

낙동강 하구역 준설토 재활용을 위한 시멘트 혼합경량토의 압축강도 특성 연구

김윤태* · 김홍주* · 권용규*
*부경대학교 해양공학과

Compressive Strength Characteristics of Cement Mixing Lightweight Soil For Recycling of Dredged Soil in Nakdong River Estuary

YUN-TAE KIM*, HONG-JOO KIM* AND YONG-KYU KWON*
*Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Cement Mixing Lightweight Soil 시멘트 혼합경량토, Dredged Soil 준설토, Cement Content 시멘트 함량, Initial Water Content 초기 함수비, Air Foam Content 기포 함량, Uniaxial Compression Test 일축압축강도시험

ABSTRACT: In this research, the behavior characteristics of cement mixing lightweight soil (CMLS) for recycling of dredged soil in the Nakdong River estuary are experimentally investigated. CMLS is composed of the dredged soil from Nakdong River estuary, cement, and air foam. For this purpose, uniaxial compression tests are carried out for artificially prepared specimens of CMLS, with various initial water contents, cement contents, and mixing ratio of dredged soils.

The experimental results of CMLS indicated that the compressive strength is strongly influenced by the cement contents, rather than water contents and air foam. Compressive strength of CMLS increased with an increase in cement content, while it decreased with an increase in water content and air foam content. It was also found that the modulus of deformation E50 was in a range of 44 to 128 times greater than the value of uniaxial compressive strength, cured in 28 days.

1. 서 론

낙동강 하구둑 건설과 신항만 건설 공사 등 각종 국책 대형 공공사업과 관련하여 해마다 엄청난 양의 준설토가 발생하고 있고 앞으로도 지속적인 항로유지 준설토와 오염해역 준설토로 인하여 준설토량이 증가할 전망이다. 현재 준설토는 대부분이 위해 단순투기 및 육상매립에 의존하고 있다. 폐기물의 해양투기에 관한 국내법으로는 투기되는 폐기물 및 투기해역과 해역별 수질기준 등이 마련되어 있는 「해양오염방지법」이 있다. 그러나, 아직 준설토의 처리/처분 또는 재활용에 직접 관련된 법적 기준이 제정되어 있지 않은 상태이다(송영채 등, 2004). 준설토는 육상에서 발생하는 일반폐기물과는 달리 지정된 해역에서 투기되는 것이 아니라 각 지방자치단체장이 발급하는 공유수면 점·사용허가에 의하여 무해역에 버릴 수 있는데 준설토가 오염되었을 경우 2차 오염으로 인한 어장의 피해와 연안 오염 등의 환경문제를 야기할 수 있으며, 자원의 재활용 면에서도 낭비될 수 있다.

국내에서 발생하는 대부분의 준설토는 항로유지 준설토와 항만건설에 따른 준설토이며 항만의 저면이 오염되었을 경우 청소준설토가 실시되고 있다. Table 1은 부산 지방 해양수산청이 집계한 준설토량이며(한국해양연구소, 2000), 1993년부터 2000년까지의 준설토량은 점진적으로 증가하는 추세이나 발생된 준설토의 처리는 주로

위해 단순투기 및 육상매립에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 꾸준히 발생하는 준설토를 적절히 이용할 수 있는 준설토 재활

Table 1 Annual generation of dredged soil (Korea Ocean Research & Development Institute, 2000)

Year	Amount of dredged (m ³)	Treatment method	Type of dredged soil
1993	52,959	Ocean disposal	-
1994	41,900	Ocean disposal	-
1995	37,080	Ocean disposal	-
1996	117,030	Reclamation	-
1997	130,900	Ocean disposal	Peat,
	311,000	Reclamation	Sand with gravel
1998	155,797	Ocean disposal	
	1396,639	Reclamation	Peat
	1934,055	Ocean disposal	Peat
1999	671,283	Reclamation,	
		Ocean disposal	Peat
	213,000	Ocean disposal	
2000	173,000	Reclamation,	
		Ocean disposal	-
Since 2001	85,452,782 (Dredging plan)	Reclamation, Ocean disposal	-

제1저자 김윤태 연락처 : 부산광역시 남구 대연3동 599-1번지
051-620-6229 yuntkim@pknu.ac.kr

용 기술이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 낙동강 하구역 일대에서 항로유지 준설과 항만건설시 발생하는 준설토를 재활용하기 위하여 이 지역에 분포하는 연약점토를 대상으로 하였다.

일반적으로 연약점토층의 공학적 성질은 흙 입자의 배열뿐만 아니라 점토광물의 성분, cementation 효과 및 입자간의 전기적인 작용력에 의해 서로 상이한 특성을 나타낸다. 낙동강 유역 부근에 퇴적된 연약지반에 존재하는 대표적인 3대 점토 광물로는 Illite, Kaolinite 및 Chlorite이며 그 밖에 Halloysite, Smectite 등의 종류가 있다.

낙동강 하구역 일대 지역에 대하여 방사성 탄소연대측정(radiocarbon dating, ^{14}C dating)에 의한 심도별 퇴적속도는 Table 2에 나타낸 것과 같다. 상부층의 퇴적속도는 0.3 cm/year, 하부층의 퇴적속도는 1.35 cm/year 정도인 것으로 나타났으며, Shogaki 등(2005)에 의해 조사된 3.7~7.8 mm/year는 위에서 언급한 범위에 속하는 것으로 나타났다. 낙동강 유역의 부산점토는 상부와 하부층의 퇴적속도가 뚜렷한 차이를 보이고 있는 것으로 나타나 서로 다른 퇴적 환경 하에서 형성되었음을 알 수 있다. 즉 하부층의 경우 해수면이 상승하여 수심이 증가되고 있는 비교적 불안정한 수위상태에서 상대적으로 빠른 퇴적속도를 보여주고 있는 반면, 상부층은 해수면이 최고에 달한 이후 비교적 안정된 수위 상태 하에서 퇴적되어 상대적으로 느린 퇴적속도를 보이고 있다(Chung, 2002). 이와 같은 영향은 제4기 이후 조간대(intertidal), 내만성 친해(Neritic), 조하대(Subtidal)와 같은 해수면의 변화와 밀접한 관련이 있다.

이러한 특성을 가지는 낙동강 하구역에서 최근에 이르러 국가공단, 주거단지, 공공시설 등을 위한 대단위 조성공사 등의

사회간접자본에 대한 투자가 지속적으로 이루어지고 있으며, 이로 인해 대량의 준설토가 발생되고 있다. 이렇게 발생한 준설토를 단순투기 하지 않고 유효적절하게 이용할 수 있는 기술을 확보함으로써 환경오염 방지와 매년 수백억원 이상의 국가 예산을 절약하는 경제적인 효과를 가져올 수 있는 계기가 될 것이다. 준설토 재활용 기술이 발달한 선진국의 예를 살펴보면 준설토를 단순매립하기 보다는 준설토의 특성에 따라서 해양환경복원 및 인공 서식지 조성, 친환경적인 친수공간 개발, 건설재료로 이용하는 등의 적극적인 활용이 이루어지고 있는 실정이다. 따라서 국내에서도 준설토를 재활용하기 위한 관련 기술개발이 시급한 실정에 이르렀다.

한편 일본에서는 1976년 이후 준설토를 활용한 경량기포혼합토가 개발되어 건설공사현장에서 사용되어지고 있다. 일반적으로 경량기포혼합토는 일반 지반재료에 비해 가볍고 유동성이 좋기 때문에 경량토 성토, 각종 구조물의 뒷채움재나 구조물 매립, 공동충진 등에 광범위하게 사용될 수 있다. 이 외에도 지반의 부등침하를 방지하기 위한 충진재료로서의 역할과 지하매설물의 뒷채움재로서 이용될 수 있다.

경량기포혼합토에 대한 기존 연구는 주로 경량혼합토의 단위중량에 영향을 주는 원료토의 물리적 특성, 입도 특성 및 유기물질의 함량 특성을 분석하였다. 그 중에서 원료토에 조립분이 많아지면 경량혼합토 내의 기포가 소포하는데 영향을 준다고 보고되었으며 유기물질의 함유량과 기포가 소포하는 양은 거의 직선적인 관계를 가지는 것으로 나타났다. 또한 건조 양생시 초기경화에 따른 단위중량은 수분의 감소와 체적수축의 영향으로 변화를 보였으나, 실제 대기중에 타설된 경량혼합토는 복토된 상태이므로 거의 건조되지 않으므로 단위중량의 변화는 없는 것으로 알려졌다(Tsachida et al., 2004). 이 외에도 Tsachida 등(1996)은 경량혼합토를 이용한 타설 재료로서의 개선과 수중에서 타설된 경량토의 거동에 대해서 많은 연구를 하였으며, Otani 등(2002)은 X-ray CT scanner를 통하여 SGM(Super Geo-Material)의 특성에 대한 연구를 수행한 바 있다.

국내에서도 준설토를 재활용하기 위한 방안으로 시멘트와 기포 또는 EPS 등을 준설토와 혼합하여 연구한 사례가 있다. 준설토 재활용에 관련된 국내의 연구를 살펴보면, 경량기포혼합토의 압축 및 강도특성 연구(윤길림 등, 2002), 준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적 특성 연구(김주철 등, 2002), 준설토와 EPS를 혼합한 경량혼합처리토의 강도 특성(김수삼 등, 2002) 등이 있다. 주로 경량혼합토의 역학적 특성에 대한 연구가 주를 이루고 있으나 낙동강 하구역에서 채취한 준설토 재활용을 위한 연구사례가 미비하므로 본 연구에서 낙동강 준설토를 이용하여 시멘트 혼합경량토의 거동 특성에 대한 연구를 수행하였다.

따라서, 본 연구에서는 낙동강 하구역 일대에서 항로유지 준설과 항만건설시 발생하는 준설토를 재활용하기 위한 일환으로 준설토를 이용하여 시멘트 함량, 초기 함수비, 기포제 함량을 변화시켜 시멘트 혼합경량토를 제작한 후 일축압축강도 시험을 수행함으로써 응력-변형 거동 그리고 압축강도 특성 등을 고찰하였다.

Table 2 Characteristics of Busan clay

Content		Remark
Generation era	Cenozoic era. (No. 4th)	Young clay Interior and exterior in 4,000 to 12,000 year
Type of mineral	Illite (50~70%) Kaolinite (10~25%) Chlorite (7~30%) Semectite (<10%)	Illite and Kaolinite are main structure mineral
Sedimentation rate	Upper: 0.3 cm/year Lower: 1.35 cm/year	Related with change of sea level ((intertidal), (Neritic), (Subtidal)) Boundary of upper and lower layers is usually about 20~30 m, but depends on site specific condition.

2. 시멘트 혼합경량토

시멘트 혼합경량토는 Fig. 1과 같이 재료의 경량화를 유지하면서 압축강도를 증가시키기 위해 준설토에 시멘트와 기포를 혼합한 형태로 구성되어 있다.

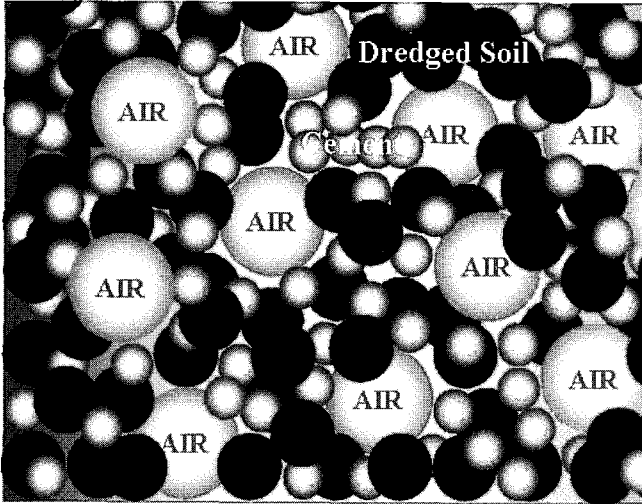


Fig. 1 The conceptual diagram of cement mixing lightweight soil

시멘트 혼합경량토는 슬러리 상태인 지반재료에 물과 시멘트 등의 고화제를 혼합하여 유동화시키고 기포를 혼합하여 경량화한 흙으로서 일반 토사에 비해 적절한 밀도와 강도를 임의로 조절할 수 있는 균질한 지반 재료이다. 시멘트 혼합경량토는 기포와 시멘트 그리고 함수비를 조절하여 사용목적에 따라 단위중량과 압축강도를 조절할 수 있다. 이를 적용함으로써 성토부의 침하와 인접지반의 변형을 억제하여 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 측면방향의 유동을 경감시켜 구조물의 변위를 방지할 수 있다. 또한 항만 및 해양 환경 구조물을 대상으로 사용가능하며, 유동성이 충분하므로 pump압송에 따른 시공이 가능하고, 저품질인 흙도 이용할 수 있어 준설토의 재활용 효과 등의 장점이 있다(태평양 Soil, 2004).

준설토에 혼합된 기포로 인해 예상되는 압축강도의 감소를 보완하기 위하여 고화제를 혼합하게 되는데, 준설토에 조립분이 많아지면 경량기포혼합토 내의 기포가 소포하는데 영향을 준다고 보고되었으며 기본적으로 고화제와 기포의 혼합량에 따라서 압축강도의 변화가 큰 것으로 알려져 있으나 고화제 함유량이 일정하더라도 습윤단위중량의 증가로 인해서 압축강도가 증가한다.

본 연구에서 사용한 낙동강 일대의 점토시료에 대한 점토광물의 정량분석결과 분포는 Table 3과 같으며, 점토광물의 구조는 face to edge 및 edge to edge의 복합구조로서 염기성 면모 구조(salt-flocculation)를 나타낸다(한영철, 2002).

기존 연구결과에 따르면 낙동강 하류지역의 연약점토 화학 성분은 Table 4와 같이 나타난다(황진연 등, 1998).

Table 3 Distribution of clay mineral in Nakdong river

Area	Illte (%)	Kaolinite (%)	Chlorite (%)	Smectite (%)	Remark
Kimhae/Jangyoo	49.5~51.2	21.3~22.8	19.3~21.4	6.2~8.1	한영철, (2001)
Nakdong river valley	45.8~56.1	17.9~24.6	3.7~10.0	3.7~10.0	최진용, 김석윤 (1998)
Nakdong river estuary	47.5~55.9	18.9~20.2	23.5~29.6	1.8~6.6	(1998)

Table 4 Chemistry component of soft clay in Nakdong river

Chemistry component (%)										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	Ti ₂ O	P ₂ O ₅	
47~65	13~21	3~11	1~9	1~4	1~3	0.2~3	≤1	≤1	≤1	

낙동강 하구역의 해양 준설토 시료는 부산신항 배후부지에 서 백호를 이용하여 채취 하였고 실내 물성실험을 통하여 채취한준설토의 기본적인 물리적 특성을 파악하였다. 그 결과는 Table 5에 나타난 바와 같이 액성한계가 39.2%로서 준설토 채취 현장함수비 125%의 약 3배정도이며, 비중은 2.60, 소성지수는 18.5%로서 사용한 준설토를 통일분류법(USCS)으로 분류하여 CL로 나타났다. 입도분석 결과 조립도가 거의 없는 세립토로서 점토성분에 실트가 함유된 실트질 점토로 확인되었다.

Table 5 Properties of dredged soil

Initial water content (%)	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Specific gravity	Percent passing		USCS
				No. 200 sieve (%)		
125	39.2	18.5	2.60	81.2		CL

사용된 기포제는 표면활성제라고도 불리는 계면활성제로서 형상에 관계없이 시멘트가 응결하고 경화될 때까지 기포를 안정되게 유지하여야 하며, 기포제는 타 재료와 혼합한 상태에서 안정한 기포를 얻을 수 있어야 한다. 기포의 생성을 위하여 기포제와 물을 1:20의 비율로 혼합한 후 공기압을 가해 사전에 발포시키는 프레폼 방식을 사용하였다.

Photo. 1은 이번 실험에서 제작된 시멘트 혼합경량토의 공시체로서 지름 7.2cm, 높이 14.8cm의 크기이고 표면의 상태로부터 기포의 발포상태를 한눈에 알 수 있다.

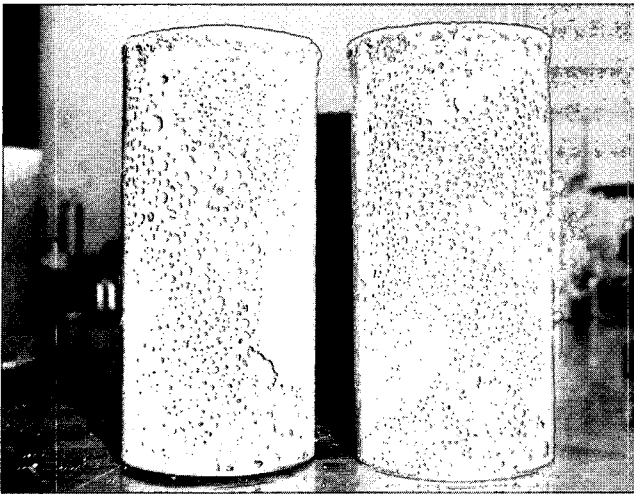


Photo. 1 Manufactured Specimen of cement mixing lightweight soil

시멘트 혼합경량토에서 고화제로 사용되는 시멘트는 물과 반응하여 수화물이 되기 때문에 강도발현을 한다. 일반적으로 점성토 등에는 강도발현이 좋은 보통 포틀랜드 시멘트 또는 고로 시멘트 B종을 사용하며, 유기질토 등에는 시멘트계 고화제를 사용한다. 본 실험에서는 보통 포틀랜드 시멘트를 이용하였으며 그 화학성분은 Table 6과 같다.

Table 6 Chemical properties of cement (%)

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

3. 실험방법

3.1 시멘트 혼합경량토의 제작

본 연구에서는 시멘트 혼합경량토의 토질시료로서 특성을 조사하기 위해 직경 7.2cm, 높이 14.8cm의 투명 PVC원형 케이스에 고화제 및 기포가 혼합된 흙을 넣고 양생하여 공시체를 제작하였다. 배합조건에 따라 준설토, 고화제, 기포, 증류수를 혼합하여 시멘트 혼합경량토 공시체를 제작하였으며, Table 7은 본 시험에 사용된 배합조건을 나타낸다.

시멘트 혼합경량토 제작을 위한 배합조건은 준설토에 대한 중량비로서 시멘트 혼합경량토의 기본적인 역학적 특성분석을

Table 7 Mixing and test conditions

	Mixing condition
Cement content, Ci (%)	8, 12, 16, 20
Water content, Wi (%)	125, 156, 187, 218, 250
Air foam content, Ai (%)	1, 2, 3, 4, 5
Curing time, Tc (day)	7, 14, 28

위하여 공시체 각각의 함수비는 준설토의 자연 함수비에 대해 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2배가 되게 배합하였다. 공시체 제작에 따른 기포의 소포를 최소화하기 위하여 발포시킨 기포를 평균 5분 이내에 배합하였다. 일축압축시험시 응력집중을 방지하기 위해 trimming을 실시하여 재하면을 매끄럽게 하였으며 부분적으로 흠이 패인 곳은 석고로 도포하였다.

3.2 일축압축강도시험

Photo. 2는 시멘트 혼합경량토 공시체의 일축압축강도를 측정하기 위해 사용되어진 Geocomp사에서 제작한 일정변형률(CRS)시험기를 나타내고 있다.

제작된 공시체로 일축압축강도시험을 실시하여 재령 7일, 재령 14일 그리고 재령 28일의 양생기간을 기준으로 압축강도를 측정하였다. 일축압축시험시 축변형률은 0.7%/min으로 제어되었으며, Photo. 3은 일축압축강도시험시 파괴된 공시체를 나타내고 있다.

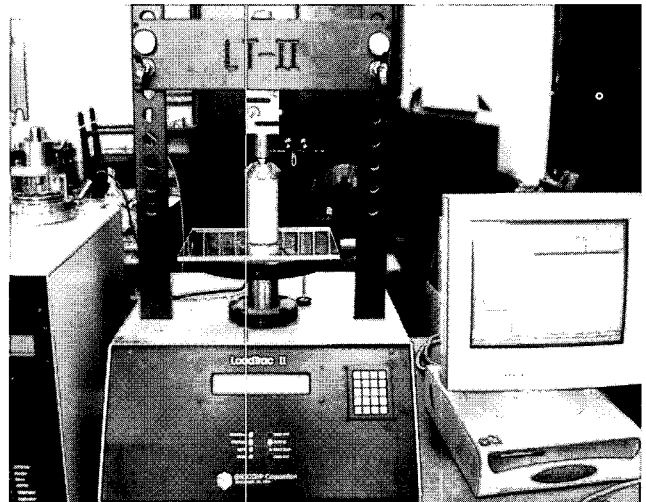


Photo. 2 Uniaxial compression test

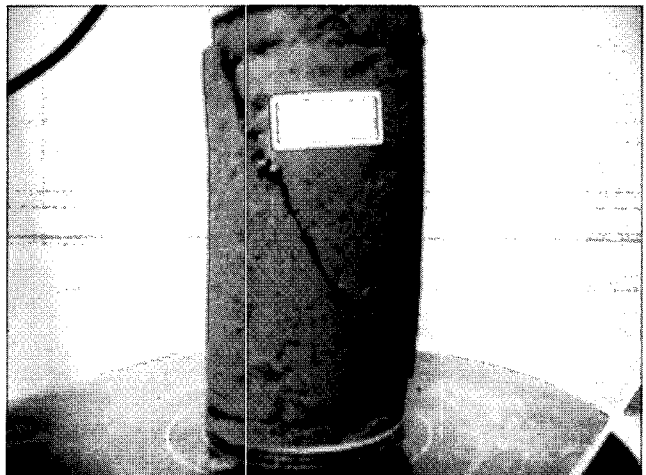


Photo. 3 Specimen of uniaxial compression strength test

4. 실험결과 및 분석

4.1 응력-변형 거동 특성

시멘트 혼합경량토의 응력-변형거동 특성을 분석하기 위해 일축압축강도 시험을 수행하였다.

Fig. 2는 초기 함수비 156%와 기포 함유율 2%에서 시멘트 함유율이 20%일 때 양생기간에 대한 응력-변형 곡선을 나타낸다. 같은 배합조건으로 양생기간에 따른 응력-변형 곡선을 보면 최대 압축강도는 양생일이 증가할수록 커지는 것을 알 수 있다. 최대 일축압축강도에서 변형률은 2.7%~3.4%의 범위를 가지고 있으며, 양생일이 증가할수록 최대 압축강도까지의 변형률은 감소하는 것을 알 수 있다.

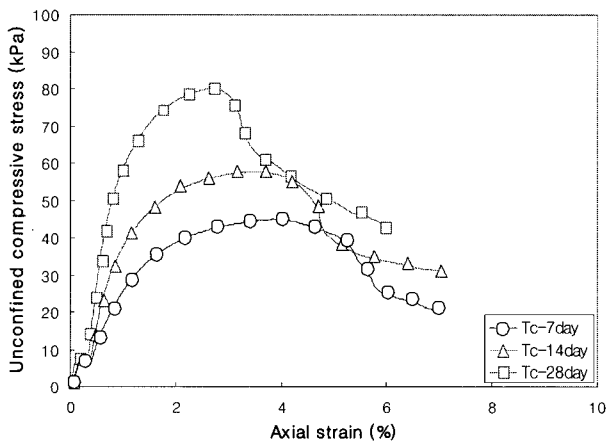
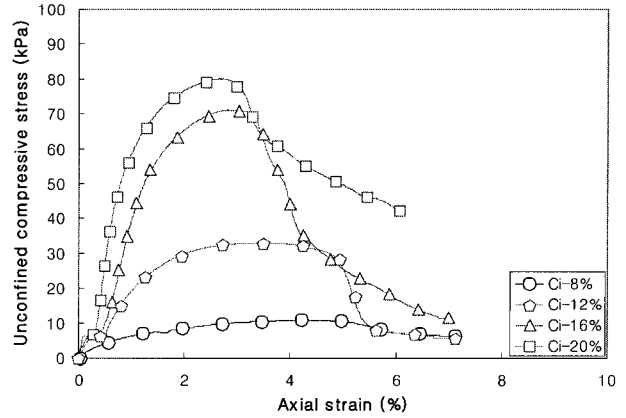


Fig. 2 Stress-strain behavior with respect to curing time

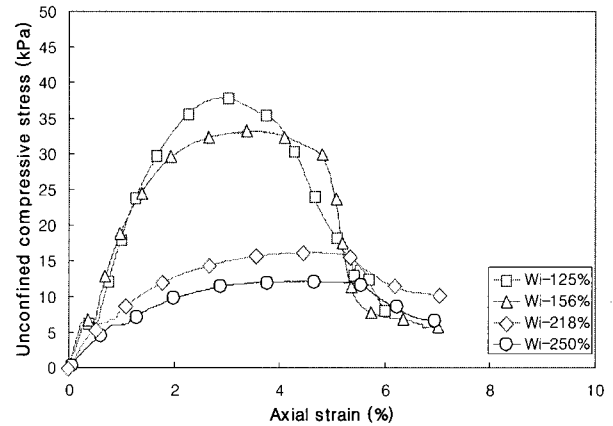
Fig. 3은 시멘트 혼합경량토에 혼합되는 재료의 함유율에 따른 응력-변형 곡선을 나타내는 그림으로서 양생기간에 따른 각 재료들의 응력-변형 거동과 거의 유사한 경향을 보이고 있다. Fig. 3 (a)는 초기 함수비 156%, 기포 함유율 2%에서 시멘트 함유율이 8%, 12%, 16%, 20%로 증가할 때의 응력-변형 곡선이다. 시멘트 함유율이 증가할수록 최대 압축강도가 커지고, 압축강도까지의 기울기 역시 커지며, 최대 압축강도 발현 후의 응력감소 또한 크게 일어난다. Fig. 3 (b)는 시멘트 함유율 12%와 기포 함유율 2%조건에서 함수비 증가에 따른 응력-변형 곡선을 나타내고 있으며, 함수비가 증가할수록 최대 압축강도는 작아지고 최대 압축강도까지의 기울기도 작아지며, 최대 압축강도 이후 응력감소 또한 적게 일어난다. Fig. 3 (c)는 시멘트 함유율이 12%, 초기 함수비가 156%일 때 기포 함유율의 증가에 따른 응력-변형 곡선이다. 기포 함유율이 증가할수록 최대 압축강도가 감소함을 알 수 있고, 최대 압축강도 이후 응력감소 역시 적게 발생함을 알 수 있으며, 최대 압축강도까지의 변형률은 기포 함유율에 무관하게 거의 같은 변형률 위치에서 나타났다.

4.2 단위중량의 변화 특성

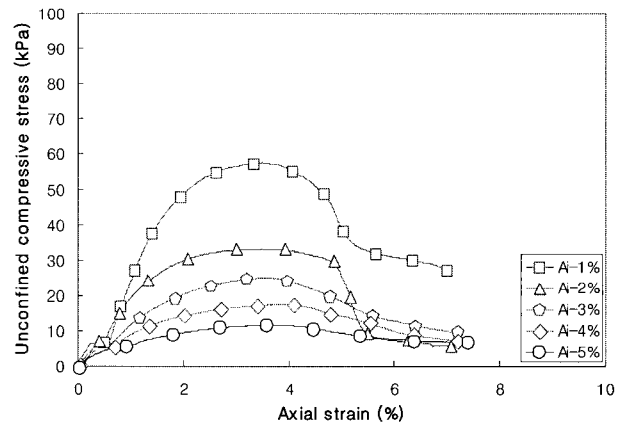
Fig. 4는 시멘트 혼합경량토의 배합특성에 따른 단위중량의



(a) Cement content



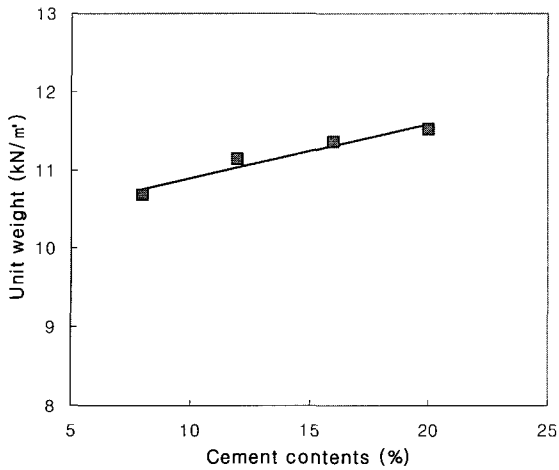
(b) Water content



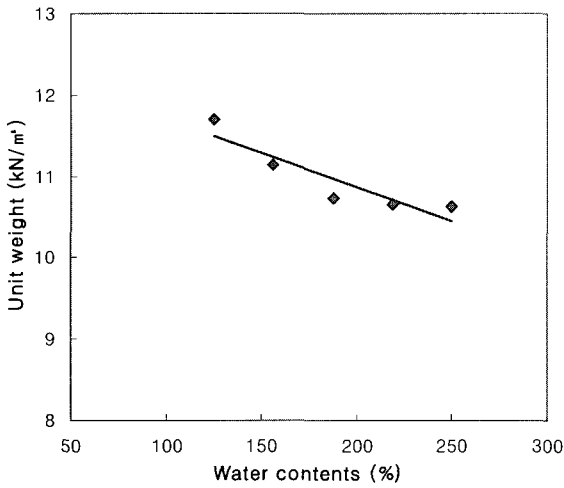
(c) Air foam content

Fig. 3 Stress-strain behavior

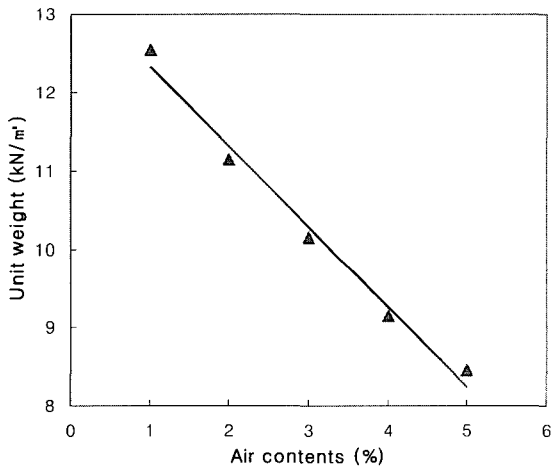
변화를 나타내고 있다. Fig. 4 (a)는 시멘트의 함유율에 따른 단위중량의 변화를 나타내고 있다. 초기 함수비 156%와 기포 함유율 2%에서 시멘트 함유율이 8%, 12%, 16%, 20%로 증가함에 따라 단위중량 역시 증가함을 보여주고 있으며 이는 혼합되는 재료 중 시멘트의 단위중량이 가장 크기 때문에 시멘



(a) Unit weight-cement content relationship



(b) Unit weight-water content relationship



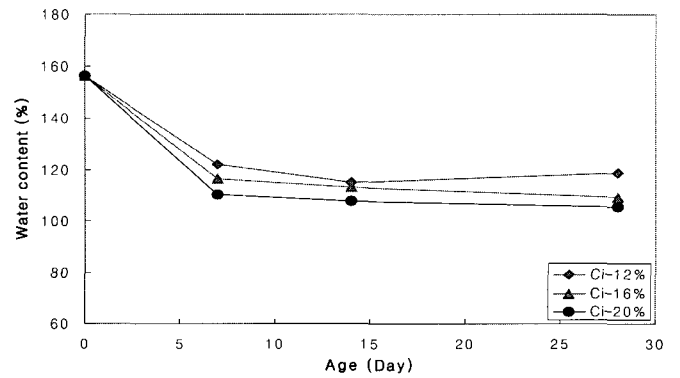
(c) Unit weight-foam content relationship

Fig. 4 Variation of unit weight of cement mixing lightweight soil

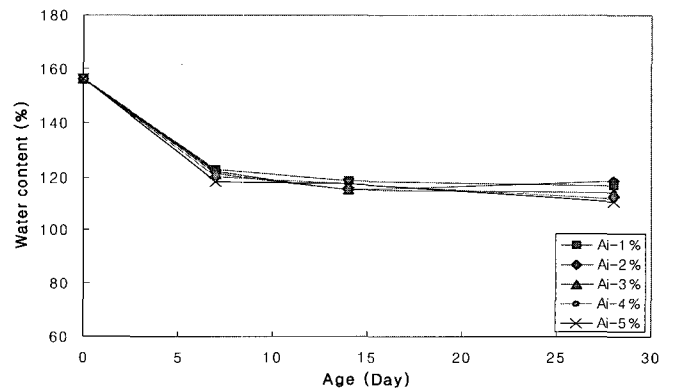
트 함유율 증가에 따라 단위중량 역시 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 4 (b)는 함수비 변화에 따른 단위중량의 변화를 나타내는 그림이다. 시멘트 함유율이 12%이고, 기포 함유율이 2%일 때 함수비가 125%, 156%, 187%, 218%, 250%로 증가함에 따라 단위중량은 점차적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 함수비가 증가함에 따른 단위중량의 차는 약 1kN/m³으로 이 역시 많은 변화는 보이고 있지 않으며, 함수비가 높아질수록 단위중량의 감소율이 적어지는 경향을 볼 수 있다. Fig. 4 (c)는 기포 함유율에 따른 단위중량의 변화를 보여주는 그림으로서 시멘트 함유율이 12%이고, 초기 함수비가 156%일 때 기포 함유율이 1%, 2%, 3%, 4%, 5%까지 증가함에 따라 단위중량의 변화가 감소하는 경향을 보이고 있으며, 다른 혼합재료에 비해 기포 함유율의 적은 변화에서도 큰 단위중량의 변화를 보인다. 이는 기포가 시멘트나 사용되는 증류수의 단위중량에 비해 훨씬 적은 값의 단위중량을 가지므로 공시체가 만들어질 때 기포의 함유율이 증가함에 따라 기포가 공시체에서 차지하는 부피가 커지는 것에 기인하는 것으로 판단되어 진다.

4.3 함수비 변화 특성

Fig. 5는 시멘트 혼합경량토의 배합설계 이후 소비되는 물의



(a) Cement content



(b) Foam content

Fig. 5 Water content change with respect to curing time

함량을 알아보기 위해 초기에 적용된 함수비와 양생기간 7일, 14일, 28일의 함수비를 각각 측정하여 나타낸 그래프이다.

Fig. 5 (a)는 초기 함수비가 156%이고, 기포 함유율이 2%일 때 각 시멘트 함유율에서 양생기간에 대한 함수비의 변화를 나타내는 그림으로서 양생기간이 길어질수록 함수비가 줄어드는 것으로 보아 배합 이후에 일어나는 시멘테이션 효과에 의한 수화작용이나 건조수축에 의해 소비되는 물의 양이 증가하는 것으로 판단되어 진다. 그리고 시멘트 함량이 증가할수록 초기 함수비의 감소가 더 크게 일어나며, 양생기간 7일 이후에 거의 일정한 상태를 유지하는데 이는 시멘트 함유율이 증가할수록 수화작용에 필요한 물의 양이 증가하기 때문에 초기에 물 소비가 많이 일어나는 것으로 판단되어 진다. Fig. 5 (b)는 시멘트 함유율 12%와 초기함수비 156%의 조건에서 기포 함유율에 따른 함수비 변화를 나타내고 있으며, 양생기간이 증가함에 따라 함수비의 변화는 감소하는 경향을 보이고 있다. 기포 함유율에 따른 함수비는 시멘트 함유율에 따른 함수비의 변화와 같은 경향을 보이나 기포 함유율과 상관없이 모든 조건에서 거의 일치하는 곡선을 나타내고 있는 것으로 보아 기포는 양생기간에 따른 함수비의 변화에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

이와 같이 함수비가 양생일에 따라 변화한 결과는 보강 혼합토의 역학적 특성에서 체적의 변화 유사한 결과를 보였다(송창섭 등, 2002).

4.4 압축강도 특성

Fig. 6은 시멘트 함유율에 따른 압축강도의 특성을 양생기간 별로 나타낸 그림이다. Fig. 6은 양생기간 7일, 14일, 28일의 재령일에서 시멘트 함유율이 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 것을 나타낸다. 양생기간이 길어질수록 시멘트 함유율의 증가에 따른 압축강도의 증가가 더 커짐을 알 수 있으며, 28일에서 가장 큰 압축강도의 증가율을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

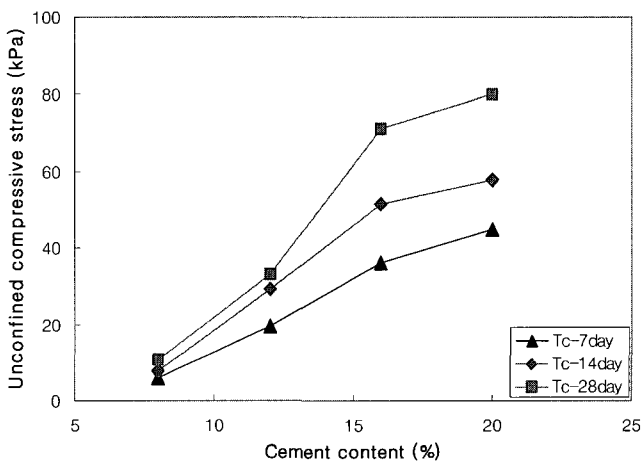


Fig. 6 Compressive strength change with cement content

Fig. 7은 함수비의 변화에 따른 압축강도의 변화 특성을 나타낸 그림으로 함수비가 증가함에 따라 압축강도가 작아짐을 알 수 있으며, 감소 곡선은 양생기간 달라져도 거의 유사한 형태를 보인다.

Fig. 8은 기포 함유율에 따른 압축강도 특성을 나타낸 그림으로서 Fig. 8에서는 기포 함유율이 증가할수록 압축강도는 작아지며, 강도 감소율 또한 줄어드는 것으로 나타났다.

이와 같이, 시멘트 혼합경량토의 압축강도는 각각의 구성요소에 의존하여 압축강도를 발현하고 있어 임의의 배합조건에서 압축강도 크기를 추정하는 것은 매우 어렵다고 할 수 있으며, 임의의 배합조건으로부터 압축강도의 크기를 추정하기 위해서 보다 많은 배합조건에서의 실험 자료가 필요할 것으로 판단되어 진다.

시멘트 함유율, 함수비, 기포 함유율에 따른 7일강도와 28일 강도 사이의 관계는 Fig. 9와 같이 나타났다.

시멘트 함유율과 기포 함유율에 따른 강도변화를 살펴보면 양생 28일의 강도가 양생 7일강도에 비해 약 1.9배정도 증가한다는 것을 알 수 있다. 함수비에 따른 강도 변화를 살펴보면

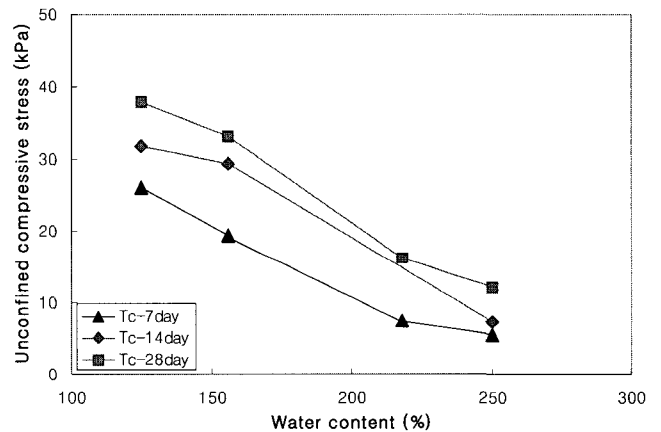


Fig. 7 Compressive strength change with water content

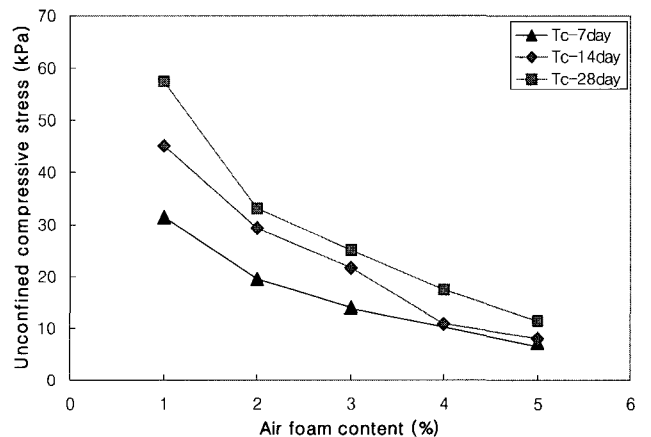


Fig. 8 Compressive strength change with foam content

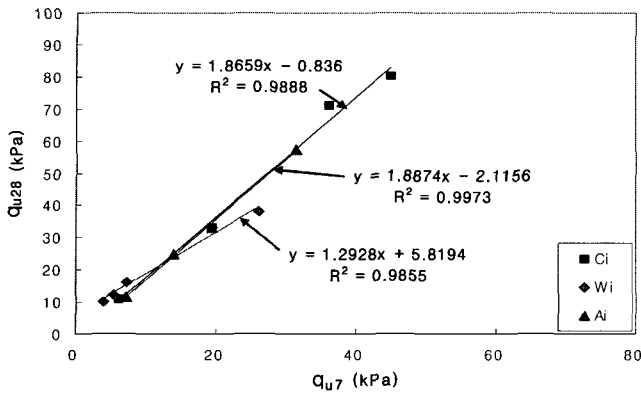


Fig. 9 Comparison of compressive strength at curing time 7 days and 28 days

양생 28일 강도가 양생 7일강도에 비해 약 1.3배정도 증가한 것을 나타낸다. 그리고 시멘트 함유율, 함수비, 기포 함유율에 상관없이 양생 7일강도와 28일강도 사이의 상관관계수는 모두 0.98이상으로서 좋은 결과를 보여준다. 이러한 결과로부터 7일강도를 이용하여 이후에 양생되는 공시체와의 강도관계를 추정할 수 있을 것이다.

4.5 변형계수와 일축압축강도의 관계

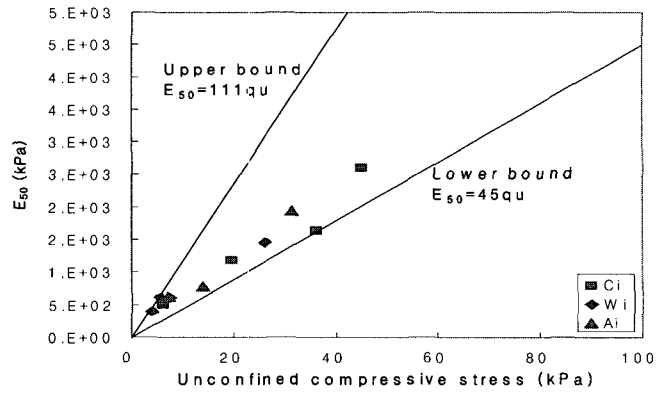
시멘트 혼합경량토의 일축압축상태에서 압축강도와 변형 탄성계수(E₅₀)의 관계를 고찰하면 Fig. 10과 같다. Fig. 10 (a)는 양생기간 7일에서의 변형계수와 일축압축강도의 관계를 나타내며, 변형계수는 압축강도의 45~111배 정도의 범위를 가지는 것으로 나타났다. Fig. 10 (b)는 양생기간 28일에서 변형계수와 일축압축강도의 관계를 나타내며, 변형계수는 압축강도의 44~128배정도의 범위를 제시하는 것으로 보여진다.

Tsuchida 등(2004)에 의하면, 기포를 혼합한 경량기포혼합토의 변형계수는 압축강도의 40~260배 정도로 제시한 바 있다. Tsuchida의 연구는 본 연구와는 시멘트 함유율, 기포 함유율, 준설토의 실트질 성분과 같은 토질특성이 다르지만 하한값은 비슷한 범위에 있음을 알 수 있다.

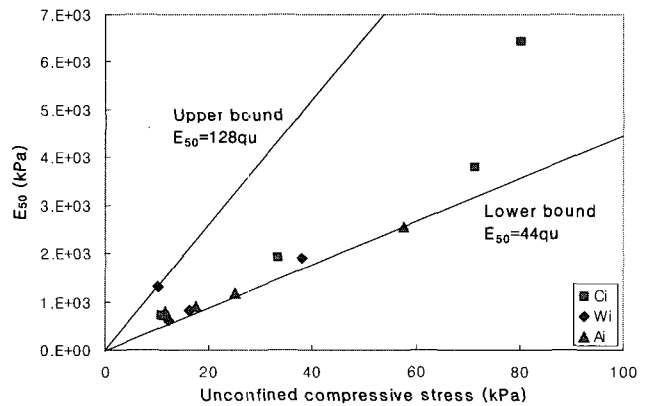
5. 결 론

본 논문에서는 낙동강 하구역 준설토를 재활용하기 위하여 고화재, 기포제 그리고 증류수를 다양한 배합조건으로 혼합한 시멘트 혼합경량토를 제작하여 대하여 일축압축강도시험을 실시함으로써 응력-변형 거동 및 압축강도 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 혼합되는 각 재료에 대한 양생기간에 따른 응력-변형 거동을 분석한 결과 정해진 조건의 시멘트 · 함수비 · 기포 함유율에서는 양생기간이 지날수록 압축강도가 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 시멘트 혼합경량토 각 재료의 함유율에 따른 응력-변형 거동을 분석한 결과 시멘트 함유율이 증가할수록 압축강도가



(a) Curing time of 7 day



(b) Curing time of 28 day

Fig. 10 Relationship between deformation modulus and unconfined compression strength

커지고, 최대 압축강도까지의 기울기가 커지며, 파괴 이후에 응력감소 또한 큰 것으로 나타났다. 그러나 함수비 · 기포 함유율이 증가할수록 압축강도와 최대 압축강도까지의 기울기는 작아지며 파괴이후 응력감소 또한 적은 것으로 나타났다.

(3) 시멘트 혼합경량토에 혼합되는 재료의 함유율에 따른 단위중량의 변화는 시멘트 함유율이나 함수비에 따른 단위중량의 변화보다는 기포 함유율에 의한 단위중량의 변화가 큰 것으로 나타났으며, 이는 기포가 공시체에서 차지하는 부피에 기인하는 것으로 판단된다.

(4) 7일, 14일, 28일에서 시멘트 혼합경량토의 함수비를 측정 한 결과 기포 함유율에 의한 함수비 변화는 양생기간 동안에 거의 일치하는 곡선을 나타내었으나, 시멘트 함유율에 따른 함수비 변화에서는 시멘트 함유율이 높을수록 함수비가 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 시멘트의 수화작용으로 물의 소비가 많이 유발되었기 때문인 것으로 판단된다.

(5) 시멘트 혼합경량토의 압축강도 특성은 양생기간이 길어질수록, 시멘트 함유율이 증가할수록 압축강도가 커짐을 알 수 있다. 그러나 기포 함유율이 증가할수록 강도는 감소하는 것으로 나타났다. 결과적으로 시멘트 혼합경량토의 압축강도는 배

로 나타났다. 결과적으로 시멘트 혼합경량토의 압축강도는 배합요소에 각각 의존하여 압축강도를 발현하고 있으므로 임의의 배합조건에 따른 압축강도의 크기를 추정하기 위해서는 보다 많은 실험 자료로부터 배합요소와 압축강도사이의 관계를 규명하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

(6) 변형계수와 일축압축강도의 관계는 재령 7일의 경우 변형계수는 압축강도의 45~111배정도의 범위를 가지는 것으로 나타났다, 재령 28일에서 변형계수는 압축강도의 44~128배정도의 범위를 가지는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 한국해양수산개발원의 수산특정연구개발과제로 수행된 “연안 생태환경공간 복원/조성 기술” 연구결과 중 일부임을 밝히며, 이 자리를 빌어 감사의 뜻을 포함합니다.

참 고 문 헌

김수삼, 김병일, 한상재, 신현영 (2002). “준설토와 EPS를 혼합한 경량혼합처리토의 강도 특성”, 한국철도학회 논문집, 제5권, 제2호, PP 61-69.

김주철, 이종규 (2002). “준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적 특성 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제18권, 4호, pp 309-317.

송영채, 엄혜경, 이재원, 윤길림 (2004). “유해물질 : 항만 준설토 재활용을 위한 위해성 평가”, 한국폐기물학회 춘계학술연구회발표 논문집, 제2004권, 0호, pp 503-506.

송창섭, 임성운 (2002). “보강 혼합토의 역학적 특성(I)”, 한국환경복원녹화기술학회지, 제5권, 제6호, PP 9-13.

윤길림, 김병탁 (2002). “준설토를 활용한 경량혼합토의 역학적 특성 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제18권, 4호, pp 75-83.

최진용, 김석운 (1998). “한반도 주변해역 점토광물의 함량과 분포”, 한국지구과학회지, 제19권, 제5호, pp 524-532.

태평양 Soil(주) (2004). “발생토를 이용한 경량(기포) 혼합토 공법”, 동서화학공업(주).

한국해양연구소 (2000). “준설토 재활용 방안 연구”, 해양수산부.

한영철 (2001). “김해점토의 광물학적 특성에 관한 연구”, 대우엔지니어링 기술보, 제17권, 제1호.

한영철 (2002). “낙동강유역 해성점성토의 지질학적 특성에 관한 연구”, ISSMGE ATC-7 SYMPOSIUM, pp 33-40.

황진연, 이선갑, 이정우 (1998). “부산지역 연약지반 점토의 광물성분과 물성”, 한국지반공학회 학술발표회 논문집, pp 57-64.

Chung, S.G. (2002). “Engineering Geology and Index Properties of Pusan Clay”, Issmge ATC-7 Symposium, pp 5-29.

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.

Shogaki, T., Nochikawa, Y., Jeong, G.H., Suwa S. and Kitada N. (2005). “Strength and Consolidation Properties of Busan New Port Clays”, Soils and Foundations, Vol 45, No 1, pp 153-169.

Tsuchida, T. and Egashira, K. (2004). “The lightweight Treated Soil Method”, New Geomaterials for Soft Ground Engineering in Coastal Areas, Balkema.

Tsuchida, T., Takeuchi, D., Okumura, T. and Kishida, T. (1996). “Development of Light-weight Fill from Dredgings”, Proc. of Environmental Geotechnics, Balkema, pp 415-420.

2005년 7월 15일 원고 접수

2006년 1월 25일 최종 수정본 채택