

Bottom Ash의 액상화 저항특성 연구

A Study on the Liquefaction Behavior of Bottom Ash

윤 원 섭¹ Yoon, Won-Sub

채 영 수² Chae, Young-Su

Abstract

In this study relative density tests of bottom ash and standard sand were carried out. And cyclic triaxial tests for samples with the relative density of 40%, 55%, and 70% were carried out on the basis of the test results. Cyclic triaxial tests were also conducted for fines content with 55% relative density. Residual samples were divided into No.40, No.60, No.100, and No.200. In order to avoid crashing that can happen when compaction of the sample is initiated, bottom ash was crushed using the a compact mold. In consideration of the crushing characteristics of each residual samples, the fragmentation rate increased up to 30%, which led to the adjustment of fine-grained amount to 10%, 20%, and 30%. Through the repative triaxial test in accordance with the relative density, resistant characteristics of the liquefaction of bottom ash was analyzed. Test results show that, crushing strength of bottom ash was smaller than that of standard sand, resulting in different liquefaction behavior characteristics. And we could find fines content with maximum resistant characteristics of the liquefaction.

요 지

본 연구에서는 Bottom Ash와 표준사의 상대밀도시험을 실시하여 시험결과를 토대로 40%, 55%, 70%의 상대밀도로 반복삼축시험을 실시하였다. 또한, 55%의 상대밀도로 세립분 함유량에 따른 반복삼축시험을 실시하였다. 시료는 No.40체, No.60체, No.100체, No.200체 잔류시료로 분류를 하여 현장에서 시료의 다짐을 실시한 경우 발생할 수 있는 시료의 파쇄를 고려하여 Bottom Ash를 A다짐 몰드를 이용한 파쇄시험을 실시하였다. 각 체의 잔류시료의 파쇄특성을 고려하면 A다짐에 따른 파쇄율은 약 30%까지 증가하게 되어 세립분 함유량을 10%, 20%, 30%로 조정하여 상대밀도시험을 실시하였다. 상대밀도에 따른 반복삼축시험을 통해 Bottom Ash의 액상화 저항특성을 분석하였다. 시험결과 Bottom Ash의 경우 파쇄강도가 표준사에 비해 작아 축차응력에 크기에 따라 기존 포화사질토와 상이한 액상화 거동특성을 보였으며, 시료의 세립분의 함유량에 따라 액상화 저항특성이 최대인 세립분 함유량을 찾을 수 있었다.

Keywords : Bottom Ash, Cyclic triaxial test, Fine content, Liquefaction, Particle size, Relative density test

1. 서 론

최근 석탄회의 매립에 의한 비용절감과 모래 대체 재료로 활용을 위하여 남부발전과 광해관리공단은 석탄

회의 기술개발과 상용화를 공동 추진해 광해방지사업을 수행하는 것을 주요내용으로 하는 협약을 맺었다. 석탄회를 100% 재활용함으로써 ‘석탄 발전소에는 회 처리장이 필요하다’는 기존 관념을 깨고 국내 최초로

1 정회원, 수원대학교 토목공학과 공학박사 (Member, Ph.D., Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Suwon, totoma13@suwon.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Suwon)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

회처리장이 없는 대용량 석탄 발전소 건설을 실현하는 전기를 마련한 것으로 예상하고 있으나 국내의 경우 석탄회 활용실적과 연구는 많이 미흡한 실정이다. 외국의 연구결과를 보면 Sweeny 등(1996)은 bottom ash에 동다짐을 실시하고 Bottom Ash의 동다짐에 따른 파쇄특성에 대해 연구하였으며, Chu 등(1993)은 석탄회 슬래그를 점토에 혼합하여 점토의 강도 증가 실험을 수행하기도 하였고, Seals 등(1972)은 미국지역에서 발생하는 Bottom Ash의 특성에 대해 연구를 수행하였다. 최근 들어 국내에서 Bottom Ash의 연구가 활발히 진행 중이며, 김상천(2009)은 Bottom Ash를 sand mat용 재료로 활용하기 위해 실내시험과 현장 시공을 통한 실용화 연구를 실시하였으며, 이호영(2008)은 세립분 함유량에 따른 석탄회의 액상화 거동 특성에 대해 상대다짐도에 따라 연구를 수행한 결과 실트 성분이 증가할수록 액상화 저항강도가 작아지는 것으로 나타났다. 이영휘(2008)는 Bottom Ash의 연직배수재로서 활용 가능성에 대해 연구를 수행하였고, 김영진(2005)은 Bottom Ash를 활용한 콘크리트 골재의 사용에 관한 실험 연구를 수행하였으나 동적거동 특성에 대한 연구 결과는 미흡한 실정이다. 따라서 석탄회를 어떻게 하면 재활용할 수 있는가의 문제가 오늘날의 당면과제로 제기되고 있으며, 이에 대한 원만한 해결을 위해 매립장에서 폐기 처리되고 있는 석탄회에 대한 연구를 활발히 수행할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 재활용보다 매립에 의존하고 있는 Bottom Ash를 활용하기 위해 No.40체, No.60체, No.100체, No.200체로 체가름시험을 실시하고, 각체 잔류시료에 대해 상대밀도시험과 다짐에 따른 파쇄시험, 액상화 저항특성 파악을 위한 반복삼축시험을 실시하였다. 각체 잔류시료와 표준사에 대해 상대밀도의 조밀하고, 느슨한 정도에 따라 상대밀도 40%, 55%, 70%로 반복삼축시험을 실시하였으며, 각체 잔류시료에 No.200체 통과시료를 10%, 20%, 30% 함유하여 중간정도 조밀한 상태인 상대밀도 55%로 반복삼축시험을 실시하여 Bottom Ash의 액상화 저항특성을 비교 분석하였다.

2. 액상화 평가

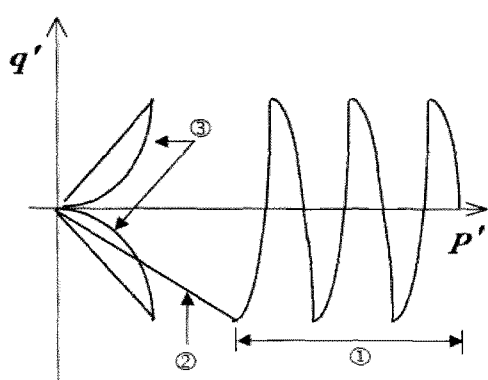
액상화가 일어날 가능성에 대한 평가는 지진 시의 진동 전단응력과 지반의 액상화 저항강도를 비교하여 판정할 수 있다. 지반의 액상화 저항강도비는 평가방법에 따라 표준관입시험, 콘관입시험, 그리고 전단파 속도를 이용한 방

법과 같이 현장시험에 의한 경험적인 방법과 단순전단시험, 반복삼축시험 등과 같은 실내시험에 의한 방법으로 나눌 수 있다. 액상화 반복 저항강도비는 불교란 시료에 대한 실내시험을 이용한 방법을 통해 평가하는 것이 바람직하지만 실내시험을 통해서도 현장응력상태를 재현할 수 없고, 기존의 시료 채취방법으로는 시료의 교란이 크게 발생하게 된다. 주로 현장지반의 지반심도에 따른 전응력 개념의 액상화 범위를 평가하고, 지진시 발생하는 반복전단응력과 지반이 저항하는 반복전단강도간의 상관관계로부터 액상화 안전율을 산정하게 된다. 안전율이 1보다 크게 나타나면 액상화에 대한 저항값이 지진하중을 초과하는 것을 의미하므로 액상화가 발생하지 않는 것으로 간주하고 있으나, 시설물의 중요성을 고려하여 액상화 허용안전율을 마련하여 평가하고 있다. 이때의 액상화에 대한 안전율은 식 (1)과 같이 지반의 액상화 저항응력비(cyclic resistance ratio; CRR)와 지진에 의한 전단응력비(cyclic stress ratio; CSR)의 비로 나타낼 수 있다(김종국, 2009).

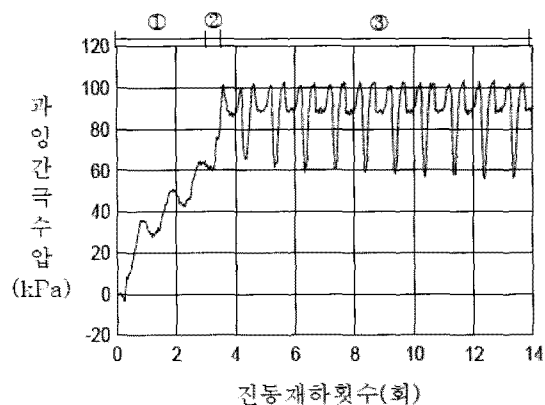
$$F = \frac{\tau_1 / \sigma_v'}{\tau_d / \sigma_v'} \quad \text{즉, } F_s = \frac{\text{CRR}}{\text{CSR}} \quad (1)$$

대상지반의 입도분포, 표준관입시험의 N치 등에 의한 액상화 간이평가 결과 액상화에 취약한 지반인 경우 또는 내진 1등급 구조물인 경우 지진응답해석과 실내 반복삼축시험을 이용하여 액상화 상세 평가를 수행한다. 액상화 저항응력비(진동전단저항응력비, Cyclic Stress Ratio, CSR)는 반복재하횟수에 따른 전응력으로 나타내는 액상화 저항응력비 특성곡선을 이용하여 산정한다. 액상화 저항응력비 특성곡선은 3수준 이상의 반복 전단응력비(τ_d / σ_v')를 변화시켜 수행된 실내 반복삼축시험결과를 토대로 도시하며, 특성곡선에 이용되는 실내 반복삼축시험 결과는 현장지반조건 및 지진특성 등을 고려한 보정작업이 수행되어야 한다(구조물기초설계기준, 2003). 반복삼축시험에 의한 액상화 저항응력비의 산정 방법으로 국내에서는 항만 및 어항시설 내진설계표준서(1999)에서 한시적으로 제안된 설계지진규모 6.5에 해당하는 10회 시 반복전단응력비 값을 액상화 저항응력비로 사용을 추천하고 있다. 따라서 본 연구에서는 반복삼축시험을 통한 액상화저항응력비 값은 국내 설계기준에서 제안한 지진규모 6.5에 해당하는 10회의 값을 이용하였다.

그림 1은 반복삼축시험 시의 거동상태로서 그림 1(a)는 유효응력경로이며, 그림 1(b)는 진동재하횟수에 따른 간극수압의 증가를 보여주고 있다. 일반적인 반복삼

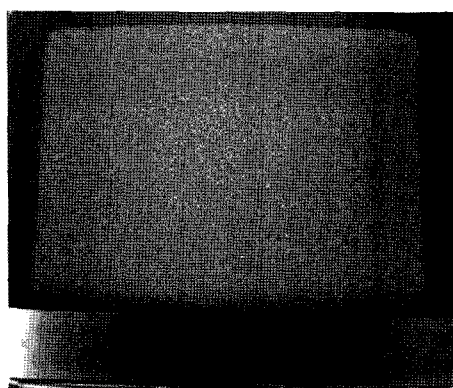


(a) 유효응력경로

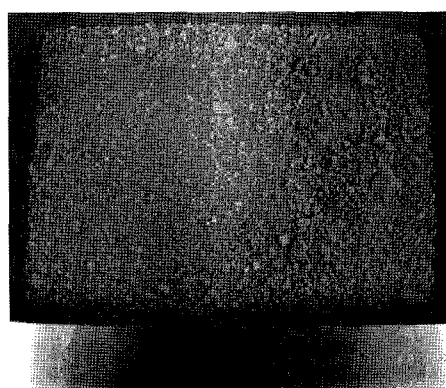


(b) 과잉간극수압

그림 1. 반복하중을 받는 등방구속하의 포화사질토의 거동(최재순, 2003)



(a) 표준사



(b) Bottom Ash

그림 2. Bottom Ash와 표준사의 시료 전경

축시험에 있어서 등방압밀하중하의 토립자 내부의 응력변화 및 과잉간극수압의 동적 거동변화를 살펴보면 그림 1과 같이 거동변화를 3부분(①점진적 응력감소, ②급진적 응력감소, ③액상화 후 파괴거동)으로 구분할 수 있으며, 응력경로에서와 같이 급진적응력감소의 상태변화를 나타내는 시점부터 실제적인 초기 액상화가 발생하는 것으로 정의하였다(최재순, 2003).

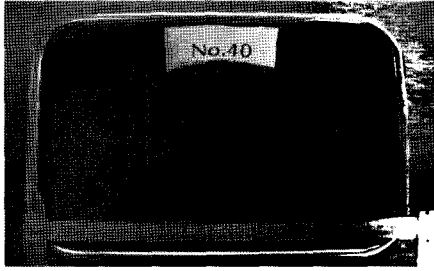
3. 시험내용

본 연구에서 사용된 Bottom Ash는 회처리과정을 거쳐 배출된 시료를 No.40체, No.60체, No.100체, No.200체에 잔류한 시료로 나누어 시험을 실시하였으며, No.40체부터 시료를 분류한 이유는 시험에 사용된 Bottom Ash의 경우 회처리과정을 거쳐 배출된 시료의 체가름시험결과 No.40체보다 큰 체에서는 대부분 시료가 통과하여 No.40체부터 사용하게 되었다. 시험항목으로는 상대밀도시험과 다짐시험에 의한 파쇄시험, 반복삼축시험을

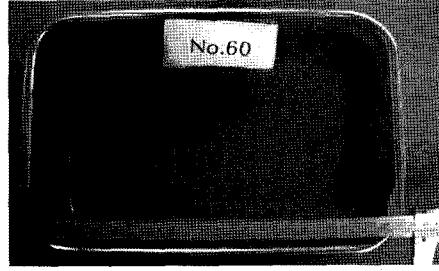
실시하였다. 연구에 사용된 표준사와 Bottom Ash는 그림 2와 같고, 각 체에 잔류한 시료와 세립분 시료는 그림 3, 그림 4와 같다. 선행연구에 의하면 Bottom Ash는 체가름시험결과 입도가 불량한 모래 혹은 실트질 모래(SP-SM)로 표준사에 비해 비교적 고른 입도를 보였으며, 비중값은 평균 2.0을 보여, 표준사에 비해 작은 값을 보였다(윤원섭 등, 2010).

3.1 상대밀도시험

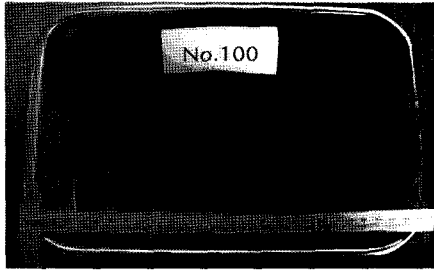
사질토 지반의 물리·역학적 특성은 입자의 조밀한 정도인 상대밀도에 따라 많은 차이를 보이게 된다. 지반의 상대밀도를 재현하기 위해서는 가장 느슨한 상태와 가장 조밀한 상태의 건조단위중량을 알아야 하며, 최소 건조단위중량과 최대 건조단위중량은 ASTM D4254-91, ASTM D4253-93의 방법에 기초하여 실험을 하게 된다. 표 1은 상대밀도 시험조건으로 Bottom Ash의 상대밀도특성을 판단하기 위해 표준사와 Bottom Ash 각체 잔류시료를 몰



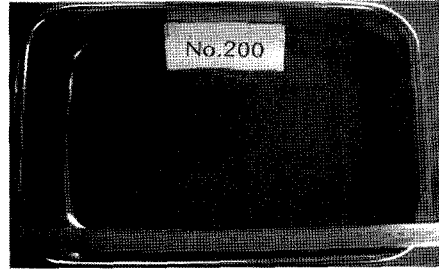
(a) No.40체



(a) No.60체



(a) No.100체



(a) No.200체

그림 3. 입경별 잔류 시료



그림 4. 세립분 시료

상태에 따라 시료의 특성이 바뀌게 되어 상대밀도는 40%, 55%, 70%로 시험조건을 통일하여 상대밀도 크기에 따른 반복삼축시험 거동 특성을 확인하였다. 또한, 각 체 잔류시료에 대해 세립분 함유량을 10%, 20%, 30%로 함유하여 최대 상대밀도, 최소 상대밀도를 결정하였으며, 세립분 함유량 시험의 상대밀도는 조밀한 경우에는 시료의 파괴에 도달하는 순간이 길고, 결과값이 크게 나오며, 느슨한 상태는 시험 시 시료의 파괴가 빨리 발생하여 결과값이 작게 나오므로 중간정도 조밀한 상태인 상대밀도인 55%로 세립분 함유량에 따른 건조단위중량을 계산하여 세립분 함유량에 따른 반복삼축시험에 사용하였다.

드에 진동하중을 주어 최대 상대밀도와 최소상대밀도를 결정하였으며, Bottom Ash의 경우 파쇄강도가 약하여 상대밀도시험 시 상재하중을 제거하고, 진동하중을 주어 시험을 실시하여 입자의 파쇄를 최소화 하였다. 시험에 사용된 시료는 사질토 성질을 보이므로 느슨하고 조밀한

3.2 파쇄시험

각체의 잔류시료에 대한 파쇄시험은 다짐시험으로

표 1. 상대밀도시험 조건

| 구 분 | | 상대밀도(Dr, %) | 세립분 함유량(%) | 비고 | |
|--------------|------------|--------------|------------|----|---------------|
| 상대밀도시험 | 표준사 | 40, 55, 70 | - | | |
| | Bottom Ash | No.40체 잔류시료 | 40, 55, 70 | | - |
| | | No.60체 잔류시료 | | | |
| | | No.100체 잔류시료 | | | |
| | | No.200체 잔류시료 | | | |
| | Bottom Ash | No.40체 잔류시료 | 55 | | 10%, 20%, 30% |
| | | No.60체 잔류시료 | | | |
| | | No.100체 잔류시료 | | | |
| No.200체 잔류시료 | | | | | |

실시하였다. 다짐시험은 미국의 프록터(Proctor)가 흙댐의 시공관리와 관련하여 다짐시험을 공사에 적용하는 방법을 제안한 후 사용되기 시작했고, 우리나라에서도 이 시험을 근간으로 해서 KS F 2312로 규정되어 실시하고 있다. Bottom Ash의 경우 기공이 존재하고, 입자의 크기가 클수록 파쇄강도가 약해 다짐을 실시할 경우 파쇄가 발생되므로 건조시료를 이용하여 A 다짐시험에 의한 시험물드와 햄머, 다짐층수, 다짐횟수를 고려한 다짐 에너지로 입자의 파쇄에 따른 세립분 증가를 확인하였다.

3.3 반복삼축시험

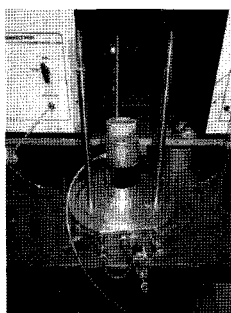
일반적으로 반복삼축시험은 사질토의 액상화 저항력

을 판단하기 위해 실시된다. 본 연구에 사용한 반복삼축 시험장치는 GEO TM사의 반복삼축시험장치를 사용하였다. 반복삼축시험의 조건은 표 2와 같다. 시험에 사용된 시료는 Bottom Ash 각체 잔류시료와 표준사를 사용하였으며, 재하 주파수는 0.1Hz, 구속압밀하중은 100kPa를 이용하였다.

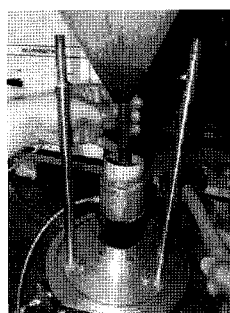
반복삼축시험 과정과 장치 개요도는 그림 5, 그림 6과 같다. 시험과정은 시료성형 후 포화, 압밀, 반복하중 재하의 과정을 거치며, 시료의 성형은 시료의 직경과 높이를 측정하여 각각의 상대밀도에 해당하는 시료의 중량을 산정하여 시료 성형을 실시하였다. 시료성형 시 밀도가 고르지 않으면 시험과정에서 반복하중을 가하는 경우 시료는 순간적인 파괴가 일어나기 때문에 고른 밀

표 2. 반복삼축시험 조건

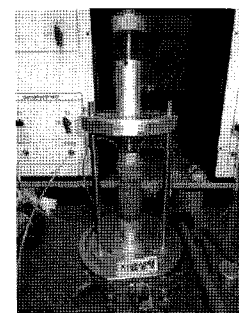
| 구분 | 상대밀도(Dr, %) | 세립분 함유량(%) | 축차응력(kPa) | 재하속도 | 유효응력 | 비고 |
|------------|--------------|------------|-----------|-------|--------|----|
| 표준사 | 40, 55, 70 | - | 40~70 | 0.1Hz | 100kPa | |
| Bottom Ash | No.40체 잔류시료 | 40, 55, 70 | 40~80 | | | |
| | No.60체 잔류시료 | | 40~80 | | | |
| | No.100체 잔류시료 | | 50~90 | | | |
| | No.200체 잔류시료 | | 50~80 | | | |
| | No.40체 잔류시료 | 55 | 40~80 | | | |
| | No.60체 잔류시료 | | 40~80 | | | |
| | No.100체 잔류시료 | | 50~90 | | | |
| | No.200체 잔류시료 | | 50~80 | | | |



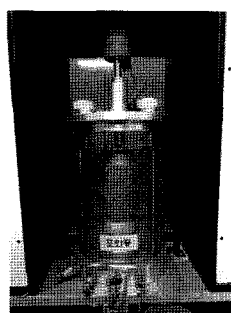
(a) 멤브레인 Setting



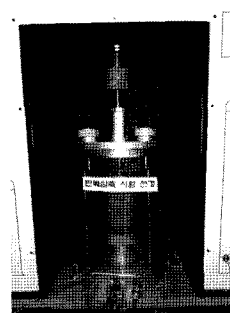
(b) 시료 성형



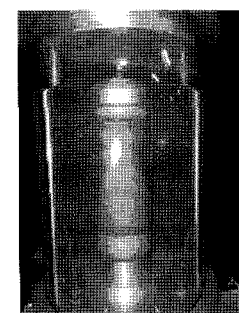
(c) 시료 성형 완료



(d) 시료포화



(e) 시료압밀



(f) 반복하중재하

그림 5. 반복삼축시험 과정

도로 시료 성형이 필요하다. 따라서 본 연구에서 그림 7은 시료의 성형방법으로 건조한 시료를 3개의 동일한 무게 시료로 나눈 후 하부패테스탈에 시료성형장치를 고정시키고, 시료를 3개의 층으로 나누어 망치에 의한 진동에너지를 시료의 밀도를 고르게 성형하였다. 시료의 포화과정은 셀의 구속압을 195kPa, 배압을 200kPa로 지속적으로 가하여 포화도가 90%이상의 조건에서 시험을 실시하였다. 일반적인 삼축압축시험에서 포화도는 95%이상의 조건에서 시험이 실시되어야하지만 물에 잘 녹는 CO₂를 시료에 주지 않으면 현실적으로 포화도를 95%이상을 만들 수 없기 때문에 구속압과 배압만을 가하여 현실적으로 포화도를 맞출 수 있는 범위내에서 시

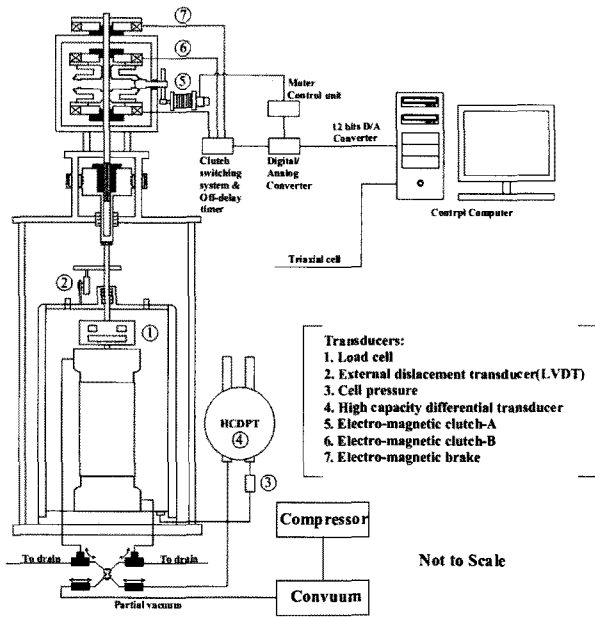


그림 6. 반복삼축시험장치 개요도

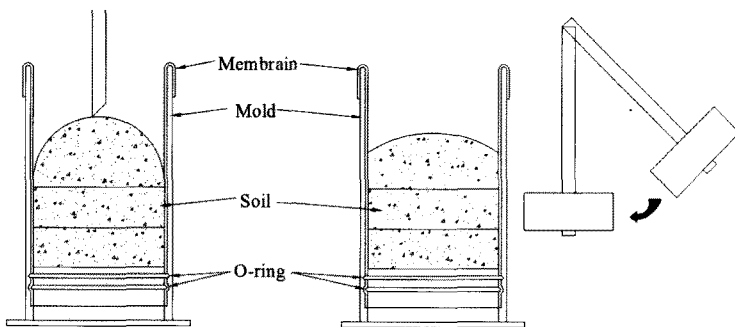
험하였다. 반복삼축시험장치는 크게 하중을 가하고, 제거하는 부분인 기어부분과 시료가 거치되고, 압력을 가하는 압력실과 기어의 제어 및 각종 결과 data를 수집하는 컴퓨터로 구분된다. 기어부분은 메인모터 부분과 서브모터로 구분되며, 서브모터는 작은 기어가 모여있는 형태를 가지고 있어 축변위의 속도를 빠르게 하거나 느리게 하는 등의 축변위 속도의 조절 할 수 있다.

4. 시험결과

석탄회는 석탄의 종류와 생성과정, 배출 후의 처리방법 그리고 경과시일 등에 따라 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 Bottom Ash는 영흥화력 발전소에서 채취한 시료로 시험결과는 다음과 같다.

4.1 상대밀도특성

상대밀도시험 결과는 표 3과 같다. 표준사의 최대 건조단위중량은 15.9kN/m³이며, 최소 건조단위중량은 13.7 N/cm³이다. No.40체 잔류시료의 경우 최소단위중량은 5.5kN/m³, 최대단위중량은 7.3kN/m³로 작은 단위중량을 보였으며, No.200체 통과시료의 경우 최소단위중량은 8.97kN/m³, 최대단위중량은 11.00kN/m³으로 전체적으로 Bottom Ash는 최소단위중량과 최대단위중량의 차이는 약 2kN/m³을 보였다. Bottom Ash는 입자의 크기가 클수록 기공이 많이 존재하여 단위중량이 작아지는 현



(a) 시료성형 모식도



(b) 시료성형

그림 7. 시료성형방법

상을 나타냈다. 또한, 세립분 함유량에 따른 상대밀도시험 결과 세립분의 함유량이 증가할수록 단위중량은 증가하였다. No.40체 잔류시료의 세립분 증가에 따른 단위중량 증가 폭이 가장 컸으며, No.200체 잔류시료의 세립분 함유량 증가에 따른 단위중량 증가 폭이 가장 작았다. No.100체 세립분을 포함하지 않은 시료의 최소 상대밀도 값은 세립분 함유량 10%보다 오히려 큰 값을

보였으며, No.200체의 경우 최소단위중량은 세립분을 함유한 단위중량보다 작았지만, 최대단위중량은 세립분 함유량 30%와 차이가 없었다.

4.2 파쇄특성

각체 잔류시료의 파쇄시험 결과는 표 4, 그림 8과 같다.

표 3. 상대밀도시험 결과

| 구분 | 세립분(%) | 최소건조단위중량(kN/m ³) | 최대건조단위중량(kN/m ³) | 몰드부피(cm ³) |
|----------|--------|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| No. 40체 | 0 | 5.50 | 7.30 | 1,000 |
| | 10 | 6.38 | 7.90 | |
| | 20 | 7.14 | 8.90 | |
| | 30 | 7.72 | 9.71 | |
| No. 60체 | 0 | 6.43 | 8.00 | |
| | 10 | 6.73 | 8.56 | |
| | 20 | 7.50 | 9.49 | |
| | 30 | 8.07 | 10.19 | |
| No. 100체 | 0 | 7.67 | 9.28 | |
| | 10 | 7.49 | 9.81 | |
| | 20 | 8.01 | 10.26 | |
| | 30 | 8.34 | 10.87 | |
| No. 200체 | 0 | 8.97 | 11.00 | |
| | 10 | 9.11 | 11.20 | |
| | 20 | 9.78 | 11.52 | |
| | 30 | 10.15 | 11.89 | |
| 표준사 | - | 13.70 | 15.90 | |

표 4. 입경에 따른 파쇄시험결과

| 구분 | 다짐 후 시료 | | | | |
|----------------|---------|-------|--------|--------|-------|
| | No.40 | No.60 | No.100 | No.200 | 세립분 |
| No.40체 잔류율(%) | 35.72 | 17.01 | 17.34 | 22.29 | 7.64 |
| No.60체 잔류율(%) | - | 44.95 | 20.52 | 27.09 | 7.44 |
| No.100체 잔류율(%) | - | - | 45.79 | 27.82 | 26.39 |
| No.200체 잔류율(%) | - | - | - | 37.67 | 32.33 |

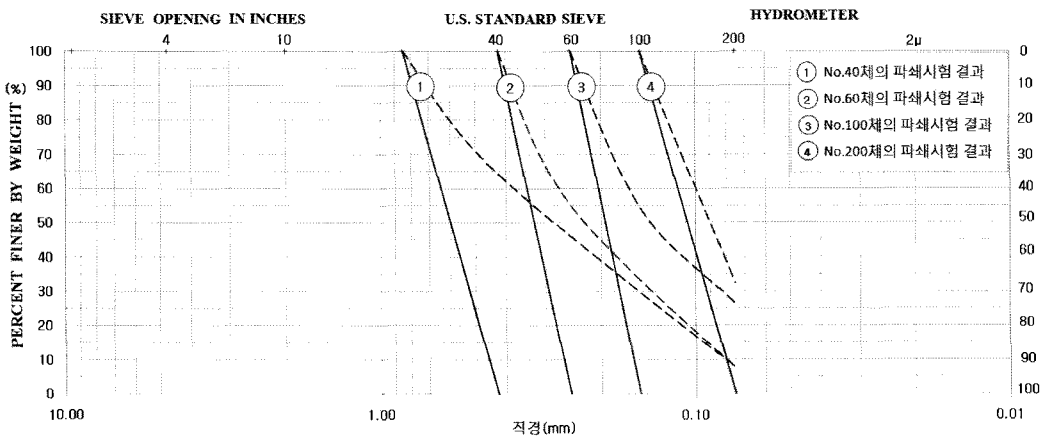


그림 8. 파쇄시험 결과

시험에 사용된 다짐에너지는 A다짐 에너지인 $563\text{kN}\cdot\text{m}^3$ 로 실시되었다. 시험 결과 No.40채 잔류시료의 다짐시험 후 세립분의 잔류율은 7.64%, No.60채 잔류시료의 다짐시험 후 세립분의 잔류율은 7.44%로 세립분이 10% 이내로 증가되었으나 No.100채, No.200채 잔류시료의 경우 세립분 잔류율이 26.4%와 32.3%로 다짐시험 후 세립분이 약 30%까지 증가하였다. No.40채와 No.60채는 입경이 비교적 커 전체 입경에 고른 파쇄가 되었으나 No.100채와 No.200채는 입경이 작아 다짐에너지에 의한 입자의 파쇄가 세립분으로 집중되어 세립분이 증가한 것으로 판단된다.

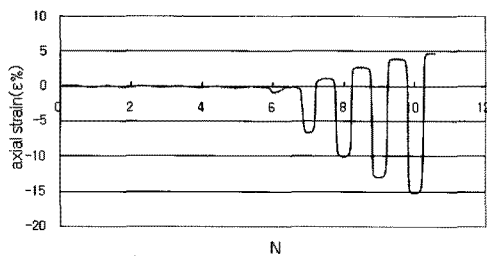
4.3 반복삼축시험 특성

반복삼축시험은 사질토의 동적거동 특성을 규명하기 위한 시험으로 사질토의 역학적 거동을 정확히 설명할 수 있는 시험방법이다. Ishihara(1975)는 사질토의 초기 액상화는 유효응력이 0이거나 혹은 상대밀도 70%이하의 경우 축변형률 5%, 상대밀도 70%이상은 축변형률 10%를 초기액상화의 시점으로 보았다(Ishihara, 1975). 따라

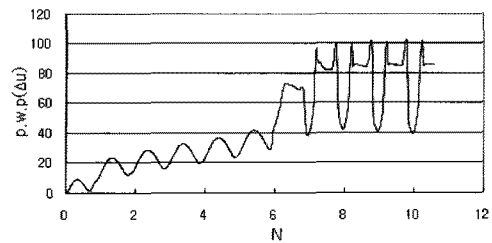
표 5. 표준사의 액상화 저항능력비

| 상대밀도(Dr, %) | 축변형률 5% | 축변형률 10% |
|-------------|---------|----------|
| 40 | 0.22 | 0.22 |
| 55 | 0.25 | 0.26 |
| 70 | 0.30 | 0.32 |

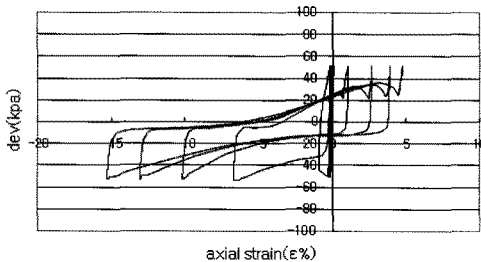
서 본 연구에서는 반복삼축시험의 액상화 저항능력비를 축변형률 5%와 10%로 분석하였으며, 각 변형률에 대해 액상화 저항능력비는 국내의 경우 지진규모 6.5를 기준으로 하기 때문에 반복횟수 10회인 경우의 액상화 저항능력을 액상화 저항능력비로 보았다. 반복삼축시험의 경우 반복횟수 10회에서 결과를 찾기 위해 축차응력 10회 이상과 10회 이하에서의 축차응력을 반복시험으로 찾았으며, 산정된 Bottom Ash의 액상화 저항능력비를 표준사와 비교하였다. 또한, 반복하중을 재하한 경우의 포화 시료의 거동특성 비교를 위해 기존의 포화사질토의 거동(최재순, 2003)과 표준사 시료의 거동 특성을 비교하였으며, Bottom Ash의 반복하중에서의 시료의 거동 특성을 비교 분석하였다. 반복삼축시험의 경우 시험 각 단계에서 밀도의 값에 따라 결과에 영향을 미치게 된다. 그러나 본 연구에서 밀도조건은 시료성형 시 초기 간극비의 크기가 같은 상태인 경우만을 고려하였다. 이는 시험과정에서의 밀도의 변화는 시험조건을 동일하게 시험을 실시하였기 때문에 시험과정에서 밀도 변화는 같을 것으로 가정을 하여 밀도 변화는 고려하지 않고, 다만 초기상태에서 상대밀도만을 고려하여 시료성형을 실시하였다. 시험과정으로 포화는 구속압과 배압의 크기 차이를 5kPa로 동일한 크기로 증가시켜 포화를 실시하여 밀도의 변화는 없을 것으로 가정하였으며, 압밀과정에서의 시료의 간극비의 변화인 밀도감소량은 모든 시료에 동일한 압밀하중을 가하였기 때문에 시험



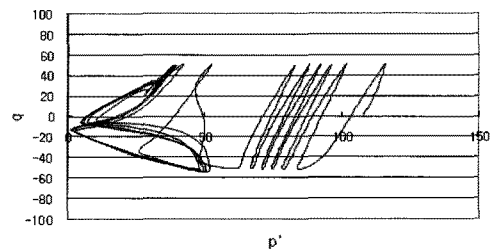
(a) 반복횟수와 축변형률



(b) 반복횟수와 간극수압비



(c) 축변형률과 축차응력



(d) 유효응력경로

그림 9. 표준사의 축차응력 50kPa에서 반복삼축시험 결과

결과에서는 고려하지 않았다. 각체 잔류시료와 표준사, 각체 잔류시료의 세립분 함유량 증가하며 시험을 실시한 결과는 다음과 같다.

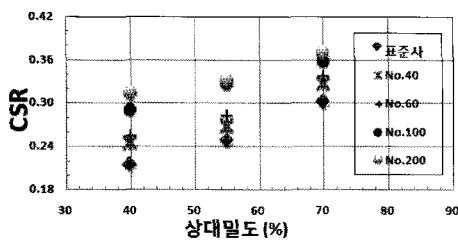
Bottom Ash의 반복삼축시험 특성의 비교 대상인 표준사의 축변형률 5%, 축변형률 10%에 해당하는 액상화 저항응력비는 표 5와 같다. 축변형률 5%의 경우 표준사의 액상화 저항응력비는 0.22에서 0.30의 결과를 보였으며, 상대밀도 증가에 따라 액상화 저항응력비가 0.08정도 증가하였다. 축변형률 10%의 경우 표준사는 0.22에서 0.32의 결과를 보였으며, 상대밀도 증가에 따라 액상화 저항응력비가 0.10정도 증가하였다.

그림 9는 표준사의 상대밀도 55%와 축차응력 50kPa에서 반복삼축시험 결과이다. 그림 9(a)는 반복횟수에 따른 축변형률로 7회 이상의 반복횟수에서 축변형률이 5%와 10%를 넘어 섰으며, 그림 9(b)는 반복횟수와 간극수압 결과로 반복횟수 6이상에서 간극수압이 급격히 증가하여 100kPa에 도달되었다. 그림 9(c)는 축변형률과 축차응력으로 압축과 인장응력이 50kPa로 작용하면서 축변형률이 변화되었으며, 그림 9(d)는 유효응력경로 결과로 점진적인 응력감소구간과 급진적 응력감소구간, 액상화 후 파괴거동을 보여주고 있다. 반복삼축시험 시 포화 완료 후 구속압밀하중이 100kPa로 시험에 사용된 시료의 유효응력은 100kPa이 된다. 표준사의 액상화는 유효응력 0이 되는 경우에 발생되므로 간극수압이 100kPa 일 때 액상화가 발생되어야하며, 그림 9(b)의 간극수압

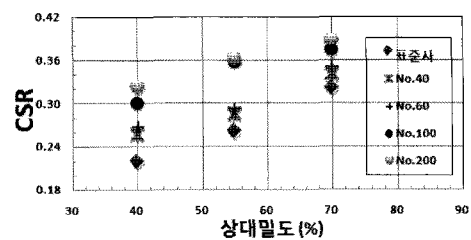
이 100kPa에 도달한 시점인 반복횟수 7회 이상에서 액상화가 발생되어야 한다. 그림 9(a)에서 액상화의 발생은 반복횟수 7회 이상의 구간에서 5%와 10%로 축변형률이 증가하여 액상화가 발생되었으며, 표준사의 액상화 발생은 유효응력이 0인 구간에서 발생되어 기존 포화시료의 연구결과와 비슷한 점진적 응력감소, 급진적 응력감소, 액상화 후 거동의 형태로 액상화가 발생되었다.

4.3.1 입경에 따른 시험결과

그림 10, 그림 11은 표 6의 값을 상대밀도와 시료에 따라 정리한 액상화 저항응력비 결과이다. 그림 10은 상대밀도에 따른 액상화 저항응력비 결과로 표준사에 비해 액상화 저항응력비는 모두 크게 나타났다. 상대밀도 40%와 55%의 경우 No.100체, No.200체 액상화 저항응력비가 비슷하였고, No.40체, No.60체 액상화 저항응력비가 비슷하였으나 No.40체, No.60체와 No.100체, No.200체의 액상화 저항응력비는 차이를 보였다. 상대밀도 70%에서는 각체 잔류시료의 액상화 저항응력비 결과 차이는 크지 않았다. 또한, 축변형률 5%의 액상화 저항응력비 값이 축변형률 10%의 액상화 저항응력비보다 분포범위가 크게 나타났다. 그림 11은 시료의 구분에 따른 액상화 저항응력비이다. 상대밀도의 증가에 따라 No.40체의 경우 축변형률 5%는 0.25에서 0.33으로 액상화 저항응력비가 증가하였으며, 축변형률 10%는 0.26에서 0.34로 증가하였다. No.60체의 경우 축변형률 5%는 0.26에

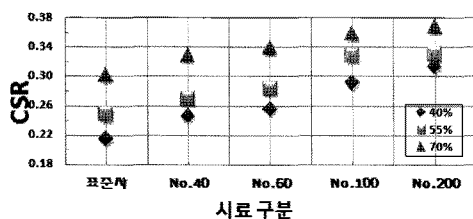


(a) 축변형률 5%

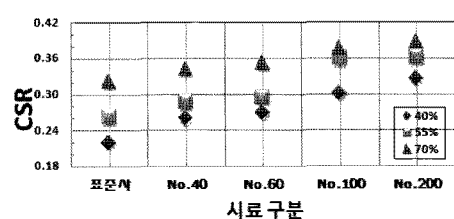


(b) 축변형률 10%

그림 10. 상대밀도에 따른 액상화 저항응력비 결과



(a) 축변형률 5%



(b) 축변형률 10%

그림 11. 시료의 구분에 따른 액상화 저항응력비 결과

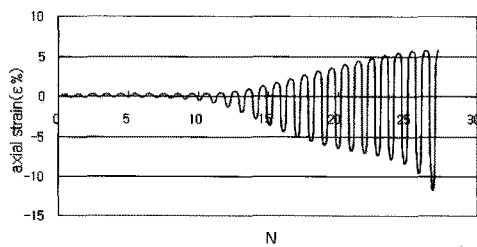
서 0.34, 축변형률 10%는 0.27에서 0.35로 증가하여 No.40체에 비해 액상화 저항응력비는 상대밀도에 따라 0.01 정도 증가하여 결과값의 크기 차이는 없었다. 그러나 No.100체의 경우 축변형률 5%에서 액상화 저항응력비가 0.29에서 0.36으로 증가하였고, 축변형률 10%에서는 0.30에서 0.37로 증가하였다. No.200체는 액상화 저항응력비가 축변형률 5%인 경우 0.31에서 0.37, 축변형률 10%는 0.32에서 0.39로 증가되어 No.100체보다 약 0.02 정도 결과값의 차이가 없었으나 No.40체와 No.60체에 비해 비교적 크게 증가하였다. Bottom Ash의 경우 입자

의 직경이 작을수록 입자의 파쇄강도가 증가하여 액상화 저항응력비의 값이 증가하였다.

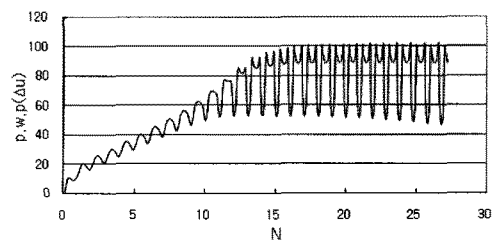
그림 12, 그림 13은 No.40체의 상대밀도 55%와 축차응력 50kPa, 70kPa에서 반복삼축시험 결과이며, 시험시 구속압밀하중이 100kPa로 시험에 사용된 시료의 유효응력이 100kPa이 된다. 그림 12의 경우 그림 12(b)에서 간극수압이 100kPa에 도달되는 시점에 그림 12(a)의 축변형률이 5%와 10%이상으로 증가하여 액상화가 발생되었다. 그러나 그림 13의 경우는 그림 13(b)의 간극수압이 100kPa에 도달하지 않은 시점에서 그림 13(a)의

표 6. 입경에 따른 반복횟수와 응력비와의 관계

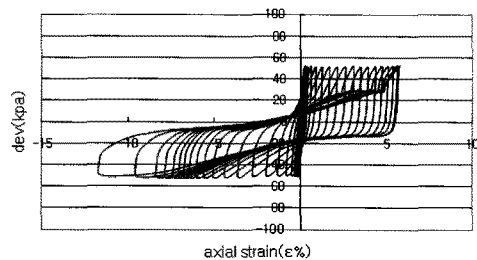
| 구분 | 상대밀도(Dr, %) | 액상화 저항응력비(축변형률 5%) | 액상화 저항응력비(축변형률 10%) |
|-----------------|-------------|--------------------|---------------------|
| 표준사 | 40 | 0.22 | 0.22 |
| | 55 | 0.25 | 0.26 |
| | 70 | 0.30 | 0.32 |
| No.40체 잔류시료 | 40 | 0.25 | 0.26 |
| | 55 | 0.27 | 0.29 |
| | 70 | 0.33 | 0.34 |
| No.60체 잔류시료 | 40 | 0.26 | 0.27 |
| | 55 | 0.28 | 0.29 |
| | 70 | 0.34 | 0.35 |
| No.100체 잔류시료 | 40 | 0.31 | 0.32 |
| | 55 | 0.33 | 0.36 |
| | 70 | 0.36 | 0.37 |
| No.200체 잔류시료 | 40 | 0.31 | 0.32 |
| | 55 | 0.33 | 0.36 |
| | 70 | 0.37 | 0.39 |



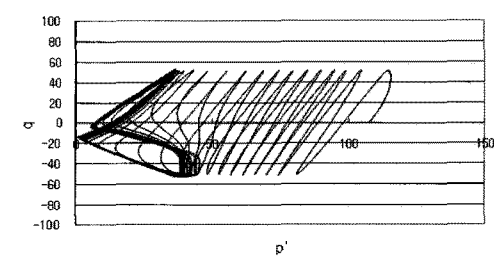
(a) 반복횟수와 축변형률



(b) 반복횟수와 간극수압비



(c) 축변형률과 축차응력



(d) 유효응력경로

그림 12. No.40체의 축차응력 50kPa에서 반복삼축시험 결과

축변형률이 액상화 발생 기준인 축변형률 5%와 10%로 발생되어 액상화가 시작되었다. 따라서 No.40체 잔류시료의 경우 거동 형태는 시료의 파쇄강도가 약해 높은 축차응력에서 반복하중횟수가 많아질수록 시료가 파괴되면서 발생되었다. 시료의 반복삼축시험 시 시료의 파쇄에 의한 액상화가 발생되었는지 확인을 위해 No.40체의 반복삼축시험 완료 후의 체가름을 실시하였으며, 시험결과는 그림 14와 같다. 시험결과 반복삼축시험 완료 후 40체 통과율이 약 8%정도 증가하는 것으로 평가되어 반복삼축시험 시 시료의 파쇄가 발생하는 것으로 판단되었다.

또한, 그림 15, 그림 16은 No.60체의 상대밀도 55%와 축차응력 50kPa, 70kPa에서 반복삼축시험 결과이다. 축

차응력 50kPa의 경우 그림 15(b)에서 간극수압이 반복 횟수 30에서 40회 사이에 100kPa에 도달되어 이 구간에서 액상화 시점이 되는데, 그림 15(a)의 축변형률이 반복횟수 30에서 40사이에서 5%를 넘었으며, 반복횟수 40에서 50 사이에서 10%이상으로 증가하여 액상화가 발생되었다. 그러나 그림 16(b)의 간극수압이 100kPa에 도달하지 않은 시점에서 그림 16(a)의 축변형률이 액상화 발생 기준인 축변형률 5%와 10%로 액상화가 발생되어 No.60체 잔류시료 역시 No.40체 잔류시료와 동일하게 최대축차응력에서는 시료의 파괴에 의한 거동 형태가 발생되었다.

그림 17, 그림 18은 No.100체, No.200체 최대축차응력의 상태에서 반복삼축시험 결과이다. No.100체와 No.200

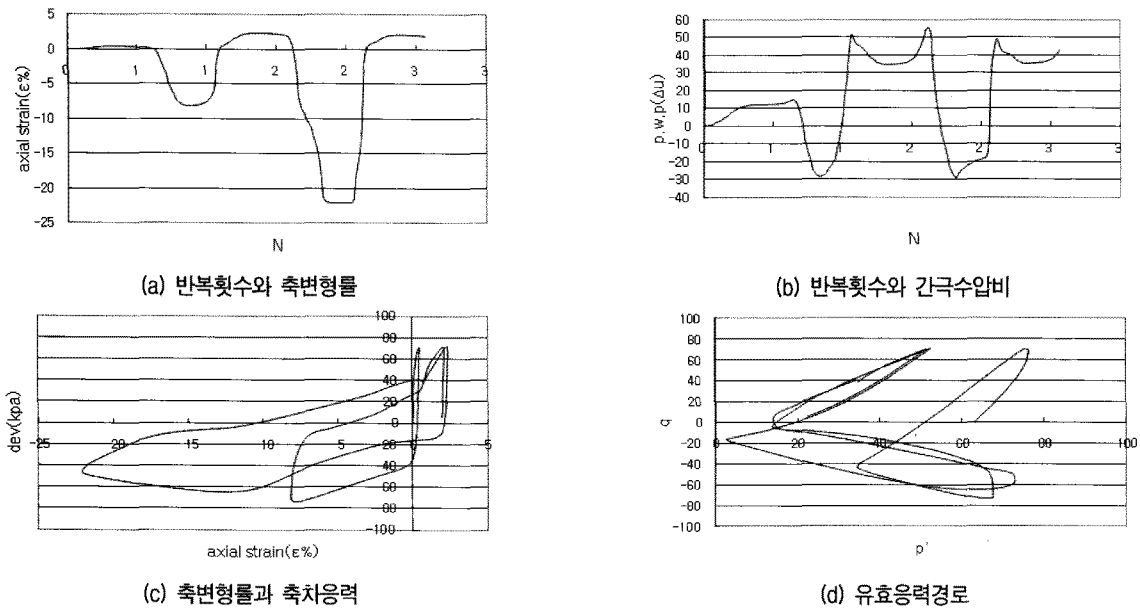


그림 13. No.40체의 축차응력 70kPa에서 반복삼축시험 결과

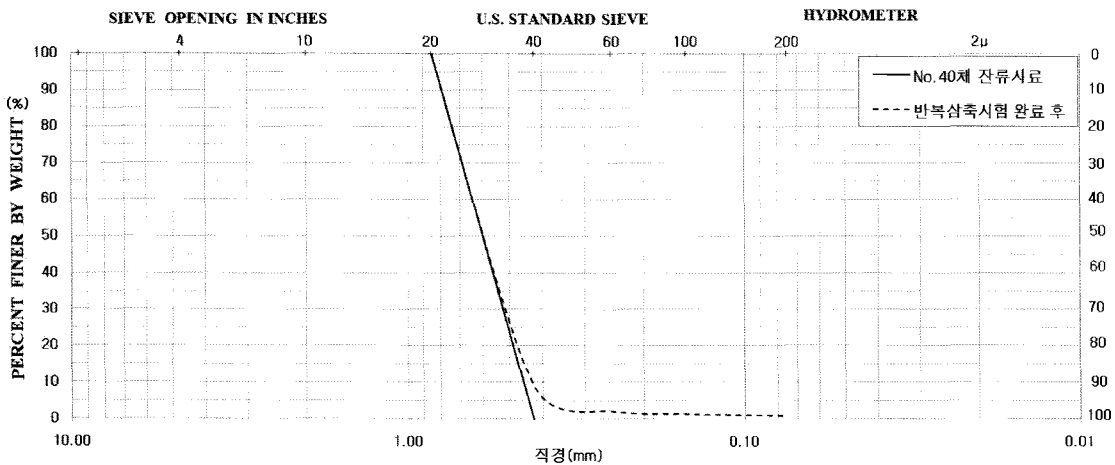
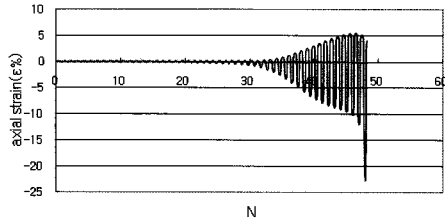
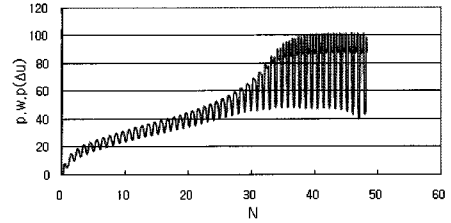


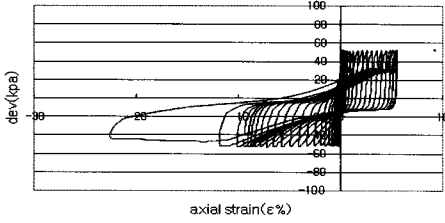
그림 14. No.40체 반복삼축시험 완료 후 체가름 시험 결과



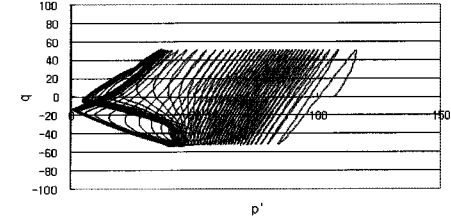
(a) 반복횟수와 축변형률



(b) 반복횟수와 간극수압비

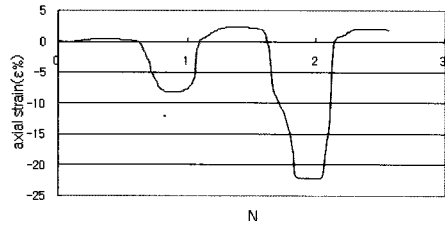


(c) 축변형률과 축차응력

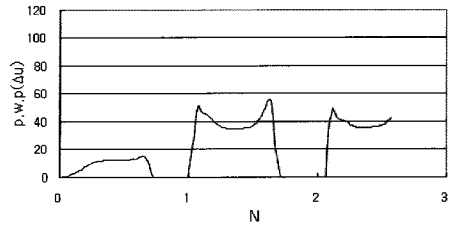


(d) 유효응력경로

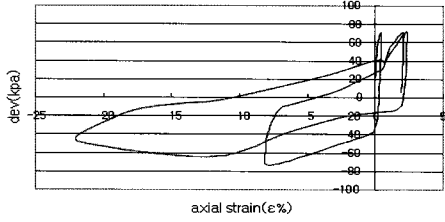
그림 15. No.60체의 축차응력 50kPa에서 반복삼축시험 결과



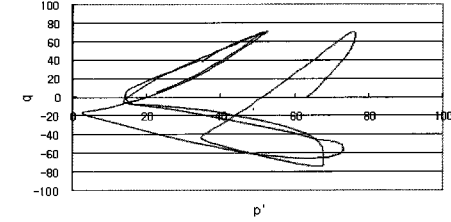
(a) 반복횟수와 축변형률



(b) 반복횟수와 간극수압비

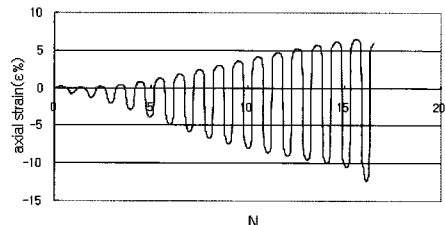


(c) 축변형률과 축차응력

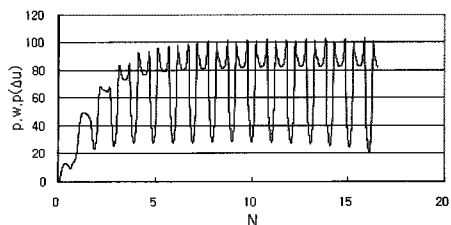


(d) 유효응력경로

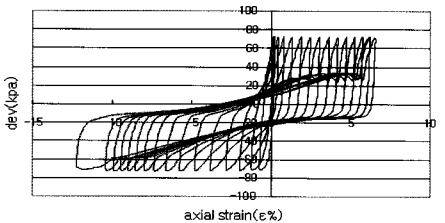
그림 16. No.60체의 축차응력 70kPa에서 반복삼축시험 결과



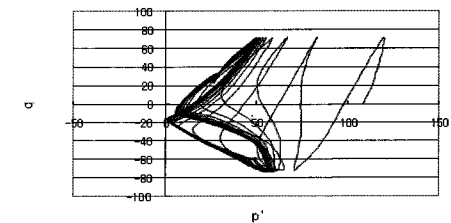
(a) 반복횟수와 축변형률



(b) 반복횟수와 간극수압비



(c) 축변형률과 축차응력



(d) 유효응력경로

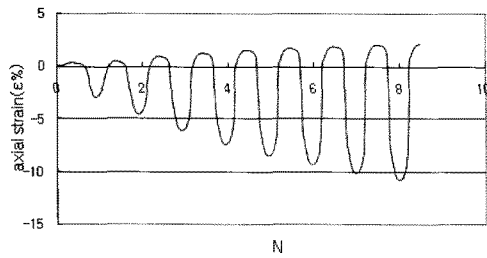
그림 17. No.100체의 축차응력 70kPa에서 반복삼축시험 결과

체의 경우 시험 시 최대축차응력인 70kPa, 80kPa에서 그림 17(b), 그림 18(b)와 같이 간극수압이 100kPa에 도달되는 구간에서 액상화가 시점이 되는데, 그림 17(a)와 그림 18(a)의 축변형률이 간극수압이 100kPa에 도달되는 시점에서 5%, 10%이상으로 증가하여 액상화가 발생하였다. No.100체와 No.200체의 경우 반복하중재하에 의한 기존 포화사질토의 거동 형태로 액상화가 발생되었다. No.40체와 No.60체의 경우 최대축차응력에서 시료의 파괴에 의한 액상화가 발생되었으나 No.100체 이상의 잔류시료는 파쇄강도가 커 기존의 포화사질토와 유사한 유효응력이 0이 되는 시점에서 파괴가 일어나는 형태의 거동이 발생된 것으로 판단된다.

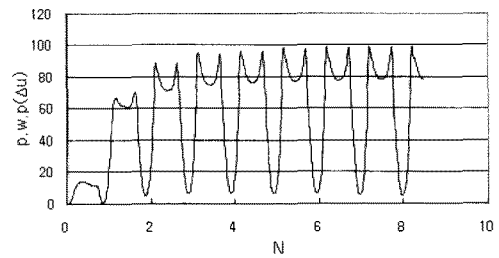
4.3.2 세립분 함유량에 따른 시험결과

그림 19는 No.40체의 반복횟수 10회에 해당하는 액상화 저항능력비 값을 세립분의 함유량에 따라 나타낸 결과이다. 세립분 함유량이 20%까지 증가할수록 액상

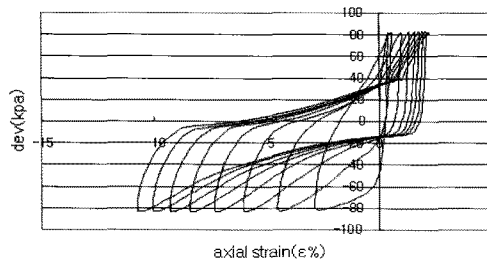
화 저항능력비가 증가하였으나 세립분의 함유량이 20% 이상에서는 액상화 저항능력비가 급격히 감소하는 결과를 보였다. 이러한 Bottom Ash의 거동특성을 건설재료로 일반적으로 많이 사용되는 모래에 세립분 함유량을 증가시킨 기존 연구결과와 Bottom Ash에 실트성분을 함유한 기존 연구결과와의 거동특성을 비교하였다. 황대진(1993)은 실트분 함유량 30%이상이면 모래입자 사이의 실트분에 의한 효과가 약해짐과 동시에 실트입자끼리의 맞물림이 생겨 다시 액상화 강도가 상승하는 현상이 발생하는 연구결과를 발표하였고, 이호영(2008)의 연구결과에 의하면 상대다짐도 80%와 90%의 Bottom Ash에 실트 성분의 세립분 함유량을 증가할수록 액상화 저항능력비의 값이 감소하는 결과를 발표하였다. 기존 연구결과와 본 연구결과를 비교하면 Bottom Ash는 세립분 함유량이 20%까지는 액상화 저항능력비가 증가하다가 20%이후에는 감소는 현상을 보여 이호영(2008)의 연구결과와 황대진(1993)의 모래시료의 연구결과와



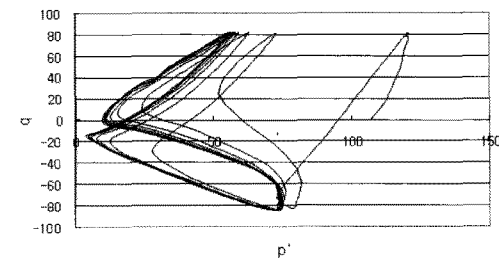
(a) 반복횟수와 축변형률



(b) 반복횟수와 간극수압비



(c) 축변형률과 축차응력



(d) 유효응력경로

그림 18. No.200체의 축차응력 80kPa에서 반복삼축시험 결과

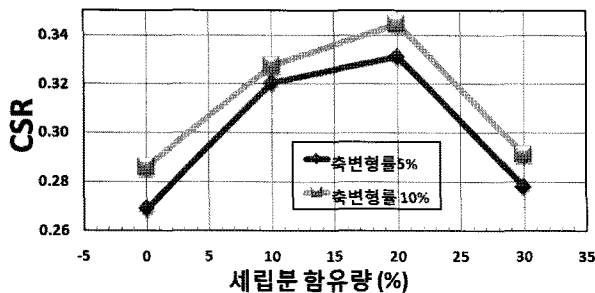


그림 19. No.40체의 세립분 함유량에 따른 액상화 저항능력비 결과

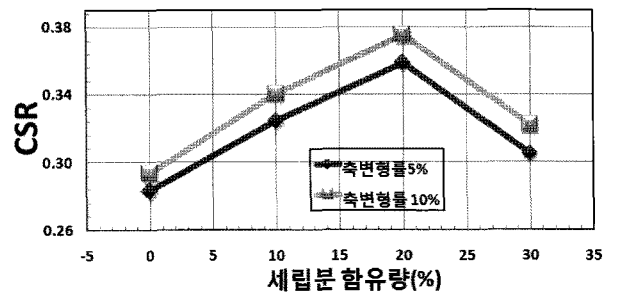


그림 20. No.60체의 세립분 함유량에 따른 액상화 저항능력비 결과

상반된 결과를 얻을 수 있었다.

그림 20은 No.60체의 반복횟수 10회에 해당하는 액상화 저항응력비의 값을 세립분의 함유량으로 정리한 결과이다. No.40체와 동일한 경향을 보이며, 세립분 함유량이 20%까지 증가할수록 액상화 저항응력비가 증가하였으나 세립분의 함유량이 20%이상에서는 액상화 저항응력비가 급격히 감소하였다. 그림 21, 그림 22는 No.100체, No.200체 액상화 저항응력비 값으로 No.40체, No.60체와 같은 경향을 보이며, 세립분 함유량이 20%까지 증가할수록 액상화 저항응력비가 증가하였으나 세립분의 함유량이 20%이상에서는 액상화 저항응력비가 급격히 감소하였다.

각 체 잔류시료에 세립분을 함유하여 반복삼축시험을 실시하고 결과를 종합하면 표 7, 그림 23과 같다. 입

표 7. 세립분 함유량에 따른 반복횟수와 응력비의 관계

| 구 분 | 세립분 함유량(%) | 축변형률 5% | 축변형률 10% |
|---------|------------|---------|----------|
| No.40체 | 0 | 0.28 | 0.31 |
| | 10 | 0.32 | 0.33 |
| | 20 | 0.33 | 0.34 |
| | 30 | 0.28 | 0.29 |
| No.60체 | 0 | 0.28 | 0.29 |
| | 10 | 0.32 | 0.34 |
| | 20 | 0.36 | 0.38 |
| | 30 | 0.31 | 0.32 |
| No.100체 | 0 | 0.33 | 0.36 |
| | 10 | 0.35 | 0.36 |
| | 20 | 0.40 | 0.40 |
| | 30 | 0.31 | 0.35 |
| No.200체 | 0 | 0.33 | 0.36 |
| | 10 | 0.35 | 0.37 |
| | 20 | 0.45 | 0.47 |
| | 30 | 0.35 | 0.37 |

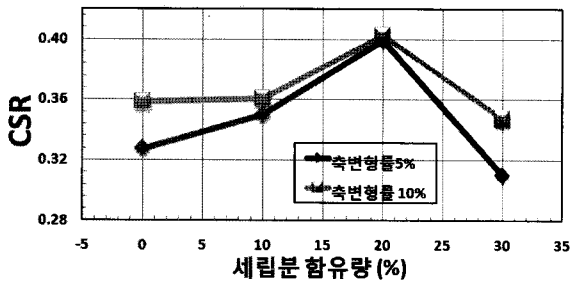


그림 21. No.100체의 세립분 함유량에 따른 액상화 저항응력비 결과

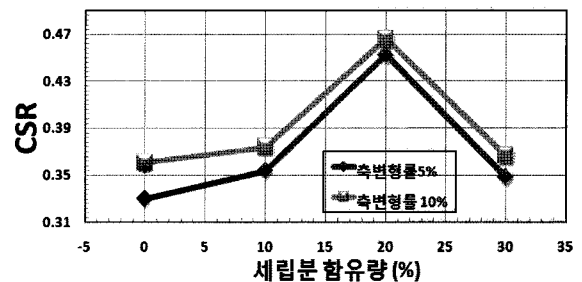
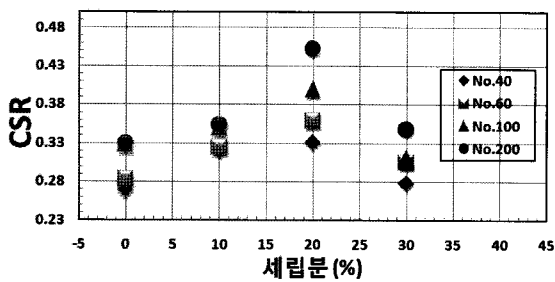
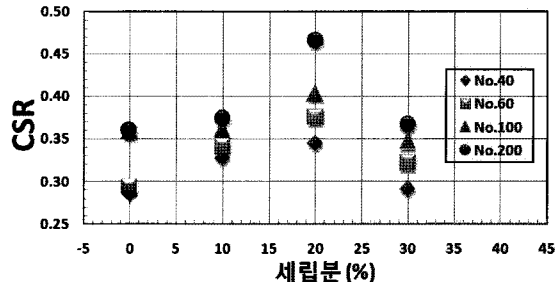


그림 22. No.200체의 세립분 함유량에 따른 액상화 저항응력비 결과

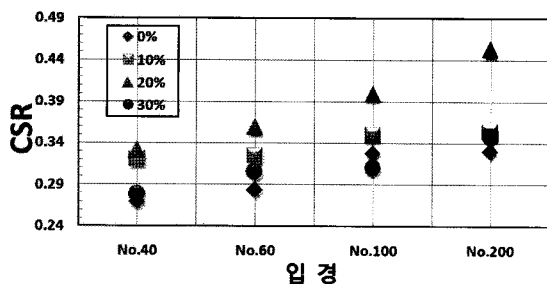


(a) 축변형률 5%

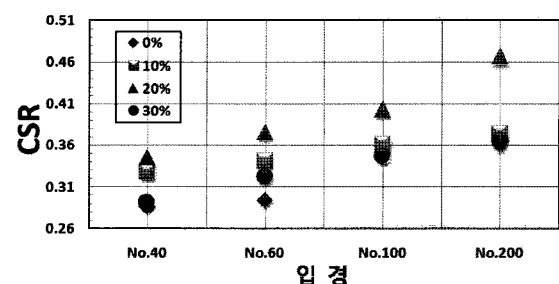


(b) 축변형률 10%

그림 23. 세립분 함유량에 따른 액상화 저항응력비 결과



(a) 축변형률 5%



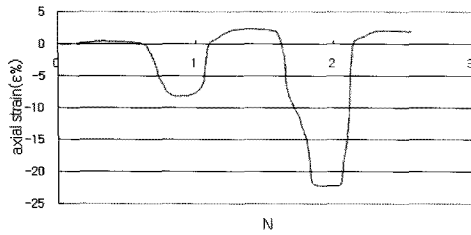
(b) 축변형률 10%

그림 24. 입경에 따른 액상화 저항응력비 결과

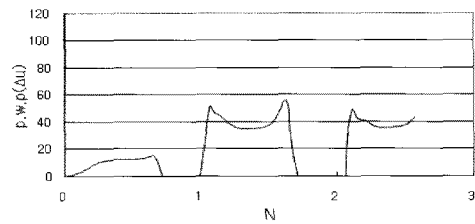
경에 따른 시험 결과 입자의 크기가 작아질수록 액상화 저항능력이 증가하였다. 세립분 함유량에 따른 반복삼축시험 결과 세립분의 함유량이 20%를 기점으로 작아 지는데 입경이 작아질수록 감소폭이 컸다. 따라서 액상화 대책을 위한 목적으로 연약지반에 사용될 경우 세립분의 함유량이 20%를 넘지 않는 시료를 사용하는 것이 적당하였다.

그림 24는 No.60체 세립분 함유량에 따른 시료의 거동 특성이다. 그림 24는 세립분 함유량 10%의 시험결과로 시험 시 시료의 유효응력이 100kPa이 되어 액상화는

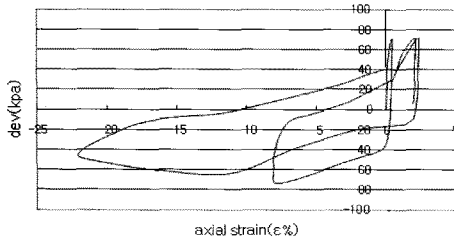
간극수압이 100kPa인 경우에 발생된다. 그러나 No.60체의 경우 그림 24(b)에서 간극수압이 100kPa에 도달되는 구간에서 액상화 시점이 되는데, 그림 24(a)의 축변형률이 간극수압이 100kPa에 도달되기 전에 5%, 10% 이상으로 증가하여 액상화가 발생되었다. 이는 간극수압의 증가보다 시료의 파쇄에 의해 발생된 것으로 판단된다. 그림 25, 그림 26의 No.100체 축차응력 80kPa, 세립분 20%와 No.200체 축차응력 90kPa, 세립분 20%인 시료의 거동특성으로 No.60체와 마찬가지로 간극수압이 100kPa에 도달하기 전에 축변형률이 5%, 10%를 넘



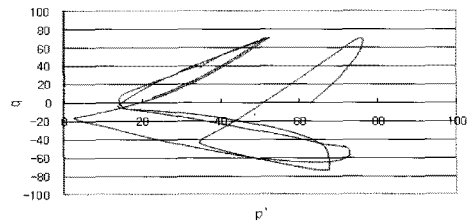
(a) 반복횟수와 축변형률



(b) 반복횟수와 간극수압비

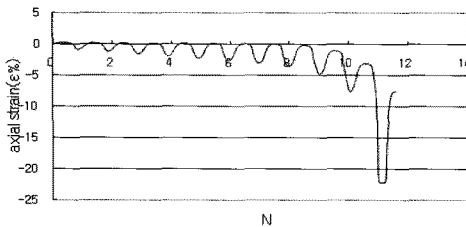


(c) 축변형률과 축차응력

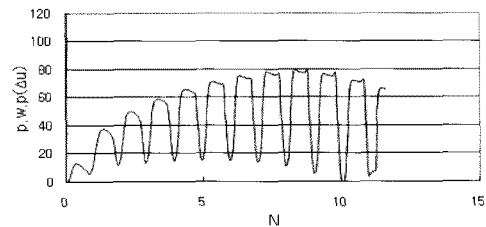


(d) 유효응력경로

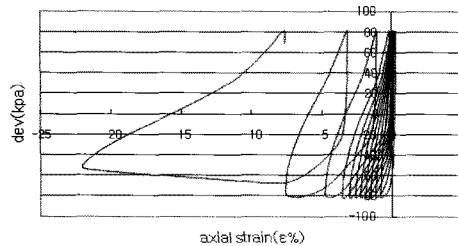
그림 24. No.60체의 축차응력 80kPa에서 반복삼축시험 결과(세립분 10%)



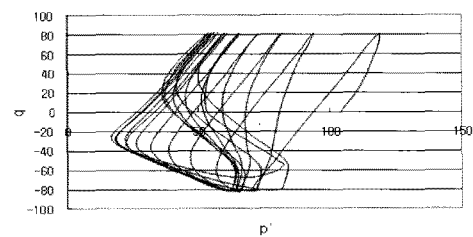
(a) 반복횟수와 축변형률



(b) 반복횟수와 간극수압비

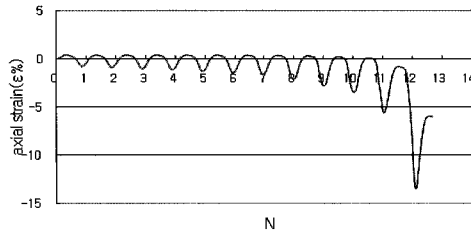


(c) 축변형률과 축차응력

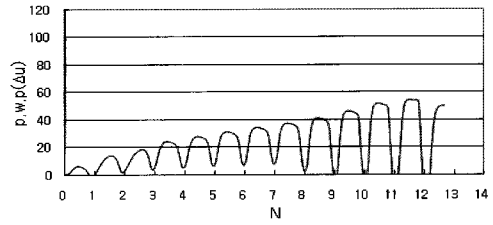


(d) 유효응력경로

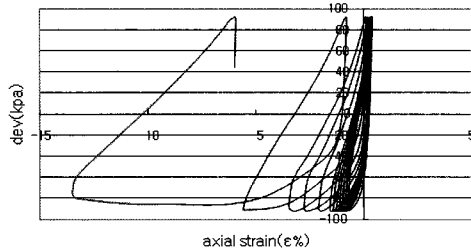
그림 25. No.100체의 축차응력 80kPa에서 반복삼축시험 결과(세립분 20%)



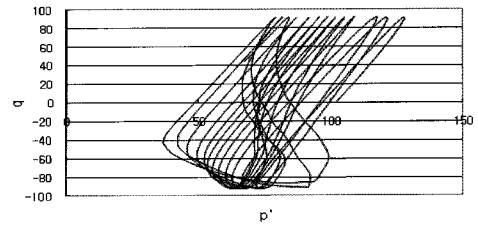
(a) 반복횟수와 축변형률



(b) 반복횟수와 간극수압비



(c) 축변형률과 축차응력



(d) 유효응력경로

그림 26. No.200체의 축차응력 90kPa에서 반복삼축시험 결과(세립분 20%)

어 시료의 파괴가 발생되었다.

5. 결론

본 연구에서는 영흥화력발전소에서 발생된 Bottom Ash를 이용하여 액상화 저항특성을 평가하기 위해 No.40체, No.60체, No.100체, No.200체에 잔류한 시료와 표준사, 세립분 함유량을 조정한 시료에 대해 반복삼축시험, 상대밀도, 파쇄시험을 실시하였으며, 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Bottom Ash의 상대밀도 시험결과 입도가 작을수록 건조단위중량이 컸으나 표준사에 비해 작은 값을 보였으며, 세립분 함유량이 증가할수록 단위중량은 증가하였는데 이는 입도가 균등한 잔류 시료에 세립분이 간극을 채워 고른 입도로 개선되어 나타난 현상이라 판단된다.
- (2) 파쇄시험결과 No.40체, No.60체 잔류시료는 입경이 비교적 커 전체 입경에 고른 파쇄가 되어 세립분 잔류율이 10%이내였으나 No.100체, No.200체 잔류시료는 입경이 작아 다짐에너지에 의한 입자의 파쇄가 세립분으로 집중되어 세립분 잔류율이 약 30%까지 증가하였다.
- (3) 각체 잔류시료의 상대밀도에 따른 반복삼축시험결과 상대밀도 70%에서는 입자의 크기에 따른 액상화 저항응력비의 차가 크지 않았으나 상대밀도 55%이

하에서는 입경의 크기에 따른 액상화 저항응력비 차이는 약 0.06 정도로 비교적 컸다.

- (4) 각체 잔류시료와 표준사의 액상화 저항응력비를 비교한 결과 Bottom Ash의 액상화 저항응력비는 표준사에 비해 컸으며, 입자의 크기가 클수록 상대밀도 증가에 따른 액상화 저항응력비 차이는 컸으며, 입자의 크기가 작을수록 액상화 저항응력비 값의 차이는 입자가 큰 시료에 비해 작았다.
- (5) 표준사의 경우 축차응력 크기에 상관없이 간극수압 증가로 유효응력 감소에 의한 파괴 거동이 진행되었으나, 입도가 비교적 큰 Bottom Ash의 경우에는 간극수압보다는 축차응력에 의한 시료의 파괴 거동이 진행되었으며, 입자의 크기에 따라 액상화 저항응력비는 0.4를 넘지 않았다. 입도가 작은 Bottom Ash의 경우에는 표준사와 같은 형태의 파괴 거동이 진행되었다.
- (6) 세립분 함유량에 따른 반복삼축시험결과 세립분의 함유량이 시료의 간극을 채워 20%까지는 액상화 저항응력비가 증가하는 것으로 나타나 액상화 대책을 위한 목적으로 Bottom Ash를 사용하는 경우 다짐에너지를 조정하여 세립분 함유량 20%로 조정이 필요하였다.
- (7) Bottom Ash는 입자의 특성상 기공이 많아 입도가 클수록 파쇄강도가 약하여 시료 파쇄에 의한 축변형의 증가로 액상화가 평가되었고, 상대밀도 변화에 따른 액상화 저항응력비의 차이가 크지 않았으며, 세립분이 함유됨에 따라 파쇄강도가 증가하여

높은 반복축하중에서 시료의 파쇄에 의한 액상화가 평가되었다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (2003), “구조물 기초설계기준 해설”.
2. 김영진 (2005), “Bottom Ash를 활용한 콘크리트용 골재사용의 실험 연구”, 한서대학교 석사학위논문.
3. 김상천 (2009), “Sand Mat용 재료로서 Bottom Ash의 적용성 연구”, 순천대학교 석사학위논문.
4. 김종국 (2009), “인천지역 매립지반에 적용된 모래다짐말뚝의 거동특성 평가”, 수원대학교 박사학위 논문.
5. 이호영 (2008), “세립분 함유량에 따른 석탄회의 액상화 거동”, 인하대학교 석사학위논문.
6. 이영휘 (2008), “저희의 연직배수재로서 활용에 관한 연구”, 한양대학교 석사학위논문.
7. 윤원섭, 한재운, 신승규, 채영수 (2010), “석탄회의 동적거동특성 연구”, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp.1142-1150.
8. 최재순 (2003), “교란상태개념에 기초한 포화사질토의 비배수 동적거동 예측기법개발”, 연세대학교 박사학위 논문.
9. 한국지진공학회 (1999), “항만 및 어항시설의 내진설계 표준서”, 해양수산부.
10. 황대진 (1993), “실트를 포함하는 모래질 흙의 액상화강도에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 13(2), pp.243-252.
11. Chu, S.C., Kao, H.S. (1993), “A Study of Engineering Properties of a Clay Modified by Fly Ash and Slag”, Fly Ash for Soil Improvement, ASCE, Geotechnical Special Publication (36), pp.89-99.
12. Ishihara, K., Yasuda, S. (1975), “Sand Liquefaction in Hollow Cylinder Torsion under Irregular Excitation”, Soil and Foundations, 15(1), pp.45-59.
13. Seals, R.K., Moulton, L.K., Ruth, B.E. (1972), “Bottom Ash : An Engineering Material”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 98(SM4), pp.311-325.
14. Sweeny, L.R., Rivard-Lentz, D.J., Demars, K.R. (1996), “Physical Chemical Behavior of Incinerator Bottom Ash”, Proceedings of the 3rd International Symposium on Environmental Geotechnology, San Diego, California, USA, 1, pp.416-425.

(접수일자 2011. 5. 2, 심사완료일 2011. 6. 24)