

준설토와 EPS를 혼합한 경량혼합처리토의 강도 특성

Strength Characteristics of Light-Weighted Soils Mixed with EPS and Dredged Soils

김수삼¹⁾ · 김병일²⁾ · 한상재³⁾ · 신현영⁴⁾

Soo-Sam Kim · Byung-Il Kim · Sang-Jae Han · Hyun-Young Shin

Keywords : Dredged Soils, Light-Weighted Soils, EPS, Initial water contents, EPS Volume, Cement contents, Expanded ratio

Abstract

Recycling of dredged soils as construction materials is experimentally discussed in this paper. The strength of light-weighted soils(LWS) consisting of expanded polystyrene(EPS), dredged soils and cement is characterized by uniaxial and triaxial compression tests with varying initial water contents of dredged soils, the EPS volume and cement contents, and expanded ratio of EPS. Test results show that the strength of light-weighted soils increases with adding cement contents, whereas the strength increases with decreasing initial water contents of dredged soils and expanded ratio of EPS. It was, however, found that increasing the EPS volume makes a lower the strength of light-weighted soils.

1. 서론

최근 해안 매립과 항로유지 확보를 위한 준설토 인하여 발생하는 준설토의 양이 Fig. 1과 같이 꾸준히 증가하는 추세를 보여 1999년에는 그 발생량이 연간 9억톤을 넘어섰다. 2000년 후반에는 그 양이 11억톤을 초과하고 처리비용 역시 600억원을 상회한 것으로 추정됨에 따라(통계청, 2000) 적절한 처리 및 재활용 방안이 요구되고 있는 실정이다. 현재 국내에서 주로 이용되고 있는 준설토 처리 방법은 준설토 직후 매립지에 장기간 방치하여 건조·처리하는 형태를 취하고 있으나, 이를 위해서는 대규모의 부지를 확보하여야

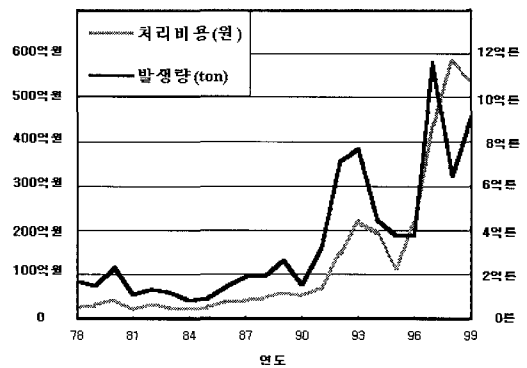


Fig. 1 연도별 준설토량과 처리비용 (통계청, 2000)

- 1) 정희원 · 한양대학교 토목환경공학과 교수
- 2) 정희원 · 한양대학교 토목환경공학과 박사과정
- 3) 정희원 · 한양대학교 공기연 연구원/
서경대 토목공학과 겸임교수
- 4) 정희원 · 중앙대학교 토목공학과 박사과정

할 뿐만 아니라 오염된 준설토로 인한 환경문제가 발생하고 있어, 이를 대체하기 위한 새로운 방안이 요구되고 있다.

국내에서는 EPS를 블럭형태로 사용하지 않고 입자를 그대로 사용하는, 이른바 EPS 경량혼합처리토에 대한 연구는 최근에 와서야 진행되고 있는데, 이러한 방법은 EPS 블럭을 이용한 기존의 경량성토 공법에 비하여 경제적인 뿐만 아니라, 임의의 밀도나 강도를 확보하기가 용이하기 때문에 그 적용이 점차 증가하고 있다. 국내의 경우 1994년 한국지반공학회가 주최한 EPS공법 국제 심포지엄이 실시된 이래, 기 발표된 연구 결과를 정리한 발포폴리스티렌을 이용한 초경량성토공법(미원유화, 1993) 및 EPS를 이용한 경량성토공법에 관한 연구(장용채, 1994)등이 수행된 바 있다. 그리고 경량성토재료를 개발, 활용하기 위한 기초연구의 목적으로 화강풍화토와 폐 EPS 조각을 혼합한 경량성토재를 대상으로 지반공학적 특성에 관련된 기본실험이 수행된 바 있다(김홍택, 1996).

이에 본 연구에서는 준설토의 재활용을 위해 EPS를 준설토와 혼합하고 이를 보통 포틀랜드 시멘트라고 해서 개발한 경량혼합처리토(LWS)의 강도 특성을 살펴보았다.

2. 실험

2.1 준설토의 물성

본 연구에서 사용된 시료는 전라남도 남해안 지역에서 채취한 준설토로 기본 물성은 아래의 Table 1에 제시하였다.

Table 1 준설토의 물성

초기 함수비	액성 한계	소성 한계	소성 지수	비중	#200체 통과율	USCS
132.5	44.5	23.6	21	2.66	93.3	CL
%	%	%			%	

2.2 시료 제작

2.2.1 배합조건 및 배합방법

다양한 배합조건으로 제작된 경량혼합처리토의 강도 특성을 규명하고자 배합조건을 초기 함수비, EPS 함량, 발포배율, 시멘트 함량 등 네 가지로 나누어 결정하였으며, 그 결과를 Table 2에 제시하였다. 본 연구에서는 초기 함수비 135%, EPS 함량 2%, 발포배율

35배, 시멘트 함량 2%를 기준 배합비로 결정하였다. 준설토의 초기 함수비는 액성한계를 기준으로 2배, 3배, 4배로 조절하였고, EPS는 국내에서 판매되는 25배, 35배, 45배, 60배 발포된 입자를 구입하여 사용하였으며, 원재료의 특성상 휘발성물질에 대해 용해되는 성질을 가지고 그 밖의 조건에 대해 화학구조상 안정성을 보인다. EPS 함량은 1%, 2%, 3%로 구분하여 혼합하였으며 시멘트는 1%, 2%, 3%로 조절하되 각각의 배합비는 준설토에 대한 중량 백분율로 산정하였다. 이 때, EPS는 두 가지의 서로 다른 원료 비드에서 발포된 입자를 사용하였는데, 25배와 60배, 35배와 45배가 각각 동일한 원료 비드에서 발포된 입자에 해당한다.

2.2.2 양생 및 시료채취 방법

실내 실험에서 경량혼합처리토를 제작하는 데는 두 가지의 방법을 사용하였다. 이는 배합을 완료한 시료를 40cm×30cm×20cm의 용기에 타설하여 일정기간 양생시킨 후 코어 채취기로 직접 채취하는 방법과, 5cm×10cm의 PVC 몰드에 채워 양생하는 몰드 제작이다. 또한, 양생압의 영향을 살펴보기 위해 ϕ 30cm의 제조성용 셀에 넣어 각각 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa의 양생압을 가한 상태로 양생시킨 시료를 준비하였다.

최초 배합시 혼합처리토는 고탍수비 상태이므로, 이를 몰드에 채워 넣는 데는 일정한 다짐에너지가 선정해야 할 필요성이 있다. Blotz et al.(1998)는 액성한계를 기준으로 고탍수비 점성토의 최적함수비와 최대 건조단위중량을 결정하는 경험적 방법을 제시한 바 있으나, 이는 순수 점성토의 경우에만 적용이 가능하며 EPS가 혼합된 상태의 시료는 EPS 입자 자체의 탄성으로 인해 적절한 다짐이 수행될 수 없음을 예비실험을 통해 확인하였다.

따라서 본 연구에서는 각 조건별로 30여개의 몰드에 혼합토를 채워 넣고 중량을 잰 후, 각 중량의 오차범위가 5g 이내에 해당하는 15개의 시료를 선택하여 이를 양생하였다.

2.3 일축압축실험

여러 가지 배합조건별로 KS F 2314 기준에 의거하

여 재령 1일, 3일, 7일, 15일, 28일에 대해 1.0%/min의 변형속도로 일축압축실험을 실시하였으며, 응력-변형 거동의 실험결과를 Fig. 2에 제시하였다. Fig. 2(a), (b), (d)에서 재령일수가 증가함에 따라 일축압축강도 역시 증가하고 있으며, Fig. 2(c)의 경우 3%의 시멘트 함량에서는 초기(재령 7일 이전)에 강도 발현이 발생하고 있음을 알 수 있다.

로부터 공간 점유율이 가장 큰 W90-B4-E3-C1 배합에 이르기까지 포화도의 범위는 92%에서부터 86% 정도로 나타났고, 동일한 배합조건에 대해서는 동일한 포화도에 이른 후 구속압을 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa로 변화시켜 실험을 수행하였다. 이러한 실험 과정을 통하여 얻은 삼축압축실험 결과를 Fig. 3에 나타냈으며 그 결과를 분석하면 다음과 같다.

Table 2 시료의 배합조건

배합 조건	시료명	준설토의 초기 함수비(%)	EPS 함량 (%)	EPS 발포배율	시멘트함량 (%)
준설토 함수비	W90	90(±5)	2	35배	2
	W135	135(±5)	2	35배	2
	W180	180(±5)	2	35배	2
EPS 함량	E1	135(±5)	1	35배	2
	E2	135(±5)	2	35배	2
	E3	135(±5)	3	35배	2
EPS 직경 (발포배율)	B1	135(±5)	2	25배	2
	B2	135(±5)	2	35배	2
	B3	135(±5)	2	45배	2
	B4	135(±5)	2	60배	2
시멘트 함량	C1	135(±5)	2	35배	1
	C2	135(±5)	2	35배	2
	C3	135(±5)	2	35배	3

Note: 각 배합비는 준설토의 중량에 대한 백분율, B1과 B4, B2와 B3는 두 가지의 원료 비드로부터 발포된 입자크기이며 굵은 글씨는 변화조건임.

2.4 삼축압축실험

구속압 상태에서의 압축강도를 결정하기 위한 비압밀 비배수 삼축압축실험을 KS F 2346 기준에 의해 실시하였다. 삼축압축실험을 실시함에 있어 시료를 포화시키기 위해 예비실험 과정에서 공시체를 셀에 안착시킨 상태로 셀압(110kPa)과 배압(100kPa)을 가하여 약 4시간 정도 포화 시킨 후, 배압 밸브를 닫고 셀압을 40kPa 증가 시켜서 Skempton의 간극수압계수, B-Value를 확인하면서 3일간 일정 구속압에서 방치하였고, 이 때의 포화도를 최적 조건으로 산정하였다. 그 이유는 EPS 자체가 실제적으로 흡수성이 없기 때문에 일반 점토시료에 대해 적용되는 95% 이상의 포화도를 얻기가 어려웠기 때문이다. 그 결과, 배합조건 즉, EPS 입자가 차지하는 공간의 크기에 따라 다소 포화도의 차이는 있었지만, EPS 입자의 공간 점유율이 가장 낮은 W90-B1-E1-C3(초기 함수비 90%, EPS 발포배율 1%, EPS 함량 1%, 시멘트 함량 3%) 배합으

(1) 준설토의 초기 함수비가 낮을수록 재령 28일의 압축강도는 크게 나타났으며, 90%와 135%에 대해서는 재령 28일 강도가 목표강도 즉, Trafficability 확보를 위한 강도(土田, 1996(a), 1996(b), 1999)인 200kPa를 초과하였으나, 180%의 경우 목표강도 값에 도달하지 못하였다.

(2) EPS 함량이 작을수록 재령 28일의 압축강도는 증가하였다. 그러나, 본 연구에서 수행된 최소 EPS 함량(1%)보다 더 낮은 함량에 대한 추가적인 연구가 필요하리라 판단된다.

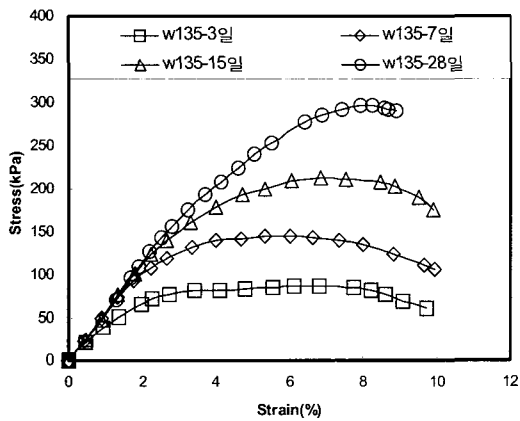
(3) EPS의 발포배율에 따라서는 동일한 원료 비드에서 발포된 EPS 입자인 25배와 60배, 그리고 35배와 45배를 기준으로 보면 발포배율이 작을수록, 즉 EPS 입자의 크기가 작을수록 재령 28일에서의 압축강도 값이 크게 나타났다. 또한, 60배와 45배의 발포입자에 대해서는 목표강도 값에 도달하지 못하는 것으로 나타났다.

(4) 시멘트 함량이 많을수록 강도는 증가하였으며, 15일 양생 후 모든 시멘트 함량 조건에 대해서 목표

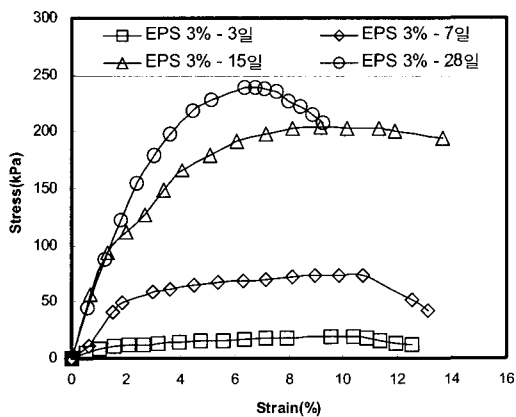
강도 값에 도달하였다.

(5) 초기 함수비 135%, 발포배율 35배, EPS 함량 2%, 시멘트 함량 2%인 기준 배합비의 경우, 양생일이 증가함에 따라 강도 역시 점차 증가하여 재령 15일 이후에 목표강도인 200kPa를 초과하였다.

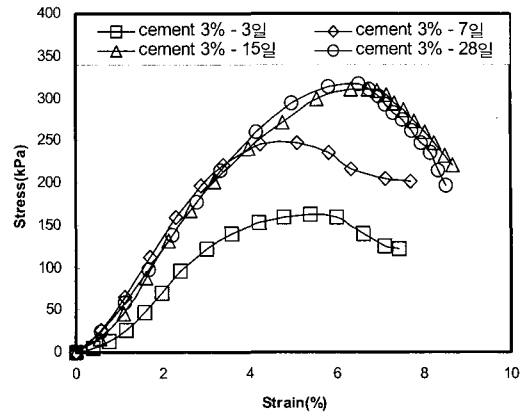
Fig. 4에는 실제 경량혼합처리토가 수중 타설되었을 경우에 경험할 수 있는 양생압 조건에 대한 강도 특성을 파악하고자 기준 배합비에 해당하는 시료에 양생압 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa을 적용하여 28일간 양생한 시료를 서로 다른 구속압으로 삼축압축실험을 실시한 결과를 제시하였다. 양생압과 구속압에 따른 실험 결과, 양생압이 증가함에 따라 삼축압축강도는 다소 작게 산정되는 경향을 보이지만 각각의 구속압 조건에 대해 재령 28일의 강도는 모두 목표강도 값인 200kPa를 넘어서고 있다.



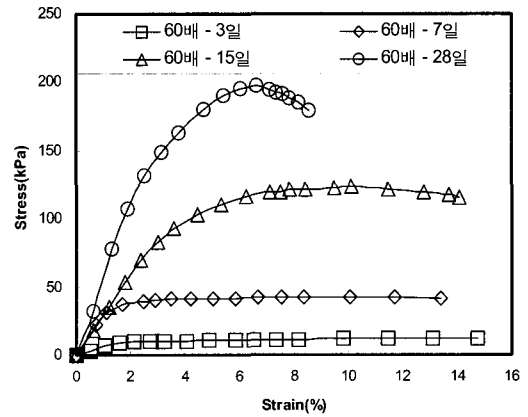
(a) 초기 함수비(135%)



(b) EPS 함량(3%)

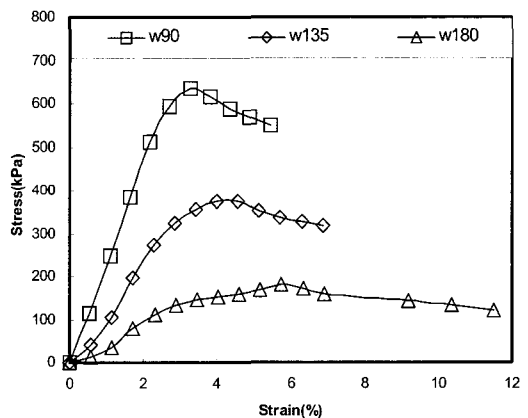


(c) 시멘트 함량(3%)

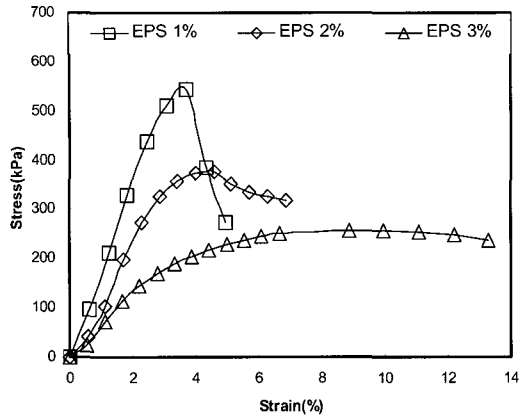


(d) 발포배율(60배)

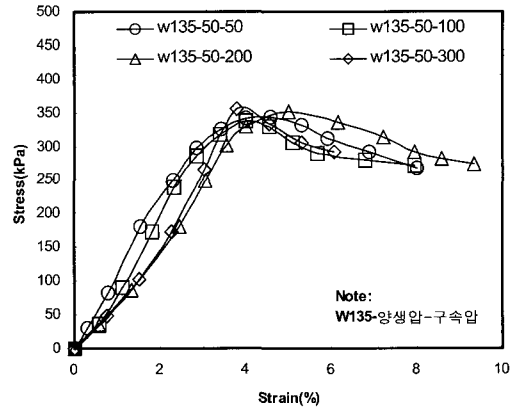
Fig. 2 배합조건별 LWS의 응력-변형 거동(일축압축실험)



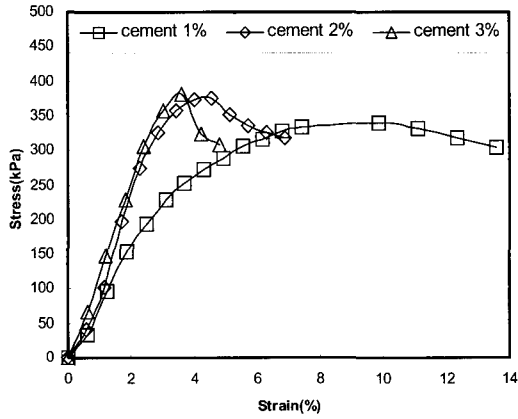
(a) 초기 함수비 조건



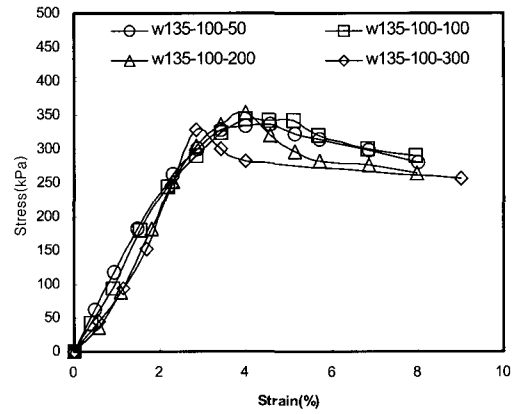
(b) EPS 함량 조건



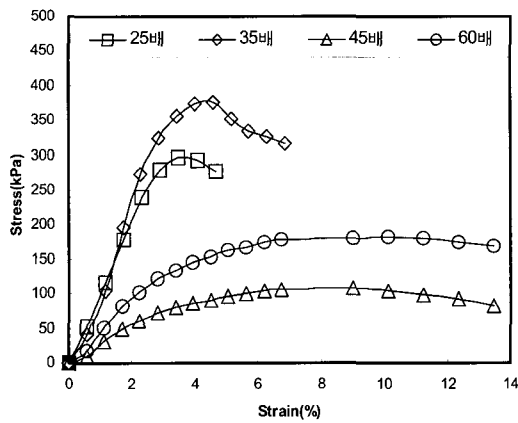
(a) 양생압(50kPa)



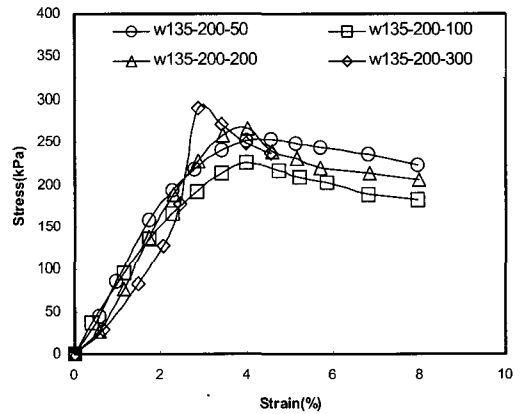
(c) 시멘트 함량 조건



(b) 양생압(100kPa)

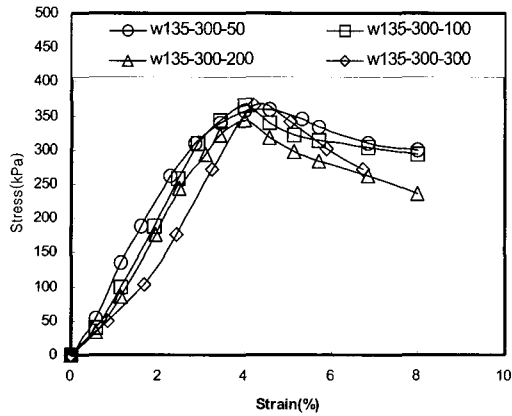


(d) EPS 발포배율 조건



(c) 양생압(200kPa)

Fig. 3 배합조건별 LWS의 응력-변형 거동(삼축압축실험)



(d) 양생압(300kPa)

Fig. 4 기준 배합 시료에 대한 구속압 및 양생압 조건별 응력-변형 거동 (삼축압축실험, 재령=28일)

3. 분석 및 고찰

3.1 초기 함수비에 따른 강도 특성

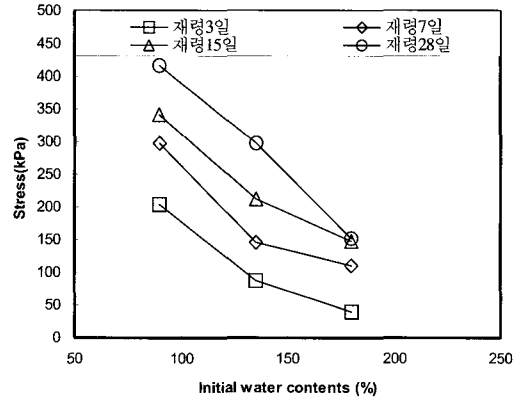
본 연구에 적용된 준설토의 초기 함수비를 액성한계(45%)의 2배, 3배, 4배에 해당하는 함수비로 조절하여 초기 함수비가 경량혼합처리토의 강도에 미치는 영향을 파악하고자 Fig. 5에 양생일에 따른 압축강도를 도시하여 보았다. Fig. 5(a)의 결과로 준설토의 초기 함수비가 90%인 경우와 135%인 경우, 그리고 재령 28일인 경우에 압축강도값이 200kPa에 도달하고 있으며 초기 함수비가 작을수록 목표강도에 도달하는 시간이 빨라지고, 함수비 90%인 상태에서는 재령 3일 째에 압축강도가 200kPa에 도달하고 있음을 알 수 있다.

이는 함수비 감소에 따른 단위중량 증가와 간극비의 감소때문이라 판단된다.

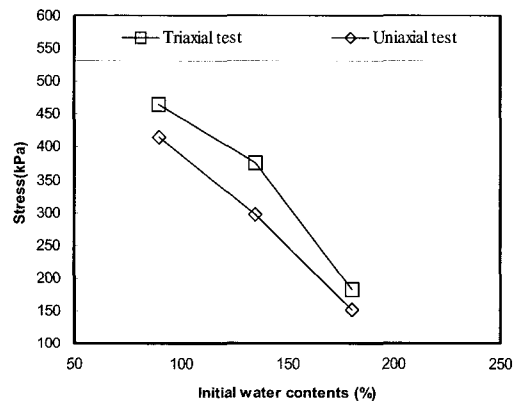
Fig. 5(b)는 28일 양생한 시료에 대하여 일축압축실험과 삼축압축실험에서의 초기 함수비에 따른 강도변화를 함께 도시한 것으로, 삼축압축강도가 일축압축강도보다 약간 크게 나타났으며 이는 삼축압축실험시 적용되는 구속압의 영향인 것으로 판단된다.

이상의 결과를 종합하면 경량혼합처리토의 강도는 초기 준설토의 함수비가 작을수록 크게 나타나지만, 대략 135% 이하의 함수비에 대해서는 재령 15일이 경과한 이후의 강도가 목표강도인 200kPa를 초과하고

있어, 초기 함수비를 증가시키고자 하는 경우 135%를 유지한 상태로 15일 정도를 양생시킨다면 경량재료 사용하기에 적절할 것으로 판단된다.

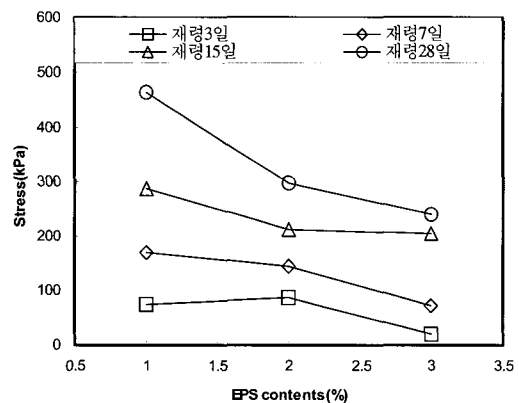


(a) 일축압축강도

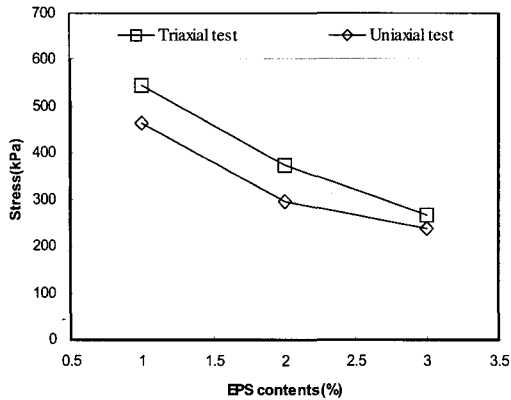


(b) 일축 및 삼축압축강도

Fig. 5 초기 함수비에 따른 강도 특성



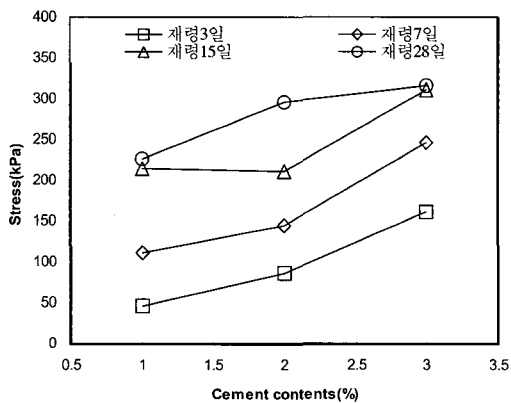
(a) 일축압축강도



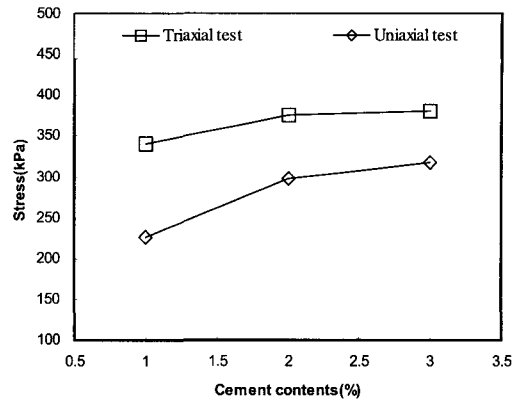
(b) 일축 및 삼축압축강도
Fig. 6 EPS 함량에 따른 강도 특성

3.2 EPS 함량에 따른 강도 특성

EPS 함량에 따른 강도 특성을 파악하기 위하여 EPS 함량 조건에 대한 일축압축실험 결과를 Fig. 6(a)와 같이 도시하였다. 그림에서와 같이 EPS 함량이 적은 경우 강도의 차이가 크게 나타나고 있으며, 양생 15일 이상에서는 EPS 함량이 변화함에도 불구하고 목표강도에는 모두 도달함을 알 수 있었다. 또한, 28일 양생한 시료에 대한 일축압축실험과 삼축압축실험에서 EPS 함량에 따른 강도변화를 함께 도시하면 Fig. 6(b)와 같은데, 동일한 조건에서의 일축압축강도의 변화와 유사하게 EPS 함량이 증가함에 따라 삼축압축강도 역시 감소하는 경향을 나타내었다.



(a) 일축압축강도



(b) 일축 및 삼축압축강도
Fig. 7 시멘트 함량에 따른 강도 특성

3.3 시멘트 함량에 따른 강도 특성

경량혼합처리의 강도는 첨가된 시멘트의 양에 의해서도 상이한 양상을 보일 것이라 판단하여 준설토에 대한 중량 백분율로 1%, 2%, 3%의 시멘트를 준설토와 혼합하여 일축 및 삼축압축실험을 실시하였고 그 결과를 Fig. 7에 제시하였다. Fig. 7(a)에서 제시한 바와 같이 시멘트 함량이 많을수록 일축압축강도는 커지는 것을 알 수 있었다. 그러나, 시멘트 첨가량 2%이상이면 양생일이 28일인 강도는 대략 일정하게 나타났으며, 시멘트 함량이 1%이상에서는 양생일이 15일 이상이 되면 압축강도가 200kPa보다 커지게 되어 목표강도에 도달하고 있음을 알 수 있었다.

동일 조건에서의 일축압축강도와 삼축압축강도의 변화를 비교하면 Fig. 7(b)와 같이 시멘트 첨가량이 증가함에 따라 압축강도 역시 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 이 그림에서는 동일조건에서 삼축압축강도가 일축압축강도보다 약간 더 큰 값을 보이고 있으며 28일 양생한 시료에 있어서 시멘트 함량에 따른 압축강도의 변화는 거의 나타나지 않았다.

3.4 EPS 발포배율에 따른 강도 특성

EPS 발포배율이 강도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 국내에서 판매되는 EPS 입자를 발포배율에 따라 구입하여 일축 및 삼축압축실험을 실시한 결과, Fig. 8에 제시한 바와 같이 동일한 원재료에서는 발포배율이 커질수록 강도가 작게 나타나는데, 이는 발포배율

이 커질수록 EPS의 변형 특성이 크게 작용하였을 뿐만 아니라, 단위 체적에 함유된 준설토의 양이 작아졌기 때문인 것으로 판단된다. 한편 발포배율에 따른 강도 특성은 EPS의 절대 발포배율보다는 EPS 원재료의 재료 특성에 의존적이며, 특히 원료 비드의 재료적 특성, EPS 생성과정, 최종 처리방법에 따라 강도 값은 달라질 수 있을 것이라 판단된다. 본 연구에서는 발포배율이 35배인 경우 가장 큰 강도를 보이는 것으로 이를 확인할 수 있었다. 즉, 25배보다 35배 발포율을 혼합한 경우의 강도가 크게 산정된 것은 혼합토의 강도 특성이 EPS 자체의 재료특성에 상당한 영향을 받고 있음을 시사한다고 할 수 있다.

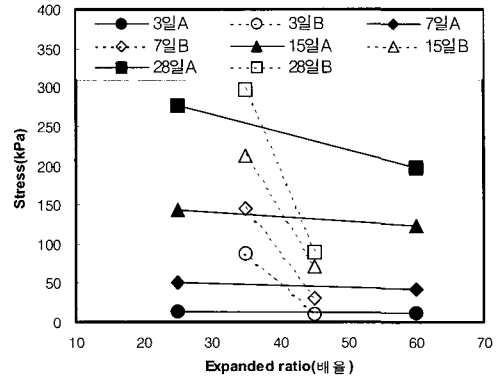
3.5 양생압 및 구속압에 따른 강도 특성

경량혼합처리토는 순수 점토의 거동과는 달리 서로 상이한 강도와 체적 변화 특성을 가진 두 가지 이상의 재료의 혼합으로 인한 복합 효과가 발생하게 된다.

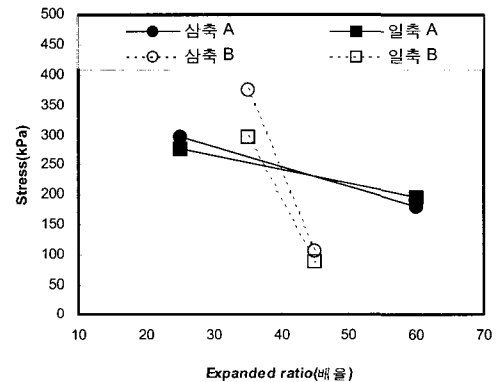
EPS는 압축성이 큰 재료이기 때문에 양생과정에서 경험하는 압력에 따라 강도 특성이 달라지므로 본 연구에서는 EPS 2%, 시멘트 2%를 배합한 시료로부터 함수비를 90%, 135%, 180%로 조절하여 28일 양생시킨 후, 삼축압축실험을 통하여 강도 특성을 살펴보았다. 그 결과, 대기중에서 양생한 경우 즉, 양생압력이 0.0kPa인 경우와 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa의 압력을 가한 상태로 양생한 경우를 Fig. 9(a)에 나타냈으며, 200kPa이하의 양생압에서는 EPS 입자 자체의 압축특성으로 인하여 약간의 강도 저하가 발생하고 있는 것을 알 수 있었다. 이는 土田(1996)의 결과와도 유사한 결과로서 200kPa이하의 양생압에서는 EPS 입자 자체의 압축성이 지배적인 역할을 하는 반면, 200kPa을 초과하는 양생압에 대해서는 혼합토의 밀도 증가에 의한 강도 증가가 EPS 입자의 크리프 변형에 의한 강도 감소보다 우세하기 때문으로 판단된다.

혼합토를 뒷채움재나 매립재로 사용하는 경우 지중 응력상태에서 측방토압을 받게 되는데, 이에 대한 강도 변화 특성을 적절히 파악하기 위해 준설토의 초기 함수비 조건이 서로 상이한 시료에 대해 구속압을 달리하여, 재령 28일에 삼축압축실험을 실시하였다. 구속압 조건은 앞서 제시한 양생압 조건과 동일한 50, 100, 200, 300kPa로 조절하여 양생압과 구속압이 강도 발현에 미치는 영향을 함께 분석하는데 이용하였다. Fig. 9(b)는 이러한 실험 결과를 제시한 것으로, 압축

강도의 평균값은 340kPa정도로 나타났으며, 구속압력이 커질수록 강도의 범위는 작아지는 것을 보여주고 있으나, 양생압의 영향과는 달리 구속압력에 따른 압축강도의 평균값은 거의 변화가 없음을 알 수 있었다.

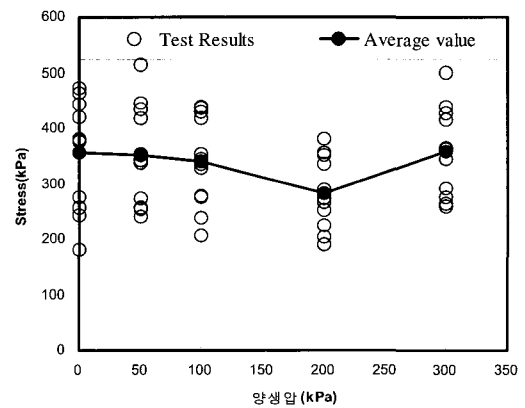


(a) 일축압축강도

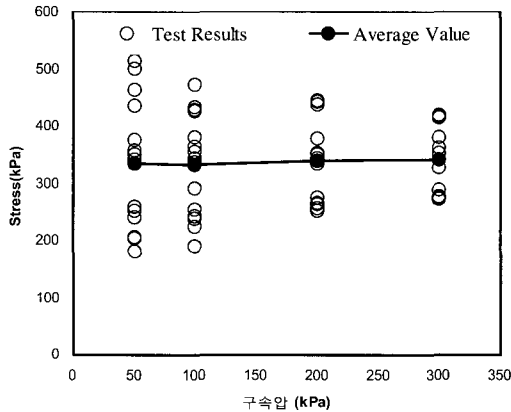


(b) 일축 및 삼축압축강도

Fig. 8 발포배율에 따른 강도 특성



(a) 양생압 조건



(b) 구속압 조건

Fig. 9 양생압 및 구속압에 따른 강도 특성

4. 결론

발생량이 매년 증가일로에 있는 준설토를 건설재료로 효율적으로 활용할 수 있는 방안을 연구하였다. 이를 위하여 준설토에 EPS 입자 및 시멘트를 적절히 혼합하여 제작한 경량혼합처리토의 강도 특성을 파악하고자, 배합조건별 일축 및 삼축압축실험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 경량혼합처리토의 배합조건별 압축강도는 준설토의 초기함수비에 의해 가장 크게 영향을 받았으며, 시멘트의 함량과 EPS 입자의 발포배율 및 함량에 의해서도 서로 다른 특성을 나타내었다.
- (2) 양생일에 따라서 압축강도는 증가하는 경향을 보였으며 경량혼합처리토의 강도가 200kPa의 목표강도를 확보하기 위해서는 양생기간이 최소 15일이 필요한 것으로 나타났다.
- (3) 재령 28일의 경량혼합처리토를 가지고 다양한 구속압 조건에서 삼축압축실험을 실시한 결과, 구속압의 크기가 경량혼합처리토의 강도에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있었다. 즉 고화후의 구속압 조건은 LWS의 강도특성에 영향을 미치지 않았다.
- (4) 구속압 조건과 동일한 양생압을 가하여 28일간 양생시킨 경량혼합처리토에 대한 삼축압축실험을 실시한 결과, 양생압이 200kPa에 이르기까지 강도가 다소 감소하는 현상이 발생하였다. 그 이유는 200kPa이하의 양생압에서는 EPS 입자 자체의 압

축성이 지배적인 역할을 하는 반면, 200kPa을 초과하는 양생압에 대해서는 혼합토의 밀도 증가에 의한 강도 증가가 EPS 입자의 크리프 변형에 의한 강도 감소보다 우세하기 때문으로 판단된다.

참고문헌

1. 김홍택(1994), EPS의 재료특성, 설계법 및 시공사례에 대한 고찰, 한국지반공학회지, 지반공학회, 제 10권, 제 3호, pp. 135-148.
2. 장용채(1994), 발포폴리스티렌(EPS)을 이용한 경량성토공법, 한국지반공학회지, 지반공학회, 제 10권, 제 3호, pp. 149~172.
3. (주)미원유화(1993), Expanded Polystyrene Construction Method : 발포폴리스티렌을 이용한 초경량성토 공법, 김수삼 감수
4. 통계청(2000), 국내 준설토현황, 해양수산부
5. Lisa R. Blotz, Craig H. Benson, and Gordon P. Boutwell(1998), Estimating Optimum Water Content And Maximum Dry Unit Weight For Compacted Clays, J. Geotech. and Geoenvironmental Engrg., ASCE, Vol.124, No.9, pp.907~912.
6. 上田(1996a), 港灣空港事業における軽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.
7. 上田(1996b), 軽量混合處理土に及ぼす養生條件の影響. 運輸省港灣技術研究所
8. 上田(1999), 建設發生土を 活用した軽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