

강우로 유실된 철도노반 긴급복구를 위한 지오백시스템 개발 기초연구

A Basic Study on the Geobag System for Urgent Restoration of the Collapsed Roadbed

조 삼 덕*¹ Cho, Sam-Deok

황 선 근*² Hwang, Seon-Keum

이 대 영*³ Lee, Dae-Young

이 광 우*⁴ Lee, Kwang-Wu

Abstract

A series of laboratory tests were performed to evaluate engineering properties of geobag system which is used for urgent restoration of the collapsed roadbed. In this study, the suitable geobag size was proposed as 44cm wide and 66cm long, and the suitable filling ratio of geobag was also proposed as 80% through the static loading tests. Also a series of model tests were carried out to investigate the characteristics of the engineering behavior and the distribution of earth pressure of the geobag roadbed under static and dynamic loading.

요 지

본 연구에서는 해마다 여름철 호우기에 집중적으로 발생하는 철도노반 유실 현장의 신속한 복구를 위하여 사용되는 지오백의 공학적 특성을 평가하기 위해, 일련의 실내시험을 수행하였다. 먼저 본 복구시스템에 사용되는 지오백의 최적 크기는 일반적인 철도노반 유실 현장 상황을 고려하여 44cm×66cm로 제안하였으며, 최적 채움도는 일련의 정적하중재하시험 결과 80%가 적합한 것으로 나타났다. 한편 본 연구에서는 일련의 축소모형실험을 통해 정적 및 동적 하중 재하시 지오백축조노반의 공학적 거동 특성 및 토압 분포특성을 평가하였다.

Keywords : Geobag, Loading test, Model test, Roadbed

1. 서 론

우리나라 철도선로의 영업선 총 연장은 2,579km에 달하고 있으며, 그 중 토공구간은 1,764km로 전체의 68.4%에 해당된다. 이와 같이 철도운행구간 및 신설건설구간에 많이 존재하는 절·성토 토공사면은 강우로 인한 유실 및 파괴에 크게 노출되어 있다. 특히, 하절기에 연평균강수량(1300mm~1500mm)의 2/3정도가 집중하는 기후 특성과 지구온난화 등으로 인한 기상이변

현상인 게릴라성호우로 인하여 해마다 여름철에 집중적으로 토사유실 등의 사면재해가 발생되고 있는 실정이다. 이러한 사면재해는 그 복구에 소요되는 비용손실의 문제 이외에도 철도 운행의 지연으로 인한 물류비용의 막대한 손실을 초래하고 있다. 따라서 여름철의 집중호우로 인해 발생한 자연재해로 인한 손실을 최소화시키는 한 방법으로, 선로의 복구기간을 최대한 단축시킴으로써 철도 운행 지연으로 인한 간접손실을 최소화시키는 것이 중요하다.

*1 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원 (Member, Research Fellow, Civil Eng. Div., KICT)

*2 정회원, 한국철도기술연구원 철도노반방재연구팀 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Geotech. Eng. Resarch Team, KRRI)

*3 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원 (Member, Researcher, Civil Eng. Div., KICT)

*4 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원 (Member, Researcher, Civil Eng. Div., KICT, kwangwu@kict.re.kr)

지오백(geobags)공법은 토목섬유 콘테이너(geosynthetic containers) 공법의 일종으로 보통 제방축조 혹은 침식안정을 목적으로 사용되며, 토목섬유 포대 내에 준설토 또는 모래 등의 토사를 넣어 만든 규격화·모듈화된 지오백을 다수 사용하기 때문에 품질관리에 따른 유지보수 문제를 최소화하고, 쇄석채취로 인한 인근 석산의 파괴 문제와 준설토의 처리문제 등을 자연스럽게 해결하며 더 나아가 시공시 환경오염을 최소화시킬 수 있어 자연·환경친화형 기술로 최근 들어 크게 평가받고 있다(조삼덕, 2000). 특히 일본에서는 SOLPACK이라는 정보를 통해 시공성, 경제성 및 친환경성 측면에서 많은 장점을 가지고 있는 지오백공법을 각종 건축 및 토목공사에 적극 홍보하고 있는 실정이다.

이러한 지오백공법을 강우로 인해 유실된 선로복구에 적합토록 개발하여 실용화할 경우 선로복구에 소요되는 공정을 간소화하고, 그 공기를 단축하며, 규격화·모듈화된 제품의 사용으로 기존의 마대 쌓기 등에 의해 발생하는 복구노반의 내구성 문제 및 복구노반에 대한 2차 보수/보강 문제 등을 해결함으로써 열차안전 및 노반의 유지보수에 만전을 기하는데 크게 기여할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 강우로 유실된 철도노반의 긴급복구 방안으로 지오백을 사용한 복구시스템을 개발하기 위한 연구의 일환으로, 일련의 실내실험을 통해 지오백의 하중변형 특성을 평가하고, 정적 및 동적하중재하시 지오백 축조노반의 공학적특성 변화를 평가하였다.

2. 철도노반 복구용 지오백의 최적 크기 및 형상

토목섬유 콘테이너는 크기와 형상에 따라 통상 콘테이너(Container), 튜브(Tube) 및 백(Bag) 형태로 구분된다(Leshchinsky et al, 1996; Sprague & Fowlew, 1994; Heibaum, 1999). 지오백(geobags or geotextile bags)은 용량이 0.3~0.5m³ 정도의 소형으로, 보통 모래를 채움재로 하여 제방축조 혹은 침식안정을 목적으로 사용하며 소형 봉합기로 마무리 봉합한다.

본 연구에서는 강우 등의 원인으로 유실된 철도노반의 긴급복구에 사용할 지오백의 최적 크기 및 형상을 검토하기 위해 두 가지 방안을 고려하였다. 첫 번째 안은 기존에 사용되던 마대와 동일한 형상(포대형)으로 제작하는 방안이고, 두 번째 안은 벽돌 형태의 박스형으

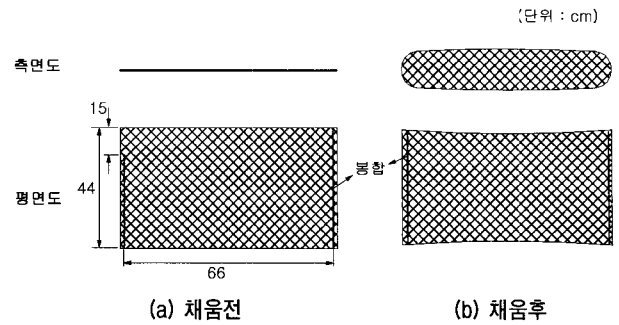


그림 1. 지오백 크기 및 형상

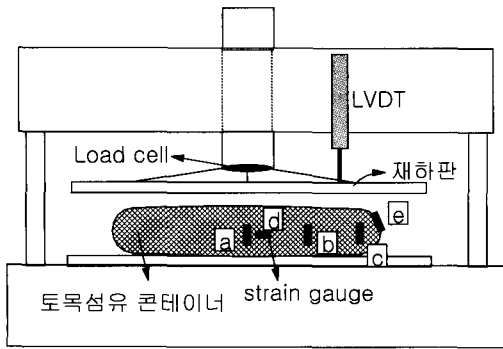
로 제작하는 방안이다. 이 두 방안의 장단점을 상대적으로 비교해 보면, 포대형의 경우는 지오백의 제작시 봉합(sewing) 부분을 최소로 할 수 있는 장점이 있는 반면에, 일정한 채움도를 가지는 지오백을 대량으로 생산하는데 다소 어려움이 있을 것으로 판단된다. 또한 채움도가 클 경우 여러층으로 시공되는 지오백들 사이에 다소 많은 간극이 발생하고, 이로 인해 하중재하시 응력이 집중되고 침하가 과다해지는 문제가 있을 것으로 판단된다. 반면에 박스형의 경우는 일정한 품질을 가지는 지오백의 생산이 용이하고 지오백 사이에 발생하는 간극을 최소화시킬 수 있는 장점을 가지는 반면에, 봉합 부분이 많아지게 되어 지오백 제작시 경제적인 측면에서 문제가 있을 것으로 판단된다. 또한 대부분의 철도제방의 경우는 현장 여건상 중장비의 접근이 용이하지 않기 때문에, 강우로 유실된 선로 복구를 위해 사용되는 지오백은 긴급복구시 1~2인의 인력에 의해 이동 및 시공이 용이해야 한다.

따라서 철도노반의 긴급복구에 사용할 지오백의 크기 및 형상은 기하학적 안정성, 시공성 및 경제성적인 측면을 고려하여 66cm×44cm 크기의 포대형(모래 채움후 중량 50kg 이하)으로 제작하는 것으로 하였다. 또한 지오백의 측면 봉합을 없애기 위해 원통형으로 제작하며, 상부 봉합은 모래채움에 따른 봉합면의 변형을 최소화 하기 위하여 그림 1과 같이 전체 상부 봉합면중 모래 주입구가 들어갈 정도의 길이(약 15cm)를 제외한 부분을 사전에 봉합하도록 하였다.

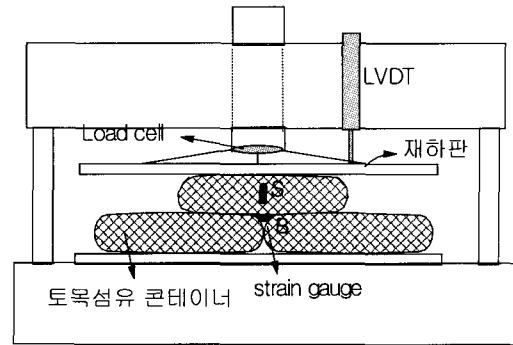
3. 지오백의 인장 및 체적변화 특성 평가

3.1 하중재하실험 개요

지오백의 채움도에 따른 응력 및 체적변화 특성을 규명하기 위하여 두 가지 형태의 하중재하실험을 수행하



(a) 한 개의 지오백에 대한 하중재하실험



(b) 지오백층 사이의 간극부 응력 집중현상 검토를 위한 재하실험

그림 2. 하중재하실험 개요도

였다. 즉, 연직하중 재하시 지오백의 채움도(75, 80 및 85%)에 따른 응력 및 체적변화 특성을 분석하기 위하여 그림 2(a)에 나타난 바와 같이 일련의 하중재하실험을 수행하였고, 추가로 여러층으로 설치된 지오백 사이에 발생하는 간극부의 응력집중 현상을 검토하기 위하여 그림 2(b)에 보인 바와 같이 지오백층을 형성시키고 연직하중을 재하하는 실험을 수행하였다. 여기서 채움도는 지오백에 채워진 모래의 하중을 지오백에 모래를 가득 채웠을 때의 하중으로 나눈 값이다. 본 하중재하실험에서 연직하중은 약 20ton까지의 하중을 재하할 수 있는 유압식 재하장치를 사용하여 3mm/min의 속도로 재하하였으며, 연직하중 재하시의 연직변위는 변위계(LVDT)를 이용하여 계측하였다. 본 실험에 사용된 변위계는 4장에 설명되어 있는 모형실험에서 사용한 제품과 동일하다.

한편, 지오백의 채움도에 따른 소요 모래량을 계산하기 위하여 66cm×44cm 크기의 지오백 포대에 진동 및 다짐을 가하며 모래를 가득 채웠을 때의 무게를 측정하고 결과 50kg가 되었으며, 이를 채움도 100%로 하였을 경우에 지오백의 채움도가 75%, 80% 및 85%인 경우 지오백 포대에 들어가는 모래의 양은 각각 37.5kg, 40kg 및 42.5kg로 산정 할 수 있었다. 본 채움모래로는 최대 및 최소 단위중량이 각각 1.68 tonf/m³ 및 1.35 tonf/m³인 인천지역에서 채취한 해사를 건조시켜 사용하였다.

3.2 지오백 채움도 결정

연직하중 재하시 지오백의 요소 위치별 인장변형거동을 평가하기 위하여, 채움도 85%인 지오백을 대상으로 그림 2(a)에 나타난 바와 같이 5곳의 요소 위치에 스트레인 게이지(strain gauge)를 부착한 후 연직하중을 재

하하는 실험을 수행하였다. 그림 2에서 a는 지오백의 측면부 중앙에 하중재하방향과 동일한 방향으로 부착한 스트레인 게이지이고, b 및 c는 a로부터 각각 10cm 및 20cm 떨어진 위치에 하중재하방향과 동일한 방향으로 부착한 스트레인 게이지이다. d는 지오백의 측면부 중앙에 하중재하방향과 직각방향으로 부착한 스트레인 게이지 이고, e는 지오백에서 폭이 작은쪽(44cm 크기를 가지는 부분) 측면 중앙에 부착한 스트레인 게이지이다. 그림 3은 재하실험 결과를 연직하중 변화에 따른 지오백의 인장변형을 변화로 나타낸 그래프이다. 그림 3에서 연직하중 재하시 지오백의 측면 중앙부에 부착한 스트레인 게이지 a에 의해 측정된 변형률이 동일한 하중수준에서 가장 크게 발생됨을 알 수 있다.

그림 4는 지오백의 채움도에 따른 지오백의 인장변형 특성을 나타낸 실험결과이다. 그림 4에서는 각각의 채움도별로 실시한 3회의 실험결과, 연직하중 재하시 가장 큰 인장변형이 발생하는 것으로 밝혀진 그림 2(a)의 a지점에 부착한 스트레인 게이지 측정값을 나타내었다. 그림 4에서 지오백의 인장변형률은 채움도가 클수록 더 커지고, 연직하중 증가에 따른 인장변형률 증가 또한 채움도가 클수록 더 급속하게 커지게 됨을 알 수 있다. 특히, 채움도를 75%에서 80%로 증가시킨 경우보다 80%에서 85%로 증가시킨 경우에 인장변형률의 증가가 대략 5배 이상 크게 발생하는 것으로 나타났다.

한편, 지오백의 채움도는 어느 정도가 적정할 것인가에 대해서는, 경제성적인 측면을 고려할 경우 채움도를 크게 하는 것이 노반복구시 소요되는 지오백의 수량을 감소시킬 수 있으므로 보다 효과적이거나, 채움도가 너무 클 경우에는 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 열차하중 재하에 의해 지오백에 작용하게 되는 인장응력이 과다해 질 수 있는 문제가 있을 뿐만 아니라, 채움도가 커질

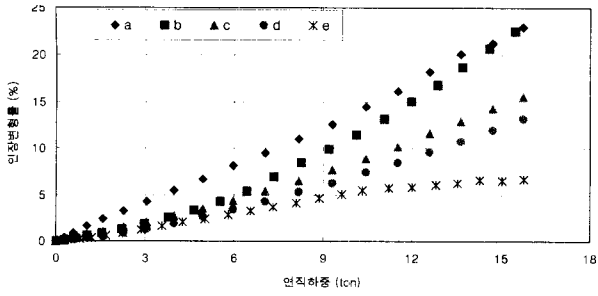


그림 3. 채움도 85%인 경우 지오백 요소 위치별 연직하중-인장변형률

수록 지오백층 사이에 보다 많은 간극이 발생할 수 있기 때문에 안정성 측면에서는 채도가 작을수록 유리하다. 이에 본 연구에서는 75%의 채움도에 비해 응력증가가 크게 발생되지 않은 80% 채움도가 경제적인 측면과 안정성에 있어서 적절할 것으로 판단하여 이후의 실험은 채움도를 80%로 하여 수행하였다.

3.3 지오백층 사이의 간극부 응력집중 현상 검토

지오백을 다층으로 설치한 경우 지오백 층간의 간극 부에서 발생할 것으로 우려되는 응력집중을 검토하기 위하여 그림 2(b)에 나타냈던 바와 같이 지오백을 2층으로 설치하여 재하시험을 수행하였고, 그림 5는 그 결과를 재하하중에 따른 지오백 인장변형률로 나타낸 그래프이다. 그림 2(b)에 나타낸 바와 같이 S(숫자는 실험 횟수)는 상부층 지오백의 측면 중앙부에 부착한 스트레인 게이지이고, B는 상·하부층 지오백 사이의 간극부에 집중되는 응력으로 인한 지오백의 인장변형률을 측정하기 위해 상부층 지오백의 아랫면 중앙에 부착한 스트레인 게이지이다.

그림 5에서 지오백층간의 간극부에 부착한 스트레인 게이지 B의 측정값이 S의 측정값보다 6배 이상 크게 나타났다. 이는 연직하중 재하시 상부층 지오백 포대 내부

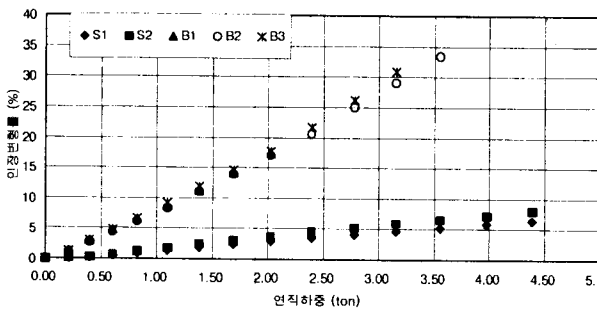


그림 5. 2층으로 설치된 지오백에 대한 하중재하시험 결과

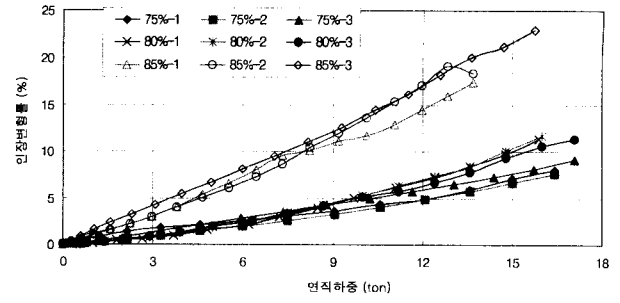


그림 4. 채움도별 지오백의 인장변형 특성

의 모래에 입자 재배열현상이 일어나면서 이 모래가 하부층 지오백의 간극부로 침투하려고 하는 힘이 응력집중현상으로 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 한편 본 실험결과 S지점에 부착한 스트레인 게이지 측정값을 그림 4에 나타낸 한 개의 지오백에 대해 하중을 재하한 경우의 실험결과와 비교해 보면, 지오백을 2층으로 설치한 경우의 인장변형률이 대략 2배 정도 크게 측정되었음을 알 수 있는데, 이 또한 앞서 언급했던 바와 같이 지오백 내부 모래의 입자재배열 운동이 보다 활발하게 진행되기 때문인 것으로 판단된다.

4. 축소모형실험

4.1 모형실험 개요

지오백 축조노반에 정적 및 동적 하중재하시 거동 특성을 평가하기 위하여 일련의 실내모형실험을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 모형실험 조건은 표 1에 나타낸 바와 같다. 본 모형실험은 하중재하 방식 및 기초지반의 지지력 변화가 지오백 축조노반의 거동 특성에 미치는 영향을 검토하고, 지오백층의 하중분산효과를 평가하기 위하여 표 1에 나타낸 바와 같이 총 7회를 수행하였다. 즉, 정적하중을 재하한 경우에 대해서는 노반층을 지오백 혹은 모래로 조성하고 기초층을 각각 2가지

표 1. 모형실험 계획

구분	하중재하	노반층 재료	기초지반 재료
MT 1	정적하중	지오백	SM (다짐도 75%)
MT 2			SM (다짐도 90%)
MT 3		모래 (상대밀도 80%)	SM (다짐도 75%)
MT 4			SM (다짐도 90%)
MT 5	반복하중	지오백	SM (다짐도 90%)
MT 6		SM (다짐도 90%)	SM (다짐도 90%)
MT 7		지오백	나무판

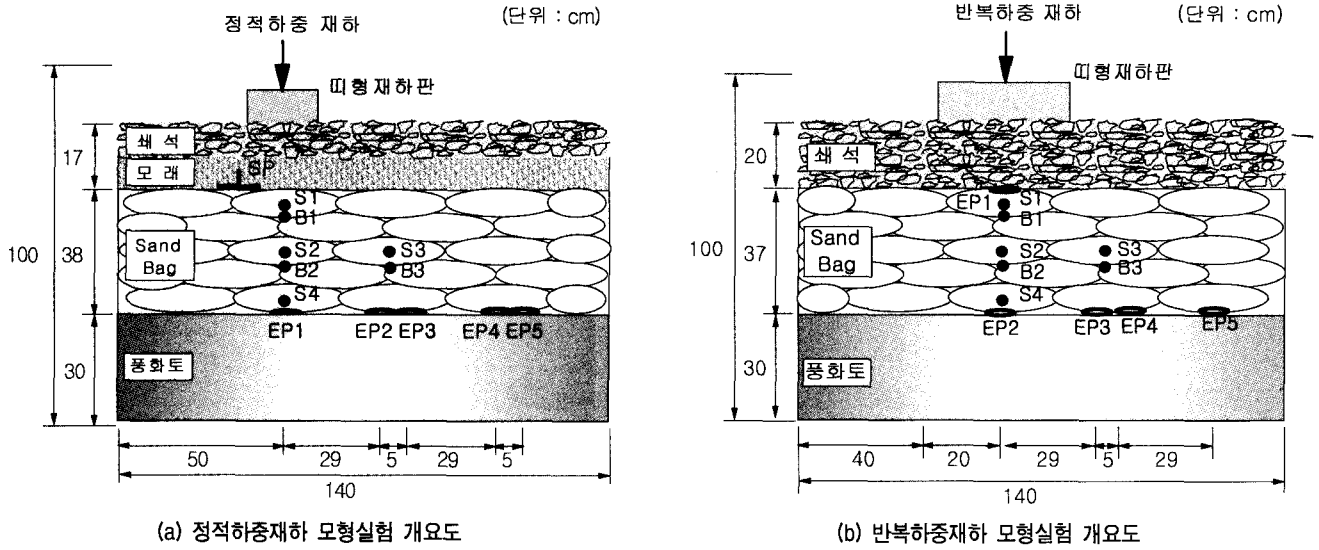


그림 6. 모형실험 개요도

형태(다짐도 90%의 화강풍화토층, 다짐도 75%의 화강풍화토층)로하여 4회(MT1~MT4)의 모형실험을 수행하였다. 한편, 반복(동적)하중을 재하한 경우에 대해서는 철도노반재료로서의 지오백 성능을 평가하기 위하여 지오백을 노반재료로 사용한 경우(MT5)와 화강풍화토로 노반을 조성한 경우(MT6)에 대한 실험을 수행하였고, 지오백을 사용하여 노반을 축조한 경우에 대해서는 실험결과를 확인/검증하고 하부기초 화강풍화토층이 지오백의 거동특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 노반 하부 화강풍화토층 대신에 나무판을 이용하여 강성기초를 모사한 경우에 대한 실험(MT7)을 추가로 수행하였다.

그림 6은 모형실험 개요도이다. 그림 6(a)는 정적하중을 재하한 경우에 대한 모형실험 개요도이고, 그림 6(b)는 반복하중을 재하한 경우에 대한 모형실험 개요도를 나타낸다.

그림 6(a)에서 알 수 있는 바와 같이 정적하중재하 모형실험에서는 30cm 두께의 화강풍화토나 쇄석을 지지층으로 하고, 지오백을 5층으로 형성한 후, 모래와 쇄석을 이용하여 17cm 두께의 도상층을 형성하였다. 다음으로 폭 20cm, 길이 100cm인 띠형 재하판에 연직하중을 가하면서 적절한 위치에 부착된 스트레인 게이지, 토압계 및 침하판에 의한 계측을 수행하였다.

반복하중재하 모형실험의 경우는 그림 6(b)에 나타난 바와 같이, 먼저 노반하부 기초지반을 30cm 높이의 화강풍화토(상대다짐도 90%) 혹은 나무판으로 조성한 후, 37cm 높이의 노반을 토목섬유 콘테이너 혹은 상대다짐

도 90%의 화강풍화토로 각각 축조하고, 20cm 두께의 도상자갈을 포설하였다. 다음으로 폭×길이가 40cm×100cm인 띠형 재하판에 반복하중을 가하면서 적절한 위치에 부착된 스트레인 게이지 및 토압계에 의한 계측을 수행하였다.

4.2 실험 재료 및 장치

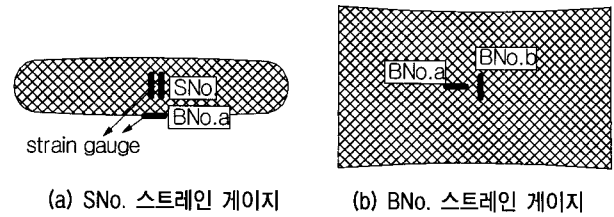
본 모형실험에서 사용한 지오백은 2장에서 제시한 66cm×44cm 크기를 1/2로 축소하여 33cm×22cm로 제작하였다. 모형토조는 축소된 지오백의 크기를 고려하여 내부치수를 140cm×100cm×100cm로 하고, 하중재하로 인한 토조의 변형을 방지하기 위해 강재를 사용하여 제작하였다. 도상자갈에는 최대입경이 40mm인 쇄석을 사용하였고, 표 1에 나타난 MT3 및 MT4에서 노반층 재료로 사용한 모래는 지오백의 내부채움재로 사용한 모래와 동일하다. 기초지반 및 노반층 조성을 위한 흙시료는 경기도 수원시 인근의 목장에서 채취한 화강풍화토를 사용하였다. 본 화강풍화토는 200번체 통과율이 41.2%이고, 통일분류법상 SM으로 분류되는 실트질 모래이다. 또한 비중(G_s)은 2.75, 소성지수(PI)는 N.P.이고, 최적함수비(OMC)와 최대건조밀도(γ_{dmax})는 각각 23% 및 1.61t/m³이다. 철도하중 모사를 위하여 사용한 띠형하중재하판은 고강도 합성수지를 이용하여 제작하였으며, 그림 6에 보인 바와 같이 토조크기 및 노반깊이를 고려하여 토조벽면에서 40cm 떨어진 거리에 설치하였다.

한편 반복하중 재하를 위해서는 한국철도기술연구원

이 보유한 종합궤도노반시험장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 종합궤도노반시험장치는 실제 현장의 철도 노반 상황을 그대로 재현, 실내에서 실험을 수행할 수 있도록 한 장치로, 토조(soil tank), 하중재하장치(loading system)와 하중 작용시 반력대의 역할을 하기 위한 하중 반력대 등 3가지로 구성되어 있으며, 이외에도 하중재하장치와 하중반력프레임을 제어하기 위한 자동제어장치(control system), 펌프실, 냉각장치 등이 있다. 종합궤도노반시험장치 토조의 크기는 길이×폭×깊이가 22m×5m×3m로 실물크기의 철도현장을 실내에서 모사할 수 있다(한국철도기술연구원, 2001). 본 연구에서 수행한 반복하중 재하실험에서는 이 토조 내부에 화강풍화토를 15cm씩 단계적으로 포설하면서 5tonf 진동로울러로 다짐하여 채운 후, 정적하중 모형실험에서 사용한 140cm×100cm×100cm 크기의 모형토조를 거치시키고 실험을 수행하였다. 일반적으로 레일에 작용하는 하중은 열차의 축하중에 약 40%정도이고, 침목과 도상자갈에 의해 하중이 분산되기 때문에 실제적으로 노반부에 작용하는 토압의 크기는 1kg/cm²이다. 본 실험에서는 앞서 설명했던 바와 같이 모형토조에 철도제방을 모사하고, 40cm×100cm 크기의 재하판을 이용하여 철도하중을 모사하였으며, 노반상부에 작용하는 토압이 1kg/cm² 이상이 될 수 있도록 8ton의 하중을 주파수 5Hz로 50만회 반복재하하였다.

4.3 계측기 설치

본 모형실험에서 사용한 스테레인 게이지는 길이가 5mm인 소성게이지로, 10만 strain까지 측정이 가능하다. 토압계는 직경이 50mm, 최대용량은 2.5kg/cm²이다. 변위계는 정적하중재하 모형실험에는 최대측정변위가 200mm인 제품을 사용하였으며, 반복하중재하 모형실험에서는 최대측정변위 50mm까지의 동적변위 계측이 가능한 제품을 사용하였다. 침하판은 10cm×10cm 크기의 정방형으로 제작하였고 직경이 5mm인 침하봉을 이용하여 변위계에 연결하였다. 모형실험시 계측기의 상세 설치위치는 그림 6에 나타난 바와 같다. 스트레인 게이지 SNo.는 그림 7(a)에 나타난 바와 같이 한 개의 지오백 측면 중앙부에 두 개씩을 하중재하 방향과 동일한 방향으로 부착하였으며, BNo.는 그림 7(b)에 나타난 바와 같이 지오백 밑면 중앙에 두 개의 스트레인 게이지를 서로 수직 방향으로 부착하여 지오백의 길이 및 폭 방향으로 발생



(a) SNo. 스트레인 게이지 (b) BNo. 스트레인 게이지

그림 7. 스트레인 게이지 부착 위치

되는 인장변형을 각각 계측할 수 있도록 하였다. 지오백의 하중분산효과를 검토하기 위한 토압계는 그림 6에 EPNo.로 나타낸 바와 같이 각각의 모형실험에서 총 5개를 설치하였으며, 침하판(SP)은 연직하중 재하시 지오백층의 침하량을 계측하기 위하여 띠형재하판 모서리 부분에서 가장 가까운 지오백 위에 설치하여 변위계와 연결하였다.

5. 모형실험 결과 및 고찰

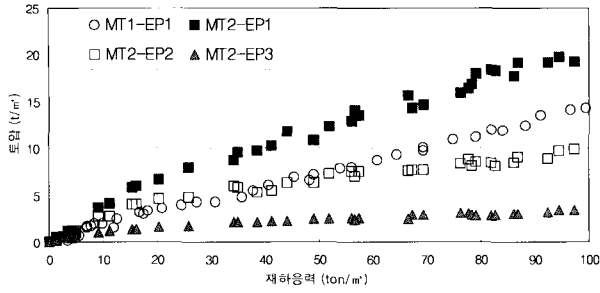
5.1 정적하중재하 모형실험 결과 및 고찰

5.1.1 정적하중재하시 지오백층의 하중분산 효과

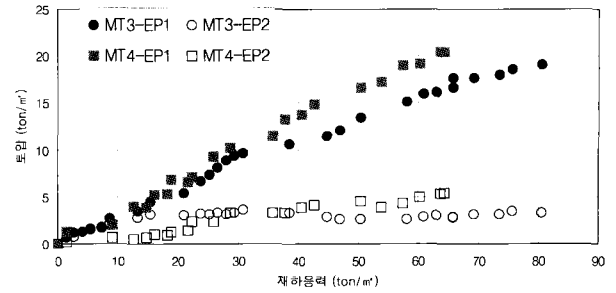
본 모형실험에서 정적하중 재하시 지오백층의 하중분산 효과를 평가하기 위하여 설치한 토압계 계측결과를 그림 8에 나타내었다.

본 모형실험에서는 그림 6(a)에 나타난 바와 같이 지오백층 하부에 총 5개의 토압계(EP1~EP5)를 설치하였으나, EP4 및 EP5의 경우는 모든 경우의 실험에서 그 계측값이 미소하였으며, EP3의 경우도 MT2의 경우를 제외하고는 그 측정치가 미소하여 그림 8에서 제외하였다. 한편, 그림 8(a)에 나타난 MT1의 경우에는 EP2토압계가 실험도중 손상된 것으로 판단되어 제외하였다.

지오백을 노반재료로 사용한 경우의 모형실험 결과를 나타낸 그림 8(a)에서 화강풍화토의 상대다짐도를 90%로 하여 조성한 MT2의 경우가 상대다짐도 75%인 경우에 비해 30%정도 더 큰 토압이 계측되었음을 알 수 있다. 또한 노반층을 상대밀도 80%인 모래를 사용하여 조성한 경우의 모형실험 결과를 나타낸 그림 8(b)에서도 지오백 축조노반을 사용한 경우와 동일하게 기초지반의 지지력이 큰 경우인 MT4의 토압계 계측값이 MT3의 경우에 비해 다소 크게 나타나고 있으나, 기초지반의 종류에 따른 토압 계측값의 차이는 대략 10% 이내로 지오백 축조노반의 경우에서 보다 작음을 알 수 있다. 한편, 노반재료에 따른 토압특성은 그림 8에서 알 수 있는



(a) MT1 및 MT2 계측결과



(b) MT3 및 MT4 계측결과

그림 8. 토압계 계측결과

바와 같이 모래를 이용하여 노반을 축조한 MT3 및 MT4의 경우가 MT1 및 MT2에서 보다 더 큰 토압 계측값을 나타내고 있다. 따라서 모래를 이용하여 노반을 조성한 경우보다는 지오백을 노반재료로 사용한 경우에 하중분산효과가 더 크음을 알 수 있다.

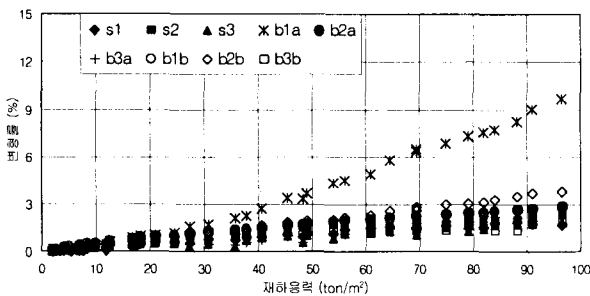
5.1.2 정적하중 재하시 지오백층의 응력-변형 거동

지오백층을 설치한 MT1 및 MT2 모형실험 결과, 스트레인 게이지 계측치를 재하응력에 따른 변형률로 그림 9에 각각 나타내었다. 그림 9의 범례에서 SNo. 및 BNo. a or b는 4.1절에서 설명했던 바와 같이 계측기 설치 위치를 의미한다.

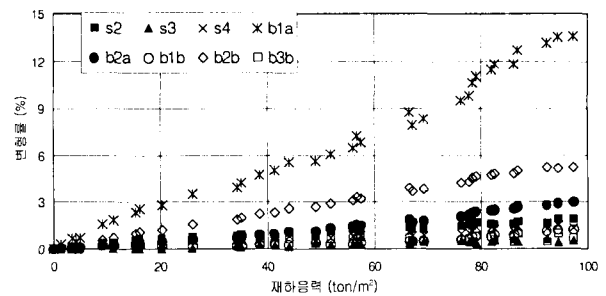
일반적으로 기초지반의 지지력이 작은 경우 하중 재하시 기초지반의 침하와 더불어 지오백 축조노반층의 변형이 유발되어 지오백의 인장변형률 또한 크게 계측될 것으로 예상하였으나, 본 실험에서는 그림 9에서 알 수 있는 바와 같이 기초지반을 변화시키면서 수행한 실험결과 지오백의 인장변형률 계측치는 대체로 그 경향이 유사하게 나타났다. 한편, 지오백의 인장변형률은 재하 하중이 증가할수록 선형적으로 커지는 경향을 보이나, B1a, B1b 및 B2a를 제외하고는 대체적으로 그 크기가 약 100ton/m²의 정적하중 재하시 3%를 넘지 않는 것

으로 나타났다. 이와 같이 인장변형이 3장에서 설명한 하중재하실험결과에서와는 달리 대체적으로 작게 발생한 이유는 지오백층이 사방으로 구속되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 모형실험시에는 다수의 지오백을 모형토조안에 일정하게 배열하여 5개의 층으로 설치하였기 때문에 하중재하시 각각의 지오백이 상호간에서 영향을 미치게 되어 구속력이 작용하게 됨으로써, 지오백의 체적변형 발생이 억제되고 이로 인해 인장변형 발생이 미소했던 것으로 판단된다. 또한 지오백 층간 간극부의 응력집중현상을 검토하기 위하여 부착한 BNo.의 계측치는 지오백 측면부에 부착한 SNo. 계측치보다 상대적으로 크게 측정되어 이로부터 3.3에서 언급했던 바와 같이 지오백 포대 내부 모래의 입자 재배열 과정에서 응력집중현상이 발현됨을 확인할 수 있었다.

그림 9에서 BNo.a와 BNo.b를 비교해 보면 2회의 모형실험 모두에서 a의 경우가 b의 경우보다 대체로 2배 이상 큰 값을 보이고 있는데, 이는 재하판과 직각 방향을 이루는 지오백의 길이 방향으로 인장력이 더 크게 작용하게 때문인 것으로 판단된다. 따라서 지오백 포대 제작시에 길이방향의 강도를 폭방향 보다 더 크게 하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.



(a) MT1 실험결과



(b) MT2 실험결과

그림 9. 스트레인 게이지 계측 결과

5.1.3 정적하중 재하시 지오백층의 침하특성

국내에서는 국철의 경우 열차의 안전운행에 지장이 없도록 궤도변위에 대한 허용치를 철도청 보선업무자료의 궤도정비기준에서 제시하고 있다(철도청, 1997). 그러나 노반의 변위와 이에 대한 정비기준은 현장 경험에 의존하고 있는 실정이다. 한편, 일본의 경우는 철도종합기술연구소(RTRI)의 연구결과에 근거하여 통상 고속철도 노반의 허용침하기준을 2.5mm로 정하고 있으며, 이러한 허용침하량의 산정에는 노상의 안정, 탈선한계 및 승차감 등이 고려되어 있다.

정적하중 재하시 지오백 축조노반의 침하특성을 규명하기 위하여 수행한 침하판 계측결과를 그림 10에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 침하량은 재하응력이 커질수록 선형적으로 증가하는 경향을 보이며, 4회의 모형실험시 침하량 계측치는 크게 두 무리로 구분된다. 즉, 노반층 하부 기초지반을 상대다짐도 90%인 화강풍화토로 조성한 MT2 및 MT4의 경우는 재하응력의 증가와 더불어 침하량 또한 점진적으로 증가하여 60ton/m²의 재하응력으로 정적하중 재하시 침하량이 대략 5~8mm 발생한 것으로 계측되었고, 기초지반을 상대다짐도 75%로 조성한 MT1 및 MT3의 경우는 60ton/m²의 재하응력으로 정적하중 재하시 침하량이 대략 23~28mm 발생한 것으로 계측되었다. 또한 노반층 재료로 지오백을 사용한 경우와 상대밀도 80%인 모래를 사용한 경우 정적하중 재하시 침하특성은 유사한 경향을 보이고 있다. 한편, 일반적으로 레일에 작용하는 하중은 열차의 축하중에 약 40%정도이고, 침목과 도상자갈에 의해 하중이 분산되기 때문에 실제적으로 노반부에 작용하는 토압의 크기는 10t/m²이다. 본 모형실험에서 10t/m²의 응력으로 정적하중을 재하한 경우에는 MT2 및 MT4에서 계측된 침하량이 그림 10에서 알 수 있는 바와 같이 2.5mm보다 작으며, 따라서 일본에서 제시한 허용침하량 기준 2.5mm에 부합함을 알 수 있다.

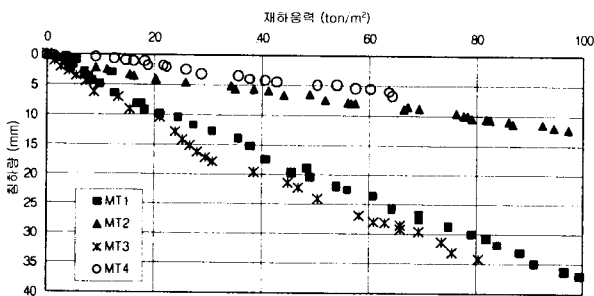
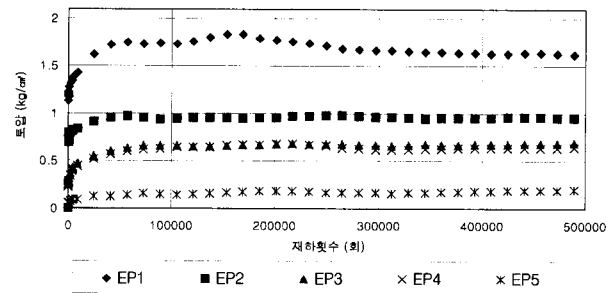


그림 10. 침하량 계측결과

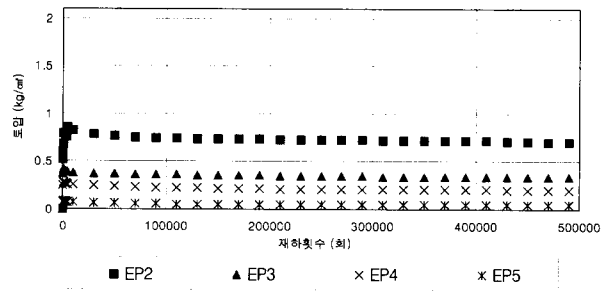
5.2 반복하중재하 모형실험 결과 및 고찰

5.2.1 반복하중재하시 지오백층의 하중분산 효과

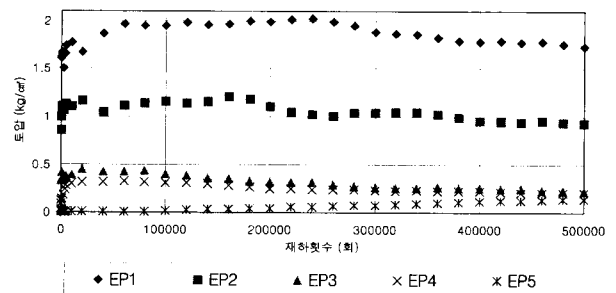
본 모형실험에서 반복하중 재하시 지오백층의 하중분산 효과를 평가하기 위하여 설치한 토압계 계측결과를 그림 11에 나타내었다. 본 실험에서는 그림 6(b)에 나타낸 바와 같이 지오백층 상부에 1곳(EP1), 하부에 4곳(EP2~EP5) 등 총 다섯 위치에 토압계를 설치하였으나, MT2의 경우는 노반상부에 설치한 토압계 EP1이 실험중 손상된 것으로 판단되어 제외하였다. 그림 11에서 토압 계측값은 대체로 반복재하 초기에 급격히 증가하다가 대략 5000회 재하 이후에는 거의 일정하게 수렴하는 경향을 보인다. 이와 같이 반복재하 초기에 토압이 급격히 증가하는 원인은 동적하중의 반복재하와 더불어 재하판과 도상부 접촉면에서 편칭현상이 초기에 급



(a) MT5 계측결과



(b) MT6 계측결과



(c) MT7 계측결과

그림 11. 토압계 계측결과

격히 일어나 노반에 전달되는 하중이 증가하게 되기 때 문인 것으로 판단된다. 이러한 편칭현상으로 인한 재하 판의 침하량은 50만회의 반복하중재하 완료시 약 5cm ~6cm에 달한 것으로 측정되었다.

본 실험에서는 40cm×100cm크기의 재하판에 8ton의 하중을 반복재하하였으므로 이를 재하응력으로 환산하 면 2kg/cm²이 되고, 또한 그림 11 (a) 및 (c)에서 EP1 계 측값도 최대 2kg/cm²까지 측정되었음을 알 수 있다. 즉, 반복재하 횟수가 5000회 이상인 경우에는 재하응력 대 부분이 노반에 전달되고 있는데, 이는 도상 두께 15cm 까지는 하중분산이 없고, 15cm 이하 깊이에서는 45°의 분산각도로 하중이 분산된다는 일본 철도총합기술연구 소(RTRI)의 연구결과와 일치하고 있다.

토압계 계측결과 그림 11에서 알 수 있는 바와 같이 전체 재하응력의 약 40%~50%가 EP1에 전달되는 것으 로 나타났다. 또한 MT1, MT2 및 MT3 모두에서 노반하 부에 매설한 토압계 계측치는 재하판중앙의 직하부 기 초지반상에 설치한 EP2의 계측치가 가장 크고 재하판 으로부터의 거리가 멀어질수록 그 값이 작아진다.

한편, 지오백을 노반재료로 사용한 MT5 및 MT7의 토압계 계측치(그림 11(a) 및 (c)) 와 상대다짐도 90%의 화강풍화토를 이용하여 노반을 조성한 MT6의 토압계 계측치(그림 11(b))를 비교해 보면, MT5 및 MT7의 토 압이 다소 크게 계측되었으나 비교적 유사한 경향을 보 이고 있다. 따라서 반복하중 재하시 지오백 축조노반의 하중분산 효과를 보다 정밀하게 평가하기 위해서는 더 많은 실험결과가 필요한 것으로 판단된다.

5.3 반복하중 재하시 지오백 층의 응력-변형 거동

지오백층을 설치한 MT5 및 MT7 실험 결과 스트레인 게이지 계측치를 재하응력에 따른 변형률로 그림 12에

나타내었다. 그림 12의 범례에서 SNo. 및 BNo. a 혹은 b는 스트레인 게이지 설치 위치를 의미한다. SNo.는 콘 테이너 측면부 중앙에 하중재하방향으로 부착한 스트 레인 게이지 계측값이고, 지오백 밀면 중앙에 부착한 스 테레인 게이지 계측값인 BNo. a 및 b는 그림 7(b)에 나 타냈던 바와 같이 동일한 위치에 서로 직각방향으로 부 착된 한 쌍의 스트레인 게이지 각각의 측정값이다.

그림 12에서 실험도중 손상된 일부 스트레인 게이지 측정값은 제외하였다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같 이 반복하중 재하시 지오백의 인장변형은 재하횟수가 작은 초기에는 급격히 증가하는 경향을 보이다 10000회 재하 이후에는 대체로 수렴하는 경향을 보이고 있다. 또 한 S3 및 S4, B3a 및 B3계측값을 제외하고는 최대 인장 변형률이 5%이상인 것으로 계측되었다. 특히, B1a의 경 우에는 두 차례의 실험 모두에서 재하횟수 1만회 이전 에 10%이상의 값을 보이며 손상되었다. 이와 같이 반복 재하 초기에 급격하게 인장변형이 증가하는 원인은 반 복재하와 함께 재하판과 도상부 접촉면에서 편칭현상 이 초기에 보다 많이 일어나 노반에 전달되는 하중이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 지오백의 인장변 형률 계측값이 정적하중 재하실험에서와는 달리 비교 적 크게 측정된 이유는 일반적인 철도노반 작용응력 1kg/cm²에 비해 현저히 큰 최대 2kg/cm²의 응력이 본 실험에서 노반상에 전달되었고, 또한 이러한 응력이 반복 적으로 재하됨과 더불어 지오백 포대 내부의 모래에 입 자 재배열이 지속적으로 일어나면서 노반층의 변형이 누적되었기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 지오백 층간 간극부의 응력집중현상을 검토하 기 위하여 부착한 스트레인 게이지 BNo.의 계측치는 SNo.로 표시한 토목섬유 측면부에 부착한 스트레인 게 이지 계측치보다 상대적으로 크게 측정되어 이로부터 3.3에서 언급했던 바와 같이 지오백 포대 내부 모래

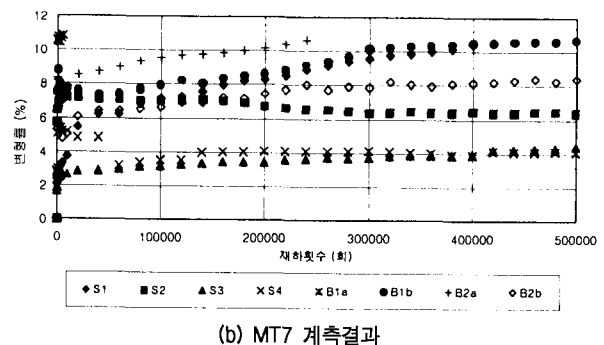
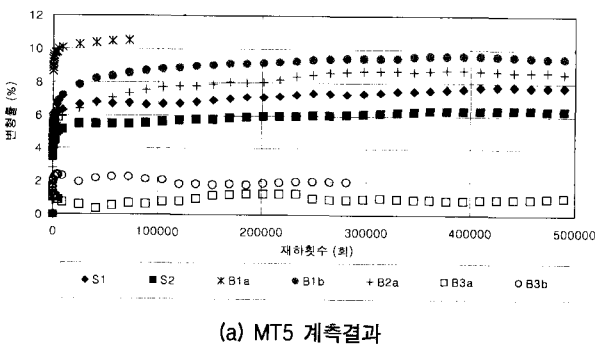


그림 12. 스트레인 게이지 계측 결과

의 입자 재배열 과정에서 응력집중현상이 발현됨을 확인할 수 있었다.

그림 12에서 BNo.a와 BNo.b를 비교해 보면 대체적으로 a의 경우가 b의 경우보다 큰 값을 보이고 있는데, 이는 정적하중재하 모형실험 결과에서 언급했던 바와 같이 재하판과 직각 방향을 이루는 지오백의 길이 방향으로 인장력이 더 크게 작용하게 때문인 것으로 판단된다. 따라서 지오백 포대 제작시에 길이방향의 강도를 폭방향 보다 더 크게 하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

5.4 반복하중 재하시 지오백층의 탄·소성 침하특성

반복하중 재하시 지오백 축조노반의 탄·소성 침하특성을 규명하기 위하여 수행한 침하판 계측결과를 그림 13에 나타내었다. 여기서 소성침하량은 재하횟수에 대한 평균값을 사용하여 구하였으며, 탄성침하량은 Peak to Peak값으로부터 산정하였다. 그림 13(a)에서 알 수 있는 바와 같이 반복하중재하시 소성침하량은 초기에 급격히 증가하다 점차 수렴해가는 경향을 보인다. 노반재료로 화강풍화토를 상대다짐도 90%로 다짐한 MT2의 경우는 침하량이 4mm에서 수렴하는 반면에, 지오백을 노반재료로 사용한 MT5 및 MT7의 경우에는 50만회 재하시 최대 침하량이 각각 27mm와 29mm로 계측되었다.

이와 같이 지오백을 노반재료로 사용한 MT5 및 MT7의 경우가 MT6의 경우에 비해 약 7배 정도 침하량이 크게 측정된 원인은 아래의 3가지 요인이 복합적으로 작용했기 때문인 것으로 판단된다.

첫째, 실험시 노반작용응력이 최대 2kg/cm^2 으로 과다함.

- 실제 철도노반에 작용하는 응력은 약 1kg/cm^2 을 초과하지 않음.

둘째, 축소모형실험에 의한 scale effect 영향

- 본 연구에서는 실물 크기의 지오백을 1/2로 축소하

여 실험을 수행함. 그러나 실물 크기의 지오백에 채움도 80%로 모래를 채운 경우보다, 축소된 지오백에 동일한 채움도로 모래를 채운 경우에 지오백의 배부름이 더 큰 것으로 관찰되었으며, 이로 인해 다층으로 축조된 지오백 사이에 생기는 간극의 비율 또한 커지게 되어 전반적으로 노반층의 변형이 크게 발생한 것으로 판단됨.

셋째, 반복재하로 인하여 모래입자 재배열에 의한 변형 누적

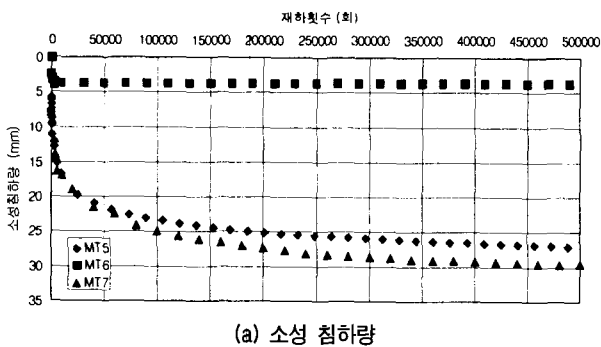
- 재하 및 진동에 의하여 지오백 포대 내부 모래의 상대밀도가 증가하면서 노반층 변형이 유발된 것으로 판단됨.

따라서 향후에 실물 크기의 지오백을 사용하여 노반을 조성한 경우에 대한 실험을 수행하여 반복하중 재하시의 소성침하특성을 보다 면밀히 조사하고, 침하량을 최소화할 수 있는 방안을 마련해야 할 것으로 판단된다.

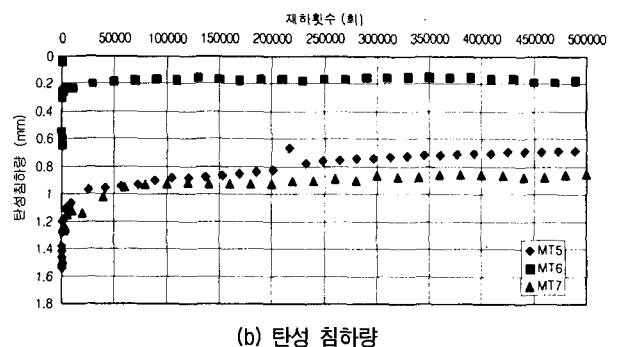
한편, 탄성침하량은 그림 13(b)에서 알 수 있는 바와 같이 재하횟수가 작은 초기 측정값이 50만회 재하시까지 거의 일정한 경향을 보이고 있다. 또한 MT2의 경우 탄성침하량은 0.2mm 이내이고, MT5 및 MT7의 경우에는 1mm 이내인 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 강우로 유실된 철도노반의 효율적인 긴급복구를 위하여 토목섬유로 제작된 지오백을 활용한 공법을 개발하기 위한 연구의 기초연구로서, 일련의 실내시험을 수행하여, 지오백의 최적 크기 및 채움도를 결정하고 지오백 축조노반의 공학적 특성 및 거동 특성을 평가하기 위한 연구를 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.



(a) 소성 침하량



(b) 탄성 침하량

그림 13. 침하량 계측결과

- (1) 채움도 변화에 따른 지오백의 인장변형 거동 시험을 통해 지오백의 채움도를 80%로 하는 것이 경제성과 안정성을 고려할 수 있음을 알 수 있었고 따라서 적정 채움도를 80%로 제안하였다.
- (2) 일련의 하중재하시험 및 실내모형실험결과로부터 다층으로 설치된 지오백 층 상부에 하중이 재하될 경우 지오백 포대 내부에 채워진 모래의 입자 재배열에 기인하여 지오백 층간의 간극부에 응력집중현상이 발생함을 확인하였다.
- (3) 정적하중 재하 모형실험 결과, 다층의 지오백 축조노반의 경우 하중재하판에 바로 인접한 지오백을 제외하고는 인장변형의 발생이 미소하였으며 이는 각각의 지오백 상호간에 서로 영향을 미치게 되어 구속력이 작용하게 됨으로써, 지오백의 체적변형 발생이 억제되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 노반부 침하량 계측치는 일본 RTRI에서 제시한 허용침하기준 2.5mm이내의 값을 보인다.
- (4) 지오백 축조노반의 동적 거동 평가를 위한 반복하중 재하 모형실험 결과, 지오백의 인장변형률은 최고 10%이상으로 정적하중 재하실험에서와는 달리 크게 계측되었는데, 이는 반복하중 재하시 최대 2kg/cm²의 큰 응력이 노반에 전달되었고, 또한 이러한 응력이 반복적으로 재하됨과 더불어 지오백 포대 내부의 모래에 입자 재배열이 지속적으로 일어나면서 노반층의 변형이 누적되었기 때문인 것으로 판단된다.

- (5) 정적 및 반복 하중 재하 모형실험 결과 지오백 층간의 간극부에 지오백의 길이방향과 폭방향으로 각각 부착한 스트레인 게이지 계측값은 길이방향으로 부착한 스트레인 게이지 계측값이 더 크게 나타났으며, 이는 재하판과 직각 방향을 이루는 지오백의 길이 방향으로 인장력이 더 크게 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 지오백 직조시에 길이 방향의 강도를 폭방향 보다 더 크게 하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 조삼덕(2000), "지오텍스타일 콘테이너공법의 현장적용 및 평가", 2000 토목섬유 특별 세미나 논문집, 한국지반공학회 토목섬유기술위원회, 2000년 9월, pp.17-31.
2. 철도청(1997), 보선업무자료.
3. 한국철도기술연구원(2001), "철도강화노반재료 및 지지력 강화방안에 관한 연구", 철도시스템 기반기술개발-토구조물 최적설계 기술분야 연구보고서.
4. Leshchinsky, D., Leshchinsky, O., Ling, H.I. and Gilbert P.A.(1996), "Geosynthetics tubes for confining pressurized slurry: some design aspects", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE,
5. Sprague, C.J. and Fowler, J.,(1994), "Dredged Material-filled Geotextile Containers: Case Histories, Research and Upcoming Workshop", *Geotechnical Fabrics Report*, Vol.12, No.3, pp.42-54.
6. Heibaum, M.H.,(1999), "Coastal Scour Stabilisation Using Granular Filter in Geosynthetic Nonwoven Containers", *Geotextiles and Geomembranes*, 17, pp.341-352.

(접수일자 2003. 3. 12, 심사완료일 2003. 4. 9)