

## 점성토의 변형특성 평가를 위한 새로운 응력경로시험기법 A New Stress Path Testing Scheme To Estimate Clay Deformation Characteristics

최영태<sup>1)</sup>, Young-Tae Choi, 김창엽<sup>2)</sup>, Chang-Youb Kim, 정충기<sup>3)</sup>, Choong-Ki Chung

<sup>1)</sup>서울대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., S.N.U.

<sup>2)</sup>서울대학교 대학원 토목공학과 박사과정, Ph. D Candidate, Dept. of Civil Eng., S.N.U.

<sup>3)</sup>서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수, Associ. Prof., School of Civil, Urban and Geosystem Eng., S.N.U.

**SYNOPSIS** : A new stress path testing scheme with back pressure equalization process is proposed, to compute the settlement of clay soils based on their probable deformation mode. The proposed testing scheme minimizes the efforts for testing, otherwise numerous testing works are required to simulate the probable stress paths in the field. Furthermore, the proposed testing scheme can supply anisotropic stress paths for consolidation which cannot be possible in a conventional way. The validity and effectiveness of the proposed testing scheme was investigated and confirmed with test results on remolded kaolinite clay soils. Conclusively, it is suggested that the proposed testing scheme is a very effective tool to compute settlement of clay soils and it is also very useful to investigate the anisotropic characteristics of deformation of clay soils.

**Key words** : Consolidation settlement of clay, stress path method, back pressure equalization, compressibility

### 1. 서론

점성토 지반 상에 구조물이 시공되는 경우 정확한 침하량의 평가는 설계에 있어 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 점성토 지반의 침하량은 즉시침하량, 압밀침하량, 이차압축침하량으로 구분되며, 대부분의 경우 압밀침하량이 지배적인 것으로 알려져 있다.

Lambe(1964, 1967)은 이러한 점성토 지반의 침하량을 보다 합리적으로 평가할 수 있는 응력경로법을 처음으로 제안하였다. 제안된 응력경로법에서는 지반의 초기응력상태와 구조물 하중에 의한 실제적인 응력경로를 실내시험을 통해 재현하고 그 과정에서 평가되는 지반의 변형특성으로부터 정확한 침하량을 예측하게 된다. 그러나 이러한 응력경로법은 실제 적용을 위해서 상당히 많은 수의 시험들이 수행되어야만 할 뿐 아니라, 점성토의 전반적인 변형특성을 판별하기에는 한계가 있다.

이런 문제점에 착안하여 본 논문에서는 기존 시험기법의 여러 가지 한계를 개선할 수 있는 배압평형과정(back pressure equalization procedure)에 근거한 새로운 응력경로시험기법을 제안하였다. 응력제어가 가능한 삼축시험장비를 활용하여 성형 kaolinite 시료에 대해 제안된 시험기법을 실제로 적용함으로써 그 실험적인 적용가능성을 살펴보았으며, 그 시험결과를 분석하여 정규압밀점성토의 변형특성을 살펴보았다. 이와 함께 제안된 시험기법의 향후 다양한 활용방안에 대해서도 제시하였다.

## 2. 기존 응력경로시험기법

점성토 지반의 침하량을 평가하기 위해 응력경로법을 적용하는 경우, 일반적으로 가정되는 지반 내 흩 요소들의 응력상태와 변형양상은 다음의 그림 1.에 제시한 바와 같다. 현장의 초기상태에서 흩 요소는  $K_0$ 응력상태(그림 1. (a))로 존재하며, 구조물에 의한 하중이 재하된 직후에는 비배수 조건에서 연직방향과 횡방향의 응력이 증가하여 비배수 변형과 과잉간극수압( $\Delta u_e$ )이 발생하게 된다.(그림 1. (b)) 이후 발생한 과잉간극수압이 소산됨에 따라 흩 요소는 압밀변형을 경험하게 되고 최종적으로 그림 1. (c)에 제시된 응력상태에 도달된다. 다만, 그림 1. (c)에 제시한 압밀완료 후의 응력상태는 압밀과정동안 전응력상태의 변화가 전혀 발생하지 않는 경우에만 타당하다.

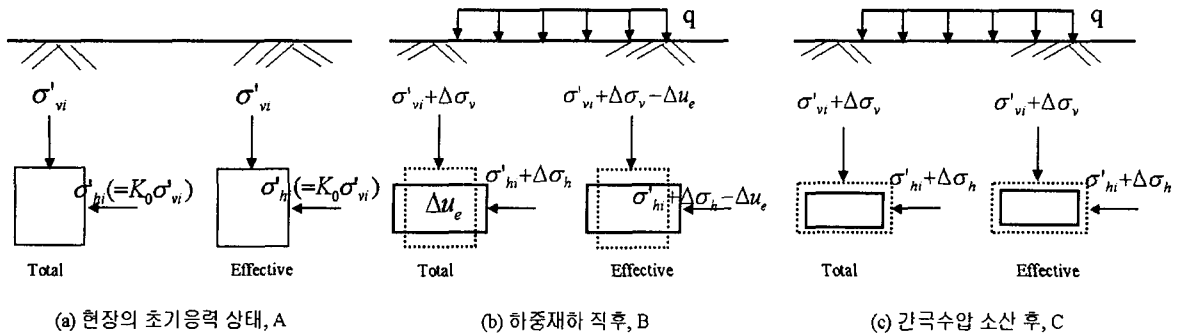


그림 1. 구조물 하중에 의한 흩 요소의 응력상태와 변형양상

기존의 응력경로시험기법에서는 침하량 평가를 위해 그림 1.에 제시된 응력상태 변화를 현장 상태에 따라 재현하여 흩 요소의 변형양상을 파악하게 된다. 즉 기존의 시험기법에서는 현장의 초기 연직유효응력( $\sigma'_{vi}$ )과 구조물 하중에 의한 연직 및 수평응력증분( $\Delta\sigma_v, \Delta\sigma_h$ )을 예측한 후, 현장의 초기응력상태를 재현하기 위하여  $K_0$  압밀과정을 수행하고, 이어지는 비배수 재하과정에서는 평가된 연직 및 수평방향 응력증분을 비배수 상태에서 재하한 후 발생하는 즉시변형률( $\epsilon_{vu}$ )을 평가하여 지반의 즉시침하량 평가에 이용하며, 최종적으로 배수 밸브를 열어 발생한 과잉간극수압의 소산을 허용함으로써 압밀과정을 재현하고 이 과정에서 평가된 연직방향 압밀변형률( $\epsilon_{vc}$ )을 이용하여 압밀침하량을 평가하게 된다.

이러한 기존 시험기법의 적용을 통해 평가된 지반의 변형특성은 미리 예측된 응력경로를 완벽하게 재현하여 침하량 평가에 활용한다는 측면에서는 매우 정확하고 합리적이라 할 수 있다. 그러나 기존의 시험기법은 그림 1.과 같이 가정된 응력경로를 효과적으로 재현한다는 측면만을 고려하여 제한되었기 때문에 압밀과정에서 모사할 수 있는 압밀응력경로가 발생간극수압의 소산에 따른 등방적인 유효응력증가 즉 등방압밀경로로 제한될 수밖에 없으며, 하나의 시험으로 압밀과정의 평균유효응력 증가량( $\Delta p'$ )이 발생과잉간극수압과 동일한 경우에 해당되는 등방압밀응력경로 상의 한 점에 대해서만 압밀변형특성을 평가할 수 있다는 한계가 있다. 즉 응력경로 또는 응력증분이 다른 경우 또 다른 시험을 필요로 한다.

## 3. 배압평형과정에 근거한 새로운 응력경로시험기법

이와 같은 기존 시험기법의 한계점에 착안하여 본 연구에서는 배압평형과정에 근거한 새로운 응력경로 시험기법을 제안하였으며, 제안된 새로운 응력경로시험기법의 구체적인 적용과정과 특징은 다음에 제시한 바와 같다.

### 3.1 제안된 새로운 응력경로시험기법의 적용과정과 특징

제안된 새로운 시험기법은  $K_0$ 압밀과정, 비배수 재하과정, 배압평형과정, 압밀과정으로 구성되며, 이 중  $K_0$ 압밀과정은 현장의 초기 유효응력상태를 재현하는 과정으로 기존의 시험기법과 동일하게 수행된다.

#### 3.1.1 비배수 재하과정

비배수 재하과정은 구조물 하중이 재하된 직후의 상태를 재현하는 과정으로서 제안된 시험기법에서는 기존 시험기법과는 달리 시료에 가해지는 연직응력만을 증가시켜 수행하게 되며, 이 과정에서 평가되는 즉시변형률( $\epsilon_{vu}$ )과 축차발생간극수압( $\Delta u_d$ )은 각각 즉시침하량의 평가와 배압평형과정의 수행에 활용된다. 제안된 시험기법에서 연직방향의 응력만을 증가시켜 비배수 재하 상태를 재현하는 것은 비배수 재하에 의한 포화 시료의 즉시변형과 축차발생간극수압( $\Delta u_d$ )이 축차응력증분( $\Delta \sigma_d$ )에 의해서만 좌우된다는 사실에 근거하고 있으며, 이러한 사실은 기존의 연구(김창엽 등 1999)에서 이미 확인된 바 있다.

#### 3.1.2 배압평형과정

배압평형과정은 비배수 재하과정에서 발생한 과잉간극수압( $\Delta u_d$ )의 크기만큼 배압(back pressure)을 증가시킨 후 배수 밸브를 개방함으로써 수행되며, 이와 같은 배압평형과정의 적용을 통해서 아래의 그림 2.에 제시된 바와 같이 비배수 재하 직후의 유효응력상태를 그대로 유지시키면서도 시료의 배수상태를 비배수 조건에서 배수 조건으로 전환시킬 수 있다. 따라서 배압평형과정의 적용 후에는 배수조건 하에서 외부하중조건을 제어함으로써 시료가 경험하는 유효응력경로를 임의로 조절하는 것이 가능해진다. 즉 비배수 재하직후의 상태에서 시작되는 압밀과정의 응력경로를 자유롭게 조절할 수 있게 된다.

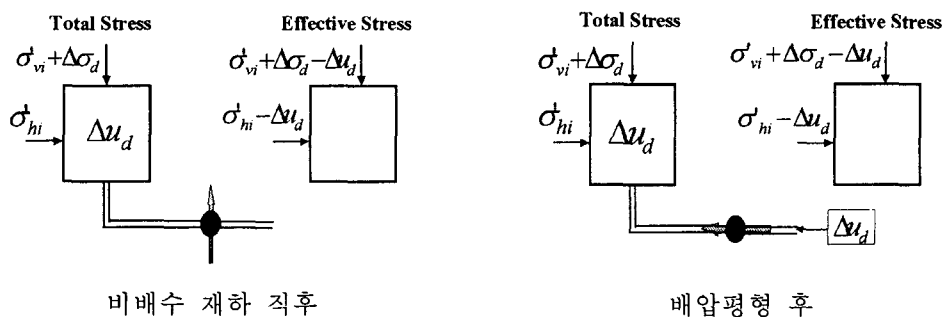


그림 2. 배압평형과정에 따른 시료 상태의 변화

#### 3.1.3 압밀과정

제안된 시험기법에서의 압밀과정은 배압평형과정을 통해 얻어진 배수조건 하에서 시료에 가해지는 외부 응력상태를 변화시킴으로써 지반의 압밀변형특성을 평가하는 단계이다. 앞에서 밝힌 바와 같이 제안된 시험기법에서는 배압평형과정의 적용을 통해 시료의 상태가 비배수 조건에서 배수조건으로 전환되므로, 비배수 재하 이후에도 기존 시험기법과는 달리 임의의 압밀응력경로에 대하여 연속적으로 압밀변형특성을 평가하는 것이 가능하다. 즉 기존시험기법을 통해서서는 하나의 시험으로 등방압밀경로상의 한 점( $\Delta p' = \Delta u_e$ )에 대한 압밀변형특성만을 평가할 수 있었던 것과 달리, 제안된 시험기법의 적용을 통해서 외부에서 가해지는 연직응력과 수평응력의 크기와 비율을 조절함으로써 임의의 압밀응력경로 상의 원하는 모든 점들에 대해 압밀변형특성을 평가할 수 있다. (표 1.)

표 1. 기존 시험기법과 새로운 시험기법의 압밀과정

	기존 시험기법		새로운 시험기법	
	전응력 상태	유효응력 상태	전응력 상태	유효응력 상태
압밀시작				
$\Delta u_i = \Delta \sigma_h$ (if saturated)				
압밀완료				
$\therefore \Delta p' = \Delta u_e, \Delta q' = 0 \rightarrow$ 등방압밀경로			$\Delta \sigma'_{vc}, \Delta \sigma'_{hc}$ : 압밀과정에서 외부하중 증가량 $\rightarrow \Delta p', \Delta q'$ 를 임의로 조절 가능	
압밀 응력경로				

### 3.2 제안된 새로운 응력경로시험기법의 장점 및 활용방안

본 연구에서 제안된 새로운 응력경로시험기법은 앞에서 설명한 시험기법 상의 특징들에 근거하여, 향후 다음과 같은 측면에서 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

첫째, 제안된 시험기법은 축차응력증분이 동일한 모든 경우의 압밀변형특성을 하나의 시험과정으로 평가하는데 효과적으로 활용할 수 있다. 즉 축차응력증분의 크기가 동일한 경우에는 앞의 3.1.1절에서 설명한 바와 같이 비배수 재하과정에서 발생하는 즉시변형과 비배수 재하 이후의 유효응력상태(즉 압밀시작시점의 유효응력상태) 역시 완전히 동일하다. 따라서 이어지는 압밀과정 역시 동일한 등방압밀응력경로 상에서 이루어 지게되며, 다만 비배수 재하과정에서 발생하는 과잉간극수압의 크기(즉 압밀과정에서의 평균유효응력 증가량)만이 서로 다를 뿐이다. 하지만 이와 같은 응력경로 측면에서의 유사성에도 불구하고 압밀변형특성을 평가하기 위하여 기존 시험기법을 적용하게 되면 개념적으로는 각각의 경우에 대해 별도의 시험을 수행하여야만 한다. 그러나 제안된 시험기법의 측면에서 볼 때는, 비배수 재하과정과 배압평형과정의 적용을 통해 비배수 재하직후의 유효응력상태에 도달한 이후, 압밀과정에서 해당되는 등방압밀경로를 연속적으로 모사함으로써 축차응력증분이 동일한 모든 경우의 압밀변형특성을 하나의 시험으로 평가하는 것이 가능해 진다.

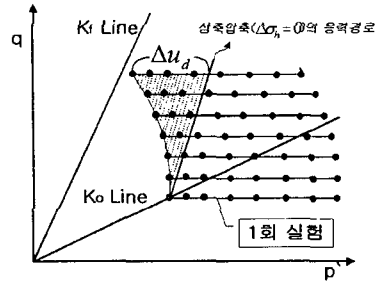


그림 3. 지반의 전반적인 변형특성을 위한 응력경로시험

둘째, 제안된 시험기법을 적용하면 지반의 전반적인 압밀변형특성을 최소한의 시험을 수행하여 평가할 수 있다. 즉 제안된 시험기법을 적용하는 경우 앞에서 밝힌 바와 같이 동일한 축차응력증분을 가지는 모든 경우의 압밀변형특성을 하나의 시험과정으로 평가하는 것이 가능하므로, 그림 3.에 제시한 바와 같이 몇 가지 축차응력증분에 대해 제안된 시험기법을 적용하여 연속적으로 압밀변형특성을 평가하고, 그 결과를 내간(interpolation)함으로써 기존 시험기법을 적용하는 경우 많은 수의 시험을 수행해야만 얻을 수 있던 지반의 전반적인 압밀변형특성을 비교적 쉽게 평가하는 것이 가능해진다. 또한 제안된 시험기법의 적용을 통해서 기존 시험기법으로 평가가 곤란했던 응력경로 상의 영역(횡방향 응력은 일정한 상태에서 연직응력만이 증가하는 삼축압축 응력경로의 왼쪽 영역, 즉 그림 3.에서의 빗금친 영역)의 압밀변형특성 역시 쉽게 평가할 수 있다.

그리고 이와 같이 얻어진 지반의 전반적인 압밀변형특성은 점성토 지반의 압축특성을 고찰하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 특히 정규압밀점성토의 지반의 경우에는 정규화된 축차응력증분( $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}}$ )과 평균유효응력 증분( $\frac{\Delta p'}{\sigma'_{vi}}$ ) 그리고 연직압밀변형률( $\epsilon_{vc}$ )을 그림 4.와 같이 3차원 좌표 상의 곡면으로 도시함으로써 하중조건의 변화에 대하여  $\sigma'_{vi}$ ,  $\Delta\sigma_d$ ,  $\Delta p'$ 를 평가하여 여러 가지 조건에 해당되는 압밀변형률 즉 압밀침하량을 평가하는데 쉽게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

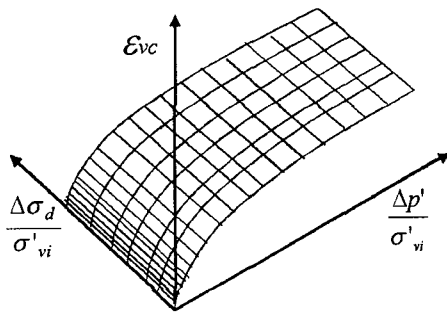


그림 4.  $\sigma'_{vi}$  -  $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}}$  -  $\frac{\Delta p'}{\sigma'_{vi}}$

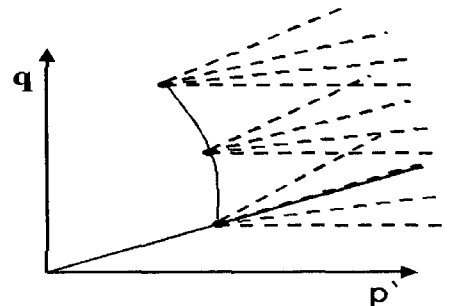


그림 5. 다양한 압밀응력경로의 모사

셋째, 응력경로법을 이용한 침하량 평가에서는 일반적으로 그림 1.에 제시한 바와 같이 압밀과정에서의 전응력상태 변화는 전혀 나타나지 않는 것으로 가정하며, 이러한 가정은 압밀과정에서의 응력경로를 기존 시험기법으로 실험 가능한 등방적인 압밀응력경로로 제한하게 된다. 그러나 흙요소의 전응력상태는 이러한 일반적인 가정과 달리 실제로는 압밀을 경험함에 따라 항상 변화하며(즉 등방압밀경로가 아닌 응력경로를 따라 압밀이 이루어지며), 이러한 사실은 탄성이론과 MCC 모델에 근거한 수치해석의 결과에서도 쉽게 확인할 수 있다. (Kim & Chung 1999) 따라서 실험기법의 한계 상 등방압밀경로만을 모사할 수 있는 기존 응력경로시험기법으로는 이와 같이 실제적인 압밀현상은 전혀 모사할 수 없다. 반면 본 연구에서 제안된 시험기법을 적용하는 경우에는 앞에서 설명한 바와 같이 비배수 재하 직후의 상태에서 출발하여 임의의 압밀응력경로를 따라 압밀변형특성을 연속적으로 평가하는 것이 가능하기 때문

에 압밀에 의한 전응력상태의 변화가 나타나는 경우에도 이를 정확하게 모사하여 압밀변형특성과 압밀침하량을 합리적으로 평가하는 것이 가능하다. 또한 제안된 시험기법의 이러한 특징은 그림 5.에 제시된 바와 같은 모든 응력경로들에 대하여 압밀변형특성을 평가할 수 있게 해주며, 이를 통해 얻어진 결과들은 점성토의 이방적 압축성을 정량화하고 비배수 재하에 따른 이방적 압축성의 변화를 고찰하는 등 점성토의 일반적인 압축거동을 확인하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 실험적 적용성 확인 및 결과 분석

본 연구에서는 제안된 새로운 응력경로시험기법을 성형 kaolinite 시료들에 대하여 실제로 적용함으로써 그 실험적 적용성을 확인하였으며, 그 시험 결과를 분석하여 정규압밀점성토의 변형특성을 고찰하였다. 연구에 사용된 시료와 시험 절차 및 확인 사항 그리고 결과분석 내용은 다음에 제시한 바와 같다.

##### 4.1 사용시료

본 연구에서 사용된 성형 kaolinite 시료는 함수비 100%(액성한계의 2배 이상)의 kaolinite 슬러리를 대형  $K_0$ 시료성형기 내에서 연직압밀압 150kPa로 압밀하여 제작하였다. 제작된 시료에 대한 표준압밀시험의 결과, 시료의 선행압밀하중( $P_c$ )은 약 100kPa 정도로 비교적 작게 나타났으며, 이는 시료성형기 내의 벽면 마찰과 표준압밀시험을 위한 시료 트리밍 및 거치 과정에서 발생한 교란의 효과로 판단된다.

##### 4.2 시험 절차 및 확인 사항

본 연구에서 실시된 배압포화과정에서는 시료의 포화를 위하여 300kPa의 배압을 약 24시간 동안 유지하였으며, 이때 포화도와 관련되는 간극수압계수 B값은 모든 시험에서 0.97이상으로 평가되었다.

현장의 초기 응력상태를 재현하는  $K_0$ 압밀과정의 효율적인 수행을 위해서는 자동화 삼축시험기를 이용하여 5회의  $K_0$ 압밀시험을 미리 실시하였으며, 그 결과 대상시료의  $K_0$ 값은 평균 0.5정도로 평가되었다. 따라서 본 시험과정에서는 실험결과의 정량적 분석을 위하여 이러한 결과를 근거로 대상 시료의  $K_0$ 값을 0.5로 가정하고, 연직방향 압밀압( $\sigma'_{vi} = 200\text{kPa}$ , 선행압밀하중의 2배)과 횡방향 압밀압( $\sigma'_{hi} = 100\text{kPa}$ )을 재하하는 이방압밀과정을 적용함으로써  $K_0$ 압밀과정을 대체하였다. 이러한 이방압밀과정의 실제 적용과정에서 평가된 연직방향과 횡방향의 평균 변형률( $\epsilon_v, \epsilon_h$ )은 각각 4.55%와 0.17%로 나타났으며, 모든 경우에 있어  $\epsilon_h / \epsilon_v$  값은 0.04 이하로 나타났다. 이러한 결과는 실시된 이방압밀과정에서 나타난 횡방향 변형이 무시할 수 있을 정도로 작으며,  $K_0$ 압밀과정을 대체하기 위하여 채택된 이방압밀과정이 시료의  $K_0$ 상태를 적절히 재현하였음을 의미한다. 또한 실시된  $K_0$ 압밀과정은 선행압밀하중( $P_c$ )의 2배에 해당하는 연직방향 압밀압까지 수행되었기 때문에,  $K_0$ 압밀과정 이후 시료는 정규압밀 상태로 존재하며 시료의 추출, 트리밍 및 거치과정에서 발생할 수 있는 교란의 영향은 배제된 것으로 판단된다.

이어지는 비배수 재하과정에서는 목표 축차응력증분(0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 kPa)에 도달할 때까지 연직방향의 하중을 단계적으로 순간 재하하였다. 각 하중단계는 기본적으로 4시간씩 유지하였으며, 최종하중단계는 비배수 재하과정에서 발생하는 변형이 압밀과정에 미치는 영향을 최대한 배제하기 위하여 연직방향 변형률( $\epsilon_{vu}$ )의 증가율이 0.00167%/hr 이하가 될 때까지 24시간 이상 유지시켰다. 그리고 이때 측정되는 과잉간극수압이 일정한 값에 수렴하는 것을 확인하였다.

배압평형과정에서는 비배수 재하과정에서 평가된 발생과잉간극수압( $\Delta u_d$ )의 크기만큼 배압을 증가시킨 후 배수 밸브를 열어 그 상태를 8시간 이상 유지시켰다. 이론적으로 배압평형과정 이후의 유효응력상태

는 비배수 재하 직후의 상태와 완전히 동일하므로, 실시된 배압평형과정에서도 이론적으로는 어떠한 변형도 발생해서는 안된다. 실제로도 배압평형과정에서 측정된 연직변형률은 평균 0.036%(최대 0.09%), 부피변형률은 평균 -0.033%(최대 -0.06%)로 무시할 수 있을 정도의 작은 값으로 나타났으며, 이는 제안된 배압평형의 개념이 실제 실험과정에서도 효과적으로 적용될 수 있음을 의미한다.

제안된 응력경로시험기법의 압밀과정에서는 배수조건하에서 외부하중을 변화시킴으로써 임의의 압밀응력경로에 대해 연속적으로 압밀변형특성을 평가할 수 있다. 이러한 특징에 근거하여 본 연구에서는 일단 등방압밀응력경로에 대해 압밀변형특성을 연속적으로 평가하였다. 다만 본 연구에서는 연속적으로 등방압밀압을 재하하는 대신 단계적으로 등방압밀압을 재하하였으며, 이러한 단계적인 하중재하는 이방압밀응력경로에서는 각 하중 단계가 비배수 전단 변형을 유발하기 때문에 연속적인 하중재하와 동일하다고 볼 수 없으나, 등방압밀경로를 따르는 경우에는 각 하중 단계가 비배수 전단 변형을 전혀 유발하지 않으므로 단계적인 하중재하를 통해서도 연속적인 하중재하와 동일한 결과를 얻을 수 있다. 실제 압밀과정에서는 각 압밀단계를 24시간씩 유지하여 각 단계에 대한 압밀결과를 얻었으며, 또한 선택적으로 24시간 경과 후의 잔류 과잉간극수압을 측정하여 압밀이 충분히 완료되었음을 확인하였다.

### 4.3 실험결과 및 분석

본 연구에서 제안된 시험기법의 실험적 적용성을 확인하기 위하여 실시되었던 응력경로시험들에서 얻어진 정규압밀상태의 kaolinite 시료의 변형특성은 다음의 그림 6.과 그림 7.에 제시하였다. 그림 6.은 비배수 재하과정에서 얻어진 축차응력증분과 연직방향 즉시변형률 및 축차발생간극수압의 상관관계를 나타내고 있으며, 그림 7.은 압밀과정에서 얻어진 시료의 연직방향과 횡방향의 압밀변형특성을 나타내고 있다. 그림 6.과 그림 7.에 제시된 연직방향의 변형특성은 정규압밀점성토의 정규화된 거동에 근거하여 대상지반의 즉시침하량과 압밀침하량을 평가하는데 직접적으로 활용될 수 있으며, 그림 6.에 제시된 과잉간극수압 발생양상은 수행된 응력경로시험들의 배압평형과정에 실제로 활용되었다.

이와 함께 그림 7.에 제시된 각 방향의 압밀변형특성은 압밀과정에 선행하는 비배수 재하과정에 의해 정규압밀점성토의 압축거동이 변화할 수 있음을 명확히 보여주고 있다. 연직방향의 압축성은 비배수 재하과정에서 가해지는 축차응력증분이 증가함에 따라 대체로 감소하는 것으로 나타났으며, 횡방향의 경우에는 그 반대의 경향이 나타났다.(그림 7.) 이러한 현상은 비배수 재하과정에서 발생한 연직방향 압축변형과 횡방향 팽창변형이 각각 시료를 초기상태에 비해 연직방향으로는 보다 조밀하게 만들고, 횡방향으로는 보다 느슨하게 만들기 때문으로 설명할 수 있다. 또한 이와 같은 현상은 등방압밀압이 증가할수록 더욱 분명하게 나타났으며, 연직방향의 압축성은 횡방향의 압축성에 비해 언제나 더 큰 것으로 나타났다. 그러나 두 방향의 압축성의 합으로 표현되는 체적 압축성은 각 방향의 압축성에 비해서는 비배수 재하 수준에 따라 그다지 큰 변화를 보이지 않는 것으로 나타났다.

이와 같이 제안된 시험기법은 점성토 지반의 압축특성을 고찰하는데 있어서도 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 점성토의 압축특성에 대해서는 향후 추가적인 실험과 체계적인 결과분석을 통해 보다 심도있는 연구를 수행할 예정이다.

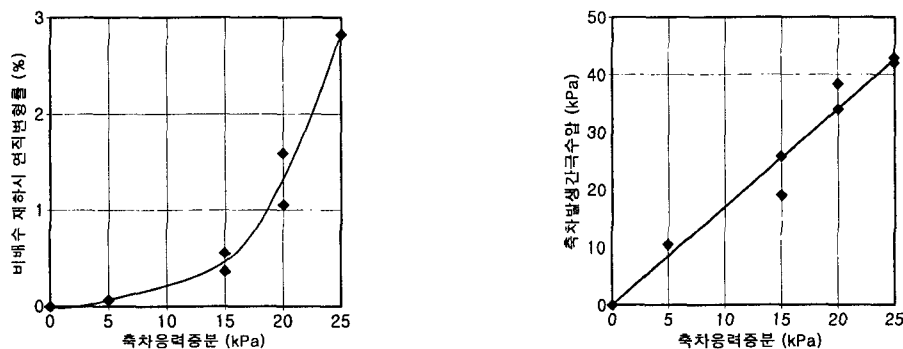


그림 6. 비배수 재하 결과

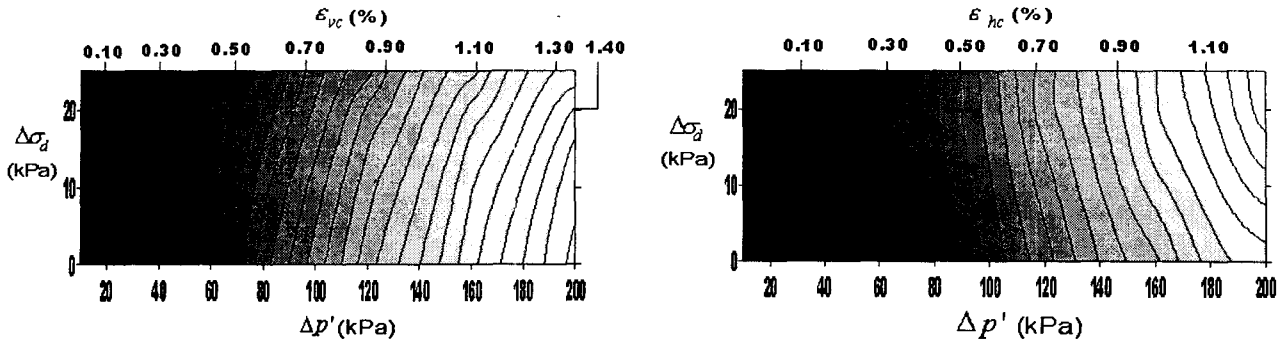


그림 7. 연직방향 및 횡방향 압밀거동

## 5. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 배압평형과정에 근거한 새로운 응력경로시험기법을 제안하였으며, 응력제어가 가능한 삼축시험기를 활용하여 성형 kaolinite 시료에 대해 제안된 시험기법을 실제로 적용하여 그 타당성을 확인하였다. 제안된 시험기법에서는 배압평형과정의 적용을 통해 비배수 재하 후의 유효응력상태를 그대로 유지시키면서도 시료의 배수조건을 비배수상태에서 배수상태로 전환시킬 수 있으며, 이후 시료에 가해지는 외부 하중을 제어함으로써 임의의 압밀응력경로를 따르는 압밀과정을 자유롭게 모사할 수 있다. 따라서 제안된 시험기법은 향후 다음과 같은 측면에서 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

첫째, 기존 시험기법과는 달리 동일한 축차응력증분을 가지는 모든 경우의 응력경로시험들을 하나의 시험으로 대체할 수 있다.

둘째, 지반의 전반적인 변형특성을 최소한의 시험을 통해 평가할 수 있으며, 특히 정규압밀점성토 지반의 경우에는 수 차례의 시험만으로 다양한 외부조건들에 대한 침하량을 평가할 수 있다.

셋째, 실제 지반에서 발생하는 압밀과정 동안의 전응력상태 변화를 모사할 수 있어 보다 합리적인 침하량의 평가가 가능하며, 다양한 압밀응력경로를 따라 평가된 압밀변형특성들로부터 점성토의 이방적 압축성을 정량화하고 그 변화양상을 고찰할 수 있다.

또한 성형 kaolinite 시료에 대한 시험 결과 연직방향 압축성은 비배수 재하과정에서 가해지는 축차응력증분이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으며, 횡방향 압축성은 반대로 증가하는 것으로 나타났다. 반면 체적 압축성은 축차응력증분의 크기에 상관없이 그다지 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이와 같이 제안된 시험기법은 점성토의 전반적인 압축특성을 고찰하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 향후 제안된 시험기법을 활용한 추가적인 실험과 결과 분석을 통해 정규압밀점성토의 일반적인 압축특성과 현장 조건에서의 적용에 대한 보다 심층적인 연구를 수행할 예정이다.

## 참고 문헌

1. 김창엽, 정충기(1999), "응력경로법에 의한 정규압밀점성토의 변형특성 고찰", 한국지반공학회지, 제 15권, 1호, pp.161-173.
2. 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.
3. Lambe, T.W.(1964), "Methods of Estimating Settlement," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.90, No. SM5, pp.43-67.
4. 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.