

모사열차 반복하중 재하에 따른 블록식 보강토 옹벽의 변위 및 토압 분포

Displacement and Earth Pressure Distribution of the Reinforced Soil Segmental Retaining Walls under the Simulated Cyclic Train Loading

이진욱* 고태훈** 이성혁* 심재훈***
Lee, Jin-Wook Koh, Tae-Hoon Lee, Seong-Hyeok Sim, Jae-Hoon

In this study, the simulated cyclic train loading test was carried out in order to investigate the dynamic behavior in/at the block type reinforced earth retaining wall. The results in this test were compared with unreinforced and reinforced case, respectively. It was shown that we confirmed the correlation between earth pressure and displacement, the confining effect of wall displacement by the effect of geogrid.

1. 서론

산업사회의 고도화에 따라 철도의 역할이 증시되어 철도선로의 확충, 고속철도 건설, 차세대 열차 개발 등이 활발히 진행되고 있으며 신선의 건설과 고속철도의 건설에 있어서 협소한 국토를 효율적으로 활용할 수 있는 공법의 개발과 함께 열차의 고속화, 고밀화 정책에 대응하여 사용년수 경과로 노후화 되어 있는 기존 선로의 개량의 필요성도 날로 증대되고 있다. 특히, 기존선의 고속화를 위해서는 선형개량, 전차선 신설 등에 따른 기존 노반의 확폭 또는 이설시 용지확보에 따른 직접 공사비의 증액은 물론, 용지 매수 및 민원이 큰 저해 요인이 되고 있다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 대안으로 국내의 철도분야에서는 적용 사례가 미미하지만, 외국에서는 일반화되어 적용사례가 많은 블록식 보강토옹벽을 대상으로 철도노반 구축물로서의 적용을 검토하였다. 본 연구에서는 모사열차 반복하중 재하시의 블록식 옹벽의 동적거동 특성 평가를 위해 실물크기의 블록식 옹벽 노반에 대한 모사열차 반복하중 재하실험을 수행하였다. 반복하중 재하실험에 앞서 시공단계 및 안정화 단계에서의 계측 및 정적 하중 재하시의 계측을 수행하였으나, 본 논문에서는 토압진폭과 벽체변위진폭과 누적변위 및 연직변위진폭과 누적변위의 상관관계만을 비교하고, 지오그리드의 벽체 변위 구속효과를 확인하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험대형 토조 및 재하장치

실험노반의 조성 및 모사열차 반복하중의 재하는 철도기술연구원이 보유하고 있는 종합케도노반 실험장비에 의해 수행하였다. 종합케도노반실험장비의 주요 구성은 토조, 하중재하장치와 반력대로 이루어져 있으며, 이 밖에 하중재하장치와 하중반력프레임을 제어하기 위한 자동제어장치, 펌프실, 냉각장치 등으로 구성되어 있다. 사진 1은 실험노반의 조성에 활용된 토조를 보인 것으로 재원은 22m(길이)×5m(폭)×3m(깊이)로 되어 있어 평면 변형조건에서의 실제 현장을 모사할 수 있다. 또한 하중재하장치와 반력대는 사진 2에 보였다. 하중 재하장치는 최대 1축당 250kN의 동적하중 재하가 가능하며, 반복횟수 즉, 재하 주파수는 100Hz까지 재현을 할 수 있다.

* 한국철도기술연구원 시설연구본부 선임연구원, 정희원

** 한국철도기술연구원 시설연구본부 주임연구원, 정희원

*** 한국철도기술연구원 시설연구본부 연구원

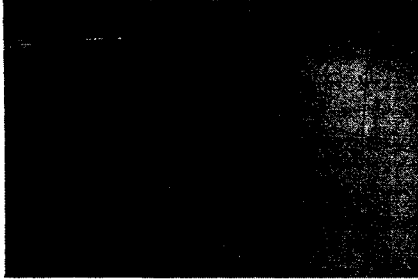


사진 1 토조내부 전경

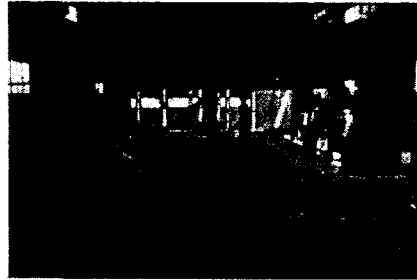


사진 2 중합체도노반 실험장치 전경

2.2 실험노반의 조성 및 계측기 매설

실제 국철의 설계기준과 부합되는 균질한 실험노반 조성을 위해 시료토에 대한 물리·역학적 시험을 수행하였으며 결과를 정리하면 표 1과 같다. 또한 블록식 옹벽의 보강을 위해 사용한 지오그리드의 형상 및 특성은 표 2에 보인 바와 같다.

표 1. 실험노반 조성에 사용한 물리·역학적 특성

| 자연 함수비 (%) | G _s | Atterberg Limits | | | 입 도 시 험 | | | | 통일 분류 | 다짐시험 | | 직접전단시험 | |
|------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|----------------|--------------------|--|----------------------------|----------------------------|----------|---|-------------------------|----------------------------|----------|
| | | ω _L (%) | ω _P (%) | I _P | #200 통과량 (%) | 유효 입경 (D ₁₀) (mm) | 균등 계수 C _u | 곡률 계수 C _c | | γ _{dmax} (g/cm ³) | ω _{opt} (%) | c (kg/cm ²) | φ (°) |
| 15.2 | 2.7 | 23.9 | 22.4 | 1.5 | 30.28 | 0.006 | 80.83 | 1.68 | SM | 1.98 | 11.21 | 0.39 | 330 |

표 2 지오그리드의 형상 및 특성

| | |
|---------------------|-----------------|
| Type (Unit : mm) | |
| QC Tensile Strength | 90.0 kN/m |
| Material | Polyester (PET) |

표 3 실험변수

| 구 분 | | 무보강 | 보강 |
|------|-------|-----|--------|
| 연직도입 | 침목직하 | pv2 | repv2 |
| | 벽체인접 | pv1 | repv1 |
| 수평도입 | | ph | reph |
| 변형율 | 더미그리드 | st | rest |
| | 그리드 | - | regrid |
| 변위 | 수평변위 | lh | relh |
| | 연직변위 | lv | relv |

균질한 실험노반의 조성을 위해 상기 노반 흙을 이용하여 4개의 실험단면에 대해 각각 20cm씩 뒷채움 시료를 부설한 후 3.5tonf의 진동롤러를 사용하여 다짐횟수를 변화시켜 가면서 시험다짐을 수행하였다. 시험다짐 결과, 왕복 5회의 다짐시 소요의 95% 다짐도를 얻을 수 있었으므로 이후 1단의 블록높이를 기준으로 20cm씩 동일한 다짐조건으로 실험노반을 조성하였다. 조성 시 3회의 들밀도시험을 수행하여 균질한 지반의 조성이 될 수 있도록 다짐관리를 수행하였다.

또한 실험노반의 조성시 일시적으로 다짐 작업을 중단하고 그림 1과 그림 2에 보인 위치에 대해 계측기를 매설하였다. 계측기의 설치는 그림에 보인 바와 같이 토압계의 경우 옹벽배면 토체 내에 래일직하부의 위치에 노반 상부에 2개를 설치하고 그로부터 60cm깊이 마다 각 층당 2개씩

총 10개의 토압계를 설치하여 수직토압을 측정하였다. 또한 수평토압을 측정하기 위하여 블록에 토압계를 부착하여 깊이별로 층당 2개씩 4개 층에 8개와 제일 하단에 1개의 토압계 등 총 9개의 토압계를 설치하였다. 옹벽의 수평변위 측정을 위하여 블록에 8개, 또한 수직변위 측정을 위해 레일상단과, 노반상단 2개소에 침하판을 설치하고 침하판 위에 변위계를 각각 설치하였다. 계측결과 분석 시에는 계측기 종류 및 위치별로 표 3과 같은 실험변수를 설정하였다.

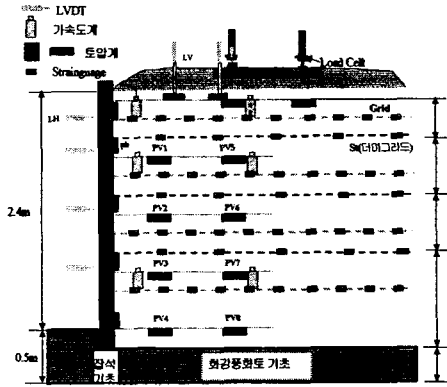


그림 1 실험 단면도

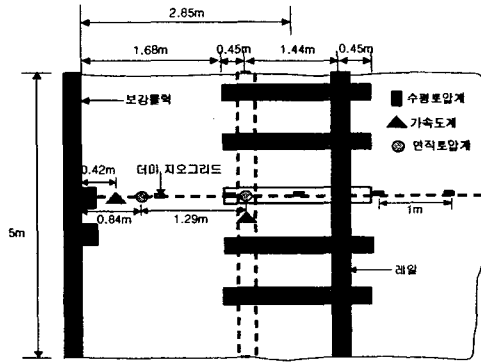


그림 2 실험 평면도

2.3 재하하중 및 주파수 산정

재하하중은 현행 철도의 설계시에 적용하는 LS22하중에 대해 설계속도는 200km/h, 직선부의 장대 레일을 대상으로 하였다. 열차의 주행에 따른 충격하중의 증분을 고려하기 위해 충격계수의 산정식으로부터 1.6을 얻고 이를 고려하여 1축당 작용 윤중을 14.3 tonf를 적용하였다.

또한 재하 주파수는 차량의 대차중심간 거리(d), 열차주행 속도(v), 통과주기(T)로부터 아래 식에 의하여 구하였다.

$$d = v \cdot T$$

$$\therefore T = d/v \tag{식 1}$$

여기서 재하진동수 $f=1/T$ 이므로

$$f = 1/T = v/d \tag{식 2}$$

위의 식으로부터 1급선의 설계속도 200km/h 기준으로 하고 대차의 축간을 고려할 때 재하주파수는 약 5Hz가 된다.

2.4 실험방법

모사열차 반복하중 재하시험의 수행을 위해 실험노반의 조성 후 실험노반의 안정화 단계를 거친 후 궤도의 안정화 및 정적하중 재하시의 거동특성을 위한 계측을 수행하였다. 정적하중 재하시험 후 현재 경부선의 통과륜수를 고려하여 100만회(약 1년 6개월 상당)의 모사열차 반복하중을 재하하여 시험을 수행하였다.

정적재하시험은 최대 윤중 143kN까지 각각 20kN씩 단계별로 10분간 재하후 계측하고 최대 하중 143kN재하 후 단계별로 재하하면서 계측을 수행하였다. 또한 모사열차 반복하중의 시험에서는 최소 하중 10kN에서 143kN까지를 재하주파수 5Hz로 100만회 재하하면서 일정 주기별로 계측을 수행하였다.

3. 반복하중 재하시험 결과 및 고찰

본 연구에서는 모사열차 반복하중 재하에 따른 블록식 보강/무보강 옹벽의 벽체 및 벽체 배면에서

의 변위, 토압 및 변형 분포를 고찰을 하였다. 결과 중 변위 및 토압을 중심으로 고찰하였다.

3.1 반복하중 재하횟수에 따른 변위 분포

(1) 변위진폭(탄성변위)

모사반복 열차 하중의 재하에 따른 벽체 및 배면 토체의 연직 변위진폭을 도시하면, 그림 3과 4와 같다.

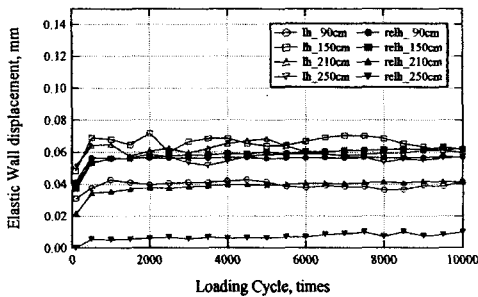


그림 3 반복재하 횟수 - 벽체 변위진폭

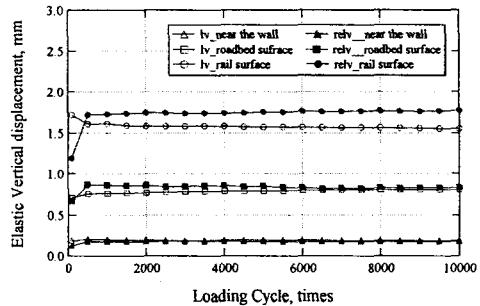


그림 4 반복재하 횟수- 연직 변위진폭

벽체 변위진폭은 그림 3에 보인 바와 같이 보강의 경우는 반복하중의 직접적인 영향을 받는 위치인 상부에서 변위 진폭에 비해 하부로 갈수록 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이는 지오그리드의 벽체 구속의 영향으로 판단된다. 이에 비해 무보강토의 경우는 벽체의 중간 높이에서부터 상부쪽이 더 큰 변위진폭을 나타내고 있으며, 하중 재하점으로부터 가장 먼지점에서 벽체 변위 진폭도 보강의 경우에 비해 상대적으로 큰 값을 보이고 있다.

한편, 옹벽의 배면 뒷채움토의 상단에서의 연직변위 진폭을 살펴보면 그림 4에 보인 바와 같이 하중 재하점인 레일 상부에서 가장 큰 값을 보이고 있으며, 재하점에서 벽체로 접근할수록 작은 값을 보이고 있으나, 두가지 경우에 대해 모두 근사한 값을 보이고 있다.

(2) 누적변위(소성변위)

모사반복 열차 하중의 재하 횟수와 벽체의 누적변위 관계를 보면 그림 5와 같다. 그림에 보인 바와 같이 반복하중 재하 초기의 즉시 침하가 상당량 발생하는 것을 알 수 있다. 전체적으로 무보강의 경우가 보강의 경우에 비해 반복하중 재하횟수에 따라 누적변위가 크게 발생하는 것을 볼 수 있으며, 보강의 경우는 누적변위가 수렴하는 경향을 보이는 반면, 무보강의 경우는 계속 증가하는 경향을 보인다.

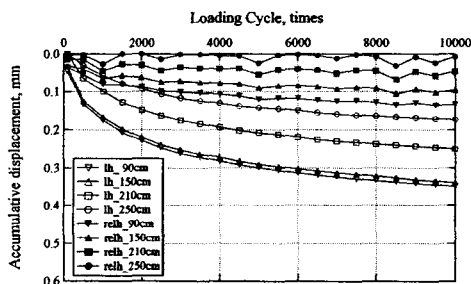


그림 5 반복재하횟수 - 벽체누적변위

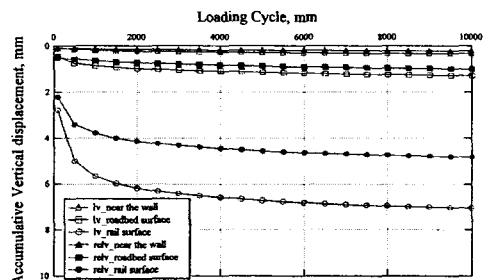


그림 6 반복재하횟수 - 연직누적변위

또한 옹벽 배면 뒷채움토 상단에서의 반복재하횟수에 따른 연직 누적변위관계를 도시하면 그림 6과 같다. 그림 6에 의하면, 레일면에서 가장 큰 누적변위를 보이고 있으며, 벽체에 인접할수록 누적

변위가 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 전체적으로 무보강의 경우가 보강의 경우에 비해 큰 누적변위를 보이고 있다. 특히 래일면에서의 누적변위가 큰 차이를 보이고 있으나, 이는 반복하중의 재하에 따라 침목하부의 도상의 재배열 및 이완에 의한 영향이 크게 작용하였기 때문으로 판단된다.

3.2 반복하중 재하횟수에 따른 토압분포

(1) 벽체 토압진폭 (탄성토압)

모사열차 반복하중 재하시의 반복하중 재하횟수에 따른 벽체의 토압진폭을 도시하면 그림 7과 같다. 그림에 보인 바와 같이 무보강/보강 모두 벽체 토압진폭이 0.005kgf/cm^2 이하의 매우 작은 값이 측정되었으며, 특히 보강의 경우는 벽체 상단부에서 반복하중 재하에 따라 거의 일정한 진폭의 토압이 측정되는 반면 무보강의 경우는 재하초기에서 20만회 재하사이에서 토압진폭이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 벽체의 연직변위 증가에 따라 재하점으로부터 멀어짐에 따른 토압의 감소로 판단된다.

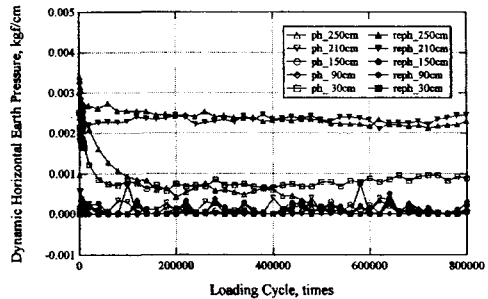


그림 7 반복하중재하횟수 - 벽체 토압진폭

3.3 벽체 높이별 변위 및 토압의 분포

(1) 변위분포

벽체 높이별 반복하중재하시의 평균 변위진폭을 나타내면 그림 8과 같다. 그림에 보인 바와 같이 보강의 경우는 하중 재하점에 근접한 상부에서의 변위진폭이 지오그리드의 구속에 의해 억제되고 있는 것을 볼 수 있으며, 무보강의 경우는 전체적으로 변위진폭이 발생하고 있다. 또한 누적변위는 전반적으로 무보강의 경우가 보강의 경우에 비해 큰 값을 보이고 있으며, 특히 무보강의 경우는 벽체의 중간 정도의 높이에서 최대의 누적변위가 발생하는 것을 알 수 있다.

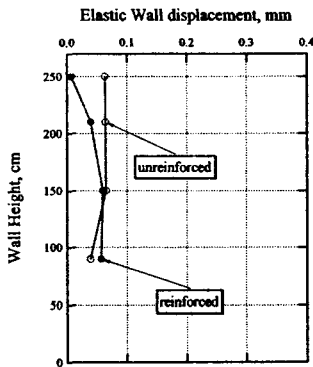


그림 8 벽체높이 - 변위진폭

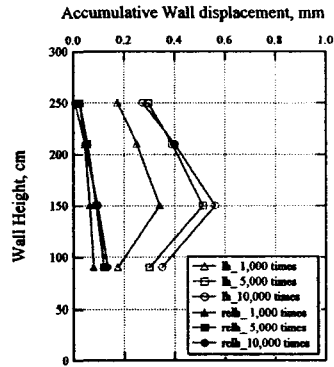
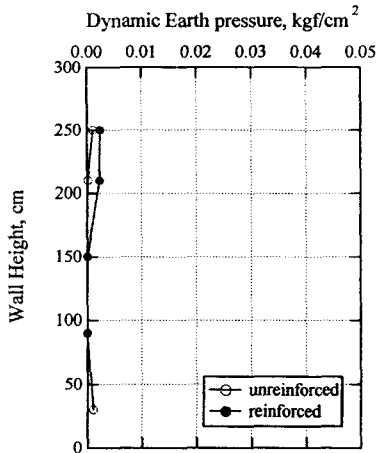


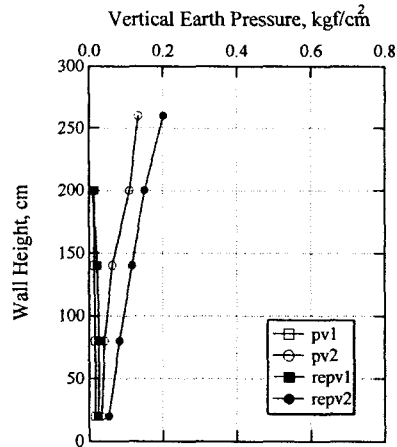
그림 9 벽체높이 - 누적변위

(2) 토압분포

그림 10은 벽체 수평토압 및 연직 토압의 진폭을 보인 것이다. 그림에 보인 바와 같이 모사열차 반복하중에 의한 수평토압의 변화는 미미한 값을 보이고 있으며, 보강의 경우 벽체 상부에서 수평토압이 상대적으로 무보강에 비해 큰 값을 보이고 있다. 또한 연직 토압의 분포 역시 보강의 경우가 큰 값을 보이고 있는데 이는 앞서 언급한 바와 같이 지오그리드의 구속효과 및 보강효과로 인해 벽체의 변위가 억제됨에 따라 벽체의 토압이 상대적으로 무보강의 경우에 비해 큰 값을 보이고 있는 것으로 판단된다.



가. 벽체 수평토압진폭 분포



나. 연직 토압진폭 분포

그림 10 벽체 높이별 토압분포

4. 결론

본 연구에서는 블록식 보강토옹벽의 정·동적 거동 특성을 분석하기 위하여 실험대형 실험노반을 조성하여 모사열차 반복하중 재하시의 토압진폭, 변위진폭 및 누적변위의 관계를 무보강/보강의 각각의 경우에 대해 비교분석을 하였다. 이와 같은 비교 분석을 통해 보강의 경우 재하점에서 가장 가까운 벽체 상단의 블록의 변위 진폭 및 누적변위가 거의 발생하지 않은 반면, 무보강의 경우 전체적으로 보강에 비해 큰 벽체 변위진폭 및 누적변위를 보이고 있다. 또한 누적변위가 보강의 경우는 재하점에서 멀어짐에 따라 증가하는 삼각형 분포를 보이고 있으나, 무보강의 경우는 벽체 하단으로부터 150m 높이에서 가장 큰 값을 보이고 있다. 한편 토압진폭의 분포를 살펴보면 반복하중 재하점 위치로부터 2.85m 이격된 거리에 위치한 벽체에서는 아주 미미한 토압이 측정되었으나, 변위와의 상관관계를 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Colin J.F.P.Jones, "Earth Reinforcement and Soil Structures".
- (2) I.Yogarajah, M.A.Saad, "Development of Horizontal earth pressures and Behaviour of Single and Multi Segmented Walls", Earth Reinforcement, 1996, Balkema.
- (3) R.K.Rowe & S.K.Ho, "A Review of the Behaviour of Reinforced Soil Walls", Earth Reinforcement Practice, Keynote Lecture(3).
- (4) I.Yogarajah "Development of horizontal earth pressures and behaviour of single and multisegmented walls" Earth Reinforcement, Ochiai, Yasufuku & Omine(eds), 1996 Balkema
- (5) T.Nakajima "Field performance of a geotextile reinforced soil wall with concrete facing blocks" Earth reinforcement, Ochiai, Yasufuku & Omine, 1996 Balkema, Rotterdam.