

발포스티로폼을 이용한 경량혼합처리토의 강도특성 Strength Properties of Light-Weighted Soils Mixed with E.P.S

김수삼¹⁾, Soo-Sam Kim, 윤길림²⁾, Gil-Lim Yoon, 신현영³⁾, Hyun-Young Shin, 홍상기⁴⁾, Sang-Gi Hong

¹⁾ 중앙대학교 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Environmental Civil Engineering, Chung-Ang Univ.

²⁾ 해양연구소 수석연구원, Senior Researcher in Chief, Korea Ocean Research & Development Institute

³⁾ 중앙대학교 토목공학과 박사과정, Doctoral course, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang Univ.

⁴⁾ 중앙대학교 토목공학과 석사과정, Master course, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang Univ.

SYNOPSIS : The strength properties of Light-Weighted Soils(LWS) mixed with Expanded Polystyrene(E.P.S) are studied. Test results show that when the initial water contents of dredged soils are under 135% and the cement contents are above 1%, Light-Weight Soils are in the appropriate strength range of 2.0 to 4.0kg/cm². However, E.P.S contents had a little effects on the strength properties of LWS. In the view of E.P.S diagram's effects on LWS, which have expand ratio of 25, 35, 45 and 60, further studies considering of physical properties of original E.P.S beads are needed.

Key Words : E.P.S, E.P.S beads, Light-Weighted Soil, Dredged Soil, Uniaxial Test

1. 서론

건설산업에 있어서 지반재료는 상재하중에 대한 지지력을 확보하며, 성토재 및 뒤펀재를 비롯하여 각종 건설공사에 소요되는 재료로서, 소요의 강도를 갖고 변형량이 적은 재료가 일반적으로 바람직하다. 연약지반에 성토나 뒤펀 시공을 할 경우 일반적인 토사를 사용하면 지반내 응력의 증가에 따라 지반 침하나 지반활동 파괴, 측방유동 등의 문제가 발생할 수 있다. 이와같이 압축성이 큰 토질과 관련된 침하문제, 옹벽구조물 배면의 토압경감문제, 사면의 불안정한 문제를 해결하기 위해 지반재료의 경량화가 필요하게 되었다.

한편, 영종도 신공항 개발사업, 서해안 고속도로 공사, 광양만 개발사업, 녹산공업단지 조성사업 등 최근들어 대단위 국책사업이 활발히 진행되어 대량의 토사를 사용하지만, 환경보존의 중요성으로 육상토나 해사를 대량으로 사용하는 것이 어려운 실정이다. 또한, 연간 항로준설과 연안준설로 인해 대량으로 발생하는 준설토는 준설 직후 매립지에 장기간 방치하여 건조·처리하는 형태를 취하였으나, 이를 위해서는 대규모의 부지를 확보하여야 할 뿐만 아니라 방치한 준설토가 오염되어 주변환경을 오염시키고 이때 발생하는 악취로 인하여 인근 주민들의 생활환경을 침해하는 요소로 작용하여, 이를 처리하기 위해 막대한 자금이 소요되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 준설된 해성점성토에 EPS를 혼합하여 이를 보통 포틀랜드 시멘트로 고화시킨 "경량혼합처리토"를 개발하여 강도 및 물리적 특성을 살펴보고 적용성을 파악하고자 한다.

2. EPS의 공학적 특성

2.1 개요

E.P.S는 S.M(Styrene Monomer)의 중합체에 발포제를 침투시켜 열을 가할 때 발포제가 외기로 확산·휘발되는 과정에서 발포되도록 제조된 발포 폴리스티렌 수지를 말한다. E.P.S 수지는 발포시 내부에 독립기포 구조를 형성하게 되고 이 기포 내에는 공기가 유입되기 때문에 열이나 소음, 습기에 대한 차단 효과가 좋고 충격, 흡수성이 좋아서 보온·보냉재료, 단열재, 완충포장재, 부양재 등으로 많이 사용되며 특히, 그 경량성에 기인하여 토목 분야에서도 그 활용 범위가 점차 증가하고 있는 추세이다.

E.P.S 수지 발포립은 0.01~0.05mm 크기의 수많은 독립기포(Cell)가 다각형의 모양으로 치밀하게 내포되어 있다. 이 독립기포의 크기는 E.P.S 가공품의 물성 및 품질 특성에 미치는 영향이 매우 크며, 통상 E.P.S bead 하나에 20만~30만개 정도 존재하며 제조 공정에서 조절이 가능하다.

2.2 재료특성

E.P.S 수지의 주성분은 Polystyrene 91~96%로 구성되어 있으며, 발포제를 4~9% 첨가시켜 발포하여 사용하는데, 이 원료비드의 특성을 Table 1에 정리하였다.

Table 1 E.P.S beads의 재료특성(신호유화, 2000)

진비중 (Specific Gravity)	겉보기밀도 (Bulk Density)	인화점	열분해 온도	발화점	pH
1.04	0.6~0.65g/cm ³	55~70℃	230~280℃	490℃	6~8

3. 실험방법 및 내용

준설토의 함수비, EPS의 함유량, EPS bead의 입자크기(발포배율), 고화재의 함량 등이 혼합토의 강도에 미치는 영향과 양생일 경과에 따른 체적수축특성을 파악하기 위해 EPS를 준설토와 혼합하여 고화시킨 EPS 경량혼합처리토에 대한 일축압축시험을 실시하였다. 각 시료는 각각 3일, 7일, 15일, 28일간 대기 중에서 양생하여 방치하였으며 배합비는 현장에서의 적용성을 감안하여 예비실험을 통해 목표강도 2kg/cm²(PHRI 문헌)의 강도 값을 갖도록 배합하였다.

3.1 준설토의 특성

본 시험에서 사용한 준설토는 여천지역 항로준설토로서 일정기간 매립지에 방치한 것을 채취한 것이다. 채취지역은 동일한 매립지에서 장소를 달리하여 선택하였으며 Table 2에는 이러한 물성치에 대한 평균값을 제시하였다.

Table 2 준설토의 물성치

초기함수비	132.5%	
액성한계	44.5%	
소성한계	23.6%	
소성지수	21	
비중	2.66	
200번체 통과량	93.29%	

3.2 시료배합

시험에 사용한 시료의 배합조건을 Table 3에 제시하였다. 배합조건은 초기함수비, EPS 함량, 발포배율, 고화재 함량 등 네 가지로 나누었으며, 그 이외의 사항은 추후 비교·분석을 위해 동일한 조건으로 고정하였다.

준설토의 함수비는 액성한계를 기준으로 각각 액성한계의 2배, 3배(본 실험에 사용한 준설토의 경우 자연함수비에 해당), 4배로 조절하였고(운수성항만기술연구소, 1996), EPS 함량은 1%, 2%, 3%, EPS 크기는 각각 25배, 35배, 45배, 60배 발포된 입자를 사용하였으며, 고화재는 1%, 2%, 3%로 조절하되 배합비는 각각 준설토에 대한 중량 백분율로 산정하였다.

3.3 공시체 제작

배합조건에 대해 각각 5개의 몰드 공시체를 제작하였고, 각 양생일에 대해 양호한 상태를 보이는 3개의 공시체를 선별하여 일축압축시험을 수행한 후 평균치를 이용하여 분석을 수행하였다. 최초 배합시 혼합처리토는 고함수비 상태로 존재하므로, 이를 몰드에 채워 넣는 데는 일정한 다짐에너지를 선정해야 할 필요성이 있다. 이에 대해 Blotz(1998)는 액성한계를 기준으로 고함수비 점성토의 최적함수비와 최대건조단위중량을 결정하는 경험적 방법을 제시한 바 있으나, EPS가 혼합된 상태의 시료에는 적용이 불가능하다고 판단되어, 본 연구에서는 예비시험 과정을 통해 직경 5cm, 높이 10cm의 몰드에 각 조건별로 다져 넣을 수 있는 혼합처리토의 최대 양입 가능한 중량을 결정한 후 이를 기준으로 일정다짐을 수행하였다. 몰딩 처리 후 각 공시체의 중량을 측정된 결과 최대 오차 범위는 대략 $\pm 5g$ 이내로 측정되었다.

Table 3 시료 배합조건

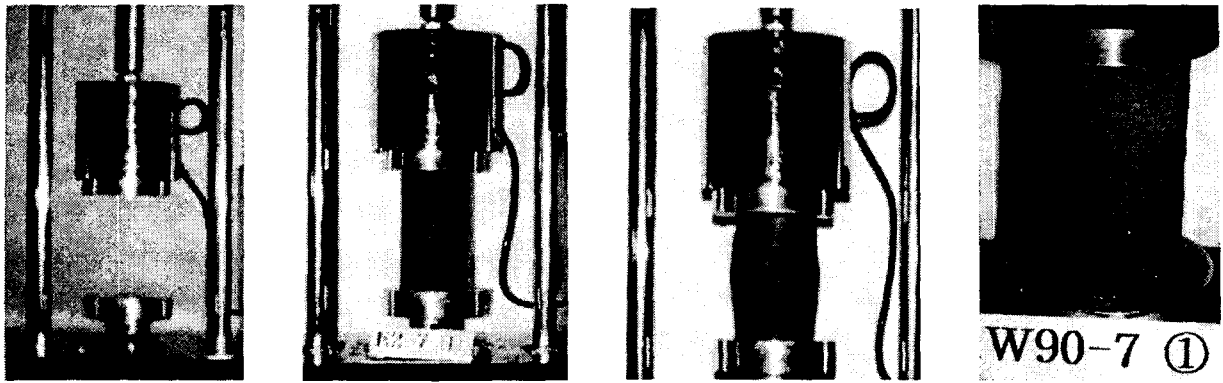
배합 조건	시료명	준설토의 초기함수비	EPS 함량	EPS 직경	고화재함량
준설토 함수비	W90	90($\pm 5\%$)	2%	NO.2 (약35배)	2%
	W135(E1,B2,C1)	135($\pm 5\%$)	2%	NO.2 (약35배)	2%
	W180	180($\pm 5\%$)	2%	NO.2 (약35배)	2%
EPS 함량	E1	135($\pm 5\%$)	1%	NO.2 (약35배)	2%
	E2	135($\pm 5\%$)	2%	NO.2 (약35배)	2%
	E3	135($\pm 5\%$)	3%	NO.2 (약35배)	2%
EPS 직경 (발포배율*)	B1	135($\pm 5\%$)	2%	NO.1 (약25배)	2%
	B2	135($\pm 5\%$)	2%	NO.2 (약35배)	2%
	B3	135($\pm 5\%$)	2%	NO.3 (약45배)	2%
	B4	135($\pm 5\%$)	2%	NO.4 (약60배)	2%
고화재 함량	C1	135($\pm 5\%$)	2%	NO.2 (약35배)	1%
	C2	135($\pm 5\%$)	2%	NO.2 (약35배)	2%
	C3	135($\pm 5\%$)	2%	NO.2 (약35배)	3%

(각 배합비는 준설토의 중량에 대한 백분율)
* B1과 B4, B2와 B3는 각각 서로 다른 두 가지의 bead 원료로부터 발포된 입자임

4. 실험결과 및 고찰

4.1 파괴형태

Fig. 1에는 일축압축시험시 시료 안착과정과 공시체의 파괴 형상을 제시하였다. 양생 초기에 해당하는 시료의 경우, 일축하중을 가하면 미처 고화되지 못한 상태에서 E.P.S 자체의 압축성과 고함수비의 영향으로 상당한 체적 압축이 발생하면서 측방으로 부풀어올라 명확한 파괴면을 형성하지 않았지만, 양생일수가 다소 경과한 시료의 경우, 일정한 방향성을 띠는 파괴 라인을 형성하였음을 볼 수 있다.



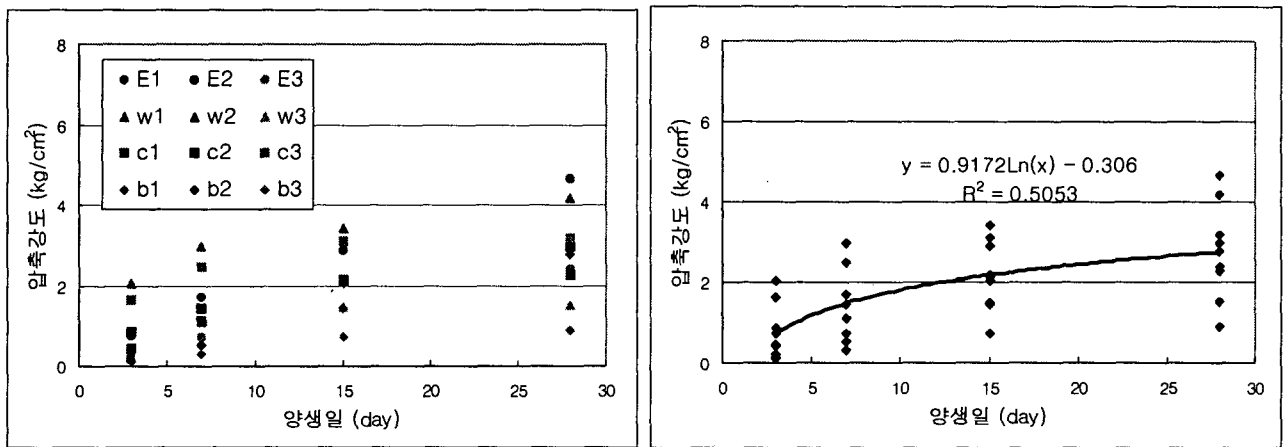
(a) 일축압축시험기 (b) 시료의 안착 (c) 측방 부풀림 현상 (d) 파괴양상

Fig. 1 일축압축시험

4.2 일축압축강도 특성

4.2.1 양생일에 따른 강도특성

초기함수비, EPS 함유율, 시멘트 첨가량, 발포배율에 따라 배합조건을 달리한 각각의 시료에 대하여 양생일에 따른 일축압축강도시험 결과는 Fig. 2(a)에 나타난 바와 같다. 모든 조건에서 양생일의 증가에 따라 강도가 증가하는 경향이 있으며, 각 양생일에서의 강도값의 범위는 양생일이 증가할수록 그 분포 범위가 넓게 나타나고 있다. 이는 실험의 목적상 배합조건을 다양하게 시도하였기 때문으로 사료되며, 이들 압축강도값의 변화경향을 파악하기 위하여 양생일에 따른 회귀분석을 수행한 결과를 Fig. 2(b)에 나타냈다. 양생일(day)에 따른 강도증가(q_u)를 식으로 나타내면 $q_u = 0.92 \log(\text{day}) - 0.3$ 과 같은데 이 경우 양생일 13일 정도에서 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 강도발현이 나타나고 있어 평균조건에서 양생기간은 15일 정도가 필요할 것으로 사료된다.



(a) 배합조건별 일축압축강도

(b) 회귀분석 수행결과

Fig. 2 양생일에 따른 일축압축강도

4.2.2 초기함수비의 영향

혼합토의 초기함수비별 강도특성을 살펴보기 위하여 본 연구에 적용된 초기함수비는 사용된 준서점성토 액성한계(45%)의 2배, 3배, 4배의 배합비를 설정하였는데 초기함수비가 클수록 강도는 급격히 떨어지

는 것으로 나타났다. 배합시 준설풍성토의 초기함수비 변화에 따른 일축압축시험결과를 Fig. 3에 나타냈는데 초기함수비가 작을수록 목표강도에 도달하는 시간이 빨라지고, 함수비 90%인 상태에서는 재령 3일째에 압축강도가 2.0kg/cm²에 도달하고 있음을 알 수 있다.

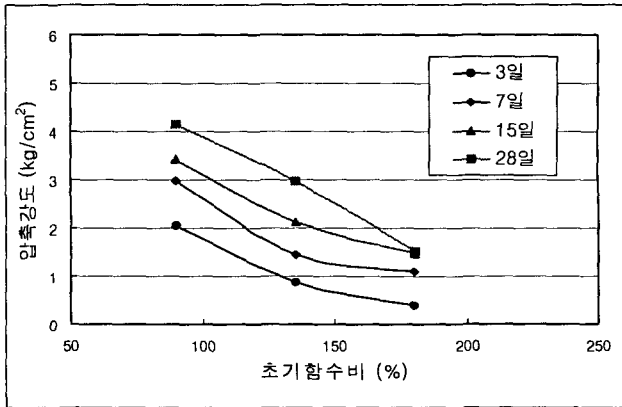


Fig. 3 초기함수비에 따른 일축압축강도의 변화

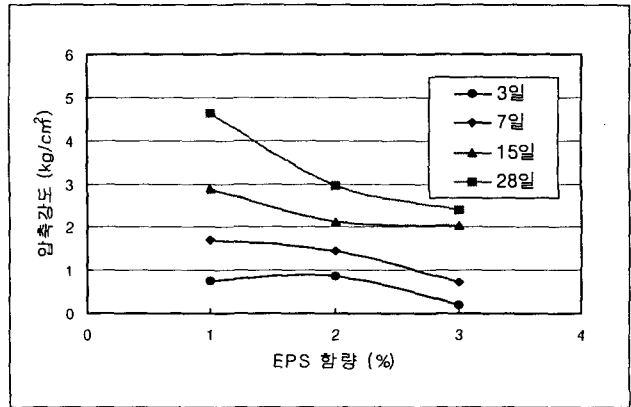


Fig. 4 EPS 함량에 따른 일축압축강도의 변화

4.2.3 EPS 함량에 따른 영향

본 연구에서 이용한 EPS 함량은 준설풍토에 대한 중량 백분율로 1%, 2%, 3%씩 배합하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 EPS 함량이 커질수록 압축강도는 작아지는데, 양생일이 15일이하에서는 EPS 함량에 따른 강도변화가 적지만 양생일이 15일이상에서는 EPS 함량에 따라 강도변화가 커지는 것을 알 수 있다. 특히 EPS 함량이 작은 경우 양생일에 따라 압축강도가 급격히 커지는 것으로 나타났다.

4.2.4 시멘트 첨가량에 따른 영향

혼합토에서 시멘트 첨가량의 효과를 파악하기 위하여 본 연구에 적용된 시멘트 함량은 준설풍토에 대한 중량 백분율로 1%, 2%, 3%씩 배합하였다. 시멘트 함량에 따른 일축압축강도의 변화는 Fig. 5에 나타냈는데 시멘트 함량이 많을수록 압축강도는 커지는 것을 알 수 있었다.

4.2.5 EPS 발포배율에 따른 영향

EPS입자는 발포배율에 따라서 25배, 35배, 45배, 60배로 발포된 EPS입자를 사용하였는데, 25배, 60배의 발포배율과 35배, 45배의 발포배율을 갖는 EPS입자는 서로 다른 원재료에서 발포되었으므로 구분하여 분석하였다. 발포배율에 따른 강도특성은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 동일한 원재료에서는 배율이 커질수록 강도가 작게 나타나는데, 이는 동일한 원재료에서는 배율이 커질수록 EPS의 변형량이 크기 때문인 것으로 사료된다.

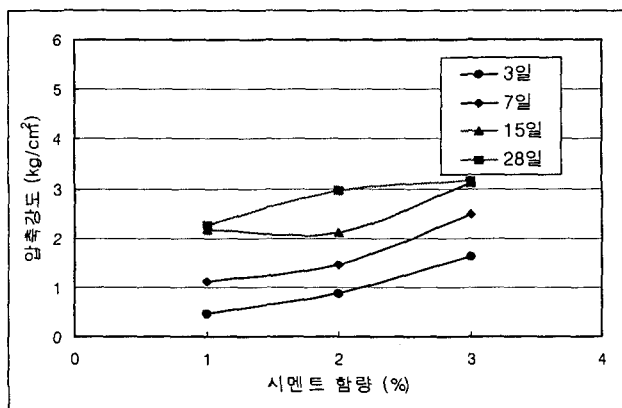


Fig. 5 시멘트 함량에 따른 일축압축강도

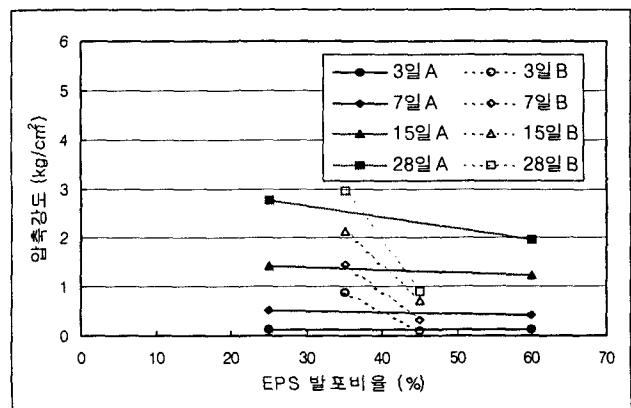


Fig. 6 EPS 발포비율에 따른 일축압축강도

5. 결론 및 추후연구과제

준설토와 E.P.S를 혼합하여 고화시킨 경량혼합처리토에 대한 배합조건별 일축압축시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 양생일에 따라 일축압축강도는 증가하게 되는데 목표강도 2.0kg/cm²에 도달하기 위해서는 15일 정도의 양생기간이 필요한 것으로 나타났다.
- 2) 강도특성을 파악하기 위한 배합조건별 시험결과 초기함수비와 EPS함량, 발포비율이 작을수록 그리고, 시멘트 첨가량이 많을수록 강도는 커지게 됨을 알수 있었다.
- 3) 본 연구 결과 준설토의 효과적인 재활용을 위해 강도특성과 경제성을 감안한 최적의 배합비는 준설토의 중량비를 100으로 할 때 35배 이하로 발포된 EPS 입자 2% 이내와 고화재 2% 이상을 배합하여 15일 이상 양생시킨 혼합토인 것으로 제시되었다.

이러한 배합조건을 단순한 일축압축시험만으로 결정하기에는 고려할 수 있는 범위가 한정적이라고 판단된다. 따라서, 현재 삼축압축시험과 투수시험을 실시 중에 있으며, 그 결과를 서로 비교·분석하면 보다 최적의 배합비를 제시할 수 있을 것으로 기대되며, 향후 시험시공을 수행함으로써 현장적용성이 파악된다면 준설토의 활용측면과 경량성토재의 생산측면에서 기여할수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 『해양연구소』의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 연구에 도움을 주신 해양연구소 담당자 여러분께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 또한, EPS beads에 대한 자료를 제공하여 주신 (주)신호유화 관계자 여러분께도 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. 김용수(1995), 발포스티로폴을 사용한 경량안정처리토의 강도특성에 관한 연구, 중앙대학교 석사학위논문
2. 김홍택(1994), EPS의 재료특성, 설계법 및 시공사례에 대한 고찰, 대한지반공학회지, 제10권, 제3호, pp.135~148.
3. 장용채(1994), 발포폴리스티렌(EPS)을 이용한 경량성토공법, 대한지반공학회지, 제10권, 제3호, pp. 149~172.
4. Lisa R. Blotz, Craig H. Benson, and Gordon P. Boutwell(1998), *Estimating Optimum Water Content And Maximum Dry Unit Weight For Compacted Clays*, ASCE.
5. 土田(1996), 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.
6. 신호유화(2000), EPS의 물리적 특성.