



시멘트계 고화재를 활용한 농어촌도로 포장공법 개발

Development of Rural Road Pavement Technology Using Cement Stabilizer

오 영 인* 공 길 용** 김 승 욱***
 Oh, Young In Kong Gil-Yong Kim, Seung Wook

Abstract

Chemical admixture stabilization has been extensively used in both shallow and deep stabilization in order to improve inherent properties of the soil such as strength and deformation behavior. An increment in strength, a reduction in compressibility, an improvement of the swelling or squeezing characteristics and increasing the durability of soil are the main aims of the admixtures for soil stabilization. Recently, the various advanced cement stabilizer mixing technique was developed. Advanced cement stabilizer mixing technique is environmentally-friendly and has an excellent mixing property and outstanding mixing speed. In this study, to develop the rural road pavement technology using cement stabilizer, compaction and unconfined compression test were performed with various mixing ratio and two types of soil (clay and silty soil). And the freezing/thaw test and bending strength test performed to develop suitable cement stabilizer material for stabilization of rural road. Based on the test results, the liquid types of cement stabilizer material and silty soil mixture are most suitable for rural road construction and although the mixing ratio is low, cement stabilizer mixture is effective for durability of rural road surface layer.

Keywords : rural road, cement stabilizer, unconfined compression strength, bending strength, freezing/thaw test

요 지

화학적 첨가제를 이용한 안정처리는 지반의 강도증가 및 변형발생을 제어하기 위한 방법으로 깊은 심도까지 광범위하게 적용되어 지고 있다. 화학적 안정처리의 기본목적은 지반의 강도증가, 압축성 감소, 팽창특성 등을 개선하여 지반의 내구성을 증가시키는 것이며, 최근 들어 환경친화적이며 혼합체의 특성 및 혼합속도를 효율적으로 개선한 다양한 형태의 진보적인 시멘트 혼화재가 개발되고 있다. 본 연구에서는 농어촌도로(농도)의 효율적인 포장공법 개발을 위하여 시멘트혼화재를 활용하는 방안을 연구하였으며, 혼화재 종류 및 배합비에 따른 다짐시험, 일축압축강도시험, 동결융해시험 및 휨강도시험을 실시하였다. 본 연구결과에 따르면, 실트질 원지반토가 점토지반에 비해 강도증가 및 동결융해특성이 우수하며, 액상형 시멘트 혼화재가 분말형태 보다 효과적인 것으로 나타났다. 또한 저배합에서도 고강도의 품질을 발휘하여 농어촌도로 표층 내구성 저하를 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어: 농어촌 도로, 시멘트계 고화재, 일축압축강도, 휨강도, 동결융해특성

* 정회원 · 한국토목섬유연구소 지반연구팀 수석연구원
 ** 한국농촌공사 경기도 본부 사업관리팀 과장
 *** 한국농촌공사 농어촌연구원 생산자원연구소 생산종합연구팀 연구원



1. 서론

농어촌도로 중 면도, 리도를 제외한 기계화경작로와 이어지는 농도는 대부분 차량하중이 적고 주행횟수가 많지 않아 현지에서 발생하는 흙을 이용한 포장공법으로도 그 기능을 발휘할 수 있다. 그러나 현지에서 발생하는 흙만을 사용하여 포장할 경우에는 지역별, 토질별로 집중강우 등에 의해 지반이 연약해지거나 동절기 후 농번기 시 차량의 반복통행으로 도로 표면의 굴곡이 심하게 나타나는 경우가 있다. 따라서 농작업기계 통행에 어려움이 많고, 콘크리트로 포장할 경우 포장폭(3~4m)이 좁아 농기계 등의 교행시 탈선 등의 위험요소를 내포하고 있다. 따라서 농어촌도로 중 농도포장은 이러한 단점을 극복할 수 있고, 도로로서의 기능을 장기적으로 유지할 수 있는 소요강도 및 내구성을 확보할 수 있어야 하며, 사업량에 대비하여 경제성, 내구성, 유지관리의 용이성, 환경친화성 등을 만족시킬 수 있는 공법의 개발이 필요하다(농림부, 2000). 고화재는 기존의 시멘트와는 달리 주로 세립토가 많이 섞인 고탍수비 연약지반의 개량을 목적으로 사용되어 왔으나, 최근에는 환경오염문제가 대두되면서 그 종류와 기능이 다양해짐으로서 현지토를 대상으로 한 도로포장에도 이용되고 있다. 또한 지금까지 고화재를 이용한 도로포장에 대한 연구결과를 보면 콘크리트 도로의 보조기층재료의 활용뿐만 아니라 기계화경작로 표층으로의 적용성까지도 어느 정도 검증되었으나, 고화재와 흙과의 특성을 단순 검토하여 강도발현 목적에만 치중하거나 단종의 고화재를 사용함으로써 연구결과 적용이 국한되어 실용화 단계에서 쉽게 접근시키지 못하였다(농림부, 2002, 2006).

본 연구에서는 우리나라 농어촌도로(농도)를 대상으로 시멘트계 고화재를 활용한 흙포장공법의 적용성을 파악하고자 하였으며, 현지 발생토와 고화재를 혼합하여 경제성, 내구성, 환경친화성을 가진 흙-고화재 포장공법을 개발하고 실용화시킬 수 있는 공법에 대하여 기초연구를 수행하였다. 현재 농어촌도

로 포장공법은 재료 및 포장공법의 특성에 따라 다양하게 활용되고 있으며, 이중 고화재는 그 종류가 많고 기능이 다양하여 대상토질 및 지역에 맞는 제품을 정확한 분석을 통해 선정하고 사용해야 한다. 그러므로 대상토질에 따른 다양한 분석방법으로 반응현상을 분석하여 소요강도 및 동결융해 내구성을 만족시킬 수 있는 부분을 실험, 분석함으로써 실용화에 보다 쉽게 접근할 수 있는 방법을 찾아내도록 하여야 한다.

2. 흙포장공법의 원리와 개요

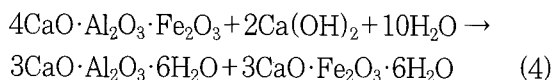
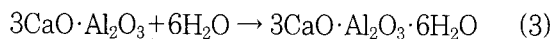
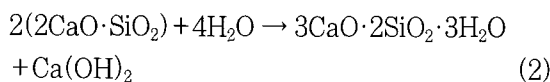
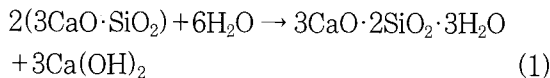
2.1 흙포장공법의 개요

첨가재를 가하는 화학적인 방법에 대한 정의는 1952년에 미국의 메사추세츠에서 개최된 학술회의에서, 협의의 안정처리는 흙에 다른 종류의 흙, 역청제, 시멘트, 석회, 염화칼슘, 규산염, 기타 유기염류, 천연 또는 합성의 유기화합물을 혼합하여 그 물리적 성질을 향상시키는 것이고, 광의의 안정처리는 강도를 증가시키고 그의 압축성이나 투수성을 감소시키는 것이라고 정의 내렸다(Ingles and Metcalf, 1973). 시멘트에 의한 토질개량효과는 흙 자체의 강도를 기초로 하여, 시멘트의 첨가에 의한 함수비의 저하, 이온교환, 단립화 등에 의한 소성의 증대로 흙의 성질이 개선되고, 시멘트의 수화반응이 진행되면 강도가 증가되며, 나아가 양생기간이 길어짐에 따라 포졸란 반응이 일어나 안정적인 강도개선을 이룰 수 있다(Lambe and Whitman, 1979, Bowles, 1992.). 고화재는 흙에 시멘트만을 혼합하는 흙시멘트공법의 적용범위를 확대시키고자 하는 목적으로 시멘트와 토립자 사이의 반응성을 향상시키거나 사용목적에 맞는 성분들을 시멘트에 추가한 제품들이다. 따라서 각각의 사용목적에 따라 고화재는 선택적으로 사용되어야 하며, 사용전 반드시 성능시험이 선행되어야 한다.



2.2 고화재의 작용원리

고화재를 이용하여 현지 흙을 사용목적에 맞게 개량하기 위한 처리방법은 흙의 개량원리 중 화학적인 방법에 속한다. 양이온 교환과 면모화반응은 흙과 고화재를 혼합하였을 때 양생기간 초기에 발생하는 반응이며, 흙의 가소성(plasticity), 작업성(workability), 양생전의 강도, 하중변위특성 등을 개량하게 되는 주요인이다. 면모화반응에 대하여 Herzog와 Mitchell(1963)은 고화재로 인한 간극수 중의 전해질의 증가와 점토표면의 Ca^{++} 부착으로 유발되는 반응이라는 연구결과를 발표하였으며, Diamond와 Kinter(1965)는 수화칼슘 알루미늄네이트의 급격한 형성 때문이라 주장하였다. 고화재에 의한 흙의 안정처리 작용원리는 시멘트에 의한 토질개량원리와 시멘트의 수화작용을 돕는 고화재의 작용원리가 복합된 작용이다. 포틀랜드 시멘트는 Tricalcium silicate(C_3S), Dicalcium silicate(C_2S), Tricalcium aluminate(C_3A), 그리고 Tetracalcium aluminoferrite(C_4AF) 등의 4가지 화합물로 구성되어 있고, 시멘트에 물을 가하면 시멘트 구성화합물이 다음 식(1)~(4)와 같은 화학반응을 일으킨다(Farrar, 1989, Locat 등, 1996, Bowders 등, 1990).



시멘트의 수화반응은 가수적후(A), 유도기(B), 가속기(C), 감속기(D)로 나누어지며 각각의 과정별로 생성물의 종류와 조직을 보면 그림 1과 같다. 시멘트

의 수화반응에 의해 생성된 물질은 시간이 경과함에 따라 유동성과 점성을 상실하고 응결(setting)하며, 시간이 경과할수록 겔(CSH gel)의 생성이 증대하여 시멘트 입자 사이가 치밀하게 채워지면서 경화(hardening)가 진행된다. 시멘트를 흙에 혼합할 경우에는 이와같은 시멘트 수화반응과 더불어 양생기간이 길어짐에 따라 포졸란 반응이 일어나는데, 포졸란이란 $Ca(OH)_2$ 과 반응할 수 있는 물질을 말하며, 시멘트 수화반응시 생성된 $Ca(OH)_2$ 는 점토성분 중에 Al_2O_3 , SiO_2 와 반응하여 $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot H_2O$ (CAH)와 $CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$ (CSH) 합성물을 생성한다(TRB, 1987).

시멘트에 의한 토질개량 효과는 흙자체의 강도를 기초로 하여, 시멘트의 첨가에 의한 함수비의 저하, 이온교환, 단립화 등에 의한 소성의 증대로 흙의 성질이 개선되고, 시멘트의 수화반응이 진행된다면 강도가 증가되며, 나아가 양생기간이 길어짐에 따라 포졸란 반응이 일어나 안정적인 강도개선을 이룰 수 있게 된다(Petry and Wohlgemuth, 1989).

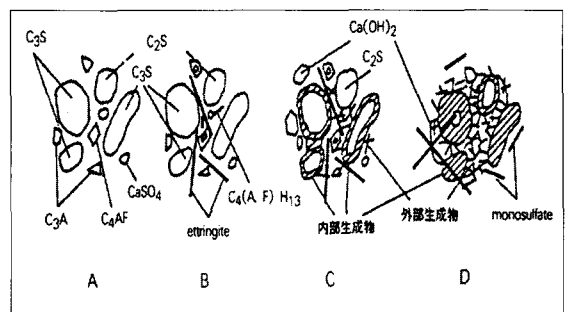


그림 1. 시멘트 수화생성물

3. 흙-고화재의 재료 및 혼합토의 다짐특성

농어촌도로를 포장하기 위해 고화재를 사용하고 자 할 때는 우선 실내배합시험을 실시하여 고화시키 고자 하는 대상토와 현장여건에 적합한 고화재와 배합비를 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 4종류의



고화재를 사용하여 배합비에 따른 다짐시험, 일축압축시험, 휨강도시험을 실시하였으며, 내구성 확인을 위한 동결융해시험을 실시하여 활용성을 검토하였다. 시험대상토는 국내 농어촌도로에 광범위하게 분포되어 있는 점토와 실트질 모래를 채취하여 시험하였고, 배합비에 따른 흙 - 고화재 혼합토의 다짐특성, 재령별 강도특성, 동결융해특성을 규명하고자 하였다.

3.1 대상토 및 고화재 특성

본 시험에 사용한 흙의 토질특성을 크게 분류하면 점토, 실트질 모래를 사용하였으며, 표 1은 사용 흙의 물리적인 특성을 보인 것이다.

표 1. 대상토의 물리적 특성

시료명 (Sample)	점토	실트질 모래	
액성한계, 소성한계, 소성지수(%)	36.1, 22.7, 13.4	NP	
통일분류법 (U. S. C. S.)	CL	SM	
흙의 비중 (specific gravity)	2.682	2.694	
자연함수비 (w_n) (%)	20.1	16.3	
다짐	최대건조밀도(γ_{max})(kgf/cm ³)	1.660	1.825
	최적함수비(OMC) (%)	21.0	14.0
투수계수(95%밀도)(k) (cm/s)	9.1E-08	6.2E-06	

본 시험에서 사용한 고화재는 국내에서 생산되는 4종의 고화재로서 2종(P1, P2)은 분말형태를 사용하였고, 2종(L1, L2)은 액상형태를 사용하였으며, 표 2는 사용한 고화재의 화학성분 분석결과를 나타낸 것이다. 현재 국내에서 시판되고 있는 고화재의 대부분은 시멘트계 고화재들로서 이중 분말형태(P1, P2) 고화재들은 제품화된 시멘트에 첨가제를 혼합하여 가공한 제품이거나, 친환경원료에 추출하여 사용되는 것으로 고화재별로 첨가제의 원료 및 첨가율은 서로 상이한 것으로 알려져 있다. 그러나 주원료는 시멘트가 대부분이기 때문에 화학성분 중 대부분은 시멘트 성분이 차지하고 있으며, 첨가제들의 성분에

따라 고화재별 화학성분들의 상대적인 성분비가 다소 차이가 나는 것으로 분석되었다. 액상형태(L1, L2) 고화재들은 현장에서 시멘트에 혼합처리하는 방법으로 시멘트가 첨가되지 않은 단일제품으로 시판되고 있다.

표 2. 사용고화재의 화학성분 분석

성분	단위	고화재명				
		PC	P1	P2	L1	L2
SiO ₂	%	22.2	27.7	32.3	-	-
CaO	%	64.2	49.6	47.2	6.23	5.24
Al ₂ O ₃	%	5.2	10.3	10.0	-	-
Fe ₂ O ₃	%	3.1	1.38	1.54	-	-
MgO	%	1.4	3.51	3.34	3.92	3.21
K ₂ O	%	0.2	0.80	0.85	20.3	18.5
Na ₂ O	%	0.6	0.16	0.27	8.98	8.23
SO ₃	%	2.1	2.22	2.02	-	-
기타	%	0.3	-	-	-	-

cf. PC : 보통 포틀랜드 시멘트

다짐시험은 KS F 2312 규격의 A다짐방법으로 점토, 실트질 모래 시료를 사용하여 건조중량대비 고화재의 혼합비를 0%, 5%, 10%, 20%로 첨가하면서 다짐시험을 실시하였다. 시험에 사용된 4종의 고화재별 다짐시험결과는 각각의 혼합비별로 그다지 큰 차이를 보이지 않았기 때문에 여기서는 대표적인 다짐특성을 보인 일부 결과만을 나타내었다. 그림 2와 그림 3과 같이 점토, 실트질 모래 시료, 모두 고화재의 함량이 증가할수록 최대건조밀도는 약간 증가하는 경향을 보였고, 최적함수비는 조금씩 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 고화재의 혼합율이 증가함에 따라 최대건조중량이 0.05gf/cm³ 이상은 증가하지 않았으며 최적함수비도 2~3% 이상은 감소하지 않는 것으로 나타나 고화재로 인한 다짐률의 증감은 크지 않다는 것을 알 수 있었다.

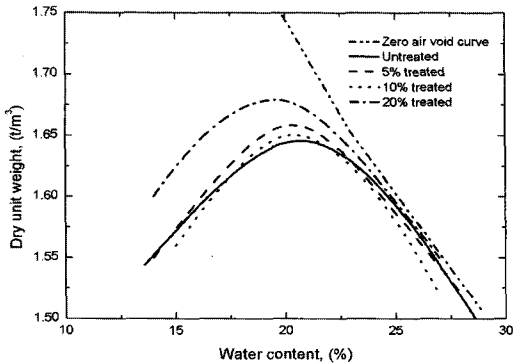


그림 2. 점토시료의 함량별 다짐곡선

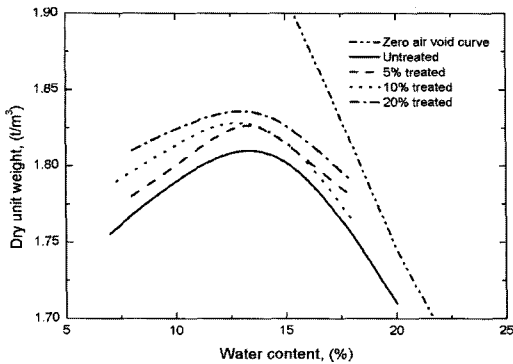


그림 3. 실트질 모래시료의 함량별 다짐곡선

4. 흙 - 고화재 혼합토의 강도특성시험

4.1 흙 - 고화재 혼합토의 일축압축강도시험

본 연구에서는 흙 - 고화재 혼합토에 대한 다짐시험(KS F 2312 규격의 A다짐방법) 결과를 이용하여 최대건조밀도 및 최적함수비를 구한 후에 압축강도시험용 공시체를 제작하였다. 흙 - 고화재 혼합비는 분말형태인 경우는 흙의 건조중량 대비 고화재 중량의 비로 계산하였고, 액상형태인 경우는 흙의 건조중량 대비 시멘트 중량의 비로 혼합비를 계산하여 시멘트의 양을 구하고, 액상고화재의 양은 첨가된 시멘트 중량대비 각 고화재별 추천 중량비로 계산하였다.

공시체 제작은 시험용 몰드에 혼합된 흙을 다짐시

험에서 얻어진 최대 습윤밀도에 해당하는 밀도로 3층으로 나누어서 몰드에 압입하는 방식으로 성형한 후 시료추출기로 몰드에서 분리하여 제작하였다. 일축압축시험 몰드는 직경 50mm 높이 100mm의 원통형몰드를 사용하였으며 동일 양생조건에서 흙 - 고화재 혼합토의 강도특성을 평가하기 위하여 양생온도 23℃ 상대습도 95%가 유지되는 습윤 양생실에서 7일과 28일 양생 후 일축압축시험을 실시하였다. 일축압축시험 전에 몰드양단에 캐핑 또는 연마기로 갈아서 완전 직각조건이 되도록 하여 5톤 용량의 일축압축시험기로 압축강도를 측정하였다. 압축시험은 변형제어방식(strain control)으로 매분당 공시체 높이의 1%에 해당하는 변형속도로 시험하였다.

그림 4와 그림 5는 점토를 대상으로 4종의 고화재를 배합비 5%, 10%, 20%, 30%로 혼합하여 7일과 28일 동안 양생시킨 후 측정된 일축압축강도를 배합

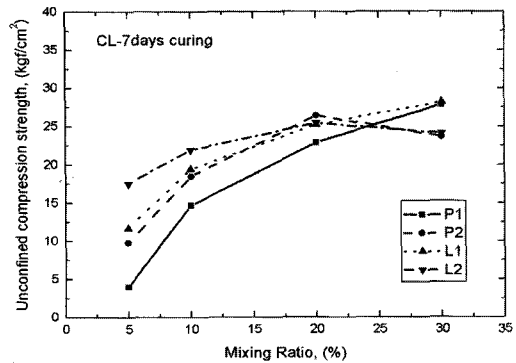


그림 4. 고화재 배합비별 일축압축강도(점토, 재령 7일)

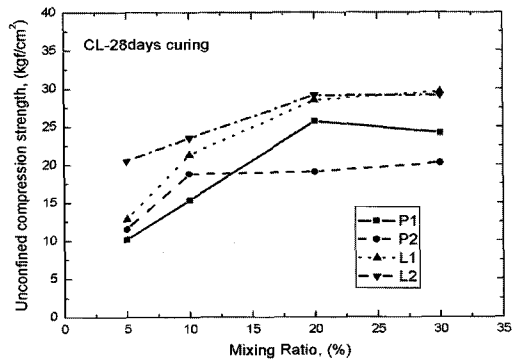


그림 5. 고화재 배합비별 일축압축강도(점토, 재령 28일)



비별로 나타낸 것이다. 고화재 배합비 5%인 경우 7일 강도는 평균적으로 11.8kgf/cm², 10%인 경우는 19.9kgf/cm², 20%인 경우는 24.1kgf/cm² 그리고 30%인 경우는 25.6kgf/cm²로 나타났고, 28일 강도는 5%인 경우 평균적으로 13.9kgf/cm², 10%인 경우는 19.0kgf/cm², 20%인 경우는 24.6kgf/cm² 그리고 30%인 경우는 27.1kgf/cm²로 나타났다. 그러나 고화재 배합비가 30%인 경우에는 20%인 경우보다 오히려 강도가 감소하는 고화재(P1, P2, L2)도 있는 것으로 나타났으나 시험상의 약간의 오차에 기인한 것으로 판단되며 대부분의 고화재는 배합비의 증가에 따라 강도가 증가하였다.

모든 고화재에서 배합비가 5%에서 10%로 증가할 때나 10%에서 20%로 증가하는 경우의 강도증가량에 비해 20%에서 30%로 증가하는 경우의 강도증가량이 현저히 작아지는 것으로 나타났다. 이는 일정한 수준의 배합비 이상에서는 강도 증가율이 차츰 감소되므로, 고화재마다 일정하진 않지만 대략 15~20% 정도의 배합비 이상에서는 고화재량의 증가보다는 대상토와의 혼합이나 다짐에 더 신경을 기울일 필요가 있을 것으로 보인다. 특히 점토 시료는 최대건조단위중량에서의 함수비가 높기 때문에 고화재의 수화에 필요한 수분을 충분히 함유하고 있으므로 양생일수가 7일 정도만 지나도 대상토의 고화가 28일 강도의 90% 정도는 이루어짐을 알 수 있다.

그림 6과 그림 7은 실트질 모래를 대상으로 배합비 5%, 10%, 20%, 30%로 혼합하여 7일과 28일 동안 양생시킨 후 측정된 일축압축강도를 배합비 별로 나타낸 것이다. 실트질 모래에 대한 고화효과는 점토질 흙보다 높은 강도발현특성을 나타내었다. 고화재 배합비 5%인 경우 7일 강도는 평균적으로 21.5kgf/cm², 10%인 경우는 31.3kgf/cm², 20%인 경우는 50.2kgf/cm² 그리고 30%인 경우는 64.4kgf/cm²로 나타났고, 28일 강도는 5%인 경우 평균적으로 30.8kgf/cm², 10%인 경우는 50.2kgf/cm², 20%인 경우는 80.1kgf/cm² 그리고 30%인 경우는 94.7kgf/cm²로 나타났다. 실트질 모

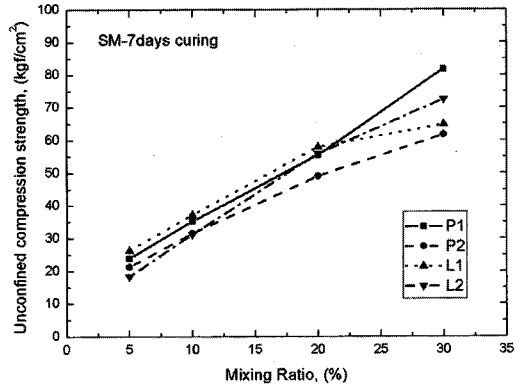


그림 6. 고화재 배합비별 일축압축강도(실트질 모래, 재령 7일)

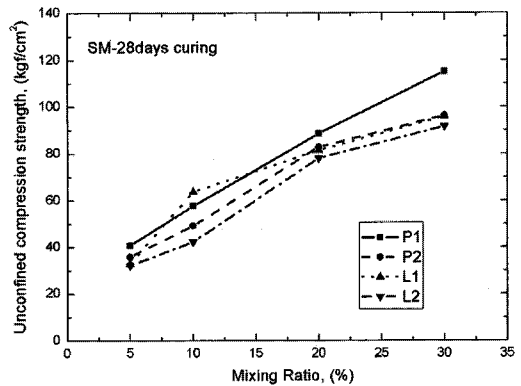


그림 7. 고화재 배합비별 일축압축강도(실트질 모래, 재령 28일)

래에서는 점토에서 배합비 30%에서의 강도가 배합비 20%에 비해 떨어지는 강도발현 저감현상이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 실트질 모래인 경우 점토보다 고화재의 혼합이나 다짐이 쉽고 균일하기 때문에 공시체의 제작이 양호했기 때문이라 할 수 있다.

실트질 모래는 점토에 비해 고화재 혼합비가 작은 경우에도 균일한 강도가 나오며, 특히 28일 강도가 7일 강도에 비해 현저하게 증가함을 알 수 있다. 이는 대상흙의 최대건조밀도시의 함수비의 영향과 습윤양생 시 지속적으로 시료에 수분이 공급되어 수화반응이 장기적으로 진행되면서 계속적으로 강도가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 실트질 모래를 대상으로 하는 고화재 혼합공법에서는 현장 시



공 시 최적함수비 보다 약간 습윤측에서 다짐을 실시 하게 되면 초기강도 발현에 효과가 있을 것으로 판단 된다. 또한 실트질 모래를 대상으로 한 고화재 혼합 토에서는 고화재 배합비가 증가할수록 강도가 계속 적으로 증가하는 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이를 통해 고강도가 요구되는 특수한 용도로 고 화재를 활용하고자 할 때는 고화시키고자 하는 대상 토를 적절하게 선정할 필요가 있으며, 선정된 토질에 적합한 고화재와 배합비를 결정함으로써 고강도가 요구되는 특수한 용도로서 고화재가 유효할 것으로 판단된다.

4.2 흙 - 고화재 혼합토의 휨강도시험

4.2.1 개요

농어촌도로를 흙 - 고화재 혼합토로 포장할 경우, 기초지반의 상태와 기후 등의 환경조건에 의해 포장 체의 두께와 배합비 등을 결정하게 된다. 흙-고화재 혼합토를 이용한 경작로 포장 또한 콘크리트 포장처럼 기초지반이 연약하거나 포장두께가 얇은 경우 중 차량 하중에 의해 포장층의 휨변형으로 인해 파괴가 일어날 가능성은 다분하다. 그러나 경작로의 관리상의 어려움으로 인해 조기에 포장층의 균열을 발견할 수도 없고 균열이 발생하더라도 강우와 바람 등으로 인해 균열부분이 흙입자로 조기에 채워지기 때문에 균열발생 직후에는 별다른 문제가 발생하지 않을 것으로 보인다. 그러나 포장층의 균열은 시간이 흐르면 서 일체화되어 있는 포장체를 분할시켜 중차량 하중의 반복작용시 각 포장층의 균열을 증대시키고 균열 부에 응력이 집중됨으로써 이로 인한 입자의 탈락, 투수성의 증가, 강도의 저하, 부등침하 등을 일으켜 농어촌도로로서의 기능을 상실케 할 우려가 있다. 그러므로 흙-고화재 경작로 포장시 휨응력 대한 검토가 이루어져야 하며 포장체가 적절한 수준의 휨응력에 저항치 못할 경우에는 포장두께를 증가시키거나 배합비를 증가시켜 이를 보완해야 할 것으로 판단된다.

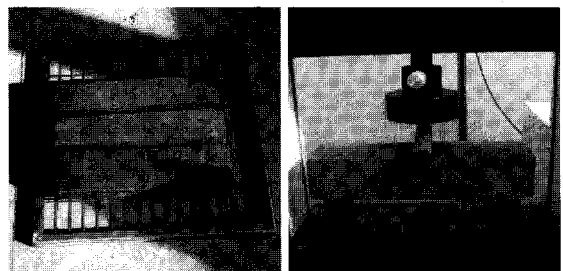
4.2.2 시험방법

중차량 하중에 대한 각각의 고화재 혼합토의 휨응 력을 알아보기 위해 건조된 대상토에 고화재를 5, 10, 20% 첨가하여 1차적으로 혼합한 후 최적함수비 상태로 물을 첨가하여 혼합이 완전히 이루어질때까 지 혼합하였다. 공시체 제작은 7.6×10×41.2cm의 장방형 몰드에 혼합된 흙을 다짐시험에서 얻어진 최 대습윤밀도에 해당하는 양을 3층으로 나누어 몰드에 골고루 다져서 압입하는 방식으로 성형한 후 몰드를 분리하여 공시체를 양생온도 23℃, 상대습도 95% 이상이 유지되는 습윤양생실에 7일간 양생시켰다. 양생된 공시체의 휨강도시험은 중앙점 하중법에 의 한 휨강도시험방법(KS F 2407)에 따라 실시하였다 (그림 8 참조). 공시체는 흙-고화재혼합토를 몰드에 넣었을 때의 옆면이 상하면이 되도록 하였고 공시체 표면이 평행이 되지 않았을 경우 적절한 방법으로 캐 팅을 실시하여 공시체가 수평이 유지된 상태에서 휨 강도시험을 실시하였으며, 다음 식 (5)에 의하여 휨 강도를 계산하였다.

$$\sigma_b = \frac{3Pl}{2bd^2} \quad (5)$$

여기서,

- σ_b : 휨강도 (kg/cm²),
- P : 시험용 계기에 나타난 최대하중 (kg),
- l : 지간의 길이 (cm),
- b : 평균폭 (cm),
- d : 평균두께 (cm)이다.



(a) 휨강도시험 공시체 (b) 휨강도시험 장비

그림 8. 흙 - 고화재혼합토 휨강도시험 장면



4.2.3 시험결과

두 종류의 농어촌도로 원지반토를 대상으로 휨강도 특성을 파악하기 위하여 분말형 고화재(P1~P5)를 5, 10, 20% 첨가하여 각각의 휨강도를 측정하였다. 휨강도시험결과, 그림 9는 점토를 대상으로 5종의 분말형 고화재를 배합비 5, 10, 20%로 첨가하여 7일간 양생시킨 후 측정된 휨강도를 나타낸 것이고 그림 10은 일축압축강도에 대한 휨강도의 비율을 나타낸 것이다. 점토시료에 대한 각 고화재의 휨강도특성은 각각의 고화재마다 약간의 휨강도 차이는 나타났으나 특별히 점토질 대상토에 큰 강도를 발현하는 고화재는 나타나지 않았으며 대부분의 고화재가 비슷하게 배합비의 증가에 따라 휨강도도 증가하는 것으로 나타났다. 점토(CL)-고화재혼합토의 평균 7일 휨강도는 배합비 5%의 경우 3.6kg/cm^2 이었고 10%

는 5.6kg/cm^2 이었으며 20%의 경우는 8.4kg/cm^2 으로 측정되었다. 또한 일축압축강도에 대한 휨강도율은 배합비 5%의 경우 압축강도의 31%, 10%는 29%, 20%는 34% 정도로 나타났다. 점토-고화재 혼합토의 경우 휨강도는 고화재배합비의 증가에 따라 일축압축강도의 증가와 함께 휨강도도 증가하는 것으로 나타났으며 압축강도에 대한 휨강도율은 25%~38% 정도로서 일반콘크리트의 휨강도율 1/5~1/7보다 훨씬 높은 것으로 나타났다.

그림 11은 실트질 모래 흙을 대상으로 5종의 분말형 고화재를 배합비 5, 10, 20%로 첨가하여 7일간 양생시킨 후 측정된 휨강도를 나타낸 것이고 그림 12는 일축압축강도에 대한 휨강도의 비율을 나타낸 것이다. 실트질 모래 시료에 대한 각 고화재의 휨강도 특성은 다른 시료와 마찬가지로 배합비의 증가에

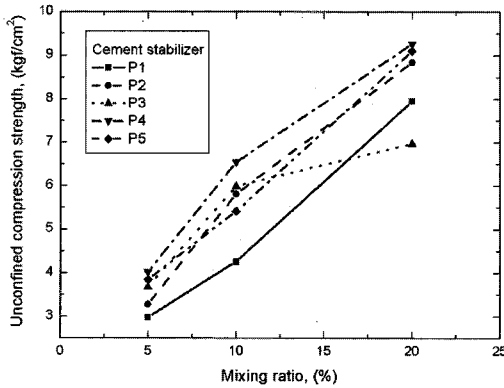


그림 9. 휨강도시험결과(점토, 재령7일)

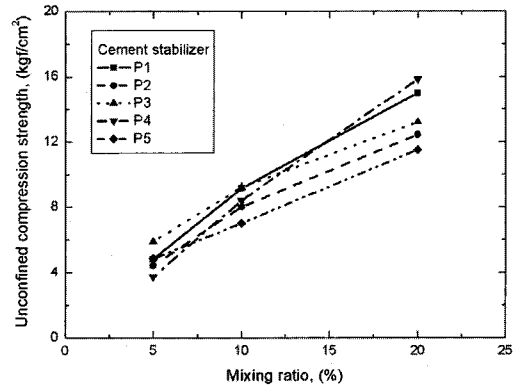


그림 11. 휨강도시험결과(실트질 모래, 재령7일)

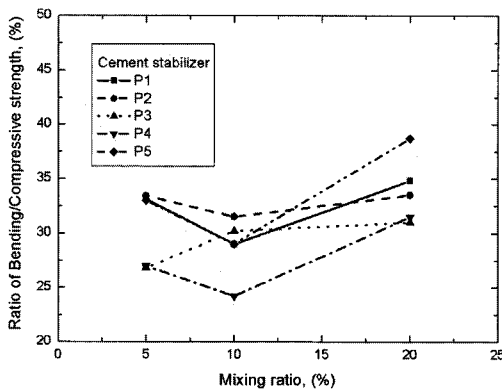


그림 10. 휨강도/압축강도비(점토)

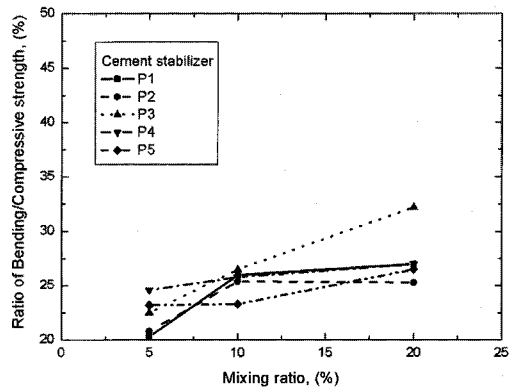


그림 12. 휨강도/압축강도비(실트질 모래)



따라 휨강도가 증가하여 일축압축강도와 비슷한 경향을 보였다. 실트질 모래(SM)-고화재 혼합토의 평균 7일 휨강도는 배합비 5%의 경우 4.7kg/cm²이었고 10%는 8.4kg/cm²이었으며 20%의 경우는 13.6kg/cm²으로 측정되었다. 또한 일축압축강도에 대한 휨강도율은 배합비 5%의 경우 압축강도의 22%, 10%는 25%, 20%는 28% 정도로 나타났다. 실트질 모래-고화재 혼합토의 경우 휨강도는 고화재 배합비와 토질의 영향으로 인한 증가추세를 보였을 뿐 고화재 종류에 따른 큰 차이점은 찾을 수가 없었다. 압축강도에 대한 휨강도율은 20%~31% 정도로서 일반콘크리트의 휨강도율 1/5~1/7보다 높은 것으로 나타났지만 점토보다는 5% 낮게 측정되었다. 이는 실트질 모래 흙이 상대적으로 강도가 높기 때문에 점토시료에 비해 일축압축강도가 높아 휨강도 비율은 떨어지는 것으로 사료된다.

5. 흙 - 고화재 혼합토의 동결융해시험

5.1 개요

농어촌도로를 포함한 농도의 대부분은 여러 가지 환경조건에 의해서 내구성을 잃는 경우가 많은데 이 중의 하나가 동결기의 기온분포에 의해서 동결과 융해작용을 반복적으로 받음에 따라 균열, 강도저하, 침하 등을 일으키게 된다. 고화재 혼합토의 동결융해에 대한 저항성은 토질, 온도, 함수비, 지반의 환경조건 등에 따라 크게 영향을 받으며 혼합토의 강도나 함수비, 다짐률, 투수성 등과 밀접한 관계를 가지고 있다. 포장시 기초지반에서의 동결융해작용은 여러 가지 문제를 일으키는데, 동결융해로 인한 도로의 파괴는 크게 2가지로 설명될 수 있다. 첫째는 동상작용에 의한 파괴로, 동상압보다 상부 포장체의 인장강도가 작을 때 상부포장체가 상승하거나 인장파괴로 인한 균열발생을 일으키게 된다. 노면에서의 동상량은 주로 횡단방향으로 불균일하게 발생하여 거의 중앙

에서 최대가 되기 때문에 도로 중앙선을 따라 주행방향으로 커다란 포장균열이 생기는 것이 일반적이다. 둘째는 융해로 인한 도로의 파괴로, 동상이 일어나 도로의 동결부분이 봄이 되면 지표면과 동상하면에서 녹기 시작한다. 하면에서의 융해속도는 표면에 비해 약간 느려서 표면의 융해수가 체류됨과 동시에 노면의 균열부분에서 표면수가 침투하여 노상 및 보조기층은 포화상태로 되고 흙속의 얼음층에 의해 밀도도 적어져서 지지력은 현저히 저하된다(Bowles, 1968).

5.2 시험방법

각각의 고화재별로 동결융해에 대한 저항성을 알아보기 위한 시료조제 및 공시체 제작은 일축압축시험용 공시체와 같은 방법으로 제작하였으며, 7일과 28일 양생 후 동결융해시험을 실시하였다. 동결조건은 그림 13에서 보인 동결챔버 내에서 -20℃로 24시간 유지시키는 방법을 이용하였고, 융해는 20℃±3℃로 24시간 수침시키는 방법을 이용하였다. 이 동결융해조건은 시험된 고화재간의 상대적인 동결융해 저항성을 측정하고자 하는 목적으로 최악의 현상상태를 재연한 것으로 절대적인 조건이라고 보기는 어렵다. 동결융해를 2cycle 반복한 후에 일축압축시험과 같은 방법으로 강도를 측정하여 동결융해 저항성을 평가하였다. 표 3은 장비사양을 보인 것이다.

표 3. 동결융해 시험장비 사양

항 목	특 성
동결융해 챔 버	<ul style="list-style-type: none"> • 형식 : PID 온도조절방식(직독식) • 크기 : 내부규격 600×600×600(H) • 재질 및 구조 : 소부도장/ 전원 220V 내부 : 스테인레스 외부 : 강재(SS41) • 냉동모터 : 1 HP
동결양생 tray	<ul style="list-style-type: none"> • 크기 : 500×500 • 재질 : 스테인레스
온도 범위	• 온도범위 : -20℃~50℃

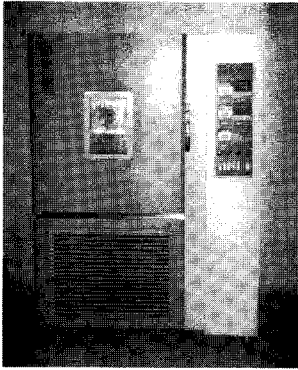


그림 13. 동결융해 시험기

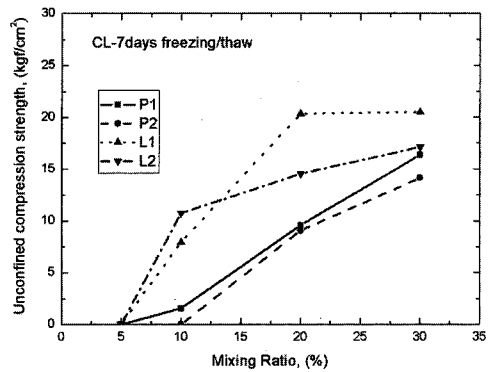
5.3 혼합토의 동결융해시험 결과

그림 14는 점토를 대상으로 고화재 배합비 5%, 10%, 20%, 30%로 혼합하여 7일과 28일 동안 양생시킨 공시체를 동결융해 2cycle 반복한 후 측정된 일축압축강도를 배합비별로 나타낸 것이다. 대부분의 고화재에서 배합비 5%인 경우에 7일 양생된 공시체를 동결융해조건에 노출시키는 과정에서 파괴되어 버렸다. 일부 고화재는 배합비가 증가하거나 양생기간이 증가하는 경우에도 동결융해과정에서 파괴되는 것으로 나타났다. 이는 융해조건이 수침상태였기 때문에 융해과정에서 공시체가 수분을 흡수하게 되어 파괴가 된 것으로 판단된다. 동결융해과정에서 파괴가 발생한 고화재 중에는 일축압축강도가 다른 고화재보다 높거나 유사한 경우가 대부분인 것을 볼 때 강도발현이 우수한 고화재라 할지라도 동결융해에는 약한 고화재가 있다는 것을 알 수 있다. 그림 15는 동결융해로 인한 강도감소율을 고화재배합비별로 나타낸 것이다. 여기서 강도감소율은 다음 식 (6)과 같이 계산하였다.

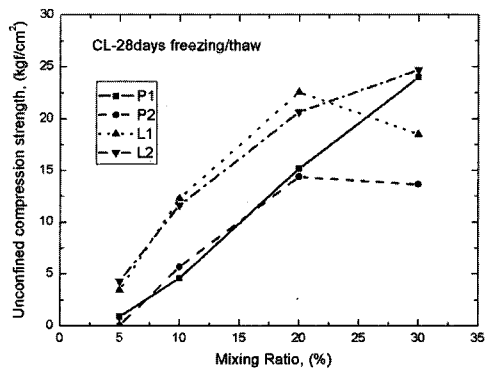
$$\text{강도감소율} = \frac{\text{동결융해전강도}(q_u) - \text{동결융해후강도}(q_u')}{\text{동결융해전강도}(q_u)} \times 100(\%) \quad (6)$$

동결융해과정에서 파괴된 공시체는 동결융해에 대한 저항성이 극히 미비할 것이라고 판단해서 강도감

소율을 100%로 처리하였다. 분말형태 고화재들인 경우는 동결융해과정에서 파괴된 공시체들이 액상형태 고화재들과 비교해서 상당히 많았으며, 파괴되지 않은 공시체들에 대해서는 배합비가 증가하거나 양생기간이 길어짐에 따라서 대체적으로 강도감소율이 낮아지는 경향으로 나타났다. 액상형 고화재인 경우는 분말형 고화재보다 대부분 강도감소율이 낮았으며 배합비가 증가함에 따라서는 강도감소율은 대체적으로 낮아지는 경향이 있는 것으로 나타난 반면 양생기간이 증가함에 따라서는 강도감소율이 낮아지는 뚜렷한 경향을 보이지는 않았다. 점성토를 대상으로 한 고화재간의 동결융해 저항성 측면에서는 분말형 고화재보다는 액상형 고화재가 좀더 좋은 효과를 발휘하는 것으로 나타났지만 배합비 변화에 따라 특정

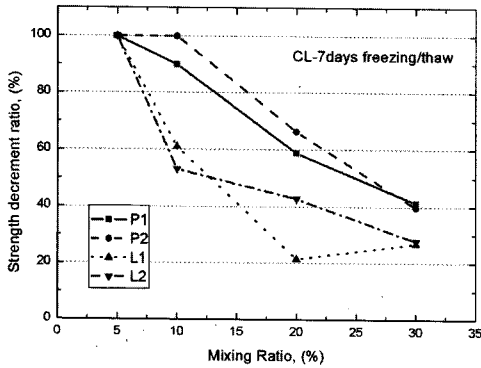


(a) 재령 7일

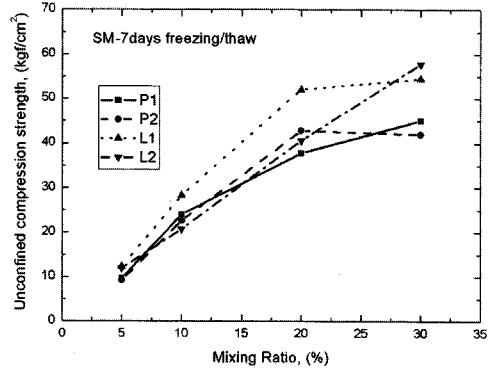


(b) 재령 28일

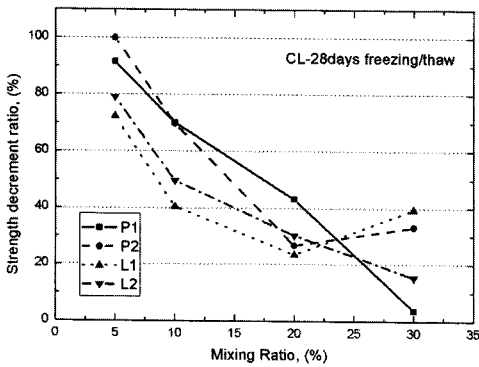
그림 14. 고화재 배합비별 동결융해 후 일축압축시험 결과(점토)



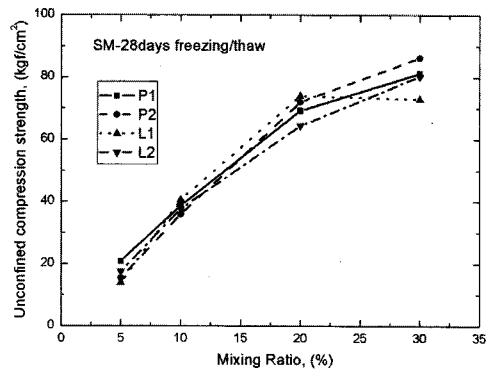
(a) 재령 7일



(a) 재령 7일



(b) 재령 28일



(b) 재령 28일

그림 15. 고화재 배합비별 동결융해 후 강도감소율 결과(점토)

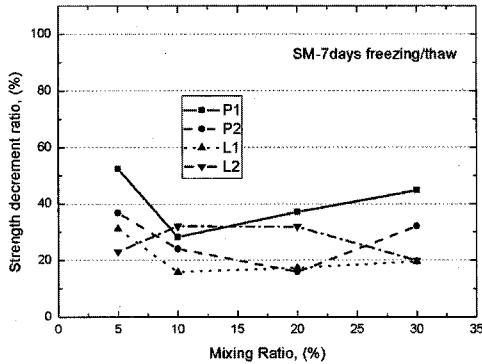
그림 16. 고화재 배합비별 동결융해 후 일축압축시험 결과(점토)

고화재가 일률적으로 동결융해 저항성이 우수한 효과를 발휘한다고 볼 수는 없고 각 고화재 마다 동결융해에 뛰어난 적정배합비가 결정될 필요가 있을 것으로 판단된다.

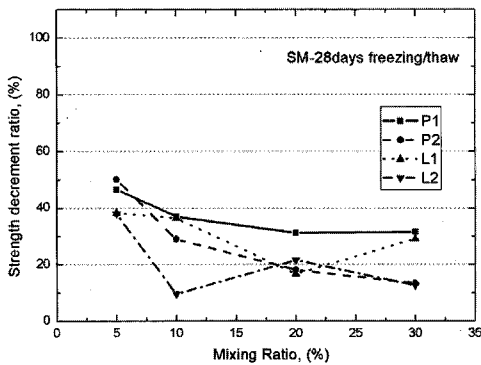
그림 16은 실트질 모래를 대상으로 고화재를 배합비 5%, 10%, 20%, 30%로 혼합하여 7일과 28일 동안 양생시킨 공시체를 동결융해 2cycle 반복한 후 측정된 일축압축강도를 배합비별로 나타낸 것이다. 실트질 모래를 고화시키는 경우에는 점토를 고화시키는 경우에 일부 고화재에서 동결융해과정 중 공시체가 파괴되는 경우가 발생하지 않았다. 배합비의 증가나 양생기간의 증가에 따라서도 동결융해 후 강도는 계속해서 증가하는 경향을 보였으며, 각각의 배합비별로 시험된 9종의 고화재 모두 일정한 범위의 강

도를 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 실트질 모래 자체가 점토와 비교해서 토립자 주위를 둘러싸고 있는 흡착수층이 강하지 않고 모세관 현상으로 인한 수분흡수력이 상대적으로 작기 때문에 주위로부터의 수분이 공시체내로 이동되는 것이 극히 제한되었기 때문인 것으로 판단된다.

그림 17은 동결융해로 인한 강도감소율을 고화재 배합비별로 나타낸 것이다. 배합비 5%인 경우에도 양생기간에 관계없이 강도감소율이 50%이하로 나타났다으며, 9종의 고화재 모두 같은 경향을 보이고 있다. 배합비가 증가함에 따라 강도감소율은 대체적으로 낮아지는 경향을 보인 반면 양생기간이 증가함에 따라서는 강도감소율 변화에 큰 차이가 없는 것으로 나타났고 일부 고화재에서는 양생기간이 증가함에



(a) 재령 7일



(b) 재령 28일

그림 17. 고화재 배합비별 동결융해 후 강도감소율 결과(실트질 모래)

따라 오히려 강도감소율이 증가하는 경우도 보이고 있다. 이는 9종의 고화재 모두가 동결융해 저항성이 좋다고 판단하기보다는 실트질 모래 자체가 다른 토질보다는 동결융해에 민감하지 않고, 고화재를 통해 동결융해 저항성을 좀더 높일 수 있다고 판단하는 것이 타당할 것이라 생각한다.

실트질 모래에서도 점토를 대상으로 한 경우와 마찬가지로 분말형 고화재보다는 액상형 고화재가 동결융해 저항성이 다소 뛰어난 것으로 보인다. 일부 액상형 고화재에서는 강도감소율이 0%이하인 경우도 나타나고 있다. 배합비 변화에 따라 특정 고화재가 일률적으로 동결융해 저항성이 우수한 효과를 발휘한다고 볼 수는 없고 각 고화재 마다 동결융해에 뛰어난 적정배합비가 결정될 필요가 있을 것으로 판

단된다. 실트를 대상으로 한 경우와 비교해서 대체적으로 동결융해로 인한 강도감소율은 실트보다는 실트질 모래에서 작은 경향을 보이고는 있지만, 배합비가 증가함에 따라 실트에서는 동결융해로 인한 강도감소율이 0%이하로 되는 고화재가 많았고 그 이외의 고화재들도 일부를 제외하고는 실트질 모래를 대상으로 한 경우보다 강도감소율이 작은 경향을 보이고 있다. 이 결과를 통해 동결융해에 민감한 토질(점토)실트질 모래 순으로 판단할 수 있는 반면 고화재를 통해 동결융해 저항성을 향상시킬 수 있는 토질은 실트질 모래)점토 순으로 판단할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 우리나라 농어촌도로(농도)를 대상으로 다양한 환경친화적 공법의 적용성을 파악하고자 하였으며, 현지 발생토와 고화재를 혼합하여 경제성, 내구성, 환경친화성을 가진 흙-고화재 포장공법을 개발하고 실용화시킬 수 있는 공법에 대하여 연구를 수행하였다. 총괄연구에 따른 결론은 다음과 같다.

1. 실트질 모래, 점토시료 모두 고화재의 함량이 증가할수록 최대건조밀도는 약간 증가하는 경향을 보였고, 최적함수비는 조금씩 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 고화재의 혼합율이 증가함에 따라 최대건조중량이 0.05g/cm^3 이상은 증가하지 않았으며 최적함수비도 2~3% 이상은 감소하지 않는 것으로 나타나 고화재로 인한 다짐물의 증감은 크지 않다는 것을 알 수 있었다.
2. 점토에 대한 일축압축강도 시험결과, 모든 고화재에서 배합비가 5%에서 10%로 증가할 때나 10%에서 20%로 증가하는 경우의 강도증가량에 비해 20%에서 30%로 증가하는 경우의 강도증가량이 현저히 작아지는 것으로 나타났다. 반면, 실트질 모래를 대상으로 한 고화재 혼합토에서는 고화재 배합비가 증가할수록 강도가 계속적으로



증가하는 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이를 통해 고강도가 요구되는 특수한 용도로 고화재를 활용하고자 할 때는 고화시키고자 하는 대상토를 적절하게 선정할 필요가 있으며, 선정된 토질에 적합한 고화재와 배합비를 결정함으로써 고강도가 요구되는 특수한 용도로서 고화재가 유효할 것으로 판단된다.

3. 점토-고화재 혼합토의 경우 휨강도는 고화재 배합비의 증가에 따라, 일축압축강도의 증가와 함께 휨강도도 증가하는 것으로 나타났으며 압축강도에 대한 휨강도율은 25%~38% 정도로서 일반 콘크리트의 휨강도율 1/5~1/7보다 훨씬 높은 것으로 나타났다. 또한, 실트질 모래-고화재 혼합토의 경우 휨강도는 고화재 배합비와 토질의 영향으로 인한 증가추세를 보였을뿐 고화재 종류에 따른 큰 차이점은 찾을 수가 없었다. 압축강도에 대한 휨강도율은 20%~31% 정도로서 일반콘크리트의 휨강도율 1/5~1/7보다 높은 것으로 나타났다지만 점토보다는 5% 낮게 측정되었다.
4. 점성토를 대상으로 한 고화재간의 동결융해 저항성 측면에서는 분말형 고화재보다는 액상형 고화재가 좀더 좋은 효과를 발휘하는 것으로 나타났지만 배합비 변화에 따라 특정 고화재가 일률적으로 동결융해 저항성이 우수한 효과를 발휘한다고 볼 수는 없고 각 고화재 마다 동결융해에 뛰어난 적정배합비가 결정될 필요가 있을 것으로 판단된다.
5. 시멘트계 고화재를 활용하여 농어촌도로를 포장할 경우, 저배합에서도 고강도의 품질을 발휘할 수 있는 것으로 나타났으며, 표층 내구성 저하에 따른 문제점을 해소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 비교적 차량통행이 많은 기간도로(리도, 면도)에는 고화재 보조기층을 활용한 표층 아스콘(재생아스콘 등) 포장 등을 활용함으로써 보다 적용이 쉽고, 장기내구성을 확보할 수 있는 포장공법의 도입도 검토되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

농림부(2000), "기계화 경작로 확포장 신공법 개발", 충북대학교

농림부(2006), "친환경 농어촌 도로 개발연구", 농업기반공사

농림부(2002), "기계화경작로 포장공법 및 실용화 연구", 농업기반공사

Bowles, J.E.(1968), "*Foundation Analysis and Design*", McGraw-Hill, New York, p.86.

Bowles J.E.(1992), "*Engineering Properties of Soils and Their Measurement*" International Edition, McGRAW-HILL Civil Engineering Series, McGRAW-HILL.

Bowders, J.J, Gidley, J.S., and Usmen, M.A. (1990), "Permeability and Leachate Characteristics of Stabilized Class F Fly Ash", *Transportation Research Board Record 1288, National Research Council, Washington D.C., USA*, pp. 70-77.

Diamond S, Kinter EB (1965) Mechanisms of soil-lime stabilization: an interpretative. review, *Highway Research Record 92*:83-96.

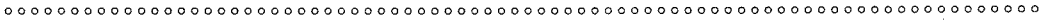
Farrar, J.A.(1989), "*Construction and Quality Control of Deep Mechanical Cement Mixing at Jackson Lake Dam*", Proceedings of Soil Stabilization Technology Exchange Workshop, Denver, Colorado, pp. 2-9~2-38.

Herzog, J.K. and Mitchell, A. (1963), *Reactions accompanying stabilization of clay with cement*, Committee on Soil-Portland Cement Stabilization, p. 144.

Ingles, O.G. and Metcalf, J.B. (1973), *Soil Stabilization*, Wiley and Sons, New York.

Locat, J., Tremblay, H., and Leroueil, S. (1996), "Mechanical and Hydraulic Behavior of a Soft Inorganic Clay Treated with Lime", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No. 4, pp. 654-669.

Lambe, T.W. and Whitman, R. V.(1979), "*Soil Mechanics SI Version*", John Wiley & Son, New



York, 1969.

Petry T.M. and Wohlgemuth S.K. (1989), "*The Effects of Pulverization on the Strength and Durability of Highly Active Clay Soils Stabilized with Lime and Portland Cement*", Proceedings of Soil Stabilization Technology Exchange Workshop, Denver, Colorado, pp. 1-37~1-39.

TRB(1987), "Lime Stabilization, Reaction,

Properties, Design, and Construction, *State of the Art Report 5*, National Research Council, Washington D.C.

접 수 일: 2007. 9. 20

심 사 일: 2007. 10. 9

심사완료일: 2007. 11. 5