

도시철도 인접지반 깊은 굴착 시 궤도 안정성 평가

전상수*, 이상승
인제대학교 토목도시공학부

Track Stability Assessment for Deep Excavations in Adjacent to Urban Railways

Sang-Soo Jeon*, Sang-Seung Lee

Department of Civil & Urban Engineering, Construction Technology Research Institute, Inje University

요약 국내 도시철도 노선은 이용자의 접근을 편리하게 하기 위하여 주거단지 및 도심지 인근 지역에 시공되는 사례가 많다. 도시 인구 증가로 인하여 교통망 확충과 재건축 등이 지속적으로 이루어짐에 따라 도시철도 인접 지역 굴착이 불가피하며 굴착 시 발생하는 지반 응력 및 지하수위 변화는 도시철도 궤도틀림을 유발한다. 이에 본 논문에서는 삼차원 유한차분 해석 상용프로그램 FLAC3D를 이용하여 도시철도 인접지반 대규모 굴착 시 지하수위에 따른 굴착 부 벽체 수평변위 및 배면 지반의 침하와 궤도틀림량 산정 후 이들의 상관관계를 분석하고 궤도틀림 및 지하 박스구조물 안정성 평가를 실시하였다. 그 결과 깊은 굴착 시 지하수위에 따른 궤간틀림은 매우 미소하게 발생하였으나 줄틀림 72.5%, 수평틀림 83.3%, 면틀림 61.9%, 평면성틀림 43.3%로서 상대적으로 큰 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 흙막이 벽체의 최대 수평 변위 및 벽체 배면 침하 차는 각각 65.1%, 21.4%가 발생하는 것으로 나타났으며 지하수위가 지표면에 위치한 경우 지하 박스구조물의 인장 응력이 허용 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 그러므로 도시철도 구조물에 인접하여 깊은 굴착이 시공된 경우 궤도틀림으로 인한 사고를 미연에 방지하기 위해 본 연구에서 수행한 삼차원 수치해석과 실시간 모니터링을 실시하는 것이 바람직하다.

Abstract Urban railway lines have been constructed adjacent to residential buildings and urban areas. The expansion of transportation networks and reconstruction of residential buildings in highly populated urban areas require deep excavations in areas adjacent to urban railways. Mobilized soil stresses and changes in the groundwater level induced by deep excavations results in track irregularities in urban railways. In this study, a three-dimensional finite difference model using the commercial program FLAC3D was adopted to estimate the horizontal displacements of earth retaining structures, settlements of backfill, the stability of track irregularity and underground box structure based on the criteria of each railway organization and its relationships. In deep excavations, a change in groundwater level induces relatively very small differences for track gauge irregularities, whereas relatively large differences for longitudinal irregularities of 72.5%, twist irregularities of 83.3%, cross level irregularities of 61.9%, and alignments of 43.3% were found to be the maximum differences when the horizontal displacement of earth retaining wall and settlement of backfill were 65.1% and 21.4%, respectively, because the groundwater level (GWL) on the ground surface-mobilized tensile strength of the underground box structure exceeds the allowable value. Therefore, three-dimensional numerical analysis was performed in this study. Overall, real-time monitoring should be carried out to prevent railway accidents in advance when a deep excavation adjacent to urban railway structures is constructed.

Keywords : Deep excavation, Numerical analysis, Stability assessment, Track irregularity, Urban railway

*Corresponding Author :Sang-Soo Jeon (Inje Univ.)

Tel: +82-10-9450-5450 email: ssj@inje.ac.kr

Received March 16, 2018

Accepted June 1, 2018

Revised April 18, 2018

Published June 30, 2018

1. 서론

도시 발전과 인구증가로 인하여 1970년대를 기점으로 새로운 교통수단의 필요성이 제기되었고 지하 공간을 효율적으로 사용할 수 있는 도시철도가 시공되기 시작하여 현재까지 운영되고 있다. 우리나라 도시철도 영업 궤도는 806.3km이며 추가 영업 궤도 연장 계획은 총 1,389.6km에 이르고 있어[1], 국민 생활과 국가 경제 운영에 중추적 역할을 하고 있다. 하지만 기존에 시공된 도시철도는 운영 기간에 비례하여 여러 가지 위험에 노출되어 있다. 특히 구 시설물의 철거 이후 이루어지는 재건축 시공 시, 기초 작업을 위한 굴착 공사는 지반 응력 및 지하수위를 변화시켜 도시철도 구조물의 침하와 용기를 초래하고 내부에 시공된 선로의 변형을 발생시키며 궤도틀림을 유발시킨다. 궤도틀림은 승차감 저하와 레일 마모를 발생시키며 차량 주행 안정성 감소의 주요 요인이 되므로 궤도틀림에 대한 안정성이 열차 운행에 차지하는 비율이 매우 높아 궤도틀림 관련 연구가 수행되고 있다[2]. 기존의 연구에서는 열차의 상호동적 거동을 분석하여 궤도틀림 발생 시 차량의 가속도가 증가할 경우 윤중 감소율과 자체 수직 진동 가속도 증가율[2], 프랑스 철도 검측차(Mauzin)와 국내 궤도틀림 검측차(EM-120)의 선형 검측차로 스펙트럼을 통한 국내 검측차의 성능[3], 과거 데이터 및 전문가 의견을 통합하여 분석할 수 있는 베이지안 방법론을 이용한 궤도틀림 진전을 분석을 통해 궤도품질지수 TQI(Track Quality Index)[4]를 규명하였으며, 국내 면틀림, 줄틀림 기준은 국외에 비해 엄격하게 설정되어 있으며 속도 대역별로 기준치 재검립이 필요함을 알 수 있다[5].

도심지 구조물 시공 시 개별요소법(Distinct element method)을 바탕으로 굴착 깊이, 암반종류, 절지조건에 따른 굴착 부 벽체에 발생하는 토압과 변위의 상관관계를 분석, 굴착 시공 시 지반 조건에 따른 적정 시공방법 제시[6], 연약지반 굴착 공사 시 압밀이 이루어진 연약지반이 상대적으로 평균 40% 작은 변위가 발생[7], 굴착 부 상부 벽체의 변위와 벽체 배면 침하 및 주변 구조물 변형 손상도가 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다[8]. 또한, 도시철도 시설물과 인접한 지반굴착 공사 시공 시 마이크로 시멘트를 적용한 보강 그라우팅 공법이 인접 구조물 안정화에 효과적임을 알 수 있다[9].

현재 열차 운행에 따른 궤도틀림 특성 및 기준 분석

그리고 굴착 시공으로 인한 벽체 및 인접 구조물 위험성 예측에 관한 연구가 활발하게 이루어졌으나 도시철도 인접지역 대규모 굴착 및 지하수위에 따른 궤도틀림, 굴착 부 벽체 및 배면 변위의 상관관계 분석에 관한 연구는 이루어지지 않았다. 그러므로 본 논문에서는 삼차원 유한차분 해석 프로그램 FLAC3D를 이용하여 국내 도시철도에 시공된 박스형 터널, 저진동 방진 궤도(Low Vibration Track (L.V.T.)), 굴착 현장에서 많이 사용하는 흙막이 벽체(토류벽, C.I.P, Strut)를 적용하여 도시철도 인접지반 대규모 굴착 시 다양한 지하수위에 따른 궤도틀림 및 박스구조물 안정성 평가와 굴착 부 벽체 수평 변위, 배면 침하의 상관관계를 분석하였다.

2. 궤도틀림

2.1 궤도틀림 정의

궤도틀림(Track irregularity)은 열차의 반복하중 및 구조물의 변형으로 인하여 궤도의 주행면에 발생하는 부정합을 의미한다. 궤도틀림은 크게 궤간틀림, 줄틀림, 면틀림, 수평틀림, 평면성틀림으로 구성되어있다. 궤간틀림은 궤도의 규정된 치수를 벗어나 있는 상태로서 좌우 레일 간격의 틀림이 발생한 것을 말하며 줄틀림은 궤간 측정 선에 있어서 레일 방향의 좌우 굴곡 차를 말한다. 면틀림은 한쪽 레일의 길이 방향에 대한 레일 면의 높이 차를 뜻하며 수평틀림은 레일 직각 방향의 레일면의 높이차를 말한다. 마지막으로 평면성틀림은 궤도의 일정 간격에서 수평 틀림 변화를 의미한다[10].

2.2 궤도틀림 측정 방법

국내 도시철도 운용기관은 콘크리트도상, 자갈도상에 관계없이 동일한 궤도틀림 검측방법을 이용하여 궤도틀림을 측정하고 있다. 궤도 검측에는 궤도 검측차를 이용한 차량 검측, 차량의 진입이 불가능하며 일부 짧은 구간에 대하여 실시하는 인력 검측 등 두 가지 방법이 있다. 인력 검측은 측정 인원이 10m의 궤도틀림 측정용 줄자를 이용해 각각의 궤도틀림 정의에 부합하는 변위를 직접 측정하는 방법이다. 인력 검측 방법은 측정 시간이 길다는 점과 인력 과다 소모 단점이 있다. 차량 검측은 관성법과 중앙중거법 두 가지 측정 방법이 있다. 관성법은 가속도를 이용하여 차체의 변위를 구하고 차체와 레일

의 상대 변위는 별도의 변위계로 측정 후 가산하여 궤도틀림을 구하는 방법이며 Fig. 1과 같다. 이 방법은 측정 열차의 주행속도가 빠른 경우 검측정확도가 낮은 것이 단점이나 검측 차량 한 대만으로 검측할 수 있으며 특별한 차체를 필요하지 않는 장점이 있다. 중앙중거법은 10m 검측 현을 지정한 뒤 현의 중앙과 양 끝단에 검측 점을 배치하여 중앙부에서 궤도 변위를 수집하는 방식이며 해당 방식은 복수 이상의 지점에서 레일 변위를 측정하기 때문에 대차 간격과 차체 제원 등이 검측 결과에 영향을 미칠 수 있는 단점이 존재하나 정확성이 우수하다는 장점이 있으며 Fig. 2는 중앙중거법을 이용한 궤도틀림 측정 방법을 나타낸다[11,12].

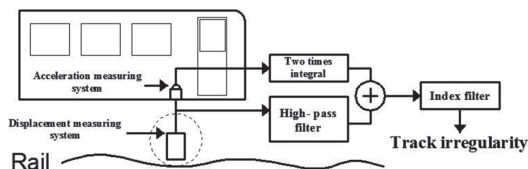


Fig. 1. Measurement of track irregularity using inertial method

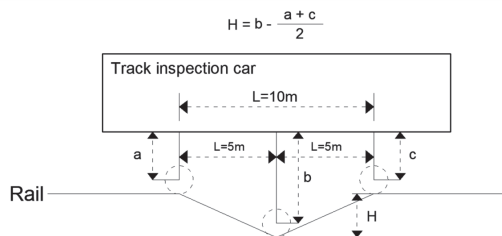


Fig. 2. Measurement of track irregularity using mid-chord offset method

2.3 궤도틀림 안정성 허용 기준

국내 도시철도 운용기관 중 일일 이용자 수가 높은 6

개 기관을 선정하여 각 기관에서 제정한 궤도틀림 기준을 바탕으로 궤도의 안정성을 검토하였다. Table 1은 서울메트로, 서울도시철도공사, 대전도시철도공사, 대구도시철도공사, 광주도시철도공사 그리고 부산교통공사의 궤도틀림 기준 중 본선 정적 구간에 대한 우선보수기준을 바탕으로 선정한 궤도틀림 기준을 나타낸다[13-18]. 우선보수기준이란 궤도틀림의 양이 현저하여 운행을 중지하고 수리 및 보수가 이루어진 이후 운행이 재개되어야 하는 단계를 의미하며 궤도틀림 발생 단계 중 가장 위험한 단계임을 알 수 있다. 기관마다 궤도틀림 기준 차이가 있으나 초기 제정 시 과거 철도청의 기준을 근간으로 하였고 각 운영기관이 위치하고 있는 지역의 지반조건 및 시공되는 구조물을 기초로 제정하였으므로 부산교통공사를 제외한 나머지 기관은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

3. 수치해석

3.1 수치해석 조건

본 연구에서는 도시철도 인접지반 깊은 굴착 시 깊은 굴착과 지하수위 변화에 따른 궤도틀림 안정성 평가를 실시하기 위하여 상용프로그램인 유한차분해석 프로그램 FLAC3D를 이용하였으며 Mohr-Coulomb 파괴모델을 적용하였다[19]. 수치해석 모델의 크기는 경계조건의 영향을 고려하여 폭 210m, 깊이 70m, 길이 50m 이며 굴착은 최대 구조물 상대 변위를 발생시키기 위하여 폭 20m, 길이 25m, 최대 깊이 38.6m의 크기로 시공하였다. 전체 해석 모델의 좌우 측면과 정면 및 후방은 수평 방향으로 구속하였으며 하부는 수직 방향으로 구속하였다. 굴착은 지하 박스구조물의 최대응력을 발생시키기 위해 풍화도 지반의 무지보 간격(2.0~6.5m)중 최대 간격에

Table 1. Stability criterion of track irregularity

	Track irregularity				
	Gauge (mm)	Longitudinal (mm)	Alignment (mm)	Cross level (mm)	Twist (mm)
Seoul metro	14.0	15.0	15.0	13.0	15.0
Seoul metropolitan rapid transit corporation	14.0	15.0	15.0	15.0	20.0
Dajeon metropolitan express transit corporation	14.0	15.0	15.0	15.0	20.0
Gwangju metropolitan rapid transit corporation	14.0	15.0	15.0	15.0	15.0
Daegu metropolitan rapid transit corporation	10.0	9.0	9.0	9.0	13.0
Busan transportation corporation	10.0	5.0	7.0	13.0	13.0

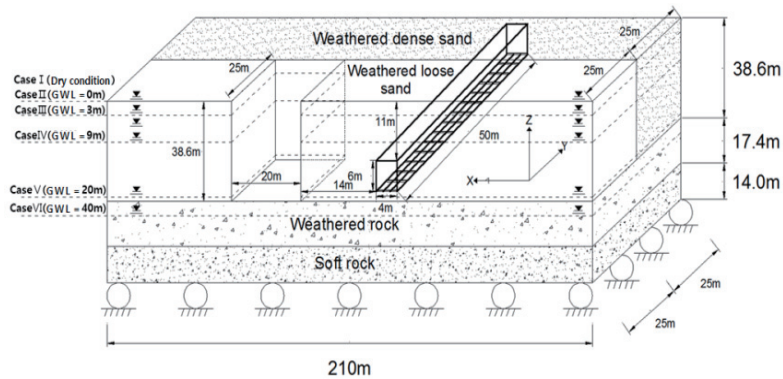


Fig. 3. Configuration of numerical analysis

속하는 6.4m를 적용, 6단계에 걸쳐 진행하였으며 벽체의 지중 근입비는 풍화토 평균 지중 근입 깊이(50~100cm)에 속하는 10%(64cm)를 적용하였다. 지하수위에 따른 굴착 부 벽체 및 배면, 궤도의 변형을 파악하기 위해 총 6가지 모델의 수치해석을 수행하였으며 지중에 지하수가 존재하지 않는 경우(Case I)와 지반 전체가 포화된 경우(Case II), 그리고 지표면 기준 3m(Case III), 9m(Case IV), 20m(Case V), 40m(Case VI) 하부에 지하수위가 위치한 경우의 수치해석을 수행 하였다. Fig. 3은 수치해석 모식도를 나타내며 Fig. 4는 삼차원 수치해석 모델을 나타낸다.

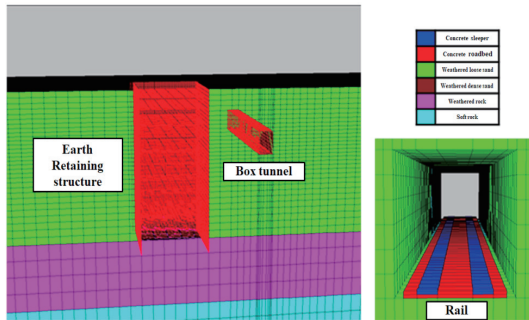


Fig. 4. Three-dimensional FLAC3D model

3.1.1 지반 특성

지반 구성은 연암, 풍화암, 느슨한 풍화토, 단단한 풍화토로 구성되어 있으며 지반 물성은 기존 문헌과대전도시철도 1호선 7공구 5구간의 현장 시료 실내 시험을 통하여 얻은 지반정수를 바탕으로 결정 되었다[20]. Fig. 5는 대전도시철도 TB-12 시추공의 지질 주상도를 나타내고 Table 2는 적용 지반 정수를 나타낸다.

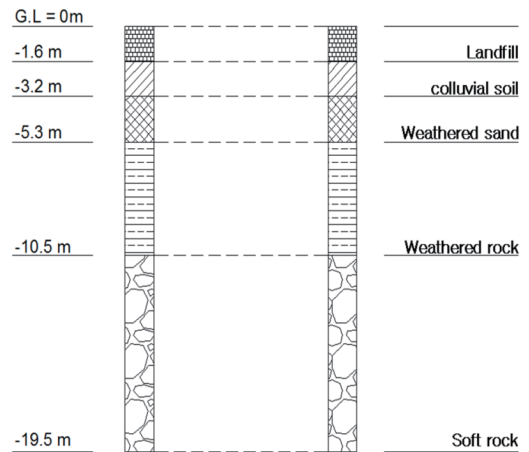


Fig. 5. Soil profiles

Table 2. Physical properties of soil

	Unit weight (kN/m ³)	Elastic modulus (kN/m ²)	Poisson's ratio (ν)	Friction angle (°)	Cohesion (kN/m ²)
Weathered loose sand	17.8	47,000	0.33	35	3.2
Weathered dense sand	17.9	71,000	0.33	37	3.4
Weathered rock	19.6	107,000	0.31	38	58.8
Soft rock	21.6	690,000	0.30	40	78.5

Table 3. Physical properties of structure

	Unit weight (kN/m ³)	Elastic modulus (kN/m ²)	Area (m ²)	Moment of inertia (m ⁴)
Earth retaining wall	76.5	2.05×10^8	8.36×10^{-3}	1.33×10^{-4}
C.I.P	24.5	1.96×10^7	1.26×10^{-1}	1.26×10^{-3}
Strut	76.5	2.05×10^8	1.20×10^{-2}	2.01×10^{-4}
Side wall of box tunnel	22.5	2.27×10^7	3.00×10^{-1}	2.25×10^{-3}
Top slab of box tunnel	22.5	2.27×10^7	1.00×10^{-1}	8.33×10^{-4}
Bottom slab of box tunnel	22.5	2.27×10^7	6.75×10^{-1}	2.56×10^{-2}
KS60 rail	76.0	2.05×10^8	7.74×10^{-3}	3.08×10^{-5}

3.1.2 구조물 특성

굴착 부 벽체의 토사가 무너지는 것을 1차적으로 방지하는 토류벽과 C.I.P는 H-pile 간격 1m, 형성두께는 40cm이며 흙막이 벽체의 변형을 압축력으로 지지하는 Strut는 1.6m 간격으로 설치하였다. 지중 박스형 터널은 폭 4m, 높이 6m, 길이 50m의 단방향 터널이며 굴착 부 벽체와는 14m, 지표면으로부터 터널 상부까지의 이격거리는 11m이다. 박스형 터널 내부에는 콘크리트 도상과 분리 매립하여 레일을 지지하는 저진동 방진 콘크리트 궤도인 L.V.T 궤도와 도시철도, 고속철도, 일반철도 등 모든 철도에서 사용 중인 KS60레일을 사용하였다. 흙막이 가시설과 박스형 터널, KS60레일은 Beam 요소를 사용하였으며 물리적 특성은 Table 3과 같다.

3.2 깊은 굴착으로 인한 흙막이 벽체 수평 변위 및 배면 침하

도심지 굴착 시 인접 지역에 위치한 구조물의 거동을 보다 효과적으로 예측하고 분석하기 위해서는 지반특성에 따른 흙막이 벽체의 변형과 벽체 배면의 침하 발생

양상을 파악하는 것이 중요하다. 흙막이 벽체 및 벽체 배면의 변형 원인은 크게 세 가지로 나뉜다. 첫 번째 원인은 굴착 부 벽체와 주변지반의 물리적 상호작용으로 인한 것이며 두 번째는 벽체의 자중 및 강성 등으로 인한 변형, 세 번째는 벽체의 이음부 및 틈을 통하여 유실되는 토사와 지하수에 의한 변형이다[21].

3.2.1 흙막이 벽체 수평 변위

Fig. 6은 Clough and O'Rourke (1990)이 제시한 점토 및 토사 지반의 굴착 깊이에 대한 벽체의 수평 변위 관계를 나타낸다. Fig. 6에서는 굴착 깊이에 따른 벽체의 수평 변위 발생량이 평균 약 0.2%임을 나타내나 특이한 지반의 경우 0.5%까지 발생하는 것을 알 수 있다[22]. Fig. 7은 Yun(1997)이 사질토 및 점성이 강한 점토 지반의 굴착 깊이에 따른 흙막이 벽체 수평변위와의 관계로부터 시공 상태가 양호한 현상과 불량한 현상을 구분하여 도식화한 것을 나타낸다. 굴착시공 상태가 상대적으로 불량한 현장의 벽체 수평변위량은 대부분 0.2%보다 크게 발생하며 최대 0.6%까지 발생하는 것을 알 수 있고

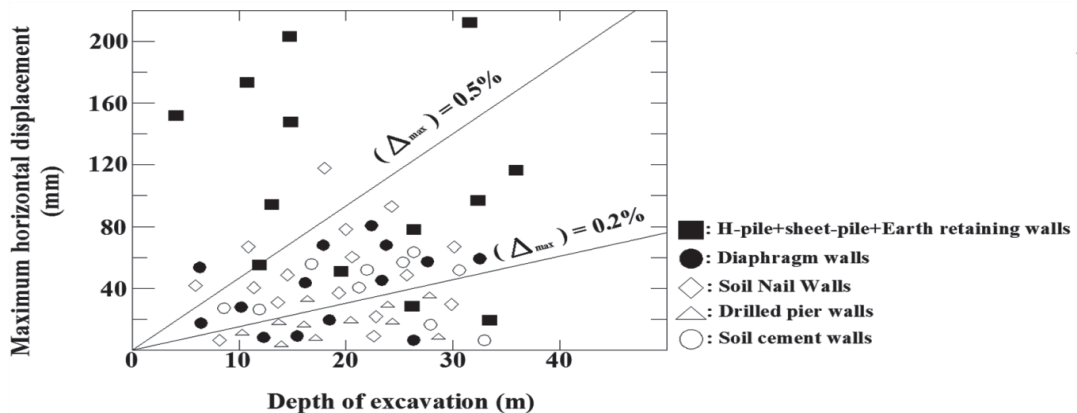


Fig. 6. Horizontal displacement of earth retaining wall embedded in clay and sands (Clough and O'Rourke, 1990)

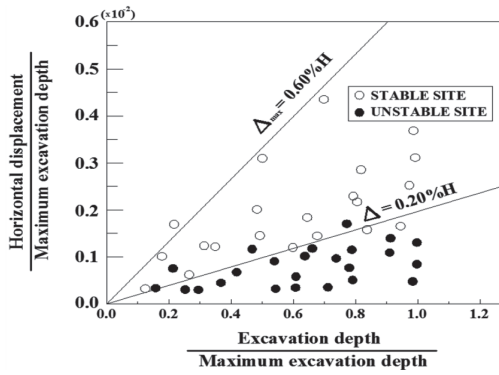


Fig. 7. Horizontal displacement of earth retaining wall with respect to excavation condition (Yun, 1997)

굴착 시공 상태가 비교적 양호한 현장에서는 벽체의 수평변위량이 0.2% 보다 낮게 발생하는 것을 알 수 있다

[23]. Fig. 8은 6단계 굴착(38.6m) 완료 후 지하수위별 굴착 부 인접지반 수평 변위 컨투어를 나타내며 Fig. 9는 굴착 부 벽체 수평 변위를 나타낸다. Fig. 8과 Fig. 9에 나타나듯이 벽체 최대 수평 변위는 총 굴착 깊이 상부로부터 2/3 지점에서 발생하였으며 지하수위에 따른 벽체의 수평 변위는 지하수가 없을 때 38.5mm로 가장 작게 발생하고 지하수가 지표면에 있을 경우 110.2mm로 가장 큰 변위가 발생하였다. 지하수가 지표면 하부 3m에 있는 경우 88.1mm의 변위가 발생하였고 지하수가 지표면 하부 9m, 20m, 40m에 있는 경우 각각 80.1mm, 76.2mm, 44.1mm의 변위가 발생하여 지하수위 하강에 따른 벽체 수평 변위 발생량 또한 감소하였으며 벽체의 수평 변위 차는 최대 65.1%가 발생하는 것으로 나타났다.

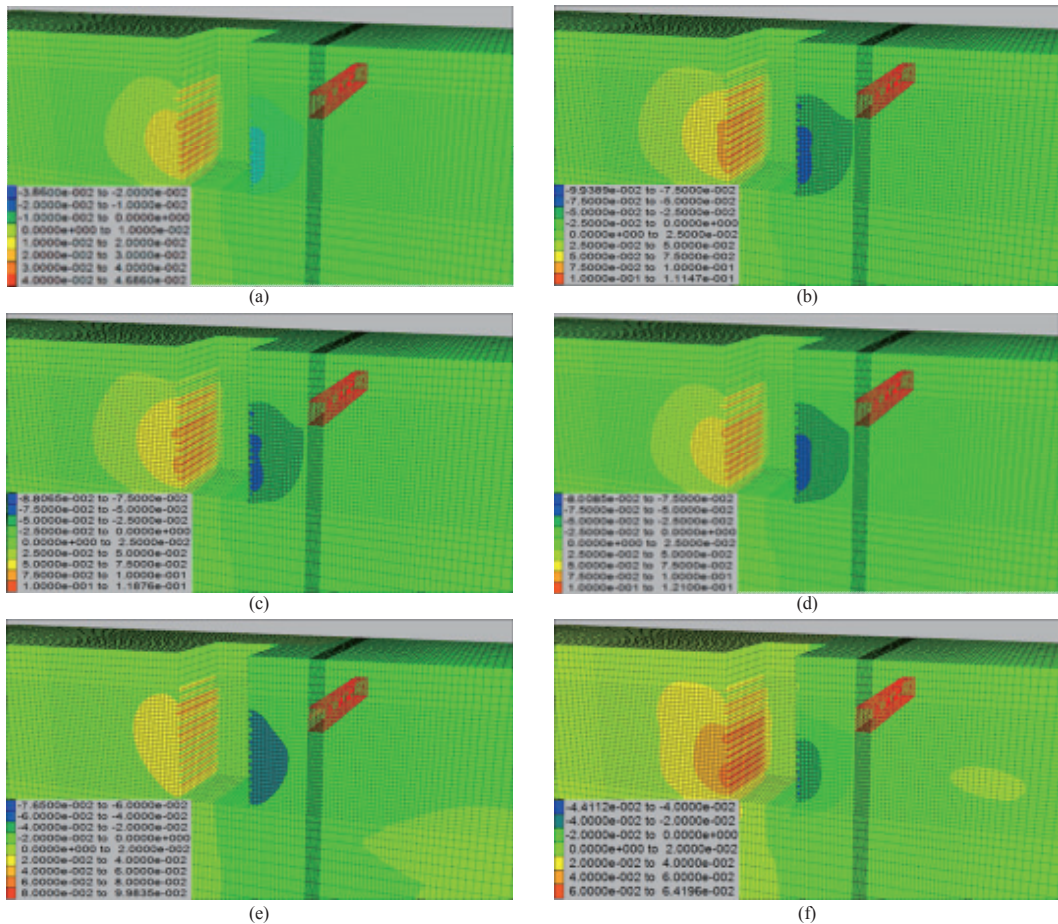


Fig. 8. Horizontal displacement contours of the earth retaining wall (mm): (a) Dry condition (b) GWL: ground surface (c) GWL: 3m, (d) GWL: 9m, (e) GWL: 20m, (f) GWL: 40m. *GWL: groundwater level

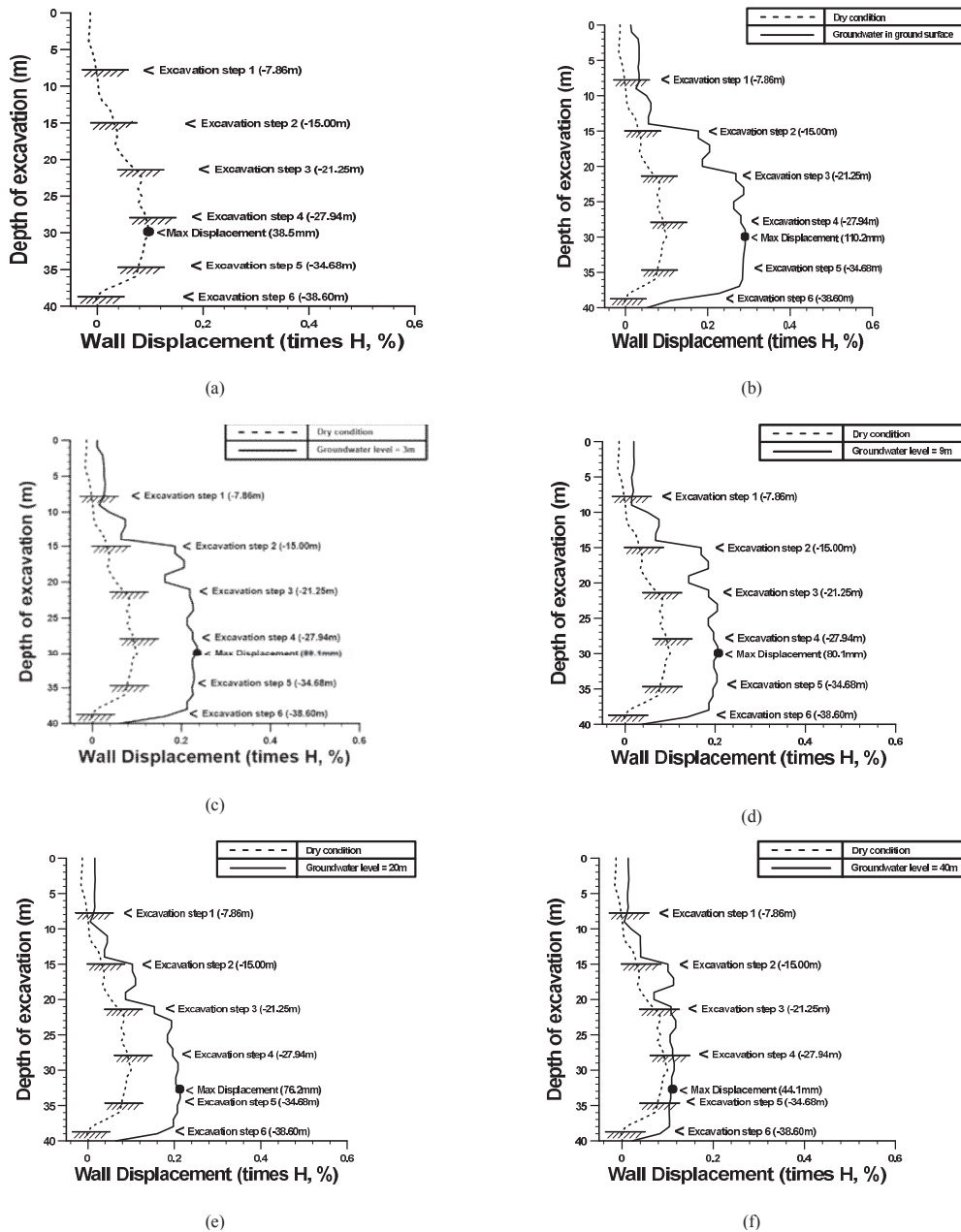


Fig. 9. Horizontal displacement of earth retaining wall with respect to groundwater level: (a) Dry condition (b) GWL: ground surface (c) GWL: 3m, (d) GWL: 9m, (e) GWL: 20m, (f) GWL: 40m. *GWL: groundwater level

3.2.2 흙막이 벽체 배면 침하

본 연구는 풍화토에서 굴착이 이루어졌다. Clough and O'Rourke (1990)은 점토 및 사질토 지반에 굴착이 이루어진 경우 흙막이 벽체 배면 침하량 추정방법을 현장측정 및 유한요소해석 등을 바탕으로 산정, Fig. 10과

같이 도식화하였다. Fig. 10의 H 는 굴착 깊이를 나타내며 d 는 흙막이 벽체로부터의 이격거리, δv_m 은 최대 침하량을 뜻하고 δv 는 거리별 침하량을 나타낸다. 해당 방법은 앵커 및 벽체의 버팀대가 없는 경우에도 적용 가능하며 Clough and O'Rourke (1990)은 벽체 배면 최대 침

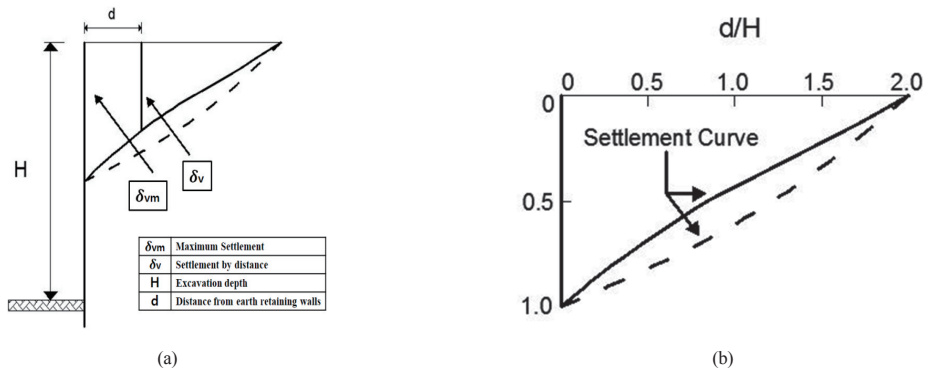


Fig. 10. Settlement of clay and sand backfill with respect to the distance from earth retaining walls: (a) Settlement of backfill, (b) Prediction of settlement (Clough and O'Rourke, 1990)

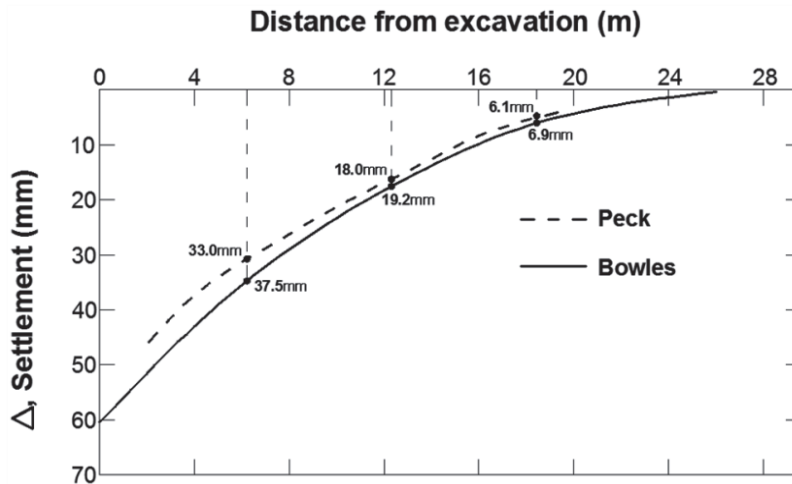


Fig. 11. Settlement of sand colluvial soil backfill with respect to the distance from earth retaining walls (Bowles, 1988)

하량의 평균을 $(0.15\%)H$ 로 제시하였다[22]. Fig. 10 (a)를 살펴보면 굴착 부 벽체 배면 최대 침하의 전체 굴착 깊이의 중간지점에서 발생하는 것을 알 수 있으며 벽체와 근접할수록 침하가 크게 발생하는 것으로 나타난다. 이후 굴착부 벽체와 이격거리가 증가할수록 침하량이 선형적으로 감소하며 Fig. 10 (b)와 같이 두 가지 곡선 형태로 감소한다. Fig. 11은 사질토 및 붕적토 지반에서 20m 이상의 대규모 굴착이 이루어진 경우 Bowles(1988)의 흙막이 벽체 배면 침하 현장측정 결과를 나타내는 것으로서 벽체의 이격 거리에 따른 배면 지반의 침하량을 Peck(1969)의 경험식과 비교하였다. Bowles(1988)의 흙막이 벽체 배면 지반 침하 양상은 Clough and O'Rourke

(1990) 이론과 마찬가지로 벽체와 근접할수록 크게 발생하며 이격거리 증가 시 침하량이 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다. Bowles(1988)는 현장측정 경험에 의한 흙막이 벽체 배면 침하량의 평균을 $(0.13 \sim 0.18\%)H$ 로 제시하였다[24]. Fig. 12는 6단계 굴착(38.6m) 완료 후 굴착 부 인접지반의 침하 컨투어를 나타낸다. 지반 침하는 지하수가 지표면에 존재할 경우 53.5mm로 가장 크게 발생하였고 지하수위가 지표면 하부 3m에 위치할 시 52.8mm, 지표면 하부 9m, 20m, 40m에 위치한 경우 각각 50.1mm, 47.5mm, 43.8mm의 변형이 발생 하였으며 지하수가 없는 경우 48.6mm의 변형이 발생하는 것으로 나타났다. 깊은 굴착 및 지하수위에 따른 굴착 부 벽체

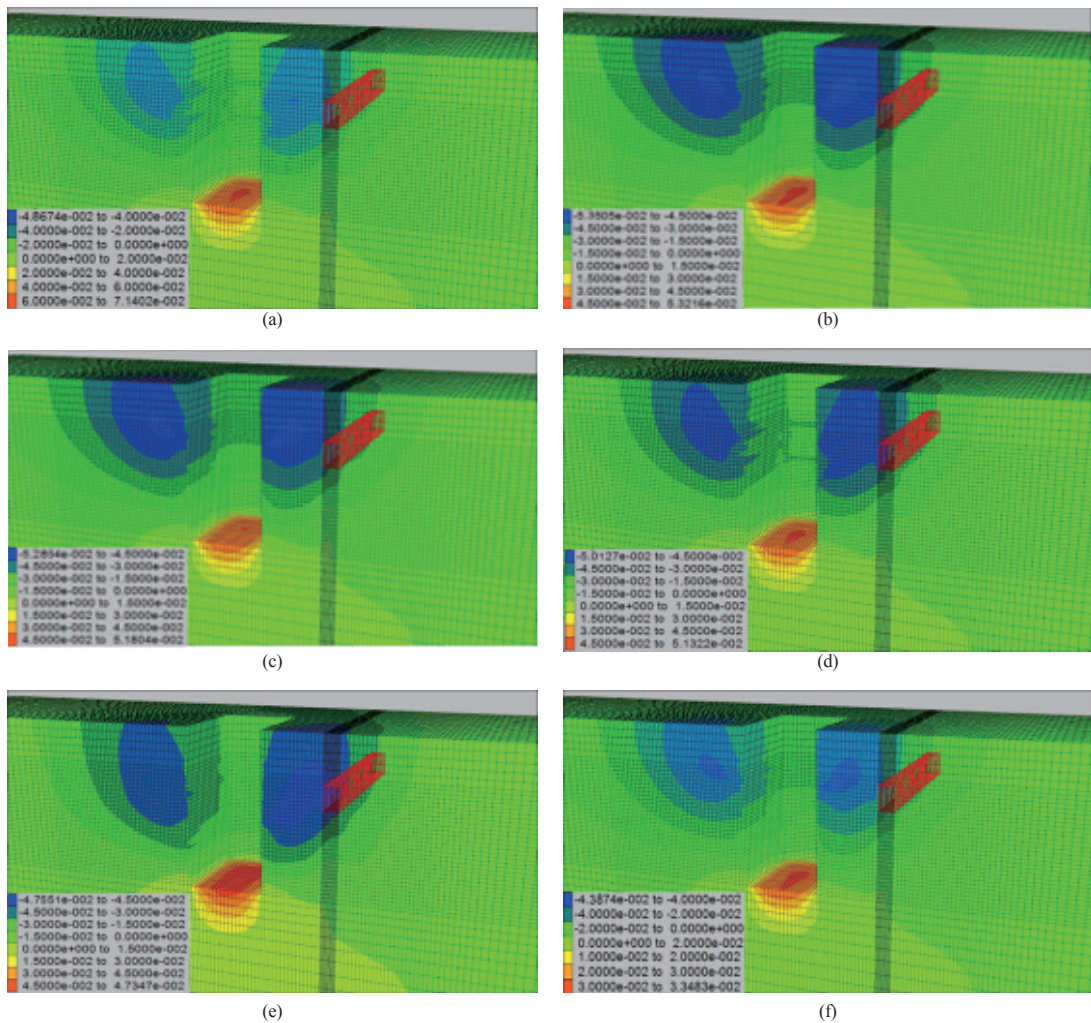


Fig. 12. Settlement contours of backfill (mm): (a) Dry condition (b) GWL: ground surface (c) GWL: 3m, (d) GWL: 9m, (e) GWL: 20m, (f) GWL: 40m. *GWL: groundwater level

배면 지반 침하하는 총 굴착 중앙 지점에서 가장 크게 발생하였으며 벽체에 근접할수록 크게 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 벽체로부터 이격거리 증가 시 벽체 배면의 침하량이 감소하여 Clough and O'Rourke(1990)과 Bowles(1998)가 제시한 흙막이 벽체 배면 침하 형태와 동일한 형태를 나타낸다.

3.3 깊은 굴착 완료 후 궤도변위량

3.3.1 궤도 침하량

궤도의 변형은 레일 10m 지점을 기점으로 측정하였으며 최대 굴착 깊이(38.6m)에서 가장 큰 변위가 발생한

것으로 나타났다. Table 4는 굴착 완료 후 좌우 레일에 발생한 침하량을 나타낸다. 궤도 침하량은 터널 시작지점(0.0m)에서 가장 크게 발생하였고, 굴착부에서 멀어질수록 발생량이 감소하는 것으로 나타났으며 굴착부와 인접한 좌측 레일의 침하가 더 크게 발생하며 침하량 차이는 레일의 중간부인 20~30m 지점에서 가장 크게 발생하였다. 이는 지반의 강성 변화 및 굴착공사 경계 구간에서 터널의 중간부가 위치하기 때문이다. 지하수위에 따른 측정 지점별 변위 차는 평균 62%인 것으로 나타나 지반 굴착 시 박스형 터널에 작용하는 토압과 수압의 영향이 큰 것을 알 수 있다.

Table 4. 10-m interval settlement of Case I ~ Case VI

Unit : mm

Rail		Measurement point (m)					
		0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
Case I (Dry condition)	Left rail (mm)	-40.6	-37.2	-32.6	-24.2	-20.6	-18.1
	Right rail (mm)	-40.3	-37.1	-32.2	-24.0	-20.5	-18.0
Case II (GWL* = 0m)	Left rail (mm)	-34.7	-32.7	-25.5	-16.4	-12.6	-11.3
	Right rail (mm)	-27.6	-26.4	-20.9	-13.5	-10.5	-9.6
Case III (GWL = 3m)	Left rail (mm)	-33.4	-31.5	-24.1	-15.1	-11.2	-10.8
	Right rail (mm)	-26.2	-24.9	-20.8	-13.1	-10.2	-9.4
Case IV (GWL = 9m)	Left rail (mm)	-30.2	-27.5	-21.2	-13.2	-9.2	-8.8
	Right rail (mm)	-24.6	-22.6	-18.9	-12.2	-8.9	-8.5
Case V (GWL = 20m)	Left rail (mm)	-23.5	-22.8	-18.9	-12.2	-11.6	-8.7
	Right rail (mm)	-21.6	-20.6	-17.6	-11.9	-10.5	-7.5
Case VI (GWL = 40m)	Left rail (mm)	-20.7	-20.2	-16.8	-11.1	-9.8	-7.1
	Right rail (mm)	-20.5	-19.9	-16.2	-11.6	-9.5	-6.9

*GWL : Groundwater Level

Table 5. 10-m interval horizontal displacement of Case I ~ Case VI

Unit : mm

Rail		Measurement point (m)					
		0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
Case I (Dry condition)	Left rail (mm)	-8.8	-8.0	-5.8	-3.4	-2.0	-1.8
	Right rail (mm)	-8.7	-7.8	-5.7	-3.2	-2.0	-1.7
Case II (GWL = 0m)	Left rail (mm)	-23.9	-23.1	-16.6	-7.5	-3.6	-2.6
	Right rail (mm)	-23.3	-22.5	-16.1	-7.1	-3.2	-2.3
Case III (GWL = 3m)	Left rail (mm)	-21.6	-20.2	-14.1	-6.1	-2.9	-2.1
	Right rail (mm)	-21.0	-19.1	-13.2	-5.7	-2.4	-1.6
Case IV (GWL = 9m)	Left rail (mm)	-18.7	-17.6	-12.8	-5.4	-2.4	-1.7
	Right rail (mm)	-18.0	-17.1	-12.1	-5.2	-2.2	-1.6
Case V (GWL = 20m)	Left rail (mm)	-12.5	-11.6	-10.3	-4.8	-2.3	-1.1
	Right rail (mm)	-12.2	-11.2	-10.1	-4.3	-2.1	-1.0
Case VI (GWL = 40m)	Left rail (mm)	-11.6	-11.1	-8.3	-3.5	-1.1	-0.5
	Right rail (mm)	-11.4	-10.9	-7.9	-3.2	-1.0	-0.5

*GWL : Groundwater Level

3.3.2 궤도 수평 변위량

레일의 수평 변위 측정은 침하 측정 시와 동일하게 수행되었으며 Table 5는 최종단계인 6단계 굴착(38.6m) 완료 후 좌·우 레일의 수평 변위 발생량을 나타낸다. 수평 변위는 궤도 침하와 마찬가지로 터널 시작지점에서 변위 발생량이 가장 크게 발생하였으며 터널 중간부인 20~30m 지점에서 상대적 수평 변위 차가 크게 발생하는 것으로 나타났다.

3.4 궤도틀림 안정성 검토

레일 10m 간격으로 측정된 침하 및 수평 변위를 바탕으로 궤도틀림을 산정한 후 각 기관별 도시철도 궤도틀림 기준을 적용하여 안정성 검토를 수행하였다. 좌·우 레일 간의 수평 간격 변형으로 인하여 발생하는 궤간틀림의 경우, 지하수위에 따른 궤도의 수평변위를 나타내는 Table 5에 나타나듯이 좌·우 레일이 굴착 부 방향으로 일정 하게 변형하는 것으로 나타나기 때문에 지하수위에 따른 궤간틀림 변위 발생량이 2mm 이내로 극히 작아 충분한 안정성을 확보한 것으로 나타났다.

3.4.1 먼들림

지하수위에 따른 먼들림 변위 발생량을 나타내는 Fig. 13을 살펴보면 지하수위가 지표면에 위치한 경우와 지표면 하부 3m에 위치할 경우 각각 9.2mm와 9.1mm의 변위가 발생하여 각 기관 기준의 평균값인 대구도시철도 공사 기준(9mm)을 초과하는 것으로 나타났으며 지하수위가 지표면 기준 9m 이하에 위치한 경우와 지하수가 존재하지 않는 경우, 최저 기준인 부산교통공사 기준(5mm)을 초과하는 것으로 나타났다. 지하수가 지표면 또는 지표면으로부터 9m 사이에 있는 경우가 지하수가 없거나 지하수위가 지표면 기준 9m 이하에 있는 경우보다 먼들림 변위가 크게 발생한 이유는 지하수가 박스형 터널 하부에 있는 경우, 부력의 영향으로 인하여 궤도의 침하량이 감소, 먼들림 변위 발생량이 감소한 것으로 판단된다. 지하수위 차로 인한 먼들림 최대 변위 차는 61.9%인 것으로 나타났다.

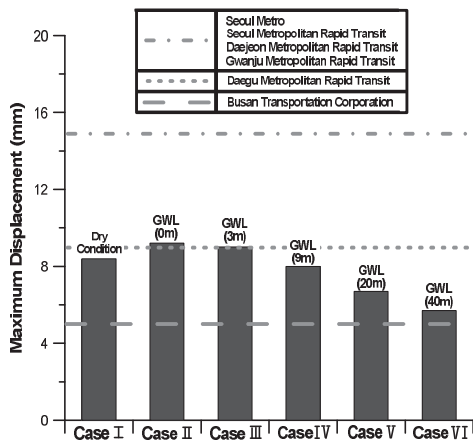


Fig. 13. Maximum displacement for Longitudinal irregularity

3.4.2 평면성틀림

Fig. 14는 지하수위에 따른 평면성틀림 변위를 나타낸다. 지하수가 지표면에 있는 경우 12.1mm의 최대 변위가 발생, 최소 기준인 대구도시철도공사, 부산교통공사 기준(13mm)을 초과하지 않았다.

평면성틀림 또한 먼들림과 마찬가지로 궤도의 침하에 의해 틀림이 산정되기 때문에 지하수가 지표면 기준 9m 아래에 있는 경우보다 지하수가 없는 경우에 더 큰 틀림이 발생하였다. 지하수위 변화에 따른 평면성틀림은 최대 43.3%의 차이가 발생하였다.

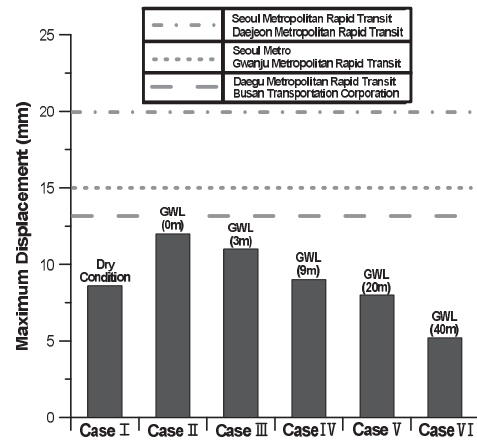


Fig. 14. Maximum displacement for Twist irregularity

3.4.3 수평틀림

Fig. 15의 수평틀림 변위 발생량을 살펴보면 지하수가 지표면에 있는 경우 7.2mm의 최대 변위가 발생하여 수평틀림은 평면성틀림과 동일하게 모든 도시철도 운영기관의 허용기준을 만족함을 알 수 있다. 지하수가 없는 경우 0.4mm의 수평틀림 변위가 발생하였고 이는 지반에 지하수가 있는 경우에 발생한 수평틀림 변위의 평균보다 88.3% 작아 굴착 시 지하수로 인한 좌우 레일의 침하 차이가 상대적으로 크게 발생함을 알 수 있다. 수평틀림은 평면성틀림과 마찬가지로 모든 기관의 허용기준을 만족하여 안정성이 확보된 것으로 나타났다.

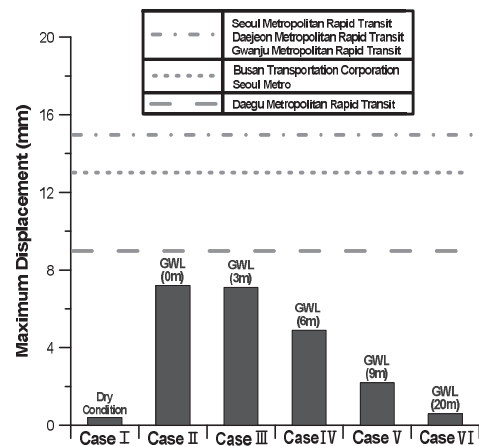


Fig. 15. Maximum displacement for Cross level irregularity

3.4.4 줄뜸림

줄뜸림 변위를 나타내는 Fig. 16을 살펴보면 지하수가 지표면에 있는 경우 9.1mm 변위가 발생하여 각 기관 기준의 평균값인 대구도시 철도공사 기준(9mm)을 초과하며 지표면 하부 6~20m지점에 지하수가 있는 경우에는 최소 기준인 부산교통공사 기준(7mm)을 초과하는 것으로 나타났다. 줄뜸림의 경우 궤간 측정 선에 있어서 레일 방향의 좌우 굴곡 차로 인하여 발생하는데 지하수가 있는 경우가 지하수가 없는 경우보다 수압으로 인한 변위 발생량이 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 지하수가 존재하는 지반에 굴착 공사가 이루어질 경우 구조물의 횡 방향 변형이 크게 발생함을 의미한다.

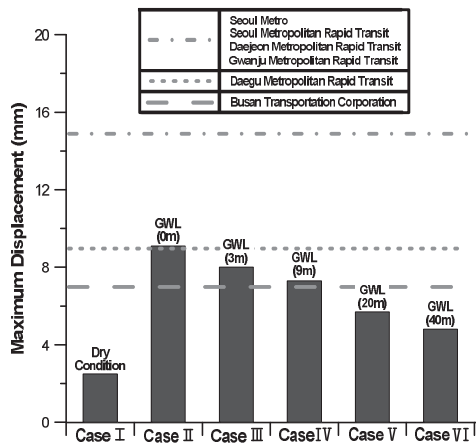


Fig. 16. Maximum displacement for Alignment irregularity

3.5 도시철도 지하 박스구조물 안정성 검토

본 연구에 적용된 도시철도 구조물은 내공 단면의 효

율이 높은 박스구조물로서 최종 굴착(38.6m)이 이루어진 이후, 구조물에 발생한 최대응력을 산정하여 허용응력설계법을 적용한 안정성 검토를 실시하였고 결과는 Table 6과 같다. 압축, 인장, 전단응력 모두 지하수위가 지표면에 위치한 경우 안전율이 가장 낮은 것으로 나타났다. 압축 응력은 모든 지하수위에서 충분한 안정성을 확보한 것으로 나타났으며 지하수위가 존재하지 않는 경우 7.68, 지하수위가 지표면에 위치할 경우 5.82의 안전율을 확보하는 것으로 나타났다. 인장응력의 경우 지하수위가 지표면에 위치한 경우 0.98의 안전율을 보여 허용응력을 초과하는 것으로 나타났으며 지하수위가 지표면 기준 하부 3m, 9m에 위치한 경우에도 1.1 이상의 안전율을 확보하지 못하여 주의를 요하는 수준인 것으로 나타나 인장에 대한 안전보장이 필요함을 알 수 있다. 전단응력은 압축응력과 마찬가지로 모든 지하수위에서 안정성을 확보하는 것으로 나타났으며 지하수위가 존재하지 않을 경우 1.95, 지하수위가 지표면에 위치한 경우 1.26의 안전율을 확보하였다.

4. 결론

궤도틀림은 차량 운행 시 주행안정성과 승차감에 지대한 영향을 미치는 위험인자로서 최근 급증하는 도심지 굴착 공사로 인하여 그 위험성이 증대되고 있다. 본 연구에서는 지하수위에 따른 굴착 부 벽체 변형 및 배면 지반의 침하와 궤도 틀림량 산정 후 이들의 상관관계를 분석하고 각 기관별 궤도틀림 기준에 따른 안정성 평가를 수행 하였으며 깊은 굴착 시 지하수위에 따른 도시철도 지하 박스구조물의 안전성을 평가하였다.

Table 6. Mobilized stress and FS of underground box structure over groundwater

Mobilized Stress G.W.L**	FS*		
	Compressive	Tensile	Shear
Dry condition	7.68	1.19	1.95
Ground surface	5.82	0.98	1.26
3m	5.87	1.01	1.32
9m	6.21	1.05	1.42
20m	6.49	1.13	1.59
40m	7.65	1.18	1.95

*FS = Factor of Safety, **GWL : Groundwater Level

굴착 부 벽체 최대 수평 변위는 지하수가 지표면에 있는 경우, 지하수가 없는 경우보다 65.1% 큰 변위가 발생하였으며 지하수위 하강 시 벽체에 가해지는 수압이 감소하여 수평변위 또한 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다.

또한, 본 연구에서 발생한 벽체 평균 수평 변위 (0.19%)를 Clough and O'Rourke(1990)이 제시한 굴착 깊이-벽체 평균 수평 변형(0.2%)과 Yun(1997)이 제시한 시공 능력이 양호한 현장에서의 벽체 수평변위(0.2%)비교할 경우 매우 유사한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다.

지하수위에 따른 굴착 부 벽체 배면 침하량은 21.4%의 차이가 발생하였으며 벽체로부터 이격거리가 증가할수록 침하량이 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 발생한 벽체 최대 평균 침하량 (0.14%)H은 Clough and O'Rourke(1990)이 제시한 벽체 최대 평균 침하량 (0.15%)H과 매우 근접하고 Bowles(1988)이 제시한 평균 침하량(0.13~0.18%)범위 안에 존재하여 벽체 수평 변위와 마찬가지로 선행연구와 매우 유사한 결과가 발생한 것을 알 수 있다.

지하수위에 따른 켈도틀림 변위 발생은 평면성틀림과 수평틀림에는 큰 영향을 미치지 않으나 줄틀림과 면틀림 변위는 크게 발생하여 일부 도시철도 운용기관의 허용 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 또한, 수평틀림과 줄틀림의 경우 지반에 지하수가 있는 경우, 지하수가 없는 경우보다 변위가 각각 최대 83.3%, 72.5% 크게 발생하였다.

도시철도 지하 박스구조물 또한 지하수위가 지표면에 근접할수록 안전율이 감소하였고 특히, 인장응력의 경우 지하수위가 지표면에 위치할 경우 0.98, 지하수위가 지표면 하부 3m, 9m에 존재할 경우 1.1이하의 안전율을 확보 하여 박스구조물의 안전 대책이 필요함을 알 수 있다.

지하수위에 따른 벽체 수평 변위 및 배면 침하, 켈도틀림 변위발생량과 지하 박스구조물의 안전율은 지하수위가 상승할수록 변위 및 응력 크기가 증가하여 간극수압에 의한 도시철도 구조물 및 주변 지반의 영향이 지대한 것으로 판단된다.

References

- [1] Korea Statistical Information Service, The length of the subway line in Korea,[cited Dec. 11, 2016]

Available from <http://www.kosis.kr>

- [2] C.-Y. Choi, H.-K. Kim, K.-Y. Chung, S.-B. Yang, "Train-structure dynamic intersection Analysis of the bridge transition considering track irregularity", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, vol. 31, no. 9, pp. 29-38, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2015.31.9.29>
- [3] K.-D. Kang, "A study of analysis method for the track geometry measuring data on high speed railway", *Journal of the Korean Society for Railway*, vol. 7, no. 4, pp. 291-295, 2004.
- [4] B.-H. Park, "A Bayesian Regression Model to Estimate the deterioration rate of track irregularities", *Journal of the Korean Society for Railway*, vol. 19, no. 4, pp. 547-554, 2016.
DOI: <http://doi.org/10.7782/JKSR.2016.19.4.547>
- [5] I.-Y. Choi, D.-H. Lee, J.-S. Lee, J.-H. Um, "A comparison of Track irregularities standards", *Autumn conference & Annual meeting of Korea society for railway*, the Korean society for railway, Pyeong Chang, Korea, pp. 1498-1502, 2013.
- [6] M.-R. Son, "Effect of step-Wise excavation depth on the earth pressure against an excavation wall in rock mass", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, vol. 30, no. 2, pp. 43-52, 2014.
DOI: <http://doi.org/10.7843/kgs.2014.30.2.43>
- [7] Y.-S. Byun, D.-C. Choi, S.-J. Shin, B.-S. Chun, "A Study on the lateral deformation of retaining walls during excavation with degree of consolidation", *Journal of the Korean Geo-environmental Society*, vol. 10, no. 7, pp. 43-51, 2009.
- [8] J.-H. Jeon, J.-D. Park, Y.-D. Lim, S.-W. Lee, "Damage assessment of Structures according to the excavation methods", *Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association*, vol. 15, no. 2, pp. 161-173, 2013.
DOI: <http://doi.org/10.9711/KTAJ.2013.15.2.161>
- [9] B.-S. Oh, "A Case study on the cause and reinforcement of railroad facilities settlement according to the ground excavation", *Journal of the Korean Geo-environmental Society*, vol. 13, no. 10, pp. 85-94, 2012.
- [10] The Korean Society of Railway, "2008 Railway glossary", Report, pp. 149-157, 2008.
- [11] W.-J. Chung, K.-I. Ahn, "A Basic Investigation for Reconstruction Profile of Track Irregularities Measured by Chord Method", *Autumn Conference & Annual Meeting of Korea Society for Railway*, The Korean Society for Railway, Cheonan, Korea, pp. 1086-1093, 2002.
- [12] J.-S. Lee, "Estimation of Railway Track Irregularities From Acceleration Data of High-Speed Trains", Master's Thesis, Department of Railway System Engineering, University of Science and Technology, Daejeon, Korea, 2012.
- [13] Seoul metro, Railway administration regulation, Korea, 2014.
- [14] Seoul metropolitan rapid transit corporation, Railway administration regulations, Korea, 2014.
- [15] Daejeon metropolitan express transit corporation,

Railway administration regulations, Korea, 2014.

- [16] Gwangju metropolitan rapid transit corporation, Railway administration regulations, Korea, 2014.
- [17] Daegu metropolitan rapid transit corporation, Railway administration regulations, Korea, 2014.
- [18] Busan transportation corporation, Railway administration regulations, Korea, 2013.
- [19] Itasca Consulting Group Inc., FLAC3D Manual : Theory and background, Minnesota, USA, 2002.
- [20] Sunjin engineering corporation Rail section 7 geotechnical research, Daejeon metropolitan transit corporation, Korea, 2007.
- [21] Cording, E.J., "Use of empirical data for braced excavations and tunnels in soil", *Lecture Series*, Chicago ASCE, Chicago, USA, 1984.
- [22] Clough, G. W., O'Rourke, T. D., "Construction Induced Movements of In situ Walls", Geotechnical Special Publication, ASCE, no. 25, New York, USA, pp. 439-470, 1990.
DOI:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1992\)118:4\(665\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:4(665))
- [23] J.-M Yun, "Lateral earth pressure and deformation behavior of earth retention walls", Master's Thesis, Civil Engineering, Chungang University, Seoul, Korea, 1997.
- [24] Bowles, J. E., "Foundation analysis and design", 4th Ed., McGraw-hill, New York, USA, pp. 658-678, 1998.
- [25] Peck, R.B., "Deep excavations and tunneling in soft ground," Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State-of-the Art Volume, pp. 225-290, 1969.

이 상 승(Sang-Seung Lee)

[준회원]



- 2016년 2월 : 인제대학교 토목공학과 (공학사)
- 2018년 2월 : 인제대학교 토목공학과 (지반공학석사)

<관심분야>

지반, 재해, 안전, 지진

전 상 수(Sang-Soo Jeon)

[정회원]



- 1992년 6월 : Oregon State University (해양공학석사)
- 1996년 12월 : University of Colorado, Boulder(지반공학석사)
- 2002년 1월 : Cornell University (지반공학박사)
- 2002년 3월 ~ 2005년 2월 : 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원
- 2005년 3월 ~ 현재 : 인제대학교 토목도시공학부 교수

<관심분야>

지반, 재해, 안전, 지진, 매설관, GIS