

# 1차원 압밀점토의 응력해방에 의한 수직변형량과 현장재현 압밀시험에 관한 연구

## A Study on Reappeared Consolidation Test of In-situ Property and Vertical Deformation of Sample Due to Stress Release

김 재 영<sup>1)</sup> Kim, Jae-Young

高田直俊<sup>2)</sup> Takada, Naotoshi

### Abstract

When a saturated clay is sampled in an undisturbed manner from a bore hole, the sample extends vertically and shrinks horizontally under undrained conditions due to stress release. The conventional consolidation test specimen is trimmed from the expanded sample so that its diameter is equal to the inner diameter of the consolidation test ring, and this test procedure does not reproduce the actual consolidation behavior. The measurement of sample extension was conducted by means of overcoring method showed that the extension strains were 1 to 2%. To simulate the in-situ consolidation behavior, we proposed the consolidation test method that uses a specimen with a slightly smaller diameter than the inside diameter of consolidometer so that the specimen expands laterally to the inside of the ring.

### 요 지

지중에서 채취한 불교란 포화점토시료는 응력해방으로 인해 연직방향으로 늘어나고 수평방향으로 수축한다. 현행 압밀시험법은 이와 같이 변형된 점토시료를 그대로 압밀링과 같은 크기로 성형하여 압밀시험을 수행하기 때문에 원지반의 거동을 명확히 나타내고 있다고 할 수 없다. 채취시료의 연직 신장변형량은 보링공에서 채취한 점토시료와 완전 퇴비빔한 슬러리로 부터 재구성한 점토시료를 이용하여 측정된 결과, 1~2%의 범위로 나타났다. 원위치의 압밀특성을 모사하는 시험방법은 표준압밀시험용 공시체보다 직경이 작고, 높이가 높은 공시체를 사용하여 원지반의 유효상재압이 재하되었을 때 눌러 퍼져 압밀링의 내벽에 밀착하는 방법을 제안하였다.

**Keywords :** Clay, Consolidation test, Expansion, Sampling, Stress release

### 1. 서 론

자연퇴적상태에 있는 점토층의 대부분은 일차원 압밀상태에 있으며, 지반내의 응력상태는 유효상재압  $\sigma_1$ 에 대해 수평유효응력  $\sigma_3(=\sigma_2)=K_0 \cdot \sigma_1$  ( $K_0$ : 정지토압계수 <1>)을 받고 있다. 이 상태에 있는 포화점토가 샘플링에

의해 채취되어 응력이 해방되면 점토내부에는 부(負)의 간극수압이 발생한다. 이 간극수압은 지반 중에서의 평균유효응력  $\sigma_m$ 과 같고, 이것이 정(正)의 유효응력으로써 점토의 구속압이 되어, 점토의 체적팽창을 억제한다. 그리고 이 유효응력  $\sigma_m$ 은  $\sigma_1$ 보다 작고,  $\sigma_3$ 보다 크기 때문에 점토는 그림 1과 같이 수직방향으로 늘어나고, 수

1 정회원, 공학박사, (주)엠코 토목설계팀 (Member, Ph. Doc., Amco Co., LTD., geokinjy@korea.com, 교신저자)

2 大阪市立大学 都市基盤工學部 教授(Prof., Dept. of Civil Engrg., Osaka City Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

평방향으로 수축하게 된다. 포화점토의 경우 이 변형은 비배수변형으로 생각할 수 있다.

통상적인 압밀시험은 상기와 같이 변형된 상태 그대로 압밀링과 같은 크기로 성형하여 넣기 때문에, 압밀하중을 가했을 때의 응력상태는 원지반의 상태와 명확하게 다르다. 또한 아무리 주의를 기울여 샘플링한 불교란 점토시료를 사용하더라도 압밀시험에서 얻어지는  $f=(1+e)\log p$  관계가 원지반의 간극비보다도 항상 아래에 위치하는 것은 잘 알려져 있다(地盤調査·土質試驗結果の解釋と適用例, 1998). 즉 압밀시험에서 얻어지는  $f\text{-log}p$  관계가 원지반의 압밀거동을 충실하게 나타내고 있다면, 공시체의 압밀항복응력(또는 유효상재압)에서의 체적비가 지반중의 간극비와 일치해야 하는데, 지반중의 간극비보다 항상 작게 나타나고 있다. 지금까지는 압밀시험에서 구해지는  $f\text{-log}p$ 가 실제보다 작게 나타나는 원인이 공시체의 교란으로 발생하는 것으로 보는 의견이 일반적이었다. 한편 일본건축학회발행의 건축기초구조설계지침(1988)에서는 정규압밀점토의 경우 통상적인 압밀시험결과의 적용시 시료교란에 의해 초기간극비가 원지반의 간극비보다 작아지기 때문에  $f\text{-log}p$  관계의 정규압밀영역을 점( $p_c, f_i$ )를 통과하는 위치까지 평행하게 끌어올리는 보정법을 취하도록 하고 있다(그림 2 참조).

그러나 원지반의 압밀거동을 압밀링내에서 직접 재현하기 위해서는 상기와 같은 시료의 변형을 고려하여 표준압밀시험 공시체와 같은 체적으로써 직경이 약간 작고, 높이가 약간 높은 공시체를 사용하여 압밀시험을 수행할 필요가 있다. 즉 시료의 수직변형을 고려한 공시체는 압밀링내에서 원지반에서의 유효상재압과 같은 응력이 재하되었을 때 일축압축상태에서 눌러 퍼져 압밀링의 내벽에 밀착되어, 높이와 직경이 표준압밀시험

공시체와 같아지는 방법으로 수행하여 압밀거동을 재현하는 것이다. 아울러 이와 같은 방법에서는 정규압밀점토의 압밀시험에서 구해지는 과압밀영역의  $f\text{-log}p$  관계는 의미가 없어지게 된다.

따라서 본 연구는 샘플링에 의한 응력해방의 영향을 고려하는 현장재현 압밀시험을 소성이 다른 3종류의 점토시료에 대해 수행하였다. 그리고 결과비교를 통해 응력해방의 영향을 고려한 현장재현 압밀시험방법의 타당성을 검증하고, 일반적으로 구해지는  $f\text{-log}p$  관계의 위치를 명확하게 하였다. 또한 상기와 같은 시험을 수행하기 위해 필요한 공시체 크기는 응력해방시 시료의 수직방향 신장량 또는 수평방향 수축량의 측정결과로 결정하였다.

## 2. 현장재현 압밀시험기의 구조

응력해방에 의한 시료변형을 고려하는 현장재현 압밀시험의 개요를 그림 3, 4에 나타냈다. 압밀링내의 공시체는 직경 60mm×높이 20mm의 표준압밀시험 공시체와 체적이 같으나, 직경이 작고 높이를 높인 공시체를 사용한다. 이 공시체에 유효상재압이 가해졌을 때, 상하단면 마찰 없이 수평방향으로 비배수 상태로 눌러 퍼서 압밀링 내벽에 밀착시킨다. 공시체의 직경과 높이는 후술하는 응력해방시 점토시료의 수직변형량 측정결과를 내경 60mm 압밀링에 대해 표 1에 나타내는 크기 중에 59.8, 59.6, 59.4mm를 선정하였다. 이하, 압밀링 내경보다 직경이 작은 공시체를 재압축공시체로 명칭한다.

압밀시험기내의 재압축공시체는 유효상재압의 재하에 의해 비배수 상태에서 직경 60mm로 눌러 퍼지며, 이때 단면마찰의 영향을 받지 않도록 그림 4와 같이 가압

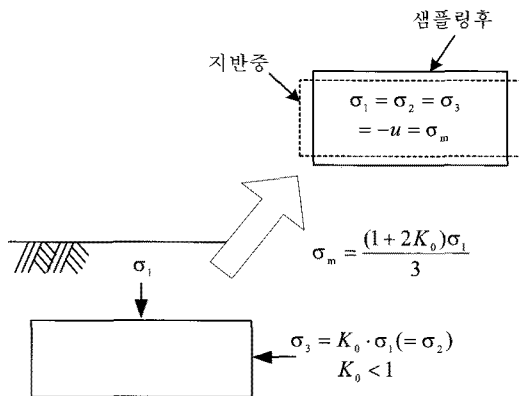


그림 1. 응력해방에 의한 시료의 이방적 변형

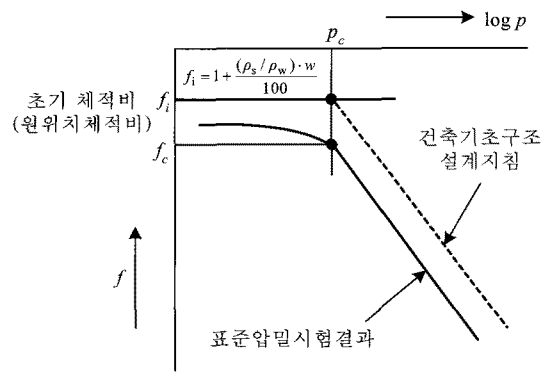


그림 2.  $f\text{-log}p$  관계의 이용과 해석법

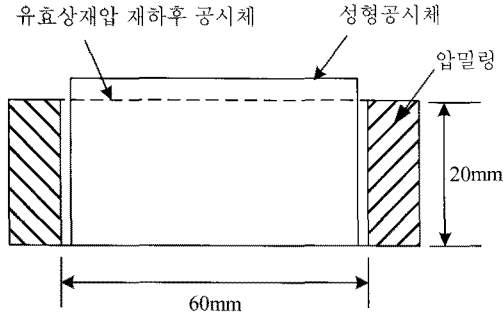


그림 3. 원지반의 압밀거동을 재현하기 위한 압밀시험 공시체

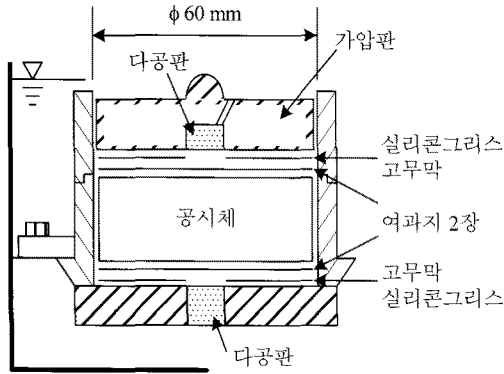


그림 4. 압밀시험기의 구성

표 1. 표준압밀 공시체에 대한 재압축공시체 크기

직경(mm)	높이(mm)
60	20
59.8	20.14
59.6	20.27
59.4	20.41
59.2	20.54
59.0	20.61

판과 공시체 사이에 고무막과 그리스로 마찰을 제거하였다. 압밀중 공시체로부터의 간극수는 공시체와 고무막사이의 여과지를 통해 가압판 외주부 및 중앙에 있는 직경 10mm의 다공판에 방사류로 배출한다. 그리고 재압축공시체를 사용하는 압밀시험에서 얻어지는 압밀량-시간관계에는 고무막과 여과지의 압축량이 포함된다. 그래서 재하압에 따른 고무막과 여과지의 압축량을 그림 4의 압밀시험기에서 별도로 측정하여, 그 양을 제외한 값으로 보정하여 시험결과를 정리하였다.

### 3. 현장재현 압밀시험방법

#### 3.1 점토시료

일본 오사카남향에서 채취한 고소성점토와 오사카

표 2. 점토시료의 액성·소성한계

점토시료명	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>p</sub> (%)
N105(남향점토)	105	35
H77(북향점토)	77	33
HK57(북향점토+카오린)	57	32

북향에서 채취한 중소성의 점토에 수돗물을 혼합하여 0.425mm체를 통과시켜 이물질을 제거한 2종류의 점토와 오사카 북향점토와 시판하는 카오린점토를 건조중량비 1:1로 혼합한 저소성점토를 사용하였다. 이들 3종류 점토의 액성·소성한계를 표 2에 나타내었다. 그리고 3종류의 점토는 각각 N105, H77, HK57로 명칭하였다.

#### 3.2 시험조건

상기의 점토는 액성한계의 2배정도 함수비로 완전 비빔한 점토를 내경 300mm의 스테인리스 원통에 높이 150mm로 넣고 단계적으로 압력을 증가시켜 3일째에 최종 압력 39.2kPa(0.4kgf/cm<sup>2</sup>)의 압력에서 압밀하였다. 압밀종료는 3t법<sup>2)</sup>으로 판정하였다. 압밀이 종료된 후 압밀링에서 꺼내어 직경 100mm, 높이 45mm로 5개의 공시체를 성형하였다. 이후 내경 100mm의 압밀링에 넣고 압력 39.2kPa(0.4kgf/cm<sup>2</sup>)를 시작으로 156.9kPa(1.6kgf/cm<sup>2</sup>)까지 하중중분비 1로 단계압밀을 하였다. 이후에도 하중중분비 1로 1255.3kPa(12.8kgf/cm<sup>2</sup>)까지 압밀하며, 5개의 공시체 중 4개의 공시체는 재성형을 하였다. 즉,

- 현장(원위치)의 압밀에 해당하는 것으로 1개는 그대로 압밀을 계속한다.

[원위치]공시체라고 명칭한다.

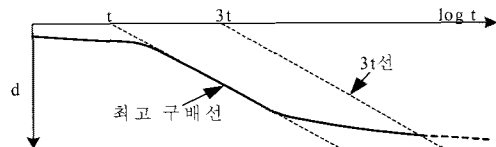
- 직경 60mm, 높이 20mm로 재성형하여 일반적인 압밀시험을 수행한다.

[표준압밀]공시체라고 명칭한다.

- 표 1의 크기로 재성형하여 응력해방에 영향을 고려한 현장재현 압밀시험을 수행한다.

[재압축]공시체로 명칭한다.

1) 3t법은 압밀시간단축을 위해 침하량-시간곡선( $d-\log t$ )에서, 최고 구배선의 연장선과 만나는 시간  $t$ (1차 압밀 종료)에 대해 3배의 시간(3t)점에서 최고 구배선과 평행하게 이동하고(이것을 3t선이라고 한다),  $d-\log t$ 가 3t선에 도달했을 때를 압밀종료시간으로 결정하는 방법이다(土質試驗の方法と解説, 2000).



#### 4. 응력해방에 의한 수직변형량 측정

직경 100mm×높이 45mm의 공시체를 156.9kPa(1.6 kgf/cm<sup>2</sup>)까지 압밀한 후 표준압밀공시체와 재압축공시체로 재성형하는 경우, 내경 100mm의 압밀링에서 공시체를 빼내게 되며, 이때 공시체는 그림 1과 같은 변형이 발생하게 된다. 변형후의 공시체 직경을 현미경(정밀도 0.01mm)으로 측정하여 비배수변형을 가정하여 수직방향 신장량을 산출하였다. 또한 별도로 직경 150mm의 스테인리스압밀원통내에서 3.2절과 같은 방법으로 액성한계의 2배로 되비빔한 점토를 단계적으로 156.9kPa(1.6kgf/cm<sup>2</sup>)까지 압밀한 점토내에 그림 5에 나타내는 직경 2.9mm의 피아노선을 통과시킨 다수의 내경 3mm, 외경 4mm, 길이 10mm의 파이프를 구성된 신장파이프형 변위계를 하중제하전 2t의 시간에 가압판에 천공해 둔 3개소의 구멍을 통해 점토내에 삽입하였다. 이 후 압밀이 종료된

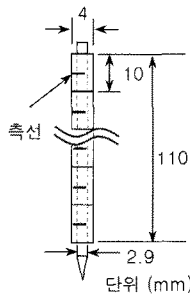


그림 5. 신장파이프형 변위계

표 3. 수직신장량 측정결과

점토시료	수직신장량 (%)		측정방법	
	범위	평균값		
N105	000519	1.772~1.801	1.791	직경변화
	000531	1.793~1.807	1.798	"
	000616	1.792~1.799	1.796	"
H77	991211	1.634~1.857	1.751	직경변화
	991227	1.630~1.742	1.696	"
	001007	1.622~1.656	1.636	"
	990114	1.665~1.681	1.839	신장파이프
	990121	1.620~1.801	1.887	"
	990128	1.685~1.706	1.883	"
	990205	1.669~1.723	1.881	"
HK57	991203	1.509~2.006	1.778	직경변화
	000119	1.757~1.856	1.805	"
	000131	1.774~1.787	1.775	"
	991125	2.084~2.109	2.094	신장파이프

\* 직경변화에 대한 측정은 4개 공시체의 결과값임.

\*\* 신장파이프에 의한 측정은 3개소의 측정값임.

후 압밀링에서 점토를 빼내어 점토를 세로로 분할하여 파이프를 노출시킨후 측선간 길이를 측정하여 수직방향 신장량을 측정하였다. 상기와 같은 2가지의 방법으로 측정된 수직신장량을 표 3에 나타내었다.

측정한 수직신장량은 약 1.8%정도이며, 신장파이프형 변위측정방법이 약간 크게 나타났다. 따라서 수직신장량 1.6, 1.8, 2.0%에 대해 공시체 직경×높이는 각각 20.32mm×59.53mm, 20.36×59.47, 20.40×59.41로 산정할 수 있다. 표 1의 공시체 크기는 이 범위를 포함하는 크기로 결정한 것이다. 참고로 高田·浜田(1993)가 층적점토에서 측정한 현장 불교란시료의 샘플링후 수직신장량은 약 1%를 나타내었다.

재압축공시체는 일축압축상태에서 직경 60mm로 눌러펴지기 때문에 H77시료에 대해 156.9kPa(1.6kgf/cm<sup>2</sup>)까지 압밀한 시료를 사용하여 일축압축시험을 수행하였다. 그림 6은 응력-변형량의 관계로 직경 59.8~59.4mm의 공시체가 직경 60mm로 비배수상태로 눌러펴지는 경우에 해당하는 축방향 변형량을 나타내었다. 그 결과, 모두 탄성영역에 있기 때문에 재압축에 의한 공시체의 교란은 작을 것으로 판단된다. 그림은 일축압축시험은 직경 35mm, 높이 80mm의 공시체를 사용하였으며, 상하면에는 고무막과 그리스를 사용하여 마찰을 경감시키고 고무막의 압축량을 보정하였다.

#### 5. 압밀시험결과 비교

그림 7~9에 3종류의 압밀시험에서 구한 f-logp관계를

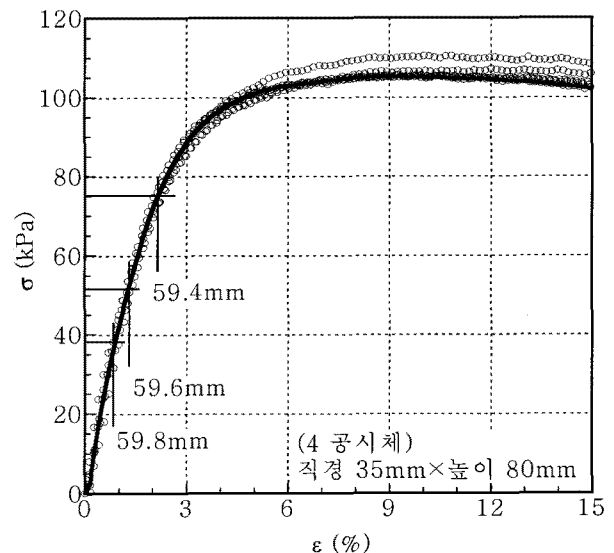


그림 6. 일축압축시험결과(H77시료)

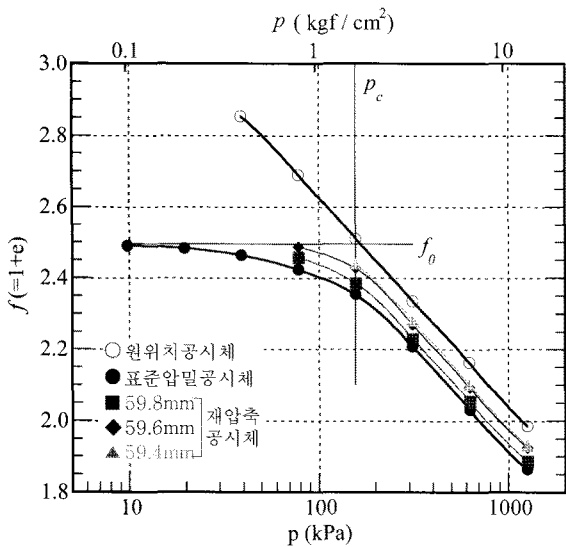


그림 7. N105시료의 f-logp관계

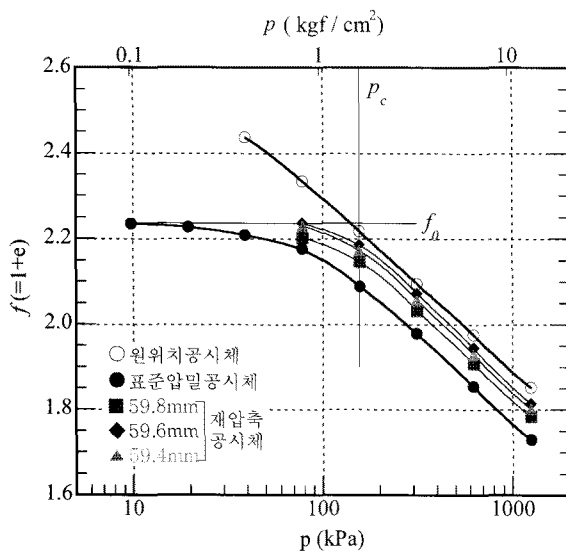


그림 8. H77시료의 f-logp관계

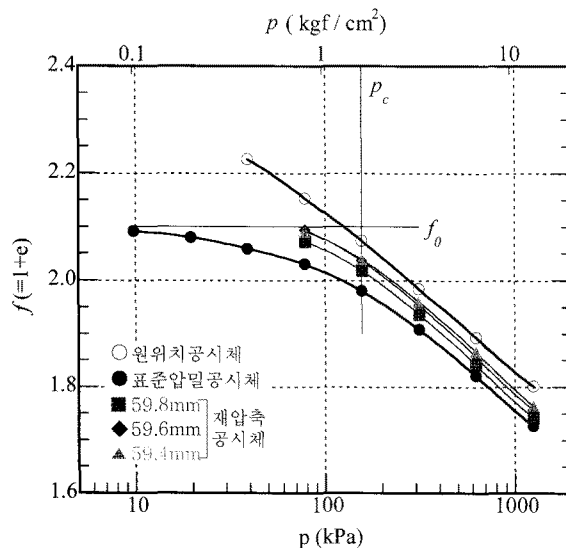


그림 9. NK57시료의 f-logp관계

비교하여 나타내었다. 표준압밀시험공시체와 재압축공시체는 초기값에 오차가 있기 때문에(함수비로 약 1% 이내), 평균값을 산출하여 초기함수비로 체적비  $f$ 를 산출하였다.

결과를 보면, 표준압밀시험에 의한  $f$ -log $p$ 관계는 원위치의 거동을 나타내는 공시체보다 크게 아래에 위치하고 있다. 그리고 재압축공시체는 그 사이에 위치하고 있다.

재압축공시체의  $f$ -log $p$ 관계를 자세히 보면, 직경 59.8mm의 공시체보다 직경 59.6mm과 59.4mm의 공시체가 상부에 위치하고 있다. 이 결과는 시료의 응력해방시의 수직변형량 1.8%인 점과 잘 일치하고 있다. 시료의 재성형과 재압축에 의한 교란의 영향은 회피할 수 없기 때문에 교란에 따른 압축성의 증가로 원위치시료보다  $f$ -log $p$ 관계가 아래에 위치하게 되지만, 본 논문에서 제안하는 시험법에 의한 결과는 원위치의 압밀거동에 가까운 것을 나타내고 있다.

3종류의 점토에 대한 표준압밀시험에서 구한  $f$ -log $p$ 관계는 모두가 압밀항복응력이 명확한 형태로 나타나고 있지 않지만 그림에 나타난 응력해방시의 유효응력 (156.9kPa=압밀항복응력)과 초기 체적비와의 교점은 원위치공시체의  $f$ -log $p$ 관계선에 거의 가깝기 때문에 표준압밀시험에 의한  $f$ -log $p$ 관계의 보정방법으로는 그림 2의 건축기초구조설계지침의 방법이 유효한 것으로 판단할 수 있다.

## 6. 결론

원위치의 압밀거동을 재현하기 위해 압밀링의 내경보다 직경이 작은 공시체를 사용하는 압밀시험법을 제안하며, 재성형 점토를 사용한 실내압밀시험에서 타당성을 조사하고 또한 표준압밀시험결과와 비교하였다.

- (1) 압밀링 내경보다 작은 공시체를 응력해방전 상재압에서 비배수변형시켜 압밀링 내경에 공시체를 밀착시키는 방법으로 구해지는  $f$ -log $p$ 관계는 원위치 압밀에 해당하는  $f$ -log $p$ 관계와 유사하다.
- (2) 이때 응력해방시에 측정된 시료의 수직변형량에 해당하는 공시체 직경으로 성형한 공시체의  $f$ -log $p$ 관계는 원위치의  $f$ -log $p$ 관계에 가깝게 나타나고 있다.
- (3) 표준압밀시험에 의한  $f$ -log $p$ 관계는 원위치의  $f$ -log $p$ 관계보다 크게 아래에 위치하고 있으며, 공시체 직경을 압밀링 내경과 일치시키는 현행 압밀시험법은

원위치의 압밀거동을 재현하고 있다고 할 수 없다.

- (4) 표준압밀시험에 의한  $f\text{-log}p$ 관계의 정규압밀영역은 원위치의  $f\text{-log}p$ 과 평행하며 유효상재압(또는 압밀 항복응력)과 초기 체적비의 교점까지 끌어올리는 보정법은 원위치의  $f\text{-log}p$ 관계를 모사할 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. John H. Schmertmann (1953), "The undisturbed consolidation behavior of clay", Paper No. 2775, *TRANSACTIONS of ASCE*, Vol.120, pp.1208-1216.
2. 建築基礎構造設計指針 (1988), 日本建築學會, pp.137-138.
3. 高田直俊, 浜田武 (1993), "サンプリング後の応力解放による粘土

の変形の計測", 第48回土木学会年次学術講演会講演概要集, III-456, pp.966-967.

4. 地盤調査・土質試験結果の解釋と適用例 (1998), 地盤工學會, pp. 229-233.
5. 金宰永, 高田直俊 (2001), "サンプリングによる応力解放を考慮した圧密試験", 土木学会論文集, No.680/III-55, pp.263-268.
6. 김재영 (2003), Q&A, *한국지반공학회*, Vol.19, No.5, pp.55-58.
7. Takada, N. and Kim, J. (2004), "Consolidation test considering sample deformation due to stress release", *International Symposium on Engineering Practice and Performance of Soft Deposits, IS-OSAKA*, pp.29-34.
8. 김재영, 김수삼, 高田直俊 (2005), "현장에서 채취한 불교란 점토 시료의 샘플링후 시료변형을 고려한 압밀시험에 대한 연구", *대한토목학회 논문집*, 제25권 제1C호, pp.9-13.

(접수일자 2008. 6. 5, 심사완료일 2008. 7. 26)