

매립회를 활용한 저강도 고유동화재의 동결융해 특성

Characteristics of the Freezing and Thawing for Controlled Low-Strength Material Using Pond Ash

현 호 규¹⁾ · 김 현 기²⁾ · 천 병 식[†]

Hyun, Hogyu · Kim, Hyungi · Chun, Byungsik

ABSTRACT : Recently, the land area for many people has been limited because of industrialization and modernization in Korea. The large-scale constructions like the reclamation development projects have been progressed to resolve this problem mentioned above. Therefore, as many of the useful construction materials as possible are needed to perform the largescale construction projects. Many studies for the utilization of pond ash which has a similar characteristic of sand have been conducted and there has been often occurred many structural problems on roadbed in winter. Therefore, the characteristics of the freezing and thawing for Controlled Low-Strength Material(CLSM) using pond ash were analyzed and evaluated by unconfined compressive strength test and mass loss test in this study. As a result of this study, it was confirmed that new CLSM using pond ash with cement(8.2% by weight) was able to stand for the freezing and thawing behavior and was satisfied with the standard of Portland Cement Association.

Keywords : Pond ash, Controlled Low-Strength Material, Freezing and Thawing

요 지 : 최근 우리나라는 산업화 및 현대화로 국토의 유효면적이 인구에 비해 부족한 실정이다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 국가적인 대단위 국토개발을 수행하여 용지 확보에 노력을 기울이고 있다. 하지만 이러한 대규모공사를 진행함에 있어 모래와 같은 성토재 및 매립재 등이 부족한 실정이다. 이에 대한 대체재로 모래와 비슷한 특성을 가진 매립회의 활용에 관한 많은 연구가 진행되어왔고, 계절동토지역인 우리나라는 동결융해로 인해 철도 노반, 도로포장체 등 토목구조물이 파손되거나 기능이 저하되는 문제가 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 매립회를 사용한 저강도 고유동화재의 동결융해의 특성을 동결융해 cycle 반복 후 공시체와 습윤양생 공시체의 일축압축시험과 손실율시험을 통해 비교분석 하였다. 비교분석결과 매립회를 활용한 저강도 고유동화재에 8.2%의 시멘트를 첨가했을 때, 소정의 강도가 발현되었으며, 내구성 또한 PCA기준에 만족하는 것으로 나타났다.

주요어 : 매립회, 저강도 고유동화재, 동결융해

1. 서 론

최근 급속한 산업발전과 국민 생활수준 향상에 따른 에너지 사용량이 증가함에 있어 산업부산물에 기하급수적으로 늘어나고 있는 실정이다. 산업부산물 중 석탄회는 발전본부에서 발생하는 산업폐기물로서 상당히 많은 양이 발생된다. 국내 10개 발전본부에서 연간 약 600만톤이 부산되는 석탄회 재활용률은 2004년 67.9%, 2005년 59.4%, 2006년 67.7%로 전체발생량에 비해 약 70%미만이며 현재 회처리장에 매립되어 있는 석탄회의 총량은 2008년 기준으로 약 7,200만톤에 달하는 것으로 추정된다(환경부, 2008). 매립회로 인해 일부 발전소에서 매립장 용량이 한계에 부딪혀 최악의 경우 전기 생산을 중단할 수 밖에 없는 위기에 처할 수도 있는 상황에 놓이게 되었다. 또한 막대한 양의 석탄회

를 폐기 처분하는데 과다한 경비가 소요될 뿐 아니라 이렇게 폐기처분된 석탄회는 환경오염의 원인이 될 수 있다. 따라서 현재 매립된 석탄회의 재활용을 극대화하기 위해 기존의 재활용 용도 이외에 추가적으로 대량 활용할 수 있는 방안 마련이 시급한 실정이다.

한편, 저강도 고유동화재는 저강도 콘크리트개념을 지반공학분야에 적용하여 만들어진 것으로 유동성채움재(CLSM, Controlled Low-Strength Material, 혹은 flowable fill), 강도조절채움재(controlled strength material), 다짐조절채움재(controlled density fill), 유동성플라이애쉬(flowable fly ash) 등으로 불린다. 하지만 지금까지의 저강도 고유동화재는 잔골재로 모래를 사용하기 때문에 모래의 수급이 어려워지고 있어 현재 우리나라 실정에는 다소 맞지 않은 면이 있다. 시대 상황에 부응하기 위해 모래 대신 매립회를 이용하여 매립회, 비회,

1) 정희원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정

2) 정희원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

† 정희원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

시멘트, 물의 혼합물로 저장도 고유동화재를 개발하여 공유 수면매립재, 각종 구조물 채움재, 공동채움재 등으로 사용한다면 매년 증가하는 매립석탄회량을 재활용할 수 있고 환경적인 측면에서 자연환경을 보호할 수 있고, 건설적 측면에서 매립 및 건설공사에 필요한 토사 대체재를 공급할 수 있을 것이다(공진영 등, 2010).

따라서 본 연구에서는 대량으로 매립되어 있는 석탄회를 대량 유효활용함에 있어 계절동토지역인 우리나라 실정을 고려하여 동결융해로 인해 토목구조물이 파손되거나 기능이 저하되는 문제점을 해결하고자 매립회를 활용한 저장도 고유동화재의 동결융해에 따른 강도 변화 및 내구성 특성을 조사하여 사용 가능성을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 저장도 고유동화재의 특징

저장도 고유동화재는 일반적으로 잔골재(모래), 비회, 물, 시멘트, 혼화제 등을 혼합하여 만들며, 자기수평성, 자기다짐성, 유동성, 인위적인강도조절, 시공 후 재굴착의 용이성 및 시공단계 단축에 의한 시공비 절감가능성의 특징을 갖는다(ACI 229 Committee, 1994). 이러한 특징을 갖는 저장도 고유동화재는 트렌치, 옹벽, 기초 등의 공동 채움재 도로노상재 등의 용도로 토사 대신 사용되며, 그에 따른 연구가 활발히 진행되고 있다(원종필 등, 2001; 조재운 등, 2000; 박재현 등, 2004; 이관호 등, 2006, 2007; 임유진 등, 2009).

2.2 국내 석탄회의 매립량 조사

현재 국내는 5개 발전사에서 총 10개 발전본부가 운용중에 있으며, 이들 모두 석탄회 매립장을 보유하고 있다. 한국중부발전(주)의 보령발전본부와 같이 넓은 석탄회 매립장을

표 1. 석탄회 매립량 및 매립율(2008년 기준)

구 분		매립량 (천m ³)	매립율 (%)
한국남동발전(주)	삼천포발전본부	11,164	97.3
	영흥발전본부	1,111	14.2
	영동발전본부	2,106	98.3
한국중부발전(주)	보령발전본부	9,579	41.4
	서천발전본부	5,380	84.8
한국서부발전(주)	태안발전본부	3,500	59.0
한국남부발전(주)	하동발전본부	4,816	52.2
한국동서발전(주)	당진발전본부	2,564	28.4
	호남발전본부	4,113	87.1
	동해발전본부	806	38.1

보유하고 있고, 매립량도 여유가 있는 발전사가 있는 반면 한국남동발전(주)의 삼천포발전본부 및 영동발전본부와 같이 매립율 97% 이상 육박하는 발전사들도 있다. 따라서 일부 발전소에서 매립장 용량이 한계에 부딪혀 최악의 경우 전기 생산을 중단할 수 밖에 없는 위기에 처할 수도 있는 상황에 놓이게 되어, 석탄회 재활용이 시급한 당면 과제로 떠오르고 있다. 석탄회의 매립량 및 매립율은 표 1에 나타내었다.

2.3 동결융해 특징

일반적으로 흙이 동결되면, 토립자는 점착력을 발휘하지 못하고 동결 중에 발생하는 부의 간극수압 때문에, 토립자의 구조변화와 빙정분란 현상이 발생된다. 동결·융해 작용은 토립자를 분쇄시키고 투수성을 감소시키는 한편 토립자를 크게 교란시킨다. 세립토가 동결되었다가 다시 융해되면 토립자의 이합 및 균열이 발생되어 투수성이 증가되고, 특히 이 균열은 흐름의 저항성을 감소시키고, 이를 위한 통로 역할을 한다. 이와 같이 흙의 동결·융해 작용은 흙의 강도, 투수성 및 변형 특성에 큰 영향을 미치고 있다. 예컨대 흙의 동결·융해 작용은 흙의 전단강도 감소로 연성 및 강성포장의 지지력을 감소시키고, 흙땀, 제방, 방조제, 성토 및 절토 사면의 안정성의 감소는 물론 옹벽이나 시트판의 벽체에 작용하는 수평 토압을 증가시킨다(최상용, 1996).

3. 시험재료 및 방법

3.1 시험재료

3.1.1 석탄회

본 연구에서 사용된 매립회는 영흥발전본부 매립장에 매립되어 있는 석탄회를 사용하였고, 비회의 경우 재활용되는

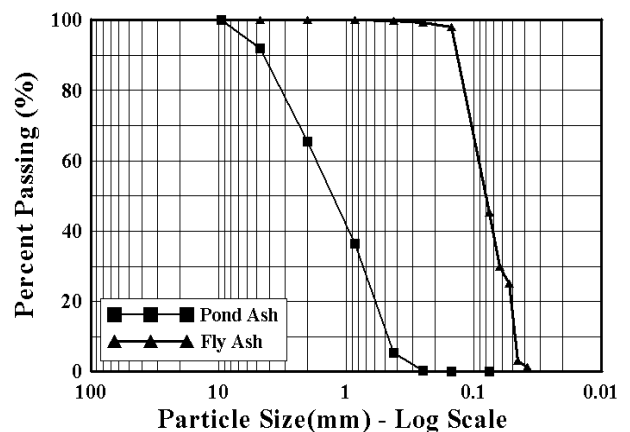


그림 1. 매립회와 비회의 입도분포

표 2. 석탄회의 기본 물성시험 결과

항목 종류	비중 Gs	흡수 종류	Atterberg Limit		입도분포			
			WL (%)	Ip (%)	No.4 통과량 (%)	No.200 통과량 (%)	Cu	Cg
비회	2.23	SM	N.P	N.P	100.0	41.0	6.1	1.2
매립회	2.32	SW	N.P	N.P	99.47	2.96	8.0	2.0

표 3. 매립회와 비회의 화학적 구성요소

Chemical Compositions (%)					
성분	매립회	비회	성분	매립회	비회
SiO ₂	50.6	52.8	Al ₂ O ₃	24.7	22.7
Fe ₂ O ₃	11.5	9.28	CaO	5.91	7.43
K ₂ O	1.75	2.33	TiO ₂	1.72	1.55
MgO	0.85	1.17	Na ₂ O	0.37	0.57

정제회가 아닌 잔사회를 사용하여 석탄회의 재활용을 극대화하는 것에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 비중은 비회의 경우 2.23, 매립회의 경우 2.32로 보통 흙보다는 다소 작은 값을 갖고 있다. 통일분류법에 의하면 비회는 SM, 매립회는 SW로 분류되며, Atterberg 한계시험 결과 두 시료 모두 비소성으로 나타났다. 연구에 사용된 석탄회의 입도분포곡선 및 자세한 물리적·화학적 특성은 그림 1과 표 2, 3에 각각 나타내었다.

3.1.2 시멘트

본 연구에 사용된 시멘트는 국내에서 많이 사용되는 일반적인 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 품질 시험결과는 표 4과 같다.

3.2 배합비

배합비의 경우는 석탄회를 활용한 저장도 고유동화재의 일축압축강도 및 플로우 특성에 관한 연구를 진행한 공진영 등(2010)의 논문을 참고하여 배합비를 산정하였으며, 경제성을 고려하여 시멘트함량을 최소화하기 위해 시멘트량의 범위를 전체중량 대비 약 10%이하로 선정하였다. 따라서 시멘트 첨가율(약 4.9%, 6.6%, 8.2%, 9.7%)를 고려하여 총 4가지 경우에 대해 공시체를 제작하여 시험하였으며, 배합

표 4. 시멘트의 특성

Fineness (m ² /kg)	Specific Gravity	Stability (%)	Compressive Strength (kPa)		
			3days	7days	28days
348.8	3.15	0.08	21,966	30,204	39,618
initial setting time (min)			231		
final setting time (min)			407		

표 5. 저장도 고유동화재 배합비

Mixture	Cement Ratio 4.9%	Cement Ratio 6.6%	Cement Ratio 8.2%	Cement Ratio 9.7%
매립회(kg)	7.00	7.00	7.00	7.00
비회(kg)	3.00	3.00	3.00	3.00
물(kg)	4.90	4.90	4.90	4.90
시멘트(kg)	0.77	1.05	1.33	1.61

비는 표 5에 나타내었다.

3.3 시험방법

3.3.1 동결융해시험

동결융해시험 시험방법은 ASTM D 560(2003)에 준하여 실시하였다. 공시체는 배합비에 따라 저장도 고유동화재를 배합하여 믹싱한 후 다짐 없이 슬러리 상태로 ϕ 50mm×100mm 크기의 공시체를 배합비별로 각각 5개씩 제작하였다. 완성된 공시체는 상온 16~27°C에서 72시간 동안 건조양생을 실시한 후 탈형하여 22±2°C의 수조에서 7일간 수중양생을 실시하였다. 항온항습도 캐비닛에서 -19°C로 20시간 동안 동결시키고 21°C에서 20시간 동안 융해시켰다(그림 2). 공시체를 7일간 수중 양생 시킨 후 매 cycle(48시간/cycle)마다 1.4kg의 힘으로 전 표면을 철슬로 2회씩 긁고, 12회 반복하여 cycle 변화에 따른 공시체의 중량의 감소 정도를 측정하였다.

3.3.2 일축압축강도시험

일축압축강도 시험방법은 ASTM D 4832(2002)에 준하여 실시하였다. 공시체는 동결융해 시험과 동일한 방법으로 배합비별로 각각 33개씩 (동결융해 시험용 15개, 수중양생 18개) 제작하였다. 완성된 공시체는 상온 16~27°C에서 72시간 동안 건조양생을 실시한 후 탈형하여 22±2°C의 수조에서 수중양생을 실시하였으며, 수중양생된 공시체 재령별(7일, 9일, 13일, 19일, 25일, 31일)과 동결융해시험용(1cycle, 3cycle, 6cycle, 9cycle, 12cycle)로 3개 공시체의 일축압축강도를 측정하여 평균값을 구하였다. 시험시 재하하중 3ton용량의 변

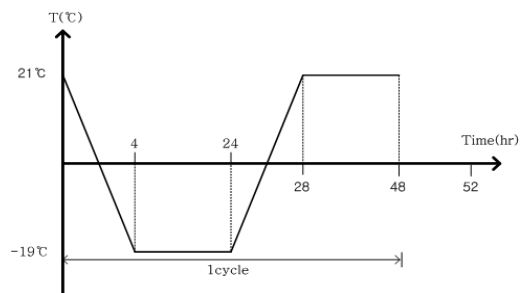


그림 2. 동결융해시 시간과 온도와의 관계

표 6. 저강도 고유동화재의 일축압축강도 적용사례(공진영 등, 2010)

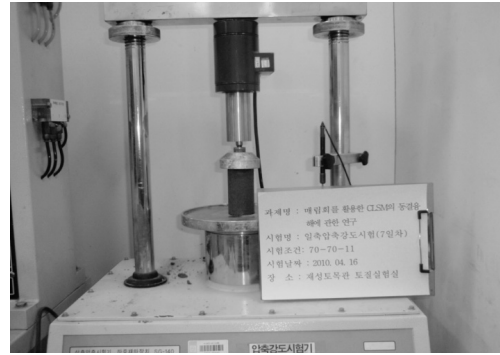
목록	일축압축강도
ACI Committee 229(1994)	· 2,068kPa(300psi) 이하
ASTM(2002)	· 인력굴착시 : 345kPa · 기계굴착시 : 1,380kPa
TRB(2008)	· 350~1,000kPa(51~145psi)
Tarun R. Naik, Rudolph N. Kraus(2004)	· 굴착시 : 1,034kPa(150psi) 이하 · 비굴착시 : 1,034kPa(150psi) 이상

위제어 방식의 만능재하시험기를 이용하였으며, 재하속도는 1mm/min로 실시하였다. 또한 본 연구에서 일축압축강도기준은 표 6을 참고하여 동결융해를 받은 후에도 재굴착이 가능하며 소정의 강도가 발현 될 수 있는 범위를 고려하여 1MPa로 선정하였다. 그림 3(a), 3(b)는 일축압축시험전경을 보여주고 있다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 동결융해반복에 따른 일축압축강도의 변화

수중양생 7일 후 동결융해 cycle수의 증가에 따른 압축강

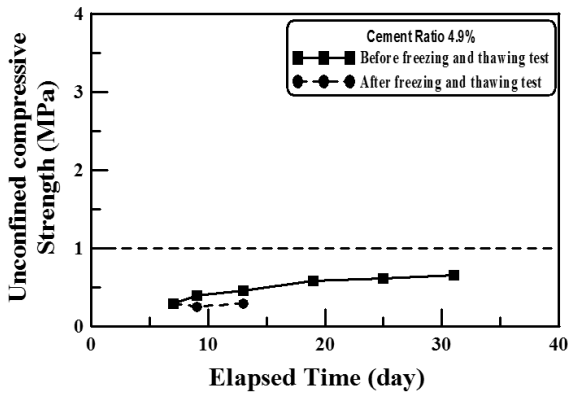


(a) 일축압축시험 전

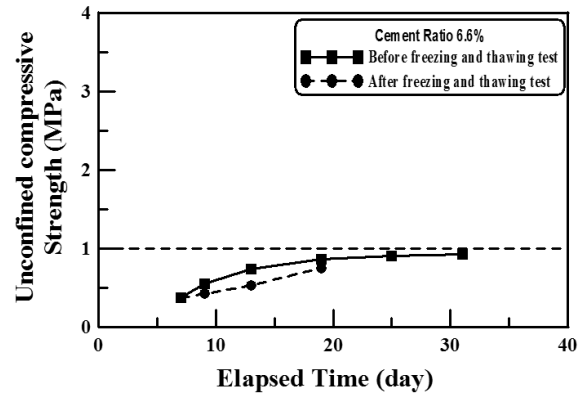


(b) 일축압축시험 후

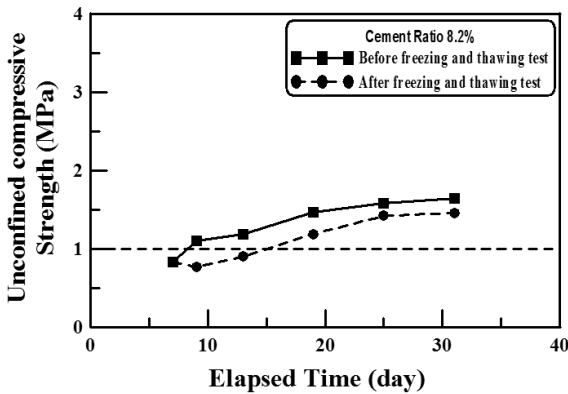
그림 3. 일축압축시험 전·후 전경



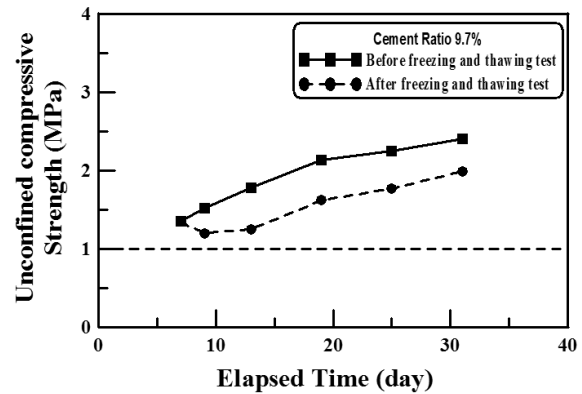
(a) 시멘트 첨가율 4.9%



(b) 시멘트 첨가율 6.6%



(c) 시멘트 첨가율 8.2%



(d) 시멘트 첨가율 9.7%

그림 4. 동결융해 반복에 따른 재령별 일축압축강도 변화

도의 변화를 시멘트 첨가율별로 그림 4에 나타내었다. 전체 중량 대비 시멘트 첨가율 4.9% 경우, 수중양생 재령 9일차 강도가 재령 7일차보다 약 34%가 증가한 반면 동결융해 1cycle의 후 강도는 재령 7일차보다 13%가 저하되었고, 5cycle 이후에는 공시체의 손실량이 커서 일축압축강도시험이 불가능하였다. 시멘트 첨가율 6.6%의 경우 재령 9일차 강도가 재령 7일차보다 약 75%가 증가한 반면, 동결융해 1cycle 후 강도는 재령 7일차보다 13%가 증가되었다. 또한 8cycle 이후에는 공시체의 손실량이 커서 일축압축강도시험이 불가능하였다. 시멘트 첨가율 8.2%, 9.7%의 경우, 동결융해 1cycle~12cycle 반복 후 압축강도 모두 측정이 가능 하였으며, 동결융해 1cycle을 제외한 다른 모든 cycle에서 압축강도가 증가하는 경향을 보였다. 따라서 앞에서 제시한 일축압축강도기준(1MPa)에 적합한 시멘트 첨가율은 6.6~8.2%로 판단된다. 시멘트 첨가율이 6.6~8.2%일 때 재굴착이 용이한 저강도 고유동화재의 강도특성을 지니며, 동결융해가 예상이 되는 지역에서 매립회를 활용한 저강도 고유동화재 사용시 시멘트 첨가율이 6.6~8.2%일 때 가장 이상적일 것으로 판단된다. 또한 재령 31일 수중양생 공시체의 압축강도가 재령 7일차 압축강도 보다 0.8MPa 증가한 반면 동결융해 12cycle 차 압축강도는 재령 7일차 압축강도보다 0.5MPa 증가하였다. 이는 동결융해현상이 시멘트와 석탄회의 포졸란 반응을 지연시키고 부착강도를 저하시킨 것으로 판단된다. 또한, 시멘트 첨가율 8.2% 와 9.7% 를 비교해 볼 때 일축압축강도는 시멘트 첨가율 9.7% 가 8.2% 일 때 보다 다소 높았지만 동결융해에 의한 일축압축강도 감소량 또한 더 높은 것으로 나타났다. 이는 시멘트 첨가량이 높을수록 강도는 높아지지만 동결융해에 대한 강도 감소량도 증가하는 것으로 나타났다.

결과들을 종합해 볼 때 동결융해 cycle 반복수의 증가에 따른 압축강도의 증가현상은 석탄회와 시멘트의 포졸란반응으로 인한 강도증가가 동결융해에 의한 강도 감소보다 컸

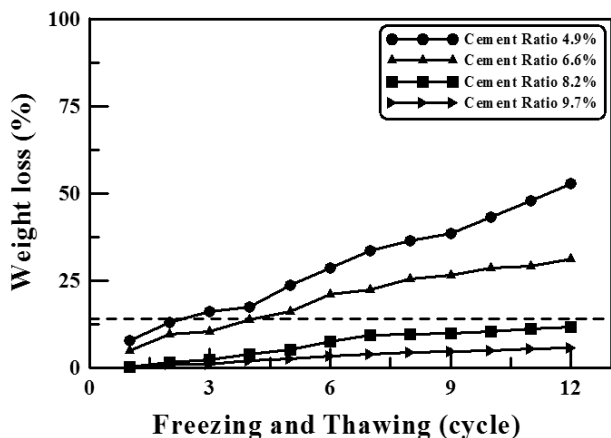


그림 5. 동결융해 반복에 따른 손실율 변화

기 때문인 것으로 판단된다. 또한 동상의 피해가 적은 동결융해 초기 cycle에서 압축강도가 증가하지 못한 원인으로는, 동결기간 중 시멘트의 양생온도가 영하로 떨어짐으로써 시멘트의 경화가 거의 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다.

4.2 동결융해반복에 따른 손실율의 변화

그림 5는 동결융해 cycle 수의 반복에 따른 시멘트 첨가율별로 누적중량손실율을 나타내었다. 그림 6은 동결융해 12회 반복 후 공시체를 보여주고 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이 동결융해 cycle 수의 증가에 따라 손실률은 증가하였으나 시멘트 첨가량이 적을수록 크게 증가하는 것으로 나타났다. 시멘트 첨가량이 4.9%일 경우 4cycle, 6.6%일 경우 5cycle 이후에 손실률이 크게 증가함을 알 수 있다. 동결융해 초기 1cycle에서의 손실율이 큰 이유는 아직 7일 수중양생에 의한 강도의 발현이 그리 크지 않았기 때문이며, 인위적으로 7일 양생강도를 높이거나 양생일수를 증가시킨다면 동결융해에 대한 저항성도 함께 높아져 손실율의 감소효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 표 7은 동결·융해를 받았을 때 흙 종류에 따른 손실률기준을 나타낸 것이다. 시험에서 사용된 시료 중 시멘트 첨가량 8.2%이상 첨가하였을 때 중량누적손실율이 14%이하로 나타나 PCA의 규정을 만족하였다. 따라서 매립회를 활용한 저강도 고유동화재는 시멘트 첨가율이 8.2%이상일 때 동결융해에 대한 내구성을 만족함을 알 수 있었다.

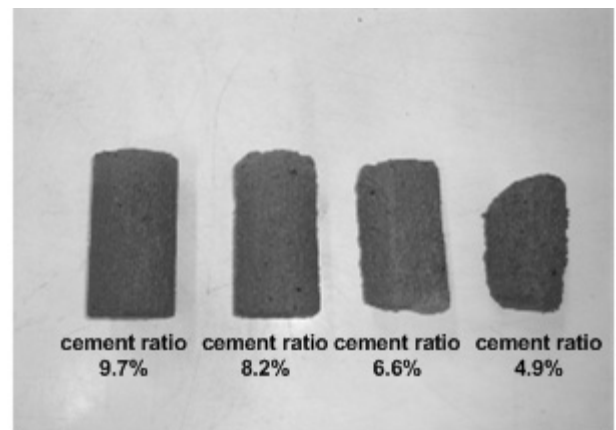


그림 6. 동결융해 12회 반복 후 공시체

표 7. AASHTO 내구성 시험 기준(박흥규 등, 1999)

AASHTO 흙 분류	동결융해 12회 반복후의 손실량
A-1-a, A-1-b, A-3, A-4, A-2-5	≤ 14%
A-2-6, A-2-7, A-4, A-5	≤ 10%
A-6, A-7-5, A-7-6	≤ 17%

5. 결 론

본 연구에서는 매립회를 대량 유효 활용하고자 개발한 매립회의 저강도 고유동화재 동결융해에 대한 연구를 진행하였으며, 그 결과는 종합적으로 요약·정리하면 다음과 같다.

- (1) 동결융해 cycle 반복수의 증가에 따른 압축강도의 증가 현상은 석탄회와 시멘트의 포졸란반응으로 인한 강도 증가가 동결융해에 의한 강도 감소보다 컸기 때문인 것으로 판단된다.
- (2) 동상의 피해가 적은 동결융해 초기 cycle에서 압축강도가 증가하지 못한 원인으로서는, 동결기간 중 시멘트의 양생온도가 영하로 떨어짐으로써 시멘트의 경화가 거의 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다.
- (3) 매립회를 사용한 저강도 고유동화재에 시멘트의 첨가율이 증가할수록 동결융해 cycle 반복 후 압축강도는 초기 cycle을 제외한 다른 cycle에서 선형적으로 증가하였지만, 9.7%이상의 시멘트를 첨가하였을 경우 동결융해 반복에 따른 강도감소율은 증가하였다.
- (4) 손실을 시험에서 7일강도가 작은 공시체일수록 동결융해 cycle반복횟수가 커짐에 따라 손실율이 증가하였으나 시멘트 첨가량이 많은 즉, 7일 양생강도가 큰 공시체는 동결융해 cycle반복에 따른 손실율은 감소하였다.
- (5) 매립회를 사용한 저강도 고유동화재의 동결융해에 대한 AASHTO 내구성 시험기준(손실율)에 만족하는 시멘트의 첨가율은 8.2%이상이었으며, 동결융해를 받는 지역에 구조물 뒷채움재나 매립재로 사용 가능 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20091020100060, 석탄회를 활용한 경량 유동성채움재(Flowable Fills) 제조공정 개발).

참 고 문 헌

1. 공진영, 강형남, 천병식(2010), 석탄회를 활용한 저강도 고유동화재의 일축압축강도 및 플로우 특성, *한국지반공학회는논문집*, Vol. 26, No. 1, pp. 75~83.
2. 박재현, 이관호, 조재운, 김석남(2004), 현장발생토 CLSM을 이용한 지하매설관의 변형, *한국지반공학회는논문집*, Vol. 20, No. 3, pp. 129~139.
3. 박흥규, 김남옥, 최문호(1999), 석탄폐석의 도로 성토재로서의 활용에 관한 연구, *대한토목학회논문집*, Vol. 19, No. III-6, pp. 1143~1149.
4. 원종필, 이용수(2001), Bottom Ash를 혼합한 저강도 고유동 충전재의 특성, *콘크리트학회논문집*, Vol. 13, No. 3, pp. 294~300.
5. 이관호, 송창섭(2006), 현장발생토사 재활용 유동성채움재를 이용한 지하매설관의 거동평가, *한국도로학회논문집*, Vol. 8, No. 2, pp. 1~12.
6. 이관호, 김주득, 현성철, 송용선, 이병식(2007), 해양준설토를 CLSM을 이용한 지하매설관 변형특성, *한국방재학회논문집*, Vol. 7, No. 5, pp. 129~137.
7. 임유진, 서창범(2009), 화강암 풍화토를 이용한 CLSM의 공학적 특성평가, *한국방재학회논문집*, Vol. 9, No. 3, pp. 19~26.
8. 조재운, 이관호, 이인모(2000), 유동특성을 이용한 폐주물사 혼합물의 옹벽뒷채움재 연구, *한국지반공학회는논문집*, Vol. 16, No. 4, pp. 17~30.
9. 최상용(1996), *화강암 풍화토의 물리·공학적 성질 및 동결·융해 특성에 관한 연구*, 석사학위논문, 강원대학교, pp. 1~12.
10. 환경부(2008), *제4 차자원재활용기본계획*, pp. 100~102.
11. ACI Committee 229 (1994), *Controlled Low Strength Materials (CLSM)*, American Concrete Institute, 229R-2, pp. 1~12.
12. ASTM(2002), *Standard Test Method for Preparation and Testing of Controlled Low Strength Material (CLSM) Test Cylinders*, ASTM D 4832, American Society for Testing Materials, pp. 1~7.
13. ASTM(2003), *Standard Test Method for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures*, ASTM D 560, American Society for Testing Materials, pp. 1~7.
14. Tarun R. Naik, Rudolph N. Kraus(2004), *Properties of Flowable Self-Compacting Slurry Using Quarry By-Products and Pondered CCPs*, Publication SP, pp. 523~538.
15. TRB(2008), *Development of a Recommended Practice for Use of Controlled Low-Strength Material in Highway Construction*, NCHRP Report 597, U.S. Transportation Research Board, pp. 3~59.

(접수일: 2010. 5. 24 심사일: 2010. 6. 1 심사완료일: 2010. 6. 17)