

구조물 뒷채움재로서의 석탄회 활용에 관한 연구

천병식* · 여유현**

*한양대학교 토목공학과, **한양대학교 대학원

A Study on the Recycling of Coal Ash as Structural Backfill Materials

BYUNG-SIK CHUN AND YOO-HYEON YEOH

Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

KEY WORDS: Structural backfill materials 구조물 뒷채움재, Optimal mixture ratio 최적배합비, Lateral earth pressure variation 수평토압변화, Wall displacement 벽체변위

ABSTRACT: The purpose of this paper is to recycle coal ash as structural backfill materials from electric power plants. Two million tons of coal ash are produced annually. The laboratory test was executed for the basic compatibility as substitution for structural backfill materials, and the optimal mixture ratio(fly ash : bottom ash) was decided. In addition, the model test was performed using medium scale earth pressure model with small size earth pressure cells, model box, data logger and some other apparatuses. Mixed coal ash and excellent backfill materials(cohesionless soil, SW) were compared in the view of lateral earth pressure variation depending on wall displacement. The reduction of earth pressure when coal ash was used as a backfill material was monitored comparing to that of cohesionless soil. The cost and environmental pollutants by treating coal ash can be reduced through developing the recycling technology.

1. 서 론

최근 산업의 발달, 인구증가 및 경제규모의 확장 등에 의해 종합적인 국토 개발이 진행중에 있고, 매립에 의한 대규모 일해공업단지조성, 관련기간시설 등 종래에 조성되었던 지역에 비해 개발 조건이 상대적으로 열악한 지역의 개발이 불가피하게 되었다(천 등, 1990).

이러한 조건에서 이루어지는 원자력 발전소와 같은 플랜트 공사 및 일반 토목공사에서 필수적으로 뒷채움(backfill)이 필요하게 되며, 채움(fill)을 하게되는 곳은 구조물과 직접 접해 있으므로 이 부분의 다짐 특성과 역학적 특성은 구조물의 안정성에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 구조적 측면에서 이러한 특성을 적절히 반영하는 뒷채움재의 선택은 구조물의 안정성 확보에 매우 중요하다.

전기 사용량의 폭발적인 증가와 함께 석탄회 자원은 우리나라에서도 2000년도이후에 500만톤이상에 이르는 엄청난 양이 부산될 것으로 예상되고 있는 데, 이는 지반개량용 고화재, 폐광합몰방지 등을 위한 충진보강재 및 구조물 뒷채움재 등 토목재료 등에 대량 활용 가능성이 있는 산업부산물로 평가되고 있다(천 등, 1993).

따라서, 본 연구는 전단강도특성(내부마찰각)과 투수계수가 일반토사보다 우수한 석탄회를 구조물 뒷채움재로서 활용하기 위하여 석탄회 혼합비율(저회와 비회의 혼합비율)에 따른 모형

토조시험을 수행하였으며, 상재하중에 따른 수평토압 결과로부터 뒷채움재로서의 활용에 적합한 혼합비율을 검토하였다.

2. 석탄회의 발생 및 재료적 특성

석탄회는 석탄화력발전소에서 석탄을 연소시킴으로서 얻어지는 부산물로서 무연탄의 경우에는 26~50%, 유연탄인 경우는 8~15%정도가 발생되며 연소후 채집위치에 따라 저회(bottom ash), 비회(fly ash) 등으로 구분된다. 전체 석탄회발생량 중 비회의 양은 약 60~80% 정도이고 저회는 20~40% 정도의 양이 부산되고 있다. 이러한 석탄회 중 재활용되지 않는 저회는 분쇄되어 비회 및 처리수와 혼합 후 고압으로 파이프를 통해 이송되어 회사장(ash pond)에 매립되고 있다(한국전력공사, 1994).

본 연구에 사용된 석탄회는 국내 화력발전소에서 발생하는 석탄회중 가장 공학적특성이 뛰어난 영월화력 발전소의 시료로 하였다(한국전력공사, 1997). 사용된 영월화력 발전소의 석탄회는 1998년 6월에 채취된 시료이며, 특히 저회는 회사장에서 채취하였기 때문에 비회가 다소 함유된 상태였다. 석탄회의 토공재료로서의 활용을 위해서 비중, 입도분석, 액소성한계 시험, 다짐시험 및 직접전단시험 등을 실시하여 석탄회의 물리적·화학적 특성 및 역학적 특성을 파악하였다.

Table 1 Physical properties of coal ash

Class	Item	Specific Gravity Gs	Classification of soil	Atterberg Limit		Grain size distribution						
				W _L (%)	I _p (%)	No. 4 passing rate (%)	No.200 passing rate (%)	D ₆₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	Cu	Cc
Fly ash		2.23	SM	NP	NP	100.0	41.0	0.11	0.049	0.018	6.1	1.2
Bottom ash		2.32	SW	NP	NP	99.47	2.96	2.40	1.20	0.30	8.0	2.0

Table 2 Chemical properties of coal ash

Class	Natural disposition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	B ₂ O	S ₂ O	Carbon	Sum	pH
		Fly ash (%)		54.23	24.14	1.13	0.15	7.41	0.86	1.22	0.32	3.39	0.09	0.01	6.00
Bottom ash (%)		55.90	24.17	1.11	0.11	7.77	1.01	1.34	0.34	3.38	0.08	0.01	3.90	99.12	6.70

2.1 물리시험

석탄회의 물리적 특성을 파악하기 위해 입도분석시험(KS F 2302), 액소성한계시험(KS F 2303, 2304), 비중시험(KS F 2308) 등을 실시하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다.

석탄회의 비중은 비회의 경우 2.23, 저회는 2.32로서 저회의 비중은 비회보다 크지만, 두 경우 모두 상대적으로 낮은 비중을 나타내고 있다. 물리시험결과 통일분류에서 저회는 SW, 비회는 SM으로 나타났다.

2.2 화학성분

원자 흡광분석기를 이용해서 비회 및 저회에 대한 화학성분을 분석하였다. 석탄회시료는 분쇄하여 200번체 통과량중 정량 분석용 시료 0.5g을 채취하여 시험하였다. pH는 Digital pH Meter(DNS Co. DP-215)를 이용하여 측정하였으며, 화학성분분석 결과는 Table 2와 같다. 시험 결과 석탄회는 실리카(SiO₂), 알루미늄(Al₂O₃), 산화제2철(Fe₂O₃), 산화칼슘(CaO)의 비결정성(3Al₂O₃·2SiO₂)이 주성분으로 나타났다. 일반적으로 팽윤의 조성이 비결정질인 경우에는 결정화 하려는 에너지가 내부에 발생하는데, 특히 불과 반응해서 응결·경화하려는 잠재수경성이 발생하게 된다. 석탄회(비회)의 경우 실리카 성분(규산염 물질)이 소석회[Ca(OH)₂, 수산화칼슘]와 반응하여 불용성 화합물을 생성하여 경화하는 성질, 즉 포졸란 반응에 의한 잠재수경성이 발생한다. 포졸란 반응에 가장 주체가 되는 화학 성분은 석회(CaO, 산화칼슘)이며, 탄소는 포졸란 반응에 마이너스 요인이 되는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 비회는 석회성분이 있으므로 물을 가하여 다지게 되면 포졸란 반응에 의한 자경성을 나타내게 되는데, 그 정도는 석회 성분 및 탄소, 물에 용해되는 성분에 의해서 영향을 받는 것으로 알려지고 있다.

환경보전상의 중요한 지표가 되는 석탄회의 중금속 용출검

사 결과는 법정 기준치 이하로 나타났으며, 분석결과로부터 pH값이 저회의 경우 산성을 나타내고 있어서 지하수의 식생에 대한 영향 및 건설재료의 부식이 예상된다. 그러나, 석탄회는 포졸란 반응에 의해 시간경과에 따라 중성화되고, 영동화력 발전소 부근의 회사장에서 어느 정도 시일이 경과된 후 초목이 자라고 있는 예로 볼 때, 지하수 오염 및 건설재료의 부식에 대한 영향은 적을 것으로 판단된다.

2.3 역학시험

2.3.1 다짐시험

경량특성 및 투수계수가 낮은 특성을 가지는 석탄회를 구조물의 뒷채움재나 구조물 주변의 메립재로 적용시 배면토압이 경감될 것으로 예상된다. 따라서, 석탄회의 뒷채움재로서의 활용성을 검토하기 위해 혼합회(저회 및 비회의 혼합회)의 중량비(저회 및 비회의 중량배합비)를 조절(1:9, 2:8, 3:7)하여 입도 분석 및 다짐시험(A다짐, D다짐방법(KS F 2312))을 실시하였으며, Table 3은 다짐시험 결과이다. 시험결과, 일반적인 토사에 석회와 같이 다짐에너지의 증가에 따라 최대건조밀도는 증가하고 최적함수비는 감소하는 경향을 보였으며, 채움재로서 적합 토질분류범위(GW, GP, SW, SP)에 속하며, 다짐도가 우수한 비회 : 저회의 혼합비는 2 : 8인 것으로 나타났다.

2.3.2 직접전단시험

석탄회의 전단특성을 파악하기 위해 직접전단시험을 실시하였다. 수직응력은 각각 0.28, 0.56, 0.83 kgf/cm²이며, 시료 성형은 D다짐결과와 같은 다짐상태를 갖도록 하였다. 국내에서 부산되는 석탄회는 화력발전소별로 공학적 특성에서 조금씩 차이는 있으나 영월산 석탄회를 대상으로 직접전단시험을 실시한 결과, Table 4와 같이 비회 및 저회의 전단강도정수는 점착력이 각각 0.026, 0.133 tf/m², 내부마찰각은 각각 25.4°, 41.5°

Table 3 Compaction test result of coal ash

Compaction method		Class	
		Fly ash	Bottom ash
A	$\gamma_{dmax}(t/m^3)$	1.32	1.50
	OMC(%)	17.45	16.95
D	$\gamma_{dmax}(t/m^3)$	1.38	1.67
	OMC(%)	16.81	13.25

Table 4. Direct shear test result of coal ash

Strength parameter	Soil type	
	Fly ash	Bottom ash
$c(t/m^2)$	0.133	0.026
$\phi(^{\circ})$	25.4	41.5

로 나타났다. 따라서, 저회의 전단특성이 비회보다 더 우수하다고 판단된다.

3. 실내모형실험

실내모형시험은 Fig. 1에서와 같이 모형토조를 이용하여 석탄회의 구조물 뒷채움재료로서의 적용성을 검토하였다. 일반적인 구조물 뒷채움재료로 사용되는 토사를 적용한 경우, 석탄회 혼합회를 적용한 경우에 대하여 토압분포 및 벽체변위 결과를 비교·검토하였다. 일반적으로 구조물의 뒷채움 작업시 및 시공완료후 수평 및 수직으로 변위가 복합적으로 발생하나 본 모형실험에서는 회전변위만을 다루었다.

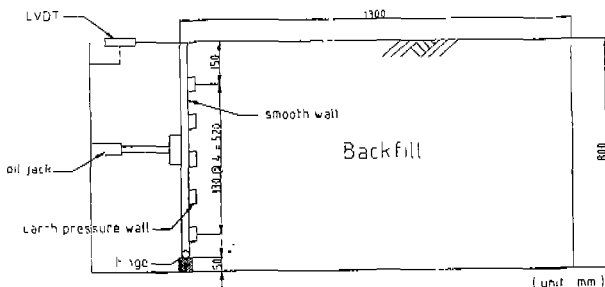


Fig. 1 Model box

3.1 실험장치

모형토조는 110cm×60cm×80cm 크기로 외벽은 변형을 극소화시키기 위하여 10mm두께의 베이클라이트판으로 제작하고 보강을 위해 steel rod를 토조외부에 설치하였다. 토압 측정을 위한 벽체도 외벽과 같은 재질의 베이클라이트판으로 제작하였으며 수동상태 구현시 벽체에 하중을 가할 때 편심 혹은 집중하중의 영향을 배제하기 위하여 보강재를 격자형태로 하여 하중이 벽체에 고르게 분산되도록 하였다. Rankine의 토압이론에 의한 벽체회전을 구현하기 위하여 저부에 힌지를 설치하여 토조의 저면에서 10cm의 턱을 만들어 그 상부에 설치하였다. 또한 베이클라이트판으로 제작된 벽체에는 토압계 설치를 위한 직경 18mm의 구멍을 벽체 최상부에서 심도 15cm인 지점에 뚫고 13cm 심도 간격으로 천공하여 총 5개의 토압계를 설치하였다.

토압계가 벽체의 회전 중에 벽체에서 이탈되는 것을 막기 위하여 구멍에 밀착되도록 테프론 테이프를 이용하여 견고하게 부착하였다. 모형지반조성을 위한 강사기(降沙機)는 높이 350cm로 78,000 cm³용량의 container을 상하로 움직일 수 있도록 상부에 기어박스를 설치하였다. 또한 토사의 포설을 균일하게 하기 위하여 토조상부에 레일을 설치하여 강사기가 레일을 따라 자유롭게 움직일 수 있도록 하였다.

토압계는 국내 계측기 전문회사에서 주문 제작한 전기저항식 토압계로서 직경 5cm(sensor 부분 3cm)의 원형이며 토압계 간의 간섭을 최소화하기 위하여 초소형으로 제작하였다. 토압계의 용량은 1 kgf/cm²이며 교정계수(calibration coefficient)는 0.001548 kgf/cm² × 10⁻⁶st 이며 4 core shield cable type이다. 모형실험에서 측정에 사용된 data logger는 Tokyo Sokki Kenkyujo제품(TDS-303)으로서 10개의 채널을 통해 토압계와 변위계로부터 데이터를 수신할 수 있다.

주동상태를 구현하기 위하여 우선 벽체는 회전하지 못하도록 구속한 후 퇴채움하였는 데 샌드커튼(sand curtain)방법을 이용한 강사법(raining method)으로 균질한 지반을 조성하였다. 조성된 모형지반의 상대밀도를 구하기 위하여 단위중량용 켈을 실험에 영향이 없는 위치에 설치하여 실험 후 채취하여 조사하였다. 강사법에 의한 모형지반은 조밀한 상태이므로 본 실험은 조밀한 지반을 중심으로 전개하였다.

3.2 모형지반의 공학적 특성

3.2.1 화강토 지반의 공학적 특성

본 모형실험에 사용된 대상토(화강토)는 Canadian Foundation Engineering Manual(1992)이 정하는 기준에 의해 뒷채움 재료로서 가장 우수한 토사로 선정하였다.

화강토의 최대 및 최소 건조단위중량을 알기 위하여 ASTM에 규정된 D 4253과 D 4254(이, 1996; ASTM, 1996)에 따라 V=2830cm³인 금속용도와 진동기를 이용하여 측정된 결과, $\gamma_{dmax} = 1.62 t/m^3$, $\gamma_{dmin} = 1.42 t/m^3$ 로 측정되었으며 토조에 모형지반을 포설할 때 측정용 켈을 설치하여 실험후 무게를 측정하여 평균단위중량을 측정된 결과, $\gamma_d = 1.57 t/m^3$, 상대밀도 $D_r = 77.4\%$ 로 나타났으며, 이 지반은 조밀한 상태로 구분되어진다.

Table 5 Properties of the ground

Class	Item	Specific Gravity Gs	Classification of soil (Unified soil classification system)	Atterberg Limit		Grain size distribution					
				WL (%)	Ip (%)	No. 4 Passing rate (%)	No.200 Passing rate (%)	D ₆₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	Cu
Deposited granite soil		2.57	SW	NP	NP	78.0	2.4	1.85	0.85	0.19	9.7
Coal ash (mixed ash)		2.29	SP	NP	NP	74.5	11.8	2.00	0.19	0.05	5.0

또한 화강토에 대한 다짐시험을 실시한 결과 최대건조단위 중량 $\gamma_{dmax} = 1.98 \text{ t/m}^3$, 최적함수비 $OMC = 10.5\%$ 로 나타났다. 화강토의 기본 물성시험결과는 Table 5와 같다.

3.2.2 혼합회 지반의 공학적 특성

비회와 저회를 적정혼합비(2:8)로 충분히 혼합한 후, 화강토와 같은 조건으로 최대 및 최소 건조단위중량을 측정하였고 토조에 모형지반을 조성하였는데 상대밀도를 화강토의 경우와 근사하게($D_r \approx 80\%$) 조성하기 위하여 강사기의 높이를 화강토의 경우와는 다르게 하였다. ASTM D4253, D4254의 vibratory table에 의해 $\gamma_{dmax} = 1.28 \text{ t/m}^3$, $\gamma_{dmin} = 1.02 \text{ t/m}^3$ 이고, $\gamma_d = 1.21 \text{ t/m}^3$ 로 나타났다(천 등, 1990).

영월산 석탄회를 적정 혼합비(비회:저회 = 2 : 8)가 되도록 혼합하여 준비하였다. 저회의 비중(2.23)이 비회의 비중(2.32)보다 작고, 비회와 저회 모두 화강토에 비해 비중이 작기 때문에 경량특성에 따른 매면 토압 경감효과가 있을 것으로 판단된다. 저회의 경량특성으로 인해 뒷채움재로서 적용시 상대적으로 유리할 것으로 예상되나, 실제 구조물 매면의 뒷채움시에는 적절한 다짐공이 요구되기 때문에, 다짐특성이 우수한 혼합회를 조성하였다. 5 : 5 혼합회는 다짐특성이 가장 우수하지만 토질 분류(SM)에서 뒷채움재의 토질분류(GW, GP, SW, SP)에 해당하지 않는다. 2 : 8 혼합회는 토질분류상 SP로 분류되며 상대밀도는 77.3%로 나타났다. 혼합회의 비중(2.29)은 화강토

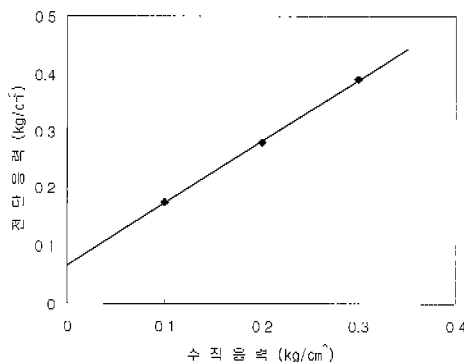
(2.57)보다 작으므로 화강토보다 경량재임을 알 수 있다. 따라서 2 : 8 혼합회는 뒷채움재로서 적합하며, 다짐특성이 우수한 것으로 판단된다.

3.2.3 직접전단시험

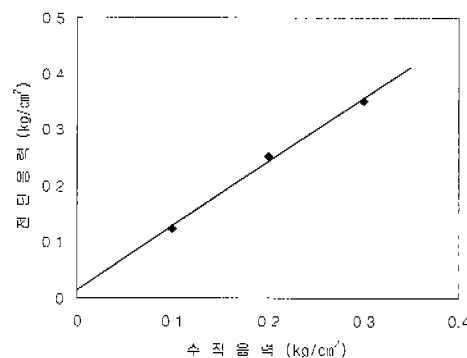
화강토 및 혼합회의 전단강도 특성을 파악하기 위하여 직접전단시험(KS F 2343)을 실시하였다. 모형지반의 상대밀도와 동일하게 하기 위하여 모형토조에 강사기로 지반을 조성할 때 측정용 캔과 함께 전단상자를 배치하여 실험 후에 채취하여 전단시험을 실시하였는데 변형률제어 방식을 취하였고 연직응력을 0.1, 0.2, 0.3 kgf/cm^2 으로 하였다. 화강토의 내부마찰각은 47.1° , 점착력은 0.047 tf/m^2 으로, 혼합회의 내부마찰각은 48.6° , 점착력은 0.032 tf/m^2 으로 나타났으며, 화강토 및 혼합회의 직접전단 시험결과는 Table 6 및 Fig. 2와 같다.

Table 6 Direct shear test result of decomposed granite soil and mixed ash

Soil	Class	Internal friction angle ($^\circ$)	Cohesion (tf/m^2)
Decomposed granite soil		47.1	0.047
Mixed ash		48.6	0.032



(a) Vertical stress - maximum shear stress diagram (deposited granite soil)



(b) Vertical stress - maximum shear stress diagram (mixed ash)

Fig. 2 Direct shear test result of coal ash (decomposed granite soil, mixed ash)

3.3 실험 및 계측

모형지반을 조성하기 위하여 강사장치(device for raining method)를 낙하지점의 30cm 상향에 위치시켜 1층을 균질하게 조성한 후 같은 방법으로 층별로 쌓아올려 모형지반을 조성한다. 이때 벽체의 회전을 막기 위하여 잠금장치(clamp)로 고정시킨다. 본 실험에서 계측된 토압을 Rankine 이론에 의한 값과 비교하기 위해, 베이클라이트 재질의 벽체에 그리스를 칠하여 벽체의 마찰각을 최대한 줄이도록 하였다.

3.3.1 화강토로 모형지반을 조성하는 경우

Lambe은 벽체에 작용하는 토압이 정지상태, 주동상태, 수동상태에 이르기 위해서는 각각 -0.5%, 2%(조밀한 경우) 정도의 벽체회전이 필요하며 Canadian Geotechnical Society(1992)는 각각 -0.1%, 2%(느슨한 비점성토인 경우)라 하였으므로 변위계로 벽체의 회전을 측정하면서 주동상태인 경우는 벽체회전이 -0.5%와 -0.1%, 수동상태는 2%에 이를 때까지 토압을 변위별로 측정하고, 토압이 완전히 발휘된 후에 각 심도별로 매설된 토압계(earth pressure cell)를 통하여 측정하였다.

3.3.2 정지상태

본 실험에서의 화강토와 혼합회 뒷채움지반에서의 심도별 토압분포는 Fig. 3과 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 많음을 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 크지만, 대체로 전구간에서 비슷한 경향을 보이고 있다. 화강토 및 혼합회의 토압은 상부에서는 선형적인 증가를 보이다가 심도 41cm부터는 비선형적인 아칭효과를 보이고 있다.

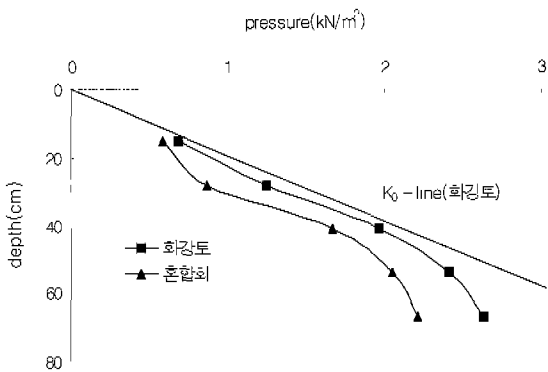


Fig. 3 Distribution of earth pressure at rest

3.3.3 정지-주동상태

정지상태에서 벽체를 지지하고 있던 clamp를 제거하여 벽체가 토체에 의해 벽체하부의 힌지를 중심으로 회전할 때의 심도별 토압변화는 Fig. 4, Fig. 5와 같다.

화강토의 경우 벽체가 회전함에 따라 주동상태에 이르기 위

하여 상부(1P)에서 급격히 토압이 감소되어 주동상태로 변화되고, 하부(5P)는 상대적으로 더 큰 벽체회전이 발생하는 조건하에서 주동상태에 이르는 것을 그림에서 알 수 있다. 또한 주동상태로 변화함에 따라 Rankine의 이론치와의 차이는 정지상태보다 더 큰 차이를 보이고 있다.

혼합회 지반의 경우, 화강토에서와 같은 경향을 보이지만, 매설된 모든 토압계에서 화강토 지반의 경우(-0.08~-1.3%)보다 더 작은 벽체변위(-0.06~-1.2%)에서 안정상태(주동상태)에 이르는 것으로 나타났다.

또한 벽체의 회전이 시작되어 완전히 주동상태에 이르는 경우의 절반정도의 회전(-0.3~-0.6%)에 이르는 경우에는 벽체의 중앙에서 토압감소가 많이 발생하며, 완전히 주동상태에 이르기까지 벽체하부에서 더욱 큰 토압감소가 관찰되었다.

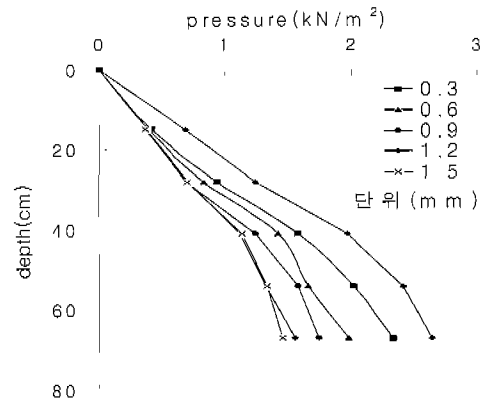


Fig. 4 Earth pressure distribution as wall displacement (decomposed granite soil)

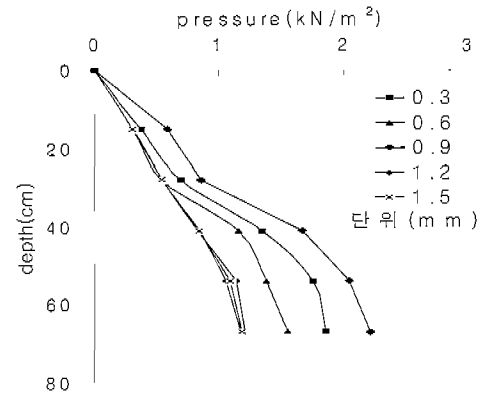


Fig. 5 Earth pressure distribution as wall displacement (mixed ash)

3.3.4 주동상태

화강토의 경우 심도에 따라 다소 차이는 있으나 대체적으로 Canadian Foundation Engineering Manual에 의한 벽체변위 -1.0% 정도에서 주동상태에 이르는 것으로 나타났다.

화강토의 경우 심도에 따른 토압은 Rankine의 이론치와 11~

40%의 차이를 보였으며 심도가 깊을수록 더 큰 차이를 보였다. 또한 화강토의 경우보다 혼합회의 경우 심도가 깊어질수록 토압감소가 더 큰 폭으로 발생하는 것을 알 수 있다.

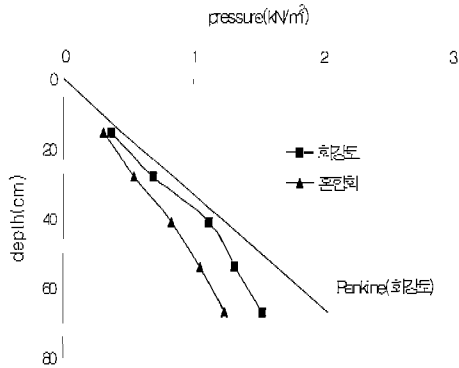


Fig. 6 Active earth pressure distribution

4. 결 론

석탄회의 구조물 뒷채움재로의 적용성에 대한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 영월산 혼합회의 입도시험결과 구조물 뒷채움재로서 우수한 토질분류에 해당하는 혼합비는 1 : 9, 2 : 8, 3 : 7로 나타났으며 가장 다짐도가 우수한 혼합비는 이중 2 : 8임을 알 수 있었다.
- (2) 직접전단시험에 의한 화강토와 혼합회의 강도정수는 내부마찰각에서는 혼합회(48.6°)가 화강토(47.1°)보다 크나 점착력의 경우에는 혼합회(0.032 t/m²)가 화강토(0.047 t/m²)보다 작음을 확인할 수 있었다.
- (3) 직접전단시험을 위한 시료는 토조의 증양에서 채취한 것이다. 내부마찰각은 심도에 따라 키질 것으로 예상되며 토압 계수(K)도 함께 달라질 것이므로 심도가 깊어질수록 실측치와 이론치의 차이는 더 커진다고 판단된다.
- (4) 정지상태에서 주동상태로 변화하는 경우 초기에는 벽체중

양에서 토압감소가 많이 일어나지만 후기에는 벽체하부에서 토압경감이 크게 일어났으며, 벽체의 하부보다 상부에서 빨리 주동상태에 도달됨을 알 수 있었다.

(5) 주동토압의 분포는 모든 심도에 걸쳐 화강토 및 혼합회 지반 모두 Rankine 이론에 의한 값보다는 작게 평가되었으며, 혼합회 지반의 경우가 화강토 지반보다 20~35% 정도 작게 평가되었다. 또한, 심도가 깊어질수록 동일 심도에서의 혼합회 지반과 화강토 지반의 토압차는 커지다가 (1P(20%) → 2P(28%) → 3P(35%)) 일정심도에서 토압차는 다시 감소하는 경향 (4P(25%) → 5P(24%))을 보였다.

(6) 상기와 같은 결론을 토대로 석탄회 혼합회 지반은 비회와 저회를 적절히 혼합(비율 : 저회 = 3 : 7)로 혼합적용시 구조물 뒷채움재로서 매우 우수한 특성을 보였다.

참 고 문 헌

이상덕(1996). "토질시험 원리와 방법", 새문출판사, pp 80~90.
 천병식, 고용일, 오민열, 권형석(1990). "산업폐기물로 발생되는 석탄회의 토질 역학적 특성에 관한 연구", 대한토목학회논문집, Vol. 10, No. 1, pp 115~124.
 천병식, 김수삼, 박홍규, 장명순(1993). "석탄회의 성토 및 포장 재료로서의 개발 연구", KOSEF 90-0600-80, pp 165~170.
 천병식, 이병하, 오재용(1990). "화력발전소 산업폐기물인 석탄회의 건설재료로서의 활용에 관한 연구", 한국과학재단 목 적기초 연구(880607)결과 보고서.
 한국전력공사(1997). "석탄회(Fly Ash) 및 탈황석고 활용 국제 워크숍", pp 29~34.
 한국전력공사(1994). "석탄회 이용가치와 재활용기술", pp 261~290.
 ASTM(1996). "Annual Book of ASTM Standards", Vol. 04. 08, pp 660~674.

1999년 12월 24일 원고 접수

2000년 2월 7일 수정본 채택