Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers
Vol. 55, No. 5, pp. 9~16, September, 2013
DOI:http://dx.doi.org/10.5389/KSAE.2013.55.5.009

ISSN 1738-3692
eISSN 2093-7709

Bottom Ash의 최대입경에 따른 시간-의존적 거동 특성 및 크리프 모델 적용성 검토

The Time-Dependent Behavior Characteristic of Bottom Ash by Maximum Particle Size and Application of Creep Models

김태완* · 손영환**,† · 봉태호* · 노수각* · 박재성*

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

ABSTRACT

This study finds the characteristics of long-term settlement of Bottom Ash and to review the application of Singh-Mitchell creep equation and Burgers Model to the creep behavior of Bottom Ash. In the undrained state, it was confirmed that creep behavior appeared in the range to 30-80 % of the maximum deviator stress by applying condition in other three stresses through triaxial compression test after isotropically consolidation. By using sieve analysis, it was compared to each sample that was passed through 9.5 mm, 2 mm, 0.25 mm sieves. Also, using Singh-Mitchell creep equation and Burgers Model, it was compared between the theoretical behavior and the observed behavior for each sample. In the result, it is found that creep behavior of Bottom Ash is similar to the theoretical behavior of Singh-Mitchell creep equation and Burgers Model in early stage and it is possible to predict creep behavior of Bottom Ash by these models.

Keywords: Bottom ash; Triaxial compression test; Maximum size; Singh-Mitchell creep equation; Burgers model

I. 서 론

현재 국내 석탄 화력발전소에서 나오는 부산물중 Bottom ash의 발생량은 꾸준히 증가하고 있으며 앞으로의 그 양도 늘어날 것으로 예상되고 있다 (Park and Kim, 2012). Bottom ash는 대부분이 화력발전소 근처의 매립장에 매립되고 있고 매립지 부족으로 인해 재활용이 시급히 필요하다.

일반적으로 Bottom ash는 투수성이 우수하고 적정 강도를 가지고 있어 도로 성토재 (Jung et al., 2010), 수평 배수재 (Kim, 2009), 구조물 뒤채움재 (Kim et al., 2010) 등으로 활용할 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한 Bottom ash는 모래와 유사한 성질을 가지고 있어 연약지반개량 공법의 일종인 SCP 등의 대체재로 사용할 수 있는 것으로 알려져 있다 (Park et al., 2010). 특히 성토재, 뒷채움재로 사용되는 경우 장기적인 사용하중을 받기 때문에 장기침하 거동을 일으킬 소지가 있어 이에 대한 연구가 필요하다 (Kim, 2009). 하지만 장기침하 또는 크리프 현상은 주로 점토에서 일어나는 것으로 간주되며 배수조건에서 사질토 등의 모래에서는 일반적으로 즉시침하가 지배적인 것으로 알려져 있어 (Schmertmann et al., 1978) 사질토에 대한 장기침하 연구가 점토에 비해 상대적으로 적은 편이다. 하지만 비배수 조건에서는 간극수압이 발생하게 되며 겉보기 점착력 등도 나타나게 되고 배수조건에서의 거동과는 다른 형태의 크리프 거동을 나타낸다.

모래 및 실트의 장기침하거동 관련 연구로는 Murayama et al. (1984)이 모래의 크리프 거동을 종래의 유변학적 모델을 통해 효과적으로 모사할 수 있음을 알아낸 연구가 있으며 Lade and Liu (1998)는 배수 상태에서 모래의 크리프 거동을 연구하였으며 소성이론 모델을 적용하여 이를 예측할 수 있음을 확인하였다. 또한 McDowell and Khan (2003)은 입상체의 크리프 거동에 대한 연구를 수행하였으며 Wang et al. (2010)은 높은 축차응력 하에서 양쯔강 모래의 크리프거동에 대한 연구를 수행한 바 있다. 국내에는 Hwang et al. (2009)은 탄산염 성분이 포함된 사질토의 장기침하 예측에 관한 계수를 제시하였다. 또한 Bong et al. (2012)은 비배수 조건에서 실트질 모래의 크리프 특성을 파악하고자 하였으며 크리프 모델의 비교 연구를 수행하였다.

그러나 Bottom ash의 장기침하 관련 연구는 모래 관련 연구와 같이 단독적으로 이루어진 경우가 부족하며, 대부분은 침하량

* 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
2013년 6월 19일 투고
2013년 7월 4일 심사완료
2013년 8월 1일 게재확정

이 큰 플라이애쉬 또는 플라이애쉬와 Bottom ash가 혼합된 매립회 혹은 다른 재료와 혼합한 Bottom ash 침하 관련 연구가 진행되어 왔다 (Ashutosh and Vijay, 2007).

본 연구에서는 Bottom ash를 성토재, 뒷채움재 등으로 사용할 경우에 Bottom ash 자체의 장기침하거동 특성을 파악하기 위하여 삼축압축시험을 실시하고, 현상학적 모델인 Singh-Mitchell 모델과 유변학적 대표모델인 Burgers 모델을 적용하여 각 모델의 적용성을 검토하고자 한다.

II. 적용 이론

1. Singh-Mitchell 크리프 방정식

흙의 시간 의존적 거동인 크리프 현상은 진행되는 동안 흙이 받는 하중의 레벨에 따라 크게 감쇄 크리프 (Attenuating creep)와 비감쇄 크리프 (Non-attenuating creep)로 나눌 수 있다. Singh and Mitchell (1968)은 삼축 압축 시험을 통해 점토의 비감쇄 크리프에 적용이 가능한 식 (1)과 같은 반경험적인 현상학적 모델을 개발하였다. 시간-변형률속도, 응력수준-변형률속의 관계로 점토의 거동을 나타내고 이를 통하여 아래의 계수들을 얻을 수 있다.

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

여기서,

t_i: 기준시간

$\dot{\epsilon}_a$: 변형률 속도

$\bar{D}$: 적용된 응력수준

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

일반적으로 위의 식은 점토에 적용이 가능하며 최대축차응력의 30~80%의 범위에서 적용이 가능하다. 또한, 위의 모델은 구속된 조건에서의 모래의 압축시험에 대한 거동과 잘 일치한다는 Mollamahmutoglu (1999)의 연구가 있으며 모래와 비슷한 성질을 가진 Bottom ash에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

2. Burgers Model

유변학적 모델에 속하는 Burgers 모델은 Maxwell 모델과 Kelvin 모델을 직렬로 연결한 모델이며 이는 지반의 크리프 거동을 예측하는데 적합한 것으로 알려져 있다 (Overt, 1967). 또한, 이 모델은 물체의 초기변형, 1차 크리프 및 2차 크리프 거동을 잘 설명해준다. Burgers 모델의 역학적 거동 특성 분석에 의하여 변형률을 산정하는 식은 (2)와 같다.

$$\epsilon = \sigma_0\left[\frac{1}{E_1}+\frac{1}{\eta_1}(t-t_1)+\frac{1}{E_2}\left(1-e^{-\frac{E_2}{\eta_2}(t-t_1)}\right)\right] \tag{2}$$

여기서,

$\frac{1}{\eta_1}(t-t_1)$: 영구 변형률

$\frac{1}{E_2}\left(1-e^{-\frac{E_2}{\eta_2}(t-t_1)}\right)$: 회복 가능한 변형률

$E_1=\frac{\sigma_0}{\epsilon_0}$: 곡선의 순간 변형률 및 적용 응력으로부터 산출

$\eta_1=\frac{\sigma_0}{\Delta\epsilon}\Delta t$:

2차 크리프 구간의 기울기인 변형률 속도로부터 산출

$E_2=\frac{\sigma_0}{\epsilon'_0-\epsilon_0}$: 2차 크리프 구간의 직선을 연장한 종축과의 절편

$\eta_2=-\frac{E_2 t_m}{\ln\left[1-E_2\left(\frac{t_m}{\sigma_0}-\frac{1}{E_1}-\frac{t_m}{\eta_1}\right)\right]}$:

1차 크리프 곡선의 중간 측정값 이용

위의 Burgers 모델은 변형성분들을 모두 표현할 수 있으며 회복 크리프에 관한 거시적인 표현 또한 가능하다.

III. 재료 및 방법

1. 재료

본 연구를 위하여 영흥화력발전소에서 채취한 Bottom ash를 사용하였으며. 재료의 물리적 특성은 다음과 같다 (Table 1, Fig. 1).

본 연구에서 사용한 Bottom ash는 일반적인 흙에 비하여 상대적으로 비중이 작고 입도분포는 좋은 것으로 나타났고 통일분류법상 SW로 분류된다.

Table 1 Physical properties of bottom ash

Gs	Passing sieve 0.075 mm (%)	D_{10} (mm)	D_{60} (mm)	Cu	Cg	USCS	PL
2.21	7.08	0.098	2.56	25.6	1.31	SW	NP

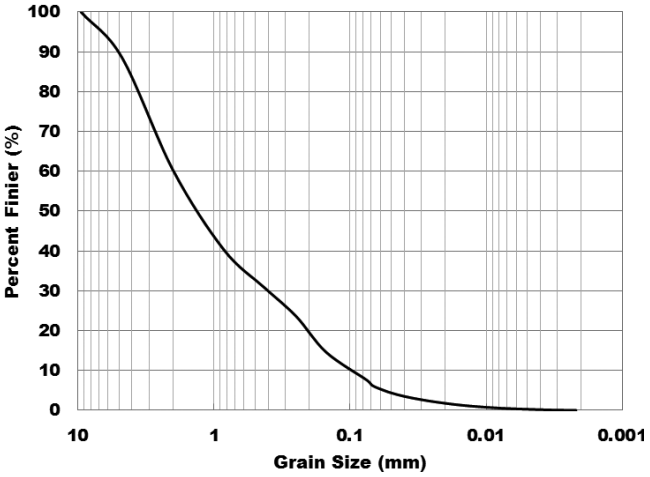


Fig. 1 The particle size distribution curve of bottom ash

2. 시험방법

가. 비배수 삼축압축 시험을 통한 최대 축차응력 파악

본 연구에서는 Bottom ash를 직경 5 cm, 높이 10 cm 몰드에 다져서 성형을 하였으며 9.5 mm 체에 통과시켜 재성형한 Case 1, 2.0 mm 체에 통과시켜 재성형한 Case 2, 0.25 mm 체에 통과시켜 재성형한 Case 3인 공시체를 제작하였다. 최대입경이 9.5 mm인 Case 1의 경우, 입경이 상대적으로 크기 때문에 크리프 거동을 파악하기 힘들 수 있다. 하지만 Bottom ash를 선별하지 않고 바로 사용하는 경우 9.5 mm 이하의 입경이 90 %가 넘기 때문에 실제 거동 특성을 파악하는데 유용할 것으로 판단된다.

또한 본 영흥 Bottom ash의 다짐시험 (KSF 2312-91)결과는 최적함수비 약 22 %, 최대건조밀도 1.1 t/m^{3}이었으며 공시체 제작에 본 결과를 반영하였다.

시료를 성형 한 후 삼축압축 시험을 위해 시료를 셀 내에 거치하고 배압 150 kPa을 적용하여 1시간동안 포화시켰다. 포화 후 100 kPa로 등방압밀을 실시하고 전단시험을 변형률 15 %까지 실시하여 각 시료의 최대축차응력을 확인하였고 그 결과는 다음과 같다.

Table 2 Cases of the test according to maximum particle size

Case	Maximum particle size (mm)
1	9.5
2	2.00
3	0.25

Table 3 Maximum deviator stress of bottom ash and applied stress levels

Case	Maximum deviator stress (kPa)	Stress levels (%)
1	350	40, 60, 80
2	350	
3	325	

Case 1과 Case 2의 최대축차응력은 비슷하게 측정되었으나 입경이 상대적으로 작은 Case 3는 앞의 두 Case보다 최대축차응력이 작게 측정되었다.

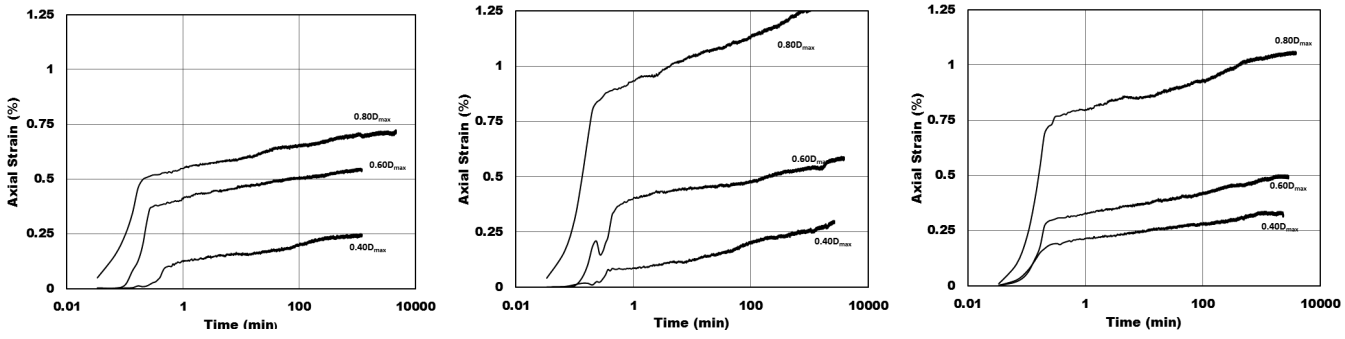
나. 장기침하거동 시험

각 시료의 최대축차응력을 파악한 후 여러 응력수준을 적용하여 Bottom ash의 장기침하거동을 파악하였다. 시료 성형 및 압밀과정은 비배수 삼축압축 실험과 동일하게 실시하였으며 등방압밀이 끝난 후 각 응력수준에 해당하는 수직응력을 적용하고 등방압밀과 동일한 수준의 구속압을 적용해 이방압밀을 실시하여 시간에 따른 변형률을 파악하였다.

Ⅳ. 결과 및 고찰

1. 최대입경별 시간-변형률 관계

각 최대입경별 시간 의존적 거동에 Singh-Mitchell 크리프 방정식을 적용하기 위해 시간에 따른 변형률을 다음 Fig. 2에 나타



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3

Fig. 2 Relationships between time and axial strain according to maximum grain size

내었다.

각 결과를 보면 80 %에서 Case 1에 비하여 Case 2, Case 3의 침하량이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 하지만 60 %에서는 Case 1이 같은 시간에서 침하량이 미세하게 큰 것을 볼 수 있다.

또한 Case 2, Case 3에서 응력수준이 40 %에서 60 % 증가할 때보다 60 %에서 80 %로 증가할 때 변형률이 더 큰 경향을 보인다.

2. Singh-Mitchell의 현상학적 모델 및 적용성 검토

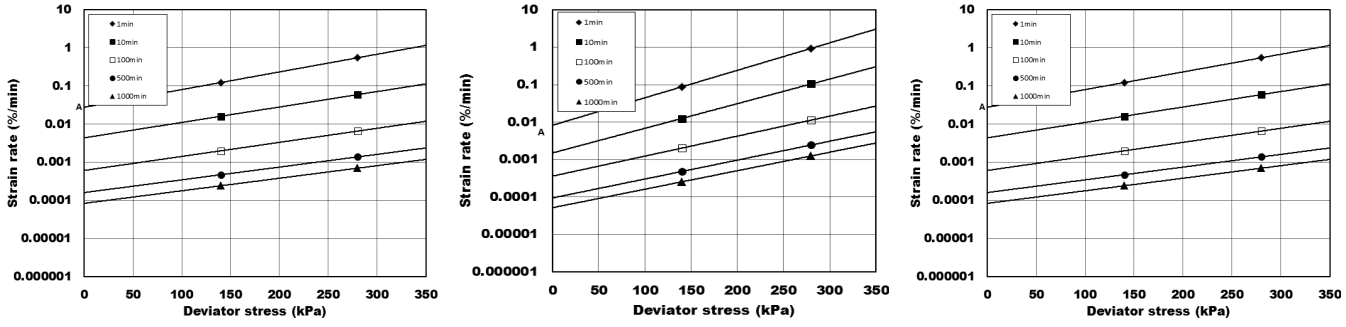
Fig. 3 및 Table 3에서 각 응력수준별 변형률 비율은 Case 3에서는 시간이 지나도 거의 일정하지만 Case 2, Case 1에서는 시간이 지날수록 응력수준에 따라 변형률 비율이 감소함을 볼 수 있다. 이는 초기에는 응력수준에 따라 변형률 차이가 크지만 시간이 지날수록 그 영향이 감소함을 의미한다. 하지만 최대입경이 상대적으로 작은 Case 3에서는 시간에 따른 응력수준의 영향이 미미함을 알 수 있다. 즉, Bottom ash는 초기에는 상대적으로 응력수준에 따라 변형률이 큰 영향을 받지만 2차 크리프 구간에서는 시간이 지날수록 응력수준과 관계없이 일정한 변형률 증가를 보인다.

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

Case	A	Time (min)	Regression equation ($y = b \cdot e^{ax}$)		Average α
			b	a	
1	0.0345	1	0.0345	0.0107	0.0087
		10	0.0054	0.0093	
		100	0.0008	0.0085	
		500	0.0002	0.0077	
		1000	0.0001	0.0076	
2	0.0092	1	0.0092	0.0169	0.0134
		10	0.0016	0.0152	
		100	0.0004	0.0123	
		500	0.00009	0.0116	
		1000	0.00005	0.0114	
3	0.0536	1	0.0536	0.0101	0.0094
		10	0.0067	0.0095	
		100	0.0008	0.0093	
		500	0.0002	0.0093	
		1000	0.0001	0.0088	

Table 3에 위의 결과를 정리하여 각 크리프 정수를 나타내었다. 크리프 정수를 구하기 위해 적용된 기준시간은 1분이며 A는 기준시간에서 축차응력이 0일 때를 나타낸다. α값은 시간이 지남에 따라 작아지는 경향을 볼 수 있으며 Case 2에서 A값이 가장 작게 나타난다.

Fig. 4는 시간에 따른 변형률 속도를 나타낸 그래프이며 시간이 지남에 따라 변형률 속도가 일정한 기울기를 가지며 줄어드는 것을 볼 수 있다. 또한, Table 4에는 이를 수식으로 나타내어 표시하였으며 국내에 많이 분포하는 풍화토에 비해 m값이 낮은 것을 볼 수 있다 (Bong et al, 2009). 예외적으로 Case 2의 응력수준 40 %일 때는 초기에 기울기가 완만한 것으로 나타났으며 이는 응력수준 60, 80 %에 비해 초기에 변형속도의 감소율이 더딘 것을 의미한다. 이는 장기침하 가능성이 큰 것을 의미하고 예외적으로 사질토와 비슷한 성질을 가졌음에도 불구하고 m값이 0.90 이하로 나온 것을 볼 수 있다 (Augustesen et al, 2004). 하지만 시간이 지날수록 다른 응력수준과 비슷한 기울기를 가지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 다짐도나 시료의 불균질성에 의해 초기에는 앞의 두 시료보다 상대밀도가 낮아 변형속도의 변화율이 감소하는 것으로 판단된다. 또한 Case 1에서도 40 %의 응력수준일 때 m값이 상대적으로 낮은 것으로 비추어 볼 때, 응력의 크기가 작아 상대적으로 60, 80 %에 비해 입자의 재배열 등이 느려 변형속도의 변화가 느린 것으로 판단된다 (Augustesen et al, 2004). 그리고 Case 3에서는 이와 같은 현상이 나타나지 않는 것으로 보아 실험 시 입자가 상대적으로 큰 경우에 응력수준이 낮으면 이와 같은 현상의 가능성을 고려해야



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3

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

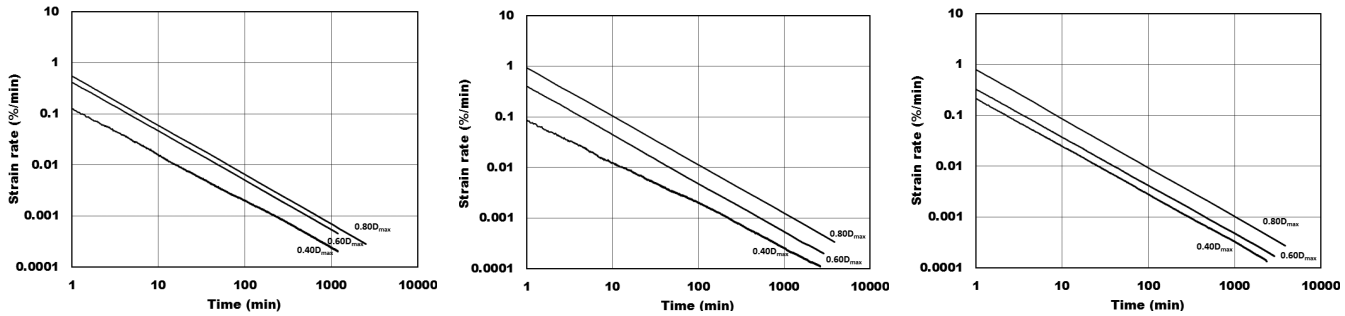
할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 시간에 따른 m값의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 4에서는 전 구간의 평균 기울기를 통해 m값을 산정했지만 Fig. 5에서는 시간에 따른 m값의 변화를 통해 각 응력에서의 시간에 따른 m값의 변화 추세를 알고자 하였다. 그 결과 최대입경이 상대적으로 큰 Case 1, Case 2에서는 응력수준이 낮은 경우 초기의 m값이 0.9 이하였으며 Case 2의 경우 초기값이 0.8 정도로 나타났다. 그러나 500분이 지난 후에는 0.9 이상의 값을 보였으며 1000분에서는 0.92～0.94의 값을 나타냈다. 이는 앞서 언급했듯이 응력수준이 낮은 경우 초기에 입경이 큰 시료가 압축응력에 저항을 하여 상대적으로 재배열이 느려지고 이는 m값의 감소를 가져오는 효과가 있는 것으로 판단된다. 그러나 입경이 상대적으로 작은 Case 3의 경우는 초기 m값이 0.95에 가까우며 오히려 1000분 근처에서 0.9에 가까운 것을 볼 수 있다. 이는 입경이 작은 경우 응력수준이 낮아도 재배열이 초기에 잘 일어나지만 시간이 지나면 재배열이 거의 다 일어나게 되고 변형률이 상대적으로 낮아져서 낮은 m값을 보이는 것으로 판단된다.

Table 4 Relationships between time and strain rate for various stress levels and creep parameter m

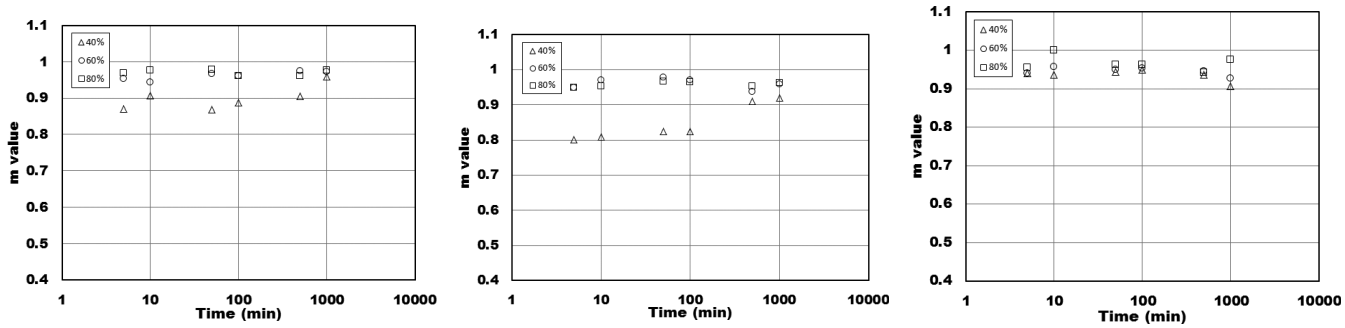
Case	Stress level (%)	Regression equation ($y = c \cdot x^{-m}$)		Average m
		c	m	
1	40	0.5851	0.973	0.945
	60	0.5752	0.957	
	80	0.1280	0.905	
2	40	0.9557	0.961	0.927
	60	0.3773	0.948	
	80	0.1074	0.874	
3	40	0.8136	0.967	0.953
	60	0.3314	0.948	
	80	0.2194	0.946	

Fig. 6은 위의 40, 80 %의 응력수준에서 Singh-Mtichell 크리프 정수를 바탕으로 응력수준 60 %일 때 시간에 따른 변형속도 및 변형률의 실제값과 이론값을 비교한 것이다. Case 2는 변형속도 및 변형률이 실제값과 이론값이 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 이는 최대입경별 40 %의 응력수준에서 m값이 상대적으로 작게 나오기 때문에 이론식에서 A값이 상대적으로 작게 산정되어 실제값보다 이론값이 작은 것으로 판단된다. 하지만 최대입경 Case 3에서는 각 응력수준에서 m값이 큰 차이를 보이지 않기 때문에 A값이 적절히 산정되어 60 %의 응력수준에서의 거동을 이론식이 잘 표현하는 것으로 나타났다. 또한 Case 1의 경우 40 % 응력수준에서 m값이 0.9에 근접했지만 결과가 잘 일치하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 Singh-Mitchell 모델을 Bottom



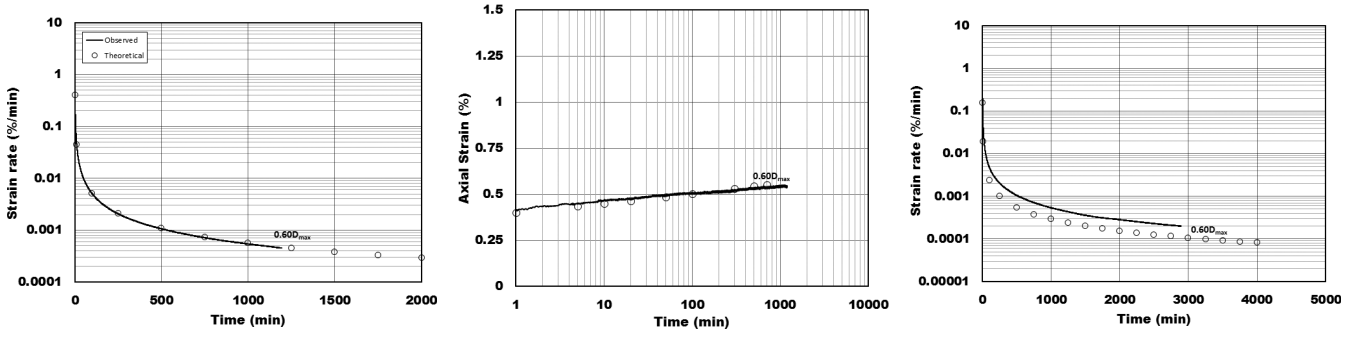
(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3

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

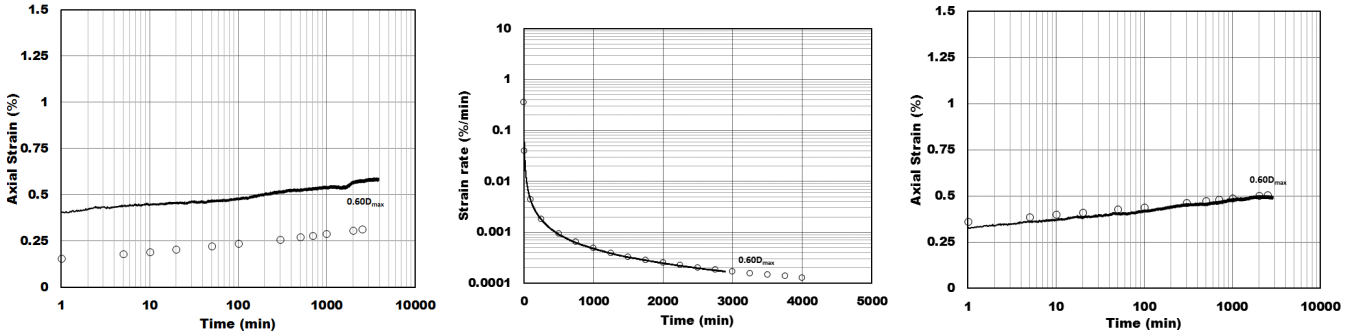


(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3

Fig. 5 Relationship between m value and time

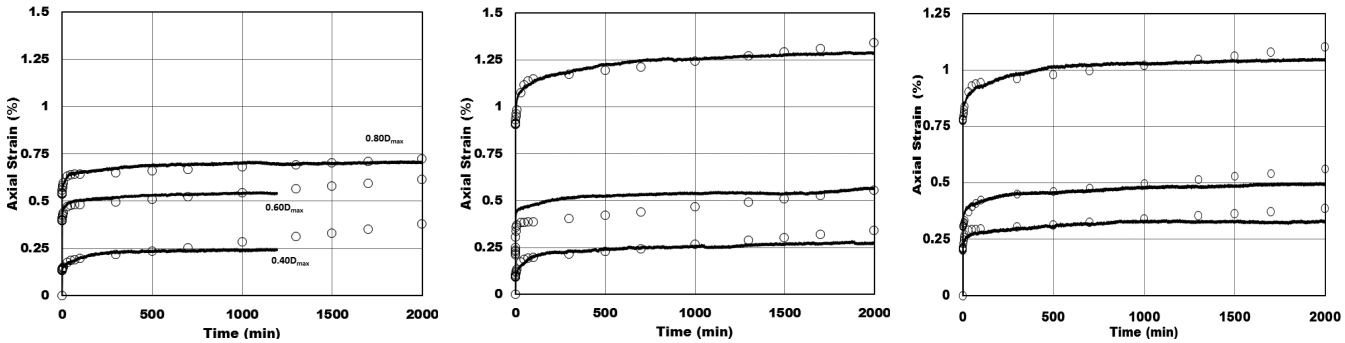


(a) Time vs strain rate (9.5 mm) (b) Time ve Strain (9.5 mm) (c) Time vs strain rate (2.00 mm)



(d) Time ve Strain (2.00 mm) (e) Time vs strain rate (0.25 mm) (f) Time ve Strain (0.25 mm)

Fig. 6 Comparison between theoretical and observed time-dependent behavior in Singh-Michell model



(a) 9.5 mm (b) 2.00 mm (c) 0.25 mm

Fig. 7 Comparison between theoretical and observed time- dependent behavior in Burgers model

ash에 적용 시 이를 바탕으로 다른 응력수준에서의 거동을 예측하는데 있어 주의가 필요한 것으로 판단된다.

3. Burgers의 유변학적 모델 및 적용성 검토

Burgers 모델은 탄성구간, 영구 변형구간, 회복 가능한 변형구간 총 3가지로 구분할 수 있으며 각 구간에 해당하는 상수는 실험결과를 바탕으로 산정된다. Fig. 2를 바탕으로 구한 Burgers 모델의 상수는 아래 Table 5에 나타내었다.

또한, Fig. 7에 Table 5의 Burgers 상수를 바탕으로 구성한

Table 5 Creep parameters of Burgers model

Case	Stress level (%)	E_1 (kPa)	η_1 (kPa · min)	E_2 (kPa)	η_2 (kPa · min)
1	40	1052.73	1470112.79	2574.37	63779.06
	60	532.18	3032561.15	2626.26	32546.03
	80	524.29	6618620.92	2705.07	29947.44
2	40	1511.55	1861097.75	1437.04	28667.25
	60	1004.33	2403263.63	1243.18	4251.75
	80	310.50	2841039.47	1167.66	28574.16
3	40	644.85	2687891.74	1480.57	10631.30
	60	635.52	3003970.64	1568.12	69351.50
	80	336.02	3134265.55	1593.57	31818.80

모델과 실제 거동을 비교하여 나타내었다. Case 2의 60 % 응력 수준을 제외하면 나머지 결과는 모두 초기 거동이 실제값과 이론값이 비슷한 것을 볼 수 있다. 그리고 최종 축변형률은 실제값보다 이론값이 더 크게 나타났다. 이는 Bottom ash의 시간 의존적 거동이 탄성구간, 1차크리프 구간까지는 Burgers 물체와 비슷한 거동을 하나 2차 크리프 구간부터는 Burgers 물체에 비해 변형속도가 느려짐을 의미한다. 즉, Bottom ash는 초기에는 점탄성 물체의 거동을 한다고 볼 수 있다. 이는 즉시 침하영역에서 Bottom ash는 사질토와 비슷하므로 탄성거동을 나타내며 이후 점탄성 거동은 포화상태의 시료이기 때문에 잘 맞는 것이라 판단된다. 따라서 설계 시 Bottom ash의 초기 수직 변형률 추정에 적합한 것으로 판단되며 장기적인 추정값은 실제값보다 클 것으로 예상되어 안전한 설계가 가능하지만 차이가 클 것으로 보이며 경제적인 설계 시 이를 고려해야할 것으로 판단된다.

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 Bottom ash의 시간 의존적 거동 특성을 파악하기 위해 비배수 삼축압축 실험을 통한 장기침하 실험을 진행하였으며 Singh-Mitchell 모델과 Burgers 모델의 적용성을 검토하였다. 이를 위하여 최대축차응력의 40, 60, 80 %에 해당하는 수직응력을 가해 이방압밀을 실시하였다. 또한 각 모델의 정수를 산정하여 실제값과 이론값을 비교 및 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

Bottom ash의 시간 의존적 거동은 초기에는 응력수준에 큰 영향을 받지만 시간이 지날수록 그 영향은 미미한 것으로 나타났다. 또한 최대입경이 작을수록 그 영향은 미미한 것으로 판단된다.

최대입경 9.5, 2.00 mm의 응력수준 40 %에서 상대적으로 변형률 속도가 큰 것을 볼 수 있는데 이는 다짐의 불균일성 또는 낮은 응력수준에 의한 재배열 등의 더딤 때문인 것으로 판단된다. 그러나 시간이 지나면 변형률 속도가 감소하여 두 응력수준과 비슷해지는 것을 볼 수 있으며 이는 상대밀도의 증가에 기인한 것으로 판단된다. 하지만 위의 현상은 최대입경 0.25 mm에서는 나타나지 않는 것으로 보아 응력수준이 낮고 입경이 큰 경우 초기의 크리프 포텐셜이 높게 나타날 수 있음을 실험 시 고려해야 할 것으로 판단된다.

Singh-Mitchell 모델로 Bottom ash의 거동을 예측할 경우 위 현상에 기인한 이상 m값 때문에 상대적으로 낮은 이론값을 얻을 수 있다. 따라서 Bottom ash에 이 모델을 적용하는 경우 재배열 속도 등을 고려하여야 하며 0.25 mm 이하의 입경에서 적용성이 높은 것으로 판단된다.

Burgers 모델로 Bottom ash의 거동을 예측할 경우 초기 탄성변형 1차 크리프 구간은 모사를 잘 할 수 있음을 알 수 있었다. 이후 2차 크리프 구간부터는 Bottom ash의 실제 거동이 모델보다 느리게 진행됨을 알 수 있었으며 예측치가 실측치보다 더 큰 것을 알 수 있었다. 이는 Bottom ash의 변형속도가 시간이 갈수록 Burgers 물체보다 빠르게 감소함을 의미한다. 따라서 Burgers 모델의 경우는 입경에 상관없이 초기의 변형을 모사하는데 적합한 것으로 판단된다.

이 연구는 2012년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2012 R1A1A1010633).

REFERENCES

1. Augustesen A., M. Liingaard, and P. V. Lade, 2004. Evaluation of time-dependent behavior of soils. *Journal of Geomechanics ASCE* 4(3): 137-156.
2. Ashutosh T. and K. S. Vijay, 2007. Settlement of compacted ash fills. *Geotech Geol Eng* 25: 163-176.
3. Bong, T. H., Y. H. Son, S. P. Kim, J. Heo, and 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).
4. Bong, T. H., Y. H. Son, S. K. Noh, J. S. Park, 2012. Undrained creep characteristic of silty sands and comparative study of creep model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(1): 19-26 (in Korean).
5. Jung, S. H., B. C. Choe, and B. C. Lee, 2010. An experimental study on bottom ash for utilization of subbase materials. *Korean Recycled Construction Resource Institute* 12: 89-97 (in Korean).
6. Kim, D. H., W. S. Ki, and S. H. Kim, 2010. The utilization of pond ash as embankment and backfill material. *The Journal of Engineering Geology* 20(3): 297-310 (in Korean).
7. Kim, J. W., 2009. Creep Modeling of Reinforced Earth. Ms Dissertation, Sungkyunkwan University (in Korean).
8. Kim, S. C., 2009. Applicability Study of Bottom Ash of Use of Sand Mat Material. Ms Dissertation. Sunchon

University (in Korean).

9. Lade P. V., C. T. Liu, 1998. Experimental study of drained creep behavior of sand. *Journal of Engineering Mechanics* 124: 912-920.
10. McDowell, G. R., and J. J. Khan, 2003. Creep of granular materials. *Granular Matter* 5 115-120.
11. Mollamahmutoglu, M., 1999. Effect of incremental loading on the creep behaviour of chemically grouted sand. *Bull Eng geol* 57: 353-358.
12. Murayama, S., K. Michihiro, and T. Sakagami, 1984. Creep Characteristic of Sands. *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering* 24(2): 1-15.
13. Overt, L., 1967. Rock mechanics and the design of Structures in Rock. New York: John wiley and Sons Inc. 293-301.
14. Park, S. G. and J. M. Kim, 2012. Present status and recycling technology for bottom ash in Korea. *Korean Recycled Construction Resource Institute* 3: 9-12 (in Korean).
15. Park, S. H., S. H. Jee, and B. S. Chun, 2010. Characteristic for consolidation and shear strength of bottom ash compaction pile according to replacement ratio in clay. *Korean Geo-Environmental Society* 11(7): 57-63 (in Korean).
16. Schmertmann, J. H. J. P. Hartmann, and P. R. Broun, 1978. Improved strain influence factor diagrams. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE* 104(8): 1131-1135.
17. Singh, A. and J. K. Mitchell, 1968. *General stress-strain-time function for soils. ASCE* 94(1): 21-46.
18. Wang, F., L. Miao, and L. Weihua, 2010. Experimental study on the creep behavior of the Yangtze River Sand. *GeoFlorida: Advanced in Analysis, Modeling & Design* 777-782.