

탄점성압밀방정식을 이용한 점성토의 일차원 압밀 해석에 관한 연구 One-dimensional consolidation analysis of clayey soils based on elasto-viscous liquid model

염혜선¹⁾, Hye-Seon Youm, 김지용²⁾, Ji-Yong Kim, 정승용³⁾, Seung-Yong Jung, 김수삼⁴⁾, Soo-Sam Kim

¹⁾중앙대학교 토목공학과 석사과정, Master course, Dept. of Civil Engineering Chung-Ang University

²⁾중앙대학교 토목공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engineering Chung-Ang Univ.

³⁾지구환경전문가그룹 선임연구원, Senior researcher, E.G.E.

⁴⁾중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering Chung-Ang University

SYNOPSIS : The traditional concept after Terzaghi was that consolidation was the dissipation process of pore water pressure compatible to external loading which was generated immediately after the loading. However, a theory of one-dimensional consolidation based on elasto-viscous liquid model proposed by Yoshikuni(1994) explained that the process of primary and secondary consolidation was considered to be not a simple process of dissipation of pore water pressure but a simultaneous process of dissipation and generation by external loading.

This study attempts to demonstrate general consolidation behaviour of clayey soils including effects of consolidation history, load increment and thickness of cohesive layer by one-dimensional Finite Difference Method(F.D.M) analysis from the viewpoint of elasto-viscous consolidation theory.

Key words : elasto-viscous liquid model, consolidation history, load increment, thickness of cohesive layer

1. 서론

점토는 정규압밀과 과압밀 상태, 비배수조건에서의 유효응력완화와 크리프(creep), 제하(unloading)-재제하(reloading)의 반복시 나타나는 이력현상, 일정변형속도압밀(CRS)시험에서 발생하는 압밀의 변형속도 의존성 그리고 유사선행압밀효과(quasi-preconsolidation effect) 등을 포함하여 압축과정에서 다양한 시간 의존적인 거동을 보인다. 따라서, 점성토지반의 압밀거동을 예측하는데 있어서 이러한 시간의존적 특성들을 고려한 신뢰성 있는 지배방정식을 선정하는 것이 필요할 것이다.

Yoshikuni et al.(1994)은 2차압밀현상을 설명하기 위하여 가능한 통합된 방법으로 이러한 현상에 대한 실험적인 관찰에 의한 판단에 근거한 비선형 elasto-viscous model을 제안하였으며 또한 elasto-viscous body에 근거한 압밀방정식을 제시하였다.

본 연구에서는 우선 점성토의 탄점성 액체거동에 관한 기본특성을 살펴보고 압밀이력, 하중증분비, 시료높이의 영향을 포함한 점성토의 일반적인 거동을 elasto-viscous consolidation 이론의 관점에서 유한차분에 의한 수치해석을 실시하였다.

2. Yoshikuni 압밀방정식

Yoshikuni(1994)는 기존의 점성토의 압밀, 압축에 관한 연구들을 정리하여 nonlinear elasto-viscous liquid model을 제안하였다. 압밀방정식의 기본형태는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_D + \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_L + \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_R \quad (1)$$

오른쪽 첫째항은 배수의 항으로서 배수시 (-)값을 가지며, 두 번째항은 하중의 항으로서 하중이 증가할 때마다 (+)값을 나타낸다. 그리고 세 번째항은 유효응력완화의 항으로서 항상 (+)의 값을 나타낸다.

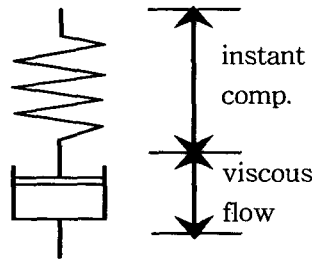


그림 1. Elasto-viscous liquid model

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{(1+e_0)}{r_w m_v(\sigma')} \frac{\partial}{\partial z} \left(k(e) \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{dp}{dt} + \frac{r' \cdot z + p - u}{m_v(\sigma') \eta(e, \sigma')} \quad (2)$$

윗 식은 앞에서 설명한 식(1)과 동일한 것으로, 위의 압밀방정식은 수치해석으로 풀 수 있는데, 시간 t 는 전진유한차분으로 깊이 z 는 중앙유한차분법으로 그 해를 구할 수 있다.

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

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

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

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

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

(3)~(7)식을 식(2)에 대입하고 이를 다시 정리하면 다음과 같다.

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

$$A_{ij} = \Delta t_j \frac{(1 + e_0) \cdot k_{ij}}{m_{v,i,j} r_w} \quad (9)$$

$$B_{ij} = \Delta t_j \frac{1 + e_0}{m_{v,i,j} r_w} \quad (10)$$

$$C_{ij} = \Delta t_j \frac{r' z + p + u_{i,j}}{m_{v,i,j} \eta_{i,j}} \quad (11)$$

간극비에 대한 미분방정식은 전진유한차분방정식에 의해 다음과 같이 근사 될 수 있다.

$$e_{i,j+1} = e_{i,j} - m_{v,i,j} \cdot (\sigma'_{i,j+1} - \sigma'_{i,j}) - \frac{\sigma'_{i,j}}{\eta_{ij}} \cdot \Delta t_j \quad (12)$$

이들 방정식에서 $m_v(\sigma')$, $\eta(e, \sigma')$, $k(e)$ 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$m_v = 0.434 C_r \left(\frac{1}{\sigma'} \right) \quad (13)$$

$$\eta = 10 \left(\frac{e - e_0}{C_\alpha} + \frac{C_\beta - C_\alpha}{C_\alpha} \cdot \log \frac{\sigma'_0}{\sigma'} + \log \eta_0 \right) \quad (14)$$

$$k = k_0 / 10^{[(e_0 - e) \cdot C_k]} \quad (15)$$

3. 해석결과 및 고찰

3.1 Elasto-viscous model에 의한 점성토의 거동특성

제안된 방정식에 의한 점토의 거동을 유한차분법에 의해 해석하였다. 점토시료는 두께 2.0cm, 상부층 일면배수로 가정하였고, 각각의 간극비와 간극수압은 상부배수층, node 1부터 하부 배수층, node 4까지 네 개의 중앙지점에서 예측되었다. 그림 2.와 3.에서 특별한 거동은 관찰되지 않았지만 그림 3.의 u-t 곡선에서 압밀초기단계에서의 간극수압의 자연소산에 의한 안장모양부분은 배수경계면에 인접하여 주로 나타나고 배수경계근처에서는 거의 나타나지 않음을 알 수 있었다. 초기입력조건은 표 1.에 제시된 바와 같고, 시간간격(Δt)은 $(k/m_v \cdot \gamma_w) \cdot (\Delta t / \Delta z^2) < 1/6$ 의 안정조건을 만족하는 기준으로 설정하였다.

표 1. 수치해석에 사용된 Parameters

Parameter	C_α	C_β	C_γ	C_k	σ'_0 (kg/cm^2)	e_0	$\Delta p/p$	dz(cm)	dt(min)
Input data	0.00563	0.351	0.051	2.83	0.8	1.33	1	0.25	0.01

그림 4.는 예측한 시간에 따른 점성계수(η)의 변화를 예측한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 η 값은 초기에 일정한 값을 보이다가 갑자기 급격히 감소한 다음 최소값에 도달한 후 다시 증가하게 되고 2차압밀이 발생하는 동안 계속하여 증가하는 경향을 보이고 있다. η 의 감소는 점토의 연화(softening)를

의미하기 때문에 압밀과정에서 점토는 한 번 연화과정을 거치고 1차압밀종료시점에서 초기값으로 회복한 다음 2차압밀동안 계속 경화(hardening)하게 된다.

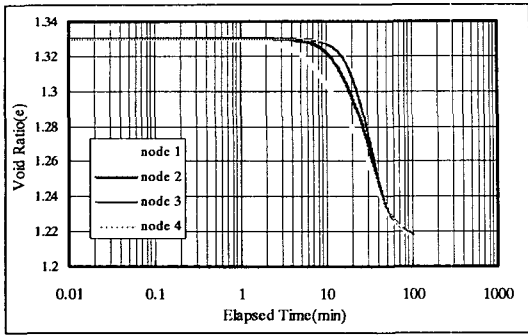


그림 2. 시간에 따른 간극비의 변화

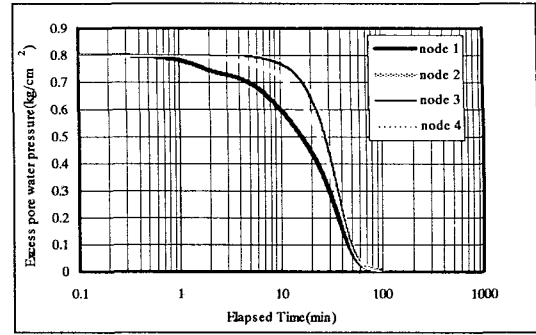


그림 3. 시간에 따른 과잉간극수압의 변화

그림 5는 압밀층에 대한 $1/m_v$ 과 평균 점성계수 η 의 곱에 대한 변화를 양대수상에 시간에 따라 나타낸 것이다. 이 값들을 완화시간(relaxation time)이라 하고 $m_v\eta$ 값이 작아짐은 완화가 더 빨라짐을 의미한다. 그림에서처럼 $m_v\eta$ 값은 최소값에 도달한 후 증가하는 경향을 보인다. 압밀과정에서 m_v 는 단지 2가지 요인에 의해서만 변화하며 그에 대한 영향 또한 작다. 그러나 η 값은 상당히 변화가 심하며 압밀 거동을 결정하는 요인이다.

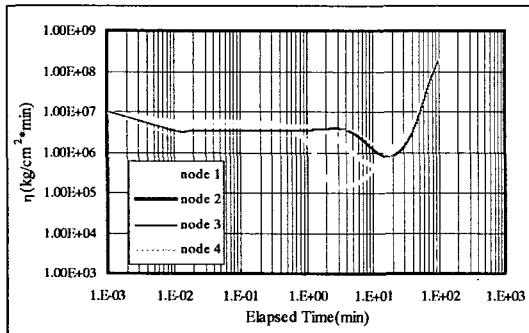


그림 4. 시간에 따른 점성계수의 변화

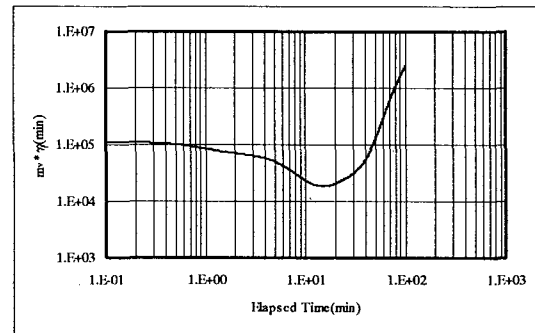


그림 5. 시간에 따른 $m_v \cdot \eta$ 의 관계

3.2 압밀이력의 영향

그림 6은 하나의 점토층 두께를 가정한 후 각기 다른 초기조건으로 압밀된 계산결과를 나타낸다. 그림에 제시된 점선은 이전까지의 압밀이력을 나타내고, 아래의 선들은 서로 다른 시간만큼 2차압밀시킨 가상점토에 동일한 Δp 를 가한 경우의 압밀과정을 나타내었다. 그림에서 제시된 바와 같이 임의의 응력하에서 2차압밀을 계속 받으면 간극비는 시간에 따라 감소하고, 그 시간이 길수록 그 후의 재하에 대해서 점토는 보다 과압밀된 것으로 나타났다. 그러나 압밀이 진행되어 최종압밀응력에 도달했을때는 초기 간극비와 상관없이 거의 같은 점으로 수렴해나가는 것을 알 수 있다. 즉, 동일 압밀압력증분 Δp 에 의한 압축은 점토의 초기조건(압밀이력)에 따라 변한다는 것을 암시하고 있다. 그림 7은 동일한 계산결과를 시간에 따른 변형률로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 점토층의 압밀이력이 변형률의 크기에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었으나 1차압밀종료시점은 크게 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

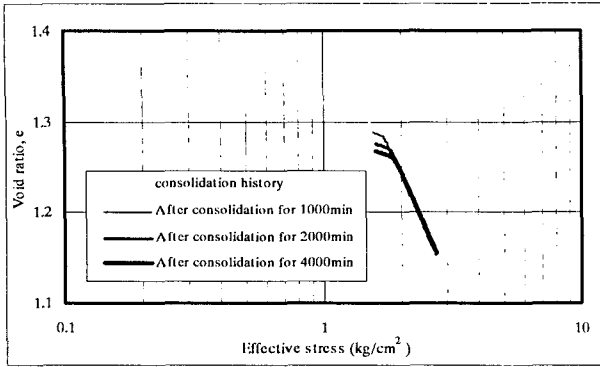


그림 6. 다른 응력이력을 가진 시료의 해석결과

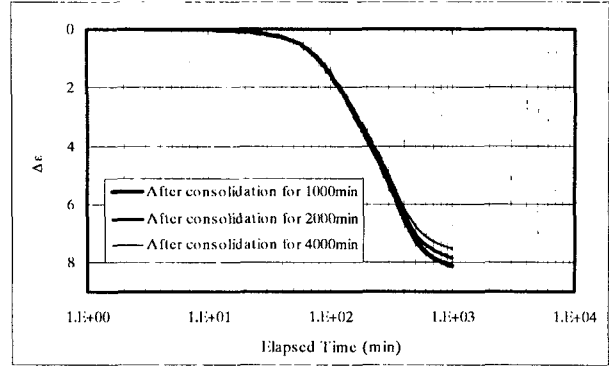


그림 7. 압밀거동에서 응력이력의 영향

3.3 하중증분비의 영향

그림 8.과 그림 9.는 2cm의 두께를 가진 시료에 대해 0.5, 1, 2, 3의 하중증분비를 달리하여 압밀시켰을 때의 거동을 예측한 것이다. 그림 8.은 각각의 하중증분비에 대한 간극비와 시간의 관계를 나타낸 것이고, 그림 9.는 동일한 계산결과에 대해서 시간에 따른 변형률의 관계로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 1차 압밀이 종료된 후의 2차압밀곡선 즉 c_a 의 기울기는 각각의 하중단계와 관계없이 일정한 값으로 나타났다.

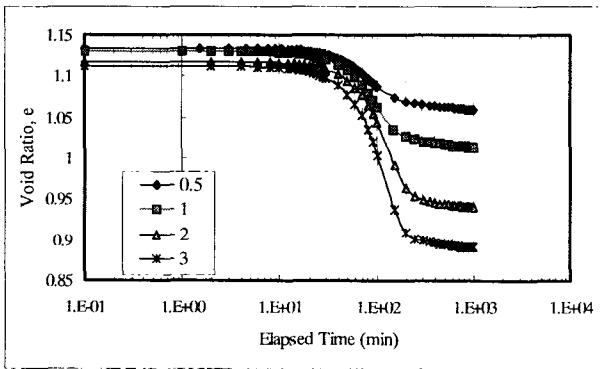


그림 8. 각 하중증분비에 대한 $e - \log t$ 관계

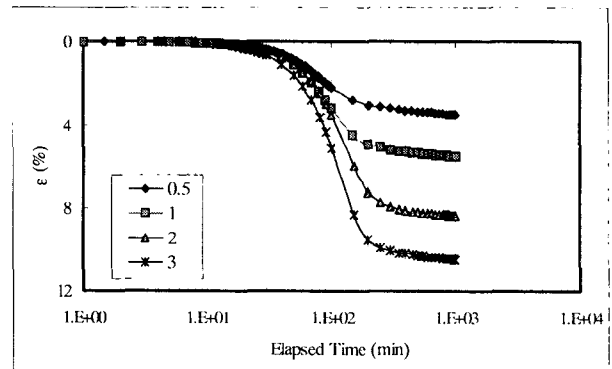


그림 9. 각 하중증분비에 대한 $\epsilon - \log t$ 관계

3.4 시료높이의 영향

다음은 2cm, 5cm, 10cm, 20cm, 1m, 5m의 각기 높이가 다른 시료를 압밀시켰을 때의 예상거동을 나타낸 것이다. 각각의 시료는 $0.4 \rightarrow 0.8 \text{ kg/cm}^2$, $0.8 \rightarrow 1.6 \text{ kg/cm}^2$, $1.6 \rightarrow 3.2 \text{ kg/cm}^2$ 의 세 단계로 재하되었으며, 자료는 $0.8 \rightarrow 1.6 \text{ kg/cm}^2$ 의 단계를 그래프로 나타낸 것이다. 각 재하단계별 시료두께 변화에 따른 평균간극비 변화량과 시간의 관계로 나타내면 그림 10.과 같고, 그림 11.은 동일한 결과에 대해 변형률과 시간의 관계로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시료두께가 증가할수록 $\Delta e - \log t$ 곡선상의 그래프가 오른쪽으로 이동하게 되고 이는 시료가 두꺼워짐에 따라 압밀속도가 느려짐을 의미한다. 또한 2cm~1m의 시료에서는 시료두께에 관계없이 1차압밀 종료시점에 도달하여 일정한 기울기, 즉 2차압밀 계수(c_a)를 갖는 선에 수렴하는 것을 확인하였지만, 두께 5m의 시료에서는 더 이상 Isotache 현상이 나타나지 않았다. 이는 자중의 영향으로, 즉 두꺼운 시료에서는 시료자체가 갖는 자중의 영향으로 인하여 적용된 하중증분비, 1보다 작은값이 작용하였기 때문으로 사료된다.

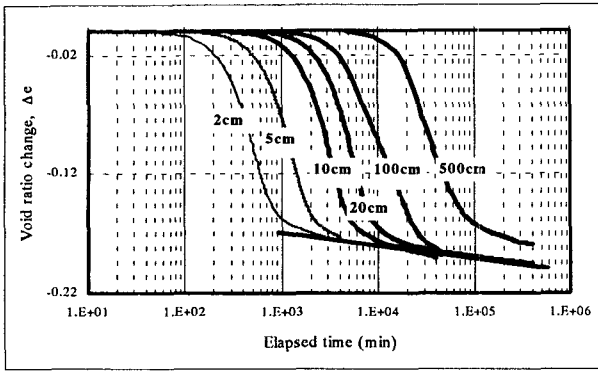


그림 10. 시료 두께별 $\Delta e - \log t$ 관계
($0.8 \rightarrow 1.6 \text{ kg/cm}^2$)

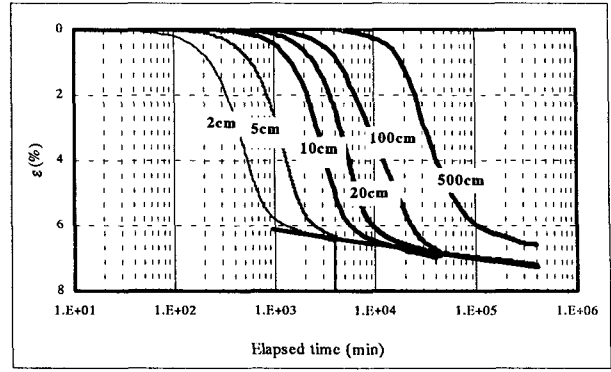


그림 11. 시료 두께별 $\epsilon - \log t$ 관계
($0.8 \rightarrow 1.6 \text{ kg/cm}^2$)

4 결론

Yoshikuni et al.(1994)이 제시한 elasto-viscous liquid model을 이용한 수치해석을 시행하여 점성토의 거동과 압밀이력, 하중증분비, 시료높이의 영향을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 시간에 따른 점성계수 η 의 변화 그래프에서 η 값의 감소는 점토의 연화(softening)를 의미하기 때문에 압밀과정에서 점토는 한 번 연화과정을 거치고 1차압밀종료시점에서 초기값으로 회복한 다음 2차 압밀동안 계속 경화(hardening)하게 된다.
2. 임의의 응력아래에서 2차압밀을 계속받으면 간극비는 시간에 따라 감소하고, 그 시간이 길수록 그 후의 재하에 대해서 점토는 보다 과압밀된 것으로 나타났다. 그러나 압밀이 진행되어 최종압밀응력에 도달했을 때는 초기 간극비와 상관없이 거의 같은 점으로 수렴해나가는 것을 알 수 있다. 압밀이력이 변형률의 크기에 영향을 미침을 확인할 수 있었다.
3. 하중증분비를 달리하여 압밀시켰을 때 1차 압밀이 종료된 후의 2차압밀곡선 즉 c_a 의 기울기는 각각의 하중단계와 관계없이 거의 일정한 값으로 나타남을 확인할 수 있었다.
4. 두께가 다른 시료를 압밀시켰을 때 얇은 두께의 시료에서는 두께에 관계없이 1차압밀 종료시점에 도달하여 일정한 기울기, 2차압밀계수(c_a)를 갖는 직선에 수렴하였으나, 두꺼운 시료에서는 자중의 영향으로 더 이상 Isotache 현상이 나타나지 않았다.

참고문헌

1. 김지용(1997), "점성토의 하중증분비효과 및 유효응력완화현상에 관한 연구", 중앙대학교 석사학위논문.
2. 김지용, 정승용, 김수삼(1997), 점성토의 유효응력완화현상에 관한 실험적 연구, 토목학회 학술발표회.
3. 정승용(1998), "자중과 점성효과를 고려한 일차원 압밀침하 해석기법", 중앙대학교 박사학위논문.
4. Serge Leroueil(1995), "Could it be that clays have no unique way of behaving during consolidation?", Proc. IS-Hiroshima'95.
5. Yoshikuni H., Kusakabe O., Okada M. and Tajima S.(1995), "Mechanism of one-dimensional consolidation", Proc. IS-Hiroshima'95.
6. Y. X. Tang and G. Imai(1995), "A constitutive relation with creep and its application to numerical analysis of one-dimensional consolidation", Proc. IS-Hiroshima'95.