

正規壓密粘土의 舉動에 미치는 K_0 -壓密效果

Effect of K_0 -Consolidation in Behavior of Normally Consolidated Clay

洪 元 杓*
Hong, Won Pyo

Abstract

After clay particles have been sedimented isotropically, the clay deposits have been consolidated under K_0 -stress system. Therefore, in order to predict the behavior in-situ of normally consolidated clays, the effect of K_0 -consolidation should be considered.

A series of undrained and drained triaxial compression tests was performed on remolded specimens of clay consolidated under both K_0 -and isotropic stress systems and the effect of K_0 -consolidation was investigated.

K_0 -consolidation has much effect on the deviator stress, especially at initial deformation stage of consolidated-undrained tests, but has little effect on the principal effective stress ratio. Thus, the undrained strength behavior of K_0 -consolidated samples can not be predicted from isotropically consolidated test data. However, the failure envelop, provided by the maximum principal effective stress ratio failure criterion, is unique and curved.

要 旨

粘土粒子가 등방적으로 퇴적된 후 K_0 -壓密이력을 받으면 應力誘導異方性을 지니게 되므로 正規壓密粘土의 現位置舉動을 조사하려면 K_0 -壓密에 의한 영향을 검토할 필요가 있다.

실내에서 반축성형하여 얻은 粘土供試體에 대하여 등방압밀 및 K_0 -압밀을 실시한 후 비배수삼축압축시험 및 배수삼축압축시험을 실시하여 K_0 -압밀이력의 영향을 검토하였다.

K_0 -압밀이력은 軸差應力舉動에 영향을 크게 미치나 有效主應力比舉動에는 영향이 작다. 특히 비배수시험의 초기변형단계에서는 軸差應力舉動에 영향을 크게 미친다. 따라서, K_0 -압밀시료의 비배수강도거동은 등방압밀비배수시험으로 추정될 수 없다. 그러나, 最大有效主應力比 파괴기준에 의한 파괴포락선은 압밀이력 및 배수조건에 관계없이 유일한 曲線이다.

1. 序 論

自然粘土地盤의 強度 및 應力—變形率舉動을 室內에서 調査하고자 할 때 等方壓密方法이 일반적으로 많이 사용되고 있다. 그러나 自然地盤

은 K_0 상태로 현장에 존재하므로 粘土粒子가 등방적으로 퇴적되더라도 퇴적후 K_0 압밀상태로 압밀이 진행되어 應力誘導異方性⁽²⁰⁾을 지니고 있게 된다. 따라서 보다 현장에 맞는 검토의 거동을 조사하려면 K_0 압밀에 의한 효과를 무시할 수 없을 것으로 생각된다.

* 正會員 · 中央大學校 工科大學 副教授, 土木工學科

표 1. 시험계획

	σ_{vs} (kg/cm ²)	Undrained Test	Drained Test
Isotropic Consolidation Specimen	2.0	ICU-2	ICD-2
	3.0	ICU-3	ICD-3
	5.0	ICU-5	ICD-5
K_0 -Consolidation Specimen	2.0	ACU-2	ACD-2
	3.0	ACU-3	ACD-3
	5.0	ACU-5	ACD-5

그러나, Taylor⁽¹⁹⁾와 Henkel⁽¹⁶⁾은 등방압밀시료의 비배수시험결과 얻은 유효응력경로는 독특하다는 가정 아래 이방압밀시료의 거동이 등방압밀시료의 시험결과로부터 유도될 수 있다 하였다. 이에 반하여 Ladd⁽¹¹⁾는 이방압밀시료의 응력-변형을 특성은 등방압밀시료의 경우와 전혀 다름을 실험으로 지적하였다.

여기에 본 연구에서는 室内에서 반죽성형하여 얻은 점토공시체에 대하여 등방압밀 및 K_0 압밀을 실시한 후 비배수삼축압축시험 및 배수삼축압축시험을 실시하여 K_0 -압밀이력이 正規壓密粘土의 비배수 및 배수 應力-變形率 거동특성 및 有效應力強度에 미치는 영향을 究明하고자 한다. 특히 삼축시험에서는 공시체內에 응력, 변형 및 간극압이 균일하게 분포되어 地域破壞(zone failure)⁽¹⁻³⁾ 형태로 파괴가 발생할 수 있도록 공시체의 크기, 潤滑端(lubricated end), 재하속도 등에 세심한 노력을 기울인다.

2. 三軸壓縮試驗

본 연구에서는 40%의 실트분과 60%의 粘土분으로 구성된 분말상태의 EPK 粘土(Edgar Plastic Kaolinite clay)가 120%의 함수비 상태하에서 반죽성형되어 試料로 사용된다. 사용된 EPK 점토의 액성한계와 소성한계는 각각 60 및 30이며 비중은 2.62 이고 活性度는 0.50 인 非活性粘土이다.

반죽된 점토현탁액을 兩面排水장치가 있는 大型壓密裝置(內徑 25.4cm, 초기높이 20.3cm)에 넣어 2kg/cm²의 연직압밀응력으로 一次元壓密을 한 후 높이와 직경이 모두 7.1cm인 원통형 공시체를 만들어 삼축시험기 내에서 有效側壓이 2, 3 및 5kg/cm²인 상태로 等方壓密 및 K_0 -壓密을 실시한다. 一次壓密이 완료된 후 일련의 비배수삼축압축시험 및 배수삼축압축시험을 실시한다. 이들 시험계획의 일람표는 표 1 과 같다.

사용 공시체의 포화도를 높이기 위하여 2kg/cm²의 back pressure를 사용하였고 압밀후 측정된 간극수압계수 $B(=\Delta u/\Delta \sigma_{cell})$ 값으로 포화도가 대단히 양호함이 확인되었다.

전단시험시 응력, 변형, 간극수압 등이 공시체내에 균일하게 분포되게 하여 공시체가 地域

破壞(zone failure)⁽¹⁻³⁾ 형태로 파괴되도록 유도하기 위하여 공시체의 높이와 직경의 비(H/D)를 1로 하며 동시에 공시체 상하면에 潤滑端(lubricated end)을 마련하여 端部の 마찰구속력을 제거하고 변형속도도 충분히 느린 속도를 채택한다. 즉, 비배수시험의 경우 변형속도는 $8.6 \times 10^{-3}(\%/min)$ 으로 하고 배수시험의 경우는 $4.3 \times 10^{-3}(\%/min)$ 으로 한다. Lade와 Musante⁽⁴⁾ 및 Lade와 Tsai^(2,3)의 연구결과에 의하면 潤滑端을 사용한 짧은 공시체의 비배수시험의 경우 潤滑端이 없는 통상의 공시체($H/D=2.3$)의 변형속도($2.5 \times 10^{-3}(\%/min)$)보다 17 배 가량 빠르게 전단하여도 동일 간극수압분포를 얻을 수 있다 하였다. 또한 Lade와 Musante⁽⁴⁾는 潤滑端을 사용한 비배수시험결과는 변형속도에 영향을 그다지 심하게 받지 않는다 하였다.

삼축압축시험중 연직하중, 측압 및 연직변위를 측정한다. 또한 비배수시험의 경우는 간극수압을, 배수시험의 경우는 體積變形을 측정한다.

시험장치 및 시험방법에 관한 그림의 자세한 사항은 다른 곳⁽⁵⁾에서 이미 설명한 바 있으므로 本稿에서는 생략한다.

3. 試驗結果

시험결과의 일부를 정리하면 그림 1 및 그림 2와 같다. 즉, 그림 1과 그림 2는 각각 等方壓密試料와 K_0 -壓密試料에 대한 비배수삼축압축시험 및 배수삼축압축시험의 결과이다. 그림 중 K_0 -압밀시료는 有效側壓(effective cell pressure)을 3kg/cm²로 하여 실시한 표 1의 ACU-3 및 ACD-3의 경우이며 등방압밀시료는 등방압이 3kg/cm² 및 5kg/cm²인 표 1의 ICU-3, ICU-5,

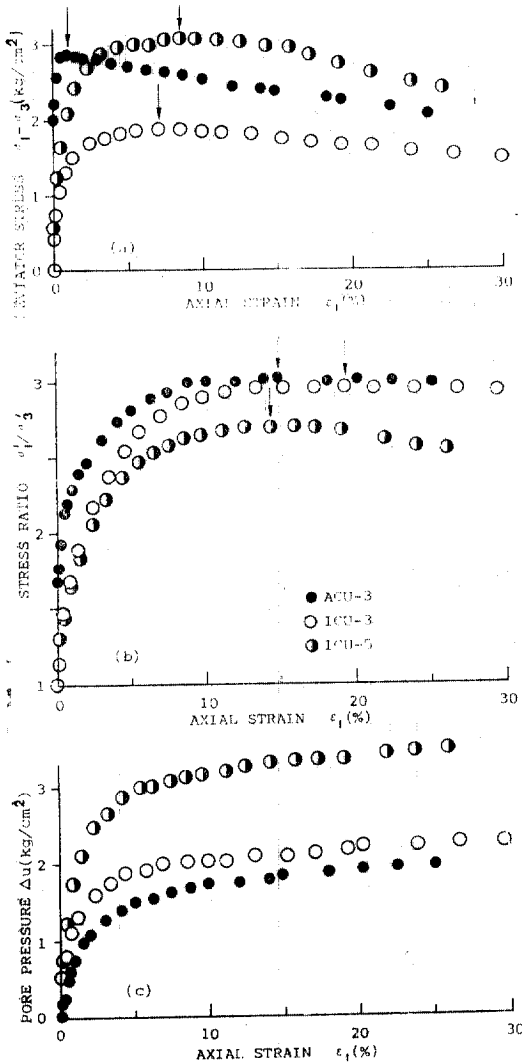


그림 1. 비배수삼축압축 시험결과

ICD-3 및 ICD-5의 경우이다. 이는 ACU-3 및 ACD-3 시료에 대한 K_0 압밀종료시의 최소주응력과 최대주응력이 각각 3kg/cm² 및 5kg/cm² 정도였으므로 K_0 압밀의 최소주응력과 최대주응력과 동일한 압밀상태에서 등방압밀을 한 시료의 거동을 비교할 수 있게 하였다.

우선 비배수시험결과인 그림 1에 의하면 軸方向變形率 ϵ_1 에 대한 主應力比 σ_1'/σ_3' 와 간극수압 Δu 의 변화는 K_0 압밀시료와 등방압밀시료가 서로 비슷한 거동특성을 보이고 있으나 主應

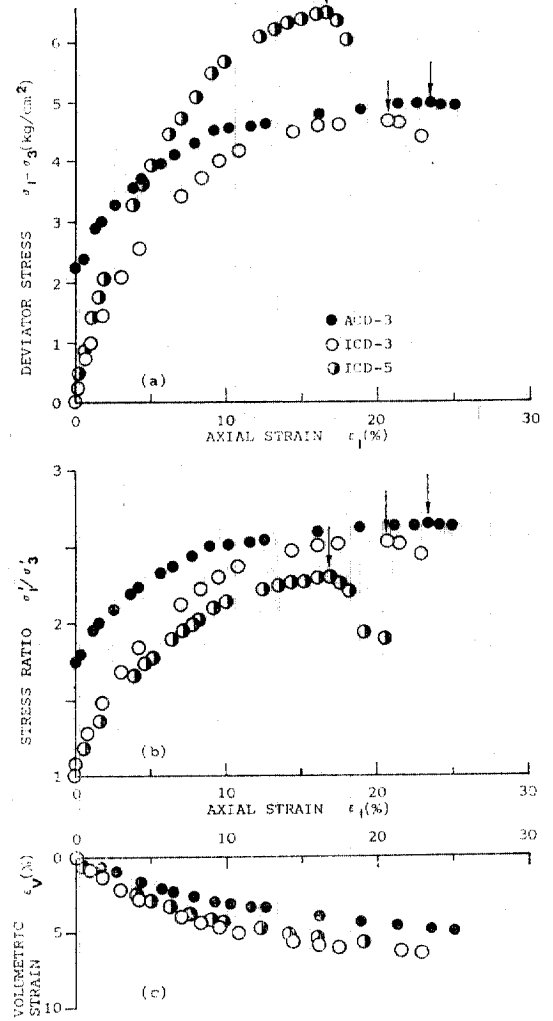


그림 2. 배수삼축압축 시험결과

力差($\sigma_1 - \sigma_3$)는 서로 다른 거동특성을 보이고 있다. 또한 그림 1(a)로부터 壓密應力이 증대할수록 초기비배수지반변형계수(initial undrained soil modulus)와 最大主應力差($\sigma_1 - \sigma_3$)_{max}(그림 중 화살표로 표시)는 증가하고 있음을 알 수 있다. ACU-3 시료의 ($\sigma_1 - \sigma_3$)_{max}는 ICD-3과 ICD-5의 사이값을 보이지만 발생시기는 크게 차이가 있다. 즉 K_0 -압밀시료의 ($\sigma_1 - \sigma_3$)_{max}는 초기변형단계에서 발생한다. 따라서 초기변형단계에서의 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 거동은 시료의 압밀방법에 크게 영

향을 받고 있음을 알 수 있다.

변형률 ϵ_1 과 主應力比 (σ_1'/σ_3') 의 관계를 보이는 그림 1(b)에 의하면 등방압밀시료의 경우 압밀응력이 증대할수록 곡선의 초기경사 및 최대치 (그림중 화살표로 표시) $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 는 감소함을 알 수 있다. ACU-3 시료의 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 는 ICU-5 시료보다는 ICU-3 시료의 값과 비슷하다. 즉 K_0 -압밀시료의 有效應力強度는 K_0 -압밀시료의 최소주응력 즉 側壓을 동일하게 한 등방압밀시료의 강도에 유사함을 알 수 있다.

간극수압은 그림 1(c)에서 보는 바와 같이 압밀응력이 큰 시료일수록 크게 발생하며 K_0 -압밀시료는 등방압밀시료보다 작게 발생한다. 이는 K_0 압밀과정에서 이미 軸差應力의 이력을 받았으며 이로 인한 과잉간극수압분은 압밀시 배수로 소멸되었기 때문이다.

한편, 배수시험결과인 그림 2에 의하면 軸方向變形率 ϵ_1 에 대한 主應力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 및 主應力比 σ_1'/σ_3' 의 관계는 K_0 -압밀시료 및 등방압밀시료가 서로 비슷한 거동특성을 보이고 있다. 배수시험에 있어서는 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 와 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 가 동시에 발생하므로 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 의 거동은 비배수시험의 경우와 달리 K_0 -압밀시료 및 등방압밀시료가 서로 비슷한 거동특성을 보이고 있다. $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 도 축방향변형이 충분히 발생한 후 (20% 전후의 변형률에서)에 발생하며 이 경향은 K_0 -압밀시료 및 등방압밀시료에서 모두 볼 수 있다. 이와 같이 배수시험의 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 거동은 비배수시험의 경우와 相異하나 (σ_1'/σ_3') 거동은 비배수시험과 유사한 거동특성을 보인다.

배수시험시 발생하는 체적변형은 그림 2(c)와 같이 K_0 -압밀시료 및 등방압밀시료가 서로 비슷한 거동특성을 보이나 K_0 -압밀시료가 등방압밀시료보다 체적변형이 작다.

4. 舉動特性

4.1 地盤變形係數

그림 3은 강도와 지반변형계수와의 관계를 圖示한 것이다. 지반변형계수로는 식 (1)과 같이 $\{(\sigma_1 - \sigma_3)_{max} - (\sigma_{1c} - \sigma_{3c})\} / 2$ 되는 지점에서의 割線係數(secant modulus) E_{50} 을 채택하였다.

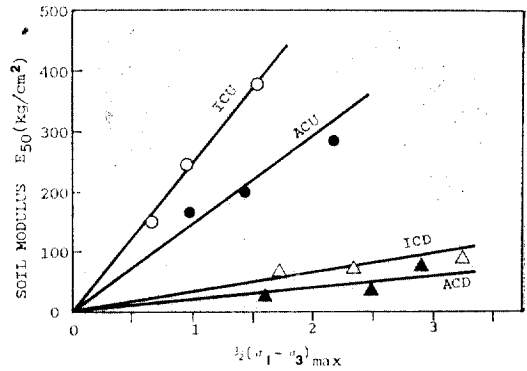


그림 3. 지반변형계수

$$E_{50} = \frac{\frac{1}{2} \{(\sigma_1 - \sigma_3)_{max} - (\sigma_{1c} - \sigma_{3c})\}}{\epsilon_{50}} \dots (1)$$

여기서, ϵ_{50} 은 $\{(\sigma_1 - \sigma_3)_{max} - (\sigma_{1c} - \sigma_{3c})\} / 2$ 지점에서의 軸方向變形率이다.

이 그림으로부터 강도가 큰 지반 즉, 큰 압밀응력을 받은 지반일수록 지반변형계수가 선형적으로 커짐을 알 수 있다. 직접기초지반해석, 말뚝기초지반해석 등과 같은 기초공학분야에서 지반변형계수는 종종 지반의 비배수전단강도 C_u ($= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$)와 연관지어 $E_s = kC_u$ 의 형태로 표현사용된다⁽⁶⁾. 비배수시험 결과를 이와 같은 형태로 정리하여 보면, 등방압밀시료(ICU)의 경우는 k 가 240이고 K_0 -압밀시료(ACU)의 경우는 150이다. 따라서 등방압밀시료의 지반변형계수는 K_0 -압밀상태의 값보다 60% 정도 크다. 이는 K_0 -압밀이력이 粘土의 응력-변형을 거동에 큰 영향을 주고 있음을 의미한다.

동일한 형태로 배수시험결과도 정리하여 보면 그림 3에서 보는 바와 같이 k 가 비배수시험보다 훨씬 작으며 등방압밀시료의 경우 30이고 K_0 -압밀의 경우 20이다. 이 결과에서도 알 수 있는 바와 같이 등방압밀시료는 K_0 -압밀시료보다 지반변형계수가 50% 정도 크다. 또한 비배수상태의 지반변형계수는 배수상태의 지반변형계수보다 8배 정도 큼을 알 수 있다. 따라서 기초지반의 거동이 단기안정문제가 아닌 장기안정문제로 해석되어야 할 경우는 배수시험에 의한 지반변형계수를 사용함이 좋을 것이다. 이는 Pou-

los^(7,8)가 말뚝이 설치된 점토지반의 자료로부터 얻은 지반변형계수와 지반강도의 관계화도 거의 일치하는 결과이다.

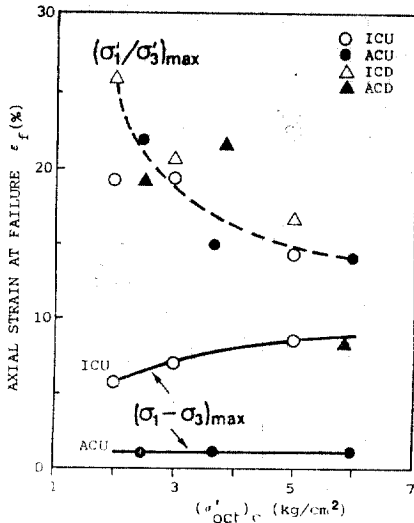


그림 4. 파괴시의 연직변형률

4.2 파괴변형률

그림 4는 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 및 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 상태에 도달하였을 때의 축변형률 $\epsilon_f(\%)$ 와 압밀응력 $(\sigma'_{oct})_c$ 사이의 관계를 나타낸다. 압밀응력으로는 有效正八面體수직응력(effective octahedral normal stress) $(\sigma'_{oct})_c = (\sigma'_{1c} + \sigma'_{2c} + \sigma'_{3c})/3$ 을 채택하였다.

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 우선, 비배수시험에서 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 에 도달하는 변형률 ϵ_f 는 K_0 -압밀시료의 경우는 압밀응력에 관계없이 1%정도인 반면에 등방압밀시료의 경우는 5%이상이며 등방압밀응력이 증대할수록 ϵ_f 값이 약간 증가되는 경향이 있다. 따라서 비배수시험의 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 에서의 변형률 ϵ_f 는 압밀방법에 따라 영향을 받는다고 할 수가 있다.

배수시험의 경우는 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 와 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 가 동시에 발생하므로 이 때의 변형률 ϵ_f 는 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 상태로 그림중에 표시하였다.

$(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 상태에 도달하는 변형률은 역시 그림 4에서 보는 바와 같이 압밀방법, 전단시험시의 배수조건에 관계없이 압밀응력이 큰 시료일수록 작아지는 경향을 보이고 있다. 즉 큰 압밀

응력을 받은 시료일수록 有效應力強度에 도달하는 시간이 짧아지며 그 때의 변형률은 압밀응력만의 함수인 것 같다.

4.3 간극수압

Skempton⁽⁹⁾은 포화토의 비배수전단시험의 경우 공시체내에 발생하는 간극수압변화 Δu 를 식(2)로 표시하였다.

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \dots \dots \dots (2)$$

여기서 A 는 간극압계수이며 $\Delta \sigma_1$ 및 $\Delta \sigma_3$ 는 각각 최대 및 최소주응력방향의 전응력변화량이다. 통상의 축대칭 공시체를 사용하는 삼축압축시험의 경우 $\Delta \sigma_3 = 0$ 이고 $\Delta \sigma_1 = \Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ 이므로 식(2)는 식(3)으로 된다.

$$\Delta u = A \cdot \Delta(\sigma_1 - \sigma_3) \dots \dots \dots (3)$$

식(3)을 사용하여 일부 비배수삼축압축시험의 간극압계수 A 의 변화를 축방향변형률에 따라

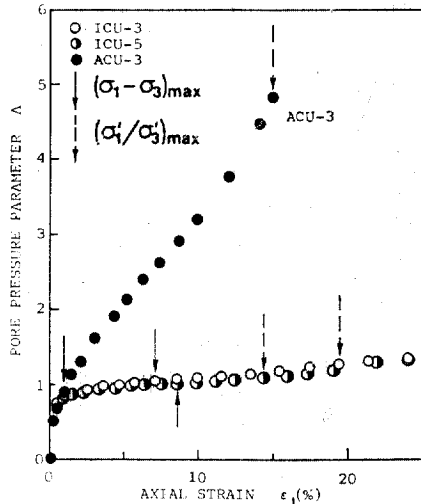


그림 5. 간극압계수 A

圖示한 예가 그림 5이다. 이 그림에 의하면 간극압계수 A 의 거동은 압밀방법에 따라 크게 차이가 나고 있음을 알 수 있다. $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 상태에서의 간극압계수 A_f 는 등방압밀시료의 경우는 평균 1.03이고 K_0 -압밀시료의 경우는 평균 1.05로 등방압밀시료와 별로 차이가 발생하지 않는다. Donaghe와 Townsend⁽¹⁰⁾은 반죽성형한 Vicksburg Buckshot 粘土와 East Atchata-laya Basin Protection Levee 粘土에 대한 일련의 시험결과를 통하여 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 에서의 간극

압계수 A_f 는 異方壓密試料의 경우가 등방압밀 시료의 경우보다 낮다고 하였다. 따라서 본 연구에 사용된 EPK 粘土의 결과는 Donaghe와 Townsend의 결론과 부합되지 않고 있다. 그러나 Ladd⁽¹¹⁾ 및 Bjerrum과 Simons⁽¹²⁾의 연구 결과에 의하면 이방압밀시료의 A_f 값이 등방압밀 시료의 A_f 값보다 반드시 낮은 값을 보여주고 있지는 않음을 알 수 있다. 따라서 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 에서의 간극압계수 A_f 에 대한 Donaghe와 Townsend의 결론은 모든 흙에 적용시킬 수는 없는 것 같다.

한편, $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 에서의 간극압계수 A_f 는 그림 5에서 점선화살표로 표시된 바와 같이 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 에서의 A_f 보다 큰 값을 보인다. 이들 두가지 A_f 사이의 차이는 등방압밀시료의 경우는 약간 증가할 정도이나 K_0 -압밀시료의 경우는 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 이후 간극압계수가 극격히 증가하여 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 에서 매우 큰 A_f 값을 보여주고 있다.

표 2. 파괴시의 $\Delta u/\sigma_{3c}'$

σ_{3c}' (kg/cm ²)	$\Delta u/\sigma_{3c}'$			
	at $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$		at $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$	
	ICU	ACU	ICU	ACU
2.0	0.65	0.27	0.73	0.66
3.0	0.65	0.25	0.72	0.61
5.0	0.63	0.24	0.65	0.56

표 2는 有效壓密側壓 σ_{3c}' 에 대한 파괴시의 과잉간극수압 Δu 의 비를 정리한 결과이다. 이 표에 의하면 등방압밀시료는 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 에서 과잉간극수압은 σ_{3c}' 의 63~65% 정도까지 발생하나 K_0 -압밀시료에는 24~27% 정도밖에 발생하지 않고 있어 시료내에 발생하는 간극수압이 압밀방법에 따라 크게 차이가 지고 있음을 알 수 있다. 그러나 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 상태에서는 과잉간극수압이 등방압밀시료의 경우는 σ_{3c}' 의 65~73%가 되어 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 보다 2~8% 정도밖에 증가하지 않았으나 K_0 -압밀시료의 경우는 56~66%로 32~39%나 증가하였다. 이는 등방압밀시료의 경우는 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 이후 變形率軟化(strain

softening)현상이 별로 발생하지 않으나 K_0 -압밀 시료의 경우는 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 이후에 變形率軟化가 많이 발생함을 의미하며 그로 인하여 시료내에 과잉간극수압이 많이 발생됨을 의미한다. 결국 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 상태에서의 파괴포락선(failure envelop)에 도달할 때까지 등방압밀시료와 K_0 -압밀 시료에 발생하는 변형율이 서로 접근하여감을 입증하여 주고 있다고 할 수 있을 것이다.

4.4 체적변형

배수시험에 의한 체적변형은 그림 2(c)에서 보는 바와 같이 등방압밀시료의 경우 압밀응력크기에 크게 영향을 받지 않는다. 그러나 K_0 -압밀 시료는 등방압밀시료보다 체적변형이 적음을 이미 3장에서 검토한 바 있다. 이를 더 자세히 조사하기 위하여 전 배수시험에 대한 파괴시의 체적변형을 정리한 것이 그림 6이다. 이 결과에

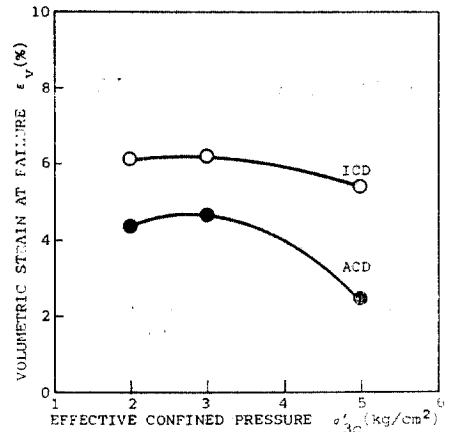


그림 6. 파괴시의 체적변형율

의하여서도 K_0 -압밀시료에 대한 체적변형율은 등방압밀시료에 대한 체적변형율보다 적음을 분명히 확인할 수 있다. 또한 체적변형은 유효압밀측압 σ_{3c}' 이 커지면 약간 증가하다가 σ_{3c}' 가 더욱 커지면 오히려 감소한다. 이러한 경향은 등방압밀시료보다 K_0 -압밀시료의 경우가 더욱 현저하다. 이는 압밀응력이 커질수록 견고한 점토가 되며 견고한 점토의 전단시 발생하는 dilatancy 현상에 의한 결과라고 생각되는 바이다.

한편, 배수시험시의 체적변형율 ϵ_v 와 축방향 변형율 ϵ_1 으로 포아슨비 ν 를 식(4)로 구하면 등방압밀시료의 경우는 평균 0.36 이고 K_0 -압밀시

료의 경우는 0.38 이다.

$$\nu = -\frac{\epsilon_3}{\epsilon_1} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\epsilon_v}{\epsilon_1} \right) \dots\dots\dots(4)$$

5. 有効應力強度

5.1 應力徑路

삼축시험으로 공시체가 파괴상태에 도달하게 하는 경로는 여러가지가 있을 수 있다. 통상의 삼축시험에서는 (1) 배수 및 비배수 조건 (2) 軸力증가 혹은 側壓감소에 의한 압축시험 (3) 軸力감소 혹은 側力증가에 의한 伸張시험의 방법으로 시험이 실시될 수 있다. 시험결과는 이상과 같은 배수 및 재하에 관한 조건에 따라 영향을 받으므로 내부마찰각은 약간의 차이를 보이게 된다. (19-18)

상기의 3 가지 類型중 첫번째의 배수 및 비배수

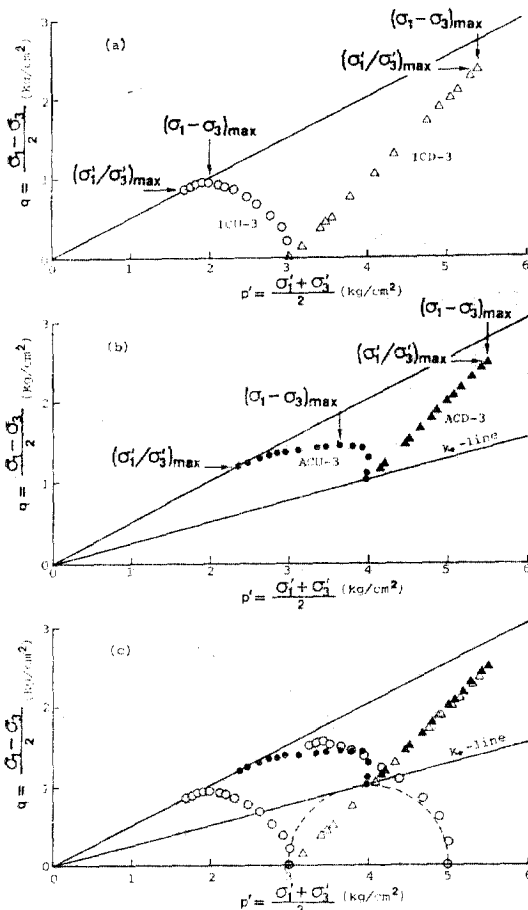


그림 7. 應力徑路도

수조건에 대한 應力徑路의 예를 보면 그림 7(a) 및 (b)와 같다. 그림 7(a)는 3kg/cm²로 등방압밀한 시료의 결과이고 그림 7(b)는 3kg/cm²의 유효축압에서 K₀-압밀을 실시한 시료의 결과이다.

이들 결과로부터 비배수시험과 배수시험의 유효應力徑路는 전혀 다름을 알 수 있다. 즉 등방압밀시료나 K₀-압밀시료 모두 비배수시험은 초기경로의 경사가 수평축에 90°의 각도로 시작되나 배수시험은 45°의 각도를 보이고 있다. 배수시험의 경로는 비배수시험의 진應力徑路和 일치하고 있다. 그러므로 배수경로와 비배수경로 사이의 거리는 간극수압의 발생량이라 생각할 수 있다. 그림으로부터 보는 바와 같이 (σ₁-σ₃)_{max} 상태에서 과잉간극수압이 최대치가 되면 (σ₁-σ₃)_{max} 상태는 (σ₁'/σ₃')_{max} 상태와 일치하게 된다. 그러나 (σ₁-σ₃)_{max} 상태 후에도 간극수압이 증가하면 두 상태의 위치는 달라지게 된다. 이 차이는 그림 7(b)의 K₀-압밀시료가 그림 7(a)의 등방압밀시료보다 크다. (σ₁-σ₃)_{max}에서의 q (= (σ₁-σ₃)/2)값은 배수시험의 경우가 비배수시험의 경우보다 2배 전후 정도가 된다.

이 그림에서 역시 비배수시험에 적당하게 그린 직선 파괴포락선에 배수시험의 應力徑路가 도달하지 못하고 있음을 알 수 있다. 이는 결국 파괴포락선이 직선이 아님을 의미하는 것이다.

Taylor⁽¹⁹⁾와 Henkel⁽¹⁶⁾은 등방압밀시료의 비배수시험결과 얻은 유효應力徑路는 독특하다는 가정아래 이방압밀시료의 거동을 등방압밀시료의 시험결과로부터 유도할 수 있다 하였다. 그러나 그림 7(c)에서 보는 바와 같이 K₀-압밀시료의 비배수시험의 유효應力徑路는 등방압밀시료의 것과 일치하지 않는다. 그러나 배수시험의 경우는 σ_{3c}'가 동일한 등방압밀시료와 k₀-압밀시료의 應力徑路가 일치함을 알 수 있다.

5.2 파괴기준

실내시험결과의 정리 및 지반안정해석에 사용되는 흙의 내부마찰각을 구하기 위하여 적용되는 흙의 파괴상태를 결정하는 기준으로는 일반적으로 두가지가 있다. 하나는 最大軸差應力 (maximum deviator stress)상태, (σ₁-σ₃)_{max} 이고 다른 하나는 最大有效主應力比(maximum

principal effective stress ratio)상태, $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 이다. (12, 20, 21) 이 두 상태는 그림 7에서 검토된 바와 같이 정규압밀점토시료에 대한 배수시험시에는 서로 일치하게 되며 비배수시험시에는 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 가 $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ 와 동시에 혹은 그 이후에 발생하게 된다. 그러나 과압밀점토의 경우는 $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ 상태에 도달하기 이전에 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 상태가 먼저 발생한다고 하였다(20, 21).

이들 두 기준을 사용함으로써 인하여 유효내부마찰각은 이따금 서로 다르게 된다. Simons(18)는 배수상태에서 파괴가 발생하는 사면이나 옹벽의 장기안정해석에는 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 기준을 사용하기를 권장하였다. 이 두 기준의 차는 sensitivity가 크면 클수록 크다(12, 22-24). 따라서 본 연구에 사용된 EPK는 sensitivity가 비교적 적으므로 $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ 와 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 의 차가 작은 편이고 내부마찰각의 차도 크지는 않다.

비배수시험시 K_0 -압밀시료는 $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ 가 비교적 작은 변형상태(1% 변형율)에서 발생된 후 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 까지 變形率軟化가 계속되며 내부마찰각값이 계속 증가한다. 그러나 등방압밀시료의 경우는 비교적 변형이 많이 발생한 후에 $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ 에 도달하므로 그 후의 變形率軟化도 비교적 적어 $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ 와 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 가 많이 접근하여 있음을 알 수 있다. 따라서 $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ 에서의 유효내부마찰각 ϕ' 는 K_0 -압밀시료가 등방압밀시료보다 작을 것이 예상된다. 본 시험에서도 그림 8에서 보는 바와 같이 비배수시험 경

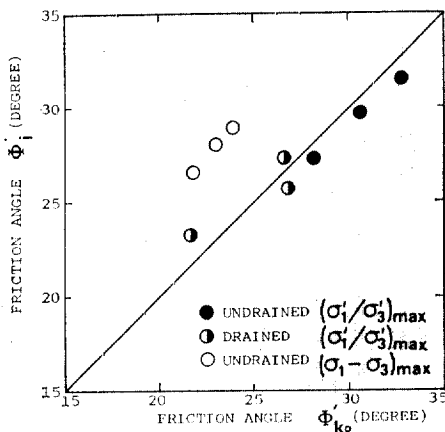


그림 8. 등방압밀시료와 K_0 압밀시료의 내부마찰각 관계

우 $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ 에서의 K_0 -압밀시료에 대한 유효내부마찰각 ϕ_{K_0} 는 등방압밀시료에 대한 유효내부마찰각 ϕ' 보다 5°정도 적음을 보여 준다. 이는 Ladd(11)의 연구결과와도 일치하는 경향이다. 그러나 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 상태에서의 등방압밀시료 및 K_0 -압밀시료의 내부마찰각은 배수시험과 비배수시험 모두 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 의 파괴상태에 대한 파괴포락선은 배수조건 및 압밀조건에 관계없이 유일하다고 할 수 있다.

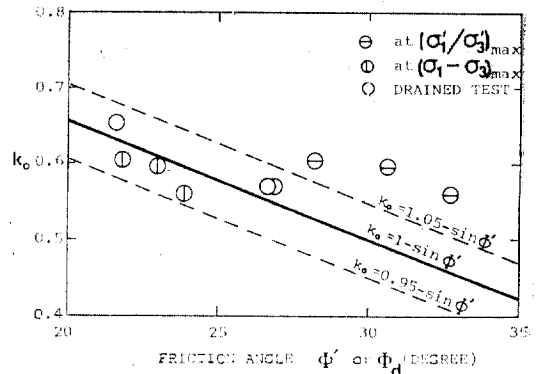


그림 9. K_0 와 내부마찰각의 관계

5.3 K_0 값

그림 9는 K_0 -압밀시료에 대한 K_0 값과 내부마찰각 사이의 관계를 圖示한 것이다. 비배수시험의 경우는 $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ 에서의 내부마찰각과 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 에서의 내부마찰각을 같이 정리하였다. 그림 중 실선은 식(5)로 표시된 Jaky의 공식을 나타내고 있다. (6)

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \dots \dots \dots (5)$$

우선 배수시험의 경우는 ϕ_d 를 사용하여 산정한 K_0 와 시험치가 양호한 일치를 보이고 있다. 한편 비배수시험의 경우는 $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ 상태에서의 ϕ' 를 사용하여 산정한 K_0 는 시험치와 잘 일치하지만 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 상태에서의 ϕ' 를 사용하여 산정한 K_0 는 시험치보다 훨씬 낮음을 알 수 있다. 따라서 Jaky의 공식 사용시에는 $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ 상태에서 구한 ϕ' 값을 사용함이 타당할 것으로 생각된다.

5.4 곡선파괴포락선

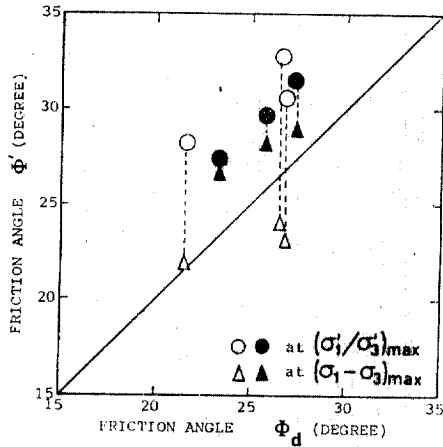


그림 10. 비배수시험과 배수시험의 내부마찰각 관계

그림 10은 비배수시험에 의한 내부마찰각 ϕ' 와 배수시험에 의한 내부마찰각 ϕ_d 를 비교한 결과이다. 이 그림에 의하면 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 에서 구한 ϕ' 는 ϕ_d 와 비교적 일치하나 $(\sigma_1' / \sigma_3')_{max}$ 에서 구한 ϕ' 는 ϕ_d 보다 $4^\circ \sim 7^\circ$ 큰 값을 보이고 있다. Blight⁽²⁵⁾는 배수시험은 비배수시험보다 재하속도가 매우 느린 관계로 ϕ_d 가 ϕ' 보다 작아진다고 하였고, Bjerrum과 Simons⁽¹²⁾의 연구결과에서도 ϕ_d 는 ϕ' 보다 $0 \sim 3^\circ$ 작게 나타난다 하였다. 본 시험에서는 2장에서 이미 설명한 바와 같이 시험방법과 재하속도에 대하여도 개량과 충분한 고찰을 한 관계로 상기의 선

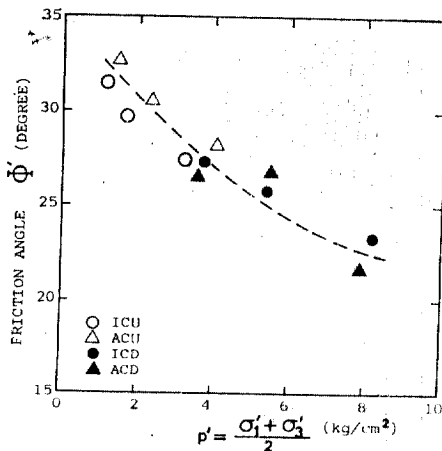


그림 11. 파괴시의 평균응력과 내부마찰각의 관계

행연구와 경향은 비슷하나 ϕ_d 와 ϕ' 의 차이가 좀 크게 나타나고 있다. 그러나 이 결과는 5.1절 및 그림 7에서 설명한 바와 같이 배수시험의 응력경로가 비배수시험의 유효응력경로와 다르기 때문에 파괴시의 응력상태를 관찰하여 판단해야 할 것으로 생각된다. 따라서 파괴시의 평균응력 $p_f' = (\sigma_{1f}' + \sigma_{3f}') / 2$ 와 내부마찰각의 관계를 圖示하여 보면 그림 11과 같다.

이 그림에 의하면 흙의 내부마찰각은 배수조건에 관계 없이 파괴시의 평균응력값의 증가에 따라 감소함을 알 수 있다. 이는 그림 7에 표시된 파괴포락선의 기울기가 일정한 것이 아니고 p_f' 의 증가에 따라 감소하는 경향이 있음을 의미한다. 즉 파괴포락선은 Mohr-Coulomb의 파괴포락선처럼 직선이 아니라 곡선의 형태임을 입증하는 것이다. Shibata와 Karube⁽²⁶⁾, Yong과 Mckeyes⁽²⁷⁾도 실험으로 파괴포락선은 직선이 아니라 곡선임을 주장하였고 Matsuoka와 Nakai⁽¹⁵⁾, Lade⁽²¹⁾ 등은 파괴를 응력의 한계상태로 정의하는 새로운 파괴기준을 제안하여 곡선파괴포락선을 제시하기도 하였다.

6. 結 論

等方壓密試料 및 K_0 -壓密試料를 대상으로 非排水三軸壓縮試驗 및 排水三軸壓縮試驗을 실시한 결과를 비교하여 K_0 -압밀이력이 正規壓密粘土의 擧動에 미치는 영향을 조사하였고 다음과 같은 結論을 얻을 수 있었다.

(1) K_0 -압밀이력은 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 거동에 영향을 크게 미치나 (σ_1' / σ_3') 거동에는 영향이 적다. 특히 비배수삼축압축시험의 초기변형단계에서는 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 거동에 영향을 크게 미친다.

(2) 지반변형계수는 압밀이력, 배수조건에 영향을 크게 받으며 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 상태의 변형율은 압밀이력에 따라 크게 영향을 받으나 $(\sigma_1' / \sigma_3')_{max}$ 상태의 변형율은 압밀이력 및 배수조건에 영향을 받지 않는다.

(3) K_0 -압밀시료는 등방압밀시료보다 간극수압이나 체적변형이 작게 발생한다. 비배수시험시의 간극압계수 A 는 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 이전에는 K_0 -압밀이력의 영향이 적으나 그 후에는 영향이 크게 나타난다.

(4) K_0 -압밀이력은 비배수응력경로에는 영향을 크게 미치나 배수응력경로에는 영향을 미치지 않는다.

(5) (σ_1'/σ_3') max 상태에 대한 파괴포락선은 압밀이력 및 배수조건에 관계없이 유일한 곡선이다.

感謝의 말

本研究은 한국과학기술연구소의 1985년도 전반기 해외연수지원에 의하여 미국 UCLA에서 수행된 研究結果의 추가분임을 밝히며 同財團에 謝意를 표하는 바이다.

아울러 여러가지 편의를 제공하여준 UCLA 토목공학과의 Poul V. Lade 教授에게도 감사드리는 바이다.

參 考 文 獻

- Lade, P.V.: "Localization Effects in Triaxial Tests on Sand," *IUTAM Conference on Deformation and Failure of Granular Materials, Delft*, 1982, pp. 461~471.
- Lade, P.V. and Tsai, J.I.: "Three-Dimensional Behavior of Remolded Overconsolidated Clay," *Report No. UCLA-ENG-85-09, UCLA, February 1985*.
- Lade, P.V. and Tsai, J.I.: "Effects of Localization in Triaxial Tests on Clay," *Proc., 11th ICSMFE, San Francisco*, Vol. 2, 1985, pp. 549~552.
- Lade, P.V. and Musante, H.M.: "Three-Dimensional Behavior of Normally Consolidated Cohesive Soil," *Report No. UCLA-ENG-7626, UCLA*, 1976.
- 洪元杓: "正規壓密粘土의 非排水剪斷強度에 미치는 壓密方法의 影響", *大韓土質工學會誌*, 第3卷第2號, 1987.
- Bowles, J.E.: *Foundation Analysis and Design, 3rd Edition*, McGraw-Hill, Tokyo, 1982, p. 70.
- Poulos, H.G.: "Behavior of Laterally Loaded Piles: I-Single Piles," *Jour., SMFD, ASCE*, Vol. 97, No. SM5, 1971, pp. 711~731.
- Poulos, H.G. and Davis, E.H.: *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley and Sons, New York, 1980, p. 102.
- Skempton, A.W.: "The Pore-Pressure Coefficients A and B," *Geotechnique*, Vol. 4, 1954, pp. 143~147.
- Donaghe, R.T. and Townsend, F.C.: "Effects of Anisotropic versus Isotropic Consolidation in Consolidated-Undrained Triaxial Compression Tests of Cohesive Soils," *Technical Report 8-75-13, U.S. Army Engineer Waterways Experimental Station, Vicksburg, Miss.*
- Ladd, C.C.: "Stress-strain Behavior of Anisotropically Consolidated Clays during Undrained Shear," *Proc., 6th ICSMFE, Montreal*, Vol. 1, 1965, pp. 282~286.
- Bjerrum, L. and Simons, N.E.: "Comparison of Shear Strength Characteristics of Normally Consolidated Clays," *Proc., ASCE Research Conference on the Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder, Colorado*, 1960, pp. 711~726.
- Parry, R.H.G. and Nadarajah, V.: "Observation on Laboratory Prepared, Lightly Overconsolidated Specimens of Kaolin," *Geotechnique*, Vol. 24, No. 3, 1974, pp. 345~358.
- Amerasinghe, S.F. and Parry, R.H.G.: "Anisotropy in Heavily Overconsolidated Kaolin," *Jour., GTE, ASCE*, Vol. 101, No. GT12, 1975, pp. 1277~1293.
- Matsuoka, H. and Nakai, T.: "A New Failure Criterion for Soil in Three-Dimensional Stresses," *IUTAM Conference on Deformation and Failure of Granular Materials, Delft*, 1982, pp. 253~263.
- Henkel, D.J.: "The Shear Strength of Saturated Remoulded Clays," *Proc. ASCE Research Conference on the Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder, Colorado*, 1960, pp. 533~554.
- Koutsoftas, D.C.: "Undrained Shear Behavior of a Marine Clay," *Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM Special Technical Publication*, No. 740, 1981, pp. 254~276.
- Simons, N.E.: "The Influence of Stress Path on Triaxial Test Results," *Laboratory Shear Testing of Soils, ASTM, Special Technical Publication*, No. 361, 1963, pp. 270~278.
- Taylor, D.W.: *Fundamental of Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York, 1948, pp. 362~405.

20. Holtz, R.D. and Kovacs, W.D.: *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981, pp. 553~556.
21. Lade, P.V.: "Prediction of Undrained Behavior of Sand," *Jour., GED, ASCE*, Vol. 104, No. GT6, 1978, pp. 721~735.
22. Parry, R.H.G.: "Triaxial Compression and Extension Tests on Remoulded Saturated Clay," *Geotechnique*, Vol. 10, No. 4, 1960, pp. 166~180.
23. Olsen, R.E.: "The Shear Strength Properties of A Sodium Illite," *Geotechnique*, Vol. 12, 1962, pp. 23~43.
24. Murthy, K., Sridharan, A. and Nagaraj, T.S.: "Shear Strength Behavior of Overconsolidated Clays," *Soils and Foundations*, Vol. 21, No. 2, 1981, pp. 73~83.
25. Blight, G.E.: "Shear Stress and Pore Pressure in Triaxial Testing," *Jour., SMFD, ASCE*, Vol. 91, No. SM1, 1965, pp. 25~39.
26. Shibata, T. and Karube, D.: "Influence of the Variation of the Intermediate Principal Stress on the Mechanical Properties of Normally Consolidated Clays," *Proc., 6th ICSMFE, Montreal*, Vol. I, 1965, pp. 359~363.
27. Yong, R.N. and Mckeyes, E.: "Yielding of Clay in a Complex Stress Field," *Proc., 3rd Panamerican Conference on SMFE, Caracas*, Vol. I, 1967, pp. 131~143.
28. Duncan, A.M. and Seed, H.B.: "Anisotropy and Stress Reorientation in Clay," *Jour. SMFD, ASCE*, Vol. 92, No. SM5, 1966, pp. 21~50.

(接受: 1987. 6. 23)