한국철도학회논문집
제9권 제1호 2006년 ▮ pp. 69-75

연약노반상에서의 토목섬유 적용에 따른 보강효과 분석

Analysis of Reinforcement Effect with Geotextile types on Soft Ground

이진욱† · 최찬용* · 이성혁**
Jin-Wook Lee · Chan-Yong Choi · Seong-Hyeok Lee

Abstract

In this study, Several types of geotextile was used on the selected track-bed. The use of geotextile prove a economical and efficientmean to prevent the problem of mud-pumping and settlement. Field testing sections from Mock-haeng to Dong-ryang in the Chungbuk lines in Korea were selected to investigate in current condition the of track and roadbed. This testing site was divided into 5 sections. In the four sections, different types of geotextiles were installed. In order to estimate for performance of the reinforced section with geotextiles on the soft ground, four different geotextiles were installed and compared with no reinforced section. Also, after the installation, mud-pumping, settlement of elastic or plastic sleeper, failure of track, wheel-loads, and earth pressures were investigated. The following is the summaries from the field tests. As a conclusion, According to naked eyes investigation, mud pumping didn't happen at reinforced sections, but no reinforced section was happen to a top of track for 6 months. And Elastic displacements at the reinforced and no reinforced section were about 30.7% and 73.8%, respectively. Also, It was found that plastic displacement in reinforced section was retrained about 50% more than that in no reinforced section.

Keywords : Geotextile(토목섬유), Soft Railroad Roadbed(연약노반), Conventional railroad(일반철도), Settlement(침하)

1. 서 론

흙노반의 경우는 사용년수의 경과에 따라 도상자갈의 마모에 의한 세립분 발생, 노반면의 지지력 부족에 의한 도상자갈의 관입 등의 현상이 필연적으로 발생하게 되고 동절기 동결융해에 의한 노반 팽창현상 등의 노반 연약화 현상이 많이 발생하게 된다. 이러한 경우 열차 반복하중에 따라 분니발생, 도상자갈 관입 등으로 인해 도상자갈 침하, 궤도파괴 등이 발생되어 열차주행에 지장을 초래할 뿐만 아니라 열차의 안전운행에 위협을 가하게 된다.

또한 열차가 지속적으로 통과됨에 따라 도상자갈입자의 마모와 파쇄가 발생되고, 마모/파쇄입자 혹은 외부로부터 유입된 불순물이 도상의 공극을 과다하게 채우게 되어 도상부의 배수를 방해한다. 이와 같은 도상자갈의 열화 현상이 누적되어 소성 침하, 궤도틀림 진행속도가 빠르게 진행되어 선형 정정작업만으로는 보수를 할 수 없는 상황에 이르게 된다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 영업선상에서 열차운행에 지장을 주지 않는 연약노반 대책공법을 선정하였다.

본 논문에서는 노반연약화로 문제가 심각한 연약노반에 대해서 시공속도와 효율성이 뛰어난 토목섬유로 보강했을 때 실제 열차주행시의 침하, 토압, 분니억제 효과 등을 고찰하였다.

현장시험구간은 분니다발 지역이면서 분니와 관련한 유지보수작업이 많은 개소 약 1,700개소 중에서 3개 현장을 선정한 후 정밀조사를 통해 선로상태, 현장 접근성 등을 고려하여 충북선 목행~동량 구간을 선정하였다.

2. 철도노반의 침하현상 및 토목섬유 노반보강

2.1 철도노반 침하현상

표 1 에서와 같이 철도노반에서 발생되는 침하는 원지반 침하와 노반 침하로 구별된다. 원지반 침하는 연약 점성토 지반의 압밀침하로서 소성적 특성이 강하여 하중을 제거하

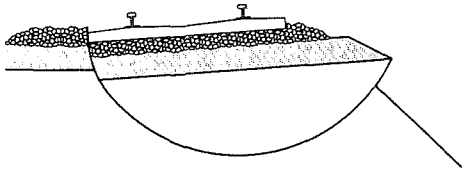
† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원 궤도노반연구팀 팀장, 선임연구원 E-mai : jinugi@krri.re.kr
TEL : (031)460-5304 FAX : (031)460-5319
* 정회원, 한국철도기술연구원 궤도노반연구팀 선임연구원
** 정회원, 한국철도기술연구원 연구시설건설사업단 단장, 책임연구원

여도 변형이 회복하지 않으며, 상당히 장기간에 걸쳐 계속되는 특징을 가지고 있다. 또한, 원지반이 연약한 사질토의 경우에는 흙쌓기 등에 의해 상재하중이 연약층을 압축함으로써 기초 지반중에 활동면을 발생시켜 급격히 파괴되는 것으로서 가장 위험한 침하이며, 침하의 진행도 돌발적이고 단시간에 발생되는 특징이 있다.

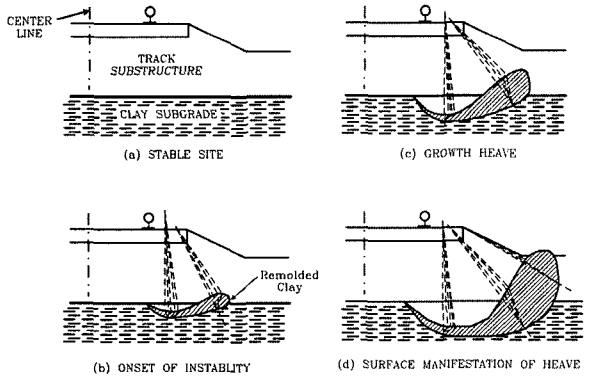
노반 침하의 경우에는 흙쌓기 재료의 부적합, 다짐부족 등에 의해 발생되는 수축 또는 압밀침하가 대부분이다. 이 밖에도 흙쌓기 부분의 파괴와 활동에 의한 침하, 매립의 불완전에 의한 점진적인 전단파괴, 땅깍기에 의해 노출된 원

표 1. 노반 연약화 현상의 분류

A. 궤도	B. 노반	C. 원지반
1) 궤도틀림 2) 도상자갈 파쇄 3) 궤도구성품의 열화 4) 도상분니 5) 레일의 파단 및 결함	1) 노반의 균열, 변형 2) 배수불량 3) 전단파괴 4) 점진적 전단파괴 5) 과도한 소성변형 6) 압밀침하 7) 도상자갈의 혼입으로 인한 분니발생(노반분니) 8) 동결/융해에 의한 강도저하 9) 함수비 변화에 의한 팽창 및 수축	1) 원지반 침하 2) 함몰 3) 활동파괴



(a) 전단파괴 형태



(b) 점진적 전단파괴 형상

그림 1. 전형적인 노반 파괴형상(Li. Dingqing, 1994)

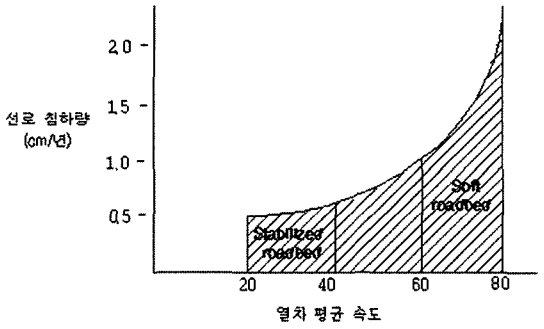


그림 2. 노반상태에 따라 선로의 침하량(鐵道總合技術硏究所 編, 1996)

지반의 토질이 현저히 풍화되어 침하가 발생되는 경우가 있다.

일본철도총합기술연구소의 연구결과에 의하면 침하 발생의 주요인은 노반이 문제이며, 양호한 노반(단일입경이 아닌 사질토)의 경우에는 노반/노상 침하비가 0.13~0.19이지만, 불량노반(이암, 풍화토 등 점성토)의 경우에는 그 비가 1.3~3.1로 노반의 영향이 대단히 크다는 것을 알 수 있다.

그림 2에 나타낸 바와 같이 불량노반과 양호한 노반별로 구분하여 열차속도에 대한 선로의 침하량을 구해보면 불량노반에서의 침하는 양호한 노반의 경우에 비하여 4배 가까이 크고 노반이 불량할수록 속도의 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

2.2 토목섬유를 이용한 노반 보강공법

토목섬유는 보강, 분리, 필터, 배수의 4가지 기능을 가지고 있으며, 지오그리드는 주로 토구조물이나 지반의 보강에 쓰인다. 또한, 철도노반과 같이 지지력뿐만 아니라 추가적으로 분니 등을 억제하기 위해서는 필터기능을 가진 지오텍스타일(geotextile)과 함께 원지반 상부에 포설된다.

일반적으로 지오그리드의 주요기능은 보강기능으로서 지오그리드의 접점에서 엇물림(Interlocking)현상과 상호작용(Interaction)에 의해 충분한 결합이 이루어진다. 이러한 엇물림 현상은 열차하중에 의해 작용되는 도상자갈의 입자들의 진동이동을 방해하고 연약한 원지반층의 입자들이 노반층으로 관입되어 궤도의 기능을 상실되는 문제를 예방할 수 있다.

지오텍스타일은 부직포로 사용되는 것을 원칙으로 하며, 주요 기능으로는 지속적인 혼합과 입자들의 변위를 억제하고 이로 인해 노반층의 강도 특성을 유지하는 분리와 필터기능이 있다. 또한, 결합되지 않는 공극수의 분리를 허용하고 이 공극수를 적절히 측구로 배출시키며 이에 따라 인접한 지반의 강도를 유지시키는 기능을 한다.

표 2. 철도건설에서 사용되는 지오텍스타일의 최소기준(U.S Army, 1995)

물성	최소요구사항	시험방법
중량, oz/yd	15	ASTM D 3776
구조	부직포	-
그래브 인장강도, lb	350	ASTM D 4632
인장변형율, %	20	ASTM D 4632
펀칭강도, lb	185	ASTM D 4833
유효구멍크기, mm	<0.22 (No. 70 Sieve)	ASTM D 4751
투수계수, cm/sec	0.1	ASTM D 4491
봉합강도, lb	350	ASTM D 1683

표 2 는 미공병단에서 제시한 철도건설시 사용되는 지오텍스타일의 최소요구조건을 나타내었다.

3. 현장시험구간 선정 및 일반사항

3.1 현장시험구간 선정

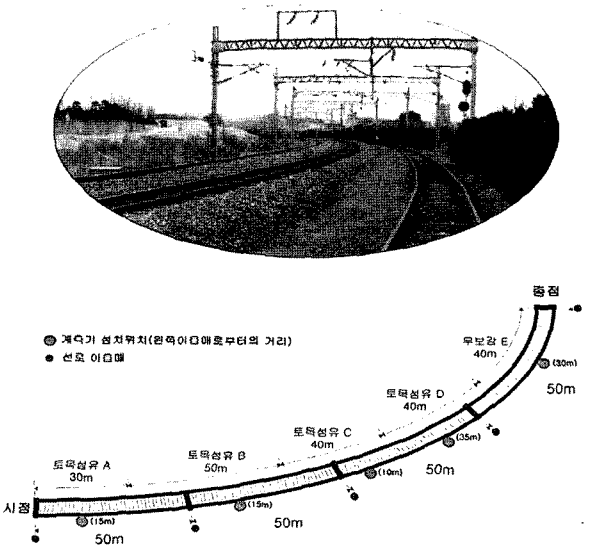
현장시험구간은 철도청에서 입수한 분니현황 자료(1995년~2002년)를 바탕으로 분니가 다발적으로 발생하고 있으며, 이에 따라 분니관련 유지보수작업이 많고 데이터 확보가 용이한 개소를 선정한 결과 충북선 목행-동량간 89㎞ 전후(상선)지점을 현장시험구간으로 선정하였다.

현장시험구간은 분니가 가장 심각하게 발생하고 있는 200m 구간을 각각 다른 종류의 토목섬유를 그림 3(a)와 같이 토목섬유 A, 토목섬유 B, 토목섬유 C, 토목섬유 D를 설치하였으며, 종점방향 40m를 무보강 E 구간으로 설치하였다(이하 Site A, Site B, Site C, Site D, Site E 로 표기하였다).

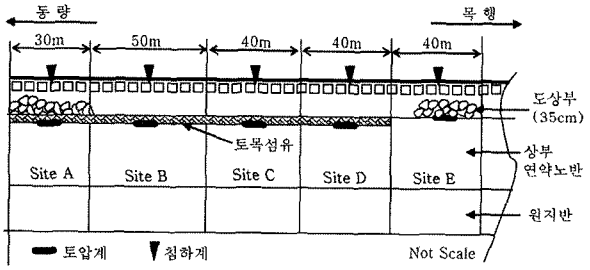
현장시험의 목적은 분니가 다발하고 있는 연약노반에서 토목섬유로 보강한 구간과 보강되지 않는 구간의 분니억제 효과를 관찰하기 위하여 시공되었기 때문에 주로 육안조사와 침목에서의 소성침하를 관찰하였다. 이외에도 각 단면별 토압, 윤중, 횡압, 지오그리드 인장변형율을 측정하였다.

3.2 노반재료의 물리적 특성 및 강성평가

현장시험구간의 노반상태를 알아보기 위하여 레일, 침목, 도상자갈을 제거한 후 노반토를 채취하여 실내시험을 수행하였다. 실내시험은 입도시험, 비중시험, 액·소성 한계시험 등 기본물성시험을 실시하였으며, 시험결과는 표 3 에 나타내었다. 표 3에서와 같이 통일분류법에 의해 대부분의 노반토가 분니가 발생하기 쉬운 소성이 낮은 점토(CL)인 것을 볼 수 있다.



(a) 현장부설시험구간 개략도



(b) 단면별 계측기 위치 및 단면도

그림 3. 현장개략도 및 계측기 설치 단면도

표 3. 현장부설구간에서의 노반토의 물리적 특성

현장부설단면	Site A	Site B	Site C	Site D	Site E
비중(Gs)	2.63	2.64	2.72	2.71	2.70
액성한계(LL)	36.6	33.1	30.6	27.8	31.7
소성한계(PL)	25	25	20.4	20.7	21.6
소성지수(PI)	11.6	8.1	10.2	7.1	10.0
흙의 분류 (USCS)	CL	CL	CL	CL	CL

또한, 현장의 지반강성도를 파악하기 위하여 간이 사운딩 기구의 하나로 많이 사용되고 있는 간이 동적콘관입시험(DCP)을 실시하였다. 그림 4는 현장부설 시험단면 5개소에 대한 각 사이트별 DCP시험결과를 노반깊이별 CBR값으로 환산하여 나타내었다. 그림 4에서와 같이 현장에서 측정된 CBR값은 평균 4~5%의 값으로 실내에서 상대다짐도(Dr)

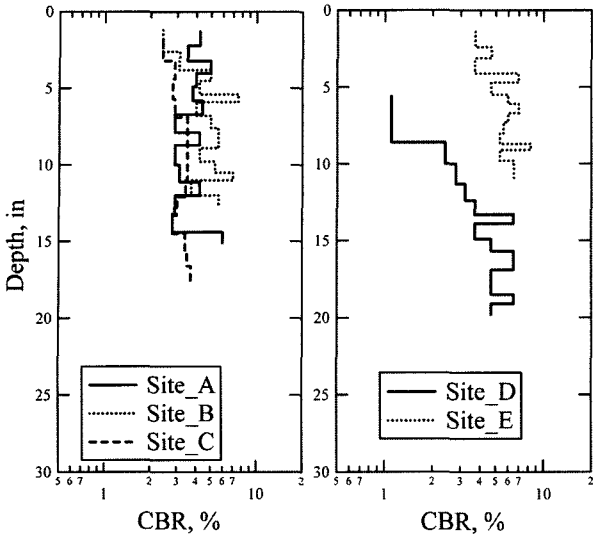


그림 4. 각 단면별 DCP시험결과

95%로 다져진 양호한 지반의 CBR값 8~9% 정도 측정된 결과와 비교할 때 현장의 지반강성도가 상대적으로 매우 약하다는 것을 알 수 있다.

3.3 토목섬유 물성치

현장에 부설된 토목섬유 보강공법은 4가지 형태로 토목섬유의 종류와 포설방법 등에 따라 구분하였다. 일반적으로 분리기능과 필터기능을 가지는 부직포와 보강기능을 할 수 있는 지오그리드로 보강하였다.

· Site A, B, C는 부직포 상단에 지오그리드를 포설하였으며, Site D단면은 지오콤포지트를 포설한 단면이다. 표 4는 현장에 부설된 토목섬유의 물성치를 나타내었다.

표 4에서와 같이 토목섬유는 미국공병단에서 제시한 최소기준을 만족하는 재료로 사용하였으며, 각 단면별로 부직포의 두께와 지오그리드의 인장강도에 따라 시공하였다. 토목섬유의 물성값이 가장 좋은(부직포의 두께, 지오그리드의 인장강도가 큰 재료)곳은 Site C에 사용하였다. Site C 구간에 가장 좋은 재료를 선정한 이유는 현장조건상 곡선구간으로 구조적으로 가장 취약할 개소라 판단되어, 토목섬유 물성을 좋은 재료로 선정하였다.

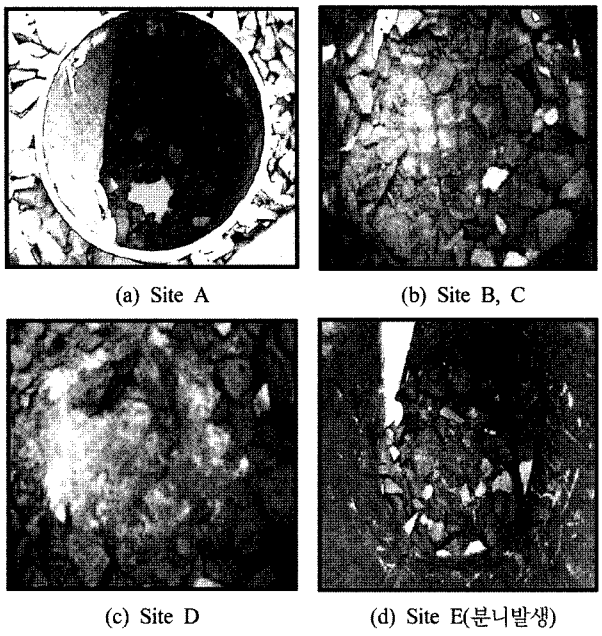
4. 실험결과 및 분석

4.1 현장답사를 통한 육안조사

현장시공 이후 약 10개월 이후(2005년 4월 13일)에 토목섬유로 보강된 단면과 보강되지 않는 단면의 분니억제효과를 관찰하기 위하여 침목과 침목사이의 도상자갈을 제거한 후 사진 1과 같이 관찰하였다. 사진 1에서와 같이 부직포와 지오그리드로 설치한 Site A, B, C의 경우에는 노반 분니가 거의 발생하지 않았으며, Site A의 경우 지하수위가 부직포와 지오그리드 약 2㎝ 정도로 다른 단면보다 높게 위치되어져 있어 지하수에 의한 현탁액이 발생되어 분니와 비슷한 현상이 관측되었다. 지오컴포지트로 시공한 Site D의 경우에는 다른 보강 단면과 마찬가지로 전혀 분니가 발생하지 않았으며, 부직포, 지오그리드, 지오컴포지트 모든 재질이 매우 양호한 것으로 관찰되었다.

표 4. 토목섬유 물성치

	항 목		물 성 치			
			Site A	Site B	Site C	Site D
지오그리드	재질		폴리프로필렌	폴리프로필렌	폴리프로필렌	지오콤포지트
	인장강도(kN/m)		30	40	40	
	중량(N/m^2)		4.5	4.5	5.3	
	신장시 인장강도 (kN/m)	2%(길이/횡)	110/130	140/140	140/140	
		5%(길이/횡)	150/150	280/280	280/280	
	양방향 구멍크기(㎜)		29.7	33	33	
	인장변형율(%)(길이/횡)		12/-	-	11/10	
부직포 Site A Site B Site C / 지오콤포지트 Site D	중량(N/m^2)		2.5	3.0	3.5	11
	인장강도(N)		450	650	800	60kN/m
	인장변형율(%)		50	50	50	11
	수직 투수계수(㎝/sec)		3.9×10^{-1}	3.5×10^{-1}	3.0×10^{-1}	수직 2.4×10^{-1} 수평 1.9×10^{-5}
	두 께(mm)		2.0	2.5	3.0	-
	유효구멍크기(mm)		0.2	0.15	0.12	0.2



(a) Site A (b) Site B, C

(c) Site D (d) Site E(분니발생)

사진 1. 단면별 육안조사결과(2005년 4월 13일)

토목섬유로 보강하지 않은 Site E 경우에는 침목 하단에서부터 약 33㎝의 충분한 도상두께를 확보하고 있음에도 불구하고 침목하단 약 17cm 부근까지 분니가 진행되어 분니진행율이 약 50%에 이르고 있는것을 관찰 할 수 있었다. 이는 현재 분니대책공법으로 가장 많이 사용되고 있는 도상클리너작업과 도상자갈 치환 등의 대책공법은 영구적인 해결방법이 아닌 것으로 사료된다.

4.2 윤중 측정결과

철도의 주행에 관한 역학의 기본으로 이동하는 차량과 고정설비인 궤도간의 작용력으로 윤중을 차상에서 측정하면

표 5. 각 단면별 윤중 측정결과(kN)

단면 / 계측일	Site A		Site B		Site C		Site D		Site E	
	내	외	내	외	내	외	내	외	내	외
6월11일(0)	118	111	110	108	113	103	107	101	101	81
7월6일 (25일 경과)	116	107	116	113	113	110	132	107	104	96

차량의 주행에 따른 선로의 작용상태를 알 수 있으며, 지상에서 측정하면 통과하는 각 차량의 작용력의 크기와 변화량을 알 수 있다. 지상에 대한 윤중 측정은 측점구간을 통과하는 각 차량의 작용력의 크기 변화량으로 침목간 중심에서 각 100㎜ 떨어진 위치의 중립축 45°의 각도를 가지고 8방향으로 스트레인게이지를 부착하여 윤중을 측정한다.

표 5와 그림 5는 계측일 날짜별 화물열차 통과시 단면별 최대 윤중값을 나타내었다. 윤중의 범위는 약 81～132kN의 범위에서 계측되었으며, 정적윤중 110kN보다 약간 상회하는 결과로 내측부가 외측부보다 약 10kN 더 발생되었다. 또한, 토목섬유에 따른 윤중 변화특성은 특별한 경향성을 보이고 있지 않았으며, 전반적으로 Site A에서 Site E로 진행함에 따라 윤중의 크기가 작아지는 경향을 볼 수 있다.

4.3 노반상부에서의 연직 동적토압 결과

노반 상부에서 발생된 동적토압은 시간이력곡선에서 Peak-to-Peak 으로 최대진폭으로 산출하였으며, 그림 6은 날짜별 동적 토압의 최대값을 나타내었다. 그림 6에서와 같이 노반상부에서의 초기 동적토압 범위는 75.4～134kN/m^{2}으로, 시일이 경과됨에 따라 점차적으로 크게 발생하는 경향을 보이고 있으며, Site C 단면에서 가장 크게 토압이 발생하였다. 이러한 이유는 Site C 단면의 경우 다른 단면과

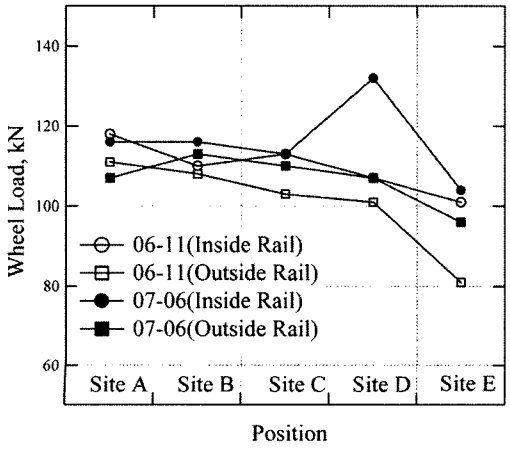


그림 5. 시일경과에 따른 윤중 내·외측 변화

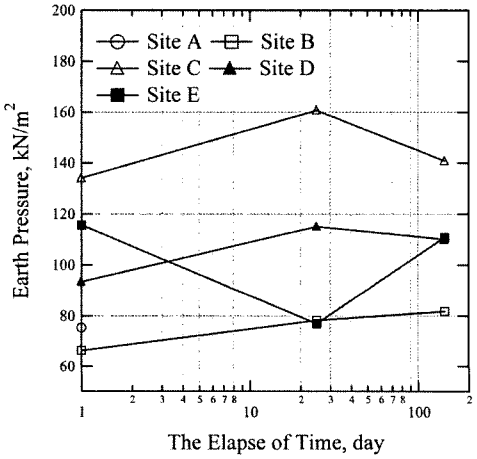


그림 6. 시일경과에 따른 토압변화

달리 곡선부로 인해 횡압이 크게 발생되어 하부에 토압이 크게 발생된 것으로 판단된다. 현장시험을 통해 실제 열차 하중에 의해 노반 상부에 약 160kN/m^2 의 압력이 작용하는 것을 알 수 있었다.

현장에서 토압을 측정한 이유는 토목섬유를 통해 열차 하중이 분산되는 정도를 정량적으로 검토하고자 하였으나, 현장시험에서 발생되는 시공조건, 도상두께에 의한 시공오차, 열차운행조건 등으로 인해 정량적으로 분석하지 못하였다. 따라서, 본 연구에서는 토목섬유로 보강된 단면에서 발생되는 토압의 크기를 계측함으로써 현장에서 발생되는 실제 토압의 크기를 관찰 할 수 있었다.

4.4 탄소성 침하량 측정결과

침하측정은 거치대에 침하계를 설치하여 침목에서 발생되는 탄성침하와 소성침하를 측정하였다. 탄성침하는 토압과 같은 방식으로 열차가 통과할 때 시간이력곡선에서의 최대로 발생된 Peak-to-Peak의 값을 사용하였으며, 소성침하의 경우에는 초기 계측된 값을 제로(zero)하여 시일경과에 따라 회복되지 않는 변형량을 누적하여 소성침하를 계측하였다.

그림 7은 계측 날짜별 탄성침하를 나타내었다. 그림 7에서와 같이 초기 계측된 결과 Site E에서 탄성침하가 가장 크게 발생하고 있으며, 보강된 단면은(Site A, B, C, D) 보강되지 않는 단면보다 상대적으로 적은 탄성침하를 보이고 있다. 시일이 경과됨에 따라 무보강 단면에서는 급격한 침하가 발생되어 8월 18일 이후 1차례 궤도보수 작업을 실시하여 약 20mm의 궤도를 들어 올려 도상자갈 다짐작업을 실시하였다.

그림 8은 현장시험구간에서의 단면별 소성침하량을 나타내었다. 소성침하는 6월 10일 최초로 계측하여 최초 계측일로 부터 약 165일 후인 11월 27일 계측을 종료하였다. 그림 8에서와 같이 장기적인 소성침하량은 무 보강 단면 Site E에서 소성침하량이 가장 크게 발생하였으며, 보강되지 않는 단면보다 토목섬유로 보강된 단면이 약 50%이상의 침하가 적게 발생하였다.

Site D 단면의 경우에는 탄성침하량과 소성침하량이 다른 보강단면보다 상대적으로 가장 작게 측정되었다. 이러한 계측결과, 침하측면을 볼 때 지오콤포지트의 재질이 침하를 억제하는 효과적인 재료인 것으로 사료되나, 현장조건이 단면마다 다르기 때문에 시공된 토목섬유에 대하여 정량적으로 비교 분석하기에는 많은 시험을 실시하여야 할 것으로 판단된다.

표 7. 계측날짜별 소성침하량(mm)

계측일	Site A	Site B	Site C	Site D	Site E
6월 10일	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6월 12일	-0.27	-0.65	-0.41	-0.36	-0.35
6월 18일	-0.99	-2.78	-1.85	-1.84	-2.43
6월 26일	-2.17	-3.59	-2.46	-2.81	-3.43
7월 06일	-2.87	-5.47	-3.89	-4.53	-5.52
8월 18일	-4.40	-7.40	-5.57	-5.95	-9.66
11월 27일	-25.3	-28.73	-26.93	-21.17	-42.80
무보강 단면 대비 침하율(%)	59.1	67.1	62.9	49.5	-

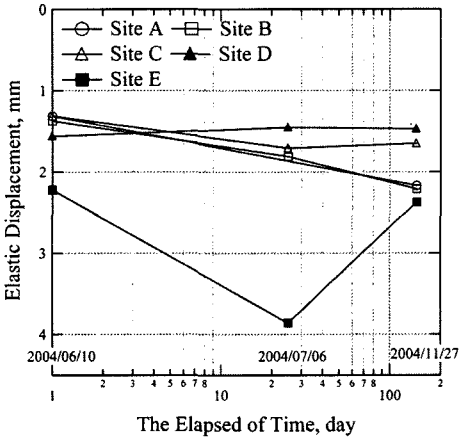


그림 7. 시일경과에 따른 탄성침하의 변화

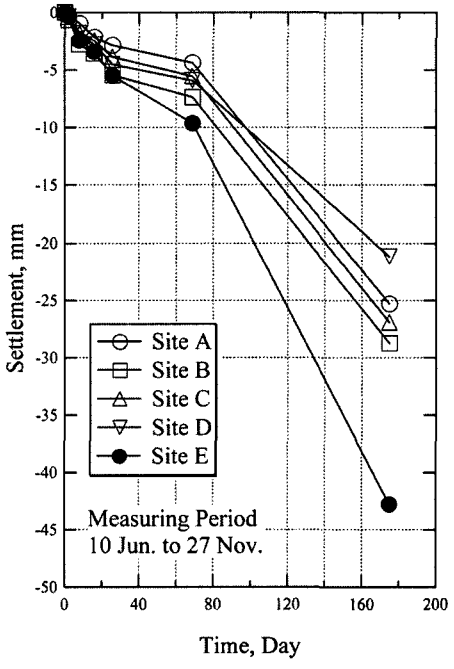


그림 8. 각 단면별 소성침하량

5. 결 론

연약노반상에 토목섬유로 보강된 단면의 성능평가를 하기 위하여 토목섬유 4종류를 포설하여 보강되지 않는 단면과 비교분석하였으며, 실제 열차 통과시 윤중, 침하, 토압 특성을 분석하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

(1) 현장시공 이후 약 10개월 이후 육안조사 결과 토목섬유로 보강된 단면은 분니가 발생하지 않았으나, 보강되지 않는 단면에서는 분니가 침목하면으로부터 약 17㎝까지 발생하여 50% 분니진행율을 보이고 있다.
(2) 분니대책공법의 일환인 도상자갈 치환공법은 1년도 되지 않아 다시 분니가 발생되고 있어 영구적인 보강방법으로는 적합하지 않다.
(3) 현장계측결과 보강단면과 보강되지 않는 단면에서 윤중의 영향은 매우 적으며, 전반적으로 내측부가 외측부보다 약 10kN 정도 윤중이 크게 발생하고 있으며, 윤중 크기는 81～132kN범위로 나타났다.
(4) 현장계측결과 동적토압은 75.4～160kN/m^{2}범위로 나타났다.
(5) 토목섬유로 보강된 단면에서는 계측 1달 후 약 30.7%의 탄성침하가 발생하였으나, 보강되지 않는 단면에서는 73.8%로 약 2배 이상의 침하가 발생하였다.
(6) 소성침하의 경우 보강되지 않는 단면보다 토목섬유로 보강된 단면이 약 50%이상의 침하가 억제되는 것을 볼 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 「유지보수성능향상기술지원사업」의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 실 현장부설시험에 도움을 주신 (주)동운, 메카모아, 삼양사, 특수자재 관계자 여러분께 진심으로 감사말씀 드립니다.

참 고 문 헌

1. Li. Dingqing (1994), "Railway track granular layer thickness design based on subgrade performance under repeated loading", Ph.D. Dissertation, University of Masachusetts.
2. 鐵道總合技術研究所編 (1996), "鐵道强化路盤の合理的設計法に關する研究", (財)鐵道總合技術研究所.
3. Department of the Army & the Air Force (1995), "Engineering Use of Geotextile" TM5-881-8/AFJMAN 32-1030.
4. 심재범 (2000), "토목섬유 시스템을 활용한 철도노반의 보강효과 및 설계기법 개발에 관한 연구", 수원대학교 박사학위논문.
5. 이진욱, 최찬용, 이성혁, 이창렬 (2004), "운행선상의 연약노반 시험부설구간에서의 장기계측을 통한 거동 특성", 한국철도학회 추계학술발표대회.
6. 이진욱, 최찬용 (2005), "토목섬유를 활용한 철도연약노반에서의 보강효과", 2005년도 한국지반공학회 봄학술발표회.
7. 한국철도기술연구원 (1998), "철도강화노반재료 및 지지력 강화방안에 관한연구" 연구보고서.
8. 한국철도기술연구원 (2003), "철도연약노반 강화기술개발 및 구조물과 토공접합부 보강기술개발" 연구보고서.
9. 황선근, 이성혁, 최찬용, 이시한 (2001), "철도노반의 분니현상 해명을 위한 반복 재하 실험", 인천환경토목학술발표회.
10. Coenraad Esveld, 서사범 역 (2003), "최신 철도선로", 얼과알.
11. 伊能忠敏 (1983), "鐵道路盤の噴泥現象の解明とその防止對策", 鐵道技術研究報告, No.1252 (施設編 546号).
12. 運輸省 鐵道局 (1992), "鐵道構造物等設計標準·同解說 土構造物", 鐵道總合技術研究所.