

유한요소해석을 이용한 SBP 시험의 결과해석 - 점성토 지반의 압밀특성 Numerical analysis of Self-Boring Pressuremeter test results using FEM - Consolidation characteristics of clay

장인성¹⁾, Jang, In-Sung, 정충기²⁾, Chung, Choong-Ki

¹⁾서울대학교 공과대학 토목공학과 박사수료, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Eng., Seoul Nat' l Univ.

²⁾서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수, Associate Professor, Division of Civil, Urban and Geo-Systems Eng., Seoul Nat' l. Univ.

SYNOPSIS : Self-Boring Pressuremeter Test(SBPT) is known to be the most effective in-situ test method which can reliably determine consolidation characteristics as well as deformation modulus and undrained shear strength. In order to derive the coefficient of consolidation using SBPT results it is necessary to obtain the dissipation behavior from the pore pressure change with time during constant radial strain(generally 10%) and to derive the reliable time factor(T) from the analytical method which considers the real in-situ conditions. As previous studies on time factor are based on the assumptions of plane strain condition that the membrane of SBP is infinite, of undrained condition during the expansion of the probe and of elastic soil behavior during consolidation, these analyses can't consider the real boundary conditions and the real soil behaviour. In this study, consolidation analysis similar to real in-situ conditions including test procedure is conducted using finite element program which employs MCC model and Biot theory. Time factor considering the effects of finite membrane length, the total pressure change during consolidation and partial drainage is proposed and compared with previous results.

Key words : Self-Boring Pressuremeter Test(SBPT), consolidation characteristics, time factor, finite membrane length, MCC model, Biot theory, partial drainage

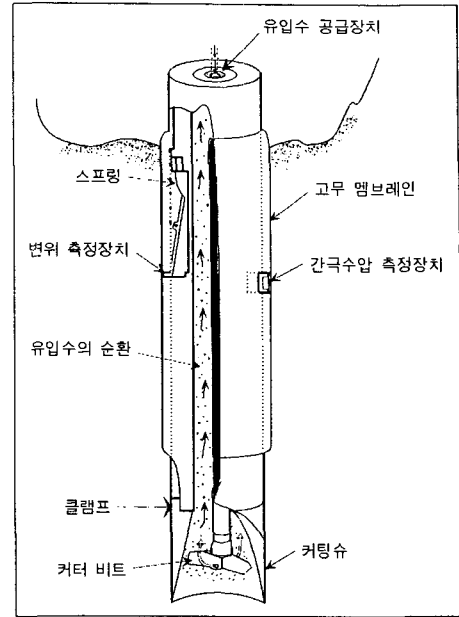
1. 서론

점성토 지반의 압밀계수를 산정하기 위해서는 현장에서 채취한 불교란 시료를 사용하여 실내 압밀시험을 행하거나 피에조콘 관입시험(Piezococone Penetration Test, CPTu) 또는 자가굴착식 프레스미터 시험(Self-Boring Pressuremeter Test, SBPT) 등의 현장시험을 이용하는 방법이 있다. 하지만 실내시험은 시료의 채취시 발생하는 교란효과, 크기효과 그리고 구속효과 등의 영향을 정확하게 고려하기가 어려운 반면, 현장시험은 실제 지반의 여러 조건들을 제대로 반영한 결과를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 국내에서도 CPTu를 이용하여 점성토 지반의 압밀계수를 추정하는 것에 대한 연구가 활발하

게 행해지고 있으며, SBPT에 대한 연구는 아직까지 거의 이루어지지 않고 있다.

SBPT는 지반의 교란을 최소화하여 시험을 할 수 있다는 장점을 가지고 있고, [그림 1]에 나타난 바와 같이 시험기 내에 설치된 간극수압 측정장치를 이용하여 횡방향 재하시 발생하는 과잉간극수압을 측정하고, 변형을 일정하게 유지한 상태에서 과잉간극수압의 소산정도를 분석하여 압밀특성을 구할 수 있다. 간극수압의 소산결과를 이용하여 점성토 지반의 압밀계수를 산정하기 위해서는 우선 시간계수의 적절한 선택이 필요한데, Randolph와 Wroth (1979) 등은 이론적인 방법을 이용하여 초기 과잉간극수압의 크기에 따른 시간계수를 제안한 바 있고, Clarke (1990), Fioravante 등 (1994) 등은 이러한 시간계수를 이용하여 구한 압밀계수를 실내시험 등의 결과와 비교하였다. 하지만, 기존의 연구들은 멤브레인의 길이가 무한하다는 평면변형을 조건에서 멤브레인이 완전 비배수 상태로 팽창한다고 가정하여 초기 과잉간극수압의 분포를 결정하였고, 압밀시 지반이 탄성적으로 거동한다는, 즉 압밀동안 전응력의 변화가 없다는 가정 하에서 압밀해석을 수행한 것이기 때문에 실제 경계조건을 제대로 반영하지 못할 뿐만 아니라 실제 지반의 거동을 정확하게 모사할 수 없다는 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 MCC 모델과 Biot 이론을 적용한 유한요소 혼합해석(Coupled analysis)을 통해 자가굴착식 프레스미터 시험 시의 초기조건과 경계조건 그리고 시험과정을 비교적 정확하게 모사한 압밀해석을 실시함으로써 멤브레인의 유한한 길이와 압밀시 전응력의 변화 그리고 투수계수에 따른 부분배수 효과 등의 영향을 고려한 시간계수를 제안하고 기존의 연구결과와 비교·분석하고자 하였다.



[그림 1] SBP의 프루브

2 기존의 연구내용

2.1 개요

프레스미터 시험을 이용하여 지반의 압밀특성을 파악하는 방법은 크게 변형을 유지시험(Strain Holding Test, SHT)과 하중 유지시험(Pressure Holding Test, PHT)으로 구분할 수 있다. SHT는 멤브레인의 변형이 어느정도(일반적으로 10%) 발생하였을 때 변형을 일정하게 유지시킨 상태에서 간극수압의 소산정도를 측정하는 방법이고 PHT는 SHT에서 변형을 일정하게 유지시키는 것에 대한 어려움을 보완하기 위해 개발된 시험방법으로 외부 하중을 일정하게 유지시킨 상태에서 간극수압의 소산정도를 측정하는 시험방법이다. SHT의 경우, Randolph와 Wroth (1979) 등이 지반의 압밀계수를 산정하는데 필요한 시간계수의 이론적인 해석해를 제안한 반면, PHT의 경우에는 아직까지 체계적인 해석방법이 제시된 바가 없기 때문에 SHT 방법이 보편적으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 SHT를 이용하여 압밀계수를 산정하는 방법에 대하여 알아보았다.

2.2 압밀계수 산정방법

Randolph와 Wroth (1979)는 말뚝의 관입시 점성토 지반에서 발생하는 과잉간극수압의 분포와 압밀과정에 대한 연구를 공동팽창이론과 일차원 압밀이론을 사용하여 실시함으로써 점성토 지반의 압밀계수를 추정하는 이론적인 해석해를 제안하였다. 이때 말뚝의 관입이 비배수 상태에서의 공동팽창과 유사하기 때문에 프레스미터 시험에도 적용할 수 있다.

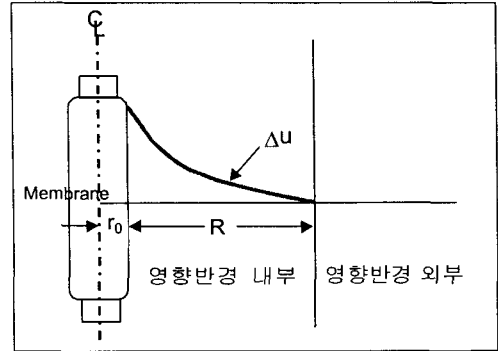
Randolph와 Wroth (1979)가 해석에서 사용한 가정조건들은 아래와 같다.

- 1) 지반은 균질·등방이고 선형탄성-완전소성 거동을 보인다.
- 2) 멤브레인의 길이가 무한한 평면변형을 상태이다.
- 3) 멤브레인의 팽창은 완전 비배수 상태에서 이루어진다.
- 4) 유체의 흐름과 지반의 변형은 수평방향으로만 이루어진다.
- 5) 압밀동안 지반은 탄성적으로 거동한다. 즉, 압밀동안 전응력의 변화가 없다.

위의 여러 가지 가정조건을 고려할 경우, 공동 팽창으로 인한 과잉간극수압의 크기(Δu)는 아래의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있는데, [그림 2]에 나타낸 바와 같이 공동 벽면으로부터 공동방향의 거리에 따라 대수적으로 감소하게 된다(Baguelin 등, 1978).

$$\begin{aligned} \Delta u/s_u &= 2 \ln(R/r) & r_0 \leq r \leq R \\ &= 0 & r > R \end{aligned} \quad (1)$$

$$(R/r_0) = \left(\frac{G}{s_u}\right)^{1/2} \quad (2)$$



[그림 2] 방사방향 거리에 따른 과잉간극수압의 분포

여기서, Δu 는 각 위치에서의 과잉간극수압이고, s_u 는 SBP 곡선으로부터 산정한 비배수 전단강도, R 은 과잉간극수압 발생 영역까지의 반경(영향반경), G 는 전단탄성계수, 그리고 r_0 는 공동의 반경이다.

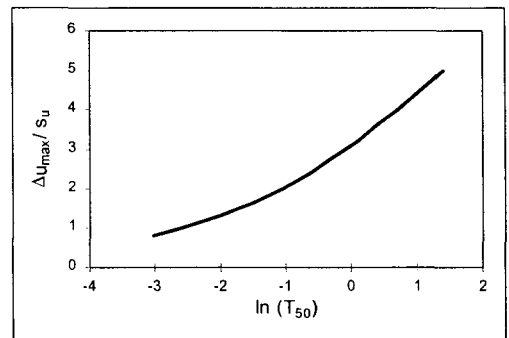
압밀시 지반이 탄성적으로 거동한다고 가정하면 압밀계수는 아래의 식 (3)과 같이 나타난다.

$$c_h = \frac{k_h}{\gamma_w m_v} = \frac{k_h}{\gamma_w} \frac{2G(1-\nu)}{(1-2\nu)} \quad (3)$$

여기서, k_h 는 수평방향 투수계수이고, γ_w 는 물의 단위중량, m_v 는 체적압축계수, 그리고 ν 는 포아송비이다.

Randolph와 Wroth (1979)는 식 (2)의 압밀계수를 [그림 2]와 같이 가정한 초기 과잉간극수압의 분포에 적용하여 [그림 3]과 같이 여러 가지 $\Delta u_{\max}/s_u$ 에 따른 T_{50} 을 제안하였다. 여기서 T_{50} 은 50% 압밀도에 해당하는 시간계수로서 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{50} = \frac{c_h t_{50}}{r_c^2} \quad (4)$$



[그림 3] $\Delta u_{\max}/s_u$ 에 따른 시간계수 (after Randolph와 Wroth, 1979)

여기서, t_{50} 은 50% 압밀도에 해당되는 압밀 시간이고, r_c 는 SHT를 시작할 때의 공동의 반경이다.

2.3 기존 연구의 한계점

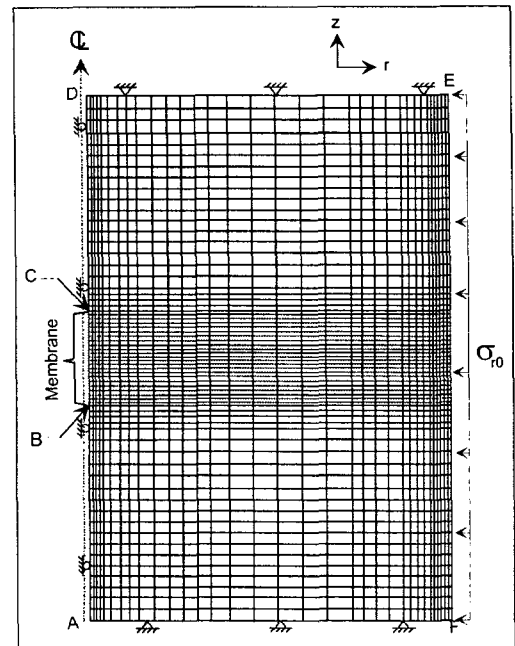
앞서 언급한 바와 같이, SBPT로부터 점성토 지반의 압밀계수를 추정하는 것과 관련한 지금까지의 연구들은 거의 대부분 Randolph와 Wroth(1979)의 이론적인 해석해를 사용하고 있다. 하지만, 이러한 해석해는 평면변형을 조건, 완전 비배수 조건, 그리고 압밀동안 전응력의 변화가 없다는 등의 가정조건들

을 바탕으로 하였기 때문에 실제 지반의 거동이나 경계조건 등의 모사에는 한계를 가지고 있다. 따라서 멤브레인의 실제 길이와 재하 동안 발생하는 부분배수, 그리고 압밀동안 전응력의 변화 등을 고려하여 실제 시험과정을 보다 유사하게 모사할 수 있는 해석이 요구된다.

3. 유한요소해석

3.1 가정조건 및 경계조건

[그림 4]는 본 유한요소해석에서 사용된 격자모양의 단면도를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 프레스미터 프루브의 직경(D)에 대한 멤브레인의 길이(L)의 비가 일반적인 시험기에 해당되는 값인 6일 때의 해석을 실시하였고 이와 함께 비교를 위한 목적으로 멤브레인의 길이가 무한한 경우, 즉 상하부 평면 변형을 조건에서의 해석도 함께 수행하였다. 8절점 축대칭 4각형 요소를 사용하였으며, 절점의 수는 총 7646개이고, 요소의 수는 2479개이다. 또한 방사방향으로는 50R(여기서 R은 프루브의 반경)을, 그리고 연직방향으로는 37R만큼의 충분한 거리를 두었기 때문에 경계부분의 구속 및 배수 여부에 따른 영향을 무시할 수 있었다. [표 1]은 각



[그림 4] 유한요소 mesh

[표 1] 유한요소해석에 사용한 경계조건

경계	응력조건	변위조건	배수 조건
AB, CD	$\sigma_{r0} = \sigma_{\theta0} = K_0 \sigma_z$	$u_r = 0$	impermeable
BC	Applied Pressure	-	impermeable
AF, DE	-	$u_z = 0$	impermeable
EF	$\sigma_{r0} = \sigma_{\theta0} = K_0 \sigma_z$	-	$u_e = 0$

경계부에서의 경계조건을 나타낸 것이다. 1%/min의 변형을 속도로 실제 재하를 모사함으로써 재하동안 발생할 수 있는 부분배수 영향을 고려하였고, 공동의 변형율이 10%에 이르렀을 때 변형을 일정하게 유지하는 간극수압 소산시험(SHT)을 모사하였다. 그리고 Biot 이론을 사용하여 혼합 압밀해석(Coupled consolidation analysis)을 행하였다.

3.2 입력변수

본 연구에서는 유한요소해석 범용 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 해석을 수행하였는데, 지반의 구성모델로 MCC 모델을 사용하였다. MCC 모델에 필요한 값들을 포함하여 수치해석에 입력값으로 사용한 지반의 물성치는 [표 2]에 나타나 있다. 대부분 국내 점성토를 대상으로 한 일반적인 시험결과를 바탕으로 결정한 값이며, 투수계수는 등방의 값을 가정하였다.

[표 2] 유한요소해석에 사용한 점성토 지반의 입력 변수값

입력 변수	G (kPa)	λ	χ	e_0	M	γ_d (t/m ³)	K_0	k (m/sec)
값	5,000	0.165	0.0134	1.4	1.2	1.083	0.44	$1.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-14}$

4. 해석 결과 및 분석

4.1 개요

SBPT로부터 점성토 지반의 압밀계수를 추정하기 위해서는 실제 현장 시험조건이 반영된 시간계수의 산정이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 기존의 시간계수 산정법에서의 한계점을 보완하고자 멤브레인의 유한한 길이, 부분배수, 그리고 압밀시 전응력의 변화 등을 고려한 압밀해석을 실시하였다. 각각의 가정조건이 압밀특성 및 시간계수의 산정에 미치는 영향에 대하여 알아보고, 기존의 연구에서는 고려하지 못한 여러 가지 영향 요인들을 고려한 시간계수를 제안하였다.

4.2 구성모델의 영향(압밀시 전응력의 변화)

압밀시 지반이 탄성적으로 변형한다고 가정할 경우, 압밀계수는 식 (3)과 같이 투수계수 및 탄성 관련 계수(G, ν)의 형태로 일정하게 나타난다. 하지만 실제 지반의 체적압축계수는 식 (5)에 나타난 바와 같이 압밀동안 흙 입자의 응력-변형을 관계에 따라서 변하기 때문에 압밀계수도 이에 영향을 받게 되며 MCC 모델과 같은 소성모델을 적용할 경우 이러한 효과를 고려할 수 있다. SBP의 소산시험시 지반은 Randolph 등 (1979)이 설명한 바와 같이 정규압밀이 아닌 과압밀 거동을 하게 되므로 m_v 는 아래의 식 (5)와 같이 재압축지수(C_r)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} m_v &= \frac{\Delta \epsilon_v}{\Delta p'} = \frac{1}{\Delta p'} \frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{C_r \cdot \Delta \log p'}{\Delta p' \cdot (1 + e_0)} \\ &= \frac{C_r}{(1 + e_0) \cdot p'} \times \frac{p'}{\Delta p'} \times \log \left(\frac{p' + \Delta p'}{p'} \right) = \frac{C_r}{(1 + e_0) \cdot p'} \times \log \left(1 + \frac{\Delta p'}{p'} \right)^{\frac{p'}{\Delta p'}} \quad (5) \\ &\approx \frac{C_r}{(1 + e_0) \cdot p'} \times \log e = \frac{x}{(1 + e_0) p'} \end{aligned}$$

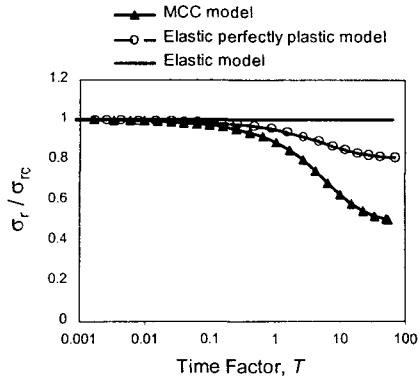
여기서, m_v 는 체적압축계수, p' 은 평균 유효응력, e_0 는 초기 간극비, C_r 은 재압축지수, x 는 $e - \ln p'$ 상에서 제하-재재하선의 기울기를 나타낸다.

식 (5)를 이용하여 시간계수(T)를 새롭게 정의하면, 식 (4)는 아래의 식 (6)과 같이 나타나게 된다.

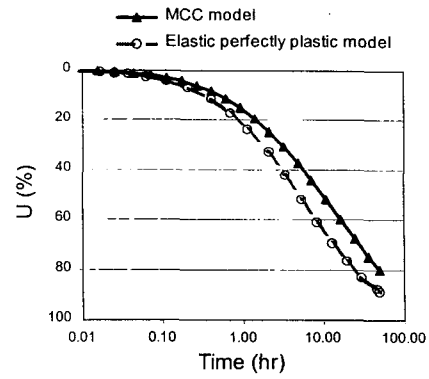
$$T = \frac{t \cdot c_h}{r_c^2} = \frac{t}{r_c^2} \cdot \left(\frac{k_h}{\gamma_w \cdot m_v} \right) = \frac{t \cdot k_h}{r_c^2 \cdot \gamma_w} \times \frac{(1 + e_0) p'}{x} \quad (6)$$

여기서, t 는 특정 압밀도에 해당하는 압밀시간, r_c 는 소산시험을 시작할 때의 공벽의 변위를 나타낸다.

[그림 5]는 압밀 동안의 흙의 거동을 모사할 수 있는 여러 가지 구성모델에 대하여 압밀시간에 따른 전응력의 변화(σ_r/σ_{rc} , σ_r : 압밀시간에 따른 전응력, σ_{rc} : 압밀 시작시의 전응력)를 나타낸 그림이다. 여기서 시간계수(T)의 산정에 필요한 체적압축계수는 탄성 모델 및 Von Mises 모델의 경우 (식 3)을, MCC 모델의 경우 (식 5)를 이용하여 산정하였다. 이때 각각의 변수들은 수치해석의 입력치 및 수치해석 결과로부터 구하였다. 그림을 보면, Randolph와 Wroth (1979)가 가정한 탄성모델의 경우, 압밀 동안 전응력의 변화가 전혀 없는 반면, 본 연구에서 사용한 MCC 모델은 압밀이 진행됨에 따라 전응력이 크게 감소함을 보여주고 있다. 한편, Carter 등 (1979)은 탄성모델과 선형탄성-완전소성 모델인 Tresca 모델을 서로 비교한 결과, 전응력의 변화가 해석해에 미치는 영향은 크지 않다고 주장하였다. 하지만 [그림 5]와 MCC 모델과 선형탄성-완전소성 모델에 대하여 시간에 따른 압밀거동을 서로 비교



[그림 5] 각각의 해석조건에 대하여 압밀시간에 따른 전응력의 변화

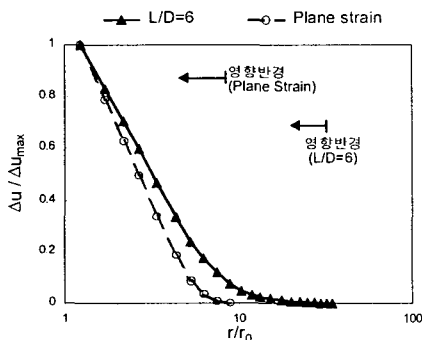


[그림 6] 각각의 해석조건에 대하여 압밀시간에 따른 압밀거동 비교

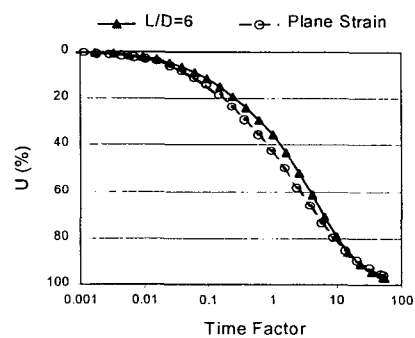
한 [그림 6]에서 보는 바와 같이 선형탄성-완전소성 모델과 MCC 모델에서 압밀시간에 따른 전응력의 변화 및 압밀거동에서 서로 큰 차이를 보이고 있고, 현장에서 측정된 전응력의 감소가 MCC 모델을 사용한 수치해석 결과보다 오히려 더 크게 나타난다는 Fioravante 등 (1994)의 연구결과를 감안한다면, 압밀동안 발생하는 전응력의 감소가 과잉간극수압의 소산거동에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 기존의 연구에서 가정하였던 탄성모델보다는 압밀동안의 전응력의 변화를 최대한 모사할 수 있는 MCC 모델을 사용하는 것이 현장 지반의 거동을 보다 정확하게 모사할 것으로 판단된다.

4.3 멤브레인의 유한한 길이의 영향

[그림 7]은 완전비배수 상태($k=1.0 \times 10^{-14}$ m/sec의 값을 비배수 조건으로 가정)에서 멤브레인을 10%의 변형율만큼 팽창시켰을 때, 방사방향 거리비 r/r_0 (r : 방사방향 거리, r_0 : 초기공동의 반경)에 따른 과잉간극수압의 분포 및 영향반경을 멤브레인의 길이에 대하여 나타낸 것이다. 각 결과는 MCC 모델을 사용한 수치해석으로부터 구하였고, 각 위치에서의 과잉간극수압(Δu)을 공동벽면에서의 초기 과잉간극수압(Δu_{max})으로 정규화시켜 나타내었다. 그림을 보면, 멤브레인의 유한한 길이($L/D=6$, L : 멤브레인의 길이, D : 프루브의 직경)를 고려할 때의 초기 과잉간극수압의 분포가 평면변형율 조건에 비해 넓게 나타남을 알 수 있다.



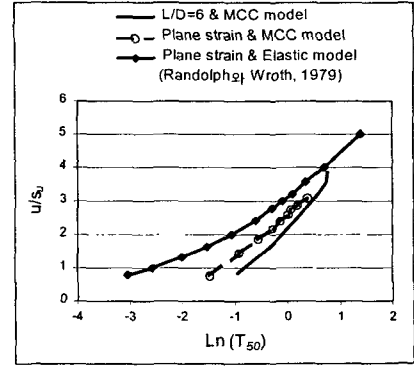
[그림 7] 방사방향 거리비(r/r_0)에 따른 초기 과잉간극수압의 분포 및 영향반경($\epsilon_c=10\%$)



[그림 8] 멤브레인 길이에 따른 압밀곡선 비교

[그림 8]은 멤브레인의 중앙부분에 위치한 흡요소에서, 과잉간극수압의 소산에 따른 압밀도를 식 (6)으로부터 구한 시간계수에 대하여 나타낸 것이다. 그림을 보면, 압밀이 완료되는 시간은 거의 일치하지

만, 압밀 진행중에는 평면변형을 조건을 가정하였을 때보다 $L/D=6$ 인 경우에 소산속도가 더 느린 것으로 나타났다. 이는 [그림 7]에서 보는 바와 같이 $L/D=6$ 인 경우에 있어, r/r_0 에 따른 과잉간극수압 분포곡선의 기울기(즉, 동수경사)가 작아서 그만큼 압밀소요시간이 더 걸리기 때문이다. 이와 같이 지반의 압밀거동에 영향을 미치는 가장 큰 요인 중 하나인 초기 과잉간극수압의 분포가 멤브레인의 길이, 즉 해석에서 가정한 구속조건에 따라 큰 차이를 나타내는 것으로 보아 멤브레인의 유한한 길이를 고려한 해석이 반드시 이루어져야 할 것으로 판단된다.

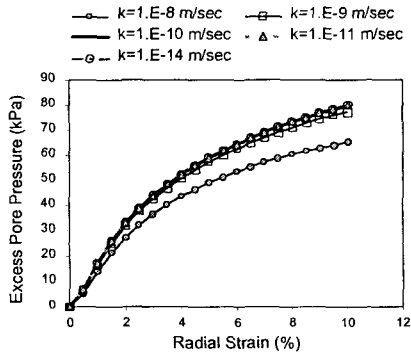


[그림 9] 해석 조건에 따른 T_{50}

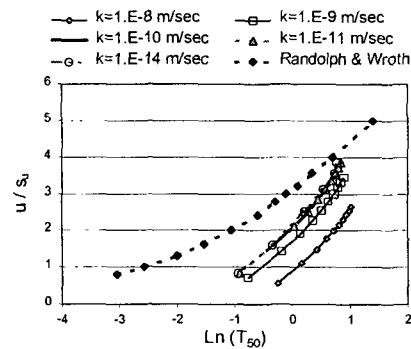
[그림 9]는 사용 구성모델과 멤브레인의 길이에 따른 50% 압밀도에서의 시간계수 (T_{50})를 초기 과잉간극수압의 크기에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 T_{50} 은 (식 6)을 이용하여 산정하였다. 그림을 보면, 같은 초기 과잉간극수압에 대하여 $L/D=6$ 인 경우에서의 T_{50} 이 평면변형을 가정하였을 때보다 크게 나타나고, Randolph와 Wroth (1979)가 제안한 곡선과도 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 흙의 소성적 특성과 멤브레인의 유한한 길이를 고려할 때, T_{50} 은 Randolph와 Wroth (1979)의 제안값보다 큰 값을 반영하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

4.4 부분배수의 영향

부분배수가 압밀특성, 특히 시간계수에 미치는 영향을 알아보기 위해서 [표 2]에 제시한 바와 같이 여러 가지 투수계수에 대하여 1%/min의 일정한 변형률 속도로 재하를 모사한 해석을 실시하였다. 각각의 투수계수에 대하여 멤브레인의 유한한 길이를 고려하였고, 흙의 구성모델로는 MCC 모델을 사용하였다.



[그림 10] 방사방향 변형률에 따른 과잉간극수압



[그림 11] 투수계수에 따른 T_{50} 의 비교

[그림 10]은 멤브레인 바로 옆 요소에서 방사방향 변형률에 따른 과잉간극수압을 여러 가지 투수계수에 대하여 나타낸 것이다. 그림을 보면, 투수계수가 1.0×10^{-8} m/sec인 경우에 비해 그보다 작은 투수계수에서의 발생 과잉간극수압이 18%($k=1.0 \times 10^{-9}$ m/sec)~22%($k \leq 1.0 \times 10^{-10}$ m/sec) 정도로 크게 나타나고, 투수계수가 1.0×10^{-10} m/sec 이하인 지반에서는 결과의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 $k \leq 1.0 \times 10^{-10}$ m/sec에서는 부분배수의 영향을 무시할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 투수계수가 압밀특성에 미치는 영향에 대하여 연구한 Clarke (1990)의 해석결과와 유사한 것이다.

[그림 11]은 여러 가지 투수계수에 대하여, 초기 과잉간극수압에 따른 T_{50} 을 나타낸 것으로, 투수계수가 작아짐에 따라 Randolph와 Wroth (1979)의 해석해에 근접함을 알 수 있다. 또한, 앞서 설명한 바

와 같이 $k \leq 1.0 \times 10^{-10}$ m/sec인 지반에서는 부분배수의 효과가 나타나지 않기 때문에 해석곡선이 거의 일치하는 것으로 나타났다.

결론적으로 압밀동안의 전응력의 변화, 멤브레인의 유한한 길이 그리고 투수계수에 따른 부분배수 효과 등을 고려해볼 때, SBPT로부터 점성토 지반의 압밀계수를 산정하기 위해서는 단순화한 가정으로부터 유도한 Randolph와 Wroth (1979)의 해석해를 사용하는 것보다 각 투수계수에 대하여 [그림 11]에 제시한 T_{50} 을 이용하는 것이 보다 신뢰성 있는 것으로 판단된다.

5. 결론 및 요약

SBPT로부터 점성토 지반의 압밀계수를 추정하기 위해서는 시간계수의 적절한 선택이 중요하다. 하지만 이와 관련한 기존의 연구들은 거의 대부분 멤브레인의 길이는 무한하고 완전비배수 상태에서 재하가 이루어지며, 압밀시 전응력의 변화가 없다는 가정조건을 두고 있다. 이에 본 연구에서는 MCC 모델과 Biot의 이론을 적용한 유한요소 혼합해석(Coupled analysis) 기법을 이용하여 SBPT에서의 구속조건 및 경계조건 등의 실제 시험조건을 정확하게 모사한 압밀해석을 실시하였다.

압밀 동안 발생하는 전응력의 변화와 평균유효응력의 증가로 인한 체적압축계수의 변화는 간극수압의 소산정도 및 시간계수의 산정에 영향을 미치게 되는데, 이를 제대로 모사하기 위해서는 단순화한 탄성 모델보다는 MCC 모델 등의 소성모델이 필요한 것으로 판단된다. 그리고 멤브레인의 유한한 길이를 고려할 경우, 평면변형을 조건을 가정할 때보다 초기 과잉간극수압의 분포가 넓게 나타나고, 이로 인하여 압밀시간 및 50% 압밀도에 해당하는 시간계수 (T_{50})도 큰 값을 보인다. 또한 투수계수에 따른 부분배수의 효과를 알아본 결과, $k > 1.0 \times 10^{-10}$ m/sec인 지반에서는 투수계수가 1.0×10^{-10} m/sec보다 커짐에 따라 발생 과잉간극수압이 3%~18% 정도 작게 나타나 부분배수의 효과를 보이는 반면, $k \leq 1.0 \times 10^{-10}$ m/sec인 지반에서는 부분배수의 효과를 거의 보이지 않고 초기 과잉간극수압에 따른 T_{50} 의 분포에도 변화가 없는 것으로 나타났다.

본 연구의 해석결과, 압밀동안의 전응력의 변화, 멤브레인의 유한한 길이 그리고 투수계수에 따른 부분배수 효과 등 실제 시험조건들의 영향을 고려하여 SBPT로부터 점성토 지반의 압밀계수를 산정하는데 있어 필요한 T_{50} 도표를 제안하였다.

참고문헌

1. ABAQUS manual - Version 5.6 (1996), Hibbit, Kalsson and Sorensen Inc.
2. Baguelin, F., Jézéquel, J. F. and Shields, D. H. (1978), *The Pressuremeter and Foundation Engineering*, Trans. Tech. Pub., 617p.
3. Carter, J. P., Randolph, M. F. and Wroth, C. P. (1979), "Stress and pore pressure changes in clay during and after the expansion of a cylindrical cavity," *Proceedings of the International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 3(3), pp. 305-322
4. Clarke, B. G.(1990), "Consolidation characteristics of clays from self-boring pressuremeter tests," *Proc. 24th Ann. Conf. of the Engrg Group of the Geological Soc.: Field Testing in Engineering Geology, Sunderland*, pp. 33-37
5. Fioravante, V., Jamiolkowski, M. and Lancellotta, R. (1994), "An analysis of pressuremeter holding tests," *Geotechnique*, Vol. 44, No. 2, pp. 227-238
6. Randolph, M. F. and Wroth, C. P. (1979), "An analytical solution for the consolidation around a driven piles," *Proc. of the Int. Jour. for Num. and Anal. Methods in Geomech.*, 3(3), pp. 217-229
7. Randolph, M. F., Carter, J. P. and Wroth, C. P. (1979), "Driven piles in clay - the effects of installation and subsequent consolidation," *Geotechnique*, 29(4), pp. 361-393