

교차터널 시공 시 도시철도 지하구조물 안정성 평가

Stability Assessment for Underground Structures of Urban Railways during Intersection Tunnel Construction

이상승*, 박영곤**, 이성진**, 김명재*, 전상수*†

Sang-Seung Lee*, Young-Kon Park**, Sung-Jin Lee**, Myung-Jae Kim*, Sang-Soo Jeon*†

Abstract Cross shape intersection tunnels have been constructed especially at transfer station of urban railway. Construction of buildings nearby the station has been demanded because of both highly floating population and geological advantage. Construction of intersection tunnel and buildings caused negative effects on the stability of existing urban railway structures due to its deformation induced by redistribution of ground stress. Since damage of underground structures in urban railway induces a lot of life loss, the stability of underground structures should be carefully examined. In this study, a three-dimensional finite difference model using the commercial program FLAC3D is adopted to estimate the stability of underground structures of existing tunnel as intersection tunnel under the tunnel is constructed and the superstructure loading on ground surface is applied. Numerical results show a large deformation at the crown and inner section of the existing tunnel and a large vertical displacement of track on roadbed.

Keywords : Urban railway, Intersection tunnel, Superstructure, Numerical analysis, Stability

초 록 도시철도 환승역의 경우 상·하부로 엇갈려 시공되는 十 자형 교차터널이 상대적으로 많이 시공되고 있으며 환승역 인근 지역은 높은 인구 유동성과 지리적 이용가치로 인하여 신규 구조물이 지속적으로 시공되고 있다. 교차터널 및 신규 구조물 시공은 지반 응력을 재분배하여 기존 도시철도 구조물의 변형을 초래하고 안정성에 부정적 영향을 미치게 된다. 도시철도 지하구조물은 구조물 특성상 사고 발생 시 수많은 인명피해를 야기 할 가능성이 크기 때문에 반드시 안정성 확보가 이루어져야 하는 시설물이다. 따라서 본 연구에서는 삼차원 유한차분해석 프로그램 FLAC3D를 이용, 지표면 상부구조물 하중이 재하 된 경우 도시철도 하부 교차터널 시공에 따른 기존 도시철도 구조물의 안정성 평가를 수행하였다. 수치해석 결과 교차터널 시공에 의한 터널 구조물의 천단 및 내공변형과 노반에 시공된 궤도의 수직 변형이 크게 발생하는 것으로 나타났다.

주요어 : 도시철도, 교차터널, 상부구조물, 수치해석, 안정성

1. 서 론

도시철도는 상업 및 주거시설 등 인구 밀집 지역의 지하 공간을 효율적으로 이용할 수 있는 구조물로서 수도권 및 광역시를 중심으로 건설되고 있으며 인구증가로 인하여 신규 노선

† 교신저자: 인제대학교 공과대학 토목도시공학부(ssj@inje.ac.kr)

* 인제대학교 공과대학 토목도시공학부

** 한국철도기술연구원

증설이 이루어지고 있는 추세이다. 그 중 도시철도 이용자의 이동을 편리하게 하기 위하여 인구 유동이 활발하고 접근성이 높은 지역에 시공되는 환승역은 지리적 특성상 주변 지역의 토지 이용 가치가 높아 고층 구조물들이 연속적으로 시공되고 있다. 이러한 교차 터널 및 신규 구조물 시공은 기존 도시철도 지하구조물에 안정성을 저해시키며 천단 및 내공변형과 지중변위, 구조물 내에 시공된 궤도의 변형인 궤도틀림을 초래한다. 터널 구조물의 변형계측 결과는 역학적 안정성을 신속하고 객관적으로 판단할 수 있는 요소이며 궤도틀림은 차량 진동, 레일 마모 등을 발생시키는 중요 원인으로 터널 변형 계측과 함께 계획적인 점검 및 보수가 반드시 이루어져야 하는 중요한 항목이다. 따라서 본 연구에서는 삼차원 유한차분해석 FLAC3D를 이용하여 국내·외 터널 변위 기준을 바탕으로 제정한 변위 기준과 국내 도시철도 운용 기관의 궤도틀림 기준을 적용한 안정성 평가를 실시하였고 도시철도 구조물과 인접지역에 설치되어야 할 최적 계측기 방안을 제시하였다.

2. 터널 계측 기준

국내 터널 계측관리 기준의 경우 법령으로 제도화되어 있지 않은 실정이며 시공하는 터널의 크기와 시공 공법, 지반 특성 및 국·내외 관리지침 사례 등을 바탕으로 제정하고 있다. 그러므로 본 연구에 적용된 터널의 크기와 지반조건을 고려, 한국철도시설공단 철도 설계지침 및 편람에 제시되어 있는 선진 국외 계측기준[1]과 서울메트로 3, 4 호선 구간 계측관리 기준[2] 등을 바탕으로 Table 1과 같은 계측기준을 제정하였다.

Table 1 Tunnel measurement standard

| Measurement items | Convergence | Crown settlement | Underground displacement |
|---------------------------|-------------|------------------|--------------------------|
| Measurement standard (mm) | 15.0 | 15.0 | 7.0 |

3. 궤도틀림

궤도틀림(Track irregularity)은 열차의 운행 및 구조물의 변형으로 인하여 차량의 주행면에 발생하는 부정합을 뜻한다. 궤도틀림은 궤간틀림, 줄틀림, 면틀림, 수평틀림, 평면성틀림으로 구성되어 있다. 궤간틀림은 좌·우 레일간격의 차이를 말하고 줄틀림은 레일의 횡 방향 굴곡 차를 의미한다. 면틀림은 한쪽 레일의 종 방향 높이 차를 의미하며 수평틀림은 좌·우 레일의 높이 차를 뜻한다. 끝으로 평면성틀림은 궤도의 일정 간격에서 수평틀림 변화를 의미한다[3]. 본 연구에 적용된 궤도틀림 안정성 검토 기준은 국내 도시철도 주요 운용기관인 서울메트로, 서울도시철도공사, 대전도시철도공사, 대구도시철도공사, 광주도시철도공사 그리고 부산교통공사에서 제정한 궤도틀림 기준[4-9]을 적용하였다.

4. 수치해석

4.1 수치해석 조건

본 연구에서는 상부구조물 하중 재하 및 교차터널 시공 시 기존 도시철도 지하구조물의

안정성을 평가하기 위하여 유한차분해석 프로그램 FLAC3D를 이용하였으며 Mohr-Coulomb 파괴모델[10]을 적용하였다. 수치해석 모델의 크기는 폭 50m, 길이 50m, 깊이 51m이다. 기존 터널 천단부에서 지표면까지의 거리는 10m이며 하부터널은 기존 터널 노반 중심에서 10m의 이격거리를 두어 시공하였다. 지표면 상부구조물 하중 증가에 따른 구조물의 거동을 파악하기 위하여 터널 중앙부 144m² 면적에 층당 1.2t/m²의 하중을 적용, 20층 건물 하중(22.4 t/m²(Case I)), 30층 건물 하중(33.6 t/m²(Case II)), 40층 건물 하중(44.8 t/m²(Case III))을 적용하여 상재하중 조건에 따른 총 3개 모델 수치해석을 진행하였다. 수치해석 모식도는 Fig. 1에 나타내었고 삼차원 수치해석 모델은 Fig. 2와 같다.

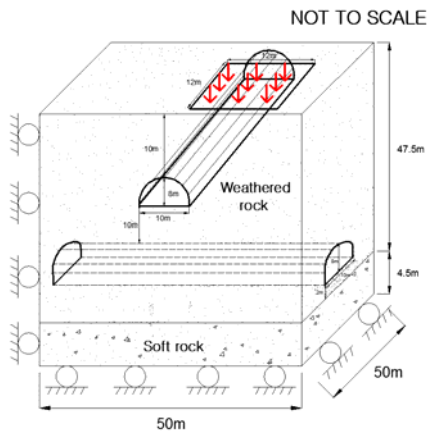


Fig. 1 Configuration of numerical analysis

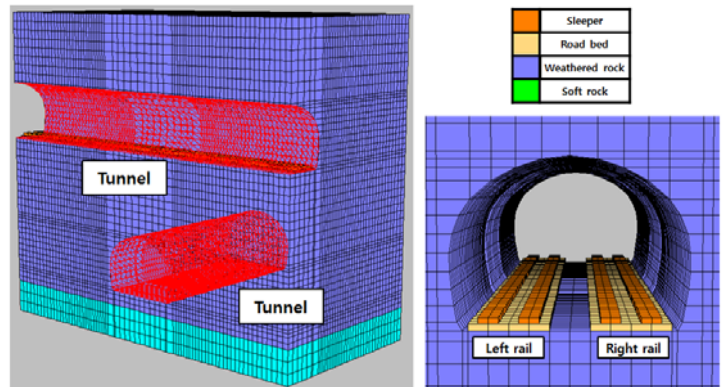


Fig. 2 Three-dimensional view of numerical analysis

4.2 터널 구조물 및 지반 특성

본 연구에 적용된 기존 및 신규 터널 구조물은 동일한 크기(D=10m)의 터널이며 터널 표준 시방서에 기재된 복선 터널[11]을 적용하였고 Table 2는 터널의 물리적 특성을 나타낸다. 본 연구의 지반은 풍화암, 연암으로 구성되어 있으며 물리적 특성은 대전 도시철도 1호선 00구간 현장 시료를 채취한 후 실내 시험을 통하여 산정된 물성[12]과 기존 문헌에 제시된 물성을 사용하였으며 Table 3과 같다.

Table 2 Physical properties of tunnel

| | Unit weight (t/m ³) | Elastic modulus (t/m ²) | Poisson's ratio (ν) | Thickness (m) |
|-----------------|------------------------------------|--|------------------------|------------------|
| Shotcrete | 2.55 | 2.2×10^5 | 0.23 | 0.3 |
| Concrete lining | 2.70 | 2.7×10^5 | 0.24 | 0.4 |

Table 3 Physical properties of soil

| | Unit weight (t/m ³) | Elastic modulus (t/m ²) | Poisson's ratio (ν) | Friction angle (°) | Cohesion (t/m ²) |
|----------------|------------------------------------|--|------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Weathered rock | 2.0 | 9,500 | 0.31 | 38 | 6.0 |
| Soft rock | 2.0 | 70,000 | 0.30 | 40 | 8.0 |

4.3 수치해석 결과

4.3.1 구조물 변형 분석

상부구조물 하중 재하 및 하부 교차터널 시공 시 기존 터널 및 주변지반의 변형을 파악하기 위하여 터널 구조물의 천단, 내공, 지중변형에 대한 변위량을 산정하였다. 본 연구에 시공된 터널은 아치형 복선 터널이고 천단 및 내공변위 측정 지점은 한국철도시설공단 철도 설계지침에 수록되어 있는 3축선 배치 형식을 적용하였다. 지중변위 측정 지점은 터널 외측 벽면에서 0.5D 이격하여 각기 다른 지점에서 계측된 변위량과 터널 벽체 변위와의 상대 변위를 바탕으로 산정하였다. 상부구조물 하중 재하 및 교차터널 시공 시 발생한 내공변위를 나타내는 Fig. 3 (a)를 살펴보면 구조물 하중이 재하 된 경우 Case I과 Case II가 각각 12.6mm, 13.5mm의 변위 발생, 가장 많은 변위가 발생한 Case III는 14.3mm의 변위가 발생 하였으나 내공변위 기준인 15mm를 초과하지 않는 것으로 나타났다. 이후 교차터널 시공 완료 후 Case I~III 모두 변위량이 증가하였고 Case III가 15.3mm의 변위가 발생하여 허용기준 15mm를 초과하는 것으로 나타났다. 천단 침하 변위를 나타내는 Fig. 3 (b)를 살펴보면 구조물 하중이 재하 되었을 경우 Case I이 14.6mm, Case II가 18.3mm, Case III가 20.7mm 발생 하여 Case II와 Case III가 허용기준 15mm를 초과하는 것으로 나타났으며 교차터널 시공이 완료된 후에는 Case I 또한 19.1mm 변위가 발생하여 Case I~III 모두 허용 기준 15mm를 초과하는 것으로 나타났다. 마지막으로 지중변위를 나타내는 Fig. 3 (c)를 살펴보면 구조물 하중 재하 시 Case I이 3.13mm, Case II가 3.29mm, Case III가 3.45mm의 변위가 발생하여 허용기준 7mm를 초과하지 않는 것으로 나타났으며 교차터널 시공이 완료된 후에는 Case I이 3.3mm, Case II가 3.5mm, Case III가 3.7mm가 발생하여 교차터널 시공으로 인해 변위량이 증가하였으나 마찬가지로 허용기준 7mm에 미치지 않는 것으로 나타나 매우 안전한 것을 알 수 있다. 구조물 하중으로 인한 각 변위 최대 증가율은 내공변위가 12.13%, 천단 침하가 29.28%, 지중변위가 9.30%이며 교차터널 시공으로 인한 각 변위의 증가량은 내공변위 10.79%, 천단 침하 26.31% 지중변위 9.52%인 것으로 나타나 대체적으로 상부구조물 하중이 증가할 경우 변위량이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

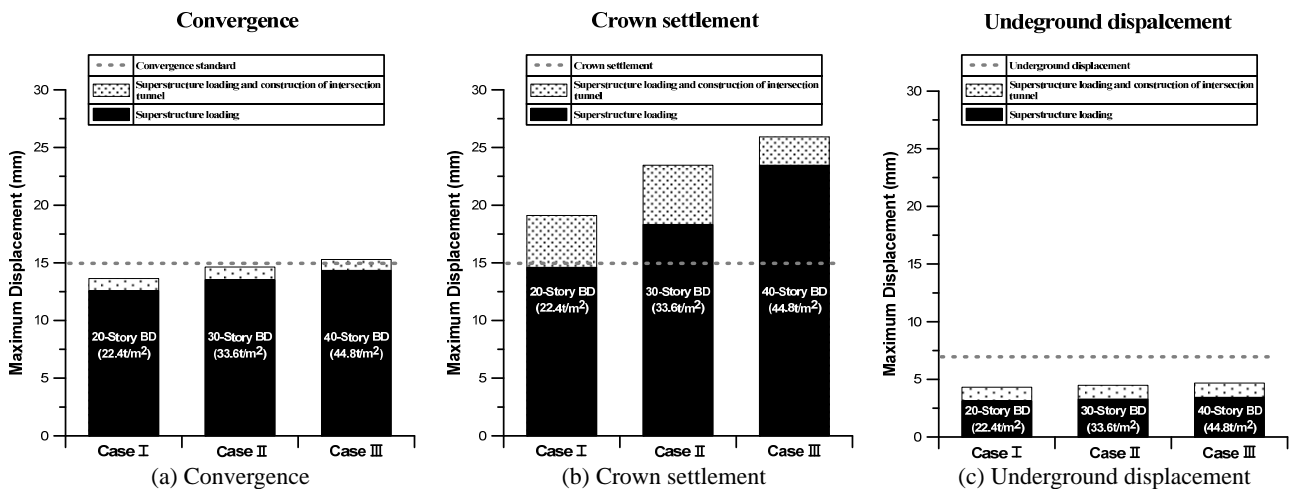


Fig. 3 Maximum displacement induced by applied superstructure loading and intersection tunnel construction

4.3.2 궤도틀림 변형 분석

상부구조물 하중 재하 및 하부 교차터널 시공구간은 기존 터널 중앙 상·하부 지점에서 발생하였다. 그러므로 두 가지 위험영향인자로 인한 궤도의 변형은 수직 방향으로 크게 발생하였으며 수평 방향 변형은 최대 2.5mm 이내로 발생한 것으로 나타나 수평 방향 변형으로 인하여 발생하는 궤간틀림과 줄틀림의 경우 매우 미소한 변위가 발생, 충분한 안정성을 확보한 것으로 나타났다. 상부구조물 하중 재하 및 하부 교차터널 시공 시 면틀림 변위를 나타내는 Fig. 4 (a)를 살펴보면 구조물 하중이 재하 되었을 경우 Case I 과 Case II가 허용기준 9mm를 초과하였고 Case III가 모든 도시철도 운용기관의 허용기준 15mm를 초과하는 것으로 나타났으며 교차터널 시공 후에는 Case I ~III 모두 변위가 증가하였고 Case II가 17.5mm의 변위가 발생하여 Case III와 마찬가지로 모든 도시철도 운용기관의 허용기준을 초과하는 것으로 나타났다. 수평틀림 변위를 나타내는 Fig. 4 (b)를 살펴보면 구조물 하중이 재하 된 경우 Case I ~III 모두 최소 허용기준 9mm를 초과하는 것으로 나타났으며 이후 교차터널까지 시공이 완료된 후에는 Case II와 Case III가 각각 13.1mm, 13.8mm의 변위가 발생하여 부산교통공사와 서울메트로 허용 기준인 13mm를 초과하는 것으로 나타났다. 마지막으로 평면성틀림의 변위를 나타내는 Fig. 4 (c)를 살펴보면 구조물 하중이 재하 된 경우, Case I 이 14.5mm의 변위가 발생, 최소 허용기준 13mm를 초과하였고 Case II와 Case III가 서울메트로, 광주도시철도공사 기준 15mm를 초과한 것으로 나타났다. 이후 교차터널 시공이 완료된 후 다른 궤도틀림과 마찬가지로 변위량이 증가하였으며 Case I 이 17.3mm의 변위가 발생, 허용기준 15mm를 초과하였으며 Case III는 20.7mm의 변위가 발생하며 모든 도시철도 운용기관의 허용기준을 초과하는 것으로 나타났다. 상부구조물 하중 증가로 인한 각 궤도틀림 변위 증가는 면틀림 35.2%, 수평틀림 7.3%, 평면성틀림 17.4%인 것으로 나타났으며 교차터널 시공으로 인한 최대 변위 증가는 면틀림 16.2%, 수평틀림 12.1%, 평면성틀림 12.4%인 것으로 나타나 터널변형과 마찬가지로 상부구조물 하중 증가 시 궤도의 변형이 더욱 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

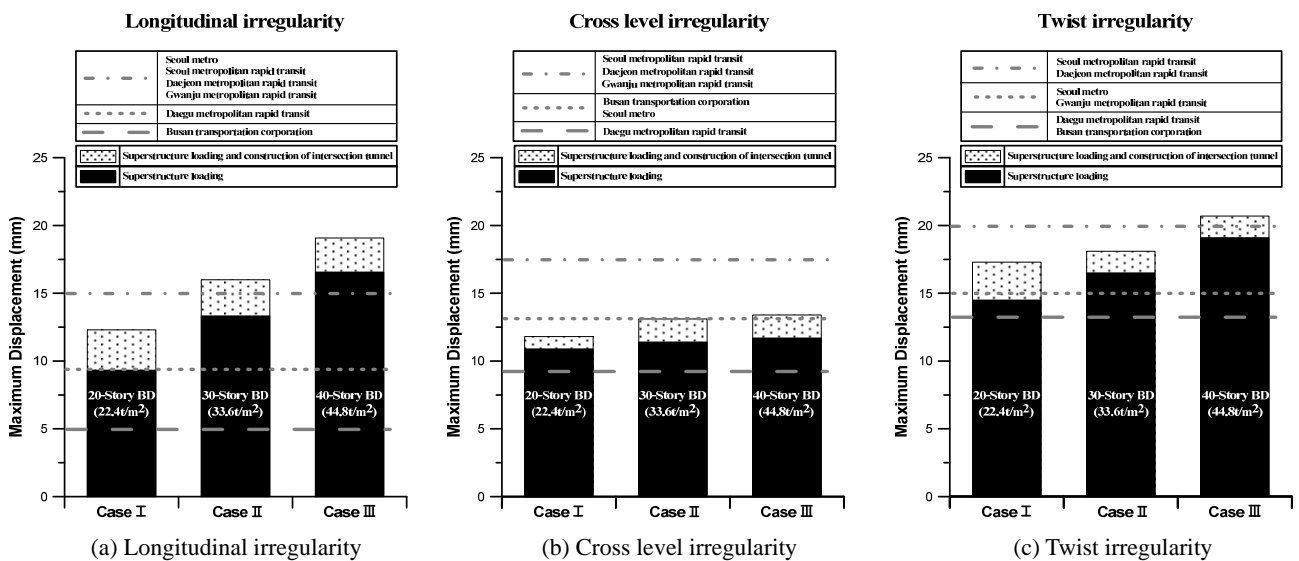


Fig. 4 Maximum displacement induced by track irregularity associated with superstructure and construction of intersection tunnel