



실트질 모래의 비배수 크리프특성 및 크리프 모델 비교연구

Undrained Creep Characteristics of Silty Sands and Comparative Study of Creep model

봉태호* · 손영환**† · 노수각* · 박재성*

Bong, Tae-Ho · Son, Young-Hwan · Noh, Soo-Kack · Park, Jae-Sung

ABSTRACT

Soils exhibit creep behavior in which deformation and movement proceed under a state of constant stress or load. In this study, A series of triaxial tests were performed under constant principal stress in order to interpret the undrained creep characteristics of silty sands. Although samples are non-plastic silty sands, the results of tests show that the creep deformation increasing over time. Based on the results of test, Singh-Mitchell model parameters and Generalized model coefficients were calculated. Generalized model showed slightly larger deformation in the primary creep range but secondary creep deformation was almost identical. Although Singh-Mitchell model showed relatively large errors compared to Generalized model because it uses the average of test results, but Singh-Mitchell model can be easily represented by three creep parameters.

Keywords: Creep; phenomenological model; rheological model; singh-mitchell; generalized model

1. 서 론

흙의 시간의존적인 거동은 흙의 종류, 응력이력, 함수비, 구속 조건 등에 따라 다르게 나타나지만 흙의 종류에 따라 고유한 시간 의존적 특성을 가지고 있다. 흙의 시간 의존적 변형에 대한 연구는 초기에 대부분 시간 의존적 성질이 두드러지는 점토에 대한 연구가 수행되었으며 (Ronaldo, 1992) 이후 일부 학자들이 모래와 같은 입상토에 대한 시간 의존적 성질을 연구하기도 하였다 (Murayama et al., 1984; Lade and Liu, 1998; Kuwano and Jardine, 2002; Leong and Chu, 2002; Nawir et al., 2002; McDowell and Khan, 2003; Kiyota et al., 2005). 우리나라의 경우, Chung et al (1991)과 Kang and Hong (1993), Lee (1998), Kim (2004) 등이 점토에 대한 크리프 연구를 수행한 바 있으며 Park et al. (2007)과 Bong et al. (2009)은 풍화토에 대한 크리프 연구를 수행한 바 있다.

사질토 지반의 시간의존적인 거동은 다른 지반에 비하여 두드러지지 않으므로 시간에 따른 변형에 대하여 안정하다는 인식과

함께 현장이나 기초조사에서 중요하게 인식되지 않으며 이에 대한 많은 연구가 이루어지지 않았다. 사질토의 경우 투수성이 커서 배수조건의 경우 간극수압이 거의 발생하지 않는다. 또한 사질토의 잘 알려진 다른 특성 중 하나는 점착력이 존재하지 않는다는 것이며 이는 사질토의 흙 입자사이에 물리·화학적 결합력이 없다는 것을 의미한다. 따라서 배수조건에서 사질토의 크리프 거동은 간극수압에 따른 영향을 받지 않아 쉽게 관측될 수 있다. 하지만 비배수 조건의 경우 간극수압이 발생할 뿐만 아니라 겉보기 점착력 등의 발생으로 인하여 배수조건과 다른 크리프 거동을 나타낸다. 따라서 비배수 조건에서 사질토의 크리프 거동을 파악하고 이를 규명하는 것은 중요하다고 할 수 있다. 사질토 지반의 크리프 거동의 해석은 장기적인 지반의 침하량을 예측하는 것뿐만 아니라 거동에 따른 1차 크리프 및 2차 크리프를 구분하고 이에 따른 변형률을 파악하는데 목적이 있다.

크리프 거동을 해석하는 방법으로는 크게 3가지로 구분할 수 있는데 Skempton (1964)은 흙의 전단강도와 관련된 지속하중의 영향으로 흙 입자사이에 존재하는 흡착수에 의한 구조적 점성의 작용을 해석하였고, Singh and Mitchell (1968)은 응력-변형-시간의 함수로 크리프 거동을 현상학적 모델 (phenomenological model)로 해석하고자 하였으며, Christensen and Wu (1964), Murayama and Shibata (1961) 등은 유변학적 모델 (rheological model)로 크리프 거동을 해석하고자 하였다 (Lee, 1998). 각각의 해석방법들은 크리프를 바라보는 관점에 따라 해석하고자 하는 변형률 구간이나 구하고자 하는 계수의 종류가 다르게 나타

* 서울대학교 조경·지역시스템공학부 대학원

** 서울대학교 조경·지역시스템공학과 조교수, 서울대학교 농업생명과학연구원

† Corresponding author Tel.: +81-2-880-4585

Fax: +81-2-873-2087

E-mail: syh86@snu.ac.kr

2011년 6월 8일 투고

2011년 12월 1일 심사완료

2011년 12월 9일 게재확정

난다.

본 연구에서는 포항시 북구 영일만항 해저에서 채취한 퇴적토를 대상으로 크리프 시험을 수행하여 심도별 비배수 크리프 거동을 관찰하였으며 현상학적 모델인 Singh-Mitchell 크리프 모델 및 유변학적 모델 중 하나인 Generalized 모델을 적용하여 시간의존적인 거동을 해석하고 그 차이점을 비교·분석하였다.

II. 크리프 해석 모델

1. Sigh-Mitchell 크리프 모델

Singh and Mitchell (1968)은 삼축시험을 통하여 일정한 응력 (D)을 받는 점토의 거동을 식 (1), (2)와 같은 변형률에 대한 방정식으로 나타내었다.

$$\epsilon = A e^{\alpha D} (t_i)^{\left(\frac{1}{1-m}\right)} t^{1-m} + constant \quad (m \neq 1) \quad (1)$$

$$\epsilon = A e^{\alpha D} t_i \ln t + constant \quad (m = 1) \quad (2)$$

여기서, t_i : 기준시간

A : $\bar{D}=0$ 일 때의 변형률 속도

α : 응력에 대한 변형률 속도의 기울기

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

Singh and Mitchell이 제시한 현상학적인 크리프 모델은 실제로 응력의 크기가 어느 수준 이상이 되면 크리프 파괴에 의

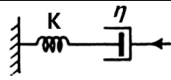
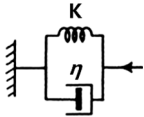
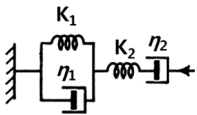
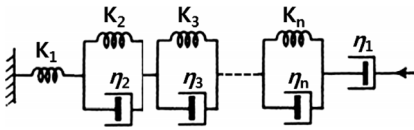
하여 시간-변형률 속도의 그래프가 시간이 지남에 따라 직선에서 더 큰 변형률 속도를 나타내는 곡선으로 나타나기 때문에 크리프 정수를 구할 수 없다. 따라서 이 모델의 적용범위는 최대축차응력의 약 30~80 % 응력수준 (\bar{D})을 적용할 때이다.

2. Generalized 모델

흙에서 외력이 작용할 때 생기는 응력-변형률이 시간에 따라 어떻게 영향을 받는가를 알아보기 위해서는 점탄성모델을 이용한다. 점탄성은 재료에 점성과 탄성이 동시에 존재하는 것을 의미하며 실존하는 모든 물질은 점탄성을 가진다고 가정할 수 있다. 점탄성체의 대표적인 특징은 유변물성이 시간의 함수로 나타난다는 것이다. 유변학적 모델은 탄성거동을 하는 스프링 (K)과 완충기 (dashpot- η)의 기본 요소에 근거하여 모델을 표현할 수 있다. Maxwell 모델은 두 요소가 직렬로 연결되어 있으며 Kelvin-Voigt 모델은 두 요소가 병렬로 연결되어 있다. Burgers 모델은 가장 많이 사용되는 모델로 Maxwell 모델과 Kelvin-Voigt 모델의 조합으로서 점성 η_1 과 η_2 를 가지고 있는 두 개의 완충기와 계수 K_1 및 K_2 를 가지고 있는 두 선 (string)의 조합에 기초를 두고 있다. 하지만 Kelvin-Voigt 모델 하나로는 지체 시간 전체를 완전하게 나타내지 못하며 여러 개의 Kelvin-Voigt 모델을 추가로 구성함으로써 보다 광범위한 지체시간을 사용할 수 있는 Generalized 모델을 이용하면 어떠한 점탄성 재료라도 표현할 수 있다. 기본적인 유변학적 모델의 요소 조합 및 크리프 컴플라이언스는 Table 1에 정리하였다.

Generalized 모델에서 Kelvin-Voigt 모델의 수는 사용자가 필요에 따라 조절하여 방정식을 구성할 수 있으며 일반적으로 Kelvin

Table 1 Rheological model and Creep compliance

Model	Symbol	Creep compliance
Maxwell		$J(t) = \frac{1}{K} + \frac{t}{\eta}, \tau = \frac{K}{\eta}$
Kelvin-Voigt		$J(t) = \frac{1}{K}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \tau = \frac{K}{\eta}$
Burgers		$J(t) = \left(\frac{1}{K_1} + \frac{t}{\eta_1}\right) + \frac{1}{K_2}(1 - e^{-\frac{K_2}{\eta_2}t})$
Generalized		$J(t) = \frac{1}{K} + \frac{t}{\eta} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_i}(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}),$ $\tau_i = \frac{\eta_i}{K_i}$

* K : 탄성계수, η : 점성계수

-Voigt 모델의 수가 증가할수록 실측값과 더 잘 맞는 것으로 나타난다.

III. 재료 및 실험방법

1. 재료

본 연구에 사용된 시료는 포항시 북구 흥해읍의 영일만항 해저에서 채취한 퇴적토이다. 시료의 채취는 한 지점의 심도별 시료를 채취하기 위하여 시추조사를 수행하고 코어 샘플링을 통하여 연속적인 시료를 채취하였다. 심도별 코어시료는 Table 2와 같다.

입도분석은 오차를 줄이고 세립분의 분포를 보다 정확히 파악하기 위하여 레이저 회절 입도분석기 (mastersizer 2000)를 이용하여 해석을 실시하였으며 시료의 물리적 특성 및 입도분포곡선은 Table 3, Fig. 1과 같다.

Table 2 Core samples




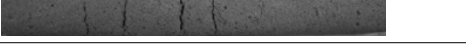
Depth (m)	Core Samples
3~5	
6~7	
8	
9~11	

Table 3 Physical properties of soils

Sample	Depth (m)	Specific Gravity (G_s)	USCS	LL (%)	PL (%)	D_{10} (mm)
S-1	GL-3.0~5.0	2.69	SM	NP	NP	0.022
S-2	GL-6.0~7.0	2.68	SM	NP	NP	0.027
S-3	GL-8.0	2.68	SM	NP	NP	0.012
S-4	GL-9.0~11.0	2.71	SM	NP	NP	0.044

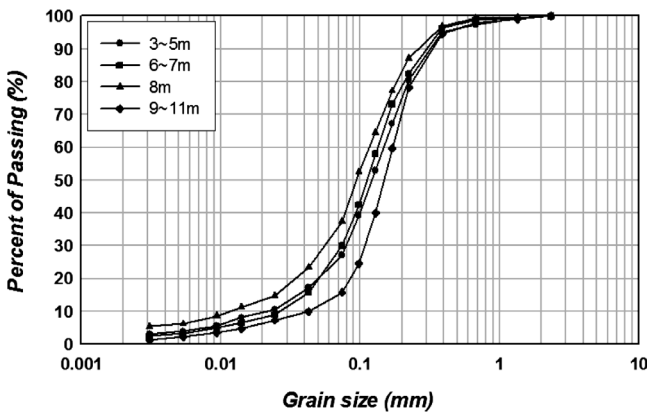


Fig. 1 Particle size distributions

2. 실험방법

가. 시료 재성형

시료는 Table 4와 같이 목표 단위중량 및 함수비에 맞추어 재성형하였다. 심도별 자연 함수비는 24~36 %의 범위로 평균 32.5 %의 함수비를 나타내었지만 평균 함수비에 맞추어 시료를 재성형할 경우 함수량이 높아 정적다짐 시 목표 단위중량에 도달하면 물이 새어나오며 시료추출 시 흐트러짐이 너무 커서 모든 시료를 동일한 상태로 재성형하는 것이 거의 불가능하였다. 따라서 시료 재성형에 따른 오차를 줄이기 위하여 목표 함수비를 25 %로 설정하였으며 함수비 차이에 따른 크리프 영향을 배제하기 위하여 모든 시료에 동일한 함수비를 적용하였다. 또한 S-4 시료의 경우 다른 시료에 비하여 입도분포가 고르지 않고 굵은 입자를 많이 포함하고 있어 동일한 단위중량으로 재성형이 어려워 목표 단위중량을 1.7 t/m³로 선정하였다.

시료의 재성형 방법은 동적다짐에 의한 시료의 파쇄영향을 배제하기 위하여 목표단위중량에 해당하는 흙을 몰드에 넣은 후 일축압축시험기를 이용하여 일정높이가 될 때까지 하중을 재하하여 다짐을 하는 정적다짐을 수행하였으며 시료의 크기는 지름 5 cm, 높이 10 cm이다. 또한, 시료에 하중이 재하된 직후에는 응력이 시료의 상, 하부에 집중되며 하중을 바로 제거하게 되면 탄성회복 등이 발생하므로 시료 내 응력이 고르게 분포하도록 하중을 가한 뒤 1~2 시간 후에 하중을 제거하였다. 시료는 함수비 변화 및 구속조건의 제거에 따른 변형을 최소화하기 위하여 시료추출기를 이용하여 추출한 후 바로 멤브레인을 씌워 압력셀에 세팅하였다.

Table 4 Conditions of Remolding

Sample	γ_t (t/m ³)	Water content, w (%)
S-1	1.8	25
S-2	1.8	25
S-3	1.8	25
S-4	1.7	25

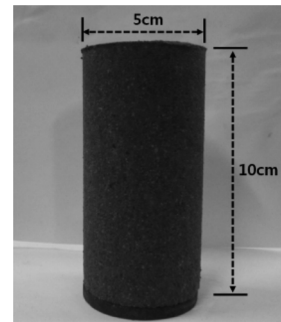


Fig. 2 Remolded specimen

나. 삼축압축시험

재성형한 시료는 삼축압축시험에서 배압 160 kPa 이상으로 충분히 포화시킨 후 100 kPa로 등방압밀을 수행하였다. 압밀은 시간이 경과하여도 시료의 체적변화가 발생하지 않을 때까지 수행하였으며, 압밀 완료 후에 비배수상태에서 변형률 제어 방식을 적용하여 0.5 mm/min의 변형률속도로 축차응력을 가하여 최대 축차응력을 구하였다.

다. 크리프 시험

크리프 시험은 시료에 일정한 하중을 적용하고 시간에 따른 변

위를 측정해야 한다. 본 실험에서는 삼축압축시험기를 이용하여 구속압은 일정하게 유지하고 비배수 상태에서 최대축차응력을 기준으로 두 가지 응력수준의 축차응력을 응력제어방식을 통하여 시간에 따른 일정한 하중을 적용하여 시간에 따른 변위를 측정하였다. 각 응력수준에 대한 실험조건은 Table 5와 같다.

IV. 결과 및 고찰

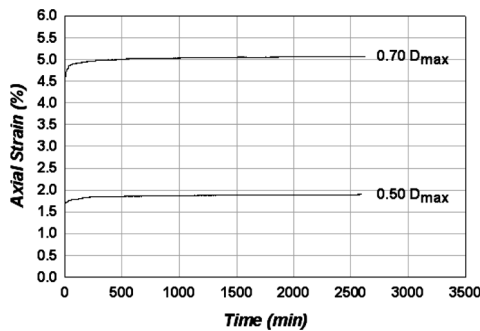
1. 크리프 변형률

각 시료의 응력수준에 대한 시간-변형률은 Fig. 3에 나타내었다. 모든 심도에서 하중이 재하됨에 따라 큰 순간변형률이 발생하였으며 이후 최대축차응력의 50 % 수준의 낮은 응력 하에서도 시간이 지남에 따라 변형률이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 시간에 따른 변형률속도는 응력수준이 클수록 크게 나타났으며 일정한 시간 경과 후에는 시간에 따른 변형률 변화가 일정한 2차 크리프 거동을 나타내었다.

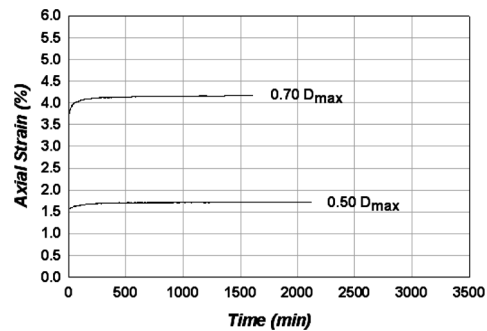
거동에 따른 변형은 초기 발생하는 즉시탄성변형, 1차 크리프에 의한 점탄성변형, 2차 크리프에 의한 점성변형으로 구분할 수 있다. 특히 점탄성 변형과 점성변형의 구분은 하중이 제거되었을 때 회복 가능한 변형률을 구분하는 기준으로 일반적으로 하중이

Table 5 Conditions of Creep test

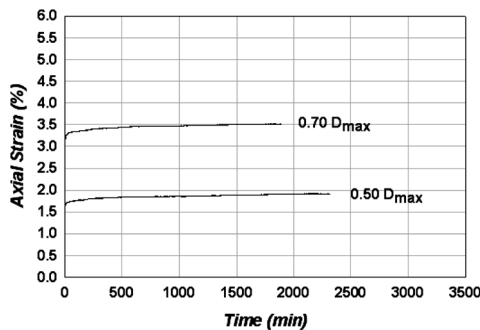
Sample	Stress level (%)	Max. deviator Stress (kPa)	Confining Stress (kPa)	Sustained deviator Stress (kPa)
S-1	50	318.0	100.0	159.0
	70			222.6
S-2	50	282.0	100.0	141.0
	70			197.4
S-3	50	285.0	100.0	142.5
	70			199.5
S-4	50	205.0	100.0	102.5
	70			143.5



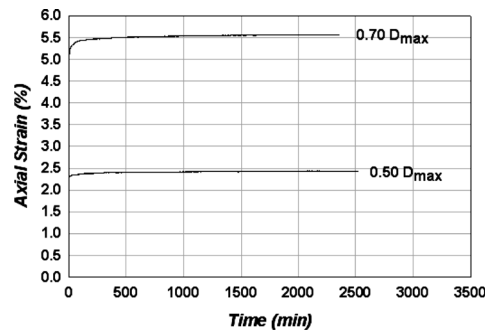
(a) S-1



(b) S-2



(c) S-3



(d) S-4

Fig. 3 Relationship between time and strain

제거되었을 때 1차 크리프에 의한 변형은 회복가능하나 2차 크리프에 의한 변형은 영구변형으로 회복이 불가능한 것으로 알려져 있다 (Jaroslav Feda, 1992). 따라서 회복크리프의 거시적인 표현을 위해서는 거동에 따른 변형의 원인을 파악하는 것이 중요하며 실험결과 4가지 시료 모두 약 400~500분 후 2차 크리프가 발생하는 것으로 나타났다.

2. Singh-Mitchell의 크리프 정수

크리프 시험결과를 통하여 Singh-Mitchell의 크리프 정수를 구하기 위해 응력수준-변형률속도 관계와 시간-변형률속도 관계를 확인하였다. 이에 따라 Fig. 4~5와 같은 그래프를 통하여 여러 가지 시간에 대한 응력수준과 변형률속도 관계 및 응력수준별 시간-변형률 속도 관계에 대한 각 시료의 크리프 정수를 산정하였으며 Table 6에 정리하였다. 크리프 발생 가능성을 나타내는 크리프 정수 m 값은 0.9802~0.9907로 일반적인 점토의 m 값이 0.75~1.00인 것과 비교하면 매우 작은 m 값을 나타내었다. 이는 시간에 따른 변형률이 가장 큰 원인이지만 모델의 특성상 1

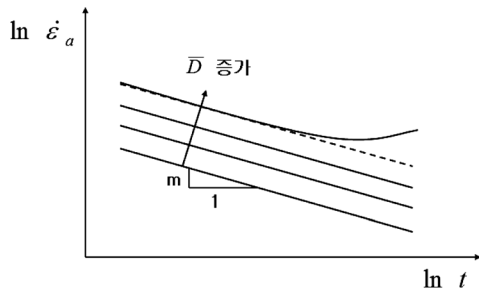


Fig. 4 Relationship between time and strain rate

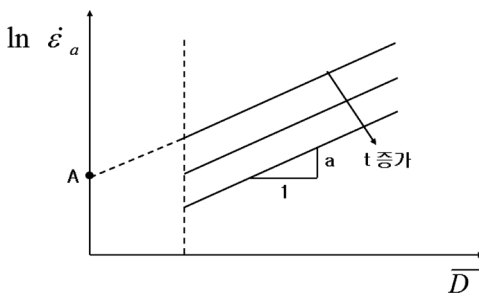


Fig. 5 Relationship between stress level and strain rate

Table 6 Singh-Mitchell's creep parameters

Sample	A	α	m
S-1	0.01392	0.01770	0.9863
S-2	0.01766	0.01557	0.9870
S-3	0.03272	0.01548	0.9802
S-4	0.01492	0.00985	0.9907

차 크리프 거동까지 포함하여 m 값을 산정함에 따라 점토에 비하여 상대적으로 즉시침하에 의한 변형이 크고, 1차 크리프 거동이 짧은 실트질 모래의 경우 m 값이 2차 크리프에 의한 변형률 속도에 많은 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 또한 시료의 변형이 작아 m 값의 0.001 차이가 시간에 따른 크리프 거동을 나타내는 데 큰 오차를 보임에 따라 유효숫자를 4자리까지 표기하여 크리프 정수를 나타내었다.

3. Generalized 모델의 점·탄성계수

Generalized 모델의 경우 Burgers 모델에 추가적으로 Kelvin-Voigt 모델을 직렬로 연결하여 방정식을 구성하므로 사용된 Kelvin-Voigt 모델의 수에 따라 점·탄성계수의 수가 달라지게 된다. 본 연구에서는 시료에 따라 2~4개의 Kelvin-Voigt 모델을 사용하여 해석을 실시하였으며 점·탄성계수는 successive residual method를 통하여 산정하였다. 각 시료에 따른 탄성계수 및 점성계수는 Table 7~8과 같다.

4. 크리프 거동 모델 분석

가. 실측값과 이론식의 비교

시료의 크리프 거동에 대하여 현상학적 모델인 Singh-Mitchell

Table 7 Modulus of elasticity by successive residual method

Sample	Stress Level	E_0 (kPa)	E_1 (kPa)	E_2 (kPa)	E_3 (kPa)	E_4 (kPa)
S-1	50 %	92.12	993.97	918.67	-	-
	70 %	49.30	1160.09	656.91	498.45	1815.53
S-2	50 %	102.91	1078.07	960.69	5823.23	-
	70 %	64.05	984.945	667.46	555.55	1547.50
S-3	50 %	67.47	871.50	1071.59	1177.63	-
	70 %	50.02	770.15	728.98	846.24	-
S-4	50 %	97.04	2721.74	2024.45	4276.21	-
	70 %	65.92	2171.19	956.0890	677.93	1867.36

Table 8 Modulus of viscosity by successive residual method

Sample	Stress Level	η_0 (kPa·min)	η_1 (kPa·min)	η_2 (kPa·min)	η_3 (kPa·min)	η_4 (kPa·min)
S-1	50 %	7142857.1	44879.7	235.1	-	-
	70 %	7692307.7	86956.8	3539.3	178.1	30.5
S-2	50 %	16666666.7	51157.1	462.6	129.6	-
	70 %	8333333.3	42298.3	2947.6	184.1	27.9
S-3	50 %	2222222.2	46741.3	2182.6	66.8	-
	70 %	2941175.6	55707.8	1522.3	53.2	-
S-4	50 %	12500000.0	147654.5	3553.6	282.0	-
	70 %	10000000.0	153995.1	5910.6	216.3	25.4

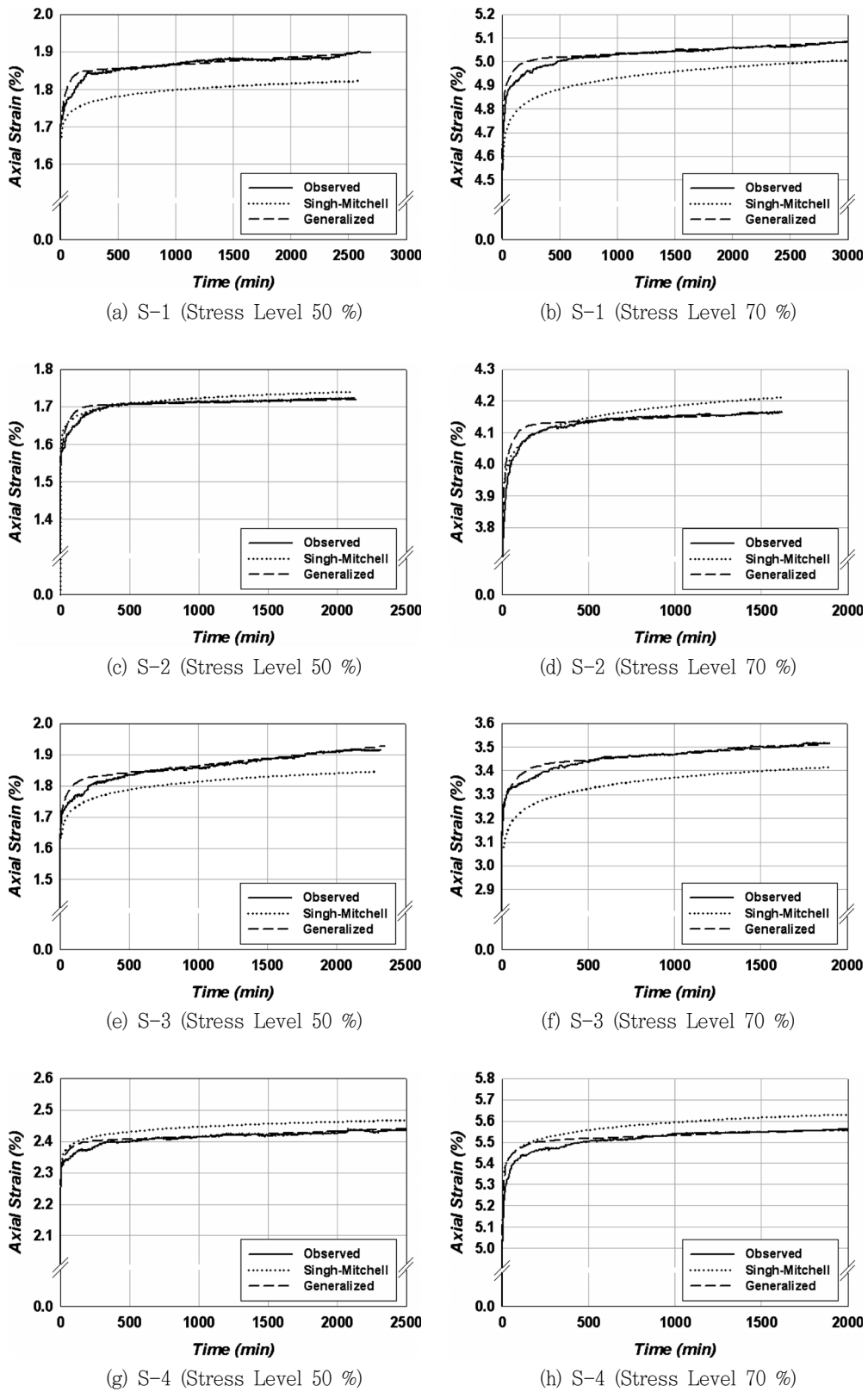


Fig. 6 Comparison between theoretical and observed creep behavior

방정식과 유변학적 모델인 Generalized 모델을 이용하여 크리프 방정식을 구성하였으며 각 시료에 따른 실측값 및 이론식을 통해 구한 값을 비교하면 Fig. 6과 같다.

Generalized 모델에 의한 크리프 변형은 실측값과 거의 일치하는 것으로 나타났으며 1차 크리프 거동은 실측값보다 약간 큰 값을 나타내었지만 2차 크리프 거동의 경우 실측값과 거의 차이를 보이지 않았다. Singh-Mitchell 방정식에 의한 크리프 변형은 Generalized 모델에 비하여 큰 오차를 나타내었으며 이는 응력 수준에 따른 실험결과의 평균값을 통하여 크리프 정수를 산정하기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 전체적인 크리프 경향은 거의 동일하게 나타났다.

나. 모델의 차이점 분석

현상학적 모델인 Singh-Mitchell 방정식의 경우 2차 크리프 거동을 나타내기 위하여 개발된 모델로 순간 변형률 및 1차 크리프에 의한 변형률은 초기값으로 설정되어 1차 크리프 거동을 나타낼 수 없는 단점을 가지고 있지만 크리프 정수에 응력수준에 따른 크리프 정수가 포함되어 있어 한 시료에 대한 크리프 거동은 응력수준에 관계없이 크리프 정수 3개로 구성된 한 개의 방정식을 통하여 나타낼 수 있었다. 따라서 구하고자 하는 임의의 응력수준 (30~80 %)과 시간을 입력하게 되면 그 때의 크리프 변형률을 예측할 수 있지만 응력수준에 따른 평균값을 통하여 정수를 산정함으로써 유변학적 모델에 비해 큰 오차를 나타내었다.

반면에 유변학적 모델인 Generalized 모델의 경우 한 개의 응력수준에 대한 시료의 크리프 거동을 해석하고 이에 따른 점·탄성계수를 산출하였으며 이에 따라 동일한 시료라 하더라도 응력수준이 달라지면 점·탄성계수도 다르게 나타났다. 따라서 응력수준에 따라 각각 계수를 산정해주어야 하며 임의의 응력수준에 대하여 시험을 수행하지 않으면 크리프 거동을 예측하지 못한다는 단점을 가지고 있다. 하지만 2차 크리프 거동뿐만 아니라 1차 크리프 거동도 효과적으로 나타낼 수 있으며 Kelvin-Voigt 모델의 수를 적절히 증가시킴에 따라 모델의 정확도를 높일 수 있었다.

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 실트질 모래의 시간의존적인 크리프 거동을 살펴보기 위하여 응력수준에 따른 크리프 실험을 수행하고 그 거동을 분석하였다. 또한 크리프 거동을 표현하는 모델의 적용성 및 차이점을 분석하기 위하여 현상학적 모델 및 유변학적 모델을 적용하여 크리프 방정식을 구성하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

실트질 모래에 대하여 비배수 크리프 시험을 수행한 결과, 아터버그 한계 시험에서 비소성을 나타내었지만 시간에 따라 지속적인 변형이 발생하는 크리프 거동을 나타내었으며 시료의 점·탄성적인 거동을 확인할 수 있었다.

4 가지 시료 모두 하중 재하 직후 20~30초 이내의 짧은 시간에 즉시침하가 발생하였으며 약 400~500분 동안 변형률 속도가 감소하는 점·탄성적 거동을 나타내었다. 이 후에는 변형률 속도가 일정한 2차 크리프 거동을 나타내었다.

Singh-Mitchell 방정식을 적용한 결과, 크리프 정수 3가지를 통하여 크리프 거동을 간단하게 표현할 수 있으며 시간에 따른 변형 수준을 나타내는 m값은 동일한 시료에 대하여 적용응력에 관계없이 동일한 값을 나타내었으며 이를 통해 시료에 따른 크리프 발생가능성에 대한 직관적인 예측이 가능할 것으로 판단된다.

실트질 모래의 m값은 점토에 비하여 매우 작은 값을 나타내었는데 이는 시간에 따른 변형률의 차이가 가장 큰 원인이지만 모델의 특성상 1차 크리프 거동까지 포함하여 m값을 산정함에 따라 점토에 비하여 즉시침하량이 크고, 1차 크리프 거동시간이 짧은 실트질 모래가 m값을 산정함에 있어 2차 크리프 변형률 속도의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 판단된다.

Generalized 모델을 적용한 결과, 각 시료에서 특정한 응력수준에 따른 점·탄성계수를 산정할 수 있었으며 2~4개의 Kelvin-Voigt 모델을 추가함에 따라 실트질 모래의 비배수 크리프 거동을 효과적으로 표현할 수 있었다.

Generalized 모델이 Singh-Mitchell 방정식에 비하여 더 높은 정확도를 나타내었으며 Singh-Mitchell 방정식은 2차 크리프 변형만을 표현하는 반면 Generalized 모델은 1차 및 2차 크리프 변형을 모두 효과적으로 표현할 수 있었다.

여러 가지 응력수준에 대한 크리프 거동을 예측하고자 할 경우에는 Singh-Mitchell 방정식을 통하여 간편하게 예측할 수 있으며, 특정한 응력수준에 대하여 보다 정확한 크리프 거동 예측 및 1차 크리프 변형에 의한 회복 크리프를 표현하고자 할 경우에는 Generalized 모델을 통하여 효과적으로 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Bong, T. H., Y. H. Son, S. P. Kim, J. Heo, P. W. Chang, 2009. Creep Characteristics of Weathered Soils and Application of Singh-Mitchell's Creep Formula, *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 51(6): 69-76 (in Korean).
2. Christensen, R. W. and T. H. Wu, 1964. Analysis of

- clay deformation as a rate process, *Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE* 90(SM6): 125-157.
3. Chung, H. S., S. R. An, S. H. Lee, 1991. A Study on the Creep Characteristics of Marine Clay, *Journal of Korean Geotechnical Society* 7(4): 65-73 (in Korean).
 4. Jaroslav Feda, 1992. Creep of soils and related phenomena, Elsevier Science Publishers.
 5. Kang, B. H., E. Hong, 1993. Undrained Creep Rupture of an Anisotropically Normally Consolidated Clay, *Journal of Korean Geotechnical Society* 9(4): 55-63 (in Korean).
 6. Kim, D. K., 2004. Prediction of Creep Behavior for Cohesive Soils, *Journal of Korean Geotechnical Society* 20(7): 79-90 (in Korean).
 7. Kiyota, T., F. Tatsuoka, J. Yamamuro, 2005. Drained and Undrained Creep Characteristics of Loose Saturated Sand, *Proceedings of the Geo-Frontiers 2005 Congress*.
 8. Kuwano, R., Richard J Jardine, 2002. On measuring creep behaviour in granular materials through triaxial testing, *Canadian Geotechnical Journal* 39: 1061-1074.
 9. Lade, P., Liu. C-t, 1998. Experimental study of drained creep behavior of sand, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE* 124(8): 912-920.
 10. Lee, S. H., 1998. A study on the Undrained Creep Properties of the Undisturbed Normally Consolidated Clays, M.S. Thesis, Pusan University (in Korean).
 11. Leong, K. and Chu, 2002. Effect of undrained creep on instability behavior of loose sand, *Canadian Geotechnical Journal* 39: 1399-1405.
 12. McDowell, G. R., J.J. Khan, 2003. Creep of granular materials, *Granular Matter* 5: 115-120.
 13. Murayama, S. and T. Shibata, 1961. Rheological properties of clay, *Proc. 5th ICSMFE, Paris* 1: 269-273.
 14. Murayama, S., K. Michihiro, T. Sakagami, 1984. Creep characteristics of sands, *Soils and Foundations* 24(2): 1-15.
 15. Nawir, H., F. Tatsuoka, R. Kuwano, 2002. Viscous effects of yielding characteristics of sand in triaxial compression, *15th ASCE Engineering Mechanics Conference*, New York, 1-8.
 16. Park, H. G., Y. H. Kim, W. S. Paeng, H. S. Lee, 2007. Creep Deformation Characteristics of the Granite Soil used in Road Embankment, *Journal of Korean Geotechnical Society, Proceeding* 11-18 (in Korean).
 17. Ronaldo I. Borja, 1992. Generalized Creep and Stress Relaxation Model for Clays, *Journal of Geotechnical Engineering* 118(11): 1765-1786.
 18. Singh, A. and J. K. Mitchell, 1968. General stress-strain-time function for soils, *Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE* 94(1): 21-46.
 19. Skempton, A.W., 1964. Long-term stability of clay slopes. *Geotechnique*, 14: 75-102.