K_o-재하/제하에 의한 건조모래의 거동(Ⅱ) : 다주기 시험

Behaviour of Dry Sand under K_o-Loading/Unloading Conditions(Ⅱ) : Hysteretic Test

정 성 교*1 송 무 효*2
Chung, Sung-Gyo Song, Mu-Hyo

정 진 교*3 남 선 우*3
Chung, Chin-Gyo Nam, Sun-Woo

Abstract

In order to investigate the characteristics of the lateral earth pressure at rest under hysteretic Ko-loading/unloading conditions. Seven types of multi-cyclic models have been studied experimentally using dry sand. For this study a new type of Ko-oedometer apparatus is developed, and horizontal pressure is accurately measured. The multi-cyclic models consist of largely 3 cases : (i) Ko-test under the same loading/unloading condition, (ii) multi-cyclic loading/unloading Ko-test exceeding the maximum pre-vertical stress, and (iii) multi-cyclic loading/unloading Ko-test within the maximium pre-vertical stress.

As a result, the nulti-cyclic model showed that single-cyclic model could be extended as well, in which the exponents for unloading condition(α and α^*) and the reloading coefficients(m_r and m_r^*) were mainily dependent upon type of stress model, number of cycles and relative density.

요 지

다주기 K_o-재하/제하 시에 수평응력의 변화특성을 관찰하기 위하여 7종류의 시험모형을 선정하였고, K_o조건을 크게 만족할 수 있도록 특별히 고안한 압밀링 형태의 K_o-시험기를 제작하여 실내 건조된 모래에 대하여 실험을 수행하였다. 시험모형은 동일한 재하/제하 응력의 반복, 최대선행응력을 초과하는 반복 재하/제하, 그리고 최대선행 연직응력 내의 반복 재하/제하 K_o-시험으로 구분된다.

*1 정회원, 동아대학교 토목공학과 교수

*2 정회원, 동의대학교 토목공학과 교수

*3 정회원, 동아대학교 토목공학과 박사과정

실험결과에서 다주기 이력모형도 역시 기존의 단주기 이력모형을 확대하여 사용할 수 있음을 보였다. 여기서, 제하시의 지수 (α 및 α^*)와 재재하 시의 계수(m_r 및 m_r^*)는 응력이력의 형태, 반복회수 및 상대밀도에 따라 주로 지배되었다.

1. 서 론

지반해석을 수행할 때 토질기술자는 먼저 지반의 초기응력상태를 평가하며, 또한 외력으로 유발되는 지반응력의 변화를 정확히 예측하는 것이 중요한 문제이다. 이러한 해석중에 정지상태(K_o 상태) 즉, 수평변위가 무시된 상태의 해석을 많이 접하게 된다. 예로서, 계절적인 지하수위의 변동, 흙의 생성에 대한 지질학적인 역사 등으로 복잡한 이력을 지닌 실제지반의 평가, 그리고 교대, 매설암거, 지하벽체, 옹벽 및 보강토 옹벽의 뒤채움 다짐에 따른 토압해석 등이 있다. 이와 같이 복잡한 응력이력을 받는 경우에 수평토압을 정확히 산출하는 것이 절실히 요구되고 있지만, 현재까지의 연구결과는 극히 미흡한 실정이다.

기존의 실험적인 연구로써 Wright[15], Campanella & Vaid[3], Al-Hussaini & Townsend[1] 등의 삼축압축시험의 결과 및 Ofer[5,6,7,8]와 Ou[9]의 압밀시험 결과로 국한된 응력이력 조건 하에서 수행된 것이다. 그리고 복잡한 응력이력을 예측하기 위한 다주기 K_o-응력모형이 Seed & Duncan[10,11], Ou[9] 및 정[18]에 의하여 제안되었지만, 국한된 시험결과 때문에 모형의 합리적인 입증은 어려운 실정이다.

따라서 본 연구를 위해서 손쉽게 K_o값을 얻을 수 있으며, K_o실험이 완료된 직후에 흙이 강도정수를 얻기 위한 시험이 가능하도록 특별히 고안된 압밀링형태의 K_o시험기를 고안 제작하였다. 국내에서 표준사로 알려진 주문진 모래를 사용하여 실제현장에서 발생가능한 7가지 형태의 다주기 응력경로를 시험모형으로 설정하여 K_o실험을 수행하였다. 본 실험을 통하여 다주기 K_o-응력에 따라 제반 토질역학적 특성을 규명하고자 하였다.

2. 기존의 연구결과

다주기 K_o-실험결과는 삼축시험기를 사용한 Wright[15]의 실험결과와 압밀링을 사용한 Campanella & Vaid[3], Ofer[5,6,7,8], Ou[9]의 실험결과 등으로 극히 제한되어 있다.

다주기 K_o상태에서 응력의 거동을 정량적으로 표현하기 위하여 Seed & Duncan[11]은 다주기 K_o-재하제하모형을 Fig. 1과 같이 제안하였으며, Ou[9] 및 정[18]도 이와 유사한 응력경로 모형을 개발하였다.

이들은 처녀재하 및 제하 시에 연직 및 수평응력의 비를 각각 식 (2.1)과 (2.2)와 같이 정의하였다.

$$K_{on} \simeq 1 - \sin\phi' \tag{2.1}$$

$$K_{ou} = K_{on}(OCR)^{\alpha} \tag{2.2}$$

여기서 OCR은 과압밀비이며, α는 정지상태에서 응력제하변수로 정의되는 지수이다.

다주기 K_o-재하 조건은 단주기 K_o-재재하 조건을 포함하고 있는데, 단주기 K_o-재재하 상태에 Seed & Duncan[11]의 모형에서는 Fig. 1에서와 같이 계수 β를 사용하고 있다. 그러나 Mayne & Kulhawy[4]는 K_o-재재하 조건에서 σ_v'와 σ_h'의 직선적인 변화관계로 정의한 Wroth[14]의 가설을 이용하여 식 (2.3)과 같이 정식화하였다.

$$\sigma_h' - \sigma_{h,min}' = m_r(\sigma_v' - \sigma_{v,min}') \tag{2.3}$$

여기서 m_r은 재재하 계수, $\sigma_{v,min}'$ 및 $\sigma_{h,min}'$은

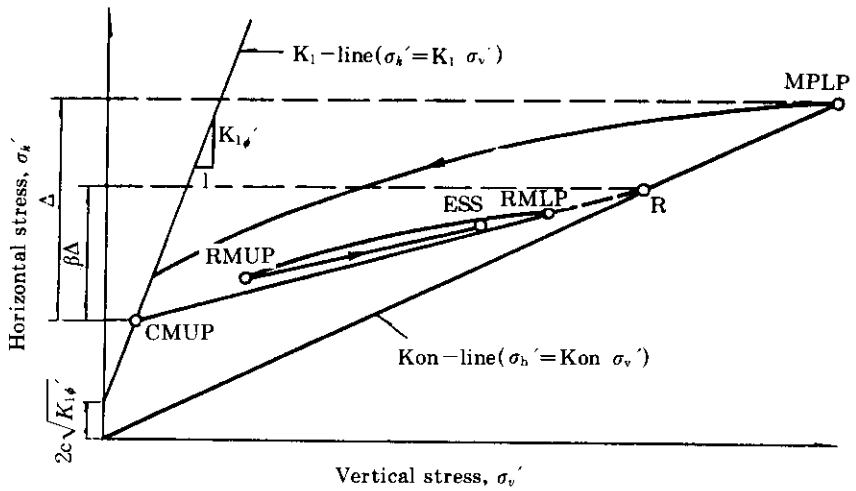

Fig 1. Hysteretic Ko-loading/unloading model of Seed & Duncan[20]

각각 재재하시의 초기 연직 및 수평응력을 각각 나타낸다. 그리고 이들은 15종류의 실험결과로 부터 m_r을 식 (2.4)와 같이 정의하였다.

$$m_r = \frac{3}{4}(1-\sin\phi') = \frac{3}{4}K_{on} \qquad (2.4)$$

따라서 단주기 K_o-재재하 시의 정지토압계수 K_{or}은 식 (2.5)와 같이 유도되었다.

$$K_{or} = K_{on}\left[\frac{OCR}{OCR_{max}^{(1-\alpha)}}\right] + m_r\left[1-\frac{OCR}{OCR_{max}}\right] \qquad (2.5)$$

여기서 OCR_{max}는 최소연직응력 $\sigma_{v,min}'$에 대한 최대연직응력 $\sigma_{h,min}'$의 비이다.

Seed & Duncan[11]의 모형에서 비처녀 제하(nonvirgin unloading)시의 연직 및 수평 응력의비는 식 (2.6)으로 정의하였다.

$$\frac{\sigma_h'}{\sigma_v'} = K_{on}\left[\frac{\sigma_{v,RMLP}'}{K_{on}\sigma_{v,Ess}}\right]\alpha^* \qquad (2.6)$$

여기서, $$\alpha^* = \frac{\ln\left[\frac{\sigma_{h,RMLP}'}{K_{on}\sigma_{v,CMUP}}\right]}{\ln\left[\frac{\sigma_{v,RMLP}'}{\sigma_{v,CMUP}'}\right]}$$

만약 식(2.6)에 의한 응력경로가 처녀재하경로 보다 위로 벗어나는 경우에는 처녀재하경로를 따르도록 하였다. 그리고 처녀재재하 시에 연직응력이 K_{on}선과 일치하지 않을 경우에는 재재하경로(선)을 평행이동하는 수법을 사용하였다.

이 모형에서 비처녀 재재하 응력경로는 Fig. 1에서 점 RMLP(recent maximum loading point)로부터 점 R(Ko-reloading point)에 이르는 직선으로 생각하였으며, 점 R를 지나서는 점 MPLP(maximum past loading point)까지 K_{on}선을 따르도록 하였다. 점 MPLP를 초과하는 응력에서는 처녀재하의 경우와 같이 되도록 하였다. 그리고 점 MPLP보다 작고 점 R을 초과할 경우에는 비처녀 재재하 응력의 최종점을 새로운 점 R로 정의하였다.

3. 실내실험

실내실험을 기술하기 위하여 필요한 시료 및

실험장치에 대해서는 "K_o-재하/제하에 의한 건조모래의 거동(Ⅰ):단주기 시험" 논문[17]에서 상세히 기술되어 있으므로, 여기서는 단지 실험방법에 대해서만 언급하기로 한다.

다주기 K_o-시험은 상대밀도 50% 및 85%인 시료에 대하여 크게 3가지 형태의 응력조건으로 시험모형을 설정하였다.

1) 동일한 재하/제하의 반복(시험모형 No. 3)
2) 최대선행응력을 초과하는 반복 재하/제하(시험모형 No. 4, 5 및 6)
3) 최대선행응력내의 반복 재하/제하(시험모형 No. 7, 8 및 9)

Table 1~Table 7은 위의 시험모형 No.3~No.9까지에 대한 실험방법을 나타낸다. 여기서 동일응력경로의 반복회수에 따른 영향을 좀 더 면밀히 관찰하기 위하여 모형 No.3, No.6 및 No.9에서 10회 이상의 반복회수를 설정하였다.

Table 1 Multi-cyclic K_o-loading/unloading (Model No.3)

Hysteresis No.	1	2	3	4
σ_v',max	3.0	3.0	3.0	3.0
σ_v',min	0.1	0.1	0.1	0.1
σ_v',r	3.0	3.0	3.0	3.0
No. of cycle	1	2	4	20

unit : kgf/cm²

Table 2 Multi-cyclic K_o-loading/unloading (Model No.4)

Hysteresis No.	1	2	3
σ_v',max	1.0	1.6	3.0
σ_v',min	0.1	0.3	0.7
σ_v',r	1.6	3.0	3.0

unit : kgf/cm²

Table 3 Multi-cyclic K_o-loading/unloading (Model No.5)

Hysteresis No.	1	2	3
σ_v',max	1.5	2.0	3.0
σ_v',min	0.1	1.0	1.8
σ_v',r	1.0	2.0	3.0

unit : kgf/cm²

Table 4 Multi-cyclic K_o-loading/unloading (Model No.6)

Hysteresis No.	1	2	3
σ_v',max	1.0	2.0	3.0
σ_v',min	0.1	0.8	1.8
σ_v',r	1.0	2.0	3.0
No. of cycle	20	40	60

unit : kgf/cm²

Table 5 Multi-cyclic K_o-loading/unloading (Model No.7)

Hysteresis No.	1	2	3	4	5	6
σ_v',max	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
σ_v',min	0.05	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0
σ_v',r	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0

unit : kgf/cm²

Table 6 Multi-cyclic K_o-loading/unloading (Model No.8)

Hysteresis No.	1	2	3	4	5
σ_v',max	3.0	2.8	2.5	2.3	2.0
σ_v',min	0.1	0.5	0.8	1.0	1.2
σ_v',r	2.8	2.5	2.3	2.0	3.0

unit : kgf/cm²

Table 7 Multi-cyclic K_o-loading/unloading (Model No.9)

Hysteresis No.	1	2	3	4	5
σ_v',max	3.0	2.8	2.5	2.3	2.0
σ_v',min	0.1	0.5	0.8	1.0	1.2
σ_v',r	2.8	2.5	2.3	2.0	3.0
No. of cycle	10	20	30	40	50

unit : kgf/cm²

4. 다주기 K_o-재하/ 제하 시험결과

다주기 K_o-시험결과에 얻은 각각의 응력경로는 지면 관계상 D_r=50%에 해당하는 것만 Fig.2~Fig.8까지 나타내었으며, Fig.9은 시험모형 No.3에 대한 연직응력과 변형의 관계곡선이다. 그리고 다주기 K_o-시험 도중에 측정된 간극비에 대한 자료는 참고문헌(16)을 참고하기로 한다.

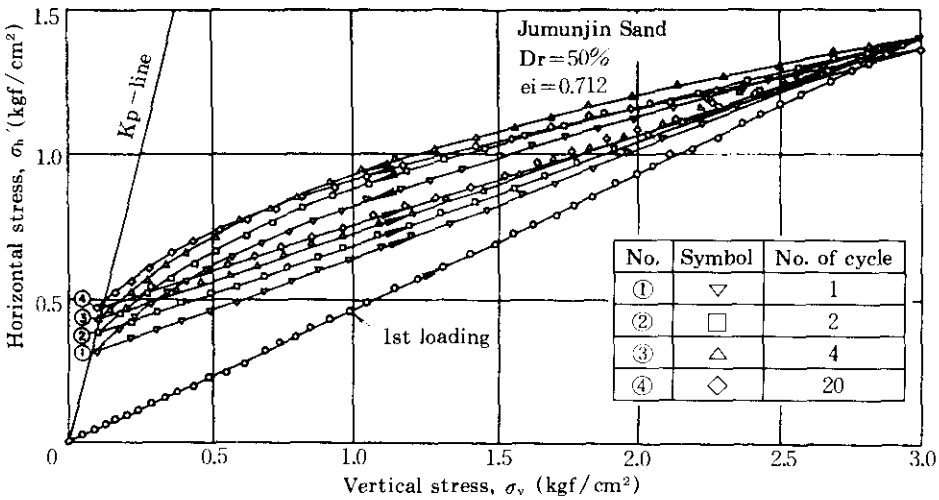

Fig 2. Stress path of multi-cyclic loading for model No.3(Dr=50%)

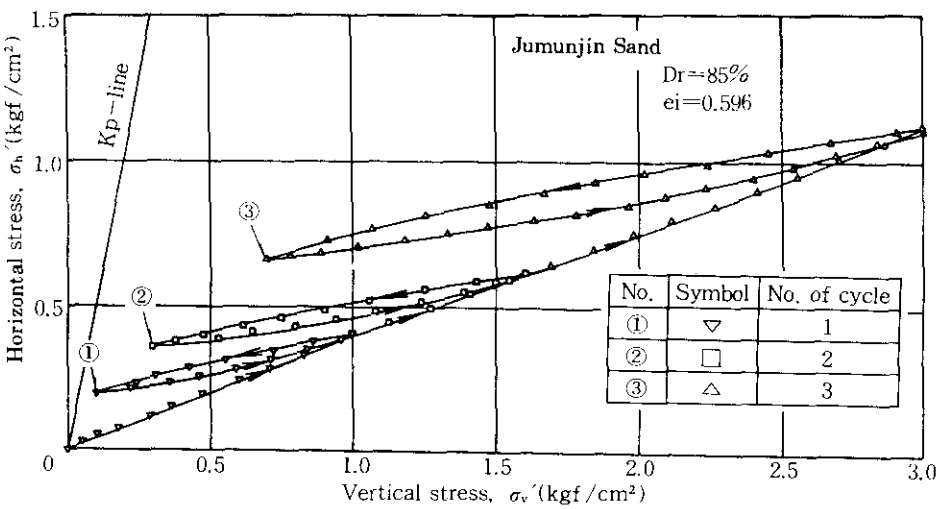

Fig 3. Stress path of multi-cyclic loading for model No.4(Dr=50%)

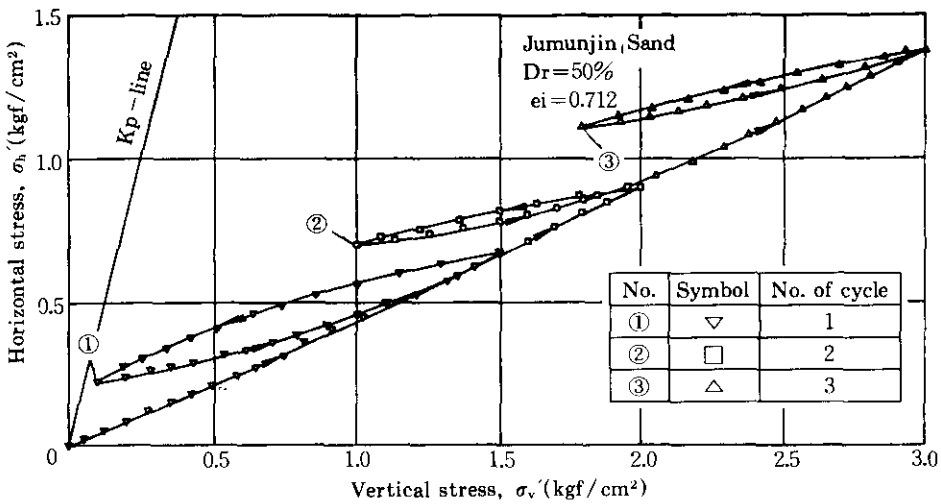

Fig 4. Stress path of multi-cyclic loading for model No.5(Dr=50%)

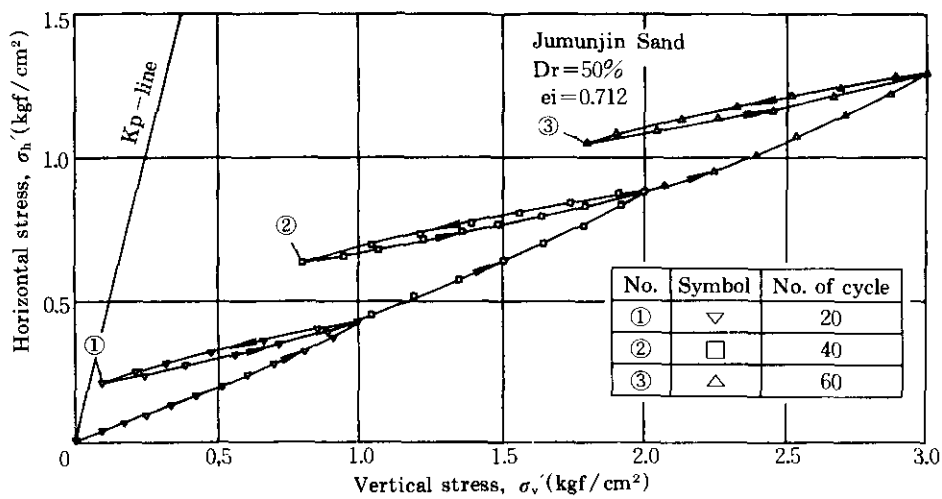

Fig 5. Stress path of multi-cyclic loading for model No.6(Dr=50%)

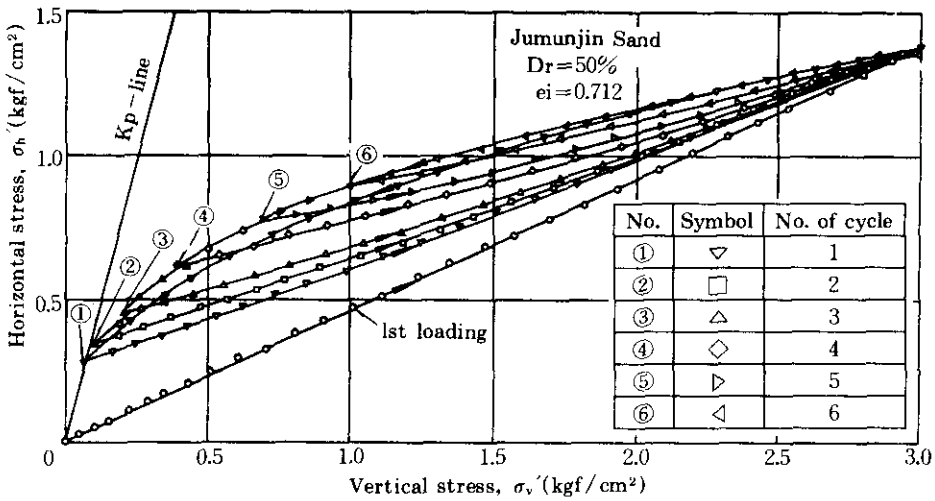

Fig 6. Stress path of multi-cyclic loading for model No.7(Dr=50%)

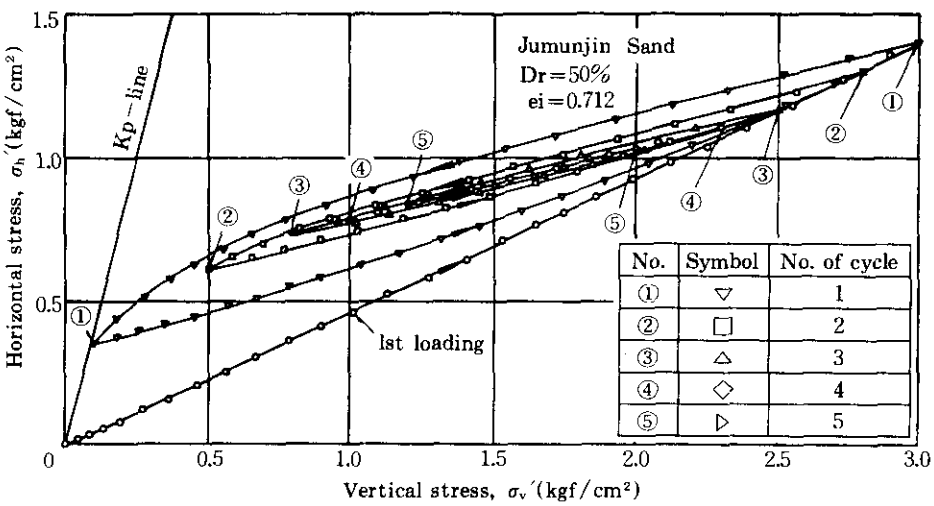

Fig 7. Stress path of multi-cyclic loading for model No.8(Dr=50%)

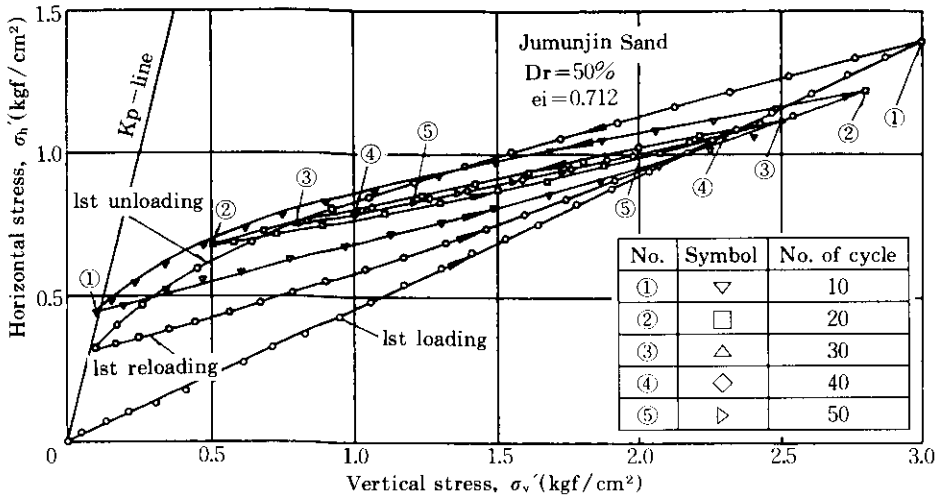

Fig 8. Stress path of multi−cyclic loading for model No.9(Dr=50%)

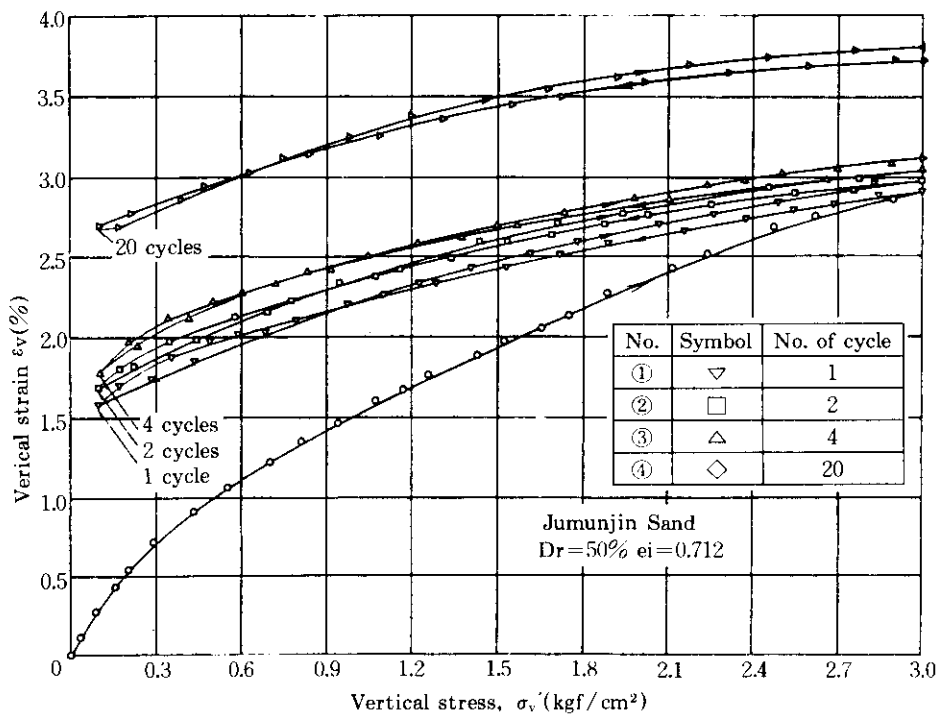

Fig 9. Vertical stress−strain path for multi−cyclic loading of model No.3(Dr=50%)

5. 실험결과의 분석 및 토의

5.1 동일한 재하/ 제하 응력의 반복

(1) 변형특성

시험모형 No.3의 경우는 동일한 응력의 재하 및 제하가 반복될 경우에 응력과 변위의 특성을 관찰하고자 채택한 모형이다. 본 실험에서는 연직응력을 3.0kgf/cm²까지 재하한 후 0.1kgf/cm²까지 제하하는 과정을 20회 반복한 것이다. 이 결과는 Fig.2에서 볼 수 있듯이 이력고리(hystersis loop)가 1회에서 2회 반복을 할 때 σ_v'가 3.0kgf/cm²에서 수평응력은 거의 고정인 반면에 σ_v'가 0.1kgf/cm²에서 수평응력의 증가폭은 2회에서 4회 반복에 이르는 증가폭보다 더 큼을 알 수 있으며, 4회에서 20회 반복에 이를 때는 증가폭이 미소하였다.

상기의 이력고리의 양상은 재하된 연직응력에 대한 연직변형(vertical strain)의 관계를 나타낸 Fig.9에서도 알 수 있다. 이력고리가 1회에서 2회 사이에는 체적변형이 상당히 증대하였으며, 2회와 4회의 이력고리로 갈수록 점차 체적변형의 증가폭이 감소하였으나, 4회를 초과해서도 계속하여 변형이 증대되어 20회 반복 후에 변형은 2.7~3.8%에 이르렀다. 이 그림에서 보면, 0.7~0.9kgf/cm²보다 작은 연직응력의 부분에서 이력고리가 꼬여있는 양상을 관찰할 수 있는데, 이것은 하중의 제거(제하)에 따른 시편의 체적이 다소 팽창되었다는 것을 나타내고 있다. 이러한 영향으로 20회의 반복회수가 작은 경우보다 크며, 0.9kfg/cm²보다 큰 연직응력의 범위에서는 간극비의 변화에 따라 크게 좌우되었음을 알 수 있었다.

동일한 응력의 제하 및 재하가 반복될 경우에 연직 및 수평응력의 관계를 나타낸 Fig.2와 연직변형의 변화를 나타낸 Fig.9에서 보면, 두 경우 모두 Tatsuoka & Ishihara[12], Tatsuoka[13]의 시험결과와 같이 선행하중의 방향과 동일하게 재하될 경우는 변형의 증가폭이 점차 감소하고 수평응력은 증대한다는 사실을 알 수 있었다. 다시 말해서, 사질토에서 응력이력은 선행응력(prestress)의 성질과 관련된 변형의 크기에 따라 거동에 영향을 미친다는 것이다. 그리고 K_o상태에서 반복되는 선행응력은 흙을 점차 조밀하게 만들며, 수평응력은 어느 범위까지 점차 증가하게 됨을 나타내고 있다.

(2) 재 하

동일한 응력의 재하/제하가 반복될 경우에 재하특성을 살펴보기 위하여 먼저 반복회수에 따라 재하곡선의 기울기로 정의된 재재하계수 m_r의 변화를 살펴보았다. Table 8과 Fig.10은 반복회수와 m_r의 관계를 나타낸 것이다.

Table 8 및 Fig.10에서 볼 수 있는 바와 같이, 상대밀도가 50% 및 85%인 경우에 모두 반복회수가 증가할수록 재재하선(reloading line)의 기울기 m_r은 점차 감소하고, 모래가 조

Table 8 The reloading coefficient m_r for model No.3

Dr(%)	No. of cycle				Remarks
	1	2	4	20	
50	0.37	0.35	0.33	0.31	$3/4K_{on}$=0.46
85	0.29	0.27	0.26	0.23	$3/4K_{on}$=0.37

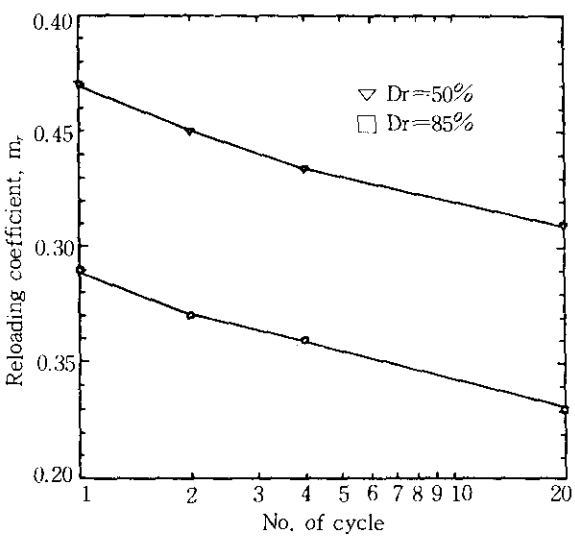

Fig 10. No. of cycle vs. m_r

밀할수록 작다는 사실을 알 수 있었다. 그러나 반복회수가 증가하여도 최대 선행연직응력에서 수평응력이 동일하므로, Seed & Duncan[11]이 제안한 다주기 응력모형인 Fig.1에서 계수 β는 그들이 추천한 0.6값과는 상이하게 거의 모든 경우에 1.0으로 얻어졌었다. 그리고 동일한 응력으로 재하 및 제하되는 경우에 m_r은 Wroth[14]가 제안한 바와 같이 직선적으로 변함을 알 수 있었으나, Table 8에서 보면 Mayne & Kulhawy[4]가 제안한 $m_r=3/4\,K_{on}$으로 일정하지 않고 반복회수에 따라 m_r이 작아짐을 알 수 있다.

재재하시의 연직응력 σ_v'에 대한 정지토압계수 K_{or}의 변화를 관찰하기 위한 측정 곡선과 이론곡선은 Fig.11과 같이 비교하였다. 여기서 실선은 Mayne & Kulhawy[4]가 제안한 재재하시의 수평토압계수를 산출하는 식(2.5)를 이용하여 구한 이론식이다.

K_{or}값은 상대밀도가 50 및 85% 모두 최대선행응력과 동일한 연직응력 σ_v'가 3.0kgf/cm² 가까이에서 거의 일치하고 있으나, 역시 σ_v'가 1.0kgf/cm² 이하에서는 급격한 변화를 보여주

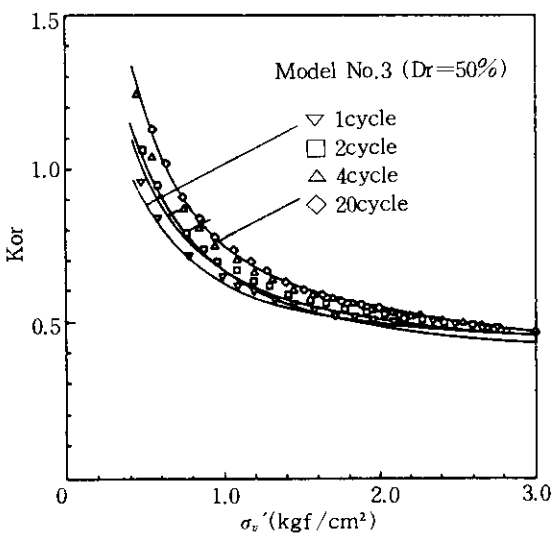

Fig 11. K_{or} vs. σ_v' relationship for nonvirgin reloading(Model No. 3)

고 있다. 그리고 단주기의 경우에는 두값이 거의 일치하지만, 반복회수가 증가할수록 m_r값이 작아지므로 계산치와 실측치의 차이는 큰 폭으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

한편으로, 특이한 점은 반복회수가 20회를 상회할 경우에 σ_v'가 2.7~2.8kgf/cm² 부근에서 재재하곡선이 처녀재하곡선에서 벗어남을 Fig.2에서 볼 수 있었다. 즉, 이부근에서 수평응력은 처녀재하시의 경우보다 감소하였다는 것이다. 이 원인은 다음과 같은 개념으로 추론이 가능할 것으로 생각된다.

재하를 받는 시편이 등방성인 완전탄성체로 거동한다고 가정하면 포와송비 μ(Poisson's ratio)는

$$\mu = \frac{K_o}{1+K_o} \tag{5.1}$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서 K_o는 재재하시의 정지토압계수 K_{or}을 대입하여 포와송비를 계산하였으며, 이것을 D_r이 50% 일 경우에 σ_v'와 함께 나타낸 것이 Fig.12이다.

이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 이것은 $K_{or}-\sigma_v'$관계의 거동과 비슷한 양상을 보여주며, 반복회수가 증가할수록 포와송비는 크게 계산되었다. 그러나 반복회수가 20회인 경우에, 그림에서 잘 나타나지 않으나, σ_v'가 2.7kfg/cm²를 초과하는 범위에서는 1회 때의 값보다 작은 포와송비의 값을 나타내고 있다. 그리고 Fig.9에서 보면, 전반적으로 반복회수가 증가하면 체적이 감소하였지만 위의 응력범위에서는 재하중 임에도 불구하고 흙의 체적이 팽창하는 것을 알 수 있다. 이러한 사실들을 미루어 보아 K_{or}값이 K_{on}보다 작게 산출될 수도 있음을 알 수 있다.

(3) 제 하

반복회수에 따른 제하특성을 살펴보기 위하여 Fig.2에서 보면, 연직응력의 초기부분에서 반복회수가 증가할수록 수평응력이 증가함을

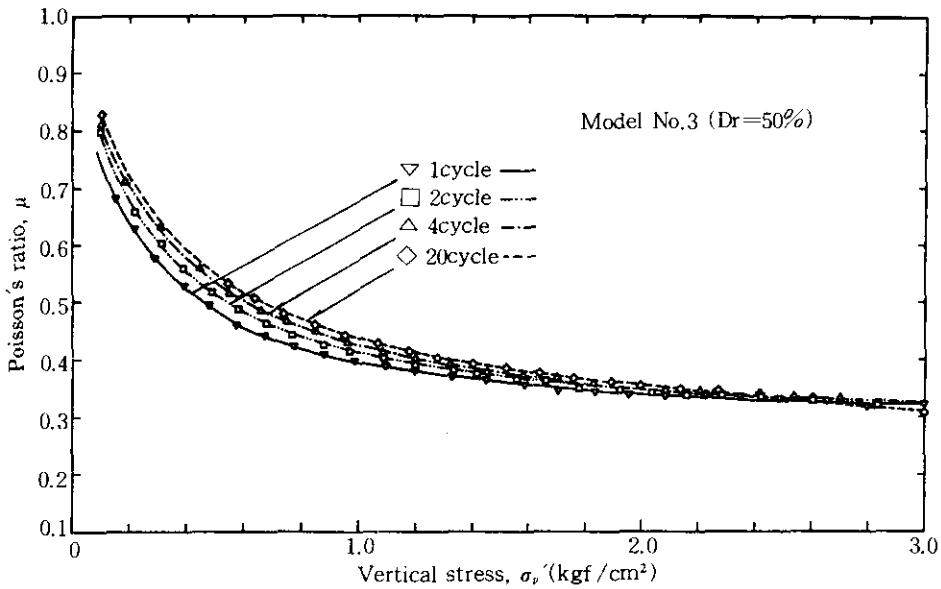

Fig 12. μ vs. σ_v' relationship for nonvirgin reloding (Model No.3)

알 수 있다. 그러나 이 외에의 부분에서는 반복회수가 증가함에 따라 수평응력은 약간씩 증가하지만, 반복회수가 20회에 이르러서는 오히려 포와송비는 작게 나타났다.

제하특성은 $K_{ou}=K_{on}(OCR)^{\alpha}$의 관계식에서 지수 α의 변화로부터 찾을 수 있다. Fig.13은 $\log(K_{ou}/K_{on})$과 $\log(OCR)$의 관계를 나타낸 것이며, Fig.14는 Fig.13에서 직선의 기울기인 지수 α를 구하여 반복회수와 함께 비교한 것이다. 그림에서 보면, 단주기의 경우와 같이 K_{ou}/K_{on}과 OCR은 일정한 관계로 변하며, 지수 α의 상대밀도가 클수록 크게 산출되고, 대체로 반복회수가 증가할수록 α값은 증가하며, 그 증가율은 반복횟수가 증가할수록 감소한다.

한편, $(K_{ou})_{limit}$값은 K_p값을 비교하기 위하여 Fig.2를 살펴보면, 단주기의 경우와 비슷하게 $(K_{ou})_{limit}$값이 K_p값을 초과하고 있다. 이러한 원인은 단주기에서 지적된 것 이외에도 반복회수에 따라 간극비가 감소한 이유 등을 들 수 있다.

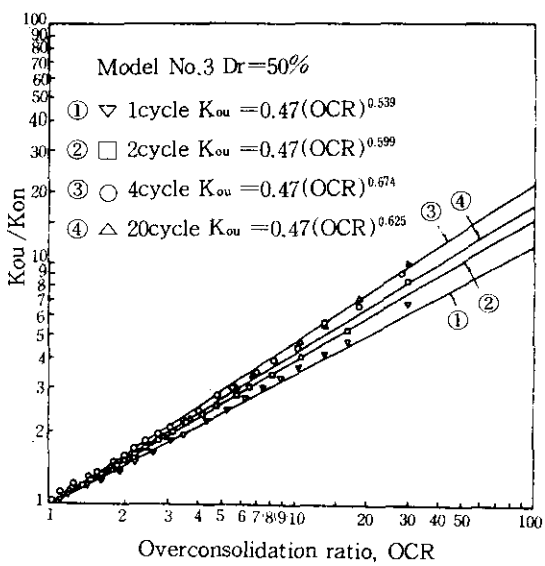

Fig 13. K_{ou}/K_{on} vs. OCR relationship for model No.3

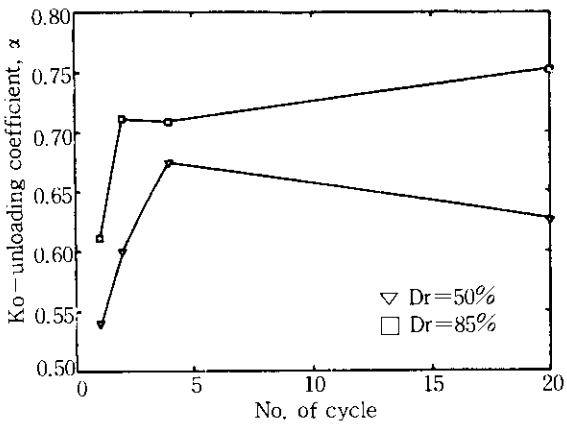

Fig 14. α vs. No. of cycle for model No.3

5.2 최대선행응력을 초과하는 반복 재하/제하

최대선행응력을 초과하는 반복 재하/제하시 모래의 특성을 관찰하기 위하여 3개의 응력모형, 즉 시험모형 No. 4, 5 및 6을 채택하였다. 여기서 변형의 특성은 전자의 5.1절의 경우와 유사한 특성이므로 생략하였다.

(1) 재 하

최대 선행연직응력을 초과하는 연직응력이 작용할 경우 처녀재하의 경우와 같이 K_{on}선은 직선으로 나타났으며(Fig.3~5), K_{on}값들은 처녀재하의 경우와 비슷하였다. 3단계의 응력경로에 대해 각각 20회씩의 반복 재하/제하를 시킨 시험모형 No.6에서는 D_r=50%에 대해 3단계에서, D_r=85%에 대해 2단계 후반부터 약간씩 곡선형태로 나타나지만 거의 직선으로 볼 수 있다.

(2) 제 하

최대선행연직응력을 초과하고 응력경로를 달리하는 경우에 지수 α의 변화를 관찰하기 위하여 시험모형 No.4, No.5 및 No.6에 대하여 Fig.13과 같이 K_{ou}/K_{on}-OCR의 관계 곡선으

Table 9 The exponent α for unloading paths

Model No.	No. of cycle	$\sigma_v'{}_{,max}$	$\sigma_v'{}_{,min}$	OCR_{max}	$\alpha^{(a)}$	$K_{on}{}^{(a)}$	Remarks[(a)]
4	1	1.0	0.1	10.0	0.707 (0.723)	0.45 (0.37)	
	2	1.6	0.3	5.3	0.702 (0.695)		
	3	3.0	0.7	4.3	0.628 (0.662)		
5	1	1.5	0.1	15.0	0.529 (0.591)	0.46 (0.37)	$\sin\phi$= 0.605 (0.668)
	2	2.0	1.0	2.0	0.593 (0.699)		
	3	3.0	1.8	1.7	0.567 (0.607)		
6	20	1.0	0.1	10.0	0.676 (0.679)	0.43 (0.35)	
	40	2.0	0.8	2.5	0.636 (0.722)		
	60	3.0	1.8	1.7	0.514 (0.605)		

Note.(a) : The value in parenthesis is for Dr of 85%

로부터 기울기 α를 구하여 Table 9에 각각의 시험모형별로 α값을 수록하였다. 여기서 $\sigma_v'_{max}$는 재하직전(시작점)의 연직응력이며, $\sigma_v'_{min}$은 재하 종료시의 연직응력을 나타낸다. 이 표에서 보면, 상대밀도 50 및 85%에서 각각 K_{on}값은 비슷하나 지수 α값은 반복회수에 따라 일정한 상관성을 찾아 볼 수 없다. 그 이유는 반복회수가 증가함에 따라 간극비가 변하기 때문이다.

한편, 시험모형 No.6에서 α와 반복회수와의 관계를 살펴보면, 3단계의 응력경로마다 각각 20회씩 반복 재하/제하한 경우에는 지수 α값이 반복응력과 반복회수가 증가함에 따라 줄어드는 경향이 있다.

(3) 재재하

실측한 m_r값을 Mayne & Kulhawy[4]가 제안한 식(2.5)에 대입하여 계산한 K_{or}값과 함께 대표적으로 시험모형 No.5의 D_r=50%에 대하여 Fig.15에 나타내어 비교하였다. 시험모형 No.4, No.5 및 No.6에 대한 비교에서, 계산치의 K_{or}

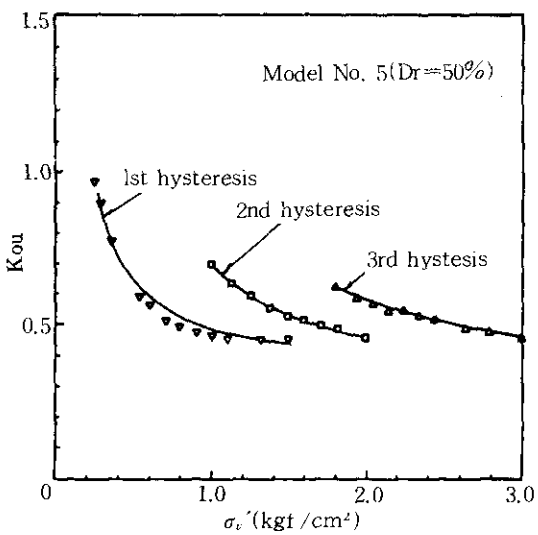

Fig 15. Kor vs. σ_v' relationship for Model No.5

과 실측치는 비교적 좋은 일치를 보여주고 있다. 그리고 K_{or}은 연직응력 σ_v'값이 증가함에 따라 급격히 감소하고, 하중의 반복회수가 늘어날수록 증가함을 볼 수 있다.

5.3 최대 선행응력 내의 반복 재하/ 제하

최대 선행응력 내에서 연직응력을 반복하여 재하/제하하는 경우에 K_o-응력의 특성을 관찰하기 위하여 첫째, 최대 선행 연직응력과 동일하게 최대재하응력으로 취하고 제하 연직응력의 최소점을 달리하여 6회의 반복 재하/제하하는 경우를 시험모형 No.7로 선택하였다. 둘째, 최대 선행 연직응력보다 작은 연직응력을 각각 최대와 최소점으로 취하여 5회의 반복 재하/제하하는 경우를 시험모형 No.8로 선택하였다. 마지막으로 시험모형 No.8의 경우와 유사하게 응력경로를 선정하였으나 각각의 응력 주기마다 10회씩 반복하여 재하/제하하여 총 5가지 응력주기에 대해서 모두 50회 반복하중을 가한것이 시험모형 No.9이다.

(1) 재 하

처녀재하는 최대 선행 연직응력을 초과하지 않는 연직응력을 작용시킬 경우로 정의하였으므로 위의 3경우에서 1단계 재하는 모두 처녀재하에 해당하며, 여기서는 설명을 생략한다.

(2) 제 하

연직응력이 최대 연직응력을 초과하지 않는 범위에서 응력경로가 움직이므로, 이 경우는 Seed & Duncan[11], Ou[9] 및 정[18]이 제안한 응력모형과 함께 비교가 가능할 것이다. 상기의 연구자들에 의해 제안된 비처녀 제하시의 정지토압계수 K_{ou}'는 식(5.2)와 같다. 즉,

$$K_{ou}' = K_{on}(OCR)^{\alpha'} \qquad (5.2)$$

이다. 여기서

K_{ou}'=비처녀 재하인 경우에 $\frac{\sigma_v'}{\sigma_h'}$의 값

$OCR_n=\frac{\sigma_{v,RMLP}'}{\sigma_{v,Ess}'}$ (Fig.2.1 참조)

이 관계식으로부터 α^*를 구하였다. 만약 재재하선이 K_{on}선과 일치하지 않을 경우에는 재재하선을 평행이동시켜 조정하는 Seed & Duncan[11]의 방법에 따라 구하였다.

이들의 실측치와 Seed & Duncan이 제안한 식(2.18)에 의한 계산치를 Talble 10에서 비교하여 나타내었다. 여기서, OCR_{max}는 모든 응력경로중에서 최대와 최소치의 연직응력의 비이며, OCR_n은 해당되는 제하경로에서 두 값의 비이다.

Table 10에서 보면, 연직응력이 최대선행응력으로 복귀하여 반복하는 시험모형 No.7의 경우에는 반복회수에 따라 α^*값은 거의 변함이 없으며, 실측치와 계산치는 대략 비슷하다. Fig.16에 나타낸 α^*값은 시험모형 No.8에 대한 실측값으로, OCR_n에 무관하게 반복회수가 증가할수록 대체로 증가하는 경향을 보여주며, 이 값은 계산치와의 사이에 약간의 차이가 있음을 Table 10에서 볼 수 있다. 그리고 시험모형 No.9에 대한 α^*의 실측치는 상대밀도가 50%일 때 α^*값은 반복회수와 무관하게 대체로 일정한 값으로 나타나며, 상대밀도가 85%일 때는 반복회수가 증가함에 따라 같이 증가하는 경향을 보이고 또한 계산치와는 약간의 차이가 있음을 알 수 있었다.

Table 10 The exponent α^* value for model No.7, 8 and 9

Model No.	No. of cycles	OCR_{max}	OCR_n	Measured[(a)] α^*	Calculated[(a)] α^*	Remarks
7	1	60	60.0	0.556 (0.675)	0.562 (0.672)	$\alpha^*=\alpha$
	5		4.3	0.583 (0.667)	0.599 (0.663)	
8	1	30	30.0	0.547 (0.593)	0.590 (0.607)	$\alpha^*=\alpha$
	2		5.6	0.486 (0.573)	0.554 (0.627)	
	3		3.1	0.547 (0.634)	0.582 (0.625)	
	4		2.3	0.584 (0.724)	0.561 (0.626)	
	5		1.7	0.923 (1.032)	0.505 (0.601)	
9	10	30	28.0	0.596 (0.605)	0.685 (0.714)	$\alpha^*=\alpha$
	20		5.0	0.553 (0.602)	0.660 (0.683)	
	30		2.9	0.665 (0.596)	0.654 (0.644)	
	40		2.0	0.578 (0.789)	0.615 (0.610)	
	50		1.7	0.594 (0.913)	0.584 (0.570)	

Note.(a) : The value in parenthesis is for Dr of 85%

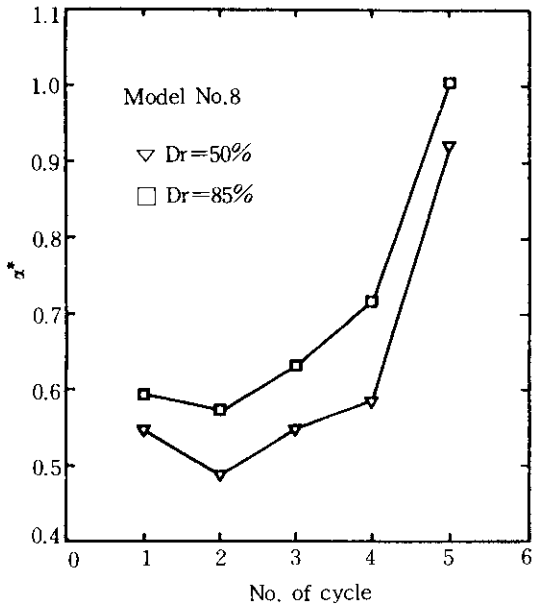

Fig 16. α^* vs. No. of cycle for model No.8

(3) 재재하

비처너 재재하 시의 응력경로의 기울기는 Seed & Duncan[11], Ou[13] 및 정[18]에 의하면, Fig.1에서 RMUP(recent minimum unloading point)와 R점을 잇는 선을 기울기로 하였다. 여기서, 이 기울기는 m_r^*의 계산치로, 실험에서 나타난 기울기를 실측치의 m_r^*로 정의하여 Table 11에서 비교하여 나타내었다.

이 표에서 보면, 시험모형 No.7의 경우에는 R점이 최대 연직응력이므로 모든 경우에 계산치와 실측치는 정확히 일치하였다.

시험모형 No.8의 경우에는 두 값들은 다소 차이를 보였지만 대략 일치함을 볼 수 있다. Fig.17은 반복회수에 따른 m_r^*의 실측치를 나타낸 것인데, 반복회수가 증가함에 따라 점차 감소하다가 3회의 반복회수에 이르러서는 거의 일정한 값으로 되며, 상대밀도가 작은 경우가 더 큰 m_r^*값을 보여주고 있다.

5단계의 응력경로마다 10회씩 반복주기를

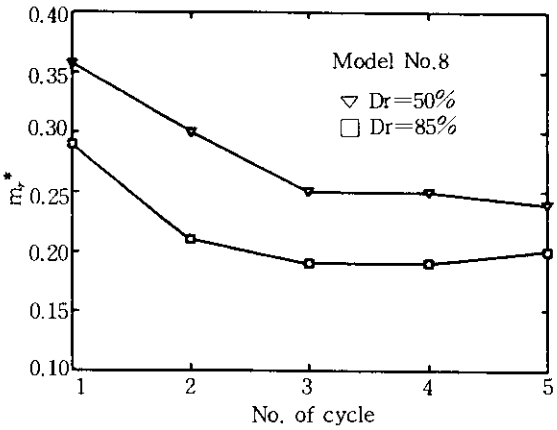

Fig 17. m_r^* vs. No. of cycle relationship for model No.8

가한 시험모형 No.9의 경우에는 Fig.8에서 보는 바와 같이 재재하선이 K_{on}선을 벗어나고 있다. 재재하선이 K_{on}선을 벗어난 요인은 응력-변형 곡선에서 10회의 반복재하로 인하여 최종 재하값의 부근에서 체적이 약간 팽창된 까닭으로 생각되었다.[18] 즉, 이러한 현상은 시험모형 No.6의 경우에서도 볼 수 있었다. 시험모형 No.9의 경우에는 m_r^*의 실측치와 계산치가 거의 일치함을 Table 11에서 관찰할 수 있다. 그리고, Fig.17은 반복회수에 따른 m_r^*값의 비교인데, 대체로 반복회수에 따라 m_r^*값의 변화가 예민하지 않으며, 상대밀도가 작을수록 큰 값을 나타내고 있다.

6. 결 론

K_o상태에서 다주기 재하/제하시의 응력이력에 따른 수평응력의 변화특성을 관찰하기 위하여 실제 현장에서 예상되는 7가지 시험모형을 선정하였고, K_o조건을 크게 만족할 수 있도록 특별히 고안한 압밀링형태의 K_o-시험기를 제작하여 실내 건조된 모래에 대하여 실험한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 동일한 재하/제하 응력의 반복 K_o-시험에서 K_{on}값은 거의 변함이 없이 일정하다.

Table 11 The nonvirgin reloading coefficient m_r^* value

Model No.	No. of cycles	OCR_{max}	OCR_n	Measured[(a)] m_r^*	Calculated[(a)] m_r^*	Remarks
7	1	60	60.0	0.370 (0.280)(c)	0.370 (0.280)	$m_r^*=m_r$
	5		4.3	0.260 (0.200)	0.260 (0.200)	
8	1	30	30.0	0.360 (0.290)	0.360 (0.290)	$m_r^*=m_r$
	2		5.6	0.300 (0.210)	0.300 (0.210)	
	3		3.1	0.250 (0.190)	0.280 (0.210)	
	4		2.3	0.250 (0.180)	0.280 (0.210)	
	5		1.7	0.240 (0.160)	0.290 (0.210)	
9	10	30	28.0	0.280 (0.220)	0.260 (0.210)	
	20		5.0	0.220 (0.180)	0.220 (0.160)	
	30		2.9	0.210 (0.180)	0.210 (0.180)	
	40		2.0	0.200 (0.210)	0.210 (0.180)	
	50		1.7	0.210 (0.200)	0.200 (0.180)	

Note.(a) : The measured value is the slope of linear regression line.
(b) : The calclated value is the secant slope.
(c) : The value in parenthesis is for D_r of 85%

재하시에는 단주기의 경우와 같은 관계식이 역시 성립하며, 지수 α는 상대밀도가 클수록 크게 산출되고, 반복회수가 증가할수록 대체로 증가한다. 재재하시에 재재하계수 m_r은 반복회수가 증가할수록 감소하고, 상대밀도가 클수록 크다.

2) 최대선행응력을 초과하는 반복 재하/제하 K_o-시험에서 재하시에는 처녀재하시와 비슷하다. 제하시의 토압계수는 처녀제하시의 관계식으로 표시할 수 있지만, 지수 α는 반복회수에 따라 감소하는 경향이 있고 상대밀도가 클수록 대체로 크다. 재재하시의 정지토압계수 K_{or}은 처내재재하시의 특성과 유사하며, 하중의 반복회수가 늘어날수록 증가함을 보인다.

3) 최대선행연직응력 내의 반복 재하/제하 K_o-시험인 경우, 제하정지토압계수 K_{ou}'는 $K_{ou}'=K_{on}(OCR)^{\alpha^*}$의 관계를 보이며, 지수 α^*는 대체로 하중의 반복회수가 증가할수록 증가하는 양상을 나타낸다. 재재

하계수 m_r*는 초기 1~2회 반복에서 완만히 감소하다가 3회 반복 이후부터 대체로 일정한 값으로 보이며, 상대밀도가 작을수록 큰 값을 나타낸다.

기존의 K_o-이력모형들은 본 실험결과와 상당한 차이가 있으므로 차후 더 많은 실험을 통하여 개선해야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Al-Hussaini, M. M. and Townsend, F.C. (1975) "Stress Deformation of Sand under Ko Conditions," Proceedings, 5th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1,Buenos Aires, Argentina, pp.125-136.
2. Bishop, A.W., and Henkel, D.J.(1957) "The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test," Arnold, London,
3. Campanella, R.G. and Vaid, Y.P. (1972) "A Simple Ko Triaxial Cell," Canadian Geotechnical Journal, Vol.9, No.3, pp.249-260.
4. 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
5. Ofter, 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.
6. Ofter, Z. (1981, 1982) "Laboratory Instrument for Measuring the Lateral Soil Pressure and Swelling Pressure, ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol. 4, No. 4, pp. 177-182.
7. Ofer. Z. (1982) "Laboratory Ko Testing of Choesionless Soil," The Civil Engineering in South Africa, Vol. 24, No. 10, pp.533-545
8. Ofer, Z. (1984) "Laboratory Determination of Ko and Comparison with Prototype Soil Obervations," 4th Australia New Zealand Conference on Geotechanics, Perth, pp.14-18.
9. Ou, Chang-Yu (1988) "Finite Element Analysis of Compaction-Induced Stresses and Deformation," Ph. D. Thesis, Stanford University.
10. Seed, R.B. (1983) "Soil-Structure Interaction Effects of Compaction-Induced Stress and Deformations," Ph. D. Thesis, Univ. of Califonia at Berkeley, 425 p.
11. Seed, R.D. and Duncan, J.M. (1983) "Soil-Structurt Interaction Effects of Compaction-Induced Stresses and Deformations," Geotechnical Engineering Research Report No. UCB/GT/83-06, Univ. of california, Berkeley, CA.
12. Tatsuoka, F. and Ishihara, K. (1974) "Drained Deformation of Sand Under Cyclic Stresses Reversing Direction," Soils and Foundations, Vol. 14, No. 3, pp. 51-65.
13. Tatsuoka, F. (1974) "Deformation Characteristics of Snad, Ph. D.Dissertation, univ. of Tokyo.
14. Worth, 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.
15. Wright, S.G. (1969) "A Study of Slope Stability and Undrained Shear Strength of Clay Shales," Ph. D. Thesis, University of California at Berkeley.
16. 송무효 (1991) "다주기 K_o-재하/제하에 의한 건조 모래의 거동", 동아대학교, 공학박사 학위 논문.
17. 송무효, 정성교, 남선우, 정진교 (1994) "K_o-재하/제하에 의한 건조모래의 거동(Ⅰ) : 단주기 시험", 한국지반공학회지, 제10권제4호 pp. 83~102.
18. 정성교, 정인준, 김명모 (1991) "뒷채움 다짐에 의한 횡방향토압," 대한토목학회 논문집, 제 11권, 제2 호, pp.51-64.

(접수일자 1994. 8. 16)