

지오텍스타일 백으로 보강된 철도노반의 동적거동 분석

Dynamic Behavior of Reinforced Railroad Roadbed by Geotextile Bag

이동현*
Lee, Dong Hyun

신은철**
Shin, Eun Chul

최민근***
Choi, Min Guen

ABSTRACT

In this study, a large-scale laboratory model test, 2-D numerical analysis was conducted to verify the reinforcement effect by utilizing geotextile bag on the railway roadbed. Dynamic loading which simulated train load was applied on the geotextile bag-reinforced railway roadbed and also unreinforced railway roadbed. Computer program named Pentagon which is a part of FEM programs was used in the numerical analysis. Based on the results of laboratory test, 2-D numerical analysis, the effect of load distribution and settlement reduction was found to be depending on the geotextile characteristics, tensile strength of geotextile, and interface friction angle between geotextile bags. In general, the result of 2-D numerical analysis show lower value than that of laboratory test.

1. 서론

여러 선진국에서는 철도 노반상에서 발생하는 문제점을 해결하기 위해 토목섬유를 활용한 노반강화공법을 적용하고 있다(Koerner, 1997; Selig and Waters, 1994). 보강재로는 쉬트형, 띠형, 그리드형을 많이 사용하고 있으며, 우리나라에서도 최근 많은 연구가 진행되고 있다(한국철도기술연구원, 2003). 지오텍스타일 백 공법은 지오텍스타일 백 내에 기계적, 수리학적 방법을 통하여 모래 또는 준설토 등의 토사를 채워 구조물을 형성하는 공법이다. 지오텍스타일 백 공법은 개발 초기에는 홍수조절 및 재해복구 등의 해안·호안 구조물로서 주로 사용되어 왔으며, 이후 1970년대 해일에 의한 제방의 긴급복구를 위하여 사용된 것을 시작으로 지속적인 발전이 이루어져 왔다(Heibaum, 1999). 이러한 지오텍스타일 백 공법을 유실된 철도 노반에 적용할 경우 규격화된 재료이고, 품질관리 및 시공의 규격화가 가능해져 그 동안 선로복구와 유지보수에 사용된 방법보다 빠르고 신뢰성있는 철도노반을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 지오텍스타일 백 축조노반위에 모사열차하중을 재하할 수 있는 실험실시험과 동일조건하에서 범용 유한요소법에 의한 수치해석을 실시하였다. 본 해석을 통해 지오텍스타일 백 노반에 발생하는 토압 및 침하량을 무보강 단면과 비교하였으며, 보강효과를 실험실시험결과와 비교분석하였다.

2. 실험방법

2.1 실험 토조 및 재하장치

대상노반의 조성 및 모사열차 반복하중의 재하는 종합궤도노반 실험장비에 의해 수행하였다(한국철도기술연구원, 2003). Fig.1은 종합궤도노반 실험장치의 전경과 하중재하장치를 보인 것이며 Table.1은 하중재하장치의 제원을 나타낸다. 시험노반의 조성에 활용된 토조의 제원은 15m(길이)×5m(폭)×3m(깊이)로 평면변형조건에서의 실제현장을 모사할 수 있도록 하였다. 이러한 실험실시험은 실제현장의 철도노반 상황을 모사하고, 현장계측에서 오는 문제점을 해결하도록 실내에서 시험을 수행

* 1. CTC(주) 전무이사, 비회원

** 2. 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 교수, 정회원

*** 3. 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과 석사과정, 비회원

할 수 있는 장점을 지니고 있다.



Fig. 1 종합궤도노반 실험장치 전경

Table.1 하중재하장치의 제원

항 목	내 용
성능 및 특성	<ul style="list-style-type: none"> ·최대 동적 하중 : 250kN/AActuator ·가진 진동수 : 0 ~ 100Hz ·동적변위 : ± 100mm ·유압펌프용량 : 3000psi
주요 구성품	<ul style="list-style-type: none"> ·동적 재하 장치 용량 : 25 tonf ·유압조정장치 ·하중 및 변위 계측기 ·중량 계측 장치 ·자동 제어 조절 장치

2.2 철도노반재료 및 지오텍스타일 백

일반적으로 철도노반의 재료는 양질의 자연토로서 노반 분리가 발생하지 않고, 진동이나 유수에 있어서도 안정해야 하며 열차하중을 지지할 수 있는 강도가 요구된다. 본 시험에서는 통일분류법상 200번체 통과량이 5%미만인 SP시료를 노반재료로 사용하였다(Table.2 참조). 지오텍스타일 백의 형상은 경제성 측면을 고려하여 포대형으로 제작하고, 적정크기는 시공성을 고려하여 66cm×44cm로 제작하였으며, 채움도 변화에 따른 지오텍스타일 백의 인장변형 거동을 고려하여 90% 채움도로 시험을 수행하였다. Table.3은 선정된 지오텍스타일 백의 공학적인 특성을 지오텍스타일 부분과 채움재 부분으로 나누어 정리한 것이다.

Table.2 철도노반 재료의 공학적 특성

비 중	최대건조단위중량 ($\gamma_{d_{max}}$, t/m ³)	최적함수비 (%)	내부마찰각 (°)	점착력 (t/m ²)	흙의 분류 (USCS)
2.64	2.01	10.2	38	2.5	SP

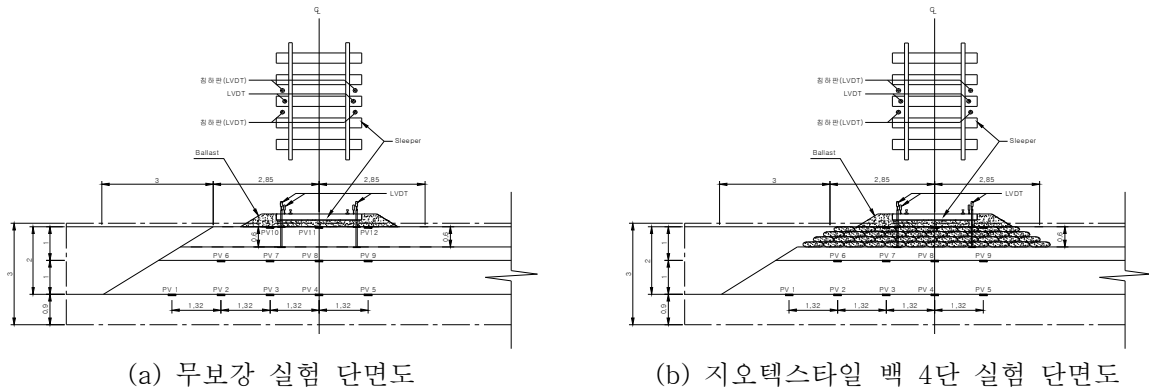
Table.3 지오텍스타일 백 및 채움재의 공학적 특성

구 분	지오텍스타일 백 (PP)			채움재 (모래)		
	최대인장강도 (tonf/m)	최대인장강도 (tonf/m)	신장율 (%)	비중	최대건조단위중량 ($\gamma_{d_{max}}$, t/m ³)	투수계수 (cm/sec)
물성치	4.0	2.5	16	2.61	1.68	5.0×10^{-1}

3. 실험단면구성 및 실험하중

3.1 노반구성 및 계측기 설치

실대형시험에서는 토압계, 침하관 및 변위계 등과 같은 계측기를 설치하여 계측을 실시하였으며, 실험단면으로는 무보강 단면과 지오텍스타일 백을 2층 및 4층으로 보강한 단면을 구성하였다.



(a) 무보강 실험 단면도

(b) 지오텍스타일 백 4단 실험 단면도

Fig.2 실험 단면(한국철도기술연구원, 2003)

노반의 높이는 총 2m로서 노반하부의 기초층은 앞서 기술한 바와 같이 충분한 다짐을 실시한 후, 상부에 PV1~PV5의 토압계를 설치한다. 토압계는 무보강 단면도인 Fig.2(a)에 나타난 바와 같이 궤도의 중심부로부터 각각 1.32m간격으로 설치되었다. 이후 유효높이 20cm간격으로 흙을 포설하여 다짐을 실시하면서 단면을 형성하고, 기초층으로부터 1m, 2m높이에 각각 PV6~PV9, PV10~PV12의 토압계를 매설하였다. 침하판은 연직변위량을 계측하기 위해서 노반면 상단으로부터 0.6m깊이와 노반면 최상단에 설치하였다. 노반이 완료되면, 도상자갈을 30cm 포설한 후, 궤광을 부설한다. 완성된 지오텍스타일 백 4층 단면의 단면도와 전경은 Fig.2(b)와 같다.

3.2 실험하중 조건

열차하중은 차량특성, 운전조건, 곡선제원, 열차의 속도 등으로부터 결정된다. 정하중은 예상차량의 정적 윤중값을 이용하는 것으로 하며, 이 경우 차량 중량을 축수로 나눈 것을 정적 축중, 나아가 정적 축중을 1/2로 한 것을 정적 윤중으로 한다. 본 연구에서는 국유철도 건설규칙에 정한 표준 활하중인 LS22하중을 사용하였다. 충격하중의 산정은 활하중에 충격계수(i)를 곱하여 구하며, 정확한 충격하중은 현장에서 계측하여 구해야 하나, 각 선로별 편차가 크므로 기존의 제안식을 사용하였다. 본 연구에서는 일본의 장대레일구간에서 적용되고 있는 충격계수(i)를 적용하여 산정한 결과 충격계수는 1.6을 사용하였다. 충격하중의 증분을 고려하여 계산된 결과 설계윤중은 14.3tonf으로 산출되었으며, 거동특성을 보다 명확히 고찰하기 위해서 설계윤중의 약 40% 증가시킨 20tonf을 동적재하시 설계하중으로 재하하였다. 여기서 동적재하시험시 10tonf, 15tonf, 20tonf의 세 단계로 실험을 실시하였으며 각 하중조건에서 재하횟수는 400,000회, 재하주파수는 5Hz로 실험을 수행하였다. 수치해석에서 하중조건은 실험하중조건과 동일하게 하였으며, 재하횟수는 동하중 해석시 재하횟수에 따른 연직변위가 일정하게 되는 10,000회를 결정하여 해석하였다.

4. 수치해석

4.1 모델링 및 경계조건

지오텍스타일 백을 활용한 노반강화 효과를 확인하기 위하여 실험에서 실시한 무보강단면, 지오텍스타일 백 2층과 4층 보강단면과 동일하게 모델링 하였다. 또한, 실험시 계측 결과와 동등하게 비교하기 위하여 계측기 위치를 감안하여 유한요소망을 만들었다. 지오텍스타일 백은 실제 크기와 동일한 크기로 사각형모양으로 모델링하고 인터페이스 요소를 적용하도록 하였다. 지반-지오텍스타일 백 및 지오텍스타일 백-지오텍스타일 백의 인터페이스는 무시할 만한 두께의 그라우트 재료로 모델링하였으며, 인터페이스의 전단거동은 인터페이스 전단강성 K_{bond} (Table.5 참조)으로 이루어진 Spring-Slider 시스템으로 표현하였다. 수치해석에 사용된 요소들은 지오텍스타일 백의 형태와 하중조건을 고려하여 2절점 트러스요소를 사용하였고, 노반 및 도상, 침목 등의 지반요소는 4절점 solid요소를 적용하였고, 레일은 2절점 frame요소를 적용하였다. 해석의 경계조건은, 상부지표면은 자유경계조

건, 측면 및 하부 경계는 각각 면에 수직인 방향의 변위를 구속하는 변위 경계조건을 적용하였다. Fig.3은 본 연구 수치해석에 적용한 2차원 모델링을 나타낸 것이다.

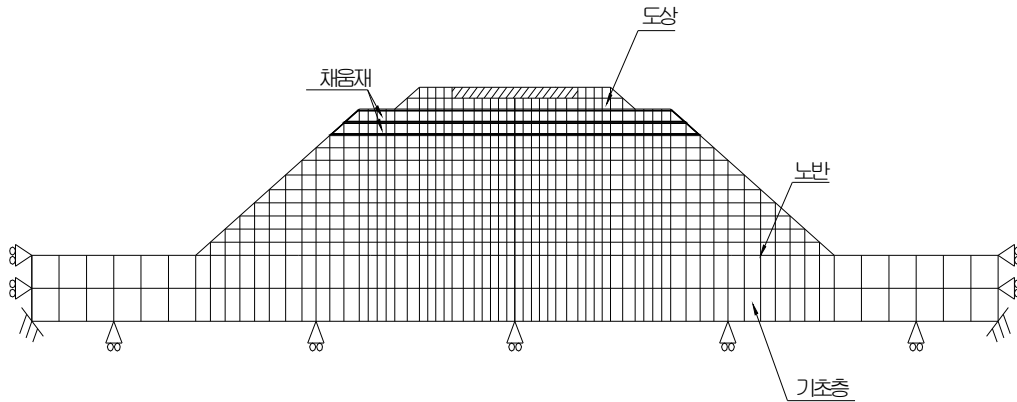


Fig.3 철도보강노반의 2차원 수치모델링 조건

4.2 입력변수 및 해석과정

(1) 입력변수

지오텍스타일 백의 입력변수는 두께 t_G , 탄성계수 E , 포아송비, 단위중량 γ_t 가 있으며, 각각의 입력변수는 해석조건에 따른 변수를 제외하고는 기존의 연구문헌 고찰을 통하여 설정하였다(Table.4 참조). 해석에 적용한 지오텍스타일 백의 두께는 2.0mm, 밀도는 1,350 kgf/m³를 사용하였으며 지반의 물성치는 직접전단 시험결과와 Hunt(1984)에 의해 제안된 일반적인 범위의 값을 사용하였고 인터페이스의 물성치는 대형 직접전단시험에서 측정된 결과치를 적용하였다(Table.5 참조).

수치해석의 전체적인 과정은 총 2가지 경우(무보강, 4층보강)의 해석조건에 대하여 각 단계별로 상이하게 적용하였으며 다음 순서와 같다.

- (1) 노반조성 (2) 지오텍스타일 백 조성 (3) 도상 및 침목,레일 설치 (4) 동하중 재하 및 해석 (5) 출력분석

Table.4 유한요소해석의 입력 물성치

구 분	치수(cm)	단위중량 $\gamma_t(\text{tonf}/\text{m}^3)$	탄성계수 $E(\text{tonf}/\text{m}^2)$	포아송비 ν
노반	140~200	2.15	3,060	0.3
기초	90	2.15	4,164	0.3
자갈도상	30	2.20	15,000	0.3
침목	260x30x20(h)	2.3	3,000,000	0.167
레일	60kg/m	7.85	21,000,000	-
지오텍스타일	15	1.35	700,000	0.25
채움재(모래)	15	1.68	4,164	0.3

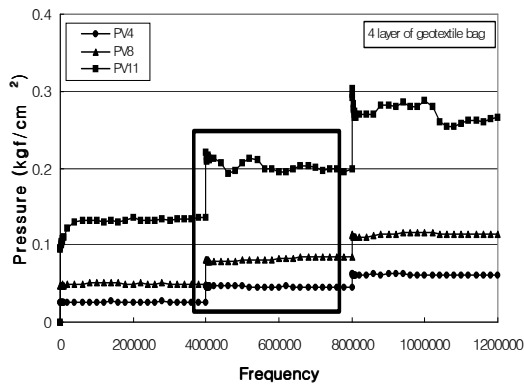
Table.5 인터페이스요소 입력 물성치

구 분	K_{bond} (tonf/m/m)	S_{bond} (tonf/m)	$S_{friction}$ ° ()
지반-지오텍스타일 백	1020	0.42	30.4
지오텍스타일 백 -백	326	0.21	21.0

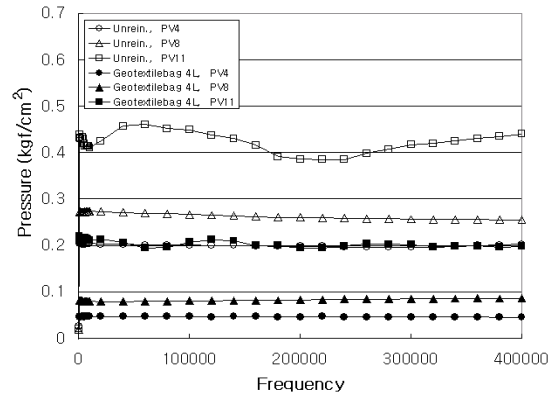
5. 동하중 실험결과분석

5.1 연직토압진폭

Fig.4(a)은 지오텍스타일 백 4단 시공시 모사반복 열차하중의 재하횟수에 따른 연직 토압진폭을 나타내는 것으로서 하중이 재하되는 단면, 즉 중심부의 연직 토압진폭을 나타내고 있다. 그림에서 400,000회와 800,000회의 토압진폭이 급격하게 변화하는 것은 실험조건에서 살펴본 바와 같이 초기 400,000회는 10tonf, 다음 400,000회는 15tonf, 마지막 단계에서는 20tonf의 하중을 재하함으로써 나타나는 형상을 보여주고 있다. 직접적인 반복하중의 영향을 받는 PV11는 도상자갈 혹은 케광의 영향으로 인하여 비교적 유동적인 토압의 변화를 보여주고 있으나 노반면으로부터 각각 1m, 2m깊이에 설치된 PV8, PV4의 결과는 최대값이 0.12 kgf/cm²의 값을 넘지 않는 안정된 응답특성을 보이고 있다.



(a) 지오텍스타일 백 4단 보강



(b) 무보강 단면과의 비교

Fig.4 모사반복 열차하중의 재하횟수에 따른 연직토압 진폭(한국철도기술연구원, 2003)

열차의 운중인 14.3tonf의 값과 가장 유사한 거동을 보일 것으로 예상되는 부분 즉, 반복하중이 15tonf의 범위를 표시하였다. Fig. 4(a)에서 표시된 부분(반복재하횟수 400,000 ~ 800,000번)을 무보강 단면과 비교하면 Fig.4(b)와 같다. 각 하중단계별 변화를 살펴보면 재하하중이 증가함에 따라 2단 시공된 단면의 토압진폭이 4단 토압진폭보다 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 하중이 재하됨에 따라 지오텍스타일 백 사이의 공극이 줄어들면서 상대적으로 공극이 많이 발생하였던 4단 단면이 불안정한 거동을 보인 것으로 판단된다. Fig.5는 각 하중 단계별, 즉 10tonf, 15tonf, 20tonf 중 15tonf 재하시 중심부로부터 이격거리에 따른 연직 토압진폭을 대표적으로 나타낸 그림이다. 정하중 재하시와 마찬가지로 토압의 변화가 가장 크게 나타나는 노반면으로부터 1m깊이에 위치한 PV6 ~ PV9의 토압계에서 측정된 토압진폭을 나타내었다. 각 하중단계에서 무보강 단면보다 지오텍스타일 백 단면이 보다 안정된 토압진폭을 보이고 있으며 하중이 직접적으로 재하되는 중심부에서 가장 큰 토압진폭을 나타내고 있다.

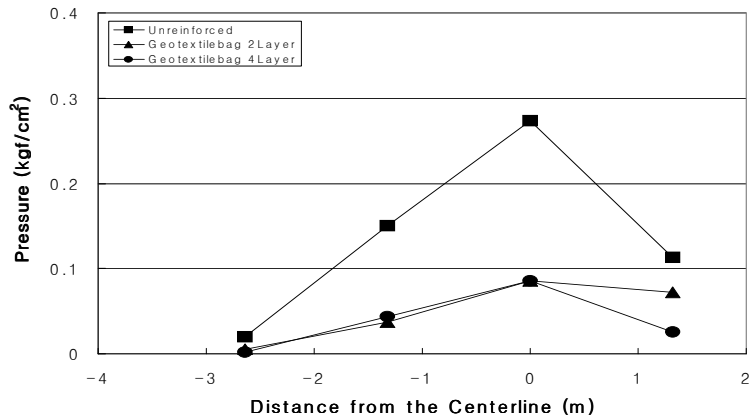
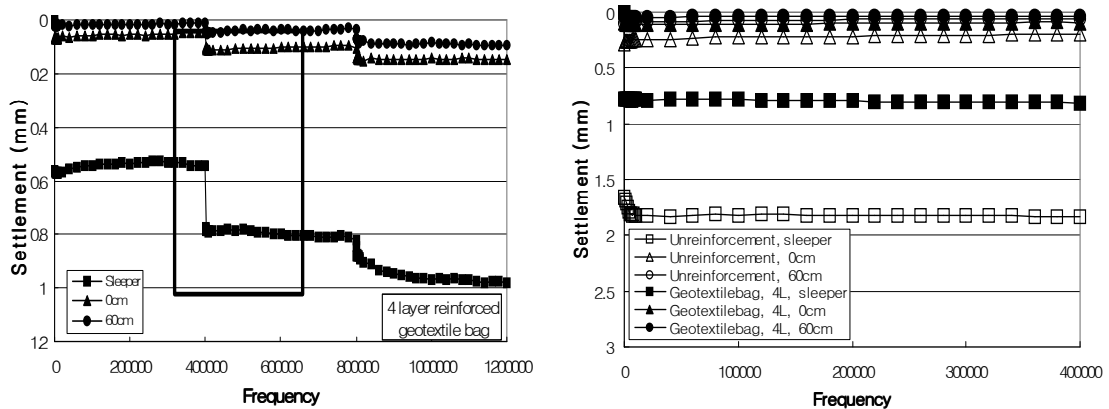


Fig.5 15tonf 재하시 중심부로부터 이격거리에 따른 연직토압진폭 (한국철도기술연구원, 2003)

5.2 연직변위(침하량)

연직 변위진폭은 Fig.6(a)에 보인 바와 같이 침목위, 노반면, 노반면으로부터 0.6m 깊이 순으로 탄성변위가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 침목부의 변위 진폭이 노반면, 노반면 아래 0.6m 깊이보다 크게 발생하는 것은 동적하중재하에 따른 도상자갈 층의 이완작용이 주요한 원인으로 판단되며, 노반면과 노반면으로부터 0.6m 깊이에서의 변위진폭은 거의 일정한 값을 보이는 것을 알 수 있다.



(a) 지오텍스타일 백 4단 보강

(b) 무보강 단면과의 비교

Fig.6 모사반복 열차하중의 재하횟수에 따른 연직변위 진폭 (한국철도기술연구원, 2003)

그림에 표시된 설계운중범위 1~15tonf의 변위진폭을 따로 분리하여 무보강 단면과 비교하면 Fig.6(b)과 같다. 연직 변위진폭은 Fig.6(b)에서와 같이 무보강 단면에서 크게 나타났다.

특히, 무보강 단면의 경우 지오텍스타일 백 단면에 비해 재하초기에 변위 진폭이 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, 이는 소성변위량이 초반에 많이 발생하는 것을 알 수 있었다. 한편 지오텍스타일백 단면은 초기 하중의 재하시 약 0.01mm의 변화 이외에는 변위진폭의 변화가 거의 없이 수렴하는 경향을 보이고 있다.

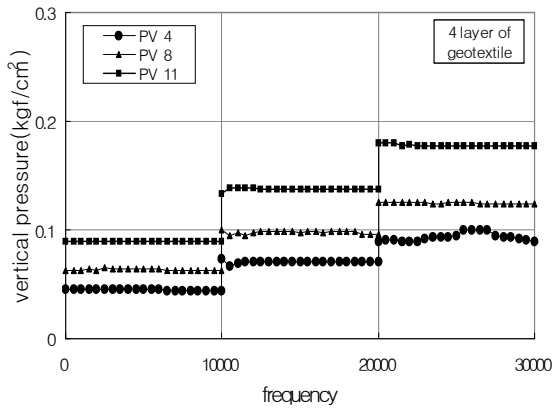
6. 2차원 수치해석결과 분석

6.1 연직토압

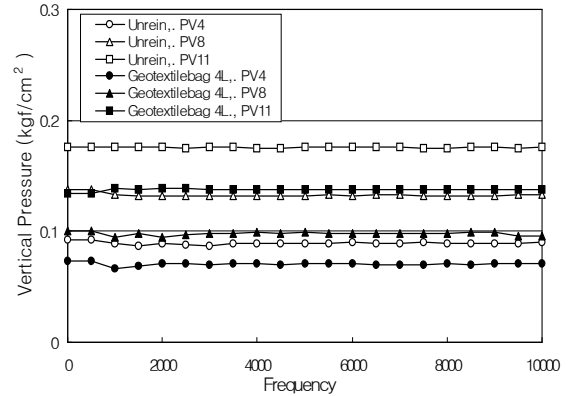
Fig.7(a)은 지오텍스타일 백 4단 보강시 반복 재하횟수에 따른 연직토압증가분을 나타낸 것으로 재

하횟수 10,000회마다 10tonf, 15tonf, 20tonf 에 대한 형상을 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 반복하중으로 인한 노반 상단 및 노반상단면 아래 1.0m, 2.0m에서의 연직 토압의 최대값은 0.17kg/cm² 의 값을 넘지 않는 안정된 응답특성을 보이고 있다.



(a) 지오텍스타일 백 4단 보강



(b) 무보강 단면과의 비교 (15tonf 재하시)

Fig.7 반복재하 횟수에 따른 연직 토압증가분

Fig.7(b) 는 반복하중 15tonf시 무보강단면과 비교하여 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 지오텍스타일 4단 보강 단면에서의 토압증가분은 무보강단면에 비해 약 25~30% 정도 작게 나타났으며, 실험결과보다 토압증가분이 작게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 지오텍스타일 백이 반복하중에 대해서도 하중분산 효과가 큰 것으로 판단되며 실험결과에 비해 작게 나타나는 것은 실험결과를 계측기 측정오차, 재하장치의 영점조정오차 때문인 것으로 판단되며, 수치해석에서는 동적 물성치 및 반무한 지반으로의 수치모델링에 의한 경계조건의 차이로 사료된다.

Fig.8에서 보는 바와 같이 노반상단면 1.0m 지점 중심으로부터 거리에 따른 토압증가분도 실험결과와 매우 유사한 경향으로 나타남을 알 수 있다. 즉, 재하되는 중심부에서 가장 큰 토압증가를 보이고, 중심에서 멀어질 수록 하중이 분산됨을 알 수 있으며, 지오텍스타일 4단 보강시가 무보강단면에 비해 토압증가분이 약 30% 정도 작게 나타나 실험결과와 마찬가지로 보강효과를 확인 할 수 있었다.

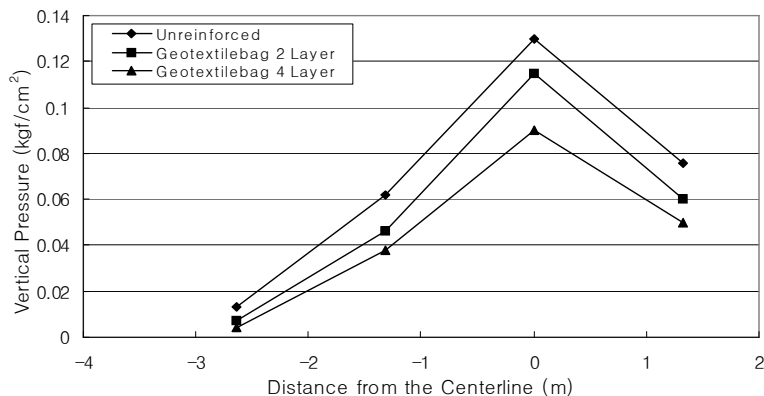
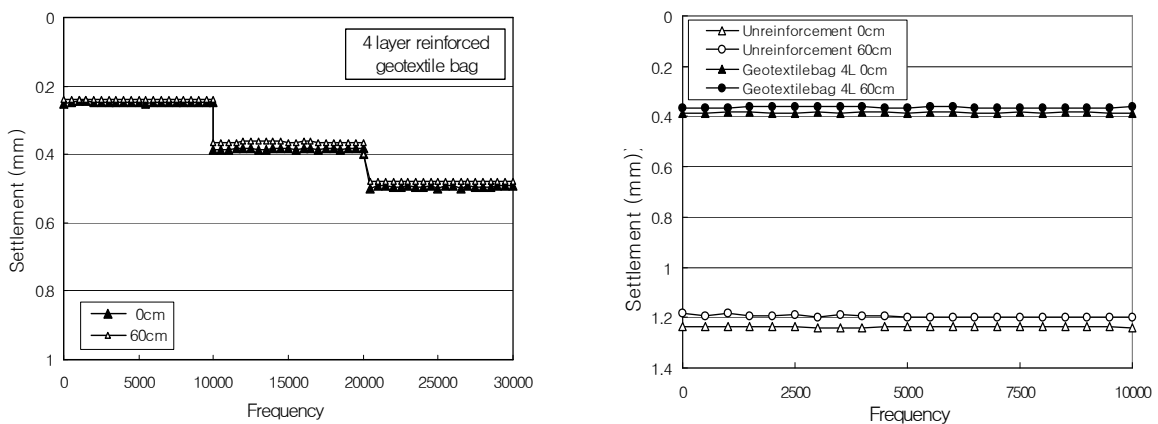


Fig.8 15tonf 재하시 중심부로부터 이격거리에 따른 연직토압진폭

이는 지오텍스타일 백의 보강효과로 인하여 반복하중에 의하여 발생하는 토압증가분이 상당히 감소되는 것으로 판단되며, 실제 철도노반에 지오텍스타일 백을 적용하여도 반복열차하중에 의한 철도노반은 안정된 거동특성을 보일 것으로 사료된다.

6.2 연직변위(소성침하량)

Fig.9(a)는 지오텍스타일 4단 보강시 재하횟수에 따른 노반상단면 및 노반상단면 아래 0.6m 에서의 소성변위량을 나타낸 것이다. 아래 그림에서 보는 바와 같이 무보강단면에 비해 지오텍스타일 백을 보강한 단면에서 훨씬 작은 변위가 나타남을 알 수 있으며, 실험결과와 유사하게 나타났다. Fig.9(b)에서 보는 바와 같이 열차 운중과 비슷한 15tonf 반복하중 재하시 노반상단면 아래 0.6m 에서의 소성변위는 무보강단면에서는 1.24mm이나, 지오텍스타일 백 4단 보강단면에서는 0.39mm로 실험결과와 같이 하중분산에 의한 침하저감효과가 큰 것으로 나타났다.



(a) 지오텍스타일 백 4단 보강

(b) 무보강 단면과의 비교 (15tonf 재하시)

Fig.9 재하횟수에 따른 소성변위량

또한, 수치해석 결과와 실험결과와 비교하면 무보강 단면에서는 실험결과 노반면하 0.6m 에서의 소성침하량이 2.08mm이나 수치해석에서는 1.1mm로 더 작게 나타남을 알 수 있다.

4단 보강단면에서는 노반면하 0.6m 소성침하량이 0.92mm이고 수치해석에서는 0.35mm로 작게 나타남을 알 수 있었다.

이같은 차이의 원인은 실험실의 경우 경계조건이 구속되어 진동의 반사영향이 있는 모형토조에서 실험을 실시한 반면 수치해석에서는 이를 고려하여 반무한 지반으로 수치모델링을 하여 반복하중에 의한 전달파가 반사됨 없이 충분히 전파되도록 구속조건을 모델링한 차이로 사료된다.

7. 결론

이 논문에서는 지오텍스타일 백으로 축조된 노반의 동적거동 특성 및 보강효과를 평가하고자 열차하중과 운행주기를 모사한 실험조건과 동일한 조건에서 수치해석을 실시하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

1. 동적하중 하에서 유한요소 수치해석을 실시하여 축조노반의 토압 및 연직침하량을 비교분석한 결과 지오텍스타일 백을 보강한 단면이 무보강단면에 비해 보강효과가 크게 나타났으며, 실험결과와 유사한 경향을 나타남을 알 수 있었다.
2. 실험결과와 2차원 동하중 유한요소해석을 비교분석한 결과 연직토압 및 침하량이 매우 유사한

경향을 나타내나 수치해석결과가 실험실시험보다 전반적으로 작게 나타남을 알 수 있었다.

이는 동하중 수치해석의 경우에 동적물성치 및 반무한지반으로의 수치모델링에 의한 경계조건의 차이로 사료된다.

3. 유한요소 수치해석결과 지오텍스타일 백을 보강한 단면이 무보강 단면에 비해 동하중 2차원 해석 결과 약 30%의 하중감소효과가 나타남을 알 수 있었다.

이는 지오텍스타일 백의 보강효과로 인하여 반복하중에 의해 발생하는 토압증가분이 상당히 감소되는 것이며, 채움재의 압축변형특성과 지오텍스타일 백 자체의 인장특성 및 마찰특성에 의한 상부하중의 하중분산효과로 사료된다. 따라서, 실제 철도노반에 지오텍스타일 백 적용시 안정된 거동특성을 보일 것으로 사료된다.

8. 참고문헌

1. 한국철도기술연구원(2003), “강우로 인해 유실된 선로복구를 위한 토목섬유 콘테이너의 실용화 기술개발, 산·학·연 공동연구 최종보고서, pp 46 ~ 92, 145 ~ 176
2. Annual Book of ASTM Standards(2002), Geosynthetics
3. Esveld C. (2001), Modern Railway Track 2nd edition, MRT-Production
4. Selig, E. T. and Waters J. M. (1994), Track Geotechnology and Substructure Management, Thomas Telford
5. Heibaum, M. H. (1999), "Coastal Scour Stabilization Using Granular Filter in Geosynthetic Non-woven Containers", Geotextile and Geomembrane, Vol. 17, pp 341 ~ 352
6. Koerner, R.M (1997), Designing With Geosynthetics, pp 113 ~ 115, pp 436 ~ 449