

석탄회 자원의 채움재로서의 활용에 관한 연구 A Study on the Recycling of Coal Ash as Fill Materials

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 고용일²⁾, Yong-Il Koh, 송경율³⁾, Kyoung-Yool Song, 이준기⁴⁾, Joon-Ki Lee

- 1) 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.
- 2) 초당대학교 토목공학과 전임강사, Full-time Instructor, Dept. of Civil Engineering, Chodang Univ.
- 3) 한양대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.
- 4) 한양대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

SYNOPSIS : 20 million tons of coal ash has been produced in Korea annually. This causes the environmental problems and the cost of land for ash pond. However the amount of coal ash for recycling is small because of the low level of recycling technology and the ignorance. As the coal ash has the significant engineering properties, it can be utilized as soft ground stabilizer, backfill materials and so forth. The purpose of this paper is to summarize some of the recycling methods of coal ash. One is structural backfill materials, the other is flowable fill. Optimal mixture ratio(fly ash : bottom ash) is determined for structural backfill materials and the model test is performed. The model test accompanied with physical tests were executed for identifying that the flowable fly ash can be used as fill materials such as trench back filling.

Key words : coal ash, fly ash, bottom ash, structural backfill material, flowable ash

1. 서 론

매년 국내 화력발전소에서 발생하는 2천만톤의 석탄회의 재활용 기술은 아직 초보단계로서 활발한 활용이 이루어지지 않고 대부분이 무용도로 단순 매립되고 있는 실정이다. 또한 많은 발전소가 해안가에 위치해 있어 산업폐기물인 석탄회를 효과적으로 처리하지 못할 경우에는 환경문제와 입지문제 등을 일으킬 수 있다. 그러나 석탄회의 우수한 특성을 이용하여 연약지반개량용 고화재, 폐광합몰방지 등을 위한 충전보강재 및 구조물 뒷채움재 등 토목재료 등에 대량 활용한다면 외국의 선례에 비추어 보아도 석탄회는 재활용 품목중 가치 있고 자원화가 쉬운 산업부산물일 수 있다. 따라서 본 연구는 폐자원으로 막대한 경비로 무용도로 폐기되고 있는 석탄회를 건설자원으로서의 재활용을 위한 방안에 대하여 논한다.(한전, 1997),(천병식 등, 1990a)

본 연구는 석탄회를 구조물 뒷채움재(structural backfill materials)로서 활용하기 위하여 석탄회의 적정혼합비(비회:저회)를 선정하고, 모형토조실험을 통하여 뒷채움재로서 토압분포와 벽체거동을 규명하였으며, 또한 석탄회를 주성분인 고함수비의 고화재를 도관(陶管)의 하부기초나 얇은기초 등의 되메움이 어려운 곳에 주입하는 유동성 뒷채움재(flowable fill)로서의 활용에 대한 타당성을 검토하였다.

2. 뒷채움재로서의 석탄회의 활용

보통 뒷채움재는 토류구조물의 배면을 지지하기 위하여 채워넣어지는 재료를 총칭하는 데 실트 및 점

토질이 거의 함유되어 있지 않고 투수성이 큰 조립질흙이 공학적으로 우수하다. 그러나 이러한 재료는 일반적으로 고가이거나 인근 공사현장에서 쉽게 구할 수 없는 경우가 많다. 그리고 불량된 뒷채움재는 배면토압을 증가시켜 구조물의 공사비를 증가시키게 된다(예, 옹벽 등의 단면이 커짐). 석탄회는 내부마찰각과 투수계수가 일반토사보다 우수하므로 구조물 뒷채움재로서 사용가능함을 충분히 예측할 수 있다.(천병식 등, 1990a)

본 연구를 위해 뒷채움재로서 우수한 재료인 화강토에 대한 공학적특성을 파악하고, 석탄회의 비회(fly ash)와 저회(bottom ash)를 적정혼합비로 섞은 혼합회와 비교 분석하였으며, 사각형 토조를 제작하여 화강토와 혼합회로 벽체거동과 토압분포에 관한 실험을 통해 뒷채움재로서의 사용 타당성을 검토하였다. 증한다.

2.1 물리시험

석탄회의 공학적 특성을 파악하기 위해 영월산 석탄회의 입도분포를 측정하기 위한 입도분석시험(KS F 2302), 석탄회의 연경도를 측정하기 위한 Atterberg한계시험(KS F 2303, 2304), 비중시험(KS F 2308) 등을 실시하였다. 기본 물리적 특성은 다음 표 1과 같다.

표 1. 석탄회의 기본 물성시험 결과

항목 종류	비중 Gs	흙의 종류 (통일 분류법)	Atterberg Limit		입도분포			
			W _L (%)	I _p (%)	No. 4 통과량 (%)	No.200 통과량 (%)	Cu	Cc
비회	2.23	SM	NP	NP	100.0	41.0	6.1	1.2
저회	2.32	SW	NP	NP	99.47	2.96	8.0	2.0

2.2 역학시험

2.2.1 다짐시험

석탄회를 뒷채움재로 사용하기 위하여 혼합회가 뒷채움재로서 입도분포가 양호하고 우수한 종류(GW, GP, SW, SP)에 우선 속하고, 여러 혼합비 중에서 가장 다짐도가 좋은 혼합비를 선정하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 입도분포가 우수하고 저회:비회가 1:9, 2:8, 3:7인 혼합회에 대하여 다짐시험을 실시하였다. 다짐시험결과는 표 2와 같다. 다짐시험에 의하면 2:8 인 경우가 가장 다짐도가 우수한 것으로 나타났다.

표 2. 혼합회(비회:저회)에 대한 다짐시험결과

다짐방법	혼합비	1 : 9	2 : 8	3 : 7
	D	$\gamma_{dmax}(t/m^3)$	1.54	1.67
OMC(%)		13.7	14.4	15.2

2.2.2 직접전단시험

실내실험에서 모형지반의 전단강도 특성을 조사하기 위하여 직접전단시험(KS F 2343)을 실시한 결과, 화강토의 내부마찰각은 47.1°, 점착력은 0.047 t/m²으로 나타났다. 혼합회(2:8)의 경우, 내부마찰각은 48.6°, 점착력은 0.032t/m²으로 결정되었다.

2.3 실내모형실험

실내모형실험은 토조(그림 1. 참조)를 제작하여 수행하였다. 일반적인 구조물 뒷채움재로 사용 가능한 토사로 토조를 채운 경우의 토압분포 및 벽체변위를 계측하고 같은 방법으로 석탄회(石炭灰)의 경우에도 실험을 수행하여 그 결과를 비교 검토하였다. 일반적으로 구조물의 뒷채움 작업시 및 시공완료후 수평 및 수직으로 변위가 복합적으로 발생하나 본 모형실험에서는 회전변위만을 다루었다.

2.3.1 실험장치

모형토조는 변형을 극소화시키기 위하여 베이클라이트판으로 제작하고 강재로 보강하였다. 벽체회전을 구현하기 위하여 저부에 힌지를 설치하였고, 벽체에는 토압계 설치를 위한 구멍을 벽체 최상부에서 심도 15cm인 지점에 뚫고 13cm 심도 간격으로 천공하여 총 5개의 토압계를 설치하였다. 모형지반조성을 위한 강사기(降沙機)는 78000cm³ 용량의 컨테이너를 상하로 움직일 수 있고 토조상부의 레일을 따라 자유롭게 움직일 수 있도록 하였다. 벽체의 최상부에는 벽체의 변위를 측정하기 위하여 변위계(LVDT)를 설치하였고 데이터로거(data logger)를 연결하였다.

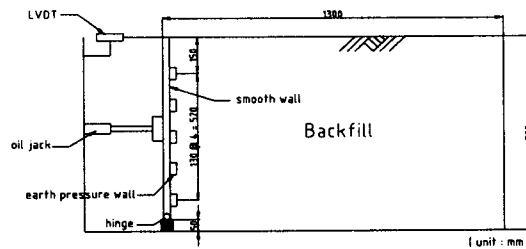


그림 1. 실내모형토조

2.3.2 실험방법

정지상태를 구현하기 위하여 우선 벽체는 회전하지 못하도록 구속한 후 되메움하였다. 지반이 완전히 조성된 후 clamp를 풀고 토압과 벽체의 변위를 계측하였다. 조성된 모형지반의 상대밀도를 알기 위하여 단위중량용 캔을 실험에 영향이 없는 위치에 설치하여 실험 후 채취하여 조사하였다.

2.4 모형지반의 공학적 특성

2.4.1 화강토 지반의 공학적 특성

본 모형실험에 석탄회 혼합지반과의 비교분석을 위해 사용된 대상토는 Canadian Foundation Engineering Manual(1992)이 정하는 기준에 의해 뒷채움 재료로서 가장 우수한(excellent) 화강토로 선정하였다.(Karl Terzaghi 등,1976)

화강토의 최대 및 최소건조단위중량을 측정된 결과 $\gamma_{dmin} = 1.42t/m^3$, $\gamma_{dmax} = 1.62t/m^3$ 이었으며 토조에 모형지반을 포설할 때 측정용 캔을 설치하여 실험후에 무게를 측정하여 평균단위중량을 측정하였더니 $\gamma_d = 1.57t/m^3$ 로 조사되었고, 따라서 상대밀도 $D_r=77.4\%$ 이고 이는 지반이 조밀한 상태(dense)임을 알 수 있다. 또한 화강토에 대한 다짐시험을 실시한 결과 최대건조단위중량 $\gamma_{max} = 1.98t/m^3$, 최적함수비 $OMC = 10.5\%$ 으로 결정되었다.

2.4.2 혼합회 지반의 공학적 특성

비회와 저회를 적정혼합비(2:8)로 충분히 혼합한 후, 화강토와 같은 조건($D_r=80\%$)으로 모형지반을 조성하여 최대 및 최소 건조단위중량을 측정하였고 $\gamma_{dmax} = 1.28 \text{ t/m}^3$, $\gamma_{dmin} = 1.02 \text{ t/m}^3$ 이고, $\gamma_d = 1.21 \text{ t/m}^3$ 로 나타났다. 따라서 석탄회 지반도 화강토 지반과 다짐도가 매우 유사한 조밀한 상태임을 알 수 있다.

석탄회 지반을 조성하기 위한 석탄회는 국내 석탄회 중에서 공학적 특성이 가장 뛰어난 영월산 석탄회를 적정 혼합비(비회:저회 = 2 : 8)가 되도록 혼합하여 준비하였다.(천병식 ;, 1990a) 저회의 내부마찰각(41.5°)은 비회에 내부마찰각(25.4°)보다 크고 저회의 비중(2.23)은 비회의 비중(2.32)보다 작다. 비회와 저회 모두 화강토에 비해 비중이 작아 경량재이므로 배면 토압 경감효과가 있을 것으로 예상된다. 저회의 비중이 비회의 것보다 더 작으므로 저회 단독으로 뒷채움재로 사용이 유리해 보이나 실제 구조물 배면의 뒷채움시에는 적절한 다짐시공이 요구된다. 혼합비 중 가장 다짐특성이 좋은 것은 5:5 혼합비이나 이는 입도분포가 좋지않아(SM) 우수한(GW, GP, SW, SP) 뒷채움재에 해당하지 않는다. 따라서 입도분포가 여기에 해당하고 다짐특성이 가장 우수한 혼합비는 비회와 저회가 2:8로 혼합된 것이다.

표 1과 그림 3에서와 같이 혼합회는 통일분류법에 의해 SP로 분류되었고 ASTM에 의한 상대밀도는 77.3%로 나타났다. 비중은 화강토(2.57)보다 작으므로(2.29) 상당히 경량재임을 알 수 있다. 따라서 혼합회의 뒷채움재로서의 공학적 특성은 화강토의 특성과 매우 유사 혹은 우수한 것으로 판단되었다.

표 3. 대상토의 기본 물성시험 결과

항 목 종 류	비 중 Gs	흙의 종류 (통일 분류법)	Atterberg Limit		입 도 분 포		
			WL (%)	Ip (%)	No. 4 통과량 (%)	No.200 통과량 (%)	Cu
화강토	2.57	SW	NP	NP	78.0	2.4	9.7
석탄회 (혼합회)	2.29	SP	NP	NP	74.5	11.8	5.0

2.5 시험결과 및 분석

강사장치(device for raining method)를 이용하여 모형지반을 균질하게 조성하고 이때 벽체의 회전을 막기 위하여 잠금장치(clamp)로 고정시킨 후 변위계로 벽체의 회전을 측정하면서 토압의 변화를 각 심도별로 매설된 토압계를 통하여 측정하였다.

2.5.1 정지상태(at-rest state)

본 실험에서의 화강토와 혼합회 모형지반에서의 심도별 토압분포는 그림 2와 같다. 그림에서와 같이 전체적으로 상부보다 하부에서 계측된 토압차가 더 크며 Rankine 이론에 의한 정지토압선(K_0 - line)과 비교하여 상부에서는 큰 차이를 보이지 않으나 하부로 갈수록 차이가 많이 나는 것을 알 수 있다.

화강토의 경우에는 Rankine의 이론치와 최소 8%, 최대 31%의 차이를 보인다. 이 토압차는 심도가 깊어질수록 커지는 경향을 보인다(심도 28cm에서 예외). 화강토 지반과 혼합회 지반의 경우에는 최상단(18%)보다는 최하단(23%)에서의 토압차가 크기는 하나 대체로 전구간에서 비슷한 차이를 보인다. 그리고 화강토 및 혼합회의 토압 모두 상부에서는 선형적인 증가를 보이다가 심도 41cm부터는 비선형적인 아칭효과(arching effect)를 보이고 있다.

2.5.2 정지~주동상태

정지상태에서 벽체를 지지하고 있던 clamp를 제거하여 벽체가 토체에 의해 벽체하부의 hinge를 중심으로 회전할 때의 심도별 토압변화는 그림 3과 그림 4와 같다.

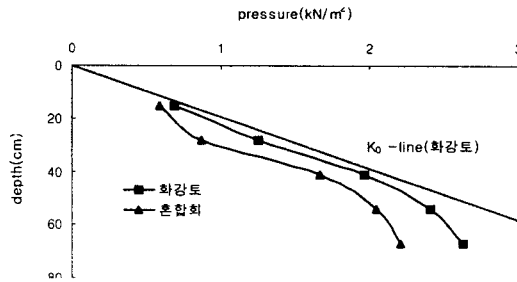


그림 2. 정지상태의 토압분포

화강토의 경우 벽체가 회전함에 따라 주동상태에 이르기 위하여 상부(1P)에서 급격히 토압이 감소되어 주동상태로 바뀌어 가고 하부(5P)는 상대적으로 더 큰 벽체회전이 발생해야만 주동상태에 이르는 것을 그림에서 알 수 있다. 또한 주동상태로 변화함에 따라 Rankine의 이론치와의 차이는 정지상태보다 더 큰 차이를 보이고 있다.

혼합회 지반에서도 화강토와 같은 경향을 보이거나 매설된 토압계 모두에서 화강토 지반의 경우(-0.08~-1.3%)보다 더 작은 벽체변위(-0.06~-1.2%)에서 안정상태(주동상태)에 이르는 것으로 계측되었다.

또한 벽체가 전을 시작하여 완전히 주동상태에 이를 때의 절반정도의 회전(-0.3~-0.6%)이르는 경우에는 벽체의 중앙에서 토압감소가 많이 발생하며, 완전히 주동상태에 이르기까지 벽체하부에서 더욱 큰 토압감소가 관찰되었다.

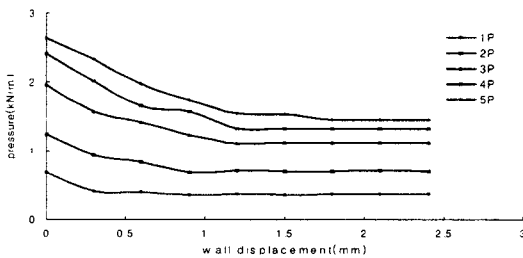


그림 3. 벽체회전에 따른 토압분포(화강토)

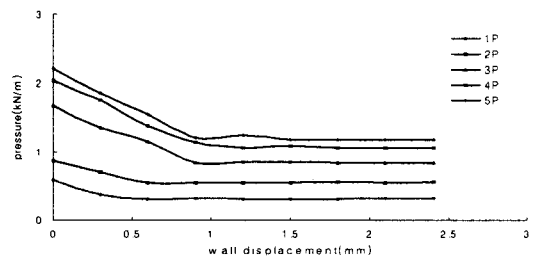


그림 4. 벽체회전에 따른 토압분포(혼합회)

※ 상부로부터 1P, 2P, 3P, 4P, 5P

2.5.3 주동상태

화강토의 경우 심도에 따라 다소 차이는 있으나 대체적으로 벽체변위 -1.0% 정도에서 주동상태에 이르는 것으로 나타났다. 화강토의 경우 심도에 따른 토압은 Rankine의 이론치와 11~40%의 차이를 보였으며 이도 역시 심도가 깊을수록 더 큰 차이를 보였다. 또한 화강토의 경우보다 혼합회의 경우 심도가 깊어지수록 토압감소가 더 큰 폭으로 발생하였다.

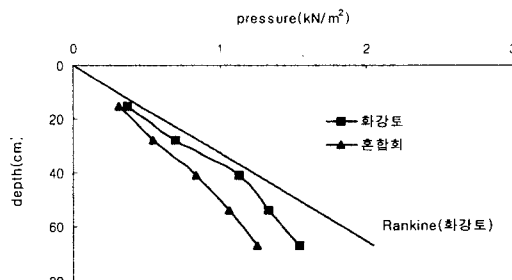


그림 5. 주동상태의 토압분포

3. Flowable fill로서의 석탄회(飛灰)의 활용

flowable fill이란 유동성이 높은 저강도의 채움재(fill materials)로서 현재, unshrinkable fill, flowable motar, plastic soil-cement, K-Krete 등의 표현으로 사용되어지고 있다. 1970년대에 들어서면서부터 선진 각국에서는 20~80 kg/cm² 정도의 일축압축강도를 보이는 flowable fill을 제방축조, 트렌치 되메움, 구조물 뒷채움재 등의 공사에 적용하기 시작하였으며, 국내에서도 특수한 목적으로 저강도 콘크리트의 일부 쓰여지고 있는 실정이다.(ACI Commitee 229, 1994)

본 연구에서는 석탄회(飛灰)를 주성분으로 하는 GL-1, GL-2 고화재의 trench 되메움재로서의 강도와 침하 특성을 관측분석하여 flowable fill로서의 적용성을 검토하고자 한다.

3.1 실험 개요(Richard D. Peindl, 1992)

3.1.1 사용재료

본 연구에서 사용된 시료로는 “2. 뒷채움재로서의 석탄회(飛灰)의 활용”에서의 화강토와 저강도 고화재(GL-1, GL-2)를 사용하였다. 저강도 고화재의 성분은 화학 무수석고, 석탄회(飛灰), 보통포틀랜드 시멘트의 화학적 혼합물이다.

3.1.2 실험계획 및 실내모형실험

GL-1, GL-2 저강도 고화재의 trench 되메움재로서의 활용성을 평가하기 위하여 함수비에 따른 일축압축강도와 모형토조(그림 6. 참조) 시험을 통한 침하 특성을 화강토 되메움재와 비교·분석하고자 한다. trench 되메움재로서 1~30kg/cm²의 저강도의 fill재가 요구되는 데, 이는 차후의 보수·수리의 용이함을 위해서이다. 따라서, 본 연구를 위해 GL-1은 함수비 50~90%, GL-2는 150~350%까지 변화시켜가면서 원형공시체를 제작하여 시험을 실시하였다.

함수비가 적을 경우 flowable fill재로서의 유동성이 저하되고, 높을 경우 양생과정에서 재료분리현상이 나타나 종류에 따라 위에서 언급된 함수비 내에서 실험을 실시되었다.

GL-1, GL-2 저강도 고화재의 침하특성을 알고자 1100×75×5mm의 강판에 strain gauge를 부착하고 모형지반에 매설한 후 단계적으로 하중을 재하하였다. 또한 본 실험을 위하여 WFLA-6-11-1L type의 strain gauge를 사용하였으며, 온도에 의한 팽창·수축량을 보정하기위해 tee rosette로 구성된 bridge를 사용하였다.

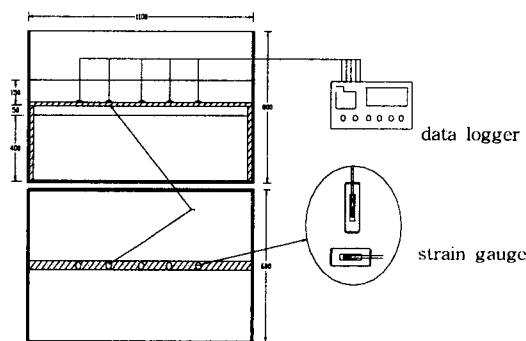


그림 6. 실내모형토조

(1) 화강토

모형토조내에 $0.9\gamma_{dmax}$ 로 높이 45cm로 다지고, 그 위에 스트레인 게이지(strain gauge)를 부착한 강판을 토조 양쪽의 지지대를 이용하여 거치한다. 높이 60cm까지 화강토를 $0.5\gamma_{dmax}$ 로 다진다. 100~400 kg/cm²까지 단계적으로 하중을 재하하여 강판의 변위 및 응력을 측정한다. 단계하중 재하시 30분 동안 강판의 게이지 측정값에 변화가 없을 시점에 다음의 하중을 재하 하였다.

(2) GL-1, GL-2 저항도 고화제

모형토조내에 $0.9 \gamma_{dmax}$ 로 높이 45cm로 다지고, 스트레인 게이지를 부착한 강판을 토조 양쪽의 지지대를 이용하여 45cm높이에 거치한다. 높이 60cm까지 고탄수비의 고탄화제 밀크를 채워 양생시킨다. 100~400kg/cm²까지 단계적으로 하중을 재하하여 강판의 변위 및 응력을 측정한다. 단계하중 재하시 30분 동안 강판의 게이지 측정값에 변화가 없을 시점에 다음단계 하중을 재하였다.

3.2 시험결과 및 분석

3.2.1 일축압축강도

함수비의 변화에 따른 GL-1, GL-2의 일축압축 결과 GL-1이 GL-2보다 강도면에서는 우수한 결과 나타났으나 flowable fill재의 재료 특성상 σ_{28} 가 30kg/cm²이상의 고강도는 차후의 보수작업을 고려한다면 부적절한 것이다. 따라서 이를 근거로 한 모형토조시험은 GL-1, GL-2가 최저 강도가 발현되는 함수비가 각각 90%, 350%인 fill재를 사용하여 시험을 실시하였다.(Funston, 1984)

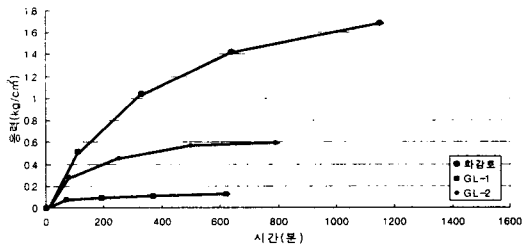


그림 7. 강판의 응력분포곡선

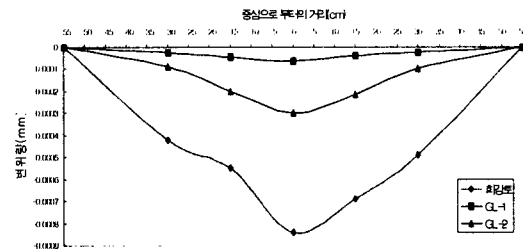


그림 8. 강판의 위치별 침하곡선

3.2.2 모형토조시험

GL-1, GL-2 fill재의 trench 되메움재로의 적용성을 평가하기 위해 $0.9 \gamma_{dmax}$ 로 다진 화강토로 되메움한 경우와 비교 실험을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

100~400kg의 하중이 단계적으로 재하되었을 때, 강판의 응력분포 GL-1, GL-2 fill재가 다진 화강토 보다는 강성구조물로 작용하여 강판에 걸리는 응력을 저하시킨 것으로 판단된다. 또한 강판의 위치별에 따른 침하거동에서도 유사한 결과가 도출되었다.

4. 결론

본 논문에서의 석탄회를 이용한 두가지 실내모형시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 구조물 뒷채움재로 우수한 석탄회의 혼합비는 3:7 인 것으로 확인되었고, 직접전단시험에 의한 화강토와 혼합회의 강도정수는 내부마찰각에서는 혼합회(48.6°)가 화강토(47.1°)보다 크나 점착력의 경우에는 혼합회(0.032t/m²)가 화강토(0.047t/m²)보다 작은 것으로 나타났다.

(2) 정지상태 및 주동토압의 분포는 모든 심도에 걸쳐 혼합회 지반이 화강토보다 20~35% 정도 작게 평가되었다. 또한, 심도가 깊어질수록 동일 심도에서의 석탄회 지반과 화강토 지반의 토압차는 커지다가 (1P(20%)→2P(28%)→3P(35%)) 일정심도에 이르러 토압차는 다시 감소하는 경향(4P(25%)→5P(24%))을 보였다. 상기와 같은 연구결과 석탄회를 적정혼합비로 혼합하여 사용할 경우 구조물 뒷채움재로 매우 우수하게 사용할 수 있다고 판단된다.

(3) trench 되메움재로 GL-1, GL-2의 적용가능성을 평가하기 위한 일축압축강도 시험결과 GL-1은 $w=90\%$, GL-2는 $w=200\sim 350\%$ 인 경우 28일강도가 $4\sim 30\text{kg/cm}^2$ 정도로 나타나 유동성과 강도면에서 적절한 것으로 나타났으며, 고함수비의 fill재로서 28일 양 습윤단위중량이 각각 $1.35\sim 1.53\text{t/m}^3$ 과 $1.04\sim 1.16\text{t/m}^3$ 로서 구조물에 가해지는 자중의 영향을 최대한 줄일 수 있는 장점이 있다.

(4) 일축압축강도를 근거한 모형토조시험에서 GL -1($w=90\%$), GL-2($W=350\%$)와 $0.9\gamma_{dmax}$ 로 다진 화강토의 비교실험 결과, 강판에 미치는 응력감소와 변위저감면에서 다진 화강토 보다는 우수한 절로 나타났다. 이는 두 고화재의 강성이 다진 화강토 보다 큰 데 기인한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국전력공사(1997), “석탄회(Fly Ash) 및 탈황석고 활용 국제워크숍”, pp.29~34.
2. 천병식, 고용일, 오민열, 권형석(1990a), “산업폐기물로 발생하는 석탄회의 토질역학적 특성에 관한연구”, 대한토목학회논문집, Vol.10, No.1, pp.115~124.
3. 천병식, 이병하, 오재웅(1990b), “화력발전소 산업폐기물인 석탄회의 건설재료로서의 활용에 관한 연구”, 한국과학재단 목적기초연구(880607) 결과보고서.
4. ACI Committee 229(1994), “Controlled Low Strength Materials(CLSM)”, ACI 229R-94.
5. Canadian Geotechnical Society(1992), “Canadian Foundation Engineering Manual”, pp.377~382.
6. Funston, J.J., Krell, W.C. and Zimmer, F.V.(1984), “Flowable Fly Ash”, Journal of Ciivil Eng., ASCE, pp. 48~51.
7. GAI Consultants, Inc.(1988), “Laboratory Testing of Fly Ash Slurry”, EPRI.
8. Javed I. Bhattay, Sanker Bhattacharja and H.A. Todres(1996), “Use of Cement Kiln Dust in Strabilizing Clay Soils”, Portland Cement Association.
9. Karl Terzaghi, Ralph B. Peck and Gholamereza Mesri(1976), “Soil Mechanics in Engineering Practice”, John Wiely & Sons, pp.330~332.
10. Richard D. Peindl, Rajaram Tanardhanam and Frank Burns(1992), “Enaluation of Flowable Fly Ash Backfill”, ASCE, J. of Geotechnical Eng., Vol. 118, No. 3, pp. 449~463.