

연직배수재가 설치된 정규압밀 점성토 지반의 점진적 압밀이 차후 압밀거동에 미치는 영향

Influence of Progressive Consolidation on Consolidation Behavior of Normally Consolidated Clayey Soil with Vertical Drains

윤 찬 영¹ Yune, Chan-Young

정 충 기² Chung, Choong-Ki

Abstract

In this study, the influence of progressive consolidation from the drainage boundary on the subsequent process of consolidation was investigated. Analytical theory and numerical program for consolidation of clayey soil were developed based on finite difference method, in which spatial variation of permeability and volume compressibility were implemented. And model ground with normally consolidated clayey soils and a vertical drain at its center were simulated. Various types of soils with different relations between coefficient of volume compressibility and permeability and void ratio were applied. Also numerical simulations based on the properties of the normally consolidated clay at Nakdong River basin and reconstituted kaolinite soil were performed to recognize its practical impact. Consequently, it is found out that retardation of consolidation induced by progressive consolidation is very important to understand consolidation behavior on field conditions and its effect is remarkable at the initial state of consolidation, and increases with plasticity index and applied load.

요 지

본 연구에서는 배수면으로부터의 거리에 따라 점진적으로 진행되는 압밀이 차후의 압밀 거동에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 이를 위해 압밀진행에 따른 위치 별 투수계수 및 부피압축계수의 변화를 고려할 수 있는 유한차분 압밀해석기법 및 프로그램을 개발하였다. 개발된 해석 프로그램을 이용하여 간극비 변화에 따른 투수계수와 부피압축계수의 변화 정도가 다른 다양한 특성의 지반에 대하여 연직배수재가 설치된 모형지반의 압밀거동을 분석하였다. 또한 실제 지반조건에서의 영향 정도를 살펴보기 위하여, 낙동강 하구의 정규압밀 점성토 및 재성형 카올리나이트의 지반 특성을 근간으로 입력치를 결정, 해석을 수행하여 위치 별 점진적 압밀에 의한 영향을 분석하였다. 해석 결과 점진적 압밀 진행에 따른 압밀 지체가 현장의 압밀 거동 이해에 매우 중요하며, 또한 압밀 초기에, 소성성이 크고, 재하하중이 클수록 현저하게 나타남을 알 수 있었다.

Keywords : Coefficient of consolidation, Consolidation, Finite difference analysis, Permeability, Volume compressibility

¹ 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Urban and Geosystem Engrg., Seoul National Univ., yune@snu.ac.kr)

² 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Urban and Geosystem Engrg., Seoul National Univ.)

1. 서론

점성토로 이루어진 연약지반을 개량하고자 할 때 가장 많이 시행되는 방법은 선행재하공법이며, 이 때 압밀을 촉진하여 시공 시간을 단축시키기 위하여 연직배수재를 이용하게 된다. 연직배수재를 적용하게 됨에 따라 압밀 시간극수의 흐름은 주로 방사 내측 방향으로 발생하게 된다. 따라서 선행재하공법 적용에 필요한 압밀 소요 시간의 산정은 연직방향 압축, 방사방향 배수 조건에 대한 압밀방정식과 그 해를 통하여 이루어지게 되며, Barron(1944)은 균질한 점성토 지반의 방사 배수에 대한 해를 제시한 바가 있다.

그러나 실제 연직배수재에 의한 선행재하공법이 적용되는 경우에는 Barron(1944)이 제시한 바와 같은 이상화된 조건의 해로서는 정확한 압밀 거동을 해석할 수 없다. 우선 배수재 설치에 따라 그 인근 지반의 교란으로 발생하는 스미어(smear) 현상 그리고 배수재가 갖고 있는 투수성의 한계로 인한 통수저항 때문에 압밀 거동이 영향을 받게 되며, 이에 더하여 압밀 진행에 따른 점성토 지반의 특성 변화, 즉 간극비 감소에 따른 투수성과 압축성 저하가 차후의 압밀 거동에 크게 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

스미어 현상과 통수저항의 효과는 그 동안 지반공학 전문가들이 이론적으로 그리고 모형 실험과 실제 현장 계측 결과 분석을 통하여 많은 연구를 수행하였으며, 현재도 많은 연구가 진행되고 있다. 압밀 진행에 따른 간극비 감소 효과에 대해서도 고변형률 점성토를 대상으로 이를 반영하여 해석할 수 있는 방법 개발을 중심으로 연구가 진행되고 있다.

그러나 아직까지 압밀 거동 해석 시 간과하고 있는 점은 압밀이 배수재로부터의 거리에 따라 차별적으로, 그리고 점진적으로 진행됨에 따라, 차후의 압밀 거동이 영향을 받는다는 것이다. 점성토 지반에 재하된 하중에 의해 발생한 간극수압은 압밀이 진행됨에 따라 소산되며, 그 소산속도는 배수면에서 가까울수록 빠르게 그리고 멀어질수록 느리게 진행된다. 따라서 배수면에서 가까울수록 동 시간대에 더 작은 간극비를 갖게 되며, 이러한 위치에 따른 압밀도와 간극비의 차이에 의해 차후의 압밀 거동이 영향을 받을 수 있다. 즉, 설혹 압밀 진행에 따른 간극비의 변화를 고려해서 차후 압밀 거동을 예측한다 하더라도 단순히 전체 지반의 평균 압밀도에 따른 평균 간극비의 변화만을 반영하여 예측한 결과는

실제 거동과 다르게 나타날 수 있다.

본 연구에서는 배수면으로부터 점진적으로 진행되는 압밀이 차후의 압밀 거동에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 이를 위해 압밀 진행에 따른 위치 별 투수계수 및 부피압축계수의 변화를 고려할 수 있는 유한차분 해석기법 및 프로그램을 개발하였으며, 개발된 해석 프로그램을 이용하여 연직배수재가 설치된 모형지반의 압밀거동을 분석하였다. 압밀 진행에 따른 간극비의 변화가 차후 압밀 거동에 미치는 영향은 대상 흙의 특성, 즉 간극비 변화에 따른 투수계수와 부피압축계수의 변화 정도에 따라 다르게 나타난다는 것은 자명하다. 따라서 본 연구에서는 압밀 진행에 따라 발생하는 투수계수와 부피압축계수의 변화 정도를 달리하고, 이에 더하여 재하하중 크기를 변화시켜 압밀에 따른 간극비 변화 정도를 달리한 해석을 수행함으로써, 위치 별 점진적 압밀 진행이 차후 압밀 거동에 미치는 영향을 흙의 특성 및 재하하중 크기에 따라서 분석하였다. 또한 특성이 다른 낙동강 하구의 정규압밀 점성토 및 재성형 카올리나이트, 두 가지 종류의 흙을 근간으로 입력치를 결정, 해석을 수행하여 흙의 특성에 따라 위치 별 점진적 압밀 진행에 따른 영향이 어떻게 나타나는 지 파악하여 보고 이를 통하여 실제 해석에서의 적용성을 검증하였다.

2. 기존의 연구

방사배수 압밀에 관련된 연구는 방사내측 배수, 상부 경계면 자유변형률 조건에서 Barron(1944)의 이론 해가 제시된 이후, 등변형률 조건 및 스미어와 배수재의 통수저항을 고려한 해(Barron, 1948), 연직배수재의 지반 내 부분 관입을 고려한 해(Hart 등, 1958), 통수저항 및 연직배수와 방사배수를 동시에 고려하고 횡방향 변형을 고려한 엄밀해(Yoshikuni와 Nakanodo, 1974), 배수재의 통수저항과 스미어를 고려한 간편해(Hansbo, 1981), 그리고 시간에 따른 재하하중 변화를 고려한 해(Olson, 1977) 등 많은 이론 해가 발표되었다. 이와 함께 방사배수 압밀을 실험적으로 확인, 평가하고 이론 해의 적용성을 검증함과 동시에 관찰된 오차를 보정하기 위하여 실험 또는 현장 계측을 통한 연구가 많이 시행되었으며, 특히 최근에는 Bergado 등(1991), Onoue 등(1992), Indraratna와 Redana(1998), Almeida 등(2000), Bo Myint Win 등(2000), Hird와 Moseley(2000), Sharma와 Xiao(2000) 등에 의하여 스미어가 발생할 때 배수재 주변지반의 간극

비 및 투수계수 등의 변화와 이들이 압밀 거동에 미치는 영향을 밝히기 위한 연구가 수행되었다.

압밀진행에 따른 점성토 지반의 특성 변화, 즉 간극비 감소에 따른 투수성과 압축성 저하는 압밀 거동에 영향을 줄 수 있으나, 기존의 연구에서는 압밀과정에 나타나는 변화가 크지 않다고 가정하여 일반적으로 그 영향을 무시하여왔다. 다만 고변형률 점성토의 경우에는 이러한 투수성과 압축성의 변화가 압밀거동에 크게 영향을 줄 수 있기 때문에 연직배수 조건을 중심으로 Davis와 Raymond(1965), Barden과 Berry(1965), Gibson 등(1967), Poskitt(1969), Berry와 Poskitt(1972), Mesri와 Rokhsar(1974) 등이 압밀과정에서 간극비, 투수계수, 부피압축계수 등을 고려할 수 있는 방법 및 이러한 압밀특성의 변화가 압밀거동에 미치는 영향에 대하여 이론적으로 또는 일부 수치적, 실험적으로 연구한 바가 있다. 하지만 방사배수조건에서의 압밀 중 지반특성 변화를 고려한 연구는 매우 적다. Schiffman(1958)은 방사배수 조건에서 투수계수가 유효응력에 따라 선형적으로 변화하는 제한적인 경우에 대하여 해를 제안한 바 있으며, Berry와 Wilkinson (1969)은 유한차분 해석을 이용하여 재하하중 크기, 배수재 직경비, 투수계수와 부피압축계수의 변화 비율 및 구조적 점성(structural viscosity) 변화에 대한 압밀거동을 분석하였다. 그러나 연직배수 및 방사배수 압밀에서 투수계수, 부피압축계수의 변화를 고려한 이들의 연구도 압밀이 배수재로부터의 거리에 따라 차별적, 점진적으로 진행됨에 따라 나타나는 위치 별 압밀특성(투수계수, 부피압축계수) 변화가 압밀거동에 미치는 영향에 대해서는 인지하지 못하고 있으며, 단순

히 압밀과정에서 나타나는 투수계수, 부피압축계수 변화에 대한 이론적, 수치적 분석만을 수행하고 있다.

Sridharan과 Prakash(2002)는 투수계수가 다른 두 개의 토층으로 이루어진 지반($k_1 < k_2$)에 대한 투수실험으로부터 유출부 가까이에 작은 투수계수를 가지는 경우에 측정된 전체지반의 겉보기 평균투수계수(k_a)가 그 반대의 경우, 혹은 Darcy의 법칙과 흐름의 연속성을 고려하여 계산된 다음 식 (1)과 같은 등가투수계수(k_e)보다 더 작으며, 결과적으로 전체지반의 겉보기 평균 투수계수는 유출부 가까이에 있는 층의 투수계수에 더 큰 영향을 받는다고 밝혔다.

$$k_e = \frac{l_1 + l_2}{l_1/k_1 + l_2/k_2} \quad (1)$$

여기서 l_1, l_2 : 투수계수 k_1, k_2 를 갖는 층의 배수거리

또한 아래 그림 1에 제시한 바와 같은 유한요소법을 이용한 간단한 압밀 해석으로부터도 배수면 인근에 더 작은 투수계수를 가질 경우 압밀이 지체된다는 사실을 확인할 수 있다. 이 해석에서는 압밀 시 압축성 변화의 영향을 배제하기 위하여 동일한 탄성계수를 갖도록 변형 특성을 선형적 응력-변형률 관계로 묘사하였으며, 다만 두 가지 토층의 위치를 배수면으로부터 다르게 한 조건과 등가 투수계수(k_e)를 이용한 조건에 대해 해석을 수행하였다. 그 결과 배수면 가까이에 투수계수가 작은 지반이 있을 경우의 압밀 소요 시간은 그 반대로 지반이 구성된 경우보다 훨씬 길게 나타났으며, 또한 등가 투수계수에 의한 결과보다도 더 길게 나타남을 그림 2로부터

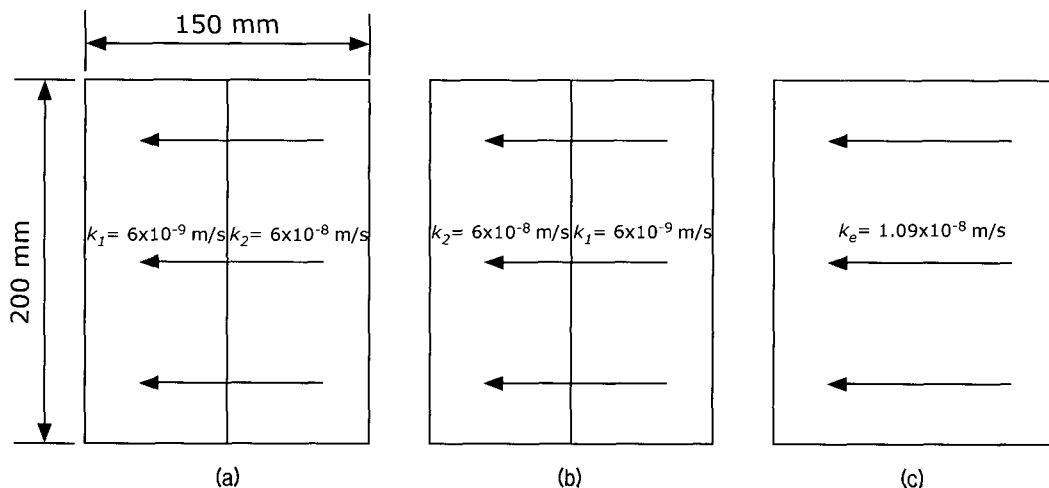


그림 1. 유한요소 해석지반 형상 및 투수특성: (a) 유출부 가까이에 작은 투수계수를 갖는 경우; (b) 유출부 가까이에 큰 투수계수를 갖는 경우; (c) 전체지반이 등가의 투수계수를 갖는 경우

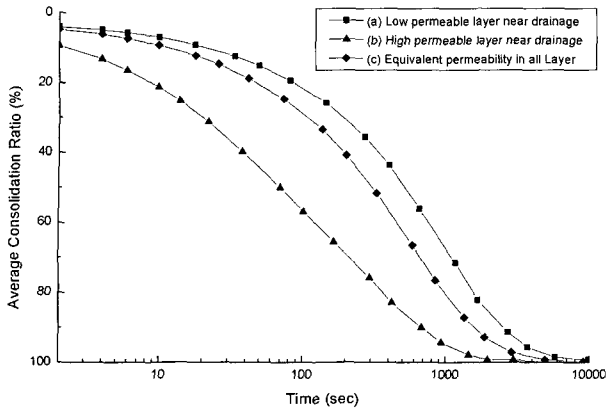


그림 2. 이질층의 위치변화 및 등가 투수계수를 고려한 압밀해석

확인할 수 있다. 즉, 투수성이 다른 이질층이 존재하는 경우 배수면에 대한 각 층의 상대적인 위치에 따라 압밀 속도는 다르게 나타나며 특히 배수면 가까운 토층의 투수성에 크게 영향을 받음을 재확인할 수 있다. 따라서 연직배수재가 설치되어, 내측 배수면으로부터, 방사 외측 방향으로 점진적으로 압밀이 진행되는 경우에도, 위치 별 압밀도의 차이 그리고 이에 따른 투수성의 차이로 인하여 압밀이 지체될 수 있다.

위치 별 점진적 압밀 진행이 차후 압밀 거동에 미치는 영향은 위치 별 간극비의 차이에서 기인하는 두 가지 계수, 즉 투수계수와 부피압축계수의 위치 별 차이에 의해서 비롯되게 된다. 이는 압밀계수를 정의하는 다음 식 (2)로부터 쉽게 확인할 수 있다. 간극비가 감소함에 따라 투수계수의 감소와 더불어 압밀계수가 감소하면서 압밀 속도가 느려지는 반면, 간극비 감소는 부피압축계수의 저하를 유발하여 압밀계수의 증가와 함께 압밀 속도를 빠르게 할 수도 있다. 따라서 간극비의 변화에 따라 압밀속도가 어떻게 나타날지는 간극비 변화에 대한 투수계수와 부피압축계수 변화의 상대적 민감도에 따라 결정된다고 할 수 있다.

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} \quad (2)$$

여기서 c_v : 압밀계수
 k : 투수계수
 γ_w : 물의 단위중량
 m_v : 부피압축계수

압밀 중 간극비의 위치 별 변화에 따른 차후 압밀속도에 대한 영향은 현재까지 제대로 인식되지 못하거나, 무시되어 왔다. 또한 현재의 연직배수재가 설치된 지반

에 대한 압밀 해석도 이에 대한 영향을 고려한 바는 없으며, 다만 스미어 효과를 연구하는 가운데에서 계층 결과를 해석에 반영하면서, 인용되는 경험적 요소로서 매우 간접적으로 고려되었을 수는 있다. 그러나 지반에서 발생하는 압밀 현상은 실제 발생하는 모든 요인을 명확히 규명한 토대에서 연구되고, 해석되어야 하므로 이에 대한 연구는 학술적으로 매우 중요하다. 아울러 실제 압밀 거동 해석도 이에 대한 명확한 정량적 평가를 토대로 이루어지는 것이 당연하다는 관점에서, 연직배수재가 설치된 점성토 지반에서 방사내측 배수 시 배수면으로부터의 거리에 따라 점진적으로 진행되는 압밀이 차후의 압밀거동에 미치는 영향을 체계적으로 규명하여야 할 필요가 있다.

3. 유한차분해석 프로그램

방사배수 조건에서 압밀 진행에 따라 배수면 거리 별로 다르게 나타나는 간극비의 변화를 감안하여 이론 해를 구하는 것은 거의 불가능하다. 하지만 유한요소법이나 유한차분법과 같은 수치적 기법을 이용하면 신뢰성 높은 근사해를 구하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 이미 많은 연구에서 사용되고 있으며 점성토의 압밀 중 간극비의 변화에 따른 투수계수 및 부피압축계수 변화뿐만 아니라 전체지반의 평균적 간극비 감소에 따른 투수계수 및 부피압축계수의 변화도 손쉽게 고려할 수 있는 유한차분법을 이용하여 해석 프로그램을 개발하였다.

3.1 관계식 설정 및 프로그램 개발

축대칭 조건에서의 압밀 지배방정식은 다음 식 (3)과 같으며, 이 식은 투수계수의 이방성을 고려하여 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial u}{\partial z} \right) = m_v \gamma_w \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3)$$

여기서 u : 간극수압
 t : 시간
 r : 반경방향 좌표계
 z : 연직방향 좌표계

$$\left[k_h \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \left(\frac{k_h}{r} + \frac{\partial k_h}{\partial r} \right) \frac{\partial u}{\partial r} \right] + \left[\frac{\partial k_v}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} + k_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] = m_v \gamma_w \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4)$$

여기서 k_v : 연직방향 투수계수
 k_h : 횡(방사)방향 투수계수

식 (4)에 대하여 그림 3과 같은 유한차분망 내의 임의의 절점 (i, j)에 대하여 임의의 해석 시간단계 t에서 중앙차분법을 이용하여 외재적(explicit) 방법으로 차분식을 구성하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 u_{i,j}^{t+1} = & u_{i,j}^t \\
 & + \frac{k_{h\ i,j}^t}{m_{v\ i,j}^t \gamma_w} \frac{\Delta t}{\Delta r^2} \left\{ u_{i+1,j}^t - 2u_{i,j}^t + u_{i-1,j}^t \right. \\
 & + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta r}{r_{i,j}} + \frac{k_{h\ i+1,j}^t - k_{h\ i-1,j}^t}{2k_{h\ i,j}^t} \right) (u_{i+1,j}^t - u_{i-1,j}^t) \left. \right\} \\
 & + \frac{k_{v\ i,j}^t}{m_{v\ i,j}^t \gamma_w} \frac{\Delta t}{\Delta z^2} \left\{ u_{i,j+1}^t - 2u_{i,j}^t + u_{i,j-1}^t \right. \\
 & + \frac{k_{v\ i,j+1}^t - k_{v\ i,j-1}^t}{4k_{v\ i,j}^t} (u_{i,j+1}^t - u_{i,j-1}^t) \left. \right\} \quad (5)
 \end{aligned}$$

압밀이 진행됨에 따라서 위치 별로 과잉간극수압이 변화하면 각 절점에서의 유효응력은 다음 식 (6)으로 계산할 수 있으며, 유효응력이 계산되면 식 (7)과 같은 정규압밀 조건에서의 유효응력-간극비 관계에서 위치 별 간극비를 계산할 수 있다.

$$\sigma_v' = \sigma_v - u \quad (6)$$

여기서 σ_v' : 연직 유효응력
 σ_v : 연직 전응력

$$e = e_0 - C_c (\log \sigma_v' - \log \sigma_{v0}') \quad (7)$$

여기서 e : 간극비

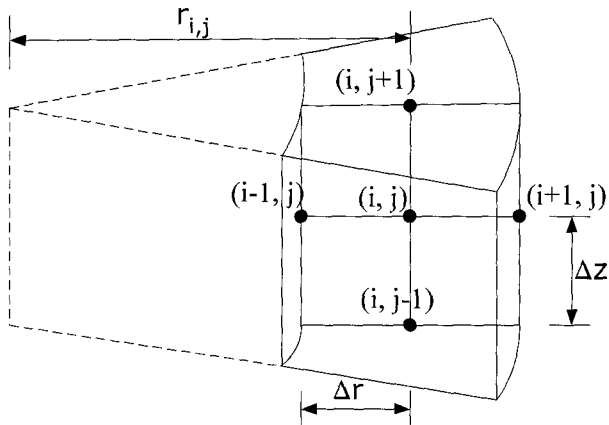


그림 3. 유한차분망 내의 절점(i, j)

e_0 : 초기 간극비
 C_c : 압축지수
 σ_{v0}' : 초기 연직유효응력

위치 별 간극비가 계산되면 다음 식 (8)과 같은 간극비-투수계수(Mesri와 Choi, 1985), 그리고 1차원 변형조건에 대한 식 (9)의 간극비-부피압축계수 관계로부터 위치 별 투수계수 및 부피압축계수를 계산할 수 있다.

$$k = k_0 \exp \left[\frac{-2.3(e_0 - e)}{C_c} \right] \quad (8)$$

여기서 k_0 : 초기 투수계수

C_k : 투수계수 변화지수(Change of permeability index)

$$m_v = -\frac{\partial e}{\partial \sigma_v'} = \frac{a_v}{1+e} = \frac{0.434 C_c}{\sigma_v' (1+e)} \quad (9)$$

따라서 유한차분법에 의해 주어진 시간 증분에 대하여 전체 대상 지반에 대하여 절점 별로 압밀해석을 수행하고, 이에 따라 결정된 간극수압 그리고 유효응력과 간극비로부터 변화된 지반 특성 즉, 투수계수와 부피압축계수를 식 (8)과 (9)를 이용하여 각 절점 별로 산정한다. 그리고 이 값들을 다음 시간 증분에 대하여 각 절점에 대입하여 압밀 해석을 진행하고, 이 과정을 계속해서 필요한 시기까지 반복, 적용함으로써 전체 압밀 해석이 시행된다. 한편, 압밀진행에 따라 투수계수 및 부피압축계수가 전체 지반에 걸쳐 평균적으로 변화하는 경우는 각 해석단계에서 전체 지반의 간극비 평균을 계산하고 이를 이용한 평균 투수계수와 평균 부피압축계수를 모든 절점에 대입하여 다음 단계의 해석을 진행하도록 함으로써 모사하는 것이 가능하다.

3.2 실시된 해석 내용

개발된 유한차분 해석 프로그램을 이용하여 지름 36cm, 높이 20cm의 점성토 지반의 중앙부에 지름 6cm의 연직 배수재를 포함하는 조건을 대상으로 해석을 수행하였다. 초기 연직유효응력이 100kPa인 정규압밀상태의 대상 지반은 외주면 방사방향 변형이 구속된 채 연직방향으로만 변형이 발생하고, 간극수의 흐름은 방사 내측으로만 발생하는 것으로 간주하였다. 해석이 필요한 유한차분망은 그림 4에 제시된 바와 같이 축 대칭의 방사방

향, 연직방향 각 20개로 구성하였다. 유한차분 해석에서 해의 안정조건을 얻기 위하여 선행 해석을 실시하고, 이를 통해 해석시간 간격을 1~5초 범위로 결정하였다. 한편 연직 배수재의 투수성은 대상지반에 비교하여 매우 크다고 간주하여 해석에서는 배수재 경계면을 자유 배수면으로 가정하였다.

Berry와 Wilkinson(1969)은 간극비 변화에 따른 투수계수와 부피압축계수의 변화 정도, 즉 압축지수와 투수계수 변화 지수의 비(C_c/C_k)에 따라서 그리고 재하하중 크기 등에 의해 압밀거동이 영향을 받는다는 연구결과를 발표하였다. 본 연구에서도 이러한 연구결과를 참고해서 간극비 변화에 따른 압축지수와 투수계수 변화 지수의 비를 달리하여 해석을 수행함으로써, 위치 별 점진적 압밀진행이 압밀거동에 미치는 영향을 다양한 흙의 특성에 대하여 파악할 수 있도록 하였다. 위에서 제시한 해석 조건을 토대로 아래 표 1에 제시된 비교적 고소성이고, 압축성이 크며, 투수성이 작은 낙동강 하구 점성

토의 특성을 근간으로 하여, C_c/C_k 를 0.5, 0.8, 1.0, 1.5로 변화시키면서, 그리고 각각의 지수 비에 대하여 재하하중을 현재 연직유효응력의 2배, 4배, 6배로 가했을 때의 압밀 해석을 실시하고 그 결과를 분석하였다. 이에 더하여 낙동강 하구 점성토에 비교하여 압축성이 작고 저소성의 특성을 가지며 큰 투수성을 갖는 재생형 카올리나이트 점성토 지반의 물성치를 이용한 해석을 수행하여, 상이한 지반조건을 갖는 실제 점성토 지반에 대한 해석 프로그램의 적용성 및 위치 별 점진적 압밀진행이 실제 점성토 지반의 압밀거동에 미치는 영향에 대한 수치적 분석을 실시하였다. 해석 입력치로 사용된 점성토의 물성치는 표 1과 같으며, 이 표에서 나타난 투수계수, 투수계수변화 지수, 압축지수 등의 값들은 연직배수 및 방사배수조건에서 실시된 일정변형률 압밀시험(윤찬영 등, 2002) 결과를 바탕으로 산정, 또는 평가되었다.

4. 해석결과 및 분석

4.1 C_c/C_k 의 변화에 따라 점진적 압밀진행이 압밀거동에 미치는 영향

압밀계수를 정의하는 식 (2)를 통하여 알 수 있는 바와 같이 압밀 중 투수계수의 변화는 압밀계수를 감소시켜 압밀을 지체시키고, 부피압축계수의 변화는 압밀계수를 증가시켜 압밀을 촉진시킨다. 따라서 압밀 중 간극비 변화로 인한 압밀지체 여부와 그 정도는 간극비 변화에 대한 투수계수와 부피압축계수 변화의 상대적 민감도에서 비롯된다는 것을 알 수 있다. 또한 투수계수와 부피압축계수의 간극비 변화에 따른 상대적 민감도는 재하 하중의 크기에 따라 영향을 받을 수밖에 없다. 즉 가해진 하중에 의한 간극비의 변화에 대응하여 발생하는 투수계수와 부피압축계수의 변화량은 전혀 다른 상관관계로 정의되는 식 (8)과 (9)를 통해 결정되고, 따라서 이들의 변화비율, 즉 압밀계수 변화율은 재하되는 하중의 크기에 따라 다른 값을 갖게 될 것이다. 투수계수와 부피압축계수의 변화비율은 식 (8)과 (9)로부터 알 수 있듯이 정규압밀 상태에서는 C_c , C_k 로서 고려할 수 있다. Berry와 Wilkinson(1969)은 간극비에 따른 투수계수와 부피압축계수의 변화지수의 비인 C_c/C_k 값을 간극비 변화 효과를 고려하는데 활용하였으며, 이 값은 일반적으로 1/2~2의 범위를 가진다. C_c/C_k 값은 정규압밀 상태에서 초기간극비(e_0)가 증가함에 따라 커지며(Tavenas

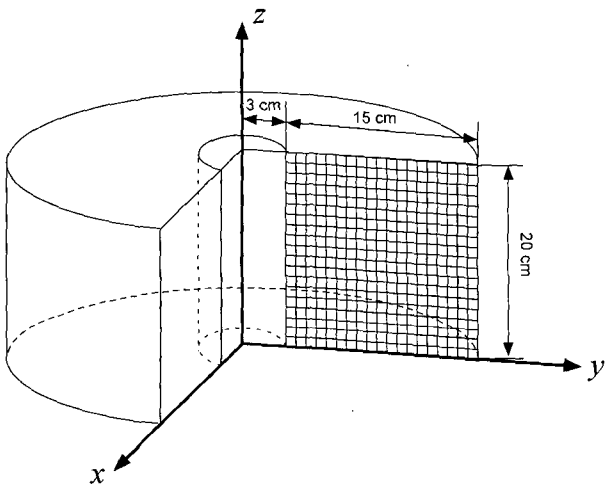


그림 4. 유한차분 해석망

표 1. 대상 점성토의 특성 및 입력치

	낙동강 하구 점성토	재생형 카올리나이트
소성지수, PI(%)	35.3	15.4
#200체 통과량(%)	97.3	98.0
초기 간극비, e_0	1.700	0.930
압축지수, C_c	0.933	0.294
투수계수(m/s)	k_{v0}	6.67×10^{-10}
	k_{h0}	1.00×10^{-9}
연직유효응력 (=선행압밀압, kPa)	100	100
투수계수 변화지수, C_k	C_{kv}	0.665
	C_{kh}	0.766

등, 1983), 초기 간극비는 소성성이 클수록 커지므로 (Mesri와 Choi, 1985), C_c/C_k 값 역시 소성성 증가에 따라서 커진다는 사실을 알 수 있다. 참고로 본 연구에서 해석에 사용된 저소성의 카올리나이트($PI = 15.4\%$)는 C_c/C_k 값이 연직배수조건에서 0.887, 방사배수조건에서 0.805이며, 고소성의 특징을 갖는 낙동강 하구 점성토($PI = 35.3\%$)의 경우에는 연직배수조건에서 1.403, 방사배수조건에서 1.218이다.

본 연구에서는 C_c/C_k 값이 0.5, 0.8, 1.0, 1.5인 경우에 대하여 유한차분해석을 실시하였다. 낙동강 하구 점성토에 대한 방사배수조건의 C_k 값 0.766에 대하여 C_c 값을 0.383, 0.613, 0.766, 1.149로 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 각각의 경우에 대하여 초기 유효응력(σ'_{v0}) 100kPa에 100, 300, 500kPa을 추가 재하하여 최종 유효응력(σ'_{vf})과의 비를 각각 2, 4, 6으로 변화시켜가며 해석을 실시하였다. 앞서 설명한 바와 같이 해석결과는 간극비 변화에 따른 투수계수와 부피압축계수의 상대적 민감도에 의하여 영향을 받지만 이에 더하여 배수면으로부터의 점진적 압밀진행에 따른 위치별 간극비 변화에 의

해서도 동시에 영향을 받는다. 따라서 두 영향 인자를 구분하여 평가하기 위하여 본 연구에서는 압밀진행에 따른 전체지반의 평균적 간극비 변화를 고려한 선행 해석을 실시하여 투수계수와 부피압축계수의 상대적 민감도에 따른 영향을 먼저 파악한 이후, 본 해석을 실시하여 점진적 압밀진행에 따른 위치별 간극비 차이가 실제 압밀거동에 미치는 영향을 분석하였다.

4.1.1 압밀진행에 따른 전체 지반의 평균적 간극비 감소의 영향

그림 5에 압밀 진행에 따른 전체지반의 평균적 간극비 감소를 고려한 압밀도의 변화를 재하 하중 크기에 따라 구분하여 간극비 변화를 전혀 고려하지 않은 이론해와 함께 C_c/C_k 값에 따라서 분리, 도시하였다. 또한 간극비의 평균적 변화에 근거한 투수계수와 부피압축계수의 상대적 변화 비율 $\frac{k_h/k_{h0}}{m_v/m_{v0}}$, 즉 평균적 압밀계수의 변화비가 압밀시간에 따라 어떻게 나타나는지도 각 그림에 함께 도시하였다. 간극비 변화를 고려하지 않은 이론해와 비교할 때 C_c/C_k 값이 0.5 및 0.8인 경우에는

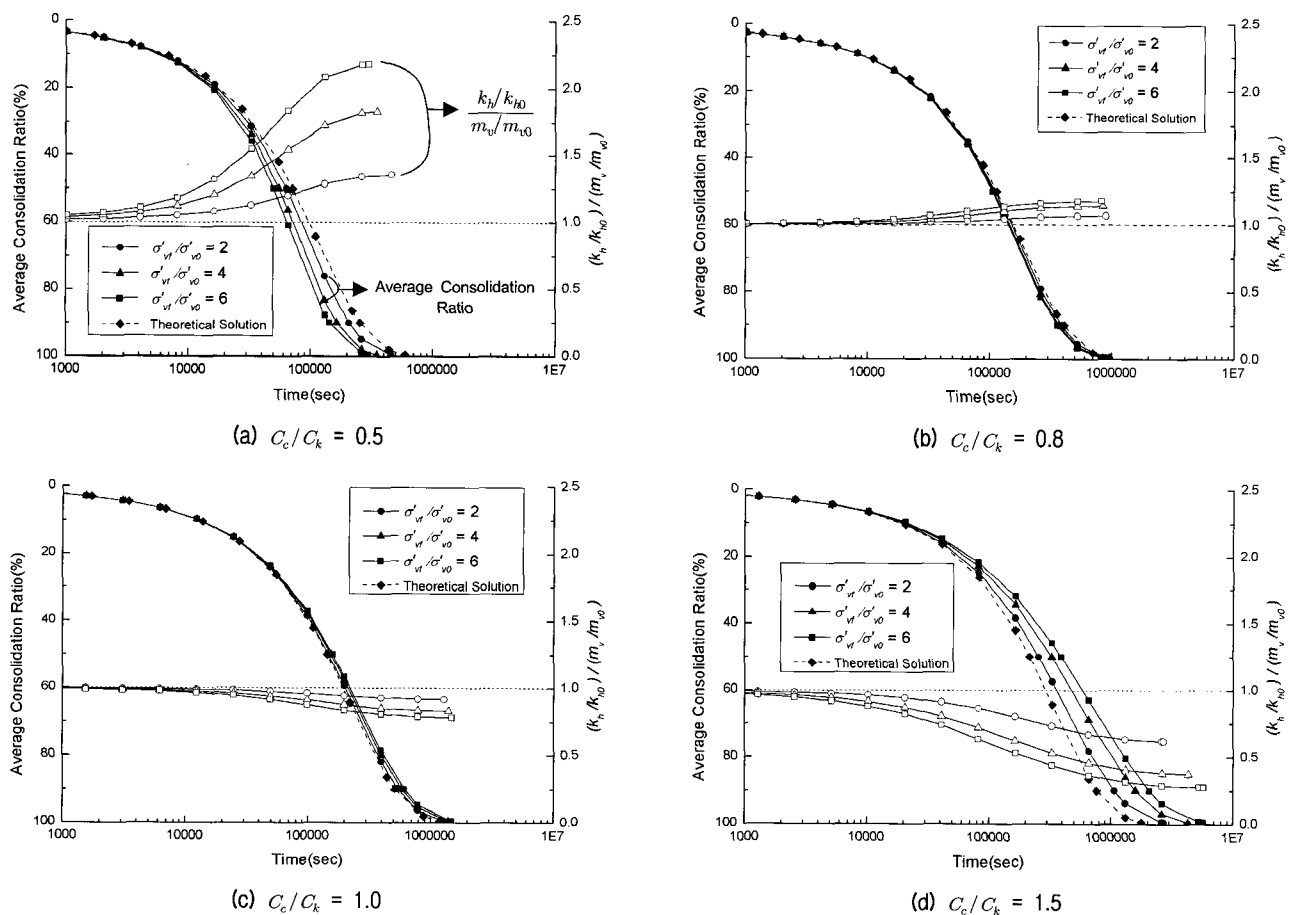


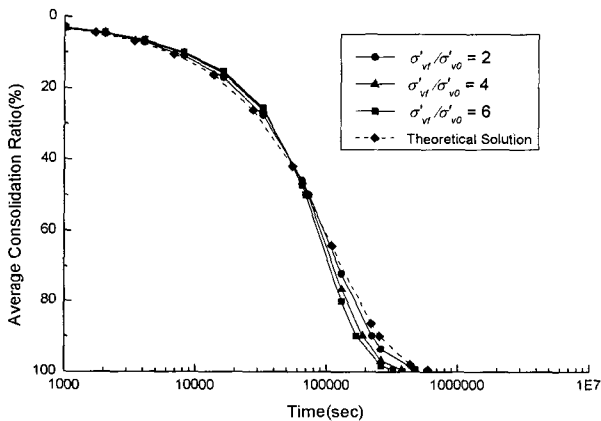
그림 5. 압밀진행에 따른 평균적 간극비 감소의 영향

압밀진행에 따라 $\frac{k_h/k_{h0}}{m_v/m_{v0}}$ 값이 증가하고 이는 압밀계수의 증가를 의미하므로 압밀진행에 따라 점차 압밀이 빠르게 진행된다. 이 때 하중재하비 증가 및 C_c/C_k 값의 감소는 $\frac{k_h/k_{h0}}{m_v/m_{v0}}$ 값을 더욱 크게 만들어 압밀축진을 더욱 심화시킨다. 반면 C_c/C_k 값이 1.0 및 1.5인 경우에는 압밀진행에 따라 $\frac{k_h/k_{h0}}{m_v/m_{v0}}$ 값이 점차 감소하며 그에 따라 압밀도 점차 지체된다. 이 때 하중재하비 증가 및 C_c/C_k 값의 증가는 $\frac{k_h/k_{h0}}{m_v/m_{v0}}$ 값을 더욱 작게 만들어 압밀지체를 더욱 심화시킨다. 정리하면, 간극비의 평균적 변화에 의한 압밀지체 혹은 압밀축진은 흙의 특성에 따라 압밀 중 발생하는 $\frac{k_h/k_{h0}}{m_v/m_{v0}}$ 값의 증감 여부에 따라 결정된다. 압밀 중 $\frac{k_h/k_{h0}}{m_v/m_{v0}}$ 값이 1 보다 큰 경우에는 압밀진행에 따라서 이론해에 비하여 압밀 시간이 단축되며, 하중재하비 증가 및 C_c/C_k 값의 감소는 압밀을 더욱 촉진시킨다. 압밀 중 $\frac{k_h/k_{h0}}{m_v/m_{v0}}$ 값이 1 보다 작은 경우에는 압밀진행에 따라 점차 압밀 시간이 증가하며, 하중재하비 증가 및

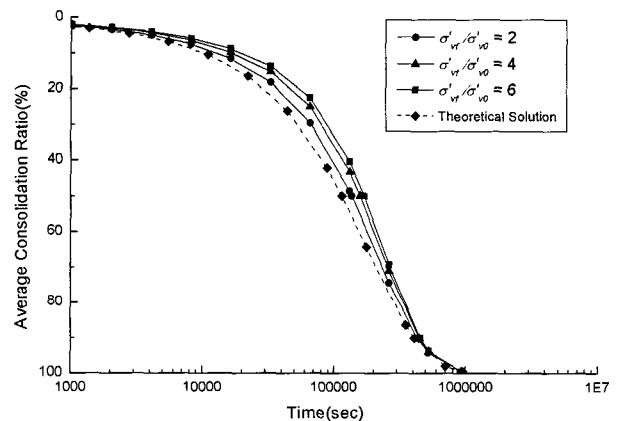
C_c/C_k 값의 증가는 압밀을 더욱 지체시킨다. 또한 간극비의 평균적 변화가 압밀거동에 미치는 이러한 영향은 간극비 값의 크기가 압밀 진행에 따라 계속 감소하기 때문에 압밀초기에는 매우 작다가 압밀진행에 따라서 그 영향이 점차 증가하는 것으로 나타난다.

4.1.2 배수면으로부터의 점진적 압밀진행에 따른 위치별 간극비 변화의 영향

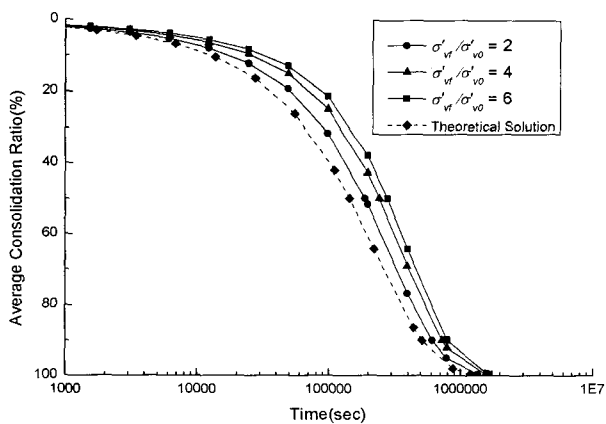
실제 지반의 압밀과정에서는 4.1.1절의 해석과 같이 전체 지반에서 평균적으로 간극비가 감소하는 것에 더하여 배수면으로부터 점진적으로 진행되는 압밀에 의하여 배수거리에 따른 위치별 간극비 차이가 발생한다. 그림 6에 압밀 진행에 따른 위치별 간극비 변화를 고려한 경우의 하중재하비에 따른 시간에 대한 압밀도 변화를 간극비 변화를 전혀 고려하지 않은 이론 해와 함께 C_c/C_k 값에 따라 구분하여 도시하였다. 간극비 변화를 고려하지 않은 이론 해와 비교할 때 C_c/C_k 값이 1.0 및 1.5인 경우에는 초기부터 압밀 지체가 뚜렷하게 발생하



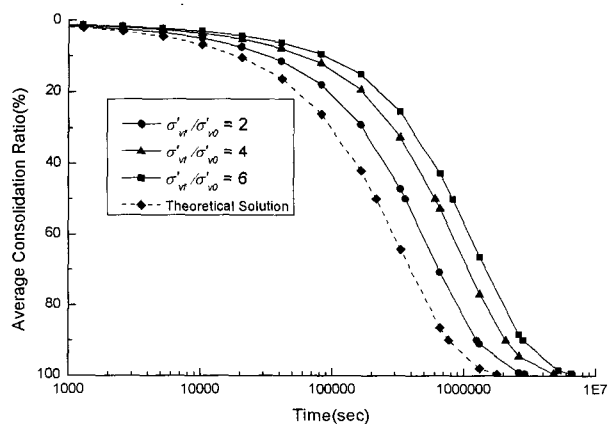
(a) $C_c/C_k = 0.5$



(b) $C_c/C_k = 0.8$



(c) $C_c/C_k = 1.0$



(d) $C_c/C_k = 1.5$

그림 6. 배수면으로부터의 점진적 압밀진행에 따른 위치별 간극비 변화의 영향

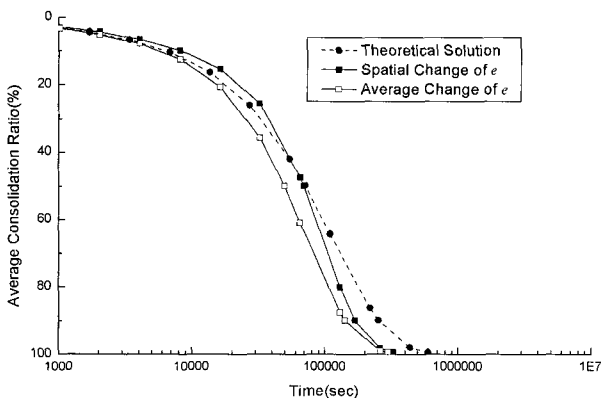
고, 완료 시에도 압밀이 크게 지체되며, C_c/C_k 값이 증가할수록 압밀이 더욱 지체됨을 알 수 있다. C_c/C_k 값이 0.8인 경우에도 초기에 압밀이 지체되지만 압밀완료 시간은 이론해와 거의 같다. 반면에 C_c/C_k 값이 0.5인 경우에는 초기에 압밀이 지체되다가 압밀도 42%부터 오히려 간극비 변화를 고려하지 않은 이론 해 보다 압밀이 빠르게 진행된다. 또한 C_c/C_k 값이 0.8, 1.0 그리고 1.5인 경우에는 하중재하비 증가에 따라 압밀이 지체되지만, C_c/C_k 값이 0.5인 경우에는 압밀 초기에 하중재하비 증가에 따라서 압밀이 느려지다가 압밀도 42% 이후에는 그와 반대로 하중재하비 증가에 따라서 압밀이 빠르게 진행된다. 결과적으로, 압밀진행에 따른 평균적 간극비 변화를 고려한 그림 5의 결과에 비하여 전체적으로 압밀 초, 중반에 압밀이 지체되는 경향을 보이고 있으며, 이는 점진적 압밀진행으로 인한 위치에 따른 간극비 차이가 압밀을 지체시키고 그 영향이 압밀 초, 중반에 지배적이라는 것을 의미한다.

압밀 중 평균적 간극비 변화로 인한 영향과 점진적 압밀로 인한 위치별 간극비 변화의 영향을 명확히 구분, 분석하기 위하여 가장 압밀이 촉진된 $C_c/C_k = 0.5$, $\sigma_{vf}'/\sigma_{v0}' = 6$ 과 가장 압밀이 지체된 $C_c/C_k = 1.5$, $\sigma_{vf}'/\sigma_{v0}' = 6$ 의 대표적 두 경우에 대하여 간극비 변화를 고려하지 않은 이론해, 평균적 간극비 변화를 고려한 해석, 그리고 위치별 간극비 변화를 고려한 해석 결과로 정리하여 그림

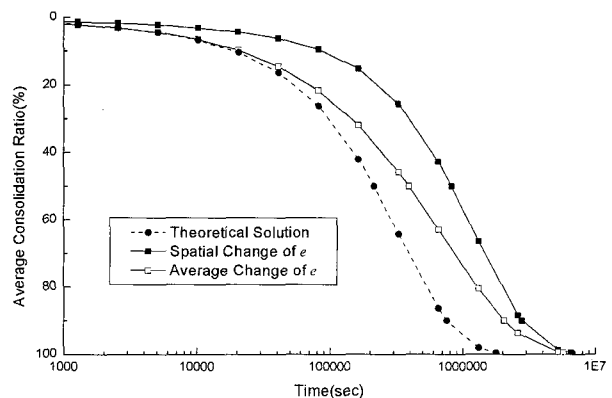
7에 도시하였다. 이 때 평균 압밀도 50% 및 90% 지점에서 간극비 변화가 고려되지 않은 이론해에 대한 압밀시간 비를 계산하여 다음 표 2와 같이 나타내었다. 표에서 압밀시간 비가 1보다 크다는 것은 압밀이 이론해에 비하여 지체되었다는 것을 뜻하며 압밀시간 비가 1보다 작은 것은 그 반대의 경우를 의미한다. 두 해석결과 모두 간극비의 평균적 변화를 고려했을 때보다 위치별 변화를 고려했을 때 압밀이 더 지체되며, 그 차이는 평균 압밀도 90%보다 50%에서 크게 나타나 위치별 간극비 차이로 인한 압밀지체의 영향이 압밀 종반보다 압밀 초, 중반에 더 크다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 그림 7(a)에서 압밀도 42%이전의 압밀초기에는 $\frac{k_h/k_{h0}}{m_v/m_{v0}}$ 값의 증가로 인한 압밀촉진보다 점진적 압밀진행에 따른 위치별 간극비 차이로 인한 압밀지체 영향이 더 크게 나타나서 압밀이 지체되고 그 이후 압밀이 진전됨에 따라 평균적 간극비 변화의 영향이 증가하고 위치별 간극비 영향이 감소하면서 압밀촉진 현상이 나타나고 있다. 또한, $\frac{k_h/k_{h0}}{m_v/m_{v0}}$ 값의 감소로 인한 압밀지체가 나타나는 그림 7(b)의 경우에 있어서는 위치별 간극비 차이로 인한 압밀지체가 중첩되어 압밀초기부터 압밀지체가 뚜렷이 나타나며 압밀 후반에도 $\frac{k_h/k_{h0}}{m_v/m_{v0}}$ 값의 지속적인 감소로 인한 압밀지체 영향이 더하여 저서 압밀 완료시에도 여전히 큰 압밀시간 증가를 나타낸다. 결론적으로 $\frac{k_h/k_{h0}}{m_v/m_{v0}}$

표 2. 이론해에 대한 압밀시간 비

	$C_c/C_k = 0.5, \sigma_{vf}'/\sigma_{v0}' = 6$		$C_c/C_k = 1.5, \sigma_{vf}'/\sigma_{v0}' = 6$	
	평균 압밀도 50%	평균 압밀도 90%	평균 압밀도 50%	평균 압밀도 90%
평균적 변화	0.70	0.56	1.82	2.71
위치별 변화	0.97	0.67	3.81	3.68



(a) $C_c/C_k = 0.5, \sigma_{vf}'/\sigma_{v0}' = 6$



(b) $C_c/C_k = 1.5, \sigma_{vf}'/\sigma_{v0}' = 6$

그림 7. 압밀 중 평균적 간극비 변화 및 위치별 간극비 변화가 압밀거동에 미치는 영향

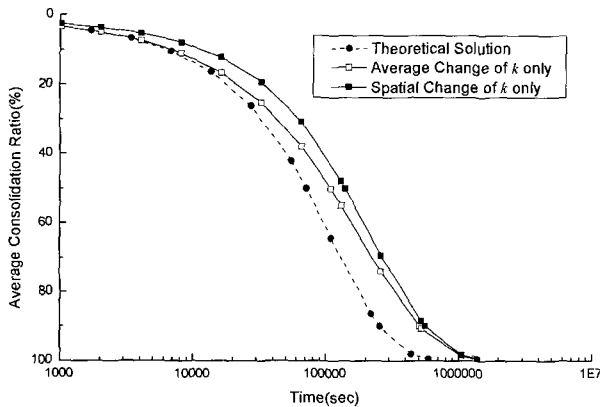
값이 1보다 커서 압밀이 촉진되던지, $\frac{k_n/k_{n0}}{m_v/m_{v0}}$ 값이 1보다 작아서 압밀이 지체되던지 상관없이 배수면으로부터의 점진적 압밀진행으로 인한 간극비의 위치별 차이는 항상 압밀을 지체시키며, 압밀 초, 중반에 그 영향이 지배적으로 나타난다. 이러한 경향성은 C_c/C_k 값이 0.8, 1.0인 경우, 그리고 재하하중비가 다른 모든 경우에도 동일하게 나타나며, 배수면으로부터의 점진적 압밀진행으로 인한 압밀지체가 비록 압밀 후반에는 그 영향이 줄어들지만 압밀완료시까지도 압밀을 지체시키는 주요한 원인이라고 판단된다.

4.1.3 점진적 압밀진행으로 인한 투수계수 및 부피압축계수 변화가 압밀거동에 미치는 영향

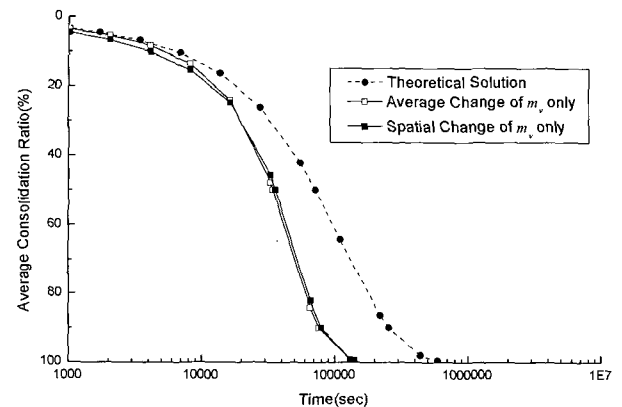
본 연구에서 개발된 해석 프로그램은 압밀해석 시 투수계수와 부피압축계수를 개별적으로 고려할 수 있으며, 또한 각각에 대하여 압밀과정에서의 평균적 변화 및 점진적 압밀진행에 따른 위치별, 차별적 변화를 고려할 수 있다. 이에 수행된 해석과 동일한 해석조건에 대하여

투수계수 및 부피압축계수의 변화를 독립적으로 고려하여 압밀지체에 미치는 각각의 영향을 파악하여 보았다. 4.1.2절에서와 동일하게 압밀이 가장 촉진된 $C_c/C_k = 0.5$, $\sigma_{vf}'/\sigma_{v0}' = 6$ 과 가장 압밀이 지체된 $C_c/C_k = 1.5$, $\sigma_{vf}'/\sigma_{v0}' = 6$ 의 대표적 두 경우에 대한 해석을 수행하였다. 해석 결과는 압밀 중 간극비 변화를 고려하지 않은 이론해와 함께, 압밀에 따른 투수계수의 평균적 변화 및 위치별 차별적 변화를 고려한 해석 그리고 압밀에 따른 부피압축계수의 평균적 변화 및 위치별 차별적 변화를 고려한 해석으로 정리하여 그림 8에 도시하였다.

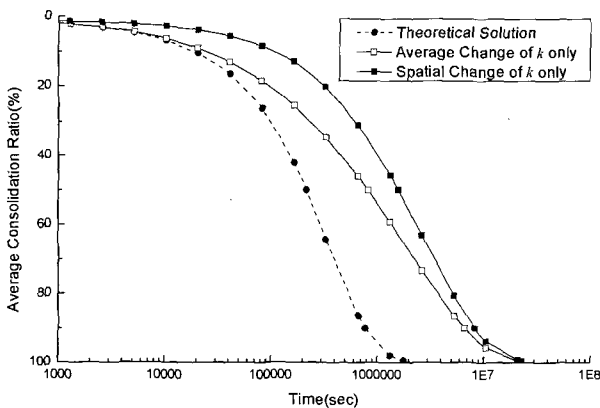
식 (2)를 통하여 예상되었던 바와 같이 압밀 중 투수계수의 변화는 압밀을 지체시키며 부피압축계수의 변화는 압밀을 촉진시킨다는 사실을 각각의 그래프에서 확인할 수 있다. 이 때 그림 8(b), (d)에서 압밀에 따른 부피압축계수의 평균적 변화를 고려한 경우와 위치별 차별적 변화를 고려한 경우는 모두 압밀진행에 따라 이론해에 대한 압밀시간의 차이가 점차 증가하며 두 해석간에 차이가 크지 않다. 그에 반하여, 그림 8(a), (c)에서



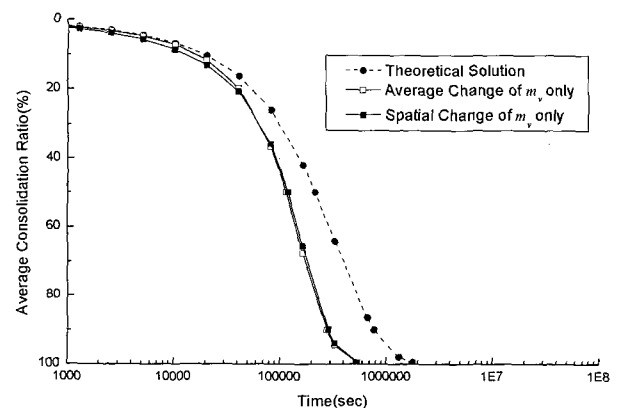
(a) $C_c/C_k = 0.5$, $\sigma_{vf}'/\sigma_{v0}' = 6$, 투수계수 변화만 고려



(b) $C_c/C_k = 0.5$, $\sigma_{vf}'/\sigma_{v0}' = 6$, 부피압축계수 변화만 고려



(c) $C_c/C_k = 1.5$, $\sigma_{vf}'/\sigma_{v0}' = 6$, 투수계수 변화만 고려



(d) $C_c/C_k = 1.5$, $\sigma_{vf}'/\sigma_{v0}' = 6$, 부피압축계수 변화만 고려

그림 8. 압밀에 따른 투수계수 및 부피압축계수의 변화가 압밀거동에 미치는 영향

압밀진행에 따른 투수계수의 평균적 변화를 고려하였을 때는 부피압축계수 변화를 고려했을 때와 마찬가지로 압밀진행에 따라 점차 이론해에 비하여 압밀지체 정도가 증가하지만, 위치별 차별적 변화를 고려하였을 때는 압밀초기부터 뚜렷한 압밀지체를 보이고 압밀중반 이후에는 평균적 변화를 고려한 해석결과와 압밀도의 차이가 점차로 줄어드는 경향을 보이고 있다. 즉, 4.1.2 절에서 나타난 점진적 압밀진행에 따른 위치별 간극비 차이로 인한 압밀지체 효과는 투수계수의 위치별 차이로 인한 것이며, 부피압축계수의 위치별 차이가 압밀거동에 미치는 영향은 상대적으로 매우 미약함을 알 수 있다.

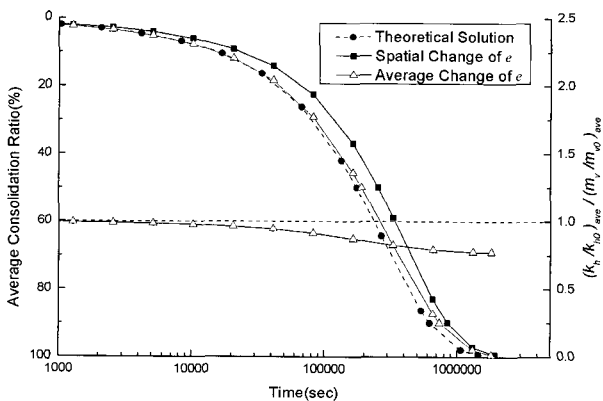
4.2 배수면으로부터 점진적인 압밀진행이 낙동강 하구 및 카올리나이트 점성토 지반의 압밀거동에 미치는 영향

압축성이 크고 고소성의 특성을 가지며 투수성이 비교적 작은 낙동강 하구 점성토 및 압축성이 작고 저소성의 특성을 가지며 비교적 큰 투수성을 갖는 재성형 카올리나이트 점성토 지반의 물성치를 이용한 해석을 수행하여, 상이한 지반조건을 갖는 실제 점성토 지반에 대한 해석프로그램의 적용성 및 위치 별 점진적 압밀진행이 실제 점성토 지반의 압밀거동에 미치는 영향에 대한 수치적 분석을 실시하였다.

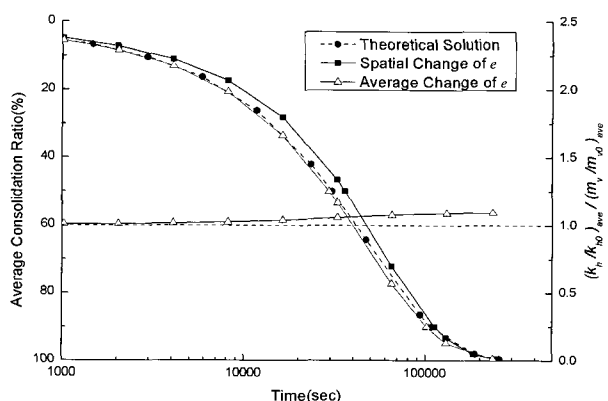
그림 9에 압밀 진행에 따른 평균적 간극비 변화 및 위치별, 차별적 간극비 변화를 고려한 경우의 해석결과를 간극비의 평균적 변화에 근거한 투수계수와 부피압축계수의 상대적 변화비율과 함께 압밀시간에 따라 도 시하였다.

낙동강 하구 점성토는 소성성이 크고($PI = 35.3\%$) C_c/C_k 비가 1.218로서 압밀진행에 따라 투수계수와 부피압축계수의 상대적 변화비율이 감소하는 특성을 나타내며 이론해에 비하여 압밀이 지체된다. $\frac{k_n/k_{n0}}{m_v/m_{v0}}$ 값은 1에서부터 압밀진행에 따라 점차 감소하여 압밀이 거의 완료된 평균압밀도 99.5%에 이르러 0.77이 되며, $\frac{k_n/k_{n0}}{m_v/m_{v0}}$ 값의 감소로 인한 압밀지체에 더하여 위치별 투수계수 차이에 의한 압밀지체로 인하여 압밀초기부터 압밀완료 시까지 매우 뚜렷한 압밀지체를 보인다. 그림 9(a)에서 간극비변화가 고려되지 않은 이론해에 대한 위치별 차별적 간극비가 고려된 해석에서의 압밀시간은 평균 압밀도 50%에서 1.45배, 90% 지점에서 1.37배, 압밀이 거의 완료된 99.5%에서 1.33배로 나타났다.

카올리나이트는 소성성이 작고($PI = 15.4\%$) C_c/C_k 비가 0.805로 압밀진행에 따라 $\frac{k_n/k_{n0}}{m_v/m_{v0}}$ 값이 점차 증가하여 평균압밀도 99.5%에서는 1.09가 된다. 따라서 평균적 간극비 변화만을 고려했을 때는 전체 압밀구간에서 압밀축진이 나타나지만, 위치별, 차별적 간극비 변화를 고려한 해석 결과는 대부분의 압밀시간에서 압밀이 지체되고 평균압밀도 90% 이후에 이르러서야 약간의 압밀축진을 나타낸다. 즉, 압밀 초, 중반에 지배적 영향을 미치며 압밀을 지체시키는 위치별 투수계수 차이로 인하여 대부분의 압밀과정에서는 압밀이 지체되다가 평균압밀도 90% 이후에 이르러서야 압밀 후반에 지배적 영향을 나타내는 투수계수와 부피압축계수의 상대적 변화비율의 영향에 의하여 약간의 압밀축진이 나타난다. 그림 9(b)에서 이론해에 대한 압밀시간은 평균 압밀도 50%에서 1.18배, 90% 지점에서 1.04배, 압밀이 거의 완료된 99.5%에서 0.97배로 나타났다.



(a) 낙동강 하구 점성토



(b) 재성형 카올리나이트

그림 9. 낙동강 하구 점성토 및 재성형 카올리나이트에 대한 압밀 해석

4.1.3절에서 이미 밝혀진 바와 같이 압밀 중 간극비 변화가 압밀거동에 미치는 영향은 전체지반의 평균적 간극비 변화와 점진적 압밀진행으로 인한 위치별 간극비 차이로 나누어 볼 수 있다. 이 때 점진적 압밀진행으로 인한 위치별 간극비 차이 그리고 그에 따른 투수계수의 위치별 차이는 항상 압밀을 지체시키며 압밀 초, 중반에 지배적인 영향을 발휘한다. 이러한 투수계수의 변화가 낙동강 하구 점성토에 대하여 얼마나 나타나는지, 그리고 그 위치별 차이는 얼마나 되는지를 다음의 추가 해석을 통하여 확인하였다. 그림 10과 11에 해석에 사용된 유한차분망의 두 점 및 각 점에서 압밀 진행과 더불어 간극비의 감소의 결과로 산정되어 해석에 반영된 투수계수 값들의 변화를 제시하였다. 점 A는 배수면에서 0.79cm, 점 B는 15.00cm 이격되어 있다. 압밀 초기부터

배수면에서 가까운 점 A의 투수계수는 감소하기 시작하지만, 점 B의 투수계수는 10,000초가 될 때까지 변화가 나타나지 않았다. 두 점의 투수계수 차이는 압밀 초기부터 증가하여 20,000초와 30,000초 사이에서 최대 1.9 배까지 나타났으며, 이후 감소하여 전체 지반의 압밀이 거의 완료된 2,000,000초 이후에는 거의 동일한 투수계수를 갖는다. 그림 9(a)에서 위치 별 간극비의 변화를 고려한 압밀도-시간의 관계를 평균 간극비의 경우와 비교하여 보면, 그림 11의 위치 별 투수계수의 차이에서 나타난 바와 같이 압밀 초기부터 압밀도의 차이가 발생하며, 최대 투수계수의 차이가 발생한 20,000초 경과 후 그 차이가 점점 심화되는 것으로 나타난다. 압밀도가 80%(압밀소요시간 대략 600,000초 경과 시) 이상에 도달하면서 두 점의 투수계수 차이가 급격히 감소하고, 압밀도의 차이도 감소하여 결국 압밀이 완료되어 가면서 차이가 구분되지 않게 된다. 따라서 배수면으로부터의 점진적 압밀진행에 따른 압밀지체가 거리 별 투수계수의 차이에서 비롯된다는 점을 쉽게 확인할 수 있다.

이상과 같은 해석결과로부터 낙동강 하구 점성토와 같이 소성성이 비교적 큰 점성토 지반에서는 이론해에 비하여 압밀 초기부터 확연히 압밀이 지체되고 압밀 완료시까지 매우 큰 압밀지체를 나타내며, 소성성이 작은 점성토 지반에서도 소성성이 지극히 작은 일부 지반을 제외하면 대부분의 저소성 지반에서 압밀 후반까지도 이론해에 비하여 압밀지체가 나타날 것으로 예상된다. 이러한 영향에 더하여 기존의 연구에서 압밀진행에 따라서 압밀을 지체시키는 것으로 나타나는 스미어, 통수저항 등을 동시에 고려하였을 때 간극비의 변화를 고려하지 않은 이론해와의 차이는 더욱 커질 수도 있어 간극비의 변화를 고려하지 않은 이론해만을 이용하여 지반의 압밀거동을 정확히 예측하기는 매우 어려울 것으로 판단된다. 한편, 실제 방사배수 압밀에서는 압밀에 따른 간극비의 위치 별 차이가 압밀 중뿐만 아니라 압밀 완료 후에도 여전히 존재한다는 결과가 여러 연구에서 실험과 수치 해석을 통해 제시된 바가 있다(Al-Tabbaa와 Muir Wood, 1991; Atkinson 등, 1985; Pyrah 등 1999). 따라서 실제 지반에서 압밀 중 투수계수의 위치 별 차이로 인하여 압밀이 지체되는 현상은 이 논문에서 제시한 것 보다 더욱 크게 나타날 것으로 예상되며, 차후 스미어 등 압밀거동에 영향을 주는 요인들과 연계하여 더욱 깊이 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

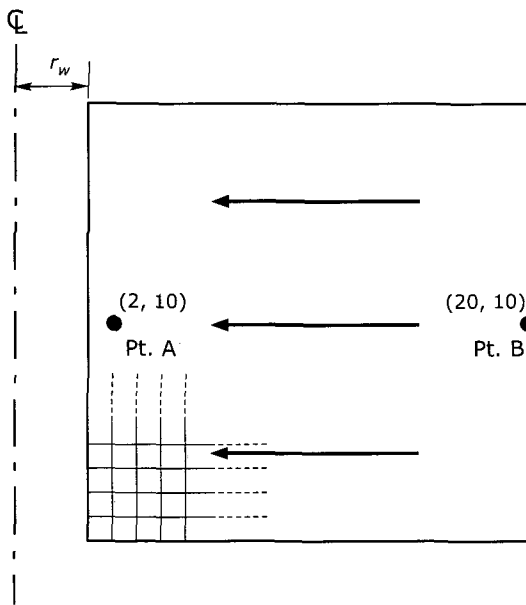


그림 10. 유한차분망 내의 두 점 A, B

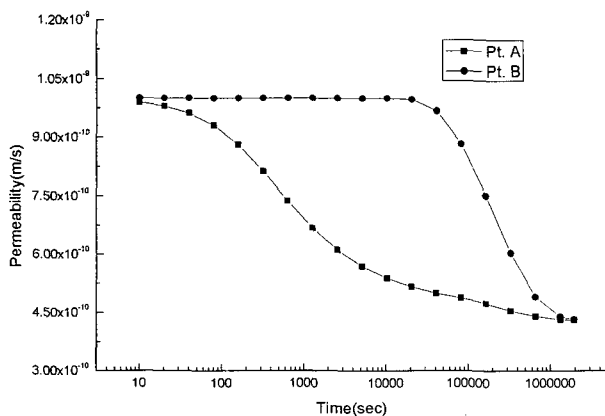


그림 11. 두 점 A, B에서 시간에 따른 투수계수 변화

5. 결론

배수면으로부터의 점진적 압밀 진행에 따라 위치 별 투수계수 및 부피압축계수의 변화를 고려할 수 있는 해석기법 및 유한차분해석 프로그램을 개발하였으며, 이를 이용하여 압밀에 따른 위치별 점진적 압밀 진행이 차후 압밀 거동에 미치는 영향을 고찰하기 위한 해석을 실시하였다. 간극비에 따른 투수계수 변화지수에 대한 압축지수 비(C_c/C_k)의 다양한 값을 적용하였으며, 연직 압축, 방사 내측 배수가 발생하는 모형 지반을 대상으로 초기 연직 유효응력의 2배, 4배, 6배의 연직압에 대한 해석을 수행하였다. 또한 실제 지반에서의 영향 정도를 파악하기 위하여 높은 압축성과 고소성, 낮은 투수성을 갖는 낙동강 하구 지역의 정규압밀 점성토 특성과 상대적으로 낮은 압축성, 저소성, 높은 투수성을 갖는 재성형 카올리나이트의 특성을 갖는 두 가지 지반에 대한 해석을 추가로 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 압밀에 따른 간극비 변화가 차후 압밀거동에 미치는 영향은 대상 지반 전체에 대한 간극비의 평균적 변화와 점진적 압밀진행에 따른 간극비의 위치별 차이에 의해 나타난다.
- (2) 압밀에 따른 간극비의 평균적 변화가 압밀거동에 미치는 영향은 간극비 변화에 따른 부피압축계수와 투수계수의 상대적 변화비율 즉, $\frac{k_h/k_{h0}}{m_v/m_{v0}}$ 값의 증감 여부에 따라 결정된다. $\frac{k_h/k_{h0}}{m_v/m_{v0}}$ 값이 압밀 과정에서 증가하면 압밀이 촉진되며, 이 때 하중재하비 증가 및 C_c/C_k 값의 감소는 압밀을 더욱 촉진시킨다. 반면 압밀 중 $\frac{k_h/k_{h0}}{m_v/m_{v0}}$ 값의 감소는 압밀을 지체시키며, 이 때 하중재하비 증가 및 C_c/C_k 값의 증가는 압밀을 더욱 지체시킨다. 간극비의 평균적 변화로 인한 압밀촉진 및 압밀지체는 압밀초기에 그 영향이 매우 작고 압밀진행에 따라 점차 증가하여 압밀 후반에 지배적인 영향을 나타낸다.
- (3) 배수면으로부터의 점진적 압밀진행으로 인한 간극비의 위치별 차이는 압밀을 지체시키며 그 영향은 압밀 초기에 크게 나타나고 중반 이후에 점차 감소한다. 또한 하중재하비의 증가는 압밀지체를 더욱 심화시킨다. 이 때 나타나는 압밀지체는 투수계수의 위치별 차이에서 대부분 비롯되며, 부피압축계

수의 위치별 차이의 영향은 매우 미약하다.

- (4) 소성성이 크고($PI = 35.3\%$) C_c/C_k 비가 1.218인 낙동강 하구 점성토에 대한 해석 결과, 압밀진행에 따른 $\frac{k_h/k_{h0}}{m_v/m_{v0}}$ 감소와 점진적 압밀 진행에 의한 두 가지 압밀지체 효과가 병발하므로, 압밀초기부터 압밀완료 시까지 매우 뚜렷한 압밀지체를 보이고 있으며, 압밀지체시간은 간극비 변화를 고려하지 않은 이론해에 비하여 평균압밀도 50%에서 1.45배, 90% 지점에서 1.37배, 압밀이 거의 완료된 99.5%에서 1.33배로 나타났다. 한편, 소성성이 작고($PI = 15.4\%$) C_c/C_k 비가 0.805인 재성형 카올리나이트 점토는 압밀진행에 따라 $\frac{k_h/k_{h0}}{m_v/m_{v0}}$ 값이 점차 증가하여 평균적 간극비 변화만을 고려했을 때는 전체 압밀구간에서 압밀촉진이 나타나지만, 점진적 압밀 진행을 고려하게 되면 압밀 초, 중반에 지배적으로 나타나는 압밀 지체 효과 때문에 대부분의 압밀과정에서 압밀이 지체되다가 평균압밀도 90% 이후에 이르러서야 약간의 압밀촉진이 나타났다. 이 때, 이론해에 대한 압밀시간은 평균 압밀도 50%에서 1.18배, 90% 지점에서 1.04배, 압밀이 거의 완료된 99.5%에서 0.97배로 나타났다.

기 호

e	: 간극비
e_0	: 초기 간극비
C_c	: 압축지수
C_k	: 투수계수 변화지수(Change of permeability index)
c_v	: 압밀계수
k	: 투수계수
k_0	: 초기 투수계수
k_a	: 겉보기 평균투수계수
k_e	: 등가투수계수
k_h	: 횡(방사)방향 투수계수
k_v	: 연직방향 투수계수
l_1, l_2	: 투수계수 k_1, k_2 를 갖는 층의 배수거리
m_v	: 부피압축계수
r	: 반경방향 좌표계
t	: 시간
u	: 간극수압
z	: 연직방향 좌표계

- γ_w : 물의 단위중량
- σ_v : 연직 전응력
- σ_v' : 연직 유효응력
- σ_{v0}' : 초기 연직유효응력

감사의 글

본 연구는 서울대학교 공학연구소의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 윤찬영, 장인성, 정충기 (2002), "일정변형률 압밀시험을 이용한 방사배수 조건하에서의 압밀해석", *한국지반공학회는논문집*, 제18권, 4호, pp.147-157.
2. Almeida, M. S. S., Santa Maria, P. E. L., Martins, I. S. M., Spotti, A. P., and Coelho, L. B. M. (2000), "Consolidation of a very soft clay with vertical drains", *Geotechnique*, Vol.50, No.6, pp.633-643.
3. Al-Tabbaa, A. and Muir Wood, D. (1991), "Horizontal drainage during consolidation : insights gained from analyses of a simple problem", *Geotechnique*, Vol.41, No.4, pp.571-585.
4. Atkinson, J. H., Evans, J. S., and Ho, E. W. L. (1985), "Non-uniformity of triaxial samples due to consolidation with radial drainage", *Geotechnique*, Vol.35, No.3, pp.353-355.
5. Barden, L. and Berry, P. L. (1965), "Consolidation of Normally Consolidated Clay", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.91, No.SM5, pp.15-45.
6. Barron, R. A. (1944), "The Influence of Drain Wells on the Consolidation of Fine-grained Soils", *Diss. Providence (R. I.) District, U.S. Engineering Office*.
7. Barron, R. A. (1948), "Consolidation of fine-grained soils by drain wells", *Transactions ASCE*, Vol.113, Paper No.2346, pp.718-742.
8. Bergado, D. T., Asakami, H., Alfaro, M. C., and Balasubramaniam, A. S. (1991), "Smear Effects of Vertical Drains on Soft Bangkok Clay", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.117, No.10, pp.1509-1530.
9. Berry, P. L. and Poskitt, T. J. (1972), "The Consolidation of Peat", *Geotechnique*, Vol.22, No.1, pp.27-52.
10. Berry, P. L. and Wilkinson, W. B. (1969), "The radial consolidation of clay soils", *Geotechnique*, Vol.19, No.2, pp.253-284.
11. Bo Myint Win., Bawajee, R., Chu, J., and Choa, V. (2000), "Investigation of smear zone around vertical drain", *3rd International Conference on Ground Improvement Techniques*, pp.109-114.
12. Davis, E. H. and Raymond, G. P. (1965), A Non-Linear Theory of Consolidation, *Geotechnique*, Vol.15, No.2, pp.161-173.
13. Gibson, R. E., England, G. L., and Hussey, M. J. L. (1967), "The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays", *Geotechnique*, Vol.17, No.3, pp.261-273.
14. Hansbo, S. (1981), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains", *10th ICSMFE*, Vol.3, pp.677-682.
15. Hart, E. G., Kondner, R. L., and boyer, W. C. (1958), "Analysis for Partially Penetrating Sand Drains", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.84, No.SM4, 1-15.
16. Hird, C. C. and Moseley, V. J. (2000), "Model study of seepage in smear zones around vertical drains in layered soil", *Geotechnique*, Vol.50, No.1, pp.89-97.
17. Indraratna, B. and Redana, I. W. (1998), "Laboratory Determination of Smear Zone due to Vertical Drain Installation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.124, No.2, pp.180-184.
18. Mesri, G. and Choi, Y. K. (1985), "Settlement Analysis of Embankments on Soft Clays", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.111, No.4, pp.441-464.
19. Mesri, G. and Rokhsar, A. (1974), "Theory of Consolidation for Clays", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol.100, No.GT8, pp.889-904.
20. Olson, R. E. (1977), "Consolidation Under Time Dependent Loading", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol.103, No.GT1, pp.55-60.
21. Onoue, A., Ting, N., Germain, J. T., and Whitman, V. (1992), "Permeability of Disturbed Zone Around Vertical Drains", *Applied Ground Improvement Techniques*, Vol.2, pp.163-174, Bangkok, Thailand.
22. Poskitt, T. J. (1969), "The Consolidation of Saturated Clay with Variable Permeability and Compressibility", *Geotechnique*, Vol.19, No.2, pp.234-252.
23. Pyrah, I. C., Smith, I. G. N., Hull, D., and Tanaka, Y. (1999) "Non-uniform consolidation around vertical drains installed in soft ground", *12th European Conference, Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure*, pp.1563-1569.
24. Sharma, J. S. and Xiao, D. (2000), "Characterization of a smear zone around vertical drains by large-scale laboratory tests", *Can. Geotech. J.*, Vol.37, pp.1265-1271.
25. Schiffman, R. L. (1958), "Consolidation of Soil Under Time-Dependent Loading and Varying Permeability", *Proceedings, Highway Research Board*, 37, pp.584-617.
26. Sridharan, A. and Prakash, K. (2002), "Permeability of Two-Layer Soils", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.25, No.4, pp.443-448.
27. Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P., and Leroueil. S. (1983), "The Permeability of Natural Soft Clays. Part II: Permeability Characteristics", *Can. Geotech. J.* Vol.20, pp.645-660.
28. Yoshikuni, H. and Nakanodo, H. (1974), "Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability", *Soils and Foundations*, Vol.14, No.2, pp.35-46.

(접수일자 2005. 2. 4, 심사완료일 2005. 8. 16)