

농업생산기반정비사업계획설계기준

수 로 터 널 편

(기준 및 편람)

농 립 부

농업생산기반정비사업계획설계기준

수 로 터 널 편

농 립 부

목 차

개정 요지	
1. 기준의 목적과 적용범위	
2. 설계의 기본	
3. 관계법령의 준수	
4. 설계의 순서	
5. 조 사	
6. 기본설계	
7. 세부설계	
8. 수리설계	
9. 무압터널	
10. 압력터널	
11. 시 공	

개정 요지

1. 개정 경위

현행 농지개량사업계획설계기준 수로터널편은 1977년 12월에 제정되어 지금까지 사용되어 왔다. 현행 기준은 70년대까지 소규모 터널에서 많이 사용되어온 널판공법을 위주로 기술되었으나 그 이후 NATM공법으로 불리는 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트 공법이 발달되어 수로터널에서도 점차 이용 빈도가 높아져 왔으며 널판공법에 있어서도 많은 기술적 진보가 있어 개정의 필요성이 대두되었다. 이에 따라 1997년 4월 농림부의 승인을 받아 농어촌진흥공사 농어촌연구원에서 기준(안)을 작성에 착수하게 되었으며 1998년에는 기준(안)에 대한 실무 전문가의 검토와 한국농공학회의 편수를 받아 원고를 보완하여 농어촌진흥공사의 기술심의위원회 심의를 거쳐 최종 확정하였다.

이번의 개정에 있어서는 기술적 진보에 따른 발전에 따른 내용의 보완 외에도 기준의 편성체제도 기준의 기준에 비해 상당한 변경을 하였다. 근래의 토목공학기술의 진보와 발달의 속도가 현저하게 빨라지면서 설계에 있어서 신기술, 신공법 및 신소재 등을 적용할 수 있도록 요구되고 있다. 또한 설계기준에 따른 획일적인 설계보다는 지역의 특성이나 현지 여건에 부합되는 유연한 설계가 중시되는 경향이다. 이제까지의 계획설계기준은 세부적인 사항까지 포함하여 광범위한 내용이 기준으로 기술되어 절대적인 것으로 해석되는 경우가 많았으나 최근에는 구조물의 기능상 꼭 지켜야 할 사항을 기준으로 규정하고 그 외에 현지 여건에 따라 선택적으로 적용해야 할 사항이나 사례 등은 기준 외의 참고 자료로 제시함으로써 설계자가 현지 여건에 맞게 합리적으로 설계할 수 있도록 요구되고 있다.

따라서 이번 개정의 기본 방향은 설계기준 본래의 규범과 기술이 요구하는 즉시성, 유연성, 선택성 등을 동시에 확보하고 농업생산기반정비사업이 적절하고 원활하게 수행되는데 도움이 되도록 하기 위하여 「기준」과 「편람」으로 구분하여 편집함으로써 이러한 경향에 맞도록 정비하였다. 「기준」에는 지역의 특성이나 각각의 현장조건 등에 따른 특성에 관계없이 모든 설계에서 지켜야 할 기본적인 규범적이며 구체적인 사항만을 규정하며 □안에 기술한다. 이렇게 지켜야 할 사항만을 기술한 내용만 가지고는 그 근거나 배경을 이해할 수 없으므로 적절한 적용을 위해 해설로서 보완한다.

「기준」에서 일률적으로 정하지 않은 사항, 지역의 특성이나 현장의 조건 등에 의하여 선택적으로 적용해야 할 사항, 일반적인 기술 해설, 표준적인 설계 사례, 기타 참고가 되는 사항에 대해서는 「기준」과는 별도로 「편람」으로서 편집하였다. 설계자의 편의를 위해서 「기준」과 「편람」을 1권의 책으로 합본하였지만 「편람」의 내용은 어디까지나 설계자의 편의를 위한 참고자료이며 기준으로서 해석하지 않는다.

2. 개정의 주안점

가. 편제

- (1) 현행 기준의 형식을 변경하여 「기준」과 참고자료인 「편람」으로 구분하여 별책으로 편집하되 1권으로 합본한다.
- (2) 「기준」에는 지역의 특성이나 현지여건 등의 특성에 관계없이 모든 설계에서 지켜야 할 기본적이고 규범적이며 구체적인 사항만을 규정한다.
- (3) 기준에서 규정하지 않은 사항, 지역의 특성이나 현장의 조건 등에 의하여 선택적으로 적용해야 할 사항, 일반적인 기술 해설, 표준적인 설계 사례, 기타 참고가 되는 사항에 대해서는 기준과는 별도로 「편람」으로서 편집함으로서 설계자의 편의를 도모한다.

나. 내 용

- (1) 농업용 용배수를 목적으로 하는 수로터널에 주로 적용되는 공법에 대해서 기술한다.
- (2) 이론보다는 실무에 편리하도록 기술하여 실질적인 도움이 되도록 한다.
- (3) 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트 공법에 대해 상세히 기술한다.
- (4) 터널의 수리특성이 일반적인 수로와 상이한 것이 많으므로 수리설계에 대해 기술한다.
- (5) 시공에 관한 것은 설계시 반드시 참조해야 할 시공 과정이나 공법 등에 대해서만 기술한다.
- (6) 관리에 관한 것은 기준에는 수록하지 않되 「편람」에 수록함으로서 기술자가 참고할 수 있도록 한다.
- (7) 「편람」에는 용어해설을 부록으로 수록하여 설계자의 이해를 돕는다.

3. 기준의 주요내용

제 1 장 기준의 목적과 적용 범위

본 기준의 총론으로서 기준의 목적과 적용 범위에 대해서 기술

제 2 장 설계의 기본

터널 설계의 기본적인 사항에 대하여 명시하고 기능성과 안정성을 만족시키고 시공이나 유지관리 조건 등을 고려한 경제적인 시설을 위한 설계에 대하여 기술

제 3 장 관계 법령의 준수

터널 설계시 준수해야 할 관계 법령에 대하여 기술

제 4 장 설계의 순서

터널 설계의 원칙적인 순서에 대하여 기술

제 5 장 조 사

터널 설계시 필요한 조사항목과 각 항목에 대한 기본적인 사항을 기술

제 6 장 기본설계

현지의 제반 조건을 근거로 정하는 터널의 기능에 관한 기본적인 제반 사항에 대하여 기술

제 7 장 세부설계

터널을 구성하는 각 시설별 설계와 전체적으로 조화를 이루는 설계에 대하여 기술

제 8 장 수리설계

설계상의 유량이 수리적으로 안전하고, 안정된 상태로 흐르도록 하는 설계에 대하여 기술

제 9 장 무압터널

외압만 받는 터널의 구조설계에 대하여 기술

제 10 장 외압터널

내수압 및 외압에 대하여 안전하며 수밀성과 내구성이 우수한 구조설계에 대하여 기술

제 11 장 시 공

공사규모, 지질조건 및 현장조건에 적합하며 기술적, 경제적으로 안전하고 합리적인 시공을 하기 위한 설계에 대하여 기술

5. 편람의 내용

「편람」에는 지역의 특성이나 현장의 제반 조건을 적절하게 반영할 수 있도록 세부적인 사항을 수록하여 설계자의 판단에 참고가 되도록 하였다.

1. 기준의 목적과 적용범위

이 기준은 농업생산기반정비사업에서 용·배수의 송수를 위한 수로터널을 설계할 때 지켜야 할 기본적인 사항을 정한 것이다. 수로터널의 계획 및 설계시에는 기준에서 정한 기본적인 사항을 준수하고 목적, 위치, 규모, 사회조건 및 시공조건 등을 반영하여 결정하여야 한다.

이 기준은 건설기술관리법 제34조(설계 및 시공기준)과 동시행령 제60조의2(권한의 위탁) 규정에 근거하여 작성되었으며, 적용 대상 범위는 농업생산기반정비사업에 의한 수로터널의 계획 및 설계이다. 따라서 농업생산기반정비사업 이외의 사업에서의 조사·계획·설계·시공·관리 등에 대해서는 이 기준의 적용을 받지 않아도 되나 사업주체나 기술자의 판단에 따라 이 기준을 적용할 수도 있다.

기술자는 터널을 설계할 때 필요한 사항 중 이 기준에서 정하지 않은 사항에 대해서는 현지 제반 조건을 반영하고 편람 등 관련 자료와 사례 등을 참고하여 결정한다.

이 기준의 적용범위는 일반적으로 용·배수의 송수를 위한 수로터널(이하 “터널”이라 함)로 한다. 이 범위 외의 터널이나 내공단면이 큰 경우는 특별한 검토가 필요하다.

2. 설계의 기본

설계는 터널에 필요한 기능과 안전성을 확보하고 시공 조건이나 유지관리의 편의를 고려하여 경제적인 시설이 되도록 하여야 한다. 터널에 필요한 기능과 안전성을 확보하기 위해서는 물이 원활하게 흐르도록 하면서 토압이나 수압 등의 외력에 대해 안전하고 소요의 내구성을 가지도록 설계되어야 한다. 또한 경제적인 설계를 위하여 터널의 건설과 관리가 경제적으로 이루어지도록 종합적인 검토를 한다.

설계단계에서 현장조건을 충분히 고려한 시공계획을 수립해야 하며 당초의 설계조건이 실제의 현장조건과 다른 경우에는 설계의 재검토를 하는 등 안전하고 경제적인 시공이 되도록 설계한다.

공공사업으로 건설되는 모든 토목구조물 설계의 기본은 소정의 기능과 안전성을 확보하면서 가능한 한 경제적인 시설이 되도록 하는 것이다. 특히 터널은 경험적인 면과 공학적인 면이 강하기 때문에 조사결과, 시공 실적과 사례 및 관련 자료에 따라 현지 여건에 맞게 설계하여야 한다. 경제성 검토 시에는 시설의 건설비용 뿐 아니라 유지관리 비용까지 고려하여 종합적으로 검토한다.

3. 관계 법령의 준수

터널공사에서는 법령에 의한 공사의 규제를 받는 경우가 있으므로 규제를 받는 법규의 내용, 관계 관청이나 관계자에 대한 제반 수속 및 대책 등에 대하여 충분한 조사와 검토를 하는 등 관계 법령을 준수하면서 공사가 될 수 있도록 설계하여야 한다.

터널의 설계 시에는 국토개발, 재해방지, 공해방지 및 환경보호, 도시계획, 하천, 도로 및 교통, 문화재보호, 군사시설보호 및 안전관리 분야에 관련된 제반 법률이나 규정을 철저히 검토하여 한다. 법령 등 관련 규정의 내용에 따라서는 계획의 변경이 부득이 한 경우가 있으므로 사전에 충분한 조사, 검토를 하여야 한다.

4. 설계의 순서

설계는 터널주변의 자연적, 사회적, 환경적 제반 조건을 고려하여 골격부터 세부사항까지 순차적으로 적절하고 합리적인 순서에 따라 시행하여야 한다. 설계는 다음 순서에 따라 시행하는 것을 원칙으로 하지만 각 단계의 작업은 상호 연계성을 고려하여 합리적으로 진행해야 한다.

- (1) 조사(현지조건의 파악)
- (2) 기본설계(노선의 계획, 터널 형식의 선정, 터널기울기 및 단면형 결정, 갱구 위치 및 환화공 형식의 선정, 최소 시공단면, 최소 토피두께, 시공방법의 선정 등 기본적인 제원의 결정)
- (3) 세부설계(각 부분의 수리설계, 구조설계)

설계작업은 조사된 현지조건을 기초로 개략적인 형식과 규모의 결정 등 기본적인 제원을 결정한 후 순서에 따라 세부설계로 진행하게 되지만 어느 단계에서든 설계상의 조건을 만족하지 못하는 등 적합하지 않은 점이 발견되면 즉시 전 단계의 설계 내용을 재검토하거나 후속단계에서 작업을 상호 연계시키면서 진행할 필요가 있다.

5. 조 사

터널의 설계에 관한 자료를 얻기 위하여 터널주변의 자연적, 사회적, 환경적 제반 조건을 정확하게 조사하여야 한다.

5-1. 조사항목

터널설계에서는 다음에 열거하는 조사를 반드시 실시해야 한다.

- (1) 지형조사
- (2) 지질조사
- (3) 지하수문조사
- (4) 입지조건조사

위에 열거한 조사 이외에도 설계하는 터널의 조건에 따라 필요한 조사가 있으면 추가하여 조사한다.

5-2. 지형조사

설계에 필요한 자료의 수집과 지형도의 작성을 위해 상황을 파악하여 전체 계획지역에 대한 지형조사를 실시한다.

5-3. 지질조사

계획노선을 따라 설계와 시공에 필요한 지질구조, 지질의 분포 및 공학적인 특성 등을 파악하기 위해 시굴 등의 현장조사를 포함하여 지질조사를 시행한다.

5-4. 지하수문조사

터널굴착에 따른 갱내의 용출수와 지표수·지하수에 미치는 영향 등을 예측하기 위하여 대수층의 구조와 성질, 대상지역의 물 수지 등을 파악할 수 있도록 지하수문조사를 실시한다.

5-5. 입지조건 조사

공사로 인한 환경영향, 공사를 규제하는 법규와 용지 및 권리관계는 물론이고 공사용 기자의 입수나 반·출입 조건, 공사용 설비의 설치조건 등을 파악하기 위해 입지조건 조사를 실시한다.

조사단계는 사업실시의 순서에 맞추어 계획조사, 기본조사, 세부설계조사, 시공 중의 조사 및 보완조사로 구분되지만 조사범위, 조사방침, 조사내용, 조사방법, 조사정도 등은 목적, 공정단계에 따라 다르므로 사전에 조사계획을 수립하여 실시해야 한다.

「5-1. 조사항목」은 어디까지나 최소한의 필요 항목을 열거한 것이므로 현지 상황에 따라서는 추가 조사를 시행해야 하는 경우가 있다. 이런 경우에는 설계자의 판단으로 적절한 조사항목을 추가 설정하여 현지조건에 맞는 적절한 설계가 되도록 하는 노력이 필요하다.

「5-2~5」는 조사항목별로 파악해야 할 조건의 내용을 포괄적으로 규정하고 있으므로 구체적인 조사항목, 방법, 순서, 정리방법 등에 대해서는 관련 자료를 참고하면서 설계자가 현지 여건에 맞게 결정한다.

6. 기본설계

조사된 터널 주변의 자연적, 사회적, 환경적 조건들을 근거로 하여 세부설계의 기초가 되는 기본설계를 해야 한다. 기본설계에서는 터널의 위치나 선형 등 기본적인 제원을 결정한다.

6-1. 기본설계의 항목

터널의 기본설계시 검토되어야 할 항목은 노선의 계획, 터널형식의 선정, 터널의 기울기 및 단면형 결정, 갱구 위치 및 환화공 형식의 선정, 최소 시공단면, 최소 토피두께, 터널 시공법의 선택 등이다.

6-2. 터널의 분류

터널은 수리특성에 의해서는 무압터널과 압력터널로, 지질특성에 의해서는 암터널과 토사터널로 분류한다.

6-3. 노선의 계획

터널의 노선은 기술적, 경제적, 사회적 조건 및 환경에 미치는 영향 등을 고려하여 최선의 위치를 선정하고 터널의 선형은 지형, 지질조건이 허용하는 한 직선 또는 큰 곡률반경이 되도록 계획해야 한다.

6-4. 터널 형식의 선정

터널의 형식은 수리특성 및 지질조건에 따라 지보공의 형식과 종류, 라이닝의 유무와 재질 등에 따라 분류하고 선정한다.

6-5. 터널의 기울기 및 단면형 결정

터널의 기울기 및 단면형은 수리, 구조, 시공상의 측면을 고려하고 경제성이 있게 결정한다.

6-6. 갱구 위치 및 환화공 형식의 선정

터널의 갱구는 안정된 원지반으로 기능상의 장애를 최소화 할 수 있는 위치에 선정하고 터널 단면과 상이한 단면의 다른 구조물과 접속시킬 경우에는 손실수두를 최소화하고 원활한 물의 흐름을 위해 터널의 입구와 출구에 환화공을 설치한다.

6-7. 최소 시공단면

터널의 시공단면은 안전성과 경제성을 고려하되 시공상 필요한 최소단면을 확보해야 한다.

6-8. 최소 토피두께

터널의 토피는 구조상, 시공상의 안전성과 경제성 및 유지관리를 위하여 필요한 두께를 확보해야 한다.

6-9. 시공법의 선택

터널 시공법은 지질조건, 터널단면의 크기, 굴착방법, 라이닝방법 등을 고려하여 시공상의 안전성과 경제성을 고려하여 선택해야 한다.

기본설계의 각 항목은 세부설계의 기초가 되므로 재 설계하는 경우가 발생하지 않도록 충분

한 비교, 검토가 필요하다.

터널은 수리상의 분류나 지질상의 분류가 가능하며 각 터널 형식마다 수리설계 방법이나 구조설계 방법이 크게 다르므로 각각의 설계방법에 따라 시행한다. 터널의 분류는 다음과 같다.

(1) 수리상의 분류

① 무압터널

계획유량이 자유수면을 유지하며 흘러 내수압이 작용하지 않는 터널이다.

② 압력터널

계획유량이 만류가 되어 흘러 내수압이 작용하는 터널이다.

(2) 지질상의 분류

① 암터널

비교적 풍화가 진행되지 않은 암반이나 고결도가 높은 연암 등으로 이루어진 원지반에 구축되는 터널이다.

② 토사터널

고결되지 않은 토층이나 풍화토, 고결도가 낮은 연암 등으로 구성된 원지반에 구축되는 터널이다.

터널을 안전하고 경제적으로 설계·시공하는 동시에 기존시설이나 환경이나 주변 주민의 생활에 미치는 영향을 최소화하기 위해서는 노선의 선정이 매우 중요하다. 그러므로 노선 선정 시에는 조사결과를 근거로 2~3개 안의 노선에 대한 비교 검토를 하는 것이 바람직하며 관련 자료와 법규를 참고로 선정한다. 터널의 선형은 계획노선을 기초로 지형 및 지질 조건, 작업 갭, 기존시설과의 위치 관계 등과 시공법 등을 종합적으로 검토하여 결정해야 하지만 가능한 직선 또는 곡률반경이 큰 곡선이 되도록 설계해야 한다.

콘크리트 라이닝을 할 때 강제 거푸집 또는 철재 거푸집을 사용하는 경우의 최소 곡률반경은 다음과 같다.

$$R = \frac{l^2}{8 \cdot d_e}$$

여기서, R : 터널 중심선의 최소 곡률반경(m)

L_f : 강제 거푸집의 길이 또는 철재거푸집을 사용하는 경우의 1회 타설 길이(m)

d_e : 원형곡선을 절곡형상으로 할 경우, 지정노선으로부터 벗어나는 거리

(표준은 0.05m 정도이며 최대일지라도 0.10m로 한다)

실드(shield)공법이나 터널 보링머신(tunnel boring machine)을 사용하는 경우의 최소 곡률반경은 관련 자료나 시공사례를 참고하여 설계한다.

그림-1 최소 곡률반경

터널의 형식은 기본적으로 표-1과 같이 네 가지 종류 중에서 선정하지만 다음에 기술하는 터널형식에 대한 설명과 표-2, 표-3, 표-4의 기준 등을 참고하고 지질조사 결과, 시공성 등을 종합적으로 판단하여 설계하여야 한다. 설계의 목적상 필요한 경우에는 RMR(Rock Mass Rating)분류나 Q-시스템 분류를 적용할 수 있다.

(1) A형식

균열이 적은 신선한 암반 구간을 발파, 굴착하여 라이닝 할 때까지 지보공이 없는 상태로 오랜 시간 자립할 수 있는 곳에 적용된다. 균열이 부분적으로 존재하더라도 록 볼트(rock bolt)나 뿔어붙임 콘크리트(shotcrete) 등을 시공함으로써 일정 기간 동안 원지반을 유지시킬 수 있는 경우에도 적용한다.

라이닝은 원칙적으로 무근 콘크리트 또는 뿔어붙임 콘크리트로 한다.

(2) B형식

경암이지만 균열이 발달하여 굴착 직후 막장은 유지하되 용출수 등의 영향으로 시간이 경과함에 따라 풍화되어 지반 탈락이 발생할 가능성이 큰 경우 또는 연암으로서 굴착 후 막장은 자립하지만 시간이 경과하면서 토압이 발생할 우려가 있는 경우에 적용한다.

널판공법을 사용하는 곳에서는 강제 동바리를 설치하고 끼움널(legging)공법을 사용한다. 이 경우 지반의 상태에 따라 어느 정도 굴착을 진행시킨 후에 강제 동바리를 설치하는 경우와 굴착 후 신속하게 강제 동바리를 설치하는 경우가 있다. 전자의 경우는 강제 동바리의 설치간격은 최대 1.5m 이내로 설치하며 이를 B₁ 형식이라 한다. 후자의 경우는 동바리의 설치간격을 굴착진행 길이와 동일하게 설치하는 것으로 동바리의 설치간격을 1.2m로 하며 이를 B₂ 형식이라 한다. 원칙적으로 B₁, B₂ 형식의 라이닝은 무근 콘크리트로 한다.

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법을 사용하는 경우에는 아치 및 측벽부에 뿔어붙임 콘크리트나 록 볼트를 사용하되 강제 동바리는 사용하지 않는다.

(3) C형식

풍화암, 파쇄대와 경질토사 등의 구간을 굴착할 때와 같이 동바리를 신속히 설치하여 지반을 지지하지 않으면 버력의 반출작업에 위험이 따를 수 있는 경우에는 C형식을 적용한다.

널판공법을 사용할 때는 강제 동바리를 사용하며 아치부는 보내기널공법, 측벽부는 끼움널공법으로 한다.

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법을 사용하는 경우 록 볼트를 적용하였을 때는 일반적으로 강제 동바리가 필요 없다. 또한 점토질의 토사 등과 같이 록 볼트의 효과가 작은 지반에서는 강제 동바리를 사용하고 록 볼트의 추가 사용여부를 검토한다. 일반적으로 뿔어붙임 콘크리트는 아치·측벽부에 한하여 시공하고 인버트부에는 시공하지 않는다.

라이닝은 무근 콘크리트를 원칙으로 한다.

(4) D형식

많이 풍화된 암, 단층 파쇄대와 용출수가 많은 연질토사 지대에서 토압이 크게 작용하는 경우에 적용한다. 이와 같은 원지반의 경우에는 막장의 자립성에 따라 지보공 형식이 크게 달라진다. 또한, 지반의 지지력이 부족하거나 측압이 크게 작용하여 인버트 스트럿(invert strut)이 필요한 경우도 있으므로 D형식은 다음과 같이 2종류로 분류한다.

① D₁형식

아치(arch)부의 토압은 크지만 측벽의 토압이 작아서 막장이 유지될 수 있는 지반에 적용한다.

널판공법을 사용하는 경우는 강제 동바리를 사용하며 아치부는 빗끼움널공법, 측벽부는 끼움널공법과 빗끼움널공법을 병용한다.

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법을 사용하는 경우에는 뿔어붙임 콘크리트와 함께 록 볼트, 강제 동바리를 병용한다. 뿔어붙임 콘크리트를 인버트부에도 시공하는 것을 검토한다. 라이닝은 특별한 경우 이외는 무근 콘크리트로 한다.

② D₂형식

아치부의 토압이 더욱 크게 작용하고 다량의 용출수로 인하여 막장이 자립할 수 없기 때문에 막장면 보호공(막장의 붕괴를 방지하는 흙막이공)이 필요하게 되고 원지반의 지지력이 없기 때문에 동바리가 침하되거나 측벽의 토압 때문에 밀려나는 원지반에 적용된다.

널판공법을 사용하는 경우는 일반적으로 강제 동바리의 인버트 스트럿을 추가시키고 아치부, 측벽부 모두 빗끼움널공법으로 한다.

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법을 사용하는 경우는 뿔어붙임 콘크리트와 록 볼트, 강제 동바리를 사용하나 측압이 크게 작용하여 융기(heaving)의 우려가 있는 원지반이 많으므로 원칙적으로 인버트에도 뿔어붙임 콘크리트를 시공하고, 필요한 경우에는 인버트 스트럿을 설치한다. 콘크리트 라이닝은 상황에 따라 철근으로 보강한다. 이와 같이 D₂형식은 원지반 상황이 매우 나쁜 경우에 적용한다.

이러한 지보공 형식의 구분은 표준적인 경우에 대한 것이므로 원지반의 상황에 따라 설계하는 것을 기본으로 한다. 뿔어붙임·록 볼트공법을 사용할 때 압출성 토압이 크게 작용하는 경우에는 설계단면을 확보하기 위하여 강한 동바리로 지지토록 하고, 변형 여유량도 고려한다.

널판공법 및 뿔어붙임·록 볼트공법의 표준단면은 그림-2, 그림-3과 같다.

표-1. 터널의 형식 분류

터널 형식	지질상황		널판공법의 경우		뿔어붙임 콘크리트·록 볼트 공법의 경우						
			동바리	라이닝	뿔어붙임 콘크리트 두께 (cm)	록 볼트 길이 (cm)	록 볼트의 간격		강제 동바리 설치간격 (m)	라이닝	
							원둘레 방향 (m)	길이 방향 (m)			
A	균열이 적은 신선한 암		동바리가 없거나 록 볼트	무근 콘크리트 또는 뿔어붙임 콘크리트	0또는5	-	-	-	-	무근 콘크리트 또는 뿔어붙임 콘크리트	
B	B1	균열이 있는 약간 풍화된 암, 또는 연암	강제 동바리 (아치, 측벽은 끼움널판)	무근 콘크리트	5 ~ 10	0.4De	1.5	2.0	-	무근 콘크리트	
	B2							1.5			
C	풍화암, 파쇄대, 경토		강제 동바리 (아치 : 보내기 널, 측벽 : 끼움널판)	무근 콘크리트	10	0.5De	1.2 ~ 1.0	1.2	1.2 (H-1.0 정도)	무근 콘크리트	
D	D1	심한 풍화암, 단층 파쇄대, 연질토사 등	막장이 자립하는 원지반	막장이 자립하지 못하므로 막장 굴착면의 흙막이가 필요하다거나 동바리가 침하하거나 압출이 있는 원지반	강제 동바리 (아치 : 빗끼움 널, 측벽 : 끼움 및 빗끼움널, 인버트 스트럿)	무근 콘크리트 또는 철근 콘크리트	15 ~ 20	0.6De	1.0이하	1.0 ~ 0.8 (H-1.0 정도)	무근 콘크리트 또는 철근 콘크리트
	D2										

- (주) (1) 압력터널과 댐 부대터널에 대해서는 내외수압을 고려하여 라이닝의 종류를 결정
(2) De : 터널굴착단면의 직경, H: 동바리 높이
(3) 뿔어붙임 콘크리트의 두께는 평균두께이며, 여유 라이닝 두께는 고려하지 않았음
(4) 록 볼트는 표에 의한 계산 값과 가장 비슷한 시판품을 사용
(5) 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법의 경우에는 원칙적으로 C형식에서는 록 볼트와 강제 동바리중에서 택일 하고, D형식에는 양쪽을 병용
(6) 널판공법에서 강제 동바리의 규격과 설치간격은 표-8을 참고
(7) 연질토사 등 록 볼트의 시공이 불가능한 곳에서는 록 볼트를 적용하지 않는다.

표-2. 터널형식의 관정기준

형식	지 질 상 태			탄성파속도 (km/s)	외관상의 원지반 강도비(F_c')
A	균열이 적은 신선한 암	균열의 상태	a: 대량의 것으로부터 비교적 많은 것까지의 범위 β: 적은 것부터 약간 있는 정도의 것까지 γ: 거의 없음	α균: 4.5이상 β균: 4.0이상 γ균: 3.0이상	10이상
		암 석 시 료 의 압축강도	a: 1,200kgf/cm ² 이상 β: 800kgf/cm ² 이상 γ: 500kgf/cm ² 이상		
		원지반의 푸 아송의 비	0.16 ~ 0.23		
		토압	작용하지 않음		
B	균열이 있는 약간 풍화된 암 또는 연암	균열 및 파쇄 상황	a: 균열이 많고 여러 곳에 소단층이 있으며 장소에 따라서는 파쇄질대 β: 균열이 많고 여러 곳에 소단층을 끼고 있음 γ: 균열이 다소 있는 연암 δ: 연암	α균:3.0 ~ 4.5 β균:2.5 ~ 4.0 γ균: 2.0 ~ 3.0 δ균: 2.0이상	6 ~ 10
		암 석 시 료 의 압축강도	a: 600 ~ 1,200kgf/cm ² β: 400 ~ 1,000kgf/cm ² γ: 200 ~ 500kgf/cm ² δ: 50 ~ 200kgf/cm ²		
		원지반의 푸 아송의 비	0.18 ~ 0.35		
		토압	일반적으로 작용하지 않으나 파쇄질이나 용출수가 있는 곳에 작용하는 수가 있음		
C	풍화암, 파쇄대, 경토	균열, 파쇄, 연질상황	a: 파쇄대 β: 파쇄대 혹은 균열이나 소단층이 많다 γ: 균열이 많고 파쇄대 또는 연암 δ: 연암 또는 고결도가 나쁜 것 (잘 다져진 경토사도 포함) 일반적으로 막장전면 또는 일부가 붕괴되어 가는 경우에 적용함	α균:1.8 ~ 3.0 β균:1.5 ~ 2.5 γ균: 1.0 ~ 2.0 δ균: 0.8 ~ 2.0	2 ~ 6
		암 석 시 료 의 압축강도	50kgf/cm ²		
		토압	작용함		
D	부풀어 진 풍 화 암, 단층 파 쇠 대, 연질토사	균열, 파쇄, 연질상황	a,β: 파쇄대 및 용출수가 있는 곳 γ: 파쇄대 또는 연질암으로 고결도가 낮음 δ: 파쇄대 또는 고결도가 매우 나쁘다. 일반적 으로 미고결 퇴적토 등으로 막장전면이 용출수로 인하여 자립을 못하고 유동화하는 경우나, 용출수가 현저하게 많은 파쇄대에 적용 함	α균: 1.8이하 β균: 1.5이하 γ균: 1.0이하 δ균: 0.8이하	2.0이하
		암 석 시 료 의 압축강도	50kgf/cm ²		
		토압	작용함		

주) (1) α,β,γ,δ균별 암석구분은 표-5.3과 같다

(2) $F_c' < 0.3 \sim 0.5$ 에서는 막장이 자립하지 못하는 경우가 있다. 원지반의 강도비는 원지반을 대표하는 암반 또는 흙의 일축압축강도와 토피의 자중에 의한 초기응력의 비로서 실제로 암반을 압축시험하는 것이 곤란하므로 암석의 일축압축강도를 사용하며 이를 외견상의 강도비 F_c' 라 한다.

표-3 암 석 구분

군	암 석 명
α군	① 고생층, 중생층(점판암, 사암, 역암, 석회암, 휘록응회암 등) ② 심성암(화강암, 화강섬록암, 섬록암 등) ③ 반심성암(석영반암, 화강반암, 휘록암, 사문암 등) ④ 화산암(현무암) ⑤ 변성암(결정편암, 편마암, 호른펠스(Hornfels))
β군	① 박리가 심한 변성암 ② 잔 층리가 발달된 고생층, 중생층(혈암, 사암, 휘록응회암 등) ③ 화산암(유문암, 안산암 등) ④ 고제3기층의 일부(화산암질 응회암, 규화혈암, 사암, 응회암 등)
γ군	고제3기층 ~ 신제3기층(이암, 혈암, 사암, 역암, 응회암, 각력응회암, 응회암 등)
δ군	① 신제3기층 ~ 홍적층(이암, 실트암, 사암, 사력암, 응회암, 단구, 애추 등) ② 홍적층 ~ 충적층(점토, 실트, 모래, 사력, 애추, 단구 등) ③ 표토, 붕괴토

그림-2 널판공법의 표준단면도(표준마제형의 경우)

그림-3 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법의 표준단면도(표준마제형의 경우)

주) 지질이 특히 불량하여 압축이 많은 경우에는 굴착단면을 가능한 한 원형에 가깝게 한다. 또한, 인버트의 뿔어붙임 콘크리트 시공에도 불구하고 압축의 억제가 곤란하게 될 우려가 있을 때는 인버트 스트럿을 설치한다. 록 볼트를 인버트의 지반에 시공하는 수도 있다.

C형식 중 강제 동바리를 사용하는 경우 록 볼트를 병행할 수도 있다.

뿔어붙임 콘크리트의 시공시 인장강도의 증진을 위해 철망을 부설하는 경우도 있다

표-2는 탄성과 탐사를 시행하여 탄성파의 속도, 종파(V_p), 횡파(V_s)를 구하고 푸아송 비를 구하여 적용하는 하는 경우에는 직접적용이 가능하나 여건상 탄성과 탐사를 시행하기 어려운 경우가 많으므로 표-4와 같은 현장암질분류기준과 함께 검토하여 설계에 반영한다. 또한 굴착과정에서 확인되는 제반 지질상황에 따라 터널의 형식을 최종적으로 결정하게 되므로 시공중에는 굴착 후의 암질조사를 통해 현장암질분류기준에 따라 암질을 분류함으로써 최종적인 터널 형식을 결정한다.

표-4 현장암질 분류기준

암질분류 기준 및 터널형식						
합계수치	86이상	85.9 ~ 66	65.9 ~ 46	45.9 ~ 21	20.9 ~ 9	8.9이하
암질분류	극경암	경 암	보통암	연 암	풍화암	풍화토사
터널형식	A		B	C	D	
현장암질조사 항목별 기준 점수표						
구 분	A	B	C	D	E	F
○ 암괴상태 - 조 직	신선 견고함	대체로 신선 견고함	비교적 견고하며 조암광물이 다소 인지됨	암내부는 비교적 신선하나 외부는 상당히 풍화 변색됨	심하게 풍화 되어 황갈색 등으로 변색, 조암광물인지 곤란	완전하게 풍화 되어 토사화됨
(점수)	(15)	(11)	(7.5)	(4)	(1.5)	
- 풍화도	풍화 흔적 전무 (fresh)	약간 풍화 변질 (slightly weathered)	다소 변질되어 조암광물 변색 (moderately weatered)	풍화로 인하여 연질화 (신선하거나 변색된 암석은 연속적인 구조 또는 핵석으로 존재) (highly weathered)	암 조직 파괴 되어 굴착에 곡괭이 사용 (신선하거나 변색된 암석은 불연속적인 구조나 핵석 으로 존재) (completely weathered)	원암구조를 인지하기 어려움 (residual soil)
(점수)	(15)	(11)	(7.5)	(4)	(1.5)	
○ 불연속면의 간격	3m 이상	1 ~ 3m	0.3 ~ 1.0m	5 ~ 30cm	5cm이하	토 사 화 되 어 crack없음
(점수)	(30)	(25)	(20)	(13)	(7)	
○ 불연속면의 상태 - 틈	밀착, 불연속	0.1mm이하 약간 불규칙하게 벌어짐, 암반 견고, 불연속	0.1 ~ 1.0mm 다소 벌어져 충진물이 약간 협재, 암반 연약	1 ~ 5mm 연속적으로 벌어지고 충진물이 많음	5mm이상 연속적으로 상당히 벌어짐, 연속충진물 상당히 많음	
(점수)	(13)	(10)	(6.7)	(4)	(1.3)	
- 면상태	매우 거친 면	약간 거친 면 (경암반)	거친 면 (중경질 암반)	평탄한 면	아주 평탄한 면	
(점수)	(7)	(5)	(3.3)	(2)	(0.7)	
○ 강도 - 암석용 슈미트 합마	57이상	51 ~ 57	44 ~ 51	34 ~ 44	10 ~ 34	
(점수)	(7.5)	(5)	(3.5)	(1.5)	(0.5)	
- 합마타격 (회)	11회 이상	8 ~ 10	5 ~ 7	2 ~ 4	1	
· 타격음 · 타격 반응	금속성 깨짐없이 반발	경금속성 약간 깨짐	경금속성 ~ 탁음 불연속면을 따라 크게 깨짐	탁 음 쉽게 깨짐	둔탁함 쉽게 소편으로 깨지거나 손으로도 깨짐	손으로 부서짐
(점수)	(7.5)	(5)	(3.5)	(1.5)	(0.5)	

터널의 기울기와 단면형은 수리·구조상 및 시공 조건을 고려하여 경제적으로 정할 필요가 있다. 터널의 기울기는 수리적, 시공적, 경제적 요소의 상호관계를 고려하여 결정하며 기본적으로는 전체 수로조직 중에서 수로배분에 의하여 결정되지만 가능한 한 기울기를 급하게 하여 단면의 축소를 피하는 것이 일반적으로 유리하다. 터널의 기울기를 결정짓는 시공요소로는 갱내의 용출수 처리 및 시공기계의 주행조건 등이 있으나 기울기가 1/500 ~ 1/5000의 범위이면 특별한 지장은 없다.

단면형에 대해서는 내공 단면적이 같은 경우라도 수리특성이나 구조특성이 다른 경우 관련 자료를 참고하여 유리한 단면형상으로 해야 한다.

터널의 갱구는 개수로 등 다른 구조물과의 접속부가 되는 경우와 작업을 위한 갱구(횡갱, 사갱, 수직갱 등)가 되는 경우가 있다. 특히 후자에 대해서는 경제성, 공사기간, 작업의 안전성 등에 큰 영향을 미치게 되므로 관련되는 자료 및 사례 등을 참고하여 선정한다.

완화공은 단면형이 다른 구조물과 접속시키는 경우, 손실수두를 가능한 한 작게 하고 물의 흐름을 안전하고 원활하게 하기 위한 구조물이다. 완화공의 형상에 대해서는 관련 자료나 사례를 참고하여 설계한다.

터널의 시공단면은 안전성과 경제성이 확보되어야 하며 시공상 필요한 최소 단면이 되도록 해야 한다. 시공상의 최소 단면은 지반의 지질, 터널의 길이, 시공법 및 사용기계의 종류와 규격 등에 따라서 달라진다.

널판공법을 사용하는 경우 최소 시공단면은 시공조건, 사용기계 및 근로자의 안전규칙을 준수해야 하나 굴착(천공, 버력처리) 및 라이닝(콘크리트 운반 및 치기)을 기계시공으로 할 경우 최소한 동바리 내폭이 2.0m, 킥업(kick up) 시점부까지의 동바리 높이가 1.8m 정도 필요하다. 시공조건이 이와 다른 경우에는 공사규모, 시공법, 안전성 및 경제성 등을 고려하여 종합적으로 검토하여 결정한다.

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법을 채택하는 경우 작업효율과 안전성이나 작업환경 측면에서 유압착암기에 의한 천공, 로봇에 의한 뿔어붙임 등 기계화시공이 표준화되고 있다. 이런 경우 최소 시공단면은 기계의 치수와 작업공간을 고려할 때 굴착 완성 직경으로 대략 2.7m이다. 굴착 완성 직경이 3.0m 이하의 경우에는 뿔어붙임의 각도와 거리 등의 제한으로 인해 뿔어붙임 콘크리트의 리바운드가 많아지므로 주의가 필요하다.

터널을 굴착할 때 원지반 내부의 응력상태가 변하여 굴착 단면 주변에는 수직토압이 측면을 경유하여 바닥지반에 전달되는 그랜드 아치(grand arch)가 형성되므로 터널에 작용하는 하중을 줄여주나 토피가 작으면 원지반의 평형이 무너져 지표까지 붕괴가 발생하므로 터널이 많은 하중을 받게 되므로 위험하다. 이 때문에 원지반 내부응력의 평형을 유지하기 위한 최소한의 토피가 필요하게 되며 이와 같은 최소한의 토피 두께를 최소 토피두께라 한다.

① 갱구의 경우

② 계곡 중간의 경우

그림-4 터널의 최소 토피두께

무압터널의 경우에는 각종 실험 및 탄성이론에 기초한 이론해석 등을 통하여 최소토피두께는 일반적으로 터널 굴착단면 직경의 5배 정도로 알려져 있으나 원지반의 지질, 라이닝의 유무와 재질, 동바리의 종류에 따라 표-5의 값을 표준으로 한다.

표-5 터널의 최소 토피두께(Dc)의 표준값

구 분	암 터 널	토 사 터 널	비 고
모르터 또는 콘크리트 뿔어붙임 단면	$D_c = 10D_e \geq 30m$	-	(동바리 없음)
무근 콘크리트 라이닝 단면	$D_c = 3D_e \geq 6m$	$D_c = 5D_e \geq 10m$	(동바리 없음)
무근 콘크리트 라이닝 단면	$D_c = 2D_e \geq 4m$	$D_c = 3D_e \geq 6m$	(동바리 있음)
철근 콘크리트 라이닝 단면	$D_c = 1.0D_e \geq 2m$	$D_c = 1.5D_e \geq 3m$	(동바리 있음)

(주) (1) D_e : 터널 굴착단면의 직경(m)

(2) 토피의 두께는 터널본체 상부에서 지표까지의 높이

터널의 시공법이란 산악터널의 표준공법인 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법과 널판공법을 말한다. 공법의 선택은 관련 자료를 참고로 각 공법의 특징을 고려하여 결정해야 한다. 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법과 널판공법은 본래 설계 및 시공법이 각기 다르기 때문에 적용의 잘못을 피하기 위하여 주의하여야 하며 표준공법에 의한 시공이 곤란한 경우는 자료나 관련 문헌을 참고하여 적절한 공법을 선택해야 한다.

7. 세부설계

기본설계에서 정한 터널의 기본적인 기능에 관한 조건과 제원에 따라 세부설계를 한다. 세부설계는 수리적, 구조적 제 조건을 만족함과 동시에 터널 전체로서의 조화를 이루도록 하여야 하며 안전하고 경제적인 시설이 되도록 하여야 한다. 세부설계 시에는 수리설계 외에 지보공과 라이닝 등의 구조설계를 한다.

세부설계는 「6. 기본설계」에서 결정된 기본 제원(노선, 기울기 및 단면형 등)을 조건으로 구조, 치수 등의 상세한 설계를 하는 것이며 항상 터널의 전체적인 균형에 대한 배려가 필요함을 명기하고 세부설계를 위한 항목을 명시하고 있다.

8. 수리설계

터널은 수리특성상 무압터널과 압력터널로 구분되며 설계유량이 수리적으로 안정된 상태로 흐르도록 설계하여야 한다.

8-1. 설계유량

설계유량은 계획하고 있는 유량 중 최대 유량이 흐르는 경우의 유량이다. 수리설계에 있어서는 설계유량 이외의 유량이 흐르는 경우에 대해서도 검토하여야 한다.

8-2. 허용유속

터널내의 유속은 토사가 퇴적을 일으키지 않는 최소 허용유속과 수로내면이 흐름에 의하여 침식되지 않고, 수리적으로 불안정한 흐름이 발생하지 않는 최대 허용유속과의 범위 이내로 하며 수로의 형식, 구조 등에 따라서 정하여야 한다.

8-3. 평균유속

터널의 평균유속계산은 수로형식에 따라 적절한 공식을 사용하여 계산하여야 한다.

8-4. 부등류 계산

수로단면의 변화, 보에 의한 배수효과 등에 의하여 흐름의 단면이 변화하는 구간의 유량은 부등류의 계산에 의하여 해석하여야 한다.

8-5 여유고

터널의 통수단면은 수리상의 안전성을 확보하기 위하여 설계유량에 따른 설계수위에 여유고를 가산하여 결정하여야 한다.

「8-1. 설계유량」은 수리설계에서 목표로 하는 설계유량 통과시 수리적으로 안전하게 통수시킬 수 있는 설계수위를 확보하는 것 외에 터널의 목적과 기능을 충분히 발휘하도록 설계유량 이외의 유량에 대해서도 검토할 것을 규정하고 있다. 설계유량 이외의 유량으로는 최소 유

량, 기타 터널시설에 지장을 줄 수 있는 유량이 있다.

(1) 최소 유량

통수량의 감소로 터널의 상·하류 수로시설에 미치는 영향 등을 검토할 때 적용한다.

(2) 기타 터널시설에 지장을 미치는 유량

터널의 규모로 보아 상당한 피해가 예상되는 경우, 예를 들면 여유고의 검토에 있어서는 수로에 떨어지는 경우에 의한 유량증가를 고려하여 수로의 유향과 통수능력을 확인함과 동시에 시설의 구조, 규모 등 대책방법을 검토한다.

터널내의 유속은 최소 허용유속과 최대 허용유속의 범위 내로 설계되어야 하며 흐름의 안전성에 대해서도 고려하여 결정해야 한다. 허용유속은 표-6의 값을 표준으로 하지만 관수로의 경우는 설계기준 「농업생산기반정비사업계획설계기준 수로공편」을 참고하여 결정한다.

최소 허용유속은 토사가 퇴적을 일으키지 않는 유속으로 한다. 일반적으로 실트와 이보다 큰 입경의 부유토사가 적을 경우 0.45 ~ 0.90m/s의 평균유속이 유지되면 부유토사의 퇴적이 발생하지 않는다고 볼 수 있으므로 이 값보다 적지 않도록 하는 것이 적당하다.

최대 허용유속은 수로를 형성하는 재료에 따라 현저히 다르며 재질에 따라 명확하게 규정되어 있지 않으나 경험이나 유사한 지구의 사례로부터 판단할 때 표-6의 값을 표준으로 한다.

표-6 허용유속의 제한 값

구 분	재 질	유 속 (m/s)
최소허용유속	-	0.45 ~ 0.90
최대허용유속	경 암	3.00
	중 경 암	2.50
	콘크리트	3.00
	뽀어붙임 콘크리트	2.00

수로터널의 평균 유속을 산정하는 공식은 개수로의 경우는 매닝(Manning)식을, 관수로는 하젠 윌리엄즈(Hazen-williams)식을 사용하는 것을 원칙으로 한다. 유속계산의 구체적인 방법이나 계산에 필요한 조도계수와 유속계수는 관련 자료나 자료를 참고하여 선택해야 한다.

수로단면이 변화하거나 보에 의한 배수현상이 발생하는 경우 등과 같이 흐름의 단면이 일정하지 않은 구간의 유향은 부등류에 의한 해석을 해야 한다. 부등류란 개수로의 흐름에 있어서 수심이나 유속이 시간적으로는 변하지 않지만 수로의 단면에 따라 변화하는 흐름을 말한다.

터널의 여유고는 개수로의 흐름에 있어서 설계유량에 대한 수면으로부터 터널 천정까지의 높이를 말한다. 여유고는 원칙적으로 다음 (1), (2)에 의해 계산하여 그 중 큰 값을 취한다.

(1) 설계유량에 대하여

$$d_1 / D_1 = 0.80 \sim 0.83$$

여기서, d_1 : 설계유량에 대한 수심(m)

D_1 : 터널의 높이(m)

단, $(D_1 - d_1) \geq 0.30(m)$

(2) 홍수를 유입시키는 경우

$$d_2 / D_2 = 0.90 \sim 0.93$$

여기서, d_2 : 홍수를 고려한 유량에 대한 수심(m)

D_2 : 터널의 높이(m)

다음과 같이 특수한 경우에는 앞에서 기술한 것 이외의 여유고를 취할 수 있다.

(1) 최소 시공단면의 터널이나 부등류의 흐름을 갖는 터널은 표준보다도 여유고를 크게 취할 수 있다.

(2) 도수터널과 같이 도중에 홍수유입이 없는 경우로서 다음과 같은 경우에는 $d/D = 0.90$ 정도를 취할 수 있다. 일반적으로 원형 또는 표준마제형 단면은 $d/D = 0.80$ 부근에서 최대유속이 발생하며, $d/D = 0.90 \sim 0.93$ 부근에서 최대의 유량이 흐르기 때문이다. 여기서 d 는 수심, D 는 터널의 높이이다.

- ① 유량에 변동이 없으며,
- ② 급한 만곡부분이 없고 난류현상이 발생하지 않으며,
- ③ 조도계수의 추정이 정확하고 악화의 우려가 없는 경우

9. 무압터널

9-1. 일반사항

무압터널의 구조는 지질조사 등에 의하여 추정된 토압, 외수압 등을 고려하여 내구성이 우수하고 안전하도록 설계해야 한다.

9-2. 널판공법의 설계

널판공법은 다음 방법으로 설계한다.

- (1) 널판에 작용하는 하중은 조사결과와 시공실적 등을 바탕으로 결정해야 한다.
- (2) 강제 동바리의 형상은 지질상황, 굴착 및 라이닝 방법 등을 고려하여 결정해야 한다.
- (3) 강제 동바리의 재질은 하중에 의한 변형이 있어도 쉽게 파손되지 않고 구부림이나 용접 등의 가공성이 양호한 것으로 해야 한다. 또한, 동바리의 구부림 가공은 냉간 가공을 원칙으로 한다.

- (4) 강제 동바리의 이음 위치 및 구조는 단면형상, 응력의 크기와 분포, 시공방법 등을 고려하여 결정해야 한다.
- (5) 강제 동바리에 관련되는 부재는 동바리의 기능을 충분히 발휘할 수 있도록 설계해야 한다.
- (6) 동바리의 규격과 설치간격은 지질조건, 시공성 및 규모 등을 고려하여 결정한다.

9-3. 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법의 설계

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법은 다음 방법으로 설계한다.

- (1) 원지반 조건을 고려하여 터널 주변의 원지반이 갖고 있는 지지능력을 유효하게 활용하도록 설계한다.
- (2) 지보공 방식은 원지반 조건, 시공법 등을 고려하여 결정한다.
- (3) 뿔어붙임 콘크리트의 배합, 강도, 두께 등은 사용목적, 원지반의 조건, 작용효과 및 시공성을 고려하여 지보공으로서 충분한 기능을 발휘하도록 결정한다.
- (4) 록 볼트의 정착방식, 배치, 치수, 재질 등은 사용목적, 원지반의 조건, 작용효과 및 시공성을 고려하여 지보공으로서 충분한 기능을 발휘하도록 결정한다.
- (5) 강제 동바리를 설치하는 경우에는 규격, 설치간격 등은 뿔어붙임 콘크리트와 일체가 되어 지보공으로서 유효한 기능을 발휘하도록 결정한다.

9-4. 라이닝의 설계

라이닝은 다음 방법으로 설계한다.

- (1) 라이닝에 작용하는 하중은 자중, 토압, 지반반력 및 외수압 등을 선정한다.
- (2) 라이닝의 설계두께는 터널의 목적과 원지반의 조건 등을 고려하여 충분한 안정성과 내구성을 확보하기 위한 필요한 두께로 한다.
- (3) 콘크리트 라이닝은 특별한 조건의 경우 이외에는 무근 콘크리트로 한다.

9-5. 그라우팅(grouting)

라이닝의 배면과 원지반 사이의 공극을 메우기 위하여 원칙적으로 그라우팅을 시공한다.

9-6. 배수공

무압터널의 경우 라이닝의 완료 후 작용할 수 있는 과도한 정수압을 해소하기 위하여 실시하는 것으로서 원칙적으로 아치부에는 배수구멍을, 인버트의 중앙 바닥부에는 배수구를 설치한다.

9-7. 부대시설

터널에는 원칙적으로 배수시설, 안전시설, 갯문시설, 비탈면 보호시설, 기타 유지관리에 필요한 시설을 한다.

터널에 작용하는 하중은 지질조건과 터널의 단면, 시공법 등에 따라서 현저하게 차이가 있으

므로 하중의 추정을 하는데는 지질과 터널공학의 양면에 걸쳐 넓은 지식과 경험을 가진 기술자가 참여해야 한다.

널판공법에 의한 설계시 특별한 경우를 제외하고 동바리에 작용하는 토압은 표-7의 이완높이의 값을 표준으로 산정할 수 있다. 특별한 경우란 다음과 같은 지질조건인 경우이다.

- (가) 지질이 단단한 암석으로 되어있어 극히 양호한 경우
- (나) 지질이 많이 불량하고 용출수도 있어서 토사가 유동상태로 되기 쉬운 경우
- (다) 대규모 압출성 및 팽창성 토압이 발생하는 경우

지질조건이 특별한 경우에는 테르자기(Terzaghi)의 암반하중 개념이나 RMR 또는 Q-시스템에 의한 암반하중 평가법에 의해 산정한 이완높이와 비교 검토하여 결정한다.

표-7 동바리에 작용하는 이완높이의 표준 (단위 : m)

터널형식	B형	C형	D형	비고
이완높이	0.5De	1.0De	2.0De	De : 굴착단면의 직경

강재 동바리는 하중에 대하여 유리한 형상으로 시공상의 편의도 겸비한 것이어야 한다. 형상은 그림-5와 같은 여러 종류가 사용되지만 일반적으로 연속리브(rib)형을 사용하며, 특히 측압이 큰 경우에는 인버트 스트럿을 부설한 전주리브형을 사용한다.

그림-5 강재 동바리의 형식

강재 동바리는 9-2, (3)에서 명시한 것과 같은 재질이 되기 위해서는 강재의 신장율이 크고, 너무 단단하지 않은 것이 바람직하다. 일반적으로는 경제성을 고려하여 H형강은 KS D 3503에 규정한 SS400, 강관은 KS D 3566에 규정된 SPS400과 동등 또는 그 이상의 재질을 사용하여야 한다.

또한, 동바리를 구부림 가공할 경우에 원칙적으로 냉간가공을 하도록 한 것은 강재에 흠이 있을 경우에 열간가공보다 냉간가공의 경우가 발견하기 쉬우며 또한 열간가공은 열관리가 어려운 것 등의 이유 때문이다. 냉간가공에 의한 동바리의 최소곡선반경은 관련 자료를 참고하여 결정해야 한다.

강재 동바리는 여러 개의 부재로 구성되어 있으며 이음부는 동바리의 약점이 되므로 가능한 이음부가 적은 것이 바람직하다. 이음부의 위치 및 연결구조는 관련 자료를 참고하여 정해야 한다. 관련된 부재로는 ① 썰기, ② 정판(頂板), ③ 저판, ④ 칼라 버팀대, ⑤ 널판, ⑥ 경사 동바리 등이 있다. 이들 관련 부재는 동바리가 기능을 충분히 발휘하는데 중요한 것들이므로 관련 자료나 표준도를 참고하여 적절한 설계를 해야 한다.

강재 동바리의 규격 및 설치간격은 표-8을 표준으로 하되 지질조건, 시공성 및 터널규모 등에 기초하여 결정한다. 표-8은 구조 및 시공성을 고려한 표준적인 것으로서 다음 사항에 유의하여 설계해야 한다.

- ① 구조계산에 의해 동바리 구조상의 안전성을 확인한다.
- ② 구조계산의 결과와 관계없이 최대설치 간격은 1.50m로 한다.
- ③ 특별한 경우 설치간격을 0.6m까지 단축할 수 있다.

표-8 강재동바리의 규격과 설치간격

터널직경 형식 구분	2.0m미만			2.0m ~ 3.0m			3.0m ~ 4.0m		
	B	C	D	B	C	D	B	C	D
동바리의 종류	강 관 H형강	강 관 H형강	H형강	강 관 H형강	H형강	H형강	H형강	H형강	H형강
동바리의 규격 (mm)	Φ89.1 ~ 101.6 H-100× 100	Φ114.3 H-100× 100	H-100× 100	Φ89.1 ~ 114.3 H-100× 100	H-100× 100 H-125× 125	H-100× 100 H-125× 125	H-100× 100 H-125× 125	H-125× 125 H-150× 150	H-125× 125 H-150× 150
설치간격(m)	1.2 ~ 1.5	1.0 ~ 1.2	0.8 ~ 1.0	1.2 ~ 1.5	1.0 ~ 1.2	0.8 ~ 1.0	1.2 ~ 1.5	1.0 ~ 1.2	0.8 ~ 1.0

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법은 「동바리 부재로서 이완하중을 지지한다」라는 널판공법의 개념과는 달리 뿔어붙임 콘크리트나 록 볼트에 의해서 「원지반 자체가 본래 지니고 있는 강도를 충분히 발휘하게 하여 가능한 한 원지반 자체가 터널을 지지토록 한다」는 것이 특징이다.

뿔어붙임 콘크리트나 록·볼트는 굴착 단면 주변에 작용 지압을 분산시킬 수 있으므로 동바리 설치시 어려움을 겪는 팽창성의 원지반에서도 비교적 쉽게 압력을 극복할 수 있다. 그러나 용출수의 상황이나 지질상태 등에 따라 뿔어붙임 콘크리트나 록 볼트의 유효성에 문제가 생길

경우에는 보조공법이나 특수공법을 고려한 종합적인 비교 검토가 필요하다.

9-3. (2)는 지보공의 설계에 있어서 복잡하게 변화하는 원지반 특성을 터널 굴착 전에 완전히 파악한다는 것은 곤란하므로 원지반에 따라 표준이 되는 지보공 형식을 설정할 것을 규정하고 있다. 지보공을 결정할 때는 원지반의 분류에 따라 원칙적으로 표-1 터널의 형식분류와 같이 표준 분류 형식에 의할 수 있다. 다만 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법의 특징은 다양한 지보공 방법을 원지반의 상황에 따라서 합리적으로 조합시켜 현장에 적용시키는 것이므로 지보공 방법을 결정할 때는 굴착시의 관찰·계측결과에 따라서 현지의 상황에 유연하게 적용시키는 것이 필요하다. 지보공 방법의 결정방법이나 설계변경의 대응방법에 대해서는 자료나 유사한 사례를 참고한다.

9-4. (3)에서는 뿔어붙임 콘크리트가 지보공으로서 충분한 기능을 발휘하도록 뿔어붙임 콘크리트의 배합설계, 강도, 두께 등을 결정해야 한다는 것을 규정하고 있다. 뿔어붙임 콘크리트의 작용효과는 원지반의 조건에 따라 다르지만 암반과의 부착력, 전단력에 대한 저항, 횡압축 또는 축력에 대한 저항, 외력의 배분효과, 약층의 보강, 피복효과 등이 있는 것으로 여겨지고 있다. 뿔어붙임 콘크리트가 지보공으로서 충분한 기능을 발휘하도록 하기 위해서는 다음의 요건을 충족시킬 필요가 있다.

- ① 작용하중에 대하여 충분한 강도가 있어야 한다.
- ② 조기에 필요한 강도가 발휘되어야 한다.
- ③ 원지반과는 충분한 부착성이 있어야 한다.
- ④ 내구성이 있어야 한다.
- ⑤ 수밀성이 높아야 한다.
- ⑥ 반발량(rebound)이 작아야 한다.

뿔어붙임 콘크리트의 설계두께는 작용효과와 시공실적을 고려하여 결정하는 경우가 많으며 일반적으로 5~20cm 정도이고 표준적인 설계두께는 「표-1 터널의 형식분류」에 나타나 있는 것과 같다. 여기서 말하는 설계두께란 단면내의 평균 두께를 말하는 것이며 평균 두께가 설계두께 이상이면 부분적으로 설계두께에 미치지 못하는 장소가 있더라도 가능하다는 개념이다.

록 볼트의 설계시에는 원지반의 조건에 따라 작용효과가 서로 다르다는 것을 고려해야 한다. 록 볼트의 작용효과로는 현수효과, 빔 형성효과, 내압효과, 아치 형성효과, 원지반의 개량효과가 있으며 이들은 원지반의 강도나 절리, 균열의 상태, 용출수의 상태에 따라 서로 다르므로 지질상황의 파악이 중요하다. 록 볼트의 정착방식, 배치, 치수, 재질 및 강도, 정착재료 등의 설계는 관련 자료나 유사한 사례를 참고하여 결정한다.

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법을 사용하면서 강제 동바리를 설치하는 경우는 동바리도 뿔어붙임 콘크리트와 록 볼트 등과 함께 터널의 안정을 유지하는 지보공의 하나로서 역할을 해야 한다. 따라서 예상되는 작용하중에 견딜 수 있도록 강제 동바리의 설치간격 등을 결정하는 동시에 다른 지보공 부재, 특히 뿔어붙임 콘크리트와 일체가 되어 유효하게 기능을 발휘하도록

설계해야 한다.

뿔어붙임 콘크리트공법을 사용할 때 강재 동바리는 뿔어붙임 콘크리트의 보강, 막장의 조기 안정, 선시공 록 볼트 등의 지점으로 이용된다. 이때 강재 동바리의 설치간격은 막장의 자립성, 토압의 크기, 단면의 크기, 사용목적, 굴착공법, 굴진방식 등을 고려하여 종합적으로 결정해야 하지만 표준은 표-1과 같다. 강재 동바리의 단면형상, 재질, 이음, 연결재 등은 관련 자료나 사례를 참고하여 설계해야 한다.

라이닝의 안정성 검토, 라이닝의 두께 결정에 대해서는 토압 등의 주동외압이 큰 경우를 제외하고는 일반적으로 과거의 시공사례 등을 근거로 경험적인 결정을 하고 있다. 보통 이완토압 및 작은 압출토압 등은 주로 지보공에 의해 지지되고 있는 것으로 추정하고, 외수위는 배수공에 의해 아치 정점(arch crown)까지 저하시키는 것으로 추정한다. 이 때문에 큰 압출토압이나 팽창성토압이 작용하여 지보공만으로는 외압을 견디기 어려운 경우 또는 큰 외수압의 작용을 피할 수 없을 경우에는 이러한 외력의 크기와 분포를 가능한 한 측정하여 그 결과에 의해서 라이닝 등의 안정성에 대한 검토를 할 필요가 있다.

널판공법과 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법의 경우 설계두께는 특별한 경우를 제외하고는 표-9와 표-10의 값을 표준으로 할 수 있으나 [적용상의 유의사항] 을 지켜야 한다.

(가) 널판공법의 설계 라이닝 두께

널판공법을 사용할 때의 설계 라이닝의 두께는 표-8을 이용한다.

표-9 널판공법의 설계 라이닝 두께의 표준

터널의 형식	설 계 두 께 (cm)		비 고
	아 치, 측 벽	인 버 트	
A	$\frac{1}{20} D_i \geq 15$	$\frac{1}{20} D_i \geq 15$	인버트의 최소두께는 토압이 있는 경우에는 아치, 측벽과 같다
B	$\frac{1}{20} D_i \geq 20$	$\frac{1}{20} D_i \geq 15$	
C	$\frac{1}{15} D_i \geq 20$	$\frac{1}{15} D_i \geq 20$	
D ₁	$\frac{1}{12} D_i \geq 20$	$\frac{1}{15} D_i \geq 20$	
D ₂	$\frac{1}{12} D_i \geq 25$	$\frac{1}{12} D_i \geq 25$	

(주) (1) D_i : 터널의 내공단면의 직경(cm)

(2) 본 표의 값은 콘크리트 라이닝 내면으로부터 두께임

[표-9의 적용상 유의사항]

- ① 무압터널일 것
- ② 무근 콘크리트 라이닝일 것

- ③ 내공단면의 형상은 원칙적으로 마제형으로 한다. 측벽수직형 단면의 경우 필요에 따라 라이닝 두께를 증가시키거나 철근으로 보강한다.
- ④ 외수위는 배수구멍이나 배수구를 이용하여 아치 정점 이하로 저하시킨다.
- ⑤ D형은 필요에 따라 철근으로 보강한다.
- ⑥ 최소라이닝 두께는 $D/30$ 으로 하되 최소한 10cm 이상으로 한다. 최소 라이닝 두께는 터널 표준단면도에 A선으로 표시하고 그 속에는 어떠한 것도 남겨서는 안 된다. 설계 라이닝 두께선은 터널 표준단면도에 D선으로 표시한다.

(나) 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법의 설계라이닝 두께

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법을 사용할 때의 설계 라이닝의 두께는 표-10을 이용한다.

표-10 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법에서의 설계 라이닝 두께의 표준

터널의 내공 단면직경(m)	설계라이닝 두께 (cm)			
	아치·측벽		인버트	
	A, B형식	C, D형식	A, B형식	C, D형식
3.0미만	15	15	15	20(15)
3.0이상	20	20	20	25(20)

(주) (1) C, D형식에서 인버트에 뿔어붙임 콘크리트를 시공한 경우와 융기가 없는 경우에는 인버트의 설계라이닝 두께는 ()내의 값으로 아치·측벽부와 같게 한다.

(2) 본 표의 값은 콘크리트 라이닝 내면으로부터 두께임.

[표-10의 적용상 유의사항]

- ① 무압터널 일 것
- ② 무근 콘크리트 라이닝 일 것
- ③ 외수위는 배수구멍이나 배수구를 이용하여 아치 정점 이하로 저하시킨다.
- ④ 설계라이닝 두께선, 최소라이닝 두께선은 널판공법에서와 같다.

9-4.(3)에서 규정하고 있는 라이닝 콘크리트의 품질에서의 특별한 조건은 다음과 같은 경우를 들 수 있다.

- ① 터널 갱구부 및 계곡의 풍화암 및 토피가 아주 작을 경우
- ② 토사터널로서 토압이 크게 작용하는 경우
- ③ 지질이 양호하더라도 「6-8. 터널의 최소 토피두께」에 규정한 두께보다도 토피가 작은 구간
- ④ 단층파쇄대로서 토압이 크게 작용하는 경우
- ⑤ 외수압이 크게 작용하는 경우

콘크리트의 품질(설계기준강도, 배합강도, 배합설계)은 내마모성, 내구성 및 수밀성 등을 고려하여 결정해야 하지만 콘크리트의 설계 기준강도는 무근 콘크리트의 경우 160kgf/cm^2 이상으로

하며 철근 콘크리트에서는 240kgf/cm^2 이상으로 한다. 사용재료 및 배합 등에 대해서는 건설교통부 제정의 「콘크리트 표준시방서」에 준한다.

널판공법의 경우에는 아무리 주의 깊게 시공하여도 라이닝 배면과 원지반 사이에 공극이 생긴다. 특히 널판은 라이닝과 원지반과의 밀착을 방해하여 토압을 균등하게 분포시키거나 지반 반력을 유효하게 작용시키는데 장애가 된다. 따라서 지질이 양호한 경우를 제외하고는 모르타 및 기타의 주입재로서 공극을 메울 필요가 있다. 그라우팅 시공구간, 주입압력, 강도 및 재료는 관련 자료나 설계사례를 참고하여 설계한다.

10. 압력터널

압력터널은 내수압과 외압에 대하여 안전하고 수밀성 및 내구성이 우수한 구조로 한다.

10-1. 압력터널에 작용하는 하중

압력터널의 지보공에 작용하는 하중은 무압터널에 준한다. 또한, 라이닝에 작용하는 하중은 내수압, 외수압 및 그라우트 주입압 중에서 선정한다.

10-2. 압력터널의 라이닝

압력터널의 라이닝은 하중조건을 감안하여 부재에 발생하는 최대응력에 따라 설계한다.

(1) 압력터널의 라이닝 두께는 터널의 목적과 라이닝의 종류에 따라서 충분한 안전성과 내구성 확보에 필요한 두께로 한다.

(2) 압력터널의 구조설계에 채용되는 콘크리트나 철근의 허용응력은 터널의 목적, 구조 등의 조건에 따라서 적절한 값으로 한다.

10-3 압력터널의 그라우팅

압력터널에서는 라이닝 배면과 원지반사이의 공극이나 내장관의 바깥 측을 충전하거나 또는 터널주변의 암반을 강화하기 위하여 그라우팅을 한다.

「10. 압력터널」에서는 압력터널로서의 특별한 사항에 대하여 기술하고 있으며 기타의 사항에 대해서는 「9. 무압터널」의 각 조에 의하는 것으로 한다. 압력터널의 굴착에 대해서는 무압터널과 같으므로 지질조건과 지보공의 종류 등은 무압터널의 경우와 동일하게 취급한다.

압력터널은 라이닝의 종류에 따라 콘크리트 라이닝방식과 내장관방식으로 구분한다. 어느 방식을 선정하는가는 원지반의 조건, 내수압의 크기 등에 따라 결정한다.

그림-6 압력터널의 분류

압력터널로서의 노선선정, 선형, 내공단면의 현상, 시공법의 선택은 관련 자료 등을 참고하여 선정한다.

압력터널의 라이닝에 작용하는 하중은 자중, 토압, 내수압, 외수압 및 그라우트 주입압을 고려할 수 있다. 자중은 다른 하중에 비하여 작으므로 특별한 경우 이외에는 설계에서 무시한다. 토압은 지보공이 지지하는 것을 원칙으로 하므로 라이닝에 작용하는 하중으로는 무시하지만 압출성 토압 등이 큰 경우에는 별도로 고려한다. 압력터널의 라이닝에 작용하는 하중의 조합은 각각의 하중이 라이닝에 동시에 작용하는 경우와 독립적으로 작용하는 경우가 있으므로 구조 설계에서는 각각의 지형, 지질조건을 감안하여 부재에 최대응력이 발생하도록 하중을 조합하여 결정할 필요가 있다. 일반적으로 표-11의 하중조합을 사용할 수 있다.

표-11 터널의 라이닝에 작용하는 하중조합

단면형별 사례 하 중	원 형 단 면			마 제 형 단 면		
	사례 I	사례 II	사례 III	사례 I	사례 II	사례 III
내 수 압	○			○	○	
외 수 압		○			○	○
그라우트 주입압			○			

주) 각 단면에 대하여 사례 I ~ III까지 3가지의 경우에 대한 검토를 한다.

(1) 원형단면

- ① 원형단면의 경우 외수압은 내수압을 상쇄하는 효과가 있으나 라이닝을 하기 전에 굴착에 의해 외수위가 저하되었고 라이닝 완료 후 외수압이 원래의 상태와 같이 복원할지는 불확실하므로 안전을 고려하여 외수압과 내수압은 동시에 작용하지는 않는 것으로

본다.

- ② 일반적으로 라이닝 완료후 외수위가 복원되는데 상당기간을 필요로 하므로 그라우트 주입시에 큰 외수압이 작용한다고는 할 수 없다. 따라서 외수위와 그라우트 주입압은 동시에 작용하지는 않는 것으로 본다.

(2) 마제형 단면

- ① 마제형 단면은 내외수압이 비교적 작은 경우에 적용하는 것으로서 일반적으로 고압 그라우팅을 할 필요가 없다. 따라서 그라우트 주입압에 대해서는 고려하지 않는다.
- ② 마제형 단면의 인버트부에는 외수압에 의해 발생하는 인장응력과 내수압에 의해 발생하는 인장응력이 작용하므로 내외수압이 동시에 작용하는 경우의 검토가 필요하다.

10-2.(1)에서 규정하고 있는 라이닝 두께는 표-12의 값을 표준으로 하지만 특별한 경우에는 현지 여건을 반영하여 별도로 고려할 수 있다.

표-12. 압력터널 라이닝의 설계두께

구 분	설계 두께	비 고
무근 콘크리트	$D_i/10 \geq 20$	D _i : 터널 내공단면의 직경 (단위:cm)
단철근 콘크리트	$D_i/10 \geq 25$	
복철근 콘크리트	$D_i/10 \geq 30$	

라이닝 설계 두께는 다음과 같이 정의하고 있다.

- ① 무근콘크리트의 경우
무압터널과 같이 취급한다.
- ② 단철근콘크리트 및 복철근콘크리트의 경우
지보공 공법에 관계없이 동바리 리브 내면선을 설계라이닝 두께선으로 한다
(무압터널의 A선에 해당)

10-2.(2)에서 규정하고 있는 허용응력은 표-13 ~ 표-15의 값을 표준으로 하며 이때 철근의 허용인장응력은 KS D3504에 따른다. 표-15의 저감공식은 수밀성 확보를 위하여 콘크리트의 균열 방지가 필요한 내수압을 받는 구조물에 적용된다. 고압 그라우팅 구간에서는 저감공식을 적용하지 않는다.

인장을 받는 철근콘크리트 부재의 설계에 있어서는 콘크리트의 인장응력을 무시하고 철근만으로 인장력을 받는 것으로 설계하는 것이 일반적이다. 그러나 압력터널이나 잠관과 같이 수밀을 필요로 하는 경우는 철근의 신장량이 콘크리트의 균열인장강도에 상당하는 신장량을 초과할 경우 콘크리트에 균열이 발생하므로 이때 수반되는 콘크리트의 균열을 막기 위하여 실제로 생기는 콘크리트의 응력이 균열인장강도를 넘지 않도록 해야 한다. 이를 위해서는 작용하는 내압의 크기에 따라 철근 허용응력의 값을 저감하는 방법을 사용하여 배근될 철근의 양을 증가시키고자 하는 것이 이 규정의 근본 취지이다.

표-13 무근 콘크리트의 허용응력(kgf/cm²)

허용응력	설계기준강도				비 고
	160	180	210	240	
압 축 응 력	40	45	50	55	$\sigma_{ca} \leq 0.25 \sigma_{ck}$
지 압 응 력	48	54	60	60	$\sigma'_{ca} \leq 0.30 \sigma_{ck}$

(주) σ_{ck} 는 콘크리트의 설계기준강도

표-14 철근 콘크리트구조물에서의 콘크리트의 허용응력(kgf/cm²)

허용응력		설계기준강도			비 고	
		180	210	240		
휨 압 축 응 력		70	80	90		
전단 응력	사인장 철근의 계산을 안하는 경우	보의 경우 ¹⁾	4	4.2	4.5	
		슬래브의 경우 ²⁾	8	8.5	9	
	사인장 철근의 계산을 하는 경우	전단력만의 경우	18	19	20	
부착 응력	원 형 철 근	4	7.5	8		
	이 형 철 근	14	15	16		
지 압		54	64	72		

주) 1) 펀칭전단(Punching shear)에 대한 값이다.

2) 비틀림(Torsion)영향을 고려하는 경우에는 이 값을 할증할 수 있다.

표-15 철근의 허용응력 저감공식

철근의 종류	허용응력 저감공식	
	$\sigma_{sa} = 1,300 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_{sa} = 1,500 \text{ kgf/cm}^2$
원형단면	1,300-37H	1,500-40H
마제형단면	1,040-9.2H	1,200-10H

(주) 적용범위는 마제형단면에서는 $H \leq 10\text{m}$, 원형단면에서는 $H \leq 38\text{m}$ 로 한다.

여기서 H는 터널중심에서의 정수두(m)이다.

11. 시공

터널은 공사규모, 지질조건 및 현장조건 등에 적합하도록 기술적, 경제적 관점에서 안전하고 합리적으로 시공을 할 수 있도록 설계하여야 한다.

11-1. 시공계획

시공계획은 공사규모, 지질조건 및 현장조건 등을 감안하여 기술적, 경제적 관점에서 안전하고 합리적으로 수립해야 한다.

11-2. 굴진방식

터널의 굴진방식은 지질조건, 터널의 규모, 공사기간 등을 종합적으로 검토하여 선정한다.

11-3. 굴착공법

터널의 굴착공법은 지질조건, 터널의 규모, 공사기간 등을 종합적으로 검토하여 선정한다.

11-4. 동바리의 시공

동바리는 소정의 내공단면과 설계 라이닝 두께가 확보되도록 정해진 위치에 정확하게 설치한다. 외력에 충분히 견딜 수 있도록 동일평면상에 설치하는 한편 뒤틀리는 일이 없도록 주의하며 각 동바리 부재의 기능을 합리적으로 살릴 수 있도록 원지반의 상태를 고려하여 시공한다.

11-5. 작업 갱

작업 갱은 지형조건, 지질조건 및 공사의 규모 등을 검토하여 필요성 유무, 형식과 규모 등을 결정한다.

11-6. 라이닝

라이닝의 시공은 지질조건, 터널의 규모, 공사기간 등을 종합적으로 검토하여 안전하고 경제적으로 시행한다.

11-7. 그라우팅

그라우팅의 시공은 그라우팅의 목적과 지형조건 등에 적합하게 주입재료, 주입순서, 주입 압력 및 주입종료기준 등을 정하여 시행한다.

11-8. 공사용 설비

공사용 설비는 공사기간, 시공법 등을 검토하여 갱내 및 갱외 설비와 운반로 등 필요한 설비에 대한 계획을 수립하여 시행한다.

11-9. 관찰 및 계측

터널굴착에 따라 주변의 원지반 거동과 각 동바리 부재의 효과를 파악하고 시공상의 안전성 및 경제성을 확보하기 위하여 필요한 관찰·계측계획을 수립한다. 시공 중의 관찰 및 계측결과에 따라 굴착방식이나 라이닝방식 등을 변경 시행한다.

11-10. 안전시설

시공의 안전과 근로자의 건강관리 등을 위하여 관계 법규에 규정된 조건을 충분히 만족하는 안전시설계획을 수립한다.

11-11. 환경보전

환경보전에 관한 관계 법규를 준수하여 소음, 진동, 탁수, 지표의 침하 및 지표수·지하수의 고갈 등의 방지에 대한 계획을 수립한다.

11-12. 시공관리

터널의 시공에 있어서는 정해진 공사기간 내에 안전하고 소정의 품질을 확보하도록 관계 법규를 준수하며 적절한 시공관리를 한다.

11-13. 관 리

터널은 그 기능을 완전히 유지하기 위하여 적절한 관리체제와 계획에 따라 충분한 점검, 조사, 정비를 하고 필요에 따라 개수 또는 보수를 한다.

시공계획의 기본이 되는 사항으로 다음과 같은 것이 있으며 어떻게 계획할 것인가는 관련 자료나 유사한 시공사례 등을 참고하여 결정한다.

- ① 공정방식
- ② 굴진방식 및 굴착공법
- ③ 막장 안정을 위한 보조공법의 선정
- ④ 라이닝방식 및 라이닝공법
- ⑤ 작업 갱의 선정
- ⑥ 공사용 설비 계획

공정방식이란 굴착과 라이닝시공의 순서를 규정하는 것으로 분리방식, 병진방식, 교차진행방식 등이 있으며 지질조건이나 시공법 등을 참고하여 공사 기간, 경제성 등도 고려하여 선정한다.

수로터널의 굴진방식으로는 전단면방식, 벤치 컷(bench cut)방식, 선진도갱 방식 등이 있으며 공법의 선택시는 지질, 터널규모, 시공, 공사기간, 경제성을 고려하고, 관련 자료나 유사한 시공사례 등을 참고하여 선정한다. 뿔머붙임 콘크리트·록 볼트공법에서는 전단면 방식 또는 벤치 컷 방식을 표준으로 한다.

굴착방식에는 발파굴착공법, 기계굴착공법, 인력굴착공법, 특수굴착공법 외에 막장안정을 위한 보조공법이 있으며 공법의 선택은 지질조건, 터널규모, 공사기간, 경제성, 환경영향 등을 고려하여 선정한다.

버력처리는 터널의 굴진속도를 지배하는 큰 요소가 되므로 원지반의 조건(지질, 용수 등), 입지조건(주변의 환경, 사토장, 운반로 등), 터널단면의 크기, 길이, 기울기, 굴진방식, 굴착공법, 버력의 형상 등을 고려하여 적재기계, 버력운반방식, 버력버림설비 등을 정한다.

동바리를 정확하게 설치하기 위해서는 정부 이음볼트의 조임, 접합볼트, 연결볼트의 삽입 및 조임, 널판 결침, 토대목의 부설작업에 주의해야 한다. 접합볼트의 시공에 특히 주의해야 한다. 터널굴착으로 인해 발생하는 토압은 시간이 경과함에 따라 증대하는 것이 일반적이므로 굴착 후 빨리 동바리를 설치해야 한다.

뿔머붙임 콘크리트·록 볼트공법에서는 굴착 진행과 동시에 주변의 원지반을 안정시킬 필요가 있으므로 벽면 변위량을 제한하고 동바리에 의한 반력이 주변의 원지반에 미치도록 굴착 후 빠르게 동바리를 설치하는 것이 중요하다.

버력의 반출, 기계, 재료의 반입 및 반출, 급배수, 환기 및 작업원의 이동 등의 통로는 안전성과 경제성에서 본 갱을 이용하는 것이 유리하지만 지형조건상 본 갱의 이용이 불가능하거나 터널이 길어 공정계획상 분할시공으로 막장의 수를 증가시킬 필요가 있을 때는 작업 갱이 필요하다. 작업 갱은 횡갱, 사갱, 수직갱의 형식이 있으며, 형식의 선정에는 다음의 조건 외에 관련 자료나 시공사례 등을 참고하여 결정한다.

- ① 입지조건
- ② 터널의 규모와 공사기간

- ③ 작업 갱의 유무에 따른 시공의 경제성
- ④ 터널 완성 후 관리용 갱으로서의 사용 가능성
- ⑤ 작업 갱의 위치, 지형·지질조건 및 시공의 난이도
- ⑥ 시공계획

작업 갱의 굴착, 지보공, 라이닝의 설계는 본 갱에 준하여도 좋으나, 유지관리용이 아닐 경우에는 라이닝은 주로 갱구 및 갱구부근에 시행하고 기타 부분에 대해서는 공기, 지질조건 등을 고려하여 최소한으로 억제한다.

무근 콘크리트 또는 철근 콘크리트 라이닝은 터널규모, 지질조건 및 공기 등을 고려하여 안전하고 경제적인 것이 되도록 관련 자료나 시공사례를 참고로 라이닝 방법이나 공법을 선정한다. 그라우팅의 시공에 관련되는 주입재료, 주입순서, 주입압력 및 주입종료기준 등은 관련 자료나 시공사례를 참고하여 결정한다.

공사용 설비는 지형, 지질 및 기상조건, 주변환경에 미치는 영향을 고려해야 하며 공사기간 및 시공법에 따라 필요한 설비의 종류와 규모를 결정한다. 특히 공사용 설비에 의해 주변환경에 미치는 영향을 고려하여야 하며 공정계획에 적합하도록 계획하여야 한다.

「11-9. 관찰·계측」에서는 터널시공의 안전성과 설계의 타당성을 확인하기 위하여 터널굴착에 따른 주변 원지반의 거동과 각 지보공 부재의 효과를 관찰·계측할 것을 규정하고 있다. 관찰·계측해야 할 항목, 방법, 결과의 정리방법 및 결과의 설계, 시공에의 반영에 대해서는 관련 자료나 설계·시공사례를 참고하여 정한다. 터널의 경우 설계시 지하의 지반상태를 완벽하게 파악하기 어렵기 때문에 시공 중에 이러한 관찰 및 계측결과에 따라 굴착방식이나 라이닝 방식 등을 변경하여 시공할 수 있다.

「11-10. 안전시설」에서는 조명시설, 환기시설, 배수시설, 도로 등과 같은 보안시설의 필요성과 시공의 안전, 작업자의 건강관리에 대한 규정을 하고 있다. 안전시설의 설계나 작업자의 건강관리를 위한 방법에 대해서는 관련 자료나 설계·시공사례를 참고하여 한다.

「11-11. 환경보전」에서는 소음, 진동, 탁수, 지표의 침하, 지표수 및 지하수의 고갈 및 산업폐기물 등의 환경대책에 대하여 규정하고 있으며 이들 환경대책의 계획에 있어서는 관련 자료나 설계·시공사례를 참고하여 한다.

시공관리에는 공정관리, 기성관리 및 품질관리가 있으며 각각의 관리방법에 대한 것은 관련 자료나 시공사례를 참고하여 설계한다.

사용 중 관리가 부실하여 터널의 기능에 장애가 있을 경우에는 수로조직의 원활한 운영에 지장을 초래하기 때문에 적절한 관리체제와 계획을 세워서 효율적으로 운영할 필요가 있다. 그러므로 일상 또는 낙수 후의 보수점검을 시행하고, 결과를 정리 보관하는 외에 이상이 발견될 경우에는 정밀 조사를 하고 안전상의 문제가 발생하면 개수 또는 보수 등의 조치를 취한다. 개수 및 보수의 필요성 유무, 공법의 선정, 설계·시공 등에 대해서는 관련 자료나 시공사례 및 전문기술자의 의견을 참고하여 정한다.

수 로 터 널 편 램

동 령 부

목 차

제 1 장 총 론	
1.1 편람의 목적	
1.2 터널의 정의와 분류	
1.3 조사설계의 순서	
제 2 장 조 사	
2.1 조사계획	
2.1.1 일반사항	
2.1.2 조사계획	
2.1.3 조사단계	
2.2 조사	
2.2.1 조사 항목	
2.2.2 지형조사	
2.2.3 지질조사	
2.2.4 지하수문조사	
2.2.5 입지조건조사	
2.2.6 개수 및 보수공사를 위한 조사	
2.3 조사결과의 정리	
제 3 장 기 본 설 계	
3.1 노선 계획	
3.1.1 노선 선정	
3.1.2 터널 선형	
3.2 터널의 형식	
3.2.1 터널 형식의 분류	
3.2.2 시공상의 주의사항	
3.3 터널의 기울기와 단면형	
3.3.1 터널의 기울기	
3.3.2 터널의 단면형	
3.4 갱구의 위치 및 환화공 형식 선정	
3.4.1 갱구 위치 선정	
3.4.2 환화공의 형식 선정	
3.5 최소 시공단면	

3.6	최소 토피두께	
3.7	시공법의 선택	
3.7.1	널판공법	
3.7.2	뿔어붙임 콘크리트·록 볼트 공법	
3.7.3	널판공법과 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법의 비교	
제 4 장	수 리 설 계	
4.1	일반사항	
4.2	허용유속	
4.2.1	최소 허용유속	
4.2.2	최대 허용유속	
4.2.3	유속 결정시의 유의사항	
4.3	평균유속 계산	
4.3.1	유량 계산	
4.3.2	무압터널의 평균유속계산	
4.3.3	압력터널의 평균유속계산	
4.4	부등류의 계산	
4.4.1	부등류의 기초방정식	
4.4.2	한계수심	
4.4.3	손실수두 및 수위의 변화량	
4.5	여유고	
4.5.1	일반적인 경우	
4.5.2	기타의 경우	
제 5 장	무 압 터 널	
5.1	일반사항	
5.2	터널의 지압 해석	
5.2.1	터널 측벽의 응력상태	
5.2.2	터널의 상부·하부의 응력상태	
5.2.3	터널 지보공에 가해지는 각종 지압발생의 기구	
5.2.4	원지반의 강도비(F_c)	
5.2.5	지보공과 원지반의 변형관계	
5.2.6	수치해석기법에 의한 해석	
5.3	널판 공법	
5.3.1	동바리에 작용하는 하중	

5.3.2 동바리의 규격과 설치간격	
5.4 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트 공법	
5.4.1 일반사항	
5.4.2 지보공의 형식	
5.4.3 뿔어붙임 콘크리트	
5.4.4 록 볼트	
5.4.5 강제 동바리	
5.5 라이닝	
5.5.1 라이닝에 작용하는 하중	
5.5.2 콘크리트 라이닝의 설계	
5.5.3 뿔어붙임 콘크리트에 의한 라이닝	
5.6 그라우팅	
5.6.1 저압충전 그라우팅의 기능	
5.6.2 시공구간	
5.6.3 주입압력 및 강도	
5.6.4 그라우트 재료	
5.7 배수공	
5.7.1 배수구멍	
5.7.2 배수구	
5.8 부대공	
5.8.1 배수시설	
5.8.2 안전시설	
5.8.3 갯문공	
5.8.4 비탈면 보호공과 배수대책	
제 6 장 압 력 터 널	
6.1 일반사항	
6.1.1 콘크리트 라이닝 방식	
6.1.2 내장관 방식	
6.1.3 노선 선정 및 선형 결정	
6.1.4 터널 내공단면의 형상	
6.1.5 최소 토피두께	
6.1.6 터널 시공법의 선택	
6.2 압력터널에 작용하는 하중	

6.2.1	하중의 종류
6.2.2	하중의 조합
6.3	압력터널의 라이닝
6.3.1	일반사항
6.3.2	내수압에 의해 라이닝에 발생하는 응력과 철근량 계산
6.3.3	외수압에 의해 라이닝에 발생하는 응력과 철근량의 계산
6.3.4	그라우트 주입압에 의해 라이닝에 발생하는 응력과 철근량의 계산
6.3.5	마제형 단면의 구조설계
6.3.6	내장관의 구조계산
6.4	압력터널의 그라우팅
6.4.1	콘크리트 라이닝 방식
6.4.2	내장관 방식
6.5	댐 부대터널
6.5.1	일반사항
6.5.2	작용 하중
6.5.3	라이닝
6.5.4	그라우팅
6.5.5	폐색공
제 7 장	시 공
7.1	시공계획
7.2	굴진방식
7.2.1	전단면 방식
7.2.2	벤치 컷(bench cut)방식
7.2.3	도갱선진 방식
7.2.4	굴착방식의 선정
7.3	굴착공법
7.3.1	발파굴착공법
7.3.2	기계굴착공법
7.3.3	인력굴착공법
7.3.4	특수공법
7.3.5	막장 안정을 위한 보조공법
7.4	버력처리
7.4.1	일반사항

7.4.2	버력적재	.....
7.4.3	버력운반	.....
7.4.4	버력머림	.....
7.5	지보공의 시공	.....
7.5.1	동바리의 설치	.....
7.5.2	뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법에서의 지보공 시공	.....
7.6	작업갱	.....
7.6.1	횡갱	.....
7.6.2	사갱	.....
7.6.3	수직갱	.....
7.7	라이닝	.....
7.7.1	라이닝 시공방식	.....
7.7.2	라이닝 공법	.....
7.7.3	아치·측벽부의 라이닝 작업	.....
7.7.4	인버트의 라이닝 작업	.....
7.8	그라우팅	.....
7.9	공사용 설비	.....
7.10	관찰·계측	.....
7.10.1	관찰·계측의 일반사항	.....
7.10.2	관찰·계측항목의 선정	.....
7.10.3	관찰	.....
7.10.4	내공변위의 측정	.....
7.10.5	관찰·계측결과의 정리	.....
7.10.6	관찰·계측결과의 설계·시공 반영	.....
7.11	안전시설	.....
7.11.1	조명시설	.....
7.11.2	환기시설	.....
7.11.3	배수시설	.....
7.11.4	통로	.....
7.11.5	안전점검	.....
7.11.6	노동위생	.....
7.12	환경보전	.....
7.12.1	소음, 진동 대책	.....
7.12.2	탁수의 처리	.....

7.12.3	지표의 침하대책
7.12.4	지하수 고갈대책
7.12.5	산업폐기물의 처리
7.13	시공관리
제 8 장	관 리
8.1	관리계획
8.1.1	점검
8.1.2	조 사
8.2	터널의 개수 및 보수
8.2.1	전면 재라이닝공법
8.2.2	부분 재라이닝공법
8.2.3	이중 라이닝공법
8.2.4	인버트 내림공법
8.2.5	강관 내장공법
8.2.6	공장제품의 삽입공법
8.2.7	라이닝 배면의 그라우팅 공법
8.2.8	기타 보수공법
<부록>	용어해설

제 1 장 총 론

1.1 편람의 목적

이 편람에는 농업생산기반정비사업에서 용·배수의 송수를 주목적으로 하는 수로터널의 계획 및 설계에 있어서 「기준」에서 규정하지 않은 사항으로서 지역 특성 및 개별 지형, 지질조건, 현장조건 등에 따라 선택할 사항, 일반적인 기술해설, 표준적인 사례와 참고 사항 등을 기술한다.

설계자 및 시공자는 이 편람을 참고하고 현지의 제 조건을 적절히 반영하여 재량을 가지고 설계와 시공을 할 필요가 있다.

1.2 터널의 정의와 분류

터널은 통수나 교통로 등의 목적으로 산, 지하 등에 굴착한 상당한 크기의 내공단면을 갖는 갱도로서 추도라고도 한다. 수로터널은 크게 수리특성, 지질 등에 따라 분류할 수 있으며 지지공법이나 굴착공법에 의해 분류할 수도 있다.

가. 수리특성에 따른 분류

(1) 무압 터널

계획유량이 자유 수면으로 흐르며 내수압이 작용하지 않는 터널이다.

(2) 압력 터널

계획유량이 만류가 되어 흐르며 내수압이 작용하는 터널이다.

나. 지질에 따른 분류

(1) 암 터널

비교적 풍화가 되지 않은 암반이나 고결도가 높은 연암 등으로 이루어진 지반에 구축되는 터널이다.

(2) 토사 터널

미고결 토층이나 풍화토, 고결도가 낮은 연암 등으로 형성된 지반에 건설되는 터널이다.

다. 지보공 공법이나 굴착공법에 따른 분류

지보공 공법에 따라 산악터널의 경우 널판공법, 뿔어붙임콘크리트·록 볼트공법 등으로 분류할 수 있으며 굴착공법에 따라 발파굴착공법, 기계굴착공법, 인력굴착공법 등으로 분류할 수 있다. 이외에도 실드(shield)공법, 메서(messer)공법 등의 특수공법에 대한 분류가 있을 수 있으나 수로터널은 대부분 산악지형에서 건설되므로 이 편람에서는 상세히 다루지 않으며 필요에 따라 관련 자료나 문헌 등을 참조한다.

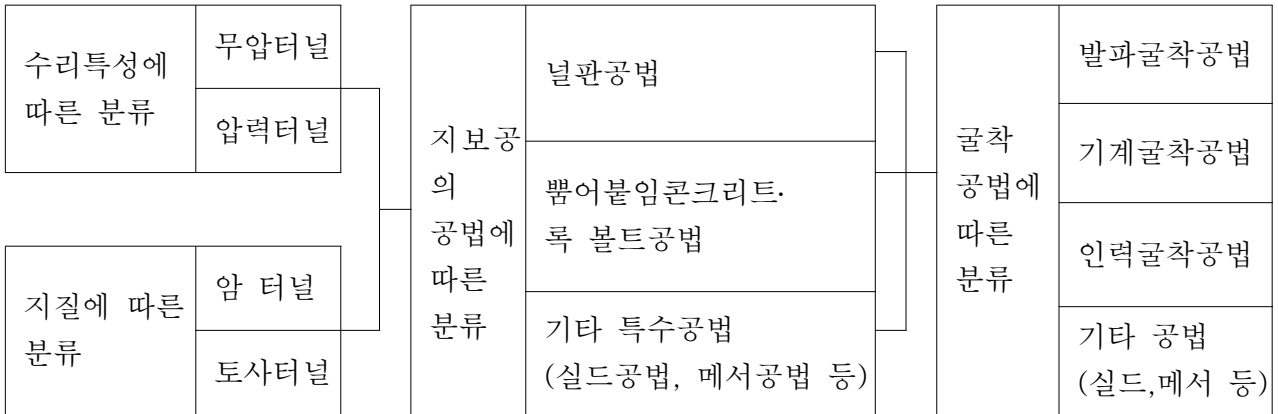


그림-1.1 수로터널의 분류

1.3 조사설계의 순서

조사설계에 있어서 설계의 단계에 따라 필요한 자료의 내용, 범위 및 정도가 다르므로 설계의 각 단계에 따른 조사항목을 설정하여 적절한 순서와 방법에 따라 조사 및 설계를 실시한다.

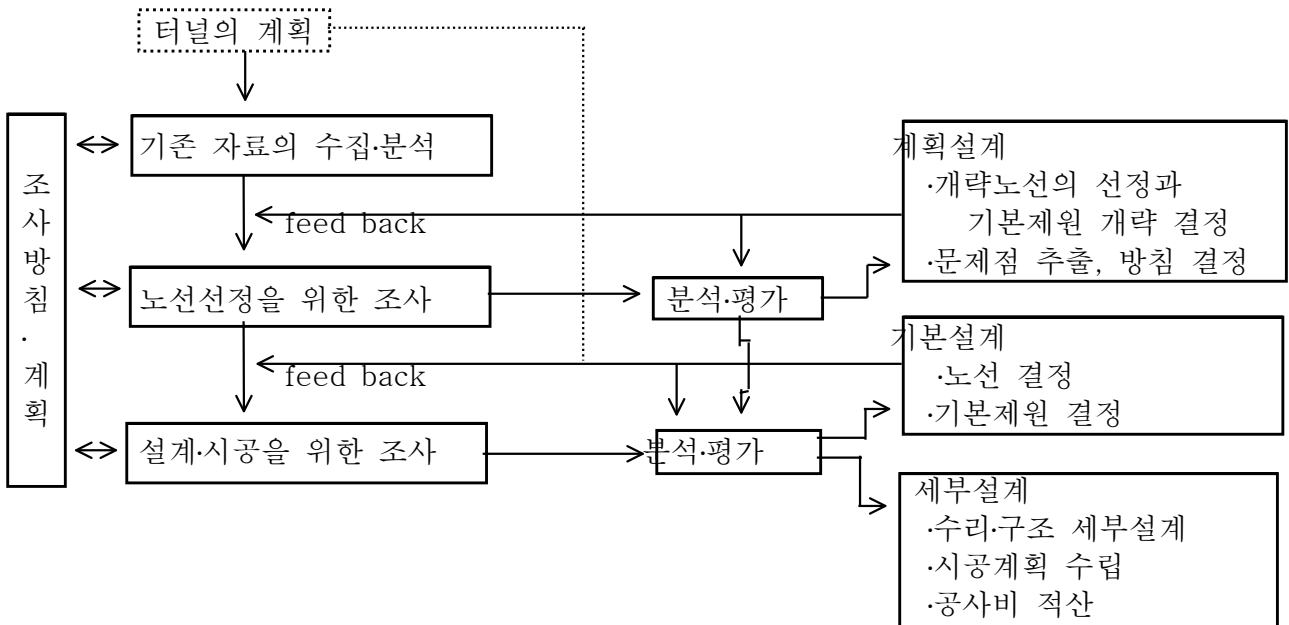


그림-1.2 조사설계의 표준적인 순서

제 2 장 조 사

2.1 조사계획

터널의 계획, 설계, 시공 및 관리에 관한 자료를 얻기 위하여 정확한 조사계획을 수립한다.

2.1.1 일반사항

터널의 계획, 설계 및 시공은 지형, 지질환경의 영향을 받으므로 터널의 노선 선정, 구조 설계, 시공법, 보상물건, 가설비 및 유지관리 등에 관한 제반 조사를 실시하여 충분한 기초자료를 수집한다. 지질구조가 복잡한 경우 계획 및 설계의 변경으로 공사비의 증대, 공사기간의 지연 등이 발생할 우려가 크므로 예측하지 못한 재해에 대비하여 충분한 지질조사가 필요하다.

공사 착수전의 조사만으로는 반드시 충분한 성과를 얻을 수 없으므로 시공 중에도 조사를 계속하여 공사의 안전성과 경제성의 확보에 노력한다. 환경보전을 위한 조사가 충분하지 못하면 공사시행에 중대한 영향을 미칠 수가 있으므로 지질조사와 함께 환경조사도 시행한다.

2.1.2 조사계획

터널의 조사는 진척상황에 따라 조사사항, 조사범위, 조사방침, 조사내용 및 조사정도 등이 달라지게 된다. 조사 착수 전에 이들에 대한 충분한 조사계획을 수립한다.

터널의 조사에는 ①계획상 필요한 조사, ②설계상 필요한 조사, ③시공상 필요한 조사, ④유지·관리상 필요한 조사, ⑤기타 조사 등이 있다. 조사방법으로는 ①자료수집 및 청문조사, ②답사, ③현지조사, 측량·현지시험·현지관측, ④실내시험, ⑤시험시공 및 시공 후의 관측, ⑥보충조사 등이 있다.

이 편람에서는 사업실시 순서에 맞추어 편의상 ①계획조사, ②기본조사, ③세부설계조사, ④시공중의 조사, ⑤보충조사로 구분한다. (그림-2.1 참조)

2.1.3 조사단계

가. 계획조사

계획조사는 기상, 수문, 지형, 지질, 입지조건 등에 대한 기존의 자료에 대한 폭 넓은 검토와 현지 답사 및 기타 필요한 조사를 병행하여 터널의 기본계획을 개략적으로 정하기 위한 것이다. 따라서 예상되는 여러 예비노선을 비교·검토하여 조사 대상 노선을 2~3개 안으로 선정한다.

나. 기본조사

기본조사는 세부설계 등을 시행하기 전에 기본계획을 수립하기 위한 조사로서 계획조사에서 개략적으로 정한 노선의 결정, 기본적인 설계·시공 및 개략공사비 등의 검토에 필요한 자료를 수집하기 위하여 측량, 현지조사, 지질조사 등을 시행한다. 일반적으로 이 단계에서 터널의 최종적인 계획이 책정된다.

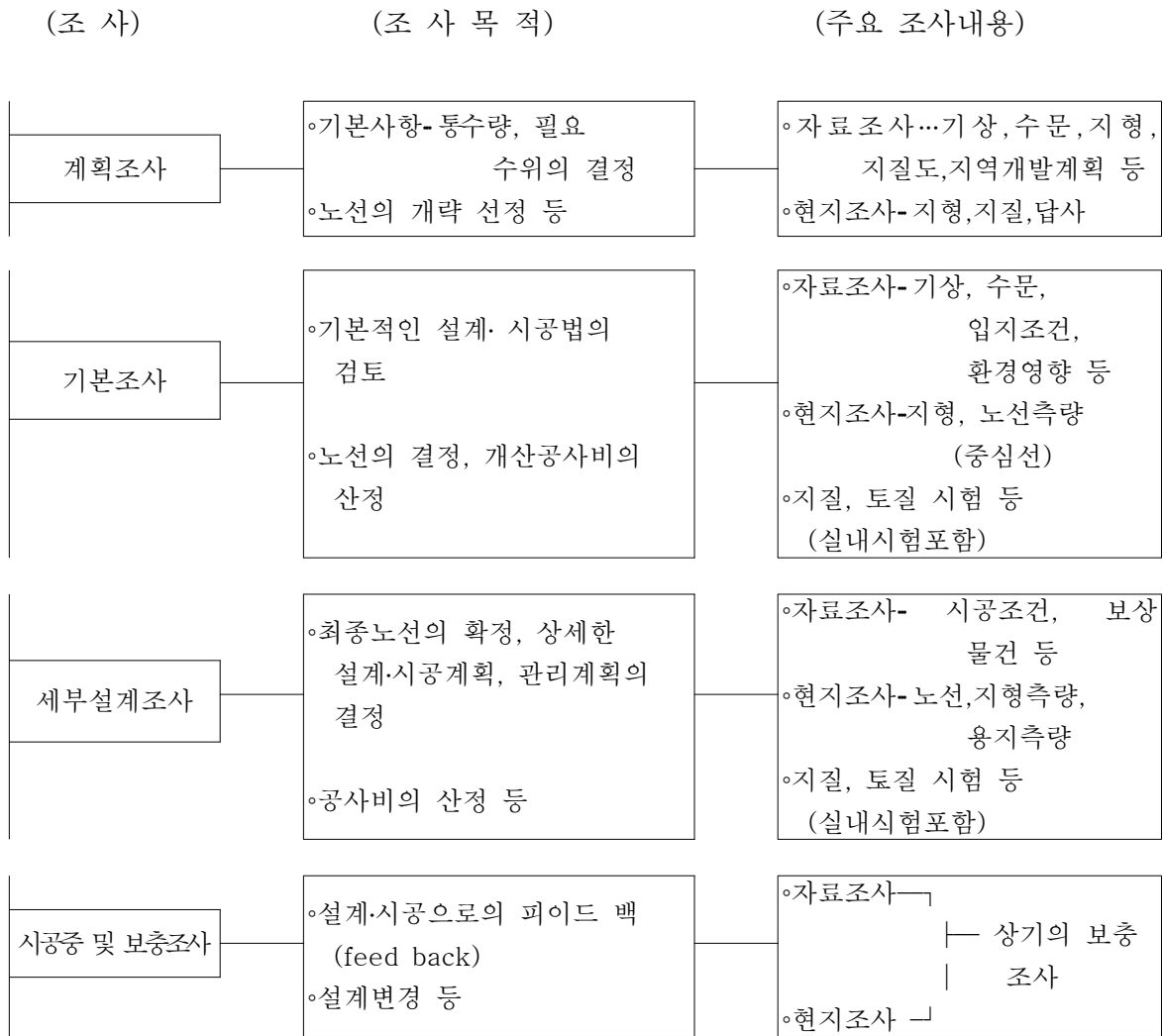


그림-2.1 조사의 구분

다. 세부설계조사

세부설계조사는 세부설계를 시행하기 위한 조사로서 기본 설계를 근거로 세부설계, 공사비 산정 및 시공계획의 검토 등에 필요한 자료를 수집하기 위하여 기본조사 결과를 근거로 정도를 높여 가는 것이다. 즉, 기본조사를 바탕으로 검토된 기본적인 설계는 바로 건설공사를 시행하기에는 불충분하므로 이 조사는 설계를 가능한 한 확실히 하기 위하여 시행한다.

라. 시공 중의 조사

시공 중의 조사는 시공 중 발생하는 문제점의 예상과 확인, 설계변경, 시공관리, 보상 및 이후의 시공을 위한 자료수집을 위하여 시행한다.

마. 보충조사

보충조사는 시공 중 필요한 사항에 대한 자료를 수집하는 것이다. 세부설계단계까지 상세한 조사가 이루어져 그 결과가 설계 및 시공계획에 정확하게 반영되는 것이 가장 이상적이지만 당초 계획한 지질조건과 크게 다른 현장조건 또는 예측하지 못한 사태가 발생한 경우와 자연 및 사회적 조건의 변화 등으로 터널구조나 시공법을 재검토해야만 할 경우에는 보충조사를 시행한다.

2.2 조사

2.2.1 조사 항목

터널의 계획 및 설계에서는 필요한 조사항목을 설정하여 적절한 순서와 방법에 따라 조사를 시행한다. 단계별 관한 조사항목은 다음과 같다. 대상 터널의 제반 조건에 맞추어 이들 조사항목 중에서 필요한 항목을 선정하여 합리적이고 효율적인 조사를 한다.

가. 계획조사

여러 개의 예비 노선에 대하여 다음과 같은 개략조사를 한다.

- ① 터널의 종단면도, 지질도
- ② 토피의 두께, 지표의 성층, 액상화의 유무, 갱구부의 절취높이
- ③ 용출수량, 작용토압, 배수, 성층 등에 의한 편압
- ④ 지질시대 및 분포암석, 단층·습곡·절리 등의 지질구조, 토질
- ⑤ 버력의 처리, 사토장 및 보상

나. 기본설계 및 세부설계조사

- ① 터널의 종단면도
- ② 터널의 지질·지하수위, 지질별 투수계수, 원지반의 역학적 값, 간극수압, 지하수의 수질과 온도
- ③ 지표에서의 지하수 및 강우의 침투상태
- ④ 성층 상태 및 지표 기울기에 의한 편압의 유무
- ⑤ 토피가 충분치 못할 경우 지표에 대한 영향 또는 지상구조물 및 차량하중의 영향
- ⑥ 유해가스 발생의 가능성
- ⑦ 터널 굴착후 용출수량의 추정
- ⑧ 터널기초지반의 허용지내력, 침하, 융기(heaving)의 유무
- ⑨ 터널 굴착에 의한 원지반의 변위, 인접구조물에 대한 영향, 지하수 고갈의 가능성
- ⑩ 토피 두께와 갱구부 절취높이
- ⑪ 터널공사용 골재로서 버력의 이용가치

- ⑫ 사토장의 이용
- ⑬ 부근 터널의 현황

다. 시공 중의 조사

시공 중 막장의 관찰이나 내공 변위의 계측 등에 대해서는 「7.10 관찰·계측」을 참조한다. 특히 주의해야 할 경우의 시공 중 조사항목은 다음과 같다.

(1) 토압이 큰 경우

- ① 터널 상단부에서 지표까지의 지질, 점착력, 허용지내력 등
- ② 지하수위, 원지반의 함수비
- ③ 원지반의 변위
- ④ 부근 공사에 의한 영향
- ⑤ 지보공에 미치는 작용지압의 측정, 토압의 증가와 경과 일수
- ⑥ 굴착 후의 토압, 원지반의 이완, 지반의 용기(화학변화를 포함)
- ⑦ 용출수·강우유출·용설 등의 변화

(2) 편압이 큰 경우

- ① 굴착지반의 성층상태
- ② 원지반의 기울기, 지하수위, 용출수의 상태, 지하수위의 경사와 변화의 진행도
- ③ 편압 방향의 원지반의 물리적 성질
- ④ 편압 작용시기와 동바리 조립시기, 굴착시기와의 관계
- ⑤ 원지반 및 터널기반층(큰 활동면내의 경우)의 변위
- ⑥ 편압에 의한 지보공의 변위, 편압강도
- ⑦ 굴착지반내의 허용지내력 분포, 투수계수의 분포

(3) 용출수량이 많은 경우

- ① 굴착직후부터의 용출수량 변화
- ② 용출장소와 지질 및 투수계수
- ③ 용출수맥, 지표수, 강우량, 용설수와 용출수량의 관계
- ④ 불투수층의 기울기

(4) 유니(流泥)의 붕괴가 발생한 경우

- ① 유니의 지질적, 물리적 성질
- ② 유니의 붕괴량, 용출수량
- ③ 굴착 절개에서 유니 붕괴까지의 경과
- ④ 불투수층의 기울기
- ⑤ 붕괴에 의한 원지반의 응력 불균형과 편압의 발생

(5) 굴착지반이 연약하여 라이닝이 곤란한 경우

- ① 기초층의 위치, 깊이, 기울기, 지하수위
- ② 굴착전단면내 허용지내력의 분포
- ③ 동바리에 작용하는 작용지압과 동바리 토대목의 크기, 침하, 변위량
- ④ 터널벽 부근 원지반의 일축압축강도, 점착력
- ⑤ 아치하중에 의한 터널벽의 활동·붕괴의 유무
- ⑥ 라이닝 바닥에의 작용력과 허용지내력과의 관계

(6) 유해가스 발생의 가능성이 있는 경우

- ① 가스성분 (메탄가스 등의 가연성 가스나 유화수소 등의 유독가스), 용출량, 가스압
- ② 발생장소와 지질

라. 라이닝 후의 조사 (변위·균열 등)

- ① 균열발생의 시기
- ② 지표의 변위, 지질, 지하수위의 변화, 부근의 공사와의 관계
- ③ 터널 원지반의 변위
- ④ 변위의 진행도, 변위도
- ⑤ 변위의 경과와 터널 변위와의 관계
- ⑥ 라이닝의 강도(σ_c , σ_t , τ)
- ⑦ 라이닝 각부의 변위량, 기초의 침하량
- ⑧ 균열의 깊이, 폭, 라이닝 두께, 라이닝 배면의 공극
- ⑨ 용출수와의 관계, 지하수의 수질, 수온과 콘크리트의 열화현상의 관계
- ⑩ 변위구간
- ⑪ 작용력의 방향과 크기
- ⑫ 원지반의 역학적 성질
- ⑬ 라이닝 배면에 대한 송수시험

마. 기타 조사항목

터널공사에 따른 용지의 취득과 보상, 자연 및 생활환경에 대한 영향을 조사한다.

- ① 용지, 보상조사
- ② 환경조사

2.2.2. 지형조사

계획지역에 대한 자료수집과 지형도를 작성하기 위하여 지형조사를 시행한다.

가. 자료수집

국립지리원 발행의 지형도 (축척 : 1/5,000, 1/10,000, 1/25,000 또는 1/50,000), 토지이용도, 항공사진 등을 수집하여 조사계획의 수립이나 설계에 참고한다

나. 지형도의 작성

일반적으로 도상작업에 필요한 지형도는 수집된 기존의 지형도를 계획지역에 맞는 도면으로 재정비하는 것으로 충분하지만 기존의 자료가 없는 경우에는 새로 지형도(1/1,000 ~ 1/5,000)를 작성한다.

다. 지형도의 사용목적

지형도는 일반적으로 다음과 같은 목적으로 사용한다.

- ① 터널노선의 검토
- ② 지질평면도의 작성
- ③ 수문조사 해석의 기초자료
- ④ 터널의 개요도 작성
- ⑤ 작업 갱(수평 갱, 사갱, 수직 갱)의 계획
- ⑥ 공사용 도로의 계획
- ⑦ 사토장 계획

2.2.3 지질조사

계획노선의 결정 및 설계·시공에 필요한 지질구조, 지질의 분포 및 공학적인 특징 등을 파악하기 위하여 지질조사를 실시한다.

가. 조사의 순서

- ① 계획노선을 포함하는 지역의 지질구조, 지질의 분포 및 특징 등에 대한 자료를 수집하고 인접지구 및 유사지질 장소의 조사사례 및 시공실적을 수집한다.
- ② 수집한 자료, 개략답사, 항공사진 판독 등으로 지질상황을 파악한 후에 설계·시공에 필요한 조사방법, 범위, 수량 및 실시순서 등의 계획을 수립한다.
- ③ 상기 계획에 따라 조사를 실시하고 그 결과 새로 필요한 조사가 있으면 적절히 추가한다.

나. 조사항목과 조사방법

터널의 지질조사방법에는 지표답사와 같이 주로 지질의 분포상태를 파악할 목적으로 하는 조사방법과 원지반의 공학적 특성을 파악할 목적으로 하는 조사방법이 있다. 예를 들면, 현장 시험이나 시료시험은 시험지점의 정확하고 정량적인 정보를 제공하는 것이지만 그 수치를 주위에 어느 정도 범위까지 적용시킬 수 있을 것인지 하는 판단은 지질의 분포와 지반의 상태에 관한 조사결과에 의존할 수밖에 없다. 그러므로 조사는 공사에 관계되는 범위의 전체적인 지질

구조, 지질분포 및 정성적인 성질을 파악한 후에 막장의 자립성 검토나 지보공의 설계를 위한 기초 자료가 되는 원지반의 물성치 등 공학적 성질을 파악하기 위한 조사와 시험을 단계적으로 실시한다. 일반적으로 원지반의 종류에 따라 표-2.1과 같이 조사항목을 명확히 할 필요가 있다. 표-2.2의 조사방법을 적절히 조합하여 선정한다. 표-2.3은 지반 분류와 특징으로 터널의 지지형식 결정시 대표 지반으로 활용할 수 있다.

표-2.1 원지반의 종류와 조사항목

구분	지형	지질구조	암질·토질	지하수	역학적 성질	물리적 성질	광물·화학적 성질	비고
연암지반	활동(사태) 붕괴지, 편압지형	지질분포, 단층· 습곡	암석명, 암의 상태 ^① , 절리상태, 풍화·변질	대수층, 지하수위	일축압축강도	원지반의 탄성과 속도,	-	특히 부서지 기 쉬운 토사 상태의 것은 토사 원지반에 준한다.
연암지반	활동(사태) 붕괴지, 편압지형 토피	지질분포, 단층· 습곡	암석명 암의 상태 ^① , 절리상태, 풍화·변질	대수층, 지하수위 및 투수계수	일축압축강도, 점착력, 내부마찰각, 변형계수, 푸아송의 비	원지반의 탄성과 속도, 밀도	침수붕괴도	상 동. 침수붕괴도 가 뚜렷한 경우는 팽창성 원지반에 준한다
토사지반 ^②	활동(사태) 붕괴지, 편압지형 토피	지질분포	토질명, 고결도	대수층, 지하수위 및 투수계수	일축압축강도, 점착력, 내부마찰각, 변형계수, 푸아송의 비, N_{60}	밀도, 입도조성, 함수비	-	균등한 입경이고 점토분이 거의 없는 경우는 유동성에 대한 검토가 필요하다
팽창성지반	활동(사태) 붕괴지, 편압 지형 토피	지질분포, 단층· 습곡	암석명 암의 상태 ^① , 절리상태, 풍화·변질	-	일축압축강도, 점착력, 내부마찰각, 변형계수, 푸아송의 비	밀도, 입도조성, 액성한계, 소성한계, 함수비, 원지반의 탄성과속도	함유점토광 물, 침수붕괴도	-

(주) ① : 암석의 입도, 광물조성, 공극상태를 말한다.

② : 토사원지반이 점성토인 경우에는 연암지반, 팽창성지반을 참고한다.

표-2.2 조사항목과 조사법

지질조사법 조사항목		자료조사	지표답사	탄성과탐사	지하수문조사	지하수조사	보링	공내검층				표준관입시험	공내재하시험	시료시험	조사경관찰계측
								속도검층	전기검층	공경검층	온도검층				
지형	활동(사태)-붕괴지	○	○				○								
	편압이 작용하는 지형	○	○												
	토 피	○													
지구질조	지질분포	△	○	△			○	△	△						○
	단층·습곡	△	○	○			○	△							○
암질·토질	암석·토질명	△	○				○		△						○
	암의 상태	△	○				○								○
	절리상태		△	○			○	○							○
	풍화·변질		△	○			○	○	△						○
	고결정도		○	△			○	△	△	○		○			○
지하수	대수층		○		○	○	○		○	○	△				○
	지하수위		△			○	○								
	투수계수					○									
역성학적질	일축압축강도											△		○	△
	점착력·내부마찰각											△		○	△
	변형계수·푸아송의 비											△	○	○	○
	N 값											○			
물리적성질	원지반의 탄성과 속도			○				○							
	탄성과 속도													○	
	밀도													○	
	입도조성													○	
	액성한계·소성한계													○	
	함수비													○	
광학적·성화질	점토광물													○	
	침수붕괴도													○	
	흡수율·팽창율													○	

(주) ○ : 유효한 조사법

△ : 보충으로 유효한 조사법

표-2.3 터널공사용 지반분류와 특징

지층명	정성적특징
퇴적토층(DS)	원지반에서 분리·이동되어 다른 곳에 퇴적된 층으로 일반적으로 원지반보다 연약하며 입자의 크기나 구성에 따라서 세분되는 지반
풍화토층(RS)	조암광물이 대부분 완전 풍화되어 암석으로서의 결합력을 상실한 풍화산류토로서 절리의 대부분은 풍화산물인 점토 등 2차 광물로 충전되어 흔적만 보이고 포화 시에 전단강도가 현저히 저하되기도 하며, 손으로 쉽게 부서지는 지반
풍화암층(WR)	심한 풍화로 암석자체의 색조가 변색되었으며 충전물이 채워지거나 열린 절리가 많고, 가벼운 망치 타격에 쉽게 부서지며 칼로 흠집을 낼 수 있음. 절리간격이 좁고 시추시 암편만 회수되는 지반
연암층(SR)	절리면 주변의 조암광물은 중간 풍화되어 변색되었으나 암석 내부는 부분적으로 약한 풍화가 진행 중이며 망치 타격에 둔탁한 소리가 나면서 파괴되고, 일부 열린 절리가 있으며 절리간격은 중간정도인 지반
보통암층(MR)	절리면에서 약한 풍화가 진행되어 일부 변색되었으나 암석은 강한 망치 타격에 다소 맑은 소리가 나면서 깨어지고, 절리면의 대부분이 밀착되어 있고 절리간격이 넓음
경암층(HR)	조암광물의 대부분이 거의 신선하며 암석은 강한 망치 타격에 맑은 소리를 내며 깨어지고, 절리면은 잘 밀착되어 있고 절리간격이 매우 넓음
극경암층(XHR)	거의 완전하게 신선한 암으로서 절리면은 잘 밀착되어 있고 강한 망치 타격에 맑은 소리가 나며 잘 깨어지지 않으며 절리간격이 극히 넓음

(주) 터널표준시방서(1996.5 건설교통부)

다. 지표답사

지표답사는 지질조사의 기본이 되는 것으로 조사방법, 순서, 위치 등을 검토하기 위한 자료가 된다. 지표답사, 항공사진 판독만으로 충분한 정도의 지질도가 작성되는 경우가 적으므로 지표조사를 보완하기 위하여 다음의 조사를 계획한다.

라. 탄성과 탐사

탄성과 탐사로 조사 가능한 항목은 지층의 미고결 퇴적물, 풍화층의 두께, 지층경계의 깊이, 단층, 파쇄대, 연약층의 위치, 폭 등이다.

측선(測線)은 주측선과 부측선으로 설정하며 주측선은 터널 중심선상 또는 이에 평행하게 설치하고, 부측선은 갱구 부근, 지질적 문제가 예상되는 지역, 주측선의 해석상 중요한 보조가 된

다고 생각되는 지역에 주측선과 평행 또는 교차하여 선정한다.

전체 측선길이는 터널의 연장, 지형, 토피의 두께, 제1층의 두께에 따라 다르지만 터널길이의 2~3배가 필요한 경우도 있다. 단위 측선길이는 특별한 경우를 제외하고는 200m이상으로 하며 소요심도의 3~4배 정도가 표준이다. 측점의 간격은 5~10m를 원칙으로 하나, 갱구 부근, 지질적으로 문제가 있는 지역, 토피가 작은 지역 등은 5m로 한다.

일반적으로 1개 측선의 양단에 주기진점(主起振点), 200~500m 간격으로 부기진점(副起振点), 100~150m 간격으로 보조기진점을 설치한다. 측선 양단에 적당한 주기진점을 설치할 수 없을 경우에는 원격기진점을 설치하여 관측한다.

주시(走時)곡선의 해석은 일반적으로 박취(剝取)법으로 시행하는 경우가 많다. 지층이 단순한 성층 상태이고 깊어질수록 단단해지는 경우는 이 방법으로 지층상태를 비교적 정확하게 파악할 수 있으나 지질구조가 복잡하게 되면 정확한 해석이 곤란하기 때문에 지표답사, 보링 등의 다른 지질조사 결과를 참고하여 해석하고 그 결과를 토목·지질적 관점에서 종합적으로 해석하여 판단한다.

탄성과 탐사는 역학적 의미를 갖는 물성치를 얻을 수는 있으나 지질구조의 해석에는 다음과 같은 곤란한 사항이 있다.

- ① 아래 층이 위층보다 속도가 느릴 경우
- ② 주시곡선에 나타나지 않는 속도층이 존재하는 경우
- ③ 측선 가까이 측선과 거의 평행하게 빠른 속도층이 존재하는 경우 측선 밑의 참 속도
- ④ 파쇄대나 연약층 등이 환경사인 경우의 경사각
- ⑤ 단층이나 암맥 등의 경사각
- ⑥ 저속도의 좁은 층의 존재
- ⑦ 포화되어 있는 경우의 새로운 지층 (충적층, 홍적층, 신제3기층)의 판별
- ⑧ 초동(初動)의 읽기, 기진(起振)시각, 중간층이나 기반층의 속도 값, 지형의 복잡성에 의한 심도계산상의 오차(최대 10~20%)
- ⑨ 지형, 기반면의 급경사로 인하여 생기는 속도 값의 보정
- ⑩ 이방성(異方性)을 가진 지층의 속도 값 산정 및 속도와 암석강도와의 관계
- ⑪ 입사각·출사각은 속도비를 정현(正弦)으로 하는 임계각이 되지만 경계면이 급경사이면 왕복의 한편이 공백으로 되어 박취계산이 불가능

마. 보링(boring)조사

보링 위치는 지형조사, 지표답사, 물리탐사의 결과를 참고하여 결정한다.

보링조사는 터널을 계획한 위치의 지하 시료가 채취되므로 실태파악에 가장 확실한 조사법이다. 시료는 암석시험, 토질시험에 사용되며, 보링공은 공내 검층, 원위치 시험, 수위관찰에 이용할 수 있다. 그러나 보링장소 이외에 대해서는 자료를 얻을 수가 없으며 비용이 많이 들기

때문에 보링장소는 이제까지의 조사결과를 근거로 신중히 선정한다. 관찰결과로는 주상도 외에 코어의 채취율, RQD, 굴진속도, 굴진 중의 수위변화 등을 기록한다.

터널의 지질조사에 사용되는 공내 검층에는 속도검층, 전기검층, 공경(孔徑) 검층, 온도검층을 들 수 있다. 보링공을 이용한 원위치 시험에는 표준관입시험, 공내 재하시험 등이 있으며 장기간 수위변동관측도 가능하다. 실시하는 조사에 맞추어 굴착직경을 정한다.

(1) 보링조사 위치의 선정

보링조사의 위치는 지형, 지질, 터널길이 등에 따라 다르지만 한 터널의 조사에서 최소한 양갱구와 중간부는 필요하다. 특히 지형, 지질조사 결과 단층과쇄대, 계곡부 등으로 풍화대가 두꺼운 장소, 용출수가 예상되는 지층 및 팽창성 토압 등이 염려되는 지층이 있다고 추정되는 지역에는 필요에 따라 보링조사를 추가한다.

보링공은 노선에서 터널 직경의 1.5배 정도 떨어지는 것이 좋다. 계류부 및 하상부의 보링조사는 보링공이 터널 굴착중 용출수의 유로가 되지 않도록 터널 중심선 보다 하류 측으로 하고, 보링공은 나중에 시멘트 등으로 그라우팅 한다. 또한 갱구 부근의 지형에 따라서는 수평 보링이 효과적인 경우가 있다.

(2) 심 도

보링심도는 터널 계획고를 기준으로 터널 단면의 3배 이상의 깊이까지 하는 것이 바람직하다. 특히 갱구부근에서 암반선을 확인하고자 할 경우는 심도에 관계없이 암반에 도달할 때까지 시행할 필요가 있다.

(3) 코어의 보존과 이용방법

시험용 코어는 원칙적으로 더블 코어 튜브(double core tube)로 채취하여 코어 상자에 보존한다. 또한 역학시험을 할 때까지 함수비가 변하지 않도록 비닐봉지로 밀봉하여 코어 상자에 보관한다. 이때 코어의 암석명과 풍화상황 등을 기록해 둔다.

(4) 지하수위, 용출수량, 배수량 조사

보링 종료 후 공내의 지하수위가 안정되면 지하수위와 터널 표고와의 관계를 조사함과 동시에 보링 굴착 중의 배수량, 용출수량에도 주의하여 터널 굴착 중의 터널내 용출수에 대하여 검토한다. 양수시험이 필요한 경우에는 보링공을 이용한다.

바. 시료시험

시료시험에는 표-2.2와 같이 많은 시험이 있으며 조사목적에 따라 선정한다. 토질재료에 대해서는 토질시험을 실시하고, 연암시료는 함수비에 따라 시험결과가 크게 다를 수가 있으므로 시험 때까지 함수비의 변화가 없도록 조치한다. 팽창성의 암석은 점토광물의 함유량 등 점토광물학적 시험이 필요하다.

사. 특수한 지반

(1) 활동(사태)등의 이동성 원지반 및 사면의 붕괴가 예상되는 원지반

활동을 포함한 사면의 붕괴에 대해서는 공중사진의 판독이 매우 유효하며 규모가 큰 활동의

경우에는 이를 피할 수 있는 노선검토가 필요하다. 사면에 근접하여 터널이 계획되었을 경우, 사면붕괴의 가능성, 편압의 작용 등 사면의 안정성을 평가한 후에 대책의 필요성과 설계에 대한 판단을 하기 위한 조사가 필요하다.

(2) 토피가 작은 경우

토피가 작은 경우에는 어느 정도의 지표 침하는 피할 수가 없다. 그러므로 지표에 주택 등이 있는 경우에는 사전에 침하량과 침하범위를 추정하기 위한 조사가 필요하다. 침하를 억제할 필요가 있을 경우에는 보조공법을 선정하기 위한 조사도 필요하다.

특히 균등한 입경을 가진 모래질로 형성된 지반에서 지하수위가 높을 때는 막장이 자립하지 못하므로 지하수위의 조사와 지층의 입도분석 등의 토질시험이 필요하다.

(3) 단층파쇄대, 습곡교란대(褶曲攪亂帶)

폭 넓은 파쇄대를 수반한 단층이나 습곡층의 존재는 문헌 등에 의한 자료조사 및 지표답사를 실시하여 정확한 지질구조의 해석과 공중사진 판독 등에 의해 개략적인 파악이 가능하다. 파쇄의 정도는 탄성과 탐사, 보링 등으로 예측 산정할 수 있다.

특히 제3기 응회암 지대에서는 팽창에 의한 압력이 발생할 수 있으므로 팽창성 지반의 조사가 필요하다. 단층파쇄대를 굴착할 때는 터널의 굴착 전방에 대량의 피압수가 있을 수 있으므로 지하수에 관한 조사가 필요하다. 활동단층에 대해서는 문헌 자료조사에 의한 활동도를 파악한 후 후속조사를 검토한다.

(4) 물이 함유된 미고결 원지반

제4기홍적세(第4紀洪積世)의 사암, 역암 등은 충분히 고결되어있지 않은 경우가 많으므로 지하수의 유로가 형성되어 있거나, 피압되어 있는 수가 있다. 이와 같은 원지반으로 터널에 공급되는 지하수원이 막대할 경우에는 대량의 용출수가 지속적으로 발생하므로 터널의 굴착이 매우 어렵게 된다.

미고결 사력층은 지질구조가 단순한 경우가 많으며 지표답사, 보링, 공내 검층, 지하수조사, 토질시험 등을 하여 어느 정도의 추정이 가능하다. 이러한 경우 탄성과 탐사는 크게 유효하지 않다.

(5) 팽창성 지반

응회암지역의 신제3기(新第3紀)의 이암(泥岩), 응회암 등에 다량의 점토광물이 함유된 원지반으로 토피가 큰 경우의 터널굴착에 있어서는 굴착단면의 축소가 발생할 수 있으며 이러한 경우의 지반을 팽창성지반이라고 한다. 지반의 강도가 작기 때문에 보링코어를 이용한 일축압축시험을 시행하여 지반강도비(F_c')를 구하기 위한 자료로 사용한다. 또한 보링공을 이용한 원위치시험(N 값, 공내 재하시험 등)도 필요하다. 기타 암석을 구성하는 입자의 점토분 함유율, 침수붕괴도 시험, 점토광물의 함유율, 액성 및 소성한계시험, 흡수시험 등에 의한 팽창압력의 유무 정도를 판정한다.

$F_c' < 2$ 이고 소성지수 $I_p > 30\%$, 2μ 이하의 점토광물 함유량이 40%보다 큰 이암이나 단층 점

토에서는 팽창성 토압(압출성 토압)이 발생할 가능성이 있다. $F_c' < 1$ 이면 그 가능성이 아주 크다. 한편 사문암(蛇紋岩), 흑색편암(黑色片岩), 이질편암(泥質片岩) 등에서는 이와 같은 방법만으로 팽창성토압의 유무를 판단하는 것이 어려우므로 과거의 사례를 참고하여 조사한다.

(6) 높은 지열, 온천, 유해가스 등이 있는 지반

문헌, 공사기록 등의 자료조사에 의해 높은 지열, 온천, 유해가스 등이 있는 지역을 파악할 수 있다. 이와 같은 지역에 터널을 계획하는 경우 보링에 의한 상세한 조사가 필요하며 경우에 따라서는 터널노선의 변경을 검토한다.

2.2.4 지하수문조사

터널의 굴착에 수반되는 갱내 용출수와 지표수·지하수의 영향 등을 예측하기 위하여 지하수문조사를 시행한다. 터널에서의 지하수문조사는 시공에 미치는 영향과 주변환경에 대한 영향을 예측, 평가하는 자료를 제공하는 것이며, 구체적으로 막장의 자립성, 갱내 용출수의 형태와 규모, 지표수나 지하수의 고갈 영향 범위와 규모, 배수구나 양수시설의 계획·설계 등의 평가 및 검토를 할 수 있어야 한다.

가. 갱내 용출수와 집수범위

터널내 용출수는 굴착 시 집중적으로 유출하는 집중 용출수와 그후 오랜 기간에 용출하는 평상시 용출수로 구분된다. 이와 같은 용출수의 형태나 용출수량 및 집수범위는 주로 지하수가 있는 대수층의 구조와 그 속에서 지하수의 흐름을 규제하는 수리전도도, 투수량계수, 저류계수 등 대수층의 성질에 영향을 받는다. 대수층의 성질을 밝히는 데는 수맥도를 참고하고 수위변화 관측, 양수 및 주수시험, 트레이서(tracer)관측 등의 방법으로 투수량계수, 저류계수를 평가하고 이들 조사 결과에 따라 용출수량과 집수범위를 예측한다.

나. 강수와 하천유량, 지하수위 및 용수량과의 관계

지하수와 지표수 및 강수의 시계열적인 관측기록을 근거로 대상 지역의 지하수에 대한 물수지 분석을 하여 터널 굴진에 따른 지하수 산출 상태를 예측한다.

2.2.5 입지조건조사

공사로 인한 환경영향, 공사를 규제하는 법규나 용지 및 권리관계 등을 파악하기 위하여 입지조건 조사를 시행한다.

가. 환경조사

공사로 인하여 동식물, 토지이용, 교통에 미치는 영향, 지표 및 지하수 고갈, 탁수, 소음, 진동 등의 문제가 발생하는 수가 있다. 따라서 환경에 미치는 영향을 최소한으로 하고 환경과 조화가 되는 설계 및 시공을 위하여 환경보전에 관한 조사를 한다.

환경조사는 지형, 지질, 동식물, 토지이용, 교통, 지표수 및 지하수 고갈, 탁수, 지하수위, 소

음, 진동, 지반 침하 등 자연환경, 사회환경, 생활환경에 관한 것이 있다.

노선선정 단계에서는 비교노선을 포함하는 광범위한 지역을 대상으로 환경조사를 시행한다. 설계단계에서는 터널의 공사용 설비, 운반도로 등을 중심으로 공사 실시전의 상황을 파악하여 공사로 인한 영향을 예측하고 평가하는 것이다. 시공단계에서는 주변에 대한 영향과 공사와의 인과관계 검토, 시공으로 인한 영향을 경감하기 위하여 시행한다.

지표 및 지하수 고갈, 탁수, 소음, 진동, 지반 침하 등은 착공전후의 상황과 시간경과에 따른 변화가 중요하므로, 영향이 예상되는 사항에 대한 조사는 공사착공 전에 착수하고 그 후의 변화 및 문제점이 규명될 때까지 계속 시행하는 것이 바람직하다.

나. 관계 법규 조사

터널 건설에 있어서 법규에 의한 규제를 받는 경우에는 공사에 미치는 영향의 범위, 이에 대한 규제의 정도, 수속, 대책 등에 관하여 조사해 두어야 하며 주된 관련 법은 다음과 같다.

- ① 공해방지 및 환경보전 분야 : 자연환경보전법, 자연공원법, 산림법, 대기환경보전법, 환경영향평가법, 조수보호 및 수렵에 관한 법률, 소음·진동규제법, 수질환경보전법, 해양오염방지법, 수도법, 하수도법, 광업법
- ② 재해방지 분야 : 사방사업법, 택지개발 촉진법, 농어업재해대책법, 자연재해대책법
- ③ 국토개발 분야 : 국토건설종합계획법, 국토이용관리법
- ④ 하천분야 : 하천법, 공유수면관리법, 지하수법, 온천법
- ⑤ 도시계획분야 : 도시계획법, 도시공원법
- ⑥ 도로 및 교통분야 : 도로법, 도로교통법, 철도법
- ⑦ 군사분야 : 군사기밀보호법, 군사시설 보호법
- ⑧ 문화재분야 : 문화재보호법, 전통건축물보존법
- ⑨ 안전분야 : 시설물안전관리에 관한 특별법, 건설기술관리법, 산업안전보건법

다. 보상대상조사

공사의 보상대상은 용지확보에 따른 토지, 건물 등의 매수, 이전, 각종 권리(지상권, 수리권, 온천권, 어업권, 광업권, 채석권 등)의 취득과 공사 중 혹은 완공 후에 공사로 인한 침하, 변위, 수량 고갈 등에 대한 손실보상 등이 있으므로 필요한 조사를 한다.

라. 기타조사

- ① 공사용 설비를 기능적으로 배치하고 조성이 용이하며 재해를 입지 않는 용지취득을 위한 조사
- ② 공사용 전력에 관한 기존의 송·배전선의 용량, 주파수, 전압, 수전 및 변전의 난이도 등에 대한 조사
- ③ 공사용 급수시설의 필요량, 수원 등의 조사

- ④ 터널시공에 수반되는 용출수 및 배출수의 방류조건 등의 조사
- ⑤ 공사에 사용되는 콘크리트, 기타 자재의 공급상황에 대한 조사

2.2.6 개수 및 보수공사를 위한 조사

터널의 개수 및 보수공사에 있어서는 기설 터널 및 주위의 지반상황을 파악하기 위하여 필요한 조사를 한다. 개수 및 보수를 위한 조사는 기설 터널 내의 작업을 수반하는 수가 많으므로 원지반의 붕괴나 산소 결핍 등에 주의하고 안전을 확인하면서 시행한다.

일반적으로 개수 및 보수공사를 위한 조사항목은 다음과 같다.

- ① 갱내 노선측량
- ② 보링조사(기설 라이닝 및 주위의 원지반을 대상)
- ③ 갱내 지질답사(라이닝을 하지 않은 경우)
- ④ 시료시험(일축압축강도, 밀도, 탄성과 속도 등)
- ⑤ 용출수조사
- ⑥ 누수조사
- ⑦ 라이닝의 관찰(균열이나 마모 등의 상황)
- ⑧ 라이닝 두께의 상황
- ⑨ 라이닝 배면의 공극 상황
- ⑩ 지표의 노선측량 (토피조사 등)

2.3 조사결과 정리

조사결과는 계획, 설계, 시공 및 장래 유지관리 등의 자료로서 활용할 수 있도록 다음과 같이 정리, 취합한다.

가. 원지반의 분류

일반적으로 원지반의 상태를 지배하는 요소는 암질, 토질, 탄성과속도, 함수량, 용출수 상태, 원지반의 역학적 성질(압축강도, 푸아송의 비 등), 풍화, 균열, 고결도, 파쇄상태, 팽창성 등이다. 이들 요소를 감안하여 원지반을 분류한다.

나. 지질평면도 및 지질 종단면도의 작성

조사결과를 종합하여 축척 1/1,000 ~ 1/5,000의 지질평면도 및 지질종단면도를 작성한다.

지질 평면도 및 지질 종단면도의 작성에는 터널통과 지점의 원지반의 지질구조에 대하여 추정지질과 확인지질을 상세히 기록한다. 또한 터널이 계곡부를 횡단하는 경우는 그 부분의 지질 횡단면도를, 갱구 부근이나 토피가 작은 구간 등에는 필요에 따라 축척1/100 ~ 1/600정도의 지질단면도를 작성하는 것이 바람직하다.

제 3 장 기 본 설 계

3.1 노선 계획

3.1.1 노선 선정

터널 노선은 기술적, 경제적, 사회적 조건 및 환경에 미치는 영향 등을 고려하여 설정한다. 안전하고 경제적인 시공과 더불어 기존시설 및 주변의 주민생활에 미치는 영향이 최소화 되도록 노선을 선정하며 다음 사항에 특히 유의한다.

- ① 시공 및 구조상의 안전을 위하여 가능한 한 지형·지질조건이 양호한 노선을 선정한다. 특히 지질의 경계가 터널 노선 부근인 경우에는 주의한다.
- ② 지형·지질조건을 고려하고 경제성을 감안하여 짧은 거리가 되도록 노선을 선정한다.
- ③ 조사결과에 의하여 2~3개 안의 비교노선을 검토하는 것이 바람직하다.
- ④ 『3.4 최소 토피두께』에 규정한 필요 토피두께를 고려하여 노선을 선정한다.
- ⑤ 철도 등 중요한 기존시설에 접근하여 터널을 설치할 경우에는 굴착단면 직경(D_e)의 5~10배 정도의 거리를 유지시키는 것이 바람직하다.

3.1.2 터널 선형

터널의 선형은 계획노선을 기초로 지형·지질의 조건, 작업 갭, 기존시설 등과의 위치관계 및 시공법 등을 종합적으로 검토하여 결정하며 지형·지질조건이 허락하는 한 직선 또는 곡률반경이 크게 되도록 설계한다. 터널의 최소 곡률반경(R)은 다음과 같다.

가. 콘크리트 라이닝에 강제 거푸집(steel form)이나 철재 거푸집(metal form)을 사용하는 경우

$$R = \frac{\ell^2}{8 \cdot d_e} \quad \text{----- (3.1)}$$

- 여기서, R : 터널 중심선의 최소 곡률반경(m)
 ℓ : 강제거푸집의 길이 또는 철재거푸집을 사용하는 경우 1회 타설길이(m)
 d_e : 원형곡선을 절선형상으로 할 경우 지정노선으로부터 벗어나는 거리
(표준은 0.05m정도이며, 최대 0.10m로 한다)

그림-3.1 최소 곡률반경

나. 실드(shield)공법을 채용하는 경우

보조공법을 사용하지 않는 수굴식 실드공법을 사용할 때의 최소 곡률반경의 표준은 다음과 같다.

$$R=m \cdot De \quad \text{또는} \quad R=n \cdot ls \quad \text{-----} \quad (3.2)$$

여기서, m : 계수(최소 30, 시공 사례는 50정도가 많음)
 n : 계수(최소 20, 시공 사례는 30정도가 많음)
 De : 터널 굴착단면의 직경(m)
 ls : 실드의 길이(m)

다. 터널 보링기를 사용하는 경우

$$R = m \cdot De \quad \text{-----} \quad (3.3)$$

여기서, m : 계수(로빈슨식 또는 월마이어식의 경우로 시공 사례는 30 정도가 많음)
 De : 터널 굴착단면의 직경(m)

3.2 터널의 형식

터널의 형식은 지질조건, 지보공 및 라이닝의 종류에 따라 결정한다.

3.2.1 터널 형식의 분류

터널 형식은 주로 라이닝의 유무와 재질, 지보공의 유무와 형식, 종류 등에 따라 표-3.1과 같이 4 종류로 분류한다. 터널형식은 표-3.2와 표-3.4를 참고로 하고 지질조사 결과, 시공성 등을 종합적으로 판단하여 결정하며 코어의 채취율이 양호하고(RQD 75%이상) 코어가 터널 근방의 암반강도를 대표하고 있다고 생각될 경우에는 원지반의 강도비를 참고로 한다.

표-3.2는 탄성과 탐사를 시행하여 탄성파의 속도, 종파(V_p), 횡파(V_s)를 구하고 푸아송 비를 구하여 적용하는 하는 경우에는 직접적용이 가능하나 여건상 탄성과 탐사를 시행하기 어려운 경우가 많으므로 표-3.4와 같은 현장암질분류기준과 함께 검토하여 설계에 반영한다. 또한 굴착과정에서 확인되는 제반 지질상황에 따라 터널의 형식을 최종적으로 결정하게 되므로 시공중에는 굴착 후의 암질조사를 통해 현장암질분류기준에 따라 암질을 분류함으로써 최종적인 터널 형식을 결정한다.

비교적 굴착단면이 큰 경우 등 설계 목적상 필요한 경우에는 국제적으로 널리 쓰이는 RMR(Rock Mass Rating)분류나 Q-시스템 분류를 적용할 수 있다. RMR분류는 Bieniawski에 의한 암반 분류법으로서 신선암의 강도, RQD, 불연속면의 간격 및 상황, 용출수량 등 5개 항목의 평점 및 절리 방향에 대한 보정 평점에 의해 종합평점으로 암반등급에 의한 암반 분류를 실시하는 것이다. Barton에 의한 Q-시스템은 절리군의 수 및 변질도, 절리면의 거칠기,

RQD(Rock Quality Designation의 약자이며 보링 굴진 길이에 대한 10cm이상의 봉상 코어의 길이의 비율을 %로 표시한 지표로서 보링한 암반의 상태를 나타내는 지표) 등에 따른 평점에 의해 Q값을 산정하여 분류하는 방법이다.

가. A형식

균열이 적은 신선한 암반구간을 발파, 굴착 후 라이닝 할 때까지 지보공이 없는 상태로 오랜 시간 자립할 수 있는 곳에 적용된다. 균열이 국부적으로 존재하더라도 록 볼트나 뿔어붙임 콘크리트 등을 시공함으로써 일정기간 원지반을 자립시킬 수 있는 경우에도 적용한다.

라이닝은 원칙적으로 무근 콘크리트 또는 뿔어붙임 콘크리트로 한다.

나. B형식

경암질이지만 균열이 발달하여 굴착 직후 막장은 자립하되 용출수 등의 영향으로 시간이 경과함에 따라 풍화되어 지반탈락이 발생하는 것과 같은 경우, 또는 연암으로 굴착후 막장은 자립하지만 시간이 경과하면서 지압이 발생할 우려가 있는 경우에 적용한다.

널판공법을 사용할 때는 강재 동바리를 사용하고 여기에 끼움널 공법으로 지반을 지지하나 지반의 상태에 따라 어느 정도 굴착을 선행시킨 후에 강재 동바리를 설치하는 경우와 굴착 후 신속하게 강재 동바리를 설치하는 경우가 있다. 전자의 경우는 강재 동바리의 설치간격을 최대치 1.50m내로 설치하며 이를 B₁ 형식이라 한다. 후자의 경우는 동바리의 설치간격을 굴착진행 길이와 동일하게 설치하는 것으로 B₂ 형식이라 한다. 원칙적으로 B₁, B₂ 형식의 라이닝은 무근 콘크리트로 한다.

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법을 사용하는 경우에는 아치·측벽부에 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트를 사용하며 강재 동바리는 사용하지 않는다.

다. C형식

풍화암, 파쇄대와 경질토 등의 지반은 굴착시 동바리를 신속히 설치하여 지반을 지지하지 않으면 버력의 반출작업에 위험이 따를 수 있는 경우에 C형식을 적용한다.

널판공법을 사용할 때는 강재 동바리를 사용하며 아치부는 보내기널공법, 측벽부는 끼움널 공법으로 한다. 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법에서 록 볼트를 채택한 경우는 일반적으로 강재 동바리가 필요없다. 또한 점토질의 토사 등과 같이 록 볼트의 효과가 작은 지반에서는 강재 동바리를 채용하고 록 볼트의 사용여부를 검토한다. 일반적으로 뿔어붙임 콘크리트는 아치·측벽부에 한하여 시공하고 인버트부에는 시공하지 않는다.

라이닝은 무근 콘크리트를 원칙으로 한다.

Æ3-1

표-3.2 터널형식의 관정기준

형식	지 질 상 태			탄성파속도 (km/s)	외관상의 원지반강도비 (F _c ')
A	균열이 적은 신선한 암	균열의 상태	a: 대량의 것으로부터 비교적 많은 것까지의 범위 β: 적은 것부터 약간 있는 정도의 것까지 γ: 거의 없음	α균: 4.5이상 β균: 4.0이상 γ균: 3.0이상	10이상
		암 석 시 료 의 압축강도	a: 1,200kgf/cm ² 이상 β: 800kgf/cm ² 이상 γ: 500kgf/cm ² 이상		
		원지반의 푸와송의 비	0.16 ~ 0.23		
		토압	작용하지 않음		
B	균열이 있는 약간 풍화된 암 또는 연암	균열 및 파쇄 상황	a: 균열이 많고 여러 곳에 소단층이 있으며 장소에 따라서는 파쇄질대 β: 균열이 많고 여러 곳에 소단층을 끼고 있음 γ: 균열이 다소 있는 연암 δ: 연암	α균: 3.0 ~ 4.5 β균: 2.5 ~ 4.0 γ균: 2.0 ~ 3.0 δ균: 2.0이상	6 ~ 10
		암 석 시 료 의 압축강도	a: 600 ~ 1,200kgf/cm ² β: 400 ~ 1,000kgf/cm ² γ: 200 ~ 500kgf/cm ² δ: 50 ~ 200kgf/cm ²		
		원지반의 푸와송의 비	0.18 ~ 0.35		
		토압	일반적으로 작용하지 않으나 파쇄질이나 용출수가 있는 곳에 작용하는 수가 있음		
C	풍화암, 파쇄대, 경토	균열, 파쇄, 연결상황	a: 파쇄대 β: 파쇄대 혹은 균열이나 소단층이 많다 γ: 균열이 많고 파쇄대 또는 연암 δ: 연암 또는 고결도가 나쁜 것 (잘 다져진 경토사도 포함) 일반적으로 막장전면 또는 일부가 붕괴되어 가는 경우에 적용 함	α균: 1.8 ~ 3.0 β균: 1.5 ~ 2.5 γ균: 1.0 ~ 2.0 δ균: 0.8 ~ 2.0	2 ~ 6
		암 석 시 료 의 압축강도	50kgf/cm ²		
		토압	작용한다		
D	부풀어진 풍 화 암, 단층 파 쇠 대, 연결토사	균열, 파쇄, 연결상황	a,β: 파쇄대 및 용출수가 있는 곳 γ: 파쇄대 또는 연결암으로 고결도가 낮음 δ: 파쇄대 또는 고결도가 매우 나쁘다. 일반적으로 미고결 퇴적토 등으로 막장전면이 용출수로 인하여 자립을 못하고 유동화하는 경우나, 용출수가 현저하게 많은 파쇄대에 적용함	α균: 1.8이하 β균: 1.5이하 γ균: 1.0이하 δ균: 0.8이하	2.0이하
		암 석 시 료 의 압축강도	50kgf/cm ²		
		토압	작용함		

주) (1) α,β,γ,δ균별 암석구분은 표-3.3과 같다

(2) 특히 F_c' < 0.3 ~ 0.5에서는 막장이 자립하지 못하는 경우가 있다. 원지반의 강도비는 원지반을 대표하는 암반 또는 흙의 일축압축강도와 토피의 자중에 의한 초기응력의 비로서 실제로 암반을 압축시험하는 것이 곤란하므로 암석의 일축압축강도를 사용하며 이를 외견상의 강도비 F_c'라 한다.

표-3.3 암 석 구분

군	암 석 명
α군	① 고생층, 중생층(점판암, 사암, 역암, 석회암, 휘록응회암 등) ② 심성암(화강암, 화강섬록암, 섬록암 등) ③ 반심성암(석영반암, 화강반암, 휘록암, 사문암 등) ④ 화산암(현무암) ⑤ 변성암(결정편암, 편마암, 호른펠스(Hornfels))
β군	① 박리가 심한 변성암 ② 잔 층리가 발달된 고생층, 중생층(혈암, 사암, 휘록응회암 등) ③ 화산암(유문암, 안산암 등) ④ 고제3기층의 일부(화산암질 응회암, 규화혈암, 사암, 응회암 등)
γ군	고제3기층 ~ 신제3기층(이암, 혈암, 사암, 역암, 응회암, 각력응회암, 응회암 등)
δ군	① 신제3기층 ~ 홍적층(이암, 실트암, 사암, 사력암, 응회암, 단구, 애추 등) ② 홍적층 ~ 충적층(점토, 실트, 모래, 사력, 애추, 단구 등) ③ 표토, 붕괴토

라. D형식

많이 풍화된 암, 단층과쇄대와 용출수가 많은 연질토사지대에서 토압이 크게 작용하는 경우에 D형식을 적용한다. 이와 같은 지반은 막장의 지지력에 따라 지보공 형식이 크게 달라진다. 또한, 지반의 지지력이 부족하거나 측압이 크게 작용하여 인버트 스트럿이 필요한 경우도 있으므로 D형식은 다음과 같이 2 종류로 분류한다.

(1) D₁ 형식

아치부의 토압은 크지만 측벽의 토압이 작아서 막장이 유지될 수 있는 지반에 적용한다.

널관공법의 경우, 강재 동바리를 사용하며 아치부는 빗끼움널관, 측벽부는 끼움널관과 빗끼움널관을 병용한다. 뿔어붙임 콘크리트-록 볼트공법의 경우에는 뿔어붙임 콘크리트와 함께 록 볼트, 강재 동바리를 병용한다. 뿔어붙임 콘크리트는 인버트부에도 시공하는 것을 검토한다. 라이닝은 특별한 경우 이외는 무근 콘크리트로 한다.

(2) D₂ 형식

아치부분의 토압이 크게 작용하며 다량의 용출수로 인하여 막장이 유지될 수 없기 때문에 막장면 보호공(막장의 붕괴를 방지하는 흙막이공)이 필요하게 되고 원지반의 지지력이 약하기 때문에 동바리가 침하되거나 측벽의 토압으로 밀려나는 원지반에 적용한다.

널관공법에서는 일반적으로 강재 동바리의 인버트 스트럿을 부가시키고 아치부, 측벽부 공히 빗끼움널로 한다. 뿔어붙임 콘크리트-록 볼트공법을 사용할 때는 뿔어붙임 콘크리트와 록 볼트, 강재 동바리를 사용하나 측압이 크게 작용하여 용기의 우려가 있는 원지반이 많으므로 원칙적으로 저반부에도 뿔어붙임 콘크리트로 시공하고 필요한 경우에는 인버트 스트럿을 설치한다.

콘크리트 라이닝은 상황에 따라 철근으로 보강한다.

표-3.4 현장암질 분류기준

암질분류기준 및 터널형식						
합계수치	86이상	85.9 ~ 66	65.9 ~ 46	45.9 ~ 21	20.9 ~ 9	8.9이하
암질분류	극경암	경 암	보통암	연 암	풍화암	풍화토사
터널형식	A		B	C	D	
현장암질조사 항목별 기준 점수표						
구 분	A	B	C	D	E	F
○ 암괴상태 - 조 직	신선 견고함	대체로 신선 견고함	비교적 견고하며 조암광물이 다소 인지됨	암내부는 비교적 신선하나 외부는 상당히 풍화 변색됨	심하게 풍화되어 황갈색 등으로 변색, 조암광물인지 곤란	완전하게 풍화되어 토사화됨
(점수)	(15)	(11)	(7.5)	(4)	(1.5)	
- 풍화도	풍화 흔적 전무 (Fresh)	약간 풍화 변질 (Slightly weatered)	다소 변질되어 조암광물 변색 (Moderately weatered)	풍화로 인하여 연질화 (신선하거나 변색된 암석은 연속적인 구조 또는 핵석으로 존재) (Highly weathered)	암 조직 파괴되어 굴착에 곡괭이 사용 (신선하거나 변색된 암석은 불연속적인 구조나 핵석으로 존재) (Completely weathered)	원암구조를 인지하기 어려움 (Residual Soil)
(점수)	(15)	(11)	(7.5)	(4)	(1.5)	
○ 불연속면의 간격	3m 이상	1 ~ 3m	0.3 ~ 1.0m	5 ~ 30cm	5cm이하	토 사 화 되 어 crack없음
(점수)	(30)	(25)	(20)	(13)	(7)	
○ 불연속면의 상태 - 틈	밀착, 불연속	0.1mm이하 약간 불규칙하게 벌어짐, 암반 견고, 불연속	0.1 ~ 1.0mm 다소 벌어져 충진물이 약간 협재, 암반 연약	1 ~ 5mm 연속적으로 벌어지고 충진물이 많음	5mm이상 연속적으로 상당히 벌어짐, 연속충진물 상당히 많음	
(점수)	(13)	(10)	(6.7)	(4)	(1.3)	
- 면상태	매우 거친 면	약간 거친 면 (경암반)	거친 면 (중경질 암반)	평탄한 면	아주 평탄한 면	
(점수)	(7)	(5)	(3.3)	(2)	(0.7)	
○ 강도 - 암석용 슈미트 합마	57이상	51 ~ 57	44 ~ 51	34 ~ 44	10 ~ 34	
(점수)	(7.5)	(5)	(3.5)	(1.5)	(0.5)	
-합마타격 (회)	11회 이상	8 ~ 10	5 ~ 7	2 ~ 4	1	
·타격음 ·타격 반응	금속성 깨짐없이 반발	경금속성 약간 깨짐	경금속성 ~ 탁음 불연속면을 따라 크게 깨짐	탁 음 쉽게 깨짐	둔탁함 쉽게 소편으로 깨지거나 손으로도 깨짐	손으로 부서짐
(점수)	(7.5)	(5)	(3.5)	(1.5)	(0.5)	

이와 같이 D_2 형식은 어디까지나 표준적인 경우이므로 원지반의 상황에 따라 설계하는 것을 기본으로 한다. 이들 원지반에서 큰 압축성 토압이 있을 경우에는 설계단면을 확보하기 위하여 강한 동바리로 지지해야 할 경우가 많다.

그림-3.2 널판공법의 표준단면도(표준마제형의 경우)

그림-3.3 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법의 표준단면도(표준마제형의 경우)

주) 지질이 특히 불량하여 압출이 많은 경우에는 굴착단면을 가능한 한 원형에 가깝게 한다. 또한, 인버트의 뿔어붙임 콘크리트의 시공에도 불구하고 압출의 억제가 곤란하게 될 우려가 있을 때는 인버트스트럿을 설치한다. 록 볼트를 인버트의 지반에 시공하는 경우가 있다.

C형식중 강재 동바리를 사용하는 경우 록 볼트를 병행할 수도 있다. 뿔어붙임 콘크리트의 시공 시 철망을 부설할 수도 있다

3.2.2 시공상의 주의사항

터널형식은 지질조건에 따라 분류되지만 시공법은 단면의 크기에 따라서도 다르다.

D형식과 같이 지질이 열악하고, 단면이 어느 정도 큰 터널에서는 전단면의 굴착이 곤란하게 된다. 이러한 경우에는 막장의 중앙 부분을 남기고 동바리를 설치하는 부분만을 우선 환상으로 굴착하는 링 컷(ring cut)방식을 채용하는 수가 많다. 또한 굴착단면의 직경이 5~6m 정도의 터널에서 널판공법으로 시공하는 경우, 도갱식으로 굴진하여 지질의 상황을 확인함과 동시에 용출수를 배제한 후 소정의 단면을 굴착하는 하부도갱 선진상부 반단면 공법, 측벽도

갱 선진상부 반단면 공법 등 지질의 상황에 따라 여러 공법이 채택된다. 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법을 사용하는 경우 이러한 도갱방식이 채택되는 경우도 있으나 벤치 컷(bench cut)방식으로 불리는 반단면 굴착공법 등, 막장단면을 분할하여 굴착하는 공법을 채용하는 경우가 많다.

C형식 이상의 비교적 양호한 원지반에서도 터널단면이 클 경우, 전단면 굴착을 채용하지 않고 위에서와 같이 단면을 분할하여 시공하는 수도 있다. 또한 터널길이에 따라서는 큰 단면이면서 막장이 자립하는 경우라도 굴착기계의 효율을 고려하여 상부 반단면의 굴착을 선행하는 경우도 있다.

한편 작은 단면의 터널은 아주 열악한 지반일지라도 막장이 자립하는 경우가 많으므로 전 단면굴착을 채용한다. 작은 단면의 터널에서 막장이 자립하지 못하는 경우에는 용출수를 배제하는 드레인(drain)공법, 약액주입공법, 파이프 루프(pipe roof)공법, 압기공법(壓氣工法) 혹은 선수공(先受工) 등과 같은 보조공법을 사용한다.

3.3 터널의 기울기와 단면형

터널의 기울기와 단면형은 수리·구조 및 시공상의 문제점을 고려하여 적절히 설계한다.

3.3.1 터널의 기울기

터널의 기울기는 수리적 특성, 시공성 및 경제성 등의 상호관계를 고려하여 결정한다.

수리 및 경제적 요소와 관련하여 기울기는 수로조직의 전체적인 수두배분에 의해서 결정할 필요가 있지만 가능한 한 기울기를 급하게 하여 단면을 축소하는 것이 일반적으로 경제적이다. 시공적 요소로는 갱내의 용출수 처리 및 사용기계의 주행조건이 있으나 1/500~1/5,000의 범위라면 특별한 지장은 없다.

3.3.2 터널의 단면형

터널의 내공단면 형상은 수리·구조적, 시공적 및 경제적 요소를 고려하여 결정하지만 무압 터널은 표준마제형, 압력터널은 원형이 일반적이다.

각종 터널 단면형을 비교하면 다음과 같다.

가. 수리학적인 면에서의 비교

내공 단면적을 일정하게 하고 각종 단면의 만류시 유량비를 비교한 결과는 표-3.5와 같다. 이에 따르면 주변장이 최소인 원형이 가장 유리하며 단면은 각이 질수록, 세장할수록, 또한 편평할수록 유량비는 감소하지만 높이와 폭이 같고 측벽과 인버트가 원호인 경우에는 수리특성상 원형과 큰 차이는 없다.

나. 암반 및 구조역학적인 면에서의 비교

터널 해석시에는 지반조건, 지하수조건, 터널 단면형, 시공방법 및 터널 주변의 지지능력을 고려해야 한다. 이러한 해석은 이론해석방법과 수치해석방법이 있으며 이론해석방법은 참고에 별도 기술된 해석이론을 참고하며 근래는 거의 컴퓨터 프로그램을 이용하는 수치해석방법을 많이 사용하고 있다. 수치해석방법을 이용할 때는 공학적으로 공인되어 있어 널리 사용되고 있으며 대상지반 및 설계조건을 적절히 반영할 수 있고 지반의 거동을 해석할 수 있는 기능을 보유한 해석프로그램을 이용한다.

표-3.5 각종 터널단면의 만류시 유량비

단 면 기 호	반경(m)	윤변(m)	동수반경(m)	유량(m ³ /s)	유량비(%)
① 2r-r-r	2.500	15.708	1.250	37.99	100.0
② 2r-2r-2r	2.433	15.897	1.235	37.67	99.2
③ 2r-3r-3r	2.407	16.070	1.222	37.36	98.3
④ 2r-4r-4r	2.393	16.187	1.213	37.20	97.9
⑤ 2r-V-3r	2.383	16.293	1.205	37.07	97.6
⑥ 2r-V-H	2.345	16.747	1.173	36.41	95.8
⑦ 1.6r-2r-4r	2.713	16.345	1.201	36.99	97.4
⑧ 2.4r-V-3r	2.148	16.405	1.197	36.90	97.1
⑨ 1.268r-0-2r	3.185	16.787	1.178	36.50	96.1
⑩ 1.172r-0-3r	3.303	17.110	1.176	35.82	97.3

주) 이 표는 직경5m의 원형단면과 동일 내공단면(19.635m²)을 갖는 각종 단면의 수로터널에 대하여 동수기울기(I)=1/1,600, 조도계수(n)=0.015의 경우를 비교한 것이다. 단면기호에 따른 단면형은 그림-3.4를 참조한다.

① 원 형
 $2r-r-r$

② 표준마제형(2r마제형)
 $2r-2r-2r$

③ 3r마제형
 $2r-3r-3r$

④ 4r마제형
 $2r-4r-4r$

⑤ 3r측벽수직형
 $2r-V-3r$

⑥ 1원호측벽수직형
 $2r-V-H$

⑦ 2r4r편평마제형
 $1.6r-2r-4r$

⑧ 3r2원호측벽수직형
 $2.4r-V-3r$

⑨ 2r2원호편평마제형
 $1.268r-0-2r$

⑩ 3r2원호 편평마제형
 $1.172r-0-3r$

기호 설명	x	—————	y	—————	z
	높이		측벽의 반경		인버트의 반경

그림-3.4 수로터널의 내공단면 형상도

원지반이 경암으로 동바리를 설치하지 않는 단면의 경우에는 단면형상을 임의로 해도 좋다고 생각하는 경향이 많으나 탄성이론이나 광탄성실험의 결과를 보면 다음과 같은 차이가 있다. (p_2 , p_3 에 대한 것은 표-3.6을 참조)

① 원형이나 타원형 단면의 경우 압축응력의 최대치는 측벽의 중앙에 나타나지만, 각이 있는 단면형의 경우에는 그 부근이 최대치이며 측벽에도 상당한 크기의 압축응력이 생긴다. 압축응력의 최대치는 단면형에 따라 다르지만 표-3.6과 같은 단면형일 때 C점과 같은 측벽과 인버트의 접합부에서는 p_2 의 3~5배로 되는 수도 있다.

② p_3 가 수직으로 작용하는 상태에서 p_2 의 절대치가 0에서 증가함에 따라 천정이나 바닥에 인장응력이 나타나는 범위가 좁아지고 최대치가 감소하며 결국 인장응력이 소멸하여 어느 곳이나 압축응력이 생기게 된다. 단면의 각에 나타나는 압축응력은 p_2 의 절대 값의 크기에 따라 증가한다. 단면의 각이 예각이면 매우 큰 응력이 집중되며, 둥글면 응력집중도는 저하한다.

③ p_3 가 수직이거나 수직에 가까운 경우, 단면형의 폭보다 높이가 높을수록 응력집중도는 낮다. 그러나 원지반의 주응력 방향을 알 수 없거나 수직에 가까운 주응력과 수평에 가까운 주응력 중 어느 쪽이 큰가를 구분하지 못하는 경우에는 폭과 높이가 거의 같은 단면형이 바람직하다.

구조역학적인 면에서 라이닝 형상을 고려할 경우에는 다음과 같다.

① 큰 정수압 또는 정수압과 유사한 성질을 가진 토압(팽창성 토압 등)이 작용하는 경우에는 내공단면을 원형 또는 원형에 가까운 마제형 단면으로 하는 것이 바람직하다.

② 원형단면은 압력의 방향, 크기가 변화하더라도(편압이 작용하는 경우도 포함) 같은 강도로서 저항이 가능하다.

③ 연직방향과 수평방향으로 작용하는 힘이 거의 동일한 원형단면에 작용하는 외력은 대부분 축방향으로 작용하며, 큰 휨모멘트와 전단력이 생기지 않는다.

다. 시공상의 비교

터널단면이 큰 경우(내공단면의 직경이 약 3.5m 이상) 측벽은 반드시 수직에 가까운 필요는 없으며 인버트가 평평할수록 시공이 용이하다. 또한 터널단면이 극히 작은 경우(내공단면의 직경이 약 2.0m 이하)에는 측벽이 수직에 가깝고 인버트는 평평할수록 버력반출, 콘크리트 운반 등이 편리하다. 인버트가 수평일수록 콘크리트 타설이 용이하지만 직경 5.0m 정도의 마제형에서는 수평이 아닐지라도 콘크리트 타설에 큰 지장은 없다. 원형단면에서 인버트 콘크리트를 타설할 경우는 거푸집이 필요하게 되므로 긴 터널에서는 니들 빔(needle beam)형 거푸집을 사용하는 일체시공을 고려할 수 있다.

표-3.6 터널의 벽면상 각 지점에서의 응력비(σ_t/p_3)

터널굴착 전의 주응력	터널굴착 후의 응력비(σ_t/p_3)		터널의 단면형상
	A	B	
$p_2 = p_3$ 의 경우	2.0	2.0	
$p_2 = \frac{p_3}{2}$	0.5	2.5	
$p_2 = \frac{p_3}{3}$	0.0	2.7	
$p_2 = 0$	-1.0	3.0	
$p_2 = p_3$	2.2	1.3	
$p_2 = \frac{p_3}{2}$	0.6	1.8	
$p_2 = \frac{p_3}{3}$	0.1	1.9	
$p_2 = 0$	-1.0	2.2	
$p_2 = p_3$	1.1	1.1	
$p_2 = \frac{p_3}{2}$	0.1	1.6	
$p_2 = \frac{p_3}{3}$	-0.3	1.8	
$p_2 = 0$	-0.1	2.1	
$p_2 = p_3$	1.8	0.7	
$p_2 = \frac{p_3}{2}$	0.4	1.2	
$p_2 = \frac{p_3}{3}$	-0.1	1.3	
$p_2 = 0$	-1.0	1.7	
$p_2 = p_3$	0.7	1.8	
$p_2 = \frac{p_3}{2}$	-0.2	2.3	
$p_2 = \frac{p_3}{3}$	-0.4	2.4	
$p_2 = 0$	-1.0	2.8	

- 주) (1) p_2 : 터널굴착전의 수평방향의 원지반응력
 p_3 : 터널굴착전의 연직방향의 원지반응력
 σ_t : 벽면 각 지점에서의 접선방향의 주응력
(2) 응력비 중 (-)는 인장응력을 나타낸다

이상의 비교검토 결과에서 단면형상 결정의 지침으로 다음과 같은 것을 열거할 수 있다.

① 압력터널의 경우 내공단면 형상은 원칙적으로 원형으로 하지만 내수압이 대략 1kgf/cm^2 이하의 경우에는 표준마제형도 무방하다.

② 터널보링기, 실드공법 등의 기계시공을 할 경우에는 원형으로 한다.

③ 내공단면의 직경이 대략 2.0m 이상의 무압터널은 원칙적으로 표준마제형으로 한다. 널관공법을 사용하는 경우에는 다음과 같이 할 수 있다.

① 토피가 크고 파이핑이 생기지 않는 터널로서 암반이 경암인 경우 4r마제형을 선정할 수 있다.

② 측압이 크게 작용할 우려가 있는 지반에서는 측벽을 수직형 단면을 선정하지 않는 것이 바람직하다. 불가피하게 선정하게 되는 경우에는 강제 동바리를 간격 1.0m 이내로 사용한다. 토압의 증가가 예상되는 경우에는 철근의 보강도 고려해야 한다.

3.4 갱구의 위치 및 완화공 형식 선정

3.4.1 갱구 위치 선정

터널의 갱구는 개수로 등 다른 공종과의 접속부가 되는 경우와 작업을 위한 갱구(수평갱, 사갱, 수직갱 등)로 구분한다. 갱구는 안정된 원지반이면서 기능상 장애를 받지 않는 위치에 선정하며 다음 사항에 유의한다.

① 터널의 갱구는 토압이 가장 불안정한 장소이므로 퇴적부 같은 곳은 피한다.

② 갱구 부근은 토피가 얇고, 표층 가까운 곳의 강도가 약한 풍화암을 굴착하는 경우가 많아 큰 토압이 작용하거나 갱구 부근의 사면이 불안정하여 붕괴하는 수가 많으므로 지층이 갱구로 향하여 경사진 원지반의 경우에는 특히 주의가 필요하다.

③ 저지대나 계곡부는 용출수가 많고 강우의 영향도 받기 쉽다. 이러한 곳은 호우시 물이 집중되어 토사에 의해 갱구가 막히는 경우도 있다. 또한, 적설지대는 눈사태의 우려가 있는 곳은 피해야 한다.

④ 갱구 부근의 소음이나 진동이 주변환경에 악영향을 미치지 않도록 배려한다.

3.4.2 완화공의 형식 선정

터널을 개수로, 암거, 잠관 또는 수로교 등과 같이 단면형이 다른 구조물과 접속시키는 경우에 원활한 물의 흐름을 위하여 원칙적으로 완화공을 설치한다. 일반적으로 수로터널에서 단면형이 다른 구조물과 접속시키는 경우 손실수두를 가능한 한 적게 하여 물의 흐름을 안전하고 원활히 하기 위하여 구조상 접속부를 설치한다. 단 수두에 여유가 있거나 소규모 공사의 경우에는 이에 구애되지 않는다.

OT: 개방 완화공
CT: 폐쇄 완화공
C&C: 암 거
T: 터 널

단면 I - I

단면 II - II

단면 III - III

단면 IV - IV

그림-3.5 터널 출입구의 완화공 구조

가. 개방 완화공(O.T: open transition)

일반적으로 개수로, 암거, 잠관 및 수로교 등에서 터널에 접속하기까지 점차로 변이하는 이행부 중 개거부분을 지칭한다. 형상은 「농업생산기반정비사업계획설계기준 수로공」에서와 같이 직선형 또는 사다리꼴의 직선형으로 한다.

개방완화공의 길이는 그림-3.6과 같이 중심선과 접근수로까지의 확장 각도(점축각 θ)가 10°이하가 되도록 결정한다.

$$\ell = \frac{B-b}{2} \cot\theta \quad \text{----- (3.4)}$$

- 여기서, ℓ : 개방완화공의 길이 (m)
- B : 접근개수로의 수면폭 (m)
- b : 폐쇄완화공의 수면폭 (m)
- θ : 점축각(。)

그림-3.6 개방 완화공

나. 폐쇄 완화공 (C.T: closed transition)

터널 출입구의 개방 완화공과 터널단면과의 접속부로서 폐쇄 완화공을 설치한다. 원칙적으로 절개시공으로 하고 시점의 위치는 토피가 터널직경과 거의 같은 위치로 한다. 또한 동일 터널내에서 단면을 변화시키는 경우에도 폐쇄 완화공을 설치한다.

(1) 길이의 결정

- ① 마제형 단면의 경우 : D_i 정도, 단 최소 2.0 m
- ② 원형단면의 경우 : $2D_i$ 정도, 단 최소 3.0 m

(2) 구 조

전 길이를 2등분하여 터널 단면에 가까운 쪽의 1/2은 마제형 또는 원형암거의 배근을 적용하고, 출입구에 가까운 쪽의 1/2 은 터널폭을 1번으로 하는 박스형 암거의 배근을 적용한다. 표준마제형 무압터널이 접속하는 경우의 표준형상은 그림-3.7 및 그림-3.8과 같다.

종단면도

단면 A-A

평면도

단면 B-B

그림-3.7 폐쇄 완화공의 형상(출입구폭과 터널직경과의 차가 없는 경우)

종단면도

단면 A-A

평면도

단면 B-B

그림-3.8 폐쇄 환화공의 형상(출입구 폭과 터널직경과의 차가 있는 경우)

3.5 최소 시공단면

터널의 시공단면은 안전성과 경제성을 고려하여 시공상 필요한 최소단면을 확보한다.

터널단면의 크기는 통수량을 기준으로 결정하는 것을 원칙으로 하지만 통수량이 적어서 터널단면이 현저히 작아질 경우에는 작업환경이 열악하게 되어 작업능률의 저하와 안전대책상의 문제가 야기되므로 시공법, 터널규모 등을 고려하여 시공의 안정성과 경제성이 확보되도록 시공상의 최소단면을 결정한다.

널판공법을 사용하는 경우 최소 시공단면은 시공조건, 사용기계 및 근로자의 안전규칙을 준수해야 하나 굴착(천공, 버력처리) 및 라이닝(콘크리트 운반 및 치기)을 기계시공으로 할 경우 그림-3.9와 같이 최소한 동바리 내폭이 2.0m, 킥업(kick up) 시점부까지의 동바리 높이가 1.8m 정도의 단면이 필요하다. 시공조건이 이와 다른 경우에는 공사규모, 시공법, 안전성 및 경제성 등을 고려하여 적절하게 종합적으로 검토하여 결정한다.

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법을 채택하는 경우 작업효율과 안전성이나 작업환경 측면에서 유압착암기에 의한 천공, 로봇에 의한 뿔어붙임 등 기계화시공이 표준화되고 있다. 이런 경우 최소 시공단면은 기계의 치수와 작업공간을 고려할 때 굴착 완성 직경으로 대략 2.7m이다. 굴착 완성 직경이 3.0m 이하의 경우에는 뿔어붙임의 각도와 거리 등으로 인해 뿔어붙임 콘크리트의 반발량(rebound)이 많아지므로 주의가 필요하다.

그림-3.9 터널의 최소시공단면의 표준도

3.6 최소 토피두께

터널의 토피는 구조상의 안전성, 시공상의 안전성과 경제성 및 유지관리 등에 필요한 두께를 확보한다. 라이닝의 유무와 재질, 지보공의 종류, 원지반의 지질, 내수압의 크기 등을 고려하여 필요한 최소 토피두께를 확보한다.

터널 굴착으로 인하여 지반내부의 응력상태가 변화하여 터널 주변에는 수직토압을 측면에서 바닥에 전달하려는 그라운드 아치(ground arch)가 형성된다고 판단된다. 이러한 경우 토피가 작으면 터널은 과대한 하중을 받아서 안정이 저해되고 지반의 균형이 깨어져 지표까지 붕괴된

다. 이 때문에 원지반 내부응력의 균형을 도모하기 위한 최소한의 토피가 필요하게 된다.

무압터널의 경우, 최소 토피두께에 대해서는 각종 실험 및 탄성이론에 의한 해석 등에 의하면 일반적으로 터널 굴착단면 직경(De)의 5배 정도로 되어 있으나 이는 원지반의 지질, 라이닝의 유무와 재질, 동바리의 유무에 따라 다르며 다음 표-3.7의 표준값을 적용하는 것이 좋다.

표-3.7 터널의 최소 토피두께(Dc)의 표준

구 분	암 터 널	토 사 터 널	비 고
모르터 또는 콘크리트 뿔어붙임 단면	$D_c = 10D_e \geq 30m$	-	
무근 콘크리트 라이닝 단면	$D_c = 3D_e \geq 6m$	$D_c = 5D_e \geq 10m$	동바리 없음
무근 콘크리트 라이닝 단면	$D_c = 2D_e \geq 4m$	$D_c = 3D_e \geq 6m$	동바리 있음
철근 콘크리트 라이닝 단면	$D_c = 1.0D_e \geq 2m$	$D_c = 1.5D_e \geq 3m$	동바리 있음

주) 1. De : 터널 굴착단면의 직경(m)

2. 토피의 두께(Dc)는 터널 본체 상부에서 지표까지의 높이

(1) 갱구의 경우

(2) 계곡의 경우

그림-3.10 최소 토피두께

3.7 시공법의 선택

시공법은 지질조건, 터널단면의 크기, 굴착방법, 라이닝방법 등을 고려하여 시공상의 안전성과 경제성이 보장되도록 선정한다.

수로터널의 시공은 특수한 지질이나 지형조건에 사용하는 실드공법 등 특수한 공법을 시행하는 경우를 제외하고는 대부분이 널판공법을 적용하고 있으며 근래에는 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법도 많이 적용하고 있다. 터널의 시공법에 따라 지보공 형식은 다음과 같이 분류한다.

① 널판공법 : 강제동바리와 널판을 주체로 한다.

② 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법 : 뿔어붙임 콘크리트와 록 볼트를 주체로 한다.

지보공은 안정되어 있는 원지반에 터널을 굴착함에 따라 발생하는 새로운 원지반의 거동에 대하여 굴착단면을 유지하는 동시에 안전을 확보할 수 있어야 한다. 터널은 굴착 후 시간이 경과함에 따라 하중이 증대하는 수가 많으므로 신속하게 지보공을 설치한다. 또한 지보공은 시공이 용이할 뿐 아니라 갱내 작업이 능률적으로 가능한 것이어야 한다.

3.7.1 널판공법

널판공법에서 동바리는 라이닝 콘크리트와 일체가 되거나 공동으로 최종 토압을 지지하는 것이다. 또한 설치된 동바리의 철거는 매우 위험하므로 라이닝 콘크리트 속에 매입되어도 악영향을 미치는 일이 없어야 한다. 이 때문에 강제 동바리가 사용된다. 한편 암질이 양호하여 강제 동바리를 생략하는 경우에는 원지반의 탈락 등 위험방지 대책을 검토한다.

3.7.2 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트 공법

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트 공법의 지보공은 터널주변의 원지반이 보유하는 지지기능을 유효하게 활용할 수 있어야 한다. 따라서 지형·지질, 원지반의 역학적 특성, 토피의 많고 적음, 용출수의 유무, 굴착단면의 크기, 지표침하의 제한, 시공법 등 여러 가지 설계조건이 고려된 합리적인 지보공의 설계가 이루어져야 한다. 일반적으로 지보공 부재로는 뿔어붙임 콘크리트, 록 볼트, 강제 동바리가 사용되지만, 지질조건이 열악한 경우에는 라이닝도 지보공으로서의 역할을 하도록 하는 수도 있다.

3.7.3 널판공법과 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법의 비교

가. 널판공법의 문제점

토사 터널에서 터널 굴착 후 원지반의 자중으로 인하여 터널 공간 주변의 원지반에 작용하는 응력은 그림-3.11에서와 같이 막장의 진행에 따라 3차원적 응력에 의한 반 돔(dome)작용에서 2차원적 응력상태의 아치작용으로 이행하고, 이에 따라 동바리에 작용하는 토압은 증가한다. 탄성체지반에서 막장 진행의 영향은 동바리의 설치위치(그림-3.11의 B위치)에서 직경 $D=2R_1$ 의 2배 정도 떨어지면(그림 A위치) 없어진다는 것이 증명되지만 소성상태의 원지반에서는 직경의 수 배 정도 떨어질 때까지 영향을 준다.

지반굴착 직후에 반 돔작용에 의하여 지반으로부터의 하중이 막장전방의 지반과 막장에 가까운 동바리로 분산되어 작용할 때는 막장 가까이 또는 동바리를 설치하지 않은 구간(그림-3.11의 B~C구간)에서는 터널주변의 암반에 아직 충분한 크기의 응력이 작용하지 않고 있다. 따라서 이 시점에서 강제 동바리와 사이에 널판이나 썰기를 강하게 박어 그림-3.12의 σ_{r0} 보다 큰 σ_i 로 굴착면의 원지반을 억제하여 터널 굴착면의 응력상태를 그림의 모어원 C보다 작게 하면 파괴를 억제하거나 파괴영역의 발달을 작게 할 수 있다.

그림-3.11 막장 근방에서의 3차원적인 반 돔(dome)작용과 막장에서 떨어진 부분에서의 2차원적 아치작용($L_0 = 1$ 회 굴진 길이이며 이 구간이 막장의 작업공간이 된다.)

(주) S_r, S_s : 막장 상부의 중량(W)이 흡기등의 좌·우 양측에 작용하는 전단응력
 S_f : 막장 상부에서 흡기등에 작용하는 전체 전단응력
 $(S + S_r + S_f) > W$ 이면 반 돔작용으로 흡기등이 동바리없이 유지되기 때문에 일반적으로 이 조건이 만족되도록 1회 굴진 길이(L_0)를 조절한다. 지반이 나쁜 경우, 전단저항력(S)이 적으므로 1회 굴진길이를 짧게 해서 W 를 작게하여 반 돔작용이 효과가 있도록 함.

그림-3.12 터널위치에서의 여러 가지 응력상태의 설명도
(토포 100m, $r_o = 2\text{tf/m}^3$, $\nu=0.5$ 일 때의 예)

주) 모어원 A는 터널굴착 전 원지반의 초기응력상태를 표시함. 굴착 후 ①→②, ③→④로 변화함

그러나 널판과 강재 동바리를 사용하는 널판공법으로 터널을 굴착하는 경우에는 널판에 의해 지반에 전달되는 힘은 그림-3.13과 같이 지반 굴착면의 요철 때문에 점 지지 상태로 되는 것이 보통이다. 그래서 처음에는 동바리 사이에는 거의 힘이 작용하지 않는 것이 보통이다.

이상과 같이 터널 굴착면에 대하여 지반을 누르는 응력(σ_1)을 일정하게 분포시키는 것은 강재 동바리와 널판을 사용하는 공법에서는 실제로 거의 불가능하다. 따라서 일반적으로 지반강도비가 그 보다 작은 경우에는 터널굴착벽면의 지반응력상태를 그림-3.14의 모어응력원 C보다 작게 하여 파괴기준에 저촉되지 않는 상태로 이끌어가기 어렵다. 게다가 굴착벽면의 지반요철로 인한 국부적인 응력집중도 터널벽면의 파괴를 조장한다. 예를 들면 그림-3.12와 같이 타원상의 결원(d : 결원의 깊이, ρ : 결원 선단부의 곡선 반경)이 탄성체에 연직방향으로 σ_1 을 일정하게 작용시켰을 때 선단부에 최대의 집중응력(σ_{max})이 연직방향으로 작용하며 그 크기는 다음 식과 같다. $d=10cm$, $\rho=2cm$ 라 하면 $\alpha=5.5$ 가 되며 σ_1 의 5.5배의 응력집중이 국부적으로 발생하게 된다.

$$(\sigma_{\theta})_{max} = \sigma_1 \left(1 + 2\sqrt{\frac{d}{\rho}}\right) \text{----- (3.5)}$$

여기서 $\alpha=1+2\sqrt{d/\rho}$ 로서 응력집중계수이다.

따라서 원지반 강도비가 낮은 지반을 널판공법으로 굴착하면 지반의 파괴는 굴착면으로부터 쉽게 발생하기 시작하여 막장의 진행과 함께 지반내부로 진행되어 진행성 파괴가 발생한다. 이에 따라 다일레이턴스로 인한 체적증가나 활동면에 의한 소성 유동에 의하여 터널주변의 원지반이 터널 내로 압출된다. 이 압출을 억제하기 위하여 강재 동바리를 설치하면 토압으로 인한 응력이 발생한다. 그림-3.15는 막장의 진행에 따른 파괴영역의 증대에 의한 토압의 증가과정을 보여주고 있다.

이와 같이 강재 동바리와 널판을 사용하는 널판공법은 굴착벽면의 지반을 안정시키는 응력(σ_1)을 일정하게 유지할 수가 없다. 이에 반해 뽐어붙임 콘크리트·록 볼트 공법은 이 결함을 어느 정도 극복할 수 있는 공법이다.

그림-3.13 원지반의 요철부에서 국부적인 응력집중점으로부터 시작되는 진행성 파괴

그림-3.14 원형단면 굴착면의 곡부 선단에서의 응력집중과 타원 장축의 연장선상에서의 원지반의 응력분포($\rho/d = 0.2$ 의 경우)

그림-3.15 동마리에 발생한 응력과 설치후의 경과일수(예)

나. 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트 공법의 장점과 문제점

이 공법은 오스트리아의 라프세비쓰(Rabcewics)에 의해 1963년에 명명된 공법으로 신오스트리아 터널공법(New Austrian Tunneling Method)의 머리 글자를 따서 NATM공법으로 불려지고 있다.

이 공법의 특징은 뿔어붙임 콘크리트와 록 볼트에 의해 암반의 진행성 파괴의 발달을 조기에 억제하여 암반이 본래 지니고 있는 강도를 최대한으로 발휘시킴으로써 터널 주변의 원지반 속에 어느 두께를 가진 쉘 상의 원지반 구속영역을 형성시키는 방법으로 원지반 자체에 지보공 역할을 하도록 하는 것이다.

굴착 직후 막장 가까이에서 돔작용에 의해 막장 주변지반에 원지반의 자중에 의한 응력이 충분히 작용하고 있지 않은 단계, 즉 지반의 암반이 그림-3.16에서와 같이 응력-변형곡선의 사선부의 탄성영역에 있든지 또는 암반 내에 균열이 발생하더라도 연속적으로 전단면에 발생하지 않은 단계에서 콘크리트를 뿔어 붙여 굴착 시 생긴 지반의 요철을 매끄럽게 하여 그림-3.14와 같이 국부적 집중응력으로 인한 파괴를 억제하는 동시에 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트, 강제동바리 등으로 지반에 압력(σ_i)을 가하여 굴착면 근방의 응력상태를 2차원적 응력상태에서 3차원적 응력상태로 바꾸어 암반의 강도를 증가시킴으로써 암반의 파괴를 억제하여 원지반을 탄성상태로 유지하거나 또는 파괴가 발생하여도 그 진행을 조기에 억제하여 소성영역의 발달을 그림-3.17와 같이 터널 주변의 좁은 범위에 한정시키고자 하는 것이다.

일반적으로 널리 사용되는 전면 점착방식의 록 볼트는 원래 원지반을 지탱하는 힘이 전혀 없다. 그러나 터널 주변으로부터 파괴가 시작될 때 소성변형이나 이에 따른 다일레이턴시 등에 의해 그림-3.18에 모식적으로 나타낸 것과 같이 터널주변의 원지반은 록 볼트와 함께 터널 내공으로 압출하고자 하나 록 볼트는 소성영역 끝머리의 탄성영역에 정착되어 있기 때문에 전단면 ab 에 의하여 원지반 내측부분을 억압하게 되어 결과적으로 원지반에 압력을 가하여 전단면이 원지반 내측으로 파괴되는 것을 억제하게 된다. 즉 그림-3.18의 ab 로부터 터널 내측부분 AB 가 지반의 구속영역이 되며 소위 앵커 플레이트(anchor plate)의 역할을 하고 있는 것이다.

수로터널과 같이 비교적 작은 단면의 터널은 지반강도비가 1 전후의 비교적 나쁜 원지반일 지라도 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법을 사용할 경우에는 직경 3m전후까지 전단면방식을 원칙으로 하며 그 이상의 직경인 경우로서 벤치 컷(bench cut)방식을 취해야 할 경우라도 벤치 길이는 최단 거리가 되도록 하고 인버트를 조기에 뿔어붙임 콘크리트로 폐합하는 것이 원칙이다. 이와 같이 조기에 폐합하는 공법을 취하는 경우, 원지반을 유지시킨다는 점에서는 뿔어붙임 콘크리트가 가장 중요한 역할을 하고 있으며 록 볼트의 역할은 부차적인 것이다.

그림-3.16 이암의 각종 측압(σ_3)에서의 일반적인 응력과 변형곡선

그림-3.17 뿔어붙임 콘크리트·록볼트 공법의 효과와 설명개념도
(원형터널이고 $K_0=1$ 의 경우)

주) (P_{v1}, P_{v2}) : (P_{h1}, P_{h2})는 막장의 진행에 따라 증가하는 연직·수평토압을 나타냄.
 P_v, P_h 는 최종적으로 작용하는 토압

그림-3.18 터널 주변의 암 파괴와 록 볼트에 의한 진행성 파괴의 억제효과 모식도

이 공법은 원지반의 구석구석까지 압력(σ_i)을 전달할 수 있으므로 비교적 토피가 작은 터널에서 굴착으로 인한 지표면 침하를 억제하거나 방지하는데 적절하다. 이 공법은 어느 정도 지반의 변형을 허용하며 그 강도를 충분히 발휘시키는 것이 본래의 목적이므로 지반이 나쁜 경우에는 강제 동바리와 병용할지라도 신축성이 있는 동바리를 사용하는 것이 본래의 취지에 부합한다. 그러나 지반의 변형을 조기에 억제하여 지표의 침하 방지를 목적으로 하는 경우 널판 공법에서 사용해 온 강성의 강제 동바리와 병용하는 것이 효과적이다. 이 경우 강성 동바리에는 휨성 동바리를 사용하는 것보다 큰 하중이 작용한다.

원형단면 터널의 경우 이와 같은 터널내공단면의 변형과 동바리에 가해지는 지압(σ_i)과의 개념을 그림으로 나타내면 그림-3.19와 같이 된다. 이 그림 (a)에서 ①은 $F_c > 2$ 의 탄성암반(A)의 경우로 지반은 지보공이 없는 상태라도 U_{01} 만큼 탄성변형하여 안정한다. ③~④은 $F_c < 2$ 의 암반으로 전단시험시의 전단응력(τ)~전단변위(δ)의 관계가 (b)와 같이 전단파괴시까지 탄성적 성질을 나타내나, 피크강도에 도달한 후 현저한 변형 연화를 보이는 암반(B)의 경우에 대한 것이다. 즉 ②는 강성 동바리에 의해 원지반의 변형을 조기에 억제한 경우 ③은 유연성의 동바리로 원지반의 변형을 적당히 허용하며 원지반이 본래의 강도를 충분히 발휘시킨 경우 ④는 원지반의 변형을 과대하게 허용, 파괴영역을 확대시켜 토압이 크게 증가한 경우이다. 이에 대하여 ⑤는 단층에 의하여 원지반이 전단파괴되어 완전연화상태에서 잔류강도 상태가 되어 $F_c < 2$ 로 되어버린 암반(C)의 경우에 대한 것이다. 이와 같은 경우는 암반의 전단시험시의 전단응력~전단변위의 관계는 (C)와 같이 완전소성을 나타내며, 토압과 원지반의 변형 관계도에는 토압의 최소점이 없이 허용 변형량 이내로 원지반의 변형을 억제하기 위하여 강성의 동바리에 의해 ⑤의 선으로 나타낸 것과 같이 강인하게 변형을 억제시켜야 한다.

(a) 개념도

(b) 암반(B)의 전단응력 ~ 변위

(c) 암반(C)의 전단응력 ~ 변위

그림-3.19 원지반의 변형(U_a)과 지보공에 작용하는 토압(σ)의 관계

이와 같이 이 공법은 여러 가지 장점을 갖고 있으나 다음과 같은 결점도 있다.

① 지하수면하에서는 지하수위 저하공법이나 약액 주입공법 등의 보조공법을 사용하지 않으면 시공이 곤란하다.

② 막장부에서의 뿔어붙임 콘크리트 작업의 능률이나, 시공기계, 뿔어붙임 거리 등의 제한상 적어도 터널 굴착단면의 직경이 대략 2.7m정도 이상이 되어야 한다.

③ 막장부에서 뿔어붙임 콘크리트의 작업시, 분진이 발생하여 작업환경이 악화되는 경향이 많다.

따라서 원지반의 상황, 시공능률과 비용, 작업환경 등을 종합적으로 고려하여 널판공법 혹은 실드공법이나 메서공법 등의 특수공법과도 비교·검토하여 가장 적절한 시공법을 선택할 필요가 있다.

다. 시공법 선정 흐름도

시공법(널판공법과 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법)을 선정할 때에는 다음 그림의 흐름도를 참고한다.

제 4 장 수 리 설 계

4.1 일반사항

터널의 수리설계 시에는 계획된 설계유량을 대상으로 하여 설계수위를 확보함은 물론이고 터널의 목적과 기능을 충분히 발휘할 수 있도록 설계유량 이외의 유량에 대해서도 검토해야 한다. 검토대상으로는 최소 유량, 기타 터널시설에 지장을 줄 우려가 있는 유량 등이 있다.

가. 최소 유량

통수량이 감소하는 경우 터널의 상·하류 수로시설에 미치는 영향을 확인할 때는 최소 유량을 사용한다.

나. 기타 터널시설에 지장을 줄 우려가 있는 유량

터널의 시설에 상당한 피해가 예상되는 경우, 예를 들면 여유고 검토에서는 수로에 낙하하는 강우로 인한 유량의 증가 등을 고려하여 수로의 능력을 확인할 뿐 아니라 시설의 구조와 규모 등을 검토한다.

4.2 허용유속

터널내의 유속은 토사가 퇴적을 일으키지 않는 최소 허용유속과 수로내면이 유수로 인하여 침식되지 않고, 수리적으로 불안정한 유황이 발생하지 않는 최대 허용유속의 범위 이내로 한다. 터널단면의 결정에는 유속이 가장 중요한 요소가 되며, 최소 허용유속과 최대 허용유속을 고려하여 터널의 기능, 구조 등에 적합한 유속으로 한다.

4.2.1 최소 허용유속

최소 허용유속은 토사가 퇴적을 일으키지 않는 유속으로 한다. 일반적으로 실트나 실트보다도 큰 입경의 부유토사가 적을 경우 0.45~0.9m/s의 유속이면 부유토사의 퇴적을 방지할 수 있으므로 유속이 이 값보다 내려가지 않도록 하는 것이 중요하다.

터널에 토사가 퇴적되면 통수단면이 작아지고 퇴적된 토사의 배제도 어렵기 때문에 최소 허용유속은 접속되는 개수로의 유속보다 크게 하되 일반적으로 개수로 유속의 1.3배 이상의 값이 바람직하다.

4.2.2 최대 허용유속

최대 허용유속은 수로를 형성하는 재료에 따라 현저히 다르고 불명확하므로 경험이나 사례를 통하여 판단할 수밖에 없다. 내면의 재질에 따라 대략 표-4.1과 같은 값을 상한 값으로 하고 있다. 터널 부속시설인 방수로, 여수로 등 일시적으로 물이 흐르는 구조물의 최대 허용유속은 이 값의 1.5배 이내로 한다.

표-4.1 최대 허용유속

종 류	유 속 (m/s)
경 압	3.00
중 경 압	2.50
콘크리트	3.00
뿔어붙임 콘크리트	2.00

4.2.3 유속 결정시의 유의사항

수로의 유속 결정시에는 수리특성을 고려한다. 특히 한계상태에 가까운 흐름에서는 본질적으로 수면이 불안정하기 쉬우며 일단 파가 발생하면 해소가 어려워져 수로의 기능이 저하될 수 있다.

흐름의 안정성은 유량, 유속, 단면변화와 만곡의 정도 등에 따라 다르지만 유속에 의해 지배되고 있으며 유량이 같을 때는 한계유속의 2/3(프루드 수: 0.54)정도 이하의 유속이면 일단 안정된 수면을 기대할 수 있다.

4.3 평균유속 계산

터널의 평균유속을 계산할 경우 개수로에서는 매닝(Manning)공식을, 관수로에서는 하젠·윌리엄즈(Hazen-Williams)공식을 사용하는 것을 원칙으로 한다.

4.3.1 유량 계산

수로의 유량은 다음 식으로 계산한다.

$$Q = A \cdot V \quad \text{----- (4.1)}$$

여기서 Q : 유량(m^3/s), A : 통수단면적(m^2), V : 평균유속 (m/s)

4.3.2 무압터널의 평균유속계산

무압터널은 개수로 상태의 흐름이므로 매닝공식으로 평균유속을 계산한다.

가. 평균유속공식(Manning공식)

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad \text{----- (4.2)}$$

여기서, V : 평균유속 (m/s)
 R : 동수반경 (m)

n : 조도계수
 I : 수로바닥 기울기

등류 이외의 흐름에 대한 평균유속을 구하는 경우 식 (4.2)의 수로바닥 기울기는 계산 지점의 에너지 기울기 또는 수면 기울기로 한다.

나. 조도계수

(1) 조도계수의 결정

매닝공식에서 중요한 것은 조도계수의 적절한 선정에 있다. 조도계수는 표면조도, 수로의 만곡, 단면형상, 유속, 동수반경, 침전과 세굴, 부유물질, 장래 터널의 유지관리 등 많은 요소에 의해 변화하므로 신중을 기해야 한다. 설계에서 선정하는 조도계수는 표-4.2의 값을 많이 사용한다.

표-4.2 조도계수(n)의 값

수로의 재료	조 도 계 수		
	최소 값	표준 값	최대 값
강관(도장)	0.010	0.013	0.014
철근콘크리트관	0.011	0.013	0.014
콘크리트 라이닝	0.012	0.015	0.016
뿔어붙임 콘크리트	0.017	0.025	0.029
라이닝하지 않은 암 터널	0.030	0.035	0.040

터널은 유수작용으로 인한 마모·세굴 등으로 수로내면이 평평함을 잃어가는 경우도 있으므로 조도계수 결정시는 이 점도 고려한다. 가배수 터널로서 사용기간이 짧은 경우의 조도계수는 초기 값을 사용하여도 좋다. 다만 급한 기울기의 가배수터널에서는 홍수시 부유 모래나 자갈에 의한 마모를 추정하여 영향이 클 것으로 예상되는 경우에는 조도계수를 크게 취한다.

(2) 합성조도계수

윤변에 따라 조도계수가 다른 경우에는 전체 윤변에 대한 합성조도계수를 계산하여 유속을 구한다.

다. 등류 수로 단면의 결정

수로의 등류수심은 매닝공식을 사용하여 시산으로 구한다. 예를 들면 매닝의 평균유속공식(4.2)를 식(4.1)에 대입, 이를 $A \cdot R^{2/3} = n \cdot Q / \sqrt{I}$ 로 변형하여 간편하게 계산할 수 있다.

라. 등류수심의 직접계산법

수로의 유량, 바닥기울기, 조도계수와 수로단면형상을 나타내는 값이 주어지는 경우 매닝 공식에서는 시산에 의하지 않고 이들의 값을 사용하여 직접 등류수심을 산출한다. 터널에서 사용되는 등류수심(d)은 다음 순서에 따라 주어진 유량(Q), 터널반경(r), 수로바닥기울기(I), 조도계수(n)로부터 직접 계산한다.

① $\frac{Q \cdot n}{I^{1/2} \cdot r^{8/3}}$ 을 계산한다.

② 표-4.3 ~ 표-4.7에서 주어진 단면형별 직접계산표를 이용하여 ①에서 구한 값에 대한 d/r 의 값을 구하며 필요에 따라서는 내삽(內插)계산을 한다.

③ $(d/r) \cdot r = d$ 에서 등류수심(d)을 구한다. 예를 들면 반경(r)=1m, 수로바닥 기울기 $I=1/500$ 를 가진 원형단면의 콘크리트 관수로에서 유량 $Q= 5\text{m}^3/\text{s}$ 가 흐를 때 등류수심 d 를 구하려면

$$\frac{Q \cdot n}{I^{1/2} \cdot r^{8/3}} = \frac{5 \times 0.015}{0.002^{1/2} \times 1^{8/3}} = 1.704 \text{이며 이 때의 } d/r \text{의 값은 } 1.43 \text{이므로 } d \text{는 } 1.43\text{m가 된다.}$$

4.3.3 압력터널의 평균유속계산

압력터널의 평균유속계산은 터널 상·하류의 유황 등을 고려하여 사용공식을 정한다.

가. 평균유속공식의 선정

① 개수로 조직에서 압력터널에 사용하는 평균유속공식은 무압터널과 같이 매닝공식의 사용을 원칙으로 한다.

② 관수로 조직에서 압력터널에 사용하는 평균유속공식은 하젠·윌리엄즈공식의 사용을 원칙으로 한다.

나. 관수로 평균유속공식(하젠·윌리엄즈공식)

$$V = 0.355 C \cdot D^{0.63} \cdot I^{0.54} \text{-----}(4.3)$$

여기서 V : 평균유속(m/s) C : 유속계수
 D : 관경(m) I : 동수기울기

식 (4.3)의 동수기울기는 마찰손실수두 및 관로의 길이를 사용하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = h_f / L \text{-----} (4.4)$$

여기서, h_f : 마찰손실 수두 (m) L : 관로의 길이(m)

표-4.3 등류수심 직접계산표(원형단면)

d/r	$a=A/r^2$	P/r	$\beta=R/r$	$\beta^{1/2}$	$\beta^{2/3}$	$a\beta^{2/3} = \frac{Q \cdot n}{I^{1/2} \cdot r^{8/3}}$
2.000	3.1416	6.2832	0.5000	0.7071	0.6300	1.9791
1.960	3.1266	5.7156	0.5470	0.7396	0.6689	2.0913
1.920	3.0994	5.4778	0.5658	0.7522	0.6841	2.1203
1.880	3.0646	5.2933	0.5790	0.7609	0.6947	2.1289
1.840	3.0239	5.1362	0.5887	0.7673	0.7024	2.1241
1.800	2.9781	4.9962	0.5961	0.7721	0.7083	2.1093
1.760	2.9281	4.8682	0.6015	0.7755	0.7125	2.0863
1.720	2.8743	4.7492	0.6052	0.7780	0.7155	2.0565
1.680	2.8171	4.6371	0.6075	0.7794	0.7173	2.0208
1.640	2.7571	4.5306	0.6085	0.7801	0.7181	1.9799
1.600	2.6943	4.4286	0.6084	0.7800	0.7180	1.9345
1.560	2.6291	4.3304	0.6071	0.7792	0.7170	1.8851
1.520	2.5618	4.2353	0.6049	0.7777	0.7152	1.8323
1.480	2.4925	4.1429	0.6016	0.7757	0.7127	1.7764
1.440	2.4215	4.0528	0.5975	0.7730	0.7094	1.7178
1.400	2.3489	3.9646	0.5925	0.7697	0.7054	1.6570
1.360	2.2749	3.8781	0.5866	0.7659	0.7007	1.5942
1.320	2.1997	3.7931	0.5799	0.7615	0.6954	1.5297
1.280	2.1234	3.7092	0.5725	0.7566	0.6894	1.4640
1.240	2.1462	3.6263	0.5642	0.7512	0.6828	1.3972
1.200	1.9681	3.5443	0.5553	0.7452	0.6756	1.3296
1.160	1.8894	3.4630	0.5456	0.7387	0.6677	1.2616
1.120	1.8102	3.3822	0.5352	0.7316	0.6592	1.1933
1.080	1.7306	3.3018	0.5242	0.7240	0.6501	1.1251
1.040	1.6508	3.2216	0.5124	0.7158	0.6403	1.0571
1.000	1.5708	3.1416	0.5000	0.7071	0.6300	0.9895
0.960	1.4908	3.0616	0.4869	0.6978	0.6189	0.9227
0.920	1.4110	2.9814	0.4733	0.6879	0.6073	0.8569
0.880	1.3314	2.9010	0.4589	0.6774	0.5950	0.7921
0.840	2.2522	2.8202	0.4440	0.6663	0.5820	0.7288
0.800	1.1735	2.7389	0.4285	0.6546	0.5683	0.6669
0.760	1.0954	2.6569	0.4123	0.6421	0.5540	0.6068
0.720	1.0182	2.5740	0.3956	0.6289	0.5389	0.5487
0.680	0.9419	2.4901	0.3783	0.6150	0.5230	0.4926
0.640	0.8667	2.4051	0.3604	0.6003	0.5064	0.4389
0.600	0.7927	2.3186	0.3419	0.5847	0.4889	0.3876
0.560	0.7201	2.2304	0.3228	0.5682	0.4706	0.3389
0.520	0.6491	2.1403	0.3033	0.5507	0.4514	0.2930
0.480	0.5798	2.0479	0.2831	0.5321	0.4312	0.2500
0.440	0.5125	1.9528	0.2624	0.5123	0.4099	0.2100
0.400	0.4473	1.8546	0.2412	0.4911	0.3875	0.1733
0.360	0.3845	1.7526	0.2194	0.4684	0.3638	0.1399
0.320	0.3245	1.6461	0.1971	0.4440	0.3387	0.1099
0.280	0.2673	1.5340	0.1743	0.4175	0.3120	0.0834
0.240	0.2135	1.4150	0.1509	0.3885	0.2835	0.0605
0.200	0.1635	1.2870	0.1270	0.3564	0.2527	0.0413
0.160	0.1177	1.1470	0.1026	0.3204	0.2192	0.0258
0.120	0.0770	0.9899	0.0777	0.2788	0.1822	0.0140
0.080	0.0422	0.8054	0.5223	0.2288	0.1399	0.0059
0.040	0.0150	0.5676	0.0264	0.1625	0.0887	0.0013
0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

표-4.4 등류수심직접계산표(표준마제형단면2r형)

d/r	$a=A/r^2$	P/r	$\beta=R/r$	$\beta^{1/2}$	$\beta^{2/3}$	$\alpha \beta^{2/3} = \frac{Q \cdot n}{I^{1/2} \cdot r^{8/3}}$
2.000	3.3169	6.5331	0.5077	0.7125	0.6364	2.1109
1.960	3.3019	5.9655	0.5535	0.7440	0.6741	2.2259
1.920	3.2747	5.7277	0.5717	0.7561	0.6889	2.2558
1.880	3.2399	5.5432	0.5845	0.7645	0.6991	2.2649
1.840	3.1992	5.3861	0.5940	0.7707	0.7066	2.2605
1.800	3.1534	5.2461	0.6011	0.7753	0.7122	2.2460
1.760	3.1034	5.1182	0.6063	0.7787	0.7164	2.2232
1.720	3.0496	4.9991	0.6100	0.7810	0.7193	2.1935
1.680	2.9924	4.8871	0.6123	0.7825	0.7211	2.1578
1.640	2.9324	4.7805	0.6134	0.7832	0.7219	2.1170
1.600	2.8696	4.6785	0.6134	0.7832	0.7219	2.0716
1.560	2.8044	4.5803	0.6123	0.7825	0.7211	2.0222
1.520	2.7371	4.4852	0.6103	0.7812	0.7195	1.9692
1.480	2.6678	4.3928	0.6073	0.7793	0.7172	1.9132
1.440	2.5968	4.3027	0.6035	0.7769	0.7142	1.8546
1.400	2.5242	4.2146	0.5989	0.7739	0.7105	1.7935
1.360	2.4502	4.1281	0.5936	0.7704	0.7063	1.7305
1.320	2.3750	4.0430	0.5874	0.7664	0.7014	1.6659
1.280	2.2987	3.9591	0.5806	0.7620	0.6960	1.5998
1.240	2.2215	3.8763	0.5731	0.7570	0.6899	1.5327
1.200	2.1434	3.7942	0.5649	0.7516	0.6834	1.4647
1.160	2.0647	3.7129	0.5561	0.7457	0.6762	1.3962
1.120	1.9855	3.6321	0.5467	0.7394	0.6686	1.3275
1.080	1.9056	3.5517	0.5366	0.7325	0.6604	1.2586
1.040	1.8261	3.4715	0.5260	0.7253	0.6516	1.1899
1.000	1.7461	3.3915	0.5148	0.7175	0.6424	1.1216
0.960	1.6661	3.3115	0.5031	0.7093	0.6326	1.0540
0.920	1.5862	3.2315	0.4909	0.7006	0.6223	0.9870
0.880	1.5064	3.1514	0.4780	0.6914	0.6114	0.9209
0.840	1.4268	3.0712	0.4646	0.6816	0.5998	0.8558
0.800	1.3474	2.9909	0.4505	0.6712	0.5877	0.7919
0.760	1.2684	2.9104	0.4358	0.6602	0.5748	0.7291
0.720	1.1898	2.8297	0.4205	0.6484	0.5612	0.6677
0.680	1.1116	2.7488	0.4044	0.6359	0.5469	0.6079
0.640	1.0339	2.6676	0.3876	0.6226	0.5316	0.5496
0.600	0.9568	2.5861	0.3700	0.6083	0.5154	0.4931
0.560	0.8804	2.5043	0.3516	0.5929	0.4981	0.4385
0.520	0.8047	2.4221	0.3322	0.5764	0.4797	0.3860
0.480	0.7298	2.3394	0.3119	0.5585	0.4600	0.3357
0.440	0.6557	2.2563	0.2906	0.5391	0.4387	0.2877
0.400	0.5826	2.1728	0.2681	0.5178	0.4158	0.2423
0.360	0.5105	2.0886	0.2444	0.4944	0.3909	0.1996
0.320	0.4395	2.0039	0.2193	0.4683	0.3637	0.1598
0.280	0.3696	1.9185	0.1926	0.4389	0.3336	0.1233
0.240	0.3009	1.9323	0.1642	0.4053	0.2999	0.0903
0.200	0.2336	1.7455	0.1338	0.3658	0.2617	0.0611
0.160	0.1686	1.6109	0.1047	0.3235	0.2221	0.0374
0.120	0.1099	1.3927	0.0789	0.2809	0.1839	0.0202
0.080	0.0600	1.1352	0.0528	0.2299	0.1408	0.0084
0.040	0.0213	0.8014	0.0265	0.1629	0.0890	0.0019
0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

표-4.5 등류수심직접계산표(3r 마제형단면)

d/r	$a=A/r^2$	P/r	$\beta=R/r$	$\beta^{1/2}$	$\beta^{2/3}$	$a\beta^{2/3} = \frac{Q \cdot n}{f^{1/2} r^{8/3}}$
2.000	3.3889	6.6748	0.5077	0.7125	0.6364	2.1568
1.960	3.3739	6.1073	0.5524	0.7433	0.6733	2.2716
1.920	3.3468	5.8694	0.5702	0.7551	0.6876	2.3014
1.880	3.3120	5.6850	0.5826	0.7633	0.6975	2.3103
1.840	3.2712	5.5278	0.5918	0.7693	0.7049	2.3057
1.800	3.2254	5.3878	0.5987	0.7737	0.7103	2.2911
1.760	3.1754	5.2599	0.6037	0.7770	0.7143	2.2682
1.720	3.1216	5.1409	0.6072	0.7792	0.7171	2.2384
1.680	3.0645	5.0288	0.6094	0.7806	0.7188	2.2027
1.640	3.0044	4.9222	0.6104	0.7813	0.7196	2.1618
1.600	2.9416	4.8203	0.6103	0.7812	0.7195	2.1164
1.560	2.8765	4.7220	0.6092	0.7805	0.7186	2.1671
1.520	2.8092	4.6270	0.6071	0.7792	0.7170	2.0142
1.480	2.7399	4.5346	0.6042	0.7773	0.7147	1.9582
1.440	2.6689	4.4444	0.6005	0.7749	0.7118	1.8996
1.400	2.5963	4.3563	0.5960	0.7720	0.7082	1.8387
1.360	2.5223	4.2698	0.5907	0.7686	0.7040	1.7758
1.320	2.4470	4.1847	0.5848	0.7647	0.6993	1.7112
1.280	2.3707	4.1008	0.5781	0.7603	0.6940	1.6452
1.240	2.2935	4.0180	0.5708	0.7555	0.6881	1.5782
1.200	2.2155	3.9360	0.5629	0.7503	0.6817	1.5103
1.160	2.1368	3.8546	0.5543	0.7445	0.6748	1.4419
1.120	2.0576	3.7738	0.5452	0.7384	0.6674	1.3732
1.080	1.9780	3.6934	0.5355	0.7318	0.6595	1.3044
1.040	1.8981	3.6133	0.5253	0.7248	0.6511	1.2358
1.000	1.8181	3.5333	0.5146	0.7173	0.6421	1.1675
0.960	1.7381	3.4532	0.5033	0.7095	0.6328	1.0998
0.920	1.6582	3.3732	0.4916	0.7011	0.6229	1.0328
0.880	1.5783	3.2932	0.4793	0.6923	0.6124	0.9666
0.840	1.4986	3.2131	0.4664	0.6829	0.6014	0.9013
0.800	1.4190	3.1329	0.4529	0.6730	0.5898	0.8369
0.760	1.3397	3.0527	0.4388	0.6625	0.5775	0.7736
0.720	1.2606	2.9724	0.4241	0.6512	0.5645	0.7116
0.680	1.1818	2.8920	0.4086	0.6392	0.5507	0.6508
0.640	1.1033	2.8115	0.3924	0.6264	0.5360	0.5914
0.600	1.0253	2.7309	0.3754	0.6127	0.5204	0.5336
0.560	0.9476	2.6501	0.3576	0.5980	0.5038	0.4775
0.520	0.8705	2.5691	0.3388	0.5821	0.4860	0.4231
0.480	0.7938	2.4880	0.3191	0.5649	0.4669	0.3707
0.440	0.7178	2.4066	0.2982	0.5461	0.4464	0.3204
0.400	0.6423	2.3251	0.2762	0.5256	0.4242	0.2724
0.360	0.5675	2.2433	0.2530	0.5030	0.4000	0.2270
0.320	0.4934	2.1613	0.2283	0.4778	0.3735	0.1843
0.280	0.4200	2.0790	0.2020	0.4495	0.3443	0.1446
0.240	0.3474	1.9965	0.1740	0.4171	0.3117	0.1083
0.200	0.2757	1.9136	0.1440	0.3795	0.2748	0.0757
0.160	0.2048	1.8305	0.0119	0.3345	0.2322	0.0476
0.120	0.1350	1.7028	0.0793	0.2815	0.1845	0.0249
0.080	0.0736	1.3888	0.0530	0.2302	0.1411	0.0104
0.040	0.0261	0.9810	0.0266	0.1631	0.0891	0.0023
0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

표-4.6 등류수심직접계산표(3r측벽수직형단면)

d/r	$a=A/r^2$	P/r	$\beta=R/r$	$\beta^{1/2}$	$\beta^{2/3}$	$a\beta^{2/3} = \frac{Q \cdot n}{f^{1/2} r^{8/3}}$
2.000	3.4569	6.8365	0.5056	0.7111	0.6347	2.1941
1.960	3.4419	6.2689	0.5490	0.7410	0.6705	2.3078
1.920	3.4147	6.0311	0.5662	0.7525	0.6844	2.3370
1.880	3.3799	5.8466	0.5781	0.7603	0.6940	2.3455
1.840	3.3391	5.6895	0.5869	0.7661	0.7010	2.3407
1.800	3.2934	5.5495	0.5935	0.7704	0.7062	2.3258
1.760	3.2433	5.4215	0.5982	0.7735	0.7100	2.3027
1.720	3.1895	5.3025	0.6015	0.7756	0.7126	2.2728
1.680	3.1324	5.1904	0.6035	0.7769	0.7141	2.2370
1.640	3.0723	5.0839	0.6043	0.7774	0.7148	2.1961
1.600	3.0096	4.9819	0.6041	0.7772	0.7146	2.1507
1.560	2.9444	4.8837	0.6029	0.7765	0.7137	2.1014
1.520	2.8771	4.7886	0.6008	0.7751	0.7120	2.0486
1.480	2.8078	4.6962	0.5979	0.7732	0.7097	1.9927
1.440	2.7368	4.6061	0.5942	0.7708	0.7068	1.9342
1.400	2.6642	4.5179	0.5897	0.7679	0.7032	1.8735
1.360	2.5902	4.4314	0.5845	0.7645	0.6991	1.8107
1.320	2.5150	4.3464	0.5786	0.7607	0.6944	1.7464
1.280	2.4387	4.2625	0.5721	0.7564	0.6892	1.6806
1.240	2.3614	4.1796	0.5650	0.7517	0.6834	1.6138
1.200	2.2834	4.0976	0.5572	0.7465	0.6772	1.5462
1.160	2.2047	4.0163	0.5489	0.7409	0.6704	1.4781
1.120	2.1255	3.9355	0.5401	0.7349	0.6632	1.4096
1.080	2.0459	3.8551	0.5307	0.7285	0.6555	1.3411
1.040	1.9660	3.7749	0.5208	0.7217	0.6473	1.2727
1.000	1.8861	3.6949	0.5105	0.7145	0.6387	1.2046
0.960	1.8064	3.6149	0.4996	0.7068	0.6294	1.1372
0.920	1.7261	3.5349	0.4883	0.6988	0.6201	1.0703
0.880	1.6461	3.4549	0.4764	0.6902	0.6100	1.0041
0.840	1.5661	3.3749	0.4640	0.6812	0.5994	0.9387
0.800	1.4861	3.2949	0.4510	0.6716	0.5881	0.8740
0.760	1.4061	3.2149	0.4374	0.6613	0.5762	0.8101
0.720	1.3261	3.1349	0.4230	0.6504	0.5635	0.7472
0.680	1.2461	3.0549	0.4079	0.6387	0.5500	0.6853
0.640	1.1661	2.9749	0.3920	0.6261	0.5356	0.6245
0.600	1.0861	2.8949	0.3752	0.6125	0.5202	0.5649
0.560	1.0061	2.8149	0.3574	0.5978	0.5036	0.5067
0.520	0.9261	2.7349	0.3386	0.5819	0.4858	0.4499
0.480	0.8461	2.6549	0.3187	0.5645	0.4666	0.3947
0.440	0.7661	2.5749	0.2975	0.5454	0.4457	0.3414
0.400	0.6861	2.4949	0.2750	0.5244	0.4229	0.2901
0.360	0.6061	2.4149	0.2510	0.5010	0.3979	0.2411
0.320	0.5261	2.3349	0.2253	0.4747	0.3703	0.1948
0.280	0.4461	2.2549	0.1978	0.4448	0.3395	0.1514
0.240	0.3661	2.1749	0.1683	0.4103	0.3048	0.1116
0.200	0.2861	2.0949	0.1366	0.3695	0.2652	0.0759
0.160	0.2074	1.9684	0.1053	0.3246	0.2230	0.0462
0.120	0.1350	1.7028	0.0793	0.2815	0.1845	0.0249
0.080	0.07361	1.3888	0.0530	0.2302	0.1411	0.0104
0.040	0.0261	0.9810	0.0266	0.1631	0.0891	0.0023
0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

표-4.7 등류수심직접계산표(3r2원호측벽수직형단면)

d/r	$a=A/r^2$	P/r	$\beta=R/r$	$\beta^{1/2}$	$\beta^{2/3}$	$a\beta^{2/3} = \frac{Q \cdot n}{f^{1/2} r^{8/3}}$
2.400	4.2569	7.6365	0.5574	0.7466	0.6773	2.8833
2.352	4.2372	7.0143	0.6041	0.7772	0.7146	3.0279
2.304	4.2016	6.7530	0.6222	0.7888	0.7288	3.0621
2.256	4.1561	6.5499	0.6345	0.7966	0.7384	3.0689
2.208	4.1029	6.3764	0.6434	0.8022	0.7453	3.0579
2.160	4.0433	6.2215	0.6499	0.8062	0.7503	3.0337
2.112	3.9784	6.0796	0.6544	0.8089	0.7537	2.9986
2.064	3.9087	5.9472	0.6572	0.8107	0.7559	2.9547
20.16	3.8350	5.8222	0.6587	0.8116	0.7570	2.9032
1.968	3.7576	5.7031	0.6589	0.8117	0.7572	2.8452
1.920	3.6771	5.6886	0.6580	0.8111	0.7565	2.7817
1.872	3.5937	5.4780	0.6560	0.8100	0.7560	2.7133
1.824	3.5079	5.3706	0.6532	0.8082	0.7528	2.6408
1.776	3.4200	5.2659	0.6495	0.8059	1.7500	2.5648
1.728	3.3301	5.1633	0.6450	0.8031	0.7465	2.4859
1.660	3.2387	5.0625	0.6397	0.7998	0.7425	2.4046
1.632	3.1459	4.9632	0.6338	0.7961	0.7379	2.3213
1.584	3.0520	4.8650	0.6273	0.7920	0.7328	2.2366
1.536	2.9572	4.7678	0.6203	0.7876	0.7273	2.1508
1.488	2.8619	4.6712	0.6127	0.7827	0.7214	2.0644
1.440	2.7661	4.5749	0.6046	0.7776	0.7150	1.9778
1.392	2.6701	4.4789	0.5961	0.7721	0.7083	1.8913
1.344	2.5741	4.3829	0.5873	0.7664	0.7013	1.8052
1.296	2.4781	4.2869	0.5781	0.7603	0.6939	1.7196
1.248	2.3321	4.1909	0.5684	0.7539	0.6862	1.6345
1.200	2.2861	4.0949	0.5583	0.7472	0.6780	1.5500
1.152	2.1901	3.9989	0.5477	0.7400	0.6694	1.4660
1.104	2.0941	3.9029	0.5365	0.7325	0.6603	1.3827
1.056	1.9981	3.8069	0.5249	0.7245	0.6507	1.3001
1.008	1.9021	3.7109	0.5126	0.7159	0.6405	1.2182
0.960	1.8061	3.6149	0.4996	0.7068	0.6296	1.1372
0.912	1.7101	3.5189	0.4860	0.6971	0.6181	1.0570
0.864	1.6141	3.4229	0.4716	0.6867	0.6058	0.9779
0.816	1.5181	3.3269	0.4563	0.6755	0.5927	0.8998
0.768	1.4221	3.2309	0.4402	0.6634	0.5786	0.8229
0.720	1.3251	3.1349	0.4230	0.6504	0.5635	0.7473
0.672	1.2301	3.0389	0.4048	0.6362	0.5472	0.6731
0.624	1.1341	2.9429	0.3854	0.6208	0.5296	0.6006
0.576	1.0381	2.8469	0.3646	0.6039	0.5104	0.5298
0.528	0.9421	2.7509	0.3425	0.5852	0.4895	0.4611
0.482	0.8461	2.6549	0.3187	0.5645	0.4666	0.3948
0.432	0.7501	2.5589	0.2931	0.5414	0.4413	0.3310
0.384	0.6541	2.4629	0.2656	0.5153	0.4132	0.2703
0.366	0.5581	2.3669	0.2358	0.4856	0.3817	0.2130
0.288	0.4621	2.2709	0.2035	0.4511	0.3460	0.1599
0.240	0.3661	2.1749	0.1683	0.4103	0.3049	0.1116
0.192	0.2701	2.1789	0.1299	0.3604	0.2565	0.0693
0.144	0.1772	1.8667	0.0949	0.3081	0.2081	0.0369
0.096	0.0967	1.5222	0.0635	0.2521	0.1592	0.0154
0.048	0.0343	1.0750	0.0319	0.1786	0.1006	0.0034
0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

설계에 채용되는 유속계수(C)의 값은 표-4.8에 준한다.

표-4.8 유속계수(C)의 값

관 (내면의 상태)	유 속 계 수(C)		
	최소 값	표준 값	최대 값
주철관(미도장)	80	100	150
강 관(미도장)	90	100	150
콜타르(coaltar)도장관(주철)	80	100	145
타르에폭시(tar epoxy)도장강관			
ø800 mm이상	-	130	-
ø700 ~ 600 mm	-	120	-
ø500 ~ 350 mm	-	110	-
ø300 mm이하	-	100	-
모르터 라이닝관(강, 주철)	120	130	150
원심력 철근 콘크리트관	120	130	140
P·S 콘크리트관	120	130	140
경질염화비닐관	140	150	160
폴리에틸렌관	130	150	170
강화플라스틱복합관	-	150	160

4.4 부등류의 계산

수로단면의 변화 또는 보에 의한 배수영향 등으로 흐름의 단면이 일정하지 않는 구간의 유황은 부등류계산에 의하여 해석한다.

4.4.1 부등류의 기초방정식

개수로의 흐름에서 수심이나 유속이 시간적으로는 변화하지 않으나 단면에 따라 변화하는 흐름을 부등류라 한다. 부등류는 일반적으로 취부수로, 분수공, 낙차공 등과 같이 수로단면이나 수로기울기의 변화 혹은 보 등으로 인한 배수의 영향을 받는 곳에서 발생한다.

부등류의 일반식은 다음과 같다.

$$-i + \frac{dh}{dx} + \alpha \frac{1}{2g} \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{Q^2}{A^2} \right) + \frac{n^2 \cdot V^2}{R^{4/3}} = 0 \quad \text{----- (4.5)}$$

- 여기서, i : 수로바닥기울기 h : 수심(m)
 Q : 유량(m³/s) A : 통수단면적 (m²)
 g : 중력가속도(m/s²) R : 동수반경(m)
 n : 조도계수 V : 평균유속(m/s)
 x : 수로바닥에 따라 물이 흐르는 방향으로 취한 거리(m)
 α : 에너지 보정계수(보통은 1.1이나 개산할 경우 $\alpha=1$ 로 하여도 무방하다)

부등류의 수면추적은 부등류의 기초방정식을 풀거나 축차계산법이나 도해법에 의한다. 이때의 계산은 기지의 점을 시점으로 하여 상류(常流)의 경우에는 상류 측으로, 사류(射流)일 때는 하류 측으로 향하여 각각 계산한다. 흐름의 도중에 지배단면의 유무를 확인하고 지배단면이 생길 때는 이 점을 계산시점으로 한다. 지배단면의 수심, 즉 한계수심의 계산법은 다음과 같다.

4.4.2 한계수심

낙차공의 낙차부근 또는 급류공과 같이 기울기가 급히 변화되는 지점에서 한계수심이 발생하여 상류와 사류의 경계가 된다. 상류와 사류의 경계가 되는 한계류의 수심, 즉 한계수심은 다양하게 정의되지만 식 (4.6)~(4.8)을 만족시키는 수심이다.

한계수심이 발생하는 단면을 지배단면이라 하며 이로부터 상류의 상류(常流)영역 및 하류의 사류(射流)영역으로 향하여 영향이 미치게 된다.

$$\frac{Q^2}{gA^3} \cdot \frac{dA}{dh} = 1 \quad \text{----- (4.6)}$$

$$\text{또는 } Q^2/g = A^3/T \quad \text{혹은} \quad \frac{Q}{\sqrt{g}} = A\sqrt{D} \quad \text{----- (4.7)}$$

$$\text{또는 } V^2/2g = D/2 \quad \text{----- (4.8)}$$

여기서, Q : 유량 (m³/s) D : 수리수심, $D=A/T$ (m)
 h : 수심 (m) g : 중력가속도(m/s²)
 A : 통수단면적(m²) T : 수면폭(m)

터널의 한계수심을 구하는데는 다음과 같은 방법이 있다.

가. 도해법

복잡한 단면의 한계수심을 구하는데 편리한 방법이다. 주어진 수로단면형에 대하여 $D=A/T$ 라고 정의하고 h 와 $A\sqrt{D}$ 와의 관계곡선을 그린다. 한편 주어진 Q 에서 Q/\sqrt{g} 를 계산하여, 이 값과 같은 $A\sqrt{D}$ 에 대한 h 를 도상에서 구한다. 이것이 한계수심(h_c)이다. 그림-4.1은 원형단면일 때의 $A\sqrt{D}$ 와 h 와의 관계 곡선도이다.

그림-4.1 원형단면의 $A\sqrt{D}$ 와 h 와의 관계곡선

나. 직접계산법

통수단면적(A), 수면폭(T), 수로저폭(b), 수심(h), 직경(d) 등의 관계로 나타내고 식(4.7)에 대입하여 $Q/b^{2.5}$ 또는 $Q/d^{2.5}$ 의 형태로 정리한다. 이 값을 미리 실용적인 범위 내에서 구하여 표나 그림으로 완성시켜서, Q와 b 또는 Q와 d가 주어졌을 때 $Q/b^{2.5}$ 또는 $Q/d^{2.5}$ 를 계산하여 대응하는 h/b, h/d를 구함으로써 한계수심(hc)을 구하는 방법이다. 통수단면(A), 수면폭(T), 터널직경(d)의 관계로 나타내면 식(4.9), (4.10)과 같이 된다.

$$A = k_1 \cdot d^2 \text{----- (4.9)}$$

$$T = k_2 \cdot d \text{----- (4.10)}$$

여기서, k_1, k_2 : A, T를 구하는 계수

이들 관계식을 식(4.7)에 대입하여 정리하면 식(4.11)을 얻는다.

$$\frac{Q}{d^{2.5}} = \left(\frac{g \cdot k_1^3}{k_2} \right)^{\frac{1}{2}} = k_3 \text{----- (4.11)}$$

여기서, k_3 : 한계수심계산 계수

k_3 는 h/d의 함수이므로 원형, 표준마제형 등의 터널단면에 대한 k_3 의 값을 각종 수심 별로 계산해 두면 주어진 유량(Q), 터널직경(d)으로부터 $Q/d^{2.5}$ 즉 한계수심계산 계수(k_3)를 계산하고 표를 사용하여 hc/d를 계산한 후 한계수심(hc)을 구한다.

표준마제형 및 원형단면의 k_3 는 표-4.9와 같다.

다. 수면추적 계산법

수로 단면이 일정한 장방형, 포물선형과 같은 경우의 부등류 계산은 식 (4.5)를 직접 적분하여 얻은 여러 가지 공식을 사용하여 계산할 수 있다. 그러나 일반적으로 베르누이 방정식을 차분화하여 수로의 계산구간별로 순차적으로 수면형을 구해가는 축차계산법이 많이 사용되고 있다.

축차계산법이란 수로를 적당한 계산구간으로 분할하여 경계조건이 주어진 지점에서 각 구간별로 베르누이 정리가 성립되도록 순차적으로 수면형을 구하는 방법이다. 그림-4.2의 I, II 단면에 베르누이 정리를 적용하면 식 (4.12)가 된다.

$$\begin{aligned} h_1 + \frac{\alpha \cdot Q^2}{2g \cdot A_1^2} + Z_1 &= h_2 + \frac{\alpha \cdot Q^2}{2g \cdot A_2^2} + Z_2 + h_f \\ h_f &= \frac{Q^2 \cdot \ell}{2} \left(\frac{n_1^2}{R_1^{4/3} \cdot A_1^2} + \frac{n_2^2}{R_2^{4/3} \cdot A_2^2} \right) \end{aligned} \text{----- (4.12)}$$

여기서, Z : 기초면에서 수로바닥까지의 높이 (m) h : 수심 (m)
 Q : 유량 (m^3/s)
 h_f : I, II 단면간에서 발생한 수두손실(m)
 ℓ : I, II 단면간의 사거리 (m) n : 조도계수
 A : 통수단면적 (m^2) R : 동수반경(m)
 g : 중력 가속도(m/s^2) α : 에너지 보정계수
(첨자 1, 2 : 각각의 단면 I, II의 것임을 나타냄)

I 단면의 에너지선의 높이가 주어졌을 때 이에 I, II 단면간의 수두손실을 더한 것이 II 단면의 에너지 선의 높이와 같아지도록 시산으로 II 단면의 수심을 구한다. 식 (4.12)를 사용하여 축차계산 결과가 얻어질 때까지 계산하여 작성한 계산표의 예가 표-4.10이다.

4.4.3 손실수두 및 수위의 변화량

터널 수리설계에는 원칙적으로 다음의 손실수두를 고려한다.

- ① 마찰에 의한 손실수두
- ② 유입, 유출에 의한 손실수두
- ③ 단면변화에 의한 손실수두
- ④ 스크린에 의한 손실수두
- ⑤ 교각에 의한 손실수두

그림-4.2 축차계산법 설명

표-4.9 터널한계수심 계산계수

h/d	$Q / d^{2.5} = k_3$		h/d	$Q / d^{2.5} = k_3$	
	원형단면	표준마제형		원형단면	표준마제형
0.01	0.0003	0.0005	0.51	0.8001	0.9346
0.02	0.0014	0.0019	0.52	0.8304	0.9664
0.03	0.0030	0.0044	0.53	0.8611	0.9938
0.04	0.0054	0.0077	0.54	0.8924	1.0317
0.05	0.0084	0.0120	0.55	0.9239	1.0652
0.06	0.0121	0.0172	0.56	0.9566	1.0992
0.07	0.0164	0.0235	0.57	0.9895	1.1338
0.08	0.0215	0.0306	0.58	1.0230	1.1690
0.09	0.0271	0.0388	0.59	1.0570	1.2047
0.10	0.0334	0.0485	0.60	1.0916	1.2410
0.11	0.0404	0.0590	0.61	1.1267	1.2780
0.12	0.0479	0.0702	0.62	1.1625	1.3155
0.13	0.0561	0.0821	0.63	1.1989	1.3536
0.14	0.0649	0.0946	0.64	1.2359	1.3924
0.15	0.0744	0.1078	0.65	1.2735	1.4319
0.16	0.0845	0.1216	0.66	1.3117	1.4720
0.17	0.0952	0.1361	0.67	1.3506	1.5128
0.18	0.1064	0.1510	0.68	1.39025	1.5544
0.19	0.1184	0.1666	0.69	1.4305	1.5967
0.20	0.1309	0.1828	0.70	1.4716	1.6398
0.21	0.1440	0.1996	0.71	1.5135	1.6838
0.22	0.1577	0.2168	0.72	1.5562	1.7286
0.23	0.1720	0.2347	0.73	1.5998	1.7744
0.24	0.1869	0.2530	0.74	1.6442	1.8211
0.25	0.2024	0.2720	0.75	1.6898	1.8690
0.26	0.2184	0.2913	0.76	1.7363	1.9179
0.27	0.2351	0.3113	0.77	1.7840	1.9682
0.28	0.2524	0.3317	0.78	1.8329	2.0197
0.29	0.2701	0.3527	0.79	1.8832	2.0727
0.30	0.2885	0.3741	0.80	1.9350	2.1274
0.31	0.3074	0.3961	0.81	1.9885	2.1839
0.32	0.3269	0.4186	0.82	2.0438	2.2423
0.33	0.3469	0.4414	0.83	2.1013	2.3030
0.34	0.3675	0.4649	0.84	2.1611	2.3664
0.35	0.3887	0.4888	0.85	2.2236	2.4326
0.36	0.4104	0.5132	0.86	2.2892	2.5023
0.37	0.4326	0.5380	0.87	2.3585	2.5760
0.38	0.4554	0.5634	0.88	2.4322	2.6544
0.39	0.4787	0.5892	0.89	2.5112	2.7386
0.40	0.5026	0.6154	0.90	2.5966	2.8297
0.41	0.5270	0.6422	0.91	2.6900	2.9296
0.42	0.5518	0.6694	0.92	2.7937	3.0407
0.43	0.5774	0.6970	0.93	2.9109	3.1664
0.44	0.6034	0.7252	0.94	3.0465	3.3122
0.45	0.6299	0.7537	0.95	3.2086	3.4868
0.46	0.6569	0.7827	0.96	3.4111	3.7052
0.47	0.6845	0.8122	0.97	3.6819	3.9980
0.48	0.7126	0.8421	0.98	4.0889	4.4659
0.49	0.7413	0.8724	0.99	4.8728	5.2878
0.50	0.7704	0.9032			

㉟-10

4.5 여유고

터널의 통수단면은 수리상의 안전성을 확보하기 위하여 설계유량에 따라 설계수면상에 여유고를 더하여 결정한다. 여유고는 설계유량에 대한 수면에서 터널 정부까지의 높이를 뜻하며 표준적인 여유고 산정법은 다음과 같다.

4.5.1 일반적인 경우

터널의 여유고는 원칙적으로 다음의 (1), (2)에 의한 계산 결과 중 큰 값을 취한다.

(1) 설계유량에 대하여

$$d_1/D_1 = 0.80 \sim 0.83 \quad \text{-----}(4.13)$$

여기서, d_1 : 설계 유량에 대한 수심 (m)

D_1 : 터널의 높이(m)

단, $(D_1 - d_1) \geq 0.30\text{m}$

(2) 홍수를 유입시키는 경우

$$d_2/D_2 = 0.90 \sim 0.93 \quad \text{-----}(4.14)$$

여기서, d_2 : 홍수를 가미한 유량에 대한 수심(m)

D_2 : 터널의 높이 (m)

4.5.2 기타의 경우

최소시공단면의 터널과 부등류의 터널 등 특별한 경우의 여유고는 위 식의 값보다도 큰 값을 취할 수 있다.

도수터널과 같이 도중에서 홍수유입이 없는 경우로서 아래 와 같은 조건에서는 $d/D=0.90$ 정도를 취할 수 있다.

① 유량에 변동이 없고

② 급한 만곡 등이 없으며 난류가 발생하지 않고

③ 조도계수의 추정이 정확하여 악화의 우려가 없는 경우

일반적으로 원형 또는 표준마제형의 단면에서 최대유속은 $d/D=0.80$ 부근에서, 최대유량은 $d/D=0.90 \sim 0.93$ 부근에서 발생하기 때문이다. 여기서 d 는 설계수위, D 는 터널의 높이이다.

터널의 여유고는 규모, 홍수 유입량, 노선의 곡선반경, 최소시공단면 등의 모든 것을 고려한 후에 조정한다. 배수터널의 경우에는 용수터널에 준하지만 터널 상류개수로의 여유고를 포함하여 통수능력 이하가 되지 않도록 하며 계획유량 이상의 유량에 대하여는 터널 통수능력이 미치는 피해 등을 감안하여 결정한다.

제 5 장 무 압 터 널

5.1 일반사항

무압터널은 외압에 대하여 안전한 구조이어야 하고 구조는 지질조사 등으로 추정된 지압, 외수압 등을 고려하여 내구성이 뛰어나고 안전하도록 한다. 터널에 작용하는 하중의 추정은 지질조건 외에도 터널의 단면, 시공법 등에 따라서도 현저히 달라지므로 하중을 추정할 때는 지질과 터널공학의 양면에 걸쳐 광범위한 지식과 경험을 가진 기술자가 필요하다.

5.2 터널의 지압 해석

지표면이 수평이고 균질등방 탄성체인 지반의 지표로부터 충분한 깊이에 원형터널을 굴착하는 경우, 막장에서 충분히 떨어진 위치(탄성체의 지반이라면 막장에서 이미 굴착된 방향으로 터널직경의 2배 정도 떨어진 위치)에서는 연직방향으로 $\sigma_1 = \gamma_o \cdot H$ (γ_o : 원지반의 단위 중량, H : 토피), 수평방향으로 $\sigma_2 = K_o \cdot \gamma_o \cdot H$ (K_o : 측압계수)의 힘이 일정하게 작용하고 있다고 볼 수 있다(그림-5.1 참조). 이와 같은 외압이 작용하고 있는 지반에 터널을 굴착할 때는 터널반경방향의 응력(σ_r), 이에 직각인 접선방향응력(σ_θ), 전단응력 ($\tau_{r\theta}$)는 그림-5.2(a)와 같이 터널의 중심축을 원점으로 하는 극좌표를 이용하여 다음의 식으로 나타낸다. (R_1 는 터널의 반경으로 $r = R_1$ 일 때 $\sigma_r = 0$, 즉 터널 벽면에는 내압이 작용하지 않는다. 또한 압축응력은 정<+>이다)

$$\sigma_r = 0.5 \cdot \sigma_1 \{ (1 + K_o)(1 - a^2) + 0.5(1 - K_o)(1 - 4a^2 + 3a^4) \cdot \cos 2\theta \} \quad \text{----- (5.1)}$$

$$\sigma_\theta = 0.5 \cdot \sigma_1 \{ (1 + K_o)(1 + a^2) - (1 - K_o)(1 + 3a^4) \cdot \cos 2\theta \} \quad \text{----- (5.2)}$$

$$\tau_{r\theta} = 0.5 \cdot \sigma_1 (1 - K_o)(1 + 2a^2 - 3a^4) \cdot \sin 2\theta \quad \text{----- (5.3)}$$

여기서 $a = R_1/r$

실제 지반은 복잡한 형상이나 구조를 하고 있는 경우가 많으므로 위와 같은 가정은 현실과는 다른 점도 있으나 터널 토압의 문제를 개념적으로 파악하는데는 충분히 도움이 될 수 있다.

5.2.1 터널 측벽의 응력상태

이 부분에서는 $\theta = 90^\circ$, $r = R_1$ 이므로 식 (5.1) ~ (5.3)에 이들의 값을 대입하고, 측압계수 ($K_o = \sigma_2 / \sigma_1$)를 여러 가지로 변화시킨 경우에 대한 값을 구하면 그림-5.3과 같이 우측으로 하향하는 직선을 얻는다.

그림-5.1 원지반의 자중에 의한 터널굴착전의 응력분포

그림-5.2 균질등방 탄성체중의 원형공간 주변 응력상태에 관한 설명도

그림-5.3 균질등방의 탄성암반 중에 터널을 굴착하였을 때 측벽 및 천단벽면부에 발생하는 응력의 크기와 측압계수($K_0 = \sigma_2 / \sigma_1$)와의 관계

즉, 터널굴착 이전에 터널위치에 영향을 미쳤던 초기응력(σ_1)의 2~3배에 해당하는 압축응력이 터널굴착 직후 측벽부에 국부적인 집중응력을 발생하여 그림-5.2(b)와 같이 작용한다는 것을 알 수 있다. 따라서 암의 일축압축강도(q_u)가 지반의 초기응력(터널 굴착 이전에 지반의 자중 등으로 인하여 작용하고 있는 응력)의 2~3배 이상이 되지 않으면 측벽부의 암반은 파괴된다.

5.2.2 터널의 상부·하부의 응력상태

터널의 상부 즉, 정부에서 $\theta=0^\circ$, $r=R$ 이므로 식 (5.1)~(5.3)에 이들 값을 대입하고, 측압계수를 여러 가지로 변화시킨 경우의 σ_θ 의 값을 구하면 그림-5.3과 같이 우측으로 상향하는 직선을 얻게된다. 즉 $K_o < 1/3$ 이면 정부(상단부)에는 인장응력이 발생하고, $K_o > 1/3$ 이면 정부에도 압축응력이 발생함을 알 수 있다. 터널하부의 인버트에도 이것이 적용된다.

5.2.3 터널 지보공에 가해지는 각종 지압

가. 이완토압

$K_o < 1/3$ 일 때 터널정부에는 인장응력이 발생한다. 암의 인장강도는 일축압축강도(q_u)의 1/5 ~ 1/20 정도로서 대부분의 암반에는 절리나 균열이 있는 것이 보통이므로 터널정부의 암은 인장파괴를 일으켜 이완된다. 이러한 현상은 굴착시 발파작용에 의해 더욱 심해지므로 터널의 정부 주변에는 암의 이완영역이 형성된다.

일축압축강도(q_u)가 초기응력 (σ_1)의 2~3배 이상이면 측벽부분의 암에는 압축파괴가 발생하지 않으므로 측벽에는 이상이 생기지 않으며 정부의 이완 영역의 암만이 지보공의 상부에 토압으로 작용한다. 이것이 이완토압이며 비교적 토피가 작은 터널에서 가장 보편적으로 나타난다.

나. 팽창성토압(또는 압출성토압)

이암, 혈암, 사문암, 안산암 등의 연암이나 경암의 단층파쇄대에서는 암반의 일축압축강도가 지반의 자중에 의한 초기응력의 2~3배 보다 작은 경우가 있다. 또한 이암, 혈암 등의 과압밀점토질 퇴적암은 어느 정도의 깊이 이상에서는 $K_o \approx 1$ 이며 얇은 곳에서는 $K_o > 1$ 의 경우가 있다. 이와 같은 경우에는 터널주변의 암반이 압축될 때 전단파괴를 받는다. 예를 들어 $K_o = 1$ 의 경우, 암반이 $q_u < 2 \cdot \sigma_1$ (단, $\sigma_1 = \gamma_o H$)이면 측벽, 정부, 인버트부를 포함한 터널 주변의 암반은 전단파괴되어 터널 주변에는 파괴영역 즉 소성역이 형성된다.

암이 전단파괴되면 완전 연화상태(한계상태)에 달한 단층점토대의 지반을 제외하고는 일반적으로 체적이 증가한다(이를 다일레이턴시(Dilatancy)라 한다). 동시에 암괴가 전단파괴면에 따라 점소성 흐름으로 터널내공을 향하여 압출한다. 터널내공은 소정의 설계단면을 유지해야

하므로 이 지반의 압출에 대하여 지보공 등으로 대항하여야 한다. 이때 지보공에 가해지는 토압 또는 암압을 팽창성 토압 또는 압출성 토압이라고 한다. 팽창성 토압의 원인에 대해서는 이외에도 흡수팽창설 등이 있으나 현재로는 이 전단파괴설이 가장 유력하다.

5.2.4 원지반의 강도비(F_c)

상기와 같이 원지반을 대표하는 암반(또는 흙)의 일축압축강도(q_u)와 토피(H)의 자중에 의한 초기응력($\sigma_o = \sigma_1 = \gamma_o \cdot H$)의 비 $F_c = q_u / (\gamma_o \cdot H)$ 즉, '원지반 강도비'가 지보공이나 라이닝에 미치는 토압의 종류를 예측하는데 중요한 지표가 된다. (q_u 를 kgf/cm^2 로, H 를 m , γ_o 를 tf/m^3 의 단위로 표시하는 경우, $F_c = (10 \cdot q_u) / (\gamma_o \cdot H)$ 가 된다)

실제로 암반을 압축시험하는 것은 곤란하므로 암석의 일축압축강도를 사용하는 것이 보통이다. 그런 경우는 '외견상의 지반강도비'가 되므로 그것을 F_c 로 하여 상기의 F_c 와 일단 구별하여 사용한다.

균질이고 불연속면이 적은 이암이나 사암 등의 퇴적암에서는 $F_c = F_c$ 로 하여도 좋으나 층리, 편리, 절리, 단층면 등의 불연속면이 터널 크기에 대하여 무시할 수 없는 간격으로 존재하고 있는 암반의 경우 암반의 압축강도는 불연속면의 간격과 경사각에 의하여 크게 영향을 받아 $F_c \ll F_c$ 가 되는 경우가 있다(그림-5.4 참조). 균열의 영향을 무시할 수 없는 암반은 일축압축강도 대신에 편의적으로 식 (5.4)로 나타내는 준암반강도(σ_c)를 암반의 일축압축강도(q_u) 대신 사용하여 지반강도비를 구한다.

$$\sigma_c = \left(\frac{V_p}{v_p} \right)^2 \cdot q_u \quad \text{----- (5.4)}$$

- 여기서, V_p : 원지반의 탄성과 속도(km/s)
- q_u : 암석의 일축압축강도(kgf/cm²)
- v_p : 암석의 초음파(탄성과) 속도 (km/s)

연암에서는 $V_p > v_p$ 일 경우가 있으나 그런 경우는 $(V_p/v_p) = 1$ 로 한다.

5.2.5 지보공과 원지반의 변형관계

터널 굴착단면의 설계시에는 터널내공에 미치는 지반의 변형량이 필요하다. 이를 산정하는 방법으로는 유한요소법이 있으며 또한 단면형상을 원형의 간단한 형으로 모형화하여 탄소성론에 의한 응력·변형상태를 파악하려는 이론적 해석법이 있다. 이론적 해석법으로는 가스너(Kastner)의 식이 널리 사용되고 있으며 이 식은 지보공으로부터 지반에 가해지는 응력(σ_1)과 터널내공에 미치는 지반변형량(U_a)과의 관계의 개념과 개략 값을 구하는데 유익하다.

- (a) $d \approx D$ 또는 $d > D$ 의 경우, $F_c = F_c'$ (단, 암피의 크기에 의한 치수효과가 없을 때)
- (b) $d < D$ 의 경우, $F_c < F_c'$
- (c) 불연속면의 경사각(α)과 암반의 압축강도(q)의 관계를 나타내는 개념도(불연속면의 경사각에 의하여 압축강도는 크게 영향을 받는다. α 가 작을 때, 또는 90° 에 가까울 때는 암피강도와 동일하다) (σ_3)₁, (σ_3)₂는 구속압력임

그림-5.4 터널의 크기(직경)와 불연속면의 간격(d), 불연속면의 경사각(α)와 F_c , F_c' 의 관계

단면형상이 원형인 터널에서 $K_o = 1$ 의 경우, 즉 원지반의 초기응력이 정수압과 같은 형태로 작용하고 있을 때 탄소성에 의한 이론해석법에 의하면 다음과 같다.

가. $F_c > 2$ 의 경우

지반이 탄성변형일 경우 그 전변형량(U_a ; cm)은 다음 식으로 구한다.

$$U_a = \left(\frac{r_o H}{10} - \sigma_i \right) \cdot \frac{1 + \nu}{E} \cdot R_1 \quad \text{----- (5.5)}$$

여기서, r_o : 원지반의 단위중량 (tf/m³)

H : 터널의 토피 (m)

R_1 : 터널 굴착단면의 반경(cm)

E : 지반의 탄성계수 (kgf/cm²)

ν : 원지반의 푸와송(Poisson)비(0.2 ~ 0.5, 일반적으로 0.3 정도)

σ_i : 뿔어붙임 콘크리트, 록 볼트, 강재 동바리 등 지보공 부재가 원지반에 가하는 힘으로서 이들 지보공 부재에 최종적으로 미치는 토압(kgf/cm²)

일반적으로 터널 굴착에 의해 발생하는 지반의 탄성변형량은 무시할 정도이다. 연암에서 $E=3,000\text{kgf/cm}^2$, $R_1=300\text{cm}$, $r_o = 2\text{tf/m}^3$, $H=100\text{m}$ 일 때, $\sigma_i=0$ 즉 지보공 없이 굴착을 하여도 $U_a=2.6\text{cm}$ 에 불과하며 이 정도의 값은 지보 구조물을 시공하기 이전의 변형(막장에서 이미

총 탄성변형의 1/3정도는 발생되고 있음)으로 흡수되고 지보공과 지반사이의 공극(널관 공법의 경우 강재 동바리의 패킹(packing)등)에서 흡수되어 문제시되는 변형량은 아니다. 탄성변형만이 발생할 때 지반 중의 응력분포상태는 그림-5.5(a)와 같다.

나. $F_c < 2$ 일 때

터널주변에 소성영역이 그림-5.5(b), 그림-5.6에서와 같이 발생한다. 이런 경우의 소성영역 반경(R_a)은 다음 식과 같다.

$$R_a = R_l \left\{ \frac{2}{1+\zeta} \cdot \frac{\zeta-1+F_c}{\beta(\zeta-1)+F_c} \right\}^{\frac{1}{\zeta-1}} \text{----- (5.6)}$$

단, $\beta = \frac{\sigma_j}{(\gamma_o \cdot H)/10}$, $\zeta = \frac{1+\sin\theta}{1-\sin\theta}$

여기서, θ : 원지반의 암반 또는 흙의 전단저항각

이 식에서 알 수 있듯이 소성역의 크기는 지반 강도비 (F_c)와 원지반의 전단저항각(θ)과 관계가 있다. 소성역과 탄성역의 경계면에서의 지반 탄성변형량 (U_{Ra}^* (cm) ;그림-5.6 참조)은 다음 식과 같다.

$$U_{Ra}^* = \frac{r_o \cdot H}{10} \left[1 - \frac{F_c}{\zeta-1} \left\{ \left(\frac{R_a}{R_1} \right)^{\zeta-1} - 1 \right\} - \beta \left(\frac{R_a}{R_1} \right)^{\zeta-1} \right] \frac{1+\nu}{E} \cdot R_a \text{----- (5.7)}$$

이때의 터널 굴착면의 변형량 (U_a)은 다음 식과 같다.

① 소성영역이 발생하나 다일레이턴시(체적증가)가 발생치 않을 경우

(예를 들면 단층 점토화대로서 단층점토가 완전 연화상태로 되어있는 경우)

$$U_a = R_1 \cdot \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{R_a}{R_1} \right)^2 + \left(\frac{R_a}{R_1} - \frac{U_{Ra}^*}{R_1} \right)^2} \right\} \text{----- (5.8)}$$

② 소성역이 발생하면서 다일레이턴시가 발생하는 경우

$$U_a = R_1 \cdot \left[1 - \sqrt{\left\{ 1 - \left(\frac{R_a}{R_1} \right)^2 (1 + \epsilon_v) + \left(\frac{R_a}{R_1} - \frac{U_{Ra}^*}{R_1} \right)^2 \right\}} \right] \text{----- (5.9)}$$

여기서 ϵ_v : 암 파괴시 다일레이턴시의 비율

ϵ_v 의 값은 엄밀하게는 소성영역중 평균 주응력의 크기에 따라서도 변화하며 앞으로 연구되어야 할 과제가 많다.

(a) 탄성체의 원지반이 집중응력에 의하여 항복하지 않는 경우

(b) 터널 주변의 원지반이 일부 항복하여 소성역이 생기는 경우

그림-5.5 터널주변에 생기는 응력 σ_θ 와 σ_r 의 분포 상황

그림-5.6 탄성영역의 탄성변위에 따른 소성영역 터널 내경으로의 압출

다. 원지반강도비(F_c)와 소성영역반경(R_a), 굴착 내공면에서의 변형량(U_a)의 계산 예

단층 점토화대로 원지반은 완전 연화상태이며 다일레이턴시에 의한 체적의 증가가 없을 경우에 식 (5.6), (5.9)에 의한 계산 예는 그림-5.7, 5.8(a),(b), 5.9(a),(b)와 같다. 그림-5.7은 이암의 단층 파쇄대로서 원지반의 전단저항각이 잔류강도의 전단저항각 $\theta_r = 10^\circ$ 가 되어 있는 경우의 F_c 와 소성영역의 크기와의 관계를 보여주는 것이다. 소성영역의 크기는 소성영역의 반경(R_a)과 터널 굴착면의 반경(R_I)과의 비를 가지고 무차원화하여 나타낸 것이다.

$\beta=0(\sigma_i=0)$, 즉 지보공이 없는 경우 $F_c < 1$ 에서 급격히 소성영역이 확대되지만 $\beta=0.3$, 즉 토피의 하중으로 인한 초기응력이 30% 정도의 응력(σ_i)을 지보공 부재에 의해 터널 굴착면에 전달하면 $F_c = 0.5$ 정도까지는 소성영역의 발달을 대부분 억제할 수 있음을 알 수 있다.

그림-5.8(a),(b)는 소성영역 외측지반의 탄성계수(E)가 500kgf/cm^2 과 100kgf/cm^2 일 때 굴착면의 내공에서 변형량(U_a)과 원지반강도비(F_c) 및 흙덮이(H)의 관계를 식 (5.9), (5.10) 등을 사용하여 계산한 결과이다. 변형량은 굴착단면의 반경(R_I)과의 비를 가지고 무차원화 하였다

이들 그림에서 원지반의 탄성계수가 500kgf/cm^2 정도이면 지보공이 없는 경우 $F_c < 1$ 로 급격히 터널내공에서의 변형량(압출량)이 증가하며 토피가 커지면(예를 들면 $H=200\text{m}$) 이런 경향이 특히 현저하게 된다는 것을 알 수 있다. 그러나 토피에 의한 초기응력의 30%정도 압력을 지보공 부재에 의해서 지반에 전달하면 $F_c = 0.5$ 정도까지는 거의 탄성변형 정도로까지 억제할 수 있음을 알 수 있다.(그림-5.8(a)의 $\beta=0.3$ 의 경우)

지반의 탄성계수가 $E=100\text{kgf/cm}^2$ 인 경우는 지반이 매우 연약한 경우지만 거의 같은 경향임을 알 수 있다. 또한 이 그림에서 알 수 있듯이 토피에 의한 초기응력의 30%정도의 압력을 지보공 부재에 의해 지반에 전달하여도 $E=500\text{kgf/cm}^2$ 의 지반인 경우는 $F_c < 0.3$, $E=100\text{kgf/cm}^2$ 의 지반일 때는 $F_c = 0.5 \sim 0.7$ 로서 지반의 변형량(압출량)은 급격히 커지며 실제로 터널은 지반의 압출로 인하여 붕괴될 가능성이 있다. 이러한 경우는 튼튼한 지보공으로 지반의 압출을 억제해야 하며 이 경우에는 지보공에 토피로 인한 하중이 전부 걸릴 가능성이 있다(즉, $\beta=1$ 이 된다.) 단, $F_c < 0.3$ 에서는 막장이 자립하지 못하고 터널내로 막장이 압출되어 굴진이 불가능하게 될 우려가 있다.

소성영역의 크기나 굴착면의 변형량은 식 (5.6)~(5.9)에서 알 수 있듯이 지반의 전단저항각에도 관계된다. 입경 2μ 이하의 점토광물을 40% 이상 포함한 이암(또는 소성지수 $I_p > 30\%$ 의 이암)이 단층작용을 받아 단층면을 가진 점토로 된 경우, 단층면에 연한 잔류강도의 전단저항각(θ_r)은 10° 전후가 된다. 이에 반해 사암은 단층작용을 받아 단층면이 생기더라도 θ_r 는 30° 정도 된다. 각각의 경우에 대하여 지반의 $E=100\text{kgf/cm}^2$, $H=30\text{m}$ 일 때, 굴착면의 변형량(U_a)과 소성영역의 R_a (무차원화 되어 있음)와 지반강도비(F_c)의 관계는 그림-5.9(a),(b)와 같다. 사암의 경우 비록 단층파쇄대 일지라도 이암의 단층파쇄대 만큼 큰 압출이 없는 것이 보통이며 이는 지반의 전단저항력의 차이에 의한 것으로 판단된다.

그림-5.7 원지반의 강도비(F_c)와 소성영역(R_a)과의 관계

(a) ($E=500\text{kgf/cm}^2$, $\theta=\theta_r=10^\circ$)

(b) ($E=100\text{kgf/cm}^2$, $\theta=\theta_r=10^\circ$)

그림-5.8 원지반강도비(F_c) 및 토피(H)와 터널굴착면의 내공에서의 변형량(U_a)의 관계

(a)

(b)

그림-5.9 원지반강도비(F_c), 소성영역의 전단저항각(θ)과 터널굴착면의 내공에서의 변형량(U_a), 소성영역의 크기(R_a)의 관계($E=100\text{kgf/cm}^2$, $H=30\text{m}$)

5.2.6 수치해석기법에 의한 해석

근래에는 수치해석 기법의 발달로 인해 터널 설계에 있어서도 수치실험에 의한 해석이 많이 도입되고 있으며 특히 유한요소 해석기법의 발달에 따라 종래에는 해석하기 어려웠던 매우 복잡한 조건들도 해석이 가능하게 되었다. 또한 터널의 거동은 시공과정에 의해 많은 영향을 받게 되는데 유한요소 해석기법을 사용하면 이러한 시공과정에 대한 모의실험이 가능하기 때문에 종래에는 해석할 수 없었던 분야에 대해 해석이 가능해지고 있다.

이러한 많은 수치해석기법들은 아직도 발전단계에 있으며 그 적용에 있어서 변수의 선정 등 많은 주의를 기울여야 하지만 터널 설계에 매우 효율적으로 이용될 수 있으므로 여기서는 각 기법에 대해 약술하며 각 프로그램은 개별적인 특성을 가지고 있으므로 입력조건 및 모델링 방법 등은 개별 프로그램의 사용설명서에 의한다. 터널해석에 적용되는 수치해석 기법은 보요소법(*beam element method with elastic support*), 유한요소법(*finite element method*), 유한차분법(*finite difference method*), 경계요소법(*boundary element method*), 개별요소법(*discrete element method*), 혼합법(*hybrid method*) 등으로 구분될 수 있다.

가. 보요소법

이 방법은 터널의 복공 및 실드터널의 라이닝 설계에 주로 사용되는 방법으로서 복공은 보요소로서, 주변 지반은 스프링요소로서 터널 구조 및 주변 지반을 모델링하는 방법이다.

이 방법은 일반적으로 사용되고 있는 구조해석 프로그램을 적용할 수 있고 해석과정이 단순하며 연산시간이 적어 컴퓨터의 용량이 작아도 되는 장점이 있으나 간단한 경우에만 적용할 수 있으며 특히 지반의 특성을 반영하는 스프링 요소의 강성 및 작용하는 외력의 적절한 설정이 어렵다는 단점이 있다.

나. 유한요소법

이 방법은 지반을 연속체로 간주하며 각 절점으로 연결되는 특정한 크기를 갖는 한정된 수의 요소로 이산화하여 해석하는 방법으로서 외력에 따른 지반의 변형 특성은 응력-변형률 구성법칙에 의해 결정된다. 이 방법은 지반의 비균질성, 비등방성 및 시간에 따른 변화 등을 비교적 간단히 해결할 수 있는 장점이 있는 반면에 정확한 해석을 위해서는 모델링에 세심한 주의가 필요하다는 점과 상당한 용량의 컴퓨터를 필요로 하는 단점이 있다. 이 바업에 기반을 두고 있는 범용 프로그램으로는 SMAP, DIANA, MRSOIL, PLEXIS, 2D- σ , ABAQUS 등이 있다.

다. 유한차분법

유한차분법은 지반을 각 절점에서 연결된 요소로 이산화된 연속체로 해석한다는 점은 유한요소법과 유사하나 해를 구하는 방법에서 차이가 있다. 연산과정에서는 뉴우튼의 운동법칙과 재료의 구성법칙이 적용되며 각 절점에서 얻어진 가속도를 이용하여 속도를 구하고 이로

부터 변형율의 변화, 이에 따른 응력의 변화에 의해 절점하중과 불평형 하중을 산정하고 평형조건을 검토하는 과정으로 해석한다. 국내에서 터널 및 지하굴착에서 많이 이용되고 있는 FLAC가 이 방법으로 구성되어 있다.

라. 경계요소법

이 방법은 최근에 들어와서 터널해석 분야에 적용이 증가되고 있는 방법으로서 유한요소법이나 유한차분법과 같이 지반을 연속체로 간주하나 경계에 해당하는 부분만 이산화가 필요하며 이러한 경계부부에서만 수치연산이 행해지며 경계의 안쪽에 위치하는 매체는 선형편미분방정식을 사용함으로써 근사적인 해석을 하게 된다. 따라서 해석되어야 할 방정식의 수가 유한요소법에 비해 적어 입력 및 출력자료가 비교적 간단하다는 장점이 있고 특히 경계면에서의 거동이 매우 중요한 경우 효율적으로 적용될 수 있다. 반면에 재료의 비선형거동의 해석이 매우 어려우며 단계별로 시간에 따른 거동 변화의 해석이 어렵다는 단점이 있다.

마. 개별요소법

개별요소법은 지반을 연속체로 간주하는 유한요소법 등과는 달리 개개의 강성 블록으로 모델링되며 절리에서의 변위가 블록 자체의 변형보다 월등히 큰 경우에 적용성이 높다. 따라서 절리가 매우 많이 형성된 암반에서의 터널 굴착 해석에 매우 유용하나 정확한 해석을 위해서는 절리의 위치와 방향에 관한 상세한 입력 자료가 요구되어 적용이 어려운 편이다. 이 방법에 의한 모형으로는 UDEC 및 3DEC가 있다.

바. 혼합법

이 방법은 위에서 언급한 수치해석기법을 두 가지 이상 혼용하여 사용하는 방법으로서 각 기법이 가지고 있는 장단점을 상호 보완하도록 함으로서 보다 효율적으로 해석을 하고자 하는 방법이다. 예를 들면 가상경계면을 설정해야 하는 유한요소법의 단점을 보완하기 위해 경계요소법을 연계하여 해석하는 방법이 있다.

5.3 널판 공법

5.3.1 동바리에 작용하는 하중

널판공법의 동바리에 작용하는 하중은 조사결과와 시공실적 등을 고려하여 결정한다. 특별한 경우를 제외하고는 동바리에 작용하는 토압은 표-5.1의 이완높이의 값을 표준으로 한다.

표-5.1 동바리에 작용하는 이완높이의 표준 (단위 : m)

터널형식	B형식	C형식	D형식	비 고
이완높이	0.5De	1.0De	2.0De	De : 굴착단면의 직경

특별한 경우란 다음과 같은 지질조건의 경우로서 이러한 경우는 테르자기(Terzaghi)의 암반 하중 개념이나 RMR 또는 Q-시스템에 의한 암반하중 평가법을 비교 검토하여 결정한다.

- (가) 지질이 단단한 암석으로 되어있어 극히 양호한 경우
- (나) 지질이 많이 불량하고 용출수도 있어서 토사가 유동상태로 되기 쉬운 경우
- (다) 대규모 압출성 및 팽창성 토압이 발생하는 경우

가. 수정 테르자기 암반 하중

이 방법은 1946년도에 테르자기에 의해 제안된 분류법으로서 표-5.2에 나타낸 분류는 1982년 로제(Rose)에 의해 수정된 것이다.

표-5.2 수정된 테르자기 암반하중 분류

암반 상태	RQD	이완높이	비고
경질의 무결암	95 ~ 100	0	
경질의 층상 또는 편상암	90 ~ 99	0 ~ 0.5B	
괴상으로 보통 정도의 절리가 발달	85 ~ 95	0 ~ 0.25B	
보통 정도의 괴상으로 균열이 있음	75 ~ 85	0.25B ~ 0.20(B+H)	
심한 괴상으로 균열이 많음	30 ~ 75	(0.20 ~ 0.60)(B+H)	
완전히 파쇄되어 있으나 화학적으로는 신선한 암이나 사력	0 ~ 30	신선암 : (0.60 ~ 1.10)(B+H) 사력 : (1.10 ~ 1.40)(B+H)	
압출성 암반으로 토피가 보통인 경우	-	(1.10 ~ 2.10)(B+H)	
압출성 암반으로 토피가 튼 경우	-	(2.10 ~ 4.50)(B+H)	
팽창성 암반	-	단면에 상관없이 80m까지	

주) 여기서 B는 터널 굴착 단면의 폭이며 H는 터널 굴착 단면의 높이이다

나. RMR에 의한 암반하중 평가

RMR 분류법에 의한 암반 평점인 RMR값을 이용하여 산정하는 방법으로서 비교적 큰 단면의 암터널에서 적용된다. 이완 높이 H_p 는 다음과 같이 산정한다. 여기서 B는 터널 굴착단면의 폭이다.

$$H_p = \frac{(100 - RMR)}{100} \times B \quad \text{----- (5.10)}$$

다. Q-시스템에 의한 암반하중 평가

Q-시스템에 의해 산정한 암질 지수인 Q값과 절리에 대한 값을 이용하여 터널 천단부에 작용하는 암반 하중을 산정하는 방법으로서 다음 식에 의한다.

$$P = \frac{2.0}{J_r} Q^{-1/3} \quad \text{----- (5.11)}$$

절리군의 수가 3개 미만이면 다음 식을 적용한다.

$$P = \frac{2}{3} J_n^{1/2} J_r^{-1} Q^{-1/3} \quad \text{----- (5.12)}$$

여기서 P 는 암반하중(kgf/cm²)이며 J_r 은 절리면의 거칠기, J_n 은 절리군의 수이다.

5.3.2 동바리의 규격과 설치간격

동바리의 규격과 설치간격은 지질조건, 시공성 및 터널규모 등을 고려하여 적절히 결정한다.

가. 강제 동바리

(1) 강제 동바리의 종류

강제 동바리는 강제리브식 동바리, 강관 동바리, 라이너 플레이트(liner plate) 동바리로 분류된다. 수로터널에서 일반적으로 사용되는 강제 동바리 재료의 규격과 치수는 표-5.3과 같다.

① 강제리브식 동바리

강제리브식 동바리는 H형, U형 등의 형강을 동바리 리브로 사용하는 것으로서 광폭 H형강이 가장 일반적으로 사용되고 있다.

② 강관 동바리

구조용 강관을 동바리 리브로 사용하는 것으로서 단면구조상의 특성이 등방성을 갖고 있는 점, 경량으로 운반이나 설치가 용이한 점, H형강으로는 가공이 곤란한 작은 단면에도 사용가능한 점 등의 장점이 있으므로 내공단면의 직경 2.0m 이하의 작은 터널에 사용하는 경우가 많다.

③ 라이너 플레이트 동바리

라이너 플레이트(파형 강판)와 H형강 동바리 또는 라이너 플레이트만을 사용하는 것이다. 전 둘레를 라이닝하는 형태가 되므로 상당히 안전한 동바리지만 공사비가 많아진다.

표-5.3 강재 동바리의 제원(최소 곡선반경은 냉간가공에 의한 표준이다)

종별	규격 (mm)	단면적 A(cm ²)	단위중량 W(kgf/m)	단면2차모멘트 I _x (cm ⁴)	단면계수 Z _x (cm ³)	최소곡률반경 R(cm)
H형강	H-100×100×6×8	21.90	17.2	383	76.5	130
	H-125×125×6.5×9	30.31	23.8	847	136	160
	H-150×150×7×10	40.14	31.5	1640	219	250
	H-175×175×7.5×11	51.21	40.2	2880	330	340
	H-200×200×8×12	63.53	49.9	4720	472	420
U형강	MU-21	26.76	21.0	296	56.6	135
	MU-29	37.00	29.0	581	97.4	150
강관	Ø76.3×3.5	8.005	6.28	53.2	13.9	65
	Ø89.1×3.5	9.412	7.39	86.4	19.4	90
	Ø101.6×4.2	12.85	10.1	153	30.1	100
	Ø114.3×4.5	15.52	12.2	234	41.0	110

(2) 굴착방식과 강재 동바리 형식

강재 동바리의 형식은 다음과 같이 분류한다.

- ① 연속 리브형
- ② 반단면 리브포스트(rib post)형
- ③ 전주리브형
- ④ 리브 월 플레이트(rib wall plate)형
- ⑤ 리브 월 플레이트 포스트(rib wall plate post)형

(3) 형상과 치수

강재 동바리의 형상과 치수는 지질상황, 굴착방법 및 라이닝방법 등을 고려하여 결정한다. 즉 하중에 대해서 유리한 형상과 치수로서 시공상의 편의도 고려한다. 형상은 그림-5.10와 같은 종류가 사용되고 있으나 일반적으로 연속리브형을 선정하며, 측압이 특별히 큰 경우는 인버트 스트럿을 부설하는 전주리브형으로 한다.

표-5.4 굴착방식과 강재동바리 형식의 관계

강재 동바리 형식	굴착방식
연속 리브형	전단면 방식
반단면 리브포스트형	벤치 컷 방식
전주(全周)리브형	전단면 또는 벤치 컷 방식
리브 월 플레이트형	벤치 컷 방식
리브 월 플레이트 포스트형	벤치 컷 방식

연속리브형

반단면 리브포스트형

전주리브형

전주리브형(Rib strut)

리브 월 플레이트형

리브 월 플레이트 포스트형

그림-5.10 강재 동바리의 형식

터널 내공단면의 직경이 대략 4.0m 이상의 큰 단면에서는 지질이 불량할 경우에 상부 반단면을 굴착 시공하는 공법으로 반단면 리브포스트형을 선정한다. 강재 동바리의 이음부는 약점이 되므로 가능한 한 적게 하는 것이 바람직하다.

라이닝 콘크리트의 두께를 확보하고 부재의 가공이 편리하도록 하고 시공상의 편의를 도모하기 위하여 양단에 약간의 직선부를 두는 경우가 많다(그림-5.11 참조). 단 직선부가 너무 길어지면 강재 동바리의 약점이 되므로 최대한 짧게 한다.

더우기 콘크리트 치기 파이프를 아치 정점(arch crown)부에 삽입하는 인발관(引撥管)방식은 킥업(kick up)이 커지므로 가능한 한 피하는 것이 바람직하다.

그림-5.11 킥 업(kick up)

(4) 강재 동바리의 재질

강재 동바리에 사용되는 강재는 하중에 의하여 변형이 되더라도 쉽게 파손되지 않고 가공성이 양호한 것이어야 한다. 그러므로 신장률이 크고 너무 단단하지 않은 것이 바람직하며

경제성을 고려하여 H형강은 KS D 3503에 규정된 SS400, 강관은 KS D 3566에 규정된 SPS400과 동등 또는 그 이상의 재질을 사용한다.

동바리의 구부림가공은 냉간가공을 원칙으로 한다. 이는 강재에 결점이 있을 경우 열간 가공보다 냉간가공에서 발견하기 쉽고 열간가공은 열관리가 어렵다는 것이다. 가공에서는 단면의 변형, 뒤틀림 등이 발생하지 않도록 주의한다. 냉간가공의 최소곡률반경의 표준은 표-5.2와 같다.

(5) 관련 부재

강재 동바리와 관련되는 부재는 ①썰기, ②정판, ③저판, ④칼라 버팀대(collar brace), ⑤널판, ⑥경사동바리가 있으며 어느 것이나 동바리의 기능을 충분히 발휘시킨다는 면에서 중요한 것이므로 확실하게 시공해야 한다.

① 썰 기

강재 동바리를 조립할 때 원지반과 동바리사이에 썰기를 박음으로서 동바리에 토압을 전달하여 원지반의 이완에 의한 하중증대를 방지한다. 썰기타입의 최대 간격은 H형강의 경우 80cm, 강관의 경우 60cm로 하고 아치 정점부와 지점부에는 반드시 타입한다.

② 정 판

정판에 대해서는 그림-5.12의 표준단면도와 같이 이음판 및 볼트 등으로 강하게 연결하도록 설계한다.

③ 저판 및 토대목

강재 동바리의 인버트부에는 그림-5.12와 같이 저판 및 토대목을 설치하여 동바리가 하중으로 인해 침하하지 않도록 한다. 지내력이 부족하다고 생각되는 점토를 함유한 파쇄대나 암, 고결도가 약한 연암, 미고결된 홍적층 또는 충적층 점토나 실트층 등 지반이 열악한 장소는 지내력에 대한 충분한 검토가 필요하다. 지내력이 충분한 곳에서는 강재 동바리의 하부에 저판과 토대목을 설치하는 것만으로 충분하지만 지내력이 부족한 경우에는 접시판이나 월 플레이트를 설치한다. 그래도 침하의 우려가 있을 때는 받침 콘크리트 또는 인버트 스트럿 부설 널판을 시공한다.

④ 칼라 버팀대(collar brace)

동바리와 동바리 사이에는 연결볼트 및 버팀보로 연결한다. 칼라 버팀대는 터널 축방향으로 작용하는 외력에 대하여 동바리 상호간의 결합을 도모하는 것으로 아치 정점부와 지점부에는 반드시 설치하되, 동바리에 따라서는 1.0m이하의 간격으로 설치하는 것이 바람직하다. 목재 버팀보가 설계 라이닝두께 내에 있을 때는 라이닝 시공 직전에 제거한다. 만약 토압이 커서 버팀보의 제거가 위험하다고 판단될 때는 강재를 사용하도록 설계하는 것이 바람직하다.

그림-5.12 동바리부재의 표준단면도 (H형강 동바리의 경우)

그림-5.13 동바리부재의 표준단면도 (강관 동바리의 경우)

⑤ 널판

강재 동바리의 외주에는 암석과 토사의 붕괴를 억제하기 위하여 지질상황에 따라 목재 널판, 스파일(spile), 강재널판, 라이너 플레이트 등을 시공하도록 설계한다. 토압이 특히 크게 작용하는 경우 이외에는 일반적으로 목재 널판을 사용한다. 목재 널판은 원칙적으로 소나무를 사용하며 두께와 길이는 동바리의 형식, 토압 및 터널단면의 크기 등에 따라 적절히 설계한다. 빗끼움널공법의 경우 라이닝 콘크리트를 동바리 강재의 주위에 충분히 충진시키고 설계 라이닝 두께 내에 널판이 매입되는 것을 방지하기 위하여 콘크리트 치기 전에 널판 끝을 절단한다. 널판 끝의 절단으로 인한 널판 전체의 이완을 방지하기 위하여 반드시 지지 통나무를 설계한다. 널판이 토압으로 파손되는 것을 방지하기 위하여 그림-5.14와 같이 반력 췌기도 설계한다. 스파일, 강재 널판 및 라이너 플레이트 등은 토압이 큰 경우에 사용한다.

⑥ 경사동바리

강재 동바리의 시공 구간이 짧은 경우 또는 종단방향으로 하중이 작용할 우려가 있는 경우는 경사 동바리 등으로 전도방지를 도모한다. 경암구간에는 록 볼트를 타입하여 동바리를 암반에 고정시킬 수도 있다.

그림-5.14 빗끼움 단면도

나. 강재 동바리의 규격과 설치간격

강재 동바리의 규격과 설치간격은 표-5.5를 표준으로 한다.

표-5.5 강재 동바리의 규격과 설치간격

Di 형식 구분	2.0m미만			2.0m ~ 3.0m			3.0m ~ 4.0m		
	B	C	D	B	C	D	B	C	D
동바리의 종류	강 관 H형강	강 관 H형강	H형강	강 관 H형강	H형강	H형강	H형강	H형강	H형강
동바리의 규격(mm)	ø89.1 ~ 101.6 H-100× 100	ø114.3 H-100× 100	H-100× 100	ø89.1 ~ 114.3 H-100× 100	H-100× 100 H-125× 125	H-100× 100 H-125× 125	H-100× 100 H-125× 125	H-125× 125 H-150× 150	H-125× 125 H-150× 150
설치간격(m)	1.2 ~ 1.5	1.0 ~ 1.2	0.8 ~ 1.0	1.2 ~ 1.5	1.0 ~ 1.2	0.8 ~ 1.0	1.2 ~ 1.5	1.0 ~ 1.2	0.8 ~ 1.0

이 표에 의한 동바리의 규격과 설치간격은 구조와 시공성을 고려하여 결정한 것이지만 적용할 때는 다음 사항에 유의한다.

- ① 표-5.1에 표시한 토압에 의하여 「다. 강재 동바리의 구조계산방법」을 사용하여 구조상의 안전성을 확인한다.
- ② 구조계산 결과에 관계없이 최대 설치간격은 1.5m로 한다.
- ③ 특별한 경우는 설치간격을 0.6m까지 단축할 수 있다.
- ④ 구조상 경제성을 고려하여 그림-5.15와 같이 H형강 동바리를 편심시켜서 사용하는 경우도 있다.

일반적인 경우 편심시킨 경우
그림-5.15 강재 동바리의 설치

다. 강제 동바리의 구조계산방법

강제 동바리의 구조계산은 일반적으로 사용되고 있는 P. V. Proctor, T. L. White의 저서 “Rock Tunneling with Steel Support” 에서 소개된 방법에 의한다. 이 방법에서 축방향력은 일반적으로 힘의 다각형을 그려서 구할 수도 있지만 다음의 식으로 근사 계산할 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} \cdot De \cdot h_v \cdot D \quad \text{----- (5.13)}$$

여기서, T : 동바리에 작용하는 축방향력 (tf) D : 동바리의 설치간격(m)
 h_v : 수직토압(tf) De : 굴착단면의 직경(m)

강제 동바리를 조립할 때 동바리의 정점을 연결하거나 원지반과 동바리 사이에 썸을 타설하면 동바리에 어느 정도의 변형이 작용하여 내부응력이 발생한다. 이 응력은 썸을 통하여 원지반에 외력을 작용시켜 원지반의 이완에 의한 하중의 증대를 방지한다.

이 경우 원지반과 동바리는 썸에 의하여 역학적으로는 힌지결합으로 간주된다. 따라서 썸에 의하여 동바리에 전달되는 힘은 동바리에 수직방향만 작용한다고 생각하는 것이다(그림-5.16 참조). 동바리의 조립 시에는 원지반이 아치작용에 의하여 일시적으로 지지되고 있으며 동바리에 썸을 타입함으로서 원지반에 원심방향의 힘(F_p)이 미치게 되며 따라서 원지반의 지반 반력(F_b)과 평형을 이룬다(그림-5.17(a) 참조)

그러나 원지반을 일시적으로 지지하고 있는 아치작용이 무너지면서 원지반의 중량(W)이 영향을 미치기 시작하면 그림-5.17(b),(c)와 같이 F_p 의 방향은 원심방향보다 기울어진다. W 가 더욱 증가하면 F_p 의 방향은 (d)와 같이 F_r 과 직각방향 즉 굴착면에 접한 방향으로 된다. F_p 는 성질상 원지반 중에 있어야 하므로 더 이상 기울 수는 없다. 따라서 W 가 증대하면 힘이 평형을 이루기 위해서 (e)와 같이 F_r 가 증가하여야 한다. 이때 동바리에는 처음으로 조립시의 내부 응력보다 큰 응력이 생긴다.

그림-5.16 힘의 전달법

그림-5.17 동바리와 원지반 압력과의 평형

이상을 기본으로 하여 동바리의 구조설계는 다음 순서로 진행한다. D형식의 큰 단면 터널 등에서 반단면 리브 포스트형이나 전주 리브형을 선정하는 경우 별도의 검토가 필요하다.

(1) 수직하중(W)의 계산

원지반으로부터 동바리에 작용하는 수직하중(W)은 동바리 상부의 원지반이 이완되었다고 가정하여 각 썰기의 중간점 및 각 동바리간의 중간점을 지나는 수직면에 둘러싸인 토양의 중량으로 한다.

(2) 동바리에 직각인 방향력 (F_r)의 계산

수직하중(W)을 동바리의 직각방향의 힘(F_r)과 접선방향의 힘(F_p)으로 분해한다.

F_{pr} 와 평행되는 F_p 의 방향은 접선방향과 수평선을 이루는 각도가 25° 보다 작은 경우는 그 각도로 하지만 25° 보다 큰 경우는 25° 를 한계로 한다. 따라서 수직하중(W)이 주어지면 이와 평형을 이루는데 필요한 최소의 F_r 와 F_p 는 접선방향 또는 수평과 25° 경사의 방향으로 취할 때 정해진다.

(3) 동바리 축방향력(T)의 계산

동바리 축방향력의 크기를 구하기 위하여 동바리를 핀(pin)구조로 가정한다. 동바리 중립축

의 각 점에서의 F 와 축방향력의 평형으로부터 힘의 다각형을 그려 동바리의 축방향력(T)을 구한다.

(4) 동바리 아치부의 응력

앞에서 구한 동바리의 축방향력의 방향은 인접한 켜기점을 잇는 현의 방향이다. 동바리가 핀 결합이면 켜기점에서의 휨모멘트는 0 이다. 그러므로 중간의 최대 휨모멘트(M_t)는 다음 식과 같이 된다.

$$M_t = T \cdot h \quad \text{----- (5.14)}$$

여기서 T : 동바리 축방향력(kgf) h : 아치 라이스(arch rise) (m)

그러나 동바리는 연속체이므로 각 켜기점에는 중간 모멘트와 반대 방향으로 작용하는 모멘트(M_b)가 있다. 따라서 켜기간의 휨모멘트(M_m)는 다음 식과 같다.

$$M_m = M_t - M_b \quad \text{----- (5.15)}$$

만약 동바리가 연속이고 양단이 고정되어 있으면 최대 휨모멘트는 각 켜기점에 생기며 그 값은 다음 식과 같다.

$$M_{\max} = M_b = 0.67 M_t = 0.67 T \cdot h \quad \text{----- (5.16)}$$

만약 동바리가 정점에서 힌지결합이면 다음 식에 의한다.

$$M_{\max} = M_b = 0.86 M_t = 0.86 T \cdot h \quad \text{----- (5.17)}$$

상기의 T 및 M_{\max} 에 의한 동바리의 응력은 다음 식에 의한다.

$$\sigma_s' = \frac{T}{A} \pm \frac{M_{\max}}{Z} \quad \text{----- (5.18)}$$

- 여기서, σ_s' : 동바리에 발생하는 응력 (kgf/cm²)
- T : 동바리에 작용하는 축방향력 (kgf)
- A : 동바리 부재의 단면적 (cm²)
- M_{\max} : 동바리에 발생하는 최대휨모멘트(kgf·cm)
- Z : 동바리 부재의 단면계수 (cm³)

여기에서 $\sigma_s' \leq \sigma_{sa}$ 이면 된다. σ_{sa} 는 동바리 부재의 허용응력(SS 400의 30%를 증가하여 $1,400 \times 1.3 = 1,820 \text{kgf/cm}^2$ 을 선정)을 적용한다.

(5) 동바리 직선부의 응력

그림-5.18에서와 같이 동바리의 직선부분(ℓ)은 축방향력(R_v)과 직선부와 아치가 접속되는 점에서 휨모멘트(M)를 받는 장주로 취급한다. 이 휨모멘트는 기둥의 상단에서 최대가 되고 하단에서 0 이 되며 그 사이를 직선적으로 변화한다.

이 휨모멘트는 기둥을 터널안쪽으로 d_1 만큼 변위시킨다. 이 최대변위량은 상단에서 0.422ℓ 되는 곳에 발생한다. 만약 직선부가 완전한 강성이면 상단의 휨모멘트는 약 $0.67M_t$ 이다. 실제로는 직선부는 자유롭게 변위하므로 $0.67M_t$ 보다 적어지지만 안전상 $0.67M_t$ 로 한다. 직선부는 이 휨모멘트에 의해 d_1 만큼 굽어지며 축방향력에 의하여 d_1 에서 d_2 로 변위가 증가하지만 이 2차 변형량은 미소하며 이로 인해 증가하는 휨모멘트도 일반적으로 3% 이하로서 무시할 수 있다.

최대 변위는 상단에서 0.422ℓ 과 0.5ℓ 사이에서 발생한다. 그 점의 휨모멘트(M_c)는

$$M_c = (1.0-0.422) \times 0.67M_t + T \cdot d_1 = 0.38M_t + T \cdot d_1$$

$$\text{여기서, } d_1 = 0.0642 \frac{0.67 M_t \cdot \ell^2}{EI} = 0.043 \frac{M_t \cdot \ell^2}{EI}$$

이렇게 산정된 M_c 를 식 (5.6)에 대입하여 동바리에 발생하는 응력(σ_s)을 산정한다.

그림-5.18 직선부의 변위

5.4 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트 공법

5.4.1 일반사항

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트 공법의 경우는 원지반의 조건을 고려하여 터널주변의 원지반이 보유하는 지지기능을 유효하게 활용하도록 설계해야 한다. 이 공법은 「동바리 부재로 이

완하중을 지지한다」는 널판 공법의 목적과는 다르게 「원지반 자체가 본래의 강도를 충분히 발휘하여 가능한 한 원지반 자신이 터널을 유지한다」는 목적으로 하는 점이 특징이다.

뿔어붙임 콘크리트나 록 볼트 공법은 원지반에 구속압을 줄 수 있으므로 널판공법과 달리 같이 팽창성 원지반에서도 비교적 용이하게 극복할 수 있다. 단, 지하수면 아래에서는 굴착면에 대한 뿔어붙임 콘크리트의 시공이 곤란하게 되므로 깊은우물공법, 약액주입공법 등 보조공법의 병행이 필요하다. 따라서 이와 같은 경우 보조공법을 고려한 공사비와 널판공법 및 실드공법, 압기공법 등의 특수공법을 채용할 때의 공사비와 비교하여 이 공법의 채택 여부를 결정한다. 특히 원지반의 강도비가 아주 작은($F_c' < 0.5$) 연질암의 경우에는 이 공법을 채택하더라도 변형량이 대단히 크게 되므로 강제 동바리와 병행하여 원지반의 압출을 강력하게 억제할 필요가 있다.

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트 공법은 시공중의 관찰 및 계측 결과에 따라 이를 반영하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 설계와 시공은 그림 5-19와 같은 순서를 참고한다.

가. 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법의 적용

(1) 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법을 적용할 때 특별한 검토가 필요한 경우

- ① 용출수량이 많은 원지반
- ② 용출수로 인하여 유사(流砂)현상이 발생하는 원지반
- ③ 용출수량이 작은 경우라도 뿔어붙임 콘크리트의 부착성 저하, 록 볼트의 정착력 부족 등으로 지지효과가 별로 없는 원지반
- ④ 원지반이 파쇄되어서 록 볼트의 천공이나 타입이 매우 곤란한 경우
- ⑤ 막장이 자립하지 못하는 원지반
- ⑥ 굴착단면 직경이 약 2.7m 이내로서 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트의 작업이 어려운 경우

(2) 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트 공법이 적합한 경우

- ① 팽창성 원지반
- ② 토피가 작고 널판공법의 시공이 곤란한 경우
- ③ 터널주변의 지표, 지중에 구조물이 있어서 지표침하 및 지중변위를 아주 작게 해야 할 경우

나. 막장의 자립성

터널은 시공 중에 일시적으로 무지보 굴착상태가 되므로 막장에서는 원지반의 자립이 필요하다. 이 막장의 자립성에 따라 굴착방법, 단면의 분할방법, 1회 굴진길이 등의 주요 설계제원이 변화하며 막장면 흙막이공, 선타 볼트공 등의 보조공법이나 지하수위 저하공법, 약액주입공법 등의 특수공법에 대한 필요성도 다르게 된다.

막장의 자립성은 원지반의 종류, 용출수량, 굴착단면의 크기, 토피 등도 밀접한 관계가 있으므로 이들의 사항도 검토가 필요하다.

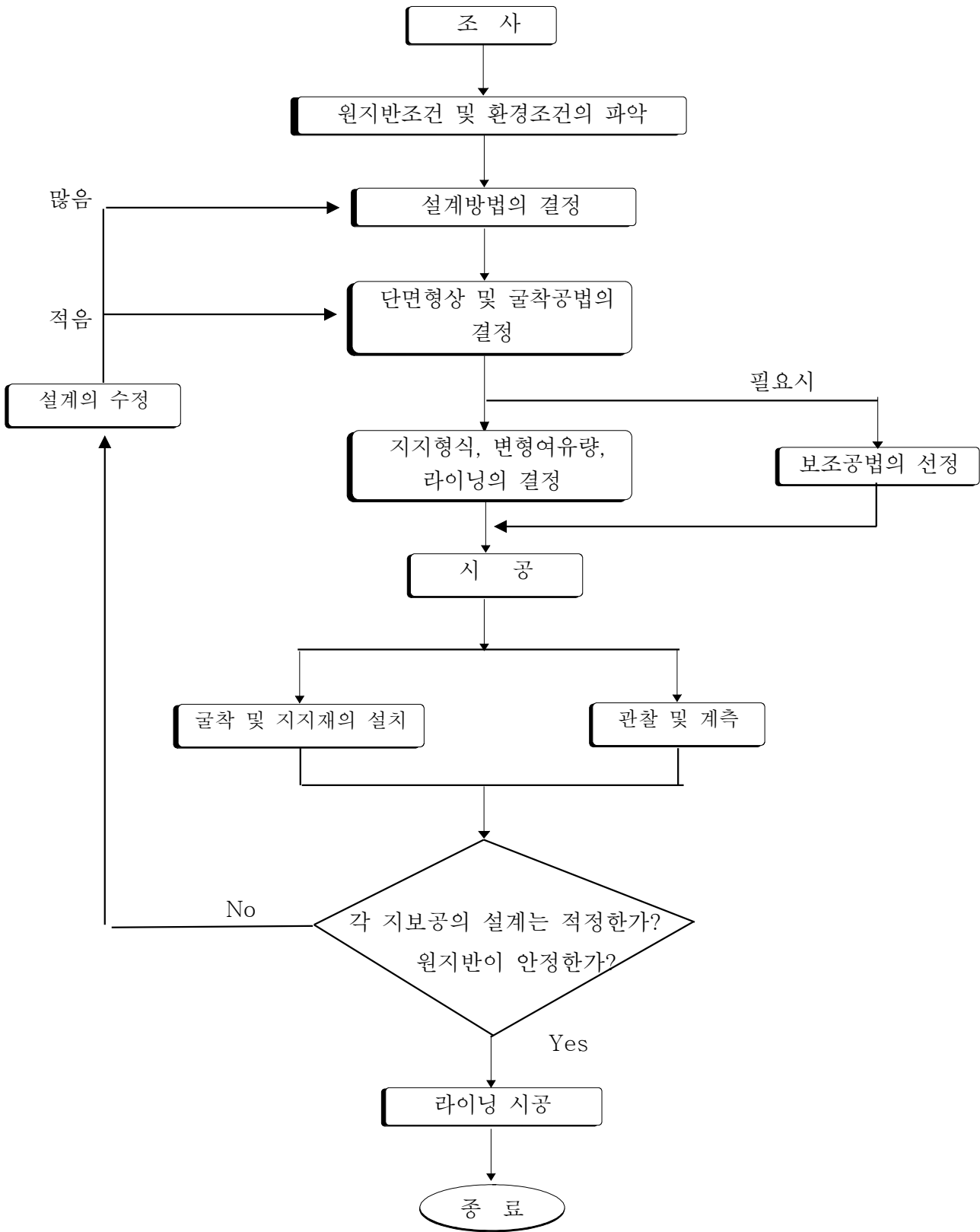


그림-5.19 흙어붙임 콘크리트·록 볼트 공법의 설계 및 시공의 순서

다. 지보공

뿔어붙임 콘크리트나 강재 동바리의 설계에는 상재하중의 영향, 편압, 원지반과의 밀착성에 대한 검토가 필요하다. 또한 록 볼트의 내력에 대해서는 원지반의 종류, 록 볼트의 길이, 정착방식 등에 따라 정해지는 인발내력만이 아니라 볼트의 내하력에 대해서도 검토한다.

5.4.2 지보공의 형식

지보공의 형식은 원지반의 조건, 시공법 등을 고려하여 원지반을 구분하여 결정한다. 지보 설계에서 복잡하게 변화하는 원지반의 특성을 터널굴착 전에 완전히 파악하는 것은 곤란하므로 원지반을 구분하여 표준이 되는 지보공 형식을 설정하는 것이 대부분이지만 굴착시의 관찰 및 계측결과에 의해서 필요에 따라 변경하여 현지상황에 적합하도록 한다.

가. 원지반의 분류

원지반의 분류는 원칙적으로 표-3.2, 3.3 및 3.4를 참고로 한다.

나. 지보공 형식

(1) 표준 지보공 형식

지보공의 설계는 원지반의 분류에 따라 원칙적으로 표-3.1과 같은 표준 지보공 형식에 준한다. 그러나 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트 공법의 특징은 다양한 지보공을 원지반의 상황에 따라 합리적으로 조합하여 현장에 적합하도록 하는데 있으므로 이 표준 지보공 형식을 합리적으로 조정하여 적용할 필요가 있다.

(2) 해석에 의한 지보공 형식의 설정

이상토압이나 통상의 변위량을 초과하는 변위가 예상되는 특수한 원지반인 경우 또는 굴착단면이 특수한 형상일 경우 등에는 표준 지보공 형식의 적용이 곤란하게 된다. 이러한 경우에는 해석에 의하여 지보공 형식을 설정하는 수가 있다.

해석방법은 유한요소법 등을 이용하여 원지반 및 구조물의 응력상태를 파악하려는 수치해석법과 단면형상을 원형 등의 간단한 형태로 모형화하여 탄소성이론에 의하여 응력상태를 파악하는 이론적 해석법 등이 있다. 이 방법들은 정량적으로 설계한다는 점에서 바람직한 방법이라고 할 수 있으나 원지반의 특성을 나타내는 물성치의 선택, 초기 원지반 응력평가, 지보공 부재의 모형화 등 해석상 해결해야 할 문제가 많이 있으므로 신중한 검토가 필요하다.

(3) 유사한 조건의 원지반에서의 지보공 형식의 적용

원지반 또는 단면형상 등의 조건이 유사한 시공사례가 있는 경우, 그것을 참고로 한 지보공 형식의 설정이 가능하다. 이러한 경우에는 기설 터널의 설계조건이나 계측결과 등의 정보를 가능한 한 많이 수집하고 이를 근거로 기왕의 지보공 형식에 대한 검토를 하여 적절한 형식을 설정한다.

(4) 지보공의 변경

터널을 안전하고 경제적으로 시공하기 위하여 막장 및 갱내를 관찰하고 현장에서의 계측 결과를 반영하여 설계를 보완할 필요가 있다. 계측결과를 검토하여 지보공의 변경이 필요한 경우에는 신속하게 변경해야한다. 관찰·계측항목은 변위량, 변위속도, 막장의 안정성, 변위의 안정성, 용출수량, 지보공 부재의 변위 등이 있다. (「7.8 관찰·계측」항을 참조)

지보공의 변경에는 다음의 두 가지 경우를 고려 할 수 있다.

① 굴착한 구간의 계측에 따라 미 굴착부분을 수정하는 경우

지질조사 결과 등에 따라 당초 설계시 설정한 지보공 형식은 표준적인 것으로서 이를 계측결과에 따라 현지의 상황에 맞도록 수정하고 개량할 필요가 있다. 이 경우 변위량, 원지반의 조건이 당초 예상한 것과의 차이에 따라 지보공의 변경내용·규모도 달라지게 된다. 표-5.6은 변경항목 및 주요 대책에 대한 것이다.

② 굴착 구간의 변위가 예상과 달리 원지반의 안정에 문제가 되어 설계를 변경하는 경우
굴착후 변위가 안정되지 않을 경우의 대책으로 보강 볼트, 보강 뿔어붙임 콘크리트 등이 있다.

표-5.6 설계변경 항목

변경항목	주요대책
적용 지보공 방식내에서의 변경	변형여유량의 재검토 뿔어붙임 콘크리트 두께의 변경 또는 망, 강섬유의 사용 록 볼트의 길이, 본수의 변경 록 볼트나 강재 동바리 간격의 변경
보조부재의 추가	경사볼트, 선타(先打)볼트 강널판 굴착면 뿔어붙임 콘크리트 굴착면 흠막이 록 볼트
원지반 분류의 재검토	적용 지보공 형식의 변경
단면의 폐합	인버트 뿔어붙임 콘크리트 인버트 콘크리트
굴진방식의 변경	벤치 컷 방식 링 컷 방식
단면의 변경	원형단면
특수공법의 채용	지하수 저하공법, 압기공법, 약액주입공법, 파이프 루프공법

5.4.3 뿔어붙임 콘크리트

뿔어붙임 콘크리트의 배합, 강도, 두께 등은 사용목적, 원지반의 조건, 작용효과 및 시공성을 고려하여 지보공 부재로서 충분한 기능을 발휘할 수 있도록 결정한다. 뿔어붙임 콘크리트는 굴착후 즉시 원지반에 밀착할 수 있고 굴착단면 형상에 좌우됨이 없이 용이하게 시공할 수 있으므로 가장 일반적으로 사용되는 지보공 부재의 하나이다. 뿔어붙임 콘크리트의 작용효과는 일반적으로 표-5.7과 같다.

표-5.7 뿔어붙임 콘크리트의 작용효과

뿔어붙임 콘크리트의 작용효과	개 념 도
<p>① 암반과의 부착력, 전단력에 의한 저항</p> <p>뿔어붙임 콘크리트와 암반과의 부착력에 의하여 뿔어붙임 콘크리트에 작용하는 외력을 원지반에 분산시키고 터널 주변의 균열에 전단저항을 주어 떨어지기 쉬운 암괴를 지지하며 지반아치를 터널벽면 가까이에 형성시킨다. 균열이 많은 경암 등에 작용효과가 크다</p>	
<p>② 횡압축 또는 축력에 의한 저항</p> <p>비교적 두꺼운 뿔어붙임 콘크리트가 하나의 부재로서 원지반을 지지하기 위하여 가능한 한 빨리 링으로 폐합하는 것이 바람직하다. 주변의 원지반에 내압을 주므로써 원지반을 삼축응력 상태로 유지하여 원지반의 강도저하를 방지한다. 연암이나 토사지반 등에 작용효과가 크다</p>	
<p>③ 외력의 배분효과</p> <p>강재 동바리, 또는 록 볼트에 토압을 전달하는 판으로서 거동하여 지반응력을 배분한다.</p>	
<p>④ 약층의 보강</p> <p>굴착된 지반의 굴곡부를 메우고 절리면 사이를 접촉시켜주어 응력집중을 피하여 안정을 도모하는 효과를 발휘한다.</p>	
<p>⑤ 피복효과</p> <p>풍화방지, 지수, 세립자 유출방지 등 피복효과가 있다.</p>	

뿔어붙임 콘크리트의 설계 시에는 목적, 원지반의 조건, 시공성 등을 고려하여 배합, 강도, 두께 등을 정할 필요가 있으며 지보공 부재로서 충분한 기능을 발휘시키기 위하여 다음 요건을 만족하도록 한다.

- ① 작용하중에 대하여 충분한 강도가 있어야 한다.
- ② 조기에 필요한 강도가 형성되어야 한다.
- ③ 원지반과 충분한 부착성이 있어야 한다.
- ④ 내구성이 있어야 한다.
- ⑤ 수밀성이 높아야 한다.
- ⑥ 반발량이 적어야 한다.

뿔어붙임 콘크리트의 작용효과는 원지반의 조건에 따라 다르다. 원지반 중의 층리, 절리 등의 불연속면이 터널의 거동을 지배하는 경우나 경암지반으로 절리 등의 공극이 비교적 클 경우에는 뿔어붙임 콘크리트가 국부적인 압괴의 붕괴방지나 약층의 보강 등에 효과가 있으며 표-5.7 중의 ①, ④, ⑤가 주된 작용효과가 된다.

원지반의 강도가 터널의 거동을 지배하는 경우는 주로 ②, ③의 효과를 기대할 수 있다. 이 경우 록 볼트나 강제 동바리 등 기타 지보공 부재를 고려하여 각각의 지보공 부재와 뿔어붙임 콘크리트의 상호작용을 고려하여 설계한다.

원지반의 조건에 따라 뿔어붙임 콘크리트를 영구적인 라이닝으로 사용할 수도 있으나 이런 경우의 설계에서는 특히 내구성, 수밀성 등에 대하여 충분히 배려해야 한다 (「5.5.3 뿔어붙임 콘크리트에 의한 라이닝」참고)

가. 뿔어붙임 콘크리트의 배합

뿔어붙임 콘크리트의 배합은 적절한 강도를 얻고 반발량이 적으며 치밀한 콘크리트를 얻는 것이 바람직하다. 배합설계는 물시멘트비(W/C), 잔골재율(s/a), 굵은 골재의 최대치수(G_{max}), 단위 시멘트량, 혼화재료의 종류 및 단위수량 등에 대하여 결정한다.

나. 뿔어붙임 콘크리트의 보강

뿔어붙임 콘크리트에 인장강도가 요구되는 경우에는 철망이나 강섬유에 의한 보강을 검토한다.

(1) 철망

철망은 뿔어붙임 콘크리트의 전단보강이나 부착력의 향상, 시공 중 및 시공 후의 표면박리 방지, 뿔어붙임 콘크리트의 균열 발생후 인장성 향상 등을 목적으로 사용된다. 일반적으로 철망은 토사지반에서 경암까지 여러 가지 조건의 원지반에 사용된다. 예를 들면 토사지반의 경우 망의 눈이 치밀한 철망으로 시공하므로써 원지반의 표면박리를 방지할 수 있다. 팽창성 지반 등과 같이 큰 변형이 발생하는 지반에서는 뿔어붙임 콘크리트에 다수의 균열이 생겨

콘크리트 덩어리가 떨어지는 수도 있으므로 이런 때는 콘크리트 분리방지와 인장성의 향상을 위하여 철망을 사용한다. 경암으로 절리나 균열이 많은 경우 돌발적인 암괴의 붕락에 대비하여 뿔어붙임 콘크리트의 전단강도 보강이나 인성의 향상을 위하여 철망을 사용하는 수가 많다.

일반적으로 사용되는 용접철망의 표준 망눈 치수는 100×100mm 또는 150×100mm이다. 철망은 원지반이나 뿔어붙임 콘크리트에 핀 등으로 견고하게 고정시키고 철망을 서로 충분히 겹치게 배치한다. 중첩 폭은 철망 눈의 1~2배 정도로 한다.

(2) 강섬유

강섬유 보강 콘크리트는 보통 콘크리트와 비교할 때 전단강도, 휨강도, 인장강도가 약간 증가하나 압축강도는 거의 같다. 보통 콘크리트보다 우수한 특성으로는 균열발생 후에도 상당한 내력을 유지하면서 점차 파괴에 달하는 콘크리트의 취약성을 대폭적으로 개선시켜 인장성이 향상되는 수가 있다.

일반적으로 사용되는 강섬유 길이는 40mm이하, 섬유의 직경은 0.3~0.6mm로, 형태의 비(길이/직경)는 40~60 정도이다. 강섬유의 혼입율은 용적비로 0.5~1.5% 범위이다. 강섬유 보강 콘크리트는 터널 갱구부, 단층과쇄대 또는 팽창성지반 등 지반조건이 열악하며 큰 토압이 작용하는 장소나 단면확장부 등 구조적으로 큰 응력이 발생하는 장소에 사용된다. 이 경우 반발량이 커진다는 것도 고려한다. 보강용 섬유에는 강섬유 외에 유리섬유, 플라스틱섬유 등이 있다.

다. 뿔어붙임 콘크리트의 설계두께

뿔어붙임 콘크리트의 설계두께는 사용목적, 원지반조건, 단면의 크기에 따라 결정된다. 경암으로 토압이 거의 없어서 지반의 탈락이나 암괴의 박리방지 등을 목적으로 할 때는 설계두께가 작아도 된다. 한편 팽창성 지반이나 미고결 지반 또는 토피가 작을 때는 설계두께를 비교적 크게 한다.

뿔어붙임 콘크리트의 설계두께는 작용효과, 시공실적을 고려하여 결정되는 수가 많으며 통상 5~20cm정도이다. 전단강도가 부족한 경우에는 설계두께를 두껍게 하는 것은 비경제적일 뿐 아니라 휨응력을 발생시키게 되므로 강제 지보공, 강섬유 등에 의한 보강을 검토한다.

설계두께는 모든 장소에서 설계두께 이상이 되어야 한다는 최소두께의 개념과 단면내의 평균두께가 설계두께 이상이면 부분적으로 설계두께에 못 미치는 장소가 존재할 수 있다는 평균두께 개념을 들 수 있다.

최소두께로 규정하면 굴착면의 굴곡이 커지는 중경암, 경암지반에서는 여굴에서의 뿔어붙임 콘크리트 량이 필요 이상으로 많아진다. 따라서 평균두께로 표시하며 표준적인 설계 두께는 표-3.1과 같다.

5.4.4 록 볼트

록 볼트의 정착방식, 배치, 치수, 재질 등은 사용목적, 원지반 조건, 작용효과 및 시공성을 고려하여 지보공 부재로서 충분한 기능을 발휘하도록 결정한다. 특히 원지반 조건이 각기 다른 특성을 가지고 있을 경우에는 이로 인한 작용효과의 차이를 고려한다. 록 볼트의 작용효과는 개념적으로 표-5.8과 같다.

절리나 층리가 발달한 중경암이나 경암의 경우 암석자체의 강도가 크기 때문에 응력적으로는 문제가 발생하는 수가 없으나 균열 등의 역학적 불연속면에서 암괴의 이탈이나 이동 등이 문제가 된다. 이러한 경우 록 볼트의 작용효과로는 암괴의 이탈이나 이동을 억제하고 암반을 일체화하여 유지하는 효과 즉 고정 효과나 원지반 개량효과 등을 기대할 수 있다.

한편 강도가 작은 연암 등의 지반에서 터널굴착으로 주변의 원지반 응력이 지반의 강도를 넘어 넓게 소성화하여 비교적 큰 변형이 발생하는 경우 록 볼트로서 원지반의 변형을 억제하여 지반의 소성화를 방지한다거나 소성영역이 확대함에 따라 원지반의 안정성을 증대시킬 필요가 있다. 이러한 경우 록 볼트의 작용효과로서 내압효과, 아치형성효과, 원지반 개량효과 등을 기대 할 수 있다.

뿔어붙임 콘크리트나 강재 동바리 등 다른 지보공 부재와 병용하는 경우에는 각각의 지보 효과를 종합적으로 평가하여 록 볼트를 설계한다.

록 볼트가 오랜 기간동안 기능을 발휘하기 위해서는 강재의 부식이 문제가 된다. 일반적인 원지반에서는 전면접착방식의 볼트는 부식하지 않는 것으로 취급하는 예도 있다. 특히 강산성원지반(산성용출수, 유산, 유화수소 등이 존재하는 원지반)이나 해수의 영향을 받는 장소에서는 내부식성 재료를 사용하는 것이 바람직하다.

가. 록 볼트의 정착방식

록 볼트의 정착방식에는 선단정착방식, 전면정착방식, 병행방식으로 분류된다. 각 정착방식의 정착 방법, 특징, 적용범위는 표-5.9와 같다. 선단정착방식에서는 록 볼트의 선단을 원지반에 정착시켜 터널벽면과 볼트선단간에 압축력이 작용하여 원지반에 압축영역을 형성시킨다. 따라서 지반의 안정성을 향상시키거나 암괴를 고정시킬 목적으로 사용된다. 이 방식은 선단의 정착이 충분하지 않으면 효과를 발휘할 수 없기 때문에 비교적 단단한 원지반에 사용된다.

전면접착방식은 볼트 길이 전체에 대해 정착제로 지반과 밀착시키는 것으로 적용 지질의 범위가 넓어 최근에는 경암지반에서도 거의 전면접착방식이 채용되고 있다. 병용방식은 선단 정착방식과 전면접착방식의 이점을 살린 것으로 록 볼트에 프리스트레스를 도입하는 경우에 적당하다.

표-5.8 록 볼트의 작용효과

록 볼트의 작용효과	개 념 도
<p>① 봉합효과(현수효과) 발과 등으로 이완된 암괴를 이완되지 않은 원지반에 고정시켜 암괴의 낙하를 방지코자 하는 것으로 가장 단순한 효과이다. 균열 및 절리가 발달한 지반에서 뿔어붙임 콘크리트와 병행하면 비교적 작은 암괴에도 효과가 있다. 뿔어붙임 콘크리트를 원지반에 부분적으로 시공하는 것도 이에 속한다.</p>	
<p>② 보 형성효과 터널주변에서 층을 이루고 있는 원지반은 층간의 접촉면을 기준으로 분리된 겹침 보로서 거동하나 록 볼트에 의하여 층간을 조여 붙임으로서 층리면에서의 전단응력의 전달을 가능하게 하고 합성 보로 거동시키는 효과가 있다.</p>	
<p>③ 내압효과 록 볼트의 인장력에 상당하는 압력이 내압으로 터널벽면에 작용한다고 예상하고 이에 따라 2축 응력상태의 터널근방 원지반을 3축 응력상태로 되게 하는 효과이다. 이는 압축시험시의 구속력(축압)의 증대와 같은 의미를 가지며 원지반의 강도 또는 내하능력의 저하를 막는 작용을 한다.</p>	
<p>④ 아치형성효과 록 볼트에 의한 내압효과로 인하여 일체화하고 내하능력이 높아진 터널 주변의 원지반은 내공 측으로 일정하게 변위함으로써 그라운드 아치(ground arch)를 형성한다.</p>	
<p>⑤ 원지반 개량효과 지반 내에 록 볼트가 삽입되어 있으면 원지반의 전단저항력이 증대하여 내하력이 커질 뿐 아니라 원지반이 항복 후에도 잔류강도가 증대한다. 이러한 현상은 록 볼트에 의하여 원지반 전체의 안정성이 개선되었다는 것이다.</p>	

표-5.9 록 볼트의 정착방식

정착방식	정착방법	특징	적용범위	개략도
선단정착식	기계적으로 정착하는 썬기형, 확장형과 캡슐에 의한 접착형 등이 있으며 정착 후 너트로 조인다.	기계식의 경우에는 정착부의 지반상태에 따라 정착력이 부족하게 되거나 발파로 인한 이완 등의 문제가 있다. 확장형은 발파후 적절히 다시 조이게 되면 적용할 수 있는 경우도 있다.	썬기형 및 캡슐 접착형은 고정효과를 목적으로 하는 경우가 많다.	
전면접착식	정착재로서 수지, 시멘트 모르타 등을 사용하거나 록 볼트 전장을 원지반에 정착시킨다.	록 볼트 전 길이를 원지반 고정한다. 원지반의 강도, 절리, 균열상태, 용출수상태 및 자립성 등에 따라 여러 종류가 있다.	경암, 보통암, 연암, 토사 지반으로부터 팽창성 지반까지 적용 범위가 넓다.	
병용방식	① 선단을 기계적으로 정착시킨후 시멘트풀을 주입하는 방식과 ② 전면접착 방식의 정착재 충전시 선단에 급결용의 캡슐을 사용하는 것이 있다.	선단접착형과 전면접착형을 병행한 것이다. ① : 시공공정이 2단계에 걸쳐 이루어진다. ② : 시공에 따라서는 선단의 급결성을 얻을 수 없는 경우도 있다.	① 선단을 기계적으로 정착하는 록 볼트는 많이 사용되지 않는다 ② 팽창성 원지반 혹은 프리스트레스를 도입하는 경우에 유효하다.	

주) 전면접착방식의 정착방식으로는 공내에 정착재를 충전하고 볼트를 압입하는 방법과 볼트를 삽입후 정착재를 주입하는 방법이 있다.

원지반의 강도가 현저히 낮은 미고결층이나 애추 등 볼트 공의 내벽유지가 곤란한 경우에는 자기 천공식 록 볼트 등의 사용을 검토한다. 터널의 토피가 작을 경우 록 볼트에 프리스트레스를 도입하여 원지반에 강제적으로 압축영역을 형성하여 안정성을 향상시키는 수가 있다. 이 경우에는 기계식 또는 모르타 급결제를 사용하여 록 볼트의 선단을 확실하고 신속하게 원지반에 정착시킨다.

원지반에 정착된 록 볼트는 주로 인장부재의 기능을 한다. 따라서 설계시 인발내력이 가장 기본이 되며 볼트의 항복 축력과 정착부의 정착력에 대하여 충분한 검토를 한다.

록 볼트의 정착력은 인발시험을 하여 그 내력으로 판단한다. 인발내력은 원지반과 정착재간에 생기는 마찰력에서 얻어지는 것으로 원지반의 조건, 정착방식, 정착재, 볼트길이, 구멍의 직경에 따라 다르다. 록 볼트의 인발시험결과의 예는 그림-5.20과 같으며 일반적으로 C영역은 볼트의 정착효과를 기대할 수 없는 영역이며 인발내력은 P점이 된다.

그림-5.20 록 볼트의 인발시험의 예(하중-변위곡선)

나. 전면정착방식에서의 록 볼트의 작용 기구

팽창성 토압이 작용하는 연암터널을 비롯하여 일반적으로 널리 채용되고 있는 전면접착방식에 있어서 록 볼트의 작용기구는 다음과 같다.

막장 가까이에서 뿔어붙임 콘크리트를 시공한 후 천공하여 록 볼트를 삽입, 정착한 상태가 그림-5.21(a)이다. 정착 후 시간의 경과에 따라 터널주변의 원지반에 작용하는 응력이 증대하므로 터널내측에 가까운 원지반의 탄성변형 및 항복에 따른 소성변형으로 인하여 터널 내공으로 록 볼트가 압출된다.

그림-5.21(b)와 같이 터널 굴착벽면에 가까운 부분의 원지반은 록 볼트에 대하여 상대적으로 크게 터널내공 방향으로 변형하지만 록 볼트와 원지반의 암반이 접촉되어 있으므로 암반

의 팽창변형은 록 볼트에 대하여 그림 5.21(b)의 점선과 같은 전단응력(τ)이 작용한다. 이 전단력의 분포도를 그리면 그림-5.22(a)와 같이 된다. 록 볼트를 삽입하여 모르터 또는 수지로 접착시킨 구멍의 직경을 d 라 하면 터널 벽면으로부터 거리 x 의 점에서 록 볼트가 원지반에 미치는 힘은 이 전단력을 적분한 값

$$P_x = \int_0^x \tau \cdot \pi \cdot d' \cdot dx$$

가 되고 그 분포상태는 그림-5.22(b)와 같이 된다. 록 볼트에 대한 원지반의 상대 변위량이 0가 되는점($x=\ell$)이 중립점이며 이 점에서 P_x 가 최대치(P_n)가 된다. $0 \leq x \leq \ell$ 은 원지반 구속영역이며 이 부분의 록 볼트 길이가 원지반의 구속길이(pickup length)가 된다. 또한 이보다 안쪽의 원지반($\ell \leq x \leq L$)은 록 볼트를 고정하고 있는 영역이다. 이 부분의 길이 $\ell_1 = L - \ell$ 이 고정길이이다.

터널 벽면 $A(m^2)$ 당 1본의 록 볼트가 타설되어 있다면 중립면 BB'를 지나는 단위면적당 $\sigma_{i2} = P_n/A$ 의 힘이 원지반 구속영역에서 원지반의 안쪽으로 향하여 가해지며 이 σ_{i2} 와 뿔어 붙임 콘크리트에서 원지반 굴착벽의 단위 면적당에 가해지고 있는 힘 σ_{i1} 이 함께 되어 (즉, 터널내경을 R_1 라 하면 굴착면에서는 $\sigma_i = \sigma_{i1} + \sigma_{i2}(R_1 + \ell)/R_1$ 이 되어) 원지반의 항복이 다시 원지반의 안쪽으로 진전하는 것을 억제한다.

(a)

(b)

그림-5.21 전면접착방식에서 록 볼트의 작용기구

주) 전면접착방식 볼트의 정착직후(a)와 막장 진행에 수반하여 터널벽면 가까이의 암반이 록 볼트에 대하여 상대적으로 변형한 상태(b)(점선의 화살표는 원지반이 록 볼트에 미치는 전단력, 실선의 화살표는 록 볼트가 원지반에 미치는 전단력)

실제로 작용되는 힘은 그림-5.21(b)중에 모식적으로 나타낸 것과 같이 어느 범위로 분산 작용한다.

뿔어붙임 콘크리트는 굴곡부를 고르게 하여 응력집중에 의한 전단파괴를 억제할 뿐 아니라 뿔어붙임 콘크리트에서 경화할 때까지는 유연성이 있으므로 균열의 발생이 없이 변형된다. 따라서 막장의 진행에 따른 원지반 구속영역내의 암반이 터널 내공면을 향하여 록 볼트의 상대적 변위를 흡수하여 암반이 전단파괴에 의하여 박리되는 것을 방지하고 일체가 되어 지지하는 중요한 역할을 다하고 있다.

그림-5.22 전면접착식 록 볼트에 작용하는 응력의 분포

다. 록 볼트의 배치와 치수

록 볼트의 배치와 치수는 원칙으로 표-3.1에 의한다. 다만 특수한 원지반 조건의 경우에는 록 볼트의 사용목적, 터널의 단면형상 등을 고려하여 결정한다. 예를 들면 암반의 잠재적인 절리나 굴착에 의한 새로운 균열에서 암괴의 표면 이탈 가능성을 예상하여 이탈이 발생하지 않도록 볼트의 본수, 간격을 결정하거나 1본의 록 볼트가 지지가능한 하중과 지지해야 할 하중의 관계에서 본수, 간격을 결정하는 경우가 있다.

(1) 록 볼트의 배치

록 볼트의 배치는 사용 목적에 따라 다르며 원지반의 종류, 강도, 균열의 간격, 길이, 용출수의 유무, 원지반의 초기 응력, 터널단면의 크기, 형상, 굴착방법 등으로 결정된다.

록 볼트의 배치는 랜덤 볼팅(random bolting)과 시스템 볼팅(system bolting)이 있다. 전자는 원지반의 열악한 장소를 국부적으로 보강하도록 굴착후 막장의 상태에 따라 볼트의 배치를 정하고 후자는 지질상태를 예상하여 미리 록 볼트의 배치를 정해두는 것이다. 어느 경우에도 원지반 조건에 큰 변화가 있을 때는 신속하게 록 볼트의 배치를 변경해야 한다.

록 볼트는 원지반 조건에 따라 여러 가지로 배치를 고려할 수 있다. 예를 들면 고정효과, 원지반 개량효과를 기대하는 보통암, 경암지반에서는 이완된 상단부의 안정이 목적이므로 주

로 아치부에 배치한다. 균열이 많고 암괴가 작은 경우에는 긴 볼트를 등성등성 배치한다. 한편 내압효과를 기대하는 연암지반에서는 아치 및 측벽부에 타설하나 강재 동바리를 병용하는 경우에는 아치부의 볼트를 생략하는 수가 많다. 토피가 작은 원지반에서는 아치 형성 효과를 기대할 수 없으므로 아치부에 볼트를 타설할 경우에는 선타 록 볼트로 시공한다. 원지반이 점토질의 토사인 경우에는 록 볼트 자체의 효과가 적으므로 록 볼트를 생략하는 경우도 많다. 그림-5.23은 록 볼트의 배치 예이다.

록 볼트는 일반적으로 그림-5.24(a)와 같이 방사상으로 굴착면에 직각으로 타설하나 (b)~(d)와 같이 경사지게 또는 터널 축방향에 평행하게 타설하는 경우도 있다. (b)는 원지반조건 때문에 조기에 록 볼트의 타설이 필요하지만 시공상 조기에 수직으로 타설할 수 없을 때 시공되는 경우이다. (c)와 (d)는 보조공법으로 사용되는 경우로서 본래의 작용효과와는 별도로 막장 전방의 원지반을 보강하거나 막장의 압출을 방지할 목적으로 타설된다.

(a) 연암지반의 배치 예

(b) 토사지반의 배치 예

그림-5.23 록 볼트의 배치 예

(a) 일반적인 경우

(b) 경 사

(c) 선 타

(d) 막장면 흠막이

그림-5.24 록 볼트의 타설 예

(2) 록 볼트의 치수

록 볼트의 길이는 원칙적으로 굴착에 의한 영향범위를 보강할 수 있도록 결정해야 되지만 터널단면이 작은 경우에는 시공성을 고려해야 한다. 일반적인 경우 록 볼트의 길이는 표 3-1을 참고한다. 강도가 작은 원지반에서는 록 볼트의 효과를 증가시키기 위하여 표준 지보공

형식보다도 본수를 증가시키거나 볼트를 길게 하는 경우가 있다.

록 볼트의 길이는 기대하는 작용효과에 따라 다르나 고정효과나 보 형성효과를 기대하는 경우에는 이완영역 이상의 록 볼트를 사용한다. 내압효과, 아치 형성효과나 지반 개량효과를 기대하는 경우에는 터널주변 원지반의 변형을 억제하고, 작용하는 토압에 대항하기 위하여 필요한 정착력을 얻을 수 있는 길이로 한다.

록 볼트의 굵기는 1본의 록 볼트가 지지하는 암괴의 중량이나 원지반의 전단에 저항하는 힘 등에 따라 결정되나 일반적으로 $\phi 22 \sim 25\text{mm}$ 정도의 것이 사용되는 수가 많다. 팽창성 원지반에서는 록 볼트에 큰 축력이 발생하여 원지반내에서 록 볼트가 끊어지는 수가 있으므로 이러한 경우에는 통상보다 굵은 록 볼트로 변경하는 것을 검토한다.

라. 록 볼트의 재질 및 강도

(1) 록 볼트의 재질

록 볼트의 재질은 원지반 조건 및 사용목적에 따라 필요한 강도나 신장특성이 있는 것으로 한다. 록 볼트는 인장재로서 사용하기 위하여 인장강도가 큰 것이어야 하지만 원지반의 급격한 붕괴를 방지하기 위하여 충분한 신장 특성을 갖추고 있어야 한다.

록 볼트에 큰 축력의 발생이 적을 것으로 예상되는 원지반에서는 KS D 3504에 규정한 SD30이나 SD35 정도의 재질로 인장강도 및 연신율이 큰 것이어야 한다. 비교적 큰 변형이 발생할 것 같은 원지반에서는 ① 항복강도가 크고, 신장 특성이 좋은 나선상의 강봉(고장력강)을 사용하거나 ② 단면적이 큰 것을 사용하거나 ③ 본수를 많게 하는 등의 방법이 있다.

표-5.10 록 볼트로 사용되는 봉강의 기계적 성질

종 류	재 질 기 호	기 계 적 성 질		
		항복점(kgf/mm ²)	인장강도(kgf/mm ²)	연신율(%) (시험편 2호 기준)
원 형 봉 강	SR 30	30 이상	45 ~ 61	18 이상
이 형 봉 강	SD 30A	30 이상	45 ~ 61	16 이상
	SD 30B	30 ~ 40	45 이상	16 이상
	SD 35	35 ~ 45	50 이상	18 이상
	SD 40	40 ~ 52	57 이상	16 이상

록 볼트를 이어서 시공하는 경우는 결합기(coupler)를 사용한다. 사용하는 결합기는 시공성이 좋고 볼트와 동등이상의 강도를 가진 것으로 한다.

막장타설 볼트나 광폭 굴착예정인 원지반을 보강하는 경우는 굴착의 시공성을 고려하여 강봉 대신 유리섬유를 사용할 수도 있으나 내하력이나 시공효과를 검토하여 설계를 한다.

(2) 지압판(bearing plate)

지압판은 록 볼트와 뿔어붙임 콘크리트를 일체화하는 중요한 부재로서 예상 응력에 대하여 충분한 면적과 강도를 갖는 것으로 한다. 일반적으로 평판(6×150×150mm)으로 충분하지만 팽창성 지반에서는 록 볼트가 끊어지는 정도의 축력이 발생하는 경우도 있으므로 강도에 대한 배려가 필요하다.

마. 록 볼트의 정착재

정착재는 원지반의 상황(볼트 공벽의 자립성, 용출수 등), 사용 목적을 고려하여 정착부의 전 길이에 걸쳐 충분한 정착력을 확보할 수 있는 것으로 선정한다.

정착재에 필요한 조건은 장·단기간의 접착력이 크고 내구성이 있으며 충전성이 양호해야 한다. 록 볼트의 정착력은 록 볼트 본체와 정착재와의 부착성 및 정착재와 원지반과의 부착성 등 양면으로 검토한다. 일반적으로 록 볼트 본체와 정착재와의 부착성은 좋지만 정착재와 원지반과의 부착성에 대해서는 록 볼트의 길이, 형상, 정착재의 재질 및 원지반 조건에 따라서는 충분한 부착성을 기대할 수 없는 경우도 있으므로 주의를 요한다. 연암이나 토사지반에 있어서 원지반의 강도가 작고 원지반과 정착재간의 정착력을 기대할 수 없는 경우에는 부착성이 높은 정착재를 사용할 뿐 아니라 천공직경을 확대하여 부착면적을 크게 하는 등의 검토가 필요하다.

정착재로는 수지, 시멘트 모르타, 시멘트 풀 등이 있다. 일반적으로 시멘트 모르타가 많이 사용되고 있으나 조기 강도가 작아서 급결재를 병용하거나 조강 시멘트를 사용하여 조기 강도를 상승시킨다. 수지형의 정착재는 정착재료가 들어 있는 캡슐을 볼트로 교란하므로써 화학적으로 경화반응을 일으켜 순식간에 정착시킨다.

정착재의 시공방법은 미리 정착재를 구멍에 충전하고 록 볼트를 삽입하는 충전방식과 먼저 록 볼트를 삽입하고 정착재를 주입하는 주입방식이 있으나 공벽의 자립성, 용출수의 상황 등을 고려하여 정한다. 주입방식의 정착재료는 포틀랜드 시멘트와 급결제로 된 시멘트 풀이 사용된다.

긴 록 볼트를 상단부 부근에 타설하는 경우에는 정착재의 충전이 불충분하거나 애추와 같은 미고결된 원지반의 경우에는 천공이 몹시 거칠어져서 볼트 공이 붕괴되는 수도 있으므로 특히 정착재의 종류, 충전방식에 대한 검토가 필요하다. 용출수가 있으면서 정착재로 시멘트 모르타 등을 사용하는 경우에는 유출 또는 분리되어 작용효과를 기대할 수 없게 되므로 용출수 처리의 필요성, 정착재의 종류, 충전방식 등에 대한 검토가 필요하다.

5.4.5 강제 동바리

강제 동바리의 규격과 설치간격 등은 지보공 부재로서 효과적인 기능을 발휘할 수 있도록 결정해야 한다.

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법을 사용하는 경우 강제 동바리는 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트와 함께 터널의 안정을 유지하는 지보공 부재의 하나이다. 따라서 예상되는 작용하중에 견디는 강도를 갖도록 사용 강제, 설치 간격 등을 결정하는 동시에 다른 지보공 부재 특히 뿔어붙임 콘크리트와 일체가 되어 효과적인 기능을 갖도록 한다.

가. 강제 동바리의 사용 목적

강제 동바리의 사용목적은 터널단면의 형상과 크기, 막장의 자립성, 토압의 크기, 지표 침하량의 제한 등에 따라 다르지만 다음과 같이 대별한다.

(1) 뿔어붙임 콘크리트의 보강

뿔어붙임 콘크리트는 초기 재령에서 변형하기 쉽고 강도도 작기 때문에 원지반의 조건에 따라서는 강제 동바리를 사용하여 뿔어붙임 콘크리트와 일체화 함으로서 지보공의 강성과 강도를 증가시킨다. 예를 들면 토사지반에서 터널의 변형 또는 지표 침하를 극소화시킬 필요가 있을 경우에 강제 동바리를 사용하여 보강한다. 붕괴의 위험이 있는 원지반이나 팽창성 지반에서 토압이 큰 경우에는 철망과 병행하여 강제 동바리를 사용함으로서 지지강도를 높일 수가 있다. 이와 같은 경우에 뿔어붙임 콘크리트와 분리되지 않도록 배려해야 할 뿐 아니라 강제 동바리의 좌굴에도 주의한다.

(2) 막장의 조기 안정

강제 동바리는 설치와 동시에 충분한 강도를 가진 지보공 부재가 되므로 막장의 자립기간이 짧은 토사지반이나 균열이 발달한 원지반에서는 뿔어붙임 콘크리트 또는 록 볼트에 소요 강도가 발현되기 전에 지지효과를 발휘한다. 그러나 강제 동바리를 설치 할 때는 원지반과의 사이에 공극이 생기게 되므로 췌기 또는 뿔어붙임 콘크리트의 충전을 신속히 하지 않으면 막장의 조기 안정에 효과를 잃게 된다.

(3) 선타 록 볼트 등의 지점

막장의 자립성이 좋지 않은 원지반에서 막장 전방의 원지반을 미리 지지하기 위하여 선타 록 볼트나 소구경의 강관 혹은 강널판을 사용한 보조공법을 시행하는 경우가 있다.

그림-5.25는 선타 록 볼트 등의 지점으로 강제 동바리를 사용하는 예를 보여주는 것이다. 강제 동바리의 단면이 큰 경우에는 선타 록 볼트의 경사각이 커지므로 여굴이 증대하는 수가 있다. 또한 강성이 작은 동바리는 선타 록 볼트의 하중에 의한 변위가 크게 되는 수가 있으므로 주의한다.

(a) 강재 동바리의 배면에서 시공

(b) 강재 동바리의 천공 부분에서 시공

그림-5.25 강재 동바리를 선타 록 볼트의 지점으로 사용하는 예

나. 강재 동바리의 형식 및 형상

강재 동바리와 뿔어붙임 콘크리트는 동시에 작용하중에 양호하게 저항하여 발생하는 휨모멘트가 극히 작아지는 형상이 된다. 강재 동바리의 형식은 그림-5.26과 같이 상반부 한정, 상·하반부, 전주형식 등 원지반조건, 작용하중의 크기와 방향, 시공법 등을 고려하여 결정한다.

강재 동바리는 원호형이 일반적이며 원지반이나 동바리에 과대한 응력을 발생하게 하는 형상은 피하도록 한다. 동바리의 침하를 억제할 필요가 있을 때는 접지면적을 크게 하여 지반의 지지력을 쉽게 확보할 수 있는 설계를 한다.

(a) 상반부 한정(반원형)

(b) 상·하반부(마제형)

(c) 전주(인버트부 마제형)

(d) 전주(원형)

그림-5.26 강재 동바리의 형식

다. 강재 동바리의 단면형상 및 재질

(1) 강재 동바리의 단면형상

강재 동바리는 작용하중 외에 뿔어붙임 콘크리트의 두께, 터널단면의 크기, 시공법을 고려하여 적당한 강도와 강성을 가진 강재를 선정한다. 강재 동바리의 단면형상은 원지반과의 공극에 뿔어붙임 콘크리트가 잘 투입되어 일체화되기 쉬운 것으로 한다. 큰 하중이 작용하는 경우는 좌굴이나 뒤틀림이 일어나지 않도록 하는 것이 바람직하다.

강재 동바리에 사용되는 강재는 H형강, U형강 등 외에 격자동바리(lattice girder)등이 있으며 일반적으로 H형강이 많이 사용되고 있다. U형강은 뿔어붙임 콘크리트의 혼입이 양호하며 겹침이음을 형성하는 등의 특징이 있다. 작은 단면의 터널에는 강관이 사용되는 수가 있다.

격자동바리는 강봉을 삼각형태로 엮어 만들어 기존의 강재 동바리를 대체할 수 있도록 개발한 것이며 뿔어붙임 콘크리트와 좋은 결합을 이루는 반면 강성이 작아서 휘어지기 쉬운 특성이 있다. 격자동바리는 대형 단면의 터널 굴착시 H형강의 경우 무겁고 다루기 어려워 강지보재의 설치가 지연되어 후속 지보재인 뿔어붙임 콘크리트나 록 볼트의 설치를 지연시켜 터널의 초기 안정에 불리하게 작용하는 단점을 개선하기 위해 서유럽이나 일본 등지에서 적용되고 있다. 구조는 하중의 지지 역할을 담당하는 지지강봉과 이들을 연결하는 연결용 부재로 구성되며 지지강봉은 보통 3개 또는 4개로서 삼각형이나 사각형의 형태가 많으며 지지강봉을 연결하는 연결용 부재가 사용된다.

(2) 강재 동바리의 재질

강재 동바리에 사용하는 강재는 큰 하중이 작용하여 변형이 생기더라도 취성적으로 파괴되지 않는 것이 좋다. 구부림 가공이나 이음, 기타 용접가공이 용이한 것이 바람직하며 구부림 가공은 관리에 양호한 냉간가공으로 한다.

강재 동바리의 제원과 냉간가공의 최소 곡률반경의 표준은 표-5.2와 같다.

라. 강재 동바리의 이음

강재 동바리의 이음부는 구조상의 약점이 되기 쉬우므로 그 위치 및 연결기구는 굴착단면형상, 단면력의 크기와 분포 등을 고려하여 설계한다. 특히 큰 토압이 작용하는 경우 이음부에서 좌굴이나 휨파괴를 일으키기 쉬우므로 강결하게 연결해야 한다. 침하를 최소화 할 필요가 있을 때는 이음판, 저판 등을 크게 할 뿐 아니라 뿔어붙임 콘크리트와 일체화시켜 충분한 지지력을 얻도록 해야 한다.

팽창성 지반에서는 강재 동바리에 수축이음을 설치하고 뿔어붙임 콘크리트에 수축 이음을 설치하는 경우도 있다. 이는 터널의 변형을 어느 정도 허용함으로서 큰 토압을 경감시켜 동바리 전체의 파괴를 방지하려는 것이다. 그러나 적절한 수축량 및 수축 눈금의 폐합시기의 결정이 곤란하기 때문에 적용에는 충분한 검토가 필요하다.

(a) 상단부의 이음

(b) 상반부와 하반부와의 이음

(c) 인버트 스트럿과의 이음

그림-5.27 H형강 동바리의 각종 이음 예

(a) 정점부의 이음

(b) 상반부와 하반부와의 이음(이음판)

그림-5.28 U형강 동바리의 겹침이음 예(단위: mm)

마. 강재 동바리의 연결

강재 동바리는 설치후 뿔어붙임 콘크리트에 의하여 고정될 때까지 전도를 방지하기 위하여 적당한 연결재를 설치한다. 뿔어붙임 콘크리트의 시공시 연결재 내면에 공극이 생기지 않도록 뿔어붙임 콘크리트의 투입을 조심스럽게 한다. 강재 동바리의 설치 후 즉시 뿔어붙임 콘크리트를 시공하는 경우는 연결을 생략하기도 한다.

그림-5.29 뿔어붙임 콘크리트를 사용한 경우 이음재의 예(단위: mm)

5.5 라이닝

5.5.1 라이닝에 작용하는 하중

가. 라이닝의 기능

라이닝은 터널 내공단면과 원지반 사이 또는 지보공 사이를 충전하는 무근이나 철근콘크리트 또는 직접 원지반에 뿔어붙여진 콘크리트 등을 말하며 다음의 기능을 구비해야 한다.

① 널판공법에서는 널판 또는 동바리 등과 공동으로 토압, 수압, 기타의 외력에 대항하여 오래 동안 소정의 내공단면 형상을 유지한다.

② 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법에서는 지질의 불균일성, 동바리의 품질 미달, 록 볼트의 부식 등 불확정 요소를 고려하여 구조물로서의 안정성을 높인다.

③ 원지반의 물리적, 화학적 풍화작용을 저지 또는 경감한다.

④ 터널 내외면간에 물의 유통을 방지한다.

⑤ 터널 내면의 조도를 감소시켜 내공단면의 축소 또는 수두손실의 경감을 꾀한다.

⑥ 터널의 유지관리를 용이하게 한다.

나. 라이닝의 종류

터널의 라이닝에는 ①무근 콘크리트, ②철근 콘크리트, ③뿔어붙임 콘크리트가 사용된다. 지질조건, 시공법, 경제성, 장래의 유지관리 등을 종합 판단하여 공법을 결정하며 일반적으로 무근콘크리트가 사용된다.

다. 터널의 라이닝에 작용하는 하중

무압터널의 라이닝에 작용하는 하중은 다음 중에서 적절히 결정한다.

- ① 자중
- ② 토압
- ③ 지반반력
- ④ 외수압

지보공의 개략적인 응력계산에서는 일반적으로 토압 및 지반반력 만을 고려하지만 라이닝의 안정성 검토 및 라이닝 두께의 결정은 토압 등의 주동외력이 강대한 경우를 제외하고는 일반적으로 과거의 시공 사례 등을 근거로 하여 경험적으로 정하고 있다. 이 편람에서는 이완토압 및 작은 압출토압은 주로 지보공에 의해 지지되어 있는 것으로 보며 또한 외수위는 배수구멍에 의하여 정점부까지 저하시키는 것으로 간주해서 작성하였다. 큰 압출토압이나 팽창성 토압이 작용하여 지보공만으로는 외압을 견디지 못할 경우나 막대한 외수압의 작용을 피할 수 없는 경우는 외력의 크기, 분포를 가능한 한 측정하여 그 결과에 따라 구조의 안정성을 검토하여 철근으로 보강토록 한다.

라이닝 완료 후 과도한 정수압이 외력으로 작용할 우려가 있을 때는 아치부에 배수구멍을 설치하여 외수압의 발생을 방지한다. 현장조건상 배수구멍 설치가 불가능한 경우나 장래 배수구멍이 막힘으로 인해 기능을 충분히 발휘할 수 없을 우려가 있을 경우에는 장래 예상되는 최대 외수압을 고려하여 라이닝의 구조를 계산한다.

5.5.2 콘크리트 라이닝의 설계

라이닝의 설계는 터널의 목적과 원지반 조건 등을 고려하여 충분한 안정성과 내구성 확보 하도록 한다.

가. 널관공법의 설계 두께

(1) 설계두께

설계두께는 특별한 경우를 제외하고는 표-5.11의 값을 표준으로 한다. 이 표를 적용할 때 다음 사항에 유의한다.

- ① 무압터널일 것
- ② 무근 콘크리트 라이닝일 것
- ③ 내공단면의 형상은 원칙적으로 마제형으로 한다. 측벽수직형 단면의 경우 필요에 따라 라이닝 두께를 증가시키거나 철근으로 보강한다.
- ④ 외수위는 배수구멍 또는 배수구로 아치 크라운 이하로 저하시킨다.
- ⑤ D형은 필요에 따라 철근으로 보강한다.

또한 라이닝과 동바리의 관계는 다음과 같다.

- ① 토압을 영구구조물로서 지지하는 것은 주로 강제 동바리이며 콘크리트 라이닝은 보조 구조물이다.
- ② 토압은 강제 동바리와 콘크리트 라이닝이 각각 하중을 분담한다.
- ③ 토압에 대해 강제 동바리와 콘크리트 라이닝이 합성작용을 한다.

그러나 라이닝에 작용하는 하중은 지질, 시공조건 등에 따라 크게 다르므로 합리적인 설계 방법은 확립되어 있지 않다. 특히 큰 하중(토사 유동으로 인한 토압, 외수압, 압출, 팽창성 토압 등)이 작용하여 라이닝 두께나 철근량을 해석적인 구조계산으로 결정하는 경우를 제외하고는 시공사례 등을 참고로 하되 표준은 표-5.11과 같다.

(2) 설계 라이닝 두께선

설계 라이닝 두께선은 라이닝으로서 구조상 필요한 두께를 나타내는 것으로 터널 표준단면도에 D선으로 표시한다.(그림-3.2 참조) D선의 안쪽에 동바리의 강재가 잔류하는 것은 좋으나 라이닝의 강도를 해치는 동바리 목재나 충전 버력 등이 들어가서는 안 된다. 다만 단단한 원지반의 부분적인 돌출을 무리하게 고르면 원지반을 이완시켜 하중의 증가를 초래하거나 여굴량을 많게 하여 비경제적이 되므로 허용량을 정하여 D선 내측에 들어가는 것을 인정한다. 설계 라이닝 두께와 동바리의 위치 관계는 그림-5.30과 같다.

끼움널의 경우 동바리 강재는 설계라이닝 두께선 내에 들어도 좋으나 목재로 된 버팀보는 라이닝 시공 전에 반드시 제거한다. 버팀보를 제거하는 것이 위험한 경우에는 이에 대신하여 강관 등을 사용한다. 또한 동바리의 설치오차나 발과 및 토압으로 인한 변형에 대해서도 설계 라이닝 두께가 확보되도록 적절하게 설계한다. 이를 위하여 설계 라이닝 두께선의 위치는 동바리 강재의 외측선이 되지만 시공 때는 이보다 외측에 설치한다.

표-5.11 널판공법의 설계 라이닝 두께 및 지불선의 표준(cm)

형 식	구 분	설계라이닝 두께	굴착지불선	콘크리트지불선	비 고
A	아 치	$\frac{1}{20} Di \geq 15$	Td + 15	Td + 15	Di : 터널내공단면의 직경(cm) Td : 설계라이닝 두께 (cm) tr : 동바리 리브 두께 (cm)
	측 벽	$\frac{1}{20} Di \geq 15$	Td + 10	Td + 10	
	인버트	$\frac{1}{20} Di \geq 15$	Td + a	Td + a	
B	아 치	$\frac{1}{20} Di \geq 20$	Td + 15	Td + 10	상하단이 구분된 경우: ·상단 : 끼움널판의 경우 ·하단 : 빗끼움 및 보내기널판의 경우
	측 벽	$\frac{1}{20} Di \geq 20$	Td + 10	Td + 7	
	인버트	$\frac{1}{20} Di \geq 15$	Td + a	Td + a	
C	아 치	$\frac{1}{15} Di \geq 20$	Td + 20 Td + tr + 15	Td + 14 Td + (tr+15)×0.7	
	측 벽	$\frac{1}{15} Di \geq 20$	Td + 15	Td + 10	
	인버트	$\frac{1}{15} Di \geq 20$	Td + a	Td + a	
D ₁	아 치	$\frac{1}{12} Di \geq 20$	Td + 20 Td + tr + 15	Td + 14 Td + (tr+15)×0.7	
	측 벽	$\frac{1}{12} Di \geq 20$	Td + 15	Td + 10	
	인버트	$\frac{1}{15} Di \geq 20$	Td + a	Td + a	
D ₂	아 치	$\frac{1}{12} Di \geq 25$	Td + 20 Td + tr + 15	Td + 14 Td + (tr+15)×0.7	
	측 벽	$\frac{1}{12} Di \geq 25$	Td + 15	Td + 10	
	인버트	$\frac{1}{12} Di \geq 25$	Td + a	Td + a	

- 주) (1) 본 표의 치수는 콘크리트 라이닝 내면으로부터 두께를 표시
(2) 인버트의 설계 라이닝 최소 두께는 토압이 작용하는 경우 측벽부와 같이 한다.
(3) 굴착 및 콘크리트 지불선은 정부의 킥업을 고려한 평균치임
(4) 지불선은 현장여건에 따라 적절히 가감할 수 있다.
(5) a : 인버트에는 통상 여굴량을 계상하지 아니하나 수로터널 등 단면이 적은 경우에는 5cm 이내에서 현장여건에 따라 적용할 수 있다.

빚끼움널공법 및 보내기널공법의 경우 널판은 동바리 강재의 외측선보다 안쪽으로 들어오게 되어 설계 라이닝 두께선의 위치는 동바리 강재의 내측선이 되며 시공할 때는 끼움 널공법의 경우와 같은 이유에서 그보다 외측에 설치한다.

(a) 끼움 널 공법

(b) 빚끼움 및 보내기 널공법

그림-5.30 설계 라이닝 두께선과 동바리의 위치

(3) 최소 라이닝 두께

최소 라이닝 두께는 $\frac{1}{30} \cdot D_i$ 를 적용하지만 10cm를 최소로 한다. 이 때 D_i 는 터널내공 단면의 직경으로 최소라이닝 두께는 터널 표준단면도에 A선으로 명시한다(그림-3.2 참조).

빚끼움널공법을 제외하고는 일반적으로 터널 굴착면은 울퉁불퉁하게 된다. 이 경우 콘크리트 라이닝에 악영향을 주지 않는 단단한 원지반이 설계 라이닝 두께 내에 드는 것을 허용하였으나 이것을 무제한으로 허용하는 것은 문제가 있다. 또한 라이닝 내면과 강재 동바리 내면사이의 거리(강재 동바리의 피복)가 너무 적게 되면 전단 등에 의한 악영향을 받을 수 있으므로 최소 두께를 확보하도록 한다. 최소 라이닝 두께 안에는 어떠한 것도 잔류해서는 안된다. 다만 철근콘크리트 라이닝의 경우에는 필요한 철근의 피복이 확보되면 최소 라이닝 두께 안에 철근이 들어가는 것을 허용하여도 좋다. 강재 동바리는 설치오차와 설치후의 토압이나 발파 등에 의한 변화에 대해서도 소정의 최소 라이닝 두께가 확보되도록 적절한 설계 시공을 한다.

(4) 지불선

굴착 및 콘크리트 라이닝의 지불선은 표-5.11의 식을 기준하되 원지반 조건 및 시공법 등을 고려하여 적절히 가감한다.

① 굴착 지불선

굴착 지불선은 설계라이닝 두께를 확보하기 위하여 동바리 두께나 여굴 두께를 예상하여 결정한다. 여굴 두께가 많아지면 버력 반출이나 라이닝의 비용이 많아질 뿐 아니라 토압이 증대하여 구조적으로도 불리하게되므로 가능한 한 여굴이 적게 되도록 시공한다.

여굴 두께는 암질의 단단한 정도, 균열상황 등 원지반의 조건과 굴착공법이나 천공수, 천공 길이 등의 시공조건에 따라 다르다. 일반적으로 응회암, 편암, 점판암 등은 여굴이 적고 화강암계통은 여굴이 많으며 사암, 혈암, 역암 등은 그 중간이 된다. 시공면에서는 단위면적당 천공수를 적게 할수록, 1회 발파의 천공길이가 길수록 여굴이 많아진다.

② 콘크리트 라이닝 지불선

콘크리트 라이닝 지불선은 실제로 콘크리트가 충전되는 범위를 나타낸 것으로 동바리형식이나 여굴량 등에 따라 다르다. 라이닝 뒷면에 공극이 남으면 주동토압을 균등하게 분포시키는 것이나 수동토압을 유효하게 작용시키는 것을 기대하기 어려우며 라이닝 변형의 원인이 되기도 한다. 또한 이완도 더욱 증가하여 하중을 증대시키는 원인이 된다. 따라서 여굴에는 콘크리트 또는 양질의 암석으로 될 수 있으면 공극이 남지 않도록 충진한다.

나. 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법의 라이닝 설계 두께

(1) 설계라이닝 두께

설계라이닝 두께는 특별한 경우를 제외하고는 표-5.12를 표준으로 하되 적용할 때는 다음 사항에 유의한다.

- ① 무압터널일 것
- ② 무근콘크리트 라이닝 일 것
- ③ 외수위는 배수구멍 및 배수구로 아치 정점 이하로 저하시킨다.

현저하게 원지반이 불안한 경우나 터널 갱구부근의 경우를 제외하고는 일반적으로 내공단면의 크기에 따라 설계 라이닝 두께는 15~20cm로 한다.

원지반이 열악하고 토피가 작으며 편압이 있는 등 라이닝에 큰 내력을 기대해야 하는 경우에 안이하게 라이닝 두께를 증가시키면 굴착단면이 커져서 도리어 토압의 증가를 초래한다. 또한 인장강도가 작은 무근 콘크리트는 콘크리트 라이닝 두께를 증가시켜 휨 파괴를 방지하는데 한계가 있으므로 라이닝 형상을 역학적으로 유리하게 한다거나 라이닝 재료로 철근콘크리트, 강섬유 보강콘크리트 등을 사용하여 휨강도의 증가를 검토한다.

(2) 설계 라이닝 두께선

설계 라이닝 두께선의 내측에는 라이닝의 기능을 해칠 수 있는 것이 들어가서는 안되며 터널 표준단면도에는 D선으로 표시한다. 뿔어붙임 콘크리트의 동바리는 뿔어붙임 콘크리트의 시공오차, 토압에 의한 터널변형에 대한 여유를 감안하여 설계 라이닝 두께가 확보되도록 한다. 단 보통암, 경암의 원지반에 뿔어붙임 콘크리트나 단단한 원지반의 부분적인 돌출을 무리하게 고르게 되면 동바리기능을 손상시켜 원지반을 파손하여 하중을 증대시키는 등, 악영향을 줄 뿐 아니라 여굴량이 두드러지게 증가하여 비경제적인 경우가 있으므로 조건부로 설계 라이닝 두께선 내에 드는 것을 인정하여도 좋다.

(3) 최소라이닝 두께선

널판공법에 준한다.

(4) 지불선

- ① 굴착 지불선 : 널판공법에 준한다.
- ② 콘크리트 라이닝 지불선 : 뿔어붙임 콘크리트 면에는 굴곡이 있으며 변형여유를 계상하는 경우가 있으므로 라이닝 두께에 적당한 여유를 가산하여 지불선으로 한다.

표-5.12 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법에서의 설계 라이닝 두께의 표준

터널의 내공단면 직경(m)	설 계 두 께(cm)			
	아 치, 측 벽		인 버 트	
	A,B형식	C,D형식	A,B형식	C,D형식
3.0미만	15	15	15	20(15)
3.0이상	20	20	20	25(20)

- 주) (1) C,D형에서 인버트에 뿔어붙임 콘크리트를 시공한 경우와 히빙이 없는 경우는 인버트의 설계 라이닝 두께를 ()와 같이 아치·측벽부와 같게 한다.
 (2) 본표의 치수는 콘크리트 라이닝 내면으로부터의 두께이다.

다. 라이닝 콘크리트의 품질

콘크리트 라이닝은 특별한 조건 이외는 무근콘크리트로 한다.

콘크리트의 품질은 내마모성, 내구성 및 수밀성 등을 고려하여 결정한다. 콘크리트의 설계 기준 강도는 무근콘크리트의 경우 160kgf/cm²이상으로 하며 철근콘크리트는 240kgf/cm² 이상으로 하며 사용재료 및 배합에 대한 것은 건설교통부 제정의 콘크리트 표준시방서에 준한다.

라. 갱구부의 설계

(1) 철근 콘크리트 구간

지형·지질상황을 고려하여 결정하지만 일반적으로 다음의 조건일 경우는 철근 콘크리트 구조로 한다.

- ① 터널 갱구부 및 계곡부의 풍화암 및 애추지대로서 토피가 작을 경우
- ② 토사터널로서 토압이 크게 작용하는 경우
- ③ 지질상황이 양호한 경우라도 「3.6 최소 토피두께」에 규정하는 두께보다도 토피가 작은 구간(그림-5.31 참조)
- ④ 단층파쇄대로 토압이 크게 작용하는 경우
- ⑤ 외수압이 크게 작용하는 경우

그림-5.31 철근보강 구간

(2) 철근 콘크리트 구조의 설계

철근 콘크리트 구간의 구조는 최대로 4.0m의 수직하중을 받는 암거로 설계하며 설계 라이닝 두께는 최소 25cm이다.

라이닝 콘크리트는 아치·측벽부를 먼저 타설하는 수가 많으므로 철근의 고정방법이나 조립된 콘크리트 속의 철근으로 인하여 분리하기 쉬운 것 등을 고려하여 철근의 간격은 가능한 한 넓게 하는 것이 바람직하다. 용출수가 많은 경우에는 방수공을 고려하여 양질의 콘크리트가 타설되도록 배려한다.

철근콘크리트의 구조계산은 표-5.13~표-5.18의 계수표를 사용하며 휨모멘트(M), 축력(N), 전단력(S)을 구하여 시행한다. 계수표의 단면형과 다른 경우에는 탄성중심법이나 유한요소법으로 M, N, S를 구하는 것이 바람직하나 일반적으로 근사단면의 계수표를 사용하여도 무방하다.

표-5.13~표-5.18은 빔 부재에 의한 유한요소법으로 구하였다. 마제형 및 측벽수직형의 경우 부재단면의 분할을 아치부는 반경반향, 측벽부는 수평방향, 인버트부는 수직방향으로 하였다. 또한 마제형 및 측벽수직형의 경우(각 하중의 작용선은 그림-5.32 참조) 자중 및 충만수로 인한 정수압은 인버트부의 지반반력이 절점 5~7사이에서 작용하는 것으로 하였다. 직각 절점인 절점 5의 N와 S에 대해서는 부재 4, 5로부터 구한 치수와 5, 6에서 구한 치수가 크게 다르므로 양자를 병기하였다.

실제의 계산은 표에서 식(예를 들면 표준마제형의 등분포 수직하중에 의한 N에서는 Pr에 상당)의 값을 구하고, 이에 표로부터 얻은 계수를 곱하면 된다. 하중의 조합은 구조물부재에 최대 응력이 생기는 경우도 고려한다.

(a) 부재단면의 힘을 구하는 단면의 방향 및 절점위치

(b) 등분포 수평하중

(c) 등분포 수직하중

(d) 3각형 수평하중

(e) 층만수에 의한 정수압

그림-5.32 표준마제형의 경우 계수표의 하중분포 상태(다른 단면의 경우도 이에 준함)

마. 이 음

이음에는 시공이음, 수축이음, 신축이음이 있으며 표준적인 구조 및 위치는 다음과 같다.

(1) 시공이음

시공이음 위치의 표준은 표-5.19 및 그림 5-33과 같다.

표-5.19 시공이음의 위치

내공단면형상	3r 측벽수직형 (2r-V-3r)	표준마제형(2r 마제형) (2r-2r-2r)					
		2.0	2.1	2.2	2.3 ~ 2.4	2.5 ~ 3.0	3.1 ~ 4.0
터널내공직경(m)	1.8 ~ 2.2						
H(mm)	150	70	110	150	160	200	250

그림-5.33 시공이음의 위치

(2) 수축이음

콘크리트 고유의 성질인 건조에 의한 수축 및 온도변화로 인한 신축 또는 터널의 종단적인 하중변화에 의한 전단응력 등에 의한 균열이 발생하게 된다. 이 균열을 방지하고 일정한 위치에 집중시킬 목적으로 횡단 수축이음을 일정 간격으로 설치한다. 수축이음의 위치, 구조에 대한 표준은 다음과 같다.

① 아치, 측벽부

횡단방향의 시공이음을 수축이음으로 한다. 이 간격은 6.0 ~ 12.0m로 한다.

② 인버트

아치, 측벽부와 동일 위치로 하고 갱구에서 500m이내의 구간은 최대 간격 12m로 하며, 500m이상의 구간은 아치·측벽부와 동일 위치로 하되 최대 간격 24m로 한다.

③ 수축이음의 구조

구조는 그림-5.34를 참고로 하며 아래와 같이 적용한다.

- I 형 : 지하수위보다 낮게 위치한 터널에서 누수가 염려되는 경우에 라이닝의 전단면에 적용한다.
- II 형 : 누수의 염려가 적고 설계 라이닝 두께가 35cm 이상의 아치, 측벽부에 적용한다.
- III 형 : 누수의 염려가 적고 설계 라이닝 두께가 35cm 미만의 아치, 측벽부에 적용한다.
또한 인버트 타설 경계인 시공이음에도 적용한다.
- IV 형 : 인버트를 연속타설하는 경우에 적용한다.
- V 형 : 측벽부를 12m이상 연장하여 타설하는 경우에 적용한다.

I 형

II 형($t_d \geq 35\text{cm}$)

III 형($t_d < 35\text{cm}$)

IV 형(맹줄눈, 인버트용)

V 형(맹줄눈, 아치·측벽부용)

그림-5.34 수축이음의 구조

(3) 신축이음

신축이음은 갱구와 개수로 등과의 접합부에 설치하며 지중의 터널부에는 설치하지 않는다.
위치와 구조는 그림-5.35 및 그림-5.36을 참조한다.

그림-5.35 수축이음·신축이음의 위치도

그림-5.36 신축이음의 구조

바. 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법에서의 콘크리트 라이닝의 균열대책

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법에서는 과도한 하중이 작용하는 경우 변위에 따른 균열과는 별도로 콘크리트의 수축변형이 뿔어붙임 콘크리트에 의하여 외부 구속되기 때문에 균열이 발생하기 쉽다.

콘크리트에 수축변형이 발생하는 주요 요인은 다음과 같다.

- ① 콘크리트의 경화온도 저하로 인한 온도수축
- ② 터널내 온도의 저하로 인한 온도수축
- ③ 터널내 습도의 저하로 인한 건조수축

이들 요인에 의한 균열은 라이닝의 강도를 저하시킬 뿐 아니라 콘크리트의 수밀성을 현저하게 저하시켜 라이닝의 내구성, 안전성 등을 해치게 된다. 따라서 이와 같은 현상이 우려되는 경우 터널의 사용목적, 사용조건, 환경조건 등을 고려하여 적절한 균열방지대책을 검토한다. 특히 용출수가 많은 구간이나 외기의 영향을 받기 쉬운 갱구 부근과 연장이 짧은 터널 등에 대해서는 충분한 검토가 필요하다. 균열방지 대책은 다음과 같다.

- ① 뿔어붙임 콘크리트와의 절연 (외부구속의 저감)
- ② 콘크리트의 품질개량 (수축변형의 감소 및 인장강도의 증가)
- ③ 균열을 유도 발생시키는 줄눈의 설치 (균열발생의 억제)

이들 가운데 가장 효과적이고 확실한 방법은 뿔어붙임 콘크리트와의 절연이다. 절연공은 방수시트, 발포 모르타 등 절연재를 뿔어붙임 콘크리트공법으로 시공하는 수도 있다.

콘크리트의 품질개량방법으로는 팽창제, 유동화제의 첨가나 철망의 설치 등이 있으나 확실성이 결여되므로 사용할 때는 충분한 검토가 필요하다.

균열의 발생위치, 방향을 억제하기 위해 균열을 유도 발생시키는 줄눈도 품질개량과 같이 확실성이 결여된다. 또한 균열을 발생시키는 유발 줄눈으로부터 용출수가 문제될 우려가 있는 경우에는 라이닝 배면에 방수시트 등의 설치를 검토한다.

5.5.3 뿔어붙임 콘크리트에 의한 라이닝

뿔어붙임 콘크리트에 의한 라이닝은 원지반이 단단한 암반으로 장래에도 물리적 및 화학적 풍화작용에 견딜 수 있다고 예상되는 경우에 사용이 가능하다.

가. 뿔어붙임 콘크리트에 의한 라이닝

널판공법이나 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법의 경우 A형에 주로 사용되는 뿔어붙임 콘크리트에 의한 라이닝을 채용하는 조건으로는 다음 조건이 만족되어야 한다.

- ① 주변 원지반의 탄성과 속도가 4.5km/sec이상, 암의 일축압축강도가 1,000kgf/cm²이상 되고 구간이 길 것
- ② 터널 완공 후 점검이 용이하여 지반탈락, 붕괴 등이 발생할 때 보수공사가 가능할 것
- ③ 조도계수가 크더라도 계획수량의 통수가 가능할 것

또한 뿔어붙임 콘크리트에 의한 라이닝의 두께는 터널 내공단면의 직경이 3.0m미만은 5cm, 3.0m이상은 7cm정도로 한다. 다만 인버트는 시공성 및 경제성 때문에 일반적으로 무근 콘크리트로 시공한다. B, C, D형은 원칙적으로 무근 콘크리트 또는 철근 콘크리트 라이닝으로 한다.

나. 뿔어붙임 콘크리트의 배합

「5.4.3 뿔어붙임 콘크리트」에 준한다.

다. 뿔어붙임 콘크리트의 보강

뿔어붙임 콘크리트의 인장강도의 보강을 위해서는 철망이나 강섬유로 보강을 한다.

5.6 그라우팅

라이닝 배면과 원지반 사이의 공극을 충전하기 위하여 원칙적으로 그라우팅을 시공한다. 널판공법은 아무리 주의 깊게 시공을 하더라도 라이닝 배면과 원지반과의 사이에 공극이 생긴다. 특히 동바리의 널판은 원지반과 라이닝의 밀착을 방해하여 토압을 균등하게 분포시키거나 지반반력을 유효하게 작용시키는데 장애를 준다. 따라서 지질이 양호한 경우를 제외하고 모르타 등의 주입재로 공극을 충전할 필요가 있다.

공극의 충전은 이완 진행으로 인한 하중의 증가를 막는 효과도 있다. 무압터널에서는 일반적으로 저압충전 그라우팅을 시공한다.

5.6.1 저압충전 그라우팅의 기능

저압충전 그라우팅는 다음과 같은 기능을 가지고 있다.

- ① 토압을 균등하게 분포시켜 편압의 발생을 방지한다.
- ② 원지반의 반력을 유효하게 작용시킨다. 이 기능은 원지반과 동바리 리브사이에 타입된

썩기 또는 나무 널판이 썩은 후라도 계속된다.

- ③ 부분적으로 생기는 아치부 콘크리트의 공극에 침투, 고결·강화하여 라이닝의 질적 향상을 도모한다.

5.6.2 시공구간

저압충전 그라우팅은 라이닝과 원지반간의 공극을 방지하면 원지반의 이완이 증대하여 라이닝에 편압이 작용할 우려가 있는 구간에서 시공된다. 따라서 단단한 암반에서는 생략하는 수가 많다. 그라우팅 구간이 시공하지 않는 구간 사이에 끼어 있는 경우에는 그 구간의 시점, 종점의 원지반과 콘크리트 라이닝의 공극으로부터 모르터가 유출하지 않도록 시공 전에 충분히 밀폐하도록 주의를 기울인다. 또한 사질토로 용출수가 많아서 압기공법이나 웰포인트 공법을 채용하는 경우에는 공극이 충분히 채워지므로 특별히 지수가 목적이 아닌 경우에는 생략할 수 있다.

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트 공법의 경우는 뿔어붙임 콘크리트와 원지반은 밀착되어 있으므로 일반적으로 저압충전 그라우팅을 한다.

그림-5.37 뒷채움 그라우트공의 위치

- (주)① 콘크리트 타설시에 매입하는 경우에는 중심선에서 $\alpha=10^\circ$ 정도의 위치②에 갈지자형으로 설치하는 것을, 타설후에 천공하는 경우는 중심선상 ①에 설치하는 것을 기준으로 한다.
공경 $\phi 50\text{mm}$ 정도이며 공 간격은 4~6m가 표준이다.
- ② 터널 내공단면이 클 때에도 $\alpha=20^\circ$ 이내의 장소 ②에 갈지자형으로, 그렇지 않으면 양측에 그라우트공을 설치한다.

5.6.3 주입압력 및 강도

저압충전 그라우팅 주입압력의 표준은 2kgf/cm^2 이다. 강도는 고결후 10kgf/cm^2 정도이면 충분하다.

5.6.4 그라우트 재료

일반적으로 벤토나이트 혼입 모르터 및 에어 모르터가 사용된다. 주입 작업이 용이하고 분리나 고형물의 침전 등이 없으며 주입후 체적의 수축이 적고 빠르게 고결하는 종류의 것으로 지질상황과 용출수상황을 고려하여 선정한다.

5.7 배수공

무압터널은 라이닝 완성후 과도한 정수압의 작용을 방지하기 위하여 원칙적으로 아치부에 배수구멍을, 인버트 중앙 하부에는 배수구를 설치한다.

5.7.1 배수구멍

터널은 인버트 콘크리트 타설후 점차 외측의 지하수위가 상승되어 라이닝에 과도한 정수압이 작용함으로써 균열이 발생한다거나 변위의 우려가 있다. 이러한 경우에는 정수압을 완화시키기 위하여 아치부에 배수공을 설치한다. 배수공의 설계 표준은 터널정부로부터 좌우 30°위치에 공의 직경 450mm, 공의 간격 5m로 배치하는 것이며 그림-5.38과 같이 설치한다.

토사 터널에는 필터를 부설하여 토사 등의 유출을 방지한다.

그림-5.38 배수구멍의 위치

5.7.2 배수구

시공중의 용출수 처리를 위하여 설치한 배수구에 필터재를 충전하거나 덮개를 하여 배수구를 설치하며 다음과 같은 종류가 있다. 이들 형식은 지질이나 용출수량을 검토한 후에 선정한다. 배수구에는 필요에 따라 집수조를 설치한다.

- ① 막파기(무동바리 굴착) 또는 U자구 속에 필터재료를 충전하는 것
- ② 막파기 후에 유공파이프를 넣고 필터재료를 충전하는 것
- ③ U자구에 덮개를 하는 것

(1) 필터재료의 충전

(2) 파이프 필터재료 충전
(용출수가 많은 구간 또는 유출밸브 부근)

(3) 덮개를 한 U자구

그림-5.39 배수구의 형식

5.8 부대공

터널에는 원칙적으로 배수시설, 안전시설, 갱문공, 비탈면 보호공, 기타 유지관리에 필요한 시설을 설치한다.

5.8.1 배수시설

유지관리를 위하여 단수 후 수로내의 물을 배제할 필요가 있는 경우에는 필요에 따라 다음과 같이 배수용의 집수조 및 배수구를 터널 출구부에 설치한다.

- ① 집수조는 터널 인버트가 부근의 지반보다 낮아서 고인 물이 터널 밖으로 자연배수가 되지 않는 경우에 암거부 종점부근에 설치한다.
- ② 배수구는 터널 인버트가 부근의 지반보다 높아 바닥의 물을 단거리에서 자연배수가 가능한 경우에 설치한다.

5.8.2 안전시설

터널 출입구에는 유지관리상 안전을 위하여 사다리, 난간, 가드 레일, 울타리 등의 안전시설을 설치한다.

5.8.3 갱문공

폐쇄 완화공의 관리 보호, 통로역할의 소단 폭의 유지, 난간의 기초, 기타 용도를 위하여 갱문공으로 출입구에 면벽을 설치한다. 벽의 높이는 폐쇄 완화공의 내측 상단에서 1.5m 정도로 한다.

5.8.4 비탈면 보호공과 배수대책

터널 갱구 주변의 절토 비탈면에 비탈면 보호공을 설치한다. 터널 갱구 주변은 호우에 의한 재해를 받기 쉬우므로 배수시설의 완비와 비탈면의 안정이 필요하다. 또한 갱구로 지표수가 유입하지 못하도록 사면부 배수구, 사면부 소단 등을 설치한다.

제 6 장 압 력 터 널

6.1 일반사항

압력터널은 내수압과 외압 등에 안전하고 수밀성 및 내구성에 뛰어난 구조이어야 한다.

이 장에서는 압력 터널이라는 특별한 사항에 한정하여 기술하였으므로 기타 사항에 대한 것은 다른 장을 참고한다. 압력터널의 굴착에 대해서는 무압터널과 같으므로 지질조건과 지보공의 종류 등은 무압터널의 경우와 동일하게 취급한다.

압력터널은 라이닝의 종류에 따라서 다음과 같이 분류한다.

6.1.1 콘크리트 라이닝 방식

무근 또는 철근 콘크리트로 라이닝을 하는 방식으로 원지반 조건이 양호한 경우나 내수압이 작은 경우에 적합하다.

6.1.2 내장관 방식

터널 내에 공장제품의 관을 설치하고 그 외측은 모르타 등으로 충전하는 방식으로 원지반의 조건이 좋지 않은 경우나 내수압이 큰 경우 등에 적합하다.

그림-6.1 압력터널의 분류

6.1.3 노선 선정 및 선형 결정

압력터널의 노선 선정 및 선형 결정은 「3.1 노선 계획」에 준하되 다음 사항에 유의한다.

① 압력터널은 수리적 특성이 무압터널과 달라서 터널의 높이를 어느 정도의 범위 내에서 자유롭게 선택할 수 있는 경우가 많다. 따라서 무압터널과 비교하여 노선선정의 범위도 넓어지므로 지형·지질조건이나 수리조건 등을 고려하여 장점을 유효하게 살릴 수 있도록 계획한다.

단, 기울기의 방향은 원칙적으로 동일 방향으로 한다.

② 터널 출입구 부분에 계획하는 환기시설, 보호시설 및 관리시설(제수변이나 맨홀) 등도 충분히 검토를 한다.

6.1.4 터널 내공단면의 형상

압력터널의 내공단면 형상은 원칙적으로 원형이지만 내·외수압이 비교적 작은 경우에는 표준마제형을 선정하여도 된다. 내수압을 받는 압력터널의 라이닝에 발생하는 인장응력은 표준마제형 단면의 측벽과 인버트 접합부에 있어서 원형단면의 약 2배 정도 되는 것으로 알려지고 있다. 따라서 내수압이 큰 터널은 원형단면으로 하는 것이 유리하다. 그러나 굴착, 라이닝 등 시공측면에서는 원형단면과 비교하여 마제형단면이 일반적으로 유리하므로 내수압 1kgf/cm² 미만의 경우는 외수압 등을 고려하여 표준마제형 단면을 선정하여도 된다.

6.1.5 최소 토피두께

내수압의 일부를 원지반에 분담시키는 경우 필요한 최소 토피두께는 터널 상부 연직선상의 원지반의 수중중량이 전체 내수압보다 커야하므로 다음 식이 성립된다.

$$\frac{H_r (\gamma_r - 1)}{H_p} \geq 1 \quad \text{----- (6.1)}$$

$$\frac{H_r}{H_p} \geq \frac{1}{\gamma_r - 1} = C_r \quad \text{----- (6.2)}$$

$$H_r \geq C_r \cdot H_p \quad \text{----- (6.3)}$$

- 여기서, H_r : 원지반의 최소 토피두께(m)
- H_p : 전내수압의 수두높이 (m)
- C_r : 원지반의 최소토피 비 (cover ratio)
- γ_r : 원지반의 단위중량(tf/m³)

갱구 및 계곡부 등에서 최소 토피두께의 확보가 불가능하면 철근 콘크리트 라이닝 또는 내장관 방식을 검토한다.

6.1.6 터널 시공법의 선택

시공법은 터널의 단면 규모, 원지반 조건, 내수압의 규모 등을 고려하여 선정한다. 원지반에 내수압의 일부를 분담시키지 않는 경우에는 무압터널과 같은 개념으로 지보공을 선정하여도 지장은 없으나 원지반에 내수압의 일부를 분담시킬 경우에는 토압을 균등하게 분포시키고 지반의 반력을 유효하게 작용시키는 등의 신뢰성을 높이기 위해 원지반과 라이닝과의 사이에 공극을 남기지 않는 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트 공법을 선정하는 것이 바람직하다.

6.2 압력터널에 작용하는 하중

압력터널의 지보공에 작용하는 하중은 무압터널의 경우에 준하며 라이닝에 작용하는 하중은 내수압, 외수압 및 그라우트 주입압 중에서 적절히 결정한다.

6.2.1 하중의 종류

압력터널의 라이닝에 작용하는 하중은 자중, 토압, 내수압, 외수압 및 그라우트 주입압 등이 있다. 자중은 다른 하중에 비하여 작아서 특별한 경우 외에는 설계에서 무시하여도 좋다. 토압은 지보공으로 지지하는 것이 원칙이므로 라이닝에 작용하는 하중으로는 무시하여도 좋다. 다만 강한 압출성 토압 등이 있는 경우에는 별도로 고려한다.

따라서 라이닝의 설계에는 내수압, 외수압 및 그라우트 주입압을 주로 고려한다.

가. 내수압

터널 중심에서의 압력수두로부터 구하는 정수압과 수격압을 합하여 설계내수압으로 한다.

나. 외수압

인버트 아래에서 지하수위까지의 수두를 설계 외수압으로 한다. 지하수위는 터널의 굴착시 일시적으로 저하할 수도 있으나 원칙적으로는 터널 굴착이전의 지하수위를 기준으로 외수압을 결정한다.

다. 그라우트 주입압

그라우트 주입압은 최대 주입압력을 설계 그라우트 주입압으로 한다.

6.2.2 하중의 조합

상기의 하중이 라이닝에 동시에 작용하는 경우와 동시에 작용하지 않는 경우가 있으므로 구조설계에서는 각각의 지형, 지질조건을 감안하여 부재에 최대응력이 발생하는 경우의 하중조합을 결정한다.

가. 원형 단면

① 원형단면의 경우 외수압은 내수압에 대하여 상쇄효과가 있으나 외수위의 복원에 대해서는 불확실한 요소가 있으므로 안전상 외수압과 내수압은 동시에 작용하지 않는 것으로 한다.

② 일반적으로 라이닝 완료 후 외수위가 복원하는데는 상당한 기간을 요하기 때문에 라이닝 직후에 시행하는 그라우트 주입시에 강대한 외수압이 작용한다는 것은 고려할 수 없다. 따라서 외수위와 그라우트 주입압과는 동시에 작용하지 않는 것으로 한다.

표-6.1 터널의 라이닝에 작용하는 하중조합

사례 \ 단면형	원 형 단 면			마 제 형 단 면		
	사례 1	사례 2	사례 3	사례 1	사례 2	사례 3
하중						
내 수 압	○			○	○	
외 수 압		○			○	○
그라우트 주입압			○			

(주) 각각의 단면에 대하여 사례 1~3 의 3가지 경우를 검토한다

나. 마제형단면

① 마제형 단면은 비교적 내외수압이 작은 경우에 선정하는 것으로 일반적으로 고압 그라우팅을 할 필요가 없다. 따라서 그라우트 주입압은 고려하지 않는다.

② 마제형 단면의 인버트부에는 외수압에 의한 인장응력과 내수압에 의한 인장응력이 가산되므로 내외수압이 동시에 작용하는 경우의 검토가 필요하다.

6.3 압력터널의 라이닝

압력터널의 라이닝구조는 하중조건을 감안하여 부재에 발생하는 최대 응력에 따라 적절히 설계한다.

6.3.1 일반사항

라이닝 두께와 철근배치의 구조설계는 구조의 안정을 위하여 가장 위험한 상태의 것을 적용한다. 구조설계시에는 내수압과 외수압 및 그라우트 주입압에 따라 라이닝에 발생하는 응력의 종류, 크기 및 위치가 다른 것에 주의해야 한다.

가. 설계라이닝 두께

압력터널의 라이닝 두께는 표-6.2를 표준으로 하되 특별한 경우에는 별도로 고려한다.

표-6.2 압력터널 라이닝의 설계두께(cm)

구 분	설 계	비 고
무근 콘크리트	$D_i/10$, 단 최소 20cm	D_i : 터널 내공단면의 직경
단철근 콘크리트	$D_i/10$, 단 최소 25cm	
복철근 콘크리트	$D_i/10$, 단 최소 30cm	

(주) 압력터널의 설계 라이닝두께는 다음과 같이 정의한다.

- ① 무근 콘크리트의 경우 : 무압터널과 같이 취급한다. 즉 끼움널 공법의 경우는 동바리 리브 배면선, 빗끼움널 공법은 동바리 리브 내면선을 설계라이닝 두께선으로 한다.
- ② 단철근 콘크리트 및 복철근 콘크리트의 경우 : 지보공 공법에 관계없이 동바리리브 내면선을 설계 라이닝 두께선으로 한다.(무압터널의 A선)

나. 지불선

굴착 지불선 및 콘크리트 라이닝 지불선에 대한 것은 무압터널에 준한다.

다. 암반의 탄성계수

각종 구조계산에 사용하는 암반의 탄성계수(정탄성계수)는 갱내의 잭 시험 또는 수압시험에 의하여 구하는 것이 바람직하나 일반적으로 표-6.3을 사용한다.

표-6.3 암반(원지반)의 정탄성계수의 표준 값

$V_p \backslash \gamma_r$	1.75	2.0	2.25	2.5	2.75
5.5	49,000	56,000	63,000	69,000	76,000
5.0	40,000	46,000	52,000	57,000	63,000
4.5	33,000	37,000	42,000	46,000	51,000
4.0	26,000	29,000	33,000	37,000	40,000
3.5	20,000	23,000	25,000	28,000	31,000
3.0	14,000	17,000	19,000	21,000	23,000
2.5	10,000	12,000	13,000	14,000	16,000
2.0	6,400	7,300	8,300	9,200	10,100
1.5	3,600	4,100	4,600	5,200	5,700
1.0	1,600	1,800	2,100	2,300	2,500
0.5	400	400	520	570	630
0.3	140	170	190	210	230

(주) 탄성계수의 계산식은 다음과 같다.

$$E_D = 10^7 \cdot \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(g)(1 - \nu)} \cdot \gamma_r \cdot V_p^2$$

$$E_S = \frac{1}{10} \cdot E_D$$

여기서, V_p : 탄성파속도(중파) (km/s)

γ_r : 암반의 단위중량(tf/m³)

E_D : 암반의 동탄성계수(kgf/cm²)

E_S : 암반의 정탄성계수(kgf/cm²)

ν : 암반의 푸아송 비(0.2 ~ 0.5, 일반적으로 0.3 정도)

g : 중력가속도(m/s²)

라. 허용응력

구조설계에서 재료의 허용응력은 다음과 같다.

(1) 콘크리트의 허용응력

콘크리트의 허용응력은 표 6-4, 6-5를 기준으로 한다.

표-6.4 무근 콘크리트의 허용응력 (kgf/cm²)

설계기준강도		160	180	210	240	비 고
허용응력						
압	축	40	45	50	55	$\sigma_{ca} \leq 0.25 \sigma_{ck}$
지	압	48	54	60	60	$\sigma'_{ca} \leq 0.30 \sigma_{ck}$

(주) σ_{ck} 는 콘크리트의 설계기준강도

표-6.5 철근 콘크리트의 허용응력 (kgf/cm²)

설계기준강도		180	210	240	
허용응력					
휨 압 축		70	80	90	
전 단	사인장철근의 계산을 안하는 경우	보의 경우	4	4.2	4.5
		슬래브의 경우 ¹⁾	8	8.5	9
	사인장철근의 계산을 하는 경우	전단력만의 경우 ²⁾	18	19	20
부 착	원 형 철 근	4	7.5	8	
	이 형 철 근	14	15	16	
지 압		54	64	72	

(주) (1) 편칭전단에 대한 값임

(2) 뒤틀림의 영향을 고려하는 경우에는 이 값을 할증할 수 있다

(2) 철근의 허용응력

철근의 허용응력은 KS D 3504에 따른다. 내수압을 받는 구조물은 수밀성을 확보하기 위하여 콘크리트의 균열을 방지할 필요가 있다. 이 때문에 철근의 허용인장력을 표-6.7과 같이 저감한다. 단, 고압 그라우팅 시행구간에서는 허용응력을 저감시키지 않는다.

표-6.6 철근의 허용인장응력 (kgf/cm²)

철근의 종류	항복강도(σ_y)	허용인장응력(σ_{sa})
SR 24	2,400	1,300
SR 30	3,000	1,500
SD 30B	3,000 ~ 4,000	1,500

표-6.7 철근의 허용응력 저감공식

철근의 종류	허용응력 저감공식	
	$\sigma_{sa} = 1,300 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_{sa} = 1,500 \text{ kgf/cm}^2$
원형단면	1,300-37H	1,500-40H
마제형단면	1,040-9.2H	1,200-10H

(주) 적용범위는 마제형단면은 $H \leq 10\text{m}$, 원형단면은 $H \leq 38\text{m}$ 로 한다.

여기서 H는 터널중심에서의 정수두(m)이다.

6.3.2 내수압에 의해 라이닝에 발생하는 응력과 철근량 계산

가. 무근 콘크리트 라이닝의 응력계산

무근 콘크리트 라이닝에 발생하는 응력을 구하기 위한 다음과 같은 가정조건이 있다.

- 원지반은 무한으로 펼쳐져 있다.
- 콘크리트 및 원지반은 균질등방성의 탄성체이다.
- 콘크리트와 원지반은 연속이다.

위와 같은 가정조건에서 탄성이론으로 콘크리트 라이닝 중에 발생하는 접선방향응력(σ_t), 반경방향응력(σ_r)을 다음 식으로 구한다.

$$\sigma_t = P_i \left\{ \frac{\lambda \left(\frac{1}{2} + \frac{C_t}{D_i} \right)^2 - \frac{1}{4}}{\frac{C_t}{D_i} \cdot \left(1 + \frac{C_t}{D_i} \right)} + \frac{1}{4 \left(\frac{r}{D_i} \right)^2} \cdot \frac{(\lambda - 1) \left(\frac{1}{2} + \frac{C_t}{D_i} \right)^2}{\frac{C_t}{D_i} \cdot \left(1 + \frac{C_t}{D_i} \right)} \right\} \quad \text{----- (6.4)}$$

$$\sigma_r = P_i \left\{ \frac{\lambda \left(\frac{1}{2} + \frac{C_t}{D_i} \right)^2 - \frac{1}{4}}{\frac{C_t}{D_i} \cdot \left(1 + \frac{C_t}{D_i} \right)} - \frac{1}{4 \left(\frac{r}{D_i} \right)^2} \cdot \frac{(\lambda - 1) \left(\frac{1}{2} + \frac{C_t}{D_i} \right)^2}{\frac{C_t}{D_i} \cdot \left(1 + \frac{C_t}{D_i} \right)} \right\} \quad \text{----- (6.5)}$$

여기서,

$$\lambda = \frac{P_c}{P_i} = \left\{ \frac{1}{2 \cdot \frac{C_t}{D_i} \cdot \left(1 + \frac{C_t}{D_i} \right)} \right\} \quad \div$$

$$\left\{ \frac{m_2' + 1}{m_2' \cdot \left(\frac{E_2'}{E_1'} \right)} + \frac{(m_1' - 1) \left(\frac{1}{2} + \frac{C_t}{D_i} \right)^2 + \frac{1}{4} (m_1' + 1)}{m_1' \cdot \frac{C_t}{D_i} \cdot \left(1 + \frac{C_t}{D_i} \right)} \right\} \quad \text{----- (6.6)}$$

여기서, P_i : 내수압

C_t : 콘크리트 라이닝 두께

D_i : 터널 내공단면의 직경

r : 터널 중심에서 콘크리트 라이닝의 응력을 구하려는 점까지의 거리
 m_1 : 콘크리트의 푸아송 수(콘크리트의 푸아송비 ν_2 의 역수) $m_1' = m_1 - 1$
 m_2 : 암반의 푸아송 수 (암반의 푸아송비 ν_2 의 역수) $m_2' = m_2 - 1$
 E_1' : 콘크리트의 탄성계수 ($E_1' = \frac{m_1^2}{m_1^2 - 1} \cdot E_1$)
 E_2' : 암반의 탄성계수 ($E_2' = \frac{m_2^2}{m_2^2 - 1} \cdot E_2$)

그림-6.2 콘크리트의 라이닝에 발생하는 응력의 개념도

식 (6.4), (6.5)에서 내수압(P_i)이 정(+)으로 주어졌을 경우 인장응력은 부(-), 압축응력은 정(+)으로 나타나며 접선방향응력(σ_t)은 인장응력시 (-), 반경방향응력(σ_r)은 압축응력시 (+)이 된다.

식 (6.4)에서 라이닝 내면($r=D_i/2$)에 발생하는 접선 방향응력(σ_t)은 다음 식으로 구한다.

$$(\sigma_t)_{D_i/2} = P_i \frac{(2\nu - 1) \left(\frac{1}{2} + \frac{C_t}{D_i} \right)^2 - \frac{1}{4}}{\frac{C_t}{D_i} \cdot \left(1 + \frac{C_t}{D_i} \right)} \quad \text{----- (6.7)}$$

무슨 콘크리트 라이닝 설계시 식 (6.7)에 의하여 라이닝 내면의 σ_t 를 구하여 이것이 콘크리트의 허용응력 이내에 들도록 C_t/D_i 를 결정하거나 콘크리트의 허용응력 이내로 억제하는 것이 불리한 경우는 철근으로 보강한다.

식 (6.7)은 계산이 복잡하므로 암반의 탄성계수(E_2)를 매개변수로 할 때 라이닝 내면에 발생하는 접선방향응력(σ_t)과 C_t/D_i 의 관계를 나타내는 그림-6.3을 이용하여 산정할 수 있다. 이 그림은 내수압이 $P_i = 1\text{kgf/cm}^2$ 의 경우이므로 임의의 내수압 P_i' 경우의 σ_t' 는 이 그림에서 얻은 값에 P_i' 에 해당하는 값을 곱해야 한다(예를 들면 $P_i' = 10\text{kgf/cm}^2$ 의 경우, $\sigma_t' = 10 \times \sigma_t$ 가 된다). 그림-6.3, 그림-6.4, 그림-6.5에 예시한대로 σ_t 는 라이닝 두께가 동일하고 내수압이 같은 조건에서는 암반의 탄성계수(E_2)가 적을수록 즉 암반이 약할수록 커지며 또한 암반의 탄성계

수가 같은 경우는 동일한 내수압에서 C_i/D_i 가 커질수록 적어지므로 설계시 이들의 관계를 충분히 고려한다. 식 (6.5)에서 라이닝에 발생하는 반경방향응력 σ_r 은 $\sigma_r \leq P_i$ 가 되며 특별한 경우 이외에는 콘크리트의 허용응력을 초과하지 않으므로 σ_r 의 검토는 생략할 수 있다.

그림-6.3 무근 콘크리트 라이닝에서의 C_i/D_i 와 내수압에 의하여 콘크리트내면에 발생하는 인장응력(σ_t)과의 관계($P_i=1\text{kgf/cm}^2$)

그림-6.4 콘크리트 라이닝에 발생하는 접선방향응력, 반경방향응력의 분포 그림-6.5 콘크리트 라이닝에 발생하는 접선방향응력, 반경방향응력의 분포

$$\left(\frac{C_t}{D_i} = \frac{1}{10}, \frac{E_2}{E_1} = 0.5 \text{의 경우} \right)$$

$$\left(\frac{C_t}{D_i} = \frac{1}{10}, \frac{E_2}{E_1} = 0.05 \text{의 경우} \right)$$

나. 철근 콘크리트 라이닝의 응력과 철근량의 계산

내수압이 커지면 콘크리트 라이닝에 발생하는 응력을 허용응력 이내로 억제하기 위해서 라이닝 두께를 크게 해야 한다. 그러나 라이닝 두께를 너무 크게 하면 경제성이 적으므로 적절한 두께로 하고 대신 철근으로 응력을 분담시킬 필요가 있다.

이 경우에 철근 콘크리트 라이닝일지라도 콘크리트에 허용인장응력 이내의 응력밖에 허용치 않는다면 철근에는 약간의 변형만이 허용될 뿐 철근에 의한 효과는 매우 작아진다. 그래서 철근 콘크리트로는 하는 경우에는 내수압으로 인해 라이닝에 균열이 발생하여 콘크리트가 인장응력을 발휘할 수 없게 되어도 라이닝이 붕괴되지 않도록 필요한 원주방향 철근량을 구해야 한다. 이를 위해서는 무근 콘크리트 압력터널의 응력 계산식을 유도할 때의 계산가정에 다음의 가정을 추가하여 계산식을 유도한다.

- 철근 콘크리트의 단면형상은 그림-6.6과 같다.
- 철근의 피복은 무시한다. (즉 $d_1 = d_2 = 0$)
- 철근은 얇은 원통으로 환산한다.
- 콘크리트에는 균열이 발생하기 때문에 접선방향 인장응력이 발생되지 않는다.

그림-6.6 철근 콘크리트 라이닝의 단면도

(1) 라이닝 내면 측에만 철근을 넣는 경우(단철근)

내수압(P_i)에 의해 철근에 발생하는 접선방향응력(σ_t)은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\sigma_t = P_i \frac{1}{2 \left(\frac{A_s}{D_i} \right)} \cdot \left[\frac{1}{1 + 4.6 E_s \left(\frac{A_s}{D_i} \right) \left\{ \frac{\log_{10} 2}{E_1'} + \frac{m_2' + 1}{2.3 m_2' \cdot E_2'} + \frac{1}{E_1'} \log \left(0.5 + \frac{C_t}{D_i} \right) \right\}} - 1 \right] \quad (6.8)$$

여기서, A_s : 철근단면적

E_s : 철근의 탄성계수이며 기타 기호는 무근 콘크리트의 계산식과 동일하다.

식 (6.8)을 암반의 탄성계수(E_s)를 매개변수로 하여 내수압 1kgf/cm^2 당 A_s/D_i 와 σ_t 의 관계로 표시하면 그림-6.7과 같이 된다. 단, $C_t/D_i=0.1$ 로 한다. (C_t/D_i 의 값이 0.1이외의 경우에도 계산결과는 거의 차가 없다)

그림-6.7 단철근의 경우에 내수압에 의하여 철근에 발생하는 인장응력 σ_t ($P_i = 1\text{kgf/cm}^2$)

(2) 라이닝에 복철근을 넣을 경우

내수압(P_i)에 의해 복철근 콘크리트 라이닝의 내측철근에 발생하는 접선방향 응력(σ_t)은 다음 식으로 구한다.

$$\sigma_t = P_i \frac{1}{2 \left(\frac{A_s}{D_i} \right)} \left[\frac{1}{1 + A_1 - B_1} - 1 \right] \quad \text{----- (6.9)}$$

$$\text{단, } A_1 = 4.6 \cdot E_s \cdot \frac{A_s}{D_i} \left\{ \frac{\log_{10} 2}{E_1'} + \frac{0.5 + \frac{C_t}{D_i}}{2.3 E_s \frac{A_s}{D_i}} + \frac{1}{E_1'} \log \left(0.5 + \frac{C_t}{D_i} \right) \right\}$$

$$B_1 = \frac{m_2' \cdot E_s' \cdot \left(1 + \frac{2C_t}{D_i} \right) \left(0.5 + \frac{C_t}{D_i} \right)}{E_s \left(\frac{A_s}{D_i} \right) (m_2' + 1) + m_2' \cdot E_2' \left(0.5 + \frac{C_t}{D_i} \right)}$$

복철근의 경우 시공성을 고려하여 일반적으로 내외양면의 철근배치를 동일하게 한다. 식 (6.9)를 암반의 탄성계수(E_2)를 파라미터로 하여 내수압 1kgf/cm²당 A_s/D_i 와 σ_t 의 관계로 표시하면 그림-6.8과 같다. 단 $C_t/D_i=0.1$ 로 한다.

그림-6.8 복철근의 경우에 내수압에 의하여 철근에 발생하는 인장응력 σ_t ($P_i = 1\text{kgf/cm}^2$)

6.3.3 외수압에 의해 라이닝에 발생하는 응력과 철근량의 계산

외수압(P_c)은 원형단면의 라이닝 원주에 연하여 등분포 하중으로 작용한다고 본다. 이 경우 라이닝에 압축응력이 발생하며 라이닝 내면의 접선방향 응력이 최대압축응력(σ_c)으로 되며 다음 식 (6.10)~(6.12)로 구한다. 각 식에서 기호는 다음과 같다.

D_i : 터널 내공 단면의 직경

C_t : 라이닝 두께

m_1 : 콘크리트의 푸아송 수(콘크리트의 푸아송비(ν_1)의 역수), $m_1' = m_1 - 1$

E_1 : 콘크리트의 탄성계수, $E_1' = \frac{m_1^2}{m_1^2 - 1} \cdot E_1$

E_s : 철근의 탄성계수

A_{s1} : 내측철근의 철근단면적

A_{s2} : 외측철근의 철근단면적

가. 무근 콘크리트 라이닝의 경우

$$\sigma_c = 2 \cdot P_e \left[\left\{ \frac{1}{2} + \left(\frac{C_t}{D_i} \right) \right\}^2 / \left\{ \left(\frac{C_t}{D_i} \right) \cdot \left(1 + \frac{C_t}{D_i} \right) \right\} \right] \quad \text{----- (6.10)}$$

나. 단철근 콘크리트라이닝의 경우 ($A_{s2} = 0$ 의 경우)

$1 + \frac{2 \cdot C_t}{D_i} = j$ 라 하면

$$\sigma_c = P_e \left(\frac{B_2}{A_2} + \frac{C_2}{D_2} \right) \quad \text{----- (6.11)}$$

$$\text{단, } A_2 = 1 + \frac{1}{2E_s' \left(\frac{A_{s1}}{D_i} \right)} \cdot \left(\frac{m_1' \cdot E_1'}{m_1' + 1} \right) - \left(\frac{m_1' - 1}{m_1' + 1} \right) \cdot \frac{1}{j^2} \cdot$$

$$\left\{ \frac{1}{2E_s' \left(\frac{A_{s1}}{D_i} \right)} \cdot \left(\frac{m_1' \cdot E_1'}{m_1' - 1} \right) - 1 \right\}$$

$$B_2 = 1 + \frac{1}{2E_s' \left(\frac{A_{s1}}{D_i} \right)} \cdot \left(\frac{m_1' \cdot E_1'}{m_1' + 1} \right)$$

$$C_2 = \frac{1}{2E_s' \left(\frac{A_{s1}}{D_i} \right)} \cdot \left(\frac{m_1' \cdot E_1'}{m_1' - 1} \right) - 1$$

$$D_2 = \frac{m_1' + 1}{m_1' - 1} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{2E_s' \left(\frac{A_{s1}}{D_i} \right)} \cdot \left(\frac{m_1' \cdot E_1'}{m_1' + 1} \right) \right\} \\ - \frac{1}{j^2} \cdot \left\{ \frac{1}{2E_s' \left(\frac{A_{s1}}{D_i} \right)} \cdot \left(\frac{m_1' \cdot E_1'}{m_1' - 1} \right) - 1 \right\}$$

다. 복철근 콘크리트 라이닝의 경우 (일반적으로 $A_{S1} = A_{S2}$ 이다.)

$$\begin{aligned}
 & 1 + \frac{2 \cdot C_t}{D_i} = j \text{ 이면,} \\
 & \sigma_c = P_e \left[\frac{C_3}{A_3 + B_3} + \frac{F_3}{D_3 + E_3} \right] \text{----- (6.12)} \\
 \text{단, } & A_3 = \left\{ \frac{j}{2E_s \cdot \left(\frac{A_{S2}}{D_i}\right)} + \left(\frac{m_1' - 1}{m_1' + 1}\right) \right\} \left\{ \frac{1}{2E_s \cdot \left(\frac{A_{S1}}{D_i}\right)} \cdot \left(\frac{m_1' \cdot E_1'}{m_1' + 1}\right) + 1 \right\} \\
 & B_3 = \frac{1}{j^2} \left\{ 1 - \frac{j}{2E_s \cdot \left(\frac{A_{S2}}{D_i}\right)} + \left(\frac{m_1' \cdot E_1'}{m_1' + 1}\right) \right\} \left\{ \frac{1}{2E_s \cdot \left(\frac{A_{S1}}{D_i}\right)} - \frac{m_1' - 1}{m_1' \cdot E_1'} \right\} \\
 & C_3 = \frac{j}{2E_s \cdot \left(\frac{A_{S2}}{D_i}\right)} \left\{ \frac{1}{2E_s \cdot \left(\frac{A_{S1}}{D_i}\right)} \cdot \left(\frac{m_1' \cdot E_1'}{m_1' + 1}\right) + 1 \right\} \\
 & D_3 = j \left\{ \frac{j}{2E_s \cdot \left(\frac{A_{S1}}{D_i}\right)} \cdot \left(\frac{m_1' \cdot E_1'}{m_1' - 1}\right) + 1 \right\} \left\{ \frac{1}{2E_s \cdot \left(\frac{A_{S1}}{D_i}\right)} + \frac{m_1' + 1}{m_1' \cdot E_1'} \right\} \\
 & E_3 = \left\{ \frac{m_1' + 1}{j m_1' \cdot E_1'} - \frac{1}{2E_s \cdot \left(\frac{A_{S2}}{D_i}\right)} \right\} \left\{ \frac{1}{2E_s \cdot \left(\frac{A_{S1}}{D_i}\right)} \cdot \left(\frac{m_1' \cdot E_1'}{m_1' - 1}\right) - 1 \right\} \\
 & F_3 = \frac{j^2}{2E_s \cdot \left(\frac{A_{S2}}{D_i}\right)} \left\{ \frac{1}{2E_s \cdot \left(\frac{A_{S1}}{D_i}\right)} \cdot \left(\frac{m_1' \cdot E_1'}{m_1' - 1}\right) - 1 \right\}
 \end{aligned}$$

식 (6.10), (6.11), (6.12)를 가지고 A_s/D_i 를 매개변수로 할 때 C_t/D_i 와 σ_c 간의 관계는 그림-6.9 및 그림-6.10과 같다.

그림-6.9 철근 콘크리트(단철근)의 경우에 C_t/D_i 와 외수압에 의하여 콘크리트 라이닝에 발생하는 압축응력(σ_c)과의 관계($P_e=1\text{kgf/cm}^2$)

그림-6.10 철근 콘크리트(복철근)의 경우에 Ct/Di 와 외수압에 의하여 콘크리트 라이닝에 발생하는 압축응력(σ_c)과의 관계($Pe=1\text{kgf/cm}^2$ 당)

6.3.4 그라우트 주입압에 의해 라이닝에 발생하는 응력과 철근량의 계산

가. 원형단면의 콘크리트 라이닝에 발생하는 응력의 계산

그라우트 주입압으로 인하여 콘크리트 라이닝에 발생하는 응력은 원통 셸(Shell)이론으로 구한다. 그림-6.11과 같이 그라우트주입 방향과 정반대 방향에서 원주방향으로 각도(ψ)를 취한다. 라이닝 배면에 시멘트풀의 주입범위와 암반반력이 작용하는 범위의 경계점에서 라이닝의 반경방향 변위 $w=0$ 이 된다. 이 경계점의 위치를 $\psi=\psi_0$ 로 하여(그림-6.11을 참고) 다음의 순서로 계산한다.

그림-6.11 콘크리트 라이닝이 원통 셸이라고 생각하는 경우의 그라우트 압력(변압)분포와 지반반력 분포도 (N_ψ, M_ψ 는 그림에 표시된 쪽으로 작용하는 것을 정(+))으로 한다.)

① ψ_0 를 다음 식으로 시산하여 구한다.

$$\left\{ \frac{3a^2}{n} - \frac{b\pi\beta}{a}(\eta-3) + a(\eta-3)(\psi_0-\pi) \right\} \cdot \sin\psi_0 \cdot \cos\psi_0 + 2 \left\{ \frac{a\beta}{n}(2-\eta) - b\pi + (\eta-1)(\psi_0-\pi) \right\} \cdot \sin^2\psi_0 + \left(b\pi a - \frac{a^2}{n} - 2\eta + a\beta(\psi_0-\pi) \right) (\psi_0-\pi) = 0 \quad \text{----- (6.13)}$$

여기서, $a = \sqrt{n^2 - 1}$, $n^2 = 1 + \frac{3 \cdot E_2}{4 \cdot E_1} \cdot \frac{\left\{ 1 + \frac{C_t}{D_i} \right\}}{\left\{ \frac{1}{2} + \frac{C_t}{D_i} \right\}} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{\left(\frac{C_t}{D_i} \right)} \right\}^3 \cdot \frac{1}{1 + v^2}$

$$a = \sqrt{\frac{n-1}{2}}, \quad \beta = \sqrt{\frac{n+1}{2}}$$

$$b = 1 + \frac{1}{3} \left\{ \left(\frac{C_t}{D_i} \right) / \left(1 + \frac{C_t}{D_i} \right) \right\}^2 \cdot n^2$$

E_1 : 콘크리트의 탄성계수

E_2 : 암반의 탄성계수

v_1 : 콘크리트의 푸아송비

v_2 : 암반의 푸아송비

D_i : 터널내공 단면의 직경

C_t : 라이닝 두께

② ①에서 구한 ψ_0, a, β, n, a 를 사용하여 다음 식에서 Q_1, Q_2 를 구한다.

$$R = [a(3-n)\sin\psi_0 \cdot \cos\psi_0 - 2\{1 + (\eta-1)\sin^2\psi_0\} + a\beta(\psi_0-\pi)]n \quad \text{----- (6.14)}$$

$$Q_1 = [a(3+n)\sin\psi_0 \cdot \cos\psi_0 + 2\sin^2\psi_0 - a\beta(\psi_0-\pi)] \quad \text{----- (6.15)}$$

$$Q_2 = [\beta(\eta-3)\sin\psi_0 \cdot \cos\psi_0 + 2a\sin^2\psi_0 - a\alpha(\psi_0-\pi)] \quad \text{----- (6.16)}$$

③ ②에서 구한 R, Q_1, Q_2 를 사용하여 콘크리트 라이닝 중에 발생하는 최대연응력 σ_1, σ_2 를 다음 식에서 구한다(σ_1, σ_2 는 ϕ 의 함수이므로 시산에 의해 최대치와 발생위치를 구할 수 있다).

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{matrix} \right\} = \left(\frac{N_\psi}{C_t} \pm \frac{6M_\psi}{C_t^2} \right) \quad \text{----- (6.17)}$$

여기서 σ_1, σ_2 는 각각 라이닝 내주면 및 외주면에 발생하는 응력으로 정(+)의 값인 경우는 압축응력, 부(-)의 값인 경우는 인장응력이다. 또한 N_ψ, M_ψ 는 그라우트 주입압(편압)에 의하여 ψ 위치의 라이닝 중에 발생하는 축 방향력 및 휨모멘트로서 다음과 같이 구한다.

$$N_\psi = - \frac{P_g \cdot D_i}{2} \left\{ 1 - \frac{\beta Q_2 - \alpha Q_1}{R \cdot \sin\psi_0} \cdot \cos\psi \right\} \quad \text{----- (6.18)}$$

$$M_\psi = \frac{P_g \cdot D_i^2}{4} \left\{ - \frac{1}{a} \left(\frac{n^2}{R} Q_2 + a \right) + \frac{\beta Q_2 - \alpha Q_1}{R \cdot \sin\psi_0} \cdot \cos\psi \right\} \quad \text{----- (6.19)}$$

식 (6.17)에 대해서 C_t / D_i 를 변수로 하고 암반의 탄성계수(E_2)를 파라미터로 하여 그라우트 주입압 1kgf/cm² 당 σ_1, σ_2 의 값을 구하면 그림-6.12 및 그림-6.13과 같이 된다. 또한 식

(6.18), (6.19)에 대하여 암반의 탄성계수(E_2)를 파라미터로 하여 C_t / D_i 와 $N_\psi / \left(\frac{P_g \cdot D_i}{2} \right)$

및 $M_\psi / \left(\frac{P_g \cdot D_i^2}{4} \right)$ 의 관계를 나타내면 그림-6.14 및 그림-6.15와 같이 된다.

그림-6.12 C_t / D_i 와 그라우트 주입압에 의하여 콘크리트 라이닝에 발생하는 응력(σ_1) 과의 관계 ($P_g = 1\text{kgf/cm}^2$ 당)

그림-6.13 C_t / D_i 와 그라우트 주입압에 의하여 콘크리트 라이닝에 발생하는 연응력(σ_2) 과의 관계($P_g = 1\text{kgf/cm}^2$ 당)

그림-6.14 그라우트 주입압에 의하여 콘크리트 라이닝에 발생하는 축방향력(N_{ψ})의 산출도

그림-6.15 그라우트 주입압에 의하여 콘크리트 라이닝에 발생하는 휨모멘트(M_{ψ})의 산출도

나. 철근량의 계산

그림-6.12 및 그림-6.13에서 σ_1 , σ_2 의 허용응력이 초과되었으면 아치축에 관한 축방향력 (N_{ψ})과 휨모멘트(M_{ψ})를 그림-6.14, 그림-6.15에서 구하여 원통 쉘의 계산에서는 무시하였던 철근을 고려한 보통의 철근 콘크리트 보의 응력을 계산하여 철근량을 결정한다. 더구나 그라우트는 방사선상에 균등하게 주입되므로 철근은 전단면에 균등하게 넣을 필요가 있다.

6.3.5 마제형 단면의 구조설계

앞의 설명은 원형단면의 구조설계이지만 내외수압이 비교적 작을 경우 시공성을 고려하면 반드시 원형단면이 유리한 것만은 아니기 때문에 마제형 단면에 대한 검토가 필요하다.

마제형 단면의 구조설계는 다음과 같다.

① 내수압에 대한 검토는 탄성중심법 또는 유한요소법에 의하는 것이 바람직하나 편의상 「5.5.2 콘크리트 라이닝의 설계두께」의 근사 단면형의 계수표에서 등분포수직하중 및 등분포수평하중의 기호를 역으로 사용하여도 좋다.

② 외수압에 대한 검토는 무압터널에 준한다.

③ 외압에 의하여 인장응력이 발생하는 경우 내수압으로 발생하는 인장응력을 고려하여 구조설계를 한다.

6.3.6 내장관의 구조계산

가. 관의 종류

압력터널의 내장관으로 사용하는 관은 하중에 대하여 충분히 안전한 강도와 수밀성, 내구성이 우수한 것이어야 한다.

(1) 강 관

내장관으로 가장 많이 사용되고 있는 것은 강관이다. 강관은 큰 내외압에 견딜 수 있으며 비교적 경량일 뿐 아니라 가공성이 좋다. 이음은 용접이므로 신뢰성이 높지만 용접 작업시에 발생하는 연기나 현장 도장작업에 따른 유해가스 제거에 주의한다.

(2) 덕타일(ducktile)주철관

강도가 크고 이음은 볼트 조임으로서 내구성이나 시공성이 우수하지만 비교적 무겁다.

(3) 강화플라스틱 복합관

경량이면서 강도가 큰 특징을 갖고 있다. 관 이음부 외경이 작은 것을 사용하는 것이 좋다.

나. 하중

내장관의 설계에는 다음의 하중을 고려한다.

만관일 때 ----- 내수압(정수압+ 수격압)

관이 비었을 때 ----- 외수압(지하수 침투압)

충전압(관과 지보공과의 틈을 충전할 때의 압력)

충전시의 부력(충전시에 발생하는 부력)

다. 구조설계

(1) 내수압에 대한 검토

① 철관 및 덕타일 주철관

내수압에 대한 필요한 관 두께는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$t \geq \frac{PD}{2\sigma_a} \text{-----}(6.20)$$

여기서, t : 필요한 관 두께(cm)

P : 내수압 (kgf/cm²)

D : (호칭) 관경(cm)

σ_a : 허용인장응력 (kgf/cm²)

(σ_a 는 강관 STWS 400의 경우 1,740 kgf/cm², 덕타일 주철관은 1,890 kgf/cm²으로 한다.)

최종적인 관 두께는 산정된 필요한 관두께(t)에 부식 및 두께의 오차에 대한 여유를 주어서 결정한다.

② 강화플라스틱 복합관

내수압이 관의 허용내압 이내에 들도록 관의 종류를 선정한다.

$$P \geq H_c/S \text{-----} (6.21)$$

여기서, P : 내수압 (kgf/cm²)

H_c : 관의 시험내압(kgf/cm²)(표-6.8참고)

S : 안전율(2이상)

표-6.8 강화플라스틱 복합관의 시험내압

종 류	시험내압(kgf/cm ²)
1 종	27
2 종	21
3 종	14
4 종	10
5 종	5

(2) 외수압에 대한 검토

관과 지보공 사이의 틈을 콘크리트나 에어 모르타 등으로 충전할 경우 작용하는 외수압에 대해서는 관의 변형이 구속된 것으로 취급한다. 이 경우의 허용좌굴응력(허용외수압)은 다음 식으로 구하고 이 값이 외수압보다 크면 된다.

$$P_k = \frac{\sigma_N}{\frac{R}{t} \left(1 + 0.35 \frac{R}{t} \cdot \frac{(\sigma_F^* - \sigma_N)}{E_c^*} \right)} \cdot \frac{1}{S} \quad \text{----- (6.22)}$$

여기서, P_k : 허용좌굴응력 (허용외수압) (kgf/cm²)

S : 안전율 (1.5 이상)

R : 관두께 중심반경(cm)

t : 관두께 (cm)

σ_F^* : $\mu \cdot \frac{\sigma_F}{\sqrt{1+\nu+\nu^2}}$ (kgf/cm²)

σ_F : 재료의 항복점 (kgf/cm²)

μ : $1.5 - 0.5 \cdot \frac{1}{(1 + 0.002 \cdot E_c / \sigma_F)^2}$

ν : 관재료의 푸아송비

σ_N : 변형을 일으킨 부분의 관의 원주방향 직응력(kgf/cm²)

이 때 σ_N 은 다음 식 (6.23)으로 시산하여 구한다.

$$\left(\frac{K_O}{R} + \frac{\sigma_N}{E_c^*} \right) \left(\frac{E_c^*}{E_b} + 12 \frac{R^2}{t^2} \frac{\sigma_N}{E_b^*} \right)^{1.5} = 3.36 \frac{R}{t} \cdot \frac{\sigma_F^* - \sigma_N}{E_b^*} \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{R}{t} \cdot \frac{\sigma_F^* - \sigma_N}{E_b^*} \right) \quad \text{----- (6.23)}$$

여기서, K_O : 관과 충전재 사이의 공극(cm)(일반적으로 $K_O = 0.4 \times 10^{-3} \cdot R$)

E_c^* : $\frac{E_c}{1-\nu^2}$

E_b : 관의 휨탄성계수 (kgf/cm²)

E_c : 관의 압축탄성계수 (kgf/cm²)

E_b^* : $\frac{E_b}{1-\nu^2}$

참고로 E_b, E_c 의 치수는 다음과 같다.

강관 ----- $E_b = E_c = 2.1 \times 10^6$ (kgf/cm²)

타일 주철관 ----- $E_b = E_c = 1.6 \times 10^6$ (kgf/cm²)

(3) 충전압에 대한 검토

콘크리트나 에어 모르타 등으로 관 외측을 충전할 때 허용좌굴응력 (허용충전압)은 다음

식으로 구한다. 이 값이 충전압보다 크면 된다.

$$P_k = \frac{2E_b}{1-v^2} \left(\frac{t}{D_o}\right)^3 \frac{1}{S} \quad \text{----- (6.24)}$$

- 여기서, P_k : 허용좌굴응력 (허용충전압) (kgf/cm²)
- E_b : 관재료의 휨탄성계수 (kgf/cm²)
- v : 관재료의 푸아송 비
- t : 관의 두께 (cm)
- D_o : 관의 외경 (cm)
- S : 안전율 (1.5이상)

(4) 충전시의 부력에 대한 검토

콘크리트나 에어 모르타 등으로 관 외측을 충전할 때 부력에 대한 검토는 다음 식에 의해 산정한다.

① 원주방향의 휨응력

다음 식으로 구한 원주방향의 응력(σ)이 허용휨응력(σ_b)을 초과해야 한다.

$$\sigma = M/Z \quad \text{----- (6.25)}$$

- 여기서, σ : 원주방향의 휨응력 (kgf/cm²)
- M : 휨모멘트 (kgf·cm) ($M = C \cdot P_c \cdot R^3 \cdot L$)
- Z : 단면계수 (cm³) ($Z = (B \cdot t^2)/6$)
- B : 유효폭 (cm) (관외경의 2배 또는 L이 작은 쪽을 채택한다.)
- t : 관두께 (cm)
- C : 지지각(θ)에 대한 휨모멘트계수(그림-6.17참고)
 - ㉠ 한번에 전단면을 충전하는 경우
 $\theta=120^\circ$ 일 때, 관정에서 $C=0.2602$
 - ㉡ 반단면을 충전하는 경우
 $\theta=120^\circ$ 일 때, 관정에서 $C=0.1984$
- P_c : 충전재의 단위중량 (kgf/cm³)
 - 콘크리트의 경우 ----- (2.3 ~ 2.35)×10⁻³
 - 에어 모르타의 경우 ----- 0.7×10⁻³
- R : 관두께의 중심반경(cm)
- L : 부력방지공의 간격(cm) (일반적으로 관 1분당 1개소)

강관 및 덕타일 주철관의 경우 허용휨응력(σ_b)은 허용인장응력(σ_a)을 사용하지만 시공중의 하중이므로 1.5배 하여도 된다.

주) 앵커밴드(anchor band)로 지지하는 경우
설계지지각은 120°로 하고 형강 등으로
지지하는 경우는 그 지지각을 설계지지각
으로 한다

그림-6.16 지지각도의 개념

② 축방향의 휨응력

다음 식으로 구하는 축방향 휨응력이 허용휨응력(σ_b)을 초과해야 된다. 다만 강관 및 덕타일 주철관은 축방향응력의 검토가 불필요한 경우가 많다.

$$\sigma = M/Z \text{-----}(6.26)$$

여기서, σ : 축방향 휨응력도 (kgf/cm²)

M : 휨모멘트 (kgf/cm) ($M = \frac{q \cdot L^2}{8}$)

Z : 단면계수 (cm³) ($Z = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D_o^4 - D^4}{D_o}$)

q : 관의 길이 1cm당 작용하는 부력 (kgf/cm) ($q = P_c \cdot \pi \cdot (D_o/2)^2$)

P_c : 충전재료의 단위중량 (kgf/cm³)

D_o : 관 외경 (cm)

D : 관 내경 (cm)

6.4 압력터널의 그라우팅

압력터널에는 라이닝 배면과 원지반사이의 공극이나 내장관의 외주를 충전하고 터널주변의 암반을 강화하기 위하여 그라우팅을 한다.

6.4.1 콘크리트 라이닝 방식

콘크리트 라이닝 방식에서는 내수압의 일부를 원지반에 분담시키기 위하여 고압 그라우팅을 한다. 단 갱구 부근 및 토피가 작은 구간에서는 원지반에 내수압을 감당시킬 수 없으므로 별도 보강을 고려하는 것으로 하여 고압 그라우팅은 시공하지 않는다.

그라우트 설계주입압은 표준적인 경우 저압충전 그라우팅은 2kgf/cm², 고압 그라우팅은 전내수압의 2배 정도이다.

6.4.2 내장관 방식

내장관 방식에서의 그라우팅은 관 외측의 공극을 충전할 목적으로 콘크리트나 에어 모르타 등을 주입하는 것이며 주입압은 2kgf/cm²정도의 경우가 많다.

6.5 댐 부대터널

6.5.1 일반사항

댐 부대터널은 내수압과 외압에 대하여 안전하고 댐 체체의 안정이나 저수기능에 지장이 없는 구조이어야 한다. 여기서는 댐 부대터널에 대한 특별한 사항에 한하여 기술한다. 따라서 일반적인 수로터널과 공통되는 부분은 제5장까지의 사항을, 압력터널로 취급하는 사항에 대해서는 제6장의 앞 절들을 적용한다.

댐 부대터널은 사용 목적에 따라 다음과 같이 분류한다.

① 가배수 터널 : 댐 시공을 위하여 하천의 흐름을 종래의 위치에서 일시적으로 바꾸어 시공 중의 홍수유량을 흐르게 하기 위한 터널

② 취수터널 : 관개 및 기타 용수를 댐으로부터 취수하기 위한 터널

③ 방수터널 : 홍수유량, 조절유량 및 긴급 방류량을 댐으로부터 방수시키기 위한 터널

댐 부대터널의 계획, 설계에 있어서는 여기에서 언급하지 않은 사항은 「농업생산기반정비사업계획설계기준 댐편」을 참조한다. 가배수 터널은 댐 완성 후 취수터널이나 방수터널로 전용하는 경우가 많으므로 취수설비나 방수시설과의 관련 사항을 고려한다.

가. 노선의 선정

일반적으로 지형·지질 등이 노선결정의 중요한 요소가 되지만 댐 본체 굴착시 발파 등에 의한 영향을 받지 않도록 최종굴착 예정선과의 피복 두께는 적어도 터널굴착 단면직경의 3배 이상 확보하는 것이 바람직하다. 가배수 터널은 댐 완성 후 취수시설 등의 일부로 이용되는 수가 많으므로 이러한 점에서 노선결정이 좌우되는 경우가 있다.

나. 갱구 위치의 선정

가배수 터널의 갱구 위치 선정시는 다음 사항에 유의한다.

(1) 가배수 터널의 시점

가배수 터널의 시점은 홍수시에 가체절 체체의 침식 및 손상을 방지하기 위하여 성토 비탈면 끝으로부터 충분한 거리를 두는 것이 바람직하다. 시점의 위치는 체체의 성토 범위, 가체절 성토재료의 성질과 보호공, 지형·지질조건, 하상높이, 가배수 터널의 폐색방법, 퇴사의 상황 등을 고려하여 결정한다.

가배수터널 입구의 표고는 하상과 거의 같게하는 것이 보통이다.

(2) 가배수 터널의 종점

가배수 터널의 종점은 방류수가 댐 하류측 및 하천에 나쁜 영향을 미치지 않아야 한다. 설계시는 단지 평면적인 위치관계 뿐 아니라 하천의 종단기울기, 하류수위 등을 검토하여 결정하며 상황에 따라서 하류측 가체절 또는 특별히 도수를 위한 시설을 설치하는 경우가 있다.

댐 완성 후 취수설비 등의 일부로 사용하는 경우에는 취수설비 완성 후의 감세공, 분수공,

간선수로와의 접속·배치, 공사 중 현 하천까지의 도수방법 등도 고려한다.

다. 터널의 선형

가배수 터널은 수리적, 시공적으로 유리한 직선으로 하고 가배수 터널입구는 등고선에 직각방향으로 하는 것이 바람직하며 등고선에 과도하게 경사진 위치는 수리, 구조면에서 좋지 않다. 그러나 저수지 부지내의 현 하천은 반드시 이 조건에 합치하지 않으므로 현 하천에 대해서는 가배수 터널입구의 방향은 가능한 한 등고선에 직각으로 근접시키는 것이 좋다.

라. 복수터널의 중심간격

터널을 평행하게 여러 개 설치하는 경우는 토압의 상호간섭으로 인한 편압의 발생에 의한 지보공의 파괴, 시공중 발파의 영향에 의한 라이닝의 손상 방지에 필요한 노선의 간격을 확보한다. 일반적으로 노선중심 간격을 터널굴착 단면 직경의 5배 정도 이상으로 한다.

마. 터널 내공단면의 형상

댐 부대터널은 시공상 표준마제형 단면의 경우가 많으므로 내외수압에 대한 구조적 안정을 검토한다. 더욱이 저수지에 의한 외수압 또는 내수압이 크게 작용하는 경우 내공단면의 형상은 원형으로 하는 것이 바람직하다.

바. 가배수 터널과 가체절

가배수 터널은 가체절과 함께 기능이 발휘되는 것으로 설계시에는 양자의 관계를 충분히 고려한다. 가체절 높이를 높게 하면 가배수 터널에 높은 수두가 가해지므로 터널단면의 축소가 가능하다. 그러나 반면 가체절에 필요한 성토량이 증대하여 갈수기간 중에 필요한 단면을 완성시키지 못하는 경우도 생긴다. 이 때문에 가배수 터널과 가체절과의 연계는 시공의 난이도, 성토계획, 공사비의 증감을 비교 검토하여 댐 전체의 시공계획에 적합하고 경제적인 선정을 한다.

사. 터널 시공법의 선택

라이닝의 배면에 공극이 잔존하면 터널 외측 단면을 따라 지하수가 침투할 우려가 있으며 또한 체체에 근접한 터널에서는 원지반의 이완 진행이 터널뿐 아니라 체체에도 영향을 미치게 된다. 따라서 댐 부대터널의 시공법은 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법 등의 라이닝과 원지반사이에 공극의 잔존 우려가 적고 원지반의 이완이 없는 방법이 바람직하다.

6.5.2 작용 하중

댐 부대터널에 작용하는 하중은 무압터널 또는 압력터널에 준하여 적절히 선정한다. 지보공에 작용하는 하중의 개념은 무압터널에 준하며 라이닝에 작용하는 하중은 무압터널과 압력터널의 개념으로 내외수압과 그라우트 주입압을 고려한다.

6.5.3 라이닝

댐 부대터널의 라이닝구조는 무압터널 또는 압력터널에 준하여 적절히 설계한다.

가. 설계조건

댐 부대터널의 라이닝에 작용하는 하중에 대하여 유의해야 할 사항은 다음과 같다.

① 터널출구에 제수문이나 조절문 혹은 밸브를 설치하는 경우에는 터널 전체 길이에 대하여 댐 만수위까지 내수압을 받는 압력터널로 설계한다. 댐축 중심 부근에 설치하는 차수구역보다 상류는 외수압도 작용하므로 내외수압이 평형을 이루는 수가 많으나 외수압이 라이닝에 작용하지 않는 사이에 일시적으로 내수압이 작용하는 수도 있으므로 전체 길이를 압력터널로 설계한다. 또한 댐의 수위가 급강하하는 경우에는 외수압이 잔류하는 수가 있으므로 차수구간 보다 상류 측에 대해서는 외수압에 대한 검토를 한다. 댐체 자체에 충분한 차수방벽이 강구되는 경우에는 하류 측에 대해서는 일반적으로 외수압에 대한 검토는 하지 않는다.

② 터널입구에 제수문이나 조절문 혹은 밸브를 설치하는 경우에 터널 속이 비게 되면 차수구간보다 상류는 외수압을 받으므로 이 구간은 댐 만수위까지의 외수압에 견디도록 설계한다.

③ 가배수 터널을 댐 완성 후 다른 것으로 사용하지 않을 경우 공사기간중 홍수에 의해 만수가 되어 일시적으로 내수압이 생겨서 압력터널로 될 때는 입구에서 출구까지 각 점의 압력을 산출하여 최대 값을 가지고 설계한다. 그러나 일반적으로 이 값은 작기 때문에 갱구 부근의 철근보강 및 저압충전 그라우팅을 하면 충분한 경우가 많다. 또한 댐축 부근에 플러그(plug) 및 차수구간을 설치하는 동시에 차수구간보다 하류에 배수공을 설치하면 외수압에 대한 검토는 필요하지 않다.

④ 댐 부대터널의 라이닝 구조설계는 무압터널 또는 압력터널에 준한다.

나. 인버트 라이닝

가배수 터널에서의 빠른 유속의 토사 흐름으로 인하여 라이닝이 손상을 입어 인버트 중앙에 많은 마모가 발생할 것으로 우려되는 경우에는 빈배합의 콘크리트를 타설하거나 인버트 내면을 평평하게 시공하는 방법 등을 검토한다.

6.5.4 그라우팅

댐 부대터널에서는 라이닝 배면과 원지반 사이의 공극을 충전하고 터널 주변의 암반강화와 터널에 의한 침투수를 저지하기 위하여 그라우팅을 한다.

수로터널에서 그라우팅의 목적은 주로 라이닝의 안정이지만 댐 부대터널에서는 그 목적 외에 터널에 의한 침투수를 저지하기 위하여 전체 길이에 걸쳐 우선 저압충전 그라우팅을 실시한다. 이 경우 터널 상류 입구에서 댐 축까지는 시공시 특별한 주의가 필요하다. 단 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법의 경우에는 터널과 원지반 사이에는 공극이 없기 때문에 저

압충전 그라우팅은 생략한다. 또한 플러그 또는 차수벽을 포함한 차수구간에 커튼 그라우팅을 시공하여 제체 기초의 커튼 그라우팅과 연결하여 저수지로부터의 침투수를 차단한다.

댐 부대터널의 출구에 조절게이트 또는 밸브를 설치하여 취수 또는 방류하는 경우는 출구에서 댐축 부근의 차수구간은 전 내수압의 2배 이상의 압력으로 고압 그라우팅을 실시한다.

6.5.5 폐색공

댐 부대터널에는 플러그(plug)를 설치하여 댐의 저수가 유출하는 것을 방지한다. 가배수 터널에는 댐축과의 교차점 또는 댐의 커튼 그라우팅선의 교점에 플러그 및 커튼 그라우팅을 실시한다.

가. 폐색 플러그의 필요길이 검토

폐색 플러그의 길이는 플러그 위치의 원지반 토피, 터널주변의 지형·지질조건, 작용수압 등을 고려하고 과거의 사례 등을 참고로 하여 결정하되 다음 식으로 구하는 경우가 많다.

$$L = (0.3 \sim 0.8)H \quad \text{----- (6.27)}$$

여기서, L : 플러그 길이 (m)
 H : 최대 작용수두 (m)

또한 수치적으로 플러그길이를 구하려면 터널주변의 암반과 플러그 콘크리트의 전단저항 강도를 근거로 다음 식으로 구하는 방법이 있다.

$$L = a \frac{PA}{\tau \ell} \quad \text{----- (6.28)}$$

여기서, L : 플러그 길이 (m)
 P : 작용수압 (tf/m²)
 A : 플러그 면적 (m²)
 ℓ : 플러그 콘크리트와 암 접촉부의 원둘레(m)
 τ : 플러그 콘크리트와 암 접촉면의 전단강도(tf/m²)
 a : 안전율($a=4$ 로 하면 충분히 안전하다.)

그림-6.17 플러그 길이산정 개요도

나. 폐색시기와 방법

가배수 터널의 폐색은 안전을 위하여 갈수기에 시공하는 것이 바람직하다. 플러그의 형식은 가배수 터널의 사용계획이나 터널의 숫자에 따라 다르지만 표준적인 방법은 그림-6.18과 같다.

A형식

단면A-A

B형식

단면B-B

C형식

단면C-C

그림-6.18 플러그의 형식

제 7 장 시 공

7.1 시공계획

시공계획은 공사규모, 지질조건 및 현장조건 등을 감안하여 기술적, 경제적 관점에서 안전하고 합리적인 계획을 수립토록 한다.

터널단면, 길이 및 공기를 바탕으로 원지반조건, 입지조건에 맞추어 안전하고 경제적인 시공법을 정하고 공사를 실시하기 위하여 필요한 기계, 설비에 대한 검토를 한 후에 시공계획을 수립한다. 시공계획의 기본이 되는 사항은 다음과 같다.

- ① 공정방식
- ② 굴진방식 및 굴착공법
- ③ 막장안정을 위한 보조공법의 선정
- ④ 라이닝 방식 및 라이닝 공법
- ⑤ 작업갱의 선정
- ⑥ 공사용 설비 계획

공정방식이란 굴착과 라이닝 시공의 순서를 규정하는 것으로 다음과 같이 분류한다. 공정방식의 선정에는 표-7.1의 비교표를 참조한다.

- ① 분리방식 : 터널의 전 길이(입구, 출구 또는 작업 갱구와 개별로 생각하여도 된다)에 걸쳐 굴착을 완료한 후부터 라이닝을 개시하는 방식
- ② 병진방식 : 굴착을 어느 정도 진행시킨 후에 라이닝을 병진시키는 방식
- ③ 교차진행방식 : 굴착과 라이닝을 구간마다 교대로 진행시키는 방식 (인버트 콘크리트를 나중에 연속하여 타설하는 경우도 포함)

7.2 굴진방식

터널의 굴진방식은 터널규모, 지질조건 및 공기 등을 종합적으로 검토한 후에 적절히 선정한다.

7.2.1 전단면 방식

터널의 굴착단면 대부분을 1회의 발파, 또는 다른 방법으로 굴착하는 방식이다.

지질이 불량하여 보내기 널, 또는 빗끼움 널을 필요로 하는 터널에서는 동바리의 설치를 위하여 링 컷을 하는 수가 있다.

그림-7.1 전단면방식

표-7.1 공정방식 선정표

구분 항목	분리방식	병진방식	교차진행방식
지질 및 터널규모	지질상황이 양호한 경우, 터널 단면이 비교적 작은 경우와 단면과는 관계없이 터널길이가 짧은 경우에 적합하다. 압출성 토압, 팽창성 토압 지대 등 토압의 크기, 분포상황을 측정하여 적절한 라이닝을 결정할 수 있는 이점이 있다.	풍화하기 쉬운 암 및 토사 터널과 같이 굴착 후 가능한 한 신속히 라이닝을 시공할 필요가 있는 경우, 지질조건에 관계없이 단면이 크고 라이닝 작업이 버력반출 등의 작업에 지장을 적게 주는 경우	지질조건이 나쁘고 굴착후 즉시 라이닝의 필요가 있는 경우 터널단면이 커서 굴착작업을 중지하는 것이 현저하게 비경제적이 되는 경우에 적합하다.
시공	라이닝작업이 굴착작업을 방해하지 않기 때문에 굴착작업의 능률저하가 없으며, 가설비나 작업원의 절대수를 늘릴 필요가 없다. 다른 방식에 비하여 기계시공이 가능하지만 굴착 후 라이닝까지의 기간이 길어져서 토압의 진행에 따른 지보공의 변형이 생겨 재시공하거나 보강 등의 필요가 발생하는 경우가 있다.	단면이 작은 경우는 굴착작업의 능률저하가 예상된다. 또한 콤프레서 용량이나 작업원 수를 증가시킬 필요가 발생한다.	시공적으로 가장 불리하다.
공기	보통	짧다	길다
공사비	단면의 크기, 터널의 길이 등에 따라 다르다.		고가

7.2.2 벤치 컷(bench cut)방식

상부 반단면을 먼저 굴착하고 하부 반단면의 굴착은 약간 늦게 병진하는 방식이다.

그림-7.2 벤치 컷 방식

7.2.3 도갱선진 방식

터널단면의 일부에 도갱(하부, 상부, 측벽등)을 먼저 굴착하거나 또는 관통시키고 나머지 단면을 굴착하는 방식이다.

그림-7.3 도갱선진 방식

7.2.4 굴착방식의 선정

굴착방식의 선정에 대해서는 표-7.2를 참고한다.

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법에서는 전단면 방식 또는 벤치 컷 방식을 표준으로 한다. 벤치 컷 방식은 지질이 불량한 구간에 채택되는 수가 많으므로 큰 변형을 방지하기 위하여 벤치의 길이는 가능한 한 짧게 하여 조기에 단면을 폐합하는 것이 바람직하다.

표-7.2 굴진방식의 선정

구분 항목	전단면 방식	벤치 컷 방식	도갱선진 방식
지질 및 터널규모	지질이 양호한 암터널 및 용출수가 적은 토사 터널	지질조건이 좋지 않은 터 널 및 비교적 단면이 큰 터널	단층과쇄대, 용출수가 많 은 연약토사 등의 지질조 건이 불량하고 단면이 비 교적 큰 터널
시 공	다른 방식에 비해 대형 기계의 사용이 가능하며 고능률적인 반면 설비용 량이 커진다.	착암, 버력적재 기계는 상부반단면에 사용한 것을 그대로 하부반단면에도 사 용이 가능하며 설비용량은 작아도 되지만 공기가 길 어진다.	각 굴착단면에 따른 규모 의 기계가 필요하다. 도갱 과 다른 굴착단면을 병진 시킬 경우 갱내작업이 복 잡하게 된다.
공사기간	보 통	약간 길다.	길 다.
공 사 비	보 통	약간 비싸다.	비 싸 다.

7.3 굴착공법

7.3.1 발파굴착공법

터널의 굴착공법은 지질조건, 터널규모 및 공기 등을 종합적으로 검토한 후에 적절히 선정한다.

원지반의 대부분이 미풍화된 암석인 경우에는 다이내마이트 등의 폭약을 사용하여 쇄석하는 공법이 공사기간이 짧고 경제적으로 유리하다.

터널길이가 대략 3km이상이고 지질상 암질의 변화가 적으며 단층 파쇄대 등의 연약부분이 적은 암반으로서 압축강도가 대략 2,000kgf/cm²이하의 원지반인 경우에는 TBM(Tunnel Boring Machine)공법과의 비교 검토가 필요하다. 특히 TBM의 경우 원형단면에 적합하지만 중소단면에 채택하기 어렵고 또한 초기투자액이 많고 시공중의 공법변경이 용이하지 않으므로 기계굴착을 할 수 있는 시공 길이의 검토가 중요하다.

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법은 부분적인 과다굴착(여굴)에 의한 국부적인 응력집중 등의 문제가 생기므로 평활한 굴착면을 얻기 위하여 스무스 블래스팅(smooth blasting)방법도 고려할 필요가 있다. 스무스 블래스팅은 터널굴착을 위한 폭파에서 여굴을 적게 하고 굴착면이 설계선에 가깝고 평활하게 되도록 연구한 공법으로서 일반적으로 설계 굴착선상에 바르고 약간 조밀하게 천공하여 폭파력을 약화시킨 경량 다이내마이트를 구멍의 중심에 미치도록 장진하고 전기뇌관에 의하여 동시 폭파하며 폭파력이 구멍에서 구멍으로 이어 나가도록 한다.

가. 발파계획

발파작업의 결과가 버력처리 등의 후속작업 능률이나 주변 원지반의 이완 등에 미치는 영향이 크기 때문에 암질, 단면적, 굴진방식 등을 충분히 검토하여 발파계획을 수립한다. 일반적으로 발파제원과 발파결과는 표-7.3과 같은 관계가 있으므로 이를 종합 판단해야 한다.

표-7.3 발파제원과 발파결과의 관계

발파결과 발파제원	버력의 크 기	버력의 퇴적상태	여 굴 량	가스의 발 생 량	원지반의 이 완	굴착면의 평 활 도	진 동 소 음
1회 발파 진행길이			○		○		
심빼기 방식		○					○
천 공 배 치	○						
폭약의 종류				○			
폭약의 사용량	○			○	○	○	○
주변공의 간격, 장 약 량			○		○	○	
발 파 순 서		○					

(주) 이 표는 비교적 밀접한 관계만을 나타낸 것이다.

터널을 지상 및 지중 구조물, 주택 등 다른 시설에 접근하여 설치하는 경우에 발파진동이 이들에게 좋지 않은 영향을 미치는 수가 있다. 인가가 가까이 있는 경우는 발파진동 외에 발파음이나 저주파 공기진동이 문제되는 경우도 있다.

발파에 의하여 이러한 환경문제가 발생할 우려가 있을 때는 발파계획시 주변환경에 미치는 영향을 조사하여 필요한 대책을 강구한다.

나. 천 공

천공 중에 막장으로부터 원지반의 부분 탈락이나 잔류폭약에 의한 폭발사고 등의 위험을 방지하기 위하여 천공에 앞서 막장의 점검, 뜯 돌의 제거, 잔류폭약의 유무 확인 및 회수 등의 조치를 한다. 천공의 결과는 폭발효과에 크게 영향을 주기 때문에 발파계획을 바탕으로 원지반에 적합한 위치와 방향으로 천공배치를 하고 심도도 일치시키도록 주의한다. 만일의 사고를 방지하기 위하여 앞에서 천공한 구멍의 끝을 다시 천공해서는 안 된다. 이상한 용출수나 가스의 분출, 지질의 변화 등은 천공속도, 천공시 배출되는 물의 색과 양 등으로 어느 정도 알 수 있는 경우가 많으므로 천공작업 중에는 이에 주의를 기울여야 한다.

다. 천공기계

일반적으로 발파를 위한 천공에는 착암기가 사용된다. 착암기로는 레그 드릴(leg drill)이나 드리프터(drifter) 등이 있으며 동력으로는 주로 공기압이 사용되고 있다. 레그 드릴은 기동성이 좋으며 작은 단면의 경우에 사용되고 있다. 드리프터를 이동식 차에 탑재하여 동작과 이동을 원격조작하는 점보(jumbo)는 천공능률의 향상에 유용하다. 천공기계의 선택은 암질, 터널단면의 규모, 형상 및 길이, 굴진방식, 심빼기 방식, 1회 발파 진행길이, 버력쌓기와 운반방법, 공기 등을 고려한다.

로드(rod)의 직경, 길이, 재질 및 비트(bit)의 종류, 재질 등에는 각종 조합방법이 있으므로 로드와 비트의 조합은 천공기계, 암질, 천공길이, 천공지름에 적합한 것으로 한다.

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법에서는 발파천공 외에 록 볼트의 천공이 필요하므로 천공 기계는 록·볼트의 시공방법도 고려하여 선정한다.

라. 장 약

장약에 앞서 천공의 상태를 점검한다. 천공 중에 발생한 뜯돌의 유무를 점검하여 필요하면 사전에 제거하는 등 안전을 확인한다. 특히 용출수가 있는 막장에서는 뜯돌이 발생하거나 천공이 파손되기 쉬우므로 주의한다. 전기뇌관의 폭발을 방지하기 위하여 경보기와 같은 소정의 계기에 의해 누전전류에 대한 안전을 확인하는 동시에 작업복 등에 발생하는 정전기를 방전시켜야 한다. 또한 낙뢰의 위험이 있는 경우에는 장약작업을 중단한다.

장약시 용출수가 있는 막장에서는 내수성의 폭약을, 지열이 높은 막장에서는 내열성의 폭약을, 가연성 가스가 용출하는 막장에서는 소염·방폭성 폭약 등을 사용한다. 폭약은 소정의

입봉, 장전재료 등을 사용하여 갑작스러운 폭발이나 불발이 생기지 않도록 주의해야 하며 또한 폭발순서가 틀리지 않도록 주의한다.

마. 발 파

발파작업의 지휘자는 위험구역, 대피장소 및 경로, 점화장소를 지시하고 발파예고, 점화, 발파해제 등의 신호 및 경보를 정한다. 또한 미리 점화자를 정하여 위험구역의 경계에 출입 금지 표지를 설치하고 감시원을 배치하여 작업원의 대피를 확인한다. 관통이 가까워지면 반대측의 작업에도 유의하여 상호연락을 긴밀히 하고 발파시에는 상대방의 대피를 확인한다.

전기뇌관을 사용할 때는 잘못된 결선, 결선누락, 회로단선 등의 유무를 점검하여 이상유무를 확인한다. 발파용 전선은 절연이 완전한 전용선을 사용하고 전선 등 대전의 우려가 있는 것으로부터 완전히 격리하며 점화기에 접하는 말단부는 점화시 이외는 분리시켜 둔다.

가연성 가스가 용출하는 막장에서는 가스농도가 폭발 하한치의 30%이하가 되지 않으면 폭발작업을 해서는 안 된다. 발파시에는 비산하는 암석 등에 의하여 기시공 부분이나 갱내 가설물이 손상 당하는 것을 방지해야 한다..

발파후 불의의 사고를 방지하기 위하여 전기 발파시는 5분 이상, 도화선 발파시는 15분 이상 경과하지 않으면 막장에 접근해서는 안 된다. 발파후의 막장은 뜬돌이 많아서 위험하므로 지정된 점검자는 막장 주변을 충분히 점검하여 뜬 돌을 제거한다. 또한 점검자는 막장의 불발공, 잔류화약의 유무를 점검하여 필요하면 회수 등의 조치를 한다. 점검 작업중인 경우는 지정된 작업자 이외는 막장의 출입을 금하고 점검자가 안전을 확인한 후가 아니면 후속작업을 개시해서는 안 된다.

발파결과가 계획과 다른 경우는 그 원인을 검토하여 다음 발파계획에 반영시킨다.

바. 폭약과 뇌관

(1) 폭 약

발파작업에 사용하는 폭약은 다이너마이트 및 함수폭약이 주체이다. 다이너마이트에는 교질 다이너마이트, 반교질 다이너마이트 등의 종류가 있다.

(2) 뇌 관

발파는 뇌관에 의하여 폭약에 충격을 가하여 기폭시키는데 일반적으로 전기발파가 안전하고 작업능률도 양호하므로 많이 사용된다.

7.3.2 기계굴착공법

기계굴착은 발파굴착에 비하여 원지반을 이완시키는 경우가 적으므로 원지반의 지보 기능을 최대한으로 활용하는 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법에 적합한 굴착공법이다. 또한 소음, 진동도 비교적 적기 때문에 주위의 환경을 위하여 발파굴착을 채택할 수 없는 도시부의 터널에서 많이 사용한다.

기계굴착공법은 자유단면 굴착기에 의한 자유단면 굴착방식과 터널보링머신(TBM: Tunnel Boring Machine)에 의한 전단면 굴착방식으로 대별된다. 암질에도 관계되나 일반적으로 전자가 일축압축강도 500kgf/cm²이하의 원지반에 적용되며 후자는 일축압축강도 200~2,000 kgf/cm²의 원지반에 적용된다.

굴착기계의 선정을 위해서는 일반적인 지질조사 외에 암석의 강도, 경도, 광물조성, 원지반의 균열의 상태 등에 대한 조사·시험을 한다. 또한 터널의 길이, 단면의 크기 및 형상을 고려한 후에 기계의 특성이 적합한지 여부를 충분히 확인하여 선정한다.

자유단면 굴착기는 TBM에 비하여 소형이며 저가로서 원지반의 변화에 따라 다른 공법으로 변경이 비교적 용이하다. 이와 반대로 TBM공법은 기계가 대형이며 고가로서 시공도중에 굴착공법을 변경시켜야 할 경우에는 공기의 대폭적인 지연과 공사비의 증대를 가져오기 때문에 신중한 검토가 필요하다. 또한 TBM공법의 굴착단면은 원형으로 한정되어 있다.

가. 자유단면 굴착기

자유단면 굴착기에는 암(arm)굴착기, 백호, 자이언트 브레커(giant breaker) 등이 있다. 암 굴착기는 굴착기 암의 선단에 드럼(drum)이 있어서 암을 이동시키면서 부분 굴착을 하기 때문에 굴진속도는 빠르지 않지만 임의단면의 터널을 굴착할 수 있다. 또한 터널단면을 적절한 단면으로 분할하여 굴착하는 경우 큰 단면에도 적용이 가능하다. 암 굴착기는 주로 연암 또는 미고결의 원지반에 적용되기 때문에 특히 막장의 자립성을 고려하여 단면을 분할해야 하며 1 사이클 당 굴진길이와 동바리를 포함한 굴착방식을 정해 시공하는 것이 중요하다.

용출수가 있는 원지반에 암 굴착기를 사용하는 경우 지질에 따라서는 바닥이 진창이 되어 통행에 지장이 되고 버력쌓기가 곤란하게 될 뿐 아니라 터널구조상에도 악영향을 준다. 따라서 배수를 원활히 하여 막장에 물이 고이지 않도록 배려하는 동시에 매트나 복공판 등을 사용하는 대책을 강구한다. 또한 원지반이 건조할 때는 분진이 많이 발생하기 때문에 막장에 살수를 한다거나 집진기를 설치하는 등의 대책을 세운다.

나. TBM

TBM에 의한 굴착은 원지반이 양호한 경우에는 고속 굴진이 가능하나 초기투자가 커지고 단면형이 한정되며 굴착직경의 변경이 곤란한 것 등의 문제가 있다. 그러나 원형단면 수로터널에서는 TBM의 채택이 비교적 유리하다.

TBM에 의한 굴착을 선택하였을 때는 능률적이고 경제적으로 작업하기 위하여 암석시험 등의 성과를 충분히 검토한 후에 커터(cutter)의 종류와 배치, 커터 헤드(cutter head)의 회전수 및 추진력 등을 설정한다. 또한 TBM은 굴진속도가 중요하므로 굴진속도에 맞추어 충분한 능력을 갖춘 버력 처리설비를 설치할 필요가 있다. 굴착시 분진의 발생, 막장부근의 기온 상승 등에 대한 대책 마련도 필요하다.

7.3.3 인력굴착공법

풍화암, 단층파쇄대, 토사지반 등에 터널을 설치할 경우에 곡괭이 또는 간이 굴착기구를 사용하여 굴착하는 공법이다. 경점토질이나 매우 잘 굳어진 사력층에는 인력굴착의 보조 수단으로서 단면의 일부를 발파하여 이완시키는 방법을 취하는 수가 있다. 이 공법을 채택할 경우에는 지질조건이나 공사규모 등에 대하여 기계굴착공법, 실드공법 및 메서공법 등과 비교 검토를 한다. 인력굴착은 지질상황, 터널단면의 규모에 따라서 전단면 굴착, 링 커트 및 벤치 커트로 나누어진다.

가. 전단면 굴착

굴착단면이 비교적 작은 단면이고 단층파쇄대나 토사로서 토압이 작용하는 지반에서 부분적으로 굴착면의 흠막이를 하면서 굴착하는 경우, 또는 연암이나 비교적 고결된 토사 및 자갈층으로 토압은 작용하나 막장이 자립하는 원지반의 경우에 적합하다. 모든 경우 빗끼움 널에 의하는 것이 원칙이다.

굴착작업의 시공순서는 그림-7.4와 같으며 동바리의 설치간격은 0.6~1.0m정도이다.

- | | | |
|--|--------------------------|--|
| ① 우선 막장 가까이 설치된 동바리 리브에 널판을 끼워 놓고, 널판 박을 준비를 한다. | ② 굴착하면서 널판 선단을 원지반에 박는다. | ③ 널판 박는 것이 완료되었으면 새로이 동바리 리브를 막장 가까이 설치한다. |
|--|--------------------------|--|

그림-7.4 인력굴착(전단면굴착)의 시공순서

나. 링 커트(ring cut)

이 공법은 단층 파쇄대 또는 토사 및 자갈층 등의 원지반에서 용출수에 의해서 막장이 붕괴하거나 또는 압출되는 경우 적용하는 것으로 그림-7.5와 같이 우선 터널 외주 부분을 링모양으로 굴착하여 동바리 리브를 설치한 후에 가운데를 굴착하여 완성시킨다. 굴착단면이 큰 경우에는 동바리를 여러 개 선행시키는 경우가 있으나 굴착단면이 작은 경우에는 동바리 1개 마다 굴착을 완료하는 것이 일반적이다.

다. 벤치 커트(bench cut)

굴착단면이 비교적 크고 링 커트를 적용하여도 막장의 붕괴나 압출을 방지할 수 없다고 판단될 때는 막장을 분할하여 굴착하는 벤치 커트 방식을 적용한다. 상부 반단면의 시공은 링 커터로 하는 것이 일반적이며 상부 반단면의 동바리는 월빔 등의 침하방지 대책을 취하는 경우가 많다.

그림-7.5 링커트의 모식도

7.3.4 특수공법

지질조건, 터널의 규모, 공기 및 경제성 등에서 발파굴착, 기계굴착, 인력굴착공법의 적용이 불가능하거나 불리한 경우에 특수공법이 채택된다. 특수공법을 적용하는 경우에는 충분한 조사와 검토가 필요하다.

가. 실드공법

실드공법은 실드(shield)라 불리는 강재의 통 또는 틀을 추진시켜서 동바리의 역할을 하도록 함으로써 그 보호아래 굴착작업을 하는 것이다. 이 공법은 원지반을 이완시키거나 함몰시키는 경우가 적기 때문에 연약지반이나 대수층에 많이 채택되고 있다. 또한 최근에는 부분제품을 사용하지 않고 실드의 말단부를 이용하여 현장타설 콘크리트 라이닝을 구축하는 ECL 공법이 개발되었다.

나. 메서공법

메서공법이란 강널판을 1매씩 맞물리면서 아치형으로 배치하고 유압 잭으로 추진하여 원지반에 압입해 가는 공법으로서 간이 메서공법과 기계식 메서공법이 있다.

간이 메서공법은 종래의 나무널판 대신 강성이 높은 특수단면을 가진 메서 널판을 사용하며 이것을 특수 잭을 사용하여 원지반에 압입하고 메서 널판으로 둘러싸인 안에서 굴착과 동바리를 설치하는 공법이다. 반면에 기계식 메서공법은 분할하여 배열한 메서 널판이나 이에 대신하는 블레이드(blade)를 지지프레임에 부착시킨 후 이 지지프레임을 전진시킨 후 굴착 및 동바리를 설치하는 방법이다.

메서공법으로 시공이 가능한 지질로는 사질흙 층으로서 N값이 10~40정도로 단단하며 막장이 일정시간 (블레이드의 추진시간)자립할 수 있는 지질에 적합하다. 모래나 사력층으로 지하수가 많은 경우는 막장면이 붕괴하는 수가 있으므로 약액주입과 같은 적당한 보조공법이 필요하다.

7.3.5 막장 안정을 위한 보조공법

막장 안정을 위한 보조공법은 원지반조건, 입지조건, 효과 및 시공성 등을 고려하여 선정한다. 이러한 보조공법으로는 배수보링공법, 웰 포인트공법, 깊은우물공법, 약액주입공법, 파이프루프(pipe roof)공법, 압기공법 등이 있다.

가. 용출수를 배제하는 공법

(1) 배수보링공법

보링공을 이용하여 물을 빼서 수압 및 지하수위를 낮추는 방법

(2) 웰 포인트공법

웰 포인트라고 불리우는 집수관을 지반에 설치하고 지반에 부압을 걸어 지하수를 흡인하는 방법이다. 일반적으로 이 공법에 의한 지하수위의 저하는 5~8m를 한도로 하고 있다. 갱 내에서 시공하는 것이 일반적이지만 토피가 적고 지표의 토지이용이 없는 경우는 지상에서 시공하는 경우도 있다.

(3) 깊은우물공법

일반적으로 지표에서 깊은 우물을 파서 수증펌프로 배수하는 공법이다. 깊은 우물의 외경은 300mm정도로 시공하는 예가 많다. 깊은 우물은 일정한 간격으로 설치하지 않으면 좋은 효과를 얻을 수 없기 때문에 지상에 건물과 같이 장애물이 있는 경우는 배치에 특별한 배려를 해야 한다.

웰포인트공법이나 깊은 우물공법을 적용하는 경우는 대수층의 특성조사를 실시한 후 적절한 공법을 선정한다.

나. 약액주입공법

약액주입공법은 시멘트 풀, 규산소다 등의 액체를 원지반속에서 고화시켜 원지반의 투수성을 저하시킴으로써 터널내의 용출수량을 감소시키는 공법이다.

약액주입공법을 사용하는 경우는 단층과쇄대 등의 불안정한 원지반의 길이나 용출 지하수층의 위치를 잘 조사하여 목적에 맞는 주입재료, 시공법을 선정한다. 주입범위, 주입재료, 주입압, 주입량을 결정하기 위한 시험을 하여 원지반의 투수계수나 유효공극율 등을 구하며 필요에 따라서는 주입시험을 한다.

다. 파이프 루프공법

이 공법은 굴착단면 밖을 보링하여 파이프 내로 모르터를 충전하거나 주위를 그라우팅 함으로서 굴착단면 밖을 보강하는 것이다. 애추나 단층과쇄대 등과 같이 불안정한 원지반을 보강하여 막장의 이완을 방지하는 효과가 있어서 막장안정대책으로 사용된다.

그림-7.6 파이프루프공법

라. 압기공법

압기공법은 용출수가 많은 연약한 토사터널에서 막장이 허물어져 웰 포인트공법 등의 배수공법으로는 시공이 곤란한 경우 갱내에 압축공기를 주입하여 지하수의 용출을 막으면서 작업하는 공법이다.

이 공법의 효과는 원지반의 지형 및 지질조건, 지하수의 상태에 따라 좌우되므로 설계시 조사를 세밀히 해야 한다. 특히 토피가 적은 경우나 암반의 균열 등이 있는 경우에는 갱내의 압축공기가 지표로 분출할 우려가 있으므로 압기공법을 사용할 때의 최소 토피두께는 지질이나 압기 압력에 따라 다르지만 10m정도가 필요하다. 압기 압력은 일반적으로 터널상단에서 (2/3)D위치의 지하수압과 동등한 압력으로 하는 경우가 많다. 점토성 원지반에서 통기성이 작은 경우에는 이 값보다 작은 압기 압력으로 시공되고 있다.

1.0kgf/cm²정도의 압기 압력에서는 특별한 지장은 없으나 1.5kgf/cm²에 가까워지면 작업원의 피로가 커지고 작업능률도 저하한다.

마. 선수공

선수공은 강관, 철근, 철못 등을 사용하여 막장의 전방에 타설하여 놓고 막장 굴착시 원지반의 이완을 적게 한다거나 타설한 보조 지지 재료에 의한 막장 천정의 보호를 목적으로 하고 있다.

(1) 선수파이프

점착력과 토피가 작은 토사지반에 흔히 사용되고 있으며 $\phi 40 \sim 50\text{mm}$, 길이 2~3m정도의 강관을 천공 후 타설하는 것이다. 애추부와 같이 공극이 있는 원지반에는 이 강관을 이용하여 시멘트 풀 등을 주입하여 지반을 강화하는 시공 사례도 있다.

(2) 선타볼트

균열이 발달한 원지반이나 얇은 점토층을 끼고 있는 지반에서 터널 천정부분의 분리나 붕괴를 방지하기 위하여 사용된다. 이 방법은 막장 천정에서 어깨부분에 걸쳐 양각 10~30°,

타설간격 0.2~1.0m정도로 철근을 타설한다. 그 길이는 원지반 상황에 따라 다르지만 2~3m로 하는 것이 많다.

(3) 철판, 강널판

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법에서는 널판공법의 빗끼움과 마찬가지로 기능을 하는 철판, 강널판을 굴착 외주를 따라 원지반에 박는다. 일반적으로 폭 15~20cm정도의 것을 사용함으로써 파이프나 볼트보다도 넓은 지지면으로 원지반을 지지하게 된다. 그러나 원지반에 따라서는 박을 때의 시공성이 좋지 않으므로 충분한 검토가 필요하다.

시공시의 문제점으로는 강널판과 원지반 사이에 공극이 발생하기 쉬우며 강널판과 동바리 사이에 사용하는 썬기 때문에 뿔어붙임 콘크리트를 충전하기가 어려운 것 등이 있다. 그러므로 강널판의 배치나 썬기의 사용량을 고려하여 시공한다. 또한 강널판의 양이 많으면 록 볼트의 타설에 지장을 주는 수가 있다.

바. 막장 보호공

뿔어붙임 콘크리트·록 볼트공법은 막장에 근접하여 뿔어붙임 콘크리트나 록 볼트 등의 지보공을 시공하기 때문에 널판공법보다는 막장의 자립성이 좋은 경우가 많다. 그러나 원지반이 불량한 구간의 막장안정을 위하여 다음 보조공법이 사용된다.

(1) 막장면 뿔어붙임 콘크리트

막장의 안정을 위하여 두께 3~5cm정도의 뿔어붙임 콘크리트를 막장면에 시공하는 것으로 막장면의 이완이나 열화의 방지에 효과가 있는 공법으로 활용되고 있다.

(2) 막장면 막이 록 볼트

팽창성 원지반에서 막장안정이 어려운 경우에 사용된다. 이 경우 뿔어붙임 콘크리트를 병용하는 것이 보다 효과적이다. 타설하는 본수나 간격은 원지반의 상태에 따라 다르지만 일반적으로 1~2 m²에 1개 정도이다.

사. 지표면으로부터의 보강볼트

터널 굴착 전에 미리 지표면에서 거의 연직으로 록 볼트를 시공하는 것이다. 이 공법은 선형침하 방지나 록 볼트의 정착 및 뿔어붙임 콘크리트가 강도를 발현할 때까지의 이완발생방지에 효과가 있어서 굴착작업에 지장없이 시공이 가능한 이점이 있다. 또한 갱구부의 비교적 가벼운 사면 활동에 대한 대책으로도 사용된다.

7.4 버력처리

7.4.1 일반사항

버력처리는 터널의 굴진속도를 지배하는 큰 요소이므로 원지반 조건(지질, 용출수 등), 입지조건(주변의 환경, 토사장, 운반로 등), 터널단면의 크기, 길이, 기울기, 굴진방식, 굴진공법,

버력의 성질 등을 고려하여 적재기계, 버력운반 방식, 운반기계, 버력버림 설비 등을 정한다.

버력처리의 기계설비를 정할 때는 버력의 증가율 및 여굴량도 고려해서 검토해야 한다. 버력의 증가율은 암질, 발파방식, 굴착기계 등에 의해서 변화하므로 일률적으로 규정할 수는 없으나 일반적으로는 다음 표를 참조한다. 여굴량을 예상하는 경우는 이 양도 포함하여 버력 반출량을 산정해야 한다. 버력처리는 버력적재, 버력운반, 버력버림으로 구분한다.

표-7.4 버력의 용적변화율 및 단위중량

구 분	자연지반		버 력	
	용 적	단위중량(tf/m ³)	용 적	단위중량(tf/m ³)
경 암	1	2.2 ~ 2.8	1.4 ~ 2.0	1.4 ~ 2.0
연 암	1	2.0 ~ 2.5	1.3 ~ 1.7	1.3 ~ 1.9
토 사	1	1.5 ~ 2.2	1.2 ~ 1.5	1.2 ~ 1.8

7.4.2 버력적재

버력적재에 앞서 굴착면의 뜬 돌을 떼어내어 작업 중 압괴, 암편 등의 붕괴방지에 노력한다. 버력적재기계는 압축공기 구동, 전기 구동 및 내연기관 구동의 것이 있으나 일반적으로 압축공기 구동의 로커 쇼벨(rocker shovel)을 사용하는 예가 많다. 수로터널은 일반적으로 단면이 중소규모로서 내연기관 구동식은 부적당한 경우가 많으며 전기 구동식의 경우에도 막장에서 고압이 필요하게 되므로 별로 사용되고 있지 않다. 압축공기 구동식은 착암용의 압축공기를 사용하여 공기 모터를 작동하며 공기변을 조정하여 운전한다.

버력적재기는 단면이 허용하는 한 대형의 기계를 사용하는 것이 좋으나 막장의 단면에 의해 제약을 받으므로 수로터널의 경우 버켓용량 0.1 ~ 0.4m³ 정도의 로커 쇼벨이 널리 사용되고 있다. 규격 결정시에는 후속작업인 운반기계, 예를 들면 트레인 로더(train loader), 체리 픽커(cherry picker), 셔틀 카(shuttle car), 운반차 등의 능력 등도 고려한다.

버력적재 효율은 암의 강도, 천공 및 발파의 상태, 버력 채취 폭 등에 따라 다르며 특히 단면이 적은 경우 버력의 비산이 크므로 적재기계의 제원대로 능력을 발휘하기 힘들다. 수로터널의 실적에서는 약 40% 전후의 적재능력을 발휘할 수 있는 것으로 알려지고 있으며 이외에도 적재준비 시간, 비산 버력의 처리 작업능력 등을 고려하여 결정한다.

7.4.3 버력운반

운반방식은 궤도식과 타이어식이 있으나 수로터널에서는 일반적으로 궤도식을 사용한다. 수로터널은 대부분 굴착 단면이 작으므로 단선 궤도가 많이 사용되며 이 경우 500 ~ 600m 정도의 간격으로 교차할 수 있는 피행선이 필요하게 된다. 궤도식의 경우에는 일반적으로 운반차를 다수 연결하여 기관차로 견인한다.

버력운반작업을 안전하고 원활히 하기 위하여 항상 운반궤도의 보수관리에 노력하고 궤도의 간격, 통행, 고저, 수준의 이상 유무를 항상 점검한다.

가. 운반차

운반차로는 상자형과 사이드 덤프(side dump)형, 그랜비형 트롤리(granbee type trolley), 셔틀 카(shuttle car), 방커 트레인(banker train) 등이 사용된다.

상자형 운반차는 제작비는 저렴하나 버력 운반차 전도 장치를 이용하여 운반차와 같이 회전시켜 사토하게 된다. 그랜비형은 3.0m³까지는 인력으로 회전시켜 사토할 수도 있으며 대형의 경우 호이스트(hoist) 등에 의해서 한쪽을 달아 올려 사토하거나 유압펌프에 의한 전도기에 의해 사토한다.

셔틀 카는 길이가 긴 형태의 운반차로서 체인 컨베이어가 장치된 것이다. 로카 쇼벨 등에 의해 적제구에 버력을 쌓아 체인 컨베이어에 의한 운반하여 연속적으로 적재하므로 전체 길이(보통 30m³ 형이 25m정도)에 걸쳐서 버력을 적재 운반할 수 있는 운반차이다. 컨베이어의 동력은 압축공기를 이용하는 에어 모터를 사용하는 경우가 많다. 적재용량은 1회 발파의 버력량을 적재할 수 있는 크기로 제작한다. 단점으로는 제작비가 높고 중량이 무겁기 때문에 큰 궤도(30kgf/m)가 사용되어야 하며 곡선이 많으면 사용할 수 없는 점 등이 있으므로 비교 설계를 한다. 특히 셔틀 카의 중량이 무겁기 때문에 탈선이 되지 않도록 궤도 부설에 주의를 한다.

사용하는 운반차의 규격, 대수는 터널단면, 버력적재 기계 등을 고려하여 결정하지만 차량의 운행중에도 작업원이 안전하게 보행할 수 있도록 토차와 동바리 또는 토차와 라이닝간에 필요한 간격을 확보할 수 있도록 결정한다. 운반궤도는 갱내 운반차의 고속화에 따라 일반적으로 15~30kgf/m의 레일을 사용한다.

적재 완료한 운반차와 빈 운반차와의 원활한 교차의 성패는 버력처리 작업전체의 능률을 좌우하게 되므로 교차방식의 선정에 신중을 기한다.

나. 교차방식

토차의 교차에는 체리 픽커(cherry picker), 카 패서(car passer), 트레인 로더(train loader), 이동분기기(sliding point, 별명 : california switch) 등이 사용된다.

체리 피커는 고정식과 이동식이 있다. 고정식은 체리 피커용 궤도가 필요없으며 H형강 등을 사용하여 굴착한 측벽에 고정하고 호이스트 등을 이용하여 운반차를 들어 올려 교체하는 것이다. 이동식은 체리 피커용 궤도를 부설하여 막장에서 교차시킬수도 있고 천공용 발판으로도 이용할 수 있으며 보통 단면 직경이 3.0m 이상인 경우 사용된다. 이 보다 내경이 작으면 100~200m 간격으로 고정식 체리 피커를 설치하여 교차시키는 것이 좋다.

카 패서에 의한 교차 방식은 슬라이드 궤도를 본선 궤도와 함께 설치하여 빈 운반차를 슬라이드 궤도상으로 옮겨 이동시켜 적재된 운반차의 뒤쪽으로 본선 궤도에 올려놓음으로서

교차하는 방식으로서 이러한 방법을 반복하여 운반차 전체를 교차시킨다.

트레인 로더 방식은 막장에서 버럭 운반차를 1대씩 교차하지 않고 운반차들을 연결한 체벨트 컨베이어의 아래에 끌어 넣어 갱구측의 운반차부터 족재를 시작하여 차례대로 적재하는 방식이다. 제작비가 체리 피커보다 3~4배 이상 비싸며 터널의 길이가 긴 경우에 경제성이 있다.

이동분기기는 조립된 가동식 복선궤도로서 본선 궤도 위에 올려놓고 로커 쇼벨로 끌어당겨 이동시킨다. 양단부에는 운반차가 오를 수 있게 선단 궤도를 장치한다. 궤도 중간에 사용하는 경우와 막장에서 사용하는 경우가 있으나 수로터널에서는 대부분 단면이 작아 막장에 복선의 궤도 부설을 위한 여유가 없기 때문에 막장에서의 교차용으로는 잘 사용되지 않는다.

다. 기관차

기관차는 축전지 기관차와 디젤 기관차가 있다. 최근 배기가스 처리장치의 발달 및 환기설비의 발달에 따라 경비가 싼 디젤 기관차가 사용되기 시작하여 대규모 단면의 터널에서 사용되고 있으나 수로터널은 단면이 작고 비교적 길이가 긴 길기 때문에 배기가스 처리문제로 축전지 기관차가 많이 사용되고 있다.

기관차의 견인력은 운반차의 용량과 터널의 구배를 고려하여 결정한다.

7.4.4 버럭 버림

갱내의 버럭운반방식은 일반적으로 궤도방식이므로 갱구에서 옮겨신는 수가 있다. 이런 경우 갱구 부근에 버럭받이 시설(버럭 옮겨신기 시설)을 설치할 필요가 있다.

버럭받이 시설은 버럭운반차 전도 설비와 트랙터 쇼벨(tractor shovel)로서 트럭에 싣는 경우가 많다. 또한 버럭받이 핀 및 플레이트 피더(plate feeder) 또는 에이프론 피더(apron feeder) 등을 설비하는 수도 있다. 이외에도 작업갱이 사갱 또는 수직갱의 경우 버럭운반차를 감아 올리는 장치도 필요하다.

7.5 지보공의 시공

지보공은 각 지보공 부재의 기능을 합리적으로 살릴 수 있도록 원지반의 상태를 고려하여 적절히 시공한다.

7.5.1 동바리의 설치

터널 굴착으로 발생하는 토압은 시간의 경과와 함께 증대하는 것이 일반적이므로 굴착후 신속하게 동바리를 시공한다. 단, 지질조건이 양호하여 굴착 후 뜬돌 떼기를 철저히 시행함으로써 일정기간 낙석이나 붕괴의 우려가 없는 경우에는 나중에 동바리를 설치하고 굴착을 선행시키는 경우가 있다.

동바리는 소정의 내공단면과 설계강도가 확보되도록 정해진 위치에 정확히 설치한다. 특히

외력에 충분히 대응할 수 있도록 한 조의 동바리는 동일 평면상에 설치하여 비틀림 모멘트가 발생하지 않도록 주의를 한다. 동바리의 설치작업에는 정부이음의 볼트 조임, 연결볼트, 안보의 삽입 및 조여붙임, 널판 걸치기, 켜기, 토대목의 붙임 등이 있으며 이들 작업은 주의하여 시공하지 않으면 동바리의 구조물로서의 기능이 저하된다. 켜기나 연결볼트의 시공에 대해서는 특히 주의를 요한다.

7.5.2 뿔어붙임 콘크리트-록 볼트공법에서의 지보공 시공

굴착에 따라 주변 원지반을 안정시키려면 벽면 변위량을 제한하여 지보공에 의한 반력을 주변 원지반에 전달토록 해야 한다. 이와 같이 하려면 지보공의 시공은 굴착 후 신속히 하는 것이 중요하며 지보공과 원지반과를 밀착시켜 일체화시키는 것이 중요하다.

지보공의 시공순서는 원지반조건이 비교적 양호한 경우에는 ①뿔어붙임 콘크리트, ②록 볼트의 순서로 하며 원지반이 나쁜 경우에는 ①1차 뿔어붙임 콘크리트, ②강재 동바리, ③록 볼트, ④2차 뿔어붙임 콘크리트 순서로 시공하는 예가 있다. 각 지보공 부재가 각각의 기능을 합리적으로 살려서 시공단계마다의 효과와 종합적 효과를 기대할 수 있도록 원지반 상태를 고려하면서 지보공의 시공순서를 정한다.

가. 뿔어붙임 콘크리트 방식

(1) 뿔어붙임 콘크리트 방식의 구분

콘크리트의 비빔방식, 압송방식에 따라 건식과 습식으로 구분한다. 건식은 시멘트와 골재를 마른 비빔으로 한 다음 급결제를 첨가하고 압축공기를 이용하는 압송노즐로 압력수를 가하여 뿔어 붙이는 방식이다. 노즐에서 물과 마른 재료를 혼합하기 때문에 콘크리트의 품질은 작업원의 숙련도와 능력에 좌우된다는 단점이 있다.

습식은 물과 시멘트 및 골재를 믹서로 혼합한 비빔콘크리트를 압축공기 또는 펌프로 압송하여 노즐로 급결제를 첨가하여 뿔어 붙이는 방식이다. 건식에 비해 콘크리트의 품질관리는 용이하지만 먼 거리의 압송에는 부적합하다. 습식의 장점인 품질관리의 용이성을 건식에 도입하기 위하여 물을 노즐의 수 미터앞에서 가하는 연구가 이루어져 실용화되고 있으며 이를 준습식이라 하기도 한다.

표-7.5에 두 방식의 비교, 그림-7.7에 두 방식의 계통도를 표시하였으나 일장일단이 있으므로 현장의 규모 및 상황, 뿔어붙임 콘크리트의 양 등에 따라 선택적으로 사용되고 있다.

표-7.5 건식과 습식의 비교

구 분	건 식	습 식
콘크리트의 품질	노즐로 물과 건식비빔 재료와 혼합하므로 품질은 작업원의 숙련도, 능력에 따라 좌우된다	물을 포함하여 각 재료를 미리 정확하게 계량하는 한편 충분한 혼합이 가능하여 품질관리가 용이하다
작업의 제약	건식비빔 재료를 공급하면 되기 때문에 운반시간 등 공급작업의 제한은 적다	재료의 공급에 제한을 받는다
압송거리	비교적 먼거리의 압송이 가능하다	먼거리의 압송에는 적당하지 않다
분 진	비교적 많다	비교적 적다
반발량	비교적 많다	비교적 적다
청소, 보수	소형·보수가 용이하다. 비빈상태로 들 수 있다.	대형호수가 막히는 경우 청소가 곤란하다. 비빈상태로 들 수 없다

(a) 건식계통도

(b) 습식계통도

그림-7.7 뿔어붙임 콘크리트 방식의 계통도

(2) 뿔어붙임 콘크리트의 배합

뿔어붙임 콘크리트의 배합은 콘크리트 강도와 품질에 영향을 줄 뿐 아니라 사용하는 뿔어붙임 기계의 효율, 압송 등의 시공성에 크게 관련되므로 시방배합을 근거로 배합이 되도록 한다. 각 현장의 사용재료, 기계 및 원지반 상황에 적합하도록 사전에 현장시험을 하여 적절한 현장배합을 한다.

표-7.6 뿔어붙임 콘크리트의 배합 예

뿔어붙임 콘크리트의 방식	압축강도 $\sigma_{28}(\text{kgf/cm}^2)$	굵은 골재의 최대치수 (mm)	단 위 시멘트량 (kgf)	물·시멘트비 W/C(%)	잔골재율 s/A(%)	급결제율 X/C(%)
건 식	180	10 ~ 15	330 ~ 360	45 ~ 50	60	5.0 ~ 7.0
습 식	180	10 ~ 15	330 ~ 360	50 ~ 55	60	5.0 ~ 7.0

(3) 뿔어붙임 기계

뿔어붙임 기계의 선정을 위해서는 소요배합의 콘크리트로 시공이 가능한가를 확인해야 한다. 폐색 등으로 내압이 일시적으로 높아지는 수가 있으므로 기계 각부는 내압에 대하여 충분히 안전하게 하고 특히 호스의 뿔어붙임부, 연결부 등에 주의한다. 또한 뿔어붙임 기계는 재료를 균등하게 연속하여 압송하지 못하면 소요 품질과 양호한 마무리면을 기대할 수 없을 뿐만 아니라 작업능력에도 영향을 준다. 건식은 연속 균등 압송이 되지 않으면 균질의 콘크리트를 얻기가 곤란하다.

(4) 뿔어붙임 작업

뿔어붙임 작업을 할 때는 다음 사항에 유의한다.

- ① 굴착 후 뜯돌을 떼어낸 다음 굴착표면을 신속하게 뿔어붙임 콘크리트로 피복한다. 뜯돌은 작업원에게 위험하며 또한 뿔어붙임 콘크리트의 부착성 및 강도에 나쁜 영향을 미치므로 작업 전에 제거해야 한다.
- ② 철망, 철근, 배수장치, 계측기 등을 붙일 경우에는 충분히 고정시킨다. 철근 및 철망의 고정이 불충분한 경우에는 뿔어붙임 작업중의 이동, 진동에 의하여 반발량이 증가하므로 앵커, 철근, 핀 등으로 충분히 고정시킨다.
- ③ 노즐로부터 분출되는 재료가 적절한 속도로 굴착면에 직각으로 부딪혔을 때 가장 압축이 잘 되므로 부착성도 좋다. 굴착면에 경사지게 부딪혔을 경우에는 먼저 뿔어붙인 부분을 날려버리는 결과가 되어 반발량이나 박리가 많아진다. 노즐과 시공면과의 거리는 충돌과 부착밀도가 적당한 상태가 되도록 정한다. 일반적으로 1m정도가 적당한 거리이다.
- ④ 작업에 앞서 굴착면의 요철을 메워서 원지반의 응력이 원활하게 전달되도록 한다. 또한 원지반의 응력이 강재 동바리에 균등하도록 전달되게 강재 동바리의 배면에 공극을 남기지 않도록 주의하고 후속되는 방수시트 포설작업에서 시트의 파손을 방지하기 위하여 시공면을 가능한 한 매끄럽게 마무리한다.
- ⑤ 뿔어붙임 콘크리트 작업으로 인한 분진은 집진기를 사용하여 발생장소에서 처리하는 방법도 있으나 적절한 환기방식을 채택하여 충분한 환기를 하는 것이 보다 효과적이다. 또한 분진 발생 억제 대책으로 분진 억제제를 사용하는 경우도 있다.

(5) 용출수 대책

원지반에서의 용출수가 있는 경우에는 콘크리트를 씻어 내리거나 박리와 부착력 약화의 원인이 되어 품질과 작업능률이 저하되므로 적절한 대책을 검토해야 한다.

- ① 시멘트량과 급결제를 늘리는 등 배합을 변경하여 타설한다.
- ② 철망을 붙여 뿔어붙임 콘크리트의 부착성을 높인다.
- ③ 처음에는 건비빔 콘크리트를 뿔어붙여서 용출수가 스며들도록 한 후 서서히 물을 추가하면서 시공한다.

- ④ 용출수가 부분적으로 다량 발생하는 곳에는 배수파이프를 박아 배제하며 타설한다.
- ⑤ 용출수가 광범위하게 발생하는 경우에는 철망에 휠터재나 시트 등을 붙여 원지반에 고정시키고 배수를 하며 타설한다.
- ⑥ 암반의 절리부분에서 용출수가 발생할 때는 절리를 따라 배수구로 배제하며 타설한다.

나. 록 볼트

(1) 천 공

록 볼트의 천공은 뜯돌을 제거하고 안전을 확인한 후에 적절한 치수의 비트를 사용하여 소정의 위치에 정확한 방향과 깊이로 시공한다.

록 볼트공의 천공직경은 사용하는 록 볼트의 직경에 따라 다르지만 천공직경이 너무 작으면 록 볼트의 삽입이 곤란하게 되거나 볼트의 형식에 따라서는 나사부분의 파손을 가져올 우려가 있다. 또한 너무 크면 정착재가 많이 필요하게 되고 충전되지 않은 부분이 남아있기가 쉬워 정착이 불완전한 경우가 있다.

천공직경은 비트의 직경에 따라 정해지며 경암의 경우는 비트의 소모상황을 점검하여 허용치를 초과하지 않도록 한다. 경암에서는 천공이 거칠어지거나 천공으로 인한 돌가루의 배출로 작업이 곤란한 경우가 있으며 토사의 경우 로드의 흔들림으로 천공직경이 크게 되기 쉬우므로 주의하여 시공한다. 자기천공형의 록 볼트는 선단에 비트를 부착한 것으로 천공상태가 현저하게 거칠어지는 경우나 공벽이 자립하지 못하는 경우에 사용된다. 록 볼트의 정착 방식에 따라서는 돌가루가 남아 있으면 작업성이나 정착성이 현저하게 떨어지므로 공 내측을 충분히 청소한다.

천공기계는 록 볼트공 전용기와 발파공 겸용기가 있다. 전용기는 록 볼트의 삽입, 조여 붙임까지 1대의 기계로 일관된 시공이 가능한 것도 있다. 록 볼트의 천공작업은 록 볼트 작업 중 차지하는 비율이 크기 때문에 효율이 좋은 천공기계를 선정해야 한다. 일반적으로 사용되는 천공기계는 드리프터(drifter), 레그 드릴(leg drill), 에어 오거(air auger) 등이다.

표-7.7 천공기계의 특징

드리프터(drifter)	레그 드릴(leg drill), 싱커(sinker), 스톱퍼(stopper)	핸드 오거(hand auger), 레그 오거(leg auger)
대형으로 천공능력이 크고 직경이 크거나 긴 구멍의 천공에 적합하다. 로드의 회전을 라이플 바(rifle bar)로 하는 것과 독립회전모터를 장비한 것이 있다. 후자의 쪽이 회전력이 강하고 회전수의 변경도 되기 때문에 적용범위가 넓다.	레그 드릴은 상향공이나 하향공의 천공이 곤란하다. 상향공에는 스톱퍼, 하향공에는 싱커를 사용한다. 일반적으로 인력작업이어서 로드를 잡아 빼기가 곤란한 경우가 있다.	연암, 토사 등에 대하여 사용된다. 옥석층이나 자갈층에서는 천공이 곤란하다. 점토층에서는 스파일 로드(spile rod)에 돌가루가 부착하여 천공이 불가능한 경우도 있다.

(2) 록 볼트의 삽입 및 정착

록 볼트의 삽입, 정착작업을 할 때는 다음 사항에 유의한다.

- ① 사용기계는 볼트의 종류에 따라 적절한 것을 선정한다. 모르터를 사용하여 록 볼트를 정착할 경우 모르터의 비빔에는 모르터 믹서, 모르터 압송은 모르터 피더나 모르터 펌프 등의 기계가 사용된다. 록 볼트의 조여붙임에는 토크 렌치(torque wrench), 유압 텐쇼너(tensioner), 임팩트 렌치(impact wrench) 등 정착방식에 따라 특수한 기계가 사용된다.
- ② 록 볼트를 소정의 깊이까지 삽입하기 위하여 공 내부의 청소를 철저히 한다. 삽입이 곤란한 경우에는 록 볼트의 형식변경 등 대책을 세운다.
- ③ 선단정착방식은 시공 후에 토크 렌치 등으로 너트를 죄어서 정착이 충분히 되었는지 여부를 확인한다. 정착제를 사용하여 정착하는 경우에는 경화시간이나 경화 정도를 용출수량이나 공의 방향에 따라 조정하여 소정의 정착력을 얻을 수 있도록 한다.
- ④ 록 볼트의 경화작용을 충분히 발휘시키기 위하여 록 볼트의 정착 후 지압판이 굴착면이나 뿔어붙임 콘크리트면에 밀착되도록 너트 등으로 고정한다. 록 볼트에 프리스트레스를 도입하는 경우 소정의 죄어진 힘에 대하여 정착재가 내력을 발휘할 수 있는 재력을 확인한 후에 조인다.

(3) 용출수 대책

모르터를 사용한 전면접착방식에서 용출수가 있는 경우 모르터를 유출 또는 분리시키거나 물시멘트비를 증가시켜 현저하게 강도가 저하한다. 경암·중경암의 원지반에서 용출수량이 많은 경우에는 록 볼트공 가까이 배수구멍을 설치하여 록 볼트공의 물을 뺀 후에 수지, 발포수지, 시멘트캡슐을 사용한다거나 시멘트 풀 주입방식 등으로 시공한다.

사질의 토사 원지반에서는 사전에 용출수 처리를 하면 공벽의 자립이 곤란하게 된다.

용출수량이 적을 경우에는 구멍 입구에 썰기를 박거나 되게 비빈 모르터를 사용하는 방법이 있다. 원지반의 조건이나 천공상태, 용출수 상황에 따라 충분한 정착력을 얻지 못할 경우에는 정착재료나 정착방식의 변경을 고려한다.

다. 강제 동바리

강제 동바리는 하중을 부담할 수 있게 가능한 한 원지반에 밀착하여 설치한다. 침하 또는 변형이 예상될 때는 미리 여유있게 넓혀서 설계 라이닝 두께가 확보될 수 있도록 설치한다. 또한 지지부에 위험한 침하가 발생하지 못하게 대책을 강구해야 한다.

한 조의 동바리는 동일 평면내에서 뒤틀림이나 전도되지 않게 설치하고 이동하지 못하게 썰기, 연결볼트 등으로 고정시킨다. 강제 동바리는 초기하중을 부담하는 역할이 크므로 굴착 후 가능한 한 막장에 가깝게 신속히 설치한다.

7.6 작업갱

작업갱은 지형조건, 지질조건 및 공사규모를 검토하여 필요성, 형식과 규모 등을 결정한다. 버력 반출, 기계·재료의 반입 및 반출, 급·배수, 환기 및 작업원 이동 등의 통로로는 안전성과 경제성으로 보아 본갱을 이용하는 것이 유리하지만 지형조건으로 본갱의 이용이 불가능한 경우와 터널이 길어 공정상 분할시공하여 막장의 수를 증가시킬 필요가 있을 때는 작업갱이 필요하게 된다.

작업갱의 필요성, 형식 및 규모에 대해서는 다음 조건을 검토한 후에 결정한다.

- ① 입지조건
- ② 터널규모와 공사기간
- ③ 작업갱 유무에 의한 시공의 경제성
- ④ 터널 완성 후 관리용 갱으로의 사용 여부
- ⑤ 작업갱 위치의 지형·지질조건 및 시공의 난이
- ⑥ 시공계획

작업갱의 굴착, 동바리, 라이닝 등의 설비는 본갱에 준하되 유지관리용으로 계속 사용하는 경우를 제외하면 라이닝은 갱구 및 갱구 부근에 주로 하고 기타 부분은 공사기간, 지질조건 등을 고려하여 최소한으로 한다.

7.6.1 횡갱

터널 측면에서 작업갱을 거의 수평으로 설치하여 본갱에 연결하는 작업갱을 말한다.

횡갱의 단면은 버력운반, 콘크리트운반과 자재의 운반을 위한 기계의 통행, 환기관, 급·배수관의 설치 또는 작업원의 안전보행을 고려하여 결정한다. 각종 기계의 형식·규격은 공사규모에서 결정된다. 기계는 록 쇼벨(rock shovel), 기관차, 운반차, 애지테이터(agitator: 교반기), 프레스서(presser) 또는 애지테이터 카(agitator car) 등을 대상으로 한다.

7.6.2 사갱

사갱은 본갱의 토피가 작은 지점에 설치하고 본갱과 평면적으로 직각 또는 경사지게 교차시킨다. 사갱의 기울기는 지형조건에 따라 제약되지만 작업과 안전을 위하여 1:4 정도를 한도로 한다.

사갱은 버력 반출이나 재료의 운반 등에 있어서 횡갱보다는 못하지만 수직갱에 비하면 편리하고 공사비도 저가이다. 사갱의 단면은 버력반출방법, 콘크리트의 운반방법과 사용기계에 대한 충분한 검토와 보행자의 안전확보, 환기관, 급·배수관의 설치 등을 고려하여 설계한다.

가. 버력반출방법

사갱에서의 버력반출방법은 일반적으로 다음 방식이 채택된다.

(1) 인클라인(incline)방식

가장 간단한 방법으로 짧은 사갱에 흔히 채택되며 다른 방식에 비하여 경제적이다. 이 방식은 막장으로부터 사갱과 본갱과의 교차점에 운반된 버럭토차를 원치로 끌어 갱외에 반출하는 것이다.

(2) 스킵 카(skip car)방식

막장으로부터 운반된 버럭을 사갱과 본갱과의 교차점 부근에서 스킵 카에 옮겨 싣고 원치로서 갱외로 감아 올리는 방식이다. 이 경우 사갱과 본갱과의 교차점 부근에 버럭을 옮겨 싣는 설비가 필요하다.

(3) 벨트 컨베이어(belt conveyor)방식

사갱이 긴 경우 제일 안전한 방법이며 작업능률도 유리하다. 이 방식은 사갱과 본갱과의 교차점 부근에서 벨트 컨베이어에 옮겨 실어 갱외로 반출하는 것으로 스킵 바 방식과 같이 옮겨 싣는 설비가 필요하다. 이 방식에서는 버럭의 크기가 커지면 작업이 불가능하게 되는 등 작업능률이 현저하게 저하되므로 주의해야 한다. 이 방식은 상기의 각 방식에 비하여 일반적으로 사갱 단면을 적게 할 수 있다.

나. 콘크리트 운반방법

사갱을 이용할 경우의 콘크리트 운반방법은 인클라인 방식이 좋다고 판단된다. 이 경우 사갱의 기울기가 완만하면 특별한 문제는 없으나 기울기가 급하게 되면 애지테이터 프레스의 토출구가 콘크리트로 막히거나 콘크리트의 분리가 생기는 등의 문제가 있다.

콘크리트의 투입공을 별개로 설치하는 경우도 있다. 이 경우는 $\phi 250 \sim 300\text{mm}$ 정도의 보링공을 파고 강관을 삽입하여 하부에 설치된 탱크에 연결하고 내부를 기밀상태로 하여 공기를 하부에서 빼어냄으로써 콘크리트를 하부 탱크로 낙하시키는 방법과 $1.5 \times 1.5\text{m}$ 정도의 수직갱을 굴착하고 버켓을 내려서 갱내의 운반기계에 적재하는 방법이 있다.

7.6.3 수직갱

지형조건이나 경제성 측면에서 횡갱 또는 사갱의 시공이 곤란한 경우에 채택한다. 일반적으로 수직갱은 횡갱이나 사갱에 비해 작업조건이 불리하다.

수직갱을 설치하는 경우에는 본갱 중심선상에 설치하는 경우와 옆으로 비껴서 연락 횡갱을 설치하여 본갱과 연결하는 경우가 있다. 수직갱의 단면설계는 버럭반출, 콘크리트의 운반, 자재의 반입, 작업원의 승강 등을 고려한다. 특히 궤도와 같이 긴 재료의 반입·반출을 위해서는 수직갱과 본갱의 교차점에서 본갱의 천정부근을 넓게 해 줄 필요가 있다. 작업원의 승강설비는 버럭반출과 자재 운반 등과 공용하는 것은 가능한 한 피하는 것이 좋으며 비상계단도 설치할 필요가 있다.

가. 버력반출 방식

(1) 엘리베이터방식

버력운반차를 케이지(cage)안에 직접 밀어 넣어서 감아 올리는 방식이다. 안정성이 매우 높고 버력을 옮겨 적재 할 필요도 없어서 작업능률도 좋다. 이 방식의 경우 수직갱의 단면은 버력반출용 케이지, 작업원 승강용 케이지 및 작업원 승강용 비상계단의 설치를 고려하여 결정한다.

(2) 스킵 엘리베이터(skip elevator)방식

버력운반차에서 호퍼(hopper)에 투입하여 버킷에 받아서 스킵 카와 마찬가지로 가드레일에 의해 수직으로 감아 올리는 방식이다. 이 경우 수직갱 아래에 버력 적재설비가 필요하므로 바닥을 내리거나 확폭을 한다. 이 방식은 버킷의 크기와 작업원의 승강시설에 따라 수직갱 단면을 결정한다.

나. 콘크리트의 운반방법

수직갱에서의 콘크리트 운반방법은 엘리베이터 방식으로 애지테이터 프레서를 승강시킬 수 있으나 일반적으로 수직갱내에 콘크리트 투입관을 설치하여 수직갱 아래에서 콘크리트의 공급을 받는 방식이 많다. 사갱과 같이 콘크리트 투입공을 별개로 설치하는 경우도 있다.

7.7 라이닝

라이닝의 시공은 지질조건, 터널규모 및 공사기간 등을 종합적으로 검토하여 안전하고 경제적으로 시행한다.

7.7.1 라이닝 시공방식

무근 콘크리트 또는 철근 콘크리트로 라이닝을 하는 경우에는 터널의 규모, 내수압, 지질 조건 및 공기 등을 종합적으로 검토하여 라이닝의 시공방식을 선정한다.

가. 일체시공방식

니들 빔(needle beam)형 거푸집에 의해 1회의 콘크리트 타설로 라이닝을 완성시키는 방식

나. 분할시공 방식

- ① 순라이닝 방식 : 아치.측벽부를 일체로 하여 또는 측벽부, 아치부의 순으로 라이닝 콘크리트를 타설하는 방식
- ② 역라이닝 방식 : 아치부의 콘크리트를 먼저 타설하고 측벽부는 굴착을 하면서 측벽 콘크리트를 타설하는 방식

일체시공 방식 순라이닝 방식 순라이닝 방식 역라이닝 방식
 그림-7.8 라이닝방식의 표준

표-7.8 라이닝 방식의 선정

분 류		구조상의 안정성 및 마무리후 품질	시공의 난이도, 공기, 공사비 등
방 식	기 호		
일체시공 방식	A	원형 또는 원형에 가까운 마제형에 한함. 종단 방향의 이음이 없으므로 구조상 가장 유리하지만 지질이 불량하고 용출수가 많은 경우에는 인버트부의 마무리가 불량하여 품질이 열악하다.	세그먼트(segment)등의 1차 라이닝이 없는 경우 용출수처리가 곤란하다. 공기는 분할시공 보다는 빨라지지만 공사비가 약간 많이 든다.
분리시공 방식	B	일반적으로 중소단면에 적합하다. 마무리 상황은 약간 떨어지나 구조상으로는 오히려 이음이 적은 만큼 유리하다.	콘크리트의 타설량이 적은 경우, 시공은 유리하고 공기도 약간 빨라진다. 수로터널의 표준적인 방식이다.
	C	원형의 압력터널에서 용출수가 많은 경우, 내수압이 낮은 경우, 연장이 긴 경우에 채택되나 이음이 구조상의 약점이 되기 쉬우며 누수도 염려된다. 그라우팅을 충분히 할 필요가 있다.	원형터널로는 시공이 가장 용이하고 공기가 빠르며 공사비도 가장 적게 든다.
공방식	D	단면이 크고 지질이 불량한 경우에 안전시공을 위하여 시행한다. 종단이나 횡단으로 가늘고 불규칙하게 이음이 생기고 불완전하게 되기 쉬우며 발파때문에 먼저 타설한 콘크리트를 손상하여 강도가 가장 떨어진다. 수로터널의 시공법으로는 부득이한 경우 외에는 피하는 것이 바람직하다.	시공상 가장 안전하며 강도의 결함을 보충하기 위하여 버림 역라이닝으로 하는 것이 바람직하나 공사비는 불리하다.

7.7.2 라이닝 공법

라이닝 공법은 지질조건, 터널규모 및 공기 등을 종합적으로 검토하여 선정하지만 특수한 경우를 제외하고는 일반적으로 기계로서 시공한다.

7.7.3 아치·측벽부의 라이닝 작업

아치·측벽부의 라이닝작업은 다음 공정으로 분류된다.

- ① 거푸집의 조립(설치)
- ② 콘크리트의 운반
- ③ 콘크리트의 치기
- ④ 양생 및 거푸집 제거

가. 거푸집의 조립(설치)

(1) 거푸집의 선정

거푸집은 이동식 거푸집과 조립식 거푸집으로 분류된다. 이동식 거푸집이란 센터와 강재거푸집 패널(panel) 또는 스킨 플레이트(skin plate)를 일체의 구조로 한 것으로서 텔레스코픽(telescopic)형과 논-텔레스코픽(non telescopic)의 것이 있다.

텔레스코픽형은 여러 조의 거푸집과 한 조씩 이동하는 장치 트래블러(traveler)를 조합한 형식의 것으로 1구간의 콘크리트 치기에서 이미 경화된 부분의 거푸집을 제거하고 앞으로 이동시켜 연속콘크리트 치기가 가능한 것이다.

논-텔레스코픽형은 거푸집 1조 분이 일체가 되고 이동장치를 고정한 형식이다. 1구간의 콘크리트 치기가 끝나고 소요 양생시간이 지나면 제거하여 다음의 치기 위치로 이동하는 것이다. 수로터널에서는 일반적으로 이 형식이 사용된다.

이동식 거푸집은 조립과 제거가 간단하여 라이닝의 공정을 단축할 수 있는 것과 거푸집의 어긋남에 대한 걱정이 없기 때문에 라이닝 표면이 매끈하게 마무리되는 장점이 있으나 역라이닝이 필요할 경우에는 측벽콘크리트 부분에 사용할 수 없는 단점도 있다. 조립식 거푸집은 설비비는 이동식 거푸집과 비해 저렴하지만 조립과 제거에 시간과 노력이 소요되고 거푸집이 어긋나기 쉬운 단점이 있다.

(2) 거푸집의 설치

① 설치준비

거푸집의 설치 때는 소정의 단면과 설계 라이닝두께를 확보하기 위하여 동바리의 조립위치에 대하여 정확한 측량을 한다. 설치 오차나 설치 후의 발파, 토압에 의한 변형 등으로 설계라이닝 두께가 확보되지 않는 경우가 있으므로 주의를 요한다.

소정의 단면과 설계라이닝 두께가 확보되는 것이 확인되면 콘크리트 라이닝에 악영향을 미치는 버팀 통나무를 제거하거나 보내기 널 및 빗끼움 널의 끝을 절단한다. 거푸집의 설치

장소에 용출수가 있는 경우에는 라이닝 밖으로 유도하도록 조치한다.

② 설치

거푸집을 정확한 위치에 설치하고, 설치 후에는 이동이나 변형이 없도록 한다. 거푸집의 설치에는 다음 사항에 유의한다.

- 설치위치를 확실하게 하기 위하여 정확한 측량을 한다.
- 콘크리트의 치기로 인하여 거푸집이 침하될 수 있으므로 주의한다.
- 조립식 거푸집을 사용할 경우 서로 어긋나지 않도록 주의한다.
- 맨 가장자리의 거푸집은 콘크리트의 압력에 견디는 구조로 하고 모르타가 새지 않도록 원지반에 밀착시킨다.

나. 콘크리트 운반

운반기계는 애지테이터 카 또는 애지테이터 프레서를 사용하는 경우가 많다.

다. 콘크리트 치기

콘크리트 치기 기계는 콘크리트 펌프, 애지테이터 프레서 중에서 공사규모, 경제성 등을 고려하여 선정하지만 수로터널에서는 애지테이터 프레서의 사용이 많다.

라. 양생 및 거푸집의 제거

거푸집의 제거시기는 토압의 유무, 지보공 형식, 콘크리트 배합 및 타설 방법, 터널내 기온 등에 따라 다르지만 타설한 콘크리트가 필요한 강도에 도달할 때까지 제거해서는 안된다. 현장의 상황에 따라서는 거푸집을 제거한 후 피막양생을 하기도 한다.

7.7.4 인버트의 라이닝 작업

인버트의 라이닝은 터널의 마지막 공정이 되는 경우가 많다. 이 때문에 터널의 안쪽으로부터 갱구를 향하여 레일, 송기관, 송수관, 환기시설, 송전시설 및 배수시설 등의 제반 시설을 철거하면서 시공하는 것이 일반적이다. 라이닝의 준비에는 이러한 제반 시설의 철거, 인버트 부분의 수정(통상 「반내림」이라 함), 배수구의 설치작업이 있다.

버력운반이나 콘크리트운반 등의 작업에 의한 연약화를 방지하기 위하여 설계보다 높게 굴착한 경우나 운반중에 흘러 내린 버력이나 유사의 퇴적물이 있을 경우에는 라이닝에 앞서 소정의 높이로 정정한다.

인버트의 콘크리트 치기에는 벨트 컨베이어 및 애지테이터부 프레서 등을 사용한다.

인버트 라이닝의 마무리는 인버트 피니셔(invert finisher), 슬립 폼(slip form) 및 인버트 스크리드(invert screed)를 사용한 인력 마무리가 있다. 마무리방법은 공사규모를 고려하여 결정하지만 시공속도나 마무리면에서 인버트 피니셔나 슬립 폼을 사용하는 것이 바람직하다.

7.8 그라우팅

그라우팅의 시공은 그라우팅의 목적과 지형조건에 따라 주입재료, 주입순서, 주입압력 및 주입종료 기준 등을 정하여 적절하게 시행한다. 주입작업은 재료의 품질관리, 시공상황의 기록, 주입기계의 점검·정비 등 적절한 시공관리 아래에서 시행한다.

주입기계는 일반적으로 그라우트 믹서와 그라우트 펌프의 조합에 의하는 수가 많다. 특히 그라우트 펌프는 주입관내의 재료 압송 속도, 압력에 따라 주입능률과 효과에 영향이 있으므로 믹서의 용량, 펌프의 능력 및 관경의 결정에는 주의하여 상호간의 균형을 갖춘다.

원지반의 이완에 대한 안전성을 증가시키기 위하여 라이닝 시공 후 가능한 한 조기에 라이닝의 배면 그라우팅을 시공하는 것이 좋다. 라이닝에 변위가 발생할 우려가 있으므로 콘크리트의 라이닝 강도, 거푸집의 유무를 검토하여 주입의 시기를 결정한다.

주입에 앞서 그라우트 구멍을 막고 있는 천조각 또는 나무마개 등을 제거하고 널판이 있는 경우에는 뜯어내어 그라우트공에 주입을 방해하는 것들이 없도록 한다.

주입순서와 압력은 그라우팅의 목적, 재료, 공극의 상황, 배합 등과 관련되는 것으로 일률적으로 정할 수는 없으나 라이닝에 편압이 걸려 변위가 발생되지 않도록 순서를 정하고 원지반을 파괴하지 않도록 시공한다. 주입작업 도중에 콘크리트 라이닝의 시공이음과 관 등으로부터 주입재료가 누출되는 경우에는 적당한 방법으로 이를 막고 소정의 압력에 달할 때까지 충분히 주입하며 주입압력, 주입량 등에 의하여 주입을 완료한다. 상당량의 주입을 하였는데도 소정의 압력까지 상승하지 않을 경우에는 보링으로 주입결과를 확인한다. 작업이 완료된 공은 비빔모르터 등으로 충전하고 누수가 없도록 마무리한다.

7.9 공사용 설비

공사용 설비를 계획하기 위해서는 지형·지질 및 기상조건, 주변환경에 미치는 영향 등 필요한 사항을 조사하여야 하며 터널의 시공법과 밀접한 관계가 있으므로 시공계획에 따라 설비를 계획한다.

갱의 공사용 설비로는 터널입구의 설비, 집진설비, 운반설비, 골재 및 콘크리트 플랜트 설비, 수배전 설비, 용배수 설비, 임시건물 설비 등이 있으며 이들을 위해 비교적 넓은 평지가 필요하다. 험준한 지형에서 갱구 부근에 적절한 공사용지를 확보하기 어려운 경우에는 여러 장소로 분산배치하는 방안도 검토한다.

공사용 설비의 소음, 진동, 배수 등이 주변환경에 미치는 영향, 공사용 전력공급을 위한 송배전선의 용량, 발전설비 등의 동력원, 공사용 장비운용시의 소요전력량 등을 조사하여 반영한다. 터널공사의 주요 동력인 전력의 수전에 대해서는 규모와 장소에 따라 다르지만 많은 시간이 소요되므로 조기의 조치가 필요하다. 일반적으로 공사용 기계 설비 계획과 공사 공정계획을 이용하여 기종별로 소요대수와 가동상태를 상정하여 전력의 소요량을 산정하여 수전계획을 수립한다.

갱내 가설비의 경우에는 굴착방법, 지반조건 등에 따라 공사용 기계설비 등의 사용계획을

수립하여야 하며 특히 기계굴착방식을 적용할 경우는 상당한 전력이 소요되므로 수배전 설비에 유의한다.

운반로의 경우 공사용지나 기존도로를 이용하는 것이 원칙이며 트럭류의 사용이 일반적이거나 입지조건에 따라서는 궤도방식, 삭도방식, 인크라인 방식, 벨트콘베이어 방식 등을 계획해야 하는 경우도 있다. 산악지대에서의 공사에서는 공사용 도로와 사토장의 확보가 중요하다.

7.10 관찰·계측

터널을 시공할 때는 터널굴착에 수반되는 주변 지반의 거동과 각 지보공 부재의 효과를 파악하고 시공상의 안전성과 경제성을 확보하기 위하여 필요한 관찰과 계측을 한다.

7.10.1 관찰·계측의 일반사항

공사의 안전성과 설계의 타당성을 확인하기 위하여 굴착에 의한 터널 주변의 원지반 거동과 각 지보공 부재의 효과를 바르게 파악하는 것이 중요하다. 그러나 사전에 얻은 원지반의 정보에는 한계가 있으므로 설계단계에서는 원지반을 추정하여 설계를 한다. 수치해석을 이용하여 설계하는 경우에도 원지반이나 뿔어붙임 콘크리트, 록 볼트 등의 지보공 부재의 효과에 대하여 불명확한 점이 있다. 그러므로 시공중의 관찰, 계측에 의해 실제 주변 원지반의 거동이나 지보공 부재의 효과를 바르게 파악하여 이를 근거로 설계·시공법의 수정을 한다.

공사의 안전성 확인은 터널 자체의 구조물로서의 안전성을 확인하는 것 뿐 아니라 토피가 작은 터널을 시공하는 경우 지표까지 이완될 우려가 있으므로 터널굴착이 주변의 구조물에 끼치는 영향을 파악하는 것도 필요하다. 널판공법에서는 일반적으로 동바리나 널판 및 라이닝의 변위를 관찰하는 정도지만 뿔어붙임 콘크리트·록 볼트 공법의 경우는 원지반 자체가 갖고 있는 지지기능을 충분히 활용하기 위하여 관찰·계측이 보다 중요시된다.

그림-7.9 관찰·계측의 역할

7.10.2 관찰·계측항목의 선정

관찰·계측항목은 원지반의 조건에 따라 굴착시에 생기는 현상을 예측하여 대책을 세우기 위하여 필요한 것을 선정한다. 작은 단면의 터널에서는 굴착 직후의 원지반 거동이 중요하므로 갱내 관찰조사와 내공변위 측정을 하지만 파쇄대와 같이 원지반의 조건이 나쁜 경우에는 록 볼트의 축력 측정도 필요하게 된다.

7.10.3 관 찰

관찰은 막장에서 지질의 관찰, 기 시공구간에서 동바리·라이닝의 점검, 터널 상부의 지표 관찰로 분류할 수 있다.

가. 막장관찰

시공중에는 원칙적으로 굴착에 의하여 막장이 새로 나타날 때마다 지질상황의 변화를 확인하여 설계·시공의 타당성을 판단한다. 특히 용출수가 시공에 미치는 영향은 크기 때문에 용출수량이나 위치 변화에 유의한다.

막장 관찰시에는 다음 항목에 대한 상황을 파악한다.

- ① 지질구조 : 암석의 관찰, 지층과 절리의 방향, 경사
- ② 원지반의 분류 : 풍화·변질의 정도, 단단한 정도, 갈라진 틈의 방향·간격·층사이의 물질의 유무와 성질
- ③ 단 층 : 위치와 방향·경사, 파쇄의 정도
- ④ 용출수 : 위치와 양, 탁도
- ⑤ 막장의 자립성 : 암편·암괴의 박락, 붕락 등

또한 막장에서 암반의 물성을 보다 정확하게 파악하기 위한 간이 시험으로서 간이 탄성과 측정, 점하중시험, 슈미트 록 햄머(schmidt rock hammer)시험 등이 있다.

나. 기 시공구간의 점검

기 시공구간에 대해서는 아래와 같은 사항을 점검하고 주의 깊게 관찰한다.

- ① 뽑어붙임 콘크리트
 - 원지반과의 부착
 - 균열(발생위치, 종류, 폭, 길이 등)
 - 용출수장소와 상태, 용출수량
- ② 록 볼트
 - 타설위치, 방향
 - 록 볼트, 지압판의 이완
 - 베어링 플레이트의 원지반으로 침몰
 - 머리부의 파단

③ 강재 동바리

- 변형, 좌굴위치, 상황
- 뿔어붙임 콘크리트와의 일체화 상황
- 직선부의 침하

④ 콘크리트 라이닝

- 균열(발생위치, 종류, 폭, 길이 등)
- 용출수장소와 상태, 용출수량
- 변위가 인지된 경우에는 변위의 위치, 종류, 규모, 기구 등을 기록하고, 필요에 따라 위치도, 스케치 등을 작성

다. 지표의 관찰

계곡부 등 토피가 작은 터널의 시공시에는 굴착에 의한 영향이 지표까지 미쳐서 지표침하나 지하수의 고갈 등이 발생할 수도 있으므로 터널상부의 지표상황도 관찰 조사한다. 공사에 의한 영향을 정확히 파악하기 위하여 시공 전부터 영향이 미칠 것으로 생각되는 범위에 대해서 충분한 조사를 해 두는 것이 바람직하다.

7.10.4 내공변위의 측정

가. 계측위치

내공변위와 막장의 상황 변화를 가능한 한 빨리 파악하는 것이 그 후의 합리적인 시공으로 이어지기 때문에 시공의 초기단계에서는 계측단면을 조밀하게 설치한다. 내공변위 측정은 일반적으로 30~50m정도의 간격으로 한다. 어느 정도 상관관계가 파악되고 지질이 양호하여 변화하지 않는 경우에는 갱내 관찰조사를 주로 하고 단면을 적게 할 수 있다. 그러나 지질이 나쁜 경우에는 조밀하게 설치한다.

나. 측정빈도

일반적으로 변위나 응력변화의 비율은 굴착 직후에는 크지만 시간이 경과하고 막장이 멀어짐에 따라 감소해 가는 경향이 있으므로 막장에 가까운 지점에서의 측정은 초기단계에서 조밀하게 측정빈도를 정한다. 작은 단면의 터널에서는 굴착직후의 거동이 중요하므로 적어도 굴착후 1일간은 1회 굴진마다 측정하는 것이 바람직하다. 변위가 안정되어감에 따라, 또한 막장에서 멀어짐에 따라 점차 감소시킨다. 변위속도 등이 변화한 경우에는 측정빈도를 조밀하게 한다. 초기 값은 이후 측정치의 기준이 되므로 막장으로부터 가까운 위치에서 조기에 측정한다.

7.10.5 관찰·계측결과의 정리

터널의 굴착에 따른 주변 원지반과 지보공 등의 거동을 나타내는 관찰 및 계측 결과는 정확히 파악할 수 있게 그림, 표 등에 알기 쉽도록 정리한다. 막장부근은 역학적으로 불안정하

여 원지반의 거동이 뚜렷하며 작은 단면의 터널에서는 막장부근에서의 판단이 보다 중요하므로 이에 대응할 수 있도록 관찰·계측결과를 속히 정리한다.

표-7.10은 관찰·계측결과의 정리항목에 대한 예를 들었다. 결과의 정리는 지형·지질의 특기사항, 지보공의 시공시기, 시공상황 등 계측항목 이외의 유의사항을 병기하여 상호의 관련과 대비하기 쉽도록 정리하고 종합적, 객관적인 평가를 용이하게 할 수 있도록 한다.

7.10.6 관찰·계측결과의 설계·시공 반영

관찰·계측결과를 설계·시공에 반영시키는 목적은 시공의 안전성을 확인하여 경제적인 터널을 건설하는데 있다.

가. 막장관찰

막장관찰은 실제의 원지반 상태가 설계시에 계획한 원지반의 분류와 일치되는지를 판단하고 일치하지 않는 경우에는 실제의 원지반에 적합한 터널형의 지보공으로 신속히 변경한다. 또한 막장이 안정되지 못하고 용출수가 많은 등의 거동을 나타낼 때는 표-7.11의 예시와 같은 대책을 강구한다.

나. 내공변위의 측정

내공변위 측정결과의 평가는 변위량, 변위속도, 변위가속도 관리기준을 설정하고, 그 범위 내에서 거동이 안정하는지의 여부를 판단한다. 관리기준으로서의 수치는 각 현장의 상황에 따라 일정하게 정해지는 것이 아니므로 공사초기 단계나 작업갱에서 충분히 관찰·계측을 하여 적절한 값을 정한다. 내공변위 측정결과에 따른 대책은 표-7.12와 같다.

표-7.9 관찰·계측으로 구해지는 사항

구분	계측항목	계측에 의하여 구해지는 주요사항	종별
	갱내관찰조사	①막장의 자립성, 무지보 굴착면의 안전성. ②암질, 단층파쇄대, 습곡구조, 변질대 등의 성상파악. ③뿔어붙임 콘크리트 등 지보공의 변위파악. ④당초 원지반의 구분 재평가.	A ¹⁾
원위치조사·시험	갱내탄성파속도 측정	①당초 원지반의 구분 재평가. ②이완영역. ③지층의 균열, 변질의 정도. ④암반으로서의 강도파악.	B ¹⁾
	보링조사	①암질, 단층파쇄대, 습곡구조, 변질대, 가스 등의 성상파악. ②원지반 시험시료의 채취.	
	보링공을 이용한 조사, 시험	지내력(표준관입시험), 수압, 투수계수(용출수압시험), 변형계수(공내수평재하시험).	
	암반직접전단시험	원지반의 초기전단강도(c,φ), 잔류강도(c',φ'), 변형계수(D)	
원지반시료시험	액 시험	변형계수(D), 지반반력계수(K)	
	일축압축시험	일축압축강도(σ_c), 정영율(E_s), 정푸아송비(ν_s).	B ²⁾
	탄성파전파속도측정	P파 속도(V_p), S파 속도(V_s), 동영율(E_d), 동푸아송비(ν_d).	
	단위중량시험	단위중량(γ), 함수비(ω)	
	흡수율시험	흡수율	
	압열인장시험	압열인장강도(σ_t)	
	크리프시험	크리프정수(η)	
	입도분석시험	토사원지반의 경우에는 막장의 안전성 판단자료로 한다. 이암의 경우에는 팽창성의 판단자료로 한다.	
	침수붕괴도시험	연암의 경우에는 물에 대한 안전성의 판단자료로 한다.	
	삼축압축시험	점착력(c), 전단저항각(ϕ), 잔류강도(c', ϕ).	
X 선회절시험	점토광물의 종류(팽창성 점토의 유무).		
양이온교환용량	점토광물의 함유량 추정		
계측	내공변위측정	변위량, 변위속도, 변위안정상황, 단면의 변형상태에 의하여 ①주변 원지반의 안전성. ②지보공의 설계, 시공의 타당성. ③ 라이닝의 타설시기를 판단한다	A
	정부 침하측정	터널 정부(천단)의 절대침하량을 감시하여 단면의 변형상태를 파악하고 터널 정부의 안전성을 검토한다	A
	지중변위측정	터널주변의 이완영역, 변위량을 파악하여 록 볼트의 길이, 설계, 시공의 타당성을 판단한다.	B
	록 볼트 축력측정	록 볼트에 생기는 변위로부터 록 볼트의 축력, 효과의 확인, 록 볼트의 길이와 직경을 판단한다.	B
	록 볼트 인발시험	록 볼트의 인발내력에서 적정한 정착방법, 적정한 록 볼트 종류 선정 목적을 목적으로 한다.	B ³⁾
	뿔어붙임 콘크리트 응력측정	뿔어붙임 콘크리트에 작용하는 배면토압, 응력 측정으로 지지효과를 확인하여 추가여부를 판단한다.	B
	지표 침하측정	갱구부나 토피가 작은 구간에 대해 종단방향으로 지표면의 침하를 측정하여 터널굴착으로 지표에 미치는 영향을 확인한다.	A
	강재 동바리 응력측정	동바리의 크기, 간격, 동바리의 필요성을 판단한다. 강재 동바리에 작용하는 토압의 크기, 방향, 측압계수(K_0)를 추정한다.	B
인버트측정	인버트의 필요성과 효과를 판정한다.	B	

(주)1) 계측종별 A는 일상의 시공관리를 위하여 반드시 실시해야 할 계측이다. 계측종별 B는 원지반조건에 따라 계측 A에 추가하여 선정하는 계측이다. 계측종별이 빈칸인 것, 혹은 본표에 표시되지 않은 시험, 계측항목에 대해서도 필요하다고 인정되는 것에 대해서는 실시한다.

2) 원지반 시료시험의 시험항목은 원지반의 조건에 따라 선정한다.

3) 시공관리(품질관리)로서의 록 볼트 인발시험은 계측으로는 취급하지 않는다.

표-7.10 관찰·계측결과의 정리항목 예

계측항목	정 리 항 목		
	미세한 변화	전 개 도	종단분포
갱내관찰조사		○	○
내공변위조사	○		○

표-7.11 갱내관찰 조사결과에 의한 거동과 대책

구분	거 동	시공법을 중심으로 한 응급처치	응급처치후의 단면설계
미시공구간	막장이 안정되지 않는다.	·막장을 경사지게 한다. ·종단면에서 반원에 가깝게 한다. ·막장에 뿔어붙임 콘크리트 ·경사 볼트, 미니 파이프 루프 ·1회 굴진길이의 단축 ·뿔어붙임 콘크리트의 조기시공	·경사 볼트, 미니 파이프루프 ·1회 굴진길이의 단축 ·시공사이클의 검토 ·배수보링공
	상단부에 박락이 많다.	·경사 볼트, 미니 파이프 루프 ·메시널판과 강 스파일의 병용 ·뿔어붙임 콘크리트의 조기시공 ·종단면에서 반원형에 가깝게 한다. ·1회 굴진길이의 단축 ·부분적으로 록 볼트 추가 ·강재 동바리의 채택	·강재 동바리의 채택 ·경사 볼트, 미니 파이프 루프, 강 스파일의 병용 ·굴착방법(발파형식, 착암기의 종류 등)의 변경 ·1회 굴진길이의 단축
기시공구간	용출수가 많다.	·배수공의 채택, 수발공의 천공, 배수시트, 파이프의 병용 ·뿔어붙임 콘크리트의 조기 강화 ·철망의 눈을 좁게 한다. ·록 볼트 정착제의 변경 ·강재 동바리의 채택	·강재 동바리의 채택 ·철망의 보강·치수변경 ·배수보링공 ·원지반의 개량공
	뿔어붙임 콘크리트에 균열이 생기고 박리한다.	·배수구멍의 설정 ·록 볼트의 증가 ·박리부를 없애고 뿔어붙임 콘크리트의 추가	·강재 동바리의 채택 ·록 볼트의 길이를 길게한다. ·배수공의 병용 ·철망의 보강 ·강섬유의 혼입
간	강재 동바리가 좌굴한다. 뿔어붙임 콘크리트로부터 박리한다.	·록 볼트의 증가(동바리의 봉지) ·뿔어붙임 콘크리트의 추가 ·스트럿에 의한 단면의 폐합	·록 볼트의 본수와 길이를 증가 ·변형여유량을 취한다. ·동바리를 뿔어붙임 콘크리트로 충분히 라이닝 ·록 볼트로 동바리를 빚기옴함 ·강재 동바리의 치수를 크게 함
	불연속면에 의한 압괴의 붕락이 나타난다.	·부분적으로 록 볼트를 추가 ·뿔어붙임 콘크리트의 추가	·경사 볼트 ·강재 동바리의 채택 ·철망의 보강 ·랜덤 볼팅의 채택

표-7.12 내공변위 측정결과에 의한 거동과 대책

거 동	시공법 중심의 응급처치	응급처치 후의 단면설계
최종변위량이 주변 원지반의 안정을 위협할 정도로 커진다. 변위가 안정되지 않는다.	·록 볼트의 증가 ·뿔어붙임 콘크리트의 추가 (인버트부에도) ·스트럿에 의한 폐합	·록 볼트의 본수와 길이 증가 ·뿔어붙임 콘크리트의 두께 증가 ·철제동바리의 채택, 철망의 보강 ·스트럿 채택, 저반의 뿔어붙임 콘크리트 ·단면형상을 원형에 가깝게 한다. ·1회 굴진길이 단축, 동바리 조기시공
반내림이 생긴다.	·인버트에 록 볼트 ·측벽하부에 록 볼트 증가	·인버트 스트럿 채택 ·배수공법의 채택 ·원지반의 개량 ·측벽부의 록 볼트 본수, 길이의 증가 ·인버트에 록 볼트
정부 침하가 커진다.	·양측면부 뿔어붙임 콘크리트의 증가 ·록 볼트의 증가	·경사볼트, 미니 파이프루프 ·강재동바리의 채택 ·동바리의 조기시공 ·단면형상의 변경(너비를 좁게)
편압(이방성)이 커서 종단면에 연속적인 변위가 발생	·록 볼트의 증가	·볼트의 형식, 길이의 변경 (기대칭으로)

7.11 안전시설

터널시공에서는 시공의 안전과 작업원의 건강관리 등을 위하여 안전시설을 갖추어야 한다. 갱외의 보안시설은 지상공사와 다른 점이 없으므로 갱내의 안전시설에 대해서만 기술한다.

7.11.1 조명시설

갱내조명은 직접 작업하는 막장 및 라이닝 콘크리트 타설장소와 차량의 통행에 사용되는 구간으로 구분된다. 전자에서는 작업의 안전과 작업환경을 양호하게 하여 작업능률의 향상을 꾀하기 위하여 투광기를 사용한다. 후자에서는 차량사고의 방지와 동바리의 변위 관찰 등을 위하여 필요한 조도를 얻을 수 있도록 백열등 또는 형광등을 설치한다.

7.11.2 환기시설

굴착작업에 따른 발파 후의 가스와 분진, 디젤기관의 배기가스, 작업자의 호흡 혹은 자연 발생하는 유해가스에 의한 오염이나 시계의 제한에 대해 안전하고 위생적인 환경을 확보하기 위하여 적절한 환기를 한다.

환기대상이 되는 주된 항목은 다음과 같이 분류한다.

- ① 메탄(CH₄)등의 자연발생에 의한 가연성가스
- ② 유화수소(H₂S), 아황산가스(SO₂)등의 자연발생에 의한 유독가스
- ③ 디젤기관의 배기가스와 발파가스에 의한 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x), 매연 등
- ④ 주로 작업자의 호흡에 의한 탄산가스(CO₂)
- ⑤ 뿜어붙임 콘크리트, 굴착작업 등에 의한 분진
- ⑥ 산소결핍 공기

또한 가스의 발생상태에 대해서는 항상 주의하여 적절한 관리를 하고 정기적으로 농도를 측정하여 기록해 둔다.

가. 굴진방식과 환기계획의 관계

굴진방식과 환기계획과의 일반적인 관계는 다음과 같다.

(1) 도갱선진방식으로 굴착하는 경우

도갱선진 방식에서는 선진도갱부의 환기관이 전단면 굴착부 부분에서 중단되기 때문에 이 부분의 환경을 가능한 한 개선하는 것이 필요하다. 도갱단면은 송풍관의 공간을 고려하여 계획한다.

(2) 전단면방식 또는 벤치 컷 방식으로 굴착하는 경우

전단면방식 및 벤치 컷 방식에서는 굴착작업이 막장에 집중되기 때문에 환기도 막장 부근을 집중적으로 계획한다. 또한 라이닝 병행의 경우는 중간에 거푸집이 존재하므로 환기효율을 떨어뜨리지 않도록 계획한다.

(3) 기 타

작업갱으로서 횡갱, 사갱 혹은 수직갱을 설치하는 경우는 통풍관의 공간을 고려하여 단면을 계획한다.

나. 환기량의 산출

(1) 발파후 가스에 대한 소요 환기량

폭약의 종류별 환기대상 유독가스와 표준 발생치는 표-7.13과 같다. 발파후 가스에 대한 소요 환기량(Q)은 다음 식으로 구한다.

$$Q = \frac{k \cdot P \cdot W}{a \cdot t} \text{----- (7.1)}$$

여기서, Q : 소요환기량 (m³/min)

P : 표준 발생치 (m³/kg)

W : 1회 발파당 폭약사용량 (kg)

a : 허용농도(ppm)

t : 소요환기시간 (=발파대피시간) (min)

k : 환기계수 ($k=0.4/R$)

R : 송기식은 1, 송배기 병용식은 0.7

허용농도 α 는 일산화탄소(CO)는 50ppm, 일산화질소(NO)는 25ppm을 기준으로 한다.

표-7.13 발파로 인한 유해가스의 표준 발생치

폭약의 종류	표준 발생치(m ³ /kg)	비 고
젤라틴 다이너마이트	800×10^{-3}	
초유폭약(ANFO)	$1,000 \times 10^{-3}$	
함수폭약(Slurry)	900×10^{-3}	

(2) 디젤기관을 사용하는 경우 소요환기량

디젤기관에서 배출되는 배기가스는 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x)등이 있다. 일산화탄소의 정화장치는 발달되어 있으나 질소산화물의 정화대책은 아직 실용화되어 있지 않다. 그러므로 배기가스 중의 농도는 질소산화물이 높고 허용농도도 질소산화물이 낮아 환기대상을 질소산화물로 한다. 질소산화물의 허용농도는 이산화질소(NO₂)가 질소산화물에 차지하고 있는 비율이 10% 이하로 추정되므로 질소산화물은 전부 일산화질소(NO)로 간주하고 25ppm으로 한다.

디젤기관동력(PS)당 환기량의 표준치는 표-7.14와 같다.

표-7.14 디젤기관 PS당 환기량

장비의 종류	PS당 환기량(m ³ /min/PS)
쇼 벨 계	2.2
덤 프 계	0.8
기 타	0.8

(3) 호흡으로 인한 오염에 대한 소요 환기량

작업자의 호흡에 의한 오염대상은 탄산가스(CO₂)로서 소요 환기량은 1인당 최저 3m³/min이다.

(4) 오염원이 중복되는 경우의 소요환기량

갱내의 주된 공기오염원은 발파후의 가스, 디젤기관차의 배기가스 및 작업원의 호흡 등으로 막장에서 발파와 디젤기관차가 중복되는 일은 거의 없기 때문에 자연발생 가스 또는 산소부족 등의 우려가 없는 갱내에서 오염원이 중복되는 경우의 소요 환기량은 ①, ②에서 구한 소요 환기량 중 최대 값에 ③에서 구한 값을 가산하여 구한다.

원지반에서 자연발생하는 유해가스, 뿜어붙임 콘크리트의 시공에 따른 분진 혹은 높은 온도도 필요에 따라 고려한다. 디젤기관을 사용하는 경우의 소요 환기량 각각의 기계 가동률을 고려하여 구하여도 좋다.

다. 팬 및 송풍관

(1) 새는 바람

송풍관으로 송풍하는 경우 파손이나 이음매의 불량 등으로 새는 바람은 피할 수가 없다. 새는 바람의 비율은 송풍관의 설치방법 등에 따라 각기 다르다. 송풍관의 100m당 새는 바람의 목표치는 다음과 같다.

·경질관 (스파이럴(spiral)강관 등) : 1.5%

·연질관 (비닐송풍관 등) : 1.5 ~ 4%

(2) 팬의 풍량

새는 바람이 있는 경우 팬의 풍량은 다음 식으로 구한다.

$$Q_F = Q_o / (1 - m) = Q_o / (1 - \beta L / 100) \quad \text{----- (7.2)}$$

- 여기서 Q_F : 팬의 풍량 (m³/min)
- Q_o : 소요 환기량 (m³/min)
- m : 송풍관 전체의 새는 바람의 율
- β : 송풍관의 100m당 새는 바람의 율
- L : 송풍관의 연장거리 (m)

(3) 팬 동력 및 송풍관

팬 동력 및 송풍관의 규모는 다음 식으로 구한다. 송풍관에 곡선부, 확대, 축소부가 있는 경우에는 이들도 고려한다.

$$v = \frac{Q_F}{60a} = \frac{Q_F}{15\pi \cdot D} \quad \text{----- (7.3)}$$

$$h = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \gamma \quad \text{----- (7.4)}$$

$$H_1 = \frac{Q_F \cdot h}{6,120} \quad \text{----- (7.5)}$$

$$H_2 = \frac{H_1}{\eta} \quad \text{----- (7.6)}$$

- | | |
|-------------------------------------|--|
| 여기서, v : 송풍관내의 평균유속 (m/s) | g : 중력가속도 (9.8m/s ²) |
| a : 송풍관의 단면적 (m ²) | γ : 공기의 비중량 (일반적으로 1.2kg/m ³) |
| Q_F : 팬의 풍량 (m ³ /min) | H_1 : 팬의 이론동력 (kW) |
| h : 압력손실 (mmH ₂ O) | H_2 : 팬의 축동력 (kW) |

λ : 압력손실계수 (경질관 ----- 0.025) (연질관 ----- 0.035)	n : 송풍기 효율 (축류팬 40~70%) (곤돌라형팬 75~85%) (원심팬(다익)40~55%) (" (터보) 55~70%) (원심송풍기40~75%)
L : 송풍관의 길이(m)	
D : 송풍관의 직경(m)	

라. 환기방식의 선정

환기방식은 공사의 규모, 굴착방식 등에 적합한 것을 선정할 필요가 있으며 다음과 같은 방식이 있다.

(1) 배기식

① 배기식 집중방식

공사의 전구간에 걸쳐 필요한 환기용량의 팬을 갱외에 일괄적으로 설치하고 송풍관의 흡입구를 막장부근에 설치하여 발생가스를 송풍관을 통하여 배기하는 것으로 다음과 같은 특징이 있다.

- 발파후 막장에서 발생하는 가스는 송풍관을 통하여 직접 배기되어 갱도 전체를 오염시키지 않는 이점이 있다.

- 작업의 진척에 따라 송풍관만을 이어가는 것으로 막장의 청정화가 이루어지나 발파에 의한 송풍관의 파손방지 또는 송풍관 연장시 작업의 집약화를 위하여 막장에서 흡입구가 30m이상 떨어질 경우에는 막장가스를 균등하게 흡입하는 것이 곤란하므로 일반적으로 국부적인 순환 팬의 병용이 필요하다.

그림-7.10 배기식 집중방식

② 배기식 연속직열 방식

비교적 소형의 축류팬을 송풍관의 중간에 설치하고 진척에 따라 송풍관을 점차 접속하여 늘려가면서 발생가스를 송풍관을 통하여 배기하는 것으로 다음과 같은 특징이 있다.

- 축류팬의 소요동력은 팬에 접속한 송풍관의 길이에 따른 용량으로 되지만 집중방식과 비교하여 접속장소가 증가하기 때문에 바람이 새기 쉽다.

- 기타는 배기식 집중방식을 참조한다.

그림-7.11 배기식 연속직열 방식

(2) 송기식

① 송기식 집중방식

설비는 배기식 집중방식과 거의 같지만 송풍관의 배기구를 막장부근에 설치하여 갱구에서 신선한 공기를 송풍관을 통하여 막장에 보내고 발생가스는 갱도를 통하여 배출시키는 것으로 다음과 같은 특징이 있다.

- 막장부근에서 발생하는 가스는 갱도를 통하여 배출되기 때문에 갱도 전구간이 오염되어 중간에서 라이닝 작업 등이 이루어질 경우에는 배기식 집중방식에 비해 좋지 않은 상태가 된다.

- 배기식 집중방식과 같이 송풍관을 작업의 진척에 따라 연장하여 막장을 정화하지만 배기구와 막장과의 거리가 30m이상 떨어지는 경우 송기된 신선한 공기가 막장까지 도달하기 어려우므로 배기구를 가능한 한 막장에 가깝게 하거나 국부 순환용 팬의 겸용이 필요하다.

그림-7.12 송기식 집중방식

② 송기식 연속직열 방식

설비는 배기식 연속직열 방식과 같지만 신선한 공기는 송풍관을 통하여 막장에 송기되고 발생 유해가스는 갱도를 통하여 배출한다. 이 방식의 특징은 배기식 연속직열 방식 및 송기식 집중방식을 참조한다.

그림-7.13 송기식 연속직열 방식

(3) 송·배기 겸용식

① 송·배기 겸용 집중방식

배기식 집중방식과 송기식 집중방식의 두 방식을 함께 사용하는 환기설비로서 송기계의 팬은 배기계의 팬보다 능력을 크게 하여 송기계의 배기구를 배기계의 흡입구보다 갱구측으로 적당한 위치에 설치하여 공사진척에 맞추어 각각의 송풍관을 이어 간다. 이 방식의 특징은 다음과 같다.

- 배기식 집중방식과 송기식 집중방식의 단점을 보완할 수 있다. 따라서 갱도가 길 경우 혹은 횡갱, 사갱, 수직갱을 지나 본갱이 굴착되는 경우 또는 굴착속도의 향상에 따라 발생가스량이 증가하는 경우 등에 있어서 작업환경의 악화 방지에 이 방식이 우수하다.

- 이 방식은 전단면 굴착의 경우에 적합하다. 도갱선진 굴착 등의 경우는 전면굴착 작업장소 혹은 라이닝 작업장소에서 송풍관을 중단해야만 할 경우가 많으므로 불리하다.

그림-7.14 송·배기 겸용 집중방식

② 송·배기 겸용 연속직열 방식

배기식 연속직열 방식과 송기식 연속직열 방식의 두 가지 환기설비로 구성되었다. 특징은 송·배기 집중방식 및 배기식 연속직열 방식, 송기식 연속직열 방식을 참고한다.

그림-7.15 송·배기 겸용 연속직열 방식

7.11.3 배수시설

터널공사에서 배수가 불량한 경우에는 동바리의 지지 기반을 이완시킨다거나 운반로가 불량해져 작업환경을 열악하게 하고 작업상 위험을 증가시킬 뿐 아니라 작업능률을 저하시키므로 배수에 주의한다. 배수방법으로는 배수구에 의한 자연배수와 배수구와 펌프를 병용하는 경우가 있으나 공사규모, 용출수량을 충분히 고려하여 계획한다. 특히 펌프배수의 경우 펌프용량 및 양정에 어느 정도의 여유가 있도록하고 고장 시를 대비하여 예비펌프를 비치한다. 사갱, 수직갱, 하향기울기 구간을 시공하는 터널에서는 정전시의 사고대책을 강구해 둔다.

7.11.4 통로

작업기계 등에 의한 사고방지를 위하여 작업자가 안전하게 통행할 수 있는 통로를 설치한다. 통로는 작업자가 운전중의 작업기계와 접촉위험이 없도록 충분한 공간을 확보하고 동시에 항상 안전한 보행이 가능하도록 노면을 정비하는 한편 적절한 조명을 시설한다. 그리고 통로도 궤도부지 또는 운반로와는 울타리, 안전로프 등으로 구분되는 것이 바람직하다.

갱내 운반이 궤도방식일 경우는 운행하는 차량과 측벽 또는 장애물과의 간격은 한쪽에서 0.6m이상으로 하는 것이 바람직하다. 이 간격을 확보하기가 곤란한 작은 단면의 터널에서는 명확하게 식별할 수 있는 대피소를 적당한 간격으로 설치하던지 혹은 신호설비의 설치, 감시인의 배치 등으로 운행중의 차량 진행방향에 작업자 등의 출입을 통제하는 조치를 강구한다.

그리고 추락, 전도 등의 재해방지를 위하여 기울기 15°이상의 가설도로에는 발판이나 미끄럼 방지시설을 하고 추락의 위험이 있는 장소에는 난간을 설치한다. 난간은 높이 110cm로서 중간에 가로대를 설치하는 것이 바람직하다. 수직갱내의 가설도로가 길이 15m이상의 것은 10m 이내마다 대피 또는 상호 교차할 수 있는 공간을 둔다. 또한 사다리를 사용할 때는 기울기를 80°이내로 하고 사다리 상단은 바닥에서 60cm를 돌출시킨다. 수직갱이나 사갱 등에서 권양장치와 작업자와의 접촉에 의한 위험이 있을 때는 판막이로 격벽을 설치한다.

7.11.5 안전점검

시공 중에 원지반, 동바리, 작업환경, 기계, 설비 등에 변위나 결함이 생기고 이것들이 작업 습관이나 바쁜 업무로 소홀하게 방치되어 뜻하지 않은 사고가 발생하는 수가 있다. 이와 같은 사고를 방지하기 위하여 적절한 안전점검을 해야한다.

안전점검의 내용은 공사의 상황, 사용기계, 설비 등에 따라 다르지만 법규에 정해진 것 외에 공사의 실정에 따라 내용을 보완한다. 특히 필요하다고 생각되는 항목에 대해서는 책임자 또는 지명된 점검자가 점검을 한다.

주된 점검항목은 아래와 같다.

① 원지반 : 막장에서 의 뜬돌이나 균열발생의 유무, 라이닝 미설시 구간의 변위 유무, 가연성가스와 유해가스의 발생유무 및 용출수 상태 등

② 동바리 : 뿔어붙임 콘크리트의 균열이나 박리의 유무, 록 볼트의 정착상태, 강재 동바리의 침하나 변형 등

③ 작업환경 : 통로, 환기설비, 조명설비, 배수설비, 연락통보설비, 긴급피난설비, 구호용구 등의 정비 상황 등

④ 설비기계 : 운반로, 궤도, 주행차량, 기계류 등의 정비상황

효과적인 점검을 위하여 점검대상별로 실시시기를 정하여 점검표를 작성하는 것이 바람직하고 결과는 보존하여 둔다. 점검결과 이상이 발견되면 즉시 보수하거나 적절한 조치를 강구한다.

7.11.6 노동위생

작업 시에 특히 유의해야 할 건강 장애 요소와 방지대책은 다음과 같다.

가. 분진

굴착, 버력적재, 버력반출, 뿔어붙임 콘크리트 등의 작업에는 다량의 분진이 발생하며 장기간 분진을 흡입하면 진폐에 걸릴 위험이 있다. 작업환경의 정비개선을 위하여 분진의 농도를 정기적으로 측정하여 실태를 파악하는 것이 바람직하다.

분진대책은 발생원에서 분진의 발생을 방지하는 것을 기본으로 하지만 발생원에서 처리할 수 없는 분진에 대해서는 집진기로 포착, 배제하여 가능한 한 확산을 방지하고 충분한 환기를 하여 신선한 공기로 희석하는 등의 조치가 필요하다. 이러한 대책으로도 충분하지 않을 경우는 방진 마스크의 사용, 분진 작업시간의 단축 등을 검토한다.

나. 소음

소음은 음성의 인식 및 생리기능에도 악영향을 미쳐서 장기간 소음에 노출되면 소음성 난청을 일으키는 원인이 된다. 청력저하의 정도는 음의 크기가 클수록 또 시간이 길수록 커지며 또한 음의 크기가 같으면 고주파성분이 저주파 성분에 비하여 유해성이 크다. 소음장해의 방지책으로는 소음이 보다 적은 설비기계, 작업방법을 선정하여 소음원이 되는 설비기계에 적절한 소음장치를 설치하여 소음을 줄이는 것이 기본이다. 시간이 길고 소음성 난청의 우려가 있는 경우에는 귀마개 등의 보호장치를 한다.

표-7.15 청력보호를 위한 소음의 허용기준

중심주파수 (Hz)	허 용 데 시 벨(dB)					
	480분	240분	120분	60분	40분	30분
250	98	102	108	117	120	120
500	92	95	99	105	112	117
1,000	86	88	91	95	99	103
2,000	83	84	85	88	90	92
3,000	82	83	84	86	88	90
4,000	82	83	85	87	89	91
8,000	87	89	92	97	101	105

다. 진 동

착암기에서의 진동이 작업자의 손이나 팔에 가해져서 말초신경 장애나 손이나 팔의 뼈 및 관절의 변형 등 진동장해를 일으킬 우려가 있다. 이와 같은 진동장해의 방지책은 진동발생이 가능한 한 적은 또는 효과 있는 방진장치가 설치되어 있는 기계 및 공구를 선정하고 구체적인 작업계획을 수립하여 진동되는 작업시간을 적절히 관리한다.

7.12 환경보전

환경보전에 관한 관계 법규를 준수하고 소음, 진동, 탁수, 지표의 침하와 갈수 등의 방지에 관한 대책을 강구한다.

7.12.1 소음, 진동 대책

인가에 가까운 곳에서 터널을 시공하는 경우에는 소음, 진동에 대하여 주의한다.

터널공사에서 소음 발생원은 콤프레서, 배치 플랜트 등이 있으며 필요에 따라 방음 피복, 방음벽의 설치 등의 조치를 한다. 또한 갱구 부근이나 토피가 적은 곳에서의 폭파는 진동장해의 원인이 되므로 화약량의 제한이나 발파시간의 한정 등 조치를 강구한다.

특히 발파 진동은 주변환경에 많은 영향을 미치게 된다. 발파진동이 인체에 미치는 영향은 심리적 측면과 생리적 측면을 고려할 수 있으나 통상 발파 진동에서 문제시되는 것은 인간 생활의 쾌적함을 저해하는 심리적인 것이 크다. 구조물에 미치는 발파 진동의 영향은 발파에 의해 지반이 움직이는 폭을 나타내는 진폭, 지반이 움직이는 정도를 나타내는 변위속도와 변위가속도로서 이중 변위속도를 기준으로 규정하는 것이 일반적이다. 발파진동의 허용기준치는 각국마다 그 기준을 다소 다르게 하고 있으나 다음 표와 같은 기준을 참고하여 결정한다.

표-7.16 독일의 허용진동치

건축물의 종류	허용진동치(cm/s)
유적이거나 고적 등의 문화재	0.2
결함이 있는 건물, 빌딩이나 균열이 있는 주택	0.4
균열이 있고 결함이 없는 빌딩	0.8
회벽이 없는 공업용 콘크리트 구조물	1.0~4.0

표-7.17 서울지하철에서 적용된 허용진동치

건물구분	I	II	III	IV
건물종류	문화재	주택, 아파트 (실금이 나타나 있는 정도)	상가 (금이 나타나 있는 블록건조물)	철근 콘크리트 빌딩 및 공장
건물기초에서의 허용진동치(cm/s)	0.2	0.5	1.0	1.0~4.0

7.12.2 탁수의 처리

골재를 씻은 물이나 갯내의 배수를 정화하지 않고 하천으로 흘리면 어류나 농작물의 생육에 지장을 줄 우려가 있으므로 관련 법에 따라 조치를 취한다. 탁수는 일반적으로 부유물질량(SS)과 수소이온농도(pH)를 기준 값 이내로 하여 하천에 유입시킨다. 이를 위해 다음 방법 중에서 적절한 것을 시행한다.

- 자연침강법으로 정화시킨다.
- 응집침전법으로 정화시킨다.
- 알카리성이 높은 배수는 산으로 중화한다.

가. 자연침강법

종래 많이 채택되어오던 방법으로 침전지를 설치하여 배수를 체류시켜 부유물질량(SS) 등을 자연적으로 침전시키는 것이다. 탁수에서 미립자의 침강속도는 아주 늦으므로 충분히 침전시키려면 넓은 공간의 침전지와 많은 시간이 필요하여 공사규모가 작은 경우와 배수량이 적은 경우를 제외하고는 일반적으로 불리하다.

나. 응집침전법

짧은 시간에 능률적으로 처리하기 위하여 응집제를 사용하여 탁수중의 미립자를 화학적으로 응집시켜 침강을 촉진시키는 것이다. 이 경우 침전지만 사용하는 경우와 본격적인 처리기계를 사용하는 경우가 있는데 공사규모, 배수량, 오탁의 정도 등을 고려하여 결정한다.

다. 알카리성의 중화

콘크리트 치기 등으로 배수중의 pH가 높을 때는 조정이 필요하며 탄산가스법과 산성액법이 있으나 현재는 반응효율이 좋고 다량으로 첨가한 경우의 안정성이 높다는 점에서 탄산가스법이 널리 쓰여지고 있다. 중화후 오수의 pH 값은 항상 측정하여 기록해 둔다.

7.12.3 지표의 침하대책

터널의 토피가 작은 경우에는 지표가 침하를 일으킬 염려가 있으므로 시공에 앞서 지형,

지질조사를 충분히 하여 「3.6 최소토포 두께」에 규정하는 토포의 두께가 확보되도록 계획한다. 또한 터널부근에 공작물이 있는 경우에는 침하대책공법과 침하의 관측이 필요하다.

7.12.4 지하수 고갈대책

터널시공에 따라 지하수의 변동이 초래되어 우물물이나 관개용수원 등이 고갈되는 예를 볼 수 있다. 이런 경우에는 충분한 다른 시설의 설치 등이 필요하게되므로 사전에 대책을 세운다. 필요에 따라서는 지하수의 복원을 위한 조치를 강구한다.

7.12.5 산업폐기물의 처리

탁수처리 과정에서 생긴 슬러지나 콘크리트 조각 등의 산업폐기물은 허가를 받은 장소에 버린다.

7.13 시공관리

터널의 시공은 설계사양에 근거하여 정해진 공사기간 내에 안전하게 시공하고 소정의 품질을 확보하기 위하여 관계 법규를 준수하고 적절한 시공관리를 해야한다. 시공관리는 규격을 만족시키고 공사기간 내에 안전하고 경제적으로 공사를 완성시키는 것을 목적으로 하고 있으며 내용은 그림-7.16과 같다.

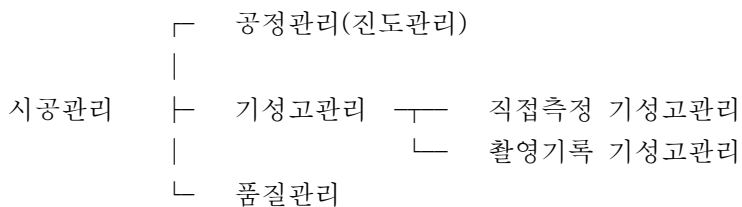


그림-7.16 시공관리의 기본 구성

제 8 장 관 리

8.1 관리계획

터널은 그 기능을 안전하게 유지하기 위하여 관리계획에 따라 적절히 관리해야 한다. 이를 위해 적절한 관리체제와 계획을 수립하여 효율적으로 운영하는 것이 필요하다. 관리가 불충분하여 터널의 기능에 장애를 가져온다면 수로조직의 원활한 운영이 어렵게 되므로 시설물에 대해 충분한 보수, 점검, 정비를 하여 항상 양호한 상태를 유지하도록 한다.

8.1.1 점검

일반적으로 터널의 경우 갱내의 일상적인 점검이 곤란하므로 낙수 후에 점검을 하게 된다. 그러나 일상적인 수로 순시 중 터널 상·하류의 수위 현상에 이상이 발견된 경우에는 터널 내에 무엇인가 이상 상태가 발생한 것으로 추정되기 때문에 수로로서의 기능이 저하한 경우나 상류의 수위가 이상 상승하는 경우는 통수를 중지하고 신속히 원인을 규명하여 대책을 강구한다.

터널 관리를 위한 점검사항은 다음과 같다.

- ① 토사의 퇴적사항
- ② 라이닝의 마모나 균열상태
- ③ 용출수 발생장소 및 수량
- ④ 부대시설의 상황
- ⑤ 갱구 부근의 상황
- ⑥ 토피가 작은 구간에서는 지표면의 상황

토사의 퇴적이 통수능력의 저하를 가져오게 되면 이를 제거하여 정상적인 기능을 회복한다. 라이닝에 새로운 균열이 발견되면 보다 상세한 조사를 하여 터널 구조상의 안전성을 검토하고 필요하다면 개수·보수 등의 적절한 처치를 강구한다. 점검결과는 그 후의 관리에 도움이 되도록 정리하여 보관한다.

8.1.2 조 사

낙수 후의 점검에서 라이닝의 변위나 이상을 발견한 경우나 통수시의 일상점검에서 수위의 이상을 발견한 경우에는 상세한 조사를 하여 안전상 문제가 있으면 개수·보수 등의 조치를 한다. 이 때의 조사항목은 「2.2.6 개수 및 보수공사를 위한 조사」를 참조하고, 기타 과거의 보수내력, 터널 건설시 당초의 구조·제원, 지형·지질조건 및 지표면의 변화 등도 참조한다. 개수·보수공사가 필요하게 된 경우에는 주변 및 지표의 토지이용조건 등의 조사도 필요하다.

8.2 터널의 개수 및 보수

터널의 개수 및 보수는 원지반 조건, 입지조건, 노후화의 정도 등을 감안하여 시행한다.

개수와 보수공법은 지금까지 엄밀하게 구분되어 있지 않으나 여기서는 터널라이닝의 저하된 기능을 보장 또는 회복시키는 것을 개수, 기능의 저하를 방지하는 것을 보수로 구분하여 다음과 같이 분류한다.

	┌—	전면 재라이닝 공법
	|—	부분 재라이닝 공법
개수공법	├—	이중 라이닝 공법
	|—	인버트 내림공법
	|—	강판 내장공법
	└—	공장제품 삽입공법
	┌—	라이닝 배면 그라우팅공법
보수공법	├—	방수 라이닝 공법
	|—	균열 주입공법
	└—	누수 도수공법

개수 및 보수의 필요성 여부에 대해서는 터널라이닝에 변위나 결함이 진행되고 있는지 또는 정지하고 있으나 재발의 우려가 있는지에 대해서 터널점검 및 조사 결과를 종합적으로 검토하여 판단한다.

8.2.1 전면 재라이닝공법

가. 적용조건

- ① 기설 라이닝의 손상이 전면에서 발생하여 부분 보수만으로는 기능 유지가 어려운 경우
- ② 통수단면에 여유가 없어 이중 라이닝공법의 채택이 불가능한 경우
- ③ 라이닝 배면의 그라우팅만으로는 기능유지가 안 되는 경우
- ④ 기설 라이닝을 제거해도 낙반의 우려가 없거나 방지할 수 있다고 판단되는 경우

나. 공법의 개요

기설 콘크리트 라이닝을 전단면에 걸쳐 제거하고 새로 무근 콘크리트 또는 철근 콘크리트로 라이닝을 한다. 라이닝의 종류에는 다음과 같은 것이 있다.

- ① 동바리 없이 하는 것
- ② 강재 동바리에 의하는 것

상황에 따라 동바리로서 록 볼트·뿔어붙임 콘크리트를 사용하는 수도 있다.

(1) 동바리 없이 하는 라이닝

(2) 강제동바리에 의한 라이닝

그림-8.1 전면 재라이닝공법의 예

8.2.2 부분 재라이닝공법

가. 적용조건

- ① 기설 라이닝의 손상이 일부분에 그쳐 부분 재라이닝으로 기능유지가 되는 경우
- ② 통수단면에 여유가 없어 이중라이닝공법의 채택이 불가능한 경우
- ③ 라이닝배면의 그라우팅만으로는 기능유지가 안되는 경우
- ④ 기설라이닝을 부분적으로 제거하여도 낙반의 우려가 없거나 혹은 방지가 가능하다고 판단되는 경우

나. 공법의 개요

콘크리트 라이닝의 손상부분을 제거하고 새로이 무근 또는 철근 콘크리트로 라이닝을 한다. 특히 아치부의 재라이닝에서는 상황에 따라 동바리로서 록 볼트·뿔어붙임 콘크리트를 사용하는 수도 있다.

8.2.3 이중 라이닝공법

가. 적용조건

- ① 통수단면에 여유가 있는 경우
- ② 기설 라이닝의 노후정도가 심해서 토압 등 외압을 부담할 수 없는 경우

나. 공법의 개요

기설 콘크리트 라이닝을 그대로 둔 채로 내면을 콘크리트로 라이닝하여 기설 라이닝과 함께 기능의 유지를 도모한다.

단 면 도

A 부 상 세

그림-8.2 부분 재라이닝공법(아치부)의 예

단 면 도

측 면 도

그림-8.3 부분 재라이닝공법(측벽부)의 예

그림-8.4 이중 라이닝공법의 예

다. 유의사항

이중 라이닝공법을 사용할 때는 통수단면의 감소에 의한 수로여유고나 수로상류의 수위상승 등에 대한 영향을 검토하여 개수 후 수로시설의 기능에 지장이 없도록 주의한다. 통수량의 변동으로 유황이 자유수면과 만류가 반복되는 개수계획은 급격한 수위변동, 공기의 체류, 부압 발생 등의 우려가 있으므로 피하는 것이 바람직하다.

8.2.4 인버트 내림공법

가. 적용조건

- ① 기설 라이닝의 손상이 전면적으로 발생하여 부분 재라이닝으로는 기능유지가 되지 않는 경우
- ② 통수단면에 여유가 없어 이중 라이닝공법 채택이 불가능한 경우
- ③ 바닥내림에 의한 유황의 변화가 기능의 유지를 방해하지 않는 경우

나. 공법의 개요

기설 라이닝의 인버트부분을 제거하고 파내려서 측벽하부와 저반에 콘크리트를 시공하고 아치측벽부의 기설 라이닝의 내면을 무근 또는 철근 콘크리트로 보강함으로써 기설 라이닝과 함께 기능의 유지를 꾀한다.

8.2.5 강판 내장공법

가. 적용조건

- ① 통수단면에 여유가 없는 경우
- ② 기설 터널의 노후정도가 심하여 토압 등의 외압을 부담할 수 없는 경우
- ③ 원지반의 조건이 불량하여 기설 라이닝에 힘을 가하면 위험한 경우
- ④ 조도계수의 향상을 꾀하고자 할 경우
- ⑤ 현장에서 시공기간을 길게 잡을 수 없는 경우

- | | |
|-------------|-----------------|
| ① 약액주입공 | ⑥ 언더드레인공 |
| ② 중간분할 굴착공 | ⑦ 아치측벽 라이닝 콘크리트 |
| ③ 반굴착공 | ⑧ 인버트 콘크리트 |
| ④ 바닥부 콘크리트공 | ⑨ 충전그라우팅 |
| ⑤ 터널벽 굴착공 | |

그림-8.5 인버트 내림공법의 예

그림-8.6 강판내장공법의 예

나. 공법의 개요

기설 라이닝을 제거하지 않고 공장에서 기설 터널단면보다 약간 작게 같은 모양으로 강관을 가공·제작하여 기설 터널 내로 운반·거치후 용접접합과 마무리 도장을 한다. 강관과 기설 라이닝의 공극에는 에어 모르터로 충전한다.

8.2.6 공장제품의 삽입공법

가. 적용조건

- ① 통수단면에 여유가 없어 조도계수의 향상으로 기능을 유지시켜야하는 경우
- ② 기설 라이닝의 노후가 심하여 토압 등의 외압을 부담할 수 없는 경우
- ③ 원지반의 조건이 나빠서 기설 라이닝에 손을 대면 위험한 경우

나. 공법의 개요

기설 라이닝을 제거하지 않고 강관, 덕타일 주철관, FRP관 등을 기설 터널에 운반, 압입하여 설치한다. 기설 라이닝과 삽입관과의 공극에 에어 모르터 등으로 뒤채움 주입을 하는 공법이다.

그림-8.7 공장제품 삽입공법의 예

8.2.7 라이닝 배면의 그라우팅 공법

콘크리트 라이닝 배면에 공극이 있는 경우에는 라이닝에 대한 원지반으로부터의 편압을 방지하고 내압을 원지반에 균등하게 분담시키고 원지반의 붕괴 확대를 방지하고 용출수 및 누수를 방지하기 위하여 공극을 그라우팅으로 충전하며 다음과 같은 경우에 적용한다.

- ① 콘크리트 라이닝이 주입압력에 견딜 수 있는 상태의 경우
- ② 다른 공법만으로는 불충분하여 이들 공법과 병용하는 경우
- ③ 작업공간이 확보되는 경우

8.2.8 기타 보수공법

이 외에도 누수 도수공법, 방수라이닝공법, 균열주입공법 등이 있으며 사례는 그림-8.8과 같다.

(1) 누수 도수공법

(2) 방수 라이닝공법

(3) 균열주입공법 ①

(4) 균열주입공법 ②

그림-8.8 보수공법의 예

<부록>

용어 해설

가스 용출

가스를 품고 있는 지층의 표면에서 가스가 용출하는 것을 말한다. 상당량의 가스가 불규칙적으로 내뿜는 것을 가스 용출. 일시에 다량의 가스가 맹렬한 기세로 분출하는 것을 가스 돌출이라 한다.

간극수압

흙이 압밀을 받을 때 토립자의 입자간 간극을 채우고 있는 물을 통해서 전달되는 압력

강관 동바리

강아치 동바리의 한 형식으로 주요 부재에 구조용 강관을 사용한 강재 동바리를 말한다.

강재 거푸집(steel form)

이동식 거푸집 가운데 특히 지지틀과 강판(skin plate)이 일체가 된 것을 말한다. 철재 거푸집의 막판(幕板: 목재 또는 강재)을 사용하여 분해되는 구조로 된 것을 슬라이드 센터(slide center)라고 한다.

강재 동바리

H형강, I형강, U형강, 강관, 격자지보(lattice girder) 등을 가공하여 주요 부재로 한 동바리를 말한다. 목재 동바리와 대비하여 사용된다.

갱구(坑口)

터널 출입구부의 총칭

갱구부 절취

터널을 굴착하는 경우 갱구 부근의 원지반을 처음으로 절취하는 것을 말한다. 터널 갱구에 달할 때까지의 갱외 흙깎기와 갱구에서 원지반으로 약간 들어간 부분의 터널 굴착을 포함한다.

갱내 설비

터널 갱내에 설치되는 설비의 총칭. 갱외 설비와 대비하여 사용된다.

갱문(坑門)

터널의 갱구를 보호하기 위하여 흙막이, 사면보호 등의 역할을 하도록 입구·출구에 설치하는 문 모양의 구조물

갱외 설비

일반적으로 동력, 급·배수, 수리, 콘크리트 제조 등의 제 설비와 사무소, 작업자 숙소, 각종 창고와 이들을 연결하는 교통·통신 시설 등 터널의 갱 외부에 설치되는 설비의 총칭으로 갱내 설비와 대비하여 사용된다.

건식 뿔어붙임 콘크리트 방식

뿔어붙임 콘크리트(shotcrete)를 원지반에 뿔어 붙이는 공법의 하나로 시멘트와 골재를 건조 상태에서 혼합하여 노즐까지 압송하고 그 선단에서 물과 합류시켜 뿔어붙이는 공법

경사동바리

기둥, 비계와 같이 수직으로 서 있는 구조물에 대하여 넘어지거나 비틀리지 않게 비스듬히 바치는 부재이다. 터널의 막장 받침, 강아치 동바리의 전도 방지 등에 쓰인다.

그라우트(grout)

유동성이 풍부하며 지반에 압입, 충전된 후 일정 시간을 지나 경화하는 성질을 갖은 재료를 말한다

그랜드 아치(grand arch)

터널의 이완영역 외측에 그 보다 상부의 토피하중을 주변의 원지반에 전달하는 아치 상의 영역이 형성되는데 그 아치 상의 원지반 부분을 말한다.

급결제

뿔어붙임 콘크리트의 경화를 촉진하는 혼화제

기계굴착

터널 건설을 인력, 폭파에 의존하지 않고 주로 굴착기계를 사용하여 원지반을 굴착하는 굴착방식이다.

끼움 널(legging board)

동바리에 널판을 걸치는 방법의 하나로 비교적 양호한 원지반의 경우에 동바리 부분에서 겹치도록 설치하여 원지반의 붕괴를 방지하는 공법

NATM(New Austrian Tunneling Method)

원지반의 강도 열화를 방지하고 터널 주변의 원지반이 본래 갖고 있는 내하능력을 적극적으로 활용하기 위하여 주로 뿔어붙임 콘크리트나 록 볼트를 지지 부재로 하여 현장 계측에 의한 관리하에 터널을 굴진하는 공법이다. 1963년 오스트리아에서 명명되었으며 신 오스트리아 터널공법의 머리 문자를 따서 NATM이라 불려지고 있다.

낙반(落盤)

터널 굴착시 토압의 작용으로 원지반에 균열 또는 파괴가 발생하거나 혹은 원지반의 기존의 층리, 절리가 이완, 박리되어 암석이나 토사가 붕괴하는 현상이다. 미고결 원지반, 토피가 적은 터널에서는 낙반에 대한 배려가 특히 필요하다.

내공변위(內空變位)측정

일반적으로 터널의 변형상태를 조사하기 위하여 내공 치수를 측정하는 것이다. 특히 산악 터널에서 시공 관리 및 계측상 하는 내공변위측정의 경우 굴착 후 터널 벽면이 응력해방 또는 주변 암반의 소성변형에 의하여 터널 내공을 향하여 변위하는 경우의 상대변위량을 측정함에 따라 터널의 안정상태를 파악한다.

냉간가공(冷間加工)

금속을 상온에서 소성변형시켜 소정의 형상으로 가공하는 것이다. 냉간가공은 가공에 큰 힘이 필요하지만 치수의 정밀도가 좋고 강도가 높으며 흠을 발견하기가 용이한 점에서 터널 동바리는 원칙적으로 이 방법이 사용된다.

널판

일반적으로 널판은 흙막이나 가체철에 사용되는 판 상의 말뚝을 말한다. 터널 동바리에 사용되는 널판은 목재와 강재가 있으며 나무 널판은 두께 3~5cm, 길이 1.5~2.0m 정도이다.

누수처리

라이닝 완성후 누수에 대한 강구 수단으로 철판 또는 합성수지성의 통, 시트(sheet), 관(pipe)등으로 유적수(流適水)를 집수하거나 라이닝 내면에 모르터를 발라 누수를 측벽 하부로 끌어내리는 방법 혹은 수지의 주입 등이 시행된다.

다일레이턴시(Dilatancy)

비점착성의 흙이 전단 변형을 일으킬 때 나타나는 부피의 증가 현상이다. 암반의 파괴·변형에 따른 부피의 증가 현상을 말하는 수도 있다. 이완 사질토나 정규압밀점토는 부피가 감소한다. 이를 부(負)다일레이턴시라 한다.

단면분할(Division of heading)

단면이 커서 부분 굴착할 경우, 단면을 분할하여 구획을 정하는 것을 말한다.

단층(斷層)

지각변동에 의하여 지각에 발생한 단열로서 다소라도 면을 따른 변위가 인정되는 것을 말한다.

대수층(帶水層)

물로 포화되어 있는 암석 또는 지층을 말한다.

도갱(導坑)

터널의 크기나 원지반의 조건 때문에 전단면 굴착공법의 적용이 곤란한 경우에는 터널 단면중 먼저 굴착해 들어가는 부분이며 굴착위치에 따라 저설도갱, 측벽도갱, 중심도갱, 저하도갱, 병행도갱 등이 있다.

동바리

동바리란 굴착에서 라이닝 완료까지의 기간 동안에 원지반으로부터의 하중에 충분히 대항해서 원지반의 붕괴, 탈락 등을 방지하여 소정의 굴착단면을 유지하는 한편 능률적으로 갱내 작업이 이루어지도록 터널 내에 설치하는 원지반 지지 구조물이다.

동바리 바닥판

강아치 동바리의 지지력을 확실히 하기 위하여 동바리 부재의 하단에 붙인 강판을 말한다.

동탄성계수

탄성과 탐사 등으로 얻은 P파, S파 속도에서 구한 탄성계수를 말하며 잭 사용 등으로 정적인 응력과 변형관계에서 구하는 정탄성계수와 구분된다.

뒤채움 주입(backfill grouting)

라이닝 배면과 원지반 사이에 생긴 공극부에 모르터를 주입하는 것을 말한다.

드리프터(drifter)

일반적으로 수평 또는 35°이내의 수평에 가까운 수평 갱의 천공에 사용되는 중량이 큰 착암기이다.

드릴 점보(drill jumbo)

폭과공법에서 장약공 등을 천공하기 위하여 몇 개의 착암기를 장착한 것으로서 깊은 구멍과 경암의 천공에 적합하다

뜯돌 떨구기(trimming, scaling)

원지반의 굴착면에서 자연적으로 또는 가벼운 충격에 의하여 쉽게 원지반에서 떨어져 나가려는 암석을 뜯돌이라 하며 이를 제거하는 작업을 뜯돌 떨구기라 한다.

라이닝

원지반의 변형이나 붕괴의 억제와 방지 등 원지반의 안정 확보, 용출수나 누수의 처리, 터널 내공의 단면 정리나 미관 등을 목적으로 터널 굴착면을 피복하는 구조체 또는 그 구조체를 구성하는 것을 말한다.

라이닝 두께

라이닝의 두께를 말한다. 보통 굴착공법에서는 굴착면에 요철이 생겨서 라이닝 두께는 일정하지 않으므로 역학적 또는 내구성의 점에서 설계상 필요한 두께로 라이닝 두께를 표현한다. 설계 라이닝 두께라고도 한다. 설계 라이닝 두께 안에는 목재와 같이 라이닝 강도에 영향을 미치는 부재가 들어가는 것은 허용되지 않는다. 따라서 빗끼움 널, 끼움 널 등 널판의 시공법에 따라 설계 라이닝 두께가 달라진다.

랜덤 볼팅(random bolting)

특 볼트를 미리 정해진 배치와 길이에 따라 타설하는 것을 패턴 볼팅이라 하는데 반해 랜덤 볼팅은 굴착 후에 판명되는 원지반의 상황에 따라 볼트의 배치, 길이 등을 그때마다 결정하는 것을 말한다.

레일(rail)방식

굴착한 버력을 갱외로 반출처리하는 일련의 작업 가운데 버력 운반시 갱내에 레일을 부설하여 밧데리 기관차, 디젤 기관차 등과 이들이 견인하는 버력운반차를 사용하는 방법이다.

로커 쇼벨(rocker shovel)

터널 굴착에서 나온 버력을 운반용 차량 등에 적재할 목적으로 제작된 버력 적재기의 한 기종으로 작은 단면의 터널에서 가장 많이 쓰이는 오버헤드(over head)식의 것이다. 작은 버킷으로 버킷에 긁어모아 벨트 컨베이어(belt conveyer)로 후방의 버력토차에 투입하는 형식의 기종도 있다.

특 볼트(rock bolt)

터널 굴착후 신속히 암반을 천공하여 그 속에 볼트를 삽입하여 너트조임, 접착 등으로 터널의 동바리 역할을 하도록 하는데 사용되는 볼트이다.

링 컷트(ring cut)공법

터널 단면의 외주 부분을 링 모양으로 선행 굴착하여 동바리를 설치한 후 심부를 굴착하여 완성시키는 공법이다. 단층파쇄대나 토사력이 용출로 인하여 막장이 붕괴 또는 압출하는 원지반에 사용된다.

막장면

터널의 굴진 방향에 있는 굴착면

막장 지보(支保)

연약지반에서 막장의 붕괴를 막는 지지재

맹줄눈

콘크리트 수축에 의한 균열(crack)을 흡수하기 위하여 특별히 설치한 이음을 수축이음이라고 하며 이때 얇은 홈으로 된 수축줄눈을 맹줄눈이라고 한다.

무동바리 굴착

지질이 극히 양호하여 토압작용이 거의 없는 경우에 강아치 동바리, 록 볼트(Rock bolt), 뿔어붙임 콘크리트(Shotcrete), 흙막이 동바리 등을 시공하지 않고 그대로 터널 원지반을 굴착하는 것이다.

무압(無壓)터널

수리상의 터널분류로 계획유량이 자유수면을 유지하며 흘러서 내수압이 작용하지 않는 터널이다.

물리탐사(物理探査)

지질구조에 관련된 물리현상을 지표에서 관측하여 그 자료를 검토하므로써 지질구조를 추정하는 방법의 총칭이다.

반단면 굴착

터널 굴착 방식의 일종으로 터널 단면의 상하 절반의 어느 것이든 먼저 굴착하고 남은 부분을 뒤에 굴착하여 진행하는 방식을 말한다. 상부 반단면을 먼저 굴착하는 것이 보통이고 이때에 하부 절반은 벤치식 굴착법을 쓰는 것이 많다.

반발량(rebound)

뿔어붙임 콘크리트를 시공할 경우에 부착되지 않고 튀어나오는 것을 말한다.

방수공

누수를 막기 위하여 라이닝을 불투수성 재료로 처리하는 공사이다. 라이닝의 누수는 터널 보수의 곤란, 내구성의 저하, 전기 설비에 대한 악영향의 원인이 된다.

배수(排水)보링

용출수 처리의 한 방법으로 원지반 중의 지하수위를 저하시켜 막장의 굴진을 쉽게 하기 위하여 막장면으로부터 원지반을 향해 시공하는 보링이다. 저류수에 대해서는 단시간에 효과가 나타나지만 지하수의 공급 범위가 넓고 공급량이 많은 경우에는 배수갱의 시공을 고려할 필요가 있다.

버력

터널의 굴착시 생기는 토사, 암석의 부스러기를 말한다.

버팀보(brace)

인접한 동바리 사이에 설치하는 버팀재로서 연결볼트가 인장에 대항하는데 비하여 버팀보는 압축에 대항한다.

벤치컷(bench cut)공법

상부 반단면 또는 하부 반단면의 굴착을 선행하여 시행하는 공법이다. 상부·하부가 병진(併進)하는 모양이 벤치와 같은 모양에서 붙여진 명칭이다.

변성암

암석이 형성되었던 때와 다른 온도·압력 등의 환경에서 광물의 조성이나 조직이 변화한 암

변질작용

기존의 암석이 마그마로부터의 고온 가스에 의하여 변질하는 기성작용이나 고온 용액의 작용으로 변질하는 열수작용에 의하여 특수 광물을 생성하는 것이다. 일반적으로 암석 강도는 약해진다.

변형계수

평판재하 등의 변형시험으로 구해지는 변형 특성을 나타내는 계수로서 하중-변위 곡선에서의 기울기로 표시한다.

변형 여유량

팽창성 원지반과 같이 측압이 큰 지질에서 터널을 시공할 때 굴착 후 라이닝까지의 기간 동안에 동바리가 소정의 설계 폭을 유지할 수 없는 경우를 예상하여 미리 넓혀 놓는다. 이 확대치를 변형 여유량이라고 한다.

보강효과

록 볼트의 작용 효과 중 하나로서 암반에 록 볼트를 패턴 볼팅으로 함에 따라 전체적으로 하나의 구조물이 되어 거동하는 층을 터널 주변에 형성시키는 효과를 말한다. 이 효과로 인하여 원지반에 아치가 형성되어 원지반 강도를 최대한으로 이용한 지지력을 발휘할 수 있다.

보내기 널(fore poling, poling board)

동바리에 널판을 끼우는 방법의 하나로 마지막에 설치된 동바리로부터 삽입하여 굴착하면서 널판을 차례로 끼워서 굴착면의 붕괴를 막는 공법이다. 끼움 널과 빗끼움 널의 중간 정도의 경우에 적용한다.

보조 공법

굴착시 흙막이 배면 및 막장의 강도, 지수성의 향상, 안정의 도모, 굴착작업의 능률화, 흙막이면의 안정, 지하수의 갭내 유입 방지, 기설 구조물의 변위 방지 등 본체 공사에 수반되는 각종 장애를 방지하기 위하여 보조적으로 시행되는 공법의 총칭이다.

본갱(本坑)

공사 목적의 주체가 되는 터널이며 작업 갭이나 선진 갭과는 구분하여 사용된다. 본터널, 본선 터널이라고도 한다.

부등침하

구조물 기초면 아래의 침하량이 위치에 따라 일정하지 않은 현상이다.

분진(粉塵)

공기 중에 부유 또는 비산하고 있는 개체 상의 미립자이다. 터널에서는 뿜어붙임 콘크리트, 암반굴착, 파쇄 등의 작업 공정에서 발생하는 암석분, 점토분 등이 이에 해당한다.

불발공(不發孔)

어떠한 이유에서 폭약이 폭발되지 않은 발파공으로서 불발공에 남은 폭약을 잔류폭약 또는 잔약이라 한다.

불투수층

물이 투과하기 어려운 점토 층이나 암반을 말한다. 일반적으로 물은 토층의 상부를 투과하여 불투수층에 도달하여 집적되어 지하수가 된다.

브레이커(breaker)

연암 등을 부수고, 작게 쪼갤 때 사용되는 파쇄기계의 총칭이다.

블록킹(blocking)

동바리와 원지반 사이에 끼워넣어 하중을 균등하게 동바리에 전달하고 원지반의 이완을 방지하기 위한 목재블록이다. 썰기, 패킹(packing)이라고도 한다. 이 썰기는 동바리의 아치 작용을 확보하는데 없어서는 안되는 것으로 확실하게 채우도록 한다.

빋끼움 굴착

연약한 원지반에 터널을 굴착할 때 터널 막장 주변의 붕괴방지를 위하여 직전에 설치된 기존 동바리를 이용하여 막장 쪽으로 널판이나 스파일(spile)을 원지반에 켜매듯 타설하여 이것이 캔틸레버 작용으로 지지토록 하면서 순차적으로 굴착하는 것을 빋끼움 굴착(공법)이라 한다.

뿔어붙임 콘크리트(shotcrete)

압축공기나 기계력으로 뿔어 붙인 콘크리트를 말한다. NATM공법에서는 동바리 부재로 사용되며 또한 라이닝으로 이용되기도 한다.

사갱(斜坑)

연직이나 수평방향이 아니고 경사각도를 가지고 굴착된 작업갱 또는 갱도를 말한다.

사문암(蛇紋岩, serpentine)

초염기성암(超塩基性岩)이 사문암화(蛇紋岩化) 작용에 의해 생성된 암석이다. 원암(源岩)의 감람석, 휘석 등이 잔존하는 것도 있다. 암괴는 엽편상(葉片狀)인 것과 괴상(塊狀)의 것이 있으며, 터널공사에서는 팽창성 지질로서 시공에 좋지 않은 암석이다. 특히 엽편상의 사문암은 난공사가 되는 수가 많다.

산악터널

철도, 도로,수로 등 산악이나 구릉을 관통하는 터널을 말한다. 도시터널이나 하저터널과 대비시켜 건설 장소의 차이를 나타내는 호칭이다.

상향굴착

터널 굴착에서 상향 기울기로 굴착하는 것을 말한다.

선진갱

본갱의 굴진에 앞서 본갱 단면내, 혹은 본갱 단면 외에 굴착하는 작은 직경의 터널로서 지질 확인, 지하수위의 저하, 버력반출, 환기, 원지반의 안정처리를 위한 작업 갱이나 환기 갱의 역할을 하는 터널의 총칭이다.

선진보링

시공중 막장 부근으로부터 지질조사, 배수, 환기 등의 목적으로 굴착에 선행하여 시행하는 보링

설계 라이닝선

라이닝의 구조상 필요한 두께를 표시하는 것으로 표준 단면도에 D선으로 표시한다.

센터(center)

라이닝 콘크리트 타설시의 거푸집을 일반적으로 센터라 한다. 센터에는 조립식 거푸집과 이동식 거푸집이 있다.

셔틀 카(shuttle car)

대량의 버력을 연속하여 운반하기 위한 것으로 운반차의 바닥면이 콘베이어로 되어 버력을 차례로 후방으로 이동시켜 만재하는 것으로 갱의 사토장에서 바닥면 컨베이어를 구동시켜 후방 끝으로부터 전량 배토가 가능한 구조로 되어 있다.

소성영역

터널굴착에 의하여 원지반이 소성화한다고 추정되는 영역을 말한다. 실제의 원지반은 불연속체이며 엄밀한 이론적 해석은 불가능하지만 실용적인 사고방법으로는 유용하다.

소성토압

터널을 굴착하였을 때 생기는 2차 응력이 원지반의 고유강도를 초과하여 소성한계 혹은 파괴에 달한 경우이거나 잠재적으로 소성상태의 원지반을 굴착하였을 때 생기는 토압을 말한다.

속도검층(速度檢層)

보링공을 이용하여 시행하는 시험의 하나로서 지표에서의 탄성과 탐사에 비하여 정밀도가 높고 층의 순서에 관계없이 각 지층에서의 속도측정이 가능하다.

손잡이식 착암기(jack hammer)

주로 하향공의 천공에 사용되는 착암기로서 15~30kg 정도의 중량이며, 손으로 조작하는 경량소형이다. 최근에는 레그(leg)를 써서 효율이 좋은 수평천공이 가능하다. 잭 해머라고도 한다.

송풍관(送風管)

갱내 환기를 위하여 사용되는 환기설비의 일부로 신선한 공기를 막장으로 송기하거나 오염공기를 갱외로 배출하기 위하여 사용되는 관이다.

수직갱(vertical adit)

사갱이나 수평 갱과 대조하여 사용되는 말로서 연직으로 굴착한 갱도이다.

수평갱(horizontal adit)

터널을 몇 개의 공구로 분할하여 시공하는 경우, 재료의 반입, 버력의 반출 등을 위하여 설치되는 작업 갱 중에서 거의 수평에 가까운 갱을 말한다.

순(順)라이닝

라이닝 시공방법의 순서를 나타내는 것으로 측벽 콘크리트를 타설하고서 아치 콘크리트를 타설하는 공법을 말한다.

스무스 블래스팅(smooth blasting)

터널굴착을 위한 폭파에서 여굴을 작게 하고 굴착면을 설계선에 가깝고 평활하게 되도록 시행하는 폭파공법. 보통 설계굴착선 상에 바르고 약간 조밀하게 천공하여 폭파력을 약화시킨 경량 다이너마이트를 구멍의 전심에 미치도록 장진하고 전기 뇌관에 의하여 동시 폭파하며 폭파력이 구멍에서 구멍으로 이어 나가도록 한다. 폭파력이 암(岩)의 후방으로 미치지 않게 하여 굴착면의 여굴을 감소하려는 것이다.

스트럿(strut)

흙막이 동바리에서 수평으로 넓은 배판(背板)을 지지하는 세로재나 수평재의 사이에 들어가는 버팀재를 말한다.

스파일(spile)

지질이 불량한 터널 굴착시 연약한 원지반을 미리 지지하기 위하여 원지반에 타입하는 통나무를 말한다. 보통의 널판으로는 토압을 충분히 지지하지 못할 경우, 또는 발파와 동시에 막장의 붕락이 있었던 경우에 사용된다.

스프링 선(spring line)

터널의 내공 면에서 상반 아치가 시작되는 선. 실드 터널에서는 일반적으로 가장 폭이 넓은 장소를 말한다.

슬러지 (sludge: 汚泥)

폐기물 처리법의 적용을 받는 폐 벤토나이트(bentonite) 등의 산업폐기물로서 건설 잔토 가운데 사람이 걸어다닐 수 없는 토사도 슬러지의 대상이 된다.

습곡(Fold)

파곡(波曲)상의 변형 형태. 일반적으로 지각변동에서 수평방향의 압축력을 받아 형성된다.

습식 뿔어붙임 콘크리트방식

전 재료를 믹서로 습윤혼합한 후 노즐까지 보내어 분사시키는 공법

시굴조사

지질, 암상, 암반의 상태를 조사하기 위한 굴착으로 방법, 위치, 규모 등을 목적에 따라 결정한다. 도가니 파기, 트렌치 파기, 표토제거와 같은 표층을 대상으로 하는 굴착과 시굴갱 조사를 목적으로 한 수평갱, 수직갱 등 지반 중의 굴착도 있다.

시스템 볼팅(system bolting)

록 볼트를 미리 정해진 배치와 길이에 따라 타설하는 것. 패턴 볼팅이라고도 한다.

시트(sheet)방수

일반적으로 막 방수라 하며 고분자 재료를 시트로 가공한 지수시트를 사용하는 방수공법이다.

실드(shield)

터널형상에 맞추어진 강재 원통 또는 틀에 추진용 잭, 흙막이 기구, 용접봉을 장비하고, 거기에 각종 작업을 하기 위한 작업공간을 확보한 터널굴착기이다. 실드 후방을 세그먼트(segment)나 콘크리트로 라이닝하여 터널을 완성하는 일련의 공법이다.

심빼기(心拔: cut)

굴진발파에서 막장면을 폭파할 때 중앙부를 부분적으로 먼저 폭파하고 이것을 자유면으로 하여 주위를 폭파하면 폭파효과가 높다. 이러한 중앙부분의 선행폭파를 말한다.

췌기

동바리와 원지반 사이에 끼우는 블록으로 원지반을 동바리가 지지하도록 압력을 전달하는 역할을 한다.

아치(arch)작용

그라운드 아치(ground arch)라고도 한다. 터널 굴착에 따른 이완이 서서히 위쪽으로 확대되어 이완영역이 형성되거나 토피가 충분하면 이완 부분의 외측 부분에는 응력이 재분배되어 평형상태로 되면서 그라운드 아치가 형성되어 이완영역보다 상부의 토피 하중은 라이닝이나 동바리에 작용하지 않는다고 보는 것이다. 이는 압괴 등의 아칭(arching)작용으로 마치 터널 상부의 원지반에 아치가 형성된 상태로 보는 것이다.

아치 정점(arch crown)

아치의 정부(頂部)

아치 지점(arch springing)

아치의 양쪽 하단부, 또는 터널에서 아치부분이 측벽과 만나는 부분

암맥(岩脈)

지층암석에 나중에 관입된 암체 가운데 수직에 가까운 관상암체를 말한다. 경사진 층상관입암체는 암상(岩床)이라 한다.

암(arm) 굴착기

터널굴착기는 절삭기구상 전단면을 한번에 절삭, 파쇄하는 전단면 절삭방식과 단면을 부분적으로 절삭해 가는 부분 절삭방식으로 구분되는데 후자방식의 굴착기를 말한다.

암(岩)터널

지질 상의 터널 분류로서 비교적 풍화가 되지 않은 암반이나 고결도가 높은 경암 등으로 이루어진 원지반에 구축되는 터널

압기공법 (pneumatic method)

용출수가 많은 연약토사 터널에서 막장이 유동하는 경우에 갱내에 지하수압에 대응하는 압축공기를 밀어 넣어 지하수의 용출을 막고 굴착 및 라이닝을 시공하는 방법이다.

압력터널

수리상으로 터널을 분류할 때 계획유량이 만류가 되어 내수압이 작용하는 터널이다.

압밀 그라우트(consolidation grout)

원지반의 일체화, 변형성의 개량, 불투수성의 증대, 지반과 구조물의 일체화 등을 목적으로 각종 시멘트나 약액의 그라우트 주입재를 터널주변의 원지반에 주입하는 것

압밀침하

투수도가 낮은 흙 위에 축조된 구조물의 중량에 의해서 흙속의 수분이 시간이 경과하면서 배출됨에 따라 흙이 서서히 압출되는 현상을 압밀이라 한다. 그 결과 지표부에 침하현상이 일어나는데 이것이 압밀침하이다.

압입공법

흙막이용의 강널판이나 H형강을 저진동, 저소음으로 지중에 압입하여 설치하는 항타공법의 일종이다.

압축공기 착암기

압축공기를 동력원으로 하는 굴착기의 총칭이다. 일반적으로 많이 사용되고 있다.

압출(壓出, squeezing)

터널 등의 굴착에 따라 굴착면에서의 응력변화가 발생하여 벽면이 안쪽으로 밀려나오는 현상이다.

압출성 토압

터널굴착에 의해 터널 주변에 생긴 응력이 원지반의 강도를 초과하면 원지반에 활동면이 발생하여 소성변형이 생긴다. 이때 굴착면에 대하여 중심점 방향의 압력을 말한다. 힘의 크기는 변형량과 관계되며 이완토압과는 다른 것이다.

애지테이터 카(agitater car)

콘크리트를 비비면서 운반할 수 있도록 한 콘크리트 운반차이다.

애추(崖錐)

돌서령이라고도 하며 급경사면의 풍화암층이 벼랑 밑으로 떨어져서 형성되는 원추 상의 퇴적지형으로서 각이 진 자갈이나 기타 대·소 입경의 돌과 흙이 공존한다. 때로는 30°가까운 급경사를 이루어 호우 시에는 대량의 물과 혼합되어 붕괴하는 수가 있다.

H형 동바리

강아치 동바리의 한 형식으로 주요 부재(아치 리브: arch rib)에 H 형강을 사용한 것이다.

여굴

설계라이닝 두께를 확보하기 위하여 불가피하게 굴착된 부분으로 동바리가 설치되는 두께를 제외한 부분이다. 여굴량은 지질이나 시공법에 따라 다르다.

역(逆)라이닝

라이닝 시공방법의 순서를 나타내는 것으로 아치 콘크리트를 타설한 후 측벽 콘크리트를 타설하는 공법을 말하며 상부 반단면 선진공법, 저설도갱 선진상부 반단면 공법의 경우에 사용하는 방법이다.

연결볼트

강재동바리에서 동바리 상호간을 연결시키기 위해 터널 축방향으로 끼우는 긴 볼트

연암(軟岩)

일반적으로 풍화암이나 신제3기 이후의 고결도가 낮은 퇴적암을 말한다. 명확한 기준은 없으나 일반적으로 일축압축강도가 200kgf/cm^2 이하이다.

연약지반

강도가 작고 변형하기 쉬운 점성토나 느슨한 사질토의 지반. 일반적으로 점성토의 경우 $N \leq 4$, 사질토의 경우 $N \leq 10$ 이 표준이다. 그러나 댐 기초에서는 $N \leq 20$ 일 경우 이를 연약지반이라 한다.

영계수(Young's modulus)

응력-변형관계가 직선으로 나타나지 않는 암석이나 흙과 같은 재료의 응력과 변형의 비를 말한다. 탄성체의 경우 이 비는 탄성한도내에서는 일정하며 탄성계수(영율)라 불리운다.

용출수 처리

용출수 처리란 굴착에 따른 돌발적인 집중 용출수나 장기 용출수로 인하여 공사에 방해되지 않도록 사전에 이를 배제하고 고결도가 낮은 지반의 강화를 꾀하는 것을 말한다.

우물 고갈(Well dry)

우물의 수위는 지하수위를 나타내며 이 수위가 우물의 깊이 이하로 저하하여 우물의 사용이 불가능하게 되는 상황을 말한다.

원지반 강도비

원지반을 대표하는 암반(또는 흙)의 일축압축강도와 토피의 자중에 의한 초기응력의 비(比)로서 지압의 종류를 예측하는데 중요한 지표가 된다.

원지반 탈락

터널내에 노출된 원지반의 토사와 암편이 자연적 요인이나 인위적 요인으로 박리·낙하하는 현상을 말한다.

웰 포인트 공법(Well point method)

웰 포인트라고 하는 집수관을 지반에 설치하여 지반에 부압을 주어 지하수를 흡인함으로써 지하수위를 저하시키는 방법이다.

유사현상(流砂現象)

모래와 같은 토립자가 침투류(浸透流)의 영향을 받아 입자간의 압력이 줄어 지지력을 거의 상실하고 유출하는 현상을 말한다.

유압식 착암기

유압 구동에 의하여 천공하는 착암기의 총칭이다.

융기(Heaving)

터널굴착에 따라 바닥 부분이 내측으로 부풀어오르는 현상을 말한다. 팽창성의 원지반이나 강도가 낮은 원지반에서 소성 유동하는 경우 또는 측벽 배면의 원지반이 주위로 몰려드는 경우에 발생한다.

음파탐사(音波探査)

방전(放電)작용, 가스폭발, 고압공기의 방출 등에 의한 음원(音源)을 에너지원으로 하여 수중에 반복 진동을 주어서 파동이 수중 밀바닥과 수중 밀바닥 아래의 지층 경계로부터 반사되어 오는 것을 받아 수중 밑의 지질구조를 조사하는 방법이다.

이동식 거푸집

터널 라이닝의 콘크리트 타설에 사용되는 거푸집으로 분해하지 않고 이동 설치하면서 잇달아 라이닝을 타설할 수 있는 형식의 거푸집을 말한다.

이방성(異方性)

물체의 어떤 성질이 방향에 따라 다르게 될 때 그 물체는 그 성질에 대하여 이방성을 갖는다고 말한다.

이완높이

터널 굴착에 따라 원지반이 이완되어 토압으로 작용하는 범위로서 터널 상부의 원지반 이완영역의 높이(두께)이다. 이완하중 높이라고도 한다.

이완토압

터널 굴착에 따른 폭파, 동바리의 침하 및 라이닝 배면의 공극 등으로 터널 상부의 원지반이 이완되어 어느 높이의 원지반 중량이 터널 동바리 또는 라이닝에 직접 하중으로 작용하는 토압이다. 이완하중이라고도 한다.

2차 라이닝

라이닝을 나누어 시공하는 경우 임시 라이닝을 1차 라이닝이라 하며 그 후 최종적인 라이닝을 2차 라이닝이라고 한다. NATM에서는 뿔어붙임 콘크리트를 1차 라이닝으로 하고 그 내측에 2차 라이닝으로 현장타설 콘크리트를 시공한다.

2차 발파(boulder blasting)

폭파로 생긴 암괴가 너무 커서 운반이나 다음 공정에서의 처리가 곤란한 경우에 암석의 큰 덩어리에 대한 발파를 다시 하는데 이와 같은 발파를 말한다.

2차 응력

터널 굴착 이전의 원지반은 1차(초기)응력 상태로 있으나 터널 굴착에 따라 터널 주변 원지반의 응력상태에 변화가 생겨서 변형이나 파괴가 발생하여 2차 응력상태가 된다. 이 응력을 2차 응력이라 한다.

인력굴착

브레이커(breaker)등의 간이 굴착 기계나 공구를 사용하여 인력을 주체로 하여 터널 원지반을 굴착하는 굴착 방식이다.

인버트(invert)

바닥 지반에 타설한 역아치 콘크리트를 말한다. 또한 바닥 부분을 지칭하기도 한다.

일방굴착

터널 공사에서 한쪽 갱구에서만 굴착하는 것으로서 일반적으로 상향기울기로 굴진하는 것을 말한다.

1차 라이닝

라이닝은 굴착 후 가능한 한 조속히 시공하여 원지반의 이완을 억제하거나 원지반의 안정을 기다려 최종적인 라이닝을 시공하도록 하기 때문에 2회로 나누어 시공되는 경우가 있다. 이런 경우 최초에 시공하는 라이닝을 1차 라이닝이라 한다.

1차(초기)응력

굴착 등의 행위가 가해지기 이전의 자연상태의 원지반내 응력

자유단면 터널굴착기

터널굴착기는 전단면을 한번에 굴착 파쇄하는 전단면 굴착방식과 단면을 부분적으로 굴착하여가는 부분굴착방식으로 대별되는데 후자방식에 사용되는 굴착기를 말한다.

작업갱

본갱의 공사를 시공하기 위한 작업용 터널로서 선진갱도 작업 갱일 경우가 많다. 또한 공사용의 수직갱, 사갱, 수평갱도 작업갱이라 말하는 경우가 있다.

잔류폭약

발파하였을 때 어떠한 이유에서든 발파공의 폭약이 발파를 일으키지 않고 폭약의 전부 또는 일부가 공 내부에 잔류하는 경우가 있다. 이를 잔류폭약이라 한다.

잠재소성(潛在塑性)상태

터널 굴착 전의 자연상태에서 이미 원지반이 소성상태인 것을 말한다. 소성이나 팽창성 원지반은 이 상태에 있으며 굴착에 의해 즉시 내공으로 향하여 유동을 일으킨다.

저반(底盤)

굴착단면의 저면을 말한다. 바닥면이라고도 한다.

저판(底版)

강재 동바리에서 하중 지지면적을 확대하여 지지력을 갖도록 동바리 하단에 붙인 강판으로 토대목에 의해 저반에서 지지된다.

전기검층(탐사)

보링공을 이용하여 시행하는 물리검층 시험의 하나이다. 대지를 구성하는 암석은 구조, 성분, 간극수 등에 따라 고유의 전기적인 값을 나타낸다. 측정된 비(比)저항치는 점토와 같은 전도성의 것은 낮고 경암질의 것은 높으므로 비저항치를 측정함에 따라 지질의 분포구조를 알 수 있다. 이 방법은 터널공사에 적극적으로 사용되고 있는 것은 아니지만 비교적 토피가 적은 부분의 대수층 구조파악은 간편하고, 빠르고, 값싸게 되므로 지하수 문제가 있는 터널의 조사나 다른 측정치의 검증에는 유효하다.

전단면 굴착

터널굴착시 소정의 단면을 한번에 굴진하는 작업방식이다.

절리(節理)

암석 혹은 암반중의 모든 역학적 불연속면을 나타내는 일반적인 표현으로서 암반 중에 변위가 없는 균열을 절리라 한다.

점보(jumbo)

폭파공법에서 장약공 등을 천공하기 위하여 여러 개의 착암기를 장비한 착암용 이동차량의 총칭이다. 점보 드릴이라고도 한다.

접착형 록 볼트

접착제를 사용하여 암반에 정착하는 방식의 록 볼트이며 전면 접착형과 선단 접착형이 있다.

정판(頂版)

강재 동바리에서 아치 정점에 위치하는 동바리 상단에 붙인 강판이며 마주 보는 2개의 정판을 연결하여 강재동바리를 고정시킨다.

제3기층

약 6,500만년 ~ 200만년 전에 형성된 암층을 말한다. 고제3기(古第三紀)는 주요 탄전을 형성하고 신제3기(新第三紀)는 주요 유전을 형성하였다.

제4기층

약 200만년 전 ~ 현재까지 사이에 형성된 지층을 말한다. 홍적층이나 충적층이 포함된다. 제4기는 퇴적물이 미고결인 까닭에 토목공사상 문제점이 많으며 지반공학상 많은 중요 의미를 갖고 있다.

조사갱

원지반 조건 등의 조사를 목적으로 한 터널

주시(走時)곡선(time-distance curve)

탄성파가 진원에서 수신점(受振点)까지 도달에 요하는 시간을 주시(走時)라 한다. 또한 횡측에 진원에서 수신점까지의 거리, 종축에 주시를 취하여 각 수신점마다의 주시를 표시하여 이를 연결하여 얻어진 것이 주시곡선이다.

지반응력

지반, 암반내의 응력으로 1차 응력과 2차 응력의 총칭.

지반활동(sliding)

토지의 일부가 지하수 등에 의하여 활동하는 현상 또는 이에 수반하여 지속적으로 이동하는 현상. 점토지대에서 흔히 볼 수 있다.

지불선

시공상 불가항력적으로 생기는 여굴이나 라이닝 선으로 이 선 내에 포함되는 굴착량 및 콘크리트량이 지불대상 수량이 된다.

지중변위(地中變位) 측정

원지반의 변위를 계측하는 측정으로 원지반의 안정상태의 검증, 이완영역의 추정, 지면활동 등에 대한 운동의 감시를 목적으로 시행한다.

지질구조

지각변동으로 인하여 변형, 변위가 생긴 지층, 암석, 암체의 상호관계를 말한다. 지질구조의 기본적인 요소는 면구조(지층면, 편리면, 단층면 등)와 선구조이다. 터널공학에서는 특히 단층, 습곡에서 형성된 구조와 층리, 편리, 절리, 균열 등의 주행, 경사 등이 중요한 의미를 갖는다.

지층(地層)

각종 작용에 의하여 파쇄된 암석의 입자 또는 용암이 물, 공기, 중력 등의 작용으로 운반되어 층상으로 퇴적된 것. 화학적으로 침전 퇴적된 것도 포함된다.

지표(면)침하

광역적인 지반침하와 구분하여 터널시공에 기인한 지반의 침하를 말한다.

지하수위 저하(低下)

지하수는 기상조건에 지배되어 어느 쪽으로 수위의 상승과 저하를 반복하고 있으나 터널 굴착에 따라 용출수가 생기면 자연상태의 순환계 균형이 깨어져 그 결과 새로운 균형 위치까지 지하수의 저하현상이 일어난다. 이를 지하수위 저하라고 한다.

진폐

분진이 다량 함유된 공기를 장시간 흡입하여 폐에 장애를 일으키는 병증이다.

천공 패턴(pattern)

폭파를 효과적으로 하기 위하여 굴착단면, 지층경사에 따라 선정하는 천공길이, 천공간격, 천공방향 등의 배치를 말한다

체리 픽커(cherry picker)

빈차를 들어올려 교차를 하는 장치로 운반노선이 단선인 경우 또는 드릴점보(drill jumbo)를 사용하는 경우에 많이 사용되며 동력 권양기(卷揚機: hoist)로 빈차를 위로 들어올려 그 아래를 열차가 통과하는 것과 조금만 들어올려 옆으로 이동시키는 것이 있다.

최소 라이닝 두께선

강재 동바리의 라이닝 두께가 작으면 펀칭 전단(punching shear)등에 의한 악영향을 받을 우려가 있으므로 이를 방지할 수 있도록 최소 라이닝 두께를 설정하며 이를 표준단면도에 A선으로 명시한 선을 말한다.

충적층(沖積層)

제4기 가운데 약2만년 전의 마지막 빙하기 이후 일련의 해면 상승 시의 퇴적층을 말하며

연약지반을 형성하고 있다.

측압(側壓)

터널 구조물에 작용하는 지압 가운데 수평방향으로 작용하는 지압을 말한다.

층리(層理)

퇴적과정에서 퇴적물내부에 생기는 성층구조로서 가장 얇은 1cm 이하의 층리를 엽리(葉理)라 한다. 지층면과 수평면의 교선(交線)이 나타내는 방향을 주향(走向), 그 양면이 이루는 각도를 경사라고 한다.

카 패서 (car passer)

버력의 반출에 있어서 레일 방식의 경우에 버력운반차의 회차를 효율적으로 하기 위하여 사용하는 장치로 슬라이드 레일에 의한 빈 운반차의 측방이동과 열차의 전후진을 반복하여 모든 운반차에 실는 방식이다.

칼라 버팀대(collar brace)

강재 아치 또는 지주식 동바리의 부재로서 터널 축 방향으로 작용하는 하중에 대해 동바리 상호간의 결합을 피하기 위하여 터널 축 방향으로 넣는 지지재로 연결볼트, 버팀보 등이 있다.

콘크리트 펌프 (concrete pump)

콘크리트를 치는 기계로서 피스톤 혹은 고무튜브를 당기는 등의 동작에 의해 콘크리트를 압송하는 형식의 것을 말한다.

콘크리트 플레이서 (concrete placer)

콘크리트 타설기계로서 압축공기에 의해 파이프를 통하여 콘크리트를 압송하는 형식의 것을 말한다.

크라운(crown)

일반적으로 굴착면 내지 구조물의 상단면을 말한다. 터널에서는 굴착단면 최상부의 아치크라운(arch crown)을 말한다.

킥업(kick up)

콘크리트 타설관을 배치하기 위하여 강아치 동바리의 크라운 양단부에 직선부를 설치하는 것을 말한다. 직선부를 너무 길게 하면 동바리의 약점이 된다.

타이어 방식

굴착한 버력을 갱외로 반출처리하는 일련의 작업 가운데 버력 운반에 덤프 트럭 등의 자

동차를 사용하는 방식

탄성영역(彈性領域)

터널굴착에도 불구하고 원래의 성질을 가지고 있다고 생각되는 영역이다.

탄성과 속도

어떤 물질 속을 탄성과가 단위시간에 전파하는 속도를 말한다. 일반적으로 지층의 물리적 강도에 비례한다.

탄성과 탐사

지표 또는 지하의 얇은 곳에서 화약의 폭발 등으로 인공지진을 일으켜 이 파동의 도달시간을 근거로 탄성과 속도를 산출하여 지층의 두께나 깊이, 단층 등의 지하구조를 추정하는 방법이다.

터널 (tunnel)

통수나 교통로 등의 목적으로 산, 지하 등에 굴착한 상당한 크기의 내공 단면을 갖는 갱도로서 추도라고도 한다.

터널 보링기(tunnel boring machine)

회전 커터(cutter)로 터널 전단면을 한번에 굴착 또는 파쇄하여 굴진하는 기계의 총칭으로 TBM이라고도 한다.

토대목(foot plate)

강재 동바리에서 하중의 지지 면적을 확대하여 충분한 지지력을 갖도록 저판을 바닥에서 받치는 판상재 또는 블록재이다.

토사 터널(earth tunnel)

지질상의 터널 분류로 미고결 토층이나 풍화토, 고결도가 낮은 연암 등으로 이루어진 원지반에 구축되는 터널로서 어스 터널이라고도 한다.

토피압

땅속의 어느 점에서 그 위쪽에 있는 암반 또는 지반을 토피라고 한다. 토피의 중량에 의하여 생기는 연직압력을 토피압이라고 한다.

파쇄대

단층면에 따라 불규칙적인 갈라진 눈금이 많은 층을 말한다. 갑자기 다량의 용출수가 나오거나 점토의 연약대가 터널내로 압출되거나 분출하는 수가 있다.

파이프 루프(pipe roof)공법

터널 원지반의 굴착에 따른 지표 침하와 원지반의 이완을 방지하기 위하여 굴착에 앞서 굴착면의 아치부 외주에 따라 강 파이프를 삽입하여 지붕 구조를 형성해두고 굴착시에 이 파이프를 강아치 동바리 등으로 지지하여 굴착하는 공법이다.

패턴 볼팅(pattern bolting)

록 볼트를 미리 정해진 배치와 길이에 따라 설치하는 것을 말한다.

팽창성 토압

터널주변의 원지반이 내측으로 축소하는 것과 같이 불거져 나오는 지질로서 동바리나 라이닝에 작용하는 토압이다. 원인은 지질에 따라 다르고 물의 침가에 의한 것이나 공기에 접촉되어 산화하는 등의 화학변화에 의한 것이 있고 몬모릴로나이트 점토에 의한 것이 있다

편압

터널 등에 대한 토압이 좌우 대칭이 아니고 현저히 치우쳐 작용하는 경우를 말한다. 일반적인 경우에도 터널 하중은 동바리, 라이닝에 대하여 대칭이고 일정하게 작용한다고는 할 수 없으나 특히 터널 상부의 토피가 작고 경사진 경우, 지층이 터널 단면에 대하여 경사지고 있는 경우, 지질이 균일치 않은 경우, 팽창성 지질로 한쪽에서 보다 강하게 늘어나는 경우 등에는 편압이 작용하는 경우가 많다.

푸아송의 비(Poisson's ratio)

탄성부재가 축 방향력을 받는 경우 탄성한도 내에서는 세로변형(ϵ)과 가로변형(β)간에 $\beta = -\nu\epsilon = -(1/m)\epsilon$ 의 관계가 있으며 이 ν 를 푸와송의 비, m 을 푸와송의 수라고 한다. 콘크리트는 $\nu=1/6$, 흙은 $\nu=1/3 \sim 1/4$ 정도이다.

풍화작용

암석이 화학적, 물리적, 생물학적 작용에 의하여 토양으로 변화하는 현상이며 파쇄와 분해로 대별된다.

프루드 수(Froude number)

흐름에 관한 무차원량($Fr=v/\sqrt{gh}$)으로서 $Fr < 1$ 일 때 상류(常流), $Fr > 1$ 일 때 사류(射流)이다.

피압지하수(artesian ground water)

대수층 상부가 불투수층에 의하여 차단되어 있고 불투수층 아래에 수압이 작용하고 있는 지하수면을 갖지 않은 지하수를 말한다. 불투수성의 두께가 배후의 피압지하수의 수두에 대하여 저항할 수 없게 된 경우에 대량의 용수와 토사유출을 수반하는 막장 붕괴를 일으키므로 주의해야 한다.

픽 해머(pick hammer)

주로 경암을 잘라 부수거나 작게 쪼갤 때 사용하는 특수 착암기로 천공용은 아니며 픽스틸(pick steel)로 불리는 끝이 예리한 정을 회전시키지 않고 타격만을 가하는 것으로 곡괭이 대리 역할을 한다. 중량 7~9kg 정도의 휴대용 착암기이다.

하향굴착

터널 굴착에서 하향 기울기로 굴착하는 것을 말한다.

한계자립높이

굴착면이 동바리 없이 어느 시간 동안 붕괴하지 않고 자립할 수 있는 최대 높이

핵(core)

터널 굴착시 외곽 측을 먼저 굴착하고 단면의 중앙부에 막장면의 안정을 위하여 남기는 부분의 명칭

핸드 해머(hand hammer)

주로 하향공의 천공에 사용하는 착암기를 말하며 휴대하여 사용할 수 있게 만들어진 것이다. 동의어로는 싱커(sinker), 잭 해머(jack hammer)가 있다.

현수효과

록 볼트 작용효과의 하나이며 터널굴착으로 이루어져 낙하할 것 같은 암괴를 이완되지 않은 심부의 원지반으로부터 매달아서 지지하여 붕괴를 방지하는 효과를 말한다.

홍적층(洪積層)

제4기 중 약 200만년 전 이후부터 약 1만년 전 사이에 형성된 지층

활성단층(Active fault)

일반적으로 최근의 지질시대에 반복적으로 활동하여 앞으로도 활동이 예상되는 단층. 최근의 지질시대에는 여러 가지 설이 있으며 그 예측이 어렵다.