한국지반공학회논문집 제23권 4호 2007년 4월 pp. 69 ~ 77

탄-점성 압밀이론에 의한 버티칼 드레인 타설지반의 잔류침하 예측 (I) -이론의 적용성 검증

Prediction of Residual Settlement of Ground Improved by Vertical Drains Using the Elasto-Viscous Consolidation Model (I) - Verification of the Applicability of Theory -

백 원 진[1] Baek, Won-Jin

Abstract

In this study, the consolidation behavior of clayey ground improved by vertical drain method was analyzed by the finite difference method based on the three-dimensional elasto-viscous consolidation theory, which can express the behavior of the secondary consolidation without considering the distinction of the normally consolidated and overconsolidated states. And the applicability of the elasto-viscous consolidation theory was discussed by comparing with the test results obtained from the model test of ground improved by vertical drain system. From these results, it is found that the amount of the settlement when the excess pore water pressure almost dissipated in the clay ground with vertical drains became smaller than that of the one-dimensional condition, and then the amount and rate of the residual settlement at secondary consolidation process became larger than those of the one-dimensional condition. Finally, the effect of soil parameter on behavior of consolidation process was investigated by the results of a series of numerical analysis for the normalized and overconsoldiated states.

요 지

본 연구에서는 정규압밀 및 과압밀상태의 구별없이 이차압밀 거동을 표현할 수 있는 3차원 탄-점성압밀이론에 의한 유한차분해석에 의해 버티칼 드레인으로 개량된 점성토 지반의 압밀거동을 해석하였다. 또한, 탄-점성압밀이론의 적용성에 대해 버티칼 드레인 타설지반의 모형실험결과와 비교하여 검토하였다. 이들 실험결과로부터, 과잉간극수압이 거의 소산된 상태에서의 버티칼 드레인 개량지반에서의 침하량은 1차원 조건에 비해 적으며, 이차압밀과정에서의 잔류침하량 및 침하속도는 1차원 조건보다 크게 나타남을 알았다. 마지막으로, 압밀과정의 거동에 대한 토질정수의 영향을 정규압밀 및 과압밀 상태에 대한 일련의 수치해석의 결과에 의해 조사하였다.

Keywords : Elasto-viscous model, Residual settlement, Three-dimensional consolidation, Vertical drain

1. 서 론

연약 점성토지반의 경제적인 개량공법으로서 버티칼 드레인을 병용한 선행재하공법이 폭 넓게 이용되어지고 있다. 이 공법에서는 드레인 타설에 의해 점토지반 내부에서 간극수의 이동방향(수평방사방향 흐름)과 변형방향(연직방향)이 일치하지 않고, 압밀형식은 3차원 압밀이 된다. 이와 같은 압밀형식에서의 압밀거동은 통

1 정회원, 전남대학 공과대학 토목공학전공 시간강사 (Member, Part-time Lecturer, College of Eng., School of Civil, Geosystem & Environmental Eng. Chonnam National Univ., bhsy0004@hanmail.net)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

상 탄성압밀이론에 근거한 Barron(1948), Hansbo(1981), Onoue(1988), Yoshikuni(1993) 등의 제안식에 의해 예측하고 있지만, 이들의 이론은 간극수압이 소산된 후에 발생하는 이차압밀이 주를 이루는 잔류침하를 예측할 수 없다. 또한, 잔류침하를 지배하는 이차압밀을 표현하기 위해 정규압밀 상태에 대한 크리프(creep)현상에 관해 Taylor(1948), Sekiguchi & Toriihara (1976), Adachi & Oka(1982) 등의 연구와 과압밀 상태에 대한 Kutter & Sathialingam(1992)의 탄점-소성모델, Yoshikuni 등(1994)의 탄-점성모델, Imai 등(2003) Isotache 모델의 다양한 압밀모델들이 제안되어져왔다. 이러한 크리프를 고려한 압밀이론 중에서 Yoshikuni는 압밀현상과 같이 변형률 속도가 작은 범위에서는 점토를 탄-점성액체로 취급하는 것이 가능하므로 과압밀영역과 정규압밀영역을 구별하지 않고 이차압밀이나 유효응력 완화현상을 고려할 수 있는 탄-점성압밀이론을 제안하였다. 그러나, 이 이론은 1차원압밀 조건하에서 제안되었기 때문에 압밀과정에서 3차원적인 거동을 보이는 버티칼 드레인에 의해 개량된 점토지반의 압밀현상에 적용이 어렵다. 따라서 저자는 버티칼 드레인에 의한 압밀현상을 예측하기 위해 1차원 탄-점성압밀이론을 3차원으로 확장한 수치해석 모델을 제안하고, 버티칼 드레인에 의해 개량된 점토지반의 압밀과정중에 발생하는 수평방향변위를 측정할 수 있는 실험장치를 이용한 실험결과와 해석결과가 잘 일치함을 보고하였다(Baek 등, 2006).

본 연구에서는 3차원 탄-점성 압밀이론을 이용한 해석결과의 적용성을 모형실험결과와 비교·검토하고, 실험결과 및 해석결과를 이용하여 버티칼 드레인 타설지반의 압밀메카니즘을 1차원압밀(연직배수)과 비교하여 명확히 하였다. 또한, 정규압밀 및 과압밀상태에 대해 수치해석을 수행하고 3차원 탄-점성압밀해석에 관련된 각 토질정수가 압밀거동에 미치는 영향을 비교·검토하였다.

2. 탄-점성압밀이론

본 장에서는 탄-점성압밀이론의 개요를 간단히 설명하고자 한다. 식 (1)은 점토의 골격을 비선형 탄-점성액체(Maxwell model)로 하였을 때의 간극수압소산과정을 나타낸 Yohikuni(1994)등이 제안한 1차원 탄-점성 압밀방정식이다.

$$\frac{du}{dt}=\frac{k}{m_v\cdot\gamma_w}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}+\frac{1}{m_v\cdot\gamma_w}\frac{\partial k}{\partial z}\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{dp}{dt}+\frac{\gamma' z+p-u}{m_v\cdot\eta} \quad (1)$$

식 (1)에서 알 수 있는 것처럼, 우변의 제 1항과 2항이 배수에 따른 간극수압의 감소항, 제 3항이 하중변화에 의한 재하/제하에 대해 간극수압의 증가/감소를 나타낸다. 마지막으로 제 4항이 유효응력완화에 따른 간극수압의 증가항을 나타내며, 압밀현상이 단지 간극수압의 소산현상뿐만 아니라 소산과 증가가 동시에 진행하는 현상임을 나타내고 있다.

식 (2)는 점토골격을 비선형 탄-점성액체로 할 때의 3차원 구성 방정식이다(森脇 등, 2003).

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

여기서, K와 G는 각각 체적탄성계수와 전단탄성계수, η_K와 η_G는 체적점성계수와 전단점성계수이며, 응력과 변형률(간극비)에 의존한다(Yoshikuni 등, 1995). 식 (2)의 3차원 구성 방정식에, 버티칼 드레인에 의한 압밀의 가장 대표적인 경계조건인 내주면과 외주면의 변위를 구속하고, 등연직변형률 조건하에서 일정하중이 작용하는 경우의 압밀방정식은 다음과 같이 구해진다(Baek 등, 2006).

$$\frac{\partial u}{\partial t}=\frac{k}{\gamma_w}\left(K+\frac{4}{3}G\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}+\frac{1}{\gamma_w}\left(K+\frac{4}{3}G\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial u}{\partial x_i}-\frac{p-u}{T_G}+\frac{T_G-T_K}{T_G T_K}\left(\frac{p+2p_r}{3}-u\right) \quad (3)$$

여기서, T_K와 T_G는 $T_K=\eta_K/K$, $T_G=\eta_G/G$로서 정의되어지며, 체적변형과 전단변형에 관한 완화시간을 나타낸다. 자세한 계산과정에 대해서는 참고문헌(Baek 등, 2006)을 참고하기 바란다.

3. 3차원 탄-점성압밀해석의 적용성

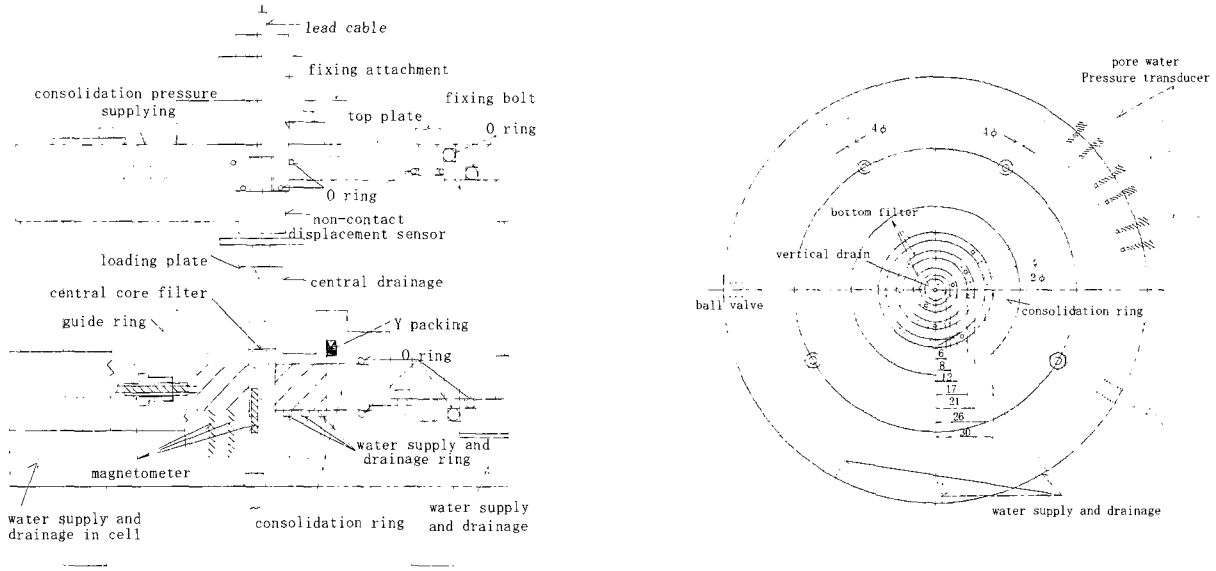
앞 절에서 소개한, 3차원 탄-점성압밀이론의 적용성을 검토하기 위해 유한차분법에 의한 해석결과와 버티칼 드레인에 의한 압밀현상을 재현한 모형실험결과와 비교하고 3차원압밀의 메카니즘을 명확히 하고자 한다.

3.1 실내모형실험과 수치해석결과의 비교

버티칼 드레인 타설지반에서는 간극수의 이동방향(수평방사흐름)과 변형(침하, 연직방향)의 진행방향이 일치하지 않으므로 압밀형식은 3차원 압밀이 된다. 즉,

버티칼 드레인 타설지반에서의 간극수의 흐름이 드레인을 향한 수평방사흐름이 되므로, 압밀초기에 드레인측의 점토요소에서는 간극수압의 소산과 더불어 큰 체적변형률이 발생하지만, 비배수면측의 요소에서는 간극수압의 소산이 지연되므로 체적변형률은 거의 발생하지 않는다. 그러나, 등연직 변형률조건하의 지반에서는 비배수면측에서는 비배수전단변형이 발생하여, 비배수면측으로부터 드레인을 향한 반경방향 변위가 일어난다. 한편, 압밀후반에 있어서는 비배수면측의 요소에서 간극수압의 소산과 더불어 체적변형이 발생하지만, 드레인측의 요소에서는 체적변형을 거의 종료되어 전단변형이 탁월하게 된다. 따라서, 등연직변형률 조건을 유지하기 위해 압밀후반에는 드레인측으로부터 비배수면측을 향한 반경방향 변위가 발생한다(Baek 등, 2004). 이와 같은 3차원 압밀조건하의 메카니즘을 실험적으로 확인하기 위하여, 표준압밀시험 공시체와 같은 크기의 높이 20mm, 직경 60mm의 점토공시체 중앙에 드레인(ϕ=12mm)을 설치하여 수평 방사방향 흐름을 재현하고, Fig. 1에 나타낸 3차원 압밀시험기를 이용하여 압밀거동을 조사하였다. 본 연구에서 이용한 모형실험장치는, 공시체 내부에 소형자석을 매립하여 자석의 자기(Magnetic field)강도를 공시체 중앙의 드레인 및 압밀링에 설치된 자기센서에 의해 자석의 변위를 검출하여 3차원 압밀과정에서의 연속적인 공시체 내부의 수평변위가 측정 가능하다(Baek 등, 2004, 2007). 모형실험에 이용한 시료는 일본 Kyoto의 Maizuru항에서 채취한 점토를 실내에서 49kPa의 압밀하중으로 재성형한 것으로, 물리적 성질은 G_s=2.737, w_L=83.3%, I_p=52이다.

1차원과 3차원 압밀시의 침하거동을 조사하기 위해 수행한 모형실험케이스를 Table 1에 나타내며, 예압밀단계의 하중 증분비는 $\Delta p/p$=1.0에서 압밀시간은 24시간 재하하고, 최종압밀하중은 p=157, 314, 628kPa의 3패턴으로 이차압밀과정을 명확히 하기 위하여 10,000min 이상 압밀을 행하였다. 본 연구에서의 1차원 및 3차원 압밀시험의 공시체 작성은 동일한 조건(수침조건에서 중앙에 드레인을 설치한 상태)으로, Table 1에 나타낸 배수



(a) Cross section of test apparatus (b) Plane of the base

Fig. 1. Three-dimensional consolidation test apparatus (Baek et al., 2004)

Table 1. Test conditions

	Consolidation type	Drainage condition	Pre-consolidation pressure (kPa)	Final consolidation pressure (kPa)
Case 1	One-dimensional	Top surface	78.5	157
	Three-dimensional	Central drain		
Case 2	One-dimensional	Top surface	157	314
	Three-dimensional	Central drain		
Case 3	One-dimensional	Top surface	314	628
	Three-dimensional	Central drain		

조건과 같이 1차원 압밀의 경우에는 드레인으로의 배수를 허용하지 않은 상부배수조건으로, 3차원 압밀의 경우에는 상부배수가 아닌 드레인으로의 배수만을 허용하여 실험을 수행하였다.

본 연구에서 제안한 삼차원 탄-점성압밀해석에 이용한 대표적인 변수로서는, 이차압밀계수 C_α=0.022, 등크리프선의 기울기 C_β=0.558, 제하곡선의 기울기 C_γ=0.032, e-logk 곡선의 기울기 C_k=0.735으로, 앞에서 기술한 모형실험에 이용한 Maizuru 점토에 대한 등방압밀실험 결과로부터 결정하였다. 이들 파라메타로부터 식 (1)과 식 (2)의 탄-점성 파라메타가 결정되어지며, 파라메타의 결정법에 대해서는 Baek 등(2002, 2006)을 참고하기 바란다.

모형실험결과와 수치해석에서 얻어진 침하-시간관계를 나타낸 것이 Fig. 2이다. 그림에서 수치해석결과는 각 압밀하중에 대한 일차압밀 및 이차압밀과정을 포함한 3차원 압밀침하거동을 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 Case 2의 3차원 압밀에 대한 공시체중심으로부터 거리 r=12.5mm와 22.5mm에서의 공시체 내부의

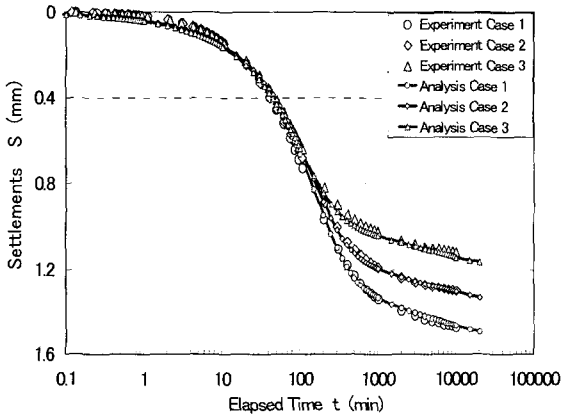


Fig. 2. Settlement-time curves

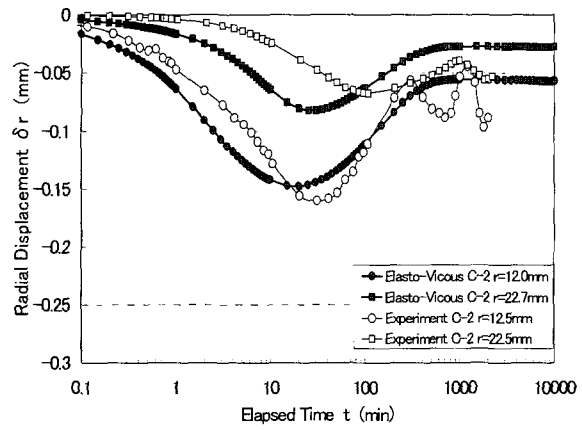


Fig. 3. Radial displacement-time curves

반경방향 변위 δr(비배수면측을 향한 변위 (+))의 경시변화를 실험결과와 해석결과를 함께 나타낸 것이다. 또한, 본 연구에서는 단면마찰의 영향을 줄이기 위해 자석을 공시체의 상면으로부터 3mm의 연직위치에 매설하여 실험을 행하고, 1차원 압밀중의 매설 자석의 연직위치는 심도방향으로 연직변형률이 동일하다고 가정하여 공시체 전체의 침하량으로부터 산출하였다. 그리고 공시체내부의 반경방향 변위를 구하기 위한 자석의 수평위치는 드레인내부와 압밀링에 설치된 자기센서에 의해서 측정한 자속밀도의 크기와 자석의 연직위치와의 관계에 의해 결정하였다(Baek 등, 2004, 2006, 2007). 이 그림으로부터 해석결과와 실험치는 잘 일치하고 있으며, 반경방향 변위 δr은 압밀초기에 드레인 측을 향해서 진행하며, 최고치를 나타낸 후에 비배수면 측을 향해서 변위가 일어남을 알 수 있다. 또한, 드레인 측의 요소가 더 큰 반경방향 변위가 발생함을 알 수 있다.

Fig. 4는, Case 2의 모형실험결과에서 얻어진 1차원압밀과 3차원압밀의 침하(평균 침하변형률)-시간관계를 나타낸 것이다. 그림에 표기한 1차압밀의 종료(EOP; End of primary consolidation)는 logt법에 의해 결정한 것이다. 통상의 탄성압밀이론에 의한 설계에서는 버티칼 드레인 타설지반은 1차원 압밀인 비개량 지반과 비교하면 배수거리의 차이에 따른 압밀종료시간에 차이가 있으나 침하량은 일치한 결과를 보인다. 그러나 그림에서도 알 수 있는 바와 같이, 버티칼 드레인에 의한 압밀의 경우에서 일차압밀 종료시점의 연직변형률은 1차원 압밀보다 적으며, 이차압밀과정의 변형률 속도는 크게 나타난다. 이는 3차원 압밀에서는 배수거리가 짧은 드레인 근방의 요소에서 배수에 따른 체적변형률이 크게 일어

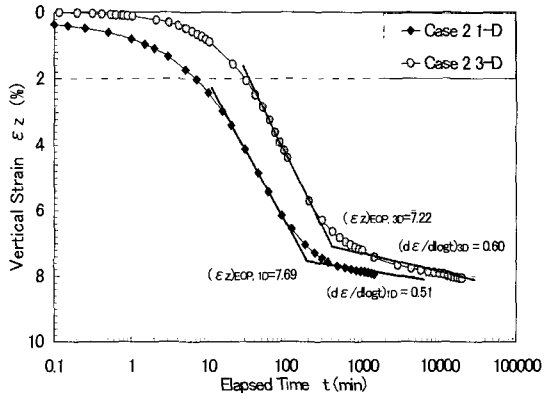


Fig. 4. Comparison with 1-D and 3-D vertical strain for test results

나 강성이 커진 요소가 등연직변형률 조건하의 연직하중을 보다 많이 분담하게 되므로, 1차압밀 종료시의 연직변형률은 연직하중이 심도방향으로 균등하게 작용하는 1차원 압밀의 경우보다 적게 일어난 것으로 판단된다. 그러나 탄성성분의 압축이 종료한 이차압밀과정에서는 흐름압축(Flow compression; Yoshikuni 1995)이 진행되어 응력의 재배분으로 인한 등연직변형률 조건하에서 지연된 비배수면측의 요소가 압축되어지기 때문에 1차압밀 종료 후의 잔류침하속도는 1차원 압밀에 비해 크게 일어난 것으로 판단된다.

이상의 모형실험 및 수치해석 결과로부터, 버티칼 드레인 타설지반에 대한 압밀거동해석에 3차원 탄-점성압밀모델이 1차압밀 및 이차압밀과정을 포함한 침하거동 및 내부변형에 대해서 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 다만, 본 연구에서 수행한 모형실험에서의 공시체의 크기가 소규모(높이 20mm, 직경 60mm)로 간극수압 소산 후의 이차압밀과정에서 발생하는 미소변형량인 잔류침하에 대한 실험결과와 해석결과에 약간의 정량적인 차이는 있을 수 있다. 그러나, 모형실험에서 얻어진 실측 침하량과 해석결과의 침하량이 1차압밀 및 이차압밀의 전과정을 통해서 잘 일치하고 있으며, 샌드 드레인으로 개량된 대형 모형실험결과에 대해서도 동일한 결과를 보고하였다(백원진, 2006).

4. 삼차원 탄-점성이론의 압밀정수의 영향

4.1 수치해석을 위한 해석조건

수치해석에 이용한 모델지반은, 상부에 모래층(상부로의 일면배수)을 가진 점토층 두께 10m의 연약 점성토 지반을 대상으로 하였다. 모델지반은 해석 및 고찰이 용이하도록 균일한 지반으로 설정하였으며 수치해석에 이용한 지반정수는 전술한 일본의 Maizuru항에서 채취한 Maizuru 점토를 참고로 등방압밀실험에서 구한 이차압밀계수 C_α=0.022, 압축지수 C_β=0.558, 제하곡선의 기울기 C_γ=0.035, e-logk 곡선의 기울기 C_k=0.735와 σ'_0=49kPa, e_0=1.669, Δp=49kPa을 적용하였다. 또한, 점성토지반의 체적압축계수 m_v=1.16×10^{-3}m^2/kN, 압밀계수 c_v=80cm^2/day이다.

탄-점성이론에 사용되는 압밀정수 중에서 압밀거동에 크게 영향을 미치는 인자로서는 C_α, C_β, C_γ, C_k와 σ'_0, e_0, k_0, K(체적탄성계수), G(전단탄성계수), η_0(점성계수), Δp(압밀하중)등이 있다. 본 연구에서는 압밀침하 및 반경방향변위에 미치는 이들 변수의 영향을 조사하기 위해서 이차압밀계수, 압축지수, 체적탄성계수, 압밀하중 등을 변화시킨 수치해석을 수행하고 그 영향을 조사하였다. 각 변수에 대한 기준 값과 설정 값을 Table 2에 나타낸다.

4.2 정규압밀점토에 대한 해석결과

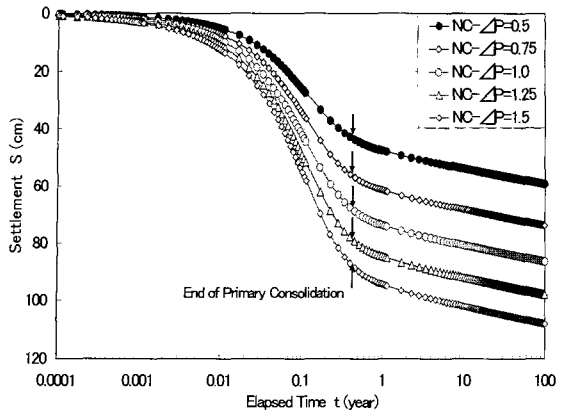
4.2.1 압밀하중의 영향

Table 2에서 기준으로 설정한 Δp=49kPa에 대한 압밀하중의 변화에 따른 침하 및 반경방향변위((r-rw)/(re-rw)=0.3)와 경과시간의 관계를 나타낸 것이 Fig. 5(a), (b)이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼, 1차압밀 종료시의 침하 및 이차압밀 침하량과 반경방향 변위량이 압밀하중 증

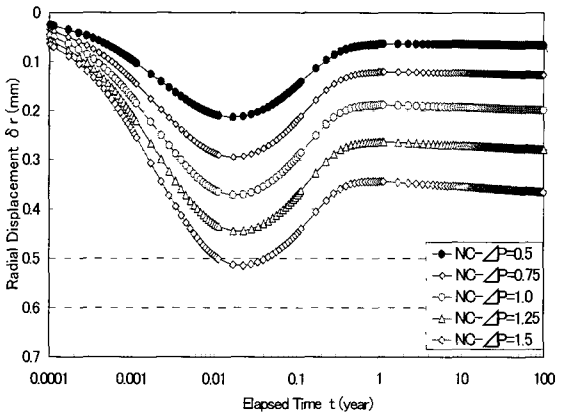
Table 2. Numerical analysis parameters

States	Parameters	Applied values				
Normally consolidated	Δp(kPa)	24.5 (0.5)	36.75 (0.75)	49.0 (1.0)	61.25 (1.25)	73.5 (1.5)
	C_α	0.011 (0.5)	0.0165 (0.75)	0.022 (1.0)	0.0275 (1.25)	0.033 (1.5)
	K (kPa)	3.06×10^2 (0.5)	4.59×10^2 (0.75)	6.12×10^2 (1.0)	7.65×10^2 (1.25)	9.18×10^2 (1.5)
	C_k	0.3675 (0.5)	0.5513 (0.75)	0.735 (1.0)	0.9188 (1.25)	1.1025 (1.5)
Overconsolidated	C_α	0.011 (0.5)	0.0165 (0.75)	0.022 (1.0)	0.0275 (1.25)	0.033 (1.5)
	K (kPa)	7.51×10^3 (0.5)	1.13×10^3 (0.75)	1.50×10^3 (1.0)	1.88×10^3 (1.25)	2.25×10^3 (1.5)
	C_k	0.3675 (0.5)	0.5513 (0.75)	0.735 (1.0)	0.9188 (1.25)	1.1025 (1.5)

* ( ) 내의 숫자는 본 연구의 수치해석에서 적용한 기준치에 대한 비를 나타낸다.



(a) Settlements



(b) Radial displacements at (r-rw)/(re-rw)=0.3

Fig. 5. Effect of the applied consolidation pressure on NC condition

분의 증가와 더불어 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림에 나타낸 1차압밀 종료시간은 압밀하중증분에 관계없이 거의 동일한 값을 나타내고 있으며 1차압밀 종료 후의 침하거동은 설정한 이차압밀계수의 기울기에 따라 평행하게 진행된다.

Fig. 5에서 얻어진 침하-시간관계와 반경방향변위-시간관계로부터, 1차압밀 종료시의 침하량(S_{EOP})과 반경방향의 최고치에 대한 압밀하중의 변화에 따른 경향을 나타낸 것이 Fig. 6이다. 그림에서 1차압밀 침하량 보다 반경방향의 변위에 압밀하중의 영향이 크게 나타남을 알 수 있다.

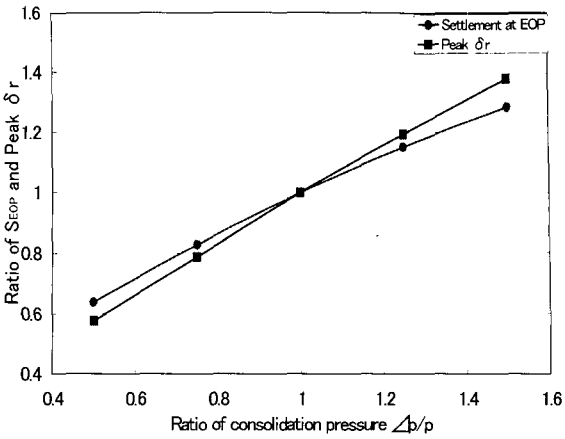
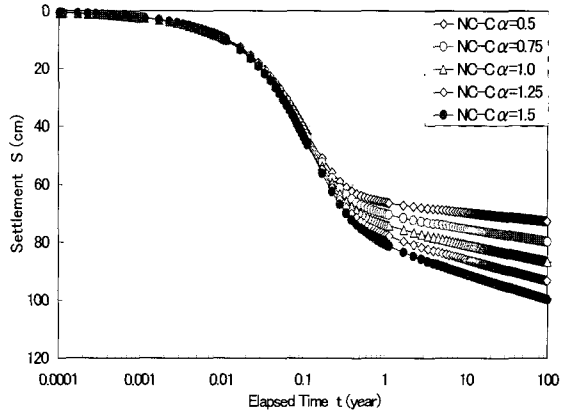
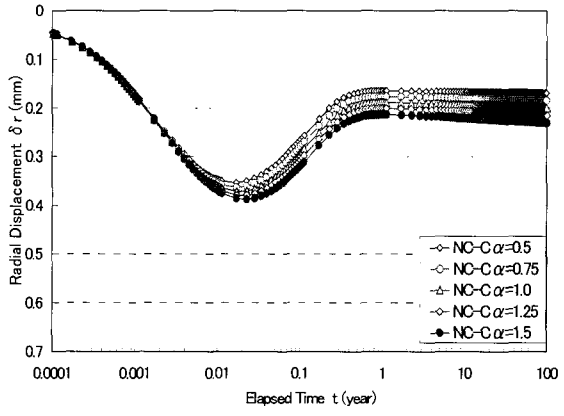


Fig. 6. Relations between Δp/p and SEOP and δr



(a) Settlements



(b) Radial displacements at (r-rw)/(re-rw)=0.3

Fig. 7. Effect of the coefficient of secondary consolidation on NC condition

4.2.2 이차압밀계수의 영향

Maizuru 점토의 등방압밀시험에서 얻어진 이차압밀계수의 변화에 따른 해석결과로부터 침하 및 반경방향변위-시간관계를 나타낸 것이 Fig. 7(a), (b)이다. 본 연구에서 이용한 탄-점성압밀이론에서는 전 압밀과정에 있어서 고려한 점성계수가 간극비와 유효응력의 변화와 더불어 변화하므로 이차압밀계수의 증가와 더불어 1차 압밀침하량이 약간 증가하고 이차압밀과정에서는 큰 이차압밀계수의 영향으로 이차압밀이 크게 증가하는 결과를 나타낸다. 또한, 반경방향변위도 큰 값을 나

타내며, 이차압밀계수가 큰 경우에 간극수압이 소산된 후에 비배수면 측을 향한 변위가 크게 일어남을 알 수 있다.

4.2.3 초기체적탄성계수의 영향

압밀선행하중 49kPa에서 체적탄성계수(K)의 변화에 따른 침하 및 반경방향변위와 시간관계를 나타낸 것이 Fig. 8(a), (b)이다. 그림으로부터 체적탄성계수가 작은 NC-Kv=0.5의 경우에는 1차압밀침하가 종료한 후에 흐름압축에 의한 이차압밀에의 전이영역이 나타나고 있다. 이는 압밀초기에 큰 침하로 인한 간극비의 큰 감소와 간극수압의 소산으로 유효응력이 일정한 상태에서 점성계수의 증가에 기인한 것으로 판단된다. 반경방향변위는 체적탄성계수의 증가와 더불어 크게 감소한 결과를 나타낸다.

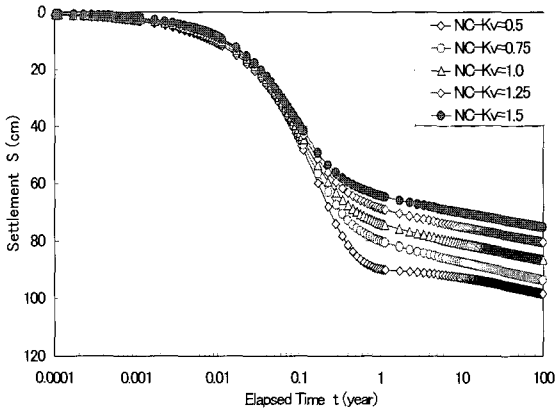
4.2.4 e-logk 곡선 기울기의 영향

등방압밀실험을 통해 구한 간극비와 투수계수의 e-logk 곡선의 기울기인 C_k의 변화에 따른 침하 및 반경방향변위와 시간관계를 나타낸 것이 Fig. 9(a), (b)이다. 탄-점성이론에서의 투수계수는 간극비의 변화에 따라 변화한다($k = k_0 \times 10^{(e_0 - e)/C_k}$). 그림으로부터 C_k의 증가와 더불어 투수계수가 감소하여 침하 및 반경방향변위의 발생이 지연되어 일어남을 알 수 있다.

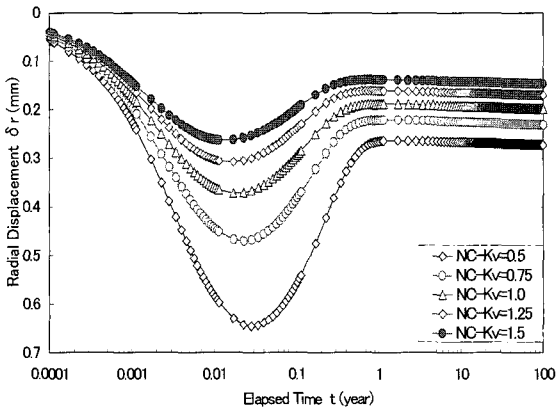
4.3 과압밀점토에 대한 해석결과

4.3.1 이차압밀계수의 영향

선행재하에 의해 과압밀영역으로 된 점토지반에 대한 해석으로 OCR=1.2에 대해, 과압밀 영역에서의 이차압밀계수의 변화에 따른 침하 및 반경방향변위-시간관계를 나타낸 것이 Fig. 10(a), (b)이다. 과압밀 영역에서의 침하량은 전술한 정규압밀영역에서의 침하량에 비해 초기 체적탄성계수 가 큰 값을 나타내므로 극히 적은 침하가 일어나며, 1차압밀 침하는 거의 동일한 값으로 이차압밀과정에서 주어진 이차압밀계수에 대응하여 침하가 증가한다. 반경방향변위에 있어서는 이차압밀계수의 차이에 관계없이 일정한 값을 나타낸다.

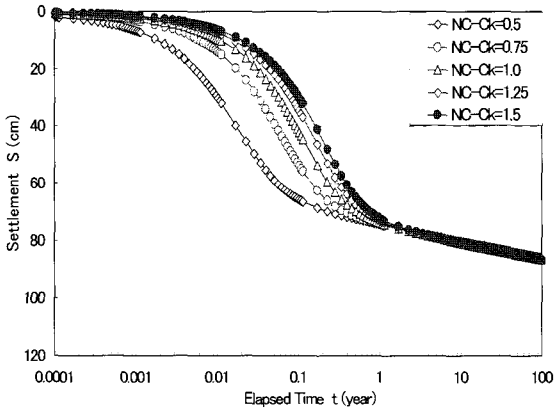


(a) Settlements

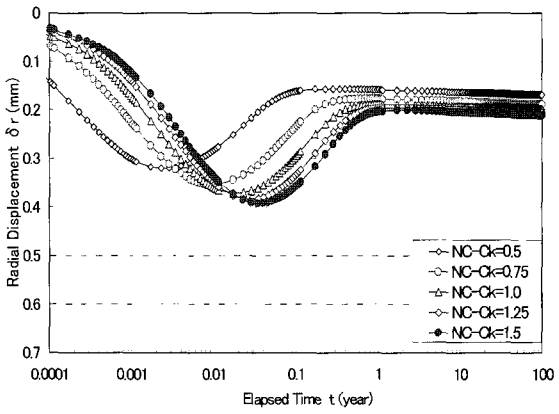


(b) Radial displacements at (r-rw)/(re-rw)=0.3

Fig. 8. Effect of the volumetric elastic modulus on NC condition

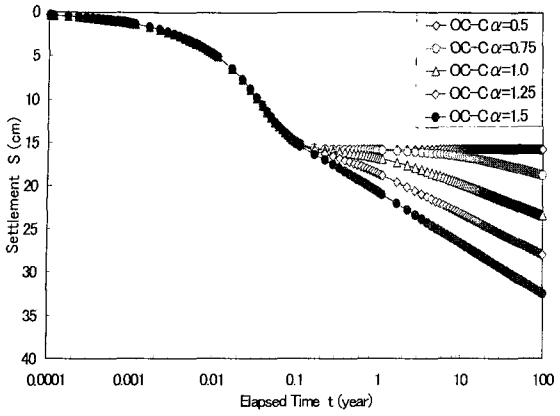


(a) Settlements

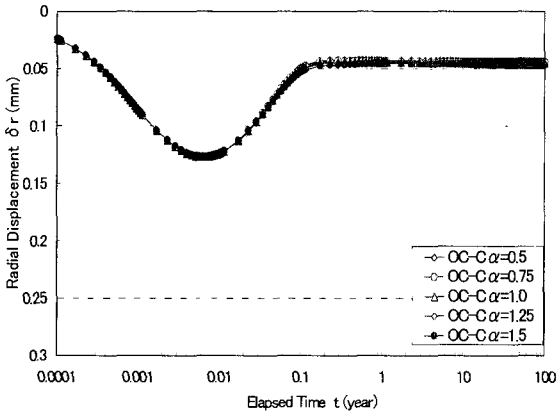


(b) Radial displacements at (r-rw)/(re-rw)=0.3

Fig. 9. Effect of the gradient of e-log k curve on NC condition



(a) Settlements



(b) Radial displacements at (r-rw)/(re-rw)=0.3

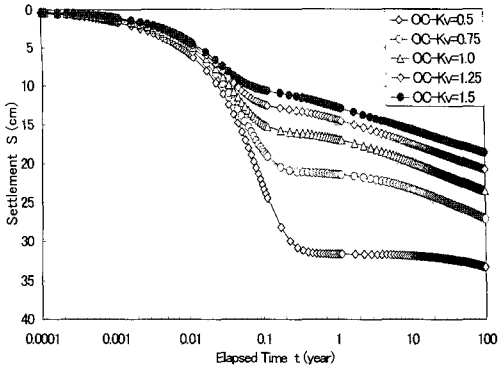
Fig. 10. Effect of the coefficient of secondary consolidation on OC condition

4.3.2 초기체적탄성계수의 영향

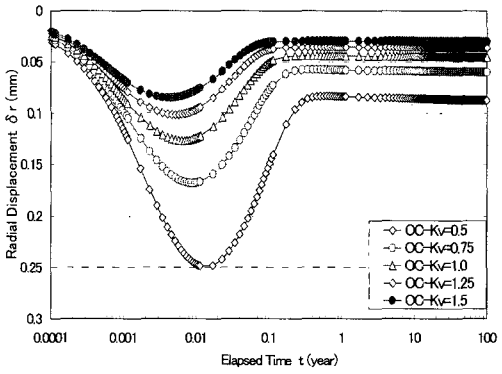
OCR=1.2에 대해, 체적탄성계수(K)의 변화에 따른 침하 및 반경방향변위와 시간관계를 나타낸 것이 Fig. 11(a), (b)이다. 그림으로부터 정규압밀영역에서의 해석결과와 동일하게 초기 체적탄성계수가 작은 OC-Kv=0.5의 경우에는 1차압밀침하가 종료한 후에 흐름압축에 의한 이차압밀에의 전이영역이 크게 나타나고 있다. 반경방향 변위는 체적탄성계수의 증가와 더불어 크게 감소한 결과를 나타낸다.

4.3.3 e-logk 곡선 기울기의 영향

OCR=1.2에 대해, 등방압밀시험에서 구한 간극비와 투수계수의 e-logk 곡선의 기울기인 C_k의 변화에 따른 침하 및 반경방향변위와 시간관계를 나타낸 것이 Fig. 12(a), (b)이다. 침하량과 반경방향변위의 발생량이 정규압밀영역에 비해 극히 미소한 값을 나타내지만, C_k의 증가와 더불어 투수계수가 감소하여 침하 및 반경방향변

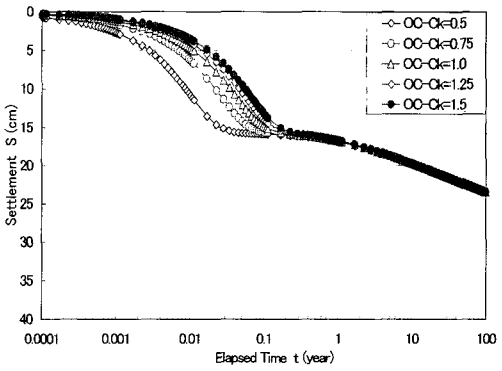


(a) Settlements

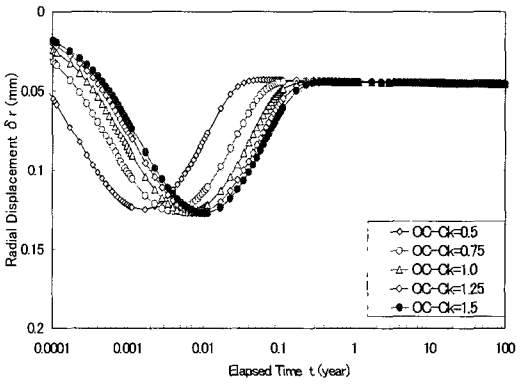


(b) Radial displacements at (r-rw)/(re-rw)=0.3

Fig. 11. Effect of the volumetric elastic modulus on OC condition



(a) Settlements



(b) Radial displacements at (r-rw)/(re-rw)=0.3

Fig. 12. Effect of the gradient of e-logk curve on OC condition

위의 발생이 지연되어 나타나는 동일한 경향을 나타냄을 알 수 있다.

5. 결론 및 고찰

버티칼 드레인으로 개량된 점성토 지반에 대해 삼차원 탄-점성압밀을 이용한 수치해석결과의 적용성을 소형 실내모형실험결과와 비교·검토하고, 모델지반을 이용한 해석결과로부터 각 압밀정수가 압밀거동에 미치는 영향에 대해서 검토하고 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 탄-점성압밀이론에 의한 버티칼 드레인 타설지반의 압밀침하거동과 반경방향변위의 경시변화는 실험결과와 잘 일치하였다.

(2) 모형실험결과로부터 버티칼 드레인 타설지반에서는 지반내부의 응력과 변형률의 반경방향 분포로 인해 1차압밀 종료시점의 침하량은 1차원 압밀의 경우보다 작지만, 간극수압이 소산된 후의 이차압밀과정에서의 잔류침하 속도는 응력의 재배분 등으로 1차원 압밀의 경우에 비해서 크게 나타났다.

(3) 모델지반에 대한 수치해석결과, 정규압밀영역에서의 압밀하중은 영향은 하중증가와 더불어 1차압밀량 및 반경방향변위의 발생량이 선형적으로 증가하며, 압밀하중의 증가는 침하보다 반경 방향변위에 큰 영향을 보인다.

(4) 정규압밀 및 과압밀영역에 있어서 이차압밀계수의 증가 및 체적탄성계수의 감소와 더불어 이차압밀침하량 및 반경방향변위가 증가하며, 이차압밀계수가 클수록 간극수압소산후의 비배수면 측으로의 변위량이 크게 나타난다.

(5) 정규압밀 및 과압밀 영역에서 e-logk 곡선 기울기 C_k의 증가와 더불어 압밀침하 및 반경방향 변위의 발생에 지연현상이 발생한다.

감사의 글

본 연구의 수행에 있어 논문의 작성에 대한 조언과 지도를 도와주신 일본 Kure College of Technology의 Moriwaki Takeo 교수님과 일본 재단법인 국토기술연구센터의 기술고문이신 Sasaki Yasushi에게 깊은 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. 백원진 (2006), "샌드 드레인으로 개량된 점토지반의 내부거동에 대한 압밀변형 메카니즘", *한국농공학회 논문집*, 제48권 제6호, pp.69-77.
2. 吉国洋 (1993), "*バーチカルドレーン工法の設計と施工管理*", 技報堂出版, pp.29-36.
3. 森脇武夫, 加納誠二, 吉国洋 (1993), "弾粘性圧密理論の三次元化とバーチカル土レーンによる圧密 への適用(その1)", *第33回地盤工学研究発表会論文集*, pp.483-484.
4. Adachi, H. and Oka, R. (1982), "Constitutive equations for normally consolidated clay based on elasto-visco plasticity", *Soils and Foundations*, Vol.22, No.4, pp.57-70.
5. Barron, R. A. (1948), "Consolidation of fine-grained soils by drain wells", *Transactions ASCE*, Vol.113, No.2346, pp.718-742.
6. 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).
7. 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.
8. 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.
9. Baek, W., Moriwaki, T., and Sasaki, Y. (2007), "Study of a displacement measurement method inside a small-sized model ground in laboratory test", *Geotechnical Testing Journal of ASTM*, (in press).
10. Hansbo, S., Jamiolkowski, M., and Kok, L. (1981), "Consolidation by vertical drains", *Geotechnique*, Vol.31, No.1, pp.45-66.
11. Imai, G., Tanaka, Y., and Saegusa, H. (2003), "One-dimensional consolidation modeling based on the isotache law for normally consolidated clays," *Soils and Foundations*, Vol.43, No.4, pp.173-188.
12. Kutter, B. L. and Sathialingam, N. (1992), "Elastic-visco plastic modeling of the rate- dependent behavior of clays", *Geotechnique*, Vol.42, No.3, pp.427-441.
13. Onoue, A. (1988), "Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consolidation," *Soils and Foundations*, Vol.28, No.4, pp.165-174.
14. Sekiguchi, H. and Toriihara, M. (1976), "Theory of one-dimensional consolidation of clays with consideration of their rhelogical properties," *Soils and Foundations*, Vol.16, No.1, pp.27-44.
15. Taylor, D. W. (1948), "*Fundamentals of soil mechanics*," John Wiley & Sons, pp.208-249.
16. 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.
17. 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.

(접수일자 2006. 11. 1, 심사완료일 2007. 4. 17)