

점성토지반의 침하거동 평가를 위한 새로운 응력경로시험기법

A New Stress Path Test Method for Evaluating Settlement Behaviors of Clay Deposits

정 충 기*¹ Chung, Choong-Ki

최 영 태*² Choi, Young-Tae

김 창 엽*³ Kim, Chang-Youb

이 원 택*⁴ Lee, Won-Taeg

Abstract

A new stress path test method, which is more suitable for evaluating settlements of clay deposits, was introduced. This new method is basically based on back pressure equalization concept and makes it possible to estimate deformations corresponding to all points on a specific stress path by only one test. As a result, deformation characteristics of a clay deposit can be predicted by a few tests and the more practical application of stress path method can be realized. In addition, anisotropic deformation behaviors following arbitrary stress paths also can be experimentally measured by this test method. Experimental applicability of the proposed method was confirmed by performing various stress path tests on remolded kaolinite samples and the actual process to evaluate overall deformation characteristics and settlements was also presented.

요 지

본 연구에서는 점성토지반의 침하량 평가에 보다 적합한 새로운 응력경로시험을 소개하였다. 새로운 시험기법에서는 배압평형과정을 채택함으로써 특정 응력경로상의 모든 점에 대응하는 변형특성을 하나의 시험을 통해 파악할 수 있다. 따라서, 제안된 시험기법을 적용하는 경우, 응력경로법의 실용적인 적용을 위해 필요한 지반의 전반적인 변형거동을 몇 개의 시험만으로 예측할 수 있으며 나아가 기존의 시험기법으로는 수행이 불가능했던 이방적 압밀응력 경로에 대한 변형거동의 평가 역시 실험적으로 가능해진다. 이와 함께 본 연구에서는 성형 카올리나이트 시료에 대해 다양한 응력경로시험을 수행하여 제안된 시험기법의 실험적 적용성을 확인하였으며, 그 결과를 활용하여 전반적인 변형거동과 침하량을 평가하는 실제 과정을 제시하였다.

Keywords : Back pressure equalization, Compressibility, Settlements of clay, Stress path method

1. 서 론

Lambe(1964, 1967)은 지반의 초기응력상태와 구조물 하중에 의해 지반이 받게 되는 응력경로를 합리적으로 결정하고, 이를 적절한 응력경로시험을 통해 재현함으로써 지반의 침하량을 보다 정확하게 평가할 수 있는

응력경로법의 개념을 처음으로 제안하였다. 응력경로법은 현장의 응력경로에 대응하는 실제 변형거동을 실험을 통해 파악하고, 이에 근거하여 침하량을 평가한다는 측면에서 매우 합리적인 침하량 평가기법이라 할 수 있다.

응력경로법의 실제 적용을 위해서는 우선 다양한 응

*1 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engr., Seoul National Univ., geolabs@gong.snu.ac.kr)
*2 정회원, 삼보기술단 지반공학부 주임 (Member, Junior, Engineer., Sambo Engr.)
*3 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil, Urban & Geosystem Engr., Seoul National Univ.)
*4 정회원, 호남대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engr., Honam Univ.)

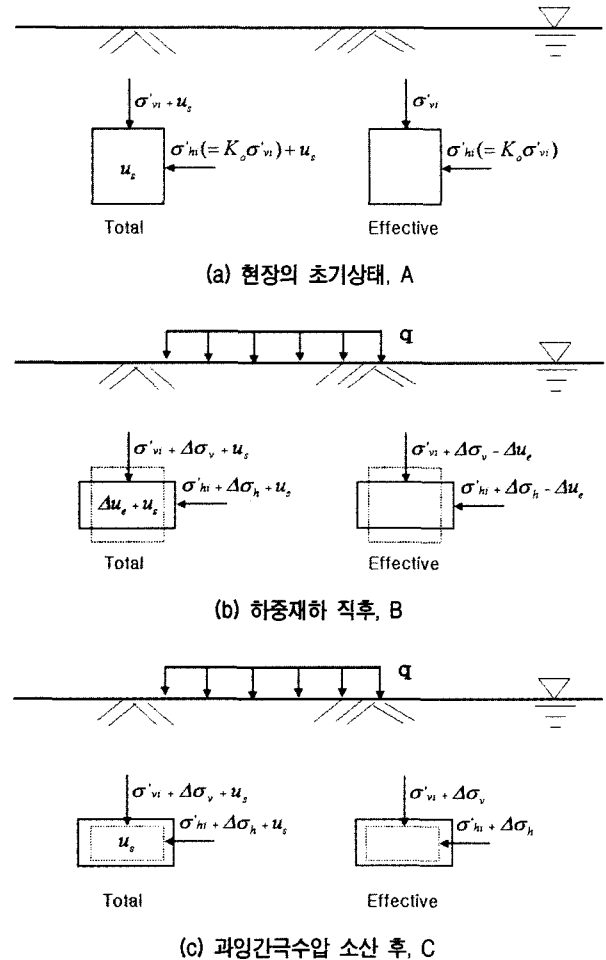
력경로를 재현할 수 있는 장비가 필수적일 뿐만 아니라, 현장에서 발생하는 실제 응력경로를 적절하게 모사할 수 있도록 실험을 계획하여 수행하는 것이 중요하다. 실험 장비의 경우 관련 기술의 발달과 더불어 최근에는 응력경로시험을 위한 제어 가능 삼축시험장비 등이 보편화되고 있다. 또한 아직은 극히 제한적이지만, 축대칭 이외의 다양한 변형모드의 구현을 위하여 응력 제어가 가능한 평면변형을 시험기와 진삼축시험기의 개발 시도가 이루어지고 있다. 그러나 구조물 재하에 의해 발생하는 응력경로는 구조물에 대한 상대적 위치와 깊이에 따라 매우 다양하게 나타나게 된다. 따라서 정확한 변형 거동을 예측하기 위해서는 적절한 시험장비의 개발과 더불어 발생한 응력경로를 근사하게 모사할 수 있도록 실험을 계획, 실행해야 한다. 이러한 측면에서 기존의 응력경로시험기법은 하나의 시험으로 오직 하나의 응력경로만을 재현할 수 있기 때문에, 정확한 변형 거동, 즉 침하량 평가를 위해서는 발생 가능한 다양한 응력경로 각각에 대한 많은 수의 실험이 필요하다는 문제점이 있다. 따라서 응력경로법의 실용적 적용을 위해서는 실험횟수를 줄일 수 있는 것이 매우 중요하다.

한편 적은 수의 응력경로시험으로 특정 지반의 재하 또는 경계조건 변화에 따라 존재 가능한 전반적인 변형 거동을 평가할 수 있다면, 즉 전반적인 변형 거동을 예측할 수 있는 도표 등이 제시된다면, 그 지반 상에 건설되는 어떠한 구조물이라도 간편하고 정확하게 침하량을 평가할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 기존의 응력경로시험기법을 개선하여, 하나의 실험으로 다양한 응력경로를 모사할 수 있는 시험기법을 소개하고, 그 실험적 적용성을 확인하고자 한다. 또한 이를 통하여 어떻게 침하와 관련된 전반적인 변형거동을 예측할 수 있는지 제안하였다. 변형모드는 축대칭인 삼축조건으로 한정하였으며, 성형 카울리나이트 점성토를 실험적 검증 시료로 사용하였다.

2. 기존 응력경로시험기법

응력경로법을 적용하여 점성토지반의 침하량을 평가하고자 할 때, 일반적으로 가정되는 흙요소의 단계별 응력상태와 변형양상은 축대칭 조건인 삼축상태를 가정할 때 그림 1과 같다. 재하 이전의 초기상태에서 흙요소는 횡방향 변형이 없는 K_0 상태(그림 1 (a))로 존재하며, 구조물 하중이 재하된 직후에는 연직방향과 횡방향의



σ'_{vi} : 초기 연직유효응력 σ'_{hi} : 초기 수평유효응력
 K_0 : 정지토입계수 $\Delta\sigma_v$: 연직응력증분
 $\Delta\sigma_h$: 수평응력증분 u_s : 정수압 Δu_e : 과잉간극수압

그림 1. 구조물 하중에 의한 흙요소의 응력상태와 변형양상

응력이 비배수 상태에서 증가하므로 즉시변형과 함께 과잉간극수압이 발생한다(그림 1 (b)). 이후 흙요소는 발생한 과잉간극수압(Δu_e)이 소산되면서 압밀되어 최종적으로 그림 1 (c)와 같은 상태에 도달하게 된다. 그림 2는 이때 흙요소가 경험하는 유효응력경로를 표시한 것이다.

기존의 응력경로시험에서는 응력경로법 적용에 필요한 변형률의 평가를 위해 그림 1에 제시된 바와 같은 유효응력의 변화를 실험실에서 재현한다. 즉 초기 유효응력상태(σ'_{vi} , $\sigma'_{hi} = K_0 \sigma'_{vi}$)까지 시료를 압밀하여 현장의 초기상태를 재현한 후(그림 2의 A점), 예측된 연직응력증분($\Delta\sigma_v$)과 수평응력증분($\Delta\sigma_h$)을 비배수상태에서 동시에 재하함으로써 연직방향 즉시변형률(ϵ_{vi})을 평가한다(그림 2의 AB). 이후 배수밸브를 개방하여 발생한 과잉간극수압 소산시킴으로써 연직방향 압밀변형률

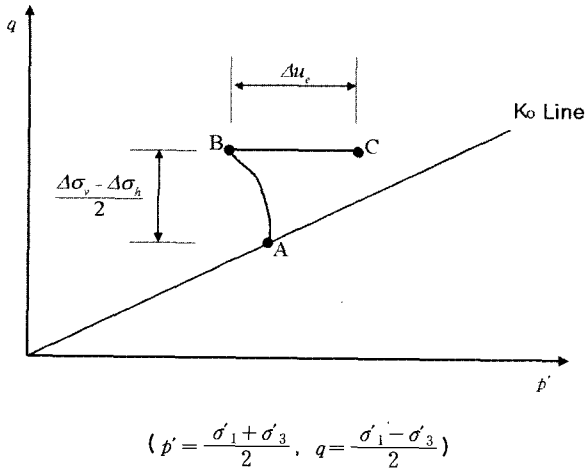


그림 2. 구조물 하중에 의한 흙요소의 유효응력경로

(ϵ_{vc})을 평가한다(그림 2의 BC). 보편적으로 응력경로 법에는 삼축시험기가 사용되므로 축대칭 조건, 즉 원형 기초 또는 정방형 기초에 대한 침하예측에 적합하며, 줄기초의 경우에는 평면변형시험기를 이용한 응력경로법의 적용이 필요하다.

기존 응력경로시험은 미리 예측된 응력경로에 대해 발생하는 변형률을 직접적으로 파악한다는 측면에서는 매우 합리적이라 할 수 있다. 그러나 하나의 시험에서는 해당 응력경로 상의 특정한 점들(B점과 C점)에 해당하는 변형특성밖에 파악할 수 없다는 한계를 가지고 있다. 따라서 침하량의 평가를 위해서는 많은 수의 응력경로 시험들을 반드시 수행해야만 하며, 다양한 구조물들이 동일한 지반 상에 시공되는 경우에도 각각의 하중조건에 대해 응력경로시험들을 개별적으로 수행해야만 한다.

이러한 측면을 고려할 때, 응력경로법의 개념을 합리적으로 적용하기 위해서는 실험적 노력을 최소화하면

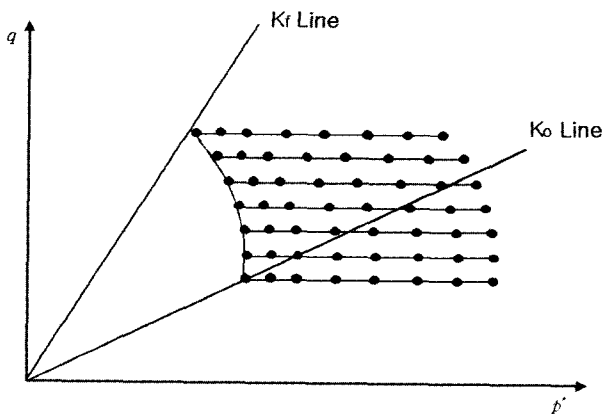


그림 3. 전반적인 변형양상의 평가를 위해 필요한 시험조건(기존 시험기법을 적용하는 경우)

서 발생 가능한 여러 응력경로들에 대해 지반의 전반적인 변형양상을 먼저 파악하고, 이를 근거로 각각의 설계 구조물 하에서 발생하는 응력경로를 평가하여 침하량을 산정하는 것이 바람직하다. 그러나 기존 시험기법을 적용하는 경우, 지반의 전반적인 변형양상을 파악하기 위해서는 수많은 응력경로(예를 들어, 그림 3의 점들)에 대해 각각 응력경로시험을 수행해야 하고, 구속압의 변화까지 고려해야 하므로 이러한 접근은 사실상 불가능하다.

또한 기존 시험기법에서는 비배수 재하과정에서 발생한 과잉간극수압을 배수밸브를 개방하여 소산시키는 수동적인 방식으로 압밀과정을 수행하므로, 시료의 압밀은 언제나 등방압밀응력경로를 따라서만 발생하게 된다. 그러나 실제 지반 내에서는 압밀이 진행됨에 따라 흙요소의 전응력상태가 변화하며, 결과적으로 압밀은 이방적인 유효응력경로를 따라 발생한다. 이와 같은 압밀 중 전응력 변화는 이미 널리 알려져 있을 뿐 아니라(권오엽, 1988), 탄성이론과 소성모델(MCC)을 적용한 수치해석의 결과로부터도 쉽게 확인할 수 있다(Kim and Chung, 1999).

따라서 이방적 압밀응력경로에 대한 시험 자체가 불가능한 기존 시험기법으로는 압밀 중의 전응력 변화를 고려하는 보다 정확한 압밀침하량의 평가는 불가능하며, 이방적 압축특성을 가지는 점성토 지반의 일반적인 변형특성 평가측면에서도 기존 시험기법의 활용가능성은 크게 제한된다.

3. 새로운 응력경로시험기법

본 연구에서는 이러한 기존 시험기법의 한계를 고려하여 침하와 관련된 점성토 지반의 변형거동 평가에 보다 적합한 새로운 응력경로시험기법을 제안하였다. 새로운 시험기법은 이방적인 압밀응력경로를 포함하여 발생 가능한 다양한 응력경로들에 대해 지반의 전반적인 변형특성을 최소한의 시험을 통해 파악하는 것을 목표로 고안되었으며, 그 구체적인 수행절차와 특징 및 활용성은 다음과 같다.

제안된 응력경로시험은 시료가 포화되었다는 조건하에서 개념적으로 그림 4와 같은 절차로 수행된다.

① K_0 압밀과정,

점성토 지반의 응력-변형거동은 초기 유효응력상태

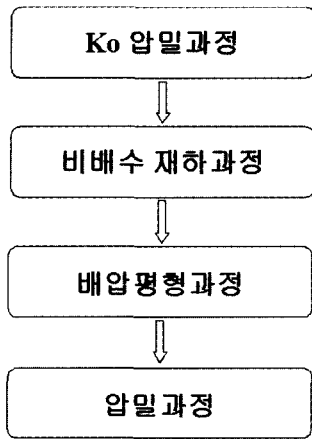


그림 4. 제안된 시험기법의 수행절차

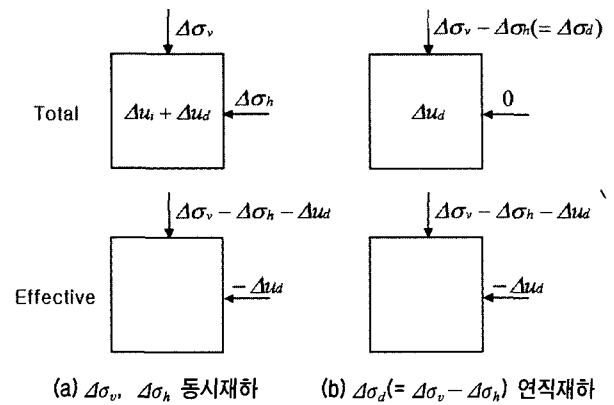


그림 5. 기존 시험기법과 제안된 시험기법의 비배수 재하과정 비교

에 따라 크게 좌우된다. 그러나 대상지반의 응력이력이 동일한 경우(즉, OCR이 동일한 경우), 응력-변형거동은 초기 유효응력상태에 대해 정규화된 거동을 보인다. 따라서, 특정한 응력이력을 가지는 점성토 지반(예를 들어, 정규압밀점성토 지반)의 전반적인 변형거동을 평가하기 위해서는 기존 시험기법에서와 같이 현장의 다양한 초기 유효응력상태를 개별적으로 재현하는 대신, 현장의 응력이력에 맞는 대표적인 초기 유효응력상태를 결정하여 이를 재현하고, 결과 해석과정에서 정규화된 거동특성으로 고려하는 것으로 충분하다.

이에 근거하여 제안된 시험기법에서는 모든 시료를 현장의 응력이력에 해당하는 대표적인 하나의 초기 유효응력상태로 K_0 압밀한 후, 이어지는 시험과정에서 평가되는 응력-변형거동을 적용된 초기 유효응력상태로 정규화하여 표현함으로써 다양한 초기상태에 대응하는 지반의 전반적인 변형거동을 예측하게 된다.

② 비배수 재하과정

이론적으로 비배수 재하과정에서 포화시료에 발생하는 축차발생간극수압(Δu_d)의 크기는 축차응력증분($\Delta\sigma_d$)에 의해서만 좌우되며, 이러한 현상은 기존의 연구(김창엽 등, 1999)를 통해 실험적으로도 이미 확인된 바 있다(여기서, 축차발생간극수압은 전체 과잉간극수압(Δu_e)에서 등방응력증분에 의한 발생간극수($\Delta u_i = \Delta\sigma_h$)을 제외한 간극수압을 의미한다). 따라서 동일한 초기상태를 가지는 시료에 대해 연직방향과 횡방향 응력증분($\Delta\sigma_v, \Delta\sigma_h$)을 동시에 증가시키는 경우와 축차응력증분($\Delta\sigma_d = \Delta\sigma_v - \Delta\sigma_h$)만을 연직방향으로 증가시키는 경우의 유효응력상태는 다음의 그림 5에 제시한 바와 같이

완전히 동일하며, 유효응력상태에 의해 지배되는 즉시 변형 역시 결과적으로 동일하다.

따라서 제안된 시험기법에서는 연직방향과 횡방향 응력을 동시에 증가시키는 기존 시험기법과는 달리 연직방향으로만 응력을 증가시켜 비배수 응력경로를 재현하며, 이 과정에서 즉시변형과 함께 이어지는 배압평형과정의 수행에 필요한 발생간극수압을 측정한다.

③ 배압평형과정

본 연구에서 새롭게 고안되어 채택된 배압평형과정은 제안된 시험기법의 핵심적인 절차라 할 수 있다. 실제 배압평형과정은 비배수 재하과정에서 발생한 간극수압의 크기만큼 배압을 증가시킨 후 배수밸브를 개방하는 매우 간단한 방식으로 수행된다. 그러나, 이러한 간단한 과정의 적용을 통해 비배수 재하 시 유효응력상태를 유지시키면서도 시료의 배수조건을 비배수에서 배수상태로 전환할 수 있으며, 이어지는 압밀과정에서 임의의 압밀응력경로를 자유롭게 재현할 수 있게 된다(표 1).

④ 압밀과정

이미 언급한 바와 같이 기존 시험기법에서는 배수밸브를 개방하여 과잉간극수압을 소산시키는 수동적인 방식으로 압밀과정을 수행한다. 따라서 시료의 압밀응력경로는 언제나 등방압밀경로로만 제한된다(표 1). 또한 압밀이 진행되는 동안에 시료 내부의 잔류 과잉간극수압을 측정할 수 없으므로, 압밀과정 전체에 걸쳐 연속적으로 압밀변형을 측정하더라도 압밀 중에는 유효응력상태와 압밀변형 간의 관계를 파악할 수 없다. 즉 하나의 시험을 통해서만 등방압밀응력경로 상의 한 점(압

표 1. 기존 시험기법과 제안된 시험기법의 압밀과정 비교

	기존 시험기법		새로운 시험기법	
	전응력 상태	유효응력 상태	전응력 상태	유효응력 상태
	비배수 재하 직후의 상태		배압평형 이후의 상태	
압밀시작				
	<ul style="list-style-type: none"> · $\Delta u_i = \Delta \sigma_h$ (if saturated) · 배수조건을 제외한 모든 상태가 완전히 동일함. 			
압밀완료				
	<ul style="list-style-type: none"> · 압밀과정에서의 유효응력 증가량 $\Delta \sigma'_{vc} = \Delta \sigma_h + \Delta u_d = \Delta u_i + \Delta u_d = \Delta u_e$ $\Delta \sigma'_{hc} = \Delta \sigma_h + \Delta u_d = \Delta u_i + \Delta u_d = \Delta u_e$ $\Delta p' = \frac{\Delta \sigma'_{vc} + \Delta \sigma'_{hc}}{2} = \Delta u_e$ $\Delta q' = \frac{\Delta \sigma'_{vc} - \Delta \sigma'_{hc}}{2} = 0$ 		<ul style="list-style-type: none"> · 압밀과정에서의 유효응력 증가량 $\Delta \sigma'_{vc}, \Delta \sigma'_{hc}$ = 임의로 조절 가능 $\therefore \Delta p', \Delta q'$ = 임의로 조절 가능 	
압밀 응력경로				

밀완료시점)에 대해서만 압밀변형특성을 정확히 평가할 수 있다.

반면 제안된 시험기법에서는 배압평형과정의 적용을 통해 구현된 배수조건 하에서 시료 외부의 하중을 제어하는 능동적인 방식으로 압밀과정을 수행한다. 따라서 재하시 시료내에 과잉간극수압이 발생하지 않도록 주의하면서 시험을 수행한다면, 해당 압밀응력경로 상의 모든 점에 대해 유효응력상태와 압밀변형을 동시에 평

가할 수 있다. 또한 표 1에 제시된 바와 같이 시료 외부에 가해지는 압밀응력($\Delta \sigma'_{vc}, \Delta \sigma'_{hc}$)의 비율을 적절히 제어함으로써 이방적인 압밀응력경로에 대해서도 압밀변형특성을 자유롭게 평가할 수 있다. 즉 제안된 시험기법을 적용하는 경우에는 이방적 압밀응력경로의 적용이 가능할 뿐 아니라, 해당 압밀응력경로 상의 모든 점에 대응하는 압밀변형특성을 하나의 시험을 통해 연속적으로 파악할 수 있다.

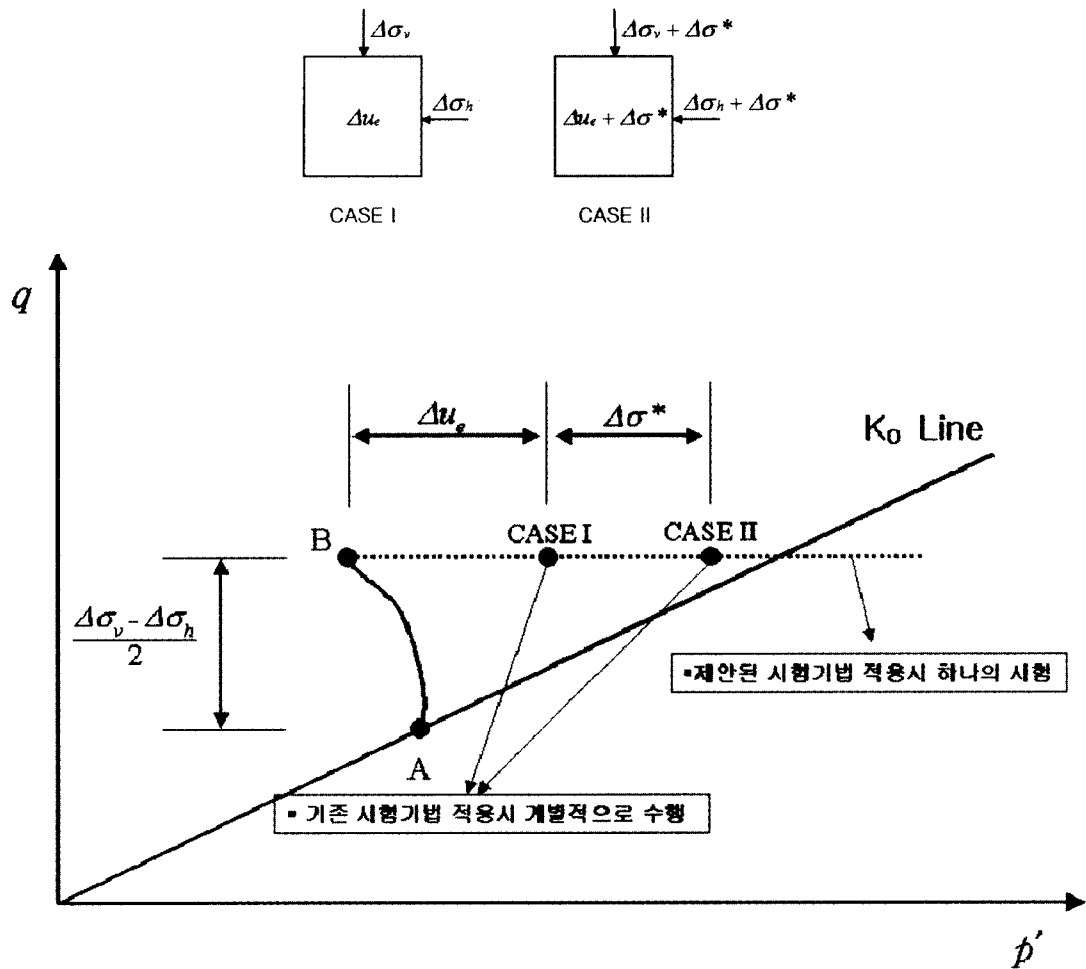


그림 6. 축차응력증분이 동일한 경우의 응력경로 (제안된 시험기법과 기존 시험기법의 비교)

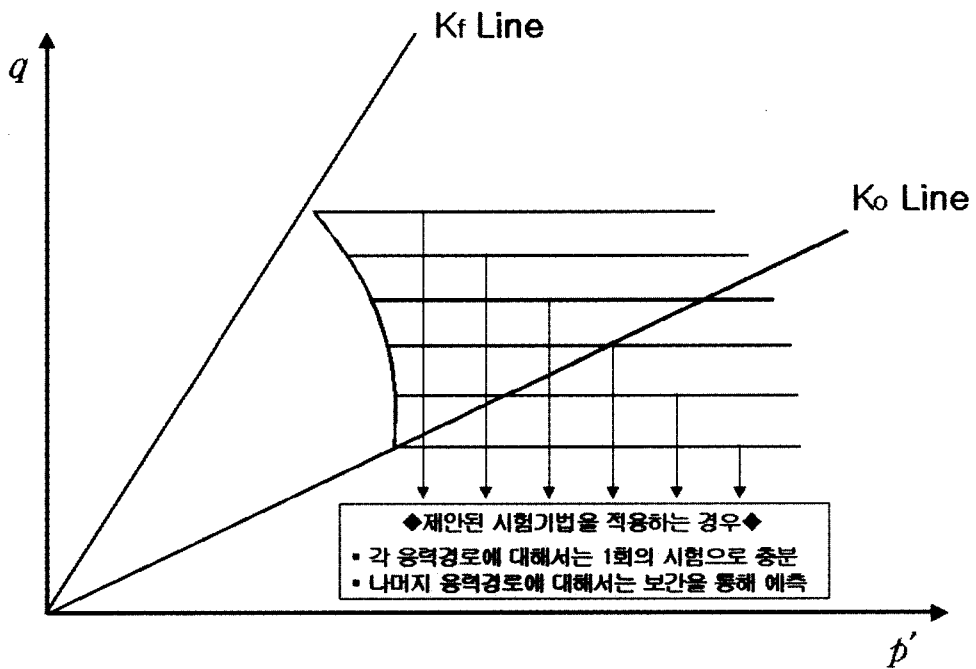


그림 7. 제안된 시험기법을 적용하는 경우의 전반적인 변형거동의 평가

이러한 시험절차와 특징을 가지는 제안된 시험기법은 동일한 응력이력을 가지는 특정 점성토 지반의 전반적인 변형거동을 최소한의 시험을 통해 파악하는 데 효과적으로 활용할 수 있다. 이는 제안된 시험기법에서는 개념적으로 개별 응력증분이 다르더라도 초기응력상태와 축차응력증분만 동일하면 모든 경우의 비배수 재하 과정을 하나의 시험과정으로 대체할 수 있으며, 압밀과정 역시 연속적인 하나의 등방배수압축과정으로 대체할 수 있기 때문이다(그림 6). 즉 몇 가지 축차응력증분에 대한 시험만으로도 특정 초기상태에 대해 전반적인 즉시 및 압밀변형거동을 파악할 수 있으며(그림 7), 이와 같은 결과를 초기응력상태에 대해 정규화하여 표현함으로써 모든 초기상태에 대해 대상지반의 전반적인 변형거동을 합리적으로 예측할 수 있다.

이와 함께 이방적인 압밀응력경로를 자유롭게 재현할 수 있는 제안된 시험기법은 압밀에 따른 전응력상태의 변화를 반영하는 보다 정확한 압밀침하량의 평가 역시 실험적으로 가능하게 한다.

4. 실험적 적용성 및 활용성 확인

제안된 시험기법의 실험적 적용성과 활용성을 확인하기 위하여 성형 kaolinite 시료에 대해 삼축시험기를 이용하여 다양한 응력경로시험들을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

4.1 사용시료

본 연구의 응력경로시험에서는 정규압밀상태의 성형 kaolinite 시료를 사용하였으며, 사용된 시료는 함수비 100%(액성한계의 2배 이상)의 kaolinite 슬러리를 대형 K_0 시료성형기 내에서 연직압밀압력 150kPa로 압밀하여 성형하였다. 표준압밀시험의 결과, 성형 시료의 선행압밀압력(σ_{vp})은 성형압밀압력에 비해 비교적 작은 100kPa 정도로 나타났으며, 이는 시료성형기 내의 벽면 마찰과 표준압밀시험을 위한 시료의 준비 및 거치 과정에서 발생한 교란의 영향으로 판단된다. 사용된 kaolinite 시료의 기본적인 물성치는 다음의 표 2에 제시하였다.

표 2. 사용된 kaolinite 시료의 기본 물성치

비중	액성한계(%)	소성한계(%)	소성지수(%)	200번체 통과량(%)	통일분류
2.60	44.4	21.1	23.3	98.0	CL

표 3. 실시된 응력경로시험

시험명	비배수 재하시 축차응력증분 (kPa)	압밀응력경로	시험횟수
U00K10	0	등방압밀경로	1
U05K10	5	"	1
U10K10	10	"	2
U15K10	15	"	2
U20K10	20	"	2
U25K10	25	"	2

4.2 시험계획

본 연구에서 실시된 삼축시험상태의 응력경로시험들을 표 3에 정리하였다. 이미 밝힌 바와 같이 제안된 시험기법을 적용하는 경우에는 임의의 압밀응력경로에 대한 시험이 가능하지만, 본 연구에서는 일단 기존 시험기법의 압밀응력경로와 동일한 등방압밀응력경로에 대해서 제안된 시험기법을 적용하여 응력경로시험을 실시하였다.

4.3 시험 절차 및 확인 사항

① 배압포화과정

배압포화과정에서는 시료의 포화를 위하여 300kPa의 배압을 약 24시간 동안 유지하였으며, 이 때 간극수압계 수 B값은 모든 시험에서 0.97이상으로 측정되었다.

② K_0 압밀과정

현장의 초기상태를 재현하는 K_0 압밀과정의 효율적인 수행을 위해서 삼축시험장비를 이용한 5회의 K_0 압밀시험을 먼저 실시하였다. 그 결과 대상시료의 K_0 값은 평균 0.5정도로 평가되었으며, 수행된 응력경로시험에서는 이에 근거하여 연직방향과 횡방향 압밀압력을 일정비율(1 : 0.5)로 점증재하하는 이방압밀과정으로 K_0 압밀과정을 대체하였다. 이때 연직압밀압력은 시료 교란의 영향을 최소화하기 위하여 선행압밀압력(σ_{vp})의 약 2배에 해당하는 200kPa까지 재하하였다. 따라서, K_0 압밀과정 이후 시료는 정규압밀상태로 존재하는 것

으로 볼 수 있다.

이와 같은 이방압밀과정에서 측정된 연직방향과 횡방향의 평균 변형률(ϵ_v, ϵ_h)은 각각 4.70%와 0.12%로 나타났으며, 모든 시험에서 ϵ_h / ϵ_v 값은 0.03 이하로 나타났다. 따라서, 본 연구에서 적용된 이방압밀과정은 시료의 초기 K_0 응력상태를 적절히 재현한 것으로 판단된다.

③ 비배수 재하과정

비배수 재하과정에서는 제안된 시험기법에 근거하여 목표 축차응력증분 (0~25kPa)에 도달할 때까지 5kPa 단위로 연직방향으로만 하중을 단계적으로 재하하였다. 각 하중단계는 기본적으로 4시간씩 유지하였으며, 최종 하중단계는 비배수 변형이 압밀과정에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 연직변형률(ϵ_{vu})의 속도가 0.00167%/hr 이하가 될 때까지 24시간 이상 유지하였다. 이때 측정되는 과잉간극수압 역시 일정한 값에 수렴하는 것으로 나타났다.

④ 배압평형과정

배압평형과정은 비배수 재하과정에서 측정된 발생과잉간극수압(Δu_d)만큼 배압을 증가시킨 후, 배수 밸브를 개방하여 8시간 이상 유지시키는 방식으로 수행되었다.

앞의 3.1절에서 밝힌 바와 같이 배압평형과정 전·후의 유효응력상태는 이론적으로 완전히 동일하므로 배압평형과정에서는 어떠한 변형도 발생해서는 안되며, 실제로도 수행된 모든 배압평형과정에서 연직 및 체적 변형률은 무시할 수 있을 정도의 작은 값으로 발생하였다.(연직방향 변형률 - 평균 0.039%, 최대 0.07%, 체적 변형률 - 평균 0.025%, 최대 0.04%) 이와 같은 결과는 이론적인 측면에 제안된 배압평형의 개념이 실제로 타당하며 실험적으로도 쉽게 적용될 수 있음을 보여 준다.

⑤ 압밀과정

제안된 시험기법에서는 시료 외부에 가해지는 압밀 응력을 제어함으로써 임의의 압밀응력경로에 대해 연속적으로 압밀변형특성을 평가할 수 있다. 이러한 특징에 근거하여 본 연구에서는 4.2절에서 밝힌 바와 같이 다양한 등방압밀응력경로들에 대해 압밀변형특성을 평가해 보았다.

수행된 실제 압밀과정에서는 그림 8에 제시한 바와 같이 외부하중을 단계적으로 재하하였다. 이는 등방압

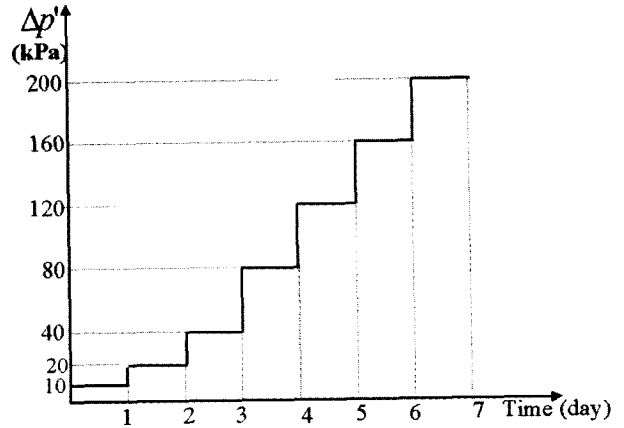


그림 8. 등방압밀과정에서의 하중 재하

밀경로의 경우에는 각 하중 단계에서 비배수 변형과 유효응력상태의 변화를 유발하지 않으므로, 연속재하가 아닌 단계재하만으로도 압밀변형특성을 연속적으로 파악할 수 있기 때문이다. 각 압밀단계에서는 기본적으로 24시간씩 유지하였으며, 선택적으로 24시간 경과 후의 잔류 과잉간극수압을 측정함으로써 압밀 완료여부를 확인하였다.

제안된 시험기법을 적용하는 이러한 모든 시험과정은 응력경로의 제어가 가능한 기존 삼축시험장비를 활용하여 수행되었다. 따라서 기존 응력경로시험기법을 적용할 수 있는 일반적인 시험장비만으로도 제안된 시험기법을 쉽게 적용할 수 있다.

4.4 실험결과의 활용

그림 9~그림 11은 사용시료의 비배수 변형거동과 과잉간극수압 발생양상 및 연직방향 압밀거동을 초기 연직압밀압에 대해 정규화하여 나타낸 것이다. 제안된 시험기법을 적용함으로써 얻을 수 있는 이와 같은 지반의 전반적인 변형양상은 특정한 응력이력(즉, 특정한 과압밀비 OCR)을 가지는 지반의 침하량 평가에 효과적으로 활용할 수 있다.

실제 침하량의 평가는 대상지반의 대표점들을 심도 별로 설정하고, 각 대표점에 대해 초기 연직유효응력(σ'_{vi})과 구조물 하중에 의한 응력증분($\Delta\sigma_v, \Delta\sigma_h$)을 결정하는 것으로부터 시작된다. 즉시침하량은 각 대표점에 대해 초기 연직유효응력과 응력증분으로부터 정규화된 축차응력증분($\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} = \frac{\Delta\sigma_v - \Delta\sigma_h}{\sigma'_{vi}}$)을 계산한 후, 그림 9와 같은 결과로부터(즉, $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - \epsilon_{vu}$ 관계로부터) 연

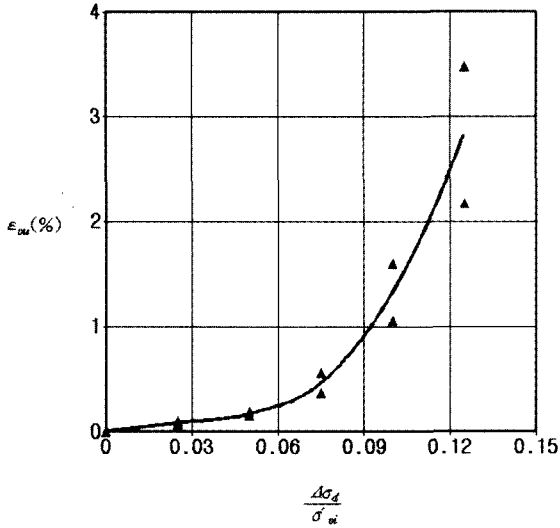


그림 9. 정규화된 즉시변형거동, $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - \epsilon_{vu}$ (비배수 재하결과)

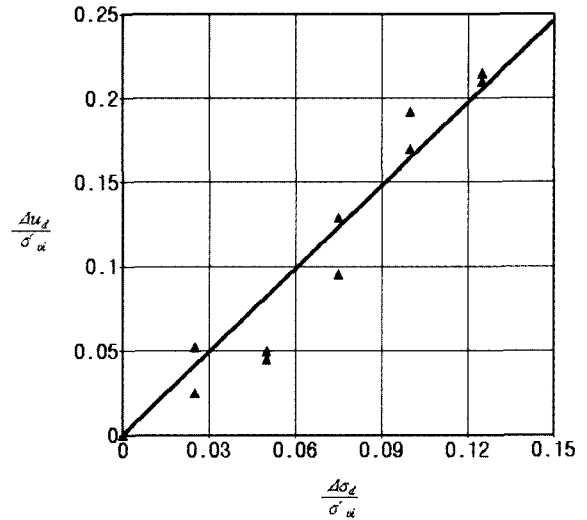


그림 10. 정규화된 과잉간극수압 발생양상, $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta u_d}{\sigma'_{vi}}$ (비배수 재하결과)

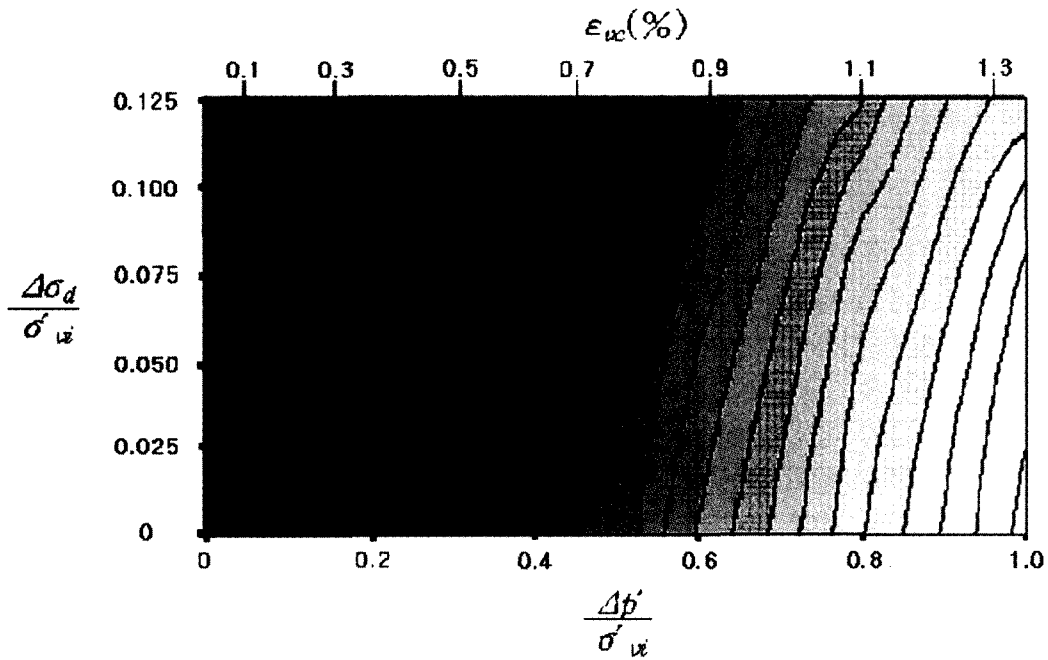


그림 11. 정규화된 연직방향 압밀거동($\frac{\Delta p'}{\sigma'_{vc}} - \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - \epsilon_{vc}$)

직방향 즉시변형률(ϵ_{vu})들을 결정하여 이들을 깊이
에 따라 적분함으로써 평가할 수 있다.

압밀침하량의 평가를 위해서는 먼저 비배수 재하에
의한 전체 발생간극수압(Δu_e)을 평가해야 한다. 전체
발생간극수압은 각 대표점에 대해 즉시침하량의 경우
와 마찬가지로 정규화된 축차응력증분을 계산하여
 $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta u_d}{\sigma'_{vi}}$ 관계(그림 10)로부터 축차발생간극수압
(Δu_d)을 결정하고, 여기에 횡방향 응력증분($\Delta\sigma_h = \Delta u_i$)

을 더하여 평가할 수 있다. 압밀 중의 전응력변화를 고
려하지 않는 일반적인 가정하에서는 이와 같이 평가된
전체 발생간극수압이 압밀 중의 평균유효응력 증가량
($\Delta p'$)과 동일하므로, 정규화된 평균유효응력 증가량
($\frac{\Delta p'}{\sigma'_{vi}} = \frac{\Delta u_e}{\sigma'_{vi}}$)을 계산하여 $\frac{\Delta p'}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - \epsilon_{vc}$ 관계(그림
11)로부터 연직방향 압밀변형률을 평가할 수 있다. 그리
고 각 대표점의 값들을 깊이에 따라 적분하면, 압밀침하
량을 구할 수 있다.

지반의 전반적인 변형거동을 활용하는 이러한 침하량 평가방법은 다양한 외부하중 조건에 대해서도 해당하는 응력증분들만 새롭게 결정하면 추가적인 시험 없이 적용할 수 있으므로, 점성토 지반의 침하량 평가에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론 및 요약

(1) 본 연구에서는 응력경로법의 개념을 적용하는 점성토 지반의 침하량 평가와 관련하여, 지반의 전반적인 변형거동을 보다 효과적으로 파악할 수 있는 배압평형과정에 근거한 새로운 응력경로시험기법을 제안하였다. 제안된 시험기법은 크게 K_0 압밀과정, 비배수 재하과정, 배압평형과정, 압밀과정으로 구성된다.

- 제안된 시험기법의 K_0 압밀과정에서는 점성토지반의 정규화된 거동특성에 근거하여, 특정 응력이력을 가지는 동일한 지반에 대해서는 하나의 초기 유효응력상태만을 재현한다.
- 비배수변형(ϵ_{vu})과 축차발생간극수압(Δu_d)의 축차응력증분($\Delta \sigma_d$) 의존성에 근거하여 제안된 시험기법의 비배수 재하과정에서는 기존 시험기법과 달리 연직방향으로만 하중을 재하한다.
- 제안된 시험기법에서 새롭게 고안되어 채택된 배압평형과정은 비배수 재하과정에서 발생한 과잉간극수압만큼 배압을 증가시킨 후 배수 밸브를 개방하는 방식으로 수행되며, 이를 통해 비배수 재하 이후의 유효응력상태를 유지시키면서도 시료의 배수조건을 배수상태로 전환할 수 있다.
- 제안된 시험기법의 압밀과정은 배압평형과정을 통해 구현된 배수조건 하에서 외부 압밀응력을 연속적으로 증가시키는 능동적인 방식으로 수행된다. 따라서, 기존 시험기법으로는 수행이 불가능했던 임의의 이방적 압밀응력경로에 대한 실험이 가능할 뿐 아니라, 하나의 시험만으로도 특정 압밀응력 경로 상의 모든 점에 대해 연속적으로 압밀변형특성을 파악할 수 있다.

(2) 제안된 시험기법을 적용하는 경우, 정규화된 축차응

력증분이 동일한 많은 응력경로시험들을 하나의 시험으로 대체할 수 있다. 따라서, 제안된 시험기법은 다양한 응력경로에 대한 지반의 전반적인 변형거동 평가와 이에 근거한 침하량 평가에 효율적으로 활용될 수 있다. 또한 제안된 시험기법에서는 비배수 재하 이후 임의의 압밀응력경로에 대한 자유로운 실험이 가능하므로, 압밀 중 전응력상태의 변화를 반영하는 보다 정확한 압밀침하량의 평가 역시 실험적으로 가능해진다.

(3) 본 연구에서는 제안된 시험기법의 실험적 적용성과 활용성을 확인하기 위하여 정규압밀상태의 성형 kaolinite 시료에 대해 응력경로시험들을 수행하였으며, 이를 통해 다음과 같은 사실을 확인하였다.

- 이론적인 측면에서 제안된 배압평형의 개념이 실제로 타당하며, 실험적으로도 쉽게 적용될 수 있음을 확인하였다.
- 기존 응력경로시험을 수행할 수 있는 일반적인 삼축시험장비만으로도 제안된 시험기법의 전체 시험과정을 특별한 어려움 없이 수행할 수 있음을 확인하였다.
- 제안된 시험기법을 적용하여 평가된 전반적인 변형거동으로부터 점성토지반의 즉시 및 압밀 침하량을 평가하는 실제 과정을 제시하였다.

참고 문헌

1. 권오엽(1988), "정규압밀점성토의 응력경로에 따른 응력-변형 거동", 서울대, 박사학위논문.
2. 김창엽, 정충기(1999), "응력경로법에 의한 정규압밀점성토의 변형 특성 고찰", 한국지반공학회지, 제15권, 1호, pp.161-173.
3. C.Y.Kim and C.K.Chung(1999), "Experimental Investigation of Settlement on Soft Clay Deposits Based on Probable Deformation Mode", *Proceedings of the Second International Symposium on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, M. Jamiolkowski, R.Lancellotta & Lo Presti(eds), Vol.1, pp.341-348.
4. Das, B.M., *Advanced Soil Mechanics*, McGraw-Hill Co., 1997
5. Lambe, T.W.(1964), "Methods of Estimating Settlement," *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.90, No.SM5, pp.43-67.
6. Lambe, T.W., and Marr, W.A.(1967), "Stress-Path Method: Second Edition," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.93, No.GT6, pp.309-331.

(접수일자 2002. 9. 18, 심사완료일 2003. 2. 10)