

직육면체 섬유보강재 노반보강공법 현장부설에 따른 지지력 평가 비교분석

Comparative Analysis of Support Stiffness Based on On-Site Laying of Rectangular Parallelepiped Fiber Reinforcement Sack

박윤식* · 김자연** · 엄기영*** · 조국환****

Park, Yoon-Sik*, Kim, Ja-Yeon**, Eum, Ki-Young***, and Cho, KookHwan****

Abstract

The roadbed reinforcement method, in which a rectangular parallelepiped fiber reinforcement sack is used, is ecofriendly and overcomes the disadvantages of the conventional roadbed reinforcement method. Through large-scale tests, the effects of improving the bearing capacity, stability, and constructability according to the train speed were confirmed. Physical property investigations of the field test were conducted to analyze the conditions of the roadbed. The settlement degree of the site, where the reinforced section and unreinforced section were placed, was measured and analyzed. A rectangular parallelepiped fiber reinforcement sack was laid. Based on the physical properties determined during the field tests, this section was found to be soft ground composed of silt sand with a low bearing capacity. In addition, through comparison and analysis of the degree of settlement caused by the laying of rectangular parallelepiped fiber reinforcement sack, the dynamic vertical displacement of rails and sleepers decreased by at least 84%. It was shown that the track stability improved when the rectangular-parallelepiped fiber reinforcement sack was laid, which reduced the dynamic behavior along and improved the track support.

Key words : Fiber Reinforced Bag, Soft Ground, Reinforcement Method, Geotextile, Dynamic Vertical Displacement

요 지

직육면체 섬유보강재를 이용한 노반보강공법은 친환경적이며 기존 노반 보강 기술의 단점을 보완한 공법이다. 실험을 통하여 열차 속도에 따른 지지력 향상 효과, 안정성 및 시공성이 검증되었다. 검증된 자료를 바탕으로 자갈의 세립화, 뜯침목 및 침묵균열이 발생한 기존선 구간에 직육면체 섬유보강재를 부설하였다. 노반의 기본 물성시험을 실시하였으며, 보강단면과 비보강단면의 현장부설에 따른 침하량을 비교·분석하였다. 직육면체 섬유보강재 부설 후 열차운행에 따른 침하량을 비교분석한 결과, 레일 및 침목의 수직 변위량이 최대 84% 감소되었다. 이는 직육면체 보강재의 보강효과로 인해 궤도 지지력이 향상되어 궤도의 안정성을 향상시키는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 섬유보강재, 연약지반, 보강공법, 토목섬유, 동적수직변위

*정회원, 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 박사과정(E-mail: parkys0710@kr.or.kr)

Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Railway Construction Engineering, Seoul National University of Science & Technology

**한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부 선임연구원

Senior Researcher, Department of Advanced Railroad Civil Engineering, Korea Railroad Research Institute

***교신저자, 정회원, 한국철도기술연구원, 첨단궤도토목본부 수석연구원(Tel: +82-31-460-5866, Fax: +82-31-460-5000, E-mail: kyeum @krii.re.kr)

Corresponding Author, Member, Chief Researcher, Department of Advanced Railroad Civil Engineering, Korea Railroad Research Institute

****정회원, 서울과학기술대학교 철도전문대학원 교수

Member, Professor, Dept. of Railway Construction Engineering, Graduate School of Railway, Seoul National University of Science & Technology

1. 서론

집중호우 자갈도상 궤도는 초기 부설비용이 콘크리트 궤도에 비해 비교적 저렴하나 연약지반 및 저성토 구간에서의 열차 반복하중에 의한 자갈의 세립화, 분니발생 등과 같은 궤도의 안정성을 위한 유지보수 비용이 지속적으로 요구되는 단점이 있다. 철도노반의 지지력 저하는 궤도틀림 및 뜬침목, 콘크리트 도상의 균열을 유발 시키는 주요 원인 중 하나다. 이러한 현상은 열차의 주행 안정성을 위협하며 보수작업으로 인한 유지보수 비용을 발생시키고 궤도 틀림을 유발하는 주요 원인으로서의 문제점을 발생시키고 있다. 이러한 열차의 주행 안정성에 심각한 피해를 초래할 수 있는 원인을 해결하기 위해 토목섬유를 사용한 지지력 향상 공법은 꾸준히 연구되고 있다. 현재 토목섬유는 국내외 연약지반 및 토목구조물을 보강하는 역할로 사용되고 있으며, 토목분야의 지속적인 발전으로 인해 연약지반 위에 도로 및 철도 등과 같은 교통 시설물이 건설되거나 대형구조물이 건설되는 경우가 많아지고 있어 효율적이고 경제적인 지반 개량 공법이 많이 사용되고 있다. 토목섬유는 시공방법이 간단하고 타 공법에 비해 공사시간을 단축시킬 수 있으며, 연속성 및 인장력을 이용하여 지지력 확보 및 부등침하 등을 경감시키는 목적으로 사용되고 있다(Kim and Kang, 2009). Haliburton and Barron (1983)은 토목섬유 부설에 따른 지반의 파괴면 위치가 변화하는 것을 실험결과로 보여주었고, 토목섬유 보강토 기초지반을 다층구조로 간주하는 경우, 경감된 응력이 연약층에 전달된다고 하였다. Barenberg (1980)의 실내모형실험 결과와 같이 토목섬유의 효과는 연약지반의 변형을 구속하는 것에 의해 기초지반의 파괴형태를 국부파괴로부터 전반 전단파괴로 변화 시키는 것에 의해 설명하였다. 또한 Schlosser 등이 제안한 보강토 기초의 파괴형태는 Fig. 1과 같이 표현된다. 이 파괴모델은 보강재의 보강효과가 보강재위치에서 전달되어 오는 가상 기초폭의 증가(ΔB)량에 의하여 설명된다. 또한 Fig. 2와 같이 하중-침하곡선으로부터 보강재 보강에 따른 보강지반 지지력증가는 다음과 같은 무차원 형태로 표시할 수 있다. 본 논문에서는

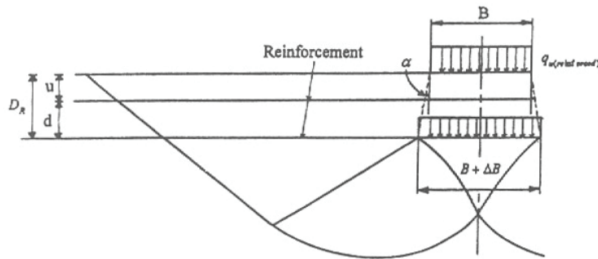


Fig. 1. Failure Mechanism of Reinforcement Soil Foundation (Schlosser et al., 1983)

실대형실험(Hong et al., 2019)으로 지지력향상효과가 검토된 직육면체 섬유보강재를 철도현장에 부설하여 부설단면과 대조군단면의 침하 분석을 통하여 지지력 향상 여부와 개발 공법의 현장 적용성을 평가하였다.

$$BCR_u = q_{u(R)}/q, \quad BCR_s = q_{(R)}/q \quad (1)$$

BCR_u : 극한지지력에 대한 지지력비

BCR_s : 기초의 임의침하량 s 에 대한 지지력비

$q_{(R)}, q$: $s \leq s_u$ 일 때, 동일한 침하에 대한 보강재 보강, 비보강시 기초의 단위면적당 하중

$q_{u(R)}, q_u$: 보강재 보강, 비보강시 기초의 극한지지력

2. 노반보강공법 개요 및 현장계측

2.1 직육면체 섬유보강재를 이용한 노반보강 공법

토목섬유는 외력에 의한 인장력(Tension)이 발생하고 단위길이당의 인장력에 의해 채움재에 부가적인 구속응력이 각각 발생하게 된다. 이는 구속력으로 인한 응력을 추가적으로 유발시키며 이로 인하여 내하능력의 증진을 위한 점착력과 내부마찰력을 증가시켜 전단강도에 의한 지지력을 향상시키며 외력에 대한 안정성을 지니게 된다. 직육면체 섬유보강재를 이용한 노반보강 공법은 이러한 이론적 배경을 기준으로 설계되었으며 기존 지오텍스타일 백으로 보강하는 공법과 달리 내부에 트러스밴드, 내부격벽과 지반이 만나는 면적을 넓히고 고정장치로 단면을 폐쇄하여 지반이 완전히 구속된 상태를 리프트밴드를 이용하여 현장에 부설 가능하도록 설계되었다(Eum et al., 2018). 섬유보강백(A) 간의 결속은 따로 하지 않고 내부에는 쇄석 및 토사 등 유용토를 전체 용량의 120%가량을 채운 후 인력다짐을 수행, 고정밴드를 이용하여 섬유보강백을 고정하였다. 성형을 마친 보강백은 이동시 리프트 밴드와 트러스밴드로 모양이 유지된 채로 시공이 가능하여 공기절감과 균일한 다짐도를 기대할 수 있으며 용도에 따라 크기와 높이 조절이 가능하다. 기존 디자인의 장점을 극대화시키기 위해 철도현장 적용 설계를

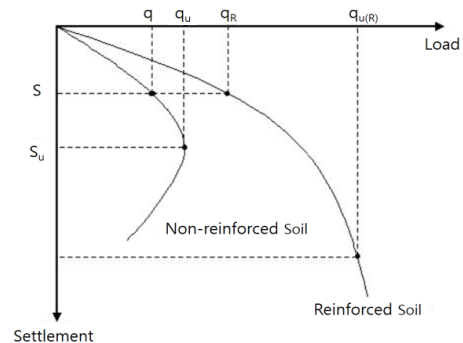


Fig. 2. Load-settlement Curves of Reinforced and Non-Reinforced Soil (Das, 1995)

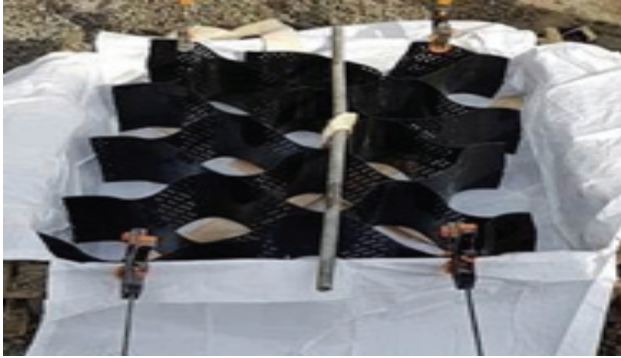


Fig. 3. Rectangular-Parallelepiped Fiber Reinforcement Sack

하였다. 내부격벽은 플라스틱 재질로 중앙부와 외각 4방향으로 나누어 설계되었으나 철도현장에서의 시공성, 강도 증진, 측방 배수 및 지지력 향상 등을 고려하여 Fig. 3과 같이 토목섬유의 내부격자를 이용하여 직육면체 섬유보강재 내부를 수개로 나누어 제작하였다. 3차원 형태로 제작된 복합체를 이용하여 중심부의 선형홀이 변형하며 내부 채움재와 결합하므로 채움재와의 마찰력을 극대화하며, 접점부위의 결합력이 우수해 노반의 다짐작업을 충분히 수행할 수 있고, 측방배수가 원활한 장점이 있다. Fig. 4는 직육면체 섬유보강재를 부설하는 모습으로, 사전 제작이 가능함으로서 섬유보강재는 트롤리를 사용하여 열차 차단시간 내에 작업이 완료될 수 있도록 현장 부설 부근에 적재가 가능하며 침목 및 골재 제거 작업이 완료되면 준비된 섬유보강재를 신속하게 부설이 가능한 장점이 있다.

2.2 현장부설구간 선정

직육면체 섬유보강재 부설구간은 운행 중인 기존선 ○○역 단선구간으로, Fig. 5와 같이 지반의 지지력이 낮아지며 침목의 불균형이 발생하고, Fig. 6과 같이 열차의 반복하중으로 인한 자갈의 세립화로 인해 분리가 진행되어 있으며 뜬침목이 확인되어, 궤도의 지지력 저하구간으로 선정하였



Fig. 5. Settlement of Sleeper



Fig. 4. Construction Site Being Installed

다. 본 지형은 절토구간으로, 우측사면에는 경사가 높은 산으로 이루어져 있으며 좌측사면아래 하천이 흐르는 지형적 특성으로 인해 열차 반복하중에 의한 자갈의 세립화, 콘크리트 침목의 균열 및 뜬침목이 발견되어 주기적인 유지보수를 필요로 하는 구간이다. 직육면체 섬유보강재 현장부설구간은 Figs. 5, 6과 같이 침목의 불균형과 분리현상이 심한 35 m 직선구간을 선정하였다.

2.3 계측시스템 구축 및 측정방법

본 구간은 무궁화, 디젤 견인 새마을, 화물열차가 운행 중인 여객화물혼용선 구간으로 Table 1은 현장측정에 사용된 계측기 항목으로서 계측 주파수는 응답치의 신뢰성을 높이기 위해 수집율을 계측빈도 5 kHz (5,000 sample/sec)로 설정하였다.

현장 측정을 위한 센서는 레일 및 침목의 동적 수직변위를 측정하기 위한 변위계(LVDT)를 사용하였으며, 직육면체 섬유보강재를 이용한 노반보강 공법 적용 전후의 레일 및 침목과 궤도의 동적 수직 변위 분석을 통해 궤도의 안정성을 확인하고자 하였다.

변위계는 고정용 말뚝을 부설하고 말뚝에 고정 지그를 설치 후 레일 및 침목 변위를 측정하였다. 레일 및 침목의



Fig. 6. Mud-pumping Occurrence

Table 1. Measurement Item

	Quantity	Specification	Designation	Data collection
Rail vertical displacement	1 ea (A Section) 1 ea (B Section)	<ul style="list-style-type: none"> Measuring range: 10 mm Resolution: 0.001 mm Allowable temperature range: -10~60 °C 	LVDT	5 kHz, 5,000 Sample/sec
Sleeper vertical displacement	1 ea (A Section) 1 ea (B Section)	<ul style="list-style-type: none"> Measuring range: 25 mm Resolution: 0.001 mm Allowable temperature range: -10~60 °C 		

동적 수직변위 측정에 선정된 레일 변위계는 측정범위 10 mm, 침목변위계는 25 mm의 측정범위로 설정하였다. Data Logger 데이터를 사용하여 동적데이터를 조합하여 보강단면과 대조군 단면을 동시 측정할 수 있도록 시스템을 구축하였다.

Fig. 7은 현장에 설치된 계측기의 위치도를 보여주고 있다. 전체 35 m 구간은 앞서 설명했던바와 같이 궤도의 지지력이 저하된 구간으로, 전체 구간 중 20 m (B단면)에 직육면체 섬유보강재를 현장 부설하였다. A단면은 대조군단면으로, B단면과 마찬가지로 자갈의 세립화와 침목의 균열 등이 확인되었다. 각 단면의 레일 및 침목에 설치된 변위계는 총 4개이며 A단면의 설치위치는 섬유보강재가 부설된 위치로부터 15 m 떨어진 곳으로(초록색 침목) 섬유보강재로 인한 지지력 향상효과가 전달되지 않도록 하였다. B단면의 계측기는 섬유보강재 설치 구간의 가운데 지점(빨간색 침목)으로 선정하였다. A단면과 B단면의 부설 전 계측데이터는 A와 B로 표기하며 부설 후 계측데이터는 A'와 B'로 표기하였다. 본 연구에서는 궤도하부 상부노반에 직육면체 섬유보강재를 이용한 노반보강을 실시하여 A, B단면에서의 침하량을 레일과 침목에서 측정하였고, 이를 이용하여 보강재의 지지력향상 효과를 검토하고자 한다.

3. 상부노반 물성 시험 및 수직변위 측정

3.1 기본 물성시험 결과

일반적으로 자갈도상에 사용되는 자갈과 상부노반에 사용되는 다짐재료는 철도설계기준(8)에서 사이즈와 입도분포, 다짐도를 제시하고 있다.

포, 다짐도를 제시하고 있다.

자갈 및 콘크리트궤도에서 상부노반의 다짐은 최대건조 밀도 95% 이상, 노반의 다짐은 최대건조밀도의 90% 이상을 만족하여야한다(KR, 2015). 이에 측정구간의 상부노반 기본 물성시험 및 다짐도를 평가하였다.

상부노반의 입도분포 분석 결과 Fig. 8과 같이 곡선이 완만하고 흙 입자가 크고 작은 것이 골고루 분포되어 있으므로 본 구간은 입도분포가 양호한 재료를 이용하여 부설된 것으로 나타났다. 흙의 공학적 분류법인 통일 분류법에 의한 원지반 토시는 Tables 2와 3의 결과와 같이 NO4.체 통과율이 72.6%를 보여 제 1문자는 S(모래)로 판단되며, 소성지수(7.6%)와 액성 한계(31.3%)를 이용하여 소성도표에 적용하였다. 제 2문자는 실트질을 함유하고 있는 흙(M)과 점토질을 함유하고 있는 흙(C)를 구분하는 A선에 있다. 정확한 흙의 분류를 위해 AASHTO분류법(AASHTO, 1975)을 수행하였으며 비교 결과, 군지수는 12 이하로 점토질실트 M으로 구분되어 SM으로 분류되었다. 또한 들밀도 시험 분석 결과, 흙의 함수비는 24.25%로 측정되었으며 흙의 최대건조단위중량은 19.47 kN/m³, 흙의 건조단위중량은 15.842 kN/m³로 측정되어 다짐도 81%로 나타났다. 상부노반의 입도분포와 AASHTO분류 결과는 기준에 만족하였다. 그러나 분니 발생으로 일정구간에 궤도와 침목처짐등이 발생하고, 설계하중보다 큰하중이 반복적으로 작용하면서, 상부하중의 지지력이 낮아져, 상부노반의 다짐도는 기준에 못 미치는 것으로 판단된다. 본 구간은 유지보수가 잦은 구간으로 상부노반의 다짐도 확보를 위해 상부노반에 직육면체 보강재를 설치하고, 자갈의 재부설을 통해 자갈궤도의 지지력을 확보하고자 하였다.

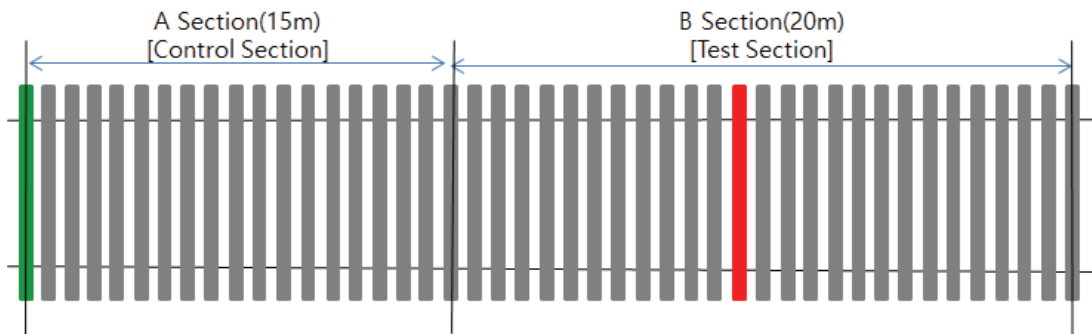


Fig. 7. Sensor Installation Location

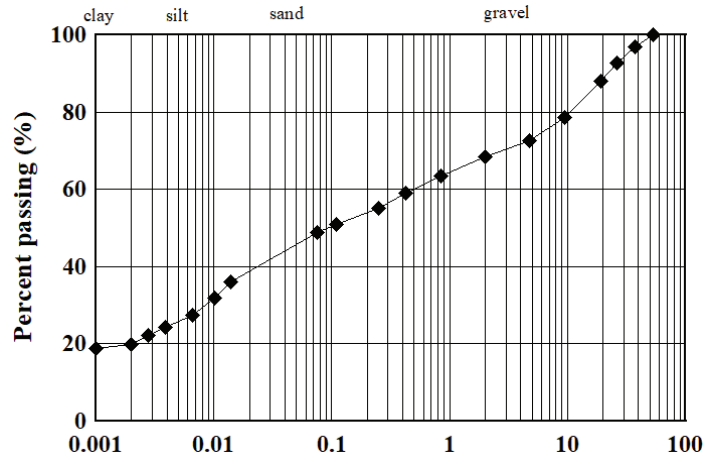


Fig. 8. Particle Size Distribution - Log Scale

Table 2. Particle Size Distribution

Particle size	Maximum Particle Size	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200	D60	D30	D10
Unit	mm	%	%	%	%	mm	mm	mm
Result	53	72.6	68.3	58.9	48.7	0.504	0.009	-
Test Method	Unified Soil Classification System							

Table 3. Physical Properties of Field Materials

	Test Item	Unit	Result	Remark
Existing Grade	Density	kN/m ³	27.01	
	Granularity	-	Particle Size reference	
	Liquid Limit	%	31.3	
	Plastic Limit	%	23.7	
	Maximum Dry Density	kN/m ³	19.47	Modified Proctor Test D

3.2 레일 수직변위 측정결과

레일변위는 A, B단면으로 나누어 계측하였고, B단면에 보강재 설치 전후에 따라 A, A', B, B'로 구분하여 표시하였다. Fig. 9는 B단면에 직육면체 섬유보강재 부설 전후에 따른 A단면에서 열차 운행 시 레일 동적수직변위의 최대값을 나타내었다. 측정열차는 무궁화, 새마을, 화물열차로 총 10대를 계측하였고, A, A'단면에서는 거의 비슷한값인 평균 -5.542 mm의 동적 수직변위값이 측정되었다. 또한 측정된 레일 수직변위의 최대값은 ± 0.37 이내로 최대값이 측정구간에 걸쳐 비슷한 값이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 궤도하부 상부노반의 전반적인 다짐도 및 궤도 지지력 저하를 나타낸다. 또한 B단면에 직육면체 섬유보강재 부설로 인한 지지력향성 효과는 A단면에 영향을 주지 않는 것으로 분석되었다.

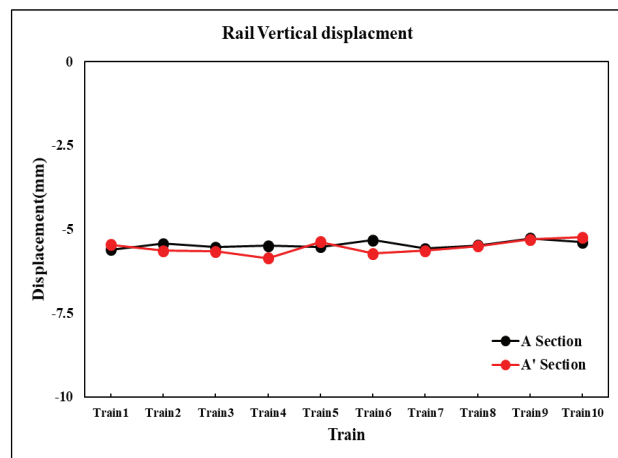


Fig. 9. Rail Vertical Displacement of A and A' Section

Fig. 10은 B단면에서 열차 운행 시 레일 동적수직변위의 최댓값을 나타내었다. 측정열차는 A단면과 동일하게 무궁화, 새마을, 화물열차로 총 10대를 계측하였고, 직육면체 섬유보강재 보강전 단면인 B단면에서는 평균 -5.61 mm의 동적 수직변위값이 측정되었다. 이후 직육면체 섬유보강재 설치 후 단면인 B'단면의 레일 수직변위량은 평균 -1.04 mm로 약 83%의 변위가 감소하였다. 이는 직육면체 섬유보강재 부설로 인해 상부노반의 지지력이 향상되어 레일의 탄성 변위가 감소한 것으로 확인할 수 있다.

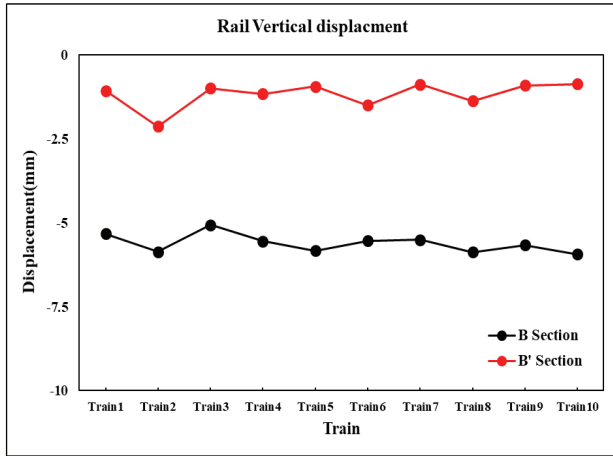


Fig. 10. Rail Vertical Displacement of B and B' Section

3.3 침목 수직변위 측정결과

침목 수직변위도 레일과 동일하게 A, A'단면, B, B'단면으로 나누어 계측하였다. Fig. 11은 B단면에 직육면체 섬유보강재 부설 전후에 따른 A, A'단면에서 열차 운행 시 침목 동적수직변위의 최댓값을 나타내었다. A, A'단면에서 침목 수직변위는 레일 수직변위와 비슷한 -6.04 mm의 동적 수직 변위값이 측정되었다.

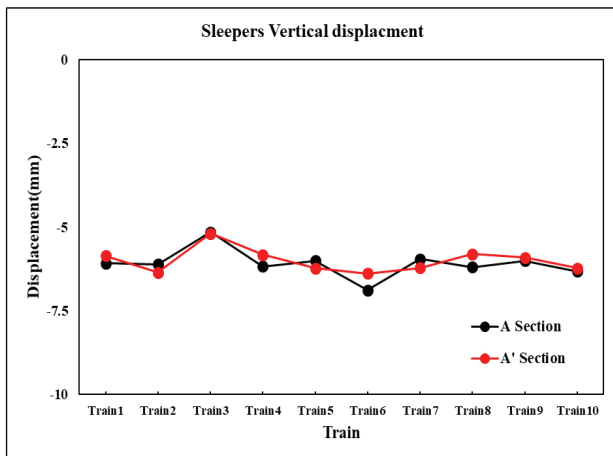


Fig. 11. Sleeper Vertical Displacement of A and A' Section

Fig 12는 B, B'단면에서 열차 운행 시 레일 동적수직변위의 최댓값을 나타내었다. 직육면체 섬유보강재 보강전 단면인 B단면에서는 평균 -6.06 mm의 동적 수직변위값이 측정되었다. 이후 직육면체 섬유보강재 설치 후 단면인 B'단면의 레일 수직변위량은 평균 -1.04 mm로 약 83%의 변위가 감소하였다. 이는 직육면체 섬유보강재 부설로 인해 상부노반의 지지력이 향상되어 침목의 탄성 변위가 감소한 것으로 확인할 수 있다. 열차 속도 및 열차의 하중에 따라 레일과 침목의 수직 변위값은 다르지만 전반적으로 수직변위값의 감소를 보여준다. 이는 섬유보강재 보강으로 상부노반 지지 강성이 향상되어 궤도의 안정성이 향상되었음을 보여준다.

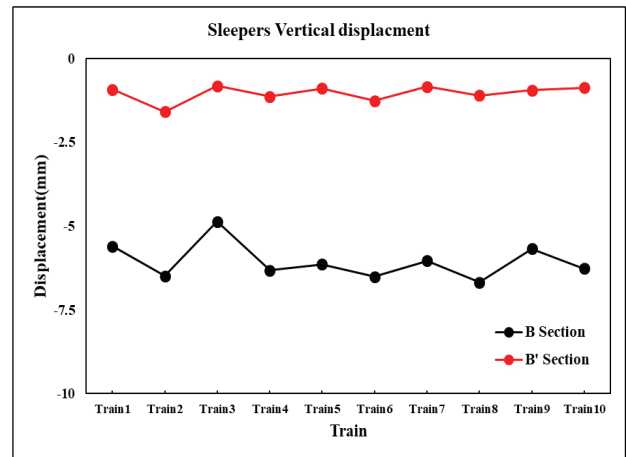


Fig. 12. Sleeper Vertical Displacement of B and B' Section

4. 결론

본 논문에서는 운행 중인 기존선 ○○구간에 직육면체 섬유보강재를 이용한 노반보강 공법을 현장적용 하였다. 보강공법 적용 전 상부노반의 기본 물성시험 및 다짐도를 실험하였으며 직육면체 섬유보강재 부설에 따른 지지력 향상을 레일 및 침목의 수직변위를 측정하여 비교·분석하였다.

- (1) 상부노반의 기본 물성시험 분석 결과 입도분포가 양호한 SM으로 판단되었다. 흙의 건조단위중량은 15.84 kN/m³, 최대건조단위중량은 19.47 kN/m³로, 다짐도 81%로 나타났다.
- (2) A, A'단면(대조군 단면)에서 레일과 침목의 수직변위 측정결과, 직육면체 섬유보강재 부설에 따른 영향이 거의 발생하지 않음을 확인하였다.
- (3) B, B'단면은 직육면체 섬유보강재를 20 m 구간에 설치한 단면으로, 설치 전후 레일과 침목의 수직변위를 측정한 결과 직육면체 섬유보강재 부설 전 대비 약 79% ~ 84% 정도의 감소율을 확인할 수 있었다.

이는 섬유보강재 부설로 인한 상부노반의 지지력 향상, 궤도의 안정성이 확보되었음을 나타낸다.

- (4) 직육면체 섬유보강재를 이용하여 상부노반을 보강하는 경우 사전제작으로 짧은 열차 차단 시간내에 시공이 가능하고, 노반 및 궤도의 균일한 지지력 향상을 기대할 수 있는 것으로 나타났다. 궤도의 동적거동이 줄어들고, 열차의 주행안정성 향상으로 유지보수비용 절감에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 지원(과제번호: PK2004B2J)로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (1975). *Guidelines for the hydraulic design of culverts*.
- Barenberg, E.J. (1980). *Design procedures for soil fabric-aggregate systems with Mirafi 500X fabric*. University of Illinois at Urbana Champaign.
- Das, B.M. (1995). *Principles of foundation engineering* (3rd ed.). Boston, PA, USA: PWS.
- Eum, K.Y., Lee, S.H., Lee, C.G., Hwang, S.J., Hong, G.C., Park, B.H. et al. (2018). *Fiber reinforcement bag of rectangular parallelepiped type having double inner partitions for improving filler interlocking*. Korea Patent No. 10-2018-0123294.
- Haliburton, T.A., and Barron, J.V. (1983). *Optimum-depth method for design of fabric-reinforced unsurfaced roads*. Transportation Research Record 916, pp. 26-32.
- Hong, K.C., Eum, K.Y., Kim, J.Y., and Kim, D.K. (2019). Real-scale accelerated testing to evaluate roadbed reinforcement effect by using rectangular-parallelepiped fiber reinforcement sack. *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 22, No. 11, pp. 888-895.
- Kim, Y.M., and Kang, S.G. (2009). The analysis of bearing capacity behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand over a soft clay by numerical method. *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 8, No. 3, pp. 1-7.
- Korea Railway Network Authority (KR). (2015). *Rail design standard (Roadbed)*.
- Schlosser, F., Jacobsen, H.M., and Juran, I. (1983). Soil reinforcement: General report. *Proceedings of 8th Eur. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg. (ECSMFE)*, Balkema, Helsinki, Finland, pp. 83-103.

Received October 22, 2020

Revised October 23, 2020

Accepted October 26, 2020