철도 건설 용지 부족문제 해결을 위한 연직형 보강노반의 변형 특성 분석

Analysis of the Deformation Characteristics of Vertically Reinforced Subgrades to Address Land Shortage in Railroad Construction

김대상* · 김웅진**

Kim, Dae Sang*, and Kim, Ungjin**

Abstract

Vertically reinforced subgrade (VRS) the construction of which involves building backfills first and then facing walls was developed for the railroad construction in areas with land shortages, such as civil areas. VRS minimizes the land use during railroad construction and operation. It also reduces residual settlement during railway operation by virtue of its staged construction process. In this study, numerical analysis was performed to quantitatively evaluate the deformation characteristics of VRS, such as surface settlement and horizontal deformation, during the construction and operation of railroads. It was confirmed that VRS with 40 cm of vertical spacing and a reinforcement short length of 0.35H complies with the limit of residual settlement (30 mm) and horizontal deformation (less than 0.03H) for concrete slab tracks, even in the most unfavorable conditions.

Key words : Lack Shortage, Short Reinforcement, Minimize Section, Settlement, Horizontal Deformation

요 지

철도 건설을 위하여 도심지 등 용지가 부족한 곳에서의 적용을 위하여 뒤채움 토공부를 선 시공한 후 전면 벽체를 나중에 시공하는 연직형 보강노반을 개발하였다. 연직형 보강노반은 철도 시공 및 운영 시 소요되는 점유 면적을 최소화할 수 있는 기술로 단계시공을 통하여 공용 중 잔류침하를 저감시킬 수 있는 특징이 있다. 동 논문에서는 연직형 보강노반의 시공 중 및 운용 중 변형 특성을 평가하기 위하여 수치해석을 통하여 노반침하 및 수평변위에 대한 정량적 평가를 수행하였다. 연직형 보강노반이 가장 불리한 해석조건인 연직간격 40 cm와 짧은 보강재 조건 0.35H에서도 콘크리트 슬래브레도용 노반의 요구성능인 잔류침하 기준(30 mm)과 수평변위(높이의 3% 이내) 규정을 만족하는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 용지 부족, 짧은 보강재, 단면 최소화, 침하, 수평변위

1. 서 론

수도권을 중심으로 최근 급등하고 있는 부동산 가격으로 인하여 토지 보상비용이 높은 지역에서의 건설 행위 시 용지 부족 및 보상 업무가 점차 어려워질 것이 예상된다. 따라서, 철도 건설 시 동일한 성능을 발휘하나, 그 점유

면적을 최소화할 수 있는 기술은 국토면적이 좁은 우리나라에서 토지에 대한 매몰비용을 줄이고 보상 절차에 따른 사회 간접비용을 줄일 수 있어 효율성 높은 사회기반 건설 기술이 될 수 있을 것이다(Fig. 1).

흙쌓기 노반의 안전성을 확보하기 위해서는 법면을 일정 기울기 이상으로 건설해야 하는데 이는 넓은 용지를 필요로

*교신저자, 정회원, 한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부 수석연구원(Tel: +82-31-460-5305, Fax: +82-31-460-5749, E-mail: kds@krii.re.kr)

Corresponding Author, Member, Principal Researcher, Advanced Railroad Civil Engineering Division, KRRI

**한국철도기술연구원 궤도노반연구팀 박사후연구원

Post Doctor, Track & Roadbed Research Team, KRRI

하게 된다. 또한, 도로 및 택지 조성에 많이 이용되고 있는 옹벽은 구조물을 먼저 시공하고 뒤채움 흙노반을 후순위로 시공하므로 콘크리트 슬래브 궤도와 같이 공용중 잔류침하에 민감한 구조물의 경우에는 불리하다. 그리고 옹벽구조물의 경우 높이가 높아질수록 작용 수평토압이 높이(H)의 자승으로 증가하여 벽체 구조물 단면 및 기초 설치 비용이 증가하게 된다.

용지 부족개소에 적용이 가능한 연직형 토류구조물의 한 종류인 블록식 및 패널식 보강토 옹벽은 벽체가 하중 분담을 할 수 없는 구조로 반복 열차하중이 지속적으로 작용하는 철도 적용 시 배부름 등 큰 수평변위가 발생할 수 있는 구조적인 한계를 갖고 있다. 이와 같은 이유로 높이의 70%까지 보강재를 적용하여 보강하고 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016).

철도용 보강노반은 뒤채움을 선시공하고 철근 콘크리트 일체형 벽체를 후시공하여 잔류침하 문제를 해소하고, 벽체의 하중분담 특성을 이용하여 높이의 35% 수준의 짧은 보강재를 적용한다(Tatsuoka et al., 1989; Tatsuoka et al., 1997; Tatsuoka et al., 2007). 비록 높이의 35% 수준의 보강재를 사용하나, 시공 중에는 철근망 기준틀을 사용하여 안정성을 확보하고, 공용 중에는 강성벽체와 보강재를 일체화한

구조로 안정성을 확보할 수 있다(Kim, 2014; 2016). 짧은 보강재의 적용을 통한 단면 최소화는 여러 측면에서 이점이 있다. 노반을 구성하는 양질의 흙 사용을 줄일 수 있으며, 인접 구조물과의 간섭을 최소화하여 시공 중 및 열차 운행 중 안전성을 확보할 수 있다(Kim and Kim, 2020; 2021). 그 외에 관련 연구로는 Park and Kim (2020), Won et al. (2020) 등에 의해 보강토 옹벽의 수치해석이 수행된바 있다. 그러나 짧은 보강재와 일체형 벽체를 이용한 노반의 높이에 따른 보강사양과 적용성에 대한 연구는 미비한 실정이다. 본 논문에서는 용지부족문제를 해결할 수 있을 뿐 아니라 사용성 측면에서 변형 최소화가 요구되는 콘크리트 슬래브 궤도용 노반으로서 연직형 보강노반의 적용성을 평가하고자 한다.

2. 수치해석 모델링

2차원 유한요소해석 프로그램을 활용하여 Fig. 2와 같이 보강한 단면을 Plane strain 조건으로 모델링하였다. 연암층 위에 층 두께 10 m의 사질토층 지반이 놓여 있는 지층조건에서 폭 13 m의 철도 용 복선노반을 건설하는 것을 가정하였다. 철도용으로 건설하는 연직형 보강노반의 높이, 보강재 수직 간격 및 짧은 보강재 길이를 변수로 하여 총 16 케이스에 대한 수치해석을 수행하였다.

수치해석 모델링은 각 단계별 현장 시공순서를 고려하였으며 궤도 및 열차하중 재하 시의 변형 특성을 분석하였다 (Fig. 3).

- ① 기초 터파기
- ② 시멘트 처리된 자갈 치환 및 기초 시공
- ③ 뒤채움 시공
- ④ 강성벽체 시공
- ⑤ 궤도하중 재하
- ⑥ 열차하중 재하

궤도 및 열차하중은 철도설계기준에서 규정하는 15 kPa과 35 kPa을 등분포하중으로 철도 보강노반 상부 전체에 재하하

Fig. 1. Railroad Site Width Depending on Types of Structures

Fig. 2. Analyses Section

였다.

총 16개 케이스에 대한 상세 해석조건은 Table 1과 같다. 현장의 다양한 높이 변화에 대한 평가를 수행하기 위하여 해석모델의 높이를 4~10 m로 변화시켰다. 기존 연구 결과 안전성을 확보하는 최소 보강사양과 추가보강 시 변형제어

성능을 비교하기 위하여 연직형 보강노반의 변형에 영향을 미칠 수 있는 보강재 연직간격과 보강재 길이는 각각 30 cm와 40 cm, 높이의 35%와 40%를 적용하였다.

Table 2에서는 해석에 사용된 재료의 모델과 물성값을 정리하였다. 상하부노반, 시멘트 처리된 자갈, 사질토, 연암층

Fig. 3. Analysis Steps

Table 1. Analysis Cases

No.	Cases	Vertical spacing of reinforcement	Length of short reinforcement	Height
1	30 cm_0.35H_4 m	30 cm	35% of H	4 m
2	30 cm_0.35H_6 m			6 m
3	30 cm_0.35H_8 m			8 m
4	30 cm_0.35H_10 m			10 m
5	30 cm_0.40H_4 m	30 cm	40% of H	4 m
6	30 cm_0.40H_6 m			6 m
7	30 cm_0.40H_8 m			8 m
8	30 cm_0.40H_10 m			10 m
9	40 cm_0.35H_4 m	40 cm	35% of H	4 m
10	40 cm_0.35H_6 m			6 m
11	40 cm_0.35H_8 m			8 m
12	40 cm_0.35H_10 m			10 m
13	40 cm_0.40H_4 m	40 cm	40% of H	4 m
14	40 cm_0.40H_6 m			6 m
15	40 cm_0.40H_8 m			8 m
16	40 cm_0.40H_10 m			10 m

Table 2. Material Properties

Layers and Materials	Model	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (MPa)	Friction angle (°)	Modulus of elasticity (MPa)	Poisson's ratio
Upper subgrade	Mohr-Coulomb	19	1	35	80	0.3
Lower subgrade	Mohr-Coulomb	19	20	25	60	0.33
Cement mixed gravel	Mohr-Coulomb	21	50	40	120	0.2
Sandy soil	Mohr-Coulomb	18	10	30	40	0.35
Soft rock	Mohr-Coulomb	23	300	35	1,800	0.28
Reinforced concrete	Linear elastic	24.5	-	-	30,000	0.2
Reinforcement	Geogrid	J = 1,000 kN/m				
Net of welded rebar	Plate	EA = 1.46×10^5 kN, EI = 1.542 kN · m ²

Fig. 4. Location of Measurement Points

은 Mohr-Coulomb 모델로, 전면벽체는 선형 탄성모델을, 보강재는 지오그리드 모델을 사용하였다. 보강재의 스프링 계수는 기존 연구들(Yoo, 2011; Abdi and Zandieh, 2014)에서 사용한 값을 참고하여 $J = 1,000$ kN/m (설계인장강도 60 kN/m)를 적용하였다. 뒤채움재 전면의 철근망 기준틀은 플레이트 모델을 사용하였으며, 기준틀에 사용되는 직경 13 mm 철근 11개를 고려하여 $EA = 1.46 \times 10^5$ kN와 $EI = 1.542$ kN · m²를 적용하였다. 각 재료의 물성값은 설계사례 및 지반공학 관련 문헌 등(Schnaid et al., 2001; Kim et al., 2005; Aqil et al., 2005)을 참고하여 결정하였다.

각 해석단계에서의 침하는 노반 상부의 중앙부에서 계측하였고, 벽체 수평변위는 높이에 따른 변형 양상을 파악할 수 있도록 벽체의 하단($h = 0.0 \times H$), 중앙($h = 0.5 \times H$) 및 상단($h = 1.0 \times H$)의 3점 위치에서 계측하였다. Fig. 4는 각 계측점의 위치를 보여준다.

3. 해석 결과 및 분석

3.1 침하

각 해석 단계별로 노반상부 중앙에서의 침하량을 측정하였다. 뒤채움을 먼저 시공하고 뒤채움부 침하가 수렴된 이후 벽체를 시공하는 공법의 특성을 고려하여 벽체 시공, 궤도하

중 및 열차하중 재하 단계별 침하를 측정하였다. 각 해석 케이스별로 침하를 측정된 결과를 Table 3 및 Fig. 5에 정리하였다.

30 cm_0.40H 케이스에서 최소 침하, 40 cm_0.35H 케이스에서 최대 침하가 발생하여 보강재 연직 간격이 클수록, 보강재 길이가 짧을수록 침하가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 높이가 높아질수록 두드러졌다. 해석 결과 최대 침하량은 콘크리트 슬래브궤도의 허용잔류침하량기준(Korea Railway Network Authority, 2016) 30 mm 이내에 있음을 알 수 있다.

열차하중 재하조건에서 보강재 연직 간격이 30 cm에서 40 cm로 증가하는 경우 최대 10%, 보강재 길이를 높이의 40%에서 35%로 감소시키는 경우 최대 3.0%의 침하가 증가하였다.

높이 6 m 이하의 경우에는 보강재 배치조건 변화에 따른 침하 측면에서의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

Figs. 6과 7은 높이 10 m의 경우 30 cm_0.40H 케이스와 40 cm_0.35H 케이스의 시공 단계별 연직변위분포를 비교한 그림이다. 벽체 시공 시에는 벽체하중에 의해 노반 외측에서 가장 큰 침하가 발생하였으나, 궤도 및 열차 하중이 작용하는 경우에는 노반 중앙에서 가장 큰 침하가 발생하였다. 이러한 침하 경향은 보강재의 연직간격이나 길이가 변화하여도 동일하였다.

3.2 수평변위

상재하중 재하에 따른 수평변위를 검토하기 위하여 벽체 하단, 중앙 및 상단 지점에서 벽체 시공 후 궤도 및 열차하중을 차례로 재하하였다. 케이스별 수평변위를 측정된 결과는 Table 4와 같다. Figs. 8 및 9는 이를 그래프로 표시한 결과이다.

30 cm_0.35H_4 m 케이스와 30 cm_0.40H_4 m 케이스를 제외한 모든 케이스에서 벽체 중앙에서 최대 수평변위가 발생하였다. 최대 벽체 수평변위는 40 cm_0.35H 케이스에서 발생하였다.

Table 3. Settlements

No.	Cases	Surface settlements (mm)		
		Wall construction	Track load	Train load
1	30 cm_0.35H_4 m	0.30	3.28	10.29
2	30 cm_0.35H_6 m	0.70	3.95	11.99
3	30 cm_0.35H_8 m	1.32	5.38	17.11
4	30 cm_0.35H_10 m	2.62	9.09	28.23
5	30 cm_0.40H_4 m	0.30	3.28	10.29
6	30 cm_0.40H_6 m	0.70	3.95	11.99
7	30 cm_0.40H_8 m	1.32	5.37	16.81
8	30 cm_0.40H_10 m	2.61	8.96	27.42
9	40 cm_0.35H_4 m	0.32	3.30	10.31
10	40 cm_0.35H_6 m	0.70	3.95	12.00
11	40 cm_0.35H_8 m	1.33	5.40	17.84
12	40 cm_0.35H_10 m	2.73	9.54	30.92
13	40 cm_0.40H_4 m	0.32	3.30	10.31
14	40 cm_0.40H_6 m	0.70	3.95	12.00
15	40 cm_0.40H_8 m	1.32	5.38	17.60
16	40 cm_0.40H_10 m	2.72	9.44	30.21

Fig. 5. Surface Settlements

레도 및 열차하중 재하 시 높이 4 m 일때 각각 0.37 mm와 1.42 mm, 높이 6 m 일때 0.69 mm와 3.21 mm, 높이 8 m 일때 1.48 mm와 8.33 mm, 높이 10 m 일때 3.51 mm와 16.49 mm의 수평변위가 발생하였다. 벽체 중앙에서 가장 큰 변위가 발생하는 배부름 현상은 높이가 높을수록 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

가장 큰 수평변위가 발생한 40 cm_0.35H_10 m 케이스의 경우에도 보강토옹벽 허용수평변위(높이의 3% 이내) 범위 이내인 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 연직형 보강노반은 40 cm_0.35H 보강재 배치조건에서도 높이 10 m까지는 수평변위에 대하여 충분한 변형 제어성능을 확보할 수 있을 것으로 판단되었다.

침하와 동일하게 보강재 연직 간격이 넓을수록, 보강재 길이가 짧을수록 수평변위가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 열차하중 재하 시에 두드러지게 발생하였다.

열차하중 재하조건에서 보강재 연직 간격을 30 cm에서 40 cm로 증가하는 경우 최대 64%, 보강재 길이를 높이의 40%에서 35%로 감소시키는 경우 최대 20%의 수평변위가 증가하였다. 보강재 배치조건(30 cm_0.40H → 40 cm_0.35H)과 높이 변경(4 → 10 m) 시 수평변위는 57%~74% 증가하는 것으로 평가되었다.

Figs. 10과 11은 30 cm_0.40H와 40 cm_0.35H 케이스의 열차 하중 재하 시 수평변위 분포를 높이 별로 비교한 그림이다. 높이 4 m에서는 벽체 하부로 갈수록 벽체 수평변위가 크게 발생하였으나, 높이 6 m 이상에서는 벽체 중앙에서 최대 수평변위가 발생하는 배부름 현상을 관찰할 수 있었다. 이러한 경향은 보강재의 연직 간격 및 길이를 변화시켜도 유사하였다.

Fig. 6. Distribution of Vertical Displacement (30 cm_0.40H case)

Fig. 7. Distribution of Vertical Displacement (40 cm_0.35H case)

Table 4. Horizontal Displacement of Wall

No.	Cases	Horizontal displacements of wall (mm)					
		Track load			Train load		
		$h/H = 0$	$h/H = 0.5$	$h/H = 1.0$	$h/H = 0$	$h/H = 0.5$	$h/H = 1.0$
1	30 cm_0.35H_4 m	0.36	0.34	0.20	1.40	1.19	0.51
2	30 cm_0.35H_6 m	0.38	0.66	0.42	1.91	2.90	1.70
3	30 cm_0.35H_8 m	0.72	1.35	0.64	3.58	6.82	4.46
4	30 cm_0.35H_10 m	1.62	3.13	1.10	6.38	13.43	8.42
5	30 cm_0.40H_4 m	0.36	0.34	0.19	1.40	1.15	0.48
6	30 cm_0.40H_6 m	0.38	0.64	0.40	1.87	2.80	1.59
7	30 cm_0.40H_8 m	0.71	1.31	0.61	3.43	6.23	3.71
8	30 cm_0.40H_10 m	1.55	2.98	1.02	6.02	12.42	7.32
9	40 cm_0.35H_4 m	0.37	0.37	0.24	1.42	1.31	0.75
10	40 cm_0.35H_6 m	0.39	0.69	0.48	1.92	3.21	2.36
11	40 cm_0.35H_8 m	0.74	1.48	0.78	3.88	8.33	6.85
12	40 cm_0.35H_10 m	1.74	3.52	1.49	7.16	16.49	12.76
13	40 cm_0.40H_4 m	0.37	0.37	0.23	1.41	1.30	0.74
14	40 cm_0.40H_6 m	0.39	0.67	0.46	1.89	3.09	2.20
15	40 cm_0.40H_8 m	0.72	1.41	0.72	3.73	7.75	6.09
16	40 cm_0.40H_10 m	1.69	3.37	1.39	6.85	15.42	11.55

Fig. 8. Horizontal Displacement of the Wall Under Track Load

Fig. 9. Horizontal Displacement of the Wall Under Train Load

Fig. 10. Horizontal Displacement Distribution Under Track Load (30 cm_0.40H case)

Fig. 11. Horizontal Displacement Distribution Under Train Load (40 cm_0.35H case)

4. 결 론

철도 건설 시 용지저감 측면에서 장점을 갖는 연직형 보강노반의 엄격한 변위제한 규정을 갖는 콘크리트 슬래브 케도용 노반으로서의 적용성을 평가하고자 유한요소 해석을 통한 변형특성을 평가한 결과는 다음과 같다.

1. 짧은 지오토크 보강재를 적용한 연직형 보강노반은 높이 8 m 이하에서는 허용잔류침하 기준을 만족하였다. 콘크리트 슬래브케도의 허용잔류침하 기준이 30 mm 임을 고려할 때, 높이 10 m 조건에서 보강재 연직간격이 40 cm 이상인 경우에는 허용잔류 침하기준을 초과하므로 상부노반 상부에 강화노반 등 보강이 필요한 것으로 판단되었다.
2. 열차하중 재하 시 발생하는 수평변위는 가장 불리한 보강재 연직 배치간격(40 cm)과 보강재 길이 조건(높이의 35%)에서도 높이의 3% 이내로 발생하여 연직형 토류구조물의 허용범위 이내인 것을 확인할 수 있었다. 또한, 연직형 노반구조물에서 빈번하게 발생하는 배부름 형태의 변위는 시공 중 높이 6 m 이상에서만 발생하는 것을 확인하였다.

기존의 웅벽구조물과 비교하여 기초를 최소화할 수 있는 연직형 보강노반은 근접공사 뿐만 아니라 경제성 측면에서도 우수한 철도 노반구조물로 발전시켜 나갈 계획이다.

감사의 글

본 연구는 ZSR (Zero Settlement Railroad) 기술개발 연구사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Abdi, M.R., and Zandieh, A.R. (2014). Experimental and numerical analysis of large scale pull out tests conducted on clays reinforced with geogrids encapsulated with coarse material. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 42, No. 5, pp. 494-504.
- Aqil, U., Tatsuka, F., Uchimura, T., Lohani, T., Tomita, Y., and Matsushima, K. (2005). Strength and deformation characteristics of recycled concrete aggregate as a backfill material. *Soils and Foundations*, Vol. 45, No. 5, pp. 53-72.
- Kim, D.S. (2014). Stability evaluation of reinforced subgrade with short geogrid for railroad during construction. *Journal of Korean Geosynth. Soc.*, Vol. 13, No. 4, pp. 11-20.
- Kim, D.S. (2016). Reinforcement of collapsed railway subgrade and line capacity increase using short reinforcement with rigid wall. *Journal of Korea Acad.-Ind. Coop. Soc.*, Vol. 17, No. 11, pp. 604-609.
- Kim, K.Y., Park, H.G., and Jeon, J.S. (2005). Strength characteristics of cemented sand and gravel. *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol. 21, No. 10, pp. 61-71.
- Kim, U.J., and Kim, D.S. (2020). Load sharing characteristics of rigid facing walls with geogrid reinforced railway subgrade during and after construction. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 48, No. 6, pp. 940-949.
- Kim, U., and Kim, D.S. (2021). Evaluation of Deformation Characteristic of Railway Subgrade Using Reinforced

- Rigid Walls with Short Reinforcement under Repetitive and Static Loads. *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 8, 3615.
- Korea Railway Network Authority. (2016). *Railway design standard for roadbed*. Korea Railway Network Authority.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2016). *Design Standard for Man-made Slope*. Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Park, C.S., and Kim, D. K. (2020). Numerical Analysis for Optimal Reinforcement Length Ratio According to Width-to-Height Ratio of Back-to-Back MSE. *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 36, No. 12, pp. 69-76.
- Schnaid, F., Prietto, P.D., and Consoli, N.C. (2001). Characterization of cemented sand in triaxial compression. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol. 127, No. 10, pp. 857-868.
- Tatsuoka, F., Tateyama, M., and Murata, O. (1989). Earth retaining wall with a short geotextile and a rigid facing. *Proc. 12th Int. Conf. on SMFE, Rio de Janeiro*, Vol. 12, No. 2, pp. 1311-1314.
- Tatsuoka, F., Tateyama, M., Uchimura, T., and Koseki, J. (1997). Geosynthetic-reinforced soil retaining walls as important permanent structures (1996-1997 Mercer Lecture). *Geosynthetics International*, Vol. 4, No. 2, pp. 81-136.
- Tatsuoka, F., Tateyama, M., Mohri, Y., and Matsushima, K. (2007). Remedial treatment of soil structure using geosynthetic-reinforcing technology. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 25, No. 4-5, pp. 204-220.
- Won, M.S., Langcuyan, C.P., Choi, J.H., and Ha, Y.S. (2020). A Case Study on the Reinforcement of Existing Damaged Geogrid Reinforced Soil Wall Using Numerical Analyses. *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 19, No. 1, pp. 75-82.
- Yoo, C.S. (2011). Numerical Modeling of Long-Term Behavior of Geosynthetic Reinforced Soil Wall used in Bridge Abutment. *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 10, No. 4, pp. 105-112.

Received	May 11, 2021
Revised	May 12, 2021
Accepted	May 27, 2021