

준설풀토 활용 경량혼합토의 연약지반개량공법 수치해석

Numerical Analysis of Light-weight Air Foamed Soils using Dredged Marine Clay for Soft Ground Improvement Method

윤길림¹⁾ · 김선빈[†]

Gillim Yoon · Sunbin Kim

Received: December 2nd, 2013; Revised: December 12th, 2013; Accepted: February 4th, 2014

ABSTRACT : This paper presents the results of a numerical investigation on applicability of Light-weighted Foam Soils (LWFS) consisted of dredged soils for soft ground improvement. The engineering properties of LWFS were comprehensively investigated based on the previous experimental tests. And three dimensional numerical models which reflect soft ground conditions were adopted to evaluate the applicability of LWFS compared to SCP and DCM. A number of cases were analyzed using a stress-pore pressure coupled model. The results indicated that LWFS method enables to reduce more settlement, lateral flow and heaving than SCP method and enable to reduce more residual settlement than DCM method. Also it was revealed that such effect depends on the properties of LWFS such as unit weight, unconfined compressive strength, deformation modulus and Poisson's ratio.

Keywords : Light-weight Air Foamed Soils (LWFS), Dredged soils, Soft ground improvement, Finite element analysis

요지 : 본 논문에서는 준설풀토를 활용한 경량혼합토(LWFS)의 연약지반개량 적용성에 대해 검토한 내용을 다루었다. 현재까지 제시된 경량혼합토의 공학적 특성에 관한 연구결과를 종합·분석하여 경량혼합토의 물성을 정리하였으며, 그 결과를 토대로 임의의 현장조건을 가정하여 경량혼합토공법과 SCP 공법 및 DCM 공법 적용 시에 대한 3차원 수치해석을 수행하였다. 연약지반개량공법 비교해석 결과, 경량혼합토 공법을 적용하는 경우 SCP 공법을 적용하는 수준 이상의 침하관리가 가능하며, 경량혼합토의 목표성능에 따라 침하발생 수준을 조절할 수 있는 것으로 검토되었다. 또한 DCM 공법과 비교 시 경량혼합토 재료의 경량성으로 과잉간극수압 발생량이 현저히 작아져 잔류침하를 최소화할 수 있는 것으로 검토되었다.

주요어 : 경량혼합토, 준설풀토, 연약지반개량, 유한요소해석

1. 서론

현재 국내외적으로 대규모 신항만건설 사업과 항로 유지 등을 위한 준설풀토로 해양 준설풀토 발생량이 지속적으로 증가하는 추세에 있으며, 산업시설의 확충과 항만, 택지개발 등과 같은 기반시설의 신설 및 확장사업에 해양 준설풀토를 매립과 성토재료로써 활용하는 방안이 적극적으로 요구되고 있다. 가용할 수 있는 육상토나 해사가 고갈되고 있으며, 발생준설풀토 처리를 위한 대규모 부지의 확보 곤란, 해양환경 피해 최소화를 위한 환경규제 강화 등으로 발생준설풀토의 재활용에 대한 요구가 증가한 것이다.

해양준설풀토를 재활용하는 방법은 여러 가지 측면에서 고려할 수 있으나, 최근 항만과 공항건설사업 중 대심도 연약지반처리 대책으로 주목받고 있는 경량지반재료로 활용하는 방안을 들 수 있다. 외해에 매립이 진전될수록 연약점토

층의 층후가 증대되는 경우가 많으며, 이에 따라 압밀침하량이 증가하고 계획고를 유지하기 위해 추가성토 및 매립이 요구된다. 또한 하네다 공항 외해 전개사업의 사례에서 알려진 바와 같이 과거에는 고려하지 않았던 대심도 연약점토층의 압밀침하 문제도 고려하여야 한다. 이러한 문제를 해결하는데 있어 침하와 변형의 원인이 되는 하중 자체를 경감시키는 방안이 유효한 수단이 될 수 있다. 연약지반 상에서 일반적인 토사를 사용하여 성토 혹은 옹벽 및 교대의 뒤채움을 하는 경우 지반 내 응력증가에 따른 침하, 활동 파괴, 측방 유동 등의 문제가 발생할 수 있으나, 이를 경량지반재료로 대체하는 경우 침하와 측방유동 감소, 토압경감 등의 효과를 기대할 수 있게 된다.

이러한 맥락에서 해양 준설풀토를 경량지반재료로 재활용하는 방안으로 해양 준설풀토와 고화재 및 경량화재를 혼합한 경량혼합토(Light-weighted Foam Soils, LWFS)에 대한 연

1) Coastal Development & Ocean Energy Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology

† Coastal Development & Ocean Energy Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology (Corresponding Author : ksb9677@kiost.ac)

구가 수행된 바 있다(土田, 1996; 土田, 1999; Kim & Lee, 2002; Yoon & Kim, 2004; Yoon & Yoo, 2004; Yoon & Yoo, 2005; Song, 2008; Hwang et al., 2010). 이들 연구에서는 지반재료로 활용하기 위해 요구되는 경량혼합토의 공학적 특성을 구명하고자 다양한 시험조건에 대한 실내시험을 수행하여 경량혼합토의 물리·역학적 특성을 고찰하였다. 시공성 측면에서 유동상태인 경량혼합토의 수중타설조건에 대한 재료분리와 밀도증가 및 강도감소 등의 문제를 해결하기 위해 수중타설실험을 통한 적정 타설유속 및 혼합토의 유동성 등이 제시되기도 하였다.

본 연구에서는 상기 연구내용을 근간으로 하여 준설토를 활용한 경량혼합토의 실용화를 목표로 구체적인 활용 및 적용분야에 대한 검토를 수행하고 있다. 본 논문에서는 그 일환으로 현재까지 제시된 경량혼합토의 공학적 특성 분석결과를 종합하여 수치해석을 통해 연약지반개량 분야에 대한 적용성을 검토한 내용을 다루었다.

2. 경량혼합토의 공학적 특성

2.1 경량혼합토의 특징

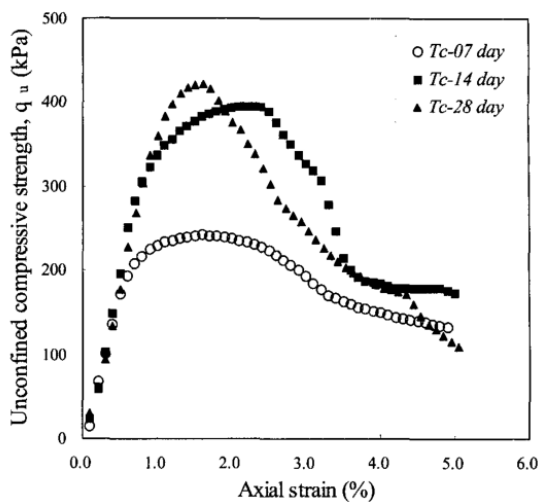
경량혼합토는 해양 준설토를 비롯한 건설발생토를 원료토로 하여 물(해수)과 시멘트 등의 고화재를 혼합하여 유동화시킨 것에 경량화재를 혼합하여 제작한 6~12 kN/m³ 정도의 단위중량을 갖는 지반재료를 말한다. 경량화재에 따라 기포혼합처리토와 발포 Beads 혼합처리토로 구분되는데 전자는 슬러리 상태의 토사에 기포와 고화재를 혼합하는 것이며, 후자는 슬러리상 토사에 직경 1~3 mm의 발포 스티로

폼 입자를 고화재와 혼합하는 것이다. 경량기포혼합토의 특징은 다음과 같다.

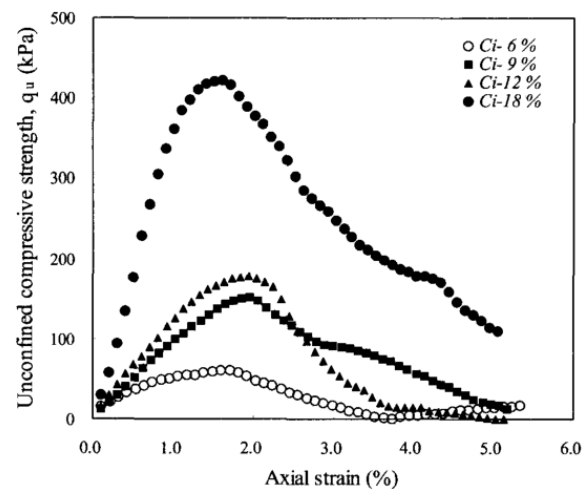
- (1) 자연지반재료와는 달리 적절한 밀도와 강도로 조절할 수 있는 균질의 지반재료이므로 지반의 압밀침하량을 저감시킬 수 있다.
- (2) 수중분리를 방지하므로 배합설계 함으로써 주변 해역의 오탉을 억제할 수 있다.
- (3) 적당한 유동성을 갖고 있어 펌프 압송에 의하여 다짐의 필요없이 원하는 형상으로 타설이 가능하다.
- (4) 함수비가 큰 준설토를 원료로 유용하게 활용한다.

2.2 경량혼합토의 응력-변형거동 특성

경량혼합토의 응력-변형거동은 일반적으로 초기함수비가 증가함에 따라 파괴 시 변형율이 증가하고, 최대 압축강도는 감소하며, 반대로 시멘트 함유율이 증가할수록 파괴 시 변형율은 감소하고, 최대 압축강도는 증가한다. 또한 축변형율 1~2 % 범위에서 최대강도가 발현되고 이후 파괴에 이른 후 변형율 연화(strain softening) 현상을 나타낸다. 특히 파괴 후에는 급격한 응력저하 양상을 나타내는 취성적 파괴양상을 나타내며, 시멘트 함유율이 많을수록 그러한 경향이 뚜렷하게 나타나는 것으로 알려져 있다. 이는 경량혼합토의 강도특성이 시멘트 고화재에 의한 고결화 작용에 지배되기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 1은 Yoon & Yoo(2004)가 수행한 경량혼합토의 일축압축시험 결과 중 일부를 나타낸 것으로서 상기 경량혼합토의 응력-변형거동 특성을 잘 보여주고 있다. Fig. 1(a)는 준설토 초기함수비 150 %, 시멘트 함유율 18 %에 대한 재령 기간에 따른 응력-변형거동을



(a) Stress-strain relationships with curing times (T_c)



(b) Stress-strain relationships with cement contents (C_i)

Fig. 1. Stress-strain relationships of LWFS (Yoon & Yoo, 2004)

나타낸 것이며, Fig. 1(b)는 준설토 초기함수비 150 %, 재령 기간 28일에 대한 시멘트 함유율 6, 9, 12, 18 %의 응력-변형거동 관계이다.

2.3 경량혼합토의 압축강도특성

경량혼합토는 밀도와 시멘트 함유량 및 양생 압력이 클수록 압축강도가 크게 발현되며, 준설토의 초기함수비가 높을수록 감소하는 것으로 알려져 있다. 특히 해양 준설토를 재활용한다는 측면에서 해저지반개량 등을 위해 경량혼합토를 수중에 타설하는 경우 수압에 의한 강도특성 변화에 주목할 필요가 있다. Yoon & Yoo(2005)의 시험결과에 의하면 양생 압력이 50 kPa에서 100 kPa까지 증가함에 따라 일축압축강도는 3~14 %의 강도 증가율을 보였으며, 삼축압축강도는 18~32 %의 강도 증가율을 나타낸다. 이는 공시체의 양생 초기과정에서 양생 기간이 완료될 때까지 공시체의 표면에 작용하는 정수압력으로 인해 공시체의 구성요소의 하나인 기포가 압축되어 공시체의 밀도가 증가한 데 따른 것으로 분석하고 있다.

한편 경량혼합토의 구속압 영향에 따른 압축강도 특성은 연구자별로 서로 상이한 결과를 보여주고 있다. 먼저 일본의 항만기술연구소에서 수행한 실험결과(土田, 1996)에서는 삼축압축시험(UU-test) 결과 전단강도(c)가 일축압축강도 q_u 의 1/2 정도로 나타난다고 보고하였다. 이는 경량혼합토의 전단강도가 구속압의 영향을 받지 않는다는 결과로서, $\phi=0$ 인 재료로 취급해야 함을 의미한다. 이와는 반대로 Kim & Lee(2002), Yoon & Kim(2004)은 삼축압축시험 결과에서 경량혼합토의 압축강도는 구속압 증가에 따라 비례하여 증가한다고 보고하였다. 이는 경량혼합토의 전단강도가 $\phi \neq 0$ 인 재료임을 보여주는 것으로서 일본의 항만기술연구소의 연구결과와는 상이한 결과라 할 수 있다. 구속압 영향에 따른 지반재료의 압축강도 특성은 설계 시 고려해야 하는 매우 중요한 요소이므로, 향후 경량혼합토의 해당 특성 규명을 위한 추가적인 실험 및 분석이 필요하다.

2.4 경량혼합토의 변형특성

재료의 응력-변형거동을 나타내는 중요한 해석변수로서 전단강도와 함께 변형계수가 중요한 요소이다. 경량혼합토의 변형계수는 활선탄성계수(E_{50})로 나타내며, 일축 및 삼축압축강도 결과를 이용하여 다음과 같이 추정할 수 있다. 土田(1999)은 일본 내 점토를 이용하여 제작한 경량혼합토에 대해 E_{50} 는 일축압축강도의 100~200배 정도라고 제시하였으며, Kim & Lee(2002)는 E_{50} 를 일축압축강도의 82.85

배, 삼축압축강도의 22~167배 정도로 제시하였다. Yoon & Kim(2004)의 연구에서는 일축압축강도의 18~120배로, Yoon & Yoo(2004)의 연구에서는 일축압축강도의 130배, 삼축압축강도의 52배로 제시하였다. 이와 같이 연구자별로 경량혼합토의 E_{50} 가 서로 다르게 평가된 것은 각각의 실험조건별로 고화제 함유율과 기포 함유율이 다르고, 사용한 준설토의 성분이 상이한 데서 원인을 찾을 수 있다. 또한 전반적으로 구속압력이 커지면 E_{50} 의 값이 작아지는 경향을 나타내 고도 있다.

한편 일본의 항만기술연구소의 연구결과(土田, 1996)에 의하면, 압축 전단 중 경량혼합토의 프아송비는 축변형 1~2 % 범위에서 0.1~0.2 정도로 나타나 있는데, 이는 일반 지반재료의 프아송비와 비교 시 현저히 작은 수준이라 할 수 있다.

2.5 경량혼합토의 장기변형 특성 및 투수특성

현재까지 경량혼합토의 장기변형 및 투수특성에 관한 연구는 비교적 충분하지 않은 것으로 판단된다. 해당 특성에 대한 연구는 향후 추가적인 실험을 통해 확인이 필요할 것으로 여겨지며, 본 논문에서는 일부 수행된 연구결과에 대해 정리하였다.

Lee(2013)는 전단크리프 시험 및 장기압축시험을 수행하여 경량혼합토의 크리프 특성에 대해 고찰한 바 있다. 전단크리프 시험은 목표단위중량 10 kN/m³, 일축압축강도 500 kPa의 경량혼합토에 대해 일축압축강도의 50 %로 수직응력을 재하한 상태에서 최대전단강도의 70 %와 80 % 수준에서의 전단응력을 일주일 동안 재하하였다. 1차원 압밀시험을 이용한 장기압축시험은 목표단위중량 10, 11 kN/m³, 일축압축강도 200, 500 kPa로 제작한 경량혼합토에 대해 항복하중의 0.5배와 1.5배 수준으로 재하하였다. 전단크리프 시험결과 전단변형은 재하초기에 대부분 나타나고 시간 경과에 따른 추가 변위는 대단히 작은 수준이라고 보고하였다. 장기압축시험 결과는 압축하중이 항복응력의 0.5배인 경우 크리프계수가 0.19~0.31 % 정도로 나타났으며, 항복응력의 1.5배로 압축하중을 재하한 경우 크리프계수는 0.74~0.80 % 정도로 제시되었다. 항복응력 이하의 응력에서 장기변형은 매우 작은 수준임을 알 수 있다.

Hwang et al.(2009)은 경량혼합토의 투수성에 관한 연구 결과를 보고한 바 있다. 대상 경량혼합토의 목표단위중량과 일축압축강도는 각각 10 kN/m³와 500 kPa이며, 포화 시 상태에 대한 투수시험결과 점토의 투수계수(3.0×10^{-6} cm/sec)와 유사한 수준인 4.857×10^{-6} cm/sec 정도로 제시되었다.

3. 연약지반개량 검토조건

3.1 현장조건

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 비배수 전단강도가 50 kPa 정도인 두께 10 m의 연약지반 상부에 높이 6 m, 하부 폭 68 m의 제방이 2H:1V 경사로 시공되는 경우를 대상으로 하였다. 점토층 하부는 비교적 견고한 풍화토층이 존재하는 것으로 가정하였다. 연약지반 상부에는 장비 주행성 확보 및 배수층 확보를 위해 1 m 높이의 모래층이 포설되도록 하였으며, 연약지반개량공법은 DCM 공법과 SCP 공법 및 경량혼합토(LWFS) 공법을 각각 적용하여 보강 및 굴착 치환되는 조건으로 간주하였다. DCM 공법은 제방 하부로부터 수평 방향 5 m 범위까지 적용되도록 하였으며, SCP 공법의 경우 직경 700 mm의 모래 말뚝을 풍화토 지반까지 포설하고 정사각형 배치로 치환율 30%를 확보하도록 하였다. 경량혼합토 공법의 경우 연약지반 선굴착 후 2H:1V 경

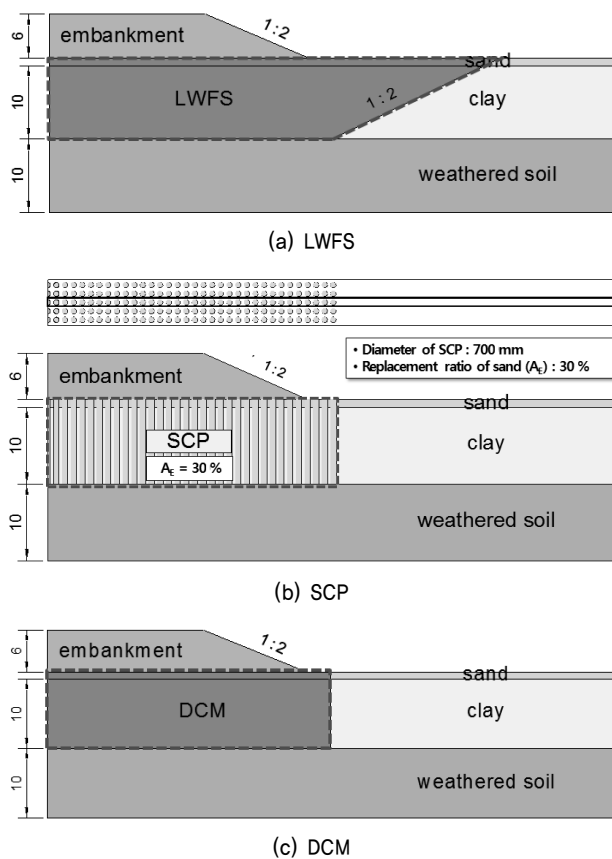


Fig. 2. Design conditions

사로 치환되는 조건을 고려하였다.

3.2 해석조건

대상 검토단면에 대해 연약지반개량공법별 적용 효과를 비교하고, 경량혼합토공법의 일축압축강도 특성에 따른 거동특성을 비교하기 위하여 Table 1과 같은 해석조건을 선정하였다.

4. 경량혼합토의 연약지반개량공법 적용성 비교검토

4.1 유한요소해석 모델링

연약지반 위의 제방성토에 관한 해석 시에는 성토로 인한 연약지반 내 과잉간극수압 발생 및 소산, 그리고 이에 따른 압밀현상 등이 해석모델에서 현실적으로 다루어져야 하며, 이를 위해 응력-간극수압이 연계되는 해석모델링을 필요로 한다. 본 연구에서는 지반-지하수 상호작용 및 시공과정에 대한 모델링이 효율적으로 수행될 수 있는 범용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus ver. 6.10을 사용하였다.

해석 모델링에 있어서 시공조건이 성토제방 중심을 기준으로 좌우 대칭 조건이므로 우측 반단면만을 해석모델에 포함하였으며, 정사각형 배치로 고려한 SCP 시공조건상 종방향으로 동일한 조건이 반복되는 일종의 평면변형을 조건이 성립되므로 SCP 단일 행에 대한 3차원 모델링을 수행하였다.

변위 경계조건에 있어서 해석 단면의 좌우 측면은 수평방향 변위를 구속하였으며, 바닥면은 수평과 연직방향 변위를 구속하였다. 평면에 수직인 종방향면은 종방향 변위를 구속하여 평면변형조건이 성립되도록 하였다. 연계해석을 위한 수리 경계조건은 초기 및 시공 중 지하수위를 점토층 상부에 위치하도록 하였으며, 우측 수평면에 정수압이 일정하게 유지되도록 고려하였다. 성토하중에 의한 과잉간극수압은 점토층 상부에서의 간극수압이 0이 되도록 부여함으로써 소산되도록 하였다.

한편 모델의 이산화에서 지하수위 하부에 위치하는 연약지반과 하부 풍화토층, 경량혼합토, DCM, 모래 말뚝은 8절점 응력-간극수압 연계요소(C3D8P)로 모델링하였으며, 지하

Table 1. Analysis case for applicability of light-weighted foam soils

Purpose	Analysis case
Comparison with soft ground improvement methods	SCP, DCM, LWFS, without any ground improvement treatment
Comparison with unconfined compressive strength of LWFS	106 kPa, 120 kPa, 140 kPa, 160 kPa, 180 kPa

수위 상부 모래층과 성토재는 8절점 가감적분 응력요소 (C3D8R)로 모델링하였다.

재료 모델링에 있어서 연약지반은 Modified Cam-Clay

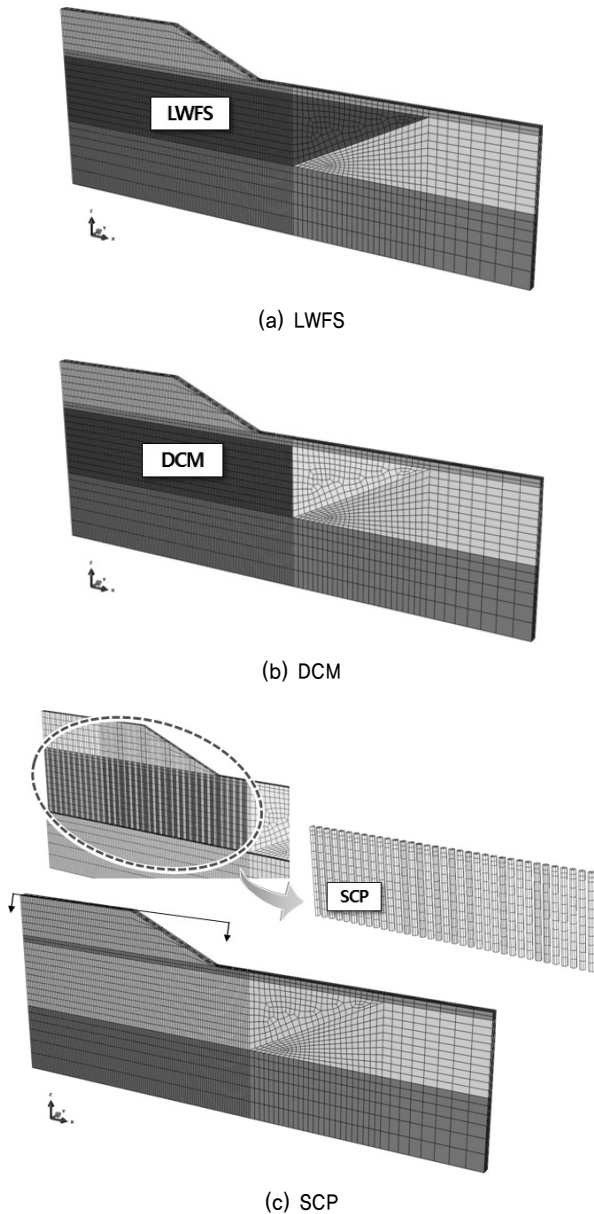


Fig. 3. 3D finite element model

Table 2. Material properties for finite element analysis

Division	γ (kN/m ³)	E (kPa)	ν	c (kPa)	ϕ (deg)	k (cm/s)
Embankment	19.0	40,000	0.4	10	30	-
Sand	19.0	15,000	0.3	0	28	-
Clay	19.0	$\lambda=0.2, \kappa=0.2, M=1, a_0=50, e=1$				1.160×10^{-6}
Weathered soil	19.0	100,000	0.3	180	33	1.160×10^{-6}
SCP	19.0	20,000	0.3	0	33	1.000×10^{-3}
DCM	22.6	20,000,000	0.2	-	-	1.000×10^{-8}
LWFS	11.0	17,000	0.15	60	-	4.857×10^{-6}

λ =plastic slope, κ =elastic slope, M =critical stress ratio, a_0 =initial yield surface size, e =void ratio

(MCC) 모델을 적용하여 압밀 시 연약점토지반의 침하특성이 모사되도록 하였으며, 성토재 및 점토층 하부 풍화토와 모래 말뚝, 경량혼합토는 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. DCM은 상대적으로 강도와 강성이 매우 큰 재료임을 감안하여 탄성거동을 하는 것으로 고려하였다. 본 연구에서 적용한 유한요소해석 모델과 해석적용 물성은 각각 Fig. 3과 Table 2에 정리하였다. Table 2에 정리하고 있는 경량혼합토의 물성은 성토고 6 m를 고려하여 목표일축압축강도를 120 kPa로 고려한 것이며, 보수적인 견지에서 $\phi=0$ 인 재료로 취급하였다. Table 3은 경량혼합토에 대한 추가 매개변수 해석조건을 정리한 것으로서 목표일축압축강도를 106~180 kPa로 고려 시 적용한 경량혼합토의 물성을 나타낸다. 한편 본 연구에서 적용한 해석 모델링에서는 2차 압밀은 고려하지 않았다.

연약지반 상 이루어지는 성토에 대한 현실적인 해석 모델링을 위해서는 실제 현장에서 이루어지는 시공과정에 대한 상세한 모델링이 해석과정에 고려되어야 한다. 본 연구에서는 해석단계에 초기 지중응력과 간극수압 확보 후 굴착 및 치환, 그리고 단계별 성토가 순차적으로 이루어지도록 고려하였다. 각 단계별로 15일에 걸쳐 2 m씩 성토가 되도록 하였으며, 원지반 성토조건과 SCP 공법 적용의 경우 성토 후 10일의 방치기간을 갖도록 모델링하였다.

4.2 유한요소해석 결과분석 및 고찰

4.2.1 경량혼합토공법 적용 시 연약지반개량 효과 비교

본 절에서는 경량혼합토공법 적용 시 연약지반개량 효과 분석을 위하여 본 연구에서 비교 대상으로 고려한 SCP 공법과 DCM 공법, 지반개량 무처리 시 해석결과를 상호 비교하였다. 이때 경량혼합토공법은 상기 설명한 바와 같이 목표단위중량과 일축압축강도를 11 kN/m³, 120 kPa인 조건으로 검토하였으며, SCP 공법은 치환율이 30 %를 확보하는 조건이다.

Fig. 4는 최종성토(6 m) 후 2년이 경과한 시점에 해당하

는 성토구간의 침하와 성토체 끝단에서의 히빙을 각각 나타낸 것이며, Fig. 5는 지반 내 수평변위를 보인 것이다. Fig. 4와 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 지반개량 무처리 시 성토구간 내 최대침하는 615 mm 정도이며, 이로 인한 지반 내 수평변위는 최대 249 mm, 성토체 끝단에서의 히빙은 29 mm 까지 발생할 수 있는 것으로 예상되었다. 이와 비교하여 경량혼

합토(LWFS) 공법을 적용하는 경우 최대침하는 92 mm 정도로 무처리 시의 1/6~1/7 수준이며, 히빙은 3 mm 정도로 약 1/10 수준, 지반 내 최대 수평변위는 8 mm 정도로 1/30 이하로 감소하는 것으로 나타났다. SCP 공법 적용 시에는 최대침하가 148 mm로 무처리 시의 약 1/4 수준이며, 히빙은 10 mm 정도로 약 1/3 수준, 지반 내 최대 수평변위는

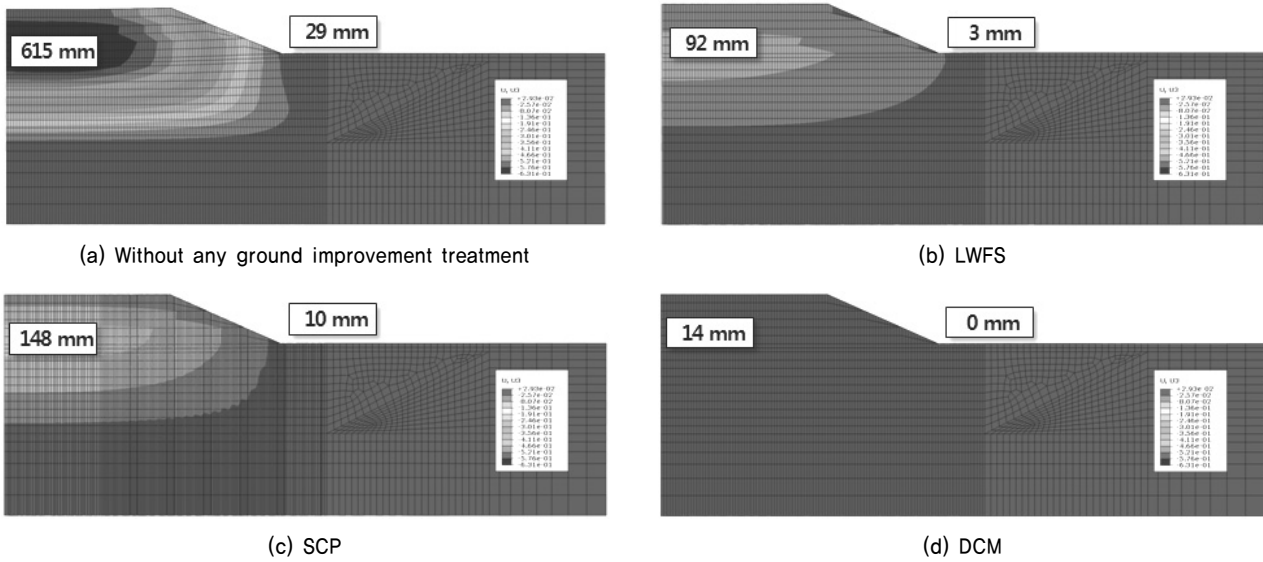


Fig. 4. Vertical settlement and heaving

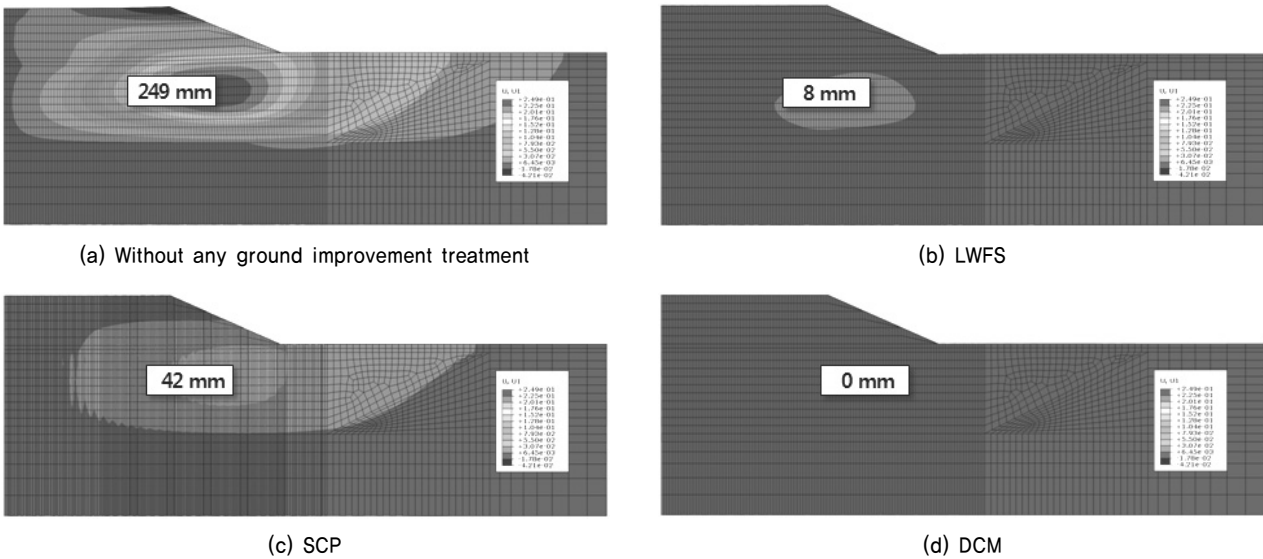
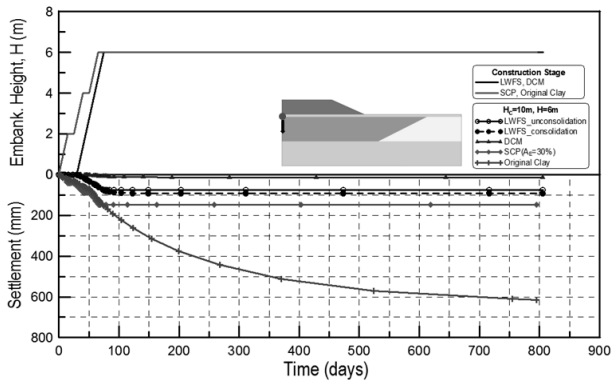


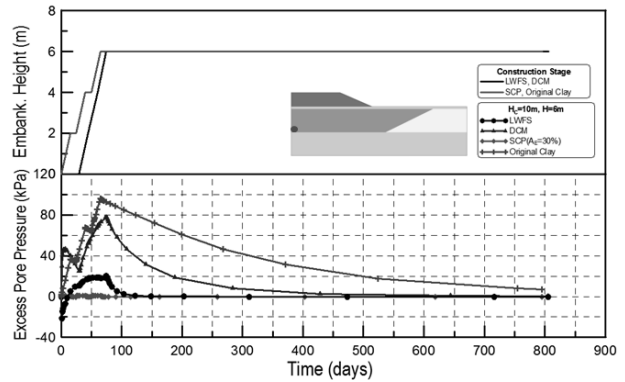
Fig. 5. Horizontal deflection

Table 3. Parametric conditions for LWFS in the analysis

q_u (kPa)	γ (kN/m ³)	E (kPa)	ν	c (kPa)	ϕ (deg)	k (cm/s)
106	11.0	11,000	0.15	53	-	4.857×10^{-6}
120	11.0	17,000	0.15	60	-	4.857×10^{-6}
140	11.0	23,000	0.15	70	-	4.857×10^{-6}
160	11.0	30,000	0.15	80	-	4.857×10^{-6}
180	11.0	36,000	0.15	90	-	4.857×10^{-6}



(a) Time-settlement



(b) Time-excess pore pressure

Fig. 6. Time history curves for settlement and excess pore pressure dissipation

42 mm로 약 1/6 수준으로 감소하는 것으로 예상되었다. DCM 공법 적용 시에는 여타의 공법과 비교할 때 침하와 수평변위 및 히빙 등이 현저하게 감소하는 것으로 나타났다. 상기 결과로부터 경량혼합토공법을 적용하는 경우 SCP 공법을 적용하는 수준 이상의 침하관리가 가능하다는 것을 알 수 있으며, 특히 지반 내 수평변위 즉 측방유동이 현저하게 감소할 수 있음을 보여준다. 이는 경량혼합토의 프아송비가 0.15 수준으로 일반적인 지반의 프아송비 보다 2배 정도 작기 때문이라 여겨진다.

Fig. 6(a)는 단계별 성토 및 시간 경과에 따른 성토부 중심 및 점토층 상부 지점에서의 침하(압밀) 곡선을 나타낸 것이며, Fig. 6(b)는 성토부 중심 및 점토층 최하단 지점에서의 시간 이력 과잉간극수압 그래프이다. Fig. 6에서 보이는 바와 같이 지반개량 무처리 시의 경우 성토 완료 후 2년이 경과한 시점에서도 압밀이 진행 중인 상태임을 알 수가 있다. 반면 지반개량을 적용하는 경우 각 공법별로 정성·정량적인 차이가 있긴 하나 성토완료 후 1년 6개월 이내에 압밀이 완료된 것을 알 수 있다. SCP 공법 적용 시 단계별 성토단계에서 모래 말뚝을 통해 배수가 진행되므로 지반 내 급격한 과잉간극수압은 발생하지 않는 것으로 나타났으며, DCM 공법의 경우 개량체의 단위중량이 크고 투수계수가 매우 작아 압밀진행 속도는 원지반 수준과 유사하나, 자체 강성이 매우 커서 총 침하량은 상대적으로 미소한 수준인 것으로 나타났다. 경량혼합토공법 적용 시 결과를 살펴보면, 자체의 단위중량이 작은 영향으로 굴착지환 단계에서 부의 간극수압이 일부 발생하기도 하며, 성토 시에도 과잉간극수압 발생량은 비교적 작은 수준임을 알 수 있다. 그 결과 성토 완료 후 약 70일경과 시 과잉간극수압은 모두 소산되는 것으로 예상되었다.

Fig. 7은 성토 완료 후 시간 경과에 따른 잔류침하(S_r)를 각 공법의 성토완료 시점의 침하량(S_c)을 기준으로 도시한

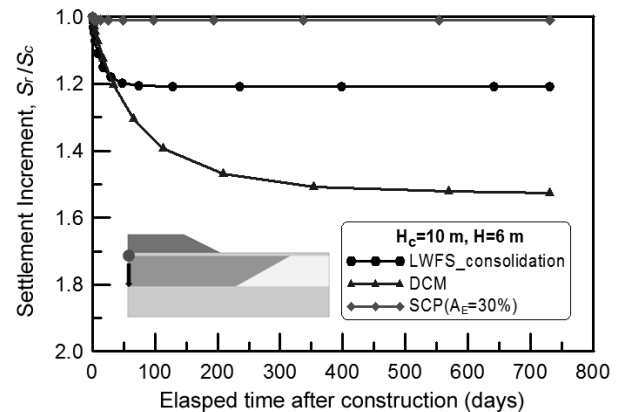


Fig. 7. Residual settlement after completion of embankment

결과이다. Fig. 6(b)의 과잉간극수압 소산 그래프에서 확인한 바와 같이 SCP 공법의 경우 단계별 성토단계에서 과잉간극수압이 모두 소산되어 잔류침하는 거의 발생하지 않으며, 경량혼합토공법 적용 시 성토완료 후 과잉간극수압이 모두 소산되는 70일 이후 추가적인 잔류침하는 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 한편 DCM 공법 결과에서는 점진적인 과잉간극수압 소산으로 성토 완료 후 1년 6개월에 걸쳐 잔류침하가 발생할 수 있음을 보여주고 있다. DCM 공법의 경우 자체 강성이 매우 크므로 시공단계에서의 정량적인 침하량은 크지 않지만, 개량체의 자중이 상대적으로 커서 시공완료 후 개량체 하부지층에서 잔류침하는 운영 중 지속적으로 발생할 수 있음을 보여주는 결과라 하겠다. 본 연구에서 연약지반 하부지층을 비교적 견고한 풍화토로 고려한 결과 성토 완료 후 정량적인 잔류침하가 비교적 크지는 않았으나, 연약지반 하부에 압축성 지반이 존재하는 경우 DCM 공법 적용 시 상대적으로 큰 잔류침하가 발생할 수 있음을 예상할 수 있다. 따라서 대심도 연약지반의 경우 경량혼합토와 같은 경량지반재료를 활용하는 것이 보다 유리한 방법이라 할 수 있다.

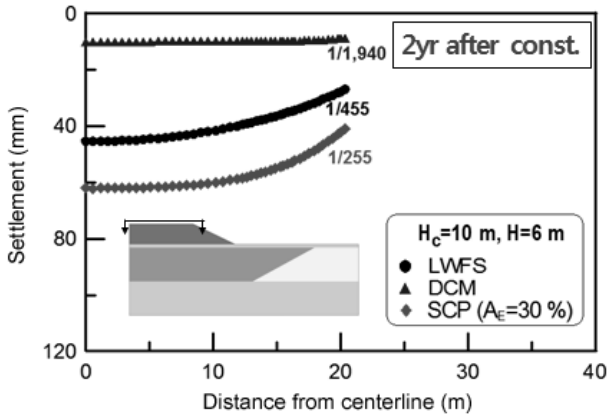


Fig. 8. Settlement profiles

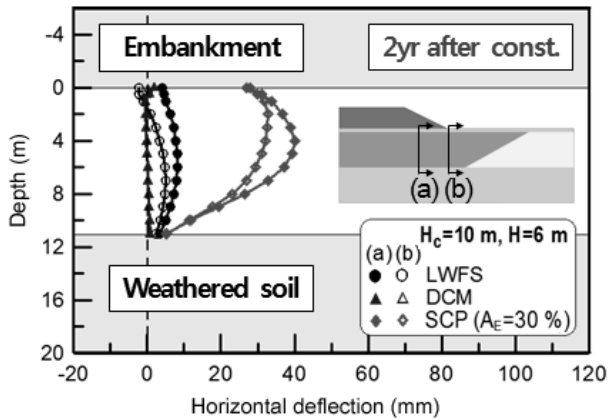


Fig. 9. Lateral flow

Fig. 8과 Fig. 9는 연약지반개량 공법별 성토 완료 후 2년 경과 시점의 성토부 최상단의 침하 프로파일과 제체 하단부 단면에서의 측방유동 프로파일을 각각 도시한 것이다. 앞서 살펴본 바와 같이 경량혼합토공법이 SCP 공법을 적용하는 수준 이상의 침하관리가 가능하며, 제체사면의 측방유동을 현저하게 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

4.2.2 경량혼합토 일축압축강도 조건별 지반개량효과 비교

본 절에서는 경량혼합토의 성능조건, 즉 일축압축강도에 따른 지반개량 효과를 비교하였다. Fig. 10은 본 연구에서 고려한 경량혼합토의 일축압축강도별 시간 이력 침하곡선을 도시한 것이다. 성토고 6 m를 고려 시 작용하는 축차응력 수준은 약 114 kPa이므로 경량혼합토의 일축압축강도 106 kPa을 제외하면 일축압축강도가 축차응력 이상을 확보한 조건이다. 일축압축강도 조건별 정량적인 침하량을 비교하면 일축압축강도 증가에 따라 침하량이 감소하며, 일축압축강도 120~180 kPa 범위에서는 최종침하량이 48~92 mm 범위로 강도와 침하량과의 관계가 반비례하고 있음을 확인할 수 있다. 한편 경량혼합토의 일축압축강도가 106 kPa인

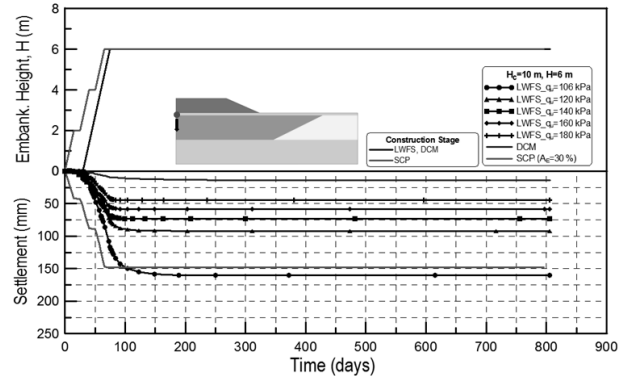


Fig. 10. Time history curves for settlement with q_u of LWFS

조건의 경우에는 최종침하량이 160 mm 정도로 나타나 침하량이 현저히 증가한 것을 볼 수 있는데, 이는 성토로 인한 축차응력이 치환재의 일축압축강도를 초과하여 항복상태에 이르렀기 때문으로 이해할 수 있다. 재료적 관점에서 경량혼합토는 항복하중 초과 시 급격한 변형을 연화(strain softening) 거동을 하게 된다는 점을 고려하면 Fig. 10의 해석결과보다 더 큰 침하가 발생할 것임을 예상할 수 있다. 따라서 경량혼합토공법을 적용하는 경우 상재하중 수준을 고려하여 혼합토 내 발생응력이 항복응력을 초과하지 않도록 계획하는 것이 중요하다. 또한 본 연구에서는 보수적인 검토차원에서 경량혼합토의 구속압에 따른 강도증가 효과를 반영하지 않았으나, 이와 관련한 실험결과가 연구자별로 상이한 것을 고려할 때 경량혼합토의 구속압과 압축강도 특성에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 준설토를 활용한 경량혼합토의 실용화를 목표로 경량혼합토의 공학적 특성 및 이를 활용하는 구체적인 적용분야에 대한 검토를 수행 중이며, 본 논문에서는 현재까지 제시된 경량혼합토의 공학적 특성에 관한 조사·분석결과를 종합하고 수치해석을 통해 연약지반개량 분야에 대한 적용성을 검토하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 아래와 같이 요약된다.

- (1) 연약지반개량을 위해 경량혼합토공법을 적용하는 경우 SCP 공법을 적용하는 수준 이상의 침하관리가 가능하며, 특히 개량구간 내 측방유동을 현저하게 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다. 이는 경량혼합토가 갖는 경량성 및 소정의 강도, 변형특성에 기인한다.
- (2) DCM 공법과 같이 자체 하중이 크고 투수성이 작은 재

료를 이용하여 연약지반을 개량하는 경우 단기 압밀침하는 최소화할 수 있으나 과잉간극수압 소산이 천천히 진행되므로 장기적인 잔류침하가 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 직접적으로 고려하지는 않았으나 대심도 연약지반에서 그러한 경향은 더욱 뚜렷할 것으로 예상되며, 따라서 경량성을 갖는 경량혼합토를 활용하여 과잉간극수압 증가를 최소화하는 것이 보다 유리한 것으로 판단되었다.

- (3) 경량혼합토의 목표성능에 따라 침하발생 수준을 조절할 수 있는 것으로 검토되었다. 경량혼합토의 일축압축강도 증가에 따라 발생 침하량은 감소하며, 항복하중 이내에서 선형적인 관계를 나타내었다. 한편 상재하중에 대한 축차응력이 경량혼합토의 일축압축강도를 초과하는 경우 발생침하는 현저히 증가하며, 실제 침하량은 급격한 변형을 연화(strain hardening) 거동으로 일반적인 해석에서 얻은 결과보다 더 크게 나타날 수 있다. 따라서 연약지반개량을 위해 경량혼합토공법 적용 시 상재하중 수준을 고려하여 혼합토 내 발생응력이 항복응력을 초과하지 않도록 계획하는 것이 중요하다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원에서 수행하는 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 “환경친화적 준설토 확보, 매립 및 운송거리 30 km 이상급 이송기술 개발, PM57590”의 연구성과이며, 이에 감사드립니다.

References

1. 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, pp. 1~252.
2. 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, pp. 1~186.
3. Hwang, J. H., An, Y. K. and Kim, T. H. (2010), Effect of water on the lightweight air-mixed soil containing silt used for road embankment, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 26, No. 2, pp. 23~32 (in Korean).
4. Kim, Z. C. and Lee, C. K. (2002), Mechanical characteristics of light-weighted foam soil consisting of dredged soils, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 18, No. 4, pp. 309~317 (in Korean).
5. Lee, M. A. (2013), Assessment the applicability of lightweight air-trapped soil for the abutment backfill, Master's thesis, Korea Maritime University, pp. 27~28 (in Korean).
6. Song, J. H. (2008), Analysis of compressive strength of lightweight air-mixed soil according to the properties of soil, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 24, No. 11, pp. 157~166 (in Korean).
7. Yoon, G. L. and Kim, B. T. (2004), Compressibility and strength of the lightweight air formed soils, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 20, No. 4, pp. 5~13 (in Korean).
8. Yoon, G. L. and Yoo, S. K. (2004), Strength and deformation characteristics of lightweight soil using in situ soils, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 20, No. 9, pp. 125~132 (in Korean).
9. Yoon, G. L. and Yoo, S. K. (2005), Behaviors of lightweight foamed soils considering underwater curing and water pressure conditions, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 21, No. 4, pp. 21~29 (in Korean).