시멘트 처리된 자갈로 뒤채움 된 교대 및 접속부의 시공 중 장기거동 평가

Evaluation of Long-term Behaviors of Abutment and Transition Zone with Cement-treated Gravels during Construction

김대상*

Kim, Dae Sang*

Abstract

This study measured the horizontal earth pressure on the boundary between an abutment and transition zone with cement-treated gravels over 16 months during the construction of the Osong test line. The internal friction angles were back-calculated from the measured horizontal earth pressure based on the Rankine active earth pressure theory. They were in the range 38° - 58° with an average of 46° . This value is 11° higher than the internal friction angle usually used for the design of an abutment. Furthermore, the inclination and settlement of the abutment were measured for a long time and the behaviors of abutment were investigated during and after construction based on the data.

Key words : Horizontal Earth Pressure, Abutment, Transition Zone, Cement Treated Gravel, Long Term Behaviors

요 지

본 논문에서는 건설 중인 오송 철도종합시험선로에서 시멘트 처리된 자갈로 뒤채움된 교대 및 접속부의 시공 중 및 시공 후 16개월간 수평토압을 장기 계측하였다. 계측된 수평토압으로부터 Rankine 주동토압이론으로 내부마찰각을 역산한 결과, 그 값은 38° - 58° 의 범위로 넓게 분포하고 평균값은 46° 로 일반적으로 교대 설계 시 적용하는 내부마찰각보다 11° 높은 값을 보였다. 또한, 교대의 경사와 침하에 대한 장기계측을 통하여 시공 중 하중조건 변화에 따른 교대의 거동에 대해서도 검토하였다.

핵심용어 : 수평토압, 교대, 접속부, 시멘트 처리된 자갈, 장기거동

1. 서 론

최근 고속철도 건설을 위한 교량의 건설, 기존선 고속화를 위한 선형조건 상의 제약 등의 이유로 교량과 토공 접속부에 건설하는 교대는 높이와 규모가 점차 대형화하는 추세이다. 교대는 교량 및 교통하중 등의 수직하중 외에도 배면의 뒤채움에 의한 수평하중을 지지해야하는 구조물로, 높이 증가에 비례하여 토압이 증가하는 구조적인 한계점이 있다. 교대에 작용하는 토압을 결정하는 주요 설계 입력값은 뒤채

움재의 내부마찰각이다. 따라서, 교대 및 접속부의 뒤채움재는 압축성이 작고 입도 분포가 양호한 재료를 사용하도록 철도설계기준이 정하고 있으며, 철도건설공사 전문시방서(KR, 2011)에서는 Fig. 1과 같이 고속철도의 자갈레도와 일반철도 및 고속철도의 콘크리트레도의 표준 접속부 단면을 규정하고 있다. Table 1은 교대 뒤채움부인 접속영역에 사용되는 재료에 대한 물리적 특성 및 다짐도 기준으로, 공용 중 침하를 최대한 억제하기 위하여 엄격하게 재료의 품질기준을 관리하고 있다.

*교신저자, 정회원, 한국철도기술연구원 책임연구원(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

Fig. 1. Standard Section of Transition Zone

Table 1. Properties of Backfill Material

No.	Materials	Properties & Compaction Criteria
①	Cement treated Reinforced roadbed	D _{max} = 37.5mm, 31.5mm, 26.5mm(3% Cement), E _{v2} ≥ 120MN/m ² , E _{v2} /E _{v1} <2.2
②	Reinforced roadbed	D _{max} = 37.5mm, 31.5mm, 26.5mm, E _{v2} ≥ 80MN/m ² , E _{v2} /E _{v1} <2.3
③	Cement treated Gravel	D _{max} = 63mm (3% Cement), E _{v2} ≥ 120MN/m ² , E _{v2} /E _{v1} <2.2
④	Gravel	D _{max} = 63mm, E _{v2} ≥ 80MN/m ² , E _{v2} /E _{v1} <2.3
⑤	Soil	E _{v2} ≥ 80MN/m ² , E _{v2} /E _{v1} <2.3

※ D_{max} = Maximum grain size

E_{v1} and E_{v2} = Strain moduli of the first and the second loading cycles of cyclic plate loading test

Fig. 1과 같이 실제 교대에 접하고 있는 재료(③)는 시멘트 처리된 자갈로 양질의 재료에 시멘트를 3% 중량비율로 배합하여 시공하고 있다. 시멘트 처리된 자갈과 관련된 연구로 Omae et al. (2003)은 Cemented sand and gravel 재료의 대형 삼축압축시험을 통하여 단위 시멘트량 60 kg/m³, 재령 7일의 경우 내부마찰각은 52.7°의 값을 가진다고 발표한 바 있다. 또한 Kim et al. (2005)은 Cemented sand and gravel 재료의 단위 시멘트량에 따라 내부마찰각은 45°~59°의 범위로 증가한다고 발표한 바 있다. Yoo et al. (2016)은 교대높이 12 m를 가정하여 뒤펀재의 내부마찰각 변화에 따른 공사비를 비교한 결과 내부마찰각에 따라 공사비용은 2.2%~8.4% 감소한다고 발표한 바 있다.

본 논문에서는 시멘트 처리된 자갈로 뒤펀재하는 교대의 시공 중 및 시공 후 수평토압을 장기 계측한 결과와 Rankine 주동토압을 비교 분석하여 현재 교대 설계에 적용하고 있는 내부마찰각 35°의 적정성에 대한 검토를 실시하였다. 또한, 시공 중 교대의 경사와 침하에 대한 장기 계측을 통하여 시공 하중조건 변화에 따른 교대의 거동에 대하여 검토하였다.

2. 교대 접속부 설계 및 시공 중 계측기 설치

Fig. 2는 오송에 위치한 철도중합시험선로의 시험 1교에 대한 교대 설계도로, 높이 8 m, 벽체 두께 1.9 m, 저판 길이 9.3 m로 설계하였다. 교대 기초는 $\Phi 609$ mm의 강관말뚝을 3 × 6의 배열로 18본 설치하였다. 접속부는 Fig. 3과 같이 STA.1km658.8에서 STA.1km680까지 21.19 m 구간을 강화노반층, 시멘트처리된 자갈층, 일반자갈층과 토사층을 시방서 기준에 부합되게 설계하였다. 각 층에 적용한 시공 중 품질 및 다짐도 기준은 Table 1과 같다. Table 2는 교대 설치 위치의 지반조건으로, 점토질 모래의 매립층 아래에 점토와 모래로 형성된 퇴적층과 풍화토층이 12 m 하부까지 분포하는 것으로 조사되었다.

Fig. 2. Concept Drawing of Abutment at Osong Test Line

Fig. 3. Concept Drawing of Transition Zone at Osong Test Line

Table 2. Ground Conditions

Depths (m)	Thicknesses (m)	Descriptions	N values (No. of blows/cm)
0~1.4	1.4	Land fill layer Clayey sand	13/30
1.40~3.70	2.3	Sedimentary layer Stiff sandy clay	8/30~12/30
3.70~12.00	8.3	Weathered soil layer Silty sand	16/30~50/9
12.00~15.00	3	Weathered rock layer Granite	50/10~50/7

시공 중 및 시공 후 하중조건 변화에 따른 교대의 거동을 파악하기 위하여 교대 배면 수평토압, 교대 침하 및 경사에 대해 2016년 10월 29일부터 16개월(486일)간 장기계측을 실시하였다. Fig. 4는 수평토압 측정 3개소, 교대 침하 측정을 위한 프리즘 2개소, 교대경사 측정을 위한 경사계 1개소의 설치 위치를 보여주고 있다. 수평토압 및 경사계는 휴대용 데이터로거를 이용하여 측정하였고, 교대 침하는 3차원 광파기를 이용하여 측정하였다.

Fig. 4. Location of Measurement Sensors (unit: mm)

수평토압은 2016년 10월 29일 최하단 토압계를 설치하고 계측을 시작하였다. 시공 단계에 맞추어 3.2 m의 간격으로 토압계를 순차적으로 설치하고 계측하였다. 수평토압 측정을 위한 토압계는 Fig. 5(a)와 같이 교대 배면에 지그를 설치하고 고정하였다. 교대의 침하는 Fig. 5(b) 및 (c)와 같이 프리즘 타겟을 교대의 정면과 측면에 부착하여 3차원 광파기로 계측하였다. 교대경사계는 Fig. 5(d)와 같이 2축 경사계를 교대 측면에 부착하여 교축직각방향과 교축방향에 대한 시공 중 경사도 변화를 측정하였다. Fig. 6과 같이 교축방향 경사(y축)는 교대 좌측면에서 반시계방향 회전이 발생하면

Fig. 5. Photos of Measurement Sensors

Fig. 6. Axes and Sign Conventions for the Measurement of Abutment Inclination

계측값이 증가하도록 설정하였다. 교축직각방향 경사(x축)는 교대 정면에서 시계방향 회전이 발생하면 계측값이 증가하도록 설정하였다.

3. 시공 중 장기계측 및 결과분석

3.1 교대 수평토압

Fig. 7은 교대 뒤택움 시공 중 및 시공 후 시간에 따른 교대에 작용하는 수평토압 변화를 나타낸 그림이다. 2016년 10월 29일 뒤택움 시작과 동시에 높이 1.1 m에서 토압 측정을 시작하여 뒤택움진행에 따라 높이 4.3 m와 7.5 m에 토압계를 설치하고 수평토압을 측정하였다. 현장여건 변화로 2016년 11월 7일 뒤택움 7 m 완료 후 약 5개월간 안정화 기간을 두었고, 이후 교량 거더 시공 및 궤도 시공을 위한 후속작업이 진행되었다. Fig. 7에 ㉠ ~ ㉦는 뒤택움, 교량 거더 및 강하노반과 궤도 시공일정을 보여준다. 각 단계별 공정에 대한 자세한 사항은 Table 3과 같다.

Table 3. Construction Working Schedules

Items	Dates (y/m/d)	Construction works
㉠	16/11/3	backfill, h = 3.8 m
㉡	16/11/7	backfill, h = 7.0 m
㉢	17/4/20	crane work for the form of girder
㉣	17/6/25	girder concrete pouring
㉤	17/8/30	completion of reinforced roadbed
㉥	17/12/28	completion of track

뒤택움 7 m 완료 후 안정화 기간 동안 높이 1.1 m에서의 수평토압은 30.3 kPa까지 상승한 후 19.2 kPa까지 감소하는 경향을 보였다. 상재하중이 변화하지 않음에도 불구하고 수평토압이 감소한 원인은 뒤택움의 안정화 및 시멘트 처리된 자갈의 양생으로 인한 수평토압 감소가 그 원인으로

Fig. 7. Changes of Horizontal Earth Pressure at the Back of Abutment Over Time

판단되며, 그 감소율은 36.7% 수준임을 확인 할 수 있었다. 안정화 기간 이후 높이 1.1 m에서는 2017년 6월 25일부터, 4.3 m에서는 2017년 4월 20일부터 점진적으로 토압이 증가하는 경향을 보였다. 이는 교대 및 접속부에서 이루어진 거더 시공 등 후속 작업에 의한 영향으로 판단된다.

Fig. 8은 높이 1.1 m의 수평토압의 시간에 따른 변화와 같은 기간 측정한 교대의 교축방향 경사를 나타낸 그래프로 토압과 경사의 변화를 비교해 보면 2017년 2월 10일 이후부터 수평토압과 교축방향 경사의 변화 패턴이 유사한 것을 알 수 있다. 이로부터 뒤채움부의 안정화 이후부터는 상재하중의 증가가 수평토압의 증가와 연동되어 교대 경사 변화에 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

Fig. 8. Horizontal Earth Pressures and Inclination of Abutment Over Time

Fig 9에서는 높이 별 현장 계측 수평토압 변화를 내부마찰각 35°, 40°, 50°에 대한 Rankine 주동토압과 비교하였다. 현장여건상 뒤채움의 높이가 교대 최상부까지 도달하고 강화노반이 시공되어 최상부의 토압측정이 가능한 2017년 8월 30일부터 궤도 시공 완료 후 2개월 경과시점인 2018년 2월 27일까지 계측을 실시하였다. Rankine 주동토압 산정 시 뒤채움재 단위중량 20 kN/m³과 궤도하중을 고려하였다.

Fig. 9. Horizontal Earth Pressures Depending on Heights

높이 1.1 m에서 계측된 최소 수평토압은 24.75 kPa, 최대 수평토압은 36.63 kPa로 내부마찰각 35°~50°의 Rankine 주동토압 범위 값을 보였다. 높이 4.3 m에서의 수평토압은 최소 7.55 kPa, 최대 9.45 kPa로 내부마찰각 50°의 Rankine 주동토압보다 작은 값을 보였다. 높이 7.5 m에서의 계측 수평토압은 최소 3.53 kPa, 최대 5.66 kPa로 내부마찰각 35°~50°의 Rankine 주동토압 범위 값을 보였다. 높이 4.3 m를 제외하면 전체적으로 시간경과에 따라 수평토압이 증가하는 경향을 보였다.

계측된 수평토압을 Rankine 주동토압으로 내부마찰각을 역산한 결과, 38°~58°의 범위로 넓게 분포되는 것을 알 수 있었다. 역산된 내부마찰각의 평균값은 46°로, 설계에서 사용하고 있는 내부마찰각인 35° 보다 11° 큰 값을 나타냈다. 이와 같이 큰 차이가 발생한 이유는 여러 가지로 추정할 수 있으나, 시멘트 처리된 자갈의 안정화로 인한 수평토압 저감이 주요 원인인 것으로 판단된다.

현장 계측을 통하여 기존 연구결과와 유사하게 시멘트 처리된 자갈의 내부마찰각 상승효과를 확인할 수 있었으며, 시멘트 처리된 자갈의 현장 시공 품질 균일화 필요성 및

설계 내부마찰각의 상향 조정을 통한 경제적인 교대 설계의 가능성을 확인할 수 있었다.

3.2 교대 경사 및 침하

Fig. 10은 시공 중 교대 경사를 장기 계측한 결과이다. 교축방향 경사는 뒤펅치 시공 중 및 안정화 기간 초기에는 (-)방향으로 경사가 발생하지만 2017년 2월 10일 이후 (+)방향으로 경사가 역전하였다. 이는 초기에는 뒤펅치 높이에 따라 수평토압에 의한 (-)경사가 발생하였으나 이후 뒤펅치 안정화 및 시멘트 처리된 자갈이 양생되면서 수평토압이 교대 경사 발생에 영향을 거의 미치지 않는 것(+)으로 판단되었다. 이후 거더 시공 시 교대 경사에 큰 영향을 미치지 않았으나, 강화노반층과 및 궤도 시공 시 상재하중 증가에 의한 수평토압 증가로 교대는 다시 (-)경사를 보였다. 교축직각방향 경사는 뒤펅치 시공 후 안정화 기간 초기에는 0.02~0.05°의 작은 변화를 보였으나, 이후 거더 시공 시점까지 0.11°까지 크게 증가하였다. 이는 시공을 위한 진입로(Fig. 11)인 토사 법면이 교대 좌측에 형성되어 교대 좌우측 작용 하중차이가 발생할 수 있는 구조가 그 원인으로 예측되었다.

Fig. 10. Changes of Inclination of Abutment Over Time

Fig. 11. Construction Site View of Abutment

Fig. 12는 시공 중 및 시공 후 교대에서 발생한 침하를 계측한 결과이다. 계측 초기에는 큰 변화가 없었으나 거더 시공 이후 하중 증가에 의하여 중앙은 0.1 mm에서 1.8

mm로, 좌측은 0.8 mm에서 2.4 mm로 침하가 증가하였다. 이후 궤도 시공에 의한 상부하중 증가로 중앙과 좌측에서 최대 3.7 mm, 4.3 mm의 침하가 발생하였다. 전체적으로 좌측에서의 침하가 더 크게 발생하였는데, 이는 교대 경사 계측 시 교축직각 방향에서 반시계방향으로의 경사 발생이 그 원인으로 판단되었다. 발생 교대 침하량은 말뚝 설계 연직변위 허용 기준인 25 mm(Korean Geotechnical Society, 2014) 이내의 값으로 구조적 안정성에는 문제가 없는 것으로 판단되었다.

Fig. 12. Settlements of Abutment

4. 결 론

오송 철도종합시험선로에서 16개월의 장기간에 걸친 수평토압, 침하 및 경사에 대한 계측을 통하여 시멘트 처리된 자갈로 뒤펅치된 교대 및 접속부의 시공 중 및 시공 후 거동을 평가하였다. 계측된 수평토압과 Rankine 주동토압을 비교 분석하여 일반적으로 교대 설계 시 사용되고 있는 내부마찰각 값의 적정성에 대하여 검토하였다.

- (1) 시멘트 처리된 자갈 뒤펅치부의 초기 시공 중 증가하는 수평토압은 재료의 안정화 및 양생기간 동안 36.7% 감소하였다. 이러한 현상은 높이가 낮고 구속압의 영향이 큰 위치에서 현저하게 발생하였다. 계측 토압으로부터 역산된 내부마찰각은 38~58°의 범위로 넓게 분포하고 평균값은 46°로 교대 설계 시 적용하는 내부마찰각보다 11° 높은 값을 보였다. 따라서, 시멘트 처리된 자갈의 현장 시공품질 편차를 줄일 수 있다면, 설계 수평토압 산정을 위한 내부마찰각 값을 35° 이상으로 상향 조정하여 보다 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단되었다.
- (2) 교대 교축방향 경사는 시공기간 중 경사가 -, 0, -로 역전하였다. 초기에는 뒤펅치 증가에 따라 수평토압에 의한 (-)경사가 발생하였으나 이후 뒤펅치 안정화 및 시멘트 처리된 자갈이 양생되면서 수평토압이 교대 경사 발생에 영향을 거의 미치지 않았다(0). 이후 강화노반층과 및 궤도 시공 시 상재하중 증가에 의한 수평

토압 증가로 (-)경사를 보였다. 교대 교축직각방향 경사는 뒤채움 시공 후 안정화 기간 초기에는 $0.02^{\circ}\sim 0.05^{\circ}$ 의 작은 변화를 보였으나, 거더 시공 시점까지 0.11° 까지 크게 증가하였다. 따라서, 거더 시공 외에도 교대 주변 법면시공 등 작업 시의 하중 변화가 교대 거동에 영향을 미칠 수 있으므로 시공 중 주의가 필요할 것으로 판단되었다.

- (3) 시공 중 및 시공 후 교대 침하하는 거더 및 궤도 시공 등 상부하중 증가에 따라 주로 발생하였다. 발생 교대 침하량은 말뚝 설계 연직변위 허용 기준인 25 mm 이내의 값을 보여 구조적 안정성을 확보한 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요연구사업의 연구비 지원(“도심지 철도 선로법면 제거를 통한 용지 활용 기술개발” 연구사업)에 의해 수행되었습니다.

References

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.

KR (Korea Rail Network Authority). (2011). *Railway construction specifications for roadbed*.

Korean Geotechnical Society. (2014). *Structural foundation design criteria*.

Omae, S., Sato, N., and Oomoto, I. (2003). Dynamic properties of CSG. *Proceedings of 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams*, Madrid, Spain, pp. 511-518.

Yoo, C.H., Choi, C.Y., Yang, S.B. and Park, Y. G. (2016). Comparison of construction cost and external stability of railway abutment wall with friction angle of backfill materials. *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 15, No. 3, pp. 67-76.

<i>Received</i>	■ June 29, 2018
<i>Revised</i>	■ July 4, 2018
<i>Accepted</i>	■ July 29, 2018