

경량기포혼합 준설토의 강도특성

Strength Characteristics of Light-Weight Cement mixed Marine Clay with Foam

박건태¹⁾, Geun-Tae Park, 김주철²⁾, Zu-Cheol Kim, 윤길림³⁾, Gil-Lim Yoon, 이종규⁴⁾, Chong-Kyu Lee

¹⁾ 단국대학교 토목공학과 석사, M.E., Dept. of Civil Engineering, Dankook University

²⁾ 단국대학교 토목공학과 박사수료, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Dankook University

³⁾ 한국해양연구원 항만공학센터, 선임연구원, Senior research engineer, Korea Ocean Research & Development Institute

⁴⁾ 단국대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dankook University

SYNOPSIS : A massive amount of marine clay produced as dredging of coast and sea bed is often dumped in open sea and filled in pond. The treatment of marine clay demand a large area and make fatal environmental problems for echo system. This research work intend to manufacture a light-weight landfill materials which are produced by mixing the dredged marine clay with various amount cement and foam. An extensive Uniaxial and Triaxial compression test are carried out to investigate the strength characteristics of the light-weight cement mixed marine clay with foam under various test conditions. The results indicated that the required unit weight has been achieved with negligible change after 28days curing time in water. It is also recognized that the compressive strength of light-weight landfill materials linearly decrease with increasing initial water content, and the rate of strength decrease with increasing initial water content in water curing was smaller than that of air curing. Futhermore, the rate of strength decreased with increasing initial water content, however, the rate become smaller as cement content increased.

Key words : Light-Weight, Marine Clay, Landfill, Foam, Cement content

1. 서론

연간 항로준설과 연안준설로 인해 대량으로 발생하는 준설토는 준설직후 대부분 외해 투기로 처리하거나 또는 투기장에 장기간 방치하여 건조·처리하는 상황이며 대규모 부지 확보 및 주변환경오염이 발생하고 있다. 이에 준설토의 오염정도를 고려하여 자원으로써 재활용하는 방안을 적극 검토하는 것은 매우 시급한 실정이다. 준설토를 재활용하는 방법은 여러 측면에서 고려할 수 있으나 경량기포혼합 준설토로 만들어 그 효용성을 증대시킨다면 매우 유용한 처리 방안이 될 것이다. 기존의 연약지반상에서 일반적인 토사를 성토, 옹벽 및 교대의 뒷채움 재료로 사용하는 경우, 상재하중 증가에 따른 침하, 활동 파괴, 측방 유동 등의 문제가 빈번히 발생하고 있다. 이에 경량기포혼합 준설토로 대체한다면 압축성이 큰 토질과 관련된 침하문제, 항만구조물 배면매립시 토압경감 문제 등을 보완할 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구는 폐기물인 수로준설 해성점토에 시멘트를 혼합하고 기포를 첨가한 경량기포혼합 준설토의 강도특성을 규명하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 준설토의 초기함수비와 시멘트 함량을 달리하여 각 배합조건에 따라 시험 시료를 제작하였고, 양생기간에 따른 단위중량의 변화를 파악 하므로써 경량기포혼합 준설토가 경량성을 유지할 수 있는지 여부와 대기상태와 수중상태로 양생한 경량기포혼합 준설토의 강도에 대한 시멘트함량과 초기함수비의 영향성을 분석하고 경량화된 지반재료로서의 가능성을 검토하였다.

2. 실험

2.1 재료의 특성

본 연구에 사용된 시료는 부산지역에서 채취한 해양 준설토로서 입도분석 결과는 그림 1과 같다. 흙의 기본적인 특성을 파악하기 위하여 KSF기준에 의해 함수비 시험, 액성한계시험, 소성한계시험, 비중 시험을 각각 5회를 실시하였고 그 결과는 표 1과 같다.

기포는 식물성기포제의 계면 활성 작용을 이용하여 물리적으로 발생시킨 것으로 기포기를 이용하여 교반전에 발포시키는 방법을 선택하였다.

표 1. 준설토의 물성시험 결과

함수비*(%)	74.5-94.1
액성한계, LL(%)	44-48
소성한계, PL(%)	24.2-23.4
소성지수, PI	21.8-24.6
비 중, Gs	2.65
# 200체 통과율(%)	91.3

* 준설토에서 채취한 교란된 해성준설토의 함수비

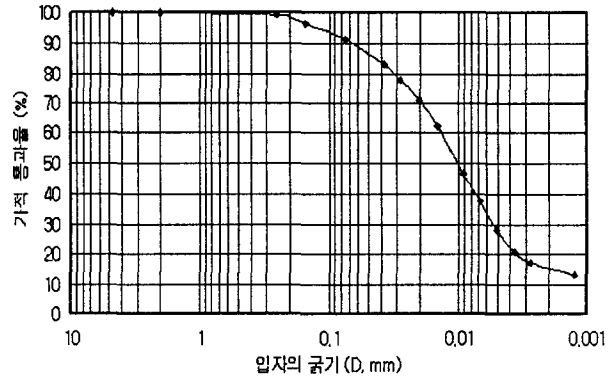


그림1. 준설토의 입도분포 곡선

3. 시험

3.1 공시체의 제작

본 실험에서 공시체는 PVC관(Φ=50, H=100)에 아크릴 판을 실리콘으로 부착한 몰드를 이용하여 제작하였다. 양생 후 몰드에서 혼합토를 분리할 때 공시체가 교란되는 것을 방지하기 위하여 공시체 몰드를 Split type을 사용하였다. 준설토의 초기함수비(Wn)는 액성한계를 기준으로 각각 101%(2.2W_L), 115%(2.5W_L), 138%(3.0W_L), 161%(3.5W_L)으로 변화시켰고 시멘트 함량(Ci)은 각 함수비를 조정된 준설토의 중량에 대해 각각 4%, 6%, 8%, 10%로 구분하여 혼합하였다. 기포의 혼합은 기포의 특성상 기포를 혼합하기 전에 체적과 무게를 측정하는 것이 어렵기 때문에 기포를 혼합한 공시체의 습윤단위중량이 1.2g/cm³가 되도록 조절하였다. 경량기포혼합 준설토를 구성하는 인자들의 배합이 공시체 내에서 균등하게 분포시키는 것이 중요하므로 비교적 균등한 상태의 배합시료를 제작하기 위해 다음과 같은 방법으로 시료를 배합하였다.

- ① 시료의 초기함수비를 맞추기 위해 준설토의 부족한 함수비는 해수를 첨가한 후 1주일 정도 방치한 상태에서 함수비를 측정하여 오차의 범위를 ±5% 이내가 되도록 조절하였다.
- ② 각 배합조건에 맞는 함수비로 조정된 시료에 시멘트를 첨가하여 충분히 혼합한 후 목표단위중량과 일치하도록 기포를 주입하였다. 공시체를 목표단위중량과 일치하지 않을 때는 기포량을 증가시켜 목표단위중량에 맞게 조정하였는데 기포는 이를 위하여 3회까지 재혼합을 실시하였고 공시체 제작과정에서 기포의 소포 및 시멘트의 경화되는 영향을 고려하여 10분 경과하면 이들 시료는 공시체 제작을 제외시켰다.

4. 시험결과 및 분석

준설토의 초기함수비 및 시멘트 함량의 변화가 경량기포혼합 준설토의 강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 준설토의 함수비와 시멘트함량을 각각 4가지 조건으로 달리하고 기포를 첨가하여 목표단위중량을 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 로 일정하게 조정된 공시체를 수중과 대기중에서 양생한 후 일축 및 비압밀비배수상태삼축압축시험을 수행하여 압축강도 거동 및 특성을 분석하였다.

4.1 양생조건에 따른 단위중량의 변화

공시체의 습윤단위중량 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 로 만든 공시체를 수중과 대기중에서 각각 3일, 7일, 14일, 28일로 양생시킨 후 측정된 습윤단위중량은 그림 2와 같다. 대기중에서 양생한 공시체는 목표단위중량 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 기준으로 양생기간이 3일때에는 2%~6%정도, 양생기간 7일때에는 2.5%~8%, 양생기간 14일때에는 14%~20%, 양생기간 28일때에는 16%~30%정도 감소하는 것으로 나타났다. 양생기간 28일 후 대기에서 양생한 공시체는 함수비 감소로 인하여 전반적으로 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 이하로 감소하는 결과를 보였다.

한편, 수중에서 양생한 공시체의 경우 양생기간 7일때에는 습윤단위중량의 변화가 거의 없었으며 양생기간 14일때에는 최대 3%까지 증가하였고 양생기간 28일때에는 최대 7%까지 증가하였으며 평균 3% 정도 증가한 것으로 나타났다. 수중에서 양생한 경우 침투에 의한 습윤단위중량의 변화는 매우 미소한 것으로 나타났다.

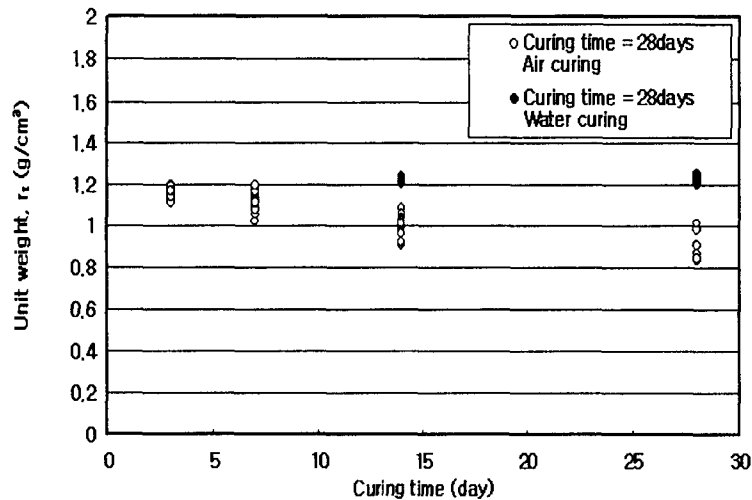


그림 2. 대기 및 수중양생일에 따른 습윤단위중량의 변화

4.2 초기함수비가 강도에 미치는 영향

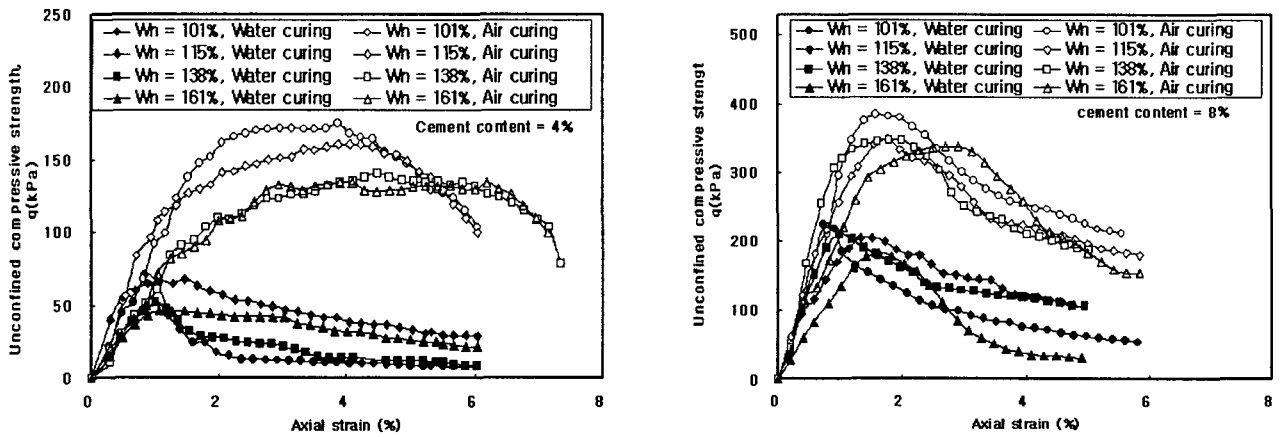
경량기포혼합 준설토에 사용되는 해성점토는 준설토에서 직접 운송하여 사용하거나 기존의 투기장에 방치되어 있는 준설토를 이용하기 때문에 초기함수비 변화에 따라 경량기포혼합 준설토의 유동성확보와 강도발현에 영향을 미칠 것으로 사료된다. 따라서 준설토의 초기함수비를 변화시켜 제작한 공시체에 대하여 일축 및 삼축압축 시험을 수행하여 초기함수비가 강도에 미치는 영향을 비교·분석하였다.

4.2.1 초기함수비 변화에 따른 응력 - 변형 거동

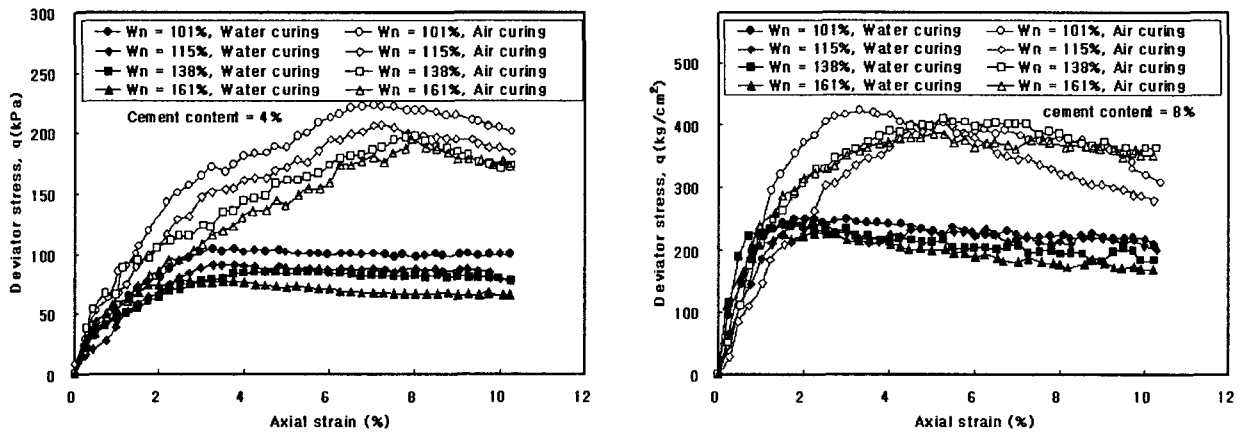
그림 3의 (a)는 시멘트함량 4%, 8%일때 초기함수비를 101%, 115%, 138%, 161%로 각각 배합하고 수

중과 대기중에서 양생한 공시체의 일축압축시험 결과인데 수중에서 양생한 경우 초기함수비 변화에 따라 변형을 0.9~1.8%에서 최대압축강도를 나타냈고 초기함수비가 증가함에 따라 최대압축강도는 감소하고 파괴시 변형율은 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 한편, 대기에서 양생한 경우 초기함수비를 증가시키면 시멘트함량이 4%인 공시체는 변형을 3.8%~5%에서 최대압축강도를 나타냈고 시멘트함량이 8%인 공시체는 변형을 1.5%~3.0%에서 최대압축강도를 나타냈다. 수중에서 양생한 공시체보다 최대압축강도는 2.5~3배정도 크게 나타났고, 파괴시 변형율은 1.5~3.5배정도 크게 나타났다. 함수비 감소하고 시멘트함량이 감소할수록 수중에서 양생한 공시체와 달리 느슨한 모래질 흙의 거동과 유사한 응력거동을 보이는 것으로 나타났다. 그림 3의 (b)는 비압밀비배수삼축압축시험 결과인데 수중에서 양생한 공시체의 경우 변형을 2.5%~3.8%에서 최대압축강도가 발생하였고 변형이 계속되어도 최대압축강도의 70%~92% 정도 일정한 잔류강도를 유지하는 것으로 나타났다. 또한, 함수비가 증가할수록 압축강도는 감소하고 파괴시 변형율이 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 대기에서 양생한 경우 변형을 7%정도에서 최대압축강도를 나타냈고 일축압축시험에서 나타난 응력-변형거동의 잔류강도를 나타내는 것은 파괴후 구속압에 의해 공시체가 조밀하게 유지되어지기 때문으로 판단된다.

양생조건과 관계없이 대기와 수중에서 양생한 공시체는 초기함수비가 증가하면 최대압축강도는 감소하고 파괴시 변형율은 증가하는 것으로 나타났고 구속압의 영향으로 인하여 파괴 이후에 계속 변형되면서 다소 완만한 응력-변형곡선을 나타내는 경향을 보이고 있다.



(a) 일축압축상태



(b) 삼축압축상태 ($\sigma_3=50\text{kPa}$)

그림 3. 초기함수비 변화에 따른 응력-변형곡선

4.2.2 초기함수비 변화에 따른 압축강도의 영향

그림 4 (a)는 시멘트 함량을 기준으로 초기함수비를 달리한 공시체의 일축압축시험 결과를 도시한 것이다. 수중에 양생한 공시체의 경우 시멘트 함량 4%인 공시체의 초기함수비를 증가시키면 압축강도는 초기함수비 101%인 공시체의 압축강도를 기준으로 각각 9%, 16%, 22%정도 압축강도가 감소하였으며, 초기함수비 증가에 따른 강도감소율은 0.58로 나타났다. 또한, 시멘트함량 6%, 8%, 10%인 공시체의 경우 초기함수비를 증가시키면 일축압축강도 감소율은 각각 0.61, 0.64, 0.7로 나타나 초기함수비가 증가함에 따라 공시체의 압축강도는 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 대기양생한 경우 공시체의 시멘트 함량을 4%, 6%, 8%, 10%로 증가함에 따라 초기함수비 증가에 의한 강도감소율은 각각 0.61, 0.68, 0.69, 0.74로 증가하였다. 그림 4 (b)는 각 시멘트함량을 기준으로 초기함수비를 증가시켰을 때 압축강도의 강도감소율을 나타낸 것이다. 초기함수비 변화에 따른 강도감소율은 시멘트함량이 증가하면서 크게 나타났고 대기중에 양생한 공시체의 강도감소율이 수중에서 양생한 경우보다 크게 나타났다. 그림 5는 삼축압축시험 결과인데 초기함수비 변화에 따른 강도감소율은 시멘트함량이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났고 대기중에 양생한 공시체의 강도감소율이 수중에서 양생한 경우보다 다소 크게 나타나 일축압축시험과 유사한 결과를 나타냈다.

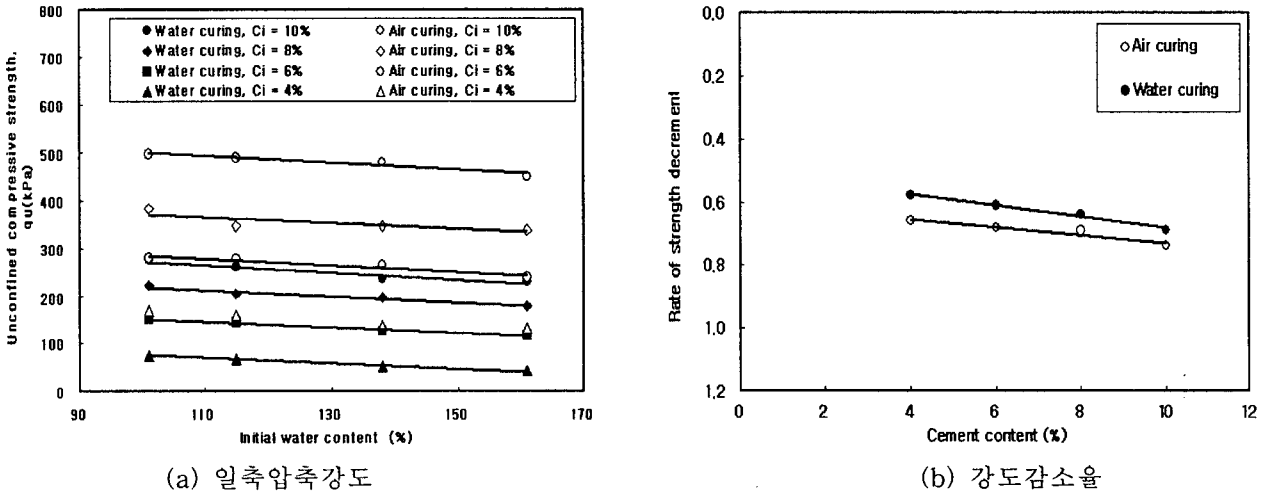


그림 4. 초기함수비에 따른 일축압축강도와 강도감소율

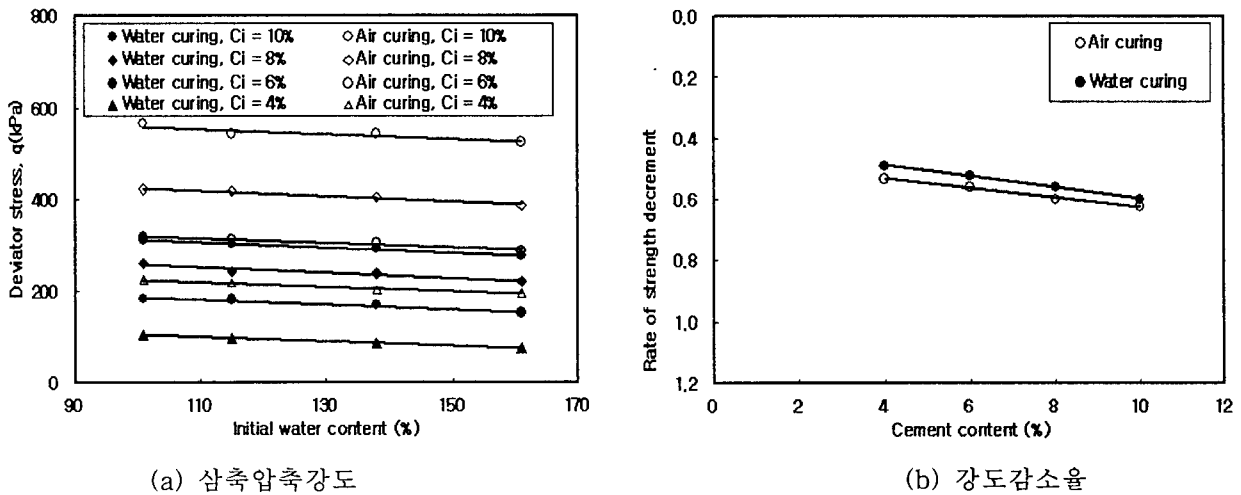
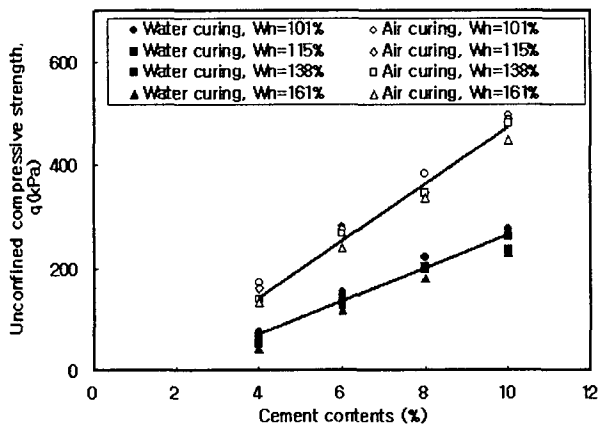


그림 5. 초기함수비에 따른 삼축압축강도와 강도감소율

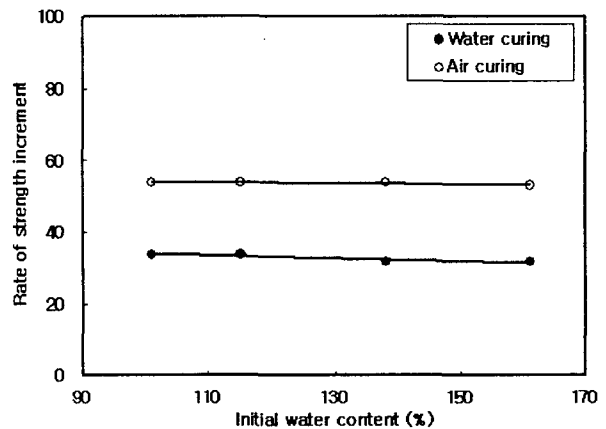
4.3 시멘트 함량이 강도에 미치는 영향

4.3.1 시멘트 함량에 따른 압축강도의 변화

그림 6은 시멘트 함량에 따른 압축강도의 영향을 고찰하기 위하여 일축압축시험을 수행한 결과이며 그림 6 (a)는 각 초기함수비를 기준으로 시멘트함량을 각각 4%, 6%, 8%, 10%로 배합하고 수중과 대기 중에서 양생한 공시체의 압축강도를 도시하였다. 수중에서 양생한 경우 초기함수비 101%인 시료에 시멘트 함량을 4%, 6%, 8%, 10%로 증가함에 따라 시멘트 함량 4%인 공시체의 최대압축강도를 기준으로 각각 100%, 193%, 263%정도 압축강도가 증가하여 강도증가율은 34로 나타났고, 초기함수비 증가에 따른 강도증가율은 32~34로 거의 변화가 없었다. 한편, 대기양생의 경우 초기함수비 101%인 공시체의 경우 시멘트함량이 증가함에 따라 압축강도는 54의 강도증가율로 나타났고 초기함수비를 증가시키면 시멘트 함량의 증가에 따른 강도증가율은 거의 변화가 없었다. 따라서 초기함수비의 변화가 압축강도에 미치는 영향은 미비한 것으로 나타났다. 그림 6 (b)는 각 초기함수비를 기준으로 시멘트함량을 증가시켰을 때 압축강도의 증가율을 나타낸 것이며 시멘트함량의 변화에 따른 강도증가율은 초기함수비 변화에 관계없이 거의 일정한 것으로 나타났고 대기중에서 강도증가율이 수중에서 양생한 경우보다 70%정도 크게 나타났다. 그림 7은 삼축압축시험을 수행한 결과이며 대체로 일축압축시험과 유사한 결과를 보이며 일축 압축시험에 비해 강도 증가율이 다소 크게 나타났고 대기중에서 강도증가율이 수중에서 양생한 경우보다 74%정도 크게 나타났다.

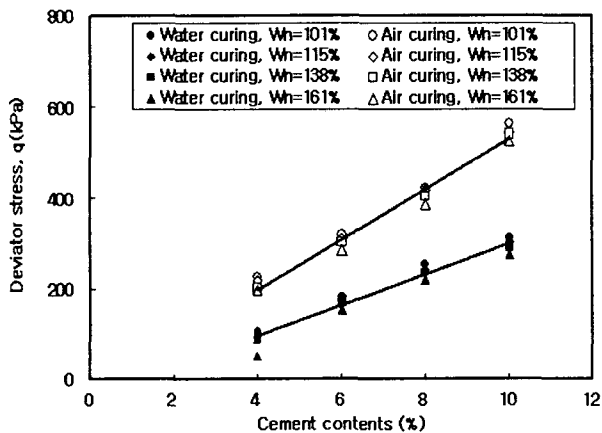


(a) 일축압축강도

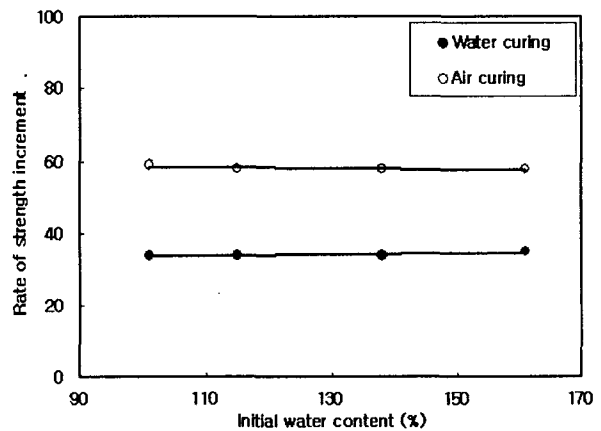


(b) 강도증가율

그림 6. 시멘트함량에 따른 일축압축강도와 강도증가율



(a) 삼축압축강도



(b) 강도증가율

그림 7. 시멘트함량에 따른 삼축압축강도와 강도증가율

4.4 경량기포혼합 준설토의 변형계수, E_{50} 와 압축강도의 관계

경량기포혼합 준설토의 압축강도와 변형계수의 관계를 일축 및 삼축압축 상태에 대하여 도시하면 그림 8와 같다.

그림 8 (a)에서 일축압축시험의 결과로서, 수중에서 양생한 경우 변형계수는 경량기포혼합 준설토의 압축강도와 $85q_u$ 의 관계를 나타내고 있으며 압축강도가 증가함에 따라 변형계수가 선형적으로 증가하고 있으며 동일한 압축강도를 갖는 공시체에 대한 변형계수는 초기함수비가 증가함에 따라 공시체의 변형계수가 작게 나타났다. 한편, 대기중에서 양생한 경우 공시체의 변형계수는 압축강도의 관계는 $81q_u$ 로 나타났고 대기에서 양생한 공시체는 수중에서 양생한 공시체의 변형계수에 비하여 다소 작게 나타났다. 그림 8 (b)에서 삼축압축시험의 결과로, 수중에서 양생한 경우 변형계수는 경량기포혼합 준설토의 삼축압축강도와 $116q_u$ 의 관계를 나타냈으며 그 분산범위가 크게 나타났다. 한편, 대기중에서 양생한 경우 변형계수는 삼축압축강도와 $73q_u$ 의 관계를 나타냈고 압축강도 5kg/cm^2 이상에서 변형계수가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 동일한 압축강도를 갖는 경량기포혼합 준설토는 수중에서 양생한 경우 대기중에서 양생한 공시체의 변형계수보다 대략 2~4배정도 큰 것으로 나타났다.

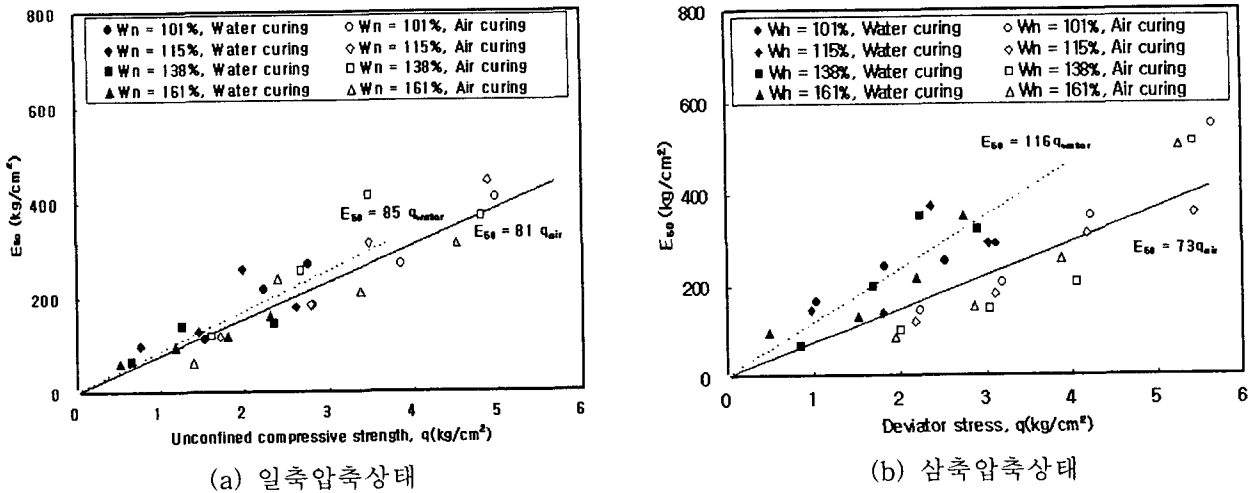


그림 8. E_{50} 과 압축강도의 관계

5. 결 론

준설토의 함수비와 시멘트함량을 달리한 경량기포혼합 준설토의 응력-변형거동과 압축강도의 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 수중에서 양생한 경량기포혼합 준설토는 양생기간 28일까지 습윤단위중량의 변화는 매우 미소하였으나 대기중에서 양생한 경우 목표단위중량의 30%정도가 감소되었다. 수중양생한 경우 침투에 의한 단위중량의 증가 없이 경량재료의 특성을 유지하는 것으로 나타났다.
- 2) 경량기포혼합 준설토를 수중에서 양생한 경우 대부분 일축 및 삼축압축강도는 최대강도를 나타낸 후 일정 잔류강도를 유지하는 연화거동을 보였으나 시멘트함량이 작은 시료의 삼축압축강도는 구속압의 영향에 의해 느슨한 모래질흙의 거동과 유사한 응력거동을 나타냈다.
- 3) 대기 및 수중에서 양생한 경량기포혼합 준설토의 압축강도는 시멘트함량이 동일한 경우에서 초기함

수비가 증가함에 따라 선형적으로 감소하는 것으로 나타났으나 초기함수비가 동일한 경우에는 시멘트함량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다. 본 연구 결과에 의하면, 경량기포혼합 준설토의 압축강도는 초기함수비보다는 시멘트함량에 크게 의존하는 것으로 나타났다.

- 4) 경량기포혼합 준설토의 일축압축시험결과 변형계수, E_{50} 은 수중양생한 경우 $85q_u$, 대기양생한 경우 $81q_u$ 의 관계로 나타났으며, 삼축압축시험 결과 수중양생한 경우 변형계수는 $116q_u$ 의 관계로 일축압축 시험에 비하여 28%정도 크게 나타났다. 이는 구속압의 영향으로 변형이 증가되면서 시료가 조밀해지며 강도가 다소 증가하였기 때문으로 판단된다.

참고문헌

1. 정성교, 광정민, 김규중, 백승훈(2001), “부산점토의 지반공학적 특성에 관한 고찰” ISSMGE ATC-7 SYM., 한국지반공학회지, pp 25~42
2. 김홍택, 방윤경(1996), “지오그리트-페 E.P.S. 조각 혼합경량토의 마찰특성” 한국지반공학회지 제 12 권 제 6호 pp 163~182
3. A. Short, W. Silicates(1978) “Light-Weight Concrete”, 3rd Ed. Applied Scirnce Publishers Ltd., London pp 1~14
4. 三木博史(1994), “혼합복합토의 이용기술”, 토목기술 제 2권 제 1호 pp 25~36
5. 横田聖哉, 三嶋信雄(1996), “기포혼합 경량토공법”, 토목기술 제 4권 제 6호 PP 45~54