

최 종
연구보고서

간척지 연약지반토 성토재료 활용방안 연구

A study on the use of soft soils
as a fill materials

연구기관

농어촌진흥공사 농어촌연구원

농 립 부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “간척지 연약지반토 성토재료 활용방안 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

1999. 10.

주관연구기관명 : 농어촌진흥공사
총괄연구책임자 : 3급 김 현 태
연 구 원 : 1급 김 호 일
연 구 원 : 1급 홍 병 만
연 구 원 : 3급 윤 창 진
연 구 원 : 4급 공 길 용
연 구 원 : 4급 김 학 준

여백

요 약 문

I. 제 목

간척지 연약지반토 성토재료 활용방안 연구

II. 연구개발의 목적 및 중요성

우리나라 서남해안 간척지에서 농경지조성을 위한 도로, 방수제, 용배수로등의 성토공사에 필요한 성토재료를 육상토취장을 개발하여 사용하고 있으나, 토취장개발에 따른 환경파괴 문제와 산업화에 따른 건설사업의 번창과 더불어 육상 토취장의 개발이 점점 어려워지고 있다.

그리고 토취장의 개발사용후 산림복구에 많은 비용이 들지만, 원상태와 같은 자연환경복구는 사실상 어렵고, 성토공사비 단가도 그 만큼 높아지고 있어 사업지구내에서 쉽게 구할 수 있는 간척지 연약지반토, 배수로굴착토 및 담수호내 준설토 등을 대체 성토재료로 활용하는 고품수비 연약지반토의 성토(Wet Fills)공법이 요구되고 있다.

간척지내 연약지반토를 대체성토재료로 활용할 수 있다면 공사비절감은 물론 민원발생, 환경파괴등의 제반문제를 쉽게 해결할 수 있을 것이다.

그러나 이들 연약지반토는 현장함수비가 높고, 전단강도가 적으며, 압축성이 크기 때문에 성토재료로 쉽게 활용되지 못하고 있다. 그러므로 성토재료로 이용하기 위하여 현장함수비를 크게 낮추거나 성토재료로서의 특성을 개

량 또는 보강하는 공법의 개발이 필요하다.

또한 실용화를 촉진하기 위하여 설계 및 시공기술자가 쉽게 적용할 수 있는 고탍수비 연약지반토의 성토공법에 대한 설계 및 시공기법의 정립이 필요하다.

이를 위하여, 우선 그 사용대상이 되는 우리나라 서남해안의 연약지반토의 분포와 특성을 분석하여야 하며, 이들 흙에 압밀배수 성토공법, 대기건조 성토공법 및 시멘트혼합처리 고결성토공법의 적용가능성을 확인하기 위한 실내모형시험이 필요하다.

또한 현장에 이들 공법으로 시험시공을 하여 그 시공성을 확인하여야 하며 시공상의 문제점을 분석하여 이들 공법에 대한 설계 및 시공기법을 제시하는 것이 실용화를 위하여 매우 중요한 과제이다.

Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

1. 1차년도 :

- 가. 우리나라 서남해안의 연약지반토의 분포와 특성분석
- 나. 성토재료로서 공학적특성분석시험
- 다. 연약지반토 성토재료로서 문제점분석과 연구과제설정
- 라. 개량성토에 대한 실내 요소시험
- 마. 압밀배수 보강성토에 대한 거동수치해석

2. 2차년도 :

- 가. 대기건조특성 수치해석 및 실내모형시험
- 나. 필터매트 소요통수능해석 및 통수능력시험
- 다. 대기건조 함수비조절토의 다짐, 압밀 및 강도특성시험

라. 필터매트보강 및 대기건조 성토공법 시험포설치 및 현장계측

3. 3차년도 :

가. 고탐수비 흙 시멘트혼합기기 개발

나. 시멘트혼합처리 현장시험포설치 및 강도특성변화 계측

다. 대기건조 및 압밀배수 단계성토공법 설계기법 검토

라. 고화처리 개량성토공법 설계기법 검토

마. 이원 및 시화지구 설계 및 시공관리 모델제시

바. 검세 및 시화지구 시멘트혼합처리 개량성토 모델제시

사. 시공현장조건별 경제성분석

IV. 연구개발결과 및 활용에 대한 건의

1. 연구개발결과

본 연구에서는 간척지내 연약지반토를 성토재료로 활용하는 고탐수비 연약지반토의 성토(Wet Fills)공법에 대한 설계 및 시공기법을 제시하기 위하여, 우리나라 서남해안의 간척지 표층토의 분포와 공학적특성을 우선 분석하고, 이들 흙에 대한 압밀배수공법, 대기건조공법, 시멘트 혼합처리 고결성토공법에 대하여 실내모형시험과 현장시험시공을 실시하였다.

또한 시멘트 혼합처리 개량성토공법을 실용화하기 위한 고탐수비 흙시멘트 혼합장비를 개발하고 시험시공을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 연약지반 표층토의 공학적 특성과 개선방법

1) 간척지 표층토의 분포

서남해안의 간척지 표층토를 보면, 서해중부는 실트질흙이 많고 남해안은 점토함량이 많은 분포를 보이고 있으며, 현장함수비와 액성한계도 서해안 중부(30 ~ 50%)부터 남해남부(40 ~ 80%)로 갈수록 증가하는 분포를

보이고 있어 서해안보다 남해안 흙이 성토재료로 사용하기가 더 어려운 것으로 분석되었다.

2) 성토재료의 소요 전단강도

성토재료의 소요강도는 기초지반이 연약할수록, 성토고가 높을수록 더 큰 전단강도의 성토재료가 필요한 것으로 분석되었으며, 성토재의 비배수전단강도 $c_u=0.2\sim 1.2\text{kg/cm}^2$ 이상이 필요한 것으로 분석되었다.

3) 고함수비 연약지반토의 성토재료 활용가능 조건

고함수비의 흙을 성토재료로 활용할 수 있는 경우는 ① 외부에서 성토재를 구할 수 없는 조건 ② 굴착된 흙을 사토처리할 수 없어 고함수비의 흙을 적절히 처리하여 재활용할 수 밖에 없는 경우 ③ 고함수비토을 대기건조공법, 고화처리공법, 보강성토공법 등으로 처리할 경우 외부에서 양질의 성토재료를 반입하는 것보다 경제적인 경우 사용할 수 있다.

4) 성토재료로서 공학적 특성 개선방법과 연구과제

간척지 연약지반 흙의 공학적 특성 개선방법은 1) 압밀배수(Consolidation)공법, 2) 양질토 혼합공법(Mixing), 3) 시멘트 또는 석회혼합처리공법(Quicklime or Soil Cement), 4) 대기건조공법(Evaporation dryey) 등이 있으며, 간척지 연약지반토를 성토재료로 활용하기 위하여는 이들 공법에 대한 설계 및 시공기법에 대한 연구가 필요하다는 결론을 얻었다.

나. 압밀배수 성토공법

1) 압밀해석방법

고함수비의 연약지반토를 굴착하여 성토하면 흙이 교란되고, 흙이 교란되면 선행압밀하중과 압밀계수가 크게 감소하므로 교란조건의 시험으로부터 이 값을 구하여 압밀해석을 하여야 한다.

2) 필터매트의 소요통수능

압밀촉진을 위하여 사용되는 필터매트의 소요통수능은 압밀지연시

간 5%를 허용치로 할 때 $q_{wa} = c_v \times L \times 20$ (cc/s/m)이상이 필요한 상판식을 얻었다. 또한 시중에 생산되고 있는 필터매트의 통수능의 차이가 매우 크므로, 통수능시험을 하여 소요통수능 이상의 값을 갖는 필터매트의 선정이 필요하다.

4) 압밀배수성토공법의 한계

전응력개념의 내부마찰각이 25도이상의 연약지반토는 투수계수도 다소 큰편으로 공사기간이 허용된다면 성토고 2m이하의 차량주행이 없는 성토단면에 압밀배수공법만으로 성토가 가능한 것으로 분석되었다.

그러나 실제 시공중 성토단면 표층부분에서 대기건조가 이루어지므로 압밀배수와 대기건조의 효과를 동시에 고려한 성토공법의 적용이 필요하다는 결론을 얻었다.

다. 대기건조 성토공법

1) 대기건조 목표함수비 결정

성토재료의 소요전단강도를 얻기 위하여 대기건조시켜야 하는 흙의 함수비는 함수비별 전단강도시험을 실시하여 함수비와 전단강도관계로 부터 구할 수 있다.

2) 대기건조 소요일수

시화지구 현장함수비 30%의 간척지 표층토를 함수비 24%로 낮추는데 3~4회 밭갈이를 하여 4~8일이 소요되었지만 지구별로 그 차이가 크므로 조사설계단계에서 시험시공을 실시하여 결정하는 것이 타당하다는 결론을 얻었다.

3) 대기건조공법의 한계

간척지 표층토를 다짐율 95% 습윤층 함수비까지 건조시켜 다짐성토를 하면 성토고 3~6m까지 성토가 가능하므로 대기건조공법이 매우 유용

하다는 결론을 얻었다.

그러나 간척지 해성퇴적토는 다짐을 하여도 노상으로 필요한 지지력비(CBR)를 얻을 수 없으므로 노상으로 사용할 때는 시멘트 혼합처리등의 개량공법이 필요하고, 또한 배수로 굴착등 심층의 고함수비토는 대기건조일수(2개월 이상)가 많이 소요되어 시공성이 없으므로 시멘트 혼합처리등의 고결성토공법의 적용이 필요하다는 결론을 얻었다.

라. 시멘트 혼합처리 성토공법

1) 시멘트 혼합처리토의 전단강도 개량효과

함수비 59%의 고함수비 해성점토에 경제성이 있는 저배합비(2~5%)의 시멘트를 혼합처리하면 성토재료로 필요한 비배수전단강도 $c_u=1.2\text{kg/cm}^2$ 이상을 얻을 수 있어 성토재료로 충분히 사용할 수 있다는 결과를 얻었다.

2) 지지력비 개량효과

함수비 30%, 지지력비 CBR=2.3%의 간척지 해성점토에 시멘트를 5%첨가시 CBR=36%, 10%처리시 CBR=77%로 증가하여 도로 노상은 물론 보조기층 대체 재료로 충분히 사용할 수 있다는 결과를 얻었다.

3) 압축성개량효과

고함수비 연약지반토에 시멘트를 혼합처리하면 선행압밀압력(1.8~3.4 kg/cm^2)이 크게 증가하여 압축성이 거의 없는 흙으로 개량되므로 압밀침하가 문제가 되는 고성토단면에서도 사용할 수 있다는 결과를 얻었다.

4) 배합설계방법

흙의 종류와 함수비에 따라 최적배합비가 크게 차이가 있으므로 배합설계가 꼭 필요하며, 배합설계의 순서는 목표 전단강도를 먼저 결정하고 그 강도를 얻을 수 있는 배합설계시험을 실시하여 소요전단강도를 얻을 수 있는 최적배합비를 결정하면 된다.

5) 흙시멘트 혼합장비개발과 시험시공

본 연구에서 개발한 혼합장비로 고탍수비의 해성점토에 시멘트를 혼합처리한 결과 실내에서 혼합하는 것 이상의 혼합결과를 얻었으며, 시멘트 혼합처리후 1~2시간이 경과하면 블도져 또는 백호등의 주행으로 다짐을 할 수 있었으며 이 다짐조건의 전단강도는 양생동안의 건조수축효과에 의해 실내혼합 시험값보다 더 큰 값을 얻었다.

시험시공구간에 우천후 차량주행 확인시험과 경제성 분석결과 고탍수비 흙시멘트고결공법의 실용성을 확인할 수 있었다.

마. 연구결과 실용화 추진

본 연구결과를 실용화하기 위하여 배수개선사업 공사중인 1개지구에서 배수로 굴착토를 대기건조 성토공법으로 기 재활용하였으며, 간척지 내부개답사업 이원지구에 대기건조공법으로 간척지 지반토를 방수제 성토단면에 활용하는 방안을 설계에 기 반영하였다. 또한 간척지 내부개답 설계계획중에 있는 시화지구에 대기건조공법과 시멘트 혼합처리 성토공법을 적용하기 위한 시험시공을 진행중에 있다.

2. 활용에 관한 건의

가. 경제성 비교

간척지 연약지반토를 성토재료로 활용하는 것은 산토보다 공정상에 흙의 함수비 조절공정, 집토공정, 운반공정 및 다짐공정 등의 번거로움과 어려움이 많다. 지금까지 시공회사가 간척지 연약지반토의 사용을 기피하는 이유는 성토공사비 단가가 산토는 3,500~7,500원/m³ 이나 지반토 유용은 800~1,300원/m³으로 공정상에 번거로운 공정이 많지만 이들 공정이 고려되지 않아 수익이 맞지 않기 때문이다.

단가산정에 시공상에서 실제로 필요한 모든공정을 고려하여 공사비를 계상하면, 총 성토공사비는 절감되면서도 시공회사의 경제성도 성립되며, 환경 파괴문제와 민원문제가 해결될 수 있으므로 간척지 연약지반토의 성토재료로서의 활용이 확산될 것이다.

나. 대기건조 성토공법 활용

대기건조 성토공법은 대기건조에 의하여 흙의 함수비를 감소시켜 성토하는 것으로 그 지구에서 적용 가능한 대기건조방법의 선정과 그 기간의 산정이 정확히 이루어지는 것이 필요하다. 이를 위하여 각 지구별로 설계 또는 시공착수전에 대기건조에 대한 시험시공을 실시하여 이 대기건조공정에 대한 공사비를 반영하여 주어야 대기건조공법의 현장적용이 적극적으로 이루어질 수 있다.

다. 고함수비 흙시멘트 성토공법 활용

본 연구에서 개발한 고함수비 흙시멘트 혼합기기는 연구를 위한 소형으로 만들었기 때문에 단위시간당 처리용량이 적어 현장적용성이 없다. 그러므로 신규 간척지 개발지구에 시험시공사업으로 시간당 처리용량이 $100\text{m}^3/\text{hr}$ 이상되는 대형장비의 제작과 시험시공을 하면, 그 지구에서 적용은 물론 앞으로 다른 지구에 계속 활용하면 기구사용료의 수입이 발생할 수 있으며, 고함수비 흙시멘트 혼합처리 고결성토공법의 활용이 촉진될 것으로 예측되므로 고함수비 흙시멘트 고결성토공법의 시험시공사업이 필요하다.

SUMMARY

I. Title

A study on the use of soft soils as a fill material

II. Object and importance of the study

In order to expand agricultural lands in the western and southern coasts of the Korean Peninsula, coarse soils excavated from hillsides have been used as fill materials for reclamation. Suitable borrow pits available in land are now limited and also they bring about environmental problems when soils are excavated at the borrow pits and transported to the site. Furthermore, transportation costs become higher as the site is located far away from the borrow pits, and the borrow pits should be recovered to natural environment. Therefore, an alternative can be considered to use soft materials abundant in the coast available near the site which are usually fine and wet soils. If this were possible, the reclamation cost as well as environment problems would be remarkably reduced.

When using fine and wet materials as fill, however, many engineering problems can be encountered. Usually, the materials have high water contents, low strength, and high compressibility. In order to use them, we need research that can improve the inherent properties of those materials. The problems should be attacked in terms of both design and

construction phases.

In order to tackle with the problems, the first thing to do is to investigate the engineering characteristics and distribution of available soft soils. Researches on soil improvement involve consolidation drain using filter mat, Evaporative drying for the soft ground surface, and mixing cement to the fine wet soils. A lab model test is necessary to verify effectiveness and comparison of those techniques. A field test is also required to show applicability and to find problems that may exist in the design and construction stages.

III. Contents and Scope of the study

1. First year

- Analysis of engineering characteristics and distribution of soft soil in the west and south coasts of the Korean Peninsula.
- Soil tests for availability as fill materials.
- Problem analysis and selection of detailed research topics
- Lab test for improving soil
- Numerical analysis for the fill to be improved by consolidation drain.

2. Second year

- Numerical analysis and lab model test for features of Evaporative drying
- Discharge capacity test for filter mat
- Compaction, consolidation, and strength test for Evaporative

dried soils

- Set-up of test embankment for filter mat and Evaporative dried fill
- Field measurements

3. Third year

- Development of soil-cement mixture apparatus for high water content soils
- Set-up of in-situ test site for soil-cement mixture treatment and measurements of strength changes
- Development of design techniques for the air-dried and the consolidation-drained embankment.
- Development of improvement technique for cement-treated materials.
- Proposal of a model for design and construction management in Leewon and Shihwa sites.
- Proposal of a model for soil-cement mixture design in Gukuong and Shihwa sites.
- Economic analysis for different construction requirement.

IV. Results of the study

1. Engineering properties of surface soil of soft grounds and its improvement technique

- Physical properties of soils on the ground surface in reclamation areas

It is known that the soils on the ground surface of the soft

ground in the west of the Peninsula are mainly composed of silty soils with 30 to 40% of natural water contents. On the other hand, soils in the southern coast that have 40 to 80% of natural water content are much dominant in clay portion. Therefore, soils in the southern coast are considered to be more difficult in treating them as fill materials.

- Required shear strength for fill materials

According to stability analysis, strength required for embankment construction becomes higher as the foundation grounds are weak and the embankment height increases. When undrained strength of soil of foundation ground is expressed as $c_u=0.1+0.02d$ kg/cm², where d is soil depth, the required strength for the fill is $c_u=0.2$ kg/cm² for 2m-high embankment and it increases to 1.2kg/cm² for 10m-high embankment.

- Compaction and strength characteristics

Standard compaction test shows that the optimum moisture contents for soils on the ground surface in the West Coast ranges from 19% to 23% and the dry densities are between 1.57 kg/cm³ and 1.64kg/cm³. Shear strength tests also show that friction angles of compacted soils in terms of effective stress and total stress are; $\phi' = 30-39^\circ$ $\phi = 14-29^\circ$. It can be concluded that those materials with relatively high friction angles could be used as fill materials.

- Detailed research topics based on improvement technique.

Improvement techniques for soft fine materials include

consolidation drain, mixing with coarse materials, treatment with cement and quicklime, and air drying of surface soils. For the practical application of those techniques, it is necessary to do research works in terms of design and construction phases.

2. Consolidation drain method

- Consolidation analysis

Soils used as fill materials are disturbed because they are excavated from natural ground. As consolidation behavior for disturbed soils are different from natural soils; its consolidation analysis should be performed based on the disturbed condition.

- Discharge capacity of filter mat

Using filter mats in the construction of embankment, consolidation can be accelerated. The author has developed the consolidation analysis that can involve discharge capacity of the filter mat. From the analysis, it is known that the required discharge capacity of the filter mat should be over than the value, $q_{wa}=c_v \times L \times 20$ (cc/s/m), when the allowable consolidation lag time is 5%.

- Limitation of consolidation drain method

When the strength of reclaimed soil is over 25° in terms of total stress, its permeability is considered to be drained by itself. Therefore, for the embankment less than 2m in height no drainage facilities are necessary where traffic is not allowed. However, if air-drying is possible, it is concluded that effects of

air-drying should be considered in design and construction phases.

3. Air drying method

- Required strength for fill material

Required strength of fill materials for possibility of air-drying has big differences depending on shear strength of the soil used. The criteria we established on this problem is that the embankment is stable when the undrained shear strength is over the value; $c_u = 0.133h - 0.133 \text{ kg/cm}^2$, where h is the embankment height, for foundation ground of $c_u = 0.1 + 0.02d \text{ kg/cm}^2$.

- Determination of target water content

Minimum requirement of water contents of soils that is dried in the air can be determined from water content-shear strength relationship obtained from tests.

- Required days for air drying

Soils, initial water content, pavement thickness, ground water table, and climate affect the days required for air-drying. Therefore, it is not easy to determine the accurate dates for air-drying. It is concluded that the most reasonable way is to determine from in-situ test including all natural conditions.

- Limitations of air drying method

When soils are compacted with 95% standard compaction test after air drying, it is possible to build embankments up to 3 to 6m-height. And when surface layer is exposed to air during 4

to 10 days (except rainy days), 95% of standard compaction can be reached. However, compaction degree 95% is not enough, as CBR required for the subgrade of roads. Therefore, other improvement techniques such as cement-mixed treatment may be required for satisfactory performance. Much more days (sometimes more than 2 months) for air drying would be required for soils with high water content that lies in the deeper layer. This means that air drying only is not practical and therefore it is much effective when soil improvement should be followed.

4. Cement mixing treatment

- Improvement of shear strength by cement mixing

It has been known that when 3% of cement is added to high water content marine clay ($c_u=0.04\text{kg/cm}^2$ and $\omega_n=59\%$), its unconfined compression strength after 7 days curing increased to 2kg/cm^2 . This result shows the possibility and effectiveness of cement mixing.

- Improvement of bearing ratio

A test result shows that when 5% and 10% of cement is added to marine clay with $\omega_n=30\%$, the bearing ratio increased from CBR=2.3% to CBR=30% and to CBR=77% respectively. It can be concluded from this result that cement treatment is very effective in improving bearing capacity for the subgrade and subbase of roads.

- Improvement of compressibility
For marine clay with $\omega_n=59\%$, cement was added and cured for 7days. Consolidation results show that pre-consolidation pressure increased to 1.8kg/cm^2 and 3.4kg/cm^2 with the addition of 3% and 5% of cement respectively. This result shows that low embankments could be constructed without significant compression.
- Development of mixing equipment and in-situ test
With the equipment developed for mixing, cement was mixed to the marine clay of $w=46-52\%$ and found that field performance was better than lab test. In other words, unit weight of soils mixed with cement was increased due to air drying and shrinking and thereby shear strength was obtained higher than that of the lab test.
- Mix design
Since the effectiveness of improvement may be different site by site, the mix design for each site is necessary in order to optimize it. The process is first to determine aimed shear strength and then optimum mix ratio of cement after carrying out a series of tests.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction

Section 1. Object of the study	33
Section 2. Contents and scope of the study	34
Section 3. Study scheme	35

Chapter 2. Distribution and particulars of soft ground in Korea

Section 1. Distribution and particulars of soft ground	38
Section 2. Tests of soft ground soils as fill materials	41
Section 3. Required shear strength for fill materials	51
Section 4. Improvement methods of soft soils for fill materials	57
Section 5. Conclusion	59

Chapter 3. Consolidation Method for wet fills

Section 1. Variation of consolidation properties by disturbance	61
Section 2. Required Discharge Capacity of filter mat with wet fills	74
Section 3. Design Method of wet fills considering Consolidation	102
Section 4. Conclusions	112

Chapter 4. Evaporative dewatering for wet fills

Section 1. Variation of natural water content by evaporative drying	115
Section 2. Shear strength increase by evaporative drying ...	162
Section 3. Test wet fills with evaporative drying	169
Section 4. A Process plan of evaporative drying wet fills ...	185
Section 5. Conclusion	192

Chapter 5. Soil-cement mixing for wet fills

Section 1. Improvement principles and effectiveness of soil-cement and stabilizing agent of cement Group ..	194
Section 2. Test of improvement effect with soil-cement mixing	203
Section 3. Development of soil-cement mixing equipment and test fills with soil-cement mixing	236
Section 4. Mixing design method of stabilizing with soil-cement mixing	248
Section 5. Analysis for economical possibility of stabilizing with soil-cement mixing	251
Section 6. Conclusion	253

Chapter 6. Conclusion. 265

Reference

Appendix

1. Disign of wet fills in Shi-Wha project	269
2. Disign of wet fills in Lee-Won project	282
3. Disign of wet fills in Guk-Uong project	293

〈 목 차 〉

제 1 장 서 론

제 1 절 연구목적	33
제 2 절 연구내용 및 범위	34
제 3 절 연구방법	35

제 2 장 우리나라 연약지반토의 분포와 특성

제 1 절 연약지반토의 분포와 특성	38
제 2 절 연약지반토의 성토재료로서 공학적 특성시험	41
제 3 절 성토재료의 소요강도	51
제 4 절 고함수비 연약지반토의 공학적특성 개선방법	57
제 5 절 결 론	59

제 3 장 압밀배수 성토공법

제 1 절 연약지반토의 교란후 압밀특성변화	61
제 2 절 필터매트의 소요통수능	74
제 3 절 압밀배수 강도증가특성을 고려한 성토설계방법	102
제 4 절 결 론	112

제 4 장 대기건조 성토공법

제 1 절 대기건조에 의한 현장함수비 변화	115
제 2 절 대기건조에 의한 전단강도 증가	162
제 3 절 대기건조 성토공법 시험시공	169
제 4 절 대기건조 성토공법 공정계획	185
제 5 절 결 론	192

제 5 장 시멘트 혼합처리 성토공법

제 1 절 시멘트 및 시멘트계 고화재의 개량원리와 효과	194
제 2 절 시멘트혼합처리의 개량효과 확인시험	203

제 3 절 고탐수비 흙시멘트 혼합장비 개발과 현장시험시공 ...	236
제 4 절 시멘트 혼합처리 성토공법의 배합설계방법	248
제 5 절 고탐수비 흙시멘트 성토공법의 경제성분석	251
제 6 절 결 론	253

제 6 장 결 론

참 고 문 헌	265
---------------	-----

부 록

I. 시화지구 고탐수비 연약지반토 성토공법설계 예)	269
II. 이원지구 고탐수비 연약지반토 성토공법설계 예)	282
III. 적용지구 고탐수비 연약지반토 성토공법설계 예)	293

〈 표 목 차 〉

표 2.1	간척지 표층토 시험시료의 물리성	42
표 2.2	삼축압축시험결과표	46
표 3.1	압밀 및 투수시험시료의 물리성	68
표 3.2	프로그램 검증을 위한 기초지반조건 및 토질정수(예제)	81
표 3.3	Giround(1981)제안 필터토목섬유 투수능 계산조건	96
표 3.4	압밀 및 투수시험시료의 물리성	98
표 4.1	경계조건별 대기건조현상 해석을 위한 성토재 토질정수(예제)	122
표 4.2	대기건조 모형시험시료의 물리성	135
표 4.3	각 시험포 흙의 물리성 및 초기함수비	169
표 4.4	함수비조절 시험성토 내역	170
표 4.5	대기건조 성토 시험시공 분석결과	184
표 5.1	흡시멘트의 삼축압축시험결과($\omega_n=59\%$ 해성점토)	216
표 5.2	해성점토의 시멘트혼합처리후 CBR시험결과	225
표 5.3	시멘트함량별 선행압밀하중 증가특성	227
표 5.4	흡시멘트 혼합처리 시험시공 흙의 물리성	242
표 5.5	각 지구별 순성토공사비 비교	251
표 5.6	각 지구별 순성토공사비 비교	252
표 5.7	각 지구별 종단유용 성토공사비 비교	252
표 5.8	각 지구별 사토처리 공사비 비교	253
표 5.9	고함수비 흡시멘트 혼합처리 성토공사비	253
표 부 1.1	표층토의 다짐 및 전단강도 특성	275
표 부 2.1	표층토의 다짐 및 전단강도 특성	283
표 부 2.2	성토단면 사면안정해석 검토 토질정수 조건	285
표 부 2.3	외부하중조건별 각 성토층의 소요전단강도	285
표 부 2.4	흙의 전단강도별 함수비 및 다짐을 관리기준	286
표 부 2.5	성토단면별 함수비 및 다짐을 기준	287
표 부 2.6	지반표층토 성토재료활용 구조물별 다짐기준 및 소요대기건조기간	289
표 부 3.1	기초지반 및 성토단면의 토질정수	294
표 부 3.2	승수로 성토단면 및 대책공법에 대한 사면안정해석결과	296
표 부 3.3	지반용기토의 물리성 및 다짐후 전단강도 특성	297

〈그림목차〉

그림 2.1	각 지구 액성, 소성한계 및 현장함수비 분포도	40
그림 2.2	각 지구의 점토, 실트 및 모래함량(입도) 분포도	40
그림 2.3	각 지구의 점토함량(0.005mm이하) 분포도	41
그림 2.4	서남해안 간척지 표층토 다짐특성곡선	43
그림 2.5	영산강지구 삼축압축(CU)시험 결과도	48
그림 2.6	시화지구 삼축압축(CU)시험 결과도	49
그림 2.7	실트와 점성토의 삼축압축(CU)시험 결과비교	50
그림 2.8	성토재 소요강도 결정을 위한 사면안정해석조건	53
그림 2.9	성토재 소요강도 결정을 위한 사면안정해석결과	54
그림 2.10	성토재의 소요 비배수전단강도	56
그림 3.1	압밀계수 일정조건의 유효응력별 투수계수변화	64
그림 3.2	교란에 따른 압밀계수의 변화	65
그림 3.3	압밀과 투수시험장치	67
그림 3.4	압밀시험결과(반월지구 시료)	69
그림 3.5	압밀시험결과(이원지구 시료)	70
그림 3.6	압밀진행동안의 투수계수변화(반월지구 시료)	72
그림 3.7	압밀진행동안의 투수계수변화(이원지구 시료)	72
그림 3.8	Wet Fills 필터매트 배수공법의 압밀해석 모식도	75
그림 3.9	Semi-Analytic Consolidation Program(S, A, C, P.)의 흐름도	80
그림 3.10	본 연구 제안 압밀해석에 의한 압밀해석결과	83
그림 3.11	본 연구 제안 압밀해석과 Terzaghi 해석결과 비교	84
그림 3.12	필터매트의 통수능을 고려한 압밀해석 모식도	87

그림 3.13 통수능을 고려한 Wet Fills 압밀배수공법의 압밀해석프로그램 (S.A.C.P.)의 흐름도	89
그림 3.14 필터매트의 통수능에 따른 압밀지연 특성	91
그림 3.15 통수능의 크기별 배수재내 유량의 변화 비교	92
그림 3.16 압밀계수와 배수재의 길이별 소요통수능의 결정	93
그림 3.17 압밀계수와 배수재의 길이별 압밀지연시간 5%이하의 배수재의 소요통수능	94
그림 3.18 Giround(1981)제안 필터토목섬유 통수능 계산 모형도	95
그림 3.19 해석방법별 소요통수능 비교	96
그림 3.20 필터매트 통수능시험장치	98
그림 3.21 각 조건별 필터매트의 통수능변화 특성	99
그림 3.22 동수경사 조건별 필터매트 통수능변화	101
그림 3.23 교란된 흙의 압밀침하곡선과 선행압밀하중 결정	104
그림 3.24 CU삼축압축시험에서 전응력개념의 모아윈	106
그림 3.25 8m Wet Fills조건의 비배수전단강도 분포	108
그림 3.26 각 성토층의 압밀도별 사면안정도	110
그림 3.27 각 성토층의 전응력개념 내부마찰각별 사면안정도	111
그림 4.1 등온조건의 이상적인 건조곡선	117
그림 4.2 Wet Fills의 대기건조 및 배수공법의 압밀해석 모식도	121
그림 4.3 대기건조현상 해석조건	123
그림 4.4 필터매트를 통한 압밀배수와 대기건조현상 해석결과	125
그림 4.5 지반으로부터 모관수의 공급조건 대기건조현상 해석결과	129
그림 4.6 대기건조모형시험기	133
그림 4.7 1차 대기건조모형시험 시료(A)의 압밀특성	136
그림 4.8 2차 대기건조모형시험 시료 1(시화 실트)의 압밀특성	137

그림 4.9	2차 대기건조모형시험 시료 2(이원 공감)의 압밀특성	138
그림 4.10	2차 대기건조모형시험 시료 3(이원 화력)의 압밀특성	139
그림 4.11	고함수비토 성토조건외 대기건조 모형시험결과	141
그림 4.12	대기건조모형시험의 대기증발 및 배수량 변화특성	142
그림 4.13	대기건조 증발량 변화	143
그림 4.14	하부 배수조건과 증발량 차이	144
그림 4.15	고함수비토 성토조건외 대기건조 수치해석 결과	146
그림 4.16	대기건조 함수비 변화 수치해석결과 성토고별 비교	148
그림 4.17	대기건조 모형시험과 수치해석결과 비교	150
그림 4.18	대기건조에 의한 성토고별 평균함수비변화	151
그림 4.19	수면증발량 대비 토양면증발량비	152
그림 4.20	대기건조 2차 모형시험 층별침하량 측정결과	154
그림 4.21	무게비로 나타낸 시간-침하량(배제수심)	157
그림 4.22	대기건조 침하량 실측과 이론해석 결과비교	159
그림 4.23	흙의 압밀계수와 대기건조 모관부압 관계	159
그림 4.24	압밀해석에 의한 대기건조 함수비변화 예측과 실측 비교	162
그림 4.25	시험포별 연약 지반토 다짐특성	164
그림 4.26	시화지구 해성실트의 다짐 및 전단강도특성	166
그림 4.27	이원지구 공감층 실트질모래의 다짐 및 전단강도특성	167
그림 4.28	이원지구 화력층 해성점토의 다짐 및 전단강도특성	168
그림 4.29	고함수비토 함수비조절 시험성토	170
그림 4.30	시화지구 고함수비토 성토후 층별 함수비 변화	172
그림 4.31	시화지구 대기건조 시험시공 함수비 및 전단강도변화	174
그림 4.32	시화지구 해성실트의 다짐성토와 사면안정도	176
그림 4.33	이원지구 공감층 연약지반토성토후 함수비 변화	177

그림 4.34 이원지구 공감측 심도별 함수비 변화	178
그림 4.35 이원지구 공감측 실트질모래의 다짐 및 전단강도특성	179
그림 4.36 이원지구 화력측 연약지반토성토후 함수비 변화	181
그림 4.37 이원지구 화력측 심도별 함수비 변화	181
그림 4.38 이원지구 화력측 해성점토의 다짐 및 전단강도특성	183
그림 4.39 기초지반 조건별 성토재료의 소요전단강도	185
그림 4.40 현장함수비와 비배수 전단강도관계	186
그림 4.41 대기건조 포설두께 및 소요일수 결정도	188
그림 4.42 연약지반토의 성토재료 활용을 위한 소요 비배수 전단강도, 소요 함수비 및 소요다짐을 결정방법	190
그림 5.1 포틀랜드 시멘트와 고화재의 일축압축강도	198
그림 5.2 흙시멘트 일축압축시험의 응력-변형곡선	207
그림 5.3 시멘트 혼합처리후 양생일수별 일축압축강도	208
그림 5.4 흙시멘트 혼합처리토의 일축압축강도 특성	210
그림 5.5 흙의 종류별 흙시멘트의 일축압축강도 비교	211
그림 5.6 지구별 흙의 종류별 일축압축강도 비교	212
그림 5.7 흙시멘트 성토재료의 삼축압축(UU)시험결과	214
그림 5.8 고함수비 해성점토 무처리 삼축압축(CU)시험 결과	217
그림 5.9 고함수비 해성점토 2%시멘트처리 삼축압축(CU)시험 결과	219
그림 5.10 고함수비 해성점토 3%시멘트처리 삼축압축(CU)시험결과	221
그림 5.11 고함수비 해성점토 5%시멘트처리 삼축압축(CU)시험결과	223
그림 5.12 이원지구 화력측 해성점토 시멘트처리 CBR증가특성	226
그림 5.13 흙시멘트의 압밀특성 및 투수성변화 시험결과	229
그림 5.14 시멘트믹싱후 대기건조후 다짐밀도 증가특성	232
그림 5.15 대기건조후 다짐시기별 7일 양생 일축압축강도	233

그림 5.16	시멘트혼합후 대기건조 지연다짐에 의한 압축특성변화	234
그림 5.17	고함수비 흙시멘트 혼합장치 전면도	237
그림 5.18	고함수비 흙시멘트 혼합장치 측면도	238
그림 5.19	고함수비 흙시멘트 혼합 스크류	240
그림 5.20	고함수비 흙시멘트 혼합장치 전면도	241
그림 5.21	시멘트 혼합처리 시험시공 실내와 현장양생 비교	245
그림 5.22	전단강도기준 흙시멘트 소요배합비 결정방법	250
그림 5.23	지지력비기준 흙시멘트 소요배합비 결정방법	251
그림 부 1.1	시화지구 기초지반 지층 및 토질특성	271
그림 부 1.2	사면안정해석 단면 및 강도조건	271
그림 부 1.3	성토사면안정해석결과도	272
그림 부 1.4	시화지구 간척지 표층토 다짐시험결과도	273
그림 부 1.5	함수비별 포화도별 비배수전단강도	274
그림 부 1.6	발갈이 횡수별 대기건조일수별 함수비 변화	278
그림 부 1.7	전단강도기준 흙시멘트 소요배합비 결정방법	280
그림 부 1.8	지지력비기준 흙시멘트 소요배합비 결정방법	281
그림 부 2.1	사면안정 해석조건	284
그림 부 2.2	이원지구 지반표층토 성토후 심도별 함수비 변화곡선	288
그림 부 2.3	이원지구 실트질모래지반토 성토현장다짐 추정곡선	289
그림 부 2.4	이원지구 해성점토 현장다짐 추정곡선도	290
그림 부 3.1	승수로 기초지반 콘관입저항곡선도 및 비배수 전단강도 분포특성	295
그림 부 3.2	지반용기토 다짐특성	297
그림 부 3.3	지반용기토 시멘트혼합처리 일축압축시험결과도	299

〈사진목차〉

사진 2.1	연약지반 조사지구 위치도	39
사진 5.1	고함수비 흙시멘트 혼합장치	239
사진 5.2	고함수비 흙시멘트 혼합장치 스크류	239
사진 5.3	시멘트 혼합처리 장면	243
사진 5.4	시멘트 혼합처리토의 포설장면	243
사진 5.5	시멘트처리토와 비처리토의 혼합후 형상비교	244
사진 5.6	고함수비 흙시멘트의 차량주행가능성 확인을 위한 시험포 설치	246
사진 5.7	함수비 50% 흙시멘트(3%)처리 1시간후 백호다짐광경	247
사진 5.8	흙시멘트 처리 3일후 승용차 주행	247
사진 부 1.1	대기건조를 위한 간척지 표층토 발갈이	276
사진 부 1.2	간척지 표층토 발갈이용 경운기	276
사진 부 1.3	간척지 표층토 성토후 사면보호용 매트포설	277
사진 부 1.4	간척지 표층토 대기건조공법 성토후 전경	277

여백

제 1 장 서 론

제 1 절 연구목적

우리나라 서남해안의 간척지개발에서 농경지조성을 위한 도로, 방수제, 용배수로 등의 성토공사에 필요한 성토재료를 육상토취장을 개발하여 사용하고 있다. 그러나 산업화에 따른 건설사업의 번창과 더불어 육상 토취장의 개발이 어렵고, 사용후 토취장의 산림복구에 많은 비용이 들며, 원상태와 같은 자연환경복구는 사실상 어렵다.

간척지내 연약지반토, 배수로굴착토 및 담수호내 준설토를 대체 성토재료로 활용할 수 있다면 공사비절감은 물론 민원발생, 환경파괴등의 제반문제를 해결할 수 있을 것이다.

그러나 이들 연약지반토는 현장함수비가 높고, 전단강도가 적으며, 압축성이 크기 때문에 성토재료로 활용하기 위하여는 현장함수비의 조절과 성토재료로서의 특성개량 및 보강공법이 필요하다.

고함수비의 연약지반토를 성토재료로 활용하는 것을 실용화하기 위하여는 설계 및 시공기술자가 쉽게 적용할 수 있는 고함수비 연약지반토의 성토공법에 대한 설계 및 시공기법의 정립이 필요하다.

이를 위하여 우리나라 서남해안의 연약지반토의 분포와 특성을 분석하고, 이들 흙에 대한 실내시험을 통하여 대기건조특성, 압밀배수특성, 고화처리에 의한 개량효과를 파악하고, 현장에 시험시공을 통하여 고함수비 연약지반토의 압밀배수 성토공법, 대기건조 성토공법 및 개량성토공법 등에 대한 설계 및 시공기법을 제시하여 고함수비의 연약지반토를 성토재료로 활용할 수 있도록 한다.

제 2 절 연구내용 및 범위

1. 1차년도 :

- 가. 우리나라 서남해안의 연약지반토의 분포와 특성분석
- 나. 성토재료로서 공학적특성분석시험
- 다. 연약지반토 성토재료로서 문제점분석과 연구방향설정
- 라. 개량성토에 대한 실내 요소시험
- 마. 압밀배수 보강성토에 대한 거동수치해석

2. 2차년도 :

- 가. 대기건조특성 수치해석 및 실내모형시험
- 나. 필터매트 소요통수능해석 및 통수능력시험
- 다. 대기건조 함수비조절토의 다짐, 압밀 및 강도특성시험
- 라. 고함수비토 필터매트보강성토 시험포설치 및 현장계측

3. 3차년도 :

- 가. 연약지반토 시멘트혼합기구 제작
- 나. 시멘트혼합처리 현장시험포설치 및 강도특성변화 계측
- 다. 대기건조 및 압밀배수 단계성토공법 설계기법 검토
- 라. 고화처리 개량성토공법 설계기법 검토
- 마. 이원 및 시화지구 설계 및 시공관리 모델제시
- 바. 검세 및 시화지구 시멘트혼합처리 개량성토 모델제시
- 사. 시공현장조건별 경제성분석

제 3 절 연구방법

간척지 연약지반토는 함수비가 높고, 압축성이 크며, 압밀시간이 길고, 특히 전단강도가 적어 성토재료로 사용하기가 매우 어려운 문제점이 있다.

그러나 적절한 함수비로 건조시켜 다짐만 할 수 있다면, 압축성이 감소하고 전단강도가 크게 증가하여 성토재료로 충분히 사용할 수 있게 된다.

Thomas(1993)는 wet fills이란 자연함수비/소성한계(ω_n/PL)비가 1 ~ 1.3 이상인 경우로서, wet fills의 문제점은 1) 성토중 장비 주행성 2) 성토단면 사면안정 3) 장기 압밀침하량 등의 문제가 있다고 하였다.

Thomas(1993)는 고함수비 흙의 현장함수비조절방법은 (1) 압밀배수(Consolidation)방법 (2) 저함수비 흙 혼합(Mixing)방법 (3) 개량재료 첨가(Quicklime addition)방법 (4) 대기건조방법(Evaporative drying) 등이 있다고 하였다.

대기건조방법은 기후가 부적합한 경우는 적용하기가 어려우나 건기가 적절히 있고 저소성흙(서해중부지역)에서는 매우 유용한 방법이다.

또한 고함수비 연약지반토에 시멘트 또는 시멘트계 고화재를 첨가하여 개량하면 전단강도가 크게 증가하고 압축성이 크게 감소하여 성토재료로 충분히 사용할 수 있다.

시멘트계 고화재에 의한 개량은 그 효과는 크지만, 지금까지의 연구는 고강도에 초점이 맞추어져서 혼합비가 시멘트는 6 ~ 10%, 생석회는 10 ~ 20% 정도로서 이 배합비로 고화처리된 흙은 일반적인 제체성토재료로 이용하기에는 경제성이 없다. 이를 해결하기 위하여 성토단면에서 필요한 개량효과만을 얻을 수 있는 낮은 배합비에 대한 연구가 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 첫째 우리나라 서남해안의 연약지반 표층토의 분포와 공학적 특성을 분석하여 성토재료로 사용하기 위하여 개선하여야 하는 문제점을 파악하고, 성토단면에 대한 사면안정해석을 통하여 성토재료의 소요전단강도를 결정하고 그 강도를 얻기 위한 개선방법을 검토하였다.

둘째 차량주행이 없는 낮은 성토단면에 적용할 수 있는 압밀배수 성토공법에 대하여 교란조건의 압밀시험과 필터매트의 통수능을 고려한 압밀해석 방법을 제안하고 그 해석을 통하여, 성토중의 교란조건을 고려한 압밀해석 방법과 필터매트의 소요통수능 결정방법을 제시하였으며, 설계 및 시공관리에서 필요한 필터매트의 통수능 시험방법과 압밀배수 성토공법의 설계방법을 제시하였다.

셋째 대기건조 성토공법에 대하여 대기건조모형시험과 수치해석을 통하여 대기건조 소요일수를 결정하는 방법을 제시하고자 하였으며, 대기건조 함수비조건별 다짐시험과 역학시험을 통하여 다짐특성과 전단강도증가특성을 구하고 이로부터 성토에 필요한 소요전단강도를 얻을 수 있는 대기건조 목표 함수비의 결정등 대기건조 성토공법의 설계방법을 제시하였다.

넷째 시멘트 고화처리 성토공법에 대하여 우선 본 공법의 경제성을 확인하기 위하여 실내에서 저배합비(1~5%)조건의 시멘트 혼합처리로에 대한 전단강도 및 압밀시험을 통하여 성토단면에서 필요한 강도를 얻을 수 있는 배합비가 경제성이 있는지를 확인하였으며, 설계 및 시공을 위한 배합설계방법을 제시하고자 하였다.

시멘트 혼합처리공법에서 가장 중요한 것은 현장에서 실내시험에서 보다 더 완전하게 시멘트와 흙을 섞을 수 있는 시멘트 혼합장비의 개발이 필요하다고 판단하여 고탍수비의 흙과 시멘트를 혼합할 수 있는 장비를 개발하고자 하였다.

본 연구에서 개발한 혼합장비로 현장시험시공을 통하여 시공성을 확인하

고 설계 및 시공에 필요한 기술자료를 제시하고자 하였다.

끝으로 간척지 내부개답설계중인 2개 지구와 배수개선 1개 지구에 간척지 연약지반토 성토재료 활용방안에 대한 설계를 제공하므로서 연구결과의 실용화를 유도하였다.

제 2 장 우리나라 연약지반토의 분포와 공학적 특성

제 1 절 연약지반토의 분포와 특성

우리나라 서남해안에 분포되어 있는 간척지 연약지반토의 공학적특성을 분석하기 위하여 그림 2.1과 같이 약 32개 지구의 기존 토질조사 자료를 수집분석하였다. 분석결과 그림 2.2와 같이 서해안 중부는 점토함량(0.005mm)이 10~20%, 남부는 20~35%, 남해안은 25~50%로 서해중부부터 남해남부로 갈수록 점토함량이 증가하는 분포를 보이고 있다.

현장함수비와 액성 및 소성한계분포를 보면 그림 2.3과 같이 서해안 중부는 현장함수비와 액성한계가 30~40%, 남부는 35~45%, 남해안은 40~75%로 서해중부부터 남해남부로 갈수록 증가하는 분포를 보이고 있다.

이러한 퇴적토층의 특성차이는 서해안과 남해안의 조위의 차이와 일치하는 특성이다. 남해안의 조위는 3~5m이고, 서해안은 5~7m로 조위차가 클수록 조유속이 크므로 큰 유속에서는 점토입자가 퇴적되지 못하여 서해안은 실트질 흙이 우세하고 남해안은 점토함량이 서해안보다 많은 특성을 갖는 것으로 판단된다.

즉 서해안 중부이북은 소성이 적은 흙으로 약간의 함수비관리로도 성토재료로 사용할 수 있으나 남해안의 흙은 고소성흙으로 특별한 함수비관리 또는 개량 및 보강공법이 필요함을 알 수 있다.

그렇기 때문에 해성퇴적토로 성토된 기존 제방들이 남해안보다 서해안 중부지역에 더 많은 이유와 일치한다.

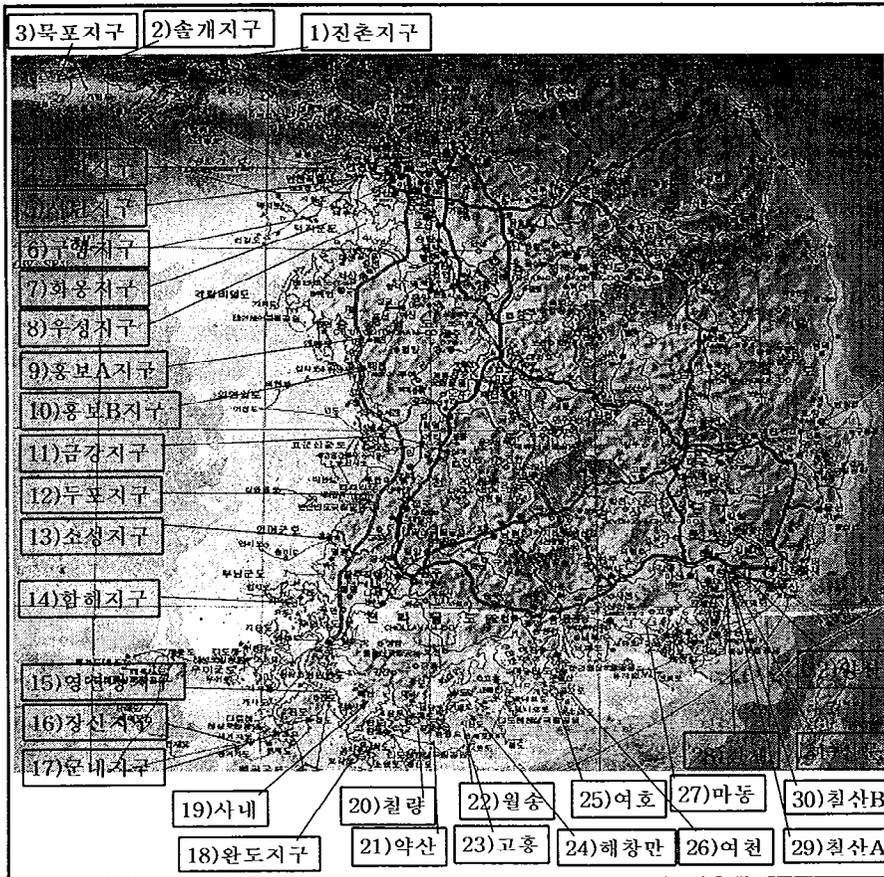


사진 2.1 연약지반 조사지구 위치도

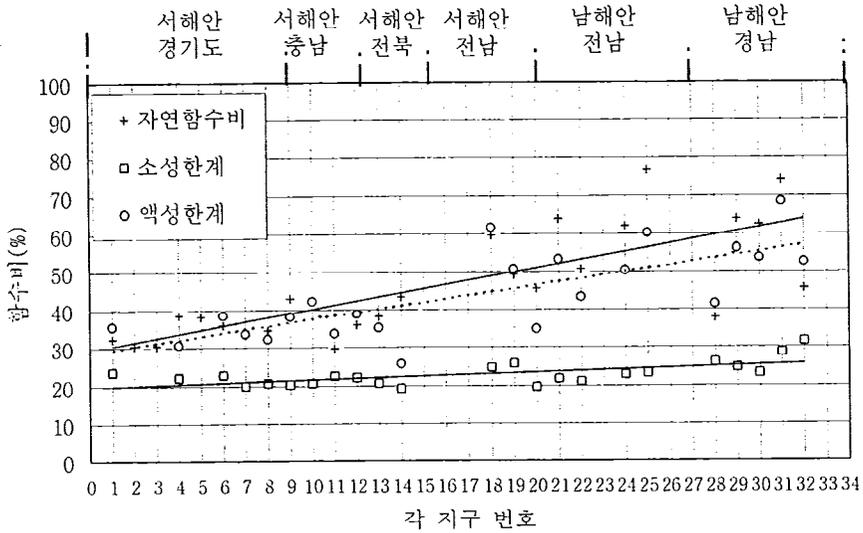


그림 2.1 각 지구 액성, 소성한계 및 현장함수비 분포도

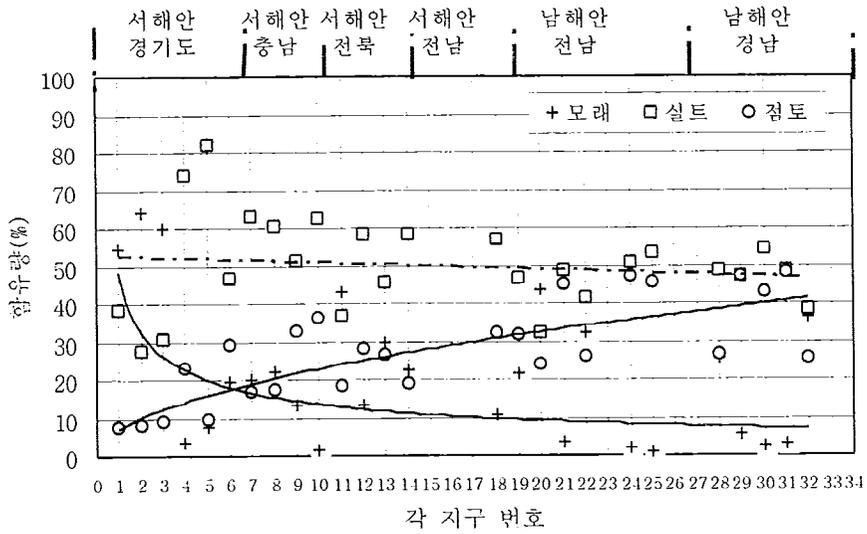


그림 2.2 각 지구의 점토, 실트 및 모래함량(입도) 분포도

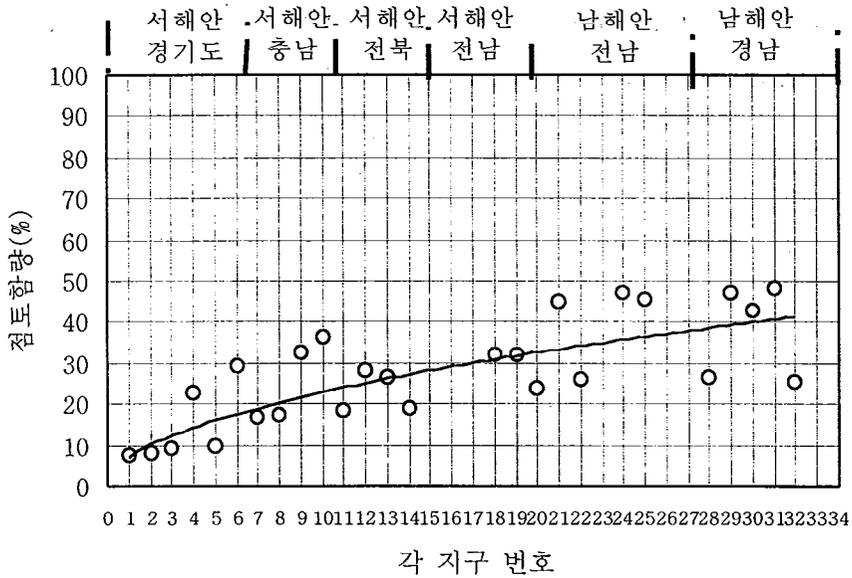


그림 2.3 각 지구의 점토함량(0.005mm이하) 분포도

제 2 절 연약지반토의 성토재료로서 공학적 특성시험

우리나라 간척지 해성퇴적토의 성토재료로서 공학적특성을 파악하기 위하여 4개 지구의 간척지 표층토에 대한 다짐시험, 삼축압축시험 및 압밀시험을 실시하였다

1. 다짐특성시험

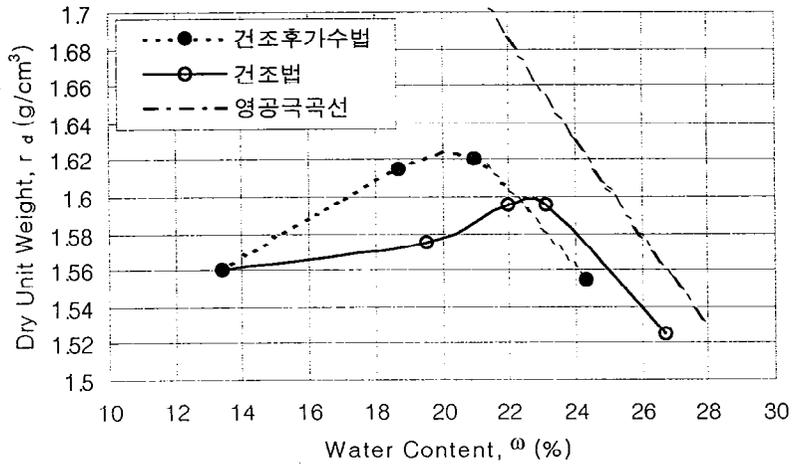
다짐시험은 KS F 2312규격의 A다짐방법으로 자연함수비에서 부터 함수비차이 약 2~3%가 되게 건조시키면서 실시하고, 함수비 약 10%상태에서 다시 가수를 하면서 다짐시험을 다시 실시하였다. 다짐시험에 사용한 흙의 물리성은 표 2.1과 같다.

다짐시험결과는 그림 2.4와 같이 점토함량이 많을수록 최대건조밀도는 적고 최적함수비는 크며 자연상태에서 건조시켜가면서 다짐한 것 보다 완전건조(약 함수비 10%)시킨후 가수하면서 다짐을 실시한 경우가 최적함수비는 적어지고 최대건조밀도는 더 증가하는 경향을 보이고 있다.

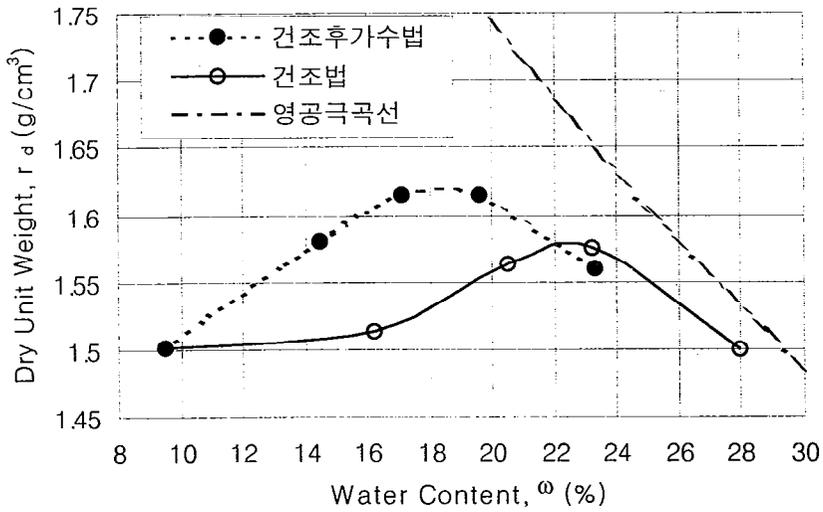
이는 흙이 건조되면 흙의 구조가 변화되고 소성지수가 적어지는 흙의 특성변화 때문이라고 판단된다. 여기서 고태수비토를 성토재료로 사용하는데 현장에서 이 함수비(10%)까지 건조시킨 후 다시 가수하여 사용하는 것은 불가능하므로, 자연함수비부터 건조시켜가면서 실시한 다짐시험의 최대건조밀도를 기준으로 각 다짐율(95, 90, 85%) 및 함수비(최적함수비, 습윤축함수비, 포화함수비)조건에 대하여 삼축압축 및 압밀시험을 실시하였다.

표 2.1 간척지 표층토 시험시료의 물리성

시 료 명 (Sample)		고흥	영산강	만경강	대호
심 도 (Depth) (m)		0~3	0~3	0~3	0~3
입 도	자 갈 (4.75mm이상)				
	모 래(0.075-4.75mm)	2.2	0.4	1.0	18.9
	실 트(0.005-0.075mm)	69.0	66.8	84.1	71.1
	점 토(0.005mm이하)	28.8	32.8	14.9	9.9
조 도	액성한계 LL (%)	61.0	46.9		
	소성한계 PL (%)	24.0	22.6	NP	NP
	소성지수 PI (%)	37.0	24.3		
통일흙 분류 (U. S. C)		CH	CL	ML	ML
흙의 비중 (Specific Gravity)		2.675	2.675	2.675	2.675
자연함수비 (ω_n)(%)		58.3	31.3	34.3	29.1
다짐 시험	최적함수비 ω_{opt} (%)	23	23	19	20
	최대건조밀도 r_{drax} (g/cm^3)	1.59	1.57	1.62	1.64

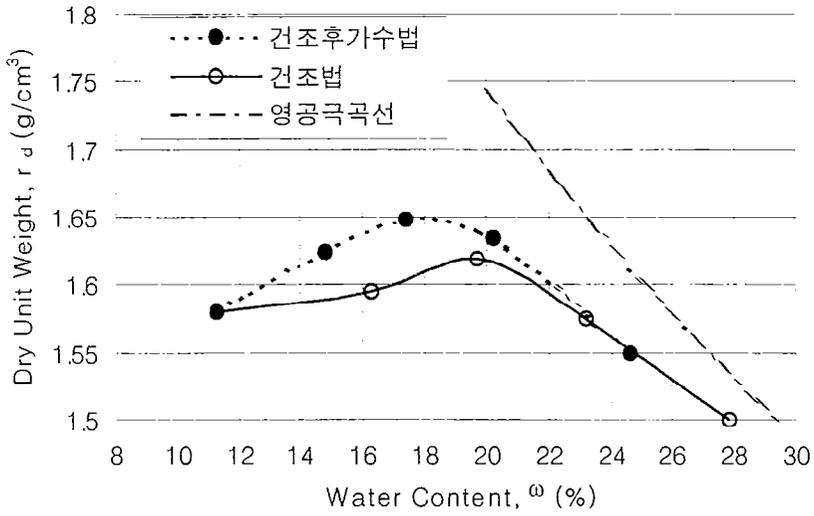


a) 고흥지구

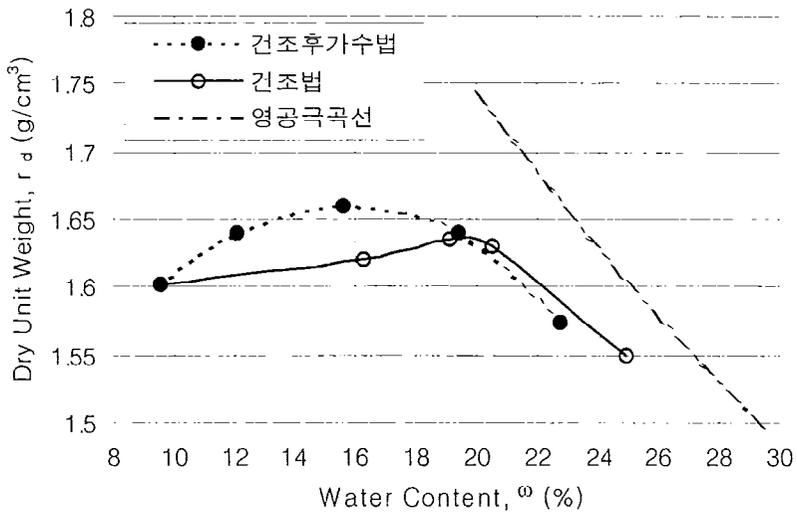


b) 영산강지구

그림 2.4 서남해안 간척지 표층토 다짐특성곡선(I)



c) 만경강지구



d) 대호지구(충남)

그림 2.4 서남해안 간척지 표층토 다짐특성곡선(II)

2. 삼축압축(CU) 전단강도특성

우리나라 서남해안 4개지구의 간척지 해성퇴적토에 대하여 자연상태의 비교란조건과 교란재성형조건 및 건조후 가수한 재성형조건 3가지조건에 대하여 압밀비배수(CU) 삼축압축시험을 실시하였다.

삼축압축시험결과는 표 2.2와 같이 유효응력개념의 내부마찰각 $\phi = 30 \sim 39^\circ$, 전응력개념의 $\phi = 14 \sim 29^\circ$ 로 측정되었다.

유효응력개념의 내부마찰각은 그 차이가 적지만 전응력개념의 내부마찰각은 흙에 따라 그 값의 차이가 크다.

각 지구별 삼축시험결과의 축차응력, 간극수압, 모아응력원 및 응력경로는 그림 2.5, 2.6과 같이 실트질흙과 점토질흙의 차이가 매우 크다.

실트질흙은 전응력개념의 내부마찰각이 점토질흙보다 크다. 그 차이를 분석하기 위하여 응력경로를 비교하여보면 그림 2.7과 같이 같은 구속압밀하중조건에서의 응력경로가 전혀 다른 경로를 보이고 있다.

축압축과정동안 실트질흙이 점토질흙보다 적은 간극수압이 발생하여 그만큼 더 큰 전단강도를 갖는 것으로 해석된다.

즉 실트질흙은 점성토보다 같은 구속하중으로 압밀되었을 지라도 비배수 전단강도가 현저히 크고 투수계수도 크기 때문에 점성토보다는 쉽게 성토 재료로 활용할 수 있음을 알 수 있다.

표 2.2 삼축압축시험결과표(I)

시료명		고령(I)			금강(I)		
시료상태		불교란	ω_n 리몰딩	건조후 리몰딩	불교란	ω_n 리몰딩	건조후 리몰딩
입도	S (%)	2.2			0.5		
	M (%)	69			88		
	C (%)	28.8			11.5		
조도	LL (%)	66.7		61.0	38.9		36.4
	PL (%)	26.7		24.0	24.8		27.8
	PI (%)	40		37.0	14.1		8.6
흙분류		CH			ML		
삼축압축 cu시험	c (kg/cm ²)	0.04	0.04	0.02	0	0	0
	ϕ	18	18	18	25	27	26
	c'	0	0	0	0	0	0
	ϕ	30	30	30	38	38	38
건조축	r_d (g/cm ³)	1.63			1.68		
	OMC (%)	21			16		
습윤축	r_d (g/cm ³)	1.59			1.67		
	OMC	23			16.5		
Cc		0.65			0.175		
Cr		0.07			0.03		
Cv (cm ² /s)		0.0008			0.006		

표 2.2 삼축압축시험결과표(II)

시료명		영산강	고흥(II)	금강(II)	시화
시료상태		불교란	불교란	불교란	ω_n 리플딩
입도	S (%)	33.7	6.1	1	4.4
	M (%)	32.8	67.1	84.1	83.7
	C (%)	33.6	26.7	14.9	10.9
조도	LL (%)	39.6	66.7	36.4	30.6
	PL (%)	21	26.7	27.8	26.7
	PI (%)	18.6	40	8.6	3.9
흙분류		CL	CH	ML	ML
삼축압축 cu시험	c (kg/cm^2)	0.04	0.02	0	0
	ϕ	14	16	25	29
	c'	0	0	0	0
	ϕ	30	30	35	39
건조축	r_d (g/cm^3)	1.64			1.63
	OMC (%)	18.5			20
습윤축	r_d (g/cm^3)	1.57			1.59
	OMC	23			23

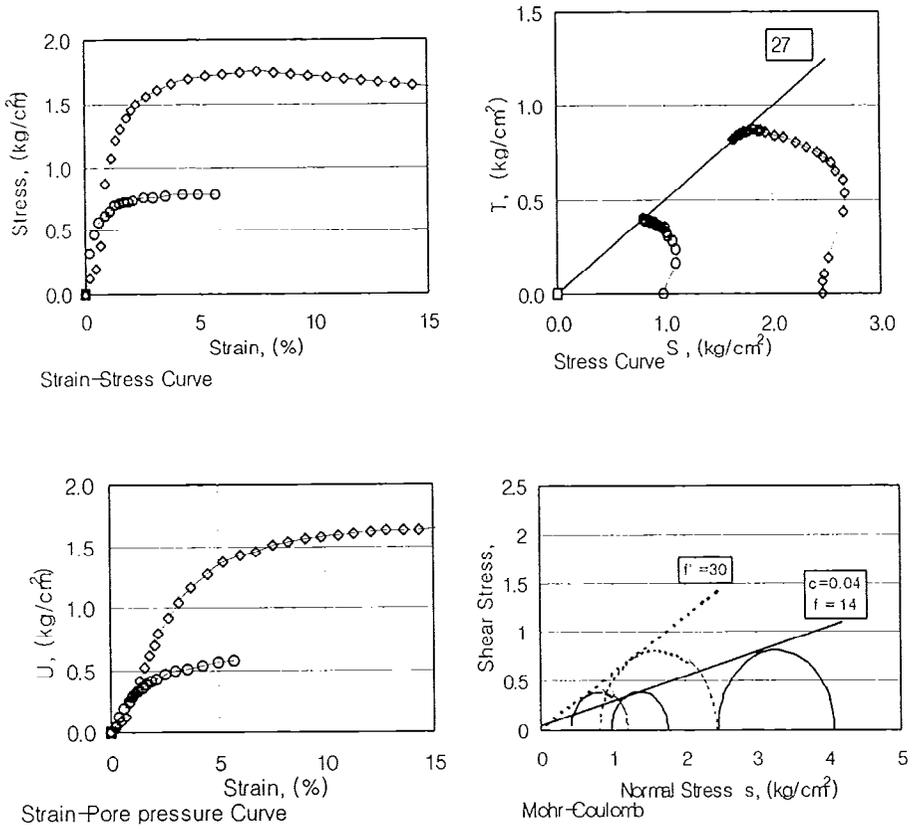


그림 2.5 영산강지구 삼축압축(CU)시험 결과도

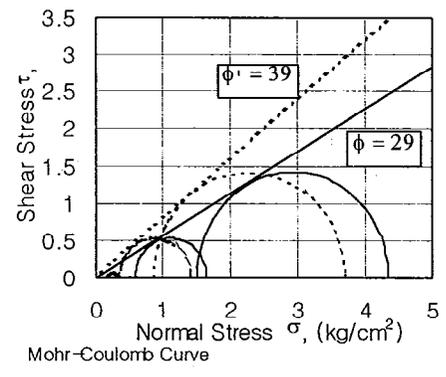
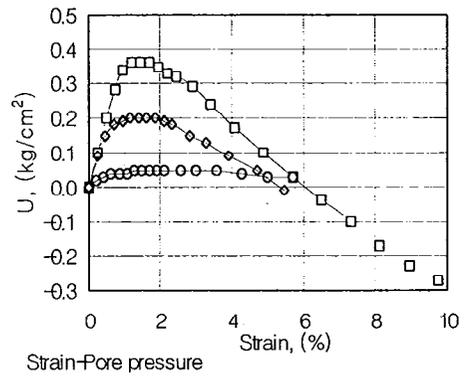
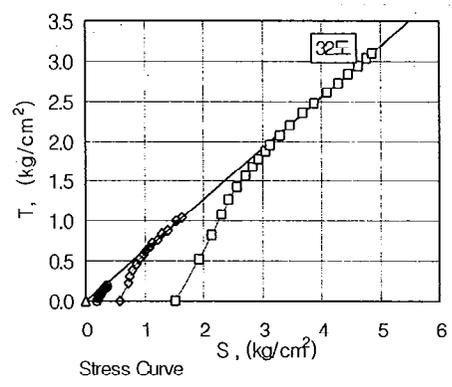
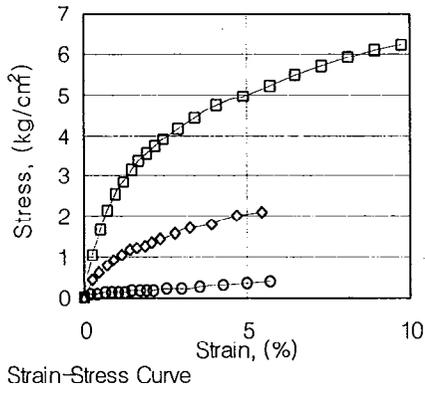
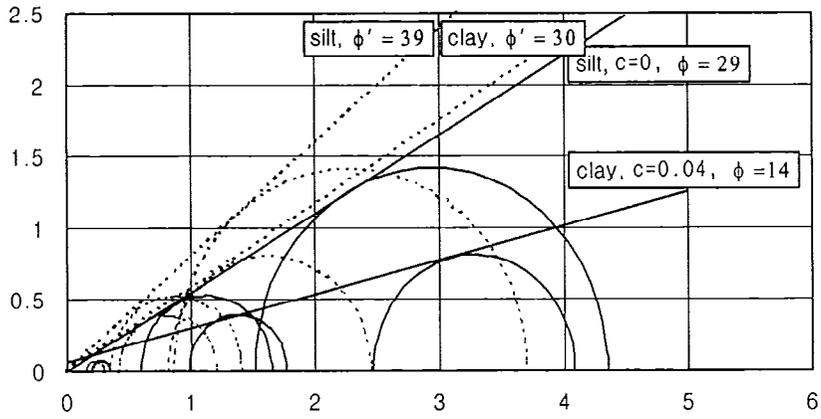
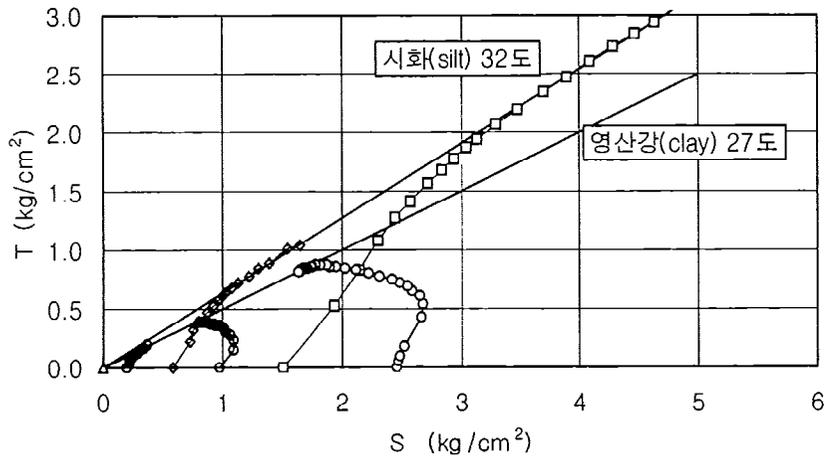


그림 2.6 시화지구 삼축압축(CU)시험 결과도



a) Mohr-Coulomb



b) Stress Curve

그림 2.7 실트와 점성토의 삼축압축(CU)시험 결과비교

3. 압밀특성시험

연약한 기초지반 흙의 비교란조건에 대한 압밀특성은 잘 알려져 있지만, 교란된 조건에 대한 압밀시험은 많이 수행되지 않아 그 특성은 잘 알려져 있지 않다. 하지만 연약지반토를 성토재료로 사용하면 굴착 및 성토과정에서 교란되어 흙의 구조가 거의 파괴되기 때문에 정확한 압밀해석을 위하여는 교란조건에 대한 압밀시험이 필요하다.

비교란과 교란조건에 대한 흙의 압밀특성이 매우 큰 차이를 보이는 것은 시험적으로 많이 알려져 있다. 이 압밀특성에 대하여는 제 3장에서 설명하고자 한다.

고함수비의 연약지반토로 성토를 하면 교란조건에 대한 압축지수는 감소하지만 선형압밀하중이 크게 감소하여 압밀침하량이 비교란 조건보다 같은 하중조건에서 더 큰 침하량이 발생된다. 또한 교란되면 압밀계수가 크게 감소하여 압밀이 완료되는 시간도 크게 증가한다.

4. 각 다짐율별 전단강도관계

고함수비의 연약지반토일지라도 흙을 적절한 함수비로 건조시켜 적절한 다짐을 하면 성토재료로서 필요한 전단강도를 충분히 얻을 수 있다. 흙을 건조시켜 다짐을 하였을 때 각 다짐율별 전단강도는 함수비조건 즉 포화 및 비포화조건에 따라서도 차이가 크다. 이 시험결과에 대하여는 제 4장에서 설명하고자 한다.

제 3 절 성토재료의 소요강도

1. 검토조건

연약지반 또는 경지반 위에 연약지반토로 성토할 때 사면활동 파괴를 일으키지 않는 성토재료의 소요 전단강도를 결정하기 위하여 그림 2.8 a)와

같이 기초지반의 연약심도 10m, 기초지반의 단위중량 $\gamma_d=1.75\text{g/cm}^3$, 비배수전단강도를 ① $c_u=0.08+0.02d$, ② $c_u=0.3$, ③ $c_u=0.5\text{kg/cm}^2$ 의 3가지 기초지반조건에 대하여 성토고 2, 4, 6, 8 및 10m별 성토재의 비배수 전단강도별 사면안정해석을 실시하였다.

사면안정해석은 기술전산프로그램 SLOPE-W를 이용하여 전응력해석방법으로 실시하였다.

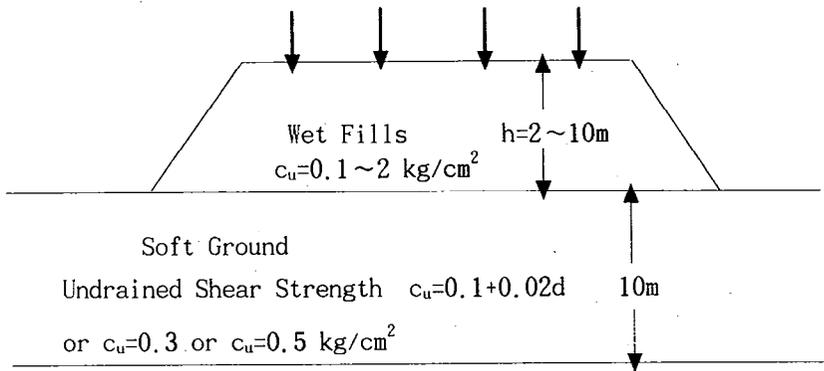
사면안정해석결과 그림 2.9와 같이 연약지반위에 성토하는 경우 매우 큰 성토재료의 전단강도가 요구되며, 기초지반이 경지반인 경우 낮은 전단강도의 성토재료로도 높은 성토고까지 성토할 수 있는 것으로 분석되었다.

연약지반위에 성토할 때 성토고별 성토재료의 소요강도는 그림 2.10과 같이 낮은 성토고(2m이하)에서는 비배수전단강도 $c_u=0.2\text{kg/cm}^2$ (안전율 1.2기준) 정도면 성토가 가능하지만, 성토고가 증가하면 소요 전단강도도 증가하여 성토고 10m의 경우 $c_u=1.2\text{kg/cm}^2$ (안전율 1.2기준) 정도의 강도가 필요한 것으로 해석되었다.

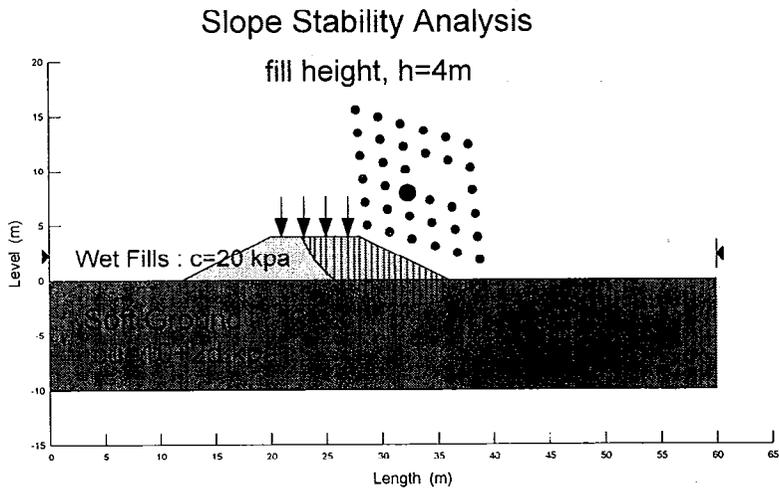
그러나 기초지반이 경지반($c_u=0.5\text{kg/cm}^2$) 일 때, 낮은 성토고(2m이하)에서는 연약지반에서와 같이 비배수전단강도 $c_u=0.2\text{kg/cm}^2$ (안전율 1.2기준)의 성토재료가 필요하지만, 성토고가 증가하면 소요 전단강도의 증가폭이 연약지반보다는 현저히 적어, 성토고 10m의 경우 $c_u=0.4\text{kg/cm}^2$ (안전율 1.2기준) 정도의 강도이면 성토가 가능한 것으로 해석되었다.

결론적으로 경지반위에 성토는 비배수 전단강도 $c_u=0.4\text{kg/cm}^2$ 의 성토재료를 사용하면 높이 10m까지도 성토가 가능하지만, 연약지반에서는 $c_u=1.2\text{kg/cm}^2$ 의 강도를 갖는 성토재료로 성토하여야 하는 결과를 얻었다.

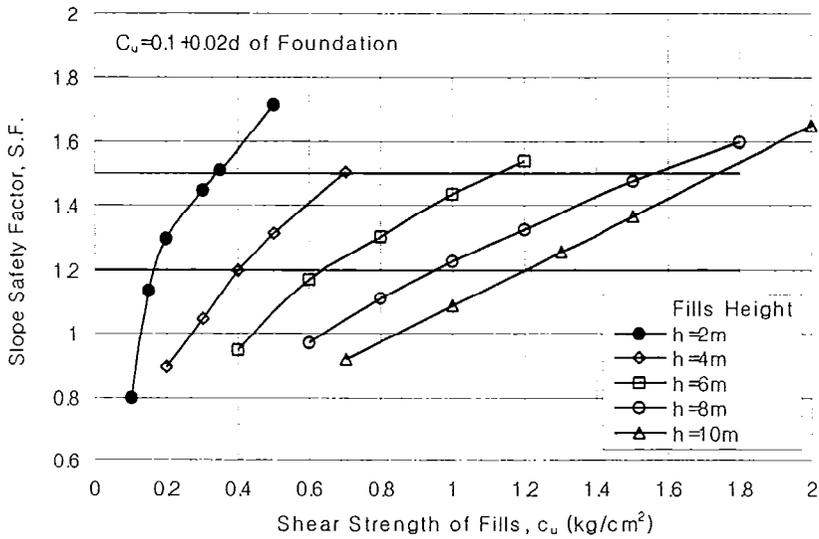
이는 기초지반이 연약하면 기초지반을 통한 활동파괴가 발생되기 때문에 성토재가 발휘하여야 하는 전단강도는 연약지반의 강도가 적을수록 상대적으로 크게 요구되기 때문으로 판단된다.



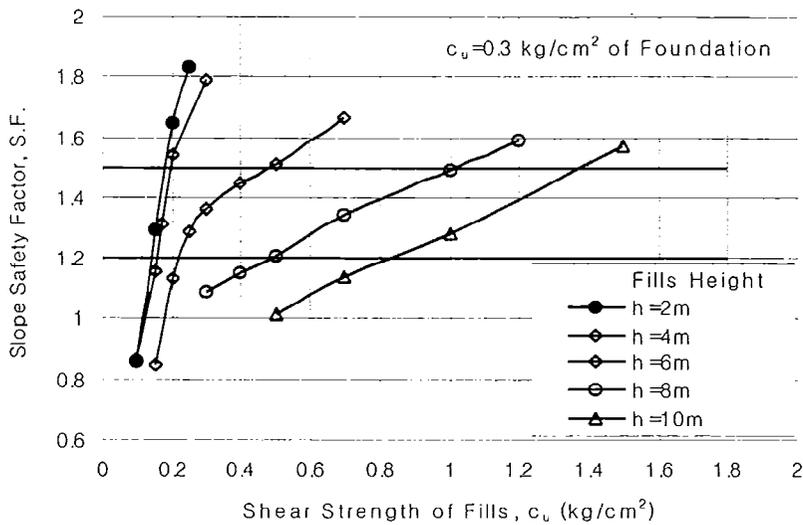
a) 사면안정해석 단면 및 강도조건



b) 사면안정해석 예) (각 조건별 해석결과는 부록 참조)
 그림 2.8 성토재 소요강도 결정을 위한 사면안정해석조건

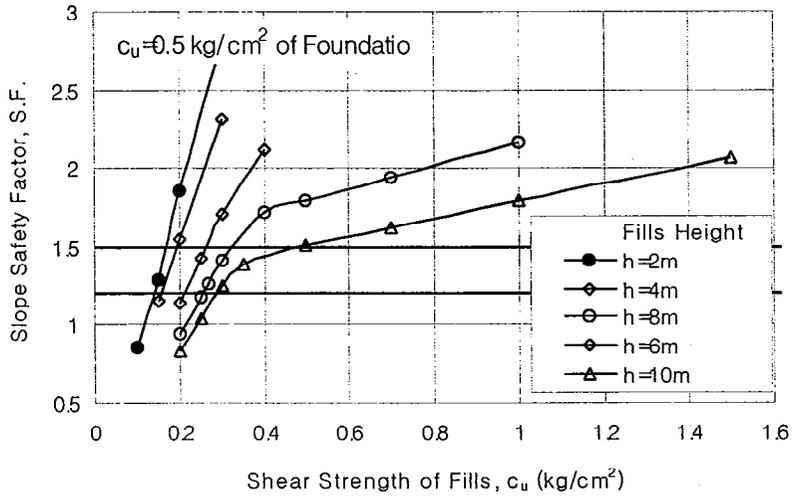


a) 기초지반 $c_u = 0.1 + 0.02d$ kg/cm² 조건



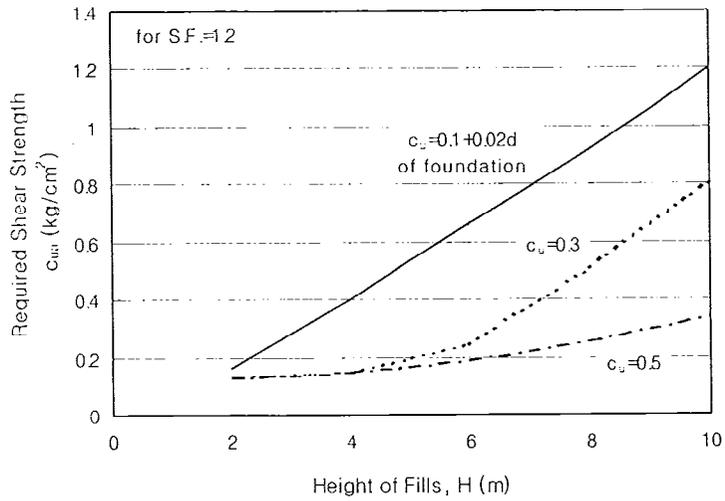
b) 기초지반 $c_u = 0.3$ kg/cm² 조건

그림 2.9 성토재 소요강도 결정을 위한 사면안정해석결과 (I)

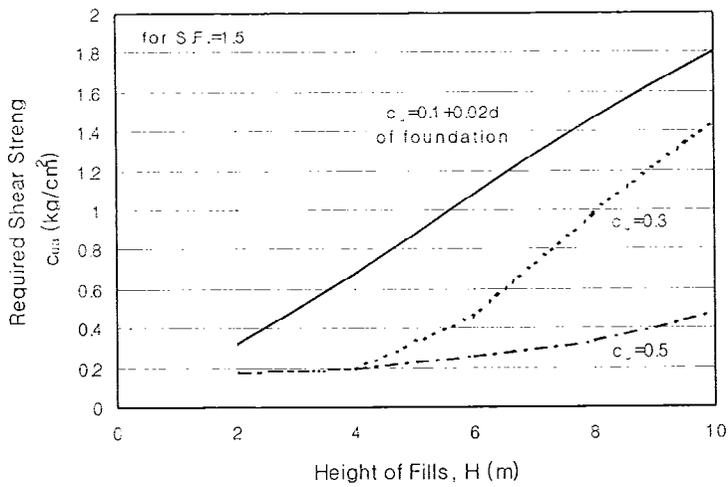


c) 기초지반 $c_u=0.5 \text{ kg/cm}^2$ 조건

그림 2.9 성토재 소요강도 결정을 위한 사면안정해석결과(II)



a) 사면안전을 S.F. = 1.2 기준



b) 사면안전을 S.F. = 1.5 기준

그림 2.10 성토재의 소요 비배수전단강도

제 4 절 고함수비 연약지반토의 공학적특성 개선방법

1. 고함수비토 재활용의 조건

다짐을 할 수 없을 만큼 높은 함수비의 흙을 성토하는 것을 Wet fills이라 한다. 고함수비의 흙을 성토재료로 사용하기 위해서는 우선 함수비를 낮추는 것이 필요하다. 그러나 함수비를 낮추는데는 한계가 있기 때문에 조절가능한 함수비 범위에서 다짐을 하였을 때 성토가능한 단면으로 토공구조물을 구축하거나 시멘트처리 및 보강재료혼합에 의해 흙의 성질을 개량하는 것이 필요하다.

고함수비의 흙을 성토재료로 활용할 것인가의 여부는 지구여건, 공사기간, 사업특성 등에 따라 다르겠지만 고함수비의 흙을 성토재료로 활용할 수 있는 경우는 ① 외부에서 성토재료를 구할 수 없는 조건 ② 굴착된 흙을 사토처리할 수 없어 고함수비의 흙을 적절히 처리하여 재활용할 수 밖에 없는 경우 ③ 고함수비토를 대기건조공법, 고화처리공법, 보강성토공법 등으로 처리할 경우 외부에서 양질의 성토재료를 반입하는 것보다 경제적인 경우이다.

2. 고함수비 흙의 함수비 조절방법

가. 압밀배수(Consolidation)

고함수비의 흙으로 성토단면을 형성할 때 문제점은 ① 사면활동에 의한 성토단면형성의 불가능 ② 성토단면자체의 압밀침하 문제가 있다. 고함수비토를 성토하기 전에 배수재(필터매트)를 포설하고 성토하면 압밀침하와 전단강도증가가 촉진되어 성토가 가능하게된다.

이 공법은 배수로 굴착공사에서 성토가 불가능한 경우 깊이나 섶을 깔고 그 위에 고함수비의 굴착토를 성토하면 깊이나 섶을 통하여 압밀배수가 촉진되어 굴착 및 성토공사를 원만하게 이룰 수 있는 실예의 공법이다.

이는 이론적인 해석이나 체계적인 설계방법이 없이 경험적으로 실무에 적

용된 공법으로 이 공법을 설계단계부터 적용하여 실용화시키기 위해서는 체계적인 설계방법의 정립이 필요하다.

나. 양질토 혼합공법(Mixing)

낮은 함수비의 양질토와 혼합하여 전체 함수비를 낮추고 적절한 다짐을 하여 성토를 하는 공법이다. 이 공법은 현장에서 소규모의 지반굴착토가 발생되면 성토재료와 적절히 혼합하여 성토재료로 활용하고 있는 실례가 많이 있다.

다. 시멘트 또는 석회혼합처리공법 (Quicklime or Soil Cement)

고함수비토에 시멘트나 석회를 혼합하면 현장함수비가 감소하고 전단강도가 크게 증가하는 특성을 이용하는 공법이다. 그러나 지금까지 백회 등을 이용한 간이적인 혼합방법으로 소규모의 공사에서 이용되고 있으나 실용화를 위해서는 현장에서 완전하게 흙과 시멘트를 혼합시킬 수 있는 현장 혼합장비의 개발이 필요하다.

라. 대기건조공법(Evaporation dryey)

고함수비토에서 대기건조에 의한 현장함수비의 감소효과는 매우 크다. 흙의 함수비가 최적함수비 정도까지 건조되면 다짐후 전단강도는 수십 배 까지 증가된다. 대기건조에 의한 현장함수비의 감소에 대한 공사기록을 보면 Lieszkowszky(1979)는 Fort Creek Dam 공사에서 고소성 점토를 두께 15~20 cm로 포설하여 1일 동안 건조시킨 결과 40%의 함수비를 30~34%로 건조시킬 수 있었다고 한다.

그러나 이 공법을 설계단계부터 적용하기 위해서는 대기건조에 필요한 공정계획의 수립이 필요하다. 대기건조과정의 공정은 함수비를 가장 경제적으로 감소시킬 수 있는 조건의 제시와 이에 필요한 공사비의 계상이 필요하다.

제 5 절 결 론

우리나라 서남해안의 연약지반 표층토의 분포와 공학적 특성을 분석하여 성토재료로 사용하기 위하여 개선하여야 하는 과제를 파악하고, 성토단면에 대한 사면안정해석을 통하여 성토재료의 소요전단강도를 결정하고 그 강도를 얻기 위한 개선방법을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 우리나라 서남해안의 연약지반 표층토의 분포와 특성

가. 표층토의 분포

서남해안의 간척지 표층토의 점토함량(0.005mm) 분포를 보면, 서해 중부(10 ~ 20%)부터 남해남부(25 ~ 50%)로 갈수록 증가하는 분포를 보이고 있으며, 현장함수비와 액성한계 분포를 보면 서해안 중부(30 ~ 40%)부터 남해남부(40 ~ 75%)로 갈수록 증가하는 분포를 보이고 있다.

즉 서해안 중부이북은 소성이 적은 흙으로 약간의 함수비관리로도 성토재료로 사용할 수 있으나 남해안의 흙은 고소성흙으로 특별한 함수비관리 또는 개량 및 보강공법이 필요함을 알 수 있었다.

나. 다짐특성

서남해안 간척지 표층토에 대한 표준다짐시험결과 최적함수비는 $\omega_{opt}=19\sim 23\%$, 최대건조밀도는 $r_{dmax}=1.57\sim 1.64g/cm^3$ 로 점토함량이 많을수록 ω_{opt} 은 증가하고 r_{dmax} 는 감소하는 경향을 보이고 있다.

다. 삼축압축시험결과

간척지 표층토에 대한 삼축압축(CU)시험결과 유효응력개념의 내부마찰각 $\phi = 30 \sim 39^\circ$, 전응력개념의 내부마찰각 $\phi = 14 \sim 29^\circ$ 로 측정되었으며, 흙의 종류별로 그 차이가 크며, 점토함량이 많을수록 간극수압발생량이 크고 그만큼 내부마찰각이 적은 값을 보이고 있다.

실트질흙과 모래질 흙은 성토재료로 활용하기가 그 만큼 쉽고, 점토질흙은 전단강도를 증가시키기 위하여 별도의 처리를 하여야 함을 알 수 있다.

2. 성토재료의 소요 전단강도

성토재료의 소요강도는 기초지반이 연약할수록, 성토고가 높을수록 더 큰 전단강도의 성토재료가 필요한 것으로 분석되었으며, 비배수전단강도 $c_u=0.1+0.02dkg/cm^2$ 의 기초지반에서 낮은 성토고(2m이하)에서는 성토재료의 $c_u=0.2kg/cm^2$ (안전율 1.2기준) 정도, 성토고 10m의 경우 $c_u=1.2kg/cm^2$ 정도의 비교적 큰 강도가 필요한 것으로 분석되었다.

3. 고함수비 연약지반토의 성토재료 활용조건

고함수비의 흙을 성토재료로 활용할 수 있는 경우는 ① 외부에서 성토재를 구할 수 없는 조건 ② 굴착된 흙을 사토처리할 수 없어 고함수비의 흙을 적절히 처리하여 재활용할 수 밖에 없는 경우 ③ 고함수비토를 대기 건조공법, 고화처리공법, 보강성토공법 등으로 처리할 경우 외부에서 양질의 성토재료를 반입하는 것보다 경제적인 경우 사용할 수 있다.

4. 성토재료 전단강도 개선방법

간척지 연약지반을 성토재료로 활용하기 위한 흙의 공학적 특성 개선 방법은 1) 압밀배수(Consolidation)공법, 2) 양질토 혼합공법(Mixing), 3) 시멘트 또는 석회혼합처리공법 (Quicklime or Soil Cement), 4) 대기 건조공법(Evaporation dryey)등이 있으며 이들 공법에 대한 연구가 필요하다.

제 3 장 압밀배수 성토공법

제 1 절 연약지반토의 교란후 압밀특성변화

1. 교란후 압밀배수특성변화 예측

가. 교란에 따른 투수계수변화

연약지반토를 성토재료로 사용하면 성토하는 동안 교란되기 때문에 압밀배수특성 즉 투수계수와 선행압밀응력이 크게 감소하여, 압밀침하량이 크게 증가하고 압밀침하 소요시간도 크게 증가한다. 그러므로 고탍수비 연약지반토의 성토(Wet Fills)에서 성토후 압밀침하를 정확히 예측하기 위해서는 교란조건에서의 투수계수의 변화특성을 정확히 예측하는 것이 필요하다.

흙이 유효구속압력을 받으면 과잉간극수압의 소산과 더불어 유효응력이 증가하면서 간극비가 감소한다. 이로 인하여 투수계수도 함께 감소한다. Taylor(1948), Lambe and Whitman(1969), Samarasinghe, Huang and Drenvion(1982) 등에 의하면 점토질흙에 대하여 흙의 간극비와 로그스케일의 투수계수는 그 관계가 선형적이라고 하였다.

Onoue(1991) 등은 Boston blue clay에 대하여 교란과 비교란조건으로 변위제어압밀(controlled-rate-of-strain consolidation)실험으로부터 흙의 간극비와 로그스케일의 투수계수는 선형적인 관계를 보이며, 투수계수는 같은 간극비에서 교란시료가 비교란시료보다 약 3배정도 적은 값을 갖는 결과를 얻었다고 한다. 여기서 일반적으로 정규압밀영역의 점토는 흙의 간극비와 로그스케일의 유효응력이 선형관계를 가지므로 투수계수와 유효응력사이에는 어떤 상관성이 있음을 예측해 볼 수 있다. 유효응력과 투수계수 사이에 상관성이 높다면, 압밀진행동안에 교란조건에서의 투수계수변화를 쉽게 반영하여 압밀해석을 할 수 있을 것이다.

또한 교란된 흙의 투수계수는 비교란조건과 차이가 크기 때문에, 교란된 성

토단면의 압밀해석에서 비교란조건의 압밀계수를 적용하여 압밀해석을 한다면, 실제 압밀현상과 차이가 크게 되므로, 압밀진행동안 교란조건의 투수계수를 압밀해석에 적용하여야 하며, 이를 고려할 수 있는 압밀해석방법이 필요하다.

나. 압밀압력에 따른 투수계수의 변화

흙의 1차원압밀이론에서 Terzaghi의 투수계수일정, 체적변화계수일정이란 가정에 대한 문제점은 많은 학자들에 의해 지적되어 왔다.

그러나 다행히 투수계수와 체적변화계수의 합성으로 설명되어 지는 압밀계수는 실제 흙에서 압밀이 진행되는 동안 투수계수와 체적변화계수가 함께 감소하여 압밀계수가 정규압밀영역에서 어느 정도 일정한 값을 갖게 되므로 Terzaghi 압밀이론은 현재에도 무리 없이 이용되고 있다.

압밀계수 c_v 는 다음 식으로 표시된다.

$$c_v = \frac{k_v}{\gamma_w \cdot m_v} \quad (3.1)$$

여기서 γ_w 는 물의 단위중량, k_v 는 투수계수, m_v 는 압축지수이며, 압밀계수가 유효응력의 증가에 관계없이 일정하기 위한 유효응력과 투수계수관계를 구하여 보면 다음과 같다.

$$m_v = \frac{1}{1 + e_o} \cdot \frac{\Delta e}{\Delta \sigma_v'} \quad (3.2)$$

여기서 $\Delta \sigma_v'$ 는 유효수직응력의 변화, e_o 는 초기간극비이고 Δe 는 $\Delta \sigma_v'$ 에 의한 간극비의 변화이다.

정규압밀영역에서 압축지수 C_c 가 일정하다고 하면 다음 식이 성립한다.

$$\Delta e = C_c \cdot \log \frac{\sigma_v' + \Delta \sigma_v'}{\sigma_v'} \quad (3.3)$$

식 (3.2)에 식 (3.3)을 대입하면 다음 식이 된다.

$$m_v = \frac{C_c}{1 + e_o} \cdot \frac{\log \frac{\sigma_v' + \Delta \sigma_v'}{\sigma_v'}}{\Delta \sigma_v'}$$

여기서 $\Delta \sigma_v'$ 가 미소한 조건에 대하여

$$\log \frac{\sigma_v' + \Delta \sigma_v'}{\sigma_v'} \simeq 0.434 \times \frac{\Delta \sigma_v'}{\sigma_v'} \text{ 가 성립하므로}$$

$$m_v \simeq \frac{0.434 C_c}{(1 + e_o) \sigma_v'} \quad (3.4)$$

가 얻어진다.

여기서 압밀계수와 투수계수관계를 구하기 위하여 식 (3.1)에 식 (3.4)를 대입하면 압밀계수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$c_v \simeq \frac{(1 + e_o) \sigma_v' k_v}{0.434 \gamma_w C_c} \quad (3.5)$$

그러므로 투수계수와 유효응력사이에는 다음식이 성립한다.

$$k_v \simeq \frac{0.434 C_c c_v}{(1 + e_o) \sigma_v'} \quad (3.6)$$

식 (3.6)을 이용하여 c_v 일정조건에 대한 σ_v' 와 k_v 의 관계를 계산하여 보면 그림 3.1과 같다.

여기서 σ_v' 와 k_v 관계가 그림 3.1과 같은 관계를 갖는 즉 식 (3.6)을 만족시키는 흙에서는 Terzaghi 압밀이론의 가정조건인 c_v 일정조건을 만족시킨다고 볼 수 있다.

그러나 실제 연약지반토에서 유효응력에 대한 투수계수가 c_v 일정조건을 만족시키는 관계를 갖는지 확인하는 것도 필요하며, 특히 굴착성토시 교란된 흙에서도 유효압밀압력별 투수계수가 c_v 일정조건을 만족시키는지 확인할 필요가 있다.

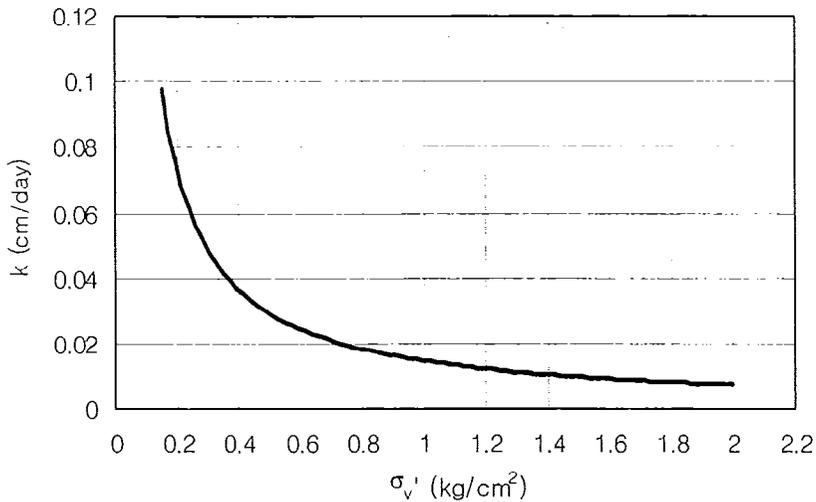


그림 3.1 압밀계수 일정조건의 유효응력별 투수계수변화

Dazawa & Wakamei (1976)의 교란된 시료에 대한 압밀시험결과를 보면 그림 3.2와 같이 비교란과 교란조건의 압밀계수가 선행압밀하중에서 차이가 크고 유효응력이 증가하면서 그 차이가 감소하여 큰 유효응력에서는 거의 같은 값을 보이고 있다. 완전히 교란된 흙의 압밀계수는 유효응력이 증가하면서 증가하는 경향을 보이고 있다.

압밀계수변화 경향으로 부터 투수계수변화를 예측해보면 비교란흙은 유효응력의 증가에 따라 투수계수가 크게 감소하지만 교란된 흙은 압밀진행동안 투수계수가 크게 감소하지 않는 경향을 갖는다는 것을 예측해 볼 수 있다.

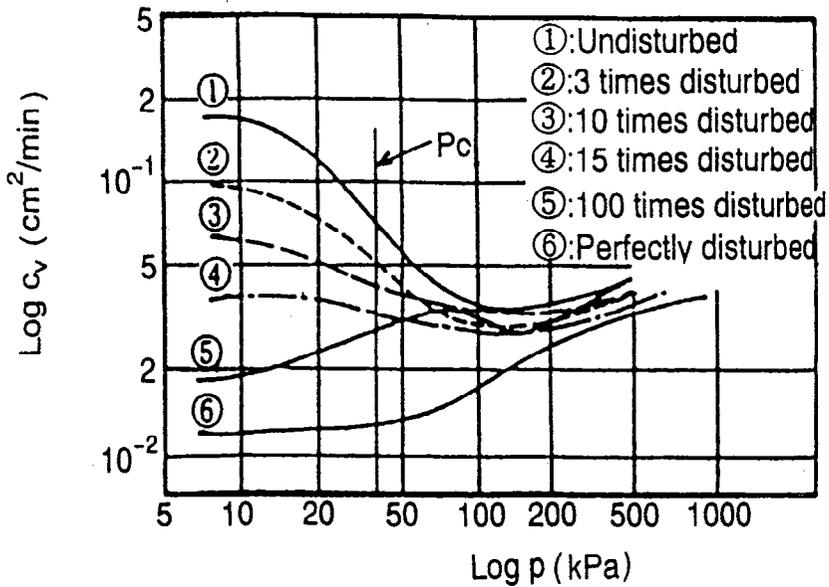


그림 3.2 교란에 따른 압밀계수의 변화
(after Dazawa & Wakamei, 1976)

다. 필터매트 Clogging의 영향

Chang(1994) 등과 Ramachandran(1995)의 Clogging 실험결과를 보면 필터 주위 흙에 투수성의 변화는 필터의 종류에 따라 매우 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

ASTM D 5101의 Clogging시험에서 동수경사비(GR)는 필터인접부(두께 2.5cm)의 동수경사(i_{sf})와 그 밖의 동수경사(i_s)의 비로 나타내어진다.

$$GR = \frac{i_{sf}}{i_s} = \frac{\frac{q}{k_{sf}}}{\frac{q}{k_s}} = \frac{k_s}{k_{sf}}$$

즉 흙의 투수계수와 GR값과의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$k_{sf} = \frac{k_s}{GR} \quad (3.7)$$

여기서 필터주위의 투수계수는 GR에 반비례하는 관계로서 GR=3인 경우 필터주위의 투수계수는 $k_{sf} = \frac{1}{3} k_s$ 로 감소한다는 것을 뜻한다.

ASTM D 5101의 시험방법에서 필터와 필터에 접한 2.5cm 두께의 흙에서 소모되는 수두손실량과 기타부위의 같은 두께에서 손실되는 수두손실량의 비로 나타내어지는 것으로 k_{sf} 는 필터와 필터에 접한 2.5cm두께 흙의 합성투수계수로 볼 수 있다.

재하초기에 스미어에 의한 투수계수분포에 Clogging에 의한 투수계수변화를 같이 나타내면 그림 3.5와 같이 된다. 그림에서 Clogging이 발생하는 영역밖의 투수계수는 스미어에 의해 감소된 투수계수값만으로 나타내어지지만, Clogging 영역은 식 (3.7)과 같이 스미어에 의해 감소된 투수계수값에서 GR값에 반비례하여 더 감소하거나 증가하는 것을 보여주고 있다.

2. 압밀 및 투수실험에 의한 검증

가. 실험방법

고함수비 연약지반토의 성토시 교란에 따른 투수계수의 변화를 확인하기 위하여 2개 현장에서 비교란시료를 채취하여 비교란 조건과 교란조건에 대한 표준압밀실험을 실시하였다.

또한 각 압밀단계의 유효응력별 투수계수변화를 직접측정하기 위하여 압밀실험과 투수실험을 동시에 실시하였다. 실험기구는 그림 3.3과 같이 표준압밀실험기구에 시료바닥으로 침투수를 공급할 수 있는 라인을 만들어 사용하였다.

압밀실험은 압밀압력 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2 6.4 및 12.8 kg/cm²으로 단계적으로 압밀을 시키면서 각 압밀단계의 압밀완료시점에 시료바닥으로 침투수압 0.2~0.5 kg/cm² 을 가하고 단위시간당 투수량을 측정하는 투수실험을 실시하였다.

각 하중단계의 압밀시간은 24시간동안 압밀시킨후 투수실험은 12시간동안 투수시키면서 투수량을 측정하였다. 투수량측정은 rolling diaphragm volume-change transducer를 사용하였다.

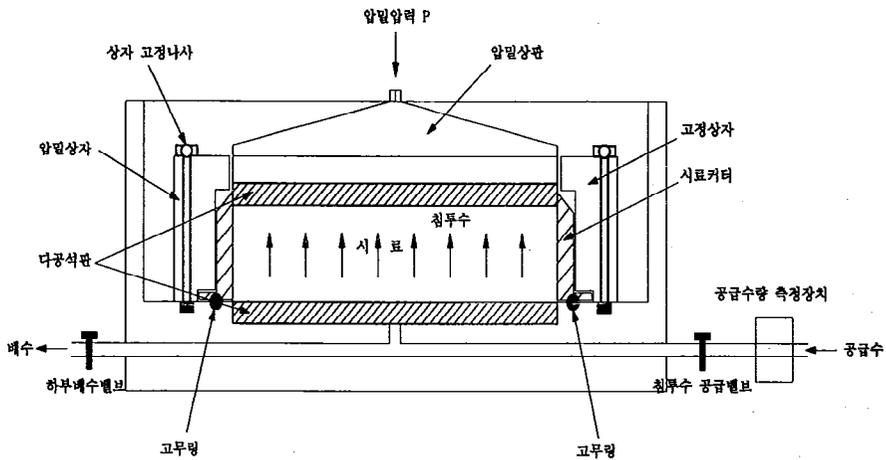


그림 3.3 압밀과 투수시험장치

나. 실험시료

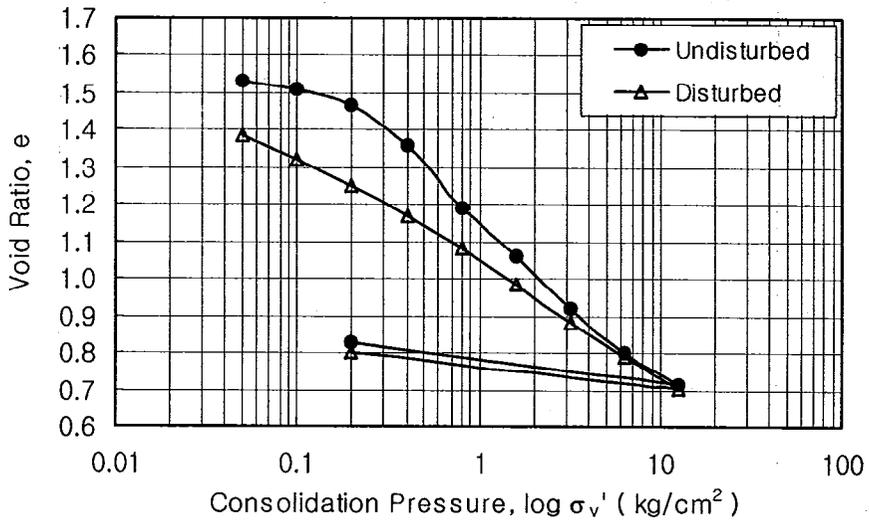
실험에 사용한 시료는 표 3.1과 같은 해성퇴적점토를 사용하였다. 교란조건은 비교란시료를 완전 되반죽하여 교란된 흙을 재성형하여 사용하였다.

표 3.1 압밀 및 투수시험시료의 물리성

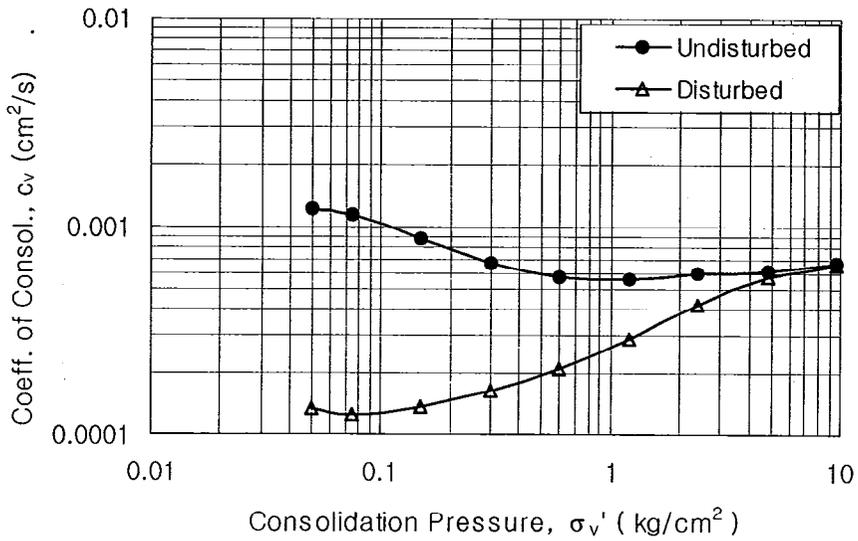
시료명	반월 점토	이원 점토
채취위치	경기 안산시 사동	충남 태안군 이원면
흙 분류(U. S. C. S.)	CL	CH
함수비, ω_n (%)	48.7	58.3
액성한계, LL (%)	48.6	52.1
소성지수, PI (%)	25.1	27.5

다. 압밀실험결과

비교란과 교란시료에 대한 압밀실험결과는 그림 3.4, 3.5와 같이 측정되었다. 각 하중단계별 압밀실험결과를 보면 교란된 시료는 비교란에 비하여 선행압밀하중이 크게 감소하고, 압축지수도 감소하였으며, 정규압밀영역의 압밀계수는 비교란 시료에서는 일정함을 유지하나, 교란시료는 낮은 압밀압력에서는 크게 감소하지만 압밀압력이 증가하면서 점차 증가하여 최종압밀압력에서는 비교란시료와 거의 같은 값을 갖는 결과를 얻었다.

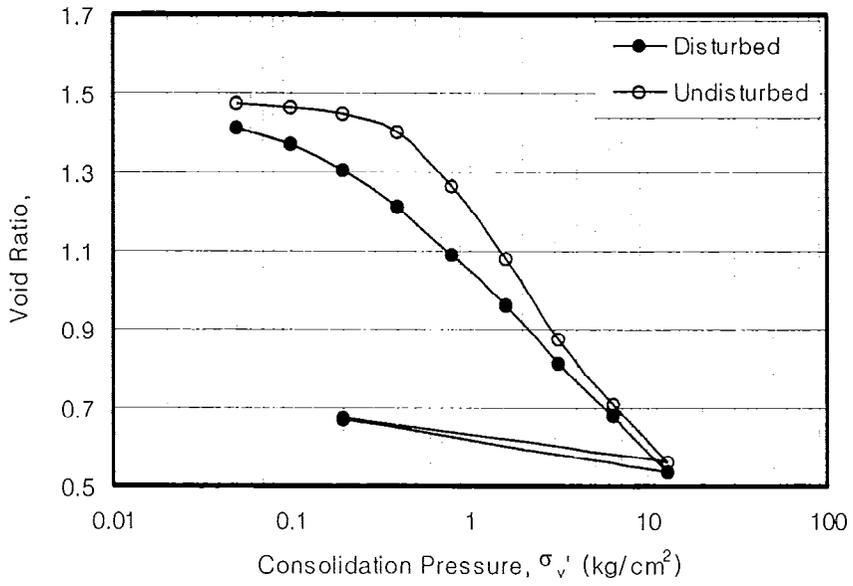


a) $\sigma'_v - e$

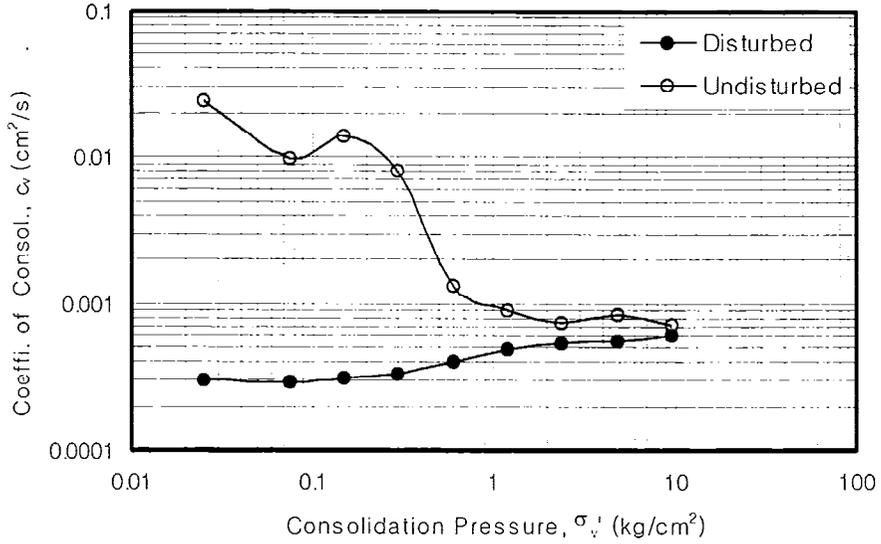


b) $\sigma'_v - c_v$

그림 3.4 압밀시험결과(반월지구 시료)



a) $\sigma_v' - e$



b) $\sigma_v' - c_v$

그림 3.5 압밀시험결과(이원지구 시료)

라. 투수계수변화 실험결과

교란 및 비교란시료에 대한 투수실험결과는 그림 3.6, 3.7과 같이 측정되었다. 각 하중단계별 압밀완료후 동수경사 $i=10\sim 25$ 조건에 투수실험 결과는 그림과 같이 비교란시료는 압밀계수 일정조건에 이론계산곡선(식 3.6의 값)과 실측값이 일치하는 경향을 보이지만 완전교란시료는 오히려 투수계수가 일정한 경향을 보이고 있다.

즉 비교란조건은 실용적인 면에서 압밀진행과정동안 압밀계수가 일정하다고 볼 수 있지만, 교란조건에 압밀계수는 유효응력이 증가되면서 증가하고, 유효응력증가에 따른 투수계수의 감소폭이 크게 적어지는 경향을 보인다.

그림 3.6, 3.7에서 표식점은 각 압밀압력단계별 압밀완료시점에 투수실험의 실측 투수계수값이고, 실선과 점선은 실측값에 일치하는 곡선이 되는 식(3.8)의 지수 X값을 찾아서 식 (3.9)로 계산한 값을 나타낸 곡선이다.

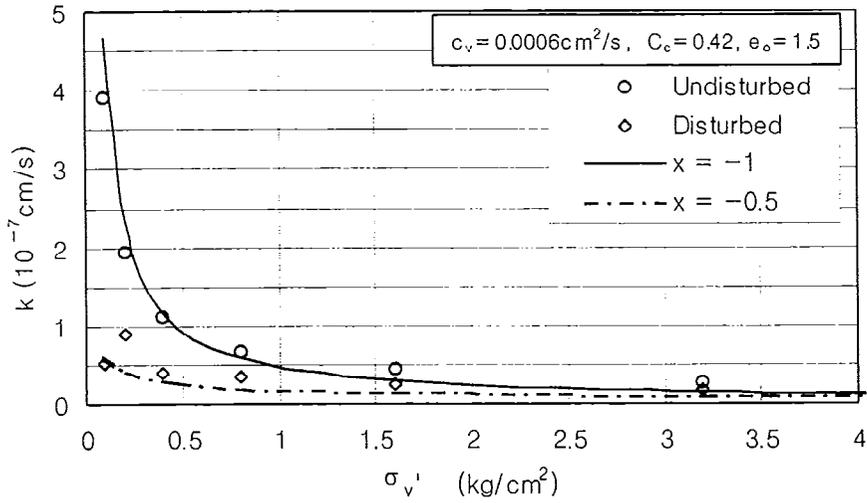


그림 3.6 압밀진행동안의 투수계수변화(반월지구 시료)

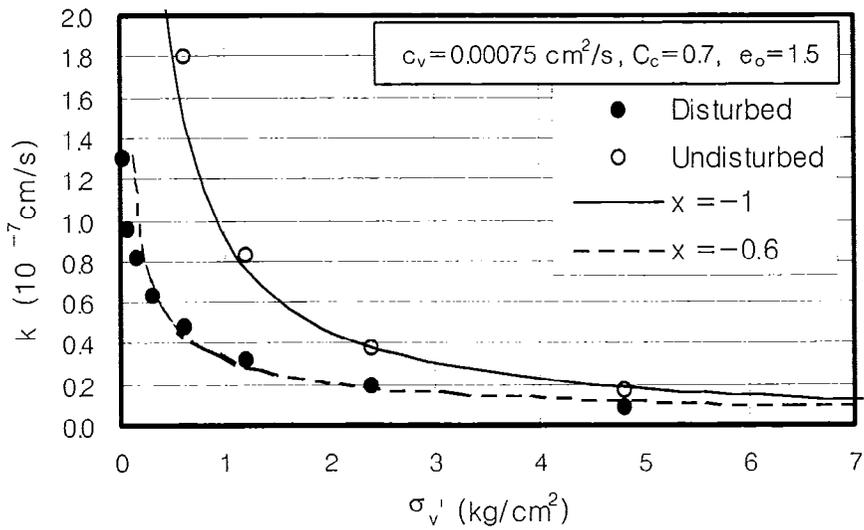


그림 3.7 압밀진행동안의 투수계수변화(이원지구 시료)

다. 투수계수 분포 및 변화공식의 유도

그림 3.6, 3.7을 보면 교란 및 비교란 조건에 대한 투수계수변화는 압밀초기 낮은 압밀압력에서는 그 차이가 크다. 그러나 유효응력이 일정값 이상으로 증가하면 거의 같은 투수계수 값을 갖는다. 이때의 응력을 σ_f' 라고 하고, 식 (3.6)이 응력 σ_f' 에서 투수계수가 같은 값을 갖도록 σ_f' 을 삽입하여 식을 만들면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k_v = \frac{0.434 c_c c_v}{\gamma_w (1 + e_o) \sigma_f'} \left(\frac{\sigma'}{\sigma_f'} \right)^x \quad (3.8)$$

여기서 x는 교란정도에 따라 변화되는 값으로 비교란조건은 $x=-1$ 이며 이 때는 식 (3.6)과 같아진다. 또한 흙이 교란되면 x값이 증가하는 경향을 보이는데, 완전교란조건에서 $x=-0.5 \sim -0.6$ 의 값을 갖는 경향을 보이고 있다.

여기서 고탍수비 연약지반토를 성토재료로 사용하면 성토단면의 높이가 적은 것이 대부분으로, 유효응력이 적은 조건으로 교란된 흙의 투수계수는 비교란조건의 흙보다 매우 적은 값이라는 것을 알 수 있다.

필터매트 인접부에 Clogging이 발생하는 위치의 투수계수는 Gradient Ratio(GR)에 반비례하여 감소하므로 GR값을 삽입하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$k_v = \frac{0.434 c_c c_v}{\gamma_w (1 + e_o) \sigma_f'} \left(\frac{\sigma'}{\sigma_f'} \right)^x \times \frac{1}{GR} \quad (3.9)$$

제 2 절 필터매트의 소요통수능

1. 필터통수능을 고려하지 않은 압밀해석방법 전개

가. 가정조건

1) Darcy의 법칙

고함수비 연약지반토를 필터매트를 매 층마다 포설하고 단계성토를 하면, 하층 성토단면에서는 상재성토하중에 의해 과잉간극수압이 발생되고, 이로 인하여 필터매트 방향으로 등수경사가 형성된다. 흩속의 물의 흐름은 이 등수경사에 의해 흐른다. 여기서 물의 흐름에 대하여 Darcy의 법칙을 적용하였다.

2) 압축지수와 재압축지수 일정

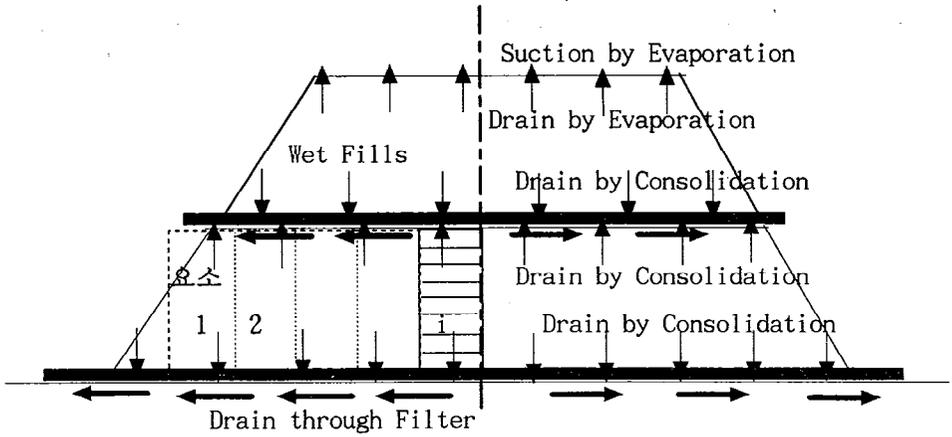
등수경사에 의해 필터매트 방향으로 물의 흐름이 발생되고 이로 인해 흩 속의 간극수가 배제되면서 간극수압이 소산된다. 간극수압의 소산은 유효응력의 증가를 의미하며 유효응력의 증가는 간극비의 감소와 비례관계를 갖는다. 즉 본 해석에서 유효응력과 간극비관계를 체적변화계수를 사용하지 않고 실용적인면에서 유효응력의 크기에 관계없이 일정하게 적용할 수 있는 압축지수와 재압축지수를 사용하였다.

3) 교란된 성토단면의 $\sigma_v' - k_h$ 관계 변화 고려

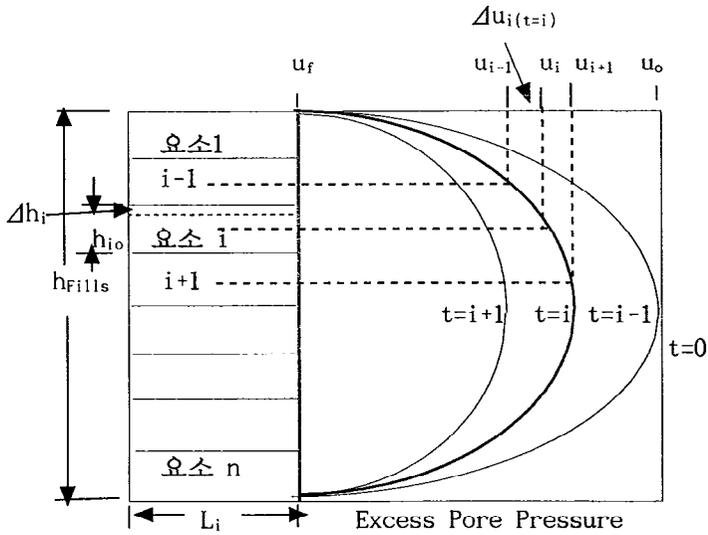
교란된 흩은 유효응력에 따라 압밀계수가 변화되므로 본 해석에서는 압밀계수를 사용하지 않고 투수계수가 유효응력에 따라 변화되는 상관식 (식 3.8)을 적용하였다.

나. 해석이론유도

Wet fills의 필터매트를 통한 성토단면내 압밀배수조건에 대한 압밀해석방법을 유도하기 위하여 수직방향의 흐름만을 고려하여 그림 3.8 b) 와 같이 유한요소계로 나누어 생각해 보자.



a) 고풀수비흡 성토(Wet Fills)의 압밀배수 모형



b) 성토단면내 압밀해석 모형

그림 3.8 Wet Fills 필터매트 압밀배수공법의 압밀해석 모식도

수직방향배수에서 시간 Δt 동안 i 요소를 통과하는 투수량은

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = - \frac{k_{hi}}{\gamma_w} \frac{\Delta u}{h_i} L_i \quad (3.10)$$

의 식이 된다.

i 요소의 체적변형을 ($\varepsilon_{v(i)}$)은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\varepsilon_{v(i)} = \frac{Q_i - Q_{(i+1)}}{L_{i0} \cdot h_{i0}} \quad (3.11)$$

여기서 Q_i 는 i 요소를 통과하는 유량이고, $Q_{(i+1)}$ 은 $i+1$ 요소를 통과하는 유량이다

i 요소의 간극비변화 ($\Delta e_{(i)}$)는 다음 식으로 나타낼 수 있으며

$$\Delta e_{(i)} = \varepsilon_{v(i)}(1 + e_o) \quad (3.12)$$

여기서 정규압밀조건에 대하여

$$\Delta e = \frac{C_c}{1 + e_o} \cdot \log \frac{\sigma_{v_{i+1}}'}{\sigma_{v_i}'} \quad \text{의 식을}$$

과압밀영역에 대하여

$$\Delta e = \frac{C_r}{1 + e_o} \cdot \log \frac{\sigma_{v_{i+1}}'}{\sigma_{v_i}'} \quad \text{의 식으로 부터}$$

$t=i+1$ 에서 i 요소의 유효응력 ($\sigma_{v_{i+1}}'$)은 다음식으로 구하고

$$\sigma_{v_{i+1}}' = 10^{(\Delta e/C_c + \log \sigma_{v_i}')} \quad (3.13)$$

Δt 동안의 과잉간극수압 소산량 ($\Delta u_{i=i}$) 은 다음식으로 구할 수 있다.

$$\Delta u_{i=i} = \sigma_{v_{i=i+1}} - \sigma_{v_{i=i}} \quad (3.14)$$

이 관계로 부터 각 요소의 Δt 동안의 과잉간극수압소산량(Δu_i)을 구할 수 있으며, 시간 t_{i+1} 일 때의 과잉간극수압 분포도를 얻을 수 있다.

시간 t_{i+1} 일 때의 과잉간극수압분포를 알면 이때의 동수경사로부터 다음 단계의 Δt 동안의 물의 흐름을 계산하여 간극비변화량(Δe)과 과잉간극수압 소산량(Δu_i)을 다시 계산하는 과정을 반복하면 압밀진행과정을 구할 수 있다.

다. 압밀해석과정 전개

본 해석방법은 그림 3.8 b)와 같이 물 흐름의 직각방향으로 여러 개의 요소로 나누어 미소시간동안 물의 흐름을 계산하고 이에 따라 발생하는 간극비변화와 침하량 및 과잉간극수압변화를 구하고 다시 미소시간의 물의 흐름을 계산하는 방법으로 Semi-Analitical Consolidation Program(S. A. C. P.)이라고 표기하기로 한다.

그림 3.8 b)에서 $t=i$ 에서 Δt 동안 i 요소를 흐르는 유량($Q_{h=i}$)은 다음과 같다.

$$Q_{h=i} = -k_{h=i} \cdot \frac{1}{\gamma_w} \cdot \left[\frac{\Delta u_{h=i}}{h_i} \right]_{t=i} \cdot L_i \cdot \Delta t \quad (3.15)$$

여기서 $k_{h=i}$: i 요소의 $t=i$ 에서의 투수계수

$\Delta u_{h=i}$: $i-1$ 요소와 i 요소의 경계면과 i 요소와 $i+1$ 요소 경계면의
과잉간극수압 차

h_i : i 요소의 높이

L_i : t=i일 때 i요소의 길이(일정)

t=i에서 Δt 동안 i요소로 부터 배제된 수량($\Delta Q_{h=i, t=i-j}$)은 다음과 같다.

$$\Delta Q_{h=i, t=i-j} = Q_{h=i, t=i-j} - Q_{h=j, t=i-j} \quad (3.16)$$

여기서 $Q_{h=j, t=i-j}$ 은 Δt 동안 j요소를 흐르는 유량이다.

t=i에서 Δt 동안 i요소의 체적변위($\epsilon_{v, h=i, t=i-j}$)는 다음 식과 같고

$$\epsilon_{v, h=i, t=i-j} = \frac{\Delta Q_{h=i, t=i-j}}{(h_{o, h=i} \cdot L_i)} \quad (3.17)$$

여기서 $h_{o, h=i}$: i요소의 초기 두께

L_o : 초기 길이

t=i에서 Δt 동안 i요소의 간극비변화($\Delta e_{h=i, t=i-j}$)는 다음과 같으며

$$\Delta e_{h=i, t=i-j} = \epsilon_{v, h=i, t=i-j} (1 + e_o) \quad (3.18)$$

여기서 e_o : 초기간극비

t=i에서 Δt 동안 i요소의 간극수압변화($\Delta u_{h=i, t=i-j}$)는 e- σ_v' 관계로 부터

다음식으로 구할 수 있다.

$$\Delta u_{h=i, t=i-j} = 10 \left(\Delta e / C_c + \log \sigma_{v, h=i, t=i}' \right) - \sigma_{v, h=i, t=i}' \quad (3.19)$$

여기서 $\sigma_{v \begin{smallmatrix} h=i \\ t=i \end{smallmatrix}}$: t=i에서 i요소의 유효수직응력

t=i에서 Δt 동안의 수직변위 즉 침하량($\Delta h_{\begin{smallmatrix} h=i \\ t=i-j \end{smallmatrix}}$)은 다음과 같으며

$$\Delta h_{\begin{smallmatrix} h=i \\ t=i-j \end{smallmatrix}} = \frac{\Delta Q_{\begin{smallmatrix} h=i \\ t=i-j \end{smallmatrix}}}{L_i} \quad (3.20)$$

t=i에서 Δt 후에 침하층의 두께($h_{\begin{smallmatrix} h=i \\ t=j \end{smallmatrix}}$)는 다음과 같이 변화된다.

$$h_{\begin{smallmatrix} h=i \\ t=j \end{smallmatrix}} = h_{\begin{smallmatrix} h=i \\ t=i \end{smallmatrix}} - \Delta h_{\begin{smallmatrix} h=i \\ t=i-j \end{smallmatrix}} \quad (3.21)$$

여기서 $h_{\begin{smallmatrix} h=i \\ t=i \end{smallmatrix}}$: t=i에서 침하층의 두께이다

t=i에서 식 (3.15)부터 식 (3.21)까지 계산하면 t=j조건인 간극비, 과잉 간극수압분포, 침하량 및 각 요소의 두께를 구할 수 있다. 여기서 다시 Δt 동안의 계산을 반복하면 각 시간별 침하량, 간극비의 변화, 간극수압분포, 투수계수변화등을 구할 수 있다.

압밀해석절차를 흐름도로 나타내면 그림 3.9와 같다. 그림에서 Time P_i는 계산결과를 기록하고 싶은 시간으로, 계산결과를 그래프로 나타내기 위해 필요한 시간들을 지정하는 것이고, Time P_f는 계산을 종료하고 싶은 시간으로 압밀이 완료된 시간으로 압밀도 95~98%의 시간을 지정하여 계산을 종료하도록 하였다.

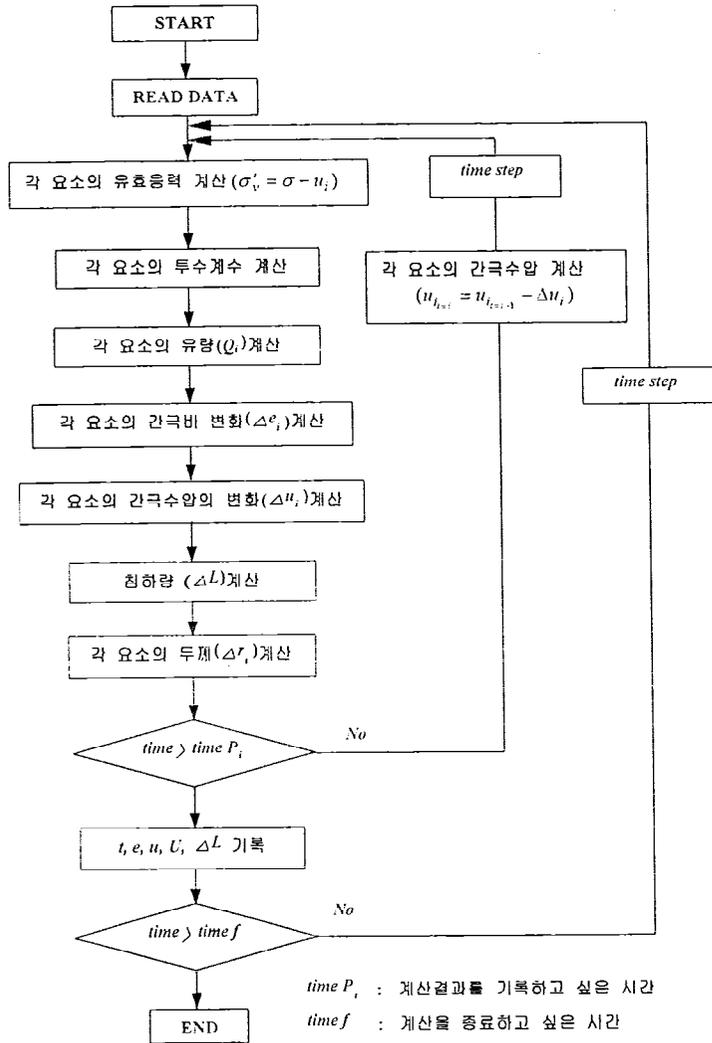


그림 3.9 Semi-Analytic Consolidation Program(S.A.C.P.)의 흐름도

라. 실예에 의한 해석방법의 검증

1) 입력자료

압밀해석에 사용한 기초지반조건 및 토질정수는 표 3.2와 같은 가정조건에 대하여 실시하였다. 본 해석방법을 검증하기 위하여 투수계수변화를 Terzaghi의 압밀계수 일정조건을 만족시키는 식 (3.6)과 같이 변화하는 조건에 대하여 본 제안해석과 Terzaghi 압밀해석결과를 비교하였다.

표 3.2 프로그램 검증을 위한 기초지반조건 및 토질정수(예제)

구 분	토질정수
초기 유효응력(σ_{vo}')	0.05 kg/cm ²
상재증가 유효응력($\Delta\sigma_v'$)	0.15 kg/cm ²
초기간극비(e_o)	1.4
압축지수(C_c)	0.3
압밀계수(c_v)	5×10^{-4} cm ² /s
Wet Fills의 1층 성토고(h_i)	1 m

2) Terzaghi 압밀해석방법

압밀해석결과의 비교를 위하여 교란되지 않은 비교란 조건에 대하여 Terzaghi 압밀해석은 다음 식을 이용하였다.

$$S_c = \frac{C_c}{1 + e_o} H \log\left(\frac{\sigma_{vo} + \Delta\sigma_v}{\sigma_{vo}}\right) \quad (3.22)$$

여기서,

S_c : 압밀침하량

C_c : 압축지수

- e_0 : 초기 간극비
- H : 압밀층의 두께
- σ_{v0} : 재하전 유효연직응력
- $\Delta \sigma_v$: 유효응력 증가량

$$t = \frac{TH^2}{c_v} \quad (3.23)$$

여기서

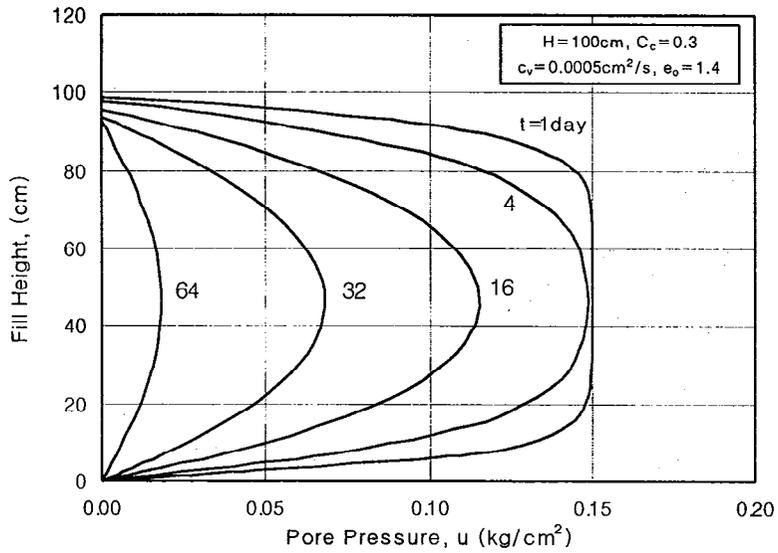
- t : 압밀 소요시간
- c_v : 압밀계수
- H : 배수거리

3) 압밀해석결과 비교

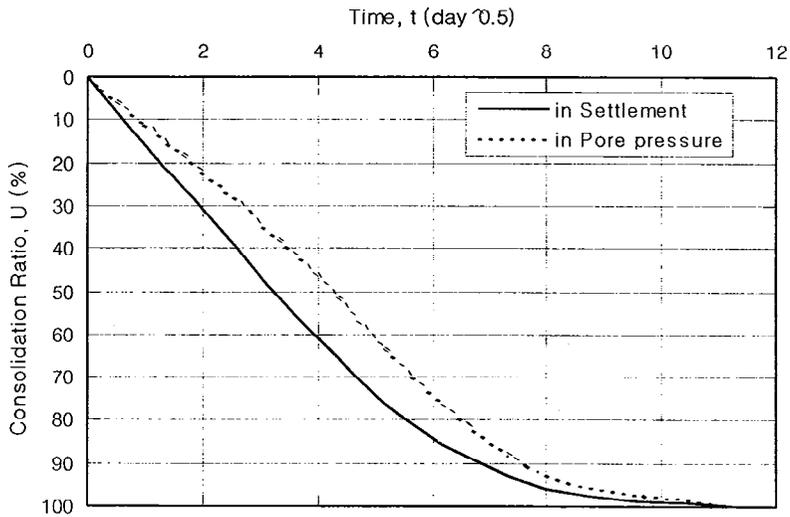
표 3.2 조건에 대하여 본 제안 압밀해석을 실시한 결과 각 압밀시간별 과잉간극수압분포는 그림 3.10 a)와 같은 분포를 보이고 있으며 시간-압밀도곡선은 그림 3.10 b)와 같이 간극수압에 의한 압밀도와 침하량에 의한 압밀도의 값이 다르며 간극수압에 의한 압밀도가 더 적은 것으로 분석되었다.

Terzaghi해와 본 제안 해석의 시간-침하량곡선을 비교한 결과 그림 3.11 a), b)와 같이 잘 일치하는 결과를 볼 때 본 제안 해석방법은 타당한 것으로 분석되었다.

또한 이 해석결과는 압밀계수 c_v 가 일정한 조건에 대한 해석결과로서 교환조건에서는 c_v 가 일정하지 않으므로 각 압밀하중단계별 평균 압밀계수를 구하여 적용하여야 한다.

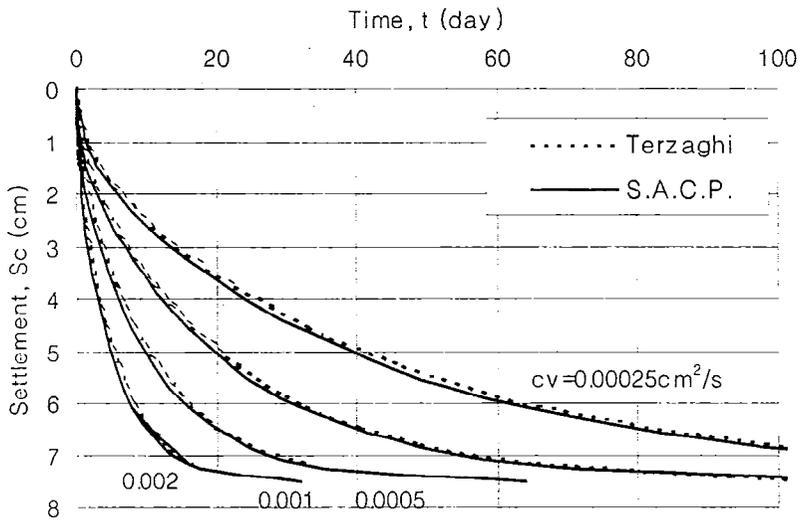


a) 과잉간극수압분포도

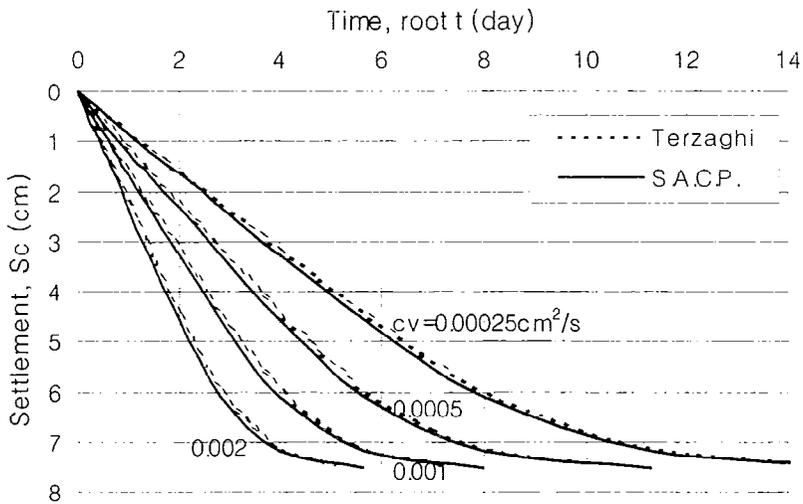


b) 시간 - 압밀곡선

그림 3.10 본 연구 제안 압밀해석에 의한 압밀해석결과



a) 압밀곡선(시간 - 침하량)



b) 압밀곡선(\sqrt{t} - 침하량)

그림 3.11 본 연구 제안 압밀해석과 Terzaghi 해석결과 비교

2. 필터통수능을 고려한 압밀해석방법 전개

가. 문헌고찰 및 해석목적

Wet Fills의 압밀배수를 촉진하기 위하여 필터매트를 성토층별로 포설할 때 필터매트의 통수능은 성토단면의 압밀속도에 지장을 주지 않도록 충분히 커야한다.

Holtz(1991)등은 배수재의 통수능에 영향을 주는 요소는 (1) Core의 통수 단면적 (2) 상재토압 (3) 배수재의 변형(folding, banding, crimping) (4) 흡입자의 Core내 침투(siltation) (5) Core 관로의 생화학적 부식이라고 하였다.

Holtz(1991), Ali(1991), Broms(1994) 등의 연구결과를 보면 흙이 압밀되면서 배수재의 연직방향변형과 필터의 변형 등에 의해 배수재의 통수능은 시간이 경과하면서 감소한다고 하였다.

또한 흙속에서 압밀배수되는 물의 량도 시간이 경과하면서 급격히 감소하는데, 이 감소보다 배수재의 압밀변형 등에 의한 통수능의 감소가 더 크다면 압밀지연의 요소가 될 것이다.

즉 압밀이 완료될 때 까지 필터매트는 흙속에서 배수되는 물을 흙의 압밀 속도에 영향을 미치지 않을 만큼 적은 손실수두로 통수시킬 수 있는 통수능력을 갖는 것이 필요하다.

필터매트를 이용한 압밀배수 성토공법의 해석에서 필터매트의 통수능에 의한 압밀지연을 고려한 압밀해석을 하거나, 성토단면의 압밀에 영향을 미치지 않는 소요통수능 이상의 필터매트를 선정하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 필터매트의 통수능을 고려할 수 있는 압밀해석방법을 제안하고, 그 해석을 통하여 흙의 압밀계수별, 성토고별 필터매트의 소요통수능을 제시하였다.

나. 해석방법전개

양면배수조건의 필터매트내의 물의 흐름은 그림 3.12와 같이 성토된 흙에서 배수재로 흘러들어오는 물이 성토단면 외부로 흐르므로 배수재를 흐르는 물의 양은 성토단면 중심부는 적고 외측부가 가장 크다. 그림에서 배수재내 i 층중심에 흐르는 물의 양(Q_i)은 배수재주위 흙으로부터 압밀배수되는 양(q_{ri})의 합으로서 이를 식으로 나타내면

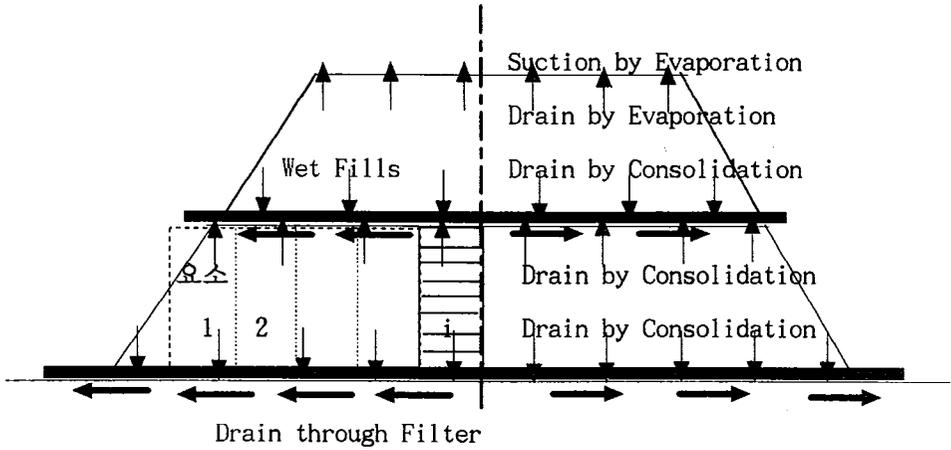
$$\begin{aligned}
 Q_1 &= \frac{(q_{u1} + q_{d1})}{2} + (q_{u2} + q_{d2}) + \dots + (q_{un} + q_{dn}) \\
 Q_2 &= \frac{(q_{u2} + q_{d2})}{2} + (q_{u3} + q_{d3}) + \dots + (q_{un} + q_{dn}) \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 Q_{n-1} &= \frac{(q_{un-1} + q_{dn-1})}{2} + (q_{un} + q_{dn}) \\
 Q_n &= \frac{(q_{un} + q_{dn})}{2}
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

필터매트내에 물의 흐름에 대하여 Darcy의 법칙을 적용하여 각층의 소요 배수량을 통수시키기 위한 손실수두 (Δh_i)를 계산하면 다음과 같다.

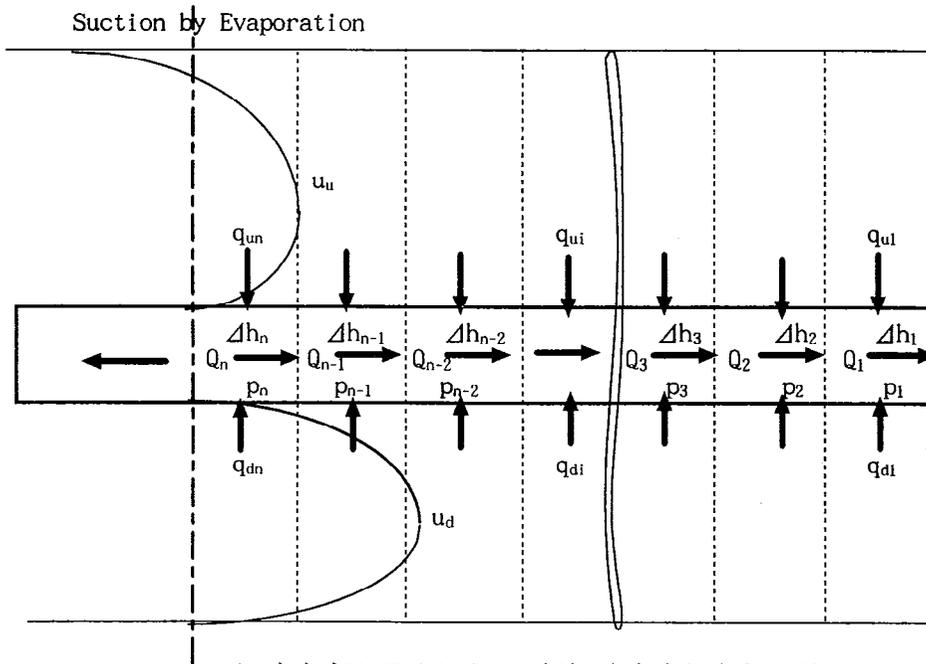
$$\begin{aligned}
 \Delta h_1 &= \frac{Q_1}{q_{u1}} \cdot L_1 \\
 \Delta h_2 &= \frac{Q_2}{q_{u2}} \cdot L_2 \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 \Delta h_{n-1} &= \frac{Q_{n-1}}{q_{un}} \cdot L_{n-1} \\
 \Delta h_n &= \frac{Q_n}{q_{dn}} \cdot L_n
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

여기서 q_{ui} : 필터매트 i 요소의 통수능

L_i : 필터매트 i 요소의 길이



a) 고함수비흙 성토(Wet Fills)의 압밀배수 모형



b) 필터매트 통수능을 고려한 압밀배수해석 모형

그림 3.12 필터매트의 통수능을 고려한 압밀해석 모식도

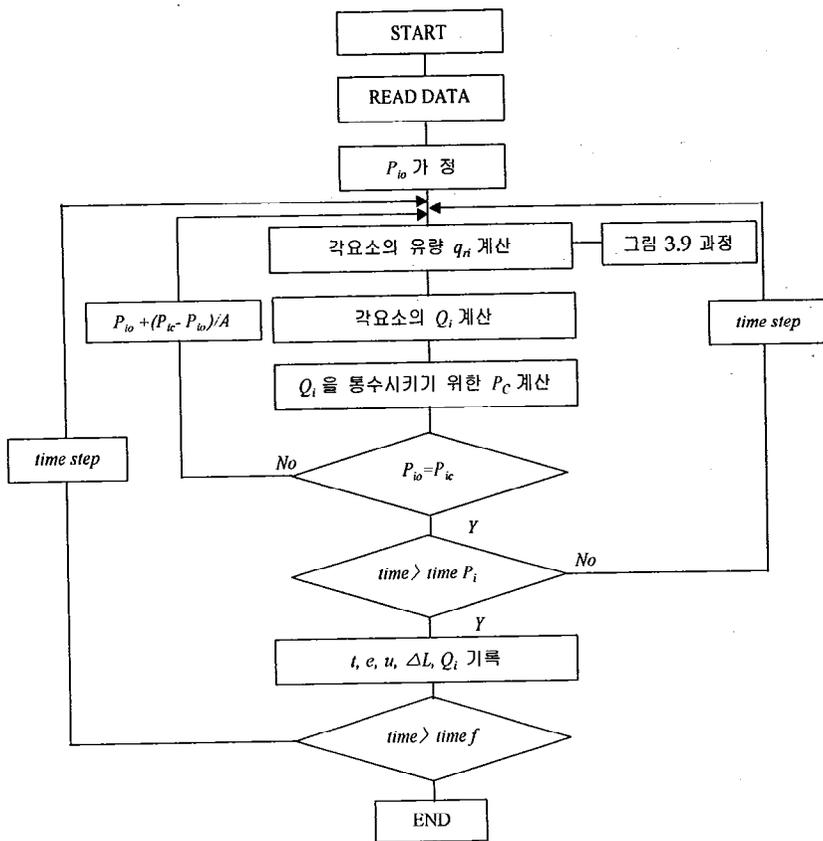
필터매트내 각종 층상의 정수압을 제외한 침출수압(p_i)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 p_1 &= \frac{\Delta h_1}{2} \times \gamma_w \\
 p_2 &= \left(\Delta h_1 + \frac{\Delta h_2}{2} \right) \times \gamma_w \\
 p_3 &= \left(\Delta h_1 + \Delta h_2 + \frac{\Delta h_3}{2} \right) \times \gamma_w \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 p_n &= \left(\Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \frac{\Delta h_n}{2} \right) \times \gamma_w \quad (3.26)
 \end{aligned}$$

각 층의 Q_i 를 통과시키기 위하여는 필터매트내에 수압 p_i 가 필요하게 된다. 즉 통수능이 충분히 커서 well resistance가 없다면 $p_i \approx 0$ 이 되어 흠의 압밀속도에 영향을 미치지 않겠지만, 통수능이 적어서 p_i 가 크다면 흠속에 형성되는 수두경사가 p_i 값만큼 감소하여 압밀이 지연되게 될 것이다.

필터매트내에 수압이 p_i 일 때 흠속에 형성되는 수두경사에 의해 흐르는 물의 량을 q_i 라고 하면 필터매트가 흘러보내야 하는 통수량(Q_i)은 식(3.25)와 같다.

여기서 p_i 가 크면 q_i 는 감소하고 Q_i 는 증가하게 된다. 즉 Q_i 와 q_i 가 평형을 유지하는 p_i 조건으로 흠과 배수재내에서 물이 흐르는 것이므로, 압밀시작부터 Δt 시간 간격으로 임의 시간에 Δt 동안 Q_i 와 q_i 가 평형을 유지하는 p_i 를 시산법으로 구하고 배수재내에 수두 p_i 가 있는 조건의 수평배수압밀해석을 그림 3.13의 흐름도와 같이 수행한다.



A : 보간계수

time P_i : 계산결과를 기록하고 싶은 시간

time f : 계산을 종료하고 싶은 시간

그림 3.13 통수능을 고려한 Wet Fills 압밀배수공법의
압밀해석프로그램(S.A.C.P.)의 흐름도

다. 실예에 의한 해석결과 분석

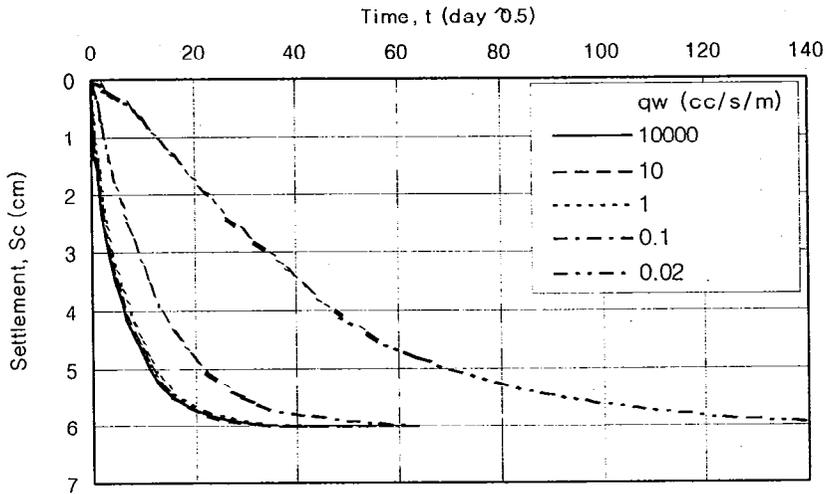
본 연구에서 해석방법으로 배수재의 통수능을 고려한 압밀해석을 실시하여 그 결과를 분석하였다.

해석결과는 그림 3.14 a)와 같이 어느 정도 이상의 큰 통수능에서는 3가지 해석결과가 잘 일치한다. 그러나 압밀지연에 영향을 미치는 적은 통수능에서는 해석결과가 차이가 크다.

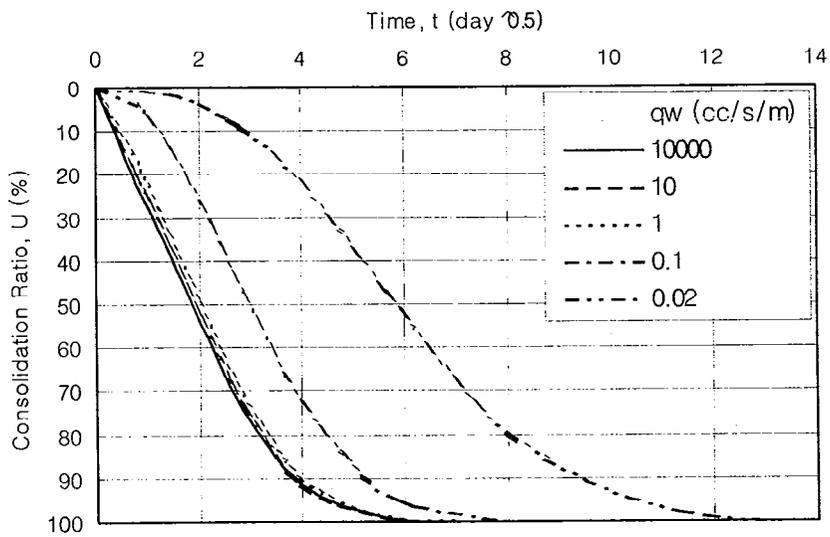
압밀과정동안 압밀배수량의 변화 즉 배수재를 통하여 흐르는 통수량의 시간별 변화를 보면 그림 3.14 b)와 같이 통수량이 압밀초기에는 매우 크지만 시간이 경과하면서 급격히 감소하므로, 대부분의 압밀지연은 압밀초기에 발생되고 압밀 후반에는 흙에서 배수되는 물의 양이 적어 지기 때문에 압밀지연은 크게 발생되지 않는다. 그러나 기존 해석방법들이 후반까지도 압밀지연이 발생하는 것으로 고려하였기 때문에 통수능이 적은 경우 압밀지연이 더 크게 계산되는 것으로 판단된다.

그림 3.15 a)는 배수재의 통수능(q_r)이 부족하여 압밀지연이 발생하는 경우와 통수능이 충분히 큰 배수재의 경우 각 층의 배수재내 통수량(q)의 변화를 나타낸 것이다. 통수능 $q_r=100\text{cc/s}$ 일때는 그림 3.15 b)와 같이 전층이 압밀초기에 큰 통수량을 보이지만 시간이 경과하면서 급격히 감소하는 경향을 보일 뿐 통수능에 의한 압밀지연현상은 볼 수 없다.

그러나 통수능이 $q_r=0.01\text{cc/s}$ 로 부족한 경우는 그림 3.15 c)와 같이 배수재의 통수능이 부족하여 압밀초기에는 상층부의 물만 배제되고 상층부의 물이 어느 정도 배제된 뒤에 하층부의 물이 서서히 배제되는 현상으로 압밀지연 영향이 매우 크게 작용되고 있음을 알 수 있다.

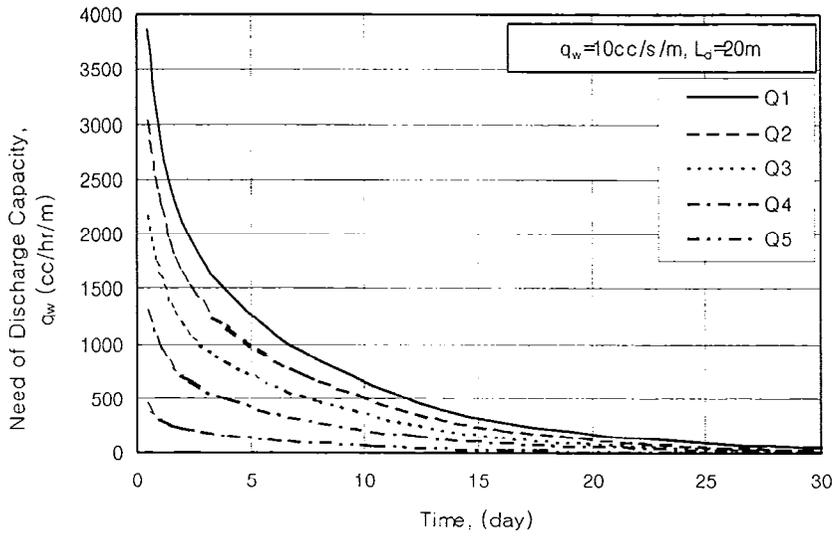


a) 시간-침하량 곡선

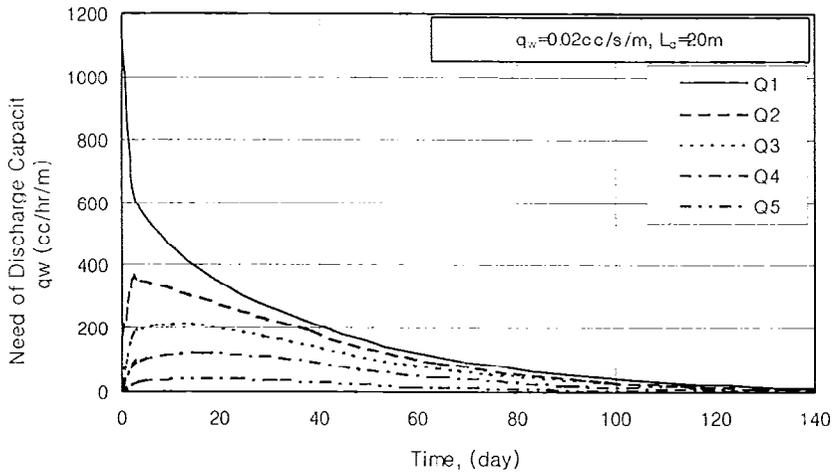


b) 시간-압밀도 곡선

그림 3.14 필터매트의 통수능에 따른 압밀지연 특성



a) 필터매트 통수능이 충분히 큰 경우



b) 통수능이 압밀지연을 일으키는 경우

그림 3.15 통수능의 크기별 배수재내 유량의 변화비교

3. 필터매트의 소요통수능 평가

가. 흙의 압밀계수와 배수재 길이를 고려한 소요통수능

연직배수공법에서 압밀지연을 일으키지 않는 소요통수능을 결정하기 위하여, 흙의 압밀계수와 배수재의 길이별로 소요통수능을 고려한 압밀 해석을 실시한 결과 그림 3.16과 같은 통수능별 압밀도 90%에 도달하는 압밀소요시간 관계를 얻었다.

그림에서 압밀지연을 발생시키지 않는 소요통수능은 로그스케일의 압밀계수와 처리심도에 비례하는 관계를 보이고 있다. 압밀도 90%에 도달하는 압밀소요시간의 압밀지연이 5% 범위내인 소요통수능값을 그림에 점으로 나타내었다.

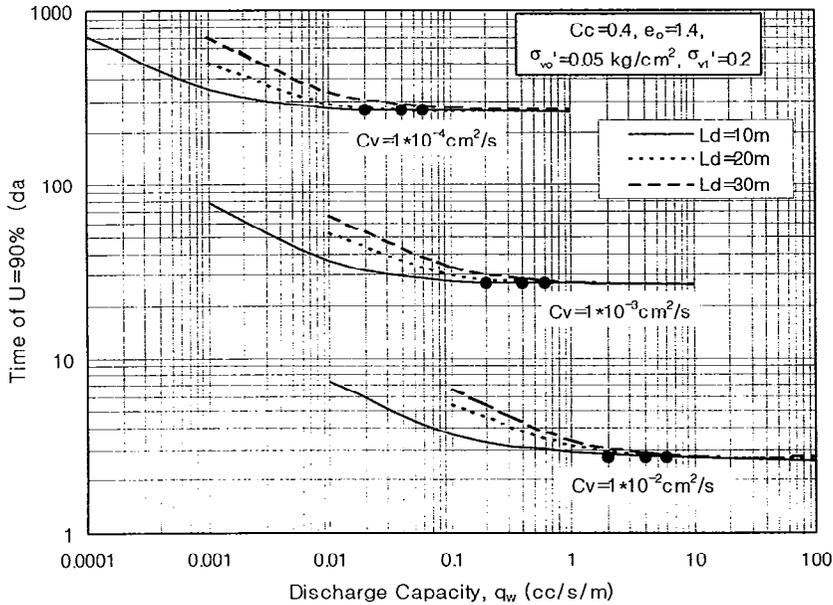


그림 3.16 압밀계수와 배수재의 길이별 소요통수능의 결정

$$(C_c=0.4, e_o=1.4, \Delta \sigma_v'=0.18 \text{ kg/cm}^2)$$

나. 소요통수능의 결정

그림 3.16에서 압밀도 90% 압밀소요시간의 압밀지연이 5%범위내인 소요통수능값을 흙의 압밀계수와 연약심도의 관계식으로 나타내면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$q_{va} = c_v \times L \times 20 \quad (3.27)$$

- 여기서 q_{va} : 소요통수능 in $i=1(cc/s/m)$
 c_v : 비교란조건의 흙의 압밀계수(cm^2/s)
 L : 필터매트 최대배수거리(m)
 i : 동수경사

이며, 이를 그림으로 나타내면 그림 3.17과 같다.

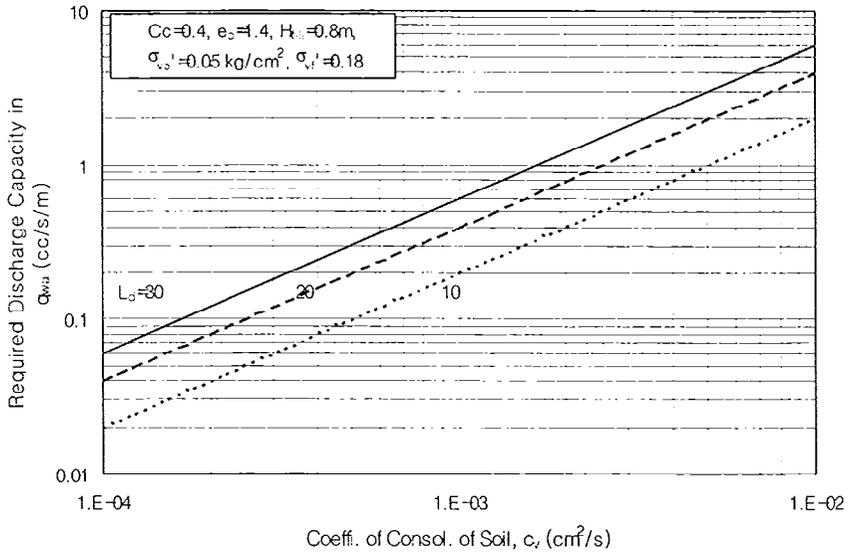


그림 3.17 압밀계수와 배수재의 길이별 압밀지연시간 5%이하의 배수재의 소요통수능

상기 제안값의 타당성을 검증하기 위하여 조건은 다소 다르지만 그림 3.18과 같은 조건에 대한 필터매트의 소요통수능을 Giroud(1981)가 제안한 공식으로 표 3.2 와 같은 조건에 대하여 계산하고, 본 제안 해석방법의 분석결과와 비교하였다.

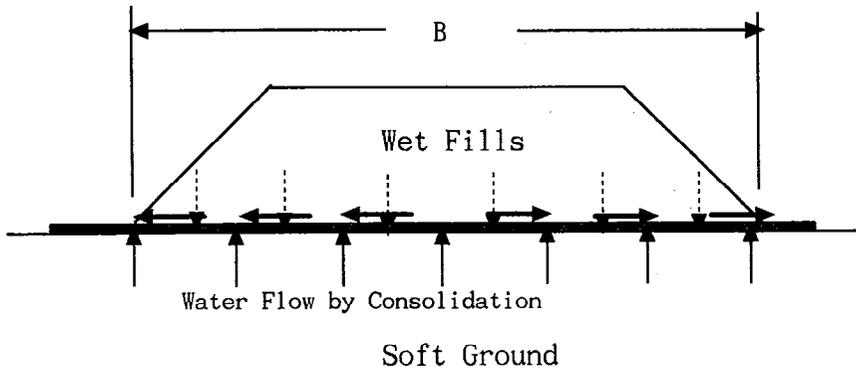


그림 3.18 Giroud(1981)제안 필터토목섬유 통수능 계산 모형도

Giroud(1981)가 제안한 공식은 다음식과 같다.

$$q_{wa} = \frac{B^2 k_s}{(c_v T)^{1/2}} \quad (3.28)$$

여기서 q_{wa} : 소요통수능 in $i=1$ ($m^3/min/m$)

c_v : 흙의 압밀계수 (m^2/min)

B : 필터매트의 폭 (m), (필터매트 최대배수거리의 2배)

k_s : 흙의 투수계수 (m/min)

T : 상재성토에 걸리는 시간 (min)

표 3.3 Giround(1981)제안 필터토목섬유 통수능 계산조건

c_v (cm ² /s)	k_s (m/min)	T (day)	B (m)
0.01	2.63×10^{-6}	5	20, 40, 60
0.001	2.63×10^{-7}	10	"
0.0001	2.63×10^{-8}	50	"

$$k_s = \frac{0.434 C_c c_v}{\gamma_w (1 + e_o) \sigma_v'}$$

이 공식은 기초지반에서 배제되는 물만 배수시키는 조건이지만, 고탍수비토를 성토하면 그림 3.18과 같이 성토재료에서도 물이 압밀배수되므로 소요통수량을 상기 계산값에 2배를 적용하였다.

그림 3.19를 보면 배수거리와 압밀계수에 따라 소요통수량의 값이 약간의 차이는 있지만 유사한 결과를 보이고 있다.

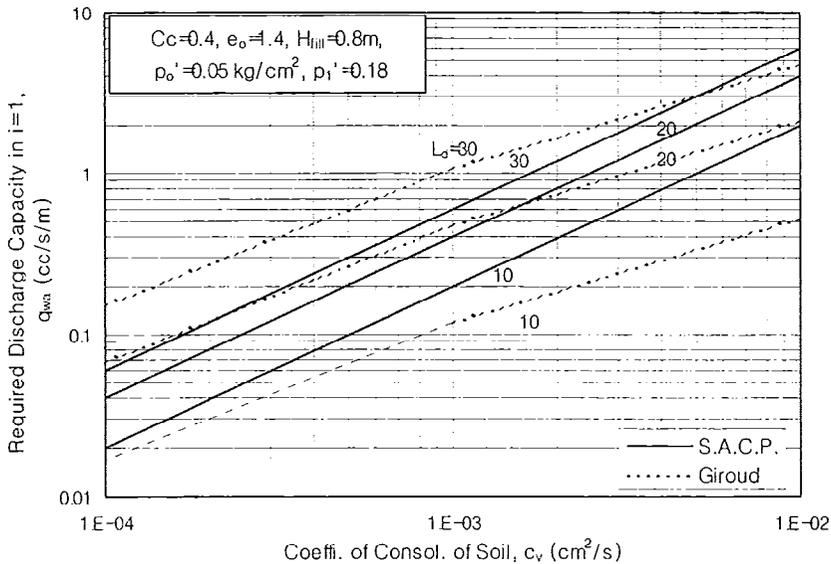


그림 3.19 해석방법별 소요통수능 비교

4. 필터매트의 통수능시험

가. 시험방법

고함수비 연약지반토의 성토시 흙으로부터 배제되는 물은 필터매트를 통하여 배제된다. 필터매트의 통수능이 충분히 커서 흙에서 배수되는 이 물을 흙의 압밀속도에 영향을 주지 않고 필터매트가 배제시킬 수 있는가를 확인할 수 있는 통수능확인시험이 필요하다.

필터매트의 통수능시험은 ASTM D 4716-87에 규정되어 있다. 이 규격에서 제시하고 있는 시험기기를 그림 3.20과 같이 제작하여 현장에서 발생할 수 있는 수직하중의 구속조건으로 통수능시험을 실시하였다.

필터매트 상하접촉부에 현장조건과 같이 고함수비($\omega_n=50\%$)의 해성점토를 사용하였다. 시험에 사용한 필터매트는 국내에서 생산되어 현장에서 사용되고 있는 토목섬유를 사용하였다.

상재구속압력은 수직압밀압력 0.3, 0.6, 1, 1.5, 2.0 kg/cm²으로 단계적으로 가하면서 각 하중단계의 압밀완료시점에서 동수경사 $i=0.3\sim 9$ 조건으로 물을 통수시켜 단위시간당 통수량을 측정하는 통수능시험을 실시하였다.

각 하중단계의 압밀시간은 24시간동안 압밀시킨후 통수시험은 1~24시간 동안 통수시키면서 통수량을 측정하였다. 통수량측정은 매스시린더와 디지털 저울을 동시에 사용하였다.

나. 필터매트 구속을 위한 흙시료

시험에 사용한 시료는 표 3.4와 같은 해성퇴적점토를 사용하였다. 현장에서 매트위에 놓이는 흙은 거의 완전히 교란되는 것으로 보고 교란조건으로 사용하였다.

표 3.4 압밀 및 투수시험시료의 물리성

시료명	이원 점토
채취위치	충남 태안군 이원면
흙 분류(U.S.C.S.)	CH
함수비, ω_n (%)	58.3
액성한계, LL (%)	52.1
소성지수, PI (%)	27.5

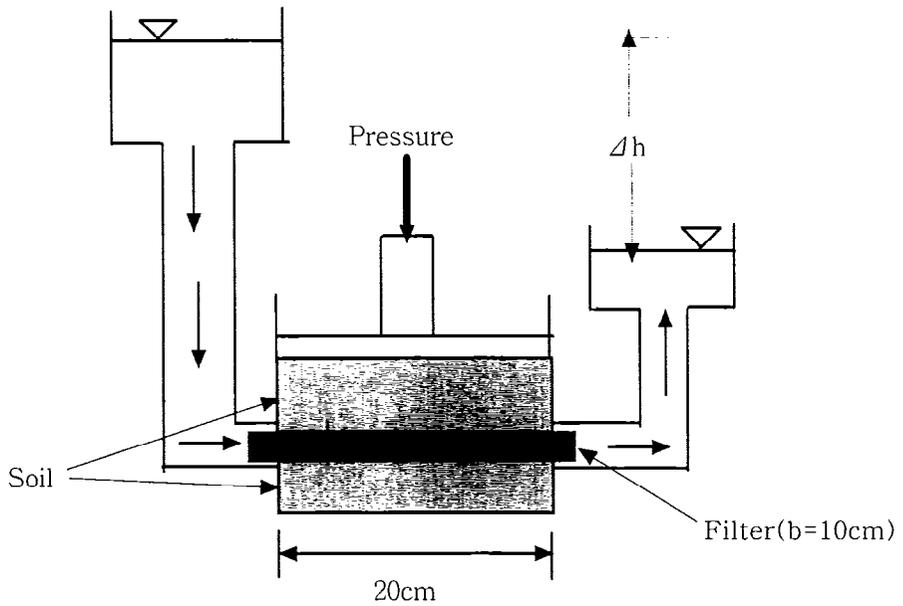


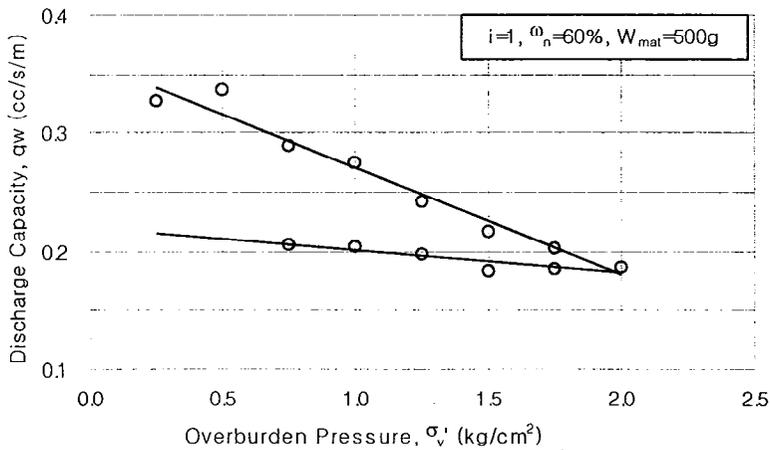
그림 3.20 필터매트 투수능시험장치

다. 통수능시험결과

필터용 토목섬유에 대한 통수능시험결과 통수능은 그림 3.21 a)와 같이 상재하중이 증가하면 크게 감소하는 경향을 가지며, 큰 상재하중으로 압밀된후 상재하중이 제거되면 통수능이 약간 증가하지만 그 양이 매우적어 처녀 압밀조건보다는 매우 적은 값을 보이고 있다.

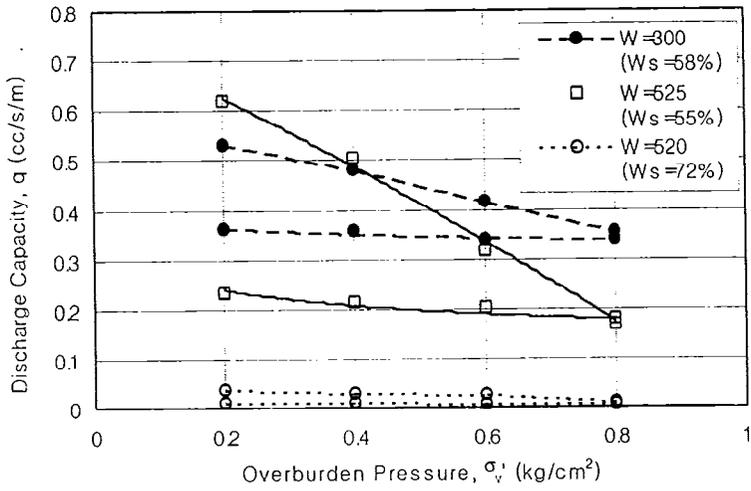
필터매트의 종류와 단위면적당 무게별 통수능의 차이는 그림 3.21 b)와 같이 매우 큰 차이를 보이고 있으며, 그림 3.21 c)와 같이 필터매트위와 아래에 놓이는 흙의 함수비에 따라 통수능의 변화가 매우 크다.

동수경사의 크기에 따른 필터매트의 통수능 변화를 보기 위하여 같은 상재구속하중조건(σ_v)에서 동수경사를 변화시켜가면서 통수능시험을 실시한 결과 그림 3.22와 같이 통수량이 동수경사에 비례하는 관계를 보이므로 통수능을 고려한 압밀해석에서 동수경사에 관계없이 통수능 일정조건으로 해석을 할 수 있다는 결론을 얻었다.

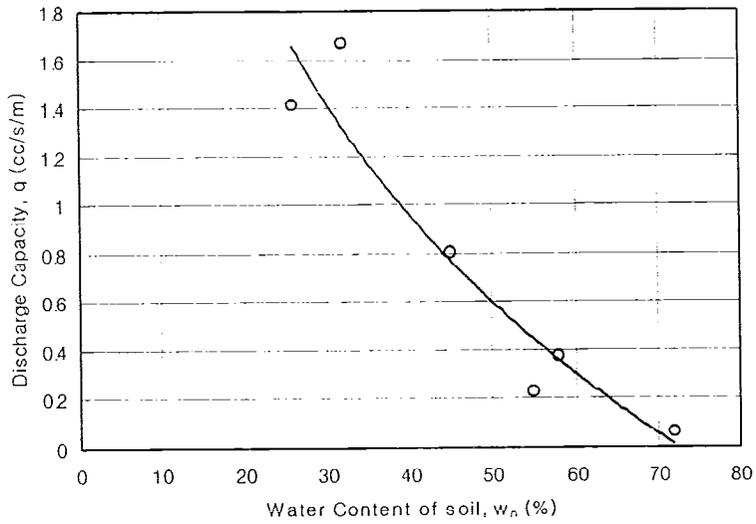


a) 구속하중조건별 필터매트의 통수능변화

그림 3.21 각 조건별 필터매트의 통수능변화 특성(I)

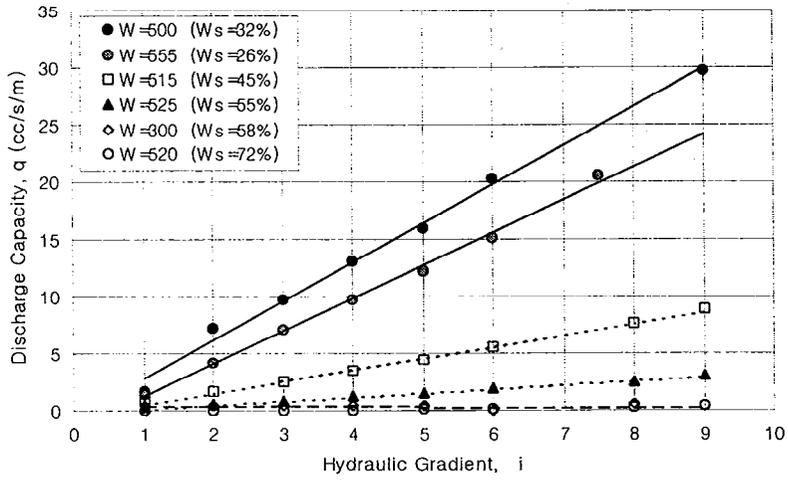


b) 구속하중조건별 필터매트와 흙의 함수비별 통수능변화

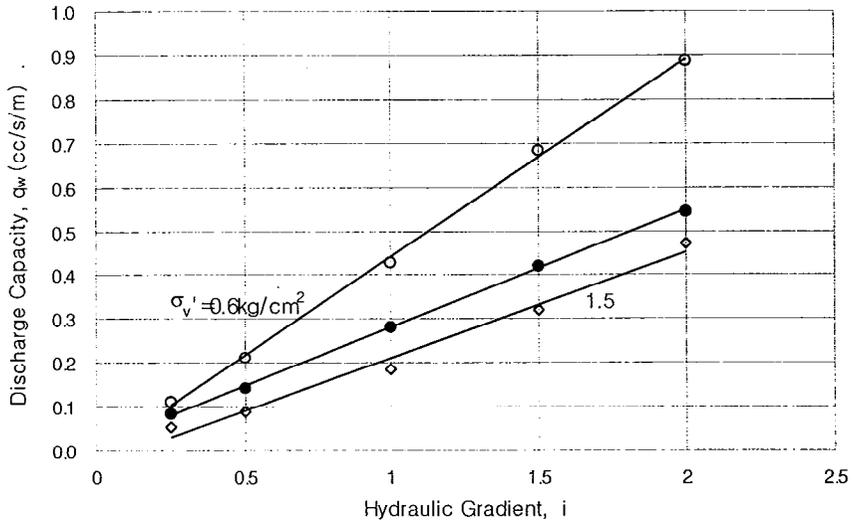


c) 흙의 함수비별 필터매트의 통수능변화

그림 3.21 각 조건별 필터매트의 통수능변화 특성(II)



a) 높은 동수경사 조건



b) 낮은 동수경사 조건

그림 3.22 동수경사 조건별 필터매트 통수능변화

라. 필터매트용 토목섬유 선정조건

고함수비토의 성토에서 필터매트를 이용한 배수압밀성토공법에서 중요한 것은 충분한 통수능을 갖는 토목섬유매트를 선정하는 것이 중요하다. 필터매트의 통수능은 기초지반 및 성토되는 흙의 종류와 현장함수비 및 구속하중조건에 따라 차이가 크므로 현장조건으로 통수능시험을 실시하여 소요의 통수능을 갖는 토목섬유의 선정이 필요하다.

특히 시중에 생산되고 있는 필터매트용 토목섬유는 그 종류가 다양하고 단위면적당 무게도 다양하게 생산되고 있으며, 이들의 통수능의 차이가 크므로 통수능시험을 통하여 소요통수능을 갖는 재료의 선택이 필요하다.

제 3항에서 해석한 필터매트의 소요통수능은 압밀계수 $c_v=0.001\text{cm/s}$, 최대 배수거리 30m일 때 $q_{va}=0.6\text{cc/s/m}$ 이상이어야 하며, 제 4항에서의 통수능시험결과는 이보다 큰 통수능을 갖는 필터매트도 많지만 적은 것도 많으므로 배수압밀성토공법에서 필터매트에 대한 통수능확인시험은 매우 중요하다.

제 3 절 압밀배수 강도증가특성을 고려한 성토설계방법

1. 압밀소요시간 결정

가. 수평필터매트의 소요통수능이 충분히 큰 조건

배수압밀성토공법에서 통수능이 충분히 큰 수평필터매트를 사용하는 조건에서는 필터매트에서의 물의 흐름에 의한 성토체내 압밀배수에 전혀 지연영향이 없으므로, 필터매트의 통수능을 고려하지 않은 성토체 내의 압밀해석만 하면 된다.

고함수비 흙을 단계적으로 성토할 때 각 단계별 압밀침하량은 교란조건외 압축지수(C_c)와 교란후 자연함수비 조건의 선행압밀하중(σ_{vo}')을 적용하여 압밀침하량을 식 (3.29)로 구하면 된다.

$$S_c = \frac{C_{cd}}{1 + e_o} H \log\left(\frac{\sigma_{vl}}{\sigma_{vo}}\right) \quad (3.29)$$

여기서,

S_c : 각 성토단계별 압밀도 100%조건 압밀침하량

C_{cd} : 교란조건의 압축지수

e_o : 초기 간극비

H : 각 성토층의 두께

σ_{vo}' : 교란후 자연함수비 조건의 선행압밀 연직유효응력

σ_{vl}' : 각 성토단계별 각 성토층의 전 연직응력

(지하수위가 성토단면 이하이고 간극수압이 완전소산조건)

그림 3.23 으로 부터 교란후 자연함수비 조건의 선행압밀하중(σ_{vo}') 에 대하여 다음과 같은 상관식을 구할 수 있다.

$$\sigma_{vo}' = 10^{(e_{i=1} - e_o) / C_c} \quad (3.30)$$

여기서

$e_{i=1}$: 압밀곡선에서 $\sigma_v' = 1 \text{ kg/cm}^2$ 일 때 간극비

e_o : 초기 간극비

교란된 흙의 압밀침하량을 구할 때 선행압밀하중의 결정은 매우 중요하다. 교란후 압축지수가 감소하기 때문에 선행압밀하중의 감소량을 고려하지 않고 압축지수만을 고려하여 계산하면 실제 침하량보다 매우 적은 침하량이 예측되기 때문이다.

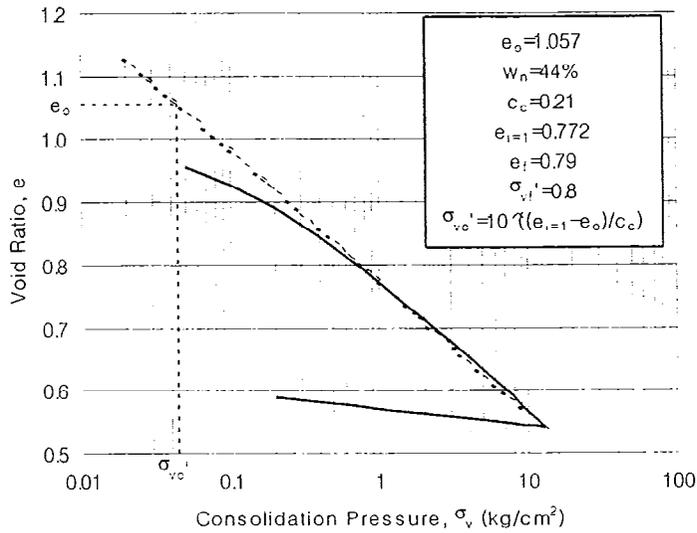


그림 3.23 교란된 흙의 압밀침하곡선과 선행압밀하중 결정

각 성토단계별 압밀소요시간은 Terzaghi 압밀이론의 다음 식으로 구할 수 있다.

$$t = \frac{T H^2}{c_v} \quad (3.31)$$

- 여기서, t : 압밀 소요시간
 c_v : 교란조건의 압밀계수
 H : 배수거리

상기 식으로 각 성토단계별로 성토후 각 압밀도별 소요시간을 구하여 시간-압밀도 및 시간-침하량곡선을 구하고 소요압밀도에 도달하는 시간을 구한다.

즉 다음단계 성토를 하기 위하여 필요한 전단강도를 갖는 소요압밀도가 결정되면, 그 압밀도에 도달하는 시간동안 방치한 후 다음단계 성토를 하면 사면활동파괴에 대하여 안전하게 성토를 진행할 수 있게 된다.

나. 수평필터매트의 소요통수능이 부족한 경우

각 성토단계별 압밀침하량계산은 동일 하지만 소요압밀도에 도달하는 시간은 필터매트에서 물을 배수하기 위하여 필요한 손실수두만큼을 고려하여 압밀해석을 실시하여야 한다.

필터매트의 통수능이 소요통수능보다 적은 경우 소요압밀도에 도달하는 시간은 통수능이 충분히 큰 경우보다 증가하게 되므로 다음 단계 성토시기 결정에서 통수능을 고려한 압밀해석이 필요하게 된다.

이 경우 본 연구에서 제안한 필터매트의 통수능을 고려할 수 있는 압밀해석방법으로 압밀해석을 실시하여 소요압밀도에 도달하는 시간을 결정하는 것이 필요하다.

여기서 성토단면의 압밀에 지장을 주지 않는 소요통수능이 제 2절 3항에서 제시되었으므로 그 이상의 필터매트를 선정하면 통수능을 고려한 압밀해석의 번거로움이 해소되고 압밀시간도 지연되지 않으므로 소요통수능을 갖는 필터매트의 선정이 중요하다.

2. 압밀도에 따른 강도증가특성

흙은 구속하중을 받아 압밀이 진행되면서 흙속의 과잉간극수가 배수되어 밀도가 증가되면서 전단강도가 증가된다. 전단강도의 증가는 흙사이에 유효응력의 증가에 의해 마찰력이 증가하기 때문으로 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

고함수비토를 단계성토하면 각 성토단계마다 증가하는 상재하중은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta \sigma_v = \gamma_t \cdot \Delta h$$

여기서,

$\Delta \sigma_v$: 상재증가하중

γ_t : 흙의 단위중량

Δh : 1층 성토고 이다.

성토에 의해 증가되는 상재하중($\Delta \sigma_v$)은 처음에는 과잉간극수압으로 작용되지만 압밀이 진행되면서 과잉간극수압이 소산되면서 유효응력이 증가된다. 이렇게 유효응력이 증가하면 단위중량과 전단강도가 증가된다.

흙이 임의의 유효응력조건으로 압밀이 완료된 시점의 비배수전단강도는 그림 3.24의 모아원의 관계로부터 구할 수 있다.

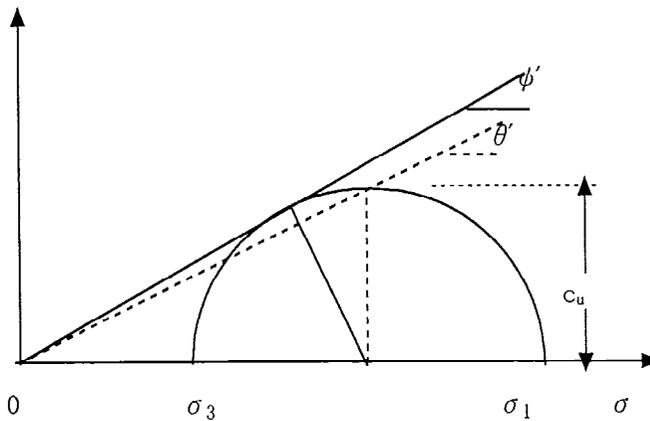


그림 3.24 CU삼축압축시험에서 전응력개념의 모아원

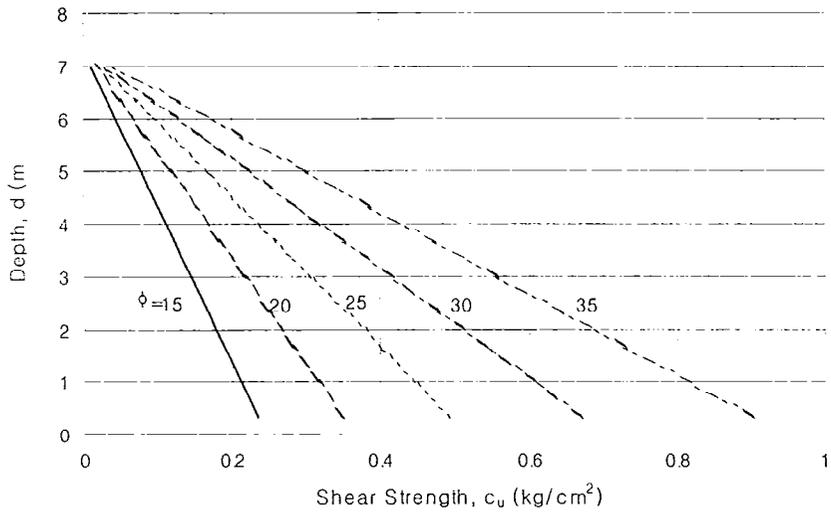
여기서, Jaky의 공식을 적용하여 $k_o = 1 - \sin \phi'$ 로 보고, 압밀비배수조건인 삼축압축시험의 압밀압력 σ_3' 가 해석의 편의를 위하여 현장조건(k_o)의 평균주응력과 같다고 보고, $\sigma_3' = \frac{1}{3}(\sigma_v' + 2\sigma_h')$ 라고 하면

$\sigma_3' = (1 + \frac{2}{3} \sin \phi') \sigma_v'$ 이므로 σ_3' 조건의 모아원으로 부터

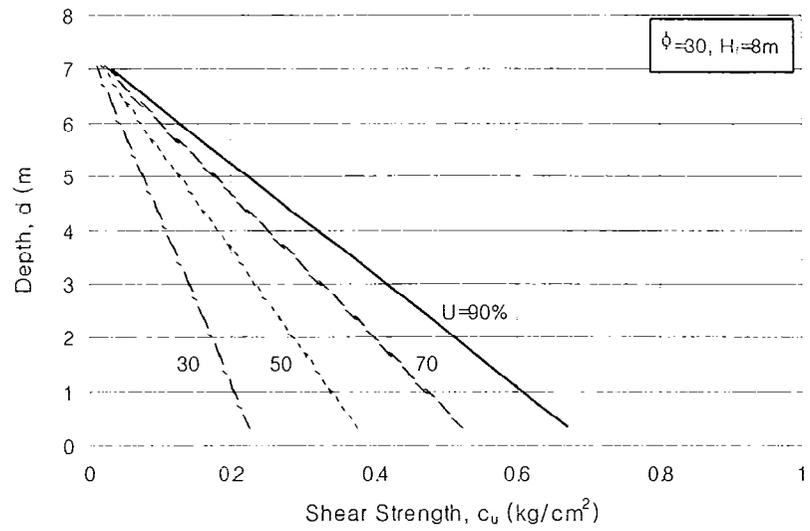
$$c_u = (1 + \frac{2}{3} \sin \phi') \frac{\sin \phi'}{(1 - \sin \phi')} \sigma_v' \text{ 이 된다.}$$

고함수비토를 성토후 압밀이 진행되어 유효응력(σ_v')이 증가하면 비배수전단강도는 증가하게 된다. 유효응력의 증가는 압밀도와 비례하므로 성토속도를 최대한 늦은 속도로 하면 압밀이 많이 진행되어 전단강도가 그만큼 많이 증가하여 성토가 가능하게 됨을 알 수 있다.

성토고 8m을 필터매트를 이용하여 각 성토층의 평균압밀도 U=90%가 되는 속도로 압밀배수공법으로 단계성토하였을 때 내부마찰각(ϕ')별 각 성토층의 비배수전단강도는 그림 3.25 a)와 같으며, 내부마찰각($\phi' = 30^\circ$)조건에 대한 압밀도별, 각 성토층의 비배수 전단강도를 계산한 결과는 그림 3.25 b)와 같다.



a) 압밀도 $U=90\%$ 조건의 내부마찰각(ϕ) 별 비배수전단강도



b) $\phi' = 30$ 도 조건의 압밀도별 비배수전단강도

그림 3.25 8m Wet Fills 조건의 비배수전단강도 분포

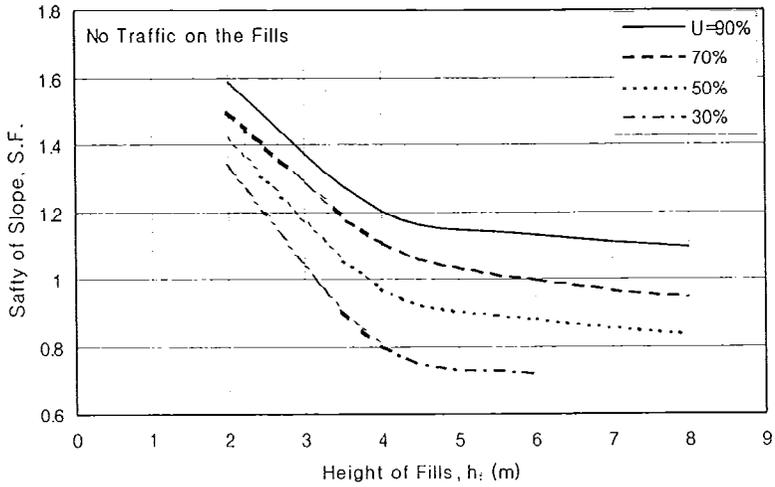
3. 강도증가특성을 고려한 사면안정해석

고함수비의 연약지반토를 성토할 때 상재하중과 압밀도에 따라 각 성토층의 전단강도가 다르므로 압밀도를 고려하여 사면안정해석을 하여야 한다.

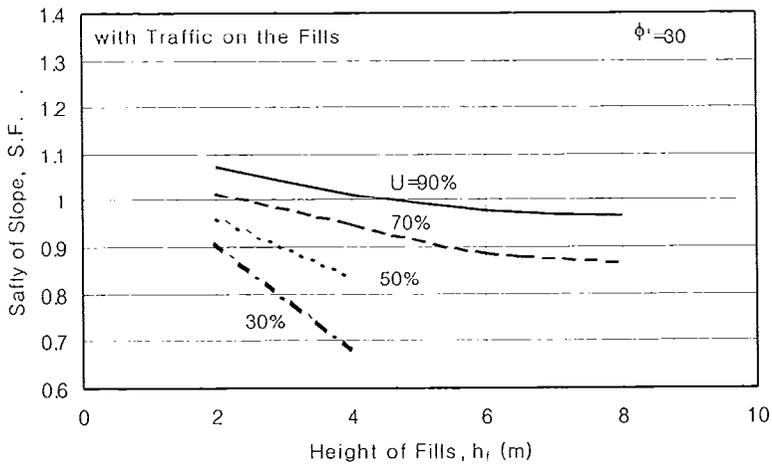
압밀비배수삼축압축시험의 전응력개념의 내부마찰각이 30° 인 조건에 대하여 각 압밀도별 각 성토층의 전단강도가 그림 3.25와 같은 조건에 대하여 사면안정해석을 실시한 결과 그림 3.26, 3.27과 같은 결과를 얻었다.

그림 3.26 a)는 차량하중이 없는 조건이고 3.26 b)는 차량하중이 있는 조건으로 압밀도가 적을수록 사면안정도가 적은 값을 보이고 있다. 성토속도를 소요의 압밀도에 도달하는 속도로 성토를 하면 높은 성토고는 어렵지만 낮은 성토고의 성토는 시공이 가능함을 보여주고 있다. 그러나 그림 3.26 b)와 같이 차량이 주행하여야 하는 성토단면인 경우 압밀배수공법에 의한 고함수비토의 성토재료로서 사용은 어렵다는 것을 보여주고 있다.

전응력개념의 내부마찰각의 크기별 압밀배수공법에 의한 고함수비흙의 성토단면의 사면안정도를 보면 그림 3.27과 같은 결과를 얻었다. 압밀도 $U=90\%$ 조건으로 시공을 하는 경우 차량하중이 없는 조건은 성토고 2m까지 가능하지만, 차량이 주행하는 조건은 압밀배수공법만으로 고함수비 연약지반토의 성토단면의 사면안전을 1.2를 얻기 어려운 것으로 해석되었다.

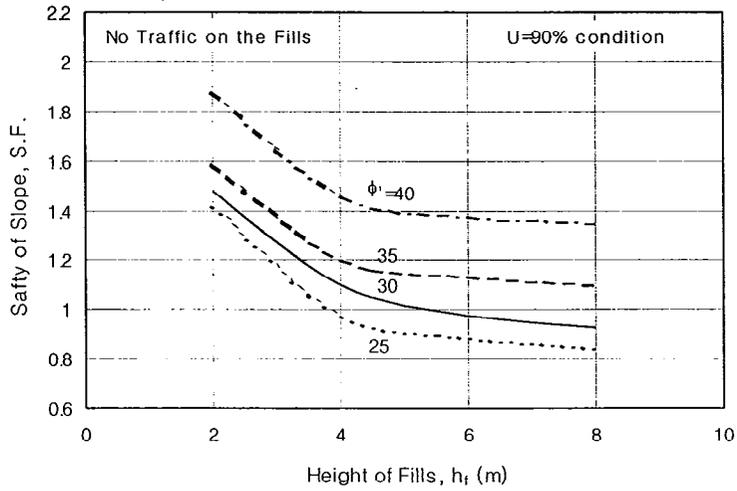


a) 차량하중이 없는 조건

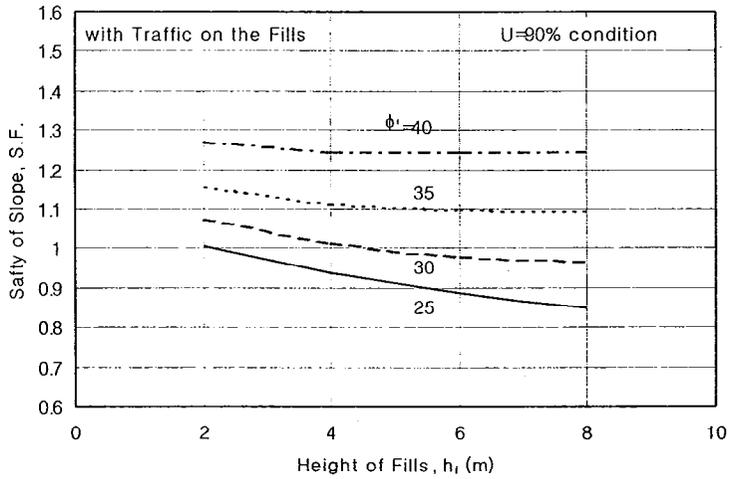


b) 차량하중이 있는 조건

그림 3.26 각 성토층의 압밀도별 사면안정도
(성토재의 CU시험의 전응력개념 $\phi = 30$ 도조건)



a) 차량하중이 없는 조건



b) 차량하중이 있는 조건

그림 3.27 각 성토층의 전응력개념 내부마찰각별 사면안정도
(압밀도 90%조건)

4. 필터매트를 이용한 압밀배수 성토공법의 한계 평가

고함수비 연약지반토를 적절한 속도로 단계성토를 하여 소요의 압밀도가 도달되도록 성토를 하면 높은 성토고는 어렵지만, 차량주행이 없는 낮은 성토고에는 연약지반토의 성토재료활용이 가능함을 보여주고 있지만, 그림 3.27 b)을 보면 차량하중이 있는 조건은 압밀배수공법만으로는 고함수비토의 성토재료로서 사용은 어려운 것으로 분석되었다.

압밀도 90%에 도달하는 시간을 보면 전응력개념의 내부마찰각이 25° 이상의 흙은 투수계수도 다소 큰 편으로 공사기간이 허용된다면 성토고 2m까지도 적용할 수 있는 것으로 분석되었지만 실용적인 면에서 차량주행이 필요하고 실제 시공도 소요압밀도에 도달하는 동안 성토단면 표층부분은 대기건조되어 강도가 크게 증가되므로 압밀배수와 대기건조의 효과를 동시에 활용한 성토공법이 효과적이며, 2가지 효과를 고려한 해석방법과 설계 및 시공방법이 필요하다.

제 4절의 대기건조공법편에서 압밀배수공법을 함께 고려한 대기건조공법을 설명하고자 한다.

제 4 절 결 론

고함수비의 연약지반토를 굴착하여 성토하면 공사과정에서 흙이 완전히 교란되는 조건이므로, 성토단면내의 압밀침하해석에서 흙의 교란조건을 고려한 해석이 필요하다. 교란된 성토단면내 흙의 압밀계수와 투수계수의 변화를 규명하기 위하여 비교란과 교란시료에 대한 압밀시험과 투수시험을 실시하였으며, 이 특성과 필터매트의 통수능을 고려한 압밀해석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 비교란시료와 교란시료에 대한 압밀시험과 투수시험을 실시한 결과 비교란시료는 압밀계수 일정조건을 실용적인 면에서 만족하지만, 교란시료는

압밀계수 일정보다는 오히려 투수계수 일정조건에 가까운 결과를 얻었다.

성토중 교란된 성토단면의 압밀해석에서는 일반적으로 가정하고 있는 압밀계수 일정조건을 만족시키지 못하므로 각 하중조건에 압밀계수를 선택하여 압밀해석을 하여야 한다

또한 교란되면 선행압밀하중이 크게 감소하므로 교란조건으로 시험을 하여 구한 선행압밀하중과 압밀계수를 사용하여 압밀해석을 하여야 한다는 결론을 얻었다.

2) 교란과 비교란시료에 대한 압밀 및 투수시험결과를 Terzaghi 압밀이론으로부터 유도한 유효응력과 투수계수의 상관식에 대입하여 성토단면내 투수계수는 압밀계수 c_v , 압축지수 c_c , 초기간극비 e_0 , 유효응력 σ' , 교란과 비교란의 투수계수가 같은 값을 갖는 유효응력 σ_f' 값과의 관계로서

$$k_v = \frac{0.434 C_c c_v}{\gamma_w (1 + e_0) \sigma_f'} \left(\frac{\sigma'}{\sigma_f'} \right)^x \text{의 경험식을 얻을 수 있었다.}$$

여기서 x 는 교란정도에 따라 결정되는 지수이며, 완전교란시 $-0.5 \sim -0.6$ 의 값을 갖고 완전 비교란시 -1 의 값을 갖는 결과를 얻었다.

3) 본 연구에서 제안한 필터매트의 통수능을 고려한 압밀해석방법으로 압밀해석을 실시한 결과, 어느값 이상의 통수능에서는 압밀지연의 영향이 전혀 없으나 이 값 이하에서는 압밀소요시간이 급속히 증가하는 경향이므로 이 값이상의 통수능을 갖는 배수재를 선정하는 것이 매우 중요하다는 결론을 얻었다.

4) 흙의 압밀계수와 필터매트의 배수거리만을 고려하여 배수재의 소요통수능을 결정한 결과 압밀지연시간 5%를 허용치로 할 때 필터매트의 소요통수능은 $q_{va} = c_v \times L \times 20$ (cc/s/m) 이상이면 되는 상관식을 얻었다.

시중에 생산되고 있는 필터매트의 통수능 시험결과 통수능 $q=0.15 \sim 20$ cc/s/m로 그 값의 차이가 매우 크므로, 통수능시험을 하여 소요통수능이

상의 값을 갖는 필터매트의 선정이 필요하다.

5) 압밀비배수 삼축압축시험의 전응력개념의 내부마찰각이 25° 이상의 연약지반토는 투수계수도 다소 큰 편으로 공사기간이 허용된다면 성토고 2m이하의 차량주행이 없는 성토단면에 사용할 수 있는 것으로 분석되었다.

그러나 차량주행이 필요하지 않은 단면은 거의 없고, 실제 시공중 소요압밀도에 도달하는 동안 성토단면 표층부분에서 대기건조가 진행되므로 압밀배수와 대기건조의 효과를 동시에 활용한 성토공법이 효과적이며, 이 2가지 효과를 고려한 해석방법과 설계 및 시공방법이 필요하다는 결론을 얻었다.

제 4 장 대기건조 성토공법

제 1 절 대기건조에 의한 현장함수비 변화

1. 대기건조에 의한 심도별 함수비변화 해석방법 전개

가. 해석의 목적

고함수비의 흙일지라도 대기건조시켜 함수비를 낮추면 성토재료로 충분히 사용할 수 있다. 그러나 함수비를 낮추는 대기건조 공법을 적용하기 위하여는 ① 대기건조시켜야 하는 목표함수비 ② 대기건조방법(포설두께, 발갈이 등) ③ 소요 대기건조기간등의 결정 ④ 계절적 영향 고려방법등의 정립이 필요하다.

대기건조에 의한 흙의 함수비변화에 대하여 많은 학자들이 연구를 하였으나, 고함수비의 흙을 성토하거나 건조장에 포설하고 대기건조시킬 때 외부 조건 즉 성토바닥으로 부터의 물(모관수)의 공급여부, 필터매트 등에 의한 배수여부 및 강우조건 등을 고려하여 포설두께별 흙의 함수비변화를 예측할 수 있는 해석방법이 필요하다.

포설두께별 경계조건을 고려한 심도별 함수비변화를 해석할 수 있는 방법이 제시되면, 허용기간내 소요함수비까지 건조시키기 위하여 필요한 포설두께를 결정할 수 있을 것이다. 또한 우천시 빗물 차수여부 및 우천일수의 고려방법, 바닥면의 차수여부 및 배수여부등을 결정하기 위하여 이들 영향요소를 고려하여 함수비 변화를 예측할 수 있는 해석방법이 필요하다.

나. 대기건조에 관한 문헌고찰

고함수비의 흙을 대기건조시켜 성토재료로 활용한 사례는 많으나, 이에 대한 기록과 대기건조시 함수비의 변화의 실측 및 다짐공정관리 기록

은 많지 않다. 외국의 고풀수비의 흙을 대기건조시켜 성토재료로 사용한 공사기록을 보면 ① Lieszkowszky(1979)은 Fort Creek Dam 공사에서 고소성 점토를 두께 15~20cm로 포설하여 1일동안 건조시킨결과 40%의 ㅅ수비를 30~34%로 건조시킬수 있었다고 하며, ② Kuno(1979)는 고소성점토 관동-를을 서레질 등으로 ㅅ수비 20%까지 낮추어 도로제체 성토로 사용하였으며, ③ Grace and Green(1979)은 Kenya의 Sesuma Dam에 대기건조방법을 성공적으로 적용하였다고 한다.

대기건조에 의한 흙의 표면에서 발생하는 물의 흐름은 모관작용(Capillary)과 확산작용(Diffusion)에 의해 발생된다. 여기서 모관작용은 granular soils에서 주도적인 영향요소이고, 확산작용은 fine grained soils에서 주도적인 영향요소라고 한다.

건조과정의 분석은 대기건조현상의 계측조사자료에 의존하고 있다. 확산 건조과정의 수학적 분석은 확산방정식에 기초하고 있다.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dz} \left(D \frac{dm}{dz} \right) \quad (4.1)$$

여기서 m : Volumetric moisture content

t : Time (days)

z : Vertical Co-ordinate (m)

D : Soil moisture diffusivity (m²/day)

등온조건에 의한 전형적인 흙의 건조곡선은 그림 4.1과 같다. 그림에서 점 A는 초기ㅅ수비(Mo), 점 B는 한계ㅅ수비(Mcr) 그리고 점 C는 평형ㅅ수비(Me)를 나타낸다.

건조는 두 단계로 구분되어진다. 첫 번째 단계 (A-B)는 건조가 일정한 속도로 일어나는 일정 건조비기간(Constant rate drying period)이라 하고, 두 번째 단계 (B-C)는 더 이상 건조되지 않는 te시간까지 건조속도가 감소

하는 기간(falling rate drying period)이라 한다.

흙의 건조는 흙 표면에 대기 건조력(potential evaporation), 초기함수비, 층두께, 흙 수분확산력의 역할에 의해 의존된다. 흙입자의 크기와 조직은 흙속의 수분변화특성과 대기건조 특성에 크게 영향을 미친다.

Gardener & Hillel(1962)와 Keey(1972)은 조립자로 형성된 흙은 세립토보다 대기건조 속도가 늦다고 하였다.

침투압밀과 자중압밀, 지하수위 저하 및 지표면의 건조수축을 함께 고려할 수 있는 방법으로서, Abu-Hejleh(1995)는 Gibson(1967)의 압밀이론에 몇 가지 가정조건을 적용하고, 건조수축에 관한 변수를 추가하여 수정된 침하해석 이론을 제시하였다. 그는 지반의 건조수축 특성을 해석하기 위해 가정조건을 도입하였다. 즉, 간극비가 수축한계에 도달될 때까지 포화상태가 유지되고, 후에 건조된 흙은 단단해지며, 흙은 수평방향으로 일정하고, 물과 토립자는 비압축성이며, 토립자 자체의 시간적 변화는 없다고 가정하였다.

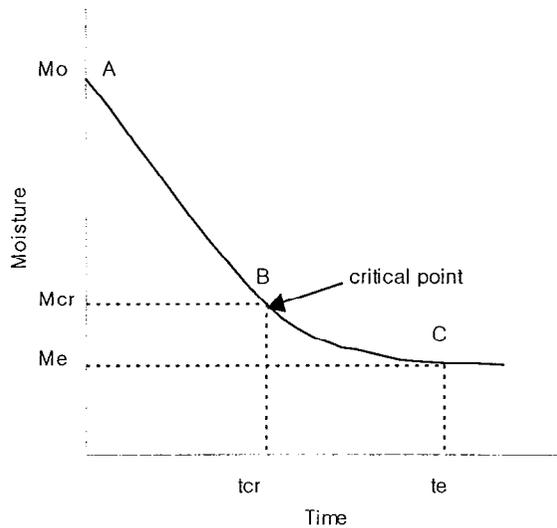


그림 4.1 등온조건에서의 이상적인 건조곡선

대기건조가 발생하는 동안 지표면에 형성되는 최대부압에 대한 실측자료를 보면 홍(1999)은 남해안 간척지에서 $-0.82 \sim -0.58 \text{kg/cm}^2$ 의 값을 얻었다고 하였다.

다. 압밀해석방법 유도의 가정조건

1) Darcy의 법칙

흙속의 물의 흐름은 토층표면에서 물이 증발할 때 발생하는 부압에 의해 형성되는 동수경사에 의해 흐른다. 이 흐름에 대하여 Darcy의 법칙을 적용하였다.

2) 토층표면의 부압

실제 현장에서 발생하는 부압의 크기는 계절, 기후 및 일조조건에 따라 차이가 크지만, 계산의 편의를 위하여 대기건조시험에서 표층의 간극비가 감소하여 일정하게 되는 시점의 간극비에 해당하는 유효응력값의 크기만큼의 부압이 작용하는 것으로 가정하였다.

이 값에 대하여는 대기건조모형시험의 실측자료와 해석결과의 비교분석을 통하여 적용성을 검증하려고 한다.

3) 압축지수 일정

대기건조시 흙 표면의 부압에 의해 발생하는 동수경사에 의해 물의 흐름이 발생되고 이로 인해 흙 속의 간극수가 배제되면서 간극수압이 소산된다. 간극수압의 소산은 유효응력의 증가를 의미하며 유효응력의 증가는 간극비의 감소와 비례관계를 갖는다. 대기건조에 의한 부압조건에 대하여도 부압에 의해 발생하는 유효응력과 간극비 관계에 대하여 압축지수 일정조건을 적용하였다.

4) 교란된 성토단면의 $\sigma_v' - k_h$ 관계 변화 고려

교란된 흙은 유효응력에 따라 압밀계수가 변화되므로 본 해석에서는 압밀계수를 사용하지 않고 투수계수가 유효응력에 따라 변화되는 상관식

(식 3.9)을 적용하였다.

라. 해석이론유도와 해석과정 전개

흙을 대기건조시키기 위하여 임의 두께로 포설하여 놓으면 그림 4.2 a)와 같이 성토의 상층부에서는 흙표면의 대기증발에 의해 흙속의 물이 상방향으로 흐르고, 하부에서는 필터매트나 투수층이 있는 조건일 때 과잉간극수압차이에 의해 물이 아래방향으로 흐르게 된다. 그러나 투수층이 없을 때는 과잉간극수압에 의한 동수경사가 상방향으로 형성되어 물은 상방향으로만 흐른다.

여기서 성토면 바다가 연약지반토일 때는 지반토로부터 모관수가 계속공급되는 조건이 되어 대기건조효과가 크게 감소하게 된다.

고함수비흙의 성토직후 심도별 과잉간극수압의 분포는 그림 4.2 b)와 같이 $t=0$ 때의 직선경사분포를 보인다. 그러나 시간이 경과하면서 지표면의 간극수압은 증발모관압(u_a)만큼의 부압이 작용되고, 바닥의 필터매트부위는 $u=0$ 이므로 간극수압분포가 $t=i-1$, $t=i$, $t=i+1$ 의 변화과정을 거쳐 $t=t_f$ 의 분포를 보이게 된다.

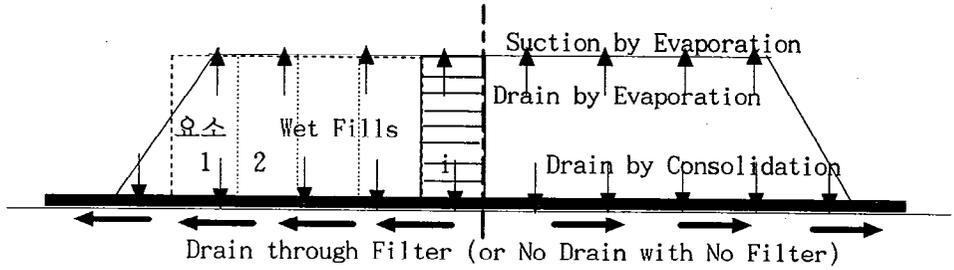
여기서 t_f 의 선은 두가지 조건이 있을 수 있다. 필터매트와 같은 투수층이 있거나 불투수층으로 되어 있을 때는 지반으로부터 모관수의 공급이 없어 전 심도가 $u_f=u_a$ 가 되는 분포를 보이고, 충분한 모관수의 공급이 있는 조건은 바닥면의 간극수압이 $u_f=u_a$ 가 되지 못하고 물의 흐름이 계속되는 조건이 된다

Wet Fills에서 성토표면의 대기건조 및 성토단면내 자중압밀해석방법을 유도하기 위하여 수직방향의 흐름만을 고려하면 그림 4.2 b)와 같이 유한요소계로 나누어 생각해 볼 수 있다. 물의 흐름은 각 요소사이의 간극수압차 Δu 에 의해 흐르고 각 요소에서 과잉간극수가 배수된 만큼 과잉간극수압이 감소되고 유효응력이 증가하게 된다.

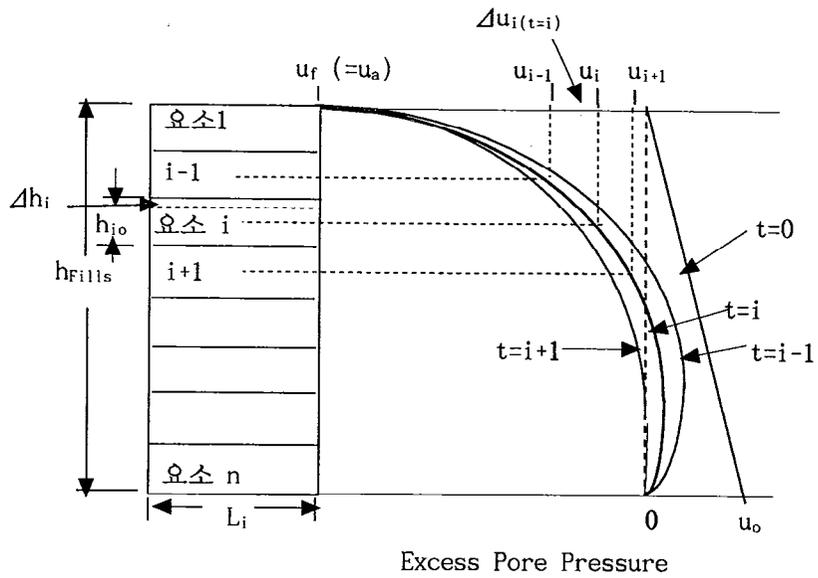
즉 대기건조 및 필터매트를 통한 압밀해석방법은 제 3장에서 유도한 필터매트를 이용한 양면배수의 압밀해석조건과 같으므로 제 3장의 해석이론 유도와 해석과정 전개를 동일하게 적용하였다.

다른 점은 초기 간극수압분포는 성토 표면에서 $u=0$, 성토바닥에서 $u=u_0(=r_v \times h_{fill})$ 의 조건이고, 표면의 간극수압은 $u_f=0$ 이 되지 않고, 대기건조 증발보관(부)압 $u=u_a$ 가 되고 바닥은 $u=0$ 이 되는 조건이 차이가 있다.

이러한 경계조건에 대하여 그림 4.3과 같은 흐름도에 따라 반복계산을 하면 필터매트의 통수능을 고려한 대기건조조건에서의 압밀해석을 할 수 있다.



a) 고탍수비흡 성토(Wet Fills)의 대기건조 및 압밀배수 모형



b) 성토내 대기건조 및 압밀배수해석 모형

그림 4.2 Wet Fills의 대기건조 및 배수공법의 압밀해석 모식도

라. 실예에 의한 해석방법의 평가

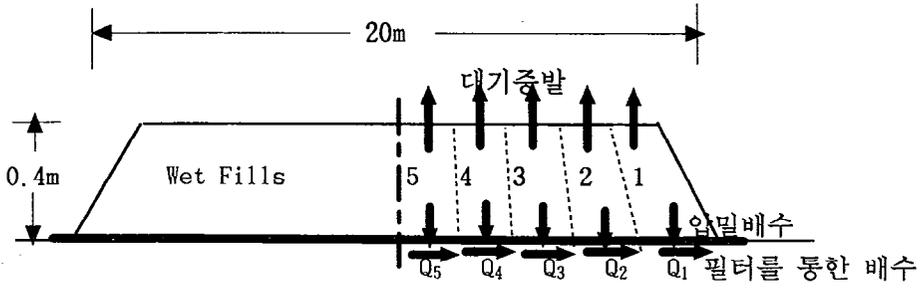
1) 입력자료 및 해석조건

압밀배수 및 대기건조현상 해석방법의 검증은 제 3장에서 압밀해석 조건에 대하여 Terzaghi 압밀해석결과와 비교하였으므로, 본장에서는 필터 매트와 유무, 기초지반으로 부터의 모관수의 공급여부등의 경계조건에 따른 차이점을 비교분석하였다.

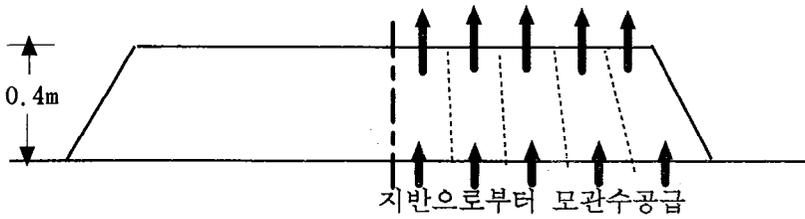
본 비교분석에서 사용한 성토재료의 토질정수 및 경계조건은 표 4.1 및 그림 4.2와 같이 성토평 20m, 성토고 0.4m 조건에 대하여 실시하였다.

표 4.1 경계조건별 대기건조현상 해석을 위한 성토재 토질정수(예제)

구 분	토질정수
교란후 초기 유효응력(σ_{vo}')	0.05 kg/cm ²
대기증발 표층모관부압(u_a)	0.8 kg/cm ²
초기간극비(e_o)	1.367
교란후 압축지수(C_c)	0.3
압밀계수(c_v)	1×10^{-3} cm ² /s
Wet Fills의 성토고(h_i)	0.4 m



a) 필터매트 포설조건에서의 대기건조



b) 지반으로부터 모관수 공급조건에서의 대기건조

그림 4.3 대기건조현상 해석조건

2) 대기건조현상 해석결과 비교

표 4.1 및 그림 4.3과 같은 조건에 대하여 본 제안 대기건조현상 해석방법으로 해석을 실시한 결과 성토후 시간별 압밀도관계는 그림 4.4 a) 및 그림 4.5 a)와 같이 필터매트 배수층이 있는 조건이 지반층으로부터 모관수가 공급되는 조건보다 침하가 완료되는 시간이 2배정도 많이 소요되지만, 침하량은 그림 4.4 b) 및 그림 4.5 b)와 같이 배수층조건이 모관수 공급조건보다 1.4배의 큰 침하가 발생되는 것으로 해석되었다.

심도별 간극수압분포는 그림 4.4 c) 및 그림 4.5 c)와 같이 필터매트와 같은 배수층이 있는 조건은 암밀완료시간이 더 많이 소요되기는 하지만, 전층의 간극수압이 대기증발 부압까지 감소된다.

그러나 기초지반으로부터 모관수가 공급되는 조건은 물이 계속 공급되기 때문에 기초지반 집지부의 간극수압이 부압조건이 되지 못하는 분포를 보이고 있다.

함수비와 간극비 분포를 보면 그림 4.4 d) ,e) 및 그림 4.5 d) ,e)와 같이 배수층조건은 전층의 흙이 거의 같은 함수비 및 간극비까지 크게 감소하지만, 모관수 공급조건에서 표층은 배수층조건과 거의 같은 값까지 감소하지만 바닥에서는 간극비의 감소가 매우 적다.

대기건조의 목적인 흙의 평균함수비 분포를 보면 그림 4.4 f) 및 그림 4.5 f)와 같이 배수층조건은 함수비가 더 이상 감소하지 않는 안정상태에 도달되는 시간은 많이 소요되지만, 모관수 공급조건보다는 훨씬 더 적은 함수비까지 감소됨을 보이고 있다.

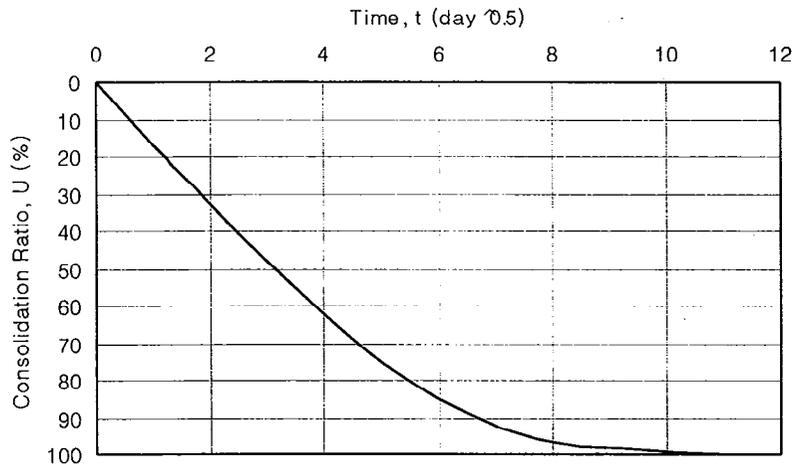
즉 흙의 함수비를 크게 감소시키기 위하여는 지반으로 부터의 모관공급수를 차단하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

필터매트를 설치하였을 때 필터매트로부터 배수되는 물의 양은 그림 4.4 g)와 같이 성토직후에는 크지만 시간이 경과하면서 급격히 감소하는 경향을 보이고 있으며, 어느 시간이 경과하면 배수량이 전혀 없는 조건이 된다.

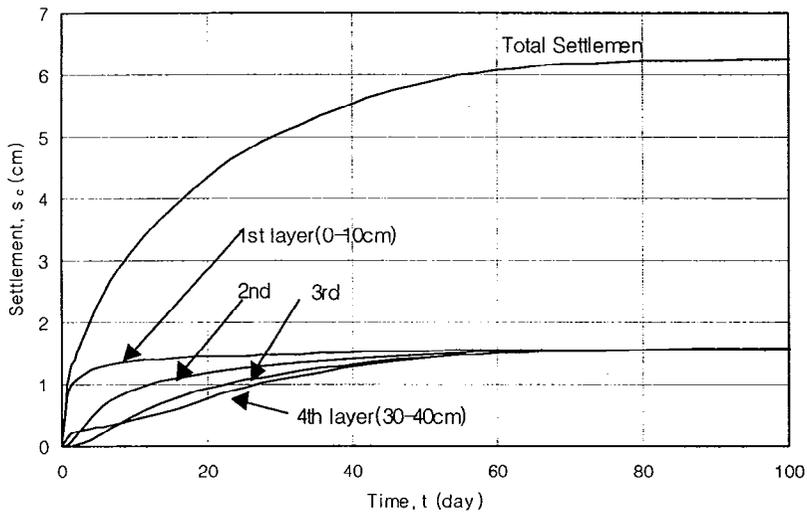
그러나 지반으로부터 모관수의 공급조건은 성토 초기에는 지반으로부터 공급되는 모관수가 없지만 어느 시간이 경과하고 나면 모관공급수가 점점 증가하여 흙의 함수비가 더 이상 감소하지 않는 조건이 되면 모관공급수의 양이 일정한 경향을 보이고 있다.

이러한 현상은 이치적으로 타당한 것으로 판단되지만, 경계조건 및 한계 간극비등의 가정조건이 입증되지 않은 것으로, 본 해석방법의 타당성을 검

증하기 위하여 압밀배수 및 대기건조 모형시험을 실시하였다.



a) Consolidation Curve



b) Settlement Curve

그림 4.4 필터매트를 통한 압밀배수와 대기건조현상 해석결과(I)

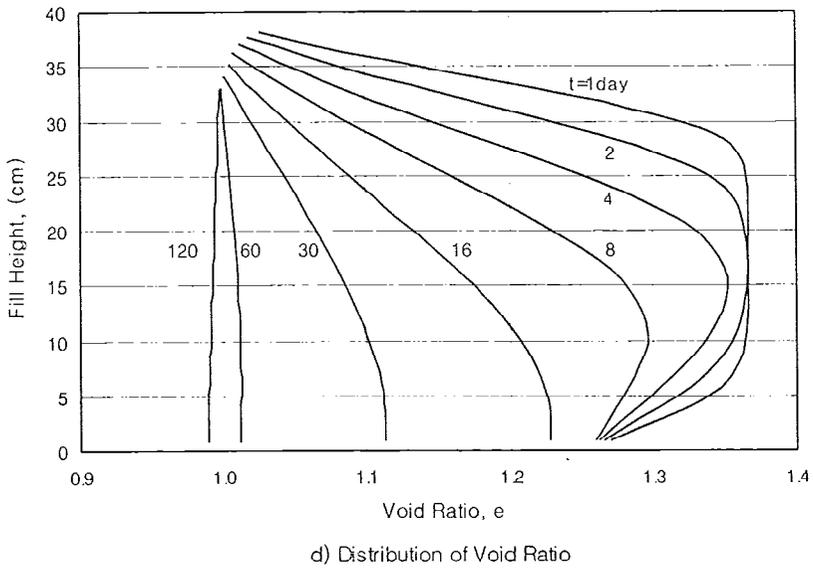
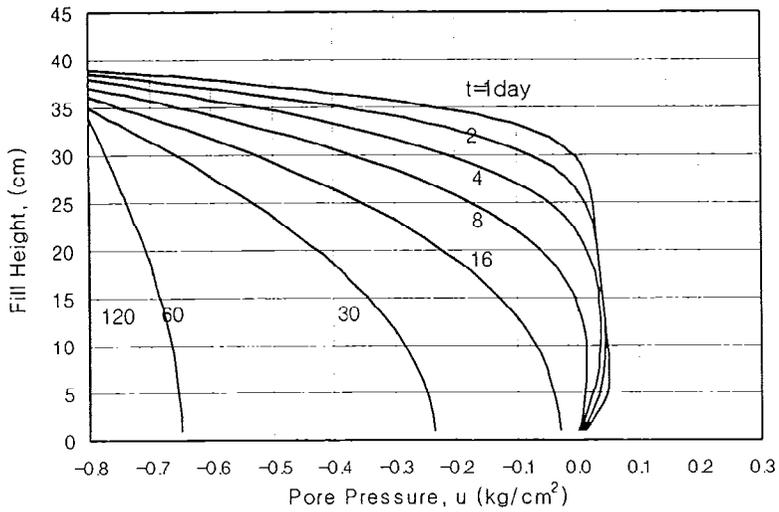
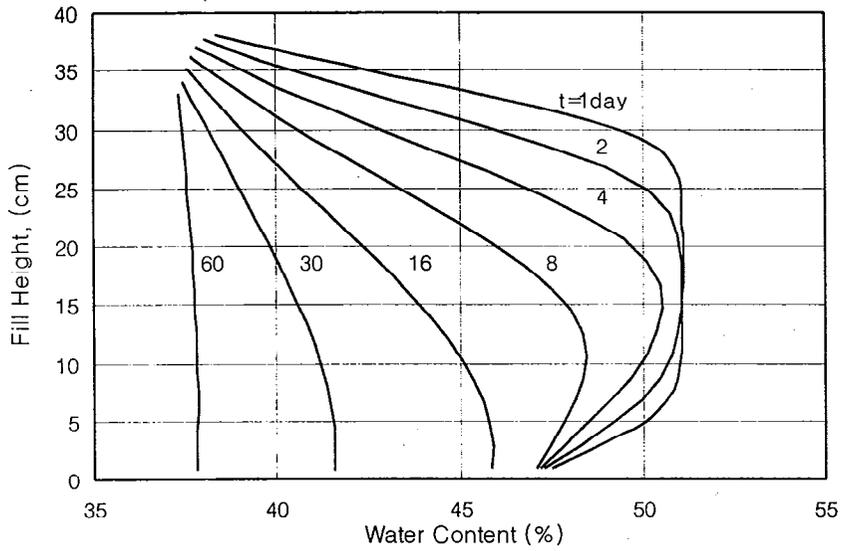
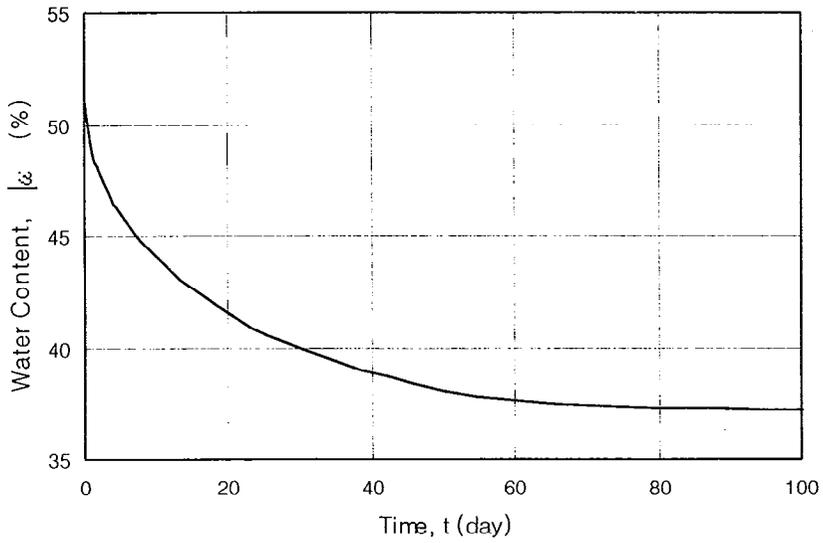


그림 4.4 필터매트를 통한 압밀배수와 대기건조현상 해석결과(II)

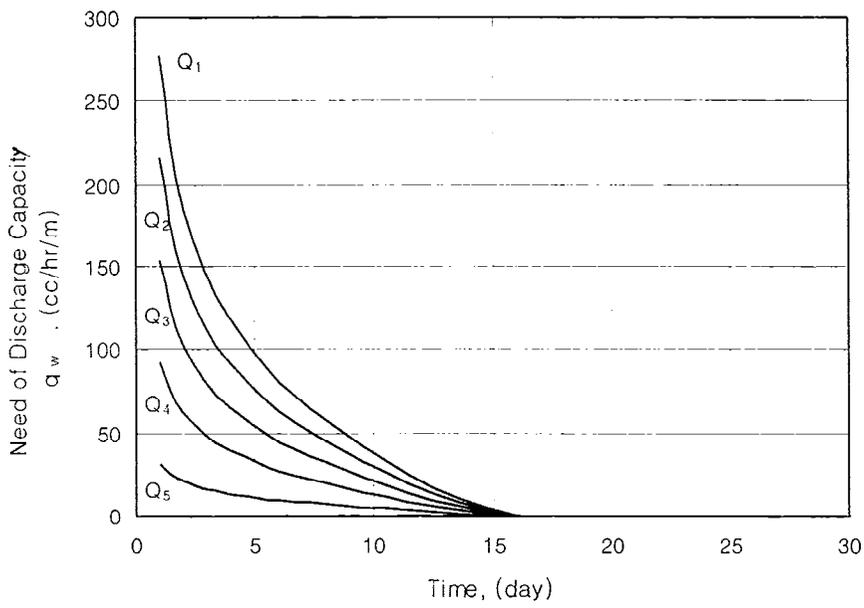
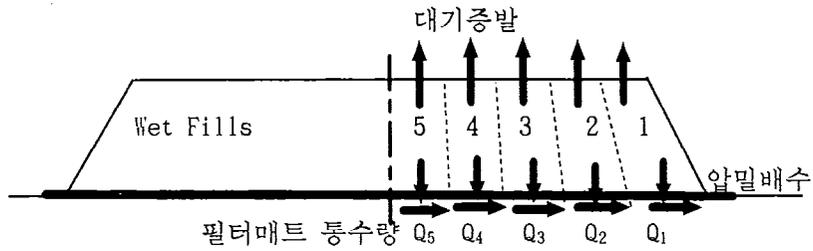


e) Distribution of Water Content



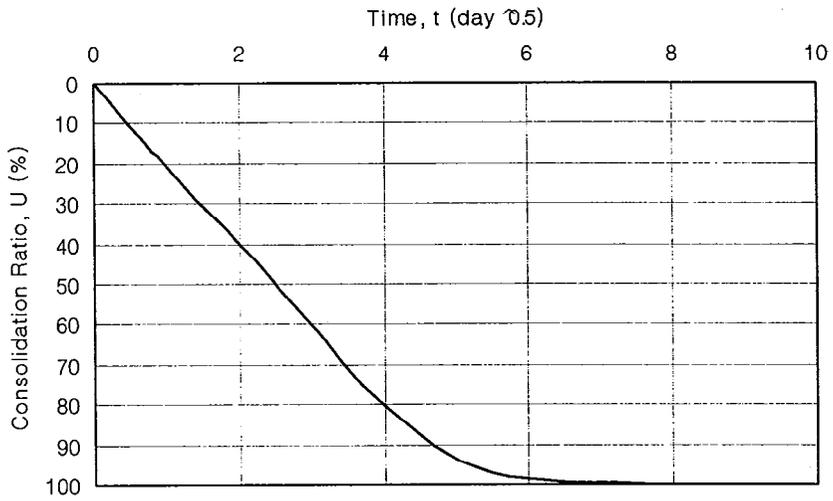
f) Variation of Water Content

그림 4.4 필터매트를 통한 압밀배수와 대기건조현상 해석결과(III)

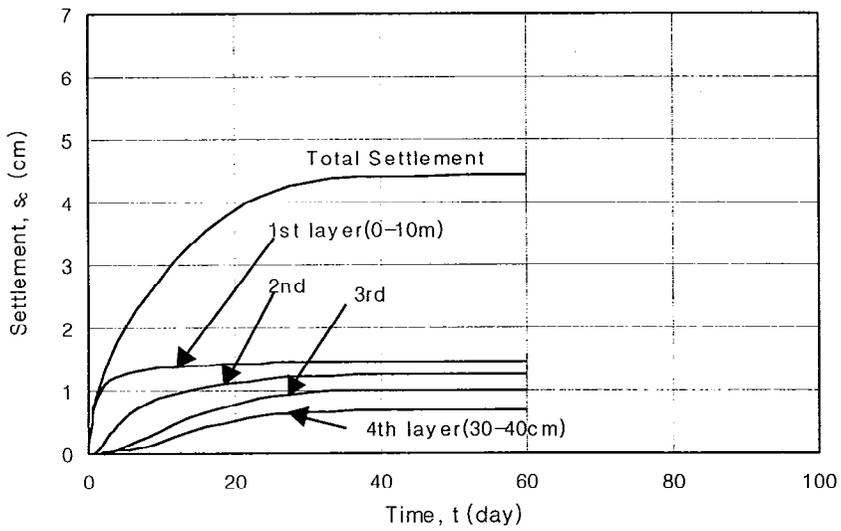


g) Variation of Discharge Quantity

그림 4.4 필터매트를 통한 압밀배수와 대기건조현상 해석결과(IV)

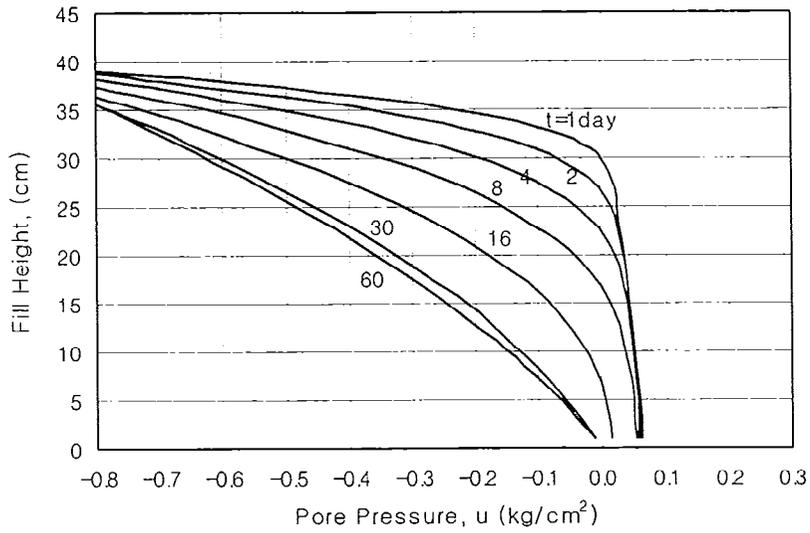


a) Consolidation Curve

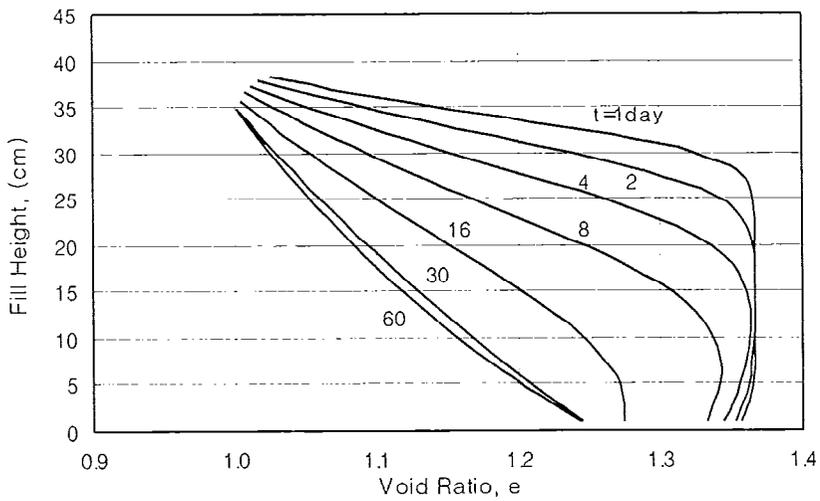


b) Settlement Curve

그림 4.5 지반으로부터 모관수의 공급조건 대기건조현상 해석결과 (I)

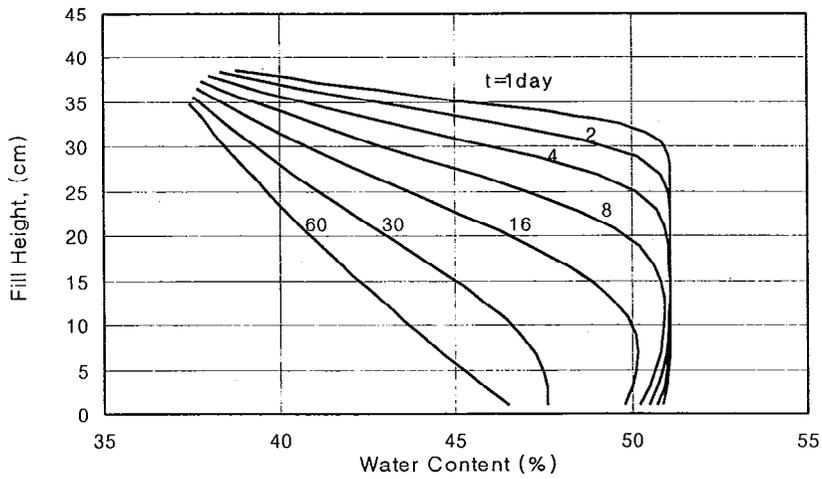


c) Distribution of excess pore water pressure

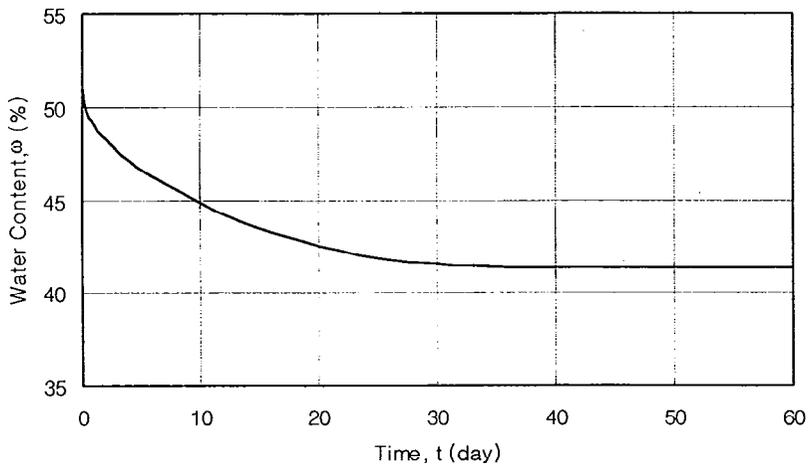


d) Distribution of Void Ratio

그림 4.5 지반으로부터 모관수의 공급조건 대기건조현상 해석결과(II)

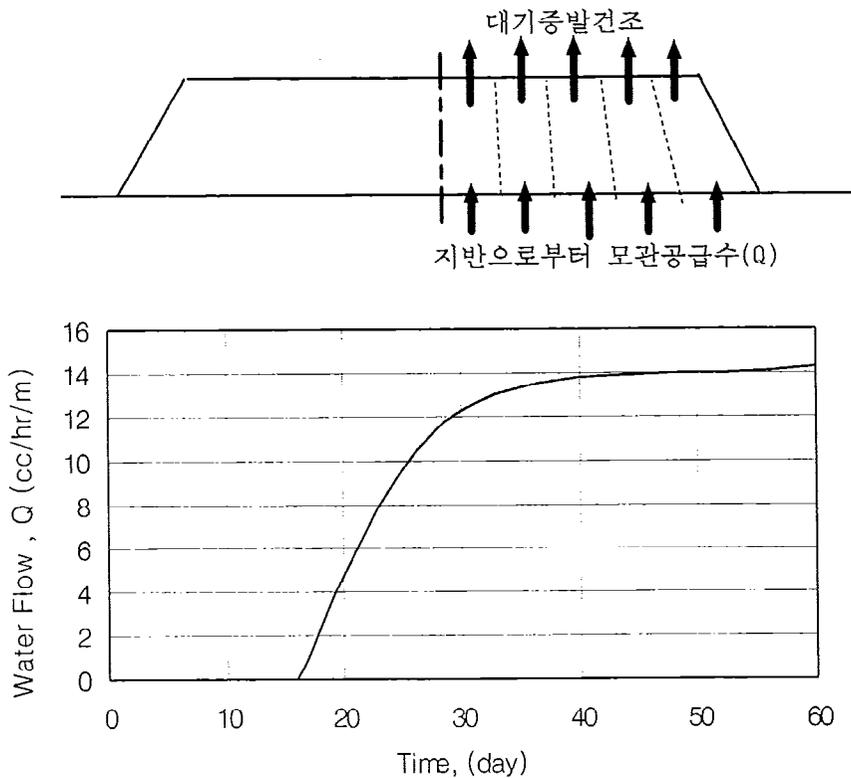


e) Distribution of Water Content



f) Variation of Water Content

그림 4.5 지반으로부터 모관수의 공급조건 대기건조현상 해석결과(III)



g) Water Flow from Ground

그림 4.5 지반으로부터 모관수의 공급조건 대기건조현상 해석결과(IV)

2. 대기건조 모형시험

가. 모형시험의 목적

압밀배수 및 대기건조현상 해석결과 경계조건에 따른 흙의 함수비 감소의 특성이 매우 다르므로 각 경계조건에 대한 특성값의 결정과 본 제안 해석방법의 타당성 입증은 물론 해석에 필요한 입력자료의 결정방법을 정립 하기 위하여 압밀배수 및 대기건조 모형시험을 실시하였다.

나. 모형시험조건

압밀배수 및 대기건조모형시험은 1차시험을 성토고별(성토고 20cm, 40cm, 60cm) 및 배수조건별(필터매트 배수조건과 비배수조건)에 대하여 모형시험을 실시하여 본 연구에서 제안한 해석방법의 타당성을 검증하고, 2차는 흙의 종류별{해성점토(CL), 실트(ML) 및 실트질모래(SM)} 배수조건별로 모형시험을 실시하여 해석방법을 실무에 적용하기 위한 입력자료를 도출하였다.

다. 모형시험방법

모형시험은 그림 4.6과 같은 컬럼에 흙을 교란상태로 채워넣고 배수조건은 하부로 배수를 허용하고, 비배수조건은 하부를 밀폐조건으로 하여 상부는 대기에 노출시켜 대기건조를 실시하면서, 각 시간별 증발량 및 배수량을 측정하고 침하봉의 침하량을 측정하여 각 층별 침하량을 구하였다.

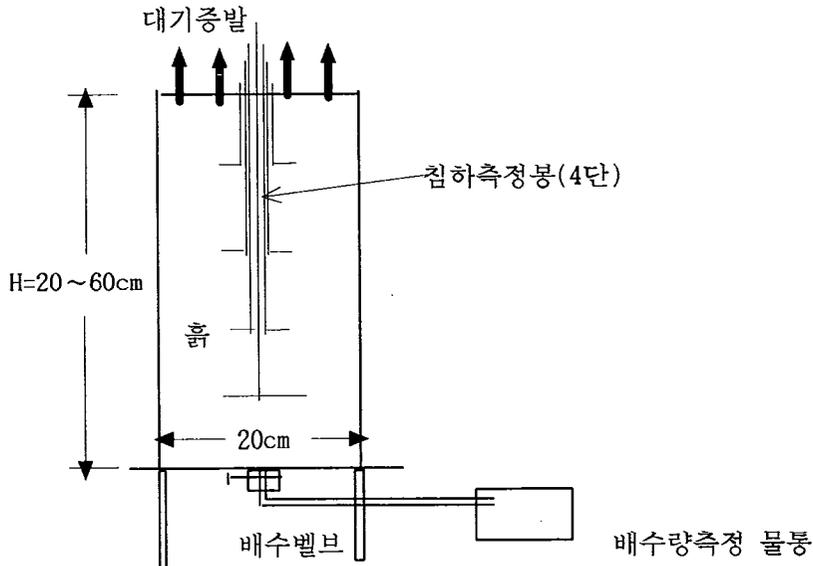


그림 4.6 대기건조모형시험기

라. 모형시험 시료

모형시험에 사용한 시험시료는 1차는 점토함량이 다소 많은 시화지구 시료(시료A)를 사용하였으며, 2차 시험은 점토함량이 적은 시화지구(시료1), 이원지구의 공감측(시료2) 및 화력측(시료3)을 사용하였다. 각 시료의 물리성 및 압밀배수특성은 표 4.2와 같으며, 압밀 및 투수시험결과는 그림 4.7~10과 같다.

고함수비토를 성토하면 대기건조에 의해 표층으로부터 흡속의 물이 증발하고 필터매트를 통하여 압밀배수가 진행된다. 이 때 대기건조 및 압밀배수에 의한 흡속의 물의 흐름은 흙의 투수계수에 영향을 받는다. 이때의 투수계수는 성토중 흙이 거의 완전 교란된다고 보면 교란조건에서의 압밀계수 또는 투수계수를 사용하여야만 한다.

그러므로 본 연구에서는 모형시험에 사용한 각 흙에 대한 압밀시험과 투수시험을 교란조건에 대하여 실시하였으며, 제 3장에서 정리한 압밀하중별 투수계수변화 상관식을 구하였다.

표 4.2 대기건조 모형시험시료의 물리성

시료번호		A	시료1	시료2	시료3
시료명		시화 점토	시화 실트	이원 공감	이원 화력
채취위치		경기 대부도	경기 화성	충남 태안	충남 태안
입도 분포	모래 S (%)	5	9	66.6	3.2
	실트 M (%)	70.7	80.3	27.4	65.8
	점토 C (%)	24.3	10.7	6	31
	0.005mm이하				
흙 분류(U.S.C.S.)		CL	ML	SM	CH
함수비, ω_n (%)		46	37.5	38.5	51
액성한계, LL (%)		48.6	NP	NP	52.1
소성지수, PI (%)		25.1			27.5
압밀계수 c_v ()내는 교란후		0.002 (0.00055)	0.005 (0.001)	0.0032 (0.001)	0.001 (0.0004)
초기간극비 e_0		1.23	1.04	1.032	1.367
교란후 압축지수 C_c		0.21	0.16	0.21	0.3
교란후 투수계수 변화계수 x		-0.6	-0.6	-0.6	-0.6

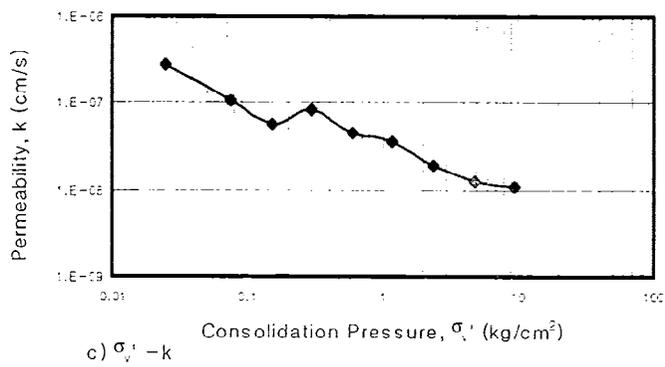
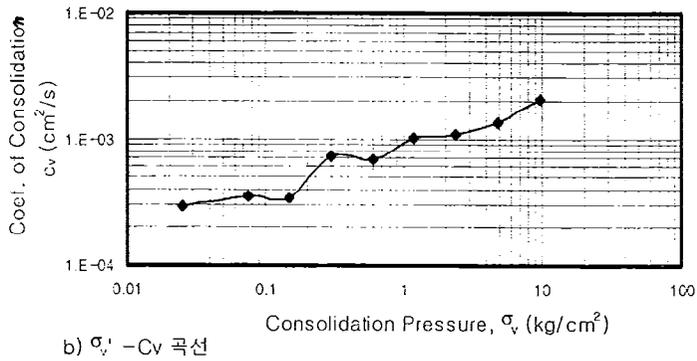
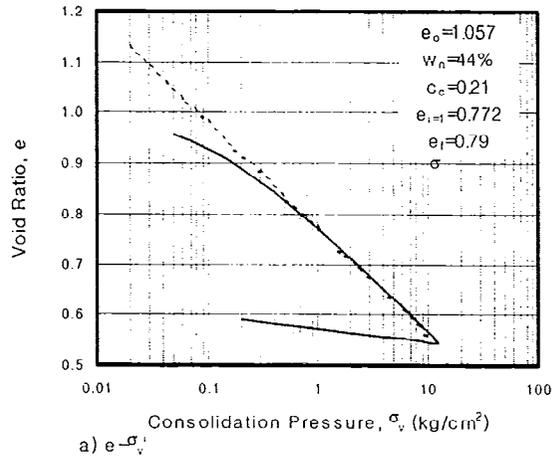


그림 4.7 1차 대기건조모형시험 시료(A)의 압밀특성

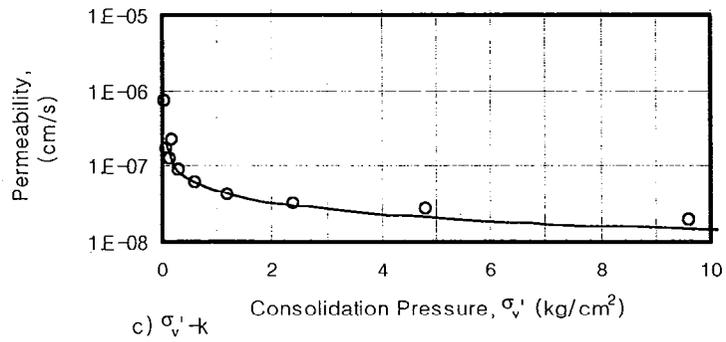
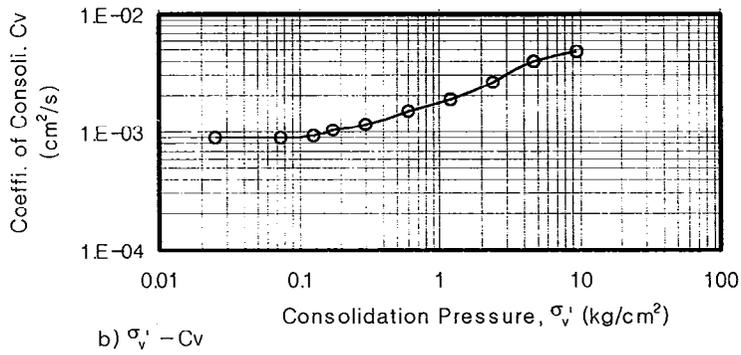
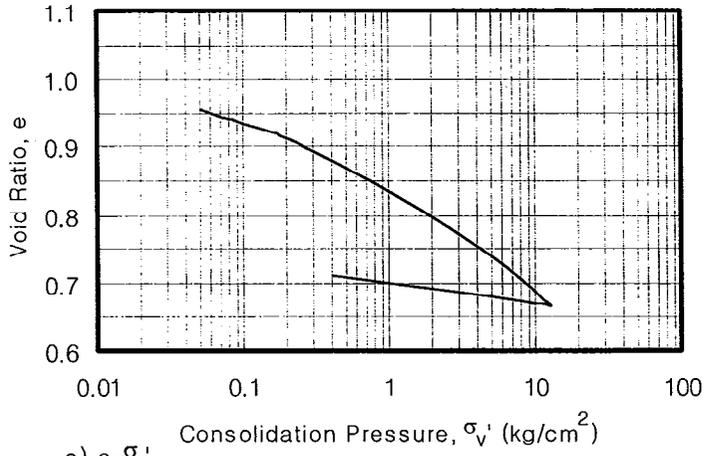
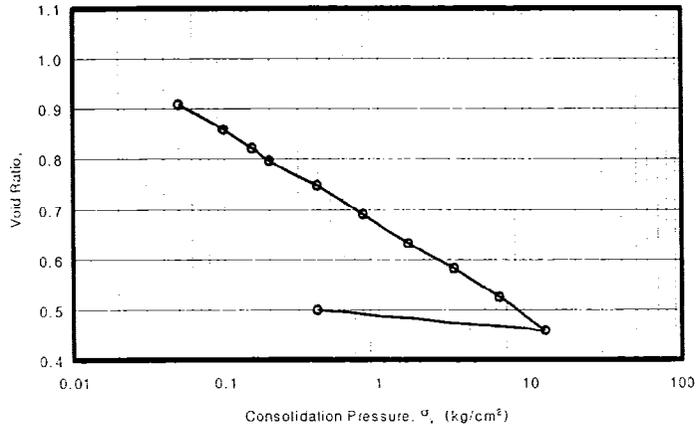
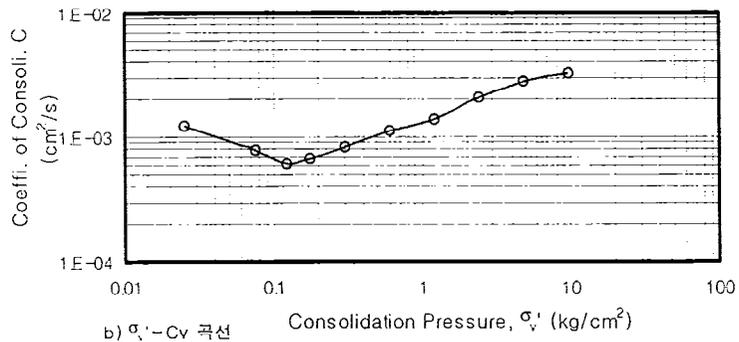


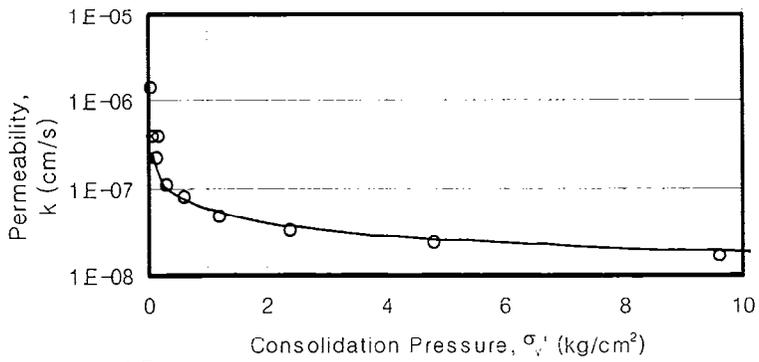
그림 4.8 2차 대기건조모형시험 시료 1(시화 실트)의 압밀특성



a) $\sigma'_v - e$



b) $\sigma'_v - C_v$ 곡선



c) $\sigma'_v - k$

그림 4.9 2차 대기건조모형시험 시료 2(이원 공감)의 압밀특성

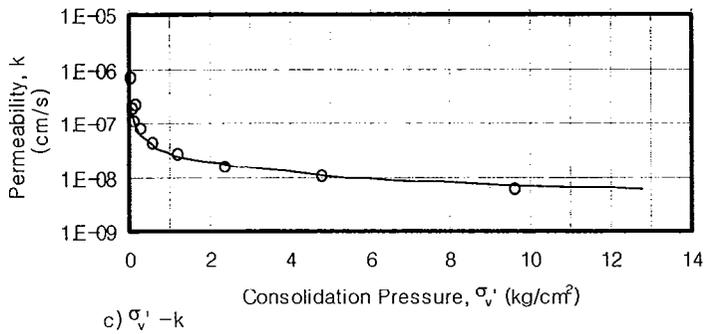
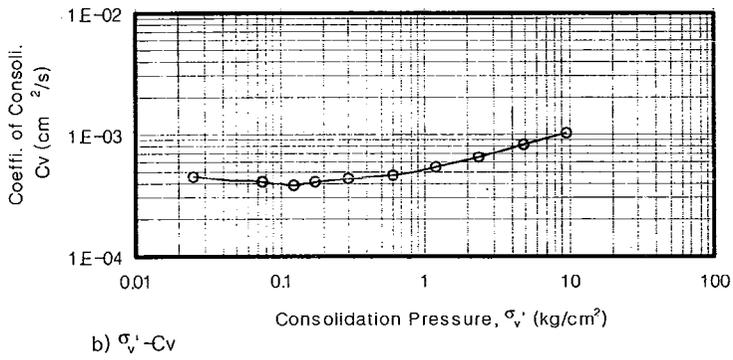
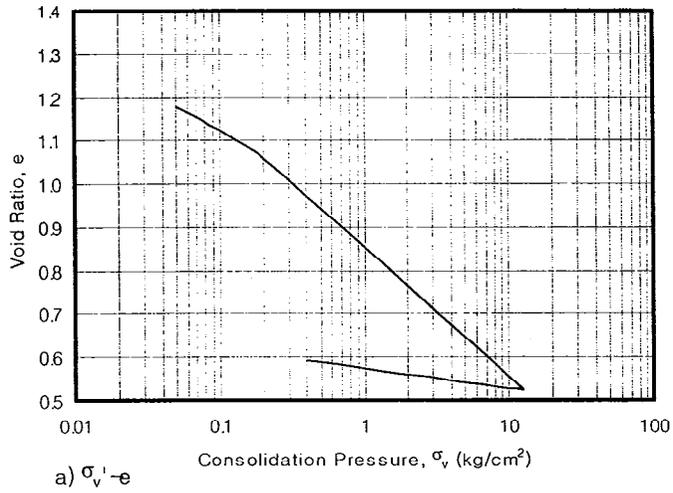


그림 4.10 2차 대기건조모형시험 시료 3(이원 화력)의 압밀특성

3. 대기건조 모형시험 및 수치해석결과 비교

가. 1차 모형시험결과

1) 시험조건

시화지구 해성점토로 직경 20cm, 높이(성토고) 20, 40 및 60cm의 원형통에 흙을 교란조건으로 채우고, 하부에 필터매트를 통한 배수조건과 비배수조건의 총 6가지 조건으로 대기건조 시키면서 배수량과 증발량을 측정하였으며, 통안에 층별침하봉을 설치하여 층별침하량을 측정하였다. 또한 시험기간동안의 수면증발량을 동일한 직경의 물통을 준비하여 수면증발량을 측정하였다.

2) 층별침하량

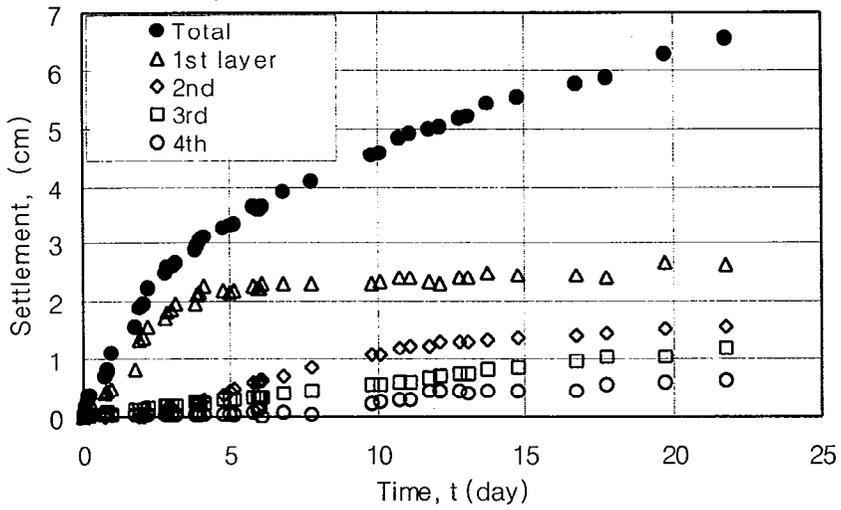
대기건조 모형시험결과 층별침하량은 그림 4.11과 같이 배수와 비배수조건 모두 표층침하량이 가장 빠르고 큰 침하가 발생되었으며, 하층부는 매우 느린 속도로 침하가 발생되었다. 그러나 하부 배수조건에서 하층부의 침하는 압밀배수로 인해 초기에 침하가 발생된후 그 후의 침하는 가장 느리게 진행되는 현상을 보이고 있다.

3) 성토고별 대기증발량 및 배수량

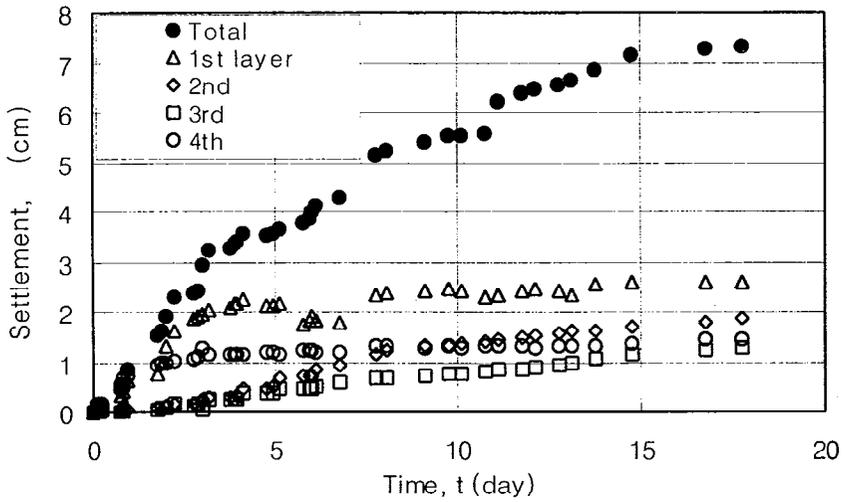
수면증발량과 각 시험조건별 증발량은 그림 4.12 a)와 같이 초기에는 흙에서의 증발량이 수면증발량보다 크거나 같은 값을 보이지만, 5일 이후에는 흙에서의 증발량이 점점 감소하여 수면증발량에 대한 증발비가 감소하는 특성을 보이고 있다.

각 조건별 증발량은 성토고나 배수조건에 관계없이 거의 같은 값을 갖는 것으로 측정되었다.

필터매트를 통한 압밀배수량은 그림 4.12 b)와 같이 성토고가 큰 것이 더 많은 배수량이 측정되었다.

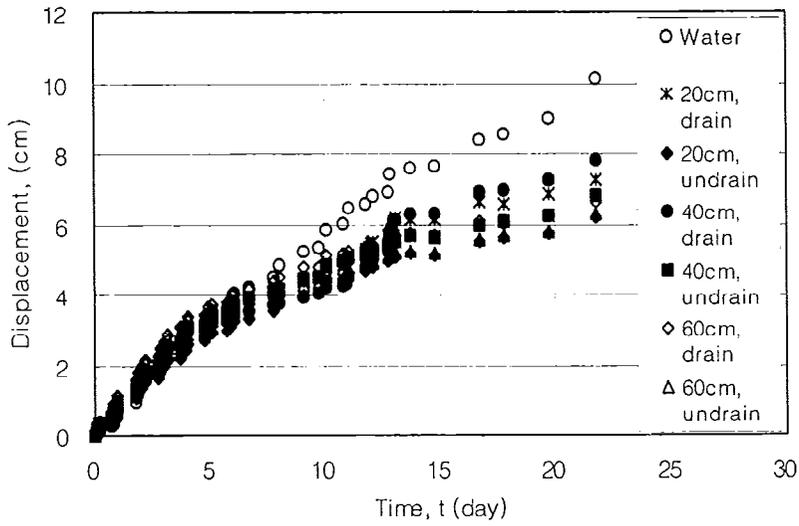


a) $h=60\text{cm}$, 하부 비배수조건

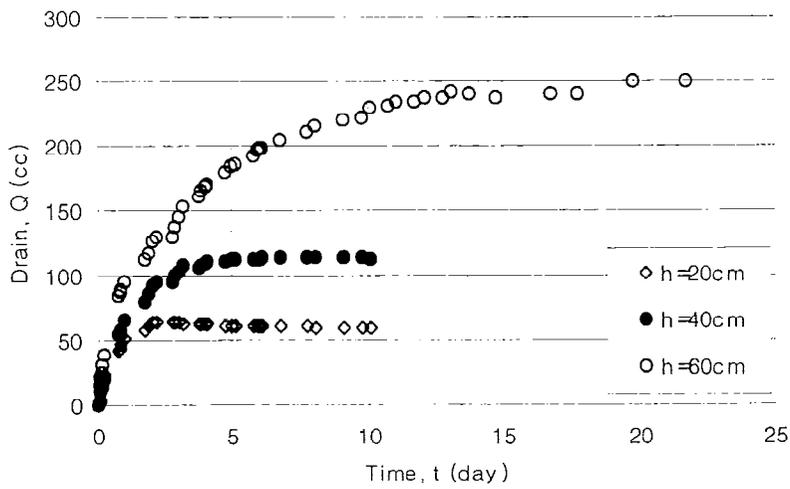


b) $h=60\text{cm}$, 하부필터 배수조건

그림 4.11 고탄수비토 성토조건의 대기건조 모형시험결과

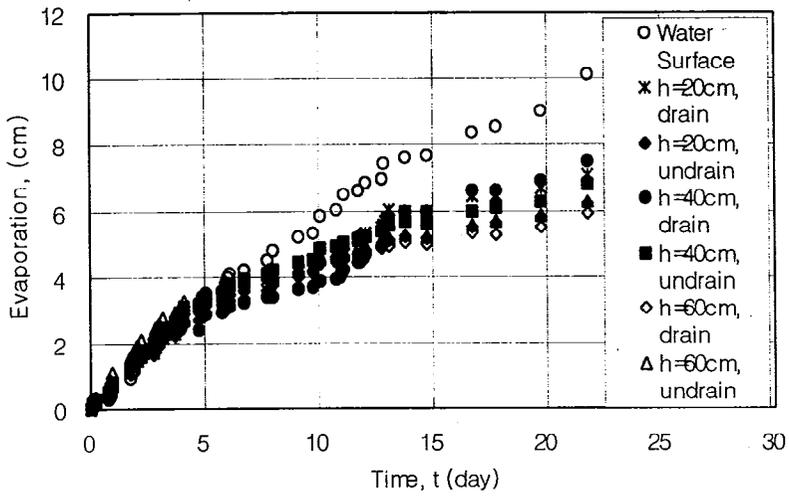


a) 단위면적당 누적총배제수심 (증발량+배수량=침하량)

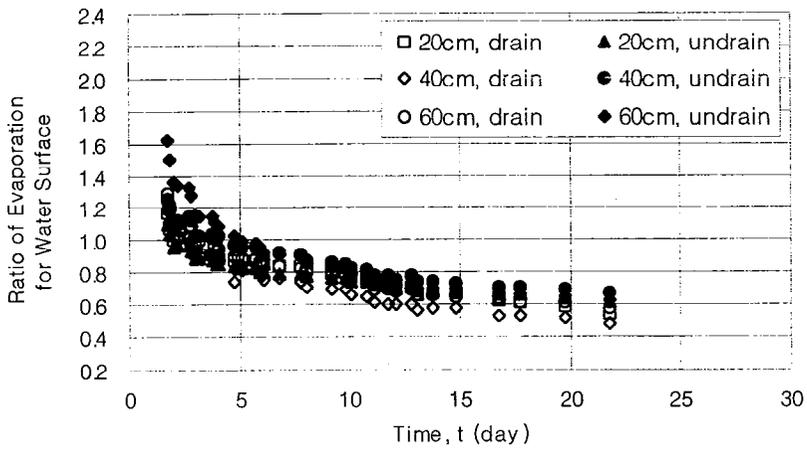


b) 필터매트를 통한 하부배수량

그림 4.12 대기건조모형시험의 대기증발 및 배수량 변화특성



a) 대기건조 증발량



b) 수면증발량에 대한 증발비

그림 4.13. 대기건조 증발량 변화

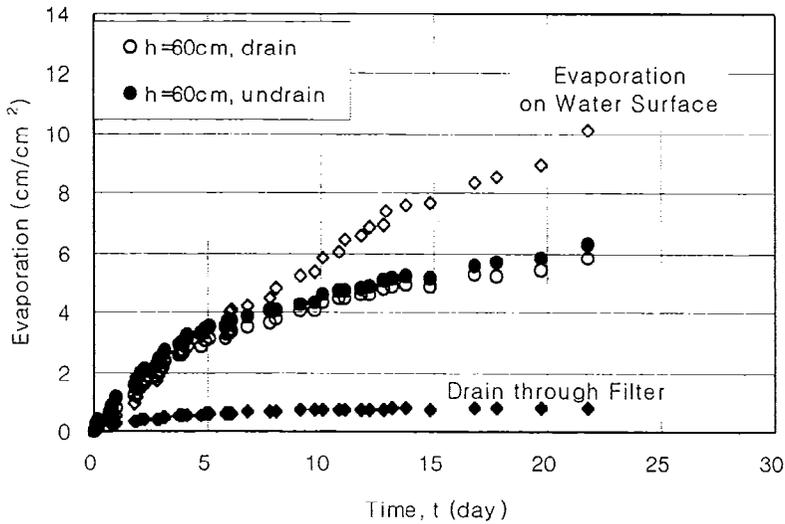


그림 4.14 하부 배수조건과 증발량 차이

나. 1차모형시험의 수치해석결과

고함수비 간척지토의 성토조건에 대한 대기건조모형시험과 동일한 조건으로 압밀배수 및 대기건조 수치해석을 실시하였다. 하부배수는 필터 매트와 통수능이 충분히 큰 조건 즉 필터매트내의 간극수압 $u_f=0$, 성토 표면의 대기증발 부압($u_a=-0.7\text{kg/cm}^2$)이 작용하는 것으로 해석하였다.

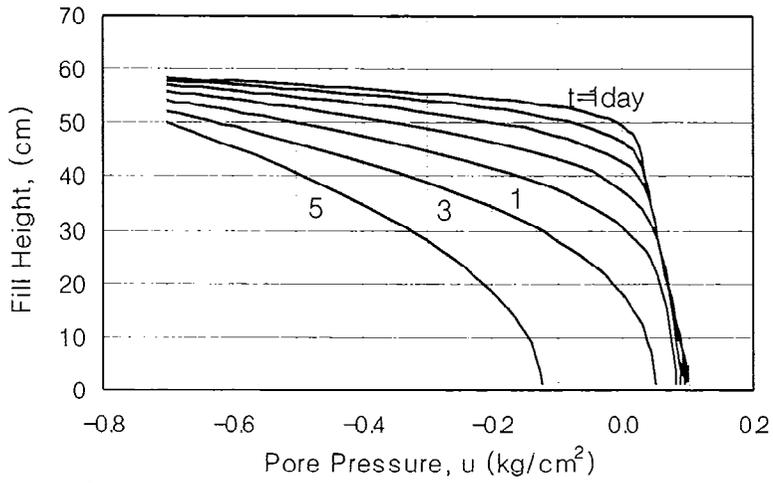
성토고 60cm, 상부 대기건조 및 하부 압밀배수조건에 대한 수치해석을 실시한 결과 그림 4.15 a)와 같이 흡속의 간극수압이 소산되는 결과를 얻었으며, 심도별 함수비분포의 변화는 그림 4.15 b)와 같이 변화하는 결과를 얻었다.

층별침하량은 그림 4.15 c)와 같이 표층(4th layer)이 가장 먼저 침하가 완료되고 그 아래층은 위층부터 아래층 순서로 서서히 압밀이 진행되어 간다.

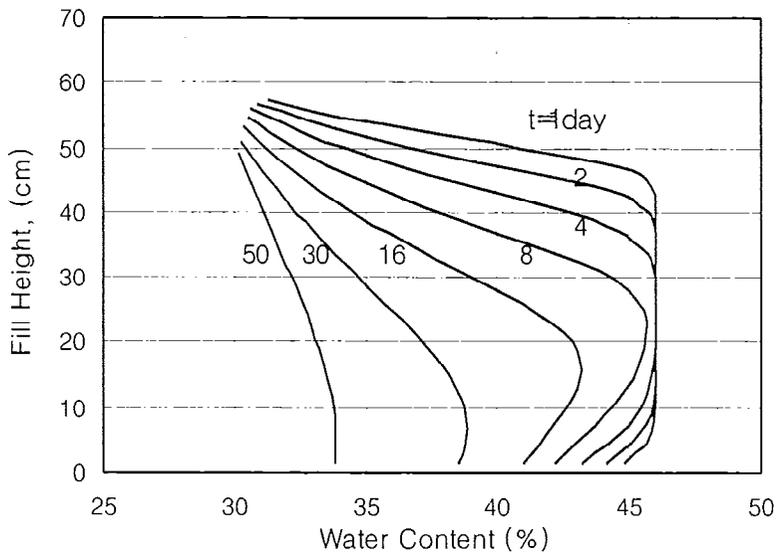
평균함수비 변화를 보면 그림 4.15 d)와 같이 초기에 크고 시간이 경과하면서 서서히 감소하는 압밀곡선과 같은 경향을 보이고 있다.

성토고별 배수조건별 전체 침하량곡선을 보면 그림 4.16 a)와 같이 성토높이가 적은 것이 빨리 압밀이 완료되고 배수조건이 비배수조건보다 빨리 침하가 발생하는 당연한 결과를 보이고 있다.

성토고별 평균함수비의 변화를 보면 그림 4.16 b)와 같이 성토고가 적은 것의 함수비가 빨리 감소되고, 배수조건이 비배수조건보다 더 빨리 감소되는 당연한 결과를 보이고 있다.

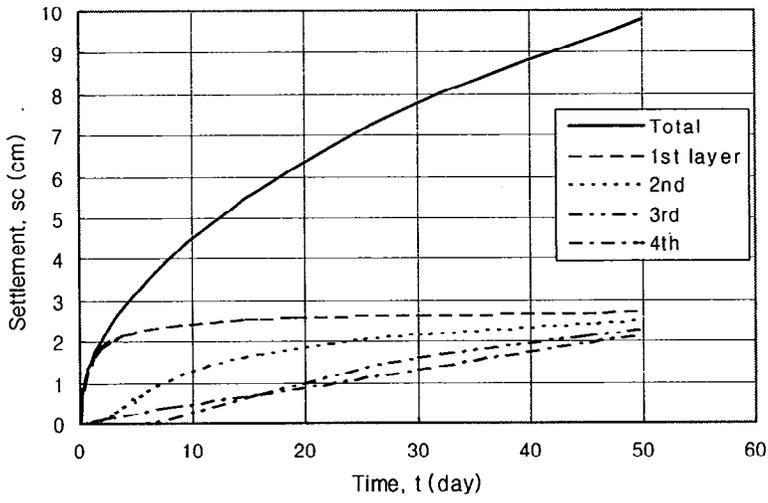


a) Distribution of excess pore water pressure

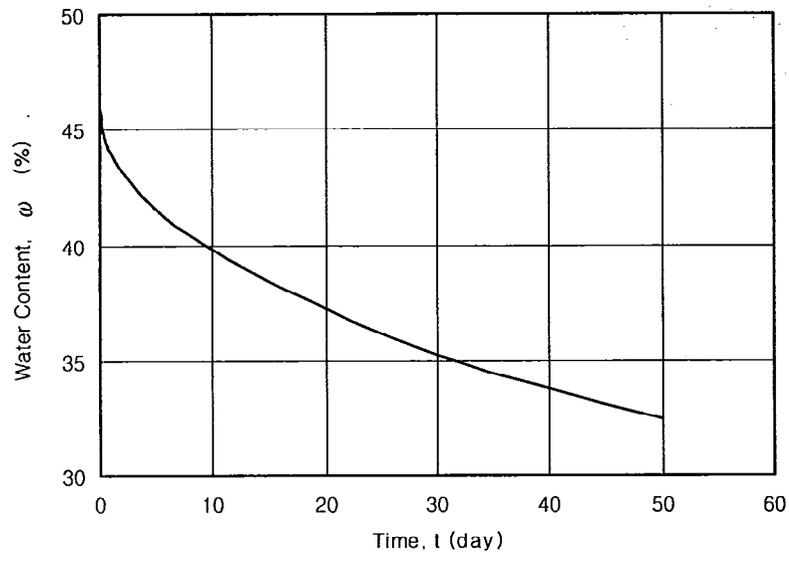


b) Distribution of Water Content

그림 4.15 고탐수비토 성토조건외 대기건조 수치해석결과(I)
(h=60cm, 하부 비배수조건)

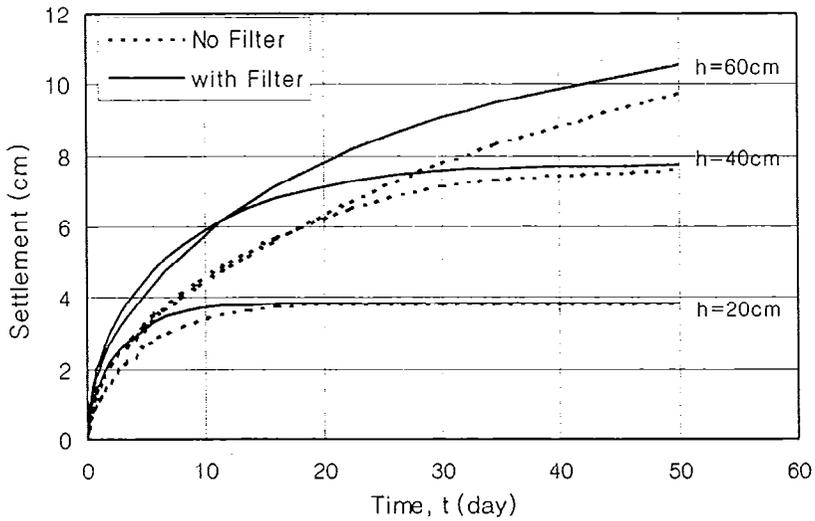


c) Settlement Curve

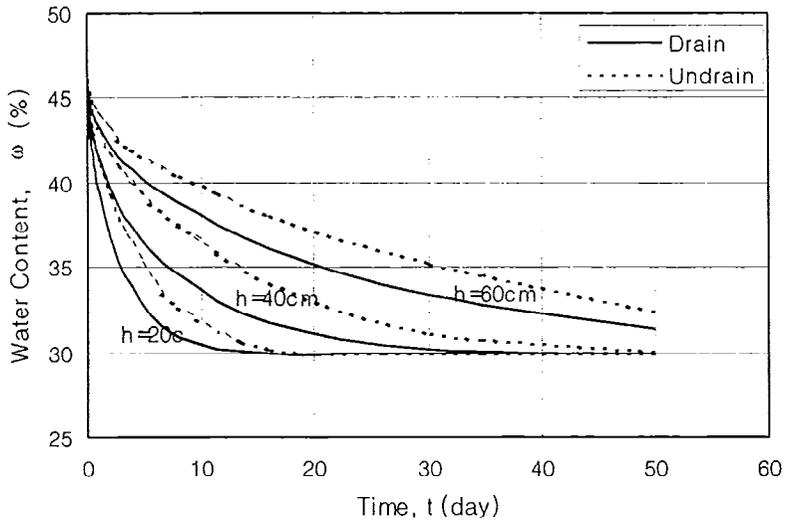


d) Consolidation Curve

그림 4.15 고함수비토 성토조건외 대기건조 수치해석결과(II)
($h=60\text{cm}$, 하부 비배수조건)



a) 침하량 곡선



b) 함수비 감소곡선

그림 4.16 대기건조 함수비변화 수치해석결과 성토고별 비교

다. 1차 모형시험과 수치해석결과 비교분석

1) 무게비로 나타낸 전체 침하량 비교

모형시험과 수치해석결과를 비교하기 위하여 전체 무게비로 나타낸 침하량곡선을 비교한 결과 그림 4.17과 같이 높이 40 및 60cm조건은 배수조건 및 비배수조건 모두 잘 일치하는 결과를 얻었다. 그러나 성토고 20cm조건은 배수조건 및 비배수조건 모두 잘 일치하지 않는 결과를 보이고 있다.

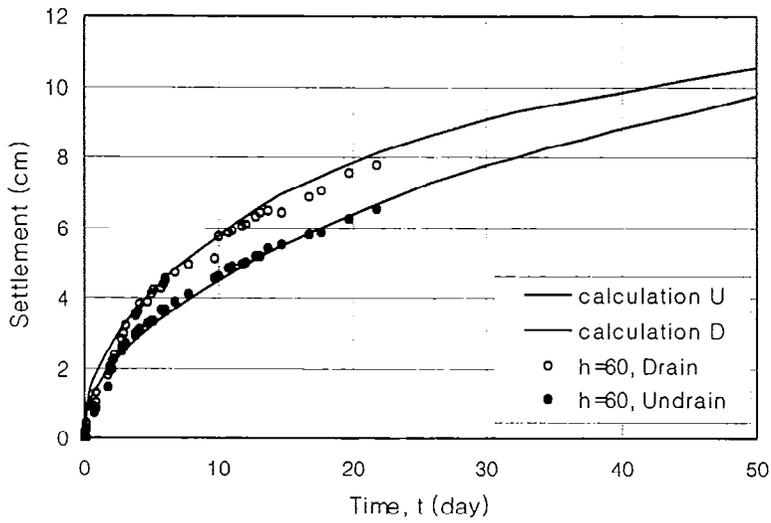
이것은 대기증발모관 부압에 해당하는 유효응력 조건 까지 압밀이 완료되면 흠속에서 더 이상의 물의 흐름과 압밀진행이 없는 것으로 압밀해석을 하지만, 실제 대기건조 증발현상에서는 유효응력 조건에 도달한 후에도 흠속의 물이 어느 함수비까지는 계속해서 증발되기 때문으로 이 특성을 고려한 해석방법이 제시되어야만 한다는 것을 알 수 있었다.

2) 흠속의 함수비 변화 비교

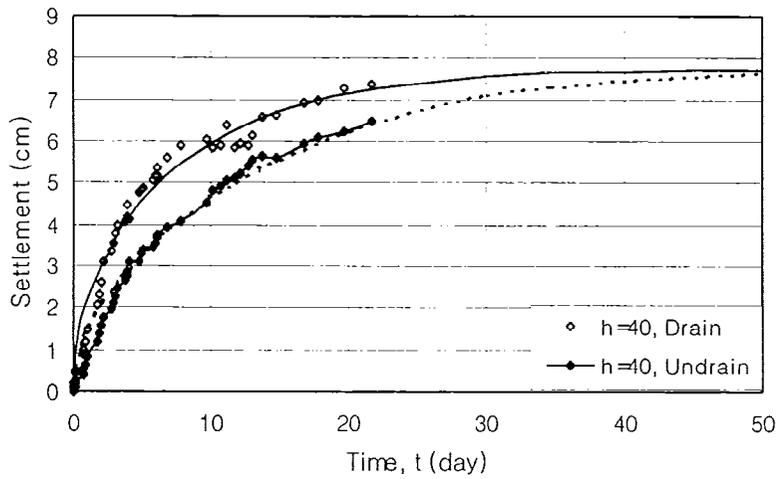
흠속의 평균함수비의 변화를 비교하면 그림 4.18과 같이 성토고 40 및 60cm조건은 전체침하량과 같이 잘 일치하지만 20cm조건은 실측값이 계속하여 증가하는 것으로 측정되었다.

이는 포화영역범위내의 대기증발현상에 대하여는 압밀해석방법으로 해석이 가능하지만 비포화영역의 대기건조현상은 비포화조건에서 발생하는 함수비 감소특성을 고려한 해석방법이 필요함을 알 수 있다.

이 비포화영역의 함수비 감소특성을 분석하기 위하여, 각 성토고별 증발량을 비교하여 보면 그림 4.19와 같이 토양면에서 단위면적당 증발량은 성토고에 관계없이 거의 같은 값을 보이고 있다. 이는 흠이 대기증발 모관부압에 의해 더 이상 압밀되지 않는 유효응력에 도달하면 더 이상의 침하(수축)는 없지만 흠속의 물이 계속하여 증발한다는 것을 알 수 있었다.

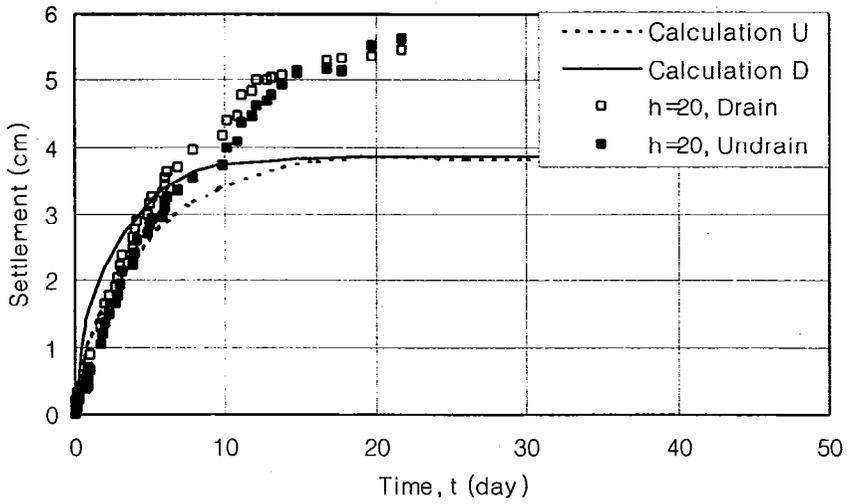


a) 성토높이 $h=60\text{cm}$ 조건



b) 성토높이 $h=40\text{cm}$ 조건

그림 4.17 대기건조 모형시험과 수치해석결과 비교 (I)



c) 성토높이 h=20cm조건

그림 4.17 대기건조 모형시험과 수치해석결과 비교(II)

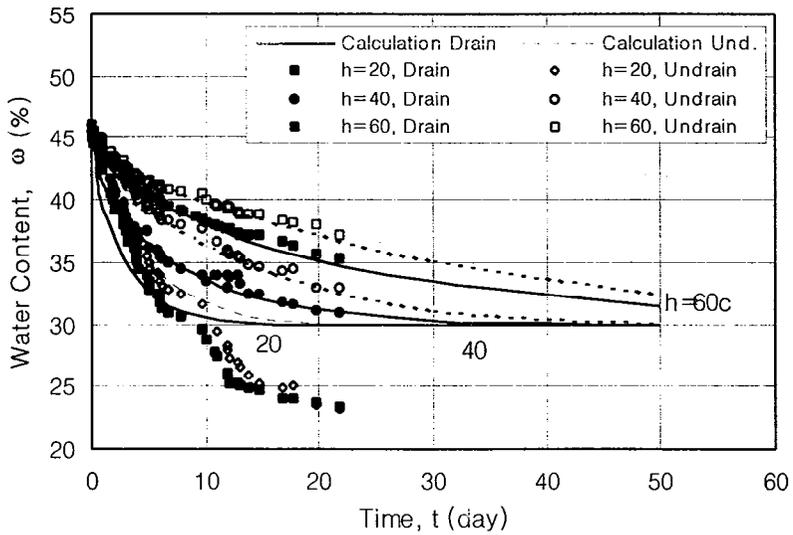


그림 4.18 대기건조에 의한 성토고별 평균함수비 변화

3) 수면증발 대비 증발량비

수면증발량에 대한 증발량비를 보면 그림 4.19와 같이 초기에는 흠에서의 증발량이 수면증발량보다 크거나 같은 값을 보이지만, 5일 이후에는 흠에서의 증발량이 점점 감소하여 수면증발량에 대한 증발비가 감소하는 특성을 보이고 있다.

각 조건별 증발량비는 성토고나 배수조건에 관계없이 거의 같은 값을 갖고, 증발량비가 1보다 적은 것을 볼 때, 증발량은 모관 증발 부압에 의해 흠속에서 흘러나오는 양이 증발량이 되는 것으로 토양면증발량의 크기는 흠에서 흘러나오는 유속에 영향을 미치는 흠의 모관부압의 크기와 투수계수에 의한 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

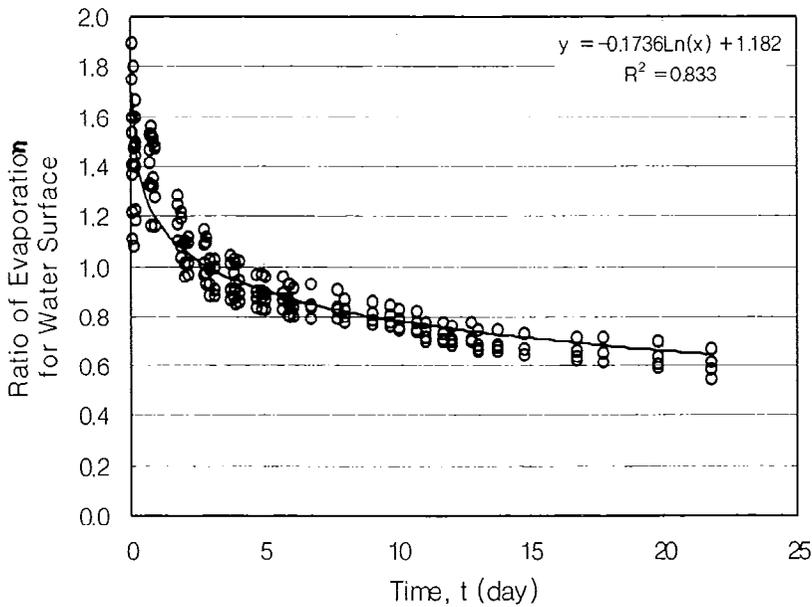


그림 4.19 수면증발량 대비 토양면증발량비

라. 2차 대기건조 모형시험 결과

1) 모형시험목적

흙의 투수계수가 다른 조건에 대한 증발량비 및 모관부압 예측방법을 도출하기 위하여, 경기도 시화지구 해성실트, 충남 이원지구 실트질 모래 및 해성점토의 3가지의 압밀계수가 다른 흙에 대하여 성토고 60cm조건에 대한 대기건조모형시험(2차)을 실시하였다.

2) 모형시험결과

2차 대기건조 모형시험의 증발침하량을 보면 그림 4.20과 같이 표층토가 먼저 침하(압축)되고 그 후에 심층부의 침하가 발생하는 것으로 측정되었다. 투수계수가 큰 시화 2차 및 이원 공감측의 하부 배수조건은 표층의 침하가 당연히 제일 빠르게 발생되지만, 하층부의 침하도 크게 빨리 발생됨을 알 수 있다.

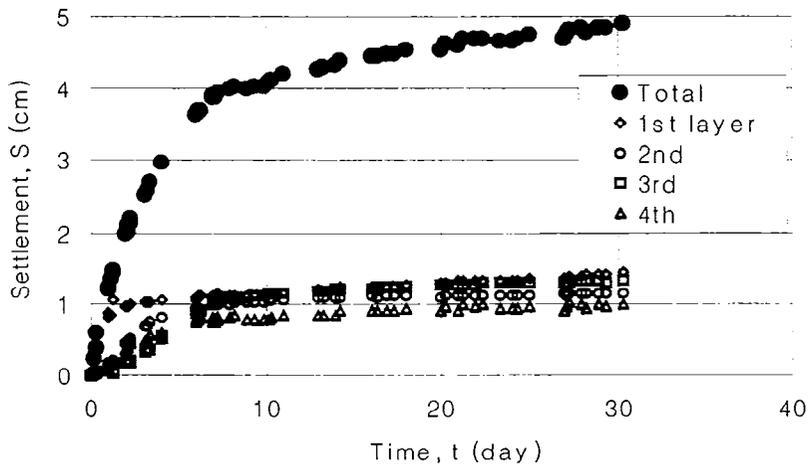
물드의 증량감소량으로부터 무게비로 나타낸 침하량은 그림 4.21과 같이 이원 화력측 흙이 침하량이 가장 크고 시화 2차와 이원공감측의 흙은 두 흙이 거의 같은 값을 보이지만 화력측보다 적게 침하가 발생되었다.

즉 압축지수가 큰 흙의 대기건조에 의한 증발량이 크고, 적은 것이 적게 증발됨을 알 수 있다. 1차 시험결과 증발속도는 비가 오지 않으면 흙에서 공급되는 수량보다 더 빨리 증발되므로 흙에서 배제되는 물의 양을 분석하면 대기증발 현상을 분석할 수 있다.

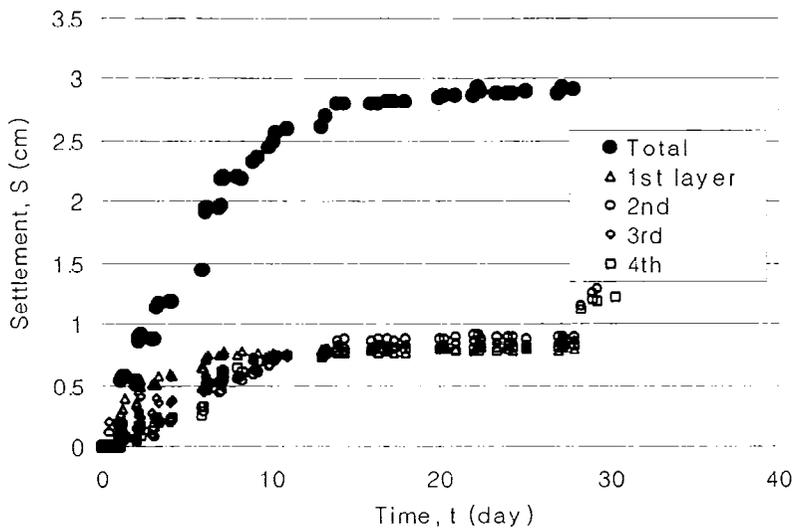
흙에서 배제되는 즉 모관부압에 의해 발생하는 동수경사에 의해 발생되므로 투수계수가 큰 흙이 같은 동수경사에서 더 많은 증발량을 유발시키는 것으로 생각되지만 일반적으로 투수계수가 적은 흙은 압축지수가 적고 흙의 초기함수비가 적기 때문에 압축성이 크고 투수계수가 적은 흙에서 더 큰 모관부압이 작용하여 더 많은 증발량이 발생하는 것으로 측정되었다.

여기서 모관부압은 흙의 유효경과 관계가 있으므로 당연히 토립자의 입경

이 적은 세립토에 더 큰 부압이 발생된다.

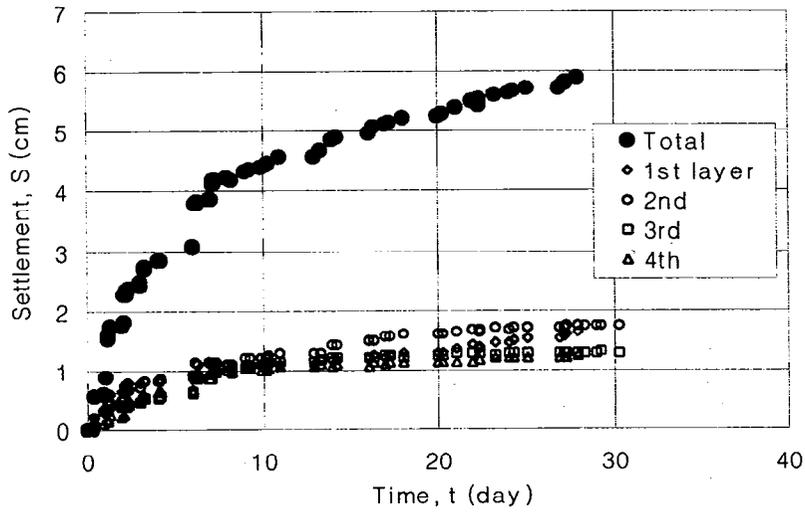


a) 시화 배수조건 ($h_o=60\text{cm}$)

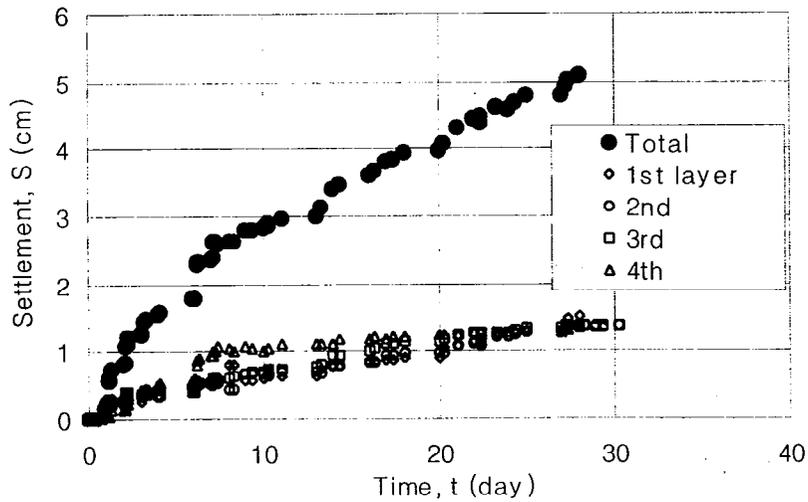


b) 시화 비배수조건 ($h_o=60\text{cm}$)

그림 4.20 대기건조 2차 모형시험 층별침하량 측정결과(I)

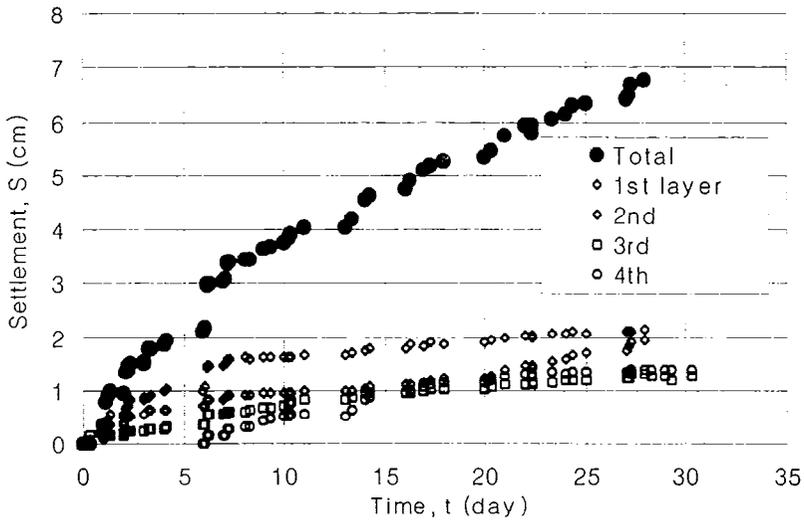


c) 이원공감측 배수조건($h_o=60\text{cm}$)

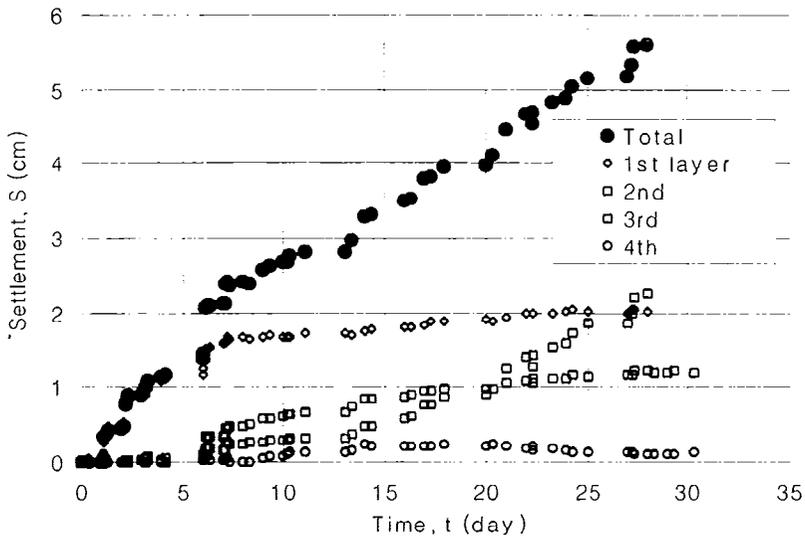


d) 이원공감측 비배수조건($h_o=60\text{cm}$)

그림 4.20 대기건조 2차 모형시험 층별침하량 측정결과(II)

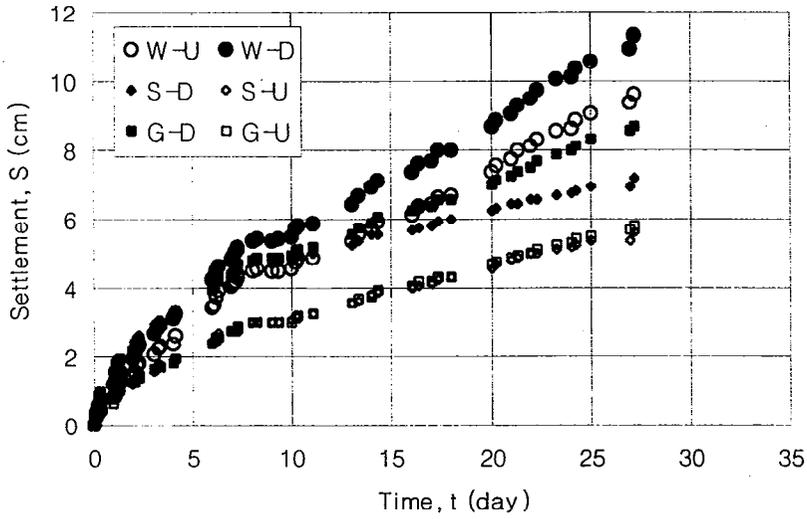


e) 이원화력층 배수조건($h_0=60\text{cm}$)

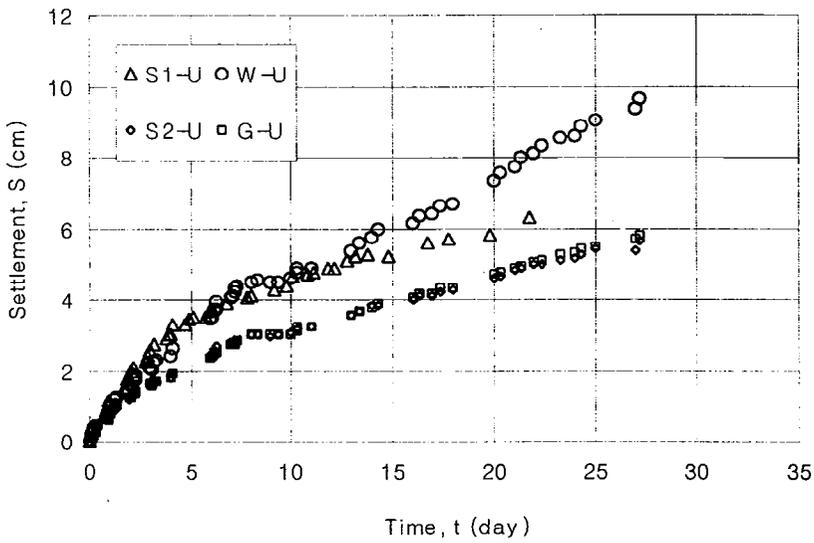


f) 이원화력층 비배수조건($h_0=60\text{cm}$)

그림 4.20 대기건조 2차 모형시험 층별침하량 측정결과(III)



a) 무게비로 나타낸 침하량(전체)



b) 무게비로 나타낸 침하량(비배수조건)

그림 4.21 무게비로 나타낸 시간-침하량(배제수심)

마. 2차 모형시험과 수치해석결과의 비교

3가지 종류의 흙에 대하여 성토고 60cm 조건으로 대기건조에 의한 압축침하 해석을 실시한 결과 그림 4.22와 같이 잘 일치하는 관계를 보이고 있다. 압축침하량의 크기는 압축지수, 초기 유효응력 및 모관부압의 크기에 크게 영향을 받으며, 압축속도는 압밀계수 즉 투수계수에 영향을 크게 받는 것으로 해석되었다.

즉 교란조건에 대한 압축지수와 압밀계수를 정확히 측정하는 것이 필요하며, 교란후의 선행압밀하중을 정확히 구하는 것이 중요하다.

성토표면에 작용하는 모관부압을 실측값과 수치해석이 일치하는 값을 구한 결과 압밀계수와 어느 정도 관계가 있는 것으로 그림 4.23과 같이 분석되었다. 그러나 이 값은 신뢰도가 없는 상태로 앞으로 현장시공 중 더 많은 시험을 통하여 정확한 값을 제시하고자 한다.

특히 이 값은 계절적인 차이와 기후차이에 의한 수면증발량의 변화에 따른 영향을 고려할 수 있는 보완도 필요하다.

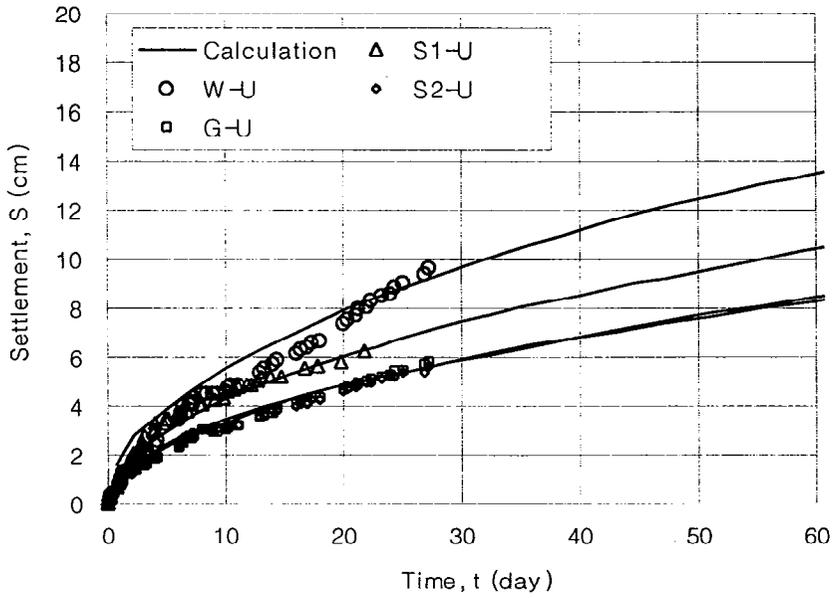


그림 4.22 대기건조 침하량 실측과 이론해석 결과비교

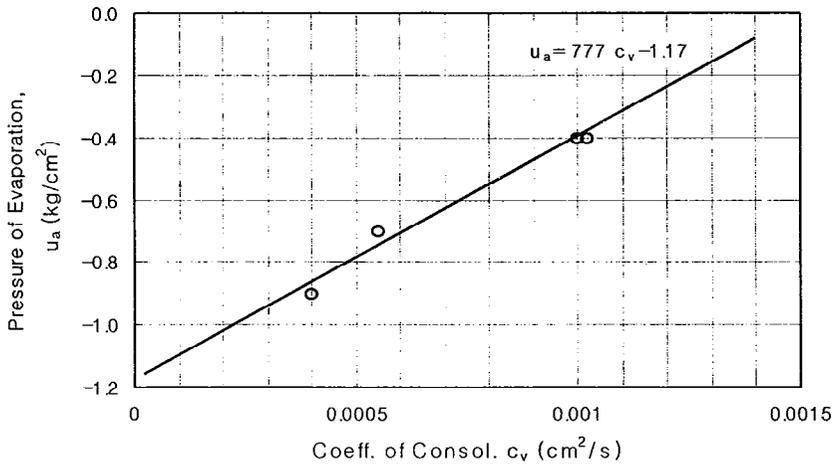


그림 4.23 흙의 압밀계수와 대기건조 모관부압 관계

4. 대기건조 소요시간예측 방법

가. 대기건조 압축침하량으로부터 함수비 계산

대기건조에 의한 흙의 함수비 변화는 대기건조에 의한 증발량과 배수량을 알면 다음식으로 구할 수 있다.

$$\omega_i = \omega_o - S_c \frac{(1 + e_o)}{H_o G} \quad (4.1)$$

여기서

ω_i : 임의 시간의 흙의 함수비

ω_o : 초기 함수비

S_c : 단위면적당 배제수심(무계비로 나타낸 침하량)

e_o : 초기 간극비

H_o : 초기 성토고

G : 흙의 비중

즉 대기건조에 의한 증발 및 배수량을 예측하면 함수비의 변화를 구할 수 있게 된다. 즉 흙으로부터의 물의 흐름을 해석하여 배제수량을 알면 함수비를 구할 수 있다.

나. 대기건조에 의한 배제수량의 특성

대기건조에 의한 단위면적당 증발량과 압축침하량은 포화영역에서는 같은 값을 갖는다. 그러나 대기건조는 흙이 건조수축한계에 도달하여도 계속하여 증발되기 때문에 비포화조건이 되고 이때부터 증발량과 압축침하량은 차이가 발생된다.

그러므로 지금 까지 전개하여온 압밀침하해석으로는 대기건조에 의한 함수비변화의 예측이 불가능하다. 그러나 모형시험결과 대기건조에 의한 배제수량은 그림 4.13과 같이 성토고에 관계없이 거의 같은 값을 갖는 것을 알

수 있다. 즉 성토고가 충분히 큰 조건의 임의 경과시간에 증발수량과 낮은 성토고의 증발수량이 같은 값을 갖는다면(단 구하고자하는 함수비범위내, 95% 습윤층함수비) 충분히 높은 성토고 조건으로 압밀해석을 하여 낮은 성토고의 비포화영역의 함수비변화를 예측할 수 있게 된다.

즉 식 4.1에서 임의 시간의 단위면적당 배제수심 S_c 을 높은 성토고조건으로 구하여 식으로 함수비를 구하고 소요함수비에 도달하는 시간을 결정하면 된다.

다. 모형시험결과를 통한 검증

임의 성토고에 대한 임의 시간의 배제수량은 그 성토고의 2배의 성토고조건에 대하여 Terzaghi의 압밀해석방법의 다음식으로 침하량을 구하면 그 시간에 총 배제수심(S_c)이 된다.

$$S_c = U \frac{c_c}{1 + e_o} 2H \log\left(\frac{u_a}{\sigma_{vo}'}\right) \quad (4.2)$$

여기서

c_c : 압축지수

e_o : 초기 간극비

H : 성토고

u_a : 대기건조 모관부압

σ_{vo}' : 교란후 선행압밀하중

U : 압밀도

여기서 임의의 압밀도에 해당하는 압밀소요시간은 다음 식으로 구하여 각 시간별 배제수심의 관계를 구한다.

$$t = \frac{T (2H)^2}{c_v} \quad (4.3)$$

여기서

T : 시간계수

각 시간별 배제수심을 구하여 식 (4.1)로 부터 시간별 함수비변화를 계산한다.

1차 대기건조모형시험결과 성토고 20cm 조건에 대하여 성토고 40cm 조건으로 성토고 40 및 60cm 조건은 80, 120cm의 성토고조건으로 구한 증발수심으로부터 대기건조에 의한 각 성토고조건의 함수비 변화를 구한 결과 그림 4.24와 같이 실측치와 잘 일치하는 결과를 얻었다.

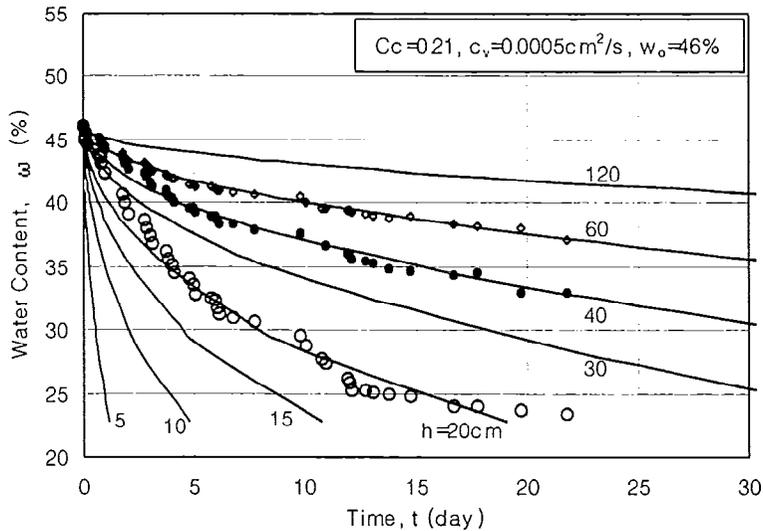


그림 4.24 압밀해석에 의한 대기건조 함수비변화에측과 실측 비교

제 2 절 대기건조에 의한 전단강도 증가

1. 흙의 다짐특성

고함수비 해성퇴적토를 건조시키면서 다짐을 하는 것과 건조후 가수시키면서 다짐을 하면 그림 2.4 및 그림 4.25와 같이 자연함수비조건에서

건조시켜가면서 다짐을 한 조건보다 더 큰 최대건조밀도를 갖는 특성을 보이고 있다.

그러나 고탐수비토 현장에서 완전 건조시킨 후 가수하여 다짐을 하는 조건은 불가능하므로 표준다짐시험에서 건조법으로 시험을 하는 것이 필요하다.

각 시험포별 간척지연약지반토의 다짐특성은 그림 4.25와 같다.

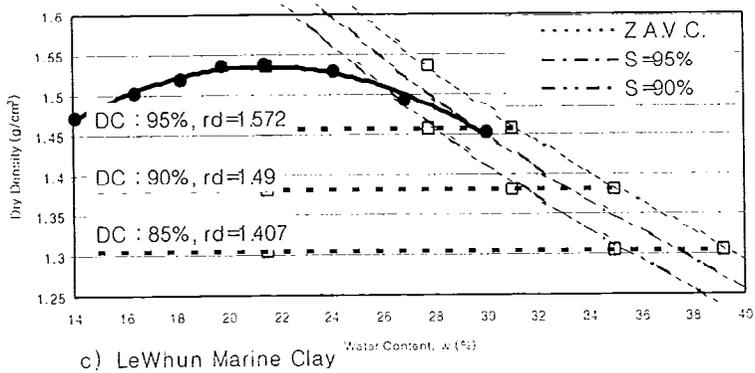
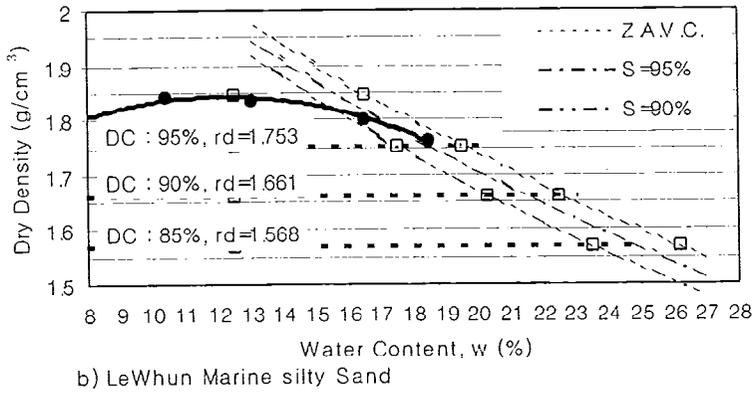
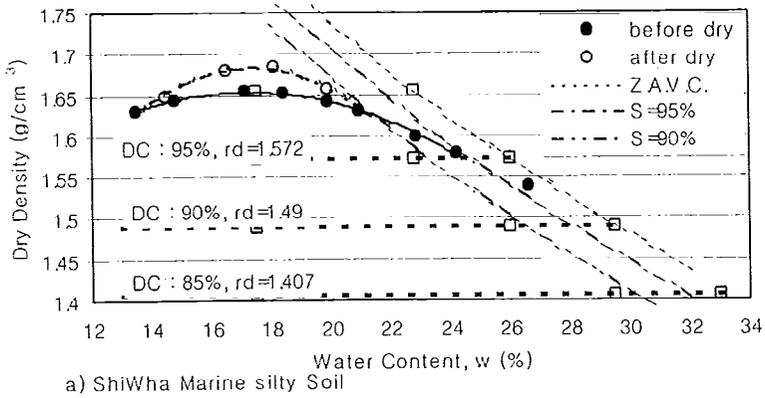


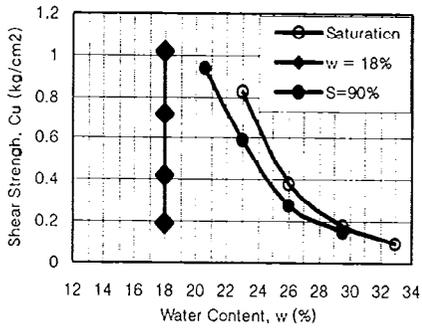
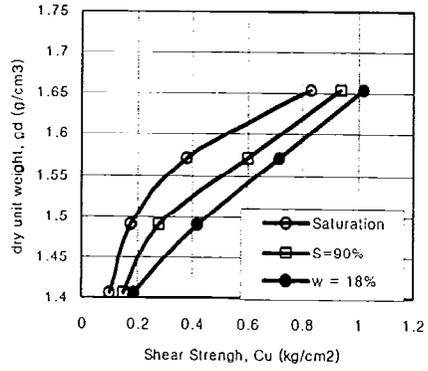
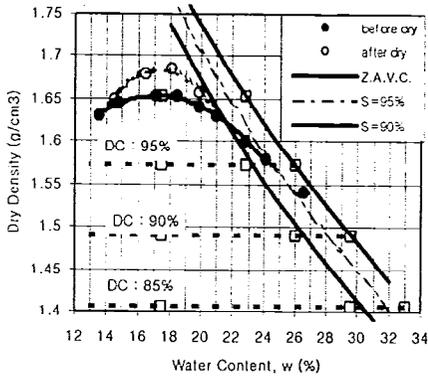
그림 4.25 시험포별 연약 지반토 다짐특성

2. 다짐을 및 포화도별 전단강도 특성

고함수비의 흙일지라도 함수비를 조절하면서 같은 다짐에너지로 다짐을 하면 그림 4.26과 같은 다짐곡선을 얻을 수 있다. 각 현장함수비별, 각 다짐을 조건으로 비배수전단강도시험을 하여 함수비별 다짐밀도별로 비배수전단강도를 그림으로 나타내면 그림 4.26 b), c)와 같은 곡선을 얻을 수 있다.

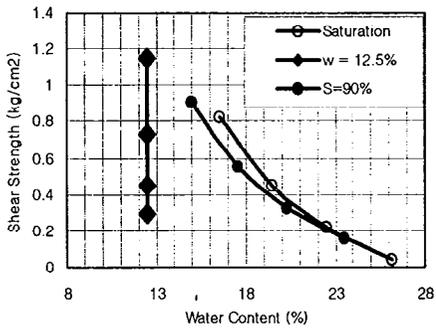
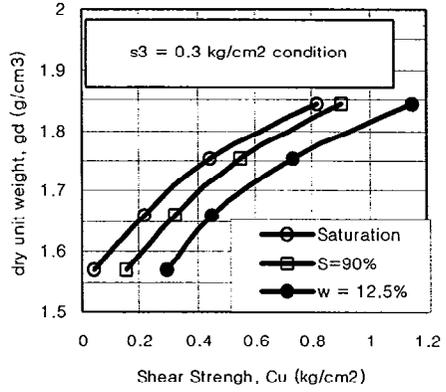
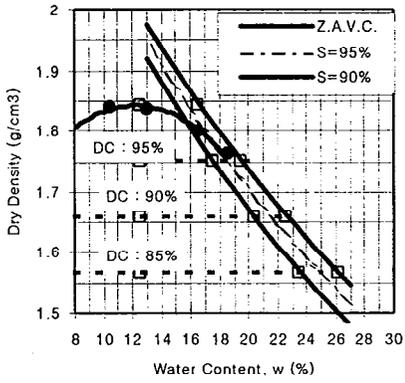
이 결과를 보면 고함수비에서 최적함수비까지의 습윤측에서는 함수비가 적을수록 다짐밀도가 증가하고 비배수전단강도가 증가하는 특성을 보이고 있다.

즉 다짐밀도가 증가할수록 비배수전단강도는 증가하고 같은 다짐밀도에서도 포화도가 적을수록 비배수전단강도가 증가하는 특성을 보이고 있다.



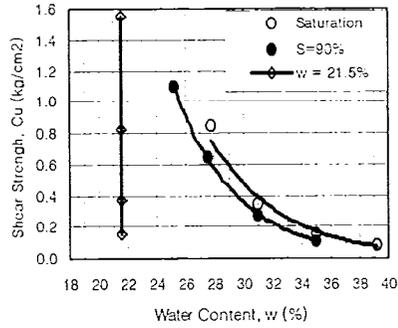
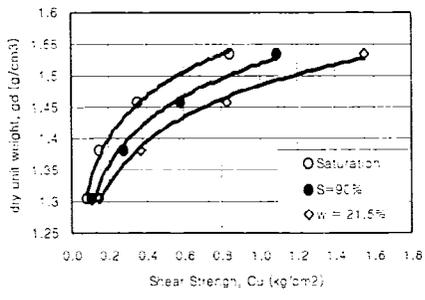
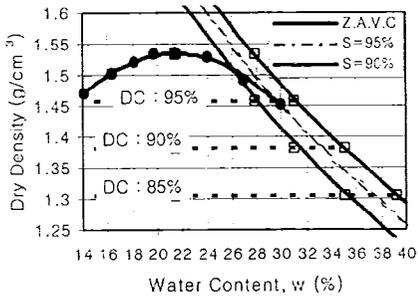
S	M	C	PI	U.S.C.S.
9	80.3	10.7	NP	CL

그림 4.26 시화지구 해성실트의 다짐 및 전단강도특성



S	M	C	PI	U.S.C.S.
66.6	27.4	6	NP	SM

그림 4.27 이원지구 공감축 실트질모래의 다짐 및 전단강도특성



S	M	C	LL	PI	U.S.C.S.
3.2	65.8	31	52.1	24.2	CH

그림 4.28 이원지구 화력측 해성점토의 다짐 및 전단강도특성

제 3 절 대기건조 성토공법 시험시공

1. 시험시공 목적

고함수비토에 대한 함수비조절(압밀배수 및 대기건조)에 의한 현장 성토공정의 가능성을 평가하고 설계시 반영하여야 하는 공정계획의 기준을 얻기 위하여 시험시공을 실시하였다.

2. 시험시공 및 측정방법

경기도 시화지구 해성실트, 충남 이원지구 실트질 모래 및 해성점토의 3가지 흙에 대한 대기건조토 시험성토시공을 실시하였다. 시험성토는 고함수비토(심도 2~3m)와 표층(0~0.5m) 대기건조토의 성토구간으로 나누어 실시하였다.

각 지구별 시험성토의 평면도 및 단면도는 그림 4.29와 같은 조건으로 실시하였다.

시험시공에 사용된 흙의 물리성 및 현장함수비는 표 4.3과 같으며 각 시험구역별 계측항목은 표 4.4와 같이 실시하였다.

표 4.3 각 시험포 흙의 물리성 및 초기함수비

지구명		시화	이원 공감	이원 화력
위치		경기 화성	충남 태안	충남 태안
입도 분포	모래 이상 (%)	9	66.6	3.2
	0.005mm이하	10.7	6	31
흙 분류(U.S.C.S.)		ML	SM	CH
함수비, $\omega_n(\%)$	심층토(0-0.5m)	37.5	38.5	51
	표층토(1.5m이하)	29	24	36
액성한계, LL (%)		NP	NP	52.1
소성지수, PI (%)				27.5

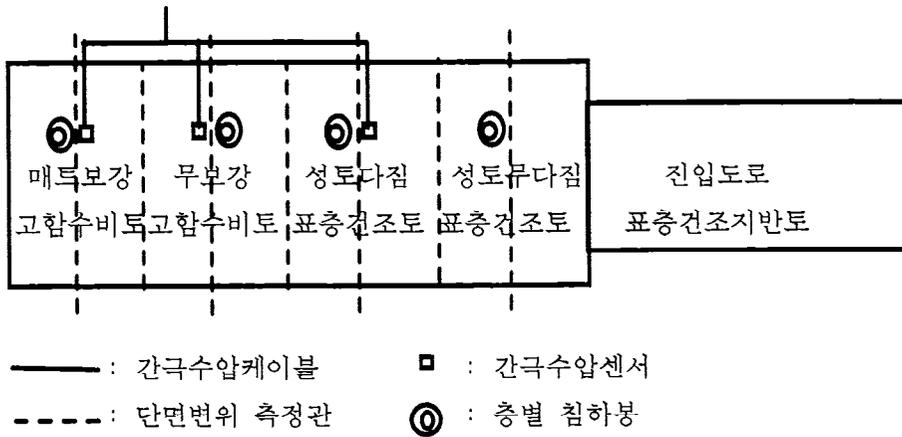


그림 4.29 고탐수비토 함수비조절 시험성토

표 4.4 함수비조절 시험성토 내역

지구명	흙분류	시공 현황	설치단면	간극 수압	침하봉	단면 침하
시화	실트 (ML)	3층	- 고탐수비토 성토(2구간) 토목섬유보강1, 무보강1 - 표층건조토 성토(2구간) 다짐 1, 무다짐 1	4조	4조	4열
이원1 (공감측)	실트질 모래 (SM)	2층	- 고탐수비토 성토(2구간) 토목섬유보강1, 무보강1 - 표층건조토 성토(2구간) 다짐 1, 무다짐 1	3조	4조	4열
이원2 (화력측)	해성 점토 (CL)	2층	- 고탐수비토 성토(2구간) 토목섬유보강1, 무보강1 - 표층건조토 성토(2구간) 다짐 1, 무다짐 1	3조	4조	4열

3. 시험시공결과

가. 시화지구

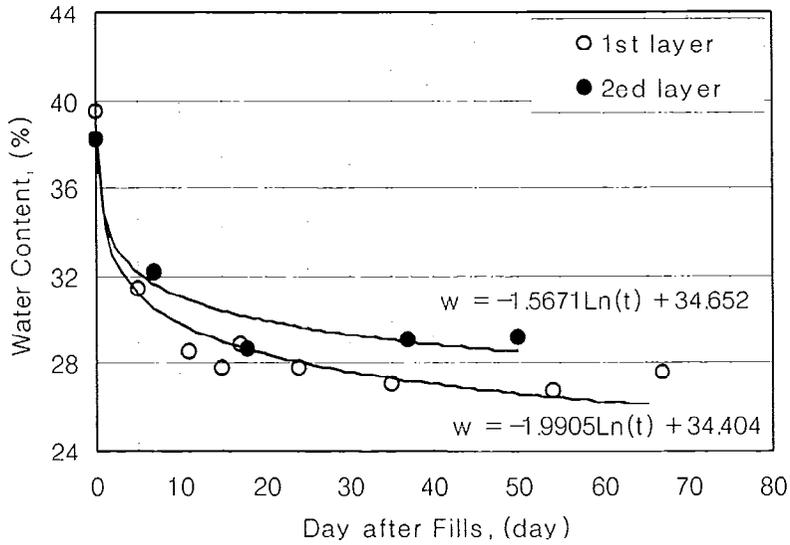
1) 성토후 함수비 변화

본 지구의 연약지반토(심층토 $w_n=39.5\%$, 표층건조토 $w_n=30.5\%$)로 1층 성토고 50~70cm로 시험성토후 함수비변화를 측정하한 결과 그림 4.30과 같이 시간이 경과하면서 감소하는 특성을 보이고 있다.

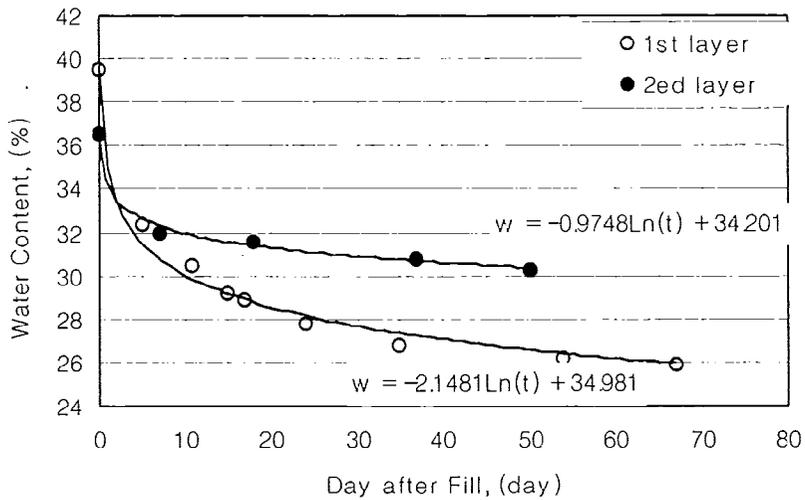
표층건조토로 성토시 대기건조기간 15일 정도면 다짐을 90~95% 습윤축합수비로 건조시킬 수 있는 것으로 측정되었으나 고함수비토를 직접 성토한 경우는 2개월 경과 후에도 현장함수비 26~28%로 다짐을 95%를 얻을 수 없는 높은 함수비로 존재하고 있다.

심도별 함수비 분포를 보면 그림 4.31과 같이 표층토의 함수비 감소가 더 빠르고 심도가 깊을수록 느린 건조특성을 보이고 있다. 그림에서 1층의 함수비가 더 적고 2층(표층)의 함수비가 더 높은 것으로 측정된 것은 1층 성토후 대기건조에 의해 충분히 건조된후 다짐을 실시하고 2층을 성토한 후 충분한 대기건조 전에 측정된 결과이기 때문이다.

대기건조공법 시험성토결과 차량주행이 없는 낮은 성토고(2m)에서는 고함수비토를 직접 사용하는 것도 시험시공사진에서와 같이 성토가 가능하지만, 차량주행과 높은 성토고 조건에서는 대기건조공법으로 흙의 함수비를 충분히 건조시킨 후 소요전단강도를 얻을 수 있는 다짐을까지 다짐이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

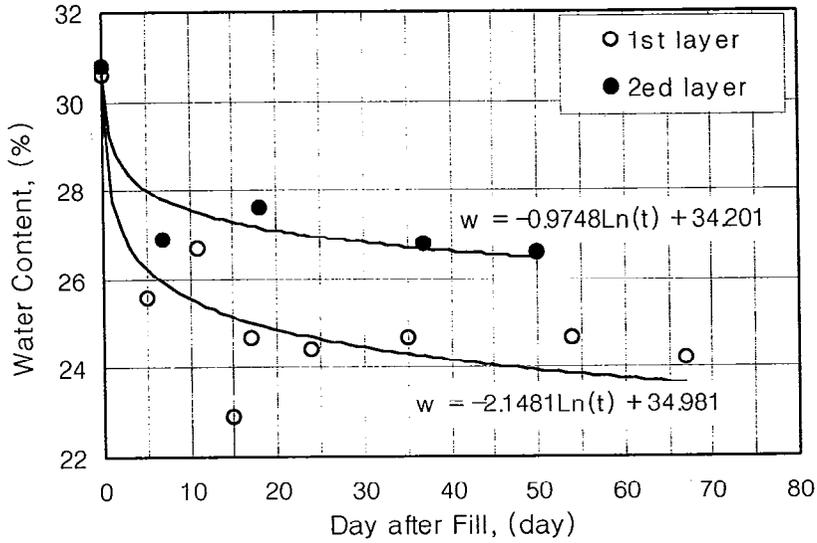


a) 필터매트위에 고탍수비토($w_n=39.5\%$) 성토

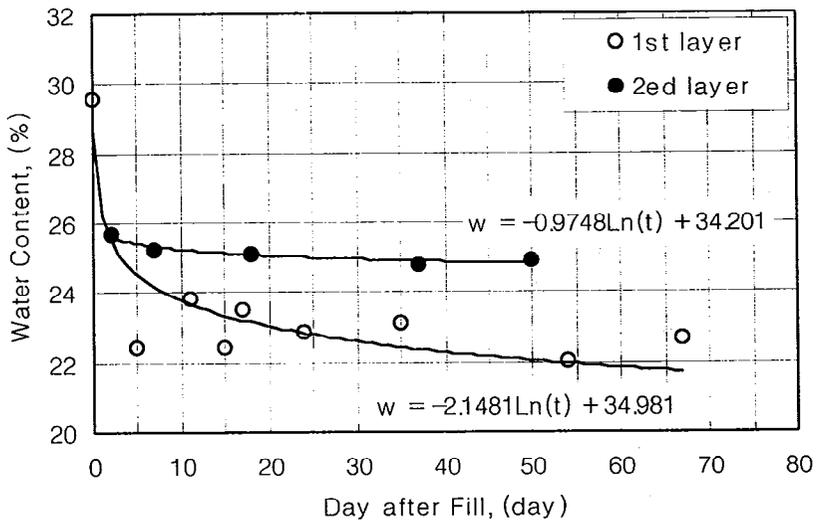


b) 필터매트 없이 고탍수비토($w_n=39.5\%$) 성토

그림 4.30 시화지구 고탍수비토 성토후 층별 함수비 변화 (I)

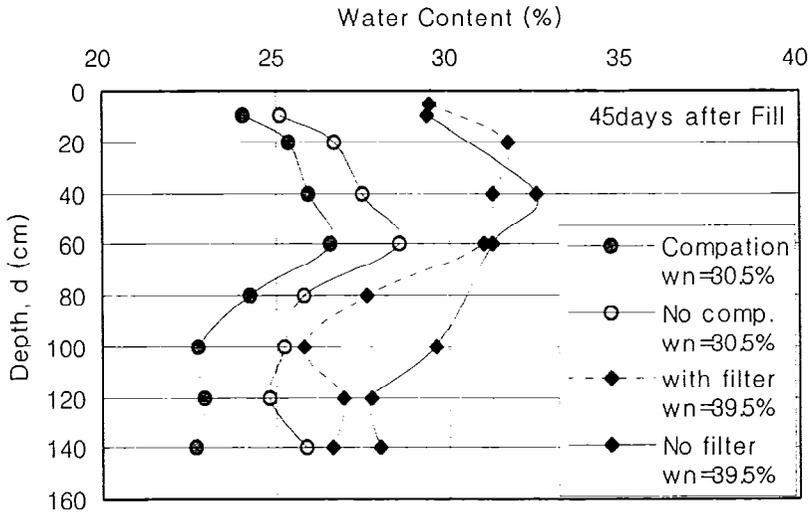


a) 표층건조토 ($w_n=30.5\%$) 성토 무다짐조건

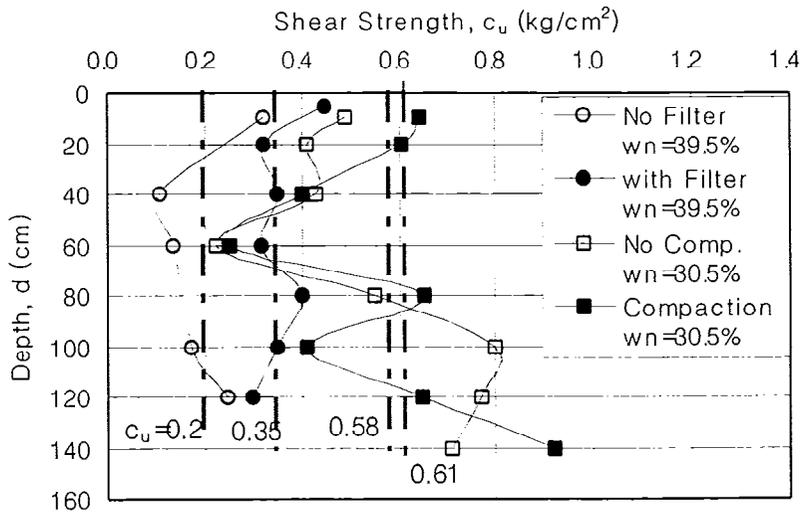


b) 표층건조토 ($w_n=30.5\%$) 성토 다짐조건

그림 4.30 시화지구 고탍수비토 성토후 층별 함수비 변화(II)



a) 현장함수비 분포



b) 비배수전단강도

그림 4.31 시화지구 대기건조 시험시공 함수비 및 전단강도변화

2) 성토다짐단계별 전단강도 증가와 사면안정도

시화지구 간척지 연약지반토의 성토재료로서의 사용가능성을 평가하기 위하여 다짐곡선 및 각 다짐을별 전단강도관계도에 현장 실측자료 사면안정해석결과도 같이 비교하였다.

비교결과는 그림 4.32와 같이 현장의 최대 다짐가능 건조밀도는 표층건조토를 성토재료로 사용할 경우 2차의 다짐으로 다짐을 95%까지 다짐이 가능하였으며, 이 때의 비배수 전단강도 $c_u=0.5\text{kg/cm}^2$ 으로 기초지반이 연약지반인 경우도 성토고 5m까지 가능하며, $c_u=0.3\text{kg/cm}^2$ 의 기초지반 위에 성토시는 성토고 8m까지, $c_u=0.5\text{kg/cm}^2$ 의 경지반 위에는 성토고 10m이상까지도 성토가 가능한 것으로 분석되었다.

그러나 교함수비토를 직접성토하여 대기건조시키는 경우는 차량하중이 없는 성토고 약 2m의 성토까지는 가능하지만 차량주행이나 고성토고의 토공구조물의 시공은 어려운 것으로 분석되었다.

또한 본 지구의 기초지반토가 실트질 흙으로 성토시 배수 및 대기건조가 잘되고, 다짐에 의해 전단강도가 크게 발현되어 성토시공이 가능하지만, 흙입자간의 점착력이 없어 사면유실의 문제가 있으므로 성토후 사면보호공법이 필요하다.

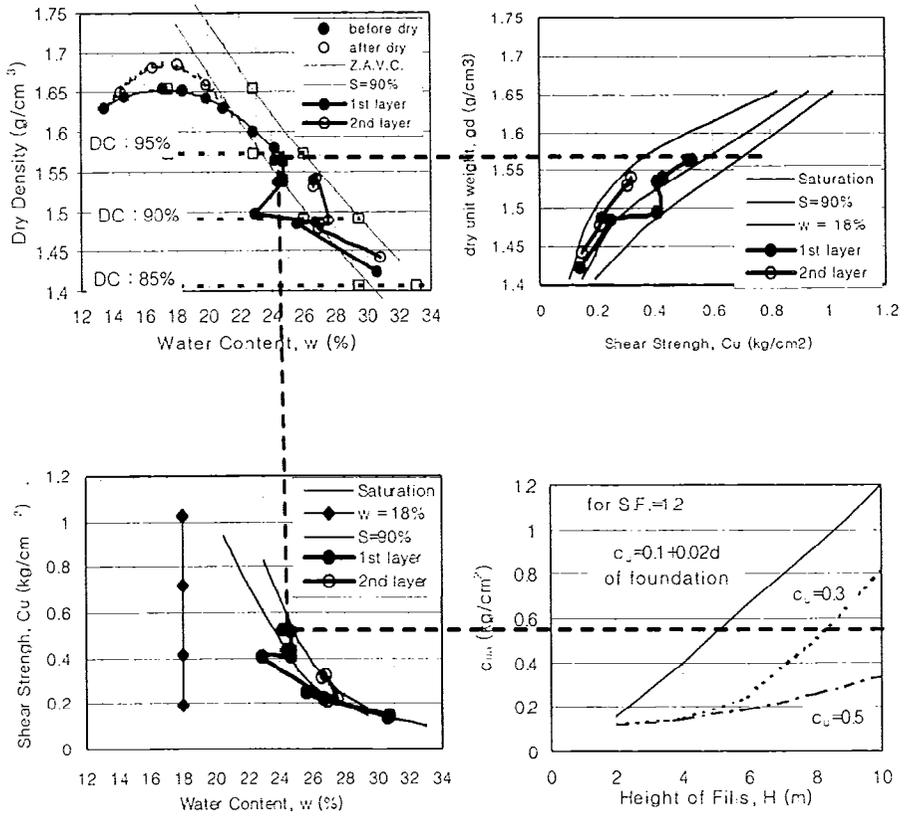


그림 4.32 시화지구 해성실트의 다짐성토와 사면안정도

나. 이원지구 공감측

1) 성토후 함수비 변화

본 구역의 연약지반토(심층토 $w_n=36\%$, 표층건조토 $w_n=28\%$)로 성토고 40~60cm로 시험성토후 함수비변화를 측정된 결과 그림 4.33과 같이 시간이 경과하면서 감소하는 특성을 보이고 있다.

표층건조토로 성토시 대기건조기간 10~20일 정도면 다짐을 90~95% 습윤 축함수비(18~22%)로 건조시킬 수 있는 것으로 측정되었으나, 고함수비토를 직접성토한 경우는 2개월 경과 후에도 현장함수비 23~25%로 다짐을 90%를 얻을 수 없는 높은 함수비로 존재하고 있다.

차량주행이 없는 낮은 성토고(2m)에는 고함수비토를 직접 사용하여 성토가 가능하지만, 차량주행과 높은 성토고 조건에서는 다짐을 95%습윤축까지 건조시켜 다짐을 하여야 성토가 가능하다는 결과를 얻었다.

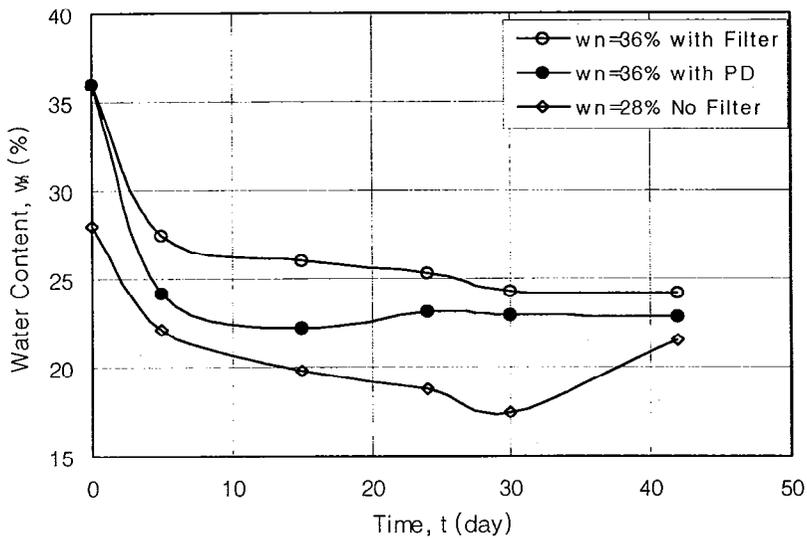


그림 4.33 이원지구 공감측 연약지반토성토후 함수비 변화

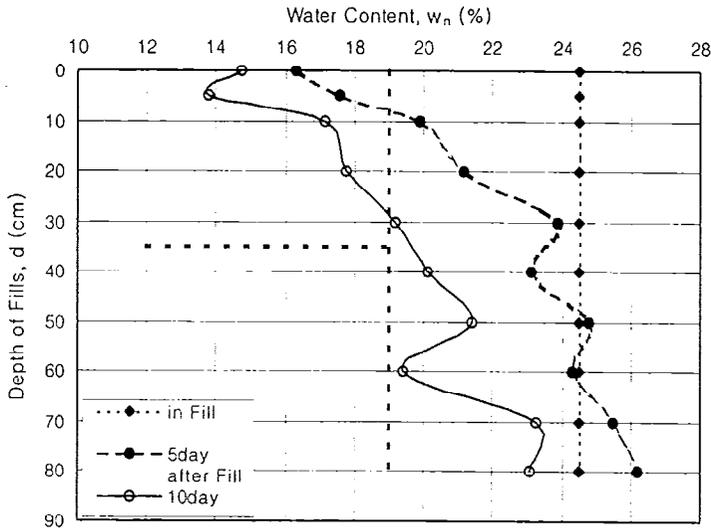


그림 4.34 이원지구 공감축 심도별 함수비 변화

2) 성토단계별 전단강도 증가와 사면안정도

시화지구와 같이 본 구역의 기초지반 표층토에 대한 다짐곡선 및 각 다짐을별 전단강도관계도에 현장 실측자료를 같이 그리고 사면안정해석 결과도와 같이 비교하였다.

비교결과는 그림 4.35와 같이 현장의 최대 다짐가능 건조밀도는 표층건조토를 성토재료로 사용할 경우 2차의 다짐으로 다짐율 95%까지 다짐이 가능하였으며, 이 때의 비배수 전단강도 $c_u=0.7\text{kg/cm}^2$ 으로 기초지반이 연약지반인 경우도 성토고 6.5m까지 가능하며, $c_u=0.3\text{kg/cm}^2$ 의 기초지반 위에 성토시는 성토고 10m이상까지도 성토가 가능한 것으로 분석되었다.

그러나 시화지구와 같은 기초지반토는 실트질모래로 함수비조절이 비교적 쉽고 성토시 전단강도가 크게 발현되지만, 사면유실의 문제가 있어 성토후 사면보호공법이 필요하다.

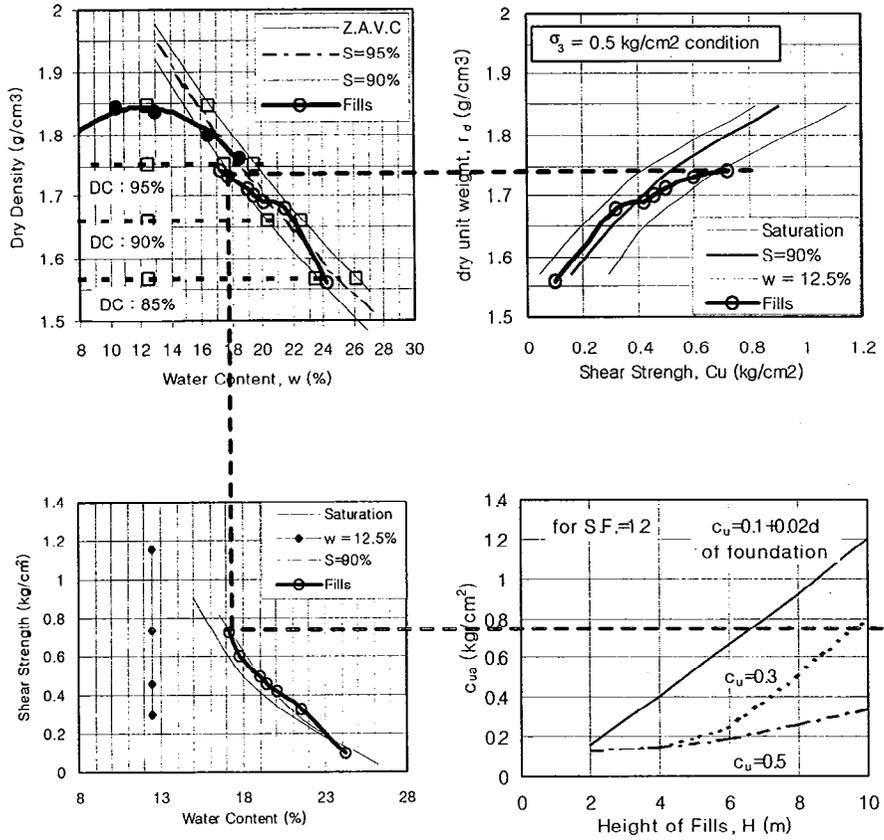


그림 4.35 이원지구 공감축 실트질모래의 다짐 및 전단강도특성

다. 이원지구 화력측

본 지구의 연약지반토(심층토 $w_n=53\%$, 표층건조토 $w_n=37.6\%$)로 1층 성토고 40~50cm로 시험성토후 함수비변화를 측정된 결과 그림 4.36과 같이 시간이 경과하면서 감소하는 특성을 보이고 있다.

표층건조토로 성토시 대기건조기간 10~25일 정도면 다짐율 90~95% 습윤축함수비로 건조시킬 수 있는 것으로 측정되었으나 고함수비토를 직접 성토한 경우는 2개월 경과 후에도 현장함수비 40%로 다짐율 90%를 얻을 수 없는 높은 함수비로 존재하고 있다.

심도별 함수비 분포를 보면 그림 4.37과 같이 표층토의 함수비 감소가 가장 빠르고 심도가 깊을수록 느린 건조특성을 보이고 있다.

고함수비토를 직접사용하는 경우는 흙의 함수비가 40%로 차량주행이 없는 낮은 성토고(2m)도 시공이 어려운 것으로 분석되었으며, 대기건조된 표층토의 사용시 다짐율 95%습윤축까지 건조시키기 위하여는 건조소요시간이 많이 소요되는 것으로 높은 성토고와 차량주행을 위한 성토는 적용이 어려운 것으로 분석되었다.

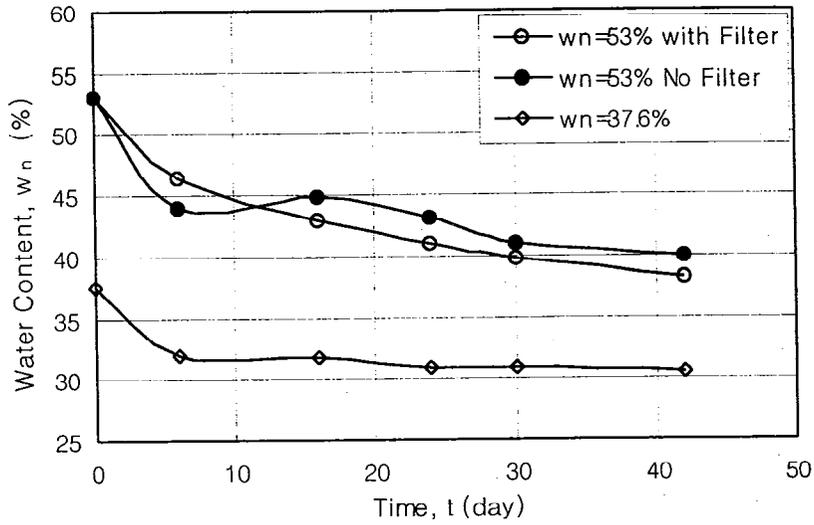


그림 4.36 이원지구 화력측 연약지반토성토후 함수비 변화

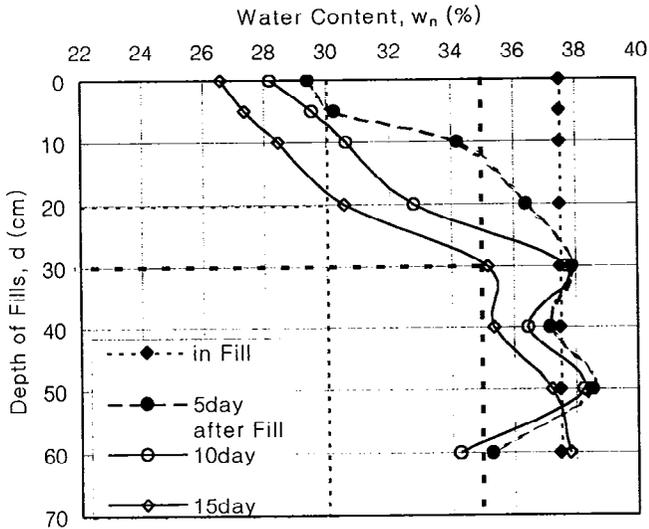


그림 4.37 이원지구 화력측 심도별 함수비 변화

2) 성토단계별 전단강도 증가와 사면안정도

본 구역의 기초지반 점토질 표층토에 대한 다짐곡선 및 각 다짐을 별 전단강도관계도에 현장 실측자료를 같이 그리고 사면안정해석 결과도와 같이 비교하였다.

비교결과는 그림 4.38과 같이 현장의 최대 다짐가능 건조밀도는 표층건조를 성토재료로 사용할 경우 2차의 다짐으로도 다짐을 95%까지 다짐이 가능하였으며, 이 때의 비배수 전단강도 $c_u=0.3\text{kg/cm}^2$ 으로 기초지반이 연약지반인 경우 성토고 3m까지 가능하며, $c_u=0.3\text{kg/cm}^2$ 의 기초지반 위에 성토시는 성토고 6m이상까지, $c_u=0.5\text{kg/cm}^2$ 의 경지반 위에 성토시는 성토고 8m까지 성토가 가능한 것으로 분석되었다.

그러나 점토질 흙은 흡수팽창이 크고, 대기건조 소요시간이 길어 실무에 적용하기는 어려우므로 차량주행 및 고성토고에서는 시멘트처리 등에 의한 고결공법의 적용이 필요하다는 결과를 얻었다.

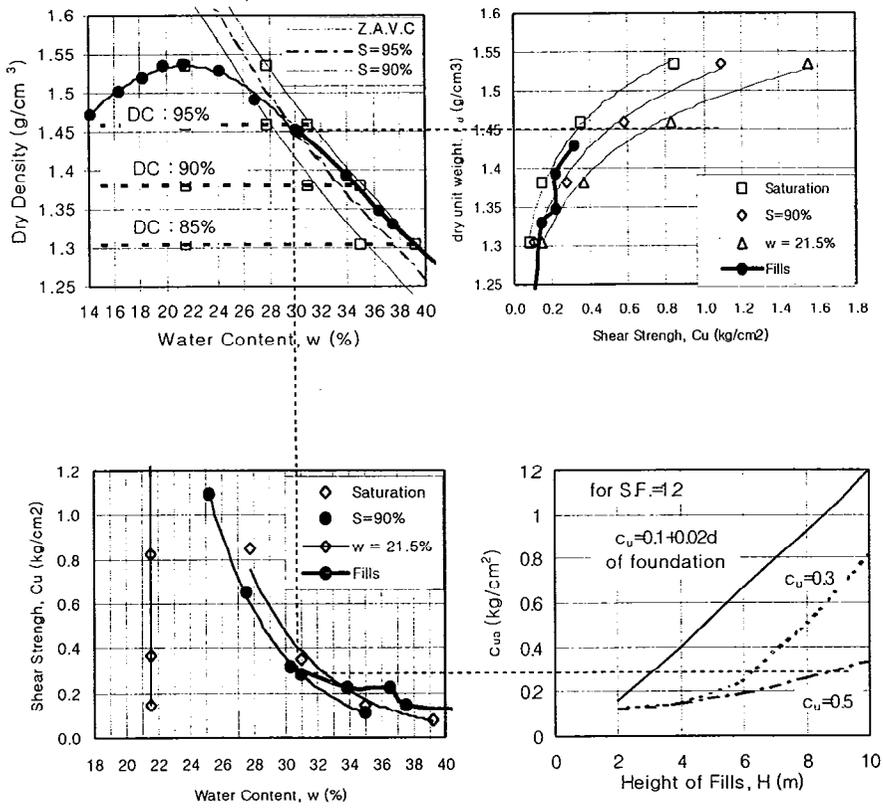


그림 4.38 이원지구 화력측 해성점토의 다짐 및 전단강도특성

다. 시험시공결과

대기건조성토공법 시험시공결과를 분석한 결과 표 4.5와 같이 표층건조토는 표층토를 집토하여 대기건조시켜 다짐율 95%조건으로 다짐을 하면 3~6m까지 성토시공이 가능한 것으로 분석되었다.

대기건조일수는 표층건조토를 집토하여 사용시 포설두께 20~30cm 일 때 약 15일(우천일수 제외)이면 다짐율 95% 습윤축조건 까지 건조가 가능한 것으로 분석되었다.

그러나 고탐수비토는 대기건조일수(2개월 이상)가 많이 소요되어 대기건조공법만으로 시공성이 없어 개량공법의 적용이 필요한 것으로 분석되었다.

표 4.5 대기건조 성토 시험시공 분석결과

지구명	구 분	성토한계	가능 다짐율	소요대기건조일수 (건기 시)	건조포설두께 (cm)
시 화	고함수비토	2m이하 무차량	90%	2개월	20
	표층건조토	4m 경차량주행	95%	15일	20
이원공갑	고함수비토	4m 무차량	90%	2개월	20
	표층건조토	6m 경차량주행	95%	15일	20
이원화력	고함수비토	2m이하 무차량	90%	3개월	20
	표층건조토	3m이하경차량	95%	15일	20

제 4 절 대기건조 성토공법 공정계획

1. 목표전단강도 결정

연약지반위에 성토하는 경우와 경지반에 성토하는 경우 사면안정(안정도 S.F.=1.2이상)에 필요한 성토재료의 소요 전단강도는 그림 4.39와 같이 차이가 매우 크다.

그러므로 주어진 기초지반조건과 성토고 조건에 대하여 사면안정해석을 하여 소요의 사면안정도를 확보할 수 있는 성토재료의 소요전단강도를 구하거나 그림 4.39를 이용하여 성토재료의 목표전단강도를 결정한다.

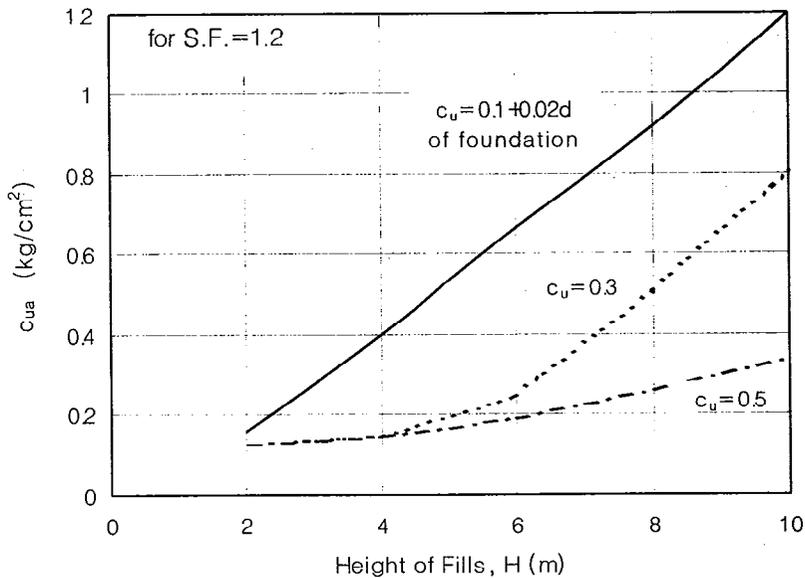


그림 4.39 기초지반 조건별 성토재료의 소요전단강도

2. 목표함수비 결정

성토재료로 사용할 연약지반토의 함수비별 다짐조건에 대한 비배수전단강도시험을 실시하여 함수비별 비배수 전단강도관계를 구한다. 이 관계로부터 1항의 목표 전단강도를 얻을 수 있는 현장함수비를 결정한다. 현장에서 이 함수비 이하로 대기건조시켜 소요의 다짐을 실시하면 사면안정에 필요한 비배수 전단강도를 얻어 토공구조물의 시공이 가능하게 된다.

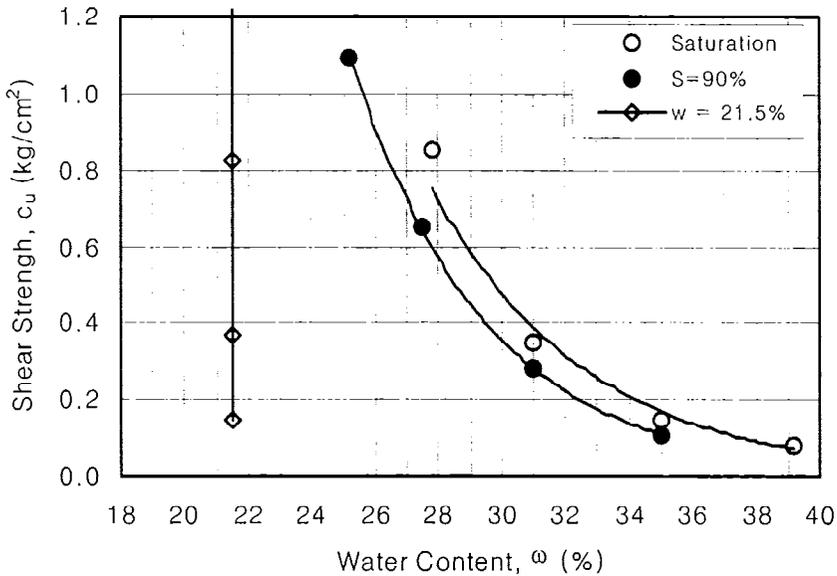


그림 4.40 현장함수비와 비배수 전단강도관계

3. 함수비조절방법 검토

함수비조절방법의 선택은 현장조건, 계절, 기후 및 공정등에 의해 결정될 것이다. 실제 현장함수비를 대기건조에 의해 조절한다는 것은 매우 어려운 일이지만 계획을 체계적으로 잘 수립하면 매우 경제적인 공사가 이루어

어질 수 있다고 판단된다.

그러나 분명한 것은 대기건조에 의해 가능한 성토공의 한계를 분명히 하는 것이 우선 필요하며, 대기건조공법을 선택할 때 현장에서 필요로 하는 공정을 설계에 반영하여야만 소요의 품질을 갖는 토공구조물을 구축할 수 있을 것이다.

대기건조공법에서 필요한 공정은 흙의 함수비를 대기건조에 의해 감소시키는 공정과 조절된 함수비 조건에서 최적의 다짐을 할 수 있는 다짐공정이 있다.

대기건조에 의한 함수비조절공정의 설계는 현장함수비를 목표함수비까지 감소시키는데 필요한 대기건조일수의 결정이다. 이 대기건조 소요일수의 결정은 기후, 지반으로부터의 모관수 공급여부, 지하수위, 지반토의 투수계수 등의 현장조건에 따라 차이가 크므로 매우 어려운 일이다.

본 연구에서 이를 규명하기 위하여 대기건조모형시험을 실시하여 대기건조 소요일수 결정방법을 제안하였으나 이는 시험에 사용한 흙의 종류가 한정되어 있고 기후조건도 시험기간동안의 특수조건에 대한 자료이므로 앞으로 시공중 시험시공을 하여 자료가 축적되면 합리적인 설계기준을 설정하는 것이 필요하다는 것을 밝혀두고 싶다.

목표함수비 까지 건조시키기 위한 대기건조 포설두께와 대기건조소요일수의 결정방법을 설명하면 식 (4.1)과 식 (4.2)로부터 그림 4.41과 같은 그림을 그리고 이 그림으로부터 목표함수비를 얻기 위한 대기건조 포설 두께 및 대기건조일수를 결정한다.

여기서 결정한 조건은 지반으로부터 모관공급수가 없는 조건으로 모관공급수가 있는 조건은 모관공급수를 고려한 해석을 실시하여 그림 4.41을 그리면 된다.

여기서 구하여지는 대기건조일수는 우천일수를 고려하지 않은 일수로 우

천일수를 추가하는 것이 필요하다. 우천일수는 우천시 비닐포장 등으로 비를 맞추지 않는 조건은 우천일수만 포함시키면 되지만 비를 맞추는 조건은 흙이 한번 비를 맞으면 비를 맞기전으로 가는데 약 2일이 소요되므로 우천일수의 3배를 더 계산하여 주는 것이 필요하다.

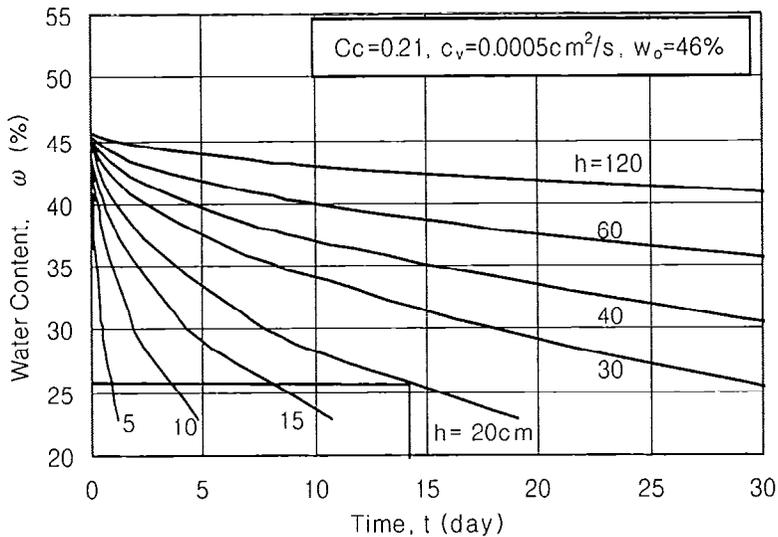


그림 4.41 대기건조 포설두께 및 소요일수 결정도

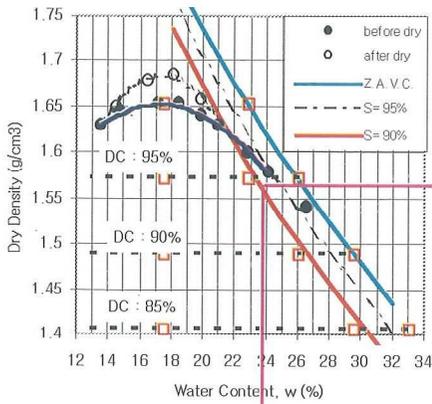
4. 함수비조절과 다짐공정 검토

고함수비의 연약지반토를 성토재료로 사용하기 위하여는 건설할 토공 구조물에서 필요한 전단강도를 얻을 수 있는 함수비까지 대기건조시켜 소요의 다짐을 하여야 한다.

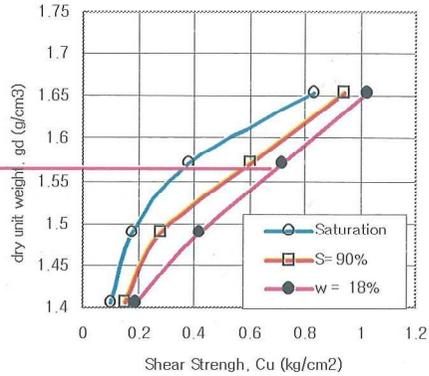
여기서 소요의 전단강도는 그림 4.42 d)에서 기초지반과 성토고에 해당하는 소요전단강도를 구하고, 소요의 함수비는 그림 4.42 c)로부터 소요전단강도를 얻을 수 있는 소요함수비를 결정한다.

그리고 소요의 다짐밀도는 그림 4.42 a)로부터 소요전단강도를 얻을 수 있는 다짐밀도를 결정한다. 다짐밀도가 결정되면 그 다짐밀도가 최대 건조 밀도에 대한 비로서 기준다짐율을 결정하면된다.

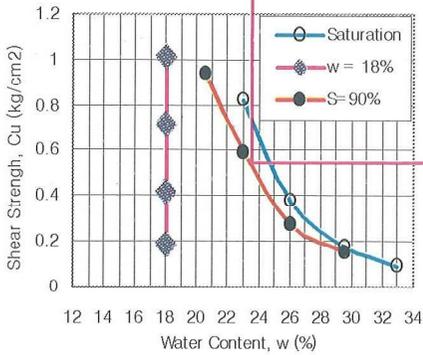
여기서 다짐시공관리에 있어서 성토재의 함수비가 높은 조건에서는 같은 함수비에서 다짐을 너무하여 포화도가 커지면 전단강도가 크게 감소하는 특성을 보이므로 현장함수비와 포화도로 품질관리를 할 필요가 있게 된다.



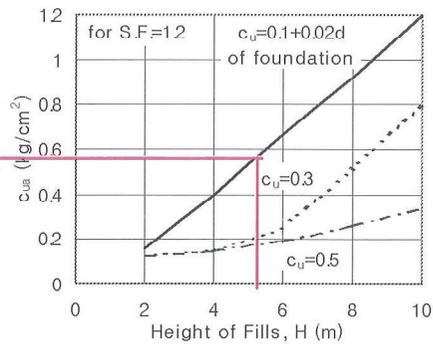
a) 다짐특성



b) 다짐밀도별 전단강도



c) 함수비별 전단강도특성



d) 성토고별 소요전단강도

그림 4.42 연약지반토의 성토재료 활용을 위한 소요 비배수 전단강도, 소요함수비 및 소요다짐을 결정방법

5. 대기건조 다짐성토공법의 한계

가. 고태수비토의 다짐 및 전단강도 증진의 한계

해성점토, 해성실트 및 실트질모래 등의 연약지반토 일지라도 함수비를 최적함수비 정도로 건조시켜 다짐을 하면 그림 4.40과 같이 토공구조물을 시공하기 위하여 필요한 충분히 큰 전단강도를 얻을 수 있다.

그러나 연약지반위에 성토를 할 때 연약지반이 연약한 경우는 그림 4.39와 같이 성토재의 소요전단강도(10m성토시 비배수전단강도 $c_u=1.2\text{kg/cm}^2$)가 너무나 크기 때문에 6m이상의 성토단면은 시공이 어려우므로 압성토와 같은 성토단면의 보강이나, 기초지반을 보강할 수 있는 개량공법등의 병행이 필요하다.

또한 흙의 전단강도는 흙의 함수비에 따라 차이가 크므로, 고태수비토의 함수비를 소요함수비까지 감소시킬 수 있는 가능성이 대기건조공법의 한계를 좌우하게 된다.

나. 고태수비토 대기건조 함수비조절 한계

대기건조에 의한 고태수비토의 함수비조절은 그림 4.41과 같이 대기건조에 의한 흙의 평균함수비의 감소는 흙의 포설두께와 관계가 크다.

표층건조토는 자연함수비가 적어 쉽게 다짐을 95% 습윤축함수비로 건조시킬 수 있어 성토재료로 사용할 수 있다. 그러나 고태수비토는 대기건조공법보다는 시멘트 혼합처리 등에 의한 개량성토공법을 적용하는 것이 경제성과 시공성면에서 적합하다고 판단된다.

즉 현장에서 표층건조토만을 사용할 경우는 소요전단강도를 얻을 수 있는 습윤축함수비까지 건조시키는 것이 가능하므로 대기건조공법을 적용하고, 배수로 굴착토와 같은 고태수비의 심층토를 성토단면에 사용하여야 하는 조건은 시멘트혼합처리공법을 적용하는 것이 타당하다는 결론을 얻었다.

제 5 절 결 론

고함수비 연약지반토를 성토재료로 사용하기 위한 대기건조 성토공법의 적용가능성을 확인하기 위하여 첫째 사면안정해석을 통하여 성토재료로서 필요한 소요전단강도를 분석하고, 둘째 소요전단강도를 얻기 위하여 대기건조시켜야 하는 흙의 목표함수비를 결정하기 위한 다짐시험과 삼축압축시험을 실시하고, 셋째 대기건조 소요일수를 결정하는 방법을 제시하기 위하여 대기건조모형시험을 실시하였으며, 현장에 시험시공을 통하여 대기건조 성토공법의 시공성을 확인하고 그 한계를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 성토재료의 소요전단강도

성토재료의 소요 비배수전단강도는 기초지반의 조건(전단강도)에 따라 차이가 크며, 기초지반의 전단강도가 $c_u=0.1+0.02\text{kg/cm}^2$ 조건에서 성토고(h)별 성토재료의 소요전단강도 $c_{ua}=0.133h\sim 0.133\text{kg/cm}^2$ 이상이면 되는 사면안정해석결과를 얻었다.

2. 대기건조 목표함수비 결정

성토재료의 소요전단강도를 얻기 위하여 대기건조시켜야 하는 흙의 함수비는 함수비별 전단강도시험을 실시하여 함수비와 전단강도관계로 부터 구할 수 있는 모델을 제시하였다.

3. 대기건조 소요일수

대기건조일수는 흙의 종류, 초기함수비, 대기건조 포설두께, 기후 등에 영향을 받으므로 그 소요일수를 정확히 예측하는 것은 매우 어렵다는 결과를 얻었으며, 조사설계단계에서 그 현장조건에서 대기건조시킬 수 있는 조건으로 시험시공을 통하여 결정하는 것이 필요하다는 결론을 얻었다.

4. 대기건조공법의 한계

간척지 표층건조토는 집토하여 대기건조시켜 다짐율 95%조건으로 다

짐을 하면 3~6m까지 성토시공이 가능하며, 대기건조일수는 표층건조토를 발갈이를 하여 대기건조시키면 약 15~20일(우천일수 제외)이면 다짐율 95% 습윤층조건 까지 건조가 가능한 것으로 분석되었다.

그러나 배수로 굴착 등의 고함수비토는 대기건조일수(2개월 이상)가 많이 소요되어 대기건조공법만으로 시공성이 없으므로 시멘트 혼합처리 등의 개량공법의 적용이 필요하다는 결론을 얻었다.

제 5 장 시멘트 혼합처리 성토공법

제 1 절 시멘트 및 시멘트계 고화재의 개량원리와 효과

1. 포트랜드 시멘트에 의한 연약지반토의 개량 원리

포트랜드 시멘트에 의한 흙의 강도개선 효과를 보면, 포트랜드 시멘트의 첨가에 의한 함수비 저하, 이온효과, 단립화에 의한 소성지수의 감소 등의 물리성 개선효과가 있다.

시멘트에 의한 수화반응이 진행된다면 강도가 증가하고, 시간이 경과할수록 시멘트 반응이 일어나서 안정적인 강도 개선이 이루어진다. 포트랜드 시멘트에 의한 흙의 강도 효과의 대부분이 포트랜드 시멘트의 수화물생성에 의한 것이다.

흙은 장석, 석영 등 주로 조립분을 구성하고 있는 광물과 Kaolinite, Montmorillonite, Illite 등의 점토광물에 의해 구성되어 있다. 특히 점토 중에는 포트랜드 시멘트와는 결합이 잘 안되는 특수한 점토가 있다. 특수한 흙이 아닐지라도 연약한 흙은 일반적으로 세립분이 많고 고함수이며 유기물을 함유하고 있는 것이 많아 시멘트의 효과를 감소시키는 작용을 한다.

시멘트의 입도는 0.09mm체를 거의 전량통과하고 0.005mm 정도를 최소입경으로 하는 직선적인 입도분포로서 점토에 시멘트를 혼합한 흙의 일축압축 강도는 흙의 종류와 함수비등에 따라 그 차이가 매우 크다.

이 개량효과의 차이는 입도분포에 의한 것만은 아니지만 시멘트보다 점토 입자의 크기가 작고, 토립자의 간극에 시멘트입자가 들어와 흙 간극의 모서리까지 시멘트를 침투시키기 위하여 보다 많은 량의 시멘트가 필요하기 때문에 흙의 입도가 적으면 적을수록 더 많은 량의 시멘트가 필요하게 된다.

일반적으로 시멘트의 첨가량이 많아지면 시멘트 혼합체리토의 강도는 증가한다(Broms, 1984). 그러므로 배합설계를 통하여 소요의 강도를 얻기 위한 배합비를 구하여 다른 고화재와 경제성을 비교할 필요가 있다.

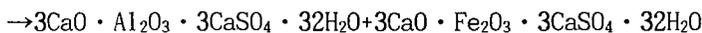
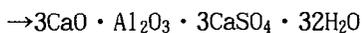
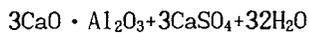
2. 시멘트계 고화재에 의한 개량의 원리

함수비가 매우 높은 연약한 점성토와, 시멘트의 수화를 저해하는 유기물을 다량으로 함유한 초연약토를 고화하는 경우, 포틀랜드 시멘트에서는 개량효과를 기대하기 어렵다고 한다.

이와 같은 고화대상물을 보다 적은 첨가량으로 경제적인 고화를 목적으로 시멘트를 주성분으로 하고 고화에 유효한 성분을 첨가하거나, 성분을 조정 한 특수 시멘트가 제조, 판매되고 있다. 이 특수한 시멘트는 시멘트를 주재료로 하고 고화를 목적으로 하는 재료의 의미로서 「시멘트계 고화재」라 부르고 있다.

연약한 흙뿐이 아니고 고유기질토 및 산업폐기물 등을 고화처리 하여야 하는 사회적 필요에 의해 포틀랜드시멘트의 성능을 개선하기 위하여 특수 시멘트로 만들어진 것이 시멘트계 고화재이다.

고화대상물의 종류가 많기 때문에 시멘트계 고화재의 종류도 다양하다. 일반 연약토용 시멘트계 고화재에 첨가되는 석고계의 재료는 그 종류와 첨가량에 따라 효과가 차이가 크다. 첨가되는 석고의 효과로서 다량의 물과 결합하여 새로운 광물을 생성하는 특수한 반응이 다음 식과 같이 일어난다고 한다.



여기서, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ 는 Ettringite(에트리가이트)라 불리

며, 질량으로 100의 CaSO_4 에 대해서 141의 H_2O 와 함께 66의 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 가 화합된다. 포틀랜드시멘트에서도 초기에는 이 반응이 일어나지만, 포틀랜드시멘트에서는 석고의 양이 적기 때문에, 석고가 다 소비되고 나면 석고가 적은 복염 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 로 변화한다고 한다.

시멘트계 고화재에 의한 고화과정은 다음과 같이 요약 할 수 있다.

① 다량의 Ettringite를 생성한다. Ettringite는 다량의 물을 결합수로 소비하여 함수비를 저하시킴과 동시에 토립자의 이동을 구속하고 cementation이 용이한 상태를 만든다.

② 수산화 칼슘, 규산 칼슘 등으로부터 용출한 Ca^{++} 은 토립자를 응집시켜 토립자는 응집, 단립화하고 사질토에 가까운 성상을 보인다.

③ 규산 칼슘 수화물 생성에 의해 강도가 상승한다.

④ 장기재령에서는 흙에 함유되어 있는 SiO_2 , Al_2O_3 등의 가용성분이 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 불용성의 수화물을 생성하여 경화한다. 이 반응이 포졸란 반응이다.

3. 시멘트계 고화처리 개량토의 특성

시멘트계 고화재에 의한 개량토의 특성을 보면, 물리적 성질로는 습윤밀도의 변화, consistency(연경도)의 개선, 화학적 성질은 개량토의 PH변화, 역학적 성질로서는 주로 일축압축강도의 증가를 들 수 있다. 그 외의 특성으로 장기 재령강도, 차수성 향상, 동상저항성 증대, 동결융해 및 건습반복에 대한 저항성 등을 들 수 있다.

가. 습윤밀도

흙의 습윤단위중량을 보면 연약지반토와 유기질토 등은 거의 1.0 t/m^3 정도부터 양질의 사질토에서 2.0 t/m^3 정도까지 그 분포 폭이 크다.

시멘트계 고화재의 비중은 3.1 정도로 토립자의 밀도와 비교하면 1.1~1.4배정도 크다. 따라서 시멘트계 고화재를 분말로 첨가할 경우, slurry의

물-고화재비 50% 일때의 비중은 1.8, 물-고화재비 100% 일 때 1.5, 150% 일 때 1.4로 작아진다. 더욱이 slurry 첨가시는 상당분의 수량이 첨가되어 개량에 의한 습윤밀도의 증가는 거의 보이지 않게 된다. 즉 초연약토를 고화재 slurry로 개량할 때에 개량전과 개량후의 단위중량은 변화가 거의 없게 된다. 그러므로 개량토의 자중에 의한 추가적인 지반침하의 검토는 필요 없다.

나. Consistency

시멘트계 고화재를 첨가한 개량토는 시간의 경과와 함께 수화가 진전되고 토립자의 응집, 접착(cementing), 수분의 흡착이 일어난다. 더욱이 시간이 경과하면 포졸란 반응이 일어나고, 토립자의 단립화, 고결경화에 의해 흙의 Consistency가 변화한다.

즉, 액성한계(LL)는 적어지고, 소성한계는 증가되기 때문에 소성지수는 작아진다. 그 결과 점성토는 사질화되어 사질토의 특성을 보여주기도 한다. 그러므로 고화처리된 흙은 토공에 있어서의 시공성은 향상되고 장비 주행성이 개선된다. 지금까지 사토처리하고 있는 흙에 시멘트계 고화재를 첨가하여 개량하면 성토재료로 재활용할 수 있다는 것을 보여주는 개량특성이다.

다. 강도 특성

연약토의 고화처리에 의한 개량효과는 일반적으로 일축압축강도로 평가된다. 그림 5.1은 개량토의 일축압축 강도를 고화재의 첨가량 및 양생일수와의 일반적인 관계를 보여주고 있다. 즉 시멘트계 고화재를 첨가한 개량토는 일반적으로 첨가량이 증가하면 일축압축강도가 증가되고, 양생일수가 경과될 수록 강도가 증가한다.

그림에서 보면 고화재의 첨가량이 같은 경우 보통 포틀랜드시멘트 보다 시멘트계 고화재의 강도가 더 크게 발현됨을 알 수 있다.

목표강도를 일정하게 할 때에는 보통 포틀랜드시멘트 보다 시멘트계 고화

재의 첨가량이 적어지고 경제적인 개량이 가능한 경우가 많다. 역시 고화재 첨가량과 양생일수 및 강도의 관계는 후에 서술된 것처럼 여러 가지 요인이 복잡하게 영향을 미치므로 현장에서부터 시료를 채취하고 실내 배합시험에 의해 고화재 첨가량과 일축압축 강도의 관계를 확인하여 설계하여야 한다.

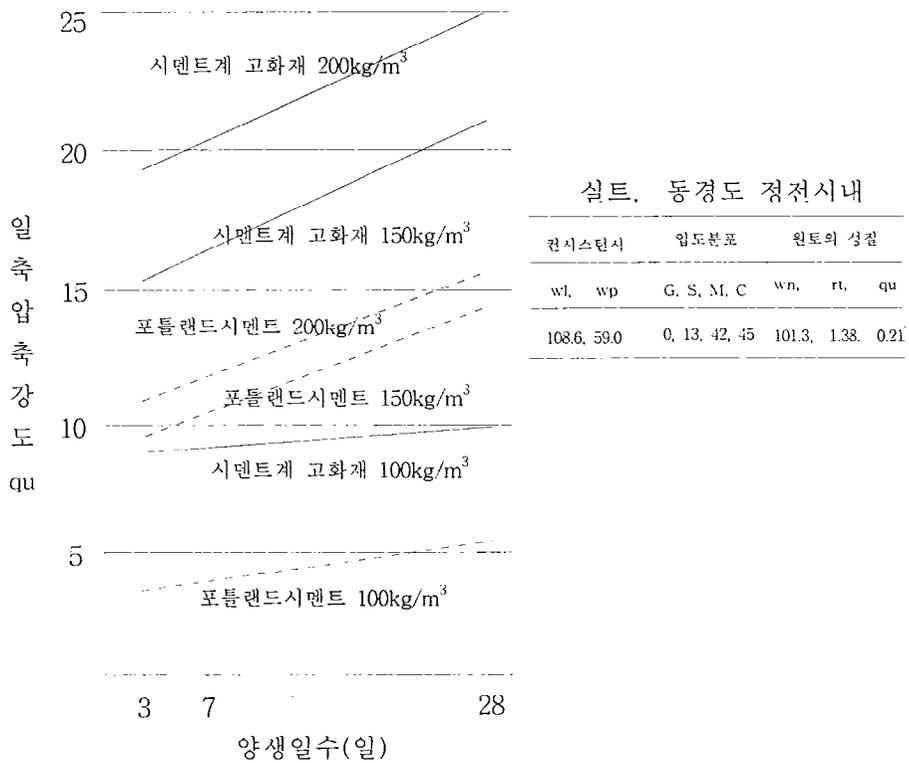


그림 5.1 포틀랜드 시멘트와 고화재의 일축압축강도

1) 토질에 의한 영향

시멘트의 개량효과는 흙의 종류와 성상에 따라서 차이가 매우 크다. Woo(1971)는 점토함량과 소성지수가 클수록 시멘트의 효과는 점점 감소한다고 하였으며, Broms(1986)도 흙의 소성지수(PI)가 클수록 개량효과가 적다고 하였다. 또한 흙의 활성도가 클수록 개량효과는 적다고 한다.

시멘트에 의한 고화 처리 개량효과는 사질토가 가장 크고, 실트(silt)→점성토→화산회점성토→유기질토의 순서로 감소하는 경향이 있다. 한편 시멘트계 고화제의 개량효과를 보통 포틀랜드시멘트와 비교하면 개량효과의 차이가 가장 큰 것이 유기질토이고, 화산회질 점성토→점성토→실트(silt)→사질토의 순서로 개량효과의 차이가 적어지는 경향이 있다고 한다.

2) 흙의 함수비 및 유기물 함유량에 의한 영향

흙의 함수비 및 유기물함유량에 따라 시멘트의 개량효과는 차이가 크다. 일반적으로 개량토의 일축압축강도에는 흙의 함수비와 유기물 함유량이 특히 영향을 미친다.

유기질흙에서는 흙시멘트의 강도증가가 매우 낮다. 하지만 유기질토의 시멘트혼합 안정처리효과는 석회(lime)보다는 더 효과적이라고 한다(Miura 1986).

시멘트계 고화제는 고함수비 흙과 고 유기질토에 대해서는 보통 포틀랜드시멘트에 비해 시멘트계 고화제가 특히 큰 개량효과를 보인다. 그림 5.2는 개량전의 흙의 함수비가 일축압축 강도에 미치는 영향을 보인 것으로 고함수비 흙의 일축압축강도가 적은 것을 보이고 있다.

3) 온도에 의한 영향

시멘트계 고화제는 기온이 높을 때 수화 반응이 활발해 지고 온도가 낮아짐에 따라 완만하게 되는 것은 보통 포틀랜드시멘트와 같은 모양이 고 0℃ 이하로 되면 강도발현은 기대할 수 없다.

양생온도가 5℃ 때의 강도와 표준양생 온도 20℃ 때의 강도를 비교하면 고화재 첨가율이 적은(5% 이하의) 범위 보다 영향이 크고, 양생일수의 초기(3일)가 장기 양생일수 보다 크게 영향을 받는 경향이라고 한다.

라. 그 외의 특성

시멘트계 고화재에 의한 기타 개량효과는 ① 장기 강도증가 효과, ② 차수성 증가효과, ③ 동상저항성 증가, ④ 동결융해 및 견습반복에 대한 저항성 증가 및 ⑤ 압축성 감소효과를 들 수 있다.

4. 흙시멘트의 성토재료로서 소요강도

가. 성토단면 시공을 위한 소요강도

연약지반토를 성토재료로 활용하기 위하여는 우선 성토시공중 발생되는 사면활동파괴가 발생되지 않도록 충분한 전단강도를 갖는 흙으로 개량하여 사용하는 것이 필요하다.

사면활동방지를 위한 소요강도에 대하여는 제 2장에서 검토되었기 때문에 그 결과만을 요약하면 다음과 같다.

기초지반이 경지반($c_u=0.5\text{kg/cm}^2$) 일 때는 그림 2.10과 같이 성토고 10m의 경우도 $c_u=0.4\text{kg/cm}^2$ (안전율 1.2기준) 정도의 강도면 성토가 가능하여 대기 건조공법만으로도 시공이 가능할 수 있다.

그러나 연약지반 위에 성토하기 위해서는 낮은 성토고(2m이하)에서는 비배수전단강도 $c_u=0.2\text{kg/cm}^2$ (안전율 1.2기준) 정도면 성토가 가능하지만, 성토고 10m의 경우 $c_u=1.2\text{kg/cm}^2$ (안전율 1.2기준) 정도의 강도가 필요하다.

그러므로 연약지반 위에 고함수비의 연약지반토를 성토재료로 이용하기 위하여는 시멘트 혼합처리 등의 개량공법으로 비배수전단강도 $c_u=0.2\sim 1.2\text{kg/cm}^2$ 을 갖는 성토재료로 개량하는 것이 필요하다.

나. 차량주행을 위한 소요지지력비

성토단면에 차량주행을 위하여는 소요의 지지력비를 갖는 성토재료

로 성토하는 것이 필요하다. 그러므로 고탄수비의 연약지반토를 시멘트 혼합처리하여 차량주행을 위한 성토재료로 사용하기 위하여는 소요의 지지력비를 갖도록 개량하여야만 한다.

도로공사표준시방서 205-2항에 도로노상토의 소요지지력비는 수정CBR=10% 이상, 보조기층은 도로공사표준시방서 602-2항에 수정CBR=30%이상으로 규정하고 있다.

이 기준을 인용하면 성토공사 중에 임시차량주행을 위해서는 CBR=10%이상이면 차량주행이 가능하고, 성토완료 후 간이포장개념의 공사용 도로로서는 CBR=30%이상의 강도를 갖는 성토재료로 개량하는 것이 필요하다.

5. 흙시멘트 배합설계의 필요성과 연구방향

위에서 설명한 것과 같이 흙의 종류, 함수비, 유기물의 함량 등에 따라 시멘트 또는 시멘트계 고화재의 개량효과는 차이가 매우 크므로 설계전에 현장시공조건에 의해 흙으로 흙시멘트 배합시험을 하여, 시멘트 또는 고화재의 첨가량과 일축압축 강도의 관계를 구하여 성토재료로 활용하기 위한 설계를 하는 것이 필요하다.

흙시멘트에 있어서 Type-III 시멘트가 Type- I 시멘트보다 더 효과적이지만 Type- I 시멘트가 더 일반적으로 사용되고 있다고 한다. 그 이유는 Type- I 시멘트가 다른 시멘트보다 구입이 쉽고 경제적이기 때문이라고 한다 (Bergado 1996).

시멘트계 고화재가 우리나라에서도 적은 규모의 공사에서 많이 적용되고 있으나 그 가격이 시멘트보다 높은 편으로 배합설계를 같이 실시하여 경제성을 비교하여 선택할 필요가 있다.

연약지반토를 성토재료로 활용하기 위하여는 시멘트 고화처리에 의하여 성토재료로서 필요한 적은 강도증가효과만 있으면 된다. 그리고 우리나라의 해성점토는 Kaolinite가 대부분으로 함수비도 거의 100%이하로서 시멘트 혼

합처리만으로 성토재료로 필요한 강도($0.5 \sim 1 \text{kg/cm}^2$)를 충분히 얻을 수 있다고 판단된다.

그러므로 본 연구에서는 우리나라 서남해안의 고함수비($\omega_n=29 \sim 59\%$)의 연약지반토에 시멘트를 혼합처리하여 성토재료로 사용하는데 경제성이 있는지를 분석하기 위하여 저배합비의 시멘트 혼합처리토의 개량효과에 대하여 중점적으로 연구시험을 하였다.

제 2 절 시멘트혼합처리의 개량효과 확인시험

1. 연구시험의 목적

고함수비 간척지반토에 시멘트 또는 시멘트계 고화재를 혼합처리하면 흙의 전단강도가 크게 증가되고, 압축성이 크게 감소되므로 성토재료로서 사용이 가능하다. 여기서 성토재료로서 필요한 개량효과를 얻을 수 있는 배합비의 결정이 중요하다.

본 연구에서는 성토재료로 활용할 흙의 함수비별로 시멘트의 첨가량별 개량효과를 확인하기 위하여 흙의 함수비별 시멘트함량별 일축압축시험, CBR 시험 및 삼축압축시험을 실시하고, 압축성의 개량을 확인하기 위하여 압밀시험을 실시하였다.

특히, 지금까지의 기존 연구자료들을 보면 고강도(일축압축강도 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상) 흙시멘트에 대한 연구가 주로 이루어졌으나, 본 연구에서는 성토재료로 사용하기 위하여 필요한 저강도($0.5\sim 2\text{kg}/\text{cm}^2$)만을 얻기 위한 저배합비(시멘트함량 2~5%)의 흙시멘트의 특성을 규명하는데 목적을 두었다.

2. 연구시험방법과 시험대상 흙의 특성

흙시멘트 배합시험은 현장에서 성토재료로서 문제가 되고 있는 고함수비의 간척지 자연지반토(함수비 40~60%)에 시중에서 일반적으로 판매되고 있는 보통포틀랜드시멘트를 저배합비(2, 3, 5, 10%)조건으로 혼합하여 완전 밀폐조건과 대기건조조건을 양생 실시하고 다짐을 혼합직후 바로 다짐하는 조건과 대기건조 후 1, 3, 6일 후에 자연다짐 조건에 대하여 양생 7일조건에서 삼축압축시험, 일축압축시험 및 압밀시험을 실시하였다.

본 시험에 사용한 흙은 이원지구 화력측 해성점토를 주로 사용하였으며, 흙의 종류별 특성을 규명하기 위한 시험은 시화지구(해성실트) 및 이원지구 공감측(실트질 모래)의 흙을 사용하였다. 시험에 사용한 흙의 물리성은 표

4.2와 같다.

가. 흙시멘트혼합 및 양생

흙시멘트 혼합비는 흙의 건조량대비 시멘트중량의 비로 계산하였다. 흙과 시멘트의 혼합은 흙에 시멘트를 넣고 혼합이 완전히 이루어질 때까지 믹싱을 하고 시험용몰드에 혼합된 흙을 공극이 발생되지 않도록 몰드에 압입하는 방식으로 몰드를 채워 몰드에 충격을 주어 완전히 시료가 몰드에 채워지도록 하였다.

흙의 함수비가 높은 조건으로 혼합토의 상태는 포화조건으로 몰드제작에는 큰 어려움은 없었으며 혼합후 10~20분 안에 몰드제작이 완료되도록 하였다. 양생은 6일간 몰드와 함께 완전밀폐조건의 습윤상태로 양생후 탈형하여 수중에 1일간 수침양생 후 7일조건의 일축압축강도시험, 삼축압축시험 및 압밀시험을 실시하였다.

나. 일축압축시험

일축압축시험 몰드는 직경 38mm 높이 76mm의 원통형몰드를 사용하였으며 일축압축시험전에 몰드양단에 캐핑 또는 연마기로 갈아서 완전 직각조건이 되도록 하여 일축압축시험기로 압축강도를 측정하였다.

강도가 큰 조건(시멘트 배합비 5~10%)의 몰드는 콘크리트용 압축강도시험기를 이용하였다.

다. 삼축압축(CU)시험

저배합비 고태수비의 흙시멘트에 대한 삼축압축시험조건의 응력경로와 삼축등방압축특성, 축압축과정의 간극수압발생특성 및 전단강도발현특성을 규명하기 위하여 시멘트 배합비별 7일 양생조건으로 압밀비배수(CU) 삼축압축시험을 실시하였다.

시험과정은 2시간정도의 백프레서(back-pressure)과정을 거친 후 24시간 동안 등방압밀조건으로 압밀배수시킨후 간극수압을 측정하면서 축압축시험

을 실시하였다.

라. 압밀시험

압밀시험은 직경 60mm, 높이 20mm의 표준압밀시험용 몰드에 흙시멘트를 채우고 완전포화조건으로 건조수축이 발생되지 않는 조건으로 7일간 양생을 실시한 후 표준압밀시험을 실시하였다. 압밀시험의 압밀하중은 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4 및 12.8kg/cm²의 단계로 각 하중 단계별로 24시간동안 압밀침하량을 계측하였다.

양생기간동안 대기건조조건일 때 건조된 후 다짐을 실시하면 압축특성의 변화를 구하기 위하여 혼합 후 1일, 3일 6일 후 대기건조된 함수비조건으로 다짐을 실시한 몰드에 대하여 압밀시험을 실시하였다.

마. CBR시험

시멘트혼합처리한 흙의 지지력비 증가특성을 확인하기 위하여 CBR 시험몰드에 시멘트혼합토를 포화다짐조건으로 제작 후 7일간 수침양생 후 CBR시험을 실시하였다. 여기서 다짐은 흙이 고함수비이기 때문에 다짐횟수와 전혀 관계없이 10회 이하로 다짐을 하여도 완전포화다짐조건이 되었다.

3. 일축압축시험결과

가. 흙시멘트의 응력-변형특성

고함수비 해성점토에 보통 시멘트를 혼합처리하면 그림 5.2와 같이 시멘트함량이 많을수록 일축압축강도가 증가하고 파괴시의 변위도 적어지는 특성을 보이고 있다.

보통 고함수비 흙의 응력변형곡선은 뚜렷한 파괴점이 형성되지 않고 변형을 15~20%까지 응력이 증가하거나 같은 값을 보이지만 흙시멘트의 응력-변위곡선은 1~6% 변위에서 파괴되어 최대강도를 보이고 있다.

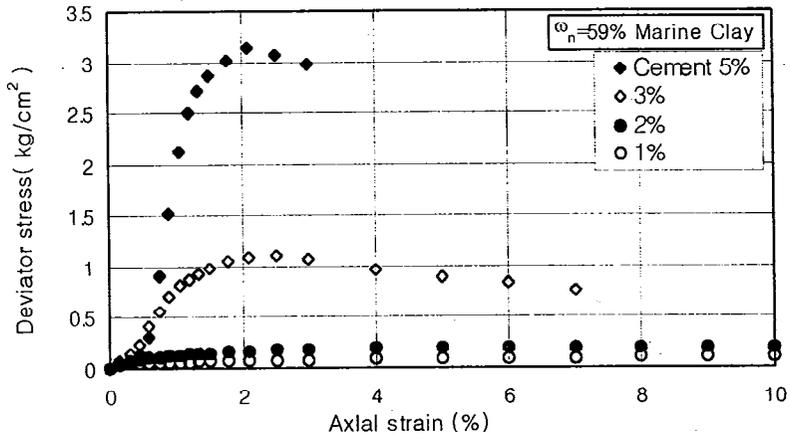
파괴점의 변위는 시멘트함량이 증가할수록 적어지는 경향으로 시멘트 함량이 증가할수록 흙은 단단한(stiff) 특성을 보이고 있으며 분명한 파괴점

을 보이고 있다.

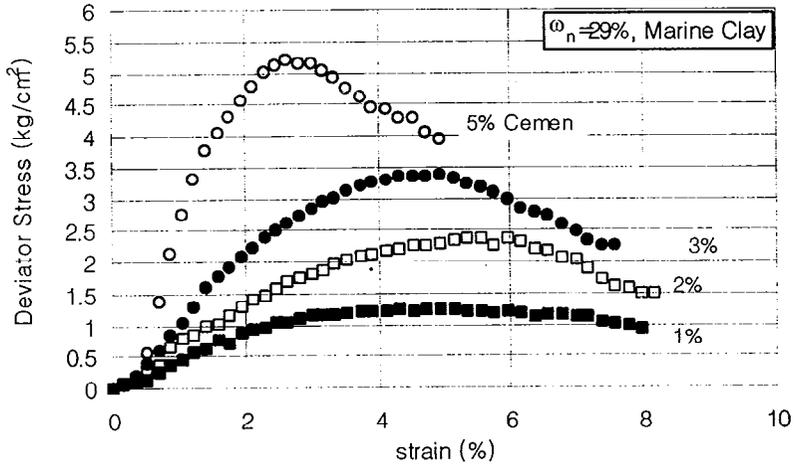
나. 양생일수와 일축압축강도

양생일수별 일축압축강도를 보면 그림 5.3과 같이 양생일수가 경과할수록 증가하는 특성을 보이고 있다. 일반 콘크리트와 같이 양생일수 초기에는 강도증가 속도가 매우 크지만 시간이 경과하면서 증가속도가 감소하는 특성을 보이고 있다.

본 연구시험의 함수비 59%의 해성절토에 대한 시험결과 양생일수 7일의 압축강도가 28일 양생일수의 압축강도에 60%정도로 초기강도발현이 크고 후기 강도발현은 매우 느린 증가속도를 보이고 있다.



a) 함수비 59% 해성점토와 시멘트혼합처리(7일양생강도)



b) 함수비 29% 해성점토와 시멘트혼합처리(7일양생강도)

그림 5.2 흙시멘트 일축압축시험의 응력변형곡선 (I)

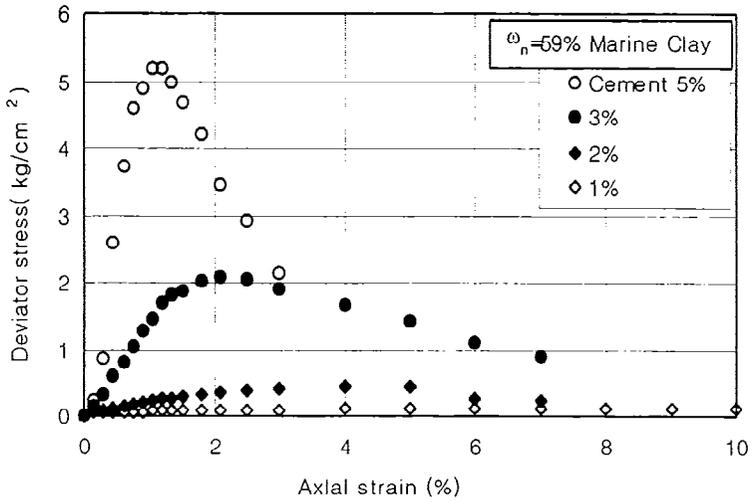


그림 5.2 흙시멘트 일축압축시험의 응력변형곡선(II)
 [함수비 29% 해성점토와 시멘트혼합처리(28일양생강도)]

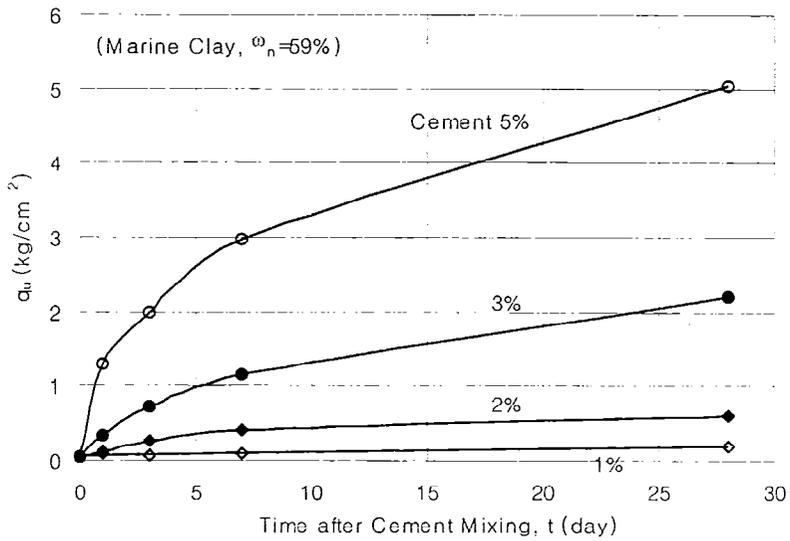


그림 5.3 시멘트 혼합처리후 양생일수별 일축압축강도

다. 시멘트 혼합비별 일축압축강도

고함수비 해성점토에 보통 시멘트를 혼합처리한 처리토의 일축압축강도는 그림 5.4 a)와 같이 시멘트 함량이 증가할수록 강도가 증가하는 특성을 보이고 있다.

강도증가량을 보면 무처리 고함수비 해성점토의 일축압축강도는 $q_u=0.04\text{kg/cm}^2$ 으로 거의 강도가 없지만, 3%시멘트 혼합시 $q_u=1\text{kg/cm}^2$, 5%시멘트 혼합시 $q_u=3\text{kg/cm}^2$ 으로 매우 큰 증가를 보이고 있다. 이 강도는 성토재료의 소요강도 $q_u=0.4\sim 1\text{kg/cm}^2$ 에 비교하면 충분히 큰 강도이다.

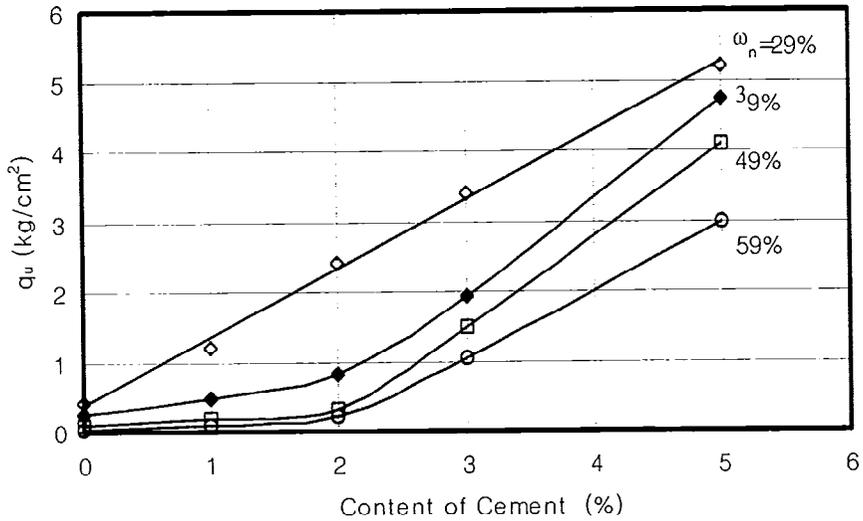
각 조건별 강도증가특성을 보면, 고함수비 흙에서는 적은 배합비(흙건중량비 2%)에서는 전혀 강도증가효과가 없으나, 강도증가효과를 나타내기 시작하는 배합비에서는 시멘트 첨가량에 거의 직선적으로 비례하여 일축압축강도가 증가하는 특성을 보이고 있다.

라. 흙의 함수비별 일축압축강도

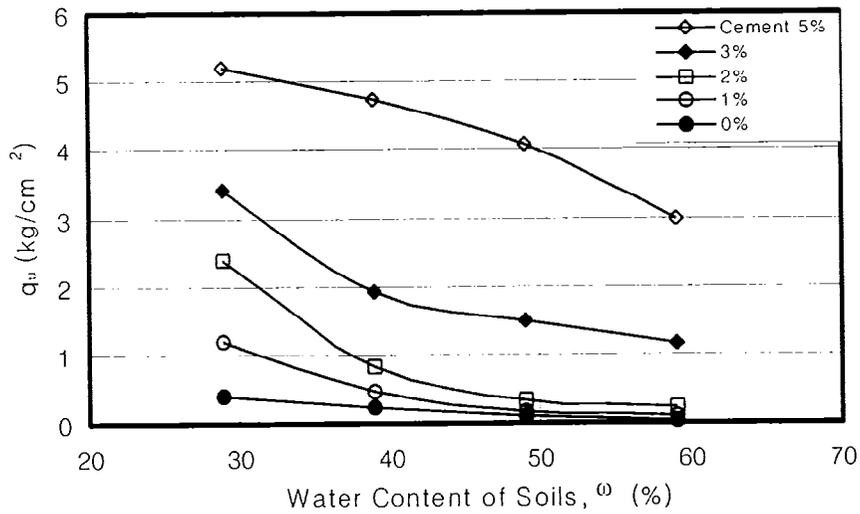
시멘트와 혼합하기 전의 흙의 함수비별 혼합처리토의 일축압축강도는 그림 5.4 b)와 같이 함수비가 높을수록 일축압축강도가 적은 특성을 보이고 있다.

함수비의 영향은 높은 시멘트 배합비에서는 시멘트의 배합비의 영향보다 적지만, 낮은 배합비(2%)에서는 함수비의 영향이 더 크다. 즉 배합비가 높을수록 함수비의 영향이 적어지는 특성을 보이고 있다. 또한 흙의 함수비가 높은 경우는 어느 배합비 이하에서는 강도증가효과가 전혀없고 어느 배합비 이상의 시멘트를 혼합하여야만 강도증가효과를 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

또한 소요의 전단강도를 얻기 위하여 자연함수비가 높을수록 더 많은 시멘트 배합비를 사용하여야 한다는 것을 알 수 있다.



a) 시멘트 함량별 일축압축강도



b) 흙의 함수비별 일축압축강도

그림 5.4 흙시멘트 혼합처리토의 일축압축강도 특성

다. 흙의 종류별 흙시멘트의 일축압축강도

흙시멘트에 대한 흙의 종류별 일축압축강도의 증가특성을 규명하기 위하여는 같은 함수비로 시험을 하여야 하나 각 현장의 함수비가 다르고 또한 일반적으로 모래질 흙의 현장함수비는 적고 점성토는 함수비가 높으므로 같은 함수비에서의 강도증가효과의 비교는 큰 의미가 없으므로 각 지구의 표층토의 함수비조건으로 시험을 실시하였다.

시험결과 그림 5.5와 같이 이원지구 공감측 실트질모래가 가장크고, 시화지구 해성실트 그리고 이원지구 화력측 해성점토의 순서로 시멘트처리에 의한 일축압축강도 증가효과를 보이고 있다.

3가지 흙 모두 시멘트함량별 일축압축강도는 그림 5.6과 같이 거의 직선 비례를 하고 있음을 보여주고 있다.

그러나 흙의 종류별 시멘트처리에 의한 강도증가효과는 현장함수비 차이의 영향도 크지만 그림 5.5와 같이 흙의 종류에 따라 그 효과는 매우 차이가 크다는 것을 알 수 있다.

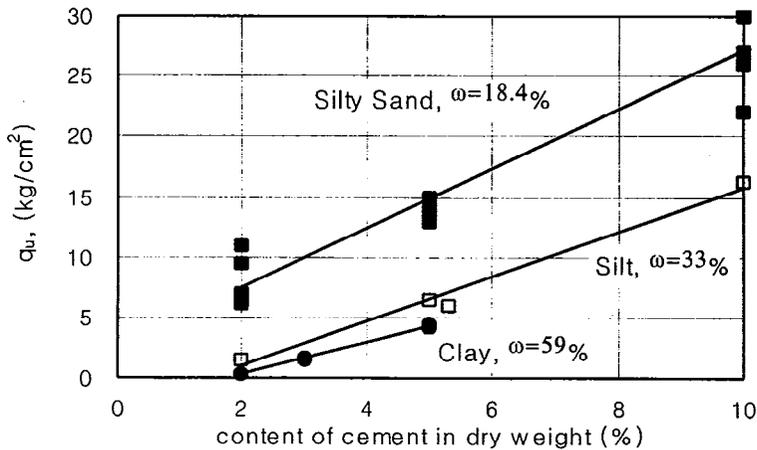
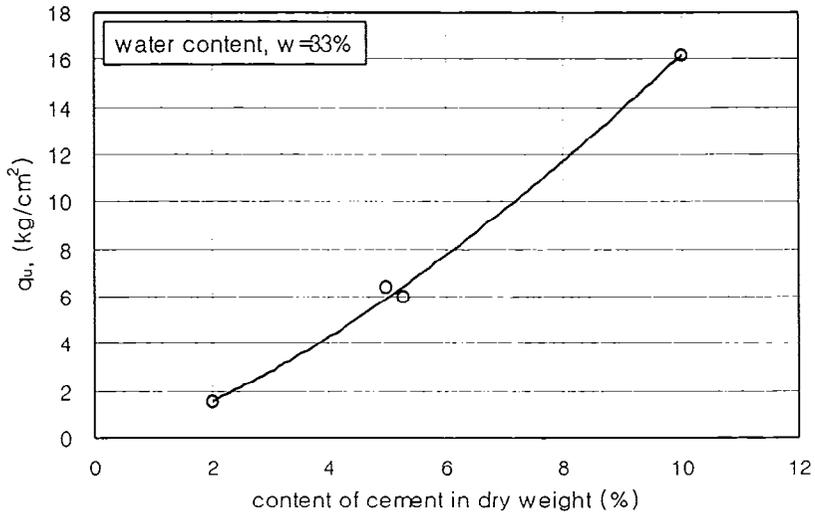
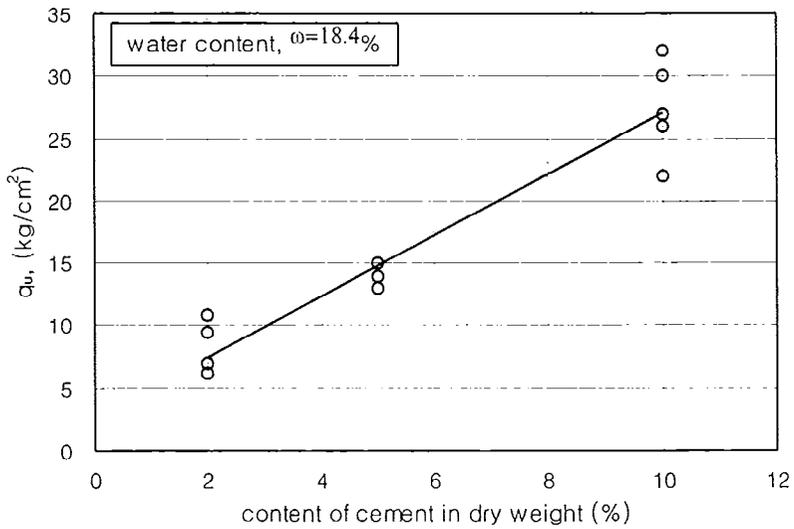


그림 5.5 흙의 종류별 흙시멘트의 일축압축강도 비교

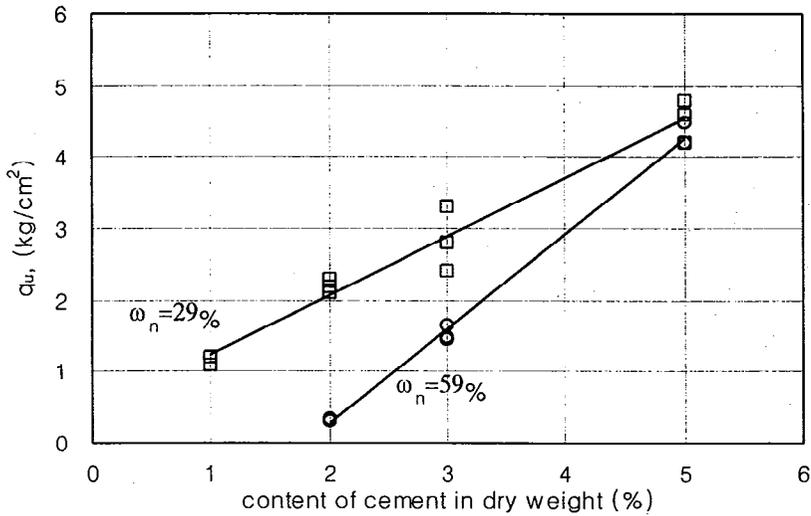


a) 시화지구(실트질 흙)



b) 이원지구 공감축(실트질모래)

그림 5.6 지구별 흙의 종류별 일축압축강도 비교(1)



c) 이원지구 화력축(해성점토)

그림 5.6 지구별 흙의 종류별 일축압축강도 비교(II)

4. 삼축압축(UU)시험결과

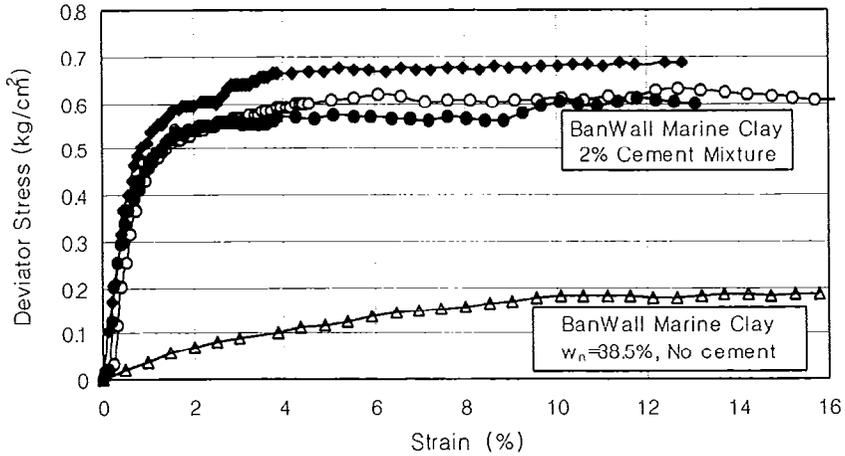
흙시멘트에 대한 강도를 일축압축강도로 표현하였으나 실제 성토단면 내에서 발생하는 응력상태는 삼축압축조건이므로 흙시멘트에 대한 삼축압축 시험을 실시하여 일축압축강도로 표현되는 비배수전단강도를 적용할 수 있는지를 확인하였다.

흙시멘트의 포화조건에 대한 삼축압축(UU)시험결과 그림 5.7 a)와 같이 저배합비(2%) 흙시멘트의 응력변형곡선은 일축압축시험과 같이 탄성계수가 크게 증가하고 축차응력도 무처리흙에 비하여 3배정도 증가한 결과를 보이고 있다.

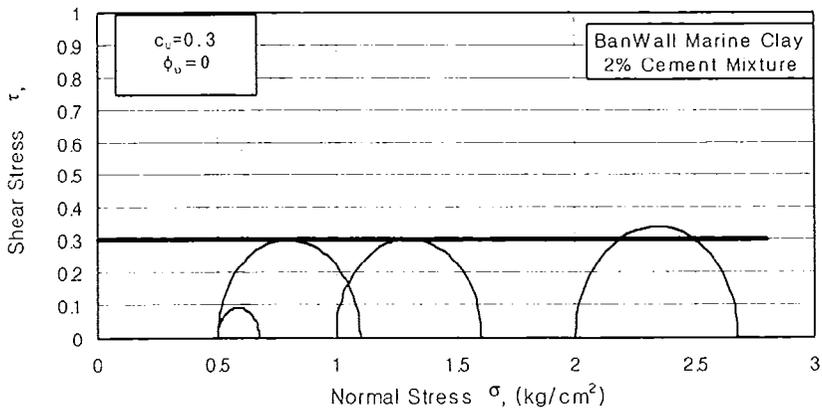
삼축압축시험결과 모아원을 그려보면 그림 5.7 a)와 같이 압밀하중에 거의 관계없이 크기가 같은 축차응력 값을 갖고 있어, 파괴포락선이 수평선으로 내부마찰각이 없이 점착력성분의 전단강도만 가지고 있는 것을 보여주고

있다.

즉, 저배합비의 흙시멘트에서 포화조건에 대하여 비배수전단강도는 일축 압축값의 1/2를 사용하여도 됨을 알 수 있다.



a) Strain-Stress Curve in UU Test



b) Mohr-Coulomb Curve

그림 5.7 흙시멘트 성토재료의 삼축압축(UU)시험결과

5. 삼축압축(CU)시험결과

저배합비의 흙시멘트에 대한 압밀비배수조건의 전단강도특성을 알기 위하여 삼축압축(CU)시험을 실시하였다. 흙은 이원지구 현장함수비 59%의 해상점토에 보통 포트랜드 시멘트를 0, 2, 3, 5%로 혼합처리하여 시험용 모델을 5조를 만들어 7일간 수침양생 후 삼축압축시험을 실시하였다.

시험결과 응력변위곡선을 보면 그림 5.8~5.11의 a)와 같이 무처리 흙은 피크점의 변위가 15%이상이지만, 시멘트함량이 증가할수록 3~1.5% 이내로 매우 크게 감소하는 매우 단단(stiff)한 특성을 보이고 있다.

축차응력도 시멘트함량이 증가할수록 매우 크게 증가하는 특성을 보이고 있다.

변위-간극수압곡선은 그림 5.8~5.11의 b)와 같이 무처리 흙은 A계수 0.86~1로 크고 시멘트함량이 증가할수록 적어져 5%일 때 A계수=-0.1~0.42로 점점 감소하는 특성을 보이고 있다. 즉 시멘트 혼합처리된 흙은 모래 또는 과압밀된 흙의 특성을 보여주고 있다.

응력경로를 보면 그림 5.8~5.11의 c)와 같이 무처리 흙은 정규압밀 점토의 전형적인 특성을 보이지만 시멘트 혼합처리토는 조립토 또는 과압밀된 흙의 특성을 보여주고 있다. 응력경로의 k_f 라인의 경사 θ 는 무처리토가 29도, 시멘트 함량이 증가할수록 증가하여 시멘트 5%일 때 $\theta=43$ 도로 크게 증가함을 보여주고 있다.

이는 같은 구속압조건일 때 훨씬 큰 전단강도를 갖는 다는 것을 알 수 있다.

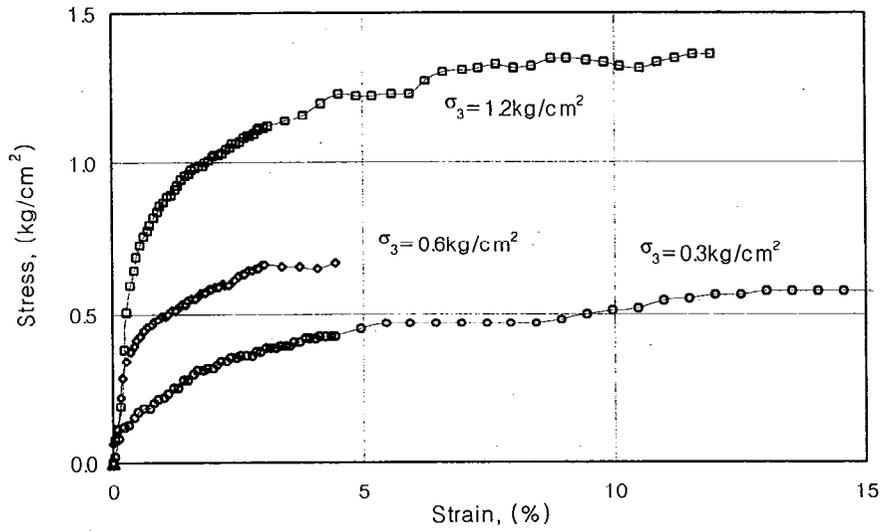
Mohr-Coulomb곡선을 보면, 그림 5.8~5.11의 c)와 같이 무처리 흙은 정규압밀 점토의 전형적인 특성을 보이지만 시멘트 혼합처리토는 낮은 구속압력($\sigma_3=1\sim 1.3\text{kg/cm}^2$ 이하)조건에서 조립토 또는 과압밀된 흙의 특성을 보여주고 있다. 파괴포락선의 내부마찰각을 보면 전응력개념의 ϕ 는 무처리토가

$\varphi=22$ 도, 시멘트 함량이 증가할수록 증가하여 시멘트 5%일 때 $\varphi=31$ 도로 크게 증가되며, 유효응력개념의 φ' 은 무처리토가 $\varphi'=34$ 도, 시멘트 함량이 증가할수록 증가하여 시멘트 5%일 때 $\varphi'=65$ 도로 크게 증가함을 보여주고 있다.

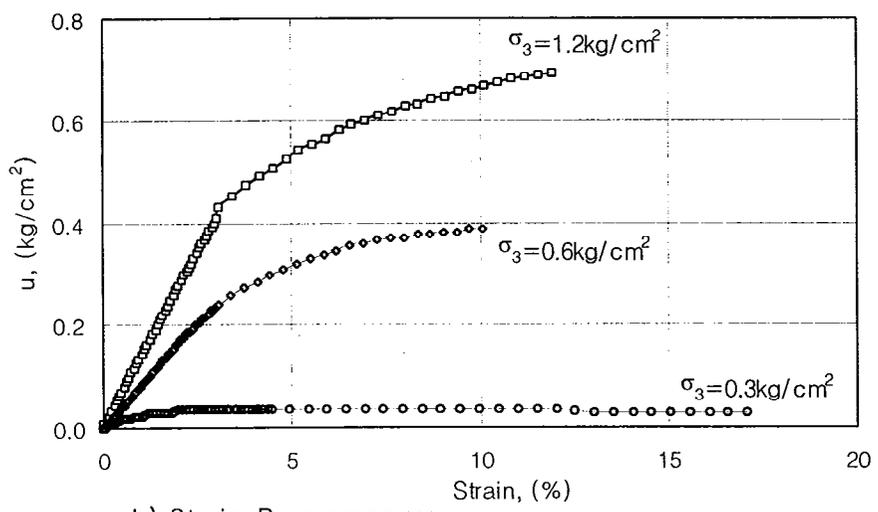
삼축압축(CU)시험결과의 대표적인 변화특성 값은 표 5.1과 같다.

표 5.1 흙시멘트의 삼축압축시험결과($\omega_n=59\%$ 해성점토)

시멘트함량(%)	0 (무처리)	2	3	5
피크점 변위(%)	15%이상	3	2	1.5
A계수	0.86~1	0.6~1	-0.15~0.58	-0.03~0.42
θ	29	32	39	43
φ	22	22	24	31
φ'	34	39	54	65
c_{up} (kg/cm^2)	-	-	0.72	1.4
선형압밀압력, p_c' (kg/cm^2)	-	-	1	1.3

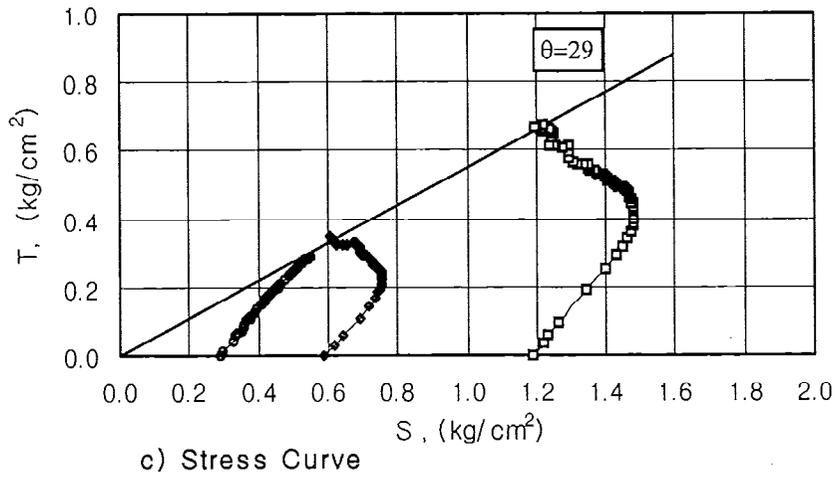


a) Strain-Stress Curve

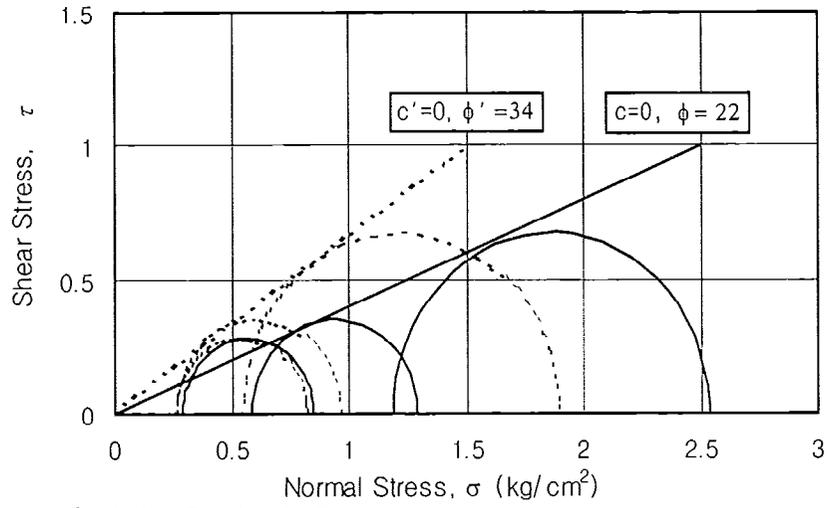


b) Strain-Pore pressure

그림 5.8 고함수비 해성점토 무처리 삼축압축(CU)시험 결과(I)

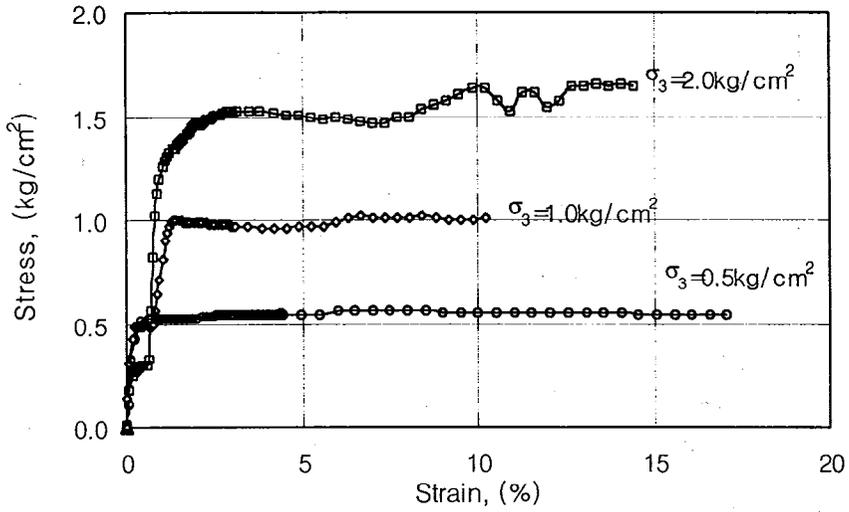


c) Stress Curve

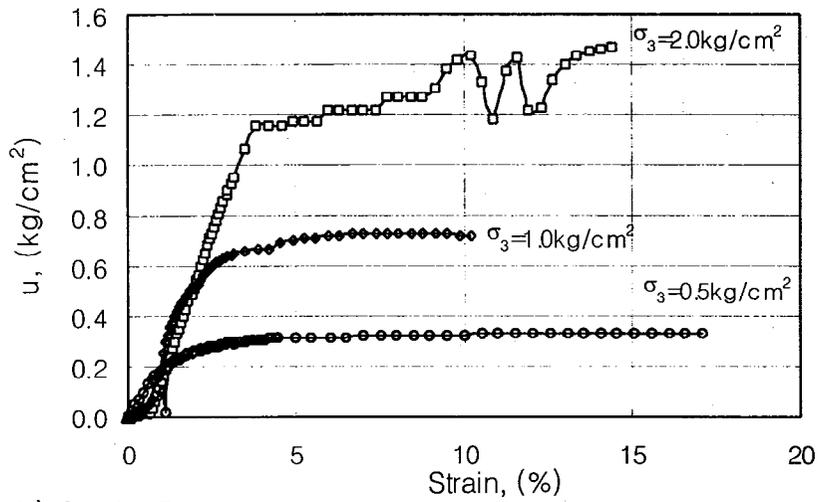


d) Mohr-Coulomb Curve

그림 5.8 고탍수비 해성점토 무처리 삼축압축(CU)시험 결과(II)

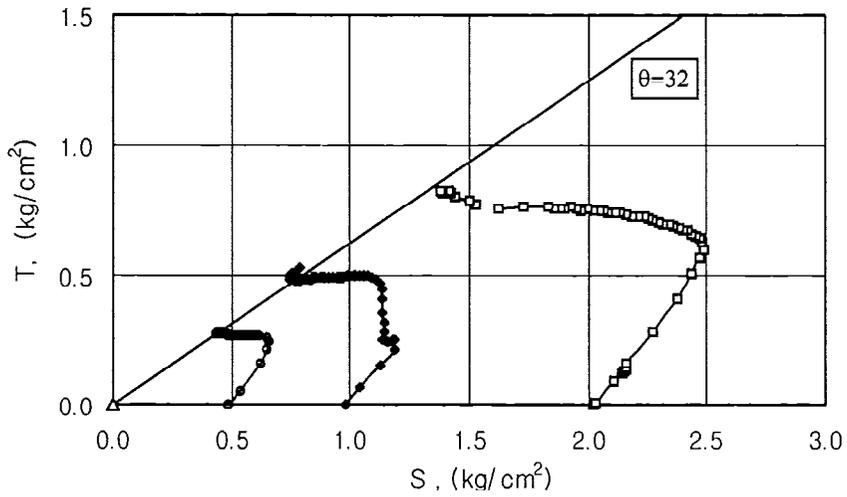


a) Strain-Stress Curve

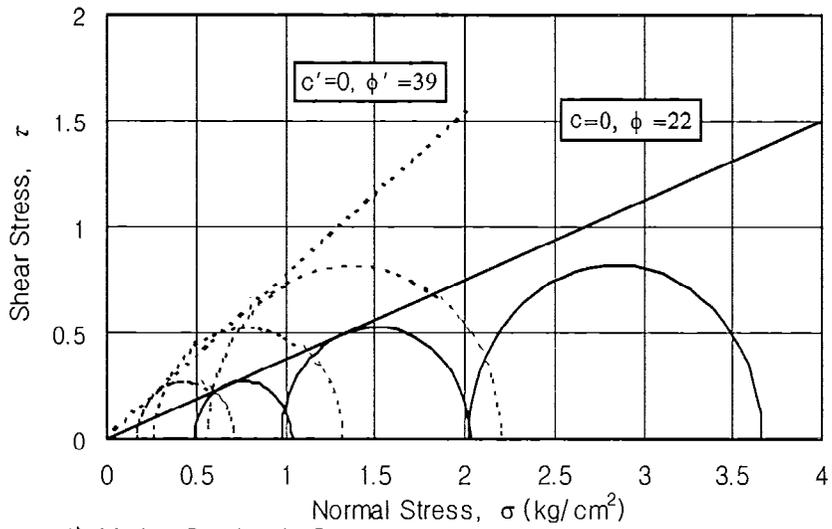


b) Strain-Pore pressure

그림 5.9 고탍수비 해성점토 2%시멘트처리 삼축압축(CU)시험 결과(I)

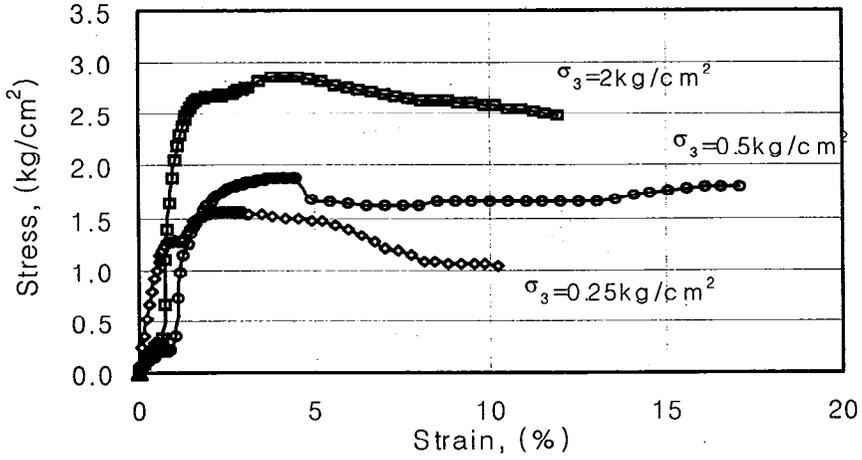


c) Stress Curve

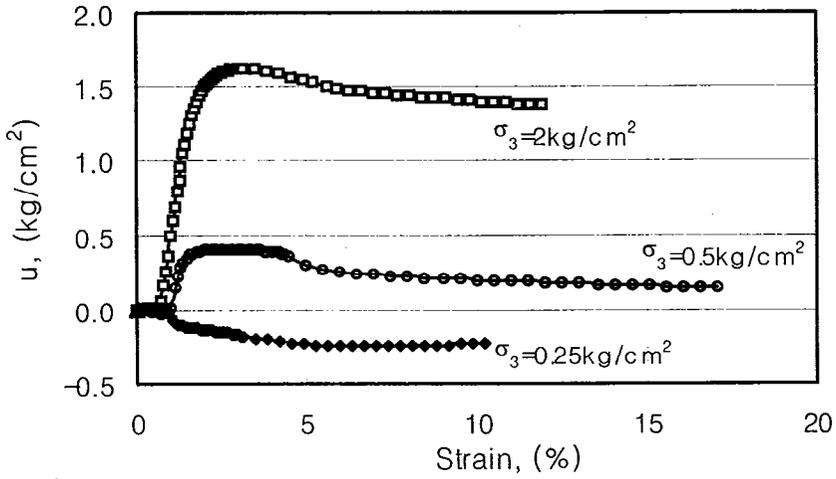


d) Mohr-Coulomb Curve

그림 5.9 고탐수비 해성점토 2%시멘트처리 삼축압축(CU)시험 결과(II)

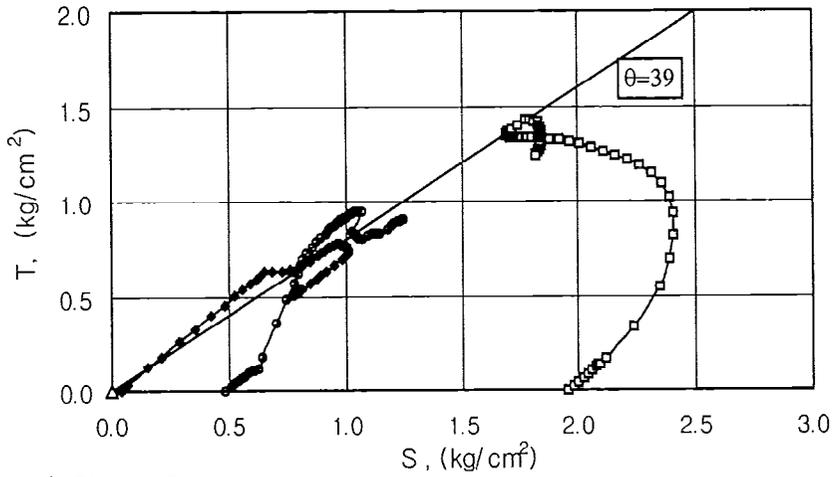


a) Strain-Stress Curve

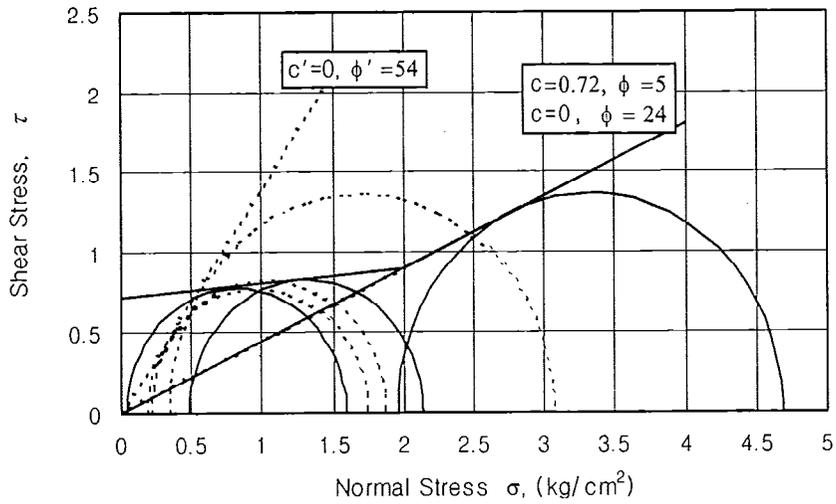


b) Strain-Pore pressure

그림 5.10 고탍수비 해성점토 3%시멘트처리 삼축압축(CU)시험결과(I)

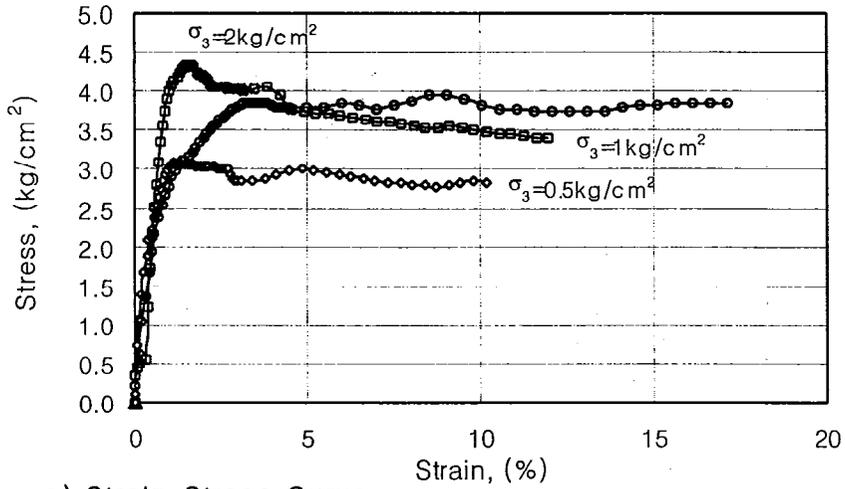


c) Stress Curve

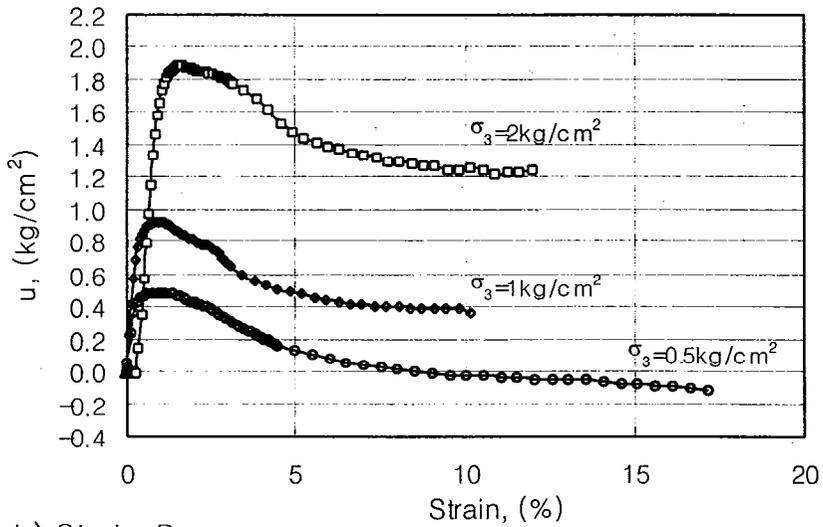


d) Mohr-Coulomb Curve

그림 5.10 고탍수비 해성점토 3%시멘트처리 삼축압축(CU)시험결과(II)

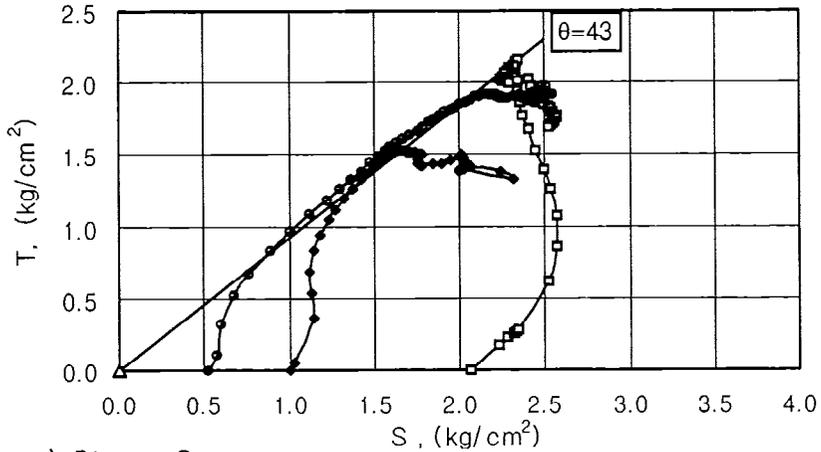


a) Strain-Stress Curve

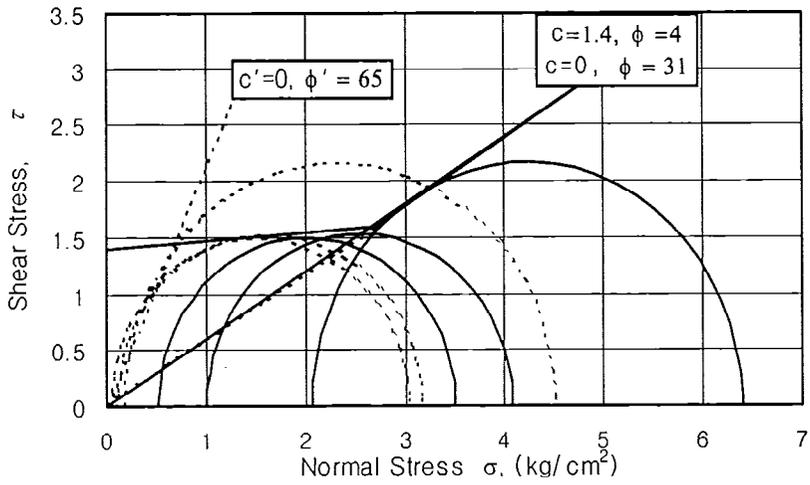


b) Strain-Pore pressure

그림 5.11 고탍수비 해성점토 5%시멘트처리 삼축압축(CU)시험결과(I)



c) Stress Curve



d) Mohr-Coulomb Curve

그림 5.11 고탍수비 해성점토 5%시멘트처리 삼축압축(CU)시험결과(II)

6. 지지력비시험결과

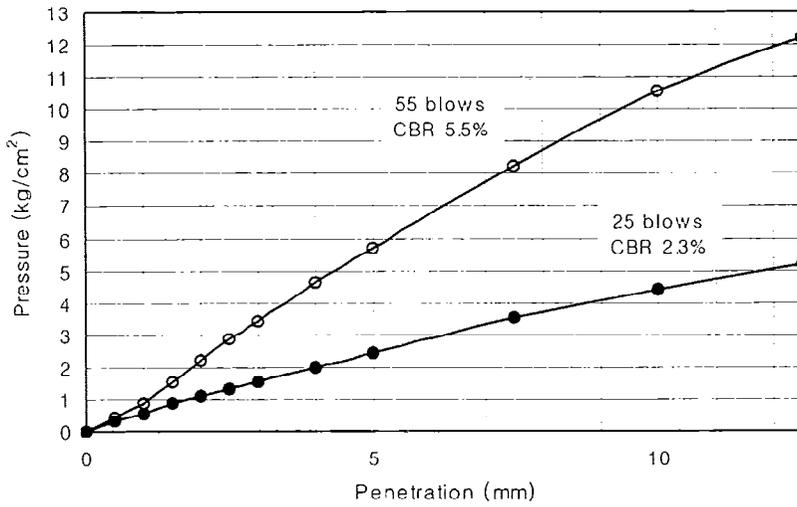
시멘트 혼합처리토의 차량주행성을 확인하기 위하여 시멘트처리후 7일간 수침양생조건에서 CBR관입시험을 실시하였다.

해성점토를 최적함수비($\omega=25\%$)조건으로 CBR시험용 몰드에 5층 각 층별 25회와 55회로 다짐 후 4일간 수침후 CBR관입시험결과 그림 5.12a)와 같이 CBR=2.5~5.5%의 값을 갖는 흙으로 도로노상으로 사용이 불가능한 흙이다.

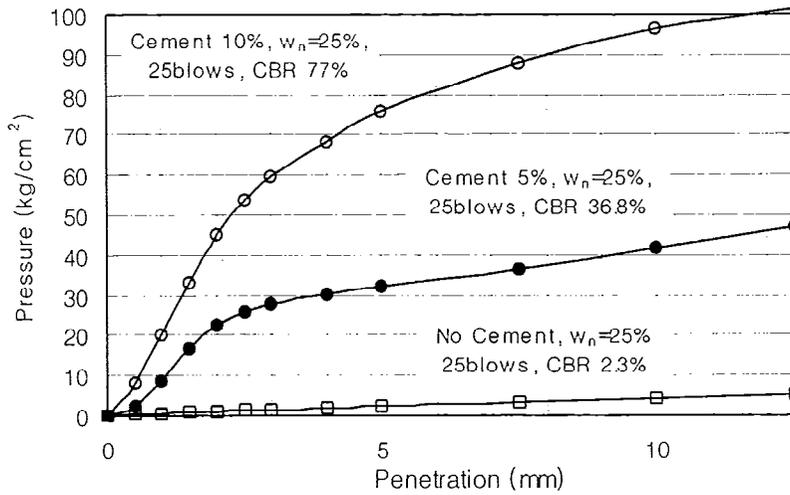
그러나 함수비 $\omega=25\%$ 의 해성점토를 시멘트 혼합처리하여 각 층별 25회의 다짐을 실시하여 7일간 수침양생 후 CBR시험을 실시한 결과 그림 5.12b)와 같이 무처리토의 CBR=2.5%이나, 시멘트 5%조건은 CBR=36%, 시멘트 10%의 흙은 CBR=77%을 갖는 흙으로 도로노상으로 충분히 사용할 수 있음을 보여주고 있다.

표 5.2 해성점토의 시멘트혼합처리후 CBR시험결과

시험조건		수침후 함수비(%)	건조단위중량 (g/cm ³)	CBR 값 (%)
무 처 리	5층 25회 다짐	32.5	1.436	2.3
	5층 55회 다짐	29.9	1.485	5.5
Cement 5% 혼합처리 5층 25회 다짐		26.5	1.535	36.8
Cement 10% 혼합처리 5층 25회 다짐		25.2	1.542	77



a) 무처리 연약지반토 현장함수비 $\omega=25\%$ 조건 4일수침조건



b) 시멘트처리와 무처리 비교

그림 5.12 이원지구 화력측 해성점토 시멘트처리 CBR증가특성

7. 압밀시험결과

고함수비 연약지반 해성점토의 시멘트혼합처리에 의한 압밀특성의 변화를 알기 위하여 이원지구 해성점토($\omega_n=59\%$)에 일반 포트랜드 시멘트를 흙의 건조량비 1, 2, 3, 5%를 첨가혼합하여 7일간 양생후 표준압밀시험을 실시하였다.

압밀시험결과 압축특성은 그림 5.13 a)와 같이 시멘트함량이 적은 흙은 압축성이 크고 시멘트함량이 증가할수록 압축성이 적은 특성을 보이고 있다. 그러나 정규압밀영역의 압축지수 C_c 는 반대로 시멘트함량이 적은 흙은 적고 시멘트함량이 증가할수록 감소하는 값을 보이고 있다.

그 이유는 시멘트 혼합처리된 흙은 Cementation에 의해 선행압밀하중이 크게 증가하여 이하중이하의 상재하중에서는 침하가 거의 발생되지 않지만 이 값이상에서는 즉 Cementation을 파괴시키는 큰 하중에서는 같은 하중증가량에서 더 큰 침하가 발생된다는 것을 보여주고 있다.

그러므로 연약지반토를 시멘트 혼합처리로 개량하여 높은 성토를 할 경우는 개량토의 선행압밀하중이 성토고의 상재하중보다 큰 조건이 되도록 배합비를 결정할 필요가 있다.

여기서 더욱 중요한 것은 흙시멘트에서 흙의 선행압밀하중보다 큰 상재하중을 받아 Cementation이 파괴된 후의 전단강도는 크게 감소하는 특성이 있다.

표 5.3 시멘트함량별 선행압밀하중 증가특성

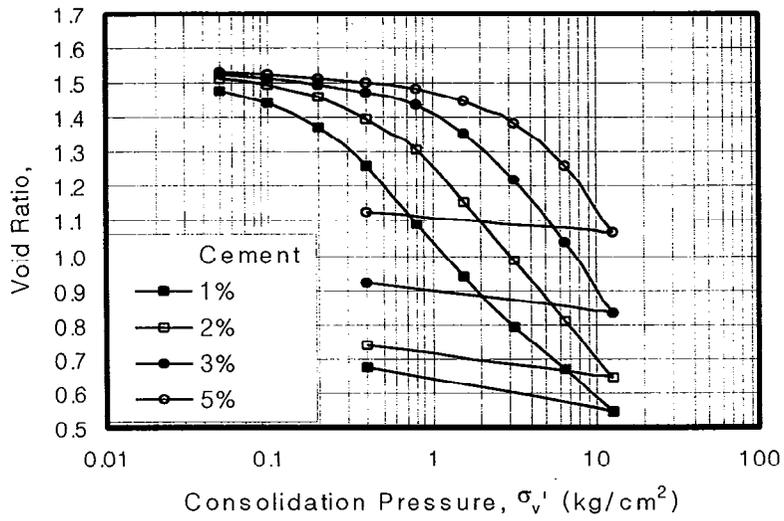
시멘트함량(%)	1	2	3	5	흙의 조건
선행압밀하중 (7일 양생후) (kg/cm^2)	0.2	0.55	1.8	3.4	해성점토 $\omega_n=59\%$
압축지수 (C_c)	4.5	5.5	6.5	7	

시멘트 처리토의 압밀계수 c_v 의 변화를 보면 그림 5.13 b)와 같이 시멘트 1%처리토의 압밀계수는 무처리토의 교란조건의 압밀계수와 거의 같은 값을 보이지만 시멘트 함량이 증가하면 압밀압력-압밀계수 관계가 불교란해 성점토와 같은 경향을 갖으며 시멘트함량이 많을수록 압밀계수가 증가하는 특성을 보인다.

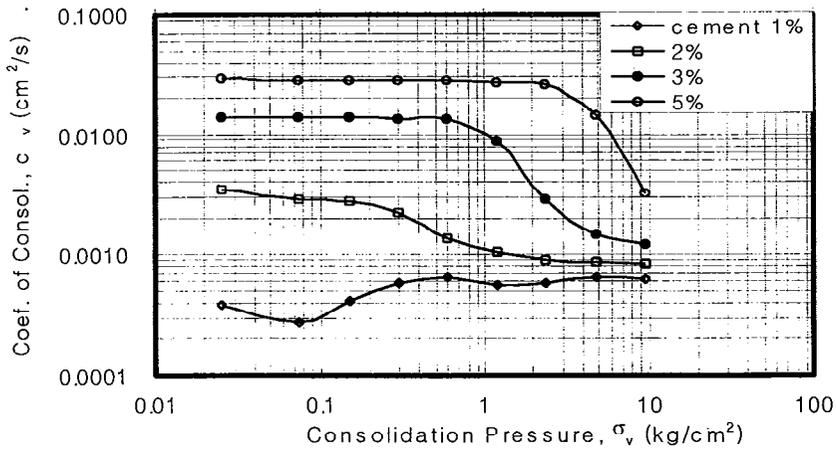
이 압밀계수의 증가는 투수계수도 약간 큰 효과도 있지만, 시멘트 함량이 많은 흙시멘트의 압축계수가 더 적기 때문에 c_v 의 값이 크게 계산되는 것이다. 결국 압밀계수가 크기 때문에 압밀침하시간은 시멘트함량이 많을수록 빨리 완료된다는 것을 알 수 있다.

즉 시멘트 혼합처리한 흙은 압축성도 적고 압밀침하시간도 빠르기 때문에 압밀문제에 대하여 매우 좋은 효과가 있음을 알 수 있다.

투수계수의 변화를 보면 그림 5.13 c)와 같이 시멘트 1%처리토의 투수계수가 약간 적고 시멘트 함량이 증가하면 투수계수가 약간씩 증가하는 경향을 보인다. 이는 고함수비의 흙으로 흙시멘트를 형성하는 것으로 혼합시 흙 속에 있는 물이 차지하고 있던 공극이 여전히 존재하고 있기 때문에 같은 구속하중에서 더 큰 공극을 유지하고 있는 시멘트 함량이 많은 조건이 더 큰 투수계수를 갖는 것으로 판단된다.

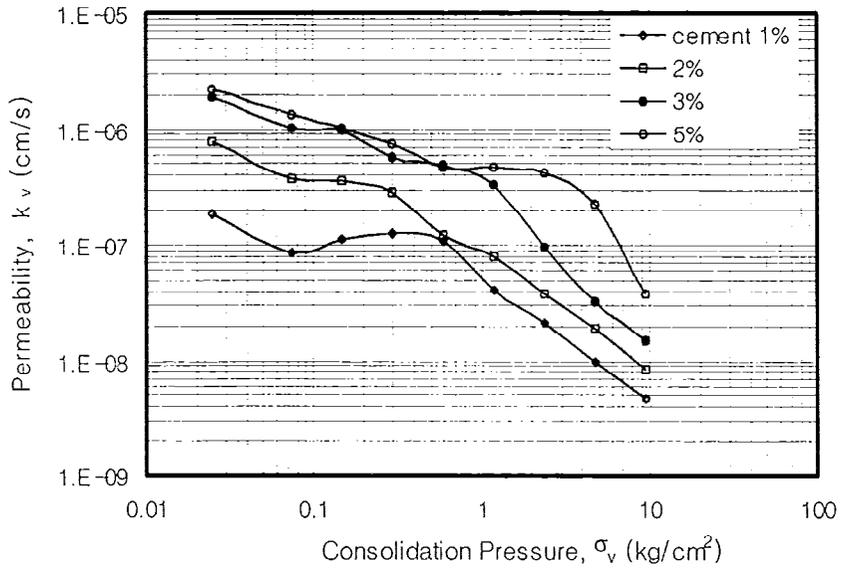


a) 압축특성변화($e-\sigma_v$)



b) 흙의 압밀계수 변화($c_v-\sigma_v$)

그림 5.13 흙시멘트의 압밀특성 및 투수성변화 시험결과(I)



c) 흙의 투수계수 변화($k-\sigma_v$)

그림 5.13 흙시멘트의 압밀특성 및 투수성변화 시험결과(II)

8. 자연다짐특성

가. 시험목적 및 방법

흙시멘트의 다짐은 매우 중요한 요소이다. 고탍수비의 흙에 시멘트를 혼합처리하는 조건에서는 흙의 공극이 크기 때문에 경량성토의 효과도 있지만 혼합 후 적절한 시간 안에 흙의 함수비가 대기건조에 의해 감소된 시점에 다짐을 하면 더 높은 밀도로 성토체를 형성하면 압축성과 전단강도 면에서 매우 효과적인 공사를 할 수 있다고 생각해볼 수 있다.

본 연구에서는 혼합 후 자연다짐에 따른 다짐밀도의 증가와 일축압축강도 특성 및 압밀특성의 변화를 확인하기 위하여 시멘트를 혼합처리한 후 대기건조시키면서 0, 1, 2, 4, 8, 24, 72, 144시간 후에 다짐을 하여 일축압축 시험 및 압밀시험을 실시하였다.

나. 다짐 건조단위증량 증가특성

시멘트 혼합처리 후 자연다짐결과 다짐건조단위증량은 그림 5.14와 같이 $r_d=1.05\text{g}/\text{cm}^3$ 에서 대기건조 후 자연다짐 일수가 클수록 점점 증가하여 6일 조건은 $r_d=1.23\text{g}/\text{cm}^3$ 까지 증가하는 특성을 보이고 있다.

이는 혼합처리 후 수화반응과 대기건조에 의해 함수비가 감소하기 때문에 같은 다짐에너지로 더 큰 밀도까지 다짐을 할 수 있기 때문이라고 판단된다.

다. 일축압축강도 변화

자연다짐에 의해 다짐밀도는 증가하지만 일축압축시험결과를 보면 그림 5.15와 같이 시멘트혼합 직후 다짐을 한 조건의 압축강도가 가장 크고 다짐시간이 늦을수록 강도가 감소하는 뚜렷한 경향을 보이고 있다.

이는 초기응결이후 Cementation이 진행된 후 다짐을 하면 Cementation이 파괴되어 오히려 강도가 떨어지는 것은 당연한 결과라고 판단된다. 그러나 시멘트 함량(2%이하)이 적은 조건은 자연다짐이 오히려 더 큰 강도를 보여

주고 있다. 이는 시멘트 함량이 흙의 전 표면에 고르게 분포되어 흙 입자를 응집시켜 줄 수 없는 적은 양에서는 흙의 함수비가 감소하여 증가되는 강도증가효과보다 Cementation에 의한 강도증가효과가 적다는 것을 보여주고 있다.

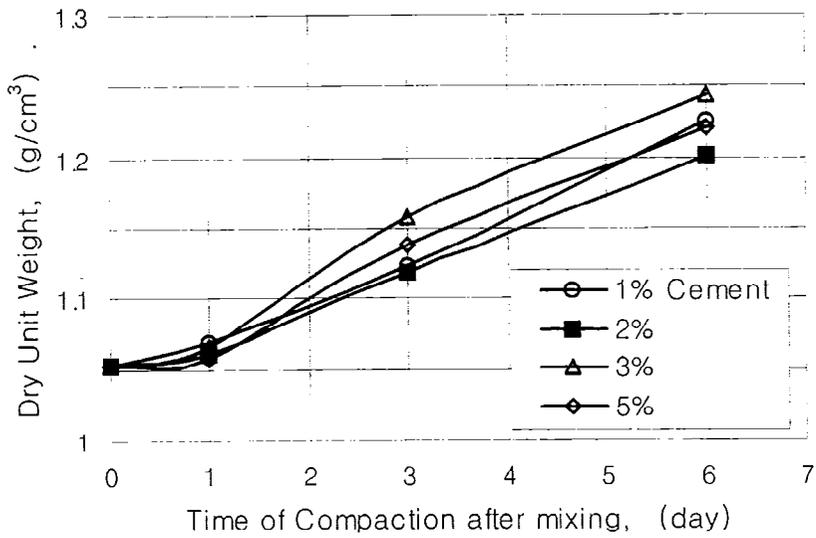


그림 5.14 시멘트믹싱후 대기건조후 다짐밀도 증가특성

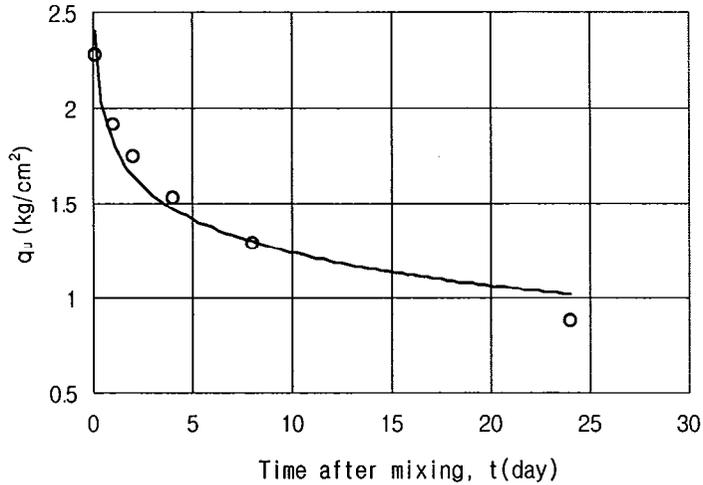


그림 5.15 대기건조후 다짐시기별 7일양생 일축압축강도

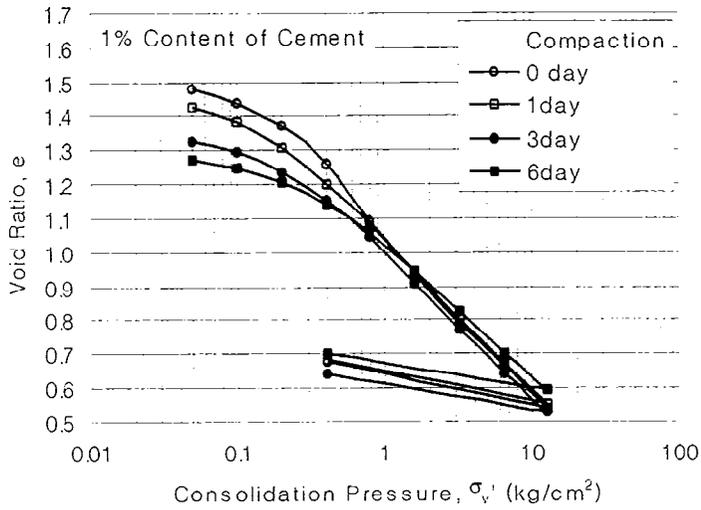
라. 압밀특성 변화

시멘트 혼합처리 후 지연다짐에 따른 압밀특성의 변화를 보면 그림 5.16과 같이 수화작용과 대기건조에 의해 더 큰 밀도로 다짐을 할 수 있는 다짐시간이 늦을수록 압축성이 감소하는 뚜렷한 경향을 보여주고 있다.

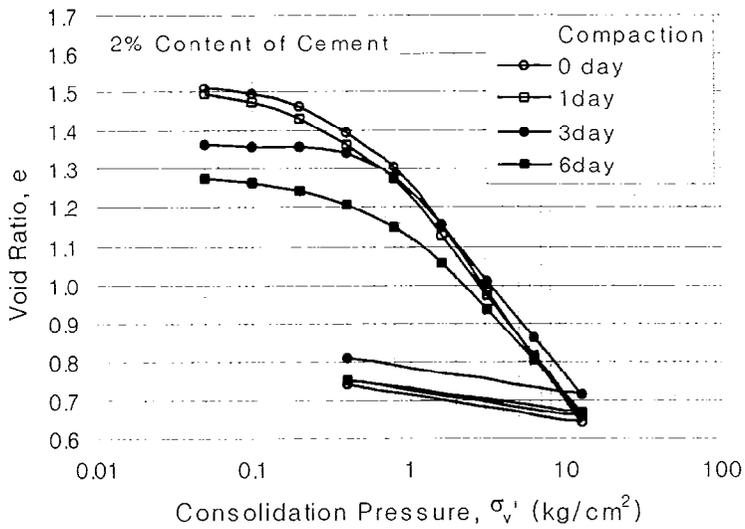
이 효과는 시멘트 함량이 많을수록 더 큰 효과를 보이고 있다. 압밀특성만을 본다면 혼합후 대기방치시 함수비가 감소하여 다짐밀도를 높일 수 있다면 지연다짐을 할 필요가 있음을 알 수 있다.

마. 지연다짐의 필요성

흙시멘트의 지연다짐은 흙의 일축압축강도가 크게 감소하므로 가능한 초결직후 이전에 펴고르기와 다짐을 완료하는 것이 꼭 필요하다. 그러나 고성토단면에서 압축성이 문제가 되는 경우 지연다짐을 할 필요성이 있는 경우가 있을 수 있지만, 이경우도 시멘트함량을 크게하여 선행압밀하중을 더 크게 조정하는 것이 더 확실한 방법이므로 지연다짐을 하여서는 않된다는 결론을 얻었다.

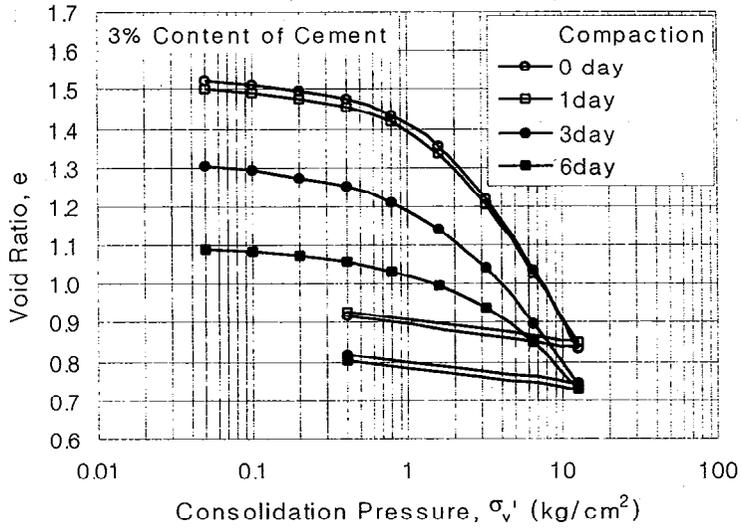


a) Cement 1%혼합조건

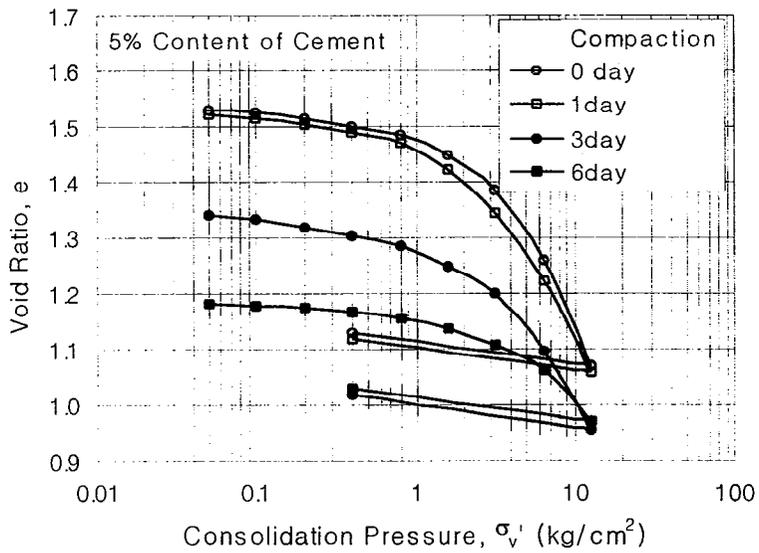


b) Cement 2%혼합조건

그림 5.16 시멘트혼합후 대기건조 지연다짐에 의한 압축특성변화(I)



c) Cement 3%혼합조건



d) Cement 5%혼합조건

그림 5.16 시멘트혼합후 대기건조 지연다짐에 의한 압축특성변화(II)

제 3 절 고탐수비 흙시멘트 혼합장비 개발과 현장시험시공

1. 흙시멘트 혼합장비개발의 필요성

제 2절에서 흙시멘트에 대한 강도증가와 압축성감소에 대한 효과를 확인하였다. 그러나 이 시험결과는 실내에서 혼합이 완전히 이루어진 조건에 대한 것으로 현장실무에 적용하기 위해서는 시멘트와 고탐수비의 흙을 완전하게 섞을 수 있는 흙시멘트 혼합장비의 개발이 필요하다.

지금까지의 혼합장비는 점성이 적은 흙(사질토)에 대한 혼합장비로서 시멘트 혼합처리 후 높은 강도를 얻기 위하여 함수비를 최적함수비 정도로 건조시킨 후 시멘트와 혼합하여 보조기층대용 등의 성토재료 등으로 사용하고 있다.

그러나 이 조건은 양질토의 운반과 함수비의 조절공정을 거쳐 시멘트와 혼합하는 것으로 공사비가 너무 크기 때문에 성토물량이 많은 일반성토공사에서는 적용하기가 어렵다. 경제성과 시공성을 고려하면 그 지구내의 연약지반토를 함수비조절 공정 없이 시멘트 혼합처리만으로 성토재료로 활용할 수 있어야 실용성이 있다.

이를 위해서는 고탐수비의 흙을 현장에서 굴착과 동시에 시멘트와 혼합처리하여 성토재료로 바로 사용할 수 있는 공법과 장비의 개발이 필요하다. 특히 고탐수비의 해성점토는 흙입자간에 점성이 있어 시멘트와 완전한 혼합을 위해서는 완전 혼합과정을 거치는 특수한 장치의 개발이 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 고탐수비 연약지반토를 시멘트와 완전하게 혼합할 수 있는 장비를 개발하고 현장 시험시공을 통한 실용성을 확인하고 설계 및 시공과정에서 필요한 설계정수를 구하였다.

2. 흙시멘트 혼합장비의 구조

흙시멘트 혼합기는 고탐수비의 흙을 시멘트와 함께 스크류(screw)안

에서 완전 파쇄교반시켜 흙과 시멘트가 완전히 섞이는 혼합구조를 만들었다.

혼합기의 전면도는 그림 5.17과 같으며 측면도는 그림 5.18과 같다. 제작 후 완성된 상태의 사진은 사진 5.1과 같다. 시멘트 투입구와 스크류부분의 상세도는 그림 5.19와 같으며, 스크류의 모형은 사진 5.2와 같다.

본 혼합장비는 선길시험기(주)에서 제작하였으며 제작완료후 시험시공중에 덩어리로 되어 있는 흙이 잘 주입되지 않아 호퍼안의 흙을 스크류안으로 강제로 주입시킬 수 있는 연약지반토 이송압입장치를 그림 5.20과 같이 고안하여 보완하였다.

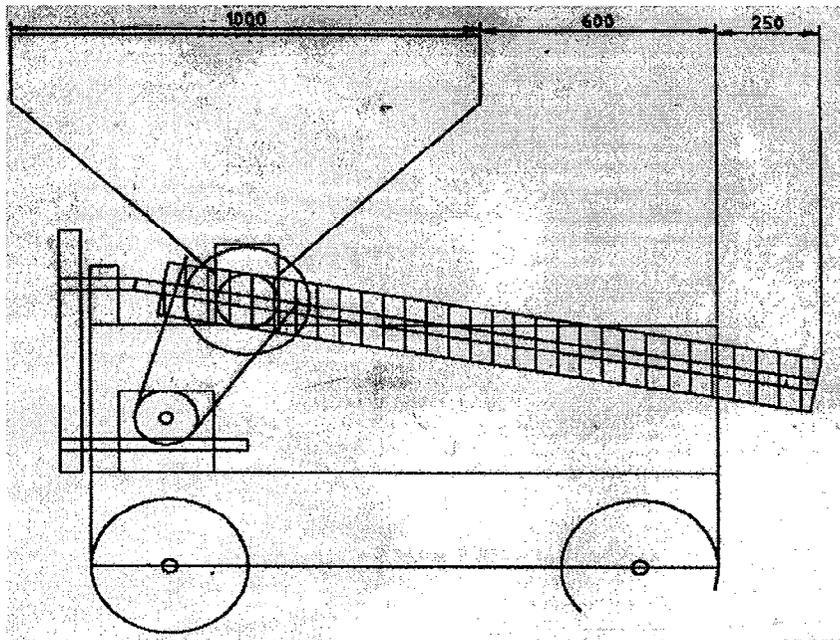


그림 5.17 고탍수비 흙시멘트 혼합장치 전면도

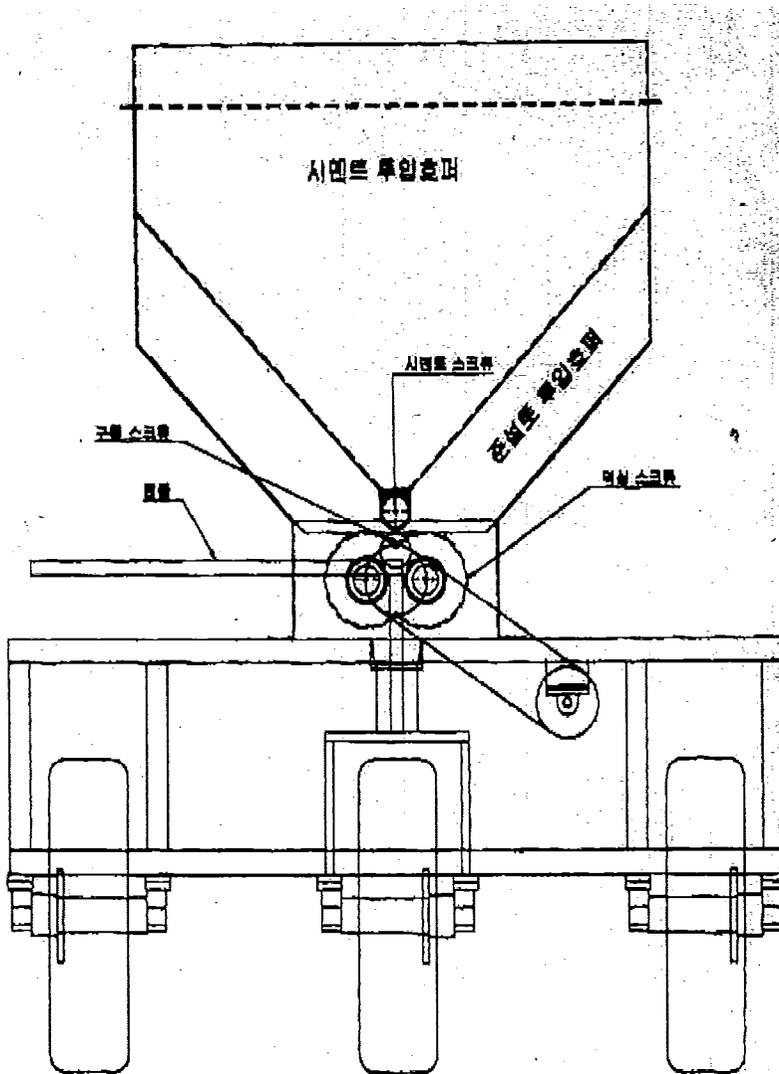


그림 5.18 고탄수비 흙시멘트 혼합장치 측면도

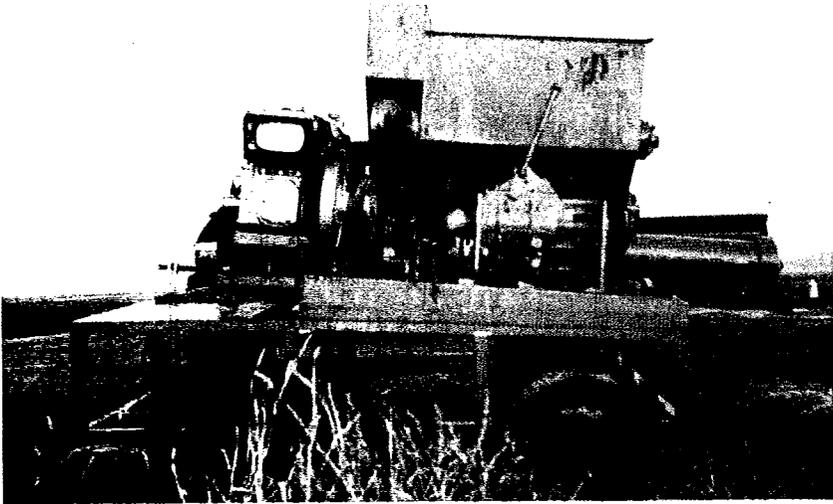


사진 5.1 고탐수비 흙시멘트 혼합장치

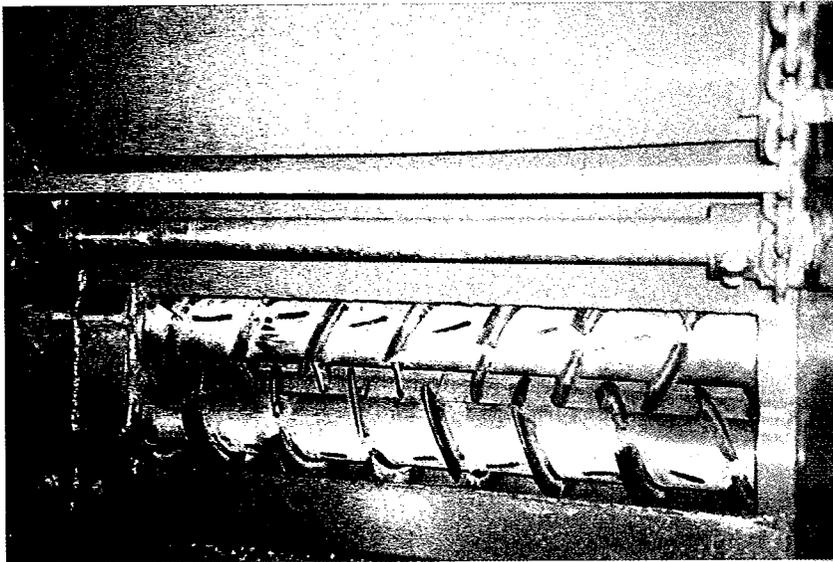


사진 5.2 고탐수비 흙시멘트 혼합장치 스크류

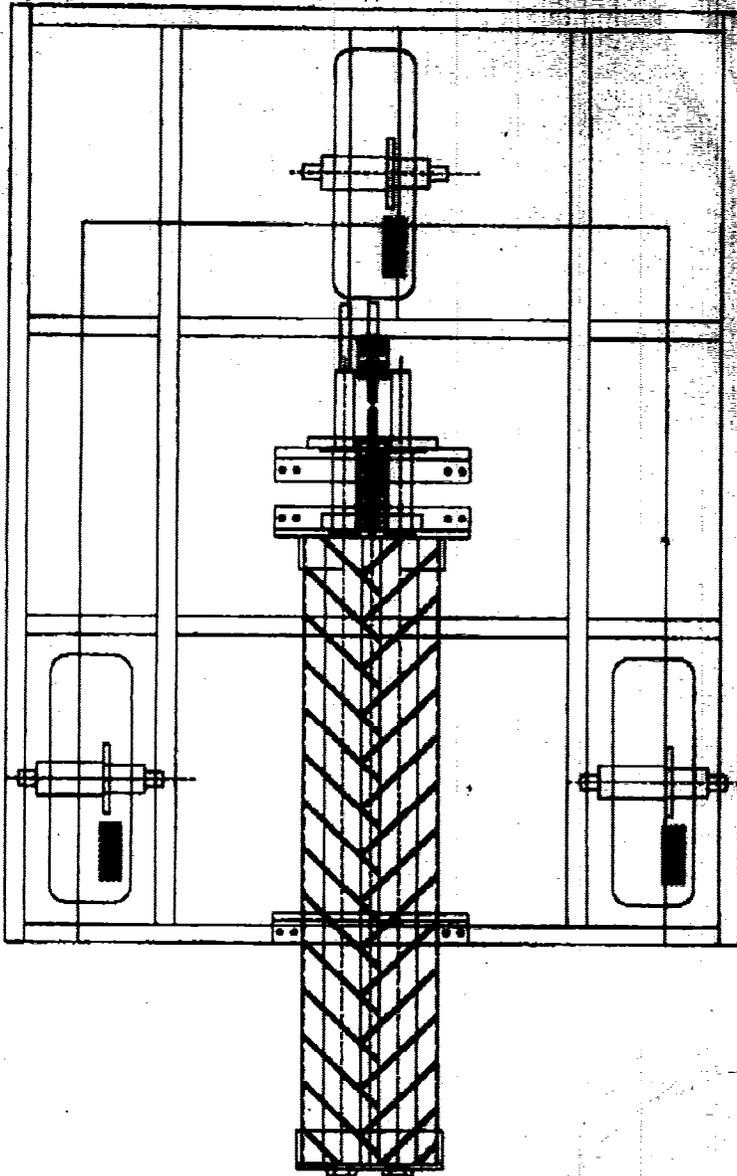


그림 5.19 고압수비 흙시멘트 혼합스크류

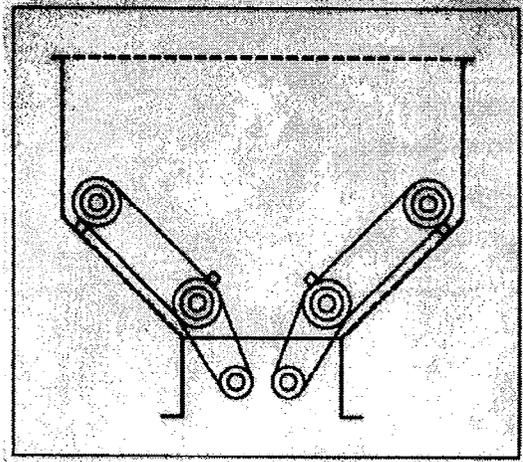


그림 5.20 고탍수비 흙시멘트 혼합장치 전면도

3. 시멘트 혼합처리 시험시공

가. 시험시공의 목적

고합수비토의 시멘트 혼합처리공법에 대한 실내시험결과 개량효과가 큰 것으로 확인되었으나 현장에서 실제로 시멘트 혼합처리공법을 적용할 때 현장시공조건에서 혼합처리토의 개량효과가 실내시험결과와 같은 효과를 얻을 수 있는지를 확인할 필요가 있다.

또한 설계에 반영하여야 하는 현장시공상의 공정과 혼합, 포설 및 다짐공정상에 전단강도 및 압축특성에 영향을 미치는 요소와 그 영향정도를 확인하여 설계 또는 시공관리상의 유의점을 도출하는데 시험시공의 목적이 있다.

나. 시험시공 위치 및 시험대상 흙의 특성

시험시공은 시화지구 간척지내에 점성토가 많은 안산시 대부도에서 실시하였다. 본 지구의 흙은 해성점토로서 현장합수비 $\omega_n=46\sim 52\%$, 액성한계 $LL=48.6\%$ 의 점토(CL)로서 흙의 물리성은 표 5.4와 같다.

표 5.4 흙시멘트 혼합처리 시험시공 흙의 물리성

시료명		시화 해성점토
채취위치		경기 안산시 대부도
입도 분포	모래 S (%)	5
	실트 M (%)	70.7
	0.005mm이하, 점토 C (%)	24.3
흙 분류(U.S.C.S.)		CL
함수비, ω_n (%)		46~52
액성한계, LL (%)		48.6
소성지수, PI (%)		25.1

다. 시험시공

1) 1차 시험시공

시험시공은 표층건조토를 제외하고 심층의 고탍수비토만을 굴착하여 사진 5.3, 5.4와 같이 시멘트함량 3%로 혼합하여 두께 20cm로 성토하고 다짐은 포크레인 바가지로 눌러서 다짐을 실시하였다.

현장혼합결과를 비교하기 위하여 시멘트 3%혼합조건의 배출토와 시멘트혼합이 전혀 없는 흙의 배출상태를 비교한 것이 사진 5.5이다. 시멘트가 전혀 혼합되지 않은 흙은 딱가래와 같이 죽상태로 배출되지만 시멘트가 혼합된 흙은 단단(stiff)한 상태로 덩어리 형태를 보이고 있는 매우 큰차이를 보이고 있다.

2) 2차 시험시공

도로노상으로서 시멘트 혼합처리토의 사용가능성을 확인하기 위하여 비포장도로를 사진 5.6과 같이 약 20cm 굴착 정리 후 그 위에 시멘트 3% 혼합처리한 흙을 성토하고 사진 5.7과 같이 백호로 다짐을 실시하였다.



사진 5.3 시멘트 혼합처리 장면



사진 5.4 시멘트 혼합처리토의 포설장면



사진 5.5 시멘트처리토와 비처리토의 혼합후 형상비교

4. 시험시공결과

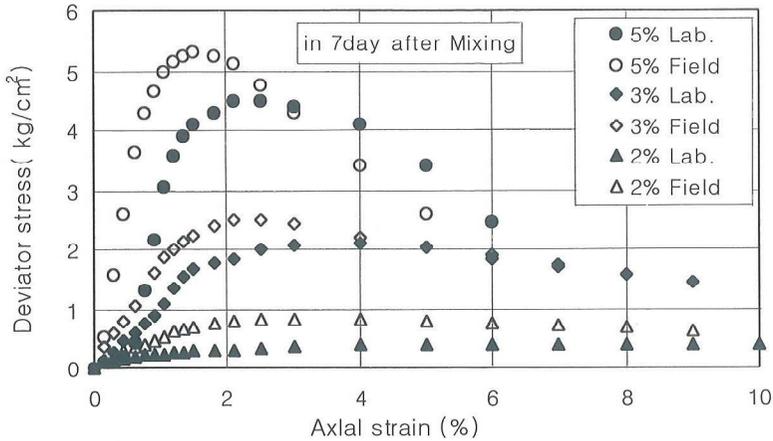
가. 현장 혼합조건의 일축압축강도

본 연구에서 개발한 고탄수비 흙시멘트 혼합장비로 현장에서 시멘트 혼합처리한 흙으로 일축압축시험용 물드를 제작하여 현장시험포내에 현장조건과 같이 양생한 시편과 실내에서 습윤양생한 시편에 대하여 일축압축강도시험을 실시하였다.

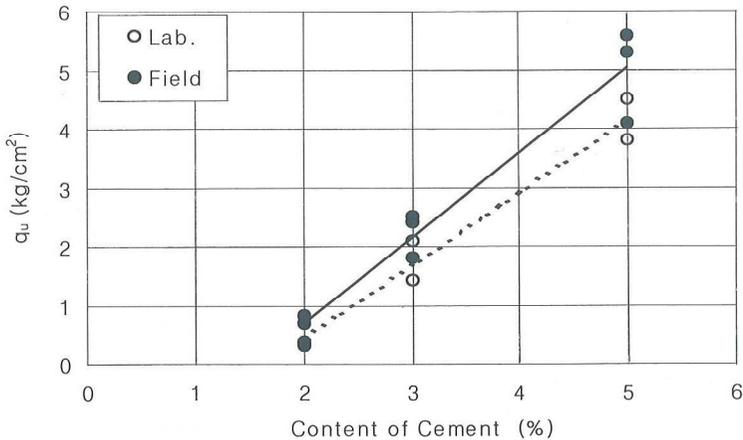
시험결과 응력-변위곡선은 그림 2.21 a)와 같이 실내양생보다 현장양생조건이 더 큰 강도와 탄성계수를 갖는 것으로 측정되었다. 시멘트첨가량별 일축압축강도를 보면 그림 2.21 b)와 같이 실내양생보다 현장양생조건이 더 큰 일축압축강도를 갖는 것으로 측정되었다.

이는 현장조건에서 대기건조에 의해 흙의 함수비가 감소하고 건조수축이 발생되어 단위중량이 증가하고 강도가 증가한 결과로 보여진다. 그러므로 현장에서 완전한 혼합이 이루어질 수 있는 혼합장비를 사용하고 대기건조에

의하여 혼합처리된 흙이 어느 정도 대기건조될 수 있는 조건에서는 배합비 결정시 할증을 하지 않아도 된다고 판단된다.



a) 응력-변위곡선



b) 시멘트 첨가량별 일축압축강도

그림 5.21 시멘트 혼합처리 시험시공 실내와 현장양생 비교
 고함수비 흙시멘트의 현장시험시공결과 실내에서 혼합할 수 있는 것보다 더 양호한 상태로 혼합처리가 가능하였으며, 시멘트함량 2~3%조건으로도

성토재료로서 필요한 비배수전단강도 $c_u=0.2\sim 1.2\text{kg/cm}^2$ 을 충분히 얻을 수 있는 것을 확인하였다.

나. 차량주행성시험결과

도로위에 사진 5.5와 같이 시멘트 3%처리 고함수비 흙시멘트를 성토높이 40cm로 성토를 하고 혼합직후에는 스폰지 현상이 발생하여 괴도형 주행장비(백호)의 주행이 불가능하였으나 사진 5.7과 같이 혼합처리후 1~2 시간 후에 백호의 주행으로 다짐이 가능하였으며, 3일 양생 후에는 사진 5.8과 같이 승용차의 주행이 가능하였다.

본 연구에서 개발한 혼합장비를 이용하여 고함수비 흙을 시멘트혼합처리 하면, 흙과 시멘트의 완전한 혼합이 이루어져 실내 지지력비시험에서 확인한 것과 같이 현장에서도 충분한 소요CBR값을 발휘시켜 공사용도로는 물론 농로의 간이포장도로의 보조기층 대체 성토단면으로 사용할 수 있음을 확인하였다.



사진 5.6 고함수비 흙시멘트의 차량주행가능성 확인을 위한 시험포 설치



사진 5.7 함수비50% 흙시멘트(3%)처리 1시간후 백호다짐광경



사진 5.8 흙시멘트 처리 3일후 승용차 주행

다. 현장다짐특성과 다짐제한시간

현장에서 시멘트 혼합처리한 직후는 흙이 스폰지현상이 발생되어 백호로 다짐을 할 수 가 없었다. 그러나 혼합 후 1~2시간 후에는 흙이 단단(stiff)하여져서 백호로 주행하면서 다짐을 충분히 할 수 있었다.

제2절 7항에서 지연다짐에 대한 시험을 실시한 결과 일축압축강도면에서는 혼합처리즉시 다짐을 하는 것이 효과가 가장 크며 다짐시간이 늦으면 늦을수록 강도가 크게 저하하는 특성이 있다. 그러므로 현장에서 시멘트 혼합 처리토의 다짐은 가능한 빨리 완료하는 것이 필요하다.

여기서 현장에서 다짐을 할 수 있으면서 지연다짐에 의해 강도저하가 없는 다짐제한시간의 결정이 필요하다. 이를 위하여는 현장함수비조건으로 시멘트 혼합처리를 한 흙에 대하여 다짐지연시간별 일축압축강도시험을 하여 강도저하가 적은 시간을 결정하고, 그 시간 안에 현장다짐을 하도록 관리하는 것이 필요하다.

제 4 절 시멘트 혼합처리 성토공법의 배합설계방법

1. 배합비 결정기준

일반성토단면에서의 소요배합비의 결정은 성토단면의 시공 중 사면활동파괴가 발생되지 않는 소요의 전단강도를 얻을 수 있는 배합비를 결정하면 되며, 도로노상이나 보조기층 대체단면에서는 소요의 지지력비 CBR값을 얻을 수 있는 배합비를 결정하면 된다.

2. 배합설계방법

소요의 전단강도와 지지력비를 갖지 못하는 고탍수비의 연약지반토를 시멘트로 고화처리하여 성토재료로 사용하려고 할 때 배합시험은 다음과 같이 한다.

가. 채취한 자연함수비의 흙에 시멘트를 소요의 일축압축강도 또는 소요의 CBR값을 얻기 위하여 예상되는 첨가량을 중심으로 3~4의 배합비로 배합한다.

나. 일축압축시험용 시편의 제작과 양생은 KS F 2329의 규정에 의하여 제작 및 양생을 하고, KS F 2328의 규정에 의하여 일축압축시험을 한다.

CBR시험용 시편은 혼합처리토를 CBR 시험용 몰드에 3층 67회씩 다짐하여 공시체를 제작하여 3일간 20℃ 습윤양생 후 4일간 수침 양생하여 CBR 시험을 한다.

다. 시험결과로부터 시멘트 첨가량과 일축압축강도 또는 CBR값의 관계를 구한다.

라. 시멘트 첨가량과 일축압축강도 또는 CBR값의 관계로부터 소요 일축압축강도 또는 소요 CBR값을 얻을 수 있는 시멘트의 첨가량을 결정한다. 첨가량을 결정한 다음은 실내와 현장의 혼합정도의 차, 함수비, 토질변화 및 시공시의 기온 등을 고려하여 할증을 한다.

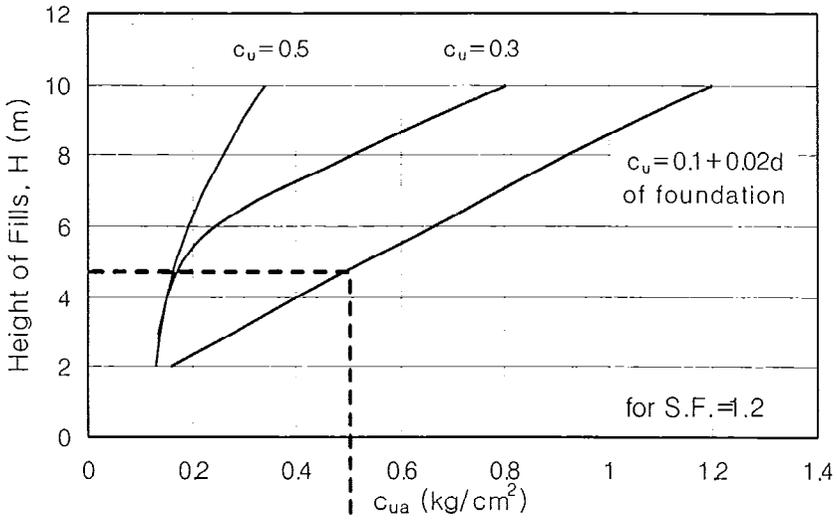
저함수비 흙시멘트에서는 시멘트 첨가량의 할증률은 15~20%로 한다. 그러나 고함수비 흙시멘트에서는 흙과 시멘트의 혼합이 완전하게 이루어지고 대기건조가 이루어지는 조건에서는 고려하지 않아도 된다.

3. 최적배합비결정

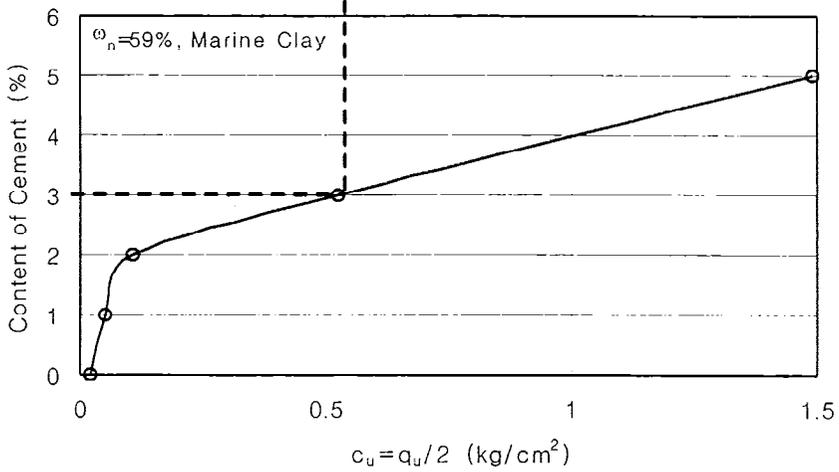
전단강도를 기준으로 배합비를 결정하는 경우, 일축압축시험 결과로부터 각 배합비별 비배수 전단강도관계를 그리고 성토고별 소요의 전단강도 관계도를 그림 5.22과 같이 그리고 그림 a)에서 목표 성토고에 해당하는 소요 비배수전단강도를 결정하고 그림 b)에서 소요비배수전단강도를 얻기 위한 배합비를 결정한다.

지지력비를 기준으로 배합비를 결정하는 경우, 그림 5.23와 같이 각 배합비별 CBR값 관계를 그리고, 차량주행을 위한 도로단면의 성토재료로서 필요

한 소요CBR값을 얻을 수 있는 배합비를 결정한다.



a) 성토고별 소요전단강도



b) 시멘트 첨가량별 비배수전단강도

그림 5.22 전단강도기준 흙시멘트 소요배합비 결정방법

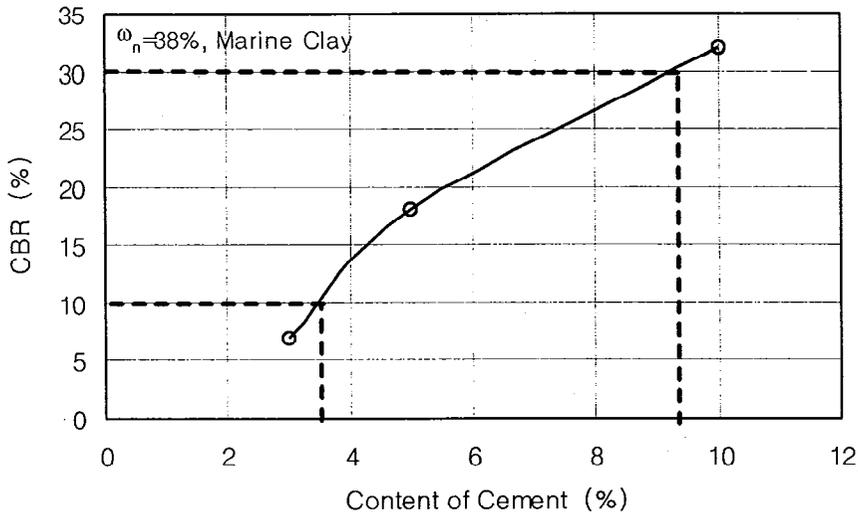


그림 5.23 지지력비기준 흙시멘트 소요배합비 결정방법

제 5 절 고함수비 흙시멘트 성토공법의 경제성분석

1. 기존 설계지구 순성토 공사비

간척지 내부개답공사 기존 설계지구에 대한 순성토 공사비를 비교분석한 결과 육상취토장에서 현장까지 운반하는 순성토공사비(취토장보상비 및 복구비 제외)는 표 5.5와 같이 평균적으로 6,000원/㎥ 이상이다.

표 5.5 각 지구별 순성토공사비 비교

단위 : (원/㎥)

지구명	계	노무비	재료비	경비	비고
영산강(마산공구)	7,577	1,975	2,776	2,826	덤프 15t ℓ=8.66 km
이원	3,188	911	982	1,295	ℓ=2.34 km
영산강(금호공구)	7,385	1,999	2,391	2,995	ℓ=11.6 km
평균	6,050	1,628	2,049	2,372	

2. 기존 설계지구 종단유용 성토공사비

기존 설계지구에 대한 종단유용 성토공사비를 비교분석한 결과 종단유용 성토공사비는 표 5.6과 같이 평균적으로 약 1,014원/m³이다.

표 5.6 각 지구별 순성토공사비 비교 단위 : (원/m³)

지구명	계	노무비	재료비	경비	비고
영산강(마산공구)	1,162	327	379	458	백호+트럭 ℓ=303 m
이원	986	327	300	359	ℓ=235 m
영산강(금호공구)	895	261	209	425	
평균	1,014	305	296	414	

3. 기존 설계지구 종단유용 성토공사비

기존 설계지구에 대한 사토처리 공사비를 비교분석한 결과는 표 5.6과 같이 평균적으로 약 1,014원/m³이다.

표 5.7 각 지구별 종단유용 성토공사비 비교 단위 : (원/m³)

지구명	계	노무비	재료비	경비	비고
영산강(마산공구)	1,796	610	351	835	1,796
영산강(금호)	1,902	601	652	649	1,902
평균	1,849	605.5	501.5	742	1,849

3. 기존 설계지구 사토처리 공사비

기존 설계지구에 대한 사토처리 공사비를 비교분석한 결과는 표 5.6과 같이 평균적으로 약 1,014원/m³이다.

표 5.8 각 지구별 사토처리 공사비 비교

단위 : (원/㎥)

지구명	계	노무비	재료비	경비	비고
영산강(마산공구)	1047	296	339	412	
영산강(금호)	1013	296	236	481	
평균	1,030	296	287	446	

4. 고함수비 흙시멘트 혼합처리 성토공사비

고함수비 흙시멘트 혼합처리 성토공사비를 산출하여 보면 표 5.8과 같이 약 5,398원/㎥³이므로 육상취토장에서 운반하는 순성토에 비하여 경제 적임을 알 수 있다.

표 5.9 고함수비 흙시멘트 혼합처리 성토공사비

단위 : (원/㎥)

공정	계(%/㎥)	노무비	재료비	경비	비고
중단유용 굴착운반	1,849	605.5	501.5	742	
시멘트 혼합처리	3,547	143	3,000	404	
평균	5,396	748.5	3,501.5	1,146	

* 운전원 : 14,315/100=143,

* 손료 : 40,406/100=404,

* 재료비 : 2,000~3,500

제 6 절 결 론

고함수비 연약지반토에 시멘트를 혼합처리하여 성토재료로서 사용 가능성을 확인하기 위하여, 3가지 간척지 흙에 대한 시멘트 혼합처리

후 일축압축시험과 삼축압축시험을 실시하여 처리토의 전단강도 개량효과를 확인하였으며, 지지력비(CBR)시험을 통하여 차량주행성을 확인하고, 압밀시험을 통하여 압축성의 개량효과를 확인하였다.

또한 흙시멘트의 실용화를 위하여 현장에서 시멘트와 흙을 완전하게 혼합할 수 있는 고탍수비 흙시멘트 혼합기기를 고안하여 시험시공을 실시하여 실용성을 확인한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시멘트 혼합처리토의 전단강도 개량효과

일축압축강도 0.04kg/cm^2 , 함수비 59%의 고탍수비 해성점토에 시멘트 3%첨가시 7일 습윤양생후 일축압축강도가 $q_u=2\text{kg/cm}^2$ 으로 크게 증가하여 성토재료로 충분히 사용할 수 있는 결과를 얻었다.

시멘트 혼합처리토의 전단강도는 시멘트함량에 직선비례하여 증가하며, 흙의 현장함수비가 높을수록 개량효과가 적고, 흙의 종류별로 보면 모래질 흙에서 처리효과가 가장 크며, 실트, 점토의 순으로 적어지는 결과를 얻었다.

2. 배합설계 양생기준일수

그 지구의 성토조건에 맞는 양생일수를 기준으로 하면 되지만, 시멘트 처리토의 7일 양생 후 강도는 28일 강도의 약 60% 이상이 되고, 낮은 성토고에서는 성토단면의 완성이 7일 정도에 완료된다고 보면 7일 강도를 양생 기준일로 보는 것이 실용적이라고 판단된다.

3. 지지력비 개량효과

함수비 30%, 지지력비 CBR=2.3%의 간척지 해성점토에 시멘트를 5%첨가시 CBR=36%, 10%처리시 CBR=77%로 증가하는 결과를 얻었다. 그러므로 간척지 연약지반토도 시멘트를 처리하면 도로 노상은 물론 보조기층대용 재료로 충분히 사용할 수 있다는 결과를 얻었다.

4. 압축성개량효과

함수비 59%의 고탄수비 연약지반토에 시멘트를 혼합처리하여 7일 양생후 압밀시험결과 선행압밀압력이 시멘트 3%처리시 1.8kg/cm^2 , 5%처리시 3.4kg/cm^2 으로 크게 증가하여 낮은 성토고(9~17m이하)조건에서는 압축성이 거의 없는 흙으로 개량되는 결과를 얻었다.

5. 다짐

시멘트 혼합처리 후 Cementation이 진행된 후에 다짐을 하면 Cementation이 파괴되어 강도가 크게 감소하므로 가능한 혼합직후에 바로 다짐을 하여야 한다는 결론을 얻었다.

6. 배합설계방법

흙의 종류와 함수비에 따라 개량효과의 차이가 크므로, 설계단계에서 각 지구의 흙에 대한 배합설계를 실시하고 최적배합비를 구하여 설계를 하여야 한다는 결론을 얻었다.

시멘트 혼합처리 배합설계의 순서는 성토단면에서 필요한 목표 전단강도를 먼저 결정하고 그 강도를 얻을 수 있는 배합설계시험을 실시하여 소요전단강도를 얻을 수 있는 최적배합비를 결정하면 된다.

7. 흙시멘트 혼합장비개발과 시험시공

가. 개발된 혼합장비로 현장함수비 $\omega_n=46\sim52\%$ 의 해성점토에 시멘트를 혼합처리한 결과 실내시험에서 혼합하는 것보다 더 양호한 혼합처리를 할 수 있었다. 그러나 단위시간당 처리용량이 적어 현장적용성을 위하여는 시간당 처리용량이 100m^3 이상되는 장비의 제작이 필요하다.

나. 시멘트 혼합처리 직후는 함수비가 높아 다짐장비의 주행이 어려워 다짐을 할 수 없었다. 그러나 혼합처리 후 함수비 감소와 Cementation의 진행에 따라 1~2시간이면 블도져 또는 백호 등의 주행으로 다짐을 할 수 있었으며 이 다짐조건의 전단강도는 실내다짐 양생시험값보다 큰 값을 얻었다.

다. 현장 시멘트혼합처리토에 대한 7일양생후 일축압축강도시험결과 포설다짐 후 건조수축에 의해 단위중량이 증가되어 실내습윤양생 조건보다 큰 강도를 발휘하므로 고탍수비 흙시멘트 성토공법이 매우 유용하다는 결론을 얻었다.

8. 고탍수비 흙시멘트 성토공법의 경제성비교

배수로굴착 및 연약지반토를 시멘트혼합 처리 성토 단가는 약 5,400 원/㎥으로 산토 순성토단가가 6,000원이상인 지구에서는 경제성이 있는 것으로 분석되었으며, 사토처리비, 산림복구비, 민원처리비용 및 취토장보상비를 고려하면 거의 모든 지구에서 경제성이 있는 것으로 분석되었다.

제 6 장 결 론

서남해안 간척지에서 농경지조성을 위한 도로, 방수제, 용배수로 등의 성토공사에 필요한 성토재료를 옥상토취장을 개발하여 사용하고 있으나 환경보존 문제와 산업화에 따른 건설사업의 번창과 더불어 옥상 토취장의 개발이 점점 어려워지고 있으며 성토공사비 단가도 높아지고 있다.

그러므로 간척지내 연약지반토, 배수로굴착토 및 담수호내 준설토 등을 대체성토재료로 활용하는 고탍수비 연약지반토의 성토(Wet Fills)공법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 간척지 연약지반토를 성토재료로 활용하는 성토공법의 설계 및 시공기법을 제시하기 위하여 우리나라 서남해안의 간척지 표층토의 분포와 성토재료로서 공학적특성을 우선 분석하고, 이들 흙에 대한 압밀배수 성토공법, 대기건조 성토공법, 시멘트 혼합처리 성토공법에 대하여 실내 모형시험과 현장시험시공을 실시하였다.

또한 시멘트 혼합처리 성토공법을 실용화하기 위한 고탍수비 흙시멘트 혼합기기를 개발하고 현장에서 시험시공을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연약지반 표층토의 공학적 특성과 개선방법

가. 간척지 표층토의 분포

서남해안의 간척지 표층토를 보면, 서해중부는 실트질흙이 많고 남해안은 점토함량이 많은 분포를 보이고 있으며, 현장함수비와 액성한계도 서해안 중부(30~40%)부터 남해남부(40~75%)로 갈수록 증가하는 분포를 보이고 있어 서해안보다 남해안 흙이 성토재료로 활용하기가 더 어려운 것으로 분석되었다.

나. 성토재료의 소요 전단강도

성토단면에 대한 사면안정해석결과 성토재료의 소요강도는 그림 2.10과 같이 기초지반이 연약할수록, 성토고가 높을수록 더 큰 전단강도의 성토재료가 필요한 것으로 분석되었으며, 비배수전단강도 $c_u=0.1+0.02dkg/cm^2$ 의 기초지반에서 성토고 2m의 경우 성토재료의 $c_u=0.2kg/cm^2$ (안전율 1.2기준) 정도, 성토고 10m의 경우 $c_u=1.2kg/cm^2$ 정도의 큰 강도가 필요한 것으로 분석되었다.

다. 다짐특성 및 전단강도특성

서남해안 간척지 표층토에 대한 표준다짐시험결과 최적함수비는 $w_{opt}=19\sim 23\%$, 최대건조밀도는 $r_{dmax}=1.57\sim 1.64g/cm^3$ 이고, 삼축압축(CU)시험결과 유효응력개념의 내부마찰각 $\phi = 30\sim 39^\circ$, 전응력개념의 $\phi = 14\sim 29^\circ$ 로 함수비를 조절하여 소요의 다짐만 할 수 있다면 성토재료로 충분히 활용할 수 있다는 결론을 얻었다.

라. 고탐수비 연약지반토의 성토재료 활용가능 조건

고함수비의 흙을 성토재료로 활용할 수 있는 경우는 ① 외부에서 성토재를 구할 수 없는 조건 ② 굴착된 흙을 사토처리할 수 없어 고탐수비의 흙을 적절히 처리하여 재활용할 수밖에 없는 경우 ③ 고탐수비토를 대기건조공법, 고화처리공법, 보강성토공법 등으로 처리할 경우 외부에서 양질의 성토재료를 반입하는 것보다 경제적인 경우 사용할 수 있다.

마. 성토재료로서 공학적 특성 개선방법과 연구과제

간척지 연약지반 흙의 공학적 특성 개선방법은 1) 압밀배수(Consolidation)공법, 2) 양질토 혼합공법(Mixing), 3) 시멘트 또는 석회혼합처리공법(Quicklime or Soil Cement), 4) 대기건조공법(Evaporation dryey) 등이 있으며, 간척지 연약지반토를 성토재료로 활용하기 위하여는 이들 공법에 대한 설계 및 시공기법에 대한 연구가 필요하다는 결론을 얻었다.

다.

2. 압밀배수 성토공법

가. 압밀해석방법

고함수비의 연약지반토를 굴착하여 성토하면 흙이 교란되고, 흙이 교란되면 선행압밀하중과 압밀계수가 크게 감소하므로 교란조건의 시험으로부터 이 값을 구하여 압밀해석을 하여야 한다.

나. 필터매트의 소요통수능

본 연구에서 제안한 필터매트의 통수능을 고려한 압밀해석방법으로 해석을 실시한 결과 배수재의 소요통수능은 압밀지연시간 5%를 허용치로 할 때 $q_{ra} = c_v \times L \times 20$ (cc/s/m) 이상이면 되는 상관식을 얻었다.

시중에 생산되고 있는 필터매트의 통수능 시험결과 통수능 $q=0.15\sim 20$ cc/s/m로 그 값의 차이가 매우 크므로, 통수능시험을 하여 소요통수능 이상의 값을 갖는 필터매트의 선정이 필요하다.

다. 압밀배수 성토공법의 한계

전응력개념의 내부마찰각이 25° 이상의 연약지반토는 투수계수도 다소 큰편으로 공사기간이 허용된다면 성토고 2m이하의 차량주행이 없는 성토단면에 사용할 수 있다.

그러나 실제 시공중 성토단면 표층부분에서 대기건조가 이루어지므로 압밀배수와 대기건조의 효과를 동시에 고려한 해석방법과 설계 및 시공방법이 필요하다는 결론을 얻었다.

3. 대기건조 성토공법

가. 성토재료의 소요전단강도

성토재료의 소요 비배수전단강도는 기초지반의 조건(전단강도)에

따라 차이가 크며, 기초지반의 전단강도가 $c_u=0.1+0.02\text{kg/cm}^2$ 조건에서 성토 고(h)별 성토재료의 소요전단강도 $c_{ua}=0.133h-0.133\text{kg/cm}^2$ 이상이면 되는 사면안정해석결과를 얻었다.

나. 대기건조 목표함수비 결정

성토재료의 소요전단강도를 얻기 위하여 대기건조 시켜야 하는 흙의 함수비는 함수비별 전단강도시험을 실시하여 함수비와 전단강도관계로부터 구할 수 있다.

다. 대기건조 소요일수

대기건조일수는 흙의 종류, 초기함수비, 대기건조 포설두께, 지하수위, 기후등에 영향을 받으므로 그 소요일수를 정확히 예측하는 것은 매우 어렵다는 결과를 얻었으며, 조사설계단계에서 그 현장조건에서 대기건조 시킬 수 있는 조건으로 시험시공을 실시하여 결정하는 것이 필요하다는 결론을 얻었다.

라. 대기건조 성토공법의 한계

간척지 표층건조토를 대기건조시켜 다짐을 95%조건으로 다짐을 하면 3~6m까지 성토시공이 가능하며, 대기건조일수는 표층건조토를 발갈이를 하여 약 5~10일(우천일수 제외)정도 대기건조 시키면, 다짐을 95% 습윤층 조건까지 건조가 가능하여 대기건조공법이 가능하다는 결론을 얻었다.

그러나 간척지토는 다짐을 95%로 다짐을 하여도 노상으로서 필요한 지지력비(CBR)를 얻을 수 없으므로 노상으로 사용할 때는 시멘트 혼합처리 등의 개량공법이 필요하고, 또한 배수로 굴착 등 심층의 고함수비토는 대기건조 일수(2개월 이상)가 많이 소요되어 시공성이 없으므로 시멘트 혼합처리 고결성토공법의 적용이 필요하다는 결론을 얻었다.

4. 시멘트 혼합처리 성토공법

가. 시멘트 혼합처리토의 전단강도 개량효과

시멘트 혼합처리토의 전단강도는 시멘트함량에 직선비례하여 증가하며, 흙의 현장함수비가 높을수록 개량효과가 적고, 흙의 종류별로 보면 모래질흙에서 처리효과가 가장 크며, 실트, 점토의 순으로 적어지는 결과를 얻었다.

나. 배합설계 양생기준일수

그 지구의 성토조건에 맞는 양생일수를 기준으로 하면 되지만, 시멘트 처리토의 7일 양생 후 강도는 28일 강도의 약 60% 이상이 되고, 낮은 성토고에서는 성토단면의 완성이 7일 정도에 완료된다고 보면 7일 강도를 양생기준일로 보는 것이 실용적이라고 판단된다.

다. 지지력비 개량효과

함수비 30%, 지지력비 CBR=2.3%의 간척지 해성점토에 시멘트를 5% 첨가시 CBR=36%, 10% 처리시 CBR=77%로 증가하는 결과를 얻었다. 그러므로 간척지 연약지반토도 시멘트를 처리하면 도로 노상은 물론 보조기층 대용재료로 충분히 사용할 수 있다는 결과를 얻었다.

라. 압밀시험 압축성개량효과 확인

함수비 59%의 고함수비 연약지반토에 시멘트를 혼합처리하여 7일 양생후 압밀시험결과 선행압밀압력이 시멘트 3%처리시 1.8kg/cm^2 , 5%처리시 3.4kg/cm^2 으로 크게 증가하여 낮은 성토고(9~17m이하)조건에서는 압축성이 거의 없는 흙으로 개량되는 결과를 얻었다.

마. 지연다짐

시멘트 혼합처리 후 Cementation이 진행된 후에 다짐을 하면 Cementation이 파괴되어 강도가 크게 감소하므로 가능한 혼합직후에 바로 다짐을 하여야 한다는 결론을 얻었다.

바. 흡시멘트 혼합장비개발과 시험시공

1) 개발된 혼합장비로 현장함수비 $\omega_n=46\sim 52\%$ 의 해성점토에 시멘트를 혼합처리한 결과 실내에서 혼합하는 것 이상의 혼합결과를 얻었으며, 시멘트 혼합처리 직후는 스펀지현상이 있어 다짐을 할 수 없었으나 혼합처리 후 1~2시간이 경과하면 볼도져 또는 백호 등의 주행으로 다짐을 할 수 있었으며 이 다짐조건의 전단강도는 실내혼합 시험값보다 더 큰 값을 얻었다.

2) 현장 시멘트혼합처리토에 대한 7일양생 후 일축압축강도시험결과 포설다짐 후 건조수축에 의해 단위중량이 증가되었으며, 실내습윤양생조건보다 더 큰 강도를 얻었다.

그러므로 배합설계에서 현장혼합정도 등을 고려한 함증은 고탍수비 흡시멘트에서는 고려하지 않아도 된다는 결론을 얻었다.

3) 현재 제작한 혼합기는 연구를 위한 소형으로 만들었기 때문에 단위시간당 처리용량이 적어 현장적용성을 위하여는 시간당 처리용량이 $100\text{m}^3/\text{hr}$ 이상 되는 대형장비의 제작이 필요하다.

사. 배합설계방법

흙의 종류와 함수비에 따라 개량효과의 차이가 크므로, 설계단계에서 각 지구의 흙에 대한 배합설계를 실시하고 최적배합비를 구하여 설계를 하여야 한다는 결론을 얻었다.

시멘트 혼합처리 배합설계의 순서는 성토단면에서 필요한 목표 전단강도를 먼저 결정하고 그 강도를 얻을 수 있는 배합설계시험을 실시하여 소요전단강도를 얻을 수 있는 최적배합비를 결정하면 된다.

5. 연구결과 실용화 추진

본 연구결과를 실용화하기 위하여 배수개선사업 공사중인 1개지구 배수로 굴착 연약지반토의 성토재료활용 방안의 기술지원을 통하여 대기건

조공법으로 재활용하였으며, 간척지 내부개답사업 이원지구에 대기건조공법으로 간척지 지반토를 방수제 성토단면에 활용하는 방안을 설계에 반영하였으며, 간척지 내부개답 설계계획중에 있는 시화지구에 대기건조공법과 시멘트 혼합처리 성토공법을 적용하기 위한 시험시공을 진행중에 있다.

여백

참 고 문 헌

1. 공길용(1997), “시멘트계 고화제를 이용한 농로의 보조기층 안정처리 공법”, 건국대학교 박사학위논문.
2. 김현태(1998), “스미어존내 투수성변화와 웰저항을 고려한 연직배수공법의 압밀해석”, 동국대학교 박사학위논문.
3. 김형주(1994), “준설표성토의 압밀특성에 미치는 시간효과”, 한국지반공학회지 Vol. 10, No.1, pp. 71-82
4. 농어촌진흥공사(1986), “농어촌도로포장공법연구”
5. 농어촌진흥공사(1995), “연약점토지반의 표층처리 및 보강공법 실용화연구”
6. 농어촌진흥공사(1999), “영산강 III-2지구 금호 1-1공구 평야부개발사업 계획서(6-1)(사업계획서)”, pp. 279-645
7. 농어촌진흥공사(1999), “이원지구 간척농지개발 사업계획서(4-1)(단가표, 정지토적)”, pp. 47-319
8. 농어촌진흥공사(1999), “영산강 III-2지구 마산 2공구 평야부개발사업계획서(6-1)(사업계획서)”, pp. 188-693
9. 유 찬(1999), “오염토양에 대한 고결공법의 처리효과에 관한 연구”, 건국대학교 박사학위논문.
10. 정철현(1995), “도로상을 통행하는 트럭의 형상 및 중량특성”, 대한토목학회지 Vol.15, No.5, pp.1159-1168
11. 천병식 외1(1992), “석탄회의 도로성토재 및 노상재로서의 활용을 위한 비회와 저회의 적정혼합비”, 대한토목학회논문집 Vol.2, No.1, pp.115-124
12. 한국건설기술연구원(1985), “Geotextile 및 보강토공법에 관한 연구보

고서”

13. 한국건설기술연구원(1988), “연약지반 천층안정처리연구”
14. 홍병만(1998), “간척지반의 건조수축 및 압밀침하특성”, 동국대학교 박사학위논문.
15. ASTM, “Standanrd Test Method for Constant Head Hydraulic Transmissivity(In-Plane Flow) of Geotextiles and Geotextile Related Products”(1987), Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08., Designation : D4716-87
16. Broms, B.B. (1984), “Stabilization of soft clay with lime columns”, Proc. Seminar on Soil Improvement and Construction Techniques in Soft Ground, Nanyang Technological Institute, Singapore.
17. Broms, B.B. (1986), “Stabilization of soft clay with lime and cement columns in Southeast Asia”, Applied Research Project RP10/83, Nanyang Technical Institute Singapore.
18. Conner, K.O. & Taylor, R.N. (1993), “The swelling behavior of compacted clayey backfill”, ENGINEERED FILLS edited by B.G. CLARKE, C.J.F.P. JONES & A.I.B. MOFFAT pp119~129
19. Giroud, J.P. (1981) “Designing with Geotextiles”, Materiaux et Constructions, Vol. 14, No. 82, pp. 257-277
20. Lambe, T. W., and Whitman, R. V. (1969), “Soil Mechanics”, John Wiley and Sons, Inc., New York.
21. Miura, N., Koga, Y., and Nishida, K. (1986), “Application of a deep mixing method with quicklime for the Ariake clay ground” J. of Japan Soc. Soil Mech. and Found. Eng'g., Vol 34, no. 4, pp.

5-11.

22. Onoue, A., Ting, N-H., Germaine, J. T. and Withman, R. V. (1991), "Permeability of disturbed zone around vertical drains", Proc. of ASCE Geotech. Engng. Congress, Colorado, pp.879~890.
23. Samarasinghe, A. M., Huang Y. H., and Drenvich, V. P. (1982), "Permeability and consolidation of normally consolidated soils", Journal of the Geotechnical Eng. Division, Vol. 108, No. GT6, pp. 266~290.
24. Taylor, D. W.(1948), "Fundamentals of Soil Mechanics", John Wiley and Sons, Inc., New York N. Y.
25. Thomas, B. R.(1993), "Wet fills : evaporative dewatering techniques applied to earthworks construction", ENGINEERED FILLS edited by B.G. CLARKE, C.J.F.P. JONES & A.I.B. MOFFAT pp. 99~108
26. Woo, S. M. (1971), "Cement and lime stabilization of selected lateritic soils", Thesis No. 409, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
27. 松尾新一郎 外 1(1984), "石灰安定処理における添加材量と処理土の強度", 土と基礎, 32-5, pp. 5-9
28. 石田 宏(1991), "生石灰 スラグによる高含水比火山灰質粘性土の凍上防止" 土と基礎, 39-8, pp. 5-10
29. 中村 俊行(1994), "路床. 路盤の安定処理", 基礎工, pp. 28-34
30. 矢野弘一郎 外 2(1984), "浚渫泥土の分離堆積", 土と基礎, 32-5, pp. 23-28
31. 小林 勤 外1(1993), "赤ぼく, 黒ぼくによる盛土施工・管理方法の-提案", 土と基礎, 41-8, pp. 45-48

32. 朴永穆(1994), “低平地に堆積する 海成粘土の 土質特性と 鉛直排水工法
による 地盤改良に関する研究”, 博士學位論文, 佐賀大學大学院

부 록

I. 시화지구 고탐수비 연약지반토 성토공법설계 예)

1. 개요

본 지구는 경기도 화성군 송산면, 서신면 및 안산시 대부도에 위치한 간척개발사업지구로서 본 검토는 개답사업에 필요한 성토재료를 간척지 연약지반토로 대체활용하기 위하여 대기건조 성토공법과 고탐수비 흡시멘트 고탐처리 성토공법의 적용성에 대한 기술검토와 활용방안을 검토하였다.

본 검토에서는 지반토를 사용할 수 있는 성토단면의 종류별 사용 단면부위를 제시하고 설계 및 현장 고탐수비 관리기준, 다짐관리기준 및 시공에 필요한 공정 및 품질관리기준을 검토하였다.

2. 시화지구 기초지반조사시험 자료분석

본 지구의 외곽 방수제 기초지반 토질조사자료를 분석한 결과 그림 부 1.1과 같이 전체적으로 서남해안 간척지보다 기초지반이 양호한 것으로 분석되었다.

그러나 방수제 및 도로 노선이 영구간이나 표고가 낮은 곳을 통과하는 구간에서 사면활동파괴 및 침하문제가 발생되므로 본 조사결과중 가장 취약한 조건으로 기초지반의 심도와 전단강도 상관성을 결정하였다.

분석결과 심도별 전단강도는 $c_u=0.13+0.024d$ kg/cm²의 관계를 갖는다. 여기서 d 는 심도로서 단위는 m이다.

3. 대기건조 성토공법

가. 검토방법

대기건조 성토공법을 적용하기 위하여 성토재료의 소요강도분석과 성토재료로 사용할 간척지 표층토에 대한 다짐 및 전단강도 특성시험을 실시하여 소요강도를 얻기 위한 목표 고탐수비와 소요다짐밀도를 결정하였다.

현장에서 발갈이를 하여 목표 고탐수비까지 대기건조시키기 위한 방법과 소요

기간을 결정하고 표층토채취, 운반 및 다짐공정에 대한 기초적인 자료를 결정하고자 하였다

나. 소요전단강도결정

본 지구 연약지반위에 그림 부 1.2와 같은 성토단면에 대하여 공사용 차량이 주행하는 조건으로 사면안정해석을 실시한 결과 그림 부 1.3과 같은 결과를 얻었다.

그림으로부터 성토 3m를 위한 성토재료의 소요강도는 $c_u = 0.4\text{kg/cm}^2$ 이상이 필요하다.

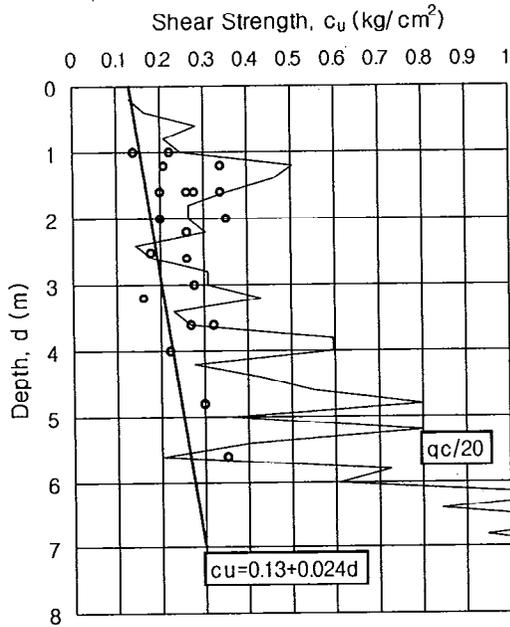


그림 부 1.1 시화지구 기초지반 지층 및 토질특성

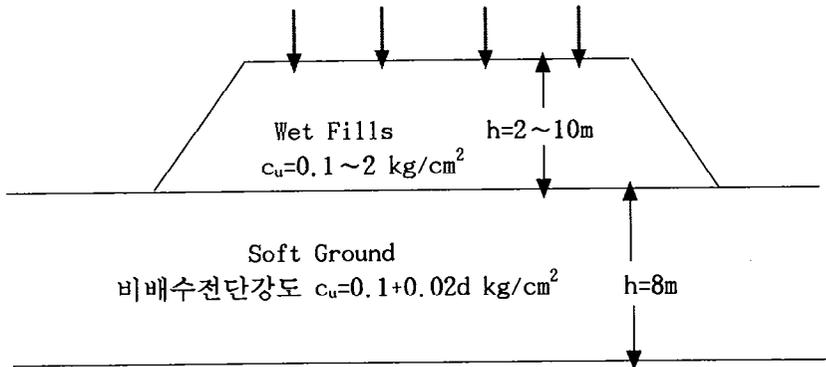
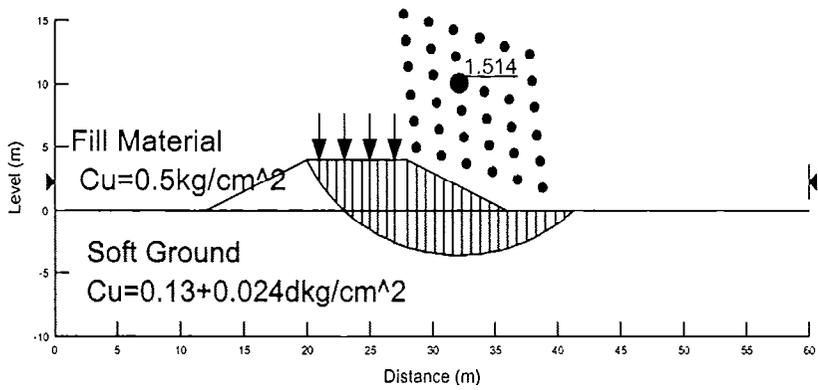
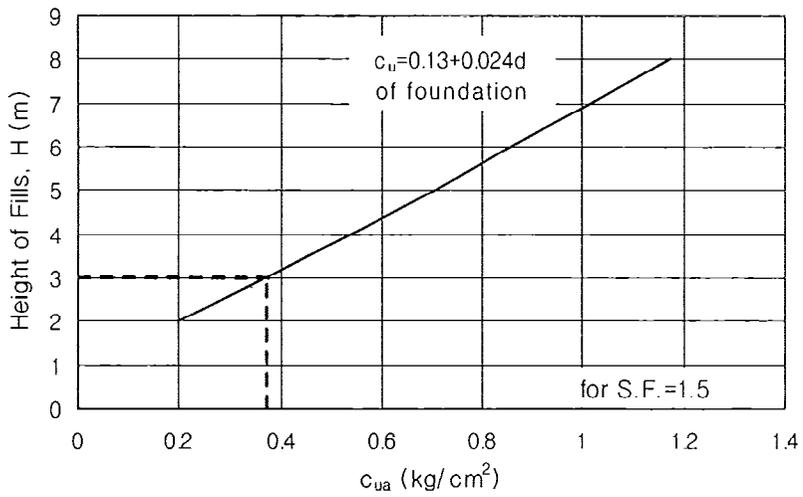


그림 부 1.2 사면안정해석 단면 및 강도조건



a) 성토사면안정해석 결과도



b) 사면안전율(S.F.=1.5조건)

그림 부 1.3 성토사면안정해석결과도

다. 표층토의 다짐특성 및 전단강도 특성

본 지구의 기초지반 표층토 흙에 대한 다짐시험결과는 그림 부1.4와 같이 현장함수비부터 함수비를 건조시키며 다짐을 한 다짐곡선과 건조후 다시 가수를 하면서 다짐을 한 것은 차이가 있다.

현장조건에서는 함수비를 가능한 건조시켜 사용하는 조건이므로 현장함수비부터 건조시켜가면서 다짐을 한 곡선을 적용하였다.

각 함수비별 다짐을별 삼축압축시험을 실시한 결과 그림 부 1.5와 같은 결과를 얻었다. 함수비가 낮을수록 다짐율이 증가할수록 큰 전단강도를 갖는 것으로 측정되었으며 주요 다짐 및 전단강도 시험결과는 표 부 1.1과 같다.

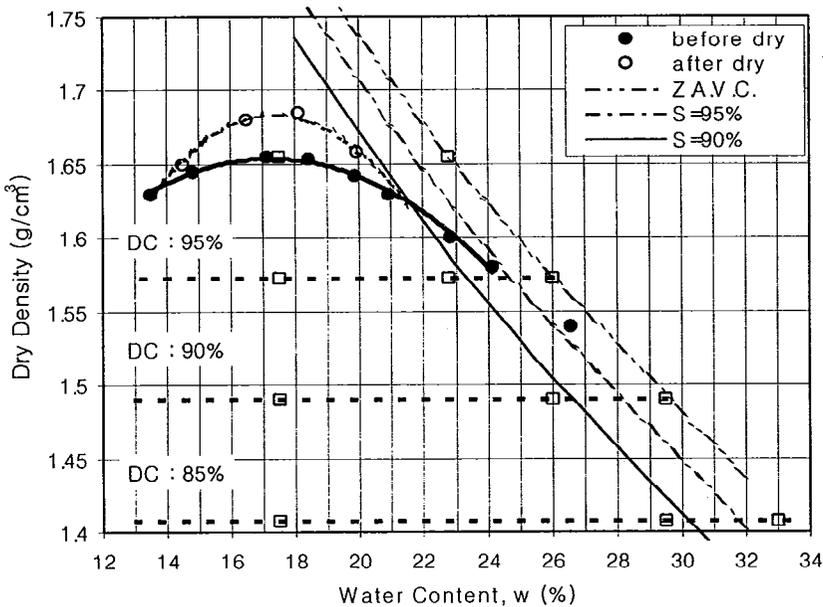
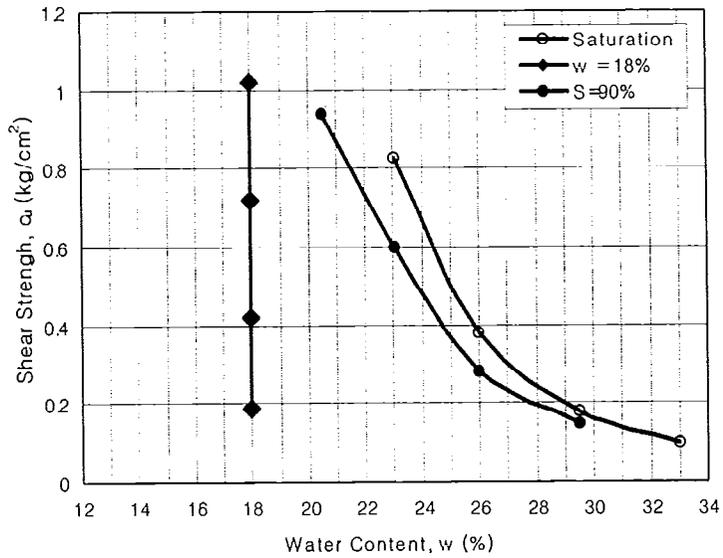
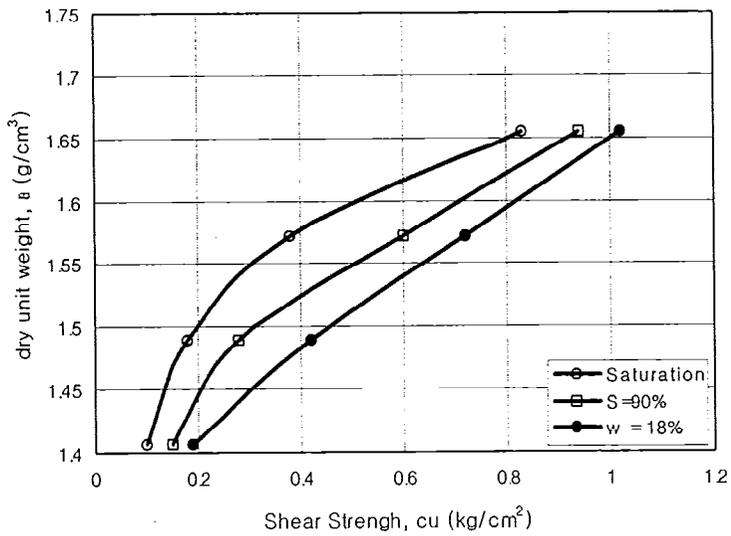


그림 부 1.4 시화지구 간척지 표층토 다짐시험결과도



a) 함수비별 비배수전단강도



b) 다짐밀도별 비배수전단강도

그림 부 1.5 함수비별 포화도별 비배수전단강도

표 부 1.1 표층토의 다짐 및 전단강도 특성

흙분류	다 짐 특 성			비배수전단강도(kg/cm ²) ()내서 함수비, (%)		
	최대 건조밀도 (g/cm ³)	최적 함수비 (%)	95% 포화층 함수비(%)	95%습윤	95%포화	90%습윤
실트질 흙 (ML)	1.65	17.5	26	0.6(24)	0.4(26)	0.28(26)

라. 대기건조 목표 함수비

그림 부 1.5 a)에서 포화조건인 비배수전단강도 $c_u=0.4\text{kg/cm}^2$ 을 얻기 위하여 필요한 함수비는 $\omega_n=26\%$ 이지만 그림 부 1.5 b)에서 $c_u=0.4\text{kg/cm}^2$ 을 얻기 위하여 필요한 다짐율은 $D=95\%$ 이상이므로 다짐율 95%이상 다짐을 하기 위하여는 $\omega_n=24\%$ 까지 대기건조시켜야 소요의 다짐을 할 수 있으므로 대기건조 목표함수비를 $\omega_n=24\%$ 이하로 한다.

마. 발갈이 대기건조 및 집토보관 공정

모관수가 공급되는 조건에서는 대기건조에 의한 흙의 함수비를 낮추는 것에 한계가 있으므로 지반으로부터 모관수의 공급을 차단하고 대기건조시키기 위하여 간척지 표층토를 사진 부 1.1~1.2와 같이 발갈이 하고 함수비변화를 측정된 결과 그림 부 1.6과 같은 결과를 얻었다.

발갈이 대기건조 시험시공결과 발갈이는 표층토가 마른후 다시 발갈이를 반복하는 것이 효과가 크므로 발갈이 4회에 우천시 손실율을 고려하여 추가 2회로 총 6회를 실시하는 것으로 한다.

또한 건조시킨 흙을 바로 집토하여 운반할 때까지 야적하는 품과 우천시 빗물의 침투를 방지하는 방수막의 품을 제공하는 것으로 한다.



사진 부 1.1 대기건조를 위한 간척지 표층토 발갈이



사진 부 1.2 간척지 표층토 발갈이용 경운기



사진 부 1.3 간척지 표층토 성토후 사면보호용 매트포설



사진 부 1.4 간척지 표층토 대기건조공법 성토후 전경

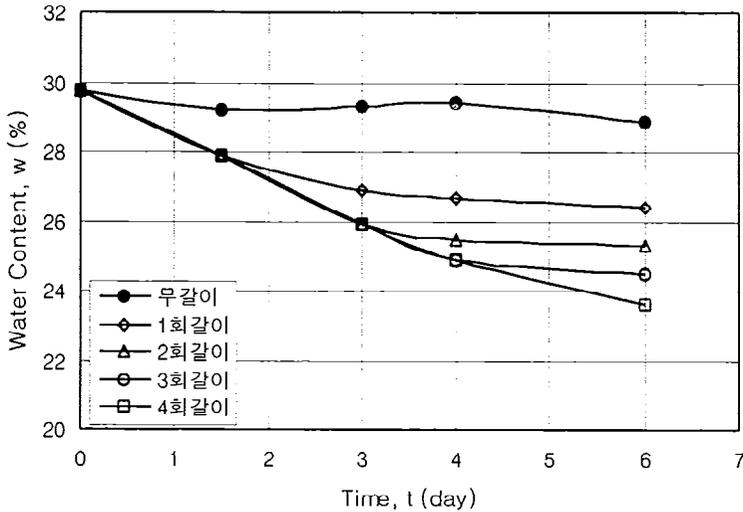


그림 부 1.6 발갈이 횟수별 대기건조일수별 함수비 변화

바. 운반 및 다짐

표층토의 대기건조후 야적장위치로부터 흙을 운반하여 소요의 다짐을 하는 것이 필요하다. 흙의 다짐은 과다짐이 되어 포화상태가 되면 전단강도가 크게 감소하므로 포설두께를 20~30cm로 하여 백호 4회다짐으로 소요의 다짐 밀도를 얻을 수 있는 것으로 측정되었다.

실제 현장에서는 시험시공을 하여 다짐장비와 다짐횟수를 결정하는 것이 필요하다.

사. 성토사면보호공

대기건조 표층토로 성토시 사면유실의 문제가 있으므로 사면보호공법을 적용하여야 한다. 사면보호공중 사석, 돌망태, 블록등의 보호공은 기존 사용하는 공법으로 산토로 성토하는 공사에서 적용하는 것과 같이 설계와 시공을 하면된다.

그러나 잔디나 무보호공 단면에서는 잔디 또는 자생풀이 활착하기 전에 사면유실이 발생되므로 이를 방지하기 위하여 적용가능한 사면보호공법으로는

토목섬유 매트포설, 산토포설, 흙시멘트 사면처리 등이 있다.

본 지구의 경우 대기건조 시험시공에서 토목섬유로 사면보호공을 한 경우 강우에 의한 사면유실이 전혀 없는 매우 효과가 큰 것으로 확인되었다.

3. 시멘트 혼합처리 성토공법

가. 검토방법

대기건조공법은 함수비가 어느정도($\omega_n=30\%$ 정도) 건조되어 있는 흙에서는 약간의 추가건조로 목표함수비($\omega_n=24\%$ 이하)까지 건조시킬 수 있지만 배수로굴착도와 같은 고태수비토는 대기건조에 의한 함수비조절에 소요시간이 많이 소요되므로 대기건조공법의 적용이 사실상 어렵다.

또한 간척지 연약지반토는 다짐을 충분히 하여도 우천시 흡수팽창에 의해 연약화되어 공사용도로나 노상재료로 사용하기가 어렵다.

그러므로 고태수비토를 시멘트와 혼합처리하여 노상재료로 사용하는 고태성토공법의 적용이 필요하다.

본 검토에서는 시화지구 고태수비($\omega_n=50\%$) 연약지반토에 시멘트 혼합처리에 대한 배합설계를 실시하고 소요의 전단강도와 CBR를 얻을 수 있는 배합비를 결정하였다.

나. 고태수비 흙시멘트 성토공법

1) 목표전단강도결정

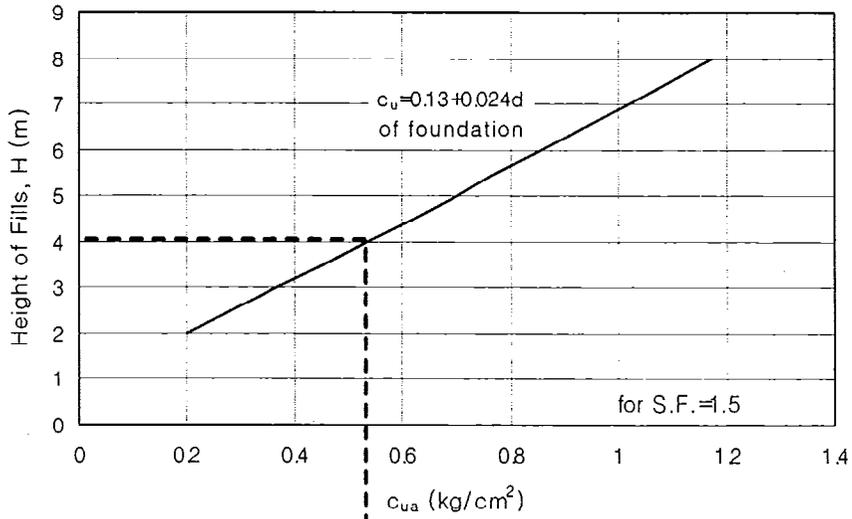
성토재료로서 필요한 전단강도는 그림 부 1.7 a)에서 성토고 4m에 대하여 소요 비배수전단강도는 $c_u=0.5\text{kg/cm}^2$ 이상이 필요하다

2) 흙시멘트 배합설계

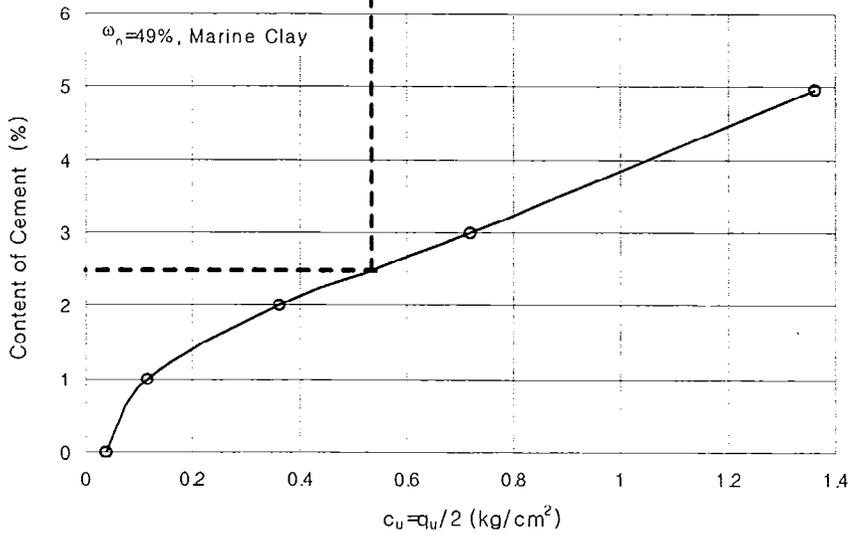
본 지구 대표적인 간척지 고태수비 표층토(심도 1~3m)에 대한 흙시멘트 배합설계결과 그림 부 1.7 b)와 같은 결과를 얻었다.

3) 최적배합비결정

그림으로부터 $c_u=0.5\text{kg/cm}^2$ 이상을 얻기 위한 소요배합비는 건중량 대비 2.5%이상이면 되는 것으로 여기에 현장시공성을 고려하여 3% ($=2.5*120\%$)로 결정하였다.



a) 성토고별 소요전단강도



b) 시멘트 첨가량별 비배수전단강도

그림 부 1.7 전단강도기준 흙시멘트 소요배합비 결정방법

다. 흙시멘트 노상성토공법

1) 목표 CBR결정

도로공사표준시방서 노상토에 대한 기준을 보면 CBR=10%이상이지만 공사용도로로 직접사용하기 위하여 CBR=15%이상으로 관리하는 것으로 하여 CBR값 15%이상을 목표값으로 한다.

2) 흙시멘트 배합설계

지반표층토 현장함수비 30~40%조건인 흙에 대하여 CBR값을 기준으로 한 흙시멘트 배합설계시험을 실시하였다. 시험결과 그림 부 1.8과 같은 결과를 얻었다.

3) 최적배합비결정

그림으로부터 CBR값 15%이상을 얻기 위한 소요배합비는 건중량대비 4.2%이상이면 되는 것으로 여기에 현장시공성을 고려하여 5% (=4.2*120%)로 결정하였다.

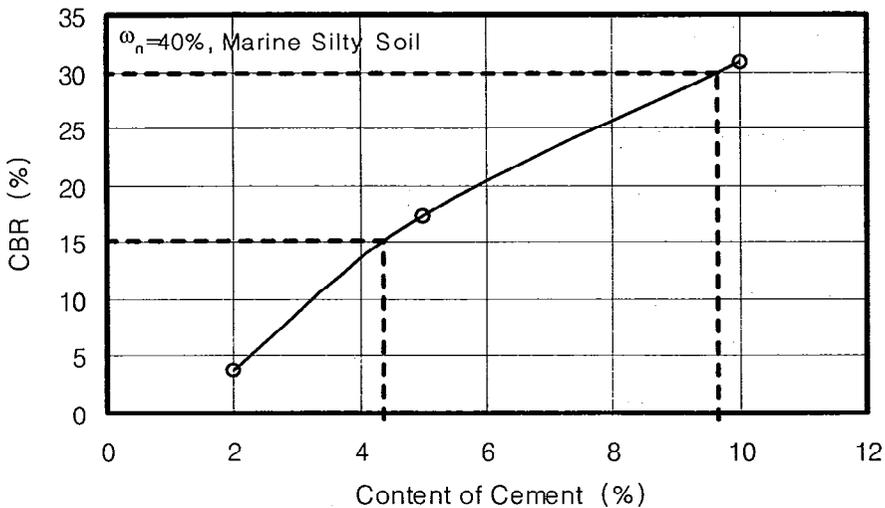


그림 부 1.8 지지력비기준 흙시멘트 소요배합비 결정방법

II. 이원지구 고탍수비 연약지반토 성토공법설계 예)

1. 개요

본 지구 성토단면중 일부구간 또는 일부 단면에 연약지반토의 성토재료로서 활용하기 위하여 그 활용 가능성에 대한 기술검토를 실시하였다.

본지구의 표층토는 해성점토(CL), 실트(ML), 실트질모래(SM)로 형성되어 있어 실트질 모래로 형성되어 있는 구간은 표층 건조토만을 활용한다면 쉽게 사용이 가능하지만 실트와 점토구역은 사용전에 현장함수비 조절과 성토 후 다짐관리가 필요하다.

본 검토에서는 지반토를 사용할 수 있는 성토단면의 종류별 사용 단면부위를 제시하고 설계 및 현장 함수비 관리기준, 다짐관리기준 및 시공에 필요한 공정 및 품질관리기준을 검토, 제시하였다.

2. 이원지구 기초지반조사시험 자료분석

가. 검토대상 성토단면

검토대상 성토단면은 방수제, 단지내 도로, 외곽순화도로 및 배수로 성토단면에 대하여 기초지반 지층별 토질특성 및 표층토의 특성에 대해 분석하였다.

나. 기초지반 지층 및 토질특성

이원지구 방수제 및 도로 예정노선의 연약지반 지층특성과 토질특성은 다음과 같다.

1) 방수제 도로

본 기초지반은 연약심도가 4.5~16m로 대부분 실트질 모래와 실트질 흙이며 표층토는 실트질 모래로 형성되어 있다.

2) 단지내 도로

본 기초지반은 2구역으로 화력측 구간과 공감측 구간으로 나누어볼 수 있다.

가) 화력측 구간(2-1구간)은 연약심도 12~16.2m로 대부분 압축성이

큰 점토질 흙으로 형성되어 있으며 표층토는 실트질 모래로 되어 있는 일부구간을 제외하고 점토질 흙으로 형성되어 있다.

나) 공감측구간(2-2구간)은 연약심도 3~16m로 실트질흙과 실트질모래로 형성되어 있으며 표층토는 실트질 모래로 형성되어 있다.

3) 외곽순환도로

외곽순환도로는 기존 해안선을 통과하는 도로로서 능선부 통과구간은 경지반이며 계곡부 통과구간은 다음과 같이 3개 구간으로 나누어볼 수 있다.

가) 3-1 구간

연약심도 3.6~16.2m로 고탍수비 해성점성토로 매우 연약지반이며 표층토도 고탍수비 해성점성토로 성토재료로 사용하기 매우 어렵다.

나) 3-2 구간

연약심도 2.2~13m로 고탍수비 해성점성토로 매우 연약한 지반이며 표층토도 3-1구간과 같이 해성점성토로 형성되어 있다.

다) 3-3 구간

연약심도 3.8~13m로 상동

3. 표층토의 다짐특성 및 전단강도 특성

본 지구의 기초지반 표층토는 점성토와 실트질모래의 2종류 흙으로 나누어볼 수 있다. 2가지 흙에 대한 다짐 및 전단강도 시험결과 표 부 2.1과 같다.

표 부 2.1 표층토의 다짐 및 전단강도 특성

흙분류	다 짐 특 성			비배수전단강도(kg/cm ²) ()내서 함수비, (%)		
	최대 건조밀도 (g/cm ³)	최적 함수비 (%)	95% 포화측 포화측 함수비(%)	95%포화	90%포화	85%포화
점성토 (CL)	1.535	21.5	31	0.35(31)	0.15(35)	0.08(39.2)
실트질모래 (SM)	1.845	12.5	19.5	0.44(19.5)	0.22(22.5)	0.04(26)

4. 성토단면의 소요강도

가. 검토단면 및 해석결과

성토구조물의 용도에 따라 상재하중조건이 달라진다. 상재하중조건은 중차량 주행용 도로(30t 덤프), 경차량 주행도로(10t 트랙터), 무차량 주행도로(2t 트럭) 단면으로 분류하였다.

차량하중은 그림 부 2.1과 같이 차량바퀴하중이 2대가 4열로 작용하는 것으로 보고 사면안정해석을 실시하였다. 연약지반 위에 도로성토에서 문제점은 시공중 사면활동파괴와 완공 후 압밀침하의 문제가 있다. 사면활동파괴는 시공중 또는 시공 직후 발생하는 것이므로 사면안정해석은 시공중 조건에 대하여 실시하였으며 시공후 압밀침하에 대해서 검토하였다.

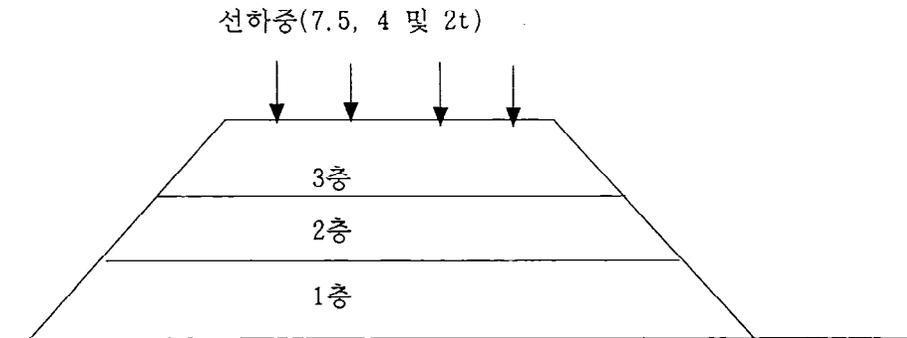


그림 부 2.1 사면안정 해석조건

기초지반의 전단강도는 기초지반조사자료로부터 $C_u = 0.08 + 0.02d$ kg/cm^2 의 관계로 심도에 따라 증가하는 것으로 검토하였다. 각 층별 토질정수는 표 부 2.2와 같이 결정하였다.

나. 사면안정 해석결과

사면안정해석결과와 각층의 전단강도값에 따라 최소 지반안전율이 크게 변화함을 알 수 있다. 각 성토단면의 하중조건에 대한 최소 허용안전율을 얻을 수 있는 각 층의 비배수전단강도를 결정하였다. 각층의 소요 비배수전단강도에 대한 해석결과를 정리하면 표 부2.2와 같다.

표 부 2.2 성토단면 사면안정해석 검토 토질정수 조건

층수	구분	단위중량	비배수전단강도	층두께	비고
3층	기초지반	1.75	Cu=0.06+0.035d	8m	
	1층	1.80	Cu=0.07~0.45	1m	
	2층	1.80	Cu=0.15~0.5	0.8m	
	3층	1.80	Cu=0.07~0.6	0.8m	
2층	기초지반	1.75	Cu=0.06+0.035d	8m	
	1층	1.80	Cu=0.1~0.45	1m	
	2층	1.80	Cu=0.2~0.6	0.8m	

표 부 2.3 외부하중조건별 각 성토층의 소요전단강도

성토층수	차량하중	소요 전단강도(kg/cm ²)		
		1 층	2 층	3 층
3 층 성토고 2.6m	중차량(30t덤프)주행 선하중 P =7.5t(4선)	0.4	0.6	0.75
	경차량(10t덤프)주행 선하중 P =4t(4선)	0.3	0.3	0.4
	무차량 주행 선하중 P =2t(4선)	0.2	0.2	0.25
2 층 성토고 1.8m	중차량(30t덤프)주행 선하중 P =7.5t(4선)	0.5	0.7	-
	경차량(10t덤프)주행 선하중 P =4t(4선)	0.15	0.3	-
	무차량주행 선하중 P =2t(4선)	0.1	0.15	-

5. 소요전단강도(Cu)를 얻기 위한 함수비(w_n) 및 다짐율 기준 판정

가. Cu 별 w_n와 r_d의 관계

소요 전단강도를 얻기 위한 다짐밀도는 포화조건외 다짐율별 전단강도

곡선으로부터 구하고 관리함수비 기준은 포화조건외의 함수비별 전단강도곡선으로부터 구할 수 있다. 즉 현장함수비는 이 기준함수비보다 적게 관리하고 다짐을 이 다짐을 이상으로 다짐기준을 결정하면 된다. 소요 전단강도별 함수비 및 다짐을 기준은 표 부 2.4와 같다.

표 부 2.4 흙의 전단강도별 함수비 및 다짐을 관리기준

구 분	포화조건외의 전단강도 (Cu)	함 수 비	다 짐 을	건조밀도	비고
해성점토 (CL)	0.1	35	87	1.34	
	0.2	32	91	1.40	
	0.3	30	94	1.44	
	0.4	28	95	1.46	
	0.5	27	97	1.49	
	0.6	26	98	1.51	
	0.7	25	100	1.53	
실트질모래 (SM)	0.1	24	87	1.60	
	0.2	22	89	1.65	
	0.3	20	92	1.70	
	0.4	19	94	1.74	
	0.5	18	96	1.77	
	0.6	17	97	1.79	
	0.7	16	98	1.81	

나. 성토단면별 관리함수비 및 다짐을기준 결정

성토단면의 사용용도에 따라 각 층의 소요전단강도가 다르고 그 전단강도를 얻기 위하여는 흙을 소요의 다짐밀도 이상으로 다짐을 실시하여야 한다. 다짐을 하기 위하여는 우선 현장함수비를 그 다짐밀도를 얻을 수 있는 함수비이하로 조절을 하고 소요의 장비로 다짐을 하여야 한다.

즉 각 성토단면별 소요전단강도, 현장함수비 및 다짐을에 대한 기준이 필요한데 그 기준을 흙의 다짐 및 전단강도특성과 사면안정해석결과를 분석한 결

과는 표 부 2.5과 같다.

표 부 2.5 성토단면별 함수비 및 다짐율 기준

흙구분	성토고	차량종류	구분	1층	2층	비고
해성점토	3층성토 h=2.6m	중차량	비배수전단강도 (Cu)	0.4	0.6	
			함수비(w)	28	26	
			다짐율(D)	95	98	
		경차량	Cu	0.3	0.3	
			w	30	30	
			D	94	94	
		무차량	Cu	0.2	0.2	
			w	32	32	
			D	91	91	
	2층성토 h=1.8m	중차량	Cu	0.5	0.7	
			w	27	25	
			D	97	100	
		경차량	Cu	0.15	0.3	
			w	33	30	
			D	90	94	
		무차량	Cu	0.1	0.15	
			w	35	33	
			D	87	90	
실트질 모래	3층성토 h=2.6m	중차량	Cu	0.4	0.6	
			w	19	17	
			D	94	97	
		경차량	Cu	0.3	0.3	
			w	20	20	
			D	92	92	
		무차량	Cu	0.2	0.2	
			w	22	22	
			D	89	89	
	2층성토 h=1.8m	중차량	Cu	0.5	0.7	
			w	18	16	
			D	96	98	
		경차량	Cu	0.15	0.3	
			w	23	20	
			D	88	92	
		무차량	Cu	0.1	0.15	
			w	24	23	
			D	87	88	

6. 함수비 조절에 필요한 대기건조 소요일수 및 공정계획

가. 대기건조에 의한 현장함수비 조절 시공가능성평가

대기건조에 의한 함수비조절은 기상조건과 흙의 종류에 따라 차이가 크며 심도별차이도 매우 크다. 기상조건은 시공시기의 기상조건을 예측하기가 어려우므로 실용적인 면에서 일반적인 조건을 적용하고 향후 시공실적이 누적 되면 이에 대한 기준을 정립하도록 한다.

현장시공성을 고려하면 성토후 약 10~15일이내에 소요함수비 이내로 건조시킬 수 있는 성토두께 이내로 성토하여 소요 다짐율이상으로 다짐을 하여야 실용성이 있으므로 본 지구의 2종류의 흙에 대하여 성토후 심도별 함수비변화 측정자료를 분석하여 시공가능성이 있는 성토두께를 제안하였다.

나. 심도별 함수비변화 특성분석

본 지구의 지반표층토의 성토후 흙의 현장함수비의 변화를 보면 그림 부 2.2와 같다. 현장 시공성을 고려하여 약 10~15일 이내에 소요함수비를 얻을 수 있는 1회 성토고를 결정하면 표 부2.6과 같다.

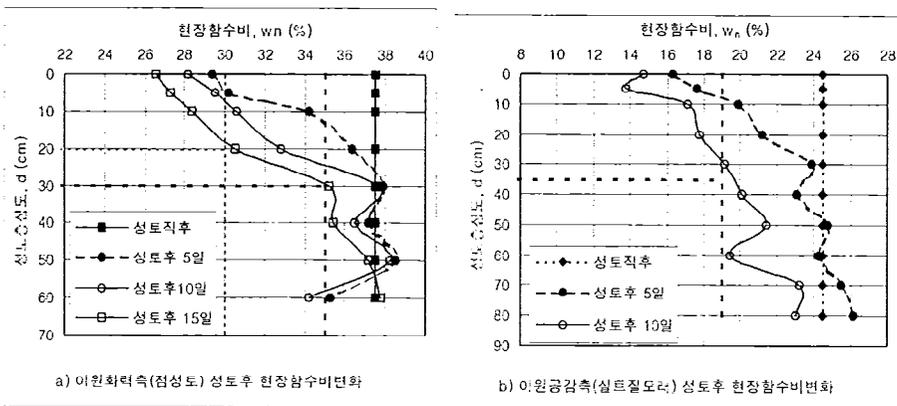


그림 부 2.2 이원지구 지반표층토 성토후 심도별 함수비 변화곡선

표 부 2.6 지반표층토 성토재료활용 구조물별 다짐기준 및 소요대기건조기간

지반토	위치	성토조건	소요 다짐율(%)	목 표 함수비(%)	1층 한계 성토고(cm)	대기건조 기간(일)
실트질 모래(SM)	방수제도로	1층(1m)	95%	19	30	10
	내부간선 도로(2-2)	1층(0.5m)	95%	19	30	10
	배수로	전층	90%	22.5	30	7
점토질흙 (CL)	내부간선 도로(2-1)	1층(0.5m)	시공불가	30	20	15
	배수로 (무차량주행)	전층	90%	35	30 20	15 10

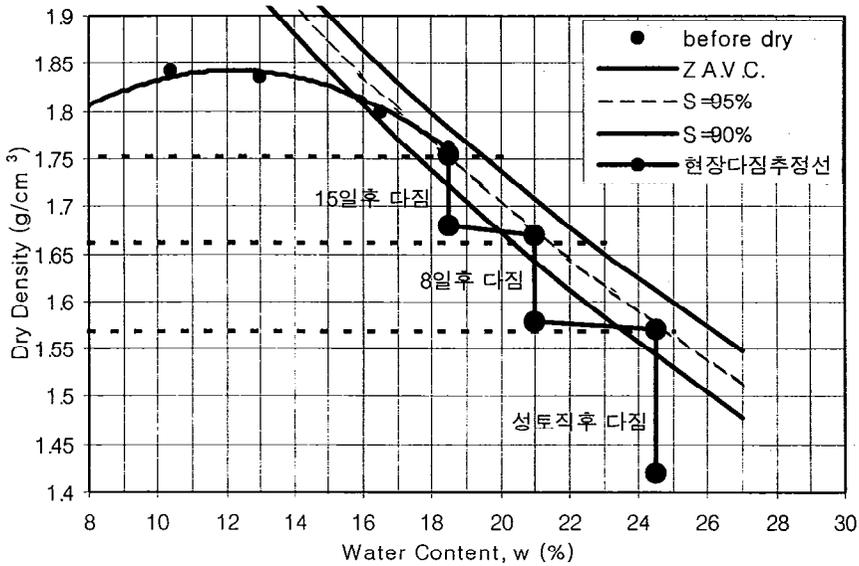
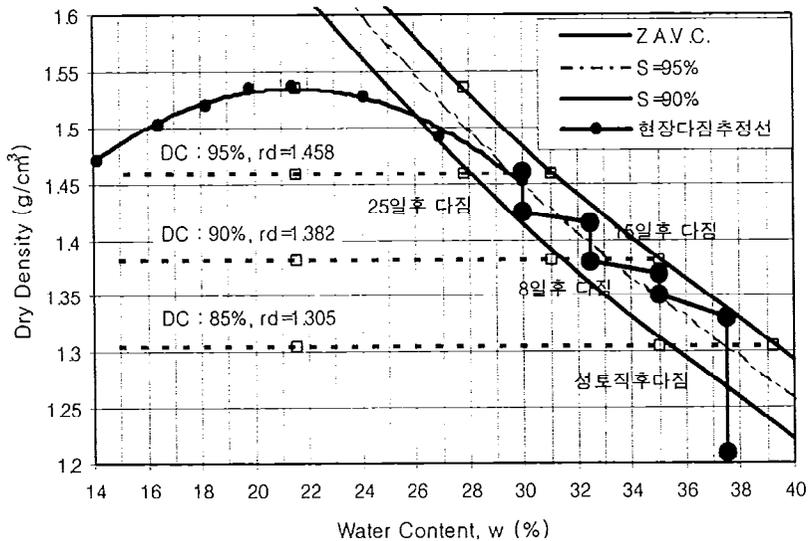


그림 부 2.3 이원지구 실트질모래지반토 성토현장다짐 추정곡선



그림

부 2.4 이원지구 해성점토 현장다짐 추정곡선도

다. 공정관리계획 검토

1) 방수제 및 단지내 도로(1층 성토 두께 30cm씩 4층 h=1.2m 성토단면)

방수제와 단지내 도로노선중에 실트질 모래지반으로 형성된 구간은 지반토가 투수성이 어느정도 있고 다짐특성이 양호하여 현장함수비관리만 하면 도로성토재료로 사용이 가능하다. 특히 실내CBR값도 12%이상으로 도로노반으로도 양호한 흙이다.

현장함수비는 다짐을 95%까지 다짐을 할 수 있는 $\omega_n=19\%$ 이하로 낮추는 것이 필요하다. 함수비를 조절하면서 다짐을 95%를 얻기 위하여는 1층 성토고 30cm의 각 성토층에 대하여 다짐을 3차에 걸쳐 시행하는 것이 필요하다. 3차의 다짐은 1차는 성토직후(블도져 편도4회), 2차는 성토 8일후(블도져 편도4회), 3차는 성토 15일후(로려다짐 6회)에 실시하면 가능할 것으로 연구사업결과 예측되었다.

3차에 걸친 다짐특성을 그림으로 나타내면 그림 부 2.3과 같이 대기건조된 표층지반토의 현장함수비 24.5%의 흙을 35cm로 성토직후 다짐을 하면 다짐을

85%을 얻을 수 있으며 성토 8일후 함수비가 약 21%가 되고 다짐을 하면 다짐을 90%을 얻을 수 있으며, 성토 15일후 함수비가 19%이하로 감소될 때 다짐을 실시하면 다짐을 95%이상을 얻을 수 있을 것으로 예측된다.

그러므로 지반토를 성토재로 활용하는 성토공의 설계는 3차에 걸친 다짐 공정으로 설계를 하고 시공전에 시험시공을 실시하여 방치기간 및 다짐횟수에 대한 현장시공기준을 확인결정하는 것이 필요하다.

2) 배수로 및 단지내 차량주행이 없는 성토단면

배수로 및 차량주행이 없는 성토단면은 다짐을 90%로 성토가 가능하므로 실트질모래지반의 표층건조토는 그림 8과 같이 성토 8일후 1차 다짐만으로 시공이 가능하므로 성토직후 다짐과 약 10일간 대기건조를 위한 방치후 다짐을 추가로 실시하는 공정관리가 필요하다.

점성토지반의 표층건조토는 그림9와 같이 성토후 10~15일후 1차 다짐만으로 시공이 가능하므로 성토직후 다짐과 약 10~15일간 대기건조를 위한 방치후 다짐을 추가로 실시하는 공정관리가 필요하다.

7. 결 론

방수제와 단지내도로(2-1구간)는 표층토가 실트질모래(SM)로서 함수비조절만 하면 도로노반의 성토재료로 사용이 가능하다. 함수비조절은 표층토(심도 0~30cm)를 1층두께 35cm를 성토직후 1차다짐을 실시하고, 8일후 2차다짐, 7일후 3차다짐을 실시하면 다짐을 95%를 얻을 수 있다.

다음층 성토공정은 1층 성토공정동안 집토를 하여 건조시키면 1단계 방치기간을 단축할 수 있으므로 2~4층은 성토후 8일공정만 고려하면 시공이 가능할 것으로 판단된다.

차량주행이 없는 성토단면은 실트질모래표층토 위치는 성토직후 다짐과 10일간 방치후 2차다짐을 실시하면 시공이 가능하며, 점성토지반은 표층건조토를 성토직후 1차다짐을 실시하고 10~15일간 방치후 2차다짐을 실시하면 다짐

을 90%을 얻을 수 있어 시공이 가능한 것으로 판단된다.

실트질모래지반은 사면보호공을 위해 사면매트보호공을 하거나 산토로 포토 단면을 형성하는 공정이 필요하다.

또한 선행암밀공법의 선행하중재료로 지반토를 사용하면 성토공사비 및 사 토처리비용을 절약할 수 있으므로 매우 경제적이므로 적극적인 활용이 필요하다.

III. 적용지구 고탍수비 연약지반토 성토재료활용 예)

(승수로 사면보강 및 지반굴착토 재활용 실예)

1. 개요

본 지구의 승수로는 낙동강변의 기존 지천의 제방을 승상하여 홍수시 농경지의 범람을 방지하는 공사로서 승수로 제체의 계획성토고는 배수로바닥에서 약 10m이며, 현재 7m정도 성토되어 있다. 기초지반의 퇴적토층은 두께 10~23m의 해성점토로 형성되어 있으며, 표층 2~3m는 하상퇴적토인 실트질모래가 퇴적되어 있다.

승수로 제체성토단면의 사면활동파괴가 발생된 구간은 기존배수로가 굴곡되어 있어 승수로제방이 기존배수로 바닥을 통과하는 구간에서 발생되었다. 활동구간에 대한 토질조사시험결과 타구간에 비하여 연약지반심도가 크고, 특히 연약한 조건으로 사면안정해석결과 성토고 7m조건에서 사면안전을 S.F.=0.989 조건으로 활동파괴가 발생된 것으로 해석되었으며, 성토고 10m의 완성단면에 대한 S.F.=0.82로 불안한 것으로 해석되었다.

적용가능한 대책공법으로는 연약지반심도가 크기 때문에 연약지반토의 고화처리공법과 사석치환공법이 가능할 것으로 판단되며, 한번 활동파괴된 지반토는 강도가 현저하게 감소되어 있으므로 대책공법적용후 추가성토 단면의 성토시 완속성토공정관리가 요망된다.

지반용기토에 대한 성토재료로 재활용은 다짐율 95% 습윤축합수비(24%) 이내로 건조시켜 다짐을 하는 조건으로 재활용할 수 있으며, 대기건조가 불가능시는 시멘트혼합처리(시멘트함량 3%)를 통하여 성토재료로 사용이 가능한 것으로 시험분석되었다.

2. 사면활동형상 및 원인

사면활동의 원인은 기초지반이 국부적으로 연약한 위치에서만 발생된 것으로 볼 때 현재 사면활동이 발생된 위치의 기초지반이 특히 연약하여 발생된

것으로 판단되며, 활동형상은 원호활동 형상이 두드러지고, 활동심도는 배수로 바닥표고에서 5~8m 정도로 예측된다. 특히, 배수로 바닥폭이 15m로 반대편 성토단면이 위치하고 있어, 활동파괴면이 더 이상 심도방향으로 확장은 없을 사면활동형상이다.

3. 기초지반조사시험결과

당초 조사결과를 검토한 결과 콘관입시험치가 3kg/cm^2 이상으로 해성점토 지반중에서는 다소 단단한 지반이며, 심도 7m에서 $q_c=5\text{kg/cm}^2$ 이상의 단단한 지반이 위치하고 있고, 승수로 전반적인 구간이 현재 양호한 상태를 유지하고 있는 것으로 볼 때 본 파괴구간이 특히 연약하여 발생한 것으로 판단되어, 활동구간에 더치콘 콘관입시험을 실시하고, 안정해석 및 대책수립에 필요한 토질정수를 얻기 위하여 대표적인 시료 2점을 채취하여 토질시험을 실시하였다.

콘관입시험결과 그림 부3.1과 같이 정규압밀특성을 보이고 있으며, 당초조사자료와 금회조사자료를 비교분석한 결과 심도별 전단강도관계는 비배수전단강도 $c_u = 0.09 + 0.02d \text{ kg/cm}^2$ 의 관계를 갖는 것으로 나타났다.

사면안정검토에 적용한 기초지반 및 성토단면의 토질정수는 당초조사와 금회조사 자료로 부터 표 부 3.1과 같이 결정하였다.

표 부 3.1 기초지반 및 성토단면의 토질정수

구 분	단위중량(g/cm^3)	점착력 (kg/cm^2)	마찰각 (도)
성토단면	2.000	0.4	6
기초지반	1.800	$c_u=0.09+0.2d$	0
심층고화처리	1.800	0.4	0
표층고화처리	1.800	2	0

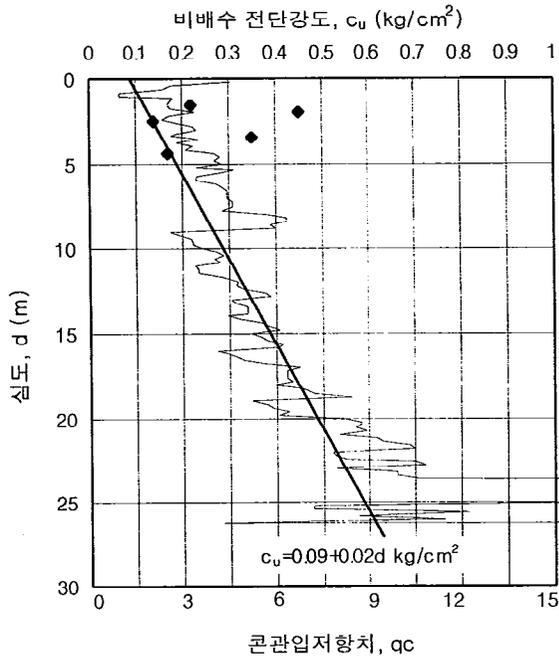


그림 부 3.1 승수로 기초지반 콘관입저항곡선도 및 비배수 전단강도 분포특성

4. 사면활동 대책검토

사면활동구간에 대한 토질조사시험결과 타 구간보다 더 연약하여 사면활동파괴가 발생한 것으로 판단되었다. 사면안정해석결과 성토고 7m조건에서 사면안전을 S.F.=0.989조건으로 활동파괴가 발생한 것으로 해석되었으며 성토고 10m의 완성단면에 대한 S.F.=0.82로 불안한 것으로 해석되었다.

본 지구에서 적용가능한 공법은 표 부 3.2와 같이 연약지반토의 천층고화처리와 심층처리공법이 가능할 것으로 판단되었다.

표 부 3.2 승수로 성토단면 및 대책공법에 대한 사면안정해석결과

공 법	구 분	점착력 (kg/cm ²)	마찰각 (도)	단위중량 (g/cm ³)	안전율 (S.F.)	판정
현재시공단면 (성토고 7m)	성토재료 기초지반	0.4 $c_u=0.09+0.02d$	6 0	2 1.8	0.989	불안
심층고화처리 내측 외측	고화처리단면	“ 4	“ 0	“ 1.8	1.293	안정
	“	“	“	“	1.231	안정
천층고화처리 내측 외측	고화처리단면	“ 2	“ 0	“ 1.8	1.438	안정
	“	“	“	“	1.210	안정

5. 지반용기부분 굴착토 성토재료로 활용방안 검토

지반용기부 굴착토는 고함수비(36~47.6%)로 성토재료로 활용하기 위하여는 1) 대기건조방법, 2) 양질토혼합방법, 3) 시멘트혼합처리공법이 있다.

최적공법을 선택하기 위한 기초적자료를 얻기 위하여 1) 지반용기된 흙을 대기건조시키는 방법, 2) 시멘트혼합처리된 흙에 대한 다짐시험과 삼축압축시험을 실시하였다.

가. 대기건조 성토다짐공법

본 공법은 성토단면에서 요구되는 다짐밀도와 전단강도를 얻기 위해 필요한 함수비(약 24%이하)까지 흙을 대기건조시키는 것이 공기나 공정상에서 허용되어야 하며, 또한 고함수비의 지반용기토를 대기에 건조시켜 현장에서 가능한 다짐을 실시하였을 때 성토단면에서 필요한 전단강도를 발휘할 수 있고 압축성이 허용치이내가 되는 것을 확인하는 것이 필요하다.

이를 위하여 실내에서 현장함수비별 표준다짐시험을 실시하고 다짐을 95%조건에서 삼축압축시험과 압밀시험을 실시하여 소요의 전단강도와 압축성이 허용되는 지를 확인하였다.

본 흙은 지소성 해성점토로 표준다짐시험결과 그림 부 3.2과 같이 최대건조밀도 $\gamma_{dmax} = 1.6\text{g/cm}^3$, 최적함수비 $\omega_{opt} = 21\%$ 로 일반성토재료와 비슷한 다짐특성을 보이고 있으며, 다짐을 95%습윤측조건의 삼축압축시험결과 표 부.3.3과 같이 점착력 $c=0.4\text{kg/cm}^2$, 마찰각 $\phi=9^\circ$ 도, 포화조건 점착력 $c=0.41\text{kg/cm}^2$, 마찰각 $\phi=2^\circ$ 도로 함수비를 조절하고 다짐을 실시하면 성토재료로 충분히 사용할 수 있는 것으로 판단되었다.

표 부 3.3 지반용기토의 물리성 및 다짐후 전단강도 특성

흙분류	입도분포(%)			95%다짐조건 전단강도(kg/cm^2)			
	모래	실트	점토	습윤		포화	
				c	ϕ	c	ϕ
지반용기토	7.1	52.2	38.8	0.4	9	0.45	2

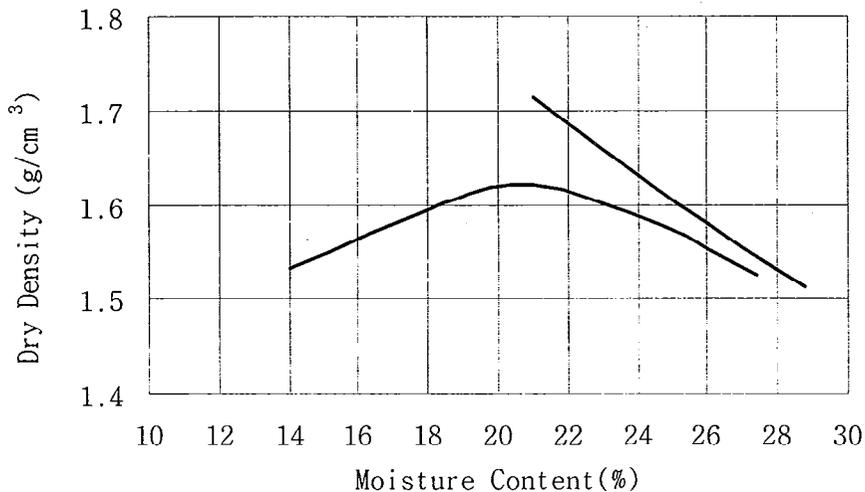


그림 부 3.2 지반용기토 다짐특성

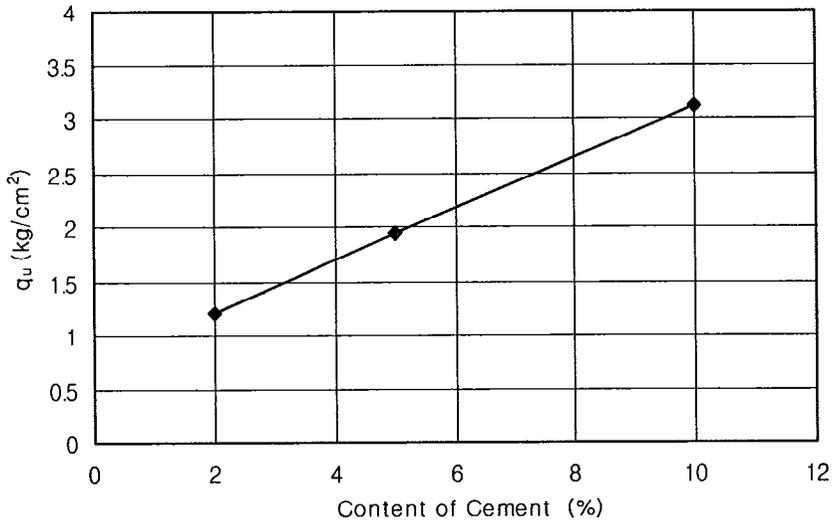
나. 시멘트 혼합처리공법

고함수비의 지반응기토를 대기건조시키지 못할 현장여건에서 쉽게 적용할 수 있는 공법이 시멘트 혼합고결공법이다. 주어진 현장함수비조건의 흙에 시멘트를 건중량비 2%, 5% 및 10%조건으로 혼합하여 7일간 습윤포화양생후 일축압축시험을 실시한 결과 그림 부 3.3과 같은 결과를 얻었다.

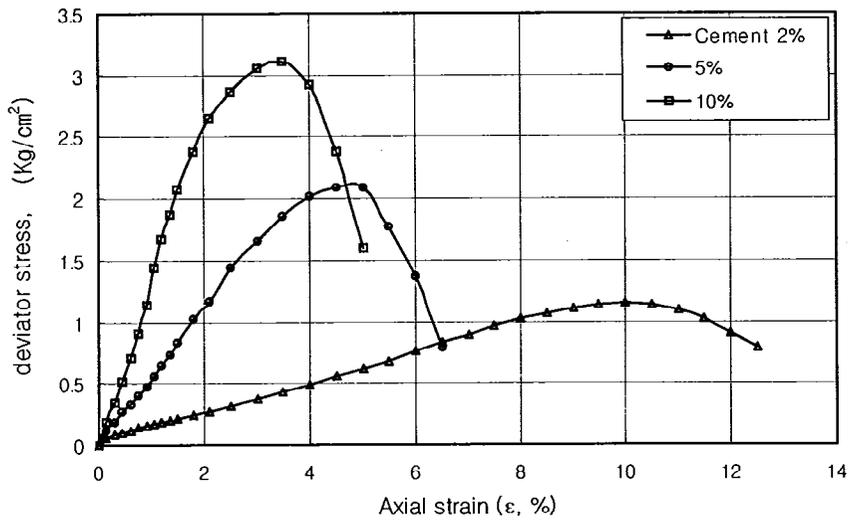
이 시험결과에서 현재 성토재료로 사용하고 있는 산토의 전단강도(성토단면 평균유효응력 조건) $S_u = C + \sigma_v' * \tan \phi = 0.43 + 1 * \tan 13 = 0.66 \text{kg/cm}^2$ 를 얻을 수 있는 시멘트혼합비율은 일축압축강도 $q_u = 1.32 \text{kg/cm}^2$ 에 해당하는 3%이상이면 되는 것으로 분석되었다.

6. 지반응기 고함수비 연약지반토 성토재료 재활용 결과

본 지구의 승수로 성토사면활동파괴에 대한 대책으로 연약지반토의 기초지반 고화처리공법으로 대책을 수립하였으며, 지반응기토의 처리는 성토단면위에 굴착성토하여 두께 약 30cm로 포설하고 대기건조시킨 결과 현장함수비를 다짐을 95% 습윤축함수비(24 %)까지 대기건조시킬 수 있어 대기건조후 다짐을 95%이상으로 다짐을 하여 사토처리 하지 않고 성토재료로 재활용할 수 있었다.



a) 지반용기토 시멘트혼합처리 7일 일축강도



b) 응력변형곡선

그림 부 3.3 지반용기토 시멘트혼합처리 일축압축시험결과도