

준설토와 Bottom Ash 재활용을 위한 복합지반재료 개발

Development of Composite Geo-Material for Recycling Dredged Soil and Bottom Ash

김 윤 태¹ Kim, Yun-Tae
한 우 종² Han, Woo-Jong
정 두 회³ Jung, Du-Hwoe

Abstract

This paper investigates the mechanical characteristics of composite geo-material which was developed to reuse both dredged soils and bottom ash. The composite geo-material used in this experiment consists of dredged soil taken from the construction site of Busan New Port, cement, air foam and bottom ash. Bottom ash is a by-product generated at the Samcheonpo thermal power plant. Several series of laboratory tests were performed to investigate behavior characteristics of composite geo-material, in particular the reinforcing effect by mixing bottom ash. The experimental results of composite geo-material indicated that the stress-strain relationship and the unconfined compressive strength are strongly influenced by mixing conditions. Especially it was observed that the compressive strength of composite geo-material increased with an increase in bottom ash content due to reinforcing effect by the bottom ash. Compressive strength of composite geo-material increased with the increase in curing time. The 28-day strength of composite geo-material is 1.7~1.8 times higher than the 7-day strength. The moist unit weight strongly depended on air-foam content as well as bottom ash content added to the composite geo-material. In composite geo-material, secant modulus (E_{50}) also increased as its compressive strength increased due to the inclusion of bottom ash.

요 지

본 연구에서는 준설토 및 Bottom ash를 동시에 재활용하기 위하여 개발된 복합지반재료의 역학적 특성을 고찰하였다. 본 실험에서 제작된 복합지반재료는 부산 신항 건설현장에서 채취한 준설토, 시멘트, 기포 및 삼천포 화력발전소에서 발생한 Bottom ash로 구성되어졌다. 다양한 배합비로 제작된 복합지반재료의 역학적 특성을 고찰하고, 특히 Bottom ash 혼합에 의한 역학적 거동 특성을 조사하기 위하여 다양한 실내실험이 수행되어졌다. 복합지반재료에 대한 실험결과 응력-변형 관계와 일축압축강도는 배합조건에 크게 의존하는 것으로 나타났고, 특히 Bottom ash 혼합시 압축강도 및 응력-변형 곡선의 기울기가 증가하는 Bottom ash 보강효과를 확인하였다. 복합지반재료의 압축강도는 양생기간이 증가할수록 증가하며, 28일 강도는 7일 강도의 약 1.7~1.8배 증가하는 것으로 나타났다. 복합지반재료의 단위중량은 기포함량에 크게 의존하였다. 복합지반재료의 변형계수(E_{50})은 Bottom ash의 혼합으로 인해 강도가 증가함에 따라 증가되었다.

Keywords : Bottom ash, Composite geo-material, Dredged soil, Recycling, Unconfined compression test

1 정회원, 부경대학교 해양공학과 조교수 (Member, Assistant prof., Dept. of Ocean Engrg., Pukyong National Univ., yuntkim@pknu.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 부경대학교 해양공학과 석사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Ocean Engrg., Pukyong National Univ.)

3 정회원, 부경대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Pukyong National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

항만 건설 및 항만 리모델링 등의 대규모 항만시설이 확충 및 재정비됨에 따라 매년 대량의 준설토가 발생하고 있고, 앞으로도 지속적인 항로유지 준설과 오염해역 준설로 인하여 준설량은 꾸준히 증가할 것으로 전망되고 있다. 현재 국내에서 발생하는 준설토는 대부분 매립 또는 외해투기 등으로 처리되고 있다. 이로 인해 연안 환경의 심각한 오염 문제가 발생할 뿐만 아니라 매립을 하기 위한 투기장 건설비용 증대, 부지확보 어려움, 처리비용의 상승 등과 같은 많은 문제점을 야기하고 있다. 따라서 꾸준히 발생하는 준설토를 효율적으로 이용하고 재활용할 수 있는 기술이 필요하다.

준설토 재활용 기술이 발달한 선진국에서는 준설토를 단순 매립하기 보다는 해양환경복원 및 인공 서식지 조성, 친환경적인 친수공간 개발 등에 건설재료로 적극적으로 재활용하고 있다. 준설토 재활용에 관한 기존 연구를 살펴보면 Tsuchida 등(1996)은 경량혼합토 성토 재료에 대한 연구와 수중에서 타설된 경량혼합토의 거동을 연구하였고, Otani 등(2002)은 X-ray CT scanner를 통하여 SGM(Super Geo-Material)에 대한 특성을 연구한 바 있으며, 이 외에도 많은 연구가 꾸준히 수행되어지고 있다. 한편 국내에서는 2000년도 초반부터 건설재료로서 준설토가 재활용될 수 있도록 경량혼합토(lightweight treated soil)에 대한 연구를 수행하고 있다. 국내에서 수행된 경량혼합토에 대한 연구를 살펴보면 준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적 특성 연구(김주철 등, 2002)를 비롯하여 무보강 및 보강경량토의 압축거동 특성 비교, 지오그리드와 폐어망을 혼합한 보강경량토의 압축거동특성 연구(김윤태 등, 2005; 김윤태 등, 2006a; b) 등이 수행된 바 있다.

한편, 산업발달과 경제성장으로 인해 전력사용량이 급증하면서 화력발전소에서 부산물로 발생하는 석탄회량도 증가하여 2010년경에는 발생량이 약 600만톤에 이를 것으로 예상된다. 이러한 석탄회는 크게 Fly ash와 Bottom ash로 구분되고 이 중에 Bottom ash는 전체 석탄회 발생량의 15~20%를 차지한다. Fly ash는 콘크리트 혼화재, 시멘트 원료 등으로 많은 양이 재활용되나, Bottom ash는 일부분만 성토재, 대체 잔골재 등으로 재활용되고 대부분은 단순 매립 및 투기되는 실정이다. 현재 이를 처리하기 위한 매립지나 Ash pond 등이 포화상태에 이르러 새로운 매립지나 처리시설 확충이 필요하

다. 앞으로 에너지의 수요는 더욱 증가하고 석탄은 국내 유일의 화석연료로서 석탄회 발생량은 계속 늘어날 전망이다. Bottom ash도 준설토와 마찬가지로 재활용할 수 있는 기술이 시급히 마련되어야 한다.

Bottom ash의 재활용에 관한 국외 연구 동향을 살펴보면 Bottom ash를 아스팔트 포장 충전재, 콘크리트 잔골재, 또는 건설공사 시 성토재 등과 같이 Bottom ash를 단순 건설재료로 재활용하기 위한 연구들이 수행되었다(Churchill과 Amirkhanian, 1999; Ghafoori과 Buchloc, 1996; Kim 등, 2005). 국내에서도 Bottom ash를 대체 골재로 활용한 연구(김동환 등, 2000) 및 특허가 주를 이루었고, 최근 Bottom ash를 이용한 그라우팅재 연구(도영곤 등, 2006) 등이 수행된 바 있으나 아직 실용화 단계에 이르지 못한 것으로 판단된다. 그러므로 화력발전소의 부산물로서 처리에 막대한 국가적 예산소요가 예상되는 Bottom ash를 재활용하는 연구는 폐자재의 자원화 및 환경보호 차원에서 매우 유용한 연구로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 준설토와 Bottom ash를 동시에 재활용하기 위하여 복합 지반재료를 개발하였다. 이를 위해 기존에 연구된 낙동강 하구지역에서 발생하는 준설토를 사용한 경량토에 화력발전소의 부산물인 Bottom ash를 혼합하여 Bottom ash 혼합경량토를 제작하였다. Bottom ash 혼합경량토는 다양한 배합조건 즉, 시멘트 함유율, 함수비, 기포함유율, Bottom ash 혼합율에 따라서 제작되어졌고, 압축강도 특성 및 응력-변형특성을 일축압축강도시험과 같은 실내실험을 통해 분석하였다.

2. Bottom ash 혼합경량토

본 연구에서 제작한 Bottom ash 혼합경량토의 개념도는 그림 1과 같다. 기존 경량토는 그림 1(a)와 같이 준설토에 기포를 배합하여 재료의 경량성을 확보할 뿐만 아니라 압축강도를 증진시키기 위해 고화재인 시멘트를 첨가하는 형태로 구성되어 있다. Bottom ash 혼합경량토는 Bottom ash를 재활용할 뿐만 아니라, 강도 증대 및 역학적 특성 개선을 위하여 그림 1(b)와 같이 Bottom ash를 경량토에 첨가한 형태이다.

경량토는 기포, 시멘트 및 함수비를 조절함으로써 사용목적에 따라 단위중량과 압축강도를 조절할 수 있기 때문에 성토부의 침하와 인접지반의 변형을 억제할 뿐만 아니라 주변 구조물에 거의 영향을 주지 않으며, 교대의 뒷면이나 칼버트·박스 설치부의 침하를 줄여서 구

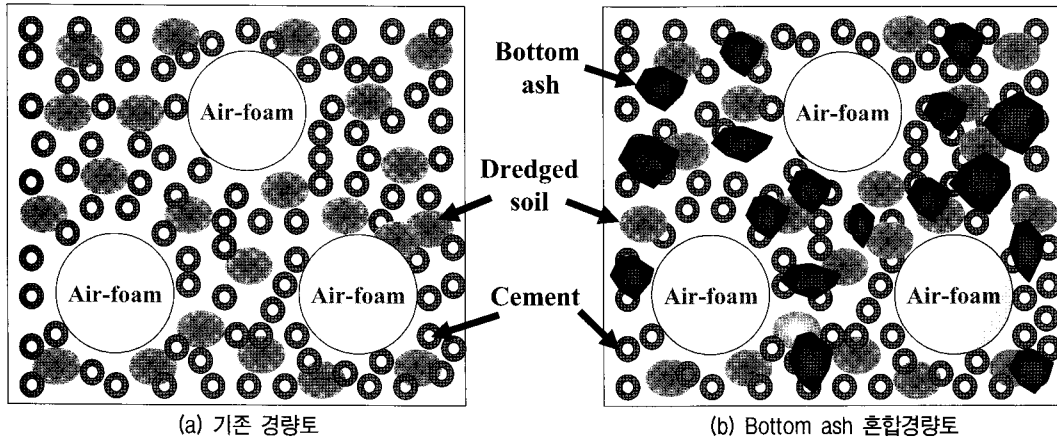
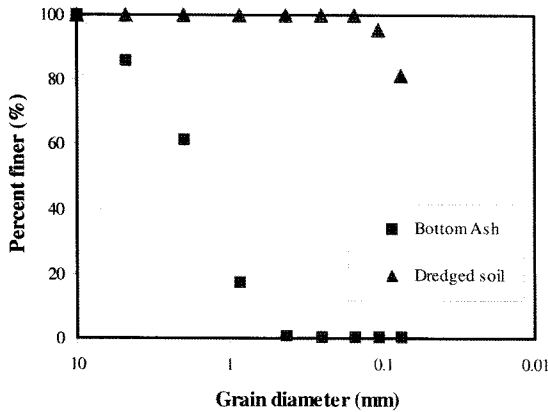


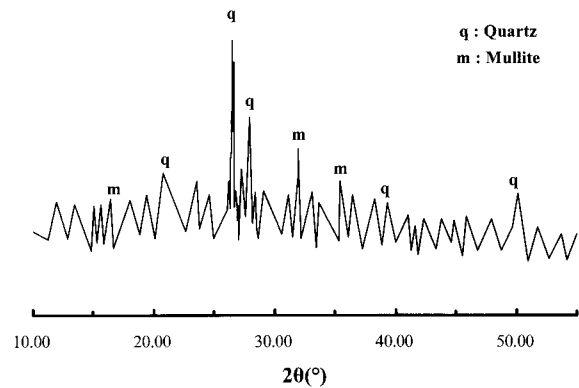
그림 1. 기존 경량토와 Bottom ash 혼합경량토의 개념도

표 1. 준설토의 물성시험 결과

초기 함수비 (%)	액성한계 (%)	소성지수 (%)	비중	No.200체 통과율(%)	USCS
54.7	39.2	18.5	2.60	81.2	CL



(a) 입도분포곡선



(b) X-ray Diffractogram

그림 2. 준설토와 Bottom ash의 입도분포곡선 및 Bottom ash XRD 분석결과

조물과 성토부의 부등침하를 경감·방지한다. 하중이 작용하더라도 수평방향으로 거의 토압이 작용하지 않으므로 측방 유동을 경감시켜 구조물의 변위를 방지할 수 있다. 또한 경량토는 유동성이 있으므로 펌프 압송에 따른 시공이 가능하고, 저품질인 흙도 이용할 수 있어 준설토의 재활용과 같은 장점이 있다(태평양 Soil, 2004).

Bottom ash 혼합경량토는 부산 신항만과 같은 연안에서 대규모 공사시 발생하는 준설토나 항로유지 및 청소 준설토 발생되는 준설토를 직접 이용할 수 있을 뿐만 아니라 단순 매립되기되는 Bottom ash를 활용할 수 있으므로 매립처리장 부지 선정에 따른 비용절감 및 환경오염을 방지할 수 있다.

3. 실내시험 방법

3.1 Bottom ash 혼합경량토의 제작

본 연구에서 사용된 준설토 시료는 부산신항 배후부지에 매립된 것으로서 채취된 준설토의 기본적인 물리적 특성은 실내 물성시험을 통하여 파악되었다. 그 결과는 표 1에 나타난 바와 같이 액성한계는 39.2%, 준설토의 현장함수비 54.7%, 비중은 2.60, 소성지수는 18.5%로서 준설토를 통일분류법(USCS)으로 분류하면 CL로 나타났다. 입도분석 결과는 그림 2(a)와 같으며 비중계 분석은 실시하지 않았다. No.200 체 통과율이 81.2%로 나타났으며 점토성분에 실트가 함유된 실트질 점토로 확인되었다.

재료의 경량성 확보를 위해 사용된 기포제는 공기압, 온도, 유기물 함량, 발포 후 경과시간에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Watabe 등, 2004). 기포제는 형상에 관계없이 시멘트가 응결하고 경화될 때까지 기포를 안정하게 유지되어야 한다. 본 연구에서 사용된 기포제는 합성계면활성제계 기포제로서 고급 Alcohol 유황 에스테르계 화합물이다. 기포의 생성을 위하여 기포제와 물을 1:20의 비율로 혼합한 후 공기압을 가해 사전에 발포시키는 방식을 사용하였다.

고화재로 사용된 시멘트는 물과 반응하여 수화물이 되기 때문에 강도발현을 한다. 일반적으로 점성토 등에는 강도발현이 좋은 보통 포틀랜드 시멘트 또는 고로 시멘트 B종을 사용하며, 유기질토 등에는 시멘트계 고화재를 사용한다. 본 실험에서는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 이용하였다.

Bottom ash는 화력발전소에서 발생된 석탄회 중 바닥에 남은 재로서 입도분포는 일반적으로 자갈에서 모래까지 분포하며 실트와 점토크기의 입자는 매우 드물다. Bottom ash의 특성은 연소되는 석탄의 종류와 연소조건 등에 의존되며 같은 발전소에서 발생한 Bottom ash라도 발생한 시간이 다르면 성분이 다른 특징이 있다(Kumar 과 Stewart, 2003). 본 연구에서 사용한 Bottom ash는 삼천포 화력발전소에서 발생한 것으로서 공시체 제작을 위해 #4번 체에 통과시켜 자갈크기의 입자를 배제시켰으며 입도 분포곡선은 그림 2(a)와 같다. 본 연구에서는 XRF(X-ray Fluorescence)와 XRD(X-ray Diffractogram)를 통하여 Bottom ash의 화학성분 분석 및 주요 결정상을 조사하였다. 표 2는 XRF 분석결과로부터 구한 Bottom ash의 화학적인 구성성분을 나타낸 것이다. 또한 XRD 분석결과로부터 그림 2(b)와 같이 주요 결정상이 Quartz

표 2. Bottom ash의 화학성분

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂
49.8	18.2	10.4	13.9	3.52	0.69	0.55	1.17	0.96

표 3. 배합 및 시험조건

시험조건	일축압축시험
시멘트 함유율, Ci(%)	8, 12, 16, 20*
준설토 초기 함수비, Wi(%)	120*, 130, 140, 150
기포 함유율, Ai(%)	0, 1, 2*, 3
Bottom ash 함량, BAi(%)	0, 25, 50, 75, 100*
양생일(day)	7, 28, 60, 90
양생방법	습윤양생

* Bold 체 : 기준배합비

(SiO₂)과 Mullite(Al₂O₃·2SiO₂)임을 알 수 있었으며, 약 27°(2θ)에서 최대 광학값을 나타내는 형태이다.

배합특성에 따른 거동특성을 파악하기 위해 표 3과 같이 시멘트 함량, 준설토의 초기함수비, 기포 함량 등에 따라 배합 및 시험조건을 달리 적용하여, Bottom ash 혼합에 따른 압축거동 특성과 보강효과를 파악하였다. 이때 재료별 함량은 건조된 준설토의 중량비로서 결정되었다. Bottom ash 혼합경량토의 기준 배합비는 시멘트 함량 20%, 초기 함수비 120%, 기포 함량 2%이며 표 3에 bold 체로 나타내었다. 이는 본 연구에 앞서 수행된 예비실험 결과를 바탕으로 단위중량 등을 고려하여 결정된 배합조건이다. 경량성 확보를 위하여 사용되는 기포제는 시간이 지남에 따라 소포가 되기 때문에 공시체 제작과정에서 기포의 혼합은 5분 이내로 실시하였으며 시멘트 경화에 대한 영향을 고려하여 전체 공시체 제작 시간은 10분 이내로 조절하였다.

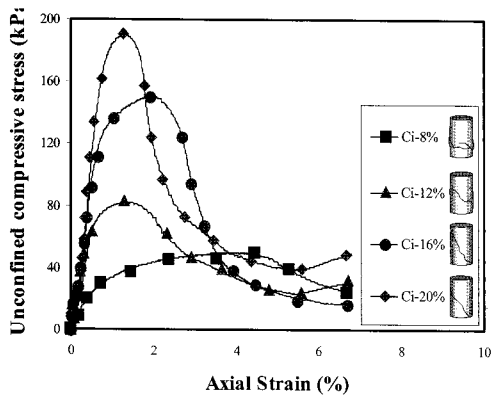
3.2 일축압축강도 시험

다양한 배합조건에 따라 제작된 경량토 공시체를 양생시킨 후 Bottom ash 혼합경량토의 거동특성을 파악하기 위하여 일축압축강도 시험을 수행하였다. 일축압축 시험의 공시체 크기는 직경 72mm, 높이 148mm로 제작하였으며 일축압축강도 시험은 변형률 제어가 가능한 D사의 일축압축 시험기를 사용하였다. 이때 축변형률은 1.0%/min으로 제어하였다.

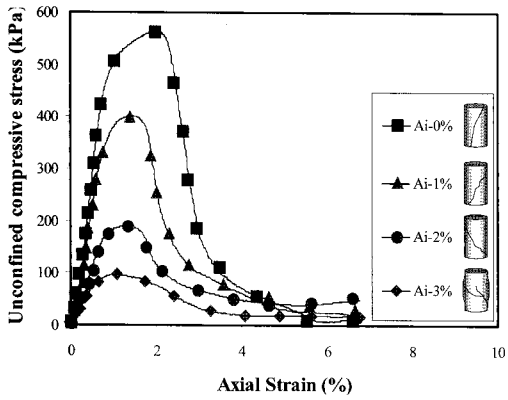
4. 실험결과 및 분석

4.1 응력-변형 거동 특성

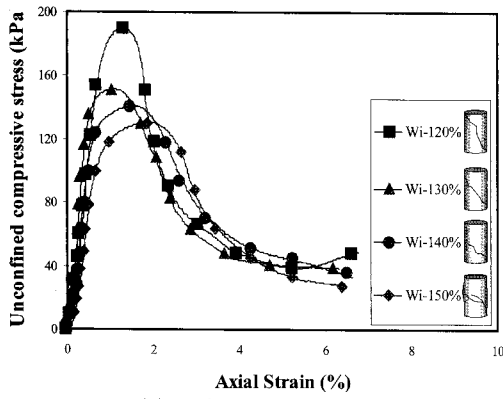
Bottom ash 혼합경량토의 응력-변형 거동 특성은 28일 양생 후 일축압축시험을 수행한 결과로 분석하였다. 그림 3은 Bottom ash 혼합경량토에 혼합되는 재료(시멘트, 물, 기포)의 함유율에 따른 응력-변형 곡선 및 공시체 파괴 형상을 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 기준 배합비에서 시멘트 함유율이 8%, 12%, 16%, 20%로 증가할 때의 응력-변형 곡선과 각 공시체 파괴 형상을 나타낸 것이다. 시멘트 함유율이 증가할수록 최대 일축압축강도도 증가하고, 최대 일축압축강도 이후 응력감소가 큰 취성적인 거동을 나타낸다. 또한 시멘트 함유율이 증가할수록 응력-변형곡선의 기울기가 커지며 최대 일축압축강도에 대응하는 축변형률이 감소하는 경향을 나타낸다.



(a) 시멘트 함유율



(b) 기포 함유율



(c) 준설토 초기 함유율

그림 3. 재료의 함유율에 따른 경량토의 응력-변형 거동

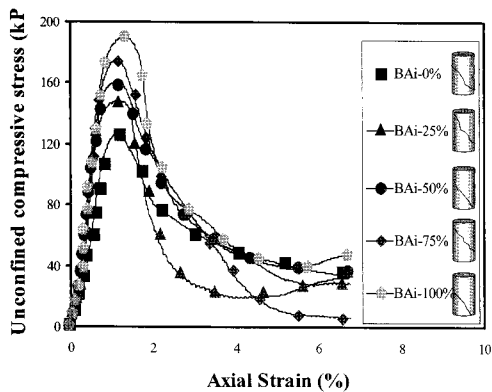


그림 4. Bottom ash의 함유율에 따른 경량토의 응력-변형 거동

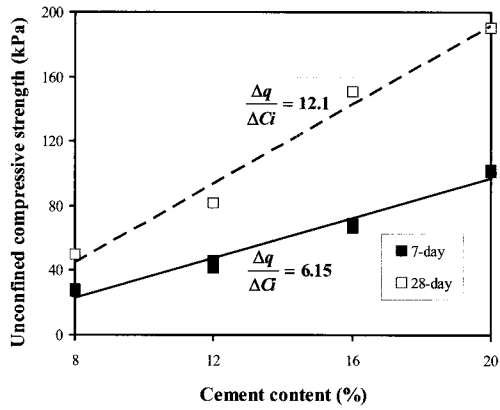
다. 시멘트 함유율이 작은 공시체에서는 bulging 파괴가 발생한 후에 전단파괴로 진행되었다.

그림 3(b)는 기준 배합비에서 초기 함유비가 120%, 130%, 140%, 150%로 변화할 때의 응력-변형 곡선과 각 공시체 파괴 형상으로서 함유비가 증가함에 따라 기울기도 작아지며 최대 일축압축강도 이후 응력감소도 작은 연성적인 거동을 나타낸다. 또한 함유비가 증가할수록 최대 일축압축강도에 대응하는 축변형율은 증가되었으며 함유비가 높은 공시체에서 초기에 bulging 파괴가 발생하였다. 그림 3(c)는 기준 배합비에서 기포 함유율이 0%, 1%, 2%, 3%로 증가할 때의 응력-변형 곡선과 각 공시체 파괴 형상으로서 기포 함유율이 증가할수록 최대 일축압축강도가 감소하고 응력-변형곡선의 기울기도 작아짐을 알 수 있다.

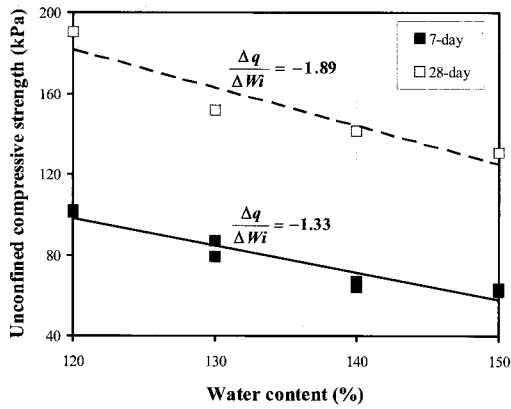
그림 4는 기준 배합비에서 Bottom ash가 혼합되지 않은 경량토와 Bottom ash가 25%, 50%, 75%, 100%의 함유율로 혼합된 경량토의 응력-변형 곡선과 각 공시체 파괴 형상이다. Bottom ash 함유율이 증가할수록 최대 일축압축강도도 증가하고 응력-변형곡선의 기울기가 커지는 경향을 나타낸다. 이와 같은 결과는 준설토로 구성된 경량토에 입자형상이 각지고 모난 모래와 유사한 Bottom ash가 혼합됨으로써 혼합경량토 재료의 interlocking이 커지고, Bottom ash에 함유된 석회성분이 물과 반응하여 최대 일축압축강도가 증가되고 곡선의 기울기도 증가한 것으로 판단된다. 또한 최대 일축압축강도 이후 큰 응력의 감소가 나타나며 공시체 파괴형상은 일반적인 전단파괴형상으로 나타났다.

4.2 압축강도 특성

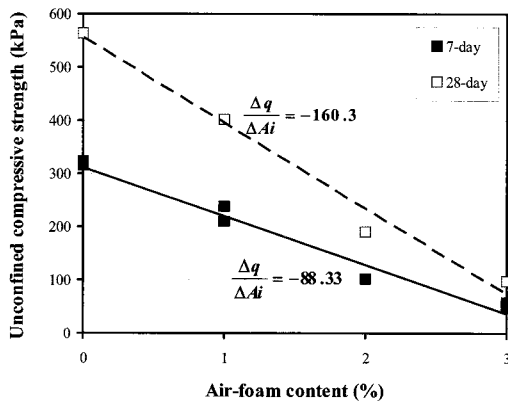
그림 5는 시멘트 함유량, 준설토 초기함수비, 기포 함유량에 따른 7일 및 28일 양생된 Bottom ash 혼합경량토의 압축강도 특성을 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 시멘트 함유율에 따른 압축강도의 특성을 나타낸 것으로 시멘트 함유율이 증가할수록 압축강도도 거의 선형적으로 증가되는 것을 알 수 있다. 그림 5(b)와 5(c)는 준설토 초기함수비와 기포 함유율에 대한 영향으로 준설토 초기 함유비와 기포 함유율이 증가할수록 압축강도는 거의 선형적으로 감소하는 결과를 나타낸다. 이와 같은 혼합재료의 함유율 변화에 따른 압축강도의 변화 경향은 무보강 경량토와 유사한 경향을 나타낸다(김윤태 등, 2005; 2006a).



(a) 시멘트 함유율



(b) 준설토 초기 함수비



(c) 기포 함유율

그림 5. 재료의 함유율에 따른 경량토의 압축강도 변화

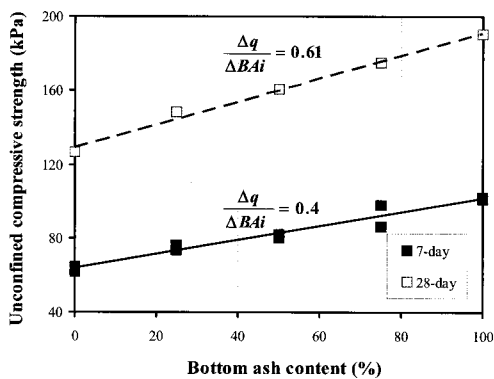


그림 6. Bottom ash 함유율에 따른 경량토의 압축강도 변화

그림 6은 Bottom ash 함유량에 따른 압축강도 특성으로 Bottom ash 함유량이 증가할수록 압축강도도 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 압축강도를 증진시키기 위해 사용된 시멘트 함유율이 일정하더라도 Bottom ash 함유량이 증가함에 따라 압축강도도 커진다. 그러므로 Bottom ash를 첨가함에 따라 복합지반재료의 강도가 증진되므로 보다 적극적인 Bottom ash의 재활용이 기대된다.

본 연구에서 제작된 공시체의 7일강도와 28일강도 사이의 비교를 그림 7과 같이 나타내었다. 공시체의 강도 변화는 양생 7일강도에 비해 28일의 강도가 약 1.7~1.8 배정도 증가한 것을 볼 수 있다. 이러한 결과로부터 7일 강도를 이용하여 차후에 제작되는 공시체의 적정 강도를 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

그림 8은 Bottom ash 함량에 따른 압축강도의 특성을 양생기간별로 나타낸 것으로 Bottom ash 혼합경량토의 장기강도 특성을 알아보기 위해 공시체를 90일까지 양생한 후에 일축압축시험을 수행한 결과이다. 양생일이 증가함에 따라 압축강도가 증가함을 알 수 있으며 특히

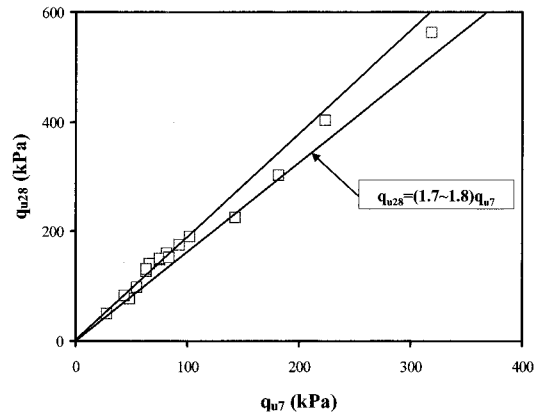


그림 7. 7일강도와 28일 강도와의 관계

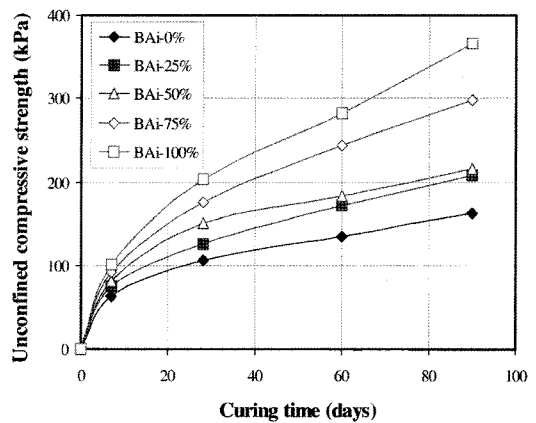


그림 8. 양생기간에 따른 압축강도의 변화

Bottom ash 함량이 클수록 압축강도의 증가율이 더 커지는 것으로 나타났다. 이것은 Bottom ash에 함유된 실리카(SiO_2)성분이 시멘트의 수화에 의해 생기는 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)과 상온에서 서서히 반응하여 불용성의 화합물을 만드는 포졸란 반응이 발생하여 나타난 결과이다. 따라서 Bottom ash 혼합이 보강효과뿐만 아니라 Bottom ash 혼합경량토의 장기간 내구성 증대에도 도움을 주는 것으로 사료된다.

4.3 단위중량특성

Bottom ash 혼합경량토를 성토재, 뒤채움재 등의 건설재료로 사용할 경우 토압경감에 의한 측면방향의 변위를 저감시키고 하중에 의한 지반의 침하 및 구조물의 변위를 방지하기 위해 단위중량특성은 매우 중요하다. 이를 위해서 혼합되는 재료(시멘트, 물, 기포, Bottom ash)의 함유율에 따른 단위중량 특성을 분석하였다. 그림 9(a), 9(b)는 시멘트와 Bottom ash 함유율에 따른 단위중량 값을 나타낸 것으로 시멘트 함유율에 따라서는 단위중량의 변화가 거의 없었으나 Bottom ash 함유율이 증가할수록 단위중량은 증가하였다. 이러한 결과는 시멘트

함량이 전체 중량에서 차지하는 비율이 매우 작아 단위중량 값에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다. 그러나 Bottom ash의 입경이 다른 혼합재료에 비해 매우 커서 공시체 제작시 단위중량을 감소시키는 기포와 물을 배제시키기 때문에 단위중량이 증가하는 것으로 나타났다.

그림 9(c), 9(d)는 기포 함유율과 준설토 초기함수비에 따른 단위중량의 변화를 나타낸 것으로 기포 함유율과 함수비가 증가할수록 단위중량이 감소하는 경향이 나타났다. 준설토 초기 함수비의 변화에 따라 단위중량의 변화는 약간 감소하였으나 기포 함유율이 증가할수록 단위중량이 크게 감소하였다. 이는 기포의 단위중량이 0.05kN/m^3 으로 사용된 다른 재료에 비해 매우 작기 때문에 나타나는 결과로 판단된다. 결과적으로 기포 함유율은 단위중량에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 경량토에 대한 단위중량의 기준범위가 $12\text{kN/m}^3 \sim 14\text{kN/m}^3$ 일 경우 본 연구에 적용된 배합비에서 적정 기포 함유율은 약 2%로 나타났다.

4.4 일축압축강도와 할선 탄성계수(E_{50})의 관계

일축압축강도와 할선 탄성계수(E_{50})의 관계를 고찰하

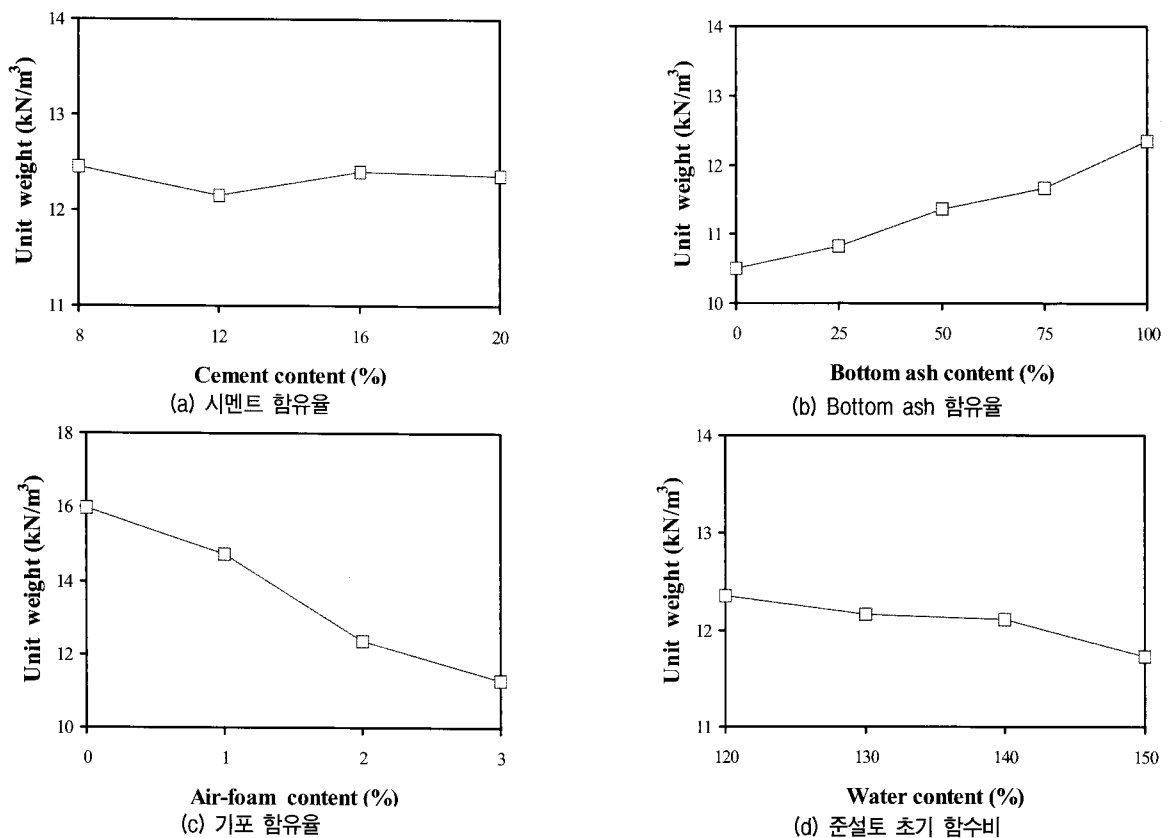


그림 9. 재료의 함유율에 따른 단위중량의 변화

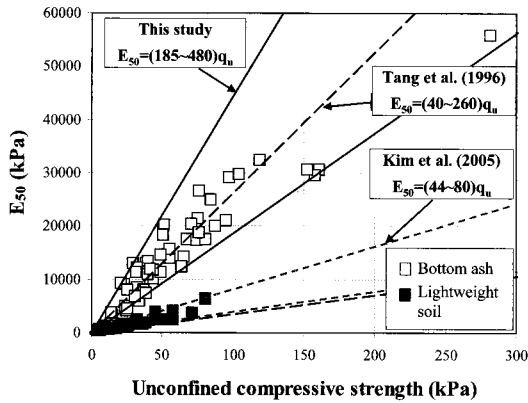


그림 10. 일축압축강도와 할선 탄성계수(E50)와의 관계

면 그림 10과 같다. 본 연구에서 Bottom ash 혼합경량토의 할선 탄성계수는 압축강도의 약 185~480배 정도의 범위를 가지는 것으로 나타났으며 각기 다른 재료별 함량에 따라서 탄성계수 값이 다르기 때문에 다소 분산되어 나타났다.

한편 Tang 등(1996)은 기포를 혼합한 경량토의 할선 탄성계수는 압축강도의 40~260배 정도로 일반적인 범위를 제시하였다. 부산 신항만에서 채취한 준설토를 사용한 김윤태 등(2005)의 연구에서는 할선 탄성계수는 압축강도의 44~80배 정도로 나타났다. 그림 10에서 알 수 있듯이 Bottom ash 혼합경량토의 할선 탄성계수는 기존 연구의 결과보다 큼을 알 수 있다. 이러한 차이는 Bottom ash의 혼합이 경량토의 응력-변형 거동 및 강도 특성에 큰 영향을 주는 것으로 판단되며, 기존의 경량토의 역학적 특성 개선에 효과가 있는 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 준설토와 Bottom ash를 동시에 재활용하기 위하여 복합 기반재료인 Bottom ash 혼합경량토를 제작하였으며 일축압축강도시험을 실시하여 응력-변형 거동 및 압축강도 특성을 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Bottom ash 혼합경량토의 응력-변형 거동 특성은 배합된 각 재료의 함유율에 크게 의존한다. 최대 일축 압축강도와 응력-변형곡선의 기울기는 시멘트 함유율이 증가할수록 증가하며 기포 함유율과 준설토 초기 함수비가 증가할수록 감소하였다. 이는 기존 경량토의 응력-변형 거동과 유사하다.

- 2) Bottom ash 함유율이 증가할수록 최대 일축압축강도가 증가하고 응력-변형곡선의 기울기가 커지는 경향이 나타난다. 이는 준설토 점토로 이루어진 경량토에 입자형상이 각지고 모난 모래와 유사한 Bottom ash가 혼합되어 재료의 강성 및 내부 interlocking이 커져서 압축강도가 증가된 것으로 판단된다.
- 3) Bottom ash 혼합경량토의 압축강도는 양생일이 증가할수록 증가하며 특히 Bottom ash 함량이 높을수록 압축강도 증가율이 더 커져 Bottom ash 혼합이 장기 강도 증대에 도움을 주는 것으로 사료되며 28일강도는 7일강도의 약 1.7~1.8배로 나타났다.
- 4) Bottom ash 혼합경량토의 단위중량은 기포 함유율 및 Bottom ash 함유율에 크게 의존하는 것으로 나타났다. Bottom ash 함유율이 증가할수록, 기포 함유율이 감소할수록 단위중량은 증가한다.
- 5) Bottom ash 혼합경량토의 할선 탄성계수는 압축강도의 약 185~470배 정도의 범위를 가져 Tang 등(1996)이 제시한 경량토의 일반적 범위 40~260배 보다 증가된 것으로 나타났다. 따라서 Bottom ash 혼합이 기존 경량토의 역학적 특성 개선에 효과가 있는 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술 연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었으며(KRF-2006-311-D00877), 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김동환, 임종욱, 임남용 (2000), "화력발전소 Ash Pond에 매장되어 있는 Bottom Ash를 잔골재로 이용한 고성능 시멘트 모르타의 물성연구", *한국폐기물학회 춘계학술연구회 발표논문집*, vol.2000, No.0, pp.69-74.
2. 김윤태, 권용규, 김홍주 (2006a), "지오그리드 혼합 보강경량토의 압축강도 특성 연구", *한국지반공학회 논문집*, 제22권, 제7호, pp.37-44.
3. 김윤태, 김홍주 (2006b), "페어망을 이용한 보강경량토의 압축거동 특성", *한국지반공학회 논문집*, 제 22권, 제 11호, pp.25-34.
4. 김윤태, 권용규, 김홍주 (2005), "준설토 재활용을 위한 무보강 및 보강경량토의 압축거동특성 비교", *한국해양공학회지*, 제19권, 제6호, pp.44-49.
5. 김주철, 이종규 (2002), "준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적 특성연구", *한국지반공학회 논문집*, 제18권 4호, pp.309-317.
6. 도영근, 권혁두, 이송 (2006), "Bottom Ash를 이용한 그라우팅제의

- 환경적 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제22권 제11호, pp.5~11.
7. 송창섭, 임성윤 (2002), “보강 혼합토의 역학적 특성(I)”, *한국환경복원녹화기술학회지*, 제5권, 제6호, pp.9~13.
 8. 태평양 Soil(주) (2004), “발생토를 이용한 경량(기포) 혼합토 공법”, 동서화학공업(주)
 9. Churchill, E. V., Amirkhanian, S. N. (1999), “Coal Ash Utilization in Asphalt Concrete Mixtures”, *Journal of Energy Engineering*, Vol. 11, No.4, pp.295~301.
 10. Kim, B. J., Prezzi, M., Salgado, R. (2005), “Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No.7, pp.914~924.
 11. Kumar, S. and Stewart, J. (2003), “Evaluation of Illinois Pulverized Coal Combustion Dry Bottom Ash for Use in Geotechnical Engineering Applications”, *Journal of Energy Engineering*, Vol.129, No.2, pp.42~55.
 12. Ghafouri, N. and Bucholc J., “Investigation of Lignite-Based Bottom Ash for Structural Concrete”, *Journal of Material in Civil Engineering*, Vol.8, No.3, pp.128~137.
 13. Otani, J., Mukunoki, T. and Kikuchi, Y. (2002), “Visualization for Engineering Property of In-situ Lightweight Soils with Air Foams”, *Soil and Foundations*, Vol.4, No.3, pp.93~105.
 14. Tang, Y. X., Tschida, T., Shirai, A., Ogata, H., and Shiozaki, K. (1996), “Triaxial Compression Characteristics of Super Geo-Material Cured Underwater”, *Proceedings of 31st Conference on Geotechnical Engineering*, pp.2493~2494.
 15. Tsuchida, T., Takeuchi, D., Okumura, T. and Kishida, T. (1996), “Development of Lightweight Fill from Dredgings”, *Proc. of Environmental Geotechnics*, Balkema, pp.415~420.
 16. Watabe, Y., Itou, Y., Kang, M. S. and Tsuchida, T. (2004), “One-Dimensional Compression of Air-Foam Treated Lightweight Geo-Material in Microscopic Point of View”, *Soils and Foundations*, Vol.44, No.6, pp.53~67.

(접수일자 2007. 7. 6, 심사완료일 2007. 10. 18)