

도로성토체로 사용된 실트질 계열의 경량기포혼합토에 대한 물의 영향

Effect of Water on the Lightweight Air-Mixed Soil Containing Silt Used for Road Embankment

황 중 호¹ Hwang, Joong-Ho
안 영 균² Ahn, Young-Kyun
김 태 형³ Kim, Tae-Hyung

Abstract

This study was especially conducted to find out the characteristics of the lightweight air-mixed soil (slurry density 10 kN/m³) containing silt related to water. Compression strength, permeability, and capillary height of the lightweight air-mixed soil were studied, and also to support these studies, the structure of that soil was analyzed in detail. Air bubbles of various sizes are inside the lightweight air-mixed soil, and its distribution in a location is almost constant. A numerous tiny pores are inside the air bubbles so that the lightweight air-mixed soil can be saturated with water. Porosity is also estimated through the image analysis. Peak strength of the lightweight air-mixed soil is not dependent on water, but behavior of stress-strain is affected by the water. Permeability is about 4.857×10^{-6} cm/sec, which is a little bit higher than the clay's permeability. Capillary rise occurs rapidly at the beginning of the test until the lapse of 100 minutes and then its increase rate becomes slow. The capillary rise causes the increase of the density of the lightweight air-mixed soil, and thus it is required to pay attention to this phenomenon during structure design and maintenance of the lightweight air-mixed soil.

요 지

본 연구는 특별히 물과 관련된 실트질 계열의 경량기포혼합토(기포슬러리밀도 10kN/m³ 대상)의 특성변화를 알아보기 위해 수행되었다. 일축압축강도, 투수계수, 모관상승고 등에 대한 연구가 이루어졌으며, 이들 연구를 뒷받침할 수 있는 경량기포혼합토의 미세구조에 대한 연구도 아울러 진행되었다. 사진을 통한 미세 구조 분석 결과 경량기포혼합토 내의 기포는 다양한 크기로 존재하며, 위치별 기포의 분포는 거의 일정한 것으로 밝혀졌다. 또한 기포 안에 아주 많은 미세한 공극들이 존재하여 물에 의해 경량기포혼합토가 포화상태에 가까이 도달될 수 있음이 밝혀졌다. 이미지를 이용한 간극률 산정도 같이 이루어졌다. 일축압축강도 시험 결과, 물에 의한 극한강도 값의 변화는 없으나 응력-변형거동에는 영향을 주는 것으로 나타났다. 경량기포혼합토의 투수계수는 평균 4.857×10^{-6} cm/sec로 점토보다는 약간 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 경량기포혼합토의 모관상승은 시험초기부터 100분 이내에는 가파르게 진행되고, 그 이후 경과시간에 따라 상승속도가 점진적으로 완만하게 진행됨을 알 수 있다. 모관상승은 곧 재료의 단위중량 증가를 유발하므로 경량기포혼합토의 설계와 유지관리 시 각별한 주의가 요구된다.

Keywords : Capillary rise, Compression strength, Lightweight air-mixed soil, Permeability, Slurry density

1 학생회원, 한국해양대학교 토목환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Maritime Univ.)

2 정회원, 한국해양대학교 토목환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Maritime Univ.)

3 정회원, 한국해양대학교 건설환경공학부 조교수 (Assistant Prof., Div. of Civil and Environmental Engrg., Korea Maritime Univ., kth67399@bhu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

경량기포혼합토는 건설발생토 등과 같은 원료토에 물과 시멘트 등의 고화제를 혼합하여 유동화 시킨 것에 기포를 혼합하여 만든 재료를 말한다. 단위중량(슬러시 상태의 습윤단위중량을 일컬음)은 보통 10kN/m^3 전후로 조정이 가능하나 여러 조건(예, 압축강도)이나 품질관리(예, 소포문제)에 따라 실제적용에 제한적인 면이 있을 수 있다. 경량기포혼합토는 토사에 비해 가벼워서 지반 등에 미치는 하중을 경감할 수 있고 유동성이 높으므로 펌프 압송에 의한 타설을 할 수 있으며 전압이 필요 없으므로 시공이 용이한 장점을 가지고 있다. 이러한 장점 때문에 연약지반 위의 성토, 옹벽의 뒤채움, 구조물의 되메우기, 침하부분 충전 등에 효과적인 재료로 인식되어 현재 사용범위가 증가되고 있는 추세이다(하이그라운드소일 연구컨소시엄, 2005).

경량기포혼합토 이전에 경량성토를 필요로 하는 곳에는 EPS(Expanded Poly Styrene)가 주로 이용되었다. EPS는 석유정제 과정에서 발생하는 Styrene Monomer(액체) 중화제로서 얻어지는 Poly Styrene(고체)과 여기에 첨가되는 발포제를 주요 원료로 하고 있다. 그 단위중량이 흙의 1/100정도로 극히 가벼워 이를 활용하여 연약지반 상에 EPS블록이 성토체, 교대와 같은 구조물의 뒷채움부에 사용되었다(한국건설기술연구원, 1996). 하지만, EPS가 갖는 자체 소성변형으로 인한 장기적인 압축성(크리프)과 블록의 파괴, 단차 침하발생으로 인한 문제점이 노출되기 시작하면서 최근 원료토에 물과 시멘트를 첨가하여 유동화 시킨 것에 기포를 혼합하는 경량기포혼합토를 적용시키고자 하는 노력이 여러 연구자들에 의해 진행되고 있다(임종철 등, 2007)

경량기포혼합토의 압축강도에 영향을 미치는 인자들에 대한 국내 연구로서는 김과 이(2002)에 의해서 시료의 초기함수비, 시멘트 함유율, 기포의 함유율 및 양생방법 등이 주요인자로 알려졌으며, 이후 윤과 김(2004)에 의해 이러한 영향인자들을 이용하여 경량기포혼합토의 임의 배합에 따른 일축압축강도를 추정하는 기법이 개발되었다. 이후 윤과 유(2004)의 연구에서는 현장발생토의 초기함수비, 시멘트 첨가량, 기포 첨가량을 고려한 정규화계수로 표현되는 일축압축강도의 적절한 회귀식을 제시하고 있으며, 정규화계수가 원료토의 채취지역에 따라 달라지는 것을 지적하고 있다. 원료토의 채취지역에 따라 경량기포혼합토의 일축압축강도가 달

라지는 이유는 원료토를 구성하고 있는 모래, 실트, 점토의 함유량에 따라 모래와 점토의 함유율이 증가하면 일축압축강도가 낮아지며, 실트의 함유율이 높으면 일축압축강도가 증가하는 경향을 보이기 때문이다. 또한 타설 높이에 따른 일축압축강도는 곡률계수가 커지면 상부와 하부의 단위중량 및 강도의 차이가 더 크게 발생하였으며, 곡률계수의 변화가 심하고 조립토의 함유율이 높을 경우, 기포의 소산율이 높으므로 이러한 원료토를 이용하는 경우에는 타설 높이를 제한할 필요가 있음이 지적되었다(송준호 등, 2008).

이와 같은 경량기포혼합토와 관련된 연구 결과를 보면 주로 압축강도와 관련된 연구가 주로 이루어졌음을 알 수 있다. 하지만 경량기포혼합토가 현장에 시공된 후 강우, 강설, 주변상황에 따라 지하수위 변화로 인한 물의 영향은 피할 수 없을 것이다. 현재까지 물의 영향은 설계 시 부력에 대한 영향 검토를 하는 것으로 되었으며, 물과 관련된, 예를 들어 물에 의한 압축강도 변화, 투수계수, 모관상승고 등에 관련된 연구가 거의 이루어지지 않은 상태이다. 또한 이들 현상을 뒷받침할 수 있는 경량기포혼합토의 미세구조에 대한 연구도 깊이 있게 이루어지지 않은 상태이다.

따라서 본 연구에서는 현장에서 발생된 원료토를 이용한 경량기포혼합토의 물과 관련된 특성들에 대해 파악하고자 한다. 이를 위해 경상남도 OO현장에 시공된 경량기포혼합토 성토체에 사용된 시료를 공시체로 이용하였다.

2. 기존 자료 분석

2.1 사진 판독

경량기포혼합토에 대한 기포의 분포를 확인하기 위해 주로 SEM등을 이용한 단면 촬영이 이루어졌다(임종철 등, 2008). 촬영된 단면을 통해 기포의 분포를 확인, 그 상태가 양호한지 판단을 하는 자료로 활용이 되었다. 이와 같은 분석은 단순히 공극의 분포를 확인하는 것 이외에 더 세부적인 고찰은 이루어지지 않았다. 이와 같이 기존 연구들은 대부분 단순한 사진 촬영을 통한 기포 확인이 주로 이루어졌는데 반해 본 연구에서 경량기포혼합토 내의 기포의 분포 확인은 물론, 기포의 상태와 고화제와 결합된 혼합토 내부 성분 분석, 내부 간극률 산정 등을 시도해 보고자 한다.

2.2 압축강도

현재까지 경량기포혼합토와 관련된 연구의 대부분은 압축강도와 관련되어 진행이 되었다. 압축강도와 관련된 연구는 주로 일축압축시험을(삼축압축시험 이용, 김주철 등, 2002) 활용하여 진행되었으며 대부분 다음과 같은 항목들에 대한 검토가 이루어졌다; 양생조건에 따른 특성, 양생일수에 따른 특성, 고화재의 함유량에 따른 특성, 시험결과를 이용한 응력-변형 특성 등이다. 구체적인 결과들을 살펴보면 양생압력, 유효구속압, 양생일수가 증가할수록 압축강도는 증가하고, 고화재의 첨가량에 따라 좌우되는 것으로 보고되었다. 수치해석에서 전단강도와 함께 중요한 해석 변수는 변형계수(E_{50})인데 압축강도가 클수록 변형계수도 커지며, 압축강도와 변형계수는 배합시 여러 조건들에 따라 영향을 받아 분산된 경향을 보여주는 것으로 나타났다(송준호 등, 2008)

일단 경량기포혼합토가 현장에 시공되면 경우 또는 주변 환경 변화에 따라 지하수위가 변동되어 물에 의한 혼합토의 침수로 인해 많은 영향을 받을 것으로 사료된다. 따라서 양생이 끝난 후 일정 기간 동안 침수시킨 시료에 대한 압축강도 변화에 대한 고찰이 본 연구에서 이루어졌다.

2.3 투수계수

일반적으로 지반에서 투수계수는 흙과 물의 성질에 따라 변하는데 그 중에서 흙의 성질과 관련된 것으로는 간극비, 흙 입자의 모양, 입도분포, 포화도 등이 있으며 물의 성질과 관련된 것으로는 물의 점성계수와 단위중량이 있다. 물의 오염정도가 심하지 않고 온도차이가 크지 않으면 점성계수와 단위중량은 상온에서 그 차이가 별로 크지 않으므로 투수계수에 큰 영향을 미치는 것은 주로 흙의 성질이다. 그러므로 경량기포혼합토의 투수계수도 경량기포혼합토의 성질에 많은 영향을 받을 것으로 판단된다.

표 1. 재료에 따른 투수계수(건설교통부, 1997)

구분	투수계수 k(cm/sec)
조립모래	$1.1 \times 10^{-1} \sim 3.6 \times 10^{-1}$
세립모래	$2.6 \times 10^{-3} \sim 1.4 \times 10^{-1}$
조립실트	$4.0 \times 10^{-5} \sim 2.8 \times 10^{-4}$
경량기포혼합토	$9.5 \times 10^{-8} \sim 7.2 \times 10^{-4}$
조립점토	3.0×10^{-6} 이하
모르터	$1.0 \times 10^{-12} \sim 8.0 \times 10^{-11}$
보통콘크리트	$9.2 \times 10^{-13} \sim 1.9 \times 10^{-9}$

본 논문에서는 경량기포혼합토에 대한 정확한 투수계수 산정을 위해 기존 방법을 개선한 시험장치가 개발되어 사용되었다. 표 1은 참고로 여러 재료에 대한 투수계수 값으로 경량기포혼합토는 보통콘크리트나 모르터의 투수계수보다는 클 것으로 예상된다.

2.4 모관상승고

흙에서 간극은 물이 지하수면 위로 상승하게 하는 모세관 같은 역할을 하며, 이러한 모세관 현상은 모관흡수력의 크기와 간극크기에 따라 달라진다. 모관흡수력은 외부환경의 변화에 의해 변하며 일반적으로 지반공학 적 문제에서는 모관흡수력이 전 흡수력 변화를 좌우하며, 삼투압 흡수력은 무시할 정도로 미미하다. 표 2는 여러 재료들에 대한 일반적인 모관상승고 범위를 나타낸 것으로 세립모래의 경우 약 0.5m까지 모관상승이 발생하는 것을 알 수 있다.

일반적으로 경량기포혼합토는 품질관리를 측면에서 1단 시공높이를 1m 내로 제한하고 있다. 본 연구에 선택된 현장의 경우도 60cm가 1단 시공높이로 적용되어 최대 3단~4단이 시공된 점을 감안하면 1.8m~2.4m 높이까지 경량기포혼합토가 시공되었으며 이에 대해 모관상승높이, 상승속도 등에 대해 관찰을 하였다.

3. 시 험

3.1 재료

본 연구에서는 원료토로 해운대 OO신축공사현장에서 발생한 흙을 사용하였으며 물성치는 표 3과 같고, 입도분포곡선은 그림 1과 같다. 이 흙은 통일분류법에 의해 ML로 분류된다.

기포제는 동물성, 식물성, 합성유계 등이 있으며 다른 재료와 혼합한 상태에서 안정적인 기포를 얻을 수 있는 것을 선정해야하며, 본 연구에서는 식물성 계면활성제를 사

표 2. 모관상승고(Chow, 1979)

재 료	모관상승고(m)
Sands	0.03 ~ 0.1
Find sands	0.1 ~ 0.5
Clayey sands	0.5 ~ 2.0
Loess	2.0 ~ 5.0
Clay-loam soils	~ 10

표 3. 원료토사의 물성

USCS	모래 (%)	실트 및 점토 (%)	함수비 w (%)	비중 G_s	액성한계 LL (%)	소성한계 PL (%)	소성지수 PI (%)	비 고
ML	22.2	77.82	45.85	2.63	40.44	26.87	13.57	$C_u=14.12$ $C_g=2.65$

표 4. 고로시멘트 B종의 규격 및 성분

구 분	화학성분			물리성능					
	삼산화황 (SO ₃) (%)	강열감량 (%)	황분 (S) (%)	분말도	안정도	응결시간		압축강도	모르터의 공기함유량 (%)
				비표면적 (cm ² /g)	오토클레이브 팽창도 (%)	길모아 시험 초결(분) 종결(시간)	비이커 시험 초결(분) 종결(시간)	3일 7일 28일 (MPa)	
KS L 5210 (2종)	4.0 이하	3.0 이하	2.0 이하	3,000 이상	0.20 이하	60 이상 10 이하	60 이상 10 이하	6.0 이상 12.0 이상 28.0 이상	
사용 재료	4.0 이하	2.0 이하	1.0 이하	4,000 이상	0.05 이하	230 이상 8 이하	200 이상 8 이하	17.0 이상 26.0 이상 40.0 이상	6 이하

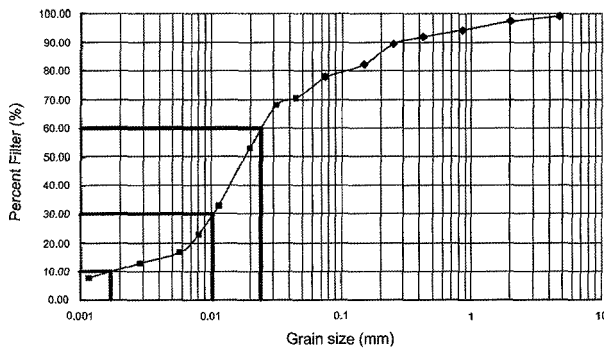


그림 1. 원료토사의 입도분포곡선

용하였다. 일부에서 식물성은 환경적인 측면에서 안전하고 동물성은 냄새가 나는 관계로 안전하지 않다고 인식되고 있으나 두 종류 기포제 모두 환경적인 측면에서 안정하다. 본 현장에서는 기포제를 물과 1:19의 비율로 혼합한 후 기포발생장치를 통해 발포시킨 기포를 시멘트 슬러리에 혼합하는 선기포 방식을 채용하였다. 선기포 방식은 기포의 양을 조절하기 쉽고 현장 발포가 용이한 장점이 있다.

고화제는 토사의 종류에 의해 선정하나 일반적으로 강도 발현이 좋은 점성토 등에는 보통 포틀랜드 시멘트 또는 고로시멘트 B종이 사용되며 관동흙(Loam)이나 유기질토 등에는 시멘트계 고화제가 이용된다. 또한 육가크롬에 대해 반응성이 높은 토사에는 시멘트계의 특수 토용 고화제도 이용되고 있다(하이그레이크소일 연구 컨소시엄, 2005). 사용하는 고화제는 기포혼합토의 육가크롬 용출시험이 토양환경기준에 적합한 것을 이용한다. 본 연구에서는 고로 시멘트 B종을 사용하였으며 규

격 및 성분은 표 4와 같다. 고로 시멘트는 포틀랜드 시멘트보다 분말도가 높아 동일한 수량에서도 작업성이 우수하며 수화열이 낮고, 내구성이 높으며, 화학적 저항성이 크고, 장기강도가 우수하며, 투수가 적은 특징이 있다. 따라서 댐 등의 대규모 콘크리트 공사, 호안, 배수구, 터널, 지하철 공사에 사용된다.

3.2 배합시험

배합시험에 이용되는 토사는 사전에 5mm의 체에 걸러 이물질이나 자갈을 걸러내어 균일하게 한 뒤 물을 넣어 혼합하였다. 준비된 토사에 고화제를 넣고 충분히 혼합한 후 기포를 넣고 믹서혼합 한다. 배합 기준은 목표 단위중량 10kN/m³, 목표 일축압축강도 500kPa, 플로우값 200±20mm이며 구조물의 설계에서 고려한 안전도를 확보하기 위해서 고화제량을 1m³당 1.0kN, 1.5kN, 2.0kN의 세 가지로 구분하여 소요강도를 확인하기 위해 시멘트양 별로 배합시험을 실시하였다. 플로우값은 크기 350×350mm 유리판위에 안지름80mm, 높이 80mm인 아크릴 원통을 세운 후 경량기포혼합토를 상부까지 붓고 남은 윗부분은 수평하게 제거하고 원통을 살며시 들어 올려 1분 후에 시료가 퍼진 4방향에 대해 등간격으로 측정된 길이의 평균값을 의미한다(KS F 4039:2004). 일축압축강도는 시멘트의 양과 양생일의 증가에 따라 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 이 결과를 이용하여 표 5와 같은 최종 배합표를 결정하였다. 공시체는 표 5의

최종 배합표를 이용하여 직경 5cm, 높이 10cm로 제작된 특수 종이캔을 사용하여 현장 시공 시에 제작되었다.

3.3 광물조성과 구조

경량기포혼합토의 광물조성을 확인하기 위해 X-선 회절(XRD)을 실시하였고, 표면과 내부의 기포의 크기, 배열, 부피를 산정하기 위해 실체현미경과 전자현미경, X-선 투과촬영을 통해 획득한 영상을 판독하였다. 각 장비에 대한 구체적인 사양은 표 6과 같다.

3.4 압축강도시험

본 연구에서는 압축강도에 대한 물의 영향을 조사하기 위하여 28일간 습윤양생 시킨 공시체를 탈형 후 물속에 2일간 수침 시킨 후, 일축압축강도시험을 실시하였다. 시료의 수침은 28일간 양생한 공시체를 탈형한 후 물을 채운 수조에 이틀간 담가 놓은 후 일축압축시험을 실시하였다. 시료를 수조에 넣으면 처음에는 가로로 수면에 떠 있는 상태로 2분 정도 경과 후부터 공시체의 한쪽부터 물속에 잠겨 세로로 선 상태가 되고, 다시 30~40초정도가 경과하면 완전히 바닥에 가라앉는 양상을 보였다.

3.5 투수시험

투수계수를 구하는 실내시험법으로는, 정수위 투수시험과 변수위 투수시험이 규정되어 있는데 두 방법 모

두 포화토를 대상으로 하며, 사질토인 경우는 정수위 투수시험으로, 실트질 일 때는 변수위 투수시험을 실시하여 투수계수를 구하나, 변수위 투수시험 시에는 시료를 포화시키는데 있어 많은 시간과 여러 어려움이 있을 뿐 아니라 자연 수두를 이용하여 투수시험을 실시하므로 시간도 상당히 오래 소요되는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 삼축셀을 이용한 투수시험 장치로써 투수계수가 낮은 시료의 경우에도 짧은 시간 내에 포화는 물론 투수계수를 측정할 수 있도록 하였다. 그림 2는 실험에 사용된 장비의 모식도이다.

시험은 시료의 포화, 투수의 단계로 실시되었다. 시료는 직경 5cm, 높이 10cm로 제작된 공시체를 양생 28일 후 탈형하여 사용하였다. 포화는 먼저 공시체에 CO₂를 10분정도 통과시킨 후, 공시체에 물을 공급하고 백압(Back pressure)을 이용하여 공시체를 포화시켰다. 포화가 끝난 상태에서 p₁을 100kPa을 주고, σ₃을 p₁보다 10kPa이 높은 110kPa을 주었으며, p₂는 대기압 상태(0kPa)로 두고 시험을 실시하였다. 이 때 시료와 멤브레인 사이로 물이 흐르지 않도록 σ₃ > p₁ > p₂의 상태가 되도록 하여야 한다. p₂로 빠져나오는 물의 양이 일정해질 때까지 시험을 실시하여 아래의 식 (1)을 사용하여 투수계수를 산정하였다.

$$q = kiA \Rightarrow k = \frac{q}{iA}$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{(\Delta p / \gamma_w)}{h}, (\gamma_w = 0.001 \text{kg/cm}^3)$$

$$\therefore k = \frac{qh}{\Delta p \cdot 10^3 \times A \times 60} \text{ (cm/sec)} \quad (1)$$

표 5. 최종 배합 표

조정니토		중량(kN)			체적(m ³)				
원료토	물	시멘트	기포제	합계	원료토	물	시멘트	기포제	합계
4.481	3.854	1.51	0.155	10.0	0.2553	0.3854	0.0493	0.310	1.0

표 6. 분석 장비 목록

장비명	제조회사	특 징
Scanning Electron Microscope(SEM) (주사전자현미경)	Hitachi(Japan) S-2700	- Electron gun: Tungsten Filament type - Resolution: 4.0nm - EDS: Horiba
X-ray Scanner (X-선 투과 촬영기)	Softex(Japan) VIX-150(A)	- Cmera size: 12", 9", 4.5". CCD - Resolution: 12/18/22 Lp/cm
Microscope (실체현미경)	Nicon(Japan) SMZ 2B	- 배율: 20, 40, 80, 160, 200
X-ray Diffractometer(XRD) (X-선 회절분석)	Philips(Netheland) X'PERT-MPD	- 광물조성 확인

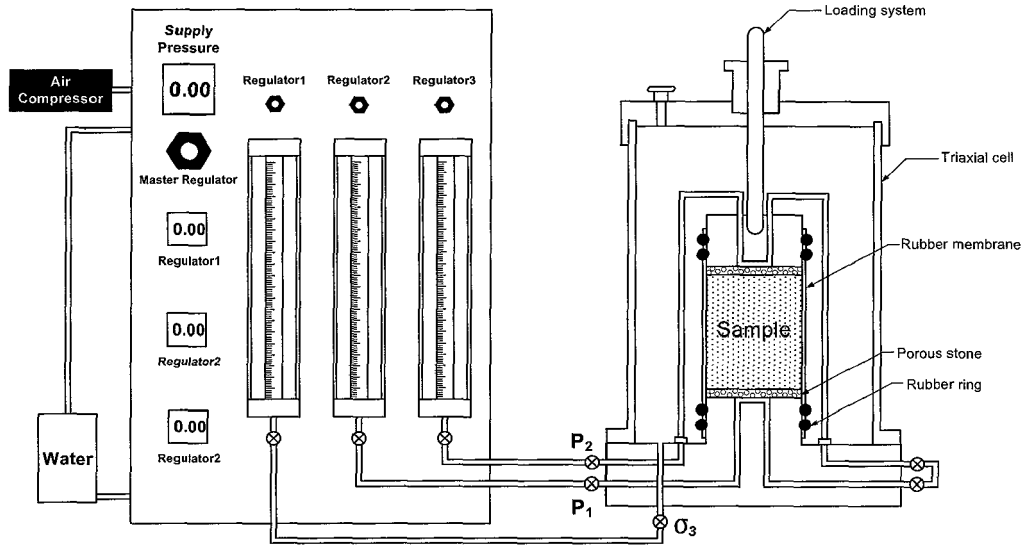
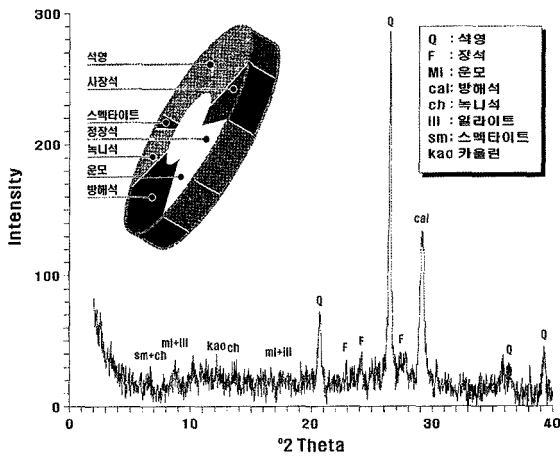
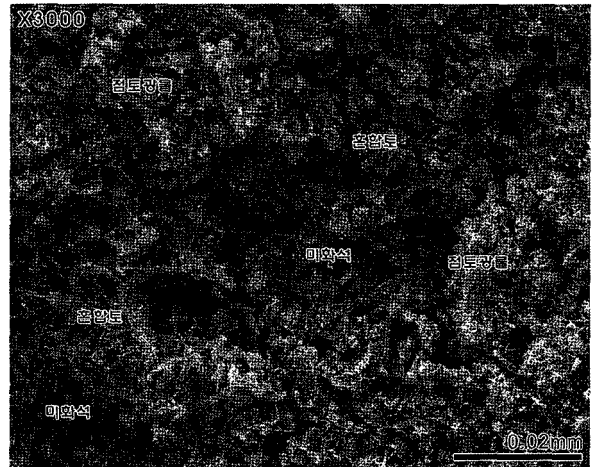


그림 2. 삼축투수시험 장비 모식도



(a) XRD



(b) SEM(×3000)

그림 3. 경량기포혼합토의 광물 조성

여기서, q : 유량이 일정할 때의 투수량(cm^3/min)
 k : 투수계수(cm/sec)
 i : 동수경사
 A : 시료의 단면적(cm^2)
 h : 시료의 높이(cm)
 Δp : $p_1 - p_2$ (kg/cm^2), $1\text{kg}/\text{cm}^2 = 98.07\text{kPa}$

3.6 모관상승고

모관상승고 시험은 시공 시 제작된 공시체(직경 5cm, 높이 10cm)에 대해 실시되었다. 방법은 1cm 정도의 물이 담긴 용기에 공시체를 넣고 경과시간에 따른 모관상승고를 관찰하였다. 또한 이때는 용기 내 물의 높이가 1cm로 유지되도록 세심한 주의가 요구된다.

4. 결과 및 분석

4.1 광물조성

X-선 회절분석에 의한 본 연구에 사용된 경량기포혼합토의 광물조성은 석영과 장석이 우세한 규산염계에 해당하며, 점토광물은 카올린과 일라이트의 함량이 우세하며 팽윤성의 스멕타이트광물이 소량 포함된다. 10% 이상의 함량을 보이는 방해석(Calcite)은 혼합토의 제조과정에서 고화제로 사용한 탄산염계의 시멘트에서 기원된 것이다. 그림 3(b)는 3,000배로 확대한 경량기포혼합토의 전자현미경 영상으로 얇은 판상형이 중첩된 층상구조의 점토광물과 미화석이 대등한 분포를 보이며, 고화제에 의한 혼합부분은 방사상의 띠를 형태로 집합체를 이루고 있다.

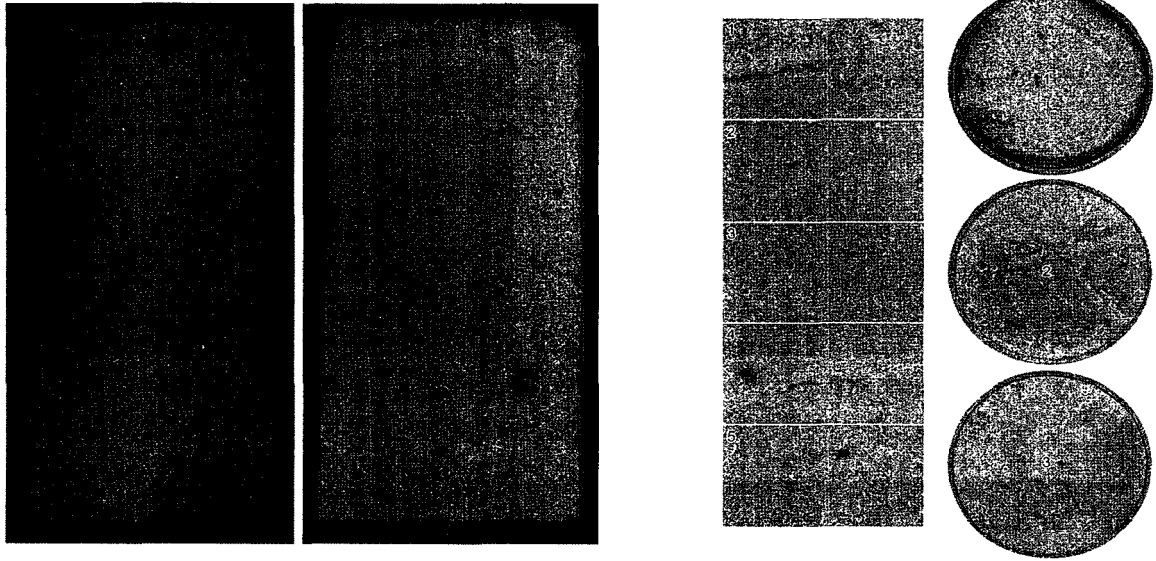


그림 4. 수직과 수평방향으로 절단한 공시체

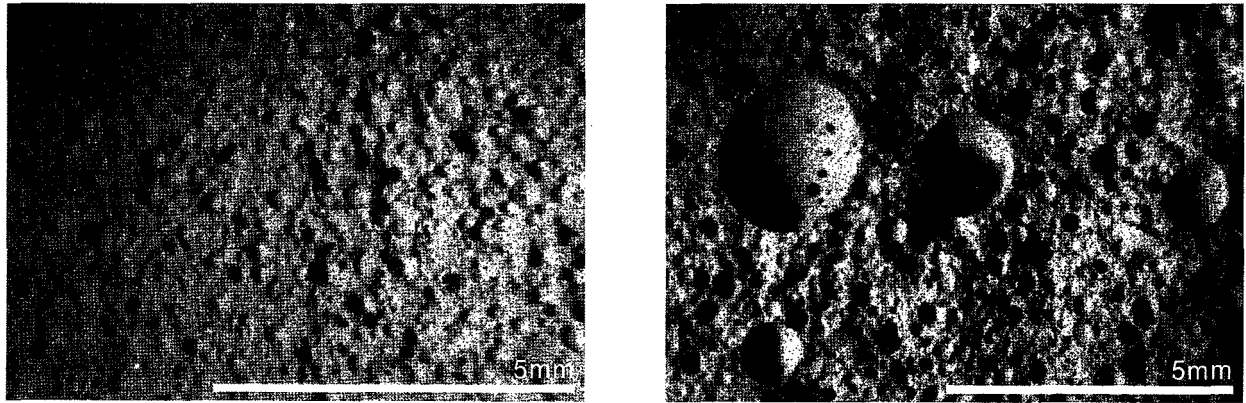


그림 5. 실체현미경 이미지

4.2 표면 구조

28일간 양생시킨 공시체를 원통형 시료를 수평과 수직 단면으로 성형(그림 4)한 후 표면에 분포하는 경량기포 혼합토 간극의 형태와 분포를 분석하였다. 경량기포 혼합토는 건조과정에서 원료토에 포함된 점토의 영향으로 균열이 발생하며, 기포의 크기와 빈도는 거의 일정한 것으로 나타났다.

그림 5는 최대 200배까지 배율을 달리하며 관찰한 실체현미경의 영상으로 표면에 분포하는 기포의 빈도는 위치에 관계없이 일정하다. 최대와 최소 크기의 기포의 직경을 기준으로 50배 이상이며, 대공극의 분포는 불규칙하다.

그림 6은 공시체의 X-선 투과 영상으로 그림의 좌측은 반전된 영상으로 기포제에 의해 형성된 공극은 원형의 흑색 점으로 표현되며, 원료토사에 포함된 굵은 입자는 모양이 일정하지 않은 백색의 점으로 관찰된다. 위치에 따른

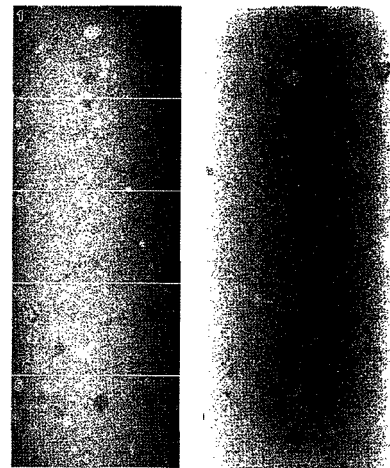
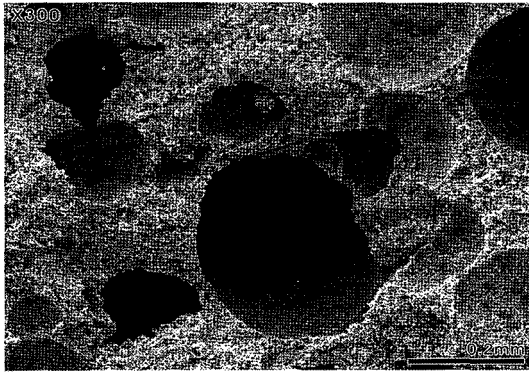


그림 6. X-ray 투과영상(좌: Negative, 우: Positive)

공시체의 기포 발생 빈도는 거의 일정한 것을 볼 수 있다.

그림 7은 공시체의 주사전자현미경 영상으로 기포는 거의 원형에 가까운 형태를 보이며, 크기는 일정한 규칙

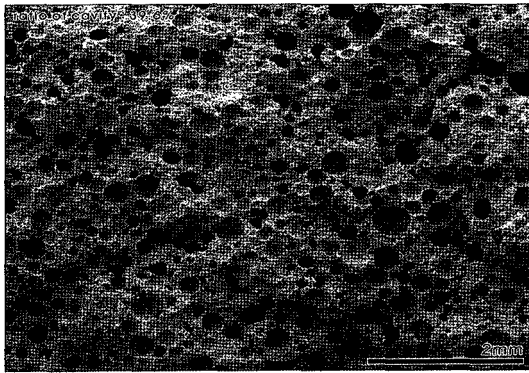


(a) 300배 확대

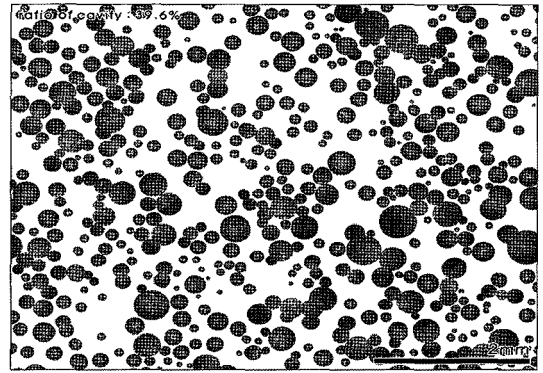


(b) 1000배 확대

그림 7. 공시체의 SEM 영상



(a) 전자현미경 영상(×40)



(b) 공극의 분포

그림 8. SEM 이미지를 이용한 공극률(간극률) 산정

이 없이 무질서한 것을 보여준다. 소규모 공극의 일부는 서로 중첩되거나 공극이 형성되는 동안 외압에 의해 변형된 모양을 보이기도 하지만 대공극의 경우는 경계가 분명하며, 독립적인 형태를 유지하고 있다. 대공극의 표면은 원료토사와 고화제의 상이한 입도분포에 의해 형성된 미세 공극이 관찰되며, 경량기포혼합토가 지하수면 하부에 놓이게 되면 미세 공극을 따라 유입된 지하수에 의해 포화 상태에 도달할 것으로 판단된다.

그림 8은 공시체 단면의 현미경 영상을 이용하여 산정한 간극율의 예로서 공극이 구의 형태를 가지므로 단면에서 차지하는 공극의 면적비는 부피의 비와 동일한 것을 전제할 수 있다. 공시체 단면의 위치별 간극률은 39.2~40.1%로 일정한 분포를 보이는 것으로 나타났다. 이것은 공시체의 간극 부피가 약 78.5cm^3 임을 의미하는 것으로 추후 목표 단위중량이 10kN/m^3 이하인 공시체에 대한 참고자료로 활용하고자 한다.

4.3 압축강도

공시체에 대한 일축압축시험 결과 목표 강도인 500kPa

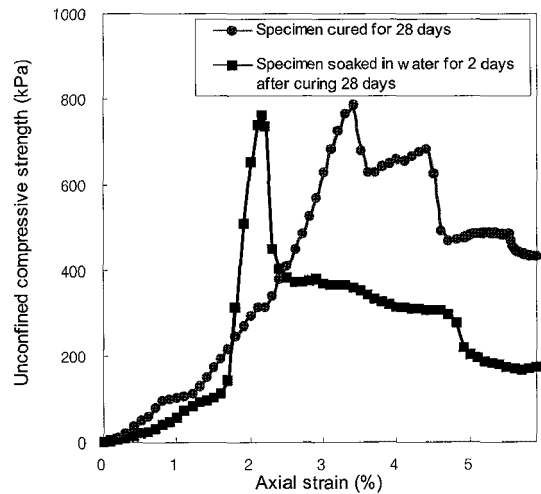


그림 9. 일축압축시험 결과(응력-변형을 곡선)

에 만족하는 것으로 나타났다. 물에 의한 압축강도의 영향을 알아보기 위해 28일 양생 후 탈형한 시료를 2일간 수침 시킨 후 일축압축시험을 실시하였다. 그 결과를 비수침 시료의 강도와 비교했을 때 약간 작은 값을 보이거나 큰 차이는 없음을 알 수 있다(그림 9). 응력-변형 거동을 살펴보면, 두 시료 모두 변형이 낮은 단계에서 응력-변형

거동이 계단형의 형태를 보이고 있음을 알 수 있다. 이것은 공시체 내부에 서로 다른 크기의 기포가 존재하여 일정 순간까지는 저항하다 파괴되는 거동을 보이기 때문인 것으로 사료된다. 잔류강도의 크기는 수침시킨 공시체의 강도가 그렇지 않은 공시체보다 작게 나타났고, 수침시킨 공시체에는 낮은 변형 단계에서 극한강도에 다다름을 알 수 있다. 즉 결론적으로 물에 의한 강도 값에는 영향이 없으나 응력-변형거동에는 영향이 있음을 알 수 있다.

4.4 투수계수

그림 2의 투수시험기를 이용한 투수시험 결과는 표 7과 같다. 본 연구에 사용된 경량기포혼합토의 투수계수는 평균 $4.857 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 로 산정되었다. 이 값은 경량기포혼합토의 투수계수가 점토($3.0 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$)보다는 약간 크고, 보통콘크리트($9.2 \times 10^{-13} \text{cm/sec} \sim 1.9 \times 10^{-9} \text{cm/sec}$)보다는 매우 큰 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 이 값을 이용하여 현장에 시공된 경량기포혼합토 구조물의 침투속도를 예상해 보면 피복토가 덮여진 경량기포혼합토에 강우가 직접적으로 침투하기는 어려울 것으로 예상되나, 만약 강우가 경량기포혼합토에 직접 침투하여 포화상태가 되고, Darcy의 법칙을 적용하고 동수경사(i)를 1로 가정하면 경량기포혼합토의 침투속도는 투수계수와 같다고 볼 수 있다.

물론 이것은 가장 극단적인 경우이며, 대부분의 경우 현장의 경량기포혼합토 구조물은 불포화 상태이므로 투수계수는 본 연구에서 측정된 투수계수보다 작을 것이다. 침투속도는 불포화상태에서 모관흡수력이 포화상

태에 비해 더 커 동수경사가 포화상태에 비해 크므로 불포화 초기에는 침투속도가 빠를 것이며 포화가 진행되면서 일정한 속도에 이를 것으로 판단된다.

4.5 모관상승고

모관상승고 시험은 1cm 정도의 물이 담긴 용기에 높이 10cm 공시체를 넣고 경과 시간에 따른 상승고를 관찰하는 것으로 이루어졌다. 이 때 용기 내의 물의 높이가 1cm로 일정하게 유지되도록 하였다. 경량기포혼합토의 시간 경과에 따른 모관상승고는 그림 10과 같다. 관찰 10시간 경과 후 높이 10cm의 공시체의 끝까지 상승하는 것으로 나타났다. 이것은 그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 경량기포혼합토 내에 미세한 공극이 존재하기 때문으로 판단된다.

이 결과를 모관상승고와 시간의 그래프로 표현하면 그림 11과 같다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 100분 이내에서 모관상승고가 가파르게 진행되고, 그 이후 시간에서 상승속도가 점진적으로 완만하게 진행됨을 알 수 있다. 경과시간에 따른 모관상승고의 추세를 수식으로 나타내면 아래의 식 (2)와 같이 나타났다.

$$h_c = 5.15 \cdot t^{0.29} \quad (2)$$

여기서, h_c : 모관상승고(cm)

t : 경과시간(hour)

모관상승은 곧 경량기포혼합토 성토체의 단위중량 증가를 유발하는데 이를 알아보기 위해 공시체 단위중

표 7. 투수시험 결과

셀압 σ_3 (kPa)	내압 p_1 (kPa)	유량 q (cm^3/min)	투수계수 k (cm/sec)
110	100	0.536	5.055×10^{-6}
		0.499	4.706×10^{-6}
		0.510	4.810×10^{-6}

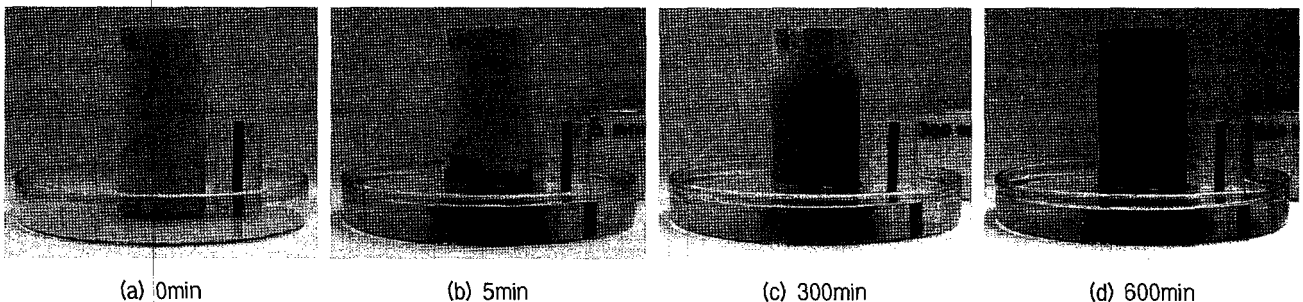


그림 10. 실험실 공시체

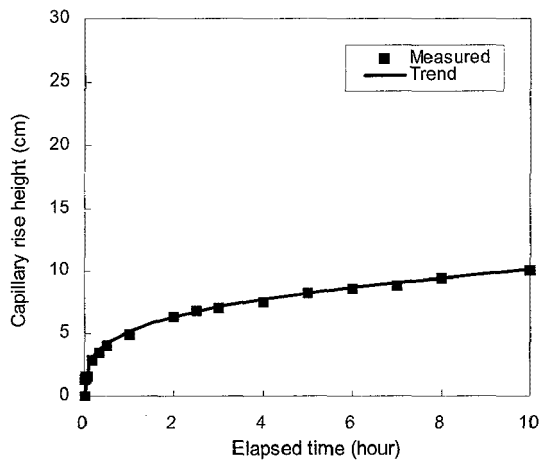


그림 11. 경과시간에 따른 모관상승고 경향

량 변화를 다음 시간대 별로 살펴보았다; 공시체 제작 시, 28일 양생 후 2일간 공기건조시, 2일간 침수 시킨 후, 공시체 제작 시 10kN/m^3 인 단위중량은 28일 양생 후 9.7kN/m^3 정도로 거의 변화가 없음을 알 수 있었다. 2일간 공기 건조된 후 단위중량은 8.3kN/m^3 으로 약 1.7kN/m^3 정도의 단위중량이 감소되었으며, 28일 양생된 시료를 2일간 침수시킨 시료의 단위중량은 12kN/m^3 로 약 2.0kN/m^3 가 증가되었다. 모관상승에 의한 단위중량의 변화는 지반의 거동을 유발할 수 있으므로 이에 대한 대비가 설계와 유지·관리에서 측면에서 각별히 요구되며, 또한 경량기포혼합토의 최종 모관상승고를 파악하기 위해서는 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구의 목적은 건설현장에서 발생하는 흙(원료토)을 이용하여 만든 경량기포혼합토(기준 슬러리밀도 10kN/m^3)의 내부구조를 관찰하고, 물과 관련된 경량기포혼합토의 특성 변화를 알아보는 데 있다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 사진을 통한 미세 구조 분석 결과, 경량기포혼합토 내의 기포는 다양한 크기로 존재하며, 위치별 기포의 분포는 거의 일정한 것으로 밝혀졌다. 또한 기포 안에 아주 많은 미세한 공극들이 존재하여 물에 의해 경량기포혼합토가 포화상태에 가까이 도달될 수 있음을 예측할 수 있다. 본 연구에 사용된 공시체는

약 40%의 간극률을 가진 것으로 이미지 분석을 통해 산정되었다.

- (2) 일축압축강도 시험 결과, 물에 의한 극한강도 값의 변화는 없으나 응력-변형 거동에는 영향을 주는 것으로 나타났다. 이것은 경량기포혼합토 내의 다양한 크기의 간극들이 존재하기 때문으로 사료된다.
- (3) 경량기포혼합토의 투수계수는 평균 $4.857 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 로 점토보다는 약간 크고, 보통 콘크리트보다는 매우 큰 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 경량기포혼합토의 모관상승 경향은 초기에 가파르게 상승이 진행되다가 시간의 경과에 따라 상승속도가 점진적으로 완만하게 진행됨을 알 수 있다. 이러한 경량기포혼합토의 모관상승은 곧 재료의 단위중량 증가를 유발하므로 경량기포혼합토 공법의 설계 및 유지·관리에 각별한 주의가 요구되며, 또한 최종 모관상승고를 파악하기 위한 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고 문헌

1. 하이그레이드소일 연구컨소시엄 (2005), 기포혼합토공법 기술자료.
2. 한국건설기술연구원 (1996), *EPS 성토공법을 적용한 도로확장용 성토체의 설계·시공 및 계측 연구*.
3. 임종철, 장지진, 이성우 (2007), “경량기포혼합토공법의 적용성”, 2007년 한국지반공학회 가을 학술발표회.
4. 김주철, 이종규 (2002), “준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적 특성 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제18권, 4호, pp.309-317.
5. 윤길림, 김병탁 (2004), “경량기포혼합토의 압축 및 강도특성 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제20권, 4호, pp.5-13.
6. 윤길림, 유승경 (2004), “현장발생토를 활용한 경량기포혼합토의 강도 및 변형특성” 한국지반공학회 논문집, 제20권, 9호, pp.125-131.
7. 송준호, 임종철, 홍석우(2008), “원료토의 특성에 따른 경량기포혼합토의 압축강도 영향인자 분석”, 한국지반공학회 논문집, 제24권, 11호, pp.1-10.
8. 건설교통부 (1997), *경량기포콘크리트 재료개발연구*.
9. V. T. Chow (1979), *Developments in Water Science*; 7, Elsevier.
10. KS F 4039:2004 현장 타설용 기포 콘크리트.
11. K. H. Head (1986), *Manual of Soil Laboratory Testing*, Vol.3 : Effective Stress Tests.

(접수일자 2009. 8. 20, 심사완료일 2010. 2. 10)