

## 샌드 드레인으로 개량된 점토지반의 내부거동에 대한 압밀변형 메커니즘

### Mechanism of Consolidation Displacement on Internal Behavior of Clay Ground Improved by Sand Drain

백 원 진\*

Baek, Won Jin

#### Abstract

In this study, the large scaled model test improved by sand drain was carried out to clarify the internal behavior of the three-dimensional consolidation under different secondary consolidation periods. From the results of model test, the void ratio in the undrained side was larger than in the drained side. In addition, the unconfined compressive strength in the long-term consolidated specimen was larger than that in the short-term consolidated one. It was also found that the unconfined compressive strength was larger in the drained side than in the undrained side. These reasons are considered to be due to the large effective stress by quick pore water pressure dissipation by the short drainage distance in the drained side.

Furthermore, in order to investigate the three-dimensional consolidation behavior of clay ground improved by the vertical drain method, the numerical analysis obtained from the three-dimensional elasto-viscous consolidation theory proposed by author (2006) were compared with the test results. It was found that during the three-dimensional consolidation process not only vertical displacement but also radial displacement occurs inside the specimen.

*Keywords : Three-dimensional, Consolidation behavior, Sand drain, Internal radial displacement, Secondary consolidation*

#### I. 서 론

연약지반 개량공법으로서는 샌드 드레인(Sand drain) 혹은 연직 배수재(VERTICAL drain)를 이용한 개량공법이 연약점토지반의 대표적인 개량공법으로서 실용화된 이래로 폭넓게 이용되고 있다. 그러나 시공예가 증가하고 개량공법이 다양화됨에 따라 연직 배수공법의 유효론과 무효론(VERTICAL

\* 일본 야마구치대학 공학부 사회건설공학과 조수  
\* Corresponding author. Tel.: +81-836-85-9325  
Fax: +81-836-85-9301  
E-mail address: bwj215@yamaguchi-u.ac.jp

drain의 유효성에 관한 연구위원회, 1988)의 많은 논의가 있어 왔다. 연직 배수재의 무효설을 주장하고 있는 일본 도로공단(1986)에 의하면 [침하촉진에는 효과가 없지만, 지반내의 간극수압이나 강도는 무개량 지반과 개량지반사이에 확연한 유의차가 있으며, 연직 배수재의 효과는 인정되어진다]라는 방향으로 바뀌어가고 있다. 이것은 비개량 지반과 연직 배수재 타설지반의 내부거동의 차이에 의한 현상으로, 변형률의 적분량인 지표면 침하량은 동일하여도 지반내에서 발생하는 변형률의 종류(체적 혹은 전단변형률) 및 분포가 다름을 암시하고 있다. 이에 대한 연구로서, 住岡 등(1993)이 실제의 샌드 드레인 타설지반의 조사결과로부터 타설된 배수재 사이의 점토에 압밀 종료 후에 균일하지 않은 응력 및 변형률의 분포에 대한 실험결과를 보고하였다. 이러한 거동은 Barron(1948)이 제안한 연직 배수재의 해석법을 기본으로 한 설계법에서의 예측과는 성격을 달리 하고 있다. 즉, 탄성압밀론에 의하면 압밀이 종료하여 간극수압의 소산이 종료된 후에는 응력 및 변형률이 균일하게 분포하지만, 실제 지반에서는 이와는 다르게 배수면 부근에의 현저한 응력집중이 발생하게 된다. 특히, 연직 배수재에 의해 개량된 지반내부에서는 배수방향(수평방사방향)과 변위방향(연직방향)이 다르기 때문에, 점토의 내부거동을 상세히 조사할 필요가 있다.

본 연구에서는 등연직변형률 조건하에서  $K_0$ 변형 조건(측방변위를 구속)을 만족하며, 배수가 공시체의 중심으로 발생하는 수평방사흐름인 경우에 대한 샌드 드레인 타설 지반의 압밀변형 메커니즘을 규명하기 위해 실내 모형실험을 수행하고, 삼차원적인 점토의 압밀거동을 조사하였다. 또한, Yoshikuni 등(1994)이 제안한 1차원 탄-점성 압밀이론을 축대칭 변형조건하의 3차원으로 확장한 탄-점성압밀이론(Baek 등 2006)에 의해 모형실험에 대한 수치해석결과를 토대로 연직 배수재에 의한 압밀의 변형 메커니즘에 대해서 고찰하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 사용시료

이 연구에 사용한 점토시료는 일본 히로시마현에서 채취한 Hiroshima 점토를 실내에서 재성형한 것으로, 샌드 드레인재로 사용된 모래는 일본의 표준사인 Toyoura sand를 이용하였으며, 물리적 특성은 비중 2.64, 최대간극비  $e_{max}=0.99$ , 최소간극비  $e_{min}=0.63$ 이다. Hiroshima 점토의 물리적 특성은 비중 2.63, 액성한계 105.0%, 소성지수 64.0이다.

### 2. 모형실험장치

본 연구에서 사용한 모형실험장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같으며, 점토시료(직경  $d_c=247.4$  mm)의 공시체 중앙에 샌드 드레인(직경  $d_s=50.0$  mm)을 조성하였다. 점토시료 상부에는 중공(직경 50.0 mm) 아크릴판(직경 247.4 mm, 두께 20.0 mm)을 설치하여 점토시료의 상부배수를 방지하고, 수평방사방향 흐름을 유지하였다. 또한, 샌드 드레인과 재하판 사이에 스폰지(직경 50.0 mm, 배수

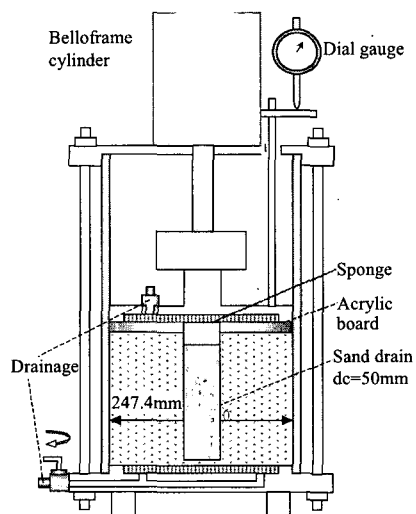


Fig. 1 Large scaled consolidation test apparatus

능을 유지하며 점토시료의 측방변위를 제어)를 설치하여 샌드 드레인에의 응력집중을 최소화하고 등연직변형률 조건을 유지한 실험을 행하였다.

### 3. 실험 방법 및 실험조건

#### 가. 모형지반의 작성

샌드 드레인으로 개량된 모형지반을 재현하기 위해, 먼저 점토를 슬러리 상태로 하여 420  $\mu\text{m}$ 의 체분석을 통해 조립분 및 조개껍질 등의 이물질 제거하고, 함수비를 액성한계의 약 2배(210( $\pm$ 3)%)로 조정하였다. 함수비조정이 끝난 슬러리상의 시료를 교반 탈기조에 투입하여 8시간 이상 진공 탈기를 행한 후, Fig. 1에 나타난 모형압밀 실험기의 외벽에 마찰을 줄이기 위한 그리스를 충분히 바르고, 공기가 유입되지 않도록 주의를 기울여 투입한 후 24시간 자중압밀을 실시하였다. 그 후 복동식 벨로프레임 실린더에 의한 재하 장치를 이용하여 압밀하중 4.9, 9.8, 19.6, 49.0 kPa로 4단계 재하를 행하였다. 3단계 재하까지는 24시간 재하하고 최종 4단계에서는 1차압밀의 종료를 3t법(각 하중 단계에 대한 압밀시험 결과로부터 얻어진  $s-\log t$  곡선의 최급기울기선과  $\log t$  시간축이 교차하는 시간  $t$ 를 구하고, 이 시간의 3배일 때의 동일 기울기를 갖는 직선(3t선)과 침하곡선이 교차할 때를 일차 압밀종료로 정의; 일본 지반공학회 토질시험법 1990)에 의해 확인한 후, 압밀용기로부터 재하 장치를 해제하고 공시체의 중심을 목공용 드릴을 이용하여 직경 50.0 mm로 천공하였다. 이때 배수재 하단에는 2.0 cm 정도의 점토층을 남겨서 점토공시체 하단을 비배수 조건에 근접하도록 하였다. 샌드 드레인 재료인 Toyoura sand는 수중낙하법에 의해 충전 ( $D_r=70\%$ )하였다. 샌드 드레인 상부에는 동일직경의 스펀지를 설치하여 샌드 드레인에의 응력집중을 최소화하고, Fig. 2에 나타난 바와 같이, 수평방사방향 배수에 의한 샌드 드레인 개량지반의 압밀종료 후의 압밀거동을 조사하기 위하여

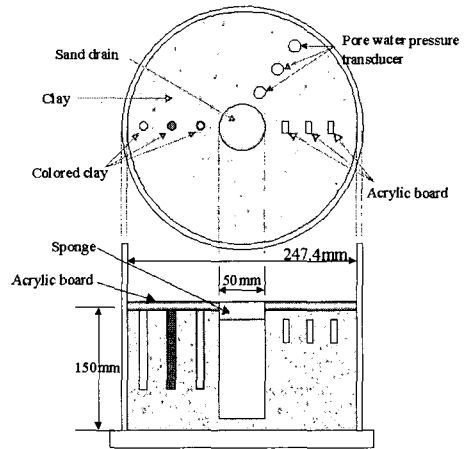


Fig. 2 Schematic diagram of test conditions

배수재측 및 중앙, 비배수면측에 해당하는 공시체 중앙으로부터 거리  $r=5, 7.5, 10.0$  cm의 위치에 압밀종료후의 단면으로부터 초기 매설위치에 대한 변화를 시각적으로 확인하기 위하여 착색점토 및 아크릴 판(15 $\times$ 20 $\times$ 2 mm)를 매설하였으며, 매설한 아크릴판이 간극수의 수평방향 흐름에 영향을 받지 않도록 2 mm 간격으로 천공(직경 1 mm)하였다. 또한, 수평방사방향 흐름에 의한 간극수압의 소산 과정을 조사하기 위하여 공시체 중심으로부터의 거리  $r=4.5, 7.5, 10.8$  cm에 간극수압계를 매설하였다.

#### 나. 실험 방법 및 실험조건

모형지반의 조성이 끝난 후, 재하장치를 설치하고 샌드 드레인과 점토의 응력상태를 안정시키기 위하여 49.0 kPa의 압밀응력으로 2일간 사전압밀을 행하였다. 본 실험은 147.0 kPa의 압밀응력으로 등연직변형률 조건으로 압밀을 행하였다. 각 실험조건에서의 압밀방치기간은 일본토질시험법에 표기된  $\gamma_t$ 법에 따라, 1.1t, 3.0t, 5.0t의 3패턴에 대해서 행하였다. 실험조건을 Table 1에 나타낸다. 표에 나타난  $\gamma_t$ 는 일차압밀종료시를 1.0으로 하였을 때의 방치기간의 비를 나타낸다.

소정의 압밀방치기간이 끝난 후의 공시체에 대해서, 압밀용기로부터 신중히 꺼내어 샌드 드레인 외

주면으로 부터 동심원상으로 1 cm 간격으로 시료를 채취하여, 깊이방향에 대해 3층으로 분할하고 반경방향으로 8개 요소로 분할하여 함수비 시험 및 일축압축시험을 행하였다. Fig. 3에 시료채취 단면의 모식도를 나타내었다. 본 연구에서 사용한 일축 압축시험 공시체는 직경 2 cm, 높이 4 cm로 작성하였다. 이는 龜井(1993)등, 藤原(2006)등에 의한 층적 연약 점성토에 대한 일축압축강도에 대해서는 소형공시체에 의한 결과가 적용가능하다는 연구결과에 근거하고 있다. 함수비 실험결과를 근거로 배수면과 비배수면의 점토의 함수비 분포를 조사하였으며, 이 결과를 이용하여 포화 점토시료에 대한 간극비( $e=Gs \times w/100$ )를 산정하였다. 또한, 일축압축시험 결과를 이용하여, 간접적이긴 하나 반경방향의 응력분포를 조사하였다.

#### 4. 삼차원 탄-점성 압밀이론

저자는 연직 배수재로 개량된 점성토 지반의 삼

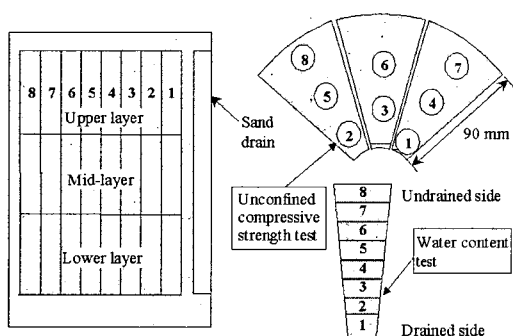


Fig. 3 Sampling position of water content and unconfined compression tests

차원 압밀이론의 메커니즘을 명확히 하기 위하여 과압밀 점토 및 정규압밀 점토의 구별없이 이차압밀현상을 통일적으로 표현할 수 있는 Yoshikuni 등(1994, 1995)의 일차원 탄-점성 압밀이론을 삼차원 조건으로 확장하고, 그 적용성을 검토해 왔다. 여기서는 삼차원 탄-점성 압밀이론의 개요를 소개한다. 일차원 탄-점성이론의 유연학적 모델에 대한 개요도가 Fig. 4이며, 이 모델은 Hooke의 탄성이론에 의한 Spring모델과 Newton의 점성체 모델에 의한 Dashpot 모델의 직렬연결(Maxwell Model)로 구성되어있다. 그림에서  $\sigma'_h$  및  $e_h$ 는 스프링에 작용하는 유효응력 및 간극비를 나타내며,  $\sigma'_n$  및  $e_n$ 는 Dashpot에 작용하는 유효응력 및 간극비를 나타낸다. 또한,  $m_v$ 는 체적압축계수,  $\eta$ 는 체적압축 점성계수를 나타낸다.

식 (1)은 점토의 골격을 비선형 탄-점성체로 하였을 때의 삼차원 유연학적 방정식이다.

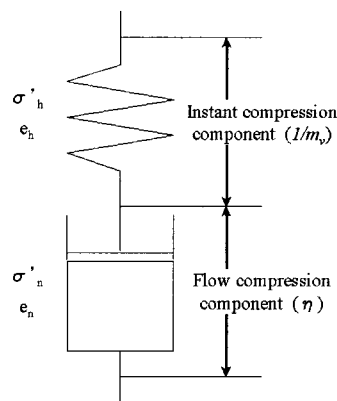


Fig. 4 Schematic diagram of Elasto-viscous model

Table 1 Test condition of large scaled consolidation test

Case	Dia. of sand drain (mm)	Water content (%)	Consolidation pressure (kPa)	Consolidation time ( $\gamma_t$ )	Height of clay specimen (cm)
C-1	50	64.92	149	1.1	16.51
C-2		65.71		3.0	16.43
C-3		65.60		5.0	16.25

$$\sigma'_{ij} = \left( K + \frac{4}{3} G \right) \epsilon'_{kk} \delta_{ij} - 2G (\epsilon'_{kk} \delta_{ij} - \epsilon'_{ij}) - \left( \frac{K}{\eta_K} + \frac{G}{\eta_G} \right) \frac{\sigma_{kk}}{3} \delta_{ij} - \frac{G}{\eta_G} \sigma'_{ij}$$

.....(1)

여기서,  $K$ 와  $G$ 는 각각 체적탄성계수와 전단탄성계수,  $\eta_K$ 와  $\eta_G$ 는 체적점성계수와 전단점성계수이며, 응력과 변형률(간극비)에 의존한다(Yoshikuni 등 1995). 이 삼차원 유변학적 방정식을 이용해서 연직 배수재에 의한 압밀의 가장 대표적인 경계조건인 내주면과 외주면의 변위를 구속하고, 등연직변형률 조건하에서 일정하중이 작용하는 경우로 정리하면 식 (1)로부터 간극수압의 소산 방정식이 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w} \left( K + \frac{4}{3} G \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$+ \frac{1}{\gamma_w} \left( K + \frac{4}{3} G \right) \frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$+ \frac{p-u}{T_G} + \frac{T_G - T_K}{T_G T_K} \left( \frac{p+2p_r}{3} - u \right)$$

.....(2)

여기서,  $T_K$ 와  $T_G$ 는  $T_K = \eta_K / K$ ,  $T_G = \eta_G / G$ 로서 정의되어지며, 체적변형과 전단변형에 관한 완화시간을 나타낸다. 식 (2)는, 우변의 제 1항과 2항이 배수에 따른 간극수압의 감소항, 제 3항이 삼차원적인 변형을 고려한 유효응력완화에 따른 간극수압의 증가항, 제 4항이 체적변형과 전단변형의 완화시간의 차이에 의한 간극수압의 증가항을 나타내며, 압밀현상이 단지 간극수압의 소산현상뿐이 아니라 소산과 증가가 동시에 진행되는 현상임을 나타낸다.

본 연구에서의 수치해석은, 유한차분법에 의해 우선 식 (2)의 간극수압에 관한 2계 비선형 편미분방정식을 시간에 관해서 전진차분, 위치에 관해서는 중간차분에 의해 차분화하고, 주어진 경계조

건과 초기조건에 대해서 다음 시점의 간극수압을 구한다. 그리고 얻어진 간극수압과 응력의 평형방정식으로부터 유효응력을 구하고 식 (1)을 전진차분에 의해 차분화한 유변학적 방정식에 대입하여 다음 시점의 변형률, 변위 및 간극비를 구하는 방법으로 반복계산을 행하였다(Baek 등, 2006).

### III. 실험결과 및 삼차원 탄-점성 압밀이론에 의한 고찰

#### 1. 실험결과

이차압밀기간의 영향에 의한 연직 배수재 개량지반의 압밀거동을 명확히 하기 위하여 수행한 모형 실험으로부터 얻어진 침하-시간관계를 나타낸 것이 Fig. 5이다. 그림에는 비개량 지반에서의 침하-시간곡선도 함께 나타내었다. 배수거리의 차이에 의해 비개량 지반의 경우가 개량지반에 비해 압밀이 서서히 진행되며, 연직 배수재로 개량된 경우의 압밀침하곡선이 거의 동일한 형상을 나타내고 있다. 1.1t의 경우, 일차압밀이 거의 종료한 상태에 도달하였으며, 3.0t와 5.0t의 경우, s-logt 곡선의 기울기가 선형적으로 증가하는 이차압밀단계에 있음을 알 수 있다.

모형지반의 압밀이 소정의 압밀기간에 도달한 후, 실험기에서 분리한 공시체에 대해 Fig. 3에 나타낸 시료채취 방법에 의하여 함수비 실험을 행하고 포화된 점토시료에 대한 함수비와 간극비와의

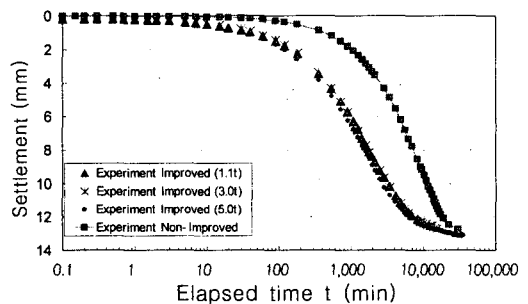
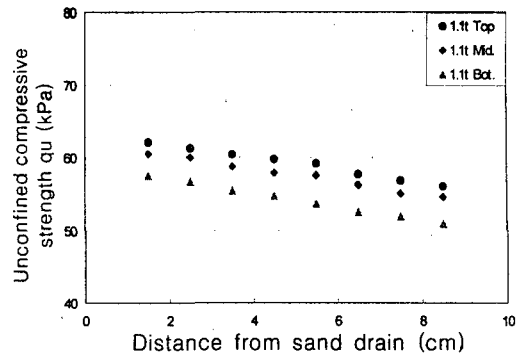


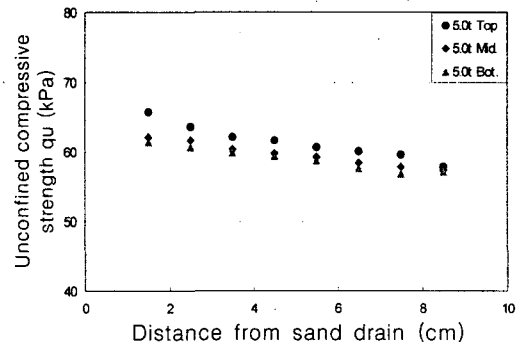
Fig. 5 Settlement-time curves of clay specimen

관계식( $e=Gs \times w$ )을 이용하여 배수면으로부터 거리에 따른 간극비 분포를 나타낸 것이 Fig. 6이다. 그림에는 공시체 상부와 저부에서의 결과를 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 것처럼, 압밀기간에 따른 차이는 있으나 압밀종료 후의 간극비는 반경방향으로 일정하지 않고 배수면측에서 적은 값을 보이며 반경방향으로 증가하는 분포경향을 나타낸다. 이는 배수거리가 짧은 배수면측에서 압밀초기의 빠른 간극수압 소산에 의한 압밀축진의 영향으로 압밀초기에 큰 유효응력을 받은 배수면측의 점토 요소가 비배수면측의 점토요소 보다 큰 압밀응력을 받았음을 의미하며, Barron이 제안한 탄성이론에 의한 간극수압소산 후의 반경방향의 유효응력일정 조건과는 상이한 결과를 나타낸다. 또한, 압밀기간이 긴 5.0t의 경우에 배수면측과 비배수면측의 차이가 감소하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 압밀종료후의 공시체의 연직방향에 대한 상, 중 하부에서 행한 1.1t와 5.0t의 일축압축시험결과를 나타낸 것이다. 그림에 나타낸 바와 같이, 연직 배수재로 개량된 지반에 있어서 배수면측의 일축압축강도가 현저하게 큰 값을 보이며, 압밀기간이 비교적 짧은 1.1t의 경우에는 연직방향으로의 일축압축강도에도 차이가 나타남을 알 수 있다. 또한, 압밀기간이 장기간인 경우에 큰 일축압축강도를 나타내며, 간극비의 반경방향으로 증가하는 경향과 달리 반경방향으로 감소하는 분포경향을 나타낸다. 이는, 배수면측의 점토요소가 간극수압소산의



(a) 1.1t



(b) 5.0t

Fig. 7 Radial distributions of unconfined compressive strength

빠른 소산과 더불어 큰 유효응력하에서 압밀되어지므로 비배수면측의 점토요소 보다 적은 간극비를 나타내며, 일축압축강도는 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 배수방향과 침하방향이 다른 샌드 드레인 개량지반의 등연직변형을 조건의 압밀과정에서 배수재와 점토공시체 사이에서 반경방향으로의 응력분포가 일어남을 의미한다(Baek 등 2002, 2004).

## 2. 실험결과와 수치해석결과의 비교 및 고찰

모형실험에서 얻어진 압밀침하-시간관계를 삼차원 탄-점성압밀이론의 수치해석결과와 비교하여 나타낸 것이 Fig. 8이다. Table 2에는 해석에 사용한 대표적인 입력변수를 나타내었으며,  $C_a$ ,  $C_b$ ,

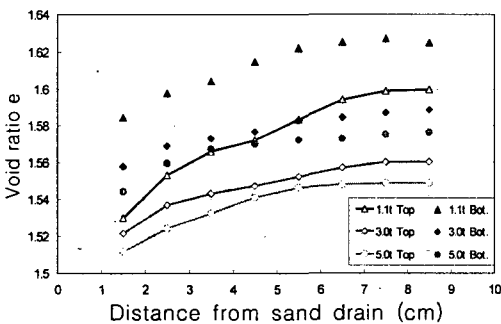


Fig. 6 Radial distributions of void ratio

Table 2 Parameters of the elasto-viscous analysis (Hiroshima clay)

$C_\alpha$	$C_\beta$	$C_\gamma$	$\sigma_0$ (kPa)	$e_0$	$k_0$ (cm/min)	K (kPa)	G (kPa)	$\eta_0$ (kPa)	h (cm)	$\Delta p$ (kPa)
0.02	0.685	0.105	49	1.613	$1.85 \times 10^{-6}$	179.83	67.45	$1.0 \times 10^5$	16.25	98

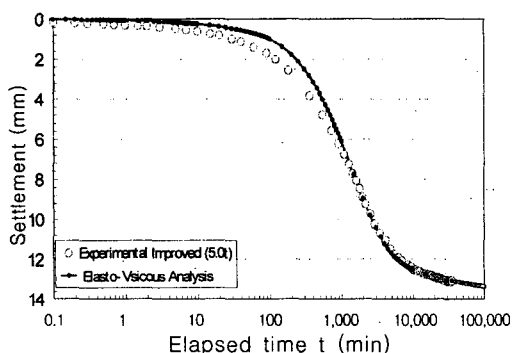


Fig. 8 Settlement-time curves (Elasto-viscous model)

$C_\gamma$ 는 등방압밀시험으로부터 얻어진 이차압밀계수, 압축지수, 팽창지수를 나타낸다. 또한, 표에 나타난 K, G,  $\eta_0$ , h는 체적탄성계수, 전단탄성계수, 초기 점성계수, 초기공시체 높이를 나타낸다. 수치해석결과와 비교를 위해 이용한 실험결과는 연직 배수재 개랑지반에 대해 이차압밀과정이 가장 긴 5.0t의 결과를 이용하였다. 그림에서 삼차원 탄-점성 압밀 이론에 의한 수치해석결과는 압밀초기에 약간의 지연되기는 하나 압밀중반 이후에는 이차압밀과정을 포함하여 실험치와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 9는 모형실험에서 얻어진 공시체의  $(r-rw)/(re-rw)=0.15, 0.50, 0.85$ 에서 얻어진 간극수압 ( $u$ )과 압밀하중( $\Delta p$ )의 비로써 정규화한 간극수압 ( $u/\Delta p$ )의 소산과정과 수치해석결과를 비교한 결과이다. 여기서, r, re, rw는 각각 공시체 중심으로부터의 거리, 연직 배수재에 의한 수평방사흐름의 유효반경, 연직배수재의 반경을 나타낸다. 실험결과에서 비배수면층의  $u/\Delta p$ 가 1.0을 초과하고 있다. 이는 압밀초기에 비배수면층에서는 등연직변형을 조건을 만족시키기 위해 비배수 전단변형이 발생하여

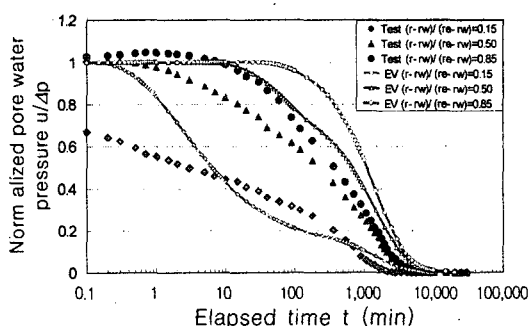


Fig. 9 Normalized pore water pressure-time curves

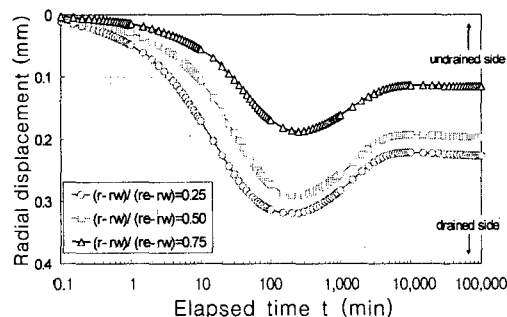


Fig. 10 Radial displacement-time curves (Elasto-viscous model)

이에 따른 부의 다이레이탄시에 의한 간극수압의 발생에 따른 것으로 판단된다. 그러나, 본 연구의 탄-점성압밀이론에서는 전단변형에 따른 다이레이탄시의 영향을 고려하지 않으므로 이 현상의 재현이 불가하다. 또한, 침하-시간관계에서와 마찬가지로 압밀초기에 해석치의 간극수압소산이 지연된 결과를 나타내었다.

Fig. 10은 압밀과정에서 공시체 내부의 변위에 대한 거동을 조사하기 위하여 수치해석결과로부터 얻어진,  $(r-rw)/(re-rw)=0.25, 0.50, 0.75$ 에서

의 반경방향 변위의 경시변화를 나타낸 것이다. 그림에서, 샌드 드레인에 의한 수평방사방향의 압밀과정중에 반경방향으로 변위가 일어나고 있으며, 압밀초기에 배수면측을 향해서 발생하여 최고치를 나타낸 후, 비배수면측을 향해서 변위가 일어나며, 배수면측의 변위가 큰 값을 나타내고 있다. 이러한 결과는 Baek 등(2004)이 수행한 소형 삼차원 압밀시험 결과에서도 동일한 결과가 얻어졌다.

### 3. 연직 배수재에 의한 삼차원압밀의 메커니즘

앞 절에서 얻어진 샌드 드레인으로 개량된 모형지반의 압밀실험결과와 삼차원 탄-점성 압밀이론에 의한 수치해석결과로부터, 연직 배수재에 의한 압밀 메커니즘은 다음과 같이 요약할 수 있다. 연직 배수재가 타설되지 않은 일차원압밀(공시체 저면으로의 편면배수)에서는, 압밀의 전과정에 있어서 간극수의 이동이 연직방향으로만 일어나므로, 점토 공시체 내부의 변형도 연직방향으로만 발생하게 된다. 그러나 간극수의 이동(수평 방사방향)과 변형의 진행방향(연직방향)이 다른 연직 배수재에 의한 삼차원압밀에서는, 압밀초기에 배수면측(내측)의 점토요소에서 간극수압의 소산이 빠르게 진행되므로 큰 체적변형이 발생하지만, 비배수면측(외측)의 요소에서는 간극수압의 소산이 지연되어 체적변형보다 전단변형(비배수)이 우세하게 되므로, 비배수면측으로부터 배수면측을 향한 반경방향의 변위가 발생한다. 한편, 압밀후반에는 배수면측의 간극수의 배수가 종료되어 체적변형이 거의 발생하기 않기 때문에 전단변형이 우세하게 되며, 비배수면측의 요소에서는 지연된 간극수압의 소산과 더불어 체적변형이 진행되게 된다. 이 때문에 등연직변형률 조건을 유지하기 위해, 수치해석결과인 Fig. 10에 나타낸 것처럼 배수면측으로부터 비배수면측을 향한 반경방향의 변위가 발생할 것으로 판단된다(Baek 등 2002, 2004).

## IV. 결 론

등연직변형률 조건하에서 배수가 공시체의 중심으로 발생하는 수평방사흐름인 샌드 드레인 개량지반의 압밀변형 메커니즘을 규명하기 위해 실내 모형실험을 수행하고, 축대칭 변형조건하에 3차원으로 확장한 탄-점성 압밀이론에 의해 샌드 드레인에 의한 압밀변형 메커니즘에 대해 고찰한 결과는 다음과 같다.

1. 드레인으로 개량된 모형지반에서는 수평방사방향흐름에 의해 점토공시체와 드레인간의 배수거리에 따라 간극비 및 일축압축강도가 반경방향으로 일정하지 않고 간극비는 반경방향으로 증가, 일축압축강도는 감소하는 경향을 나타내며, 압밀종료후에도 반경방향에 따라 변화한다.

2. 간극비 및 일축압축강도는 비배수면측 보다 배수면측에서 큰 감소를 나타내었으며, 배수면측에서 큰 값을 보이고, 압밀기간이 장기화 될수록 뚜렷한 분포 경향을 나타내었다. 이는 배수면측의 응력집중 및 간극수압 소산 후 일정 유효응력하의 장기압밀에 따른 점토골격의 구조형성에 기인한 것으로 판단된다.

3. 삼차원 탄-점성 압밀이론에 의한 침하-시간 해석결과와 실험치는 잘 일치하였으며, 반경방향변위에 대한 해석결과로부터, 등연직변형률 조건하의 연직 배수재 개량지반의 점토 공시체의 내부거동은 압밀초기에는 배수재를 향한 변위가 발생한 후 최고치를 보이고, 비배수면측으로 변위가 발생하였다.

4. 모형실험결과와 수치해석결과로부터, 연직 배수재에 의한 삼차원압밀에서는, 압밀초기에 배수재측(내측; 배수면측)의 점토요소가 빠른 간극수압의 소산으로 큰 체적변형이 발생하고, 비배수면측(외측)의 요소는 간극수압 소산이 느리기 때문에 체적변형은 거의 발생하지 않고, 등연직변형률의 변형조건에 의해 비배수면 측에서는 비배수 전단변형의 발생으로 배수재측을 향한 반경방향의 변위가 발생한다. 또한, 압밀후반에는 배수재측의 간극수의 배



수가 거의 종료되어 체적변형이 발생하지 않기 때문에 전단변형이 우세하게 되며, 비배수면 측의 요소에서는 간극수압의 소산과 더불어 체적변형이 진행되므로 등(연직)변형률 조건을 유지하기 위해 배수재측으로부터 비배수면 측을 향한 반경방향의 변위가 발생하는 것으로 판단된다.

## References

1. Barron, R. A., 1948, Consolidation of fine-grained soils by drain wells, Transactions ASCE, Vol. 113, No. 2346, pp. 718~742.
2. Baek, W., Moriwaki, T. and Kikuchi, Y., 2002, Measurement and interpretation of three-dimensional consolidation behavior in clayey ground improved by vertical drains, Ground Engineering(Journal of Chugoku Branch, JGS), Vol. 20, No. 1, pp. 71-79 (in Japanese).
3. Baek, W. and Moriwaki, T., 2004, Internal behavior of clayey ground improved by vertical drains in 3D consolidation process, Soils and Foundations, Vol. 44, No. 3, pp. 25-37.
4. Baek, W., Moriwaki, T. and Sasaki, Y., 2006, Numerical analyses on consolidation of clayey ground improved by vertical drain system based on 3-D Elasto-Viscous model, Soils and Foundations, Vol. 46, No. 2, pp. 159-172.
5. Yoshikuni, H., Kusakabe, O., Hirao, T. and Ikegami, S., 1994, Elasto-Viscous modeling of time-dependent behavior of clay, Proc. of the 13th ICSMFE, New Delhi, India, Vol. 1, pp. 417-420.
6. Yoshikuni, H., Okada, M., Ikegami, S. and Hirao, T., 1995, One-dimensional consolidation analysis based on an elasto-viscous liquid model, Proc. of the International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils, IS-Hiroshima'95, pp. 233-238.
7. 龜井健使, 常田亮, 1993, 海成粘性土の一軸壓縮結果に及ぼす寸法効果の影響, 土と基礎, Vol. 41, No. 11, pp. 41-46.
8. 藤原照幸, 三上武子, 小泉和廣, 2006, 小型供試体を用いた一軸壓縮試験の強度特性, 土と基礎, Vol. 54, No. 8, pp. 8-10.
9. 日本道路公団試験所, 土木試験室, 1986, 軟弱地盤における高速道路盛土の沈下特性に関する研究.
10. 日本地盤工學會, 1990, 土質試験の方法と解説, pp. 289-308.
11. バーチカルドレーンの有効性に関する研究委員会, 1988, バーチカルドレーンの有効性に関する研究, 土質工學會中國支部論文報告集, Vol. 6, No. 1, pp. 121-141.
12. 住岡宣博, 吉國博, 1993, サンドドレーン改良地盤の壓密メカニズムの考察, 土木學會論文集, No. 463/III-22, pp. 65-74.