

타이어 가루를 섞은 경량혼합토의 전단강도와 변형특성

Shear Strength and Deformation Characteristics of
Lightweight Soils Mixed with Tire Powder

윤길림* · 윤여원** · 안광현***

Yoon, Gil Lim · Yoon, Yeo Won · Ahn, Kwang Hyun

Abstract

This paper investigates engineering characteristics of lightweight soils mixed with air foam and tire powder. Lightweight soils could be used as foundation materials, back-fills of reducing vibrating or abutment, and so on. Unconfined and triaxial compression tests were carried out to analyze strength and deformation characteristics of lightweight soils by changing target moist unit weight and cement contents. In comparison with strength characteristics of two different kinds of lightweight soils with same moist unit weights (13 kN/m^3), unconfined compression tests showed similar compressive strength, however, triaxial compression tests showed that compressive strength of lightweight soils mixed with waste tire powder was relatively larger strength than that of lightweight soils mixed with air foam because of elasticity of waste tire powder. Also, unconfined and triaxial compressive strengths of most of lightweight soils increase with increases of moist unit weight and cement contents. However, the strength of lightweight soils mixed with air foam under 11 kN/m^3 , when moist unit weight exceeds a certain cement contents, decreases even though cement contents increase because of the effect in a void gap of air foam.

Keywords : *lightweight soils, air foam, waste tire powder, shear strength, backfill, ground improvement*

요 지

본 논문에서는 경량화 재료인 기포를 혼합한 기포혼합경량토와 페타이어 분말을 혼합한 타이어혼합경량토를 연약지반의 개량, 진동차폐재 및 교대의 뒷채움재 등으로 활용하기 위하여 공학적 특성을 조사하였다. 당 연구에서는 목표 습윤단위중량과 시멘트 혼합비 변화에 따른 기포혼합경량토와 타이어혼합경량토의 강도특성과 변형특성을 일축압축시험과 비압밀·비배수 삼축압축시험으로 분석하였다. 동일한 습윤단위중량(13 kN/m^3)에서 2종류의 경량혼합토 강도특성을 비교한 결과, 일축압축시험에서는 같은 조건에서 비슷한 압축강도특성을 보였으나 비압밀·비배수 삼축압축시험 결과에서는 타이어 분말의 탄성특성으로 인한 영향으로 타이어혼합경량토가 기포혼합경량토 보다 큰 압축강도를 보였다. 그리고 2종류의 경량혼합토는 습윤단위중량과 시멘트량의 증가에 따라 일축압축강도와 삼축압축강도가 증가하였으나 습윤단위중량 11 kN/m^3 이하의 기포혼합경량토는 일정한 기포혼합비 수준에서는 시멘트량이 증가해도 기포에 의한 간극의 영향으로 경량혼합토의 강도는 증가하지 않거나 저하되는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 경량혼합토, 기포, 페타이어 분말, 압축강도, 뒷채움재, 지반개량

1. 서 론

최근 국내에서는 연안 해안을 중심으로 해양·항만 건설 사업이 진행됨에 따라 상당한 양의 준설토가 발생하고 있고, 이를 처리하기 위한 방안이 시급한 문제로 급부상하고 있다.

이와 관련하여 해안·항만 건설현장에서 발생하는 준설토를 활용하기 위해 국내외에서 많은 연구가 진행되었다. 해양 준설토를 건설재료로 활용하는 방법은 여러 가지가 있으나, 그대로 이용하였을 시에는 합수비가 높고 점도질이 많은 준

설토 특성으로 인해 매립이나 성토를 하였을 경우 측방유동이나 침하 등의 문제점이 발생할 수 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 준설토에 시멘트를 혼합하고, 경량화를 위해 기포 또는 폐자원을 이용한 경량혼합토 고화처리 공법의 연구가 활발히 진행되었다. 국내의 경우 신방용 등(2000)이 페스티로폴과 현장발생토를 활용하여 경량성토재로서 특성을 연구하였고, 김홍택 등(2001)이 EPS bead 혼합경량토의 재료적 특성과 보강토 구조물 뒤채움재로의 활용을 연구하였다.

*정회원 · 교신저자 · 한국해양과학기술원 연안개발에너지부, 책임연구원 (E-mail : glyoon@kiost.ac)

**정회원 · 인하대학교 토목공학과 교수 (E-mail : yoonyw@inha.ac.kr)

***[대림산업(주)] (E-mail : lovsteel12@nate.com)

2000년 이후 연약지반개량에 발생 준설토나 건설잔토를 적극 활용하고자 경량혼합토에 대한 연구가 활발히 착수되었다. 국내에서 처음으로 수행된 연구성과는 윤길림과 김병탁(2004)과 윤길림과 유승경(2005) 등이 경량기포혼합토의 압축 및 강도특성과 현장발생토를 활용한 경량기포혼합토의 강도 및 변형특성에 대해 연구하였다. 그리고 김운태 등(2008)이 페타이어 분말을 이용한 혼합경량토의 역학적 특성 연구를 하였다. 또 다른 경량 재료로는 김운태 등(2007)이 섬유재를 이용하여 섬유혼합 보강 경량토에 대해 연구하였고, 백원진 등(2006)이 고로 수쇄슬래그를 이용한 뒷채움재의 토압특성에 대해 연구하였다.

국외의 경우에는 일본의 横田聖哉(1996)과 土田孝 등(1996)은 기포제를 사용한 기포혼합경량토공법 등을 연구하였고, Matsuda 등(2003)의 고로 수쇄슬래그 혼합경량토에 대한 연구와 Pierce 등(2003)이 타이어를 이용한 경량혼합토에 대한 연구 등 지금까지 경량혼합토에 대한 활발한 연구가 국내외에서 이루어지고 있다.

하지만, 기포혼합경량토 경우, 실용화를 위한 국내 시공사례가 미비할 뿐만 아니라 압축강도 특성 및 압축강도 영향인자, 그리고 압밀이나 투수 등 기포혼합경량토의 역학적 특성 측면에서만 연구가 진행되고 있는 실정이다. 특히, 송준호 등(2008)과 김운태 등(2009)의 연구에서 목표 습윤단위중량을 목표로 배합할 때, 기포를 첨가하여 반복 실험에 의해 목표 습윤단위중량의 배합비를 산정하였다. 이러한 방법으로 산정한 배합비의 오차도 송준호 등(2008)의 연구에서 목표 단위중량 대비 $\pm 5\%$ 이내로 측정되었다고 보고되었다. 또한, 타이어의 경우 자동차의 수가 증가하면서 국내에서 연간 2600만개의 페타이어가 발생하고 있는 현실에 비해 타이어를 이용한 재활용 측면에서의 타이어혼합경량토 연구 실적이 미미한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 기포혼합경량토와 페타이어 분말을 이용한 타이어혼합경량토 공시체를 제작하여, 단위중량과 시멘트 비에 따른 강도특성과 변형특성을 조사하기 위해서 일축압축시험과 비압밀·비배수 삼축압축시험을 수행하여 실험 결과에 대해 상호 비교 평가하였다.

2. 경량혼합토 배합

2.1 기포혼합경량토

목표 습윤단위중량에 따른 기포혼합경량토의 배합 방법은 흙의 삼상구조의 개념으로 접근할 수 있다. 기포혼합경량토는 시멘트, 물, 골재와 공기로 이루어져 있다. 기포혼합경량토의 목표 습윤단위중량은 $\gamma_g = W/V$ 로써, 시멘트, 물, 골재의 중량과 비중 그리고 공기의 부피가 결정되면 단위중량을 산정할 수 있다. 기포혼합경량토에 배합되는 경량기포는 공기로 대체될 수 있고, 원료토에 있는 공기는 무시한다. 이를 식으로 표시하면 식 (1)과 같다. 여기서, γ_g 는 목표 습윤단위중량, W_{os} 는 원시료에 포함된 흙의 중량, W_{ow} 는 원시료에 포함된 물의 중량, W_{aw} 는 추가한 물의 중량, W_c 는 시멘트의 중량, G_s 는 흙의 비중, G_w 는 물의 비중(4°C), G_c 는 시멘트의 비중, V_{fa} 는 경량기포의 체적이다. 경량기포의 체적(V_{fa})은 식 (2)에 의해 구할 수 있다.

$$\gamma_g = \left(\frac{W_{os} + W_{ow} + W_{aw} + W_c}{\frac{W_{os}}{G_s} + \frac{W_{ow} + W_{aw}}{G_w} + \frac{W_c}{G_c} + V_{fa}} \right) \quad (1)$$

$$V_{fa} = \frac{W_{fa}}{\gamma_{fa}} \quad (2)$$

여기서, W_{fa} : 기포의 중량

γ_{fa} : 기포의 단위중량

2.2 타이어혼합경량토

타이어혼합경량토의 배합 방법은 기포혼합경량토의 배합 절차와 같다. 다만, 기포가 아닌 타이어 분말을 혼합함으로써 흙의 구조가 재구성된다. 타이어혼합경량토에서는 타이어 분말이 경량재료로 작용을 하며, 타이어 분말의 혼합물이 경량화에 중요한 역할을 한다. 타이어혼합경량토의 배합식은 식 (3)과 같다. 여기서, 기포는 식 (1)과 같고, W 는 타이어 분말의 중량, G_t 는 타이어 분말의 비중이다.

$$\gamma_g = \left(\frac{W_{os} + W_{ow} + W_{aw} + W_c}{\frac{W_{os}}{G_s} + \frac{W_{ow} + W_{aw}}{G_w} + \frac{W_c}{G_c} + \frac{W_t}{G_t}} \right) \quad (3)$$

3. 시험 개요

3.1 재료 특성

본 연구에서는 기포혼합경량토와 타이어혼합경량토의 공학적 특성을 분석하기 위해 양산에서 채취한 준설토 시료를 사용하였으며, 물성치는 표 1과 같다. 시험에 사용된 준설토는 통일분류법에 의해 CL-ML로 분류된다.

기포제는 식물성 기포제를 사용하였으며, 기포제와 물의 비율을 1:20으로 혼합하여 한국해양연구원에서 개발한 기포발생장치(그림 1)를 사용하여, 공기압 3~4kg/cm² 하에 발포시킨 기포를 사용하였다. 이 때, 발포된 기포의 단위중량은 0.37 kg/cm³로 측정되었다.

고화제는 KS L 5201에 규정된 규격에 맞춰진 국내 S사의 보통포틀랜드 시멘트(비중 3.15)를 사용하였으며, 페타이어 분말은 동결조(Freezer, -120°C)에 투입하여 유리온도($T_g = -69^\circ\text{C}$) 이하에서 동결, 분쇄하여 제작된 것을 사용하였다. 본 연구를 위하여 실내시험에서 구한 페타이어 가루의 입

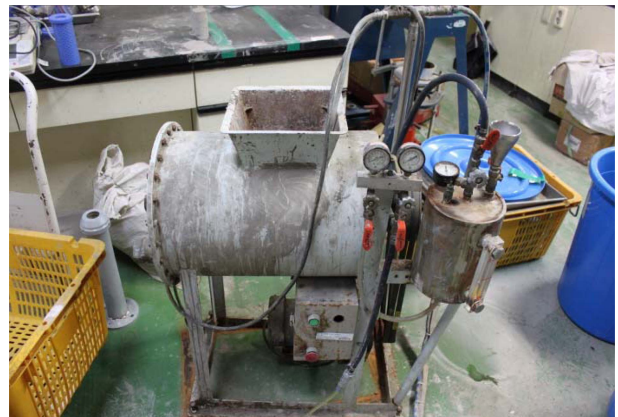


그림 1. 기포발생장치(한국해양연구원)

자는 0.105~0.420mm 사이이며, 진비중은 1.2로 측정되었고 겉보기 비중은 0.85로 측정되었다. 단위중량은 다짐도에 따라서 4~5.72kg/m³로 나타났으며, 유효입경(D₁₀)은 0.23mm이고 균등계수(C_u)는 1.52, 곡률계수(C_c)는 1.12로 측정되었다.

3.2 공시체 제작 및 시험

본 연구에서는 경량혼합토 공시체를 제작하기 위해 기포 소포의 영향을 고려하여 직경 5cm, 높이 11cm인 분리 가능한 PVC몰드를 제작하였다. 그리고 몰드 내면은 경량혼합토가 양생되면서 부착되는 것을 방지하기 위하여, 그리스(grease)를 얇게 도포하였으며, 바닥은 투명 아크릴 판으로 PVC 본드를 사용하여 밀봉하였다. 일축압축시험 및 삼축압축시험은 그림 2의 Geocomp사의 자동화기기를 사용하였다. 본 시험기의 실험과정은 사용자가 초기에 입력한 수치에 따라서 컴퓨터가 제어하고 측정된 결과를 자동 저장하는 자동화 시스템이다. 자동화 계측을 위한 시스템은 Load Tracell, Flow Tracell, Teste Cell, Arc-net, CPU로 구성되어 있다. 경량혼합토 공시체 제작을 위한 초기 함수비는 70%로 고정시켰으며, 시멘트는 원료토의 건조 중량에 대하여 16%, 24% 그리고 32%로 변화시켰다. 또한, 시험 초기의 목표 습

윤단위중량은, 기포혼합경량토와 타이어혼합경량토의 비교를 위해 9, 11, 13kg/m³로 설정하였다. 하지만, 타이어 분말의 높은 비중으로 인해 9, 11kg/m³의 타이어혼합경량토 제작에 무리가 있다고 판단되어, 타이어혼합경량토에 대해서만 13, 15kg/m³로 재설정하였다.

기포혼합경량토 공시체를 제작할 때에는, 기포의 소포를 최소화 하기 위해 발포시킨 기포를 5분 이내에 배합하였다. 또한, 몰드 해체는 공시체 제작 후 72시간 이내에 하였으며, 양생은 초기함수비가 높은 시료의 특성상 수중양생을 일어나지 않도록 20±2°C를 유지하면서 수중양생을 하였다. 일축압축 및 삼축압축시험은 변형률 1%/min으로 같은 조건의 공시체에 대하여 3~4회 반복 수행하였다.



그림 2. 일축 및 삼축압축 시험기기



그림 3. 경량혼합토 공시체 제작과정

3.3 경량혼합토 배합비

경량혼합토 제작을 위한 배합비는 식 (1)과 식 (3)을 이용하였다. 목표 습윤단위중량과 시멘트 비(%)에 대한 경량혼합토 1m³의 배합비는 각각 표 2, 3과 같다. 여기서, γ_g 는 목표 습윤단위중량, C는 건조시료에 대한 시멘트 비(%), W_s 는 준설토의 중량, W_w 는 추가한 물의 중량(목표 함수비 70%), W_c 는 시멘트의 중량, W 는 타이어 분말의 중량, W_s 는 준설토의 체적, V_w 는 추가한 물의 체적, V_c 는 시멘트의 체적, V_f 는 기포의 체적, V 는 타이어 분말의 체적을 나타낸다.

표 1. 준설토의 물리적 특성

시료	항목	비중 (G_s)	함수비 w(%)	액성한계 LL(%)	소성한계 PL(%)	소성지수 PI(%)	No.200체 통과량(%)	USCS
양산		2.643	33.36	26.90	21.52	5.38	53.54	CL-ML

표 2. 기포혼합경량토 배합비(1m³)

γ_g (kN/m ³)	C (%)	W_s (kN)	W_w (kN)	W_c (kN)	V_s (m ³)	V_w (m ³)	V_c (m ³)	V_f (m ³)
9	16	6.44	1.77	0.77	0.344	0.177	0.025	0.455
	24	6.18	1.70	1.11	0.330	0.170	0.035	0.465
	32	5.96	1.64	1.43	0.318	0.164	0.046	0.472
11	16	7.88	2.16	0.94	0.421	0.216	0.030	0.333
	24	7.53	2.07	1.35	0.402	0.207	0.043	0.348
	32	7.27	2.00	1.75	0.389	0.200	0.056	0.356
13	16	9.31	2.56	1.12	0.497	0.256	0.036	0.211
	24	8.93	2.45	1.61	0.477	0.245	0.051	0.227
	32	8.59	2.36	2.06	0.459	0.236	0.066	0.240

표 3. 타이어혼합경량토 배합비(1m³)

γ_g (kN/m ³)	C (%)	W_s (kN)	W_w (kN)	W_c (kN)	W_t (kN)	V_s (m ³)	V_w (m ³)	V_c (m ³)	V_t (m ³)
13	16	6.69	1.84	0.80	3.68	0.357	0.184	0.026	0.433
	24	6.25	1.72	1.12	3.90	0.333	0.172	0.036	0.460
	32	5.96	1.64	1.43	4.02	0.318	0.164	0.046	0.473
15	16	9.59	2.63	1.15	1.60	0.512	0.263	0.037	0.188
	24	8.99	2.47	1.62	1.89	0.480	0.247	0.051	0.222
	32	8.57	2.35	2.06	2.06	0.457	0.235	0.065	0.242

4. 실험 결과 및 분석

4.1 경량혼합토 배합

표 4와 5는 흙의 삼상을 이용한 배합의 목표 습윤단위중량과 실제 측정값과의 차이를 나타낸다. 여기서, γ_g 는 목표 습윤단위중량, γ_a 는 실측 습윤단위중량, C는 건조시료에 대한 시멘트 비(%), E는 오차율(%)이다. 본 연구에서는 기포혼합경량토의 오차율이 2.22%, 타이어혼합경량토의 경우에는 4.62%이내에서 측정되었다. 이와 같이 기포혼합경량토보다 타이어혼합경량토의 오차율이 다소 높게 측정된 원인은 타이어 분말의 높은 비중으로 인해 타이어 분말이 지나치게 배합되어 유동성을 잃어 다짐효과가 발생되었기 때문이다. 이러한 원인으로 타이어혼합경량토는 낮은 목표 습윤단위중량에서는 실무적으로 사용하기가 어렵다고 판단된다.

표 4. 기포혼합경량토 오차율(%)

γ_g (kN/m ³)	C (%)	γ_a (kN/m ³)	E (%)
9	16	9.2	+2.22
	24	9.2	+2.22
	32	9.2	+2.22
11	16	10.9	-0.91
	24	10.9	-0.91
	32	11.0	0
13	16	13.1	+0.77
	24	13.0	0
	32	13.0	0

표 5. 타이어혼합경량토 오차율(%)

γ_g (kN/m ³)	C (%)	γ_a (kN/m ³)	E (%)
13	16	13.5	+3.85
	24	13.4	+3.08
	32	13.6	+4.62
15	16	15.2	+1.33
	24	15.1	+0.67
	32	15.2	+1.33

4.2 일축압축특성

4.2.1 기포혼합경량토의 일축압축강도 특성

기포혼합경량토의 일축압축강도는 시멘트 고화재 영향에 의하여 재령 7일과 28일의 일축압축강도를 비교 하였을 때, 평균 68.5% 증가하는 경향을 나타내고 있다(표 6 참조).

또한, 동일 시멘트 비에 따른 목표 습윤단위중량의 영향을

비교하였을 경우에도 목표 습윤단위중량이 9kN/m³에서 13kN/m³로 증가할수록 재령 28일을 기준으로 4~7.2배 정도 증가하는 현상을 보이고 있다.

그림 4는 기포혼합경량토의 목표 습윤단위중량과 시멘트 비에 따른 재령 28일의 일축압축강도를 도시화 한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 13kN/m³의 목표 습윤단위중량에서는 시멘트비의 증가에 따른 일축압축강도가 뚜렷이 증가하는 경향을 보였으나, 그 이하의 목표 습윤단위중량에서는 시멘트 비의 증가에 따른 일축압축강도의 증가가 부진한 결과를 나타냈다. 특히, 목표 습윤단위중량 11kN/m³에서 시멘트 비가 24%일 때보다 시멘트 비 32%의 강도가 낮은 경향을 나타내었다. 이러한 이유는 목표 습윤단위중량을 기준으로 배합하였을 때, 시멘트 비가 높아질수록 슬러리의 단위중량이 높아져 기포혼합경량토의 단위중량 조절에 핵심이 되는 기포의 양이 증가하여 연속적인 간극을 형성하였기 때문이라고 판단된다.

표 6. 기포혼합경량토의 일축압축강도

목표 습윤단위 중량(kN/m ³)	시멘트 비(%)	일축압축강(kPa)		
		7일	14일	28일
9	16	25.1	31.8	38.4
	24	44.7	63.2	72.4
	32	34.7	59.5	65.8
11	16	43.5	59.9	69.8
	24	79.1	108.9	180.9
	32	42.9	50.1	70.0
13	16	110.3	154.3	180.5
	24	193.1	221.7	287.4
	32	320.8	390.3	471.4

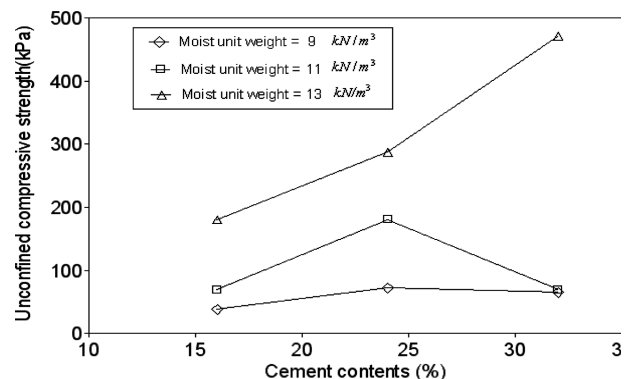


그림 4. 목표 습윤단위중량과 시멘트 비에 따른 일축압축강도(기포혼합경량토, 재령 28일)

4.2.2 타이어혼합경량토의 일축압축강도 특성

타이어혼합경량토의 일축압축시험은 기포혼합경량토와 같은 조건 아래에서 수행되었다. 타이어혼합경량토의 일축압축강도는 재령 7일과 28일의 일축압축강도를 비교 하였을 때, 평균 45.3% 증가하는 경향을 나타내고 있다(표 7 참조). 또한, 동일 시멘트 비에 따른 목표 습윤단위중량의 영향을 비교 하였을 때에도 목표 습윤단위중량이 13kN/m³에서 15kN/m³로 증가할수록 재령 28일을 기준으로 2~2.3배 정도 일축압축강도가 증가하는 현상을 보이고 있다.

표 7. 타이어혼합경량토의 일축압축강도

목표 습윤단위 중량(kN/m ³)	시멘트 비(%)	일축압축강도(kPa)		
		7일	14일	28일
13	16	119.8	154.6	186.7
	24	189.4	240.4	288.5
	32	265.6	325.8	374.9
15	16	270.4	309.9	377.6
	24	426.4	527.3	625.5
	32	640.9	700.6	873.2

그림 5는 타이어혼합경량토의 목표 습윤단위중량과 시멘트 비에 따른 재령 28일의 일축압축강도를 도시화 한 것이다. 타이어혼합경량토의 일축압축강도는 목표 습윤단위중량 13kN/m³보다 15kN/m³에서 시멘트 비의 증가에 따라 더욱 증가하는 경향을 나타내고 있다.

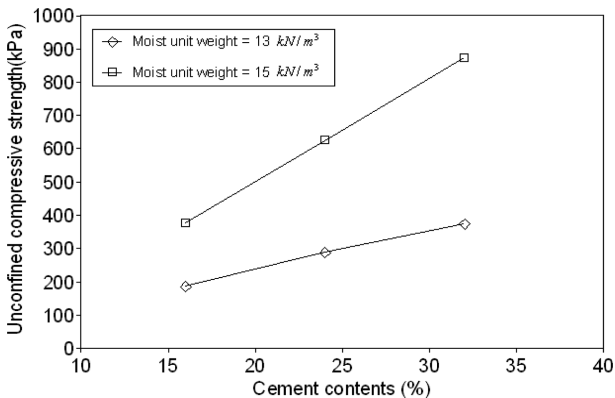


그림 5. 목표 습윤단위중량과 시멘트 비에 따른 일축압축강도(타이어혼합경량토, 재령 28일)

4.2.3 일축압축특성 비교

본 연구의 본래 목적은 기포혼합경량토와 타이어혼합경량토의 목표 습윤단위중량 9, 11, 13kN/m³에 대해서 비교 평가하기로 하였으나, 타이어혼합경량토의 목표 습윤단위중량 9, 11kN/m³에서 타이어 분말이 과하게 배합되어 공시체의 자립이 되지 않는 등의 문제로 13kN/m³에 대해서만 비교 평가하였다.

그림 6는 기포혼합경량토(air foam mixed)와 타이어혼합경량토(tire powder mixed)의 목표 습윤단위중량 13kN/m³의 시멘트 비에 따른 응력-변형률 곡선(재령 28일)을 나타낸 것이다. 두 종류의 경량혼합토는 시멘트 비 32%를 제외하고, 일축압축강도가 비슷한 경향을 나타내었다. 하지만, 기포혼합경량토는 뚜렷한 파괴점을 보이는 반면에 타이어혼합경량

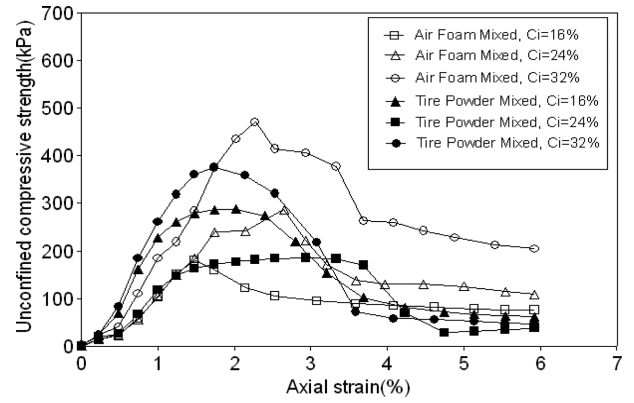


그림 6. 경량혼합토의 시멘트 비에 따른 응력-변형률 곡선($\gamma_g=13$ kN/m³, 재령 28일)

토는 뚜렷한 파괴점 없이 완만한 곡선을 보여주고 있다. 따라서 타이어 분말은 시멘트 고화에 의한 취성적인 성질을 연성적으로 개선하는 효과가 있다고 판단된다. 또한, 그림 7는 기포혼합경량토와 타이어혼합경량토의 목표 습윤단위중량 13kN/m³의 시멘트 비에 따른 일축압축강도를 도시화한 그림이다.

그림 8은 기포혼합경량토와 타이어혼합경량토의 목표 습윤단위중량 13kN/m³에서 재령 28일의 변형계수(E_{50})와 일축압축강도의 관계를 도시화한 것이다. 변형계수와 일축압축강도와의 그래프에서 기포혼합경량토보다 타이어혼합경량토의 기울기가 더 급한 것을 알 수 있다. 이와 같은 관계를 수식화해 보면 기포혼합경량토에 대해서는 식 (4)와 타이어혼합경량토에 대해서는 식 (5)와 같다.

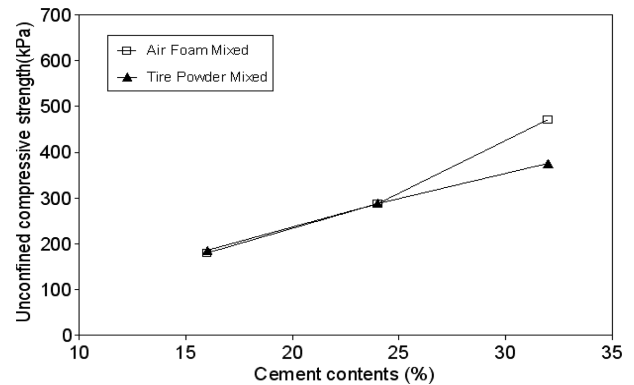


그림 7. 경량혼합토의 시멘트 비에 따른 일축압축강도($\gamma_g=13$ kN/m³, 재령 28일)

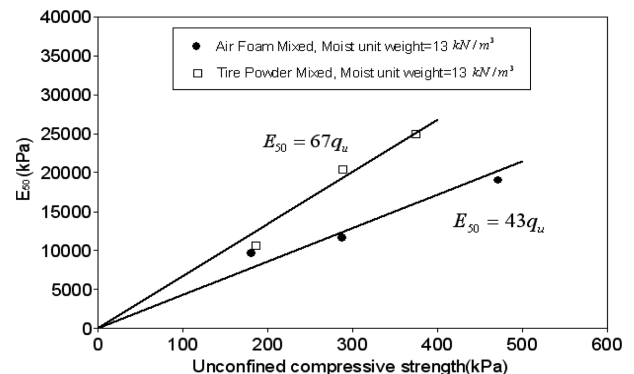


그림 8. 변형계수(E_{50})와 일축압축강도(q_u)와의 관계

$$E_{50} = 43q_u \quad (4)$$

$$E_{50} = 67q_u \quad (5)$$

4.3 삼축압축특성

4.3.1 기포혼합경량토의 삼축압축강도 특성

기포혼합경량토의 비압밀·비배수 삼축압축시험은 단위중량 9kN/m³의 일축압축강도가 매우 낮게 측정되어 이를 제외하고 11kN/m³ 및 13kN/m³에 대해서만 분석하였다. 기포혼합경량토의 비압밀·비배수 삼축압축강도는 일축압축강도에 비해 구속압에 따라 1.13~1.44배 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한, 구속압의 증가에 따라 삼축압축강도의 증가는 뚜렷하지 않고 비슷한 수치를 나타내었다. 표 8은 재령 28일을 기준으로 기포혼합경량토의 목표 습윤단위중량, 시멘트 비 그리고 구속압에 따른 삼축압축강도의 변화를 나타낸다.

표 8. 기포혼합경량토의 삼축압축강도

목표 습윤단위 중량(kN/m ³)	시멘트 비(%)	삼축압축강도(kPa)	
		100kPa	200kPa
11	16	83.9	84.8
	24	204.5	206.4
	32	181.7	189.5
13	16	216.3	226.6
	24	362.5	366.0
	32	652.2	679.1

4.3.2 타이어혼합경량토의 삼축압축강도 특성

타이어혼합경량토의 비압밀·비배수 삼축압축시험은 기포혼합경량토와 동일한 조건에서 수행되었다. 표 9는 재령 28일 타이어혼합경량토의 목표 습윤단위중량, 시멘트 비, 구속압에 따른 삼축압축강도를 나타내고 있다. 타이어혼합경량토의 삼축압축강도는 일축압축강도에 비해 구속압에 따라 1.76~2.61배 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 기포혼합경량토보다 더 큰 증가율을 나타내는 것이다.

표 9. 타이어혼합경량토의 삼축압축강도

목표 습윤단위 중량(kN/m ³)	시멘트 비(%)	삼축압축강도(kPa)	
		100kPa	200kPa
13	16	420.0	424.7
	24	598.8	637.6
	32	949.0	978.4
15	16	712.9	727.4
	24	1100.4	1157.2
	32	1539.4	1594.8

4.3.3 삼축압축특성 비교

표 10은 기포혼합경량토와 타이어혼합경량토의 목표 습윤단위중량 13kN/m³에 대해 시멘트 비, 구속압에 따른 일축압축강도와 비압밀·비배수 삼축압축강도를 나타낸 표이다.

기포혼합경량토와 타이어혼합경량토의 삼축압축강도는 일축압축강도보다 뚜렷히 증가되었다. 특히 타이어혼합경량토의 삼축압축강도는 일축압축강도에 비해 최대 2.61배 증가되었다는 것을 알 수 있다. 그 원인은 타이어혼합경량토의 타

표 10. 경량혼합토의 강도특성(Moist unit weight=13kN/m³)

	구속압	시멘트 비(%)	기포혼합 경량토	타이어혼합 경량토
삼축 압축 강도(kPa)	100kPa	16	216.3	420.0
		24	362.5	598.8
		32	652.2	949.0
	200kPa	16	226.6	424.7
		24	366.0	637.6
		32	679.1	978.4
일축 압축 강도(kPa)	0kPa	16	180.5	186.7
		24	287.4	288.5
		32	471.4	374.9

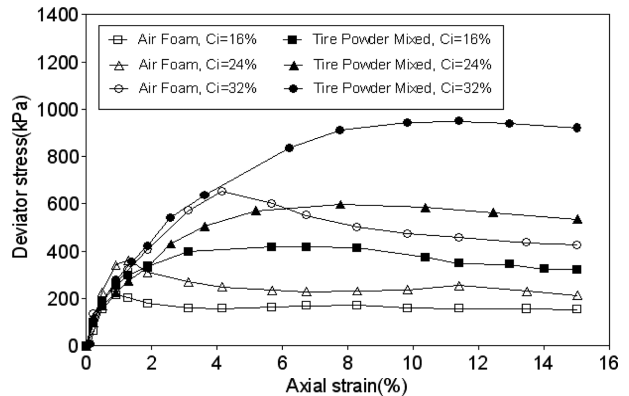


그림 9. 경량혼합토의 시멘트 비에 따른 응력-변형률 곡선($\sigma_3=100$ kPa, $\gamma_g=13$ kN/m³)

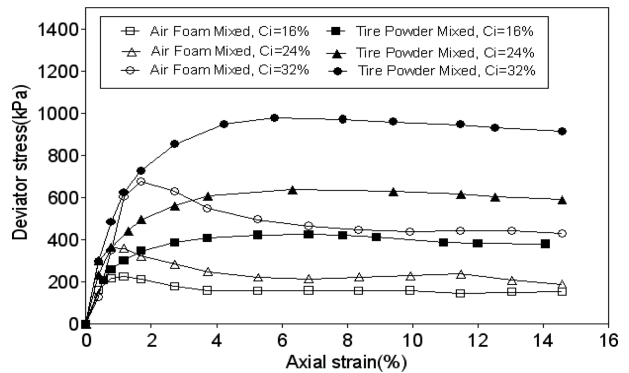


그림 10. 경량혼합토의 시멘트 비에 따른 응력-변형률 곡선($\sigma_3=200$ kPa, $\gamma_g=13$ kN/m³)

이어 분말이 가지고 있는 탄성특성으로 발생한 것으로 판단된다.

그림 9와 10은 기포혼합경량토와 타이어혼합경량토의 목표 습윤단위중량 13kN/m³에 대한 응력-변형률곡선이다. 그림 9~10에서 기포혼합경량토는 침두점이 뚜렷하게 나타나는 반면, 타이어혼합경량토는 변형이 진행됨에 따라 뚜렷한 침두점이 보이지 않는 것을 알 수 있다. 또한, 두 종류의 경량혼합토 모두 초기 변형률에 대한 삼축압축강도 증가율은 구속압이 증가할수록 급한 경향을 보였다.

5. 결 론

본 연구에서는 기포와 타이어를 섞은 경량혼합토의 강도와

변형특성을 파악하기 위하여 일축압축시험과 비압밀·비배수 삼축압축시험을 수행하여 실험 결과를 분석한 결론은 다음과 같다.

1. 대부분의 공시체가 단위중량과 시멘트비가 높아질수록 일축압축강도가 증가하는 경향을 보였다. 하지만, 기포혼합 경량토의 경우 목표 습윤단위중량 9kN/m³와 11kN/m³에서 시멘트비 24%보다 32%의 일축압축강도와 비압밀·비배수 삼축압축강도가 낮게 측정되었다. 그 이유는 시멘트비가 높아질수록 더 많은 기포가 들어가야 하기 때문에 기포로 인한 간극이 강도에 많은 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다.
2. 일축압축시험의 응력·변형률 곡선에서 대부분의 기포혼합 경량토의 경우 뚜렷한 침두점을 보였지만, 타이어혼합경량토의 경우 침두점이 뚜렷하지 않은 형태를 보였다. 이는 타이어 분말의 탄성 특성에 의한 것이라고 판단된다.
3. 기포혼합경량토와 타이어혼합경량토의 목표 습윤단위중량 13kN/m³에 대해서 비교하였을 때 시멘트 비 16%, 24% 경우 비슷한 강도를 보였다. 하지만, 시멘트 비 32%의 경우 기포혼합경량토의 일축압축강도가 타이어혼합경량토보다 1.27배 크게 나타났다.
4. 비압밀·비배수 삼축압축시험에서 기포혼합경량토는 변형률이 증가함에 따라서 파괴점이 뚜렷한 변형특성을 보였으나, 타이어혼합경량토의 경우에는 파괴점이 뚜렷하지 않은 소성변형을 보였다.
5. 기포혼합경량토와 타이어혼합경량토의 비압밀·비배수 삼축압축강도는 일축압축강도와 비교한 결과, 기포혼합경량토는 1.13~1.44배 증가하였다. 그리고 타이어혼합 경량혼합토는 1.76~2.61배 증가하였다. 타이어혼합 경량혼합토의 삼축압축강도가 비교적 크게 증가한 이유는 구속압에 의해 공시체 내의 타이어 분말이 가진 고유의 탄성특성으로 기인한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국해양과학기술원 기관역량과제인 “해상풍력 지지구조물 건설기술 개발(PE98817)”의 연구성과의 일부임을 밝히며 재정지원에 감사드립니다.

참고문헌

김윤태, 강효섭(2009) 직접전단시험에 의한 페타이어 혼합경량토의 전단특성 연구, **한국해양공학회지**, 한국해양공학회, 제23권 제3호, pp. 20-29.

김윤태, 강효섭(2008) 페타이어 분말을 이용한 혼합경량토의 역학적 특성연구, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제28권 제4호, pp. 247-253.

김윤태, 권용규, 김홍주, 조상찬(2005), 섬유혼합 보강경량토의 거동 특성, **대한토목학회 정기학술대회논문집**, 대한토목학회, pp. 3381-3384.

김홍택, 김영운, 강인규, 김경모, 박준용, 박시삼(2001) EPS bead 혼합경량토의 재료적 특성과 보강토 구조물 뒤채움재료의 활용, **Geosynthetics Conference**, Nov. 30, 2001, pp. 257-264.

백원진, 이강일(2006), 뒤채움재료 이용한 고로 수쇄슬래그의 토압특성에 관한 실험적 연구, **한국지반공학회 논문집**, 한국지반공학회, 제22권 제8호, pp. 119-127.

송준호, 임종철, 홍석우(2008), 원료토의 특성에 따른 경량기포혼합토의 압축강도 영향인자, **한국지반공학회 논문집**, 한국지반공학회, 제24권 제1호, pp. 157-166.

신방용, 이종규(2000) 페스티로폴 입자와 현장 발생토를 활용한 경량혼합토의 공학적 특성, **한국지반환경공학회 논문집**, 한국지반환경공학회, 제1권 제1호, pp. 43-50.

윤길림, 김병탁(2004) 경량기포혼합토의 압축 및 강도특성 연구, **한국지반공학회 논문집**, 한국지반공학회, 제20권 제4호, pp. 5-13.

윤길림, 유승경(2005) 수중양생 및 수압조건을 고려한 경량기포혼합토의 거동, **한국지반공학회 논문집**, 한국지반공학회, 제21권 제4호 pp. 21-29.

윤길림, 유승경, (2004), 현장발생토를 활용한 경량기포혼합토의 강도 및 변형특성, **한국지반공학회 논문집**, 한국지반공학회 제20권 제9호, pp. 125-131.

Matsuda, H., Ohira, N., Takamiya, K., Shinozaki, H., Kitayama, N. and Murakami, M.(2003), Application of granulated blast furnace slag to light weight embankment, *Proceedings of the international conference organized by British Geotechnical Association and held in Dundee*, pp. 603-611.

Pierce, CE. and Blackwell, M.C.(2003), Potential of Scrap Tire Rubber as Lightweight Aggregate in Flowable Fill, *Waste Management*, Vol. 23, pp. 197-208.

横田聖哉, 三信雄(1996), 기포혼합 경량토공법, **토목기술**, 제4권 제6호, pp. 45-54.

土田孝, 長井興治, 湯川雅之, 岸田澤夫(1996) 山本實: 岸壁の裏め材として打設さわそ輕量混合處理土の土質特性, **港灣坡研工資料**, No. 833.

(접수일: 2012.5.30/심사일: 2012.6.27/심사완료일: 2012.10.24)