

K₀-재하/제하에 의한 건조모래의 거동(I): 단주기 시험

Behaviour of Dry Sand under K₀- Loading/Unloading
Conditions(I): Single - Cyclic Test

송 무 효* ¹	정 성 교* ²
Song, Mu - Hyo	Chung, Sung - Gyo
남 선 우* ³	정 진 교* ³
Nam, Sun - Woo	Chung, Chin - Gyo

Abstract

For estimation of K₀-value depending upon the stress history of dry sand, a new type of K₀- oedometer apparatus is devised, and the horizontal earth pressure is accurately measured. For this study, 2 types of one-cyclic K₀- loading/unloading models have been studied experimentally using four relative densities of the sand. The results obtained in this test are as follows: K_{on}, the coefficient of earth pressure at-rest for virgin loading is a function of the angle of internal friction ϕ' of the sand and is determined as $K_{on} = 1 - 0.914 \sin \phi'$, K_{ou}, the coefficient of earth pressure at-rest for virgin unloading is a function of K_{on} and overconsolidation ratio(OCR), and is determined as $K_{ou} = K_{on}(OCR)^\alpha$. The exponent α , increases as the relative density increases. K_{or}, the coefficient of earth pressure at-rest for virgin reloading decreases in hyperbola type as the vertical stress, σ_v' , increases. And, the stress path at virgin reloading leads to the maximum prestress point, independent upon the value of the minimum unloading stress. The gradient of this curve, m_r, increases as OCR increases.

요 지

건조모래의 응력이력에 따른 K₀ 값을 관찰하기 위하여 압밀링 형태의 K₀ 시험기를 새로이 고안하였으며, 이 시험기를 사용하여 수평응력을 측정하였다. 본 실험을 위하여 총 2 형태의 단주기 K₀- 재하/제하시험이 4종류의 상대밀도에 대하여 수행하였다. 실험결과, 처너재하 시의 정지토압계수 K_{on}은 모래의 내부마찰각 ϕ' 의 함수로서 $K_{on} = 1 - 0.914 \sin \phi'$ 와 같은 관계식을 얻을 수 있었다. 처너재하 시의 정지토압계수 K_{ou}는 K_{on}과 과압밀비(OCR)의 함수로서 $K_{ou} = K_{on}$

*1. 정희원, 동의대학교 토목공학과 교수

*2. 정희원, 동아대학교 토목공학과 교수

*3. 정희원, 동아대학교 토목공학과 박사과정

(OCR)'으로 표시할 수 있으며, 지수 α 는 대체로 상대밀도가 클수록 증가하는 경향을 보인다. 처너재재하 시의 정지토압계수 K_0 은 연직응력 σ_v' 가 증가함에 따라 쌍곡선 형태로 감소한다. 그리고 처너재재하 시의 응력경로는 최소재하응력의 크기에 무관하게 최대선행점으로 복귀하며, 이 곡선의 기울기 m 은 OCR이 클수록 증가한다.

1. 서론

토질공학에서 흙-구조물의 거동을 예측하기 위해서는 정지토압계수 K_0 (the coefficient of lateral earth pressure at rest)를 정확히 결정하는 것이 대단히 중요한 문제이다. 이는 수평변위가 없을 때 지반내의 연직응력에 대한 수평응력의 비로 정의되며, K_0 값은 현장에서 self-boring pressuremeter로 측정하는 시험법과 실내에서 삼축시험기 및 압밀시험기를 이용한 실내시험법으로 측정하고 있다.

비록 K_0 의 현장측정값이 신뢰성이 있는 것으로 보고 가끔 사용하고 있지만 실제 지반에서는 계절적인 지하수위 변동, 흙의 생성에 대한 지질학적인 역사 등에 의해 응력의 재하 및 제하를 받는 복잡한 이력을 유발하기 때문에 현장응력을 정확히 예측하기는 무척 어려운 일이다. 그리고 현장측정기인 self-boring pressuremeter의 조작에 따라 응력상태가 상당히 변화되는 단점이 있다. 따라서, 실내에서 측정된 K_0 값을 경험적으로 보정하여 일반적으로 사용하고 있는 실정이다.

실내 K_0 -시험을 하기 위해 많은 학자들이 새로운 시험기를 고안하여 사용하였으나, 크게 삼축시험기와 압밀시험기의 형태로 구분할 수 있다. 현재까지 K_0 -시험방법이 상당히 개선되었음에도 불구하고 정확한 K_0 조건을 만족시키기에는 아직도 많은 문제점들을 내포하고 있다. 그러나 실내 K_0 -시험을 통하여 응력 및 변형의 경로에 따라 K_0 값을 정성적 내지 정량적인 분석이 가능하도록 함으로서 흙 구조물의 거동을 예측하는데 크게 도움이 되고 있다. 그럼에도 불구하고 이러한 분석은 정량화를 위해

서 여전히 미흡한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 K_0 조건을 크게 만족할 수 있는 새로운 K_0 -압밀링을 제작하였으며, 총 2형태의 단주기 K_0 -재하/제하에 의한 응력이력 모형을 설정하여 4종류의 상대밀도를 지닌 건조모래에 대하여 K_0 -시험을 수행하였다. 그 시험결과를 통하여 응력이력에 따른 K_0 값의 변화와 기존의 단주기 응력이력 모형에 대하여 분석·검토하고자 한다.

2. 기존의 K_0 -시험기 및 시험결과

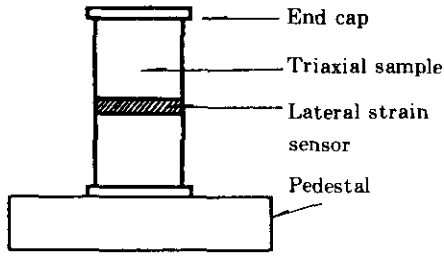
2.1 기존의 실내 K_0 -시험기

K_0 -시험 결과의 신뢰성을 입증하기 위하여 K_0 -시험방법에 대한 고찰이 필요하다. 일반적으로 신뢰성이 있는 실내 K_0 -시험을 수행하기 위해서는 다음과 같은 세가지 조건을 만족시켜야 한다.

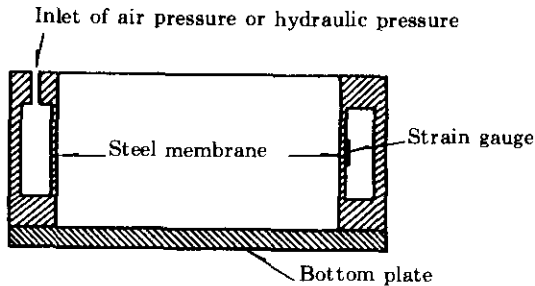
- (i) 흙은 재하방향인 연직방향으로 자유롭게 변형해야 하며,
- (ii) 모든 점에서 흙의 측면변형은 없어야 하고,
- (iii) 시험중에 연직 및 수평방향의 응력이 주응력이 될 수 있도록 시료의 경계에서 측면마찰이 없도록 해야 한다.

K_0 -시험은 많은 연구자들에 의하여 시험장치의 고안과 함께 수행되었는데, 크게는 삼축압축시험기와 압밀시험기로 분류할 수 있다.

K_0 상태하에서 수평응력을 측정하기 위한 삼축압축 시험은 그림 1(a)와 같이 수평변위 감지기를 이용하여 시료의 측면에서 수평변위를 직접측정하는 방법과 시료의 측면위와 체적변



(a) Conventional triaxial test device



(b) Conventional oedometer test device

Fig.1 Schematic representations of existing K_0 -test apparatus

위를 동시에 측정하여 측면변위의 평균치를 간접적으로 제어하는 두가지 유형으로 구분된다. 전자의 경우에 수평감지기는 LVDT(linear variable differential transformer) 변형감지기, 변형계이지(strain gauge) 등을 사용하여 Bishop & Henkel⁶⁾, Skempton & Sowa⁴³⁾, Henkel & Sowa⁴⁸⁾, Akai & Adachi¹⁾, Nakase et al²⁷⁾, Menzies et al²⁵⁾, Konishi et al²⁹⁾, Brown et al¹¹⁾, Daramola¹⁴⁾ Al-Hussaini²⁾, Feda¹⁵⁾ 등에 의하여 수행되었다.

이 방법에 의하여 측정된 변위는 시료의 전체 길이에 대해 변위가 균등하지 않을 때 횡방향 변위의 평균값으로 대표될 수 없으며, 또한 멤브레인(membrane)의 외측에서 측정된 변위이므로 멤브레인 내측에 있는 흡입자의 변위와 일치한다고 할 수 없는 단점이 있다.³²⁾ 후자의 경우는 시료를 포화시켰을 때 주로 사용하였던 방법으로 Bjerrum et al⁹⁾, Saada³⁵⁾, Lewin²²⁾,

Mitachi & Kitago²⁶⁾, Hanzawa¹⁶⁾, Lo & Chu²³⁾ 등에 의하여 수행되었다. 이 방법에서는 측면변위를 자동적으로 계산하여 조절하지 않는다면 K_0 상태를 유지하기 어려우며 또한, 각 하중단계에서 압밀에 의해 유발되는 변위를 조절하기 위하여 재 압축해야 하는 결점을 가지고 있다.

최근에 Hsieh¹⁹⁾는 완전배수상태에서 체적변형이 압밀시험에서의 축변형과 같도록 측압을 조절하여 K_0 -삼축시험을 한 Bishop & Eldin⁶⁾의 방법을 개량한 것으로 컴퓨터를 사용하여 체적변형의 계산과 측압의 조절을 신속히 처리하였다. 그러나 이와 같이 개선된 방법에도 불구하고 위에서 언급한 결점 이외에도 시료가 접하는 하중판에서의 마찰은 전시료에 걸쳐 불균등한 변형을 일으키는 결점을 가지고 있다.

한편으로, 삼축압축 시험에서 이중셀(double cell)을 사용하여 K_0 -시험을 수행한 Bishop et al⁶⁾의 방법과 이것을 개선한 Okochi & Tatsuoka³²⁾의 방법이 있다. 이 두방법의 차이는 시료와 내부셀(inner cell) 사이의 압력 및 내부셀과 외부셀 사이의 압력이 일정하도록 하여 측면변형이 없도록 조절하는 기법의 차이로서, 전자는 합금으로 된 침(needle)을 사용하여 전기적으로 내부공간에 채워진 수은의 변위를 측정 및 조절하였으며, 후자는 차등압력 변환기(differential pressure transducer)를 사용하였다. 그러나 이처럼 정교한 방법을 사용하였음에도 불구하고 시료의 불균등한 변형의 존재를 감지할 수는 없을 것이다.

K_0 -시험을 수행하기 위한 가장 편리하고 간단한 방법은 압밀링의 측면에 계기를 부착하여 수평응력을 직접 측정하는 방법이다. 그림 1.(b)와 같이 계기의 부착 및 측정 방법을 다르게 하여 Brooker & Ireland¹⁰⁾, Singh et al⁴²⁾, Saxena et al⁴⁶⁾, Ofer^{28, 29, 30, 31)}, Ou³³⁾ 등이 K_0 -시험을 수행하였다. 이 방법의 결점은 압밀링의 벽면마찰과 측벽의 변위로 인하여 K_0 값에 다소 영향을 미친다는 것이다. 이와 다른 형태

인 Campanella & Vaid¹³⁾ 방법은 시료와 셀 (cell) 사이에 물을 채워서 수평변위가 발생하지 않도록 제어하는 것으로서 포화점토에 한정된 시험법이다.

2.2 기존의 K_0 -시험결과

(1) 단주기 K_0 -재하시험

1982년까지 Andrawes & El-Sohby⁴⁾, Brooker & Ireland¹⁰⁾, Burland¹²⁾ 등의 많은 연구자에 의하여 수행된 K_0 -시험결과들이 Mayne & Kulhawy²⁴⁾에 의하여 집대성 되었다.

그림2는 대표적인 단주기 이력모형이다. 단주기 K_0 -재하시험결과를 통계처리한 Mayne & Kulhawy¹³⁾의 결과를 보면, 정규압밀점토에

대한 정지토압계수(K_{on})는

$$K_{on} \approx 1 - 0.987 \sin \phi' \quad (2.1)$$

로 되며, 이 때의 보정계수 r 은 0.854이었다.

처녀재하시의 비점성토에 대한 K_{on} 은

$$K_{on} \approx 1 - 0.998 \sin \phi' \quad (2.2)$$

이며, 여기서 $r=0.625$ 이었다.

총 121점의 점토와 모래질 흙에 대해서 통계 처리한 결과 K_{on} 은

$$K_{on} \approx 1 - 1.003 \sin \phi' \quad (2.3)$$

이며, $r=0.802$ 이었다.

일반적으로 많이 사용되고 있는 Jáky⁸⁾식은

$$K_{on} \approx 1 - \sin \phi' \quad (2.4)$$

로서 개략적인 공식이며, 주로 점성토에 잘 일치하는 것으로 알려져 있다.²⁴⁾

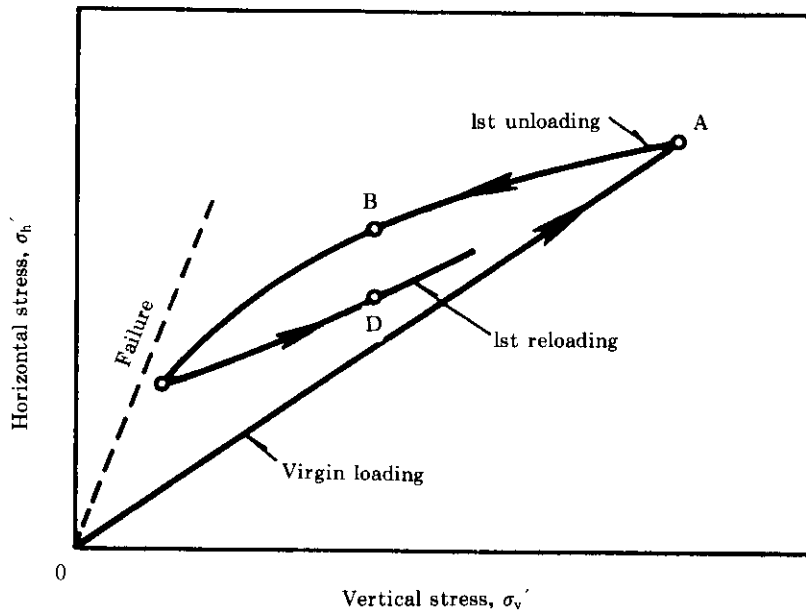


Fig.2 Typical stress path of soils under K_0 conditions

한편으로 K_{on} 이 액성한계, 소성지수, 점토함량, 균등계수, 간극비 및 그의 변수들에 의하여 지배된다고 주장하는 많은 연구자들이 있지만, 개략적으로 Jáky 공식에 일치하였다.¹³⁾

(2) 단주기 K_0 -재하시험

많은 시험결과에서 응력제하시의 정지토압계수(K_{on})는 응력의 제거에 따른 과압밀로 인하여, 처녀재하시의 정지토압계수(K_{on})보다 큰

값으로 관찰되었다.

K_{ou} 는 일반적으로 Schmidt³⁸⁾와 Prúška³⁴⁾의 경험공식인 식(2.5)으로 통용되고 있다.

$$K_{ou} = K_{on} (OCR)^\alpha \quad (2.5)$$

여기서, OCR은 과압밀비이며, α 는 정지상태에서의 응력제거변수로 정의되는 지수다. 식(2.5)는 강도의 정의뿐만아니라, 정규 및 과압밀시의 토압계수를 구하는데 OCR이란 한 매개변수만 사용되기 때문에 좋은 장점이 있다.

그러나 지수 α 의 사용에는 많은 의견이 있다. Hendron¹⁷⁾, Worth⁴⁴⁾, Brooker & Ireland¹⁰⁾ 등은 α 가 흙의 종류, 지질학적 역사, 소성지수, 활성도 등의 어떤 변수에 따라 결정되는 값이라고 하였지만 직접 사용하기에는 애매하다. 따라서 α 를 내부마찰각 ϕ' 의 함수로써 정의한 Schmidt³⁸⁾의 제안을 대부분 채택하고 있다. Mayne & Kulhawy²⁴⁾는 189점의 시험결과를 통계처리한 결과 Schmidt의 제안과 같이

$$\alpha \approx \sin\phi' \quad (2.6)$$

로 주장하였다. 그 후에 Seed & Duncan⁴⁰⁾은 회귀분석법에 의하여 α 를 $\sin\phi'$ 의 함수로써 표시하였다.(그림15.참조) 그리고 Ou³³⁾의 압밀시험 결과는 Seed & Duncan¹⁵⁾에 의한 평균치보다 작게 측정되었다.

한편, Okochi & Tatsuoka³²⁾는 삼축압축 시험에 의한 내부마찰각 ϕ' 가 시료성형방법과 OCR에 무관하며, 단지 초기 간극비(e)에 반비례함을 관찰하였고, 또한 지수 α 는 초기 간극비에 비례하며 시료 성형방법에 의한 영향은 비교적 작음을 밝혔다.

K_{ou} 의 상한치, 즉 정지상태를 적용할 수 없는 상태로써 수동응력이 동원(mobilization)되는 상태를 Mayne & Kulhawy²⁴⁾ 및 정⁴⁰⁾은 간단히 Rankine의 수동토압계수 K_p 와 같이 채택하였다.

$$K_p = \frac{1 + \sin\phi'}{1 - \sin\phi'} \quad (2.7)$$

여기서, $K_{ou} = K_p$ 일때, 정지상태에 대한 OCR의 한계치는 식(2.5)와 (2.7)을 같게 놓으면 풀

수 있다.

$$OCR_{limit} = \left(\frac{1}{K_{on}} \cdot \frac{1 + \sin\phi'}{1 - \sin\phi'} \right)^{1/2} \quad (2.8a)$$

만약 K_{on} 대신에 $(1 - \sin\phi')$ 를, α 대신에 $\sin\phi'$ 대입하면,

$$OCR_{limit} = \left(\frac{1 + \sin\phi'}{(1 - \sin\phi')^2} \right)^{(1/\sin\phi')} \quad (2.8b)$$

으로 된다. 이러한 제안은 Yond & Craven⁴⁶⁾의 단순 전단시험, Skempton⁴⁴⁾의 현장계측 및 Fedá¹⁵⁾의 삼축압축시험의 결과에서도 개략 일치하였다.

한편 Seed & Duncan⁴⁰⁾ 및 Ou³³⁾는 K_{ou} 의 극한치를 K_1 으로 정의하고 Mohr - Coulomb의 파괴기준을 식(2.9)와 같이 채택하였다.

$$K_1 = \left(\frac{\sigma_h'}{\sigma_v'} \right)_{limit} = K_{1\phi} + \frac{2c'}{\sigma_v'} \sqrt{K_{1\phi}} \quad (2.9)$$

여기서, $K_{1\phi} = \tan^2(45^\circ + \phi'/2)$

c' = 점착력

이 식은 하중조건에 따라 변화하는 내부마찰각 ϕ' 와 연직응력 σ_v' 를 고려한 것이므로 일반적인 적용에 있어서는 번거로움이 있다.

(3) 단주기 K_o - 재재하 시험

이 경우에 대한 시험결과는 극히 제한되어 있다. Mayne & Kulhawy²⁴⁾는 K_o - 재재하조건에서 σ_v' 와 σ_h' 가 직선적인 관계로 정의한 Wroth⁴⁴⁾의 가설을 이용하여 식(2.10)과 같이 정식화하였다.

$$\sigma_h' - \sigma_{h',min}' = m_r (\sigma_v' - \sigma_{v',min}') \quad (2.10)$$

여기서, m_r = 재재하 계수, $\sigma_{v',min}'$ 및 $\sigma_{h',min}'$ 은 재재하시의 초기 연직 및 수평응력을 각각 나타낸다. 그리고 최대 과압밀비를 식(2.11)과 같이 정의하면

$$OCR_{max} = \frac{\sigma_{v',max}'}{\sigma_{v',min}'} \quad (2.11)$$

로 된다. 식(2.11)을 식(2.5)에 대입하면

$$\frac{\sigma_{h',min}'}{\sigma_{v',min}'} = K_{on} (OCR_{max})^2 \quad (2.12)$$

로 된다. 식(2.12)와 식(2.10)으로부터

$$K_{or} = K_{on} \left(\frac{OCR}{OCR_{max}^{(1-a)}} \right) + m_r \left(1 - \frac{OCR}{OCR_{max}} \right) \quad (2.13)$$

이 얻어진다.

Mayne & Kulhawy²⁴⁾는 재재하 계수 m_r 을 15개의 시험결과로부터 식(2.14)와 같이 정의하였다.

$$m_r = \frac{3}{4}(1 - \sin\phi') = \frac{3}{4} K_{on} \quad (2.14)$$

그러나, 이 식은 OCR이 작을때 처너재하 경로를 벗어나는 불합리한 점 때문에 정⁴⁷⁾은 식(2.15)와 같이 최대 및 수동상태의 수평응력인 $\sigma'_{h,max}$ 과 $\sigma'_{h,c}$ 사이에서 기울기 m_r 이 비례적으로 변하도록 가정하였다.

$$m_r = K_{on} \cdot \frac{3}{4} \frac{(\sigma'_{h,r} - \sigma'_{h,min})}{(\sigma'_{h,r}) - \sigma'_{h,c}} \quad (2.15)$$

여기서, $\sigma'_{h,r}$ 는 재재하시의 최대 수평응력이며, 또 Seed³⁹⁾의 가정은 정⁴⁸⁾과 비슷한 개념으로 계수 β 를 사용하였다.⁴⁷⁾ 그리고 Ou 는 m_r 을 OCR과 비례관계로 정의한 식(2.16)을 제안하였다.

$$m_r = a \cdot \log(OCR) + b \quad (2.16)$$

여기서 a 와 b 는 상수이며, Ou ³⁹⁾의 시험결과에서 a 는 상대밀도의 함수로 표시한 $a = 0.95 - 1.28\sin\phi'$ 이었으며, $b = 0.07$ 이었다.

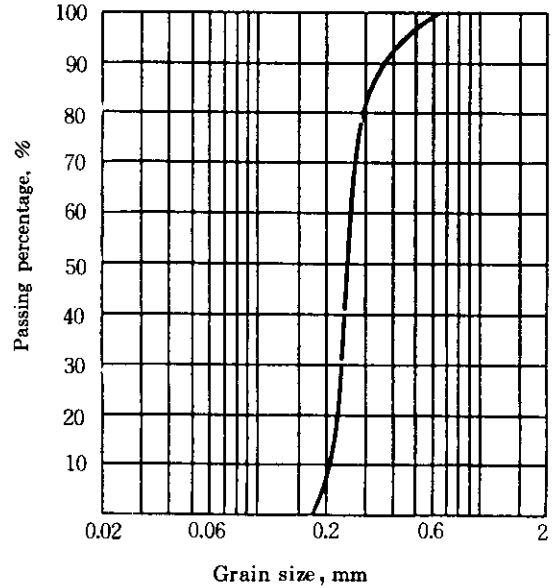
3. 실내시험

3.1 시 료

(1) 시료의 물리적 특성

본 실험에서 사용한 시료는 국내에서 표준사로 통용되고 있는 주문진 모래이다. 이 모래의 입도분포는 Fig.3과 같으며, 통일분류법(USCS)에 의하면 SP에 해당하는 균등한 중립모래이다. 이 모래의 모양을 관찰하기 위하여 30배와 100배의 배율로 SEM촬영한 결과에 의하면 대개 6면체에 가까운 등근모양(subangular)임을 알 수 있었다.⁴⁷⁾

그리고 이 모래의 비중은 2.60이며, 공기 건조 시킨 상태로 사용하였다.



$D_{10} = 0.21\text{mm}$	Uniformity coefficient
$D_{30} = 0.23\text{mm}$	$C_u = 1.19\text{mm}$
$D_{50} = 0.24\text{mm}$	Curvature coefficient
$D_{60} = 0.25\text{mm}$	$C_c' = 1.01\text{mm}$
	Angle of response
	$\theta = 35^\circ$

Fig.3 Grain size distribution of JOO MUN JIN SAND

(2) 시료의 밀도

실내에서 모래시료의 성형방법으로는 시편 몰드에 측벽을 두들겨서 제작하는 태핑(tapping)법과 작은 막대로 다짐을 하는 Plunging 법 그리고 공중낙하법(air-pluviation method)이 있다.

본 시험에서는 특별히 용기를 제작하여 낙하 높이를 변화시키면서 시료의 밀도를 조절하는 공중낙하법을 이용하였으며, 각각의 낙하 높이에 해당하는 밀도의 관계를 구하였다⁴⁷⁾. 이 실험에서 낙하 높이가 80cm 이상에서는 상대밀도의 증가폭이 작아지면서 점차 일정하게 나타났

다. 여기서 상대밀도 D_r 은 Bowles방법에 의하여 구한 것으로 최대 간극비 e_{max} 는 0.879, 최소 간극비 e_{min} 은 0.546이었다.

3.2 시험장치

(1) 재하 및 변위장치

본 시험에 사용된 재하장치는 Norway Geonor사이에 제작한 일정하중률 압밀시험(constant ratio of stress consolidation test)장치

로서 그림4와 같다.

재하속도는 comparator box에서 제어할 수 있는데, 본 실험에서는 $1.0\text{kgf/cm}^2/\text{min}$ 의 속도로 재하/제하하였다. 그리고 하중용 모터는 본 시험에 적합한 새로운 모터(DC24V, 500rpm)로 교환하였다.

재하 및 제하시의 하중크기는 프로빙링에 부착된 변위계를 통하여 컴퓨터에 자동입력되도록 하였다. 그리고 재하 및 제하에 의한 시료의 변위는 압밀링의 덮개 위에 부착된 변위계를 통하여 자동입력되도록 하였다.

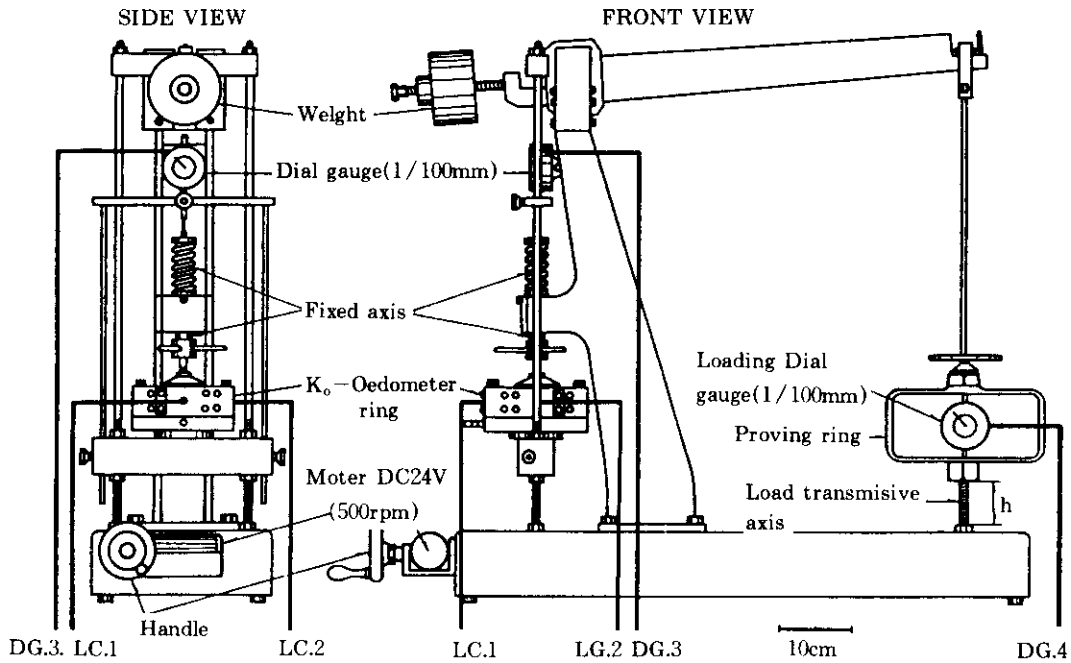


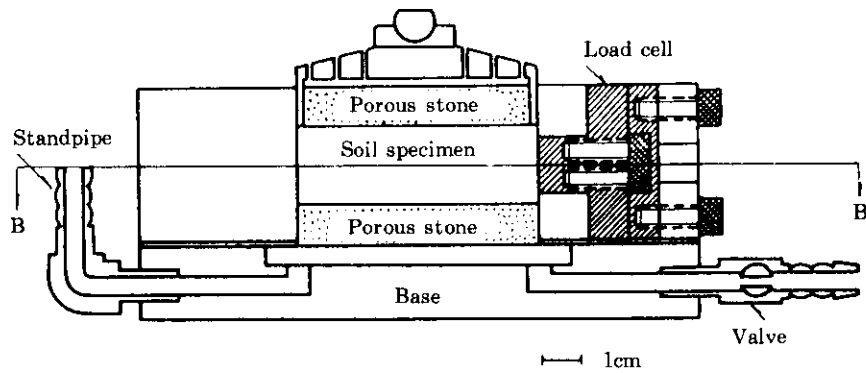
Fig.4 Oedometer and swelling test equipment
(GEONOR A/S, H-200A, Oslo, Norway)

(2) 압밀링

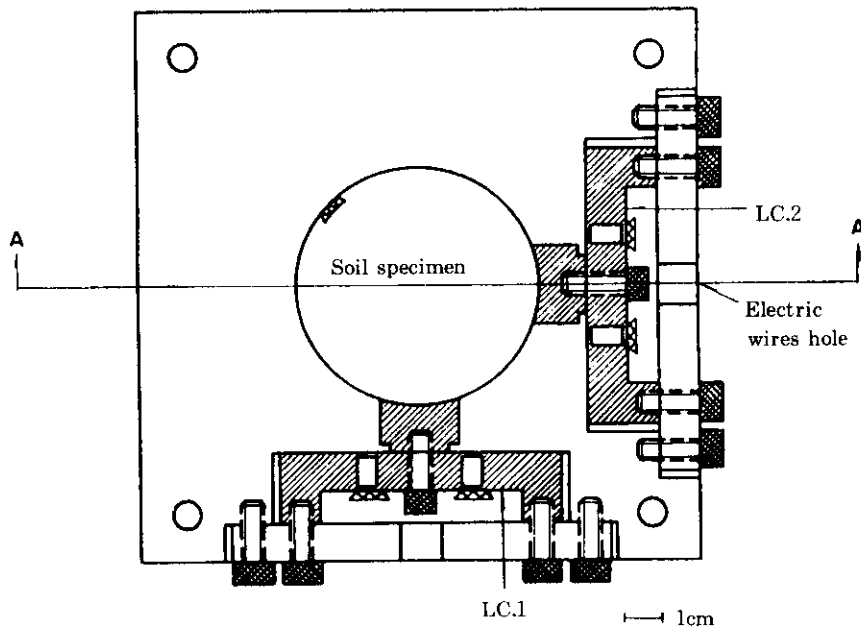
K_o 조건에서 압밀링의 변위를 최대한 억제 하면서 수평응력의 측정이 가능하며, K_o- 시험이 완료된 직후에 직접전단 시험이 가능하도록 Fig.5와 같은 압밀링을 새로이 고안하였다. 이 압밀링의 안지름은 6cm, 높이는 2cm이다. 재

질은 표면처리와 녹이 쓰는 것을 방지하기 위하여 스테인레스 강으로 방전가공하였다.

수평응력은 직교되는 두면에 설치된 하중계(load cell)에 하여 측정하도록 하였으며, 재하 면적은 3.0cm^2 이다. 하중- 변형곡선은 15kgf 재하범위에서 $7.2 \times 10^{-3}\text{mm}$ 의 변위를 나타냈으



SECTION A-A



SECTION B-B

Fig.5 Sectional view of modified K_0 -oedometer ring

며, 실험중 실내온도는 22℃였다.

이 재하범위내에서 유발되는 하중계의 변위 $7.2 \times 10^{-3} \text{mm}$ 는 수평 재하판의 주위에 발생할 수 있는 야칭효과를 무시할 수 있는 크기로 생각된다. ($D_{50} = 0.24 \text{mm}$ 로서 $7.2 \times 10^{-3} \text{mm}$ 는 입경의 1/33에 해당)

3.3 시험방법

(1) 시료성형 방법

K_0 -시험을 위한 압밀시험법에서 가장 큰 단점은 벽면마찰이다. 이 벽면마찰을 최소화하기 위하여 벽면에 바셀린(vaseline)을 바른후

멤브레인 또는 테프론(teflon) 테이프를 부착하여 사용하는데, 본 실험에서는 0.05mm 두께의 테프론 테이프를 사용하였다. 시료는 임의의 높이에서 모래를 공중낙하시켜 전 두께에 걸쳐 균등한 밀도가 되도록 하였다. 본 실험에서는 상대밀도 50%, 60%, 70% 및 85%를 선택하였다.

한편, 사용한 시료인 주문진사에 대한 초기조건, 즉 초기간극비의 변화에 따른 전단강도 특성을 관찰하고자 삼축압축시험을 수행하였다. 시료의 초기상태는 공중낙하용기구를 사용하여 시료의 전체높이에 걸쳐 균등한 밀도가 되도록 하였으며, 14가지의 낙하높이를 선정하여 강도 시험을 하였다. 이때, 연직변형률은 1.05mm/min이 되도록 재하하였다.

(2) 재하 및 제하방법

단주기 K_0 - 시험은 과압밀비(OCR)와 상대밀도(D_r)에 따른 수평응력을 관찰하고자 아래와 같은 2가지 형태의 시험모형을 채택하였다. 먼저 상대밀도가 50% 및 85%인 시료에 대한 단주기 K_0 의 응력경로를 얻기 위하여 표1 과 같은 시험모형을 설정하였다.

또한, 상대밀도 60% 및 70%인 시료에 대해서도 표2 와 같은 재하모형을 설정하였다.

4. 실험결과

4.1 전단강도 시험

K_0 조건하에서 K_0 - 응력경로를 전단강도 정수인 내부마찰각 ϕ' 의 함수로 표시하기 위하여 총 14개의 초기조건 즉, 초기간극비 e_i 가 0.554에서 0.732의 범위 내에서 삼축압축시험을 수행하였다.

Okochi & Tatsuoka²⁰⁾의 연구결과에 의하면, 모래의 내부마찰각을 초기간극비의 함수로 표현하고 임의의 등방응력을 기준으로 산출하였을 때, 시료의 내부마찰각은 시료의 성형방법에 무관하다고 하였다. 따라서, 여기서는 공중낙하법으로 시료를 성형하였으며, 등방응력

이 1.0kgf/cm²일 때 내부마찰각 ϕ' (또는 ϕ')를 초기간극비의 함수로 표현하여 Fig.6과 같이 나타냈었다. 그림에서 삼축압축시험에 의한 내부마찰각 ϕ' 는 $\phi' = 66.36 - 40.95e_i$ 의 관계식을 구하였다.

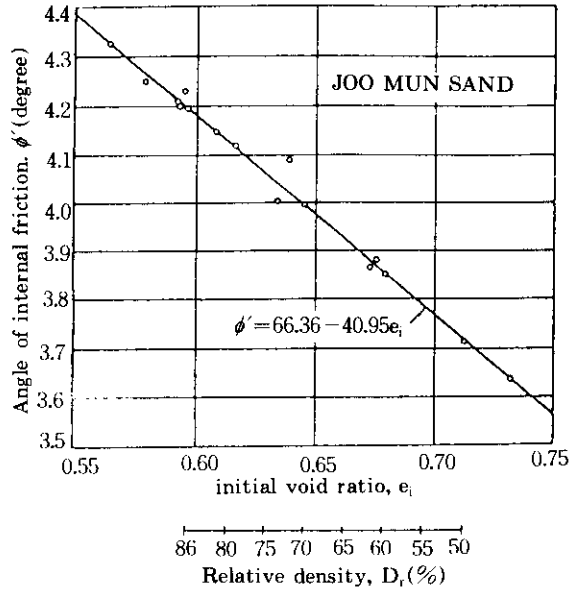


Fig.6 ϕ' vs. e_i relationship by conventional triaxial compression test

4.2 단주기 K_0 - 재하/ 제하 시험

단주기 K_0 - 재하/제하 시험은 표1 (시험모형 No.1)과 2(시험모형 No.2)에서 설정한 시험모형에 대하여 수행하였다. 전자인 경우는 상대밀도 D_r 이 50 및 85%에 대해, 후자인 경우는 D_r 이 60 및 70%에 대하여 실험한 것이다.

그림7~그림10까지는 시험모형 No.1 및 2로 각각의 상대밀도에 대해 K_0 - 시험을 수행한 응력경로를 나타내고 있다. 이들 그림에서 보면, 반복하여 재하/제하한 것으로 보이나 실제로는 각각에 응력경로들을 합하여 그린 결과이다.

Table 1 One- cyclic Ko- loading/unloading model(Model No. 1)

Test No.	1	2	3	4	5	6
$\sigma'_{v_s \max}$	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
$\sigma'_{v_s \min}$	0.05	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0
$\sigma'_{v_s r}$	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0

unit : kgf/cm²

Note $\sigma'_{v_s \max}$: Maximum vertical stress during loading
 $\sigma'_{v_s \min}$: Minimum vertical stress during unloading
 $\sigma'_{v_s r}$: Maximum vertical stress during reloading

Table 2 One- cyclic Ko- loading/unloading model (Model No. 2)

Test No.	1	2	3	4
$\sigma'_{v_s \max}$	3.0	3.0	3.0	3.0
$\sigma'_{v_s \min}$	0.01	0.75	1.25	2.0
$\sigma'_{v_s r}$	3.0	3.0	3.0	3.0

unit : kgf/cm²

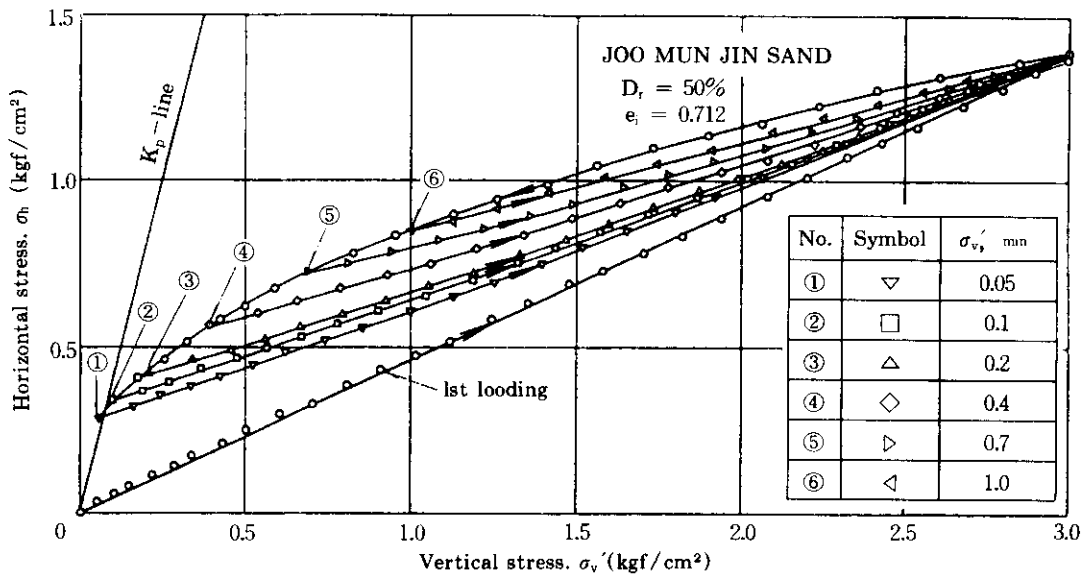


Fig.7 Stress path of one- cyclic loading for Model No.1 ($D_r=50\%$)

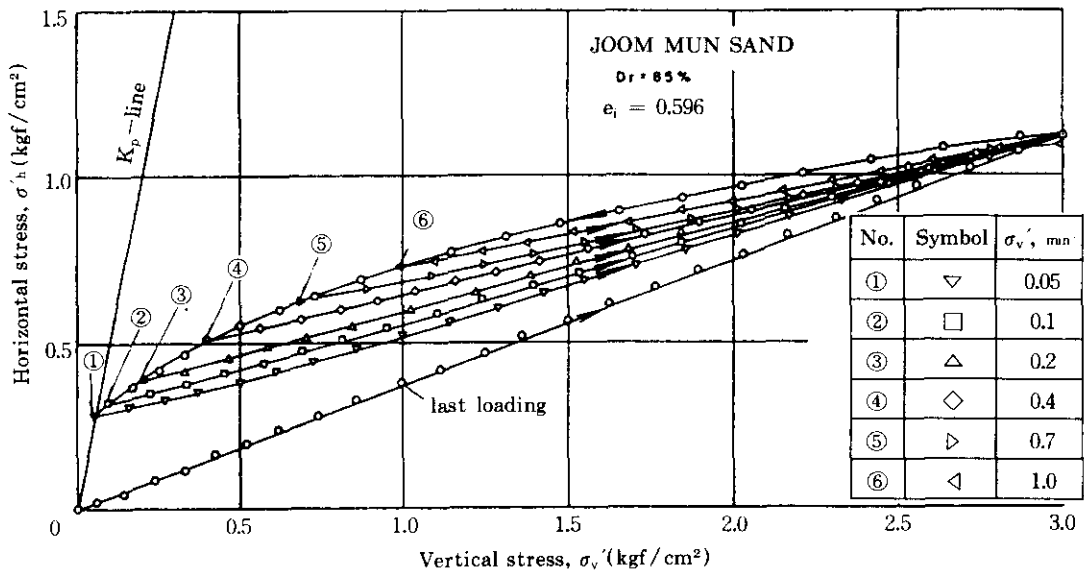


Fig.8 Stress path of one - cyclic loading for Model No. 1($D_r=85\%$)

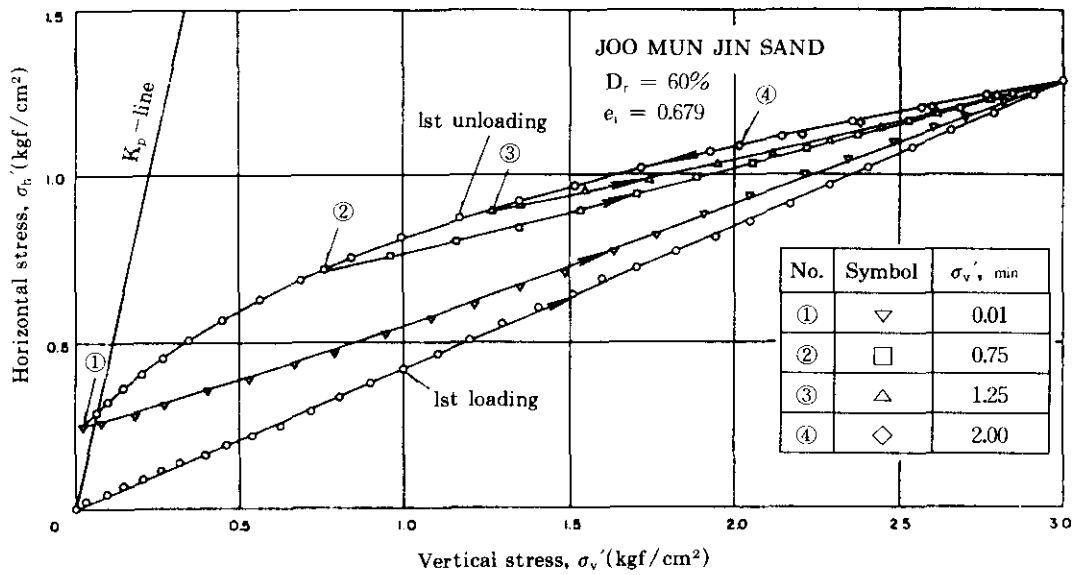


Fig.9 Stress path of one - cyclic loading for Model No.2($D_r=60\%$)

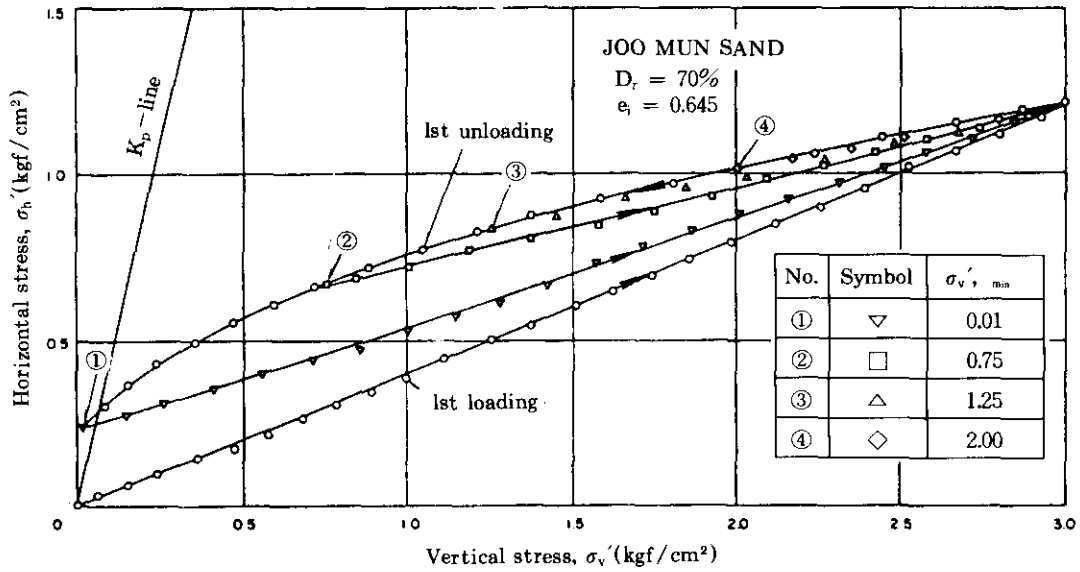


Fig.10 Stress path of one-cyclic loading for Model No.2($D_r=70\%$)

5. 실험결과 분석 및 토의

5.1 단주기 K_{on} -재하/제하 시험

(1) 처너재하

K_{on} -시험의 처너재하시 얻어진 8개의 시험 모형에 대한 자료와 Mayne & Kulhawy²⁴⁾의 120여개의 자료를 Fig.11과 같이 비교하여 나타내었다. 이 그림에서 보면, 본 시험결과는 비점성토에 대한 기존의 시험결과가 나타내는 범위내에 속하고 있음을 알 수 있다. 본 시험결과에서 얻어진 관계식 그림12에서 볼 수 있는 바와 같이

$$K_{on} = 1 - 0.914 \sin \phi' \quad (5.1)$$

이다. 이와같은 K_{on} 값은 Mayne & Kulhawy²⁴⁾와 Jaky의 산출결과에 비하여 약간 큰 값이었다.

(2) 처너제하

처너제하에 대한 시험결과는 역시 8개의 응

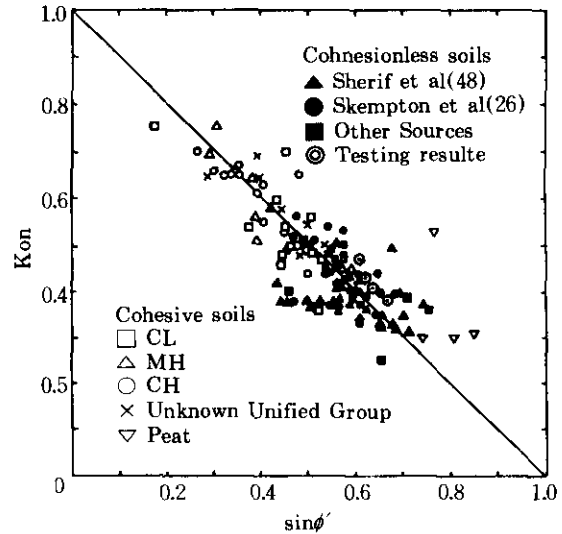


Fig.11 K_{on} vs. $\sin \phi'$ relationship for cohesionless and cohesive soils

력모형에서 얻을 수 있으며, 표 3은 $K_{on} = K_{on} \cdot (\text{OCR})^\alpha$ 의 관계식에서 실측치 K_{on} 과 OCR를 대입한 후 α 를 계산하여 수록하였다.

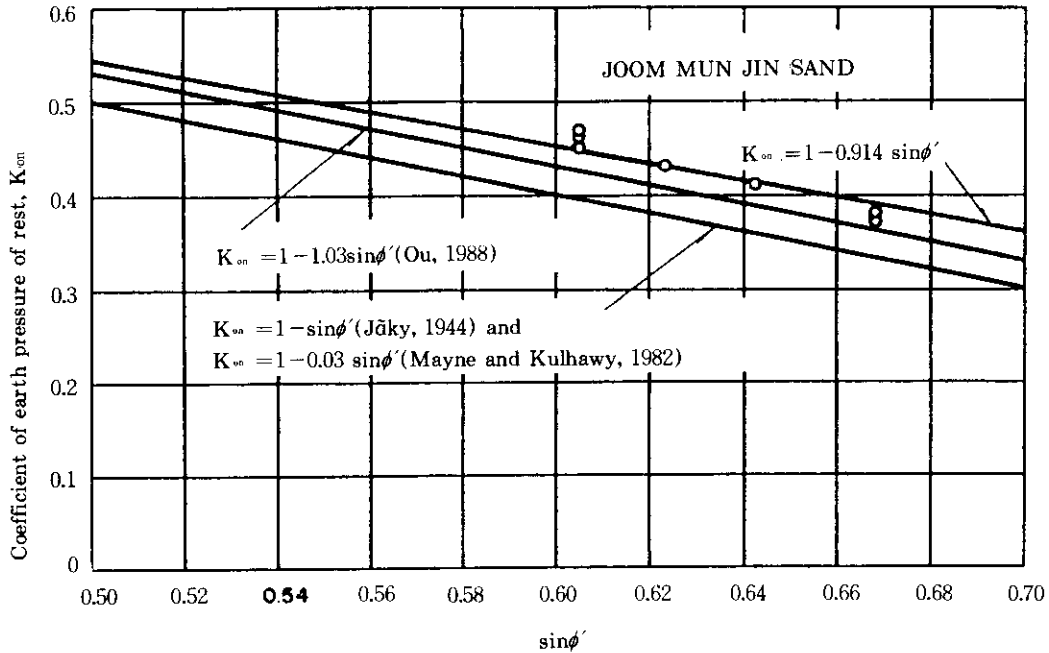


Fig.12 Comparison of oedometer testing with other researcher's results

즉, α 의 계산은 $K_{ou} = K_{on} \cdot (OCR)^\alpha$ 에서

$$\alpha = \frac{\log \left(\frac{K_{ou}}{K_{on}} \right)}{\log(OCR)} \quad (5.2)$$

로서 구해진 값이며, 이 도표에서 보면, 상대밀도가 같은 조건에서 처너제하한 결과는 거의 비슷하게 나타났다. 과압밀비(OCR)의 변화에 따른 지수 α 값의 변화를 상세히 관찰하기 위하여 위의 식으로 부터 $\log(K_{ou}/K_{on})$ 을 세로축에, $\log(OCR)$ 을 가로축에 취하여 그림13과 같이 도식화 하였다. 그리고 상대밀도와 지수 α 값의 관계를 살펴보기 위하여 그림13에 결과를 이용하여 그림14와 같이 나타내었다. 그림13에서 보면, K_{ou}/K_{on} 과 OCR값은 일정관계를 나타내고 있으며, 지수 α 는 직선의 기울기를 의미하고 있다. 그림14에서는 상대밀도에 따라 지수 α 의 변화가 일정하지는 않지만 대체로 상대밀도가 클수록 커지는 경향이 있다.

지수 α 에 대하여 Schmit³⁸⁾, Okochi & Tatsuoka³²⁾, Mayne & Kulhawy²⁴⁾, Seed & Duncan¹⁰⁾ 등은 내부마찰각 ϕ' 의 함수로 정의하고 있다. 지수 α 를 ϕ' 의 함수로 나타낸 것으로서 Seed & Duncan⁴⁰⁾이 연구한 회귀분석 결과에 본 시험결과를 삽입하여 그림15와 비교하여 나타내었다. 본 시험결과는 Seed & Duncan⁴⁰⁾이 제안한 평균치보다 조금 작은 값이었으며, Ou³³⁾가 수행하였던 압밀링을 이용한 시험결과와 유사한 결과를 보였고, Mayne & Kulhawy²⁴⁾ 및 Okochi & Tatsuoka³²⁾가 제안하였던 $\alpha \approx \sin \phi'$ 값보다도 약간 작은 값의 범위로 나타났다. 또한, 지수 α 는 모래의 함수로 표현하고 있다. 즉, Alpan³⁾은 0.4~0.5, Schmertmann³⁷⁾은 0.42, Sherif et al⁴¹⁾은 0.68, Bellotti et al⁵⁾은 0.50~0.51, 그리고 Hendeon¹⁷⁾은 0.38~0.51이라고 각각의 시험결과에서 밝히고 있다. 그러나 표3에서 보는 바와 같이, 본 실험 결과는 0.512~0.643으로 α 값이 단지 모래종류의 함수인 것으로 규정짓기 어려웠다.

Table 3 The exponent α value for virgin unloading

Model No.	$D_r(\%)$	K_{on}	OCR_{max}	α	$\sin\phi'$	Remarks ^(a)
1	50	0.47	60	0.554	0.605	0.565
	85	0.38	60	0.612	0.668	0.607
2	60	0.43	300	0.595	0.625	
	70	0.41	300	0.570	0.642	

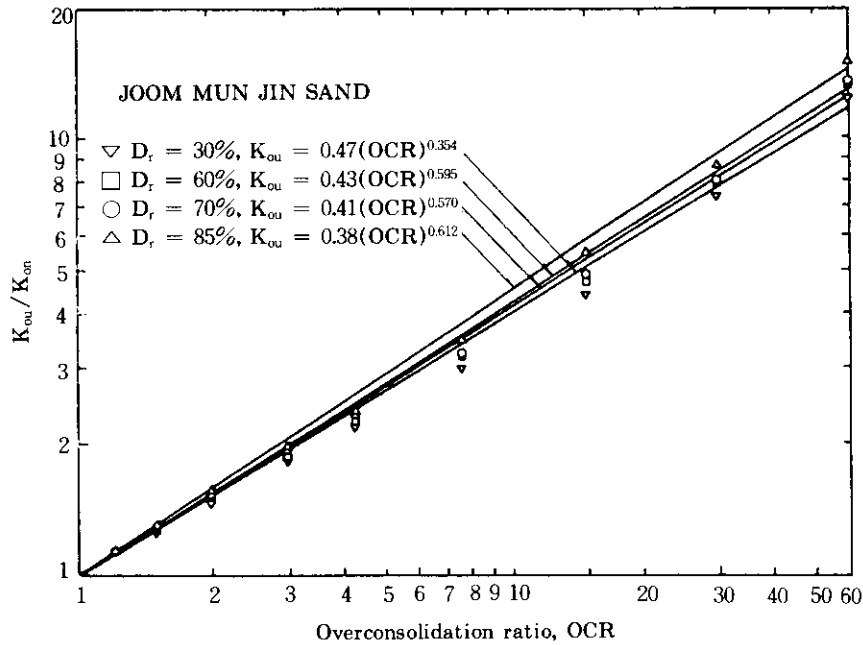


Fig.13 K_{ou}/K_{on} vs. OCR relationship for virgin unloading

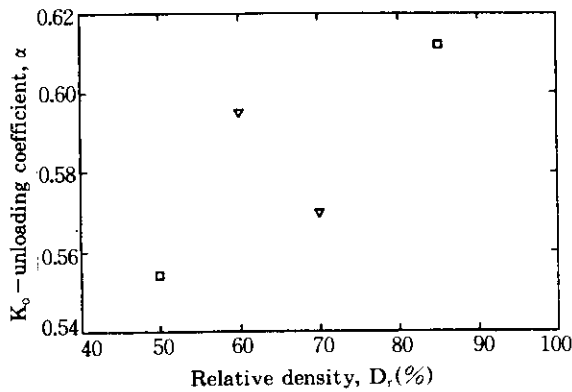


Fig.14 α vs. D_r relationship for one-cyclic models

한편으로, 처너제하시의 극한상태, 즉 K_{ou} 가 소성상태에 이르는 응력상태를 알아 보기 위하여 Mayne & Kulhawy²⁴⁾가 제안한 Rankine의 소성상태와 비교하여 보았다. 만약 점착력 c' 가 없다면 이 상태는 Mohr-Coulomb의 파괴기준과 일치하는, 즉

$$(K_{ou})_{limit} = K_p = \frac{1 + \sin\phi'}{1 - \sin\phi'} \quad (5.3)$$

이다. Table 4는 처너제하시에 측정된 최대 과압밀비 OCR_{max} 와 계산으로 얻어진, 즉 이론 상으로 소성상태에 도달하는 극한 과압밀비 OCR_{limit} 를 식(2.8a)를 이용하여 나타내고 있

Table 4 K_p and K_{ou} values for virgin unloading

Model No.	D_r (%)	K_{on}	α	OCR_{max}	OCR_{limit}	K_{ou}	K_p	Remarks
1	50	0.47	0.554	60	49.0	0.05	3.81	$K_p < K_{ou}$
	85	0.38	0.612	60	67.9	0.05	5.02	$K_p > K_{ou}$
2	60	0.43	0.595	300	48.1	0.01	4.31	$K_p < K_{ou}$
	70	0.41	0.570	300	69.2	0.01	4.59	$K_p < K_{ou}$

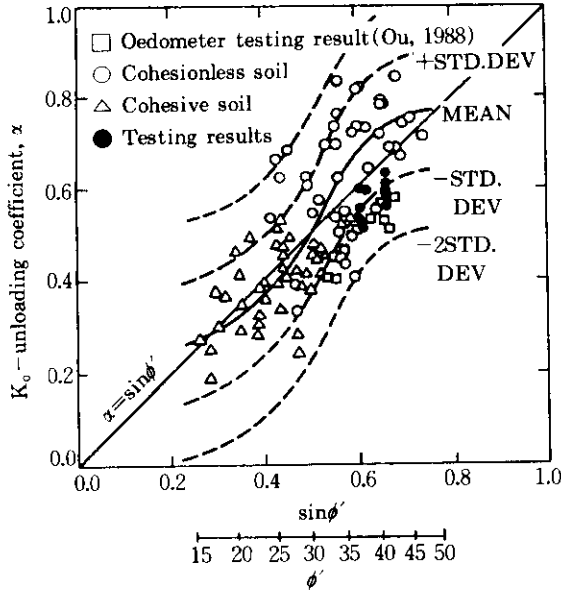


Fig.15 α vs. $\sin\phi'$ relationship(After Ou)³³⁾

다. 그리고 위에서 계산된 OCR_{max} 와 OCR_{limit} 를 식(2.5)에 대입하여 구한 K_{ou} 와 K_p 값을 이 표에 함께 수록하여 비교하였다.

역시 그림7~10에서 K_p 선은 상기와 같은 계산과정에 얻어진 것이다. 이들 그림과 표 4를 보면, 시험모형 No.1의 $D_r=85\%$ 인 경우를 제외하고는 처녀제하의 최소치는 Rankine의 소성상태를 초과하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 원인은 시료내의 결보기 점착력의 존재 또는 압밀링의 벽면마찰에 의해 제하에 따른 체적변형의 억제결과인지는 불분명하였다.

(3) 처녀 재재하

단주기 실험결과를 나타내고 있는 그림7~10을 살펴보면, 처녀 재재하시의 응력 경로는 대개 직선에 가까운 형태이나 아주 조금 아래로 처져 있으며, 최대선행응력점으로 거의 정확히 복귀하였음을 알 수 있다. 따라서, 처녀 재재하시의 응력경로는 Wroth⁴⁵⁾가 제안한 바와 같이 직선으로 생각할 수 있으므로, 이때 직선의 기울기인 처녀재재하계수 m_r 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m_r = \frac{K_{on}\sigma'_{v,r} - K_{ou}\sigma'_{v,min}}{\sigma'_{v,r} - \sigma'_{v,min}} \quad (5.4)$$

식(5.2)를 이용하여 시험모형 No.1 및 No.2로부터 처녀 재재하계수 m_r 을 산출하여 표 5와 같이 나타내었다. 그리고 m_r 과 OCR의 관계를 살펴보기 위하여 그림7~10을 이용하여 그림16과 같이 나타내었다. 이 그림에서 보면 m_r 은 OCR에 따라 대체로 일정하게 증가함을 알 수 있다.

Mayne & Kulhawy²⁴⁾는 $m_r=3/4K_{on}$ 으로 정의하였으나, 표 5에서 보면, m_r 이 K_{on} 만의 유일한 함수가 아님을 알 수 있다. Seed & Duncan⁴⁰⁾은 자신이 제안한 응력모형에서 m_r 을 β 의 계수로 표현하여 일반적으로 0.6의 값으로 추천하였지만, 본 실험결과에서는 β 의 값이 1.0이다. Ou¹⁶⁾는 그림15에서 직선식을 $m_r=a \cdot \log(OCR)+b$ 형태로 표현하여 직선의 기울기인 상수 a 가 $\sin\phi'$ 의 함수라고 제안하였으나, 그림16에서 a 값이 초기 상대밀도에 따라 일정하지 않음을 알 수 있었다. 그리고 정⁴⁷⁾은 m_r 을 식(2.15)와 같이 제안하였으나, 본 실험에서는 수동상태에 이르는 수평응력을 규명할 수 없으

Table 5 The reloading coefficient m_r for virgin reloading

Model No.	$D_r(\%)$	$\sigma'_{v \max}$	$\sigma'_{v \min}$	OCR_{\max}	m_r	Remarks
1	50	3.0	0.05	60.0	0.38	$3/4 K_{on}$ = 0.35
		3.0	0.1	30.0	0.37	
		3.0	0.2	15.0	0.35	
		3.0	0.4	7.5	0.32	
		3.0	0.7	4.3	0.29	
		3.0	1.0	3.0	0.27	
	85	3.0	0.01	600.0	0.28	$3/4 K_{on}$ = 0.29
		3.0	0.1	300.0	0.27	
		3.0	0.2	15.0	0.26	
		3.0	0.4	7.5	0.24	
		3.0	0.7	4.3	0.22	
		3.0	1.0	3.0	0.20	
2	60	3.0	0.01	300.0	0.35	0.32
		3.0	0.75	4.0	0.25	
		3.0	1.25	2.4	0.22	
		3.0	2.00	1.5	0.20	
	70	3.0	0.01	300.0	0.33	0.31
		3.0	0.75	4.0	0.24	
		3.0	1.25	2.4	0.22	
		3.0	2.00	1.5	0.20	

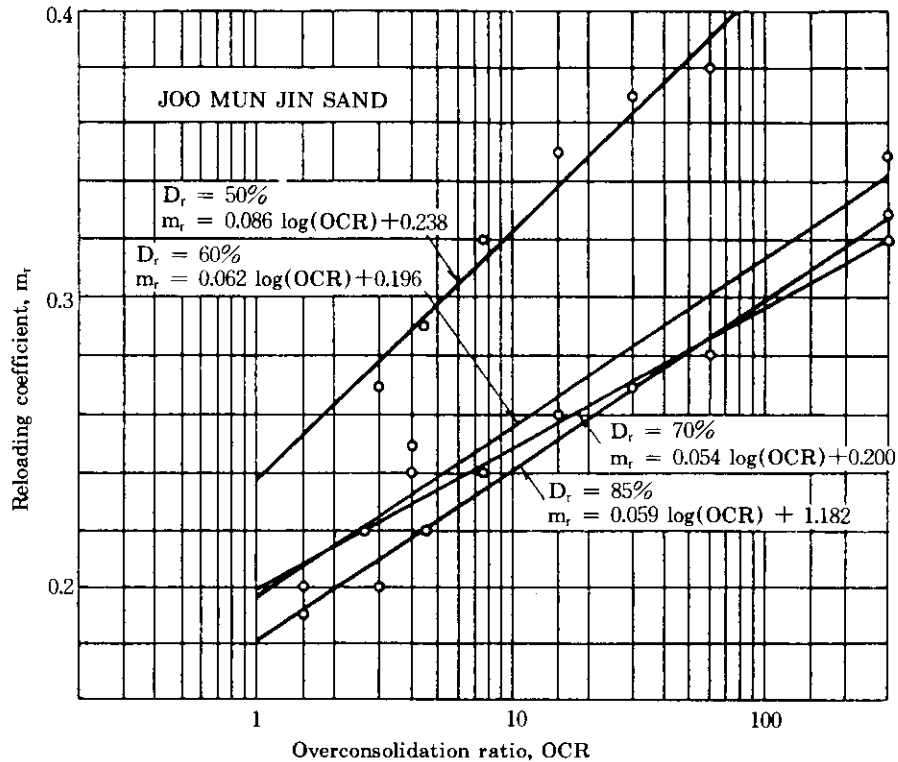


Fig.16 m_r vs. OCR relationship for virgin reloading

므로 직접적인 비교는 할 수 없었다.

그림17과 그림18은 시험모형 No.1 및 No.2에 대하여, Mayne & Kulhawy²⁴⁾가 제안한 K_{or} 의 공식인 식(2.13)과 실측치를 비교한 것이다. 이 그림들에서 보면, 과압밀비가 1.0인 경우에 K_{or} 에 일치하며(식(2.13)으로 부터 알 수 있음), σ_v' 가 증가함에 따라 K_{or} 값은 대략 쌍곡선 형태로 감소되는 경향을 알 수 있다. 그리고 식(2.13)으로 계산한 값과 실측치는 지수 α 의 변화

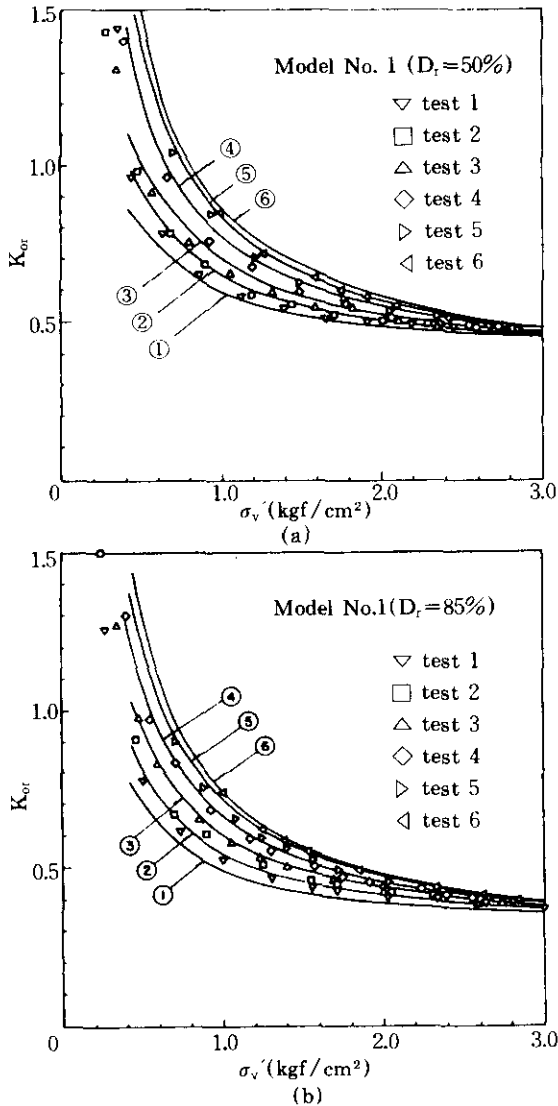


Fig.17 K_{or} vs. σ_v' relationship for reloading (Model No.1)

에 따라 차이를 보여주고 있으나, σ_v' 가 0~1.0kgf/cm²에서 두값의 차이가 더 크다는 것을 알 수 있다. 이론식 (2.13)에 의한 계산값이 실측치와 합치되기 위해서는 지수 α 의 정확한 산정법이 요구된다.

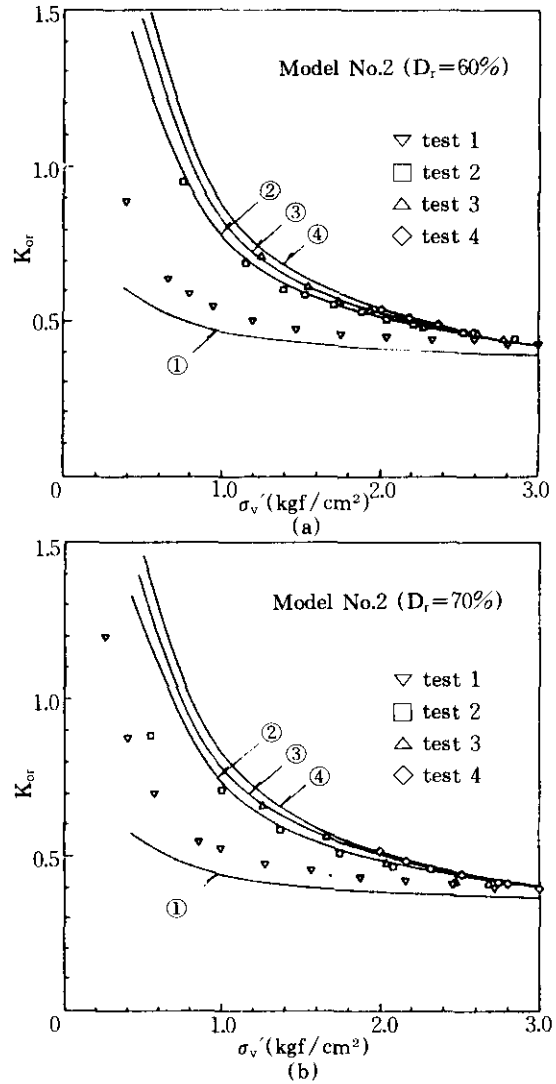


Fig.18 K_{or} vs. σ_v' relationship for reloading (Model No.2)

6. 결 론

K_o 상태에서 단주기 재하/제하시의 응력이

력에 따른 수평응력의 변화특성을 관찰하기 위하여 K_0 조건을 크게 만족할 수 있도록 특별히 고안한 압밀링 형태의 K_0 시험기를 제작하였으며, 실내 전조된 모래에 대하여 2가지 시험모형을 선정하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 처너재하 시의 정지토압계수 K_{on} 은 모래의 내부마찰각 ϕ' 의 함수로 $K_{on}=1-0.914\sin\phi'$ 와 같은 관계식을 얻을 수 있었다.
- (2) 처너재하 시의 정지토압계수 K_{ou} 는 K_{on} 과 과압밀비(OCR) 함수로 $K_{ou}=K_{on}(OCR)^\alpha$ 으로 표시할 수 있으며, 지수 α 는 대체로 상대밀도가 클수록 증가하는 경향을 보였다. 그리고 처너재하 시의 극한상태인 $(K_{ou})_{limit}$ 는 Rankine의 소성상태를 초과하였다.
- (3) 처너 재재하 시의 정지토압계수 K_{or} 은 연직응력 σ_v' 가 증가함에 따라 쌍곡선 형태로 감소하였다. 그리고 처너재재하 시의 응력경로는 최소재하 응력의 크기에 무관하게 최대선행 응력점으로 복귀하며, 이 곡선의 기울기인 m 은 OCR이 클수록 증가하였다.

감사의 글

본 논문을 위하여 새로이 고안한 압밀링 형태의 K_0 시험기의 설계와 검정을 위하여 도움을 주신 부산대 임종철 교수님과 논문의 내용을 함께 토의하여 주신 인하대 강병희 교수님께 감사의 말씀을 전합니다.

참고 문헌

1. Akai, K. and Adachi, T. (1965), "Study on the One-Dimensional Consolidation and Shear Strength Characteristics of Fully Saturated Caly," Proceedings of 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, Montreal, Canada, pp.

- 146-150.
2. Al-Hussaini, M. M. and Townsend, F. C. (1975), "Investigation of K_0 Testing in Cohesionless soils," Technical Report S-75-11, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, P. 70.
3. Alpan, J. (1967), "The Empirical Evaluation of the Coefficient K_0 and K_{or} ," Soils and Foundations, 71 (1), pp. 31-40.
4. Andrawes, K. Z. and El-Sohby, M. A. (1973), "Factors Affecting Coefficient of Earth Pressure K_0 ," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division ASCE, 99(7), pp. 148-161.
5. Bellotti, R. et al. (1975), "Remarks on the Coefficient of Overconsolidation on Coefficient of Earth Pressure at Rest," Proceedings, 1st Baltic Conference on Soil Mechanics, Vol. 2, pp. 59-71.
6. Bishop, A. W. and Eldin, A. K. G. (1953), "The Effect of Stress History on the Relation Between ϕ and Porosity in Sand," Proceedings, 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 100-105.
7. Bishop, A. W., Webb, D. L. and Skinner, A. E. (1965), "Triaxial Test on Soils at Elevated Cell Pressure," Proceedings, 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tronto, Vol. 2, pp.170-174.
8. Bishop, A. W., and Henkel, D. J. (1957), "The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test," Arnold, London.
9. Bjerrum, L. and Anderson, K. H. (1972), "In-Situ Measurement of Lateral Pressure in Clay," Proceedings, 5th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Madrid, Vol. 1, pp. 11-20.
10. Brooker, E. W. and Ireland, H. O. (1965), "Earth Pressure at Rest Related to Stress History," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 11, No. 1, pp. 1-15.
11. Brown, S. F. and Snahit, M. S. (1974), "The Measurement of Recoverable and Irrecoverable Deformation of the Repeated Load Triaxial Test," Geotechnique Vol. 24, No. 2, pp. 255-259.

12. Burland, J. B. (1967). "Deformation of Soft Clay," Ph. D. Thesis, Cambridge University, Emmanuel College.
13. Campanella, R. G. and Vaid, Y. P. (1972). "A Simple Ko Triaxial Cell," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 9, No. 3, pp. 249-260.
14. Daramola, O. (1980). "On Estimating Kofor Overconsolidated Granular Soils", Geotechnique, Vol. 30. No. 3, pp. 310-313.
15. Fedá, J. (1984). "Ko Coefficient of Sand in Triaxial Apparatus," JGED, ASCE, Vol. 110, No. 4, pp. 519-524.
16. Hanzawa, H. (1977). "Geotechnical Properties of Normally Consolidated Fao Clay, Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foudation Engineering, Tokyo Japan, Vol. 17, pp. 1-15.
17. Hendron, a. J. (1963). "The Behavior of Sand in One-Dimensional Compression," Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illionis.
18. Henkel, D. J. and Sowa, V. (1963). "The Influence of Stress History on Stress Paths in Undrained Triaxial Test on Clay," Laboratory Shear Testing of Soils, ASTM STP 361, Ottawa, Canada, pp. 280-294.
19. Hsieh, H. (1985). "An Sutomated Triaxial Device for Measuring the At-rest Earth Pressure Coefficient," Engineer's Degree Thesis, Department of Civil Engineering, Stanford University.
20. Jdky, J. (1944). "The Coefficient of Earth Pressure at Rest," Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, Budapest, Hungary, pp. 355-358
21. Konishi, J. and Hirai, S. (1980). "The Ko-Values of Sand in Triaxial Compression Apparatus," Proceedings, 15th Aunual Symposium on Soil Mechanics and Foudation Engineering.
22. Lewin, P. I. (1971). "Use of Servo Mechanisum for Volume Change Measurment and K_o Consolidation, Geotechnique, Vol. 21, No. 3, pp.259-262.
23. Lo, S-C, R. and Chu J. (1991). "The Measurmet of Ko by Triaxial Strain Path Testing," Soils and Foundations, Vol. 31, No. 2, pp. 181-187.
24. Mayne, P. W. and F. H. Kulhawy. (1982). "Ko-OCR Relationships in Soil," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 108, GT6, pp.851-872.
25. Menzies, B. K, Sutton H. and Davies, R. E. (1977). "A New System for Automatically Simulating Ko Consolidation and Swlling in the Conventional Triaxial Cell," Geotechnique, Vol. 27, No. 4, pp.593-596.
26. Mitachi, T. & Kitago, s. (1976). "Change in Undrained Strength Characteristics of Saturated Remolded Clay due to Swelling," Soils and Foundations, Vol. 16, No. 1, 1976, pp. 45-58.
27. Nakase, A., Kishi, M. and Katsuno, M. (1965). "Triaxial Comprssion Test on Soils(1st report)," Report of the Port and Harbour Research Instrument, Vol. 4, No. 1, pp. 1-27.
28. Ofer. Z. (1981). "Instruments for Laboratory and In-Situ Measurement of the Lateral Swelling Pressure of Expansive Clays," Proceeding, 4th International Conference on Expansive Soils, Denver, USA, pp. 45-53.
29. Ofer. Z. (1981, 1982). "Laboratory Instrument for Measuring the Lateral Soil Pressure and Swlling Pressure, ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol. 4, No. 4, pp. 177-182.
30. Ofer. Z. (1982). "Laboratory Ko Testing of Cohesionless Soil," The Civil Engineering in South Africa, Vol. 24, No. 10, 533-545
31. Ofer. Z. (1984). "Laboratory Determination of Ko and Comparison with Prototype Silo Observations," 4th Australia - New Zealand Conference on Geomechanics, Perth, pp. 14-18.
32. Okochi, Y. and Tatsuoka, F. (1984). "Some Factors Affecting Ko-Values of Sand Measured in Triaxial Cell," Soil and Foundations, Vol. 24, No. 3, pp. 52-68.
33. Ou, Chang-Yu (1988). "Finite Element Analysis of Compaction-Induced Stresses and Deformation," Ph. D. Thesis, Stanford University.
34. Prúska, L. (1973). "Effect of Initial Stress on the Stress-Strain Relation," Proceedings, 8th International Conference on Soil Mech-

- anics and Foundation Engineering, Vol. 4, Moscow, U. S. S. R., pp. 26-28.
35. Saada, A. S. (1970). "One-dimensional Consolidation in Triaxial Cell," Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of ASCE, Vol. 96, No. SM3, pp. 1085-1089.
 36. Saxena, S., Hedberg, J. and Ladd, C. C. (1978) "Geotechnical Properties of Hackensack Valley Varved Clays," ASTM Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 1, No. 3, pp. 148-161.
 37. Schmertmann, J. H. (1985). "Measure and Use of the In-Situ Lateral Stress, The Practice of Foundation Engineering (Osterberg Vol, 1) Ed. RJ Krizek et al, Northwestern Univ., Evanston, pp. 189-213.
 38. Schmidt, B. (1966). "Discussion of Earth Pressure at Rest Related to Stress History," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 3, No. 4, pp. 239-242.
 39. Seed, R. D. (1983). "Soil-Structure Interaction Effects of Compaction-Induced Stress and Deformations," Ph. D. Thesis, Univ. of California at Berkeley, 425 p.
 40. Seed, R. D. and Duncan, J. M. (1983). "Soil-Structure Interaction Effects of Compaction-Induced Stresses and Deformations," Geotechnical Engineering Research Report No. UCB/GT/83-06. Univ. of California, Berkeley, CA., 1983.
 41. Sherif, M. A., Ishibashi, I. and Ryden, D. E. (1974). "Coefficient of Lateral Earth Pressure At Rest in Cohesionless Soils," Soil Engineering Research Report No. 10, University of Washington, Seattle, Washington.
 42. Singh, H., Henkel, D. J. and Sangrey, D. A. (1963). "Shear and Ko Swelling of Overconsolidated Caly," Proceedings, 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1. 2, Moscow, U. S. S. R., pp. 367-376.
 43. Skempton, A. W. and Sowa, V. A. (1963), "The Behavior of Saturated Clays During Sampling and Testing," Geotechnique, Vol. 13, No. 4, pp. 269-290.
 44. Skempton, A. W. L. (1961). "Horizontal Stresses in an Overconsolidated Eocene Clay," Proceedings, 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, Paris, pp. 352-357.
 45. Wroth, C. P. (1975). "In-Situ Measurement of Initial Stresses and Deformation Characteristics," Proceedings, In-Situ Measurement of Soil Properties, ASCE, Vol. 2, North Carolina State University, Raleigh, N. C., pp. 181-230.
 46. Youd, T. L. and Craver, T. N. (1975). "Lateral Stress in Sands during Cyclic Loading," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 101, GT2, pp. 217-221.
 47. 송무효, (1991) "다주기 Ko-재하/재하에 의한 건조 모래의 거동", 동아대학교, 공학박사 학위논문, 160p.
 48. 정성교, (1989) "뒷채움 다짐에 의한 토압," 서울대학교 공학박사 학위논문, 130p.

(접수일자 1994. 8. 16)