

# 정지토압계수 측정에 관한 연구 1

송무효  
동의대학교 토목공학과

## A Study on the Measuring about the Coefficient of Earth Pressure at Rest 1

MU-HYO SONG  
Civil Engineering, Dongeui University, Busan 614-714, Korea

**KEY WORDS:** Coefficient of earth pressure at Rest 정지토압계수, Oedometer 압밀시험기, Over consolidation ratio 과압밀비

**ABSTRACT:** It is very important to determine the coefficient of earth pressure at rest accurately in order to estimate the behavior of soil structure. For estimation of  $K_0$ -value depending upon the stress history of dry sand, a new type of  $K_0$ -oedometer apparatus is devised, and the horizontal earth pressure is accurately measured. For this study, 2 types of one-cyclic  $K_0$ -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  $\phi'$  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 over consolidation ratio(OCR), and is determined as  $K_{ou}=K_{on} (OCR)^\alpha$ . The exponent  $\alpha$ , 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,  $\sigma_v'$ , 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,  $m$ , increases as OCR increases.

### 1. 서 론

정지토압계수 ( $K_0$ ; the coefficient of earth pressure at rest)는 측면 구속상태에서 지중의 응력-변위에 대한 특성을 나타내는 것으로 굴착시 베타구조물에 작용하는 측압, 그리고 해양, 항만 및 지중구조물에 작용하는 토압해석에 중요한 입력변수이다. 따라서 구조물의 거동을 예측하기 위해서는 정지토압계수를 정확히 결정하는 것이 대단히 중요하다.

정지토압계수(송, 1999)는 수평방향변위가 없는 지반내의 연직응력에 대한 수평응력의 비로 정의되며, 고정벽체와 같이 비교적 강성이 크고 벽체가 연직이며, 벽마찰 및 벽체변위가 없는 경우에는 정지상태로 고려한다. 이러한 토압은 정지상태 하에서 하중이 반복하여 재하(loading) 및 제하(unloading)되는 경우에 벽체와 뒷채움의 접촉면에서 발생하는 수평응력으로 생각할 수 있다. 이러한 경우에는 뒷채움 흙의 다짐 진행과정에 따른 응력경로(stress path)를 고려하여 정지토압계수를 결정하여야 한다.

본 논문에서는 정지토압 조건을 만족하면서, 응력경로에 따른 정지토압을 측정할 수 있는 새로운  $K_0$ -압밀시험기를 개발하였고, 이 시험기를 이용해 모래지반에서 단주기  $K_0$ -시험을 실시하고 결과를 정리 분석하였다. 본 연구에서 개발된 시험기를 이

용하면 실제 현장에서 발생할 수 있는 제반 응력조건 변화를 고려한 시험이 가능하여 응력 및 변형의 경로에 따라  $K_0$  값의 정성적 내지 정량적인 분석이 가능하다. 따라서, 지반 구조물의 거동을 해석하는데 보다 신뢰성 있는 정지토압계수를 적용함으로써 효율적이고 경제적인 해석이 가능할 것으로 기대된다.

### 2. 정지토압계수 측정방법

정지토압계수는 선형등방탄성인 경우 식 (1)과 같이 주어진다.

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu} \tag{1}$$

그러나, 선형탄성체가 아닌 지반의 정지토압계수를 실험적으로 결정하기는 매우 어려워, Jáky(1944), Brooker와 Ireland(1965), 그리고 Alpan(1967) 등은 경험적 상관식을 제안하고 있다.

정지토압계수는 포아송비, 마찰각, 과압밀비, 소성지수 등 매우 많은 인자에 영향을 받으며, 특히 내부마찰각과 응력이력(또는 과압밀비)에 큰 영향을 받는다. 다짐에 의해서 발생하는 정지토압은 다짐과정 중 재하 및 제하를 반복적으로 경험하는 응력경로를 갖게 되므로 이를 고려하여 정지토압계수를 평가하여야

**Table 1** The methods of estimation of Lateral pressure by pressuremeter test (shin, 1999)

기 술	참 고	흙 유형	조사	장 점	단 점
Lift off	Wroth(1982)	All soils	SBP	1. 직접 측정	1. 시스템응력과 천공을 정확하게 하기 어렵다.
Strength	Marsland & Randolph(1977)	Stiff clays	SBP		1. 되풀이하는 절차
			PBP		2. 산출점 평가의 어려움
	Hawkins <i>et al.</i> (1990)	Stiff clays	SBP	1. 시험과 전단응력 곡선 사이의 서로의 일관성	1. 되풀이하는 절차 2. 산출점 평가의 어려움
	Newman(1991)	Sands	SBP		1. 질적 시험에만 적용 2. 산출점 평가의 어려움 3. 산출이 천공동안에 발생할 가능성이 높다.
	Denby & Hughes(1982)	Clays	SBP		1. 완전한 소성 흙 2. 곡선은 수평응력에 있어 큰 변화를 산출하는 미소변형까지 미소변형에 의한 영향을 거의 미치지 않는다.
	Fahey & Randolph(1984)	Sands	SBP		1. 완전한 소성 흙 2. 곡선은 수평응력에 있어 큰 변화를 산출하는 미소변형까지 미소변형에 의한 영향을 거의 미치지 않는다.
Test procedure	Lacasse & Lunne(1982)	All soils	SBP	1. 간편하다.	1. 응력비율과 흙의 강성도에 의한 영향을 받는다.
	Wroth(1982)	Soft clays	SBP	1. 간편하다.	1. 정규압밀점토에만 적용함 2. 공극수압을 신뢰성있는 값으로 읽어야한다.
	Jefferies <i>et al.</i> (1987)	All clays	SBP		1. 공극수압을 신뢰성있는 값으로 읽어야한다. 2. 완전한 소성 흙
Curve fitting	Arnord(1981)	Clays	SBP		1. 독단적으로 선택한 계수
			PBP		
	Denby & Clough(1980)	Clays	SBP		1. 완전한 소성 흙 2. 곡선은 수평응력에 있어 큰 변화를 산출하는 미소변형까지 미소변형에 의한 영향을 거의 미치지 않는다.
	Jefferies(1988)	Clays	SBP	1. loading & unloading 곡선의 완전함	1. 완전한 소성 흙
	Ferreira & Robertson(1992)	Clays	SBP	1. loading & unloading 곡선의 완전함	1. 완전한 소성 흙
	Withers <i>et al.</i> (1989)	Sands	SBP		1. 계수선택의 영향 받지 않음 2. 계수의 단일값이 없다.
Correlations				1. 유도된 계수들 사이의 일관성	

**Table 2** The types of oedometer test (shin, 1999)

유 형	시 험 자	특 징	결 점
압밀링의 측면에 계기를 부착하여 수평응력을 직접측정하는 방법	Brooker & Irland(1967), Singh <i>et al</i> (1973), Saxena <i>et al</i> (1978), Ofer(1981), Ou(1988)등	1. 가장 편리하고 간단한 방법	1. 압밀링의 벽면마찰과 측벽의 변위로 인하여 K0값에 다소 영향을 미친다.
압밀링의 측면에 계기를 부착하여 수평응력을 직접측정하는 방법	Campanella & Vaid(1972)	1. 시료와 셀(cell) 사이에 물을 채워서 수평변위가 발생하지 않도록 제어	1. 포화점토에 한정된 시험법

**Table 3** The types of triaxial compression test (shin, 1999)

유 형	시 험 자	특 징	결 점
수평변위를 직접 측정	Bishop & Henkel(1957), Skempton & Sowa(1963), Henkel & Sowa, Akai & Adachi(1965), Nakase <i>et al.</i> (1965), Menzies <i>et al.</i> (1977), Konishi <i>et al.</i> (1980), Brown <i>et al.</i> (1974), Daramola(1980), Al-Hussaini(1981), Fedra(1984)등	1. 수평감지기 : LVDT (linear variable differential transformer) 변형감지기, 변형게이지(strain gauge) 등을 사용	1. 측정된 변위는 시료의 전체길이에 대해 변위가 균등하지 않을 때 횡방향 변위의 평균값으로 대표될 수 없다. 2. 멤브레인(membrane) 의 외측에서 측정된 변위이므로 멤브레인 내측에 있는 흙입자의 변위와 일치한다고 할 수 없는 단점이 있다.
시료의 측면변위와 체적변위를 동시에 측정, 측면변위의 평균치를 간접적으로 제어	Bjerrum <i>et al.</i> (1972), Saada(1970), Lewin(1971), Mitachi & Kitago (1976), Hanzawa(1977), Lo & Chu(1991) 등	1. 시료를 포화시켰을 때 주로 사용	1. 측면변위를 자동적으로 계산하여 조절하지 않는다면 K0상태를 유지하기 어렵다. 2. 각 하중단계에서 압밀에 의해 유발되는 변위를 조절하기 위하여 재압축해야 한다.
완전배수상태에서 체적변형이 압밀시험에서의 측면변형과 같도록 측압을 조절	Hsieh(1985)	1. K0-삼축압축시험을 수행한 Bishop & Eldin(1953)의 방법을 개량 2. 컴퓨터를 사용하여 체적변형의 계산과 측압의 조절을 신속히 처리	1. 개선된 방법에도 불구하고 시료가 접하는 하중판에서의 마찰은 전시료에 걸쳐 불균등한 변형을 일으킨다.
시료와 내부셀 (inner cell) 사이의 압력 및 내부셀과 외부셀 사이의 압력이 일정하도록 하여 측면변형이 없도록 조절	Bishop <i>et al.</i> (1953)	1. 합금으로 된 침(needle)을 사용하여 전기적으로 내부공간에 채워진 수은의 변위를 측정 및 조절	1. 시료의 불균등한 변형의 존재를 감지하기 곤란
시료와 내부셀 (inner cell) 사이의 압력 및 내부셀과 외부셀 사이의 압력이 일정하도록 하여 측면변형이 없도록 조절	Okochi & Tatsuoka(1984)	1. 차압계(differential pressure transducer)를 사용	1. 시료의 불균등한 변형의 존재를 감지하기 곤란

한다.  $K_0$ -시험은 현장시험과 실내시험으로 나눌 수 있으며(신, 1999), 현장시험을 통한  $K_0$ -측정방법은 DMT를 이용하는 방법, PMT를 이용하는 방법 등이 있으며 이를 Table 1에 정리하였다.  $K_0$ -실내시험은 압밀링을 이용하여 수평응력을 직접 또는 간접적인 방법으로 측정하는 형태와 삼축압축기에서 시료의 측면변위를 제어하면서 수평응력을 측정하는 두가지 방법이 있는데 개발되어 있는 시험기법을 Table 2, Table 3에 정리하였다. 이 외에도 기 개발된 많은 시험장치들이 있으나 지면관계상 생략한다 [참고문헌 (신, 1999) 참조].

### 3. $K_0$ -측정장치 및 시험방법

#### 3.1 $K_0$ -측정장치

시험장치는 크고 새롭게 고안한 하중계를 장착한 압밀장치, 재하-제하 하중을 제어할 수 있는 재하장치, 데이터 획득장치로

구분된다. 시험기의 전체구성은 Fig. 1과 같다[시험장치에 대한 자세한 내용은 참고문헌 송(1999) 참조].

#### 3.2 시험방법

##### (1) 시료의 성형

정확한  $K_0$ -시험을 위해서는 벽면의 마찰을 없애는 것이 중요하다. 본 연구에서는 벽면마찰을 최소화하기 위해서 멤브레인(Membrane)과 테프론 테이프(Teflon tape)를 사용하였고, 균등한 밀도를 유지하기 위해 모래를 공중낙하시키는 방법(일명 絳沙法)을 사용하였다.

##### (2) 재하 및 제하방법

본 연구에서는 재하 및 제하의 단주기에 대해 시험을 실시하였는데 과압밀비(OCR)와 상대밀도( $D_r$ )에 따른 수평응력을 관찰하기 위해 다음 2가지 형태의 시험형태를 결정하였다. 먼저 상

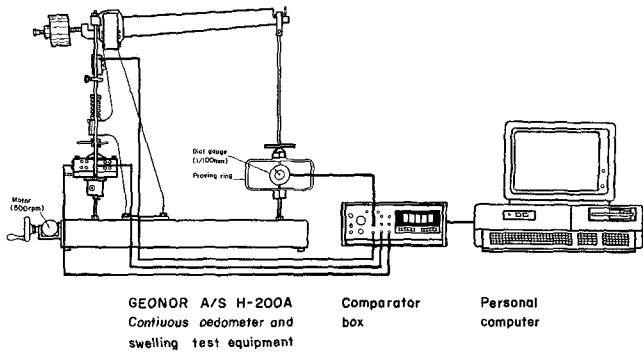


Fig. 1 The system of measurement and output data

Table 4 One-cyclic K<sub>0</sub>-loading/unloading model

Test	D <sub>r</sub> =50%, 85%(Type A)					D <sub>r</sub> =60%, 70%(Type B)				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sigma'_{v \max}$	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
$\sigma'_{v \min}$	0.05	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0	0.01	0.75	1.25	2.0
$\sigma'_{v r}$	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0

(unit : kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma'_{v \max}$  : 하중 재하시 최대수직응력  
 $\sigma'_{v \min}$  : 하중 재하시 최소수직응력  
 $\sigma'_{v r}$  : 하중 재재하시 최대수직응력

대밀도 50% 및 85%에 대해서는 시험번호 1~6의 형태(Type A)로 상대밀도 60% 및 70%에 대해서는 시험번호 7~10의 형태(Type B)로 Table 4와 같이 시험을 실시하였다.

## 4. 시험결과

### 4.1 전단강도시험

K<sub>0</sub>조건하에서 K<sub>0</sub>-응력경로를 전단강도 정수인 내부마찰각  $\phi'$ 의 함수로 표시하기 위하여 총 14개의 초기조건 즉, 초기간극비  $e_i$ 가 0.554에서 0.732의 범위 내에서 삼축압축시험을 하였다.

Okochi & Tatsuoka(1984)의 연구결과에 의하면, 모래의 내부마찰각을 초기간극비의 함수로 표현하고 임의의 등방응력을 기준으로 산출하였을 때 시료의 내부마찰각은 시료의 성형방법에 무관하다고 하였다. 따라서, 여기서는 공중낙하법으로 시료를 성형하였으며 등방응력을 나타내었다. 그림에서 삼축압축시험에 의한 내부마찰각  $\phi'$ 는  $\phi' = 66.36 - 40.95 e_i$ 의 관계식을 구하였다.

### 4.2 단주기 K<sub>0</sub>-재하/제하 시험

단주기 K<sub>0</sub>-재하/제하 시험은 Table 4에서 설정한 시험모형에 대하여 수행하였다. 전자인 경우는 상대밀도 D<sub>r</sub>이 50 및 85%에 대해(Type A), 후자인 경우는 D<sub>r</sub>이 60 및 70%에 대해(Type B) 실험한 것이다.

Fig. 2-5까지는 시험모형 (Type A) 및 (Type B)로 각각의 상대밀도에 대해 K<sub>0</sub>-시험을 수행한 응력경로를 나타내고 있다. 이들 그림에서 보면, 반복하여 재하/제하한 것으로 보이나 실제로는

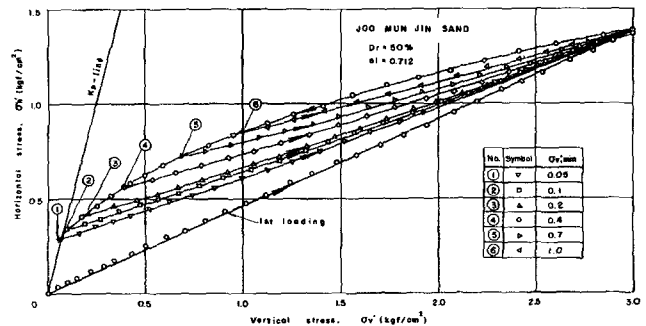


Fig. 2 Stres path of one-cyclic loading for type A (D<sub>r</sub> =50%)

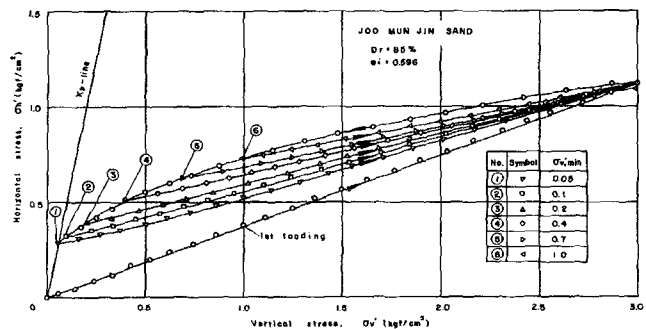


Fig. 3 Stres path of one-cyclic loading for type A (D<sub>r</sub> =85%)

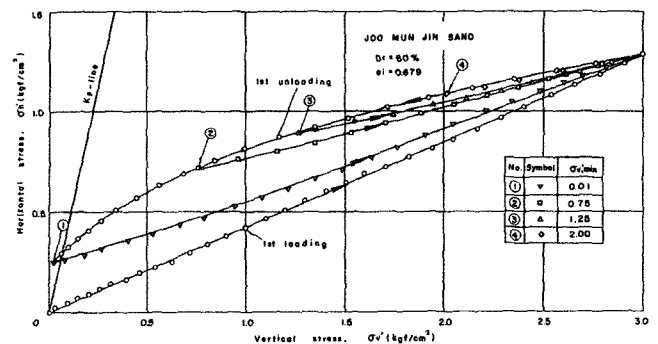


Fig. 4 Stres path of one-cyclic loading for type B (D<sub>r</sub> =60%)

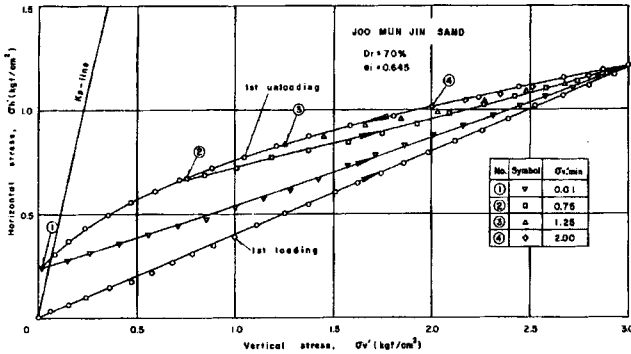


Fig. 5 Stres path of one-cyclic loading for type B ( $D_r = 70\%$ )

각각에 응력경로들을 합하여 그린 결과이다.

### 5. 실험결과와 분석

#### 5.1 단주기 $K_0$ - 재하/제하 시험

##### (1) 처녀재하

$K_0$ -시험의 처녀재하시 얻어진 8개의 시험모형에 대한 자료와 Mayne & Kulhawy(1982)의 120여개의 자료를 Fig. 6과 같이 비교하여 나타내었다. 이 그림에서 보면, 본 시험결과는 비점성토에 대한 기존의 시험결과가 나타내는 범위 내에 속하고 있음을 알 수 있다. 본 시험결과에서 얻어진 관계식은 Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 식(2)로 나타내어 진다.

$$K_{on} = 1 - 0.914 \sin \phi' \quad (2)$$

(2)식의  $K_{on}$  값은 Mayne & Kulhawy(1982)와 Jáky(1944)의 산출결과에 비하여 약간 큰 값이었다.

##### (2) 처녀제하

처녀제하에 대한 시험결과는 역시 8개의 응력모형에서 얻을 수 있으며, Table 5는  $K_{ou} = K_{on} \cdot (OCR)^\alpha$ 의 관계식에서 실측치  $K_{ou}$ 과 OCR를 대입한 후  $\alpha$ 를 계산하여 수록하였다.

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

$$\alpha = \frac{\log\left(\frac{K_{ou}}{K_{on}}\right)}{\log(OCR)} \quad (3)$$

로서 구해진 값이며, 이 도표에서 보면, 상대밀도가 같은 조건에서 처녀제하한 결과는 거의 비슷하게 나타났다. 과압밀비(OCR)의 변화에 따른 지수  $\alpha$  값의 변화를 상세히 관찰하기 위하여 위의 식으로 부터  $\log(K_{ou}/K_{on})$ 을 세로축에,  $\log(OCR)$ 을 가로축에 취하여 Fig. 8과 같이 도식화 하였다. 그리고 상대밀도와 지수  $\alpha$  값의 관계를 살펴보기 위하여 Fig. 8의 결과를 이용하여 Fig. 9와 같이 나타내었다. Fig. 9에서 보면,  $K_{ou}/K_{on}$ 과 OCR값은 일정 관계를 나타내고 있으며, 지수  $\alpha$ 는 직선의 기울기를 의미하고 있다. Fig. 9에서는 상대밀도에 따라 지수  $\alpha$ 의 변화가 일정하지는 않지만 대체로 상대밀도가 클수록 커지는 경향이 있다.

지수  $\alpha$ 에 대하여 Schmidt(1966), Okochi & Tatsuoka(1984), Mayne & Kulhawy(1982), Seed & Duncan(1965)등은 내부마찰각  $\phi'$ 의 함수로 정의하고 있다. 지수  $\alpha$ 를  $\phi'$ 의 함수로 나타낸 것으로서 Seed & Duncan(1983)이 연구한 회귀분석 결과에 본 시험결과를 삽입하여 Fig. 10과 비교하여 나타내었다. 본 시험결과는 Seed & Duncan(1983)이 제안한 평균치보다 조금 작은 값이었으며, Ou(1988)가 수행하였던 압밀링을 이용한 시험결과와 유사한 결과를 보였고, Mayne & Kulhawy(1982) 및 Okochi & Tatsuoka(1984)가 제안하였던  $\alpha \approx \sin \phi'$  값보다도 약간 작은 값의 범위로 나타났다. 또한, 지수  $\alpha$ 는 모래의 함수로 표현하고 있다. 즉, Alpan(1967)은 0.4~0.5, Schmertmann(1985)은 0.42, Sherif et al(1974)은 0.68, Bellotti et al(1975)은 0.50~0.51, 그리고 Hendeon(1963)은 0.38~0.51이라고 각각의 시험 결과에 밝히고 있다. 그러나 Table 5에서 보는 바와 같이, 본 실험결과는

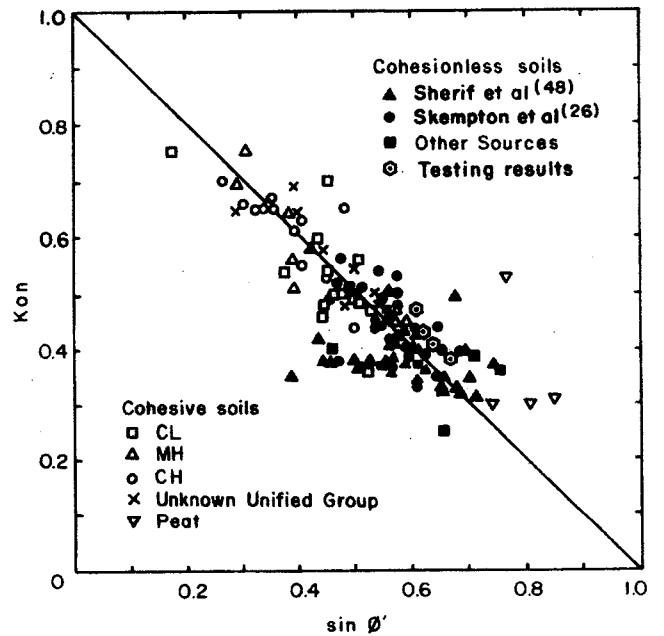


Fig. 6  $K_{on}$  vs.  $\sin \phi'$  relationship for cohesionless and cohesive soils

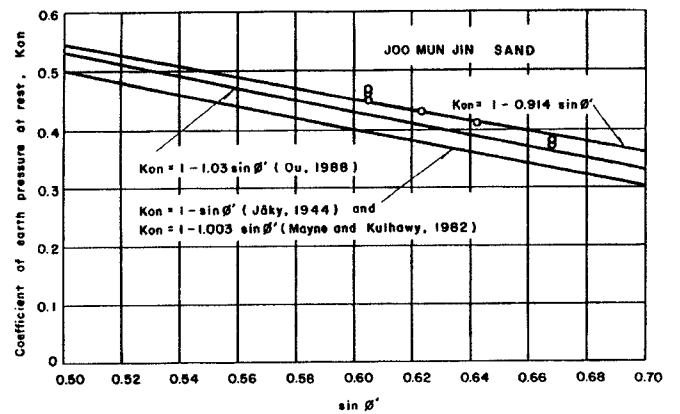


Fig. 7 Comparison of oedometer testing with researcher's results

**Table 5** The exponent  $\alpha$  value for virgin loading

Model	$D_r(\%)$	$K_{on}$	$OCR_{max}$	$\alpha$	$\sin \phi'$	Remarks <sup>(a)</sup>
Type A	50	0.47	60	0.554	0.605	0.565
	85	0.38	60	0.612	0.668	0.607
Type B	60	0.43	300	0.595	0.625	
	70	0.41	300	0.570	0.642	

0.512~0.643으로  $\alpha$  값이 단지 모래종류의 함수인 것으로 규정짓기 어려웠다.

한편, 처녀제하시의 극한상태, 즉  $K_{ou}$ 가 소성상태에 이르는 응력상태를 알아보기 위하여 Mayne & Kulhawy(1982)가 제안한 Rankine의 소성상태와 비교하여 보았다. 만약 점착력  $c'$ 가 없다면 이 상태는 Mohr - Coulomb의 파괴기준과 일치하며 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$(K_{ou})_{lim} = K_p = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (4)$$

Table 5는 처녀 제하시에 측정된 최대 과압밀비  $OCR_{max}$ 와 계산으로 얻어진, 즉 이론상으로 소성상태에 도달하는 극한 과압밀비  $OCR_{limit}$ 를 이용하여 나타내고 있다. 그리고 위에서 계산된  $OCR_{max}$ 와  $OCR_{limit}$ 를 대입하여 구한  $K_{ou}$ 와  $K_p$ 값을 이 표에 함께 수록하여 비교하였다.

Fig. 2~5에서  $K_p$ 선은 상기와 같은 계산과정에서 얻어진 것이다. 이들 그림과 Table 6을 보면, 시험모형 Type A의  $D_r = 85\%$ 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 재제하

단주기 실험결과를 나타내고 있는 Fig. 2-5를 살펴보면, 처녀 재제하시의 응력경로는 대개 직선에 가까운 형태이나 조금 아래로 처져 있으며, 최대선행응력점으로 거의 정확히 복귀하였음을 알 수 있다. 따라서, 처녀 재제하시의 응력경로는 Wroth(1975)가 제안한 바와 같이 직선으로 생각할 수 있으므로 이때 직선의 기울기인 처녀재제하계수  $m_r$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

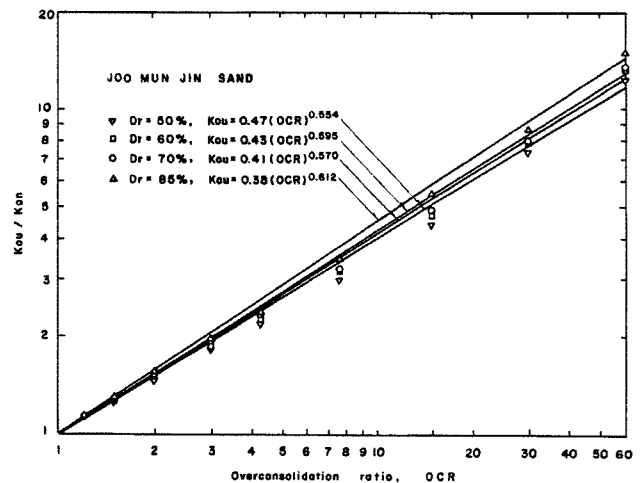
$$m_r = \frac{K_{on} \sigma'_{v,r} - K_{on} \sigma'_{v,\min}}{\sigma'_{v,r} - \sigma'_{v,\min}} \quad (5)$$

식(3)을 이용하여 시험모형 Type A 및 Type B로부터 처녀 재제하계수  $m_r$ 을 산출하였고,  $m_r$ 과 OCR의 관계를 살펴보기 위하여 Fig. 2-5를 이용하여 Fig. 11과 같이 나타내었다. 이 그림에서 보면  $m_r$ 은 OCR에 따라 대체로 일정하게 증가함을 알 수 있다.

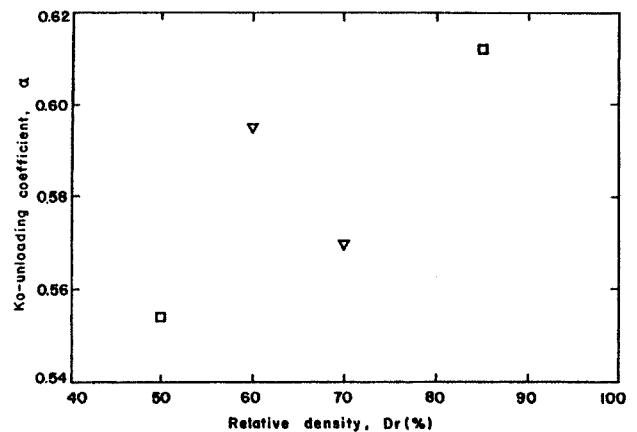
Mayne & Kulhawy(1982)는  $m_r = 3/4K_{on}$ 으로 정의하였으나, Fig. 11에서 보면,  $m_r$ 이  $K_{on}$ 만의 유일한 함수가 아님을 알 수 있다. Seed & Duncan(1983)은 자신이 제안한 응력모형에서  $m_r$ 을  $\beta$ 의 계수로 표현하여 일반적으로 0.6의 값으로 추천하였지만, 본 실험결과에서는  $\beta$ 의 값이 1.0이다. Ou(1988)는 Fig. 5.5에서

**Table 6**  $K_{ou}$  and  $K_p$  values for virgin unloading

Model	$D_r(\%)$	$K_{on}$	$\alpha$	$OCR_{max}$	$OCR_{limit}$	$K_{ou}$	$K_p$	Remarks
Type A	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	$K_p > K_{ou}$
Type B	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. 8**  $K_{ou}/K_{on}$  vs. OCR relationship for virgin unloading



**Fig. 9**  $\alpha$  vs.  $D_r$  relationship for one-cyclic models

직선식을  $m_r = a \cdot \log(OCR) + b$ 형태로 표현하여 직선의 기울기인 상수  $a$ 가  $\sin \phi'$ 의 함수라고 제안하였으나, Fig. 11에서  $a$ 값이 초기 상대밀도에 따라 일정하지 않음을 알 수 있었다.

Fig. 12와 Fig. 13은 시험모형 Type A 및 Type B에 대하여, Mayne & Kulhawy(1982)가 제안한  $K_{or}$ 의 값과 실측치를 비교한 것이다. 이 그림들에서 보면, 과압밀비가 1.0인 경우에  $K_{on}$ 에 일치하며  $\sigma'_{v,r}$ 가 증가함에 따라  $K_{or}$ 값은 대략 쌍곡선 형태로 감소되는 경향을 알 수 있다. 그리고  $K_{or}$ 의 값과 실측치는 지수  $\alpha$ 의

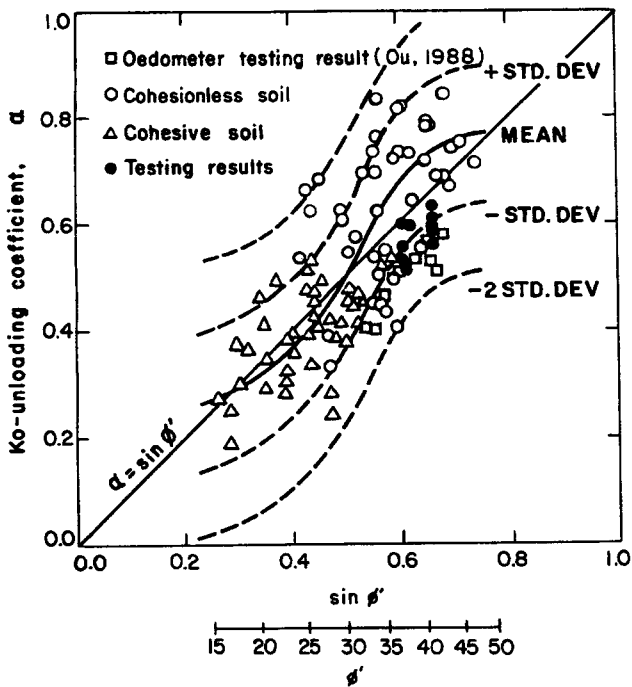


Fig. 10  $\alpha$  vs.  $\sin \phi'$  relationship (After Ou, 1988)

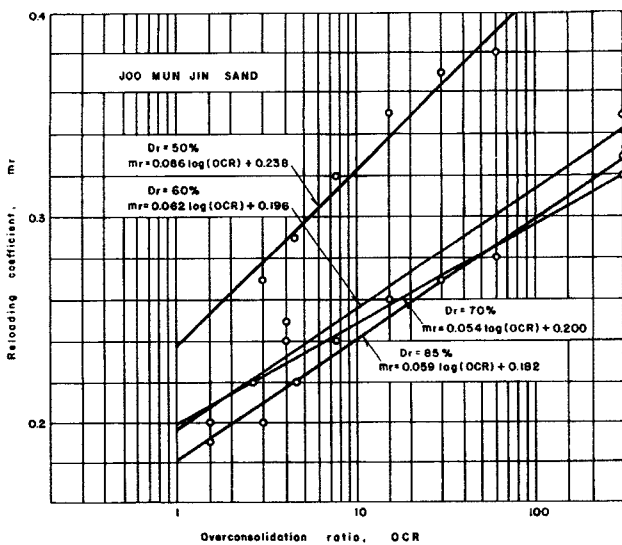


Fig. 11  $m_r$  vs. OCR relationship for virgin unloading

변화에 따라 차이를 보여주고 있으나,  $\sigma_v'$ 가 0 ~ 1.0kgf/cm<sup>2</sup>에서 두값의 차이가 더 크다는 것을 알 수 있다.  $K_{or}$ 의 값이 실측치와 합치되기 위해서는 지수  $\alpha$ 의 정확한 산정법이 요구된다.

### 6. 결 론

$K_o$ 상태에서 단주기 재하/제하시의 응력이력에 따른 수평응력의 변화특성을 관찰하기 위하여  $K_o$ 조건을 크게 만족할 수 있도록 특별히 고안한 압밀링 형태의  $K_o$ 시험기를 제작하였으며, 실

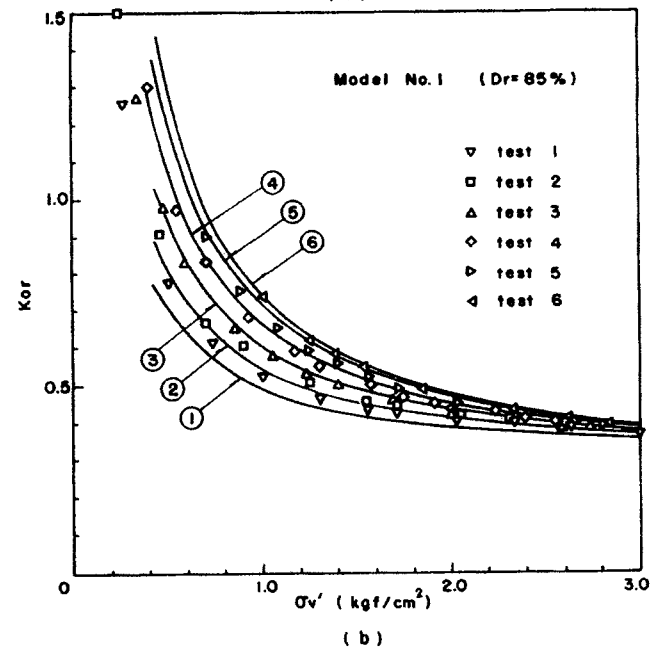
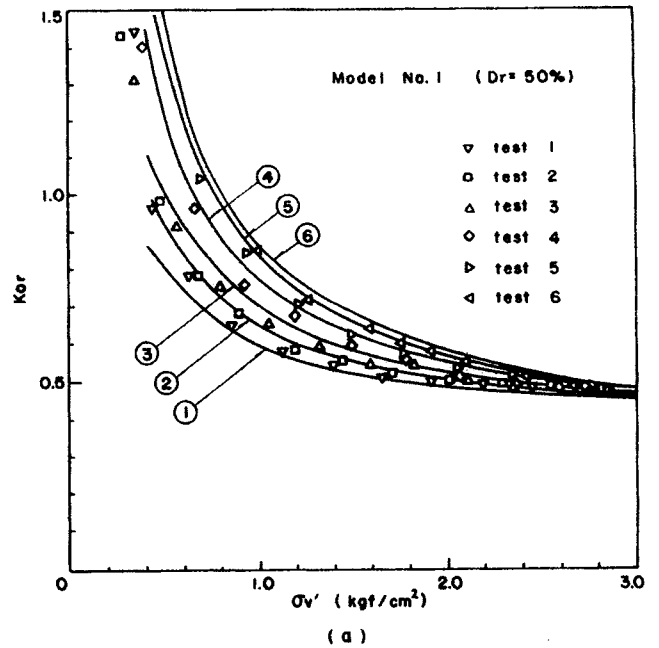


Fig. 12  $K_{or}$  vs.  $\sigma_v'$  relationship for reloading (Type A)

내 건조된 모래에 대하여 2가지 시험모형을 선정하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 처녀재하 시의 정지토압계수  $K_{on}$ 은 모래의 내부마찰각  $\phi'$ 의 함수로  $K_{on}=1 - 0.914\sin \phi'$ 와 같은 관계식을 얻을 수 있었다.
- (2) 처녀재하 시의 정지토압계수  $K_{ou}$ 는  $K_{on}$ 과 과압밀비(OCR) 함수로  $K_{ou}=K_{on}(OCR)^\alpha$ 으로 표시할 수 있으며, 지수  $\alpha$ 는 대체로 상대밀도가 클수록 증가하는 경향을 보였다. 그리고 처녀재하 시의 극한상태인  $(K_{ou})_{limit}$ 는 Rankine의 소성상태를 초과하였다.
- (3) 처녀 재재하 시의 정지토압계수  $K_{or}$ 은 연직응력  $\sigma_v'$ 가 증가함에 따라 쌍곡선 형태로 감소하였다. 그리고 처녀재재하시의

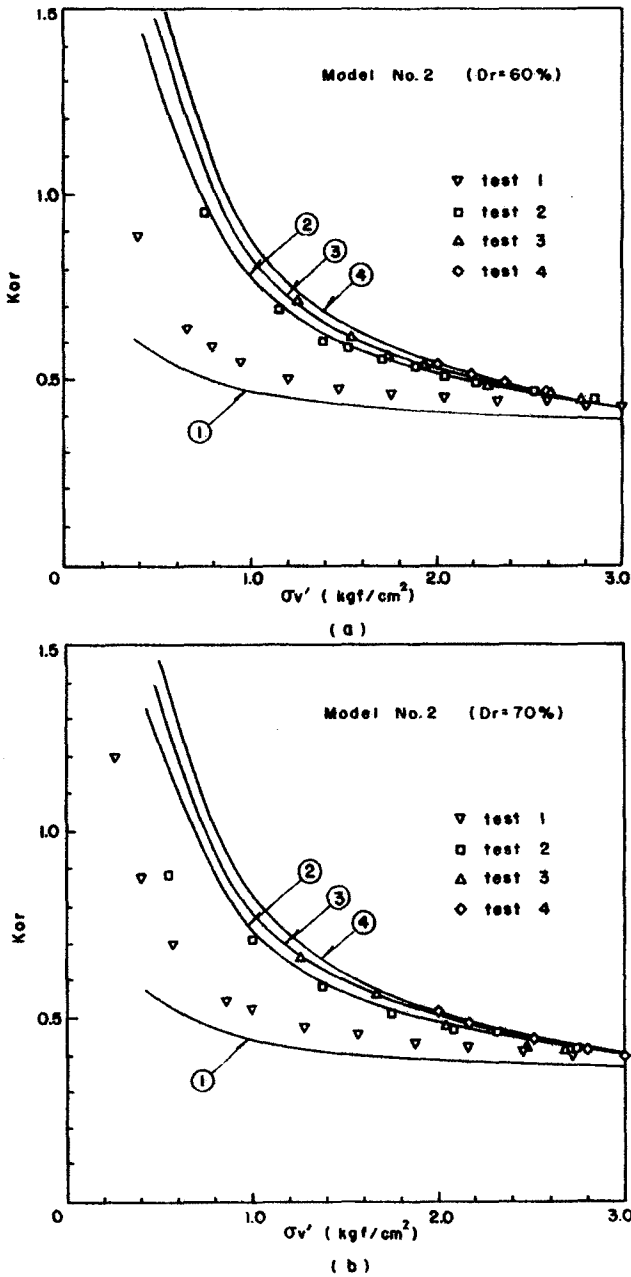


Fig. 13  $K_{or}$  vs.  $\sigma_v'$  relationship for reloading (Type B)

응력경로는 최소재하응력의 크기에 무관하게 최대선행응력점으로 복귀하며, 이 곡선의 기울기인  $m_r$ 은 OCR이 클수록 증가하였다.

### 후 기

이 논문은 2000학년도 동의대학교 자체 학술연구조성비의 지원을 받아 작성된 것으로 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

송무효(1991). "다주기  $K_o$  - 재하/제하에 의한 건조 모래의 거동", 동아대학교, 공학박사 학위논문, 160p.

송무효(1999). "정지토압계수의 측정장치 개발에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제13권, 제2호, pp 159~167.

정성교(1989). "뒤틀림 다짐에 의한 토압", 서울대학교 공학박사 학위논문, 130p.

신종철(1999). "정지토압계수 측정장치 개발에 관한 연구", 석사 학위논문, 동의대학교 대학원.

Alpan, J.(1967). "The Empirical Evaluation of the Coefficient  $K_o$  and  $K_{or}$ ", Soils and Foundations, 71 (1), pp 31~40.

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.

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.

Hendron, a. J.(1963). "The Behavior of Sand in One - Dimensional Compression", Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illionis.

Jáky, J.(1944). "The Coefficient of Earth Pressure at Rest", Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, Budapest, Hungary, pp 355~358.

Mayne, P. W. and F. H. Kulhawy.(1982). " $K_o$  - OCR Relationships in Soil", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 108, GT6, pp 851~872.

Okochi, Y. and Tatsuoka, F.(1984). "Some Factors Affecting  $K_o$  - Values of Sand measured in Triaxial Cell", Soil and Foundations, Vol. 24, No. 3, pp 52~68.

Ou, Chang - Yu(1988). "Finite Element Analysis of compaction - Induced Stresses and Deformation", Ph. D. Thesis, Stanford University.

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.

Schmidt, B.(1966). "Discussion of Earth Pressure at Rest Related to Stress History", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 3, No. 4, pp 239~242.

Seed, R. D.(1983). "Soil - Structure Interaction Effects of Compaction - Induced Stress and Deformations", Ph. D. Thesis, Univ. of California at Berkeley, 425p.

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.

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.

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.

---

2001년 10월 11일 원고 접수

2001년 11월 8일 수정본 채택