

철도노반 보수용 토목섬유 콘테이너의 정적 거동특성 분석

Static Behavior of Geotextile Container for Urgent Restoration of Rail Roadbed

신은철*
Shin, Eun-Chul

고태훈**
Koh, Tae-Hoon

조인휘***
Cho, In-Hui

이준철***
Lee, Jun-Chul

ABSTRACT

Utilizing of the geotextile container shows several advantages such as standardized construction, factory manufactured products, the control of quality, workability, and economical point of view. Recently this technique can be applied to rehabilitate the loss of rail roadbed due to the heavy rainfall. In this study, a large-scale laboratory test were conducted with simulation of static performance on the geotextile container reinforced rail roadbed.

Based on the laboratory test results, the vertical pressure distribution with respect to the depth, and settlement of rail roadbed were measured and compared test results between geotextile container reinforced case and unreinforced case. Thus, the effectiveness of reinforcement was evaluated in terms of its performance and stability.

1. 서 론

토목섬유 콘테이너 공법은 하천 또는 해안에서 침식방지 구조물이나 제방을 축조할 경우 사용되는 공법으로, 토목섬유 포대 내에 기계적 또는 수리학적 방법을 통하여 준설토 또는 모래 등의 토사를 채워 구조물을 형성하는 공법이다. 토목섬유 콘테이너 공법은 규격화, 모듈화 된 토목섬유 콘테이너를 다수 사용하기 때문에 품질 관리에 따른 유지보수 문제를 최소화하고, 쇄석 채취로 인한 인근 석산의 파괴문제와 준설토의 처리문제 등을 자연스럽게 해결하며 더 나아가 시공 시 환경오염을 최소화시킬 수 있어 자연·환경친화형 기술로 크게 평가받고 있다. 따라서, 최근 국지성 호우에 의한 선로나 그 연변 사면의 붕괴 혹은 유실로 인하여 발생하는 선로 복구에 보다 경제적이고 시공성에 유리한 토목섬유 콘테이너 공법을 적용하고자 본 연구를 수행하였다.

철도하중은 일정한 하중과 주행에 의해 발생하는 동하중, 횡하중, 풍화중, 제동하중, 충격하중, 원심력에 의한 하중 등이 동시에 반복적으로 작용하는 복잡한 메카니즘을 가지고 있다. 노반에서의 하중에 의한 거동특성을 분석하는 것은 이론적인 접근 또는 실험실에서의 모형실험과 동시에 실현장 상황을 모사하여 실험실실험을 수행하는 것 또한 효과적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 토목섬유 콘테이너 축조노반 위에 모사열차하중을 재하할 수 있는 종합 궤도노반 실험장비를 이용하여 실험실 실험을 실시하였다. 본 실험을 통하여 토목섬유 콘테이너 축조노반에 발생하는 토압분포와 침하량 등을 계측하고 화강풍화토로 축조된 무보강 단면과 비교하여 정량적인 보강효과와 성능 및 안전성을 평가하였다.

* 인천대학교 토목환경시스템공학과 부교수, 정회원

** 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

*** 인천대학교 토목환경시스템공학과 석사과정, 비회원

2. 실험실 장비

2.1 하중재하 장치 및 모형토조

모사열차하중실험에 사용되는 장비는 한국철도기술연구원에서 보유하고 있는 종합케조노반실험장비로서 그림 1과 같으며, 이는 실제 현장의 철도노반 상황을 모사하고, 현장계측에서 오는 문제점을 해결하도록 실내에서 실험을 수행할 수 있는 장점을 가지고 있다. 토조는 폭 5m, 높이 3m, 길이 15m의 대형토조를 사용하였으며, 하중재하장치는 최대 25 tonf 까지 하중의 재하가 가능하다(그림 2참조).

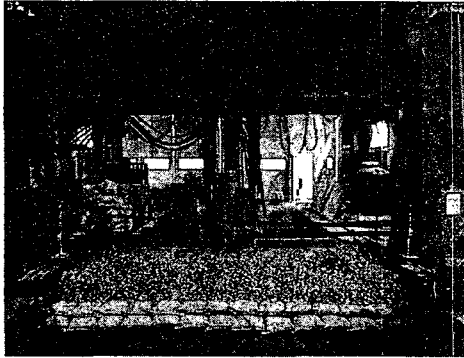


Fig.1 종합케조노반실험장비

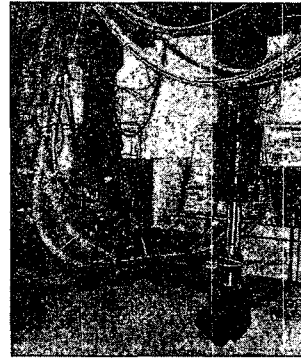


Fig.2 하중재하장치

2.2 모형지반

일반적으로 철도노반의 재료는 양질의 자연토로서 노반 분리가 발생하지 않고, 진동이나 유수에 있어서도 안정해야 하며 열차하중을 지지할 수 있는 강도가 있어야 한다. 본 실험에서는 표 1과 같이 통일분류범상 200번체 통과량이 5%미만인 SP시료를 노반재료로서 사용하였다.

표 1. 실험재료의 공학적 특성

비 중	최대건조 밀도 $tonf/m^3$	최적 함수비 (%)	내부 마찰각 (°)	점착력 $tonf/m^2$	흙의 분류 (USCS)
2.64	2.01	10.2	38	2.45	SP

표 2. 들밀도 실험결과

물성치	구분		
	기초층	기초층으로부터 1m 높이	노반면 상단
함수비 (%)	10.59	11.01	10.55
습윤단위중량 $tonf/m^3$	2.11	2.04	2.05
건조단위중량 $tonf/m^3$	1.91	1.84	1.85

실험실시험시 축조노반을 소정의 다짐도로 관리하기 위해 실내 표준다짐 시험에서 결정된 건조단위중량을 근거로 하여 다짐롤러에 의한 다짐을 실시하였다. 특히 기초지반은 모형시험결과에 영향을 미치지 않도록 충분한 다짐이 필요하다. 따라서 기초지반은 3.5 tonf의 롤러를 이용하여 왕복 5회 다짐을 실시함으로써 표2에 나타난 들밀도 시험결과와 같이 다짐도가 95%이상인 값을 얻을 수 있었다. 실험단면의 조성은 같은 용량의 롤러로서 6회 다짐을 실시하였으며, 기초지반으로부터 1m높이, 노반면 상단의 다짐도를 측정한 결과 90%이상의 값을 얻을 수 있었다. 이는 강우로 유실된 노반을 모사하기 위하여 실험단면을 철도노반설계기준보다 낮은 다짐도로서 단면을 형성하기 위함이다.

3. 토목섬유 콘테이너

직포형 토목섬유는 직조과정에서 MD(Machine Direction), CD(Cross-Machine Direction)로 구분되며, 방향에 따라 공학적 성질이 상이하게 된다. 또한 콘테이너 내부에 채움재를 넣어 완성된 토목섬유 콘테이너는 토목섬유만의 전단특성과는 다른 채움재와 토목섬유의 상호작용에 의한 역학적 거동을 보이기 때문에, 토목섬유 콘테이너의 MD·CD방향의 접촉시 전단특성을 알아보기 위하여 대형전단시험을 수행하였다. 토목섬유 콘테이너의 공학적인 특성을 토목섬유 부분과 채움재 부분으로 나누어 정리하면 표 3과 같다.

그림 3과 같이 30 cm×30 cm×19 cm 크기의 토목섬유 콘테이너에 모래를 채움비 90%로 제작한 후, 상재하중 1.2 kgf/cm²을 단계적으로 재하하면서, 1mm/min의 전단속도로 시험을 실시하였다.

표 3. 토목섬유 콘테이너의 공학적 특성

구분	토목섬유 (PP)			채움재 (모래)		
	최대인장강도 (tonf/m)	신장률 (%)	유효입경 (D ₉₀ , mm)	비중	최대전조밀도 (γ _{dmax} , t/m ³)	투수계수 (cm/sec)
물성치	4.0	16	0.188	2.61	1.68	0.5×10 ⁰

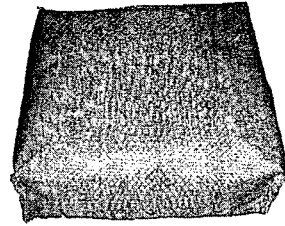


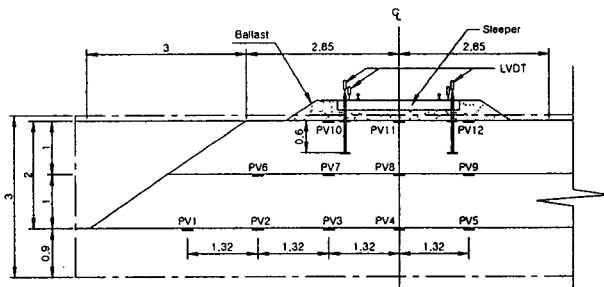
Fig.3 토목섬유 콘테이너

PP(Polypropylen) 재질의 토목섬유는 MD의 경우 면이 더 부드럽고, CD의 경우가 더욱 거친면임을 육안으로 쉽게 판단할 수 있다. 마찰각에 대해서는 실험결과, 24.3° ~ 20.3°의 범위에서 CD vs. CD, CD vs. MD, MD vs. MD의 순서로 큰 것을 알 수 있다. 실험결과를 토대로 토목섬유 콘테이너의 시공시 쌓기 방법을 고려한다면, CD vs. CD의 쌓기 방법이 사면의 활동에 대해 보다 안전하리라 판단되지만, 본 실험실에서는 보수적인 설계로서 MD vs. MD의 쌓기 방법으로 단면을 조성하였다.

4. 실험단면조성 및 실험하중

4.1 노반조성 및 계측기 설치

실험실에서는 토압계, 침하판 및 변위계 등과 같은 계측기를 설치하여 계측을 실시하였으며, 실험단면으로는 무보강 단면과 토목섬유 콘테이너를 2층 및 4층으로 보강한 단면을 조성하였다.



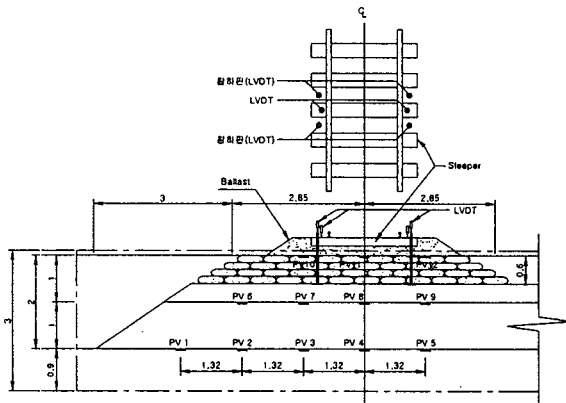
(a) 실험 단면도



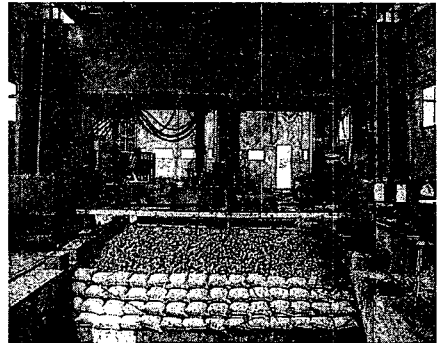
(b) 무보강 실험 단면 전경

Fig.4 무보강 실험 단면

노반의 높이는 총 2m로서 노반하부의 기초층은 앞서 언급한 바와 같이 충분한 다짐을 실시한 후, 상부에 PV1~PV5의 토압계를 설치한다. 토압계는 무보강 단면도인 그림 4에 나타난 바와 같이 궤도의 중심부로부터 각각 1.32m간격으로 설치되었다. 이후 유효높이 20cm간격으로 흙을 포설하여 다짐을 실시하면서 단면을 형성하고, 기초층으로 부터 1m, 2m높이에 각각 PV6~PV9, PV10~PV12의 토압계를 매설하였다. 침하판은 연직 변위량을 계측하기 위해서 노반면 상단으로부터 0.6m깊이와 노반면 최상단에 설치하였다. 노반이 완료되면, 도상자갈을 30cm 포설한 후, 레광을 부설한다. 완성된 토목섬유 콘테이너 4층 단면의 단면도와 전경은 그림 5와 같다.



(a) 실험 단면도



(b) 토목섬유 콘테이너 4단 단면의 전경

Fig.5 토목섬유 콘테이너 4단 실험단면

4.2 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 장대레일 구간에서 적용되고 있는 충격계수(i)를 적용하여 산정한 결과 충격계수는 1.6을 사용하였다.

위의 조건들에 따른 설계 윤중을 구해보면 다음과 같다.

$$\text{설계윤중} : P_w = P_{st} + S_p = 11 + 3.3 = 14.3 \text{ tonf}$$

$$\text{여기서, } S_p = 0.5 \times P_{st} \times (i - 1) = 0.5 \times 11 \times (1.6 - 1) = 3.3 \text{ tonf}$$

$$P_{st} = 11 \text{ tonf} \text{ (정하중, 정적축중의 1/2)}$$

$$i = 1 + 0.3 V/100 = 1.6 \text{ (충격계수, 장대레일)}$$

$$V = 200 \text{ km/hr (설계속도)}$$

이상의 계산결과에 의해, 실험에 재하되는 축중은 28.6 tonf, 윤중은 14.3 tonf으로 결정하였다. 본 연구에서는 이 윤중을 기초로 하여, 결정된 윤중의 약 40%까지 증가된 20 tonf의 윤중을 각 단계별로 4 tonf씩 재하 및 제하 하였다.

5. 실험결과 및 분석

5.1 연직토압

그림 6은 성토단계에서 발생한 자중에 의한 토압과 모사열차하중 재하에 의한 토압증가량, 그리고 이들을 모두 고려한 연직토압의 분포를 나타내었다. 전체적으로 노반면에서는 정하중에 의한 토압증가량이 지배적이고, 이하의 심도에서는 자중에 의한 영향이 지배적임을 알 수 있다. 노반면에서 계측된 토압의 경우, 무보강 단면과 토목섬유 콘테이너 4단 설치 단면의 결과는 유사한 반면, 심도가 증가할수록 토압의 증가분은 보강단면에서 현저히 감소함을 알 수 있다.

특히, 토목섬유 콘테이너가 설치된 심도 하단에서의 토압은 무보강단면의 동일심도에 비해 약 30% 정도의 응력감소가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 토목섬유 콘테이너의 채움재를 노반 성토재에 비해 경량재료로 사용한 점, 그리고 토목섬유 콘테이너간의 기하학적인 불연속 거동으로 인한 하중분산 효과에 기인하는 것으로 판단된다.

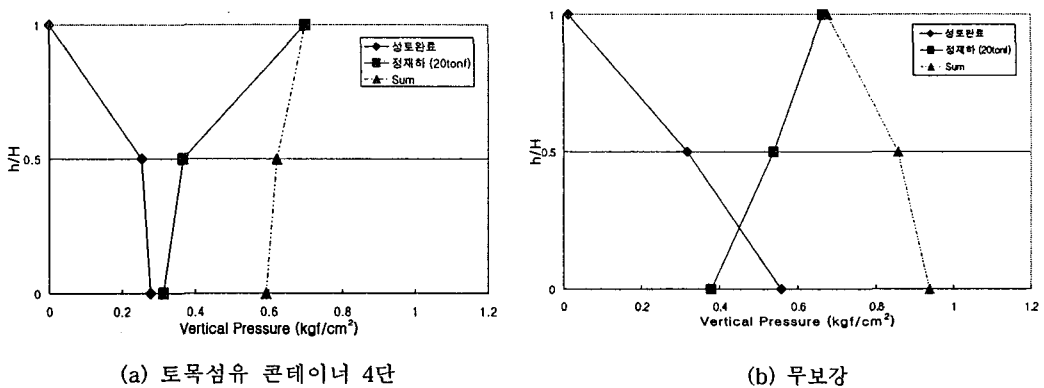


Fig.6 토층 심도에 따른 연직 토압분포도

특히, 그림 7의 중심으로부터 이격거리에 따른 연직토압분포를 살펴보면, 무보강 단면이 가장 큰 값을 보이며 2단, 4단 설치의 순으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 토목섬유 콘테이너의 채움재로 사용된 경량재료의 특성과 토목섬유 콘테이너 재료자체의 인장특성, 그리고 시공된 토목섬유 콘테이너 간의 접촉면에서 발생하는 불연속적인 거동에 의한 하중분산효과에 기인하는 것으로 판단된다.

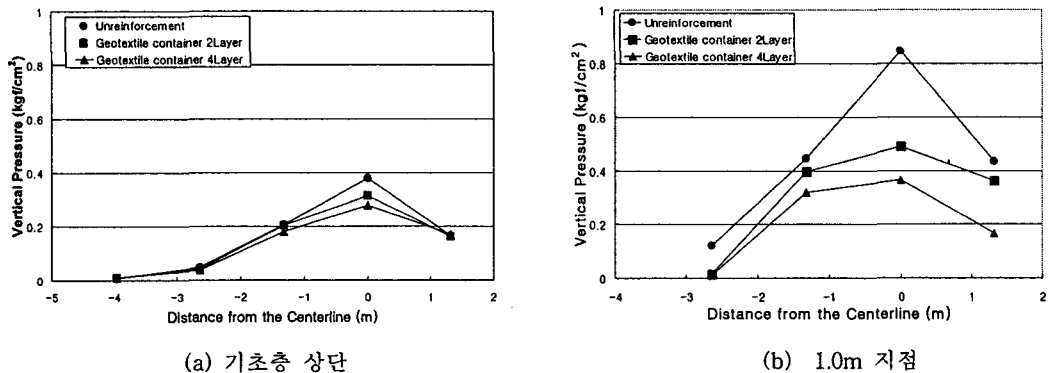


Fig.7 중심으로부터 이격거리에 따른 연직토압분포도

5.2 연직변위(침하량)

정적하중 재하에 따른 침하량은 그림 8은 정적하중의 재하 및 제하 곡선을 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 토목섬유 콘테이너 보강한 단면에서 무보강 단면에 비해 상대적으로 작은 연직변위가 발생하는 것을 알 수 있으며, 또한, 토목섬유 콘테이너가 4단으로 설치된 단면이 2단으로 설치된 단면보다 침하가 작게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

이는 토목섬유 콘테이너 내부채움재의 압축변형특성과 토목섬유 콘테이너 자체의 인장변형 특성을 고려할 때 토목섬유 콘테이너의 하중분담에 따른 침하저감효과라 할 수 있다.

재하 및 제하 곡선으로부터 각각 단면의 탄·소성변위를 살펴보면, 토목섬유 콘테이너 4단 설치시의 탄성변위 및 소성변위는 각각 0.559, 1.884mm, 무보강 단면에서는 각각 1.972, 7.917mm로서 정량적으로 무보강 단면에 비해 침하량에서 72~76%의 저감효과를 나타내고 있다. 이는 채움재의 공학적 장점과 토목섬유 콘테이너 보강효과에 기인하는 것으로 판단된다. 전체 수직변위에 대한 탄성변위의 비율을 살펴보면, 4단 설치시 23%, 무보강의 경우 20%로서 토목섬유 콘테이너 단면이 더욱 민감한 탄성거동을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 흙노반 재료에 비해 탄성적 거동을 보이는 채움재의 특성과 토목섬유 콘테이너 재료 자체의 인장특성에 의한 것으로 판단된다.

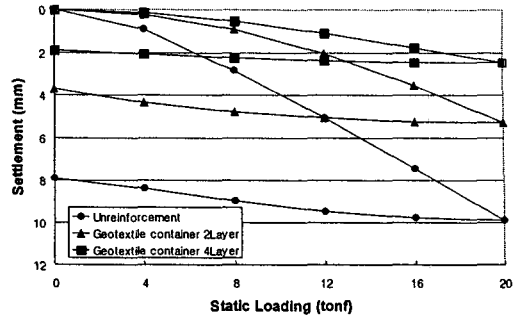


Fig.8 침하량의 Hysteresis 곡선

6. 결론

본 연구에서는 일반적인 철도 성토재료인 화강풍화토 축조노반과 토목섬유 콘테이너 축조노반에 대한 모사열차하중 재하 실험을 통해, 토목섬유 콘테이너의 정량적인 보강효과와 성능 및 안정성을 평가하였다.

1. 토목섬유 콘테이너의 하중분산효과 : 연직토압 계측결과 토목섬유 콘테이너 채움재로 사용된 경량 재료의 특성, 토목섬유 콘테이너 재료자체의 인장특성, 그리고 시공된 토목섬유 콘테이너 간의 접촉면에서 발생하는 불연속적인 거동에 의한 하중분산효과를 고찰하였다.
2. 토목섬유 콘테이너의 침하저감 효과 : 토목섬유 콘테이너 채움재의 압축변형특성과 토목섬유 콘테이너 자체의 인장변형 특성을 고려할 때 토목섬유 콘테이너의 하중분담에 따른 침하저감 효과를 확인하였으며, 철도노반 건설 초기에 발생할 수 있는 상당한 양의 침하도 제어할 수 있는 기능을 가지고 있는 것으로 평가되었다.

7. 참고문헌

1. Annual Book of ASTM Standards(2002), Geosynthetics
2. Coenraad Esveld (2001), Modern Railway Track 2nd edition, MRT-Production
3. Koerner, R.M (1997), Designing With Geosynthetics, pp 113~115, pp 436~449
4. Ernest T. Selig and John M. Waters (1994), Track Geotechnology and Substructure Management, Thomas Telford