온도변화에 따른 지하철 터널의 콘크리트 라이닝 거동

Concrete Lining Behaviors of Subway Tunnels according to Temperature Variations

유지형 · 이승원 · 김대성*

Ji-Hyeung Yoo · Seung-won Lee · Dae-Sung Kim

Abstract In this study, the behavior of urban subway tunnels is measured using instrumentation sensors installed in the lining concrete inside subway tunnels in order to analyze their behavior according to temperature variations. It is observed that the stresses of the concrete lining, tunnel convergence, and cracks change according to the temperature variations. However, the crack deformation differs depending on the size and status of the crack. In addition, this study proposes a correction formula for the lining stress and tunnel convergence through numerical analyses of the concrete lining according to the temperature variations. The results of this research can be used in the tunnel maintenance considering the tunnel behavior depending on the temperature variations in the tunnel.

Keywords : Subway tunnel, Temperature variation, Behavior measurement, Maintenance

초 록 본 연구에서는 도심지 지하철 터널의 콘크리트 라이닝에 계측센서를 설치하여 터널 내부의 온도변화에 따른 콘크리트 라이닝의 거동을 분석하였다. 계측결과, 터널 내부의 온도변화에 따라 콘크리트 라이닝의 응력과 내공변위, 균열이 변화하는 것을 알 수 있었다. 특히 균열의 경우, 온도변화에 따라 수축과 팽창이 이루어지고 있으나 균열의 크기와 상태에 따라 변화의 폭이 다른 것으로 나타났다. 또한 온도변화에 따른 콘크리트 라이닝의 수치해석을 통하여 터널 내부 온도변화에 따른 콘크리트 라이닝 응력과 내공변위의 보정식을 제안하였다. 본 연구 결과는 도심지 지하철 터널 내부의 온도변화에 따른 거동 파악 및 온도변화를 고려한 터널의 유지관리에 크게 활용될 것이다.

주요어 : 지하철터널, 온도변화, 거동계측, 유지관리

1. 서 론

산업의 발달로 인하여 도시의 성장이 가속화되면서 도시가 점차 거대화되어 교통망의 확충에 대한 문제가 대두되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 노력의 일환으로 도심지에 터널을 건설하여 도시철도 및 도로 등으로 운영되고 있다. 일반적으로 터널은 외부의 온도변화에 따른 영향을 적게 받는다. 그러나 최근 지구 온난화에 따른 이상기온 현상에 의해 동절기와 하절기의 온도차가 커짐으로 외부 온도변화에 따른 터널 내부의 온도변화 또한 커짐을 알 수 있다[1]. 본 연구에서는 기 운영 중인 도시철도 지하철 터널 내부의 온도변화에 따른 콘크리트 라이닝의 거동을 계측하고, 수치해석을 통하여 터널 내부의 온도변화에 따른 거동을 분석하여 터널의 유지관리에 활용하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 도심지 터널 유지관리를 위한 계측

2.1 현장개요

대상현장은 ○○현장의 기초 구조물 설치 구간이 기존 운영 중인 도시철도 터널에 인접하여, 기초 시공 전·후 터널에 미치는 영향을 파악하기 위하여 터널 내에 계측센서를 설

Fig. 1 Site location

*Corresponding author.

Tel.: +82-53-600-5470, E-mail : kimds0124@naver.com

©The Korean Society for Railway 2014

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.6.410>

치하여 기초 시공에 따른 터널의 거동 분석 및 시공 후 유지관리를 목적으로 계측관리를 수행하였다[2]. Fig 1은 대상 현장의 위치를 나타내고 있다.

2.2 터널 유지관리 계측

2.2.1 계측항목 선정

터널에서 유지관리 계측은 터널 구조물 완공 후 공용기간 중에 굴착면 주변지반의 변화 등으로 발생하는 토압 및 수압의 변화와 콘크리트 구조물의 변화양상, 환경조건 등을 측정하여 터널 구조물의 안정성을 확인하는데 있다[3]. 본 현장의 경우 기 운영 중인 도시철도 지하철 터널 인접구간 기초 설치로 인한 도시철도 터널에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Table 1과 같이 계측항목을 선정하였다.

Table 1 Selection of measurement items

Measurement items	Instrumentation	Contents
Crack displacement	Crack gauge	Tunnel crack width
Concrete lining stress	Strain gauge	Tunnel lining stress
Convergence	Cross section convergence extensometer	Tunnel 2D convergence

2.2.2 계측센서 설치 및 자동화계측

계측센서는 2012년 2월 25일부터 3월 2일까지 7일간에 걸쳐 지하철 터널의 콘크리트 라이닝에 균열계 3개소, 응력계 3개소, 전단면 내공변위계 1단면을 설치하였으며, 자동계측 시스템을 이용하여 3월부터 10월까지 매1시간 간격으로 계측데이터를 수집하였다. Fig. 2는 계측센서 설치 단면도이며, Fig. 3은 계측센서 설치 위치도, Fig. 4는 설치된 계측센서의 전경을 보여주고 있다.

Fig. 2 Measurement sensor mounting section

Fig. 3 Measurement sensor installation location

Fig. 4 Measurement sensor installation foreground

2.3 계측결과 및 분석

기 운영 중인 도시철도 터널에 인접한 기초의 시공으로 인하여 터널에 미치는 영향을 파악하기 위하여 터널 내에 계측센서를 설치하여 실시간 자동계측을 수행하였다. 터널 인접 기초의 시공은 4월에 완료된 상태이며, 기초 시공 완료 후 지속적인 유지관리계측을 수행하였다. Fig. 5부터 Fig. 7까지는 각각의 센서에서 측정된 결과를 보여주고 있다.

Fig. 5는 콘크리트 라이닝 응력을 측정한 결과로 천단에

Fig. 5 Concrete lining stress measurement results

Fig. 6 Crack gauge measurement results

Fig. 7 Convergence measurement results

설치된 응력계의 경우 온도가 상승함에 따라 응력이 (+, 인장)방향으로 점진적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 하행의 경우 천단과 반대로 (-, 압축)방향으로 점진적으로 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 상행에 설치된 응력계는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. Fig. 6은 균열계 측정결과로 터널의 온도가 상승함에 따라 폭이 점차적으로 감소하다가 온도가 감소함에 따라 균열폭이 회복되는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 전단면 내공변위계로 측정된 천단부와 최대변위 발생지점을 나타낸 것으로 내공변위계 설치 후 약 4개월간 계측 후 계측기 문제로 인하여 계측을 종료하였다. 그림에서 보는 바와 같이 터널의 온도 변화에 따라 내공변위가 점진적으로 커짐을 알 수 있다.

본 연구에서는 기 운영 중인 도시철도 터널 콘크리트 라이닝에 계측센서를 설치하여 유지관리 계측을 수행하였다. 계측결과, 도시철도 인접구간 기초 시공으로 인한 터널의 거동은 거의 없는 것으로 나타났다. 기초 시공 완료 후 지속적인 계측을 통해 터널 내부의 온도가 약 15°C 이상 상승하면서 계측결과와 변화가 매우 크게 나타나고 있어, 터널의 유지관리계측의 경우, 터널 내부의 온도변화를 고려한 계측관리에 대한 기준이 필요할 것으로 판단된다.

3. 온도변화에 따른 지하철 터널 콘크리트 라이닝 구조해석

3.1 해석개요

터널의 콘크리트 라이닝은 쾌적한 터널 내 공간을 보장하고 터널 완공 후 시간경과에 따른 지반의 크립 현상 또는 외적인 변화요인에 의해 발생할 수 있는 압반 내에 응력 재분배로 인한 하중 및 온도변화에 따른 신축거동 등을 지지함으로써 터널의 안정성을 유지하도록 하는데 목적이 있다 [4]. 본 연구에서는 온도에 따라 콘크리트 라이닝에 작용하는 하중이 상이하므로 터널 내부의 온도를 변수로 두고 온도변화에 따른 콘크리트 라이닝의 거동을 해석하였다.

3.2 콘크리트 라이닝 구조해석

구조물의 모델링은 콘크리트 라이닝 중심축 절점을 직선으로 연결하여 구성하였으며, 곡선형태의 콘크리트 라이닝을 직선요소로 모델링함에 따라 발생하는 오차를 줄이기 위하여 요소의 최대길이인 1m를 초과하지 않도록 하였다. 라이닝은 측벽하부까지 모델링 한 후 하부 경계조건은 힌지로 수직 및 수평변위를 구속하였다. 또한 지반반력계수는 Wolfer의 공식을 이용하였으며, 터널 주변의 지반이완하중은 지반조사 자료를 토대로 Rose에 의해 수정된 Terzaghi의 압반하중 분류에서 심한 블록상, 균열상을 적용하여 해석을 수행

Fig. 8 Analysis of tunnel cross-section

Fig. 9 Analysis of tunnel cross-section modeling

하였다. 해석에 사용된 지반정수 및 콘크리트 라이닝 재료의 물리적 특성은 지반조사 자료 및 기존 설계자료를 활용하였다. 해석프로그램은 범용 구조해석 프로그램인 STRAND7 Release 2.3.6을 이용하였으며, 해석은 터널 내부의 온도를 변수로 +5°C~+30°C까지 5°C씩 온도를 증가시켜 해석을 수행하였다. Fig. 8은 해석대상단면을 보여주고 있으며, Fig. 9는 모델링된 해석 단면을 보여주고 있다.

3.3 해석결과 및 분석

본 연구에서는 터널 내부의 온도변화를 변수로 콘크리트 라이닝의 구조해석을 실시하였다. Fig. 10은 온도변화에 따른 계측센서 설치 위치에 대한 콘크리트 라이닝의 응력해석 결과를 보여주고 있으며, Fig. 11은 온도변화에 따른 내공변위 위계 설치 위치별 변위 해석 결과를 보여주고 있다. 구조해석 결과, 터널 내부의 온도변화에 의한 콘크리트 라이닝의 응력과 내공변위가 온도변화에 영향을 받는 것으로 나타났다.

또한 해석 결과를 토대로 터널 내부의 온도 변화량과 콘크리트 라이닝의 응력 변화량, 그리고 내공변위의 변화량을 이용하여 해석결과를 분석하였다. Fig. 12는 온도변화에 따른 콘크리트 라이닝 응력변화를 나타낸 것으로 온도가 25°C 증가할 때, 1.77MPa의 응력의 변화를 보였다. 그리고 Fig. 13은 온도변화에 따른 내공변위의 변화를 나타낸 것으로 온

도가 25°C 증가할 때, 0.2mm 정도의 변위의 변화를 보였다. 따라서 계측 수행시 온도의 영향을 고려한 계측결과 값의 보정이 필요하다. 본 연구에서는 구조해석 결과를 토대로 터널 내부의 온도변화에 따른 콘크리트 라이닝 응력 변화량과 내공변위 변화량을 이용하여 온도보정 선형식을 다음과 같이 제안한다. 식(1)은 온도변화에 따른 콘크리트 라이닝 응력 보정식이며, 식(2)는 온도변화에 따른 콘크리트 라이닝 천단변위에 대한 보정식이다.

$$\Delta f_c = 0.071 \times \Delta T \quad (1)$$

$$\Delta f_s = 0.065 \times \Delta T$$

$$\Delta d_c = 0.082 \times \Delta T \quad (2)$$

여기서, Δf_c 는 천단에서 콘크리트 라이닝 응력 보정값이며, Δf_s 는 콘크리트 라이닝 중심에서 수평으로 교차되는 위치의 콘크리트 라이닝 응력 보정값이다. 그리고 Δd_c 는 천단에서 내공변위 보정값이며, ΔT 는 초기온도와 현재온도의 차이이다.

3.4 현장계측결과 보정

구조해석 결과를 토대로 도출된 보정식을 이용하여 콘크리트 라이닝 응력과 내공변위를 보정한 결과는 다음 Fig. 14

Fig. 10 Concrete lining stress analysis results

Fig. 12 Concrete lining stress variation vs. temperature

Fig. 11 Convergence analysis results

Fig. 13 Convergence variation vs. temperature

Fig. 14 Correction of the concrete lining stress measurement results.

Fig. 15 Correction of the convergence measurement results.

와 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 14에서 보는 바와 같이 콘크리트 라이닝 응력의 경우 보정전과 보정후 상당한 차이를 나타내고 있어 온도보정을 필히 수행하여야 될 것으로 판단되며, Fig. 15에서 보는 바와 같이 내공변위의 경우 온도 보정으로 인한 변화가 크지 않은 것으로 나타났다.

3. 결 론

본 연구에서는 기 운영 중인 도시철도 터널에 인접한 기초의 시공으로 인하여 터널에 미치는 영향을 파악하기 위하여 터널 내에 계측센서를 설치하여 기초 시공 전·후의 터널의 유지관리 계측을 수행하였다. 계측결과 분석을 통하여 도시철도 인접 기초 시공으로 인한 터널의 거동은 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 기초 시공 완료 후 지속적인 계측을 통해 터널 내부의 온도가 약 15°C 이상 상승하면서 계측결과와 변화가 매우 크게 나타나고 있어, 터널의 유지관

리계측의 경우, 터널 내부의 온도변화를 고려한 계측관리에 대한 기준이 필요할 것으로 판단된다. 또한 터널 내부의 온도변화에 대한 콘크리트 라이닝에 미치는 영향을 파악하기 위하여 온도변화를 변수로 콘크리트 라이닝의 구조해석을 실시하였다. 구조해석 결과, 터널 내부의 온도변화에 의한 콘크리트 라이닝의 응력과 내공변위가 온도변화에 영향을 받는 것으로 나타났으며, 구조해석 결과를 토대로 터널 내부의 온도변화에 따른 콘크리트 라이닝 응력 변화량과 내공변위 변화량을 이용하여 온도보정 선형식을 제안하였다. 제안된 보정식을 이용하여 계측결과를 보정한 결과, 콘크리트 라이닝 응력의 경우 보정전과 보정후 상당한 차이를 나타내고 있어 온도보정을 필히 수행하여야 될 것으로 판단되며, 내공변위의 경우 온도 보정으로 인한 변화가 크지 않은 것으로 나타났다.

References

- [1] S.W. Lee, J.H. Yoo, D.S. Kim, M.G. Kang (2012) Behavior measurement according to the temperature variation inside the urban subway tunnel, *2012 Fall Conference of Korean Society for Railway*, pp. 1096-1101.
- [2] DOOSAN E&C (2012) Dongdaegu station bridge repair exchange and extension construction urban rail 1st tunnel measurement report, Daegu metropolitan city.
- [3] J.T. Woo (2008) *Construction Measurement Engineering*, Goomibook, Seoul, pp. 760-763.
- [4] J.T. Woo, S. Lee (2002) The mechanical characteristics of subway tunnel for maintenance monitoring, *Journal of Korea Society of Civil Engineering*, 22(1), pp. 89-97.

접수일(2014년 9월 4일), 수정일(2014년 9월 22일),
게재확정일(2014년 9월 27일)

Ji-Hyeung Yoo: jhyoo@kiu.ac.kr

School of Construction Engineering, Kyungil University, 50 Gamasil-gil, Hayang-up, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do 712-701, Korea

Seong-Won Lee: swlee@kbu.ac.kr

Department of Construction and Environmental Design, Kyungbuk University, 425 Kyungbukdae-ro, Jinjeum-up, Namyangju-si, Gyeonggi-do, Seoul 472-948, Korea

Dae-Sung Kim: Kimds0124@naver.com

School of Construction Engineering, Kyungil University, 50 Gamasil-gil, Hayang-up, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do 712-701, Korea