

도시철도 지하구조물에 미치는 지하수 영향 평가 Groundwater Effects on Underground Structure of Urban Railway

김호석*, 박영곤**, 이성진**, 전상수*[†]

Ho-Seok Kim*, Young-Kon Park**, Sung-Jin Lee**, Sang-Soo Jeon*[†]

Abstract Structures of domestic urban railways are being constructed in underground of highly populated commercial and residential areas in Seoul metropolitan region and metropolitan cities. Since expansion of transportation network inside of the big cities, redevelopment, and reconstruction are continuously progressed, new structures adjacent to the urban railway are constructed. Groundwater induced by excavation for foundation causes the stability problems of structures. The urban railway is a key method of transportation and, if there are accidents, it results in a great loss of life. Therefore, the stability of the urban railway should be very important issue. In this study, as deep excavations adjacent to the urban railway are under construction, the soil behavior associated with groundwater levels and ground effects on underground box structures are examined. Compressive, tensile, and shear strength mobilized in underground box structures induced by groundwater are 24%, 13%, and 35%, respectively. The shear strength has been dominantly mobilized by groundwater.

Keywords : Urban railway, Deep excavation, Groundwater, Box structure, Stability

초 록 국내 도시철도는 상업 및 주거시설 등 인구 밀집 지역의 지하공간을 이용한 구조물로서 수도권 및 광역시를 중심으로 건설되고 있다. 또한 대도시 내 교통망 확충과 재개발 및 재건축 등이 지속적으로 진행됨에 따라 도시철도 인접 지역 신규구조물 시공이 이루어지고 있으며 시공 시 기초작업을 위한 굴착은 지하수의 흐름을 유발시켜 도시철도 구조물의 안정성에 부정적인 영향을 미치고 도시철도는 대도시의 핵심 교통수단이며 사고 발생 시 수많은 인명피해를 야기하므로 안정성 확보가 반드시 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 인접 지역에 깊은 굴착이 이루어진 경우 지하수위 변화에 따른 지반 거동이 도시철도 지하 박스구조물에 미치는 영향을 검토하였다. 지하수 유무에 따라 도시철도 박스구조물에 발생한 압축, 인장, 전단응력의 차이는 각각 24%, 13%, 35%로서 전단응력이 지하수위에 가장 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

주요어 : 도시철도, 깊은 굴착, 지하수, 박스구조물, 안정성

1. 서론

우리나라 도시의 지상공간 활용성은 이미 한계치에 달해 있으며 증가하는 인구와 요구되는 편의, 여가 시설을 충족시키기 위하여 기존 구조물 근접시공이 지속적으로 이루어

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

* 인제대학교 공과대학 토목도시공학부

** 한국철도기술연구원

지고 있다. 신규 구조물 시공 시 필수적으로 동반되는 굴착시공은 지반 내 응력 및 지하수의 변화를 초래, 간극수압 및 유효응력 변화를 발생시키게 되며 이러한 지반 내 응력 변화[1]는 지중에 시공되어 있는 도시철도 구조물에 매우 큰 영향을 미치고 있다. 국내 도시철도는 인구 이동 시 매우 중요한 교통수단이며 현재 수도권과 4곳의 광역시에는 일일 약 1,000만 명 이상의 시민이 이용하고 있다. 따라서 급격히 증가하는 도시철도 구조물 근접 굴착에 대한 안정성 검토가 필요한 실정이며 본 연구에서는 삼차원 유한차분해석 프로그램 FLAC3D를 이용, 대전도시철도에 시공된 박스구조물 및 지반특성과 최근 국내 굴착시공 시 많이 사용하는 흙막이가시설(토류벽, C.I.P, Strut)을 적용하여 도시철도 인접지반 대규모 굴착시 지하수위 변화에 따른 지반 거동이 지하 박스구조물에 미치는 영향을 평가하였고 굴착 부벽체 변위 발생량과의 상관관계를 분석하였다.

2. 수치해석

2.1 수치해석 조건

본 연구에서는 인접 지반 대규모 굴착시 지하수 및 지반 응력에 의한 도시철도 박스구조물의 안정성을 평가하기 위해 상용프로그램인 유한차분해석 프로그램 FLAC3D를 이용하였으며 Mohr-Coulomb 파괴모델[2]을 적용하였다. 수치해석 모델의 크기는 대규모 굴착의 폭과 깊이의 영향을 고려하여 폭 210m, 깊이 70m, 길이 50m로 하였으며 굴착은 최대 깊이 38.6m, 폭 20m, 길이 25m이다. 지하수위에 따른 박스구조물 발생 응력변화를 파악하기 위해 총 6개 모델의 수치해석을 수행하였으며 전체지반이 포화된 경우(Case I)와 지표면을 기준으로 3m(Case II), 6m(Case III), 9m(Case IV), 20m(Case V), 40m(Case VI) 아래 위치한 모델의 수치해석을 수행하였다 굴착 우측면과 박스 구조물 좌측 벽체의 이격 거리는 14m이고 박스구조물 상부슬래브와 지표면까지의 거리는 11m이다. 지중에 시공된 박스구조물은 폭 4m, 높이 6m이며 수치해석 모식도는 Fig. 1에 나타내었고 3차원 수치해석 모델은 Fig. 2에 나타내었다.

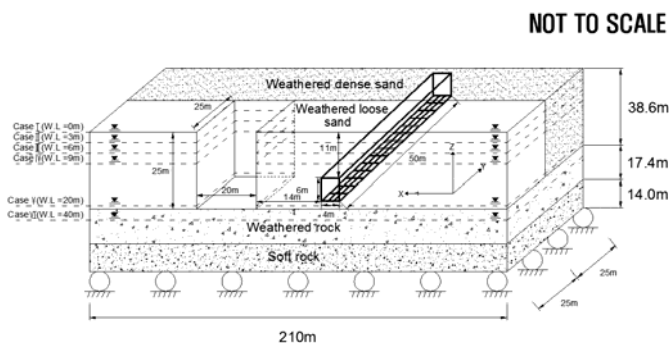


Fig. 1 Configuration of numerical analysis

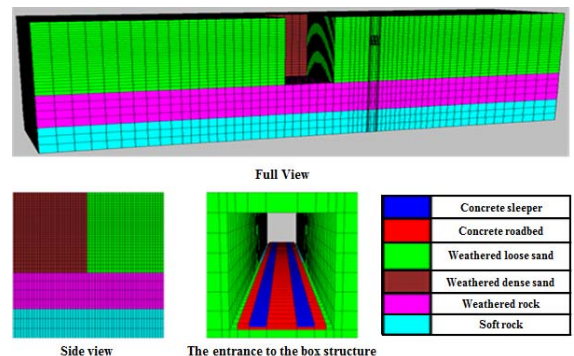


Fig. 2 Three-dimensional view of numerical analysis

2.2 수치해석 물성치

2.2.1 지반 물성

수치해석에 적용된 지반은 느슨한 풍화토, 단단한 풍화토, 풍화암, 연암으로 구성되었다. 지반 물성은 기존 문헌에 제시된 지반 물성과 대전도시철도 1호선 시공구간의 현장 시료를 채취한 후 실내 시험을 통하여 얻은 물성은[3] Table 1과 같다.

Table 1 Physical properties of soil

	Unit weight (t/m ³)	Elastic modulus (t/m ²)	Poison's ratio (ν)	Friction angle (°)	Cohesion (t/m ²)
Weathered Loose sand	1.82	4,800	0.33	35	0.33
Weathered Dense sand	1.83	7,200	0.33	37	0.35
Weathered rock	2.00	11,000	0.31	38	6.00
Soft rock	2.20	70,000	0.30	40	8.00

2.2.2 터널 및 흙막이가시설

본 연구에 적용된 터널 구조물은 대전도시철도에 시공된 박스구조물과 동일한 것을 적용하였으며[4] 굴착 시공 시 주변의 토사 및 지하수의 침입을 방지하는 흙막이가시설(토류벽, C.I.P, Strut)은 최근 공사현장에서 많이 사용하고 있는 부재[5]를 선정하였다. Table 2는 이들 부재의 특성을 나타낸다.

Table 2 Physical properties of structure

	Unit weight (t/m ³)	Elastic modulus (t/m ²)	Area (m ²)	Moment of inertia (m ⁴)
Earth retaining wall	7.80	2.10×10^7	8.36×10^{-3}	1.33×10^{-4}
C.I.P	2.50	2.00×10^6	1.26×10^{-1}	1.26×10^{-3}
Strut	7.80	2.10×10^7	1.20×10^{-2}	2.01×10^{-4}
Side wall of Box	2.30	2.32×10^6	3.00×10^{-1}	2.25×10^{-3}
Top slab of Box	2.30	2.32×10^6	1.00×10^{-1}	8.33×10^{-4}
Bottom slab of Box	2.30	2.32×10^6	6.75×10^{-1}	2.56×10^{-2}

2.3 수치해석 결과

본 연구에서는 내공 단면의 사용효율이 높은 박스구조물을 적용하였으며 전체 39.6m의 굴착부를 총 6단계에 걸쳐 평균 6.6m씩 굴착하였다. 지하수위별 굴착부 우측 벽체의 수평변위는 Fig. 3에 나타내었으며 6가지 Case 모두 최종굴착 단계에서 가장 큰 변위가 발생하였고 총 굴착 깊이 2/3 지점에서 최대 수평변위가 발생하였다. 지하수위에 따른 벽체 수평변위는 Case I이 110.2mm로 가장 크게 발생하였으며 Case II는 88.1mm, Case III는 82.6mm, Case IV가 80.1mm, Case V는 76.2mm의 변위가 발생하였고 끝으로 Case VI의 경우 44.1mm의 변위가 발생하여 지하수위 하강에 따른 벽체 수평 변위 발생량이 점점 감소하는 것을 알 수

있다. 구조물에 발생한 축 응력, 휨 모멘트, 전단응력 값을 산정한 뒤 허용응력설계법을 적용한 안정성 검토 결과를 Table 3에 나타내었다. 박스구조물 벽체 수평변위와 마찬가지로 지하수위가 높을수록 구조물에 압축, 인장, 전단 응력이 크게 발생하였고 지하수가 지반 전체에 포화된 Case 1의 경우 인장에 대한 안정성을 확보하지 못하는 것으로 나타났다.

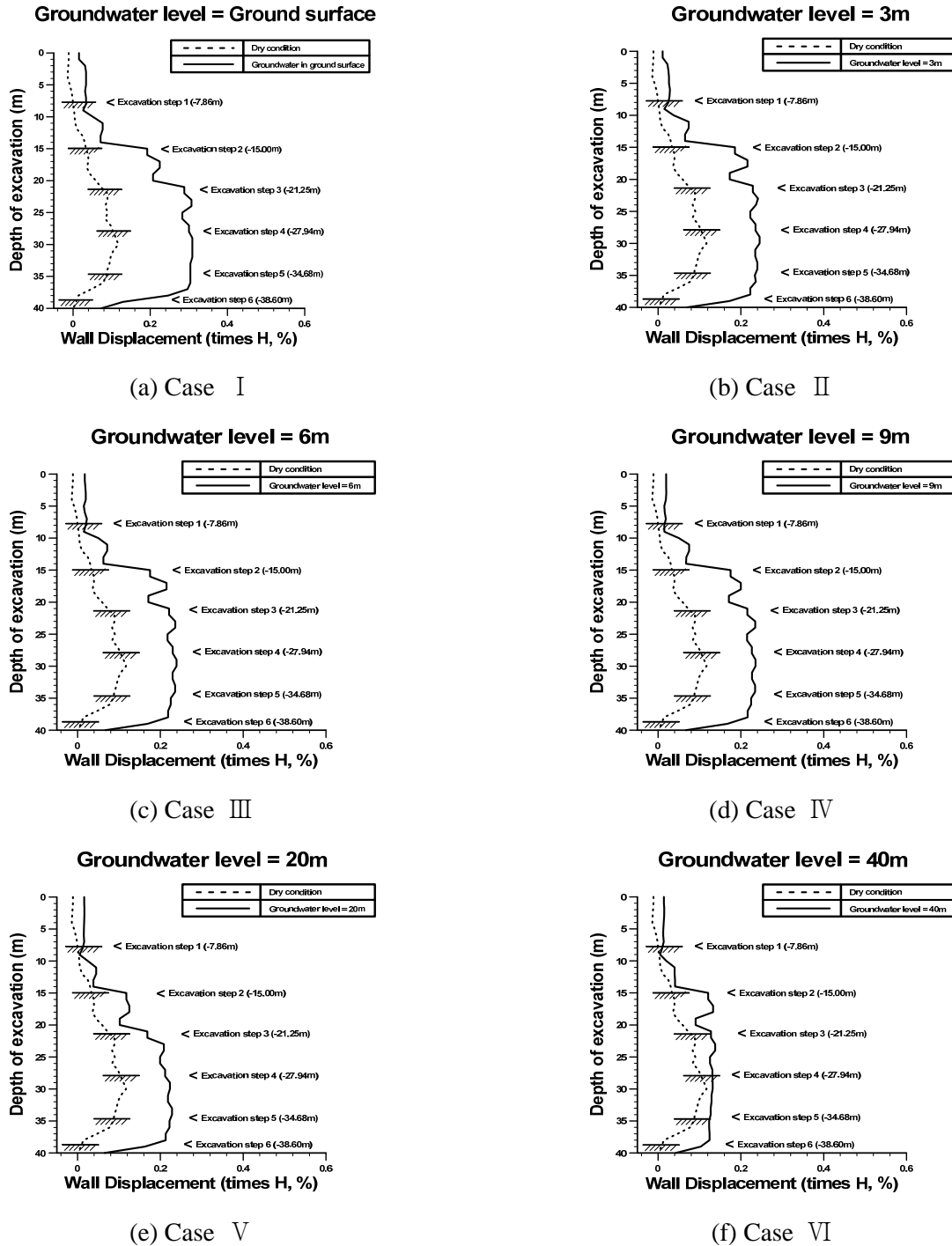


Fig. 3 Wall displacement (Times H, %) for Case I, Case II, Case III, Case IV, Case V, Case VI

Table 3 Mobilized strength and FS of underground box structure

Mobilized strength	FS*					
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Compressive	5.82	5.87	5.99	6.21	6.49	7.65
Tensile	0.98	1.01	1.03	1.05	1.09	1.18
Shear	1.26	1.32	1.38	1.42	1.59	1.95

f_{ca} (allowable compressive stress) = 960t/m², f_{ta} (allowable tensile stress) = 65t/m², f_{sa} (allowable shear stress) = 39t/m²

*FS = Factor of safety

3. 결론

본 연구에서는 도시철도 인접지반 깊은 굴착시 지하 수위에 따른 박스구조물 안정성 평가를 삼차원 수치해석을 통하여 수행하였다. 지하수위에 따른 굴착부 벽체 최대 수평변위는 지반 전체가 포화되었을 때 지반 40m 아래 포화된 경우에 비해 약 60% 큰 수평변위가 발생하였고 박스구조물에 발생한 압축, 인장, 전단응력 또한 지하수위가 하강할 시 발생응력이 점차적으로 감소하여 안전율이 증가하였다. 따라서 지하수위에 따라 발생하는 굴착부 벽체 변위와 박스구조물 응력은 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 그러나 지하수위가 지표면에 있는 경우 박스구조물에 발생한 인장응력의 안전율이 기준치 이하로 나타나 굴착시 도시철도 박스구조물에 발생하는 인장응력에 대한 안정성 검토가 필요하다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부 및 국가과학기술연구회의 융합연구사업의 일환으로 수행하였음. [융합연구단-14-2-ETRI, 사물인터넷(IoT) 기반 도시 지하매설물 모니터링 및 관리시스템 기술 개발]

참고문헌

- [1] G. N. Choi, C. S. Yoo (2011) Urban excavation – induced ground movement in water bearing ground using stress-pore pressure coupled analysis, Journal of the Korean geotechnical society, 5(27)
- [2] Itasca Consulting Group, Inc. (2002) *FLAC3D Manual : Theory and background*, Itasca Consulting Group, Inc., Minnesota, USA.
- [3] Sunjin engineering corporation (1997) *Rail section 7 geotechnical research*, Daejeon metropolitan transit corporation, Daejeon, Korea, pp 45-62.
- [4] Daejeon metropolitan express transit corporation (1995) *Daejeon subway line 2 design service*, Daejeon metropolitan express transit corporation, Daejeon, Korea, pp 4-12.
- [5] <http://kimminseo777.tistory.com/m/post/79> (Accessed 15 April 2015)