

경량기포토의 압축 및 인장 특성

이영준* · 윤성규** · 김태형***

*한국해양대학교 대학원, **한국해양대학교 건설환경공학부, ***한국해양대학교 건설환경공학부 교수

Compression and Tensile Characteristics of Lightweight Air-Trapped Soil(ATS)

Y. J. Lee* · S. K. Yun** · T. H. Kim***

*Graduate School of Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

***Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 본 논문에서는 성토재로서 균일한 품질을 가지는 경량기포토의 압축 및 인장 특성에 대한 연구가 이루어졌다. 이전에는 경량 성토를 필요로 하는 곳에는 EPS 블록을 이용한 공법이 많이 이용되었으나 시간의 경과에 따라 EPS의 소성변형(크리프)으로 인한 단차 발생과 균열 등의 문제점이 노출되면서 새로운 재료개발이 시급해졌다. 그에 대한 대책으로 현장 발생토 등을 이용한 경량기포혼합토공법에 대한 연구와 현장 적용이 이루어지고 있다. 경량기포혼합토는 EPS블럭에 비하여 장기적인 크리프는 적지만 원료토가 발생하는 지역마다 공학적인 성질에 차이가 있어 품질 확보에 어려움이 있다. 또한 원료토의 대체 재료로서 폐기물로 처리되는 건설발생토, 준설토, 플라이애쉬, 석분 등을 활용하고 있는데, 적용되는 현장마다 경제적으로 구할 수 있는 재료도 각기 다르고, 각각의 혼합재료를 적용하는데 있어서 강도특성 등을 예측할 수 있는 기준이 되는 자료가 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 균질한 품질 확보가 가능한 공장에서 생산된 모래를 이용하여 단위중량, 시멘트-모래 비, 공기량 등을 달리한 배합 조건을 설정하여 경량기포토 공시체를 제작하고 일축압축시험, 간접인장강도시험 등을 실시하여 압축 및 인장특성을 분석하였다.

핵심용어 : 경량기포토, 발포폴리스틸렌, 성토재, 일축압축시험, 간접인장강도시험, 크리프

ABSTRACT : This study is experimentally investigated for the characteristics of compression and tensile of lightweight air-trapped soils with uniform quality. Previously, EPS blocks are often used as lightweight embankment, but many problems such as the level difference and cracks caused by plastic(creep) deformation occurred in the EPS blocks. So, new materials development is urgent. By means of alternatives, lightweight air-mixed soil method using in-situ soils has been developed and applied to fields. In comparison with EPS block, lightweight air-mixed soils have less creep deformation in long-time, but the strength characteristics of them are different depending on soils where they are obtained. Therefore, the quality management of them is very difficult. Recently, waste materials like dredged soil, ash, lime etc. are used as the instead of in-situ soil. However, they also have problems. For example, the most economic replacement material is changed according to place it is generated, and also available data related to the strength properties are limited. In this study, therefore, characteristics of lightweight air-trapped soil samples are investigated. To do this, the lightweight air-trapped soils are prepared using a manufactured sand with uniform quality. Air-trapped soil specimens are manufactured about different unit weight, cement-sand ratio and airspace. To found out the compression and tensile characteristics of lightweight air-tapped soils, unconfined compression test, splitting tensile test are conducted.

KEY WORDS : Lightweight air-trapped soil, EPS, Fill material, Unconfined compression test, Splitting tensile test, Creep

* angchun@paran.com

** tjdrb30@nate.com

*** kth67399@hhu.ac.kr 051)410-4465

1. 서 론

국내에서는 경량성토를 필요로 하는 곳에 EPS가 주재료로 이용되어 왔으나, EPS가 갖는 소성변형(크리프)으로 인한 문제점이 노출되기 시작하면서 최근에는 원료토에 물과 시멘트를 첨가하여 유동화한 것에 기포를 혼합하는 경량기포혼합토를 적용시키고자 많은 연구가 이루어지고 있다. 경량기포혼합토는 물과 시멘트와 같은 고화재를 혼합하여 유동화 시킨 것에 기포를 혼합하여 제작한 것으로, 연약지반이나 산악지대와 같은 급경사지 위의 성토, 옹벽의 뒤채움, 구조물의 되메우기 등에 효과적인 재료이다.

경량기포혼합토의 압축강도에 영향을 미치는 인자들에 대한 국내 연구로서는 김과 이(2002)에 의해서 시료의 초기함수비, 시멘트 함유율, 기포의 함유율 및 양생방법 등이 주요 인자로 알려졌으며[1], 이후 윤과 김(2004)에 의해 이러한 영향인자들을 이용하여 경량기포혼합토의 임의 배합에 따른 일축압축강도를 추정하는 기법이 해양연구원에 의해 개발되었다[2]. 이후 윤과 유(2004)의 연구에서는 현장발생토의 초기함수비, 시멘트 첨가량, 기포첨가량을 고려한 정규화계수로 표현되는 일축압축강도의 적절한 회귀식을 제시하였으며, 원료토의 채취지역에 따라 이 정규화계수가 달라지는 것을 지적하였다[3]. 원료토의 채취지역에 따라 경량기포혼합토의 일축압축강도가 달라지는 이유는 원료토를 구성하고 있는 모래, 실트, 점토의 함유량에 따라 각각의 상호작용과 기포의 형성을 방해하는 소포현상의 영향에 의한 것으로, 그 결과로 인해 경량기포혼합토의 단위중량, 강도, 변형특성 모두에 영향을 미친다는 것을 밝혔다. 이와 같이 경량기포혼합토는 현장에서 발생하는 다양한 원료토에 따라, 기포의 형성 정도가 다르게 되어 품질관리에 어려움이 있는 것이 사실이므로 현장적용에 있어서는 이들에 대한 철저한 시공관리가 요구되는 것을 알 수 있다[4],[5]. 따라서, 이러한 경량기포혼합토의 단점이 보완된 품질이 균질한 대체 경량기포재료의 개발과 공법의 확립이 요구된다. 이를 위해 먼저 원료토를 포함하지 않은 경량기포토에 대한 기초적인 특성 연구가 필요하고, 아울러 균질한 특성을 가진 공장에서 생산된 재료, 예를 들어, 모래를 혼합한 경량기포토에 대한 특성 연구도 요구된다.

그래서 본 연구에서는 먼저 경량기포토에 대한 기초적인 연구로 압축강도와 인장강도 특성에 대해 검토하고자 한다. 연구 대상은 흙을 전혀 포함하지 않은 경량기포토와 균질한 모래를 포함한 경량기포토에 대해 시험이 실시되었다. 본 연구를 통해 소요 단위중량에 대한 압축강도 및 변형, 인장강도 특성을 파악하여 경량기포토에 대한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 경량기포토 공법

2.1 경량기포토의 정의

경량기포혼합토는 재료의 경량화를 위하여 액성한계 이상으로 조정하여 슬러리화된 준설토나 건설발생토 등의 원료토와 시멘트와 같은 고화재 및 경량화 재료인 기포제를 첨가·혼합해서 만들어진 재료이다.

반면, 경량기포토는 재료특성이 불균질한 원료토를 제외한 시멘트 고화재와 기포제가 결합된 재료나 또는 공장에서 생산된 균질한 재료특성을 가진 모래와 시멘트 고화재, 기포제가 결합된 재료라 본 논문에서 정의한다.

2.2 경량기포토의 용도

경량기포토는 경량성인 특징을 살려 일반적인 흙에서는 시공이 곤란한 장소에서의 시공에 가장 적합하며 확폭성토, 지반 활동지에서의 성토, 배면토압의 경감, 급경사지에서의 연직성토, 협소부의 충전재료로 널리 쓰이고 있다.

구체적인 용도를 살펴보면, 도로의 신설이나 확폭을 하는 경우 근접지나 시설 성토로의 성토 하중의 저감이 가능하며 단기간에 저소음, 저진동으로 연직성토가 가능하다. 또한 지반 활동 두부의 성토하중을 저감하고, 지반활동 대책경감을 도모할 수 있으며, 구조물 배면에 작용하는 토압을 경감할 수 있기 때문에 기초말뚝 등 구조물의 규모를 작게 하는 것이 가능해진다. 산악도로 등 급경사지에서 연결성토에 이용함으로써 공사용 진입로나 재료 운반을 경감할 수 있고, 절성토량 또한 감소시킬 수 있고 유동성이 우수하기 때문에 발판 아래의 공동이나 지하 매설물의 내부 충전 등에 적합하다.

3. 실내시험

3.1 재료특성

본 연구에서는 경제성을 고려하여 일반적인 제조 및 시공에 이용되는 보통 포틀랜드시멘트를 고화재로 사용하였고, 품질이 균질한 경량기포토의 제작을 위해 공장에서 생산된 모래를 사용하였다. 또한 여러 종류의 기포제 중 경량기포 콘크리트의 취약한 특성을 고려하여 흡수율을 최대한 낮출 수 있고, 사용기간과 사용용도에 큰 제약이 없는 동물성 기포제를 사용하였다. 각 재료들에 대한 구체적인 내용은 다음과 같다.

3.1.1 시멘트

본 연구에서는 KS L 5201의 규정에 적합한 H사 제품인 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 물리적 성질과 화학적 성분은 각각 Table 1과 Table 2와 같다.

Table 1 Physical nature of Portland cement

| 비중 | 분말도 | 응결 | | 안정도 (%) | 압축강도(MPa) | | |
|------|-------|-------|-------|---------|-----------|------|------|
| | | 초결(분) | 종결(분) | | 3일 | 7일 | 28일 |
| 3.15 | 3,354 | 205 | 275 | 0.09 | 28.8 | 39.1 | 52.2 |

Table 2 Chemical element of Portland cement

| 성분 | CaO | SiO ₂ | AlO ₃ | MgO | Fe ₂ O ₃ | SO ₃ | 강열감량 | Free Cao | Insol 불용잔분 |
|-------|------|------------------|------------------|------|--------------------------------|-----------------|------|----------|------------|
| 함량(%) | 61.3 | 21.1 | 5.2 | 2.73 | 2.8 | 1.81 | 1.62 | 0.6 | 0.2 |

3.1.2 모래

본 연구에서는 품질이 비교적 균일한 경량기포토의 제작을 위해 균질하게 생산되는 모래를 사용하였으며, 입도포곡선은 Fig. 1과 같으며 유효입경(D₁₀)은 약 0.15mm이다.

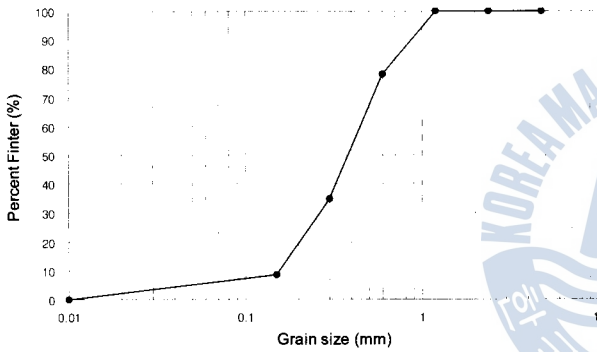


Fig. 1 Particle size distribution curve of sand

3.1.3 기포제

본 연구에서는 콘크리트의 양생과 장기적인 사용에 악영향을 주지 않는 동물성기포제를 사용하였다. 동물성기포제는 단백질계 기포제로서 단백질의 원료로는 동물의 혈액, 유제성분 인카세인, 동물의 뼈, 뿔의 분말인 젤라틴 등이 있다. 이들은 여러 종류의 아미노산으로 구성되어 있고 이것을 알칼리로 가수분해하여 중화한 후 여과한 것을 철염이나 방부제를 첨가하여 제작되었다. 본 시험에 사용된 기포제는 증금속 검출시험에서 Table 3과 같은 만족된 결과를 나타내었다.

Table 3 Detection test (unit : mg/kg)

| 항목 | 검출한계 | 결과 | 시험방법 | 분석장비 |
|-------------|------|-----|-------------|---------|
| 납(Pb) | 5 | 불검출 | EPA 3050B | ICP-AES |
| 카드뮴(Cd) | 1 | 불검출 | EPA 3050B | |
| 수은(Hg) | 1 | 불검출 | EPA 3050B | |
| 6가 크롬(Cr6+) | 1 | 불검출 | USEPA 3060A | UV-VIS |

3.2 배합계획

본 연구에서는 경량기포토의 물리적 특성에 따른 역학적 특성 및 강도발현에 영향을 미치는 영향을 분석하고, 추후의 강도나 단위중량에 따른 제품 생산시에 적용을 위한 최적배합을 도출하기 위하여 16가지의 배합비를 설정하였다. 시료 1~4번은 모래를 포함하지 않은 상태에서의 강도를 측정하여 모래의 첨가량에 따른 변화를 알아보기 위한 배합이며, 5~16번은 시멘트-모래의 비를 1:1~1:3으로 설정하여 시멘트-모래비에 따른 변화를 알아보기 위한 배합이다(Table 4).

Table 4 Material Mixing ratio

| 구분 No. | γ-C-S | 슬러리 | | | 시멘트 슬러리 총량:① | 기포군 | | | 기포슬러리 밀도:①+② (kN/m ³) |
|--------|---------|-----|-----|-------|--------------|------|-------|----------|-----------------------------------|
| | | 시멘트 | 잔골재 | 수량 | | 기포제 | 희석수량 | 기포군 총량:② | |
| 1 | 0.4-1-0 | 245 | 0 | 122.5 | 367.5 | 0.64 | 31.35 | 31.99 | 4 |
| 2 | 0.6-1-0 | 380 | 0 | 190 | 570 | 0.55 | 27.02 | 27.57 | 6 |
| 3 | 0.8-1-0 | 515 | 0 | 257.5 | 772.5 | 0.46 | 22.7 | 23.16 | 8 |
| 4 | 1.0-1-0 | 655 | 0 | 327.5 | 982.5 | 0.37 | 18.21 | 18.58 | 10 |
| 5 | 0.6-1-1 | 217 | 217 | 143.2 | 577.2 | 0.55 | 26.83 | 27.38 | 6 |
| 6 | 0.8-1-1 | 294 | 294 | 194 | 782 | 0.46 | 22.45 | 22.91 | 8 |
| 7 | 1.0-1-1 | 370 | 370 | 244.2 | 984.2 | 0.37 | 18.12 | 18.49 | 10 |
| 8 | 1.1-1-1 | 407 | 407 | 268.6 | 1082.6 | 0.33 | 16.01 | 16.34 | 11 |
| 9 | 0.6-1-2 | 147 | 294 | 132.3 | 573.3 | 0.54 | 26.7 | 27.24 | 6 |
| 10 | 0.8-1-2 | 200 | 400 | 180 | 780 | 0.45 | 22.19 | 22.64 | 8 |
| 11 | 1.0-1-2 | 253 | 506 | 227.7 | 986.7 | 0.36 | 17.68 | 18.04 | 10 |
| 12 | 1.1-1-2 | 278 | 556 | 250.2 | 1084.2 | 0.32 | 15.55 | 15.87 | 11 |
| 13 | 0.6-1-3 | 110 | 330 | 132 | 572 | 0.54 | 26.6 | 27.14 | 6 |
| 14 | 0.8-1-3 | 150 | 450 | 180 | 780 | 0.45 | 21.88 | 22.33 | 8 |
| 15 | 1.0-1-3 | 188 | 564 | 225.6 | 977.6 | 0.36 | 17.49 | 17.85 | 10 |
| 16 | 1.1-1-3 | 208 | 624 | 249.6 | 1081.6 | 0.31 | 15.18 | 15.49 | 11 |

3.3 장치 및 공시체 제작

물로 희석한 기포제를 압축공기와 함께 발포장치에 넣어 넣고 소정의 발포비율이 되도록 공기압을 조절하여 제조한다. 본 연구에서는 실내 실험용 공시체의 제작을 위해 소규모의 기포발생장치를 제작하여 사용하였다. 또한, 본 연구에서는 기포발생장치를 통해 발생된 기포를 시멘트 슬러리에 혼합하는 선기포방식을 사용하였다.

3.4 시험내용 및 방법

3.4.1 일축압축시험

본 연구에서는 배합조건에 따른 경량기포토의 응력-변형 특성과 단위중량 및 시멘트-모래 비의 관계를 조사하기 위해 일축압축시험을 실시하였다. 일축압축시험은 축압이 없는 상태에서 상하로 축하중을 주어 시료를 파괴시키는 방법으로 비배

수 삼축압축시험에서 구속압력이 0인 경우의 시험에 해당한다. 시험 방법은 KS F 2314에 따라 Fig. 2와 같은 일축압축시험기를 이용하여 실시하였고, 공시체는 내경 5cm, 길이 10cm이다.



Fig. 2 Unconfined compression test equipment

3.4.2 간접인장강도시험

경량기포토의 인장강도는 일축압축강도와 더불어 역학적 특성을 나타내는 중요한 요소로서 성토재 뿐만 아니라 기타 토목 및 건축 재료로 적용성을 판단하는 조건이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 KS F 2423 콘크리트의 쪼갬 인장강도 시험방법에 따라 간접인장강도시험을 실시하였고, 시험에 사용되는 공시체는 직경 5cm, 길이 3cm이다. 시험 장비는 Fig. 3과 같은 일축압축시험기를 이용하여 간접인장강도시험을 실시하였다.

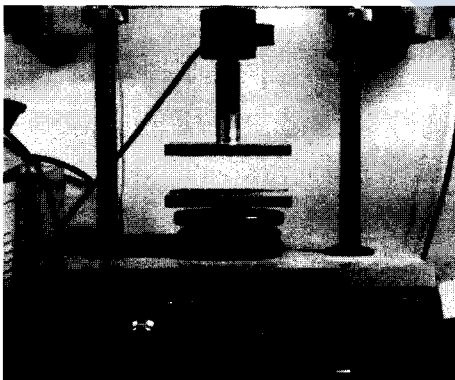


Fig. 3 Splitting tensile test equipment

4. 시험결과 및 분석

본 장에서는 앞에서 소개된 시험방법으로 경량기포토에 대해 실시된 시험결과를 분석하였다. 구체적으로 여러 단위중량에 대한 모래첨가의 유무에 따른 일축압축강도 및 간접인장강도 특성 등이 파악되었다.

4.1 일축압축강도

시멘트-모래비에 따라 단위중량을 달리하여 설정한 배합비로 제작된 공시체를 각각 3회씩 일축압축시험하여 얻어진 평균값을 요약한 결과는 Table 5와 같다.

Table 5 Unconfined compression test of wet-cured samples (unit : kPa)

| 구분 | | 양생기간 | | | | |
|-----|------------------|------|------|------|---------|-----|
| No. | ($\gamma-C-S$) | 3일 | 14일 | 28일 | 기건(28일) | 60일 |
| 1 | 0.4-1-0 | | | 191 | | |
| 2 | 0.6-1-0 | | | 1085 | | |
| 3 | 0.8-1-0 | | | 2292 | 2004 | |
| 4 | 1.0-1-0 | | | 4940 | | |
| 5 | 0.6-1-1 | | 528 | 584 | | |
| 6 | 0.8-1-1 | | | 1089 | 997 | |
| 7 | 1.0-1-1 | | 1542 | 2239 | | |
| 8 | 1.1-1-1 | | | 4363 | | |
| 9 | 0.6-1-2 | | 186 | 234 | | |
| 10 | 0.8-1-2 | 254 | 318 | 419 | 369 | 445 |
| 11 | 1.0-1-2 | 340 | | 1456 | | |
| 12 | 1.1-1-2 | 490 | | 1572 | | |
| 13 | 0.6-1-3 | | | 65 | | |
| 14 | 0.8-1-3 | | | 192 | 168 | |
| 15 | 1.0-1-3 | 230 | | 908 | | |
| 16 | 1.1-1-3 | 230 | | 1040 | | |

경량기포토는 Fig. 4(a)와 같이 시멘트 함유율이 높고(모래 함유율 낮고) 단위중량이 증가할수록 수직에 가깝고 취성적으로 파괴되었다. 반면에 시멘트 함유율이 낮고(모래 함유율 높고) 단위중량이 감소할수록 Fig. 4(b)와 같이 전체적으로 스펀지처럼 압축되며 연성적으로 파괴되는 거동을 보였다.



(a) 단위시멘트량, 단위중량이 높은 경우 (b) 단위시멘트량, 단위중량이 낮은 경우

Fig. 4 Failure shape of specimen

4.1.1 응력-변형 거동

경량기포토의 응력-변형특성을 고찰하기 위해 구성요소인 시멘트-모래비에 따른 거동을 분석하였다. Fig. 5는 모래를 포함하지 않은 공시체에 대한 응력-변형곡선을 나타내었다. 분석결과 단위중량이 6kN/m^3 인 경우 압축변형률의 증가에 따른 뚜렷한 파괴 형상이 나타나지 않는 벌징파괴(bulging failure)의 경향이 나타났다. 이는 공시체 내의 기포의 영향으로 보여진다. 즉, 슬러리화된 원료토에 첨가된 기포제의 양은 단위중량이 작아질수록 증가하기 때문에 이로 인해 파괴시 전반적인 파괴가 진행되는 것이 아니라 상부 또는 하부에서 국부적인 파괴가 발생하게 되는 것으로 판단된다. 이와 달리 단위중량 10kN/m^3 의 경우 응력-변형거동은 피크값이 뚜렷하고 기울기가 증가하는 것을 알 수 있다. 압축변형률 1%이내에서 전반적인 파괴가 발생하며 파괴 후 급격한 응력저하 양상이 보이는 것을 알 수 있다.

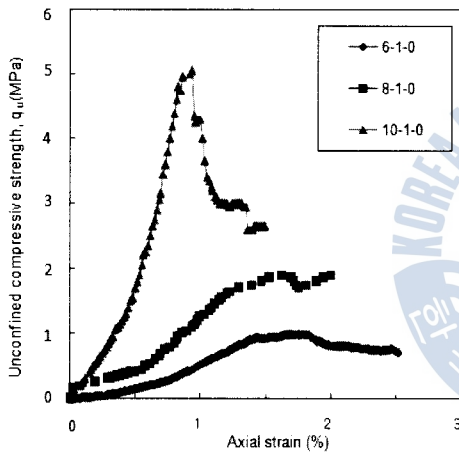


Fig. 5 Stress-strain curve for unit weight(non-sand specimens)

4.1.2 시멘트-모래비의 영향

경량기포토는 균질한 품질확보를 위해 공장에서 생산된 모래를 혼합하여 제작하게 된다. 물론 시멘트의 혼합량을 많이 사용하는 것이 압축강도 측면에서 유리하지만, 경량기포토의 경제성을 확보하기 위해서는 고화제의 양을 최대한 줄이면서 소요강도를 얻는 것이 중요하다. 따라서 적정 시멘트-모래비를 결정하는 것은 경량기포토의 경제성을 판단하는 측면에서 매우 중요한 부분이라 할 수 있다.

Fig. 6은 시멘트-모래비와 일축압축강도사이의 관계를 나타내고 있다. 시멘트함유율이 높고(모래함유율은 낮고) 단위중량이 높을수록 수직에 가까운 기울기를 보이며, 최대강도 또한 높은 것을 알 수 있다. 반면 시멘트 함유율이 낮고(모래함유율은 높고) 단위중량이 낮을수록 기울기와 최대강도 또한 낮은 것을 알 수 있다.

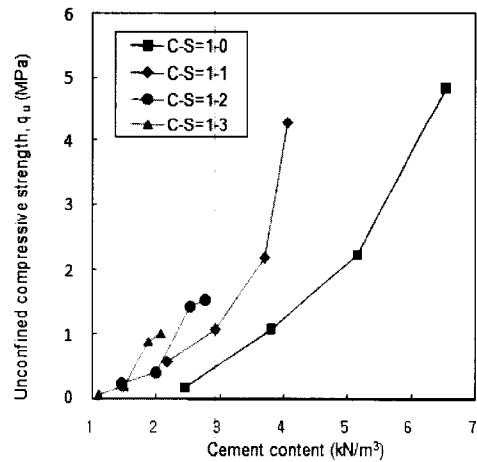


Fig. 6 Relation between cement content and unconfined compressive strength

4.1.3 기포함유율의 영향

Fig. 7은 기포함유율과 일축압축강도와와의 관계를 나타낸 그래프이다. 경량기포토는 경량화를 위해 혼합한 기포로 인해 압축강도의 감소가 예상된다. 낮은 단위중량의 공시체를 제작하기 위해선 시멘트슬러리에 많은 양의 기포가 혼합되고 반대로 높은 단위중량의 공시체에는 적은 양의 기포를 혼합하게 된다. 고화제인 시멘트와 마찬가지로 기포함유율이 낮을수록 압축강도 측면에서는 유리하지만, 경량기포토의 경제성을 확보하기 위해서는 최대한 기포함유율을 높이는 것이 중요하다고 할 수 있다.

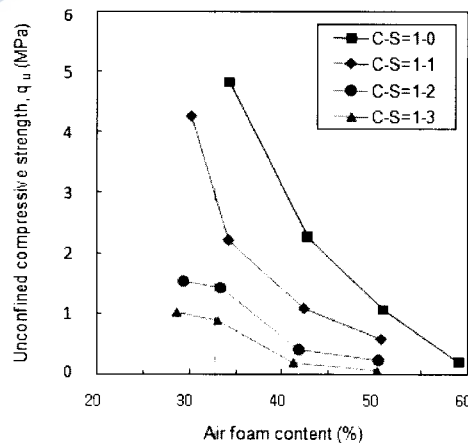


Fig. 7 Relation between air foam content and unconfined compressive strength

4.1.4 수중양생

경량기포토를 몰드에 타설한 후 48시간 이내에 탈형하여 후물 속에서 수중양생 시킨 공시체에 대하여 일축압축시험을 한 결과는 Table 6과 같다. 공기 중에서 양생한 경우의 일축압축

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- [1] 김주철, 이종규, 2002: 준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적 특성 연구, 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제18권, 4호, pp.309-317.
- [2] 윤길림, 김병탁, 2004: 경량기포혼합토의 압축 및 강도특성 연구, 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제20권, 4호, pp.5-13.
- [3] 윤길림, 유승경, 2004: 현장발생토를 활용한 경량기포혼합토의 강도 및 변형특성, 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제20권, 9호, pp.125-131.
- [4] 송준호, 임종철, 홍석우, 2008: 원료토의 특성에 따른 경량기포혼합토의 압축강도 영향인자 분석, 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제24권, 11호, pp.1-10.
- [5] 송준호, 2009: 원료토의 특성에 따른 경량기포혼합토의 압축강도 영향인자 분석, 석사학위논문, 부산대학교.
- [6] 일본도로공단, 1996: 기포혼합경량토를 이용한 경량 성토 공법의 설계·시공 지침서

원고접수일 : 2009년 12월 15일

원고채택일 : 2010년 02월 23일

