

철도노반 복구를 위한 토목섬유 Soilbag 공법의 적용성 평가

Assessment of Geosynthetic Soilbag Method to Restore the Roadbed of Railway

황 선 근* / 고 태 훈** / 박 성 현***

Hwang, Seon Keun / Koh, Tae Hoon / Park, Sung Hyun

Abstract

Roadbed failure due to the natural disaster may bring out social and economic damage such as the loss of life and property, the consumption of time and cost for recovery, and the delay of logistics in railway. In this study, the method using geosynthetic soilbag was applied to rehabilitation of the railway roadbed which was failed by disaster. The full scale tests with the simulated train loading were performed in order to evaluate the static and dynamic performance at the railway roadbed using geosynthetic soilbag. The results of these tests were compared with unreinforced and reinforced cases with geosynthetic soilbag, respectively. The data gathered by various measurement devices from these full scale tests would be useful to evaluate and understand the roadbed with geosynthetic soilbag. In conclusion, geosynthetic soilbag was evaluated as a permanent restoration method to reinforce the roadbed of railway.

Key words : geosynthetic soilbag, geotextile container, real scale test, simulated train loading

요 지

자연재해에 기인한 철도노반의 유실 및 파괴는 유실된 선로복구를 위한 공사가 장기간 소요됨으로써 정상적인 철도운영에 지장을 초래하여 사회적, 경제적으로 많은 비용 및 시간의 손실을 유발시키고 있다. 본 연구에서는 자연재해로 인해 유실된 철도노반에 대한 신속하고 안전한 복구대책으로서 토목섬유로 제조된 Soilbag의 적용성을 평가하고자 정적하중 및 모사반복 열차하중 재하 실험을 수행하였다. 실험을 통해 심도별 연직토압과 침하량을 측정한 결과, 하중분산효과에 기인한 토압 및 침하 저감 효과를 확인할 수 있었으며 시공성과 장기적 안정성을 고려할 때 Soilbag 공법의 현장적용성은 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 토목섬유 Soilbag, 토목섬유 콘테이너, 실험, 모사열차하중

1. 서 론

우리나라는 전 국토의 70% 이상이 산지로 구성되어 있어 철도 건설에 따라 발생된 철도사면이 전국적으로 많이 분포하고 있으며, 또한 국가 기반시설의 확충에 따른 화물 물류량의 증가, 도로의 정제, 공해 문제 등으로 인하여 국내 수송체계는 철도로의 관심이 고조되고 있는 실정이다.

우리나라 철도선로의 절·성토 사면은 해마다 자연재해 인한 유실 및 파괴에 크게 노출되어 있으며, 이는 최근의 지구온난화 및 기상이변에 기인하여 그 위험이 점차 고조되고 있는 실정이다. 또한, 유실된 선로복구를 위한 공사가 장기간 소요됨으로써 정상적인 철도운영에 지장을 초래하여 물류손실이 발생하고 있으며, 복구 후에도 철도노반 유실에 따른 품질 및 관리기준이 미흡하여 유지보수 및 관리가 재차 문제시 되고 있다.

* 한국철도기술연구원 책임연구원

** 한국철도기술연구원 주임연구원

*** 한국철도기술연구원 연구원

따라서, 본 연구에서는 철도노반 유실에 대한 복구 대책공법으로서 토목섬유 Soilbag 공법을 적용한 철도사면을 대상으로 실험대형시험을 수행함으로써 그 적용을 평가하였다.

2. Soilbag 공법

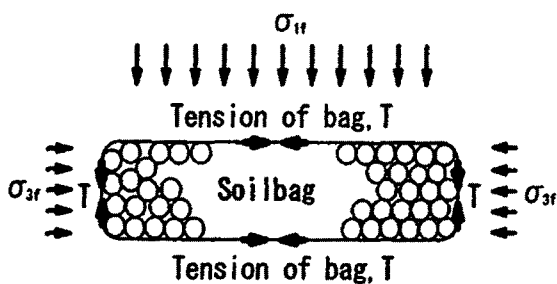
Soilbag 공법은 다양한 구조물에 적용이 가능한 공법으로서 하중이나 외력에 대한 안전성, 지진에 의한 붕괴피해의 최소화, 장기적 내구성, 미관이나 환경과의 조화 등 다양한 구조물의 요구성능에 의해 개발된 것으로 토목섬유 콘테이너(geosynthetic container) 공법의 일종이다. 이러한 Soilbag 공법은 일본에서 실용성 및 강도특성에 대한 연구가 활발히 진행중이며, SOLPACK 협회를 통해 시공성과 경제성 및 친환경성에 대한 많은 홍보가 이루어지고 있는 실정이다.

이러한 Soilbag의 마찰특성, 전단특성 및 동적특성에 대한 검토결과(Matsuoka et al, 2000), Soil-bag이 흙의 다일러터시를 구속하여 지반보강에 효과적임을 입증한 바 있다.

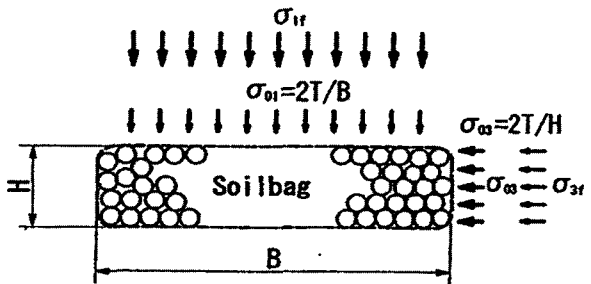
2.1 Soilbag 공법의 역학적 특성

그림 2.1은 Soilbag에 작용하는 응력을 보이는 것이다. 그림과 같이 Soilbag에 외력으로 인해 인장력 T가 발생하고 단위 길이당의 인장력에 의해 Soilbag의 채움재에 부가적인 구속응력($\sigma_{01} = 2T/B$, $\sigma_{03} = 2T/H$)이 각각 작용하게 된다(그림 2.1(b)). 그러므로, 그림 2.1(b)와 같이 장축으로 평행한 면에 주응력 ($\sigma_{1f} + \sigma_{01}$), 단축으로 평행한 면에 주응력 ($\sigma_{3f} + \sigma_{03}$)이 작용하게 되며, 이러한 주응력을 기초로 Soilbag 채움재의 전단파괴시 응력은 다음과 같이 정리할 수 있다.(식 2.1)

$$\sigma_{1f} + 2T/B = K_p(\sigma_{3f} + 2T/H)$$



(a) Soilbag에 작용하는 응력



(b) Soilbag 내부입자에 작용하는 응력

그림 2.1 Soilbag과 채움재의 응력

여기에서, $K_p = \frac{(1 + \sin \phi)}{(1 - \sin \phi)}$

따라서,

$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f}K_p + (2T/B)[(B/H)K_p - 1] \quad (\text{식 2.1})$$

위 식은 c , ϕ 재료의 파괴시의 주응력 σ_{1f} , σ_{3f} 의 사이의 관계식(식 2.2)과 같은 형태를 가지고 있으며,

$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f}K_p + 2c\sqrt{K_p} \quad (\text{식 2.2})$$

이에 따르면 점착력 c 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$c = (T/B)[(B/H)K_p - 1]/\sqrt{K_p} \quad (\text{식 2.3})$$

따라서, 토목섬유 Soilbag을 사용함으로써 ϕ 재료의 성질이 c , ϕ 재료의 성질로 변화게 되며, 이로 인하여 토목섬유 Soilbag 적용시 Soilbag에 가해지는 연직하중 및 수평하중은 Soilbag에 발생한 구속력으로 인한 응력(식 2.3)을 추가로 유발하고 이로 인하여 내하능력의 증진 즉, 외력에 대한 안정성을 지니게 된다.

2.2 Soilbag 공법 시공 사례

Soilbag에 외력이 작용하면 내부채움재에 충분한 구속력이 작용하여 상당히 큰 내하(耐荷)능력을 발휘할 수 있게 된다. 국외의 경우, Soilbag 공법의 이러한 특성으로 인해 시공이 증가하는 추세에 있으며 그 연구 또한 활발히 진행 중이다. 그림 2.2(a)는 Soilbag 공법을 저층 건축기초로서 이용한 예이며, 그림 2.2(b)는 Soilbag 공법과 더불어 지오그리드를 이용하여 하중 지지체로서 이용한 예이다. 그림 2.2(c)는 붕괴된 사면의 안정을 도모함과 동시에 옹벽에 작용하는 토압을 경감시키기 위하여 시공한 예를 보인 것이다.

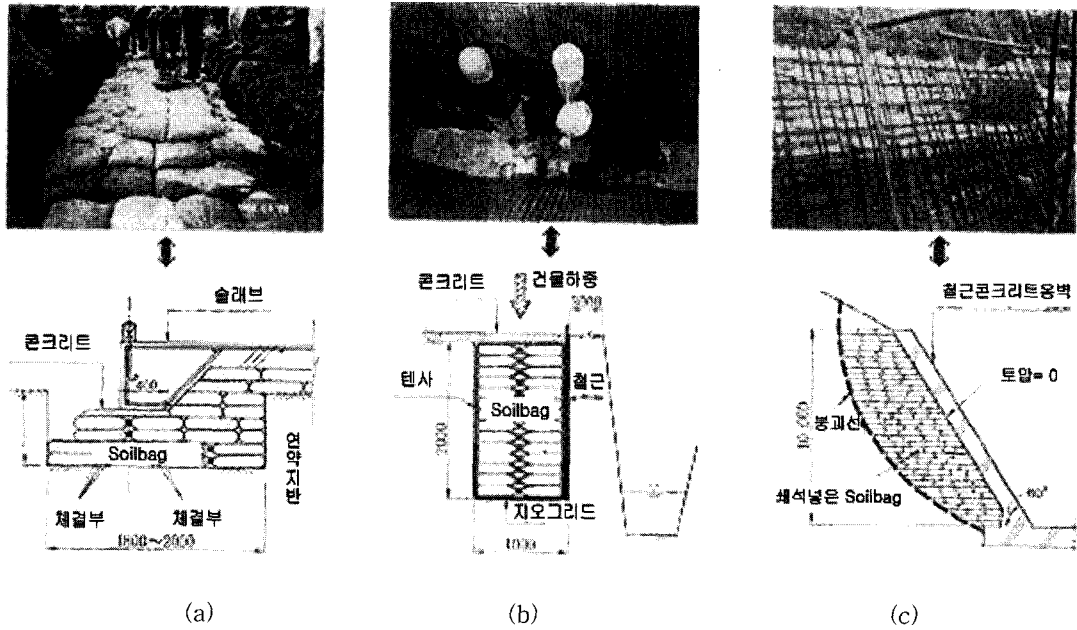


그림 2.2 Soilbag 공법의 시공예

3. 실대형시험

철도하중은 일정한 차량의 하중과 주행에 의해 발생하는 동하중, 횡하중, 풍하중, 제동하중, 충격하중, 원심력에 의한 하중 등이 동시에 반복적으로 작용하는 복잡한 메카니즘을 가지고 있다. 따라서 노반의 거동 특성을 분석하기 위하여 이론적인 접근 또는 실험실에서 모형시험과 동시에 실현장 상황을 모사한 실대형시험을 수행하는 것 또한 효과적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 토목섬유 콘테이너 축조노반 위에 모사반복 열차하중을 재하할 수 있는 종합 케도노반 시험장비를 이용하여 실대형시험을 수행하였다. 본 시험을 통해, Soilbag 축조노반에 발생하는 토압분포와 침하량을 무보강 단면과 비교하여 정량적인 보강효과를 통해 성능을 평가하였다.

3.1 노반재료의 공학적 특성

일반적으로 철도노반 재료는 양질의 자연토로서 노반 분리가 발생하지 않고, 진동이나 유수에 있어도 안정해야 하며 열차하중을 지지할 수 있는 강도를 지녀야 한다. 본 시험에 사용된 노반재료의 특성은 표

3.1과 같다. 또한, 실대형시험을 위한 노반은 다짐롤러(용량 3.5 tonf)를 사용하여 최대진조밀도의 약 92%의 다짐도로 조성하였다.

3.2 Soilbag의 공학적 특성

Soilbag을 구성하고 있는 토목섬유와 채움재에 대한 공학적 특성은 표 3.2와 같다. 철도사면의 수평방향 활동(sliding)에 대하여 안전한 Soilbag 축조노반을 조성하기 위해서는 그림 3.2와 같은 전단시험을 수행하여 Soilbag간 접촉면에서의 마찰특성을 고찰하여야 한다. 폴리프로필렌(polypropylene, PP)재료의 직포형 토목섬유 Soilbag은 직조과정에서 MD(Machine Direction)와 CD(Cross Direction)로 구분되며, 이러한 방향성에 따른 인장특성 또한 상이하다. 따라서, 전단시험에서는 상하 Soilbag의 방향성에 따른 상호접촉면(Interface)에서의 마찰각을 중심으로 고찰하였다. 전단시험 수행결과, 축조방법에 따라 상호접촉면에서의 마찰각은 20.3°~24.8°의 범위를 보였다(그림 3.3참조).

전단시험 결과를 토대로 실대형시험에서는 상호접촉면 Soilbag 마찰각이 가장 작은 경우인 MD and MD의 축조 방법으로 시험을 수행하였다.

표 3.1 노반재료의 공학적 특성

비 중	최대진조밀도 ($\gamma_{d_{max}}$, t/m^3)	최적함수비 (%)	내부마찰각 (°)	점착력 (kPa)	흙의 분류 (USCS)
2.64	2.01	10.2	38	25	SP

표 3.2 Soilbag의 공학적 특성

구 분	토목섬유 (PP)			채움재 (모래)		
	최대인장강도 ($tonf/m$)	신장율 (%)	유효입경(D_{90}) (mm)	비중	최대건조밀도($\gamma_{d,max}$) (t/m^3)	투수계수 (cm/sec)
물성치	4.0	16	0.188	2.61	1.68	0.5

(단위 : cm)

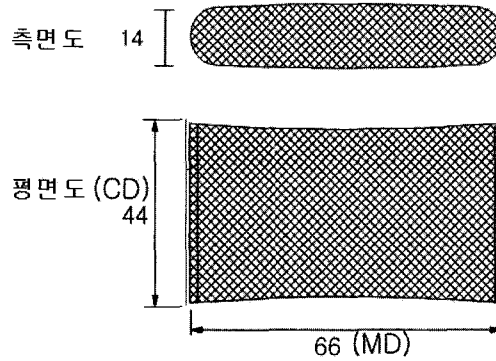
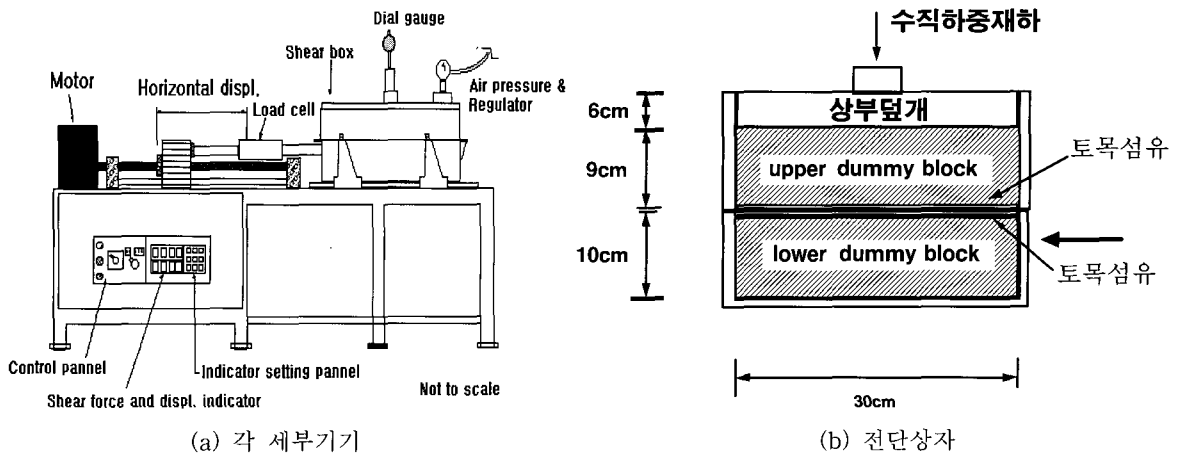


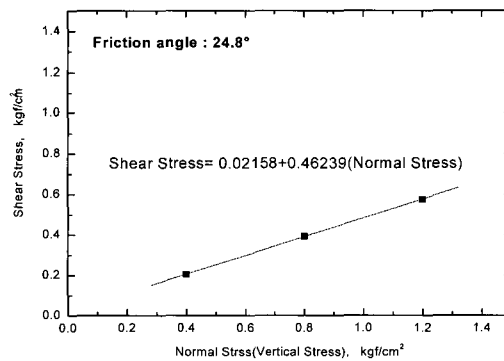
그림 3.1 토목섬유 콘테이너의 크기 및 형상



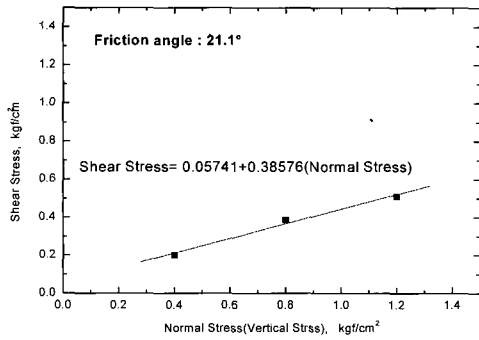
(a) 각 세부기기

(b) 전단상자

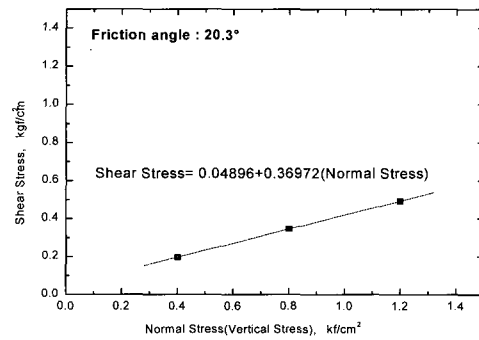
그림 3.2 전단시험 장치



(a) CD and CD



(b) MD and CD



(c) MD and MD

그림 3.3 대형전단시험 결과



항목	내용
성능 및 특성	<ul style="list-style-type: none"> · 최대 동적 하중 : 250kN/Actuator · 가진 진동수 : 0 ~ 100Hz · 동적변위 : ± 100mm · 유압펌프용량 : 3000psi
주요 구성품	<ul style="list-style-type: none"> · 동적 재하장치 용량 : 25tonf · 유압조정장치 · 하중 및 변위 계측기 · 중앙 계측장치 · 자동제어 조절장치

그림 3.4 하중재하장치 전경 및 제원

3.3 종합궤도노반시험 장비

실대형시험에 사용되는 장비는 한국철도기술연구원 에서 보유하고 있는 종합궤도노반시험장비로서 이는 실제 현장의 철도노반 상황을 모사하고, 현장계측에서 오는 문제점을 해결하도록 실내에서 시험을 수행할 수 있는 장점을 가지고 있다.

종합궤도노반시험장비는 하중재하장치(loading sys-

tem, MTS), 하중 반력대(loading frame), 대형토조로 구성되어 있으며, 이 외에 중앙계측실에서 자동계측할 수 있는 자동제어장치, 펌프실, 냉각장치 등이 있다. 그림 3.4는 종합궤도노반시험장비의 하중재하장치와 제원을 나타내고 있으며, 그림 3.5에서는 실대형시험에 사용된 토조(L 22m×W 5m×H 3m)를 보여주고 있다.

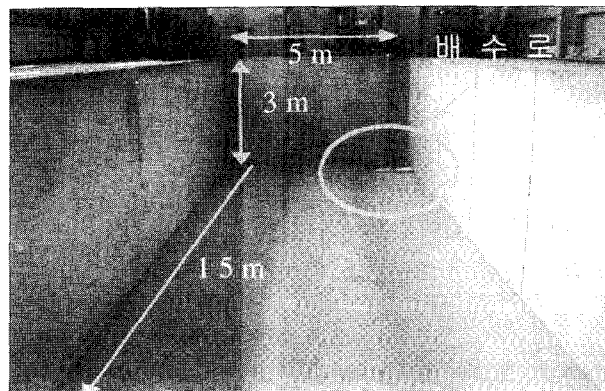


그림 3.5 대형토조

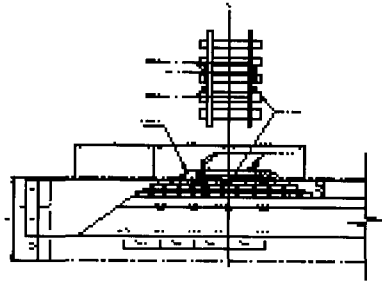
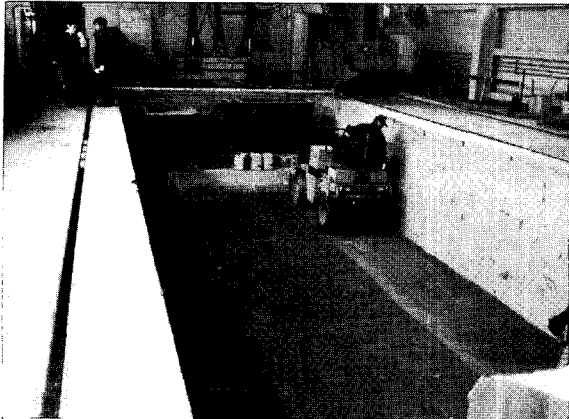


그림 3.6 계측기 설치 단면



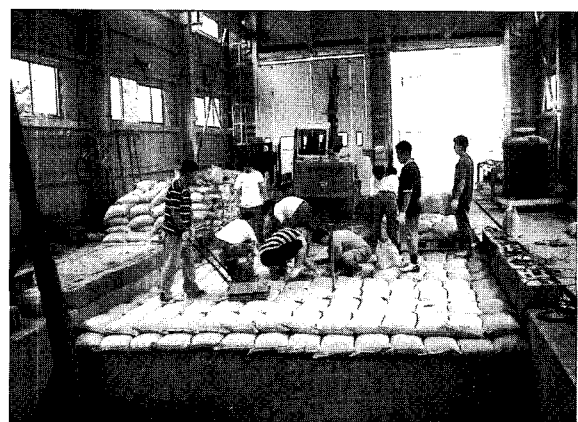
(a) 장비를 이용한 다짐작업



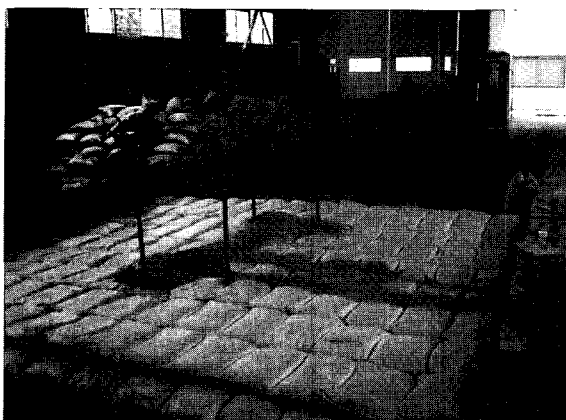
(b) 토압계 매설 전경



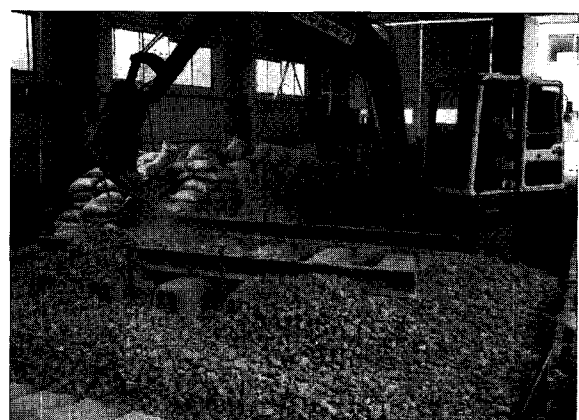
(c) 지중 침하판 매설



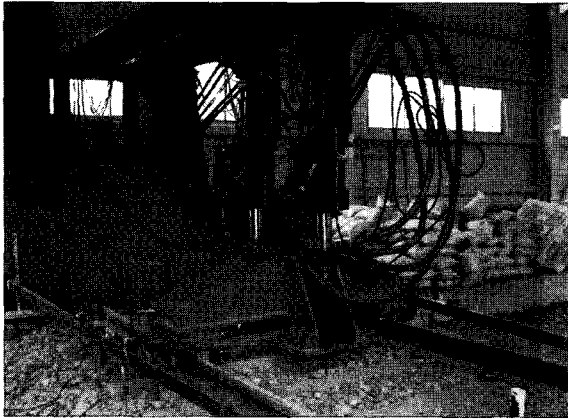
(d) 토목섬유 콘테이너 적재



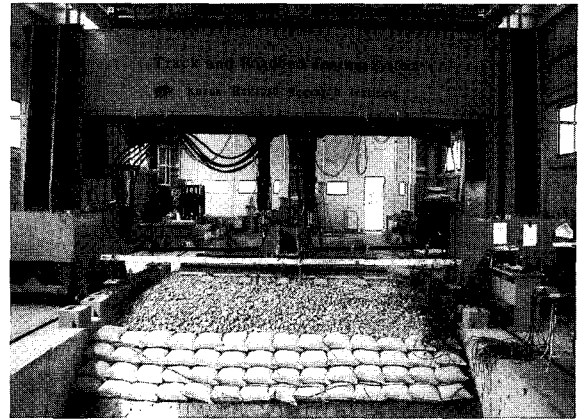
(e) 노반면 침하판 매설



(f) 궤광 부설



(g) 하중제하 장치 및 변위계 설치



(h) 완성된 토목섬유 Soilbag 축조노반

그림 3.7 실대형시험 단면조성

3.4 실대형시험 단면조성 및 계측기 설치

실대형시험에서는 그림 3.6과 같이 토압계, 침하판 및 변위계를 설치하여 계측을 수행하였으며, 시험대상 단면으로는 Soilbag을 사용하지 않은 무보강단면과 Soilbag을 4층으로 시공한 단면으로 구성하였다. 그림 3.7는 시험노반의 단면조성 과정을 보여준다.

4. 시험결과 및 고찰

본 연구에서는 모사 열차하중에 의한 정·동적거동을 평가하기 위해 단계적으로 하중을 재하하였다. 정적하중 재하시험의 경우, 열차운중 (14.3 tonf)의 40% 증가된 운중 20 tonf 까지 장비의 성능을 고려하여 하중재·제하시험을 수행하였다.

또한, 정적하중 재하시험 후 모사반복 열차하중 재하시험의 경우, 열차속도 및 기타하중을 고려하여 10, 15, 20 tonf 의 세 단계로 시험을 수행하였으며 각각의 하중에 대한 반복재하횟수는 400,000회로 결정하였다.

4.1 정적하중 재하시험

초기 궤도조건의 안정화 및 조성된 단면의 정적거동을 분석하기 위해 정하중을 단계별로 4 tonf 씩 20 tonf 까지 재하시켰다. 제하 단계에 있어서도 동일한 조건으로 시험을 수행하였다.

4.1.1 연직토압

그림 4.1은 성토 완료시 발생한 자중에 의한 토압과 정적하중(20 tonf) 재하에 의한 토압증가량, 그리고 이들을 모두 고려한 연직토압의 분포를 나타내었다. 전체적으로 노반면에서는 정하중에 의한 토압증가량이 지

적이고, 이하의 심도에서는 자중에 의한 영향이 지배적임을 알 수 있다. 노반면($h/H=1$, H :옹벽전체의 높이, h : 기초면으로부터 계측기 설치 위치)에서 계측된 토압의 경우, 무보강 단면과 Soilbag 4단 설치 단면의 결과는 유사한 반면, 심도가 증가할수록 토압의 증가분은 Soilbag 보강단면에서 감소함을 알 수 있다.

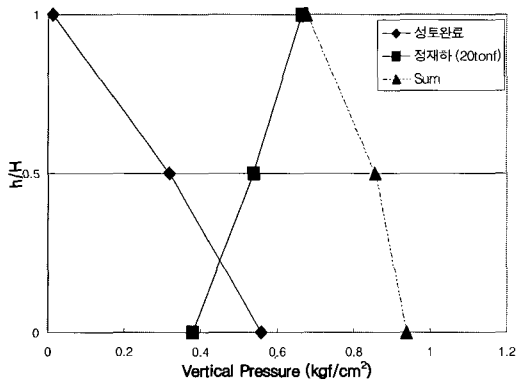
특히, Soilbag이 설치된 심도 하단($h/H=0$)에서의 토압은 무보강단면의 동일심도에 비해 약 30%정도의 응력감소가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 Soilbag의 채움재를 노반 성토체에 비해 경량재료로 사용한 점, 그리고 Soilbag의 기하학적인 불연속 거동으로 인한 하중분산효과에 기인한 것으로 판단된다.

또한, 1m 심도에서의 연직토압분포를 단면별로 살펴본 결과(그림 4.2 참조), Soilbag 설치시 확연한 토압감소 효과를 확인할 수 있었다.

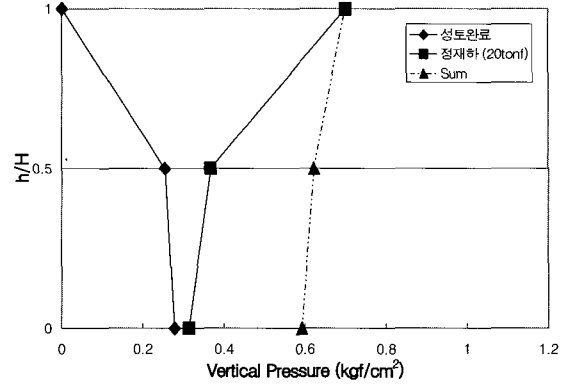
4.1.2 연직변위(침하량)

그림 4.3은 정적하중 재하 및 제하과정을 통해 계측된 노반면에서의 침하곡선을 나타낸다. Soilbag을 시공함으로써 발생하는 침하량은 무보강 경우에 비해 현저히 감소하는 것을 볼 수 있다. 즉, Soilbag 4단 설치시의 탄성변위 및 소성변위는 각각 0.56, 1.88mm 무보강 단면에서는 각각 1.97, 7.92mm로서 정량적으로 무보강 단면에 비해 침하량에서 72~76%의 저감효과를 나타내고 있다. 이는 외력에 의해 발현된 Soilbag의 인장력으로 인해 Soilbag 내부의 채움재 상호간에 추가적인 결속력(binding force)이 작용한 것으로 판단된다.

전체 연직변위에 대한 탄성변위의 비율을 살펴보면, 4단 설치시 23%, 무보강의 경우 20%로서 토목섬유 Soilbag이 좀더 민감한 탄성거동을 보였다.



(a) 무보강



(b) Soilbag 4단 보강

그림 4.1 심도에 따른 연직토압 분포

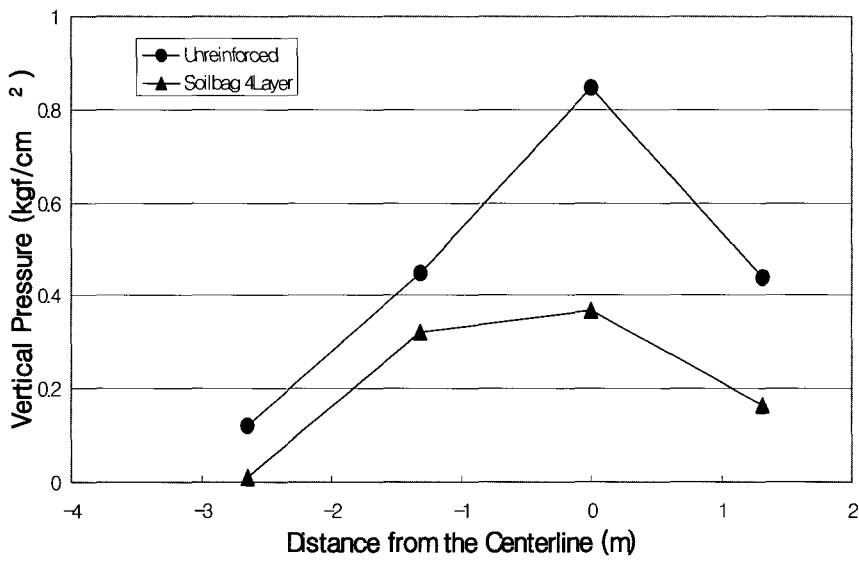


그림 4.2 1m 심도에서의 연직토압분포

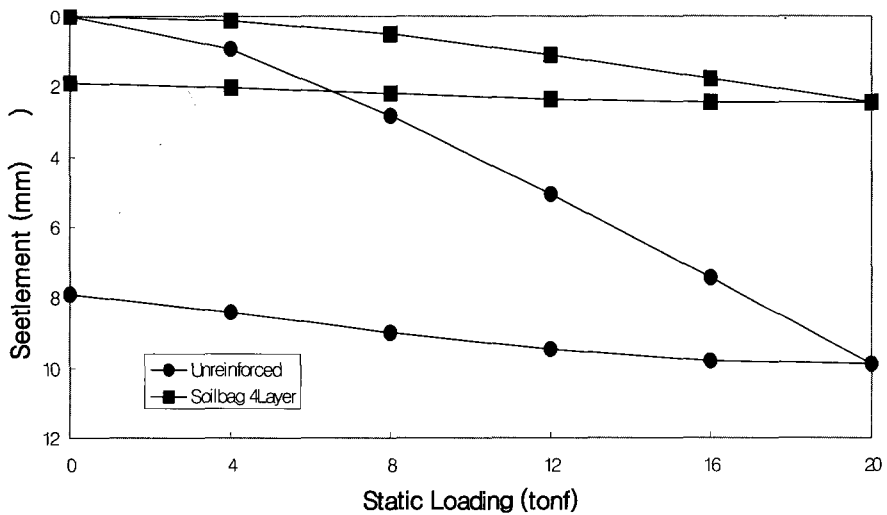


그림 4.3 정적하중 재하·제하시 침하량 곡선

4.2 모사반복 열차하중 재하시험

유도상 궤도상의 열차하중은 레일, 침목에 의해 횡방향으로 분산되며, 도상자갈은 이러한 분산하중을 탄성적으로 지지하며 수직방향 하중을 또 다시 분산시키는 기능을 하게 된다. 또한, 하중이 장기적으로 반복 재하되면 이에 따른 누적 변형 등 동적 거동특성이 변화하게 된다. 따라서, Soilbag 단면과 무보강 단면의 모사반복 열차하중 재하에 따라 각각의 단면에 발생한 토압진폭과 변위진폭에 대한 계측 및 분석을 수행하였다.

4.2.1 연직 토압진폭

그림 4.4는 Soilbag 4단 시공시 모사반복 열차하중 재하면적 내에 설치한 토압계에서 발생한 연직 토압진폭을 재하횟수에 따라 나타내었다. 동적하중은 초기 400,000회는 10 tonf, 다음 400,000회는 15 tonf, 마지막 단계에서는 20 tonf의 최대하중을 재하하였다. 직접적인 반복하중의 영향을 받는 PV11은 도상자갈 혹은 궤광의 영향으로 인해 비교적 유동적인 토압의 변화를 보여주고 있으나 노반면으로부터 각각 1, 2m 깊이에 설치된 PV8, PV4의 경우는 최대 0.12 kgf/cm²의 토압을 초과하지 않는 상태를 보이고 있다. 또한, 충격계수를 고려한 열차운중(14.3 tonf)과 유사한 15 tonf의 동적하중 재하시 응답(Box 영역)을 무보강단면과 비교하여 나타내면 그림 4.5와 같다. 그림에서 보이는 바와 같이, Soilbag 단면에서의 연직 토압진폭은 무보강 단면에 비하여 1/2~1/3 수준의 분포를 보이고 있어 정적하중 재하시와 동일하게 반복하중에 대해서도 상당한 토압저감효과를 보이는 것을 알 수 있다.

4.2.2 연직소성변위(장기침하량)

모사반복 열차하중 재하에 따른 무보강 단면과

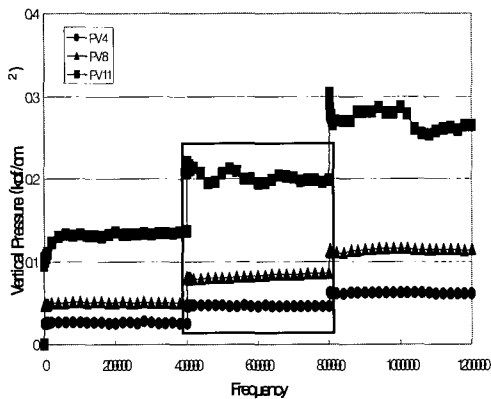


그림 4.4 연직 토압진폭(Soilbag 4단)

Soilbag 단면에 발생한 연직소성변위 즉 장기적인 침하량은 그림 4.6과 같다. 계측결과, 노반면에서의 침하(0cm)는 3.1mm(unreinforced), 2.9mm(Soilbag 4단)의 침하량을 보이고 있으나 노반면으로부터 침도 60cm에서의 침하량은 각각 2.08mm(unreinforced), 0.92mm(Soilbag 4단)로서 상당한 차이를 보이고 있다. 따라서, 토목섬유 Soilbag은 열차하중에 대한 장기적인 측면에서의 침하억제효과 뿐만이 아니라 노반 건설 초기에 발생할 수 있는 상당한 양의 침하도 제어할 수 있는 기능을 가지고 있는 것으로 평가된다.

4.3 Soilbag의 인장강도 변화

토목섬유 Soilbag에 발생하는 인장특성은 여러 가지 외부요인들에 의하여 변화하게 되는데, 본 연구의 실험대형시험의 경우에 있어서는 재료자체의 내화학적, 자외선 및 일광에 대한 저항성보다는 주로 장기적인 반복하중에 의한 토목섬유의 저항성에 영향을 받는 것으로 판단된다. 따라서 총 120만회의 반복하중 재하 후, 흙노반과의 경계면(1단)에 설치한 Soilbag과 도상자갈층과의 경계면(4단)에 설치한 Soilbag에 대한 광폭인장강도 시험을 수행하였다.

표 4.1에서 MD의 경우, 초기 극한 인장강도와 시험 완료 후 극한 인장강도를 비교한 결과, 1단의 MD에서는 9%, 4단에서는 15%정도의 인장강도 감소를 나타내고 있다. 모든 경우에서 설계인장강도(2.5 tonf/m)를 상회하는 것을 알 수 있다. 또한, CD의 경우에 있어서는 강도저감의 변화를 보이지 않았다. 따라서 실험대형시험 결과를 근거로, Soilbag은 장기적인 반복하중하에서도 내구성에 대해 안정성을 유지하고 있음을 알 수 있었다. 또한 실험대형시험 종료시 Soilbag의 상태를 유관으로 관찰한 결과, 도상자갈과의 상호작용에도 물리적인 손상 없이 내구성이 유지되고 있음을 알 수 있었다.

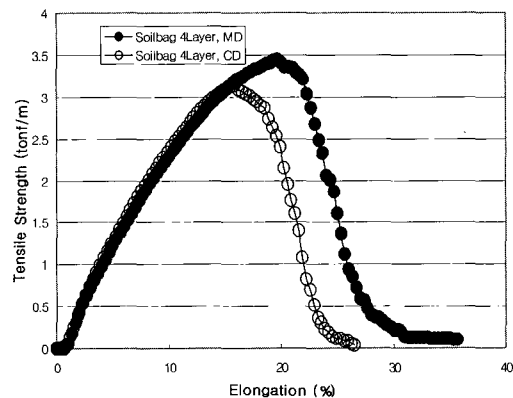


그림 4.5 연직 토압진폭의 비교

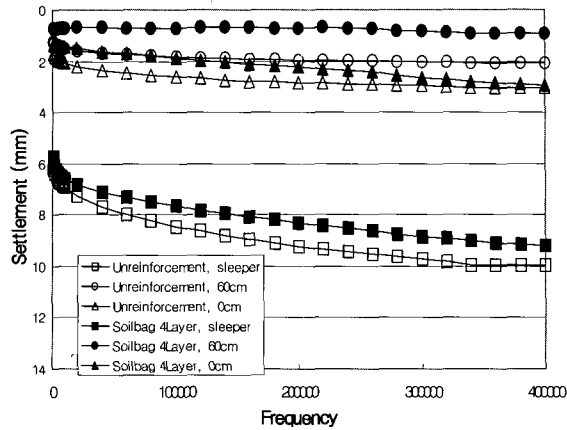
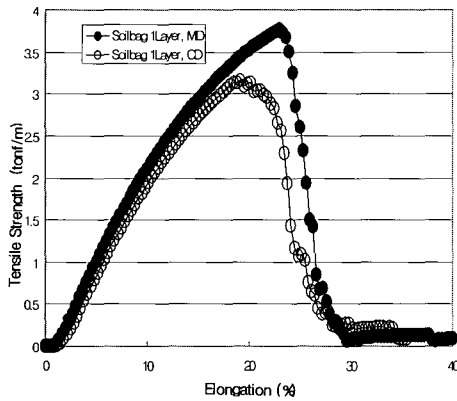
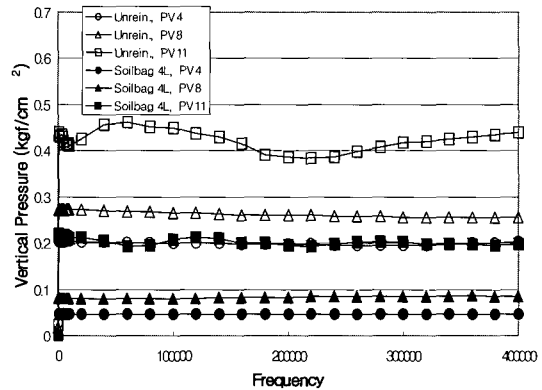


그림 4.6 소성변위의 비교



(a) 흑노반과의 접촉면에 설치한 Soilbag



(b) 도상자갈과의 접촉면에 설치한 Soilbag

그림 4.7 각 층별 Soilbag의 인장강도

표 4.1 각 층별 Soilbag의 인장강도 비교

구분	초기인장강도		실대형시험 후 1단		실대형시험 후 4단	
	MD	CD	MD	CD	MD	CD
인장강도 (tonf/m)	4.08	3.14	3.74	3.14	3.44	3.14
신율 (%)	16.33	10.9	23.29	19.15	19.68	15.89

* 설계인장강도 : 2.5 tonf/m

* MD : Machine Direction

* CD : Cross Machine Direction

5. 결론

본 연구에서는 일반적인 철도성토재료인 화강풍화토 축조노반과 Soilbag 축조노반에 대한 모사반복 열차하중 재하 실대형시험을 통해, Soilbag의 정량적인 보강효과와 성능 및 안정성을 평가하였다.

1. Soilbag의 하중분산 효과 : 연직도압 계측결과를 통해, Soilbag 채움재로 사용된 경량재료의 특성,

Soilbag 재료자체의 인장특성, 그리고 축조된 Soilbag 간의 접촉면에서 발생하는 불연속적인 거동에 의한 하중분산효과를 확인하였다.

2. Soilbag의 침하저감 효과 : 열차하중에 의해 발견된 Soilbag의 인장력은 Soilbag 내부의 채움재 상호간에 추가적인 결속력(binding force)을 발생시키고 다이러턴시를 구속하여 침하저감 효과를 보였다. 또한, 이러한 반복하중 재하횟수에 따른 침

하거동을 통해, Soilbag 공법이 장기적인 측면에서의 침하억제 효과 뿐 만이 아니라 철도노반 건설 초기에 발생할 수 있는 상당한 양의 침하도 제어할 수 있는 기능을 가지고 있는 것으로 평가되었다.

3. 실험시험 완료 후, 시험에 사용된 Soilbag에 대한 팽폭인장시험을 수행한 결과, 장기적인 반복하중하에서도 내구성에 대해 안정성을 유지하고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산·학·연 공동연구개발사업의 일환으로 건설교통부의 연구지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(2004), “강우로 인해 유실된 선로복구를

위한 토목섬유 콘테이너의 실용화 기술개발” 2001년 산·학·연 공동연구개발사업 최종보고서

2. 조삼덕(2000), “지오텍스타일 콘테이너 공법의 현장 적용 및 평가”, 2000토목섬유 특별 세미나 논문집, 한국지반공학회 토목섬유기술위원회, 2000년 9월, pp.17-31

3. 한국철도기술연구원(2001), “철도강화노반재료 및 지지력 강화방안에 관한 연구” 철도시스템 기반기술개발- 토구조물 최적설계 기술분야 연구보고서.

4. Annual Book of ASTM Standards(1999), Geosynthetics.

5. H. Matsuoka, S. H. Liu, R. Shimao & T. Hasebe, (2003) “An environment-friendly Earth Reinforcement Method by Soilbags.

6. Hajime Matsuoka & Sihong Liu(2001) “ Mechanical properties of soilbags and their applications to earth reinforcement.