

# 사전압밀된 포화점토의 응력이력과 2차압밀에 관한 연구

A Study on the Stress History and Secondary Compression  
of Saturated Clays Subjected to Precompression

김 형 주\*  
Kim, Hyeong - Joo

## Abstract

A series of long term consolidation tests were conducted under loading-unloading and loading( $p_c$ )-unloading( $p_u$ )-reloading( $p_r$ ) conditions using reconstituted clay in order to investigate the effect of stress history on secondary consolidation characteristics and the applicability of the secondary consolidation model suggested by Bjerrum to overconsolidated clays.

According to the test results, the secondary compression settlement affected by the stress history in the first half of experimental period and the coefficient of secondary compression,  $C_{s1}$ , is dependent on overconsolidation ratio,  $OCR(p_r/p_u)$ , maximum  $OCR(p_c/p_u)$ , and unloading duration time. Moreover the coefficient of secondary consolidation in the latter half of experimental period  $C_{s2}$  is mainly affected by OCR and it gradually reduces with OCR increment. Finally the comparison of the experimental results with the Bjerrum model indicates that the Bjerrum model can be applied beyond certain range of stress history in the overconsolidated clay.

## 요 지

사전압밀된 포화점토의 응력이력이 2차압밀특성에 미치는 영향 및 Bjerrum모델이 과압밀점토의 2차압밀침하추정에 적용가능한지를 실험적으로 파악하기 위하여 재성형점토를 이용하여 재하-제하 및 재하-제하-재재하 응력이력의 조건에서 일련의 장기압밀시험을 실시하였다.

실험결과에 의하면 과압밀점토의 2차압밀침하는 전반부에서 응력이력의 영향을 받고 전반부의 2차압밀계수  $C_{s1}$ 은  $OCR(\text{선행압밀하중 } P_c / \text{재재하하중 } P_r)$ , 최대  $OCR(\text{선행압밀하중 } P_c / \text{제하시의 하중 } P_u)$ 과, 제하시간에 의존하며 과압밀비 증가에 따라 감소한다. 또한 2차압밀후반부의 2차압밀계수  $C_{s2}$ 는  $OCR$ 의 영향을 받으며 과압밀비 증가에 따라 감소한다. 최종적으로 실험결과와 Bjerrum모델을 비교분석한 결과 임의 응력이력범위를 벗어나면 과압밀점토에서 Bjerrum모델의 적용은 가능하다.

\*정희원, 군산대학교 공과대학 해양공학과 조교수

## 1. 서 론

연약지반상에 도로, 택지조성, 구조물등을 축조 하는 경우 발생하는 잔류침하 및 안정문제를 사전에 극복하기 위하여 Preloading 공법 및 Surcharge공법등이 이용되고 있다. 이러한 공법은 성토 및 포장에 의한 하중과 여성하중을 이용하는 공법으로서 재하과정은 압밀침하 특성에 영향을 미치므로 재하중의 크기 및 재하기간을 어떻게 조합하여야 경제적으로 유효 적절하게 적용될 것인가를 사전에 파악하는 것은 설계 및 시공상 중요한 일이다.

그러므로 이러한 공법등에 의해 지반개량이 이루어지는 연약지반은 사전 압밀-하중제거-구조물건설과정에 의해 載荷-除荷, 또는 載荷-除荷-再載荷 (loading-unloading-reloading) 의 하중변화를 받고 지반내부의 각 지점의 유효응력에 대응하여 압밀-팽창-재압밀 된다. 그리고 실제지반의 거동은 이러한 현상이 중복되어 하중 변화를 받으며 그 내부에서는 과압밀과 정규압밀 부분이 동시에 포함되며 압밀특성계수, 점토입자의 구조등이 변화되어 내부 응력상태는 동일하지만은 않다. 이러한 연구는<sup>1, 4, 8)</sup> Drain 공법에 관한 연구와 비교하여 볼 때 그 예가 적고 해안지대에 건설되는 구조물 및 고성토 도로 건설이 대형화 되면서 구조물 건설후 안정성을 위해 잔류침하도 엄격하게 제한되므로 선행재하에 의해 개량된 지반의 2차압밀 침하 문제도 무시할 수 없는 실정이다. 이러한 연약 지반의 압밀 침하 해석시 필요한 2차압밀특성을 규명하고자 Mesri<sup>5)</sup>, Yasugawa<sup>7)</sup>, Aboshi<sup>6)</sup> 등은 주로 정규압밀점토를 대상으로 연구결과를 발표하였으며 과압밀점토에 대한 연구는 아직 미흡한 상태이다.

그러므로 본 연구에서는 과압밀점토의 2차 압밀특성을 예측하기 위한 기초적 연구로서 과 압밀점토의 응력이력에 의한 침하 및 팽창특성과 응력이력이 2차압밀특성에 미치는 영향등을 분석한 후 2차압밀이론중 대표적인 Bjerrum(1967)<sup>2)</sup> 모델이 과압밀점토에 적용가능한

지를 실험적으로 검토하기 위하여 동일한 점토를 이용하여 응력이력을 변화시켜 장기압밀시험을 실시하였으며 얻어진 결과를 고찰하여 실제 현장에 Preloading 및 Surcharge공법을 경제적이고 효과적으로 적용할 수 있도록 제시하였다.

## 2. Bjerrum모델 고찰

Bjerrum(1967)<sup>2)</sup>은 점토의 압축을 즉시압축 (instant compression)과 지연압밀(delayed compression)으로 구분하여 간극비-유효응력-시간관계는 단일함수임을 제시하였으며 정규압밀점토의 Creep거동을 표시하기 위하여 간극비는 유효응력 및 시간관계에 의해 다음식과 같이 요약할 수 있다.

$$F(e, \sigma, t) = 0 \quad (1)$$

$e-\log p$  관계의 선형관계에 의해 점토의 압축성과 응력관계는 다음식으로 표시된다.

$$e=e_0-Cc \log(p/p_0) \quad (2)$$

여기서  $Cc$ 는 압축지수,  $e_0$ 는  $p=p_0$ 일 때의 간극비 이다.

또한 유효응력 일정하에서 간극비  $e$ 의 변화가  $\log t$ 에 비례한다고 가정하면 Creep변형은 다음식으로 표시할 수 있다.

$$e=ec-C\alpha \log(t/t_c) \quad (3)$$

여기서  $C\alpha$ 는 2차압밀계수,  $e_c$ 는 기준시간  $t=t_c$ 에서의 간극비이며 여기서  $t_c$ 는 2차압밀이 시작되는 시간으로 본연구에서는 시험개시시간으로 하였다.

2차압밀계수( $C\alpha$ )가 유효응력 및 경과시간에 의해 변화하지 않는 경우 식(2) 및 식(3)에 의해  $e-p-t$ 관계는 그림 1과 같으며 직선AA'~EE'는 식(2)로 표시한 등시압축곡선군 이고

이중 직선AA'는 즉시압축곡선(instant-compression)이다. 직선 aa'~ee'는 식(3)에서 표시한 등압밀응력하의 Creep곡선이다. 이 모델에 의해 정규압밀점토의 배수 Creep특성이 간단명료하게 설명되며 많은 연구자에 감명을 주었다.

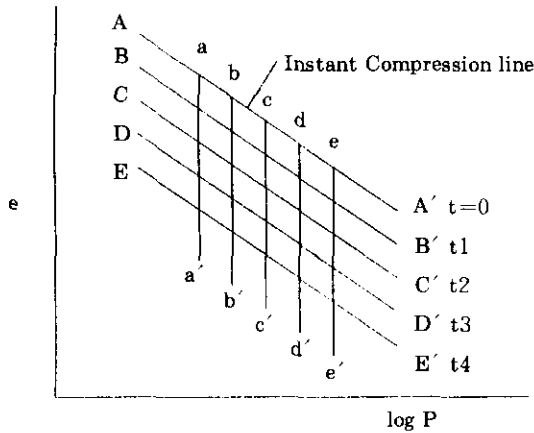


그림 1. 등압밀압력선과 등시간압축선(Bjerrum, 1967)

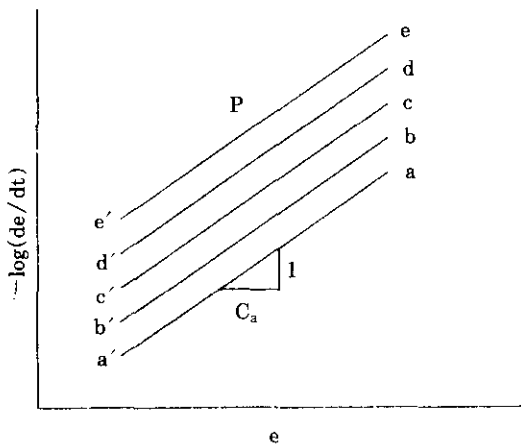


그림 2. 변형속도와 변형관계(Bjerrum, 1967)

그러나 Bjerrum모델은 정규압밀점토를 연구대상으로 하여 구축되었으므로 과압밀점토의 배수 Creep거동에 적용하는 경우에는 문제가 발생된다. 즉 식(3)에 표시한 것과 같이

Bjerrum모델에서는 점토의 압밀에 대한 시간 효과를 표시하기 위하여 기준시간의 설정에 의존하는 2차압밀계수를 압밀시험에 있어서 간극수압이 소산한 후의 점토변형이 log t에 비례하여 발생한다고 생각하여 재하순간을 기준시간의 원점으로 하면서도 압밀곡선 e-log t의 후기 직선부분의 구배로부터 2차압밀계수를 구하는데 문제가 되고 있다.

그러나 본 연구와 같이 재하-제하 및 재하-제하-재재하의 응력이력을 거쳐 간극비를 감소시킨 상태에서 점토에 대하여 기준시간을 결정하는 것은 곤란하기 때문에 식(3)을 이용하여 Bjerrum모델을 과압밀점토에 적용하는데는 어려움이 있다. 그러므로 여기서 과압밀점토의 Creep에 대한 Bjerrum의 적용성을 검토하기 위해서 우선 식(3)을 시간 t에 대해 미분하여 간극비의 감소 방향을 양으로 하고 양변을 대수로 하여 정리하면 다음식과 같다.

$$\log(de/dt) = \log(C\alpha/2.3) - \log t \quad (4)$$

식(4)를 식(3)에 대입하여 t를 제거하면 식(5)와 같다.

$$\log(de/dt) = \log(C\alpha/2.3) - (e_c - e)/C\alpha - \log t_c \quad (5)$$

또한 식(2)에서 p<sub>0</sub>=1 일 때 e=e<sub>0</sub>로 하여 식(5)에 대입하여 정리하면 식(6)과 같다.

$$\log(de/dt) = \log(C\alpha/2.3t_c) + e/C\alpha(e_0 - Cc \log p)/C\alpha \quad (6)$$

단 여기서 e<sub>0</sub>는 p=1일 때의 간극비이다.

식(6)은 Creep변형중의 간극비의 변화속도의 대수와 간극비 사이에는 기울기 1/Cα의 직선관계가 존재하며 또한 Cα가 유효응력에 의해 변화하지 않는 경우에 그림 2와 같이 e-de/dt-p관계는 평행선이 된다.

식(6)은 정규압밀점토에 대한 식(3)으로 부

터 유도되었고 그 이상의 일반적인 의미를 갖고 있다. 즉 점토의 상태에 관계없이 어떤 적당한 기준시간에 대해  $e - \log t$ 의 직선관계가 존재하면 Creep속도에 대한 대수와 간극비의 관계에 의해 기준시간에 관계없이 2차압밀계수에 상당하는 비례계수를 구할 수 있다. 이것은 기준시간을 확정하기 어려운 경우에 대한 점토의 Creep특성을 설명하는데는 매우 유용하다.

### 3. 시료 및 시험방법

#### 3.1 시료 및 시험장치

시험에는 군산 시내에서 채취한 층적점토를 재압밀시킨 성형시료를 이용하였다. 시험시 시료의 초기상태가 교반시 함수비, 재압밀기간등에 의해 변하므로 시료작성을 통일할 필요가 있어 현장에서 채취한 점토를 실내에 주의 깊게 운반하여 대형시료통에 저장한 후 교반기로 충분히 섞고 시료의 균질성을 확보하기 위하여  $420\mu\text{m}$ 의 체를 통과시켜 진공펌프에 의해 완전탈기시킨 시료를 제작시료로 사용하였다. 시료제작은 Bellofram Cylinder를 조정연마 스텐레스 압밀통에 부착시켜 하중을 임의적으로 가할 수 있는 장치를 이용하였다. (그림3) 또한 가압판과 압밀통 사이에 시료가 유출가능성이 있으므로 재하하중은 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8,  $1.0\text{kg}/\text{cm}^2$  순으로 최종하중에 도달할 때까지 24cycle로 단계 재하 하였으며 Remold제작 시료의 2차압밀이 본시험에 미치는 영향을 극소화하고 통일된 초기조건을 갖추기 위해서  $3T_L^{(n)}$ 법에 의해 최종재하단계에서 재하시간을 최대구배곡선의 기울기에 대한 시간의 3배에서 종료하였다. 시료보존은 알루미늄호일로 파라핀코팅을 하여 아이스박스에 항온 보존하면서 시험시 계속적으로 이용하였다.

시험시 이용된 제작시료의 물리적성질을 표 1에 표시하였고 시험장치로는 표준압밀시험장치를 이용하였고 재하방법은 직접재하에 의해 하중을 가하였다.

표 1. 군산 점토의 물리적 성질

액성한계(%)	소성한계(%)	소성지수	비중
34.7	18.8	15.9	2.69

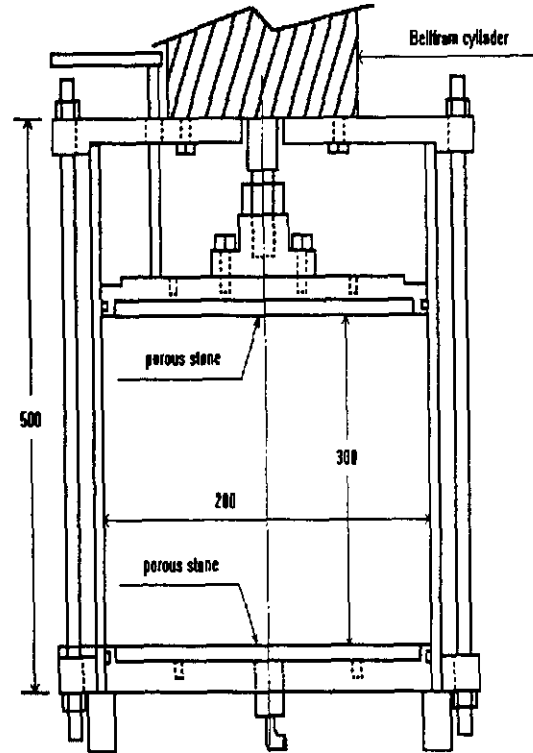


그림 3. 재성형시료 제작장치

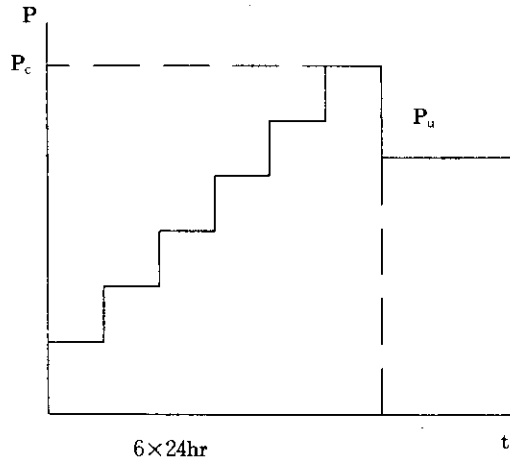
#### 3.2 시험방법

##### 3.2.1 시험종류

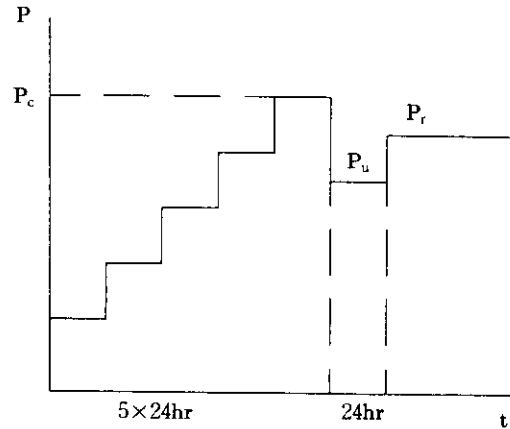
시험은 그림 4과 같이 載荷-除荷 및 載荷-除荷-再載荷의 응력이력을 부여하고 재하(Unloading)후 및 재재하(Reloading)후의 압축거동을 장기간에 걸쳐 조사하였다. 시험기간은 선행압밀에서 각하중 단계마다 1440분, 본 시험에서는 10000분 이상으로 하였으며 각 시험의 개요 및 점토항목은 아래와 같다.

##### 3.2.2 載荷-除荷過程

(시험 1, Test 1-1~3)



(a) 재하(Loading)-제하(Unloading)과정



(b) 재하(Loading)-제하(Unloading)-재재하(Reloading)과정

그림 4. 각 시험조건에 대한 응력이력도

재하-제하과정에 있어서 각 Test에 대한 선행압밀하중  $P_c$ 를 변화시켜 제하시의 팽창특성 및 팽창후의 재침하특성에 미치는 과압밀비 O.C.R(재하-제하과정의 경우는 선행압밀하중  $P_c$ /제하하중  $P_u$ 로 정의)의 영향을 검토하였다.

본 검토에 대한 응력경로는 표 2와 같다.

표 2. 재하-제하-재재하과정의 응력이력 (단위  $\text{kg/cm}^2$ )

Test	재 하 ( $p_c$ )	제하( $p_u$ )	OCR
1-1	단계재하 → 3.6		1.2
1-2	( $\Delta P/P_o=1$ ) → 3.9	→3.0	1.3
1-3	0.2→0.4→0.8→1.6→3.2 → 4.2		1.4

### 3.2.3 載荷-除荷-再載荷過程

(시험 2, Test 2-1~5)

재하-제하-재재하 과정에서 각 Test에 대한 재재하 하중  $P_r$ 를 변화시킴으로서 재재하시의 2차압밀특성에 미치는 과압밀비 OCR(재하-제하-재재하과정의 경우는 선행압밀하중  $P_c$ /재재하하중  $P_u$ 로 정의) 및 재재하 하중  $P_r$ 의 영향에 대해서 검토한다. 본 검토에 응력경로는 표 3과 같다.

표 3. 재하-제하과정의 응력이력 (단위  $\text{kg/cm}^2$ )

Test	재 하 ( $p_c$ )	제하( $p_u$ )	재재하( $P_r$ )	OCR	최대OCR
2-1	단계재하		→2.4	1.33	
2-2	( $\Delta P/P_o=1$ )		→2.6	1.23	
2-3	0.2 → →3.2	→1.6	→2.8	1.14	2.0
2-4			→3.0	1.07	
2-5			→3.2	1.00	

### 3.2.4 載荷-除荷-再載荷過程

(시험 3, Test 3-1~3)

재하-제하-재재하 과정에서 각 Test에 대한 재재하하중  $P_r$ 를 변화시킴으로서 재재하시의 2차압밀특성에 미치는 최대 OCR(선행압밀하중  $P_c$ /재재하하중  $P_u$ 로 정의) 및 제하시의 팽창량을 검토한다. 본 검토에 대한 응력경로는 표 4와 같다.

표 4. 재하-제하재재하 과정의 응력이력 (단위  $\text{kg/cm}^2$ )

Test	재 하 ( $p_c$ )	제하( $p_u$ )	재재하( $P_r$ )	OCR	최대OCR
3-1	단계재하	→0.2			16.0
3-2	( $\Delta P/P_o=1$ )	→0.4	→1.6	2.0	8.0
3-3	0.2 → →3.2	→0.8			4.0

## 4. 시험결과 및 고찰

### 4.1 載荷-除荷過程(Test1)

본 시험에서는 선행압밀하중 또는 제하하중을 변화시켜 제하시의 팽창특성과 재침하특성에 미치는 과압밀비(OCR) 및 제하하중 영향에 대하여 검토 하였다. 간극비-시간관계를 각 Test별로 비교하기 쉽게  $\Delta e - \log t$ 관계로 정리하여 그림 5에 표시하였다. 그림에서와 같이 각 Test는 시험개시 직후 부터 100분정도까지는 제하에 따라 팽창이 일어나며 그 후는 팽창속도가 감소하여 간극비 변화가 미소한 기간을 거쳐 재침하과정으로 이행하고 있다. 제하과정의 팽창-재침하곡선이 이와 같은 형상이 되는 것은 점토층 내부에 분포된 간극수압 분포의 영향을 고려하여 설명할 수 있다.

일반적으로 점토지반에 선행재하공법이 적용되면 비배수면에서 존재된 잔류 과잉간극수압이 소산되면서 침하 및 2차압밀침하가 계속되지만 제하직후는 배수면의 (-)간극수압에 의한 팽창이 일어나며 결과적으로 점토층 전체의 압축량을 고려하면 간극비가 일정상태로 되면서 계속해서 침하량이 탁월하여 재침하 되는 경향이 있다. 따라서 본시험의 경우는 제하전에 재하에 의한 과잉간극수압은 이미 소산되어 제하시에는 잔류과잉간극수압이 존재하지 않다고 가정되므로 재침하는 배수면의 (-)간극수압이 소산한 후에 발생하는 2차압밀에 의한 영향으로 생각할 수 있다.

본시험의 팽창특성에 있어서는 그림 5와 같이 어느 경우도 제하직후의 구배가 급한 부분과 그 후의 어느 정도 완만한 부분이 존재한다. 제하하는 하중 및 OCR이 큰 경우 일수록 이 경향은 크고 전반부의 급구배인 곳에서는 팽창 시간도 길다. 이것은 제하한 하중이 작은 경우에는 1차압밀에서 발생한 Pad압축에 대한 탄성적인 회복에 의해 팽창이 급격하게 일어나는 것에 대해 제하한 하중이 큰 경우는 Pad팽창 시간이 필요한 지연압밀(delayed compression)상태에 있다고 볼 수 있다. 또한 팽창량에

서도 같은 결과로 생각할 수 있으며 OCR이 큰 경우일수록 팽창량은 크다. 시험 1의 최대 팽창량  $\Delta e_s$ 와 과압밀비 OCR의 관계를 그림 6에 표시 하였으며 실제적으로 연약지반상의 도로성토와 같이 응력이력 변화가 작은 범위에서는 팽창량이 OCR의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 제하에 따라 재침하까지의 팽창량은 OCR 혹은 제하하는 하중의 크기에 영향을 받으나 재침하가 시작하는 시간은 거의 같은 시간에 시작되며 2차압밀에 의한 침하로 생각할 수 있다. 시험 1의 재침하과정의 2차압밀계수  $C_a$ 와 COR의 관계를 그림 6에 표시하였다. 연약지반상에 도로건설시 Surcharge공법을 적용하는 것과 같이 미소 응력이력 범위에서 재침하과정의  $C_a$ 는 OCR의 증가에 따라 감소한다. 또한 Crawford<sup>3)</sup>는  $C_a$ 가 과압밀영역에서 압밀응력의 증가에 따라 증가하고 선행압밀하중을 상회하는 시점(OCR이 1보다 큰 시점)에서 부터 최대값이 되고 그 후는 감소 혹은 약간 일정하다고 제시하고 있다.

이상의 고찰을 통하여 제하과정의 팽창특성 및 재침하특성은 제하하는 하중의 크기의 영향을 크게 받고 재하-제하의 형태에 의해 시공되는 Surcharge공법은 점토지반의 침하를 억제하고 있다. 한편  $C_a$ 가 시간과 함께 변화하는 관점도 무시할 수 없는 실정이므로 해석적으로는  $C_a$ 를 구할때 어떠한 방법으로 구하는 것이 가장 큰 문제이므로 이에 대한 연구를 다음과 같이 수행하였다.

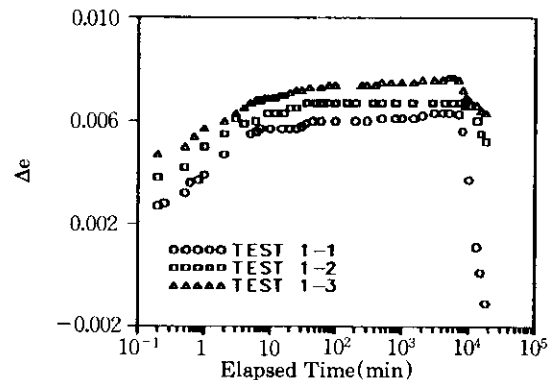


그림 5. 시험 1에서 경과시간에 대한 간극비 변화량 관계

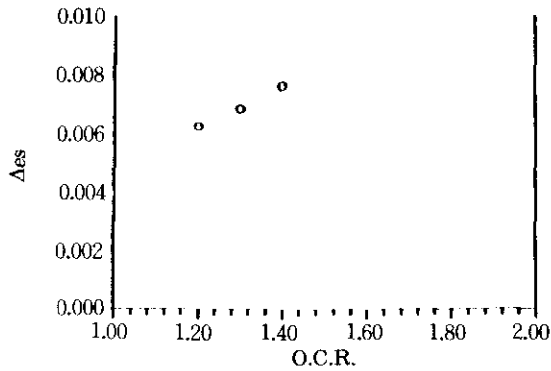


그림 6. 시험 1에서 제하시 최대팽창률( $\Delta e_s$ )과 OCR 관계

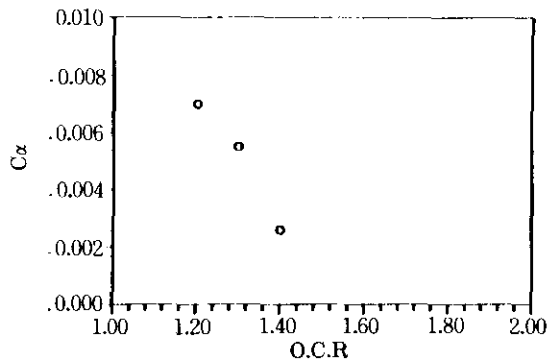


그림 7. 시험 1에서 2차압밀계수  $C_\alpha$ 와 OCR 관계

#### 4.2 載荷-除荷-再載荷過程(Test 2)

본시험은 동일한 응력이력을 받았던 과압밀 점토에 과압밀과 정규압밀영역에 걸쳐 재재하 하중을 가한 것이다. 따라서 각 Test에서 선행 압밀하중과 제하시의 응력으로 정의하는 OCR은 일정하고 선행압밀하중과 재재하 하중에 의해 정의하는 최대 OCR은 다르다. 본 시험에 의해서 얻어진 각 Test의  $e-\log t$ 관계를 그림 8에 표시하였다. 여기서 재재하 후 충분한 시간이 경과하면 하중이 큰 Test일수록 압축량이 크기 때문에  $e-\log t$ 곡선은 아래에 위치하고 있다. 다음에 각곡선의 형태를 관찰하면 과잉간극수압이 소산한 후  $\log t$ 에 비례하여  $e$ 가 감소하고 있는 경향을 나타내고 있다. 또한 각

Test는 재재하 후 수분간 과잉간극수압에 대응하는 압밀부분(7~15분간)이 존재하며 입자의 안정기간(Test 2-1~3에서는 10~30분, Test2-4~5에서는 10~200분)을 거쳐 그후는 2차압밀과정으로 이행되고 있다. 이 2차압밀과정은 비교적 평탄한 전반부의 2차압밀 $C_{\alpha_1}$ (Test2-1~3에서는 30~1500분, Test2-4에서는 200~10000분)과 구배가 다소 증가하는 후반부의 2차압밀 $C_{\alpha_2}$ (Test2-1~2에서는 1500분, Test2-4에서는 10000분이상)로 나누어진다. 한편 Test2-5는 재재하 하중이 정규압밀영역에 있으므로 변화가 없는 것으로 생각할 수 있다.

여기서 각 Test의  $\log(de/dt)-\log t$ 관계를 그림 9에 표시하여  $e-\log t$ 관계의 직선성을 검토하여 보면 2절의 Bjerrum모델 고찰에서 설명한 것과 같이 간극비  $e$ 가  $\log t$ 에 대하여 직선적으로 변하면 이  $\log(de/dt)-\log t$ 관계는 기울기가 -1의 직선으로 된다고 제시하였다(식 4). 그림에서와 같이 재재하 하중이 과압밀영역에 있는 Test의  $\log(de/dt)-\log t$  관계는 거의 -1의 직선적 분포가 되고 있지만 시간이 경과하면서 후반부에서는 다소 평행이동하는

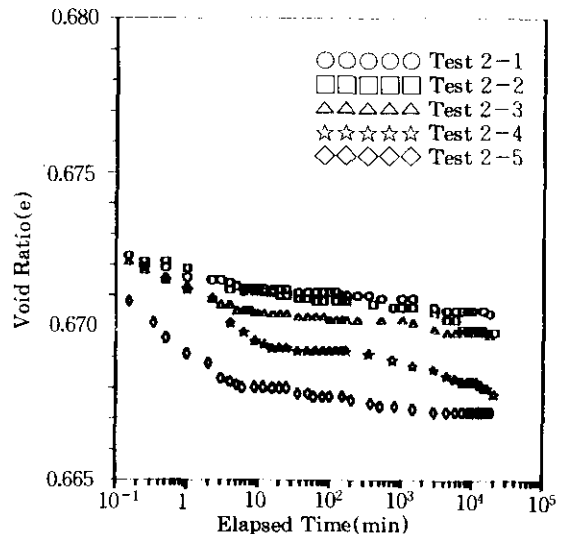
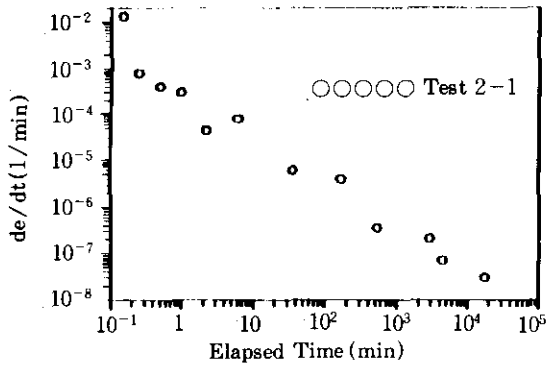
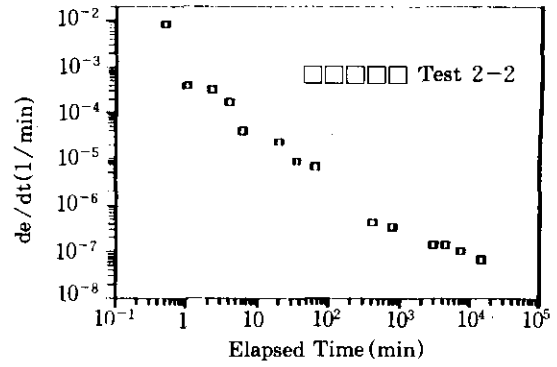


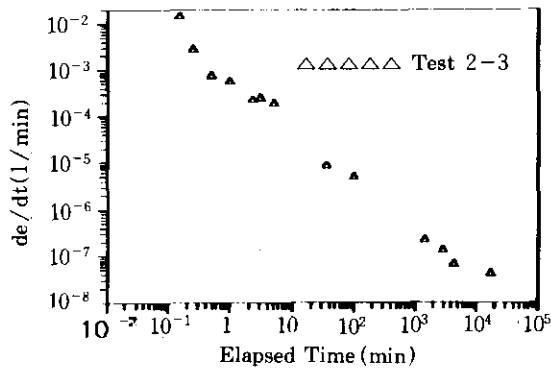
그림 8. 시험 2에서 재재하시 간극비( $e$ )와 경과시간 관계



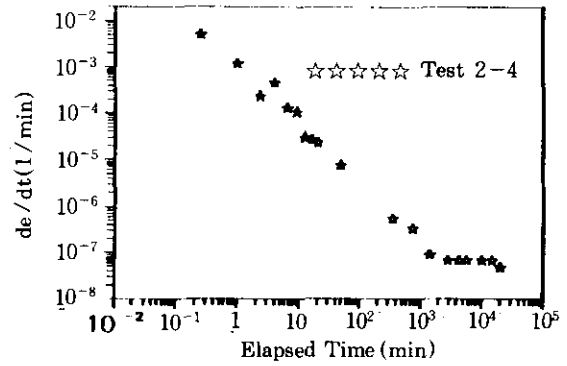
(a) Test2-1



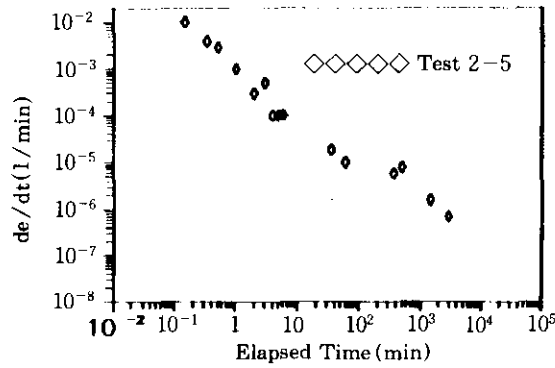
(b) Test2-2



(c) Test2-3



(d) Test2-4



(e) Test2-5

그림 9. 시험 2에서 재재하시 Creep 변화속도와 경과시간 관계



경향도 있다. 이것은 2차압밀과정에 있어서 2차압밀계수  $C\alpha$ 가 일정한 값으로 수렴하지 않고 전반부( $C_{\alpha 1}$ )와 후반부( $C_{\alpha 2}$ )에서는 그 값이 각각 다르기 때문이라고 생각된다.

본 연구와 같이 시간효과 및 응력이력에 의해 간극비를 감소한 상태에 있는 과압밀점토에 대해 Bjerrum모델의 적용성을 검토하는 경우에는 2차압밀의 기준시간( $t_c$ )의 결정방법을 검토할 필요가 있다. 본 실험은 그림 10과 같이  $P_c$ 까지 재하한 후  $P_s$ 까지 제하하고  $P_r$ 까지 재하 하고 있는 경우이므로 a점의 시간이 어떠한 등시압축선을 기준으로 한 시간인가( $t_1 \sim t_n$  line)를 결정하는 것은 곤란하다. 즉 기준시간의 결정방법에 따라 변하지 않는 변형속도 ( $de/dt$ )와 간극비  $e$ 로 각 Test를 정리하여 보면 그림 11과 같으며, 여기서 그림에 표시한 평행선은 압밀압력  $3.2\text{kg/cm}^2$ 에서 Creep시험에 의해 얻어진  $C\alpha=0.0051$ 를 이용하여 식(6)에서 설명된 Bjerrum모델의 등압력선을 표시한 것이며 실선위의 숫자는 압밀하중( $p$ )이다. 각 Test 2-1~3의 경우는  $\log(de/dt)$ 가 초기압밀 과정에서 간극비의 감소에 따라 급격히 감소되고 있으나 재재하하중이 정규압밀영역에 있는 Test 2-4, 5의 경우는 어느 정도 기울기가 완만하게 되어 등압력선과 유사한 변화과정을 거치고 있다. 전반적으로 재재하 하중이 큰 Test 일수록 위쪽으로 이동하는 경향을 나타내고 있으며 재재하 하중이 정규압밀영역에 있는 Test 2-4, 5는 기울기가 완만한 부분 즉 초기 압밀부분에서는 Bjerrum모델의 등압력선을 따라 변화하고 있다. 따라서 OCR이 큰쪽에서 작은 쪽으로 이동할 수록 기울기는 서서히 완만하게 되고 본실험에서는 확인되지 않았지만 시간이 충분히 경과하여 간극비가 감소할 수록 Bjerrum모델의 정규압밀의 등압력선을 따를 것으로 추측된다. 그러므로 응력이력을 받은 과압밀점토의 2차압밀특성은 미소 응력이력 범위에서는 Bjerrum모델의 적용은 문제가 있지만 응력이력의 영향에는 한계가 있고 어떠한 형으로도 이 범위를 벗어나면 Bjerrum모델의

적용은 가능하리라고 예상된다.

실제적으로 선행재하공법등에 의해 과압밀 상태가 된 점토지반의 Creep침하 해석에는 1주간정도의 실내시험에서 구한  $C\alpha$ 가 이용된다. 그러나 이것은 전술한 전반부의 구배에 해당되며 이 값에 의해 해석을 하면 구배가 급한 2차압밀 후반에서는 해석치가 과소평가 될 가능성이 있다. 역으로 OCR이 큰 경우에는 응력이력의 영향을 탈피하는데 많은 시간이 필요하나 실제 해석대상은 응력이력 범위에 있는 2차압밀초기값(전반부의 구배)만을 고려하게 되므로 해석시에는 OCR과 응력이력의 영향범위 등을 고려할 필요가 있다.

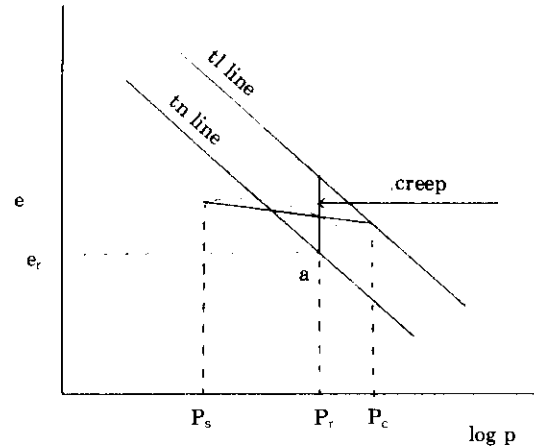


그림 10. 2차압밀의 기준시간

#### 4.3 除荷荷重影響(Test 3)

시험 2의 고찰을 통하여 응력이력 변화가 큰 부분(OCR증가)에서는 2차압밀특성이 각각 다른 것으로 예상되므로 본검토에서는 더욱 상세한 검토를 하고자 한다. 먼저 제하하는 하중을 바꾸어 팽창량이나 최대 OCR이 2차압밀 특성에 어떠한 영향을 미치는지를 검토하기 위하여 시험 3의 결과를 그림 12에  $e - \log t$  관계로 표시하였다. 시험 2와 마찬가지로 2차압밀과정에서 구배가 완만한 직선부의 전반부(10~1000

분)와 Bjerrum모델에 따라 침하 또는 침하형태로 이동하는 후반부(1000분이상)가 존재하는 경향이 있고 굴곡점이 나타나는 시기는 거의 같은 시간(1000분정도)이다. 각 Test는 재하하는 하중이 다르기 때문에 재하시의 유효상재응력이 작은 Test일수록 팽창량도 크므로 시험개시시의 초기간극비도 크게 된다. 그러나 재재하후 수분간(15분정도)에 그 차이는 없어지고 각 곡선은 거의 같은 시간에 교차하는 형이 된다. 그 이후는 초기간극비가 큰 것이 작은 것을 하회하여 더욱이 간극비의 감소속도가 커지면서 침하가 진행되고 있다(그림 12).

Bjerrum모델로 부터 생각하면 초기간극비가 다른 점토를 동일 압밀하중으로 압밀한 경우의  $e-\log t$ 관계는 그림 13에서 표시한 것과 같이 초기간극비가 큰 것이 위로부터 작은 것이 아래로부터 어떤 Unique한직선으로 접근하는 것으로 예상된다. 그러나 시험결과는 이것과는 다르고 각 Test는 교차한 후의 2차압밀초기(10~100분)에서 재하시의 응력이 큰 순서로 간격이 넓어지고 있다. 결국 최대 OCR이 큰 Test일수록 초기 2차압밀계수  $C_{\alpha 1}$ (10~1500분간의 구배)은 크게 된다. 초기 2차 압밀계수  $C_{\alpha 1}$ 와 최대 OCR의 관계를 표시하였을 경우 그림 14에 표시한 것처럼 양관계는 선형관계이다. 한편 시험2의 결과에 대한 그림8의 Test 2-1~2(30~1500분간의 구배), Test2-4(200~1000분간의 구배)의 경우에도 OCR이 클수록  $C_{\alpha 1}$ 이 작다. 그러므로 본 연구와 같이 재하-재하-재재하의 응력이력을 받는 경우 재재하 과정의 초기 2차압밀계수  $C_{\alpha 1}$ 은 재재하시의 OCR과 최대 OCR의 양자에 영향을 받고 있다고 생각 할 수 있다.

한편 그림 12에서 2차압밀후반의 구배  $C_{\alpha 2}$ (1500~20000분간의 구배)는 각 Test에서 차이가 미소하다. 따라서 시험 2, 3의 결과에 의하면 재재하시에 2차압밀특성은 그 초기에 있어서는 최대 OCR의 영향을 받지만 시간이 경과함에 따라서 최대 OCR의 영향은 작고 OCR의 영향을 받을 것으로 예상된다.

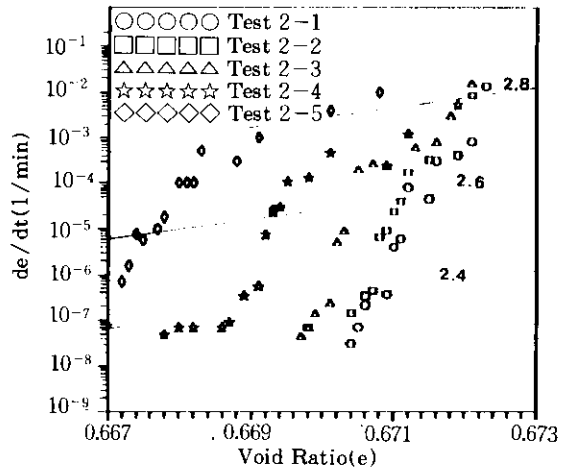


그림 11. 각 Test에서  $e-\log(de/dt)$ 관계

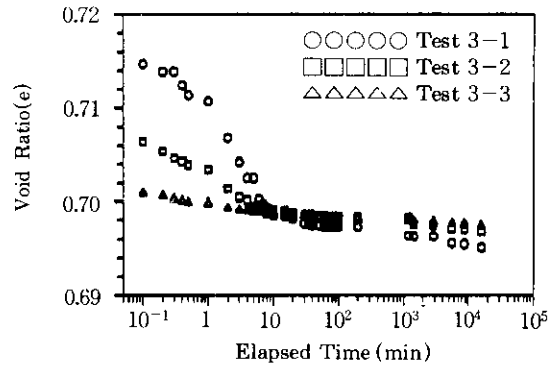


그림 12. 시험 3에서 간극비(e)와 경과시간 관계

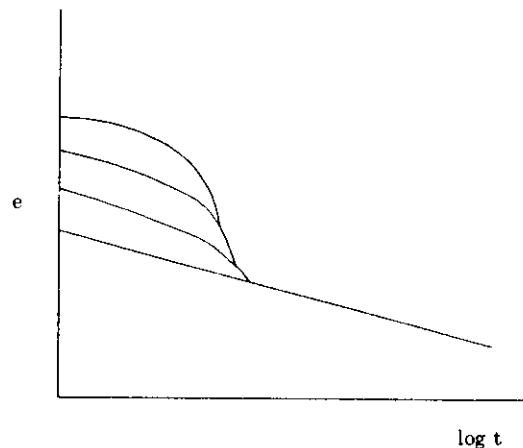


그림 13. Bjerrum모델에 의한  $e-\log t$  관계

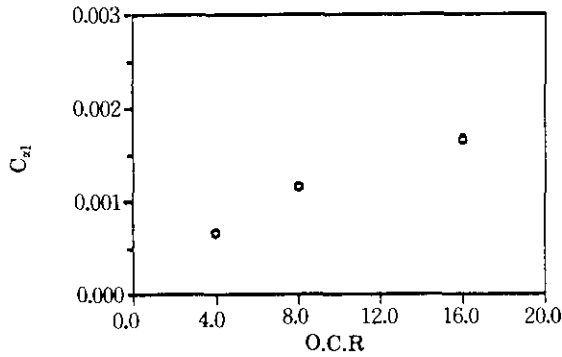


그림14. 시험 3에서 초기 2차압밀계수  $C_{2i}$ 와 최대OCR 관계

## 5. 결 론

본 연구는 사전압밀된 포화점토의 응력이력이 2차압밀특성에 미치는 영향 및 Bjerrum모델이 과압밀점토의 2차압밀에 적용가능한지를 실험적으로 파악하기 위하여 실내에서 재성형된 포화점토를 이용하여 재하-재하 및 재하-재하-재하 응력이력 조건하에 일련의 장기 압밀시험을 실시하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 除荷過程에서 점토는 除荷에 따라 일단 팽창하고 극대치에 도달한 후 재침하과정으로 진행하며 최대팽창량은 과압밀비 OCR의 증가에 따라 상승된다.
- 2) 除荷過程에서 팽창후 再沈下시에 2차압밀계수는  $C_s$ 는 미소응력이력변화 범위에서는 과압밀비(OCR)의 증가에 따라 감소된다.
- 3) 응력이력에 의해 과압밀된 점토에 대해 Bjerrum모델을 직접 적용하는 것은 문제가 있으므로 응력이력범위를 고려하여 적용하여야 한다.
- 4) 초기 2차압밀계수는  $C_{2i}$ 은 OCR, 최대 OCR, 재하시간등의 영향을 받고 최대 OCR이 일정한 경우에는 OCR의 증가에 따라 감소하며 OCR이 일정한 경우에는 최대 OCR의 대수와 선형관계이고 2차압밀과정의 후반부는 응력이력의 영향을 받

는다.

- 5) 과압밀점토지반 침하예측을 하는 경우 2차압밀에 의한 잔류침하를 초기 2차압밀계수  $C_{2i}$ 에 의해 구하면 OCR에 따라서는 과소평가되는 경우가 있으므로 응력이력 영향범위를 고려 하여야 한다.
- 6) 본 연구실험에서는 표준압밀시험장치의 주변마찰, 온도등의 영향을 무시한 상태에서 수행되었고 침하거동이 매우 미소한 범위에서 얻어진 연구결과이므로 앞으로 이러한 문제점이 보완되도록 지속적인 연구가 요구되며 3축압축 시험에 의해 보다 더 광범위한 응력이력 범위에서 연구를 수행할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 1993년도 한국학술진흥재단의 신진교수공모과제의 연구비에 의하여 이루어진 것으로, 이에 대하여 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Aldrich, H.P.,(1965) "Precompression for support of shallow foundation", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 91, No.SM2, pp.5~20.
2. Bjerrum, L.(1967), "Engineering geology of norweigan normally consolidated marine clays as related to settlement of buildings", Geotechnique, Vol.17, No.2, pp.83~117.
3. Crawford, C.B. and Sutherland, J.G.(1971) "The empress hotel victoria Brith Columbia sixty-five years of foundation settlements", Canadian Geotech. Jour., Vol.8, No.1, pp. 77~93.
4. Johnson, S.J.(1970), "Precompression for improving foundation soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.96, No.SM1, pp.111~144.

5. Mesri, G.,(1977) "Time and stress-compressibility interrelationship", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.103, GT5, pp.417~430.
6. 網干壽夫, 松田博(1983) 層別計測による粘土層の事前圧密工法に関する基礎的研究, *日本土木學會論文報告集*, No.340, pp.139~144.
7. 安川郁雄, 嘉門雅史: 粘性土の二次壓密における荷重條件の影響, *日本土木學會論文報告集*, Vol. 27, No.2, pp.93~106.
8. 中野但(1966) サーチャージ工法に関する一考察, *土と基礎*, Vol.14, No.5, pp.39~43.
9. 日本土質工學會編(1987) 土質試験法, pp.6-2-13~6-2-14.  
(접수일자 1994. 10. 24)