

현장발생토를 활용한 경량기포혼합토(LWFS)의 강도 및 변형특성

Strength and Deformation Characteristics of Lightweight Foamed Soil Using In-situ Soil

윤길림¹ Yoon, Gil-Lim

유승경² You, Seung-Kyong

Abstract

A series of unconfined compression tests were carried out firstly to investigate mechanical behaviors of Lightweight Foamed Soil (LWFS) which is composed of dredged soils, cement and air foam. And secondly, to compare the difference of mechanical characteristic of LWFS with previous research conclusions (Yoon & Kim, 2004) by using different dredged soils sampled at Joong-Ma in Gwangyang harbor area. Based on numerous laboratory experiments, it was found that deformation coefficient (E_{50}) of LWFS increases with increasing cement contents but decreases with increasing initial water contents of dredged soils. Appropriate regression formula (normalizing factor scheme) which considers relationship between LWFS composing elements, initial water contents of dredged soils, cement, air foam, and uniaxial compression strength of LWFS is proposed for practical applications. Finally, it was clear that, to apply LWFS method to practical projects, certain laboratory test would be necessary to take considerations of soil locality because mechanical characteristics of LWFS were surely dependent upon their sampled locations and properties.

요지

본 연구에서는 준설토와 시멘트, 기포를 이용하여 제작한 경량기포혼합토에 대한 일련의 일축압축시험으로 경량기포혼합토의 역학적 거동에 미치는 준설토의 초기 함수비 및 시멘트 함유율의 영향을 정량적으로 조사하였다. 또한, 기존의 연구결과(윤과 김, 2004)와의 비교검토를 통해 광양항 중마지역의 준설토를 채취하여 지역에 따른 경량기포혼합토의 역학적 특성의 차이를 분석하였다. 일축압축시험결과 경량기포혼합토의 변형계수(E_{50})는 시멘트 함유량이 증가하면서 그 크기도 증가하나 준설토의 초기함수비가 클수록 작게 나타났다. 또한, 경량혼합토의 구성요소인 준설토의 초기 함수비, 시멘트 함유량, 기포 함유량을 고려한 정규화계수로 표현되는 일축압축강도의 적절한 회귀식을 제시하였다. 본 연구의 결과, 경량기포혼합토의 역학적 특성은 준설토의 채취지역에 따라 다르므로 설계반영을 위해서는 적절히 실내실험을 통하여 검토해야 할 필요성이 있음을 확인하였다.

Keywords : Dredged soils, In-situ soil, Lightweight foamed soil, Uniaxial compression test

1. 서론

현재 우리나라에서는 건설현장 및 항로 준설과 연안 준설공사로 인해 다량의 현장잔토가 발생되고 있지만,

준설직후 대부분 외해 투기로 처리하거나 또는 투기장에 장기간 방치하여 건조·처리하는 상황이며, 이로 인한 대규모 부지확보 및 주변 환경오염 발생 등 많은 문제점이 제기되고 있다. 그러나, 선진국에서는 단순

1 정회원, 한국해양연구원 연안항만공학연구본부 책임연구원 (Member, Principal researcher, Coastal & Harbor Engrg. Lab, Korea Ocean Research & Development Institute, glyoon@kordi.re.kr)

2 정회원, 명지전문대학 토목과 조교수 (Member, Assistant prof., Dept. of Civil Engrg., Myongji College)

매립보다는 신기술 및 신공법 개발로 준설토를 방파제나 안벽 및 호안 시공시 적절히 건설재료로 이용하는 등의 재활용 기술을 적극적으로 활용하고 있다. 따라서 국내에서도 장차 대규모 건설공사, 준설사업, 항로유지 준설 및 오염해역 준설과 관련한 발생 준설토를 오염정도를 고려하여 자원으로서 재활용할 수 있도록 관련 기술개발이 필요한 시점에 이르렀다.

현장발생토를 재활용하는 방법은 여러 측면에서 고려할 수 있으나 침하감소 및 토압저감용 경량기포혼합토를 만들어 그 효용성을 증대시킨다면 매우 유용한 처리 방안이 될 것이다. 기존의 연약지반상에서 일반적인 토사를 사용하여 성토, 옹벽 및 교대의 뒷채움 재료로 하는 경우 지반내 응력증가에 따른 침하, 활동 파괴, 측방 유동 등의 문제가 빈번히 발생하고 있는 상황에서 이 경량기포혼합토로 대체한다면 압축성이 큰 토질과 관련된 침하문제, 항만구조물 배면 매립시 토압경감 문제 등을 보완할 수 있을 것으로 예상된다(윤길림 등, 2003). 또한 기존의 준설토 재활용에 관한 국외의 연구(土田, 1996, 1999)에서는 주로 자국에서 발생하는 준설토에 국한하여 혼합토에 대한 압축강도 특성을 연구함에 따라 각 지역의 다양한 입도로 분포하고 있는 준설토를 재활용하기 위한 연구 자료로서는 불충분한 실정이라 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 전라남도 광양해역 중마항 지역에서 채취된 점토질 준설토를 재활용하기 위하여 고화제와 기포제를 혼합한 경량기포혼합토를 제작한 후 응력-변형거동 그리고 압축강도 특성을 고찰하였다. 경량기포혼합토의 초기함수비, 시멘트 함유율의 변화가 압축강도에 미치는 영향 및 응력-변형 거동 특성을 비교·분석하여 경량화 된 지반재료로서 갖는 역학적 특성을 파악하였다. 최종적으로 각 배합인자들에 의한 경량혼합토의 압축강도의 변화를 모두 고려할 수 있는 정

규화계수(Normalized Factor, NF)를 제안하고 압축강도와 정규화계수의 관계를 고찰하였다.

2. 준설토와 경량혼화재의 특성

본 연구에서 사용한 해양 준설토 시료는 전라남도 광양해역 중마항 지역에서 채취하였다. 실내 물성실험을 통하여 채취한 준설토의 기본적인 물리적 특성을 파악하였으며, 그 결과는 표 1에 나타난 바와 같다. 사용된 준설토를 통일분류법에 근거하여 분류하면 CL에 해당하였으며, 그림 1에 입도분포를 나타내었다.

또한, 본 연구에서는 환경 친화적인 식물성 기포제를 사용하였다. 또한, 혼합토에 기포가 균일하게 분포할 수 있도록 한국해양연구원(2003)에서 자체 개발한 기포장치를 이용하여 기포제에 물리적으로 공기압을 가해 사전에 발포시킨 후 혼합하는 방법을 적용하였다. 이때 기포제와 물의 비율을 1:20, 공기압은 2~3kg/cm² 하에 발포시킨 기포를 사용하였다(그림 2 참조). 사용된 식물성 기포제의 특성과 공기압에 따른 단위중량은 표 2와 같다. 한편, 본 논문에서 경량기포 혼합토의 강도증대를 위하여 사용한 고화재는 1종 보통포틀랜드(Portland) 시멘트

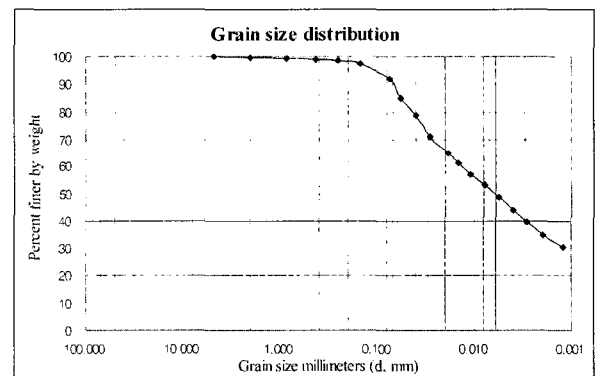


그림 1. 준설토의 입도분포곡선

표 1. 준설토의 물성시험 결과

시료	항목	비중 (G _s)	액성한계 (LL, %)	소성한계 (PL, %)	소성지수 (PI)	균등계수 (C _u)	곡률계수 (C _g)	USCS
중마항		2.60	43.67	21.88	21.79	50	0.32	CL

표 2. 식물성 기포제의 특성

비중 G _s	Ph (4°C)	비누화값	침전값	염분농도 (%)	단위중량, γ _t (g/cm ³)	
					공기압 (2~3kg/cm ²)	공기압 (3~4kg/cm ²)
1.03	7.10	5.30	0	1.70	0.047	0.076



그림 2. 발포된 기포의 형상

를 사용하였다.

3. 경량기포혼합토의 배합

한국해양연구원(해양수산부, 2003)에서는 그림 3에 보이는 바와 같이 혼합토의 함수비 조정단계와 고화재 및 발포기포의 첨가단계를 실내에서 가능하게 한 배합장치를 자체적으로 개발·제작하여 경량기포혼합토를 설계 목적에 맞게 배합하는 방법과 지반개량공법에 적용하는 기술을 특허출원중에 있다(윤길림과 김병탁, 2003a; 윤길림 등, 2003). 본 연구에서는 다양한 배합조건에서 경

표 3. 배합 및 시험 조건

항목	배합 및 시험 조건
준설토의 초기함수비, w_i (%)	125, 150, 200
시멘트 함유율, C_i (%)	6, 9, 12, 18
양생기간, T_c (day)	7, 14, 28

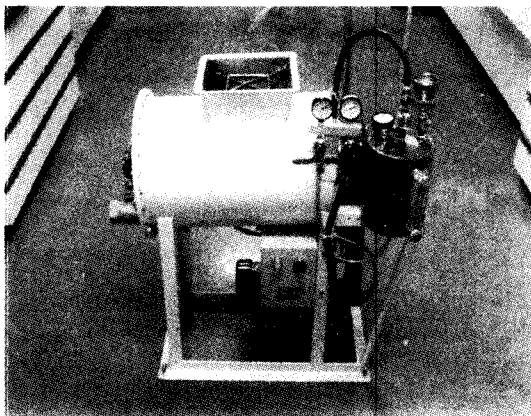


그림 3. 기포발생기가 장착된 배합장치

량기포혼합토의 역학특성을 조사하기 위해 본 배합장치를 사용하여 공시체를 제작하였으며, 배합조건으로는 준설토의 초기 함수비(w_i), 시멘트 함유율(C_i), 기포의 함유율(A_i)의 각 요소들의 조건을 달리하여 배합 설계치를 산정하였다. 경량기포혼합토 제작을 위한 w_i 는 125%, 150% 및 200%로 변화시켰으며, C_i 는 경제성과 시공성을 고려하여 각각의 함수비에 대해 6%, 9%, 12%, 18%로 변화시켰다. 또한, 각각의 배합비에 따른 기포의 혼합은 기포 발생장치를 이용하여 2~3kg/cm²의 압력 하에 발포시킨 기포를 평균 5분 이내에 수행함으로써, 공시체 제작에 따른 기포의 소포를 최소화하였다. 이때 경량기포혼합토의 목표단위중량은 1.2g/cm³이며, w_i , C_i , 및 A_i 은 준설토에 대한 중량 백분율로 산정하였다. 표 3은 본 실험의 배합 및 시험조건을 나타내고 있다.

4. 일축압축강도시험

본 논문에서는 전술한 배합조건에서의 경량기포혼합토의 응력-변형특성과 강도특성을 조사하기 위해 일축압축시험을 실시하였다. 일축압축시험을 위한 공시체 제작은 직경 5.0cm, 높이 12cm인 PVC 몰드를 이용하였다. 몰드 하부는 가로, 세로 10cm의 아크릴판으로 밀봉하였으며, 몰드 내면은 경량기포혼합토가 양생되면서 부착되는 것을 방지하기 위하여 그리스(grease)를 얇게 도포하였다. 그 후 각각의 배합설계에 따른 경량기포혼합토의 슬러리를 전체 양의 1/3씩 나누어 몰드 안에 주입하였는데, 이때 슬러리 속의 기포가 소포되지 않도록 세심한 주의를 기울이며 스펀저를 이용하여 다짐을 하였다. 한편, 일축압축시험을 위한 공시체는 일반적으로 적용되는 양생기간 7, 14 및 28일의 대기양생을 계획

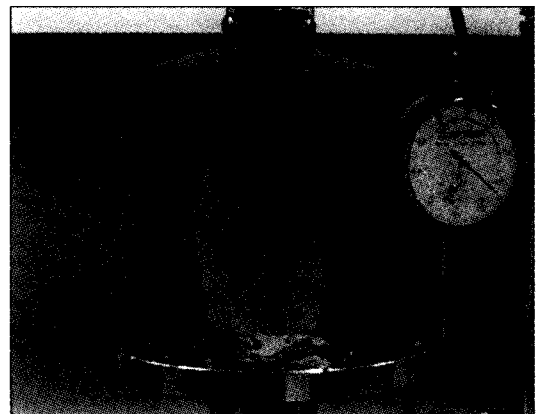


그림 4. 공시체의 파괴형상



그림 5. 경량기포혼합토의 단면

하여 제작하였다. 재하 중 공시체에 발생되는 축변형량과 압축하중은 각각 다이얼 게이지와 로드셀에 의해 측정하였다. 그림 4와 5는 각각 경량기포혼합토 공시체의 전형적인 파괴형상과 그 단면을 나타내고 있다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 경량기포혼합토의 응력-변형거동

그림 6은 준설토 초기함수비 150%, 시멘트 함유율 18%인 경우의 재령기간에 따른 경량기포 혼합토의 응력-변형거동을 나타내고 있다. 재령기간 7일에 대한 경량기포 혼합토의 응력-변형거동은 뚜렷한 파괴양상은 나타나지 않고 흙시료와 유사한 응력-변형거동을 보이고 있다. 이것은 공시체의 재령기간이 짧기 때문에 시멘트 고화제에 의한 고결화(cementation) 작용이 충분히 발휘되지 못했기 때문이라고 판단된다. 또한, 재령기간 14일의 경우 공시체의 파괴 전까지는 완만한 응력-변형거동을 보이지만 파괴 후에는 급격한 응력저하 양상을 보이고 있으며, 재령기간 28일의 경우에는 비교적 작은 축변형율에서 파괴된 후 급격한 응력저하를 나타내는 취성적 파괴양상을 보이고 있다. 한편, 재령기간이 길수록 일축압축강도가 크을 알 수 있다. 그림 7은 준설토 초기함수비 150%, 재령기간 28일인 경우의 시멘트 함유율에 따른 경량기포 혼합토의 응력-변형거동을 나타내고 있다. 일축압축강도는 시멘트 함유량이 많을수록 크게 나타나고 있으며 응력-변형거동 또한 현저한 취성적 파괴양상을 나타내고 있다.

5.2 경량기포혼합토의 구성요소에 따른 압축강도특성

그림 8은 경량기포 혼합토의 일축압축강도에 미치는

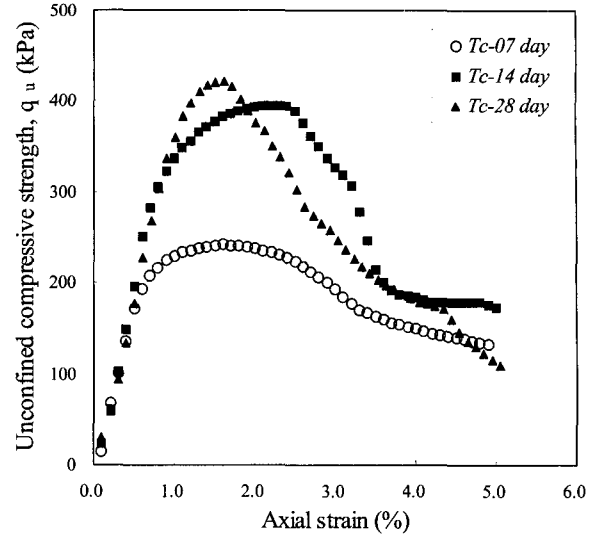


그림 6. 재령기간에 따른 응력-변형거동

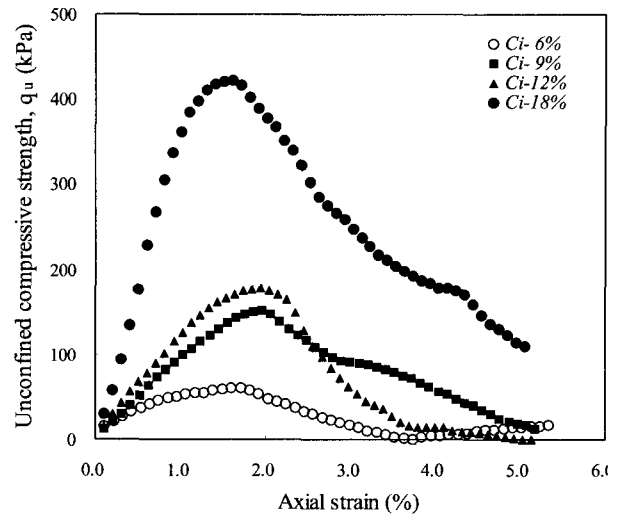


그림 7. 시멘트 함유율에 따른 응력-변형거동

준설토의 초기함수비의 영향을 나타내고 있다. 동일한 시멘트 함유량일 때 재령기간이 긴 경우 일축압축강도가 크게 나타나고 있으나 재령기간에 관계없이 모든 시멘트 함유량에 대해서 초기함수비가 증가할수록 일축압축강도는 감소하고 있다. 또한, 준설토의 초기함수비 증가에 따른 일축압축강도의 감소율은 시멘트 함유량이 증가할수록 작아짐을 알 수 있다. 한편, 그림 9는 경량기포 혼합토의 일축압축강도에 미치는 시멘트 함유량의 영향을 나타내고 있다. 모든 초기 함수비에 대해서 시멘트 함유량이 증가할수록 일축압축강도는 증가하고 있으며, 준설토의 초기함수비가 높을수록 시멘트 함유량의 증가에 따른 강도증가율이 커짐을 알 수 있다.

5.3 경량기포혼합토의 변형계수-일축압축강도의 관계

그림 10은 경량기포 혼합토의 시멘트 함유량의 변화에 따른 변형계수의 변화를 나타내고 있다. 시멘트 함유

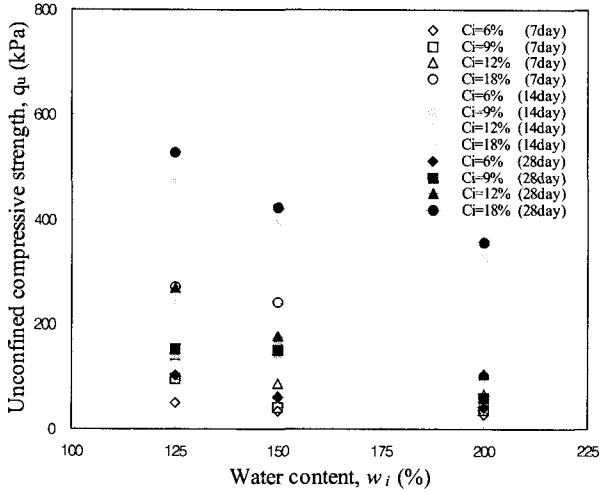


그림 8. 압축강도에 미치는 초기함수비의 영향

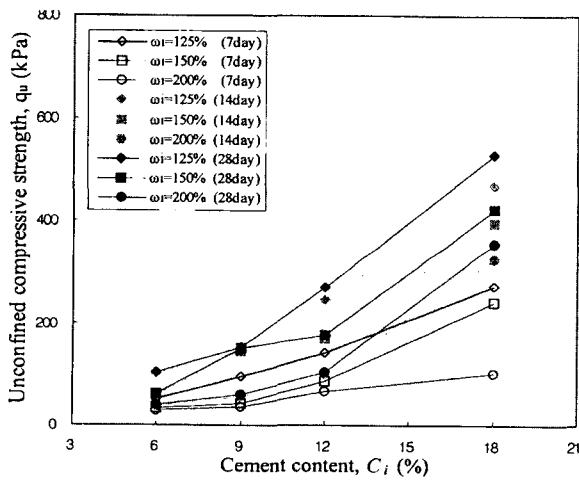


그림 9. 압축강도에 미치는 시멘트 함유량의 영향

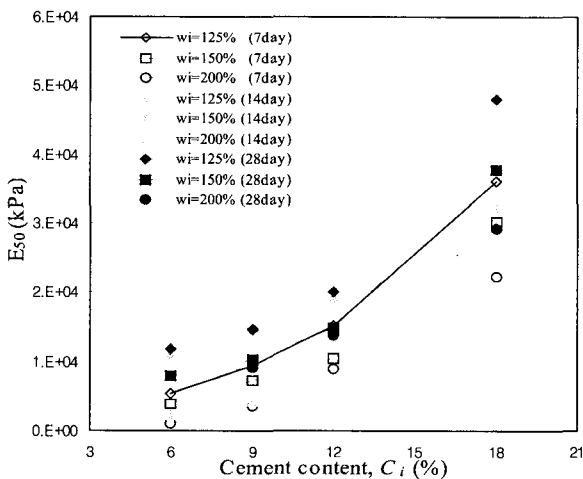


그림 10. 시멘트 함유량과 변형계수의 관계

량이 증가하면서 변형계수의 크기도 증가하나 준설토의 초기함수비는 클수록 변형계수는 작은 것을 시험결과 보여주고 있다. 그림 11은 경량기포 혼합토의 변형계수-일축압축강도의 관계를 나타내고 있다. 그림 11은 토질의 종류별 경량기포혼합토의 역학적 특성을 알아보기 위하여 부산 신항만 건설지역의 준설토에 대한 실험결과(윤길립 등, 2004)와 일본의 실험결과(土田, 1996, 1999)를 함께 도시하였다. 본 실험결과에 의한 경량기포 혼합토에 대한 변형계수-일축압축강도의 관계를 함수식으로 표현하면 각각 식 (1), (2), (3)과 같다. 한편, 본 실험의 결과는 부산시료에 대한 실험결과와 상한계측에 분포하며 土田에 의한 실험결과와 중간에서 하한계측 사이에 분포함을 알 수 있다. 이는 준설토의 물리적 특성이 지역에 따라 차이가 있음에 기인한 결과라고 판단된다.

$$E_{50} = 130q_u \text{ (7day)} \quad (1)$$

$$E_{50} = 97q_u \text{ (14day)} \quad (2)$$

$$E_{50} = 98q_u \text{ (28day)} \quad (3)$$

5.4 경량기포혼합토의 정규화계수-일축압축강도의 관계

경량기포 혼합토의 압축강도는 준설토의 초기함수비, 시멘트 함유율 및 기포함유율 등의 구성요소 모두에 의존하고 있어 임의의 배합조건에 따른 압축강도의 크기를 추정하는 것은 복잡하다. 최근 한국해양연구원에서는 경량기포 혼합토의 구성요소들에 의한 다양한 배합조건비에 상응하는 압축강도를 추정할 수 있는 정규화계수(Normalized Factor, NF)에 대해 연구가 진행되고 있으며, 경

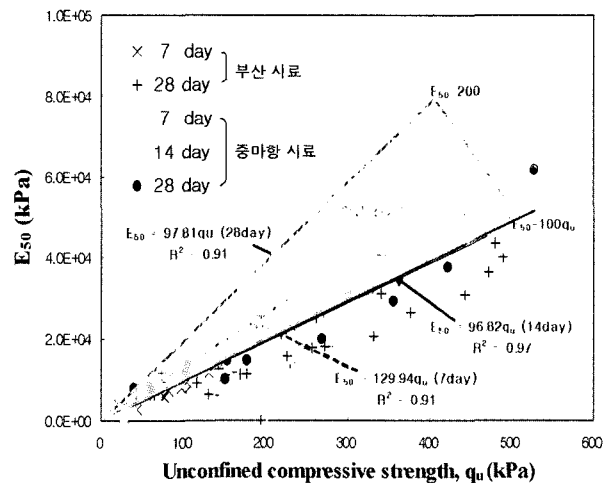


그림 11. 경량기포혼합토의 변형계수-일축압축강도의 관계

량기포 혼합토의 구성요소들의 중량비로써 고려한 NF 를 식 (4)와 같이 제시한 바 있다(윤길림과 김병탁, 2003, 2004).

$$NF = \frac{W_n \times A_r}{C_i} \quad (4)$$

여기서, W_n 는 준설토의 초기함수비, A_r 은 기포의 중량비, C_i 는 시멘트의 중량비를 나타내고 있다. 그림 12는 본 연구의 결과로부터 얻은 양생 28일 일축압축강도와 NF 와의 관계를 나타내고 있다. 그림에는 전술한 부산시료에 대한 관계도 함께 도시하였다. 각각의 결과를 회귀분석한 결과 모두 지수함수의 형태로 나타났으며, 결정계수(R^2)는 0.92이상으로 얻어졌다. NF 의 증가에 따라 일축압축강도는 비선형적으로 감소하는 것을 알 수 있으며, 그것은 매우 유용한 관계를 나타내고 있다. 준설토 시료의 채취지역에 따라 그 관계는 차이를 보이고 있으나, 이는 준설토의 물리적 특성이 지역에 따라 차이가 있음에 기인한 결과라고 판단된다. 한편, 표 4는 각각의 경우에 해당하는 회귀분석식을 나타내고 있으며, 이러한 식들을 이용하면 본 연구의 대상인 준설토에 대하여 임의의 배합조건에 따른 경량기포 혼합토의 일축압축강도의 예측이 가능하다고 판단된다.

표 4. 정규화계수(NF)와 일축압축강도(재령28일)와의 회귀분석 결과

준설토 시료	NF 와 일축압축강도와의 회귀분석식	결정계수(R^2)
중마항	$q_u = 10.40 \times NF^{-1.65}$	0.92
부산	$q_u = 0.29 \times NF^{-3.36}$	0.96

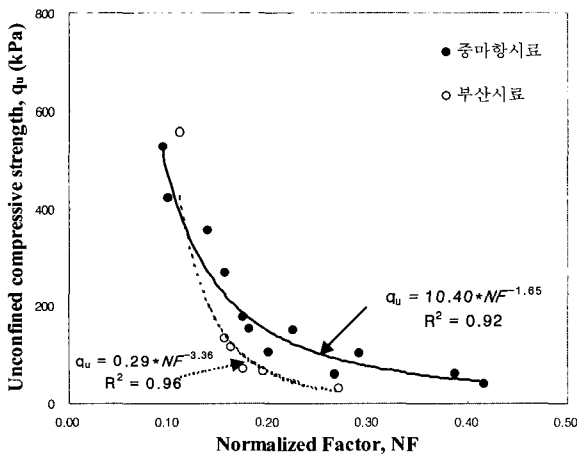


그림 12. 정규화계수(NF)와 일축압축강도(재령28일)의 관계

6. 결론

본 연구에서는 광양항 중마 일반부두의 준설토와 시멘트 고화제 그리고 기포를 혼합한 기포혼합처리토를 다양한 배합조건으로 실험하여 이에 대한 응력-변형 거동 및 압축강도특성을 분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 재령기간 7일에 대한 경량기포 혼합토의 응력-변형 거동은 시멘트 함유량에 관계없이 뚜렷한 파괴양상은 나타나지 않았으며 일반 흙과 유사한 응력-변형 거동을 나타냈다. 재령기간 14일의 지난 경우에는 파괴 전까지는 완만한 응력-변형거동을 보였지만 파괴 후에는 급격한 응력저하 양상을 보였다. 그리고 재령기간 28일의 경우에는 비교적 작은 축변형율에서 공시체가 파괴된 후, 급격한 응력저하를 나타내는 취성적 파괴양상을 보였다.
- (2) 경량기포 혼합토의 일축압축강도는 재령기간에 관계없이 모든 시멘트 함유량에 대해서 초기함수비가 증가할수록 감소하였다. 또한 준설토의 초기함수비 증가에 따른 일축압축강도의 감소율은 시멘트 함유량이 증가할수록 작아짐을 알 수 있었다. 한편, 일축압축강도는 재령기간에 관계없이 모든 초기 함수비에서 시멘트 함유량이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였으며, 준설토의 초기함수비가 높을수록 시멘트 함유량의 증가에 따른 강도증가율이 커짐을 알 수 있었다.
- (3) 일축압축시험결과 경량기포 혼합토의 변형계수(E_{50})는 시멘트 함유량이 증가하면서 그 크기도 증가하나 준설토의 초기함수비가 클수록 작게 나타났다. 또한, 실험결과에 의한 압축강도와 변형계수의 관계는 재령 7일의 경우 $E_{50} = 130q_u$, 재령 14일의 경우 $E_{50} = 97q_u$, 재령 28일의 경우 $E_{50} = 98q_u$ 로 나타났다.
- (4) 경량혼합토의 임의의 배합비에 대한 재령28일에 대한 일축압축강도를 구하고자 구성요소인 준설토의 초기 함수비, 시멘트 함유량, 기포 함유량을 모두 고려한 정규화계수(NF)와 일축압축강도의 적절한 회귀식을 제시하였으며, 이 식을 이용하면 관심대상 준설토에 대하여 임의의 배합조건에 따른 경량기포 혼합토의 일축압축강도의 예측할 수 있다.
- (5) 본 연구의 결과와 기존의 연구성과와의 비교를 통해 준설토의 물리적특성의 차이에 따른 경량기포

혼합토의 역학적특성이 변화함을 알 수 있었다. 따라서, 경량기포 혼합토의 역학적특성은 준설토의 채취지역에 따라 검토해야 할 필요성이 있다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 해양수산부 국책과제 “준설토 재활용 방안 연구”의 연구결과입니다. 연구가 가능하도록 재정지원 원을 해준 항만국 기술안전과 담당자께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 윤길림, 김병탁 (2004), “경량기포혼합토의 압축 및 강도특성 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제20권, 4호, pp.5-13.
2. 윤길림, 유승경, 김병탁 (2003), “연약지반개량을 위한 경량기포 혼합토의 역학적특성”, *대한토목학회 학술발표회 지반분야*, pp.242.
3. 윤길림, 김병탁 (2003), 경량기포혼합토의 제조방법 및 지반개량 공법, 한국 특허출원서(no.2003-33130호), 특허청.
4. 윤길림, 유승경 (2003), 경량기포혼합토 수중시물레이션 시스템, 한국 및 일본 특허출원서(no.2003-92965호), 특허청.
5. 해양수산부 (2000, 2001, 2002, 2003), *준설토 재활용 방안 연구*, 한국해양연구원 연구보고서.
6. 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.
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.

(접수일자 2004. 9. 15, 심사완료일 2004. 11. 23)