

이방과압밀점토의 비배수크리프파괴

Undrained Creep Rupture of an Anisotropically Overconsolidated Clay

강 병 회*1

Kang, Byung-Hee

오 선 호*2

Oh, Seon-Ho

Abstract

The undrained creep tests with isotropically and anisotropically overconsolidated clays were performed to investigate the effects of anisotropic consolidation on the undrained creep rupture behavior. Results of tests showed that the undrained creep rupture behaviors were influenced significantly by stress history including overconsolidation ratio and consolidation pressure ratio ($\sigma'_{3c}/\sigma'_{1c}$). That is, the creep strength of clay increases with the increase of both overconsolidation ratio and consolidation pressure ratio. It, therefore, is dangerous to decide the possibility of creep rupture of clay by the isotropically consolidated creep rupture test in the case of the coefficient of earth pressure lower than 1.0. And the creep strength of clay could be obtained by the equation of the upper yield strength suggested by Finn and Shead(1973) irrespective of both overconsolidation ratio and consolidation pressure ratio.

요 지

이방압밀이 과압밀점토의 비배수크리프파괴거동에 미치는 영향을 연구하기 위하여 등방 및 이방과압밀시킨 점토시료에 대해서 비배수상태에서 크리프시험을 수행하였다. 연구결과 비배수 크리프파괴거동은 점토시료의 응력이력 즉 과압밀비와 압밀응력비($\sigma'_{3c}/\sigma'_{1c}$)의 크기에 의해서 영향을 크게 받는다는 사실이 밝혀졌다. 즉 점토의 크리프강도는 과압밀비와 압밀응력비가 클수록 증가하므로 정지토압계수가 1.0보다 작은 점토지반의 크리프파괴 가능성을 등방압밀크리프파괴시험에 의해서 판단하는 것은 위험하다. 그리고 점토의 크리프강도는 과압밀비와 압밀응력비의 크기에 관계없이 Finn 과 Shead(1973)의 제안식에 의한 상한항복강도로써 구할 수 있었다.

Keywords : Overconsolidated clay, Undrained creep rupture behavior, Anisotropic consolidation, Consolidation pressure ratio.

*1 정회원, 인하대학교 공과대학 토목공학과, 교수

*2 정회원, 대우엔지니어링 지반공학부

1. 서론

점토사면이나 점토지반상의 사면 및 구조물은 비교적 크지 않은 하중하에서도 변형이 계속되어 크리프파괴에 이르게 되기도 한다. 흙의 크리프는 배수조건에 따라서 일정한 유효응력하에서 발생하는 축차크리프 및 체적크리프와 같은 배수크리프와 거동은 배수크리프와 유사하지만 일정한 전응력하에서 일어나는 전단 변형으로서 과잉간극수압의 발생과 함께 유효응력이 감소되는 비배수크리프로 나누어진다.

크리프는 상대적으로 낮은 응력수준하에서는 시간이 오래 경과하게 되면 궁극적으로 정지하거나 또는 매우 미세한 속도로 계속되거나 비교적 높은 응력수준하에서는 초기에는 일정한 속도를 지속하거나 또는 속도가 감소하다가 어떤 일정한 시간이 경과되면 가속되어 결국에는 크리프파괴에 이르게 된다.

이와 같은 크리프거동은 불교란 및 교란점토, 습윤 및 건조점토, 정규압밀 및 과압밀점토 뿐만 아니라 모래에서도 일반적으로 비슷한 형태를 나타낸다(Singh 과 Mitchell, 1968). 그리고 크리프속도는 점토의 종류, 점토함유량 및 소성지수에 따라 달라지며 축차크리프는 과압밀점토보다 정규압밀점토에서 더 크게 일어난다(Mitchell, 1993).

흙의 크리프거동에 대한 이방압밀에 관한 연구는 많지는 않으나, Campanella 와 Vaid (1974)는 K_0 -이방압밀시료에 대한 크리프파괴에 관한 연구를 수행하여 동일한 연직유효응력하에서 K_0 -압밀시료가 등방압밀시료보다 일찍 크리프파괴에 도달하였다고 발표한 바 있다. 그리고 Mitchell(1993)과 Ladd 등(1977)도 원위치와 동일한 응력상태하에서 크리프거동을 검토해야 한다고 주장하였으며 강 과 홍(1993)은 이방정규압밀점토의 비배수크리프파괴에 관한 연구에서 압밀응력비가 크리프거동에 미치는 영향을 규명한 바 있다.

본 연구는 압밀의 이방성이 과압밀점토의 크리프파괴에 어떤 영향을 끼치게 되는지를 검토

하고 Singh과 Mitchell(1968)이 제안한 크리프방정식이 이방과압밀점토시료에도 적용될 수 있는지를 연구하고자 한다. 또한 Finn 과 Shead(1973)가 제안한 상한항복 강도와 각각의 시험조건에 따라 수행한 실험에서 구한 크리프파괴시의 강도를 비교검토하여 어느정도 잘 일치하는지를 연구하고자 한다.

2. 흙의 크리프거동

2.1 Singh 과 Mitchell 방정식

Singh 과 Mitchell(1968)은 크리프파괴가 일어나지 않는 일정한 크리프응력하에서 발생하는 변형률속도($\dot{\epsilon}$)와 경과시간(t)은 $\log(\dot{\epsilon})$ 가 $\ln(t)$ 에 대하여 선형적으로 감소하고 응력수준이 증가하면 변형률속도는 증가하나 기울기는 일정하다는 여러 학자들의 실험결과를 이용하여 변형률속도를 아래 식(2.1)과 같이 나타내었다.

$$\dot{\epsilon} = A \exp(\alpha D) \left(\frac{t_1}{t} \right)^m \quad (2.1)$$

여기서,

D : 축차응력($\sigma_1 - \sigma_3$)으로 나타낸 크리프응력 수준

m : $\log \dot{\epsilon} - \log t$ 관계직선의 기울기

t_1 : 단위시간(주로 1분)

α, A : 여러가지의 시간 t_1 에 대한 $\log \dot{\epsilon} - D$ 관계곡선중 직선부분의 기울기와 단위시간 t_1 에서의 절편

식중 3개의 매개변수 A, α, m 은 최소 2개 이상의 크리프시험에 의해서 구할 수 있다. m 계수값이 1.0보다 적으면 크리프중에 강도가 떨어져서 궁극적으로는 파괴에 이를 가능성이 높으며 일반적으로 이 값은 0.75~1.0 범위내에 있으나, 흙의 종류와 과압밀정도에 따라 그 값이 달라진다고 한다(Singh 과 Mitchell, 1968). 그러나 Mitchell(1993)이 제시한 자료에 의하면 점토에 대한 크리프파괴시의 m 계수값은 0.4

~1.0 범위내에 있으며 이방압밀인 경우 m값이 등방압밀에 비해 적은 값을 보여주었다. 또한 Edgers 등(1973)은 작용하는 응력체계가 점토의 비배수크리프거동에 영향을 줄 수 있다고 하였다. 즉 저소성충적점토에 대한 CKoU 삼축압축크리프시험에서 m계수 값은 0.55 ± 0.1 을 나타낸 반면 직접전단시험에 의하면 0.85~0.9의 값을 나타내었다고 하였다.

2.2 크리프파괴

점토는 일반적인 비배수삼축압축시험에서 구한 침투비배수강도보다 낮은 수준의 지속적인 크리프응력하에서도 파괴가 일어날 수 있는데 이를 크리프파괴라고 하고, 그 크기는 침투비배수강도의 약 50%까지 줄어들 수 있다고 하였다(Campanella 와 Vaid, 1974).

Mitchell(1993)에 의하면 크리프에 의한 강도의 손실은 크리프변형에 의한 고결결합(cemented bond)의 파괴 및 전단면의 간극수압 증가 등에 의해서 일어난다고 한다. 특히 포화된 과압밀점토의 경우 크리프에 의한 강도손실은 전단응력의 작용에 따라 비배수 상태에서 부의 간극수압이 일정하게 발생하지 않고 전단변형이 더 큰 면에 집중해서 발생되고 하중지속시간의 경과에 따라 간극수의 이동으로 강도가 감소되기 때문이라고 여러학자들은 그들의 실험에서 밝힌 바 있다(Casagrande 와 Wilson, 1951, Ter-Stepanian, 1975, Vialov 와 Skibitsky, 1957).

한편 Singh 과 Mitchell(1968)은 전술한 바와 같이 그들의 크리프 방정식(식 2.1)에서 m 값이 1.0보다 작으면 크리프에 의해 강도가 소실되어 결국에는 파괴에 이른다고 하였으며 Campanella 와 Vaid(1974)에 의하면 그림 2.1에서 보이고 있는 바와 같이 크리프응력하에서 파괴에 이르기전에 변형률속도는 처음에는 계속하여 줄어들다가 어떤 최소치에 이르면 급격히 증가하여 파괴에 도달한다고 하였다. 이때 크리프응력이 줄어들수록 최소변형률속도는 감소하고 최소변형률속도에 이르는 경과시간

즉 파괴가 시작되는 경과시간은 증가한다. 그리고 이 최소변형률속도($\dot{\epsilon}_{min}$)와 파괴에 이르는 경과시간 즉 파괴수명(t_f)과의 관계는 대수누금상($\log t_f - \log \dot{\epsilon}_{min}$)에서 선형적인 관계를 나타낸다. 따라서 파괴수명은 응력수준에 의해서 좌우되고 어떤 한계응력수준 이하에서는 파괴수명이 무한히 길어져서 파괴가 발생하지 않는다. 이 한계응력을 Murayama 와 Shibata (1961)는 상한항복강도(upper yield strength)라 했으며 Finn 과 Shead(1973)는 이들의 관계를 다음 식 (2.2)와 같이 나타내었다.

$$\sigma_d = \sigma_{uy} + k \dot{\epsilon}_{min}^{(1/n)} \quad (2.2)$$

여기서 σ_d : 크리프촉차응력

σ_{uy} : 상한항복강도

$\dot{\epsilon}_{min}$: 최소변형률속도

n, k: 상수

특히 이들은 Haney Clay에 대해서 과압밀비가 각각 1, 2, 6, 25인 경우 상수 n값은 압밀이력이나 배수조건에 관계없이 3.0이라고 하였으며 Sherif(1965)도 Overconsolidated seattle Clay인 경우 3.0이라 하였다.

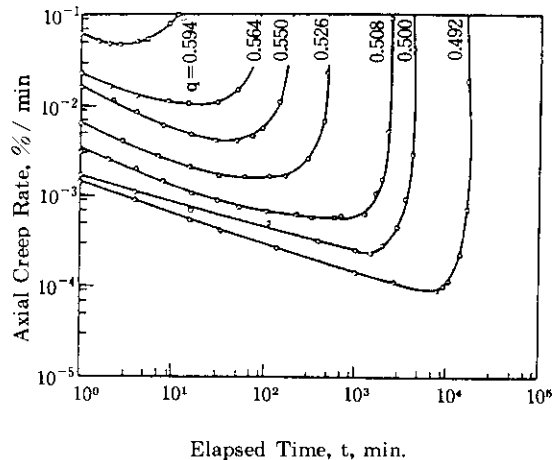


Fig. 2.1 Creep behavior of Ko-consolidated Haney Clay under axially symmetric loading (after Campanella & Vaid, 1974)

3. 실험

3.1 시료

시료는 경기도 안산에서 채취한 세립토 (ML)와 벤토나이트를 2:1의 중량비로 혼합하여 점토의 성질을 증가시킨후 0.1N 염화칼슘 용액속에 넣어 3일간 충분히 교반시키면서 수화시켰다. 이렇게 준비된 현탁액을 토조(30cm×120cm×60cm)에 넣고 하중판과 수압을 이용하여 1.6kg/cm²의 압력하에서 2개월간 압밀시켜 준비하였다. 이와 같이 실험실 토조에서 인공퇴적시켜 준비한 시료는 현장에서 채취한 자연시료에 비해 균일한 함수비 및 밀도를 갖는 이점이 있다.

이 시료의 입도분포는 그림 3.1과 같으며 점토크기(2 μ m 이하)의 함유량은 55%이고 균등계수는 7로서 통일분류법에 의해 CH로 분류되었으며 몇가지의 물리적성질은 표 3.1.과 같다. 그리고 등방압밀비배수삼축압축시험(CIU)

Table 3.1 Properties of the clay

Liquid limit (%)	52
Shrinkage limit (%)	11
Plasticity index	25
Water content (%)	43~45
Specific gravity	2.70
Degree of saturation (%)	98~100
Initial void ratio	1.13~1.22
Preconsolidation pressure (kg/cm ²)	1.1

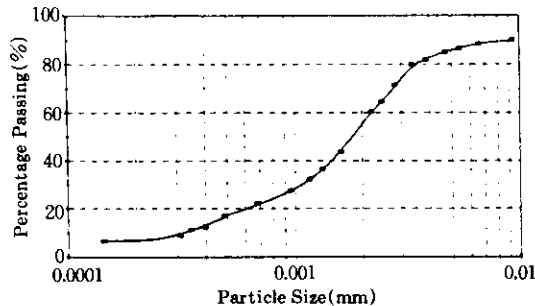


Fig. 3.1 Particle size distribution curve

에 의한 정규압밀점토의 유효내부마찰각은 30°이다.

3.2 실험장치

본 연구에서 사용된 삼축압축시험기는 변형률제어식 일반 삼축압축시험기이고 항압장치는 수은항압장치로서 수은주의 높이를 조정하므로써 일정한 압력을 가할 수 있다.

실험중에 발생하는 과잉간극수압과 체적변화량은 transducer에 연결된 digital readout에 의해서 측정하였다. 또한 이방압밀시 재하장치는 응력제어식으로서 삼축실 상단에 재하레버(lever)를 설치하여 하중을 조정하고 크리프응력의 재하 역시 이 레버를 이용하였다.

3.3 크리프 시험

압밀응력비($Kc = \sigma'_v / \sigma'_{vc}$) 및 과압밀비가 크리프파괴를 포함하는 크리프 전과정에 미치는 영향을 연구하기 위하여 압밀응력비를 1.0 및 0.5를 유지하면서 과압밀비가 1, 2 및 4가 되도록 미리 압밀시킨 후 크리프응력을 가하였다. 즉 표 3.2.에서 볼 수 있는 바와 같이 압밀응력비가 1.0 및 0.5를 유지시키면서 유효연직 압밀응력이 8.0kg/cm²가 되도록 가하여 압밀시킨 후 4.0kg/cm² 및 2.0kg/cm²이 되도록 다시 재하하였다. 이와 같이 유효연직압밀응력을 최소한 2.0kg/cm²보다 크게 가해주므로써 토조에서 발달된 선행압밀응력의 영향을 최소화하도록 하였다.

이렇게 유효연직압밀응력을 조정후 크리프응력을 결정하기 위하여 비배수삼축압축시험을 실시하여 파괴가 일어나는 최대축차응력을 먼저 구하였다. 최대축차응력을 기준으로하여 0.05kg/cm²씩 임의로 감소시킨 몇가지 응력을 크리프응력으로 하여 이 응력을 가하여 비파괴 및 파괴까지의 시간-변형률 및 응력-변형률 거동을 관찰하였다. 이들 크리프응력중 최저크리프응력은 3일이 경과하여도 크리프파

파괴가 일어나지 않는 최대응력으로 하였다. 크리프시험의 일람표는 표 3.2와 같다.

Table 3.2 The list of creep tests

(a) $K_c=1.0$

(unit : kg/cm^2)

OCR	consolidation stress			creep stress $q=(\sigma_1-\sigma_3)_c$	max. deviator stress $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$
	σ'_{1c}	σ'_{3c}	$(\sigma_1-\sigma_3)_c$		
1	2	2	0	1.64	1.66
				1.59	
				1.55	
				1.51	
2	4→2	4→2	0	1.86	1.86
				1.82	
				1.78	
				1.74	
4	8→2	8→2	0	2.12	2.12
				2.08	
				2.03	
				1.98	

(b) $K_c=0.5$

(unit : kg/cm^2)

OCR	consolidation stress			creep stress $q=(\sigma_1-\sigma_3)_c$	max. deviator stress $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$
	σ'_{1c}	σ'_{3c}	$(\sigma_1-\sigma_3)_c$		
1	2	1	1	1.46	1.46
				1.40	
				1.35	
				1.30	
2	4→2	2→1	1	1.70	1.70
				1.65	
				1.60	
				1.55	
4	8→2	4→1	1	1.98	1.98
				1.93	
				1.88	
				1.83	

4. 실험결과 및 토의

4.1 변형률과 경과시간

그림 4.1. 및 그림 4.2.는 압밀응력비가 각각 1.0 및 0.5, 과압밀비가 각각 1.0 및 2.0인 공시체에 대한 변형률과 시간과의 관계를 나타내는 전형적인 크리프곡선으로서 과압밀비가 4인 경우도 동일한 곡선을 나타내었다. 즉 크리프파괴가 일어난 경우 초기에는 변형속도가 줄어드는 1차 크리프를 보이다가 그후 일정한 변형속도를 갖는 2차 크리프를, 그리고는 변형속도가 가속되어 결국 파괴에 도달하는 3차 크리프의 3가지 영역을 보여주고 있다.

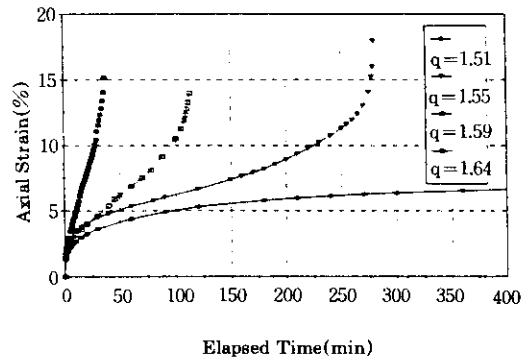


Fig. 4.1 Creep curves for $K_c=1.0$, $OCR=1.0$

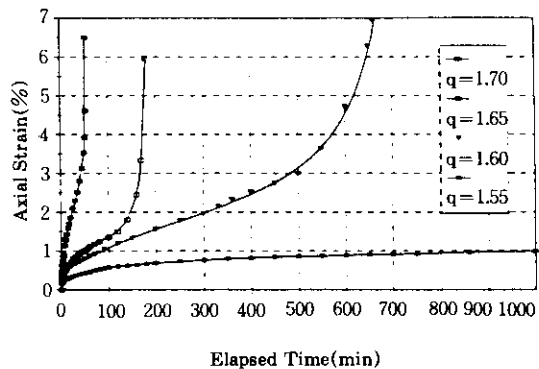


Fig. 4.2 Creep curves for $K_c=0.5$, $OCR=2.0$

크리프파괴를 일으킬 수 있는 최소크리프응력은 표 4.1에 보인 바와 같이 압밀응력비가 1.0인 경우 과압밀비가 1, 2, 4가 됨에 따라 각각 1.55, 1.78, 2.08kg/cm²로서 과압밀비가 증가함에 따라 커짐을 알 수 있으며, 압밀응력비가 0.5인 경우 역시 과압밀비가 1, 2, 4가 됨에 따라 각각 1.35, 1.60, 1.88kg/cm²로서 같은 경향을 보였다. 또한 동일한 연직압밀응력(2.0

kg/cm²)과 과압밀비를 가질 경우 압밀응력비가 1.0인 공시체가 0.5인 공시체보다 크리프파괴에 대한 최소크리프응력 즉 크리프강도는 훨씬 더 크게 나타났다. 이는 압밀응력비와 과압밀비가 클수록 공시체에 이미 가해진 평균압밀응력(σ'_{mc})이 더 크므로 크리프파괴에 대한 저항력이 더 크게 발달되었기 때문이다.

Table 4.1 The results of creep tests

Kc	OCR	Test No.	at $\dot{\epsilon}_{min}$			σ_{uy} (kg/cm ²)	$\frac{\sigma_{uy}}{(\sigma_1-\sigma_3)_{max}}$ (%)	$\frac{\sigma_{uy}}{\sigma'_{mc}}$	$(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ (kg/cm ²)	k
			strain (%)	strain rate (%/min)	time (min)					
1.0	1	CR-1-1-1.64	8.34	0.23	22	1.52	9.16	0.76	1.66	0.11
		CR-1-1-1.59	7.51	0.06	70					
		CR-1-1-1.55	8.94	0.03	190					
		CR-1-1-1.51	no failure							
	2	CR-1-2-1.86	7.02	0.10	19	1.75	94.1	0.88	1.86	
		CR-1-2-1.82	6.45	0.05	55					
		CR-1-2-1.78	6.61	0.025	140					
		CR-1-2-1.74	no failure							
	4	CR-1-4-2.12	9.28	0.05	50	2.05	96.2	1.03	2.12	
		CR-1-4-2.08	7.32	0.02	100					
		CR-1-4-2.03	no failure							
		CR-1-4-1.98	no failure							
0.5	1	CR-0.5-1-1.46	1.38	0.09	9.7	1.30	88.4	0.98	1.46	0.30
		CR-0.5-1-1.40	1.21	0.01	80					
		CR-0.5-1-1.35	1.42	0.004	170					
		CR-0.5-1-1.30	no failure							
	2	CR-0.5-2-1.70	2.31	0.042	31	1.56	91.8	1.17	1.70	
		CR-0.5-2-1.65	1.49	0.007	90					
		CR-0.5-2-1.60	1.87	0.003	300					
		CR-0.5-2-1.55	no failure							
	4	CR-0.5-4-1.98	1.47	0.008	80	1.85	94.4	1.39	1.98	
		CR-0.5-4-1.93	1.03	0.003	140					
		CR-0.5-4-1.88	1.37	0.001	620					
		CR-0.5-4-1.83	no failure							

- σ_{mc} : $(\sigma'_{1c}+2\sigma'_{3c})/3$
- k : constant in eq.(2.2) for upper yield strength
- σ_{uy} : upper yield strength
- $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$: max. deviator stress

4.2. 변형률속도와 경과시간

그림 4.3.은 압밀응력비가 0.5이고 과압밀비가 2.0인 공시체에 대한 4가지의 크리프응력에 대한 변형률속도와 경과시간과의 관계곡선을 log-log 눈금상에 나타낸 그림이다. 크리프응력을 가한 이후 시간이 경과함에 따라 변형률속도는 줄어들다가 최소변형률속도에 이르러 일정한 속도를 잠시 나타낸 후 다시 급속하게 증가하여 파괴에 이르게 되나 크리프응력이 1.55 kg/cm²인 경우는 파괴가 일어나지 않고 계속해서 직선적으로 감소함을 보여주고 있다. 이중 크리프파괴가 일어나는 곡선은 그림 2.1.의 곡선과 같은 모양을 보여준다.

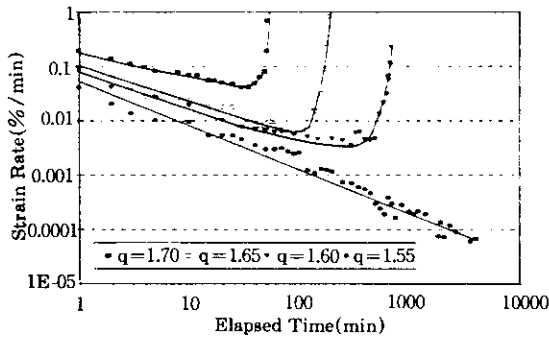


Fig. 4.3 Creep rate behavior of overconsolidated clay (Kc=0.5, OCR=2.0)

그림 4.4.에서는 각 응력에 대한 최소변형률속도를 압밀응력비와 과압밀비별로 비교하여 나타내었다. 압밀응력비와 과압밀비에 관계없이 모든 경우에서 최소변형률속도가 작을수록 이에 도달하는 시간은 길어진다. 즉 장시간 경과된 이후에 크리프파괴가 발생하는 경우에는 더욱 더 낮은 최소변형률속도까지 이른 후에 크리프파괴가 발생하기 시작한다.

그림 4.5.에서는 크리프강도에 대한 최소변형률속도는 과압밀비가 증가할수록 감소하며 압밀응력비가 1.0인 경우가 0.5인 경우보다 훨씬 크다는 사실을 보여주고 있다. 따라서 원위치의 압밀응력비가 1.0보다 작을 경우 원위치의 크리프파괴거동을 등방압밀시료에 의해서 예측하였다면 크리프강도 뿐만아니라 크리프강도에 대한 최소변형률속도를 과대평가하게

되어 위험한 방향으로 예측하게 된다.

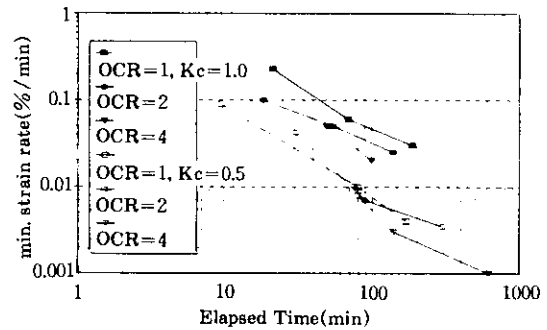


Fig. 4.4 Relationship between minimum strain rate and elapsed time by OCR for each kc-value

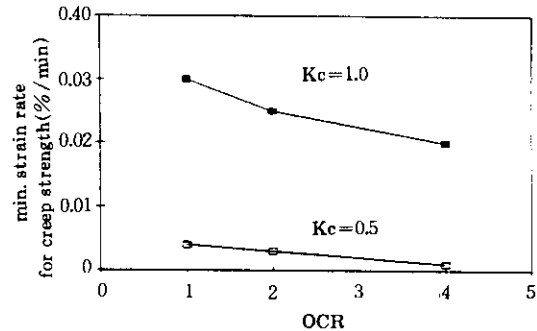


Fig. 4.5 Influence of stress history on minimum strain rate for the creep strength

4.3 상한항복강도

상한항복강도는 크리프는 일어나지만 크리프로 인한 파괴는 일어나지 않는 응력중에서 가장 큰 축차응력으로서 Finn 과 Shead(1973)는 식 (2.2)와 같이 나타내었다.

압밀응력비가 1.0인 경우 상한항복강도는 표 4.1.에서 나타낸 바와 같이 과압밀비가 1, 2, 4인 경우 각각 1.52, 1.75, 2.05kg/cm² 이고, 압밀응력비가 0.5인 경우에도 각각 1.30, 1.56, 1.85kg/cm² 이다. 이 상한항복강도는 크리프 시험에서 크리프파괴가 일어나는 최소크리프응력과 크리프파괴가 일어나지 않는 최대크리프응력 사이에 존재하므로 상한항복강도는 압밀응력비나 과압밀비에 관계없이 크리프강도를 잘 나타내어 주는 것으로 판단된다.

상한항복강도로 나타낸 이 크리프강도는 그림 4.6.에서 볼 수 있는 바와 같이 압밀응력비와 과압밀비가 증가할수록 증가한다. 그러나 평균압밀응력으로 정규화한 상한항복강도는 그림 4.7.에서와 같이 과압밀비와 함께 증가하나 압밀응력비가 0.5인 경우가 1.0일 때 보다 더 큰 값을 보인다. 이는 점토가 이방압밀응력 하에서 흙의 구조가 최대압밀 주응력방향의 응력에 더 잘 저항할 수 있도록 이방성으로 발달되었기 때문인 것으로 생각된다.

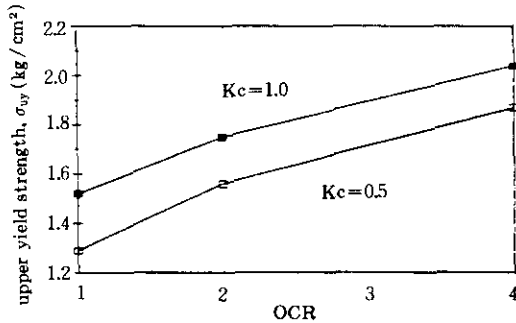


Fig. 4.6 Influence of stress history during consolidation on the upper yield strength

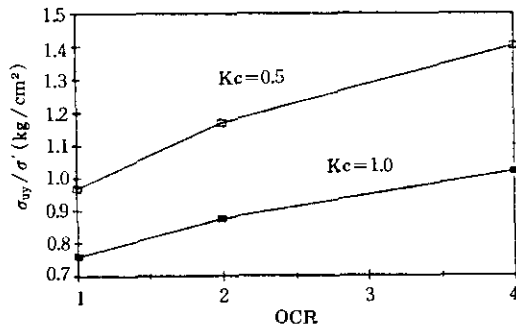


Fig. 4.7 Influence of stress history on the upper yield strength normalized by mean consolidation pressure

상한항복강도와 \overline{CU} 삼축압축시험으로부터 구한 최대축차응력과의 비는 그림 4.8.에서와 같이 과압밀비가 클수록 증가하며 압밀응력비가 0.5인 경우가 1.0일 때보다 낮다. 즉 과압밀

비가 클수록 그리고 압밀응력비가 1.0인 경우가 0.5인 경우보다 크리프강도가 최대축차응력에 근접하게 되어 크리프파괴의 가능성이 줄어들게 된다. 이는 과압밀비와 압밀응력비가 클수록 선행압밀응력의 크기가 크므로 더 큰 선행압밀응력하에서 크리프파괴에 대한 저항력이 증가되었기 때문인 것으로 판단된다.

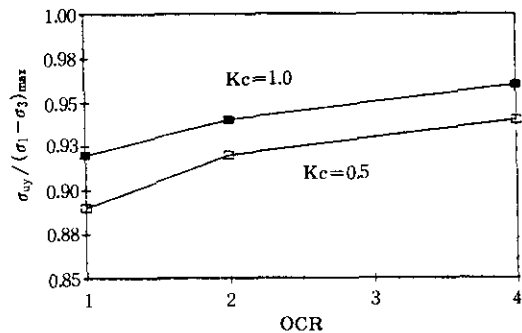


Fig. 4.8 Influence of stress history on the ratio of upper yield strength and maximum deviator stress

4.4 한계변형률

Campanella 와 Vaid(1974)는 최소변형률속도 즉 파괴가 시작되는 변형률을 한계변형률이라고 정의하고 이 한계변형률은 크리프응력의 크기에 관계없이 일정하다고 하였다. 그림 4.9.에서 볼 수 있는 바와 같이 한계변형률은 크리프응력의 크기에 따라 약간의 차이는 있으나 일정한 압밀응력비와 과압밀비에서는 거의 비슷한 값을 나타내고, 또한 과압밀비가 커짐에도 불구하고 비교적 일정한 값을 유지한다. 그리고 압밀응력비가 클수록 한계변형률은 크며 압밀응력비가 1.0인 경우가 0.5인 경우보다 약 5배정도 크게 나타났다. 압밀응력비가 클수록 한계변형률이 큰 사실은 Campanella 와 Vaid (1974)와, 강 과 홍(1993)의 연구결과와도 잘 일치한다.

이러한 사실을 미루어 보면 실내시험에서 통상 수행되고 있는 등방압밀에 의한 실험들이

현장의 응력조건과 이방성을 고려하지 않고 행해지므로서 한계변형률에 의해서 원위치의 크리프파괴를 예측하는 것은 원위치의 압밀응력비가 1.0보다 적을 경우 대단히 위험하다는 것을 알 수 있으며, 이러한 경향은 과압밀비의 크기에 관계없이 뚜렷하게 나타난다.

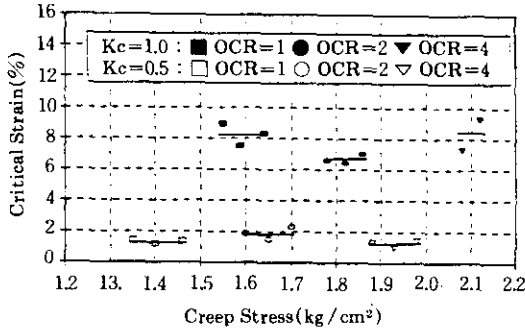


Fig. 4.9 Relationship between critical strain and creep stress for different values of Kc and OCR

4.5 Singh 과 Mitchell의 크리프방정식의 적용

Singh 과 Mitchell(1968)의 크리프방정식인 식 (2.1)의 계수 m은 크리프파괴가 일어나지 않는 응력 범위내에서는 응력의 크기에 관계없이 일정한 재료특성치로서 실험결과 일반적으로 0.75~1.0 범위를 갖는 것으로 알려져 있다 (Singh 과 Mitchell, 1968).

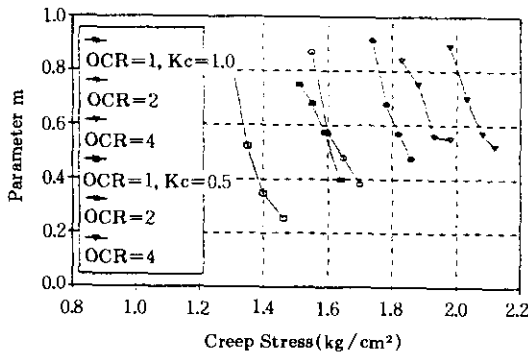


Fig. 4.10 Relationship between parameter m and creep stress for different values of Kc and OCR

그러나 크리프파괴가 일어나는 응력범위에서는 m치는 압밀응력비와 과압밀비에 관계없이 크리프응력의 증가에 따라 일정한 비율로 모두 크게 감소하고 있음을 그림 4.10.에서 볼 수 있다. 그리고 동일한 m값에 대한 크리프응력은 압밀응력비가 클수록 그리고 과압밀비가 클수록 크다.

5. 결론

이방압밀이 과압밀점토의 비배수 크리프 파괴 거동에 미치는 영향을 연구하기 위하여 2가지의 압밀응력비로서 정규압밀 및 과압밀시킨 점토로서 비배수 크리프파괴시험을 한 결과 다음과 같은 사실을 얻었다.

- 1) 압밀응력비와 과압밀비의 크기에 관계없이 크리프응력이 클수록 최소변형률속도는 증가하고, 이 최소변형률속도에 이르는 시간은 감소한다.
- 2) 크리프파괴를 일으킬 수 있는 최소크리프 응력 즉 크리프강도는 과압밀비가 클수록 그리고 압밀응력비가 클수록 증가한다.
- 3) 평균압밀응력으로 정규화한 크리프강도 역시 과압밀비가 클수록 증가하나 압밀응력비가 클수록 오히려 감소한다.
- 4) 크리프강도는 압밀응력비와 과압밀비의 크기에 관계없이 Finn 과 Shead(1973)가 제안한 상한항복강도식으로 잘 나타낼 수 있다.
- 5) 크리프강도와 CU 삼축압축시험으로부터 구한 최대축차응력과의 비는 과압밀비와 압밀응력비가 클수록 더 크다.
- 6) 크리프파괴가 일어나는 최소변형률속도는 과압밀비가 증가할수록 감소하나 압밀응력비가 클수록 크다.
- 7) 최소변형률속도에서의 변형률인 한계변형률은 과압밀비의 크기에 관계없이 거의 일정하나 압밀응력비가 클수록 크다.
- 8) 정지토압계수가 1.0보다 적은 원위치에서

의 크리프파괴거동을 실내의 등방압밀시험에 의해서 평가하고자 할 경우 위의 2), 6) 및 7)항에 의해서 대단히 위험한 방향으로 예측하게 된다.

- 9) Singh 과 Mitchell의 방정식의 m계수는 크리프응력의 증가에 따라 크게 감소하며 동일한 m계수 값에 대한 크리프응력은 압밀응력비가 클수록, 그리고 과압밀비가 클수록 크다.

감사의 말

본 연구는 1994년도 인하대학교 연구비 지원에 의해서 수행되었음.

참고 문헌

1. 강병희, 홍의(1993), "이방정규압밀점토의 비배수 크리프 파괴." 한국지반공학회지, 제9권, 제4호, pp.55~63
2. Campanella, R. G. and Vaid, Y. P.(1974), "Triaxial and Plane Strain Creep Rupture of an Undisturbed Clay," Canadian Geotechnical Journal, Vol.11, No.1, pp.1~10.
3. Casagrande, A. and Wilson, S. D.(1951), "Effect of Rate of Load on the Strength of Clays at Constant Water Content," Geotechnique, Vol.2, No.3, pp.251~263.

4. Edgers, L., Ladd, C.C. and Christian, J.T. (1973), "Undrained Creep of Atchafalaya Levee Foundation Clays," Report R73-16, No. 319, Dept. of Civil Eng., MIT, Cambridge, 600p (Vol.2)
5. Finn, W. D. L. and Shead, D.(1973), "Creep and Creep Rupture of an Undrained Sensitive Clay," Proc. 8th ICSMFE, Vol.1-1, pp.135~142.
6. Ladd, C. C., et al.(1977), "Stress-deformation and Strength Characteristics", Proc. 9th ICSMFE, state-of-the-art. Vol.2, pp. 421~494.
7. Mitchell, J. K.(1993), Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley, pp. 283~339.
8. Murayama, S. and Shibata, T.(1961), "Rheological Properties of Clay," Proc. 5th ICSMFE, Paris, Vol.1, pp. 269~273.
9. Sherif, M. A.(1965), "Flow and Fracture of Seattle Clays," Research Series No.1, Univ. of Washinton, Soil Engineering.
10. Singh, A. and Mitchell, J. K.(1968), "General Stress-strain-time Function for Soils," J. SMFD, ASCE, Vol.94, No.SM1, pp.21~46.
11. Ter-Stepanian, G.(1975), "Creep of a Clay During Shear and its Rheological Model", Geotechnique, Vol.25, No.2, pp.299~320
12. Vialov, S. and Skibitsky, A.(1957), "Rheological Processes in Frozen Soils and Dense Clays," Proc. 4th ICSMFE, Vol.1, pp. 120~124.

(접수일자 1996. 9. 6)