2015 년도 한국철도학회 추계학술대회 논문집 KSR2015A129

도시철도 인접지반 깊은 굴착시 지하 박스구조물 삼차원 안정성 평가

Three-dimensional Stability Analysis of Underground Box Structure in Urban Railway Adjacent to Deep Excavation in the Ground

이성진*, 박영곤*, 이상승**, 김호석**, 윤경원**, 전상수**†
Sung-Jin Lee*, Yeong-Kon Park*, Sang-Seung Lee**, Ho-Seok Kim**, Kyeong-Won Yoon**
Sang-Soo Jeon**†

Abstract Since a lot of people live in urban areas with high population in limited small area, railway structures in underground have been constructed mainly in big cities. Urban railway structures are facing high risks by mobilized stresses of soils induced by newly constructed structures on the ground and/or excavations. In recent days, the construction of deep excavation in soils for high-rise buildings has frequently caused the stability problems of underground structures in urban railway. In this study, a three-dimensional finite difference model using the commercial program FLAC3D is adopted to estimate the stability of urban box structures. Soil profiles and properties in the 00 area of Daejeon subway line No.1 is used to model an underground box structure of urban railway adjacent to deep excavation. Displacements and stresses of the structure induced by deep excavations are estimated to examine its stability with respect to the number of struts and various excavation depths and lengths.

Keywords : Urban railway, Deep excavation, Underground structure, Stability, Numerical analysis

초 록 국내 도시의 특성은 한정된 공간에 많은 인구가 밀집하여 생활하므로 지하공간을 이용한 도시철도 구조물이 대도시를 중심으로 건설되고 있다. 도시철도 지하 구조물은 인근 신규 구조물 및 굴착 시공시 지반응력 변화에 따른 위험을 부담하게 된다. 그 중 최근 고층구조물 시공으로 인한 불가피한 대규모 굴착은 지하구조물의 안정성 문제를 야기시키므로 본 연구에서는 삼차원 유한차분해석 프로그램인 FLAC3D를 이용하여 대전도시철도 1호선 00구간 지역의 지층 단면 및 토질의 특성을 바탕으로 도시철도 인접지반 깊은 굴착시 굴착 깊이 및 길이와 Strut 설치개수에 따른 지하 박스구조물에 발생하는 응력 및 변위를 산정하여 구조물의 안정성 평가를 수행하였다.

주요어 : 도시철도, 깊은 굴착, 지하 구조물, 안정성, 수치해석

1. 서 론

산업 및 기술 발전과 인구증가로 인하여 새로운 교통수단의 필요성이 제기된 1970년대 후반을 기점으로 수도권, 부산광역시, 대구광역시, 대전광역시, 광주광역시 도시철도가 활발하게 시공되어 운영되고 있다. 기존에 시공된 도시철도는 운행기간에 비례하여 여러가지 외부 위험요인에 노출되며 안정성 문제를 야기 시켜왔고 특히 지하구조물 인접지반에 신규

† 교신저자: 인제대학교 공과대학 건설환경공학부(ssj@inje.ac.kr)
* 한국철도기술연구원
** 인제대학교 공과대학 건설환경공학부

구조물 시공시 깊은 굴착으로 인한 지하수 및 지반 응력변화는 주변 지하구조물에 영향을 미치므로 굴착작업을 진행할 경우 인접 지하구조물의 안정성을 고려한 설계 및 시공을 통하여 기존 지하구조물 붕괴로 인한 대규모 인명피해를 방지하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 도시철도 인접지반에 깊은 굴착이 이루어진 경우에 지하 박스구조물의 안정성을 평가하기 위하여 대전도시철도 1호선 운영구간의 지층 단면 및 토질의 특성 그리고 최근 굴착공사 현장에서 많이 사용하고 있는 지보재인 토류벽(H-Pile(300*200*9*14)), 현장타설말뚝(C.I.P(Φ400)), Strut(H-Pile(300*300*10*15))를 적용하여 굴착 깊이와 길이 및 Strut 설치개수에 따른 굴착 단계별 지하 박스구조물에 발생하는 응력 및 변위를 삼차원 유한차분해석 프로그램인 FLAC3D를 이용하여 산정하였다.

2. 지반 및 구조물특성

2.1 지반특성

본 연구에서는 대전도시철도 1호선 00구간 지역의 지층 단면과 현장시료를 채취한 후 실내시험을 통하여 얻어진 지반 특성을[1] 이용하여 수치해석을 수행하였으며 지반특성은 Table 1과 같다.

2.2 구조물특성

Table 1 Physical properties of soils

	Unit weight (t/m^3)	Elastic modulus (t/m^2)	Poison's ratio (υ)	Friction angle (○)	Cohesion (t/m^2)
Land fill	1.7	3000	0.35	25	0.5
Silt clayed	1.7	2000	0.35	25	0.5
Weathered sand	1.9	7500	0.33	34	1.0
Weathered rock	2.0	11000	0.31	40	6.0
Soft rock	2.0	70000	0.30	42	8.0

지중에 시공된 박스구조물은 대전도시철도에 시공된 박스구조물과 동일한 구조물을 사용하였으며 토류벽, C.I.P, Strut는 최근 공사현장에서 많이 사용하고 있는 부재를 선정하였으며[2] Table 2는 이들 부재의 특성을 나타낸다.

3. 수치해석

3.1 수치해석 조건

Table 2 Physical properties of structures

	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}	2.04×10^{-4}
Box side wall	2.30	2.32×10^{6}	3.00×10^{-1}	2.25×10^{-3}
Box top slab	2.30	2.32×10^{6}	1.00×10^{-1}	8.33×10^{-4}
Box bottom slab	2.30	2.32×10^{6}	6.75×10^{-1}	2.56×10^{-3}

깊은 굴착에 의한 도시철도 박스구조물의 안정성을 평가하기 위해 상용프로그램인 유한차분해석 프로그램 FLAC3D를 이용하였으며 Mohr-Coulomb 파괴모델을[3] 적용하였다. 원지반의 크기는 깊은 굴착 영향을 고려하여 깊이 70m, 폭 210m, 길이 50m로 하였으며 굴착 최대깊이 41m, 폭 32m, 굴착 우측면과 박스구조물 좌측벽체의 이격거리는 14m이며 박스구조물 상부슬래브와 지표면까지의 거리는 11m이고 박스구조물은 폭 4m, 높이 6m이다. 깊은 굴착은 전굴착(굴착길이 50m), 반굴착(굴착길이 25m)의 두가지 형태로 설정하였다. 각각 굴착 형태별로 Strut 설치개수를 달리하여 총 4개 모델의 수치해석을 수행하였으며 전굴착 모식도를 Fig. 1에 나타내었으며 반굴착 모식도를 Fig. 2에 나타내었다. 전굴착시 Strut 6개 설치(Model #1)와 Strut 12개 설치(Model #2) 그리고 반굴착시 Strut 6개 설치(Model #3)와 Strut 12개 설치(Model #4)하여 수치해석 모델링을 수행하였다. Fig. 3(a)와 Fig. 4(a)는 각각 전굴착과 반굴착시 수평방향 지반변위를 나타내며 Fig. 3(b), Fig. 3(c), Fig. 4(b), Fig. 4(c)는 6단계 굴착시 사용된 Strut 6개 및 12개 설치와 지하 박스구조물을 나타낸다.

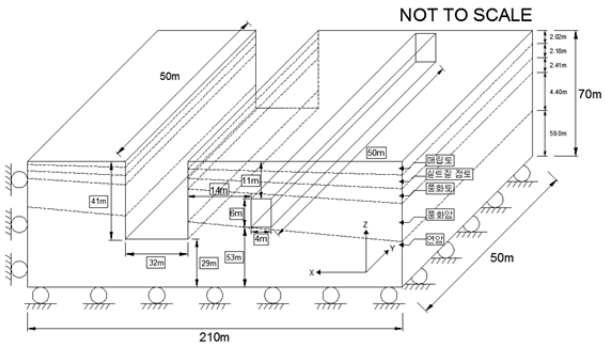


Fig. 1 Configuration of 50-m length excavation (Model #1 & Model #2)

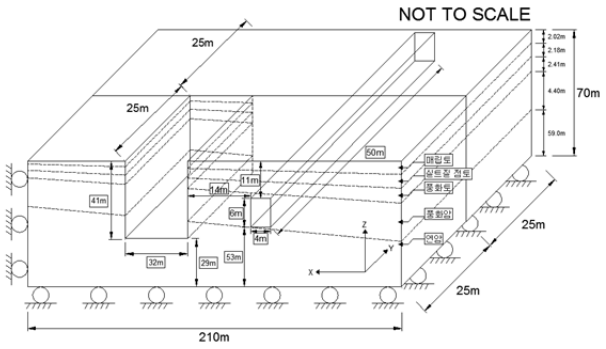
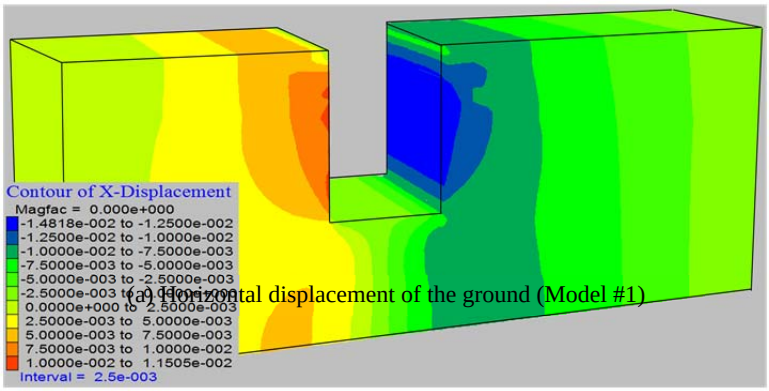
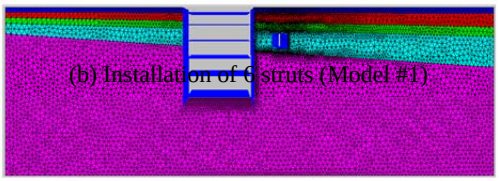


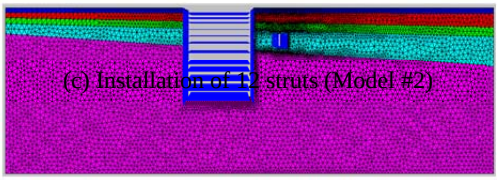
Fig. 2 Configuration of 25-m length excavation (Model #3 & Model #4)



(a) Horizontal displacement of the ground (Model #1)

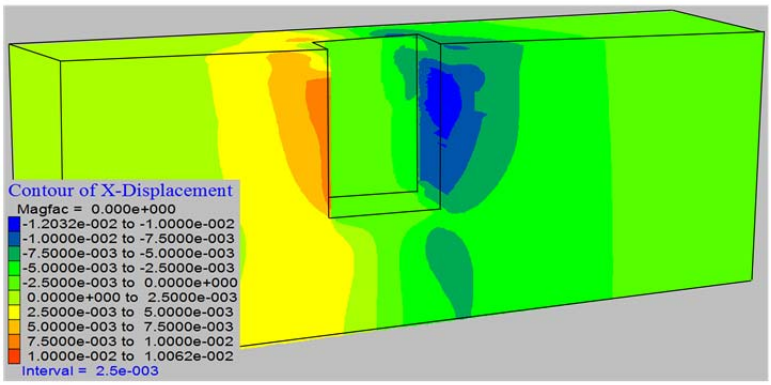


(b) Installation of 6 struts (Model #1)

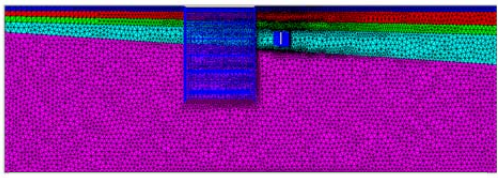


(c) Installation of 12 struts (Model #2)

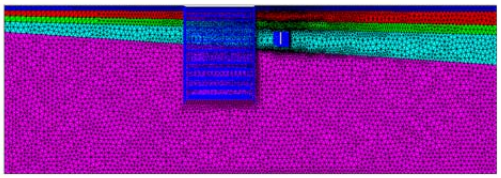
Fig. 3 Three-dimensional view of 50-m length excavation, the installation of struts, and underground box structure



(a) Horizontal displacement of the ground (Model #3)



(b) Installation of 6 struts (Model #3)



(c) Installation of 12 struts (Model #4)

Fig. 4 Three-dimensional view of 25-m length excavation, the installation of struts, and underground box structure

3.2 수치해석 결과

본 연구에서는 내공 단면의 사용효율이 높은 개착공법[4]으로 시공된 지하 박스구조물을 적용하였다. 최종굴착시 구조물에 발생하는 변위를 검토하였으며 박스구조물의 천단, 하부, 좌·우측벽의 중앙에서 산정된 축 응력, 휨 모멘트, 전단응력 값을 바탕으로 허용응력설계법을 적용하여 지하 박스구조물의 안정성 검토를 실시하였으며 네가지 모델 모두 굴착에 인접한 좌측벽부에서 수평변위량이 가장 크게 나타났으며 마지막 6단계 굴착에서 최대변위가 발생하였다. 수직변위는 굴착심도가 어느 정도까지 깊어질 때까지는 히빙(Heaving)이 발생하여 구조물의 변위가 상향으로 발생하지만 그 이상의 굴착이 이루어진 경우에는 변위가 하향으로 발생되었다. 전체적으로 수직방향 변위는 수평방향 변위보다 약 50% 정도 작게 나타났다. Strut 설치개수 차이에 따라 발생한 수평변위를 살펴보면 Model #1이 Model #2보다 약 3~4mm, Model #3가 Model #4보다 약 2~3mm 더 크게 발생하였다. 이는 Strut 설치개수가 적으면 구조물의 변위가 상대적으로 크게 발생함을 알 수 있다. 전굴착과 반굴착시 수평변위를 살펴보면 Model #1이 Model #3보다, Model #2가 Model #4보다 모두 약 2~3mm 더 크게 발생하여 전굴착 모델이 반굴착 모델보다 발생 변위가 큼을 알 수 있다. Table 3는 굴착단계중 발생한 축응력, 인장응력, 전단응력 중 최대값을 산정하여 허용응력설계법을 통한 구조물의 안정성 검토 결과값을 나타내었다. 네 가지 모델 모두 발생응력이 허용응력 이내로 발생하였으며 Strut 설치개수가 많은 Model #2가 Model #1보다 Model #4가 Model #3보다 더 안전하고 전굴착과 반굴착의 경우를 비교해 보면 Model #3가 Model #1보다 Model #4가 Model #2보다 더 안전함을 알 수 있다.

Table 3 Mobilized stress and FS of underground box structure

Mobilized stress	Model #1	Model #2	Model #3	Model #4
	FS*	FS	FS	FS
Compressive	9.73	9.84	9.78	9.89
Tensile	1.06	1.10	1.07	1.11
Shear	2.54	2.78	2.63	2.88

f_{ca}(allowable compressive stress) = 960t/m^2, f_{ta}(allowable tensile stress) = 65t/m^2, f_{sa}(allowable shear stress) = 39t/m^2,
*FS = Factor of safety

3. 결 론

본 연구에서는 도시철도 인접지역의 깊은 굴착으로 인한 지하박스형 구조물의 안정성을 평가하기 위하여 대전도시철도의 지반특성 및 구조물의 특성을 반영한 삼차원 수치해석을 수행하였다. 단계별 깊은 굴착에 따른 도시철도 지하구조물에 발생한 변위는 전굴착시 반굴착한 경우보다 약 20%, Strut 12개 설치시 Strut 6개 설치한 경우보다 약 30% 큰 수평변위가 발생하였고 각각의 경우에 발생한 최대 응력의 차이는 미미하여 압축, 인장, 전단응력 모두 허용범위 내에 있는 것으로 나타났다. 콘크리트 박스구조물에 발생된 인장응력의 안전율 1.0~1.1은 압축응력과 전단응력의 안전율 2.5~9.8에 비해 상대적으로 매우 작으므로 굴착시 구조물에 발생되는 인장응력 검토가 반드시 이루어져야 한다.

후 기

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

참고문헌

[1] SunJin Engineering Corporation (1997) Rail Section 7 Geotechnical research report, Daejeon metropolitan express transit corporation, Deajeon, Korea, pp. 45-62.

[2] http://kimminseo777.tistory.com/m/post/79 (Accessed 15 April 2015)

[3] Itasca Consulting Group, Inc. (2002) FLAC3D Manual: Theory and background, Itasca Consulting Group, Inc., Minnesota, USA.

[4] N.-S. Ahn, S.-S. Kim (1998) *Design example of structure (civil engineering, architecture)*, Science and technology book publishing, Seoul, Korea, pp. 156-178.