

工學碩士 學位論文

점성토의 변형·강도특성에 미치는  
영향

慶州大學校 大學院

土木工學科

金 周 龍

2007年 12月

# 점성토의 변형·강도특성에 미치는 영향

指導教授 黃 聖 春

이 論文을 碩士學位 論文으로 提出함

2007年 12月

慶州大學校 大學院

土木工學科

金 周 龍

# 金周龍의 碩士學位論文을 認准함

審 查 委 員 長 \_\_\_\_\_ 印

審 查 委 員 \_\_\_\_\_ 印

審 查 委 員 \_\_\_\_\_ 印

慶州大學校 大學院

2007年 12月

## 목 차

### 제 1 장 서론

|                 |   |
|-----------------|---|
| 1.1 연구 목적 ..... | 1 |
| 1.2 연구 동향 ..... | 1 |
| 1.3 연구 방법 ..... | 3 |

### 제 2 장 시료교란 및 비배수전단강도 보정방법

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 2.1 시료교란 .....                      | 4  |
| 2.2 시료교란의 원인 .....                  | 4  |
| 2.3 시료의 질 평가 .....                  | 5  |
| 2.3.1 현장유효 응력으로 재압축시 체적변화량 이용 ..... | 5  |
| 2.3.2 잔류유효응력 이용 .....               | 6  |
| 2.3.3 시료의 탄성계수 이용 .....             | 7  |
| 2.3.4 압밀 곡선을 이용 .....               | 7  |
| 2.3.5 기타 방법 .....                   | 7  |
| 2.4 시료의 교란을 감소시킬 수 있는 시험 방법 .....   | 7  |
| 2.5 비배수 전단강도 보정방법 .....             | 9  |
| 2.5.1. Murthy 등 (1982)방법 .....      | 9  |
| 2.5.2 Murthy 식 적용을 위한 가정 .....      | 11 |
| 2.5.3 Shogaki 등 (1998) 방법 .....     | 12 |

### 제 3 장 압밀이방성

|                  |    |
|------------------|----|
| 3.1 흙의 압밀 .....  | 15 |
| 3.2 흙의 이방성 ..... | 19 |

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| 3.3. 표준압밀시험 .....                                     | 21 |
| 3.3.1. 일반적인 시험방법 .....                                | 21 |
| 3.3.2. 압밀제상수 .....                                    | 24 |
| 제 4 장 SHANSEP Method                                  |    |
| 4.1 흙의 정규화 거동 .....                                   | 46 |
| 4.2 SHANSEP법의 원리 .....                                | 53 |
| 4.3 수정 SHANSEP법 .....                                 | 55 |
| 4.4 시험방법 .....                                        | 61 |
| 제 5 장 실내시험에 의한 이방성 평가 및 SHANSEP Method에<br>의한 전단강도 분석 |    |
| 5.1 실험개요 .....                                        | 64 |
| 5.1.1 압밀시험 .....                                      | 65 |
| 5.1.2 삼축압축시험 .....                                    | 67 |
| 5.2 압밀시험결과 및 이방성평가 .....                              | 72 |
| 5.3 $CK_0UC$ 시험결과 및 SHANSEP 법에 의한 강도증가율 분석 .....      | 86 |
| 5.3.1 $CK_0UC$ 시험결과 .....                             | 86 |
| 5.3.2 SHANSEP 법에 의한 강도증가율 분석 .....                    | 87 |
| 제 6 장 결론 .....                                        | 91 |
| 참고문헌 .....                                            | 93 |
| Abstract .....                                        | 91 |

## 그 립 목 차

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| 그림 2.1 비배수 강도비와 OCR과의 상관관계 .....                         | 10 |
| 그림 2.2 변화된 쌍곡선관계 .....                                   | 10 |
| 그림 2.3 튜브 샘플링 동안 정규압밀점토에 대한 가상적 응력경로                     | 11 |
| 그림 2.4 Shogaki 방법을 이용한 강도보정 방법 .....                     | 14 |
| 그림 3.1 일축압축강도와 압밀항복응력의 관계 .....                          | 16 |
| 그림 3.2 자연함수비와 압축지수의 관계 .....                             | 16 |
| 그림 3.3 습윤밀도와 압축지수의 관계 .....                              | 17 |
| 그림 3.4 압밀항복응력과 압축지수의 관계 .....                            | 17 |
| 그림 3.5 압축지수와 습윤밀도의 관계 .....                              | 18 |
| 그림 3.6 자연함수비와 $e - \log p$ 곡선의 관계 .....                  | 18 |
| 그림 3.7 압밀시험 기구 .....                                     | 21 |
| 그림 3.8 대표적인 시료의 주어진 하중증분에 대한 변형 대 $\log$ 시간<br>관계도 ..... | 23 |
| 그림 3.9 제하와 재제하 과정에서 나타나는 간극비 대 유효응력의<br>관계도 .....        | 25 |
| 그림 3.10 압축지수 $C_c$ .....                                 | 27 |
| 그림 3.11 압밀하중에 따른 압밀계수 .....                              | 31 |
| 그림 3.12 압밀도와 시간계수의 관계 .....                              | 35 |
| 그림 3.13 Taylor의 $\sqrt{t}$ 법 .....                       | 36 |
| 그림 3.14 Casagrande의 $\log t$ 법 .....                     | 37 |
| 그림 3.15 이론적인 $T/U$ 대 $T$ 관계 .....                        | 39 |

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 그림 3.16 $m'/c'$ 와 $m/c$ 의 관계 .....                                                | 40 |
| 그림 3.17 (a) Terzaghi의 압밀속도, (b) Oedometer시험 결과의<br>압밀속도 .....                     | 43 |
| 그림 4.1 동일한 시료에 대한 응력-변형 관계 (a) 응력-변형률 곡선,<br>(b) 정규화된 곡선 .....                    | 47 |
| 그림 4.2 OCR과 정규화된 전단강도의 관계 .....                                                   | 48 |
| 그림 4.3 OCR에 따른 정규화된 $\overline{CK_0U}$ DSS 강도 파라미터<br>의 변화 .....                  | 50 |
| 그림 4.4 균질한 점토의 정규화 거동 .....                                                       | 51 |
| 그림 4.5 단순전단시험으로부터 평가된 해성 유기질 점토의 정규화<br>거동(정규압밀점토) .....                          | 52 |
| 그림 4.6 $\overline{CK_0U}$ 직접전단시험으로부터 평가된 Boston Blue Clay의<br>정규화 거동(과압밀점토) ..... | 53 |
| 그림 4.7 SHANSEP법에서의 일반적인 응력경로 .....                                                | 54 |
| 그림 4.8 수정 SHANSEP법 : (a) 응력경로, (b) 정규화된 정규 압밀<br>전단강도 .....                       | 60 |
| 그림 4.9 압축 및 인장시험의 응력경로 .....                                                      | 63 |
| 그림 5.1 표준압밀시험 진행과정 .....                                                          | 66 |
| 그림 5.2 (a) 삼축압축시험 진행과정( $\overline{CIUC}$ ) .....                                 | 70 |
| 그림 5.2. (b) 삼축압축시험 진행과정( $\overline{CK_0UC}$ ) .....                              | 71 |
| 그림 5.3 압밀시험 결과 (NS-3, 심도 : G.L(-) : 4.8m ~ 5.6m) .....                            | 72 |
| 그림 5.4 압밀시험 결과<br>(NS-3-1, 심도 : G.L(-) : 4.0m ~ 4.8m) .....                       | 73 |
| 그림 5.5 압밀시험 결과<br>(NS-3-1, 심도 : G.L(-) : 8.0m ~ 8.8m) .....                       | 73 |

|         |                                                                      |    |
|---------|----------------------------------------------------------------------|----|
| 그림 5.6  | 압밀시험 결과 (NS-4, 심도 : G.L(-) : 3.0m ~ 3.7m) .....                      | 74 |
| 그림 5.7  | 압밀시험 결과 (NS-4, 심도 : G.L(-) : 4.0m ~ 4.8m) .....                      | 74 |
| 그림 5.8  | 압밀시험 결과 (NS-18, 심도 : G.L(-) : 3.6m ~ 4.4m) .....                     | 75 |
| 그림 5.9  | 유효응력과 체적압축계수의 관계 .....                                               | 77 |
| 그림 5.10 | 유효응력과 투수계수의 관계 .....                                                 | 78 |
| 그림 5.11 | 유효응력과 압밀계수의 관계 .....                                                 | 79 |
| 그림 5.12 | 평균 체적압축계수비 .....                                                     | 80 |
| 그림 5.13 | 평균 투수계수비 .....                                                       | 82 |
| 그림 5.14 | 평균 압밀계수비 .....                                                       | 84 |
| 그림 5.15 | $\overline{CK_0UC}$ 시험결과<br>(NS-03, 심도 : G.L(-) : 4.8m ~ 5.6m) ..... | 86 |
| 그림 5.16 | NS-03 시료에 대한 응력-변형관계 .....                                           | 87 |
| 그림 5.17 | NS-3 (4.8m ~ 5.6m)의 $\overline{CK_0UC}$ 결과 .....                     | 89 |



## 표 목 차

|       |                                           |    |
|-------|-------------------------------------------|----|
| 표 2.1 | 체적 변형율과 유효 수직응력에 따른 시료교란의 분류 .....        | 6  |
| 표 2.2 | 시료의 교란을 최소화시키기 위한 시험방법의 비교 .....          | 8  |
| 표 3.1 | 국내외 점성토에 대한 압축지수 관계식 .....                | 29 |
| 표 3.2 | 압밀계수의 대표값 .....                           | 31 |
| 표 3.3 | 1차원 압밀에 대한 시간계수 .....                     | 35 |
| 표 4.1 | $A_0$ 와 $K_0$ 에 대한 전형적인 $f_c$ 의 값 .....   | 59 |
| 표 4.2 | $R_K$ 와 $\phi'$ 에 대한 전형적인 $f_s$ 의 값 ..... | 59 |
| 표 4.3 | $\overline{CK_0U}$ 에서의 응력경로 .....         | 62 |
| 표 5.1 | 분석에 사용된 시료현황 및 시험내용 .....                 | 65 |
| 표 5.2 | 채취된 시료의 과압밀비 산정표 .....                    | 75 |
| 표 5.3 | 흙의 종류에 따른 일반적인 강도증가율 범위 .....             | 89 |
| 표 5.4 | 본 연구와 기존제안식의 강도증가율 비교표 .....              | 90 |
| 표 5.5 | NS-03-01(채취심도8.0~8.8m)의 전단강도 분석 .....     | 90 |
| 표 6.1 | 압밀 이방성 분석결과 .....                         | 92 |

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구목적

점성토의 압밀 및 변형·강도 특성을 파악하는 것은 해안 및 강의 하구가 발달한 우리나라에서는 매우 중요한 건설 공학적 문제로 대두된다. 특히 지반조사에 의한 지반정수 산정에 관한 문제는 신뢰성 있는 지반거동의 예측뿐만 아니라 공사비와도 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 지반조사는 현장시험과 불교란 시료채취에 의한 실내시험으로 구분할 수 있다. 현장 시험의 경우에 있어서 지반정수를 구한 다음 시험결과를 어떻게 보정할 것인가가 중요한 문제인 반면에 실내 토질시험의 경우는 불교란 시료의 채취, 보관 및 취급 등이 비배수 전단시험의 결과에 크게 영향을 미치고 있다. 특히 시료교란은 아주 중요한 영향 요소이다.

본 연구에서는 점토시료의 교란영향은 현 위치의 응력보다 더 큰 응력 하에서는 소멸되고 점토의 강도는 압밀압력에 대해 정규화거동(Normalized behavior)을 나타낸다는 사실을 바탕으로 교란 영향을 제거한 비배수 전단강도를 구하는 SHANSEP 방법을 이용하여 비배수 전단강도를 산정하여 실내시험에 의한 전단강도와 비교·분석을 실시하고, 점성토의 이방성시험을 하여 퇴적환경 및 압밀과정에 따른 흙의 이방성을 평가 하는데 그 목적이 있다.

## 1.2 연구동향

시료의 교란이란 흙의 함수비와 조직이 변하여 역학적 성질이 변하는 것으로 그 원인은 무수히 많다. 그 중 샘플링과 취급과정에서 발생하는 시료 교란에 대한 연구는 오래 전부터 수행되었으며, 그 결과로 크게 대구경 샘플러의 개발과 교란시료에 대한 평가 및 교란 영향을 제거하여 지반정수를 산정하는 방법 등이 연구되었다.

특히 SHANSEP은 연약점토의 안정해석을 위한 접근법으로 MIT에서 개발되었으며, Ladd와 Foott(1974)에 의해 처음으로 소개되었다.

SHANSEP은 Stress History And Normalized Soil Engineering Properties의 축약형으로 정규화된 거동을 보이는 점토에 사용하고자하는 설계방법을 제공한다. 개념은 통상적인 시험으로 가능한 조건보다도 원위치 조건에 더 유사한 조건을 재현할 수 있도록 하는 실내 시험법에 근거한 것이다. 흙의 이전 응력이력을 일관성 있게 고려하고 있으며, 특히 과압밀에서는 더욱 그러하다. 또한 응력경로를 사용하여 적용응력의 결과와 그 영향을 설명할 수 있다.

이방성(Anisotropy)이란 흙의 공학적 특성이 입자배열의 방향에 따라 변화하는 성질을 말하는데 흙의 이방성은 하중을 받아 변형하기 이전부터 가지고 있던 본래의 고유이방성(Inherent anisotropy)과 이후의 재하에 의한 후천적 응력유도이방성(Stress induced anisotropy)으로 구분된다. 흙 입자가 퇴적된 후 오랜 시간에 걸쳐 자중 및 일차원적 재하에 의해서 흙의 조직(Fabric)은 부분적 또는 전체적으로 토립자가 주로 수평방향으로 배열되는 조직이방성(Fabric anisotropy)을 나타낸다. 특히 점토의 경우는 방향성 퇴적과 점토입자간의 전기적 결합에 의해서 점토의 이방 변형특성을 나타낸다.(Sadda, 1969) 이러한 점토의 미세적 조직이방성(Microfabric anisotropy)은 균질한 이방성 조직을 보인다. 그러나 퇴적지반은 퇴적시기에 따른 거시적 조직이방성(Macrofabric anisotropy)을 보이는데 세립토가 번갈아 퇴적되어 형성된 Varved clay 와 Stiff fissured clay 지반과 같은 퇴적점토지반이 대표적인 예(Instance)라 할 수 있다. 이처럼 흙의 구조가 이방성을 갖는 원인으로는 퇴적과정, 압밀과정, 시간효과, 지반거동 등의 요인을 들 수 있다.

이방성에 대한 연구로는 Mahmood 와 Mitchell (1974)의 사질토는 입자의 모양에 따라 차이가 있으나 느슨한 상태의 경우 퇴적방향과 이와 직각되는 방향의 전단강도와는 약 40% 정도며 이 차이는 상대밀도가 증가할수록 감소되며 약 90%가 되면 거의 같게 된다는 사질토 연구와 점

토의 고유이방성은 과압밀 정도에 따라 차이가 있으며 정규압밀점토의 경우 수평방향의 비배수 전단강도는 연직방향의 약 80% 정도이다. 그러나 비배수전단강도에 대한 주응력면 회전의 영향은 점토의 예민비가 클수록 그리고 소성지수가 작을수록 증가되는 경향을 보인다는 Ladd, 1971 의 연구가 있으나 국내에서는 이방성에 대한 연구는 아직 미비한 상태이다.

### 1.3 연구방법

인천광역시 서구 경서동에 해당되는 청라지구 5공구 단지조성 현장에서 시료를 채취하여 수직방향 및 수평방향 표준압밀시험을 통한 압밀이방성을 평가하고  $CK_0UC$  삼축시험 수행결과를 이용하여 SHANSEP 기법에 의한 강도증가율 산정하여 실내시험에 의한 결과와의 비교·분석을 통해 시료의 신뢰성을 파악하였다.

## 제 2 장 시료교란 및 비배수전단강도 보정방법

### 2.1 시료교란

지반공학적인 여러 가지 문제를 해결하는 데 우선하여야 하는 것이 지반조사이다. 이런 조사과정에서 시료교란이란 샘플링과 시료취급과정에서 토질구조에 미치는 모든 영향을 말한다. 이상적인 실내시험용 시료는 샘플링하기 전에 현장에 존재하는 함수비와 유효응력을 가지고 있어야 한다. 그러나 블록 샘플링으로  $K_o=1$ 인 흙을 재취하지 않는 한 실현 불가능하기 때문에, 일반적으로 시료 교란을 최소화하거나 시료 교란이 역학적 특성에 미치는 영향을 최소화해야 한다.

### 2.2 시료교란의 원인

시료채취 과정에서는 교란이 필연적으로 발생하게 되는데, 튜브 샘플링 시 작업 단계별로 교란에 영향을 미치는 요소는 다음과 같다.

- ① 시추작업 중에 시추가 진행되는 전반에서의 흙 구조의 변화
- ② 채취관의 관입 및 지상으로의 배출
- ③ 튜브 내에서의 함수비의 재분배
- ④ 튜브로부터 시료추출
- ⑤ 시료 추출 후에 발생하는 간극수압의 변화 및 건조
- ⑥ 실내시험을 위한 시편을 준비하는 과정에서 요구되는 행위 및 시료성형

이 외에도 특수한 경우로서 깊은 해성점토에서 용해된 가스의 분출, 해머 또는 채취기에 의한 충격, 이동, 그리고 화학적 및 생물 화학적으로 활동이 왕성한 지반에서의 온도변화 등이 있다.

또한 다음과 같이 시료채취 전, 채취 중 및 채취 후로 나눌수도 있다.

- ① 채취 전 : 응력해방, 팽창, 다짐, 치환, 바닥히빙, 파이핑, 공벽붕괴
- ② 채취 중 : 응력해방, 재성형, 치환, 파쇄, 토립자의 혼합 및 분리, 회수실패
- ③ 채취 후 : 응력해방, 시료중의 수분증발, 과열, 진동, 화학변화, 추출시 교란

이들 요인은 교란정도를 감소시킬 수 없는 시료채취과정에서 불가피하게 일어나는 교란과 교란 감소가 가능한 기술자 의존적인 교란으로 분류할 수 있다. (한국지반공학회, 2003).

## 2.3 시료의 질 평가

주어진 시료 채취 방법에 따른 시료의 질을 평가하기 위해서 고려해야 할 요소가 많다. 이런 인자에는 함수비 변화, 시료내 가스의 용해와 방출, 시료의 화학 변화, 온도변화, 응력 이완 등이 있다. 다음은 시료의 질을 평가하는데 사용되는 몇 가지 방법들이다.

### 2.3.1 현장유효 응력으로 재압축시 체적 변화량 이용

불교란 시료에 대한 신뢰할 만한 응력-변위 곡선, 간극수압결과 등을 얻기 위해서는 시료의 질이 상당히 중요하다. 특히 점성토에 있어서 현장 유효응력으로 압밀시 체적변형율을 이용하여 시료의 질을 파악할 수 있다. 응력과 심도를 고려한 연약 점성토의 시료의 질은 다음 표 2.1과 같다.

표 2.1 체적 변형율과 유효 수직응력에 따른 시료교란의 분류

| OCR     | 심도(m) | 아주양호            | 양호                     | 불량              |
|---------|-------|-----------------|------------------------|-----------------|
| 1-1.1   | 0-10  | $\ell_v < 3.00$ | $3.00 < \ell_v < 5.00$ | $5.00 < \ell_v$ |
| 1-1.1   | 10-50 | $\ell_v < 2.00$ | $2.00 < \ell_v < 4.00$ | $4.00 < \ell_v$ |
| 1.2-1.5 | 0-10  | $\ell_v < 2.00$ | $2.00 < \ell_v < 4.00$ | $4.00 < \ell_v$ |
| 1.2-1.5 | 10-50 | $\ell_v < 1.00$ | $1.00 < \ell_v < 3.00$ | $3.00 < \ell_v$ |
| 1.5-2   | 0-10  | $\ell_v < 1.50$ | $1.50 < \ell_v < 3.50$ | $3.50 < \ell_v$ |
| 1.5-2   | 10-50 | $\ell_v < 1.00$ | $1.00 < \ell_v < 2.50$ | $2.50 < \ell_v$ |
| 2-3     | 0-10  | $\ell_v < 1.00$ | $1.00 < \ell_v < 3.00$ | $3.00 < \ell_v$ |
| 2-3     | 10-50 | $\ell_v < 0.75$ | $0.75 < \ell_v < 2.00$ | $2.00 < \ell_v$ |
| 3-8     | 0-10  | $\ell_v < 0.50$ | $0.50 < \ell_v < 2.00$ | $1.00 < \ell_v$ |
| 3-8     | 10-50 | $\ell_v < 0.50$ | $0.50 < \ell_v < 1.00$ | $2.00 < \ell_v$ |
| 8이상     | 0-10  | $\ell_v < 0.25$ | $0.25 < \ell_v < 0.50$ | $0.50 < \ell_v$ |

### 2.3.2 잔류유효응력 이용

Ladd등(1964)은 시료의 잔류유효응력과 완전시료의 유효잔류 응력비, 응력차, 정규화 응력비를 통해 시료교란을 평가하는 방법을 제안하였다. 그러나, 이와같은 시료교란에 대한 정의의 단점은 완전시료의 유효응력값을 결정할 때 가정되거나 측정된 토압계수,  $K_0$ 와 간극수압계수  $A_v$ 값에 의존한다는 점이다. 이값의 측정은 어려움이 있고, 적은 잔류응력과 적은 잔류간극수압이 시료교란의 신뢰할만한 지수인지는 잘 알려져 있지 않다. 다만 잔류간극수압은 교란이 증가함에 따라 감소한다는 것만이 알려져 있다.

### 2.3.3 시료의 탄성계수 이용

시료교란의 시킨트 계수에 대한 효과는 파괴지수(FI)를 이용하여 삼축 시험 파괴시의 축차응력과 임의의 변형율에서의 축차응력의 비로서 제안되었다. 파괴지수는 식 2.1와 같다.

$$FI = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \quad (2.1)$$

단, 여기서 FI는 파괴지수이다.

### 2.3.4 압밀 곡선을 이용

압밀 곡선을 이용하여 시료의 교란은 주어진 압밀응력하에서 공극비가 감소하고 최소 곡률반경점을 찾기가 어렵고 선행압밀하중 값이 명확하지 않거나, 낮은 값을 나타내거나 재압축구간에서 압축성이 증가하는 것으로 알 수 있다.

### 2.3.5 기타 방법

그 외의 방법으로 시료의 육안 검사를 통해 시료의 휨정도를 관측하거나 샘플링 튜브내의 X-ray검사를 통해 시료 교란 판정이 가능하다.

## 2.4 시료의 교란을 감소시킬 수 있는 시험 방법

시료교란에 의해 현장유효응력보다 유효응력의 감소가 일어나고 이에 의해 완전시료의 비배수강도보다 20%~50%의 강도감소 결과를 가져온다. 시료의 교란을 감소하기 위하여 시료는 종종 현장 유효응력 이상의



구속압으로 비등방 재압밀이 실시된다. Bishop과 Henkel(1953)은 재압밀 시료가 현장거동을 더 잘 표현한다고 제안하였다. 시료교란으로 인한 역학적특성의 영향을 최소화하기 위해  $CK_0UC$  시험을 수행하게 되는데, 이는 현장 흙의 구조와 응력상태를 복원하는데 유리하기 때문이다.

시료의 교란효과를 극복하기 위해 수행하는  $CK_0UC$  시험 방법으로는 재압축(Recompression)방법과 SHANSEP (Stress History And Normalized Soil Engineering Properties)method이 주로 사용된다

이 방법에서 중요한 두 변수는 수직압밀응력( $\sigma'_{vc}$ )과 압밀응력비( $\sigma'_{hc}/\sigma'_{vc}$ )이다. 연직압밀응력의 관점에서 보면, 재압축방법은 초기 현장유효상재응력( $\sigma'_{vc}$ )으로 압밀시킨 다음 시료를 전단파괴시킨다. 반면에 SHANSEP Method는 현지반의 유효수직응력,  $\sigma'_{vo}$ 보다 상당히 큰 압밀응력으로 압밀시킨후 하중을 재하한 상태에서나 혹은 현 유효과재응력 하에서 전단파괴시킨다. 두 전단시험 방법에 대한 개요는 표 2.2에 요약되었다

표 2.2 시료의 교란을 최소화시키기 위한 시험방법의 비교

| 구 분                    | 재압축 방법         | SHANSEP Method                        |
|------------------------|----------------|---------------------------------------|
| 압밀응력( $\sigma'_{vc}$ ) | $\sigma'_{vo}$ | $(1.5 \sim 2.0)\sigma'_{vo}$          |
| Ko 압밀                  | 바람직            | 바람직                                   |
| 전단전의 압밀응력              | $\sigma'_{vc}$ | $1/n \times \sigma'_{vc}$ (n=1.2.3..) |
| 강도정수                   | 한 OCR값 하에서 결정  | 여러 OCR값 하에서 결정                        |
| 적용점토                   | 시멘팅된 점토, 예민점토  | 낮은 예민비의 NC, OC점토                      |
| 현장응력이력                 | 알아야 함          | 알아야 함                                 |

## 2.5 비배수 전단강도 보정방법

비배수 전단강도는 점토지반상의 단기안정 해석을 위한 가장 중요한 설계정수이다. 그러나 여러 가지 원인에 의하여 교란이 발생되므로 실내시험자료를 사용하기 위해서는 그에 앞서 교란에 대한 적절한 고려가 수반되어야 할 것이다.(박성재 등,2003) 비배수 전단강도를 보정하는 방법은 여러 학자들에 의해 연구되었는데 여기에 몇 가지 방법을 소개한다.

### 2.5.1. Murthy 등(1982)방법

등방압밀비배수 삼축압축시험에 의해 결정되는 정규압밀시료의 압축강도  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{NC}$ 와 과압밀시료의 일축강도  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{OC}$ 는 그림 2.1과 같이 비배수 강도비  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{OC} / (\sigma_1 - \sigma_3)_{NC}$ 와 과압밀비(OCR)를 이용하여 하나의 곡선으로 정규화 시킬 수 있다.

$$y = \frac{x}{(a + bx)} \quad (2.2)$$

여기서,  $x$ 는  $1/OCR$ 이고  $y$ 는  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{OC} / (\sigma_1 - \sigma_3)_{NC}$ 가 된다.식(2.2)에 의한 쌍곡선을 그림 2.2에서와 같이  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{NC} / (\sigma_1 - \sigma_3)_{OC}$ 와  $1 / OCR$ 를 변수로 하여 변환하게 되면, 기울기가  $b$ 이고 절편이  $a$ 인 직선으로 나타낼 수 있다. 따라서, 과압밀 점토의 압축강도는 다음 식(2.3)과 같이 정의된다.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{NC} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{OC}}{a(OCR) + b} \quad (2.3)$$

한편, Ladd 등(1977)은 이와 유사한 실험적인 상관관계식인 식(2.4)을 제안한 바 있으며  $m=0.8$ 로 정의하였다.

$$\frac{c_u(OC)}{\sigma'_c} = \frac{C_u(NC)}{\sigma'_{cm}} (OCR)^m \quad (2.4)$$

여기서,  $c_u(OC)$ 는 과압밀 시료의 비배수 전단강도이고  $c_u(NC)$ 와  $\sigma'_{cm}$ 는 과거 최대압밀압력이다.

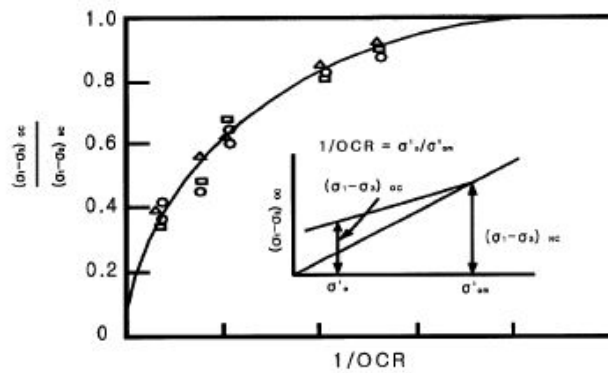


그림 2.1 비배수 강도비와 OCR과의 상관관계

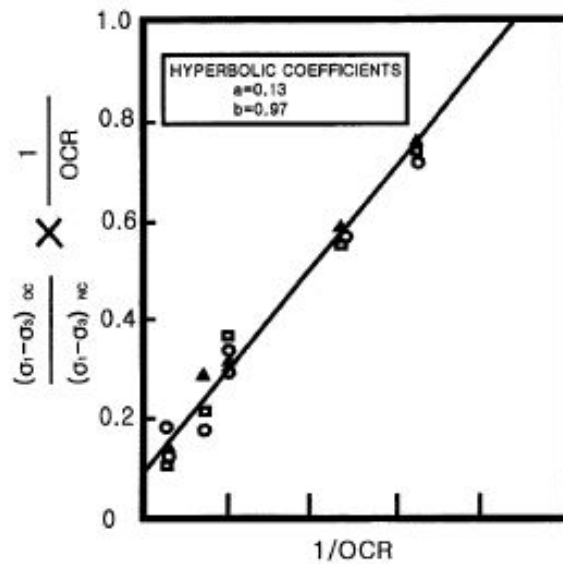


그림 2.2 변화된 쌍곡선관계

## 2.5.2. Murthy 식 적용을 위한 가정

그림 2.3은 튜브 샘플링 동안의 정규압밀점토에 대한 가성적인 응력경로를 도시한 것이다.(Ladd and Lambe.1964.) 이 가운데 A는 이상 시료의 유효응력상태를 나타내며 P와 G는 각각 완전시료( $\sigma'_{ps}$ )와 삼축UU시험시의 유효응력을 나타낸다. Ladd와 Lambe(1964)은  $\sigma'_{ps}$ 와 시험전의 시료의 잔류유효응력,  $\sigma'_r$ 의 상관관계를 교란비  $R(=\sigma'_{ps}/\sigma'_r)$ 로 정의하여 교란도와 밀접한 관련이 있음을 밝힌 바 있다.

Murthy법을 보다 간편하게 적용하기 위해 교란비와 OCR은 식(2.5)와 같다고 가정하였다.

$$OCR \frac{c_u(OC)}{\sigma'_c} = \frac{C_u(NC)^m}{\sigma'_{cm}} \quad (2.5)$$

여기서,  $\sigma'_{cm}$  는 과거 최대압밀하중이고  $\sigma'_c$  은 등방 유효압력이다.

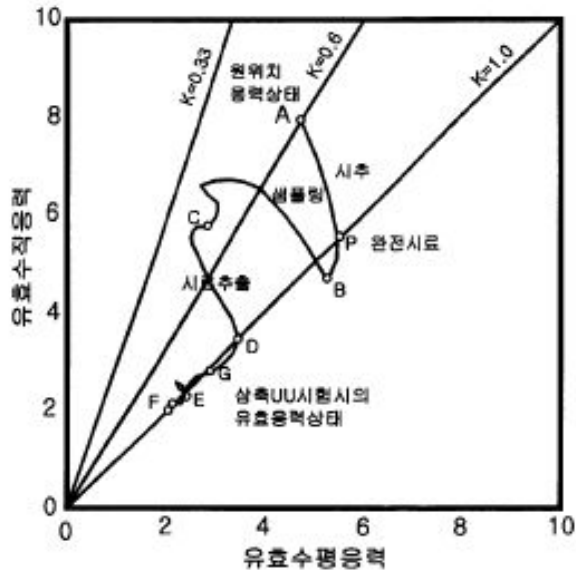


그림2.3 튜브 샘플링 동안 정규압밀점토에 대한 가상적 응력경로

$\sigma'_c$  는 흡수력시험에서 초기 흡수력( $S_p$ )을 측정하여 구할 수 있으며 (Shogaki,1998),  $\sigma'_{ps}$ 는 다음 세 가지 방법 가운데 하나를 사용하여 구할 수 있다. 각 방법에 의한 결과는  $\sigma'_{ps(1)}$ ,  $\sigma'_{ps(2)}$ ,  $\sigma'_{ps(3)}$  로 표기하였다.

방법 1)  $\sigma'_{ps(1)} = \sigma'_{v0} [K_0 + A_u(1-K_0)]$

여기서,  $\sigma'_{v0}$ 은 원위치 수직유효응력이고,  $K_0$  과  $A_u$ 는 각각 정지토압계 수와  $K_0$ 응력상태에서 등방응력 상태로 비배수 재하되었때의 간극수압계 수  $A$ 이다 (Ladd와 Lambe, 1964).

방법 2)  $\sigma'_{ps(2)} = \frac{\sigma'_{r0} + K_0 \sigma'_{v0}}{3}$

방법 3)  $\sigma'_{ps(3)}$ :  $K_0$  응력상태로 압밀 시킨 후, 등방응력상태까지 비배수 재하하여 실험적으로 구한 값 (Ladd와 Lambe, 1964)

따라서, 식 2.5를 식 2.3에 대입하고 과압밀점토의 비배수 전단강도를  $q_u/2$ 라고 하면, 응력해방에 의한 교란비가  $R$ 인 시료의 보정된 비배수 전단강도( $S_u^*$ )는 식(2.6) 와 식(2.7)과 같다.

$$S_U^* = q_u + (aR + b) \quad (\text{Murthy}) \quad (2.6)$$

$$S_U^* = \frac{q_u}{2} \cdot \frac{\sigma'_{ps}}{\sigma'_r} \cdot \frac{1}{R^m} \quad (\text{Ladd}) \quad (2.7)$$

### 2.5.3. Shogaki 등(1998) 방법

Shogaki법의 순서를 간단히 정리하면 다음과 같다.

- (1) 샘플링 튜브에서 임의 위치  $D_s$ (Shogaki와 Maruyama, 1998)에 있는 몇몇 시료에 대해 흡수력시험과 일축압축시험을 실시하여  $S_0$ ,  $q_u$  그

리고 일축압축시험 동안의 흡수력 변화를 측정한다.

- (2) 일축압축강도 가운데 가장 큰 값을  $q_{u(max)}$  로 하여, 모든 일축압축강도에 대한  $q_u/q_{u(max)}$ 를 구한다.
- (3) 2.5.2절 에서 설명한 3가지 방법 가운데 하나를 사용하여  $\sigma'_{ps}$ 와  $\sigma'_{ps}/S_0$ 를 구한다.
- (4) 각각의  $D_s$ 에 대한  $(\sigma'_{ps}/S_0, q_u/q_{u(max)})$ 를 그림 2.4과 같이 플롯한다.
- (5) 완전시료의 초기흡수력( $S_0$ )은 이론상  $\sigma'_{ps}$ 와 같아야 하므로, 외산법으로  $\sigma'_{ps}/S_0=1$ 일 때의 값을 구해 이 값을 보정계수,  $R(q_u)$ 로 한다.
- (6) (2)의  $q_{u(max)}$ 와 (5)의  $R(q_u)$ 를 곱해 비배수 전단강도  $(=[q_{u(max)} \times R(q_u)]/2)$ 를 구한다.

한편, Tokuda(2000)와 Shogaki(2001)는 이상의 방법으로 여러 지역에 대한 연구를 통해, 식(2.8)부터 식(2.10)와 같은 상관관계식이 성립함을 보였다. 각 식에 사용된  $\sigma'_{ps}$ 는  $\sigma'_{ps(2)}$ 에 의한 것이다.

$$R(q_u)=0.89-0.021(\sigma'_{ps}/S_0)-0.013(\sigma'_{ps}/S_0)^2 \quad (2.8)$$

(Tokuda, 2000)

$$R(q_u)=0.81+0.043(\sigma'_{ps}/S_0)-0.024(\sigma'_{ps}/S_0)^2 \quad (2.9)$$

(Shogaki, 2000)

$$R(q_u)=0.995-0.071(\sigma'_{ps}/S_0)-0.008(\sigma'_{ps}/S_0)^2 \quad (2.10)$$

(Shogaki, 2001)

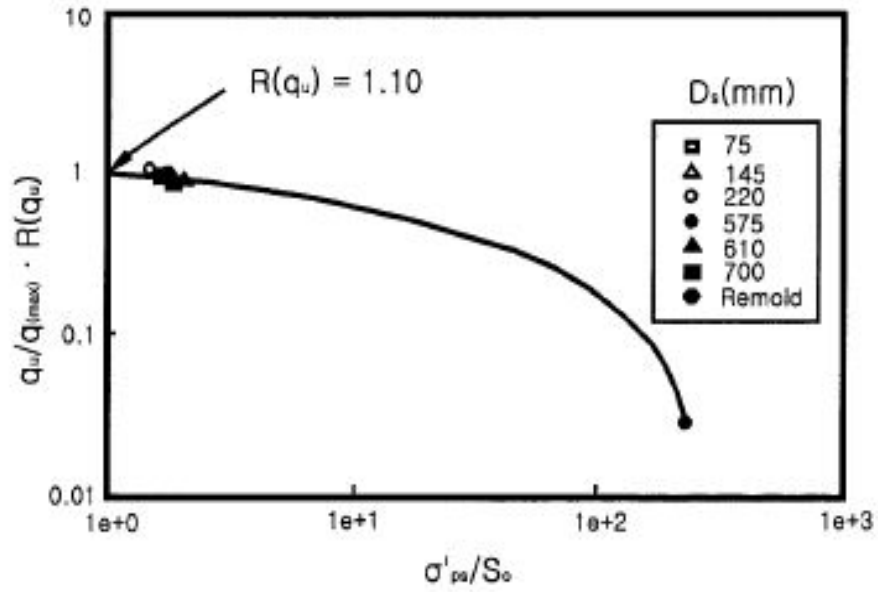


그림 2.4 Shogaki 방법을 이용한 강도보정 방법

## 제 3 장 압밀이방성

### 3.1 흙의 압밀

모든 흙은 압축성이 있다고 할 수 있다. 즉, 흙이 하중을 받으면 체적이 감소한다. 이때에 토체를 이루고 있는 세 가지 요소 즉, 흙입자, 물, 공기 중에서 흙입자와 물은 비압축성이므로 결국 토체의 체적감소는 흙입자 사이의 간극을 차지하고 있는 공기가 압축되거나 물에 용해되든지 또는 간극 속에서 물이 빠져나가기 때문이라고 할 수 있다. 만약에 흙이 완전히 포화되어 있다면 압축은 유동성인 물이 빠져나가서 발생한다. 이때의 압축속도는 간극 속의 물이 빠져가는 속도에 달려 있고 오랜 시간에 걸쳐 흙 속으로부터 물이 빠져나가면서 지반이 압축되는 현상을 압밀이라고 한다. 토질역학의 아버지로 알려진 Karl Terzaghi는 압밀을 "A decrease of water content of a saturated soil without replacement of the water by air is called a process of consolidation."이라고 정의하였다(1943). 이러한 압밀현상을 실내에서 시험적으로 구하는 시험을 압밀시험이라고 한다. 압밀시험 방법은 Terzaghi의 1차 압밀 이론에 근거를 두고 있다.

압밀시험을 통하여 압밀정수(압축지수, 선형압밀하중, 체적압축계수, 압밀계수)를 구할 수 있다. 그리고 이 압밀정수를 이용하여 점성토지반이 하중을 받아서 지반전체가 1차원적으로 압축되는 경우에 발생하는 침하특성(침하량, 침하속도)도 밝힐 수 있다.

연약지반 위에 도로제방 등의 구조물을 축조할 때에는 압밀로 인한 최종 침하량과 그 침하가 어느 비율까지 일어나는데 소요되는 시간을 추정해야 할 필요가 있다. 이러한 계산은 성토의 높이를 결정하거나 공사기간을 정하는 경우에 반드시 요구된다. 흙의 압밀특성은 프리로딩(preloading) 공법, 샌드 드레인(sand drain) 공법 또는 페이퍼 드레인(paper drain)공법과 같은 연약 지반 처리를 위한 설계에도 이용된다. 압밀시험으로부터 획득한 토질정수와 압밀시험 결과의 대표적인 상관관계를 제시하면 다음과 같다.



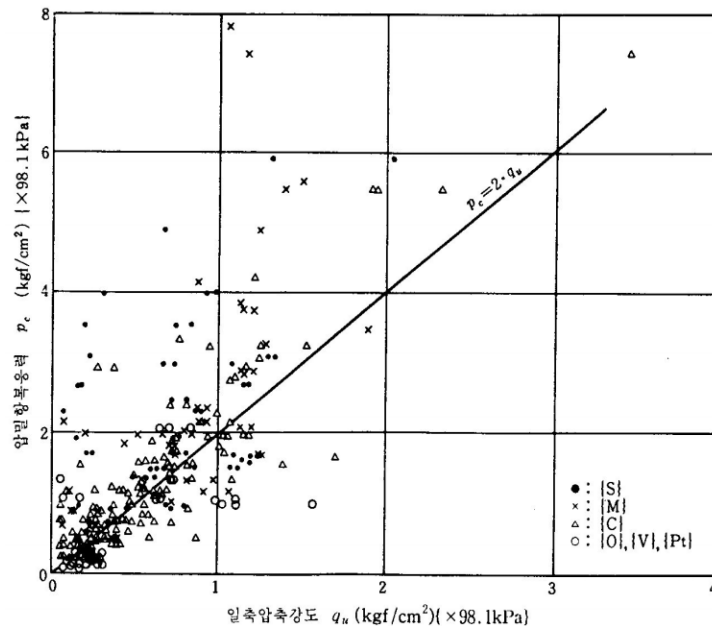


그림. 3.1 일축압축강도와 압밀항복응력의 관계

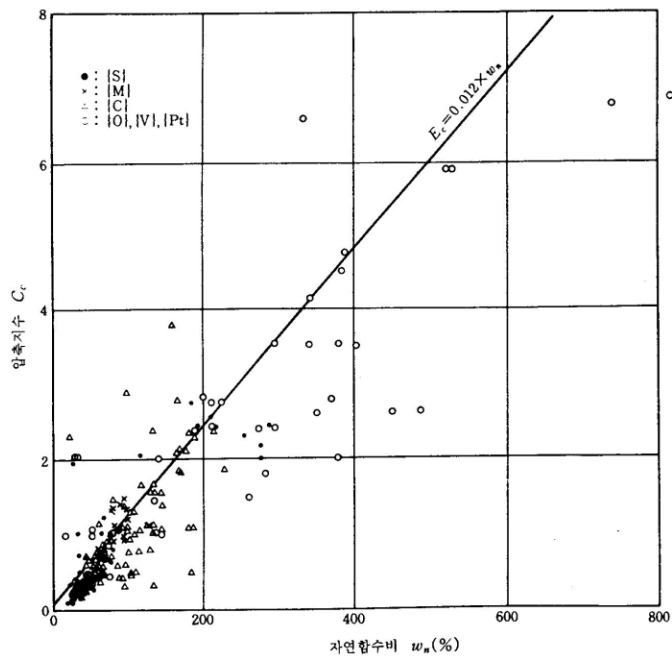


그림. 3.2 자연함수비와 압축지수의 관계

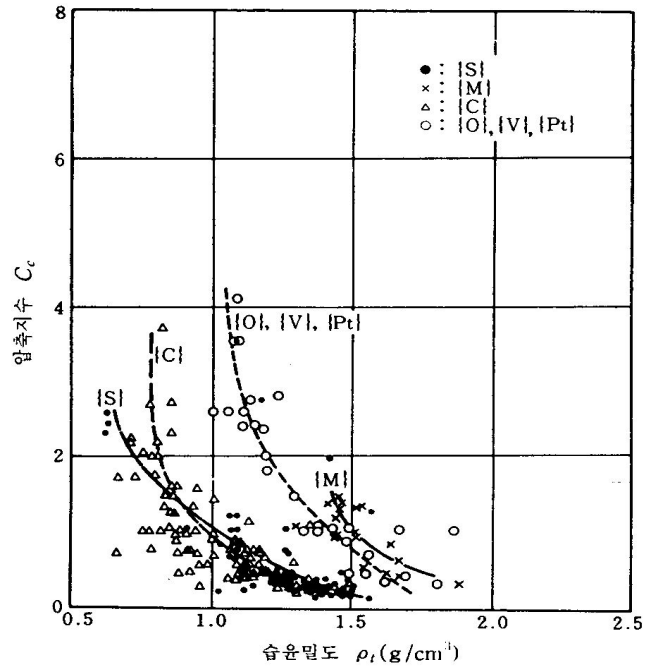


그림. 3.3 습윤밀도와 압축지수의 관계

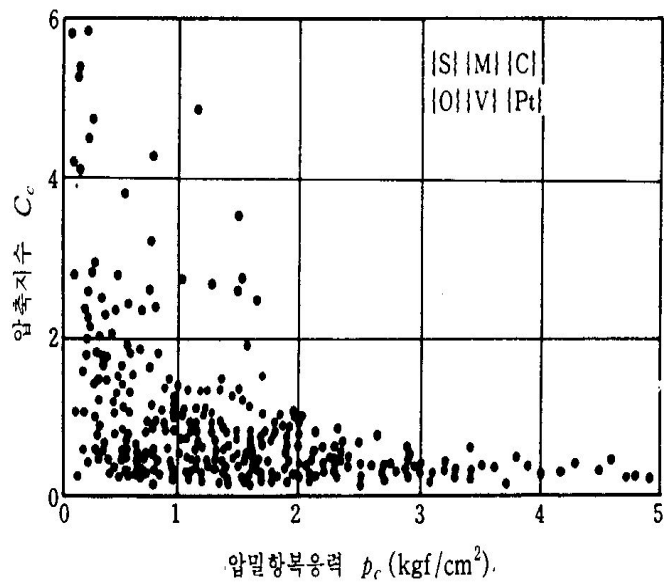


그림. 3.4 압밀항복응력과 압축지수의 관계

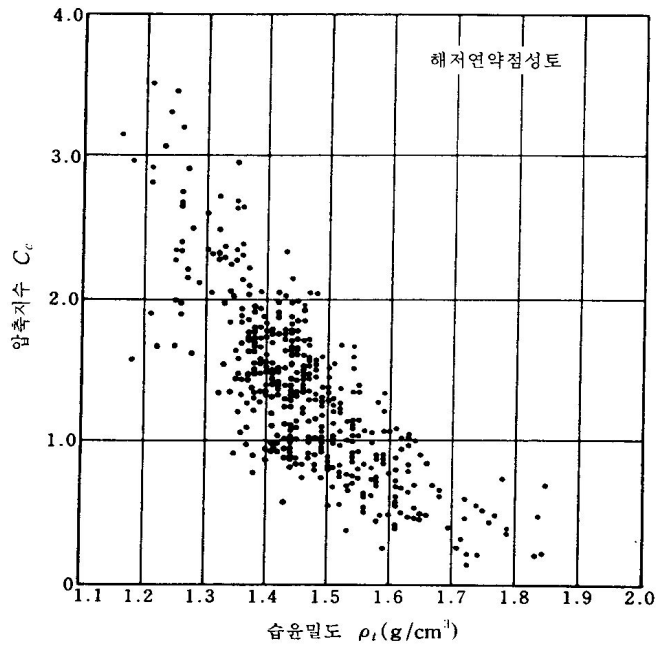


그림. 3.5 압축지수와 습윤밀도의 관계

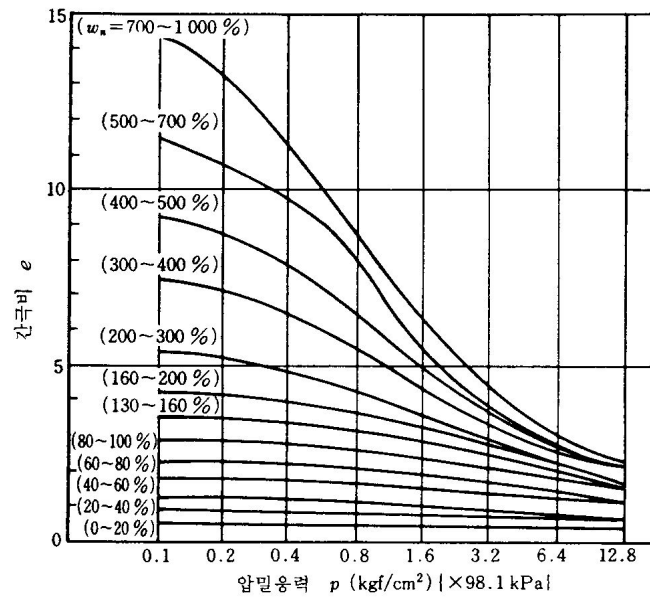


그림. 3.6 자연함수비와  $e - \log p$  곡선의 관계

### 3.2 흙의 이방성

이방성(Anisotropy)이란 흙의 공학적 특성이 입자배열의 방향에 따라 변화하는 성질을 말하는데 흙의 이방성은 하중을 받아 변형하기 이전부터 가지고 있던 본래의 고유이방성(Inherent anisotropy)과 이후의 재하에 의한 후천적 응력유도이방성(Stress induced anisotropy)으로 구분된다. 흙 입자가 퇴적된 후 오랜 시간에 걸쳐 자중 및 일차원적 재하에 의해서 흙의 조직(Fabric)은 부분적 또는 전체적으로 토립자가 주로 수평방향으로 배열되는 조직이방성(Fabric anisotropy)을 나타낸다. 특히 점토의 경우는 방향성 퇴적과 점토입자간의 전기적 결합에 의해서 점토의 이방 변형특성을 나타낸다.(Sadda, 1969) 이러한 점토의 미세적 조직이방성(Microfabric anisotropy)은 균질한 이방성 조직을 보인다. 그러나 퇴적지반은 퇴적시기에 따른 거시적 조직이방성(Macrofabric anisotropy)을 보이는데 세립토가 번갈아 퇴적되어 형성된 Varved clay 와 Stiff fissured clay 지반과 같은 퇴적점토지반이 대표적인 예(Instance)라 할 수 있다. 이처럼 흙의 구조가 이방성을 갖는 원인으로는 퇴적과정, 압밀과정, 시간효과, 지반거동 등의 요인을 들 수 있다.

흙의 고유이방성은 시료를 퇴적방향으로부터 각도를 변화시켜 준비한 공시체에 의해서 측정할 수 있다. 사질토는 입자의 모양에 따라 차이가 있으나 느슨한 상태의 경우 퇴적방향과 이와 직각되는 방향의 전단강도와 의 차이는 약 40% 정도이다. 그리고 이 차이는 상대밀도가 증가할수록 감소되며 약 90%가 되면 거의 같게 된다.(Mahmood 와 Mitchell, 1974) 점토의 고유이방성은 과압밀 정도에 따라 차이가 있으며 정규압밀점토의 경우 수평방향의 비배수 전단강도는 연직방향의 약 80% 정도이다. 그러나 비배수전단강도에 대한 주응력면 회전의 영향은 점토의 예민비가 클수록 그리고 소성지수가 작을수록 증가되는 경향을 보인다(Ladd, 1971)

한편 Katsutada Onituka & Shigenori Hayashi(1976)은 Ariake Alluvial Clay를 각도별로 성형하여 실험한 결과 투수의 이방성으로 인해 성형각

에 따라 투수계수가 최대 10배의 차이가 남을 밝혀냈다. 또한 지반의 지지력을 증가시키기 위해서 다짐을 할 때 흙의 조직이 변하게 되는데 이때 흙의 역학적 특성뿐만 아니라 투수의 이방성에도 영향을 미치게 된다고 하였다. Witt, K. J. and Brauns, J(1984)는 입자의 형상이 투수성과 이방성에 영향을 준다고 제시하였다. 佐式(1984)은 지반의 이방성이 중력과 관계가 깊으며, 이방성의 주방향은 연직, 수평방향이며 대부분 재하 이전부터 이방성 구조를 갖는다고 주장하였다. 일반적으로 수평투수계수는 연직투수계수에 비하여 작게는 1.5배~2.0배, 크게는 10배 이상 크게 나타나므로(Onitsuka, Hayashi, 1976) 기존의 Oedometer시험에 의해 구한 연직투수계수를 이용한 시간-침하의 관계는 실제와는 다른 값이 사용되어 왔다고 볼 수 있다. 이러한 점에서 흙의 이방성에 대한 올바른 이해는 체적변화에 의한 침하량 측정, 제방에서의 침투량 계산, 수리구조물에 작용하는 양압력, 옹벽이나 사면에 작용하는 간극수압 등을 평가할 때 중요하게 고려되어야 할 것이다.

한편 넓은 수평지반 내 한 지점의 토립자 조직은  $K_0$  이방압밀응력에 의해서 또한 경사지반의 경우 이와 다른 응력체계의 압밀응력에 의해서 응력유도이방성을 지니고 있다. 이와 같이 응력유도이방성은 압밀시와 재하에 의한 전단응력 작용시의 응력체계(Stress system)로 인해서 발생하는 이방성을 뜻한다. 따라서 응력유도 이방성은 압밀시 압밀응력의 크기 및 방향에 따른 이방압밀에 의해서 결정될 뿐만 아니라 전단시 작용하는 응력체계 즉 주응력면의 회전과 중간 주응력의 상대적인 크기에 의해서 크게 달라진다. 따라서 원위치 지반의 흙의 공학적 성질을 정확하게 측정하기 위해서는 고유이방성과 응력 유도이방성을 모두 포함하는 복합이방성(Combined anisotropy)을 고려한 시험을 시행해야 한다. 예를 들어 수평지반토의 비배수 전단강도는  $K_0$ 압밀 비배수 삼축시험( $CK_0U$ )에 의해서 결정하며 파괴시의 응력체계에 따라 삼축압축시험( $CK_0UC$ ), 삼축인장시험( $CK_0UE$ ) 및 직접단순전단시험( $CK_0UDSS$ )등을 시행해야 하고 압밀제상수는 수직 및 수평방향에 대해 구해야 한다.

### 3.3 표준압밀시험

연약지반의 압밀특성을 산정하기 위해서는 전 세계적으로 Terzaghi의 1차원압밀이론에 의한 단계하중 증가법인 표준압밀시험이 가장 많이 사용되고 있다. 표준압밀시험은 단계하중 증가에 따른 간극비의 변화를 구하여 압축곡선을 구하고, 각 하중단계의 압밀계수를 산정하는 방법이다. 그러나 시료의 압밀정수를 얻기 위해서는 7~14일 정도의 비교적 긴 시간이 소요된다.

#### 3.3.1 일반적인 시험방법

표준 1차원 압밀시험은 대개 두께 약 1in(25.4mm)에 직경이 2.5in(63.5mm)인 포화시료를 가지고 실시한다.(그림. 3.7) 토질시료는 금속링 내에 설치되며 시료의 윗면과 아래면에 다공석판을 두고 있다. 시료에 작용하는 하중  $P$ 는 레버를 통해서 가해지고 시료의 압밀은 다이얼게이지를 통해서 측정한다. 하중은 매 24시간마다 대개 배로 증가시킨다. 시료는 시험을 하는 동안 수침 상태로 유지시킨다.(KS F 2316)

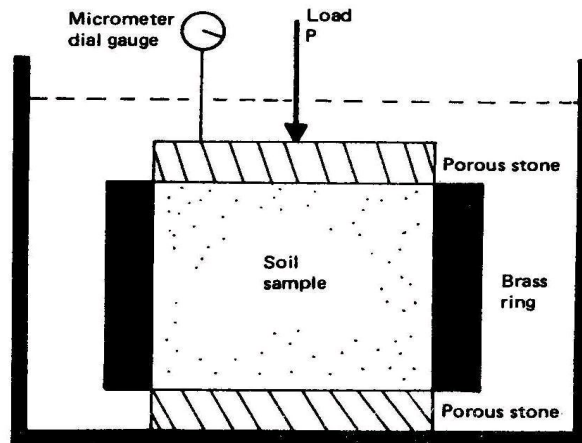


그림. 3.7 압밀시험 기구

일반적인 절차는 다음과 같다.

- 1) 조립한 압밀 상자를 지지대 위에 올려놓고 재하레버를 가능한 한 수평으로 유지한다.
- 2) 다이얼게이지 호울더를 상하로 조정하여 침하량 측정용 다이얼게이지를 설치하고 0으로 맞춘다. 다이얼게이지는 예상변위량 이내에서 충분히 기능을 발휘할 수 있도록 상하위치를 잡아 설치한다.
- 3) 규정에 맞추어서 하중을 재하하고 경과 시간에 대한 침하량을 기록한다. 추를 이용할 때에는 충격이 가해지지 않도록 조심해서 추를 올려놓는다. KS F 2316에 의거하여 초기치를 읽은 후에 재하 후 8", 15", 30", 1', 2', 4', 8', 15', 30', 1, 2, 4, 8, 24시간마다 다이얼게이지를 읽는다.
- 4) 24시간이 지나면 경과 시간과 침하량을 읽고 그 다음 단계의 하중을 가하고 3)에서와 똑같은 방법으로 경과 시간과 침하량을 읽는다.
- 5) 이와 같은 방법으로 다음과 같은 하중을 순차적으로 가하면서 경과 시간과 침하량을 기록한다(0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4, 12.8kgf/cm<sup>2</sup>).
- 6) 최종단계 하중을 가하여 24시간 압밀시킨 후에는 하중을 제하한다. 하중 제하는 모든 하중에 대하여 실시하지 않고 1.6, 0.4, 0kgf/cm<sup>2</sup>으로 감소시킨다. 즉 최종단계 하중을 가하고 시간과 침하량을 기록하고 24시간이 지난 후에 압력이 1.6kgf/cm<sup>2</sup>이 되도록 하중을 감소시킨다. 약 4시간 동안 방치한 다음 팽창량을 기록한다. 다시 압력을 0.4kgf/cm<sup>2</sup>까지 감소시켜 4시간 방치한 다음 팽창량을 기록한다. 팽창량 측정시는

통과 경과 시간은 기록하지 않는다.

- 7) 압밀 시험은 착수부터 완료까지 약 1주일 이상이 소요되므로 시험중 시료가 건조되지 않도록 시험중에 자주 물을 주입하여야 한다.
- 8) 시험이 완료되면 시료를 꺼내서 무게를 재고 건조로에서 말린다. 압밀 시험기는 해체하여 물로 깨끗이 닦아내고 무게를 잰다.
- 9) 건조로에서 말린 시료의 무게를 측정한다.
- 10) 결과를 정리한다.

각 하중 단계에서 시료의 변형과 대응하는 시간  $t$ 를 반대수지에 도식한다. 그림. 3.8은 대표적인 변형 대  $\log$  시간 관계 그래프이며 성질이 다른 3부분으로 구성되어 있다.

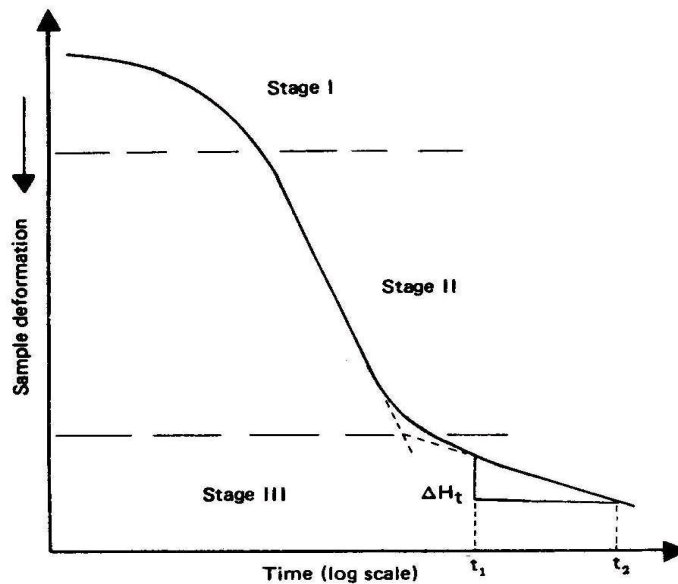


그림. 3.8 대표적인 시료의 주어진 하중증분에 대한 변형 대  $\log$  시간관계도



(1) 상부 곡선부(I 단계)

이 부분은 주로 시료의 선행압밀이 일어난 단계이다.

(2) 중간 직선부(II 단계)

이 부분은 1차 압밀단계이다. 1차압밀이 끝나는 시점에서 하중증가 때문에 생성되었던 과잉간극수압은 거의 소산된다.

(3) 하부 직선부(III 단계)

이 부분을 2차압밀이라고 한다. 이 단계에서 시료는 시간이 지남에 따라 작은 변형을 일으킨다. 실제로는 2차압밀 동안에 측정할 수 없을 정도로 작은 과잉간극수압이 시료에 남아 있다.

각 하중단계마다 시험의 최종시점에서 시료에 작용하는 응력은 유효응력  $\sigma'$ 임을 유의할 필요가 있다. 토립자의 비중, 시료의 초기수치 및 각 하중 단계마다 최종시점에서의 시료의 변형량이 측정되면 대응하는 간극비는 계산된다.

### 3.3.2 압밀 제상수

가. 선행압밀하중

압밀시험 결과로부터 도출되는 대표적인  $e-\log \sigma'$  관계를 보게 되면  $e-\log \sigma'$ 관계의 윗부분은 곡선이나, 높은 압력 하에서  $e-\log \sigma'$ 는 직선관계를 나타낸다. 토질시료를 현장으로부터 채취했을 때 그 시료는 이미 최대유효응력을 받았기 때문에 윗부분이 곡선이 된 것이다.

지반조사를 하는 동안 하중이 제거되었는바 실험실에서 시료에 하중을 가하면 그 시료가 과거에 받았던 최대유효응력과 같은 크기의 하중을 받을 때까지 간극비의 감소는 비교적 작다. 만약 그 시료에 유효응력을 더욱 크게 작용시키면 간극비는 더욱 감소하게 된다. 이 부분이  $e-\log \sigma'$  관계

에서의 직선부이다. 이와 같은 결과는 그림. 3-9에서와 같이 시료를 압밀실에서 제하 및 재재하시킴으로써 증명할 수가 있다.

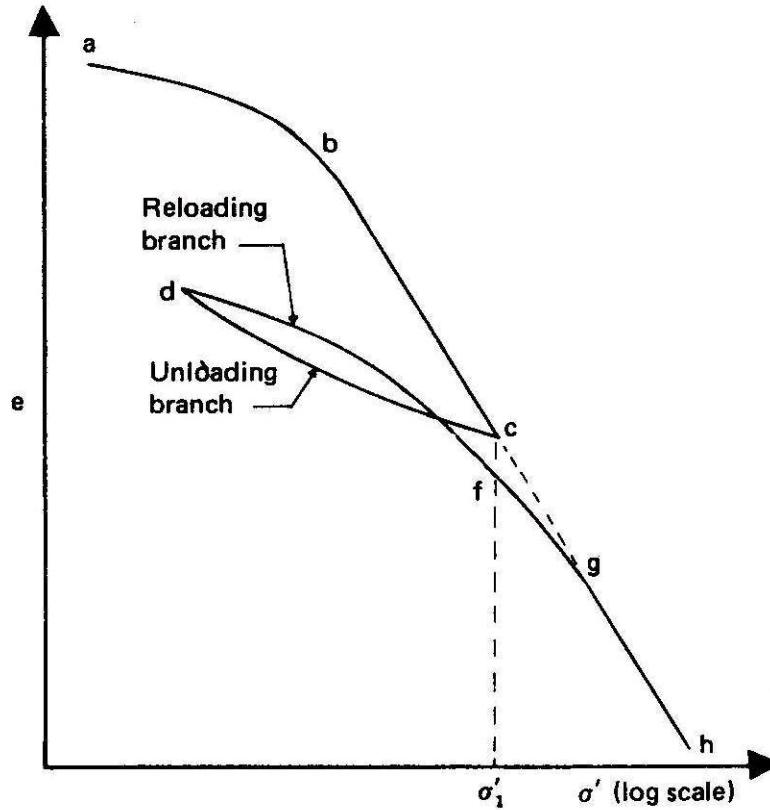


그림. 3-9 제하와 재재하 과정에서 나타나는 간극비 대 유효응력의 관계도

그림. 3-9에서 cd는 시료가 제하되었을 때의 간극비-유효응력 관계이고 dfgh는 재재하시켰을 때의 간극비-유효응력 관계이다. 점 d에서 그 시료는 과거에 받았던 최대응력  $\sigma'_1$ 보다 낮은 유효응력을 받고 있다. 그러므로 df는 평탄한 곡선부가 된다. 점 f를 지나서 간극비가 유효응력에 따라 큰 비율로 감소하며 gh는 bc와 같은 기울기가 된다.

이상과 같이 흙의 두 가지 조건에 대해서 다음과 같이 정의할 수 있다.

(1) 정규압밀

만약 흙이 받고 있는 현재의 유효압밀하중이 과거에 받았던 하중보다 가장 클 때 정규압밀되었다고 한다. 즉,  $\sigma'_{present} \geq \sigma'_{past\ maximum}$

(2) 과압밀

현재 흙이 받고 있는 유효압밀하중이 과거에 받았던 최대하중보다 작을 때는 과압밀되었다고 한다. 즉,  $\sigma'_{present} < \sigma'_{past\ maximum}$

그림. 3-9에서 선분 ab, cd 및 df는 과압밀상태이고 선분 bc 및 fh는 정규압밀상태이다.

이상에서 제시한 바와 같이 점토는 선행압밀하중을 기준으로 압밀특성이 변화되기 때문에 이에 대한 정확한 결정이 매우 중요하다.

현재까지 선행압밀하중을 구하는 방법으로는 Casagrade(1936)에 의해 제안된  $e-\log P$  곡선에서 결정하는 방법을 가장 많이 사용하였지만 이 방법에는 다음과 같은 문제점을 내포하고 있다.

- (1) 간극비의 축을 어느 구간에서 선택하는가에 따라 선행압밀하중이 달라 질 수 있다.
- (2) 기술자에 따라 최대변곡점을 다르게 선정할 수 있다.
- (3) 정규압밀구간에서 직선적인 변화를 나타내지 않는 경우가 있다.

이러한 문제점들은 현재까지 많이 거론되어 왔고 좀 더 정확한 선행압밀하중의 선정을 위하여 Schmertman(1955), Akai(1960), Janbu et al.(1981), Becker et al. (1987), Christensen and Janbu(1992) 등 수많은 연구자들에 의하여 다양한 방법들이 제안되어 있다.

나. 압축지수

정규압밀토에 대한  $e-\log \sigma'$  그림의 기울기는 압축지수  $C_c$ 로 표시되며 이 값은 압축성을 나타내는 지표로 다음과 같이 계산된다(그림.3-10참조).

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma'_2 - \log \sigma'_1} = \frac{\Delta e}{\log (\sigma'_2 / \sigma'_1)} \quad (3-1)$$

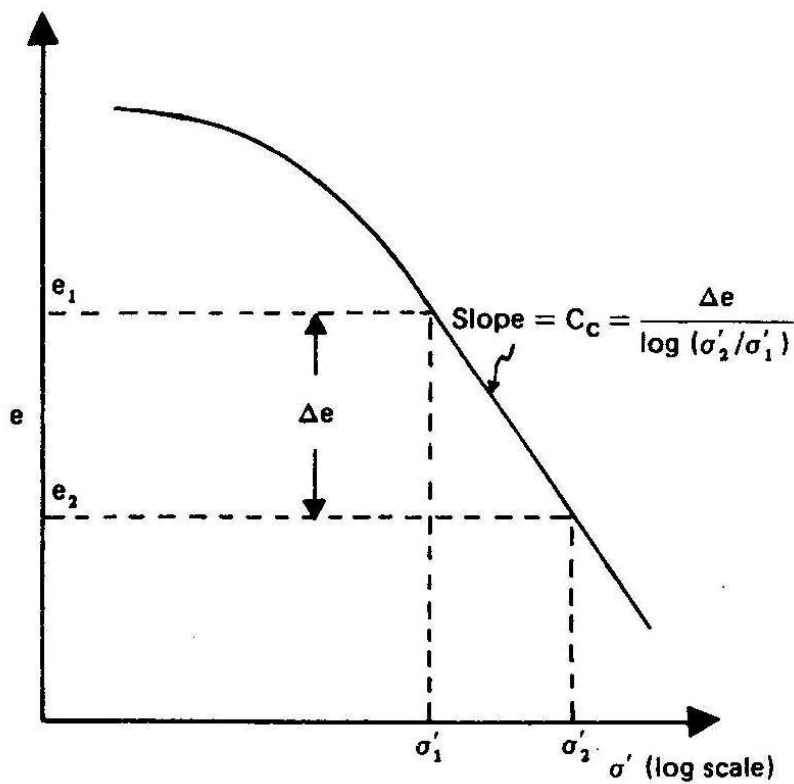


그림. 3-10 압축지수  $C_c$

Terzaghi & Peck(1967)은 정규압밀 점토의 압축지수에 대해서 다음과 같은 관계식을 제시하였다.

$$C_c = 0.009(LL - 10) \quad (3-2)$$

여기서,  $LL$ 은 액성한계이다. 위의 관계식은 신뢰도가  $\pm 30\%$ 의 범위에 있으며 예민비가 4보다 큰 점토에 대해서는 사용해서는 안된다.

Terzaghi & Peck은 또한 재성형한 점토에 대해서도 유사한 관계식을 제시했다.

$$C_c = 0.007(LL - 10) \quad (3-3)$$

압축지수와 흙의 기본적 성질에 대한 여러 상관 관계식이 제안되었으며 그 중 일부는 다음과 같다(Azzouz et al., 1976)

$$C_c = 0.01 w_N \quad (\text{Chicago 점토}) \quad (3-4)$$

$$C_c = 0.0046(LL - 9) \quad (\text{Brazilian 점토}) \quad (3-5)$$

$$C_c = 1.21 + 1.055(e_0 - 1.87) \quad (\text{Sao Paulo시의 Motley 점토}) \quad (3-6)$$

$$C_c = 0.208e_0 + 0.0083 \quad (\text{Chicago 점토}) \quad (3-7)$$

$$C_c = 0.0115 w_N \quad (\text{유기질토, Peats 등}) \quad (3-8)$$

여기서,  $w_N$ 는 자연함수비(%)이고  $e_0$ 는 현장간극비이다.

Nacci et al.(1975)은 북대서양으로부터 채취한 심해의 자연토질시료들을 시험하였다. 이 시료는 방해석 함유량이 10%에서 80% 정도였으며, 시험결과를 근거로 하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$C_c = 0.02 + 0.014(PI) \quad (3-9)$$

여기서,  $PI$ 는 소성지수이다.

국내외 점성토에 대한 압축지수 관계식은 표 3-1과 같다.

표 3-1. 국내외 점성토에 대한 압축지수 관계식

| 흙의 종류                                               | 관계식                                                  |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Remolded clay                                       | $C_c = 0.007 (LL - 7)$                               |
| Chicago clays                                       | $C_c = 0.01LL$                                       |
| All clays                                           | $C_c = 1.15 (e_0 - 0.35)$                            |
| Normally consolidated clay                          | $C_c = 0.009 (LL - 10)$                              |
| Soils with low plasticity                           | $C_c = 0.75 (e_0 - 0.50)$                            |
| Chicago clays                                       | $C_c = 0.208 (e_0 + 0.0083)$                         |
| Inorganic cohesive soil<br>(silt, silty clay, clay) | $C_c = 0.30 (e_0 - 0.27)$                            |
| Organic soils                                       | $C_c = 0.0115LL$                                     |
| Brazilian clays                                     | $C_c = 0.0046 (LL - 9)$                              |
| Motley clays from Sao paulo city                    | $C_c = 1.21 + 1.055 (e_0 - 1.87)$                    |
| 영종도 공항(ML-CL)                                       | $C_c = 0.005 (LL + 12), C_c = 1.72e_0 - 1.5$         |
| 부산 해상신도시 인공섬(CL-CH)                                 | $C_c = 0.012 (LL - 6), C_c = 0.5 (e_0 - 0.6)$        |
| 녹산공단(CL)                                            | $C_c = 0.018LL - 0.25, C_c = 0.02w_N - 0.58$         |
| 김해 칠산지구(CH)                                         | $C_c = 0.0134 (LL - 21),$<br>$C_c = 0.013w_f - 0.28$ |
| 속초 청초호 유원지(OH)                                      | $C_c = 0.009 (LL + 33),$<br>$C_c = 0.008 (w_f + 50)$ |
| 남양주행 시험장(CL)                                        | $C_c = 0.023 (LL - 24),$<br>$C_c = 0.015 (w_f - 22)$ |
| 군산 공업용수도(ML)                                        | $C_c = 0.013 (LL - 15)$                              |
| 진도 소포 간사지(CL)                                       | $C_c = 0.014 (LL - 20)$                              |

#### 다. 압밀계수

흙의 압축속도는 압축거동을 예측하는데 매우 중요한 역할을 하며 압축속도는 압밀계수  $c_v$  (coefficient of consolidation)를 통하여 결정된다.

압밀계수는 지반의 압밀침하에 소요되는 시간을 측정하는 계수로서 동일 위치의 시료 중에서도 그 값이 크게 변화할 수 있다. 아래 그림. 3-11에서 보는바와 같이 압밀하중이 증가함에 따라 감소하며, 선행압밀하중을 넘어선 정규압밀영역에서는 거의 일정한 값을 보인다. 또한 아래 표 3-2는 압밀계수의 대표 값으로 액성한계에 따라 분류된 값이다.

압밀계산에 사용되고 있는 압밀계수  $C_v$ 는 통상 채취한 불교란 시료에 대하여 표준압밀시험을 시행하고 각 하중단계마다  $C_v$ 를 구한 후  $p_o + \Delta p/2$ 의 하중에 대응하는 값을 택하고 있다. 여기서  $p_o$ 는 흙이 받고 있는 유효토피압이며  $\Delta p$ 는 재하중에 의해 흙에 가해지는 압밀압력이다. 그러나  $C_v$ 는 보통 일정하지 않고 압밀에 의해 유효응력이 증가함에 따라 변화하는 것이 보통이다.

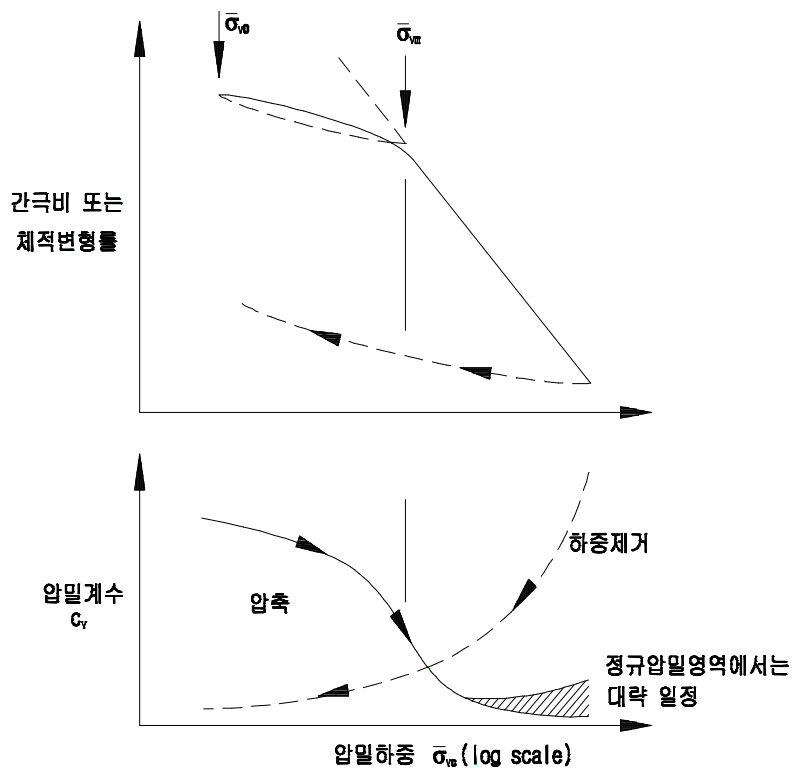


그림. 3-11 압밀하중에 따른 압밀계수

표 3-2 압밀계수의 대표값

| 구 분       | 액성한계                 |                      |                    |
|-----------|----------------------|----------------------|--------------------|
|           | 30                   | 60                   | 100                |
| 재압축시의 하한값 | $3.5 \times 10^{-2}$ | $3.5 \times 10^{-3}$ | $4 \times 10^{-4}$ |
| 처녀압축      | $5 \times 10^{-3}$   | $1 \times 10^{-3}$   | $2 \times 10^{-4}$ |
| 재성형시의 상한값 | $1.2 \times 10^{-3}$ | $3 \times 10^{-4}$   | $1 \times 10^{-4}$ |

(U.S. Navy, 1962)  $C_v$ 의 단위는  $\text{cm}^2/\text{sec}$ .



시간의 함수인  $C_v$  값은 압밀시험을 통해 획득한 시간-침하량 관계곡선을 이용하여 결정되어지는데, 관용적인 압밀해석에서 압밀속도를 지배하는 토질상수를 압밀계수( $C_v$ )로 표시하고 있으며, 압밀계수는 궁극적으로 간극수압의 소산율을 말하며, 지반의 압밀침하에 소요되는 시간을 측정하는데 사용되는 값이다. 각 하중단계별로 획득한 시간-침하량 곡선을 통해 산정된  $C_v$  값은 투수성과 압축성을 동시에 내포하면서 압밀속도를 지배하는 역할을 하게 된다. Terzaghi 이론의 경우 압밀 전 과정동안 압밀계수( $C_v$ )는 일정한 것으로 가정하고 있다.

압밀시험에서 얻어지는 시간-침하곡선에 압밀이론을 적용하여 각 재하 단계마다 구해지는  $C_v$  값은 투수성과 압축성을 동시에 내포하면서 압밀속도를 지배하는 토질상수의 역할을 하는데 압밀하중의 증가시  $k$ 와  $m_v$  값은 감소하므로 넓은 범위에서 일정한 값을 갖게 된다. 그러나 실제 압밀시험에서 얻어지는  $C_v$  값은 선행압밀하중을 기준으로 하여 크게 변하는데  $m_v$ 가 작은 과압밀영역에서는 크고 정규압밀영역에서는 작게 나타난다. 하지만 각각의 범위에서는 그다지 큰 변동이 없으므로 정규압밀과 과압밀로 구분할 경우  $C_v$ 를 일정하다고 가정한 압밀이론의 적용이 허용되는 것이다.

많은 학자들이 압밀계수를 결정하기 위하여 여러 방법들을 제시하고 있다. 그러나 대부분의 경우 실험에 의해서 결정되어지며 실험에 의해 구해진 압밀계수 값은 하중단계와 결정 방법에 따라 서로 다른 값을 보이고 있다. 따라서 현장 조건에 적합한 압밀계수를 결정하는데 많은 어려움이 있다.

압밀계수의 결정방법으로 많이 사용되고 있는 방법은 Casagrande의  $\log t$ 법, Taylor의  $\sqrt{t}$ 법,  $SU$  최대경사법,  $Scott$ 법과 Sivaram-Swamee법 그리고 Rectangular Hyperbola Method(직교 쌍곡선법)등이 현재 자주 사용되고 있다.

Lambe(1962)는  $\sqrt{t}$ 법에 의한 압밀계수의 값이  $\log t$ 법에 의한 값보다

크게 나오므로  $\sqrt{t}$ 법을 사용하는 것이 실제 문제에 적합하다고 주장했다. 반면에 Leonard는 일반적으로  $\log t$ 법으로 구한 압밀계수 값이 정규압밀 영역 내에서는  $\sqrt{t}$ 법으로 구한 값보다 더 작으므로  $\log t$ 법으로 압밀계수를 구하여 압밀속도를 계산하는 것이 실제와 더 부합된다고 했다.

또한 Scott(1961)는  $\sqrt{t}$ 법은 2차 압축을 고려하지 않아 압밀계수가 다소 과대평가 되는 경향이 있으며,  $\log t$ 법은 압밀계수를 결정하는데 오랜 시간을 요구하기 때문에 적절하지 못하다고 했다. 그래서 Scott는 정해진 시간에 다이얼 게이지를 읽지 않아도 압밀계수를 결정할 수 있는 간편법을 제시하였다.

많은 학자들이 각 방법에 대한 문제점을 제기하고 새로운 대안을 제시하였지만 현재까지도 실제와 일치하는 방법은 제시되고 있지 않다.

이하에서는 이론적인 시간계수와 압밀도의 관계를 설명하였다. 등분포 하중을 받고 있는 지반의 1차원 압밀 현상에 대하여 Terzaghi가 아래와 같은 미분 방정식을 제안하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w m_v} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3-10)$$

식(3-10)의 우변에 압밀계수,  $c_v$  ( $c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v}$ )를 대입하면 아래와 같은 미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3-11)$$

식(3-11)의 해는 압밀계수, 최장 배수거리(h) 그리고 시간의 함수인 퍼센트 압밀도,  $U$ 로 나타난다.

$$\frac{U}{100} = f\left(\frac{c_v t}{h^2}\right) \quad (3-12)$$

$\frac{c_v t}{h^2}$  는 무차원 파라미터로서, 시간계수  $T_v$ 로 정의 할 수 있다.

따라서 식(3-12)는 아래와 같이 변경할 수 있다.

$$\frac{U}{100} = f(T_v) \quad (3-13)$$

식(3-13)의 해  $U$ 와  $T_v$ 와의 관계를 도식적으로 나타내면 그림. 3-12과 같다. 동일한 관계를  $U$ 와  $\log T_v$ 로 나타내면 Casagrande법과 같고,  $U$ 와  $\sqrt{T_v}$ 로 나타내면 Talor법과 같다. 통상적으로 1차원 압밀 해석시 두 번째와 세 번째를 이용한다. 수학적으로 볼 때, 시간이 무한대에 이를 때까지 곡선은 점근선  $U=100\%$ 에 접근하게 된다. 반면에 압밀은 매우 긴 시간이 지난 후에야 완료되며, 거의 도달 할 수 없을 정도로 긴 시간이다.  $U$ ,  $T_v$  그리고  $\sqrt{T_v}$ 의 값을 표3-3에 제시하였다.

식(3-12)에 대해 한 가지 중요한 사실은 일정 시간 후에 도달되는 압밀도는 최대 배수 거리의 자승에 반비례한다는 것이다. 다시 말하면, 압밀시간은 점토층의 두께 자승에 비례하여 증가한다는 의미이다.

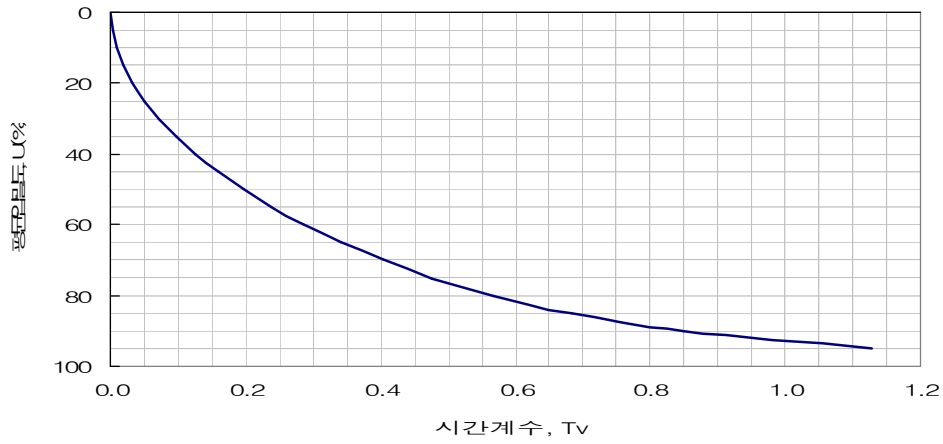


그림. 3-12 압밀도와 시간계수의 관계

표 3-3. 1차원 압밀에 대한 시간계수

| Degree of Consolidation, $U\%$ | $T_v$    | $\sqrt{T_v}$ |
|--------------------------------|----------|--------------|
| 0                              | 0        | 0            |
| 10                             | 0.0077   | 0.0877       |
| 20                             | 0.031    | 0.176        |
| 30                             | 0.071    | 0.266        |
| 40                             | 0.126    | 0.355        |
| 50                             | 0.196    | 0.443        |
| 60                             | 0.286    | 0.535        |
| 70                             | 0.403    | 0.635        |
| 80                             | 0.567    | 0.753        |
| 90                             | 0.848    | 0.921        |
| 95                             | 1.129    | 1.063        |
| 100                            | $\infty$ | $\infty$     |

(1) Taylor의  $\sqrt{t}$  법

그림. 3-13에서 보는 바와 같이  $Dial\ reading - \sqrt{t}$ 의 이론곡선에서 압밀도가 약 60% 될 때까지는 거의 직선으로 나타난다. 이 직선의 기울기의

1/1.15 배 되는 기울기로 그은 직선과 이론곡선이 만나는 점이 압밀도가 90% 이다. 실측곡선의 직선부분을 찾아 PQ의 직선을 긋는다. 이 때 P는 보정된 초기눈금  $d_s$  가 된다. 이 점으로부터 직선 부분의 기울기의 1/1.15배( $OR=1.15 \cdot OQ$ ) 되는 기울기로 직선 PR을 긋는다. 그리고 이 때 실측선과 만나는 점 S에 대응되는 값을  $d_{90}$ 으로 하고  $d_{90}$ 에 해당하는 시간이  $t_{90}$ 이다.

$$c_v = \frac{T_{90} \cdot H^2}{t_{90}} \quad (3-14)$$

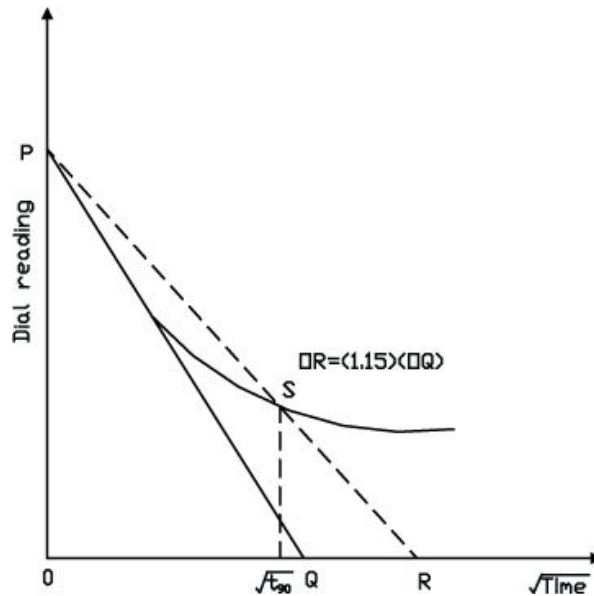


그림. 3-13 Taylor의  $\sqrt{t}$ 법

## (2) Casagrande의 $\log t$ 법

$Dial\ reading - \log t$  곡선의 중간과 끝부분은 거의 직선이다. 두 직선의 연장선의 교점(T)은 1차 압밀도가 100%되는 점으로  $d_{100}$ 으로 표시된다. (그림. 3-14)

*Dial reading-log t*관계의 초기곡선부분은 보통 포물선이다. 곡선부분에서  $t_1$ 과  $t_2$ 를  $t_2=4t_1$ 이 되도록 취한다. 시간  $(t_2-t_1)$ 동안 시료 변형량의 차이를  $x$ 라 하고  $PR=x$ 인 수평선  $RS$ 를 긋는다. 선  $RS$ 에 해당하는 변형이  $d_0$ 이다. 즉 압밀도 0%를 나타낸다.  $d_0$ 와 점  $T$ 에 대응하는  $d_{100}$ 과의 이등분점  $d_{50} = \frac{d_0 + d_{100}}{2}$ 을 구해 이에 대응되는 시간  $t_{50}$ 을 구한다. 따라서 압밀계수  $c_v$ 는 다음과 같다.

$$c_v = \frac{T_{50} \cdot H^2}{t_{50}} \quad (3-15)$$

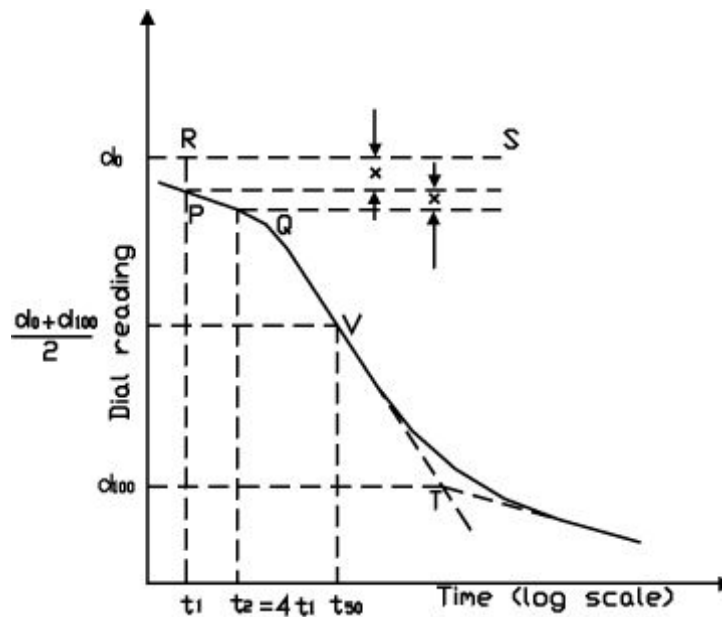


그림. 3-14 Casagrande의  $\log t$  법

### 3) Sivaram-Swamee법

Sivaram-Swamee는 Terzaghi가 제시한 압밀도 53% 미만과 53%이상에서의 압밀도-시간계수 관계에 대한 근사식을 보완하기 위해 새로운 식을 유도하였다. 압밀도  $0 \leq U \leq 100\%$ 에 대해 다음과 같다.

$$T = \frac{\left(\frac{\pi}{4}\right) \left(\frac{U\%}{100}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{U\%}{100}\right)^{5.6}\right]^{0.357}} \quad (3-16)$$

식(3-16)와 1차원으로 압밀이 진행된다는 가정을 기초로 초기눈금  $d_0$ 를 다음과 같은 방법으로 구한다.

$$d_0 = \frac{d_1 - d_2 \sqrt{t_1/t_2}}{1 - \sqrt{t_1/t_2}} \quad (3-17)$$

$d_1, d_2$ 는 압밀도가 53% 미만의 임의의 시간  $t_1, t_2$ 에 대응하는 눈금이다. 또한 압밀도 100%의 눈금  $d_{100}$ 은 다음과 같이 구한다.

$$d_{100} = d_0 - \frac{d_0 - d_3}{\left[1 - \left[(d_2 - d_3)(\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}) / (d_1 - d_2)\sqrt{t_3}\right]^{5.6}\right]^{0.179}} \quad (3-18)$$

$d_3$ 는 압밀도 53% 이상의 임의의 시간  $t_3$ 에 대응되는 눈금이다. 따라서 결정된  $d_0$ 와  $d_{100}$ 에 의해 압밀계수  $c_v$ 는 다음과 같이 구한다.

$$c_v = \frac{\pi}{4} \left( \frac{d_1 - d_2}{d_0 - d_{100}} \frac{H}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \quad (3-19)$$

#### 4) Rectangular Hyperbola Method(직교 쌍곡선법)

Sridharan(1987)은 Terzaghi의 이론으로부터 시간계수  $T$ 와 압밀도  $U$ 와의 관계는 그림. 3-15과 같은 압밀도가 60%~90%의 범위에 있을 때 Rectangular hyperbola 관계에 있다고 제시하였다. Sridharan는 이론적인  $T/U-T$ 관계와 실험적인  $t/\delta-t$ 관계(여기서,  $t$ 는 시간,  $\delta$ 는 압축)의 유사성을 통해 압밀계수  $c_v$  결정 방법을 제시하였다.

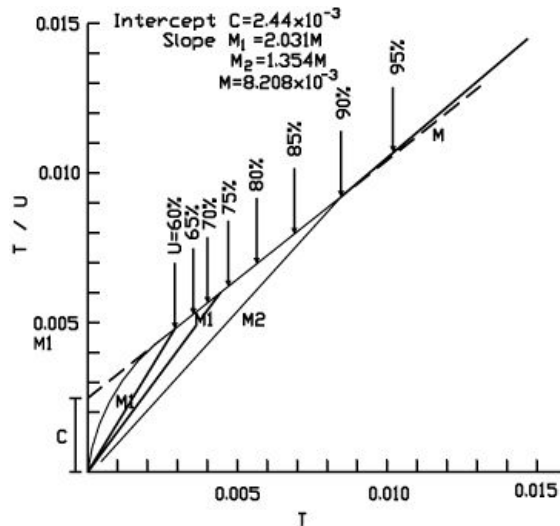


그림. 3-15 이론적인  $T/U$  대  $T$  관계

초기 압축이 없는 압축값을 이용한  $t/(\delta - \delta_i)-t$  그래프를 이용하여 그래프의 기울기  $m'$ 와 직선의 연장선에 대응되는 값  $c'$ 를 구하고, 또한 시험에 의해 구해진 압축값을 이용하여  $t/\delta-t$  그래프에서 기울기  $m$ 과  $c$ 를 구했다(그림. 3-16).  $m/c - m'/c'$ 의 log 눈금 그래프로부터 고유한 선형관계가 있음을 밝혔다. 그 관계는 다음과 같다.

$$\frac{m'}{c'} = 0.809 \frac{m}{c} \quad (3-20)$$



따라서 압밀도  $60\% \leq U \leq 90\%$ 에 대한 시간은 다음과 같다.

$$t = \frac{c}{K'(A-1)m} \quad (3-21)$$

여기서,  $K' = 0.809$   $A$ 는 무차원 수이며 순수한 압밀도만의 함수이다.  
따라서 직교쌍곡선법에 의한 압밀계수  $c_v$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$c_v = \frac{B'mH^2}{c} \quad (3-22)$$

여기서,  $B' = 0.297$   $K' = 0.241$  이다.

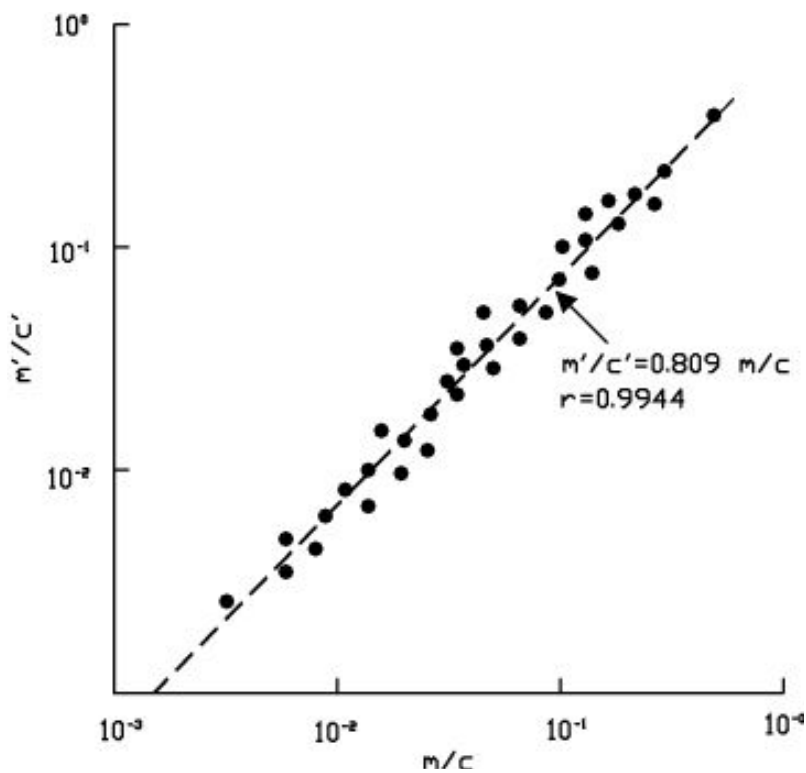


그림. 3-16  $m'/c'$ 와  $m/c$ 의 관계

##### 5) 압밀속도법(velocity method)

압밀 시험 결과 분석에 있어서 압밀계수를 산정하는 방법에는 대표적으로 3가지 방법이 있다. 그 중에서도 가장 간단하고 아마도 최초의 압밀계수 결정법인 것으로 생각되는  $t_1$ 법이 있다.  $t_1$ 법은 Capper and Cassie가 1949년에 제안한 작도법이다. 그러나, Terzaghi는 2차압축의 영향 때문에 반드시 수정이 필요하다고 하였다. 이에 Taylor가 1933에 Terzaghi의 근본적인 방법을 단순화하여 평방근 그래프를 이용한  $t_{90}$ 법을 제안하게 되었다. 동시대에 Casagrande 역시 압밀계수 산정 기법을 개발하였으며 바로 이 방법이 오늘날  $\log t$ 법으로 알려진 방법이다(Casagrande and Fadum, 1940).

위의 두 방법( $\log t$ 법과  $t_{90}$ 법)은 자동 산정 기법이 쉽지 않은 도해법이라는 것이 다소 단점이라고 할 수 있다. 뿐만 아니라, 두 방법이 비록 하나는 압밀곡선의 초반부에 중점을 둔 방법이고 다른 한 방법은 후반부에 중점을 둔 방법이라 하지만, 두 방법이 산정한 압밀계수가 항상 일치하는 것도 아니다. 그러나 아주 간단하면서도 효율적인 방법임에는 틀림없다.

압밀계수의 값은 무차원 파라미터  $U$ 와  $T$ 를 이용한 Terzaghi의 이론적인 해와 실제 실험 결과인 침하량-시간 곡선을 접합시켜서 산정할 수 있다. 이 과정에서, 아직도 해결이 되지 않는 두 개의 미지의 스케일 관계가 존재한다. 압밀 해석에 관한 전통적인 방법에서는 평방근 용지와 반대수 용지를 이용하여 연속 곡선을 작도한다. 그러나, 곡선을 대수 용지(double logarithmic scale)에 플롯한다면, 곡선 접합 과정은 아주 수월할 것이라 판단된다. 왜냐하면 단순히 스케일을 변환함으로서 곡선의 기하학적인 왜곡없이도 곡선의 전체적인 형상에 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

만약, 해석시 침하량 대신에 속도를 이용한다면 훨씬 더 바람직할 것이라고 판단된다. 이와 같이 속도를 이용하여 해석하는 경우, 해석은 초반부와 후반부 조건에 독립적이 될 것이라 판단된다. 즉, 초기 탄성 압축을 정의할 필요가 없어지며, 또한 후반부의 2차압축을 정의할 필요성이 없어지게 된다.

압밀 방정식에 관한 권위있는 해는 그림. 3-17(a)에서와 같이 속도(  $U$  and  $T$ )로서 그 해를 제안하고 있다. 실험 결과로 나타난 모든 침하 거동은 2차압축의 영향을 제외하면 대부분 기하학적 유사성을 보이고 있다. 곡선 초반부의 기울기는  $U \approx 0.5$ 까지는 1:2이고, 반면에 그 이후의 기울기는 무한정이다. 그러므로 이 곡선은 어떤 실험 곡선과도 접합시킬 수 있을 것이라 판단되며 그 결과 실제 시간,  $t$ 와 무차원 시간계수,  $T$ 사이의 관계를 얻을 수 있을 것이라 사료된다. 따라서,

$$c_v = \frac{TH^2}{t} \quad (3-23)$$

여기서 연직축의 변위가 결과로서 산정되기 때문에, 속도를 구하기 위해서 실제 시간으로 미분을 했는지 아니면 시간계수로 미분을 했는지는 기하학적으로 그다지 중요하지가 않다.

하나의 예로서, 그림. 3-17(b)에 전형적인 오이도미터를 이용하여 수행된 실험 결과로서 속도 곡선을 제시하였다. 여기서 속도를 계산할 때에는 계측 장치가 자동으로 계산하도록 하면 더욱 바람직 할 것이다. 최초점(초기 탄성 압축으로 왜곡된 점)을 무시하면, 기울기가 1:2인 직선이 나오게 될 것이다. 그림. 3-17(a)를 겹침으로서  $T=1$ 일 때의  $t$ 는  $t=15$ 분과 일치한다는 것을 쉽게 알 수 있으며, 결과적으로 시료의 두께가 19mm인 경우에 대하여 압밀계수,  $C_v = 3.2m^2/year$ 를 산정할 수 있을 것이다. 두 곡선의 후반부에 발생하는 불일치(변위)와 이론적인 해보다 침하 속도가 더 빠른 것으로 보아 역시 2차압축이 발생하였음을 알 수 있을 것이다.

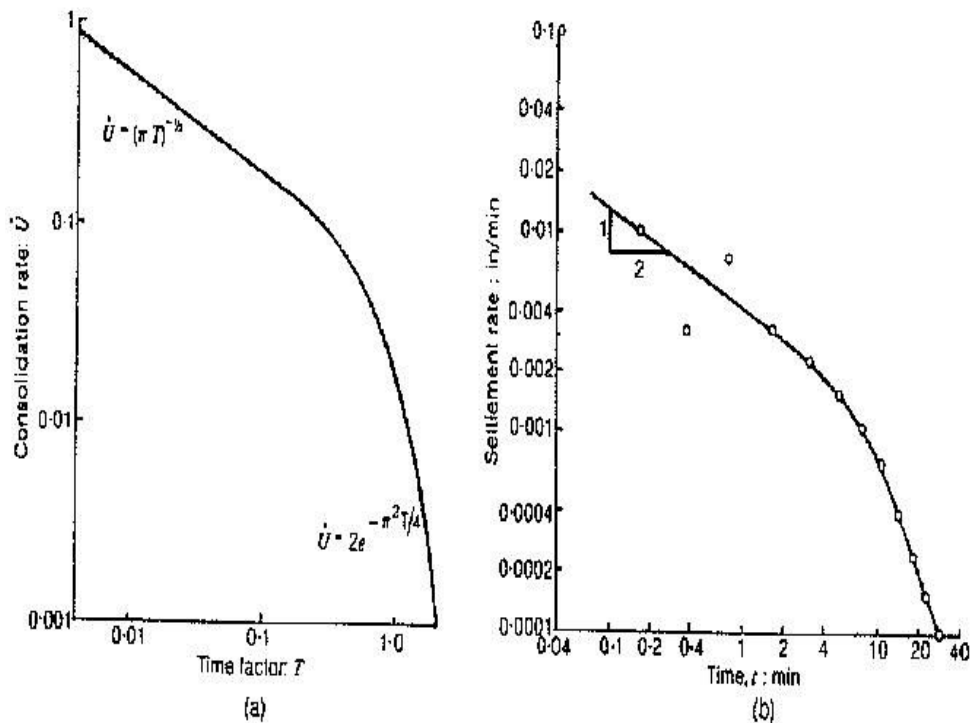


그림. 3-17 (a) Terzaghi의 압밀속도, (b) Oedometer시험 결과의 압밀속도

때때로 평방근 침하량 관계 그래프에서  $t_{90}$ 법을 적용할 경우 곡선의 모양이 다소 불규칙하여 혼동을 하기도 한다. 속도 관계 그래프상의 선형 구간에서 위와 같은 곡선의 불규칙은 속도선과 평행한 불연속으로 나타남을 명백하게 관찰할 수 있다. 이는 압밀계수의 변화로 인한 결과이지만, 변위의 방향을 알 수 없기 때문에 항상 그렇다는 것은 아니다. 이와 같은 경우, 압밀계수 산정에 있어서 선형 거동에서 비선형 거동까지의 변화 양상에 초점을 두어야 한다.

결론적으로 속도법은 기하학적 동일성을 갖는 두 곡선을 적합화 시키는 방법이라 할 수 있다. 전통적인 해석법의 복잡성은 부적절한 실험결과 때문이며, 작도법을 이용해야 한다는 것은 두 개의 곡선을 비교하고자 하는

부적합한 과정 때문이다. 속도법을 이용할 경우 위와 같은 오차는 소거될 것이며, 속도법을 이용하여 산정한 압밀계수의 값은 더욱 근본적인 값으로 인정받을 수 있을 것이라 판단된다.

## 제 4 장 SHANSEP Method

SHANSEP은 Stress History And Normalised Soil Engineering Properties의 축약형으로 정규화된 거동을 보이는 점토에 사용하고자 하는 설계 방법을 제공한다. 개념은 통상적인 시험으로 가능한 조건보다도 원위치 조건에 더 유사한 조건을 재현할 수 있도록 하는 실내 시험법에 근거한 것이다. 흙의 이전 응력이력을 일관성 있게 고려하고 있으며, 특히 과압밀조건에서는 더욱더 그러하다. 또한 응력경로를 사용하여 적용응력의 결과와 그 영향을 설명할 수 있다.

SHANSEP은 연약점토의 안정해석을 위한 접근법으로 MIT에서 개발되었으며, Ladd and Foott(1974)에 의해 처음으로 소개되었으며 SHANSEP법의 장점은 아래와 같다.

- (1) 점토의 거동에 대한 현재의 이해도를 더 적절히 활용함으로써 훨씬 더 현실적인 설계 파라미터를 평가할 수 있게끔 해준다.
- (2) 설계 해석에 사용할 경우 적용된 응력에서는 현실적인 응력-변위 특성을 파악할 수 있다.
- (3) 깊이에 따른 응력이력과 강도 변화간의 상관관계를 이용하여 분명한 토질 특성도를 작성할 수 있다.
- (4) 상대적으로 오차를 포함하고 있는 전통적인 설계법으로 예측 것 보다 더 현실적인 안정해석결과를 제공한다.
- (5) 수많은 유형의 점토 퇴적층 상의 성토 또는 기초 재하에 대하여 잘 검증되어 있다.
- (6) 시험 결과에 시료교란이 미치는 영향이 본질적으로 극복되었다.
- (7) 규칙적인 경향을 따르는 정규화된 특성을 확인하기 위해서 수행되어야 할 유효응력 시험의 수가 상대적으로 적다.
- (8) 정규화된 거동을 고려하기 위해서 세웠던 가정을 실내시험으로 확인할 수 있으며, 또 다른 가정 사항이 설계에 미치는 영향을 평가할 수

있다.

- (9) 전통적인 방법으로부터 얻을 수 있는 데이터 보다 훨씬 많은 데이터를 제공하지만 추가 비용은 들지 않는다. 또한, 제공된 데이터는 비배수 전단강도 Profile과 더불어 또 다른 정보까지도 제공하게 된다.
- (10) 현장 조건의 변화에 따른 비배수 전단강도를 예측할 수 있다.

위와는 달리 SHANSEP법의 단점과 한계는 다음과 같다.

- (1) 균일한 점토 퇴적토에 대해서만 적용할 수 있으며, 불균일한 퇴적토에 대해서는 부적절하다.
- (2) 전적으로 응력이력과 이전 최대 유효압밀응력  $\sigma_{vm}$  '의 평가에 대한 지식에 의존하게 된다.
- (3) 필요한 실내시험법이 기존의 통상적인 시험법보다 훨씬 더 복잡하다.
- (4) 통상적인 시험에서 일반적으로 사용되는 응력보다 훨씬 더 큰 응력으로 시료를 압밀 시켜야한다.
- (5) 모든 흙에 대하여 적용 가능한 것은 아니다. 특히 변형으로 인하여 그 구조가 바뀌어 버리는 흙의 경우는 적용할 수 없다.
- (6) 도출된 비배수 전단강도는, 비록 전통적인 시험으로부터 얻을 수 있는 것보다 더 현실적이기는 하지만, 전통적인 경험법에 적용할 수 없다. 아직까지 다른 방법과 만족할 만한 비교 분석이 이루어지지 않았다.

#### 4.1 흙의 정규화거동

전단강도와 같은 토질 파라미터는 동일한 단위의 어떤 또 다른 값에 대한 비로 표현하여 무차원화 시킬 수 있는데, 이를 정규화(normalization)라 한다. 예를 들면  $c_u/\sigma_v$  '가 있다.

또 다른 예를 들자면 균일한 퇴적토로부터 채취한 유사한 시료에 대한 일련의 유효응력 강도 삼축시험이 있다. 3개의 서로 다른 유효 구속압까지 압밀시킨 후 수행된 시험에 대한 응력-변형률 곡선은 아래의 그림.

4.1(a)에 제시된 형태를 갖는다. 만약 이와 같은 곡선들을  $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_c'$  으로 재도시 한다면 그림. 4.1(b)와 같이 3개의 곡선은 실제로 하나의 곡선으로 나타날 수 있다. 이것이 정규화이며, 이는 동일한 흙에 대한 동일한 종류의 시험에서의 또 다른 조건에 대한 응력-변형 거동을 나타내기 위하여 사용될 수 있다.

실제로 정규화된 파라미터 중에는 산만한 것도 있다. 그러나 만약 이들이 10% 내에 존재한다면, 그 관계는 만족할 만한 것으로 간주한다.

(a) 응력-변형률 곡선

(b) 정규화된 곡선

그림. 4.1 동일한 시료에 대한 응력-변형 관계

하나의 흙에 있어서, 하나의 과압밀비에 대하여 정규화된 파라미터가 일정한 값을 가지는 경향이 있을 때 정규화된 거동을 적용한다.



SHANSEP법에 있어서 점성토의 비배수 전단강도( $c_u$ )가 원위치 유효  
연직응력으로 정규화 된다. 즉,  $c_u/\sigma_{v0}$  '이 사용된다. 이는 흙의 과압밀비  
(OCR)와 비교해 볼 수 있다.

하나의 흙에 대하여, 동일한 OCR을 가지고 있지만, 서로 다른 압밀응  
력을 가진 시료의 경우 이와 같은 방법으로 정규화 되었을 때 매우 유사  
한 강도와 응력-변형 거동을 보인다. 이는 이 시료를 과압밀비에 대하여  
도시하였을 때 정규화된 전단강도가 산출되도록 하기 때문에 임의 OCR  
에 대하여 정규화된 강도 파라미터가 얻어질 수 있으며, 해석에 사용하기  
위한 강도/변형 특성을 파악할 수 있다.

점토가 다를 경우 서로 다른 관계를 보이며, 그 형태를 제시하면 그림.  
4.2와 같다. 수평축은 로그 스케일로 플롯하며, 둘 다 무차원 수이다.

그림. 4.2 OCR과 정규화된 전단강도의 관계

정규화된 토질 파라미터(NSP)의 개념은 흙의 정규화된 거동을 관찰하르로서 직접적으로 유도한 것이다. 정규화된 거동을 보이는 흙의 경우, 다양한 OCR 값으로 실내 시험을 수행할 수 있으며, 각 OCR에 대한 정규화된 곡선을 작성할 수 있다. 그런 다음 각각에 대한 NSP는 이와 같은 곡선들로부터 얻을 수 있으며, 광범위한 원위치 응력조건에 적용할 수 있다.

가장 일반적으로 사용된 NSP와 안정해석에 이용되는 것이 바로  $s_u / \overline{\sigma_{v0}}$ 이다. 여기서,  $\overline{\sigma_{v0}}$ 는 원위치 유효연직응력이다. 이 값은  $c/p$ 비와 동일한 값이다. 이것이 실내 시험에서  $s_u / \overline{\sigma_{vc}}$ 로 모델화 된 것이다. 그림. 4.3은 5개의 점성토에 대하여 수행된  $\overline{CK_0UDSS}$  시험으로부터 얻은 OCR에 따른  $s_u / \overline{\sigma_{vc}}$ 의 변화를 제시한 것이다(측정된 데이터 점은 거의 항상 평균 곡선의 5% ~ 10%내로 플롯되었으며, 전단변형속도는 5%/hr이다.). 그림에 제시한 바와 같이 OCR 증가에 따른 경향이 모든 흙에 대하여 유사하게 나타남을 알 수 있었다. 본 실험에서 수행된 5개의 점토에 대한 지수 시험결과가 상당히 광범위한 것으로 보아 또 다른 지수를 가지는 점토에 대하여도 위와 유사한 경향이 나타날 것으로 예상된다. 이와 동일한 경향이 또 다른 유형의 전단시험에서도 관찰되었지만,  $s_u / \overline{\sigma_{vc}}$ 의 값은 흙의 강도 이방성 때문에 변화하는 것으로 나타났다. 토질역학에서 사용되는 또 다른 NSP 값은  $E_u/s_u$ ,  $K_0$  그리고 간극수압 파라미터 등이 있다.

그림. 4.3 OCR에 따른 정규화된  $\overline{CK_0U}$  DSS 강도 파라미터의 변화

재성형된 점토를 사용한 영국 런던의 Imperial College에서 수행한 연구와 MIT와 Cambridge 등에서 실시한 광범위한 점토들에 대한 연구 등에서, 동일한 OCR을 적용시키되 압밀 응력은 다르게 적용시킨, 즉 선행압밀응력( $\sigma_{vm}$ )을 다르게 적용시킨 점토시료에 대한 실내 시험 결과들은 압밀 응력으로 정규화 시켰을 때 강도와 응력-변형률 특성이 매우 유사하게 나타났다. 이러한 사실은 그림. 4.4를 통해서도 알 수 있는데, 이는

200kN/m<sup>2</sup>, 400kN/m<sup>2</sup>의 압밀하중( $\sigma_c$ )으로 정규압밀된 점토에 대한 등방 압밀 삼축압축시험의 이상화된 응력-변형률 곡선을 보여준다.

$(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_c$ 로 다시 곡선을 그리면 두 개의 곡선은 동일한 선으로 나타난다. 이 정규화된 플롯은 동일한 시험으로 전단될 때 서로 다른 압밀 응력으로 정규압밀된 다른 시료들의 거동을 알아보는데 사용될 수 있다. 비슷한 정규화 거동이 실내시험을 통해 얻어진 간극수압 데이터에서도 보여진다.

실제 실험에 있어서, 정규화된 거동은 그림. 3-5와 완벽하게 일치하지 않고, 서로 다른 압밀응력에 대해 얻어진 정규화 그래프와는 다소 차이를 보이며 지반의 비균질성에 기인하여서도 차이를 보인다. 또한 한 번의 실험과 다른 실험과의 실험 과정에서 발생하는 필연적인 미세한 차이 때문에도 이 차이는 발생한다. 그림. 4.5는 정규압밀된 해성 유기질 점토에 대한 세 번의  $CK_0U$  직접전단 시험을 통해서, 이러한 차이가 자연함수비와 압밀 응력의 차이와 관련된 것이라는 사실을 보여준다.

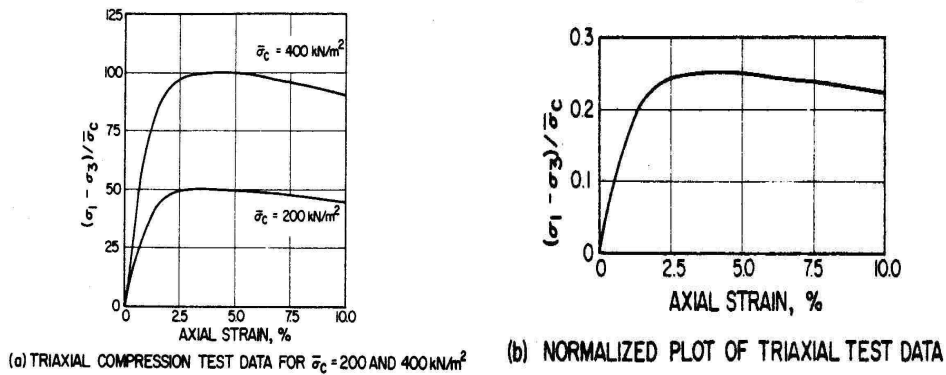


그림. 4.4 균질한 점토의 정규화 거동

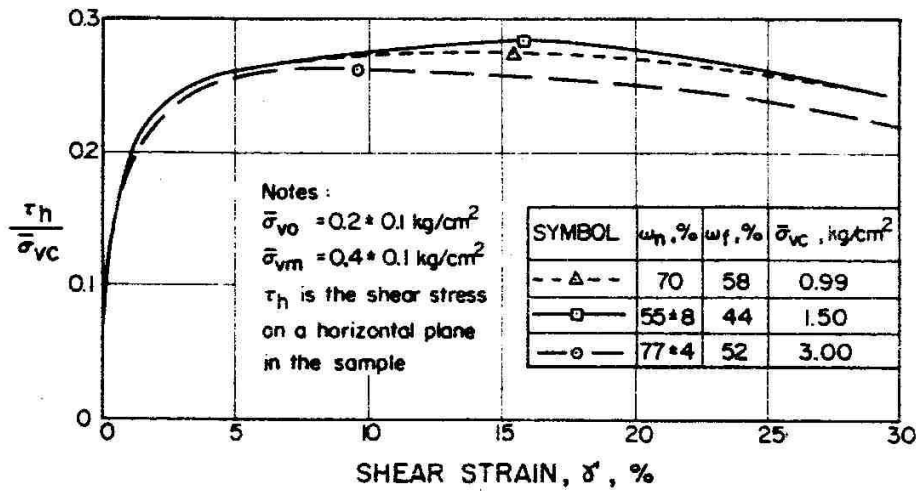


그림. 4.5 단순전단시험으로부터 평가된 해성 유기질 점토의 정규화 거동(정규압밀점토)

그림. 4.6은 4명의 연구자들에 의해 구해진 과압밀된 Boston Blue Clay의 정규화된 응력-변형률 및 강도 데이터를 보여준다. 결과에 보여지는 실측값들의 차이는 실험 과정에서 발생한 오차이다.

MIT에서는 데이터를 플롯하는 방법으로 정규화 방법을 널리 사용해왔다. 점성토에서 얻어진 수많은 특성들에 대한 데이터의 정규화 플롯은 그림. 4.4 또는 그림. 4.5와 거의 비슷하거나 차이가 적었다. 이러한 차이는 매우 작으며, 한 예로 정규화된 강도는 평균에서 10% 미만의 차이만을 보였다. 그러므로 실험적인 목적에 있어서 정규화된 거동은 점성토에 광범위하게 적용시켜 사용할 수 있다.

그러나 구조적 결함이 큰 자연 고결된 점토나 Quick Clay 등에 대한 실험에 있어서는 정규화 거동을 보이지 않을 것이다. 이는 높은 압밀응력 하에서 흙의 구조가 현저하게 바뀌기 때문이다.

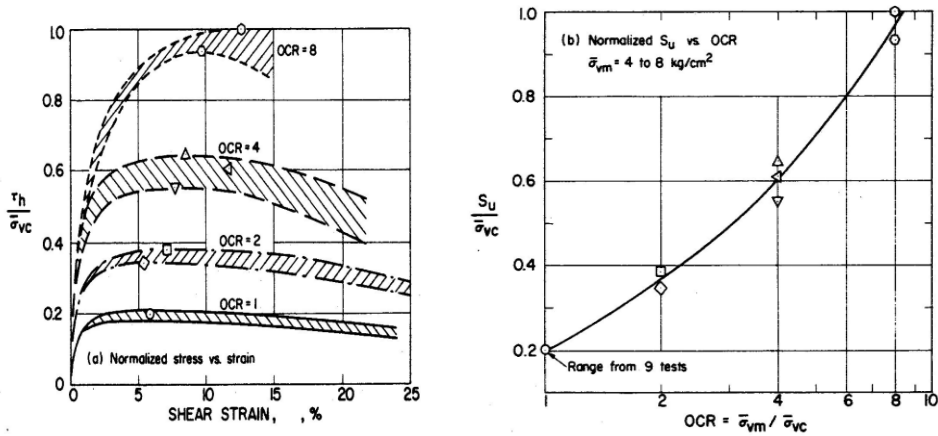


그림. 4.6  $\overline{CK_0U}$  직접전단시험으로부터 평가된 Boston Blue Clay의 정규화 거동(과압밀점토)

## 4.2 SHANSEP법의 원리

SHANSEP법은 과압밀비의 결정으로부터 시작한다.

$$OCR = \frac{\sigma_{vm}'}{\sigma_{v0}'} \quad (4-1)$$

여기서,  $\sigma_{vm}'$ 은 점토가 퇴적된 이후에 경험했던 최대 유효연직응력이다. 그리고  $\sigma_{v0}'$ 은 현재의 원위치 유효응력이다.

이하에는 SHANSEP법을 순서대로 간략하게 설명하였다. 하나의 시료에 대한 전형적인 응력경로는 그림. 4.7과 같다.

- (1)  $\sigma_{vm}'$ 을 결정하기 위해서 표준압밀시험을 수행한다. 다행히도 표준압밀시험에서 결정된  $\sigma_{vm}'$ 은 삼축압축시험으로부터 결정된 전단강도처럼 시료의 교란에 덜 민감하다.  $\sigma_{vm}'$ 의 값은 샘플링 후 유효응력 또는 함수비보다는 흙 골격의 구조 또는 이력에 주로 의존한다.

- (2) 원위치  $\sigma_{vm}'$ 에 대하여 1.5, 2.5 및 4배에 해당하는 유효연직응력까지  $K_0$ 조건하에서 삼축시료를 압밀시킨다. 이 상태가 그림. 4.7의 점 P이다.
- (3) 과압밀 조건을 구현하기 위해서 시료를 유효연직응력  $\sigma_{vc}'$ 까지 팽창(응력경로 PQ)시킨다. 따라서 시료는 과압밀 조건이 된다. 이로부터 식 (4-2)를 유도할 수 있다.

$$\sigma_{vc}' = \frac{n \cdot \sigma_{vm}'}{OCR} \quad (4-2)$$

여기서,  $n=1.5$  또는  $2.5$  또는  $4$ 이다.

- (4) 비배수 삼축압축시험을 수행한다(응력경로 QR).
- (5) 위의 단계 2, 3 그리고 4를 반복하여 각각의 OCR값에 대한  $c_u/\sigma_{vc}'$ 을 구한다.

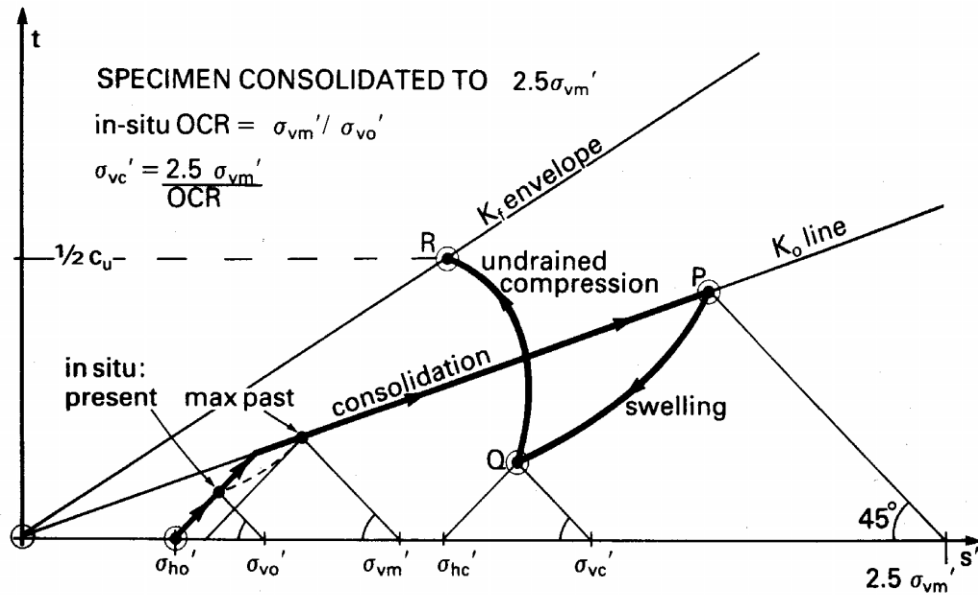


그림. 4.7 SHANSEP법에서의 일반적인 응력경로

### 4.3 수정 SHANSEP법

SHANSEP법은  $K_0$ 압밀과 팽창을 필요로 한다. 이는 통상적인 상업적 시험에서는 편리하지 않다. 등방압밀과 팽창이 사용될 수 있는 그리고 파라미터가 통상적인 삼축압축 시험으로부터 결정될 수 있는 수정법이 Coatsworth(1984)에 의해 제안되었다. 이 방법은 압밀 비배수 삼축시험에 대한 합리적인 근거를 제공하고 있다. 이하에 이를 설명하기로 한다.

이방압밀이 수행되지 않았을 때, 문제는 시료가 이방 압밀된 현장 조건과 동일한 함수비를 갖도록 하는 등방압밀압력( $p_c$ )를 결정하는데 있다. 통상적으로 채택하는 방법은 유효상재압, 산정된 평균 유효응력, 또는 유효상재압의 절반을 적용하는 것이다. 때때로 100, 200, 300kPa과 같은 임의의 구속압이 현장응력과 관계없이 3세트로 지정된다. 이와 같은 방법은 이방압밀 대신 등방압밀의 사용 및 이와 같은 적절한 응력까지의 압밀로 인하여 소거되지 않은 시료교란의 영향을 보상하기 위한 경험적인 시도이다. Coatsworth에 의해 설명된 방법에 있어서 등방압밀 방법의 세트는 이전의 최대 연직응력  $\sigma_{vm}'$ 과 관련이 있다.

이 방법은 Ladd(1974)의 SHANSEP법보다 더 근사적인 방법으로, 방법이 더 단순하기 때문에 상업적인 수행에 있어서 사용하기에는 더욱더 그럴 듯하다. 이하에 제시된 과정은 Coatsworth(1984)에 의해 제시된 과정이다.

- (1) 채취 깊이를 아는 시료에 대한 밀도 및 상부층의 두께를 알아내어 원위치 유효연직응력을 산정한다.
- (2) 과거 최대 유효연직응력을 결정하기 위해서 표준압밀시험을 수행하고 원위치 과압밀비,  $R_0(\sigma_{vm}'/\sigma_{v0}')$ 를 계산하든지, 정규압밀된 것을 고려한 현장조건에 대하여  $R_0=1$ 을 가정하라.
- (3) 현장 조건이 1의 과압밀비( $R_0>1$ )를 가질지라도 아래와 같이 정규압밀된 상태로 흙의 강도특성을 결정하라. 적어도 하나의 삼축시료에



대하여  $\sigma_{vm}'$ 에 1.5, 2.5 및 4배와 유사한 등방유효압력,  $p_c'$ 까지 압밀을 수행하라(그림. 4.8(a)). 압밀된 시료에 대하여 1%변형률에서 95%의 간극수압 균등화를 이룰 수 있는 충분히 느린 속도의 일정 변형률 속도로 간극수압을 측정하면서 비배수 압축시험을 수행하라.  $p_c'/\sigma_{vm}'$ 과  $c_u/p_c'$ 의 관계곡선을 그림. 4.8(b)와 같이 작도하라. 정규화된 거동을 보이는 흙은  $p_c'/\sigma_{vm}'$ 이 증가함에 따라  $c_u/p_c'$ 가 일정한 값, 정규화된 정규압밀 전단강도,  $G_{Inc}$ 를 향하는 경향을 보인다. 만약 정규화된 거동이 명백하지 않다면, 압밀압력이 시료를 정규압밀 시키기에 불충분했음을 의미하는 것이거나 또는 이 방법이 그 흙에 대해 적용 불가능한 것임을 의미할 수 있다.

- (4) 간극수압 측정치로부터  $\phi'$ 을 결정하고 정규압밀된 정지토압계수를 산정하라.

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (4-3)$$

- (5) 정규압밀 조건에 도달한 시료의 경우, 즉 가장 높은 압력까지 압밀된 두 개의 시료, MIT 응력장(그림. 4.8)에서 유효응력경로 PQR을 플롯하고 수평선에서 각  $\theta_K$  만큼 기울어진  $K_0$ 선을 작도하라. 여기서  $\tan \theta_K = (1 - K_0)/(1 + K_0)$ 이다.  $K_0$ 선은 Q에서 유효응력경로와 만나게 되는데 여기서 주응력은  $\sigma_{vc}'$  및  $\sigma_{hc}'$ 이다. 이론에 따르면 이들은 등방압밀된 시료와 동일한 비배수 강도를 가지게 하기 위해서 시료가 측방 변형이 없는 조건에서 압밀되어야 했던 응력이다. 등방압밀의 경우에 대한 보정계수,  $f_c$ 를 아래의 식 (4-4)로 결정하라.

$$f_c = \frac{p_c}{\sigma_{vc}'} \quad (4-4)$$

이와 같은 도해법 대신,  $f_c$ 는 아래의 식을 이용하여  $K_0$ 와 Skempton의 간극수압계수,  $A_0$ 로부터 계산할 수 있다.

$$f_c = K_0 + A_0(1 - K_0) \quad (4-5)$$

다양한 범위의  $A_0$ 와  $K_0$ 에 대한  $f_c$ 의 값이 표 3-1에 제시되어 있다. 여기서  $A_0$ 는  $K_0$ 의 함수이다.

(6) 흙이 정규압밀 되었는지 또는 과압밀 되었는지에 의존하는 원위치 비배수 전단강도를 아래와 같이 결정하라.

(7) 정규압밀된 흙

측방변형이 없는 조건하에서 압밀된 흙에 대한 정규화된 비배수 전단강도  $G_{Knc}$ 는 아래와 같다.

$$G_{Knc} = f_c G_{Inc} \quad (4-6)$$

그러므로 원위치 비배수 강도는 아래와 같다.

$$c_u = f_c G_{Inc} \sigma_{v0}' \quad (4-7)$$

(8) 과압밀된 흙

실내시험과 현장 OCR간에 반드시 정교한 일치를 필요로하는 것은 아니다. 왜냐하면 강도시험의 목적은 OCR에 따른 정규화된 강도의 변화를 결정하는 것이기 때문이다. 그러므로 이는 일반적으로 표준압밀시험의 결과를 이용하기에 앞서 보통의 강도시험으로도 가능하다. 일련의 삼축시험을 원위치  $\sigma_{vm}'$ 의 1.5, 2.5 및 4배와 유사한 등방유효응력,  $p_c'$ 까지 등방압밀 시켜라. 그런 다음 응력  $p_s'$ 하에서 등방

팽창시켜라. 그 결과 등방 과압밀비,  $R_I$ 는  $p_c'/p_s'$ 이 되며, 또한 이 방 압밀비 즉, 원위치  $R_0$  값인,  $R_K$ 와 근사적으로 동일한 값이 된다. 비배수 삼축시험을 수행하여  $p_s'/\sigma_{v0}'$ 과  $c_u'/p_s'$ 을 플롯하라. 정규화된 거동을 보이는 흙은  $p_s'/\sigma_{v0}'$ 이 증가함에 따라 정규화된 강도, 즉 일정한  $G_I$  값을 향하는 경향이 있다. 요구되는 여러 과압밀비  $R_I$ 의 범위에 대한  $G_I$ 를 결정하기 위해서 위의 과정을 반복하라. 양대수 상에  $R_I$ 에 대한  $G_I$ 를 플롯하라( $R_I=1$ 인  $G_{Inc}$ 를 포함).

- (9) 단순한 제하(unloading)에 따른 정지토압계수,  $K_{0u}$ 와 이방압밀비,  $R_K$ 의 관계로부터  $K_{0u}$ 를 계산하라. 만약 목적이 현재의 원위치 강도를 찾는 것이라면,  $K_{0u}$ 는 원위치 측정치로부터 결정될 수 있다. Mayne and Kulhawy의 제안식으로부터

$$K_{0u} = (1 - \sin \phi') R_K^{\sin \phi'} \quad (4-8)$$

- (10) 아래의 식으로부터 등방팽창을 고려한 보정계수,  $f_s$ 를 계산하라.

$$f_s = \frac{1}{3} (1 + 2K_{0u}) \quad (4-9)$$

식(4-8)과 (4-9)로부터 계산된  $f_s$ 의 값을 표 4-1에 제시하였다.

- (11) 요구되는  $R_K$  값에 대하여, 등가 등방 과압밀비,  $R_I$ 를 아래의 식으로부터 결정하여라.

$$R_I = R_K \left( \frac{f_c}{f_s} \right) \quad (4-10)$$

$R_I$ 값에 대한 정규화된 전단강도  $G_I$ 를 결정하라(단계 8에서 유도된 양대수 그래프 이용).

- (12) 과압밀비,  $R_K$ 에 대한 측방변형이 없는 압밀/팽창에 대한 정규화된 전단강도를 아래의 식으로부터 결정하여라.

$$G_K = f_s G_I \quad (4-11)$$

- (13) 마지막으로 산정된 원위치 강도는 아래와 같다.

$$c_u = G_K \sigma_{v0}' \quad (4-12)$$

- (14) 지층에 대한 여러 깊이에 대하여 즉, 서로 다른 OCR에 대하여 위의 단계 9에서 13을 반복한다.

표 4.1.  $A_0$ 와  $K_0$ 에 대한 전형적인  $f_c$ 의 값

| $\phi'$ | $K_0$ | $A_0$ |      |      |      |
|---------|-------|-------|------|------|------|
|         |       | 0.5   | 0.6  | 0.7  | 0.8  |
| 20°     | 0.66  | 0.83  | 0.86 | 0.90 | 0.93 |
| 25°     | 0.58  | 0.79  | 0.83 | 0.87 | 0.92 |
| 30°     | 0.50  | 0.75  | 0.80 | 0.85 | 0.90 |
| 35°     | 0.43  | 0.71  | 0.77 | 0.83 | 0.89 |

표 4.2.  $R_K$ 와  $\phi'$ 에 대한 전형적인  $f_s$ 의 값

| $\phi'$ | $R_K$ |      |      |      |
|---------|-------|------|------|------|
|         | 1.5   | 2.0  | 4.0  | 8.0  |
| 20°     | 0.84  | 0.89 | 1.04 | 1.23 |
| 25°     | 0.79  | 0.85 | 1.02 | 1.26 |
| 30°     | 0.74  | 0.80 | 1.00 | 1.28 |
| 35°     | 0.69  | 0.76 | 0.96 | 1.27 |

그림. 4.8 수정 SHANSEP법 : (a) 응력경로, (b) 정규화된 정규압밀 전단강도

여기서  $\sigma_{v0}'$  : 원위치 유효연직응력

$\sigma_{vm}'$  : 현장에서의 과거 최대 유효연직응력

$\sigma_{vc}'$  : 이방 압밀후 유효연직응력

$\sigma_{hc}'$  : 이방 압밀후 수평응력

$p_c'$  : 등방 압밀압력

$p_s'$  : 등방 팽창응력

$G_I$  : 등방 팽창 후 수행된 CU삼축시험으로부터 결정된 정규화된  
전단강도,  $c_u/p_s'$

$G_{Inc}$  : CU삼축시험으로부터 결정된 정규화된 전단강도,  $c_u/p_c'$

- $G_K$  :  $K_0$  압밀 및 팽창후 수행된 CU삼축시험으로부터 결정된 정규화된 전단강도,  $c_u/\sigma_{vs}'$
- $G_{Knc}$  :  $K_0$  압밀후 수행된 CU삼축시험으로부터 결정된 정규화된 전단강도,  $c_u/\sigma_{vc}'$
- $R_0$  : 원위치 과압밀비
- $R_I$  : 등방 압밀 및 팽창에 대한 OCR
- $R_K$  : 1차원 압밀 및 팽창에 대한 OCR
- $A_0$  : 등방상태에서부터  $K_0$  상태에 이른 간극수압계수  $A$
- $K_{ou}$  : Unloading 후 정지토압계수
- $f_c$  : 등방압밀을 고려한 보정계수
- $f_s$  : 등방팽창을 고려한 보정계수

#### 4.4 시험방법

일반적으로 토목 구조물의 설계, 시공 및 안정해석에서 가장 중요한 문제중의 하나는 적절한 전단강도 정수를 산정하는 것이다. 통상적으로 삼축압축 시험은 등방압밀 상태에서 실시하나 실제 지반은 정지토압 상태이고 또한 하중이 작용할 때 여러 가지 형태의 응력경로를 따라서 전단파괴가 발생한다. 따라서 흙-구조물의 거동을 예측하기 위해서는 정지토압계수( $K_0$ )를 정확히 산정해야 할 필요가 있다.

정지토압계수( $K_0$ )는 수평변위가 없을 때 지반 내의 연직응력에 대한 수평응력의 비로 정의된다. 지반의 거동을 정확히 예측하기 위해서는 지반의 정확한 전단강도정수 산정을 위해서 정지토압상태를 재현해야 할 필요가 있다.

$CK_0U$  시험은 자동화 삼축시험기를 이용하여 수행한다.  $K_0$  압밀은 시료의 수평방향 변위가 발생하지 않도록, 즉  $\sigma_1/\sigma_3 = K_0$ 의 응력 상태를

유지하며 수행되어야 한다. 이를 위해서는 변형률 제어로 인해 발생하는  $\sigma_1$ 의 변화에 따라 발생할 것으로 예상되는 수평변위가 발생하지 않도록  $\sigma_3$ 를 계속해서 변화시켜야 할 필요가 있다. 자동화 삼축시험기는 이러한 변화를 자동으로 제어해 주는 시험기이다.

$K_0$  압밀시 공시체의 변형이 항상  $\pm 0.05\%$  이하가 되게 제어하면서 소정의 압밀응력까지 압밀을 시킨다. 압밀 종료 시점에서의 축방향응력과 측방향응력을 측정하여  $K_0$  값을 구할 수 있다. 원하는 압밀응력까지  $K_0$ 상태로 압밀된 시료는 비배수 및 배수조건에 따라 전단을 실시하게 된다. 압축시험일 경우, 구속압은 일정하게 유지하는 상태에서 축하중만을 증가시키는 방법이지만, 다른 여타의 방법들이 이용될 수도 있다. 표 4.3과 그림. 4.9는 4가지 형태의 서로 다른 시험을 제시하고 있으며, 각각은 비배수일 경우와 배수일 경우 모두 이용 가능하다.

표 4.3.  $\overline{CK_0U}$ 에서의 응력경로

| Drained stress path | Type of loading                                                                                                                                                   | Change in       |                   |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------|
|                     |                                                                                                                                                                   | Vertical stress | Horizontal stress |
| AB<br>(압축)          | 연직압축시험 - 축방향 응력의 증가<br>$\Delta \sigma_3 = 0, \Delta \sigma_1 > 0$ ; $\frac{\Delta s}{\Delta p} = \frac{\Delta \sigma_1}{\frac{\Delta \sigma_1}{3}} = 3$           | 증가              | 일정                |
| AD<br>(인장)          | 연직인장시험 - 축방향 응력의 감소<br>$\Delta \sigma_3 = 0, \Delta \sigma_1 < 0$ ; $\frac{\Delta s}{\Delta p} = \frac{-\Delta \sigma_1}{-\frac{\Delta \sigma_1}{3}} = 3$         | 감소              | 일정                |
| AC<br>(압축)          | 구속압의 감소를 통한 압축시험<br>$\Delta \sigma_1 = 0, \Delta \sigma_3 < 0$ ; $\frac{\Delta s}{\Delta p} = \frac{\Delta \sigma_3}{-\frac{2\Delta \sigma_3}{3}} = -\frac{3}{2}$ | 일정              | 감소                |
| AE<br>(인장)          | 구속압의 증가를 통한 인장시험<br>$\Delta \sigma_1 = 0, \Delta \sigma_3 > 0$ ; $\frac{\Delta s}{\Delta p} = \frac{-\Delta \sigma_3}{\frac{2\Delta \sigma_3}{3}} = -\frac{3}{2}$ | 일정              | 증가                |

그림. 4.9 압축 및 인장시험의 응력경로



## 제 5 장 실내시험에 의한 이방성 평가 및 SHANSEP Method에 의한 전단강도 분석

### 5.1 실험개요

인천청라지구 경제자유구역 개발사업 5공구 단지조성 현장에서 채취된 불교란 점성토 시료를 대상으로 흙의 압밀이방성, 강도증가율을 산정하기 위해 각종 실내시험을 수행하였다. 수행된 시험은 흙의 기본물성시험, 표준압밀시험(수직/수평),  $CK_0UC$ 시험,  $CIUC$ 시험을 실시하여 합리적이고 경제적인 설계를 하고자 하였다.

본 과업에서 사용한 시료는 인천청라지구 경제자유구역 개발사업 5공구 단지조성 현장에서 채취하였는데 이 지역에 분포하는 지질은 선캠브리아기의 변성암류로 본 기반암 상부에 부정합으로 피복되어 있는 제4기 충적층(alluvium) 및 매립층으로 구성되어 있다. 제4기 충적층은 해성퇴적층으로 주로 점토와 실트로 구성되어 있고 해성퇴적층은 연경도가 연약에서 매우건고까지 다양하며 과업대상구간의 점토층의 분포는 약 12.0m~20.8m 까지 분포하고 있다. 본 과업에 사용된 시료는 깊이 3.0~8.8m에서 채취된 불교란 시료이며 통일분류법상 ML, CL, CH 에 속하는 실트질점토 혹은 점토질실트이다. 분석에 사용된 시료현황 및 시험내용을 정리하면 표 5.1 과 같다.

표 5.1 분석에 사용된 시료현황 및 시험내용

| 공 번      | 채취심도(m) | 시험내용                                | 분석항목                |
|----------|---------|-------------------------------------|---------------------|
| NS-03    | 4.8~5.6 | 물성시험, 표준압밀시험(수직/수평),<br>$CK_0UC$ 시험 | 이방성분석,<br>SHANSEP분석 |
| NS-03-01 | 4.0~4.8 | 물성시험, 표준압밀시험(수직/수평)                 | 이방성분석               |
| NS-03-01 | 8.0~8.8 | 물성시험, 표준압밀시험(수직/수평),<br>$CIUC$ 시험   | 이방성분석,<br>응력경로분석    |
| NS-04    | 3.0~3.7 | 물성시험, 표준압밀시험(수직/수평)                 | 이방성분석               |
| NS-04    | 4.0~4.8 | 물성시험, 표준압밀시험(수직/수평)                 | 이방성분석               |
| NS-18    | 3.6~4.4 | 물성시험, 표준압밀시험(수직/수평)                 | 이방성분석               |

### 5.1.1 압밀시험

시료의 압밀이방성 평가, SHANSEP법에 의한 강도증가율을 산정하기 위해서 표준압밀시험(Oedometer test)을 실시하였다. 압밀시험은 시료를 수직 및 수평방향으로 성형하였고 시험하는 동안 포화를 위해 수침상태로 유지시키며 시료에 작용하는 하중은 매 24시간마다 2배로 증가시켜 가며 각 시간마다 다이얼게이지로 변형을 기록하였다. 시료는 직경 6cm, 높이 2cm 로 성형을 한 후 압밀상자에 넣고 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4, 12.8  $\text{kgf/cm}^2$  의 압력으로 재하(Load)하고 다시 3.2, 0.4  $\text{kgf/cm}^2$  의 압력으로 제하(Unload)하였다. 각각의 경우에 대하여 6, 9, 15, 30sec, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 30, 40min, 1, 2, 4, 8, 24hour의 간격으로 침하량을 측정하였다. 그림 5.1은 표준압밀시험의 진행과정을 나타내고 있다.



(a) 시험시료



(b) 압밀링에 시료거치과정 [1]



(c) 압밀링에 시료거치과정 [2]



(d) 압밀링에 시료거치과정 [3]



(e) 압밀링에 시료거치과정 [4]



(f) 압밀과정

그림 5.1 표준압밀시험 진행과정

### 5.1.2 삼축압축시험

SHANSEP 시험은 완전자동화 삼축시험기(fully automated triaxial testing system)를 사용하여 공시체 측면방향 변형율이 항상  $\pm 0.05\%$  이하가 되도록 제어하면서 소정의 압밀 응력까지  $K_0$  압밀을 실시하였다. ( $K_0$  압밀속도 0.5kPa/min, 팽창속도 (swelling velocity 0.15kPa/min) 시료의 포화를 위해 40kPa의 배압(back pressure)을 가했으며 B값이 0.95이상인 상태를 포화상태로 간주하였다.  $K_0$  압밀후 시료를 원하는 OCR에 해당하는 연직유효응력만큼 제하하여 팽창시켰다. 전단시 변형율 속도는 0.01%/min로 일정하게 하였으며 전단 중에는 축압축력, 축변위량 및 간극수압을 측정하였다. 그런 후 하중계의 값이 최대가 되고 나서 연속해서 축변형율이 3%이상 생길 때나, 비배수 압축과정 개시시 부터의 하중계의 값 증분이 최대치의 2/3정도로 감소하든가, 혹은 축변형율이 5%에 달하면 압축을 종료하였다. 본 과업에서 수행된 삼축압축시험은 다음과 같이 실시되었다.

#### 1) 시료의 준비

시료는 지름 5cm, 높이 10cm, 크기의 원통형으로 성형하였으며 측면배수와 포화를 위해 필터페이퍼를 사용하였다. 또한 실험기간이 길어짐에 따라 고무막을 통한 투수를 방지하기 위해 특수 Membrane을 사용하였다.

#### 2) 포화과정

시료안의 공기를 제거하기 위한 포화과정으로는 진공압을 이용하여 공기를 제거하는 방법과 배압포화(Back Pressure Saturation)방법을 병행하였다. 진공압 포화는 실험이 시작되기전 진공펌프(Vacuum pump)를 사용하여 30분이상 진공압을 가하였으며 배압포화는 압력의 증분값을 20kPa로 사용하여 각 증분 단계별 2시간 정도 소요하였다. 여기서 20kPa의 구속압은 등방압밀의 효과를 발생한 것으로 볼수있다. 포화의 정도를 나타내는 Skempton의 간극수압계수 B값이 0.95이상인 경우만 채택하였

다. 간극수압계수 B의 계산식은 식(3.1)과 같다.

$$B = \frac{\Delta u_c}{\Delta \sigma_3} \quad (5.1)$$

여기서, B : Skempton의 간극수압계수

$\Delta u_c$  : 구속압 상태의 간극수압

$\Delta \sigma_3$  : 구속압력

### 3) 압밀과정

#### ① 등방압밀

압밀은 표준압밀시험과 같은 다단계 재하의 방법을 적용하지 않고 일정한 속도로 하중을 증가시키며 배수를 허용하는 방법을 채택하였다. 이 방법은 압밀압에 따른 간극비 및 변형율을 연속적으로 얻을 수 있는 장점은 있지만 압밀압이 증가되는 도중에 과잉간극수압이 발생하지 않도록 충분히 압밀압 증분속도를 작게 유지시켜야 한다. 본 실험에서 압밀압의 증분속도는 0.5kPa/min 로 적용하였으며, 압밀시 과잉간극수압은 발생하지 않았다.

#### ② $K_0$ 압밀

$K_0$  압밀은 측방향 변위가 발생하지 않도록 연직압을 일정하게 증가시키면서 체적변형율과 축변형율이 같게 되도록 컴퓨터 시스템에 의해 구속압을 제어하였으며 압밀압의 증분속도는 등방압밀의 경우와 같이 적용하였다.  $K_0$  압밀은 삼축시험기의 특성상 초기에 불안정한 값을 나타내므로 연직압밀압이 30kPa 까지는  $K_0$  값을 0.83로 보고 비등방압밀을 실시한 후  $K_0$  압밀을 실시하였다. 압밀압은 선행압밀압력의 1.5배, 2.5배, 3.5배로 하였다.

#### 4) 전단과정

전단은 각각의 압밀압에 대해 비배수 압축시험을 실시하였으며 0.01%/min의 변형률 속도로 축차응력을 증가시키며 변형률 제어시험을 실시하였다. 그림 5.2 (a)와 그림5.2(b)는  $CIUC$  및  $CK_0UC$  삼축시험 진행과정을 나타낸다.



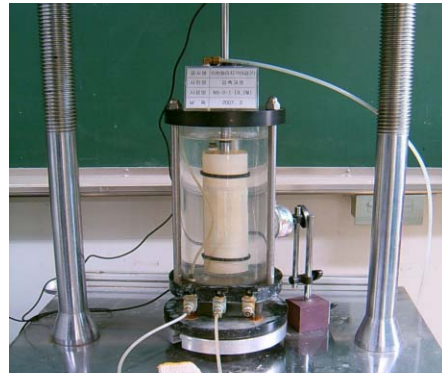
(a) 시험시료



(b) 시료포화과정



(c) 압밀과정



(d) 전단과정[1]

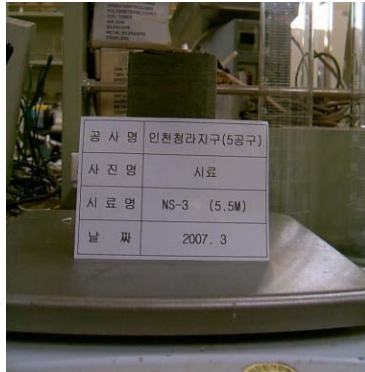


(e) 전단과정[2]



(f) 전단 후 파괴형상

그림 5.2 (a)삼축압축시험 진행과정(CIUC)



(a) 시험시료



(b) 시료거치과정



(c) 시료포화과정



(d) 시료압밀과정



(e) 전단과정



(f) 전단 후 파괴형상

그림 5.2 (b) 삼축압축시험 진행과정 ( $CK_0UC$ )



## 5.2 압밀시험결과 및 이방성평가

그림 5.3 ~ 그림 5.8은 본 과업에 적용된 불교란 시료의 표준압밀 시험 결과이다. 시험결과에서 보면 선행압밀압력은 수직방향인 경우 100kPa 에서 155kPa의 범위를, 수평인 경우 110kPa 에서 160kPa 의 범위를 보이고 있다. 이를 현재 받고 있는 유효상재압력과 비교하여 과압밀비(OCR)를 구하면 OCR은 1.57에서 4.08의 범위로 채취된 시료는 전체적으로 과압밀 되어 있는 것으로 나타난다. 한편 압축지수( $C_c$ )는 수직 방향인 경우  $C_c = 0.109 \sim 0.322$ , 수평 방향인 경우  $C_c = 0.116 \sim 0.329$ 의 범위를 보이며 팽창지수( $C_s$ )는 수직 방향인 경우  $C_s = 0.027 \sim 0.069$ , 수평 방향인 경우  $C_s = 0.024 \sim 0.063$ 의 범위를 보여 수직방향인 경우 압축지수( $C_c$ )가 팽창지수( $C_s$ )에 비해 약 3.7배내지 5.5배정도 크게 평가 되었고, 수평방향인 경우 압축지수( $C_c$ )가 팽창지수( $C_s$ )에 비해 약 2.8배내지 7.3배정도 크게 평가 되었다.

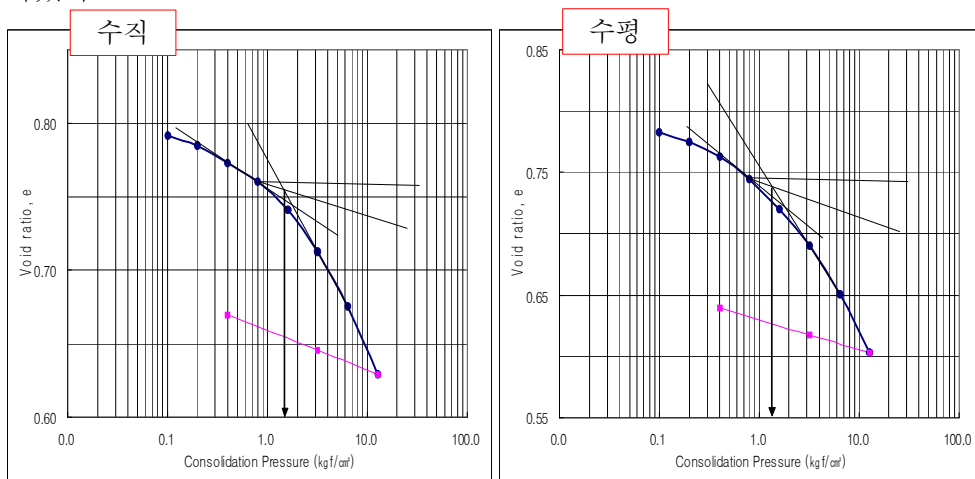


그림 5.3 압밀시험 결과 (NS-3, 심도 : G.L(-) : 4.8m ~ 5.6m)

| 시<br>험<br>결<br>과<br>요<br>약 | 구 분 | 선행압밀압력( $P_c$ )<br>(kPa) | 압축지수( $C_c$ ) | 팽창지수( $C_s$ ) |
|----------------------------|-----|--------------------------|---------------|---------------|
|                            | 수 직 | 155                      | 0.109         | 0.027         |
|                            | 수 평 | 130                      | 0.116         | 0.024         |

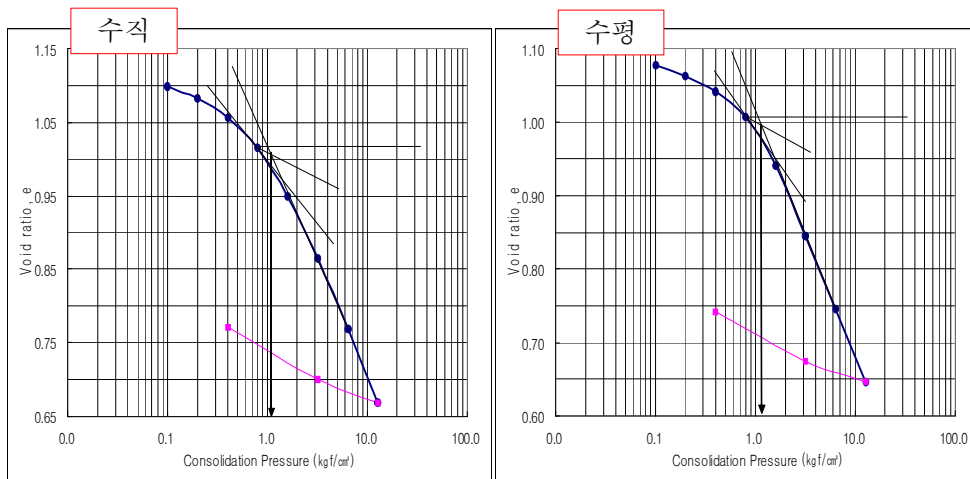


그림 5.4 압밀시험 결과 (NS-3-1, 심도 : G.L(-) : 4.0m ~ 4.8m)

| 시험<br>결과<br>요약 | 구분 | 선행압밀압력( $P_c$ )<br>(kPa) | 압축지수( $C_c$ ) | 팽창지수( $C_s$ ) |
|----------------|----|--------------------------|---------------|---------------|
|                | 수직 | 110                      | 0.322         | 0.069         |
|                | 수평 | 110                      | 0.329         | 0.063         |

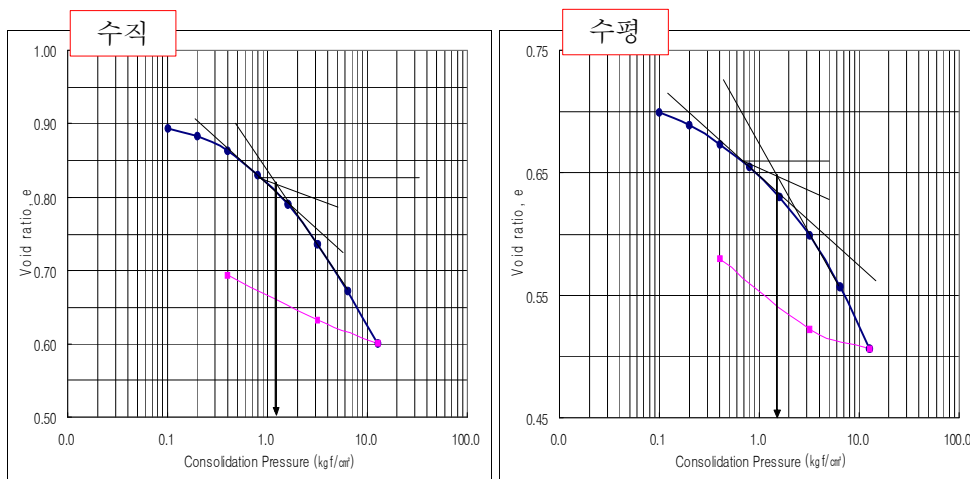


그림 5.5 압밀시험 결과 (NS-3-1, 심도 : G.L(-) : 8.0m ~ 8.8m)

| 시험<br>결과<br>요약 | 구분 | 선행압밀압력( $P_c$ )<br>(kPa) | 압축지수( $C_c$ ) | 팽창지수( $C_s$ ) |
|----------------|----|--------------------------|---------------|---------------|
|                | 수직 | 120                      | 0.226         | 0.062         |
|                | 수평 | 160                      | 0.139         | 0.049         |

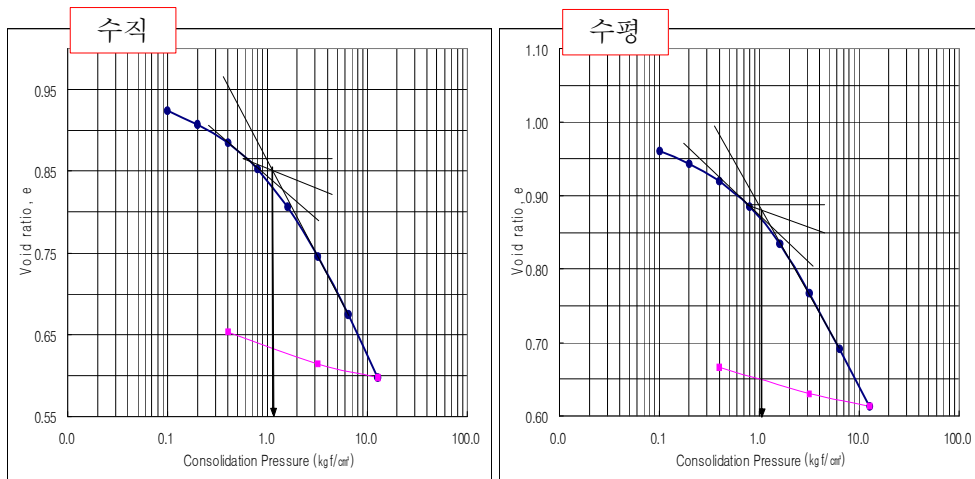


그림 5.6 압밀시험 결과 (NS-4, 심도 : G.L(-) : 3.0m ~ 3.7m)

| 시<br>험<br>결<br>과<br>요<br>약 | 구 분 | 선행압밀압력( $P_c$ )<br>(kPa) | 압축지수( $C_c$ ) | 팽창지수( $C_s$ ) |
|----------------------------|-----|--------------------------|---------------|---------------|
|                            | 수 직 | 110                      | 0.204         | 0.037         |
|                            | 수 평 | 110                      | 0.255         | 0.035         |

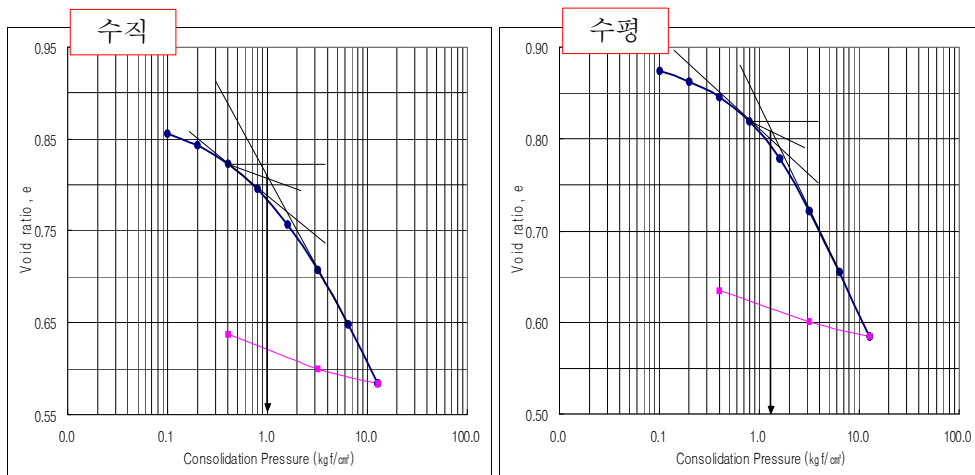


그림 5.7 압밀시험 결과 (NS-4, 심도 : G.L(-) : 4.0m ~ 4.8m)

| 시<br>험<br>결<br>과<br>요<br>약 | 구 분 | 선행압밀압력( $P_c$ )<br>(kPa) | 압축지수( $C_c$ ) | 팽창지수( $C_s$ ) |
|----------------------------|-----|--------------------------|---------------|---------------|
|                            | 수 직 | 100                      | 0.195         | 0.036         |
|                            | 수 평 | 130                      | 0.219         | 0.034         |

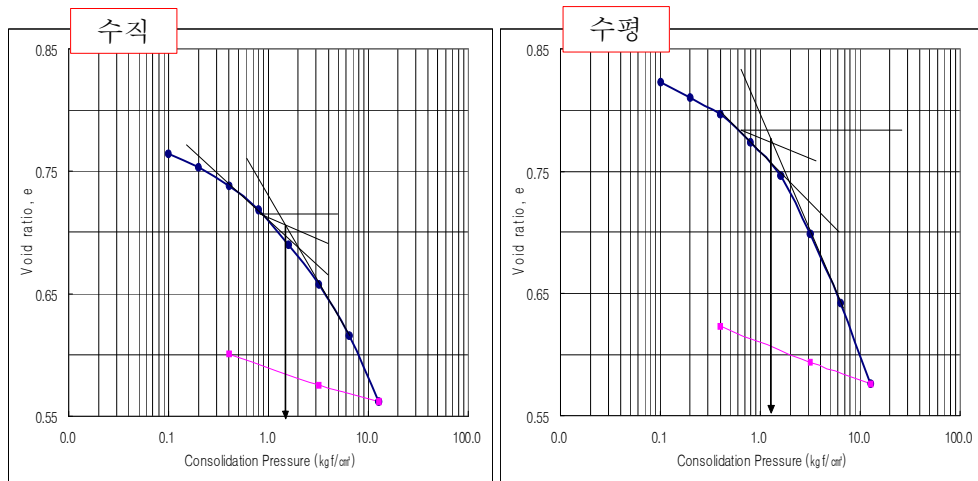


그림 5.8 압밀시험 결과 (NS-18, 심도 : G.L(-) : 3.6m ~ 4.4m)

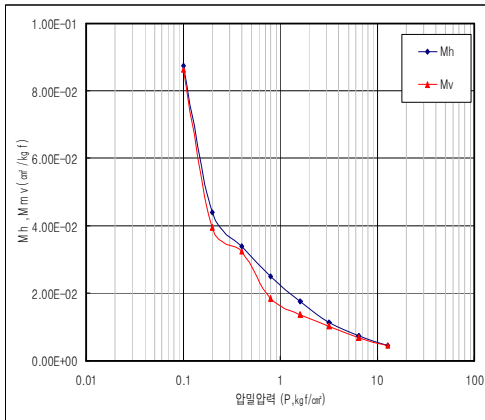
| 시험<br>결과<br>요약 | 구분 | 선행압밀압력( $P_c$ )<br>(kPa) | 압축지수( $C_c$ ) | 팽창지수( $C_s$ ) |
|----------------|----|--------------------------|---------------|---------------|
|                | 수직 | 155                      | 0.138         | 0.026         |
|                | 수평 | 130                      | 0.187         | 0.032         |

표 5.2 채취된 시료의 과압밀비 산정표

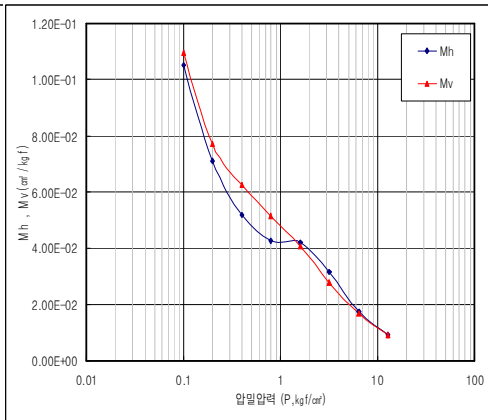
| 공번       | 채취<br>심도<br>(m) | 현재유효상재압력<br>( $P'_0$ , kPa)       | 선행압밀압력<br>( $P'_c$ , kPa) | 과압밀비<br>(OCR) |
|----------|-----------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------|
| NS-03    | 4.8~5.6         | $= 9.5 \times 5.2\text{m} = 49.4$ | 155                       | 3.14          |
| NS-03-01 | 4.0~4.8         | $= 8.2 \times 4.4\text{m} = 36.1$ | 110                       | 3.05          |
| NS-03-01 | 8.0~8.8         | $= 9.1 \times 8.4\text{m} = 76.4$ | 120                       | 1.57          |
| NS-04    | 3.0~3.7         | $= 8.9 \times 3.3\text{m} = 29.4$ | 110                       | 3.74          |
| NS-04    | 4.0~4.8         | $= 9.0 \times 4.4\text{m} = 39.6$ | 100                       | 2.53          |
| NS-18    | 3.6~4.4         | $= 9.5 \times 4.0\text{m} = 38.0$ | 155                       | 4.08          |

그림 5.9 ~그림 5.11은 표준압밀실험으로부터 얻어진 결과로서 각각 유효응력과 체적압축계수, 유효응력과 투수계수 및 유효응력과 압밀계수간의 관계를 보이며 그림 5.12 ~그림 5.14은 평균 체적압축계수비(mh/mv),

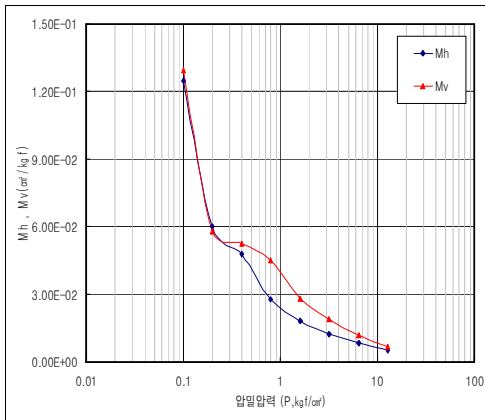
평균 투수계수비( $kh/kv$ ) 및 평균 압밀계수비( $Ch/Cv$ )를 나타내었다. 유효  
 응력과 체적압축계수의 관계를 보면(그림5.9) 시험결과 모두  $mv$  와  $mh$ 의  
 크기가 비슷한 값을 나타내고 있음을 알 수 있으며  $mv$  와  $mh$  모두 압밀  
 압력이 증가할수록 작아지는 경향을 보인다.  $mv$  와  $mh$ 의 크기비  
 ( $mh/mv$ )는 그림 5.12에 보이는 바와 같이 평균적으로 0.88에서 1.14로 작  
 아서 체적압축계수에 대한 이방성은 작은 것으로 나타나고 있으며 유효응  
 력과 투수계수의 관계를 보면(그림5.10) 대부분의 시료가 압밀압력이 작을  
 때는  $kh$  와  $kv$  의 차이가 약 1.33배에서 3.46배로 크게 나타나지만 압밀  
 압력이 증가하면서 그 차이는 점점 줄어들어 높은 압력에서는 유사해지는  
 경향을 보였다.  $kv$  와  $kh$ 의 크기비( $kh/kv$ )는 그림 5.13에서 보는바와 같  
 이 평균적으로 1.24에서 2.36으로 나타나서 약간의 이방성을 나타내고 있  
 다. 한편 유효응력과 압밀계수의 관계를 보면(그림 5.11) 결과값이 분산이  
 심해 경향을 파악하기가 다소 어려우나 대체적으로  $Ch$ 값이  $Cv$ 보다 크게  
 나오는 경향을 보이며 그 크기는 평균적으로 1.24배에서 2.36배로 약간의  
 이방성이 있는 것으로 나타났다.



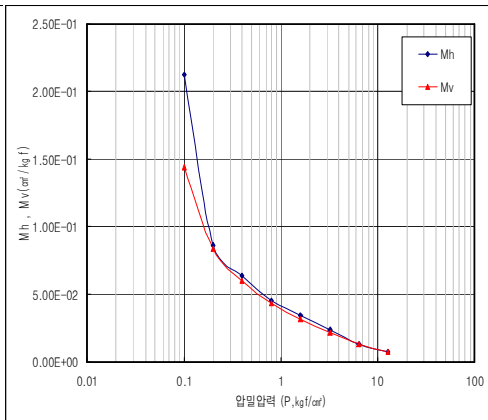
(a) NS-3(4.8-5.6M)



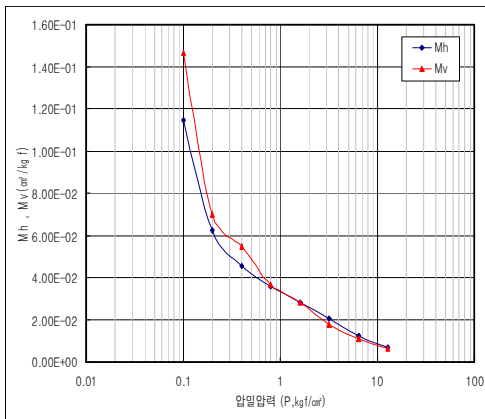
(b) NS-3-1(4.0-4.8M)



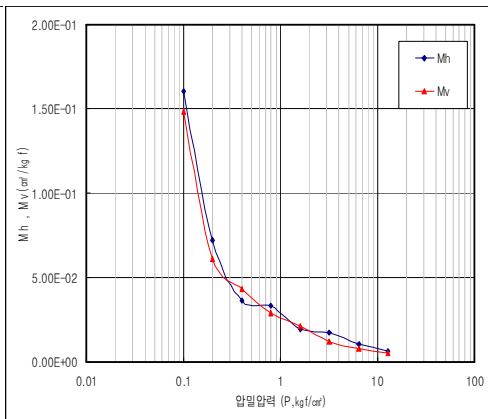
(c) NS-3-1(8.0-8.8M)



(d) NS-4(3.0-3.7M)

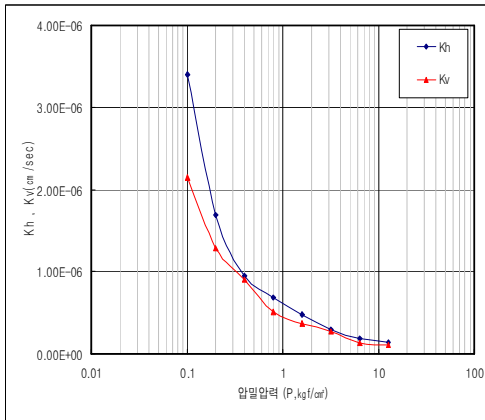


(e) NS-4(4.0-4.8M)

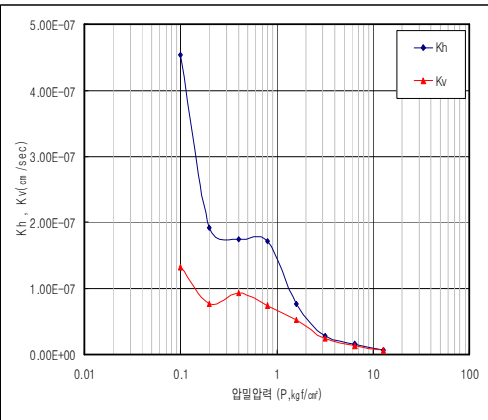


(f) NS-18(3.6-4.4M)

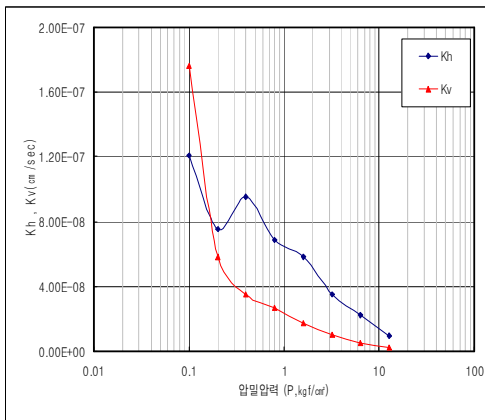
그림 5.9 유효응력과 체적압축계수의 관계



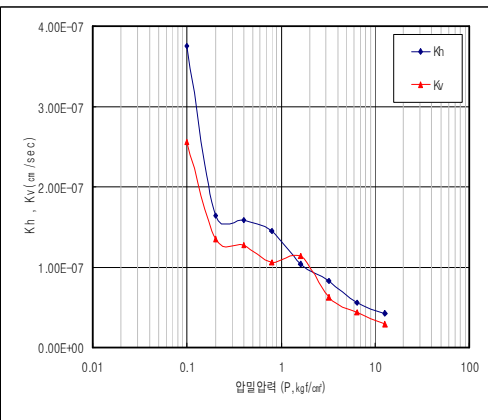
(a) NS-3(4.8-5.6M)



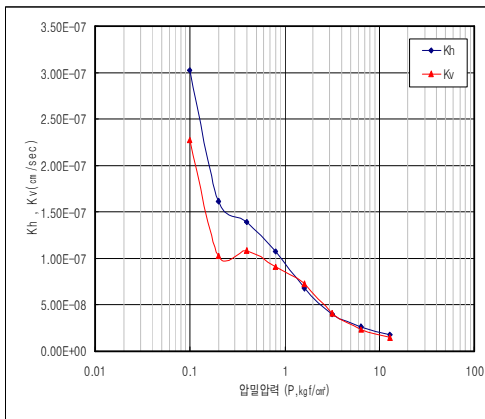
(b) NS-3-1(4.0-4.8M)



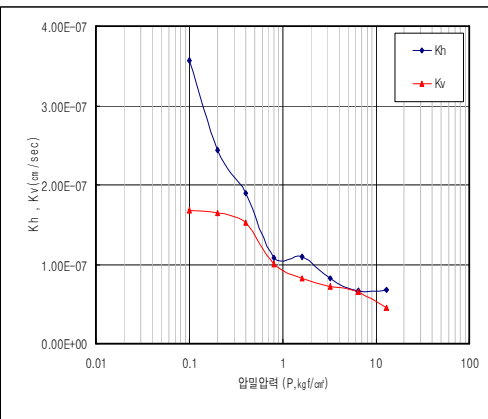
(c) NS-3-1(8.0-8.8M)



(d) NS-4(3.0-3.7M)

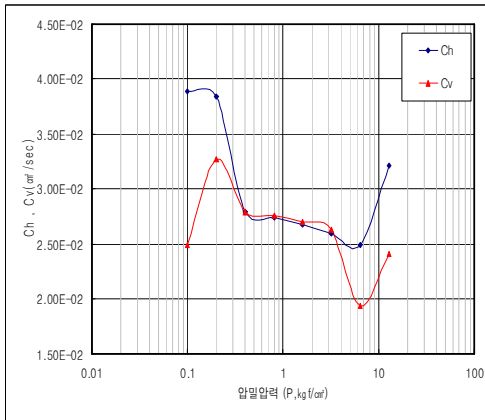


(e) NS-4(4.0-4.8M)

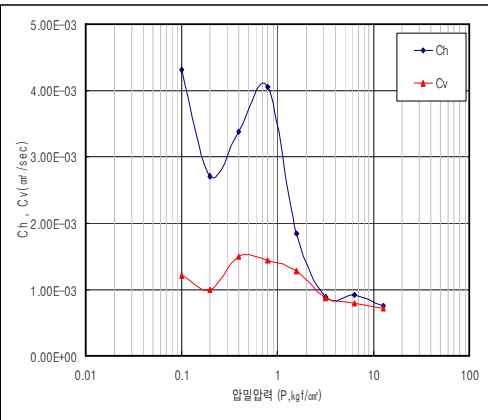


(f) NS-18(3.6-4.4M)

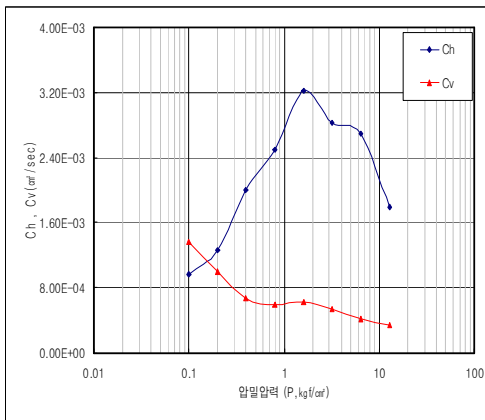
그림 5.10 유효응력과 투수계수의 관계



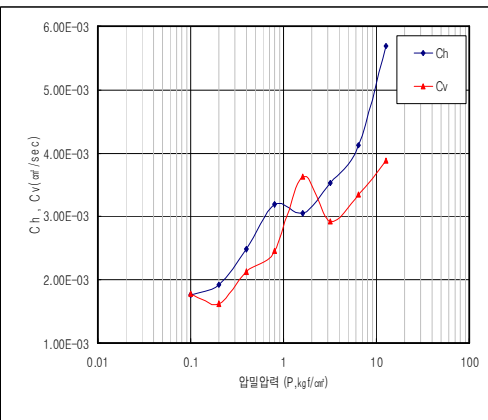
(a) NS-3(4.8-5.6M)



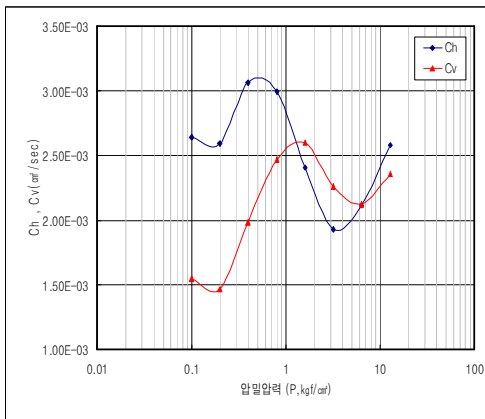
(b) NS-3-1(4.0-4.8M)



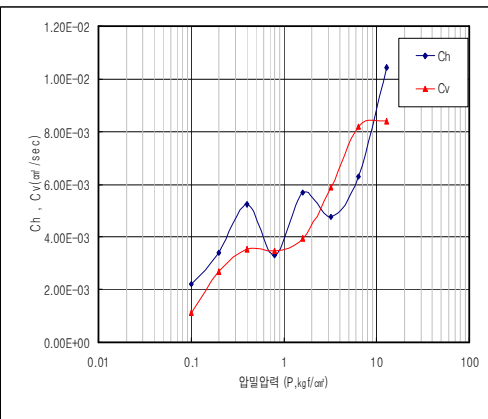
(c) NS-3-1(8.0-8.8M)



(d) NS-4(3.0-3.7M)



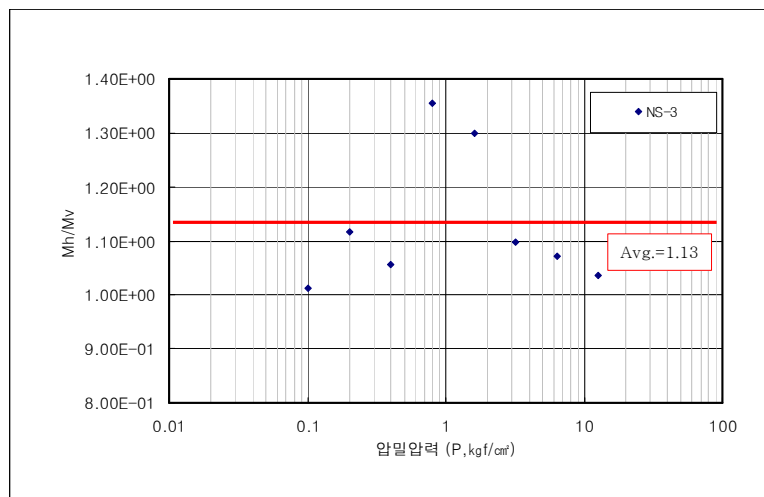
(e) NS-4(4.0-4.8M)



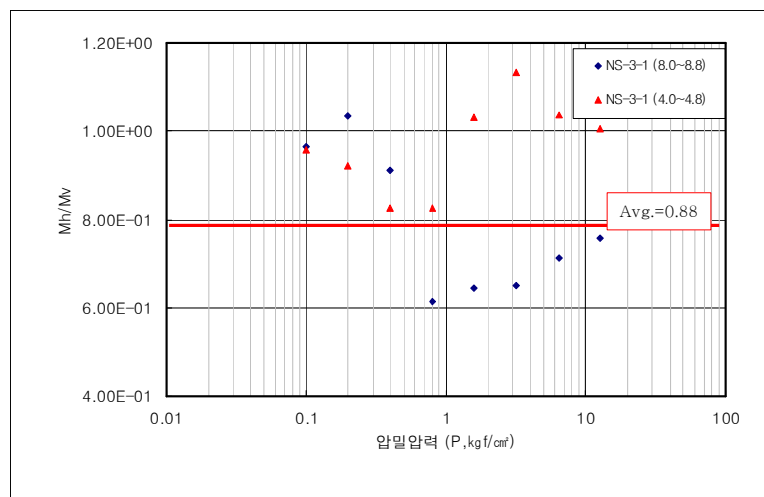
(f) NS-18(3.6-4.4M)

그림 5.11 유효응력과 압밀계수의 관계

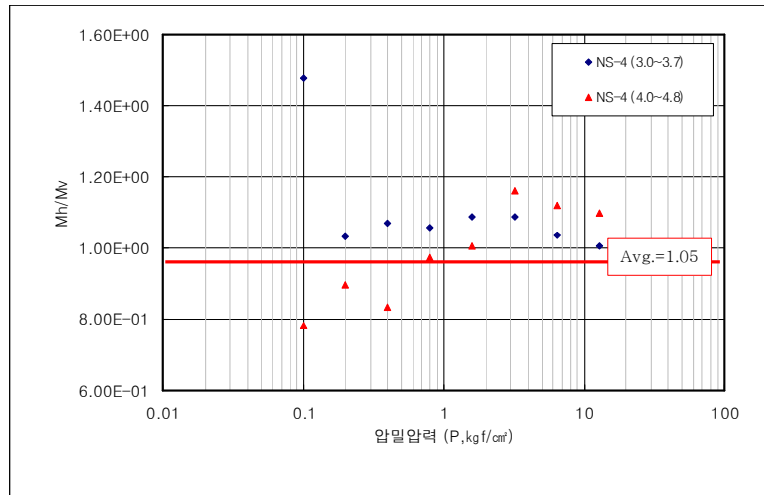




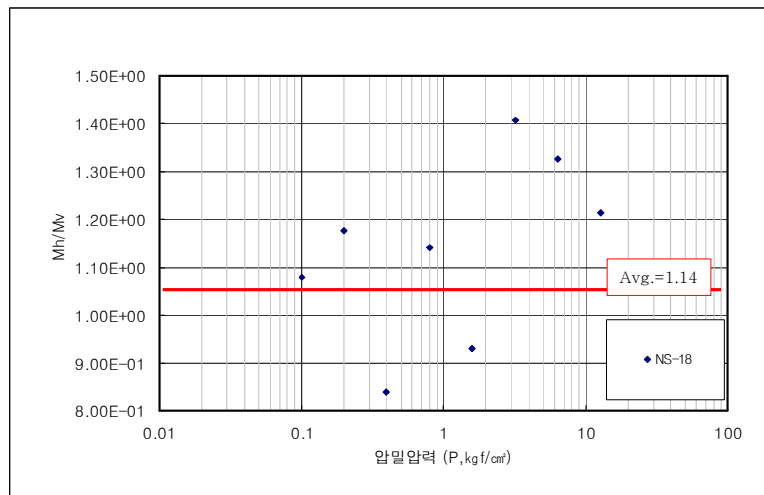
(a) NS-3



(b) NS-3-1

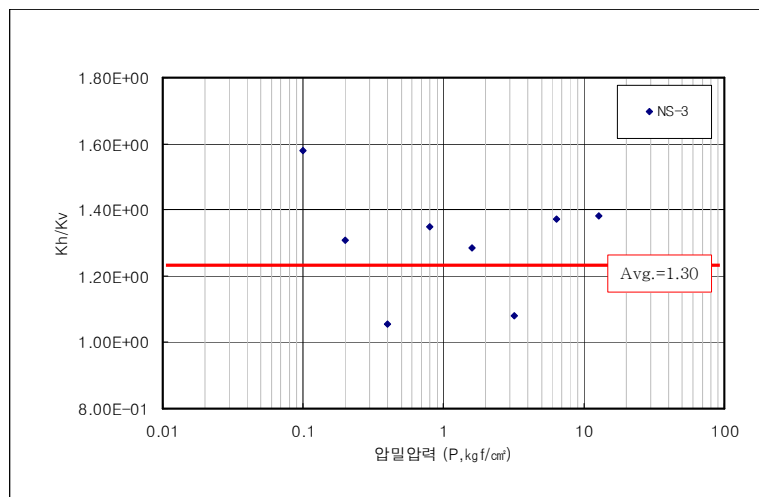


(c) NS-4

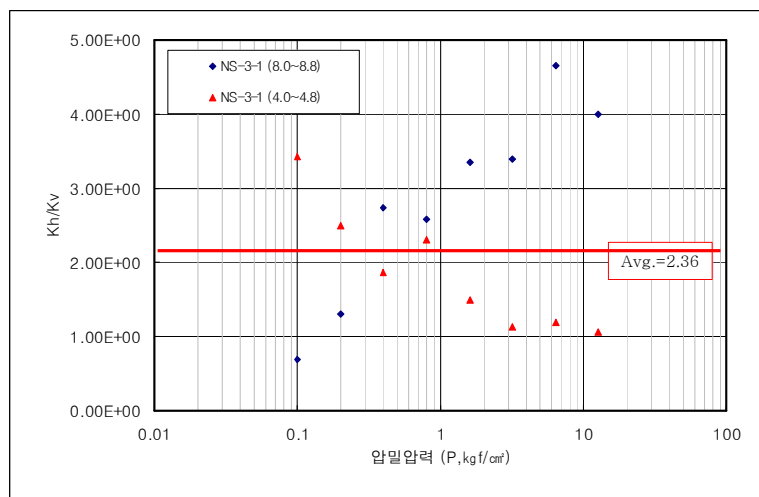


(d) NS-18

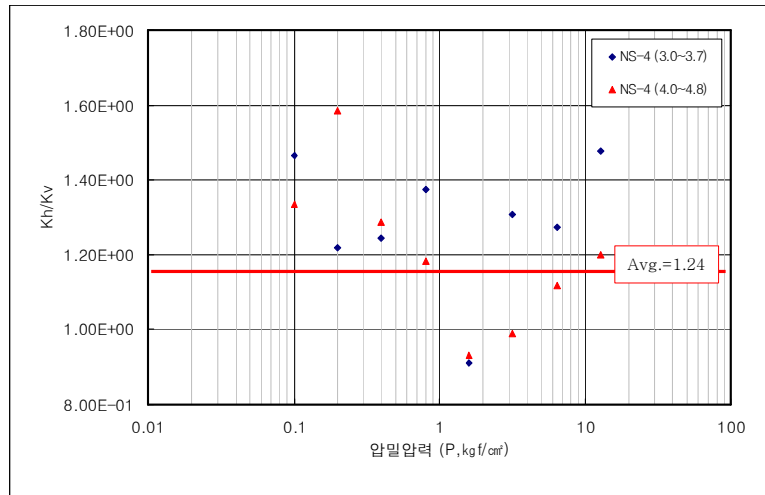
그림 5.12 평균 체적압축계수비



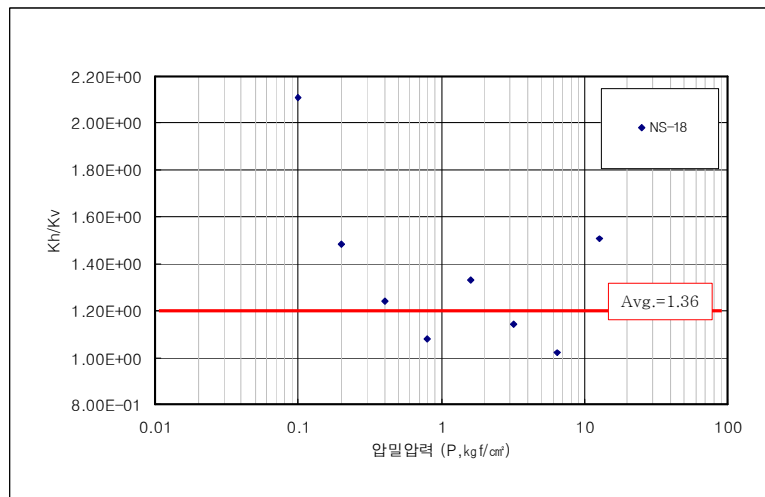
(a) NS-3



(b) NS-3-1

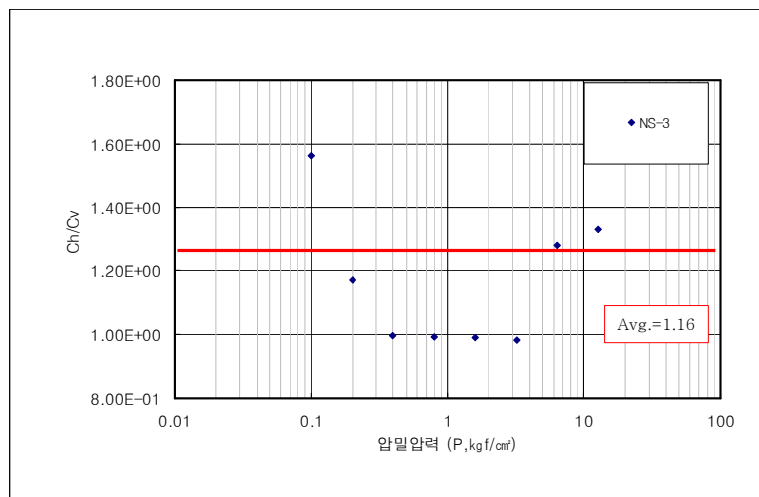


(c) NS-4

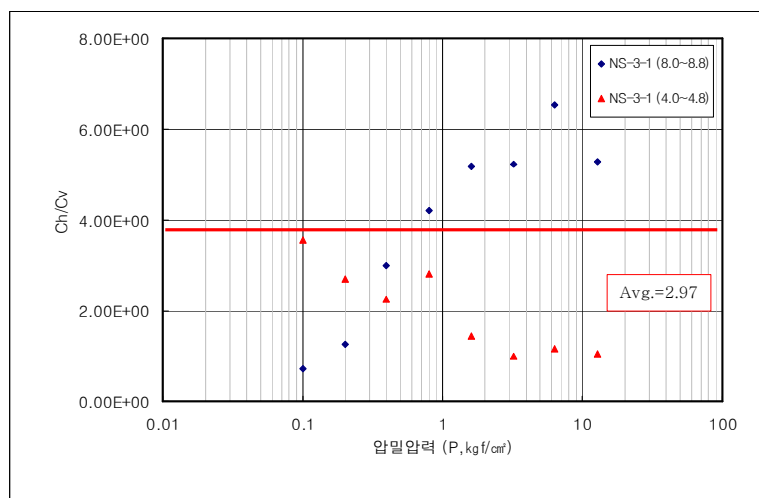


(d) NS-18

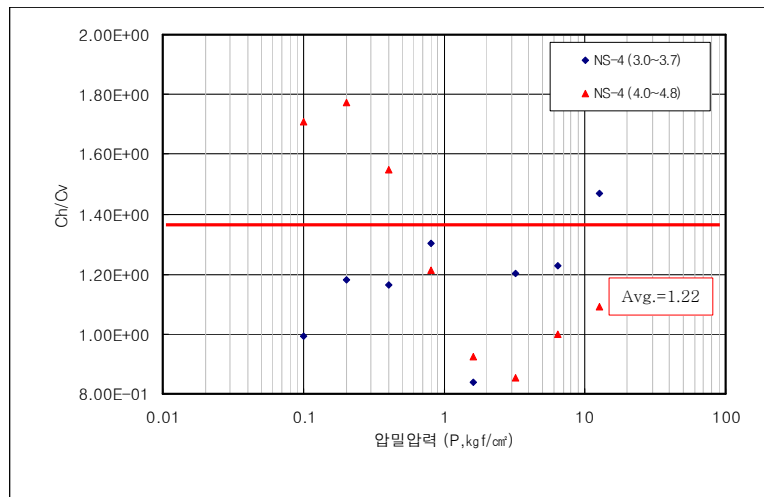
그림 5.13 평균 투수계수비



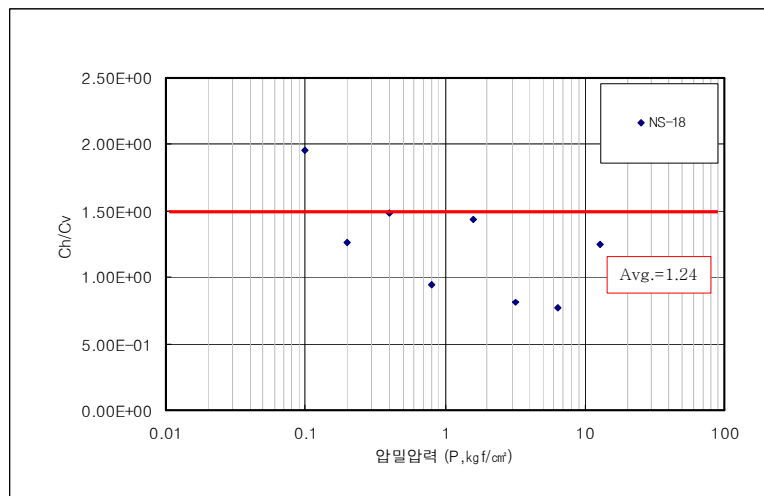
(a) NS-3



(b) NS-3-1



(c) NS-4



(d) NS-18

그림 5.14 평균 압밀계수비

### 5.3 $CK_0UC$ 시험결과 및 SHANSEP 법에 의한 강도증가율 분석

#### 5.3.1 $CK_0UC$ 시험결과

$CK_0UC$  시험은 측방향 변위가 발생하지 않도록 연직압을 일정하게 증가시키면서 체적변형율과 축변형율이 같게 되도록 컴퓨터 시스템에 의해 구속압을 제어하였으며 압밀압의 증분속도는 0.5 kPa/min으로 적용하였다.  $K_0$  압밀은 삼축시험기의 특성상 초기에 불안정한 값을 나타내므로 연직 압밀압이 30kPa 까지는  $K_0$  값을 0.83로 보고 비등방 압밀을 실시한 후  $K_0$  압밀을 실시하였다. 그림 5.15은  $CK_0UC$  시험결과를 나타낸다. 그림 5.15의  $K_0$ -t 관계도를 보면  $K_0$  값은 초기에 불안정한 값을 보이다가 경과시간이 약 5000 sec를 지나면서  $K_0 \approx 0.4$  정도로 안정한 값을 보이다가 약 30,000 sec를 지나면서 서서히 증가하는 경향을 보인다. 그림 5.15의 우측 그림은  $CK_0UC$  시험의 유효응력경로를 표시하였으며, 그림 5.16은 시료에 대한 응력-변형 관계를 나타내고 있다.

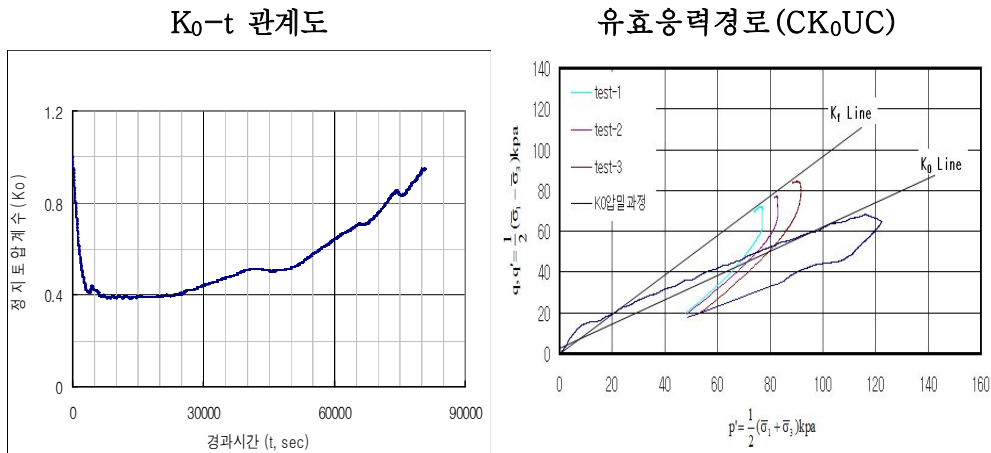
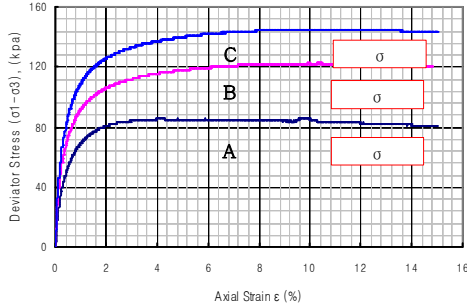


그림 5.15  $CK_0UC$  시험결과 (NS-03, 심도 : G.L(-) : 4.8m~5.6m)

(a) 축차응력-변형률 곡선



(b) 정규화된 축차응력-변형률 곡선

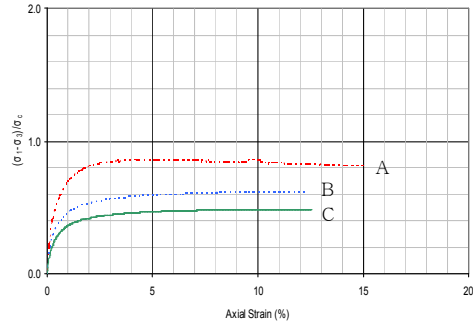


그림 5.16 NS-03 시료에 대한 응력-변형관계

### 5.3.2 SHENSEP 법에 의한 강도증가율 분석

강도증가율을 구하는 방법은 여러 학자들에 의해 제시된바 있는데 그중 대표적인 것을 정리하면 다음과 같다.

- ① 값이에 따른 강도증가 경향식으로부터  $\frac{S_u}{p}$  를 구하는 법

$$S_u = S_0 + KZ \quad (5.1)$$

- ② 소성지수와의 상관관계로부터  $\frac{S_u}{p}$  를 구하는 법 (by Skempton)

$$\frac{C_u}{p} = 0.11 + 0.0037 I_p \quad (\text{단, } I_p > 10) \quad (5.2)$$

- ③ 액성한계와의 상관관계로부터  $\frac{S_u}{p}$  를 구하는 법 (by Hansbo)



$$\frac{C_u}{p'} = 0.45LL \quad (5.3)$$

④ Mohr-Coulomb의 파괴시의 유효응력원으로부터 구하는 법

$$S_u = \frac{C' \cos \phi' + P_o \sin \phi' [K_0 + A_f(1 - K_0)]}{1 + (2 A_f - 1) \sin \phi'} \quad (5.4)$$

식 5.4은 정규압밀점토(Normally Consolidated Clay)에서는  $C' = 0$  이므로 식 5.5과 같이 간단해진다.

$$\frac{S_u}{P_0} = \frac{C' \sin \phi' [K_0 + A_f(1 - K_0)]}{1 + (2 A_f - 1) \sin \phi'} \quad (5.5)$$

⑤ 표준삼축압축시험(CU)결과에서 구한 Mohr-Coulomb의 원으로부터 구하는 법

$$\frac{C_u}{p} = \tan \phi_{cu} \quad (5.6)$$

여기서,  $S_0$  : 지표면에 있어서의  $S_u$  값( $t/m^2$ )

$K$  : 깊이에 대한  $S_u$ 의 증가율( $t/m^3$ )

$Z$  : 지표면으로부터의 깊이( $m$ )

$C'$  : 유효응력으로 표시한 점착력( $kg/cm^2$ )

$\phi'$  : 유효응력으로 표시한 전단저항각(도)

$K_0$  : 정지토압계수

$A_f$  : 파괴시의 간극수압계수

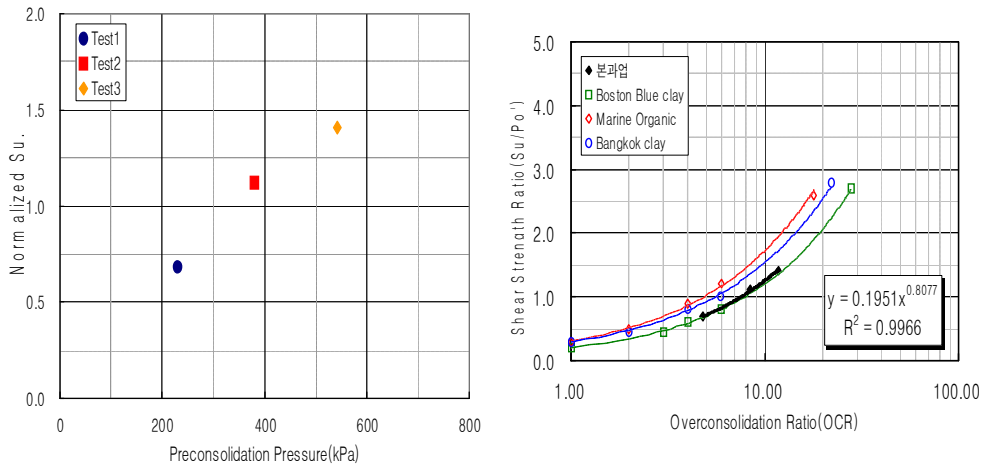
$P_0$  : 유효상재압( $kg/cm^2$ )

한편 흙의 종류에 따른 강도증가율 값은 다음 표5.3에 제시하였다.

표 5.3 흙의 종류에 따른 일반적인 강도증가율 범위

| 구 분   | 점성토       | Silt      | 유기질토      | Peat      |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 강도증가율 | 0.25-0.30 | 0.30-0.45 | 0.25-0.40 | 0.35-0.50 |

본 과업에서는 SHANSEP 시험을 적용하여 강도증가율을 직접 산정하였는데 그 결과를 정리하면 그림 5.17과 같다.



(a) 선행압밀하중과 강도증가율

(b) 과압밀비와 강도증가율

그림 5.17 NS-3 (4.8m~5.6m)의  $\overline{CK_0UC}$  결과

SHANSEP 시험결과 강도증가율은 선행압밀하중 및 과압밀비가 증가함에 따라 증가함을 보였으며, 이를 식으로 제시하면 다음과 같다.

$$\frac{Su}{P_0'} = 0.1951 \cdot OCR^{0.8077} \quad (\text{NS-3, 4.8} \sim 5.6\text{m}) \quad (5.7)$$

본 연구에서 도출된 강도증가율과 기존 제안식을 비교한 결과는 표 5.4

와 같으며, 공변 NS-03-01(채취심도8.0~8.8m)의 시험 결과와 강도증가율에 의한 강도비교 값은 표 5.5와 같다.

표 5.4 본 연구와 기존제안식의 강도증가율 비교표

| 구 분   | Skempton | Hansbo | 본 과업** | 평균    |
|-------|----------|--------|--------|-------|
| 강도증가율 | 0.154    | 0.144  | 0.195  | 0.164 |

주) \*\* 본 연구는 OCR=1을 기준으로 하였음.

표 5.5 NS-03-01(채취심도8.0~8.8m)의 전단강도 분석

| 구 분     | 강도증가율                                        | 전단강도<br>(t/m <sup>2</sup> ) | 비교 |
|---------|----------------------------------------------|-----------------------------|----|
| SHANSEP | $\frac{Su}{P_0} = 0.1951 \cdot OCR^{0.8077}$ | 4.41                        |    |
| 삼축시험결과  | 단위중량 1.9t/m <sup>3</sup>                     | 5.44                        |    |

이상과 같이 SHANSEP 법으로 강도증가율을 구한결과 기존의 제안식과 비교하여 1.27배 에서 1.35배정도 차이가 나는 것으로 나타났다. SHANSEP 시험결과가 약간 크게 나타났으나 그 차이가 미소하므로 본 과업에서 도출된 강도증가율과 과압밀비의 상관관계는 양호한 것으로 분석된다. 이를 이용하여 공변 NS-03-01(채취심도8.0~8.8m) 구간의 전단강도를 예측결과 시험값과는 상이한 결과를 나타내는데, 이는 시료의 교란 및 불균일한 퇴적환경, 사질토 포함에 기인한 것으로 추측된다.

## 제 6 장 결 론

시료의 교란효과를 극복하기 위해 인천OO지구 현장에서 채취된 불교란 점성토 시료를 대상으로 압밀시험,  $CK_0UC$  삼축시험,  $CIUC$  삼축시험을 수행하고 이를 분석하여 원지반의 압밀이방성 평가, SHANSEP 기법에 의한 강도증가율을 산정하여 전단강도를 비교한 결과다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유효응력과 체적압축계수의 관계를 보면 시험결과 모두 mv 와 mh의 크기가 비슷한 값을 나타내었고 mv 와 mh 모두 압밀압력이 증가할 수록 작아지는 경향을 보였다. mv 와 mh의 비(mh/mv)는 평균적으로 0.88에서 1.14로 체적압축계수에 대한 이방성은 크지 않은 것으로 나타났으며, 유효응력과 투수계수의 관계를 보면 대부분의 시료가 압밀압력이 작을 때는 kh 와 kv 의 차이가 약 1.33배에서 3.46배로 크게 나타났지만 압밀압력이 증가하면서 그 차이는 점점 줄어들어 높은 압력에서는 유사해지는 경향을 보였다. kv 와 kh의 비(kh/kv)는 평균적으로 1.24에서 2.36으로 나타나서 약간의 이방성을 갖는 것으로 분석되었다. 한편 유효응력과 압밀계수의 관계는 결과값의 분산이 심해 경향을 파악하기가 다소 어려우나 대체적으로 Ch값이 Cv보다 크게 나오는 경향을 보이며 그 크기는 평균적으로 1.24배에서 2.36배로 약간의 이방성이 있는 것으로 나타났다. 표 6.1은 압밀이방성 분석결과 이다.

표 6.1 압밀 이방성 분석결과

| 시추공번   | 채취심도    | 체적압축계수비<br>( $m_v/m_v$ ) |      |      | 압밀계수비<br>( $c_h/c_v$ ) |      |      | 투수계수비<br>( $k_h/k_v$ ) |      |      |
|--------|---------|--------------------------|------|------|------------------------|------|------|------------------------|------|------|
|        |         | 최대                       | 최소   | 평균   | 최대                     | 최소   | 평균   | 최대                     | 최소   | 평균   |
| NS-03  | 4.8~5.6 | 1.35                     | 1.01 | 1.13 | 1.56                   | 0.99 | 1.16 | 1.58                   | 1.05 | 1.30 |
| NS-3-1 | 4.0~4.8 | 1.13                     | 0.82 | 0.97 | 3.57                   | 1.01 | 2.00 | 3.42                   | 1.06 | 1.87 |
| NS-3-1 | 8.0~8.8 | 1.03                     | 0.61 | 0.79 | 6.54                   | 0.71 | 3.93 | 4.65                   | 0.68 | 2.84 |
| NS-04  | 3.0~3.7 | 1.48                     | 1.01 | 1.11 | 1.47                   | 0.84 | 1.17 | 1.48                   | 0.91 | 1.23 |
| NS-04  | 4.0~4.8 | 1.16                     | 0.78 | 0.98 | 1.77                   | 0.85 | 1.26 | 1.58                   | 0.93 | 1.20 |
| NS-18  | 3.6~4.4 | 1.41                     | 0.84 | 1.14 | 1.96                   | 0.77 | 1.24 | 2.11                   | 1.02 | 1.37 |

2. 교란효과를 배제하기 위하여 SHANSEP 시험결과 강도증가율과 OCR의 상관관계는  $\frac{Su}{P_0} = 0.1951 \cdot OCR^{0.8077}$  으로 분석되었다. 이 식을 이용해 강도증가율을 구한 결과 기존의 제안식과 비교하여 1.27배 에서 1.35배정도 차이가 나는 것으로 나타났으며, 이 식을 이용하여 인접 지역의 전단강도를 예측결과 시험값과는 상이한 결과를 나타내는데, 이는 시료의 교란 및 불균일한 퇴적환경, 사질토포함에 기인한 것으로 추측된다.

3. 본 연구는 한정된 시료와 시험으로 상관성을 비교·분석하는데 충분치 않으므로 향후 충분한 심도별 삼축압축시험, 현장 원위치시험 결과를 토대로 SHANSEP법에 의한 강도증가율을 검토 할 필요가 있다고 사료된다.

## 참고문헌

1. 강병희, “이방압밀이 흙의 강도에 미치는 영향”, 한국지반공학회 2000 가을학술발표회 초청강연 논문집, 2000.
2. 김광태, “표준압밀시험과 일정변형률 압밀시험에 의한 연약점성토의 압밀정수 추정에 관한 연구”, 경희대학교 대학원 박사학위논문, 1998.
3. 김성준, “이방성을 고려한 정규압밀점토의 비배수전단강도에 관한 연구” 단국대학교 석사학위논문, 1996.
4. 김주호, “연속재하압밀시험에 의한 해성점토의 압밀특성 연구”, 서울시립대학교 산업대학원 석사학위논문, 1993.
5. 김현배, “이방성을 고려한 포화점토의 비배수 전단강도에 대한 연구”, 인하대학교 석사학위논문, 1999.
6. 권오순, “정규압밀점토의 이방성에 관한 연구”, 서울대학교 석사학위논문, 1994.
7. 박순규, “일정변위압밀이론에 의한 연약점토의 압밀특성 산정에 관한 연구”, 강원대학교 석사학위논문, 1993.
8. 방의석, “일정변위압밀시험에 의한 한강 옹토의 압밀특성에 관한 실험적 연구”, 수원대학교 대학원 석사학위논문, 1997.
9. 최우진, “연속재하압밀시험에 의한 점토의 압축특성”, 서울시립대학교 석사학위논문, 1994.
10. 한창연, “CRS에 의한 연약점토지반의 압밀해석”, 서울시립대학교 석사 학위논문, 1993.
11. 홍복의, “일정변형률압밀시험에서 변형률속도가 압밀정수에 미치는 영향” 인하대학교 대학원, 석사학위논문, 1997.
12. Casagrande(1936), "The determination of the pre-consolidation load and its practical significance" 1st ICSMFE, 3, pp. 60~64.
13. Lee, K. "Consolidation with Constant Rate of Deformation", Geotechnique, 31, pp. 215-229, 1981.

14. Schmertmann, "The undisturbed consolidation behavior of clay", Trans, ASCE, 120, pp. 1201 ~ 1211, 1955.
15. Bishop, A. W. and Wesley, L. D., "A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing", Geotechnique 35, pp. 654-657, 1975.
16. Coatsworth, A. M., "A rational approach to consolidated undrained triaxial tests", Proc. 3rd ICSMFE, Vol. 1, pp. 106-110, 1985.
17. Head, K. H., Manual of soil laboratory testing, ELE, 1985.
18. Ladd C.C et al., "Stress deformation and strength characteristics", State of the Art Report, Proc. 9th ISCMFE, Vol. 2, pp. 421-496, 1997.
19. Ladd, C. C. and Foott, R., "New design procedures for stability of soft clays", J. Geotech. Eng. Div. ASCE Vol. 100, No. GT7, pp. 763-786, 1974.
20. Ladd, C. C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F. and Poulos, H. G., "Stress deformation and strength characteristics", State of the art report. Proc. 9th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Eng., Tokyo, Vol. 2, pp. 421-494, 1977.
21. Poulos, H. G., "Normalised deformation parameters for Kaolin", Geotechnical Testing Journal, Vol. 1, No. 2, pp. 102-106, 1978.

# A Study on Deformation-Strength Characteristic for Clay

Kim, Ju Yong

Department of Civil Engineering  
The Graduate School  
Gyeongju University

(Supervised by Professor Hwang, Seong-Chun)

Understanding the consolidation, deformation and strength characteristics of cohesive soil is one of the very important construction engineering issues in Korea, which has many estuaries in the seashore and river areas. Among others, the calculation of the ground properties thru ground examinations is closely related with the reliable predictions on the ground behavior as well as the construction expenses. In general, ground examinations can be divided into the field tests and the laboratory tests conducted thru undisturbed sampling. In the field tests, how to correct the test results for the ground properties is an important factor, and, in the laboratory geotechnical tests, sampling, storing and handling of the undisturbed samples greatly influence the results of the undrained shear tests. The disturbance of samples is a particularly important affecting element.

Base on the fact that the influence on the soil samples by disturbance disappears under the stresses higher than those in the current location, and the soil strength shows normalized behaviors against the consolidated stresses, this study compared the shear strength from the lab test with the one obtained thru the SHANSEP method, which calculates the undrained shear strength free from the disturbance influences, and analyzed the anisotropy of soil under the sedimentary environment and consolidating process thru the anisotropy test of



soil.

As the result, the correlation between the effective stress and the coefficient of volume compressibility demonstrated similar mv and mh values in the two tests, and tended to decrease as the consolidation stresses of both mv and mh increase. And on the correlation between the effective stress and the permeability coefficient, most of the samples showed a huge gap between kh and kv ranging from 1.33 ~ 3.46 times under the light consolidation stresses, but the gap kept decreasing as the stresses increase and they were similar under the high level of stress.

And in the SHANSEP test conducted to eliminate the disturbance effects, the correlation between the strength increasing rate and OCR was shown to be

$$\frac{Su}{P_0'} = 0.1951 \cdot OCR^{0.8077}.$$

The strength increasing rate obtained thru the use of the formula showed a difference of 1.27~1.35 times compared with the existing formula, and the predictions on the shear strength in the neighboring areas showed values drastically different from the test values, and this gap is thought to have come from the disturbance of samples and irregular sedimentary environment.

## 감사의 글

본 논문이 완성되기까지 학문적인 지도와 많은 조언, 또한 많은 꾸지람도 해주신 지도교수 황성춘 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 본 논문의 심사를 맡아 학위를 마칠 수 있도록 아낌없이 도와주신 강보순, 권혁민, 심형섭 교수님께 감사드립니다.

그동안 대학원에서 참 많은 것을 보고 배우고 느꼈습니다. 부족한 제가 그동안 무사히 대학원을 졸업 할 수 있었던 것은 주위에 모든 분께서 도와준 결과라 생각합니다.

그동안 큰 아들을 믿고 묵묵히 뒷바라지 해 주신 아버지, 그리고 새벽마다 아들을 위해 기도하시는 자상한 어머님께 감사드리고 싶습니다. 또한 못난 남편을 뒷바라지 해 준 나의 사랑스러운 아내, 그리고 힘들 때마다 용기와 희망을 준 큰아들 승구와 막내 딸 다은이에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 또한 같은 직장 동료로써 학문적 도움을 많이 준 연엔지니어링의 문일 이사님과 신일선 과장, 신승구 과장, 조태규 대리에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다. 또한 대학원 재학기간동안 많은 실험들을 해 볼 수 있는 계기와 시간을 만들어주신 연엔지니어링 이미정 사장님께도 감사드립니다.

끝으로 아버지, 어머니, 아내와 두자녀 그리고 교수님, 연엔지니어링 식구들에게 언제나 노력하고 열심히 살 것을 약속드리며 감사의 글을 마칠까 합니다.

2007년 12월 22일 김주용