

유한차분법을 이용한 위치적 이질성이 과잉간극수압의 소산 현상에 미치는 영향에 대한 연구

Numerical Study on the Dissipation of Excessive Pore Pressure in Spatially Varying Soils Using Finite Difference Method

김정열¹⁾, Jung-Yul Kim, 김현기²⁾, Hyun-Ki Kim, 조남준³⁾, Nam-Jun Cho

- 1) 국민대학교 건설시스템공학부 석사과정, Master Student, School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin Univ.
- 2) 국민대학교 건설시스템공학부 전임강사, Full-time Lecturer, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kookmin Univ.
- 3) 국민대학교 건설시스템공학부 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kookmin Univ.

SYNOPSIS : 과잉간극수압의 소산 속도는 일반적으로 압밀방정식에서 정의하는 압밀계수에 의해 결정되는데, 이 압밀계수는 투수계수와 체적압축계수의 관계로 얻어지는 흙의 특성이며 동일한 성질의 지반에서라도 측정위치에 따라 그 값의 편차가 심한 특성을 보인다. 이에 본 연구에서는 위치적 이질성이 있는 점성토 지반의 압밀과정이 균질한 지반에서의 압밀과 어떤 차이를 보이고, 위치적 이질성으로 인한 불확실성이 압밀소요시간이나 압밀속도에 미치는 영향에 대해 유한차분법을 이용한 수치적인 방법으로 고찰하였다.

1. 서론

압밀은 흙에서 발생하는 확산현상의 일종이라 할 수 있는데, 즉 빠른 속도의 하중재하로 인해 발생한 과잉간극수압이 확산현상에 의해 소산되는 과정이기 때문이다. 이러한 압밀현상은 Terzaghi의 압밀방정식에서 압밀계수에 의해 그 소산속도와 과정이 해석된다. 일찍이 깊이에 따라 달라지는 압밀 계수의 변화를 고려해야만 현장에서 측정한 침하량이나 간극수압의 변화를 적절하게 설명할 수 있음이 연구되었다 (Abbot 1960, Nishimura 등 2002). 그리고, 이러한 이질성이 존재하는 지반의 압밀거동은 등가의 성질을 가진 균질한 지층의 거동으로 모사하는 것이 어렵다 (Freeze, 1977). 그래서 대부분의 경우에 수치해석을 이용해 해석을 수행하게 된다 (Papanicolaou and Diplas 1998; Schiffman and Gibson 1964; Yang et al. 2004; Narscillo, 2006; Kim et al. 2007). 본 연구에서는 유한차분법을 이용하여 위치적 이질성으로 인한 지반의 압밀특성이 갖는 불확실성이 어떻게 압밀소요시간이나 압밀속도에 미치는지를 고찰하고자 한다.

2. 압밀 해석을 위한 유한차분방법

본 연구에서는 유한차분법을 이용한 컴퓨터 해석 프로그램인 SNUCON (Yune and Chung 2005; Yune

et al. 2008)을 이용하여 해석하였다. 이 프로그램은 층상구조지반의 일차원 혹은 축대칭 압밀 거동을 해석할 수 있게 만들어 졌는데, 압밀과정에서 발생하는 시료 내부 공극비의 변화에 따라 투수계수 k 와 체적압축계수 m_v 가 달라지는 것을 다음의 식 (1), (2)와 같이 고려하여 압밀해석을 실시한다.

$$k = k_0 \exp \left[\frac{-2.3(e_0 - e)}{C_k} \right] \quad (1)$$

$$m_v = - \frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma_v'} = \frac{a_v}{1 + e} \approx \frac{0.434 C_c}{\sigma_v' (1 + e)} \quad (2)$$

여기서 k_0 는 초기 투수계수, C_k 는 투수계수 변화지수, e_0 는 초기 간극비, e 는 현재상태의 간극비, σ_v' 는 현재 작용하는 연직 유효응력, C_c 는 압축지수를 의미한다. 그리고, 이 프로그램이 갖는 또 다른 특징은 다음과 같이 압밀 방정식 상에서 국부적인 투수계수의 공간적 변화에 따른 영향을 고려한다는 점이다.

$$k_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial k_x}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} \right) = m_v \gamma_w \frac{\partial u}{\partial t}$$

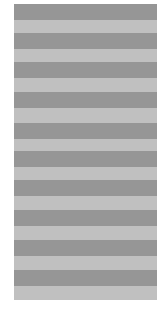
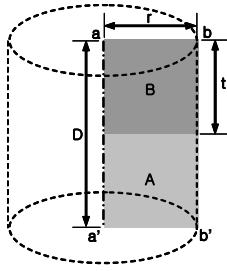
여기서 중요한 점은 투수계수의 위치에 따른 미분값이 0이 아닌 것으로 해석한다는 점이다. 그렇기 때문에 이 미분값이 클수록, 즉 위치에 따른 투수계수의 변화정도가 클수록 과잉간극수압의 소산 속도에 미치는 영향이 크게 되며 예를 들어 층상구조의 지반에서 연직방향의 배수로 압밀이 이루어질 때, 투수계수가 매우 작은 지층이 존재하게 되면 압밀소산 속도는 이 영향을 고려하지 않았을 때보다 더 느려지게 된다.

3. 두 가지 성질의 지층이 혼재하는 지반의 압밀거동

먼저 투수성이 서로 다른 두 가지의 흙이 층상구조로 혼재하는 지반의 압밀거동에 대해 논해보자. 본 연구에서 가정된 두 개의 점성토층의 성질을 표1에 요약하였고, 수치해석을 위해 적용된 지반의 형상과 이질층의 배치 양상을 그림 1에 도시하였다. 이 때 두 가지의 지반은 균일하게 분포하는 것으로 가정하였고, 각각의 이질성 분포에서 각 층의 두께는 동일하게 주어졌다. 그리고 그림 1(a)에서 D는 압밀이 가능한 지층의 전체 두께를 의미하고 2m로 가정하였다.

표 1. 수치해석에 사용된 투수성이 다른 두 지반의 물리적 특성

	A (with high k)	B (with low k)
초기 간극비 e_0	1.3	1.0
초기 연직방향 투수계수 k_{v0} [m/s]	1.2×10^{-8}	3.0×10^{-9}
투수계수 변화지수 C_{kv}	0.484	0.484
압축지수 C_c	0.35	0.35
재압축지수 C_r	0.05	0.05
초기 수직 유효응력 σ_0' [kPa]	100	100
OCR	1	1



(a) Geometry ($t/D=0.5$) (b) $t/D=0.25$ (c) $t/D=0.10$ (d) $t/D=0.05$

그림 1. 해석에 사용한 공간적 이질성 분포의 양상. 그림에서 진한 회색으로 표현된 부분의 투수계수가 옅은 회색으로 표현된 부분보다 네 배 크다.

해석은 배수조건과 이질성의 배치를 다르게 하면서 수행하였는데, 연직방향 배수는 상향일면 배수만 허용하였고 횡방향 배수조건은 그림 1(a)의 $a-a'$ 를 따라서 연직배수재의 존재 여부에 따라 조건적으로 허용여부를 결정하였다. 지반의 위치적 이질성 분포는 그림 1과 같이 전체 지반 깊이에 대한 한 층 두께의 비율로 정의하였고 $t/D=0.5, 0.25, 0.1, 0.05$ 네 가지 경우에 대해 해석을 실시하였다. 그리고 초기 횡방향 투수계수는 초기 연직방향 투수계수의 두 배로 가정하였다.

그림 2는 위치적 이질성의 배치에 따른 연직배수재에 의한 횡방향 배수가 전체 압밀 거동에 미치는 영향을 보여주고 있다. 연직배수재가 설치되지 않은 지반의 경우에는 t/D 가 작은 지반일수록 투수계수의 잦은 변화에 따른 명목효과에 의해 과잉 간극 수압의 소산의 지체현상이 심화됨을 알 수 있다. 그러나 연직배수재가 설치된 지반의 경우에는 횡방향 배수로 인한 압밀이 전체 압밀과정을 지배하게 되면서 서로 다른 이질성으로 인해 발생하는 압밀소요시간의 차이가 현격하게 줄어들었다.

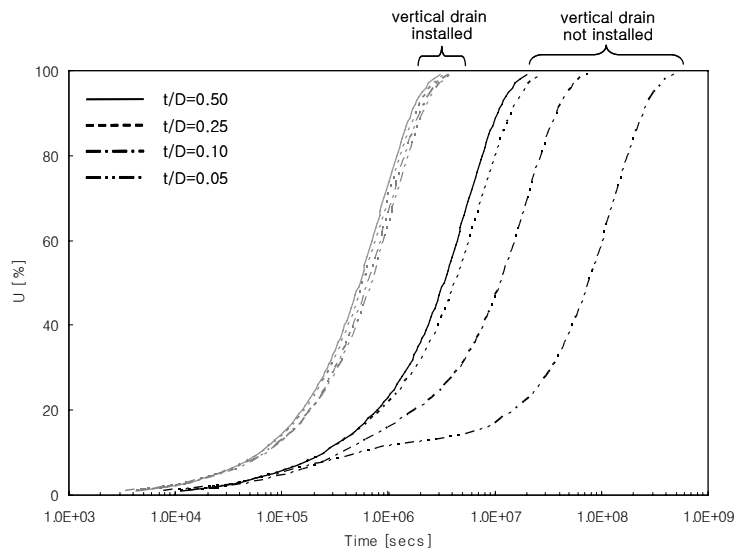


그림 2. 두 물질로 이루어진 이질적인 지반의 압밀거동에서 연직배수재에 의한 횡방향 배수가 미치는 영향

이러한 점은 지반의 이방적 성질의 차이를 통해서도 볼 수 있는데, 그림 3은 다른 모든 조건이 동일하게 유지된 상태에서 횡방향 투수계수를 연직방향 투수계수의 1배, 2배, 4배로 다르게 하였을 때 발생하

는 압밀소요시간의 차이를 보여주고 있다. 지반의 이방적 성질을 나타내는 이 투수계수비의 값이 크면 클수록 전체 압밀거동에서 횡방향 배수가 차지하는 영향이 더 크게 되고 이로 인해 공간적 이질성의 배치에 따른 압밀 거동의 차이는 더욱 줄어들게 된다.

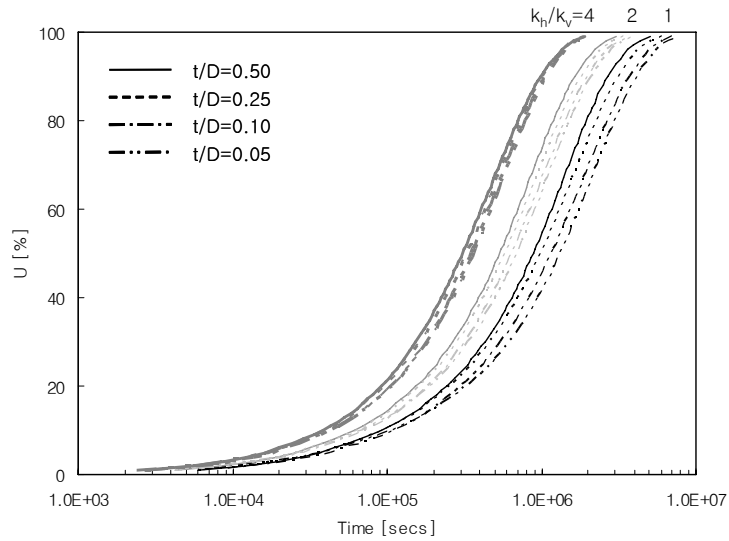


그림 3. 투수계수의 이방성이 연직배수재가 설치된 이질적 지반의 압밀거동에 미치는 영향

그리고 이러한 현상은 배수재 간격에 따른 이질적 지반의 압밀거동에서도 관측되는 것을 확인하였는데, 그림 4는 전체 압밀층 두께에 따른 최대 횡방향 배수거리 r 의 비율을 다르게 하여 구성된 지반에 대한 압밀 해석 결과를 보여주고 있는데, 최대 횡방향 배수거리가 짧아질수록 전체 압밀 거동에 대한 횡방향 배수의 기여도가 커지게 되어 초기에 주어진 이질성에 따른 영향이 점차 줄어드는 것과 동시에 투수계수가 작은 지층 사이 사이에 존재하는 투수계수가 큰 지층이 배수층 역할을 하게 되어 60% 이상의 압밀이 진행될 때 압밀속도의 역전현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 t/D 의 값이 작아 얇은 지층의 조합으로 이질성이 분포하는 지반의 경우 더 빠르고 뚜렷하게 나타난다.

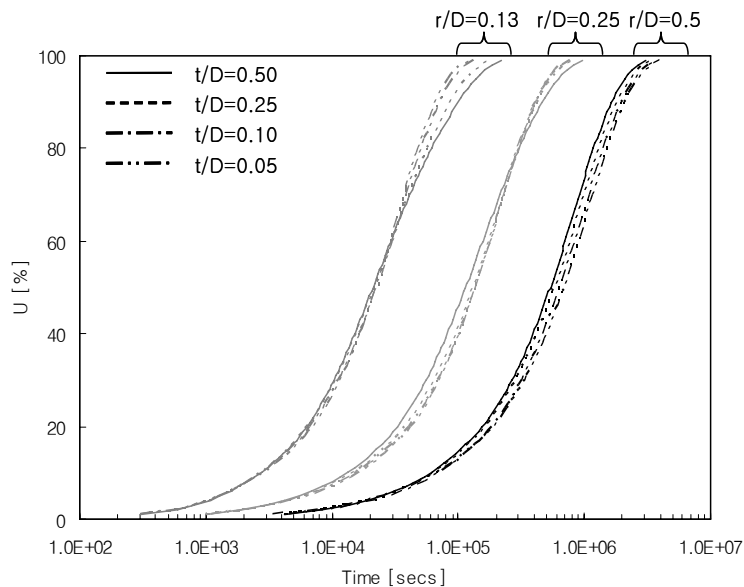
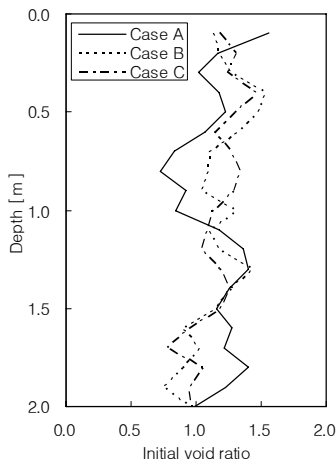


그림 4. 연직배수재의 설치 간격이 이질적 지반의 압밀거동에 미치는 영향

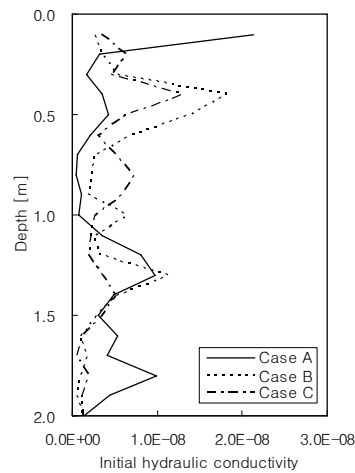
4. 통계적으로 정의한 위치적 이질성을 가진 지반의 압밀거동

깊이에 따른 지반의 위치적 이질성을 인위적으로 모사하기 위하여 행렬분해 기법으로 1차원적으로 Random한 위치적 이질성을 재구성하였다. 이 방법은 미리 정해진 확률변수의 평균값과 표준편차 그리고 상관거리(correlation length)와 같은 지구통계학적 정보를 이용하여 공간적 변동성을 모델링하는 수학기법이다 (El-Kadi and Williams, 2000; Phoon and Kulhawy, 1999; Vanmarcke, 1977). 본 연구에서는 깊이에 따른 초기 공극비를 확률변수로 정하고 이에 따라 투수계수와 체적압축계수를 전술한 식 (1), (2)로 결정하였다.

그림 5는 초기 공극비의 평균값은 1.15, COV는 20% 그리고 상대적 상관 거리는 0.2로 하여 행렬분해 기법을 통해 재구성한 초기 공극비의 깊이별 분포와 공식(1)에 의해 결정한 초기 연직 투수 계수 분포의 예를 보여준다. 그리고 전체 압밀점성토 층의 두께는 2m, 최대 횡방향 배수거리는 0.5m, 연직배수재의 반경은 0.05m로 가정하였다.



(a) 초기 간극비 e_0



(b) 초기 연직방향 투수계수 k_{v0}

그림 5. 행렬분해 기법을 이용하여 재구성된 초기 간극비와 그에 따른 초기 연직방향 투수계수의 분포 예시

그림 6은 연직방향 일면 배수에 의한 압밀 거동과 연직배수재를 설치하여 횡방향 배수가 동시에 일어나는 경우의 압밀거동을 함께 보여주고 있다. Case A의 경우에 배수재가 설치되지 않은 경우에는 가장 빠른 압밀 속도를 보여주었지만, 배수재가 설치된 경우로 압밀해석을 실시한 결과 Case B나 C보다 느린 속도의 압밀이 진행됨을 보여주고 있다. 이는 공간적 이질성의 분포에 따른 전체 압밀 과정의 차이가 경계의 배수조건에 따라 다르게 나타날 수 있음을 보여주는 예라고 할 수 있다.

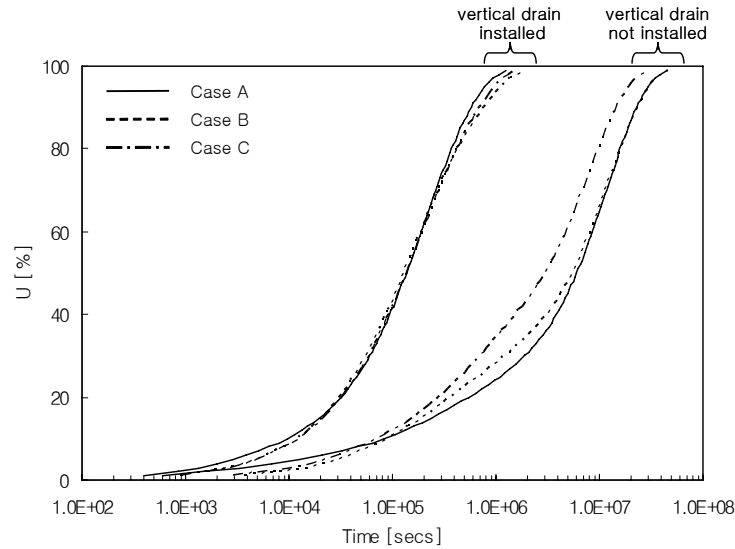


그림 6. 통계적으로 정의한 위치적 이질성을 가진 지반의 압밀거동. 초기 간극비 및 초기 투수계수의 분포는 그림 5에 도시되어 있다.

5. 결론

본 연구는 위치적 이질성을 가지고 있는 지반에서의 압밀거동의 특징을 유한차분법을 이용한 수치해석으로 조사하였는데, 이를 통해 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 다층지반의 압밀 거동의 경우에 통계적으로는 동일할지라도 깊이에 따른 투수계수의 변화가 더 빈번할 경우에 과잉간극수압의 소산에 더 오랜 시간이 소요된다.
- 같은 형태의 공간적 이질성이 존재하는 지반이라 할지라도 연직배수재가 설치된 경우에는 그렇지 않은 경우에서 보이는 이질성분포에 따른 압밀거동의 차이가 훨씬 줄어든 형태로 나타나며 이러한 경향은 횡방향 배수의 영향이 커질수록 더 분명하게 반영된다.
- 공간적 이질성의 분포에 따른 전체 압밀 과정의 차이는 경계의 배수조건에 따라 다르게 나타날 수 있다.
- 이와 같은 이론적 결론에 대한 검증을 위한 현장 시험이 필요할 것으로 생각한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2006년도 첨단도시개발사업(07 도시재생B03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Abbot, M.B. (1960). "One dimensional consolidation of multi-layered soils," *Geotechnique*, 10, 151-165.

2. El-Kadi, A.I. and Williams, S.A.(2000). "Generating two-dimensional fields of auto-correlated, normally distributed parameters by the matrix decomposition technique," *Ground Water*, 38(4), 530-532
3. Freeze, R.A. (1977) "Probabilistic One-Dimensional Consolidation," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(7), 725-742
4. Kim, H.-K., Narsilio, G.A. and Santamarina, J.C. (2007) "Emergent Phenomena in Spatially Varying Soils," *Proceedings, GeoDenver2007, ASCE Geo-institute Conference, Denver, CO*
5. Mesri, G. and Choi, Y. K. (1985). "Settlement Analysis of Embankments on Soft Clays", *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(4), 441-464.
6. Narsilio, G.A. (2006). *Spatial variability and terminal density-implications in soil behavior*, Ph.D. thesis, Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, U.S.A.
7. Nishimura, S.I., Shimada, K., and Fujii, H. (2002). "Consolidation inverse analysis considering spatial variability and non-linearity of soil parameters," *Soils and Foundation*,42(3),45-61
8. Papanicolaou, A. and Diplas, P. (1998). "Non-linear settlement of solids due to their self-weight," *International Water Resources Engineering Conference-Proceedings*, 1326-1331.
9. Phoon, K.K. and Kulhawy, F.H. (1999). "Characterization of geotechnical variability," *Can. Geotech. J.*, 36, 612-624
10. Schiffman, R.L. and Gibson, R.E. (1964). "Consolidation of non-homogeneous clay layers," *J. Soil Mech. Fdns. Div.*, ASCE, 4043, 1-30
11. Vanmarcke, E.H. (1977). "Probabilistic modeling of soil profiles," *J. Soil Mech. Fdns. Div.*, ASCE, 103(11), 1227-1246
12. Yang, H., Xie, X., Zhang, J., and Xie, K. (2004). "Spatial probability characteristic of one-dimensional consolidation for double-layered soil." *Hejiang Daxue Xu bao(GongxueBan) / Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 38(9), 1166-1169.
13. Yune, C.Y. and Chung, C.K. (2005). "Consolidation test at constant rate of strain for radial drainage", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 28(1), 71-78.
14. Yune, C.Y., Woo, S.I., Son, D.J., Choo, Y.S. and Chung, C.K. (2008). "Analysis on spatial variation of soil properties by smear and its transition during consolidation of clayey soil", *Proceedings, International Symposium on Lowland Technology, ISLT2008, Sep.24-26 2008*, 335-341