

준설토를 활용한 경량혼합토의 역학적 특성 연구

Mechanical Characteristics of Light-weighted Soils Using Dredged Soils

윤길림*¹ Yoon, Gil-Lim

김병탁*¹ Kim, Byung-Tak

Abstract

This paper is to investigate the mechanical characteristics of light-weighted soils (LWS) consisting of expanded polystyrene(EPS), dredged clays and cement by using both uniaxial and triaxial compression tests. The mechanical characteristics of the compressive strength of LWS are analysed with varying initial water contents of dredged clays, EPS ratio, cement ratio, and curing stress. In the triaxial compression state, it is found that the compressive strength of LWS containing EPS is independent on the effective confined stress. As the EPS ratio decreases($A_E < 2\%$) and cement ratio increases($A_C > 2\%$), the behavior characteristics of triaxial compressive strength-strain relationship is similar to that of cemented soil which decreases rapidly in compressive strength after ultimate compressive strength. For the applications of LWS to ground improvements which require the compressive strength of up to 200kPa, the optimized EPS ratio and initial water content of dredged clay are estimated to be 3~4% and 165~175%, respectively. Also, the ultimate compressive strength under both triaxial test and uniaxial compression states are almost constant for a cement ratio of up to 2% and then critical cement ratio of this LWS shall be 2%.

요 지

본 연구에서는 준설토, EPS 그리고 고화제를 혼합한 경량혼합토의 역학적 특성을 일축 및 삼축압축시험을 통하여 고찰하였다. 역학적 특성은 다양한 준설토의 초기 함수비, EPS 함유율, 시멘트 함유율 그리고 양생압력에 대한 경량혼합토의 압축강도에 대하여 연구하였다. 삼축압축상태에서 EPS를 함유한 경량혼합토의 압축강도는 유효구속압에 의존하지 않는 것으로 나타났다. EPS 함유율이 감소할수록($A_E < 2\%$) 그리고 시멘트 함유율이 증가할수록($A_C > 2\%$) 삼축압축강도-변형 거동특성은 극한 압축강도를 지나 급격한 압축강도의 감소를 보이는 시멘트 혼합토의 압축강도-변형 거동특성과 유사한 것으로 나타났다. 200kPa 이상의 압축강도를 요구하는 개량지반에 본 경량혼합토를 적용하는 경우에서 적절한 준설토의 초기함수비, EPS 함유율은 각각 약 165%~175%이상 그리고 3%~4%이상으로 제시할 수가 있었다. 삼축 및 일축압축상태에서 극한 압축강도는 시멘트 함유율이 2%이상에서 거의 증가하지 않음으로서 한계 시멘트 함유율은 2%로 제시할 수가 있었다.

Keywords : Cement, Compressible strength, Dredged soil, EPS, LWS, Recycling

1. 서 론

최근 해안 매립과 항로유지 확보를 위한 준설토 인화

여 발생하는 준설토의 양이 꾸준히 증가하는 추세를 보여 1999년에는 그 발생량이 연간 9억톤 그리고 2000년 후반에는 11억톤을 초과하고 있으며 처리비용 역시 600

*1 정회원, 한국해양연구원, 연안항만공학연구본부, 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Coastal & Harbor Engrg., Div., Korea Ocean Research & Development Institute (KORDI), btkim@kordi.re.kr)

역원을 상회한 것으로 추정됨에 따라 적절한 처리 및 재활용 방안이 요구되고 있는 실정이다(해양수산부, 2000). 현재 국내에서 주로 이용되고 있는 준설토 처리 방법은 준설토 직후 매립지에 장기간 방치하여 건조·처리하는 형태를 취하고 있으나, 이를 위해서는 대규모의 부지를 확보하여야 할 뿐만 아니라 오염된 준설토로 인한 환경 문제가 발생하고 있어, 이를 대체하기 위한 새로운 방안이 요구되고 있다. 국내에서는 EPS를 블럭형태로 사용하지 않고 입자를 그대로 사용하는, 이른바 EPS 경량혼합 처리토에 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. 1994년 한국지반공학회가 주최한 EPS공법 국제 심포지엄이 실시된 이래, 발포폴리스티렌을 이용한 초경량성토공법에 관한 기존 연구 및 EPS를 이용한 경량성토공법에 관한 기술적 자료를 소개한 적이 있으며 대부분이 발포비드 자체를 이용하는 연구가 아닌 EPS 블럭의 이용에 관한 연구가 주를 이루고 있다(장용채, 1994). 그리고, 경량성토재료를 개발 및 활용하기 위한 기초연구의 목적으로 화강풍화토와 폐 EPS 블럭조각을 혼합한 경량성토재를 대상으로 지반공학적인 특성에 관련된 기본시험을 수행한 바 있다(김홍택, 1996).

일본에서는 1990년 초반부터 지반재료의 경량화, 안전화 등을 목적으로 하는 경량혼합토에 대한 연구에 관심을 갖고 지속적으로 연구가 수행되어 오고 있다. 일본 운수성의 항만기술연구소(土田, 1996)에서는 항만지역에 사용하기 위하여 EPS를 혼합한 경량혼합토의 역학적 특성을 연구한바가 있으며, 이 연구에서는 시멘트 함유율과 EPS 발포배율에 따른 삼축 및 일축압축시험을 수행하였다. 그리고 일본지반공학회는 경량지반재료의 물성평가에 관한 연구위원회에서 다양한 EPS를 혼합한 경량혼합토의 기본물성과 역학적 특성 그리고 경량혼합토의 제작방법과 시공기술에 관한 연구를 수행한 바가 있다(일본지반공학회, 1998). 이와 같이, 국외에서 특히 일본에서는 EPS를 혼합한 경량혼합토의 실용화를

위한 연구가 많은 연구자들에 의하여 수행되고 있으나, 국내에서 EPS를 이용하는 연구는 대부분이 EPS 블럭이나 조각을 이용하여 경량성토재의 기본시험 또는 경량성토공법에 국한하여 이루어져 왔다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 새로운 건설재료 개발을 위하여 EPS를 항만공사에서 다량 배출되지만 대부분 재활용되지 못하고 투기되고 있는 준설토와 혼합하고 이를 보통 포틀랜드 시멘트로 고화시켜 제작한 경량혼합처리토의 압축강도-변형 특성을 연구하고자 함이 목적이다. 준설토의 초기 함수비, EPS 함유율, 시멘트 함유율 그리고 양생압력에 따른 압축강도의 변화를 정량적인 비교 분석하기 위하여 일축 및 삼축압축시험을 수행하고 그 결과를 고찰하였다.

2. 경량혼합토의 제작과 압축강도시험

2.1 준설토와 EPS의 특성

본 연구에서 사용된 시료는 전라남도 남해안 지역에서 채취한 준설토로 기본 물성은 다음의 표 1과 같다. 사용한 준설토를 통일분류법에 근거하여 분류하면 CL이다.

석유를 원료로 하여 얻은 액체상태의 스티렌모노머를 중합하여 발생하는 고체상태의 폴리스티렌과 첨가된 발포제를 주요 원료로 하는 EPS를 사용하였다. 그리고 본 연구에서의 EPS는 비드발포법에 의하여 제작된 것을 사용하였다. 사용한 발포 EPS의 단위중량은 0.118~0.147kN/m³으로 나타났다.

2.2 준설토와 경량혼합토의 배합설계

다양한 배합조건으로 제작된 경량혼합토의 강도특성을 규명하고자 준설토의 초기 함수비(w_n), EPS 함유율(A_E), 시멘트 함유율(A_C)의 각 요소에 대하여 3가지 다른 배합비로 경량혼합토를 배합하여 제작하였다. 이때 각 배합에서 EPS 함유율과 시멘트 함유율은 준설토에 대한 중량 백분율로 산정하였다. 본 연구에서는 준설토

표 1. 사용한 준설토의 물성값

초기 함수비 (%)	액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성지수 (%)	비중	#200체 통과량 (%)
132.5 (84.4 ^a)	44.5 (46.0 ^a)	23.6 (24.2 ^a)	21 (21.8 ^a)	2.661 (2.65 ^a)	93 (91.3 ^a)

^a 본 연구에서 사용한 준설토 시료와의 비교를 위한 자료로서 부산 가덕도 현장에서 채취한 시료의 물성값

표 2. 본 연구에서 수행한 실내실험의 요약

시험조건	일축압축실험	삼축압축실험
준설토 초기함수비, w_n (%)	90, 135, 180	90, 135, 180 ($\sigma'_c = 50\text{kPa}$)
EPS 함유율, A_E (%)	1, 2, 3	1, 2, 3 ($\sigma'_c = 50\text{kPa}$)
EPS 발포배율	35배	35배
시멘트 함유율, A_C (%)	1, 2, 3	1, 2, 3 ($\sigma'_c = 50\text{kPa}$)
양생압, σ_{cu} (kPa)	-	50, 100, 200, 300 ($\sigma'_c = 50, 100, 200, 300\text{kPa}$)
양생기간, T_C (day)	3, 7, 15, 28	3, 7, 15, 28
포화도, S_r (%)	-	86~92

의 초기 함수비 135%(3.0 w), EPS 함유율 2%, 발포배율 35배, 시멘트 함유율 2%를 기준 배합비로 정하여 다른 배합조건들의 값을 달리하며 경량혼합토를 배합하였다. 이는 국내의 경우, EPS를 포함하는 혼합토의 배합에 관한 적절한 기준이 제시되고 있지 않은 관계로 적절한 배합비를 산정하기 위하여 본 실험을 수행하기에 앞서 30회의 예비실험을 수행하고 정한 배합비 조건이라 할 수 있다. 기준 배합비와 다른 각 요소의 배합조건은 초기 함수비의 경우 90%(2.0 w)와 180%(4.0 w), EPS 함유율의 경우 1%와 3%, 시멘트 함유율의 경우 1%와 3%로 달리하여 경량혼합토를 제작하였다.

경량혼합토의 배합시 현장여건을 감안하면, 가장 중요한 부분이 경량혼합토의 배합시 균등성이라 할 수 있다. 본 연구에서는 발포 EPS를 활용하는 연구를 수행한 적이 있는 일본 운수성 항만기술연구소의 방법 중에서 채취한 준설토의 함수비 조절과 EPS 비드의 혼합방법을 참조하여 경량혼합토를 배합하였다. 준설토와 발포 EPS의 혼합방법을 간략하게 서술하면 다음과 같다.

- ① 현장에서 채취한 준설토의 초기 함수비가 액성한계의 3배로서, 이보다 낮은 함수비인 90%에 대한 배합 시에는 준설토를 압밀시켜 배수되는 물의 양을 측정하여 90%의 함수비에 도달하는 시점에 준설토를 배합에 이용하였다. 그리고 함수비 180%에 대한 배합 시에는 부족분의 물을 추가하여 1주일 방치후에 함수비를 측정하여 적절한 함수비가 측정될 때 배합에 이용하였다. 이러한 방법에 의한 준설토의 함수비 오차는 약 $\pm 5\%$ 정도였다.
- ② 준설토에 대한 중량비로 준비한 EPS 비드를 준설토 내에 골고루 혼합하여 약 30초간 배합하며, 이때 EPS 비드와 준설토의 고른 배합을 위하여 EPS 비드를 5회에 걸쳐 나누어 배합하였다.

2.3 경량혼합토의 양생 및 실내실험

본 연구를 위한 실내 시험에서 EPS가 포함된 경량혼합토를 제작하는 데는 몰드를 이용하는 방법을 사용하였다. 즉, 이 방법은 직경 5cm와 양생시 발생하는 체적 수축을 고려하기 위한 높이 12.5cm의 PVC 몰드에 직접 혼합토를 채워 양생하는 방법이다. Blotz(1998)는 액성한계를 기준으로 고품수비 점성토의 최적 함수비와 최대 건조단위중량을 결정하는 경험적 방법을 제시한 바 있으나, 이는 순수 점성토의 경우에만 적용이 가능하며 EPS가 혼합된 상태의 본 시료는 EPS 입자 자체의 탄성으로 인해 적절한 다짐이 수행될 수 없음을 예비실험을 통해 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 PVC 몰드에 느슨한 혼합토를 채워 넣은 후 소요의 단위중량과 5g의 오차범위내에 해당하는 50%의 시료몰드를 실험에 사용하여 대기양생을 3일, 7일, 15일, 28일간 실시하였다. 본 연구에서 수행한 실내시험을 요약하면 표 2와 같다.

기본적으로 각 양생기간동안 양생한 혼합토 시료는 1.0%/min의 속도로 일축압축시험을 수행하였다. 그리고, 유효구속압에 따른 경량혼합토의 압축강도의 변화를 고찰하기 위하여 일축압축시험과 동일한 조건들에 대해서 유효구속압 50kPa의 삼축압축시험을 수행하였다. 또한, 양생압에 따른 압축강도의 특성을 고찰하기 위하여, $\phi 30\text{cm}$ 의 강관 셀에 혼합토를 채운 PVC 몰드를 넣어 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa의 각 양생압을 가한 상태로 대기양생 시킨 시료를 준비하여 비압밀 비배수 조건으로 삼축압축시험을 수행하였다. 이때 압력양생시의 경량혼합토는 굳지 않은 상태에서 양생하였다.

삼축압축시험시, 혼합토 시료의 포화를 최대한 보장하기 위하여 110kPa의 셀압력상태에서 100kPa의 배압(back pressure)을 3일동안 가하여 혼합토를 포화하였다. 이에 따른 혼합토 시료의 포화도는 86%~92%의 범위로 측정되었다. 본 연구에서는 혼합토의 포화도가 98%

이상 되도록 하기가 어려웠던 것은 혼합토에 고화제가 포함되어 있어 매우 낮은 투수계수로 인하여 혼합토 시료의 포화도를 크게 높일 수가 없었다. 유효구속압(σ'_c)은 50 kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa로 증가하며 삼축압축실험을 수행하였으며, 하중재하방식은 변형제어방식으로 0.6%/min의 속도로 축하중을 재하하였다.

3. 실험결과 및 결과분석

3.1 압축강도 및 변형 특성

발포 EPS를 혼합한 경량혼합토의 압축강도 특성은 혼합재료들의 성분비율에 따라 크게 달리 나타날 수가 있을 것이다. 특히, 일반 지반재료에 혼합되어 있지 않은 발포 EPS는 축하중의 증가에 따른 밀도의 증가로 인하여 압축강도-변형 곡선의 기울기가 급하게 나타나며 압축강도도 커지게 되나 명확한 극한값을 보이지 않고 압축변형의 증가에 따라 압축강도가 점증하여 나타나는 것으로 알려져 있다.

경량혼합토의 압축강도-변형 특성을 본 연구에서 제시한 기준 배합비, 즉 135%의 초기함수비, 2%의 EPS 함유율, 2%의 시멘트 함유율 그리고 35배의 EPS 발포 배율에 대하여 일축압축과 삼축압축시험 결과를 나타내면 그림 1과 같다. 그림에서처럼, 1%의 축변형까지는 일축압축상태와 삼축압축상태에서의 압축강도가 거의 동일하게 발생하지만, 압축변형이 증가함에 따라 삼축 압축상태에서 압축강도의 증가가 급격히 나타나며 명확한 극한값을 보여주고 있다. 그러나, 일축압축상태에서의 압축강도는 삼축압축상태 보다 상대적으로 점증

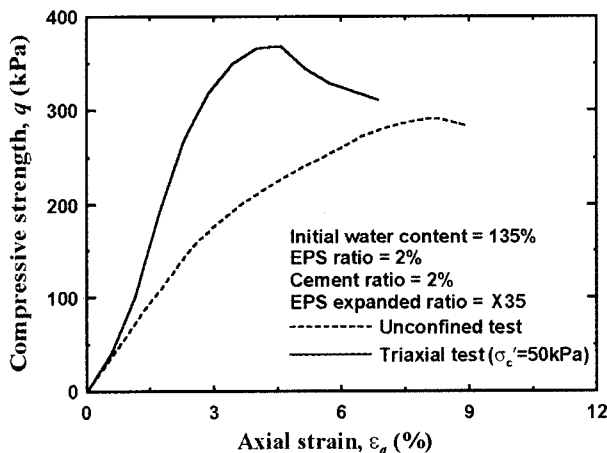


그림 1. 기준배합조건에서 삼축 및 일축압축상태에서의 변형-강도 관계

하여 나타났다. 이는 유효구속압(σ'_c)의 영향에 따른 것으로 여겨진다. 기준배합조건에서 유효구속압 50kPa의 삼축압축상태의 압축강도는 일축압축강도의 약 1.3배로 나타났으며, 파괴시 축변형률은 삼축압축상태에서 약 50% 감소하여 나타났다.

300kPa의 양생압력으로 양생한 기준배합조건의 경량 혼합토에 대하여 유효구속압에 따른 삼축압축강도-변형 특성을 나타내면 그림 2와 같다. 삼축압축상태에서의 압축강도-변형 관계곡선은 극한 압축강도를 넘어서는 압축변형에 대해서는 변형연화현상이 유효구속압에 무관하게 모두 나타나고 있다. 그리고, 파괴 변형률 이전의 압축변형률 영역에서의 압축강도의 발현은 양생 압력보다 낮은 유효구속압상태에서 크게 나타나고 있으나, 높은 유효구속압상태에서는 작게 나타났다. 이는 EPS 자체의 압축특성과 관련지어 설명할 수 있는데, 200kPa이상의 압력상태에서 EPS 자체의 압축성은 급격히 증가하는 것으로 제시한 土田(1996)의 연구결과와 같이 300kPa의 양생압력과 동일한 유효구속압상태에서 추가적으로 작용하는 축차응력에 의한 EPS의 압축량은 증가하게 되며 이에 따른 밀도의 증가로 일정 압축변형 후 급격한 압축강도로 파괴상태에 이르게 되는 것으로 판단된다. 압축강도 측면에서 극한상태의 압축강도는 큰 차이를 보이지 않음으로서 유효구속압에 의존하지 않은 것으로 나타났다.

경량혼합토의 일축압축과 삼축압축상태에서의 압축강도와 할선탄성계수(E_{50})의 관계를 고찰하면 그림 3과 4와 같다. 그림 3은 일축압축상태의 압축강도[$q_{u(UC)}$]와 할선탄성계수의 관계를 7일과 28일 양생한 경량혼합토의 결과를 도시하고 있다. 土田(1996)에 의하면, 발포

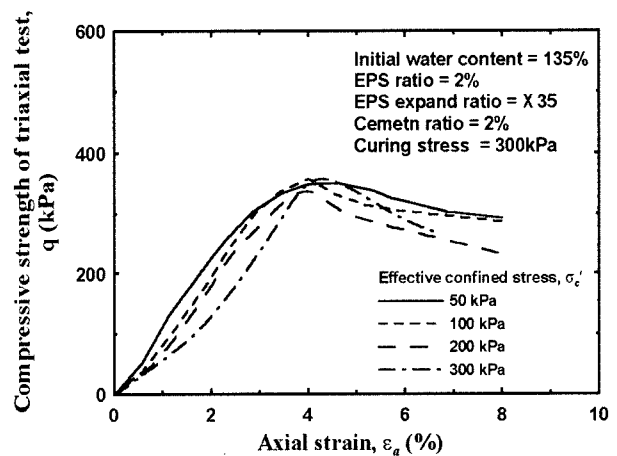


그림 2. 기준배합조건에서 유효구속압에 따른 삼축압축강도-변형 관계

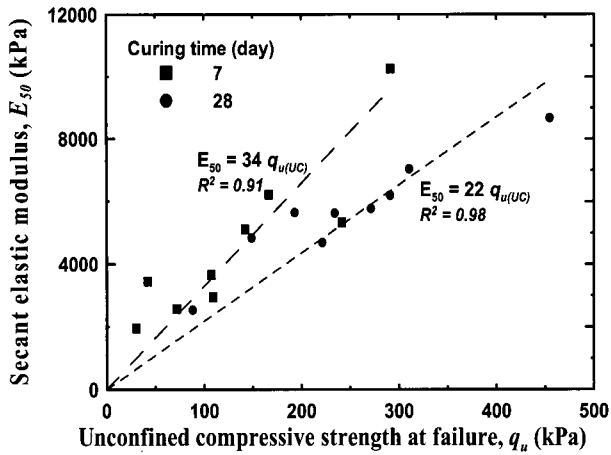


그림 3. 양생 재령별 일축압축강도와 할선탄성계수의 관계

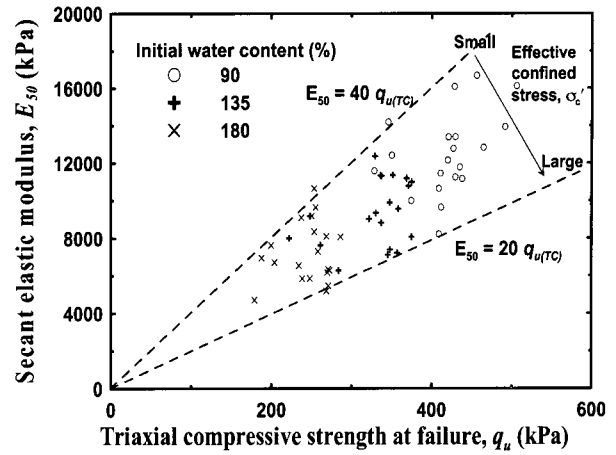


그림 4. 28일 양생시 삼축압축강도와 변형계수의 관계

EPS를 혼합한 경량혼합토에서 할선탄성계수는 일축압축강도의 100~200배 정도라고 제시한 바가 있다. 그에 의한 연구는 시멘트 함유율이 5~6%, EPS 발포배율이 30%~70%이고 사용한 준설토에 실트질 성분이 약 77% 정도로 많이 함유되어 있는 경우의 결과이다. 그러나, 본 연구에서 얻어진 28일 양생한 경량혼합토의 할선탄성계수와 일축압축강도의 관계는 $E_{50} = 22 q_{u(UC)}$ 로서 土田(1996)의 결과보다 매우 작은 기울기 관계를 보여주고 있으며, 이는 본 연구의 조건들중에서 시멘트 함유율이 작고 사용한 준설토에 대부분이 점토성분으로 이루어져 있기 때문으로 판단된다.

기준배합조건에서 준설토 초기함수비를 달리한 경우에서 삼축압축강도($q_{u(TC)}$)와 할선탄성계수의 관계를 28일 양생조건에 대하여 나타내면 그림 4와 같다. 삼축압축강도는 유효구속압에 의존하여 변화하기 때문에 적정 압축강도와 할선탄성계수의 관계 기울기를 제시하기 어려우며, 이에 본 연구에서는 유효구속압이 50kPa~300kPa의 범위에 대한 결과들로서 유효구속압이 작은 경우에는 $E_{50} = 40 q_{u(TC)}$ 로 유효구속압이 큰 경우에는 $E_{50} = 20 q_{u(TC)}$ 로 유효구속압에 따른 압축강도와 할선탄성계수의 적정범위를 제시할 수 있었다. 준설토의 초기함수비의 증가에 따른 압축강도와 할선탄성계수의 관계는 $E_{50} = 20 \sim 40 q_{u(TC)}$ 의 적정범위내에 나타났다. 土田(1996)의 연구결과와 비교하면, 본 연구의 결과가 土田의 결과인 $E_{50} = 40 \sim 240 q_{u(TC)}$ 보다도 작은 유효구속압의 경우에서 매우 작은 기울기 관계를 보여주고 있다.

본 연구에서 수행한 삼축압축시험에서 2%의 시멘트 함유율, 2%의 EPS 함유율 그리고 35%의 EPS 발포배율 배합조건에서 준설토 초기함수비(ω_n)와 유효구속압에

다른 할선탄성계수를 변화를 회귀분석한 결과 다음과 같은 실험식을 제시할 수가 있다.

$$E_{50} = (42687 - 5141 \sigma'_c) - (182 - 25 \sigma'_c) \omega_n$$

for $90\% \leq \omega_n \leq 180\%$ (1)

3.2 경량혼합토에 대한 준설토의 초기함수비의 영향

준설토를 함유하는 경량혼합토의 압축강도는 주성분인 준설토의 배합시 함수비에 따라 강도의 크기가 변화하는 것으로 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 준설토 초기 함수비에 따른 압축강도의 변화정도를 고찰하기 위하여 준설토 액성한계의 2.0, 3.0, 4.0배에 해당하는 초기함수비를 갖는 준설토를 이용하여 배합하였다. 경량혼합토의 압축강도-변형 관계와 초기함수비에 따른 극한압축강도의 변화는 각각 그림 5와 6과 같이 나타났으며, 이때의 다른 배합조건은 시멘트 함유율이 2%, EPS 함유율이 2% 그리고 EPS 발포배율이 35배인 경우이다.

그림 5에서는 유효구속압이 50kPa인 삼축상태와 일축압축상태의 결과를 각 초기함수비에 대하여 함께 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 기준배합조건으로 배합한 경량혼합토의 삼축압축상태에서 압축강도-변형 곡선은 일축압축상태의 결과에 비하여 조기에 파괴변형률이 발생하고 경량혼합토의 파괴 후 변형연화현상(strain softening)이 명확히 나타나고 있다. 액성한계의 4.0배에 해당하는 고함수비에서는 양생 후에도 잔존하는 고함수비의 유동성에 의하여 극한 압축강도의 차이가 크지 않으며 압축강도-변형 곡선 또한 거의 유사한

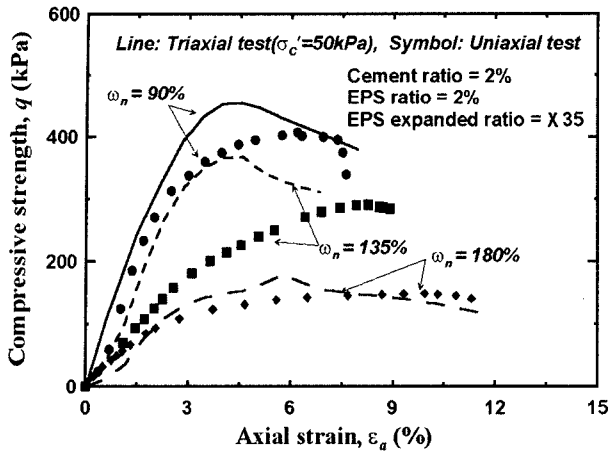


그림 5. 준설토의 초기함수비에 따른 압축강도-변형의 관계

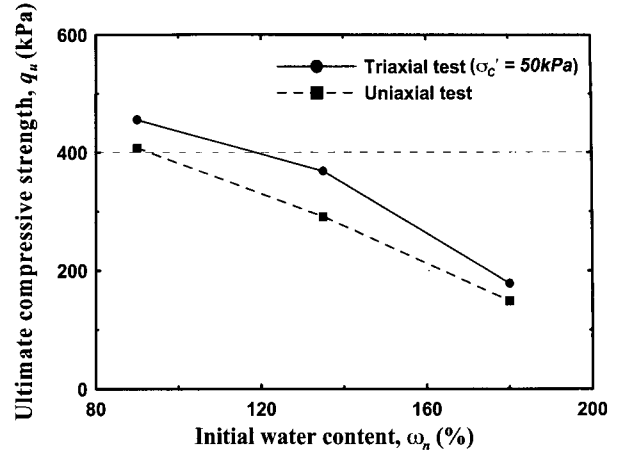


그림 6. 준설토의 초기함수비에 따른 극한 압축강도의 변화

양상을 보여주고 있다. 그리고, 액성한계의 2.0배에 해당하는 저함수비의 경우에서는 일축압축상태에서 경량 혼합토의 파괴형태가 취성파괴를 보여주고 있다.

그림 6는 준설토 초기함수비의 증가에 따른 극한압축 강도의 변화를 삼축 및 일축압축상태에 대하여 나타낸 것이다. 일축압축상태에서 초기함수비의 증가에 의한 극한압축강도의 감소는 거의 직선적으로 나타났으나, 유효구속압 50kPa의 삼축압축상태에서 극한압축강도의 감소는 곡선적이며 액성한계의 3.0배 이상의 초기함수비에서는 그 감소성이 크게 나타났다. 전반적으로, 200kPa 이상의 지지력을 요구하는 개량지반에 EPS를 함유한 경량혼합토를 적용하는 경우에서 적절한 준설토의 초기함수비는 약 165%~175%이상으로 제시할 수가 있다.

3.3 경량혼합토에 대한 EPS 함유율의 영향

경량혼합토의 성분중 EPS의 함유율에 따른 압축강도-변형 관계와 극한압축강도의 변화를 고찰하기 위하여, EPS 함유율을 1%~3%로 달리한 삼축 및 일축압축시험의 결과를 나타내면 그림 7과 8과 같다. 그림 7는 준설토 초기함수비 135%, 시멘트 함유율 2% 그리고 EPS 발포배율 35배인 배합조건에서 EPS 함유율을 증가함에 따른 압축강도-변형 관계의 변화를 도시한 것이다. 그림에서와 같이, EPS 함유율이 1%로 낮은 경우에는 삼축압축상태의 압축강도-변형 곡선은 압축변형의 증가에 대하여 급격한 압축강도의 증가를 나타낸 후 파괴강도를 지나 급격한 압축강도의 감소를 보임으로서 시멘트혼합토(cemented soil)의 압축강도-변형 특성에 유사

하다고 할 수 있다. 그리고, 파괴시 압축변형률이 삼축 압축상태가 일축압축상태보다 50% 감소하여 나타났다. 특히, EPS 함유율이 3%인 경우, 압축강도-변형 곡선이 압축변형률 6%까지는 삼축 및 일축압축상태에서 거의 일치하여 나타나고, 6%이상의 압축변형에서는 유효구속압의 영향에 의하여 삼축과 일축압축압축상태의 관계 곡선이 달리 나타났다. 그리고, 극한 압축강도는 일축 및 삼축압축상태에서 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

그림 8는 EPS 함유율에 따른 경량혼합토의 극한 압축강도의 변화를 삼축 및 일축압축상태에 대하여 도시한 것이다. EPS 함유율에 따른 극한압축강도의 변화는 EPS 함유율이 1%에서 2%로 증가함에 따라 극한 압축강도는 삼축 및 일축압축상태 모두에서 31%~36%로 급격히 감소하고 있으나, EPS 함유율이 2%에서 3%로 증가한 경우에는 완만한 감소를 보이고 있다. 따라서, 200kPa 이상의 지지력을 요구하는 개량지반에 EPS를 함유한 경량혼합토를 적용하는 경우에서 적절한 EPS 함유율은 3%~4%로 추정할 수 있으며, 400kPa 이상의 지지력을 요구하는 개량지반의 경우에는 적절한 EPS 함유율이 1.3%~1.8%로 제시할 수가 있다.

3.4 경량혼합토에 대한 시멘트 함유율의 영향

경량혼합토의 제작시 압축강도의 증가를 위하여 고화재인 시멘트를 많이 사용하는 것은 유리할 수가 있지만, 경량혼합토의 경제성을 확보하기 위해서는 고가인 고화재의 사용을 최대한 줄여주는 것이 필요하다. 소요 압축강도에 필요한 적정 시멘트 함유율의 결정은 경량혼합토의 적용성에서 주요한 부분이라 할 수 있다. 이를

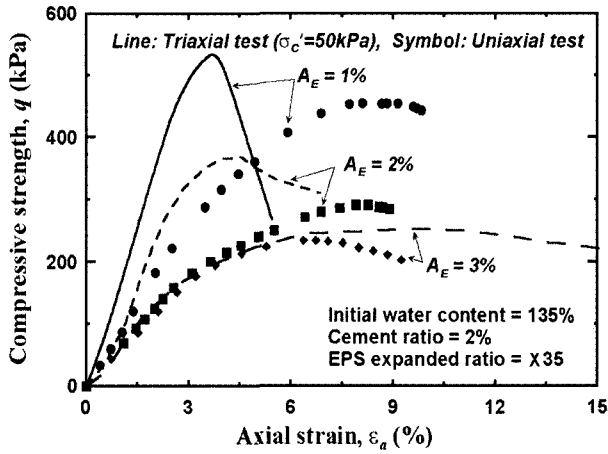


그림 7. EPS 함유율에 따른 압축강도-변형의 관계

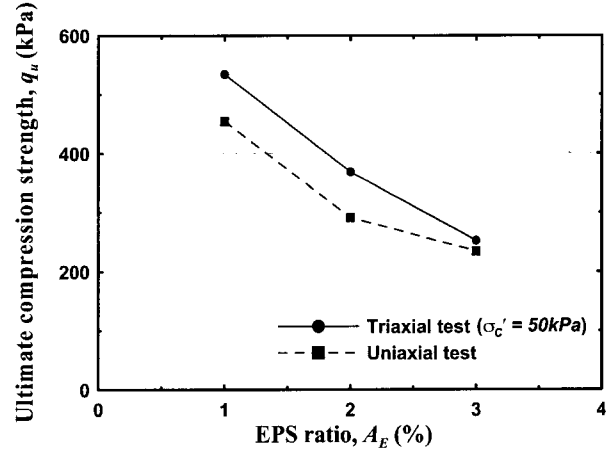


그림 8. EPS 함유율에 따른 극한 압축강도의 변화

위하여 본 연구에서는 시멘트 함유율에 따른 압축강도-변형의 관계와 극한 압축강도의 변화를 고찰하였으며 그림 9와 10과 같다.

그림 9는 준설토 초기함수비 135%, EPS 함유율 2% 그리고 EPS 발포배율 35배의 배합조건에서 시멘트 함유율을 변화한 경우 삼축 및 일축압축상태의 압축강도-변형의 관계를 도시한 것이다. 그림에서와 같이, 경량혼합토에서 시멘트 함유율이 증가할수록 압축강도-변형의 곡선은 시멘트 자체의 파괴특성인 취성파괴와 유사한 파괴후 급격한 압축강도의 감소현상을 삼축 및 일축 압축상태 모두에서 나타나고 있다. 그리고, 시멘트 함유율이 1%인 경우에는 압축변형률의 증가에 대한 삼축 및 일축압축상태에서의 압축강도의 증가는 상대적으로 완만하게 증가하고 있다. 특히, 삼축압축상태에서의 파괴시 압축변형률은 시멘트 함유율 3%의 경우보다 약 2.5배 증가하여 나타났다. 이는 시멘트 함유율 1%의 경

량혼합토의 경우에는 압축강도-변형의 관계가 시멘트 성분보다는 EPS 성분에 더 의존하여서 EPS 자체의 압축강도-변형 관계곡선과 유사한 거동양상을 보이는 것으로 사료된다. 그림 10은 시멘트 함유율에 따른 삼축 및 일축압축상태에서 극한 압축강도의 변화를 도시한 것이다. 그리고, 그림에는 각 압축상태에서 극한 압축강도와 시멘트 함유율의 관계에 대하여 회귀분석한 실험식을 함께 나타내었다. 그림에서와 같이, 일축압축상태인 경우 시멘트 함유율이 증가함에 따른 극한 압축강도의 증가는 삼축압축상태의 경우보다 크게 나타났다. 특히, 유효구속압 50kPa인 경우에서 시멘트 함유율이 2%~3% 범위에서 경량혼합토의 극한 압축강도는 거의 변화가 없는 것으로 나타나 본 연구에서와 같은 배합조건에서의 적정 시멘트 함유율은 2%라고 할 수 있을 것이다.

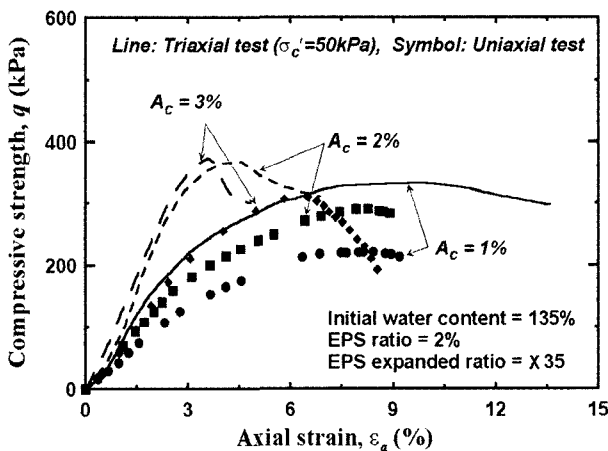


그림 9. 시멘트 함유율에 따른 압축강도-변형의 관계

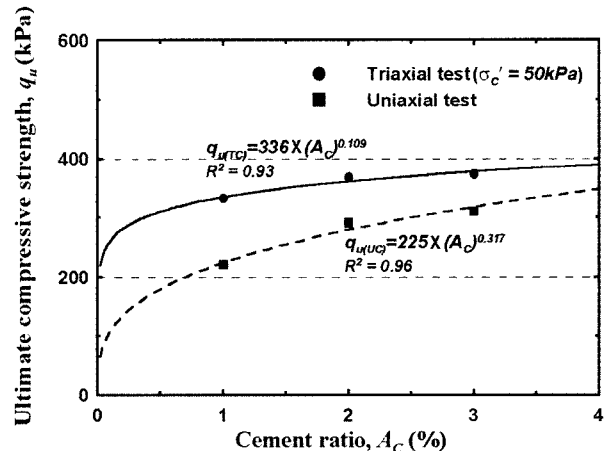


그림 10. 시멘트 함유율에 따른 극한 압축강도의 변화

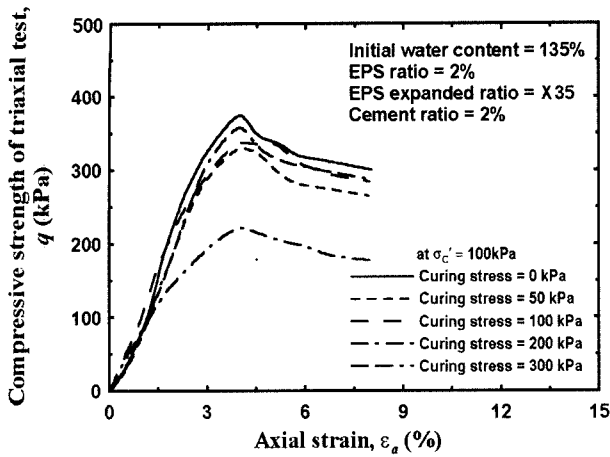


그림 11. 기준배합조건에서 양생압력에 따른 압축강도-변형의 관계

3.5 양생압력에 따른 삼축압축강도의 변화

EPS를 함유한 경량혼합토를 토압감소를 목적으로 하는 현장에 적용할 경우 타설심도에 따른 양생시 압력의 차이가 발생하게 될 것이며 이에 따른 압축강도의 특성도 달라질 것이다. 이를 검토하기 위하여 본 연구에서는 다양한 양생압력하에서 양생한 경량혼합토를 대상으로 삼축압축시험을 수행하고 압축강도-변형 관계를 고찰하였다.

그림 11은 기준배합 조건인 경우 100kPa의 유효구속압 상태에서 양생압력에 따른 삼축압축강도-변형 관계를 도시한 것이다. 그림에서와 같이, 양생압력이 있는 경우의 삼축압축강도는 양생압력이 영(zero)인 경우보다 작게 나타나고 있으나, 압축강도 측면에서 양생압력을 가하며 양생한 경량혼합토의 압축강도는 양생압력 0kPa의 대기양생한 경우보다 압축강도의 감소는 약 13% 정도로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그리고, 파괴시 압축변형률도 양생압력에 거의 의존하지 않는 것으로 나타났다. 그러나, 특히 200kPa의 양생압력으로 양생한 경량혼합토의 경우, 삼축압축강도가 양생압력이 0kPa인 경우보다 40%의 큰 폭으로 감소하는 결과를 나타내고 있다. 그리고, 압력양생한 경우의 경량혼합토에서는 낮은 압축변형에서 압축강도의 증가가 크게 나타나 압력양생하지 않은 혼합토에서 발생한 과대한 초기 압축변형이 크게 감소하였다. 이는 혼합토의 양생시 압력이 가해짐에 따라 혼합토의 밀도증가가 유발되어 초기 압축변형시 압축강도의 증가를 가져오며 압축변형이 증가함에 따라서는 양생압에 의하여 압축된 발포

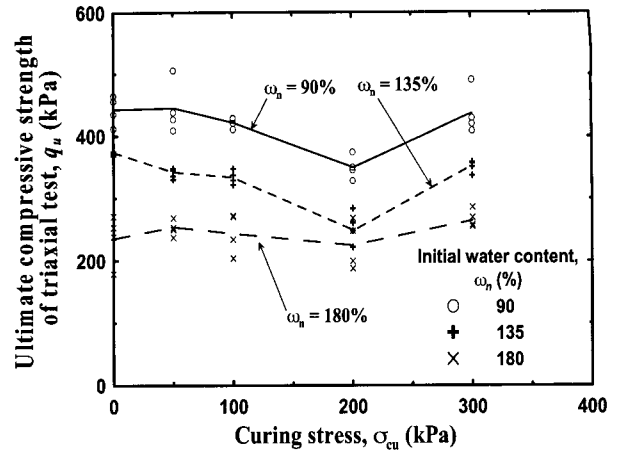


그림 12. 준설토의 초기함수비에 대한 양생압력과 극한 삼축압축강도의 관계

EPS가 토립자와는 달리 간극으로의 이동이 거의 불가능하여 오히려 혼합토의 내압으로 작용하여 압축강도를 감소하는 역할을 하는 것으로 판단되어진다.

그림 12는 각 준설토 초기 함수비에서 50kPa~300kPa의 유효구속압에 대한 양생압력과 극한 삼축압축강도의 관계를 도시한 것이며, 그림에 각 초기함수비에 대한 극한 삼축압축강도의 평균값을 나타내는 선을 함께 도시하였다. 그림에서와 같이, 전반적으로 양생압력하에서 양생한 경량혼합토의 극한압축강도는 200kPa의 양생압력 상태까지는 완만히 감소한 후 200kPa 이상의 양생압력하에서는 증가하는 양상으로 200kPa의 양생압력 상태에서 극한 압축강도가 최소값을 보여주고 있으며 이러한 특성은 준설토 초기함수비에 무관하게 나타났다. 이는 명확한 근거를 제시하기에는 어려움이 있으나, 土田(1996)의 연구결과와 유사한 결과로서 이를 명확히 규명하기 위하여는 EPS의 자체 압축특성과 관련한 보다 종합적인 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 EPS, 시멘트, 준설토를 혼합한 경량혼합토를 해안구조물의 뒷채움재로 활용하기 위하여 혼합토의 압축강도 특성을 연구하였다. 이를 위하여 시멘트 함유율, EPS 함유율 그리고 준설토 초기함수비에 따른 경량혼합토의 압축강도 특성을 파악하였으며, 배합조건별 일축 및 삼축 압축시험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 경량혼합토의 압축강도-변형 관계곡선은 삼축압축 상태의 경우, 명확한 극한 압축강도를 나타낸 후 변

형연화현상을 보여주고 있으나, 일축압축상태의 경우는 상대적으로 압축강도가 점증하는 것으로 나타났다. 그리고 삼축압축상태에서 유효구속압의 증가에 따른 압축강도의 변화는 거의 찾아볼 수 없어, EPS를 함유한 경량혼합토에서는 압축강도가 유효구속압에 의존하지 않는 것으로 나타났다.

- (2) 경량혼합토의 할선탄성계수와 일축압축강도의 관계는 $E_{50} = 22 q_{u(UC)}$ 의 실험식으로 정의할 수 있으며, 기준배합 조건에서 준설토의 초기함수비가 다른 경우에서 할선탄성계수와 삼축압축강도의 관계는 $E_{50} = 20 \sim 40 q_{u(TC)}$ 의 적정범위를 갖는 실험식으로 정의할 수 있었다.
- (3) 준설토의 초기함수비가 감소할수록 삼축압축강도-변형곡선은 일축압축상태에 비하여 파괴시 압축변형률은 평균 39% 감소하였으며 EPS 함유율이 적을수록 그리고 시멘트 함유율이 클수록 분명한 경향을 나타냈다.
- (4) EPS 함유율이 감소할수록($A_E < 2\%$) 그리고 시멘트 함유율이 증가할수록($A_C > 2\%$) 삼축압축강도-변형 거동특성은 전반적으로 극한 압축강도를 지나 급격한 압축강도의 감소를 보이는 고결된 혼합토(cemented soil)의 압축강도-변형 거동특성과 유사한 것으로 나타났다.
- (5) 200kPa 이상의 압축강도를 요구하는 개량지반에 본 경량혼합토를 적용하는 경우는 준설토의 초기함수비, EPS 함유율은 각각 약 165%~175% 그리고 3%~4%로 제시할 수가 있었다. 또한, 삼축 및 일축압축상태에서 극한 압축강도는 시멘트 함유율이 2% 이상에서 거의 증가하지 않음으로서 한계 시멘트 함유율은 2%로 제시할 수가 있었다.
- (6) 양생압력에 대한 경량혼합토의 거동 특성으로 극한

압축강도는 200kPa의 양생압력상태까지에서는 완만히 감소하며 200kPa 이상의 양생압력 조건에서는 극한압축강도가 증가하는 양상을 보였다. 이러한 특성은 200kPa의 양생압력상태에서 극한압축강도가 최소값을 보여주고 있으며 준설토의 초기함수비와는 무관한 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 지원 국책과제로서 2000년 3월부터 한국해양연구원 연안항만공학연구본부에서 수행중인 “준설토 재활용 방안 연구”의 일부임을 밝힌다. 본 연구가 가능하도록 연구비를 지원해주신 해양수산부 담당자께 심심한 사의를 표하는 바입니다.

참고 문헌

1. 김홍택(1994), EPS의 재료특성, 설계법 및 시공사례에 대한 고찰, 한국지반공학회지, 제10권, 제3호, pp.135-148.
2. 해양수산부(2000), “준설토 재활용 방안 연구”, 한국해양연구원, 2000년도 연구보고서.
3. 장용채(1994), “발포폴리스티렌(EPS)을 이용한 경량성토공법”, 한국지반공학회지, 제10권, 제3호, pp.149-172.
4. L.R. Blotz, CrEstimating Optimum Water Content and Maximum Dry Unit Weight aig H. Benson, and Gordon P. Boutwell(1998), For Compacted Clays, *J. Geotech. and Geoenvironmental Engrg.*, ASCE, Vol.124, No.9, pp.907-912.
5. 土田(1996a), 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. 土田(1996b), 輕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.
7. 土田(1999), 建設發生土を 活用した輕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.
8. 日本地盤工學會(1998), 輕量地盤材料の物性と適用の現狀, 輕量地盤材料の物性評價に関する研究委員會, 日本地盤工學會.

(접수일자 2002. 1. 23, 심사완료일 2002. 8. 12)