

수치해석을 통한 철도보강교대의 응답 특성 연구

김대상^{1*}, 정락교²

¹한국철도기술연구원 고속철도 연구본부, ²한국철도기술연구원 도시교통실용화연구팀

A study on Response Characteristics for the Reinforced Abutment for Railroads by Numerical Analyses

Dae-Sang Kim^{1*}, Rag-Gyo Jeong²

¹High-speed Railroad System Research Center, KRRI

²Urban Railroad Research Team, KRRI

요약 본 논문에서는 뒤채움을 선 시공하고, 교대를 후 시공하여 침하와 교대 수평 토압 및 변위를 저감할 수 있는 경제적인 교대 구조인 RAR(Reinforced Abutment for Railroads)을 제시하고 수치해석으로 성능을 확인하였다. 먼저 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 기존교대에서 발생하는 접속부의 침하와 교대 수평변위를 다양한 높이와 원지반 조건에 대하여 해석하였다. 이 후 보다 경제적인 설계를 위하여 교대 단면과 말뚝 기초수를 저감시킨 RAR에 대해 동일한 조건으로 해석을 수행하고 그 결과를 비교, 분석하였다. 분석 결과 RAR에서 발생하는 접속부 침하와 교대 수평변위는 기존교대의 20%와 34% 수준이며, 이는 뒤채움 안정화의 효과에 의한 것으로 나타났다. RAR은 침하와 수평변위 제어 및 토압 재분배 효과를 통하여 교대 저판, 교대벽체, 교대 기초 말뚝 수 저감으로 기존 교대 보다 경제적인 시공이 가능할 것으로 예상된다.

Abstract This paper introduced the RAR(Reinforced Abutment for Railroads) to reduce settlement of transitional zone and horizontal displacement of abutment by constructing backfill before abutment. We expect that it has more economical and better performance which was validated by numerical analyses. First, transitional zone settlements and horizontal displacements of existing abutment were evaluated for various heights and ground conditions by using finite element analysis program. Then, numerical analyses of it under the same conditions were performed and its results were compared with existing abutment's ones. From the numerical analysis, we found that the responses(settlement and horizontal displacement) of transitional zone of the RAR is about 20% and 34% of one of existing abutment due to the effect of backfill stabilizing. We expected that the RAR having small foundations could be economic way to construct abutment with the control of responses such as, settlement, horizontal displacement, and earth pressure.

Keywords : Abutment, Numerical analysis, RAR, Response characteristics, Transition zone

1. 서론

교대 구조물의 주요 기능은 교량 상판을 지지하는 것으로 교량하중, 교통하중 외에도 배면의 토압을 저항해야 하는 구조물이다. 교대 배면의 토압은 높이의 증가와

함께 높이의 제곱에 비례해서 증가하여 활동력과 전도 모멘트가 증가하고, 교대에 작용하는 부재력 또한 증가한다. 교대 구체가 충분한 저항성능을 확보하기 위해서는 교대구체는 비대해지고, 큰 저판이 필요하며, 말뚝 기초의 사용량이 증가하므로 건설에 큰 비용이 소요된다.

본 논문은 한국철도기술연구원의 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Dae-Sang Kim(KRRI)

Tel: +82-31-460-5305 email: kds@krri.re.kr

Received October 5, 2015

Revised November 4, 2015

Accepted November 6, 2015

Published November 30, 2015

교대가 연약지반 상에 시공될 경우에는 측방유동이나 과다침하 발생 등의 우려 또한 존재한다. 현재 국내에서 교대의 측방유동에 관한 연구는 연약지반상 교대의 측방이동에 관한 연구(홍원표 등, 1994)[1]와 측방 유동지반상 말뚝기초교대의 측방이동 평가(홍원표 등, 2007)[2] 등이 이루어져 있다.

또한 철도교량의 교대-토공 접속구간에서는 지지강성의 차이에 의해 큰 열차동하중의 변화가 발생하므로 과다 침하에 의한 안전성 및 사용성 저하에 대한 우려가 있다[Fig 1]. 이에 대한 보완방안으로 어프로치 블록이나 어프로치 슬래브 등이 설계에 반영되고 있고, 김자연 등(2013)[3]이 토목섬유 튜브를 이용한 교대 접속부의 토압저감 기법에 대해 연구한 바 있으나 교대 접속부 침하 및 저감 방안에 관한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

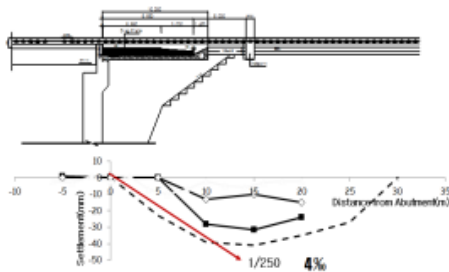


Fig. 1. Example of Settlement of transition zone

본 연구에서는 수치해석을 통해 기존 교대 및 접속부 구조의 거동을 분석하고, 이에 대한 응답저감 방안으로써 토공 및 접속부를 선 시공하고 교대를 후 시공함으로써 경제적으로 시공이 가능하고 침하 및 수평 토압 및 변위를 저감할 수 있는 교대 구조를 소개하였다.

Table 1. 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

2. 본론

2.1 기존 교대 해석

지반조건 및 교대 높이에 따른 교대 및 접속부의 거동을 분석하기 위하여 유한요소법을 이용한 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS 8.0을 활용하였다. 원지반 변형계수와 교대높이를 달리 한 각각의 조건에 대해 교대와 접속부의 거동을 비교, 분석하였다.

2.1.1 해석조건

Fig. 2와 같이 교대와 접속부를 단순화하여 모델링하였다. 교대 높이에 따른 거동 변화를 파악할 수 있도록 역T형 교대를 높이 8, 12, 16, 20m로 설정하였다. 각 높이에 대해 원지반 변형계수 10, 20, 30, 40MPa를 적용한 총 16케이스에 대하여 수치해석을 수행하였다. 15 Node, Plane stain 요소를 이용하여 뒤펅, 교대, 원지반, 말뚝기초 등을 모델링하였으며 적용된 재료 모델과 물성치는 Table 1과 같다. 원지반에 적용된 변형계수는 도로교표준시방서에서 제안하는 N값에 의한 변형계수 산정식($E=2.8N$)[4]을 적용하여 N값 4이하의 매우 연약한 지반부터 14이상의 양호한 지반까지 표현할 수 있도록 산정하였다. 수치해석 케이스를 정리하면 Table 2와 같다.

상재하중은 궤도하중, 열차하중, 교량하중을 적용하였다. 궤도와 열차하중은 철도설계기준의 설계하중을 준용하여 15kPa와 35kPa의 등분포 하중을 적용하였다.[5] 교량하중은 설계사레로부터 경간길이 35m의 교량을 고려하여 450kPa의 등분포 하중을 교량받침에 적용하였다.

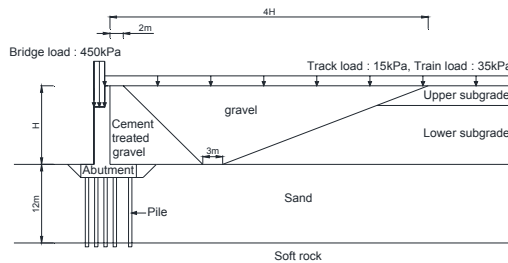


Fig. 2. Analyses section of existing abutment

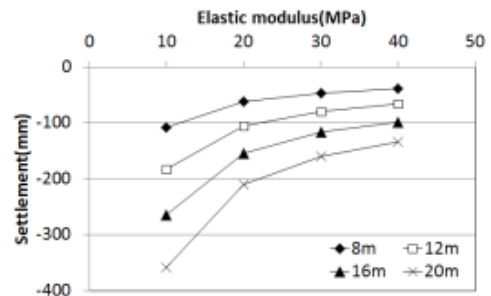
Table 2. Analyses cases

Case No.	Abutment Height	Elastic modulus of sand layer
1	8m	10 MPa
2		20 MPa
3		30 MPa
4		40 MPa
5	12m	10 MPa
6		20 MPa
7		30 MPa
8		40 MPa
9	16m	10 MPa
10		20 MPa
11		30 MPa
12		40 MPa
13	20m	10 MPa
14		20 MPa
15		30 MPa
16		40 MPa

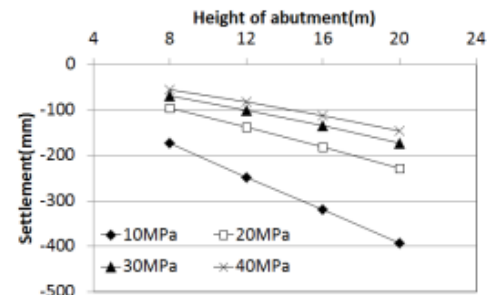
2.1.2 해석결과

Fig. 3은 교대의 높이와 원지반의 변형계수에 따라 교대 접속부의 노반 상단에서 발생하는 침하를 보여준다. 원지반의 변형계수가 작을수록 침하가 크게 발생하고, 변형계수-침하곡선의 기울기가 급해지는 것을 확인할 수 있다.

또한 교대의 높이가 높아질수록 침하는 선형 증가하는 경향을 보인다. 원지반의 변형계수가 10MPa의 경우에 높이에 따라 172mm~393mm의 과도한 침하가 발생하였는데 이는 철도설계기준에 명시되어 있는 허용잔류 침하량(자갈레도 : 100mm, 콘크리트레도: 30mm)[5]을 크게 상회하는 값이다. 시공 중 침하를 포함한 값을 감안하더라도 시공 중 및 공용 중 안정성을 위협할 수 있는 침하가 예상되므로 접속부 시공 전 연약지반을 개량하여야 한다.



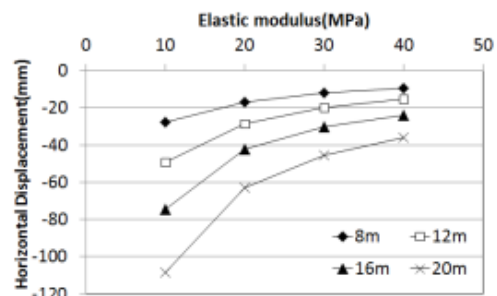
(a)



(b)

Fig. 3. Settlements of existing abutments

Fig. 4는 노반의 높이와 원지반의 변형계수에 따른 교대의 수평변위를 보여준다. 모든 높이에서 원지반의 변형계수가 작을수록 변형계수-교대 수평변위 곡선의 기울기가 급해지는 것을 확인할 수 있다. 교대 수평변위 발생은 9~108mm로, 말뚝의 허용 수평범위 기준 15mm를 적용하는 경우 높이가 8m이고 원지반의 변형계수가 30, 40MPa인 경우를 제외하고는 모두 허용값 이상의 수평변위를 보였다. 이는 교대 전면에 압성토 등의 추가보강이 없으므로 말뚝과 교대의 자중에 의해서만 토압 및 상재하중에 저항하기 때문으로 보인다. 따라서 지반조건이 나쁠수록, 교대 시공 높이가 높을수록 대규모로 압성토를 시공하거나 말뚝 설치수를 증가해야 한다.



(a)

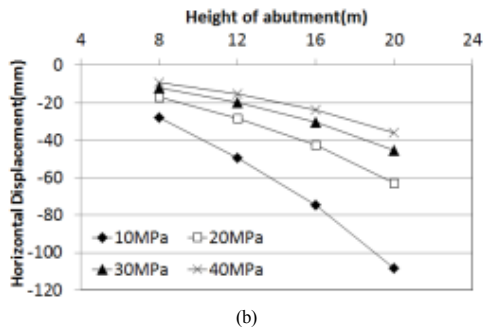


Fig. 4. Horizontal displacements of existing abutments

2.2 새로운 교대 접속부 모델 제안

응답저감을 위하여 보강교대(Reinforced Abutment for Railroad, 이하 RAR)를 제안하고 수치해석으로 그 성능을 검토하였다.

RAR은 토공 및 접속부 선 시공, 교대 후 시공이 가능한 교대이다. 교대 높이의 35%의 보강재와 긴 보강재를 혼용하고, 용접철근망(이하 기준틀)을 이용하여 토공 및 접속부를 선 시공하는데 이때 보강재와 기준틀로 인해 토체는 안정적으로 수직으로 자립할 수 있다[6]. 이후 방치기간을 두어 토체를 안정화 시키고 토체의 침하가 수렴되면 교대를 시공한다. 이러한 시공과정을 통해 교대에 작용하는 토압을 경감시키고 뒤택움의 구속력을 증가시켜 교대에서 발생하는 변위를 저감할 수 있다[7]. 기존 교대에 비해 얇은 두께로 교대를 시공하는 것이 가능하므로 저판이 필요 없고, 말뚝본수를 줄일 수 있어 경제적인 교대 시공이 가능하다. Fig. 5는 RAR의 시공 절차를 개념적으로 보여준다.

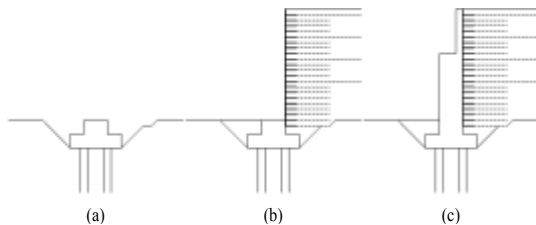


Fig. 5. Procedures to construct RAR
(a)Foundation (b)Backfill (c)Abutment

2.2.1 해석조건

RAR 및 접속부를 Fig. 6과 같이 단순화하여 유한요소 수치해석을 수행하였다. 기존교대와 마찬가지로 15Node, Plain strain 요소를 사용하여 뒤택움, 교대, 원지반, 말뚝기초 등을 모델링하였고 동일한 재료모델과

물성 값을 적용하였다. 보강재는 지오그리드 모델을 사용하였으며($J=2,000\text{kN/m}$), 기준틀은 플레이트 모델을 사용하여 $EA=1.46 \times 10^5\text{kN}$, $EI=1.542\text{kN}\cdot\text{m}^2$ 를 적용하였다. 교대 구체의 경제적인 설계를 위하여 교대 구체는 기존 교대에 비해 두께는 700mm감소, 말뚝수는 60% 감소하여 모델링하였다. 상재하중 조건은 기존교대의 모델과 동일하게 하였다.

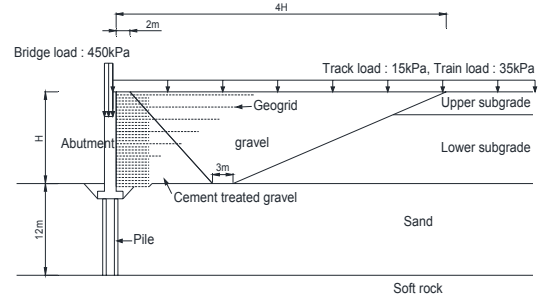
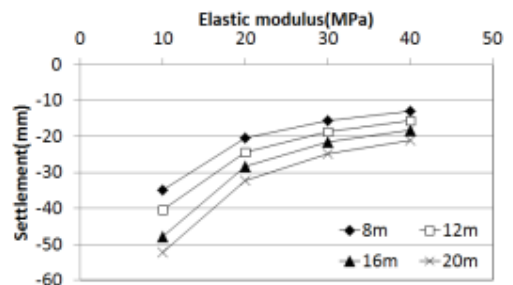


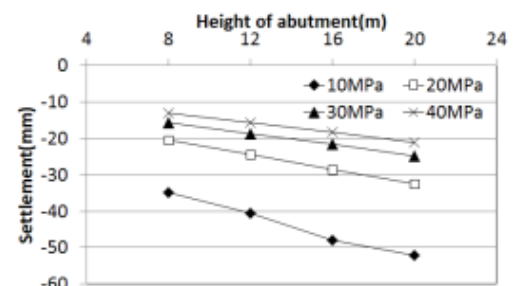
Fig. 6. Analysis section of RAR

2.2.2 해석결과

RAR을 기존교대와 동일한 케이스로 해석하여 접속부 상단의 침하를 노반 높이와 원지반 변형계수에 대해 정리하면 Fig. 7과 같다. 기존교대와 마찬가지로 원



(a)



(b)

Fig. 7. Settlements of RAR

지반의 변형계수가 작을수록 침하가 크게 발생하고, 변형계수-침하곡선의 기울기가 급해지는 것을 확인할 수 있다. 노반의 높이에 따라 침하는 선형증가하나 곡선의 기울기가 기존교대보다 완만하므로 RAR은 노반 높이에 따른 침하증가경향이 기존교대보다 적은 것으로 나타났다.

이는 앞서 설명한 RAR 시공 시 방치기간 중의 토체 안정화에 의한 것으로 판단된다. 침하량은 13~52mm로 흙쌓기 시공 전 원지반 처리가 불필요 한 것으로 보이나 방치기간이 길어짐에 따라 공사비가 증가하는 것을 고려하여 적절한 원지반 처리와 방치기간 설정이 필요하다.

Fig. 8은 노반의 높이와 원지반의 변형계수에 따른 RAR의 수평변위를 보여준다. 수평변위량은 4~21mm로 원지반 변형계수 10MPa이고 높이 12, 16, 20m인 케이스를 제외하고 모두 허용수평변위 기준 15mm를 만족하였다. 원지반이 변형계수 10MPa 이하의 매우 연약한 조건이 아니라면 교대전면에 압성토 등의 추가보강이 불필요하여 경제적이고 부지사용이 효율적인 교대시공이 가능할 것으로 보인다. 원지반이 매우 연약한 조건에서는 추가검토를 통하여 원지반 처리 혹은 추가보강의 여부를 판단해야 한다.

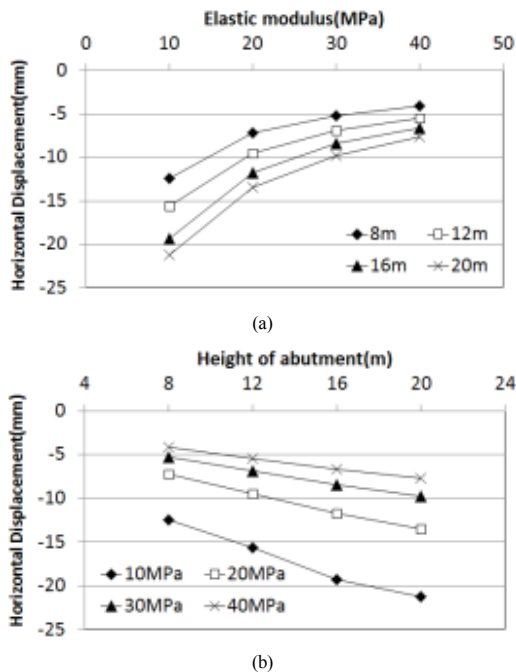


Fig. 8. Horizontal displacements of RAR

2.3 기존교대와 RAR 해석결과 비교

Fig. 9는 원지반 변형계수 10MPa, 교대 높이 12m의 케이스에 대한 접속부의 침하, 수평변위 경향을 보여준다. 기존교대는 RAR에 비해 침하와 수평변위가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 침하는 교대에서 멀어질수록 증가하는 경향을 보이는데 이는 교대에 가까울수록 변형계수가 높은 뒤채움재가 사용됐기 때문이다. 기존교대에서는 교대저판에 의해 교대 인접부의 침하가 제어되고, RAR에서는 보강재에 의해 침하가 제어되는 경향을 확인할 수 있다.

두 교대방식 모두 수평변위는 교대기초 뒤에서 최대 수평변위가 발생하고 교대 앞쪽에서 변위가 작아지는 경향을 보여 교대구체와 말뚝기초에 의해 교대 배면의 수평변위에 저항하는 형태를 보였다. RAR에서는 상부로 갈수록 수평변위가 감소하는 경향이 두드러져 보강재에 의한 수평변위 제어효과가 확인되었다. 보강재에 의한 추가 변위제어 효과로 인해 교대저판 제거, 교대두께 감소, 말뚝본수 감소 등이 적용된 교대 구조의 사용이 가능할 것이다.

시공 단계별 침하 및 수평변위의 경향은 Fig. 10과 같다. Fig. 10은 접속부 상단의 침하를 높이 12m의 교대에 대해 시공단계와 원지반 변형계수별로 나타난 그래프이다. 기존 교대의 경우 원지반 변형계수에 따라 66~183mm의 침하를 보였으며 RAR의 경우 17~47mm로 상대적으로 작은 침하를 보였다. 기존 교대의 경우 발생하는 침하의 약 80%는 뒤채움 하중에 의해 발생하는 것으로 나타났다. RAR은 흙쌓기부의 침하 대부분을 차지하는 뒤채움 하중에 의한 침하를 방치기간에 의한 토체 안정화로 인해 소거할 수 있으므로 기존 교대의 약 20% 정도의 침하가 발생하는 것으로 볼 수 있다. 침하저감 효과는 원지반의 변형계수가 낮을수록 더 높게 나타났다.

Fig. 11은 교대 하부의 수평변위를 높이 12m의 교대에 대해 시공단계와 원지반 변형계수별로 나타난 그래프이다. 기존 교대의 경우 원지반 변형계수에 따라 15~49mm의 수평변위를 보였으며 RSR교대의 경우 5~16mm로 상대적으로 작은 수평변위를 보였다. 기존 교대에서 발생하는 수평변위의 74%가 뒤채움의 수평토압에 의한 변위로 나타났다. RSR교대는 토체 전 시공 후, 토체가 안정화 된 이후에 교대를 시공하므로 뒤채움 토압에 의해 교대에 변위가 발생하지 않는다. 레도하중과 열차하중에 의해서만 교대의 수평변위가 발생하여 기존

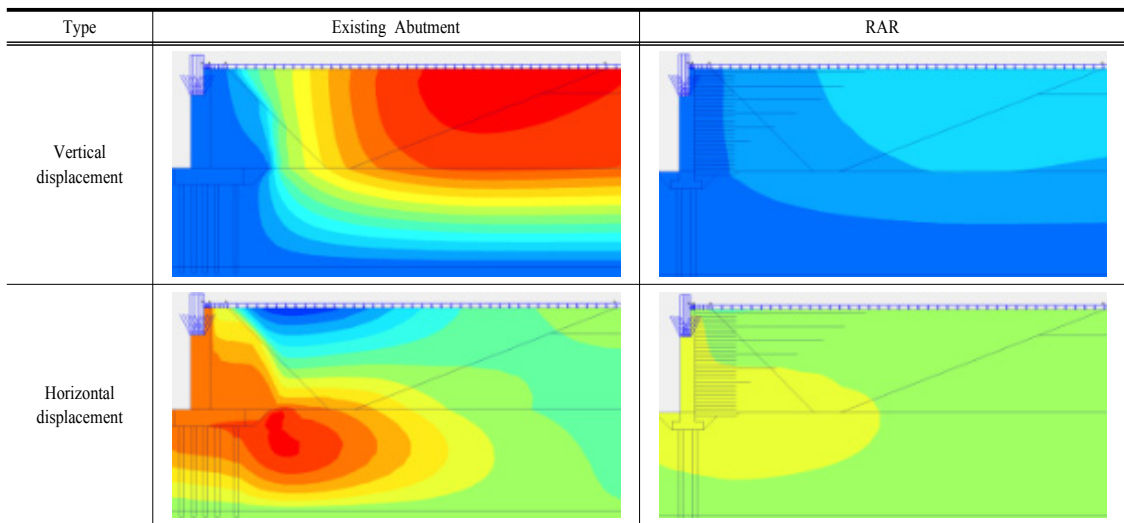


Fig. 9. Displacement contour of Existing Abutment and RAR

교대의 약 34%정도의 수평변위가 발생하는 것으로 나타났다. 수평변위 억제효과는 원지반의 변형계수가 낮을 수록 더 높게 나타났다.

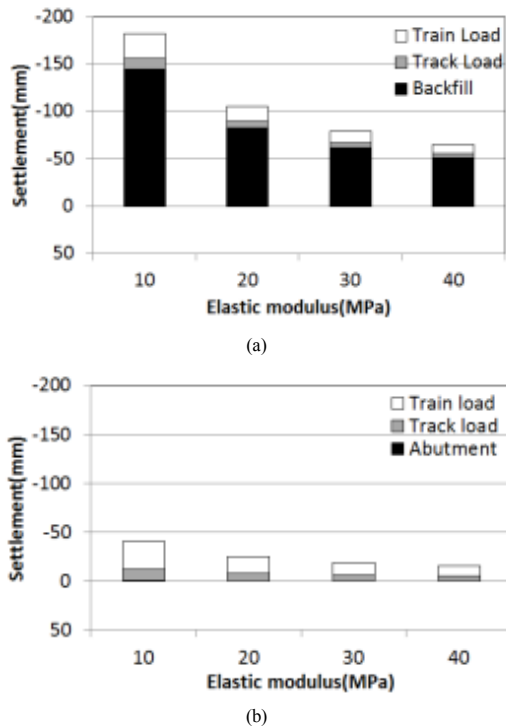


Fig. 10. Settlement of Transition zone according to each analysis step
(a)Existing Abutment (b)RAR

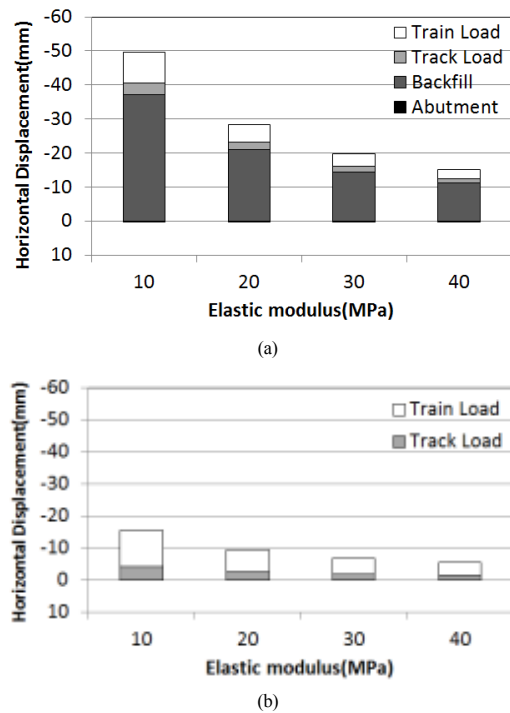


Fig. 11. Horizontal displacement of abutment according to each analysis step
(a)Existing Abutment (b)RAR

Fig. 12는 원지반 변형계수 10MPa, 교대 높이 12m인 No.5 케이스의 해석결과에서 교대 배면에 작용하는 압력을 나타낸 그래프이다. 기존 교대에서는 교대 하부로 갈수록 수평압력이 증가하는 경향을 보이는 반면 RAR

에서는 7.6m의 높이에서 최대 수평압력이 발생하였다. 수평압력의 최대 값은 기존교대에서는 59.5kPa, RAR에서는 28.8kPa로 기존교대에 비해 52% 저감된 값을 보였다. 특히 교대 하부에서의 압력은 RAR에서 기존교대의 20%의 수준으로 크게 저감되어 나타났다. 이러한 결과의 원인은 뒤채움 시공 단계에서 기준틀과 보강재에 의해 토체가 자립하고 방치기간 중 안정화 되므로, 이 후 시공되는 교대에는 매우 작은 압력이 작용하기 때문으로 분석된다. 교대 높이 6m 이상에서는 교대에 작용하는 토압이 더 크게 나타나는데 이는 상재하중 작용 범위 내에서 보강재의 인장력으로 인한 교대 배면 구속압 증가가 그 원인으로 보인다.

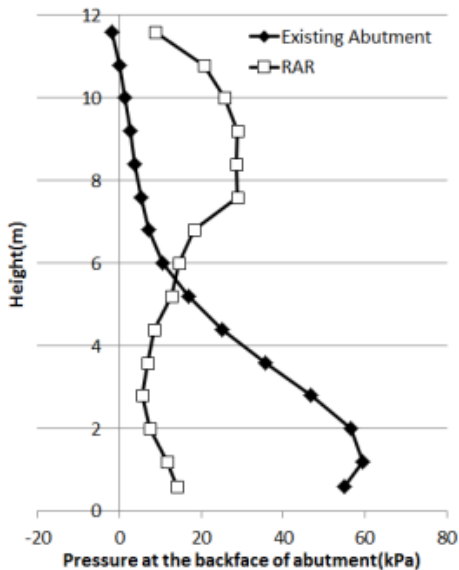


Fig. 12. Horizontal earth pressure(Case No.5)

3. 결론

본 논문에서는 2차원 유한요소법을 이용하여 기존 교대와 RAR(Reinforced Abutment for Railroads)의 높이를 8~20m까지 변화시키고, 원지반의 변형계수를 10~40MPa로 변화시킨 수치해석을 수행하였다. 각 해석별로 접속부의 침하와 교대 수평 변위 및 토압에 대하여 중점적으로 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 기존교대의 접속부에서의 침하는 원지반 변형계수

가 작을수록, 교대 높이가 높을수록 증가한다. 높이가 8m의 경우 원지반 변형계수 20MPa이상, 12m의 경우 변형계수 30MPa이상이어야 잔류침하 기준을 만족할 가능성이 높아지는 것을 확인할 수 있었다.

2) RAR의 접속부 침하 및 교대 수평변위를 정량적으로 평가하면, 접속부 침하는 기존교대의 20%, 수평변위는 기존교대의 34% 수준으로 나타났다. 이는 기존 교대 구조에서는 접속부 침하의 80%, 교대 수평변위의 74%가 뒤채움 하중에 의해 발생하나, RAR에서는 뒤채움을 선 시공하여 안정화 시킨 후 교대를 후 시공 하므로 뒤채움 하중이 침하 및 수평변위에 대한 기여가 없기 때문이다.

3) 기존 교대와 RAR에서 교대 배면에 작용하는 수평 토압은 사용된 보강재의 인장력에 의하여 크게 변화되었다. 특히 새롭게 제안한 교대의 높이 6m 이상에서는 교대에 작용하는 토압이 더 크게 나타났다. 이는 상재하중 작용 범위 내에서 보강재의 인장력으로 인한 교대 배면 구속압 증가가 그 원인으로 판단된다.

4) 기존 교대에서는 교대 구체와 말뚝기초에 의해 침하 및 수평변위에 대한 안정성이 증가된다. 신형식 교대 구조로 제안한 RAR에서는 보강재에 의하여 침하와 수평변위 제어 효과가 있음을 확인하였다. 따라서, 교대구체 두께 감소, 말뚝본수 저감, 교대저판 제거 등이 적용된 경제적인 설계 및 시공이 가능할 것이다.

References

- [1] W. P. Hong, O. H. Kwon, J. K. Han, S. H. Cho, "A Study on Lateral Movement of Bridge Abutment on Soft Ground", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.10, NO.4, pp.53-65, 1994.
- [2] W. P. Hong, K. W. Lee, S. D. Cho, J. H. Lee, "Evaluation on lateral movement of piled bridge-abutment on soft ground under lateral flow", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.27, NO.5C, pp.305-312, 2007.
- [3] J. Y. Kim, Y. H. Park, K. H. Cho, "Earth pressure reduction method in Railway bridge abutment using Geosynthetics Tube", *Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway*(2013.11), pp.952-959, 2013.
- [4] Ministry of Land, Infrastructure and Transport(in Korea),

“Standard Specification of Highway bridge”, 2013

- [5] Korea Railway Network Authority, “Railway design standard for roadbed”, 2011.
- [6] D. S. Kim, “Stability Evaluation of Reinforced Subgrade with Short Geogrid for Railroad During Construction” *Journal of the Korean Geosynthetic Society*, Vol.13, NO.4, pp.11-20, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12814/jkgs.2014.13.2.011>
- [7] D. S. Kim, S. Y. Park, K. H. Kim, "Effects of Vertical Spacing and Length of Reinforcement on the Behaviors of Reinforced Subgrade with Rigid Wall", *Journal of the Korean Geosynthetic Society*, Vol.11, NO.4, pp.27-35, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12814/jkgs.2012.11.4.027>

김 대 상(Dae-Sang Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 서울대학교 대학원
자원공학과 (공학석사)
- 2000년 3월 : 동경대학교 대학원
토목공학과 (공학박사)
- 2000년 4월 ~ 2002년 6월 : 서울
대학교 지진공학연구센터 전임연
구원
- 2002년 6월 ~ 현재 : 한국철도기
술연구원 책임연구원

<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 : 한국철도기
술연구원 책임연구원

<관심분야>

전기철도, 열차제어