

뒤채움 시공순서 및 말뚝 수에 따른 교대 접속부 거동평가

김웅진*, 정락교², 김대상¹

¹한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부, ²한국철도기술연구원 도시교통실용화연구팀

Evaluation of Behaviors in Abutment Transition Zone Depending on Constrution Orders and Number of Piles

Ung-Jin Kim^{1*}, Rag-Gyo Jeong², Dae-Sang Kim¹

¹Metropolitan Transportation Systems Research Center, KRRI

²Urban Railroad Research Team, KRRI

요 약 RAR(Reinforced Abutment for Railways)은 뒤채움을 선 시공하고, 교대를 후 시공하여 접속부의 침하와 교대 수평토압 및 변위를 저감할 수 있는 교대 구조로 교대 구체 및 저판의 사이즈와 말뚝의 설치 수를 줄인 경제적인 교대 구조이다. 본 논문에서는 말뚝 설치 수에 따른 RAR의 성능을 수치 해석을 이용하여 평가하였다. 말뚝의 설치 수를 1~4열을 적용한 RAR을 지반 변형계수를 달리한 조건에 대하여 수치 해석을 수행하고, 그 결과를 동일한 지반 조건에서 기존 교대의 수치 해석결과와 비교, 분석하였다. 해석결과 말뚝 설치 수를 증가시키는 경우 접속부 침하저감 효과는 비교적 크지 않았고, 교대 수평변위 및 토압 저감에 더 효과적인 것으로 나타났다. 말뚝 설치 열 수가 1~4열로 변할 때 RAR의 수평변위는 기존교대의 26~37%, 수평토압은 59~83%수준으로 말뚝 설치수가 증가할수록 기존교대(말뚝5열)에 비해 수평변위와 토압을 크게 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 RAR의 수평 토압은 보강재, 말뚝, 기초저판, 원지반 강성 등의 영향을 복합적으로 받는 것으로 평가되었다.

Abstract The RAR (Reinforced Abutment for Railways) is an economical abutment to reduce the settlement of a transitional zone and horizontal displacement of an abutment by constructing backfill before the abutment. In this paper, the performance of the RAR depending on the pile installation was evaluated using 2D (Dimensional) finite element analysis and compared with the existing abutment (with 5 rows pile). Numerical analysis showed that increasing pile installation is more effective in reducing horizontal displacement and earth pressure than settlement of the transitional zone. The horizontal displacement and earth pressure of the RAR was approximately 26~37% and 59~83% compared to the existing abutment by changing the pile installation. More pile installation led to a greater reduction of the horizontal displacement and earth pressure of the RAR. In addition, the horizontal earth pressure of RAR is influenced considerably by the reinforcement, pile, foundation, and stiffness of the ground.

Keywords : Abutment, Numerical analysis, RAR, Pile installation, Response characteristics

1. 서론

RAR(Reinforced Abutment for Railways)은 교대 높이의 35% 길이의 짧은 보강재와 기준틀을 이용하여 토공 및 접속부를 선 시공하고, 방치기간을 두어 토체를 안

정화시킨 후 토체의 침하가 수렴되면 교대를 시공하는 공법으로(Fig.1) 교대 구체의 두께와 말뚝을 포함한 기초의 규모를 줄여 경제적인 설계 및 시공이 가능한 공법이다. 기존 연구에서는 기존 교대 대비 교대 구체를 700mm, 말뚝수를 60% 감소시킨 RAR의 2D 수치해석

본 논문은 한국철도기술연구원의 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Ung-Jin Kim(KRRI)

Tel: +82-31-460-5349 email: ujkim@krii.re.kr

Received November 1, 2016

Revised (1st December 7, 2016, 2nd December 26, 2016)

Accepted January 6, 2017

Published January 31, 2017

을 수행하여 침하, 수평변위 및 수평토압 저감 효과를 검증하고, 교대 슬립할 가능성을 검토한 바 있다(김대상 등, 2015)[1]. Watanabe 등(2002)[2]은 뒤채움에 보강재로 보강된 교대의 모형진동시험을 수행하여 보강재의 장력이 교대에 유효하게 작용하여 안정성을 유지할 수 있고, 이로 인한 교대 기초 축소의 가능성을 확인하였다.

이일화 등(2014)[3]은 실물가속시험을 통하여 토목섬유로 보강된 교대의 수평토압은 최대 90%까지 저감되는 것을 확인하였다. 유충현 등(2016)[4]은 뒤채움재의 내부마찰각 변화에 따른 철도교대의 안정성 및 공사비를 비교하여 토압 저감에 의한 경제적 효과를 분석하였다.

교대에 작용하는 토압을 저감하면 교대 자체뿐만 아니라 말뚝 및 기초의 규모를 축소하여도 안정성을 확보하면서 경제적인 설계가 가능할 것으로 예상된다. 따라서 토목섬유로 보강된 교대의 말뚝기초의 축소에 따른 교대 및 접속부의 거동을 확인할 수 있는 연구가 필요하다. 이에 본 논문에서는 RAR에서의 말뚝의 영향을 파악하기 위한 2D 수치해석을 수행하였다. 말뚝기초의 규모를 달리한 RAR을 모델링하고 교대 및 접속부의 거동과 교대의 토압을 기존교대의 결과와 비교, 검토하였다. 또한 다양한 지반변형계수를 적용하여 지반조건에 따라 변화하는 말뚝의 영향도 파악할 수 있도록 하였다.

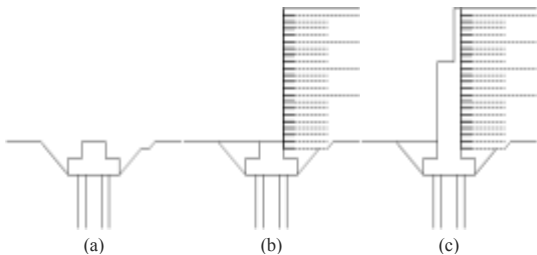


Fig. 1. Procedures to construct RAR (a) Foundation (b) Backfill (c) Abutment

2. 본론

2.1 2D 유한요소 수치해석 개요

지반조건 및 말뚝 설치 수에 따른 교대 및 접속부의 거동을 분석하기 위하여 2D 유한요소 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS 8.0을 활용하였다.

먼저 RAR 및 접속부의 거동을 기존 교대와 비교할

수 있도록 지반 변형계수 10, 20, 30, 40MPa에 대하여 높이 12m, 말뚝 5열의 역T형 교대를 Fig.2와 같이 모델링하였다.

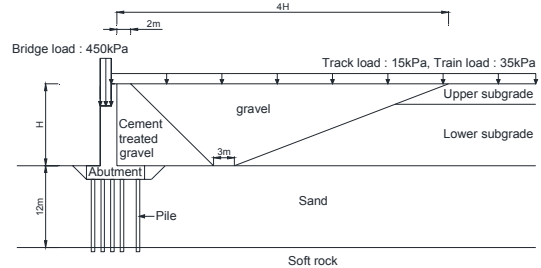


Fig. 2. Analyses section of existing abutment

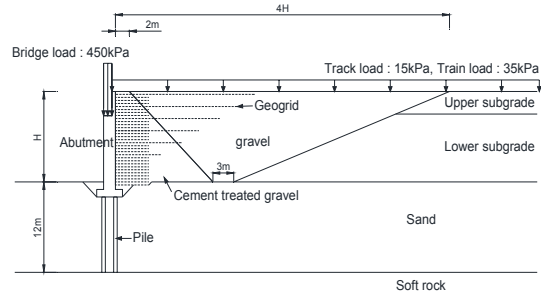


Fig. 3. Analyses section of RAR(2 row piles)

Table 1. Analyses cases

Case no.	Pile rows	Elastic modulus of sandy soil layer
1	1	10 MPa
2		20 MPa
3		30 MPa
4		40 MPa
5	2	10 MPa
6		20 MPa
7		30 MPa
8		40 MPa
9	3	10 MPa
10		20 MPa
11		30 MPa
12		40 MPa
13	4	10 MPa
14		20 MPa
15		30 MPa
16		40 MPa

지반 변형계수는 산정식 $E=2.8N[5]$ 을 적용하여 연약 지반부터 양호한 지반까지 표현할 수 있도록 선정하였다. RAR은 기존 교대와 동일 조건에서 말뚝 수 감소가 교대와 접속부에 미치는 영향을 고려할 수 있도록 지반 변형계수 10, 20, 30, 40MPa에 대해 말뚝 열을 1, 2, 3, 4열로 변환하여 적용한 총 16케이스에 대하여 수치해석을 수행하였다(Table 1). Fig.3은 수치해석 케이스 중 말뚝 2열 적용 시의 단면을 보여준다. 말뚝 열 수의 증가에 따라 RAR 기초 저판의 길이는 Table 2와 같이 변화하였다.

Table 2. RAR Foundation specification

Pile Rows	1	2	3	4
Foundation Length(m)	3.7	3.7	3.9	5.2

뒤채움, 교대, 지반, 말뚝기초 등은 15 Node, Plane stain 요소를 이용하여 모델링하였으며, 적용된 재료 모델과 물성치는 Table 3과 같다. 보강재는 지오그리드 모델을 사용하여 모델링하였다. 설계인장강도 60kN/m의 토목섬유보강재를 고려하여 $J=1,000\text{kN/m}$ 의 물성을 적용하였다. 기준틀은 플레이트 모델을 사용하여 모델링 하였고, 기준틀에 사용되는 직경 13mm의 철근 11개를 고려하여 $EA=1.46 \times 10^5\text{kN}$, $EI=1.542\text{kN}\cdot\text{m}^2$ 를 적용하였다.

상재하중은 궤도하중, 열차하중, 교량하중을 적용하였다. 궤도와 열차하중은 철도설계기준의 설계하중을 준용하여 15kPa와 35kPa의 등분포 하중을 적용하였다.[6] 교량하중은 설계사례로부터 경간길이 35m의 교량을 고

려하여 450kPa의 등분포 하중을 교대에 적용하였다.

2.2 해석결과

2.2.1 접속부 침하

Fig.4는 말뚝기초 열 별로 지반변형 계수에 따른 열차 하중 재하 단계에서 접속부 상단의 침하를 나타낸 그래프이다. 지반변형계수가 클수록 접속부 침하가 감소하는 경향을 보였다. 지반변형계수 증가에 따른 접속부 침하 감소효과는 지반변형계수가 10MPa에서 20MPa로 증가할 때 40% 저감, 30MPa에서 40MPa로 증가할 때 16% 저감으로 지반변형계수가 낮을수록 높게 나타났다. 말뚝 1열에서 4열 설치로 증가할 때 교대 접속부에서 발생하는 침하는 3.4~10.5%저감되는 것으로 나타났으며, 지반 변형계수가 낮을수록 침하 저감 효과가 높은 경향을 보였다. 결과로부터 연약지반 상에 시공되는 경우를 제외하면 RAR의 말뚝을 감소시켜도 접속부 침하가 크게 증가하지 않는 것을 알 수 있다.

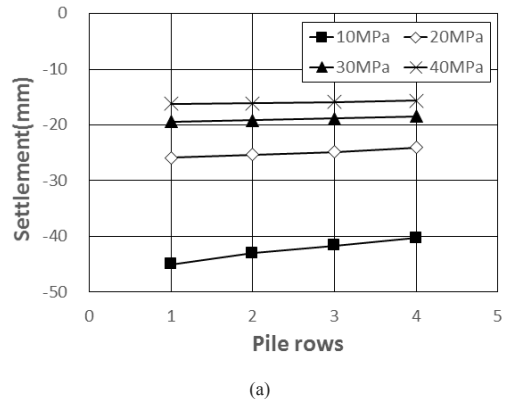


Table 3. Material properties

Materials	Model	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion (MPa)	friction angle (°)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's ratio
Upper subgrade	Mohr-Coulomb	19	1	35	80	0.3
Lower subgrade	Mohr-Coulomb	19	20	25	60	0.33
Gravel	Mohr-Coulomb	20	1	40	80	0.25
Cement treated gravel	Mohr-Coulomb	21	50	40	120	0.2
Sandy soil	Mohr-Coulomb	18	1	30	10, 20, 30, 40	0.35
Soft rock	Mohr-Coulomb	23	300	35	1,800	0.28
concrete	Linear elastic	24	-	-	24,000	0.2
Reinforced concrete	Linear elastic	24.5	-	-	30,000	0.2
Pile	Linear elastic	20(2D)	-	-	47,000	0.25
Reinforcement	Geogrid	J=1,000kN/m (Design tensile strength = 60kN/m)				
Steel frame	Plate	EA=1.46×10 ⁵ kN, EI=1.542kN·m ²				

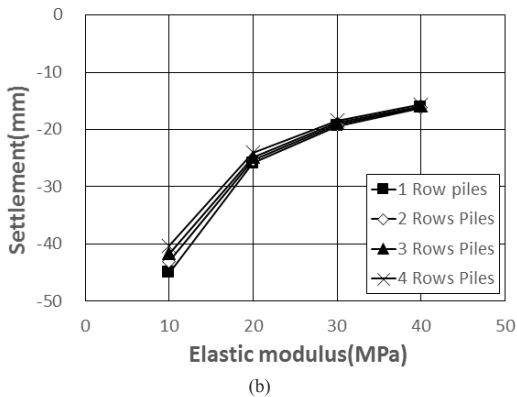


Fig. 4. Settlement of RAR

2.2.2 교대 수평변위

Fig.5는 말뚝기초 수와 지반변형 계수에 따른 열차하중 재하 단계에서 교대의 최대 수평변위를 나타낸 그래프이다. 말뚝기초의 열이 증가할수록 지반변형 계수가 증가할수록 교대의 수평변위가 낮게 나타났다. 지반변형 계수 증가에 따른 교대 수평변위 감소효과는 지반변형 계수가 10MPa에서 20MPa로 증가할 때 40%, 30MPa에서 40MPa로 증가할 때 21% 저감되는 것으로 나타났다. 말뚝기초 수가 증가할수록 작은 교대 수평변위를 보였다. 말뚝 1열에서 4열 설치로 증가할 때 교대 수평변위는 19.7~28.4% 저감되는 것으로 나타났으며, 지반변형 계수가 낮을수록 교대 수평변위 저감 효과가 높은 경향을 보였다.

열차하중 재하 단계에서 기존교대의 수평변위와 RAR의 말뚝기초 열에 따른 수평변위 발생을 정리하면 Table 4와 같다. 말뚝의 허용 수평변위 기준 15mm를 적용하는 경우 지반변형 계수 10MPa의 지반에서 말뚝이 1열, 2열을 적용하는 경우를 제외하고는 모두 허용 값 미만의 수평변위를 보였다. RAR의 수평변위는 기존교

대 대비 26~37% 수준으로 나타나 RAR의 교대 수평변위 제어 성능이 탁월한 것으로 나타났다. 이는 RAR에서는 보강재를 이용하여 뒤채움을 선 시공하기 때문에 뒤채움으로 인해 교대에 작용하는 토압이 매우 작기 때문인 것으로 볼 수 있다. 또한 보강재가 말뚝과 더불어 교대의 수평변위에 저항할 수 있으므로 말뚝 수를 감소시켜도 효과적으로 교대의 수평변위를 제어할 수 있다.

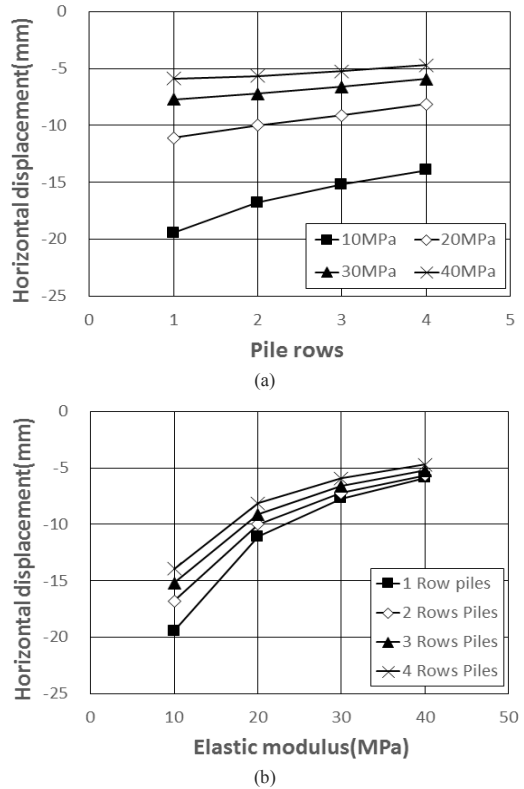


Fig. 5. Horizontal displacement of RAR

Table 4. RAR horizontal displacement relative to existing abutment

Elastic Modulus (MPa)	Horizontal displacement of existing abutment (mm)	RAR Horizontal displacement (mm) (RAR/Existing abutment ratio)			
		1 Row piles	2 Rows piles	3 Rows piles	4 Rows piles
10 MPa	-50.6	-18.2 (36%)	-15.6 (31%)	-14.0 (28%)	-13.1 (26%)
20 MPa	-28.4	-10.5 (37%)	-9.5 (35%)	-8.6 (30%)	-7.7 (27%)
30 MPa	-19.7	-7.4 (37%)	-6.9 (35%)	-6.3 (32%)	-5.7 (29%)
40 MPa	-15.2	-5.7 (37%)	-5.4 (36%)	-5.1 (33%)	-4.6 (30%)

2.2.3 교대 수평토압

Fig. 6은 지반 변형계수 10MPa의 경우에 대해서 교대 배면에 작용하는 수평토압을 나타낸 그래프이다. 기존 교대에서는 랭킨 주동토압과 유사하게 교대 하부로 갈수록 수평토압이 커지는 경향을 보였다.

RAR에서는 케도 및 열차하중 재하 전에는 0에 가까운 수평토압을 보였는데 이는 토체를 보강재와 기준틀로선 시공하고 벽체를 후 시공하였기 때문에 흠쌓기에 의한 토압이 교대에 가해지지 않았기 때문으로 판단된다. 케도 및 열차하중 재하 시의 수평토압을 살펴보면 상부에서는 교대에 인장력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 상부 보강재에 발생하는 인장력이 교대에 전달되어 배면 쪽으로 힘이 작용하기 때문으로 판단된다. 기존교대와 달리 높이 8.2m에서 최대 수평토압이 발생하고, 높이 2.6m 부근까지 감소하다 다시 증가하는 경향을 보인다.

수평토압의 감소구간은 보강재에 의한 교대 구속력이 감소하기 때문으로 보이며, 증가구간은 교대 저판 및 말뚝에 의해 교대 구속력이 증가하기 때문으로 보인다. 따라서 RAR에서 교대에 발생하는 수평토압은 상재하중에 의한 토압 증가뿐만 아니라 보강재 및 말뚝으로 인한 반력의 영향도 많이 받는 것을 알 수 있다.

RAR의 최대 수평토압을 말뚝 열 및 지반 변형계수에 따라 정리하면 Fig. 7과 같다. 모든 경우에 기존교대보다 작은 최대 수평토압을 보였다. 말뚝기초를 1~3열을 적용하는 경우에는 최대 수평토압이 5% 내외의 매우 작은 차이를 보이나, 말뚝기초를 4열로 적용하는 경우 최대 수평토압이 18.7% ~ 22.8% 줄어드는 것을 볼 수 있다.

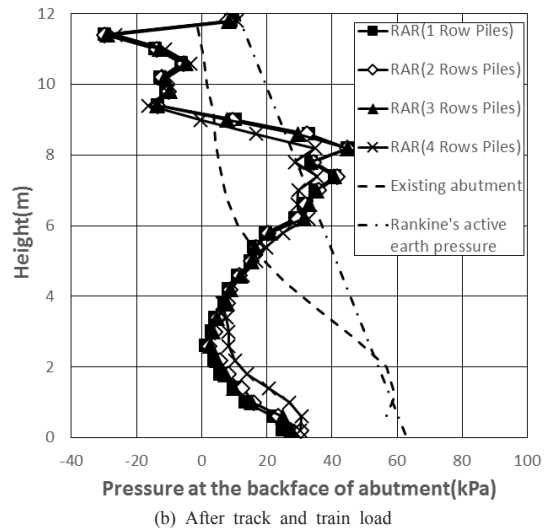
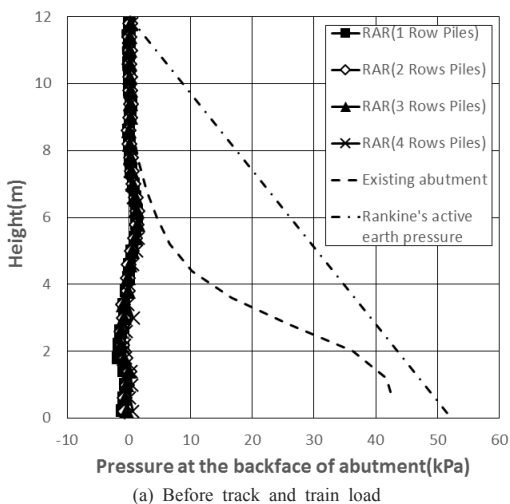
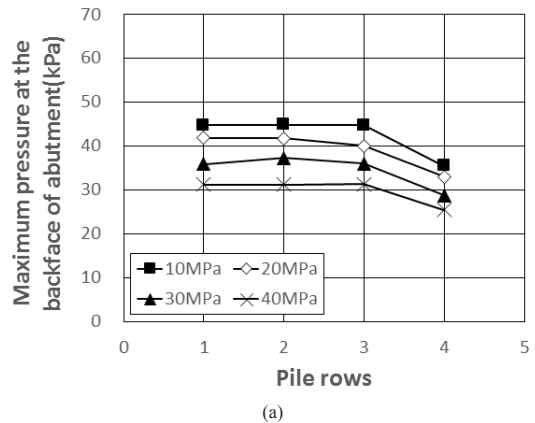


Fig. 6. Pressure at the backface of abutment

최대 수평토압이 크게 줄어든 말뚝기초를 4열로 적용하는 경우는 저판의 길이가 크게 증가하므로 단순 말뚝 열의 증가는 RAR 배면의 토압에 큰 영향을 주지 않고, 저판의 길이의 영향을 더 많이 받는 것으로 분석되었다. 이는 교대 배면에서 지반보다 강성이 높은 교대 저판이 차지하는 범위가 증가함에 따라 뒤채움재의 변형을 억제하여 수평토압의 감소가 이루어진 것으로 판단된다. 지반 변형계수가 10MPa에서 40MPa로 증가함에 따라 RAR 배면의 최대 수평토압은 28.1~30.4% 감소된 값을 보여, 원지반 강성 또한 RAR 배면의 토압에 영향을 주는 것을 확인하였다.



(a) Before track and train load



(a)

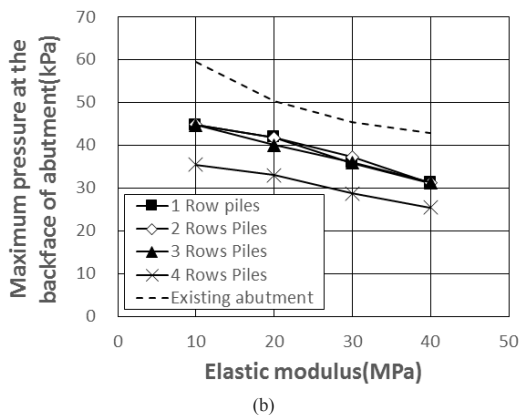


Fig. 7. Maximum Pressure at the backface of abutment

3. 결론

본 논문에서는 2차원 유한요소법을 이용하여 RAR(Reinforced Abutment for Railroads)을 지반의 변형계수를 10~40MPa, 말뚝 열 수를 1~4로 변화시킨 수치해석을 수행하였다. 또한 동일 높이의 기존교대에 대해서도 지반의 변형계수를 10~40MPa로 변화한 수치해석을 수행하여 RAR의 결과와 비교할 수 있도록 하였다. 각 해석별로 접속부의 침하와 교대 수평 변위 및 토압에 대하여 중점적으로 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) RAR의 말뚝 설치수가 증가함에 따라 교대 접속부의 침하는 감소하고, 지반 변형계수가 낮을수록 침하 저감 효과가 높은 것으로 나타났다. 접속부의 침하 저감에는 말뚝 설치수의 증가보다는 지반개량이 더 효과적인 것으로 나타났다.
- 2) RAR의 말뚝 설치수가 증가함에 따라 교대 수평변위는 말뚝 1열에서 4열로 증가할 때 19.7~28.4% 저감되는 것으로 나타났고, 지반변형계수가 낮을수록 교대 수평변위 저감효과가 높은 경향을 보였다. 기존교대와 비교했을 때, RAR의 수평변위는 열차하중 재하 단계에서 기존교대의 26~37% 수준으로 나타나 RAR의 교대 수평변위 제어 성능이 탁월한 것으로 나타났다.
- 3) RAR의 배면에서 발생하는 최대 수평토압은 기존 교대 대비 59~83% 수준으로 나타났다. RAR의 토압은 흩쌓기로 인한 토체의 토압뿐만 아니라 보강재, 말뚝, 기초지판, 원지반 강성 등의 영향을 복합적으로 받는 것으로 나타났다

분석결과 RAR에서는 말뚝과 기초의 저항역할을 보강재가 분담할 수 있으므로 교대 말뚝과 기초를 축소할 수 있는 가능성을 확인하였다. 향후 RAR의 실측 경험이 축적되면 기초 축소로 인한 교대의 경제적인 설계와 시공이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] D. S. Kim, R. G. Jeong, "A Study on Response Characteristics for the Reinforced abutment for Railroads by Numerical analyses", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 16, no. 11, pp. 7949-7956, 2015.
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.11.7949>
- [2] Watanabe K., Tateyama M., Yonezawa T., Aoki H., Tatsuoka F., Koseki J., "Shaking Table tests on a new type bridge abutment with geogrid- reinforced cement treated backfill", *Proc. of 7th International Conference on Geosynthetics Society*, vol. 1, pp. 119-122, 2002.
- [3] I. W. Lee, W. I. Choi, K. H. Cho, K. M. Lee, K. C. Min, "Real-scale Accelerated Testing to Evaluate long-term Performance for Bridge/ Earthwork Transition Structure Reinforced by Geosynthetics and Cement Treated Materials", *Journal of the Korean Society for Railway*, vol. 17, no. 4, pp. 251-259, August, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.4.251>
- [4] C. H. Yoo, C. Y. Choi, S. B. Yang, Y. G. Park, "Comparison of Construction Cost and External Stability of Railway Abutment wall with Friction Angle of Backfill Materials", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, vol. 15, no. 4, pp. 67-76, September, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.12814/jkgs.2016.15.3.067>
- [5] Ministry of Land, Infrastructure and Transport(In Korea), "Standard Specification of Highway bridge", 2013.
- [6] Korea Railway Network Authority, "Railway design standard for roadbed", 2011.

김 응 진(Ung-Jin Kim)

[정회원]



- 2010년 2월 : 성균관대학교 대학원 건설환경시스템공학과 (공학석사)
- 2014년 9월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학과 박사과정
- 2014년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 UST연구생

<관심분야>
지반공학, 궤도토목

정 락 교(Rag-Gyo Jeong)

[정회원]



- 1999년 8월 : 인하대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 인하대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1990년 12월 ~ 1994년 12월 : (주)한진중공업 사원
- 1995년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

전기철도, 열차제어

김 대 상(Dae-Sang Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 서울대학교 대학원 자원공학과 (공학석사)
- 2000년 3월 : 동경대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 4월 ~ 2002년 6월 : 서울대학교 지진공학연구센터 전임연구원
- 2002년 6월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

지반공학, 궤도토목