

배수조건에 따른 압밀 거동의 수치적 분석

Numerical analysis of Consolidation Behavior under Various Drainage Conditions

오상호¹⁾, Sang-Ho Oh, 조완제²⁾, Wanjei Cho, 윤찬영³⁾, Chan-Young Yune

¹⁾ 강릉원주대학교 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University

²⁾ 단국대학교 토목환경공학과 전임강사, Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Eng., Dankook University

³⁾ 강릉원주대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University

SYNOPSIS : Systematic finite element analyses on consolidation were performed with various drainage conditions. Numerical analyses were performed using SAGE CRISP2D, a commercial numerical analysis program for the conventional geotechnical engineering practice. For the input properties of the numerical analyses, incremental loading oedometer tests were performed on reconstituted kaolinite samples. Numerical analyses were performed with various drainage conditions such as vertical, radially inward and outward drainage conditions. For the case of radially inward drainage conditions, a series of numerical analyses were performed with varying the diameter of vertical drains. As a result, the lateral deformation and void ratio variation occurred during consolidation for the radially inward or outward drainage conditions. And the variations of the lateral deformation and void ratio did not fully disappear even after the completion of the consolidation and induced the spatial variations of the soil properties.

Keywords : finite element analysis of consolidation, various drainage conditions, lateral deformation, spatial variation of soil properties

1. 서 론

연약지반 위에 구조물을 시공하기 위하여 연직배수 공법을 적용하는 경우, 하부지반은 연직방향의 압축 및 방사방향의 배수조건에서 압밀이 진행된다. 이 때 적절한 공법의 선정과 설계를 위하여 이론적, 수치적 방법 등을 사용하여 지반의 압밀해석을 수행하는데, 방사배수 조건의 압밀해석을 위한 기존의 이론적 방법들은 대부분 압밀과정 중에 연직방향의 압축만이 발생한다고 가정하며(Barron, 1948; Hansbo, 1981; Silveira, 1953; Zeng and Xie, 1989), 실제로 현장에서도 방사배수 압밀 중에 발생하는 대부분의 변형은 연직변형이다. 하지만 방사배수 조건에서는 압밀 중 횡방향 변형 역시 발생하며, 이러한 횡방향 변형으로 인하여 압밀 중 과잉간극수압이 추가로 발생할 수 있을 뿐만 아니라 연약지반 내부에서 압축성, 투수계수, 간극비 등 지반물성의 불균질성이 나타날 수 있다. 또한 그 결과로 지반의 연직 변형과 압밀 소요시간 증가 및 불균질한 변형 발생 등 다양한 측면에서 흙의 압밀 거동에 영향을 줄 수 있다.

Al-Tabbaa와 Muir Wood(1991)는 중공 원통 형태의 점성토 시료에 대한 해석으로부터 방사배수 압밀 시에 발생하는 횡방향 변형 및 시료내부의 불균질한 응력발생을 확인하였으며, Baek과 Moriwaki(2004)는 방사배수 배수 조건에서 점토시료 내부에 자석을 설치하고 압밀 중 자력 측정 결과로부터 횡방향 변

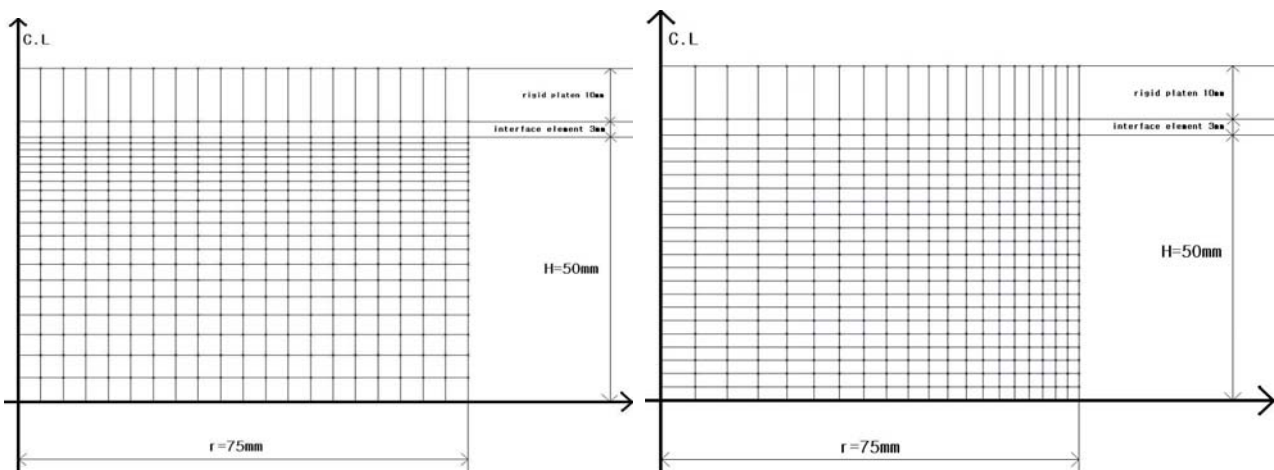
형을 확인한 바 있다. 하지만 방사배수 압밀과정에서 발생하는 횡방향 변형 및 배수방향에 따른 압밀 거동 차이에 대한 깊이있는 연구는 아직도 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서는 배수조건에 따른 압밀 거동을 분석하기 위해 유한요소 압밀해석을 수행하였다. 범용지반 해석 프로그램인 SAGE CRISP 2D를 이용 하였고 지반 물성은 재성형 카올린에 대한 압밀시험 결과로부터 산정하였다. 연직배수, 방사내측배수, 방사외측배수의 다양한 배수조건에 대하여 해석을 수행하였으며, 방사내측배수의 경우에는 배수재 직경을 변화시켜가면서 그 거동을 분석하였다. 이러한 해석결과로부터 배수 방향 별 압밀거동의 차이를 분석하였으며, 배수방향에 따른 횡방향 변형의 발생거동과 과잉간극수압 소산거동을 확인하였다.

2. 해석조건

2.1 유한 요소망 구성 및 입력물성 산정

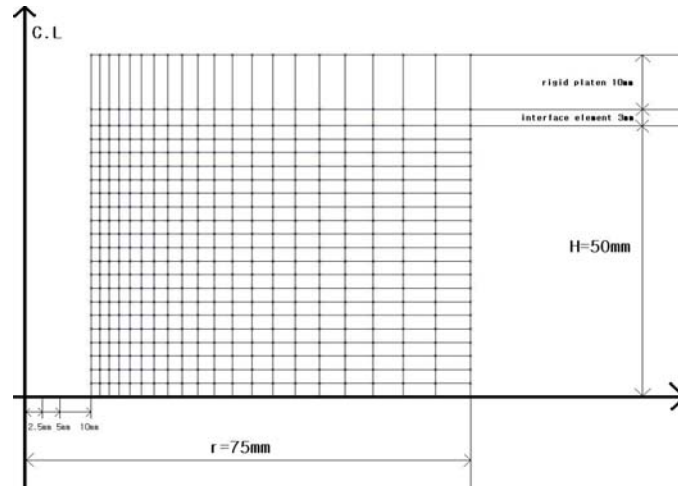
직경 150 mm의 대형 Rowe cell 시험 조건을 모사하기 위하여 다음 그림 1과 같이 축대칭 조건에서 유한요소 해석망을 구성하였다. 시료의 높이도 Rowe cell 시험의 조건과 동일하게 50 mm로 가정하였으며, 방사내측배수 조건의 경우에는 배수재의 반지름을 2.5, 5, 10mm로 가정하였다. 이 때 간극수압의 변화가 크게 나타나는 배수면 근처의 해석망을 조밀하게 구성하였다. 또한 실험조건과 마찬가지로 등변형률(equal strain) 조건에서 시료가 압밀될 수 있도록 시료 상부에 두께 10mm의 가압판을 위치하였고 가압판과 시료사이에는 두께 3mm의 interface 요소를 적용하여 압밀 중 시료에 횡방향 변형이 발생할 수 있도록 하였다. 흙의 구성방정식은 수정 Cam-Clay 모델을 사용하였고, 가압판과 interfacer 요소는 탄성 모델을 사용하였다.

해석에 사용할 지반의 물성치 산정을 위하여 EPK 카올린에 대한 기본물성실험을 수행하였다(표 1). 또한 선행압밀압 100kPa로 재성형하여 압밀시험을 수행하였다. 시료의 재성형을 위하여 EPK 카올린 분말을 액성한계 2배의 함수비로 진공압을 가하면서 교반한 후, 내경 300mm의 대형압밀챔버에서 단계적으로 하중을 증가시켰다. 압밀이 완료된 시료는 대형압밀챔버에서 꺼내어 적당한 크기로 잘라서 표준압밀시험과 단위중량, 함수비 측정 등을 실시하였으며, 남은 시료는 랩과 파라핀으로 밀봉하여 항온항습실에 보관하였다. 해석에 사용된 입력물성치는 표 2와 같다.



(a) 연직배수

(b) 방사외측배수



(c) 방사내측배수
그림 1. 유한요소망

이상과 같이 구성된 유한요소 해석망과 시료의 물성치를 이용하여 100kPa의 선행압밀압을 갖는 시료에 150kPa의 하중이 재하되는 조건에서 해석을 수행하였으며, 모든 해석에서 yield ratio가 3%이내가 되도록 해석시간 간격을 결정하였다.

표 1. EPK카울린 시료의 기본 물성치

	액성한계	소성한계	소성지수	비중	200번체 통과율	통일분류법상 분류
EPK카울린	56.5%	18.93%	37.78%	2.513	99.46%	CH

표 2. 입력물성치

입력물성	재성형 EPK 카울린	interface element	rigid platen
κ	0.0404	-	-
λ	0.2192	-	-
e_{cs}	2.380	-	-
M	0.9	-	-
G(kN/m ²)	-	-	-
E(kN/m ²)	-	1E7	10
ν	-	0.3	0.49
γ_{bulk} (kN/m ³)	15.4	15.4	15.4
k_x (m/sec)	9.86E-10	1.0E-15	1.0E-15
k_y (m/sec)	3.72E-10	1.0E-15	1.0E-15

3. 해석결과 및 분석

3.1 배수방향별 압밀속도

해석결과로부터 평균압밀도를 산정한 결과는 다음 2와 같다. 여기서 연직배수, 방사외측배수, 방사내측배수는 각각 무차원 시간계수의 정의가 다르므로 일관된 기준을 가지고 비교할 수 있도록 다음 식 (1), (2), (3)과 같이 실제 배수거리에 대하여 시간계수를 산정하였다. 배수거리와 압밀계수로 정규화된

결과임에도 불구하고 압밀속도는 방사외측배수가 가장 빠르고 그 다음으로 연직배수, 방사내측배수의 순서로 나타났으며, 방사내측배수의 경우에는 배수재 직경이 클수록 압밀속도도 빠른 것으로 나타났다. 이는 실제 배수거리가 같더라도 배수면적이 다르기 때문에 나타나는 현상으로써, 연직배수의 경우에는 배수거리에 따라 배수면적의 변화가 없는 반면에, 방사외측배수의 경우는 배수면적이 증가하고, 방사내측배수의 경우는 배수면적이 감소한다. 이에 따라 방사외측배수는 배수면적 증대에 따른 간극수압 소산 촉진효과로 인하여 연직배수조건보다 간극수압 소산속도가 더 빨라지고 반대로 방사내측배수는 간극수압 소산속도가 더 느려진다.

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2} \quad (1)$$

$$T_h = \frac{c_{ro} t}{R^2} \quad (2)$$

여기서, c_{ro} : 방사외측배수 압밀계수

$$T_h = \frac{c_{ri} t}{R_e^2} \quad (3)$$

여기서, R_e : 배수재를 포함하지 않는 유효반지름

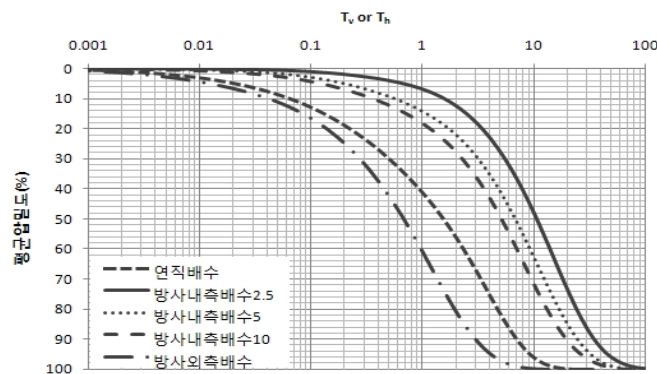
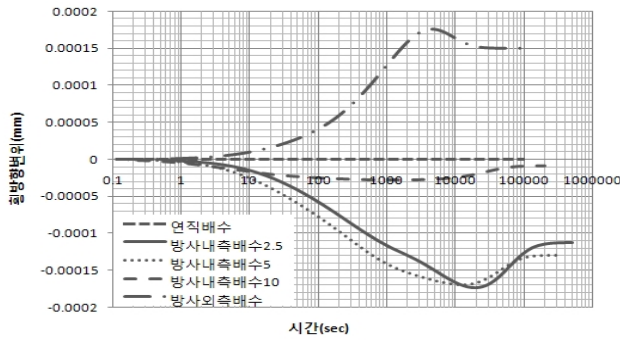


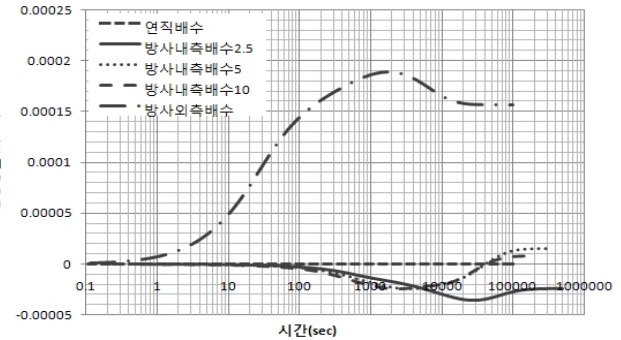
그림 2. 배수방향별 평균압밀도

3.2 배수방향별 횡방향 변위

압밀과정에서 발생하는 횡방향 변위에 대한 분석을 위하여 중심축에서 가까운 지점과 먼 지점의 두 점에서 압밀 시간에 따른 횡방향 변위를 그림 3과 같이 도시하였다. 두 점은 각각 원점으로부터 x축방향으로 12mm, y축방향으로 25mm떨어진 곳과 x축방향으로 68mm, y축방향으로 25mm떨어진 곳에 위치하고 있다. 기호는 중심으로 이동하는 것을 (-), 중심에서 멀어지는 것을 (+)로 하였다. 그림 3의 (a), (b) 두 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 연직배수의 경우에는 압밀진행에 따른 횡방향 변위가 거의 없으나 방사내측의 경우에는 중심에서 가까운 점과 먼 점 모두 압밀초기에 배수면 쪽으로 이동하다가 후반부에는 그 반대로 이동한다. 배수면에서 가까운 점은 변위가 더 크고 더 빠른 시점에 횡방향 변위가 시작되며 압밀완료 시점에도 원래 지점으로 되돌아오지 못하지만, 배수면에서 멀리 떨어진 점은 더 늦은 시점에 횡방향 변형이 시작되고 변위도 작으며 배수재 반지름이 2.5 및 5mm인 경우에는 압밀후반부에 반대방향의 이동거리가 더 커서 원래 위치를 지나 배수면에 더 가까워진다. 방사외측배수의 경우에는 방사내측배수와 반대의 이동방향을 보이며 중심에서 가까운 점과 먼 점 모두 변형이 크게 발생한다.



(a) 중심축에서 가까운 점



(b) 중심축에서 먼 점

그림 3. 압밀 시간에 따른 횡방향 변위

3.3 비배수면의 간극수압 거동

배수면에서 가장 멀리 떨어진 비배수면에서의 간극수압 소산거동을 그림 4와 같이 도시하였다. 배수면에서 멀리 떨어져 있으므로 간극수압이 소산되기 시작하는 시점이 매우 늦으며, 방사외측배수와 방사내측배수의 경우에는 Mandel-Cryer 효과(Mandel, 1953; Cryer, 1963)로 인하여 압밀초기 비배수면에서 간극수압이 상승하는 현상이 나타난다. 이 때 압밀초기의 간극수압 증가율은 방사외측배수가 초기 값 대비 9.7%로 방사내측배수의 2.9%에 비하여 3.3배 정도 크게 나타났다.

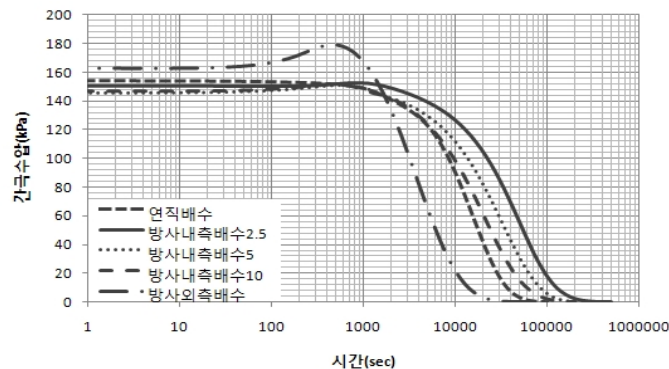


그림 4. 비배수면에서의 간극수압 소산거동

3.4 배수방향별 간극비 변화

횡방향 변형을 측정된 곳과 동일한 두 위치에서 압밀진행에 따른 간극비를 확인하고 두 위치에서의 간극비 차이를 그림 5에 도시하였다. 역시 연직배수의 경우에는 압밀진행에 따라서 횡방향의 위치별 간극비 차이가 없으나 방사배수의 경우에는 횡방향 위치에 따라 간극비차이가 발생한다. 방사배수의 경우에는 모두 압밀진행에 따라서 위치별 간극비 차이가 증가하다가 압밀후반부에는 그 차이가 줄어드는 것으로 나타났다. 그러나 위치별 간극비 차이는 압밀완료 후에도 완전히 사라지지 않고 여전히 남아 있다. 간극비는 지반의 투수성과 압축성에 밀접한 관계를 가지고 있으며 따라서 방사배수 조건의 지반은 압밀중 위치별 간극비 차이 및 그와 관련된 물성치 차이가 발생한다는 사실을 확인할 수 있다.

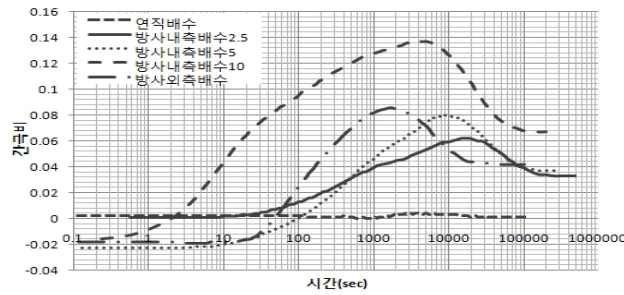


그림 5. 중심축에서 가까운 점과 먼 점의 압밀진행에 따른 간극비 차이

4. 결론

본 연구에서는 배수조건에 따른 압밀 거동을 분석하기 위해 유한요소 압밀해석을 수행하였다. 재성형 카울린의 물성치를 이용하여 배수방향 및 연직배수재 직경 변화에 따른 압밀 거동 및 횡방향 변형을 분석하였다. 해석결과 배수거리와 압밀계수로 정규화되었을 때의 압밀속도는 방사외측배수, 연직배수, 방사내측배수의 순서로 나타났으며, 방사내측배수의 경우에는 배수재 직경이 클수록 압밀속도도 빠른 것으로 나타났다. 또한 방사배수조건에서는 압밀과정에서 발생하는 횡방향 변위를 확인할 수 있었으며 압밀초기에 배수면 쪽으로 이동하고 압밀 후반부에는 배수면에서 멀어지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 횡방향 변형은 위치별 간극비 및 그와 관련된 지반물성치에도 영향을 미치며, 횡방향 변형으로 인하여 유발된 위치별 간극비 차이는 압밀완료 후에도 완전히 사라지지 않고 지반내에 여전히 남아 있다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2009-0064196)

참고문헌

1. Al-Tabbaa, A. & Muir Wood, D.(1991), "Horizontal drainage during consolidation : insights gained from analyses of a simple problem", *Geotechnique*, Vol. 41, No. 4, pp. 571~585.
2. Baek, W. and Moriwaki, T.(2004), "Internal Behavior of Clayey Ground Improved by Vertical Drains in 3D-Consolidation Process", *Soils and Foundations*, Vol. 44, No. 3, pp. 25~37.
3. Barron, R. A.(1948), "Consolidation of fine-grained soils by drain wells", *Transactions ASCE*, Vol. 113, Paper No. 2346, pp.718~742.
4. Hansbo, S.(1981), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains", *10th ICSMFE*, Vol. 3, pp.677~682.
5. Mandel, J.(1953), "Consolidation des sols (Etude Mathematique)", *Geotechnique*, Vol. 3, No. 7, pp. 287~299.
6. Cryer, C. W.(1963), "A comparison of the three-dimensional consolidation theories of Biot and Terzaghi", *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. 16, No. 4, pp.401~412.
7. Silveira, I.(1953), "Consolidation of a Cylindrical Clay Sample with External Radial Flow of Water", *3rd ICSMFE*, Vol. 1, pp. 55~56.
8. Zeng, G. X. and Xie, K. H.(1989), "New Development of the Vertical Drain Theories", *12th ICSMFE*, Brazil, Vol. 2, pp. 1435~1438.