

경량기포혼합토의 압축 및 강도특성 연구

Compressibility and Strength Characteristics of Light-weighted Foam Soil

윤길림¹ Yoon, Gil-Lim
김병탁² Kim, Byung-Tak

Abstract

Strength and compressibility characteristics of Light-Weighted Foam Soil (LWFS) are experimentally investigated in the paper. LWFS is composed of the dredged soils, cement and air foam to reduce unit-weight and to increase compressive strength. For these purposes, both unconfined compression tests and triaxial compression tests are carried out for artificially prepared specimens of LWFS with various initial water contents, cement contents, mixing ratio of silty dredged soils and different confining stresses. The experimental results of LWFS indicate that the stress-strain relationship and the compressive strength are strongly influenced by cement contents rather than initial water contents of the dredged soils. In this paper, the normalizing scheme considering the ratio of initial water contents, cement contents, and air foam contents has been proposed to evaluate the relationship between compressive strength of LWFS and a normalized factor.

요 지

본 논문에서는 경량기포혼합토의 압축성과 강도 특성에 대해 실험을 통하여 연구하였다. 경량기포혼합토는 재료의 경량화와 압축강도의 증가를 위해 해양준설토에 시멘트와 기포로 구성되어 있다. 이러한 목적을 위하여 초기 함수비, 시멘트 함유율, 실트질 준설토의 혼합율, 구속압조건 등의 다양한 조건에서 준비된 공시체로 일축압축시험 및 삼축압축시험을 수행하였다. 경량기포혼합토의 실험결과, 응력-변형거동과 압축강도는 준설토의 초기 함수비보다 시멘트 함유율에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한, 본 연구에서는 초기 함수비, 시멘트 함유율, 기포 함유율을 고려한 정규화계수를 제시하였으며 경량기포혼합토의 압축강도와 정규화 계수와의 유용한 관계를 얻을 수 있었다.

Keywords : Cement, Compressive strength, Dredged soil, Light-weighted foam soil

1. 서론

현재 국내에서는 부산 신항만, 울산 신항만 및 군장 신항만 등 대규모 신항만 건설이 진행되면서 이에 따른 많은 양의 해양 준설토가 발생하고 있으며 이러한 발생 준설토에 대한 많은 처리비용이 소요되고 있는 실정

이다. 국내에서 발생 준설토의 처리 방법은 준설 직후 매립지에 장기간 방치하여 건조·처리하는 형태를 취하고 있으나, 이를 위해서는 대규모의 부지를 확보하여야 할 뿐만 아니라 오염된 준설토로 인한 환경문제가 발생하고 있어 새로운 처리방안이 필요한 시점이다.

경량기포혼합토는 슬러리 상태의 기반재료에 석탄

1 정회원, 한국해양연구원 연안항만공학연구본부 책임연구원 (Member, Chief Researcher, Coastal & Harbor Engrg., Div., Korea Ocean Research & Development Institute)

2 정회원, 엘지건설(주) 토목사업본부 T/K설계팀 과장 (Member, Senior Manager, Ph.D., T/K Design Team, Civil Business Div. LG Construction & Engrg., btkim@lgenc.co.kr)

회, 고로 슬래그 등의 발생재료, 발포스티로폼(EPS), 기포제 등과 같은 경량재를 섞어 단위중량을 낮추고 시멘트계 고화재를 섞어 소요의 강도를 가지게 하는 인공재료를 의미한다. 국내에서 발포스티로폼(EPS)이나 기포제를 사용한 경량혼합토에 대한 연구는 최근 한국해양연구원(200-2003)에 와서야 본격적으로 진행되고 있다. 일부 학술적 연구사례로서 경량성토재를 활용하기 위한 기초연구의 목적으로 화강 풍화토와 페 EPS 블록조각을 혼합한 경량성토재를 대상으로 지반공학적 특성에 관련된 기본시험을 대학을 중심으로 수행한 바 있다. 그러나, 해양에서 오염해역 및 항로 준설로 인하여 매년 수천만톤의 발생 준설토를 대규모로 재활용하기 위한 방안으로써 일본에서는 1990년 활발히 진행되었으나(土田, 1996, 1999) 국내에서는 해양준설토와 기포제를 사용한 경량기포혼합토의 역학적 거동에 대한 연구는 한국해양연구원의 연구가 처음으로 시도되었다(윤길림 외 2인, 2003).

이에 본 연구에서는 새로운 건설재료 개발을 위하여 항만건설 공사시 다량으로 배출되지만 대부분 재활용되지 못하고 투기되고 있는 준설토와 기포제를 혼합하고 이를 보통 포트랜드 시멘트로 고화시켜 제작한 경량 혼합토의 압축성, 응력-변형거동 및 압축강도특성을 고찰하고자 함이 목적이다. 특히, 시멘트 함유율이 높은 경우의 경량혼합토 강도변화 특성을 고찰하였다. 준설토의 초기 함수비, 시멘트 함유율에 따른 압축성 및 역학적 거동을 정량적인 비교 분석을 하기 위하여 표준압밀시험, 일축 및 삼축압축강도시험을 수행하고 그 결과를 고찰하였다.

2. 경량혼합토의 제작과 압축강도 실험

2.1 준설토와 기포제의 특성

본 연구에서 사용된 시료는 해양 준설토로 기본 물성은 다음의 표 1과 같다. 사용된 준설토를 통일분류법에 근거하여 분류하면 CL과 SM이다. 기포제로서 이용될 수 있는 계면활성제는 형상에 관계없이 시멘트가 응결

하고 경화될 때까지 기포를 안정되게 유지하여야 한다. 양성계면활성제는 산성, 알칼리성에 관계없이 계면활성작용을 나타내므로 기포제로서 우수한 성능을 나타내고 있다. 그러나, 비이온 계면활성제는 이온성에 영향을 받지 않아 기포제로서 사용은 가능하지만 전반적으로 기포성이 약하고 슬러리 중의 기포 안전성이 불안정하여 단독으로 사용되지 않는다.

아니온 계면활성제는 기포제로서 모두 유용한 것이 아니고 한정된 종류만이 기포제로서 유용하다. 대표적인 것으로서 알킬벤젠설포산소다(ABS)로서 물에 용해하여 교반하면 비교적 안정된 기포를 얻을 수 있다. 다른 기포제로서는 카본산계가 있는데 비누로 대표되는 것으로 매우 안정하고 점성이 높은 세립기포가 발생하지만 슬러리 중에서는 불안정한 특성을 갖고 있다. 사용된 기포제는 환경친화적인 측면을 고려하여 식물성 계면활성제를 사용하였다. 그리고, 균질한 기포의 생성을 위하여 자체제작한 발포장치를 사용하여 물과 기포제의 비율을 1:20으로 섞은후 공기압이 2~3 kg/cm²하에 발포시킨 기포를 사용하였다. 이러한 조건에서 발포된 기포의 평균 단위중량은 0.047 g/cm³으로 나타났다.

2.2 경량기포혼합토의 배합

다양한 배합조건으로 제작된 경량혼합토의 특성을 규명하고자 준설토의 초기 함수비(ω_n), 시멘트 함유율(C_i), 기포의 함유율(A_s), B준설토의 혼합율(M_i)의 각 요소들의 조건을 달리하여 배합 설계치를 산정하고 이에 따라 경량혼합토를 제작하였다. 이때 경량혼합토의 목표단위중량은 1.2 g/cm³이며 초기함수비, 시멘트 함유율, 기포 함유율, 그리고 B준설토의 혼합율은 A준설토에 대한 중량 백분율로 산정하였다.

2.3 경량기포혼합토의 양생 및 실내실험

본 연구를 위한 실내 시험에서 기포가 포함된 경량기포혼합토를 제작하는 데는 PVC몰드를 사용하였다. 경량기포혼합토의 제작과정을 간략히 서술하면 다음과

표 1. 사용한 준설토의 물성값

준설토	비중	액성한계(%)	소성한계(%)	소성지수(%)	균등계수	곡률계수	통일분류법
A 준설토	2.61	40.3	22.4	17.9	11.05	1.60	CL
B 준설토	2.65	NP	NP	NP	3.55	2.07	SM

표 2. 연구에서 수행한 다양한 실내실험조건

실험조건	표준압밀실험	일축압축실험	삼축압축실험
준설토 초기 함수비, ω_n (%)	125, 150, 200	125, 150, 200	125, 150, 200
시멘트 함유율, C_i (%)	6, 12	6, 9, 12, 18	6, 9, 12, 18
기포함유율, A_r (%)	0.9, 1.3, 1.5	0.9, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6	0.9, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6
B준설토 혼합율, M_r (%)	-	25%, 50%, 75%	25%, 50%, 75%
구속압, σ_c (kPa)	-	-	50, 100, 200, 400
양생기간, T_c (day)	28	28	28

같다. 먼저 표준압밀 시험을 위하여 직경 6.5 cm, 높이 15 cm인 PVC 몰드를 제작한다. 그 다음에 일축압축강도 및 삼축압축강도 시험을 위한 직경 5 cm, 높이 12 cm의 PVC 몰드를 준비하고 몰드하부를 가로, 세로 10 cm인 아크릴판으로 밀봉하였다. 그리고, 각각의 배합 설계치에 따른 준설토와 시멘트를 혼합한 다음, 발포장치로 생성시킨 기포를 섞어 배합장치 내에서 바로 PVC 몰드로 직접 주입을 하였다. 제작된 공시체는 3일간 항온항습상태(20±2℃, 60%습도)에서 양생된 후 25일간 수중(20±2℃)에서 양생과정을 거쳤다. 본 논문에서 수행한 실내시험 내용을 요약하면 표 2와 같다. 표준압밀실험과 삼축압축실험의 경우에는 동일한 초기 함수비와 시멘트 함유율에 대해서 기포가 포함되지 않은 시료를 만들어 기포로 인한 압축성과 역학적 거동의 상대적인 변화를 파악하고자 비교연구를 하였다. 일축압축시험의 경우에는 2.5%/min의 속도로 실험하였으며 삼축압축시험의 경우에는 0.3%/min의 속도로 축변형을 제어하였다. 삼축압축시험의 경우에, 비압밀-비배수 조건하에서 토조의 구속압(σ_c)을 50kPa, 100kPa, 200kPa, 400kPa로 증가하며 실험하였다. 참고로 경량시료의 포화과정은 생략하였다. 그 이유는 경량기포혼합토내의 기포를 경량화에 필요한 하나의 재료로 보았으므로 강제로 공시체를 포화시켰을 경우 기포로 인한 혼합토의 영향을 현

재의 기술로는 파악할 수 없기 때문이다. 이러한 기포가 경량혼합토에 미치는 영향을 규명하는 일은 향후 연구의 중요한 주제로 파악된다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 경량혼합토의 압축특성

기포를 혼합한 경량기포혼합토의 혼합재 비율이 압축특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 우선, 표준압밀시험을 수행하였다. 그림 1은 준설토의 초기 함수비가 125%일 때 시멘트 함유율이 각각 6%, 12%일 때의 압밀현상을 재현한 모습이다. 그림 2는 시멘트 함유율이 12%일 때 초기 함수비가 각각 125%, 150%, 200%로 증가할 경우의 e-logp곡선을 각각 보여주고 있다. 경량기포혼합토에 대한 표준압밀실험의 결과는 표 3에 정리하였다.

표 3에서 알 수 있듯이 초기함수비의 증가에 따라서 경량기포혼합토의 압축지수는 증가하나 선행압밀하중은 반대로 감소하는 현상을 보여주고 있다. 그러나, 팽창지수의 경우는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그림 1과 2에서와 보는 바와 같이, 준설토의 동일 함수비 조건에서 시멘트 함유율이 증가할수록 cement bonding 효

표 3. 실험조건에 대한 경량기포혼합토의 압축지수와 선행압밀하중

초기함수비, ω_n (%)	시멘트 함유율, C_i (%)	압축지수, C_c	팽창지수, C_s	선행압밀하중, P_c (kPa)
125	6(무기포)	0.141	0.033	101
	6	0.692	0.042	80
	12(무기포)	0.116	0.033	640
	12	0.240	0.049	470
150	12(무기포)	0.223	0.041	440
	12	0.279	0.047	320
200	12(무기포)	0.274	0.052	220
	12	0.284	0.056	190

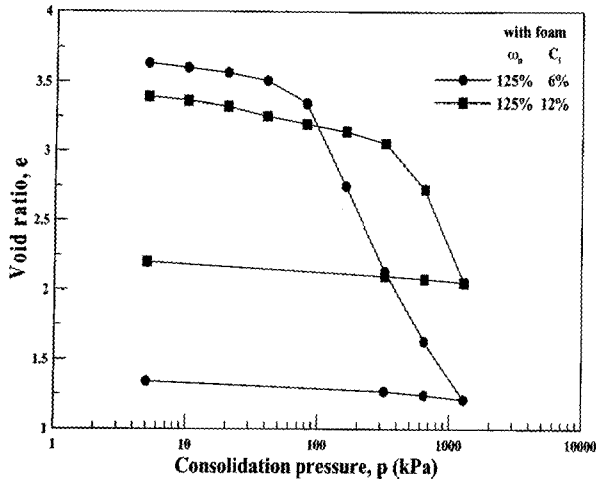


그림 1. 시멘트 함유율에 따른 압축특성

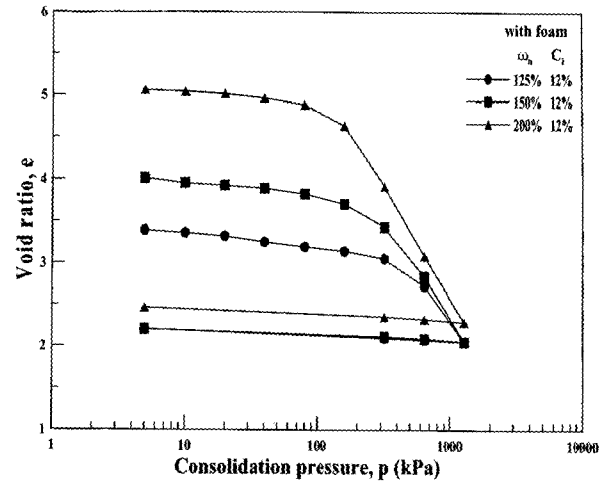


그림 2. 초기 함수비에 따른 압축특성

파괴에 의하여 경량혼합토의 압축성이 크게 감소한다. 또한 동일한 시멘트 함유율 조건에서 준설토의 초기 함수비가 증가함에 따라서 간극비의 변화는 없는 것으로 나타났다. 즉, 준설토 함수비가 125%와 150%의 경우에 압밀압력이 12.8kg/cm^2 일 때, 경량기포혼합토의 간극비가 거의 동일한 것으로 나타났다. 결과적으로, 시멘트 함유율의 변화가 상대적으로 초기 함수비보다는 압축성과 선행압밀하중에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.2 경량기포혼합토의 응력-변형 거동

경량기포혼합토의 응력-변형에 대한 거동 특성을 고찰하기 위하여 경량기포혼합토의 구성요소인 시멘트 함유율, 초기 함수비, 기포함유율에 따른 응력-변형 거

동을 분석하였다. 그림 3은 기본적인 일축압축강도 및 삼축압축강도 실험에 대한 응력-변형 거동특성을 파악하기 위한 실험결과이다. 준설토의 초기 함수비가 125%이고 시멘트 함유율이 12%일 경우에 일축압축 및 삼축압축상태($\sigma_c = 100\text{kPa}$)일 때의 응력-변형 거동을 나타낸다. 경량기포혼합토의 압축변형율이 증가함에 따라 삼축압축상태에서의 응력-변형 거동은 급격한 기울기로 증가하는 모습을 보이고 있다. 이는 일축압축상태에 비하여 초기 구속압의 제하에 따른 기포주위의 cement 골격구조의 손상으로 완만한 초기 응력-변형 거동으로서 경량기포혼합토가 파괴에 이른 후 변형연화(strain softening)현상을 나타내고 있다. 그러나, 일축상태에서는 압축변형이 증가함에 따라 압축강도가 축 변형을 1% 이내에서 명확한 극한값을 보여주고 파괴 후에는 취성 파괴의 양상을 나타내었다.

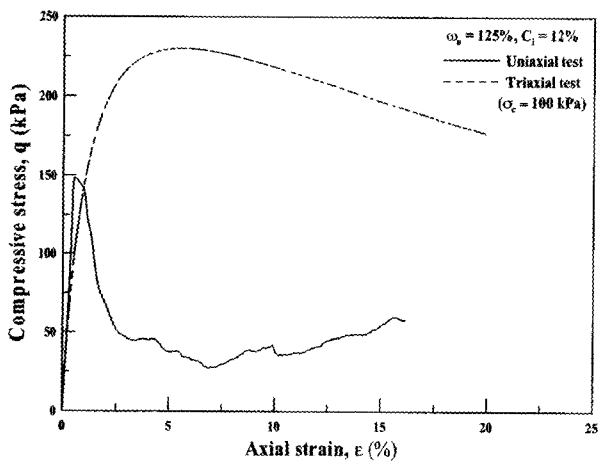


그림 3. 일축 및 삼축압축상태에서의 응력-변형

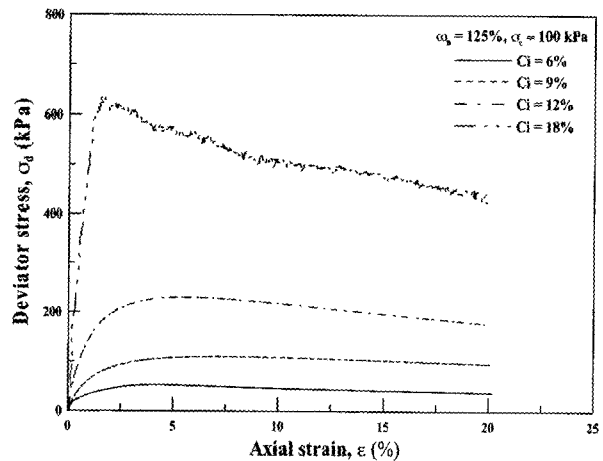


그림 4. 시멘트 함유율에 따른 응력-변형

3.2.1 시멘트 함유율의 영향

경량기포혼합토는 골재의 경량화를 위해서 혼합한 기포로 인하여 압축강도의 감소가 예상되므로 이를 보완하기 위하여 고화재인 시멘트의 혼합이 필요하다. 시멘트의 혼합량을 많이 사용하는 것은 압축강도 측면에서 유리할 수가 있지만, 경량기포혼합토의 경제성을 확보하기 위해서는 고화재의 양을 최대한 줄이면서 소요 강도를 얻을 수 있는 것이 중요하다. 따라서 경량기포혼합토의 소요 압축강도에 필요한 적정 시멘트 함유율의 결정은 경량기포혼합토의 실용화 측면에서 매우 중요한 부분이라 할 수 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 시멘트 함유율에 따른 응력-변형 거동을 고찰하였는데, 그 실험결과는 그림 4와 같다. 그림 4는 준설토의 초기 함수비가 125%일 때에 시멘트 함유율을 6%에서 18%로 증가시키면서 구속압 조건을 100kPa로 하여 삼축압축 실험을 수행한 결과이다.

그림 4에서 제시하는 내요은 시멘트 함유율이 12%이상일 때 응력-변형곡선은 고 시멘트 함유율로 인하여 공시체의 파괴 축변형율까지 압축응력의 증가는 매우 급격히 발생하고 파괴 후의 압축응력은 완만하게 감소하고 있다. 상대적으로 낮은 시멘트 함유율일수록 압축강도의 증가는 완만하게 증가하고 있다. 그리고, 시멘트 함유율이 9%일 때의 파괴시 압축변형율은 6%인 경우보다 약 1.7배 증가하여 나타났으며 시멘트 함유율이 18%일 때의 파괴시 압축변형율은 12%인 경우보다 압축강도가 약 30% 감소하였다. 전반적으로 시멘트 함유율의 증가에 대하여 파괴 축변형율은 감소하는 것으로 나타났는데 이는 고 시멘트 함유율일수록 기포보다는

시멘트가 응력-변형거동에 지배적인 영향을 미치기 때문이라 판단된다.

3.2.2 초기 함수비의 영향

현장에서 발생하는 준설토의 자연 함수비는 매우 큰 상태로 존재한다. 그러므로 준설현장에서 준설된 토사를 즉시 사용하여 경량기포혼합토를 제작하기에는 어려움이 따른다. 따라서, 소요강도의 경량기포혼합토 제작에 필요한 적정 함수비를 결정하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 이에 본 논문에서는 초기 함수비의 변화에 따른 경량혼합토의 응력-변형거동을 고찰하기 위하여 준설토의 함수비로 액성한계의 3.1, 3.5, 5.0배에 해당하는 초기 함수비를 갖는 준설토를 이용하여 배합하였다.

그림 5는 시멘트 함유율이 12%일 때 초기 함수비를 125%~200%로 변화시키면서 구속압 조건을 100 kPa로 하여 삼축압축실험을 수행한 결과이다. 경량기포혼합토는 고함수비로 갈수록 초기 탄성영역의 기울기는 감소한다. 특히, 초기 함수비가 200%일 때는 파괴 후 축변형율의 증가에 따른 압축응력의 변화가 상대적으로 매우 완만하게 나타났다. 이는 고함수비에서는 양생 후에도 잔존하는 고함수비에 따른 cement bonding 효과의 감소와 액성 상태에 기인하는 것으로 판단된다.

3.2.3 기포함유율의 영향

경량성을 유지하기 위해서 첨가된 기포가 경량혼합토의 응력-변형 거동에 미치는 영향을 고찰하였다. 준설토의 초기 함수비가 125%, 시멘트 함유율이 6%와 12%

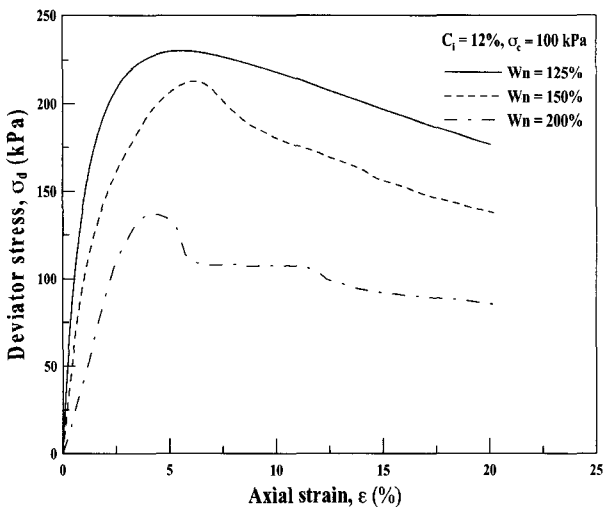


그림 5. 초기 함수비에 따른 응력-변형거동

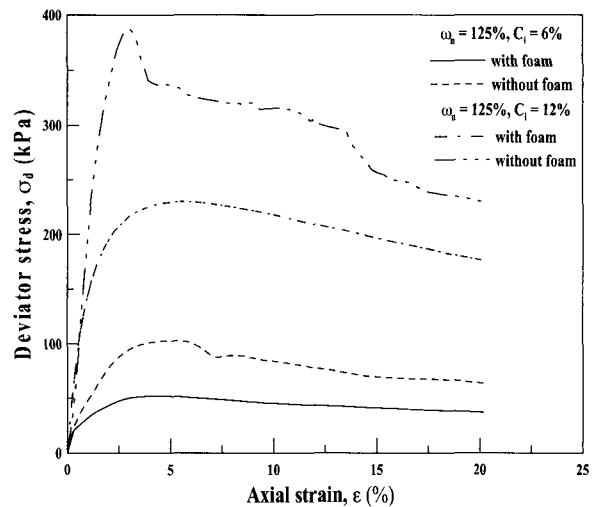


그림 6. 기포함유에 따른 응력-변형거동

일 경우, 각각 기포가 첨가된 경우와 기포가 포함되지 않은 무기포 시료에 대한 삼축압축강도 실험 결과를 그림 6에 도시하였다. 이때의 구속압 조건은 모두 100 kPa이다. 그림 6에서 알 수 있는 것은 시멘트 함유율이 6%인 경우 기포의 첨가로 인한 압축 강도의 감소율은 약 50%이며, 시멘트 함유율이 12%인 경우에는 약 60%의 압축 강도감소율을 보인다. 기포가 포함된 경우와 포함되지 않은 경우 모두가 파괴 후 변형 연화현상이 나타나고 있다. 무기포의 경우에는 파괴 후 혼합토의 갑작스러운 구조적 재배열로 인하여 압축응력이 급격히 감소하지만, 기포가 포함된 경량혼합토의 경우 축변형의 발생에 따른 기포공간으로의 혼합토가 지속적으로 이동함에 따라 파괴 후 압축응력의 급격한 감소는 나타나지 않는 것으로 판단된다. 따라서, 경량기포혼합토에 첨가된 기포로 인해 압축강도의 감소와 더불어 파괴후 잔류응력의 거동에도 상당한 영향을 미친다고 볼 수 있다.

3.3 압축강도특성

시멘트 함유율에 따른 압축강도 특성을 고찰하고자

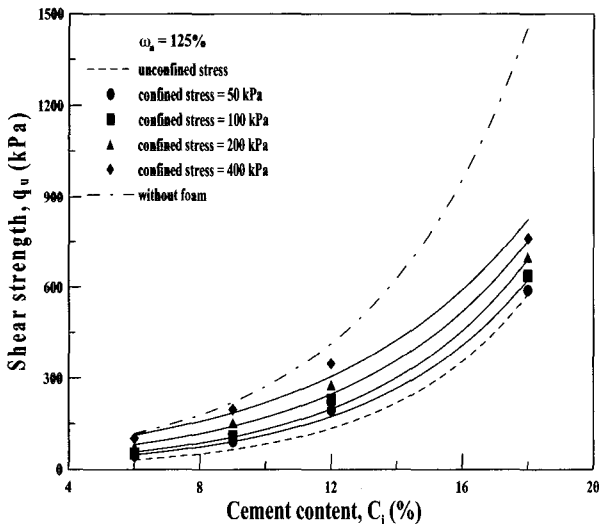


그림 7. 시멘트 함유율에 따른 압축강도 특성

초기 함수비가 125%인 경우에 일축압축실험과 구속압 조건을 50kPa~400kPa로 증가시켜 삼축압축실험을 수행하였다. 그리고, 기포가 포함되지 않은 무기포시료에 대해서도 구속압 100kPa의 조건으로 삼축압축실험을 실시하였으며 그림 7은 시멘트 함유율에 따른 압축강도의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 경량혼합토의 경우, 압축강도는 시멘트 함유율의 증가에 비선형적으로 증가하고 있으며, 무기포 시료의 경우 고시멘트비로 갈수록 기포가 포함된 시료와의 압축강도의 차이가 점차 증가하는 것으로 나타났다. 이는 고시멘트 함유율로 갈수록 압축강도가 시멘트의 고결력(bonding) 보다는 기포에 의한 영향에 의해 지배적인 영향을 받기 때문이라 판단된다. 표 4는 시멘트 함유율과 압축강도와의 관계를 회귀분석을 통하여 실험식을 제시한 것이다. 초기 함수비에 따른 압축강도 특성을 고찰하고자 시멘트 함유율이 12%일 때 구속압 50kPa~400kPa의 조건으로 삼축압축실험을 수행하였다. 그림 8은 초기 함수비의 변화에 따른 압축강도의 변화를 보여주고 있다. 초기 함수비가 증가함에 따라 압축강도는 비선형적으로 감소하며 구속압이 증가할수록 초기 함수비

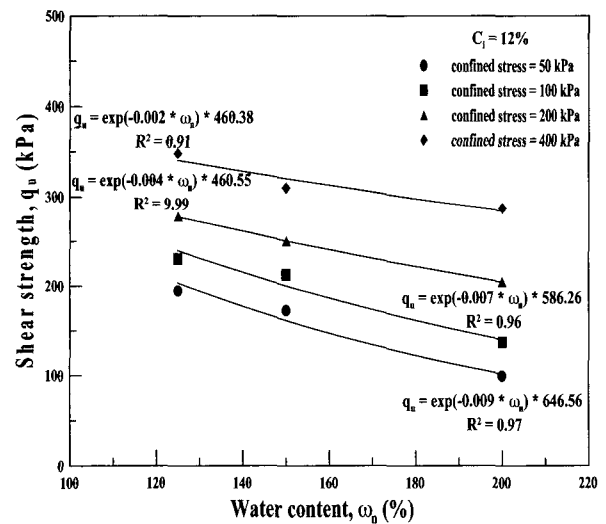


그림 8. 초기 함수비에 따른 압축강도 특성

표 4. 시멘트 함유율과 압축강도와의 관계

구속압 (kPa)	시멘트 함유율(C _i)와 압축강도(q _u)의 회귀분석식	결정계수(R ²)
0(일축)	$q_u = \exp(0.24 \times C_i) \times 7.43$	0.98
50	$q_u = \exp(0.21 \times C_i) \times 13.49$	0.99
100	$q_u = \exp(0.21 \times C_i) \times 16.51$	0.99
100(무기포)	$q_u = \exp(0.21 \times C_i) \times 33.58$	0.98
200	$q_u = \exp(0.19 \times C_i) \times 26.83$	0.99
400	$q_u = \exp(0.17 \times C_i) \times 42.14$	0.98

의 증가에 따른 압축강도의 감소율은 감소하는 것으로 나타났다.

3.4 실트질 준설토 혼합물의 영향

실트질 준설토 함유율에 따른 응력-변형거동 및 압축 특성을 고찰하기 위하여 A준설토에 대한 중량비로 B준설토의 혼합율을 25%, 50%, 75%인 경우에 구속압을 100kPa와 400kPa로 삼축압축시험을 수행하였다.

그림 9는 초기 함수비 125%, 시멘트 함유율 12%, 구속압 조건이 100kPa일 때 실트혼합율이 25%~75%로 증가시켰을 경우에 응력-변형거동을 나타내고 있다. 실트혼합율이 증가할수록 초기 탄성부의 기울기는 증가하는 것으로 나타났다. 그리고, 실트질 준설토가 포함되

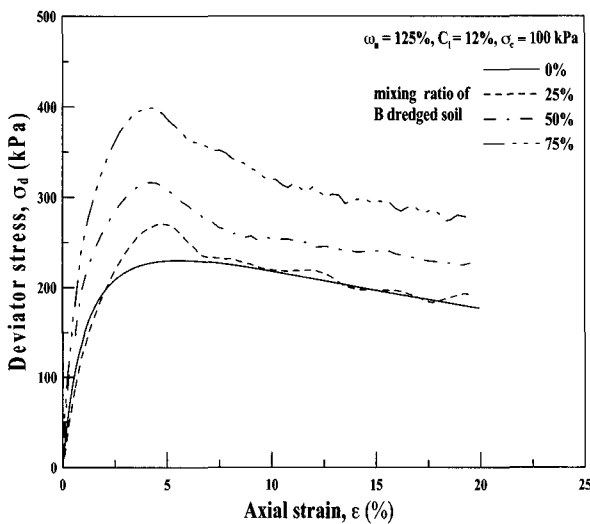


그림 9. 실트질 혼합율에 따른 응력-변형거동

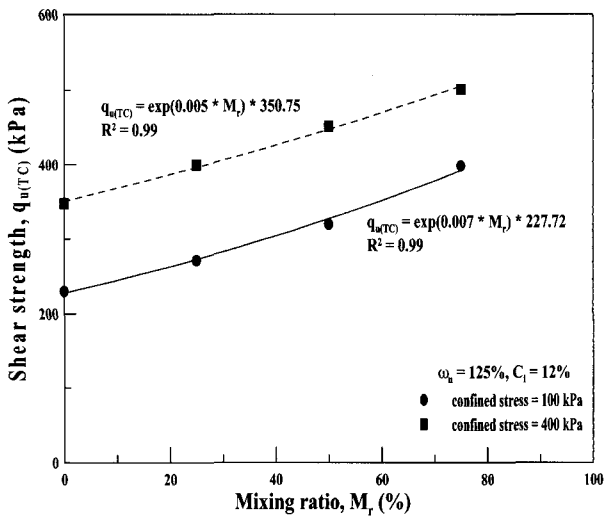


그림 10. 실트질 혼합율에 따른 압축특성

지 않은 경우와 비교할 때 비교적 명확한 파괴점을 나타내며 일반적인 사질토의 응력-변형거동과 유사한 거동을 보이는데 이는 혼합된 실트질 준설토로 인한 입자의 구조적인 변화에서 기인하는 것으로 판단된다. 그림 10은 초기 함수비 125%, 시멘트 함유율 12%, 구속압 조건이 100kPa, 400kPa일 때 실트함유율에 따른 압축특성을 나타내고 있다. 실트질 준설토의 혼합율이 증가할수록 압축강도는 비선형적으로 증가하고 있으며 회귀분석을 통한 실험식도 나타내고 있다. 그리고, 실트질 준설토가 75%혼합된 시료는 실트질 준설토가 포함되지 않은 시료에 비해 압축강도가 구속압이 100kPa인 경우에는 약 73.1%, 구속압이 400kPa인 경우에는 약 44.1%의 증가를 보이고 있다.

3.5 변형계수 (E_{50})와 압축강도의 관계

본 논문에서 실험한 결과, 경량기포혼합토의 삼축압축 상태에서의 압축강도와 변형계수(E_{50})관계를 나타내면 그림 11과 같다. 그림에서 변형계수는 압축강도의 18~120배 정도의 범위를 가지는 것으로 나타났다. 시멘트 함유율이 18%인 경우는 다른 조건과는 상당한 차이를 보이고 있어 변형계수와 압축강도와의 적정 범위를 제시하기가 어려운 것으로 나타났다. 이는 삼축압축시험시 비배수의 조건하에서 수행되었지만 실질적으로는 내부의 기포로 인해 체적 변형이 발생하게 되는데 이로 인해 전단시 파괴 축변형율이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 시멘트 함유율이 18%인 경우에는 시멘트 고결력의

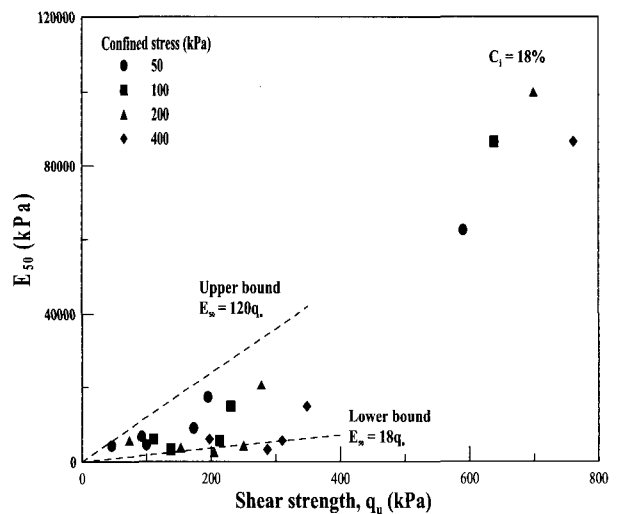


그림 11. 변형계수 (E_{50})와 압축강도의 관계

지배적인 영향으로 인하여 기포의 체적 변형을 억제함으로써 작은 축변형율의 변화에서 큰 압축강도를 나타내기 때문에 상대적으로 큰 변형계수를 나타낸다고 사료된다. 土田(1996, 1999)에 의하면, 기포를 혼합한 경량혼합토에서 변형계수는 압축강도의 40~240배 정도라고 제시한 바가 있다. 그에 의한 연구는 시멘트 함유율이 5%~6%, 사용한 준설토의 실트질 성분이 약 77%정도로 많이 함유되어 있는 경우의 결과이다. 그러나 본 연구에서는 시멘트 함유율이 크고 사용한 준설토의 대부분이 점토성분으로 이루어져 있기 때문에 상대적으로 작은 기울기를 가지는 것으로 판단된다.

3.6 정규화계수와 압축강도의 관계

본 논문에서 수행된 경량기포혼합토는 기존의 강도 증진을 위해 적용되고 있는 시멘트 혼합토와는 달리 압축성의 기포를 함유하고 있어 배합조건에 따른 압축강도, 점착력, 내부마찰각과 같은 지반재료 정수의 추정 어렵다고 할 수 있다. 본 연구에서는 앞서 경량혼합토의 구성요소들과 압축강도와의 관계와 그 거동에 대해 검토한 바를 개괄적인 정리하면 그림 12와 같다. 그림에서와 같이 압축강도는 시멘트 함유율에 비선형적으로 증가하며 초기함수비와 기포 함유율은 비선형적으로 감소하는 기본적인 양상을 보여 주고 있다. 이와 같이, 경량혼합토의 압축강도는 구성요소 모두에 의존하여 압축강도를 발현하고 있어 임의의 배합조건에 따른 압축강도의 크기를 추정하는 것은 복잡하다고 할 수 있다. 따라서, 이들 경량혼합토의 구성요소들을 모두 포함하는 정규화계수(Normalized Factor, NF)를 적용한다면, 구성요소에 따른 압축강도의 변화를 추정할 수 있을 것

이며 구성요소들에 의한 다양한 배합조건비에 상응하는 압축강도와 같은 지반재료의 정수를 쉽게 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

이에 경량혼합토의 구성요소인 초기 함수비, 시멘트 함유율, 기포함유율을 중량비로써 고려한 정규화계수(NF[®])를 식 (1)과 같이 제시하고자 한다. 그리고, 그림 13은 본 연구에서 수행된 모든 배합비에 대한 일축 및 삼축압축실험으로부터 얻어진 압축강도와 제시한 식 (1)에 의해 계산된 정규화계수와의 관계를 나타내고 있다. 당 연구결과에 관하여 2003년 8월 현재, 경량혼합토의 배합과정과 관련기술이 한국 및 일본에 특허출원(no. 2003-92965) 신청된 내용임을 밝힌다. 당 기술을 설계나 시공을 목적으로 사용하는 경우에는 반드시 저자와의 사전협의가 요구되는 기술 내용임을 표시한다(윤길림 외 2인, 2003).

$$NF = \frac{\omega_n \times A_r}{C_i} \quad (1)$$

여기서, NF[®] : 정규화계수(Normalized Factor),

ω_n : 초기함수의 중량비,

A_r : 기포의 중량비,

C_i : 시멘트의 중량비이다.

그림 13에서는 정규화계수와 압축강도가 매우 유용한 관계를 나타내고 있으며 정규화계수의 증가에 대하여 비선형적으로 압축강도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 관계는 일축압축상태에서도 유효하며 삼축압축 상태에서는 구속압의 크기에 따라 상한계($\sigma_c = 400\text{kPa}$)와 하한계($\sigma_c = 50\text{kPa}$)를 갖는 것으로 고찰되었다.

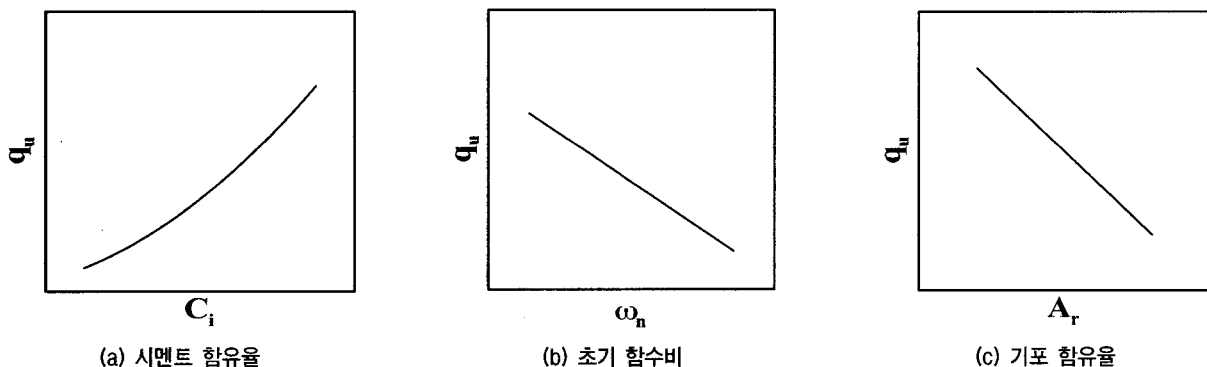


그림 12. 경량기포혼합토의 구성요소와 압축강도의 관계

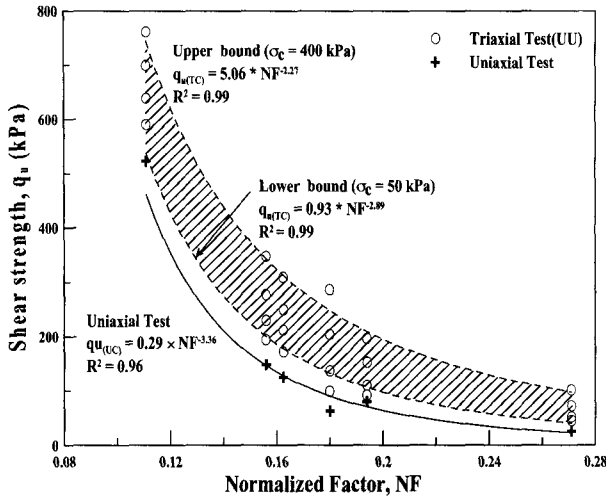


그림 13. 정규화계수(NF)와 압축강도의 관계

4. 결론

본 논문에서 준설토와 시멘트, 그리고 기포를 혼합한 경량혼합토를 다양한 배합조건으로 실험하여 이에 대한 압축성과 응력-변형거동 및 압축강도특성을 분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 동일 함수비에서 시멘트 함유율이 증가할수록 cement bonding 효과에 의하여 경량혼합토의 압축성이 매우 감소하였으며, 압축성과 선행압밀하중은 초기 함수비보다 시멘트 함유율의 변화에 더 의존하였다.
- (2) 경량혼합토의 응력-변형거동은 시멘트 함유율이 증가할수록 파괴시 축변형이 감소하며 파괴후 압축응력이 완만하게 감소하는 변형연화현상을 전반적으로 나타내며, 고함수비에서는 cement bonding 효과의 감소와 액성상태로 인하여 파괴후 응력-변형곡선이 매우 완만하게 나타났다.
- (3) 압축강도는 시멘트 함유율의 증가에 비선형적으로 증가하며 초기 함수비의 증가에 비선형적으로 감소하였다. 시멘트 함유율이 증가함에 따라 무기포의 경우와 경량혼합토의 경우에 대한 압축강도의 차가 급격하게 증가하고 있는데, 이는 고 시멘트 함유율

에서는 경량혼합토의 압축강도가 기포의 유무에 의존하는 결과를 보여주고 있다.

- (4) 실트질 준설토 혼합율이 증가할 경우 경량혼합토의 응력-변형거동은 초기탄성부의 기울기가 증가하는 것으로 나타났으며 이는 실트질 준설토의 혼합으로 인한 혼합토 입자의 구조적인 변화에서 기인하는 것으로 보인다. 또한, 압축강도는 실트질 준설토의 혼합율에 따라 비선형적으로 증가하였다.
- (5) 본 연구에서 제시한 정규화계수와 압축강도가 매우 유용한 관계를 나타내고 있으며 정규화계수의 증가에 대하여 비선형적으로 압축강도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 관계는 일축압축상태에서도 유효하며 삼축압축상태에서는 구속압의 크기에 따라 상한계($\sigma_c=400\text{kPa}$)와 하한계($\sigma_c=50\text{kPa}$)를 갖는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 해양수산부 지원 국책과제로서 한국해양연구원 연안항만공학연구본부에서 2000년도부터 2003년도까지 수행한 “준설토 재활용 방안 연구”의 일부임을 밝히며, 당 연구가 가능하도록 재정적 지원해주신 해양수산부 기술안전과장님과 담당자에게 사의를 표합니다.

참고 문헌

1. 윤길림, 김병탁 (2000, 2001, 2002, 2003), 준설토 재활용 방안 연구(I), 한국해양연구원 연차 연구보고서, 해양수산부.
2. 윤길림, 유승경, 김병탁 (2003), “연약지반개량을 위한 경량기포 혼합토의 역학특성”, 대한토목학회, 가을학술논문발표회 지반분야, pp.242.
3. 윤길림, 김병탁, 유승경 (2003), “경량기포혼합토 배합공법 및 지반개량, 수중양생 시뮬레이션 시스템”, 한국 및 일본 특허출원서, 특허출원 제 2003-92965호, 특허청.
4. 土田 (1996), 港灣空港事業における軽量混合處理上工法の開發と適用事例. 運輸省港灣技術研究所.
5. 土田 (1999), 建設發生上を 活用した軽量混合處理土の空港事業への適用, 運輸省港灣技術研究所.

(접수일자 2002. 12. 26, 심사완료일 2004. 2. 24)