

석탄회의 동적거동 특성에 대한 실험 연구

An Experimental Study on the Dynamic Behavioral Characteristics of Bottom Ash

윤원섭¹⁾, Won-Sub Yoon, 한재운²⁾, Jae-Woon Han, 신승구³⁾, Seoung-Gu Shin, 채영수⁴⁾, Young-Su Chae

¹⁾수원대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.

²⁾명진지엔티 대표이사, CEO, Myung Jin G&T Co., Ltd.

³⁾지오티엠 차장, Vice Chief, Geo Testing Management Co., Ltd.

⁴⁾수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.

SYNOPSIS : An elementary particle of bottom ash is similar to fine sand. So which expected from replace expensive sand. Therefore, this study conducts cyclic triaxial test and a resonant test using relative density, which is obtained from a relative density test of bottom ash and standard sand. Also, it compares antiseismic characteristics of bottom ash and standard sand in order to analyze the possibility of commercial use as a construction material.

Key words : Bottom ash, Resonant test, Cyclic triaxial test, Relative density test

1. 서 론

우리나라에서 연간 발생하는 석탄회의 양을 조사한 결과 민간 열병합발전소 발생분을 제외한 석탄회는 평균 약 300만톤으로 이중 무연탄 석탄회와 유연탄 석탄회는 각각 45대 55를 차지하고 있는 것으로 조사되었다. 무연탄 발전소의 용량이 유연탄 발전소의 용량에 비해 월등히 적음에도 불구하고 회발생량이 비슷한 것은 무연탄 발전소의 석탄회 발생량은 석탄사용량의 50%인데 비해 유연탄 발전소의 석탄회는 석탄사용량의 15%정도이기 때문이다(산업자원부, 2002). Bottom ash는 일반적으로 천연골재보다 작지만 어느 정도 골재로서의 필요한 경도를 가지며, 다공질의 재료로 비중이 낮고, 발생과정에서 염분을 함유하며, 탄산칼슘계 재료의 반응과정에서 포졸란체 역할을 하여 강도를 증가를 돕는 특성을 가지고 있다(산업자원부, 2005).

국내에서 발생되고 있는 석탄회(bottom ash 포함) 발생량 중 활용실적은 15%에 불과한 실정이고, 석탄회 대부분은 혼합수거 되어 일반 산업폐기물로 분류되어 특정지역에 매립하고 있다. 이는 용출성분들에 의한 알칼리도 상승과 중금속 오염 등 수질환경오염에 심각한 문제점을 야기하고 있는 실정이다. 따라서 석탄회를 어떻게 하면 재활용할 수 있는가의 문제가 오늘날의 당면과제로 제기되고 있으며, 이에 대한 원만한 해결을 위해 매립장에서 폐기 처리되고 있는 석탄회를 적극적으로 활용하고자 한다.

본 연구에서는 bottom ash와 표준사의 액상화에 대한 저항특성을 비교하기 위해 반복삼축시험과 공진주시험을 실시하였다. 표준사와 bottom ash의 경우 물성시험결과 사질토의 성질을 보이므로 역학 및 동적특성은 상대밀도에 의해 달라지므로 시험 시 시료의 조건을 동일하게 하기 위해 상대밀도시험을 실시하였으며 동일한 상대밀도에 해당하는 중량의 시료를 이용하여 표준사와 bottom ash의 액상화 저항특성에 대해 비교하였으며 시험결과를 통해 건설재료로서 가능성에 대해 비교·분석하고자 한다.

2. 시험내용

본 연구에서는 bottom ash의 건설재료로써 적합성을 판단하기 위해 입도가 대체적으로 균등한 모래인 주문진 표준사를 이용하여 건설재료의 적합성을 비교 분석하였다. 석탄회는 채취된 장소와 처리과정에 따라 특성이 달라질 수 있어 석탄회의 정적 및 동적거동 특성 등을 분석하기 전에 물성시험을 통해 석탄회의 기본적인 특성을 분석할 필요가 있다. 건설재료의 적합성 판단기준은 물리 특성과 상대밀도, 동적거동 특성을 알아보기 위한 실내시험을 실시하였다. 시험항목으로는 입도 및 비중, 액·소성시험 등의 물성시험과 밀도특성을 판단하기 위해 상대밀도시험, 동적거동 특성을 판단하기 위해 반복삼축시험과 공진주시험을 실시하였다. 표준사와 bottom ash의 경우 사질토로 상대밀도에 따라 특성이 달라질 수 있어 반복삼축시험과 공진주시험의 경우 상대밀도 조건의 동일하게 시험을 실시하였다. 반복삼축시험과 공진주시험의 상대밀도 조건은 상대밀도 40%와 70%에 해당하는 건조단위중량의 값을 이용하여 시료의 중량을 계산하여 적용하였다. Bottom ash는 영흥화력발전소에서 채취한 시료를 사용하였다. 본 논문에서는 시료의 물리 특성 및 상대밀도 특성과 동적거동 특성 측면에서 시험결과를 분석하였으며 환경적인 문제점이 발생하는 부분에 대해서는 배제하였다.

2.1 물성시험

본 연구에서는 영흥화력발전소에서 채취한 시료에 대해 기본적인 물성시험을 실시하였다. 시험 항목은 함수량, 비중, 입도분석시험, 액성한계 및 소성한계시험 등을 실시하였다. 영흥화력발전소에서 채취한 bottom ash와 주문진 표준사는 그림 1과 같다. 육안으로 시료를 관찰한 결과 입도는 대략 사질토의 성격을 가지며 화력발전소에서 발생된 시료로 재가 일부 함유되어 있었다. 시험 시 물에 시료가 녹지는 않았으나 채취하는 과정에서 함유된 재와 기름이 물에 뜨는 것이 확인되었다.



(a) 표준사



(b) Bottom ash

그림 1. Bottom ash와 표준사의 시료 전경

2.2 상대밀도시험

사질토 지반의 물리 역학적 특성은 입자의 조밀한 정도인 상대밀도에 따라 많은 차이를 보이게 된다. 지반의 상대밀도를 재현하기 위해서는 가장 느슨한 상태와 가장 조밀한 상태의 건조단위중량을 알아야 한다. 현장의 상대밀도를 재현하기 위해서는 최소 건조단위중량과 최대 건조단위중량을 ASTM D4254-91, ASTM D4253-93의 방법에 기초하여 실험을 한다. 본 연구에서는 bottom ash의 상대밀도 특성을 판단하기 위해 상대밀도시험법에 의한 방법으로 시험을 실시하였다. 최대상대밀도 3회, 최소 상대밀도 3회를 측정하여 평균한 값으로 최대 상대밀도, 최소 상대밀도 값을 각각 결정하였으며 반복삼축시

험 및 공진주시험에 사용할 상대밀도는 40%와 70%의 상대밀도에 해당하는 건조단위중량을 사용하였다. 그림 2는 표준사와 bottom ash의 상대밀도 측정 전경이다.

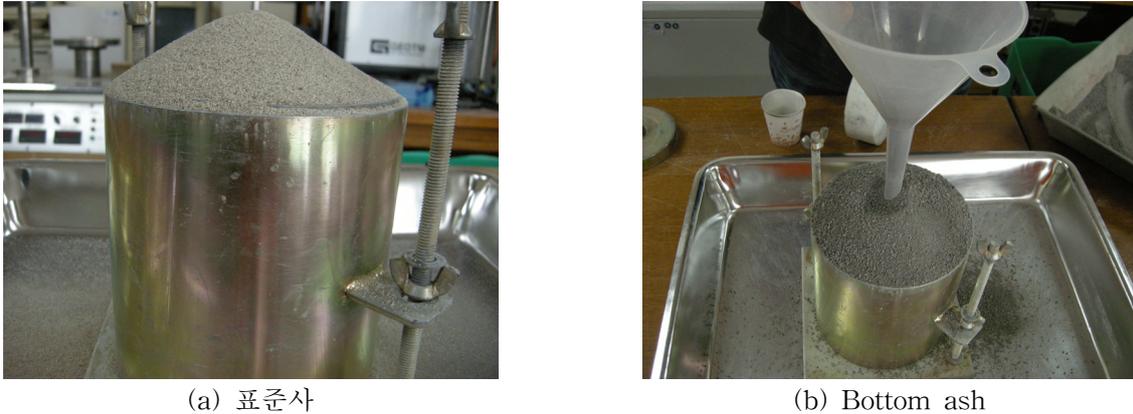


그림 2. Bottom ash와 표준사의 상대밀도시험 전경

2.3 반복삼축시험

일반적으로 반복삼축시험은 사질토의 액상화 저항력을 판단하기 위해 실시되며 표준관입시험, 콘관입시험, 딜라토미터시험 등의 현장시험과 입도분석시험 등의 실내시험을 통한 액상화 간편분석을 실시하여 액상화에 의한 파괴 가능성이 있는 지반에 대해 반복삼축시험을 실시하여 상세한 파괴 가능성을 분석하게 된다. 본 연구에 사용한 반복삼축시험장치는 GEO TM사의 반복삼축시험장치를 사용하였다. 시험에 사용된 시료의 상대밀도는 표준사와 bottom ash 상대밀도시험의 결과를 이용하여 상대밀도 40%와 상대밀도 70%에 해당하는 시료의 양을 사용하였으며 재하 주파수는 0.1Hz를 이용하였다. 시료의 성형은 시료의 직경과 높이를 측정하여 40%와 70%에 해당하는 시료의 중량을 산정하여 시료 성형을 실시하였다. 삼축시험장치는 크게 하중을 가하고 제거하는 부분인 기어부분과 시료가 거치되고 압력을 가하는 압력실과 기기의 제어 및 각종 결과 data를 수집하는 컴퓨터로 구분된다. 기어부분은 메인모터 부분과 서브모터로 구분되며 서브모터는 작은 기어가 모여있는 형태를 가지고 있어 축변위의 속도를 빠르게 하거나 느리게 하는 등의 축변위 속도의 조절과 서브모터의 기어를 제거하거나 추가하여 축변위 속도를 조절 할 수 있다.

2.4 공진주시험

공진주 시험은 전단탄성계수, 전단변형률, 감쇠비를 산정하여 사질토 및 점성토시료의 동적거동 특성을 판단하는 시험이다. 본 연구에 사용한 공진주시험장치는 GEO TM사의 공진주시험장치를 사용하였다. 시험에 사용된 시료의 상대밀도는 반복삼축시험과 동일하게 표준사와 bottom ash 상대밀도시험의 결과를 이용하여 상대밀도 40%와 70%에 해당하는 시료의 양을 사용하였으며 압밀하중은 50kPa, 100kPa, 200kPa의 압밀하중을 이용하였다. 시료의 성형은 시료의 직경과 높이를 측정하여 40%와 70%에 해당하는 시료의 중량을 산정하여 시료 성형을 실시하였다.

3. 시험결과

석탄회는 생성과정과 배출 후의 처리방법 그리고 경과시일 등에 따라서 시료의 특성이 현저히 다르기 때문에 일률적으로 석탄회의 성질을 판단하기는 어려움이 있다. 따라서 석탄회에 대한 연구를 수행할 경우 연구대상인 석탄회의 성질에 대한 충분한 검토가 되어야 한다. 본 연구에 사용된 석탄회인 bottom

ash는 영흥화력발전소에서 채취된 시료로 시험결과는 다음과 같다.

3.1 물성시험 결과

Bottom ash와 표준사의 물리적 특성을 비교하기 위한 물성시험을 실시하였다. 시험 항목은 위에서 언급한 바와 같이 입도, 비중, 액·소성시험을 실시하였으며 결과는 그림 3과 표 1과 같다. 물성시험결과 bottom ash는 입도가 불량한 모래 혹은 실트질 모래(SP-SM)의 성격을 나타냈으며 발전소에서 채취할 당시의 함수비는 1.39%였다. 액성시험과 소성시험의 결과는 비소성(NP)로 판단되었으며 비중값은 여러 번의 시험을 실시한 결과 시료의 상태에 따라 2.00에서 2.30으로 편차를 많이 보였으며 기존의 연구결과에 비해 큰 값에 분포되었으며 표준사에 비해 아주 작은 값을 보였다. 입도분포곡선으로 구한 균등계수(C_u)는 5.67의 값을 보였으며 곡률계수(C_g)는 0.76의 값을 보였다. 표준사의 시험결과 입도가 불량한 모래(SP)로 입도분포가 분석되었고 액성시험 및 소성시험은 비소성(NP)로 판단되었으며 비중은 2.65의 값을 보였다. 입도분포곡선을 통한 균등계수(C_u)는 3.22, 곡률계수(C_g)는 1.15의 값을 보였다. Bottom ash의 입도분포결과 SP와 SM의 이중적인 성격을 보였다.

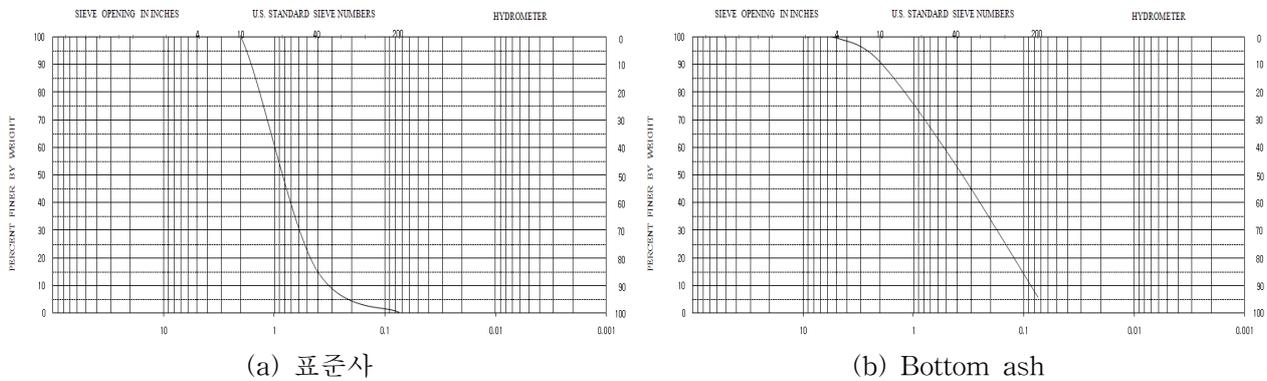


그림 3. 입도 분포 곡선

표 1. 표준사와 Bottom ash의 물리시험

물성치 시료	G_s	흙의 분류	액·소성시험		입도분석			
			W_L	I_p	#4 통과량	#200 통과량	C_u	C_g
표준사	2.65	SP	NP	NP	100	0.44	3.22	1.15
Bottom ash	2.0~2.3	SP-SM	NP	NP	100	5.35	5.67	0.76

3.2 상대밀도시험 결과

상대밀도시험 결과는 표 2와 같다. 표준사의 최대 건조단위중량은 15.9kN/m^3 이며 최소 건조단위중량은 13.7kN/m^3 이다. bottom ash의 최대 건조단위중량은 9.3kN/m^3 이며 최소 건조단위중량은 8.4kN/m^3 의 결과를 보였다. 몰드의 부피는 1000cm^3 의 A다짐 몰드를 이용하여 시험을 실시하였다. 비중시험에서 bottom ash의 경우 표준사에 비해 작은 값으로 나타났으며 상대밀도 시험의 결과에서도 bottom ash가 건조단위중량이 작게 산정되었다. 단순히 상대밀도의 시험 결과를 보면 bottom ash가 단위중량이 작아 연약지반의 경량 재료로 사용 가능성을 확인하였다.

표 2. 상대밀도시험 결과

시료	몰드부피 (cm ³)	최대 건조단위중량 (kN/m ³)	최소 건조단위중량 (kN/m ³)	비고
표준사	1000	15.9	13.7	
Bottom ash	1000	9.3	8.4	

3.3 반복삼축시험

반복삼축압축시험 결과는 일반적으로 반복횟수에 대한 축차응력(σ_d), 과잉간극수압(u), 축변형률 등으로 표시하며 상대밀도별로 시험결과를 다음과 같다.

3.3.1 상대밀도 40%에서 반복응력비와 반복횟수의 관계

그림 4는 표준사와 bottom ash의 상대밀도 40%에 해당하는 액상화 저항응력비(CSR) 곡선이다. 표준사의 경우 반복횟수 10회에 해당하는 액상화 저항응력비는 양진폭 축변형률이 5%인 경우 0.20 값을 보이며 양진폭 축변형률이 10%인 경우에는 0.22의 값을 보였다. Bottom ash의 경우 액상화 저항응력비는 양진폭 축변형률이 5%인 경우 0.33의 값을 나타내며 양진폭 축변형률이 10%인 경우에는 0.34의 값을 보였다.

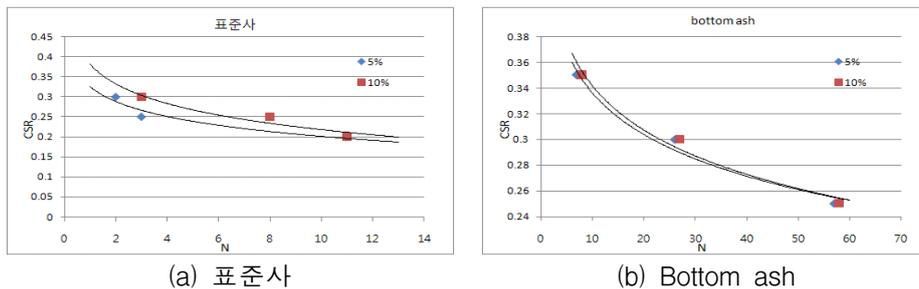


그림 4. 반복횟수와 응력비의 관계(상대밀도 40%)

3.3.2 상대밀도 70%에서 반복응력비와 반복횟수의 관계

그림 5는 표준사와 bottom ash의 상대밀도 70%에 해당하는 액상화 저항응력비 곡선이다. 표준사의 경우 액상화 저항응력비는 양진폭 축변형률이 5%인 경우 0.28 값을 보이며 양진폭 축변형률이 10%인 경우에는 0.30의 결과를 보였다. Bottom ash의 경우 액상화 저항응력비는 양진폭 축변형률이 5%인 경우 0.34의 값을 나타내며 양진폭 축변형률이 10%인 경우에는 0.35를 보였다.

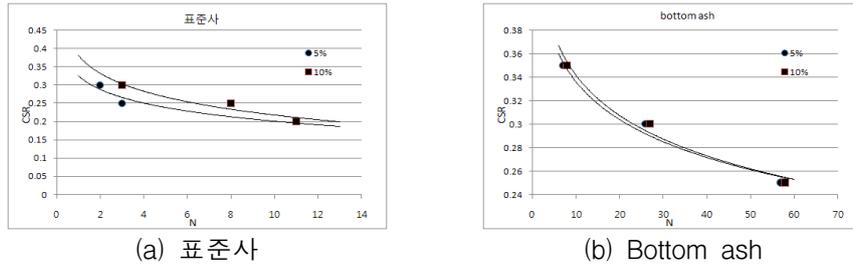


그림 5. 반복횟수와 응력비의 관계(상대밀도 70%)

3.3.3 상대밀도 변화에 따른 액상화 강도의 변화

다음의 그림 6은 표준사와 bottom ash의 상대밀도와 양진폭 축변형률에 따른 결과이다. 반복응력비의 값을 양진폭변형률과 상대밀도, 응력비의 관계이다. 여기에서 상대밀도가 높을수록 양진폭 축변형률이 클수록 반복응력비가 증가하였다. 표준사와 bottom ash의 경우 상대밀도 40%의 양진폭 축변형률이 10%와 상대밀도 70%의 양진폭 축변형률이 5%인 경우의 반복응력비의 값이 비슷하였다. 표 3은 액상화 저항응력비이다.

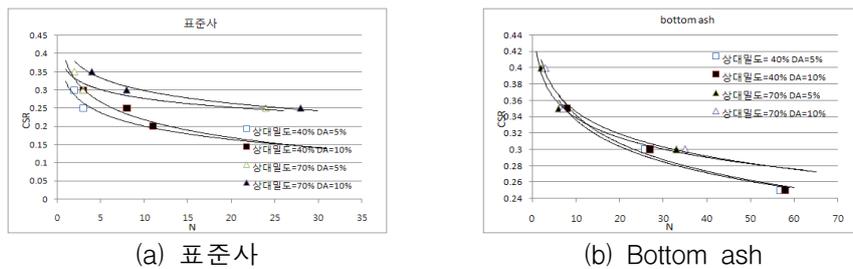


그림 6. 상대밀도에 따른 반복횟수 응력비 관계

표 3. 반복삼축시험결과에 의한 액상화 저항응력비

상대밀도	축변형률 5%		축변형률 10%	
	표준사	Bottom ash	표준사	Bottom ash
40	0.20	0.33	0.22	0.34
70	0.28	0.34	0.30	0.35

3.4 공진주시험

공진주시험 결과는 일반적으로 구속압밀하중에서 전단변형에 대한 전단탄성계수와 정규화된 전단탄성계수, 재료감쇠비의 곡선으로 표시하며 상대밀도별로 시험결과를 다음과 같다.

3.4.1 상대밀도 40%일 때 공진주시험결과

그림 7은 표준사와 bottom ash 상대밀도 40%의 전단탄성계수, 정규화전단탄성계수, 재료감쇠비의 값을 구속압밀하중에 따른 결과이다. 표준사와 bottom ash의 결과 곡선은 비슷하였다. 표 4는 상대밀도 40%의 공진주 시험결과로 구속압에 따른 최대전단탄성계수값이다.

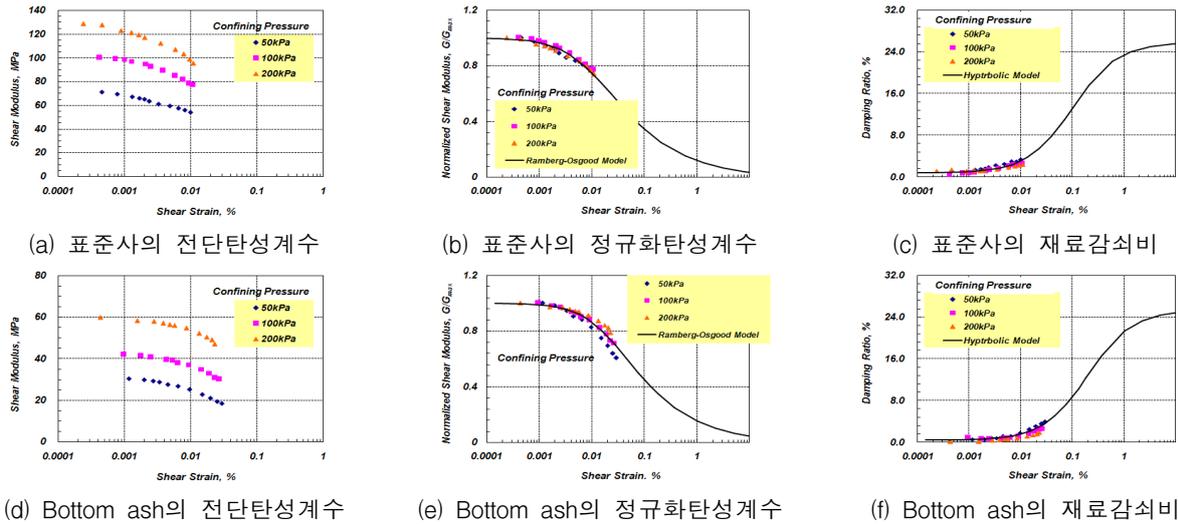


그림 7. 구속압에 대한 공진주시험 결과(상대밀도 40%)

표 4. 상대밀도 40%의 구속압에 따른 최대전단탄성계수 결과

표준사	구속압(kPa)	50	100	200
	G_{max} (Mpa)	71.305	100.651	128.960
Bottom ash	구속압(kPa)	50	100	200
	G_{max} (Mpa)	30.475	42.220	59.894

상대밀도 40%의 공진주 시험결과 표준사의 전단탄성계수는 구속압 50kPa에서 71.35MPa, 구속압 100kPa에서 100.65MPa, 구속압 200kPa에서는 128.96MPa의 값을 보였으며 bottom ash의 경우에는 구속압 50kPa에서 30.47MPa, 구속압 100kPa에서 42.22MPa, 구속압 200kPa에서는 59.90MPa의 결과를 보여 표준사의 전단탄성계수가 42%에서 46% 정도 큰 값을 보였다. 구속압이 높아질수록 전단탄성계수가 증가하였으며 정규화전단탄성계수 곡선의 선형영역이 점차 증가하였다. 재료감쇠비의 곡선은 구속압이 작아질수록 곡선의 선형영역이 점차 증가하였다. 표준사보다 bottom ash의 선형영역이 구속압의 변화에 따라 증가 폭이 컸다.

3.4.2 상대밀도 70%일 때 공진주시험 결과

그림 8은 표준사와 bottom ash의 상대밀도 70%에 대한 전단탄성계수, 정규화전단탄성계수, 재료감쇠비의 값을 구속압밀하중에 따라 시험을 한 결과이다. 상대밀도 70%의 공진주 시험결과 표준사의 전단탄성계수는 구속압 50kPa에서 75.88MPa, 구속압 100kPa에서 108.28MPa, 구속압 200kPa에서는 133.27MPa의 값을 보였으며 bottom ash의 경우에는 구속압 50kPa에서 32.56MPa, 구속압 100kPa에서 46.81MPa, 구속압 200kPa에서는 65.34MPa로 표준사의 전단탄성계수가 43%에서 49%로 컸다. 표 5는 상대밀도 70%의 공진주 시험결과로 구속압에 따른 최대전단탄성계수값이다.

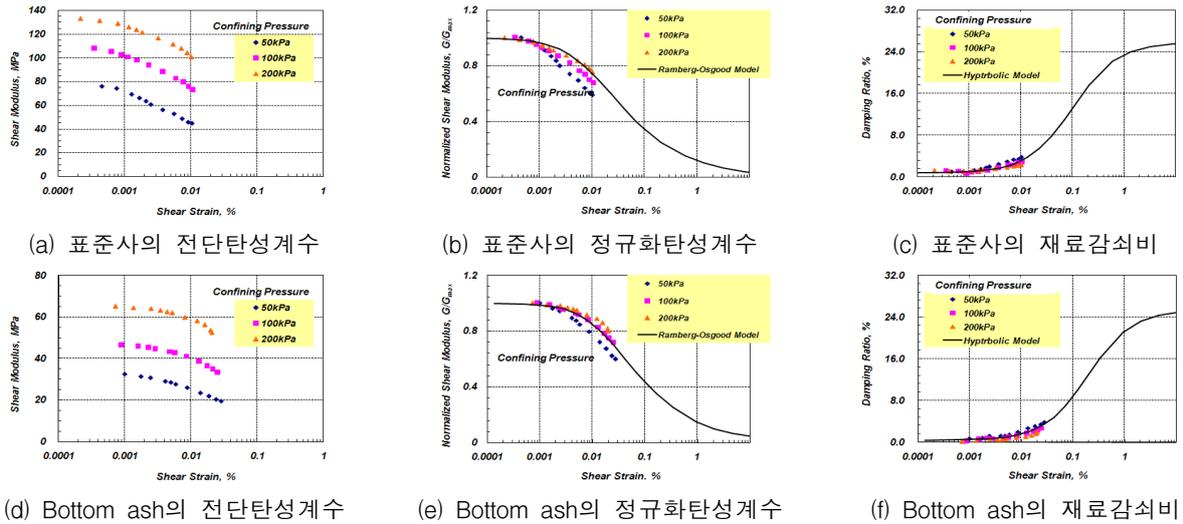


그림 8. 구속압에 대한 공진주시험결과(상대밀도 70%)

표 5. 상대밀도 70%의 구속압에 따른 최대전단탄성계수 결과

표준사	구속압(kPa)	50	100	200
	G_{max} (Mpa)	75.884	108.279	133.270
Bottom ash	구속압(kPa)	50	100	200
	G_{max} (Mpa)	32.558	46.811	65.342

상대밀도 70%도 상대밀도 40%와 비슷한 경향을 보여 구속압이 높아질수록 전단탄성계수가 증가하였으며 정규화전단탄성계수 곡선의 선형영역이 점차 증가하였다. 재료감쇠비의 곡선은 구속압이 작아질수록 곡선의 선형영역이 점차 증가하였다. 상대밀도 70%에서는 표준사와 bottom ash의 선형영역이 구속압의 변화에 따라 비슷한 경향을 보였으며 정규화전단탄성계수의 곡선과 재료감쇠비 곡선의 기울기는 bottom ash가 컸다.

4. 결론

본 연구에서는 영흥화력발전소에서 발생한 석탄회인 bottom ash가 연약개량 등의 건설 대체 재료로서의 가능성을 평가하기 위해 bottom ash, 표준사 각각에 대해서 물리적 특성, 동적거동 특성을 파악하고자 물성시험, 반복삼축시험 및 공진주시험을 실시하여 비교·분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 반복삼축시험 결과 표준사의 액상화 저항능력비를 양진폭 축변형률 5%와 10%에 대해 비교하면 0.02 정도 증가하였고, bottom ash의 경우에는 0.01정도 증가하였다. 따라서 일반적인 액상화 발생 평가기준인 양진폭 축변형률 5% 이후에는 bottom ash가 표준사에 비해 미약하지만 액상화 진행속도가 빨랐다.
2. 표준사의 경우 상대밀도가 클수록 액상화 저항능력비가 0.08정도 증가하였으나 bottom ash의 경우 액상화 저항능력비는 0.01정도 증가하였다.
3. 상대밀도 40%에서 bottom ash는 표준사에 비해 액상화 저항능력비가 0.12에서 0.13정도 컸으며, 상대밀도 70%에서는 0.05에서 0.06정도 액상화 저항능력비가 크게 나타났다.
4. 공진주 시험결과 표준사의 경우 구속압에 크기에 따른 전단탄성계수 값의 변화가 컸으나 bottom ash는 구속압에 크기에 따른 전단탄성계수 값의 변화가 작았다.

5. 또한, 상대밀도에 따라 표준사의 전단탄성계수가 bottom ash보다 45%에서 49%정도 크게 나타나 향후 건설재료로 적합성에 대해 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

이상에서와 같이 화력발전소에서 발생하는 석탄회의 폐기에 따른 경제적인 손실은 큰 것으로 판단되며 매립에 따른 추가 비용을 줄이고 연약지반의 개량 등에 석탄회를 사용한다면 경제적인 이익이 클 것으로 추정된다.

참고문헌

1. 산업자원부, (2005), “Bottom Ash를 활용한 Chemical Compaction Pile 제조 및 시공기술 개발”.
2. 산업자원부, (2002), “석탄회를 이용한 환경친화 건자재의 개발”.