화강 풍화토의 고화처리에 의한 강도변화 특성

Variation in strength owing to solidification treatment of weathered granite soil

이성열* · 김승곤** · 백원진*** · 권성진**** · 정창성***** · 이정훈*****

Lee, Sungyeol*, Kim, Sunggon**, Baek, Wonjin***, Kwon, Sungjin****, Jung, Changsung*****,
and Lee, Junghoon*****

Abstract

Recently, soil-cement is being increasingly used in various applications such as road pavements, slope protection, backfilling of earth walls, and improving soft ground, in order to increase the strength of the raw material soil. Therefore, in this study, the characteristics of changes in the unconfined compression strength of soil-cement were analyzed by adding a solidifying agent targeting granite soil, which is representatively distributed in Korea. Laboratory tests were conducted to analyze the changes in strength according to 1) curing conditions and fine contents, 2) inorganic solidifying agent, and 3) repeated effects of dry and wet conditions. The unconfined compression strength of soil-cement increased as the curing period and mixing ratio increased, and it was constant after 14 days of curing. In addition, weathered granite soil with relatively low fine contents showed a large increase in the unconfined compression strength. In addition, the strength increased with an increase in the solidifying agent added. X-ray-diffraction analysis showed that vermiculite was generated by adding cement and admixtures, and the strength was increased by filling the gap between the particles. Considering the results of this study, a relationship between the unconfined compression strength and the elastic modulus of soil-cement by treatment with a solidifying agent was proposed.

Key words : Soil Cement, Weathered Granite Soil, Solidifying Agent, Elasticity Modulus, Curing

요 지

최근 소일시멘트는 자연토사의 강도증진을 목적으로 도로포장, 사면보호, 토류벽의 뒷채움, 연약지반의 개량 등 다양한 분야에서 그 사용이 증가하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 국내에 일반적으로 분포하고 있는 화강토에 고화제를 첨가한 소일시멘트의 일축압축강도의 변화특성을 분석하였다. 실내실험은 1)양생기간과 세립분 함유량, 2) 무기질 고화제, 3) 건습의 반복의 영향에 따른 강도의 변화특성에 대해 수행되었다. 그 결과, 소일시멘트의 일축압축강도는 양생기간과 고화제의 혼합비율 증가와 더불어 증가하였으며, 양생기간 14일 이후에는 일정값을 유지하였다. 게다가, 상대적으로 낮은 세립분 함유량을 가진 화강토가 일축압축강도가 더 크게 증가하였다. 그리고, 강도는 고화제의 첨가량의 증가와 더불어 증가하였다. X선-회절분석결과, 시멘트 및 혼화제의 첨가로 Vermiculite가 생성되었다. 본 연구결과로부터, 고화제 처리에 의한 소일시멘트의 일축압축강도와 탄성계수의 관계식을 제안하였다.

핵심용어 : 소일시멘트, 화강 풍화토, 고화제, 탄성계수, 양생

*정회원, 전남대학교 지역·바이오시스템공학과 박사과정(E-mail: sungyeal86@naver.com)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Rural & Biosystems Engineering, Chonnam National University

**㈜포엠 부장

Project Manager, Four M Co. Ltd.

***교신저자, 정회원, 전남대학교 지역·바이오시스템공학과 교수(Tel: +82-62-530-2151, Fax: +82-62-530-2159, E-mail: bwj215@jnu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Rural & Biosystems Engineering, Chonnam National University

****㈜동아기술공사 부사장

Vice-president, Dong-A Eng. Co. Ltd.

*****㈜동아기술공사 상무이사

Executive director, Dong-A Eng. Co. Ltd.

*****금호건설주식회사 부장

Head of Department, Kumho E&C

1. 서 론

최근 기후변화의 영향으로 잦은 국지성 호우로 토사사면의 붕괴, 하천 제방의 침수에 의한 붕괴 및 도심지를 중심으로 빈번한 지반함몰(도로함몰: 주 요인은 노후된 하수관의 파손 부를 통한 지하수위 변동의 영향(Seoul City, 2015)) 등으로 인한 구조물의 안정성 저하, 인명피해 및 사회/경제적 문제가 대두되고 있다. 이러한 문제 발생시 긴급복구를 위해 유동성 채움재(Controlled Low Strength Material, CLSM)를 이용하여 지반의 빈 공간 및 느슨해진 공극사이를 채워 지반강도를 보강한다(Park et al., 2004). 이와 같이 채움재의 강도 발현과 증대를 위해 자연토에 시멘트와 같은 고화제 및 응결제를 혼합하여 도로 포장, 강도가 저하된 사면 보호공, 토류벽과 같은 벽체의 뒷채움, 연약지반의 개량제로 소일시멘트의 사용이 증가하고 있다. 또한, 환경적 영향을 최소화하고 주변 경관의 향상을 위해 흙, 시멘트, 혼합수를 적정 비율로 배합하여 생성되는 친환경적 포장재료인 소일시멘트가 대체재로 부상하고 있다. 소일시멘트는 일반포장용 콘크리트에 준하는 강도를 발현할 수 있는 재료로서 이를 이용한 소일시멘트의 강도개선 및 친환경적 포장을 위해 고화제를 혼합하여 사용하고 있다.

소일시멘트와 관련된 기존의 연구는 다음과 같다. 초창기의 1920년대 미국에서 도로기층 및 포장공사에 이용하기 위해 흙과 시멘트를 혼합하여 소일시멘트에 관한 실험적 시도가 시작되었으며, Moh et al. (1967)은 소일시멘트의 압축강도에 영향을 끼치는 인자로 시멘트함량, 함수비, 다짐 밀도, 양생온도, 입도 등이 있다고 발표하였으며, Bhandari (1973)은 시멘트로 고화토의 건조수축에 대한 연구를 진행하였으며, Cho (1974)는 소일시멘트의 물리적 특성에 관한 연구를 통해 토질시험에서 다짐시의 최적함수비와 최대건조밀도설이 적용된다고 하였으며, Kim et al. (2003)은 도로 노반토의 강도 증진을 목적으로 무기질 고화제를 첨가한 소일시멘트의 강도가 상당히 증진된다고 발표하였다. 2010 년대에 들어 Lee et al. (2011)은 플라이애쉬와 시멘트를 이용하여 노상토의 압축강도와 탄성계수에 대한 평가를 수행하였으며, Kim et al. (2011)은 대구경으로 소일시멘트를 적용한 토류벽에서 소일네일링과 유사한 효과를 발휘한다고 하였다. 또한 Park et al. (2018)은 산업부산물을 활용한 저시멘트 소일 콘크리트의 유동성 및 압축강도 특성에 대한 연구를 진행하였다. 이렇듯 소일시멘트에 관한 연구는 물리·역학적 성질의 개선에 대한 것이 대부분이며, 내구성에 관한 연구는 거의 전무한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 국내에 산재해 있는 화강 풍화토에 고화제를 첨가한 소일시멘트(이하 고화처리토라 기술한다) 공시체를 제작하고, 강도 특성에 대해 양생조건과 세립분의 함유량, 무기질 고화제 용액, 견습효과, 산저항성 등에 따른 강도특성의 변화에 대한 실험을 실시하였다. 또한, 응결 및 경화과정에서의 입자표면의

변화를 확인하기 위해 양생기간별로 전자 현미경 분석(SEM)을 실시하고, X-선 회절 분석법으로 화학성분과 구성 광물 조성을 분석하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 재료 특성 및 실험 방법

본 연구에서는 화강토에 시멘트계 고화제를 첨가한 고화처리토의 강도 특성 분석을 목적으로 다양한 조건에서 공시체를 제작하고, 일축압축강도시험을 실시하였다. 먼저 공시체 제작을 위해 사용된 흙(광주 ○○지구 택지조성공사현장에서 채취한 화강풍화토 계열)의 물리적 특성을 정리한 것이 Table 1이다. #200번체 통과량은 14.95이며 통일분류법(USCS)에 의해 SP로 분류되었으며, Fig. 1은 본 연구에서 이용한 화강토의 입도분포곡선을 나타낸 것이다.

실험에 사용된 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)는 국내에서 생산된 D사의 제품으로 한국 산업규격(KSL 5201)에 합격한 것을 사용하였으며, 흙과 시멘트의 고결력을 촉진하고자 고화제는 국내에서 개발된 G사의 용액을 첨가제로 사용하였으며 첨가제의 주성분은 Table 2에 나타낸다.

실험목적에 따라 배합된 공시체는 몰드에 시료를 다진 후 압출기를 이용하여 압출하여 제작하였으며, 재령 3, 7, 14, 28일에 STM-5 모델의 만능재료시험기(UTM)를 사용하여 하중재하속도 1 mm/min을 유지하는 변형률 제어방식으

Table 1. Physical Properties of Weathered Granite Soil

	Gs	LL	#200 (%)	Gravel (%)
Soil	2.66	35.53	14.95	1.42
	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	USCS
	83.63	12.84	2.11	SP

Fig. 1. Particle Distribution Curve of Weathered Granite Soil

로 일축압축실험을 수행하였다.

또한, 고화처리토의 공시체에 대한 메커니즘 분석을 위하여 전자 현미경 분석(SEM)을 통해 각 조건에 따른 입자의 변화를 파악하였으며, X선-회절 분석(XRD)을 수행하여 고화제 첨가에 따른 재령별 수화반응 생성물을 조사하였다. 마지막으로 공시체의 기공분포가 강도변화 특성에 미치는 영향을 살펴보았다.

2.2 실험 조건

고화처리토의 양생조건과 세립분 함유량, 무기질 고화제 용액, 건습효과, 산저항성 등이 공학적 특성 변화에 미치는 영향에 대해 알아보기 위해, 본 연구에서는 높이 105 mm, 지름 52 mm (체적 213.37 cm³)의 PVC 몰드를 제작하여 사용하였으며, 상·하판 및 PVC 몰드 내부에 실리콘 그리스를 도포한 후, 각각의 실험 Case별로 γ_t 를 일정하게 유지하며, Jack을 이용하여 정적으로 일정한 압력을 가하여 다짐을 실시하였다. Fig. 2는 공시체를 성형하기 위한 PVC와 하판을 나타낸 것이며, Fig. 3은 성형된 공시체의 전경을 나타낸 것이다.

고화처리토의 강도특성 변화를 분석하기 위해 Table 3에 나타난 것처럼 배합비를 조절하여 제작된 공시체는 A, B, C, D, E, F, G, H 총 8종으로, 각각 A, B는 세립분 함유량, C와 D는 무기질 고화제 용액, E와 F는 산저항성, G와 H는 건습효과에 따른 강도특성을 분석하기 위한 공시체의 배합비를 요약한 것이다.

세립분 함유량과 무기질 고화제 용액에 따른 강도특성의 분석은 일축압축 실험으로 하중재하속도 1 mm/min을 유지하는 변형률 제어방식으로 수행하였으며, 각 양생일(3일, 7일, 14일, 28일)별로 일정함을 확인하기 위해 3개의 공시체를 제작 실험하여 파괴 강도의 차이가 $\pm 5\%$ 이상인 결과를 제외하고, 나머지 결과를 평균하여 사용하였다.

Fig. 2. Apparatus of Making Specimen

Fig. 3. Front View of Specimens Formed with Mixing Ratio

Table 2. Composition of the Used Solidifying Agent

Admixtures	MgSO ₄	Mg ₂ O ₄	K ₂ SO ₄	NH ₄ CL	MgCL ₂	Gluconic	SNSC	CMC	Etc	Total
Contents (%)	15	20	10	20	17	3	10	3	2	100

* SNSC : Sodium Naphthalene Sulfonate Condensate, CMC : Carboxy Methyl Cellulose

Table 3. Mixing Ratio of Materials to Specimen Formation

Case	A/W	CR	Fc	Case	A/W	CR	Fc	Case	A/W	CR	Fc	Case	A/W	CR	Fc
A1	-	4	15	B1	-	4	5	C1	1 : 15	4	15	D1	1 : 15	4	5
A2	-	8		B2	-	8		C2	1 : 10			D2	1 : 10		
A3	-	10		B3	-	10		C3	1 : 5			D3	1 : 5		
E1	-	4	15	F1	1 : 15	4	15	G1	-	4	15	H1	1 : 15	4	15
E3	-	10		F3	1 : 5			G2				H2	1 : 10		
								G3				H3	1 : 5		

* A/W: Admixture/Water, CR: Cement Ratio, Fc: Fine contents (%)

건습효과에 따른 강도특성 분석을 위해 비율에 맞게 제작된 공시체를 28일간 양생한 후 건습(28일간 강도 발현 후 24시간 수침시킨 뒤 자연건조를 7회와 14회 반복)을 실시하고, 일축압축시험을 통해 고화제에 따른 강도 변화를 분석하였다.

3. 실내 실험결과 및 고찰

3.1 실내 일축압축강도 실험 결과

본 연구에서 설정한 배합비율에 따라 화강풍화토의 시멘트를 이용한 고화처리토의 양생조건과 세립분 함유량에 따른 일축압축시험 결과, Fig. 4에 나타난 바와 같이 두 조건 모두에서 양생기간과 시멘트 비율의 증가와 더불어 공시체의 일축압축강도는 증가하였으며, 세립분 함유량이 적은 B의 경우에 강도 증가율이 크게 나타났다. 그러나 양생 14일 이후에는 시멘트 양의 증가에도 강도발현에는 큰 영향을 주지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 5는 세립분과 고화제 첨가에 따른 일축압축시험 결과를 나타낸 것으로, 전술한 바와 같이 시멘트 함량의 증가와 더불어 강도증가가 크고(B1과 D1), 고화제를 첨가한 경우에는 세립분 함유량이 많은 C의 경우에 강도증가가 크게 나타났

으며, 이는 세립분과 고화제의 상호작용에 의한 강도발현이 빠르게 진행된 것으로 판단된다. 또한 고화제의 양이 많은 경우에 강도증가가 큰 것으로 나타났다. 비교를 위해 입도분석 결과에 따르면 조립분의 함유량이 많은 흙일수록 강도 증가는 커지는 것으로 나타났다.

건습의 반복에 따른 강도 특성을 분석하기 위해, 양생 28일 후 24시간 동안 수침시킨 후 자연 건조시키는 반복 과정을 7회, 14회 실시하고 압축강도실험을 실시한 결과를 나타낸 것이 Fig. 6과 같다. 그림에서 알 수 있는 것처럼, 건습의 반복횟수가 많을수록 수축/팽창의 반복으로 일축압축강도는 감소하는 것으로 나타났으며, 고화제의 비율이 높을수록 입자 표면의 결속력의 강화로 강도가 크게 나타났다.

산 저항성 평가를 위해, 28일간 양생시킨 후, 실험용액(H_2SO_4 5% 용액)에 일정기간 수침시킨 후 압축강도와 무게의 변화를 측정하였다. Fig. 7은 산 저항성의 일축압축강도의 변화를 나타낸 것으로, 시멘트 비율이 높고 고화제가 첨가된 공시체의 압축강도가 높게 나타났으나, 산 저항성에 대한 강도 감소율의 상관성은 나타나지 않았다. 그림에서 수침 시간이 길어질수록 압축강도가 감소하는 것으로 나타났으나, 고화제의 첨가유무 및 시멘트비율의 강도감소율에 대한 상관성은 찾아보기 어려웠다.

Fig. 4. Unconfined Compression Strength to Fine Contents

Fig. 6. Comparison of UC Strength to Dry and Humid

Fig. 5. UC Strength to Solidifying Agent and Fine Contents

Fig. 7. Comparison of UC Strength to Acid Resistance

또한, Table 4는 건습의 반복에 따른 일축압축 강도의 변화 특성 중, 28일 양생 후, 건습 7회, 14회 반복 후 공시체의 무게를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있는 것처럼, 수침기간의 증가와 더불어 공시체의 무게가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 전술한 강도감소에도 영향을 미친 것으로 판단된다.

또한, Table 5는 산 저항성 시험시의 공시체의 무게 감소를 나타낸 것으로 수침 기간이 증가함에 따라 무게의 감소가 나타났다. 이는 H_2SO_4 용액과 시료와의 화학반응 시간의 장기화에 따른 산화작용의 영향으로 판단된다.

3.2 고화처리토의 강도발현 메커니즘

3.2.1 전자현미경(SEM) 분석

화강 풍화토에 시멘트를 혼합한 고화처리토에 대해 양생

기간 및 혼합비의 변화에 따른 입자의 변화를 파악하기 위하여 3,000배의 배율로 전자현미경분석(SEM)을 실시한 결과, Fig. 8과 같이 나타났다. Fig. 8(a)와 같이 공시체 제작 초반에는 각 입자의 둘레에 많은 간극이 존재하고, 입자간의 결합은 선적으로 결합하여 강도의 발현이 크지 않지만, Fig. 8(b)처럼 양생 7일이 지나면서 알칼리성 용액의 침식작용에 의해 토립자 표면에 흡착성 물질층이 생성된다. 이후 양생 14일 후에는 입자 표면에서 입자간 결합이 나타났으며, 28일 양생 후의 Fig. 8(c)에서는 수화반응 생성물이 발생됨과 더불어 미세입자 등의 표면에 시멘트입자의 수화반응으로 간극이 충전되는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 시멘트와 고화제의 혼합량이 많을수록 증가하는 것으로 나타났다.

전자현미경에 장착되어 고에너지의 전자빔이 시료와 반응하여 시료의 구조 및 화학 조성 정보를 검출하는 장비인

Table 4. Weight Reduction of Specimen According to Dry and Humid Test

Type	G1		G2		G3	
after 28 days	7 cycles	14 cycles	7 cycles	14 cycles	7 cycles	14 cycles
strength	800.4	716.7	1,050.1	911.6	1,209.1	1,132.6
weight reduction	13.4	23.9	12.8	19.5	11.4	18.1
Type	H1		H2		H3	
after 28 days	7 cycles	14 cycles	7 cycles	14 cycles	7 cycles	14 cycles
strength	976.6	805.5	1,310.1	973.1	1,494.0	1,250.6
weight reduction	12.8	22.5	11.7	18.9	10.0	16.8

Table 5. Weight Reduction of Specimen According to Acid Resistance

Case	E1			E3		
after curing 28 days	3 days	7 days	28 days	3 days	7 days	28 days
strength	755.0	615.5	460.8	1,102.6	837.6	602.7
Weight reduction	14.2	18.2	25.1	11.8	13.3	21.3
Case	F1			F3		
after curing 28 days	3 days	7 days	28 days	3 days	7 days	28 days
strength	948.5	660.1	565.4	1,260.6	997.6	776.4
Weight reduction	9.6	12.8	19.2	8.4	11.6	18.5

(a) Curing 3 days

(b) Curing 7 days

(c) Cured 28 days

Fig. 8. Result of SEM for Curing Day and Mixed Ratio

EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer)를 이용하여 양생기간별로 분석한 결과, Table 6과 같이 주성분은 O, Al, Si로 이루어져 있으며, S, Ti, Cl, K이 소량 함유되어 있었다. 시멘트의 기본 원료인 석회암의 O, Si는 다량 함유되어 있으나, Ca은 물과 수화 반응을 일으켜 Al로 화학작용에 의해 변화된 것을 알 수 있다.

3.2.2 X선-회절 분석

고화제의 첨가에 따른 재령별 수화반응과 생성물을 조사하기 위하여 X선-회절분석(XRD)을 실시하였다. 먼저, 고화제를 첨가하지 않은 시료에 대한 XRD를 분석하고, 양생 7일이 시료에 대하여 일축압축 실험을 종료한 후 교란되지 않은 부분을 채취하여 #200번체 이하로 분쇄한 시료를 이용하여 XRD분석을 수행하였다. 그 결과를 Fig. 9에 나타낸 것으로 고화제 미첨가의 원시료는 Quartz (석영), Plagioclase (사장석), Biotite (흑운모)와 같이 국내에 일반적으로 분포하

는 화강토의 주 구성 광물로 나타났다. 그러나 시멘트와 고화제를 첨가한 시료의 XRD분석 결과, 고화제 첨가에 의한 Vermiculite (질석)이 발견 되었으며, 이는 흑운모가 시멘트와 고화제 첨가시의 수화반응에 의해 생성된 것으로 판단된다. 또한, 시멘트와 고화제의 첨가량이 증가할수록 Vermiculite의 양이 많아지는 것으로 나타났으며, 회절강도(intensity)는 광물의 결정성에 비례하므로 결정성이 높은 석영에 비해 상대적으로 결정성이 낮은 수화반응 생성물은 잘 나타나지 않은 것으로 판단된다.

3.2.3 압축강도와 탄성계수의 관계

화강풍화토와 시멘트 및 고화제를 소정의 배합비로 배합한 공시체를 이용하여 전술한 실험방법에 따라 일축압축강도를 측정하고, 응력-변형을 곡선으로부터 탄성계수를 산정하여 미처리토와 고화처리토의 압축강도-탄성계수의 관계를 Fig. 10에 나타낸다. Fig. 10(a)의 고화제가 미첨가된 시료

Table 6. Analysis Result of Energy Dispersive X-Ray Spectrometer

(unit : %)

Condition	O	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Total
Curing day and mixed ratio	32.45	16.42	27.21	0.32	0.95	3.44	9.36	0.49	9.36	100
Mixed admixture	31.89	14.98	22.92	0.21	1.56	3.60	14.51	0.73	9.60	100

(a) Weathered granite

(b) Added admixture (curing 7 days)

Fig. 9. XRD Analysis Results

(a) UC-E (none)

(b) UC-E (added admixture)

Fig. 10. Correlation between Unconfined Compression Strength and Elastic Modulus

의 압축강도와 탄성계수는 매우 높은 상관성을 가지며, $E = 408.4 \times f_c + 549.97 \text{ (kPa)}$ 로 분석되었다. 또한 본 연구에서 설정한 배합비에 따른 고화제가 첨가된 고화 처리토에서는 $E = 417.7 \times f_c + 541.98 \text{ (kPa)}$ 로 얻어졌다. 이처럼 고화제의 첨가로 인해 처리토의 강도증가가 우세한 것은 시료의 경화과정에서의 수화반응을 촉진한 것에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 고화처리토의 일축압축강도가 결정되어진다면 상기의 식을 이용하여 개략적인 탄성계수의 추정이 가능할 것이다.

4. 결 론

토사 지반의 토질 특성을 개선할 목적으로, 화강 풍화토에 시멘트와 고화제의 혼합비를 변화시킨 고화처리토의 시료를 제작하고, 양생기간 및 세립분 함유량, 고화제 첨가 여부, 건습 및 산저항성 등에 대한 실험을 수행하고, SEM과 XRD 분석을 실시하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 고화처리토의 일축압축 강도는 양생기간의 증가, 고화제 첨가량의 증가, 세립분 함유량의 감소에 따라 강도가 증가하였으며, 양생 14일이 경과한 이후부터는 일정한 강도를 유지하였다.
2. 생성된 침전물의 SEM분석 결과, 양생기간이 증가와 더불어 입자표면에 흡착된 시멘트에 의하여 흡착성 물질 층이 생성되어 입자 표면의 간극이 채워지고, 경화과정을 거쳐 굳어지는 현상을 관찰하였다.
3. 수화반응의 생성물에 대해 XRD 분석 결과, 시멘트와 고화제 첨가에 의해 Vermiculite가 발견되고, 이 물질이 입자의 간극을 메워 강도가 발현된 것으로 나타났다. 또한, 양생기간에 따른 입자간 간극은 양생기간의 경과와 더불어 간극사이가 조밀해지고, 결합력이 증대하여 압축강도를 증가시킬 것으로 기대된다.
4. 일축압축강도와 탄성계수의 관계로부터 강도 값의 범위가 500~1,500 kPa일 때, 고화제가 미첨가된 시료에서 $E = 408.4 \times f_c + 549.97 \text{ (kPa)}$, 고화제가 첨가된 고화처리토에서는 $E = 417.7 \times f_c + 541.98 \text{ (kPa)}$ 가 얻어졌다.

감사의 글

본 논문은 2017년도 전남대학교 학술연구비 지원(과제번호 2016-2843)에 의하여 연구되었습니다.

References

- Bhandarl, R.K.M. (1973). An Investigation into the Drying Shrinkage of Cement Treated Mixtures. *Journal of Indian Geotech*, Vol. 3, No. 1, pp. 26-37.
- Cho, J.G. (1974). A study on the characteristics of soil-cement on physical properties. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 16, No. 3, pp. 66-74 (in Korean).
- Kim, B.I., Wee, S.H., Lee, S.H., and Kim, Y.U. (2003). Strength characteristics of soil-cement mixed with inorganic solidification liquid. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 23, No. 3C, pp. 135-141 (in Korean).
- Kim, Y.S., Choo, J.H., and Cho, Y.S. (2011). Excavation behavior of an earth retaining wall supported by large diameter soil-cement blocks. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. C31, No. 2C, pp. 65-74 (in Korean).
- Lee, K.H., Jang, T.Y., Hwang, T.J., and Song, Y.S. (2011). Strength Properties of Subgrade Soil Modified by Cement. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 5, pp. 141-147 (in Korean).
- Moh, Z.C., Chin, Y.P., and Ng, S.C. (1967). Cement Stabilization of Lateritic Soils. *Proc. of Asian Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, pp. 42-46.
- Park, J.B., Yang, K.H., and Hwang, C.S. (2018). Flow and Compressive Strength Properties of Low-Cement Soil Concrete. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-7 (in Korean).
- Park, J.H., Lee, K.H., Jo, J.Y., and Song, C.S. (2004). Deformation behavior underground pipe with clsm. *Korean Society of Road Engineers*, Vol. 5, No. 2, pp. 123-130 (in Korean).
- Seoul city. (2015). *Pupil generation mechanism and counter-measures to prevent road depression* (in Korean).

Received	■	April 20, 2021
Revised	■	April 21, 2021
Accepted	■	April 30, 2021