

# 다공성 실리카를 혼합한 경화토의 건습반복 강도특성

## Characteristics of Cyclic Drying-Wetting on Strength of Solidified Soil Mixed Porosity Silica

김 동 근<sup>1)</sup> · 방 성 택<sup>2)</sup> · 오 세 옥<sup>†</sup>

Donggeun Kim · Seongtaek Bang · Sewook Oh

Received: June 23<sup>rd</sup>, 2014; Revised: July 29<sup>th</sup>, 2014; Accepted: August 24<sup>th</sup>, 2014

**ABSTRACT** : In order to examine strength properties depended on climate changes of solidified soil amended by porosity silica which enhance harms of cement, this study conducts a wetting and drying repetition test and then, attempts to verify strength properties before and after solidified soil gets environmental influence. Test pieces for the unconfined compression test changed the mixing ratio of solidified soil compared to mixed soil weigh to 5 %, 10 % and 15 %. For each step, it was created by mixing 0.5 %, 1.0 % and 1.5 % of wood chips, and curing period for 7, 14, and 28 days. Then, the wetting and drying repetition process was repeated 0, 3, 6, and 12 cycles to analyze mechanical properties. To also evaluate changes of relative dynamic elastic modulus before and after the wetting and drying, dynamic elastic modulus tests were conducted when each cycle was completed.

**Keywords** : Drying-wetting, Solidified soil, Unconfined compressive strength, Relative dynamic modulus of elasticity

**요 지** : 본 연구에서는 다공성 실리카를 사용하여 시멘트계 고화재의 유해성을 개선한 경화토의 기후변화에 대한 강도특성을 규명하기 위하여 습윤건조 반복시험을 수행하여 경화토가 기후영향을 받기 전과 후의 강도특성을 규명하고자 한다. 본 연구에 사용된 경화토는 주위에서 쉽게 구할 수 있는 화강풍화토 및 우드칩을 사용하였으며, 일축압축시험을 위한 공시체는 지름 50 mm, 높이 100 mm의 크기로 혼합토 중량대비 실리카의 혼합비율을 5 %, 10 %, 15 %로 변화시키고 각 단계별로 우드칩을 0.5 %, 1.0 %, 1.5 % 혼합하여 제작하고 7, 14, 28일 동안 상온으로 양생시킨 후 습윤건조 반복과정을 0, 3, 6, 12 cycle을 반복하여 역학적인 특성을 평가하였다. 또한 습윤건조 전후의 상대동탄성계수 변화를 평가하기 위하여 각 사이클이 종료되면 동탄성시험을 수행하였다.

**주요어** : 건조습윤, 경화토, 일축압축강도, 상대동탄성계수

## 1. 서 론

흙을 이용한 포장은 주위에서 쉽게 구할 수 있는 화강풍화토를 포설하여 다짐 후 사용하거나 강도 보강을 위해 석회를 혼합하여 사용하여 왔으며, 1990년대부터는 시멘트계 고화재를 혼합하여 포장용으로 사용하기 시작했다. 그러나 시멘트 고화재를 이용한 포장은 강도 및 내구성은 우수하나 시멘트가 가지고 있는 유해성 때문에 환경보존 및 환경부하 절감을 위한 다양한 대안 방법 중 친환경 고화재 개발 및 관련 공법개발이 절실히 요구된다(Jang, 2008). 따라서 본 연구에서는 친환경 고화재 중 하나인 다공성 실리카를 이용하여 실리카의 혼합비율에 따른 강도특성을 규명하였다. 흙을 주재료로 사용한 구조물은 시공 후 습윤건조, 동결융해 등 역학 외적인 기후 영향을 받게 되므로 토류구조물의 장기적인 안정성에 많은 영향을 미칠 수 있다. 따라서 기후변화에

대응할 수 있는 토류구조물의 설계 및 시공을 위해서는 기후변화에 대응할 수 있는 토류구조물에 장·단기적으로 어떠한 영향을 미치는지와 불안정해지는 과정에서 어떠한 징후를 보이는지, 그리고 이러한 기후영향을 현재 적용되고 있는 설계에 어떻게 반영하여야 하는지에 대한 구체적인 연구가 수행되어야 한다(Yoo, 2011). Allam & Sridharan(1981)은 습윤건조 반복작용이 흙의 전단강도에 미치는 영향에 대해 기본적인 이론을 정립하였고, Rajaram & Erbach(1999)는 습윤건조 반복작용이 흙의 역학적 특성과 응력장에 미치는 영향을 다루었으며, 점토를 대상으로 실험적 연구를 수행하여 습윤건조 과정에서 흙이 응력 변화를 유발하여 흙의 강도에도 영향을 미치는 것으로 발표한 바 있다. Pathma et al.(2006)은 낮은 모관흡수력 상태에서 습윤건조 반복작용이 실트질 점토의 불포화 전단강도에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 국내에서는 Yoo(2011)는 습윤건조 반

1) Department of Forest Resources and Environment, Kyungpook National University

2) Eco-Friendly Technology Research Center, Kyungpook National University

† Department of Cons. and Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University (Corresponding Author : osw@knu.ac.kr)

복작용으로 인한 화강풍화토의 압축강도 특성 변화에 대한 연구에서 세립분 함유량에 따라 성형된 시료에 습윤건조 반복작용을 강제로 부과하여 강도특성의 변화를 파악할 수 있는 평면변형률 시험을 수행하였다. 이러한 기후변화에 의한 흙 구조물의 강도저하에 대한 연구는 활발히 수행되고 있으나 시멘트계 고화재를 사용하지 않은 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 화강풍화토와 친환경 고화재인 다공성 실리카 및 경화토를 포장재로 사용할 경우 투수성과 보행감을 향상시킬 수 있는 우드칩을 이용한 경화토의 공학적 특성을 평가하기 위하여 일축압축강도 시험과 휨강도 시험을 수행하였으며, 기후변화가 경화토의 압축강도에 미치는 영향을 규명하고자 다수 사이클의 습윤건조 반복시험을 수행하였고, 각 사이클별로 일축압축시험을 수행하여 강도 변화 특성을 규명하였다. 또한 습윤건조시험 반복 사이클이 종료된 후 동탄성시험을 실시하여 상대동탄성계수의 변화를 비교·분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 경화토의 특성

#### 2.1.1 화강풍화토의 물리적인 특성

Table 1은 실험에 사용된 화강풍화토의 물리적 특성을 보여주고 있으며, 비중은 2.60, 액성한계는 29.2 %, 소성한계는 N.P로 나타났고, 통일분류법상 SW로 분류된다. 실내 다짐시험결과 최대건조단위중량과 최적함수비가 각각 19.8 kN/m<sup>3</sup>, 14 %인 것으로 나타났으며, 건습반복에 의한 경화토의 강도특성을 평가하기 위한 공시체는 최대건조단위중량의 85 %인 16.8 kN/m<sup>3</sup>로 제작하였다.

Table 1. Physical properties of soil specimens

Physical properties	Symbol	Unit	Soil specimen
			Weathered granite soil
Moisture content	$w_o$	%	14.0
Unit weight	$\gamma_{dmax}$	(kN/m <sup>3</sup> )	19.8
Liquid limit	$W_L$	%	29.2
Plastic limit	$W_p$	%	NP
Plastic index	$I_p$	-	NP
Specific gravity	$G_s$	-	2.60
$C_u$	-	-	10.19
$C_c$	-	-	1.15
U.S.C.S.	-	-	SW

### 2.1.2 다공성 실리카의 특성

본 연구에 사용된 다공성 실리카는 흙의 전단강도를 증가시켜 지반의 지지력과 내구성을 향상시키며, 침수와 동해를 동시에 방지하는 특징을 가지고 있다(Kwon & Oh, 2012). 특히 천연섬유에서 추출한 단섬유와 석회 등을 혼합한 재료를 주원료로 다른 토양결합재와 달리 유해성이 없으므로 친환경적일 뿐만 아니라 시공성이 우수하고 어느 토질에서도 사용이 가능하므로 산림공원의 관리도로, 산책로 및 자전거도로 등 쓰임새가 많은 재료이다(Oh et al., 2013). 또한 토양결합재는 흙 입자를 고화시키기 위한 충분한 강도가 필요하며 양생기간의 단축을 위해 조기에 강도를 발현할 수 있는 속결성이 매우 중요하다(Lee, 2012). 토양결합재의 양생 속도는 사용하는 재료의 분말도에 의해 영향을 받게 되는데, 본 연구에 사용된 실리카는 비표면적이 5,293 cm<sup>2</sup>/g으로서 보통 포트랜드 시멘트의 3,260 cm<sup>2</sup>/g보다 1.6배 이상 크므로 고화성능이 우수한 것으로 평가된다(Chun, 2001). Fig. 1은 본 연구에 사용된 실리카의 ICP 분석결과를 나타내고 있으며, ICP에 의한 원소 분석결과 Ca은 30.36 %, C가 9.01 %, Si가 7.17 %, Al이 4.72 % 등의 원소로 이루어져 있음을 알 수 있다. 따라서 실리카를 구성하는 주원소는 Ca과 Si이며, CaCO<sub>3</sub>와 SiO<sub>2</sub>의 형태로 존재하는 것으로 판단된다. 또한 Power XRD 분석결과, vaterite, calcite와 argonite CaCO<sub>3</sub>의 결정구조가 Peak에 모두 나타나고 있어 세 가지의 CaCO<sub>3</sub> 성분이 혼재되어 있음을 알 수 있다.

### 2.2 일축압축강도 시험

본 연구에서는 화강풍화토에 실리카 및 우드칩을 혼합한 경화토의 공학적인 특성을 평가하고자 실리카와 우드칩의 혼합비를 변화시켜가며 양생기간별로 공시체를 제작하여 KS F 2314의 규정에 따라 일축압축강도 시험을 수행하였다. 일축압축강도 시험은 직경 50 mm, 길이 100 mm의 몰드에 공시체를 건조단위중량에 맞추어 다짐하는 방법으로

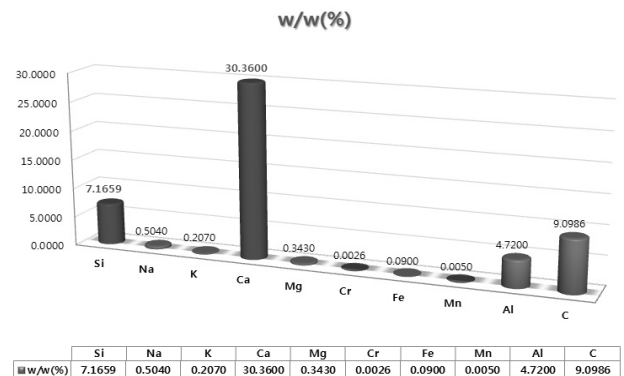


Fig. 1. Analysis result of ICP

혼합토 중량대비 실리카를 5 %, 10 %, 15 % 혼합하였고, 각 단계별 우드칩을 0.5 %, 1.0 %, 1.5 % 혼합하였으며, 양생기간은 초기강도발현을 확인하기 위하여 7일, 14일, 28일로 결정하였다. 균질한 공시체의 제작을 위하여 화강풍화토 및 실리카, 우드칩을 혼합한 다음 최적함수비의 물을 가하여 손비빔으로 충분히 혼합하여 공시체를 완성하고 상온에서 양생한 후 시험을 수행하였다. 일축압축시험 조건은 Table 2와 같다.

### 2.3 습윤건조 반복시험

본 연구에서는 습윤건조 반복작용이 경화토의 강도에 미치는 영향에 대해 규명하고자 KS F 2330에 준하여 습윤건조 반복시험을 수행하였다.

습윤건조 시험을 실시하기 위한 공시체를 제작하여 상온에서 28일간 양생시키고 24시간 동안 수침시킨 후 건조로에서 20 °C로 24시간 건조시키는 것을 1사이클로 규정하고 0사이클, 3사이클, 6사이클, 12사이클 주기로 반복시험을 실시하였다. 각 사이클이 종료되면 시험 전후의 강도변화를

Table 2. Experimental condition (unconfined compressive test)

Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Stabilizer (%)	Wood chip (%)	Curing period (day)
16.8	5	0.5	7, 14, 28
		1.0	
		1.5	
	10	0.5	
		1.0	
		1.5	
	15	0.5	
		1.0	
		1.5	

Table 3. Experimental condition (wetting-drying test)

Stabilizer (%)	Wood chip (%)	Cycles	Curing period (day)
5, 10, 15	0.5	0	28
		3	
		6	
		12	
	1.0	0	
		3	
		6	
		12	
	1.5	0	
		3	
		6	
		12	

확인하기 위하여 일축압축강도시험을 수행하였으며, 비파괴 상태의 강도변화를 측정하기 위하여 각 사이클별 동탄성 시험을 수행하였다. 시험조건은 Table 3과 같다.

### 2.4 동탄성시험

동탄성시험은 공시체를 파괴하지 않는 비파괴 시험으로 주파수 스캔회로에서 발생한 진동파형으로 다양한 종류의 탄성체를 진동시켜 탄성체의 진동을 파악하고 이를 수신하고 증폭하여 공시체의 공명진동수를 측정하고 공명주파수에 따른 동탄성계수 및 포아송비를 산출해 내는 시험이다 (Chun et al., 2010). 본 연구에서는 습윤건조 반복조건 하에서 동일한 공시체의 강도 변화를 알아보기 위하여 상대동탄성계수를 측정하였다.

동탄성계수로부터 Eq. (1)에 의하여 상대동탄성계수를 산출하였다.

$$P_c = (n_1^2/n^2) \times 100 \quad (1)$$

여기서  $P_c$  = 습윤건조 C 사이클 후의 상대동탄성계수(%)

$n$  = 습윤건조 0 사이클에서의 1차 공명주파수(Hz)

$n_1$  = 습윤건조 C 사이클에서의 1차 공명주파수(Hz)

본 연구에 사용된 동탄성시험 장비는 Fig. 2와 같다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 일축압축강도 시험결과

Fig. 3~5는 실리카를 혼합토 중량 대비 5 %, 10 %, 15 %

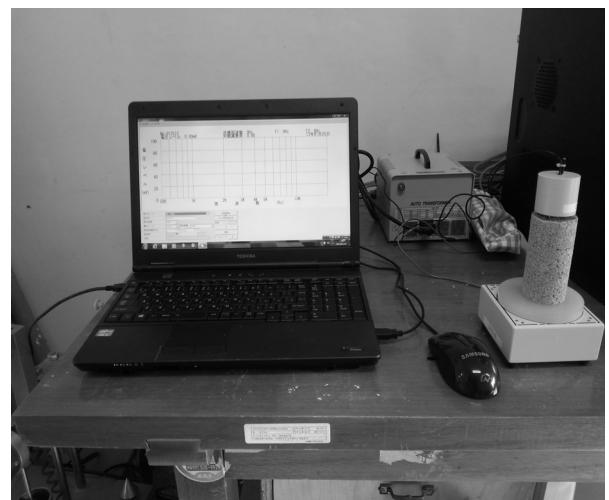


Fig. 2. Experimental equipment of dynamic elasticity

혼합하고 각 단계별로 우드칩을 0.5 %, 1.0 %, 1.5 % 혼합하였을 경우 실리카의 혼합비율에 따른 일축압축강도를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 실리카의 혼합비율이 증가할수록 일축압축 강도가 증가하는 것을 알 수 있고 양생기간이 28일인 경우 7일인 경우보다 최대 1.5배가 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 28일 강도를 표준강도로 결정할 경우 표준강도의 90 % 이상 강도에 도달하기 위한 양생기간은 14일이 적합하다고 판단된다.

### 3.2 습윤건조 반복시험결과

#### 3.2.1 습윤건조 반복 사이클에 따른 일축압축강도 특성

습윤건조 반복작용에 의한 경화토의 일축압축강도 변화를 규명하기 위하여 28일 상온에서 양생한 공시체를 0, 3, 6, 12사이클 반복시험을 수행하고 각 단계별 일축압축강도 시험을 수행하였다. Fig. 6은 습윤건조 반복 사이클 전후의 일축압축강도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있

듯이 습윤건조 반복 사이클이 증가할수록 일축압축강도가 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 3사이클까지는 강도가 완만하게 감소하는 반면, 3사이클 이후 6사이클까지 최대 63 %까지 강도가 감소하여 강도감소량이 뚜렷한 것을 알 수 있었고, 6사이클 이후 시험종료 사이클인 12사이클까지는 평균 15 % 미만의 강도감소를 보여 강도감소 경향이 완만해지는 것을 알 수 있었다. 따라서 실리카를 혼합한 경화토는 6사이클까지 습윤건조 반복작용에 의한 기후영향을 많이 받는 것을 알 수 있었다.

#### 3.2.2 습윤건조 반복 사이클에 따른 시험강도/초기강도비

Fig. 7은 습윤건조 반복 사이클별 시험강도에 대한 초기강도(0사이클)의 비를 나타내고 있다. 그림에서 나타나듯이 습윤건조 반복 사이클에 따른 시험강도/초기강도비의 변화는 3사이클까지는 완만한 감소경향을 보이거나 3사이클 이후 6사이클까지는 급격한 변화를 보이고 있다. 특히 실리

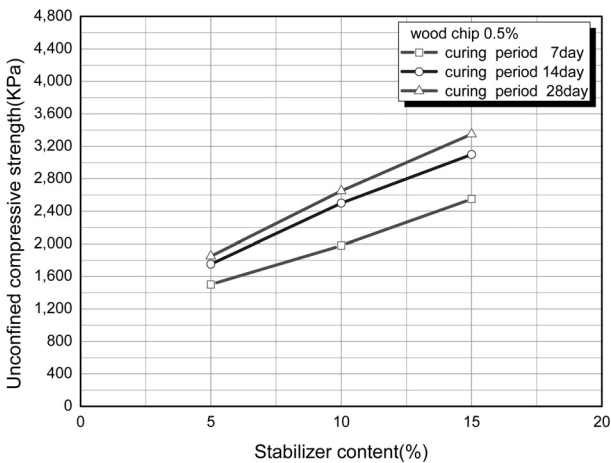


Fig. 3. Unconfined compressive strength according to the stabilizer content (wood chip 0.5 %)

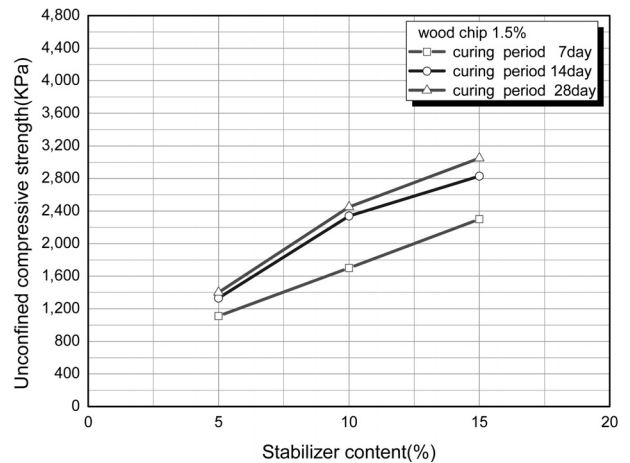


Fig. 5. Unconfined compressive strength according to the stabilizer content (wood chip 1.5%)

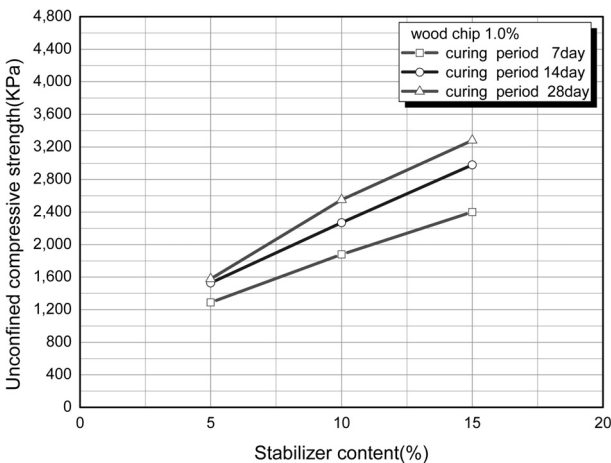


Fig. 4. Unconfined compressive strength according to the stabilizer content (wood chip 1.0 %)

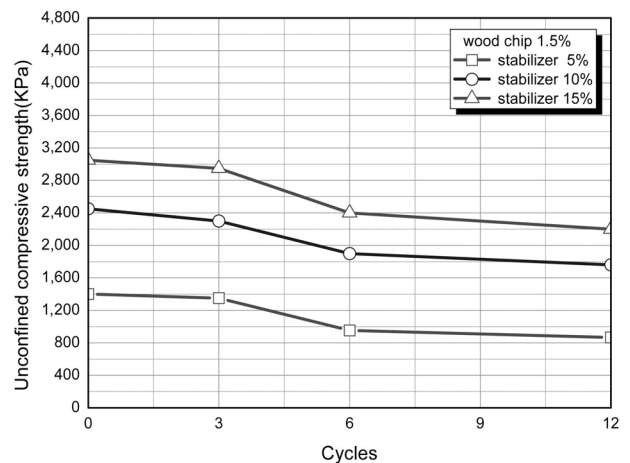


Fig. 6. Unconfined compressive strength according to the Wetting-drying cycles

카의 혼합비율이 5 %인 경우에는 강도감소비가 3사이클 대비 최대 43 %를 나타내고 있다. 또한 실리카의 혼합비율이 증가할수록 습윤건조 반복 사이클에 의한 강도비의 차이가 작아지는 경향을 알 수 있었으며, 실리카의 혼합비율이 5 %인 경우 강도감소비가 최대 32 %로 많았으나 실리카의 혼합비율이 10 %, 15 %인 경우 강도감소비가 평균 25 % 이하로 나타나 시멘트계 고화재를 사용한 경우 일반적인 강도감소비가 60 % 정도인 것과 비교하여 본 연구에 사용된 경화토는 기후 변화에 의한 영향이 현저히 작은 것을 알 수 있었다.

### 3.3 동탄성시험에 의한 상대동탄성계수 변화

Fig. 8은 습윤건조 반복작용을 0사이클에서 12사이클까지 수행하고 각 사이클별로 동탄성시험을 수행한 결과 실리카의 혼합비율에 따른 상대동탄성계수를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 습윤건조 반복 사이클 횟수가 증가할

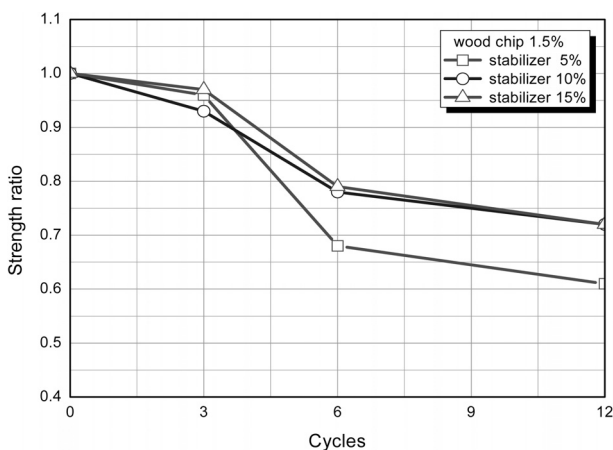


Fig. 7. Analysis of strength ratio between experiment strength and premature strength according to the stabilizer content

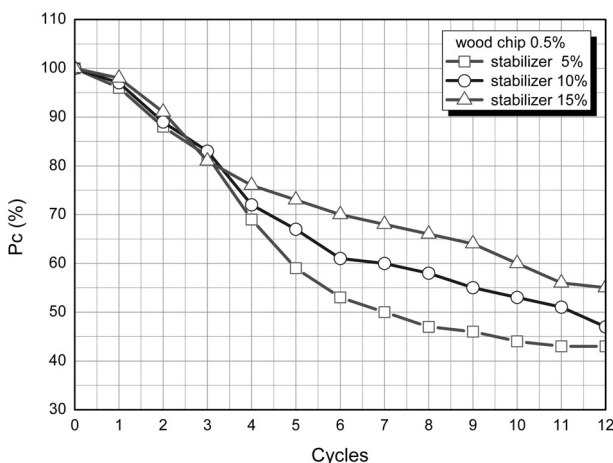


Fig. 8. Relative dynamic modulus of elasticity according to the wetting-drying cycles

수록 상대동탄성계수가 감소하는 것을 알 수 있고 시험종료 사이클인 12사이클에서는 상대동탄성계수가 최대 45 %까지 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 3사이클까지는 실리카의 혼합비율에 따른 상대동탄성계수의 차이는 크지 않았으나 3사이클 이후부터 실리카의 혼합비율이 적을수록 상대동탄성계수의 감소비율이 커지는 것을 알 수 있었고 12사이클의 상대동탄성계수는 실리카의 혼합비율이 15 %인 경우 5 %인 경우보다 1.15배 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 따라서 실리카의 혼합비율이 많을수록 경화토의 동탄성계수 감소비율이 현저히 줄어드는 것을 알 수 있었다.

## 4. 결 론

다공성 실리카 및 우드칩을 혼합한 경화토의 강도특성을 평가하기 위하여 화강풍화토와 실리카 및 우드칩의 혼합비율 변화에 따른 일축압축강도 시험을 수행하고 기후 변화가 압축강도에 미치는 영향을 규명하고자 습윤건조 반복시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 실리카의 혼합비율이 증가할수록 일축압축 강도가 증가하는 것을 알 수 있었고 양생기간이 7일인 경우 28일 강도의 최대 81 %를 발현하는 것으로 나타났으며, 양생기간 28일 강도를 표준강도로 결정할 경우 표준강도의 90 % 이상 강도에 도달하기 위한 양생기간은 14일이 적합하다고 판단된다.
- (2) 우드칩의 혼합비율이 증가할수록 일축압축 강도가 감소하며, 우드칩의 혼합비율이 1.5 %인 경우 0.5 %인 경우보다 최대 23 % 정도 강도가 감소하는 것으로 나타났다.
- (3) 기후변화에 의한 경화토의 강도특성을 평가하기 위하여 습윤건조 반복시험을 수행한 결과 3사이클까지는 강도가 완만하게 감소하는 반면, 3사이클 이후 6사이클까지 최대 63 %까지 강도가 감소하여 강도감소량이 뚜렷한 것을 알 수 있었고, 6사이클 이후 시험종료 사이클인 12사이클까지는 평균 15 % 미만의 강도감소를 보여 기후변화에 의한 영향이 크지 않을 것을 알 수 있었다.
- (4) 동탄성시험 결과 습윤건조 반복 사이클 횟수가 증가할수록 상대동탄성계수가 최대 45 %까지 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 3사이클까지는 실리카의 혼합비율에 따른 차이는 크지 않았으나 3사이클 이후부터 실리카의 혼합비율이 적을수록 상대동탄성계수의 감소비율이 커지는 것을 알 수 있었다. 따라서 실리카의 혼합비율이 클수록 경화토의 상대동탄성계수 감소비율이 현저히 줄어드는 것을 알 수 있었다.

## 감사의 글

이 논문은 2012년도 경북대학교 학술연구비에 의해 연구 되었으며, “산림과학기술개발사업(과제번호: 2013-자유18)”의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

## References

1. Allam, M. M. and Sridharan, A. (1981), Effect of wetting and drying on shear strength, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 107, No. 4, pp. 421~438.
2. Chun, B. S. (2001), Improvement effectiveness of soft ground using hardening agent, *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 2, No. 2, pp. 59~64 (in Korean).
3. Chun, B. S., Park, D. H., Kim, D. Y. and Chae, H. Y. (2010), *Geotechnical testing & subsurface exploration*, Bookstore of Goome, pp. 269~272 (in Korean).
4. Jang, C. G. (2008), An experimental study on Cr 6+ free soil pavement using weathered soil and inorganic binder, Master's thesis, Hanyang University, pp. 22~43 (in Korean).
5. Kwon, Y. C. and Oh, S. W. (2012), Strength characteristics of the soil mixed with a natural stabilizer, *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 13, No. 1, pp. 45~51 (in Korean).
6. Lee, G. H. (2012), Engineering properties and applicability of soil mixed pavement with natural soil stabilizer, Ph.D. dissertation, Incheon National University, pp. 20~69 (in Korean).
7. Oh, S. W., Lee, G. H. and Kim, D. G. (2013), Basic study on development of forest road pavement using eco-friendly method, *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 14, No. 6, pp. 31~38 (in Korean).
8. Pathma, C., Gallage, K. and Uchimura, T. (2006), Effects of wetting and drying on the unsaturated shear strength of a silty sand under low suction, *Proceedings of Unsaturated Soil, AZ, USA*, pp. 1247~1258.
9. Rajaram, G. and Erbach, D. C. (1999), Effect of wetting and drying on soil physical properties, *Journal of Terramechanics*, Pergamon, Vol. 36, No. 1, pp. 39~49.
10. Yoo, C. S. (2011), Effective cyclic drying-wetting on compressive strength of decomposed granite soils, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 10, No. 4, pp. 19~28 (in Korean).