석탄회 및 폐타이어 재료의 장기 압축 침하 거동 특성

Long-term Compressible Settlement of Coal Ash and Tire Shred as Fill Materials

이성진[1], Sung-Jin Lee, 신민호[2], Min-ho Shin, 황선근[3], Seon-Keun Hwang, 이용식[1], Yong-Sik Lee

[1] 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원, Senior Researcher, KRRI
[2] 한국철도기술연구원 철도구조연구실 수석연구원, Principal Researcher, KRRI
[3] 한국철도기술연구원 철도구조연구실 책임연구원, Chief Researcher, KRRI
[4] 한국철도기술연구원 철도구조연구실 연구원, Researcher, KRRI

SYNOPSIS : Based on the proven feasibility of bottom ash and tire shred-soil mixtures as lightweight fill materials, tire shred-bottom ash mixtures were suggested as a new lightweight fill material to replace the conventional construction material with bottom ash. Therefore, we carried out the laboratory test, field compaction test and performance test of large scale embankment in order to evaluate their suitability for the use of lightweight fill materials in the before studies. We could verified that the ash, tire-shred and the mixture are able to be the useful materials as light fill materials. In this study, we estimated the long-term compressible settlements for 6 materials such as TA(Tire-Bottom Ash mixture), TBA(Tire-Bottom Ash<5mm) mixture, TWS(Tire-Weathered Soil mixture), Bottom Ash, Bottom Ash(<5mm), Weathered soils.

Keywords : long-term compressible settlement, bottom ash, tire-shred, light fill materials

1. 서 론

현재 천연골재 채취로 인한 자연훼손방지, 토취장확보문제 해결, 천연골재의 수급난 해결 등을 위해 자원순환형 지반재료 활용의 필요성이 대두되고 있다. 특히 폐타이어와 석탄회는 그 발생량의 급증에 따라 야적장 및 회사장 확보에 어려움을 겪고 있어 이들의 활용을 통해 천연골재의 대체 효과와 산업부산물의 재활용 효과를 기대할 수 있을 것이다.

석탄회의 경우, 국내에서 2005년 말 현재 약 600만톤이 발생되고 있다. 이 중 재활용량은 약 350만톤으로 재활용율이 약 58%정도에 머무르고 있으며, 대부분 플라이애쉬의 재활용으로써 석탄회발생량 중 약 15-25%를 차지하는 저회(Bottom Ash)는 대부분 매립되고 있다. 그러나 이러한 석탄회를 매립하기 위한 회처리장의 용량이 절대 부족한 상황으로 대부분의 화력발전소는 새로운 회처리장 건설과 관리에 많은 비용을 지불하고 있으며, 자연환경 훼손에 따른 환경민원이 발생되고 있다. 또한 당진, 태안, 보령, 하동, 영흥 등에 추진 중인 석탄화력발전소의 건설로 인해 2010년에는 약 800만톤의 석탄회가 발생할 것으로 예상되고 있으나 제철설비 증가에 따라 시멘트를 50%까지 대체할 수 있는 Slag Powder가 증가되고 건설경기 침체로 수요가 감소하는 등 석탄회의 수요는 지속적으로 감소 추세에 있다. 이러한 현상은 경제성장과 비례하여 미국, 일본, 영국, 독일 등 선진국에서도 확인되고 있는 현상이며, 이들 나라에서도 석탄회의 재활용을 위해 다양한 노력이 이루어지고 있다.

폐타이어의 경우는 전 세계적으로 매년 수십억 개에 달하는 양이 발생되고 있으며, 미국의 경우 매년 5천만개가 발생한다고 보고되고 있다(Garga & O'Shaughnessy, 2000). 국내에도 2007 환경통계연감(환

경부, 2007)의 폐기물 재활용현황에 따르면 지속적인 증가추세에 있으며 2006년 현재 23,689,000개에 이르고, 이러한 증가 추세는 계속될 전망이다. 폐타이어의 회수비율은 약 40-80%이며 전량 수거되고 있지 못한 상황이다. 폐타이어는 야외 적치 등으로 미관을 해칠 뿐 아니라 각종 병원체의 전달 매개체인 동물의 서식지 역할을 하게 되어 여러 가지로 사회적 문제를 야기하고 있다(윤여원, 2004).

최근에는 폐타이어의 발생량과 함께 재활용량의 증가도 계속되고 있다. 그러나 현재 재활용의 약 70%가 시멘트 킬른에서 소각원료로 활용되면서 석탄이나 갈탄을 연료로 활용한 시멘트에 비해 납, 아연, 카드뮴 등의 중금속이 수백 배 포함되어 건설 후 심각한 2차 환경문제의 야기가 지적되고 있다. 따라서 보다 환경오염을 줄일 수 있고 대량으로 활용할 수 있는 분야의 개발과 이에 대한 연구가 필요한 실정이다.

석탄회와 폐타이어는 그 경량의 특성을 이용하여 연약지반의 경량성토재료로 활용하는 것이 제안되고 있다. 따라서 앞선 연구를 통해 경량 폐기물의 성토재로서의 활용과 합리적인 설계 및 시공을 위해서 이들 재료의 입도분포, 비중, 상대다짐밀도, 투수시험 등 기본물성 및 대형삼축압축시험 등 실내 실험을 통해 지반공학적 물성과 환경적 유해성 평가를 위한 실험으로 성토재료로서의 적합성을 검증한 바 있다(이성진 등, 2007, 2008). 또한 실제 현장에서의 혼합 및 다짐 특성과 지지력 특성 등을 평가하였고 실내 대형 토조에서 실대형 모형 성토체를 조성하여 성토구조물로서의 거동을 기존 성토재료와 비교하여 기존 성토재를 대체할 수 있는 재료적 특성을 확보하고 있는 것을 확인할 수 있었다(이성진 등 2008, 2009). 이어서 본 연구에서는 폐타이어와 석탄회 및 풍화토를 재료로 하여 장기적인 재료적 압축침하특성을 검토하고 추가적으로 온도변화에 따른 침하특성을 비교하여 성토재로서의 활용을 위한 검증을 수행하였다.

2. 실험 개요

석탄회의 경우 성토재로 활용하기 위한 연구가 국내에서도 수행된바 있다(건설기술연구원 1992, 고용일 1992). 이때 사용된 재료들은 대체로 비회(Fly Ash)를 중심으로 성능 개선을 위한 시멘트와 석회 또는 저회(Bottom Ash)의 혼합 비율에 따른 역학적 특성에 대한 연구 결과를 제시하고 있다. 이들의 연구에서는 석탄회가 동결융해에 민감한 입도분포를 갖고 있고 동결융해에 따른 일축압축시험 결과 안정처리되지 않은 석탄회의 강도감소율이 약 70%에 이르는 것으로 보고되고 있다. 반면 외국의 여러 종류의 석탄회에 대한 동결융해 실험 결과에서는 유사한 입도분포 석탄회들의 동결융해 특성은 매우 다양하게 나타나고 있기 때문에 동결융해가 우려되는 지역에서는 활용대상의 석탄회에 대한 동결융해 특성평가를 수행 후 설계에 반영되어야 할 것으로 인식되고 있다. 또한 석탄회는 무연탄과 유연탄, 비회와 저회, 석탄의 원산지 등에 따라 그 특성이 크게 다를 것으로 예상되기 때문에 대상 지반구조물의 재료로써 중요한 거동 인자에 대해서는 그 평가가 중요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 재생혼합재료가 주요 대상인 성토구조물의 장기적인 침하에 미치는 경향을 실내에서 분석 비교하고, 동결융해에 따른 1차원적 침하특성과 함수비 변화에 따른 침하 경향 등을 비교하기 위해서 다음과 같은 실험을 수행하였다.

2.1 실험 대상 및 목적

본 연구는 폐기물을 활용하여 성토재료로 활용하는 것이므로 이때 발생될 수 있는 침하의 경향을 확인하는 것이 요구된다. 이를 위해 지난 연구를 통해 TBA층과 WS층을 포함하는 실대형의 성토구조물을 조성하여 정적 동적 하중에 대해 발생되는 침하정도를 비교하여 1m의 복토 조건 하에서 그 차이가 매우 미미한 것을 확인할 수 있었다. 하지만 성토구조물의 경우 장기간 활용되어야하기 때문에 온도 및 함수비 등의 변화 조건을 포함하여 장기적인 침하경향을 확인하고 이에 대비하는 것이 필요할 것이다.

본 실험에서는 폐타이어 및 석탄회 등 성토재료들의 장기압축침하거동을 실내에서 확인, 비교할 수 있도록 다음과 같이 6종류의 재료를 실험에 이용하였다(표 1, 그림 1).

석탄회는 태안화력발전소에 매립되어 있는 저회를 활용하였으며, 두 종류로 저회를 구분하여 비교하였다. 먼저 매립저회(RBA)는 매립되어 있는 저회를 스크린작업 없이 이용한 재료이고, BA(<5mm)는 5mm 이하로 정제한 저회이며, 이들의 입도분포는 다음 그림 2와 같다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 매립저회는 정제된 저회에 비해 보다 큰 입자들을 많이 함유하고 있었다. 석탄회는 무연탄과 유연탄 또는 석탄의 원산지 등에 따라 그 입도에 차이를 보일 수 있으므로, 본 연구에서는 입도의 차이를 주었을 때 발생될 수 있는 압축침하 정도를 시험에서 확인하고자 하였다.

표 1 실험 대상 재료 설명 및 단위중량

	Material	단위중량(t/m^3)
TRBA	30mm이하의 폐타이어와 매립저회 혼합재료	1.19
TBA	30mm이하의 폐타이어와 5mm이하의 정제저회 혼합재료	1.19
TWS	30mm이하의 폐타이어와 풍화토 혼합재료	1.49
RBA	매립저회(Reclaimed Bottom Ash)	1.35
BA(<5mm)	5mm이하의 정제저회	1.35
WS	풍화토	1.88

압축침하 경향의 정확한 정량적 평가를 위해서는 실제 현장에서 활용되는 실제 입도의 재료를 활용하여 실험하는 것이 필요하지만, 이에 앞서 실내에서 소형의 실험으로 그 경향을 파악하기 위해 폐타이어의 경우 토조의 직경(150mm)을 고려하여 약 30mm 이하로 잘라 실험에 이용하였다. 본 실험에서도 앞선 연구와 같이 TRBA, TBA, TWS 시료들은 폐타이어 조각과 저회 및 풍화토를 각각 1:1의 부피로 혼합하여 실험을 수행하였다.

(a) TRBA (b) TBA (c) TWS

(d) RBA (e) BA(<5mm) (f) WS

그림 1 실험 대상 재료

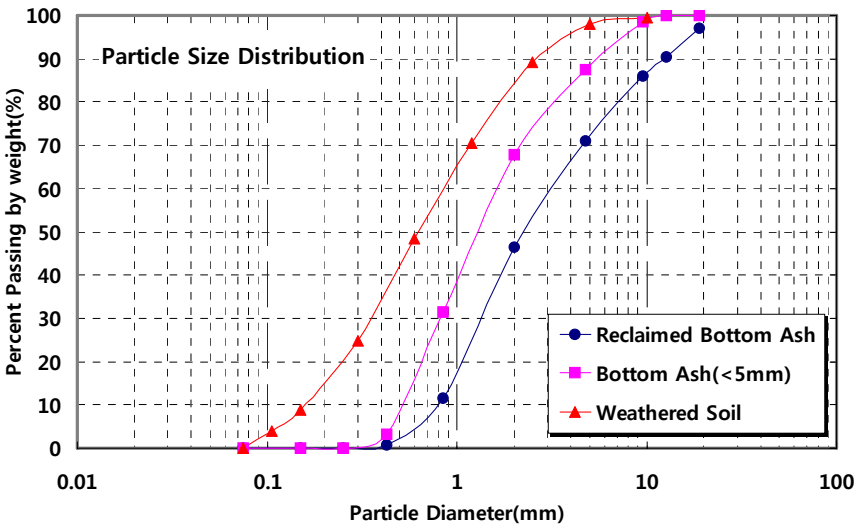

그림 2 재료의 입도분포

실험에서 같은 조건(하중, 시간, 온도 및 함수비 변화) 하에서 RBA, BA, WS재료들의 장기압축침하거동과 함께 폐타이어를 혼합한 시료들(TRBA, TBA, TWS)의 거동을 동시에 평가해볼 수 있었다.

2.2 실험 장비 및 과정

본 실험에서는 폐타이어 및 석탄회 등 성토재료들의 압축침하거동을 장기간동안 실내에서 확인, 비교할 수 있도록 다음 그림과 같이 사하중을 재하하였다.

(a) (b) (c)

그림 3 1차원 장기압축실험 장비

실험은 직경 150mm의 원통형 셀(그림 3(a))에 재료를 표 1의 밀도로 다져서 조성한 후 그림 3(b)와 같은 재하판을 덮고 그 위에 그림 3(c)와 같이 사각하중판을 얹어 사하중을 재하하여 장기간 압축침하거동을 계측하였다. 시료가 받는 응력은 다음 표 2와 같으며, 본 실험에서는 약 100(kPa)의 수직응력상태에서 장기거동을 계측하였다. 계측은 그림 3(c)와 같이 4지점에서의 침하량을 평균하여 시료의 압축침하량을 산정하였다.

표 2 장기압축시험의 하중조건

하중 조건	수직응력(kPa)	비고
Steel Plate + 재하판	13.6(kPa)	Steel Plate : 1.78(kg) 재하판 : 22.18(kg) 하중판 1개 : 51.26(kg)
Steel Plate + 재하판 + 하중판 1	40.5(kPa)	
Steel Plate + 재하판 + 하중판 2	71.2(kPa)	
Steel Plate + 재하판 + 하중판 3	100(kPa)	

3. 실험 결과

6개의 재료들을 대상으로 약 2달동안의 장기 압축침하거동을 계측한 결과는 다음 그림 4와 같다.

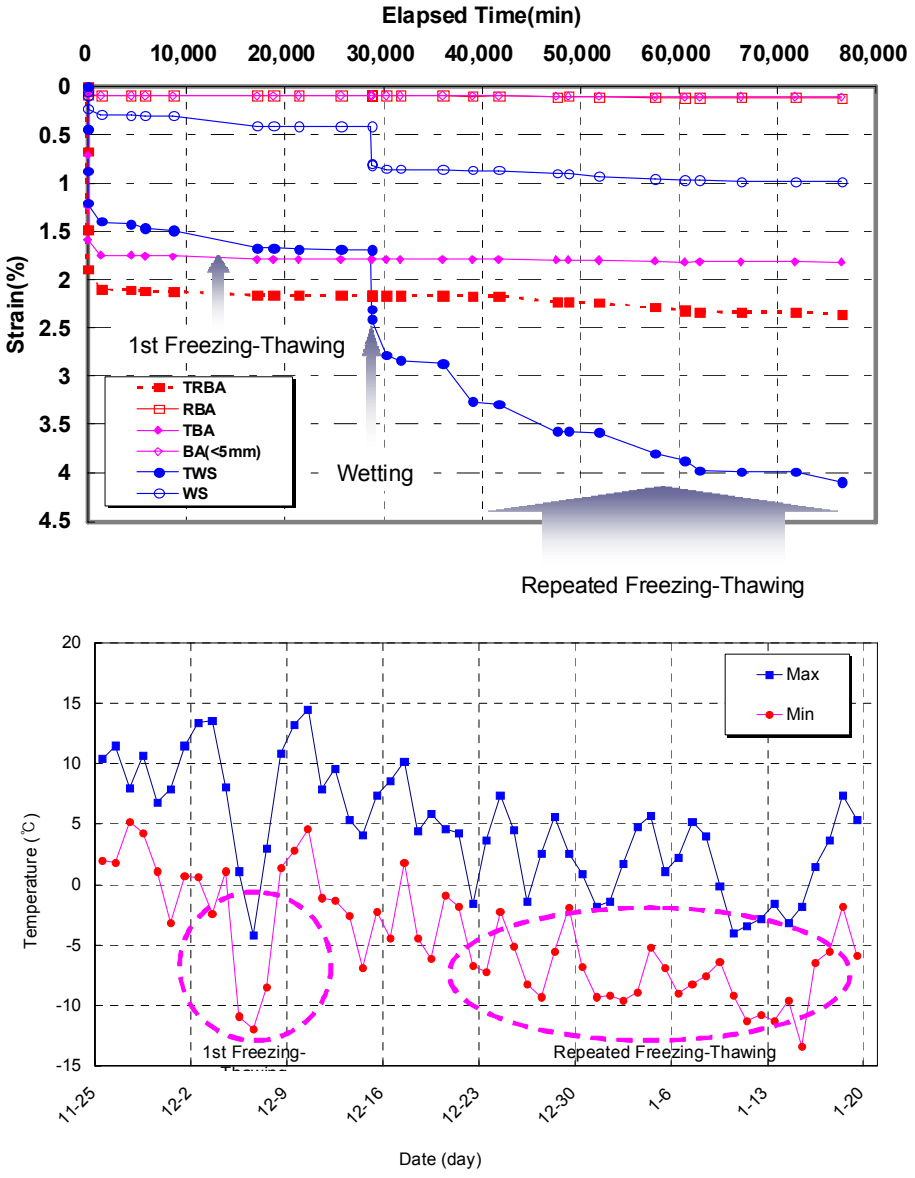

그림 4 장기 침하 및 온도변화 추이

전체적으로 하중에 의한 즉시침하는 재료의 특성상 압축성이 큰 타이어가 포함된 재료들(TRBA, TBA, TWS)에서 크게 발생되었다. 그 중에서도 즉시 침하는 TRBA, TBA가 풍화토가 포함된 TWS에 비해 크게 발생되었으나 동결융해에 따른 침하, Wetting에 따른 침하, 동결융해의 반복과 시간에 따른 침하 경향은 석탄회가 포함된 재료들(TRBA, TBA)에서 현격히 적게 발생되는 것을 확인할 수 있었다.

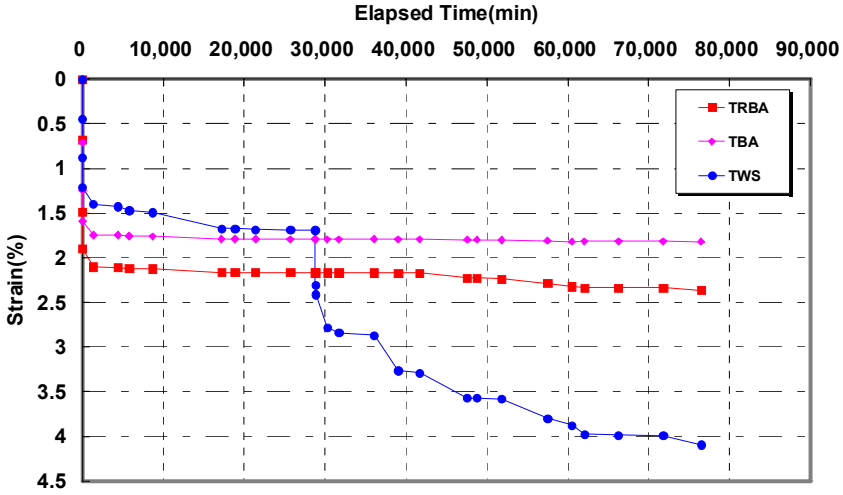

그림 5 폐타이어가 포함된 재료들의 장기 침하 특성

이러한 경향은 타이어가 포함되지 않은 재료들에서도 확인된다. 즉 RBA, BA의 재료들도 아래 그림 6과 같이 동결융해가 반복됨에 따라 침하가 발생되고는 있으나 매우 작은 변형율 범위에서 발생되고 있으며, 일반적인 성토재료인 WS에 비해 즉시침하 및 동결융해에 따른 침하, Wetting에 따른 침하, 동결융해의 반복과 시간에 따른 침하에서 모두 상대적으로 작게 발생하는 것을 확인할 수 있었다(그림 7). 특히 풍화토 계열의 재료들(TWS, WS)에서는 함수비 증가에 의해 입자구조의 붕괴나 재배열로 간극 부피가 감소되는 Wetting Collapse 현상이 매우 크게 발생되는 반면 석탄회 계열의 재료들(TRBA, TBA, RBA, BA)에서는 거의 관측되지 않았다(그림 4).

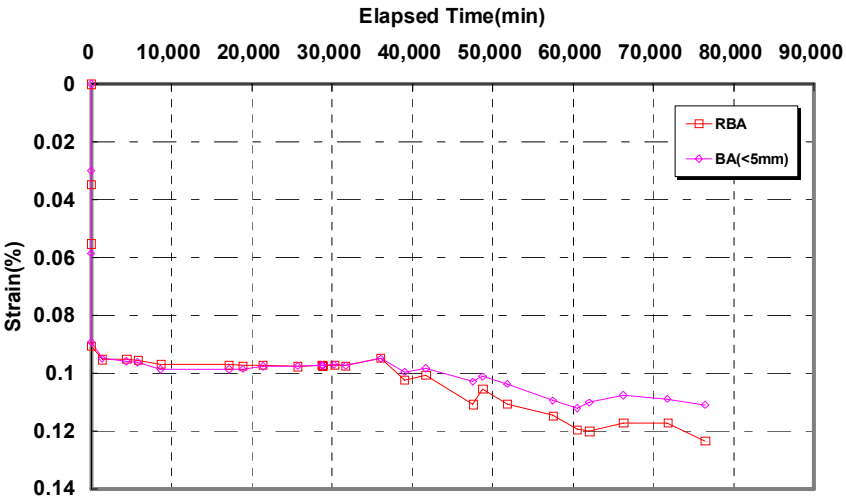

그림 6 석탄회 입도별 장기 침하특성

앞서도 언급된 바와 같이 석탄회는 동결 융해의 반복 과정에서 강도가 감소되는 것으로 밝혀진 바가 있으나 본 연구에서 일정한 구속압(수직응력) 상태에서 동결 융해가 반복되는 상태에서 1차원 압축침하 부분에서는 강도의 감소 우려와는 관계없이 일반 성토재료인 풍화토에 비해 함수비증가, 동결융해반복, 하중에 의한 즉시침하 등 모든 부분에서 작게 발생되는 것으로 나타났다. 따라서 성토재로 활용하였을 경우에 성토재 대비 침하문제에서는 안정적 성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다. 물론 전단강도가 요구되는 사면에 적용될 경우에는 강도감소를 고려하여 적용되어야할 것이지만, 본 재료는 일정 토피(약 1m)를 기본으로 사용하도록 제안되고 있기 때문에 대기 온도와 함께 내부의 온도 변화에 대한 장기적인 모니터링으로 향후 동결융해에 따른 강도감소를 고려할 수 있는 기준의 마련이 필요할 것으로 판단된다. 그리고 실제 현장에 적용될 경우에는 사용되는 재료의 입도 및 재료원산지별로 설계에 필요한 물성들 즉 전단강도 및 장기 침하특성에 대한 검증 후 적용될 필요가 있을 것이다.

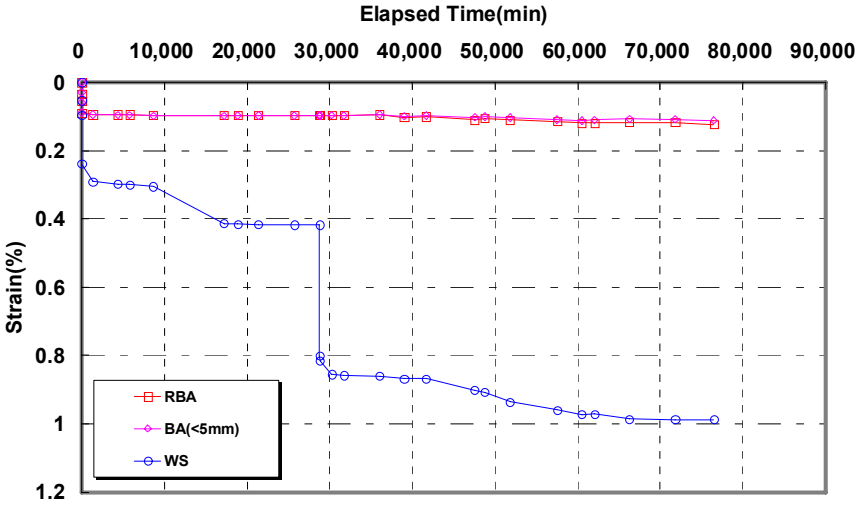

그림 7 석탄회와 풍화토의 장기압축침하거동

4. 결 론

본 연구에서는 재생혼합재료가 적용된 성토구조물의 장기적인 침하에 미치는 경향을 실내에서 분석 비교하고, 동결융해에 따른 1차원적 침하특성과 함수비 변화에 따른 침하 경향 등을 비교하고자 실험을 수행하였으며, 현재까지 계측된 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 석탄회는 입도분포, 석탄의 종류(무연탄, 유연탄) 등에 따라 물성에서 큰 차이를 보이고 있기 때문에, 본 연구에서는 두 가지 입도의 저회와 폐타이어 조각을 이용하여 성토재료로 사용 시 발생될 수 있는 장기침하 특성을 검토하였다. 그 결과 일반성토재에 대비해서 여러 침하 발생 요인(Wetting, 동결융해 등 온도 요인, Creep 등)에 대해 오히려 안정적인 거동을 보이는 것으로 파악되었다.
(2) 하지만 성토재로 사용 시에도 전단강도가 요구되는 경우에는 동결융해 등으로 발생될 수 있는 강도의 감소 요인을 고려하여 설계, 시공할 수 있도록 적용 석탄회 재료를 대상으로 강도, 침하, 지지력 등에 대한 실험을 수행하여 결과를 반영하여야할 것이다.
(3) 앞선 선행 연구들에서 석탄회나 폐타이어를 성토재로 활용할 경우 적정한 토피로 1m를 제안하고 있으므로 실대형의 현장실험을 통해 장기적인 모니터링 결과를 반영하여 내부 온도변화와 성토체의 변형, 침하 등의 거동에 대한 충분한 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(차세대 시설물용 신재료 활용기술 연구단)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 고용일(1992), “석탄회의 도로 성토재료로서의 활용에 관한 실험적 연구”, 한양대학교 박사학위논문
2. 고태훈, 이성진, 신민호, 황선근, 이수형(2007) “폐타이어와 석탄회를 혼합한 경량성토재료의 지반공학적 특성”. 2007 학술발표회논문집, 한국지반공학회, pp. 1320-1331
3. 윤여원(2004), “지반보강재로서 폐타이어의 활용; 지반보강효과, 한국지반공학회논문집, 제20권, 3호 4월 pp.107-117.
4. 이성진, 신민호, 고태훈, 황선근, 이수형(2008), “석탄회-폐타이어 혼합토의 성토재료 적용성에 관한 연구” 제34회 대한토목학회 정기학술대회 전문학회 및 국책 연구단세션-차세대 시설물용 신재료 활용 기술 연구단, pp.47-58
5. 이성진, 신민호, 고태훈, 황선근(2007) “대형삼축압축시험에 의한 폐타이어-저회 혼합토의 응력-변형 특성에 관한 연구”. 2007학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 2131-2135
6. 이성진, 신민호, 황선근, 고태훈, 이용식(2008) “저회-폐타이어 재생혼합토의 실대형 성토구조물 성능시험” 한국철도학회 봄학술발표회,
7. 이성진, 신민호, 고태훈, 황선근(2009), “저회(Bottom Ash)와 폐타이어를 활용한 성토구조물 거동에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 게재승인
8. 한국건설기술연구원(1996), 폐타이어를 재활용한 건설재료 및 신공법 개발
9. Garg V.K., and O′Shaughnessy, V.(2000), ″Tire-reinforced earthfill. Part 1 : Construction of a test fill, performance and retaining wall desigh′, Canadian Geotechnical Journal, Vol.37, pp.75-96.