

시멘트계 혼합토의 환경안정성 및 내구성 평가

Evaluation of Environmental Stability and Durability of Cementitious Mixed Soil

오 세 옥¹⁾ · 배 우 석²⁾ · 김 흥 석[†]
Sewook Oh · Wooseok Bae · Hongseok Kim

Received: May 25th, 2022; Revised: May 31st, 2022; Accepted: June 27th, 2022

ABSTRACT : Using cement as a road subbase is economical, easily modified and supplemented and has excellent road pavement quality control. In addition, cement adheres well to sandy soils without adhesion, and it plays a role of permanently preserving adhesion in viscous soils with adhesion, so it can be widely applied as stable treatment with the advantages of increased strength, reduced compressibility, and improved durability. However, while cement is excellent in terms of strength for a road subbase, the material properties mean that it is difficult to maintain and reinforce when cracks or fractures occur due to dry shrinkage, and the pH increases in the ground due to hexavalent chromium eluting from cement, which can cause environmental problems such as groundwater contamination. Therefore, this study evaluates the usability of alternatives in the road base layer such as environmentally cementitious stabilizer and on-site soil generated from the site. We intend to reduce the environmental damage and evaluate the durability. To evaluate the applicability of the site, Environmental stability test and freeze-thaw test and wetting-drying test was conducted to evaluate the strength characteristics of alternative materials on the road through the limited performance evaluation of environmentally cementitious stabilizer. The test ranges were set at mixing ratios of 10%, 20%, and 30% and ages of three days, and 28 days old to evaluate the early strength and reference strength according to the mixing ratio of the environmentally cementitious stabilizer.

Keywords : Environmentally cementitious stabilizer, Environmental stability test, Freeze-thaw test, Wetting-drying test

요 지 : 시멘트를 활용한 도로 기층은 경제적이며, 수정 및 보완이 용이하여 도로 포장 품질 관리가 우수하다. 또한, 시멘트는 점착력이 없는 사질토에 점착력을 부여하고 점성토에서는 점착력을 영구적으로 유지하는 역할을 하여, 강도 증가 및 압축률 감소 등의 내구성 향상의 장점으로 많이 활용되고 있다. 그러나 시멘트는 강도면에서 우수하나 건조수축에 의한 균열이나 파손이 발생하면 유지보수가 어렵고, 시멘트에서 용출되는 6가 크롬으로 인해 지반의 pH가 상승하여 지하수 오염과 같은 환경 문제가 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 발생하는 현장토와 시멘트계 고화재를 활용하여 환경성과 내구성을 고려한 도로 기층 대체재의 활용성을 평가하고자 한다. 도로 기층의 현장 적용성을 평가하기 위해 환경안정성시험 및 시멘트계 고화재를 일정 비율로 혼합하여 동결융해시험 및 습윤건조시험을 수행하였다. 시험범위는 시멘트계 고화재 10%, 20%, 30%의 배합비와 재령 기간 7일, 28일로 적용하여 시멘트계 고화재 혼합비율에 따른 초기 강도 및 기준 강도를 평가하였다.

주요어 : 시멘트계 고화재, 환경안정성평가, 동결융해시험, 습윤건조시험

1. 서 론

과거의 도로는 공간을 이동하기 위한 수단이라는 1차원적인 의미였으나, 현재의 도로는 인간이 삶을 영위하고 활동하기 위한 공간의 영역으로서 그 개념이 변화하고 있다. 이에 따라 도로에 대한 관점도 기존의 이동성 확보, 경제성, 관리자 중심에서 안정성, 환경 친화성, 사용자 중심으로 변화하고 있다.

특히, 도로의 기층은 양질의 골재를 사용하고 있으나

추가적인 도로의 수요 증가로 인해 양질의 골재를 공급하기 위해 원거리 운반 등의 비용과 현장에서 발생하는 사토 처리를 위한 비용 등으로 인해 경제성 및 품질의 문제가 발생하고 있다. 이러한 여건으로 인해 골재의 역할을 대체하거나 일부 기능을 분담할 수 있는 공법이 필요하게 됨에 따라 흙을 주재료로 시멘트 및 석회 등과 같은 무기계 고화재를 혼합한 화학적 안정처리 공법의 지속적인 연구가 필요한 실정이다. 화학적 안정처리 공법은 포장 단면이 줄어들어 경제적 절감 효과와 경화 전 단면의 수정 및 보완을 즉시 수행

1) Professor, Department of Construction & Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University

2) Professor, Department of Civil and Environmental Convergence Engineering, Korea National University of Transportation

† Department of Construction & Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University (Corresponding Author : kimhhs0090@knu.ac.kr)

할 수 있어 품질 관리 측면에서 우수한 장점이 있다. 또한, 점착력이 없는 사질토에 점착력을 부여하고, 점질토는 점착력을 영구 보존하여 강도 증진, 압축성 감소, 내구성 향상을 목적으로 기초 안정처리 등 광범위하게 적용할 수 있다(Kim, 2021).

한편, 무기계 고화재를 활용한 안정처리는 흙과 고화재 및 물을 혼합하여 포졸란 반응을 발생시키는 매우 조밀한 혼합물이다(Sadrekarimi, 2000). 고화재 안정처리에서 흙과 고화재 혼합토의 강도는 시간이 지남에 따라 증가하고 물과 고화재가 반응하는 즉시 강도 발현이 시작하여 초기강도 발현의 장점이 있으나(Davies, 1991) 대표적인 무기계 고화재로 사용되고 있는 시멘트는 저렴하며 성능 발현이 우수하나 6가크롬 용출 등 유해 성분이 검출됨에 따라 친환경 고화재를 활용한 연구가 요구되고 있는 상황이다(Ju et al., 2003; Jung et al., 2009).

환경영향에 의한 내구성 평가 연구로는 국외에서 Liu & Wang(2006)은 동결융해 작용으로 인해 흙의 공학적 특성은 동결융해 반복 횟수, 다짐도, 함수율에 따라 변화하는 미세 입자 구조에 관한 연구를 수행하였으며, Qi & Ma(2006)는 동결융해 반복 횟수가 증가할수록 흙의 점착력은 감소하고 내부 마찰각은 불규칙한 특성이 나타난다고 고찰하였다. Gupta et al.(2017)은 시멘트계 재료가 건조-습윤이 반복되는 환경 조건에 노출될 때 균열부에 수분을 공급함으로써 내부 양생 효과를 발현해 자기 치유 성능을 향상하는데 효과적이라고 고찰하였다.

국내의 환경영향에 의한 내구성 평가에 관한 연구로는 Hyun et al.(2010) 등이 시멘트와 첨가제를 활용하여 동결융해 특성을 분석하여 시멘트와 첨가제가 증가할수록 동결융해에 의한 손실률이 감소하는 것으로 평가하였으며, Shin et al.(2015) 등은 토질의 동결융해 반복에 따른 산지 사면의 안정성을 검토하였으며, 동결융해 반복 횟수가 증가할수록 토질의 최대전단응력이 감소하는 것으로 고찰하였다. Jin et al.(2016) 등은 CSG(Cemented Sand and Gravel) 재료의 동결융해시험에 의한 장기강도 및 내구 특성에 관한 연구를 수행하였다. Yoo(2013)은 계절적 환경변화로 인한 습윤-건조 사이클에 노출되는 옹벽의 거동에 관한 유한요소해석 모형화 기법을 개발하고 매개변수 연구를 수행하여 강우 특성에 따른 옹벽의 거동 특성을 고찰한 바 있다.

이에 본 연구에서는 현장에서 발생하는 대량의 현장토와 시멘트계 고화재를 활용하는 데 있어 계절 동토 지역인 우리나라 실정을 고려하여 동결융해로 인해 기층이 파손되거나 기능이 저하되는 문제점을 해결하고자 시멘트계 고화재를 활용하여 pH 특성 및 어독성 실험을 수행하여 고화 재료의

환경 안정성을 평가하였으며, 시멘트계 고화재를 현장토 중량 대비 10%, 20%, 30%의 혼합비율로 공시체를 제작하였다. 또한, 재령 기간에 따라 초기강도 및 장기강도에 미치는 영향을 고려하여 재령 기간을 각각 7일, 28일을 적용하였으며, 동결융해 반복 횟수에 따른 영향을 평가하기 위해 동결융해 반복 0, 3, 6, 12 사이클 반복 후 KS F 2314 규정에 근거하여 일축압축강도 실험을 수행하여 동결융해 반복에 의한 내구성을 평가하여 시멘트계 혼합토의 활용성을 제시하고자 한다.

2. 친환경 혼합토의 공학적 특성

2.1 대상 시료의 물리적 특성

본 연구에 활용된 현장토는 경북 상주시에서 채취된 현장토를 활용하였으며 시멘트계 고화재의 특성 평가를 위해 기존 상용되고 있는 보통 포틀랜드 시멘트와 물리적 특성을 분석하였다. 고화재의 물리적 특성 분석을 위해 수화열 분석(ASTM C 1679), 분말도 시험(KS L 5106), 응결시간 분석(KS L 5107), 시멘트화학분석(KS L 5120)을 수행하여 고화재의 전반적인 물리적 특성을 평가하였다.

본 연구에 활용된 시멘트계 고화재의 특성 평가를 위해 기존 상용되고 있는 보통 포틀랜드 시멘트와 구성성분을 비교 및 분석을 수행하였다. 보통 포틀랜드 시멘트의 주 구성 원소는 실리카(Si), 칼슘(Ca), 알루미늄(Al), 탄소(C)로 구성되어 있으며, 강도 증가에 영향을 미치는 주요 인자는 탄소와 칼슘의 결합체인 탄산칼슘($CaCO_3$)과 실리카와 산소의 화학적 결합체 이산화규소(SiO_2)의 형태임을 고려할 수 있다(Oh et al., 2019). Table 1은 현장토 및 고화재에 따른 물리적 특성을 나타내고 있다.

표에서 나타나듯이 보통 포틀랜드 시멘트의 경우 이산화규소(SiO_2)와 탄산칼슘($CaCO_3$)의 구성 비율이 1:1.2인 것에 반해 시멘트계 고화재는 1:3의 비율로 구성되어 있다. 이는 흙과 고화재의 화학 반응 시 보통포틀랜드시멘트보다 수화반응과 더불어 재령 기간에 따라 발생하는 포졸란 반응으로 강도 증가에 장점이 나타나는 것으로 평가할 수 있다.

또한, 시멘트계 고화재와 보통 포틀랜드 시멘트의 응결반응 시간을 분석한 결과 보통 포틀랜드 시멘트의 경우 260분부터 초결이 진행되어 465분에 종결이 나타나지만, 시멘트계 고화재의 경우 50분에서 초결이 진행되어 75분에 종결이 되며, 고화재의 비표면적을 분석한 결과 시멘트계 고화재의 경우 $3,770\text{cm}^2/\text{g}$ 으로 보통 포틀랜드 시멘트 $2,800\text{cm}^2/\text{g}$ 와

Table 1. Chemical properties of stabilizer

Element	Property	E.F.C. (Eco Friendly Cement)	Cement	Soil
Stabilizer	SiO_2	20.07	33.8	-
	Al_2O_3	5.21	12.9	-
	Fe_2O_3	2.96	3.2	-
	CaO	63.08	40.6	-
	MgO	2.67	4.20	-
	SO_3	2.97	2.60	-
	Specific weight (g/cm^3)	3.08	2.84	-
	Fineness (cm^2/g)	3,770	2,800	-
	Heat of hydration (cal/g)	12.59	39	-
	Initial set (m)	50	260	-
	Ended set (m)	75	465	-
Soil	U.S.C.S	-	-	SW
	Unit weight, γ_t (kN/m^3)	-	-	21.0
	O.M.C, W_w (%)	-	-	14.0
	Plasticity index, PI	-	-	4.5

비교하여 분말이 미세하므로 수화작용에 따른 포졸란 반응이 조기에 나타나 초기강도 증진에 우수한 장점이 나타나는 것을 알 수 있다.

2.2 환경 안정성시험

본 연구에서는 고화재의 친환경성을 평가하기 위해 보통 포틀랜드 시멘트와 시멘트계 고화재에 대하여 pH 측정을 수행하여 고화재 혼합에 따른 용액의 수소 이온 농도 지수를 분석하였다. 어독성 실험을 통해 고화재에 따른 유해성을 분석하고자 실험 수조를 조성하여 일정한 조건에서 공시어 10마리의 개체를 활용하여 유해성을 평가하였으며, 측정 및 관찰은 24시간, 48시간, 96시간의 조건으로 모니터링 후 공시어 치사율 및 pH 분석을 통해 유해성을 평가하였다.

Fig. 1은 어독성 실험을 보여주고 있으며, Table 2는 환경 안정성 실험 결과를 나타내고 있다. pH 특성은 점토, 화강풍화토, 유기질토양에 대하여 시멘트계 고화재 및 보통 포틀

랜드 시멘트를 혼합하여 실험을 수행하였으며, 보통 포틀랜드 시멘트를 혼합한 조건에 모든 대상 시료에서 염기성이 나타나는 것으로 평가되며, 시멘트계 고화재를 혼합한 조건에 모든 대상 시료에서 중성으로 평가되었다. 이는 pH 특성 결과 시멘트계 고화재는 상대적으로 친환경성에 우수한 것

Table 2. Environmental stability test result

Division		E.F.C. (Eco Friendly Cement)	Cement
pH	Clay	7.09	9.82
	Organic soil	6.67	9.15
	Granite weathered soil	7.15	9.35
Toxicity (%)	24 hour (pH)	60 (8.7)	80 (10.9)
	48 hour (pH)	70 (8.8)	100 (11.7)
	96 hour (pH)	70 (8.8)	100 (11.8)



(a) Adaptation



(b) Death observation

Fig. 1. A view of the fish toxicity test

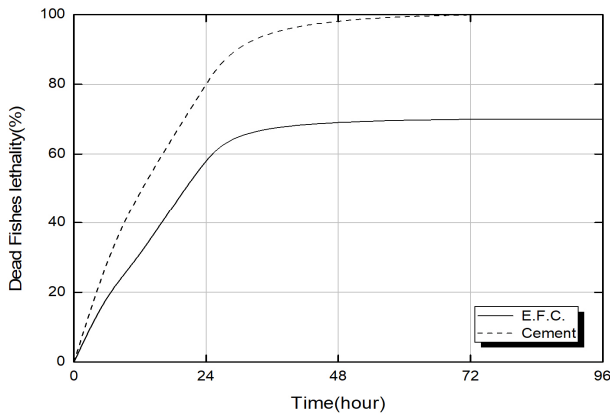


Fig. 2. Fatality change to time

으로 평가할 수 있다. 어독성 실험은 KS I 3217에 기준으로 하여 실험을 수행하였으며, 고화재가 환경에 미치는 영향을 평가하였다. 보통 포틀랜드 시멘트 조건에서 초기 24시간 동안 80%의 치사율이 관측되며, 48시간 이내에 공시어는 모두 치사되는 것으로 관측되었다. 그러나 Fig. 3의 시간에 따른 공시어 치사율에서 나타나듯이 시멘트계 고화재의 경우 초기 24시간 동안 60%의 치사율이 관측되며, 96시간 동안 70%의 치사율이 관측되었다. 또한, 어독성 실험 종료 후 pH 분석 결과 보통 포틀랜드 시멘트에서는 10.9~11.7로 강염기성이 나타나며, 시멘트계 고화재에서는 8.7~8.8로 나타나 약 염기성으로 환경 안정성에 적합한 고화재로 평가할 수 있다.

3. 시멘트계 혼합토의 환경요인 특성

3.1 동결융해 저항성 평가

본 연구에서는 현장토에 시멘트계 고화재를 혼합한 기층 대체재료로서의 동결융해에 의한 내구성을 평가하고자 혼합비율 및 양생기간 조건에 따라 공시체를 제작하고 KS F 2456에 따라 실험을 수행하였다. 동결융해 저항성 평가를 위한 온도 및 유지 시간은 국내의 동결융해에 관한 기상 데이터를 참고하여 연 동결 최저온도와 연평균 상온 온도를 적용하였으며, 동결 시 -20°C를 20시간을 유지하고 융해 시 +20°C로 20시간을 유지하는 방법을 적용하였다. 동결융해 과정 42시간 1사이클을 1년 과정 기준으로 하여 총 0사이클, 3사이클, 6사이클, 12사이클 반복 후 KS F 2314에 기준으로 하여 일축압축강도 실험을 통해 동결융해 저항성을 평가하였다. Fig. 3은 본 연구에 적용된 동결융해 실험 전경을 나타내고 있으며, Table 3은 동결융해 저항성 평가 실험조건을 보여주고 있다.

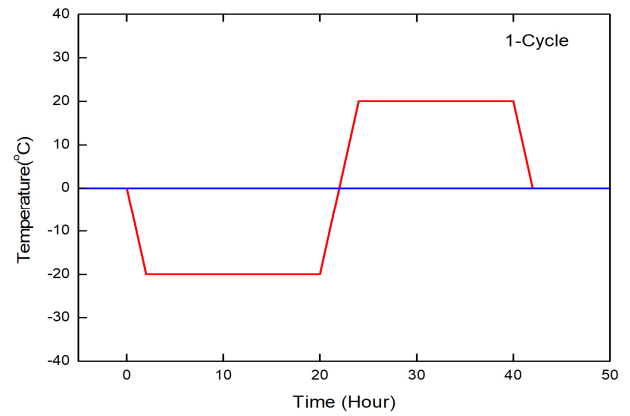


Fig. 3. Temperature control for freezing and thawing test

Table 3. Freezing and thawing to test condition

Unite weight (kN/m ³)	E.F.C. (%) (Eco Friendly Cement)	Cycle	Curing time (day)
21.0	10	0	7, 28
		3	
		6	
		12	
	20	0	
		3	
		6	
		12	
	30	0	
		3	
		6	
		12	

동결융해 저항성 평가에 사용된 공시체 규격은 직경 50mm, 길이 100mm의 몰드에 600kN/m²의 다짐에너지를 적용하는 방법으로 현장토 중량 대비 시멘트계 고화재를 10%, 20%, 30%를 혼합하였고, 고화재의 초기강도 효과를 평가하기 위해 재령 기간을 7일, 28일 적용하여 시험을 수행하였다.

Table 4는 본 연구에서 수행한 동결융해 저항성 평가 결과를 보여주고 있으며, Fig. 4는 시멘트계 고화재의 혼합비율에 따른 초기강도에 대한 동결융해 저항성 강도 비를 나타내고 있다. Fig. 4(a)는 혼합비율 10%에서 재령 기간에 따른 동결융해 저항성 평가 결과를 나타내고 있으며, 재령 기간 7일의 조건에서는 동결융해 3사이클에서 초기강도와 비교하여 약 20%의 강도가 감소하며, 6사이클을 기점으로 최종 12사이클에서 초기강도를 상회하여 회복하는 것을 알 수 있다. 또한, 재령 기간 28일의 경우 동결융해 3사이클에서 약 5% 이내의 강도가 감소하며, 최종 12사이클에서 초기강도와 비교하여 약 10%의 강도가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 공시체의 양생이 완료된 후 동결융해 작용 때문에 강도가 저하되는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 혼합비율 20%

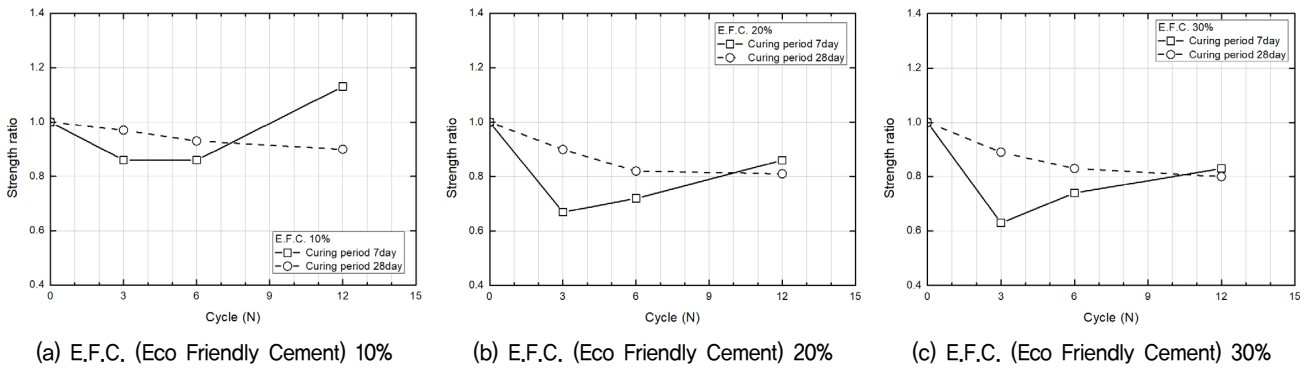


Fig. 4. Strength ratio following repeated freezing and thawing of cementitious content

Table 4. Freezing and thawing to test result

Content (%)	Cycle (N)	Strength ratio	
		Curing time 7day	Curing time 28day
10	0	1.00	1.00
	3	0.86	0.97
	6	0.86	0.93
	12	1.13	0.90
20	0	1.00	1.00
	3	0.67	0.90
	6	0.72	0.82
	12	0.86	0.81
30	0	1.00	1.00
	3	0.63	0.89
	6	0.74	0.83
	12	0.83	0.80

에서 재령 기간에 따른 동결융해 저항성 평가 결과를 나타내고 있으며, 재령 기간 7일의 조건에서 동결융해 3사이클에서 초기강도와 비교하여 약 30%의 강도가 감소하며, 동결융해 반복 누적에 따라 최종 12사이클에서 초기강도와 비교하여 약 15%의 강도가 감소하여 일정 회복하는 경향이 나타났다. 재령 기간 28일의 경우 동결융해 3사이클에서 초기강도와 비교하여 약 10% 강도가 감소하며, 최종 12사이클에서 약 20%의 강도가 감소하는 것으로 평가되었다. Fig. 4(c)는 혼합비율 30%에서 재령 기간에 따른 동결융해 저항성 평가 결과를 나타내고 있으며, 재령 기간 7일의 조건에서는 동결융해 3사이클에서 약 35%의 강도가 감소하며, 최종 12사이클에서 약 17%의 강도 감소로 강도를 일정 회복하는 경향이 나타나며, 재령 기간 28일의 조건에서 초기강도의 약 80% 이상 강도가 발현하였다.

따라서 재령 기간 7일의 조건에서 동결융해 3사이클 조건에서 강도 감소가 크게 나타나며, 동결융해 반복 누적에 따라 최종 12사이클 조건에서 초기강도의 80% 이상 강도를 회복하는 것을 알 수 있다. 또한, 재령 기간 28일의 조건

에서 동결융해에 의한 영향은 미소한 것으로 평가되며 최종 12사이클에서 초기강도의 80%를 만족하는 것으로 평가되었다. 이는 재령 기간 7일 공시체의 수분함량에 따라 초기 동결융해에 의해 강도에 영향을 미치는 것으로 평가되나 동결융해 누적에 따라 양생 효과로 인해 초기강도의 80% 이상을 회복함에 따라 재령 기간 28일 조건의 강도와 유사한 경향이 나타나며, 재령 기간 28일의 경우 상온에서 충분한 양생과정으로 인해 동결 시 공시체 내 수분에 의한 동결팽창에 따른 영향이 미소한 것을 알 수 있다. 따라서, 재령 기간 7일을 적용한 조건에서 동결융해에 의한 내구성이 우수한 것으로 평가할 수 있다.

3.2 습윤건조 저항성 평가

계절적 환경변화에 대응할 수 있는 지반 내 구조물의 설계와 시공을 위해서는 계절적 환경변화에 대응할 수 있는 지반구조물에 장·단기적으로 미치는 영향과 불안정해지는 과정에서 어떠한 징후가 나타나는지에 대한 계절적인 영향을 현재 적용되고 있는 설계에 어떻게 반영해야 하는지에 대한 구체적인 연구 수행이 필요하다.

본 연구에서는 습윤건조 반복 작용이 시멘트계 고화재 혼합토에 미치는 영향을 평가하기 위해 KS F 2330 기준에 따라 습윤건조 저항성 실험을 수행하였다. 습윤건조 저항성을 평가하기 위해 활용된 공시체는 직경 50mm, 길이 100mm로 동결융해 저항성 평가에 활용한 동일한 조건에서 환경영향에 의한 저항성을 평가하였다. 습윤건조 저항성 평가를 위해 공시체의 재령 기간은 7일, 28일을 적용하였으며, 실험은 각각 재령 기간에 따른 공시체를 24시간 동안 수침시킨 후 건조로에서 20°C로 24시간 건조하는 것을 1사이클로 적용하고 0사이클, 3사이클, 6사이클, 12사이클 반복 후 일축 압축강도 실험과 동일한 방법으로 강도를 측정하여 습윤건조 저항성을 평가하였다. Fig. 5는 습윤건조 저항성 평가 실험 과정을 나타내고 있으며, Table 5는 본 연구에서 수행한



(a) Wetting



(b) Drying

Fig. 5. Wetting and drying test process

Table 5. Wetting and drying to test result

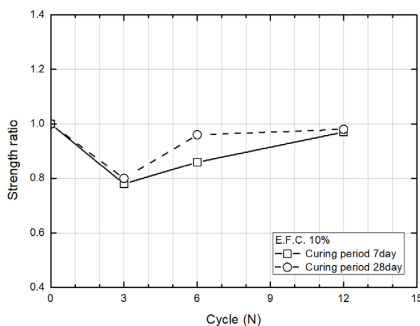
Content (%)	Cycle (N)	Strength ratio	
		Curing time 7day	Curing time 28day
10	0	1.00	1.00
	3	0.78	0.80
	6	0.86	0.96
	12	0.97	0.98
20	0	1.00	1.00
	3	0.72	0.75
	6	0.74	0.80
	12	0.80	0.94
30	0	1.00	1.00
	3	0.81	0.86
	6	0.81	0.88
	12	0.94	0.92

습윤건조 저항성 평가를 보여주고 있다.

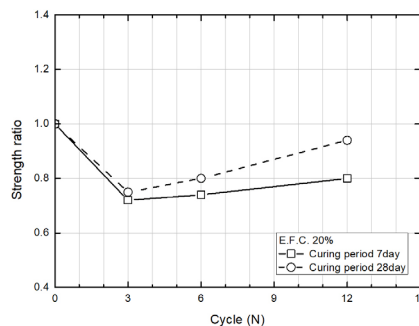
Fig. 6은 시멘트계 고화재의 혼합비율에 따른 초기강도에 대한 습윤건조 저항성 강도 비를 나타내고 있다. Fig. 6(a)는 혼합비율 10%의 재령 기간에 따른 습윤건조 저항성 평가 결과를 나타내고 있으며, 재령 기간 7일의 경우 습윤건조 3사이클에서 초기강도와 비교하여 약 22% 감소율이 나타나며, 6사이클을 기점으로 강도를 일정 회복하여 최종 12사이클에서 초기강도의 약 97%를 강도 발현하는 것을 알 수

있다. 재령 기간 28일의 경우 습윤건조 3사이클에서 초기강도의 약 20%의 강도 감소율이 나타나며, 최종 12사이클에서 초기강도의 98%로 강도를 발현하여 강도를 회복하는 것을 알 수 있다. Fig. 6(b)는 혼합비율 20%의 재령 기간에 따른 습윤건조 저항성 평가 결과를 보여주고 있으며, 재령 기간 7일의 경우 습윤건조 3사이클에서 초기강도와 비교하여 약 28%의 강도 감소율이 나타나며, 최종 12사이클에서 초기강도의 80% 이상 강도가 발현하는 것을 알 수 있다. 재령 기간 28일의 경우 습윤건조 3사이클에서 약 25%의 강도가 감소하며 12사이클에서 초기강도의 약 94%로 회복하는 것으로 평가되었다. Fig. 6(c)는 혼합비율 30%의 재령 기간에 따른 습윤건조 저항성 평가 결과를 나타내고 있으며, 재령 기간 7일의 경우 3사이클에서 초기강도와 비교하여 약 19%의 강도 감소가 나타나며, 6사이클을 기점으로 강도를 일부 회복하여 12사이클에서 초기강도의 약 94%를 발현하는 것으로 분석되었다. 재령 기간 28일의 경우 3사이클에서 약 14%의 강도가 감소하며, 최종 12사이클에서 초기강도의 약 92%를 회복하는 것으로 평가되었다.

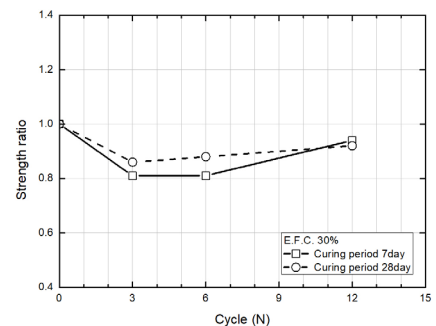
위의 결과에서 나타나듯이 재령 기간 7일, 28일을 적용한 조건에서 유사한 경향이 나타나는 것을 알 수 있으며 특히, 습윤건조 초기 3사이클에서 초기강도와 비교하여 최대 22%의 강도가 감소하지만, 습윤건조 반복 작용에 따라 6사이클



(a) E.F.C. (Eco Friendly Cement) 10%



(b) E.F.C. (Eco Friendly Cement) 20%



(c) E.F.C. (Eco Friendly Cement) 30%

Fig. 6. Strength ratio following repeated wetting and drying of cementitious content

을 기점으로 일정 강도를 회복하여 최종 12사이클에서 초기 강도의 약 90% 이상 강도를 발현하므로 습윤건조 저항성이 우수한 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 습윤건조 반복 작용이 초기 3사이클에서 공시체 내 공극에 수분이 공급되어 일축압축강도 감소에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그러나 습윤건조 반복이 누적됨에 따라 공시체 내 수분이 시멘트계 고화재와 결합하여 양생 효과로 인해 포졸란 반응이 유지되어 강도를 회복하는 것으로 평가된다.

4. 결 론

- (1) 시멘트계 고화재의 화학적 분석 결과 포졸란 반응에 필요한 원소가 시멘트와 비교하여 다량으로 구성되어 재령 기간이 증가할수록 내구성 향상에 영향을 미치는 것으로 분석되며, 분말도는 약 1,000cm²/g 높게 평가되어 초기강도 증진과 수화열 반응이 약 3배 감소하여 건조수축에 의한 내구성 저감에 장점이 있는 것으로 평가된다.
- (2) 시멘트계 고화재의 환경 안정성 평가 결과 pH 지수 7.15로 중성으로 평가되며, 어독성 실험 결과 시멘트의 경우 초기 24시간에서 80% 치사율과 48시간에서 100%의 치사율이 나타나며, 시멘트계 고화재에서 초기 24시간에서 60% 치사율과 48시간 및 96시간에서 70%의 치사율이 나타나며 이때, pH 지수는 8.8로 시멘트와 비교하여 환경 안정성이 우수하다.
- (3) 시멘트계 고화재 혼합토의 동결융해 반복에 의한 내구성 평가 결과, 재령 기간 7일 조건의 경우 반복 3사이클에서 약 15~30%의 강도 감소가 나타나지만, 최종 12사이클에서 초기강도의 약 83~110%로 강도를 회복하는 것으로 분석되며, 초기강도의 80% 이상의 목표 강도를 만족하였다. 이는 기존 연구 결과에서 강도 감소율이 50~60%인 것과 비교하여 동결융해에 의한 내구성이 우수한 것으로 평가된다.
- (4) 시멘트계 고화재 혼합토의 습윤건조 반복에 의한 내구성 평가 결과 재령 기간 7일 및 28일의 경우 습윤건조 반복 3사이클에서 공시체 내 공극에 수분이 공급됨에 따라 일축압축강도 감소 영향으로 각각 30%, 20%의 강도가 감소하지만, 습윤건조 반복 6사이클 이후 공시체 공극 내 수분과 고화재가 결합하여 수증양생 효과로 인해 포졸란 반응이 유지되어 최종 12사이클에서 초기강도의 약 95%를 발현하여 목표 강도를 만족하여 습윤건조 반복에 의한 내구성이 우수하다.

References

1. Hyun, H. G., Kim, H. K. and Chun, B. S. (2010), "Characteristics of the freezing and thawing for controlled low-strength material using pond ash", Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 11, No. 7, pp. 51~56 (In Korean).
2. Davies, J. (1991), "Fracture characteristics of cement-stabilized soils", Journal of materials science, Vol. 26, pp. 4095~4103.
3. Gupta, S., Kua, H. W. and Pang, S. D. (2017), "Autonomous repair in cementitious material by combination of superabsorbent polymers and polypropylene fibres : a step towards sustainable infrastructure", World Sustainable Built Environment Conference 2017 Hong Kong, Track 12: Emerging Green Construction Technology and Materials, pp. 2866~2873.
4. Jin, G. R., Kim, K. Y., Moon, H. D. and Quan H. C. (2016), "Long-term compressive strength and durability properties of "CSG" materials by freezing-thawing test", Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 17, No. 12, pp. 35~43 (In Korean).
5. Ju, J. W., Park, J. B., Ju, J. Y. and Lee, D. S. (2003), "Production of soil mixed pavement using hydronium", Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 23, No. 4C, pp. 213~219 (In Korean).
6. Jung, H. S., Jang, C. H., An, B. J. and Chun, B. S. (2009), "A study on environmentally friendly soil pavement materials using weathered soil and inorganic binder", Journal of Korean Geo-Environmental Society, Vol. 10, No. 4, pp. 25~31 (In Korean).
7. Kim, H. S. (2021), "Evaluation of the use of environmentally friendly cementitious mixed soil as substitute materials for road subbase", Ph. D. dissertation, Kyungpook National University, pp. 42~63 (In Korean).
8. Liu, H. J. and Wang, P. X. (2006), "Stability analysis of loss of stability caused by freeze and melt of earthen side slopes of highway", Journal of Harbin Institute of Technology, Vol. 38, No. 15, pp. 764~766.
9. Oh, S. W., Kim, H. S. and Bang, S. T. (2019), "Unconfined compressive strength characteristics of E.S.B. mixed soil Based on soil compactness and curing period", Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 20, No. 5, pp. 47~55 (In Korean).
10. Qi, J. L. and Ma, W. (2006), "Influence of freezing-thawing on strength of over consolidated soils", Chinese Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 28, No. 12, pp. 2082~2086.
11. SadreKarimi, J. (2000), "Compressive strength-freeze and thaw durability correlation in soil-cement design", International Journal of Engineering, Vol. 13, No. 4, pp. 65~71.
12. Shin, E. C., Shin, H. S. and Jung, C. G. (2015), "Slope stability analysis according to repeated freezing and thawing of the soil", Journal of Korean Geosynthetic Society, Vol. 14, No. 3, pp. 43~51 (In Korean).
13. Yoo, C. (2011), "Effect of cyclic drying-wetting on compressive strength of decomposed granite soils", Journal of Korean Geosynthetic Society, Vol. 10, No. 4, pp. 11~20 (In Korean).