

# 정규압밀점성토의 이방성에 관한 연구

Study on Anisotropy of Normally Consolidated Clay Soils

권 오 순\*<sup>1</sup> 김 병 일\*<sup>2</sup>  
Kwon, O - Soon Kim, Byung - Il

정 충 기\*<sup>3</sup> 김 명 모\*<sup>4</sup>  
Chung, Choong-Ki Kim, Myoung-Mo

---

## Abstract

In situ clay soils with  $K_0$  condition have anisotropic characteristics, varying the response according to the principal stress direction upon loading. But because of their practicality and simplicity, consolidated isotropic undrained compression tests are commonly used in practice to determine the behavior of cohesive soils. In this study to investigate the anisotropic characteristics and the effects of consolidation stress states on the response of normally consolidated clay soils during shearing, triaxial compression and extension tests after consolidating the undisturbed clay soil samples, which are obtained as a block sample to normalized consolidation states under isotropic or  $K_0$ -state, were carried out. As a result of tests, the anisotropy of the undrained strength was confirmed. Comparing the soil responses between isotropic and  $K_0$  consolidation, the undrained strength by isotropic consolidation is overestimated because of its higher mean consolidation pressure. And isotropic consolidation reduces the anisotropy of soil response and influences on the stress-strain behavior and pore pressure response because the anisotropic soil structure is partially collapsed during isotropic consolidation process. Also, OCR in overconsolidated soils is decreased by isotropic consolidation. Friction angle in extension is higher than that in compression, but regression analysis shows that friction angle with cohesion in extension is almost the same as that without cohesion in compression.

---

\*1 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사과정

\*2 정회원, 명지대학교 토목공학과 조교수

\*3 정회원, 서울대학교 토목공학과 조교수

\*4 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

## 요 지

자연상태의 점성토는  $K_0$ 상태로 존재하며 하중재하시 주응력방향에 따라 다르게 거동하는 이방적 특성을 갖는다. 그러나 실험실에서 점성토의 강도특성을 파악하기 위하여 실시하고 있는 실험은 실용성과 간편성 때문에 등방압밀 삼축시험이 보편적으로 사용되고 있다. 이 연구에서는 정규압밀점성토의 이방적 특성과 압밀방법에 따른 전단특성을 고찰하기 위하여 토괴의 형태로 채취한 불교란 점성토를 등방압밀 또는  $K_0$ 압밀시켜 정규압밀상태에 도달하게 한 후 비배수삼축압축과 신장시험을 실시하였다. 시험결과 주응력방향에 따른 강도의 이방성을 확인하였다. 등방압밀은 압밀시 시료에 가해지는  $K_0$ 상태보다 높은 평균주응력과 흙의 이방적 구조의 파괴때문에 비배수강도를 과대평가하며 이방성이 감소하고 응력-변형률과 발생 과잉간극수압이 영향을 받을 수 있었으며, 과압밀점성토의 경우 과압밀비를 감소시킨다. 또한 내부마찰각은 신장시험이 압축시험보다 큰 값을 나타내지만 파괴시의 응력상태를 이용하여 회귀분석한 결과에 따르면 신장시점착력과 함께 나타나는 내부마찰각은 압축시험과 거의 같은 값을 가짐을 알 수 있었다.

### 1. 서 론

자연상태의 흙은 형성과정에서 횡방향 변형이 발생하지 않는 1차원압축에 의한 퇴적과 재하조건에 따라 흙입자들이 횡방향으로 배열하게 되는 고유이방성<sup>(4), (9)</sup>과 현장응력상태가 등방압이 아닌  $K_0$ 응력상태( $K_0 \neq 1$ )이기 때문에 형성되는 응력유도이방성<sup>(3), (8)</sup>을 갖게 된다. 이러한 원인들에 의하여 나타나는 이방성 때문에 실제지반에서의 흙은 하중재하시 주응력 방향에 따라 다른 거동을 나타낸다. 이러한 이방적 특성을 갖는 점성토의 전단특성을 실험실 시험을 통하여 파악하려면 불교란 시료를 이용하여  $K_0$ 상태에서 압밀한 후 주응력 방향을 변화시키면서 비배수 전단시험( $CK_0U$  test)을 수행해야 한다. 그러나 일반적으로 실험실 시험을 통한 점성토의 전단특성은 실험장비와 시간의 제약으로 인하여 등방압밀 비배수 삼축압축시험(CIUC)에 의하여 얻어지며, 그 결과 주응력 방향에 따른 이방성을 고려할 수 없고, 실제 지반에서와 다른 등방압밀 응력상태 때문에 일반적으로 정확한 전단특성 예측에는 문제점이 있다.

이 논문에서는 토괴의 형태로 채취된 불교란

점성토 시료를 등방압밀 또는  $K_0$ 압밀시켜 정규압밀상태에 도달하게 한 후 비배수 삼축압축 및 신장시험을 실시하여, 비배수 전단강도( $s_u$ ), 응력-변형률, 내부마찰각( $\phi'$ ) 그리고 과잉간극수압 등에 관한 점성토의 이방적 특성을 고찰하고, 압밀방법이 이방성에 미치는 영향을 연구, 검토하고자 한다.

### 2. 점성토의 이방성

지반 내의 흙은 1차원 압축에 따른 입자 배열로 형성되기 때문에 연직 방향의 재하에 가장 효과적으로 대처하는 구조를 갖는다. 따라서 최대주응력 방향이 바뀌어 수평방향의 압축이나 연직방향의 신장으로 하중이 재하될 경우에는 새로운 주응력 방향에 효과적으로 저항력을 발휘할 수 있도록 흙의 구조가 바뀌게 된다. 이러한 흙의 구조의 변화는 같은 응력증가에 대하여 추가의 변위를 필요로 하며, 점성토의 비배수 전단시에는 과잉간극수압의 증가를 가져온다. 따라서 점성토의 경우, 전단시 주응력 방향의 변화는 비배수 전단강도의 감소와 최대 저항응력에 필요한 변형률 증가를 유발한다.

Ladd<sup>(6)</sup>는 보스톤 점토(Boston Blue Clay)

를 이용한 평면변형을 시험을 통하여 주응력 방향을 90° 회전시켰을 때 비배수 전단강도는 감소하고 최대전단응력에 도달하는데 필요한 변형률은 증가한다는 결론을 얻음으로써 점성토의 이방성을 입증하였다. 또한 비배수 전단강도의 이방성은 과압밀비(OCR)가 증가할수록 감소한다는 결과를 얻었다. Duncan과 Seed<sup>(4)</sup>도 샌프란시스코만에서 채취한 정규압밀점성토를 이용한 삼축시험을 통하여 유사한 결과를 얻음으로써 점성토의 이방적 특성을 확인하였다.

실험장비와 시간의 제한성으로 인하여 일반적으로 흙의 전단특성을 파악하고자 실시되는 등방압밀에 의한 삼축시험은 응력상태가 등방압이기 때문에  $K_0$ 상태에서 나타나는 응력유도 이방성을 상실하게 되고, 실제 지반의 1차원 압축 과정에서 형성된 흙의 구조가 변화하기 때문에 실제 지반에서 발생하는 전단특성과 다른 거동을 보여 주게 된다. Ladd와 Foott<sup>(7)</sup>은 정규압밀점성토에 대한 실험적 연구를 통하여 등방압밀과 비교하였을 때,  $K_0$ 압밀시 비배수 전단강도는 10~15%가 작게 나타나며, 응력-변형률 거동에서  $K_0$ 압밀시 훨씬 작은 변형률에서 파괴에 도달하나 내부마찰각은 압밀방법과 무관하게 비슷한 값을 갖는다고 하였다. 또한 다양한 종류의 흙에 대하여 시행된 등방압밀과 이방압밀 그리고  $K_0$ 압밀에 따른 전단 실험의 결과들을 통계적으로 분석한 Mayne<sup>(9)</sup>의 결과에 따르면  $K_0$ 압밀시의 비배수 전단강도는 등방압밀시와 비교하여 압축의 경우 평균 88%, 신장의 경우 평균 60%의 값을 가지며 압밀방법이 내부마찰각에 미치는 효과는 거의 없는 것으로 나타났다.

Wroth<sup>(15)</sup>는  $K_0$ 압밀 삼축시험의 어려움을 감

$$\frac{\left[ \frac{S_u}{\sigma_{vc}} \right]_{CKOC}}{\left[ \frac{S_u}{\sigma_{vc}} \right]_{CUC}} = \frac{3-2\sin\phi}{3} (1+a^2)^a \quad (1)$$

안하여 등방압밀 압축강도를 이용하여  $K_0$ 압밀 압축강도를 예측할 수 있는 아래와 같은 식 (1)을 수정 Cam-clay 모델을 토대로 하고  $K_0=1-\sin\phi'$ 의 관계를 가정하여 제안하였다.

여기서,  $a = \frac{(3-\sin\phi')}{2(3-2\sin\phi')}$ ,  $\sigma'_{vc}$ 은 연직압밀압이고,  $\Lambda$ 은 한계상태 간극수압계수로서 압축지수( $C_c$ )와 팽창지수( $C_e$ )의 함수로 아래 식 (2)와 같이 나타난다.

$$\Lambda = 1 - \frac{C_e}{C_c} \quad (2)$$

또한 Sivakugan 등<sup>(13)</sup>은 정규압밀점성토의 등방압밀 비배수강도에 대한  $K_0$ 압밀 비배수강도의 비를 파괴시 간극수압계수  $A_f$ 와 정지토 압계수  $K_0$ 를 이용하여 아래 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$\frac{\left[ \frac{S_u}{\sigma_{vc}} \right]_{CKOC}}{\left[ \frac{S_u}{\sigma_{vc}} \right]_{CUC}} = \frac{K_0 + 2(1-K_0) A_{f,i}}{K_0 + 2(1-K_0) A_{f,K_0}} [A_{f,K_0}(1-K_0) + K_0] \quad (3)$$

여기서,  $A_{f,i}$ 와  $A_{f,K_0}$ 는 각각 등방압밀과  $K_0$ 압밀에 따른 파괴시 Skempton의 간극수압계수이다.

### 3. 실험계획

#### 3.1 시료의 기본적인 특성과 압밀특성

이 연구에서 사용한 시료는 서울시 강남구 압구정동에서 토괴의 형태로 채취한 불교란 시료이다. 시료의 기본물성치와 입도분포는 표 1 및 그림 1과 같다. 또한 시료의 압밀특성을 파악하기 위하여 표준압밀시험을 시행한 결과 압

표 1. 사용된 시료의 기본물성치

함수비(%)	단위중량(tf/m <sup>3</sup> )	비 중	간극비	소성한계(%)	액성한계(%)	소성지수(%)
24.5~29.6	1.90~1.98	2.59	0.63~0.77	25.6	43.5	16.9

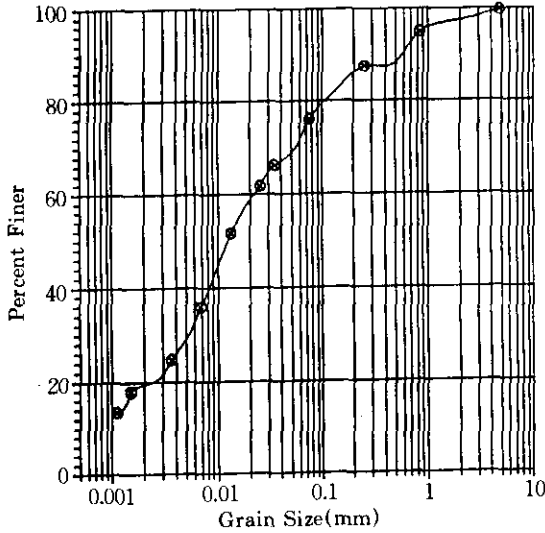


그림 1. 사용된 시료의 입도분포

축지수가 0.432, 팽창지수가 0.057, 그리고 선형 압밀압이 240kPa로 나타났으며, 원지반에서의 유효상재압력을 고려할 때 과압밀비(OCR)가 1.9로써 약간 과압밀된 점성토로 판단된다.

### 3.2 삼축시험

이 연구에서 사용된 삼축시험기는 시험 중에 축차응력, 축변형률, 구속압, 간극수압, 체적변형률 등이 시간에 따라 컴퓨터에 자동입력되고, 연직압과 구속압을 사용자가 원하는대로 컴퓨터를 통하여 자동제어할 수 있으며, 축변형률 제어를 통한 전단시험이 가능한 자동화 삼축시험기이다.

시료를 포화시키기 위하여 먼저 진공압을 가한 후 배압을 가하여 Skempton의 간극수압 계수 B값이 모든 시료에 대하여 0.97 이상이 되도록 하였다. 포화된 시료를 정규압밀상태로

만들기 위하여 선형압밀압보다 큰 300kPa, 400kPa, 450kPa까지 연직압밀압을 응력제어 방식에 의하여 증가시키면서  $K_0$ 압밀과 등방압밀을 시행하였다. 압밀 중의 연직응력의 증가 속도는 시료 내에 과잉간극수압이 발생하지 않도록 배수거리와 시료의 투수성을 감안하여 1kPa/min로 하였으며, 압밀과정이 끝난 후 시료 내의 간극수압 측정을 통하여 과잉간극수압이 발생하지 않았음을 확인하였다.  $K_0$ 압밀은 연직압밀압의 증가에 따라 발생하는 체적변형률과 축변형률이 같게 되도록 구속압을 컴퓨터에 의하여 제어함으로써 횡방향 변위가 0이 되게 하는 방법을 통하여 수행되었다. 압밀이 끝난 각각의 시료는 비배수상태에서 변형률을 제어하면서 연직응력의 증가와 감소에 의한 삼축 압축 및 신장시험을 축변형률이 최소 10%에 도달할 때까지 수행하였다. 전단시 발생하는 과잉간극수압이 시료 내에 고르게 분포할 수 있도록 변형률 제어속도는 0.5%/hr로 하였다.

### 4. 실험결과 및 분석

$K_0$ 압밀시험을 통하여 측정된  $K_0$ 값은 정규압밀상태에서 0.32~0.42로 나타났으며, 이 값은 Jaky의 제안식( $K_0=1-\sin\phi'$ )에 압축시험에 의한 평균내부마찰각( $\phi'=38.1^\circ$ )을 대입하여 계산한 값 0.38과 비슷하다.

이 연구에서 실시한 삼축전단시험의 결과는 표 2와 같다.

압밀방법이 점성토의 비배수강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 연직압밀압으로 정규화시킨 비배수강도( $s_u/\sigma'_{vm}$ )를 표 2에서 살펴보면, 전단시 주응력방향, 즉 압축, 신장에 상관없이 등방압밀시 큰 값을 갖는다. 이는  $K_0$ 값이 1보다 훨씬 작은 값을 갖기 때문에 압밀시

표 2. 비배수삼축시험에 의한 강도 특성

구분(*)	함수비(%)	$\frac{s_u}{\sigma'_{vc}}$	$\frac{s_u}{p'_m}$	마찰각, $\phi$ (degree)	$A_f$	강도비, $K_s$ $(\frac{s_{u, ext}}{s_{u, com}})$
IC300	29.07	0.57	0.57	38.25	0.58	0.82
IE300	27.80	0.47	0.47	49.26	0.08	
KC300	28.23	0.51	0.77	38.24	0.19	0.59
KE300	31.97	0.30	0.48	81.45	0.14	
IC400	29.03	0.53	0.53	37.76	0.66	0.81
IE400	29.55	0.43	0.43	52.25	0.07	
KC400	27.94	0.41	0.74	38.61	0.11	0.56
KE400	24.46	0.23	0.40	85.32	1.17	
IC450	30.62	0.50	0.50	38.63	0.69	-
KC450	28.14	0.43	0.70	47.20	0.18	0.70
KE450	31.28	0.30	0.49	83.03	0.30	
(*) I: 등방압밀      K: $K_0$ 압밀      C: 압축      E: 신장      300~450구속압(kPa)						

료에 가해진 평균주응력이  $K_0$ 압밀보다 등방압밀에서 크게 되고, 그 결과 압밀에 따른 시료의 부피변화, 즉 함수비의 감소가 크기 때문이다. 그러나 시료에 가해지는 전체압밀압의 효과를 고려하기 위하여 비배수강도를 평균압밀압( $p_m$ )으로 정규화시킨 값들을 비교하여 보면 압축의 경우에는  $K_0$ 압밀시 등방압밀보다 큰 값을 가지며, 신장의 경우에는 압밀방법에 상관없이 비슷한 값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 흙의 형성시 응력상태인  $K_0$ 압밀조건에서 생겨난 고유이방성이 새로운 응력상태인 등방압밀에 의해 일부 파손되고, 따라서 최대주응력방향 즉 압축에 대한 강도가 감소하여 발생한 것으로 판단된다. 따라서 등방압밀에 의한 점성토의 비배수강도는 연직압밀압만을 고려할 때에는  $K_0$ 압밀보다 크게 나타나지만, 전체압밀압을 고려할 때에는 파손된 흙의 고유이방성 때문에 압축의 경우 오히려  $K_0$ 압밀보다 작게 나타난다는 것을 알 수 있다.

비배수 압축강도에 대한 신장강도의 비,  $K_s$ 는  $K_0$ 압밀의 경우 1보다 상당히 작은 값으로 나타나 현장 지반이 주응력방향에 따라 강도의

차이가 큰 이방적 성격을 갖는다는 것을 알 수 있다. 그러나 등방압밀의 경우에는  $K_s$ 값이 1보다 작지만  $K_0$ 압밀의 경우보다 큰 것으로 나타나 앞서 설명한 것처럼 압밀과정에서 이방적 특성이 감소된 것을 알 수 있다.

표 2에서 연직압밀압에 따른 정규화 비배수 전단강도( $s_u/\sigma'_{vc}$ )을 비교하여 보면 압밀방법과 전단시 주응력방향이 같으면 큰 편차없이 일정한 값을 가진다. 그러나 연직압밀압이 300kPa인  $K_0$ 압밀의 경우 그보다 큰 연직압밀의 경우보다 큰 값을 가지며 특히 압축의 경우에는 분명하게 나타난다. 이것을 설명하기 위하여 Tavenas 등<sup>(14)</sup>이 압밀상태를 분명하게 파악하기 위하여 제시한 변형률에너지 방법을 이용하여 연직압밀압이 300kPa인 등방압밀과  $K_0$ 압밀의 결과를 연직압밀압이 400kPa인  $K_0$ 압밀의 결과와 함께 그림 2에 도시하였다. 등방압밀 300kPa와  $K_0$ 압밀 400kPa인 경우 변형률에너지가 평균주응력의 증가에 따라 급속하게 증가하는 정규압밀상태에 분명하게 도달하였으나  $K_0$ 압밀 300kPa의 경우 아직 완전하게 정규압밀상태에 도달하지 못한 과압밀 영역에 있음

을 알 수 있다. 따라서 연직압밀압이 300kPa인  $K_0$ 압밀시 정규화 비배수강도가 크게 나타난 것은 실험실에서 재압밀하는 과정에서 시료가 완전한 정규압밀상태에 도달할 때까지 압밀시키지 못하고 약간 과압밀된 상태에서 전단하였기 때문이다. 그러나 등방압밀시 같은 연직압밀압 300kPa에서 정규압밀로 나타난 것은 그림 2에서 보여진 것처럼 시료에 가해지는 전체 압밀압이 크기 때문이다. 그러므로 과압밀점성토를 연직압밀압이 현장유효상재압과 같도록 하여 등방압밀할 경우에는 전체압밀압이 현장 조건에서보다 크기 때문에 압밀효과를 증대시켜 과압밀비의 감소를 유발하게 함으로써 정규화 비배수강도를 과소평가할 수 있다. 결론적으로 과압밀점성토(단,  $K_0 < 1$ )의 등방압밀 전단시험은 현장응력상태보다 높은 평균압밀압 때문에 비배수강도가 증가하는 동시에, 압밀효과가 커져서 과압밀비(OCR)가 감소하여 정규화 비배수강도가 감소하는 상반된 특성을 가지게 된다. 이러한 결론은 Mayne<sup>(9)</sup>의 연구결과에서도 확인할 수 있다. 즉  $K_0$ 압밀시 정규화 비배수압축강도는 등방압밀시 값에 비교하여 정규압밀점성토와 과압밀점성토에서 각각 89%와 87%로 나타나 압밀이력에 상관없이 비슷하다고 하였다. 그러나 과압밀된 점성토의 경우  $K_0$ 값이 정규압밀 점성토의  $K_0$ 값보다 커서 압밀방법에 따른 전체압밀압의 차이가 감소

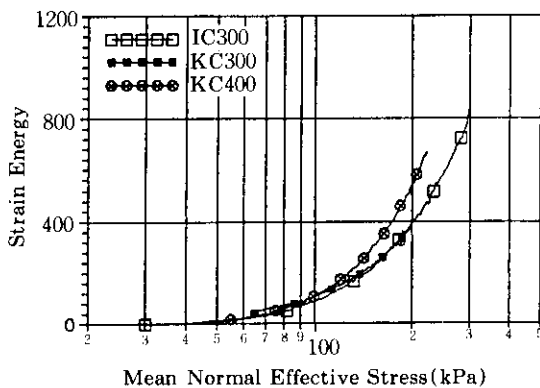


그림 2. 평균압밀압력-변형률에너지 곡선

하므로 등방압밀에 대한  $K_0$ 압밀시 강도비가 과압밀비의 증가와 함께 증가하여야 한다. 따라서 압밀방법에 따른 정규화 비배수 압축강도의 비가 압밀이력에 상관없이 비슷하게 나온다는 사실은 과압밀점성토의 경우 등방압밀에 의한 과압밀비 감소에 따른 정규화 강도의 저하로 설명될 수 있다.

압밀방법에 따른 응력-변형률 거동과 간극수압-변형률 거동을 살펴보기 위하여 연직압밀응력으로 정규화한 주응력차와 간극수압에 대한 변형률 관계를 그림 3과 그림 4에 도시하였다.

압축의 경우,  $K_0$ 압밀은 등방압밀에 비교하여 재하초기의 낮은 변형률에서 대부분의 하중변화가 발생하여 최대주응력차에 근접하게 되며, 전단시 과잉간극수압은 등방압밀시 훨씬 크게 발생함을 알 수 있다. 그러나 신장의 경우에는 압밀방법에 따른 거동의 차이가 최대 주응력차의 크기를 제외하고는 분명하게 나타나지 않으며, 다만  $K_0$ 압밀시 발생하는 간극수압이 부(-)의 값을 갖는데 반하여 등방압밀의 경우 양(+)의 값을 갖거나 상대적으로 작은 부(-)의 값을 갖는다. 이렇게 특히 압축의 경우에 있

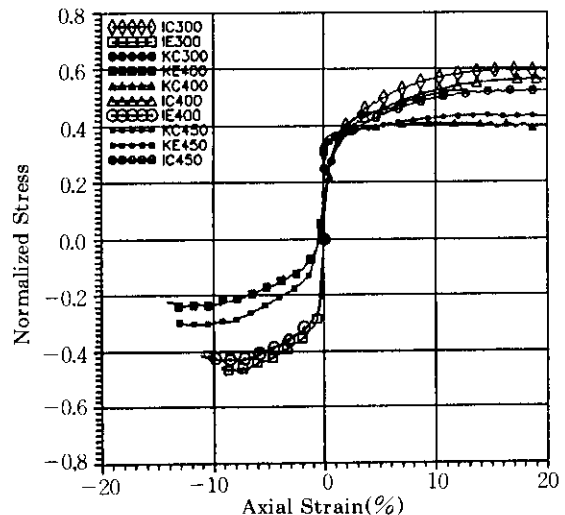


그림 3. 연직압밀압으로 정규화한 주응력차-변형률 곡선

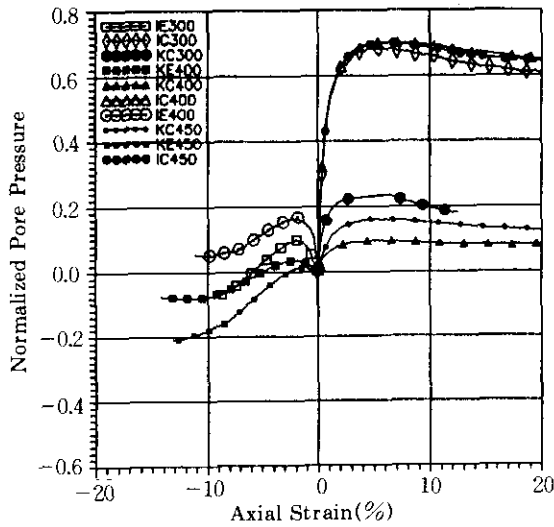


그림 4. 연직압밀압으로 정규화한 간극수압-변형률 곡선

어서 압밀방법에 따라 거동의 차이가 발생하는 것은  $K_0$  압밀에 의하여 형성된 시료는 최대주 응력방향 즉 압축에 대하여 효과적으로 저항할 수 있도록 이방적구조가 발달되어 작은 변위에서 최대의 강도를 유발시킬 수 있고 비교적 작은 양의 과잉간극수압이 발생하지만, 등방압밀된 시료의 경우에는 이러한 이방적 구조가 파괴되어 압축전단시에 최대저항력을 발휘하기 위해서는 흙의 구조 변화에 필요한 추가 변위량과 과잉간극수압이 필요하기 때문이다.

표 2에 의하면 점착력을 0으로 하여 산정한 내부마찰각은 신장시험이 압축시험보다 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한 압밀방법에 따른 효과를 고찰하여 보면 압축시에는 압밀방법에 상관없이 비슷한 값을 가지나, 신장시에는  $K_0$  압밀이 등방압밀보다 큰 값을 가짐을 알 수

표 3. 내부마찰각 요약

구 분	액성한계 (%)	소성한계 (%)	내부마찰각(°)		시험방법	비 고	
			압 축	신 장			
Florida	62.5	39.0	26.8~32.4	36.5~53.1	Hollow Cylinder	Saada and Bianchini <sup>(11)</sup>	
Hydrite	62.0	25.2	24.6~25.4	33.2~56.3			
Atchafalaya	81.19	28.85	21.3~25.7	28.6~34.2			
NC Kaolinite	62.5	39	31~32	40~47	Hollow Cylinder	Saada and Zamani <sup>(12)</sup>	
Kawasaki Clay	27.6~55.3	16.9~25.9	38.7~40.8	50.6~55.3	CIU TXL	Nakase and Kamei <sup>(10)</sup>	
			39.3~41.0	52.9~61.6	CKoU TXL		
AGS Clay	73±10	60±10	29	40	CKoU TXL	Koutsoftas and Ladd <sup>(5)</sup>	
			37	36.5	CKoU PS(*)		
Reconstituted Specswhite Kaolin	65	35	24	27	CIU TXL	Atkinson, et al <sup>(11)</sup>	
			22	29	CKoU TXL		
Haney Clay	44	26	21.4~28.6	33.8~34.3	CKoU TXL	Vaid and Campanella <sup>(16)</sup>	
			25.2~29.4	34.3~34.7	CKoU PS		
Chicago Glacial Till	Blodgett	25.8~54.7	14.5~26.3	28.5	37.8	CKoU TXL	Chung <sup>(2)</sup>
	Deerfield	29.5~32.3	16.0~16.2	30.7	46.5		
압구정 점성토	43.47	26.56	38.2	50.8	CIU TXL	실험결과	
			38.0	83.3	CKoU TXL		

(\*) PS : Plane Strain Test

있다. 주응력 방향이 내부마찰각에 미치는 영향을 조사하기 위하여 표 3에 다양한 종류의 흙에 대하여 여러가지 시험방법을 통하여 결정된 내부마찰각에 대하여 나타냈다. 표에 나타난 바와 같이 이 연구의 결과와 마찬가지로 대부분의 흙에 대하여 시험방법에 상관없이 신장시에 압축시보다 큰 내부마찰각을 가짐을 알 수 있다. 그러나 그림 5에서처럼 점착력을 0으로 가정하지 않고 이 연구의 전체실험결과와 파괴시 응력상태를 이용하여 회귀분석한 결과 압축시에는 점착력이 0이고 내부마찰각이 38°로 나타났으며 신장시에는 점착력이 50kPa이고 내부마찰각은 압축시와 비슷한 37°로 나타났다. 따라서 신장시에 나타나는 높은 내부마찰각은 신장전단시 발생하는 점착력의 효과 때문인 것으로 추정되나, 이는 한정된 실험결과에 의한 결론이므로 더 많은 실험에 의한 검증이 필요한 것으로 판단된다.

표 4는 등방압밀 정규화 비배수 압축강도에 대한  $K_0$ 압밀 정규화 비배수 압축강도의 비로 나타나는 강도비를 Mayne에 의한 통계적인 값과 기존연구에 의해 제안된 식 (1)과 식 (3)에 의하여 계산한 결과를 실험결과와 비교하여 나타낸 것이다. 각각의 식에 필요한 변수들은 실험결과에 의하여 나타난 값들을 평균하여 사

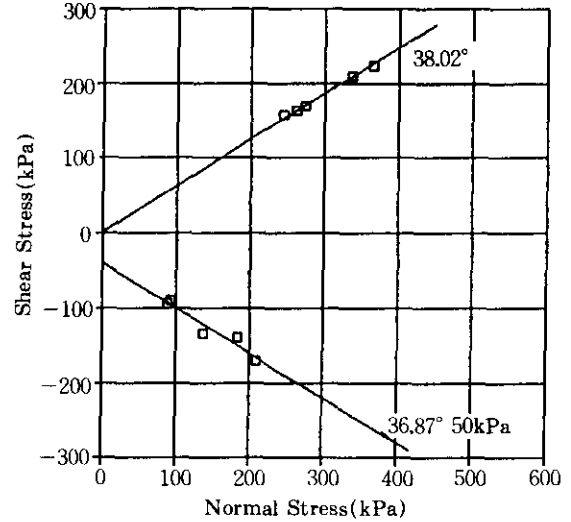


그림 5. 회귀분석에 의한 압축과 신장에서의 마찰각과 점착력

용하였다. 결과를 살펴보면, 이 연구의 실험결과는 Mayne의 통계치와 일치하며 Wroth의 제안식에 의한 값과 유사한 결과를 보이고 있지만, Sivakugan 등의 제안식에 의한 값은 실험결과보다 강도비가 큰 값으로 나타나 사용된 시료의 압밀방법에 따른 이방성을 과소평가함을 알 수 있다.

표 4. 기존연구와의 강도비 비교

구 분	Wroth <sup>(15)</sup>	Mayne <sup>(9)</sup>	Sivakugan & Holtz <sup>(13)</sup>	실험결과
$\frac{\left[ \frac{S_u}{\sigma'_{vc}} \right]_{CK0UC}}{\left[ \frac{S_u}{\sigma'_{vc}} \right]_{CIUC}}$	0.81	0.75~1.00	0.96	0.77~0.89

## 5. 결 론

정규압밀점성토의 이방성을 고찰하기 위하여 서울 압구정동에서 토괴의 형태로 채취한 불교란 점성토를 시료의 선행압밀압보다 큰 연

직압으로 등방 또는  $K_0$  상태로 압밀시킨 후, 비배수 삼축압축 및 삼축신장 시험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 이 연구에서 사용된 점성토는 압축과 신장의 주응력방향에 따른 강도의 이방성



을 나타내며, 등방압밀할 경우 이방성이 감소함을 확인하였다.

- (2) 등방압밀 비배수시험은  $K_0$ 압밀 비배수 시험보다 압밀시 시료에 가해지는 높은 평균압밀압때문에 점성토의 연직압밀압에 의한 정규화 비배수강도를 과대평가함을 확인하였다. 그러나 평균압밀압을 고려할 때 압축의 경우 오히려 등방압밀에 따른 흙의 구조 파괴때문에 강도가 저하된다.
- (3) 과압밀점성토(단,  $K_0 < 1$ )의 등방압밀 전단시험은 현장응력상태보다 높은 평균압밀압때문에 비배수강도가 증가하는 동시에, 압밀효과가 커져서 과압밀비(OCR)가 감소하여 정규화 비배수강도가 감소하는 상반된 특성을 가지게 된다.
- (4) 최대주응력방향 즉 연직압축에 효율적으로 저항할 수 있는 흙의 이방적 구조 때문에  $K_0$ 압밀 압축의 경우 이방적 구조가 부분적으로 파괴된 등방압밀 압축에 비교하여 재하초기의 낮은 변형률에서 대부분의 하중변화가 발생하여 최대주응력차에 근접하며, 과잉간극수압도 훨씬 적게 발생함을 확인하였다.
- (5) 점착력을 0으로 가정하여 산정한 내부마찰각은 신장시험이 압축시험보다 큰 값을 갖는 것으로 나타났으나, 파괴시 응력상태들을 회귀분석한 결과에 따르면 신장시 점착력과 함께 나타나는 내부마찰각은 압축과 유사한 값을 가짐을 알 수 있다. 그러나 신장시 점착력 유무에 대해서는 더 많은 실험결과에 의한 검증이 필요하다고 판단된다.

#### 감사의 글

이 연구를 위해 현장에서의 편의를 제공해 주신 (주)동부건설과 (주)동부엔지니어링에 특별히 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Atkinson J.H., Richardson D. and Robinson, P.J.(1987), *Compression and Extension of  $K_0$  Normally Consolidated Kaolin Clay*, Journal of Geotechnical Engineering, Vol 113, No. 12, December, ASCE, pp 1468~1481
2. Chung, Choong-Ki (1991), "Stress-Strain-Strength Behavior of Compressible Chicago Glacial Tilts," Ph D Thesis, Northwestern University, Evanston, Illinois, June
3. Duncan, A.M. and Seed, H. B.(1966a), "Anisotropy and Stress Reorientation in Clay," Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol 92, No. SM5, pp 21~50
4. Duncan, A.M. and Seed, H.B.(1966b), "Strength Variation along Failure Surfaces in Clay," Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol 92, No. SM6, pp81~104
5. Koutsoftas, C.D. and Ladd, C.C.(1985), "Design Strengths for on Offshore Clay," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol 111, No. 3, March, pp 337~355
6. Ladd, C.C.(1971), "Strength Parameters and Stress-Strain Behavior of Saturated Clays," Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Research Report R 65-11
7. Ladd, C.C. and Foott, R.(1974), "New Design Procedure for Stability of Soft Clays," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 100, No GT 7, July, pp 763~786
8. Ladd, C.C., Foott, R., Ishihara K., Schlosser, F. and Poulos, H.G.(1977), "Stress-Deformation and Strength Characteristics," Proceedings 9th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, Tokyo, Japan, July, pp 421~434
9. Mayne, W.P.(1985), "Stress Anisotropy Effects on Clay Strength," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol 111, No. 3, March, pp 358~366
10. Nakase, A. and Kamei, T.(1983), "Undrained Shear Strength Anisotropy of Normally Consolidated Cohesive Soils," Soils and Foundations,

- Vol. 23, No. 1, March, pp 91~101
11. Saada, S.A. and Bianchini, F.G.(1975), "Strength of One Dimensionally Consolidated Clays," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol 101, No. GT11, November, pp 1151~1164
  12. Saada, S.A. and Zamani, K.K.(1969), "The Mechanically Behavior of Cross Anisotropic Clays," 7th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, Mexico, pp 351~359
  13. Sivakugan, N., Holtz, R.D. and Chameau, J. L. (1988), "CK<sub>0</sub>UC Shear Strength of Normally Consolidated Clays from CIUC Tests," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol 114, No. 3, March, pp 284~295
  14. Tavenas, F., DesRosiers, J.P., Leroueil, S., LaRouchelle P. and Roy M.(1979), "The Use of Strain Energy as a Yield and Creep Criterion for Lightly Overconsolidated Clays," Geotechnique, Vol 29, Number 3, pp 285~303
  15. Wroth, C.P.(1984), "The Interpretation of in situ Soil Tests," Geotechnique, Vol 34, No 4, pp 449~489
  16. Vaid, P.Y. and Campanella, G.R.(1974), "Triaxial and Plane Strain Behavior of Nature Clay", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol 100, No. GT3, March, pp 207~224  
(접수일자 1994. 9. 29)