

블록식 보강토 옹벽의 정적성능 평가

Static Performance of Reinforced Soil Segmental Retaining Wall

고태훈* 이성혁** 이진욱*** 황선근**** 박성현***** 이승훈*****
 Koh, Tae-Hoon Lee, Sung-Hyuck Lee, Jin-Wook Hwang, Seon-Keun Park, Sung-Hyun Lee, Seung-Hoon

ABSTRACT

In this study, the full scale testing method of the geogrid-reinforced soil Segmental Retaining Wall(SRW) under the simulated train loading were proposed in order to evaluate the applicability of reinforced soil SRW in railway embankment. The train loading was simulated by the design static wheel load and the impact coefficient due to the train passing velocity. This test was focused on the static performance of reinforced soil SRW in terms of the following measuring systems ; the horizontal earth pressure, displacement acting on the facing block and the tensile strain along the geogrid. The data gathered from this full scale testing was compared with numerical analysis results by FLAC.

1. 서론

본 연구에서는 국내철도분야에 있어서 보강토 옹벽의 적용성을 검토하기 위해 지오그리드와 프리캐스트 타입의 블록을 조합한 블록식 보강토 옹벽을 구축하고 열차의 운중과 주행속도를 고려한 모사 열차하중을 재하하는 실험시험을 수행하였다. 블록식 보강토 옹벽에 작용하는 토압, 변위 그리고 지오그리드 보강재에 작용하는 인장변형율을 계측 및 분석함으로써 모사열차하중에 대한 블록식 보강토 옹벽의 정적거동을 평가하였으며, 또한 수치해석 결과와의 비교고찰을 수행하였다.

2. 블록식 보강토 옹벽

보강토 옹벽은 급구배 혹은 수직인 벽을 가진 성토에 적용하는 것으로 비탈 구배가 1:1보다 급구배의 성토에 적용하는 보강토 공법을 말하며, 기본적인 구성은 성토재, 보강재, 벽면공으로 이루어져 있다.

본 연구에서 대상으로 한 블록식 보강토 옹벽

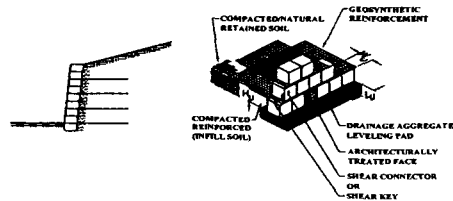


그림 1 블록식 보강토 옹벽

- * 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 주임연구원, 정희원
- ** 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원, 정희원
- *** 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원, 정희원
- **** 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 책임연구원, 정희원
- ***** 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 연구원
- ***** (주) 메카모아 대표이사

(Reinforced Soil Segmental Retaining Wall)은 뒷채움토와 상재하중에 의한 활동력을 블록의 완만한 경사와 자중으로 지지함과 동시에 수평으로 설치한 토목섬유 보강재에 의해 안정화된 보강토체와 블록이 조합을 이룬 복합적인 시스템이다(그림 1 참조).

3. 실험형시험

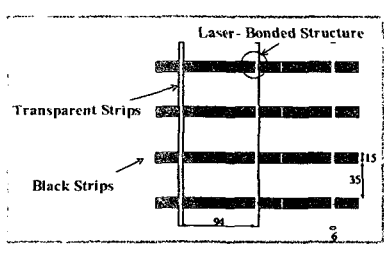
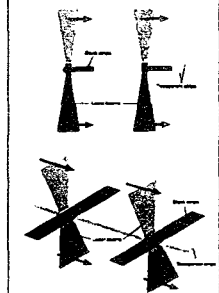
3.1 시료토 및 지오그리드 물성

철도 노반재로서의 기본적인 물성과 역학적 특성을 평가하기 위해 시험노반조성용 시료토에 대해 실내시험을 수행한 결과는 표 1과 같다. 또한 시험에 사용된 보강재는 고강도섬유인 폴리에스테르로 이루어진 횡방향부재와 종방향부재를 격자형태로 교차시켜 레이저접합 처리(Laser-Bonded Structure) 과정을 통해서 부재간의 연결강도를 향상시킨 지오그리드를 대상으로 하였다(표 2 참조).

표 1 시료토의 물리·역학적 특성

자연 함수비 (%)	G_s	Atterberg Limits			입 도 시 험				통일 분류	다점시험		직접전단시험	
		w_L (%)	w_p (%)	I_p	#200 통과량 (%)	유효입경 (D_{10}) (mm)	C_u	C_c		V_{dmax} (g/cm ²)	w_{opt} (%)	C (kg/cm ²)	ϕ (°)
15.2	2.7	23.9	22.4	1.5	30.3	0.006	80.8	1.68	SM	1.98	11.2	0.39	33

표 2 지오그리드 특성(단위 : mm)

Type (Unit : mm)			
	QC Tensile Strength	90.0 kN/m	
Material	Polyester (PET)		<Laser-Bonded Structure>

3.2 기타 구성품 및 옹벽 설치개념

블록식 보강도 옹벽을 구축하기 위해 사용된 블록과 핀, 그리고 설치 개념도를 그림 2에 나타냈다.

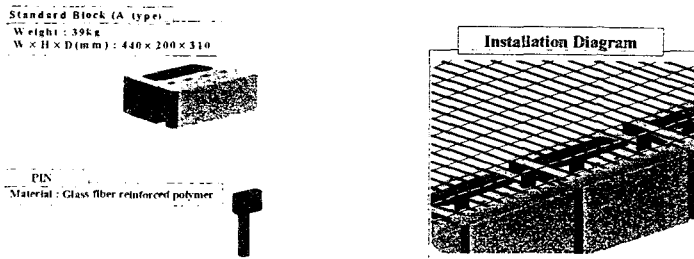


그림 2 블록, 핀 및 설치 개념도

3.3 시험윤중(Simulated Wheel Load)

시험윤중은 현행 철도 설계시에 적용되는 LS22하중(축중)과 설계속도(V) 200km/h, 직선부의 장대레일을 가정하여 산정하였다.

$$P_{dy} = P_{st} \times i = P_{st} \times (1 + 0.3V/100) = P_{st} + P_{st} \times 0.3V/100 \quad (\text{식 1})$$

여기에서, P_{dy} : 동적윤중, P_{st} : 정적윤중(11tonf), i : 충격계수
(식 1)과 같이 표현된 동적윤중은 다시 (식 2)와 같이 표현될 수 있다.

$$P_{dy} = P_{st} + 2 \times S_p \quad (\text{식 2})$$

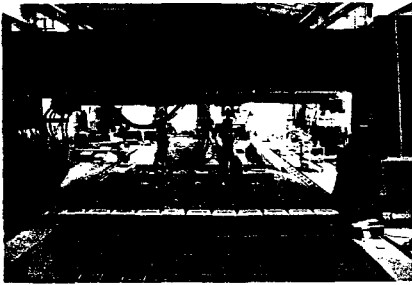
여기에서, S_p : 윤중변동의(충격율에 의한) 표준편차
반복하중에 대한 노반의 응력을 조사하는 경우, (식 3)과 같이, 표준하중과 윤중변동의(충격율에 의한) 표준편차를 이용하여 시험윤중을 산정할 수 있다.

$$P_w = P_{st} + S_p \quad (\text{식 3})$$

따라서, 실험시험에 적용되는 1축당 작용 윤중은 14.3tonf 이지만, 본 연구에서는 이러한 시험윤중을 기초로 하여 블록식 보강토 옹벽의 거동특성을 보다 명확히 평가하기 위해 약 40% 증가된 윤중 20tonf을 재하하였다.

3.4 시험단면 및 계측위치

실험시험은 철도기술연구원 이 보유하고 있는 종합 궤도노반 시험장비를 이용하여 수행하였으며 토조(길이 22m, 폭 5m, 깊이 3m, 콘크리트 구조), 하중재하장치, 반력대로 구성되어있다(그림 3 참조). 또한 실험시험 단면과 계측기의 설치위치는 그림 4에 보인 바와 같으며, 토압계, 변위계, 스트레인게이지 등의 계측기를 사용하였다.

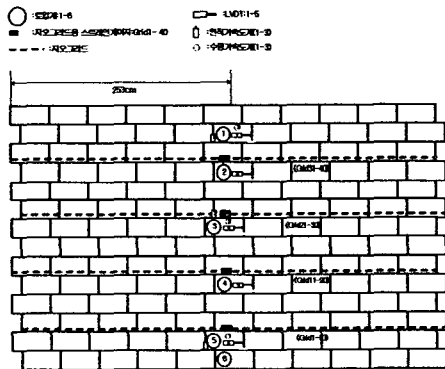


(a) 종합 궤도노반 시험장비

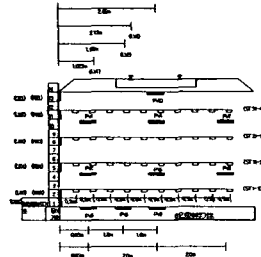


(b) 하중재하장치 상세

그림 3 블록식 보강토 옹벽 구축후의 전경



(a) 정면도



(b) 단면도

그림 4 실험시험 단면

3.5 시험결과 및 고찰

본 절에서는 블록식 보강토 옹벽의 모사 열차하중에 의한 정적 거동을 고찰하고자 실험형시험을 수행하여 블록배면에 발생하는 수평토압, 블록전면에 발생하는 수평변위, 지오그리드에 발생하는 인장변형율을 계측하였다. 계측 및 분석과정은 시험단면 조성(단계성토) 및 안정화 단계와 하중(20tonf)재하 단계로 나누어 수행하였으며, 본 논문에서는 하중재하 단계의 토압과 변위의 결과를 수록하였다.

3.5.1 연직·수평토압

심도별 연직토압 분포를 살펴보면(그림 5 참조), 배면토체 상부에서는 정하중에 의한 토압증가량이 지배적인 것을 알 수 있으며, 그 이하의 심도에서는 자중에 의한 영향이 지배적인 것을 알 수 있다.

또한 그림 6에 블록식 옹벽 배면에 작용하는 수평토압 분포를 도시하였다. 전체적으로 보강토체 내 응력상태는 극한평형해석(Rankine 토압)에서 가정한 극한상태에 도달하지 않았기 때문에 상대적으로 작은 응답을 보인 것을 알 수 있으며, 옹벽 최하단부를 제외하면 비교적 유사한 거동을 보이는 것을 알 수 있다.

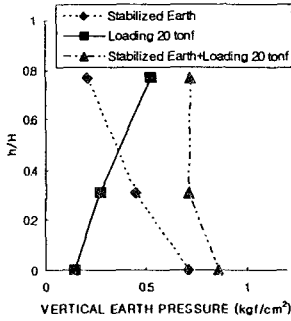


그림 5 연직토압

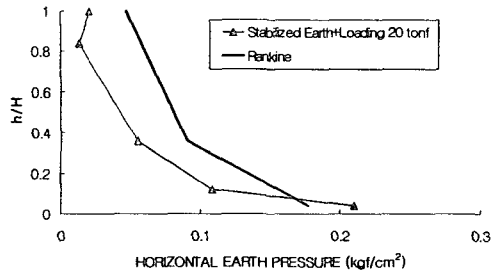


그림 6 수평토압

3.5.2 수평변위

블록식 보강토 옹벽의 수평변위는 시공단계의 다짐에 의한 변위와 상재하중에 의한 변위로 크게 나눌 수 있는데, M. Isabel etc.(1996)은 시공단계의 변형이 상재하중에 의한 영향보다 큰 것으로 보고한 바 있다.

그림 7은 상재하중 증가에 따른 수평변위 분포를 나타낸다. 상재하중이 증가함에 따라 전체적으로 일정한 기울기를 가지며 수평변위가 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있는데, 이는 배면토체 전 영역에 대해서 탄성영역내의 미소한 전단변형이 발생하고 있음을 의미한다. 또한 상재하중의 증가에 따라 옹벽 중앙부에서의 수평변위가 상부와 하부에 비해 크게 발생되는 것을 알 수 있으며 최대 수평변위는 옹벽높이의 0.045% 수준을 나타냈다.

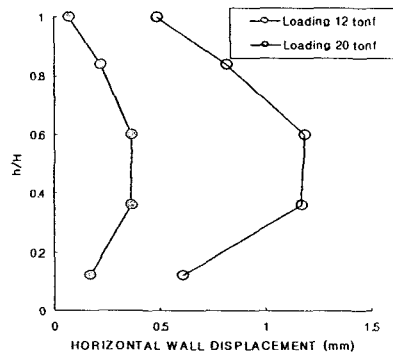


그림 7 수평변위

4. 수치해석

본 절에서는 상기 수행한 블록식 보강토 옹벽의 실험형시험 단면에 대해서 수치모형화를 수행하여, 구조물의 열차하중에 의한 정적 응력-변형거동을 분석하였다.

유한차분응력해석 프로그램인 FLAC을 이용하여 해석을 수행하였으며, 대상 보강토 옹벽 실험형시험 단면은 2차원 평면변형으로 모사되었다(그림 8 참조).

4.1 해석모델

지반과 콘크리트 블록의 모델링을 위해서 1550개의 요소를 사용하였으며, 배면토체와 블록, 블록과 블록간에는 Interface 요소를 사용하였다. 지오그리드 보강재는 선형 케이블요소로 모델링되었다.

콘크리트 블록은 탄성재료로 처리하였으며, Interface 요소를 위해 사용된 연속체요소에 대해서는 Mohr-Coulomb 파괴규준의 탄소성 응력-변형 모델을 채택하였다. 또한 Interface 요소(그림 9 참조)는 활동이 발생할 때까지 전단방향과 연직방향의 강성 스프링으로 모사되었다. 따라서, 그 지점에서의 변형은 Interface를 따라 발생할 수 있으며 연직·전단응력은 Mohr-Coulomb 파괴규준을 만족한다.

수평방향으로 15m, 기초 4.6m 깊이까지를 해석영역으로 모델링하였으며, 해석단면의 좌·우 경계조건은 평면변형 문제를 해결하기 위해 해석영역의 하부는 수평(x)과 연직(y)방향, 우측과 좌측은 수평방향의 변위를 구속하였다.

전체적인 해석과정은 시공과정에 준하여 단계성토별 해석을 수행하였으며, 매 단계시공 높이를 블록높이 0.2cm로 하여 총 13단계 성토시공 후 열차하중을 재하하였다.

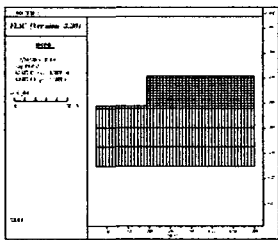


그림 8 2차원 해석단면

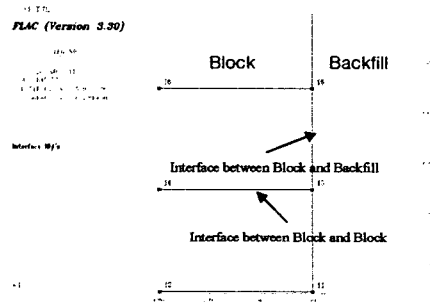


그림 9 Interface 요소

4.2 입력물성치

4.2.1 지반

표 3 기초와 배면토체의 입력물성치

물성치	지반	기초	배면토체
$\phi(^{\circ})$		33	33
c (Pa)		5.0×10^4	3.86×10^4
ν (kg/m ³)		2150	1800
ν		0.3	0.3
Bulk Modulus (Pa)		1.7×10^7	1.7×10^7
Shear Modulus (Pa)		7.7×10^6	7.7×10^6

4.2.2 보강재

표 4 지오그리드의 물성치

A (m ²)	5.0×10^{-4}
E (Pa)	2.6×10^9
EA (Axial Stiffness)	1300kN/m
Tensile Yield Strength(N/m)	9.0×10^4
Bond Strength (S _{bond} (N/m))	1×10^6
Bond Stiffness (K _{bond} (N/m/m))	1×10^{12}

4.2.3 전면블록(Facing Block)

표 5 전면블록의 물성치

ν (kg/m ³)	2400
ν	0.2
Bulk Modulus (Pa)	1.3×10^{10}
Shear Modulus (Pa)	0.96×10^{10}

4.2.4 Interface 요소

표 6 Interface 요소의 물성치

물성	Interface 요소	
	배면토체-블록	블록-블록
Normal Stiffness (Pa/m)	1×10^9	1×10^9
Shear Stiffness (Pa/m)	1×10^6	1×10^6
Friction (°)	22	23

본 절에서 산정한 많은 입력물성치는 불확실성을 내포하고 있는 것은 주지의 사실이다. 하지만 제한적인 실험장 데이터를 근거로 현장조건을 가장 합리적으로 평가할 수 있도록 입력물성을 변화시켜 가면서 계측데이터와 근접한 값을 산정하였다.

4.3 결과 및 고찰

4.3.1 수평변위

그림 10은 열차하중 재하 후 변형된 단면, 그림 11은 심도별 블록에 발생한 수평변위 분포를 보여준다. 그림 11에서 알 수 있듯이, 수치해석결과와 계측결과는 전체적으로 유사한 경향을 보였는데, 대략 0.5H지점에서 최대 1.2 ~ 1.3mm(회전변위 \approx 0.0005)의 수평변위가 발생하여, 파괴상태의 회전변위에 크게 못 미치는 탄성영역의 미소한 변위가 발생하는 것을 알 수 있었다.

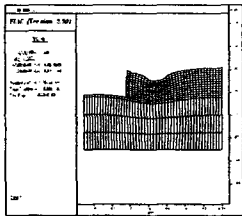


그림 10 열차하중 재하 후의 변형(Deformed Mesh)

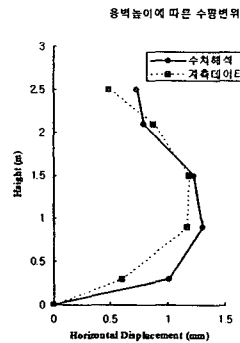


그림 11 수평변위

4.3.2 연직 · 수평토압

그림 12의 심도별 연직토압 분포를 살펴보면, 배면토체-블록 Interface에서의 마찰에 의해 배면토체에서 벽면으로 연직응력의 전이가 부분적으로 발생하고 그에 따라 연직응력이 국부적으로 감소되어 결국 최대 연직응력은 블록배면에서 일정거리 떨어진 곳에서 발생하는 것을 알 수 있다.

그림 13의 수평토압의 경우, 기초부의 영향으로 인해 수치해석결과가 과대평가되고 있는 응력 최하단부를 제외하면 비교적 유사한 경향을 보이고 있다.

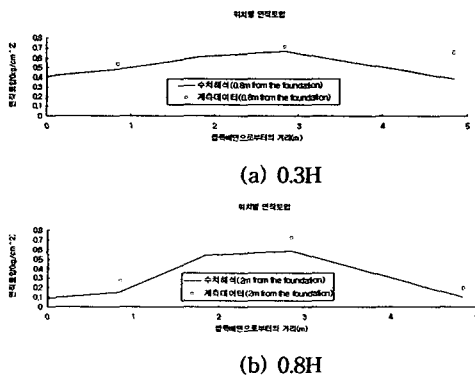


그림 12 연직토압

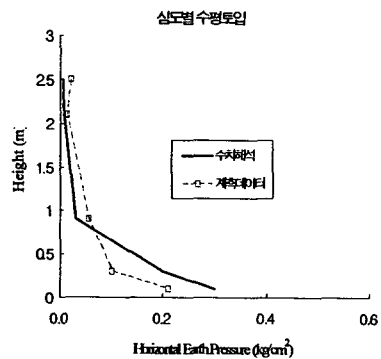


그림 13 수평토압

4.3.3 지오그리드 인장변형률

각 층에 포설된 지오그리드에서 발생한 최대 인장력 분포에 대한 계측데이터와 수치해석결과를 그림 14에 도시하였다. 그림에서와 같이, 전체적으로 계측데이터가 수치해석결과에 비해 높은 수준의 인장변형률이 발현하는 경향을 볼 수 있는데, 이러한 오차는 수치해석상, 시험단면 조성시 단계성토 다짐유발용력에 의해 추가적으로 발생한 지오그리드 변형율에 기인하는 것으로 판단되며, 또한 하중-변형을 관계가 시간 의존적인 신장성 보강재의 진행성 하중전이 거동을 고려하지 않고 보강재의 전길이에 단일 탄성계수를 적용함으로써 야기된 것으로 판단된다.

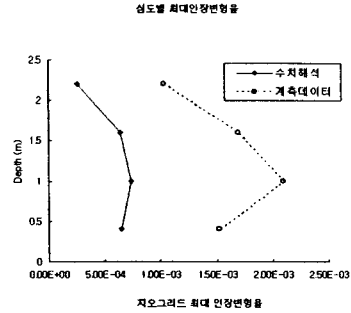


그림 14 최대인장변형률

5. 결론

레이저접합 구조(Laser-Bonded Structure)로 이루어진 지오그리드 보강재를 이용한 블록식 보강토 옹벽을 대상으로 정적 열차하중 실험시험 및 수치해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

- 1) 배면토체 전 영역에 대해서 탄성영역 내의 미소한 전단변형의 점진적인 진행에 의해서 벽체 수평변위가 유발되며, 특히 옹벽 중앙부에서 발생한 최대수평변위는 0.0005H로서 탄성영역의 미소한 변위수준이었다. 또한 수평토압 역시 Rankine의 주동토압에 비해 상대적으로 작은 응답을 보임으로서, 블록식 보강토 옹벽 구조물에 미치는 정적 열차하중의 영향은 전반적으로 미소한 수준임을 알 수 있다.
- 2) 블록식 보강토 옹벽의 수치모형을 통해 실험시험 결과와의 응력-변형 거동을 비교·분석한 결과, 전체적인 응력-변형거동은 시험 결과와 유사한 경향을 보였으나, 시공과정상 발생하는 다짐유발용력과 신장성 보강재의 진행성 하중전이 거동을 고려하지 않음으로 인해 야기된 오차를 확인할 수 있었다. 이러한 문제는 향후 블록식 보강토 옹벽의 수치해석 모형화에 있어서 입력자료 선정시 고려사항으로 평가된다.

참고문헌

1. 이성혁, 고태훈, 이진욱, 황선근, “신장성 지오그리드 보강재의 인발저항특성 평가를 위한 시험 및 수치해석 기법”, 한국철도학회지 Vol.5, No.2, 2002, pp. 93 ~ 103
2. I.Yogarahajah, M.A.Saad, “Development of horizontal earth pressures and behaviour of single and multi segmented walls”, Proceedings of the international symposium on Earth Reinforcement, 1996, pp. 553 ~ 558
3. M. Isabel, M. Pinto & T. W. Cousens, “Geotextile Reinforced Brick Faced Retaining Walls”, Geotextiles and Geomembranes 14, 1996, pp.449 ~ 464
4. NATIONAL CONCRETE MASONRY ASSOCIATION, “DESIGN MANUAL FOR SEGMENTAL RETAINING WALLS, SECOND EDITION”, 1997, pp. 3 ~ 12
5. R. Kerry Rowe, Graeme D. Skinner, “Numerical analysis of geosynthetic reinforced retaining wall constructed on a layered soil foundation”, Geotextiles and Geomembranes 19, 2001, pp. 387 ~ 412