

탄-점성 압밀이론을 이용한 점성토 지반의 장기압밀 특성 및 적용성 Long-term Consolidation Characteristics and Applicability of Soft Clayey Ground Using Elasto-Viscous Consolidation Theory

백원진¹⁾, Won-Jin Baek, 이강일²⁾, Kang-Il Lee, 하성호³⁾, Seong-Ho Ha, 김진영⁴⁾, Jin-Young Kim, 안태환⁴⁾, Tae-Hwan An

- ¹⁾ 전남대학교 지역·바이오시스템공학과, 조교수, Assistant Professor, Dept. of Rural & Bio-Systems Engineering, Chonnam National University
²⁾ (주) 서정엔지니어링, 전무, Vice President, Seojung Engineering Co., LTD
³⁾ 대전대학교 건설시스템공학과 교수, Professor, Daejin University.
⁴⁾ 전남대학교 지역·바이오시스템공학과, 석사과정, Graduate student of master courses, Chonnam National University

SYNOPSIS : When the industrial complex creation and the structures are constructed on the soft clayey ground, the long-term consolidation settlement greatly becomes a problem. In the present study, long-term consolidation tests to examine the change in the coefficient of secondary consolidation by the influence of the initial consolidation load and the influence of the consolidation load increment ratio($\Delta p/p_0$) in the normally consolidated state with an improved standard oedometer tester were examined. In addition, the finite difference method was executed by using one dimensional Elasto-Viscous model proposed by Yoshikuni et. al. From the result of the numerical analysis of the comparison laboratory tests, the applicability of the Elasto-Viscous model was verified from the agreement of the secondary consolidation process.

Key words : long-term consolidation, soft clay, elasto-viscous model, secondary consolidation, finite difference method

1. 서 론

연약 점성토 지반을 대상으로 한 구조물 축조와 단지조성 사업 및 대단위 매립사업이 활발하게 진행되고 있다. 이와 같이 연약지반상에의 단지조성이나 도로 등 SOC 기반구조물을 설계할 때 지반의 안정 문제와 더불어 침하와 관련된 문제가 자주 대두되고 있다. 점토지반을 대상으로 할 경우, 하중재하 초기에 발생하는 즉시침하와 간극수압의 소산과 더불어 장기간에 걸쳐 압밀침하가 발생하게 되는데, 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 Kutteer & Sathialingam(1992)의 탄-점소성모델, Yoshikuni et. al.(1994, 1995)의 탄-점성 압밀이론, Isotache 법칙

에 근거한 Imai(1989), Imai et. al.,(2003) 등의 모델이 제안되어져 있다. 또한 Baek et. al.,(2006)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 압밀이론을 이용한 유한차분해석(FDM 해석)결과와 실내시험결과의 비교/분석으로부터 탄-점성 압밀이론의 적용성을 검증하고자 하였다.

2. 실험 및 방법

2.1 점토시료의 작성 및 물리특성

본 연구에서는 해성점토의 정규압밀상태에 대한 장기압밀 특성을 파악하기 위하여 대형토조를 이용하여 실험실에서 재성형한 점토시료를 이용하여 수행하였다. 재성형시의 압밀압력은 토조상단부까지 점토를 채운 후에 방치기간을 두고 안정화 시킨 후, 점토시료의 교란의 영향을 방지하기 위해 초기하중은 0.05kgf/cm²를 재하하고, 그 후 0.1kgf/cm², 0.2kgf/cm²를 재하한 후, 최종압밀하중인 0.4kgf/cm²의 압밀하중에서 실제지반과 같은 안정된 재성형 점토를 얻기 위하여 1차압밀이 종료된 시점을 3 te법을 적용하여 압밀종료시점으로 하고, 블록(20cm x 10cm x 12cm)으로 채취하여 각 시료의 함수비 변화를 방지하기 위해 파라핀으로 도포하여 항온상태에서 보관하였다. 본 연구에서 사용한 실내시험용 해성점토의 물리특성을 나타낸 것이 표 1이다.

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

2.2 실내모형시험 방법

정규압밀상태에서의 초기압밀하중과 압밀하중 증분비의 변화에 따른 점성토지반의 장기압밀특성을 조사하기 위해 실시한 하중재하방법을 나타낸 것이 표 2이다. Case 1은 초기압밀하중의 영향을 Case 2는 압밀하중증분의 영향을 알아보기 위해 실시한 것이다.

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	

3. 실험결과 및 고찰

3.1 정규압밀영역에서의 압축곡선

재성형 점토 작성시의 $\sigma'_0 (=0.4\text{kgf/cm}^2)$ 에 대해 초기 압밀하중을 0.8, 1.6, 3.2, 6.4 kgf/cm^2 의 정규압밀 영역에 대해 수행한 실내시험의 압축곡선(e-logp 곡선)을 나타낸 것이 그림 1이다. 그림에서 초기 간극비에 차이를 나타낸 것은 재성형 점토를 작성하기 위해 이용한 대형토조에서 전체 점토층의 두께가 커서 3 te법에 의해 1차압밀 종료시점을 확인하였으나 시료채취 위치의 차이(상부와 하부위치)에 의한 것으로 판단된다. 그러나 각 시험 Case에 따라 압축지수에 약간의 차이가 나타났으나 큰 차이는 없었다(탄-점성 압밀이론의 적용성 검증시 압밀정수 참조).

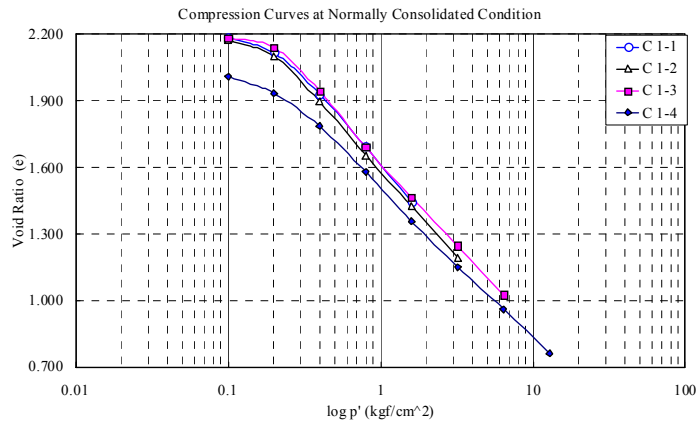


그림 1. 표준압밀시험에서의 e-logp 곡선

3.1.1 초기 압밀하중에 따른 장기압밀특성

각 하중단계에서의 초기압밀하중 차이에 따른 장기압밀특성을 규명하기 위하여 실시한 실험의 침하-시간관계곡선을 나타낸 것이 그림 2이다. 그림 2에서 압밀하중이 클수록 1차압밀과정에서의 압밀속도가 빠르고 최종압밀량이 약간 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 초기압밀하중이 클수록 점토구조의 안정화가 빠르게 진행되었기 때문으로 판단된다. 이는 초기압밀하중이 클수록 하중재하와 동시에 큰 변형이 발생하여 압밀후반까지 그 영향에 따라 차이가 나타남을 알 수 있다.

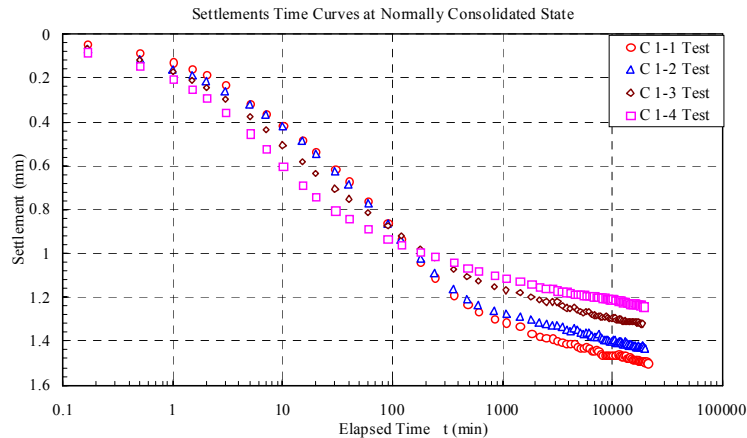


그림 2. 초기압밀하중에 따른 침하-시간곡선

그림 3은 정규화한 간극수압($U/\Delta p$)의 소산과정을 나타낸 것으로, 본 연구에서 이용한 개량형 표준압밀시험기는 밀폐형 셀이 아닌 표준압밀시험기의 하부를 벨브조작에 의해 비배수 조건하에서 압밀시험이 진행되므로 그림에서와 같이 압밀초기에 정규화한 간극수압이 $U/\Delta p=1.0$ 에 도달하지 않고 하중재하와 동시에 배수가 진행되며 간극수압이 발생한 후 peak를 나타낸 후 감소하고 있다. 각 공시체의 초기상태의 차이는 있으나 압밀하중이 증가할수록 간극수압 증가분이 감소하고 있다. 이는 압밀하중 증가에 따라 초기의 큰 변형률로 인해 간극수압소산의 촉진과 초기 공시체 높이의 감소로 인한 배수거리의 단축에 기인한 것으로 판단된다.

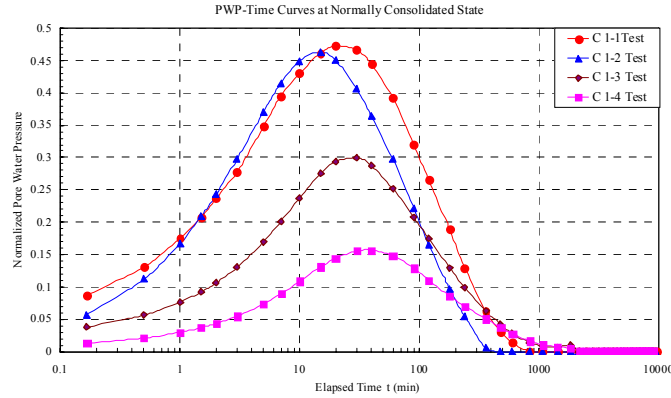


그림 3. 정규화한 간극수압의 소산곡선

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

4. 탄-점성압밀이론의 적용성 검증

4.1 탄-점성 압밀방정식의 차별화

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 향으로 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 감소향으로 압밀과 더불어 감소하고, 제 3항이 재하시 (+)값, 제 4항이 유효응력 완화현상에 따른 간극수압의 발생을 나타낸다. 이식은 간극수압에 관한 것으로 변형성분은 이것을 해석하는 것만으로는 구해지지 않으므로 식 (1)에서 간극비 e 를 구해야 한다. 즉, 간극수압과 간극비와 관련된 두 개의 방정식을 차별화하여 수치해석을 행하며, 각각의 항을 차분식으로 나타내면 다음과 같다. 또한 하중작용조건은 일정하중 재하 조건($dp/dt = 0.0$)으로 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.

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

$$\text{여기서, } A_{ij} = \Delta t_j \frac{(1+e_0)k_{i,j}}{m_{v,i,j} r_w}, \quad B_{i,j} = \Delta t_j \frac{1+e_0}{m_{v,i,j} r_w}, \quad C_{ij} = \Delta t_j \frac{r'z + p - u_{i,j}}{m_{v,i,j} \eta_{i,j}}$$

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.

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

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

상기 식들에서 구해진 $u_{i,j+1}$ 과 $e_{i,j+1}$ 을 사용하여 다음단계인 $(j+1)$ 번째의 시각에서의 m_v, η, k 가 산정되어진다.

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

전술한 Yoshikuni의 1차원 탄-점성 압밀이론을 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.

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}	

4.2.1 초기압밀하중의 영향

정규압밀영역에서의 초기압밀하중의 차이에 따른 실내시험을 수행한 결과와 FDM 수치해석결과의 침하-시간곡선을 나타낸 것이 그림 4이다. 그림으로부터 수치해석결과가 실험결과에 비해 1차압밀과정에서 약간 지연(또는 조기진행)되는 결과를 나타내지만, 간극수압이 소산된 후의 이차압밀과정에 대해서는 Yoshikuni의 탄-점성 압밀이론에 나타난 것처럼 간극수압이 소산된 후에도 유효응력완화현상에 의해 정적 간극수압이 발생되므로 이차압밀침하가 약간 큰 경향을 나타내지만 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

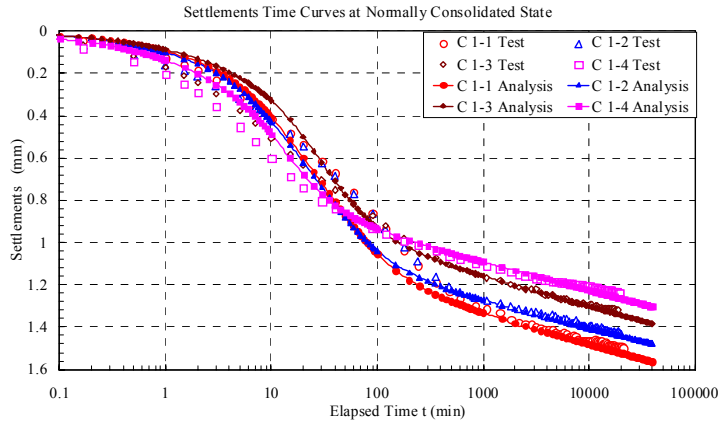


그림 4. 침하-시간곡선의 수치해석결과(Case 1)

4.2.2 압밀하중 증분비의 영향

그림 5는 초기압밀하중 0.8kgf/cm^2 에 대한 하중 증분비(시험조건 참조)에 따른 실내시험결과와 수치해석결과를 비교한 것이다. 그림 5에서 알 수 있는 것처럼, 실내시험결과로부터 하중 증분비가 증가할수록 최종침하량이 증가하고 있으나 하중증분비에 비례하여 최종침하량이 단순 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. 이는 1차압밀과정중에 포함된 크리프 침하의 영향으로 판단된다. 또한 수치해석결과는 이차압밀과정을 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

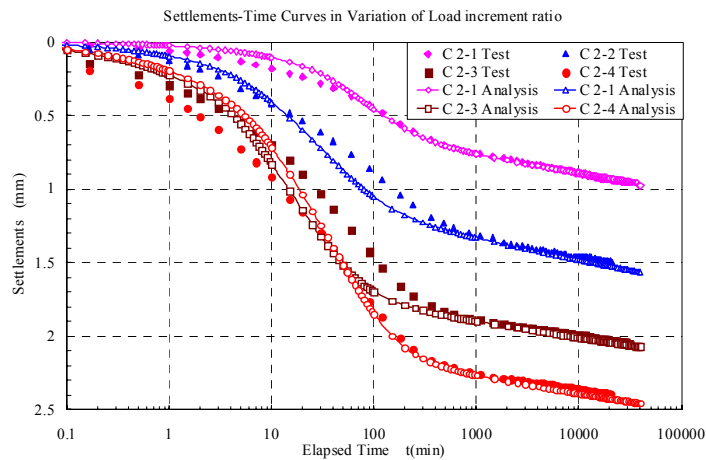


그림 5. 침하-시간곡선의 수치해석결과(Case 2)

5. 결론

본 연구에서는 광양항 점토를 재성형한 점성토 시료를 이용하여 정규압밀 상태에 대한 압밀하중의 크기 및 하중 증분비가 장기압밀 거동에 미치는 영향에 대해 조사하고, 1차원 탄-점성 압밀이론을 이용한 유한차분해석(FDM 해석)결과와 실내시험결과의 비교/분석으로부터 적용성을 검증하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 초기압밀하중(원지반 상태의 유효상재하중)의 차이에 따른 이차압밀 침하량은 초기압밀하중이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었으나, 최종단계에서의 공시체 높이를 고려한 변형률은 압밀하중

증가와 더불어 증가하는 경향을 나타내었다.

- 2) 압밀하중 증분비를 변화시킨 실험결과로부터, 하중증분비가 증가할수록 최종침하량이 증가하지만 하중증분비에 비례하여 증가하지는 않음을 알았다.
- 3) 탄-점성 압밀이론의 FDM 해석결과와 실내시험결과를 비교한 결과, 시험 공시체의 초기조건에 차이에 따라 1차압밀 과정에 있어서는 약간 지연 또는 조기진행되지만 압밀후반부의 이차압밀과정에 대해서는 잘 일치하는 결과를 나타내, 그 적용성을 검증하였다.

참고문헌

1. 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.
2. Baek, WJ. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Tan, T. K., 1957, "Secondary Time Effects and Consolidation of Clays", *Academia Sinica, Harbin, China*.
9. 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.
10. Yin, J. H. and Graham, J., (1994), "Equibalent times and one-dimensional elastic visco-plastic modeling of time-dependent stress-strain behavior of clays", *Canadian Geotechnique Journal*, Vol. 31, pp. 42-52.
11. 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.