

친환경 혼합토의 현장적용성 평가

Field Applicability Evaluation of Eco-friendly Mixed Soil

박 경 식¹⁾ · 오 세 옥²⁾ · 배 우 석[†]

Kyungsik Park · Sewook Oh · Wooseok Bae

Received: October 22nd, 2013; Revised: October 31st, 2013; Accepted: January 3rd, 2014

ABSTRACT : In the present study, it were performed an unconfined compression test and a field applicability test according to a mixed ratio of SS, soil type and curing period to analyze strength and deformation characteristic in order to evaluate engineering characteristics of soil mixed pavements using the eco-friendly soil stabilizer (SS). The test results revealed that SS mixed soil shows fast strength development at the initial curing time while 28-day strength amounted for 97% of the final strength. Furthermore, coarse-grained dredged sand (DS) and weathered granitic soil (WGS) have a larger ratio of deformation coefficient with respect to unconfined compressive strength than fine-grained dredged clay (DC) and organic soil (OS). Moreover, a comparison test between natural and forced drying conditions was conducted and test result showed 54% to 67% of strength degradation while having 55% to 63% of strength degradation in the freezing and thawing test result. Finally, a repeated loading test result showed that DS experiences up to 35% of strength reduction compared to initial strength under 10,000 times loading in maximum. Thus, it was validated that an appropriate amount of fine-grained sand is necessary to secure resistance capability to repeated loading.

Keywords : Eco-friendly stabilizer, Freezing and thawing, Repeated load, Deformation modulus

요 지 : 본 연구에서는 토양안정재(SS)를 이용한 흙 포장재의 공학적 특성을 평가하기 위해 일축압축시험과 현장적용성시험을 SS의 혼합비, 원지반 종류, 양생기간에 따라 수행하고 강도 및 변형특성을 분석하였다. 실험결과 SS 혼합토의 경우 양생 초기의 강도발현이 빠르고 28일 강도가 최종강도의 97% 이상을 확보하는 것으로 나타났으며, 세립질의 준설풀토(DC) 및 유기질토(OS) 보다 조립질의 준설풀토(DS)와 화강풍화토(WGS)가 일축압축강도에 대한 변형계수의 비가 큰 것으로 나타났다. 또한 자연건조와 강제건조의 조건으로 비교시험을 수행한 결과 54~67%의 강도 저하를 확인하였으며, 동결융해시험 결과에서는 55~63%의 강도 저하가 발생하였다. 그리고 반복재하시험 결과, 준설풀토의 경우 최대 10,000회의 재하에서 초기강도의 35%까지 강도저하가 발생하여 반복재하에 대한 저항능력의 확보를 위해서는 적당량의 세립분이 필요함을 확인하였다.

주요어 : 친환경 고화재, 동결융해, 반복재하, 변형계수

1. 서 론

최근 인간과 자연에 위해성이 없는 친환경 기술개발에 대한 관심이 고조되며, 경제성을 강조하는 획일화된 공법에 서 벗어난 다양한 기술의 개발이 필요하다고 인식하게 되었다. 특히 주변에서 흔히 구할 수 있는 재료인 흙을 이용한 건설재료의 개발이 활발히 진행되고 있는 상황이다.

현재 가장 활발히 진행되고 있는 흙 관련 연구는 흙 포장으로 흙을 주재료로 하고 소요의 강도를 확보하기 위하여 시멘트를 혼합하여 포장체를 형성하는 공법으로서, 1920년대 미국 Iowa와 South Dakota, Ohio 등지에서 공사비의 절감을 목적으로 처음 개발되기 시작하였다. 흙 포장공법에 대한 연구는 1935년 PCA(Portland Cement Association) 연

구소에서 흙과 시멘트의 혼합물에 대한 연구를 수행하였으며, 1950년대와 1960년대를 거쳐 본격적으로 흙 포장공법에 대한 연구·개발이 시작되었고, 캐나다와 유럽 및 일본 등의 국가에서 발전되어 왔다(Kwon & Oh, 2012).

우리나라에서는 Chun et al.(1993)이 석탄회의 성토 및 포장재로서의 개발연구를 시작으로 Kim et al.(2002)은 무기질 고화재를 섞은 쏘일시멘트의 일축압축강도와 휨 인장강도를 측정하는 연구를 수행하였다. Park et al.(2008)은 단섬유를 사용한 시멘트 혼합토의 일축압축강도특성에 대한 연구를 수행하여 섬유비의 증가에 따라 최대응력이 발휘되는 축 변형률도 증가하고 일축압축강도비가 시멘트비의 증가에 따라 감소하여 과도한 시멘트의 혼합이 섬유 보강 효과를 저하시킬 수 있다고 하였다. 또한 Oh et al.(2010)은 전단

1) Dept. of Aerial Geoinformatics, Inha Technical College

2) Dept. of Construction and Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University

† NANO-GEO ENC Co., Ltd. (Corresponding Author : old1007@hanmail.net)

강도의 상승을 목적으로 단섬유와 석회를 혼합한 친환경 고화재의 특성에 대해 발표한 바 있다.

국내에서는 최근 자전거 도로 및 보도, 산책로 등에 흙포장이 적극적으로 적용되고 있으나, 대부분 관련 협회나 일부 연구목적으로만 실험적 연구가 수행되었을 뿐 아직까지 통일된 설계기준이나 시방서가 없는 실정이다. 또한 흙의 인장거동과 강도를 보강하기 위해 사용되는 고화재가 포함된 혼합재의 거동에 대한 연구도 아직 미진한 상황이다. 더욱이 최근 시멘트 고화재에 대한 문제가 지적되면서 친환경적인 새로운 고화재에 대한 요구가 증가하고 있으며, 특히 시공현장에서 발생할 수 있는 상황에 대한 공학적인 접근은 거의 수행되고 있지 못하는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 환경적인 특성과 공학적인 기능의 부합성을 평가할 목적으로 중금속이 포함되어 있지 않은 친환경 재료를 이용한 혼합토의 현장적용 특성을 평가하기 위해 기본 물성시험과 일축압축시험을 수행하고 합리적인 배합비와 혼합토의 거동특성을 평가하였으며, 현장적용성을 평가하기 위해 동결융해시험과 반복재하시험을 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 대상시료의 특성

본 연구에서는 가장 쉽게 구할 수 있는 흙 시료를 대상으로 한 혼합토의 특성을 평가하기 위해 일반적인 화강풍화토를 채취하여 실험에 사용하였다. 화강풍화토에 대한 실내다짐시험 결과에 의하면 최적함수비는 11.6%로 판정되었으며, 최대건조단위중량은 18.53 kN/m³로 나타났다. 또한 흙

포장이 시도될 수 있는 환경으로 준설을 이용한 원재료의 획득과 현장토 유용 가능성을 상정하여 준설을 통해 얻는 준설점토(DC)와 준설모래(DS), 현장 주변의 화강풍화토(WGS)와 유기질토(OS)를 선정하였다.

실내 물성시험을 통해 평가된 주재의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

2.2 토양안정재(SS)

본 연구에 사용된 토양안정재(soil stabilizer, SS)는 흙의 전단강도를 증가시켜 지반의 지지력과 내구성을 향상시키는 재료로 천연섬유에서 추출한 단섬유와 석회 등을 혼합한 재료를 주원료로 하므로 독성이 없어 친자연적인 환경조성에 기여할 것으로 기대되며, 시공성이 우수하고 어느 토질에서도 사용이 가능하므로 산림공원의 관리도로, 산책로, 자전거 도로 등 쓰임새가 많은 것으로 알려져 있다(Kwon & Oh, 2012).

고화재의 역할을 수행하는 토양안정재의 공학적 특성을 평가한 결과는 Table 2에 나타난 바와 같이 비중면적이 5,293 cm²/g으로 보통 포틀랜드 시멘트보다 1.6배 이상 커 고화성능이 우수한 것으로 평가된다(Chun, 2001).

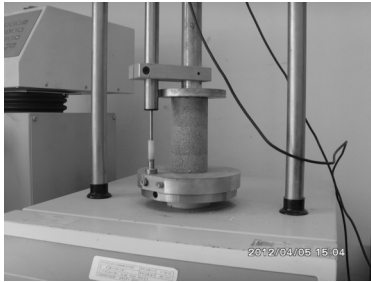
흙과 고화재를 혼합하게 되면 두 재료 사이에 발생하는 대표적인 화학적 반응으로는 수화반응(hydration reaction)과 양이온 교환(cation exchange), 포졸란반응(pozzolanic reaction)이 있다. 수화반응은 흙 속의 수분(H₂O)이 고화재의 CaO 성분과 반응하여 수산화칼슘[Ca(OH)₂]으로 변환하게 되며, 이 과정에서 열을 발산하여 주변지반의 함수비를 저감시키게 된다. 또한 양이온 교환은 석회의 Ca²⁺와 흙의 H⁺, Na⁺의 사이에서 이온교환으로 발생하므로 석회의 공급은 흙 속에 풍부한 Ca²⁺를 공급하여 주고 이로 인해 양이온

Table 1. Physical properties of various soil specimens

Physical properties	Symbol	Unit	Soil specimen			
			Dredged clay (DC)	Dredged sand (DS)	Weathered granite soil (WGS)	Organic soil (OS)
Initial moisture content	w_o	%	65.83	16.4	18.3	21.4
Unit weight	γ_t	kN/m ³	17.8	18.2	19.3	17.4
Liquid limit	W_L	%	43.0	-	30.7	42.5
Plastic index	I_P	-	24.0	NP	7.5	18.5
Initial void ratio	e_o	-	1.78	0.84	-	-
Specific gravity	G_s	-	2.68	2.67	2.65	2.55
Degree of saturation	S_r	%	98.5	-	-	-
Coefficient of uniform (Cu)	-	-	-	1.64	42.3	1285.7
Cc	-	-	-	0.85	5.05	11.47
USCS	-	-	CL	SP	SC	-

Table 2. Physical properties of the soil stabilizer and cement

Classification		Specific gravity	Fineness (cm ² /g)	Setting test		
				Water content	Start (Hour/min)	End (Hour/min)
SS		3.08	5,293	33.0%	00:16	02:20
Portland cement	Medium	3.17	3,260	27.5%	02:31	03:45
	Rapid Hardening Cement (1)	3.13	4,450	29.2%	02:25	03:44
	Rapid Hardening Cement (1)	3.11	6,050	33.8%	01:46	03:10



(a) Unconfined compressive test



(b) Freezing and thawing test

Fig. 1. Experimental equipment

교환이 일어나게 되며, 점토의 확산 이중 층이 줄어들어 지반 강도가 증가한다.

2.3 일축압축시험

일축압축시험(Fig. 1(a))은 혼합토의 적정 배합비를 결정하기 위해 배합비별 내구성 및 설계특성을 평가하기 위해 수행하였다. 시험을 위한 시료는 내경 50 mm, 높이 100 mm의 염화비닐관(PVC)을 반으로 절단하여 내벽에 그리스를 도포하고 혼합재료를 넣어 다진 후 양생하는 과정을 통해 조성하였으며, 혼합재료를 투입하고 시료의 상·하 단면을 고분자 필름을 씌워 공기의 출입을 억제한 상태에서 기중에서 양생하다가 공시체가 자중에 의해 변형되지 않을 정도의 충분한 강도가 확보되었을 때 공시체의 단부를 형성시킨 후 몰드를 분리시키고 다시 고분자 필름으로 피복하여 다시 습윤 수조에서 양생하였다. 공시체를 직접 수중에서 양생하지 않는 이유는 실제 안정처리지반의 대부분이 물의 출입이 없는 상태에서 양생 되는 것을 고려하였기 때문이다(Ko, 2012). 변형계수(E_{50})는 일축압축강도의 1/2이 되는 지점에서 할선계수를 통해 얻었으며, 초기 응력-변형률 곡선에서 변곡점이 생기는 경우에는 상기와 같이 수정원점을 다시 설정하여 수정원점을 통과하는 직선의 기울기를 통해 결정하였다.

2.4 현장적용특성평가

2.4.1 동결융해시험

양생 환경시험은 우리나라의 계절적 특성을 감안하기 위

해서 동절기와 하절기의 온도 차에 대한 영향과 건기와 우기 등 건습의 반복에 대한 영향을 알아보기 위하여 실시하였다. 온도 차와 건습의 반복에 대한 시험 모두 정해진 절차와 기준이 아직 명확하지 않은 상태이므로 관련 자료(Lee, 2012)를 참고하여 시험법을 다음과 같이 결정하였다.

습윤·건조시험을 실시하기 위해서 공시체를 제작하고 4일간 수침을 진행하였다. 4일간의 수침 이후 건조방법은 연구목적 달성을 위하여 24시간 자연건조의 방법과 24시간 건조기에 의한 강제건조방법을 실시하고, 시험조건에 따른 강도특성 평가를 위해 일축압축강도 시험을 실시하였다. 건조방법에 대한 공시체는 각 2개씩, 총 4개의 공시체를 만들어 산술 평균값을 적용하였다.

제1단계에서는 현재 온도에서 기준치인 -21°C 에 도달하기 위한 시간을 시험장비의 성능을 고려해 설정하고 제2단계에서는 충분한 동결조건을 확보하기 위하여 20시간 동안 -21°C 를 유지한다. 제3단계에서는 목표 온도를 $+21^{\circ}\text{C}$ 로 설정하고, -21°C 에서 $+21^{\circ}\text{C}$ 로 도달하기 위한 시간을 1단계 설정치의 2배인 1시간으로 설정한다. 제4단계에서는 $+21^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 20시간을 유지하고, 마지막으로 5단계에서 30분에 걸쳐 0도까지 온도를 저하시켜 1 cycle의 시험을 종료한다. 위와 같은 방법으로 동결융해시험(Fig. 1(b))은 3 cycle, 6 cycle, 12 cycle을 설정하여 총 3회에 걸쳐 강도시험을 실시하였다.

2.4.2 반복재하시험

공용 연수의 증가에 의한 반복하중에 의해 장기적으로

강도가 저하하는 정도를 평가하기 위하여 실시한 반복재하시험은 통상적으로 사용되는 동삼축압축시험기를 이용하였으며, 일축상태에서 상하로 반복재하만을 재하하여 소정의 재하회수에 도달한 이후 파괴에 이를 때까지 하중을 재하하고 강도를 측정함으로써 지속적인 반복하중에 의한 강도 저하특성을 평가하였다.

반복재하시험은 축 방향 3%의 이력을 재하회수 100회부터 최대 10,000회까지 변화시키면서 반복하중을 가하고, 각 단계별로 일축압축강도 시험을 실시하여 반복재하에 의한 강도변화 특성을 평가하였다.

2.5 흙 포장블록의 목표 강도

일반적으로 흙 포장은 보도 및 자전거 도로에 주로 적용되고 있으므로 시멘트 콘크리트 포장과 달리 요구되는 소요 강도에 차이가 있으나 포장체로서 요구되는 기본적인 기능은 유사하므로 소요 강도를 설정하는 일은 매우 중요하다. 흙 포장의 강도와 관련한 국내·외의 자료를 분석해 보면, 국내에서는 시공현장에 따라 다양한 강도기준이 적용되어 명확한 규정이 없는 실정이다. 일본 土木研究所(PWRI, 2009)는 비교적 낮은 0.3 MPa~0.7 MPa을 제시하고 있으며, 다구치기술연구소(田口技術研究所, 2010)의 “토계포장 공법 설계·시공지침”에서는 과거의 시험과 시공실적 및 표층에 작용하는 하중을 기준으로 1.0 MPa 내지 1.3 MPa을 제시하고 있다.

본 연구는 보도와 자전거 도로 및 관리용 소형트럭을 대상으로 한 다구치기술연구소(田口技術研究所, 2010)의 자료를 참고로 산정하였다. 따라서 관리용 소형트럭의 하중과 안전율을 고려하여 흙 포장블록에 대해서 2.0 MPa을 목표 강도로 설정하고자 한다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 강도 및 변형거동

3.1.1 일축압축시험 결과

본 연구에서는 토양안정재의 배합비에 따른 변형특성을 평가하기 위해 대상현장의 인근에서 쉽게 유용할 수 있는 상황을 감안하여 WGS, OS를 대상으로 서로 다른 네 가지 시료에 토양안정재를 중량대비 5%, 7%, 10%, 15%, 20%까지 변화시키면서 일축압축강도의 변화를 측정하였다.

양생기간에 따른 SS 혼합토의 강도변화를 분석한 결과, Fig. 2와 같이 네 가지의 원지반 재료 모두에서 양생기간 28일에서 최종 강도의 97~98%가 발현되고 있음을 확인하였

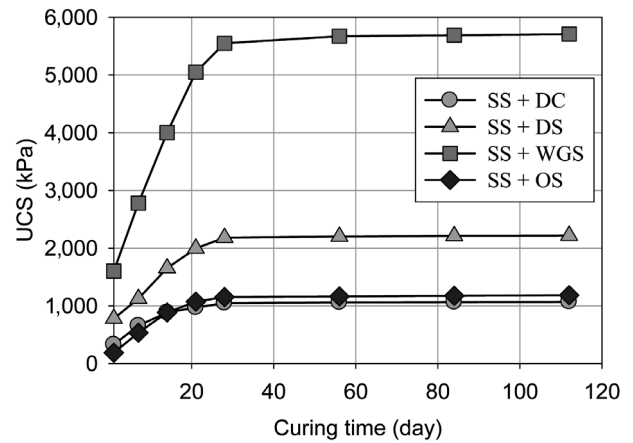


Fig. 2. Variation of UCS with curing time

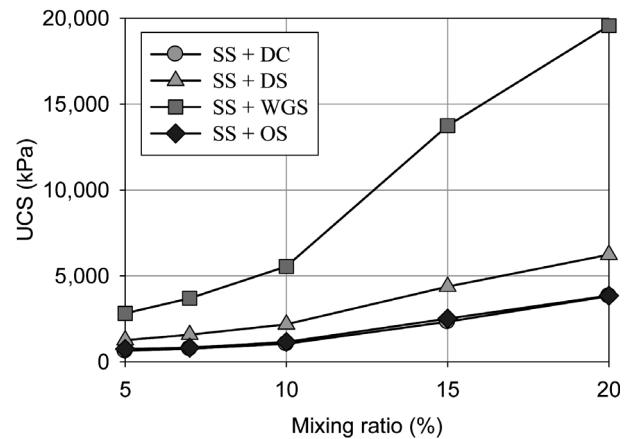


Fig. 3. Variation of UCS with mixing ratio

으며, Fig. 3과 같이 토양안정재(SS)의 배합비에 따른 강도 변화특성을 분석한 결과, 원지반 재료의 종류와 관계없이 토양안정재의 배합량 10% 전후의 강도에서 강도 증가의 변곡점이 존재하고 이 점을 기준으로 양쪽 모두 직선적으로 증가하는 이중 직선의 거동을 보이는 것으로 나타나 10%를 기준으로 토양안정재의 혼합비에 따른 강도발현 특성이 다른 경향을 나타내고 있는 것으로 분석되었다.

따라서 WGS는 5% 이하의 혼합비에서 소요 강도를 충족할 수 있으며, 입도분포가 불량한 DS는 약 9%, 세립질의 DC와 OS는 13% 정도의 혼합비에서 소요 강도 2.0 MPa을 충족하는 것으로 나타났다.

3.1.2 양생기간에 따른 변형계수의 변화

지반의 변형계수는 해당 지반에서의 응력에 대한 변형의 크기를 결정하는 인자로 흙의 변형계수는 일축압축시험을 통해 결정하며, 극한압축강도의 1/2에 해당하는 지점에서의 할선계수의 형태로 정의하였다.

Fig. 4~5와 같이 변형계수는 일축압축강도의 변화와 마찬가지로 재령 28일 이후 증가 현상이 크게 둔화되어 거의

일정한 값을 가지며, 원지반 재료에 따라서도 일축압축강도와 마찬가지로 입자가 크거나 다짐성능이 좋을수록 큰 값을 보이는 것으로 나타났다.

분석결과 WGS가 가장 큰 변형계수를 나타내고 있었으며, DS가 WGS보다 조금 작은 값을 보이고 있었다. 입자의 크기가 작은 세립토로 분류될 수 있는 DC나 유기물의 잔류에 의해 형성되는 OS는 앞서 설명한 사질토에 비해 상대적으로 작은 변형계수 값을 얻을 수 있었으며, 시멘트와 토양 안정제가 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

흙 포장의 경우에는 다른 강성 포장과 비교하여 비교적 변형을 허용하는 연성포장에 해당할 것으로 사료되는 바, 흙 포장이 보도나 자전거 도로로 주로 사용되고 있다는 점 때문에 강도뿐만 아니라 강성도 반드시 고려되어야 하는 상황이다. 즉 보행의 편의성, 자전거의 주행성을 위해 소요의 평탄성을 유지하여야 하며, 동시에 부상 방지 등을 위해 외부 충격 시 어느 정도의 변형을 허용할 수 있어야 한다는 것이다. 일반적으로 흙 포장의 경우 기준 강도를 만족하는

것은 크게 어려운 문제가 아닌 만큼 본 연구를 통해 제시된 변형계수를 활용하면 소정의 강도를 만족하고 동시에 변형계수를 선택적으로 고려할 수 있다는 측면에서 연구 성과의 활용이 기대된다.

3.1.3 SS 혼합비에 따른 변형계수의 변화

Fig. 5는 고화재의 혼합비에 따른 강도변화 특성에 대한 시험 결과를 이용해 양생일수 28일에서의 혼합비에 따른 변형계수의 변화를 보이는 것으로 SS와 시멘트를 사용한 경우 두 가지 모두 혼합비가 증가할수록 변형계수도 증가하였다. 변형계수는 강도와 밀접한 관련성을 가지므로 당연한 결과이나 SS 혼합토와 시멘트 혼합토의 증가 추이는 서로 다른 경향을 보이는 것으로 나타났다.

SS 혼합토는 강도평가에서와 마찬가지로 10% 이전과 이후의 증가 추이가 달라지는 것으로 분석되었다. 10% 이상의 고화재 혼합비는 10% 미만의 경우에 비해 동일한 고화재 증분에 비해 큰 변형강도의 증가를 보이고 있다. 고화재

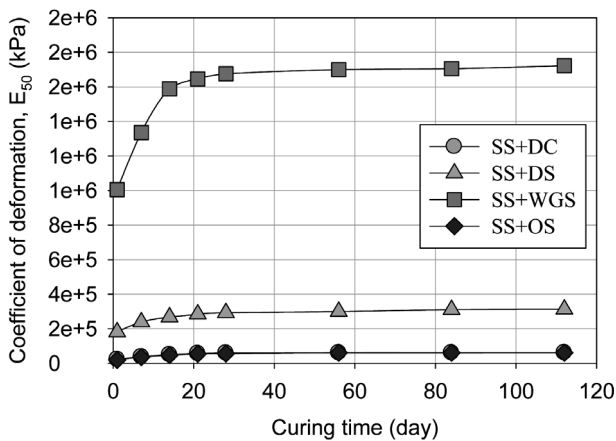


Fig. 4. Variation of Deformation modulus according to curing period (SS)

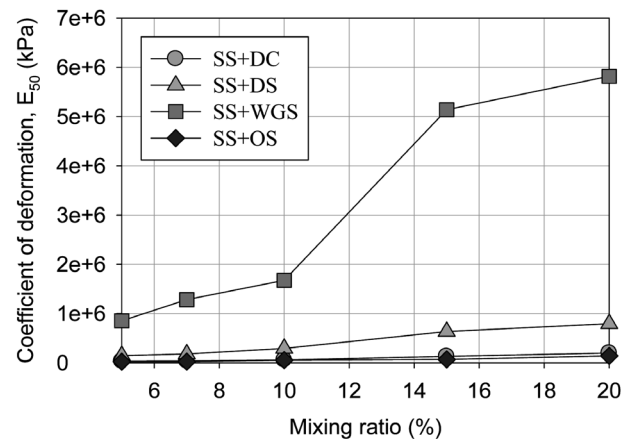


Fig. 6. Variation of Deformation modulus according to mixing ratio (SS)

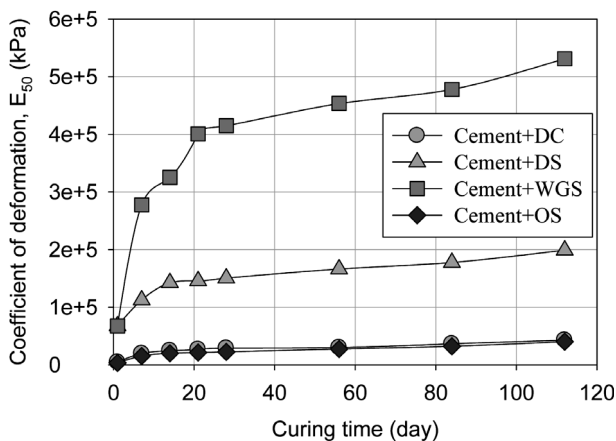


Fig. 5. Variation of Deformation modulus according to curing period (Cement)

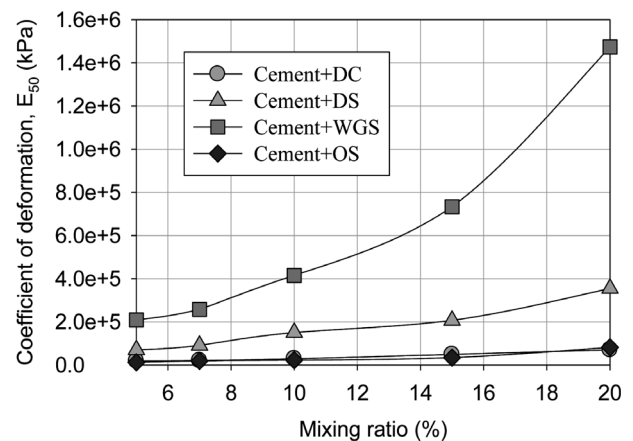


Fig. 7. Variation of Deformation modulus according to mixing ratio (Cement)

혼합비와 변형계수 관계의 변곡점은 10% 전후에 존재하며, 변형계수의 향상이 목적인 경우에는 10% 이상의 혼합비에서 더욱 유리하다는 점을 시사하고 있다. 시멘트를 사용한 경우에는 본 연구에서 설정한 고화재 혼합비의 범위인 5~20% 이내에서 대체적으로 지속적인 증가추세를 보였으며, 이는 SS 혼합토와 구별되는 시멘트 혼합토의 특징으로 판단된다.

3.1.4 일축압축강도-변형계수의 관계

일반적으로 개량토의 일축압축강도와 변형계수의 관계는 혼합방식과 연구자에 따라 차이는 있지만, 건조방식의 경우 $E_{50}=50\sim 250q_u$ 를 나타내고, 습윤 방식에서는 압축강도의 최소 30배에서 최대 1,000배까지 다양한 것으로 나타났다.

이러한 변화는 주로 흙의 입도에 기인하는 것으로 알려져 있으며(McGinn & O'Rourke, 2003), 입자가 큰 흙에서는 약 1,000배 정도로 최대값에 가까운 관계를 갖고 입자가 작은 경우에는 30배 정도의 최소값에 가까운 값을 갖게 된다고 주장하였다.

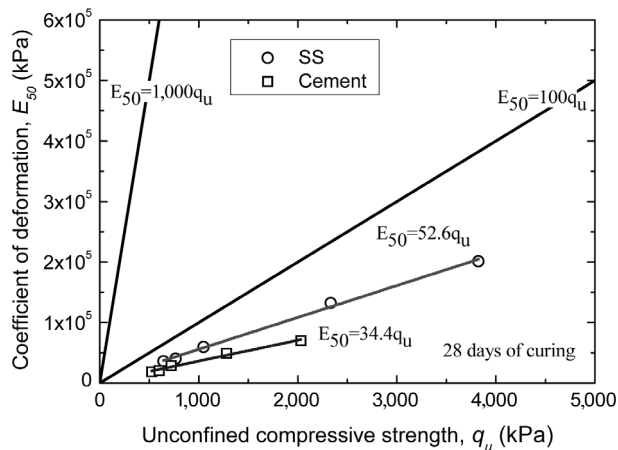


Fig. 8. Relationship between deformation modulus and UCS of DC

Fig. 8~11은 SS와 시멘트 혼합토의 일축압축강도와 변형계수의 관계를 나타낸 것으로 참고를 위해 일축압축강도의 100배와 1,000배로 가정한 변형계수 선을 함께 도시하였다.

실험 결과 DC나 OS와 같이 입자가 작거나 혹은 유기물의 영향을 많이 받는 경우에는 $qu-E_{50}$ 관계에서 SS와 시멘트의 차이는 거의 관찰할 수 없었다. DC와 OS가 원지반 재료인 경우에는 두 고화재 모두에서 변형계수는 일축압축강도의 30~50배 정도의 값을 갖는 것으로 나타나 기존의 문헌에 의한 값보다 다소 낮은 경향을 나타내었다.

Fig. 9와 같이, 입자가 큰 DS인 경우에는 DC나 OS보다 큰 상관관계를 가졌으며, 시멘트를 고화재로 사용한 경우에는 습윤 혼합의 선행 연구에서 최소값에 해당하는 일축압축강도의 100배 정도의 변형계수를 확인하였고 SS를 혼합한 경우에는 135배 정도의 값을 유지하고 있었다.

시공현장에서 원지반 재료로 사용될 가능성이 가장 높은 WGS의 경우에는 DS보다 더욱 큰 상관관계를 갖고 있는 것으로 나타났다. Fig. 10을 보면 SS를 고화재로 사용한 WGS

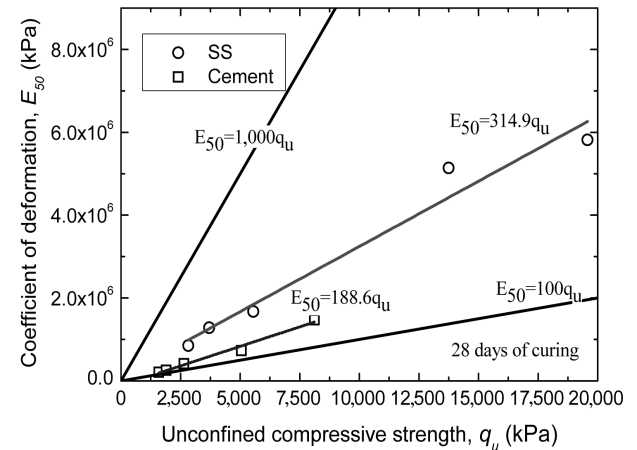


Fig. 10. Relationship between deformation modulus and UCS of WGS

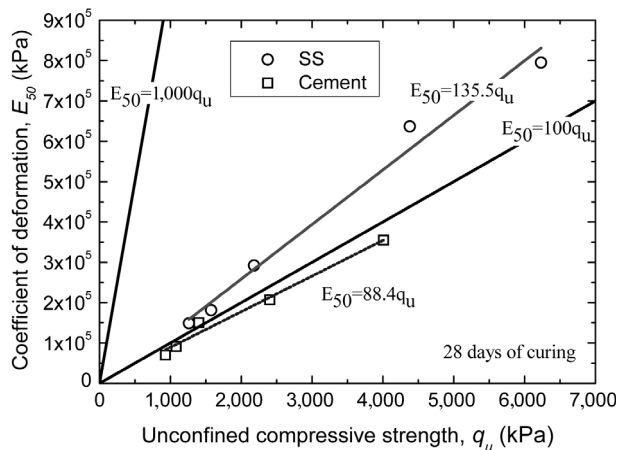


Fig. 9. Relationship between deformation modulus and UCS of DS

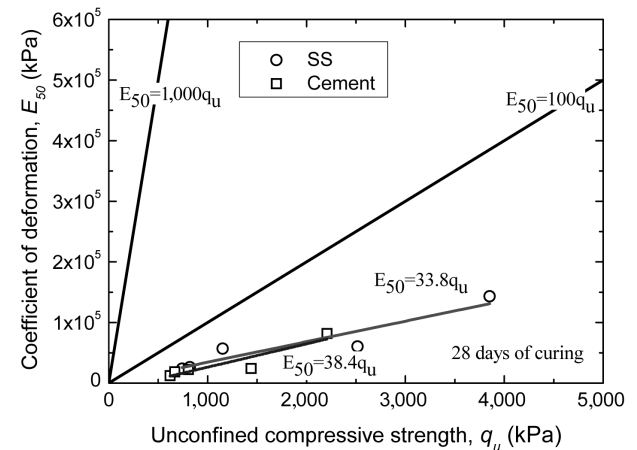


Fig. 11. Relationship between deformation modulus and UCS of OS

Table 3. Relationship between deformation modulus and UCS

Soil	Deformation Modulus (E_{50}) / Strength (q_u)	
	SS	Cement
DC	52.6 q_u	34.4 q_u
DS	135.5 q_u	88.4 q_u
WGS	314.9 q_u	188.6 q_u
OS	33.8 q_u	38.4 q_u

에서의 변형계수는 일축압축강도의 314배를 나타내었고, 시멘트를 고화재로 사용한 경우에는 일축압축강도의 188배 이상의 변형계수를 갖고 있는 것으로 분석되었다. 결국, 강도나 변형특성 모두 WGS에서 고화재의 효과를 극대화할 수 있다고 판단되며, 이러한 흙을 현장에서 채취하여 사용할 수 있다면 경제성 향상과 내구적 흙 포장을 완성할 수 있는 좋은 방안이 될 것으로 판단된다. 이상의 연구결과에 의하면, 혼합토의 변형특성은 지반의 입도가 클수록, 고화재의 고화능력이 클수록 변형계수가 커지는 특성을 확인하였다.

3.2 현장적용특성

3.2.1 동결융해시험 결과

혼합토의 양생환경에 따른 내구성 평가를 위해 동결융해와 건습반복이 어떠한 영향을 미치는지를 검토하기 위해 실시한 양생환경에 따른 내구성 평가 시험 결과를 Fig. 12~13에 나타내었다.

양생환경에 따른 내구성 평가 시험은 각각 고화재 함유량 10%와 15%인 경우를 대상으로 실시하였으며, 건습반복에 의한 습윤·건조시험은 4일간 수침시킨 공시체를 자연건조의 방법과 건조기에 의한 강제건조방법으로 나누어 비교하였다. 동결융해시험의 기준 온도는 -21°C 와 $+21^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로 각 20시간씩 총 3회에 걸쳐 동결과 융해를 반복하였고, 내구성에 대한 평가방법은 일축압축강도 시험결과로 비교하였다.

양생환경에 따른 혼합토의 일축압축강도 평가결과 고화재 함유량 10%와 15%의 두 경우 모두 건습반복에 의한 영향이 동결융해에 의한 경우보다 강도저하가 약간 크게 나타난 것을 확인하였다. 재령 28일과 56일에서의 강도저하 특성을 평가한 결과, 동결융해시험은 55~63%, 건습반복시험에서는 54~67%인 것으로 분석되었다.

비록 일축압축강도 저하의 정도가 크지 않지만, 동결융해에 비해 건습반복에 의한 강도저하가 크게 나타난 이유는 건습반복에 의해 흙 속의 수분(H_2O)이 고화재의 CaO 성분과 반응하여 수산화칼슘[$\text{Ca}(\text{OH})_2$]으로 변환하게 되는 수화반응이 원활하지 못한데 기인한 것으로 판단된다. 즉

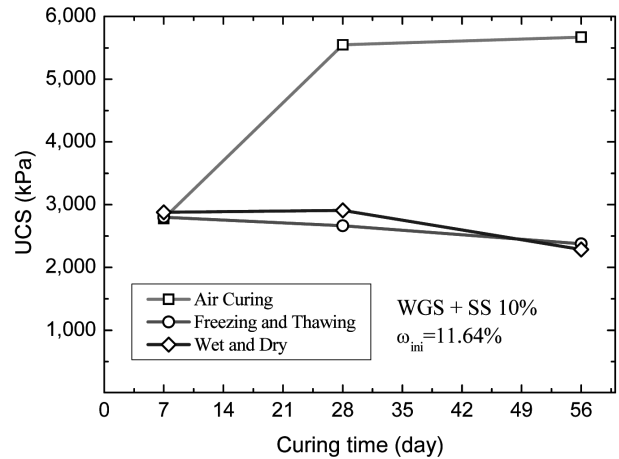


Fig. 12. UCS with the curing environment (SS=10%)

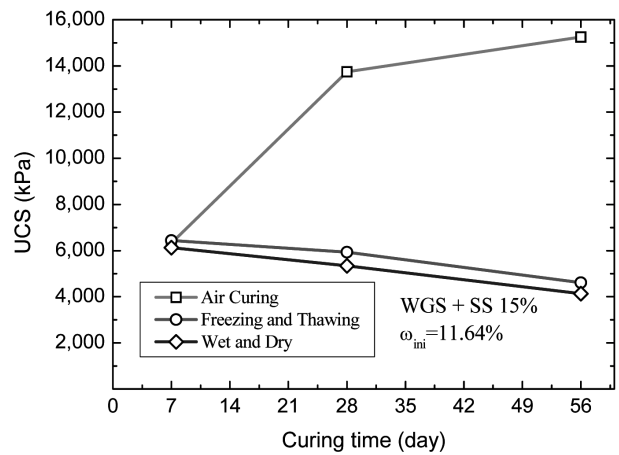


Fig. 13. UCS with the curing environment (SS=15%)

동결융해시험의 경우 혼합토의 수화반응에 의해 발생한 수화열(15.6 kcal/mol(heat))을 동결융해 과정에서 어느 정도 흡수하여 동결의 영향을 최소화시킨 것으로 판단되지만, 건습반복시험에서는 혼합토 내부의 수분이 부족하게 되어 혼합토의 수화반응에 필요한 수분(H_2O)이 충분히 공급되지 못하게 되어 원활한 양생이 이루어지지 않았던 것으로 판단된다.

3.2.2 반복재하시험 결과

비교적 입도분포가 양호한 WGS에 대한 반복재하시험결과는 SS를 사용하는 경우와 시멘트를 고화재로 사용한 경우 거동에 차이를 보이고 있다. SS를 사용한 경우 최대 재하회수로 사용한 10,000회 재하 이후에 5%의 강도 손실을 보이는 것으로 나타났으며, 이에 비해 시멘트를 고화재로 사용한 경우에는 100회 재하에서 이미 5%의 강도 저하를 보이고 10,000회 재하에서는 14% 정도의 강도 저하를 나타내고 있는 것으로 나타났다.

결국, 시멘트를 고화재로 사용한 경우에는 반복재하에

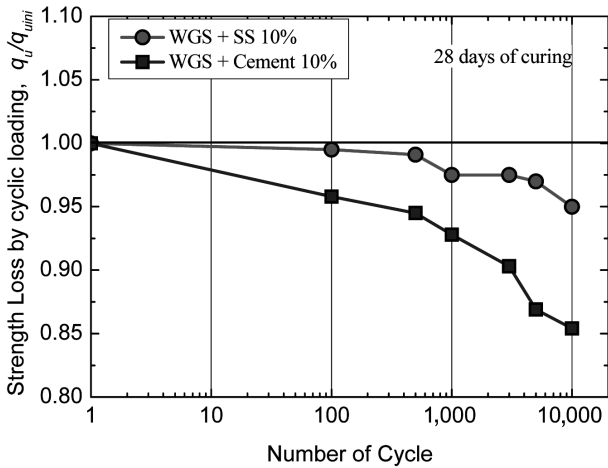


Fig. 14. Strength loss of WGS by cyclic loading

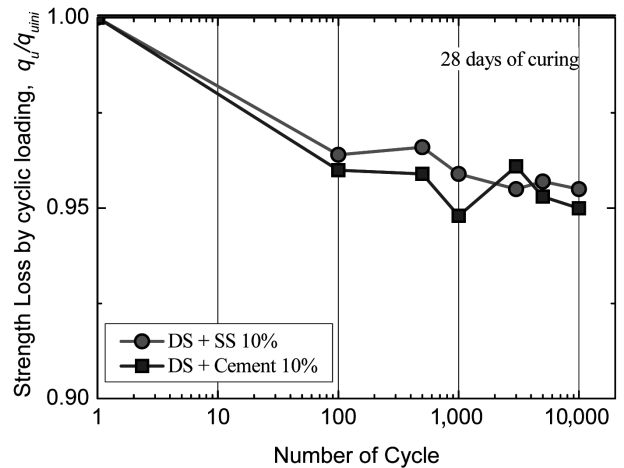


Fig. 16. Strength loss of DC by cyclic loading

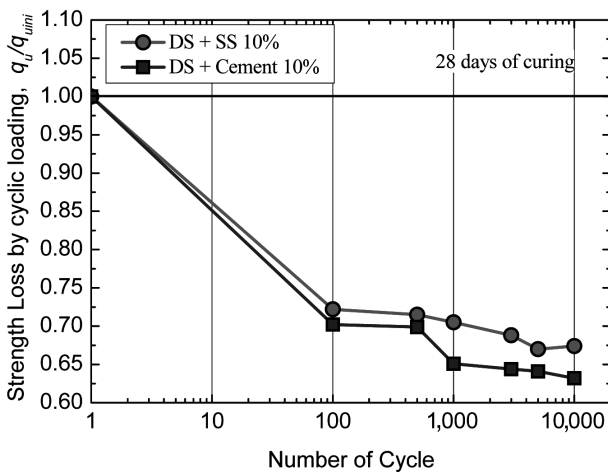


Fig. 15. Strength loss of DS by cyclic loading

상대적으로 취약한 것으로 나타났으며, 이는 고화재의 재료적 성질에 기인하는 것으로 판단된다. 즉 시멘트는 축 변형률에 의해 발생하는 강제변위가 시료 전반에 작용할 때 입자를 고화시킨 시멘트가 떨어져 취성파괴를 일으키는 반면에 섬유질을 포함한 SS는 연성을 유지하면서 외부 변형에 강한 저항성을 갖기 때문인 것으로 판단된다.

입도분포가 양호한 WGS는 입자간의 접촉 면적이 늘어나면서 섬유질에 의한 연성저항의 효과가 더욱 두드러지게 되는 것이 SS와 시멘트를 혼합한 혼합토 거동차이의 원인인 것으로 판단된다. 따라서 반복재하에 의한 강도 저하를 고려할 때 SS가 시멘트보다 효과적인 고화재인 것으로 결론 내릴 수 있다.

DS는 시멘트에 의한 입자 사이의 접촉력이 떨어지게 되는 시점에서 강도저하가 가장 크게 발생하며, 이후에도 접촉력 상실에 의해 강도의 감소가 지속적으로 발생하게 될 것으로 예상된다. 실제로 시험결과에서도 이를 확인할 수 있다. 즉 초기 100회에서 전체 강도저하의 1/3 정도의 강도

를 손실하였으며, 이후에도 지속적으로 강도 감소가 관찰되었다.

위와 같은 관점에서 보면 입도가 불량하여 입자의 접촉면이 상대적으로 작은 DS에서는 외부 변형에 의한 응력 재하가 반복되면 SS와 모래에서 모두 접촉력을 유지하기 어려울 것으로 판단되며, 따라서 두 고화재 모두에서 100회의 반복재하에 의해 약 30% 전후의 강도 손실이 발생하여, 최종적으로 10,000회의 반복재하에 의해서 초기 강도의 35% 강도 손실이 발생하고 있었다.

Fig. 16과 같이 DC의 경우에는 강도손실이 DS에 비해 그다지 크게 발생하지 않았으며, 최대 10,000회의 반복재하에도 불구하고 최종적으로는 약 5%의 강도 손실만 발생하였다. 이는 DS에 비하면 강도손실 측면에서 세립토가 대단히 유리하다는 점을 시사하고 있다.

위와 같은 점을 기초하여 판단하면 반복재하에 대한 내구성을 확보하기 위해서는 원지반 재료에서 세립토의 존재가 무엇보다 중요한 요소이며, 장기적인 내구성 그리고 변형에 대한 유연한 대처를 하기 위해서는 조립토보다는 세립토 함량을 기준으로 판단해야 할 것이다. 실제로 세립토의 경우 입자의 접촉력 손실에 의해 포장 표면에서 입자가 떨어져 보행자나 자전거 통행교통의 사고로 이루어지는 경우가 많으므로, 이러한 성능적 측면도 설계와 시공에서 반드시 고려되어야 할 점인 것으로 판단할 수 있다.

4. 결 론

친환경 고화재를 이용한 흙 포장재의 공학적 특성을 평가하기 위해 일축압축시험과 현장적용성 시험을 고화재의 혼합비, 원지반 종류, 양생기간에 따라 수행하고 그 강도 및

변형특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 양생기간별 강도변화를 고화재의 종류에 따라 비교한 결과, SS 혼합토의 경우 양생 초기의 강도발현이 빠르고 28일 강도가 최종강도(112일 기준)의 97% 이상을 확보하는 것으로 나타나 긴급성을 우선하는 경우에는 혼합비를 높임으로써 28일 이전에 소요 강도를 확보할 수 있어 경제성 측면에서 유리할 것으로 판단된다.
- (2) 일축압축 시험 결과를 이용하여 변형특성을 분석한 결과, 세립질의 DC 및 OS 보다 조립질의 DS와 WGS가 일축압축강도에 대한 변형계수의 비가 큰 것으로 나타났다.
- (3) 양생환경에 따른 강도변화 특성의 비교를 위해 4일간 수침시킨 공시체를 자연건조와 강제건조의 조건으로 비교시험 한 결과 54~67%의 강도 저하를 확인하였으며, 동결융해 반복시험 결과 55~63%의 강도 저하가 발생하였다.
- (4) 또한 반복재하시험 결과, 입도분포가 나쁜 DS의 경우 최대 10,000회의 재하에서 초기강도의 35%까지 강도저하가 발생하는 것으로 평가되어 반복재하에 대한 저항능력의 확보를 위해서는 적당량의 세립분이 필요하다는 것을 확인할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 인천녹색환경지원센터의 2013년도 연구개발 사업비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. 田口技術研究所 (2010), 土系舗装工法 設計施工指針, 田口技術研究所(遊歩道・公園路・歩道編), pp. 156~158.
2. Chun, B. S. (2001), Improvement effectiveness of soft ground using hardening agent, Korean Geo-Environmental Society Vol. 2, No. 2, pp. 59~64 (in Korean).
3. Chun, B. S., Gang, I. S. and Koh, Y. I. (1993), The frost-susceptibility of compacted coal ash with proper mixing ratio of fly ash to bottom ash, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 13, No. 1, pp. 173~178 (in Korean).
4. Kim, B. I., Kim, Y. U. and Lee, S. H. (2002), Unconfined compressive strength of soil cement mixed with NSC, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 18, No. 4, pp. 159~165 (in Korean).
5. Ko, J. H. (2012), Mechanical properties of natural soil pavement with environmental-friendly stabilizer on the waterfront road, Hongik University, Master's thesis, pp. 1~32 (in Korean).
6. 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).
7. Lee, G. H. (2012), Engineering properties and applicability of soil mixed pavement with natural soil stabilizer, Incheon National University, Ph D. dissertation, pp. 20~51 (in Korean).
8. McGinn, A. and O'Rourke, T. (2003), Performance of deep mixing methods at fort point channel, report to massachusetts turnpike authority, Federal Highway Administration and Bechtel/Parsons Brinkerhoff, Cornell University, pp. 114~209.
9. Oh, S. W., Seo, D. J. and Kim, D. G. (2010), Development of stabilizer for eco-friendly soil pavement, Journal of The Korean Society of Forest Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 280~285 (in Korean).
10. Park, S. S., Kim, Y. S., Choi, S. G. and Shin, S. E. (2008), Unconfined compressive strength of cemented sand reinforced with short fibers, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 28, No. 4C, pp. 213~220 (in Korean).
11. PWRI (2009), Soil pavement handbook, Daesung Publishing Company, pp. 1~31 (in Korean).