

다양한 응력조건을 고려한 새로운 압밀계수 평가방법 New estimation method of the coefficient of consolidation for the various stress conditions

곽찬문¹⁾, Chan-Mun Kwak, 정영훈²⁾, Young-Hoon Jung,
김창엽³⁾, Chang-Youb Kim, 정충기⁴⁾, Choong-Ki Chung

¹⁾ 동부건설 토목사업부, The Civil Engineering Division of Dongbu Corporation

²⁾ 서울대학교 공학연구소 객원연구원, Researcher, Research Institute of Engineering Science, College of Engineering, Seoul National University

³⁾ 서울대학교 공학연구소 연수연구원, Researcher, Research Institute of Engineering Science, College of Engineering, Seoul National University

⁴⁾ 서울대학교 지구환경시스템 공학부 교수, Professor, School of Civil, Urban & Geotechnical Engineering, Seoul National University

SYNOPSIS : The coefficient of consolidation has been evaluated using the conventional oedometer tests based on the one-dimensional consolidation theory. In the field, however, the actual response of the soil will be subject to the three-dimensional condition during consolidation. In this research, a new estimation method of the coefficient of consolidation for the various stress-deformation conditions was proposed. The good agreement between the computed dissipation of pore pressure and the measured data confirms the usefulness and the applicability of the proposed method to predict the exact rate of consolidation.

Key words: Coefficient of consolidation, Stress-deformation conditions, Cross-anisotropic elasticity-based prediction technique

1. 서론

연약 점성토지반의 압밀계수는 대부분 Terzaghi(1923)의 1차원 압밀이론에 근거하여 표준압밀시험을 통해 평가되고 있다. 그러나 실제 현장의 조건이 3차원적인 경우, 1차원 변형조건하에서 수행되는 표준압밀시험은 현장의 응력-변형조건을 제대로 모사하지 못하는 문제점을 내포하고 있다. 따라서 실제 현장조건에 맞는 정확한 압밀계수의 평가를 위해서는 대상 지반의 투수 및 압축특성을 보다 구체적으로 고려할 필요가 있다.

본 연구에서는 현장의 다양한 응력-변형조건에 따른 지반의 투수특성 및 압축특성의 변화를 합리적으로 반영할 수 있는 새로운 형태의 압밀계수 평가방법을 제안하였다. 제안된 평가방법에서는 기존의 표준압밀시험과 함께 등방압밀시험을 실시하여 특정 응력상태에 대한 보다 정확한 체적압축계수를 결정하였다. 또한 투수계수는 간극비만의 함수로 표현될 수 있다는 기존의 연구를 토대로 압밀 중 실측한 간극비-투수계수 관계로부터 특정 간극비에 대한 투수계수를 구하였다. 제안된 방법을 통해 특정 응력조건에 대해 압밀계수를 예측하고, 이로부터 이론적으로 구한 간극수압 소산양상을 실측 자료와 비교하여 본 연구의 타당성을 검증하였다.

2. 이론적 배경

2.1 압밀계수의 평가

압밀계수 c_v 는 압밀 소요시간을 나타내는 지표이다. 압밀계수는 일반적으로 표준압밀시험 결과로부터 Casagrande의 root t 방법 또는 Taylor의 log t 방법을 이용하여 평가된다. 그러나 대개의 경우, 두 방법은 동일한 실험 데이터에 대해서도 서로 다른 압밀계수 값을 제시하는 것으로 알려져 있다(Duncan, 1994). 이러한 측면을 고려할 때 해석방법에 관계없이 현장의 응력-변형조건을 적절히 반영하는 정확한 압밀계수를 평가하기 위해서는, 압밀계수의 기본 정의에 따라 흙의 압축특성에 관계하는 체적압축계수 m_v 와 투수특성에 관계하는 투수계수 k 를 개별적으로 평가하고 이를 식 (1)에 대입하여 압밀계수를 평가하는 것이 가장 합리적이다 (Olson 1985).

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w} \frac{1+e}{a_v} = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (1)$$

2.2 응력-변형조건에 따른 투수계수의 평가

Al-Tabbaa와 Wood (1987)는 성형 카올리나이트 시료에 대한 표준압밀시험과정에서 각 하중단계별로 변수두 투수시험을 실시하여, 대상 시료의 투수계수가 과압밀비 등의 응력조건에 관계없이 간극비에 의해서만 결정됨을 실험적으로 확인한 바 있다. 본 연구에서는 이러한 기존의 연구결과를 바탕으로 현장의 다양한 응력-변형조건 각각에 대해 투수계수를 개별적으로 평가하는 대신 표준압밀시험과정에서 변수두 투수시험을 실시하여 대상지반의 간극비-투수계수 관계를 파악하고 이로부터 현장조건에 맞는 적절한 투수계수를 결정하는 방법을 채택하였다.

2.3 응력-변형조건에 따른 체적압축계수의 평가

비선형적 이방적 압축특성을 보이는 점성토지반의 체적압축계수는 현장의 응력-변형조건에 따라 매우 다양하게 변화한다. 이와 관련하여 Davis(1972)는 등방적 재료로 가정된 흙에서도 각 차원의 응력-변형조건에 따라 식 (1)의 체적압축계수 즉, 압밀계수가 다르게 정의될 수 있음을 밝힌 바 있다. 또한 Conte(1998)는 각각 직교이방탄성체와 등방탄성체로 가정된 점성토지반이 띠기초 하중을 받는 경우, 압밀침하량과 압밀속도의 차이가 발생할 수 있음을 유한요소 해석결과를 통해 밝힌 바 있다.

따라서 정확한 압밀계수의 평가를 위해서는 현장의 응력-변형조건에 맞는 적절한 체적압축계수의 평가가 필수적이다. 그러나 발생가능한 수많은 응력-변형조건 각각에 대해 개별적으로 압밀시험을 실시하여 체적압축계수를 평가하는 것은 현실적으로 불가능하다. 이러한 측면을 고려하여 본 연구에서는 김창엽(2004)이 제안한 압밀변형률 예측기법을 활용하여 최소한의 시험으로부터 다양한 응력-변형조건에 대응하는 압밀변형률을 예측하고 이로부터 체적압축계수를 결정하는 방법을 채택하였다.

일반적으로 점성토지반은 연직방향과 수평방향의 역학적 성질이 서로 다르고, 수평면 내에서는 방향에 관계없이 동일한 역학적 성질을 가진다. 본 연구에서 채택된 압밀변형률 예측기법은 이러한 점성토지반의 이방적인 거동특성을 합리적으로 반영하기 위해 직교이방 탄성체의 구성방정식으로부터 유도된 간단한 형태의 구성방정식을 이용하고 있다. 직교이방 탄성체의 일반적인 구성방정식은 체적 변화에 기여하지 않는 전단응력-전단변형률 관계를 제외하면 축대칭조건 하에서 식 (2)와 같이 단순화될 수 있다. 이와 같이 단순화된 구성방정식에서 응력-변형률관계를 정의하는 4가지 매개변수 A, B, C, D 는 서로 다른 유효응력증분비 $[K_I^* = (\Delta\sigma'_h)_I / (\Delta\sigma'_v)_I, K_{II}^* = (\Delta\sigma'_h)_{II} / (\Delta\sigma'_v)_{II}]$ 를 가지는 두 가지 응력조합 $[(\Delta\sigma'_v)_I, (\Delta\sigma'_h)_I]$ & $[(\Delta\sigma'_v)_{II}, (\Delta\sigma'_h)_{II}]$ 과 이에 대응하는 연직방향 및 횡방향 변형률 $[(\epsilon_v)_I, (\epsilon_h)_I]$ & $[(\epsilon_v)_{II}, (\epsilon_h)_{II}]$ 을 입력

변수로 선택하여 다음의 식 (3)에 대입함으로써 결정할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_h & -\nu_{hh}/E_h & -\nu_{vh}/E_v \\ -\nu_{hh}/E_h & 1/E_h & -\nu_{vh}/E_v \\ -\nu_{hv}/E_h & -\nu_{hv}/E_h & 1/E_v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\sigma'_x \\ \Delta\sigma'_y \\ \Delta\sigma'_z \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \epsilon_v \\ \epsilon_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\sigma'_v \\ \Delta\sigma'_h \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서, E_v =연직방향의 탄성계수, E_h =수평방향의 탄성계수, ν_{hh} =수평면에서의 포아송비, ν_{vh} =연직방향의 응력에 의해 발생한 수평면의 변형과 관계된 포아송비, ν_{hv} =수평방향의 응력에 의해 발생한 연직 방향의 변형과 관계된 포아송비, $A=1/E_v$, $B=-2\nu_{hv}/E_h$, $C=-2\nu_{vh}/E_v$, $D=(1-\nu_{hh}/E_h)$

$$\begin{pmatrix} (\epsilon_v)_I \\ (\epsilon_h)_I \\ (\epsilon_v)_{II} \\ (\epsilon_h)_{II} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B & 0 & 0 \\ C & D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A & B \\ 0 & 0 & C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\Delta\sigma'_v)_I \\ (\Delta\sigma'_h)_I \\ (\Delta\sigma'_v)_{II} \\ (\Delta\sigma'_h)_{II} \end{pmatrix} \text{ or } \begin{pmatrix} \frac{3}{1+2K_I}(\Delta\sigma'_m)_I \\ \frac{3K_I}{1+2K_I}(\Delta\sigma'_m)_I \\ \frac{3}{1+2K_{II}}(\Delta\sigma'_m)_{II} \\ \frac{3K_{II}}{1+2K_{II}}(\Delta\sigma'_m)_{II} \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서, $\Delta\sigma'_m$:평균유효응력증분= $(\Delta\sigma'_v + 2\Delta\sigma'_h)/3$, K^* :유효응력증분비= $\Delta\sigma'_h/\Delta\sigma'_v$

채택된 압밀변형률 예측기법은 이와 같이 단순화된 구성방정식과 매개변수 결정방법을 근간으로 하고 있으며, 개념적으로 다음과 같은 과정을 따른다. 다양한 응력-변형조건 각각에 대해 개별적으로 압밀시험을 수행하는 대신, 서로 다른 유효응력증분비 즉 압밀응력비를 가지는 두 가지 조건에 대해서만 압밀시험을 수행한다. (예를 들어, $K^*=1$ 인 등방압밀시험과 $K^*=K^*_0$ 인 표준압밀시험) 이후 특정 압밀조건($\Delta\sigma'_v$, $\Delta\sigma'_h$)에 대응하는 압밀변형률(ϵ_{vc} , ϵ_{hc})은 수행된 두 가지 압밀시험의 결과로부터 식 (3)에 필요한 입력변수들을 선정하여 매개변수들을 결정한 다음 최종적으로 다음의 식 (4)을 이용하여 예측하게 된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{vc} &= A \times \Delta\sigma'_v + B \times \Delta\sigma'_h \\ \epsilon_{vc} &= C \times \Delta\sigma'_v + D \times \Delta\sigma'_h \end{aligned} \quad (4)$$

김창엽(2004)은 이와 같은 개념적 예측절차와 더불어 흙의 비선형적인 거동을 합리적으로 반영하기 위해 동일 변형에너지 밀도를 기준으로 하는 반복적인 입력변수 선정과정을 함께 고안하였다. 그리고 이들을 종합하여 실제 압밀변형률 예측에 활용가능 하도록 구성된 압밀변형률 예측순서도를 제시하였다.

3. 새로운 압밀계수 평가방법

2절의 내용들을 바탕으로 본 연구에서 제안하고 있는 압밀계수 평가방법은 다음의 그림 1과 같이 요약할 수 있다. 제안된 압밀계수 평가방법에서는 일반적으로 수행되는 표준압밀시험과 함께 삼축시험장비를 이용한 등방압밀시험을 실시하며, 표준압밀시험과정에서는 각 하중단계별로 변수두 투수시험을 추가로 실시하여 대상지반의 간극비-투수계수 관계를 파악한다. 다음으로 압밀계수를 구하고자 하는 현장의 응력-변형조건을 파악하고 이에 대응하는 체적압축계수와 투수계수를 결정한다. 이때 체적압축계수 평가에는 2절에서 설명한 압밀변형률 예측기법이 활용되며, 투수계수 평가에는 표준압밀시험 중의 변수두 투수시험을 통해 파악

된 간극비-투수계수 관계가 활용된다. 최종적으로 압밀계수는 평가된 체적압축계수와 투수계수를 식(1)에 대입하여 평가한다.

STEP 1
(a) 표준압밀시험 및 등방압밀시험 수행: 체적압축계수 결정을 변형률 산정을 위한 기본 자료 제시
(b) 표준압밀시험 중의 변수두 투수시험: 간극비-투수계수 관계 파악
STEP 2
현장지반의 응력-변형조건 파악
STEP 3
(a) 직교이방탄성론에 근거한 예측기법을 이용하여 체적압축계수(m_v) 평가
(b) 간극비-투수계수 관계를 이용하여 투수계수(k) 평가
STEP 4
평가된 m_v 와 k 를 Terzaghi의 압밀계수 식 $c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v}$ 에 대입하여 압밀계수 평가

그림 1. 다양한 응력-변형조건을 고려한 새로운 압밀계수 평가방법

4. 실험계획

본 연구에서는 제안된 압밀계수 평가방법의 검증을 위해 성형 카올리나이트 시료를 대상으로 표준압밀시험을 포함한 일련의 압밀시험을 수행하였다.

4.1 사용시료

사용 시료는 초기 함수비 100%의 카올리나이트 슬러리를 대형 1차원 시료성형기(직경 350mm, 높이 600mm) 내에서 160kPa의 연직 압밀압으로 압밀하여 제작하였다. 사용된 카올리나이트 점성토의 기본적인 물성치는 다음의 표 1에 제시한 바와 같다.

표 1. 사용시료의 기본 물성치

사용시료	소성한계	액성한계	소성지수	비중	200체 통과율	통일분류법
카올리나이트	33(%)	49.4(%)	16.4(%)	2.63	98%	CL

4.2 압밀시험

수행된 각 압밀시험의 조건은 다음의 표 2에 요약한 바와 같다. ASTM D 2435 규정에 따라 수행된 표준압밀시험(STD)에서는 간극비-투수계수 관계의 파악을 위해 각 하중단계 별로 그림 2에 제시된 시험장치를 이용하여 변수두 투수시험을 함께 실시하였다. 투수계수의 간극비 의존성을 확인하기 위하여 수행된 추가적인 일정변형률 압밀시험(CRS)에서는 동일한 배수방향에 대해 주응력 방향을 달리하여 압밀시험을 실시하였다. 즉, 그림 3에 제시된 바와 같이 수직방향으로 트리밍된 시료에 대해서는 방사외측배수조건으로 시험을 실시하고, 횡방향으로 트리밍된 시료에 대해서는 수직배수조건으로 시험을 수행함으로써, 동일한 배수방향(횡방향)에 대해 주응력의 방향을 바꾸어 가면서 투수계수를 평가하였다. 일정변형률 압밀시험을 통한 투수계수 평가에는 Moriwaki 등(2003)과 윤찬영(2000)이 제안한 방법이 이용되었다. 삼축시험장비를 이용한 등방압밀시험(IC)과 이방압밀시험(AC)은 250kPa의 연직유효응력으로 초기 K_0 압밀된 시료에 대해 연직상향 배수 조건하에서 총 160kPa의 연직응력증분($\Delta\sigma'_v$)을 4단계에 걸쳐 재하하는 방식으로 수행되었으며, 시료 하부

에서는 간극수압을 측정하였다. 등방압밀시험에서 파악된 시료의 압축특성은 표준압밀시험의 결과와 함께 체적압축계수 평가를 위한 입력자료로 이용되며, $K^*=0.75$ 에 대한 이방압밀시험의 결과는 제안된 압밀계수 평가방법의 타당성을 직접적으로 검증하기 위해 이용된다.

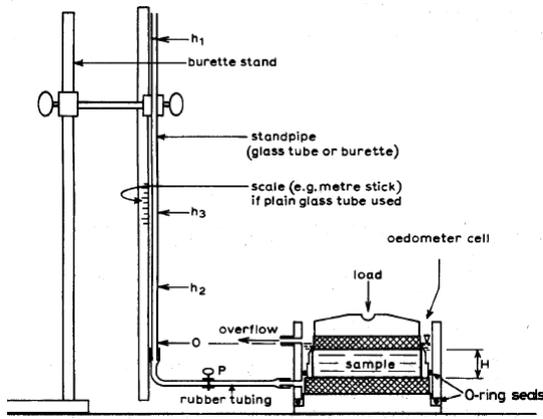


그림 2. 변수두 투수시험

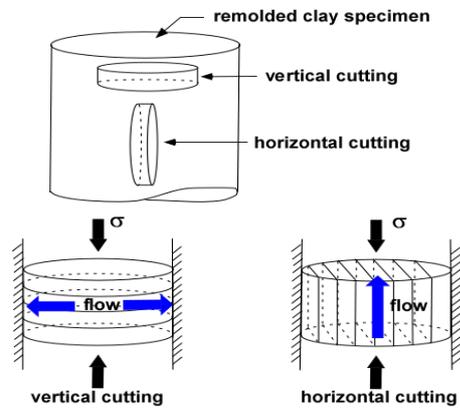


그림 3. 일정변형률 압밀시험시험

표 2. 압밀시험조건

시험구분	σ'_{v0} (kPa)	$\Delta\sigma'_v$ (kPa)	$\Delta\sigma'_h$ (kPa)	응력증분비, K $\Delta\sigma'_h / \Delta\sigma'_v$
STD(표준압밀시험)	ASTM D 2435 (하중단계 별로 변수두 투수시험 수행)			
IC (삼축시험기를 이용한 등방압밀시험)	250 (Ko state)	40	40	1.0
		80	80	
		120	120	
		160	160	
AC (삼축시험기를 이용한 이방압밀시험)	250 (Ko state)	40	30	0.75
		80	60	
		120	90	
		160	120	
CRS_vertical cutting	변형률 속도: 5%/hr, 배수방향: 방사외측			
CRS_vertical cutting	변형률 속도: 5%/hr, 배수방향: 연직배수			

5. 시험결과 및 분석

5.1 투수계수의 간극비 의존성

그림 4에 제시한 바와 같이, 일정변형률 압밀시험을 통해 평가된 투수계수는 주응력 방향에 관계없이 주어진 간극비에 대해서는 거의 동일하게 나타났다. 즉, 특정 배수방향(횡방향)의 투수계수는 응력의 조건에 관계없이 간극비만의 함수[식 (5)]로 나타났다. 또한 그림 5에 제시된 바와 같이, 표준압밀시험 중의 변수두 투수시험을 통해 평가된 연직방향 투수계수 역시 과압밀비에 관계없이 간극비만의 함수[식 (6)]로 나타났다. 이러한 투수계수의 간극비 의존성은 Al-Tabbaa와 Wood (1987)의 기존 연구결과와도 매우 잘 일치하는 것이다. 따라서 다양한 응력-변형조건에 대응하는 점성토지반의 투수계수는 본 연구에서 제안된 바와 같이 표준압밀시험과정 중의 변수두 투수시험 결과 즉, 식 (6)과 같은 간극비-투수계수 관계로부터 결정될 수 있을 것으로 판단된다.

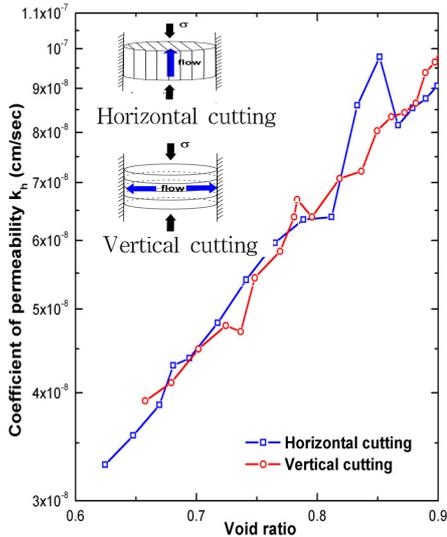


그림 4. 간극비-투수계수 관계 (일정변형률 압밀시험결과)

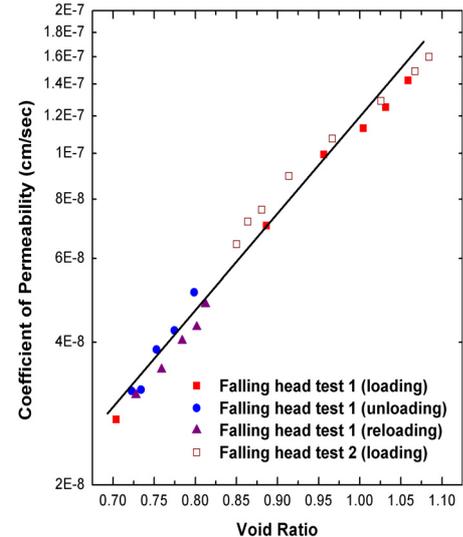


그림 5. 간극비-투수계수 관계 (변수두 투수시험결과)

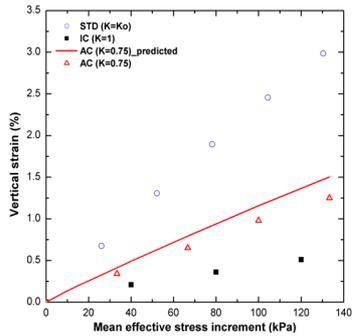
간극비-수평방향 투수계수 관계식: $k_h = 3.0 \times 10^{-9} \times 2.718^{3.86e} \text{ cm/sec}$ (5)

간극비-수직방향 투수계수 관계식: $k_v = 8.85 \times 10^{-10} \times 2.718^{4.9e} \text{ cm/sec}$ (6)

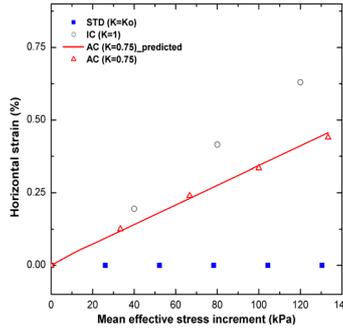
5.2 압밀변형률 예측기법의 타당성

그림 6의 (a)와 (b)는 본 연구에서 수행된 압밀시험의 결과를 평균 압밀응력증분에 대한 연직 및 횡방향 압밀변형률의 관계로 제시하고 있다. 그림에서 실선으로 표시된 결과는 표준압밀시험과 등방압밀시험의 결과를 입력값으로 하여 2.3절의 예측기법을 통해 예측된 이방압밀조건 ($K^*=0.75$)의 변형거동이며, 그림 6의 (c)는 이를 바탕으로 예측된 이방압밀조건의 체적압축계수와 실측된 체적압축계수의 비를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 예측된 압밀변형률과 체적압축계수는 측정값과 10%이내의 근소한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 본 연구에서 채택하고 있는 압밀변형률 예측기법의 타당성을 보여 준다. 즉, 2.3절의 예측기법을 채택함으로써 다양한 응력-변형조건에 대응하는 체적압축계수를 표준압밀시험과 등방압밀시험의 결과만으로 합리적으로 예측할 수 있음을 보여 준다.

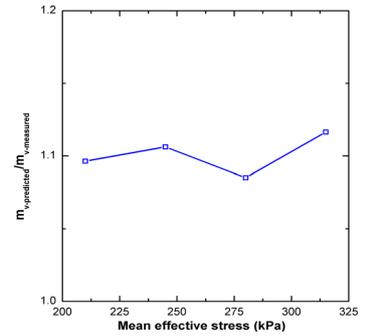
다만, 10%이내의 근소한 차이가 나타나는 이유는 다음과 같이 판단된다. 압밀변형률의 예측기법을 위한 압밀시험의 결과가 연속적인 응력제어방식의 응력경로시험이 아닌 일반적으로 실험실에서 수행할 수 있는 단계재하 시험이었고, 표준압밀시험의 경우 K_0 의 값을 가정하여 횡 방향 응력을 평가하였다. 또한, 예측된 이방압밀시험 ($K^*=0.75$)의 경우 비배수 재하 시 점성토의 구조가 바뀌지 않는다는 가정 하에서 예측하였기 때문이다.



(a) 수직 압밀변형률



(b) 수평 압밀변형률



(c) 체적압축계수 ($K^*=0.75$)

그림 6. 압밀변형률과 체적압축계수

5.3 제안된 압밀계수 평가방법의 검증

식 (6)과 그림 6에 제시된 대상 시료의 투수특성과 압축특성을 바탕으로 그림 1의 절차에 따라 예측된 이방 압밀조건시험 ($K^*=0.75$)의 압밀계수는 다음의 표 3에 제시한 바와 같다. 예측된 압밀계수의 타당성은 이를 이용하여 이론적으로 구한 시료하부의 과잉간극수압 소산양상을 실제 측정된 과잉간극수압의 소산양상과 비교하는 방식으로 검증되었다. 즉, 그림 7에 제시된 바와 같이 예측된 압밀계수에 대응하는 이론적인 소산양상이 실측된 소산양상과 모든 경우 매우 잘 일치함을 보임으로써 제안된 압밀계수 평가방법의 타당성을 실험적으로 확인하였다.

표 3. 예측된 압밀계수 ($K^*=0.75$)

$\Delta\sigma'_v$ (kPa)	$\Delta\sigma'_h$ (kPa)	$\varepsilon_{v-predicted}$ (%)	$\varepsilon_{h-predicted}$ (%)	$m_{v-predicted}$ (cm ² /N)	$k_{v-average}$ (cm/sec)	$C_{v-predicted}$ (cm ² /sec)
40	30	0.41	0.12	1.96×10^{-2}	1.46×10^{-7}	7.44×10^{-2}
80	60	0.79	0.23	1.85×10^{-2}	1.36×10^{-7}	7.36×10^{-2}
120	90	1.16	0.34	1.81×10^{-2}	1.28×10^{-7}	7.05×10^{-2}
160	120	1.50	0.46	1.77×10^{-2}	1.20×10^{-7}	6.77×10^{-2}

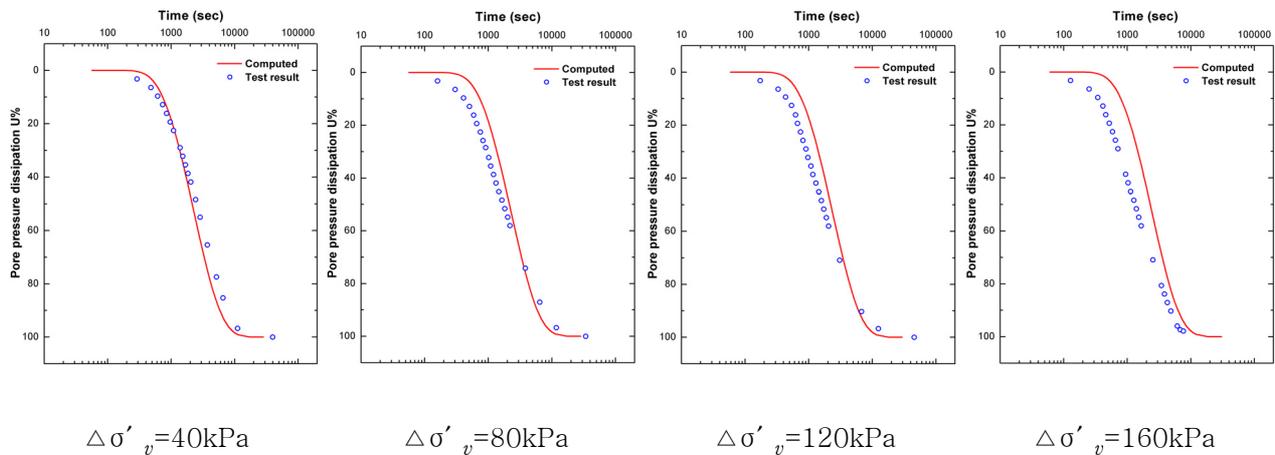


그림 7. 시료하부의 과잉간극수압 소산양상 ($K^*=0.75$)

6. 결론

본 연구에서는 현장의 실제 응력-변형조건을 합리적으로 반영하는 새로운 형태의 압밀계수 평가 방법을 제안하였다. 제안된 압밀계수 평가방법은 현장조건에 맞는 투수계수와 체적압축계수를 개별적으로 평가한 후, 이를 Terzaghi의 압밀계수 식에 대입하여 압밀계수를 평가하는 절차를 따른다. 이러한 평가과정에서 체적압축계수는 등방압밀시험과 표준압밀시험의 결과를 이용하여 압밀변형률 예측기법을 통해 결정되며, 투수계수는 표준압밀시험 중의 변수두 투수시험을 통해 파악된 간극비-투수계수 관계로부터 결정된다.

제안된 압밀계수 평가방법의 타당성은 성형 카올리나이트 시료에 대한 일련의 압밀시험 결과로부터 검증되었다. 먼저 특정 배수방향의 투수계수가 간극비만의 함수임을 실험적으로 확인하였으며, 채택된 압밀변형률 예측기법을 적용하여 평가된 체적압축계수가 실측값과 큰 차이를 보이지 않음을 확인하였다. 또한 예측된 압밀계수에 대응하는 이론적인 과잉간극수압 소산양상이 실측된 과잉간극수압 소산양상과 매우 잘 일치함을 보임으로써 제안된 압밀계수 평가방법의 신뢰성을 명확히 확인하였다.

제안된 압밀계수 평가방법의 가장 큰 장점은 일반적으로 실험실 내에서 수행 가능한 표준압밀시험과 등방압밀시험의 결과만으로 다양한 응력-변형조건에 대응하는 압밀계수를 합리적으로 평가할 수 있다는 점이다. 제안된 평가방법은 이와 같은 간편성과 합리성으로 인해 향후 연약지반 설계, 특히 압밀시간 추정에 있어 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김창엽(2004), 포화 점성토지반 침하량의 합리적 평가를 위한 새로운 응력경로법 적용, 박사학위논문, 서울대학교, pp. 15-22
2. 윤찬영(2000), 일정 변형률 시험을 이용한 방사방향배수의 압밀 거동 해석, 석사학위논문, 서울대학교, pp. 11-16
3. Al-Tabbaa, A. and Wood, D.M. (1987), "Some measurements of the permeability of kaolin", *Geotechnique*, Vol. 37, No. 4, pp. 499-503
4. Conte, E.(1998), "Consolidation of anisotropic soil deposits", *Soils and Foundations*, Vol. 38, No. 4, pp. 227-237
5. Davis, E.H. and Poulos, H.G.(1972), "Rate of settlement under two- and three-dimensional conditions", *Geotechnique*, 22, No. 1, pp.95-114.
6. Michael Duncan, J. and Fellow (1993), "LIMITATIONS OF CONVENTIONAL ANALYSIS OF CONSOLIDATION SETTLEMENT", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 119, No. 9, pp. 1346-1350
7. Olson, R.E. (1986), "State of the art: Consolidation Testing", Consolidation of Soil: Testing and Evaluation, ASTM STP 892, R. N. Yong and F. C. Townsend, Eds., *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA, PP. 7-70
8. Takeo Moriwaki, Ken Umehara(2003), "Method for Determining the Coefficient of Permeability of clays", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 26, No. 1, pp. 1-2