

현장부설시험구간에서의 장기계측을 통한 토목섬유 보강효과 A Study on Reinforcement Effectiveness for Railway Soft Roadbed through Long-Term Instrumentation on the Field Test

최찬용¹⁾, Chan-Yong Choi, 이진욱¹⁾, Jin-Wook Lee

Abstract

In this study, geotextiles was applied on the selected track-bed, which is relatively economical and efficient way to prevent the problem of mud-pumping and settlement.

Field testing sections from Mock-haeng to Dong-ryang in the Chung-La lines in Korea were selected to investigate the state of track and roadbed. And three places were chosen among 1,700 spots where mud-pumping was frequently occurred and maintenance required. At the curved section with radius of 500m between Mock-haeng and Dong-ryang, we divided this testing site into 5 section and 4 different types of geotextile were installed and left the last section with no reinforcement. Total length of the test site was 200m and individual length of each site was 40 m.

In order to understand the state and the strength of prepared roadbed, stiffness and physical properties of the roadbed soil were evaluated and analyzed.

Also, after the installation, mud-pumping, settlement of elastic or plastic sleeper, failure of track, wheel-loads, lateral force and earth pressures were investigated.

주요어(Key words): Soft roadbed, Geotextiles, Mud pumping, Settlement, Earth pressure, Wheel load

1. 서론

기존철도 및 고속철도에서 노반의 역할은 열차의 주행안전성 확보 및 레도상부로부터 전달된 하중을 하부지반으로 적절히 분산하는 기능을 수행하게 된다. 현재 노반재료로서는 양질의 흙을 사용하여 노반을 건설하고 있으나, 기존 노반의 대부분은 준공된 지 상당한 시일이 경과되어 설계당시의 하중조건, 노반조건이 매우 다르게 변화되어 선로유지 및 보수비용이 증대되고 있으며, 열차 운행상의 안전확보에 상당한 지장을 초래하고 있는 실정이다. 일반적으로 흙노반 레도구조에 있어서 도상 발라스트가 노반에 관입됨에 따른 선로의 침하나 노반자체의 연약화에 따른 압축침하 및 도상 발라스트로 향한 이토화된 노반흙이 분출되어 레도보수에 상당한 노력을 기울이고 있는 실정이다.

이러한 분니방지 대책공법중에서 시공성과 효율성이 뛰어난 것으로 판단되는 토목섬유 보강에 대한 실제 열차주행시의 노반의 침하량, 진동특성, 레도침하특성, 토압 분산효과 및 분니억제효과 등을 현장부설시험을 추진하였다.

현장부설구간은 분니다발 지역이면서 분니와 관련한 유지보수작업이 많은 개소 약 1,700개소 중에서 3개 현장을 선정 후 정밀조사를 통해 선로상태, 현장 접근성 등을 고려하여 충북선 목행~동량 구간을 선정하였다. 노반과 레도의 상태를 파악하기 위하여 현장시공시 노반강성평가를 실시하였으며, 현장노반토의 공학적 특성을 검토하였다. 또한, 현장부설 후에는 분니발생여부와 침묵의 탄소성 침하량, 레도틀림, 운중과 횡압 및 토압을 측정하였다.

¹⁾ 한국철도기술연구원 레도토목연구본부 선임연구원, Senior Researcher, Track & Civil Engineering Research Dept., KRRI.

2. 분니 발생과정 및 요인

분니 발생요인은 복합적 요인에 의해 발생하지만 크게 물, 노반 토질, 하중 3요인으로 분류될 수 있다. 노반의 토질요건을 보면 伊能忠敏(1983)의 연구에 의하면 노반토질의 연경도와 입도와 밀접한 관계가 있다고 하였다. 표 1은 분니발생 토질 한계조건을 나타내었다.

표 1 분니 발생 토질한계조건

조 건	기준치	조 건	기준치
액성한계	≥35%	#40번체 통과율	70%
소성지수	≥ 9	$R = \frac{P_{0.075}}{P_{0.45}}$	≥ 0.65

분니의 발생과정은 1) 발라스트의 노반내로관입, 2) 노반토의 리몰딩 및 강도 저하, 3) 노반토의 세립분이 상승하여 열차의 반복하중에 의해 발생하는 동간극수압의 증가에 의해 발라스트의 틈새를 막아 펌프작용이 형성되어 이토가 도상 위로 분출되는 3단계로 이루어진다. 분니발생과정은 그림 1과 같다.

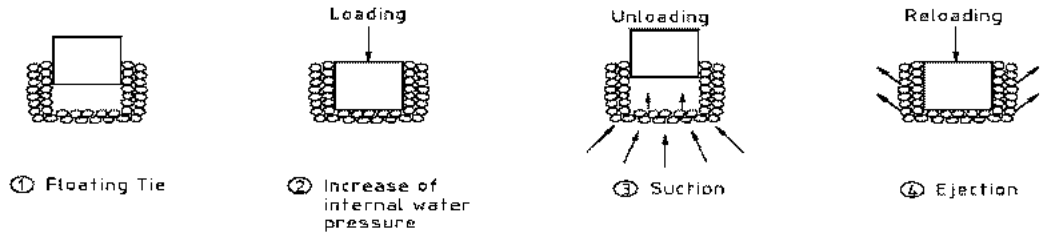


그림 1 침목에 의한 이토 분출과정

2.1 노반보강용 토목섬유

노반보강에 의한 강화공법으로 많이 사용되고 있는 토목섬유는 보강, 분리, 필터, 배수의 4가지 기능을 가지고 있으며, 지오그리드는 주로 토구조물이나 지반의 보강에 쓰이며, 토목구조물이 100년 이상의 설계수명을 갖게 하기 위하여 만들어진 토목 합성제품이다. 표 2는 주요 지오텍스타일의 용도별로 사용기준을 제시하였다. 보강성토나 보강토 옹벽에 사용되는 토목섬유는 인장강도가 크고, 크리프 등을 고려한 장기적인 인장강도가 확보될 수 있는 재료로 성토재와 충분한 마찰저항을 발휘하고, 설치장소의 환경 조건에 대해서도 충분한 내구성을 가지고 있는 것이 바람직하다.

표 2 용도별 지오텍스타일의 사용기준

용도	사용목적	지오텍스타일의 종류				
		직포	부직포	지오네트	지오그리드	복합제품
보강성토	성토의 보강,	○	○	○	○	
	비탈면의 침식	○	○			
	내진성의 향상	○	○	○	○	
보강토옹벽	성토의 보강,	○	○		○	
	토압의 저감,		○		○	
	내진성향상	○	○		○	
성토내 배수	배수에 의한 성토의 안정성		○			○
	성토내의 압밀 촉진,		○			○
	배수와 보강에 의한 성토의 안정		○			
지반보강 (표층 처리)	트래피컬러티의 확보	○	○	○	○	
	지지지반의 보강	○	○	○	○	

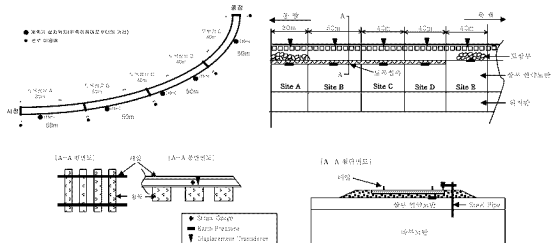
대책공법	토목설계에 의한 강화공법
개요	도구조판이나 노반의 보강에 토목설유를 이용하여 노반의 지지력 증가 및 침하를 억제하는 공법
특징	· 토목설유 기술에는 보강, 분리, 필터 및 배수의 기능으로 노반을 강화하는 공법 · 도상자갈의 노반에 관입감소, 노반의 횡방향 변위 억제, 도상임자갈의 파쇄감소의 장점
시공성	· 도상경화시 시공이 가능하여 시공성은 뛰어나
평가	· 시공성이 뛰어난 · 배수와 필터 기능에 의한 노반분리 억제효과가 뛰어나

토목설유를 이용한 노반강화공법의 단면도

3. 현장 부설시험

현장계측구간은 매년 1회의 크리닝 작업과 빈번한 자갈치기 작업에도 불구하고 지속적으로 분리가 발생하는 지역인 북영~동양 구간으로 현장부설시험 구간은 300~400m의 곡선구간 중 분리상태가 가장 심각한 200m의 구간에 대하여 현장부설시험을 수행하였다. 그림 2에서 보이는 바와 같이 200m 시공구간 중 50m 간격으로 전로이음매가 존재하며 시험 시 이를 고려하여 계측기의 예설 위치를 선정하였다. 토목설유 포설구간은 총 160m로 4개 구간으로 나누어 각기 다른 종류의 토목설유 A, 토목설유 B, 토목설유 C, 토목설유 D를 포설하였으며, 종설방향 40m를 무보강 E 구간으로 선정하였다(이하 Site A, Site B, Site C, Site D, Site E 로 표기하였다).

현장부설시험의 주목적인 일차노반상에서 토목설유의 보강효과에 대한 현장 적용성 및 성능 평가가 위하여 율동, 횡압, 침복에서의 탄소성분변위, 토압 등을 측정하였으며, 계측기는 율동과 횡압측정을 스트레인게이지, 변위계, 토압계를 설치하였다. 그림 2에서와 같이 레일면에 스트레인게이지를 부착하여 율동과 횡압을 측정하였으며, 레일 적하 토목설유 하단에 토압계를 설치하여 열차하중에 따른 토압을 측정하였다. 침하량은 소형침하량과 탄성침하량을 계측하였다.



3.1 노반재료의 물리적 특성

현장계측구간의 노반 흙을 채취하여 노반재료로서 적합조건에 부합하는지를 확인하기 위하여 실내시험 및 현장시험을 수행하였다. 실내시험은 입도시험, 비중시험, 액소성 한계시험을 수행하였으며, 시험결과는 표 3에 나타내었다. 표 3에서와 같이 통일분류법에 의해 대부분의 노반토가 분니가 발생하기 쉬운 소성성이 낮은 점토인 CL로 판명되었다.

표 3 현장 부설시험 구간내 노반토의 실내시험결과

현장부설단면	Site A	Site B	Site C	Site D	Site E	철도설계기준(토공편)
비중(Gs)	2.63	2.64	2.72	2.71	2.70	-
액성한계(LL)	36.6	33.1	30.6	27.8	31.7	35이하
소성한계(PL)	25	25	20.4	20.7	21.6	-
소성지수(PI)	11.6	8.1	10.2	7.1	10.0	10이하
흙의 분류 (USCS)	CL	CL	CL	CL	CL	

3.2 토목섬유 물성치

현장에 부설된 토목섬유는 크게 2 가지 형태로서 그리드와 부직포로 포설하는 방법과 지오클포지트로 포설하는 방법 두 가지로 시공하였다. 각 단면에 포설된 토목섬유는 부직포와 그리드의 인장강도에 따라 구분하였으며, Site A, B, C는 모두 노반 바로위에 부직포를 포설하고 부직포 상단에 그리드를 포설하는 방법으로 시공하였으며, Site D는 지오클포지트를 노반상단에 포설하였다. 표 4은 포설된 토목섬유의 물성치를 각각 나타내었다.

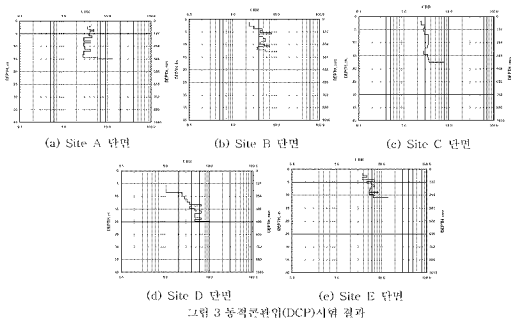
표 4 현장에 부설된 토목섬유의 물성치

		물 성 치				
		Site A	Site B	Site C	Site D	
그리드	항 목	폴리프로필렌	폴리프로필렌	폴리프로필렌	지오클포지트	
	재 질	폴리프로필렌	폴리프로필렌	폴리프로필렌	지오클포지트	
	인장강도(kN/m)	30	40	40	60/40	
	중량(N/m ²)	4.5	4.5	5.3	-	
	신장시 인장강도(kN/m)	2% 신장시(길이/행)	110/130	140/140	140/140	-
		5% 신장시(길이/행)	150/150	280/280	280/280	-
	주요 양방향 구멍크기(mm)	29.7	33	33	-	
신 륙(%) (길이/행)	12/-	-	11/10	-		
용도	연약지반 보강용	연약지반 보강용	연약지반 보강용			
부직포	중량(N/m ²)	2.5	3.0	3.5	1.1	
	인장강도(kN/m)	450	650	800	-	
	인장신도(%)	50	50	50	11	
	투수계수(cm/sec)	3.9×10^{-1}	3.5×10^{-1}	3.0×10^{-1}	수직 2.4×10^{-1} 수평 1.9×10^{-6}	
	두께(mm)	2.0	2.5	3.0	-	
	유효구멍크기(mm)	0.2	0.15	0.12	0.2	

3.3 현장부설단면의 강성도 평가

현장의 지반강성도를 파악하기 위하여 동적콘관입시험(DCP)을 실시하였다. 간이 동적콘관입시험은 해머를 50cm높이에서 자유낙하시키고 원위치 상태 흙의 관입저항을 측정하는 시험으로 지반 표층부의 조사 등 간이 사운딩 기구의 하나로 폭넓게 사용되고 있다.

그림 3은 현장부설시험단면 5개소에 대한 각 사이트별 노상 지지력값을 나타내었다. 그림 3에서와 같이 CBR값이 평균 4~5%의 값을 나타내고 있다. 실내시험에서 다짐도 95%로 양호한 시공한 단면의 경우에는 CBR 값이 8~9%정도를 나타내었다.



4. 현장 실험결과 및 분석

4.1 현장답사를 통한 육안조사

현장조성 후 약 170일 후에 대한 동일조건에서의 토목섬유 보강된 단면과 보강되지 않는 단면의 보강효과를 보기위하여 현장조사를 실시하였다. 토목섬유 보강효과를 보기위하여 레도를 제거하여 노반 상태를 조사하여야 하나, 현장이건상 레도제거가 불가능하여 상부에서의 레도 상태를 점검하였다. 육안조사결과 토목섬유로 보강되지 않는 E Site는 사진 1(b)와 같이 분리가 레도상부까지 올라오고 있는 것을 관찰하였으며, 반면 토목섬유로 보강된 단면은 분리가 발생하지 않는것을 관찰하였다. 동일한 조건에서 토목섬유로 보강된 지반의 분리 억제효과가 있는 것을 알 수 있다. 또한, 앞서 언급한바와 같이 현재 분리 대책공법으로 가장 많이 사용되고 있는 롤러나 및 도상자갈 치환 등의 분리 대책공법은 약 6개월 후에 또 다시 분리가 발생하는 등 영구적인 해결방법이 아닌 것을 알 수 있다.



(a) 토목섬유 보강단면 B Site



(b) 보강되지 않는 단면 E Site

사진 1 현장조사를 통한 육안조사 결과

4.2 용중 측정결과

지상에 대한 용중 측정은 측정구간을 통과하는 각 차량의 작용력의 크기 변화량으로 침투 간 중심에서 각 100mm 떨어진 위치의 중립축 45°의 각도를 가지며 8방향으로 스트레인게이지를 부착하였다.

이 상태에서 내력형의 운중 검정기를 이용하여 40kN 까지 재하하고 운중을 검정하였다. 표 5 는 계측 일별 화물열차 통과시 운중 최대값을 나타내었다. 전반적으로 내측부가 외측부보다 약 1kN 운중이 크게 발생하고 있으며, 운중 크기는 100~110kN범위로 나타났다.

표 5 계측일별 화물열차 통과시 보강단면별 Peak 운중(kN)

계측일 \ 단면	Site A		Site B		Site C		Site D		Site E	
	내측	외측	내측	외측	내측	외측	내측	외측	내측	외측
6월11일	117.8	110.7	110	108	113	109	107	101	101	81
7월6일	116	107	116	113	113	110	132	107	104	96

4.3 횡압 측정결과

실제 현장계측구간이 곡선구간으로 이루어진 현장이기 때문에 횡 저항력을 측정하였다. 표 6는 계측일별 횡 저항력 최대값을 나타내었다. 표 6에서와 같이 횡 저항력이 가장 큰 측정점은 C Site로 곡선반경과 캔트에 기인한 것으로 판단된다. 전반적으로 운중과 동일하게 내측부에서 더 큰 횡압이 발생하고 있는 것을 알 수 있으며, 12kN~40kN범위로 측정되었다. 그림 4는 Site A에서의 내·외측 횡압 시간이력곡선을 나타내었다.

표 6 계측일별 화물열차 통과시 보강단면별 Peak 횡압(kN)

계측일 \ 단면	Site A		Site B		Site C		Site D		Site E	
	내측	외측	내측	외측	내측	외측	내측	외측	내측	외측
6월 11일	16	12	24	19	29	32	28	28	26	32
7월 6일	13	17	26	22	30	31	40	25	38	39

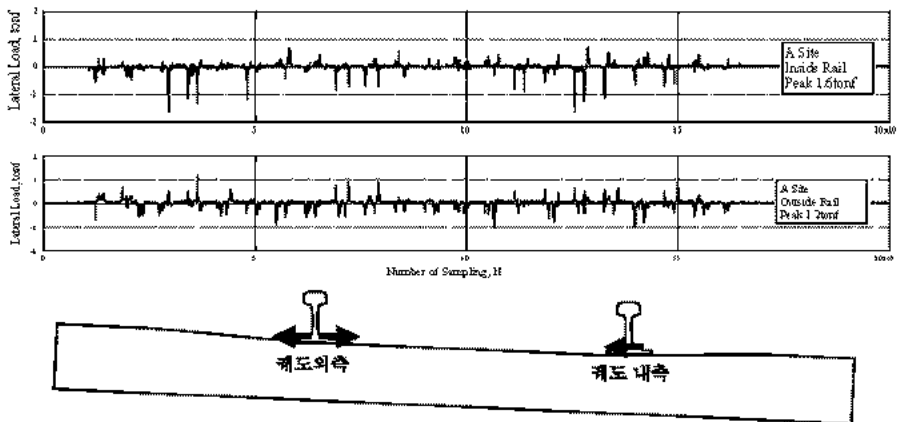
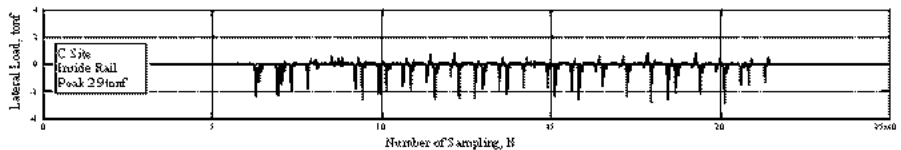


그림 4 Site A에서의 내·외측 횡압 시간이력곡선(6월 11일)

그림 5는 곡선반경이 가장 큰 구간인 C Site에서의 횡압측정된 결과이다. A, B Site 와 달리 C Site 는 외측부에서 더 큰 횡압이 발생하였으며, 교변하중이 작용하지 않고 횡압 방향이 침목 바깥부로 이동하는 경향을 보이고 있다. C Site 에 횡압이 가장 크게 발생하고 있으므로 도상자갈의 횡저항력을 증대시키는 방안이 필요할 것으로 판단된다.



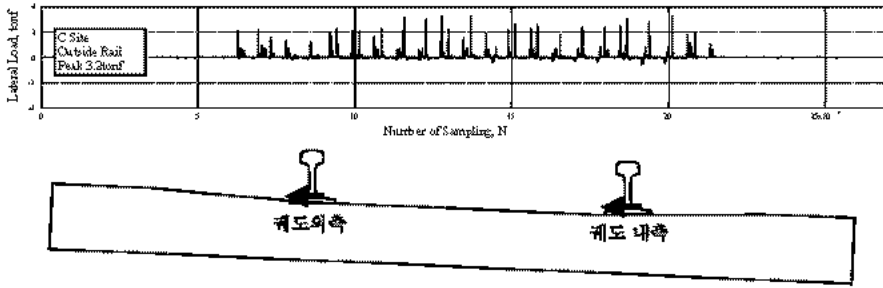


그림 5 Site C 측정에서의 내·외측부 횡압 시간이력곡선(6월 11일)

4.4 연직 동적 토압 결과

표 7은 계측일별 각 단면에서의 동적토압 최대값을 나타내었다. 동적토압은 시간이력곡선에서 최대값으로 산출하였으며, 토압은 75.4~134kN/m²범위를 보이고 있다. 전반적으로 토목섬유로 보강된 단면에서 토압이 적게 발생하였으나, 곡선반경과 캔트가 있는 Site C에서 가장 큰 토압이 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 곡선부 통과시 횡압 등의 영향에 의해 토압이 크게 측정된 것으로 판단된다.

표 7 계측일에 따른 동적 토압(kN/m²) 최대값

계측일	Site A	Site B	Site C	Site D	Site E
6월11일	75.4	66.4	134.0	93.4	115.6
7월 6일	-	78.3	160.8	115.1	77.0
11월 27일	-	81.1	140.8	110.0	110.8

4.5 탄소성침하 측정결과

현장계측구간에서의 침하특성은 탄성침하와 소성침하 거동을 분석하였다. 표 8은 계측일별 각 측정에서의 탄성변위를 나타내었다. 탄성변위는 시간이력곡선에서 Peak-to-Peak로 변위를 측정하였다. 표 8에서와 같이 무보강 단면인 Site E에서 탄성변위가 가장 크게 발생하고 있는 것을 볼 수 있으며, 토목섬유로 보강된 지반의 경우 2mm이내의 변위가 발생하고 있다. 현장조성 약 1개월 이후 계측된 결과 보강되지 않는 단면에서는 침하관리기준인 3mm를 초과하는 변위가 발생하여 보강되지 않는 단면에 2회 보수작업을 실시하였다. 1회 보수작업시 약 20mm의 침하를 들어 올리는 작업을 수행하였으며, 최종계측 시점인 11월 27일까지 보강되지 않는 단면에서 가장 큰 변위가 발생한 것을 알 수 있다.

토목섬유로 보강된 단면에서는 1달 후 약 30.7%의 침하가 발생하였으나, 보강되지 않는 단면에서는 73.8%로 약 2배 이상의 침하가 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 토목섬유로 보강된 단면에서 하중분산 효과와 보강재 효과를 충분히 발휘하고 있는 것으로 판단된다.

표 8 계측날짜별 현장부설단면에 따른 탄성침하(mm)

계측일	Site A	Site B	Site C	Site D	Site E
6월11일	1.31	1.37	1.305	1.56	2.22
7월 6일	-	1.805	1.705	1.445	3.86
11월 27일	2.17	2.205	1.65	1.47	2.37

그림 6은 현장부설구간에서의 단면별 소성침하량을 나타내었다. 그림 6에서와 같이 초기값은 6월 10일 계측하였으며, 계측 초기단계에서는 자주 측정하여 초기 변화단계를 관찰하였다. 현장조성 후 약 165일 후인 11월 27일 계측을 종료하였다. 그림 6에서와 같이 장기 소성침하량은 무보강단면인 Site E에서 가장 큰 침하를 보이며, Site A가 가장 작은 침하를 보이고 있다. 표 9은 계측일별로 각 단면에 따른 최종 소성침하량과 침하율(%)을 나타내었다. 여기서, 침하율(%)은 무보강 단면인 Site E와 대비

한 각 단면별 침하율이다. 보강되지 않는 단면보다 토목설유로 보강된 단면이 약 50%이상의 침하가 억제되는 것을 볼 수 있다.

$$\text{침하율(\%)} = \frac{\text{각 단면의 소성침하량(mm)}}{\text{E 단면에서의 소성침하량(mm)}} \quad (\text{식 1})$$

표 9 현장부설단면에 따른 계측일별 소성침하량

계측일	Site A	Site B	Site C	Site D	Site E
6월 10일	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6월 12일	-0.270	-0.645	-0.410	-0.360	-0.345
6월 18일	-0.985	-2.780	-1.845	-1.835	-2.430
6월 28일	-2.170	-3.585	-2.460	-2.810	-3.425
7월 06일	-2.865	-5.465	-3.890	-4.530	-5.515
8월 18일	-4.400	-7.395	-5.565	-5.950	-9.660
11월 27일	-25.3	-28.725	-26.925	-21.165	-42.795
무보강 단면 대비 침하율(%)	59.1	67.1	62.9	49.5	-

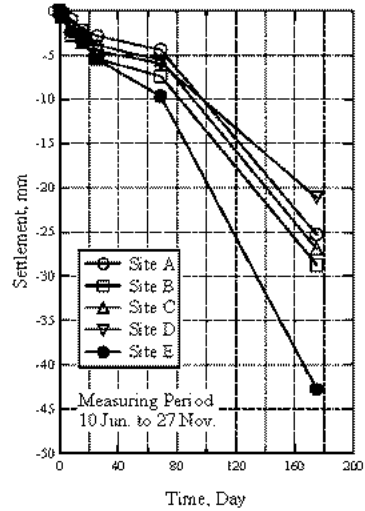


그림 6 각 단면별 소성침하량

4.6 토목설유의 인장변형을 측정결과

보강된 단면에서의 지오그리드의 인장변형을 파악하기 위하여 보강재 종·횡방향으로 스트레인게이지를 부착하였다. 그림 7은 지오그리드에 종·횡방향 스트레인게이지 부착된 개요도를 나타내었다. 그림에서와 같이 종방향은 열차진행방향과 수직인 방향으로 부착하였으며, 횡 방향은 열차진행방향과 직각으로 부착하였다.

그림 7은 각 측정별 지오그리드의 종·횡방향 인장변형을 나타내었다. 그림에서와 같이 전반적으로 열차진행 직각방향인 종방향 스트레인 게이지에서 약 1%의 더 많은 인장 변형율이 발생하였다. 지오그리드의 종·횡방향 허용 인장변형율인 5% 이내로 측정으며, C Site의 종방향 인장변형율이 7.8%로 허용 인장변형율 5%를 초과되어 측정되었다. 이러한 이유는 C Site가 곡선부로서 횡압이 크게 발생하여 지오그리드의 인장변형율에 영향을 미친 것으로 판단된다.

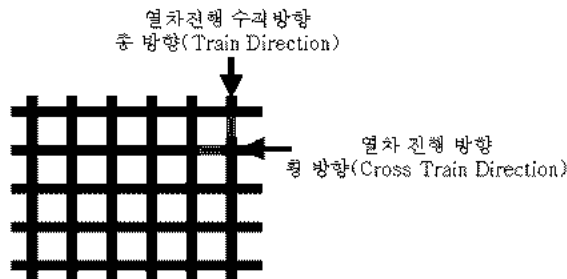
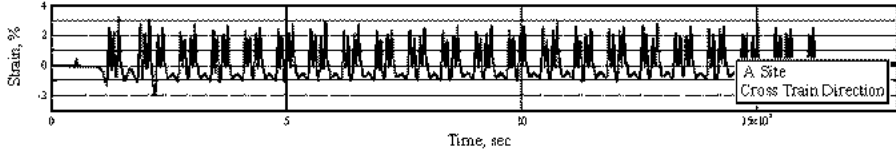
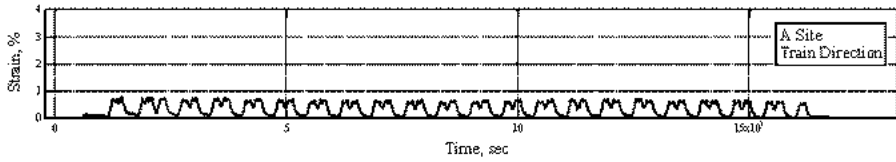
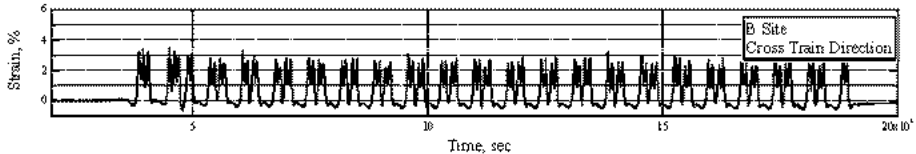
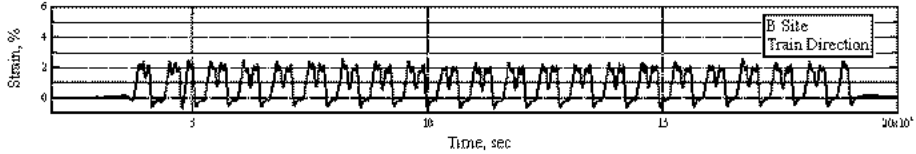


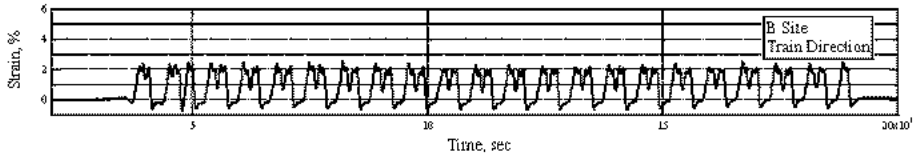
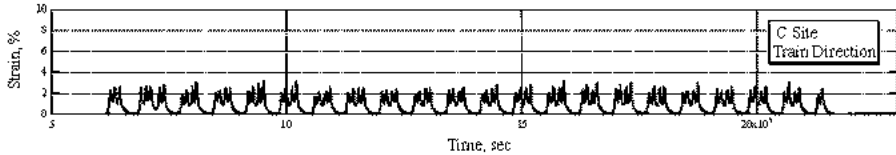
그림 7 스트레인게이지 부착도



(a) A 측점 통과시 지오그리드 중·횡방향 인장변형율(6월11일)



(b) B 측점 통과시 지오그리드 중·횡방향 인장변형율(6월11일)



(c) C 측점 통과시 토목섬유 중·횡방향 인장변형율(6월11일)

그림 7 각 측점별 지오그리드의 중·횡방향 인장변형율

5. 결론

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

1. 육안조사 결과 토목섬유로 보강된 단면에서 약 6개월 이후 분리가 발생하지 않았으나, 보강되지 않는 단면에서는 분리가 궤도상부까지 올라오는 것을 볼 수 있었다.
2. 분니대책공법으로 도상자갈 치환공법은 임시방편적인 방법으로 영구적인 방법으로 적합하지 않다.
3. 현장계측결과 보강단면과 보강되지 않는 단면에서 운동의 영향은 매우 적으며, 전반적으로 내측부가 외측부보다 약 10kN 운동이 크게 발생하고 있으며, 운동 크기는 100~110kN범위로 나타났다.
4. 현장계측결과 전반적으로 토목섬유로 보강된 단면에서 토압이 작게 발생하였으며, 토압은 75.4~134kN/m² 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.
7. 지오그리드의 종횡방향 인장변형율을 나타내었다. 그림에서와 같이 전반적으로 열차진행 직각방향인 종방향스트레인 게이지에서 약 1%의 더 많은 인장 변형율이 발생하였다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원(2003), "철도연약노반 강화기술개발 및 구조물과 토공접합부 보강기술개발".
2. 이진욱, 최찬용, 이성혁, 이창렬(2004), "운행선상의 연약노반 시험부설구간에서의 장기계측을 통한 거동 특성", 한국철도학회 추계학술발표대회.
3. 이진욱, 최찬용(2005), "토목섬유를 활용한 철도연약노반에서의 보강효과, 2005년도 한국지반공학회 봄학술발표회
4. 황선근, 이성혁, 최찬용, 이시한(2001), "철도노반의 분니현상 해명을 위한 반복 재하 실험", 인천환경토목학술발표회.
5. Coenraad Esveld, 서사범 역(2003), "최신 철도선로", 열과알
6. 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).
7. 運輸省 鐵道局(1992), "鐵道構造物等設計標準·同解説 土構造物", 鐵道總合技術研究所.