

## 폐어망을 이용한 보강 경량토의 압축거동 특성

### Compressive Behaviors of Reinforced Lightweight Soil Using Waste Fishing Net

김 윤 태<sup>1</sup> Kim, Yun-Tae

김 홍 주<sup>2</sup> Kim, Hong-Joo

#### Abstract

This paper investigates the mechanical characteristics of reinforced lightweight soil (RLS) using waste fishing net. RLS used in this experiment consists of dredged soil taken from construction site of Busan New Port, cement, air foam and waste fishing net. Several series of laboratory tests were performed to compare behavior characteristics between RLS and unreinforced lightweight soil, in which the reinforced effect by waste fishing net on RLS was evaluated. The experimental results of RLS indicated that the stress-strain relationship and the unconfined compressive strength are strongly influenced by the content of waste fishing net. Compressive strength of RLS increased with the increase in curing time and generally increased by adding waste fishing net, but the amount of increase in compressive strength was not proportional to the content of waste fishing net. In this test, the maximum increase in compressive strength was obtained at 0.25% content of waste fishing net. On the other hand, water content of RLS rapidly decreased up to 7 days of curing time and converged to constant value.

#### 요 지

본 연구에서는 폐어망을 이용한 보강 경량토의 역학적 특성을 고찰하였다. 본 실험에서 사용된 보강 경량토는 부산 신항 건설현장에서 채취한 준설토와 시멘트, 기포 및 폐어망으로 구성되어졌다. 다양한 함유율의 폐어망이 혼합된 보강 경량토의 보강효과를 고찰하고, 무보강 경량토와 보강 경량토의 거동 특성을 비교하기 위하여 다양한 실내실험이 수행되어졌다. 보강 경량토에 대한 실험결과 응력-변형 관계와 일축압축강도는 폐어망에 의해 큰 영향을 받는다는 것이 나타났다. 보강 경량토의 압축강도는 양생기간이 증가할수록 증가하며, 폐어망을 첨가함으로써 일반적으로 증가하지만, 압축강도 증가량은 폐어망 함유율에 비례하지는 않는다. 본 실험의 경우 폐어망 함유율이 0.25%일 때 최대 압축강도가 발현되는 것을 알 수 있었다. 한편, 보강 경량토의 함수비 변화는 양생기간 7일까지 급격하게 감소한 후 일정한 값에 수렴하였다.

**Keywords :** Dredged soil, Reinforced lightweight soil (RLS), Unconfined compression test, Waste fishing net

#### 1. 서 론

항만 건설 및 항만 리모델링 등의 대규모 산업시설이

확충 및 재정비됨에 따라 매년 대량의 준설토가 발생하고 있고 앞으로도 지속적인 항로유지 준설토와 오염해역 준설토 인하여 준설토량이 꾸준히 증가할 것으로 전망되고

1 정희원, 부경대학교 해양공학과 조교수 (Member, Assistant professor, Dept. of Ocean Engrg., Pukyong National Univ., yuntkim@pknu.ac.kr, 교신저자)

2 정희원, 부경대학교 해양공학과 석사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Ocean Engrg., Pukyong National Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

있다. 현재 준설토 처리는 일반적으로 단순 외해투기 및 육상매립에 의존하고 있는 실정이며, 이로 인해 주변 환경의 오염, 매립을 하기 위한 투기장 건설비용 증대, 부지확보 어려움 등과 같은 문제점들이 발생할 수 있다. 따라서 꾸준히 발생하는 준설토를 효율적으로 이용하고 재활용할 수 있는 기술이 필요하다.

준설토 재활용 기술이 발달한 선진국의 예를 살펴보면 준설토를 단순 매립하기 보다는 준설토의 특성에 따라서 해양환경복원 및 인공 서식지 조성, 친환경적인 친수공간 개발 등에 건설재료로 적극적으로 재활용하고 있다. 일본에서는 1976년 이후 준설토를 활용한 경량기포혼합토가 개발되어 건설공사 현장에 사용되어지고 있다. 준설토 재활용에 관한 기존 연구를 살펴보면 Tsuchida 등(1996)은 경량혼합토를 이용한 타설 재료로서의 개선에 대한 연구와 수중에서 타설된 경량혼합토의 거동을 연구하였고, Otani 등(2002)은 X-ray CT scanner를 통하여 SGM(Super Geo-Material)에 대한 특성을 연구한 바 있으며, 이 외에도 많은 연구가 꾸준히 수행되어지고 있다. 한편 국내에서도 준설토를 재활용하기 위한 방안으로 시멘트, 골패각 등의 고화재와 기포 또는 EPS 등의 경량재를 준설토와 혼합하여 연구한 사례가 있다. 이러한 국내의 연구 사례를 살펴보면, 골패각을 혼합한 모르타르 혼합토의 강도특성(윤길림 등, 2001), 경량기포혼합토의 압축 및 강도특성에 대한 연구(윤길림 등, 2002), 준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적 특성 연구(김주철 등, 2002), 준설토와 EPS를 혼합한 경량혼합처리토의 강도 특성 연구(김수삼 등, 2002) 등이 있다.

한편, 우리나라의 연안해역은 육상의 쓰레기가 흘러 들어가거나 해상에서 버린 폐기물 등으로 인하여 오염되어 가고 있는 실정이다. 지역적인 특성에 따라 오염물질의 주 발생원이 조금씩 달라지지만 1999년 이후 국내 항구를 중심으로 이루어지고 있는 해양쓰레기 실태조사 결과에 따르면 로프류, 목재류, 타이어류 등의 폐기물들이 주를 이루고 그 밖의 다양한 오염물질들이 20

~30%를 차지한다(한국해양수산개발원, 2001).

이러한 해양폐기물 중에 특히 어민들이 어로중에 고의 또는 실수로 버리는 페어망이나 페로프는 난분해성이기 때문에 분해되지 않고 원형 그대로 퇴적되므로 장기간에 걸쳐 많은 양이 축적되면서 어장을 황폐화시키고, 해양 식·생물의 서식과 산란을 방해한다. 또한 선박의 프로펠러에 페어망이 감기는 문제가 발생하여 크고 작은 해난 사고의 원인이 되며 페어망에 부착되어 있는 금속추는 낚과 같은 중금속으로 이루어져 있기 때문에 해역에 무단투기가 되면 해양오염을 가중시킨다. 통계자료의 미비로 아직까지 정확한 양을 추정할 수는 없으나 현재까지 페로프와 페어망은 약 200만톤 가량 근해에 축적되어 있는 것으로 추정하고 있으며 연간 4만톤 가량이 해양에 투기되고 있는 것으로 예측하고 있다(김승도 등, 2001). 해양수산부에서 조사한 자료에 따르면 연도별 해양폐기물 수거현황은 표 1에 보여주는 것과 같이 일반쓰레기, 스티로폼, 어구·어망, 패각 등으로 다양하며, 이중 어구·어망이 연간 2만톤 가량 수거되고 있는 것으로 나타났다.

이와 같이 꾸준히 발생하는 준설토와 수거 또는 단순 투기되는 페어망을 유효적절하게 이용할 수 있는 기술이 확보된다면, 환경오염 방지와 매년 수백억원 이상의 국가 예산을 절약하는 경제적인 효과가 있다.

따라서 본 연구에서는 준설토 재활용 방안으로 부산 신항 부근에서 채취한 준설토와 연안에 버려지고 있는 페어망을 이용하여 보강 경량토를 제작하였으며, 일축 압축강도시험, 표준압밀시험 및 직접전단시험을 수행함으로써 시멘트 함량, 함수비 함량, 기포제 함량 및 페어망 함량에 따른 보강 경량토의 응력-변형 거동, 압축강도 특성, 압밀특성 및 강도정수 등을 고찰하였다.

## 2. 페어망 보강 경량토

그림 1은 무보강 경량토와 페어망을 혼합한 보강 경

표 1. 연도별 해양폐기물 수거 현황(해양수산부, 2001)

단위 : ton(%)

구분	합계	일반 쓰레기	스티로폼	어구·어망	패각	기타
1998	343,830	36,427	1,712	19,160	254,783	31,763
	(100)	(10.6)	(0.5)	(5.6)	(74.1)	(9.2)
1999	107,726	24,153	44,124	21,650	3,286	14,513
	(100)	(22.4)	(41.0)	(20.1)	(3.1)	(13.4)
2000	87,340	31,591	5,027	21,761	11,476	17,486
	(100)	(36.2)	(5.8)	(24.9)	(13.1)	(20.0)

량토를 나타내는 개념도이다. 무보강 경량토는 그림 1(a)와 같이 기포로부터 생성된 간극으로 인하여 재료의 경량성을 확보하면서 시멘트를 첨가하여 압축강도를 증진시키기 위해서 발생한 준설토에 시멘트와 기포를 혼합한 형태로 구성되어 있다. 폐어망을 이용한 보강 경량토는 그림 1(b)와 같이 폐어망을 재활용할 뿐만 아니라, 지반재료의 인장 및 전단에 대한 취약점을 개선시키기 위하여 폐어망을 혼합한 형태이다.

경량토는 기포, 시멘트 및 함수비를 조절함으로써 사용목적에 따라 단위중량과 압축강도를 조절할 수 있기 때문에 성토부의 침하와 인접지반의 변형을 억제할 뿐만 아니라 주변 구조물에 거의 영향을 주지 않으며, 교대의 뒷면이나 칼버트·박스 설치부의 침하를 줄여서 구조물과 성토부의 부등침하를 경감·방지한다. 하중이 작용하더라도 수평방향으로 거의 토압이 작용하지 않으므로 측방 유동을 경감시켜 구조물의 변위를 방지할 수 있다. 또한 경량토는 유동성이므로 pump 압송에 따른 시공이 가능하고, 저품질인 흙도 이용할 수 있어 준설토의 재활용과 같은 장점이 있다(태평양 Soil, 2004).

폐어망 보강 경량토는 항만 또는 공항 등의 대규모 공사시 발생하는 준설토나 항로유지 준설토에서 발생한 준설토를 직접 이용할 수 있을 뿐만 아니라 단순 투기되는 폐어망을 활용할 수 있으므로 무분별한 외해투기로 인한 환경오염 등을 방지할 수 있고, 육상매립에 따른 경제적인 비용을 절감할 수 있다.

준설토에 혼합되어지는 기포로 인하여 예상되는 압축강도의 감소를 보완하기 위하여 고화재를 혼합하게 되는데, 원료토에 조립분이 많아지면 경량기포혼합토 내에서 기포가 소포하는데 영향을 준다고 보고되었다. 기본적으로 고화재와 기포의 혼합량에 따라서 압축강도 변화가 큰 것으로 알려져 있으나 고화재 함유량이 일정한 경우에는 습윤단위중량이 증가함에 따라 압축강도가 증가한다. 여기에 폐어망을 첨가함으로써 강도증진 효과를 더 기대할 수 있을 것으로 예상되어진다.

### 3. 실내시험 방법

#### 3.1 보강 경량토의 제작

본 연구에서는 부산 신항 배후부지에 매립되고 있는 준설토를 채취하여 실험 공시체를 제작하는데 사용하였으며, 실내 물성실험을 통하여 채취한 준설토의 기본적인 물리적 특성을 파악하였다. 표 2에 나타난 바와 같이 초기 함수비가 125%로 측정되었으며 비중 2.60, 액성한계 39.2% 및 소성지수 18.5%로서 사용한 준설토를 통일분류법(USCS)에 근거하여 분류한 결과 CL인 것으로 나타났다.

경량화를 위해 사용된 기포제는 표면활성제라고도 불리는 계면활성제이며 형상에 관계없이 시멘트가 응결하고 경화될 때까지 기포를 안정되게 유지하여야 하며,

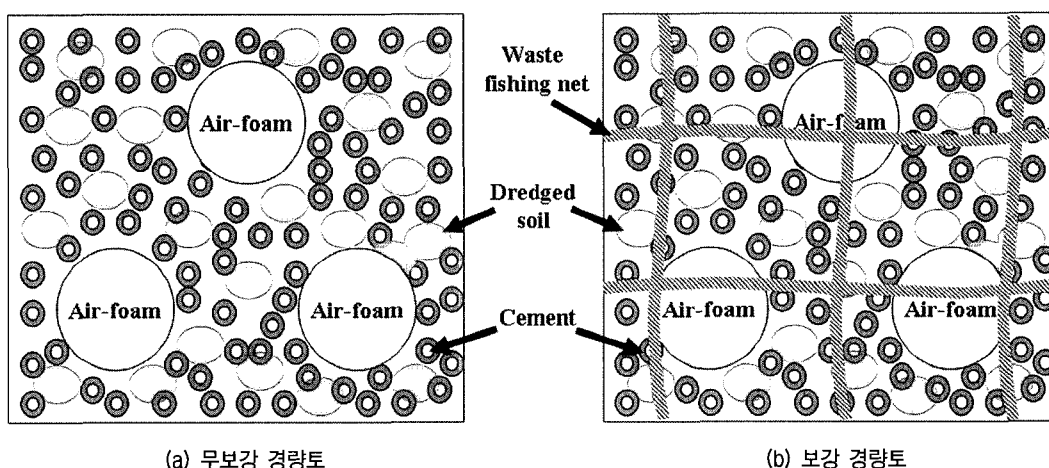


그림 1. 무보강과 보강 경량토의 개념도(김윤태 등, 2005)

표 2. 준설토의 물성시험 결과

초기 함수비(%)	액성한계(%)	소성지수(%)	비중	No.200체 통과율(%)	USCS
125	39.2	18.5	2.60	81.2	CL

기포제는 타 재료와 혼합한 상태에서 안정한 기포를 얻을 수 있어야 한다. 기포 생성을 위하여 기포제와 물을 1:20의 비율로 혼합한 후 공기압을 가해 사전에 발포시키는 방식을 사용하였다.

고화재로 사용되는 시멘트는 물과 반응하여 수화물이 되기 때문에 강도발현을 하며 강도발현성이나 고화재의 사용량, 배합비를 고려하여 선정하였다. 일반적으로 점성토 등에는 강도발현이 좋은 보통 포틀랜드 시멘트 또는 고로 시멘트 B종을 사용하며, 유기질토 등에는 시멘트계 고화재를 사용한다. 본 연구에서는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 이용하였으며, 그 화학성분은 표 3과 같다.

강도증진과 보강효과를 위해 첨가된 페어망은 일정한 크기로 절단하여 준설토와 랜덤하게 혼합하였으며, 배합시 이상적으로 혼합이 이루어질 수 있도록 주의하였

다. 보통 어망은 사용 용도에 따라 나일론( nylon ), 폴리에틸렌( polyethylene ), 폴리프로필렌( polypropylene ) 등과 같은 합성수지로 이루어져 있으며, 두 가지 이상의 성분이 혼재되어 있는 어망은 거의 없고, 일반적으로 단일 성분으로 이루어져 있다. 본 실험에서는 비중과 흡수성이 낮으며 마찰에 강하고 인장강도는 건·습기에 변하지 않는 것으로 알려져 있는 폴리에틸렌( polyethylene )을 사용하였다. 본 연구에서는 보강 경량토의 응력-변형특성, 강도 특성 등과 같은 역학적 거동 특성을 연구하기 위해 일축 압축시험 공시체( 직경×높이 : 7.2cm×14.8cm )와 직접전단 시험 공시체( 가로×세로×높이 : 10cm×10cm×6cm )를 그림 2와 같이 제작하였다.

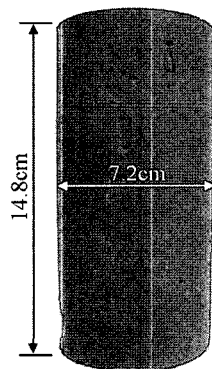
표 4는 본 시험에 사용된 배합조건을 나타내며, 공시체 제작방법은 다음과 같다.

표 3. 시멘트의 화학성분

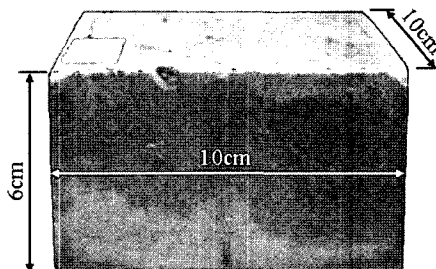
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	FCaO	Ig-Loss	K <sub>2</sub> O	Sum
20.9	5.67	2.74	62.5	3.36	0.14	2.34	0.5	1.32	1.05	100

표 4. 배합 및 시험조건

시험조건		일축압축시험	표준압밀시험	직접전단시험
시멘트 함유율, Ci(%)	무보강	8, 12, 16, 20	20	20
	보강	20	-	20
준설토의 초기 함수비, Wi(%)	무보강	125, 156, 187, 218, 250	156	156
	보강	156	-	156
기포 함유율, Ai(%)	무보강	1, 2, 3, 4, 5	1	2
	보강	2	-	2
페어망 함유율, Ni(%)	무보강	0	0	0
	보강	0.25, 0.5, 0.75, 1	-	0.25
양생기간, Tc(day)		7, 14, 28	28	28
공시체 양생조건		대기양생	대기양생, 수중양생	대기양생



(a) 일축압축시험 공시체



(b) 직접전단시험 공시체

그림 2. 제작된 보강 경량토 공시체

- ① 각 배합조건에 따라 준설토, 시멘트 및 물의 순서로 첨가한 후 균질하게 혼합한다.
- ② 균질하게 혼합된 조정토에 미리 발포된 기포를 중량비에 맞게 첨가하여 혼합한다. 이때 혼합 과정시 기포의 소포를 최소화하기 위하여 발포기로 발포시킨 기포를 평균 5분 이내에 배합한다.
- ③ 페어망은 양생몰드에 무보강 경량토를 채움과 동시에 혼합하게 되며, 페어망의 영김을 방지하고 균질하게 혼합될 수 있도록 세심한 주의를 기울인다.
- ④ 마지막으로 항온상태( $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ )에서 대기양생 및 수중양생의 과정을 거쳐 공시체 샘플이 완성된다.

보강 경량토의 배합조건으로는 시멘트 함유율( $C_i$ ), 준설토 초기 함수비( $W_i$ )를 기준으로 기포 함유율( $A_i$ )과 페어망 함유율( $N_i$ ) 조건을 각각 달리하여 배합 설계치를 산정하였다. 페어망이 함유됨에 따라 예상되는 보강효과를 알아보기 위해 무보강 경량토의 배합조건 중  $C_i=20\%$ ,  $W_i=156\%$ ,  $A_i=2\%$ 인 경우를 기준으로 선정한 후 페어망 함유율을 변화시켜 보강 경량토 공시체를 제작하였다. 보강 경량토 제작을 위한 배합조건은 준설토에 대한 중량비로 설계하였으며, 본 연구에서 사용한 폴리에틸렌 재질의 페어망은 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1%의 혼합비로 무보강 경량토와 랜덤하게 혼합하였다.

### 3.2 일축압축강도시험

제작된 보강 경량토 공시체를 각각 재령 7일, 14일, 28일까지 양생시킨 후 일축압축강도 시험을 Geocomp의

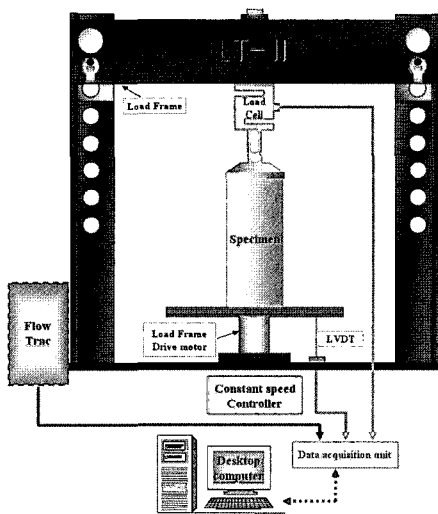


그림 3. 일정변형률(CRS)시험기 개념도

일정변형률(CRS) 시험기로 수행하였다. 그림 3은 본 연구에서 사용된 일정변형률 시험기의 개념도를 묘사한 것이며, 일축압축시험시 변형률속도는  $0.7\%/min$ 으로 제어되어졌다. 그림 4는 일축압축강도 시험시 파괴가 된 공시체를 나타내고 있으며, 그림에서 혼합된 페어망을 부분적으로 확인할 수 있다.

### 3.3 표준압밀시험

수중양생과 대기양생 조건에 따른 압밀특성을 비교하기 위해 동일한 배합조건에서 혼합된 시료를 각각 수중양생(2개), 대기양생(3개) 조건으로 28일 양생한 후 하중제어 압밀시험을 실시하였다. 그림 5는 본 연구의 실험에 사용된 표준압밀시험기로서 변위와 간극수압의 Data는 자동적으로 컴퓨터에 저장되고 측정할 수 있다.

### 3.4 직접전단시험

페어망 혼합 보강 경량토의 강도정수를 구하기 위하여 디지털 직접전단시험기를 이용하여 전단시험을 수

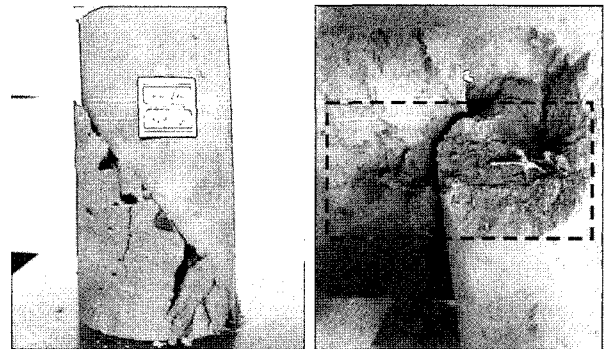


그림 4. 일축압축강도 시험시 파괴된 공시체

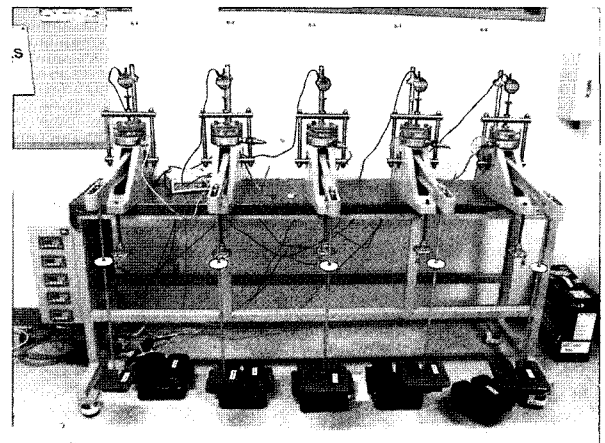


그림 5. 표준압밀시험기

행하였다. 페어망 혼합 보강 경량토에 대해 수직응력을 70kPa, 140kPa, 210kPa, 280kPa로 가한 후 전단시험을 수행하였다. 또한 배합비가 동일한 무보강 경량토 공시체를 제작하여 보강 경량토와 비교분석하였다. 전단시험시 전단변형률은 1%/min으로 제어되었다.

## 4. 실험결과 및 분석

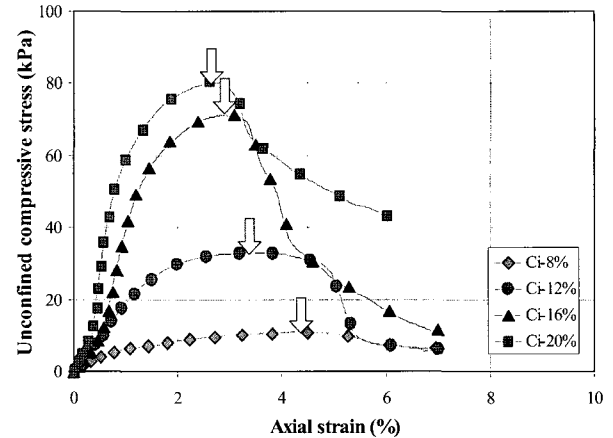
### 4.1 응력-변형 거동 특성

보강 경량토는 기존 경량기포혼합토에 강도 증진과 보강을 위해 페어망을 혼합한 흙이다. 페어망을 혼합하지 않은 무보강 경량토의 거동특성과 비교분석을 통하여 보강 경량토의 응력-변형 거동 특성을 분석하였다.

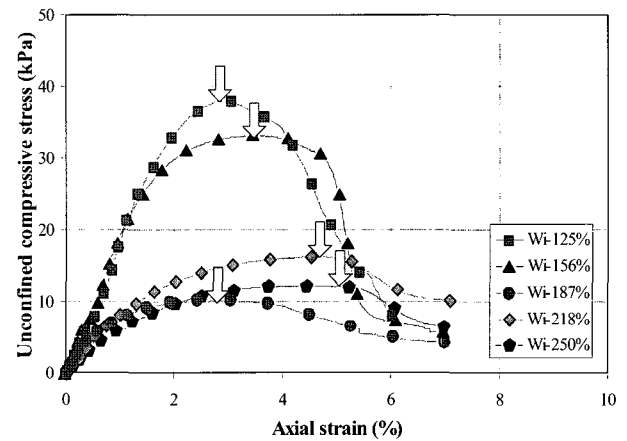
그림 6은 무보강 경량토에 혼합되는 재료(시멘트, 물, 기포)의 함유율에 따른 응력-변형 곡선을 나타낸 그림이다. 그림 6(a)는 초기 함수비 156%, 기포 함유율 2%에서 시멘트 함유율이 8%, 12%, 16%, 20%로 증가할 때의 응력-변형 곡선을 나타낸다. 시멘트 함유율이 증가할수록 압축강도가 커지고 응력-변형 곡선의 기울기도 커지며, 압축강도 발현 후의 응력감소 또한 크게 일어난다. 그림 6(b)는 시멘트 함유율 12%와 기포 함유율 2% 조건에서 함수비 변화에 따른 응력-변형 곡선을 나타내고 있으며, 함수비가 증가할수록 압축강도는 작아지고 응력-변형 곡선의 기울기도 작아지며, 압축강도 이후 응력감소 또한 적게 일어난다. 그림 6(c)는 시멘트 함유율이 12%, 초기 함수비가 156%일 때 기포 함유율의 변화에 따른 응력-변형 곡선이다. 기포 함유율이 증가할수록 압축강도가 감소함을 알 수 있고, 압축강도 이후 응력감소 역시 작게 발생함을 알 수 있으며, 최대 압축강도는 기포 함유율에 무관하게 거의 같은 변형률에서 나타났다.

그림 7은 재령 7일, 14일, 28일의 양생기간에 대한 응력-변형 곡선을 보여주고 있으며, 초기 함수비 156%의 준설토에 시멘트 20%, 기포 2% 및 페어망 0.25%의 함유율로 혼합된 보강 경량토와 페어망이 혼합되지 않은 무보강 경량토 사이의 응력-변형 거동을 나타낸다. 그림 7(a)는 무보강 경량토와 보강 경량토의 양생 7일에 대한 응력-변형 곡선을 보여주며, 보강 경량토가 같은 변형률에서 더 큰 압축강도를 나타내고, 일축압축강도가 발휘되는 변형률 4%에서 압축강도는 2배정도 더 크게 나타남을 알 수 있다. 보강 경량토의 응력-변형 곡선의 기울기가 무보강 경량토보다 더 큼을 알 수 있으며, 일축압

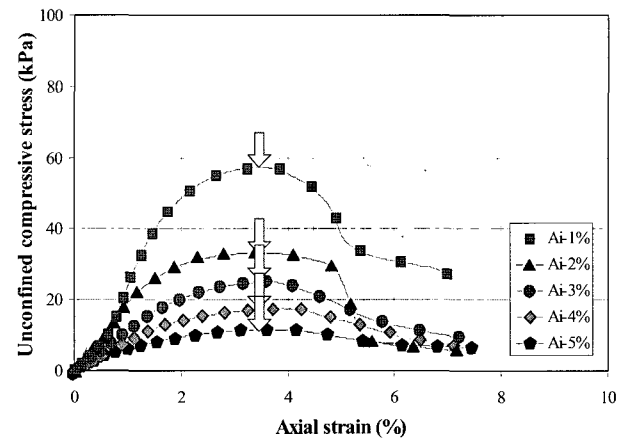
축강도 이후의 응력감소 또한 큼을 알 수 있다. 그림 7(b)는 무보강 경량토와 보강 경량토의 양생 14일에 대한 응력-변형 곡선을 도시한 것이다. 그림 7(a)의 응력-변형 곡선과 마찬가지로 페어망으로 보강된 경량토의 일축압축강도가 더 큰 것을 알 수 있고 일축압축강도



(a) 시멘트 함유율



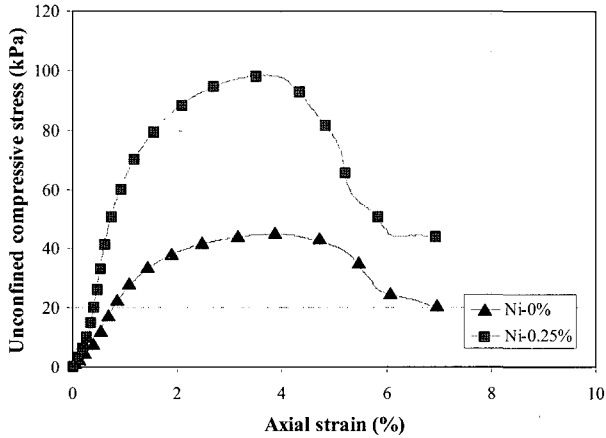
(b) 함수비



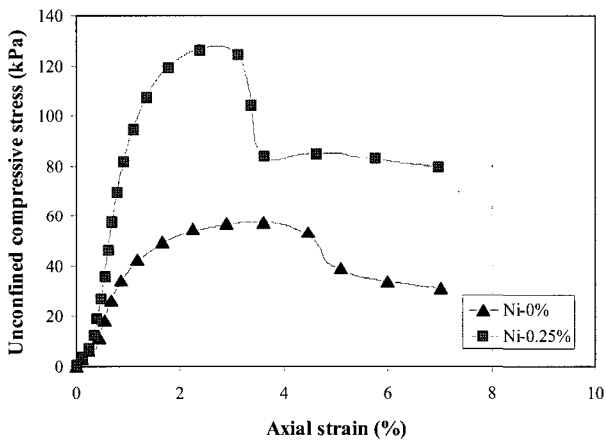
(c) 기포 함유율

그림 6. 혼합재료 함유율에 따른 응력-변형 거동

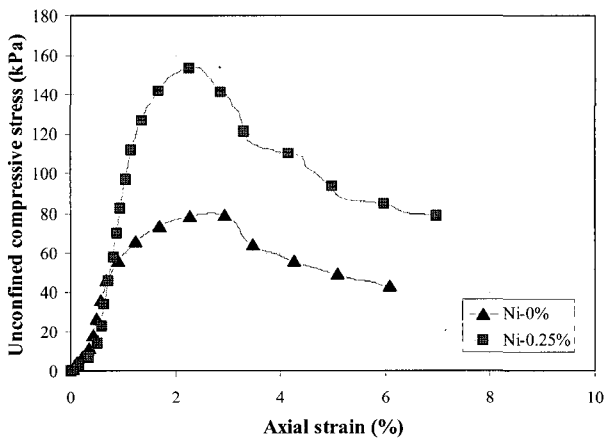
이후 응력감소 또한 크게 일어남을 알 수 있다. 일축압축강도가 발생하는 변형률은 2.6%~3%의 범위를 가지고 있다. 그림 7(c)는 양생 28일의 응력-변형 곡선을 보여준다. 그림 7(c)는 (a)와 (b)에서 보인 것과 같이 보강 경량토의 일축압축강도는 무보강 경량토의 일축압축강도보다 약 2배 정도 증가하였으며, 일축압축강도는 변



(a) 양생기간 7일



(b) 양생기간 14일



(c) 양생기간 28일

그림 7. 양생기간에 따른 응력-변형 거동

형률 2.3%에서 발생하였다. 따라서 무보강 및 보강 경량토에서 양생기간이 증가할수록 일축압축강도가 발현되는 변형률이 감소하는 것을 알 수 있다.

초기 함수비 156%, 시멘트 20%, 기포 2%인 페어망이 혼합되지 않은 무보강 경량토와 페어망이 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1%의 함유율로 혼합된 보강 경량토의 응력-변형 곡선은 그림 8과 같다. 응력-변형 거동은 그림 7과 거의 유사한 경향을 보이고 있으나, 페어망 함유율 0.25%에서 최대 일축압축강도가 얻어졌으며, 페어망 함유율이 증가함에 따라 일축압축강도는 다소 감소하는 경향을 나타낸다. 일축압축강도가 일어나는 변형률은 거의 유사하거나 조금 증가되는 위치에서 일어남을 알 수 있다. 페어망 함유율이 증가함에도 불구하고 일축압축강도가 감소하는 이유는 페어망 함유율이 증가할수록 실험 공시체에서 차지하는 페어망의 부피가 커지게 되므로 흙 입자와 페어망간의 interlocking이 감소하며, 페어망끼리의 슬립이 증가하게 되고, 시멘트에 의한 결합력이 감소되기 때문에 일축압축강도가 감소하는 것으로 판단된다. Prabaker 등(2002)의 연구에 의하면, 섬유재는 sisal fiber로서 섬유재 종류나 길이 등과 같은 조건이 본 실험 조건과 다르지만, 섬유재가 랜덤하게 혼합된 흙의 강도 특성에서 본 실험과 유사한 결과를 보여 주었다. 즉, 섬유재의 함유량이 어느 적정값을 넘어서게 되면 내부마찰각의 감소로 인해 흙과 섬유재의 interlocking이 감소하게 됨을 밝혔다. Nataraj 등(1996)은 섬유혼합토(fiber reinforced soil)에서 수행한 삼축 및 일축압축 강도시험에서 적정 섬유혼합비가 1% 이내인 것으로 보고하였다. 본 연구의 경우 페어망 함유율이 1%일 때 페어망이 혼합되지 않은 경우와 비교해보면 응력-변형 곡선에서 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며, 본 실험 조건에서 제작된 공시체의 경우 약 0.25%의 페어망 함량에서 최대 압축강도가 발현됨을 알 수 있다.

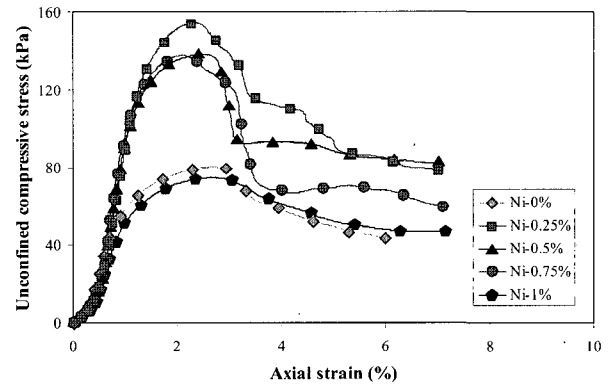


그림 8. 페어망 함유율에 따른 응력-변형 거동

#### 4.2 압축강도 특성

그림 9는 폐어망 함유율에 따른 압축강도의 특성을 양생기간별로 나타낸 것이다. 그림 9(a)는 시멘트 20%, 초기 함수비 156%, 기포 2%로 혼합된 경량토에서 폐어망 함유율에 따른 양생기간 7일, 14일, 28일의 압축강도를 나타낸다. 압축강도는 폐어망 함유율이 0.25%일 때 가장 크게 나타나고, 이후 폐어망 함유율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내며 폐어망 함유율 1%에서는 강도증진 효과를 거의 볼 수 없는 것으로 나타났다. 양생일이 증가하더라도 이와 같은 양상은 거의 유사하게 표현되어진다. 그림 9(b)에서는 양생기간에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 것으로 폐어망 함유율 0.25%에서 가장 큰 강도가 발현됨을 알 수 있고, 폐어망 함유율에 상관없이 양생일이 증가함에 따라 압축강도의 증가율 양상은 거의 비슷한 것으로 나타났다.

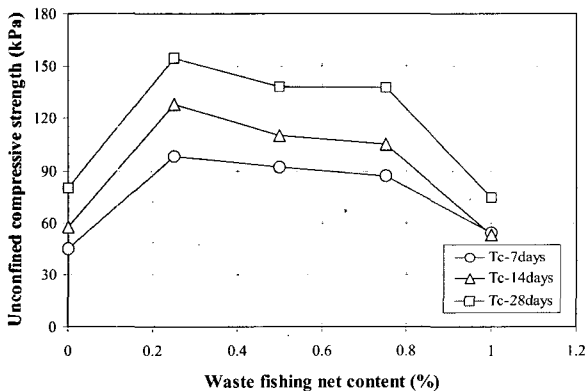
폐어망 함유율에 따른 7일 강도와 28일 강도 사이의 비교를 그림 10에 나타내었다. 폐어망 함유율에 관계없

이 양생 7일 강도에 비해 28일의 강도가 약 1.8배 정도 증가한 것을 볼 수 있으며, 양생 7일 강도와 28일 강도 사이의 상관계수는 0.99이상으로서 매우 좋다. 이러한 결과로부터 7일 강도를 이용하여 28일 양생시 강도를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

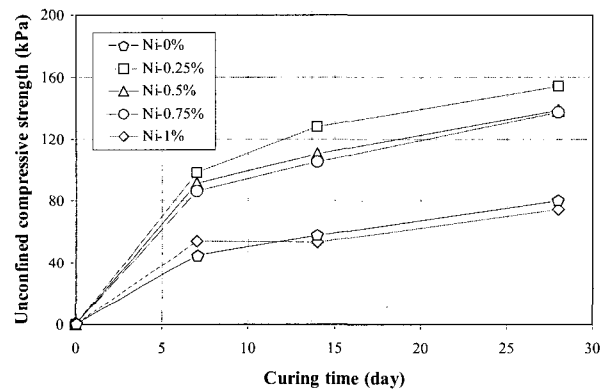
이와 같이, 보강 경량토의 압축강도는 시멘트 함유율, 함수비, 기포함유율, 폐어망 함유율, 양생기간 등에 의존하여 발현되기 때문에 임의의 배합조건에서 압축강도의 크기를 추정하는 것은 매우 어렵다고 할 수 있다. 따라서 임의의 배합조건에서 압축강도의 크기를 추정하기 위해서 보다 많은 배합조건에서의 실험 자료가 필요할 것으로 판단되어 진다.

#### 4.3 압밀특성

준설토 초기 함수비 156%에 시멘트 20%와 기포 1%의 조건으로 배합된 보강 경량토의 양생 조건에 따른 압밀특성을 비교하기 위해 표준압밀시험을 수행하였다.



(a) 폐어망 함유율의 변화에 따른 압축강도의 변화



(b) 양생기간에 따른 압축강도의 변화

그림 9. 폐어망 함유율에 따른 압축강도

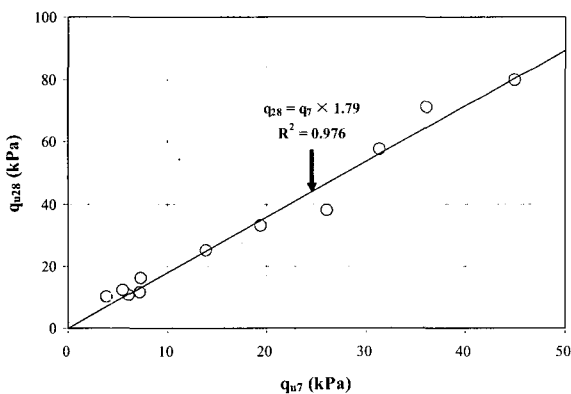


그림 10. 양생 7일과 28일의 강도 비교

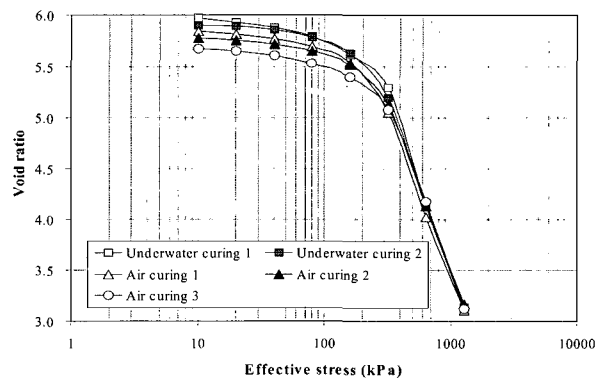


그림 11. 양생 조건에 따른 e-log  $\sigma$  곡선



표 5. 표준압밀시험 결과

구분	Underwater curing	Air curing
초기 간극비( $e_0$ )	5.90~5.97	5.84~5.68
최종 간극비	3.11~3.14	3.1~3.16
항복하중(선행압밀하중)	250~260kPa	250~260kPa
압축지수	3.4~3.6	3.4

다음 그림 11은 2개의 수중양생 시료와 3개의 대기양생 시료의  $e$ -log  $\sigma$ 의 관계곡선을 나타내고 있으며, 표 5에 그 결과를 나타내었다.

초기 간극비는 수중양생 조건의 시료( $e_0 = 5.90 \sim 5.97$ )보다 대기양생 조건의 시료( $e_0 = 5.68 \sim 5.84$ )에서 작게 측정되었으나, 압밀과정을 거친 후 최종압밀하중 단계의 최종 간극비는 3.1~3.16으로 거의 유사함을 알 수 있다.

항복하중(선행압밀하중)은 수중양생과 대기양생 조건에 상관없이 250~260kPa의 범위이며, 수중양생과 대기양생 시료의 압축지수는 3.4~3.6으로서 큰 차이가 없었다. 결과적으로 보강 경량토의 압밀특성은 양생조건에는 크게 의존하지 않으며, 배합조건에 더 큰 영향을 받는 것으로 사료된다.

#### 4.4 함수비의 변화

양생기간에 따른 보강 경량토의 함수비 변화를 알아보기 위해 초기 함수비와 양생기간 7일, 14일, 28일의 함수비를 각각 측정하여 그림 12에 나타내었다. 양생 7일까지는 함수비가 급격히 감소함을 알 수 있는데, 이는 배합 이후에 일어나는 시멘테이션 효과에 의한 수화작용이나 건조수축에 의해 소비되는 물의 양이 많기 때문

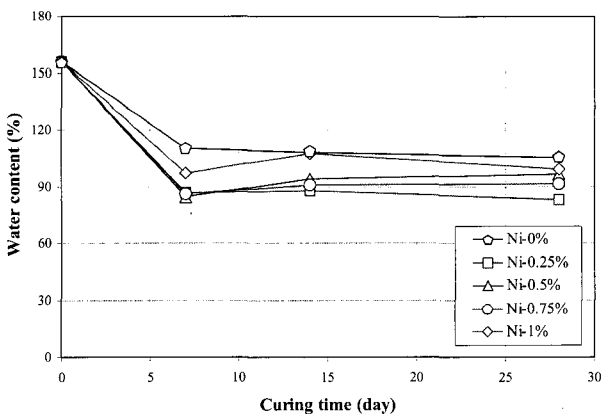


그림 12. 보강 경량토의 페어망 함유율에 따른 함수비 변화

인 것으로 판단되어진다. 그리고 양생기간 7일 이후에는 함수비의 변화가 거의 일어나지 않는 것으로 나타났다. 이와 같이 함수비가 양생일에 따라 변화되는 결과는 송창섭 등(2002)이 연구한 보강 혼합토의 체적 변화와 유사한 결과이다.

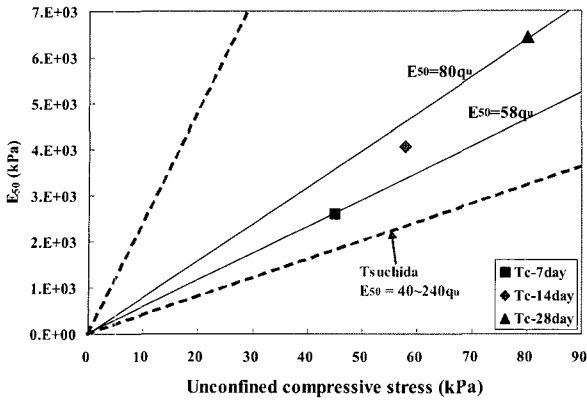
#### 4.5 일축압축강도와 할선 탄성계수의 관계

시멘트 함유율 20%, 함수비 156%, 기포 함유율 2%일 때 무보강 경량토와 보강 경량토의 일축압축상태에서의 압축강도와 할선 탄성계수( $E_{50}$ )의 관계를 고찰하면 그림 13과 같다. 그림 13(a)는 양생기간 7일에서 28일까지 무보강 경량토의 할선 탄성계수와 일축압축강도의 관계를 나타내며, 양생일이 증가할수록 압축강도와 할선 탄성계수( $E_{50}$ )가 증가하고  $E_{50} = (58 \sim 80) q_u$ 의 범위를 가지는 것으로 나타났다. 보강 경량토의 경우 그림 13(b)와 같이 양생일에 따른 경향은 무보강 경량토와 유사하며, 보강 조건에 따른 경향은 일축압축강도와 같이 페어망이 0.25% 혼합되었을 경우 일축압축강도와 탄성계수 값이 가장 큼을 알 수 있다. 보강 경량토의  $E_{50} = (53 \sim 119) q_u$  정도의 범위로 나타났다.

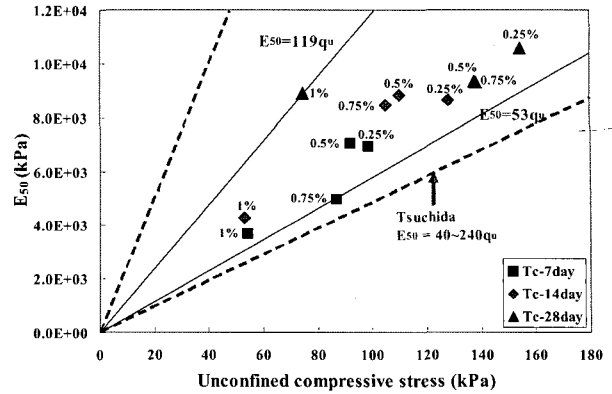
Tsuchida 등(2004)에 의하면, 기포를 혼합한 경량기포 혼합토의 할선 탄성계수는 압축강도의 40~260배 정도로 제시한 바 있으며, 김주철 등(2002)은 양생기간에 따른 변형계수의 값을 일축압축강도의 82~91배 정도의 범위로 제안하였다. 이러한 차이는 경량토의 응력-변형 거동 및 강도 특성이 준설토 성분이나 시멘트 함유율, 페어망 포함 유무에 크게 의존하는 것에 기인한다.

#### 4.6 전단강도 특성

그림 14는 페어망 함유율이 0.25%인 전단시험에 대해 수행된 직접전단시험으로부터 구한 페어망 혼합 보강 경량토의 최대 및 잔류 전단강도를 나타낸다. 수직응력이 증가함에 따라 전단강도 역시 증가하는 것을 볼



(a) 무보강 경량토



(b) 폐어망 혼합 보강 경량토

그림 13. 무보강 및 보강 경량토의 일축압축강도와 활선 탄성계수간의 관계

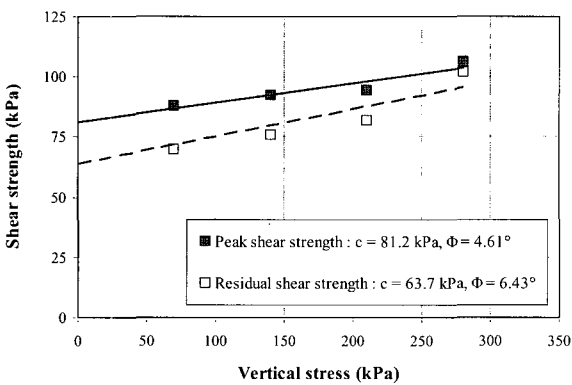


그림 14. 수직응력에 대한 폐어망 혼합 보강 경량토의 최대 및 잔류 전단강도 곡선

수 있다. 폐어망 혼합 보강 경량토의 최대 전단강도시 내부마찰각은 약 5°의 값을 가지고 점착력은 81.2kPa로 나타났다. 잔류 전단강도에서 내부마찰각은 약 6°의 값을 가지며, 점착력은 63.7kPa를 가지는 것으로 나타났다. 이로부터 전단강도는 주로 내부마찰각 성분보다 점착력 성분에 의존하며, 최대 및 잔류 전단강도에 대한 내부마찰각은 거의 같음을 알 수 있다. 또한 파괴 후에는 점착력 성분만 다소 감소되는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

본 논문에서는 해양 준설토, 고화재, 기포제 및 다양한 함유율의 폐어망을 혼합한 보강 경량토에 대하여 일축압축강도시험을 실시함으로써 응력-변형 거동 및 압축강도 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 보강 경량토에 혼합되는 폐어망 함유율에 대한 응력-변형 거동을 분석한 결과 양생기간이 증가할수

록 일축압축강도가 증가하였으며, 최대 일축압축강도에서의 변형률은 양생기간이 증가할수록 작아지는 것으로 나타났다.

- (2) 본 연구에서 수행한 실험조건인 경우, 폐어망 함유율이 0.25%일 때 최대 일축압축강도가 얻어졌으나, 폐어망 함유율이 0.25%를 초과할 경우 폐어망 함유율이 증가함에 따라 일축압축강도는 다시 감소하는 경향을 나타낸다. 폐어망 함유율이 증가함에도 불구하고 일축압축강도가 감소하는 이유는 폐어망 함유율이 증가할수록 실험 공시체에서 폐어망이 차지하는 부피가 커지게 되므로 흙 입자와 폐어망간의 interlocking이 감소하며, 폐어망끼리의 슬립이 증가하게 되고, 시멘트에 의한 결합력이 감소되기 때문인 것으로 사료된다.
- (3) 수중양생과 대기양생 조건에 따른 보강경량토의 압밀특성은 양생조건에는 크게 의존하지 않으며, 배합조건에 더 큰 영향을 받는 것으로 사료된다.
- (4) 양생기간에 따른 보강 경량토의 함수비 변화를 측정한 결과 양생 7일까지 함수비 감소가 대체적으로 크게 일어나며, 이는 시멘트 수화작용에 의한 물 소비와 건조에 기인하는 것으로 판단되어 진다. 또한 양생기간 7일 이후에는 함수비 변화가 거의 일어나지 않는 것으로 나타났다.
- (5) 무보강 경량토의 활선 탄성계수와 일축압축강도의 관계는  $E_{50} = (58 \sim 80) q_u$ 의 범위를 가지는 것으로 나타났다. 폐어망으로 혼합된 보강 경량토의 경우  $E_{50} = (53 \sim 119) q_u$  정도의 범위로 나타났다.
- (6) 직접전단시험결과 전단강도는 주로 내부마찰각 성분보다 점착력 성분에 의존하며, 최대 및 잔류 전단

강도에 대한 내부마찰각은 거의 같음을 알 수 있다. 또한 파괴 후에는 점착력 성분만 다소 감소되는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산부의 지원으로 한국해양수산개발원의 수산특정연구개발과제(연안 생태환경공간 복원/조성 기술)로 수행된 연구 중 일부이며, 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 한국해양수산개발원 (2001), *해양환경보호정책 집행의 실효성 제고방안; 페어망·페로프 관리를 중심으로*
2. 해양수산부 (2001), *해양수산 Fact Book*.
3. 김승도, 전종갑, 유경선 (2001), “페어망류의 주성분이 PE, PP, NY의 열분해 기작에 대한 연구”, *한국폐기물학회지*, 제18권, 제4호, pp.410-418.
4. 윤길림, 김병탁, 김준형, 채영수, 서승남, 심재설 (2001), “굴폐각을 혼입한 모르타르 혼합토의 강도특성 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제17권, 제5호, pp.51-60.
5. 김주철, 이종규 (2002), “준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적 특성연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제18권, 제4호, pp.309-317.
6. 윤길림, 김병탁 (2002), “준설토를 활용한 경량혼합토의 역학적 특성 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제18권, 제4호, pp.75-83.
7. 김수삼, 김병일, 한상재, 신현영 (2002), “준설토와 EPS를 혼합한 경량혼합처리토의 강도 특성”, *한국철도학회 논문집*, 제5권, 제2호, pp.61-69.
8. 송창섭, 임성운 (2002), “보강 혼합토의 역학적 특성(I)”, *한국환경복원녹화기술학회지*, 제5권, 제6호, pp.9-13.
9. 이용수, 김정호, 정형식, 정하익 (2003), “준설토를 이용한 인산석고 활용 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제4권, 제4호, pp.53-59.
10. 태평양 Soil(주) (2004), *발생토를 이용한 경량기포 혼합토 공법*, 동서화학공업(주)
11. 김윤태, 권용규, 김홍주 (2005), “준설토 재활용을 위한 무보강 및 보강 경량토의 압축거동특성 비교”, *한국해양공학회지*, 제19권, 제6호, pp.44-49.
12. Tsuchida, T., Takeuchi, D., Okumura, T. and Kishida, T. (1996), “Development of Lightweight Fill from Dredgings”, *Proc. of Environmental Geotechnics*, Balkema, pp.415-420.
13. Nataraj, M. S., Addula, H. R. and Mcmanis, K. L. (1996), “Strength and Deformation Characteristics of Fiber Reinforced Soils”, *Environmental Technology*, Proc. of 3rd Int. Symp., Vol, pp.826-831.
14. Otani, J., Mukunoki, T. and Kikuchi, Y. (2002), “Visualization for Engineering Property of In-situ Lightweight Soils with Air Foams”, *Soil and Foundations*, Vol.4, No.3, pp.93-105.
15. Prabaker, J. and Sridhar, R.S. (2002), “Effect of Random Inclusion of Sisal Fibre on Strength Behaviour of Soil”, *Construction and Building Materials*, Vol.16, pp.123-131.
16. Tsuchida, T. and Egashira, K. (2004), “The lightweight Treated Soil Method”, *New Geomaterials for Soft Ground Engineering in Coastal Areas*, Balkema.

(접수일자 2006. 2. 10, 심사완료일 2006. 10. 30)