

동결융해 및 수침조건을 고려한 경량기포혼합토의 거동 실험 연구

Experimental Study on behavior of the Lightweight Air-foamed Soil Considering Freezing-thawing and Soaking Conditions

강 대 규[†] · 신 은 철¹⁾
Daekyu Kang · Eunchul Shin

Received: March 18th, 2016; Revised: March 25th, 2016; Accepted: April 20th, 2016

ABSTRACT : In order to determine the variability of environmental characteristics of lightweight air-foamed soil using marine clay according to freezing-thawing and soaking conditions, unconfined compressive strength of the lightweight air-foamed soil samples made by changing the amount of cement under curing conditions of outdoor low temperature, underground or indoor wetting were observed. Compressive strength was not increased under freezing-thawing (temperature range of $-9.1^{\circ}\text{C} \sim 17.2^{\circ}\text{C}$) regardless of the amount of cement but the more cement using, it was increased rapidly by underground curing conditions within 30 cm beneath ground level. Therefore, it is necessary to install insulation layer cutting off exterior cold air after construction of lightweight air-foamed soil in condition of freezing-thawing. Bulk density was increased too small under the long-time soaking condition, it tended to decrease rapidly when samples were dried up and had below 6% of water contents. But variability of compressive strength and bulk density was very small for preventing drying and keeping its wet state. The lightweight air-foamed soil that installed beneath ground water level or covered by soil can be evaluated as a long-term reliable construction material.

Keywords : Dredged soil, Lightweight, Curing temperature, Soaking, Freezing-thawing, Drying

요 지 : 해상 점토를 이용한 경량기포혼합토의 동결융해 및 수침조건에 따른 환경적 변화특성을 파악하기 위하여, 시멘트 사용량을 변화시키며 경량기포혼합토의 시료를 제작하여 동결기 저온양생, 지중양생 및 실내양생 조건에서 일축압축강도를 관찰하였다. 동결융해($-9.1^{\circ}\text{C} \sim 17.2^{\circ}\text{C}$ 온도범위)를 받는 시료는 시멘트 사용량에 상관없이 강도발현이 안되었고 지표면 아래 30cm 깊이의 지중에서 양생한 경우 시멘트 사용량이 증가할수록 압축강도는 급격히 증가되었다. 따라서 동결융해를 받는 조건에서는 경량기포혼합토 타설 후 외기로부터 차단하는 보온층 설치가 필요하다. 장기간 수침상태를 유지한 시료는 단위중량의 증가가 매우 작게 발생하였고, 시료가 건조되어 함수비가 6%로 저하되었을 때 압축강도는 급격히 감소하는 경향이 있다. 그러나 건조를 방지하고 습윤상태를 유지할 경우 압축강도 및 단위중량의 변화는 매우 작았다. 지하수위 아래에 매설되거나 피복토를 갖는 경량기포혼합토는 장기적으로 안정적인 건설재료로 평가할 수 있다.

주요어 : 준설토, 경량기포혼합토, 양생온도, 수침, 동결융해, 건조

1. 서 론

건설재료로서 가장 많이 활용되고 있는 흙은 소정의 중량에 의해 연직 및 수평 토압을 유발시킨다. 이러한 토압은 기초지반 및 구조물에 상당한 영향을 미치며 토목기술자들은 토압에 안정하게 저항하도록 설계하고 있다. 그러나 지나치게 과도한 토압은 건설비용의 증가와 더불어 공학적, 기술적으로 어려움을 발생시키기도 한다. 최근 건설현장에서 흙쌓기, 구조물 뒤채움 재료 등을 경량화시켜 구조물의 하중 부담을 줄이고 연약지반과 같은 기초지반의 안정성을 증대시키려는 시도가 많이 이루어지고 있다. 그중에서 건설

재료로서 부적합한 준설토, 건설잔토 등을 개량하여 단위중량을 감소시키고 전단강도를 증대시켜 일반적인 토사에 비해 토목구조물의 안정성을 증대시키는 경량기포혼합토의 활용 범위가 넓어지고 있다.

경량기포혼합토는 흙, 물, 시멘트, 기포를 혼합하여 유동화 상태로 생산 및 시공하여 시멘트의 수화반응으로 고결시켜 흙에 비해 단단한 강도를 유지하며 기포의 함유로 경량성을 확보하는 공법이다. 이 공법은 함수비가 높아 다짐이 어려운 세립토, 각종 준설토 등을 사토처리 하지 않고 재활용할 수 있다는 점에서 친환경적이다. 특히 연약지반에서 시공되는 콘크리트 구조물은 기초보강에 많은 비용이 투자

† Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University (Corresponding Author : tk007@chol.com)

1) Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University

되며, 뒤채움 또는 배후부지 조성에 사용되는 양질의 토사를 원거리에서 가져오거나 준설토를 투기하여 안정화시켜 사용하게 된다. 이때 양질의 토사 운반에 상당한 비용이 소요되고 준설토의 처리에 상당한 비용과 시간이 투자되는 것을 감안하면 준설토 또는 성토재료로 부족한 건설잔토를 이용한 경량기포혼합토는 시공 후 빠른 시간 내에 활용이 가능하므로 건설용 성토재료로서의 이용 가치가 매우 높다고 할 수 있다. 또한, 경량기포혼합토의 경량성으로 토압을 경감시켜 경제적인 구조물 설계가 가능하며, 연약지반 처리비용의 절감과 지반보강 효과로 인한 활동의 안정성을 기대할 수 있다.

일반적으로 경량기포혼합토는 현장 플랜트에 의해 생산 및 시공되고 있으며 지하수위 아래에서 수중시공 및 양생되거나, 현장여건에 따라 부득이하게 동절기 저온상태에서도 시공하고 있다. 경량기포혼합토는 고화재로 사용되는 시멘트가 물과 반응하여 고결되므로 시멘트 사용량이 많을수록 강도는 증가된다(Yoon & Kim, 2004). 이러한 시멘트의 수화반응은 일반적인 콘크리트 구조물과 마찬가지로 양생 시의 온도, 습도 등 외부 환경조건에 따라 달라지며 이는 경량기포혼합토의 역학적 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 특히 타설 후 양생 시의 온도는 강도발현에 매우 중요한 인자로 알려져 있으며(Lee et al., 2012), 수중양생의 경우 대기 중 양생보다 강도발현에 상당한 시간이 소요되고 수중 양생압력의 증가에 따라 압축강도는 증가한다(Yoon & You, 2005). 또한, 지하수위 아래에 존재하는 경량기포혼합토는 시간의 경과와 더불어 지하수 침투의 우려가 있으므로 장기적인 흠 구조물의 안정성 확보를 위해서 그 밀도 관리가 매우 중요하다.

본 연구에서는 서해안 해상점토를 대상으로 경량기포혼합토 공시체를 제작하여 동절기 저온 조건에서 대기 중, 지중, 실내의 세 가지 조건으로 양생시켜 양생온도에 따른 압축강도 변화를 관찰하였고 공시체를 상온에서 제작하고 수중, 기중을 양생시켜 각각의 밀도, 함수비, 압축강도 변화를 관찰하여 경량기포혼합토의 수리조건에 따른 각종 공학적 특성을 파악하였다.

2. 경량기포혼합토 시료 제작

2.1 흠 시료

본 연구에 사용된 흠 시료는 경기도 시흥 매립지 인근에서 채취한 해상점토로서 흠의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

시험에 사용된 흠 시료의 물리적 특성은 함수비 42.11%,

액성한계 35%, 소성지수 14%로서 통일분류법상 CL로 분류된다.

2.2 공시체 제작

본 연구에서는 직경 52mm, 높이 104mm 원주형 PVC 몰드를 이용하여 시료를 제작하였고, PVC 몰드 내부는 실리콘 오일을 도포하고 OHP 필름을 삽입하여 시료 분리가 용이하도록 하였다. 고화재는 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 기포제는 식물성 계면활성제로서 물과 1:3~4로 희석

Table 1. Physical properties of soil

USCS	w_n (%)	G_s	LL (%)	PL (%)	PI (%)	No. 200 (%)
CL	42.11	2.585	35	21	14	99.89



Fig. 1. Sampling of experimental soil



(a) Pre-foaming

(b) Mixing slurry

Fig. 2. Sample mixing

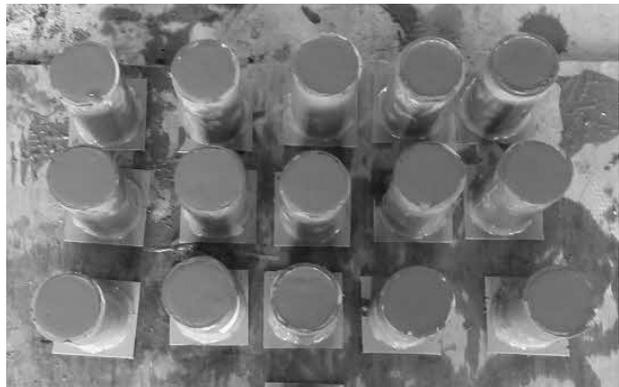


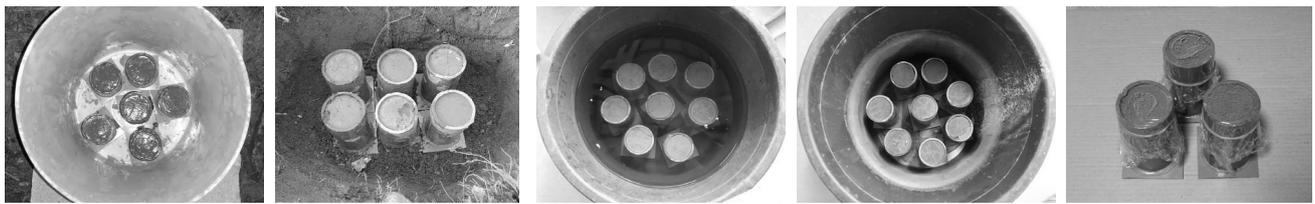
Fig. 3. Specimens for test

Table 2. Mixing ratio for the test according to freezing–thawing condition (per 1 m³)

	Bulk density (kN/m ³)	Mixing ratio (%) in weight			Water content (%)	Slurry density (kN/m ³)	Amount of foam (mL) (per 1L)
		Cement	Soil	Water			
Type-A	11.4	8.0	52.0	40.0	151.43	15.6	269
Type-B	11.4	11.3	47.3	41.4	166.49	16.2	296
Type-C	11.6	14.4	42.8	42.8	184.22	16.6	301

Table 3. Mixing ratio for the test according to soaking condition (per 1 m³)

	Bulk density (kN/m ³)	Mixing ratio (%) in weight			Water content (%)	Slurry density (kN/m ³)	Amount of foam (mL) (per 1L)
		Cement	Soil	Water			
Type-D	12.4	10.0	50.0	40.0	155.80	15.5	301



(a) Outdoor drying (b) Outdoor underground (c) Indoor soaking (d) Indoor drying (e) Indoor wetting

Fig. 4. Curing conditions of specimens

하여 사전 발포된 것을 흙, 물, 시멘트 슬러리에 혼입하였다.

경량기포혼합토의 배합비는 동결융해에 따른 실험을 위한 것과 수침조건에 따른 실험을 위한 것으로 구분하여 Table 2, 3과 같이 결정하였다. 우선 동결융해에 따른 실험을 위해 시멘트 사용량을 증가시켜 가며 Table 2와 같이 세 가지 배합으로 구분하였고, 슬러리 교반 시의 원활한 워커빌리티를 위해 시멘트 사용량에 비례하여 함수비를 실용적 범위 내 (150~200%)에서 증가시켰다. 시멘트, 흙, 물이 혼합된 슬러리 단위중량을 측정하고 후 시료의 목표단위중량 배합을 위한 기포투입량을 결정하였으며 교반에 따른 소포율을 감안하여 기포투입량을 점차 증가시켜 단위중량을 조정하였다. 수침조건에 따른 실험을 위해서는 Table 3과 같이 부력을 고려하여 수중시공 설계기준인 12kN/m³로 단위중량을 결정하였고, 시멘트 사용량은 기 시공사례를 참고하여 실무에서 가장 빈번히 사용되는 10%를 기준으로 배합비를 결정하였다.

2.3 공시체 양생

제작된 공시체는 동결융해에 따른 강도특성을 파악하기 위해 일 기온변화가 심한 2월에 외부 대기 중 양생, 동결심도(평택지역 : 83cm) 이내의 지중 양생 그리고 실내 습윤양생의 세 가지 양생조건으로 14일, 28일간 양생시켰다.

외부 대기 중 양생은 시료를 제작하고 밀봉하지 않은 상태로 플라스틱 통에 담아 뚜껑을 덮고 그늘진 곳에서 양생

시켰으며, 외부 지중양생은 공시체에 PVC 커버를 씌운 후 동결심도 이내인 30cm 깊이로 흙을 파고 매입한 후 다시 흙을 덮어 외기와의 직접적인 접촉을 차단하며 양생시켰다. 실내 습윤양생의 경우 공시체를 밀봉하여 수분의 증발을 방지한 상태에서 상온에서 양생시켰다.

수침조건에 따른 실험을 위해 공시체를 상온에서 7일간 양생한 후 물의 이동이 가능하도록 공시체에 구멍을 뚫고 수조에 담가 170일 동안 수중양생과정을 거쳤으며, 일부 시료는 상온의 기중에서 밀봉하지 않은 상태로 170일간 건조시켰다. 한편 또 다른 공시체는 습윤상태의 양생조건을 갖도록 공시체를 밀봉하여 상온에서 양생시켜 앞의 시료와 비교하도록 하였다.

3. 동결융해에 따른 경량기포혼합토의 특성

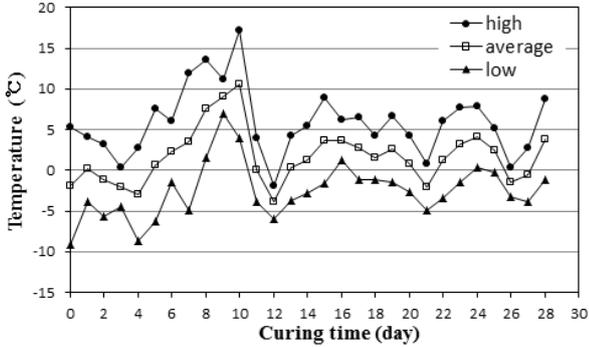
3.1 일축압축강도 시험

동결융해 조건에서 경량기포혼합토의 강도특성 규명을 위해 공시체 제작 후 외부 온도에 직접적으로 노출된 경우, 흙 속에 매립되어 간접적으로 영향을 받는 경우와 실내의 상온 조건에서 양생된 경우에 대하여 14일, 28일 양생 후 일축압축시험을 실시하였으며 시멘트 함유율에 따른 일축압축강도의 변화를 관찰하였다.

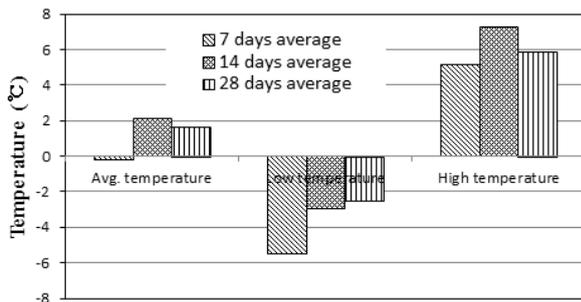
경량기포혼합토 공시체 제작 후 외부의 대기에 노출되어

양생된 경우 기온의 영향을 직접적으로 받는다. 공시체 제작 및 양생기간 동안의 기온변화는 Fig. 5(a)와 같다.

시험을 수행한 평택지역의 2016년 2월 3일부터 3월 2일까지 공시체 제작일로부터 경과일에 따른 일 온도변화를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 양생 28일간의 평균기온은 1.7°C이며, 최저기온 평균은 -2.5°C, 최고기온 평균은 5.9°C이다. 경



(a) Daily temperature



(b) Average temperature in curing time

Fig. 5. Variation of temperature (Korea Meteorological Admin.)



(a) Outdoor dry (b) Underground (c) Indoor wet

Fig. 6. 14 days cured samples

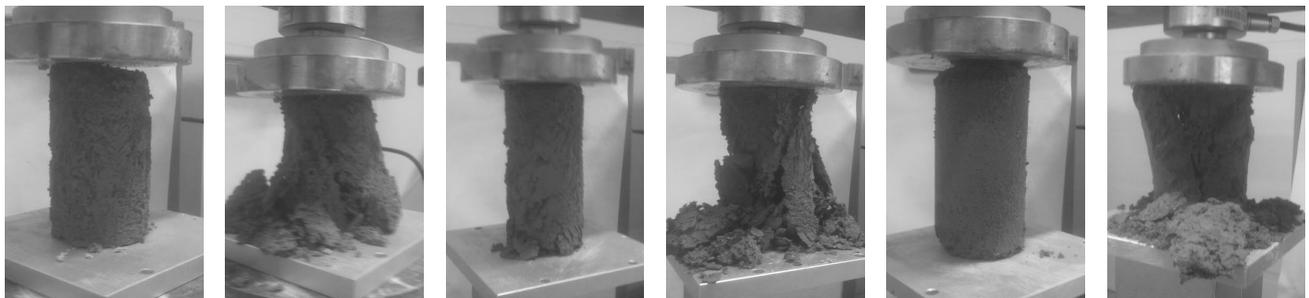
량기포혼합토는 상온에서 양생 될 경우 초기 7일간 강도가 급격히 증가하여 28일 강도의 50~60%에 이른다. 따라서 양생 초기 7일의 기온이 매우 중요할 것으로 판단되며 이때의 평균기온은 -0.2°C이고 평균일교차는 10.6°C로 관측되었다. 또한, 28일 양생기간 동안 기온이 영하로 관측된 날은 모두 21일로 전체 양생 일의 75%에 이른다.

3.1.1 14일 강도 시험

우선 14일간 양생시킨 시료에 대하여 Fig. 7과 같이 일축 압축시험을 실시하였다. 14일간 평균기온은 2.1°C이며, 최저기온 평균 -3.0°C, 최고기온 평균 7.3°C, 평균일교차는 10.2°C이고 하루 중 기온이 영하로 관측된 날은 12일이었다. 외부 대기양생 시료는 시멘트 사용량과 상관없이 동결융해를 반복하여 표층부는 거의 고화되지 않았고 수분이 증발하여 세립의 분말상태인 시멘트-점토 결정체로 존재하였다. 그러나 지표면 30cm 아래에 매설된 외부 지중양생의 경우 동결심도 이내에 존재하였어도 양생상태는 대체로 양호하였으며 비교적 단단하게 굳은 상태이다. 이는 지중에 매립되어 수분의 증발이 방지되고 외부 온도에 대한 직접적인 노출이 없어 시멘트의 수화반응이 어느 정도 일어난 것으로 판단된다. 외부 대기양생의 경우 표층부가 불규칙하게 미고결 되어 표면이 매우 거칠고 시험용 시료형성에 어려움이 따랐다.

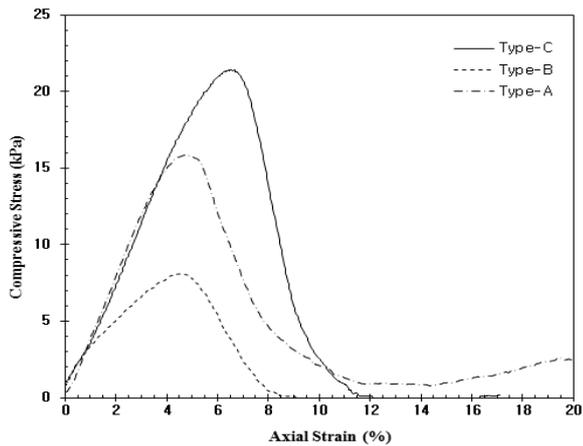
14일 양생 시료의 일축압축시험 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 먼저 외부 대기양생 시료에 대한 일축압축강도는 8.1~21.4kPa로 매우 작게 측정되었으며 시멘트 함유량이 높은 C-배합의 경우 A, B-배합에 비해 다소 크게 측정되었으나, 동절기 동결융해 조건에서 경량기포혼합토를 시공할 경우 시멘트 함유량을 크게 증가시켜도 설계기준강도를 확보하기에 어려움이 따를 것으로 판단된다.

외부 지중양생의 경우 일축압축강도는 63.8~144.7kPa로 측정되었으며 시멘트 함유량이 증가할수록 비례하여 일축 압축강도가 증가하는 것으로 나타났다. 응력-변형거동은 취

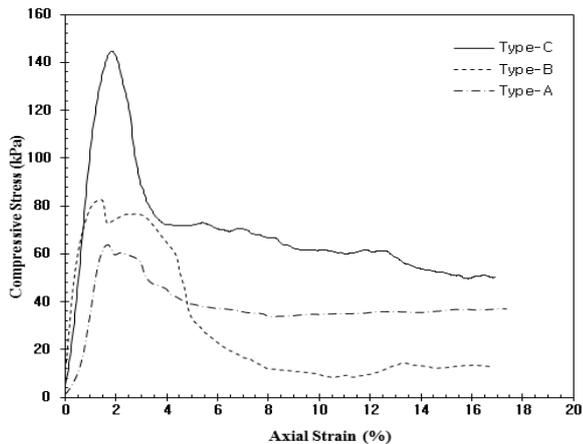


Before After Before After Before After (a) Type-A (b) Type-B (c) Type-C

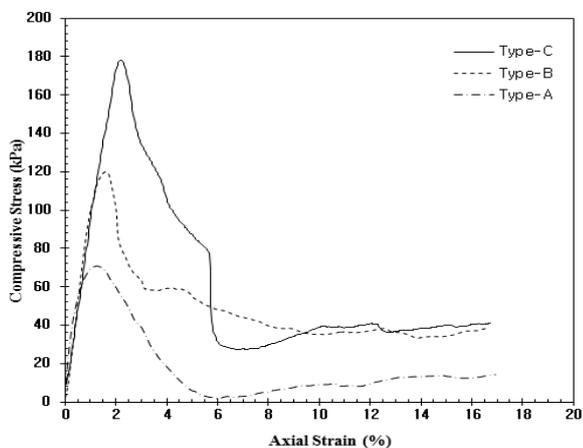
Fig. 7. Compressive stress test of outdoor dry samples cured for 14 days (freezing-thawing condition)



(a) Outdoor dry curing (freezing-thawing)



(b) Outdoor underground curing (low temperature)



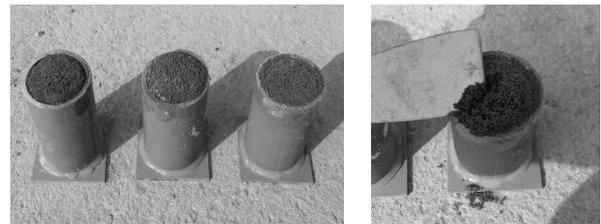
(c) Indoor wet curing (ordinary temperature)

Fig. 8. Compressive stress of 14 days cured samples

성적인 특성을 보이며 극한강도의 축 변형률은 외부 지중양생 1.4~1.8%, 실내 상온양생 1.2~2.2%로 나타났고 잔류강도는 비교적 작게 측정되었다.

3.1.2 28일 강도 시험

28일 양생 시료에 대하여 일축압축시험을 실시하여 설계



(a) Specimens (Type-A, B, C)

(b) Sample surface



Before

After

(c) Compressive stress test (Type-A)

Fig. 9. Compressive stress test of outdoor dry samples cured for 28 days (freezing-thawing condition)

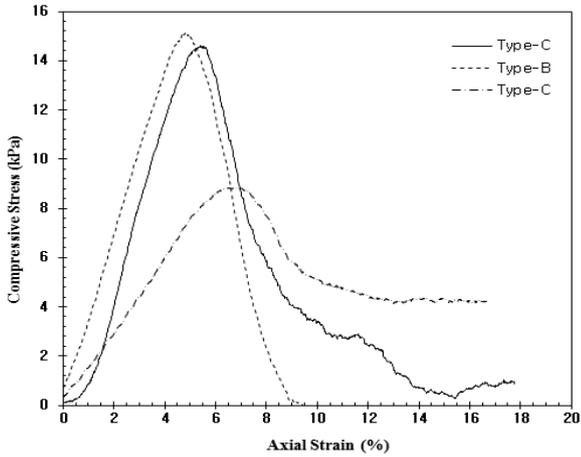
기준강도와 적합성을 판단하였다(Fig. 10). 실내 습윤양생 시료의 일축압축강도는 171.3~252.6kPa로서 설계기준강도로 대체로 적합하게 측정되었다. 일반적으로 토목공사에 사용되는 경량기포혼합토의 설계기준강도는 150~250kPa 범위에 있다. 양생된 시료를 관찰하면 저온에서 외부 대기 중 양생된 시료의 경우 14일 양생 시료와 마찬가지로 표층부는 거의 양생이 되지 않았다. 이는 초기에 동결융해를 반복하며 수화반응이 일어나지 않은 시료는 양생기간이 길어지더라도 고결되지 않는 것으로 판단된다.

외부 대기양생 시료에 대한 일축압축강도는 8.8~15.1kPa로 측정되었으며, 14일 양생 시료와 비교하여 별다른 변화를 보이지 않고 있고, 시멘트 함유량이 많은 C-배합의 경우 오히려 강도가 감소하였다. 또한, 이 값은 실내 습윤양생 시료 일축압축강도의 5.1~6.0%에 불과하다. 이는 보통포틀랜드시멘트를 사용한 경량기포혼합토는 저온조건에서 양생기간과 시멘트 함유량이 강도변화에 큰 영향을 미치지 못하고 있으며, 동결융해를 반복하여 수화작용이 일어나지 못할 경우 경량기포혼합토의 고화는 발생하기 어려울 것으로 판단된다.

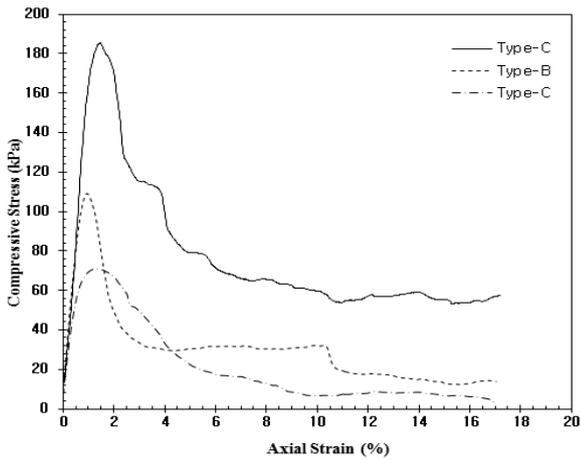
응력-변형거동은 극한강도가 명확하게 나타나는 취성적인 형태이고 최대하중에 대한 축 변형률은 외부 지중 양생 1.0~1.4%, 실내 습윤양생 2.1~2.8%로 나타났으며, 외부 지중 양생의 경우가 실내 습윤양생의 경우보다 작은 축 변형률을 보이고 있어 변형계수 값이 크게 측정되었다.

지표면 30cm의 얇은 지중에 매설한 시료의 경우 외기와

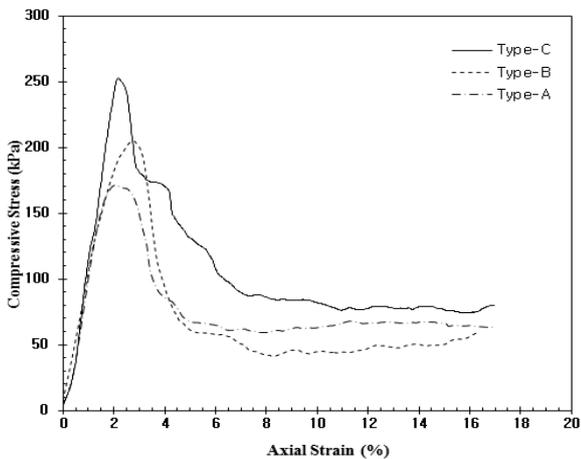
직접적으로 접촉하지 않아 외부 대기양생 시료와 비교하여 71~185.3kPa의 높은 일축압축강도 값을 나타내고 있으며, 실내 습윤양생 시료 값의 41.4~73.4%를 유지하고 있다. 또한, 14일 강도에 비해 11.3~31.8%의 강도증가율을 보이고 있으며 Type-B의 강도증가율이 가장 높았다.



(a) Outdoor dry curing (freezing-thawing)



(b) Outdoor underground curing (low temperature)



(c) Indoor wet curing (ordinary temperature)

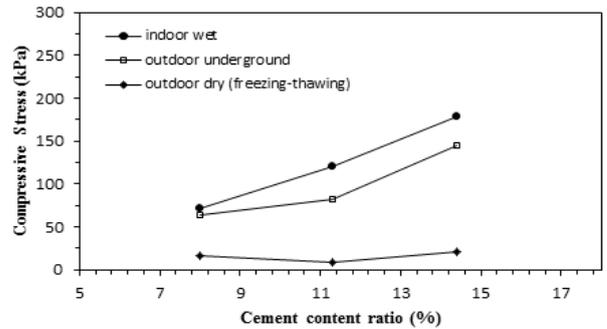
Fig. 10. Compressive stress of 28 days cured samples

3.2 상관관계 분석

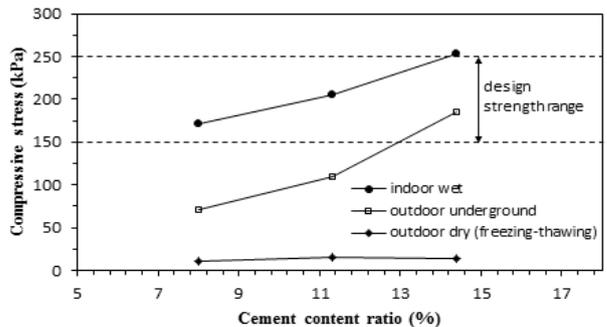
3.2.1 시멘트 함유율과 강도증가

경량기포혼합토는 시멘트 함유율이 증가할수록 강도가 증가한다. Fig. 11의 외부 대기에서 동결융해를 받는 경우 시멘트 증가에 따른 강도 증가는 거의 없는 것으로 나타났으며, 실내에서 28일간 습윤 양생한 경우는 A-배합에서 B-배합으로 시멘트 함유율이 41.3% 증가했을 때 일축압축강도는 19.5% 증가하였고, B-배합에서 C-배합으로 시멘트 함유율이 27.4% 증가했을 때 강도는 23.4% 증가하였다. 그러나 외부 지중양생의 경우 B-배합에서 C-배합으로 시멘트 함유율을 증가시켰을 때 강도는 14일 양생 시 74.8%, 28일 양생 시 69.8%로 가파르게 증가하였다. 이는 저온조건에서 시멘트 함유율을 12%~15% 이상 유지하고 차가운 대기와 직접적인 접촉을 차단할 경우 강도증가에 상당한 효과가 있을 것으로 판단된다.

城內一大 et al.(2009)은 실내에서 7일 이상 양생시킨 경량기포혼합토 시료를 25회의 동결융해실험을 반복한 결과 강도저하는 거의 없고 약간의 강도증가를 확인하였으며, 28일 양생기간에 극한의 동결융해를 시키지 않는 현장관리가 필요하다고 하였다. 따라서 보통포틀랜드시멘트를 이용하여 동절기에 경량기포혼합토를 생산, 시공할 경우 타설 면에 대한 보온조치가 필요할 것으로 사료된다. 통상 동절기 영하의 기온에서는 경량기포혼합토 시공을 금하고 있으나



(a) 14 days curing



(b) 28 days curing

Fig. 11. Relationship between strength and cement content ratio

부득이한 경우는 표층부에 대한 차단층 설치 또는 특수시멘트를 사용하는 것을 검토해야 하며, 고화재인 시멘트 사용량을 증가시키는 것으로 설계 일축압축강도(150~250kPa)를 달성하기 어려운 것으로 판단된다.

3.2.2 일축압축강도와 변형계수의 상관관계

경량기포혼합토의 변형계수(E_{50})는 일축압축강도와 상관성을 갖는다. Tsuchida & Egashira(2004)는 준설토를 이용한 경량기포혼합토의 변형계수는 일축압축강도의 40~260배 범위에 있다고 하였다. Yoon & Kim(2004)은 준설토를 이용한 시멘트 함유율을 6~12% 갖는 경량기포혼합토의 변형계수는 압축강도의 18~120배 범위를 갖는 것으로 조사하였다. 본 연구에서 측정된 경량기포혼합토의 변형계수는 Fig. 12와 같으며 Tsuchida & Egashira(2004)가 조사한 범위 내에 분포하고 있다. 특이한 점은 외부 지중양생 시료의 변형계수/압축강도 비가 실내 습윤양생의 값보다 크게 나타났다. 이는 외부 온도에 반응하여 일축압축강도는 작게 측정되었지만, 지중조건에서도 동결융해의 간접적인 영향을 받아 일축압축시험에서 보다 취성적인 거동을 유발하는 것으로 추정된다.

4. 수침조건에 따른 경량기포혼합토의 특성

4.1 경량기포혼합토의 수리적 특성

경량기포혼합토는 기포가 포함되어 있어 투수계수가 크고 물의 침투가 용이할 것으로 생각하기 쉽다. Kikuchi & Yoshino(1998)는 원료토에 75kg/m^3 의 시멘트를 첨가한 경량기포혼합토의 투수계수는 시멘트를 첨가하지 않은 경우에 비해 투수계수가 1/100 내지 1/10로 감소한다고 하였고, Tsuchida & Egashira(2004)는 경량기포혼합토 공시체를 수

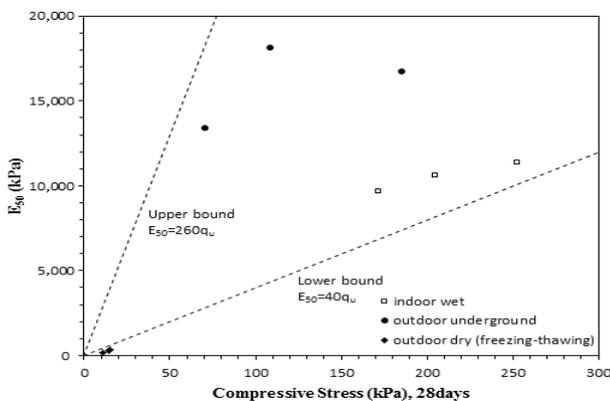


Fig. 12. Relationship between modulus of deformation and compressive stress

조에 담그고 장기간 관찰한 실험에서 공시체 표면으로 물이 침투하여 밀도가 증가되며 침투율은 대략 12mm/year 라고 하였다. Hwang et al.(2009)은 모래, 실트 및 점토에 시멘트를 151kg/m^3 첨가한 경량기포혼합토의 직접투수시험과 모관상승고시험에서 경량기포혼합토의 투수계수는 평균 $4.857 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 정도로 점토($3.0 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$)보다는 크고 보통 콘크리트($9.2 \times 10^{-13} \sim 1.9 \times 10^{-9} \text{cm/sec}$)보다는 매우 큰 값을 가진다고 하였으며, 경량기포혼합토 내에 존재하는 미세 공극이 물에 의해 포화될 수 있다고 주장하였다. 또한, 물로 포화된 경량기포혼합토의 일축압축시험에서 물에 의한 극한강도는 변함이 없으나 응력-변형거동에는 영향을 미치는 것으로 연구되었다.

4.2 경량기포혼합토의 단위중량 및 함수비 변화

4.2.1 시험방법

본 연구에서는 D-배합으로 제작된 경량기포혼합토 공시체를 수침시켜 시간 경과에 따른 단위중량의 변화를 살펴보았다. 또한, 동일 배합비 시료에 대하여 기중 건조 및 습윤 상태에서 장시간 존치시켜 시간 경과에 따른 단위중량 및 강도특성 변화를 살펴보았다.

수침상태 시험을 위해 D-배합으로 제작된 경량기포혼합토를 실내 상온에서 약 1주일간 양생시킨 후 수침시켰다. 이때 공시체가 물에 용해되어 손상되는 것을 방지하고자 PVC 공시체와 시료사이의 필름을 제거하고 바닥에 구멍을 뚫어 물의 이동이 자유롭게 하였다. 건조상태 시험을 위해 1주일 양생된 시료를 부직포로 감싸 실내 상온에서 건조시켰으며, 습윤상태 시험을 위해 1주일 양생된 공시체를 랩으로 감싸 밀봉한 후 실내에 존치하였다.

4.2.2 단위중량 및 함수비 변화

시간의 경과에 따른 시료의 단위중량 및 함수비 변화는 Fig. 14와 같다. 수침, 습윤, 건조상태를 유지하며 170일 동안의 단위중량 변화를 살펴본 결과 수침상태에서는 단위중량이 12.40kN/m^3 에서 13.12kN/m^3 로 0.72kN/m^3 가 증가하였고 이는 5.8% 증가에 해당한다. 초기 28일에 단위중량이



Fig. 13. Specimens cured for 170 days (soaking, wetting, drying)

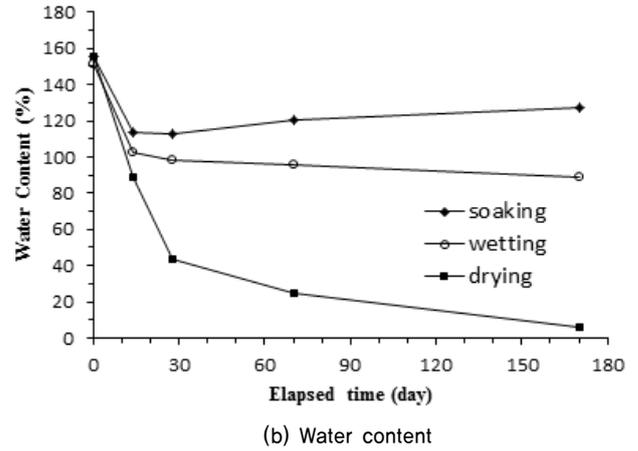
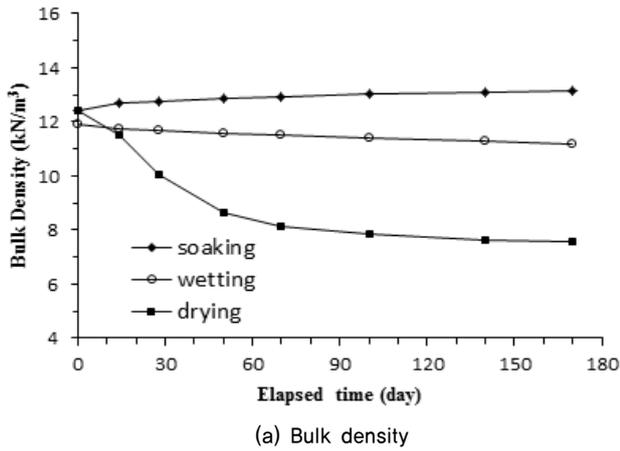


Fig. 14. Variation of bulk density and water content during 170 days

3.1% 증가되었으나 이후 142일 동안은 불과 2.7% 증가에 그쳐 수렴되는 양상을 보이고 있다. 함수비는 초기 14일간 26.8%의 감소율을 보이고 있으며 28일 이후 증가되는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 양생 초기 14일 동안 수화반응이 활발하여 물이 급격히 소모되는 것으로 보이며, 28일 이후는 수화반응이 미약하거나 거의 없는 것으로 추정된다. 이와 같이 수침상태에서 단위중량의 증가량이 미비하다. 그 이유는 시멘트-토립자-물로 구성된 경량기포혼합토 골격 형성이 완료되어 기포 내부로 물이 침투하기 어렵기 때문이며, 소량의 물만 표층부 공극으로 침투함으로써 28일 이후 함수비가 약간 증가하는 것으로 판단된다.

실무적으로 시공 시 설치규모가 큰 경량기포혼합토 제체에 피복층이 덮여있는 경우, 침투경로가 길어 내부의 공극으로 물이 쉽게 침투하지 못한다. Watabe et al.(2011)은 일본 고베항 안벽 배면의 지하수위 아래에 시공된 경량기포혼합토의 단위중량 변화를 100개월간 관찰한 결과 1.05~1.15g/cm³ 범위에서 유지되고 있음을 확인하였으며(Fig. 15), 이는 건설 당시 설계기준 1.1g/cm³에 거의 근접하는 값이다. Kikuchi et al.(2011)은 경량기포혼합토의 내구성 시험을 통하여 흙으로 피복된 경량기포혼합토는 건조되지 않으며, 물의 침투 속도는 매우 느리다고 하였다. 따라서 수중에 존재하는 경량기포혼합토는 물과의 직접적인 접촉을 방지하도록 흙으로 덮어 보호한다면 장기적으로 지하수 침투에 별다른 영향을 받지 않고 안정적인 상태를 유지할 수 있을 것으로 판단된다(Tsuchida et al., 1995).

경량기포혼합토를 건조상태에서 존치할 경우 내부의 수분이 증발하여 단위중량이 빠르게 감소하는 것으로 나타났다. 특히 14일 양생 이후의 단위중량 변화가 심하며 36일 동안 11.5kN/m³에서 8.65kN/m³로 24.8%의 중량이 감소되었다. 함수비 감소율은 14일간 42.8%, 28일 동안은 71.9%로 수침 및 습윤상태에 비해 감소 속도가 매우 빠르다. 이후 170일이

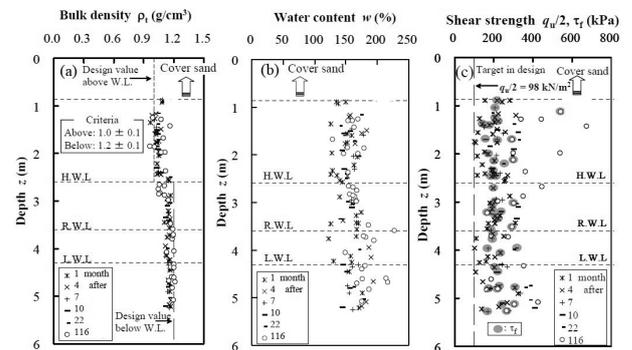


Fig. 15. Depth profiles of physical and mechanical properties - Kobe Port Island - (Watabe et al., 2011)

경과한 후 함수비는 6%로 측정되어 거의 건조되었다. 초기 14일은 수화반응에 의한 수분의 감소이고, 이후는 건조에 의한 수분감소로 판단된다. 이는 14일까지 수화반응이 어느 정도 진행되었으나 경량기포혼합토의 골격이 충분히 형성되지 못하여 미세 공극을 통해 내부의 수분이 가파르게 감소하는 것으로 보이며, 이러한 현상은 28일 양생기간에 충분히 수분을 공급받지 못할 경우 잔여 수화반응에 지장을 초래하므로 배합 시 충분한 물의 공급이 필요할 것으로 판단된다.

습윤상태의 경우 초기 14일, 28일 함수비 변화는 수침상태와 유사한 경향을 보이고 있으며 이는 수화반응에 의한 물의 소모이다. 이후 경과시간에 따른 단위중량의 변화는 6.1% 감소하였으며 이러한 현상은 공시체를 랩으로 감싸도 미세한 틈으로 수분이 증발하는 이유로 판단된다.

그러므로 경량기포혼합토를 지중에 시공할 때 피복층을 두고 존치해야 수분의 손실이 없이 일정한 단위중량을 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 경량기포혼합토의 강도특성 변화

Kim & Lee(2002)는 준설토를 이용한 경량기포혼합토의

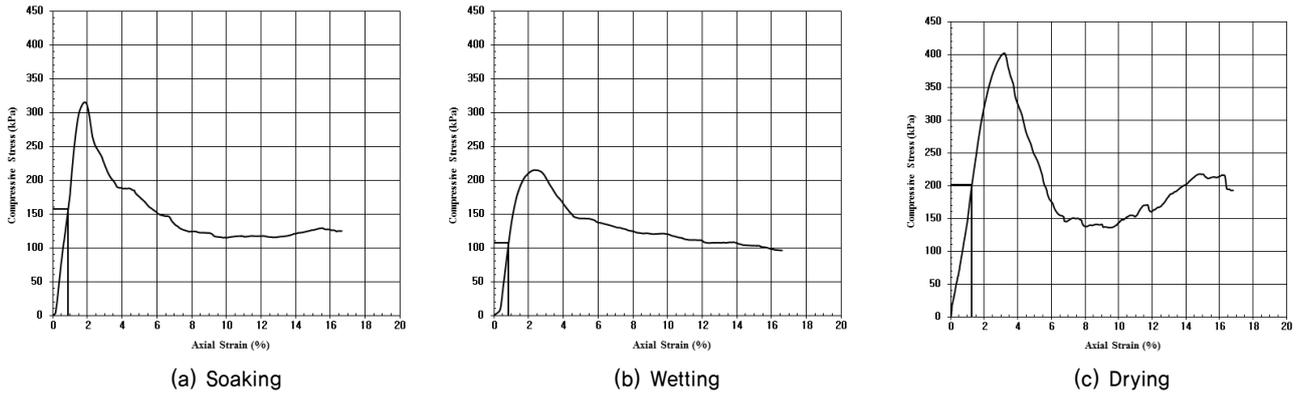


Fig. 16. Compressive stress of 28 days cured samples

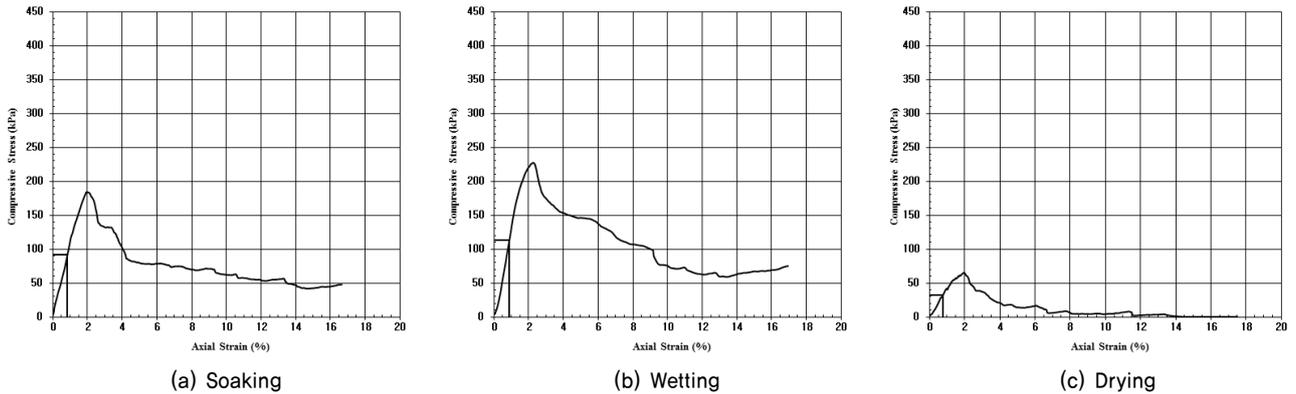


Fig. 17. Compressive stress of 170 days cured samples

역학적 특성 연구를 통하여 일축압축강도는 대기 중 양생된 시료에 비해 수중양생된 경우가 약 50% 작게 측정되는 것으로 분석하였으며, 수중양생 시료는 최대 압축강도를 나타낸 이후 변형-연화 거동을 보인다고 하였다.

28일 양생 후 실시한 일축압축시험 결과를 Fig. 16에 나타내었으며 건조상태의 일축압축강도는 401.8kPa, 수침상태는 315.1kPa, 습윤상태는 214.8kPa로 측정되었다. 습윤상태는 동일 배합비로 공시체를 제작하였으나 시료 배합과정에서 기포가 다소 과다하게 투입되어 단위중량이 작게 시료가 제작되었다. 따라서 수침상태와 건조상태 시료에 비해 일축압축강도가 작게 측정된 것으로 추정된다.

각각의 시료에 대한 함수비는 건조상태 43.8%, 수침상태 112.4%, 습윤상태 98.4%로 측정되었으며(Fig. 14(b)), 건조상태의 일축압축강도가 크게 나타난 것은 수화반응에 의해 시멘트-흙 입자-물의 경량기포혼합토 골격이 완성된 이후는 일정량의 수분 증발이 강도발현에 도움이 되는 것으로 판단된다. 한편 170일 경과 후 일축압축강도는 건조상태 65.3kPa, 수침상태 184.2kPa, 습윤상태 227.2kPa로 측정되었으며 건조상태의 강도 저하가 현저하게 발생하였다. 이때의 함수비는 건조상태 6.0%, 수침상태 126.9%, 습윤상태 92.0%로 측정되었으며 건조상태의 과도한 수분 증발이 강도저하의 큰

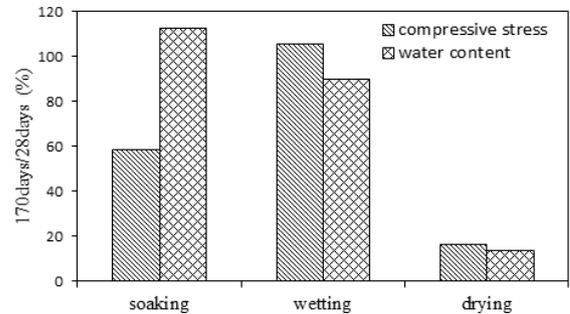


Fig. 18. Variation rate of characteristics during 170 days

원인으로 파악된다. 즉 경량기포혼합토는 시멘트-토립자-물의 결합체가 골격을 형성하여 기포를 감싸고 있으며 이때 과도한 수분의 증발은 결합력을 약화시켜 전단강도를 저하시키는 것으로 판단된다. 수침상태의 경우도 강도저하가 나타났으며 공시체크기에 따른 영향도 있는 것으로 사료된다. 실제로 수중시공 또는 지하수위 아래에 시공할 경우 강도저하를 고려한다면 설계기준 일축압축강도를 상향 조정할 필요가 있다.

그러나 Watabe et al.(2011)의 연구에 따르면 지하수위 아래 지중에 시공된 경량기포혼합토의 전단강도는 시간이 경과할수록 증가되는 경향이 있다고 연구하였다. 이는 상재

하중에 의해 압밀 되어 지반의 밀도가 증가하고 단단해지려는 특성 때문이며, 부피가 큰 경량기포혼합토 제체가 피복토를 갖는 경우에 지하수 침투는 사실상 어렵기 때문이다. 따라서 경량기포혼합토를 수중, 지중에 설치할 때 직접적으로 외부에 노출되지 않도록 피복층을 둔다면 장기적으로 매우 안정적인 건설재료로 평가할 수 있다.

5. 결 론

해성 점토를 이용한 경량기포혼합토에 대하여 양생 시 동결융해 및 수침조건을 변화하여 실시한 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 동결융해를 받는 시료는 양생이 되지 않아 강도발현이 안되었으나 대기 평균온도 1.7°C에서 지표면 아래 30cm의 흙 속에 매입하여 양생한 시료는 양호한 결정체로 형성되었고, 일축압축강도가 실내 습윤양생 시료 값의 41.4~73.4%를 유지하고 있으며 시멘트 함유율을 증가시킬 경우 전단강도 증가속도는 실내 습윤양생보다 빠르다.
- (2) 변형계수(E_{50})/일축압축강도 비의 경우 실내 습윤양생 시료는 Tsuchida & Egashira(2004)가 조사한 하안값에 근접하며, 대기 평균온도 1.7°C의 지중양생 시료는 상한 값에 근접하고 있다. 이는 외부 온도에 반응하여 일축압축강도는 작게 측정되었지만 지중양생에서도 동결융해의 간접적인 영향을 받아 일축압축시험에서 보다 취성적인 거동을 유발하는 것으로 추정된다.
- (3) 시료를 건조상태에서 28일간 양생시켰을 때 건조상태의 함수비는 43.8%로 현격히 감소했으나 매우 높은 압축강도를 나타내었다. 이는 양생기간 동안 어느 정도의 수분 증발이 강도증가에 도움이 되는 것으로 판단된다. 그러나 170일간 건조양생 되어 함수비가 6%로 저하되었을 때 일축압축강도는 28일 시험 값의 16.3%에 불과하였다. 따라서 건조양생은 장기강도 발현에 문제가 있으므로 시공 시 수분의 증발을 방지하도록 주의해야 한다.
- (4) 170일 수침으로 단위중량의 변화는 5.8% 증가하였다. 또한, 초기 28일 이후는 단위중량 증가율이 점차 감소하여 수렴되는 양상을 보였다. 함수비 변화를 살펴보면 초기 14일간 급격히 함수비가 감소하다가 이후 28일까지 줄어들었으나 28일 이후 약간 증가하는 경향이 있다. 이는 시멘트의 수화반응이 초기 14일에 가장 활발히 진행되고 있음을 의미하며 이와 같은 경향은 습윤상태 시료에서도 나타나고 있다.
- (5) 동결기 영하의 기온에서 경량기포혼합토를 시공할 경

우 동결융해를 받지 않도록 외기로부터 차단하는 보온조치가 필요하며 경량기포혼합토가 지하수위 아래, 지중에 매입될 경우 재료의 특성변화가 없이 장기간에 걸쳐 안정적인 건설재료로 활용할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 한국경량혼합토(주)의 지원으로 수행되었으며, 시료 제작 및 각종 시험에 협조해 주신 기술연구소 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

1. 城內一大, 和田芳明, 館山孝利 (2009), 気泡混合軽量盛土工法の積雪寒冷地への適応性について, 国立研究開発法人土木研究所-寒地土木研究所, 2009年度技術研究発表会, 技-52.
2. Hwang, J. H., Hwang, W. K., Lee, Y. J., Park, L. K. and Kim, T. H. (2009), Characteristics related to water of lightweight air-mixed soils, Korean Geo-Environmental Conference 2009, pp. 126~131 (in Korean).
3. Kikuchi, Y., Nagatome, T. and Noguchi, T. (2011), Analysis of strain rate-dependent consolidation behaviors of natural soil, Proceedings of the 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1, THEME 5, pp. 805~810.
4. Kikuchi, Y. and Yoshino, H. (1998), Permeability of lightweight soil made of dredged slurry mixed with air foam, International Symposium on Coastal Geotechnical Engineering in Practice, Yokohama, Balkema, Lisse, Vol. 1, pp. 635~640.
5. Kim, Z. C. and Lee, C. K. (2002), Mechanical characteristics of light-weighted foam soil consisting of dredged soils, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 18, No. 4, pp. 309~317 (in Korean).
6. Lee, M. A., Kim, S. W., Choi, D. K., Park, L. K. and Kim, T. H. (2012), Effect of curing temperature on the strength characteristics of lightweight air-trapped soil, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 28, No. 4, pp. 43~53 (in Korean).
7. Tsuchida, T. and Egashira, K. (2004), The lightweight treated soil method: new geomaterials for soft ground engineering in coastal areas, A.A. Balkema Publishers, pp. 30.
8. Tsuchida, T., Nagai, K., Okumura, T., Kishda, K. and Funada, K. (1995), Mechanical properties of lightweight geo-matrical used for the backfill of quaywalls (Part 1), Proceedings of 31st Conference on Geotechnical Engineering, pp. 2525~2528.
9. Watabe, Y., Tanaka, M. and Sassa, S. (2011), 10-year follow-up study of air-foam treated lightweight soil placed in coastal areas, Proceedings of The Institution of Civil Engineers Ground Improvement, Vol. 164, Issue 3, pp. 189~200.
10. Yoon, G. L. and Kim, B. T. (2004), Compressibility and characteristics of light-weighted foam soil, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 20, No. 4, pp. 5~13 (in Korean).
11. Yoon, G. L. and You, S. K. (2005), Behaviors of lightweight foamed soils considering underwater curing and water pressure conditions, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 21, No. 4, pp. 21~29 (in Korean).