

이방압밀이 반복하중을 받은 과압밀점토의 비배수전단강도에 미치는 영향

Effects of Anisotropic Consolidation on the Postcyclic
Undrained Shear Strength of an Overconsolidated Clay

강 병 희*¹
Kang, Byung-Hee
윤 형 식*²
Yoon, Hyoung-Suk
박 동 진*³
Park, Dong-Jin

Abstract

The effects of consolidation stress history including consolidation stress ratio, OCR and cyclic loading with drainage on the undrained shear strength of cohesive soil were investigated. The ratio $(S_u/\sigma'_{vc})_{CKOU}/(S_u/\sigma'_{vc})_{CU}$ was observed to increase with increasing OCR. The equation (1) in this paper by Mayne(1980) for the undrained shear strength of the overconsolidated clay and the equation (4) by Yasuhara(1994) for the postcyclic shear strength were found to be relatively well applicable in the case of K_0 -consolidated. It was also suggested that the value of the critical state pore pressure parameter Λ_c in these two equations for the in situ shear strength of lightly overconsolidated clay(OCR<3) be obtained by the standard consolidating test.

요 지

압밀응력비, 과압밀비 및 반복재하를 포함하는 압밀응력이력이 점성토의 비배수전단강도에 미치는 영향에 관해서 연구하였다. $(S_u/\sigma'_{vc})_{CKOU}/(S_u/\sigma'_{vc})_{CU}$ 의 강도비는 과압밀비가 증가함에 따라 증가됨이 관찰되었다. Mayne(1980)이 과압밀점토의 비배수전단강도를 추정하기 위해 제안한 식(1)과 Yasuhara(1994)가 반복재하로 인해 발생된 간극수압이 소산된 후의 비배수전단강도를 구하기 위해 제안한 식(4)는 K_0 압밀상태에서도 비교적 잘 적용될 수 있음을 알 수 있었다. 또한 이들 두 식 중의 원위치전단강도를 위한 한계상태간극수압정수 Λ_c 값은 조금 과압밀된 점토의 경우(OCR<3) 표준압밀시험에 의해서 구할 것을 제안하였다.

*¹ 정희원, 인하대학교 공과대학 토목공학과 교수

*² 정희원, 인하공업전문대학 토목공학과 부교수

*³ 정희원, 두산엔지니어링(주) 지반공학팀

Keywords : Saturated cohesive soil, Stress anisotropy, Pore pressure parameter λ_v , Cyclic loading, Undrained shear strength, OCR

1. 서 론

넓은 평지에서 자연상태로 퇴적된 연약점토 지반은 K_0 -응력상태로 이방압밀되어 응력유도 이방성(stress-induced anisotropy)을 나타내고 있으며 이 응력유도이방성은 압밀응력비($K_r = \sigma'_{vc} / \sigma'_{vc}$), 중간주응력 및 중간주응력면의 회전 등에 의해 크게 좌우된다. 그러나 재하 및 제하의 복잡한 응력이력을 받은 점토나 노령화된 점토(aged clay)의 경우 원위치에서는 K_0 -응력상태가 아닌 다른 압밀응력비를 갖는 응력상태하에 존재할 수도 있다(Mayne, 1985). 정지토압계수 K_0 는 정규압밀응력상태에서는 1.0보다 작으나 심하게 과압밀된 경우에는 1.0보다 크게 되므로 원위치의 연약점토지반은 압밀응력이력에 따라 서로 다른 이방압밀상태하에 있게 된다.

Mayne(1985)이 K_0 -이방압밀 및 등방압밀 삼축압축시험에 대한 수많은 결과를 분석한 결과 정규압밀점토의 경우 K_0 -이방압밀점토의 비배수전단강도비(S_u / σ'_{vc})는 등방압밀점토의 0.7~1.15배 범위내에 있으며 초기압밀응력비($K_r < 1.0$)로서 일정하게하여 과압밀시킨 점토의 비배수전단강도비(S_u / σ'_{vc}) 역시 등방압밀점토의 0.75~1.0배 범위내에 있음을 알았다. 그러나 실제로 과압밀점토의 경우 정지토압계수는 과압밀비에 따라 크게 증가되므로 과압밀점토에 관한 Mayne의 연구결과는 원위치상태와 큰 차이가 있음을 쉽게 예측할 수가 있다.

정규압밀상태에서 연직방향의 유효최대주응력으로 정규화한 비배수전단강도에 대한 이방압밀강도와 등방압밀강도의 비 $(S_u / \sigma'_{vc})_{CAU} / (S_u / \sigma'_{vc})_{CU}$ 는 1.0보다 작으며 압밀응력비가 클수록 증가하나 평균압밀응력으로 정규화한

강도비 $(S_u / \sigma'_{vc})_{CAU} / (S_u / \sigma'_{vc})_{CU}$ 는 압밀응력비가 클수록 오히려 감소하는 경향을 보임으로써 이방압밀에 의한 점토의 응력유도이방성을 나타내었다(강과 윤, 1994).

또한 포화점토지반은 종종 지진, 기계진동, 파도, 바람, 말뚝 타입, 교통하중 및 발파 등에 의해 반복하중을 받게된다. 포화점토지반이 반복하중을 받게되면 과잉간극수압이 발생하게 되어 유효응력의 감소와 토립자의 구조가 파괴되므로 비배수전단강도와 강성이 줄어들게 된다(Matsui 등, 1980; Yasuhara 등, 1992). 그러나 발생된 간극수압이 소산되고 배수되면 오히려 강도가 증가하기도 한다(Matsui 등, 1980).

Mayne(1980)은 한계상태개념을 이용하여 유효상재응력으로 정규화한 등방과압밀비배수전단강도(S_u / σ'_{vc})_{ca}와 등방정규압밀비배수전단강도(S_u / σ'_{vc})_{cu}와의 비를 (OCR)^{0.6}로 나타내었으며 한계상태간극수압계수 λ_v 는 등방팽창지수 및 등방압축지수로 나타내어진다. 그리고 Yasuhara(1994)는 이 Mayne식을 더욱 확장하여 반복하중을 받은 점토의 강도에 대한 식을 제안하였다. 이들 Mayne식과 Yasuhara식은 등방압밀점토에 대한 삼축압축시험 결과를 근거로 하였다.

따라서 본 논문에서는 이방과압밀점토에 대해 Mayne식과 Yasuhara식의 적용가능성을 검토하고 압밀응력비, 과압밀비 및 반복재하를 포함한 압밀응력이력이 포화점토의 비배수전단강도에 미치는 영향에 관해서 연구하였다.

2. 비배수전단강도

2.1 과압밀점토의 비배수전단강도

응력이력이 단순히 재하 및 제하를 받아 등방과압밀된 점토의 응력경로는 동일한 함수비에서 정규압밀점토가 도달한 한계상태선 상의 등

일한 파괴점에 도달한다는 가정하에 과압밀점토와 정규압밀점토의 비배수전단강도비를 아래와 같이 나타낼 수 있다(Mayne, 1980).

$$\frac{\left(\frac{S_u}{\sigma'_{vo}}\right)_{oc}}{\left(\frac{S_u}{\sigma'_{vo}}\right)_{nc}} = (OCR)^{\Lambda_0} \quad (1)$$

여기서

σ'_{vo} : 유효상재응력

Λ_0 : 한계상태 간극수압정수로서 $1 - \kappa / \lambda$ 로 표시됨

κ, λ : 비체적-압축응력(log눈금) 선상의 등방팽창 및 압축지수

한편 Schofield와 Wroth(1968)는 정규압밀점토에 대한 비배수전단강도를 유효응력항으로서 아래와 같이 나타내었다.

$$\left(\frac{S_u}{\sigma'_{vo}}\right)_{nc} = \frac{3 \sin \phi' \exp(-\Lambda_0)}{3 - \sin \phi'} \quad (2)$$

위의 식(1)과 식(2)를 이용하여 과압밀점토에 대한 비배수전단강도비를 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{S_u}{\sigma'_{vo}}\right)_{nc} = \frac{3 - \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} (e^{-\Lambda_0} OCR)^{\Lambda_0} \quad (3)$$

한편, 한계상태 간극수압정수 Λ_0 는 등방압밀시험에서의 압축지수(C_c)와 팽창지수(C_s)로써 나타내어지는 정수이다. 그러나, Atkinson과 Bransby(1978)는 κ / λ 비를 일반 표준압밀시험에서 구한 팽창지수(C_s)와 압축지수(C_c)의 비 즉 C_s / C_c 로 나타내어도 큰 차이가 없으므로 이를 이용해도 무방하다고 하였다. 점토와 실트에 대한 Λ_0 의 이론적인 값은 0~1.0 범위 내에 있다. 실제로 세계 각지의 96개의 세립토에 대한 Λ_0 정수값은 모두 0.13~0.998 범위 내에 있으며 평균 0.64로서 일반적으로 예민비가 클수록 큰 값을 보이고 있다(Mayne, 1980).

2.2 반복하중을 받은 점토의 비배수전단강도

Yasuhara(1994)는 식(1)을 이용하여 반복

하중을 받은 점토의 비배수전단강도에 관한 식을 제안하였다. 즉 반복재하에 의해 발생한 과잉간극수압이 소산됨에 따라 과압밀되고 이로 인해 증가된 비배수전단강도를 아래와 같이 나타내었다.

$$\frac{S_{u,cy}}{S_{u,nc}} = \left[\frac{1}{1 - \frac{\Delta u}{p'_i}} \right] \exp\left(\frac{\Lambda_0 C_s / C_c}{1 - C_s / C_c}\right) \quad (4)$$

여기서

$S_{u,cy}$: 반복하중을 받은 후 과잉간극수압이 소산된 점토의 비배수전단강도

$S_{u,nc}$: 정규압밀점토의 비배수전단강도

Δu : 비배수상태에서의 반복재하에 의해 발생된 과잉간극수압

p'_i : 반복하중 이전의 초기압밀응력

한편 배수상태에서 반복하중을 받아 간극비가 줄어들음으로서 증가된 비배수전단강도에 대해 Yasuhara(1994)는 아래 식(5)와 같이 나타내었다.

$$\frac{S_{u,cy}}{S_{u,nc}} = \left\{ \exp\left[\frac{\Delta e}{0.434 C_s}\right] \right\} \exp\left(\frac{\Lambda_0 C_s / C_c}{1 - C_s / C_c}\right) \quad (5)$$

여기서,

$S_{u,cy}$: 배수상태에서 반복하중을 받은 점토의 비배수전단강도

Δe : 배수상태에서의 반복재하로 인한 간극비의 변화량

3. 실험

3.1 시료 및 시험종류

사용된 시료는 인천시내 지하철 현장에서 채취한 점성토로서 이 시료를 0.1N 염화칼슘용액 속에 넣고 3일간 충분히 교반하여 수화시킴으로서 면모구조를 형성하도록 하였다. 이렇게 준비된 현탁액을 실내의 퇴적조에 넣고 약 160kPa의 응력하에서 1개월 동안 압밀시켰다. 이 시료는 모두 200번체를 통과한 크기로서 점토크기($2\mu m$ 이하)의 함량은 20%정도이고 액성한계 53%, 소성지수 25, 함수비 $38 \pm 1\%$, 토립자비중 2.74이고 통일분류법에 의해 CH로

분류된 점토시료이다.

수행한 시험은 압밀-비배수삼축압축시험으로서 공시체의 직경과 높이는 각각 3.5cm 및 7.9cm이다. 그리고 압밀응력비는 1.0, 0.7, 0.4 및 K_0 이고 과압밀비는 1, 2 및 3이 되도록 하여 압밀시킨 후 반복하중을 가한 시험과 가하지 않은 시험을 포함해서 표 1에서 나타낸 바와같이 총 24개의 시험을 수행하였다. 시험번호의 예로서 S-0.7-2 및 C-0.7-2 시험에서 S와 C는 각각 반복하중을 가하지 않은 시험과 가한 시험을 나타내며, 0.7과 2는 각각 압밀응력비와 과압밀비를 나타낸다.

본 연구에서 사용된 시험기는 축차응력, 축변형률, 구속응력, 간극수압 및 체적변형률 등이 시간에 따라 자동입력되고, 연직압과 구속압을 자동제어할 수 있는 자동화된 반복재하삼축압축시험기이다.

3.2 압밀과정

그림 1에서 보이고 있는 바와 같이 압밀응력비가 1.0, 0.7 및 0.4가 되도록 하여 유효연직응력이 170, 340 및 510kPa이 되도록 증가시켜 압밀시킨 후 최종연직응력이 170kPa이 되도록 다시 감소시켜 과압밀비가 각각 1, 2 및 3이 되도록 하였다. 그러나 K_0 -압밀시험인 경우에는 압밀응력을 가하는 과정은 다른 시험과 동일하나 다만 체적변형률과 축변형률이 동일하게 되도록 연직압밀응력을 증가시켜 수행하였다.

최대연직압밀응력을 510kPa 가한 후 170kPa로 다시 제거시키는 과정에서의 정지토압계수는 그림 2에 나타낸 바와 같으며 유효연직응력이 510kPa인 정규압밀상태에서는 0.46이고 170kPa인 과압밀비가 3인 경우에는 0.92이다. 이와 같은 경향은 Lo와 Chu(1991)가 사질토에 대해서 행한 시험결과와 유사하다.

이상과 같이 압밀응력이력을 가진 공시체에 $\pm 5kPa$ 의 반복응력을 20초 주기로 1,000번 가한 후 발생된 과잉간극수압의 증가량을 측정하고 이를 완전히 소산시킴으로서 다시 압밀시켰다.

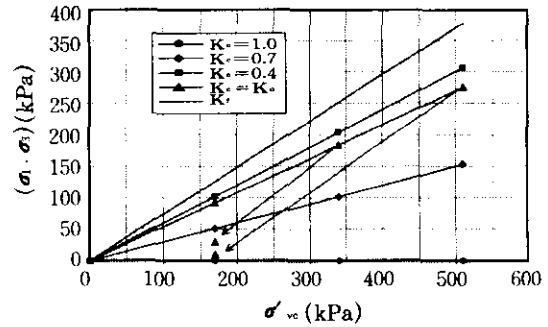


Fig. 1 Stress path during consolidation

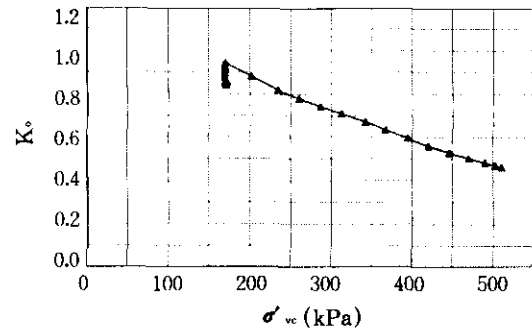


Fig. 2 Increment of K_0 value in overconsolidated clay during unloading

4. 실험결과 및 토론

4.1 압밀 및 반복재하시의 거동

반복재하 중에 발생하는 과잉간극수압을 압밀응력비가 1.0 및 K_0 인 경우에 대해서 각각 그림 3과 4에 나타내었다. 등방압밀된 공시체가 반복하중을 받게되면 과압밀비가 1인 정규압밀상태의 경우에는 반복횟수가 증가할수록 과잉간극수압은 증가하나 과압밀비가 2 및 3인 경우에는 발생하는 과잉간극수압은 부압으로서 계속해서 감소하고 그 감소폭은 과압밀비가 클수록 더 크다. K_0 -이방과압밀 공시체의 경우에는 초기에 부의 간극수압이 발생하나 반복횟수가 증가함에 따라 등방압밀시료와는 달리 오히려 증가하는 모양을 보이고 있다. 반복횟

수에 따른 간극수압의 증가율은 정규압밀점토의 경우와 비슷한 경향을 띄고 있다. 따라서 반복재하중에 의해서 발생하는 과잉간극수압의 차이는 압밀시의 다른 응력경로에 의해 발달한 점토구조의 차이를 나타낸다고 볼 수 있다. 과압밀점토의 경우 반복재하시에 부의 간극수압이 발생하는 것은 점토시료의 다일러턴시 경향 때문이다(Simons, 1960).

그림 5에서는 반복하중을 가하지 않는 시험에서 압밀에 의한 공시체의 체적감소를 나타내었다. 그림에서 과압밀비와 압밀응력비가 증가할수록 압밀중에 일어나는 체적감소는 증가함을 볼 수 있다. 이는 과압밀비와 압밀응력비가 클수록 작용한 전체압밀응력이 더 크기 때문이다.

반복재하에 의해 발생된 과잉간극수압의 소산으로 인한 체적변화는 미소하기는 하나 정규압밀점토의 경우에는 압밀응력비의 크기에 관계없이 모두 감소하는 경향을 보였으며 과압밀점토의 경우에는 일정한 경향을 찾기가 어려울 정도로 너무 소량이었다.

4.2 비배수전단시험

각 시험에서 계획된 응력경로에 따라 압밀시킨 후 비배수전단시험을 행한 결과와 압밀 후 $\pm 5\text{kPa}$ 의 반복응력을 1,000번 가하고 이때 발생된 과잉간극수압을 소산시킨 후 비배수전단시험을 행한 결과를 표 1에 수록하였다.

4.2.1 응력-변형률 관계

연직압밀응력으로 정규화한 축차응력과 변형률 곡선을 과압밀비가 1 및 3인 경우 각각 그림 6과 7에 나타내었다. 축차응력은 축변형률이 증가할수록 모두 증가하며 최대축차응력은 압밀응력비와 과압밀비가 증가할수록 증가하고 압밀응력비의 차이에 따른 최대축차응력의 차이도 과압밀비가 클수록 커지는 경향을 나타내고 있다. 이는 압밀응력비와 과압밀비가 클수록 수평압밀응력이 증가하므로 전체 압밀응력과 이에 따른 체적감소가 크게되고 이에

따라 강도가 증가하기 때문이다. 그림 7에서 $C-K_0-3$ 인 경우 압밀후의 K_0 값이 0.92로 증가되므로서 압밀응력비가 1.0인 등방압밀곡선에 접근하고 있음을 볼 수 있다.

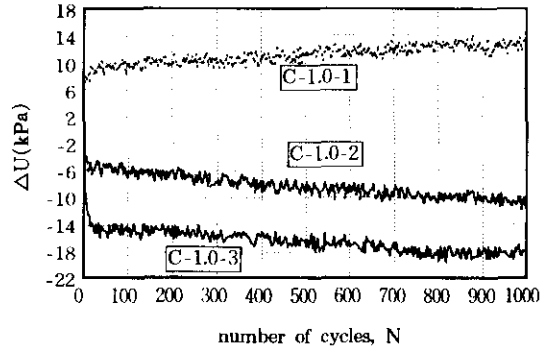


Fig. 3 Variation of excess pore water pressure during the cyclic loading for isotropic consolidation tests

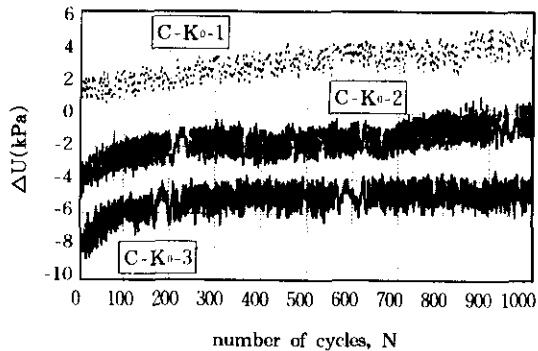


Fig. 4 Variation of excess pore water pressure during the cyclic loading for K_0 -consolidation tests

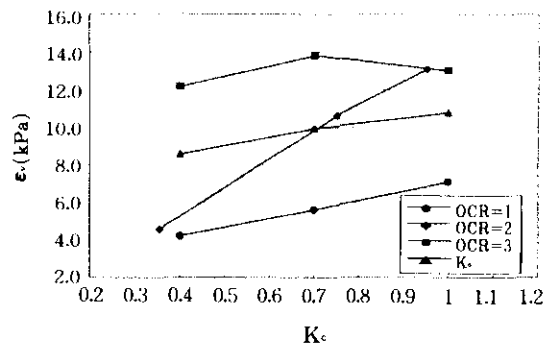


Fig. 5 Change in volumetric strain during consolidation for tests without cyclic loading

Table 1. Test results for \overline{CU} tests with different stress histories

Test no.	σ'_{vc} (kPa)	σ'_{hc} (kPa)	$(\sigma'_{vc} - \sigma'_{hc})$ (kPa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ (kPa)	S_u (kPa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{max} / \sigma'_{mc}$ (kPa)	A_f	Λ_o
S-1.0-1	170	170	0	189.1	94.6	1.1	0.56	0.60
S-1.0-2				291.2	145.6	1.7	0.23	
S-1.0-3				356.3	178.1	2.1	0.1	
C-1.0-1	170	170	0	205.1	102.5	1.2	0.47	0.52
C-1.0-2				295.9	147.9	1.7	0.16	
C-1.0-3				362.5	181.3	2.1	0.07	
S-0.7-1	170	119	51	158.7	79.3	1.2	0.59	0.61
S-0.7-2				242.6	121.3	1.8	0.15	
S-0.7-3				306.1	153	2.3	0.01	
C-0.7-1	170	119	51	160.2	80.1	1.2	0.54	0.56
C-0.7-2				236.5	118.2	1.7	0.15	
C-0.7-3				295.7	147.9	2.2	0.0	
S-0.4-1	170	68	102	145.1	72.6	1.4	0.36	0.63
S-0.4-2				234.3	117.2	2.3	-0.17	
S-0.4-3				271.4	135.7	2.7	-0.31	
C-0.4-1	170	68	102	148.3	74.1	1.5	0.36	0.61
C-0.4-2				236.9	118.5	2.3	-0.17	
C-0.4-3				271.6	135.8	2.7	-0.28	
S-K ₀ -1	170	57	113	143.3	71.6	1.5	0.31	0.76
S-K ₀ -2		122.8	47.2	248.1	124.1	1.8	0.12	
S-K ₀ -3		157.1	12.9	321	160.5	2.0	0.12	
C-K ₀ -1	170	60.34	109.66	158.4	79.2	1.6	0.15	0.66
C-K ₀ -2		127.9	42.1	251.1	125.6	1.8	0.13	
C-K ₀ -3		161.8	8.2	323.9	162.0	2.0	0.11	

Note : A_f : pore pressure parameter at failure, $(\Delta u / \Delta \sigma_1)_b$
 Λ_o : critical state pore pressure parameter
 σ'_{mc} : mean consolidation pressure, $(\sigma'_{vc} + 2\sigma'_{hc}) / 3$

그림 8과 9에서는 과압밀비가 각각 1 및 3인 경우에 대해 평균압밀응력으로 정규화한 축차응력과 변형률과의 관계곡선을 압밀응력비에 따라 비교하여 나타내었다. 그림 6과 8을 그리고 그림 7과 9를 비교하면 연직압밀응력과 평균압밀응력으로 정규화한 축차응력의 크기는 압밀응력비의 크기에 대해서 서로 반대의 경향

을 보이고 있다. 즉 평균압밀응력으로 정규화한 축차응력은 압밀응력비가 작을수록 증가하는 경향을 보여주므로서 과압밀비의 크기에 관계없이 압밀응력비에 따른 압밀점토시료의 응력유도이방성을 나타내고 있음을 보여주고 있다. 이는 평균압밀응력이 동일하더라도 압밀응력비가 작을수록 그만큼 더 큰 축차응력하에서

압밀되어 최대주응력 방향에 대한 저항력이 큰 토립자 구조로 발달되었기 때문이다. 반복응력을 받지않은 공시체의 응력-변형률 곡선은 그림 6, 7, 8, 9에서 나타낸 곡선과는 크기에 있어서는 차이가 있으나 경향은 위에서 논한 바와 동일하였다.

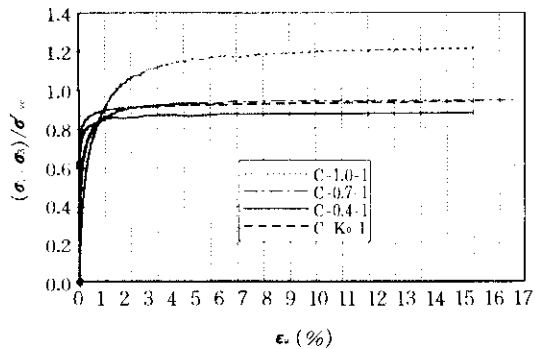


Fig. 6 Stress-strain curves normalized by vertical consolidation pressure(OCR=1, $\sigma'_w=170\text{kPa}$)

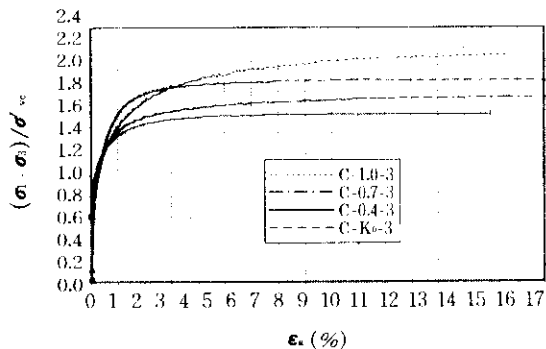


Fig. 7 Stress-strain curves normalized by vertical consolidation pressure(OCR=3, $\sigma'_w=170\text{kPa}$)

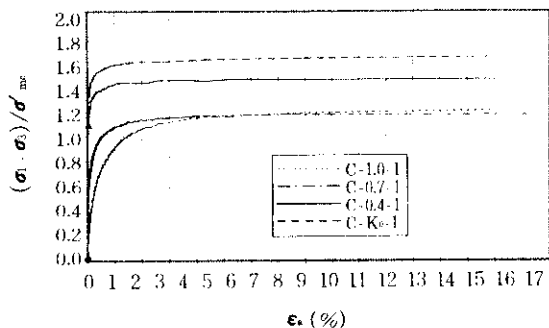


Fig. 8 Stress-strain curves normalized by mean consolidation pressure(OCR=1)

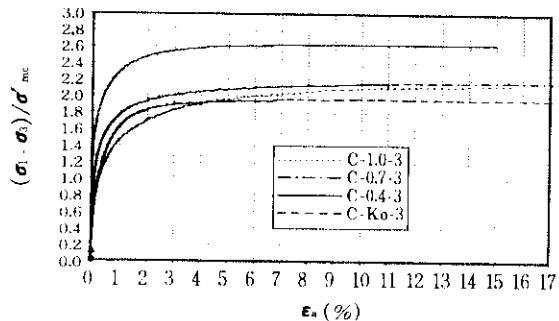


Fig. 9 Stress-strain curves normalized by mean consolidation pressure(OCR=3)

4.2.2 간극수압의 거동

그림 10, 11 및 12에서 압밀응력비와 과압밀비의 크기에 따른 축차응력에 의해 발생한 과잉간극수압의 크기를 나타내었다. 발생하는 과잉간극수압은 압밀응력비가 클수록 크고 과압밀비가 1인 경우 곡선은 계속 증가하다가 일정한 최고점에 이르게 되면 일정한 값을 보이는 경향이 있으나 과압밀비가 3인 경우 과잉간극수압은 어떤 첨두점에 이른 후 급하게 감소하는 경향을 보이며 이러한 경향은 압밀응력비가 작을수록 더욱 더 뚜렷하고 크게 감소하였다.

이는 압밀응력비가 작을수록 전단시 가해주는 축차응력의 크기가 작기 때문에 과잉간극수압이 적게 발생하고 또한 흙구조의 이방성의 발달이 원인인 것으로 생각된다. 이와같은 경향은 기존 연구결과에서도 볼 수 있다(Akai와 Adachi, 1965; Ladd, 1965; Koutsoftas와 Ladd, 1985; Mayne과 Stewart, 1988).

한편 그림 13은 K_0 -압밀 공시체에 대한 과잉간극수압의 발달을 보여주고 있는데 압밀응력비가 1.0, 0.7 및 0.4인 경우와는 다르게 과압밀비가 클수록 과잉간극수압이 증가하고 또한 빠른 첨두점을 뚜렷이 나타내어 다일러턴시 경향을 나타내고 있다. 이는 과압밀비가 증가할수록 다일러턴시 경향에 의해 간극수압이 감소하나 동시에 정지토압계수가 증가하기 때문이다. 즉 과압밀비가 3인 경우 정지토압계수가 0.92로 증가하여 압밀완료 후의 초기축차압밀응력이 감소되고 이로인해 전단시 가해주는 축

차응력이 과압밀비가 1인 경우보다 훨씬 크기 때문이다. 이상에서 논한 바와같은 과잉간극수압의 거동은 반복하중을 받지않은 경우에도 동일한 거동을 나타내었다.

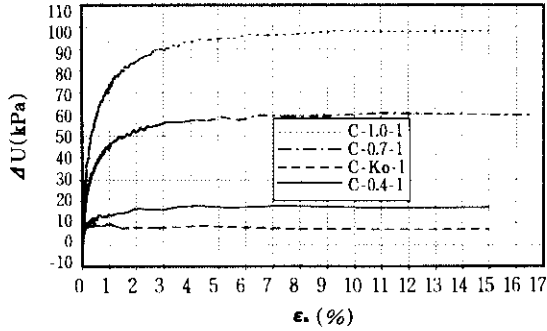


Fig. 10 Variation of excess pore water pressure with K_c values(OCR=1)

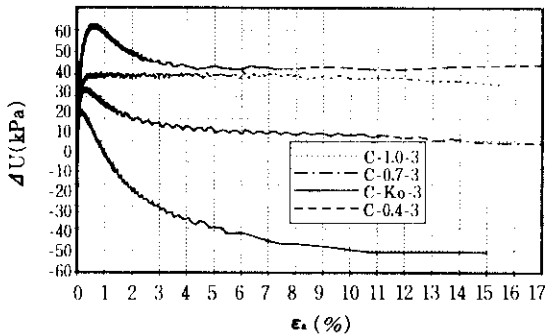


Fig. 11 Variation of excess pore water pressure with K_c values(OCR=3)

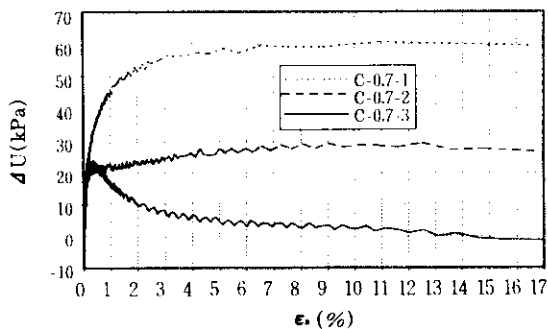


Fig. 12 Variation of excess pore water pressure with OCR($K_c=0.7$)

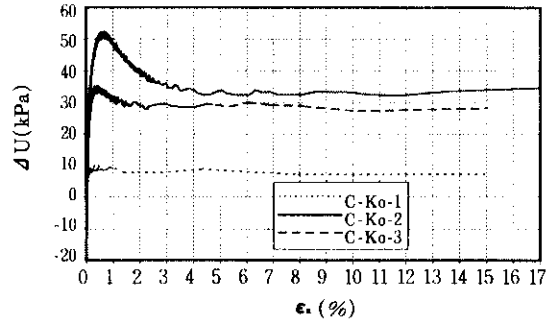


Fig. 13 Variation of excess pore water pressure with OCR($K_c=K_o$)

4.2.3 파괴시 간극수압계수 A_r

표 1과 그림 14에서 A_r 계수는 과압밀비가 증가할수록, 그리고 압밀응력비가 작을수록 감소하는 경향을 보여준다. 이는 다일러턴시 경향 때문인 것으로 판단된다. 또한 표 1에서 반복하중을 받으면 A_r 계수는 감소하는 경향을 볼 수 있는데 이는 반복재하에 의해 점토시료는 과압밀된다는 사실을 나타내어주고 있다.

K_o -압밀시험의 경우 A_r 계수는 과압밀비의 증가에 따라 감소하기는 하나 압밀응력비가 일정한 1.0, 0.7 및 0.4의 경우에 비해 감소량은 대단히 적다. 이러한 결과는 Mayne와 Stewart(1988)의 연구에서도 같은 경향을 나타냈으며 이는 정지토압계수가 과압밀비의 증가에 따라 증가하기 때문이다.

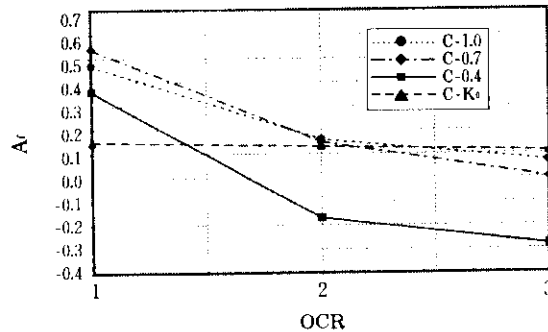


Fig. 14 Variation of pore pressure parameter at failure with OCR for different consolidation pressure ratio

4.2.4 비배수전단강도

비배수전단강도를 최대축차응력의 반으로 나타내어 이를 표 1과 그림 15에 나타내었다. 연직압밀응력으로 정규화한 점토의 비배수전단강도 S_u/σ'_{vc} 는 과압밀비와 압밀응력비가 클수록 증가한다. 동일한 연직압밀응력에 대한 비배수전단강도가 압밀응력비가 클수록 크게 되는 이유는 압밀응력비가 클수록 수평압밀응력이 커지므로 전체압밀응력이 증가하고, 이에 따른 체적감소가 더 크게되기 때문이다. 예를 들어 과압밀비가 1이고 반복하중을 가한 공시체의 경우 압밀응력비가 1.0, 0.7 및 0.4일 때 일어난 체적변형률은 각각 7.1, 5.6 및 4.2%이었다.

그러나 평균압밀응력으로 정규화한 비배수전단강도 S_u/σ'_{m} 는 그림 16과 같이 과압밀비가 증가할수록 증가하나 압밀응력비가 작을수록 오히려 증가함으로써 이방압밀에 의한 강도의 응력유도이방성을 보여주고 있다. 반복하중을 받지않은 공시체의 비배수전단강도 역시 이와 동일한 거동을 나타내었다.

또한 표 1의 내용을 자세히 살펴보면 정규압밀점토의 경우 반복하중을 받아 배수된 공시체의 비배수전단강도는 압밀응력비의 크기에 관계없이 증가되었음을 알 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 반복재하에 의해 발생된 과잉간극수압의 소산으로 인해 시료가 과압밀되었기 때문이다.

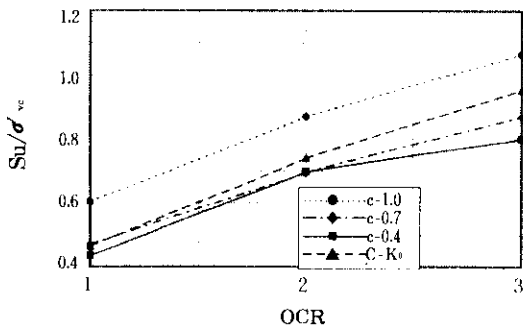


Fig. 15 Variation of the shear strength normalized by vertical consolidation stress with OCR for different consolidation pressure ratio

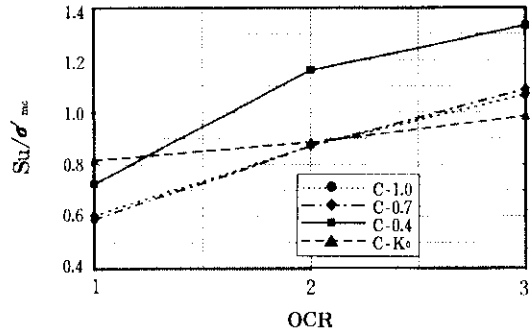


Fig. 16 Variation of the shear strength normalized by mean consolidation stress with OCR for different consolidation pressure ratio

그림 17에 나타낸 바와 같이 K_0 -이방압밀 비배수삼축압축시험(CK_0U)과 등방압밀비배수 삼축압축시험(CIU)에 의해서 구한 전단강도비는 과압밀비가 1, 2 및 3인 경우 반복재하 여부에 관계없이 각각 0.76, 0.85 및 0.90으로서 원위치의 비배수전단강도를 등방압밀시험에 의해서 추정하게 되면 실제보다 크게 추정하게 되나 과압밀비가 클수록 그 차이는 줄어들고 지나치게 과압밀되면 오히려 작게 추정할 가능성을 보여준다. 과압밀비가 클수록 이 비가 증가하는 이유는 정지토압계수의 증가 때문이다. 정규압밀점토의 경우 이 비가 0.76으로서 Mayne(1980)이 주장한 0.88보다는 작고 강과 윤(1994)이 제시한 연구결과에서 정지토압계수가 0.46인 경우의 0.71 보다는 약간 크다.

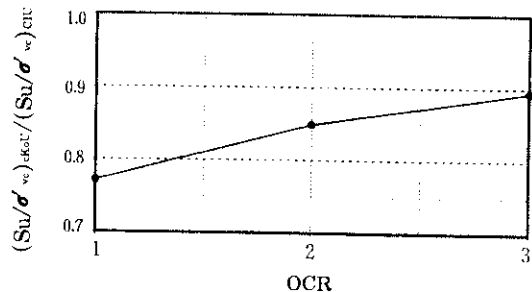


Fig. 17 Variation of the strength ratio $(S_u/\sigma'_{vc})_{CK_0U}/(S_u/\sigma'_{vc})_{CIU}$ with OCR

그림 18에는 연직압밀응력으로 정규화한 과압밀점토의 비배수전단강도와 정규압밀점토의 비배수전단강도의 비와 과압밀비의 관계를 log-log 눈금으로 나타내었다. 자료가 충분하지는 않으나 모든 압밀응력비에 관한 이들 관계는 직선으로 나타낼 수 있음을 보여주므로서 Mayne(1980)이 제안한 식 (1)을 이방압밀의 경우에도 적용할 수 있음을 확인할 수 있다. 이 관계직선의 기울기인 한계상태간극수압정수 Λ_0 의 크기는 압밀응력비의 크기에 따라 차이가 있으며 그림 19에서 나타낸 바와 같이 압밀응력비가 클수록 감소하고 반복하중을 받게되면 더 감소된다는 사실을 알 수 있다.

K_0 -이방압밀시험의 경우 Λ_0 값은 반복하중을 받지 않은 상태와 받은 상태에서 각각 0.76과 0.66으로서 등방압밀시험의 경우 0.60과 0.52에 비해 훨씬 크게 측정되므로서 K_0 -이방압밀인 원위치 상태에서의 과압밀효과가 등방압밀상태보다 훨씬 크다는 사실을 알 수 있다. 또한 Atkinson과 Bransby(1978)가 제시한 바와 같이 표준압밀시험으로부터 구한 압축지수(0.39)와 팽창지수(0.064)로부터 구한 Λ_0 값은 0.84이다. 이들 모든 값은 1.0보다는 적으나 Mayne(1980)이 세계 각지의 96개 세립토에 대한 평균치로서 제시한 0.64에 비해 큰 값을 보이고 있다.

반복하중을 받지 않은 상태에서의 Λ_0 값으로 K_0 -압밀시의 0.76, 등방압밀시의 0.60 및 표준압밀시험에 의한 0.84를 적용하여 구한 비배수전단강도비를 그림 20과 같이 나타내었다. 이들 세 직선을 비교해 보면 등방압밀삼축압축시험 보다는 오히려 표준압밀시험으로부터 구한 Λ_0 값을 이용하므로서 원위치의 K_0 -상태로 과압밀된 점토의 비배수전단강도를 더 정확하게 추정할 수 있음을 알 수 있다. 물론 과압밀비가 클수록 오차는 커지나 과압밀비가 3 정도보다 작을 경우 Λ_0 값을 표준압밀시험에 의해서 추정함이 편리하고 이를 이용하여 과압밀점토의 비배수전단강도를 약간 크기는 하지만 비교적 정확하게 추정할 수 있음을 알 수 있다.

한편 여러 가지의 응력경로에 따라 압밀시킨 후 $\pm 5\text{kPa}$ 의 응력을 20초 주기로 1,000회 반복하므로서 발생된 과잉간극수압을 측정하고 이 수압이 소산되고 배수된 후의 점토공시체의 비배수전단강도를 Yasuhara(1994)가 제안한 식 (4)에 의해서 계산하고 이를 실측치와 비교하였다. 압밀응력비가 1.0, 0.7 및 0.4이고 정규압밀점토의 경우 식중 Λ_0 값을 삼축압축시험에 의해서 구하여 적용했을 시 측정치와 계산치의 비는 압밀응력비의 크기에 관계없이 0.79~0.89 범위이고 표준압밀시험에 의해서 구해 적용했을 시 이 비는 0.75~0.85 범위로서 서로 비슷한 정도로 Yasuhara식이 크게 추정되는 경향을 보여주고 있다. 그러나 K_0 -이방압밀인 경우에는 삼축압축시험과 표준압밀시험에 의해서 구한 이 비가 각각 0.93 및 0.92로서 비교적 정확하게 추정될 수 있음을 보였다. 따라서 반복하중을 받은 원위치 점토지반의 비배수전단강도는 표준압밀시험자료를 Yasuhara식에 적용하여 추정하므로서 10% 이내의 오차로서 비교적 정확하고 편리하게 추정될 수 있음이 확인되었다.

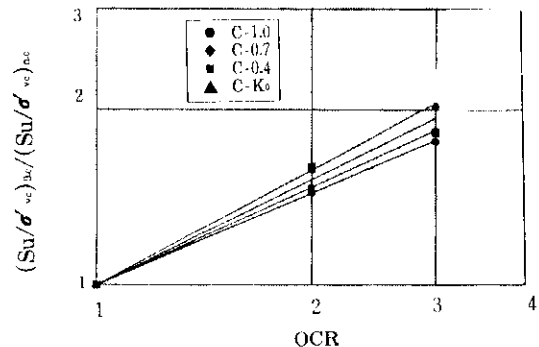


Fig. 18 Relationship between $(S_u/\sigma'_{vc})_{3u}/(S_u/\sigma'_{vc})_{nc}$ and OCR for different consolidation stress ratio

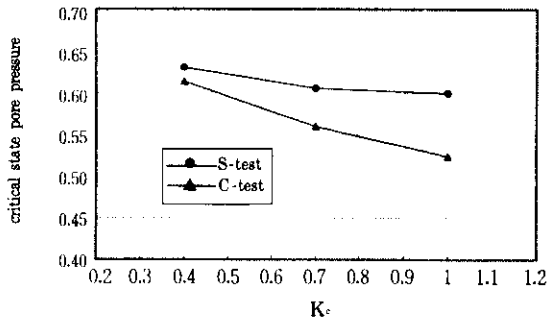


Fig. 19 Relationship between the critical state pore pressure parameter and consolidation stress ratio

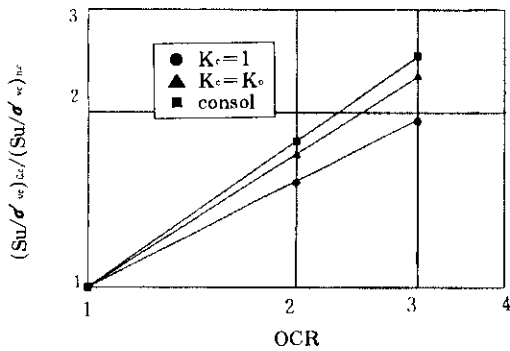


Fig. 20 Undrained shear strength ratio calculated with data from different tests

5. 결론

응력이력이 반복하중을 받은 점성토의 비배수 전단강도와 반복재하시 일어나는 동적 거동에 미치는 영향을 연구하기 위하여 4가지의 압밀 응력비(1.0, 0.7, 0.4 및 K_0)와 3가지의 과압밀비(1, 2 및 3)로 압밀시킨 후 응력제어방식의 반복재하삼축압축시험을 수행한 결과 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

- 1) 포화점토에서 반복재하의 횟수가 증가함에 따라 압밀응력비가 일정한 경우 그 크기에 관계없이 정규압밀상태에서는 과잉 간극수압은 계속해서 증가하나 과압밀상태에서는 부압으로서 계속해서 감소한다. 그러나 K_0 이방과압밀점토에서는 초기에

는 부의 간극수압을 나타내나 반복횟수가 증가함에 따라 오히려 증가하는 경향을 보인다.

- 2) 파괴시 간극수압계수 A_v 는 과압밀비가 증가할수록, 그리고 압밀응력비가 감소할수록 감소하는 경향을 보인다. 또한 반복하중을 받게 되면 A_v 계수는 더 감소하는 경향을 나타낸다.
- 3) 연직압밀응력으로 정규화한 과압밀점토의 비배수전단강도(S_u/σ'_{vc})는 과압밀비가 증가할수록, 그리고 압밀응력비가 클수록 크다. 그러나 평균압밀응력으로 정규화한 비배수전단강도(S_u/σ'_{vc}) 역시 과압밀비가 증가할수록 증가하나 압밀응력비가 클수록 오히려 감소한다.
- 4) 연직압밀응력으로 정규화한 정규압밀점토의 K_0 -이방압밀비배수전단강도는 등방압밀비배수강도의 0.76배이고 이 배율은 과압밀비가 증가할수록 증가한다.
- 5) 반복하중을 받아 발생된 과잉간극수압이 소산되고 배수된 후의 정규압밀점토의 비배수전단강도는 압밀응력비의 크기에 관계없이 증가하는 경향을 나타낸다.
- 6) 연직압밀응력으로 정규화한 과압밀점토와 정규압밀점토의 비배수전단강도의 비를 추정하기 위해 Mayne(1980)이 제안한 식(1)은 모든 압밀응력비의 크기에 대해서 비교적 잘 적용될 수 있으며, 이의 크기를 좌우하는 한계상태간극수압정수 Λ_0 는 압밀응력비가 클수록 감소하는 경향이 있다.
- 7) K_0 -이방압밀된 점토의 Λ_0 값은 등방압밀된 점토보다 크므로 K_0 -이방압밀상태인 원위치에서의 과압밀효과가 등방압밀상태보다 크다. 또한 원위치상태에서 과압밀비가 3정도 이하로 비교적 작게 과압밀된 점토의 비배수전단강도를 추정하는데 필요한 Λ_0 값은 표준압밀시험에 의해서 구하여도 충분히 정확함이 확인되었다.
- 8) K_0 -이방압밀된 점토지반이 반복하중을

받아 발생된 과잉간극수압이 소산된 후의 비배수전단강도를 표준압밀시험자료와 Yasuhara(1994)의 제안식(4)에 의해서 10% 이내의 오차로서 비교적 정확하게 추정할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의해서 연구되었음, 이에 감사를 표합니다.

참고 문헌

1. 강병희, 윤호창(1994), "정규압밀점토의 비배수 전단강도에 대한 이방압밀효과," 한국지반공학 회지, 제10권, 제1호, pp.63-70.
2. Akai, K. and Adachi, T.(1965), "Study on the one-dimensional consolidation and the shear strength characteristics of fully saturated clay in terms of effective stress," *Proc. 6th ICSMFE*, Vol.1, pp.146-150.
3. Atkinson, J. H., and Bransby, P. L.(1978), *The Mechanics of Soil*, McGraw-Hill, London, pp.329-336.
4. Konrad, J. M. and Wagg, B. T.(1993), "Undrained cyclic loading of anisotropically consolidated clayey silts," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.119, No.5, pp.929-947.
5. Koutsoftas, D. C. and Ladd, C. C.(1985), "Design strength for an offshore clay," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.111, No.3, pp.337-355.
6. Ladd, C. C.(1965), "Stress-strain behaviour of anisotropically consolidated clays during undrained shear," *Proc. 6th ICSMFE*, Montreal. Vol.1, pp.282-286.
7. Lo, S. C. R. and Chu, J.(1991), "The measurement of K_0 by triaxial strain path testing," *Soils and Foundation*, Vol.31, No.2, pp. 181-187.
8. Matsui, T., Ohara, H. and Ito, T.(1980), "Cyclic stress-strain history and shear characteristics of clay," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.106, No.10, pp. 1101-1119.
9. Mayne, P. W.(1980), "Cam clay predictions of undrained strength," *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.10 6, No. 11, pp. 1219-1242.
10. Mayne, P. W.(1985), "Stress anisotropy effects on clay strength," *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.111, No.3, pp.356-366.
11. Mayne, P. W. and Stewart, H. E.(1988), "Pore pressure behavior of K_0 -consolidated clays," *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.114, No.11 , pp.1340-1346.
12. Mitchell, J. K.(1993), *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley & Sons Inc., pp. 322-325.
13. Schofield, A. N., and Wroth, C. P.(1968), *Critical-State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, London, pp.134-206.
14. Simons, N. E.(1960), "The effect of overconsolidation on the shear strength characteristics of an undisturbed Oslo clay," *Research conference on shear strength of cohesive soils*, ASCE, Colorado, pp.747-763.
15. Yasuhara, K., Oikawa, H. and Noto, S. (1992), "Effects of cyclic loading on undrained strength and compressibility of clay," *Soils and Foundation*, Vol.32, No.1, pp.100-116.
16. Yasuhara, K. (1994), "Postcyclic undrained strength for cohesive soils," *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.120, No.11, pp.1961-1970.

(접수일자 1997. 9.5)