

정규 압밀 점성토의 2차원 배수 압밀 거동에 대한 수치해석 Numerical Analysis on Consolidation of Normally Consolidated Clays with 2-Dimensional Drainage

정영훈¹⁾, Young-Hoon Jung, 정충기²⁾, Choong-Ki Chung

¹⁾ 서울대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Seoul Nat'l University

²⁾ 서울대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Seoul Nat'l University

SYNOPSIS : The estimation of consolidation rate is one of the important factors in the construction on soft clayey deposits. A number of researches are carried out to predict the consolidation behavior in field, however, most of the results show the discrepancies between the prediction and observation.

This paper analyzes consolidation behavior of normally consolidated clay in K_0 condition with 2-dimensional drainage by use of the numerical methods. Elastic and elastic-plastic finite element analyses are compared in terms of the dissipation of excess pore pressure. These results are also compared with Terzaghi-Rendulic's equation that is implemented by finite difference method.

The consolidation time calculated by using elastic model is found to be similar to the result of Terzaghi-Rendulic's equation. The consolidation predicted by MCC model takes more time than other cases. Initial increase of excess pore pressure in radial drainage can be shown, however, this phenomenon does not have a significant effect on the final consolidation time.

Key words : Consolidation, Numerical Analysis, 2-Dimensional Drainage, Finite Element Method

1. 서론

연약 점성토 지반에 구조물을 건설하기 위해 지반 개량을 하는 경우 압밀 침하 속도를 정확히 예측하는 것은 설계 및 시공 관리에서 매우 중요한 일이다. 하지만 지반의 비균질성, 복잡한 응력-변형률 거동, 2차 압축의 영향, 투수계수의 변화 등 불확실하고 가변적인 조건 하에서 압밀 침하 속도를 정확하게 예측하기는 매우 어렵다. 많은 연구자들은 이러한 여러 조건을 단순화하여 압밀 침하 속도를 예측하려고 시도하였다.

Terzaghi가 압밀 해석의 기본이 되는 1차원 압밀 방정식을 제시한 이후, 이를 모체로 보다 정교하고 복잡한 이론들이 제안되었다. 특히 배수재가 설치된 경우의 압밀 해석을 위해 횡방향 압밀에 관한 이론이 Barron(1948)과 Hansbo(1981) 등에 의해 제안되었으며, Biot(1941)은 압밀 중 토체의 응력 변화를 고려한 다차원 압밀 해석을 시도하였다.

하지만 다수의 연구자들의 노력에도 불구하고 예측된 거동은 실제 관측된 거동과 매우 상이하게 나타났으며 이러한 차이를 규명하기 위해서는 먼저 기본적인 조건에서 압밀 진행 중에 나타날 수 있는 제반

현상을 보다 자세하게 살펴볼 필요가 있다.

본 연구에서는 Biot의 이론에 근거한 유한 요소법(finite element method)을 이용하여 일차원 변형 조건과 1차원 또는 2차원 배수 조건하에 있는 정규 압밀 점성토의 압밀 현상을 수치 해석적으로 분석하였으며, 유한 요소법으로 예측된 결과가 기존의 Terzaghi-Rendulic의 압밀식으로 예측된 결과와 어떠한 차이가 있는지 연구하였다. 2차 압축의 영향은 배제하였으며 1차 압밀에서 나타나는 현상을 분석하여 압밀 중 응력-변형을 변화에 의해 기존의 해석 방법이 실제 상황과 어떠한 차이를 가지고 있는지 고찰하였다.

2. 현장 관측치와 예측치의 비교에 대한 기존 연구

국내의 경우 충남 서천, 인천 영종도, 경남 양산, 전남 광양, 충남 아산 등의 8개 지점에서의 계측 결과를 토대로 시간-침하 관계를 Barron과 Gibson의 식, 그리고 유한 요소 해석 결과와 비교한 사례가 있다(조성민, 1997). 이 연구의 결과에서는 현장의 계측치가 예측한 값보다 더 빠른 속도로 압밀이 진행되었다. 1984년에 스탠포드 대학의 연구자들은 유한 요소 해석 결과와 실측값을 비교하였다(Kavazanjian & Poepel, 1984). 이들의 결과에서 정규 압밀 상태의 연약층에서는 예측된 변위와 간극수압이 실제와 많은 차이를 보였으며, 이들은 비배수 상태에서 발생하는 크립이 차이를 유발하는 주된 요인일 수 있다고 하였다. 실제 압밀 과정 중 높은 소성 상태에서 비선형적인 거동을 보이지만 많은 예측식이 이러한 거동을 무시하고 탄성론에 근거하므로, 실제 계측 결과와 상당한 차이를 나타나게 할 수 있다.

이러한 여러 요인들에 의한 영향을 설명하기 위해서는 먼저 기본적으로 가장 단순화된 조건에서 나타나는 압밀 거동을 분석하고 여러 예측 방법간의 차이를 비교해야 할 필요가 있다.

3. 수치해석 방법

본 연구에서는 Biot의 이론에 근거한 유한 요소법을 이용하여 압밀 중 나타나는 제반 현상을 분석하고, 이 결과를 Terzaghi-Rendulic의 2차원 압밀 방정식과 비교하였다. Terzaghi-Rendulic의 2차원 압밀 방정식은 유한 차분법(finite difference method)을 이용하여 해석하였다.

3.1 해석 조건

일반적으로 넓은 범위에 걸쳐 시공되는 성토는 하부 연약 지반의 변형 상태를 일차원적으로 일어나게 한다. 시공성을 높이기 위해 연약 지반 위에 설치되는 Sand Mat 등은 연직 방향의 배수를 유도하며, 연직 배수재가 설치되지 않은 지반에서는 이러한 연직 배수에 의해 압밀이 진행될 것이다. 대개의 경우 압밀을 촉진시키기 위해 연직 배수재가 설치되며 이는 상부면에서 일어나는 연직 배수와 함께 연약 지반의 압밀이 2차원적으로 일어나게 할 것이다.

이러한 조건을 모사하기 위해 본 연구에서는 연직 방향 배수(vertical drainage)와 방사 방향 배수(radial drainage)가 동시에 허용된 2차원 배수 조건에서 방사 방향의 변위가 구속된 정규 압밀 점성토(초기 K_0 값은 0.55)를 중심으로 수치해석을 실시하였다. 또한 비교 분석을 위해 연직 방향 배수 또는 방사 방향 배수만을 허용하였을 때의 압밀 해석도 실시하였다.

해석 대상의 초기 조건과 경계 조건은 표 1에 제시하였다. 해석 대상의 상부면은 성토체를 이용한 재하 상태를 모사하기 위해 Free Surface 조건으로 하였고 따라서 상부면은 압밀 중에 부등 침하를 일으킬 수 있다. 투수 계수는 간극비의 변화에 관계없이 압밀 동안 일정하고 연직 방향과 방사 방향의 투수 계수의 값은 같다고 가정하였다. 압밀 시 배수거리의 영향을 배제하기 위해 해석 대상의 크기를 폭 10cm / 높이 10cm 로 정하였으며 전체적인 해석 대상을 그림 1에 도시하였다.

표 1. 수치 해석 시 초기 조건과 경계 조건

경계 조건	측면			K ₀ 조건
	상부면			Free Surface 조건
초기 조건	초기 응력	연직 방향	σ'_v	100 kPa
		방사 방향	σ'_h	55 kPa
	투수 계수	연직 방향	k_v	2×10^{-9} m/sec
		방사 방향	k_h	2×10^{-9} m/sec
	초기 간극비			e_0

압밀 거동을 모사하기 위해 먼저 초기 응력을 가지고 있는 정규 압밀 점성토에서 비배수 상태로 재하하여 해석 대상의 모든 요소가 20kPa의 과잉 간극 수압을 가지도록 하고, 이후 각 해석 종류에 맞게 배수를 허용하면서 압밀을 실시하였다.

수치 해석은 Biot의 이론을 이용한 유한 요소법을 이용하였으며 재료의 탄성적 거동과 소성 해석 결과를 비교하기 위해, 선형 탄성 모델을 이용한 압밀 해석과 일반적인 점성토의 소성 해석에서 사용되는 한계 상태 이론에 근거한 수정 Cam-Clay 모델(Modified Cam-Clay Model; MCC Model)을 이용한 압밀 해석을 병행하였다. 또한 유한 차분법을 이용하여 Terzaghi-Rendulic의 압밀식을 평가하고 이를 유한 요소 해석 결과와 비교/분석하였다. 각 해석 종류는 표 2에 정리하였다.

표 2. 해석 종류

	해석 모델	배수 경계 조건
Test1(FDM)	Terzaghi-Rendulic	연직 배수(vertical drainage)
Test2(FDM)	Terzaghi-Rendulic	방사 배수(radial drainage)
Test3(FDM)	Terzaghi-Rendulic	연직+방사 배수(vertical + radial drainage)
Test1e	탄성 모델	연직 배수(vertical drainage)
Test2e	탄성 모델	방사 배수(radial drainage)
Test3e	탄성 모델	연직+방사 배수(vertical + radial drainage)
Test1p	소성(MCC) 모델	연직 배수(vertical drainage)
Test2p	소성(MCC) 모델	방사 배수(radial drainage)
Test3p	소성(MCC) 모델	연직+방사 배수(vertical + radial drainage)

3.2 유한 요소법(Finite Element Method)

유한 요소 해석을 위해 과잉 간극 수압에 대한 자유도를 가지는 축 대칭(Axi-symmetry) 조건의 8절점 직사각형 요소를 사용하였다.

탄성 모델에서 필요한 탄성 계수는 MCC 모델에서 탄성 구간의 κ 값과 동등한 값을 가지도록 하기 위해 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$E' = 3(1 + e_0)p'(1 - 2\nu')/\alpha = 3 \times (1 + 1.0) \times 70 \text{ kPa} \times (1 - 2 \times 0.3) / 0.026 = 6461.54 \text{ kPa} \quad (1)$$

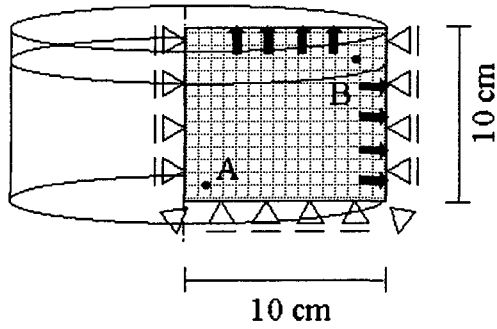


그림 1. 수치 해석 망의 개략도

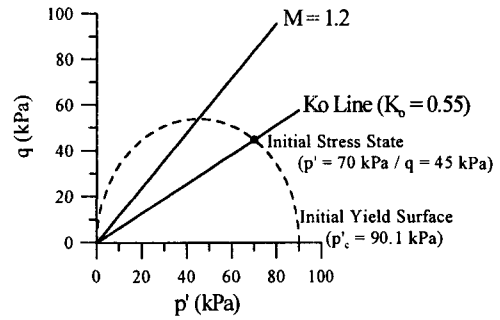


그림 2. MCC 모델의 입력 상태

유한 요소법을 통한 해석 시 필요한 인자는 표 3에 정리하였으며 MCC 모델의 모델 인자로 구성된 초기 항복면을 그림 2에 제시하였다.

표 3. 수치해석에 사용된 각 모델의 인자

해석 모델	모델 인자(parameter)	기호	인자값
탄성 모델 (Elastic Model)	탄성 계수	E'	6461.54 kPa
	포아송 비	ν'	0.3
소성 모델 (Plastic Model: MCC Model)	Logarithmic bulk modulus	κ	0.026
	Logarithmic plastic bulk modulus	λ	0.174
	Stress Ratio at Critical State	M	1.2
	초기 항복 응력	p'_c	90.1 kPa
	초기 간극비	e_0	1.0
	포아송 비	ν'	0.3

3.3 유한 차분법(Finite Difference Method)

Terzaghi-Rendulic의 2차원 압밀식의 결과치를 얻기 위해 유한 차분법을 도입하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

방사 방향 (r 방향)과 연직 방향(z 방향)의 흐름을 가지는 Terzaghi-Rendulic의 2차원 압밀식은 식 (2)과 같다. 유한 차분법에서는 explicit scheme을 이용하였으며, 임의의 간격을 가지는 절점망을 해석할 수 있도록 식 (2)를 차분화한 결과는 식 (3)과 같다.

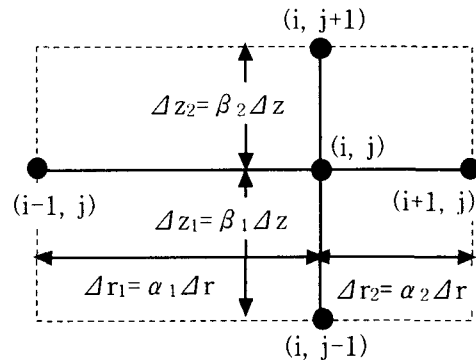


그림 3. 유한 차분법 해석 방법

$$u_{i,j}^{l+1} = u_{i,j}^l + 2\lambda_1 \times \left(\frac{\alpha_2 u_{i-1,j}^l - (\alpha_2 + \alpha_1) u_{i,j}^l + \alpha_1 u_{i+1,j}^l}{\alpha_1 \alpha_2 (\alpha_1 + \alpha_2)} \right) + \frac{1}{r} \lambda_2 \frac{u_{i+1,j}^l - u_{i-1,j}^l}{\alpha_1 + \alpha_2} + 2\lambda_3 \times \left(\frac{\beta_2 u_{i,j-1}^l - (\beta_2 + \beta_1) u_{i,j}^l + \beta_1 u_{i,j+1}^l}{\beta_1 \beta_2 (\beta_1 + \beta_2)} \right) \quad (3)$$

여기서 $\lambda_1 = C_v \Delta t / (\Delta r)^2$, $\lambda_2 = C_v \Delta t / \Delta r$, $\lambda_3 = C_v \Delta t / (\Delta z)^2$ 이며 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 는 절점 (i, j)에서 주위의 절점까지 거리를 상대적으로 표시한 값이다(그림 3 참조). Δz 는 연직 방향(z 방향)의 절점 간격 길이 중 가장 큰 값이며 Δr 는 방사 방향(r 방향)의 절점 간격 길이 중 가장 큰 값이다.

식 (2)에서 압밀의 진행 속도를 결정하고 각 위치에서의 과잉 간극 수압을 계산하기 위해서는 압밀 계수 C_v 가 정해져야 한다. 일정한 압밀 계수를 이용한다는 점은 재료 거동의 관점에서 볼 때, 재료가 압밀 동안 탄성적으로 거동한다고 가정하는 것이므로, 본 연구에서는 압밀 계수를 표 3에서 제시된 탄성 계수 값을 이용하여 계산하였다. Davis와 Poulos(1972)는 다차원 압밀이 일어났을 때 탄성계수를 이용하여 압밀 계수를 산정하는 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 시료의 내부 압밀 변형 상태가 1차원적으로 이루어지므로 1차원 상태에서의 압밀 계수 산정식을 이용하였으며 이는 식 (4)와 같다.

$$C_v = \frac{kE'(1-\nu)}{\gamma_w(1-2\nu')(1+\nu')} \quad (4)$$

$$= \frac{(2 \times 10^{-9} \text{ m/sec}) \times 6461.54 \text{ kPa} \times (1-0.3)}{9.8 \text{ kN/m}^3 \times (1-2 \times 0.3)(1+0.3)} = 1.775 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$$

4. 해석 결과 및 분석

각 해석 방법에 의해 평가된 압밀 소요 시간을 평가하기 위해 과잉 간극 수압 소산 곡선을 중심으로 설명하였다. 각 해석에서 과잉 간극 수압은 그림 1에 표시한 바와 같이 연직 / 방사 방향 배수면에서 가장 멀리 떨어진 요소(A 점)와 양 배수면에서 상대적으로 가까운 요소(B 점)에서 관측하였다. 그림 4~6은 각 해석 종류에 따른 과잉 간극 수압 소산을 A점에서 평가하여 배수 조건 별로 표시한 그림이다.

모든 배수 조건에서 Terzaghi-Rendulic의 압밀식으로 평가된 과잉 간극 수압과 탄성 모델을 이용한 유한 요소 해석 결과는 거의 일치하였으나, 소성(MCC) 모델에서 평가된 결과는 앞의 두 경우에 비해 약 6배의 압밀 지체가 나타났다. 이러한 차이는 표 4에서 나타난 바와 같이 각 해석 방법에 따른 90% 압밀 소요 시간에서 확인할 수 있었다.

연직 방향 및 방사 방향의 배수거리와 투수계수가 같은 조건에서 방사 방향 배수 조건에서 평가된 과잉 간극 수압 소산이 연직 방향 배수 조건에 비해 약 55% 정도 빠르게 진행되었다. 연직 방향과 방사 방향 배수 조건의 해석해를 통해 압밀 소요 시간과 압밀 계수를 평가한 이전의 연구(Mckinlay, 1961; Trautweit etc., 1981)를 보면, 방사 방향의 일차원 배수 조건에서 나타난 해석 결과가 연직 방향 일차원 배수에 비해 빠르게 진행되었다. 이러한 차이는 각 배수 조건에서 나타나는 유출 유량의 차이에 의해 나타나는 것으로 판단된다. 연직+방사 방향 배수 조건에 의한 과잉 간극 수압은 2차원 배수 조건에서 소산되므로 연직 또는 방사 방향의 1차원 배수 조건보다 빠르게 소산되었으나, 방사 방향의 1차원 배수 조건의 소요 시간에 비해 큰 폭으로 감소하지는 않았다. 이로부터 연직+방사 방향 배수 조건에서 대부분의 과잉 간극 수압 소산이 방사 방향 배수에 의해 이루어짐을 알 수 있었다.

표 4. 압밀도 90% 소요 시간의 비교

경계 조건	(1) 소요 시간 (Terzaghi-Rendulic)	(2) 소요 시간 (유한 요소법 : 탄성 모델)	(3) 소요 시간 (유한 요소법 : MCC 모델)
연직 방향 배수	135 분	140 분	818 분
방사 방향 배수	60 분	66 분	332 분
연직 + 방사 배수	38 분	43 분	243 분

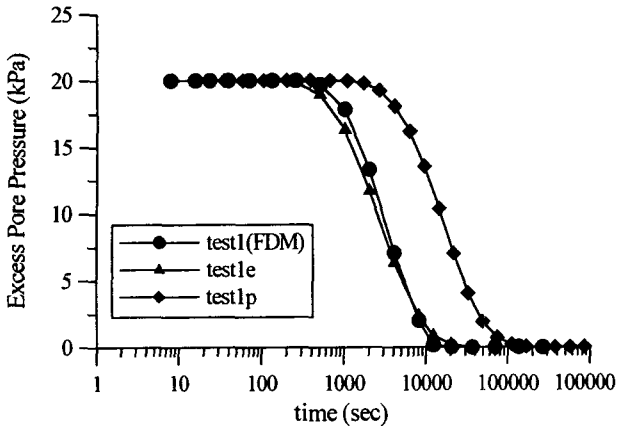


그림 4. 시간에 따른 과잉 간극 수압 소산
(연직 방향 배수 : A 점)

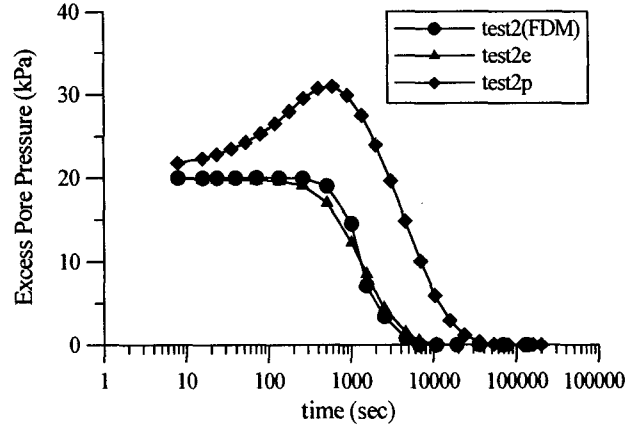


그림 5. 시간에 따른 과잉 간극 수압 소산
(방사 방향 배수 : A 점)

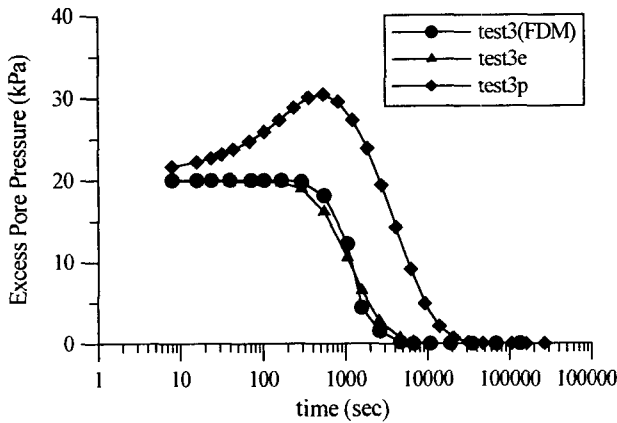


그림 6. 시간에 따른 과잉 간극 수압 소산
(연직+방사 방향 배수 : A 점)

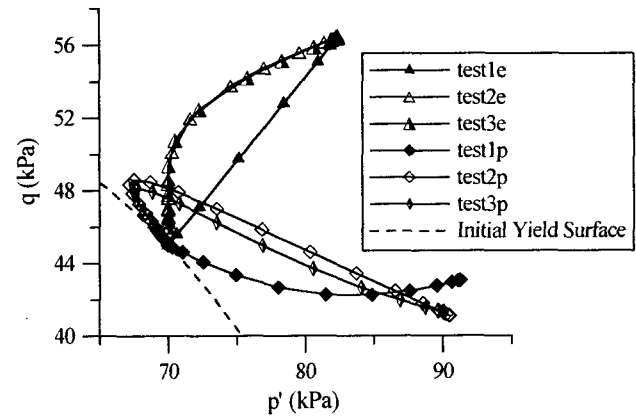


그림 7. 각 조건에서 압밀 중 유효 응력 경로
(Effective Stress Path : A 점)

소성(MCC) 모델의 경우, 방사 방향 또는 연직+방사 방향의 배수 조건에서 초기 압밀 구간에 과잉 간극 수압의 증가 현상이 나타났다. 하지만 연직 방향의 일차원 배수 조건에서는 이러한 현상이 뚜렷이 나타나지 않았다.

압밀 초기에 나타나는 과잉 간극 수압의 증가는 Mandel-Cryer effect라 불리며, Mandel(1953)과 Cryer(1963)가 해석해를 통해 밝혔다. 이러한 초기 증가는 방사 방향의 배수가 허용된 경우에 더욱 크게 나타난다. 이는 방사 방향 배수가 허용될 경우 유체 흐름의 방향과 변형 방향이 일치하지 않으며, 이에 의해 배수면과 떨어진 내측 요소가 비배수 전단 과정과 유사한 형태의 응력 상태를 가지게 되고, 전단 응력의 증가와 함께 내부 요소의 평균 유효 응력이 감소하기 때문이다(Al-Tabbaa & Wood, 1991). 소성(MCC) 모델에서 이러한 과잉 간극 수압의 증가가 더욱 크게 발생하는 것은 응력 경로의 진행이 소성 항복면(yield surface)에 의해 결정되기 때문이다(그림 7 참조).

탄성 모델에서는 방사 방향의 일차원 배수 조건이나 연직+방사 방향의 이차원 배수조건일 경우, 그림 8~10에 나타난 바와 같이 A점에서는 초기 과잉 간극 수압 증가가 거의 나타나지 않았으며, B점에서는 약간의 증가가 나타났다. 이는 소성(MCC)모델에서 나타나는 압밀 초기의 급격한 평균 유효 응력 감소가 나타나지 않기 때문이다.

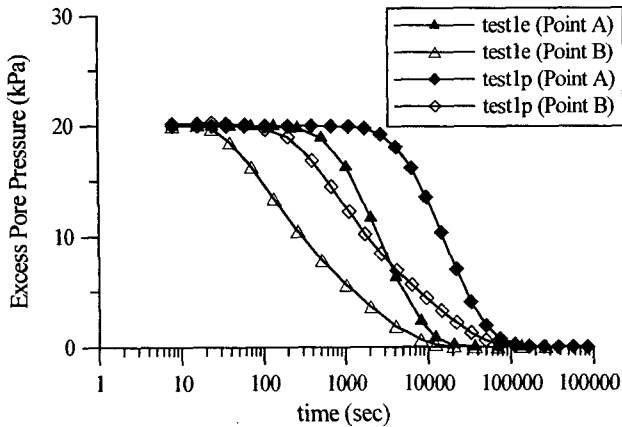


그림 8. 위치에 따른 과잉 간극 수압 소산
(연직 방향 배수: A점/ B점)

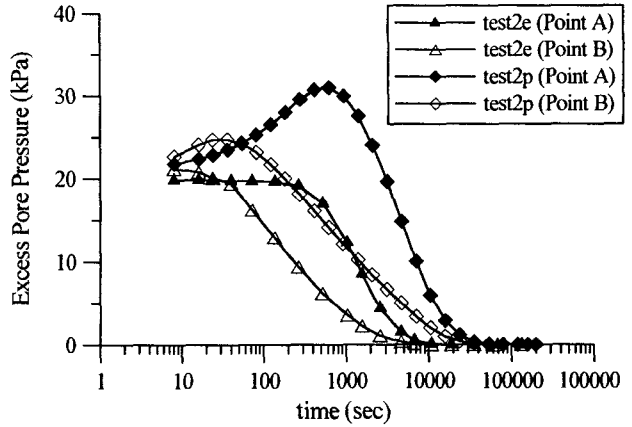


그림 9. 위치에 따른 과잉 간극 수압 소산
(방사 방향 배수: A점/ B점)

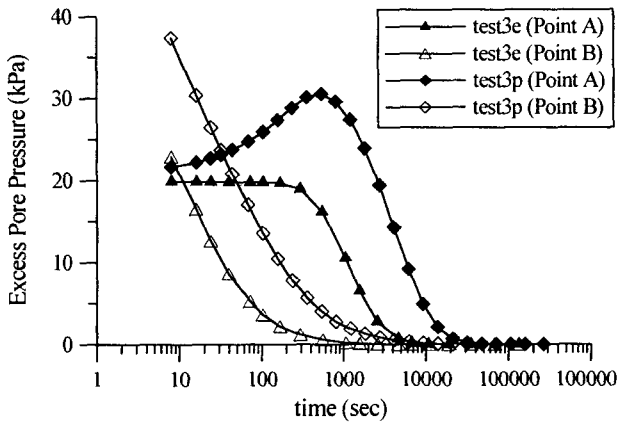


그림 10. 위치에 따른 과잉 간극 수압 소산
(연직+방사 방향 배수: A점/ B점)

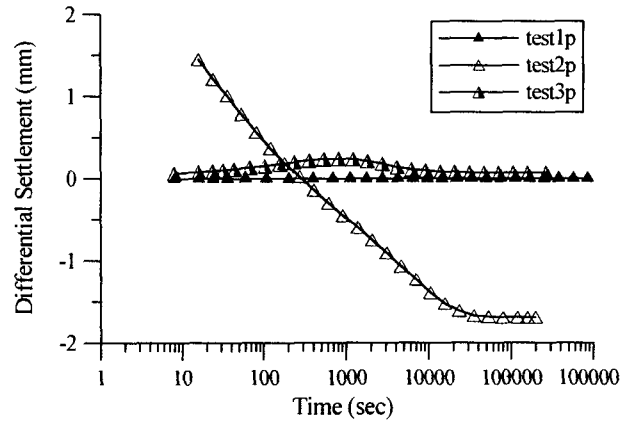


그림 11. 시간에 따른 부등 침하 양상
(연직 / 방사 / 연직+방사 배수: MCC 모델)

한편, 표 4에서 제시된 90% 압밀 소요 시간을 비교해 보면, MCC 모델에서 평가된 소요 시간이 연직 방향 배수 조건에서는 Terzaghi-Rendulic 식에서 평가된 소요 시간의 약 6.1배 정도인데 반하여, 방사 방향 배수 조건에서는 5.5배, 연직+방사 방향 배수인 경우 6.4배로 예측되었다. 즉 약간의 차이는 있으나 초기 과잉 간극 수압 증가를 일으키는 방사 방향 배수 조건이 압밀 소요 시간에 큰 영향을 주지는 못했다. 이는 내부 요소가 배수의 영향을 받기 전에 과잉 간극 수압이 증가하지만 이로 인해 그만큼의 동수 경사가 증가하고 배수가 시작되면서 이전에 증가된 동수 경사에 의해 보다 빠르게 과잉 간극 수압이 소산되기 때문으로 판단된다. 따라서 최종적인 압밀 시간을 지체시키는 것은 흙의 소성적 거동 때문이며, 방사 방향 배수에 의한 초기 과잉 간극 수압의 증가는 이러한 지체에 큰 영향을 주지는 못하는 것으로 나타났다.

방사 방향의 배수는 Free strain 조건의 상부면에 부등 침하를 발생시킨다. 이는 방사 배수면 근처 요소의 초기 체적 압축에 의해 나타나며, 이러한 부등 침하는 요소 내부에 보다 큰 전단응력을 발생시킨다. 2차원 배수 조건에서도 방사 배수의 영향에 의해 부등침하가 나타났으나, 부등 침하의 크기는 방사 배수 조건에 비해 작았다. 이는 연직 배수에 의해 부등 침하량이 감소된 것으로 판단되며, 연직 배수 조건에서는 부등 침하가 발생하지 않았다.

5. 결론

2차원 배수 조건이 압밀 거동에 미치는 영향을 비교 분석하기 위해 탄성 모델과 MCC 모델을 이용한 유한 요소 해석을 실시하였으며 이를 Terzaghi-Rendulic의 압밀식과 비교하였다. 탄성 모델을 이용한 유한 요소 해석은 Terzaghi-Rendulic의 압밀식과 거의 유사한 압밀 소요 시간을 예측하였다. MCC 모델에서 평가된 90% 압밀 소요 시간에서는 탄성 모델이나 Terzaghi-Rendulic의 압밀식에 비하여 6배 정도의 지체가 나타났다. 방사 방향의 배수가 허용된 경우 연직 방향 배수 조건보다 빠른 과잉 간극 수압 소산을 발생시켰다. 또한 방사 방향 배수에 의해 발생된 토체 내의 변형 조건의 변화가 압밀 초기에 과잉 간극 수압의 증가를 일으켰다. 하지만 이러한 과잉 간극 수압 증가가 최종 압밀 소요 시간에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 방사 방향의 배수는 상부면에 부등 침하를 일으켰으며, 연직 방향과 방사 방향 배수가 모두 허용되는 2차원 배수 조건에서도 부등 침하가 나타났지만, 방사 방향 배수만이 허용된 일차원 배수 조건인 경우보다 부등 침하의 양은 적었다.

종합해 볼 때, 흙의 소성적인 거동은 탄성적인 접근 방법에서 평가된 과잉 간극 수압 소산보다 더 지체된 소산을 일으킨다고 판단된다. 본 연구에서는 흙의 소성적인 거동을 모사하기 위해 MCC 모델을 사용하였으나, 다른 소성 모델을 사용할 경우 다른 결과가 나타날 수 있으므로 추가적인 연구가 필요하다. 또한 수치 해석적인 분석에서 나타난 여러 현상이 실제 점성토의 압밀에서는 어떻게 나타나는지 알아보기 위해 현장에서의 계측치나 실내 시험 결과와 비교해 볼 필요가 있으며, 이에 대해 추가 연구가 준비 중이다.

참고 문헌

1. 조성민(1998), "국내 연약 점성토 지반의 성토 재하시 변형 특성 분석", 서울대학교 박사학위논문, pp. 70-73
3. Al-Tabbaa, A. and Muir Wood, D.(1991), "Horizontal drainage during consolidation: insights gained from analyses of a simple problem", *Geotechnique* 41, No. 4, pp. 571-585
4. Barron, R. A.(1948), "Consolidation of fine-grained soils by drain wells", *Trans. ASCE*, Vol. 113, paper No. 2346 pp. 718-742
5. Biot, M. A.(1941), "General theory of three-dimensional consolidation", *Journal of the Applied Physics*, Vol.12, pp. 155-164
6. Davis, E. H. and Poulos, H. G.(1972), "Rate of settlement under two- and three-dimensional conditions", *Geotechnique* 22, No. 1, pp. 95-114
7. Hansbo, S.(1981), "Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains", paper 12/22 : *Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Stockholm, Sweden, Vol. 3, pp. 667-682
8. Kavazanjian, E. Jr. and Poepsel, P. H.(1984), "Numerical analysis of two embankment foundations", *Proc. Symp. on Sedimentation and Consolidation Models*, ASCE, San Francisco, pp. 84-106
9. Mckinlay, D. G.(1961), "A laboratory study of rates of consolidation in clays with particular reference to conditions of radial porewater drainage", *Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. Fdn. Eng.*, Paris, Vol. 1, pp. 225-228
10. Trautweit, S. J., Olson, R. E., and Thomas, R. L.(1981), "Radial flow consolidation testing", *Proc. Int. Conf. Soil Mech. Fdn. Eng.*, pp. 811-814