

포화 점성토지반 침하량의 합리적 평가를 위한 실용적인 응력경로법 적용방법 : Part I (특성변형거동의 평가와 활용)

A Practical Approach of Stress Path Method for Rational Settlement Estimation of Saturated Clay Deposits : Part I (Evaluation and Use of Characteristic Deformation Behaviors)

김 창 엽¹ Kim, Chang-Youb
정 충 기² Chung, Choong-Ki

Abstract

In this paper, a conceptual approach of the stress path method was newly proposed for a rational estimation of settlements of saturated clay deposits. In the proposed approach, settlement-related characteristic deformation behaviors of a specific clay deposit, which can cover all probable stress changes expected in the field, are experimentally evaluated in advance. Then settlements of various structures constructed on the deposit are easily estimated with only the characteristic deformation behaviors and without any additional experimental effort. In Part I of this paper, in order to provide practicality to the new conceptual approach, we developed a detailed procedure which is capable of evaluating characteristic deformation behaviors of a saturated clay deposit with only a limited number of tests and easily predicting deformations under a given stress change using the characteristic deformation behaviors. The applicability of the developed procedure was clearly shown by presenting an actual application example.

요 지

본 연구에서는 포화 점성토지반 침하량의 합리적인 평가를 위한 새로운 개념의 응력경로법 적용방법을 제안하였다. 제안된 적용방법은 특정 점성토지반에 대해 구조물 침하와 관련하여 현장에서 나타날 수 있는 모든 응력변화 조건을 포괄하는 특성변형거동을 실험적으로 선행하여 평가한 다음, 이를 이용하여 일체의 추가적인 시험없이 발생가능한 다양한 현장조건에 대해 손쉽게 침하량을 평가하는 방법이다. 본 연구의 Part I에서는 이러한 새로운 침하량 평가개념의 실용화와 관련하여 포화 점성토지반의 침하관련 특성변형거동을 최소한의 시험만으로 효율적으로 평가하고 이를 바탕으로 임의의 응력변화 조건에 대해 손쉽게 변형거동을 예측하는 구체적인 방법을 개발하였으며, 그 적용성을 실제 사례를 통해 명확히 확인하였다.

Keywords : Characteristic deformation behaviors, Saturated clay deposit, Settlement, Stress path method

1. 서 론

공학적으로 불리한 연약 점성토지반상에 구조물을

시공하는 경우, 하부지반의 과도한 침하는 구조물의 외관을 해치고 사용성을 저하시키며, 특히 구조물의 안정성 자체에도 심각한 손상을 미칠 수 있다. 따라서

¹ 정회원, 한국해양연구원 연안·항만공학연구본부 박사후 연구원 (Member, Post Doc., Coastal Engrg. and Harbour Research Division, Korean Ocean Research and Development Institute, macy2000@snu.ac.kr)

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

해당 구조물들의 시공 시에는 침하량을 허용수준 이내로 유지하는 것이 필수적이며, 이를 위해서는 설계단계에서 하부 점성토지반의 침하량을 정확히 평가하는 것이 무엇보다 중요하다.

이방적이고 소성적인 거동을 보이는 점성토지반의 침하량을 정확히 평가하기 위해서는 구조물 건설에 따라 현장 지반이 경험하게 되는 실제 응력변화와 변형양상을 침하량 평가과정에 합리적으로 반영해야만 한다. 이러한 관점에서 볼 때, 현재 널리 이용되고 있는 표준 압밀시험에 근거하는 등의 기존 침하량 평가방법들은 현장조건을 단순화하는 여러 가지 가정조건으로 인해 상당한 평가오차를 유발할 가능성이 있다. 예를 들어, 도로성토, 건물기초 등과 같이 유한한 면적에 하중이 재하되어 실제 지반이 횡방향 변형을 일으키는 경우, 횡방향 변형이 없는 1차원 변형조건 하에서 수행되는 표준 압밀시험은 압밀침하량을 과대평가할 뿐 아니라 전체 침하량 측면에서도 부정확한 예측결과를 제시하는 것으로 알려져 있다(Lambe and Whitman, 1986; Simons and Som, 1969; Gangopadhyay et al., 1980).

응력경로법(Lambe 1964, 1967, Lambe and Marr 1979)은 침하량을 구하고자 하는 특정 구조물의 하부지반을 지층변화나 깊이에 따른 응력감소 양상을 감안하여 몇 개의 층으로 나누고 각 층이 경험하게 될 응력변화를 사전에 예측한 다음, 이를 실험을 통해 재현할 때 나타나는 실제적인 변형거동으로부터 구조물의 침하량을 평가하는 방법이다(그림 1 참조). 따라서 응력경로법은 현재까지 개발된 여러 가지 침하량 평가방법들 중 이론적으로 가장 정확한 결과를 제시하는 것으로 인식되고 있으며,

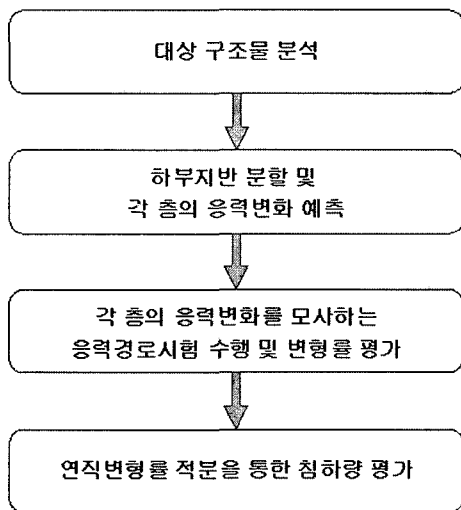


그림 1. 침하량 평가를 위한 기존의 응력경로법 적용방법

또한 옹벽, 기초, 유류저장탱크 등 다양한 구조물에 대한 성공적인 적용 사례들이 제시된 바 있다(Lambe, 1963; 1967; Lambe and Whitman, 1986).

그러나 응력경로법을 적용하여 실제로 특정 구조물의 침하량을 평가하기 위해서는 하부지반의 여러 위치 또는 깊이에서 많은 수의 복잡한 응력경로시험들을 수행해야만 한다. 즉 구조물 건설에 따라 나타나는 현장의 다양한 응력변화 조건을 개별적으로 모사해야 하는 문제점이 있다. 특히 대상 지반에 다양한 구조물이 건설되거나 특정 구조물에 대해 여러 가지 설계대안을 검토해야 하는 경우 등에는 그에 따라 급증하는 응력변화 조건을 수용하기에 현실적인 어려움이 있을 수밖에 없다. 이러한 이유로 응력경로법은 그 개념적인 합리성에도 불구하고 실제 점성토지반 침하량 평가에는 그다지 널리 활용되지 못하고 있으며, 주요 구조물에 대한 최종적인 검토단계에서만 실용적으로 적용 가능한 것으로 인식되고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 측면에 주목하여 응력경로법의 개념적 합리성을 충분히 유지하면서 동시에 그 적용상의 한계를 극복할 수 있는 새로운 응력경로법 적용방법(그림 2)을 제안하고자 한다. 제안된 적용방법에서는 먼저 일련의 응력경로시험을 통해 구조물 침하와 관련하여 현장에서 나타날 수 있는 모든 응력변화 조건을 포괄하는 대상 지반의 특성변형거동을 선행하여 평가한다. 이후 특정 구조물의 침하량은 그 구조물에 해당하는 하부지반의 응력변화를 예측한 다음 이를 선행 평가된 특성변형거동에 대입하는 방식으로 평가하게 된다. 따라서 대상 지반의 특성변형거동이 평가된 이후에는 응력변화를 예측, 반영하는 단순한 계산과정의 반복만으로 다양한 구조물 또는 설계대안에 대해 침하량을 평가할 수 있다. 즉 제안된 응력경로법 적용방법은 특정 구조물의 침하량만을 직접적으로 평가하는 기존의 적

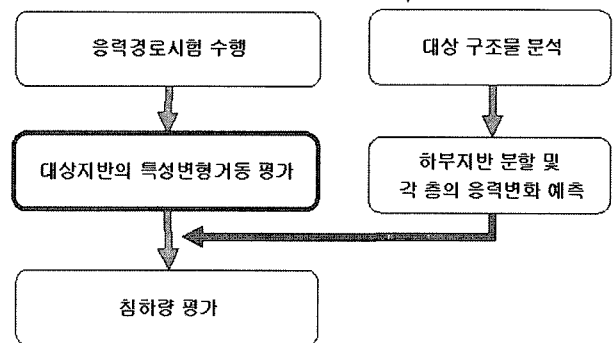


그림 2. 본 연구에서 제안된 새로운 응력경로법 적용방법

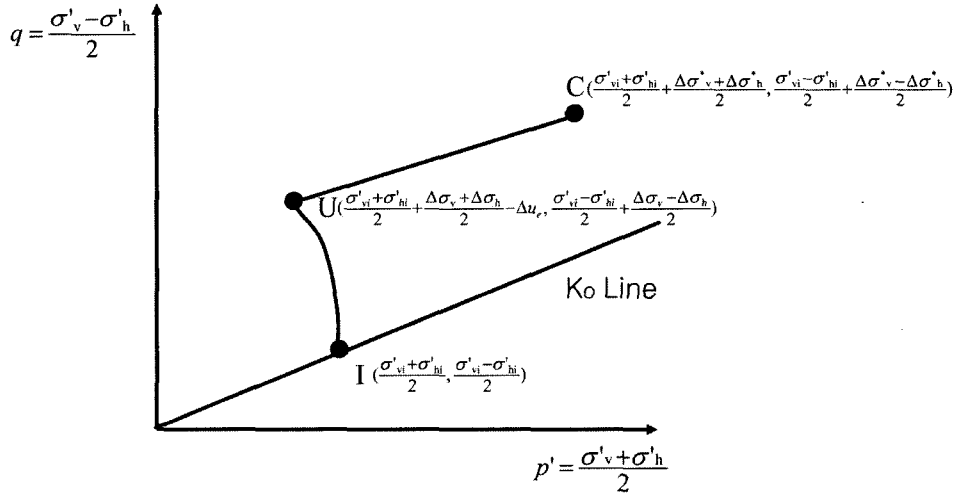


그림 3. 구조물하중에 의한 포화 점성토지반의 전형적인 응력변화

용방법과 달리 특정 지반의 전반적인 변형거동을 선행하여 평가하고, 이를 바탕으로 발생가능한 다양한 현장 조건들에 대해 침하량을 평가하는 매우 유연하고 능동적인 접근방법이라 할 수 있다. 위와 같은 장점을 지닌 새로운 응력경로법 적용방법에 필요한 지반의 특성변형거동은 앞서 밝힌 바와 같이 현장에서 발생가능한 모든 응력변화 조건을 포괄할 수 있어야 한다. 따라서 제안된 적용방법이 충분한 실용성을 확보하기 위해서는 대상 지반의 광범위한 특성변형거동을 최소한의 실험을 통해 파악하고, 이를 바탕으로 임의의 응력변화 조건에 대응하는 변형거동을 손쉽게 예측할 수 있어야만 한다. 본 연구에서는 이와 관련하여 포화 점성토지반의 특성변형거동을 효율적으로 평가하고 활용하기 위한 구체적인 방법을 개발하였으며, 실제 사례를 통해 그 적용성을 확인하였다. 본 연구에서 제시된 특성변형거동의 평가 및 활용방법은 일단 일반적인 삼축시험으로 모사될 수 있는 축대칭조건을 대상으로 개발되었지만, 락기초, 도로성토 등의 시공현장에서 자주 접하게 되는 평면 변형률조건에 대해서도 적절한 시험장비만 구비된다면 별다른 어려움 없이 확장될 수 있을 것이다.

2. 포화 점성토지반의 전형적인 응력변화

자연지반 내의 흙요소는 일반적으로 횡방향 변형이 없는 K_0 응력상태로 존재하며, 상대적으로 투수성이 낮은 포화 점성토지반의 경우 구조물에 의한 하중이 재하된 직후에는 연직방향과 횡방향의 응력이 비배수상태에서 동시에 증가하여 과잉간극수압(Δu_e)의 발생과 함

께 즉시변형을 경험하게 된다. 그리고 이어지는 압밀과정에서는 발생한 과잉간극수압의 점진적인소산과 함께 장기적인 압밀변형을 경험하게 된다.

따라서 포화 점성토지반의 전형적인 응력변화는 그림 3에 제시된 바와 같이 초기 K_0 응력점(I점)에서 출발하는 비배수 응력경로(IU)와 이어지는 선형적인 압밀응력경로(UC)로 단순화될 수 있으며, 이와 같이 단순화된 응력경로는 현장의 초기응력상태(σ'_{vi} , σ'_{hi}), 구조물하중 재하 직후의 응력증분($\Delta\sigma_v$, $\Delta\sigma_h$) 및 압밀완료 후의 응력증분($\Delta\sigma_v^*$, $\Delta\sigma_h^*$)의 향으로 정의될 수 있다. 그림 3의 응력경로와 관련하여 특히 주목하여야 할 점은 압밀응력경로(UC)가 $p'-q$ 평면상에서 반드시 유향한 기울기를 가지게 된다는 점이다. 이와 같은 압밀응력경로의 기울기는 구조물하중이 재하된 직후 나타나는 비배수상태의 응력증분이 압밀이 진행됨에 따라 배수상태의 응력증분으로 점진적으로 변화하기 때문에 나타난다.

3. 특성변형거동의 평가와 활용

앞서 밝힌 바와 같이 제안된 응력경로법 적용방법에 필요한 지반의 특성변형거동은 현장에서 발생가능한 모든 응력변화 조건을 포괄해야 한다. 즉 현장의 다양한 지반조건과 하중조건에 대응하는 수많은 초기응력상태와 각각의 초기응력상태에서 출발하는 수많은 비배수 응력경로, 그리고 각각의 비배수 응력경로에 이어지는 수많은 압밀응력경로를 반드시 포괄할 수 있어야만 한다.

그러나 이를 위해 발생가능한 모든 조건에 대해 개별적으로 응력경로시험을 수행하는 것은 현실적으로 불

가능하다. 따라서 최소한의 시험만으로 대상 지반의 기본적인 특성변형거동을 파악하고, 이를 활용하여 임의의 응력변화 조건에 대응하는 변형거동을 합리적으로 예측하는 방법이 필요하다. 이와 같은 측면에 주목하여 본 연구에서는 점성토지반의 정규화된 거동특성과 새롭게 고안된 응력경로시험기법 및 압밀변형률 예측기법을 구성요소로 하는 효율적인 특성변형거동 평가 및 활용방법을 개발하였다.

3.1 점성토지반의 정규화된 거동특성

기존의 많은 관련연구(Henkel, 1960; Parry, 1960; Ladd and Foott, 1974; 권오엽, 1988)에 따르면 응력이력 즉 과압밀비(OCR)가 동일한 특정 점성토지반의 경우, 초기유효응력으로 정규화된 응력-변형률거동은 초기유효

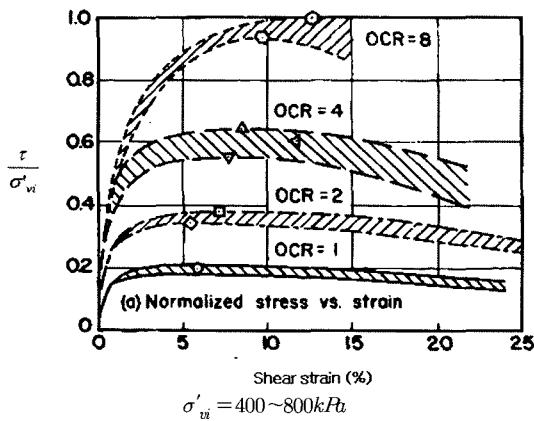
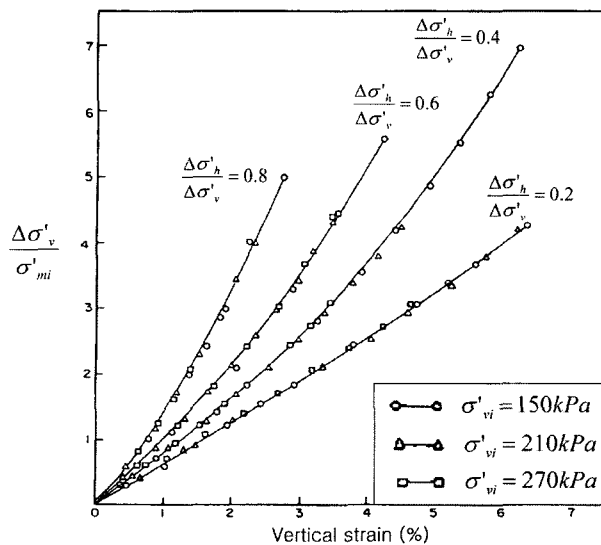


그림 4. Boston Blue clay의 정규화된 응력-변형률거동(Ladd & Foott 1974)



응력의 크기에 관계없이 거의 일정하게 나타나는 것으로 알려져 있다. 대표적인 예로 그림 4는 일련의 비배수 순수전단시험으로부터 얻어진 Boston Blue Clay의 정규화된 응력-변형률거동을 보여주고 있으며, 그림 5는 다양한 응력증분비를 가지는 일련의 배수삼축시험으로부터 얻어진 재성형 카올리나이트 점토의 정규화된 응력-변형률거동을 보여주고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 점성토지반의 정규화된 거동특성에 근거하여 현장의 응력이력을 대변하는 하나의 대표 초기응력상태에 대해서만 필요한 응력경로시험들을 수행하고, 그 결과를 정규화된 형태로 제시하여 활용하는 방법을 채택하였다. 즉 대표 초기응력상태에 대한 변형거동만을 실험적으로 파악하여 정규화된 형태로 제시한 다음, 이로부터 여타 초기응력상태에 대응하는 변형거동을 예측함으로써 현장의 다양한 초기응력상태를 반영하는데 필요한 실험적 노력을 최소화하는 방법을 채택하였다.

3.2 응력경로시험기법

정규화된 거동특성에 대한 고려와 함께 본 연구에서는 점성토지반의 일반적인 응력변화를 보다 정확하고 효과적으로 재현할 수 있는 응력경로시험기법을 새롭게 고안하였다. 새롭게 고안된 응력경로시험기법은 아래의 그림 6에 제시된 바와 같이 단순화된 형태의 비배수 재하과정과 배압평형과정 그리고 이에 이어지는 능동압밀과정으로 구성된다.

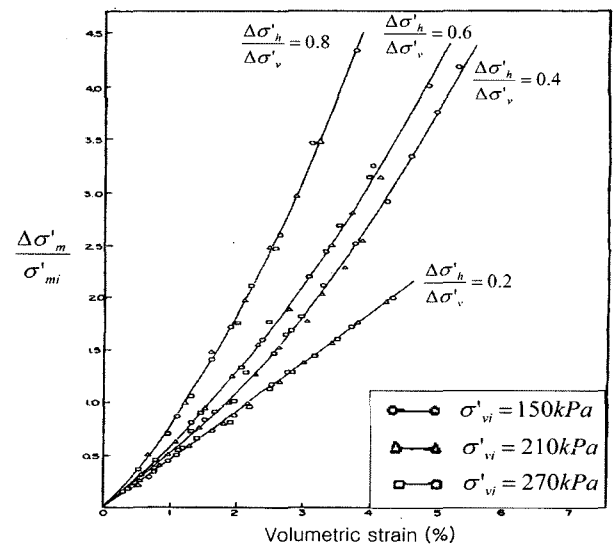


그림 5. 재성형 kaolinite 점토의 정규화된 응력-변형률거동(권오엽 1988)

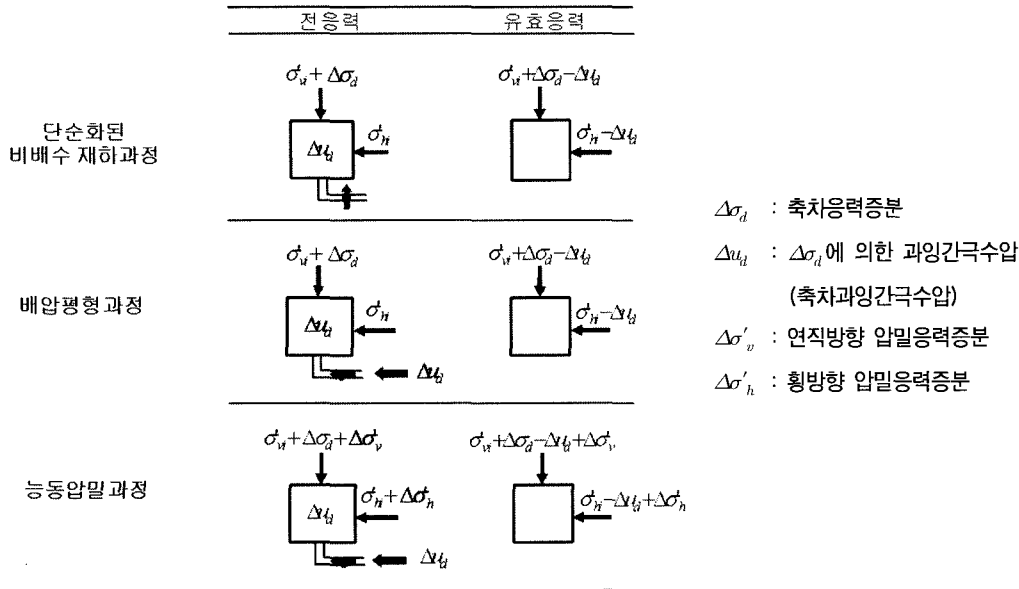


그림 6. 새롭게 고안된 응력경로시험기법

① 비배수 재하과정

구조물하중 재하 직후 점성토지반 내의 흙요소는 연직방향과 횡방향의 응력이 비배수상태에서 동시에 증가하여 과잉간극수압의 발생과 함께 즉시변형을 경험하게 된다. 그러나 새롭게 고안된 시험기법에서는 연직방향의 응력만을 연속적으로 증가시키는 방식으로 현장의 다양한 비배수 응력변화 조건을 재현한다. 이와 같이 단순화된 비배수 재하과정은 식 (1)의 간극수압공식 (Skempton 1954)에서 알 수 있듯이 $B=1$ 인 포화 점성토지반의 경우 비배수상태에서 등방적으로 가해지는 응력 증분($\Delta\sigma_i = \Delta\sigma_h$)은 동일한 크기의 (등방)과잉간극수압 ($\Delta u_i = \Delta\sigma_i$)만을 유발하므로, 연직방향으로 가해지는 축차응력증분($\Delta\sigma_d = \Delta\sigma_v - \Delta\sigma_h$)과 이에 따른 (축차)과잉간극수압($\Delta u_d = A\Delta\sigma_d$)만이 흙요소의 유효응력상태와 변형에 영향을 미치게 된다는 점에 근거하고 있다.

$$\Delta u_e = \Delta u_d + \Delta u_i = A\Delta\sigma_d + B\Delta\sigma_i \quad (1)$$

여기서, A, B : Skempton의 간극수압계수

특성변형거동 평가 시 이와 같이 단순화된 비배수 재하과정을 채택함으로써 얻게 되는 큰 장점은 특정 초기 응력상태로부터 출발하는 다양한 비배수 응력경로를 하나의 시험과정으로 포괄할 수 있다는 점이다. 즉 연직방향 응력증분($\Delta\sigma_v$)과 횡방향 응력증분($\Delta\sigma_h$)의 크기와 비율이 서로 다른 수많은 비배수 응력변화 조건에 대한 즉시변형 및 과잉간극수압 거동을 연직응력만을 연속

적으로 증가시키는 하나의 시험과정을 통해 파악할 수 있다는 점이다.

② 배압평형과정과 능동압밀과정

흙요소의 압밀은 개념적으로 과잉간극수압의 소산과 함께 발생한다. 그러나 비배수 재하과정에서 발생한 과잉간극수압을 실제로 소산시키는 기존의 압밀방식은 점성토지반에서 나타나는 일반적인 압밀응력경로 (그림 3의 UC)를 적절하게 재현할 수 없다. 이는 연직방향과 횡방향의 유효응력이 소산된 과잉간극수압 만큼 언제나 동일한 크기로 증가하여 $p'-q$ 평면상에서 수평 방향으로 진행되는 비현실적인 압밀응력경로만이 재현되기 때문이다. 뿐만 아니라 기존의 압밀방식에서는 압밀이 진행되는 동안 시료 내의 평균적인 과잉간극수압을 정확하게 측정 또는 평가할 수 없으므로, 하나의 시험과정에서는 유효응력상태가 명확하게 정의되는 압밀 완료점에 대한 변형거동만을 정확하게 파악할 수 있다. 따라서 과잉간극수압의 수동적인 소산을 특징으로 하는 기존의 압밀방식은 현장의 다양한 압밀응력경로를 포괄해야 하는 점성토지반의 특성변형거동 평가에는 현실적으로 활용이 어렵다.

배압평형과정과 이어지는 능동압밀과정은 이와 같은 실험상의 한계를 극복할 수 있도록 새롭게 고안되었다. 배압평형과정은 비배수 재하과정에서 발생한 (축차)과잉간극수압 만큼 배압을 증가시킨 후 배수밸브를 개방하는 매우 간단한 방식으로 수행되며, 이를 통해 비배수

재하직후의 응력상태를 그대로 유지시키면서 시료의 배수조건만을 비배수상태에서 배수상태로 전환시키게 된다. 이어지는 능동압밀과정에서는 배압평형과정을 통해 구현된 배수조건 하에서 시료 외부에 가해지는 연직방향 및 횡방향 압밀응력을 능동적으로 제어하는 방식으로 압밀응력경로를 재현한다. 따라서 기존의 수동적인 압밀방식과는 달리 가해지는 연직방향과 횡방향 압밀응력증분의 비율을 적절히 조절함으로써 $p'-q$ 평면상에서 임의의 기울기를 가지는 압밀응력경로를 자유롭게 재현할 수 있다. 또한 압밀응력의 재하속도를 과잉간극수압이 추가로 발생하지 않을 만큼 충분히 느리게 유지함으로써, 압밀완료점 뿐만 아니라 시험이 수행된 특정 압밀응력경로상의 모든 점에 대응하는 변형거동을 하나의 시험과정으로 파악할 수 있다. 따라서 지반의 특성변형거동 평가측면에서 볼 때 배압평형과정과 이어지는 능동압밀과정의 조합은 기존의 수동적인 압밀방식에 비해 훨씬 정확하고 효율적이다.

3.3 압밀변형을 예측기법

특성변형거동의 효율적인 평가와 활용을 위한 또 하나의 요소로 본 연구에서는 동일한 출발점을 가지는 다양한 압밀응력경로를 최소한의 시험을 통해 포괄하는 체계적인 압밀변형을 예측기법을 고안하였다.

일반적으로 점성토지반은 연직방향과 수평방향의 역학적 성질이 서로 다르고, 수평면 내의 역학적 성질은 방향에 관계없이 동일한 직교이방적인 거동특성을 보인다. 본 연구에서 고안된 압밀변형을 예측기법은 점성토지반의 이와 같은 이방적인 거동특성을 합리적으로 반영하기 위해 직교이방 탄성체의 구성방정식으로부터 유도된 간단한 형태의 구성방정식을 이용하고 있다.

직교이방 탄성체의 일반적인 구성방정식은 축대칭조건 하에서 식 (2)와 같이 단순화될 수 있다. 이와 같이 단순화된 구성방정식에서 응력-변형률 관계를 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 [(ϵ_v)_I, (ϵ_h)_I & (ϵ_v)_{II}, (ϵ_h)_{II}]을 입력변수로 선정하여 다음의 식 (3)에 대입함으로써 쉽게 결정할 수 있다.

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

여기서, E_v : 연직방향 탄성계수

E_h : 횡방향 탄성계수

ν_{hv} : 횡방향 변형이 연직방향 변형에 미치는 영향을 나타내는 포아송비

ν_{vh} : 연직방향 변형이 횡방향 변형에 미치는 영향을 나타내는 포아송비

ν_{hh} : 횡방향 변형이 직교하는 횡방향 변형에 미치는 영향을 나타내는 포아송비

ϵ_v, ϵ_h : 연직방향 및 횡방향 변형률

$\Delta\sigma'_v, \Delta\sigma'_h$: 연직방향 및 횡방향 유효응력증분

$A : 1/E_v, B : -2\nu_{hv}/E_h, C : -\nu_{vh}/E_v,$

$D : (1-\nu_{hh})/E_h$

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

여기서, $\Delta\sigma'_m$: 평균유효응력증분 = $\frac{\Delta\sigma'_v + 2\Delta\sigma'_h}{3}$,

K^* : 유효응력증분비 = $\frac{\Delta\sigma'_h}{\Delta\sigma'_v}$

본 연구에서 고안된 압밀변형을 예측기법은 이와 같이 단순화된 구성방정식과 매개변수 결정과정을 근간으로 하고 있으며, 개념적으로 다음과 같은 절차를 따른다(그림 7 참조). 동일한 출발점을 가지는 다양한 압밀응력경로 각각에 대해 개별적으로 압밀시험을 수행하는 대신, 서로 다른 유효응력증분비 즉 압밀응력증분비 (K_I^* , K_{II}^*)를 가지는 두 가지 압밀응력경로에 대해서만 압밀시험을 수행한다. 이후 특정 압밀응력경로($\Delta\sigma'_v$, $\Delta\sigma'_h$)에 대응하는 압밀변형률(ϵ_{vc} , ϵ_{hc})은 수행된 두 가지 압밀시험의 결과로부터 식 (3)에 필요한 입력변수들을 선정하여 매개변수 A, B, C, D 를 결정한다 다음, 최종적으로 다음의 식 (4)를 이용하여 예측한다.

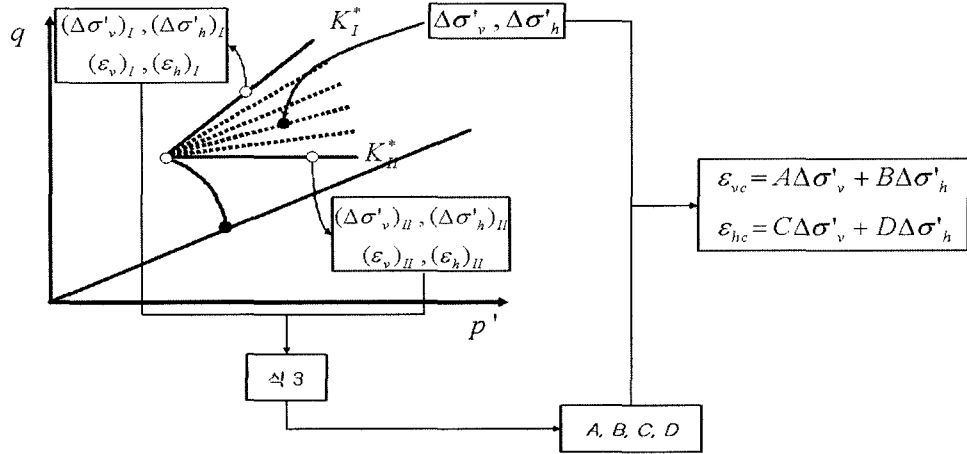


그림 7. 압밀변형률
예측절차의 기본개념

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

$$U_{target} = U_I = U_{II} \quad (8)$$

이와 같은 개념적인 압밀변형률 예측절차와 더불어 본 연구에서는 흙의 비선형적인 거동을 합리적으로 반영하기 위해 동일 변형에너지밀도를 기준으로 하는 입력변수 선정절차를 함께 고안하였다. 즉 비선형적인 거동을 보이는 압밀시험의 결과로부터 식 (3)에 필요한 입력변수를 선정하는 과정에서 입력되는 응력조합에 해당하는 변형에너지밀도(U_I , U_{II})가 예측대상 압밀응력경로의 변형에너지밀도(U_{target})와 동일해지도록 입력 응력증분의 크기를 반복적으로 조정하는 절차를 고안하였다. 이러한 입력변수 선정절차에 필요한 변형에너지밀도는 식 (5)~식 (7)을 이용하여 근사적으로 계산될 수 있으며, 식 (8)로 표현되는 동일 변형에너지밀도 기준은 일반적인 응력조건하에서 나타나는 흙의 비선형적인 거동을 표현하기 위한 합리적인 기준으로 널리 이용되어 왔다(Burland and Georgiannou, 1991).

$$\begin{aligned} U_{target} &= \frac{1}{2} \Delta \sigma'_v \epsilon_{vc} + \frac{1}{2} \Delta \sigma'_h \epsilon_{hc} + \frac{1}{2} \Delta \sigma'_h \epsilon_{vc} \\ &= \frac{1}{2} \Delta \sigma'_v (A \Delta \sigma'_v + B \Delta \sigma'_h) + \Delta \sigma'_h (C \Delta \sigma'_v + D \Delta \sigma'_h) \\ &= (\Delta \sigma'_m)^2 \frac{9[A + BK_I^* + 2CK_I^* + 2D(K_I^*)^2]}{2(1 + 2K_I^*)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

$$U_I = (\Delta \sigma'_m)_I^2 \frac{9[A + BK_I^* + 2CK_I^* + 2D(K_I^*)^2]}{2(1 + 2K_I^*)^2} \quad (6)$$

$$U_{II} = (\Delta \sigma'_m)_{II}^2 \frac{9[A + BK_{II}^* + 2CK_{II}^* + 2D(K_{II}^*)^2]}{2(1 + 2K_{II}^*)^2} \quad (7)$$

그림 8은 앞서 설명한 압밀변형률 예측절차와 입력변수 선정절차를 결합하여 실제 압밀변형률 예측에 활용 가능 하도록 만들어진 최종적인 압밀변형률 예측순서도를 보여 주고 있다. 본 연구를 통해 새롭게 고안된 이와 같은 압밀변형률 예측순서도와 관련하여 주목하여야 할 점은 그림 8의 예측순서도가 직교이방 선형탄성체의 구성방정식을 근간으로 하고 있지만, 동일 변형에너지밀도를 기준으로 하는 반복적인 입력변수 선정절차를 추가함으로써 점성토지반의 비선형적인 거동특성까지 합리적으로 반영할 수 있도록 구성되었다는 점이다.

3.4 특성변형거동 평가 및 활용방법

앞서 설명한 세 가지 구성요소를 바탕으로 본 연구에서 개발된 특성변형거동의 평가 및 활용방법은 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫 번째 응력경로시험 단계에서는 현장에서 발생가능한 모든 응력변화 조건에 대해 개별적으로 시험을 수행하는 대신 그림 9에 제시된 바와 같이 대상 지반의 응력이력을 대변하는 하나의 대표 초기응력상태와 몇 개의 선택된 비배수 재하수준(즉, 몇 개의 선택된 비배수 축차응력증분 수준) 그리고 각각의 비배수 재하수준에 이어지는 두 가지 압밀응력경로에 대해서만 응력경로시험을 수행한다. 이러한 시험과정에는 본 연구에서 새롭게 고안된 배압평형과 능동압밀에 의한 응력경로 시험기법이 이용된다.

두 번째 특성변형거동 평가단계에서는 수행된 응

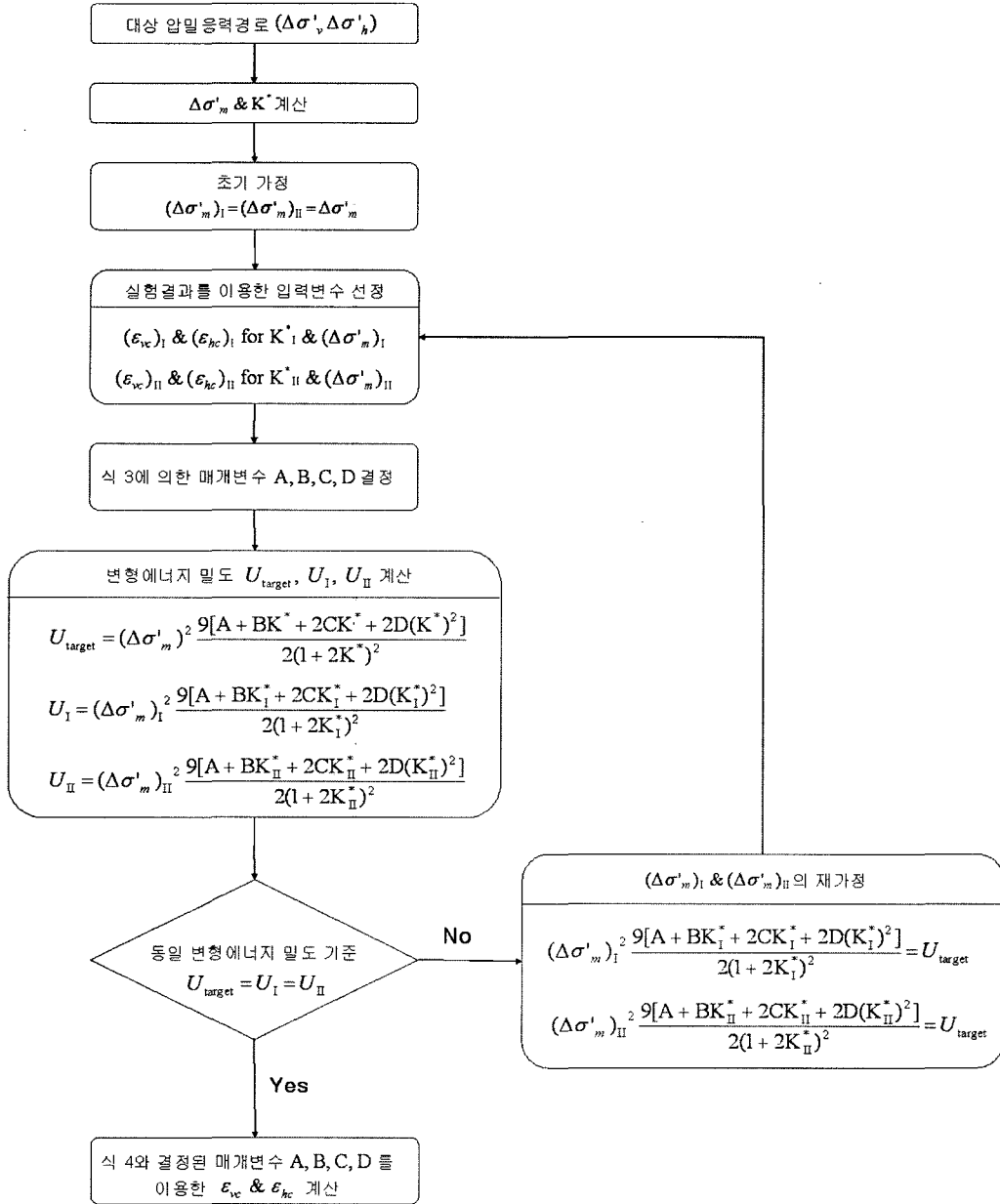


그림 8. 압밀변형을 예측순서도(축대칭조건)

력경로시험의 비배수 재하결과를 정규화된 형태의 축차응력증분-연직방향 즉시변형률 관계(① $\frac{\Delta\sigma'_d}{\sigma'_{vi}} - \epsilon_{vu}$)와 축차응력증분-축차과잉간극수압 관계(② $\frac{\Delta\sigma'_d}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta u_d}{\sigma'_{vi}}$)로 제시한다. 또한 각각의 압밀응력증분비에 대한 압밀결과는 정규화과정과 비배수 재하수준에 대한 보간과정을 거쳐 최종적으로 다음의 네 가지 정규화된 평균압밀응력증분-축차응력증분-압밀변형률 관계로 제시한다. [③ $\frac{(\Delta\sigma'_m)_I}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma'_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{vc})_I$, ④ $\frac{(\Delta\sigma'_m)_I}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma'_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{hc})_I$, ⑤ $\frac{(\Delta\sigma'_m)_{II}}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma'_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{vc})_{II}$, ⑥ $\frac{(\Delta\sigma'_m)_{II}}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma'_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{hc})_{II}$]

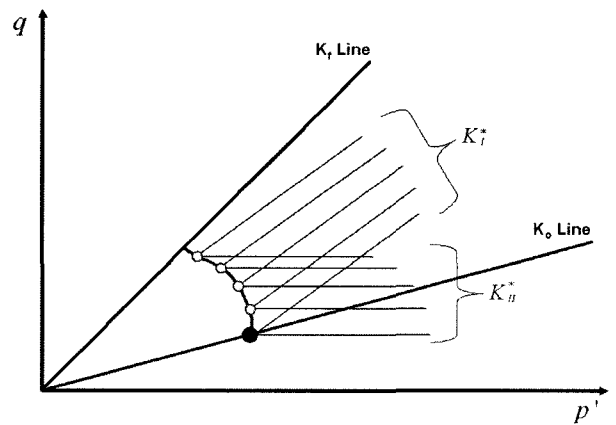


그림 9. 특성변형거동 평가를 위한 응력경로시험 조건

이와 같은 과정을 통해 평가된 대상 지반의 기본적인 특성변형거동은 실제 침하량 평가시 임의의 응력변화 조건 즉 응력경로에 대응하는 변형거동을 예측하는데 손쉽게 활용될 수 있다. 즉 변형거동을 평가하고자 하는 특정 응력경로가 초기응력상태($\Delta\sigma'_{vi}$, $\Delta\sigma'_{hi}$), 구조물 하중 재하 직후의 응력증분($\Delta\sigma_v$, $\Delta\sigma_h$), 압밀완료 후의 응력증분($\Delta\sigma_v^*$, $\Delta\sigma_h^*$)의 향으로 제시되면, 이에 대응하는 연직방향 즉시변형률(ϵ_{vu})과 축차과잉간극수압(Δu_d)은 대상 응력경로의 정규화된 축차응력증분을 ①과 ②의 관계에 대입하여 평가된다. 대상 응력경로의 전체 과잉간극수압(Δu_e)은 평가된 축차과잉간극수압을 이용하여 식 (9)를 통해 계산되며, 압밀응력증분($\Delta\sigma'_v$, $\Delta\sigma'_h$)은 계산된 전체 과잉간극수압을 이용하여 식 (10)~식 (11)을 통해 결정된다. 결정된 압밀응력증분에 대응하는 압밀변형률(ϵ_{vc} , ϵ_{hc})은 그림 8의 예측순서도에 따라 예측되며, 이러한 예측과정에서 식 (3)에 필요한 입력변수들은 특성변형거동으로 얻어진 네 가지 정규화된 평균압밀응력증분-축차응력증분-압밀변형률 관계(③~⑥)로부터 선정된다.

$$\Delta u_e = \Delta u_d + \Delta u_i = \Delta u_d + \Delta\sigma'_i (= \Delta\sigma'_h) \quad (9)$$

$$\Delta\sigma'_v = \Delta\sigma_v^* - \Delta\sigma_v + \Delta u_e \quad (10)$$

$$\Delta\sigma'_h = \Delta\sigma_h^* - \Delta\sigma_h + \Delta u_e \quad (11)$$

4. 적용사례

본 절에서는 3.4절에 제시된 방법의 적용성을 확인하기 위해 특정 점성토지반에 대해 일련의 응력경로시험을 수행하여 특성변형거동을 평가한 다음, 이를 바탕으로 임의로 선택된 응력변화 조건에 대해 변형거동을 예측하는 실사례를 제시하였다. 대상 점성토지반은 표 1에 제시된 기본 물성치를 가지는 저소성의 카올리나이트 점토로 구성되어 있으며, 정규압밀상태인 것으로 가정하였다.

4.1 응력경로시험

4.1.1 사용시료

응력경로시험에 사용된 시료는 초기 함수비 75%의

카올리나이트 슬러리를 대형 1차원 시료성형기(직경 350mm, 높이 600mm) 내에서 140kPa의 연직 압밀압으로 압밀하여 제작하였으며, 사용시료의 단위중량과 초기함수비, 압밀특성, 투수특성은 표 2에 요약하여 제시하였다. 표에 제시된 사용시료의 압밀특성과 투수특성은 연직배수 표준압밀시험과 방사배수 표준압밀시험을 통해 파악되었다.

4.1.2 시험조건 및 방법

본 연구에서는 대상 지반의 가정된 응력이력 즉 정규압밀상태를 대변하는 하나의 대표 초기응력상태와 5가지의 선택된 비배수 재하수준 그리고 각각의 비배수 재하수준에 대해 3가지 서로 다른 압밀응력증분비를 재현하는 총 15회의 응력경로시험을 수행하였다(표 3 참조). 수행된 응력경로시험 중 $K^* = K_r^* = 0.57$ 에 해당하는 C1계열과 $K^* = K_r^* = 1$ 에 해당하는 C3계열의 시험은 대상 지반의 특성변형거동을 평가하기 위해 수행되었으며, $K^* = 0.75$ 에 해당하는 C2계열의 시험은 본 연구에서 고안된 압밀변형률 예측기법의 타당성을 실험적으로 확인하기 위해 추가로 수행되었다.

수행된 모든 응력경로시험에서 시료는 250kPa의 배압으로 24시간 이상 포화되었으며, 이와 같이 포화된 시료의 간극수압계수 B 값은 모든 경우 0.97 이상으로 측정되었다. 포화과정 이후, 시료는 대상 지반의 가정된 응력이력 즉 정규압밀상태를 대변할 수 있도록 선행압밀하중($p'_c = 98 \sim 116 \text{ kPa}$)의 약 2배에 해당하는 200kPa의 초기 연직유효응력(σ'_{vi})으로 이방압밀되었다. 이러한 초기 이방압밀과정에는 5회의 예비적인 K_o 압밀시험을 통해 측정된 평균적인 K_o 값 0.5가 유효응력비($\sigma'_{hi}/\sigma'_{vi}$)로 적용되었다.

표 2. 사용시료의 단위중량, 초기함수비, 압밀특성 및 투수특성

단위중량 γ_s (kN/m ³)	1.71~1.76
초기함수비 w_o (%)	37.6~40.2
선행압밀하중 p'_c (kPa)	98~116
압축지수 C_c	0.253~0.286
재압축지수 C_r	0.110~0.126
연직방향 투수계수 k_v (m/s)	$5.24 \times 10^{-9} \sim 2.93 \times 10^{-8}$
방사방향 투수계수 k_r (m/s)	$1.07 \times 10^{-8} \sim 2.95 \times 10^{-8}$

표 1. 대상 점성토지반의 기본 물성치

비중 G_s	액성한계 LL	소성한계 PL	소성지수 PI	200번체 통과량 (%)	통일분류
2.59	44.4	21.1	23.3	98.0	CL

표 3. 수행된 응력경로시험의 시험조건

시험명	K_o 압밀과정			비배수 재하과정 $\Delta\sigma_d$ (kPa)	압밀과정 $K^* = \sigma'_h / \sigma'_v$
	σ'_{vi} (kPa)	σ'_{hi} (kPa)	K_o		
SP-U1-C1	200	100	0.5	0	0.57
SP-U1-C2					0.75
SP-U1-C3					1
SP-U2-C1				9	0.57
SP-U2-C2					0.75
SP-U2-C3					1
SP-U3-C1				18	0.57
SP-U3-C2					0.75
SP-U3-C3					1
SP-U4-C1				27	0.57
SP-U4-C2					0.75
SP-U4-C3					1
SP-U5-C1				36	0.57
SP-U5-C2					0.75
SP-U5-C3					1

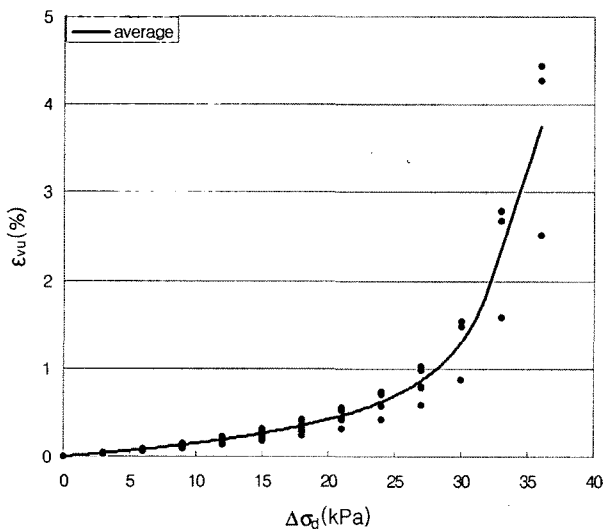
비배수 재하과정은 각각의 목표된 비배수 재하수준에 도달할 때까지 축차응력을 3kPa 단위로 단계적으로 증가시키는 방식으로 수행되었으며, 각각의 재하단계는 축차응력 증가 후 연직변형률의 발생 속도가 무시할 수 있을 정도(<0.002%/hr)가 될 때까지 유지되었다. 배압평형과정은 비배수 재하과정에서 측정된 축차과잉간극수압(Δu_d)만큼 배압을 증가시킨 후 배수밸브를 개방하는 방식으로 수행되었으며, 연직변형률의 발생 속도가 무시할 수 있을 정도(<0.002%/hr)가 될 때까지 24시간 이상 유지되었다. 이어지는 능동압밀과정은 평균압밀응력

중분($\Delta\sigma'_m$)이 100kPa에 도달할 때까지 수행되었으며, 이때 압밀응력은 과잉간극수압의 발생을 무시할 수 있을 만큼 충분히 느린 속도로 재하되었다(식 (12)~식 (14) 참조).

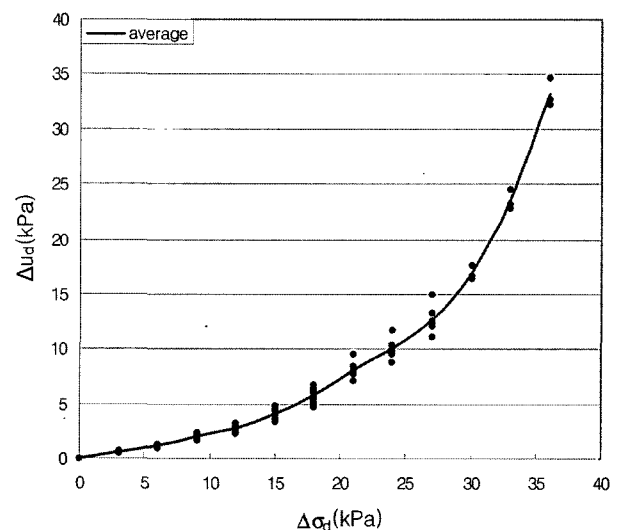
$$\frac{d\sigma'_m}{dt} = 0.8kPa/hour \quad (12)$$

$$\frac{d\sigma'_v}{dt} = \frac{3}{1+2K^*} * \frac{d\sigma'_m}{dt} = \frac{3}{1+2K^*} * 0.8kPa/hour \quad (13)$$

$$\frac{d\sigma'_v}{dt} = K^* * \frac{d\sigma'_m}{dt} = \frac{3K^*}{1+2K^*} * 0.8kPa/hour \quad (14)$$



(a) $\Delta\sigma_d - \epsilon_{vu}$ 관계



(b) $\Delta\sigma_d - \Delta u_d$ 관계

그림 10. 응력경로시험의 비배수 재하결과

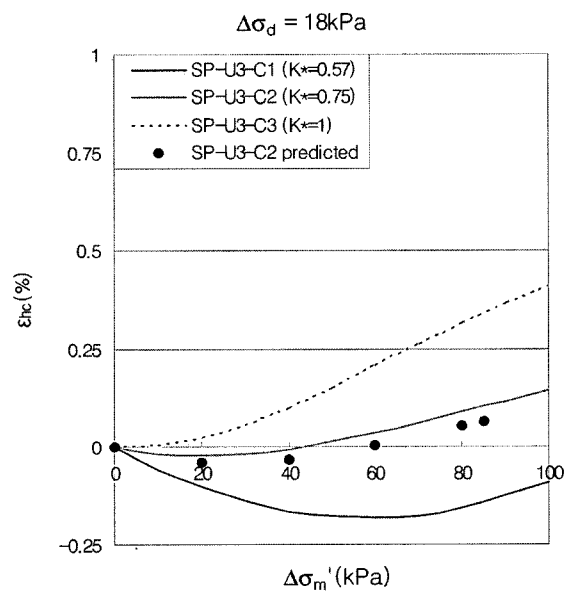
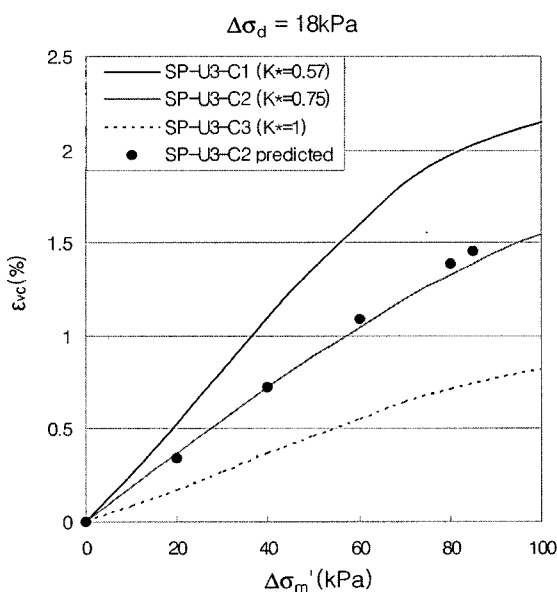
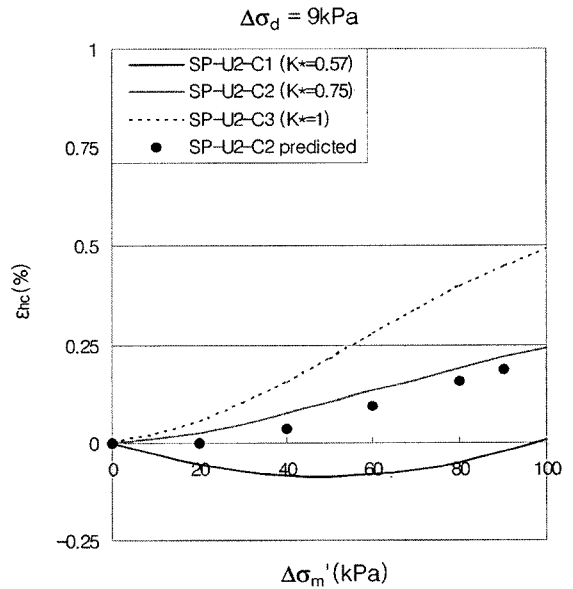
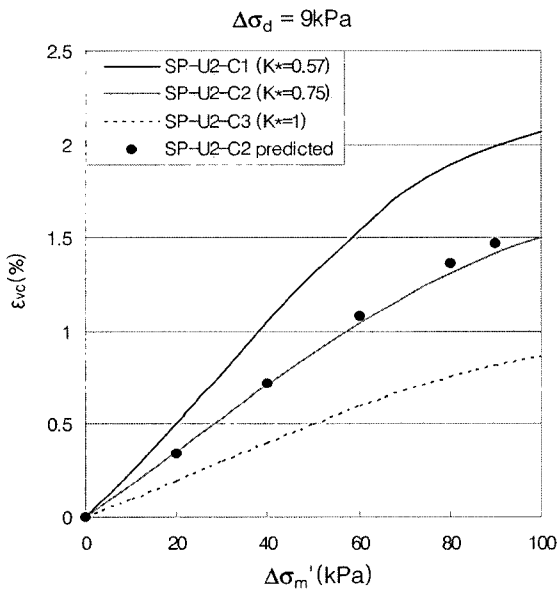
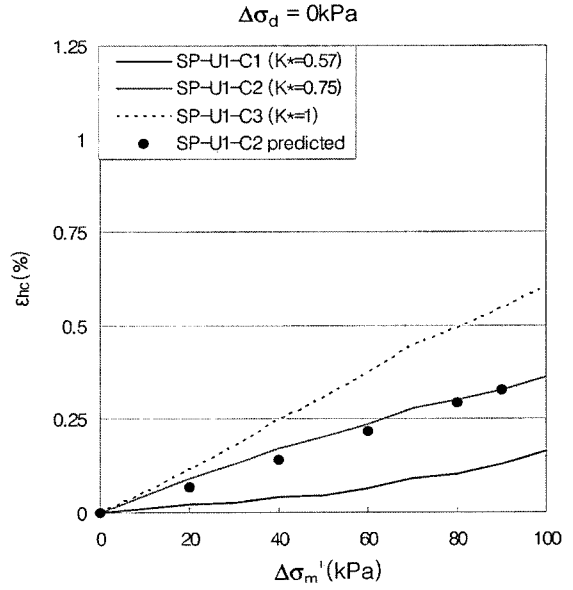
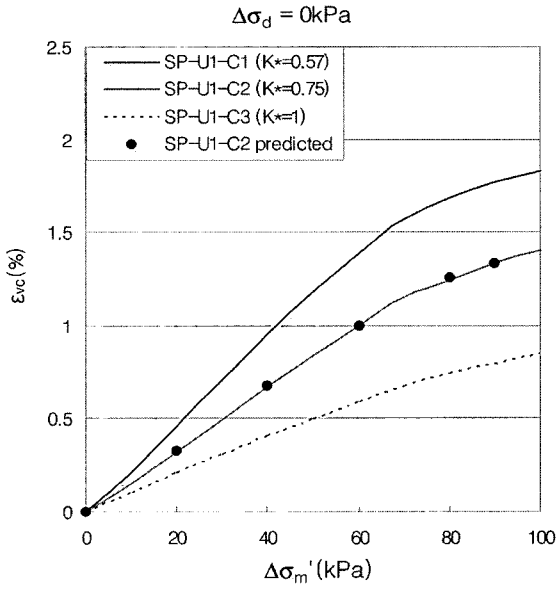


그림 11. 응력경로시험의 압밀결과(계속)

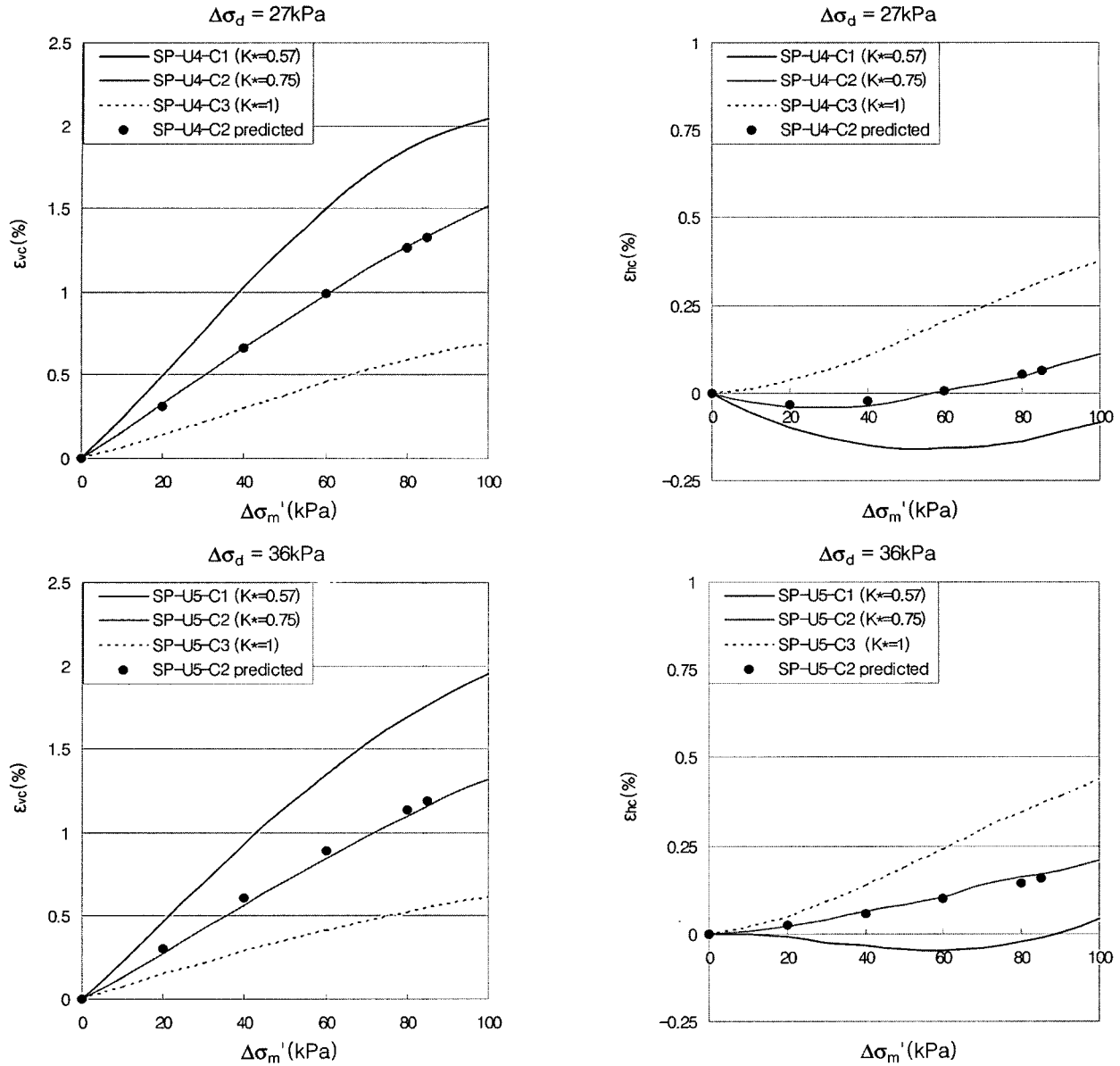


그림 11. 응력경로시험의 압밀결과

4.1.3 시험결과 및 분석

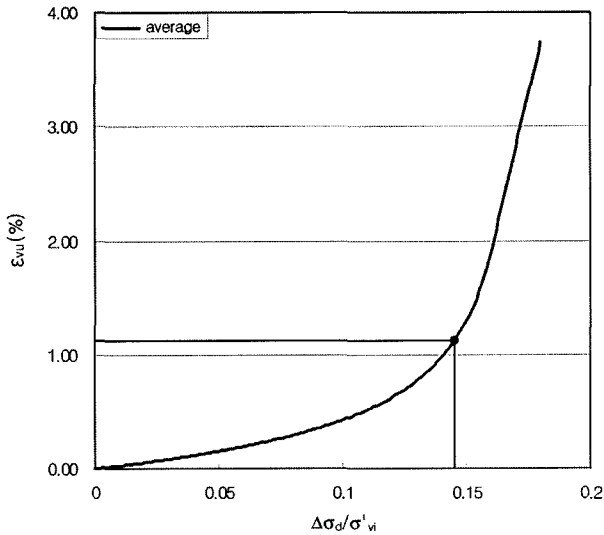
그림 10은 수행된 응력경로시험의 비배수 재하과정에서 측정된 연직방향 즉시변형률과 축차과잉간극수압을 축차응력증분에 대해 나타낸 결과이며, 그림에서 실선은 그 평균적인 변화경향을 나타낸다. 그림 11은 응력경로시험의 압밀과정에서 측정된 연직방향 및 횡방향 압밀변형률을 비배수 재하수준별로 평균압밀응력증분에 대해 나타낸 결과이다. 그림 11에서 점으로 표시된 결과는 각각의 비배수 재하수준에 대해 C1계열과 C3계열의 압밀변형거동을 입력값으로 하여 그림 8의 예측순서도에 따라 예측된 C2계열의 압밀변형거동을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 모든 경우 예측된 C2계

열의 압밀변형률은 실측된 압밀변형률과 매우 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 이러한 비교결과는 본 연구에서 고안된 압밀변형률 예측기법의 타당성을 실험적으로 뒷받침한다.

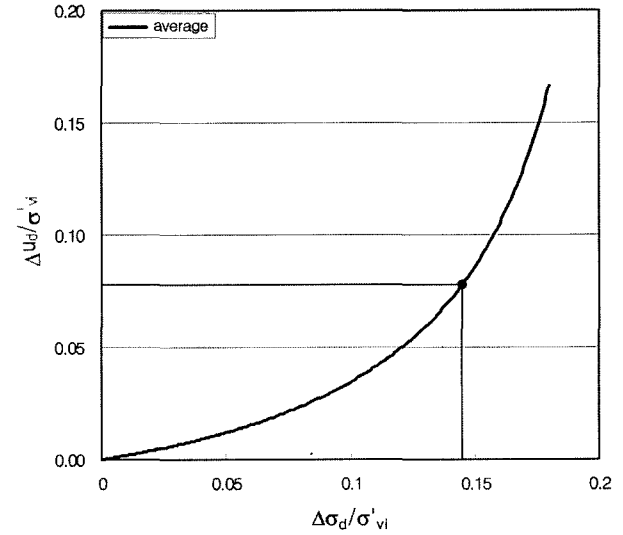
그림 11에 제시된 대상 점성토지반의 압밀변형거동은 하중수준에 따른 비선형성과 함께 뚜렷한 이방성을 보이고 있다. 특히 이방성과 관련하여, 연직방향과 횡방향의 압밀응력증분이 동일한 C3계열의 시험들에서도 연직방향의 압밀변형률은 횡방향에 비해 크게 발생하는 것으로 나타났는데, 이는 대상 지반이 횡방향에 비해 연직방향의 압축성이 상대적으로 큰 이방성을 지니고 있음을 의미한다. 따라서 대상 지반과 같이 뚜렷한 이방

성과 비선형성을 보이는 점성토지반에 대해 특정 압밀 시험의 결과로부터 일반적인 압밀응력경로에 대한 변형거동을 적절히 예측하기 위해서는 본 연구의 압밀변형률 예측기법과 같이 이방성과 비선형성을 합리적으로 반영하는 절차가 반드시 필요할 것으로 생각된다. 참

고로 본 연구의 대상 점성토지반이 보이는 이방성 즉 연직방향 압축성이 상대적으로 큰 이방성은 기존에 보고된 다양한 자연상태 점성토지반의 이방성과 그 경향이 대체로 일치한다(Yimsiri & Soga 2002).

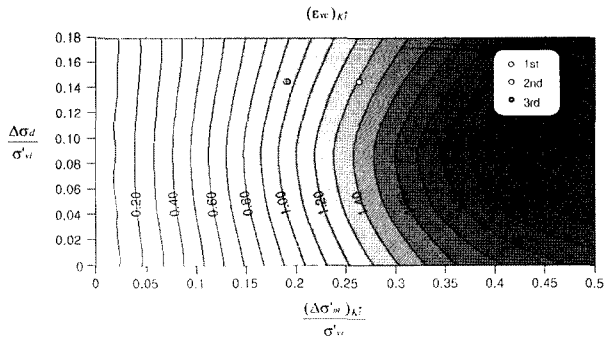


(a) $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - \epsilon_{vu}$ 관계

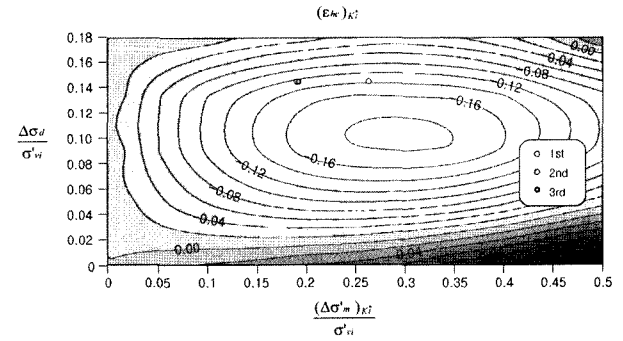


(b) $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\epsilon_v}{\sigma'_{vi}}$ 관계

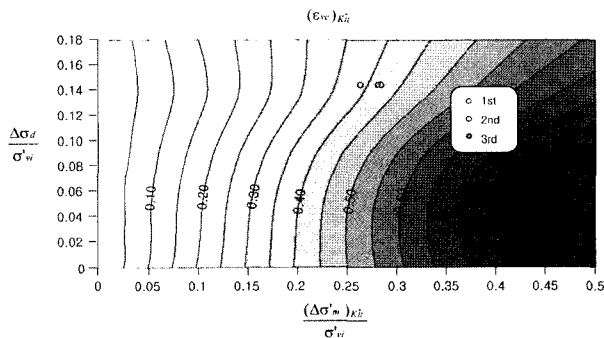
그림 12. 비배수 특성변형거동



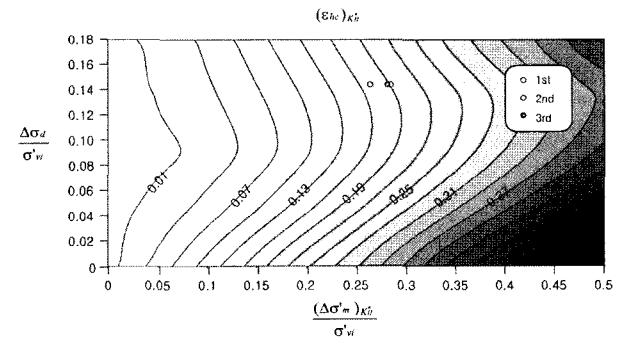
(a) $\frac{(\Delta\sigma'_m)_{kI}}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{vc})_I$ 관계 ($K_{I1}^* = 0.57$)



(b) $\frac{(\Delta\sigma'_m)_{kI}}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{hc})_I$ 관계 ($K_{I1}^* = 0.57$)



(c) $\frac{(\Delta\sigma'_m)_{kII}}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{vc})_{II}$ 관계 ($K_{II}^* = 1$)



(d) $\frac{(\Delta\sigma'_m)_{kII}}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{hc})_{II}$ 관계 ($K_{II}^* = 1$)

그림 13. 압밀 관련 특성변형거동

4.2 특성변형거동 평가 및 활용 예제

대상 지반의 비배수 특성변형거동은 3.4절의 방법에 따라 그림 10에 제시된 연직방향 즉시변형률과 축차과잉간극수압의 평균적인 변화경향을 초기 연직유효응력으로 정규화하여 다음의 그림 12와 같이 평가된다. 압밀에 관련된 특성변형거동은 그림 11에 제시된 결과 중 C1계열과 C3계열의 압밀변형률 거동을 각각 초기 연직유효응력으로 정규화한 다음 이를 비배수 재하수준에 대해 보간하여, 다음의 그림 13에 나타난 네 가지 정규화된 평균압밀응력증분-축차응력증분-압밀변형률 관계로 평가된다.

그림 12와 그림 13의 형태로 평가되는 특성변형거동의 실제 활용과 관련하여, 임의로 선택된 표 4의 응력변화 조건 즉 응력경로에 대해 변형거동을 예측하는 과정은 다음과 같다.

주어진 응력변화 조건에 대응하는 연직방향 즉시변형률(ϵ_{vi})과 축차과잉간극수압(Δu_d)은 대상 응력경로의 정규화된 축차응력증분($\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} = \frac{16.86 - 10.03}{47.20} = 0.145$)을 그림 12에 나타난 바와 같이 선행평가된 비배수 특성변형거동에 대입하여 각각 1.118%와 3.67kPa로 평가된다. 이때 3.67kPa의 축차과잉간극수압은 정규화된 축차과잉간극수압($\frac{\Delta u_d}{\sigma'_{vi}} = 0.078$)에 초기 연직유효응력

표 4. 예측대상 응력변화 조건

초기응력상태		구조물하중 재하 직후의 응력증분		압밀완료 후의 응력증분	
σ'_{vi} (kPa)	σ'_h (kPa)	$\Delta\sigma_v$ (kPa)	$\Delta\sigma_h$ (kPa)	$\Delta\sigma'_v$ (kPa)	$\Delta\sigma'_h$ (kPa)
47.20	23.60	16.86	10.03	16.81	8.23

표 5. 압밀변형률 예측을 위한 계산과정

Iteration	초기 가정된 입력 평균압밀응력증분 (kPa)		정규화된 입력 평균압밀응력증분		그림 12로부터 선정된 입력 압밀변형률 (%)			
	$(\Delta\sigma'_m)_I$	$(\Delta\sigma'_m)_{II}$	$\frac{(\Delta\sigma'_m)_I}{\sigma'_{vi}}$	$\frac{(\Delta\sigma'_m)_{II}}{\sigma'_{vi}}$	$(\epsilon_{vc})_I$	$(\epsilon_{hc})_I$	$(\epsilon_{vc})_{II}$	$(\epsilon_{hc})_{II}$
1st iteration	12.48 ($=\Delta\sigma'_m$)	12.48 ($=\Delta\sigma'_m$)	0.264	0.264	1.313	-0.137	0.390	0.172
	식 (3)을 통해 계산된 구성방정식의 매개변수 (MPa ⁻¹)				식 (5)~식 (7)을 통해 계산된 변형에너지 밀도 (Pa)			
	A	B	C	D	U_{target}	U_I	U_{II}	
	1.337	-1.024	-0.367	0.505	53.0	100.6	45.6	
2nd iteration	식 (8)을 만족하도록 재가정된 입력 평균압밀응력증분 (kPa)		정규화된 입력 평균압밀응력증분		그림 12로부터 선정된 입력 압밀변형률 (%)			
	$(\Delta\sigma'_m)_I$	$(\Delta\sigma'_m)_{II}$	$\frac{(\Delta\sigma'_m)_I}{\sigma'_{vi}}$	$\frac{(\Delta\sigma'_m)_{II}}{\sigma'_{vi}}$	$(\epsilon_{vc})_I$	$(\epsilon_{hc})_I$	$(\epsilon_{vc})_{II}$	$(\epsilon_{hc})_{II}$
	9.05	13.45	0.192	0.285	0.964	-0.124	0.421	0.192
	식 (3)을 통해 계산된 구성방정식의 매개변수 (MPa ⁻¹)				식 (5)~식 (7)을 통해 계산된 변형에너지 밀도 (Pa)			
A	B	C	D	U_{target}	U_I	U_{II}		
1.357	-1.044	-0.419	0.561	52.9	51.9	53.9		
3rd iteration	식 (8)을 만족하도록 재가정된 입력 평균압밀응력증분 (kPa)		정규화된 입력 평균압밀응력증분		그림 12로부터 선정된 입력 압밀변형률 (%)			
	$(\Delta\sigma'_m)_I$	$(\Delta\sigma'_m)_{II}$	$\frac{(\Delta\sigma'_m)_I}{\sigma'_{vi}}$	$\frac{(\Delta\sigma'_m)_{II}}{\sigma'_{vi}}$	$(\epsilon_{vc})_I$	$(\epsilon_{hc})_I$	$(\epsilon_{vc})_{II}$	$(\epsilon_{hc})_{II}$
	9.14	13.32	0.194	0.282	0.972	-0.125	0.417	0.189
	식 (3)을 통해 계산된 구성방정식의 매개변수 (MPa ⁻¹)				식 (5)~식 (7)을 통해 계산된 변형에너지 밀도 (Pa)			
A	B	C	D	U_{target}	U_I	U_{II}		
1.355	-1.042	-0.417	0.559	52.8	52.8	52.7		

$$\epsilon_{vc} = A * \Delta\sigma'_v + B * \Delta\sigma'_h = (1.355 * 13.64 - 1.042 * 11.90) / 10 = 0.609(\%)$$

$$\epsilon_{hc} = C * \Delta\sigma'_v + D * \Delta\sigma'_h = (-0.417 * 13.64 + 0.559 * 11.90) / 10 = 0.096(\%)$$

($\sigma'_{vi} = 47.20kPa$)을 곱하여 계산된다. 대상 응력경로의 전체 과잉간극수압(Δu_e)은 평가된 축차과잉간극수압과 식 (9)를 이용하여 13.70kPa로 계산되며, 연직방향 및 횡방향 압밀응력증분($\Delta\sigma'_v$, $\Delta\sigma'_h$)은 계산된 전체 과잉간극수압으로부터 식 (10)과 식 (11)을 통해 각각 13.64kPa과 11.90kPa로 결정된다. 최종적으로 결정된 압밀응력증분에 대응하는 연직방향 및 횡방향 압밀변형률(ϵ_{vs} , ϵ_{hs})은 그림 8의 압밀변형률 예측순서도를 따르는 표 5의 반복적인 계산과정을 통해 각각 0.609%와 0.096%로 평가된다. 이러한 압밀변형률 평가과정에서 각 계산단계의 입력변수들은 그림 13에 나타난 바와 같이 선행평가된 압밀 관련 특성변형거동으로부터 선정된다.

본 절에 제시된 예제는 3.4절의 방법을 따르는 경우, 구조물 침하와 관련된 포화 점성토지반의 기본적인 특성변형거동을 제한된 수의 시험만으로 충분히 평가할 수 있으며, 또한 이를 바탕으로 단순한 계산과정만을 통해 임의의 응력변화 조건에 대한 변형거동을 손쉽게 예측할 수 있음을 명확히 보여 준다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 특성변형거동의 평가 및 활용방법은 본 연구에서 궁극적으로 제안하고자 하는 유연하고 능동적인 개념의 새로운 응력경로법 적용방법과 관련하여 그 실용성을 확보하기 위한 핵심적인 방안으로 활용될 수 있을 것이다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 포화 점성토지반의 침하량 평가와 관련하여, 응력경로법에 근거한 보다 합리적인 침하량 평가방법의 개념을 새롭게 제안하였다. 제안된 침하량 평가방법은 일련의 응력경로시험을 통해 대상 지반의 침하관련 특성변형거동을 선행하여 평가한 다음, 이를 바탕으로 일체의 추가적인 시험없이 대상 지반에 들어설 다양한 구조물 또는 설계대안에 대해 침하량을 평가하는 매우 유연하고 능동적인 접근방법이다.

본 연구에서는 이와 같은 장점을 지닌 새로운 침하량 평가방법의 실용성을 확보하기 위한 현실적인 방안으로 대상 지반의 특성변형거동을 효율적으로 평가하고 활용하는 구체적인 방법을 개발하였다. 개발된 방법은 널리 알려진 점성토지반의 정규화된 거동특성과 새롭게 고안된 응력경로시험기법 및 압밀변형률 예측기법을 구성요소로 하고 있으며, 점성토지반의 기본적인 특

성변형거동을 최소한의 시험을 통해 파악하고 이로부터 임의의 응력변화 조건에 대응하는 변형거동을 손쉽게 예측할 수 있도록 구성되었다. 개발된 방법에 채택된 응력경로시험기법은 단순화된 비배수 재하과정과 배압 평형과정 그리고 이에 이어지는 능동압밀과정으로 구성되어 있으며, 점성토지반의 일반적인 응력변화를 보다 정확하고 효과적으로 재현할 수 있도록 고안되었다. 또한 채택된 압밀변형률 예측기법은 다양한 응력조건 하에서 나타나는 이방적이고 비선형적인 점성토지반의 압밀변형거동을 제한된 수의 압밀시험결과로부터 합리적으로 예측할 수 있도록 고안되었다.

개발된 방법의 적용성은 정규압밀상태의 특정 점성토지반에 대해 일련의 응력경로시험을 수행하여 특성변형거동을 평가하고 이로부터 임의로 선택된 응력변화 조건에 대해 변형거동을 예측하는 실제 사례를 제시함으로써 명확히 확인되었다. 이와 더불어 개발된 방법에 채택된 압밀변형률 예측기법의 타당성 또한 수행된 응력경로시험의 결과로부터 실험적으로 뒷받침되었다.

감사의 글

본 논문에 대한 서울대학교 공학연구소의 각종 지원에 깊이 감사드립니다.

기 호

- γ_t : 전체 단위중량
- Δu_d : 축차과잉간극수압
- Δu_e : 전체 과잉간극수압
- Δu_i : 등방과잉간극수압
- $\Delta\sigma_d$: 축차응력증분
- $\Delta\sigma_i$: 등방응력증분
- $\Delta\sigma_v, \Delta\sigma_h$: 구조물하중 재하직후의 연직방향 및 횡방향 응력증분
- $\Delta\sigma_v^*, \Delta\sigma_h^*$: 압밀완료 후의 연직방향 및 횡방향 응력증분
- $\Delta\sigma'_m$: 평균유효응력증분(또는 평균압밀응력증분) =
$$\frac{\Delta\sigma'_v + 2\Delta\sigma'_h}{3}$$
- $\Delta\sigma'_v, \Delta\sigma'_h$: 연직방향 및 횡방향 유효응력증분(또는 압밀응력증분)
- ϵ_v, ϵ_h : 연직방향 및 횡방향 변형률

참 고 문 헌

$\epsilon_{vc}, \epsilon_{hc}$: 연직방향 및 횡방향 압밀변형률
 ϵ_{vu} : 연직방향 즉시변형률
 σ'_v, σ'_h : 연직방향 및 횡방향 유효응력
 $\sigma'_{vi}, \sigma'_{hi}$: 초기 연직방향 및 횡방향 유효응력
 τ : 전단응력
 ν_{hv} : 횡방향 변형이 연직방향 변형에 미치는 영향을 나타내는 포아송비
 ν_{vh} : 연직방향 변형이 횡방향 변형에 미치는 영향을 나타내는 포아송비
 ν_{hh} : 횡방향 변형이 직교하는 횡방향 변형에 미치는 영향을 나타내는 포아송비
 A, B : Skempton의 간극수압계수
 A, B, C, D : 직교이방 탄성체 구성방정식의 매개변수 (축대칭조건)
 C_c : 압축지수
 C_r : 재압축지수
 E_v, E_h : 연직방향 및 횡방향 탄성계수
 G_s : 비중
 K_o : 정지토압계수
 k_v, k_r : 연직방향 및 방사방향 투수계수
 K^* : 유효응력증분비(또는 압밀응력증분비) = $\frac{\Delta\sigma'_h}{\Delta\sigma'_v}$
 LL : 액성한계
 PI : 소성지수
 PL : 소성한계
 p', q : $\frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2}, \frac{\sigma'_v - \sigma'_h}{2}$
 p'_c : 선행압밀하중
 U : 변형에너지밀도
 w_o : 초기 함수비

1. 권오엽 (1988), “정규압밀 점성토의 응력경로에 따른 응력-변형 거동”, 박사학위논문, 서울대학교.
2. Burland, J. B. and Georgiannou, V. N. (1991), “Small strain stiffness under generalized stress changes”, *Proc. 10th Eur. Conf. Soil Mech.*, Florence, Vol.1, pp.41-45.
3. Henkel, D. J. (1960), “The Shear Strength of Saturated Remolded Clays”, *Proc. ASCE Spec. Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils*, Boulder, pp.553-554.
4. Gangopadhyay, C. R., Das, S. C. and Som, N. (1980), “Stress Path Influence on Drained deformations of clay”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.106, No.GT11, pp. 1243-1260.
5. Ladd, C. C. and Foott, R. (1974), “New Design Procedures for Stability of Soft Clays”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.100, No.GT7, pp.763-786.
6. Lambe, T. W. (1963), “An Earth Dam for Storage of Fuel Oil”, *Proceedings of 2nd Pan American conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, p.257.
7. Lambe, T. W. (1964), “Method of Estimating Settlement”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.90, No.SM5, pp.43-67.
8. Lambe, T. W. (1967), “The Stress-Path Method”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.93, No.GT6, pp.309-331
9. Lambe, T. W. and Marr, W. A. (1979), “Stress-Path Method : Second Edition”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.105, No.SM6, pp.727-738.
10. Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1986), *Soil mechanics, SI version*, John Wiley & Sons.
11. Parry, R. G. H. (1960), “Triaxial Compression and Extension Tests on Remolded Saturated clay”, *Geotechnique*, Vol.10, No.3, pp.451-457.
12. Simons, N. E. and Som, N. (1969), “The Influence of Lateral Stresses on the Stress-Deformation Characteristics of London Clay”, *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.369-377.
13. Skempton, A. W. (1954), “The Pore Pressure Coefficient A and B ”, *Geotechnique*, Vol.4, pp.143-147.
14. Yimsiri, S. and Soga, K. (2002), “Application of Micromechanics Model to Study Anisotropy of Soils at Small Strains”, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.5, pp.15-26.

(접수일자 2005. 2. 16, 심사완료일 2005. 6. 1)