철도노반 긴급복구를 위한 토목섬유 컨테이너의 파괴형태 분석
Analysis of Failure Mode of Geotextile Container for Urgent Rehabilitation of Railroad Bed

신은철* 이명호** 이준철**
Shin, Eun-Chul Lee, Myeng-Ho Lee, Jun-Chul

ABSTRACT

This study was under taken as an analysis of failure mode in a railroad bed reconstructed with miniaturized Geotextile Container after being destroyed by heavy rain. It asesses the practical use of the bag shaped Geotextile Container method in the rehabilitation of destroyed roadbeds. The failure mode was assessed using the laboratory model tests to determine the following criteria: Strain of Geotextile Container, Vertical & Horizontal displacements of Geotextile Container layer, and the transmitting load effects due to the applied load. The Geotextile Container layer was failed as a Block Failure type, although there was some variation in the results between the saturated and unsaturated conditions. The main failure was caused by the reduction of the interface friction between Geotextile Containers. The result of this mobilizes the significant horizontal displacement and the ultimate failure of the Geotextile Container layer. The strain on the wet Geotextile Container was occurred about two times greater than that of dry condition.

1. 서론

최근 태풍과 집중호우로 인해 철도 노반의 유실과 사면의 파괴로 인적 물적 피해는 물론 복구를 위한 비용이 증가하고 있는 실정이다. 현재 사용되고 있는 유실된 철도노반의 긴급 복구방법은 자갈을 부설하여 철도노반을 임시로 복구 한 후 이것의 안정화를 위한 2차적인 보강 비용이 필요하다. 이러한 유실된 철도노반의 복구를 위한 방법으로 토목섬유 컨테이너 를 이용하여 시공을 규격화하여 2차적인 보강비용을 줄이기 위한 방법을 연구하였다. 본 연구에서는 토목섬유 컨테이너 에 사용되는 토목섬유의 재료 특성과 장기 설계인장강도, 토목섬유 컨테이너의 마찰시험 등을 통하여 선정된 토목섬유 컨테이너를 실제 사면에 적용하였을 때, 그 파괴형태를 분석하기 위하여 모형 사면을 조성하고 하중을 재하하였다. 철도하중이 가해졌을 때, 토목섬유 컨테이너의 하부 및 측면의 strain을 측정하여 실제 토목섬유에 작용하는 응력을 분석하였다. 또한, 수직변위, 수평변위 및 각 층에 전달되는 응력을 측정하여 토목섬유 컨테이너의 Stress-Strain 관계를 분석하였으며, 파괴모드를 규명하였다.

2. 토목섬유 컨테이너의 파괴메카니즘 규명 모형실험

2.1 대상 재료의 특성

본 연구에서는 토목섬유 컨테이너의 파괴의 형상을 알아보기 위하여 PP(Polypropylen)재질의

* 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 교수, 정회원
** 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과 석사과정

직포(Woven)를 이용하여 백 형태(17cm × 11cm, 실제크기 면적의 의 1/16)의 를 제작하고 컨테이너 채움재로 배수성이 좋은 모래를 선정하여 파괴모형실험을 수행하였다. 토목섬유 컨테이너의 재료인 지오텍스타일의 인장강도 시험결과 MD(Machine Direction, 토목섬유 제작 시 기계에서 나오는 방향)의 인장강도는 4.1 tonf/m, CD(Cross Machine Direction, 토목섬유 제작 시 기계에서 나오는 방향의 직각방향)의 인장강도는 3.1 tonf/m로 나타났으며, 유효입경(Effective Opening Size) 시험결과 유효입경 D_{90} = 0.19mm이고, 토목섬유 간의 대형전단시험결과, MD와 MD의 마찰각은 21도, CD와 MD의 마찰각은 21.85도, CD와 CD의 마찰각은 25.19도로서 CD와 CD방향의 마찰각이 가장 컸다. 내부 채움재인 모래의 비중, 체분석, 투수, 전단, 다짐시험 결과 다음 표1과 같은 결과를 얻었다.

표 1 내부채움재의 공학적 성질

	모래		석분	
체분석	#20 ~ #40(99%) 유효입경 이하시료 :0%		2mm 이상 시료 : 56% 유효입경 이하시료 7%	
비중	G_s = 2.61		G_s = 2.71	
다짐	지깅다짐 : γ_{max}=1.68 tonf/m^3 최소단위중량 :γ_{min}=1.35 tonf/m^3		표준다짐 : γ_{max} = 2.08 tonf/m^3	
전단	건조 : 42.3°	포화 : 41.3°	건조 : 37.2°	포화 : 35.8°
투수	0.5 × 10^0 cm/sec		1.3447×10^{-5} cm/sec	

2.2 시험방법

그림 2.1은 토목섬유 컨테이너의 파괴모형실험의 전경과 계측기의 설치 모식도이다.
토조의 크기는 가로, 세로, 높이가 150cm, 70cm, 110cm이고, 전면에는 플랙시 글라스로 파괴형태를 볼 수 있도록 하였다. 노상층으로 화강풍화토를 95% 다짐을 하여 40cm를 조성하였고, 토압계 1을 설치한 다음 통상 철도노반의 사면구배인 1 : 1.5로 쇄석층 20cm를 조성하고, 토압계 2를 설치하였다. 이때 토압계는 하중재하 Beam의 수직하부에 설치하였다. 토목섬유 컨테이너 30cm(7층)를 쇄석과 같은 구배로 수직·수평방향으로 엇갈려 포설하였으며, 그 2층(하부)과 6층(상부)에 Strain Gauge를 그림 2.1과 같이 부착하여 시험 시 토목섬유 컨테이너의 변형을 관측하였다. 실험은 포화와 불포화 두 가지 상태로 수행하였고, 하중 재하 시 각 층의 토압과 수직·수평변위, 그리고 토목섬유 컨테이너의 변형을 알아보았다.

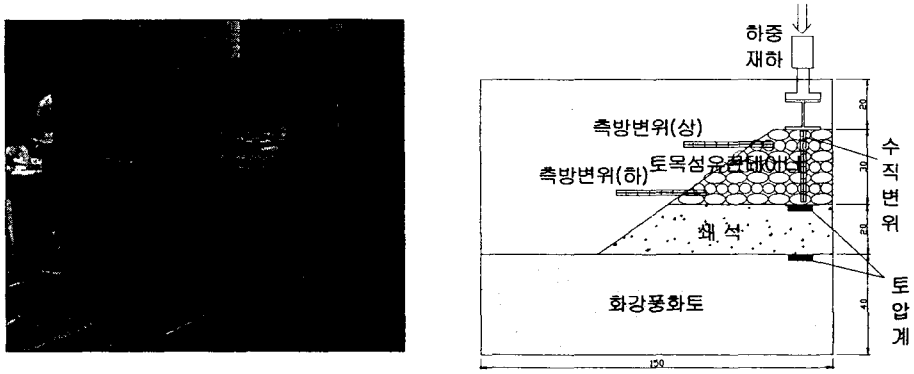

그림 2.1 토목섬유 컨테이너 파괴모형실험 전경과 계측기의 설치

2.3 시험결과 및 고찰

2.3.1 정적하중에 의한 토목섬유 컨테이너의 Strain 거동

그림 2.2는 Strain의 계측장비 TDS-301과 Strain Gauge의 설치 위치와 방향을 나타낸 그림이다.

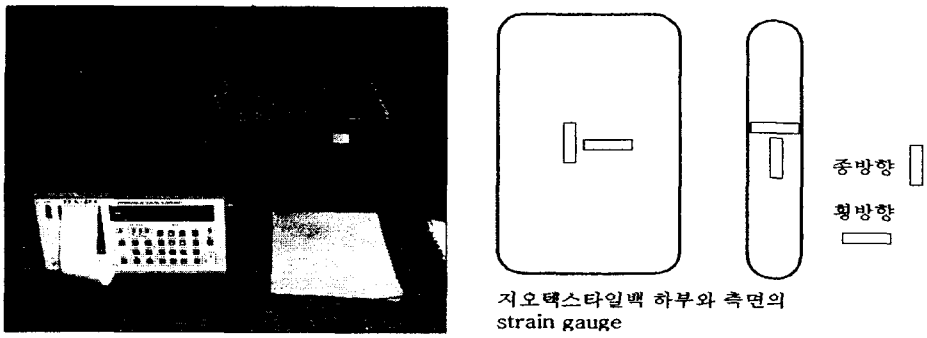

그림 2.2 Strain의 계측장비 TDS-301과 Strain Gauge의 설치 위치와 방향

그림 2.3은 불포화 조건, 그림 2.4는 포화조건에서 실험을 수행한 결과로서 토목섬유 컨테이너 상층(6층)과 하층(2층) 모두 토목섬유 컨테이너 바닥의 종방향 Strain이 가장 컸다. 상층과 하층의 다른 점은, 등분포 하중이 가해졌을 때 상층의 경우는 토목섬유 컨테이너가 밀려나는 현상으로 인하여 Strain이 감소하나, 하층의 경우는 상층의 토목섬유 컨테이너가 횡 방향으로 밀려나면서 재하판과 하층의 토목섬유 컨테이너 사이의 하중거리가 가까워짐에 따라 Strain과 토압이 증가는 경향을 보인다. Strain 계측치가 선형적인 거동을 보이다가 그 상태가 급격하게 변하는 시점을 파괴로 본다면 불포화 조건에서의 파괴는 약 3.7kg/cm^2, 포화조건에서는 약 3.2kg/cm^{2}정도로 판단되며, Strain 값이 0을 나타내는 것은 Strain Gauge가 파손된 것을 나타낸다. 시험결과를 보면 불포화 상태의 경우에는 토목섬유 컨테이너 밑바닥에 종 방향으로 붙인 Gauge에서 Strain이 파괴 시점에서 가장 큰 0.35 % ~ 0.4 %정도의 Strain값을 나타내며, 나머지 부분에서는 0.2%이하의 Strain값 나타내는 경향을 보였다. 또 포화상태의 경우에는 밑바닥 종방향 Strain은 0.7 % ~ 1.5 %정도, 나머지 부분에서는 0.15 % ~ 0.3 %정도로 나타난다. 포화조건이 불포화 조건에 비하여 Strain이 2배 이상 큰 것은 토목섬유의 성질상 습윤상태 에서는 그 신율이 크게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

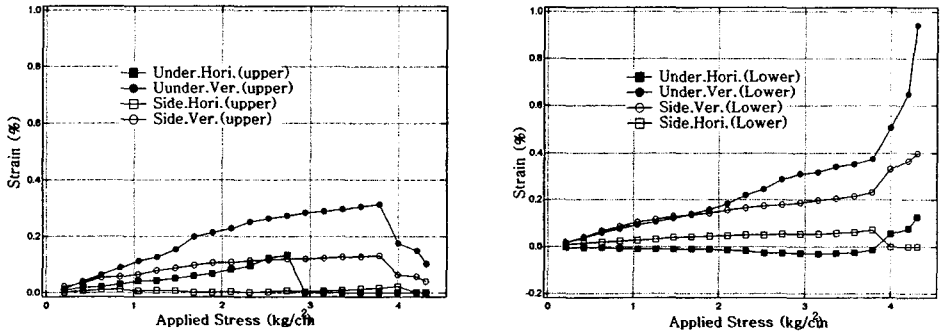

그림 2.3 토목섬유 컨테이너의 상부(6층)와 하부(2층)의 Strain 거동(불포화)

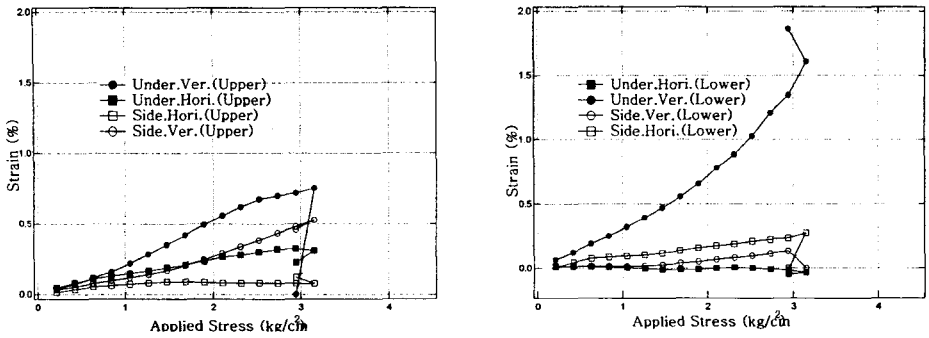

그림 2.4 토목섬유 컨테이너의 상부(6층)와 하부(2층)의 Strain 거동(포화)

2.3.2 정적하중에 의한 토목섬유 컨테이너의 수직·수평 변위의 거동

그림 2.5와 그림 2.6은 불포화 조건에서, 그림 2.6과 그림 2.7은 포화 조건에서 재하 된 응력별 변위와, 수직변위에 따른 수평변위의 변화를 나타낸 것이다.

그림 2.5와 그림 2.6을 살펴보면 약 3.7kg/cm^{2}와 3.2kg/cm^2 의 응력에서 수직·수평 변위는 변하나 더 이상의 힘이 가해지지 않는 것을 알 수 있는데, 여기서 제체의 파괴여부를 판단할 수 있다. 수평 변위의 경우 하층의 수평 변위가 상층보다 더 크게 나타나는 블록 파괴의 형태로 파괴가 나타나며 하단부가 많이 밀려나면서 그에 따라 수직 변위도 크게 일어난다. 수직 변위의 변화는 쇄석부나 토사부의 침하에 의해서도 발생하나 수직 변위의 가장 큰 원인은 토목섬유 컨테이너가 침하 하면서 수평 변위가 함께 일어나기 때문이다. 그림 2.6과 그림 2.8은 수직 변위의 변화에 따른 수평 변위의 변화를 나타낸 것인데, 수직 변위의 증가량이 수평 변위의 증가량보다 크다는 것을 알 수 있으며, 이는 하중을 가하면 토목섬유 컨테이너 층이 침하 되면서 하중을 견디다가 그 힘이 수평 방향 쪽으로 전달되어 전단마찰각이 작은 토목섬유 컨테이너 층에서 수평방향의 변위가 생기면서 동시에 수직 변위가 더 발생하여 파괴되는 양상을 보이고 있다.

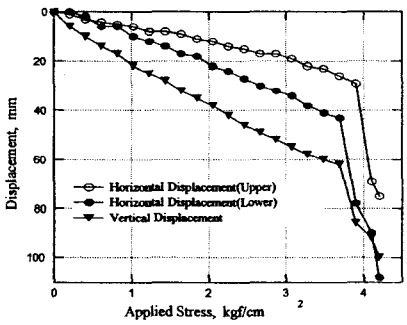

그림 2.5 재하된 응력에 따른 변위(불포화)

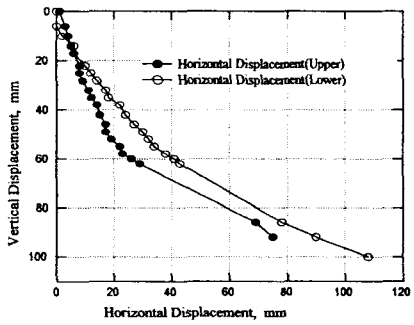

그림 2.6 수직변위에 따른 수평변위의 변화(포화)

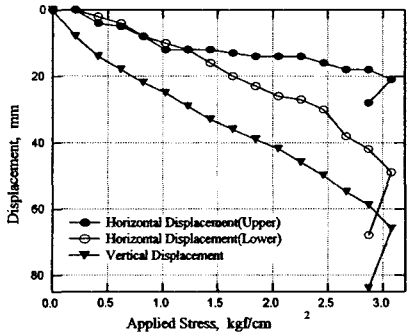

그림 2.7 재하된 응력에 따른 변위(포화)

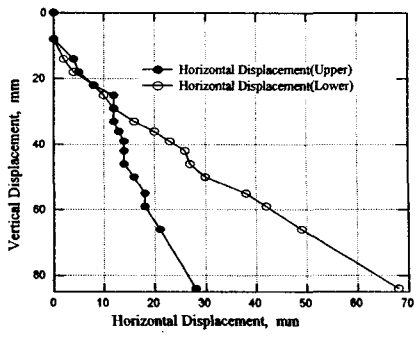

그림 2.8 수직변위에 따른 수평변위의 변화(포화)

2.3.3 정적하중에 의한 각 층별 하중의 전달

그림 2.9와 2.10은 재하 된 하중에 따른 쇄석층과 토목섬유 컨테이너층의 토압의 전달 과 전달율의 결과를 나타낸 것이다. 그림 2.9와 그림 2.10에서 쇄석층의 토압은 거의 선형적으로 증가하나 토목섬유 컨테이너 층 하부의 토압은 어느 정도까지 등분포 하중이 가해졌을 때까지는 거의 선형적으로 증가하다가 불포화 시에는 2.1kg/cm^2, 포화 시에서는 1.0kg/cm^2 넘어가면서 토압 전달율이 감소하는 경향을 나타낸다. 이런 결과는 쇄석층 아래에서는 쇄석층의 측방 유동이 거의 없기 때문에 토압의 전달이 확실한데 반하여, 토목섬유 컨테이너층 하부의 토압은 토목섬유 컨테이너가 하중의 증가에 따라서 측방 유동을 하면서 하중의 전달이 불량해 지기 때문인 것으로 판단된다.

불포화 조건에서 상층인 토목섬유 컨테이너 층 하부(하중재하 점으로부터 약 30cm)에서의 응력 전달률은 평균 69%이고, 1.0 kg/cm^{2}까지는 거의 100%의 하중이 전달되나 응력 전달률이 계속 떨어져 수직·수평 변위와 Strain값이 급격히 변하는 약 3.7 kg/cm^{2}정도에서는 응력 전달율이 33%정도까지 떨어지게 된다. 쇄석층 하부(하중재하 지점으로부터 약 50cm)의 응력 전달율은 평균 72%정도를 보이고 있다. 포화조건에서는 전체적으로 불포화 조건과 비슷한 경향을 나타낸다. 그림 2.10에서 쇄석층 하부의 토압은 불포화 조건에서와 마찬가지로 거의 선형적으로 증가하나 토목섬유 컨테이너 층 하부의 토압은 약 1.0 kg/cm^2 정도까지 등분포 하중이 가해졌을 때까지는 거의 선형적으로 증가하다가 1.0 kg/cm^{2}를 넘어가면서 토압의 전달율이 감소하는 경향을 나타낸다. 포화 조건에서의 응력 전달률은 토목섬유 컨테이너 층 하부에서는 평균 56%, 쇄석 층 하부에서는 평균 52%를 나타낸다.

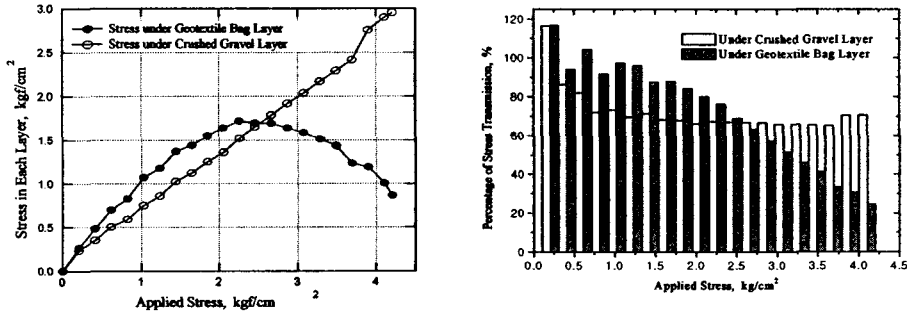

그림 2.9 재체의 층별 토압 전달과 응력 전달율(불포화)

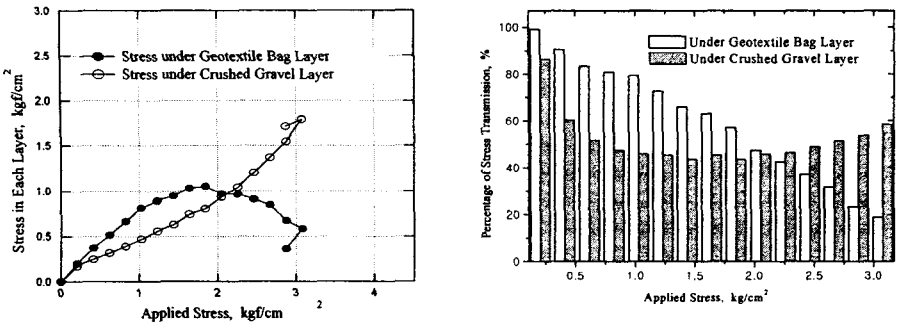

그림 2.10 재체의 층별 토압 전달과 응력 전달율(포화)

3. 토목섬유 컨테이너의 파괴메카니즘 실험의 결론

1. 변형, 변위, 토압의 3가지로 파괴메카니즘을 분석하였는데, 제체의 파괴는 가해진 하중에 의하여 수직 변위가 발생함에 따라 토목섬유 컨테이너의 Strain이 증가하며 전단마찰각이 비교적 작은 토목섬유 컨테이너 층에서 수평 변위가 발생하면서 파괴가 시작되고, 하중이 증가함에 따라 토압의 전달로 인하여 수직 변위, 수평 변위, Strain이 증가하여 마침내는 파괴에 이르는 파괴메카니즘을 갖는다.

2. 전체적으로 불포화 조건과 포화 조건을 비교하여 보면 토목섬유가 젖으면 신율이 커지기 때문에 불포화 조건이 포화조건보다 Strain이 적고, 수평 변위가 다소 적으며, 쇄석 층하부와 토목섬유 컨테이너 층 하부의 토압 또한 크며, 토압의 전달율도 컸다.

3. 그러므로 제체의 파괴 시 토목섬유 컨테이너 층에서 블록파괴와 같은 유형의 파괴가 일어나는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국지반공학회 (1998), 지반공학 시리즈 9 토목섬유, pp 1 ~ 88
2. Koerner, R.M (1997), Designing With Geosynthetics, Simom & Schuster
3. Koerner, R.M. and Welsh, J.P. (1980), Construction and Geotechnical Engineering Using Synthetic Fabrics, J. Wiley & Sons, pp. 160~229.
4. Pilarczyk, K. W. (2000), Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering, pp 1 ~ 68
5. Pilarczyk, K. W. (1997), Application and Design Aspects of Geocontainers, Geosynthetics '97, pp 147~160.
6. Annual Book of ASTM Standards(1999), Geosynthetics
7. Esveld, C. (2001), Modern Railway Track, 2nd edition, MRT-Productions
8. Selig, E. T. and Waters, J. M. (1994), Track Geotechnology and Substructure Management,