

풍화토의 크리프 특성 및 Singh-Mitchell 크리프 방정식 적용성 검토

Creep Characteristics of Weathered Soils and Application of Singh-Mitchell's Creep Formula

봉태호* · 손영환**† · 김성필*** · 허준**** · 장병욱*****

Bong, Tae-Ho* · Son, Young-Hwan**† · Kim, Seong-Pil*** · Heo, Jun**** · Chang, Pyoung-Wuk*****

ABSTRACT

Soils exhibit creep behavior in which deformation and movement proceed under a state of constant stress or load. In Korea, weathered soil is abundant and occupies around one-third of the country. Weathered soil is visually described as a sandy or gravelly soil, but the behavior is quite different from the behavior of usual sand and gravel. In particular, the permeability of weathered soil is similar to sand, but the durability of settlement is similar to clay. Therefore analysis of time-dependent behavior of weathered soil is very important. In this study, Creep tests with weathered soils were carried out under constant principal stress differences of various stress levels which were experimentally obtained by triaxial compression test. The results of these tests showed the creep behavior for which the deformation increased with time, and the results are consistent with phenomenological model by creep equation of Singh-Mitchell.

Keywords: Creep; weathered soil; singh-mitchell; time-dependent behaviour

1. 서 론

일정한 응력이나 하중이 작용하고 있는 임의의 재료는 시간이 경과함에 따라 변형이 발생하는 크리프 거동을 나타낸다. 흙의 경우 다른 재료에 비해 간극이 존재하고 연약하여 일정한 하중에 대해 보다 큰 변형을 일으킨다 (Park et al, 1999). 크리프의 거동은 흙의 종류, 구조, 응력이력, 적용 응력상태, 함수비, 온도 등 많은 인자들에 의하여 지배를 받는데, 특히 함수비 및 응력수준에 따라 큰 차이가 있는 것으로 알려져 있으며 하중의 크기에 따라서 파괴에 이르는 경우도 있으며 변형이 멈추어 파괴가 발생하지 않기도 한다 (Jarosav Fesa, 1992).

흙의 시간 의존적 변형은 공학적으로 큰 문제점 중 하나로 Casagrande와 Wilson (1951)은 처음으로 배수, 비배수 실험 결과 흙에서 크리프 파괴 현상의 존재를 밝혔으며, Murayama와 Shibata (1961), Christenson과 Wu (1964)는 흙의 크리프 거동을 유변학적 모델에 의해 해석하는 연구를 수행하였다. 또한, Murayama 등 (1984)은 모래에 대한 크리프 특성을 연구하였으며, McDowell과 Khan (2003)은 입상토에 대한 크리프 특성을 연구한 바 있다. 우리나라의 경우, 정 등 (1991)이 해성점토의 크리프 특성에 관한 연구를 수행하였으며, Kang and Hong (1993)은 이방정규압밀점토에 대하여 비배수 크리프 파괴에 대한 연구를 수행하였다. 또한, Lee (1998)는 정규압밀 점토에 대한 시간의존 변형거동을 연구하기 위하여 비배수조건 시 크리프 특성을 구명하였으며, 김대규 (2004)는 점성토에 있어서의 크리프 거동의 예측에 관한 연구를 수행하였다.

이외에도 흙의 시간 의존적 변형에 대한 많은 연구가 지반공학자들에 의해 이루어 졌지만 대부분 시간 의존적 성질이 두드러지는 점토에 대한 연구 (Edward et al., 1980; Ronaldo, 1992)가 수행되었으며, 그 이외의 흙에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.

우리나라의 경우 전역에 걸쳐 풍화토가 광범위하게 분포하고

* 서울대학교 지역시스템공학과 박사과정
** 위스콘신주립대학교 토목및환경공학과 연구원
*** 한국농촌공사 농여촌연구원
**** 한국농촌공사 농여촌연구원
***** 서울대학교 지역시스템공학과 교수
† Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4593
Fax: +82-2-873-2087
E-mail address: scott86@empal.com

2009년 10월 16일 투고
2009년 11월 10일 심사완료
2009년 11월 23일 게재확정

있으며 도로건설, 사면조성, 댐건설, 구조물의 기초공사 등이 풍화토 지반에서 빈번히 행해지고 있다. 풍화토는 풍화가 진행됨에 따라 내부에 매우 점토화된 흙입자를 포함하고 있어 투수계수는 사질토와 유사하지만 침하의 지속성은 점성토와 유사한 거동을 보이며 이는 점성토에서와 같이 간극수압의 소산에 의해 발생하는 압밀이 아니며 흙 입자의 크리프변형에 의존하는 것이다.

즉, 풍화토 지반은 즉시침하가 일어난 이후에는 점토와 같이 지속적인 침하가 발생하는데 본 연구에서는 이러한 풍화토의 크리프 거동을 분석하기 위하여 서로 다른 지역의 시료를 채취하여 크리프 시험을 수행하였다. 또한, 풍화토 지반에 구조물 설계 시 크리프 변형을 정략적으로 예측하여 설계에 반영할 수 있도록 풍화토 크리프 실험결과를 바탕으로 현상학적 모델인 Singh-Mitchell 크리프 방정식의 적용성을 평가하였다.

II. Singh-Mitchell 크리프 방정식

흙에서 크리프란 일정한 응력 하에서 흙 구조의 점성저항에 의해 일어나는 시간의존성 전단 또는 체적변형으로 정의된다.

크리프 거동은 크리프 곡선을 통하여 알 수 있는데, 크리프 곡선이란 일정한 응력이나 하중이 작용하는 재료의 시간에 따른 변형률을 나타내며 크게 비감쇄 (Non-attenuating) 크리프 곡선과 감쇄 (Attenuating) 크리프 곡선으로 나눌 수 있다.

Singh와 Mitchell (1968)은 삼축시험을 통하여 일정한 응력을 받는 점토의 거동을 시간-변형률속도 (time-strain rate), 응력수준-변형률속도 (stress level-strain rate)의 관계로 나타내고 식 (1)과 같은 점토의 시간의존적인 거동특성에 대한 반경험적인 현상학적 모델을 개발하였다.

$$\dot{\epsilon}_a = A e^{\bar{a}D} \left(\frac{t_i}{t}\right)^m \quad (1)$$

여기서, t_i : 기준시간

A : $\bar{D}=0$ 일 때의 변형률 속도

\bar{a} : 응력에 대한 변형률 속도의 기울기

m : 임의의 \bar{D} 에서 $\ln t$ 와 $\ln \dot{\epsilon}_a$ 의 기울기

식 (1)은 변형률 속도에 대한 방정식으로 시간으로 미분하여 식 (2)와 식 (3)과 같은 변형률에 대한 방정식을 얻을 수 있다.

$$\epsilon = A e^{\bar{a}D} (t_1) \left(\frac{1}{1-m}\right) t^{1-m} + constant \quad (m \neq 1) \quad (2)$$

$$\epsilon = A e^{\bar{a}D} t_1 \ln t + constant \quad (m=1) \quad (3)$$

Singh와 Mitchell이 제시한 현상학적인 크리프 모델은 실제로 응력의 크기가 어느 수준이상이 되면 크리프 파괴에 의하여 시간-변형률 속도의 그래프가 시간이 지남에 따라 직선에서 더 큰 변형률 속도를 나타내는 곡선으로 나타나기 때문에 크리프 정수를 구할 수 없다. 따라서 이 모델의 적용범위는 최대축차응력의 약 30~80% 응력수준 (\bar{D})을 적용할 때이다. 그러므로 본 연구에서는 최대축차응력의 40%에서 80%까지 다양한 축차응력을 적용하여 크리프 실험을 수행하였다.

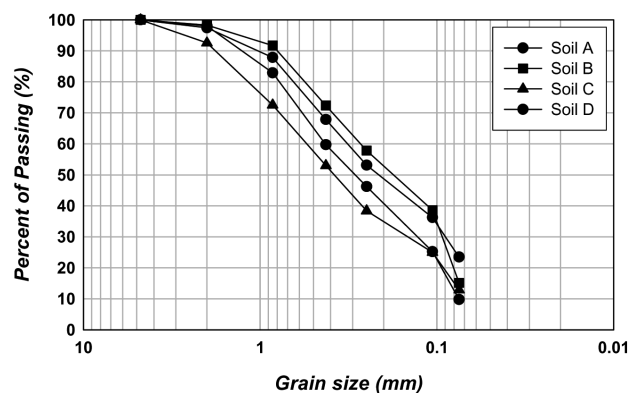
III. 재료 및 실험방법

1. 재료

본 연구에 사용된 시료 A는 경기도 화성지역에서 채취하였으며 시료 B, C 그리고 D는 전남 남원지역에서 채취하였다. 시료의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

Table 1 Physical properties of soils

Soil	Depth (m)	Specific Gravity (G_s)	USCS	LL (%)	PL (%)	γ_{dmax} (kN/m^3)	OMC (%)
A	3.0	2.72	SM	NP	NP	16.49	20.3
B	1.5	2.68	SM	NP	NP	16.15	13.9
C	2.2	2.67	SM	NP	NP	16.57	15.5
D	2.7	2.69	SM	NP	NP	16.85	15.2



2 실험방법

가. 시료의 재성형

시료는 표준 A 다짐 (KS F 2312)을 통하여 구한 OMC를 기준으로 하여 재성형하였다. 시료의 크기는 지름 5 cm, 높이

Table 2 Testing conditions of soils

Soil	Stress level (%)	Max. deviator Stress (kPa)	Confining Stress (kPa)	Sustained deviator Stress (kPa)
A	60	137.4	150.0	82.4
	80			109.9
B	45	374.2	150.0	168.4
	70			261.9
C	55	479.1	150.0	263.5
	80			383.3
D	50	540.1	150.0	270.1
	70			378.1

10 cm이며, 시료의 파쇄를 최소화하기 위해 정적다짐을 적용하였다. 또한, 응력이 고르게 분포하도록 시료에 하중을 가한 뒤 3시간 후에 하중을 제거하였다.

나. 삼축압축시험

재성형한 시료는 삼축압축시험에서 간극수압계수 B값이 0.95 이상이 되도록 포화시킨 후 150 kPa로 등방압밀시켰다. 압밀은 시간이 경과하여도 시료의 체적변화가 발생하지 않을 때까지 수행하였다. 압밀이 완료된 후, 비배수상태에서 변형을 제어 방식을 적용하였으며, 4.8 mm/hr의 변형률속도를 적용하여 최대축차응력을 구하였다.

다. 크리프 실험

본 실험에서는 삼축시험기를 이용하여 구속압을 일정하게 유지하였다. 또한, 비배수 상태에서 최대축차응력을 기준으로 두 가지 응력수준의 축차응력을 적용하여 시간에 따른 변위를 측정하였다. 각 응력수준에 대한 실험조건은 Table 2와 같다.

IV. 결과 및 고찰

1. 최대축차응력

삼축압축시험에 의한 응력-변형률곡선은 Fig. 1과 같다. Soil A의 경우 축차응력이 증가해도 시료의 급격한 파괴는 발생하지 않고 시료의 변형이 계속 증가하는 경향이 나타났으며 Soil B, C, D의 경우 축차응력이 증가함에 따라 시료의 변형은 계속 증가하다 일정 변형률 이상이 되면 시료의 파괴가 발생하여 축차응력이 다시 감소하는 경향을 나타내었다.

2. 크리프 변형

실험결과 4개의 시료 모두 낮은 응력수준 하에서도 시간이 지남에 따라 변형률이 점차 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

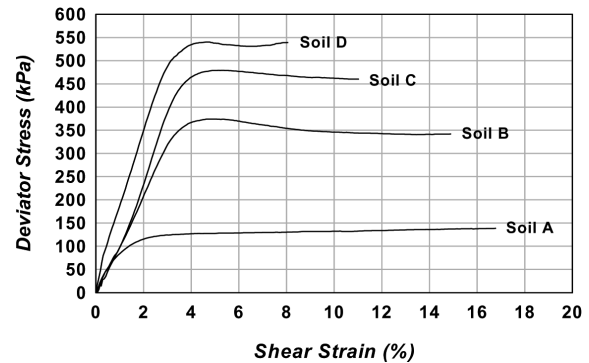


Fig. 1 Relationship between Stress and strain

특히 응력수준이 커지면 시료의 시간에 따른 변형도 더 크게 나타났다. Fig. 2는 각 시료의 응력수준에 대한 시간-변형률을 나타낸 것이다.

시료에 따른 크리프 변형을 비교해보면 응력수준에 따른 변형의 차가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 특히 Case 1과 Case 4 시료의 경우 응력수준 차이에 따른 시료의 변형이 비슷한 응력수준 차이를 가지고 있는 Case 2와 Case 3의 경우에 비하여 매우 큰 차이가 발생한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 크리프 변형은 응력수준에 따른 변형률의 차이뿐만 아니라 흙의 종류와 구조, 입도 분포 및 풍화도, 함수비 등 시료의 특성에 따라서도 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.

3. Singh과 Mitchell의 크리프 정수

Singh과 Mitchell의 크리프 정수를 구하기 위해서 응력수준-변형률속도 관계와 시간-변형률속도관계를 확인하였다. 여러 가지 시간에 대한 응력수준-변형률속도 관계를 그래프로 나타내면 Fig. 3과 같다.

응력이 증가할수록 변형률 속도는 증가하였으며 같은 응력수준에서 시간이 경과함에 따라 변형률속도는 감소하였다. 각 시간에 대한 응력-변형률 속도 그래프는 반대수용지에 나타내었을 때 직선으로 나타낼 수 있으며, 시간에 관계없이 거의 일정한 기울기를 갖는다. 여기서 기준시간은 10분이며 A는 기준시간에서 축차응력이 0일 때의 값을 나타낸다.

각 시간에 대한 응력-변형률속도 관계를 회귀분석을 통하여 회귀식과 크리프 정수 A와 α 를 구하였다. 이에 대한 결과는 Table 3과 같다.

각 시간에 대한 응력-변형률 속도 관계는 회귀식을 통하여 알 수 있다. 크리프 정수 α 의 평균값은 Soil A의 경우 0.431, Soil B의 경우 0.0029, Soil C의 경우 0.0067, Soil D의 경우 0.0173의 값을 나타냈으며 시간에 따른 차이가 거의 발생하지 않아 시간에 관계없는 흙의 크리프 특성치임을 알 수 있었다.

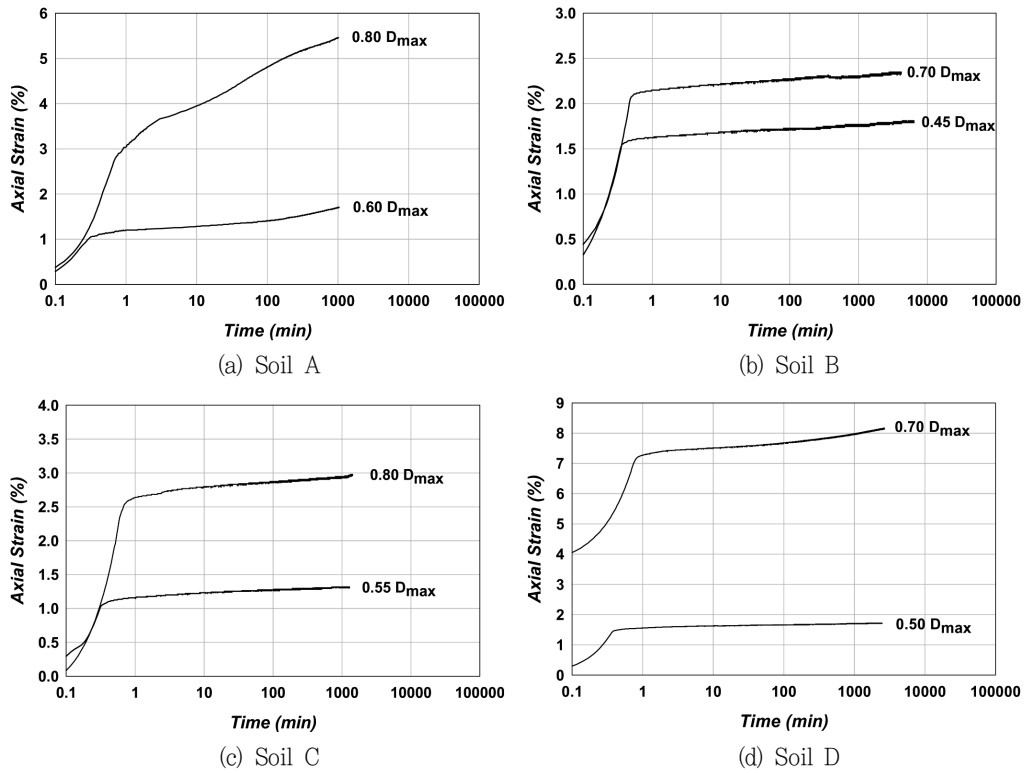


Fig. 2 Relationship between time and strain

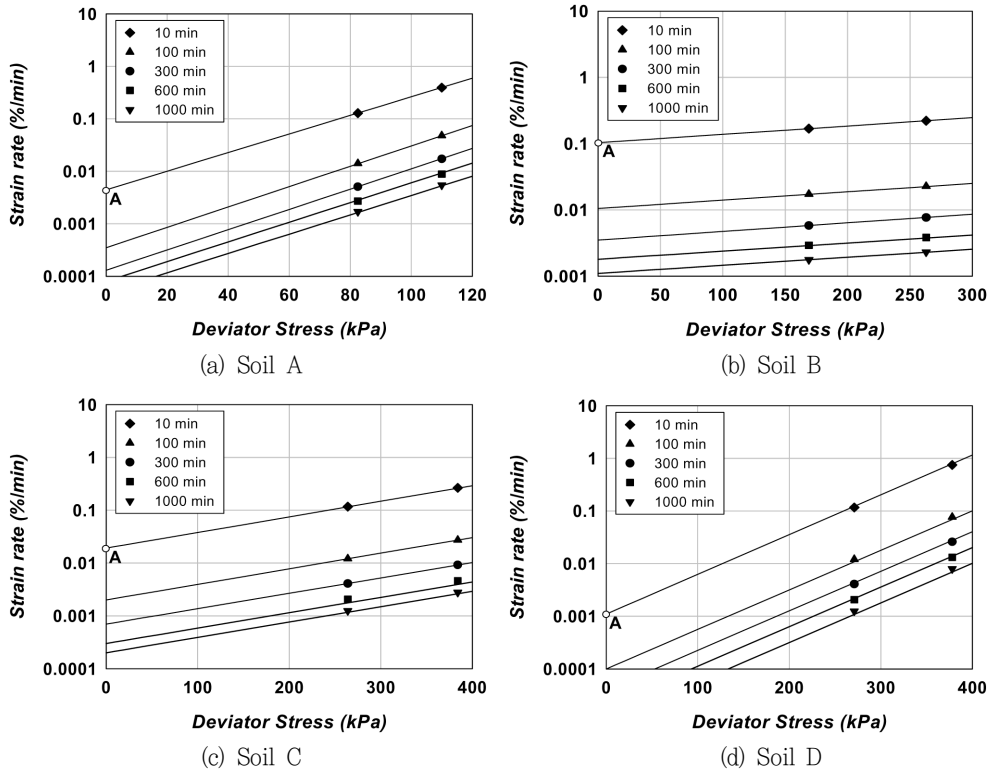


Fig. 3 Relationship between deviator stress levels and strain rate for various times

Table 3 Relationship between deviator stress levels and strain rate for various times and Creep parameter A, α

Case	A	시간 (분)	회귀식	α	α 평균
1	0.0044	10	$y=0.0044e^{0.0408x}$	0.0408	0.0431
		100	$y=0.0004e^{0.0446x}$	0.0446	
		300	$y=0.00013e^{0.0445x}$	0.0445	
		600	$y=0.00008e^{0.0432x}$	0.0432	
		1000	$y=0.00005e^{0.0423x}$	0.0423	
2	0.1032	10	$y=0.1032e^{0.0029x}$	0.0029	0.0029
		100	$y=0.0105e^{0.0029x}$	0.0029	
		300	$y=0.0035e^{0.003x}$	0.0030	
		600	$y=0.0018e^{0.0028x}$	0.0028	
		1000	$y=0.0012e^{0.0028x}$	0.0028	
3	0.0192	10	$y=0.0192e^{0.0068x}$	0.0068	0.0067
		100	$y=0.002e^{0.0068x}$	0.0068	
		300	$y=0.0007e^{0.0067x}$	0.0067	
		600	$y=0.0003e^{0.0067x}$	0.0067	
		1000	$y=0.0002e^{0.0067x}$	0.0067	
4	0.0011	10	$y=0.0011e^{0.0174x}$	0.0174	0.0173
		100	$y=0.0001e^{0.0143x}$	0.0173	
		300	$y=0.00004e^{0.0173x}$	0.0173	
		600	$y=0.00002e^{0.0173x}$	0.0173	
		1000	$y=0.00001e^{0.0173x}$	0.0173	

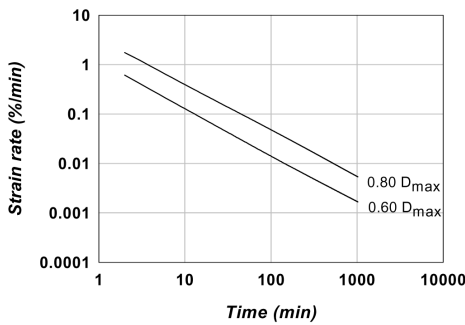
Fig. 4는 여러 가지 응력수준에 대한 시간-변형률속도의 관계를 나타낸 그래프로 대수용지에 나타낸 시간과 변형률 속도의 관계는 거의 직선으로 나타났다.

Table 4 Relationship between time and strain rate for various stress levels and Creep parameter m

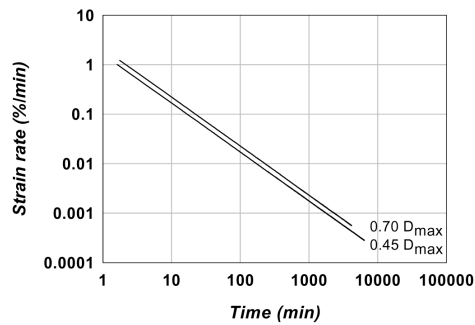
Soil	응력수준 (%)	회귀식	m	m 평균
A	60	$y=3.6080x^{-0.9390}$	0.9390	0.9325
	80	$y=1.0067x^{-0.9259}$	0.9259	
B	45	$y=1.6243x^{-0.9879}$	0.9879	0.9894
	70	$y=2.17121x^{-0.9909}$	0.9909	
C	55	$y=1.1914x^{-0.9857}$	0.9857	0.9869
	80	$y=2.7155x^{-0.9881}$	0.9881	
D	50	$y=7.074x^{-0.9823}$	0.9823	0.9860
	70	$y=1.582x^{-0.9896}$	0.9896	

Table 5 Singh-Mitchell's creep parameters

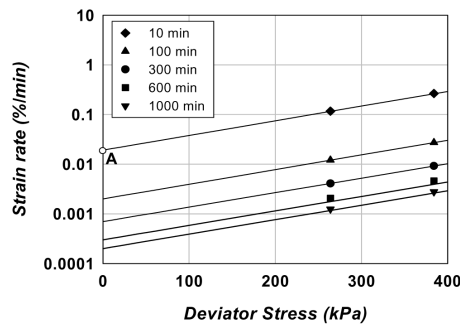
Soil	A	α	m
A	0.0044	0.0431	0.9325
B	0.1032	0.0029	0.9894
C	0.0192	0.0067	0.9869
D	0.0011	0.0173	0.9860



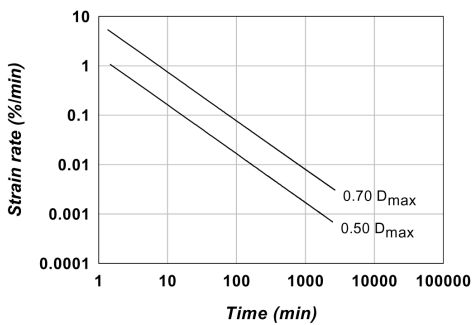
(a) Soil A



(b) Soil B



(c) Soil C



(d) Soil D

Fig. 4 Relationship between time and strain rate for various stress levels

각 응력수준에 대한 시간-변형률 속도 관계는 Table 4에 나타내었다. 크리프 정수 m 은 직선 기울기의 절대값으로 시료의

평균 m 값은 Soil A의 경우 0.9325, Soil B의 경우 0.9894, Soil C의 경우 0.9869, Case 4의 경우 0.9860의 값을 나타내

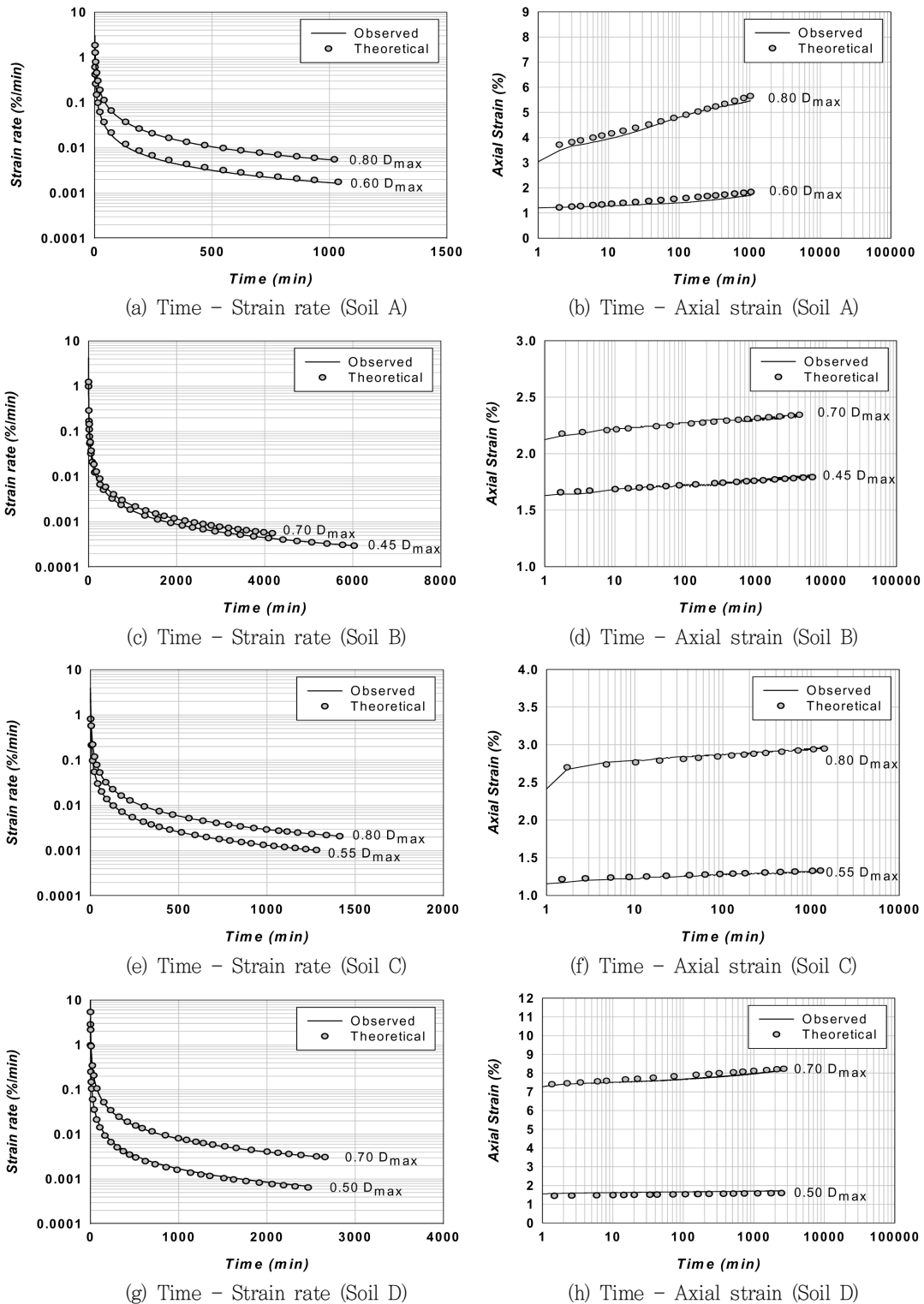


Fig. 5 Comparison between theoretical and observed creep behavior

었다. 여기서 크리프 정수 m 은 응력수준에 대해 거의 차이가 발생하지 않아 크리프 정수 α 와 마찬가지로 흙의 크리프 특성을 나타내는 물성치임을 알 수 있다.

실험 결과를 통하여 구한 Singh-Mitchell의 크리프 계수 평균값은 Table 5에 나타내었다.

4. 실험값과 이론식의 비교

실험 결과를 통하여 구한 크리프 정수를 Singh-Mitchell의 크리프 방정식에 적용하였다. Fig. 5는 각 시료의 시간-변형률 속도와 시간-변형률의 관계에서 실험값과 Singh-Mitchell의 크리프 방정식에 의한 이론값을 비교한 그래프이다. 각 응력수준에 대하여 실험값과 이론식을 통해 구한 값은 비교적 잘 일치하였다.

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 풍화토의 시간의존적인 크리프 변형을 살펴보기 위하여 응력수준을 달리하며 크리프 실험을 수행하고 그 거동을 분석하였다. 그리고 실험결과를 현상학적 해석모델인 Singh-Mitchell의 크리프 모델에 적용하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 재생형한 풍화토 시료에 최대축차응력에 따른 여러 가지 응력수준의 축차응력을 적용하여 크리프 실험을 수행한 결과, 시간이 경과함에 따라 변형률 속도는 감소하였지만 변형률은 계속 증가하는 경향을 나타내었다.

2. 시료의 변형은 응력수준이 클수록 높게 나타났지만 흙의 종류 및 조건에 따라서 응력수준에 따른 크리프 변형률의 차이는 시료마다 다른 것으로 나타났다.

3. 최대축차응력의 45~80%의 여러 가지 응력수준을 적용한 결과 크리프에 의한 급격한 파괴는 발생하지 않았지만 시간이 지남에 따라 시료의 변형이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 크리프 정수 α 는 시료에 따라서는 다른 값을 나타내었으나 시간에 따른 차이는 거의 발생하지 않았으며, 크리프 정수 m 도 시료에 따라서는 다른 값을 나타내었으나 응력수준에 대해서 차이가 거의 발생하지 않아 흙의 고유한 성질을 나타내는 특성치임을 알 수 있다.

5. Singh-Mitchell의 이론식을 통하여 구한 값과 실험결과를 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으며 응력수준이 최대축차응력의 30~80%인 경우 Singh-Mitchell의 크리프 방정식을 통하여 시간에 따른 풍화토의 크리프 거동을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Casagrande, A. and Wilson, S. D., 1951, Effect of rate of load on the strength of clays at constant water content, *Geotechnique* 2(3): 251-263.
2. Chung, H. S., An, S. R., Lee, S. H., 1991, A Study on the Creep Characteristics of Marine Clay, *Journal of Korean Geotechnical Society* 7(4): 65-73.
3. Edward Kavazanjian, Jr., James K. Mitchell, 1980, Time-Dependent Deformation Behavior of Clays, *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 106(6): 611-630.
4. G.R. McDowell & J.J. Khan, 2003, Creep of granular materials, *Granular Matter* 5: 115-120.
5. Jarosav Fesa, 1992, Creep of soils and related phenomena, ELSEVIER.
6. Kang, B. H., Hong, E., 1993, Undrained Creep Rupture of an Anisotropically Normally Consolidated Clay, *Journal of Korean Geotechnical Society* 9(4): 55-63.
7. Kim, D. K., 2004, Prediction of Creep Behavior for Cohesive Soils, *Journal of Korean Geotechnical Society* 20(7): 79-90.
8. Lee, S. H., 1998, A study on the Undrained Creep Properties of the Undisturbed Normally Consolidated Clays, *M.S. Thesis, Pusan University*.
9. Leong, K. and Chu, 2002, Effect of undrained creep on instability behavior of loose sand, *Canadian Geotechnical Journal* 39: 1399-1405.
10. Murayama, S. and Shibata, T., 1961, Rheological properties of clay, *Proc. 5th ICSMFE, Paris* 1: 269-273.
11. Park, C. S., 1996, The Characteristics of Weathered Soils, *engineers*.
12. Park, S. Z., Cho, K. T., Jeoung, J. H., 1999, The Time Dependent Stress-Strain Behaviour of Clays Based from the Consolidation Creep Test, *Journal of KSCE* 19(3-1): 117-127.
13. Reiko Kuwano and Richard J. Jardine, 2002, On measuring creep behaviour in granular materials through triaxial testing, *Canadian Geotechnical Journal* 39: 1061-1074.
14. Ronaldo I. Borja, 1992, Generalized Creep and Stress

- Relaxation Model for Clays, *Journal of Geotechnical Engineering* 118(11): 1765-1786.
15. Sakuro Murayama, Kazutoshi Michihiro and Toshihiko Sakagami, 1984, Creep characteristics of sands, *Soils and foundations* 24(2): 1-15.
16. Singh, A. and Mitchell, J. K., 1968, General stress-strain-time function for soils, *ASCE* 94(1): 21-46.