

## 연약지반에 시공된 도로용 경량성토체의 재료 및 거동특성

### Material and Behavior Characteristics of Lightweight Embankment for Road Constructed on Soft Ground

여규권<sup>1</sup>, 이용재<sup>2</sup>, 김홍연<sup>3\*</sup>, 윤길림<sup>4</sup>, 한상현<sup>5</sup>

Geu-Guwen Yea<sup>1</sup>, Yong-Jae Lee<sup>2</sup>, Hong-Yeon Kim<sup>3\*</sup>, Gil-Lim Yoon<sup>4</sup>, Sang-Hyun Han<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Member, Head of Department, Technology Research Department, SAMBU Engineering & Construction Co., 63 Toegye-ro, Jung-gu, Seoul 04529, Republic of Korea

<sup>2</sup>Nonmember, CEO, SAMBU Engineering & Construction Co., 63 Toegye-ro, Jung-gu, Seoul 04529, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, Senior Researcher, Technology Research Department, SAMBU Engineering & Construction Co., 63 Toegye-ro, Jung-gu, Seoul 04529, Republic of Korea

<sup>4</sup>Member, Principal Researcher, Coastal Engineering Division, KIOST, 385 Haeyang-ro, Yeongdo-gu, Busan Metropolitan City 49111, Republic of Korea

<sup>5</sup>Member, Professor, Department of Civil Engineering, SEOIL University, 28 Yongmasan-ro 90-gil, Jungnang-gu, Seoul 02192, Republic of Korea

#### ABSTRACT

The purpose of this study is to fabricate a full scale road embankment using lightweight air foamed soil as a soil material on soft ground and to investigate its material characteristics and behavior in order to promote dredged soil utilization and minimize ground improvement. As a result of the laboratory test of the onsite mixed samples, the total unit weight of the specimens decreased almost linearly until curing 28 days. In particular, the total unit weight after 28 days of curing was reduced to about 81% of the slurry state before curing, which will be useful in the formulation of similar native soil materials in the future. The unconfined compressive strength began to decrease with the 14th day of curing as shown in the previous study. When the cement content is increased, the strength decreases sharply at a small strain change after the occurrence of the maximum compressive strength, and the maximum strength is exhibited in a range of a smaller axial strain than normal range. The settlement at the surface layer of the ground due to the lightweight embankment was about 1 / 2.75 of the soil embankment and was in agreement with the unit weight ratio (1 / 2.7) of the embankment materials. This indicates the cause and effect of the settlement due to the difference in self weight of the embankments. Also, the difference in settlement between soil and lightweight embankment increased with increasing depth. This shows that the difference in the point at which the settlement is terminated is clear. The ground horizontal displacement under the lightweight embankment was about 15~20% smaller than that of the soil embankment and the depth of occurrence was also 4.5~5.0m shallower in the lightweight embankment.

#### 요 지

본 연구에서는 준설토 활용을 촉진하고 지반개량을 최소화 하기위한 목적으로 연약지반에서 경량기포혼합토를 토공재료로 이용하여 실규모의 도로 성토체를 제작하고 그 재료특성과 거동을 분석하였다. 현장에서 배합된 시료의 실내시험 결과 공시체의 습윤단위중량은 양생 28일까지 거의 선형적으로 감소하였고, 특히 28일 양생 후 습윤단위중량은 양생 전 슬러리 상태의 약 81%로 감소되었으므로 향후 유사한 원료토의 배합설계시 활용이 가능하다. 일축압축강도는 기존의 연구와 같이 양생 14일을 기준으로 강도증가율이 감소하기 시작하였고, 시멘트 함유량이 많아질 경우 최대 압축강도 발생 후 적은 변형을 변화에서 강도가 급격히 감소하며, 통상보다 작은 축변형률 범위에서 최대강도가 발현되는 현상이 나타났다. 경량성토로 인한 원지반

Received 8 Jun. 2018, Revised 20 Jun. 2018, Accepted 20 Jun. 2018

\*Corresponding author

Tel: +82-2-3706-2542; Fax: +82-2-756-3920

E-mail address: [hykim74@sambu.co.kr](mailto:hykim74@sambu.co.kr) (H. Kim)

천층부에서의 침하량은 토사성토의 약 1/2.75로서 성토재료의 단위중량 비율(1/2.7)과 일치함으로써 자중의 차이로 인한 침하량의 인과관계가 잘 나타났다. 또한 원지반 하부로 내려갈수록 토사 및 경량성토 사이의 침하량 차이가 크게 나타남으로써 침하중요 심도에 차이가 명확하게 나타났다. 경량성토 구간의 지중수평변위량은 토사성토 대비 약 15~20% 정도 작게 나타났고, 그 발생심도 또한 경량성토의 경우가 4.5~5.0m 가량 얕게 나타나 경량기포혼합토가 전단변형의 영향심도를 현저히 감소시키는 효과가 있음을 확인하였다.

**Keywords** : Lightweight air foamed soil, Embankment, Soft ground, Settlement, Dredged soil

## 1. 서론

매년 신항만 건설, 항로유지 등의 해양준설로 상당한 양의 준설토가 발생하고 있다. 이와 같이 막대한 양의 준설토는 과거에는 대부분 매립이나 투기에 의존하여 왔으나 환경문제로 인한 제약이나 투기장 건설비용의 문제로 최근에는 이를 건설재료 등으로 다양하게 활용하고자 하는 연구가 국가적으로 전개되고 있다. 준설토는 활용까지 투기장에 장시간 동안 매립되어야 하고 대량의 준설토 처리를 위하여 대규모의 투기장이 필요하며 오염된 준설토는 환경문제를 야기하기 때문이다. 따라서, 준설토를 적절한 용도로 활용한다면 이와 같은 투기장 건설 및 투기비용을 포함한 처분비용을 절약하면서 환경비용 등 기회비용을 최소화할 수 있다.

유럽과 일본 등에서 준설토를 다양한 용도로 활용된 사례가 있으며(Yoon et al., 2016), 그 가운데 유용한 방법 중 하나가 고화 및 경량화 처리하여 건설재료로 사용하는 것이다. 일반적으로 연약지반 상에 단지조성이나 도로를 건설하기 위하여는 사전에 지반을 개량하는 일이 필수적이며, 이는 정확한 침하량 예측의 기술적 어려움뿐 아니라

상당한 개량비용 및 시간이 필요하다. 현재까지 연약지반 개량공법으로서 Plastic Board Drain(PBD), Sand Drain, Sand Compaction Pile(SCP)과 Deep Cement Mixing(DCM) 공법 등이 많이 사용되어 왔다. 그러나, 성토체의 자중이 감소된다면 원지반의 응력 영향심도를 감소시켜 지반개량의 심도와 방치기간을 줄임으로써 경제적 효과를 거둘 수 있을 것이다. 과거 연약지반에서 도로 성토공사나 구조물 뒷채움 공사에 무게가 가벼워 취급이 쉽고 시공속도가 빠른 EPS(Expanded polystyrene) 블록을 많이 적용하였으나, 수년 후 부등침하나 크리프 변형으로 인하여 하자가 발생한 사례가 많이 있다. 반면, 경량기포혼합토(LWFS, Lightweight Air Foamed Soil)를 이용하여 성토체의 강도 및 변형특성을 개선한다면 변위발생과 내구성을 향상시켜 유지관리 비용을 줄일 수 있다.

과거에 연약지반 상에 놓인 기존도로에 대하여 경량기포혼합토와 EPS 블록을 이용하여 하중을 경감함으로써 지반개량 없이 확장공사를 수행한 사례가 있다. 상부 모래층 10.0m와 하부 점토층 10.9m의 연약지반에서 인근 현장에서 발생한 저소성 실트(ML)를 원료토로 하여 Fig. 1과 같이 별도의 지반개량 없이 7개월 동안 확장 성토체

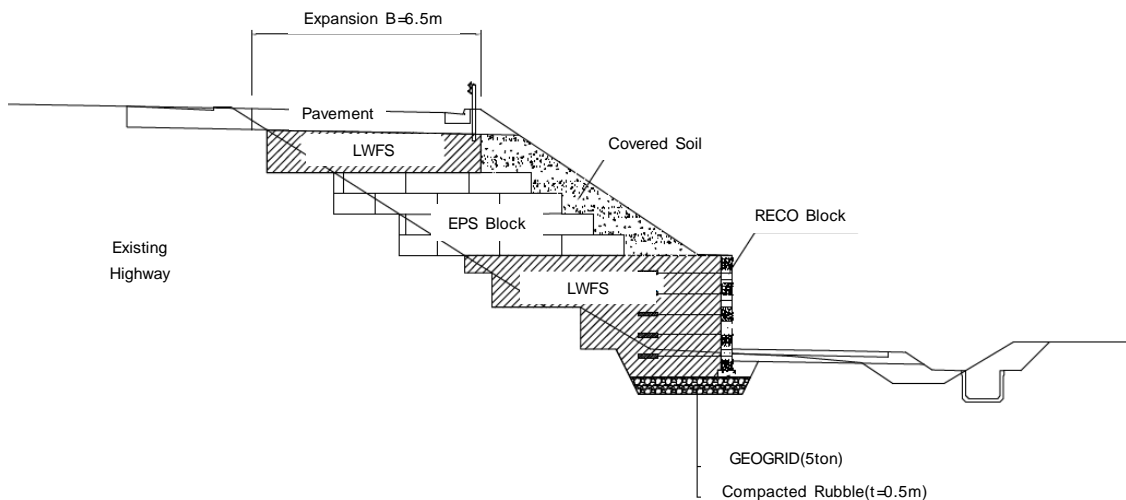


Fig. 1. Example of using LWFS and EPS block for road expansion (Ahn, 2010)

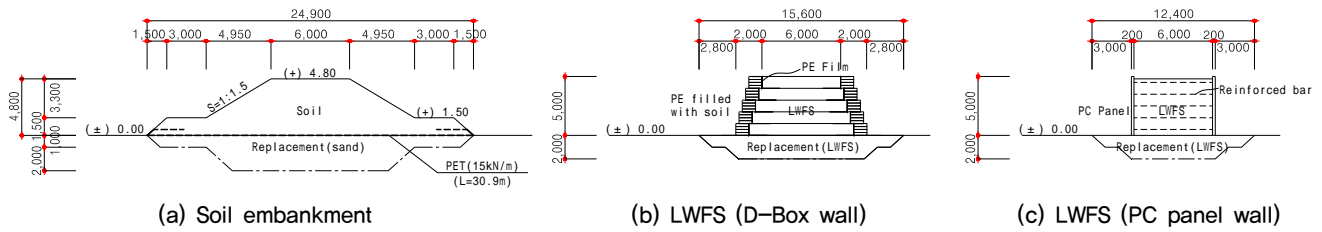


Fig. 2. Full scale embankment types

시공이 완료되어 8개월 만에 개통이 이루어졌다(Hwang et al., 2010; Ahn, 2010). 경량기포혼합토를 박스구조물의 뒷채움재로 사용할 경우 기존의 뒷채움 방법과 비교하여 초기공사비는 높지만 구조물 유지관리상의 생애주기를 고려할 때 포장재 보수비용이 절감되어 매우 유리한 측면이 있음(Park and Kim, 2009)을 감안할 때 유지보수가 빈번한 연약지반 성토재로 활용성을 적극 검토해볼 필요가 있다. 실험결과 다양한 종류의 준설토를 활용한 경량기포혼합토의 강도는 일반적으로 양생시간에 따라 증가하지만 원료토에 포함된 광물성분(mineral components)과 간극수 구성에 따라 큰 변동성을 가진다. 또한, 유사한 양의 고화재와 목표 습윤밀도를 가진 공시체에 대하여 강도의 선형적 기울기는 원료토의 종류에 관계없이 거의 동일하다(Kataoka et al., 2013).

본 연구에서는 해안에서 발생한 준설토를 건설재료로 활용하기 위하여 경량 및 고화처리하여 연약지반 상에 실규모의 도로성토 구조물을 시공하고 그 재료 및 거동특성을 분석하였다.

## 2. 실규모 시험체 제작

### 2.1 지반조건 및 시공단면

해안 인근지역에서 준설토의 활용을 촉진하는 동시에 연약지반 개량공법을 최소화하기 위하여 준설토를 경량·고화하여 제조된 재료를 가지고 도로용 성토체를 제작하고 그 거동을 비교하기 위하여 동일한 제원의 토사 성토체를 제작하였다.

도로 성토체가 놓이는 기초지반은 준설토가 투기되어

조성된 연약지반으로서 지표면에서 약 8.0m 심도까지는 실트(ML)와 점토(CL) 및 모래(SM)가 혼재된 준설토층이 존재하고, 그 하부에는 7.0m 두께로 원지반 퇴적층(CL)으로 구성되어 있다. 준설토층의 표준관입시험치는 0/30~9/30, 원지반 퇴적층은 1/30~3/30인 연약지반이다. 지하수위는 지표면으로부터 (-)0.3~0.6m의 얕은 심도에 위치하고 있다.

저소성 점성토(CL)로 구성된 준설토를 원료토로 하여 경량기포혼합토를 배합하고 이를 이용하여 높이 5m, 폭 6m의 도로 성토체를 제작하였다. 거동비교를 위하여 일반적으로 사용되는 산토를 이용하여 동일한 규격으로 또 하나의 성토체를 제작하였다. Fig. 2는 토사 및 경량기포혼합토로 제작된 시공단면도를 나타낸다. 경량기포혼합토의 경우 액상재료로서 굳기 전에는 거푸집이 필요하며 양생 후에도 장기적인 열화방지 등 내구성 유지를 위한 마감재가 필요하므로 외부에 PC패널 및 D-Box(속채움된 토목섬유 주머니)를 쌓아 그 역할을 하도록 하였다.

### 2.2 재료의 물성

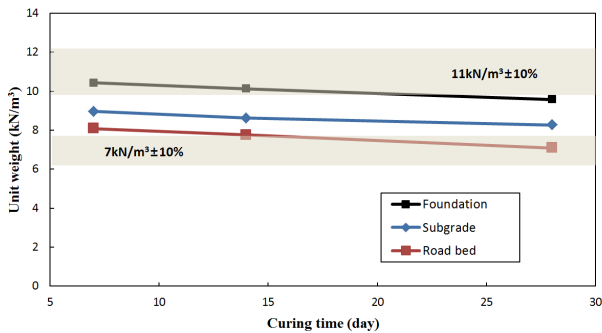
경량기포혼합토는 불량한 유기질토가 섞이지 않은 흙이라면 대부분의 경우 사용이 가능하다. 그러나 원료토의 물성과 함수비는 경량기포혼합토의 배합설계에 중요한 지배 인자이므로 원료토의 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 과거에 매립된 투기장에 존재하는 준설토를 원료토로 이용하기 위하여 시추조사 및 물성시험을 실시하였다. 토취위치 가운데 두 군데에서 교란시료를 채취하여 시험한 결과를 Table 1에 나타내었다. 원료토는 자연함수비가 70.80%로 액성한계보다 큰 불안정한 세립토로서 통일분

Table 1. Engineering properties of the test soil material

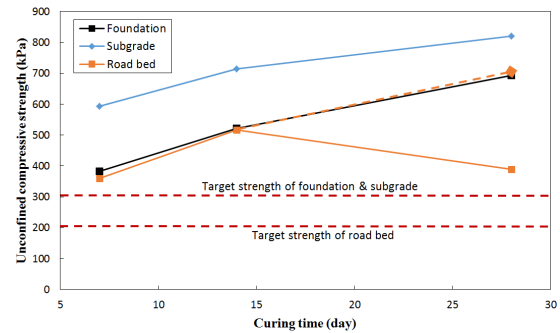
$G_s$	LL (%)	PL (%)	USCS	$\omega_n$ (%)	No.200 passing percent
2.68	46.41	26.22	CL	70.80	76.23

Table 2. LWFS properties

	Foundation replacement	Road bed	Subgrade
Total unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	11	7	7
Unconfined compressive strength (kPa)	300	200	300



(a) Total unit weight



(b) Unconfined compressive strength

Fig. 3. LWFS properties with curing time

류법(USCS)상 저소성 점토(CL)이다.

연구목적의 테스트베드 특성상 연약지반개량을 하지 않는 대신 기초지반의 처리를 위하여 토사성토 구간은 Fig. 2에 나타났듯이 3.0m 깊이까지 조립토를 이용하여 치환하고, 경량성토 구간은 2.0m 깊이까지 경량기포혼합토를 타설하였다. 경량기포혼합토 치환은 지하수위에 의한 부력의 영향을 고려하여 단위중량을 본체보다 다소 큰 11kN/m<sup>3</sup>로 설계하였다. 상부의 토공 본체는 토사성토 구간의 경우 단위중량 19kN/m<sup>3</sup>로 성토 및 다짐하였고, 경량성토 구간은 성토체의 자중을 줄임으로써 연약지반에 가해지는 응력을 감소시키기 위하여 7kN/m<sup>3</sup>의 단위중량을 가지는 경량기포혼합토를 0.5~1.0m의 높이로 단계 타설 및 양생하였다. 목표압축강도는 연약지반에 접해있어 상부하중을 분산시킬 수 있을 정도의 강성이 필요한 기초부와 교통하중을 직접적으로 받는 노상층의 경우 300kPa로, 교통하중이 분산되는 노체는 200kPa로 설계하였다. Table 2는 경량기포혼합토의 특성을 나타낸다.

### 3. 실내시험

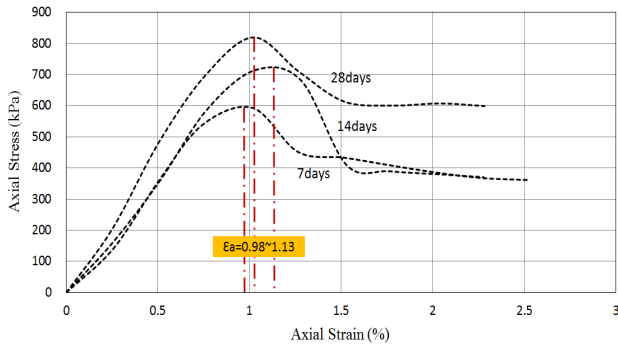
현장에서 배합된 경량기포혼합토 재료의 품질을 확인하기 위하여 샘플을 채취하여 공시체를 제작하고 양생일에 따른 단위중량 및 일축압축시험을 실시하였다.

경량기포혼합토의 타설 단계에서 굳지 않은 시료를 각 양생일별로 5회씩 총 45회 채취하여 양생일(7/14/28일)에

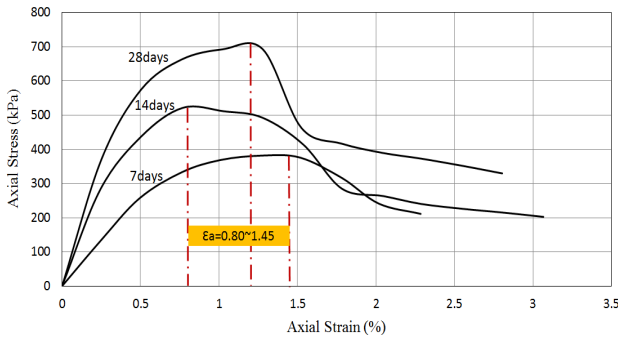
다른 물성시험을 실시하였다. Fig. 3에 나타난바와 같이 모든 단위중량은 시간경과에 따라 거의 일정하게 감소하였고, 기초부와 노체재료의 단위중량은 재령 28일에 단위중량 허용범위(목표치±10%)에 있거나 낮게 나타나 기준에 만족한 반면, 노상층의 경우 8.27kN/m<sup>3</sup>로 목표범위에 도달하지 못하였으나 노체와의 평균치(7.68kN/m<sup>3</sup>)는 목표범위 내에 위치하여 전체적인 자중영향은 없는 것으로 판단하였다. 단위중량이 감소하는 것은 시멘트의 수화작용으로 인한 공시체 내의 함수비 감소에 따른 것이라 할 수 있다. 또한, 슬러리 상태의 양생 전과 비교할 때 28일 양생 후의 단위중량은 약 81% 수준으로 감소하는 양상을 보였다.

일축압축강도는 양생 14일을 기준으로 이후의 증가속도가 완만하여 실트질 모래(SM)를 원료토로 제조된 기준의 연구결과(Lee et al., 2015)와 일치하는 추세를 나타내었으며, 모든 경우 목표강도를 충분히 상회하였다. 노체 시료의 경우 14일 이후 급격히 강도가 감소하였는데 이는 양생 과정에서 공시체의 미세균열 발생 또는 불균질한 배합결과가 그 원인이 될 수 있다. 타 시료의 시간에 따른 강도 증가추세를 고려할 때 현장의 노체 시료는 점선과 유사하게 강도가 발현될 것으로 보여진다.

Fig. 4는 현장에서 채취한 샘플에 대한 7, 14, 28일 양생 후 압축강도-변형을 관계를 나타낸다. 그래프는 각각 상부 노상 및 기초 치환부에 대한 시험치로서 목표강도는 모두 300kPa이다. 두 샘플의 28일 압축강도는 각각 819.82kPa



(a) Subgrade specimen



(b) Foundation specimen

Fig. 4. Unconfined compression test results for subgrade and foundation specimen

와 692.89kPa로서 목표강도를 충분히 상회하는 것으로 확인되었다. 7일 및 14일 경과 후 강도증가율은 28일 대비 각각 55~72%와 75~87%로서 7일 이후 최소 55%, 14일 이후 최소 75% 이상이 발생되었다. 두 샘플 모두 최대강도 발생 후 적은 변형률 변화에서 강도가 급격히 감소하는 양상을 보이며, 이는 시멘트 함유량이 많을 때 뚜렷하게 나타나는 현상이다. 일반적으로 시험시 축변형률은 1~2% 범위에서 최대강도가 발생된다고 알려져 있다. 본 샘플들의 경우 양생 28일 후의 축변형률은 이 범위와 일치하였고, 7~14일 후 일부 축변형률은 0.8~0.98로 다소 낮게 나타났다. 이는 일반적인 성토공사에서 사용되는 강도범위 보다 높은 시멘트 함유량 및 높은 압축강도에서 기인한 것으로 보인다.

경량기포혼합토의 변형계수( $E_{50}$ )는 일축압축강도와 상관성을 가진다고 알려져 있으며, Tsuchida & Egashira(2004)에 따르면 준설토를 이용한 경량혼합토의 변형계수는 일축압축강도의 40~260배의 범위에 있다. 세 개 샘플의 시험결과로부터 얻어진 결과를 플롯팅한 결과 모두 그 범위 내에 있음으로써 잘 일치하였다(Fig. 5). 얻어진 변형계수는 93,161~244,081kPa로 나타났다.

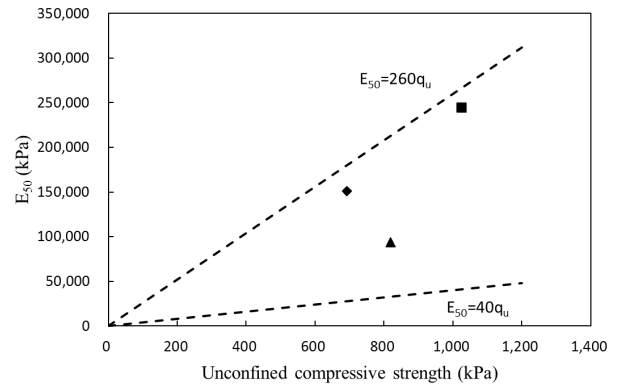


Fig. 5. Correlation between  $E_{50}$  and unconfined compressive strength

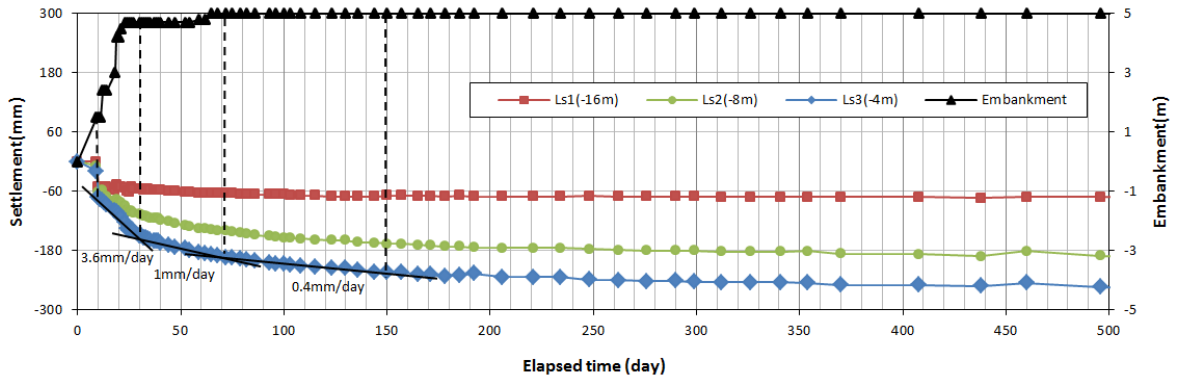
## 4. 계측결과

토사 및 경량기포혼합토 성토체에 매설한 지중침하계와 지중수평변위계에 대하여 500일 이상 계측하고 측정결과를 분석함으로써 그 거동을 비교하였다.

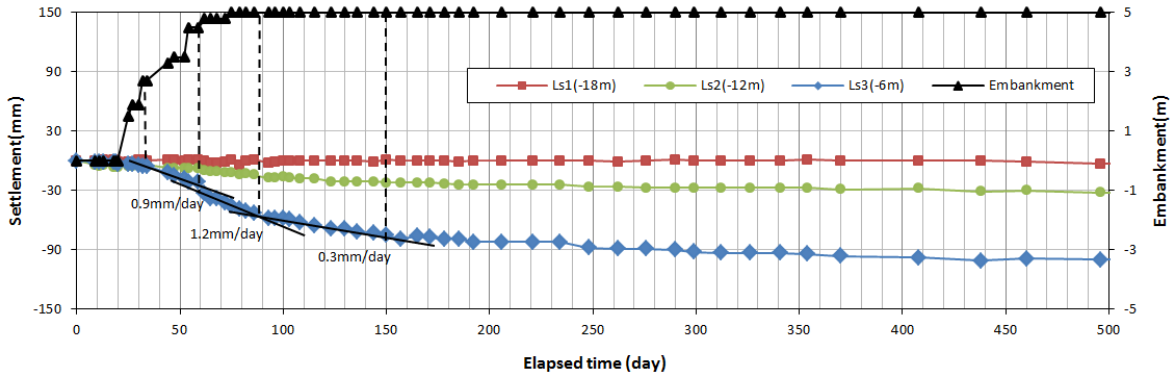
### 4.1 시간에 따른 침하량

성토재료뿐 아니라 경량기포혼합토의 타설 시공 및 마감역할을 위한 벽체의 종류에 따라서도 지반거동에 차이가 있다. Fig. 6은 성토고와 시간에 따른 침하량 변화를 나타낸다. 토사의 성토는 65일간 평균 7.7cm/day(2.3m/month)의 속도로, 경량기포혼합토의 타설은 55일간 평균 9.1cm/day(3.0m/month)의 속도로 진행되었다. 성토 시작으로 초기 150일 동안의 침하거동 양상을 성토재료에 따라 비교하였다.

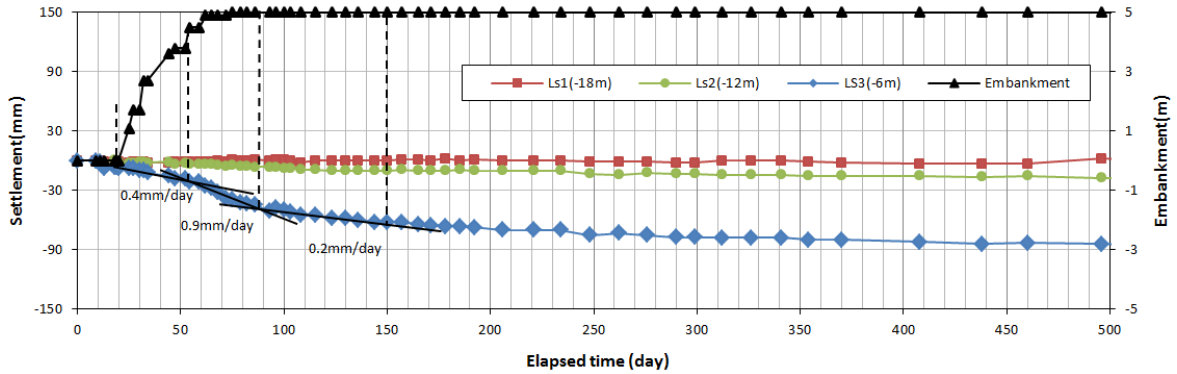
성토개시 시점으로부터 10일간의 성토높이는 토사(1.5m)에 비하여 경량기포혼합토(2.0m)가 33% 가량 커 성토속도가 상대적으로 빠르게 시공되었고, 이후 단계에는 반대로 토사의 성토가 빠르게 시공되었다. 초기단계의 토사성토에서 침하속도는 3.6mm/day인 반면 경량성토의 경우 0.4~0.9mm/day로 단위중량이 큰 토사재료가 4~9배 가량 빠르게 침하되었다. 이후 최종단계 0.5m 이하의 낮은 잔여성토 과정에서는 토사성토와 경량성토의 침하속도가 각각 1mm/day 및 0.9~1.2mm/day로서 유사한 범위를 나타내었다. 이는 지반에 작용하는 추가적인 상재하중 증가량이 최대 9kN/m<sup>2</sup> 이하로 이미 재하된 하중에 비하여 매우 작기 때문이다. 성토가 완료된 후로부터 75~85일 경과 시(성토개시로부터 150일)까지 침하속도는 토사성토(0.4



(a) Soil embankment



(b) LWFS embankment : D-Box wall



(c) LWFS embankment : PC panel wall

Fig. 6. Behavior of ground settlement for soil embankment and LWFS embankment by elapsed time

mm/day)와 경량성토(0.2~0.3mm/day)가 매우 유사하였다.

결과적으로 성토 초기 30~40일간 토사성토가 4~9배 가량 빠른 침하속도를 나타낸 이후로는 재료에 관계없이 매우 유사한 속도로 침하가 발생되었다. 또한 시공초기 150일 동안 침하의 양상은 토사성토의 경우 시간에 따라 침하속도가 점진적으로 감소하는 L자형인 반면, 경량성토 2개소 모두는 초기에 침하이후 속도가 증가하다가 다시 완만해지는 S자 형태를 나타내었다. 이는 시공과정 즉, 벽체시공 및 양생으로 성토단계에 시간차를 두었기 때문이다.

#### 4.2 심도에 따른 침하량

Table 3은 성토개시로부터 496일 시점에서 각 성토재료에 따라 측정심도별 지중 침하량을 나타낸 것이다. 원지반 지표면으로부터 Ls3은 (-)4~6m, Ls2는 (-)8~12m, Ls1은 (-)16~18m 위치에서 측정한 지중침하량이다.

기초지반으로부터 가장 얇은 Ls3 지점에서 측정된 침하량은 기초 치환재(모래)와 상부 축조재료(토사)의 단위중량이 큰 토사성토가 253mm로서 경량성토의 84~100mm보다 2.5~3배 가량 크게 나타났다. 이는 동일한 높이(H=

Table 3. Comparison of settlement with embankment materials

Section		Elapsed time (day)	Embankment height (m)	Settlement (mm)		
				Ls1	Ls2	Ls3
Soil		496	5	71	190	253
				14.9mm/m	15.75mm/m	
LWFS	D-Box wall	496	5	3	32	100
				4.83mm/m	11.33mm/m	
LWFS	PC panel wall	496	5	2	17	84
				2.50mm/m	11.17mm/m	

5m)로 다짐된 토사재료의 단위중량(약 19kN/m<sup>3</sup>)과 제체 경량기포혼합토의 단위중량(7kN/m<sup>3</sup>)의 비율(약 2.7배)로 비교하였을 경우와 거의 일치하는 수치로 자중의 차이로 인한 침하량의 인과관계가 잘 나타났다.

중간심도(Ls2)에서는 토사성토의 침하량이 경량성토의 약 6~11배, 하부심도(Ls1)에서는 약 24~36배로서 아래로 내려갈수록 침하량의 차이가 크게 증가하였다. 이는 유사한 심도에서 침하량이 상부제체의 자중에 따라 다르기 때문이며, 이는 침하속도가 0이 되는 심도와도 관계가 있다.

Table에 나타났듯이 지반 상부층과 하부층에서 측정된 각 침하량의 깊이에 따른 변화속도는 상부층(Ls3)~중간층

(Ls2)에서 토사성토와 경량성토가 약 4.5mm/m 차이에 불과한 반면, 중간층(Ls2)~하부층(Ls1)에서는 약 13.5mm/m의 큰 속도차이가 나타남을 알 수 있다. 이러한 깊이에 따른 침하량의 변화속도와 하부층(Ls1)의 침하량을 가지고 추정할 때 경량성토 하중으로 인한 침하 영향심도는 약 (-)19m 내외로 예상할 수 있으며, 이는 벽체를 포함한 평균 성토 폭 7.5m의 약 2.5배에 해당하는 심도이다. 또한, 경량성토의 경우에 벽체 재료(D-Box와 PC panel)의 자중에 따라 상부층(Ls3)에서의 침하량은 16mm의 차이가 있으나 하부층(Ls1)에서는 불과 1mm 차이로 영향심도는 거의 동일한 것으로 나타났다.

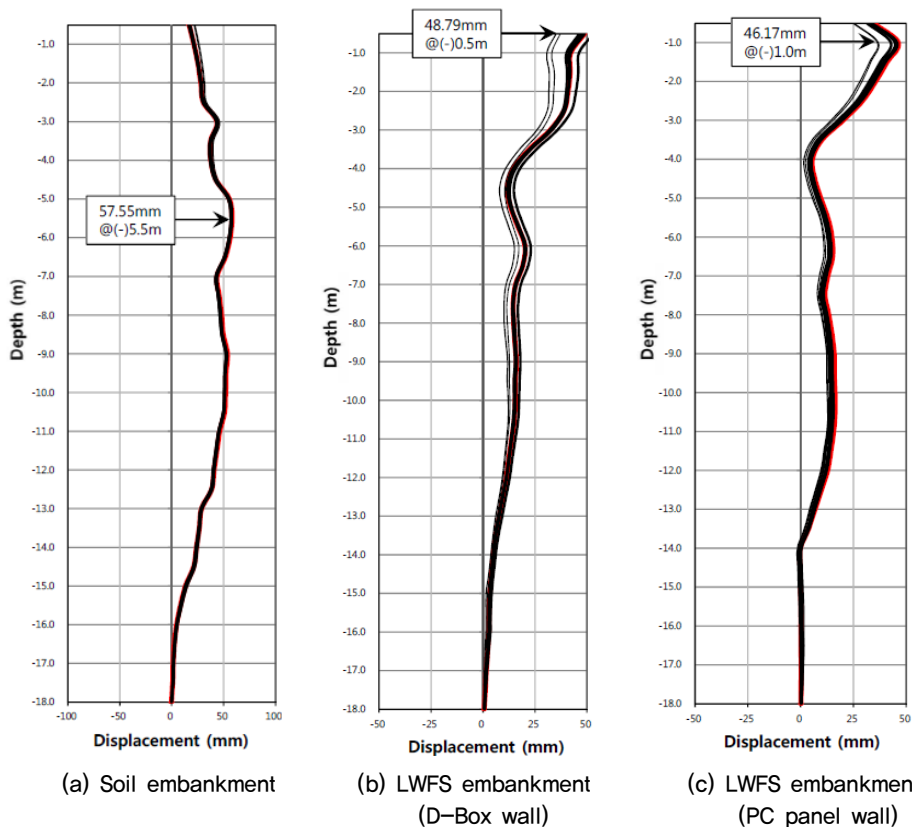


Fig. 7. Behavior of ground settlement for soil embankment and LWFS embankment by elapsed time

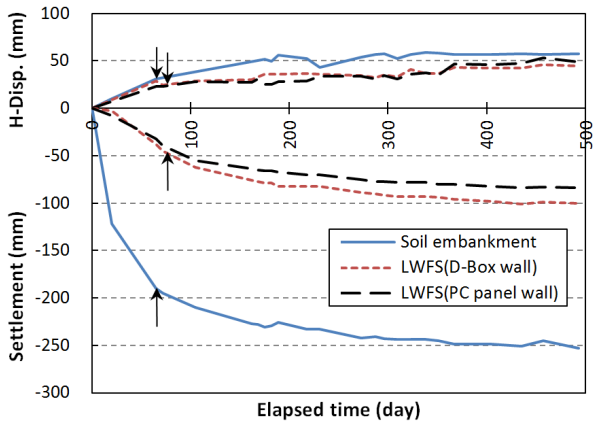


Fig. 8. Comparison of settlement with ground horizontal displacement

### 4.3 지중수평변위량

각 도로 성토체의 횡단면 단부로부터 3.0m 이격된 지중 수평변위계의 측정결과 토사성토는 최대 57.55mm, 경량성토는 각각 D-Box wall 46.17mm, PC panel wall 48.79mm로 나타나 경량성토체의 수평변위는 토사성토 대비 80~85% 수준이었다. 반면, 최대수평변위의 발생심도는 토사성토의 경우 G.L(-)5.5m, 경량성토는 각각 G.L(-)1.0m와 G.L(-)0.5m로 경량성토 구간의 발생심도가 비교적 얕아 원지반의 전단변형 영향심도가 현저히 감소되는 양상을 보였다(Fig. 7).

Fig. 8은 시간에 따른 지반의 수평변위와 원지반에서 가장 근접한 하부 (-)4~6m 위치에서의 침하경향을 나타낸다. 그림에 나타난바와 같이 성토과정에서 급격히 증가하

던 침하량과 지반의 수평변위량은 성토완료 후 그 속도가 감소하다가 서서히 수렴되었다(화살표는 성토완료 시점). 최근 126일간의 침하속도는 토사와 경량성토 모두 약 0.03mm/day의 유사한 속도로 진행되며, 지반의 수평변위량은 세 구간 모두 성토완료 후 약 300일 이후로 매우 느리게 진행되고 있다. 최근 126일간의 변위속도는 토사성토 0.007mm/day, 경량성토 각각 0.013mm/day와 0.015mm/day로서 큰 차이를 나타내지 않는다.

Fig. 9는 토사성토와 대표적 경량성토(PC panel wall) 단면에서 계측된 심도별 지중수평변위량과 그 심도에 의해 압밀 및 전단변형 양상을 추정한 것이다. 압밀 및 전단변형의 범위를 일본의 연약지반 상 도로공사 측정결과(Lee and Jang, 2005)로부터 경험적으로 제시된 성토체 단부로부터 (1.5~2.0)D(D : 연약층 두께)를 적용할 경우 경량성토의 변형범위가 상대적으로 크게 감소함을 알 수 있다. 이는 본 시험사례와 같이 실트질 또는 저소성 점성토 지반에서 성토체를 경량화할 경우 횡방향으로의 전단변형량을 현저히 감소시킬 수 있음을 나타낸다. 따라서, 연약지반에서 경량성토의 추가적인 실증을 통하여 그 거동특성이 명확히 구명된다면 기존의 지반개량공법과 병용 또는 대체가 가능할 것이다.

### 5. 결론

연약지반에서 준설토의 활용을 촉진하고 지반개량을 최소화할 목적으로 경량기포혼합토를 이용한 도로 성토체

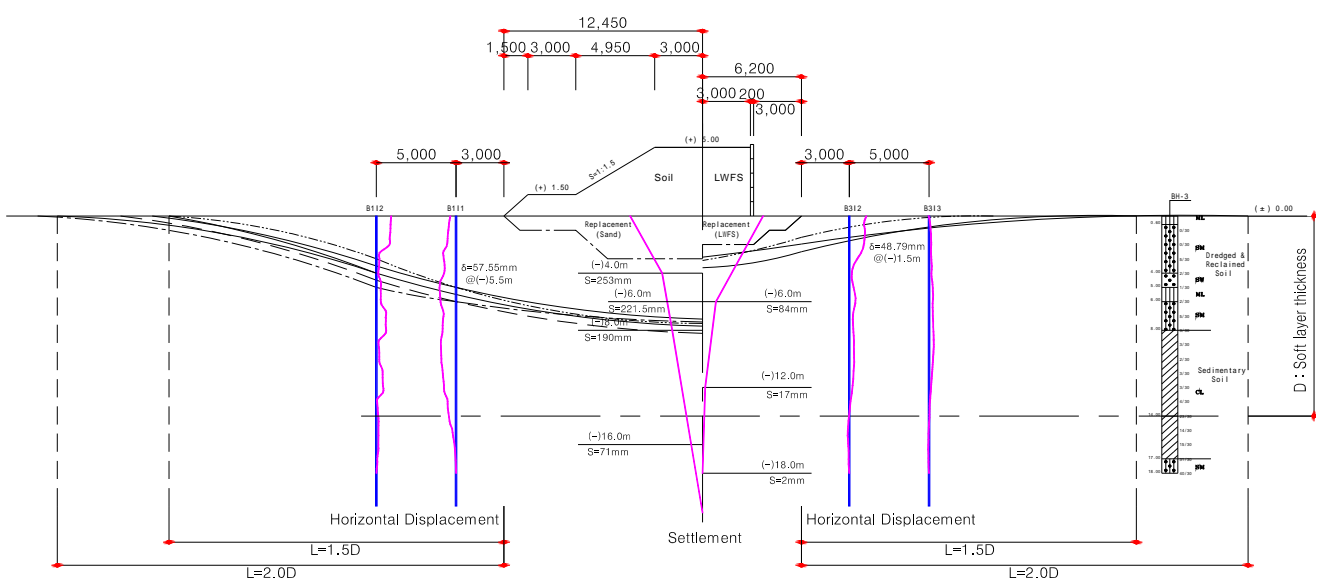


Fig. 9. Empirical prediction of shear deformation



를 제작하고 그 과정에서의 재료특성과 구조물의 거동을 분석하였다.

경량기포혼합토의 현장 배합시료에 대한 시험결과 시멘트의 수화작용에 따른 함수비 감소로 양생시간에 따라 공시체의 습윤단위중량은 거의 선형적으로 감소하였고, 특히 28일 양생 후 습윤단위중량은 양생 전 슬러리 상태의 약 81%로 감소되었다. 이는 향후 유사한 원료토의 배합설계시 활용이 가능하다. 일축압축강도는 기존의 연구와 같이 양생 14일 이후로 강도증가율이 감소하고, 시멘트 함유량이 많아질 경우 최대 압축강도 발생 후 적은 변형률 변화에서 강도가 급격히 감소하며, 통상보다 작은 축변형률 범위에서 최대강도가 발현되는 현상이 나타났다.

경량성토로 인한 원지반 천층부에서의 침하량은 토사 성토의 약 1/2.75로서 성토재료의 단위중량 비율(1/2.7)과 일치함으로써 자중의 차이로 인한 침하량의 인과관계가 잘 나타났다. 또한 원지반 하부로 내려갈수록 토사 및 경량성토 사이의 침하량 차이가 크게 나타남으로써 침하종료 심도에 차이가 명확하게 나타났다. 경량성토체의 지중수평변위량은 토사성토 대비 약 15~20% 정도 작게 나타났고, 그 발생심도 또한 경량성토의 경우가 4.5~5.0m 가량 얕게 나타나 경량기포혼합토가 전단변형의 영향심도를 현저히 감소시키는 효과가 있음을 확인하였다.

이상과 같이 토공재료로 경량기포혼합토를 적절히 활용할 경우 원지반 침하와 전단변형 거동 및 그 영향심도에 따라 연약지반에서 지반개량비용을 절감할 수 있다. 뿐만 아니라 본 연구에서 적용된 사례를 기준으로 할 때 도로건설에 필요한 소요 폭이 최소 15m 이상 절감되었으므로 기반시설 공사에서 용지매입 또는 보상비용을 절감하는 효과도 있는 것으로 나타났다. 또한, 대량의 준설토를 활용할 경우 투기장 건설비용 대체효과도 높으므로 향후 연약지반에서 토공재료로서 경량기포혼합토의 많은 활용시도가 필요할 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

This research was supported by Environment-friendly Dredging, Reclamation and Transport Technology Research Unit (15CCTI-B064664-04) and Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement.

## References

1. Ahn, Y. (2010), *Characteristics and Field Application of the Lightweight Air-Mixed Soils Used for Embankment of Road Extension*, Ph.D Thesis, Korea Maritime University, p.46.
2. Hwang, J., Ahn, Y., Lee, Y. and Kim, T. (2010), "Characteristics of the Expanded Road Embankment Constructed by Lightweight Air-Mixed Soils for a Short-Term", *J. of KSCE*, Vol.30, No.4D, pp.377-386.
3. Kataoka, S., Horita, T., Tanaka, M., Tomita, R. and Nakajima, M. (2013), "Effect of dredge soil on the strength development of air-foam treated lightweight soil", *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris 2013, pp.3227-3230.
4. Lee, G. and Jang, Y. (2005), *Geotechnical Engineering in Soft Ground*, Seron Publishing, pp.176-181.
5. Lee, Y., Yea, G., Park, S. and Kim, H. (2015), "Behavior Characteristics of Underground Flexible Pipe Backfilled with Lightweight Foamed Soil", *J. of KGSS*, Vol.14, No.1, pp.43-50.
6. Park, Y. and Kim, S. (2009), "Economic Analysis of Box Mechanical Behavior Materials Using LCC Analysis", *Journal of Construction Management*, Vo.10, No.6, pp.40-47.
7. Tsuchida, T. and Egashira, K. (2004), The lightweight treated soil method: new geomaterials for soft ground engineering in coastal areas, A.A. Balkema Publishers, p.30.
8. Yoon, G., Lee, S. and Oh, M. (2016), *Guidelines for Beneficial Use of Dredge Sediments*, CIR Publishing, pp.27-38.