

## 준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적 특성 연구

### Mechanical Characteristics of Light-weighted Foam Soil Consisting of Dredged Soils

김 주 철\*<sup>1</sup> Kim, Zu-Cheol

이 종 규\*<sup>2</sup> Lee, Chong-Kyu

#### Abstract

The mechanical characteristics of Light-Weighted Foam Soil(LWFS) are investigated in this research. LWFS is composed of the dredged soil from offshore, cement and foam to reduce the unit-weight and increase compressive strength. For this purpose, the unconfined compression tests and triaxial compression tests are carried out on the prepared specimens of LWFS with various conditions such as initial water contents, cement contents, curing conditions and confining stresses. The test results of LWFS indicated that the stress-strain relationship and the compressive strength are strongly influenced by the cement contents rather than the initial water contents of the dredged soils. On the other hand, the stress-strain relationship from triaxial compression test has shown strain-softening behavior regardless of curing conditions. The stress-strain behavior for the various confining stress exhibited remarkable change at the boundary where the confining stress approached to the unconfined compression strength of LWFS. In order to obtain the ground improvement of the compressive strength above 200kPa, the required LWFS mixing ratio is found to be 100%~160% of the initial water contents of dredged soil and 6.6% of cement contents.

#### 요 지

본 논문은 경량기포혼합토(LWFS)의 역학적 특성에 대하여 연구하였다. 경량기포혼합토는 단위중량의 감소와 압축강도의 증가를 위하여 연안준설토, 고화제 및 기포를 혼합하여 제작되었다. 초기함수비, 고화제 함유율, 양생조건 및 구속압 등 다양한 조건으로 경량기포혼합토를 제작하여 일축 및 삼축압축시험을 실시하였다. 경량기포혼합토의 실험결과는 동일한 단위중량일 경우 응력-변형 거동과 압축강도는 준설토의 초기함수비보다 고화제 함유율에 더 영향을 받는 것으로 나타났다. 한편 삼축압축시험에서 응력-변형 관계는 양생조건에 관계없이 변형-연화거동을 나타내었다. 구속압에 따른 응력-변형 거동은 경량기포혼합토의 일축압축강도와 근접한 구속압을 경계로 다르게 변화하는 것으로 나타났다. 압축강도 200kPa 이상으로 지반개량을 하기 위해 요구되는 경량기포혼합토의 배합비는 준설토의 초기함수비 100%~160%와 고화제 함유율 6.6%로 나타났다.

**Keywords :** Cement contents, Compressive strength, Dredged soils, Initial water contents, Light-weighted foam soil

\*1 정희원, 삼성물산 건설부문 토목기술팀 과장 (Member, Manager, Civil Technology Team, Samsung Engr. & Construction, zc.kim@samsung.com)

\*2 정희원, 단국대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engr., Dankook Univ.)

# 1. 서론

산업시설의 확충과 항만, 택지개발 등과 같은 기반시설의 신설 및 확장은 토지의 가용면적증대와 매립 및 성토시 양질의 지반재료에 대한 수요 증가를 필요로 한다. 부산 신항만 건설공사, 광양만 개발공사, 군산항 건설공사 및 서해안 고속도로 공사 등 최근 국책사업이 활발히 진행되어 매립, 성토재료로서 막대한 토사를 사용하고 있지만 환경보존의 중요성등을 감안하면 대량의 육상토나 해사를 사용하는 것은 매우 어려울 뿐 아니라 상당한 비용이 소요되고 있는 실정이다.

한편, 연간 항로준설과 연안준설로 인해 대량으로 발생하는 해양준설토는 준설직후 대부분 외해에 투기하거나 또는 투기장에 장기간 방치하여 건조·처리하는 상황이며, 이를 위해서는 대규모 부지확보, 처리비용부담 및 주변환경오염이 발생하는 등 많은 문제점이 제기되고 있다.

해양준설토를 건설자원으로서 재활용하는 방안을 적극 검토하는 것은 매우 시급한 실정이지만 국내에서는 최근에 와서야 연구가 진행중이나, 선진국에서는 이미 해양환경보호라는 측면에서 해양준설토의 재활용에 대한 필요성을 절감하여 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

해양준설토를 재활용하는 방법은 여러 측면에서 고려할 수 있으나 경량기포혼합토로 만들어 그 효용성을 증대시킨다면 매우 유용한 처리 방안이 될 것이다. 그 이유는 기존의 연약지반상에서 일반적인 토사를 항만 매립 및 안벽의 뒷채움 재료로 사용하는 경우 지반내 응력증가에 따른 침하, 활동 파괴, 측방 유동 등의 문제가 빈번히 발생하고 있는바 이 경량기포혼합토로 대체한다면 압축성이 큰 토질과 관련된 침하문제, 항만구조물 배면매립시 토압경감 문제 등을 보완할 수 있을 것으로 예상된다(土田, 1996a).

국내에서는 김홍택과 방윤경(1996)에 의하여 폐 EPS 조각을 혼합한 경량성토재를 대상으로 토질공학적 특성에 관련된 시험을 수행하였고, 홍상기(2000)는 해성

점토와 EPS를 혼합한 경량혼합토의 강도특성에 관한 실험적 연구를 실행한 바 있으나 기포제를 이용한 경량혼합토에 대한 연구는 국내에서 수행되지 않은 것으로 나타났다(김용수, 1995).

본 연구는 위와 같은 사실에 근거하여 해양준설토를 새로운 건설재료로 사용하기 위하여 고화제(시멘트)를 혼합하고, 경량화를 위하여 기포를 첨가한 경량기포혼합토의 응력-변형거동과 압축강도특성을 구명하기 위해 수행되었다. 이를 위하여 해양준설토의 초기함수비, 고화제 함유량, 양생조건 그리고 구속압을 달리한 삼축 압축시험을 수행하였다. 아울러 구속압에 따른 영향을 파악하기 위하여 일축압축시험을 함께 수행하였다. 이러한 시험결과들의 정량적인 비교 분석을 통하여 지반재료로서 경량기포혼합토의 역학적 특성을 구명하려는 것이 본 연구의 목적이다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 준설토의 물리적 특성

본 연구에 사용된 시료는 부산 신항만 건설지역에서 채취한 해양준설토로서 입도분석 결과는 그림 1과 같다. 흙의 기본적인 특성을 파악하기 위하여 KSF기준에 의해 함수비시험, 액성한계시험, 소성한계시험, 비중시

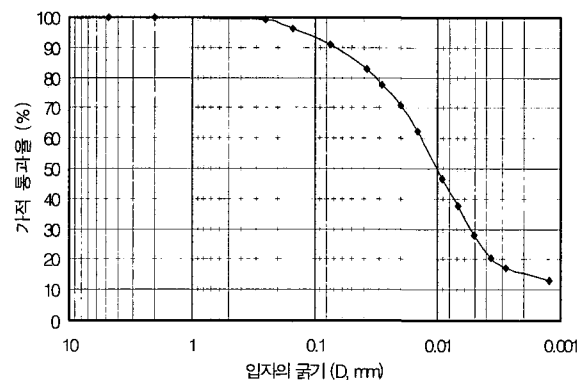


그림 1. 준설토의 입도분포 곡선

표 1. 준설토의 물성시험 결과

함수비(%)	액성한계 LL(%)	소성한계 PL(%)	소성지수 PI	비중 G <sub>s</sub>	#200체 통과량(%)
74.5-94.1 (132.5*)	44-48 (44.5*)	23.4-24.2 (23.6*)	21.8-24.6 (21*)	2.65 (2.661*)	91.3 (93*)

\*본 연구에서 사용된 해양준설토 시료와 비교하기 위한 자료로 전라남도 남해안지역에서 채취한 시료의 물성치

험을 각각 5회를 실시하였는데 그 결과는 표 1과 같다. 사용된 해양준설토를 통일분류법으로 분류하면 CL에 속한다. 표 1에 제시된 함수비는 준설선에서 채취한 준설토로서 교란된 해성점토에서 얻은 함수비를 나타낸 것이다(정철호, 1998; 정성교 등, 2001).

### 2.1.1 기포제

기포제는 동물성, 식물성, 합성유계 등이 있으며 계면활성 작용을 이용하여 물리적으로 기포를 도입하는 것으로 본 실험에서는 환경친화적인 식물성 기포제를 사용하였다. 기포를 발생시키는 방법은 기포기를 이용하여 물리적으로 공기압을 가해 사전에 발포를 시키는 방법과 발포제를 시료에 혼합시켜 수화반응에 의해 가스를 발생시키는 방법 등이 있다. 기포제는 경량성과 유동성을 확보하기 위해서 기포를 내부에 균일하게 분산시키는 것이 중요하므로 온도의 영향을 크게 받는 발포제를 혼합시키는 방법은 거의 사용하지 않는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서는 혼합토에 균일하게 기포가 분포할 수 있도록 기포기를 이용하여 사전에 발포시키는 방법을 적용하였다.

### 2.1.2 고화제(시멘트)

본 연구에서 사용한 고화제는 일반적으로 사용하는 보통 포틀랜드(Portland) 시멘트(1종 시멘트)를 사용하였다. 시멘트의 화학성분은 표 3과 같다.

## 2.2 실험 방법

### 2.2.1 공시체의 준비

본 실험에서는 직경 50mm, 높이 100mm의 공시체를 제작하였다. 준설토의 초기함수비는 액성한계를 기준으로

로 각각 100%(2.2W<sub>L</sub>), 120%(2.6W<sub>L</sub>), 140%(3.0W<sub>L</sub>) 및 160%(3.5W<sub>L</sub>)으로 변화시켰고, 고화제 함유율은 각 함수비를 조정된 준설토의 중량에 대해 각각 4%, 6%, 8%, 10%로 달리하여 배합하였다. 기포의 배합은 기포의 특성상 기포를 혼합하기 전에 기포의 소포로 인하여 체적과 무게를 측정하는 것이 불가능하기 때문에 기포를 배합한 후 공시체의 습윤단위중량이 1.2g/cm<sup>3</sup>가 되도록 조절하였다. 초기함수비와 고화제 함유율은 단위체적당 무게로 환산하여 배합할 수 있으나 기포의 경우는 시료 체적에 대한 비율로 배합하였으며, 기포의 함유율은 13.0%~19.9%까지이다. 경량기포혼합토를 구성하는 인자들을 공시체 내에서 균등하게 분포시키는 것이 중요하기 때문에 비교적 균등한 상태의 배합시료를 제작하기 위해 다음과 같은 방법으로 시료를 배합하였다(土田, 1999).

- ① 현장에서 채취한 준설토의 초기함수비가 100%이하이므로 혼합토 제작조건과 일치하는 함수비를 맞추기 위해 해수를 첨가한 후 1주일 정도 방치한 상태에서 함수비를 측정하고 오차의 범위를 ±3% 이내가 되도록 조절하였다.
- ② 각 배합조건에 맞는 함수비로 조정된 시료에 고화제를 첨가하여 충분히 혼합한 후 목표단위중량과 일치하도록 기포를 주입하였다. 공시체가 목표단위중량과 일치하지 않을 때는 기포량을 증가시켜 목표단위중량에 맞게 조정하였는데 기포의 재혼합은 3회로 제한하여 실시하였고, 공시체 제작과정에서 기포의 소포 및 고화제의 경화되는 영향을 고려하여 10분이 경과하면 이들 시료는 공시체 제작을 제외시켰다.

공시체 몰드는 PVC관(φ=50mm, H=110mm)과 아크릴 판을 이용하여 실리콘으로 부착시켜 제작하였고, 몰드 내면은 혼합토가 양생되면서 부착되는 것을 방지하기 위하여 그리스(grease)를 도포하였으며, 양생 후 몰드에서 혼합토를 분리할 때 공시체가 교란되는 것을 방지하기 위하여 분리형 몰드를 사용하였다. 대기양생 후 공시체 내부 실물사진은 사진 1과 같다.

표 2. 기포제의 특성(경일 기포(주), 2000)

구분	비중	PH (4℃)	비누화값	침전값	염분농도
식물성 기포제	1.03	7.1	5.30	0	1.7%
동물성 기포제	1.2	7.0	210	10	4.2%

표 3. 1종 포틀랜드시멘트의 화학성분

구분	화학성분(%)										합(%)
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	F-CaO	Ig-Loss	K <sub>2</sub> O	
1종 C/M	20.86	5.67	2.74	62.52	3.36	0.14	2.34	0.51	1.32	1.05	100

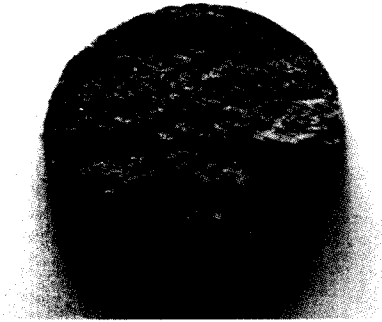


사진 1. 경량기포혼합토 내부

### 2.2.2 시험 방법

배합조건에 맞는 공시체의 양생조건을 수중과 대기 중으로 구분하여 28일간 양생하였으며, 양생한 경량기포혼합토는 1.0%/min의 속도로 일축압축시험을 수행하였다. 그리고 구속압에 따른 경량기포혼합토의 압축강도의 변화특성을 고찰하기 위해 일축압축시험의 경우와 동일한 배합 및 양생조건으로 구속압( $\sigma_c$ )을 50kPa, 100kPa, 200kPa 및 300kPa로 증가시키면서 비압밀-비배수(UU)조건의 삼축압축시험을 수행하였다.

경량기포혼합토의 배합시 기포를 제외하고 혼합토 간극 내 공기의 혼입을 최대한 억제하기 위하여 주의 깊은 혼합을 수행하였으며, 또한 공기가 제거된 물(de-aired water)을 사용하였다. 장기간(28일, 56일, 112일)에 걸쳐 수중에 방치한 혼합토 시료의 함수비와 습윤단위중량의 변화를 관찰한 결과, 습윤단위중량은 1%~3%의 변화를 보이는 것으로 나타났다. 이들 결과로부터 혼합토의 구성성분으로 간주한 기포내의 포화 가능성과 장기적으로 물과 접촉하는 경우 혼합토의 물 흡수성 및 팽창성 여의 무시할 수 있을 정도로 판단된다. 이는 혼

표 4. 실내실험 조건표

시험 조건	일축압축시험	삼축압축시험
준설토 초기함수비, $w_n$ (%)	100, 120, 140, 160	100, 120, 140, 160
시멘트 함유율, $C_i$ (%)	4, 6, 8, 10	4, 6, 8, 10
습윤단위중량, $\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	1.20	1.20
구속압, $\sigma_c$ (kPa)	-	50, 100, 200, 300
양생기간, $T_c$ (days)	28	28

합토내에 존재하는 기포가 혼합토로부터 방출되지 않는 이상 제거되기 어렵기 때문에 사료된다.

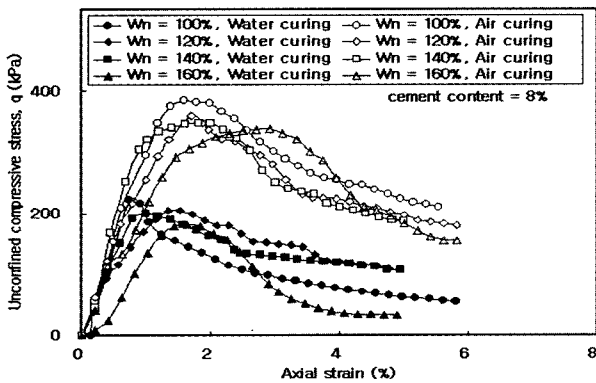
본 연구에서 이러한 특징을 고려하여 삼축압축시험 시 시료의 포화를 위한 강제 배압은 가하지 않고 수중양생된 시료를 그대로 사용하였다. 삼축압축시험에 사용한 경량기포혼합토의 포화도는 기포를 혼합토의 구성성분으로 간주하고 실험전 함수비, 비중 및 단위중량에 근거하여 계산한 결과, 대부분 시료에서 90%~95% 정도로 얻어졌다. 하중재하방식은 변형제어방식으로 0.3%/min의 속도로 축차응력을 재하하였다. 본 연구에서 수행한 실내실험 조건을 요약하면 표 4와 같다.

## 3. 시험결과 및 분석

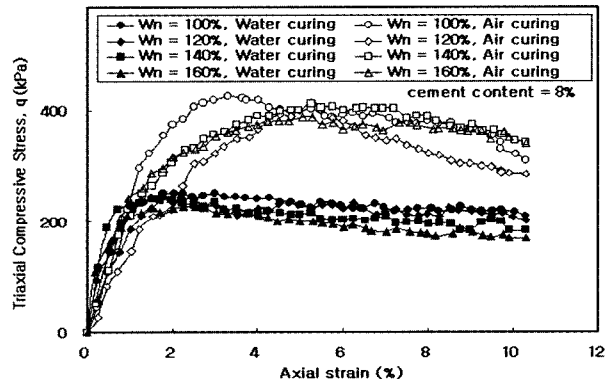
### 3.1 경량기포혼합토의 거동 분석

#### 1) 초기함수비( $w_n$ ) 영향

해양준설토는 준설당시 자연함수비가 매우 큰 상태로 존재하므로 현장에 직접 사용하기에는 여러 가지 어려움이 따른다. 따라서 적정 배합 함수비를 결정하는 것이 무엇보다도 중요하다. 이에 본 연구는 준설토의 초기함수비 조건을 4가지로 달리하여 경량기포혼합토를 제작하고, 초기함수비( $w_n$ )에 따른 응력-변형 거동을 고찰하였다.



(a) 일축압축시험



(b) 삼축압축시험( $\sigma_c=50$ kPa)

그림 2. 초기함수비에 따른 응력-변형곡선( $C_i = 8\%$ )

고화제 함유율을 8%로 고정하고, 초기함수비 조건을 100%~160%로 증가시킬 경우 일축 및 삼축압축시험의 응력-변형 거동을 그림 2에 도시하였다.

초기함수비에 따른 일축압축시험의 응력-변형 거동은 수중 및 대기양생의 경우 초기함수비가 증가함에 따라 파괴시 변형율은 증가하고, 최대압축강도는 감소하는 것으로 나타났다. 특히 수중양생의 경우에서 고함수비( $w_n=160\%$ )의 시료에 대한 응력-변형거동은 다른 함수비를 갖는 시료와 달리 초기 거동곡선은 매우 완만히 나타내고 있다. 모든 함수비 조건에서 파괴시 변형율 이후의 압축강도가 급격히 감소하였으며, 이러한 현상은 파괴시 전단면 영역에서 기포의 골격이 파괴되면서 혼합토의 구조적인 변화와 관련된 것으로 사료된다.

삼축압축상태( $\sigma_c=50kPa$ )에서의 응력-변형 거동은 수중 및 대기양생의 경우 초기함수비가 증가함에 따라 파괴시 변형율은 증가하며, 최대압축강도는 미소하게 감소하는 것으로 나타났으며, 파괴시 변형율 이후의 압축강도는 아주 완만하게 감소하여 일정하게 잔류 압축응력을 나타내고 있다. 수중양생시 변형율 10%에서의 잔류 압축강도는 최대압축강도의 75%~86%의 범위를 나타냈다.

일축압축시험에서 나타난 응력-변형 거동과 달리 삼축압축시험에서 파괴후 잔류강도를 나타내는 것은 파괴가 진행되면서 구속압 또는 혼합토내의 기포골격의 순차적인 파괴에 의한 영향인 것으로 판단된다.

## 2) 고화제 함유율에 따른 영향

해양준설토는 압축강도가 아주 작기 때문에 경량기포혼합토를 제작할 경우 강도를 증가시키기 위하여 고화제(시멘트)가 필요하다. 따라서 경량기포혼합토의 구

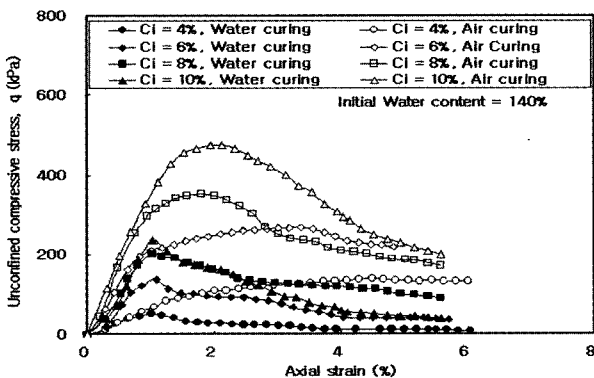
성성분인 고화제 함유율에 따른 응력-변형 거동을 고찰하였다.

초기함수비가 140%인 준설토에 고화제 함유율을 4%~10%까지 증가시켜 혼합한 시료에 대하여 양생방법에 따라 일축 및 삼축압축시험의 응력-변형 거동을 그림 3에 도시하였다.

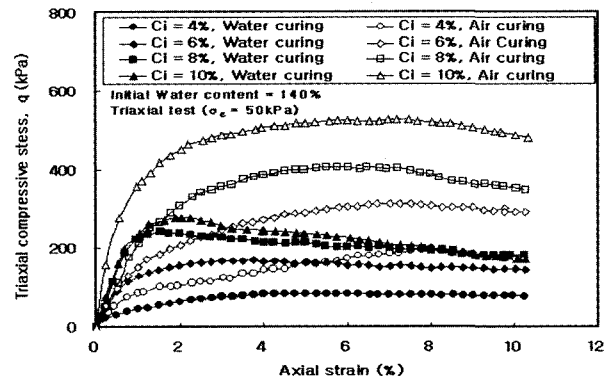
일축압축시험에서 양생조건에 관계없이 고화제 함유율이 증가할수록 응력-변형곡선은 취성파괴와 유사한 파괴시 변형율 초과후 압축강도가 감소하는 현상을 나타내었으나, 대기양생한 경우 고화제 함유율 6%이하의 압축강도의 완만한 증가에 따라 변형율이 증가하는 경향을 나타내었다. 수중양생인 경우 파괴시 변형율의 분포는 1%정도이고, 대기양생인 경우 파괴시 변형율의 분포는 2.0%~4.5%로 넓게 분포하는 것을 알수 있었다. 또한 수중양생인 경우 낮은 변형율(0.3%이하의 변형율)에서는 초기탄성계수가 작게 나타나는 거동을 보이지만 대기양생인 경우에는 고결체(고강도) 변형거동특성을 보인다. 이러한 현상은 혼합토내 함수비 감소에 기인하는 것으로 판단된다. 한편 삼축압축시험에서 경량기포혼합토는 고화제 함유율이 증가함에 따라 파괴시 변형율은 감소하는 경향을 보이고 있으며, 고화제 함유율이 클수록 파괴시 변형율 후의 변형율 증가에 따라 압축응력이 완만하게 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 변형율 10%일 때 잔류강도는 최대압축강도의 62%~93%를 유지하였다. 고화제 함유율 6%이하인 경우는 파괴시 변형율이 뚜렷하지 않은 상태로 변형율이 증가함에 따라 일정한 잔류응력을 유지하는 것으로 나타났다.

## 3) 구속압 조건에 따른 영향

삼축압축상태에서 응력-변형 거동에 관한 구속압의



(a) 일축압축시험



(b) 삼축압축시험( $\sigma_c=50kPa$ )

그림 3. 고화제 함유율에 따른 응력-변형곡선

영향을 고찰하기 위하여 준설토 초기함수비를 160%로 하고, 고화제 함유율을 4%와 10%로 한 경우의 시험결과는 그림 4와 같다. 또한 구속압의 영향을 알기 위하여 구속압이 가해지지 않는 일축압축시험 결과를 함께 도시하였으며, 공시체는 수중양생한 경량기포혼합토이다.

구속압 증가에 따른 응력-변형 거동은 고화제 함유율이 4%로 작은 경우 변형율 2%이하의 낮은 변형율 영역에서는 구속압의 영향이 거의 없는 것으로 나타났으나, 고화제 함유율이 10%로 큰 경우 구속압이 100kPa일 때를 경계로 낮은 변형율 영역에서는 축차응력의 증가가 매우 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 응력-변형 거동은 축변형율 5%이내에서 구속압이 증가함에 따라 축차응력에 대한 축변형율이 크게 발생하며, 전체적으로 높은 구속압에서 완만한 응력-변형 거동 곡선을 보여주고 있다. 이는 같은 배합조건에 해당하는 혼합토의 일축압축응력-변형 거동과 무관하지 않음을 알 수가 있다. 즉 고화제 함유율이 4%인 경우, 일축압축강도가 약 50kPa로서 구속압이 일축압축강도와 동일한 조건에서의 응력-변형곡선은 동일 축차응력에 대한 변형율이 일축압축상태의 경우보다 작게 나타나며, 고화제 함유율이 10%인 경우에는 일축압축강도가 약 230kPa로서 구속압이 일축압축강도 보다 낮은 50kPa과 100kPa 조건에서 축차응력에 대한 변형율이 일축압축상태의 경우보다 작게 나타났다. 이러한 현상이 일어나는 이유는 삼축압축 응력상태에서 일축압축강도와 유사하거나 적은 구속압에서는 축차응력에 대한 경량기포혼합토의 초기 변형율은 일축압축상태의 응력-변형 특성에 영향을 받기 때문에 사료된다. 즉, 일축압축강도보다 낮은 구속압의 상태에서는 등방의 구속압에 추가적으로 가하여

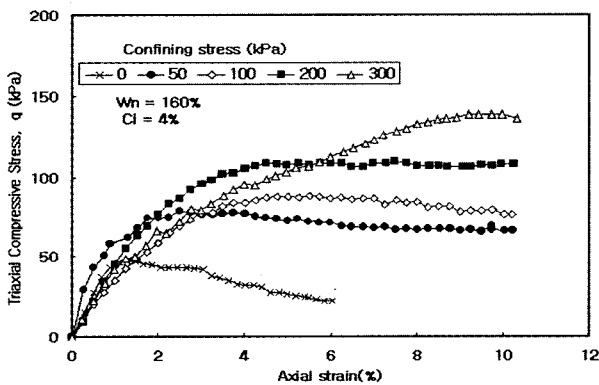
지는 축차응력이 일축압축강도보다 작은 응력상태에서는 변형율이 적게 나타나지만, 일축압축강도를 초과하는 축방향 전응력상태에서는 혼합토내 기포의 골격붕괴가 진행되며, 파괴에 이르는 것으로 판단된다. 이와같은 구속압의 영향은 초기함수비에 관계없이 같은 경향을 나타내고 있다.

#### 4) 구속압 조건에 따른 파괴시 변형을 분석

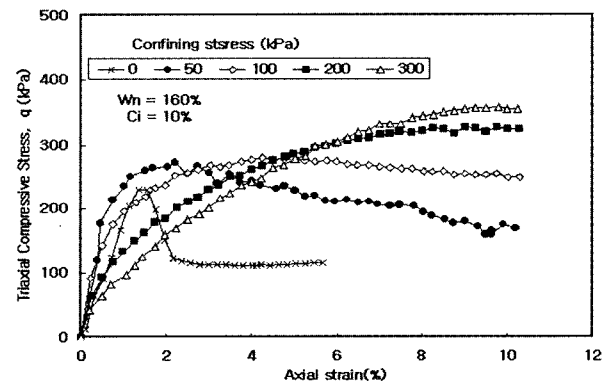
구속압 조건에 따른 파괴시 변형율을 고찰하기 위하여 초기함수비를 변화시키고, 고화제 함유율을 변화시켜 모든 구속압조건에 대하여 실험을 실시하고, 그 결과는 그림 5와 같다.

구속압이 200kPa 미만인 경우는 초기함수비가 클수록, 고화제 함유율이 적을수록 파괴시 변형율이 크게 나타나고 있으며, 선형적으로 파괴시 변형율이 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 구속압이 작은 응력구간에서 파괴시 변형율도 작게 나타나며 파괴시 변형율의 범위도 0.6%~5.4%정도이다. 구속압이 200kPa을 초과한 경우에는 전반적으로 초기함수비가 크고, 고화제 함유율이 클수록 파괴시 변형율이 크게 나타났다. 또한 구속압 증가에 따른 파괴시 변형량의 증가는 거의 없는 것으로 나타났다. 구속압이 큰 응력구간에서는 파괴시 변형율도 크게 나타나며, 파괴시 변형율의 범위도 3.0%~10%로 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

구속압 200kPa을 경계로 고화제 함유율에 대한 영향이 반대로 나타나는 것은 그림 5에서 나타나는 거동과 같이 경량기포혼합토에 존재하는 기포의 골격변화에 따른 영향으로 사료된다.



(a) ci=4%, Wi=160%



(b) ci=10%, Wi=160%

그림 4. 구속압 조건에 따른 응력-변형곡선

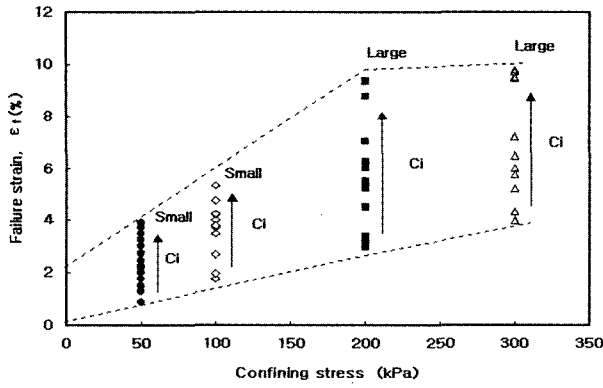


그림 5. 구속압 조건에 따른 파괴시 변형을

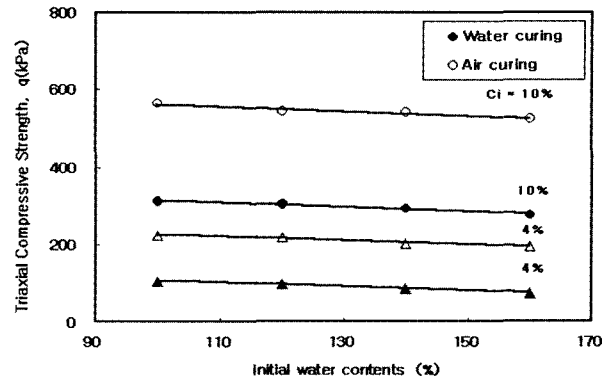


그림 6. 초기함수비에 따른 삼축압축강도 특성

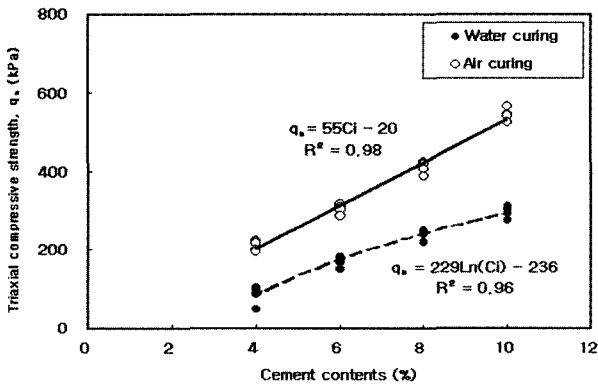


그림 7. 고화제 함유율에 따른 삼축압축강도 특성

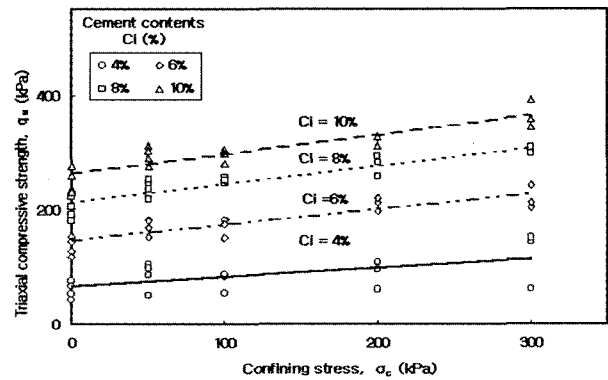


그림 8. 구속압 영향에 따른 압축강도특성

### 3.2 경량기포혼합토의 압축강도 특성분석

#### 1) 초기함수비 영향에 따른 압축강도특성

준설토 초기함수비에 따른 압축강도의 특성을 파악하기 위하여 준설토의 함수비를 100%~160%로 변화시키고, 고화제 함유율을 4%와 10%로 혼합한 경량기포혼합토에 대하여 일축 및 삼축압축시험을 실시하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다.

초기함수비에 따른 압축강도는 양생방법에 무관하게 초기함수비가 증가할수록 압축강도는 감소하는 거동은 일축 및 삼축압축시험에 관계없이 동일하게 나타났다. 한편 초기함수비 증가에 따른 압축강도의 감소를 초기함수비에 대한 압축강도 감소의 비로 나타내면, 일축압축시험은 평균 0.63~0.69이며, 삼축압축시험은 평균 0.54~0.58로 비교적 작게 나타났다. 삼축압축상태에서의 초기함수비에 대한 압축강도 감소의 비는 일축압축상태의 경우보다 약 15% 작은 값으로서 초기함수비의 영향에 대한 압축강도는 일축압축상태보다 삼축압축상태에서 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 또한 초기함수비에 대한 압축강도 감소의 비는 양생방법에

따라서는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

#### 2) 고화제 함유율에 따른 압축강도의 영향

고화제 함유율에 따른 압축강도의 영향을 일축 및 삼축압축시험에 대하여 양생조건에 따라 구분하여 그림 7에 나타내었다.

경량기포혼합토의 고화제 함유율에 따른 압축강도의 영향은 일축 및 삼축압축시험에서 동일한 결과를 나타냈으며, 초기함수비에 무관하게 도시할 수 있었다. 고화제 함유율의 증가에 대하여 대기양생의 경량기포혼합토는 압축강도가 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 수중양생의 경우 압축강도가 고화제 함유율의 증가에 따라 비선형적인 증가를 보이고 있으며, 고화제 함유율 10%이상에서 압축강도의 증가는 완만하게 나타날 것으로 추정된다.

실험결과에 근거하여 고화제 함유율( $C_i$ )과 압축강도( $q_u$ ) 관계를 회귀분석하여 실험식을 대기양생의 경우 선형함수인  $q_u = 55 C_i - 20$ 와 수중양생의 경우 지수함수인  $q_u = 229 \ln(C_i) - 236$ 로 제시할 수 있었으며, 실험식의 결정계수( $R^2$ )는 모두 0.95이상으로 얻어졌다.

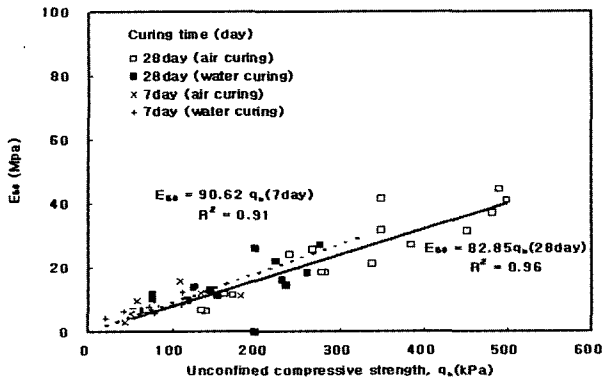


그림 9. 일축압축상태의 압축강도와 할선 탄성계수의 관계

경량기포혼합토의 목표 압축강도를 200kPa (20t/m<sup>2</sup>)로 설정하고, 적정배합비를 구속압이 50kPa인 연구결과들에 근거하여 추정한다면, 초기함수비는 양생방법에 무관하게 100%~160% 정도이고, 고화제 함유율은 수중양생과 대기양생의 경우 6.6%와 4%로 제시할 수가 있다.

### 3) 구속압·영향에 따른 압축강도특성

삼축압축상태에서 구속압과 압축강도의 관계를 고찰하기 위하여 구속압을 일축압축상태로부터 300kPa까지 증가함에 따른 압축강도의 변화를 초기함수비와 고화제 함유율에 대하여 도시하면 그림 8과 같다.

경량기포혼합토의 단위중량 1.2g/cm<sup>3</sup>인 조건에서 삼축압축상태의 구속압과 압축강도의 관계는 초기함수비보다 고화제 함유율에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 고화제 함유율별 압축강도의 변화는 구속압의 증가에 따라 비례적으로 증가하는 것을 알수 있었다.

구속압과 압축강도의 관계에서 초기함수비의 영향이 고화제 함유율의 영향에 비하여 상대적으로 적으므로, 압축강도를 고화제 함유율(C<sub>i</sub>)과 구속압(σ<sub>c</sub>)의 변수로 표현하면 다음과 같이 제안할 수 있으며, 결정계수(R<sup>2</sup>)는 0.7이다. 식 (1)의 적용범위는 고화제 함유율 4%에서 10%까지 이다.

$$q_{u(\text{triaxial})} = \frac{C_i}{100} (33 + 0.4 \sigma_c) - 0.6 \quad (1)$$

여기서, C<sub>i</sub>의 단위는 퍼센트이고 σ<sub>c</sub>의 단위는 kPa이다.

### 3.3 압축강도와 할선 탄성계수의 관계

본 연구에서는 경량기포혼합토의 일축 및 삼축압축

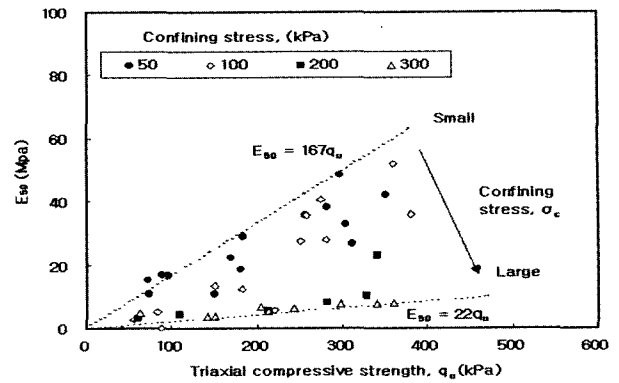


그림 10. 삼축압축상태의 압축강도와 할선 탄성계수의 관계

상태에서의 압축강도와 할선 탄성계수(E<sub>50</sub>)의 관계를 고찰하면 그림 9과 10과 같다. 일축압축시험의 압축강도와 할선탄성계수의 관계를 양생일 7일과 28일에 대하여 그림 9에 도시하였다. 경량기포혼합토의 28일 양생시 일축압축강도와 할선탄성계수의 관계는 식 (2)와 같이 나타낼수 있다.

$$E_{50(UC)} = 82.85 q_{u(UC)} \quad (2)$$

문헌에 의하면 기포를 혼합한 경량혼합토에서 할선탄성계수는 일축압축강도의 100배~200배 정도라고 제시한 연구가 있지만 그 연구는 고화제 함유율과 기포 함유율이 다르고, 사용한 준설토의 성분이 실트질을 많이 함유하고 있는 경우로 판단된다(土田, 1996).

한편, 모든 배합조건에 대한 삼축압축강도와 할선탄성계수의 관계를 28일 양생조건에 대하여 나타내면 그림 10과 같다.

삼축압축강도는 구속압과 초기함수비 및 고화제 함유율에 복합적으로 의존하여 변화하기 때문에 각 구속압에 적합한 압축강도와 할선탄성계수의 관계기울기를 제시하기는 어려우며, 본 연구에서는 구속압이 50kPa~300kPa의 범위에 대한 결과이며, 구속압에 따른 압축강도와 할선 탄성계수의 적정범위를 식 (3)과 식 (4)로 제시할 수 있었다.

$$\text{구속압이 작은 경우: } E_{50} = 167 \cdot q_{u(TC)} \quad (3)$$

$$\text{구속압이 큰 경우: } E_{50} = 22 \cdot q_{u(TC)} \quad (4)$$

## 4. 결론

해양준설토, 고화제(시멘트) 및 기포를 혼합한 경량



기포혼합토에 대하여 준설토의 초기함수비, 고화제 함유율, 양생방법 및 구속압에 따른 역학적 특성을 검토, 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 경량기포혼합토의 응력-변형거동과 압축강도는 준설토의 초기함수비 보다 고화제 함유율에 더 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.
- (2) 수중양생한 경량기포혼합토의 일축압축시험에서 응력-변형거동은 최대압축강도를 나타낸 후 압축강도가 급격히 감소하는 변형-연화거동을 보였으나, 삼축압축시험에서는 최대압축강도를 나타낸 후 일정 잔류강도를 유지하는 거동을 나타내었으며, 고화제 함유율이 작은 혼합토의 경우는 구속압의 영향에 의해 느슨한 모래질흙의 거동과 같은 비선형 응력거동을 나타냈다.
- (3) 삼축압축시험에서 구속압에 따른 응력-변형 거동은 구속압을 일축압축강도와 비슷하게 가한 경우를 경계로 다르게 나타나는 것을 알수 있었다. 이는 일축압축 강도와 관련한 경계구속압에서 축차응력상태 하의 혼합토내 기포 골격붕괴에 원인이 있는 것으로 판단된다.
- (4) 목표 삼축압축강도를 200kPa(20t/m<sup>2</sup>)로 하는 경우 경량기포혼합토의 적정배합비를 추정한다면, 양생방법에 무관하게 초기함수비는 100%~160%정도이며, 최소 고화제 함유율은 수중양생의 경우 6.6%이고, 대기양생의 경우 4%로 나타났다.
- (5) 압축강도와 할선탄성계수의 관계는 회귀분석을 통하여 일축압축상태의 경우  $E_{50} = 83 \cdot q_{u(UC)}$ 로 나타났으나 삼축압축인 경우 구속압이 50kPa에서 300kPa로 증가함에 따라  $E_{50} = 167 \cdot q_{u(TC)} \sim 22 \cdot q_{u(TC)}$ 로 다소 큰 차이를 나타내었다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산부 국책과제로서 한국해양연구원 연안항만공학연구본부에서 수행한 “준설토 재활용 방안 연구”의 일부임을 밝히며, 연구가 가능하도록 지원 해주신 해양수산부 담당자에게 사의를 표합니다.

## 참 고 문 헌

1. 김용수(1995), 발포스티로폼을 사용한 경량안정처리토의 강도특성에 관한 연구, 중앙대학교 석사학위 논문.
2. 김홍택, 방윤경(1996), “지오그리트-페 E.P.S. 조각 혼합경량토의 마찰특성”, 한국지반공학회지, 제12권, 제6호, pp.163-182.
3. 정두영, 이병석(1991), “해성점토의 석회 및 시멘트안정처리에 미치는 염분의 영향”, 한국지반공학회지, 제7권, 제4호, pp.49-64.
4. 정성교,곽정민, 김규중, 백승훈(2001), “부산점토의 지반공학적 특성에 관한 고찰”, ISSMGE ATC-7 SYM., 한국지반공학회지, pp.25-42.
5. 정철호(1998), “포항 해성점토의 분포와 공학적 특성”, 한국지반공학회지, 제4권, 제5호, pp.77-88.
6. 홍상기(2000), 해성점토를 사용한 EPS 경량혼합토의 강도특성에 관한 실험적 연구, 중앙대학교 석사학위 논문.
7. 古谷俊明(1989), “輕量盛土材としての氣泡モルタル”, 土と基礎, 37-2 (373), pp.74-87.
8. 土田(1996a), 港灣空港事業における輕量混合處理土工法の開發と適用事例, 運輸省港灣技術研究所.
9. 土田(1999), 建設發生土を 活用した輕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.
10. Short, A. and Silicates, W.(1978), *Light-Weight Concrete*, 3rd Ed. Applied Scimce Publishers Ltd., London pp.1-14.
11. Vatsala, A. and Nova, R. and Srinivasa Murthy, B. R.(2001), “Elastoplastic Model for Cemented Soils”, *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division*, ASCE Vol.127, No.8.
12. Tavenas, F., Jean, P., Lebloud, P., and Leroueil, S.(1983), “The permeability of natural clays. Part II-Permeability characteristics”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.20(4), pp.645-660.

(접수일자 2002. 5 7, 심사완료일 2002. 8. 5)