

탄-점성 이론에 의한 점성토 지반의 1차원 압밀특성

Characteristics of 1D-Consolidation for Soft Clay Ground Based on a Elasto-Viscous Model

백 원 진¹ Baek, Won-Jin

하 성 호² Ha, Sung-Ho

이 강 일³ Lee, Kang-Il

김 진 영⁴ Kim, Jin-Young

김 주 현⁵ Kim, Ju-Hyun

Abstract

In this study, in order to investigate the characteristics of secondary consolidation in the soft clay ground, oedometer tests were carried out in a normally consolidated condition, and the consolidation characteristics of the soft clay ground were examined by the Finite Difference Method (FDM) based on the Elasto-Viscous model proposed by Yoshikuni. The consolidation tests adjusted the consolidation load increment ratio ($\Delta p/p_0$) to 1.0 for the four cases with initial consolidation pressures of 0.8, 1.6, 3.2, and 6.4 kgf/cm². The long-term consolidation tests were examined by the tests that changed the load increment ratio to clarify the effect of consolidation load increment. Although the numerical analysis was delayed in the primary consolidation process, from the result of the numerical analysis of the laboratory tests, the applicability of the Elasto-Viscous model was verified from the agreement of the secondary consolidation process. Based on the developing of model ground consist of general soft clay, influences of consolidation parameters on the consolidation characteristics were studied by the numerical analysis.

요 지

본 연구에서는 점성토지반에서의 이차압밀특성을 규명하기 위해 정규압밀 영역에 대해 표준압밀시험을 수행하고, Yoshikuni가 제안한 탄-점성 압밀이론의 유한차분해석결과를 이용하여 점성토지반의 압밀특성을 조사하였다. 압밀시험은 초기압밀하중 0.8, 1.6, 3.2, 6.4kgf/cm²의 4케이스에 대해 압밀하중 증분비($\Delta p/p_0$)를 1.0으로 하여 수행하였다. 또한 압밀하중증분비의 영향을 명확히 하기 위해 압밀하중 증분비를 변화시킨 장기압밀시험을 수행하였다. 얻어진 실내시험결과에 대해 탄-점성 압밀이론을 이용한 수치해석을 실시한 결과, 수치해석결과가 1차압밀과정에서 약간 지연(또는 조기진행)되는 결과가 얻어졌지만, 이차압밀과정에 대해서는 잘 일치한 것으로부터 그 적용성을 검증하였다. 또한 일반적인 점성토지반의 모델지반을 작성하고 압밀특성에 영향을 미치는 압밀정수에 대해 수치모델링을 수행하고 그 영향에 대해서 분석하였다.

Keywords : Consolidation property, Elasto-Viscous model, Model ground, Numerical analysis, Secondary consolidation

1 정희원, 전남대학교 지역·바이오시스템공학과 조교수 (Member, Associate Prof., Chonnam National Univ., bwj215@jnu.ac.kr, 교신저자)

2 정희원, (주) 서정엔지니어링 전무 (Member, Vice President, Sujung Engrg. Co., LTD.)

3 정희원, 대전대학교 건설시스템공학과, 교수 (Member, Prof., Daejin Univ.)

4 전남대학교 지역·바이오시스템공학과, 석사과정 (Graduate Student of Master Courses, Chonnam National Univ.)

5 정희원, 일본 야마구치대학교 사회건설공학과, 박사후 연구원 (Member, Yamaguchi Univ. of Japan, Research Fellow)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

국가성장의 초석을 다져온 수많은 SOC 사업의 확장으로 해안 및 연약지반을 대상으로 한 구조물 축조와 단지조성 사업이 활발하게 진행되고 있다. 현재도 해안 지역을 중심으로 연약지반상에 단지를 조성하거나 도로 등 지반구조물을 설계할 때 점성토지반의 안정문제와 더불어 침하와 관련된 문제가 대두되고 있다. 이러한 점토지반의 경우, 하중재하 초기에 발생하는 즉시침하와 간극수압의 소산과 더불어 장기간에 걸쳐 발생하는 압밀침하가 문제시 되는 경우가 많다. 이와 같은 압밀침하를 해석하기 위해 초기에 제안된 Terzaghi의 탄성압밀이론은 획기적이긴 하나, 유도에 포함된 많은 가정조건들로 인해 제약이 많은 이론이다. 이러한 점성토 지반의 압밀현상에 대한 기존의 연구로서는, 정규압밀상태에서의 크리프 현상에 대한 연구로 점토의 시간의존성 거동을 지연탄성으로 고려한 Taylor & Merchant(1940)의 점탄성 모델, Sekiguchi & Torihara(1976)의 탄-점소성 모델 및 Adachi & Oka(1982)의 점소성 이론에 근거한 탄-점소성 모델이 있다. 또한 과압밀상태에서의 크리프 현상에 대한 연구로서는 Kutter & Sathialingam(1992)의 탄-점소성모델, Yoshikuni et. al.(1994, 1995)의 탄-점성 압밀이론, Isotache 법칙에 근거한 Imai(1989), Imai et. al.(2003) 등의 압밀이론과 등가시간개념을 이용하여 비선형 탄-점소성 모델을 제안한 Yin & Graham(1994)의 모델이 있다. Aboshi & Matsuda(1981)는 압밀침하 변형률과 시간곡선에 미치는 점토층의 두께에 대한 영향을 검토하여 시간-침하곡선이 Ladd et. al.(1977)이 제안한 가정 A와 가정 B의 사이에 존재할 것으로 제안하였다. Bjerrum(1967)은 Quick Clay 지반상의 건물의 침하해석을 수행한 결과로부터 하중증분비나 재하기간의 상이에 의해 압축곡선이 다른 형태를 나타냄을 보고하였다. 또한 Baek et. al.(2006, 2007a, 2007b)은 Yoshikuni의 탄-점성모델을 3차원 축대칭조건으로 확장하여 연직배수재로 개량된 점성토 지반에 대한 적용성을 검증하였다. 이처럼 많은 모델들이 제안되어져 있으나 이차압밀(크리프)침하를 보다 정확하게 예측하기 위한 실내시험과 그 적용성에 대한 비교/분석의 필요성이 제기되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는, 해성점토를 재성형(리몰딩)한 시료를 이용하여 정규압밀 상태에 대한 압밀하중의 크기 및 하중 증가율이 이차압밀 거동에 미치는 영향에 대해서 조사하고, Yoshikuni가 제안한 1차원 탄-점성 압

밀이론을 이용한 유한차분해석(FDM 해석)결과와 실내 시험결과와의 비교/분석으로부터 탄-점성 압밀이론의 적용성을 검증하고자 하였다. 마지막으로 실내시험결과와 수치해석 결과와의 비교를 통해 적용성의 검증된 결과를 바탕으로 연약점성토로 구성된 일반적인 모델지반을 작성하고 기본적인 압밀관련 정수를 설정한 후, Yoshikuni의 1차원 탄-점성 압밀이론의 수치 모델링 결과를 이용하여 각 압밀정수가 점성토 지반의 장기 압밀특성에 미치는 토질정수의 영향을 명확히 하고자 하였다.

2. 실험 및 방법

2.1 재성형 점토의 작성 및 시료특성

본 연구에서는 해성점토의 정규압밀상태에 대한 장기압밀 특성을 파악하기 위하여 실험실에서 인위적으로 재성형한 점토시료를 이용하여 수행하였다. 사진 1에는 재성형 점토를 작성하기 위한 토조를 나타내었다. 재성형시의 압밀압력은 토조상단부까지 점토를 채운 후에 방치기간을 두고 안정화 시킨 후, 점토시료의 교란의 영향을 방지하기 위해 초기하중은 0.05kgf/cm^2 를 재하하고, 그 후 0.1kgf/cm^2 , 0.2kgf/cm^2 를 재하한 후, 최종압밀하중인 0.4kgf/cm^2 의 압밀하중에서 실제지반과 같은 안정된 재성형 점토를 얻기 위하여 1차압밀이 종료된 시점을 3 te법(각 하중단계에 대한 압밀시험 결과로부터 얻어진 s-log t 곡선의 최급 기울기선과 log t 시간축이 교차하는 시간 t를 구하고, 이 시간의 3배일 때의 동일 기울기를 갖는 직선(3 te : 그림 1 참조 ; 총 재하기간 약 83일)과 침하곡선이 교차할 때를 1차압밀 종료시점

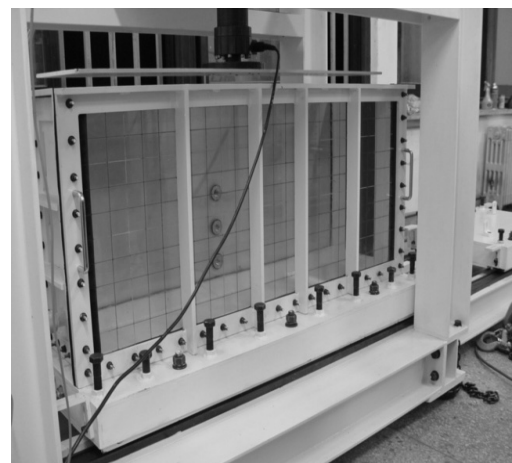


사진 1. 재성형 점토 제작용 토조 전경

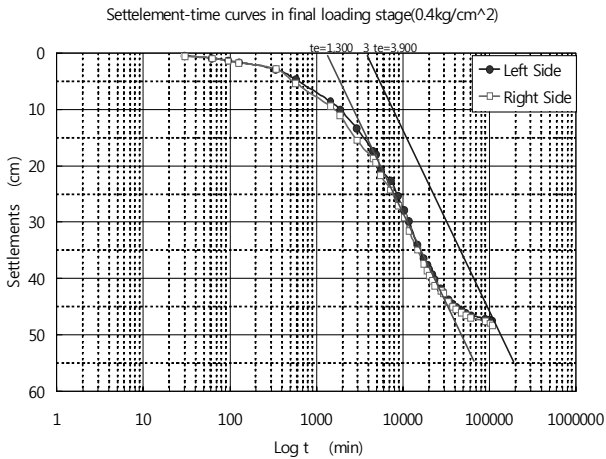


그림 1. 재생형시의 침하-시간 곡선(최종하중단계)

으로 정의)을 적용하여 압밀종료시점으로 하고, 블록 (20cm × 10cm × 12cm)으로 채취하여 각 시료의 함수비 변화를 방지하기 위해 파라핀으로 도포하여 항온상태에서 보관하였다. 본 연구에서 사용한 실내시험용 해성 점토의 물리특성을 나타낸 것이 표 1이다.

2.2 실내모형시험 방법

본 연구에서는 최종압밀하중 단계에서의 간극수압 소산과정을 살펴보기 위해, 표준 압밀 시험장치를 개조

표 1. 실내시험용 해성점토의 물리특성

| Liquid Limit (%) | Plastic Limit (%) | Plasticity Index | Specific Gravity | Percent finer by 0.074mm | Remarks |
|------------------|-------------------|------------------|------------------|--------------------------|-------------|
| 46.91 | 31.19 | 15.72 | 2.69 | 87.3% | 0.42mm 통과시료 |

표 2. 정규압밀 상태에 대한 하중재하 방법

| | Initial Cons. Pressure (kgf/cm ²) | Final Cons. Pressure (kgf/cm ²) | Applied Pressure (kgf/cm ²) | Load Increment Ratio ($\Delta p/p_0$) | Remarks |
|----------|---|---|---|---|----------|
| Case 1-1 | 0.8 | 1.6 | 0.8 | 1.0 | |
| Case 1-2 | 1.6 | 3.2 | 1.6 | 1.0 | |
| Case 1-3 | 3.2 | 6.4 | 3.2 | 1.0 | |
| Case 1-4 | 6.4 | 12.8 | 6.4 | 1.0 | |
| Case 2-1 | 0.8 | 1.2 | 0.4 | 0.5 | |
| Case 2-2 | | 1.6 | 0.8 | 1.0 | Case 1-1 |
| Case 2-3 | | 2.0 | 1.2 | 1.5 | |
| Case 2-4 | | 2.4 | 1.6 | 2.0 | |
| Case 2-5 | 1.6 | 2.4 | 0.8 | 0.5 | |
| Case 2-6 | | 3.2 | 1.6 | 1.0 | Case 1-2 |
| Case 2-7 | | 4.0 | 2.4 | 1.5 | |
| Case 2-8 | | 4.8 | 3.2 | 2.0 | |
| Case 2-9 | | 6.4 | 4.8 | 3.0 | |

하여 압밀셀 바닥면에서 간극수압을 측정할 수 있도록 간극수압센서를 장착하였으며, 최종하중단계 이외의 단계에서는 간극수압 측정용 밸브를 개방하여 양면배수로 압밀을 진행하고 최종압밀단계에서 밸브를 폐쇄하여 간극수압을 측정할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 수행한 압밀시험의 정규압밀 상태에 대한 하중재하방법을 나타낸 것이 표 2이다. 각 실험 목적은 초기 압밀하중에 따른 장기압밀거동을 살펴보고자 한 것이 Case 1이다(Case 1에서 하중 재하방법은 초기 하중(원지반상의 σ'_0 에 해당)까지는 표준압밀시험과 동일한 재하패턴으로 24시간 재하 후, 최종하중(압밀하중 증분 $\Delta\sigma'$ 에 해당) 단계에서는 최소 10일 이상의 장기 재하를 실시함). 본 연구에서는 원지반상의 유효상재하중의 크기가 이차압밀에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 Case 1의 장기압밀시험을 실시하였다. Case 2의 경우는 초기압밀하중과 하중증분비와의 관계에 따른 거동특성을 규명하고자 한 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 정규압밀영역에서의 압축곡선

수행된 실험에 대한 압축곡선(e-logp 곡선 : 표준압밀시

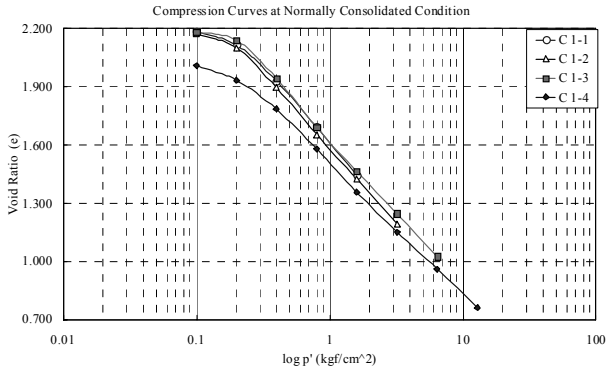


그림 2. 표준압밀시험에서의 e-logp 곡선

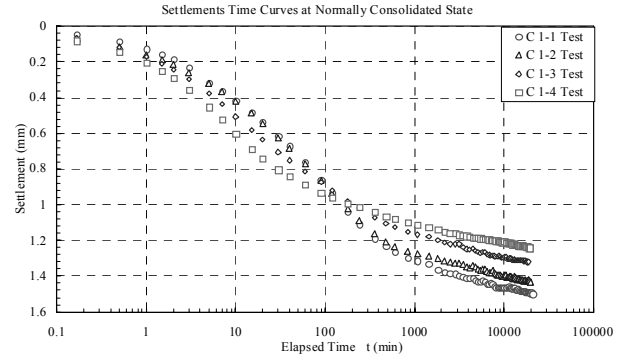


그림 4. 초기압밀하중에 따른 침하-시간곡선

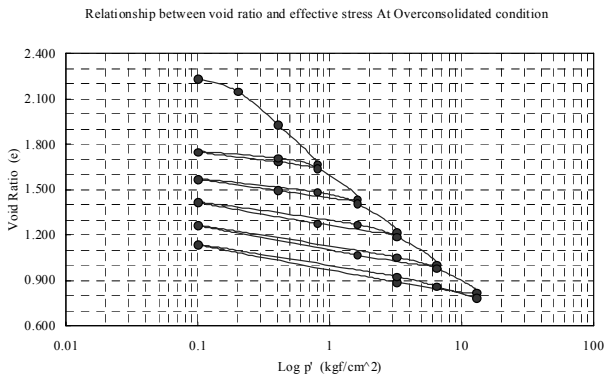


그림 3. 재압축지수를 결정하기 위한 e-logp 곡선

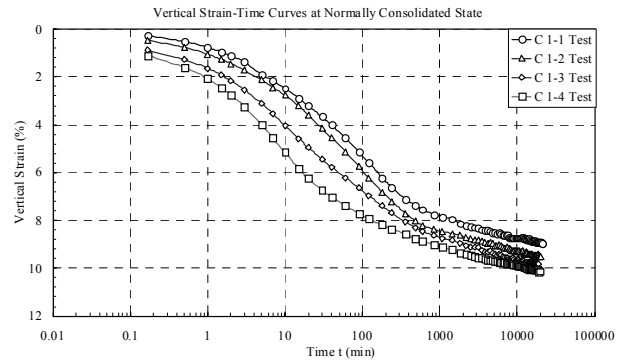


그림 5. 연직변형률-시간곡선

험)을 나타낸 것이 그림 2이다. 그림으로부터 앞에서 나타낸 재성형시료를 작성할 당시의 점토층 두께가 커서 3 te 법에 의해 1차압밀종료시점을 확인하였으나 시료채취 위치의 차이에 의해 초기간극비에 차이가 나타난 것으로 판단된다. 각 하중단계에 따라 압축지수에 약간의 차이가 나타났으나 큰 차이는 없었다(탄-점성 압밀이론의 적용성 검증시 압밀정수 참조). 지면관계상 Case 2-1 ~ Case 2-9에 대해서는 생략하지만 유사한 결과가 얻어졌다.

그림 3은 탄-점성 압밀이론에 이용되는 재압축지수를 조사하기 위해 수행한 실험의 압축곡선을 나타낸 것으로 각각의 재하-재해하곡선에서 히스테리시스 루프를 나타내고 있으며, 선행압밀하중이 증가함에 따라 재압축지수가 약간 증가하는 경향을 나타내었다.

3.2 초기 압밀하중에 따른 장기압밀특성

정규압밀영역에서의 초기압밀하중의 영향에 따른 장기압밀특성을 규명하기 위하여 수행한 시험결과로부터 얻어진 침하-시간관계곡선 및 연직변형률-시간곡선을 나타낸 것이 그림 4 및 그림 5이다. 그림 4에서 압밀하중이 클수록 1차압밀과정에서의 압밀속도가 빠르고 최종

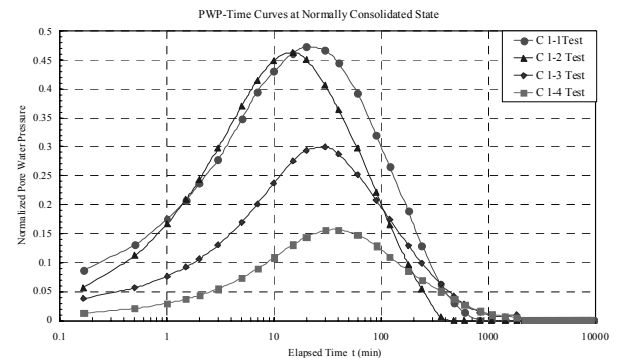


그림 6. 정규화한 간극수압의 소산곡선

압밀량이 약간 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 초기 압밀하중이 클수록 점토구조의 안정화가 빠르게 진행되었기 때문으로 판단된다. 그림 5는 최종압밀단계에서의 공시체 높이를 이용하여 압밀과정의 변형률을 계산하여 나타낸 것으로 초기압밀하중이 클수록 하중재하와 동시에 큰 변형이 발생하여 압밀후반까지 그 영향에 의해 큰 변형률을 나타냄을 알 수 있다.

그림 6은 Case 1에 대해 정규화한 간극수압($U/\Delta p$)에 대한 소산과정을 나타낸 것이다. 본 연구에서 개량한 표준압밀시험기는 밀폐형 셀이 아닌 표준압밀시험기의 하부를 밸브조작에 의해 비배수 조건하에서 압밀시험

이 진행되므로 그림에서 나타난 바와 같이 정규화된 간극수압이 $U/\Delta p=1.0$ 에 도달하지 않고 하중재하와 동시에 배수가 진행되며 간극수압이 발생하고 있다. 각 공시체의 초기상태의 차이는 있으나 그림에서 알 수 있는 바와 같이 압밀하중이 증가할수록 간극수압 증가분이 감소하고 있다. 이는 그림 4와 5에서 나타난 바와 같이 압밀하중 증가에 따라 초기에 큰 변형률이 발생되어 간극수압소산의 촉진과 초기 공시체 높이의 감소로 인한 배수거리가 단축되었기 때문으로 판단된다.

또한 본 연구에서 수행한 Case 2의 압밀실험에 대해서는 4장의 탄-점성 압밀이론의 적용성 검증의 실험결과와 해석결과에서 자세히 나타내고자 한다.

4. 탄-점성압밀이론의 적용성 검증

4.1 탄-점성 압밀방정식의 차분화

Yoshikuni가 제안한 1차원 탄-점성액체의 구성방정식은 다음과 같다.

$$-\frac{de}{dt} = m_v \frac{d(p-u)}{dt} + \frac{\gamma'z+p-u}{\eta} \quad (1)$$

식 (1)을 간극수압의 항으로 정리하면 다음과 같은 1차원 탄/점성압밀방정식이 얻어진다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{m_v \cdot \gamma_w} \frac{\partial k}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{dp}{dt} + \frac{\gamma'z+p-u}{(1+e_0) \cdot m_v \cdot \eta} \quad (2)$$

식 (2)의 우변 제 1항과 2항이 배수에 따른 간극수압의 감소항으로 압밀과 더불어 (-)값을 가지며, 제 3항이 재하시에 (+)값, 제하시에 (-)값을 가지는 하중재하의 항, 제 4항이 유효응력의 완화현상에 기인한 간극수압의 발생을 나타낸다. 이 식은 점성토의 압밀현상이 단지 간극수압의 소산현상뿐만 아니라 압밀진행중에 소산과 증가가 동시에 진행되는 현상임을 의미한다.

식 (2)는 간극수압 u 에 관한 것이므로, 변형성분은 이것을 해석하는 것만으로는 구할 수 없다. 따라서 식 (1)에서 간극비 e 를 구해야만 한다. 즉, 간극수압과 간극비와 관련된 두 개의 방정식을 차분화하여 수치해석을 행하며, 차분방법의 개념도를 나타낸 것이 그림 7이다. 그림에서는 일면배수 상태를 대상으로 나타낸 것으로 양

면배수에 대한 경우는 그림에 나타난 가상점을 제거함으로써 기본적인 방법은 동일하게 된다. 그림에서 가로축에 시간, 세로축에 심도방향을 취한 것이다. z 방향에서 본 각 격자점은 상정된 지반을 임의의 일정한 값으로 등분할 했을 경우에 가능한 절점(즉, 지반을 1차원적으로 고려했을 때의 z 좌표)을 나타내고 있으며, 가로축의 t 방향에서 본 각 격자점은 일정한 차분간격으로 차분방정식을 풀 때에 해가 구해지는 시각을 나타내고 있다.

식 (1)의 각각의 항을 차분으로 표시하면 다음과 같다. 또한 하중작용조건은 일정하중 재하조건으로 고려하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{\Delta t_j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\Delta z} (= U_1) \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}}{\Delta z^2} (= U_2) \quad (5)$$

$$\frac{\partial k}{\partial z} = \frac{k_{i+1,j} - k_{i-1,j}}{2\Delta z} (= K_1) \quad (6)$$

$$\frac{dp}{dt} = 0 \quad (7)$$

상기의 식에서 미지수는 $u_{i,j+1}$ 뿐이므로 이들 식을 (2)에 대입하여 정리하면, 다음과 같다.

$$u_{i,j+1} = A_{ij} U_2 + B_{ij} K_1 U_1 + C_{ij} + u_{i,j} \quad (8)$$

여기서, $A_{ij} = \Delta t_j \frac{(1+e_0)k_{i,j}}{m_{vi,j} r_w}$, $B_{ij} = \Delta t_j \frac{1+e_0}{m_{vi,j} r_w}$,

$$C_{ij} = \Delta t_j \frac{r'z+p-u_{i,j}}{m_{vi,j} \eta_{i,j}}$$

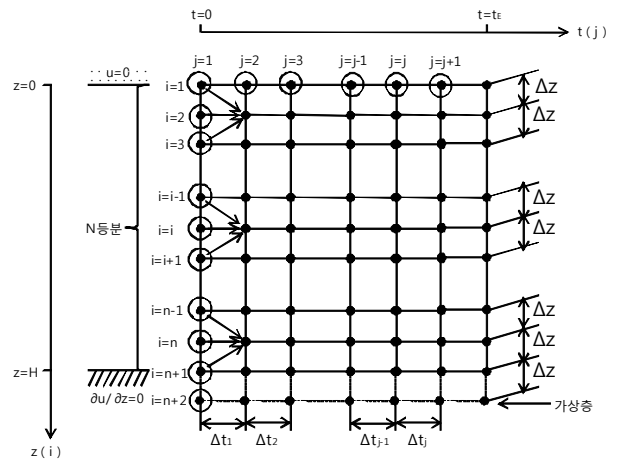


그림 7. 차분해석을 위한 개념도

이 차분방정식으로부터 간극수압 u , 즉 유효응력 σ' 가 구해지게 된다. 한편, 간극비 e 나 변형률 ϵ 의 변형성분은, (1)식에 나타난 응력~변형률 관계식으로부터 구해지게 된다.

따라서, 유변학적 방정식을 차분화하여, 이 미분방정식도 압밀방정식의 경우와 동일하게 정리하면 다음과 같다.

$$-\frac{e_{i,j+1} - e_{i,j}}{\Delta t_j} = m_{v,i,j} \frac{\sigma'_{i,j+1} - \sigma'_{i,j}}{\Delta t_j} + \frac{\sigma'_{i,j}}{\eta_{i,j}} \quad (9)$$

$$e_{i,j+1} = e_{i,j} - m_{v,i,j}(\sigma'_{i,j+1} - \sigma'_{i,j}) - \frac{\sigma'_{i,j}}{\eta_{i,j}} \Delta t_j \quad (10)$$

이상에서 구해진 $u_{i,j+1}$ 과 $e_{i,j+1}$ 을 사용하면, 다음단계인 $(j+1)$ 번째의 시각에서의 m_v , η , k 가 각각 다음에 나타낸 식으로 산정되어진다.

$$\begin{aligned} m_v &= 0.434 C_r \frac{1}{\sigma'} \\ \eta &= 10^{\{C_{\eta e}(e_0 - e) + C_{\eta \sigma'} \cdot \log(\sigma'_0 / \sigma') + \log \eta_0\}} \\ k &= k_0 10^{\{(e - e_0) / C_k\}} \end{aligned} \quad (11)$$

이상의 흐름을 해석 대상에 대한 경계조건과 초기조건하에서 깊이 z 와 시간 t 에 관한 반복계산을 행하면, 계속되는 다음시간에서의 정보를 계산할 수 있게 된다.

4.2 실내시험결과와 수치해석결과의 비교

앞에서 나타낸 Yoshikuni의 1차원 탄-점성 압밀이론

을 FDM해석결과와 실내시험결과를 비교하기 위해 사용된 각 실험케이스별 압밀정수를 나타내면 표 3과 같다. 각각의 압밀정수들은 각 실험에서 얻어진 압축곡선과 과압밀이력에 관한 압축곡선 및 최종하중단계에서의 시간-침하곡선으로부터 계산된 결과이다.

4.2.1 초기압밀하중의 영향

정규압밀영역에서의 초기압밀하중의 차이에 따른 실내시험을 수행한 결과와 FDM 수치해석결과의 침하-시간곡선을 나타낸 것이 그림 8이다. 그림으로부터 수치해석결과가 실험결과에 비해 1차압밀과정에서 지연(또는 조기진행)되는 결과를 나타내지만, 간극수압이 소산된 후의 이차압밀과정에 대해서는 Yoshikuni의 탄-점성 압밀이론에 나타낸 것처럼 간극수압이 소산된 후에도 유효응력완화현상에 의해 정의 간극수압이 발생되므로 이차압밀침하가 약간 큰 경향을 나타내지만 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

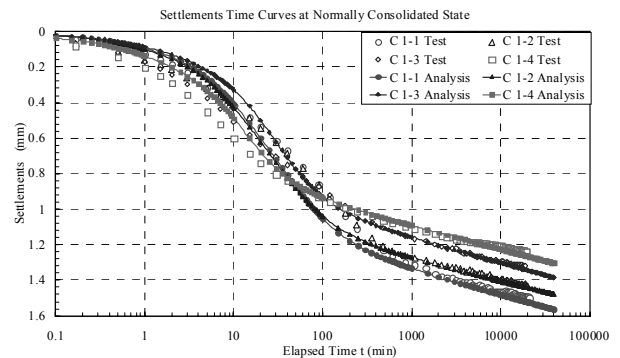


그림 8. 침하-시간곡선의 수치해석결과(Case 1)

표 3. 수치해석에 사용된 압밀정수

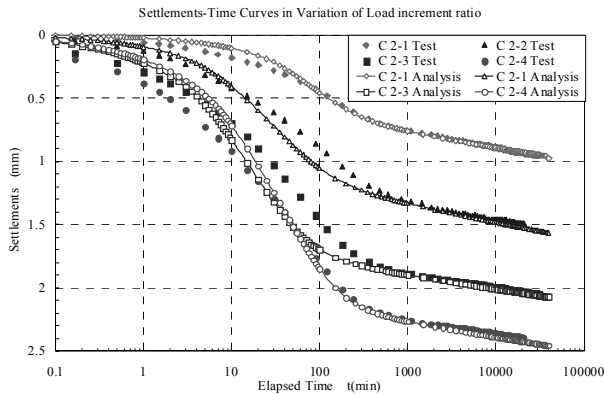
| | σ_0 (kgf/cm ²) | $\Delta\sigma$ (kgf/cm ²) | e_0 | H_0 (cm) | C_α | C_β | C_γ | k_0 (cm/min) | Remarks |
|----------|--------------------------------------|--|-------|---------------|------------|-----------|------------|-----------------------|----------|
| Case 1-1 | 0.8 | 0.8 | 1.694 | 1.664 | 0.022 | 0.83 | 0.105 | 2.05×10^{-6} | |
| Case 1-2 | 1.6 | 1.6 | 1.429 | 1.486 | 0.021 | 0.77 | 0.123 | 1.01×10^{-6} | |
| Case 1-3 | 3.2 | 3.2 | 1.248 | 1.404 | 0.022 | 0.681 | 0.143 | 8.95×10^{-7} | |
| Case 1-4 | 6.4 | 6.4 | 0.962 | 1.283 | 0.02 | 0.675 | 0.150 | 7.35×10^{-7} | |
| Case 2-1 | 0.8 | 0.4 | 1.649 | 1.626 | 0.019 | 0.79 | 0.105 | 4.35×10^{-6} | |
| Case 2-2 | | 0.8 | 1.694 | 1.664 | 0.022 | 0.83 | 0.105 | 2.05×10^{-6} | Case 1-1 |
| Case 2-3 | | 1.2 | 1.647 | 1.642 | 0.018 | 0.80 | 0.105 | 4.35×10^{-6} | |
| Case 2-4 | | 1.6 | 1.674 | 1.628 | 0.018 | 0.785 | 0.105 | 2.10×10^{-6} | |
| Case 2-5 | 1.6 | 0.8 | 1.327 | 1.463 | 0.019 | 0.735 | 0.123 | 8.62×10^{-6} | |
| Case 2-6 | | 1.6 | 1.429 | 1.486 | 0.021 | 0.77 | 0.123 | 1.01×10^{-6} | Case 1-2 |
| Case 2-7 | | 2.4 | 1.332 | 1.455 | 0.018 | 0.713 | 0.123 | 1.16×10^{-6} | |
| Case 2-8 | | 3.2 | 1.438 | 1.524 | 0.019 | 0.710 | 0.123 | 1.05×10^{-6} | |
| Case 2-9 | | 4.8 | 1.524 | 1.546 | 0.021 | 0.742 | 0.123 | 2.11×10^{-6} | |

4.2.2 압밀하중 증분비의 영향

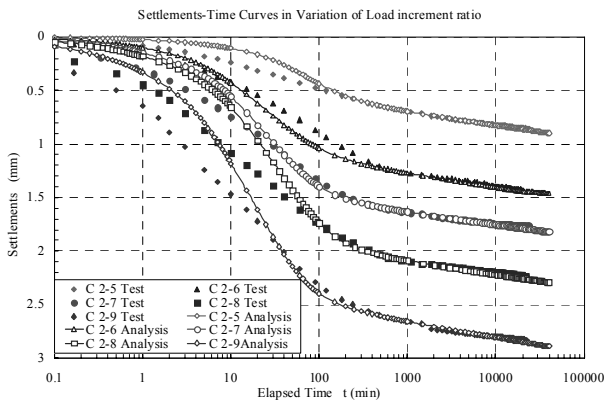
그림 9(a), (b)는 초기압밀하중 0.8kgf/cm^2 및 1.6kgf/cm^2 에 대한 하중 증분비(시험조건 참조)에 따른 실내시험 결과와 수치해석결과를 비교한 것이다. 그림 9(a), (b)에서 알 수 있는 것처럼, 실내시험결과로부터 하중 증분비가 증가할수록 최종침하량이 증가하고 있으나 하중증분에 비례하여 최종침하량이 증가하지는 않는다. 예를 들면, 하중증분비 1.0(Case 2-2)일 때 최종침하량이 1.6mm 정도인 것이 하중증분비 2.0(Case 2-4)일 경우에 2.4mm 정도로 하중증분에 따른 최종침하량이 비례하여 증가하지는 않음을 알 수 있다. 또한 수치해석결과는 이차압밀과정을 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

5. 모델지반의 수치 모델링에 의한 압밀정수의 영향

본 장에서는 일반적인 모델지반을 대상으로 4장에서 그 적용성이 검증된 1차원 탄-점성압밀이론을 이용하여 압밀정수들이 시간-침하곡선에 미치는 영향에 대해 대표적인 압밀정수(점토층 두께 Hc, 압밀압력 Δp , 투수계



(a) $\sigma_0 = 0.8\text{kgf/cm}^2$



(b) $\sigma_0 = 1.6\text{kgf/cm}^2$

그림 9. 침하-시간곡선의 수치해석결과(Case 2)

수 k_0 , 압축지수 C_c , 이차압밀계수 C_α)를 변화시킨 수치 모델해석을 수행하고 그 영향에 대해 비교/검토하였다.

압밀정수의 영향을 조사하기 위해 이용한 모델지반(1차원 압밀조건)은, 그림 10에 나타난 것처럼, 상부에 모래층(상부로의 일면배수 조건)을 가진 점토층 두께 10m의 연약 점성토 지반을 상정하였다. 모델지반은 균일한 지반으로 설정하고 수치해석에 이용한 지반정수는 일반적인 층적 점성토 지반의 평균적인 압밀정수 값을 적용하는 것으로 하였으며, 점성토지반의 체적압축계수 $m_v = 2.0 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{kgf}$, 압밀계수 $c_v = 100 \text{cm}^2/\text{day}$ ($k_0 = 2.0 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$)로 설정하였다. 그림에서 C_k 는 e -log k 곡선의 기울기를 나타낸다.

5.1 점성토층의 두께에 따른 영향

점성토층의 두께를 1.0 Hc (=10.0m)에 대해 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0의 비율로 증가시킨 수치해석(기타 압밀정

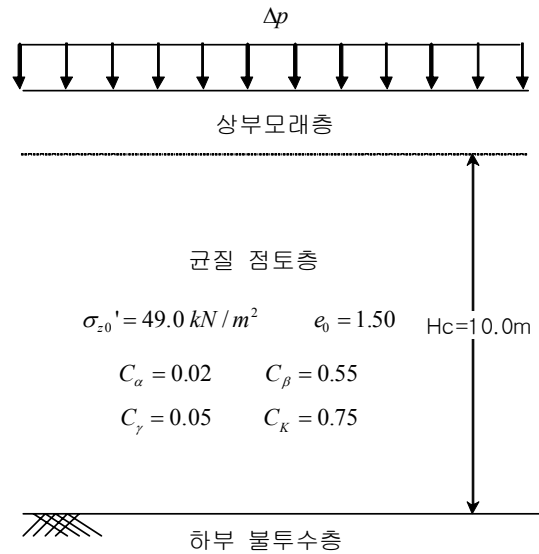


그림 10. 수치해석을 위한 모델지반

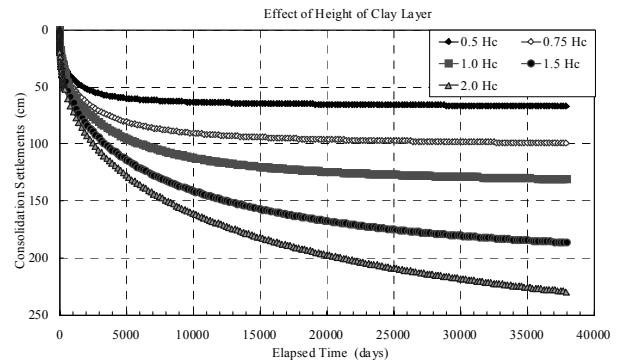


그림 11. 압밀층 두께의 영향(1차원 조건)

수는 모델지반에 주어진 값을 사용)에서 얻어진 시간-침하량 곡선을 나타낸 것이 그림 11이다.

그림에서 알 수 있는 것처럼, 점토층의 두께가 증가함에 따라서 1차압밀량과 장기압밀침하량이 증가하는 경향을 나타내지만, 기존의 탄성압밀침하량 계산식에 나타난 것과 같은 층두께의 증가비율과 단순한 1:1 대응관계는 나타내지 않음을 알 수 있다.

5.2 압밀하중(상재하중)의 영향

점성토층에 작용하는 압밀응력증분의 크기를 1.0 Δp (=10tf/m)에 대해 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0의 비율로 증가시킨 수치해석에서 얻어진 시간-침하량 곡선을 나타낸 것이 그림 12이다.

그림에서 알 수 있는 것처럼, 점성토층의 두께와 마찬가지로 지반에 작용하는 압밀하중의 증가에 따라 압밀침하량이 증가하고 있음을 알 수 있다.

5.3 압축지수의 영향

점성토의 압축지수를 1.0 C_c (=0.558)에 대해 0.5, 0.75,

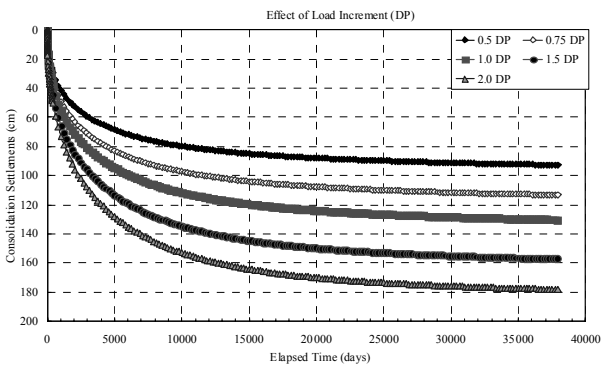


그림 12. 압밀응력의 영향(1차원 조건)

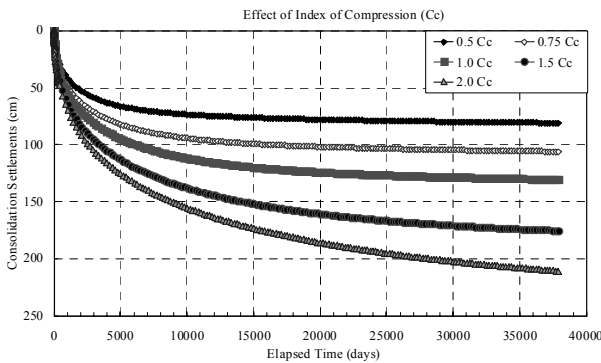


그림 13. 압축지수의 영향(1차원 조건)

1.0, 1.5, 2.0의 비율에 의한 수치해석에서 얻어진 시간-침하량 곡선을 나타낸 것이 그림 13이다.

그림에서 알 수 있는 것처럼, 압축지수가 증가함에 따라서 1차압밀량과 이차압밀량 모두 증가하고 있음을 알 수 있다. 다만, 탄성압밀이론에서 구해지는 압밀침하량과 같이 압축지수의 증가비율과 침하량에 1:1 대응관계는 나타나지 않음을 알 수 있다.

5.4 이차압밀계수의 영향

점성토층의 이차압밀계수를 1.0 C_a (=0.022)에 대해 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0의 비율로 증가시킨 수치해석에서 얻어진 시간-침하량 곡선을 나타낸 것이 그림 14이다.

그림에서 알 수 있는 것처럼, 이차압밀계수의 증가에 따른 1차 압밀과정의 차이는 거의 나타나지 않으며 압밀후반부의 침하량이 점차 증가하는 경향을 나타내고 있다.

5.5 투수계수의 영향

투수계수를 1.0 k_v (= 2.0×10^{-5} m/day)에 대해 0.5, 0.75,

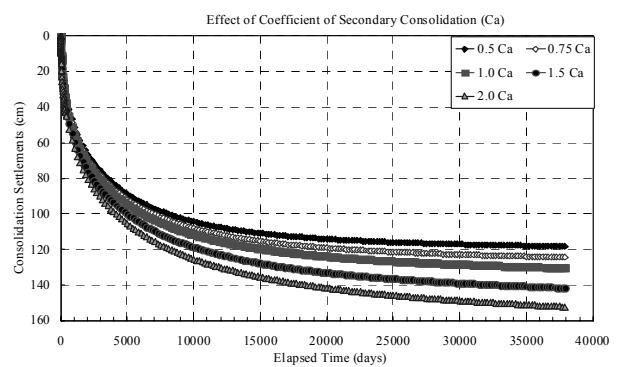


그림 14. 이차압밀계수 영향(1차원 조건)

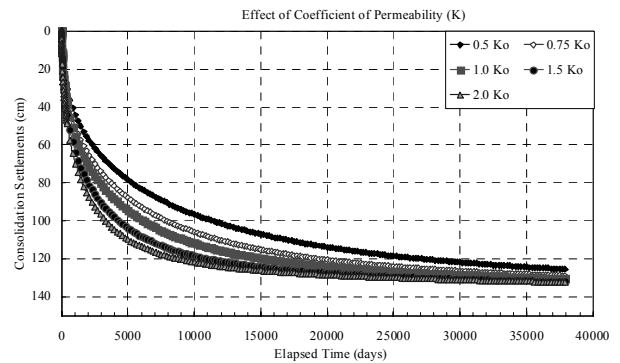


그림 15. 투수계수의 영향(1차원 조건)

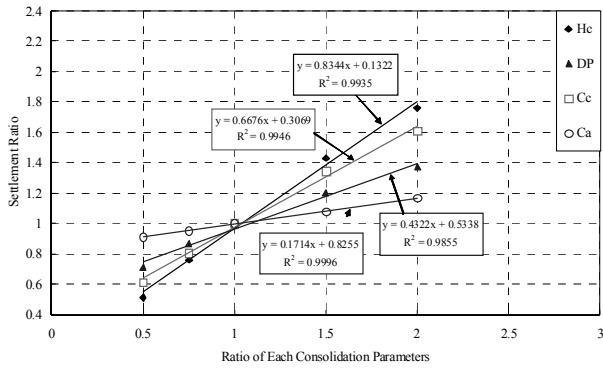


그림 16. 각 압밀정수들의 최종침하량에 미치는 영향분석

1.0, 1.5, 2.0의 비율로 증가시킨 수치해석에서 얻어진 시간-침하량 곡선을 나타낸 것이 그림 15이다. Yoshikuni의 탄-점성압밀이론에서는 $e-\log k$ 곡선의 기울기 C_k 를 이용하여 간극비의 변화에 따른 투수계수의 변화를 고려할 수 있다.

그림에서 알 수 있는 것처럼, 투수계수의 증가와 더불어 1차압밀은 빨라지지만 간극수압이 소산된 후의 이차압밀량의 차이는 크지 않음을 알 수 있다.

앞에서 수행한 모델지반의 수치모델링에서 각 압밀정수의 영향에 대해 검토하였다. 그림 16은 각 압밀정수가 최종침하량에 미치는 영향에 대해서 비교/분석한 것으로 최종침하량에 가장 큰 영향을 미치는 것은 점성토층의 두께 Hc(0.8344), 압축지수 C_c (0.6676), 하중중분 DP(0.4322), 이차압밀계수 C_a (0.1714)의 순으로 나타났으며 좋은 상관관계를 나타내고 있다. 따라서 점성토층의 압밀해석을 수행할 경우에는 각 정수들을 보다 신뢰성 있는 방법을 통해 선정하여 해석해야 할 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 해성점토를 재구성한 점성토 시료를 이용하여 정규압밀 상태에 대한 압밀하중의 크기 및 하중 중분비가 장기압밀 거동에 미치는 영향에 대해 조사하고, 1차원 탄-점성 압밀이론을 이용한 유한차분해석(FDM 해석)결과와 실내시험결과와의 비교/분석으로부터 적용성을 검증하였다. 또한 일반적인 모델지반에 대한 수치 모델링 결과를 이용하여 점성토의 압밀특성에 미치는 토질정수의 영향에 대해서 비교/분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 초기압밀하중의 차이에 따른 이차압밀량은 초기압

밀하중의 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었으나, 최종단계에서의 공시체 높이를 고려한 변형률은 압밀하중 증가와 더불어 증가하는 경향을 나타내었다.

- (2) 압밀하중 중분비를 증가시킨 실험결과로부터, 중분비가 증가할수록 최종침하량이 증가하지만 중분비에 비례하여 증가하지는 않음을 알았다.
- (3) 탄-점성 압밀이론을 이용한 유한차분해석결과는 실내시험결과와 비교한 결과, 시험 공시체의 초기조건의 차이에 따라 1차압밀과정에 대해서는 지연 또는 조기진행되지만 압밀후반부의 이차압밀과정에 대해서는 잘 일치하는 결과를 얻었다.
- (4) 모델지반을 이용한 수치모델링에 의한 각 압밀정수의 영향을 분석한 결과, 최종압밀침하량에 큰 영향을 미치는 순서는 점성토층의 두께, 압축지수, 하중중분, 이차압밀계수의 순으로 나타났다. 따라서 점성토층의 신뢰성 있는 해석을 위해서는 각 정수들을 정확하게 선정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. 백원진 (2007a), “탄-점성 압밀이론에 의한 버티칼 드레인 타설 지반의 잔류침하 예측(I)-이론의 적용성 검증”, *한국지반공학회 논문집*, Vol.23, No.6, pp.85-95.
2. 백원진, 이강일, 김우진 (2007b), “탄-점성 압밀이론에 의한 버티칼 드레인 타설지반의 잔류침하 예측(II)-현장조건에의 적용성”, *한국지반공학회 논문집*, Vol.23, No.4, pp.69-77.
3. Aboshi, H. and Matsuda, H. (1981), “Secondary compression of clays and its effect on settlement analysis”, *Soils and Foundations*, Vol.29, pp.19-24 (in Japanese).
4. Adachi, T. and Oka, F. (1982), “Constitutive equations for normally consolidated clay based on elsto-viscoplasticity”, *Soils and Foundations*, Vol.22, No.4, pp.57-70.
5. Baek, W.J. and Moriwaki, T. (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.159-171.
6. Bjerrum, L. (1967), “Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings”, *Geotechnique*, Vol.17, pp.81-118.
7. Imai, G. (1989), “A unified theory of one-dimensional consolidation with creep”, *Proc. Of the 12th I.C.S.M.F.E.*, Vol.1, pp.57-60.
8. 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.
9. Kutter, B. L. and Sathialingam, N. (1992), “Elastic-visco plastic modeling of the rate-dependent behaviour of clays”, *Geotechnique*, Vol.42, No.3, pp.427-441.
 10. Ladd, C. C., Foott, R., Ishihara, K., Schosser, F. and Poulos, H. J. (1977), “Stress -deformation and strength characteristics”, *Proc. 9th ICSMFE*, Tokyo 2. State of the art report, pp.421-494.
 11. Mesri, G., Bhahien, M. and Feng, T. W. (1995), “Compressibility parameters during primary consolidation”, *Compression and Consolidation of clayey soils*, Yoshikuni, H. and Kusakabe, O. (eds), Balkema, Rotterdam, pp.815-832.
 12. Sekiguchi, H. and Torihara, M. (1976), “Theory of one-dimensional consolidation of clays with consideration of their rheological properties”, *Soils and Foundations*, Vol.16, No.1, pp.27-44.
 13. Tan, T. K. (1957), “Secondary Time Effects and Consolidation of Clays”, *Academia Sinica, Harbin, China*.
 14. Taylor, D. W. and Merchant, W. (1940), “A Theory of Clay Consolidation Accounting for Secondary Compression”, *Journ. Math. and Phys.*, Vol.19, No.3, pp.167.
 15. Yin, J. H. and Graham, J. (1994), “Equivalent times and one-dimensional elastic visco-plastic modeling of time-dependent stress-strain behavior of clays”, *Canadian Geotechnique Journal*, Vol.31, pp.42-52.
 16. Yoshikuni, H. Kusakabe, O., Hirao, T. and Ikegami, S. (1994), “Elasto-viscous modeling of time dependent behaviour of clay”, *Proc. of the 13th ICSMFE*, New Delhi, Vol.1, pp.417-420.
 17. Yoshikuni, H., Moriwaki, T., Ikegami, S. and Nishiumi, H. (1995), “Rebound due to partial unloading and subsequent recompression behavior in 1-D consolidation”, *Proc. of the International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils*, IS-Hiroshima’95, Vol.1, pp.233-238.

(접수일자 2010. 5. 20. 심사완료일 2010. 7. 23)