

저회-폐타이어 재생혼합토의 실대형 성토구조물 성능 시험

Performance Test of Large Scale Embankment made with Bottom Ash and Tire Shred

이성진* 신민호** 황선근*** 고태훈**** 이용식*****
Lee, Sung-Jin Shin, Min-Ho Hwang Seon-Keun Koh, Tae-Hoon Lee Yong Sik

Abstract

Recently, a global trend has been established to facilitate the use of waste materials in geotechnical engineering applications. In Korea, where there is the need to save natural resources as these may become scarce in the near future and to prevent excessive ground excavation for natural aggregates. The annual production of scrap tire and bottom ash has sharply increased in recent years. Therefore, it will be good waste resource recycling, if we can utilize the above wastes as fill materials in soft ground.

In this study, based on the proven feasibility of bottom ash and tire shred-soil mixtures as lightweight fill materials, tire shred-bottom ash mixtures were suggested as a new lightweight fill material to replace the conventional construction material(soil) with bottom ash. Therefore, the main objective of this research is to investigate the feasibility of tire shred-bottom ash mixtures in order to estimate their suitability for the use of lightweight fill materials. So we carried out the performance tests of 2 large scale embankment which were made with tire shred-bottom ash mixture and the conventional fill material(weathered soil) respectively.

주요어(Key words) : tire shred-bottom ash mixtures, engineering properties, lightweight fill materials, resources to replace the conventional construction materials.

1. 서론

현재 폐자원의 지반공학 재료로의 전환은 전 세계적 추세이며, 국내에서도 천연골재 채취로 인한 자연훼손방지, 토취장확보문제 해결, 천연골재의 수급난 해결 등을 위해 자원순환형 지반재료의 활용이 요구되고 있다. 특히 폐타이어와 석탄회는 그 발생량의 급증에 따라

* 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원 정희원

E-mail : geolsj@krii.re.kr

TEL : (031)460-5072, FAX : (031)460-5319

** 한국철도기술연구원 철도구조연구실 수석연구원 정희원

*** 한국철도기술연구원 철도구조연구실 주임연구원 정희원

**** 한국철도기술연구원 철도구조연구실 책임연구원 정희원

***** 한국철도기술연구원 철도구조연구실 연구원

야적장 및 회사장 확보의 어려움과 함께 화재발생 및 환경문제가 야기되고 있다. 따라서 위의 두 가지 재료를 혼합하여 경량의 성토재로 활용하게 된다면 연약지반상의 경량성토 대체 재료로서 훌륭한 자원으로 이용될 수 있을 것이다.

페타이어와 석탄회(저회)를 혼합한 재생혼합토의 성토재로서의 활용과 합리적인 설계 및 시공을 위해서는 기본적인 물성, 응력-변형특성, 전단강도 특성 등의 파악과 환경적 유해성을 판단할 수 있는 환경특성 실험이 필요할 것이다. 또한 다양한 혼합비, 다짐 방법, 응력조건에 따른 거동파악을 위해 실험실 실험과 실제 현장에서의 단기 및 장기적 거동특성의 파악이 요구된다.

2. 실험 성토체 모형 실험

본 논문에서는 부피비 50:50으로 혼합된 페타이어와 저회의 혼합재료에 대해 파악된 기본 물성 및 지반공학적 특성을 바탕으로 대형 성토구조물을 축조하여 정동적 하중에 따른 성토구조물의 거동을 파악하고자 하였다. 먼저 성토구조물을 높이 3m, 상부 너비 4m, 사면 1:1.5의 Scale로, 하부 0.9m에 일반 성토재료, 중간 부분 1.1m를 재생혼합재료로 다짐한 후, 표층을 일반 성토재료로 30cm씩 다짐하며 평판재하시험을 수행하여 적절한 표층두께를 검토하였다. 또한 일반성토재료 이루어진 성토체와 비교하여 교통하중을 모사한 반복하중재하시험을 통한 침하경향, 방진효과 등을 확인하여 성토재로서의 적용성을 검증하고자 하였다.

2.1 실험 성토구조물

시험 성토구조물은 중방향 평면변형상태와 좌우대칭의 반단면을 모사하여 성토구조물을 축조하여 실험을 수행하였다. 아래 그림과 같이 실험단면(Test Section) I은 중간층 재료로 페타이어와 저회를 혼합한 재생혼합재료(이하 TBA)를 활용하여 상부토층 0.9m, TBA층 1.1m, 하부토층 1.0m로 구성하였으며, 실험단면(Test Section) II는 단면 전체를 기존 성토재료인 풍화토를 사용하였다.

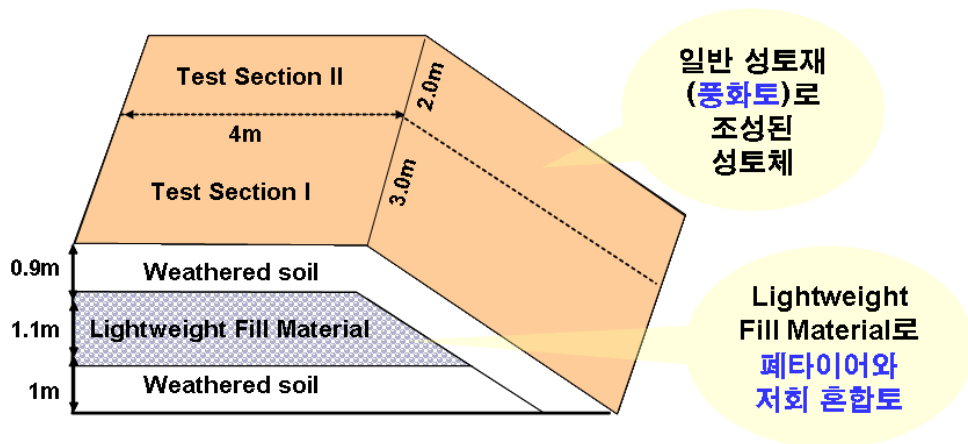
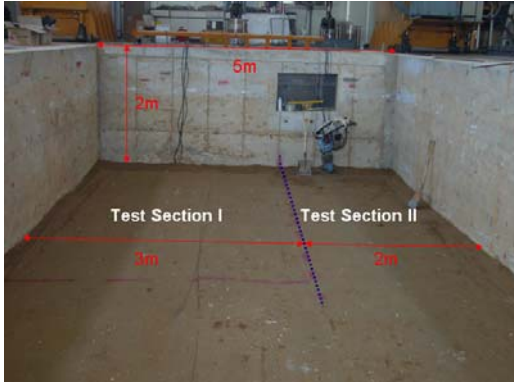


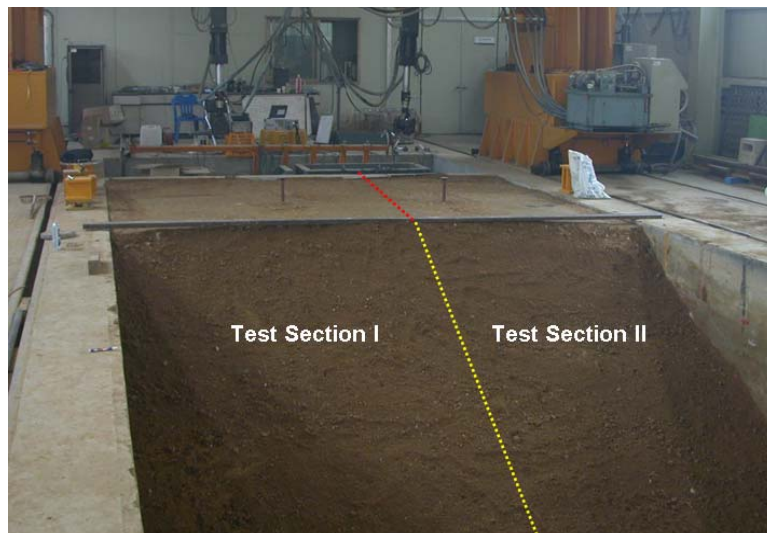
그림 1 모형 성토구조물



(a) 하부 성토 후 토조



(b) 단면 I, II 시공 장면



(b) 최종 성토 후

그림 2 모형 성토구조물 제원 및 단면 비교

먼저 하부성토층 1m를 기존의 성토재료인 풍화토로 다짐하고 실험 토조(폭 5m)를 3m와 2m 단면으로 나누어 실험단면 I은 중간층 1.1m를 TBA재료를 활용하고, 실험단면 II는 모든 층을 풍화토로 다짐하여 성토구조물을 시공하였다.

2.2 토압분석

본 재생혼합토는 폐기물을 혼합하여 구성된 재료로서 다음 표와 같이 일반 성토재(풍화토) 대비 약 30% 정도의 하중 감소로 이에 따른 수직, 수평 토압의 감소가 기대되는 재료이다(표 1). 본 모형실험에서도 토압계를 이용해 토압 감소효과를 확인할 수 있었다(표 2). 따라서 연약지반의 경량성토재료로 활용할 경우 성토체체의 하중에 의한 침하를 감소시킴으로써 전체적인 공사기간을 단축할 수 있는 효과와 옹벽의 뒤채움 등에 활용될 경우 옹벽단면감소로 인한 경제적 효과도 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

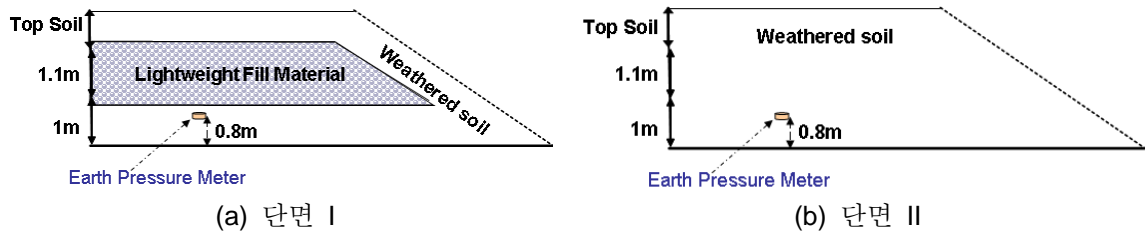


그림 3 토압계 매설 단면 비교

표 1 재료별 최대 및 최소 건조밀도

	Maximum Dry Density(kN/m ³)	Minimum Dry Density(kN/m ³)	Dry Density at 95% Relative Compaction(kN/m ³)
타이어슈레드	7.9	5.3	7.5
저회(Bottom Ash)	13.0	7.2	12.4
주문진 표준사	17.6	11.7	16.7
타이어-저회 혼합토	11.8	7.5	11.2
타이어-모래 혼합토	15.0	12.2	14.3

표 2 단면별 상부복토 깊이에 따른 토압 비교

상부 복토(Top Soil) 깊이	30cm	60cm	90cm
TBA 단면(Section I)	20.0(kPa)	25.0(kPa)	32.0(kPa)
풍화토 단면(Section II)	29.0(kPa)	32.5(kPa)	37.0(kPa)

2.3 성토 구조물 강성 평가 - 평판재하시험, LFWD

페타이어를 성토재료로 활용할 경우 성토구조물 상부와 측면 사면부를 약 0.9m 복토하는 것이 여러 연구자들(Read et al. (1991), Masad et al. (1996), Edil et al. (1992; 1994), Bosscher et al. (1992; 1997), Ahmed et al. (1993), Drescher et al. (1994) and TFHRC (1997))에 의해 추천되고 있다. 이는 페타이어의 발화 방지, 침투로 인한 체체 손실방지 등의 목적과 일반성토재와는 다른 페타이어 재료의 특성을 고려한 강성 강화 등을 목적으로 하고 있다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 페타이어와 석탄회(Bottom Ash)의 혼합재료의 경우에도 이러한 복토가 필요할 것으로 판단되며, 필요한 복토 높이의 평가를 위해 30cm층마다 평판재하시험(KS F 2310), LFWD실험 등을 통해 강성을 검토했다.

2.3.1 평판재하시험(KS F 2310)

재생혼합토의 경우 필수적으로 상부 복토가 이루어지기 때문에 일반적인 성토재료의 다짐

관리 기준으로 관리하는 것은 큰 의미가 없을 것으로 판단된다. 대신에 복토의 다짐이 이루어진 이후 복토 깊이별로 다짐도를 평가하는 것이 보다 합리적일 것이다. 따라서 본 연구에서는 합리적인 복토깊이의 평가와 함께 복토깊이별로 재생혼합토와 복토재료로 이루어진 다층지반의 평판재하시험 결과를 제시함으로써 향후 다짐관리 기준으로 활용하는 것을 추가적인 목표로 실험을 수행하였다.

본 연구의 대상재료는 도로, 철도 등의 성토재를 1차적인 대상으로 하고 있으므로 일반적인 도로의 평판재하시험방법인 KS F 2310에 준하여 복토 높이에 따라 평판 직경 30cm, 50cm, 75cm으로 실험을 수행하였다. 단면 I, II의 비교, 평판 직경에 따른 결과, 복토깊이에 따른 결과를 모두 나타낸 결과는 다음 그래프 및 표와 같다.

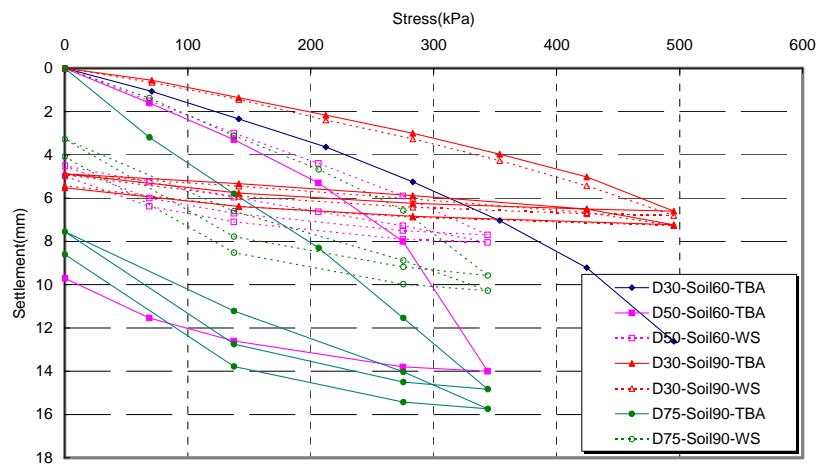


그림 4 평판재하시험 결과

표 3 평판재하시험 결과 지지력계수

지지력계수		
D30-Soil60-TBA	K_{30}	60.48(MN/m ³)
D50-Soil60-TBA	K_{50}	42.97(MN/m ³)
D50-Soil60-WS	K_{50}	45.83(MN/m ³)
D30-Soil90-TBA	K_{30}	104.02(MN/m ³)
D30-Soil90-WS	K_{30}	98.24(MN/m ³)
D75-Soil90-TBA	K_{75}	21.57(MN/m ³)
D75-Soil90-WS	K_{75}	49.86(MN/m ³)

직경 30cm의 평판으로 수행된 재하시험 결과(K_{30})에서는 복토 90cm에서 단면 I과 단면 II에서 거의 일치하는 결과를 보였다. 하지만 직경 75cm의 평판으로 수행된 재하시험(K_{75})에서는 단면 I에서의 지지력계수가 단면 II에 비해 크게 감소한 결과를 나타냈다. 이는 직경

30cm의 평판재하시험에서는 하중이 재하되는 깊이가 직경의 약 2배인 60cm 정도로 재생혼합재료까지 완전히 전달되지 않고 복토재료층내에서의 지지력으로 측정되기 때문에 판단된다. 따라서 재생혼합토로 이루어진 성토구조물의 다짐관리에서는 정규화된 평판직경 30cm, 40cm, 75cm 중에서 최소 40cm이상의 평판을 활용하는 것이 필요할 것이다. 또한 다양한 다층구조 조건에서의 실험과 이에 대한 상관관계를 도출하는 것이 향후 재료의 적용과 시공 관리에 필요한 것으로 판단된다. 본 실험에서 수행된 다층 지반구조에서 평판재하 판 직경별 시험결과를 비교 정리하면 다음과 같이 일반 성토재료의 경우와는 다른 상관관계를 보이고 있다.

- (1) 기존성토재(풍화토) 경우 $K_{30}=1.97K_{75}$
 - (2) 재생혼합토 Top Cover Soil(복토) 90cm에서 $K_{30}=4.8K_{75}$
 - (3) 재생혼합토 Top Cover Soil(복토) 60cm에서 $K_{30}=1.4K_{50}$
- ※ 참고 : KS F 2310 $K_{30}=2.2K_{75}$ $K_{30}=1.3K_{40}$

2.3.2 LFWD(Light Falling Weight Deflectometer)

LFWD(Light Falling Weight Deflectometer)는 자유낙하 시킨 추로 인해 발생하는 에너지를 하중과 처짐으로 나누어 측정하는 장비로써 차량 이동식 FWD와 손으로 이동할 수 있는 LFWD가 있다. LFWD는 장소의 제약을 받지 않는다는 장점을 가지고 있어, 차량이 접근하기 곤란한 어떠한 측점까지도 사용이 가능하다. 또한, 노상, 기초 층의 충분한 지지력을 확보하기 위해 실시되는 Stiffness 실험인 전형적인 실험법들에 비해 시간적 한계를 극복할 수 있다는 데 그 장점이 있다(박태순 외, 2001).



그림 5 LFWD 실험 장면

본 연구에서 사용된 장비는 Dynatest社의 Keros Prima100 Portable FWD를 사용하였다. 이 장비는 낙하 추(Falling Mass, 20kg)를 이용하여 고정 손잡이를 눌러 자유낙하된 낙하 추(Falling Mass)를 고무 완충기(Rubber buffer)에 등분포에 가까운 하중을 가하여, 하중판을 통해 표면에 가해진 충격력에 의해 하중판 중앙에 위치한 Geophone에 움직임을 측정함으로써 PDA로 전송된 Data는 바로 처짐량(μm)과 회복탄성계수(MPa)로 화면상에 확인하는 방

식이다. 표 4와 표 5는 층 종류에 따른 하중판의 크기와 탄성계수의 기대치 범위를 나타내었다. 본 연구에서는 하중판의 직경을 30cm를 사용하였으며 지점별 각각 5회씩 측정하였다.

표 4 층 종류에 따른 하중판

하중판 직경	층 종류
300mm	노반, 매립층, 보조기층, 자갈 기초층
200mm	자갈 기초층, 연약한 구조물
100mm	강성 도로구조물

표 5 층 종류에 따른 탄성계수의 기대치

층 종류	범위
노상	5 ~ 60MPa
노반	25 ~ 75MPa
사력층	40 ~ 125MPa
쇄석을 간 포장도로	60 ~ 150MPa
아스팔트	100 ~ 300MPa

표 6 LFWD 실험 결과

구분	Top Soil 30cm E(MPa)		Top Soil 60cm E(MPa)		Top Soil 90cm E(MPa)	
	TBA	WS	TBA	WS	TBA	WS
1회	50	54	57	60	66	63
2회	55	75	59	60	68	67
3회	57	60	60	53	69	67
4회	58	68	60	59	70	69
5회	57	69	62	62	72	70
평균	55	65	59	59	69	67

재생혼합토(TBA)를 이용한 성토체에서 실험값은 Top Soil 깊이에 따라 약간 증가하는 경향을 보이며 대체로 노상 및 노반에 적합한 탄성계수를 보였다. 본 실험이 주로 도로 성토에서 다짐도를 평가하기 위한 방법으로 주 영향 깊이는 30cm 내외로 알려져 있다. 따라서 본 실험 결과도 대체로 재생혼합토의 영향을 완전히 반영하지는 못한 것으로 보인다. 그러나 LFWD 실험이 매우 간편한 장점이 있어 복토깊이에 따라 평판재하시험과 밀도 결과 등과 상관관계를 정립할 경우 현장 활용 시 매우 유용한 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

2.4 하중판 동적 재하시험

성토구조물에 가해지는 교통하중을 모사해서 반복하중 재하시 누적침하량의 경향과 수렴되는 침하량 크기를 비교해보았다. 하중은 차량 최대하중인 축당 10(ton)과 성토구조물의 반단면을 고려해 반복재하하중 5(ton)을 모사하기 위해 2(ton)~7(ton), 5Hz로 10만회를 재하하였다. 재생혼합토와 풍화토의 직접적인 침하특성을 비교하기 위해 하중재하에 따른 침하경향은 단면 I에서 재생혼합토의 상부에 설치된 침하판과 단면 II에서 같은 높이에 설치된 침하판의 침하경향을 계측하였다.



그림 6 동적 재하 시험

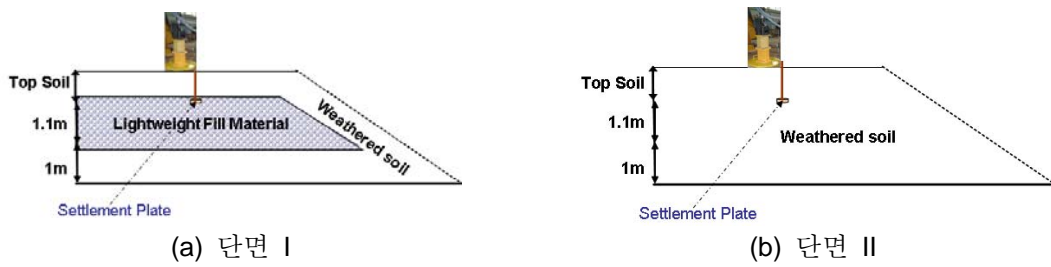


그림 7 침하판 매설 단면 비교

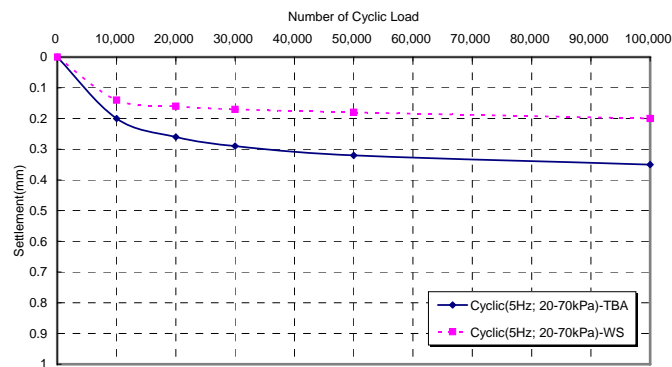


그림 8 반복재하시험 침하경향

실험 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 2(ton)~7(ton)로 10만회 반복시험에서 단면 I과 단면

II에서 각각 0.35(mm), 0.2(mm)에 수렴하며 장기침하량의 차이가 약 0.15(mm)로 미미한 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 즉 재생혼합토로 시공되고 90cm의 복토로 시공된 경우 장기적인 교통하중의 영향이 기존 성토재료에 의한 성토구조물에 비해 차이가 거의 없을 것으로 판단된다.

2.5 진동저감특성

페타이어는 재료특성으로 가진원에 의해 외력(진동)이 작용했을 때 페타이어 성토체 내에서 마찰과 진동에 의해 외력에 의한 일이 소산되어 감쇠특성을 가진 재료로 진동의 소산에 효과적인 재료로 인정된 바 있다(조삼덕 등, 1996). 따라서 본 연구에서 활용된 페타이어와 석탄회의 혼합재료에 대해서도 이러한 진동저감효과를 확인하기 위해 성토체 내에 지오폰을 설치하고 상부에서 진동을 가해 재생혼합재료를 통과하면서 계측되는 진동크기와 일반 성토체 내에서 전달되는 진동크기를 비교 검토하였다.

(1) 복토 30cm 표면에서 40Hz 진동

먼저 다음 그림과 같이 재생혼합재료로 성토하기 전 하부 20cm에 지오폰을 매설하고 1.1m로 재생혼합토와 풍화토를 단면 I, II에 각각 성토한 후 복토 30cm 위에서 40Hz의 진동을 가하고 그 진동영향을 비교하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 재생혼합토를 통과한 단면 I의 진동크기가 단면 II에 비해 약 50% 저감되는 것을 확인할 수 있었다.

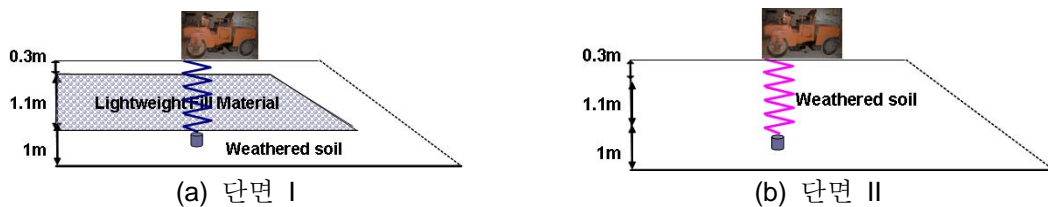


그림 9 진동 측정 단면 비교

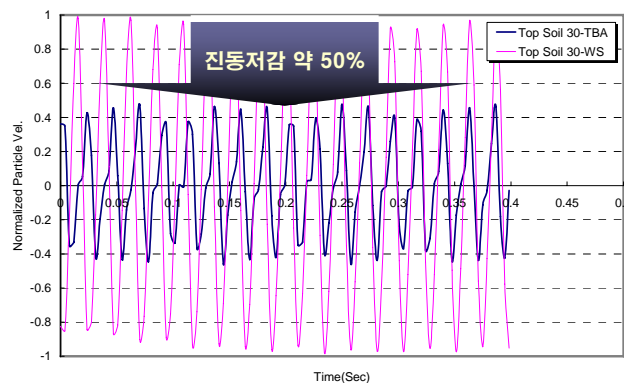


그림 10 복토 30cm 위 40Hz 진동 시 계측진동 비교

(2) 복토 60cm 표면에서 40Hz 진동

이후 30cm를 추가로 성토해 복토 깊이가 60cm일 때 같은 진동에 약 30% 진동 저감효과가 있는 것을 확인할 수 있었다.

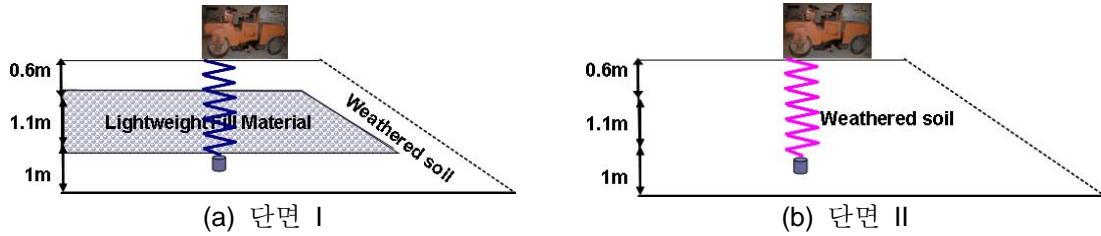


그림 11 진동 측정 단면 비교

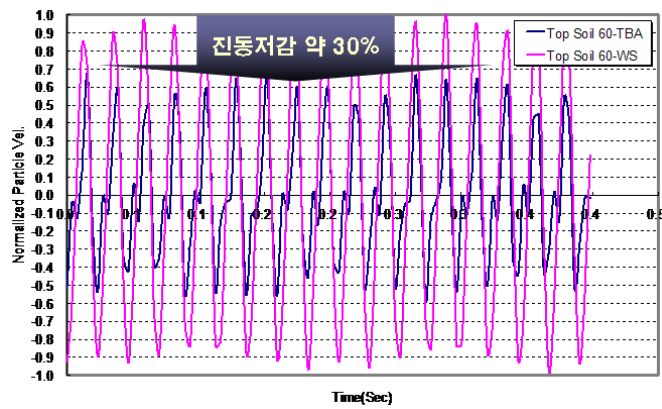


그림 12 복토 60cm 위 40Hz 진동 시 계측진동 비교

(3) 복토 90cm 표면에서 5Hz 진동

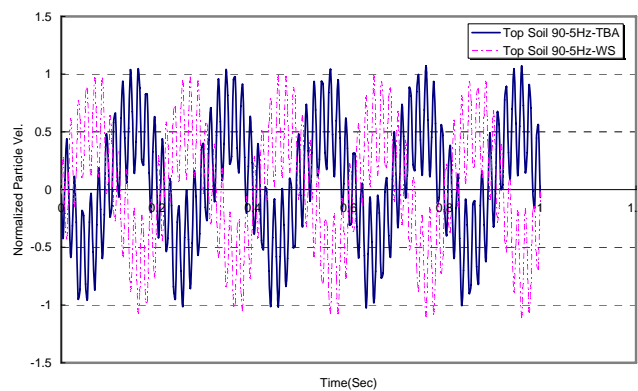


그림 13 복토 90cm 위 5Hz 진동 시 계측진동 비교

위 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 5Hz의 진동을 가했을 때 두 단면에서 계측된 진동크기가 거의 일치하는 것으로 그 차이가 매우 미미함을 알 수 있다.

이상의 실험 결과 진동원이 큰 주파수일 때, 복토깊이가 낮아 진동원의 진동 크기가 크게

전달될 때 그 저감효과가 큰 것으로 방진재료로 활용할 때는 진동원 근처에 설치할 때 진동 저감에 보다 큰 효과를 발현할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 결론 및 향후계획

본 연구에서는 부피비 50:50으로 혼합된 페타이어와 저회의 혼합재료를 이용한 대형 성토구조물을 축조하여 정동적 하중에 따른 성토구조물의 거동을 파악하고자 하였다. 먼저 성토구조물을 높이 3m, 상부 너비 4m, 사면 1:1.5의 Scale로, 하부 0.9m에 일반 성토재료, 중간 부분 1.1m를 재생혼합재료로 다짐한 후, 표층을 일반 성토재료로 다짐하며 평판재하시험 및 LFWD 시험 등을 수행하여 적정한 표층두께를 검토하였으며, 일반성토재로 이루어진 성토체와 비교하여 교통하중을 모사한 반복하중재하시험을 통한 침하경향, 방진효과 등을 확인하여 성토재로서의 적용성을 검증하였다.

- (1) 재생혼합토(TBA)는 폐기물을 혼합하여 구성된 재료로써 일반 성토재(풍화토) 대비 약 30% 정도의 하중 감소로 이에 따른 수직, 수평 토압의 감소가 기대되는 재료이며 본 모형실험에서도 토압계를 이용해 토압 감소효과를 확인할 수 있었다.
- (2) 연약지반의 경량성토재료로 활용할 경우 성토체체의 하중에 의한 침하를 감소시킴으로써 전체적인 공사기간을 단축할 수 있는 효과와 옹벽의 뒤채움 등에 활용될 경우 옹벽 단면감소로 인한 경제적 효과도 기대할 수 있을 것으로 기대된다.
- (3) 평판재하시험과 LFWD실험 결과 최소 90cm의 일반성토재료의 복토가 필요한 것으로 판단되며, 현장적용을 위해서는 평판재하판의 직경과 복토깊이에 따른 재하시험 및 LFWD 실험과 성토구조물의 모형실험을 통한 상관관계 분석으로 적절한 다짐 및 복토 관리 기준의 마련이 필요할 것으로 사료된다.
- (4) 반복재하시험 결과 단면 I과 단면 II에서 각각 0.35(mm), 0.2(mm)에 수렴하며 장기침하량의 차이가 약 0.15(mm)로 미미한 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 즉 재생혼합토로 시공되고 90cm의 복토로 시공된 경우 장기적인 교통하중의 영향이 기존 성토재료에 의한 성토구조물에 비해 차이가 거의 없을 것으로 판단된다.
- (5) 진동원이 큰 주파수일 경우와, 진동원과의 거리가 가까울 때 진동저감효과가 큰 것으로 나타났다. 즉 본 재료를 방진재료로 활용할 때는 진동원 근처에 설치할 때 진동 저감에 보다 큰 효과를 발현할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(차세대 시설물용 신재료 활용기술 연구단)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 박태순, 최준성, 박재균(2001), “회복탄성계수 측정을 위한 Portable LFWD의 활용”, 대한토목학회 2001학술발표회 논문집[창립50주년]
2. 조삼덕 등(1996), “폐타이어를 재활용한 건설재료 및 신공법 기술 개발에 관한 연구” 한국건설기술연구원
3. Read, J., Donson, T. and Thomas, J., (1991) Use of Shredded Tires for Lightweight Fill, FHWA Experimental Project No.1, DTFH-71-90-501-OR-11, Post-Construction Report, Oregon Department of Transportation Highway Division Roadway Section.
4. Masad, E., Taha, R., Ho, C., and Papagiannakis, T. (1996) "Engineering Properties of Tire/Soil Mixtures as a Lightweight Fill Material", Geotechnical Testing Journal., Vol.19, No.3. pp.297-304.
5. Edil, T. B. and Bosscher, P. J. (1992)Development of Engineering Criteria for Shredded Waste Tires in Highway Applications, Final Report No. GT-92-9, University of Wisconsin-Madison, Wisconsin Department of Transportation, Wisconsin Department of Natural Resources.
6. Edil, T. B. and Bosscher, P. J. (1994) "Engineering properties of tire chips and soil mixtures". Geotechnical Testing Journal, ASTM, 17(4), pp. 453-464.
7. Bosscher, P. J., Edil, T. B. and Eldin, N. N. (1992) "Construction and Performance of a Shredded Waste Tire Test Embankment" Transportation Research Record 1345, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 44-52.
8. Bosscher, P. J., Edil, T. B. and Eldin, N. N. (1997) "Design of Highway Embankments Using Tire Chips" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 4, pp. 295-304.
9. Ahmed, I. (1993) Laboratory Study on Properties of Rubber-Soils, Ph. D Thesis, Purdue University.
10. Drescher, A. and Newcomb, D. E. (1994) Development of Design Guidelines for Use of Shredded Tires as a Lightweight Fill in Road Subgrade and Retaining Walls, Report No. MN/RC-94/04, University of Minnesota, Minnesota Department of Transportation.
11. Turner-Fairbank Highway Research Center (TFHRC) (1997) User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, FHWA-RD-97-148, Federal Highway Administration (<http://www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/st4.htm>)