도시철도 인접지반 공동발생시 노반 삼차원 안정성 평가

Three-dimensional Stability Analysis of Urban Railway Roadbed Adjacent to Cavity in the Ground

엄기영*, 박영곤*, 김호석**, 이상승**, 윤경원**, 전상수**†

Ki-Young Eum*, Young-Kon Park*, Ho-Seok Kim**, Sang-Seung Lee**, Kyeong-Won Yoon**, Sang-Soo Jeon**†

Abstract In recent days, underground excavations and water pipeline damages have caused a lot of soil losses especially in urban areas. For instance, large-scale cavities were found at the roads adjacent to both Seokchon subway station and Incheon subway line No.2. Since a lot of people use urban subway every day, a big accident leads fatal life loss. Therefore, urban railway should be secured and the risk factors influencing on the railway stability should be examined. In this study, a three-dimensional finite difference model using the commercial program FLAC3D is adopted to estimate the stability of railway roadbed adjacent to cavity as a train loading is applied. Roadbed settlements were estimated, with respect to various depths, widths, and lengths of the cavities located at a 20-m distance from the center of railway, to examine the stability of the roadbed.

Keywords **:** Urban railway, Cavity, Roadbed, Settlement, Stability

초 록 최근 국내의 도심지에서 지하굴착공사 및 수도관 파열 등으로 토사가 유실되고 있으며 비근한 예로 도시철도 지하철 석촌 지하철역 및 인천 2호선 인근에서 대규모 공동이 발생하였다. 지하철은 일일 이용자수가 높으므로 사고발생시 커다란 인명피해가 발생할 수 있어 안정성 확보가 필요하며 이를 위해서는 도시철도에 영향을 미치는 위험인자에 대한 평가가 반드시 이루어져야 하므로 본 연구에서는 도시철도 인접지역에서 공동이 발생한 경우 차량 하중을 고려한 철도 노반의 안전성을 평가하기 위하여 삼차원 유한차분해석 프로그램인 FLAC3D를 이용하였다. 궤도중심으로부터 이격거리 20m에서 발생한 다양한 공동의 깊이, 폭, 길이에 따른 노반 침하량을 산정하여 노반 안정성을 평가하였다.

주요어 : 도시철도, 공동, 노반, 침하, 안정성

1. 서 론

국내 도시철도 지하철은 도시권역 내 이동시 이용하는 중요한 교통수단으로 현재 수도권과 4곳의 광역시에서 운행되며 일일 약 1,000만 명이 이용하고 있다. 이용자가 많은 만큼 지하철의 탈선사고는 발생 빈도가 매우 낮지만 발생시 많은 인명피해가 초래되기 때문에 안

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

* 한국철도기술연구원

** 인제대학교 공과대학 건설환경공학부

전에 대한 중요도가 매우 크다. 현재 국내 지하철 인근에 매설된 노후로 인한 수도관 파열, 토사 유실 및 도시 내 대규모 공사 등은 다양한 규모의 공동을 발생시키고 있으며 그 중 깊이나 폭 또는 길이가 10m 이상의 대규모 공동이 발생한 경우도 있다. 최근 석촌 지하철역 인근에서는 폭 2.5m, 깊이 3m, 길이 8m 그리고 인천 지하철 공사장 인근에서는 폭 11m, 깊이 27m, 길이 12m의 공동이 발생하였다. 두 가지 경우 공동이 모두 지하철 인근에서 발생하였으며 이러한 대규모 공동은 지하철 궤도 안정성에 영향을 미칠 수 있으므로 본 연구에서는 지상으로 운행되는 지하철의 궤도 중심과 공동 중심 간 이격거리 20m에서 공동이 발생하였을 경우 공동 폭, 깊이, 길이에 따른 노반의 안정성 평가를 삼차원 수치해석을 통하여 수행하였다.

2. 수치해석

2.1 수치해석 조건

본 연구에서는 지하철 노반 안정성 평가를 위한 삼차원 수치해석은 유한차분해석 프로그램인 FLAC3D와 Mohr-Coulomb 파괴모델[1]을 사용하여 수행하였다. Fig. 1은 수치해석에 사용된 모식도를 나타내며 궤도 중심에서 공동 중심 간 이격거리 20m, 궤도, 열차하중, 공동 등을 상세하게 Fig. 2에 나타내었다.

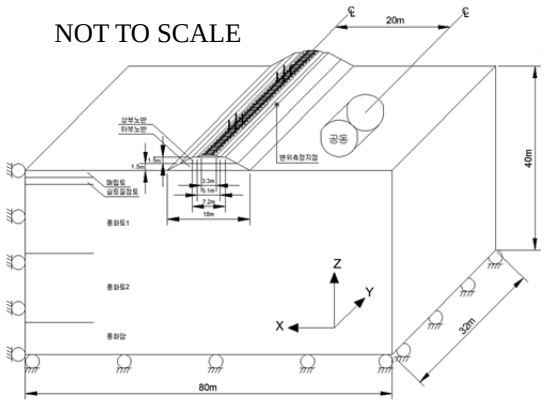


Fig. 1 Configuration of railway roadbed and cavity

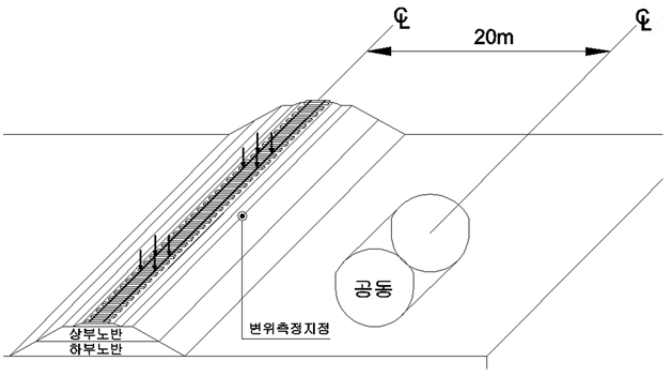


Fig. 2 Detailed configuration of railway roadbed and cavity

2.2 수치해석 물성치

2.2.1 지반 물성치

수치해석에 사용된 성토지반은 자갈도상, 상부노반, 하부노반 그리고 원지반은 매립토, 실트질 점토, 풍화토Ⅰ, 풍화토Ⅱ, 풍화암으로 이루어져있으며 각각의 지반 물성치는 Table 1과 같다. 자갈도상은 2급선 기준인 시공기면폭 8m, 도상아래폭 5.1m, 도상윗폭 3.3m, 도상두께 0.3m를 사용하였다[2].

Table 1 Physical properties of soil

	Height (m)	Unit weight (t/m^3)	Elastic modulus (t/m^2)	Poisson's ratio (υ)	Cohesion (t/m^2)	Friction angle (°)
Ballast stone	0.3	1.9	13.39	0.30	-	35
Upper loadbed	1.5	1.8	9.16	0.20	0.3	32
Lower loadbed	1.5	1.8	5.10	0.30	1	30
Land fill	1.5	1.7	3.00	0.35	0.5	24
Silty clay	1.5	1.7	2.00	0.35	0.5	25
Weathered soil Ⅰ	15.0	1.9	7.50	0.33	1	30
Weathered soil Ⅱ	15.0	1.9	7.50	0.33	1	33
Weathered rock	7.0	2.0	11.00	0.31	6	42

2.2.2 레일 및 PC 침목 물성치

수치해석에 사용된 레일은 지하철에서 사용되고 있는 KS60 레일과 자갈도상에 가장 많이 사용되는 PC 침목, 최근 사용 중인 TPU(Thermoplastic Poly Urethane)재질의 레일패드를 사용하여 수치해석을 수행하였으며 이들 재료의 물리적 특성은 Tables 2-4에 나타내었다.

Table 2 Physical properties of rail

	Area (mm^2)	Unit weight (t/m^3)	Elastic modulus (t/m^2)	Moment of inertia(m^4)	
				I_{XX}	I_{YY}
KS60 rail	7,741	7.75	$21{,}000\times10^3$	$30{,}820\times10^{-9}$	$5{,}120\times10^{-9}$

Table 3 Physical properties of prestressed concrete sleeper

	Length (m)	Width (m)	Height (m)	Interval between sleepers (m)
PC sleeper	2.45	0.28	0.20	0.58

Table 4 Physical properties of rail pad

	Thickness (mm)	Unit weight (t/m^3)	Vertical spring coefficient of rail pad (t/m^2)
Rail pad	5	1.15	15.3×10^6

2.3 차량하중

Fig. 3에 나타나듯이 지하철 차량하중을 모사하였으며 도시철도 차량안전기준에 관한 규칙 제8조[3]의 전동차 축중(P)인 16ton을 적용하였다. 설계윤중(Q)은 P/2이고 캔트부족에 따른 윤중 증가율 20%를 고려한 유효하중(Q_{eff}) = Q × 1.2, 동적충격률(i) = 1.2를 고려한 동적하

중(Q_{dyn}) = Q_{eff} × i을 산정하였다[4].

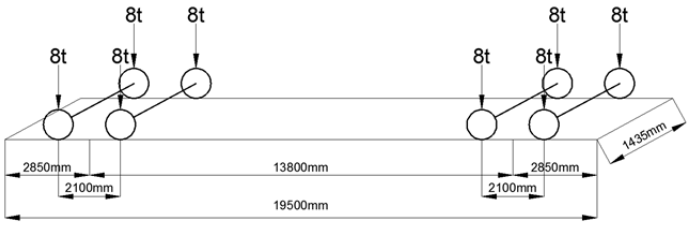
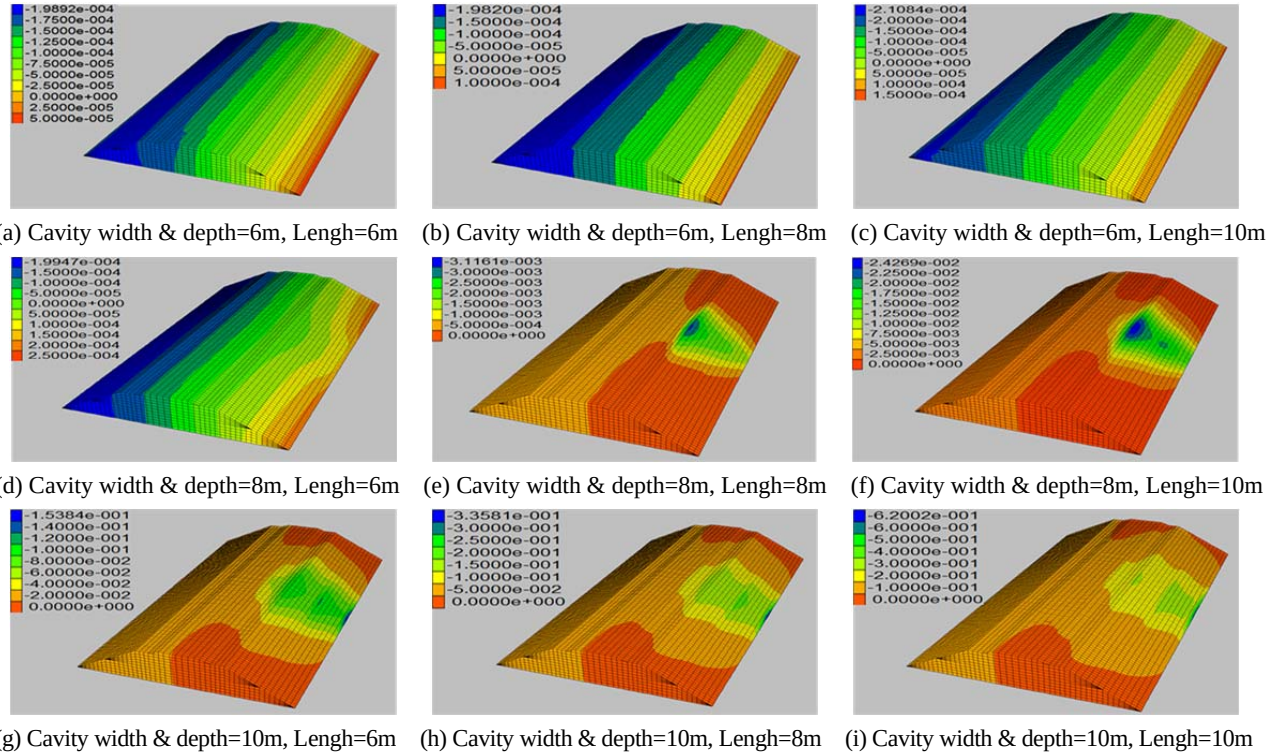


Fig. 3 Configuration of train load

2.4 수치해석 결과

Figs. 4-5는 궤도 중심과 공동 중심간 이격거리 20m에서 발생한 공동 폭과 깊이 및 길이에 따른 수직지반변위 컨투어를 나타낸다. Figs. 4-5 (a), (b), (c)는 공동 폭과 깊이 모두 6m, 공동 길이가 각각 6, 8, 10m 그리고 Figs. 4-5 (d), (e), (f)는 공동 폭과 깊이 모두 8m, 공동 길이가 각각 6, 8, 10m이고 Figs. 4-5 (g), (h), (i)는 공동 폭과 깊이 모두 10m, 공동 길이가 각각 6, 8, 10m인 경우 수치해석을 통하여 얻어진 수직지반변위이다. 공동의 폭, 깊이, 길이가 커질수록 노반 침하량에 미치는 영향이 큼을 알 수 있으며 특히 공동의 깊이가 가장 영향이 크다는 것을 알 수 있다. Table 5는 Fig. 2에 나타난 상부노반 변위측점지점에서 산정된 노반 침하량을 나타낸다. 공동 폭과 깊이 및 길이가 8m 보다 작은 경우 노반에 미치는 영향이 미미하여 노반의 허용침하량 이내로 침하량이 나타나나 공동 크기가 8m 이상인 경우 공동 발생으로 인한 노반 침하량이 허용침하량 2.5mm[5] 보다 매우 큼을 알 수 있다.



(a) Cavity width & depth=6m, Lengh=6m (b) Cavity width & depth=6m, Lengh=8m (c) Cavity width & depth=6m, Lengh=10m

(d) Cavity width & depth=8m, Lengh=6m (e) Cavity width & depth=8m, Lengh=8m (f) Cavity width & depth=8m, Lengh=10m

(g) Cavity width & depth=10m, Lengh=6m (h) Cavity width & depth=10m, Lengh=8m (i) Cavity width & depth=10m, Lengh=10m

Fig. 5 Vertical displacement contour of roadbed w.r.t cavity width, depth, and length

Table 5 Roadbed settlement (unit: mm)

		Cavity length		
		6m	8m	10m
Cavity width and depth	6m	0.1	0.1	0.1
	8m	0.1	3.1	24.3
	10m	97.0	146.0	209.8

3. 결 론

본 연구에서는 궤도 중심에서 공동 중심 간 이격거리 20m에서 발생한 다양한 공동의 폭, 깊이, 길이에 따른 노반 침하량을 산정하였으며 공동 크기가 증가할수록 노반 안정성에 미치는 영향이 매우 크며 공동의 깊이가 길이에 비해 노반 침하에 미치는 영향이 더 큼을 알 수 있다. 공동의 크기가 일정범위를 벗어난 경우에는 과도한 노반 침하량이 발생하여 탈선사고가 야기되므로 도시철도 인접지역 공동발생시 도시철도 노반 안정성 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 기술 개발]

참고문헌

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

[2] Suwon facility management office (2014) *Railway Ballast*, Suwon facility management office, KORAIL, pp. 1-12.

[3] http://www.law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?lsiSeq=137691#0000 (Accessed 25 August 2015)

[4] Department of urban infrastructure at Seoul metropolitan government (2012) Second stage working design service of track for Seoul subway line No.9, Seoul, Korea, pp. 99-188.

[5] S.-S. Jeon, G.-Y. Eum, J.-M. Kim (2007) Roadbed bearing capacity associated with estimated impact factor in conventional and improved turnout system, *Korean Society of Railway*, 10(5), pp. 582-588.