

민감도 분석을 통한 철도보강노반 설계 특성 평가

Evaluation of Design Characteristics in the Reinforced Railroad Subgrade Through the Sensitivity Analysis

김대상^{1*}, 황성호², 김웅진³, 박영곤⁴, 박성용⁵

Dae-Sang Kim^{1*}, Sung-Ho Hwang², Ung-Jin Kim³, Young-kon Park⁴, Seong-Yong Park⁵

¹Member, Principal Researcher, Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo Bangmulgwan-ro, uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Republic of Korea

²Non-Member, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo Bangmulgwan-ro, uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Republic of Korea

³Non-Member, Post-master, Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo Bangmulgwan-ro, uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Republic of Korea

⁴Member, Principal Researcher, Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo Bangmulgwan-ro, uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Republic of Korea

⁵Member, Senior Researcher, Hamwha Engineering and Construction company, 6, Sinseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-345, Republic of Korea

ABSTRACT

By changing from ballasted track to concrete slab track, new type railroad subgrade is strongly required to satisfy strict regulations for displacement limitations of concrete slab track. In this study, sensitivity analysis was performed to assess the design characteristics of new type reinforced railroad subgrade, which could minimize residual settlement after track construction and maintain its function as a permanent railway roadbed under large cyclic load. With developed design program, the safety analysis (circular slip failure, overturning, and sliding) and the evaluation of internal forces developed in structural members (wall and reinforcement) were performed according to vertical installation spacing and stiffness of short and long geotextile reinforcement. Based on this study, we could evaluate the applicabilities of 0.4 H short geogrid length with 0.4 m vertical installation spacing of geotextile as reinforcement and what the ground conditions are for the reinforced railroad subgrade. And also, we could grasp design characteristics of the reinforced railroad subgrade, such as the importance of connecting structure between wall and reinforcement, boundary conditions allowing displacement at wall ends to minimize maximum bending moment of wall.

요 지

도상구조의 자갈(연성)에서 콘크리트(강성)로의 변화는 이를 지지하는 철도 노반구조에서도 보다 엄격한 변형 규제에 적합한 신형식 철도보강노반 구조를 요구하고 있다. 본 논문에서는 공용 후 잔류침하를 최소화할 수 있으면서도 대용량 반복하중이 작용하는 철도노반 영구구조물로서의 기능을 유지할 수 있는 강성벽 일체형 철도보강노반의 설계 특성을 평가하기 위한 민감도 분석을 실시하였다. 개발한 설계프로그램을 이용하여 단보강재와 장보강재의 간격, 보강재 강성 등 설계 입력변수 변화에 따른 원호활동, 전도 및 활동파괴에 대한 안전율 및 발생 부재력을 평가하였다. 이를 통하여 철도보강노반에서는 높이의 40%(0.4H)의 짧은 보강재를 연직간격 0.4m로 적용할 수 있으며 보강노반 적용을 위한 원지반 조건 등을 평가할 수 있었다. 또한, 철도보강노반을 구성하는 벽체와 보강재 연결구조의 중요성, 벽체 경계조건에서의 변위 허용구조 적용을 통한 하중 재하 시 발생 최대휨모멘트를 저감시키는 설계상의 특징을 파악할 수 있었다.

Keywords : Reinforced Railroad Subgrade, Sensitivity analysis, Wall stiffness, Concrete Track, Residual settlement

Received 24 Jun. 2013, Revised 9 Sep. 2013, Accepted 10 Sep. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-31-460-5305; Fax: +82-31-460-5032

E-mail address: kds@krii.re.kr (D. S. Kim)

1. 서론

2013년 현재 호남고속철도 노반공사가 어느 정도 마무리 되어 가고 있다. 호남고속철도 건설은 경부고속철도 건설 시보다 양호한 원지반 조건과 양질의 쌓기재 확보 측면에서 어려움이 있다. 또한, 경부고속철도 2단계구간(대구~부산)에서부터 본격적으로 적용되기 시작한 토공 상 콘크리트궤도는 토공 후 적정 방치기간의 확보, 콘크리트 도상의 품질 향상을 위한 타설 속도 및 최적 양생조건 확보 등 다양한 기술적인 요구를 현장 기술자들에게 주문하고 있다. 이는 역설적으로 말하면, 토공 상 콘크리트궤도를 제대로 설계, 시공하지 않으면 향후 유지보수 단계에서 상당한 어려움과 비용을 지불 할 수 있다는 것을 의미한다.

강성벽과 짧은 보강재를 사용하는 벽체 보강재 일체형 보강노반의 장점은 과거 해외에서 많은 연구가 수행된 바 있다(Tatsuoka et al., 1989). 국내 적용 시에도 철도 및 도로 등 신선 건설 시 토공 법면부를 최소화함으로써 용지매입 비용을 최소화할 수 있으며, 기존선의 경우 법면 공간을 활용하여 추가 용지 매입 없이 선로 용량을 증가(단선

→복선화 등)시킬 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서는 최근 사회로부터 요구 받고 있는 사회간접자본(Social Overhead Capital, SOC)건설 비용 최소화에 부합하면서도 공용 후 잔류침하를 최소화할 수 있는 철도보강노반의 설계법을 고찰하고, 설계를 신속 정확하게 수행하기 위하여 개발된 설계프로그램을 활용하여 설계 안전율에 대한 민감도 분석을 실시한 결과를 정리하였다.

2. 강성벽 철도보강노반의 설계상 특징

강성벽 보강재 일체형 보강노반은 기존의 옹벽 및 보강토 옹벽의 장점을 결합하여 새롭게 만들어진 기존의 토류 구조물과는 차별화된 설계상의 특징이 있다.

첫째, 벽체의 구조적 특징을 설계에 반영하여, 벽체의 휨 및 전단 강성을 고려한 벽체와 토체의 전체안정계산법을 적용하고 있다는 점, 즉, 활동 검토 시 층 별 평형조건을 만족하지 못하더라도 벽체를 고려한 전체 계에서 평형조건을 만족하면(식 1), 안전성이 확보되는 것으로 판단하는 설계 개념으로 기존의 보강토 옹벽 설계 개념과는 차이가 있다(Fig. 1).

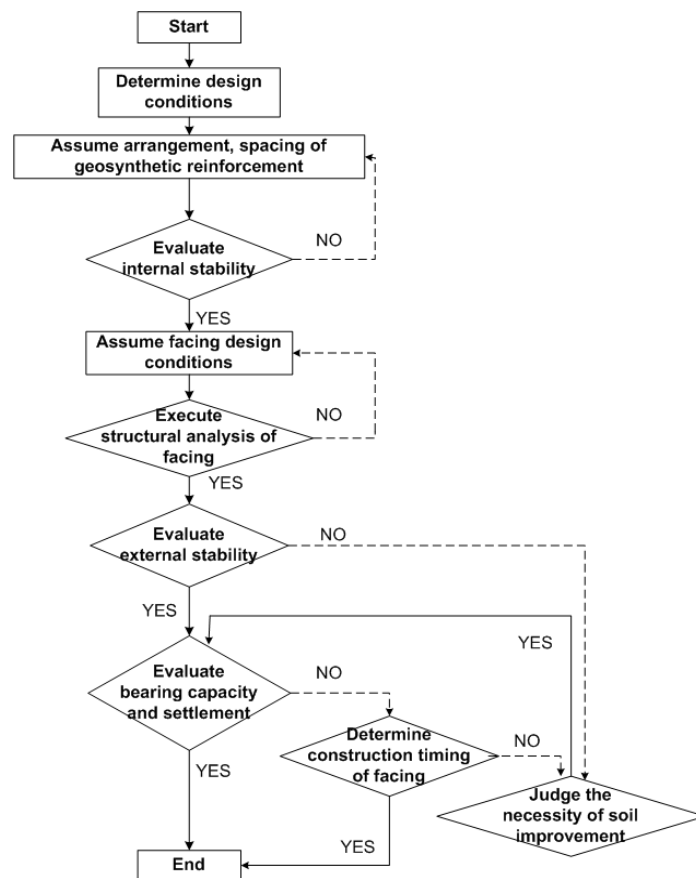


Fig. 1. Design Flow chart of Rigid Reinforced Subgrade (Associations of RRR-B, 2001)

$$\sum P_{fi} < \sum T_i$$

(1)

여기서, P_{fi} : i 층 작용토압

T_i : i 층 보강재 정착력

이를 통하여 기존 보강토옹벽 설계법보다 짧은 보강재 (높이의 40%수준 이하, 0.4H) 적용이 가능함으로써 범면 공간을 활용하여 철도보강노반을 구축할 수 있다(Tatsuoka, F. 1997) (Kim et al., 2012). 둘째, 벽 마찰을 고려한 2웨이 형 가변형 활동 파괴면을 적용하여(Fig. 2) 토압을 산정한다. 파괴면 형상은 하중 및 보강재 강도 및 설치 패턴 등이

고려된 설계조건에서의 전도 및 활동에 대한 안전율이 최소가 되는 조건으로 반복법에 의해 구한다. 수평하중 작용 시 하단 경계에서의 응력집중을 최소화하기 위하여 하단 경계조건으로 롤러형 힌지를 적용하였다.

셋째, 전면벽체는 토압과 외부하중에 대하여 충분한 휨 강도를 확보할 수 있도록 강도설계법에 의해 설계한다. Fig. 3과 같이 벽체를 보로, 배면에 포설된 보강재를 스프링으로 모델링하여 식 (2)와 같이 벽면공에 대한 구조 검토를 수행한다. 보강재 강성은 5% 축변형률 시의 인장강도를 이용하여 식 (3)과 같이 구한다. 상기의 설계상의 특징을 고려한 윈도우 상에서 구동이 가능한 설계프로그램

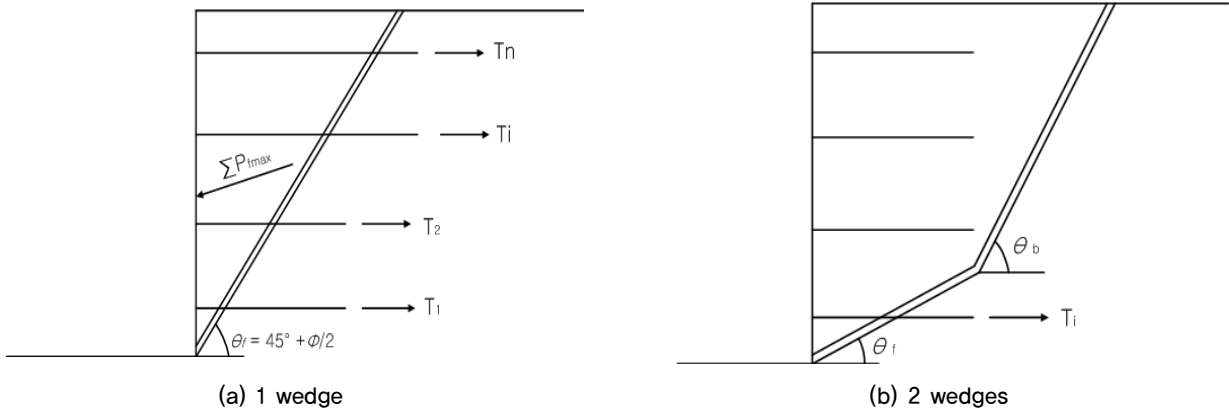


Fig. 2. Sliding failure planes

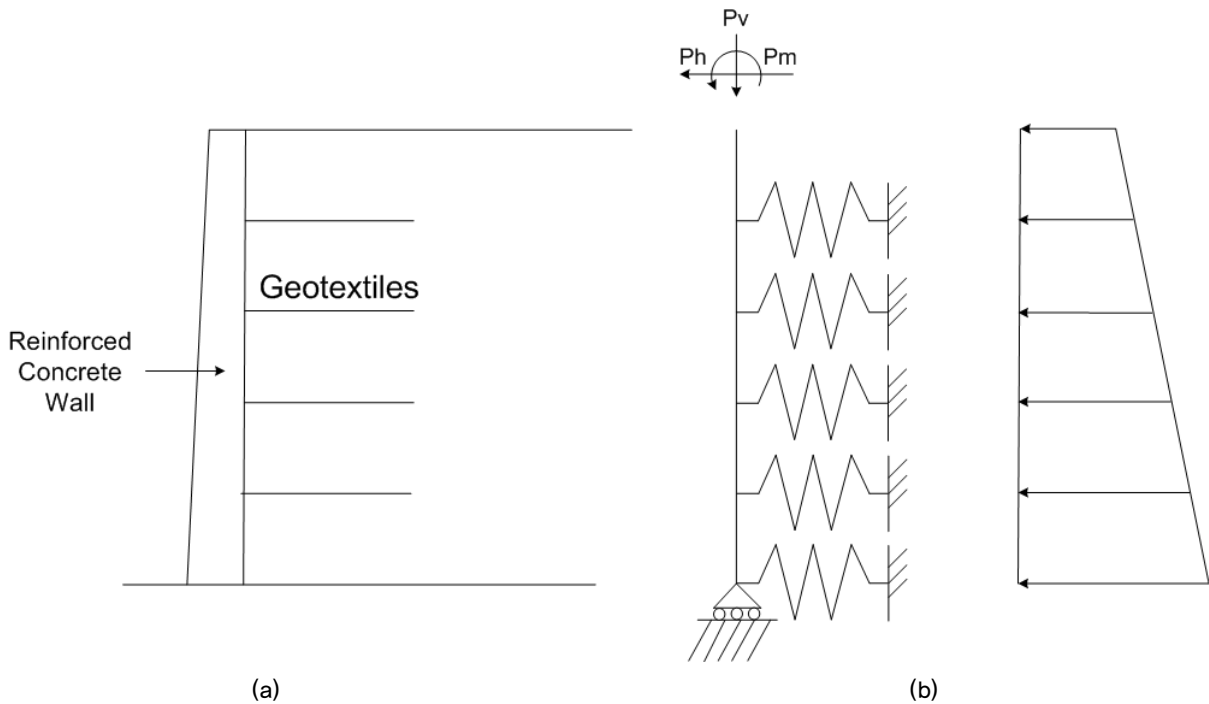


Fig. 3. Structure model for analysis and soil pressure distribution (Horii et al., 1994)

을 개발하여 민감도 분석을 실시하였다(Fig. 4). 벽체가 충분한 휨강도를 갖도록 설계함으로써 전철주 기초 혹은 방음벽 기초로 활용할 수 있으며, 대용량 열차하중 적용 시 상부벽체의 변형, 밀림 및 분리 현상을 방지할 수 있다.

국내에서는 토체 구속효과에 대한 보정계수(α_s)에 대한 실험 결과를 확보할 수 없어 국외 실험데이터로부터 토체 구속효과에 대한 보정계수 0.8을 적용하여 해석을 수행하였다.

$$EI \cdot y'''' + k_s \cdot y = p \quad (2)$$

여기서, EI : 벽체 휨강성,

y : 벽체 변위,

k_s : 보강재 강성(kN/m),

p : 토압 등 외력에 의한 벽체 작용하중

$$k_s = \frac{\alpha_s \cdot T_5}{0.05 \times L} \quad (3)$$

여기서, α_s : 토체 구속효과에 대한 보정계수,

T_5 : 5% 축변형률 발생 시의 보강재 인장강도 (kN/m),

L : 보강재 길이

3. 설계 해석 예 및 민감도 분석

3.1 설계 해석 예

본 연구에서는 Fig. 5와 같이 궤도하중 및 열차하중을 고려한 철도보강노반에 대한 매개 변수해석을 수행하였

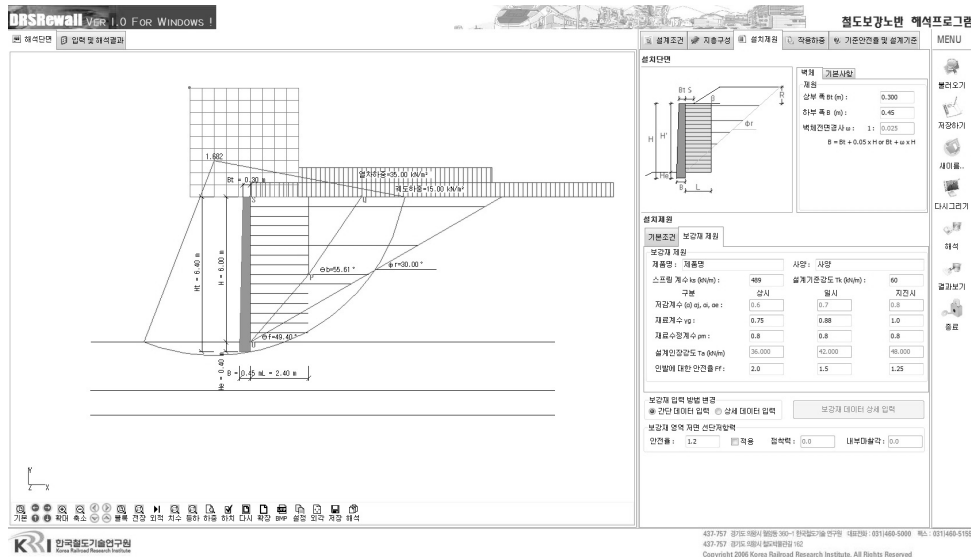


Fig. 4. Developed design program

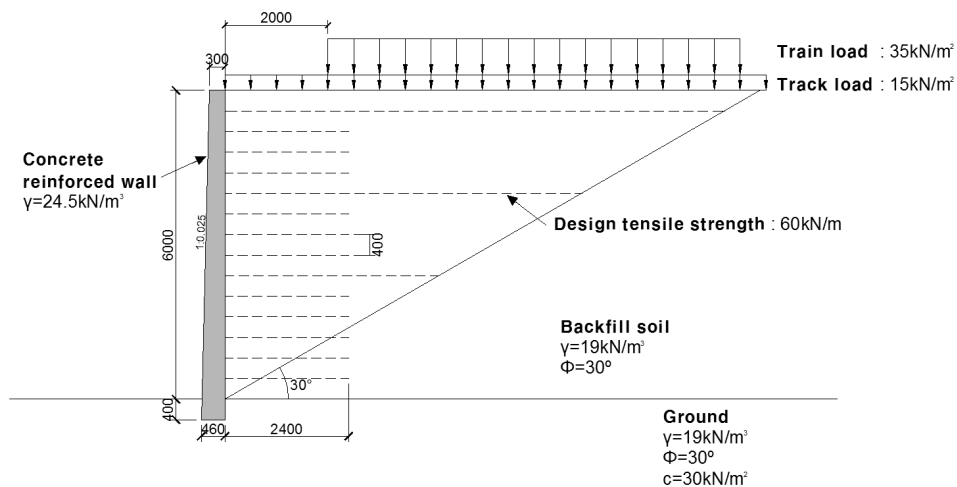


Fig. 5. Basic analysis model (Korea Railway Network Authority, 2011)

Table 1. Analysis cases

Parameters	Input values
Design tensile strength (kN/m)	40, 60, 100, 150, 200
Vertical installation spacing of short geogrid (m)	0.3, 0.4, 0.5
Vertical installation spacing of long geogrid (m)	1.2, 1.6, 2.0, 2.4
Installation number of long geogrid from the top of subgrade (ea)	0, 1, 2, 3
Physical properties of backfill soil	Unit weight, γ (kN/m ³) : 18, 19, 20 Internal friction angle, ϕ (°) : 30, 32, 35
Physical properties of ground	Cohesion, c (kN/m ²) : 10, 20, 30 Internal friction angle, ϕ (°) : 10, 15, 20, 25, 30, 35

다. 기본 설계조건은 벽체 높이 6m, 보강재 설계인장강도 60kN/m, 단보강재 연직간격 0.4m, 단보강재 길이 2.4m (0.4H), 장보강재 연직간격 1.6m(단보강재 4개당 1개), 장보강재 설치각도 30°로 정하였다. 벽체 전도에 대한 저항 역할을 하는 장보강재는 경제성을 고려하여 전 층에 설치하지 않고 일정간격으로 부설하였다. 해석 매개변수는 보강재 설계인장강도, 단보강재와 장보강재의 연직간격, 장보강재 설치단수, 쌓기재 및 원지반 물성값을 변화시켰다. 해석에 적용된 입력변수는 Table 1에 정리된 바와 같다.

3.2 민감도 분석

3.2.1 원호활동파괴 안정성

외적 안정검토, 즉 원호활동파괴에 대한 안정성 평가는 Bishop의 간편법에 기초하여 평가하였다. 강성보강노반 시공 시 원호파괴에 대한 안정성은 원지반의 물성변화에 의한 영향을 크게 받으므로, 원지반의 점착력과 내부마찰각을 변화시키면서 원호파괴 안정성을 평가하였다. Fig. 6은 해석 결과로 점착력과 내부마찰각이 클수록, 원호파괴 시 최소안전율은 증가하였다. 높이 6m 철도보강노반 적용 시 원지반의 점착력이 낮고(10kN/m²과 20kN/m²이하), 내부마찰각이 25° 이하인 경우, 기준 안전율(1.5)을 만족하지 못하는 결과를 보여 치환 등 원지반 보강 필요성을 확인할 수 있었다.

3.2.2 전도 및 활동파괴 안정성

단보강재의 연직간격 변화(0.3 → 0.5m)시의 전도 및 활동에 대한 안전율을 평가하였다. Fig. 7에서와 같이 단보강재의 간격이 증가할수록(0.3 → 0.5m) 전도에 대한 최소 안전율은 감소하였으나, 최소안전율 기준(1.5)은 만족하였다. 동 설계조건에서 철도보강노반은 연직 간격 0.5m까지

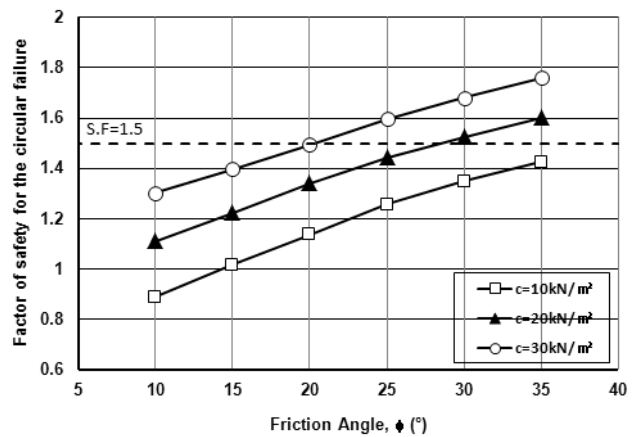


Fig. 6. Factor of safety for the circular failure according to ground conditions

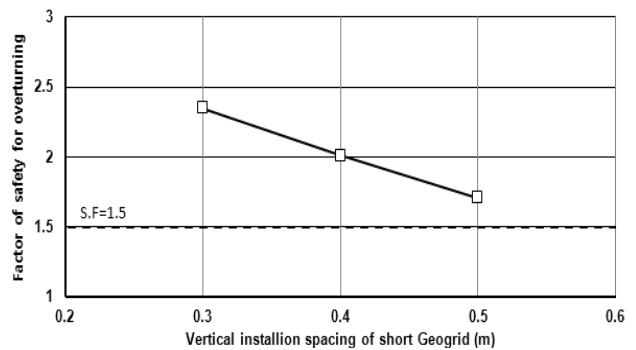


Fig. 7. Factor of safety for overturning according to vertical installation spacing of short geogrid

는 기준 안전율을 만족하였다. 단보강재의 연직간격 변화 (0.3 → 0.5m)시의 활동에 대한 최소안전율을 평가하였다. Fig. 8에서와 같이 단보강재의 간격이 0.3 → 0.4m로 증가 시에는 활동에 대한 최소안전율은 큰 변화가 없었다. 단보강재의 간격 증가(0.3 → 0.4m) 시 활동에 대한 안전율 변화가 생기지 않은 이유는 0.3~0.4m 범위의 단보강재 연직간격 증가로 인한 토압 감소와 활동저항력 감소가 상쇄

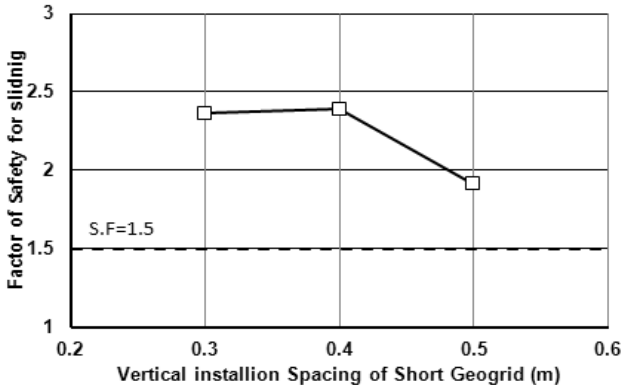


Fig. 8. Factor of safety for sliding according to vertical installation spacing of short geogrid

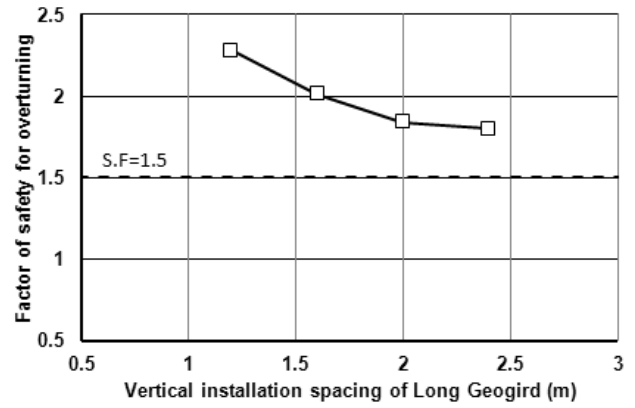


Fig. 10. Factor of safety for overturning according to vertical installation spacing of long geogrid

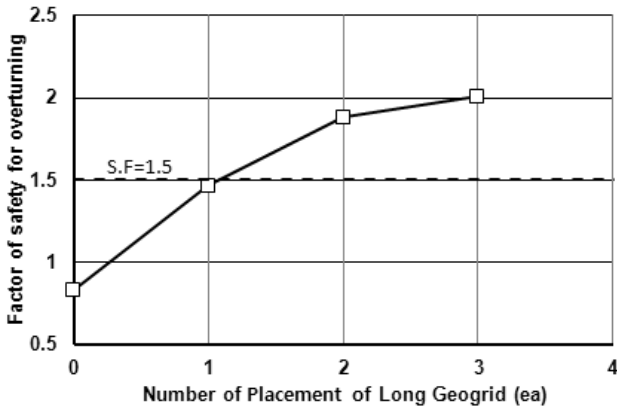


Fig. 9. Factor of safety for overturning according to the number of placement of long geogrid

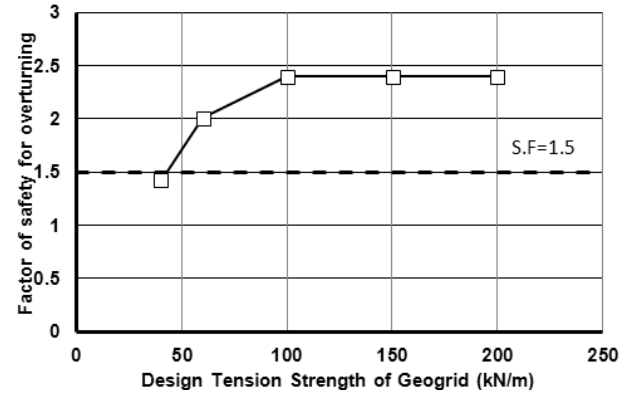


Fig. 11. Factor of safety for overturning according to design tension strength of geogrid

되었기 때문이다. 이와는 다르게, 단보강재 간격이 0.4 → 0.5m로 증가 시 단보강재 연직간격 증가로 인하여 활동저항력은 감소하였으나, 토압 감소는 상대적으로 작아 활동에 대한 안전율이 감소하였다.

Fig. 9는 노반 상면으로부터의 장보강재 설치단수에 따른 전도안전율을 평가한 결과이다. 그림으로부터 장보강재의 설치단수가 증가할수록 전도에 대한 안전율은 증가하나, 전도에 대한 안전율은 수렴하는 경향을 보였다. 최소한 상부 2단의 장보강재는 설치하여야 기준 안전율을 만족하며, 최 하부 1단 미 배치 시에서의 안전율 감소는 크지 않았다.

Fig. 10은 장보강재의 수직배치 간격에 따른 전도안전율의 변화를 보여준다. 장보강재의 수직배치간격이 증가할수록 전도안전율은 감소하며, 기본 설계조건인 장보강재의 수직배치간격이 2.4m인 경우에도 기준 안전율을 만족하였다. 안전율 감소경향으로부터 장보강재의 경우, 상부 2단 보강재가 설치되면 장보강재 연직배치 간격이 안

전율에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 평가되었다.

Fig. 11은 보강재의 인장강도 변화에 따른 전도안전율을 평가한 결과이다. 보강재 인장강도가 증가할수록 전도안전율이 증가하며, 기본 설계조건(단보강재 연직간격 0.4m)에서 적용한 보강재 인장강도 60kN/m에서는 기준 안전율을 만족하나, 인장강도 40kN/m이하의 보강재를 적용하는 경우 전도안전율을 만족하지 못하는 것으로 평가되었다.

3.1.3 벽체 및 보강재 발생력

Fig. 12는 벽체에 발생하는 휨모멘트, 전단력, 변위도이다. 기본 설계조건에서 벽체 최대 휨모멘트는 높이 2.95m 지점에서 19.771kN·m이었다. 벽체 발생 전단력은 높이 4.35m 지점에서 최대 -16.518kN이 발생하였다. 벽체 하단에서도 보강재로 인하여 14.435kN의 전단력이 발생하였다. 벽체 상하단에서 발생된 변위는 15.5mm와 29.5mm로 하단에서 14mm 더 큰 변위가 발생하였다. 이는 하단 경계

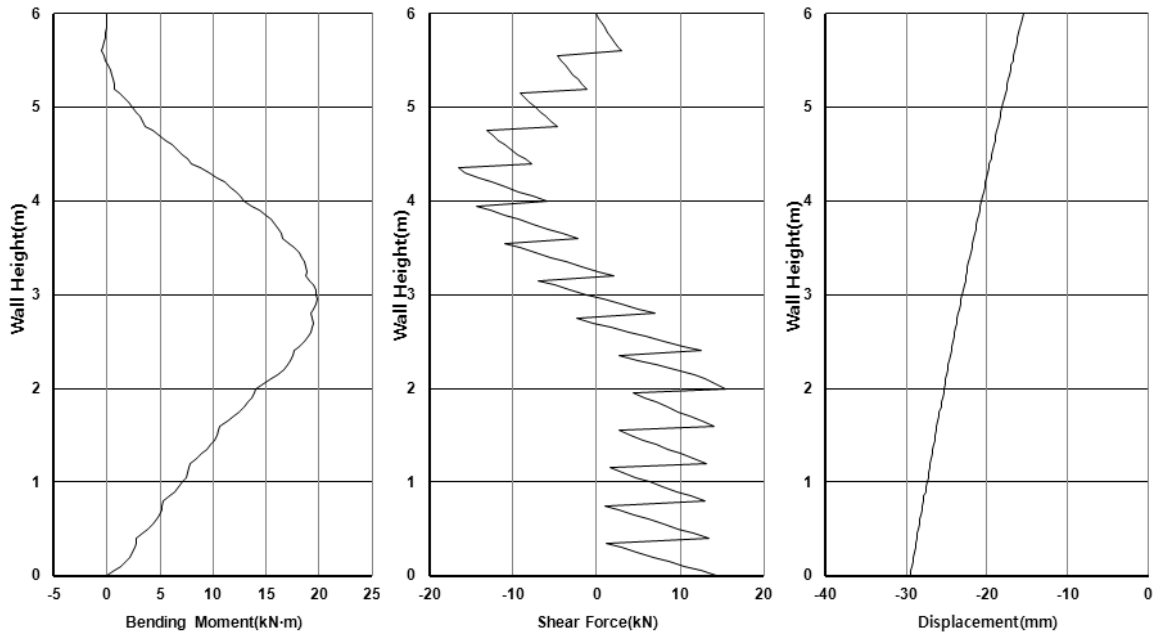


Fig. 12. Bending moment, shear force and displacement diagrams of wall

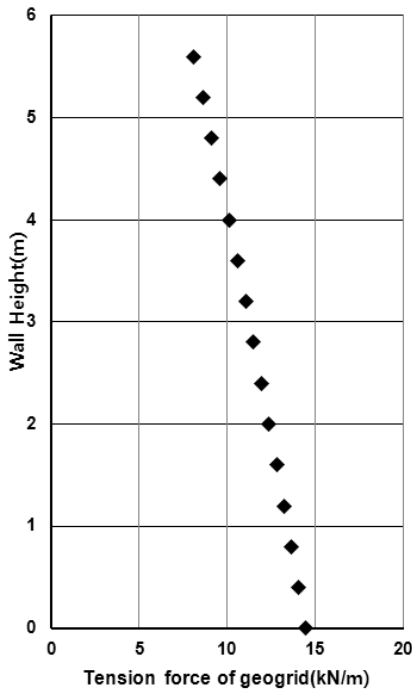


Fig. 13. Maximum tension force distribution of geogrid

조건이 롤러형 힌지로 모델링되었고, 벽체 전면의 수동토압 조건을 설계에 반영하지 않았기 때문에 판단된다. 따라서, 하중 재하 시 벽체 발생 변위를 보다 현실적으로 산정하기 위해서는 토체 내에 부설된 보강재의 강성을 적정 수준으로 평가할 필요가 있을 것으로 사료된다. 벽체의 최대 배부름은 3.05m 높이에서 최대 0.617mm 발생하였다. 6m 높이를 고려할 때 0.01%수준으로 크지 않았다.

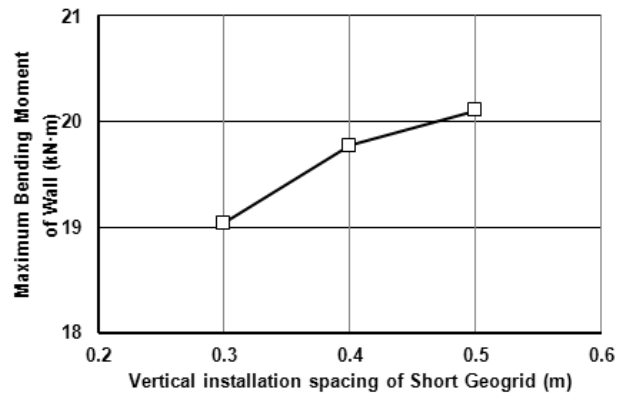


Fig. 14. Maximum bending moment of wall according to vertical installation spacing of short geogrid

Fig. 13은 높이에 따른 보강재에 발생한 최대인장력 분포를 보여준다. 최대 인장력은 경계조건의 영향으로 최하단에서 발생하였으며, 기본 설계조건에서 14.435kN의 인장력이 발생하여 해석 시 고려한 보강재 설계인장강도의 24%수준임을 확인할 수 있었다.

Fig. 14는 단보강재의 연직간격 변화에 따른 벽체 최대 휨모멘트 변화를 보여준다. 단보강재의 연직간격 증가 시 (0.3→0.5m) 벽체에 발생하는 최대 휨모멘트는 19.038→20.107kN·m로 5.6%증가하였다. 단보강재의 연직간격이 작을수록 벽체에 발생하는 최대 휨모멘트는 감소하였다. 최대 휨모멘트는 벽체의 중앙(높이 3m지점 부근)에서 발생하였다.

4. 결론

철도 및 도로 등 반복적으로 동하중을 지속적으로 부담해야 하는 토구조물에서 공용 후 잔류침하 발생을 최소화하기 위하여 개발된 강성벽체 보강재 일체형 철도보강노반의 설계법에 대하여 고찰해 보았다. 동 구조는 최근 철도분야에서 그 적용이 꾸준히 증가하고 있는 토공 상 콘크리트궤도에 적합한 구조로써 본 논문에서는 설계 민감도 분석을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 강성벽체 보강재 일체형 철도보강노반은 휨 및 전단 강성을 갖는 벽체를 뒷채움부와 일체로 결합시키는 구조를 갖고 있다. 따라서 구조체의 안전성 및 부재력 계산 시 벽체를 고려한 전체 계에서의 평형조건을 만족하도록 설계를 수행한다. 이와 같은 구조적 특징을 고려한 민감도 분석을 통하여 기존 국내 보강토옹벽 시방에서 기준으로 적용하고 있는 보강재 최소길이 0.7H 또는 최소 2.5m 이상 보다 짧은 0.4H 또는 2.5m 이하의 보강재 최소길이 적용이 가능한 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 2웨이형 가변형 활동파괴면 및 벽체하단의 롤러형 한지 경계조건 가정으로 단보강재의 연직간격 증가 시 벽체에 작용하는 토압은 감소하나, 보강재 설치간격 증가로 인하여 벽체에 발생하는 휨모멘트는 증가하였다. 또한, 보강재 최대 인장력은 경계조건의 영향으로 최하단에서 발생하였으며, 해석 시 고려한 보강재 설계인장강도의 24%수준의 인장력이 발생하였다.

- (3) 높이 6m 철도보강노반 적용 시 원지반의 점착력이 낮고(10kN/m^2 과 20kN/m^2 이하), 내부마찰각이 25° 이하인 경우, 기준 안전율(1.5)을 만족하지 못하는 결과를 보여 치환 등 원지반 보강 필요성을 확인할 수 있었다. 또한, 장보강재는 최소 상부 2단은 설치하여야 기준 안전율을 만족하며, 최 하단 1단의 미 배치 시 전도 및 활동 안전율 감소는 크지 않았다.

References

1. Associations of RRR (2001), RRR-B design and construction manual, pp. 23.
2. Horii, K., Kishida, H., Tateyama, M. and Tatsuoka, F. (1994) "Computerized design method for geosynthetic-reinforced soil retaining walls for railway embankments", Proceeding of Seiken symposium, 11, pp.205-218.
3. Korea Railway Network Authority (2011), *Railway design standard for roadbed*, pp.6-11.
4. Kim, D.S., Park, S.Y. and Kim, K.H. (2012), "Effects of Vertical Spacing and Length of Reinforcement on the Behaviors of Reinforced Subgrade with Rigid Wall", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.11, No.4, pp.27-35.
5. 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*, 12(2), pp. 1311-1314.
6. 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.