

# 정규압밀점토의 비배수 전단강도에 대한 이방압밀효과

Effects of an Anisotropic Consolidation on the Undrained  
Shear Strength of a Normally Consolidated Clay

강 병 회\*1  
Kang, Byung-Hee  
윤 호 창\*2  
Yoon, Ho-Chang

---

## Abstract

In-situ soil is anisotropically consolidated at rest, and the coefficient of earth pressure at rest  $K_0$  is dependent on the properties of soil and stress history.

In order to estimate roughly the in-situ undrained shear strength of a  $K_0$ -anisotropically normally consolidated clay from isotropic consolidated undrained test, consolidated undrained shear tests with four different consolidation pressure ratios ( $K = \sigma'_{3c} / \sigma'_{1c}$ ) were performed and test results showed  $K-\alpha$  relationship, representing the strength ratio  $\alpha$  as  $(S_u / \sigma'_{1c})_{CKU} = \alpha (S_u / \sigma'_{1c})_{CIU}$ .

Strength ratio  $\alpha$  increases with increasing consolidation pressure ratio. And the angle of internal friction  $\phi'$  and angle ratio  $\phi'_{CKU} / \phi'_{CIU}$  are increased with the increment of  $K$ -value.

## 요 지

수평지반내의 한 지점에 대한 원위치의 압밀상태는  $K_0$ -이방압밀 되어있으며 토압계수  $K_0$ 값은 흙의 성질과 응력이력에 따라 다르다.  $K_0$ -이방정규압밀점토지반의 원위치 비배수전단강도를 등방압밀시험에 의해서 추정하기 위하여 4가지의 압밀응력비( $K = \sigma'_{3c} / \sigma'_{1c}$ )로서 이방압밀시킨 비배수전단시험을 시행하여  $(S_u / \sigma'_{1c})_{CKU} = \alpha (S_u / \sigma'_{1c})_{CIU}$ 로 나타내는 강도비  $\alpha$ 와 압밀응력비  $K$ 의 관계를 나타내었다.

시험결과 강도비  $\alpha$ 는 압밀응력비가 클수록 증가하고 내부마찰각  $\phi'$ 와  $\phi'_{CKU} / \phi'_{CIU}$ 비도 압밀응력비가 클수록 동시에 증가한다.

---

\*1 정희원, 인하대학교 토목공학과 교수.

\*2 유신설계공단 공학부

## 1. 서 론

자연상태의 수평점토지반은  $K_0$ -응력상태로 압밀되어 응력유도이방성(stress induced anisotropy)을 나타내고 있음에도 불구하고 실내에서는 실험상의 편리성 때문에 등방압밀삼축 압축시험장치에 의해서 점토의 전단거동을 측정하고 있다. Ladd의 연구<sup>(4)</sup> 이외에도 여러 학자들에 의해서 이방압밀점토의 전단거동은 등방압밀점토와는 전혀 다르다는 사실이 지적되었다. 따라서  $K_0$ -이방압밀점토의 거동은  $K_0$ -압밀삼축시험에 의해서 측정되어야 한다. 그러나  $K_0$ -압밀장치는 횡방향변형은 허용하지 않으면서 응력을 가하여 이방압밀시키는 장치로서 대부분의 실험실에서는 아직까지는 일반화되어 있지 않고 시험이 까다로와 재래식과 등방압밀 시험장치에 의해서 전단강도를 구하고 있다.

압밀시험장치의 압밀응력에 대한 이방성을 극복하기 위하여 Sivakugan<sup>(8)</sup> 등의 여러 학자들에 의해서 압밀응력비( $K = \sigma'_{3c} / \sigma'_{1c}$ )가 1.0인 CIU-시험과  $K_0$ -압밀시험인 CK<sub>0</sub>U-시험 결과를 비교하여 이론식을 제시하였다. 즉  $(S_u / \sigma'_{1c})_{CK_0U} = \alpha_0 (S_u / \sigma'_{1c})_{CIU}$ 로 나타내어 전단강도비  $\alpha_0$ 값을 구하였다.

그러나 이들관계 즉  $\alpha_0$ 값은 점토의  $K_0$ 값에 따라 차이가 있으므로 모든 종류의 점토에 대해서 일정하지 않게 되어 그 실용성이 떨어진 다. 따라서 압밀응력비  $K$  값을 여러가지로 하여 시험해서 구한 이방압밀 전단강도와 등방압 밀전단강도의 비 즉  $(S_u / \sigma'_{1c})_{CK_0U} = \alpha (S_u / \sigma'_{1c})_{CIU}$ 를 구하여  $\alpha$ - $K$  관계를 나타내어 주므로서 점토에 따라 구해진  $K_0$ 값에 대한 전단강도비  $\alpha_0$ 를 구할 수 있도록 하고자 한다. 그러나 이 경우 압밀응력비  $K$ 가  $K_0$ 보다 크거나 작을 경우 시료내의 횡방향변형으로 인해  $K_0$ 압밀상태에서의 흙의 구조와는 다소 차이가 있으므로 흙의 종류에 따라 다소 오차가 예상된다.

한편 정규압밀점토의 정지토압계수  $K_0$ 는 일반적으로 액성한계, 소성지수, 점토함유율, 간극비 및 기타 다른 지수들과도 연관성이 있는

것으로 알려져 있으나 주로 유효내부마찰각 ( $\phi'$ )으로 표시되며<sup>(5)</sup> 소성지수와와의 관계식으로도 표시되고 있다.<sup>(1,5)</sup>

따라서  $K_0$ 값을 적당히 추정하여  $\alpha$ - $K$  관계를 이용함으로써 정규압밀점토에 대한  $K_0$ -압 밀 비배수전단강도를 재래식 등방압밀삼축 시험장치를 이용하여 간접적으로 쉽게 추정할 수 있게 된다.

## 2. 이론식

Sivakugan등<sup>(8)</sup>은 포화점성토의 간극수압계 수  $A_\Omega$ 와 압밀응력비  $K$ 를 이용하여 등방압밀에 대한 이방압밀의 비배수전단강도비를 식(1)과 같이 표시하였다.

$$\frac{(S_u / \sigma'_{1c})_{CKU}}{(S_u / \sigma'_{1c})_{CIU}} = \frac{1 + A_\Omega N_\phi - A_{\Omega k}}{1 + A_{\Omega k} N_\phi - A_{\Omega k}} [A_{\Omega k}(1 - K) + K] \quad (1)$$

식중  $A_\Omega, A_{\Omega k}$  : 등방압밀 및 이방압밀 전단파괴 시의 Skempton A계수

$$N_\phi = \frac{\sigma'_{1f}}{\sigma'_{3f}} = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'}$$

$K$ 값을  $K_0$ 로 놓고  $K_0$ 는 Jaky의 공식  $K_0 = 1 - \sin \phi'$ 를 적용시키면 식(1)은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{(S_u / \sigma'_{1c})_{CK_0U}}{(S_u / \sigma'_{1c})_{CIU}} = \frac{K_0 + 2(1 - K_0)A_\Omega}{K_0 + 2(1 - K_0)A_{\Omega k_0}} [A_{\Omega k_0}(1 - K_0) + K_0] \quad (2)$$

식(1)과 식(2)에서와 같이 비배수전단강도 비는  $K, A_\Omega, A_{\Omega k}$  및  $\phi'$ 의 함수이다.

여러 학자들에 의한 22개의 시험자료<sup>(8)</sup>를 그림 1과 그림 2와 같이 나타내었으며 그림에서  $A_\Omega$ 는  $K_0$  값이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있고 전단강도비는  $A_\Omega$ 의 증가에 따라

크게 증가함을 볼 수 있다. 그리고 Sivakugan 등<sup>(8)</sup>에 의하면  $A_n$ 값이 비배수전단강도비에 미치는 영향은  $A_{rk}$ 보다 훨씬 더 크며  $A_{rk}$ 값은 다소 잘못 추정하더라도 전단강도비는 크게 차이가 나타나지 않으므로  $A_{rk}$ 값을  $A_n$ 값과 동일하게 적용하여도 전단강도비는 비교적 정확하게 추정할 수 있다고 하였다. 따라서 전단강도비를  $K$ 값만으로도 어느 정도 정확하게 나타낼 수 있을 것으로 생각된다.

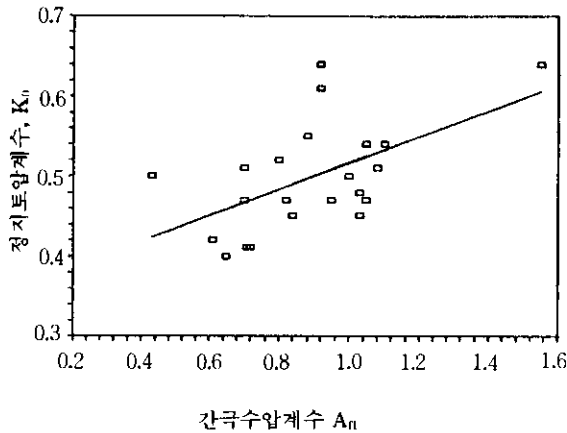


그림 1. 정지토압계수  $K_v$ 와 간극수압계수  $A_n$ 과의 관계

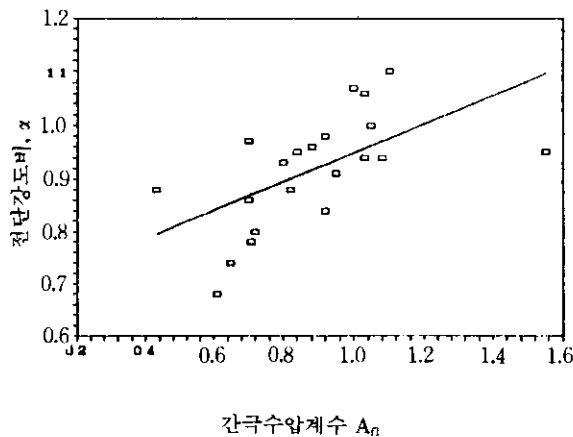


그림 2. 전단강도비  $\alpha$ 와 간극수압계수  $A_n$ 과의 관계

### 3. 실험

#### 3.1 시 료

사용된 시료는 경기도 안산에서 채취한 점성토와 벤토나이트를 2 : 1의 중량비로서 혼합하여 0.1N 염화칼슘용액속에 넣어 교반시켜서 만든 현탁액을 실내의 퇴적조에서 약 1.5  $\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 의 응력하에서 퇴적압밀시킨 점토시료이다.

시료는 모두 0.1mm체를 통과하고 점토크기 ( $2\mu\text{m}$ 이하)의 함량이 약 50% 정도이며 액성한계 54%, 소성지수 31.8, 수축한계 10.5%, 함수비 53~57%, 토립자비중 2.69이다.

#### 3.2 비배수삼축시험

이방압밀삼축시험기에 의한  $\overline{CKU}$  시험으로서 이방압밀장치는 lever type 장치를 이용하였다.

먼저 1.0  $\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 의 배압을 가하여 시료 및 전시험계통을 포화시킨후 압밀응력비가 1.0, 0.7, 0.5 및 0.4가 되도록 유지시키면서 횡방향 유효응력이 1.2, 1.5 및 1.7  $\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 가 될때까지

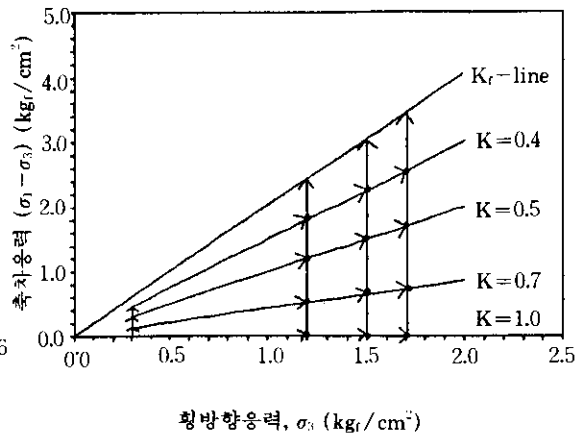


그림 3. 압밀비배수시험의 응력경로

단계별로 횡방향 및 축방향응력을 서서히 증가시키면서 압밀시켰다. 즉 그림 3에서와 같이 먼저  $0.3\text{kg}_r/\text{cm}^2$ 의 응력으로 등방압밀시켜 공시체를 안정시킨 다음 각 시험의 압밀응력비에 따른 예정된 응력경로에 따라 횡방향응력과 축방향응력을 동시에 조금씩 증가시키는 방법으로 압밀시켰다. 압밀이 완료된 후에  $0.1\%/ \text{min}$ 의 변형속도로 압축시켜 전단응력을 가하였다.

#### 4. 실험결과 및 토론

##### 4.1 실험결과

실험결과는 표 1과 같으며 각 시험의 응력경로는 그림 3과 같다.

##### 4.2 응력-변형률

그림 4에 의하면 동일한 크기의 횡방향 압밀응력( $\sigma'_{3c}$ )하에서는 K값이 작을수록 즉 최대압밀주응력( $\sigma'_{1c}$ )이 클수록 최대축차응력( $\sigma_1 - \sigma_3$ )<sub>max</sub>는 커지며 이 점에 이르는 변형률은 감

소하는 경향을 나타낸다. 이는 K값이 작을수록 시료에 가해지는 압밀응력의 크기가 작으므로 압밀에 의한 함수비 및 간극비의 감소가 적기 때문이다.

그리고 동일한 크기의 압밀응력하에서도 K값이 작을수록 최대축차응력은 크다는 사실을 그림 5에서 볼 수 있다. 즉 평균압밀응력( $\sigma'_{mc} = 1/3(\sigma'_{1c} + 2\sigma'_{3c})$ )으로 정규화한 최대축차응력은 K값이 작을수록 증가하는 경향을 나타낸

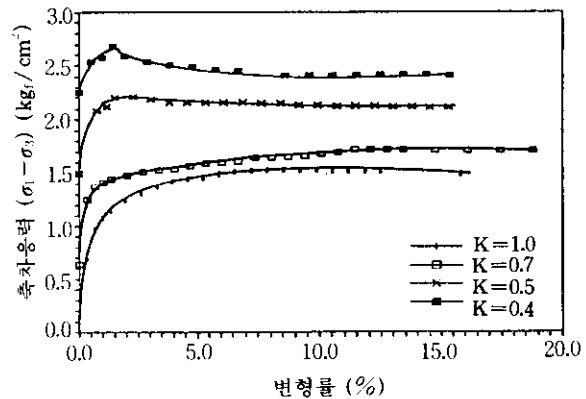


그림 4. 응력-변형률곡선의 압밀응력비별 비교 ( $\sigma'_{3c} = 1.5\text{kg}_r/\text{cm}^2$ )

표. 1 압밀비배수삼축압축시험 결과

단위 :  $\text{kg}_r/\text{cm}^2$

시험종류	$\sigma'_{3c}$	$\sigma'_{1c}$	$\sigma'_{mc}$	$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_0$	$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{max}$	$S_u$	$S_u / \sigma'_{1c}$	$S_u / \sigma'_{mc}$	$\phi'$
CIU-1.0-1.2	1.2	1.2	1.2	0.0	1.25	0.63	0.52	0.52	29.9°
CIU-1.0-1.5	1.5	1.5	1.5	0.0	1.53	0.77	0.51	0.51	
CIU-1.0-1.7	1.7	1.7	1.7	0.0	1.70	0.85	0.50	0.50	
CAU-0.7-1.2	1.2	1.71	1.37	0.51	1.40	0.70	0.41	0.51	28.6°
CAU-0.7-1.5	1.5	2.14	1.71	0.64	1.72	0.86	0.40	0.50	
CAU-0.7-1.7	1.7	2.43	1.94	0.73	1.83	0.92	0.38	0.47	
CAU-0.5-1.2	1.2	2.4	1.6	1.20	1.77	0.89	0.369	0.554	25.6°
CAU-0.5-1.5	1.5	3.0	2.0	1.50	2.21	1.10	0.368	0.552	
CAU-0.5-1.7	1.7	3.4	2.27	1.70	2.48	1.24	0.365	0.547	
CAU-0.4-1.2	1.2	3.0	1.8	1.80	2.14	1.07	0.357	0.596	25.3°
CAU-0.4-1.5	1.5	3.75	2.25	2.25	2.68	1.34	0.357	0.595	
CAU-0.4-1.7	1.7	4.25	2.55	2.55	3.00	1.50	0.354	0.589	

$\ast \sigma'_{mc} = 1/3(\sigma'_{1c} + 2\sigma'_{3c})$

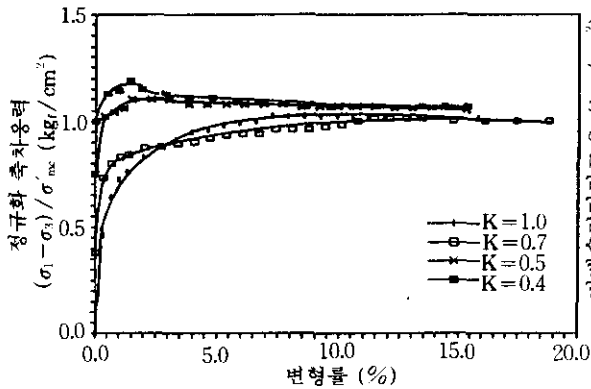


그림 5. 평균압밀응력비로 정규화한 축차응력-변형률 곡선 ( $\sigma'_{3c} = 1.5 \text{ kg/cm}^2$ )

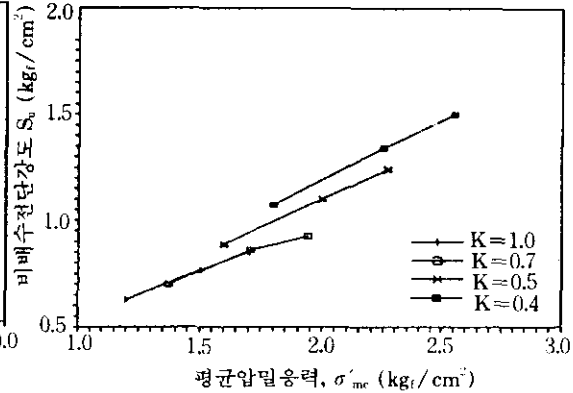


그림 6. 평균압밀응력에 따른 비배수전단강도의 변화

다. 이러한 사실을 미루어 보아 점토시료는 이방압밀이 일어나는 동안에 최대주응력방향으로 더 잘 저항할 수 있도록 점토의 구조가 이방성으로 발달되어 강도의 이방성을 나타낸다고 생각된다.

### 4.3 전단강도

표. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 동일한 크기의 압밀응력비에 대해서 횡방향 압밀응력( $\sigma'_{3c}$ )이 클수록, 그리고 동일한  $\sigma'_{3c}$ 에 대해서 K값이 작을수록 비배수전단강도는 증가한다. 이는 K값이 작을수록 평균압밀응력( $\sigma'_{mc}$ )가 크기 때문이다.

그림 6에서는  $\sigma'_{mc}$ 가 클수록 비배수전단강도는 거의 직선적으로 증가하나 K값에 따라 이들 직선은 일치하지 않고 K값이 작을수록 크다. 이러한 사실을 그림 7과 같이 나타내었으며 K값이 클수록  $S_0 / \sigma'_{mc}$  값이 감소하는 경향을 나타내어 이방압밀에 대한 강도의 이방성을 나타내어주고 있다.

그림 8에서  $S_0 / \sigma'_{3c}$  값은 횡방향 압밀응력( $\sigma'_{3c}$ )의 증가에 따라 거의 영향이 없을 정도로 대단히 미세하게 감소하나(표. 1 참조) K값의 감소에 따라 크게 감소한다는 사실을 보여주고 있다. 이는 전술한 바와 같이 K값이 작을수록

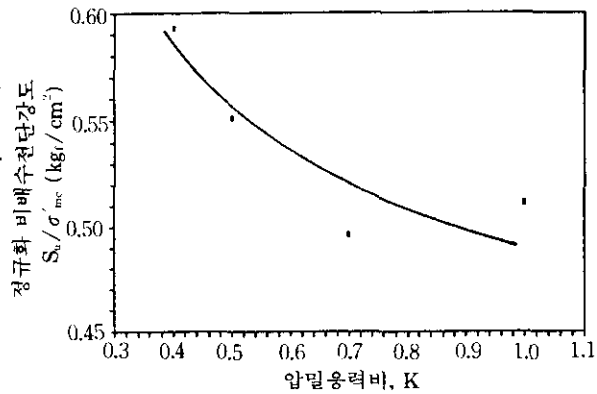


그림 7. 압밀응력비에 따른  $S_0 / \sigma'_{mc}$ 의 변화

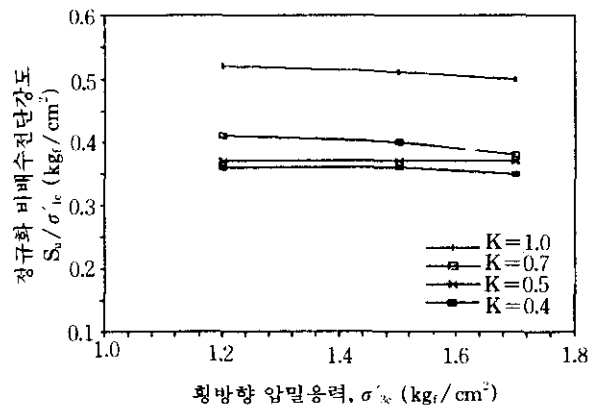


그림 8. 횡방향 압밀응력의 크기에 따른 정규화 비배수전단강도( $S_0 / \sigma'_{3c}$ )의 변화

$\sigma'_{mc}$ 가 크고 또한 이방압밀상태하에서 발달한 강도의 이방성때문이다. 이 관계를 다시 이방압밀상태의 정규화 전단강도( $S_u/\sigma'_{ic}$ )<sub>CAU</sub>를  $K=1.0$ 인 등방압밀상태의 정규화 전단강도( $S_u/\sigma'_{ic}$ )<sub>CIU</sub>로서 나눈 전단강도비  $\alpha$ 를  $K$ 값에 따라 그림 9와 같이 나타내었다. 그림에서  $K$ 값이 클수록 전단강도비는 증가한다.

본 연구에서 사용한 점토시료의  $K_0$ 값은 0.5 정도이므로 전단강도비는 0.72이다. Mayne<sup>(6)</sup>에 의하면 정규압밀점토에 대한 전단강도비는 0.70~1.15 범위내에 있으며 평균치는 0.88정도이다.

따라서 실내에서 통상적으로 실시되는 등방압밀삼축시험결과를 통하여 연직유효응력을 근거로해서 구한 비배수전단강도는  $K_0$ -압밀상태로 존재하는 원위치에서의 정규압밀점토의 실질적인 비배수전단강도보다 지나치게 크다는 사실을 알 수 있다.

그림 10에서 Skempton의 간극수압이론으로부터 구한 식(1)에 의한 전단강도비와 실험에서 구한 전단강도비를 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 이론치와 실험치가 잘 일치한다.

그림 11에서는 각 시험의 응력경로를 나타내었으며 수정파괴포락선의 절편은 영이며 경사각으로부터 구한 내부마찰각은  $K$ 값이 0.4, 0.5, 0.7 및 1.0인 경우 각각 25.3°, 25.6°, 28.6° 및 29.9°이고 이를 그림 12에서 다시 나타내었다. 그리고  $K \neq 1.0$ 이 아닌 이방압밀에 의한 내부마찰각  $\phi'_{CAU}$ 와 등방압밀에 대한  $\phi'_{CIU}$ 와의 비를  $K$ 값에 따라 그림 13과 같이 나타내었다. 이들 두 그림에서  $K$ 값이 클수록  $\phi'$ 값은 증가하고  $\phi'_{CAU}/\phi'_{CIU}$ 비도 증가함을 볼 수 있다.  $K=0.5$ 인 본 연구의 점토시료에 대해서는 이 내부마찰각비는 약 0.87정도이다. Mayne<sup>(6)</sup>에 의하면 정규압밀점토에 대한 이 내부마찰각비의 평균치는 약 0.97이라고 한다.

## 5. 결 론

압밀응력비의 크기가 정규압밀점토의 비배

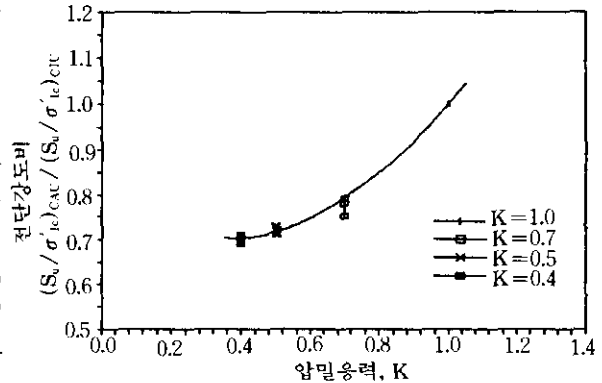


그림 9. 압밀응력비와 전단강도비의 관계

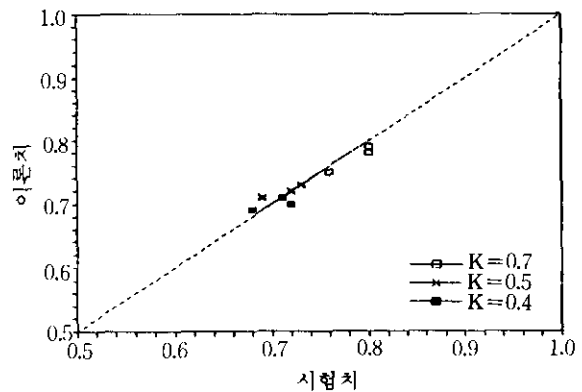


그림 10. 전단강도비 ( $S_u/\sigma'_{ic}$ )<sub>CAU</sub> / ( $S_u/\sigma'_{ic}$ )<sub>CIU</sub>에 대한 이론치와 실험치의 비교

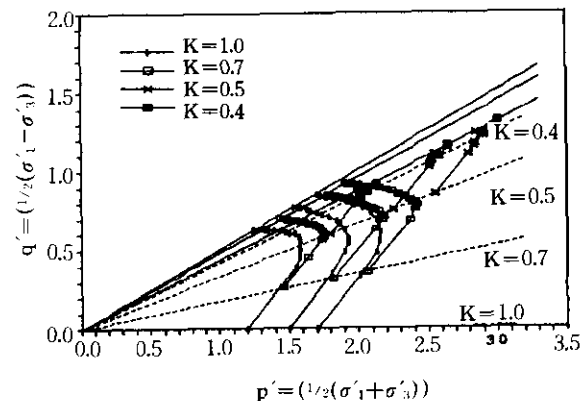


그림 11. 각 압밀응력비에 대한  $p'$ - $q'$  좌표상의 응력경로

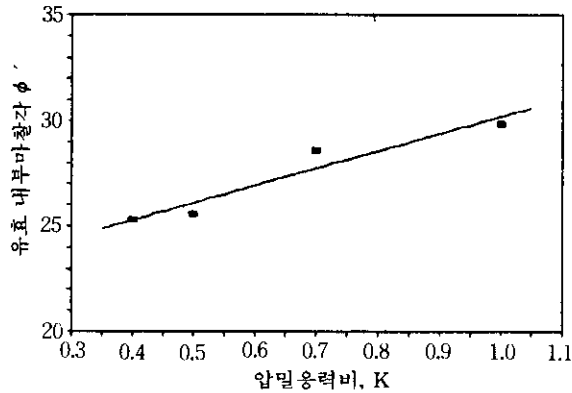


그림 12. 압밀응력비의 크기에 따른 내부마찰각의 변화

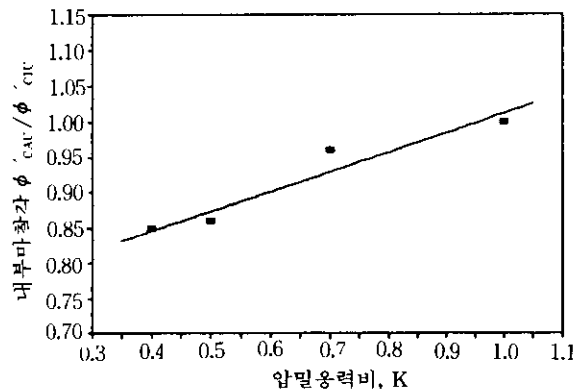


그림 13. 압밀응력비와 내부마찰각비와의 관계

수전단강도에 미치는 영향을 알기 위하여 압밀응력비의 크기를 다르게 하여 시행한 비배수삼축압축시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 동일한 크기의 횡방향압밀응력에 대한 최대축차응력은 압밀응력비가 작을 수록 크다.
- 2) 이방압밀점토의 정규화 비배수전단강도 ( $S_u / \sigma'_{1c}$ ) 및 전단강도비 ( $(S_u / \sigma'_{1c})_{CKU} / (S_u / \sigma'_{1c})_{CIUC}$ )는 압밀응력비가 클수록 증가한다.
- 3) 동일한 크기의 평균압밀응력 ( $\sigma'_{mc}$ )으로서 정규압밀시킨 점토의 비배수 전단강도는 압밀응력비가 작을 수록 약간 증가하는 경향을 보이며 또한 정규화비배수전단강도  $S_u / \sigma'_{mc}$ 도 압밀응력비가 작을수록 증가하는 경향을 보인다

로서 이방압밀에 의한 점토의 응력유도이방성을 나타낸다.

4) 유효내부마찰각( $\phi'$ )은 압밀응력비가 클수록 커지며  $\phi'_{CAU} / \phi'_{CIUC}$ 비도 역시 압밀응력비가 증가할수록 증가한다.

#### 감사의 글

이 논문은 1992년도 교육부지원 학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의해서 연구되었음.

이에 감사를 표합니다.

#### 참고 문헌

1. Brooker, E.W. and Ireland, H.O., "Earth pressure at rest related to stress history," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 2, No. 1, 1965, pp. 1~15.
2. Broms, B. and Ratnam, M.V., "Shear strength of anisotropically consolidated clay," J. SMFD, ASCE, Vol. 89, No. SM6, 1963, pp.1~26.
3. Duncan, A.M. and Seed, H.B., "Anisotropy and stress reorientation in clay," J. SMFD, ASCE, Vol. 92, No. SM5, 1966, pp.21~50.
4. Ladd, C.C., "Stress-strain behavior of anisotropically consolidated clay during undrained shear," Proc. 6th ICSMFE, Montreal, Vol. 1, 1965, pp.282~286.
5. Ladd, C.C., et al., "Stress deformation and strength characteristics," State-of-the art report, Proc. 9th ICSMFE, Vol. 2, 1977, pp. 421~496.
6. Mayne, P.W., "Stress anisotropy effects on clay strength," J. GED, ASCE, Vol. 111, No. GT3, 1985, pp.356~366.
7. Nakase, A. and Kamei, T., "Undrained shear strength anisotropy of normally consolidated cohesive soils," Soils and Foundations, Vol. 23, No. 1, 1983, pp.91~101.
8. Sivakugan, N., Holtz, R.D. and Chameau, J.L., "CK<sub>0</sub>UC shear strength of normally consolidated clays from CIUC tests," J. GED, ASCE, Vol. 114, No. GT3, 1988, pp. 284~295.

(접수일자 1994. 1. 3)