

도시철도 인접지반 공동발생시 지하수위에 따른 노반 안정성 평가 Stability Analysis of Roadbed Associated with Groundwater Levels and Cavities in Adjacent to Urban Railways

윤경원*, 이성진**, 박영곤**, 이상승*, 이동근*, 전상수*†

Kyeong-Won Yoon*, Sung-Jin Lee**, Young-Kon Park**

Sang-Seung Lee*, Dong-Geun Lee*, Sang-Soo Jeon*†

Abstract Leakage of aged pipelines in urban areas have induced ground loss frequently resulting in cavities. Train loadings associated with change of groundwater levels in an undiscerning development of urban areas induce roadbed settlements. Since train derailment occurs as the roadbed exceeds the allowable settlements, location and size of cavity and groundwater level should be figured out. In this study, the commercial program, FLAC3D, which is a three-dimensional finite-difference numerical code is used to do stability analysis of roadbed associated with groundwater levels and cavities in adjacent to urban railways. Numerical results show that the roadbed satisfies the allowable settlements as the center of roadbed is greater than 25-m distance from the center of cavity and groundwater level is lower than 22m below ground surface for 10-m diameter of cavity.

Keywords : Urban railway, Cavity, Roadbed, Groundwater, Stability

초 록 최근 국내 도심지역에서 노후관 누수로 인한 지반 토사 유실은 공동을 빈번하게 발생시키고 있다. 또한 무분별한 도시개발로 인한 지하수위 변화는 열차하중에 의한 노반의 침하를 유발시킨다. 이러한 공동발생과 지하수위 변화로 인하여 노반이 허용 침하량을 초과한 경우 열차 탈선이 발생할 수 있으므로 공동 위치 및 크기, 지하수위의 파악이 중요하다. 본 연구에서는 삼차원 유한차분해석 상용 프로그램 FLAC3D 를 이용하여 도시철도 인접지반에서 공동이 발생한 경우 지하수위에 따른 철도 노반 안정성 평가를 실시 하였다. 수치해석 결과 공동직경 10m 인 경우 궤도 중심으로부터 이격거리가 25m 이상, 지하수위가 지표면으로부터 22m 하부에 있는 경우에만 노반의 허용침하량을 만족함을 알 수 있다.

주요어 : 도시철도, 공동, 노반, 지하수, 안정성

1. 서 론

국내 도심지역에서 노후관 누수에 따른 지하수위의 변화로 최근 4년사이 15배 이상 공동이 발생하고 있다. 최근 서울시와 부산시의 공동 발생현황을 살펴보면 발생지점이 대부분 지하철노선과 일치하고 있다. 지하철 건설과 도시철도 운행은 새로운 형태의 공동을 발생시

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

* 인제대학교 공과대학 토목도시공학부

** 한국철도기술연구원

킨다. 또한 도시철도 인접 지반에서 공동 발생시 단순한 지반 침하에서 그치는 것이 아니라 노반의 침하와 열차 궤도이탈을 유발하여 인명피해로 이어지는 등 중요한 사안이다.

본 연구에서는 도시철도 인접지반의 공동발생과 지하수위 유무에 따른 노반침하량 분석을 위하여 유한차분해석 사용 프로그램인 FLAC3D를 이용하여 지상에서 운행되는 지하철의 궤도 중심에서 공동 중심까지의 이격거리, 공동의 크기, 지하수위에 따른 노반의 침하량을 분석하였다.

2. 수치해석을 이용한 노반 안정성 검토

2.1 수치해석 조건 및 방법

본 연구에서는 삼차원 수치해석 프로그램 FLAC3D를 사용하여 지하철 노반 안정성 평가를 수행하였다. Fig.1은 수치해석에 사용된 도시철도 궤도 및 지반 모식도를 나타낸 것이며 Fig.2는 궤도중심에서 공동의 이격거리, 열차하중 위치를 확대하여 나타낸 것이다.

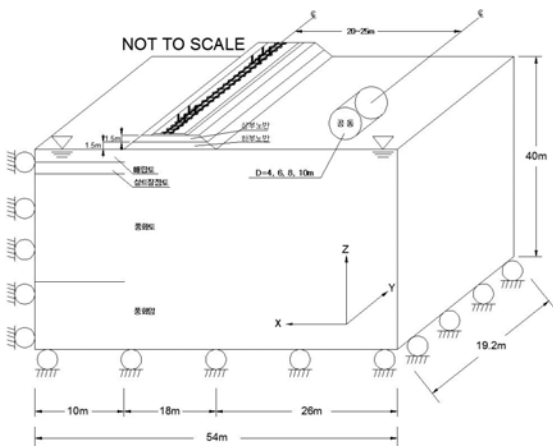


Fig. 1 Configuration of railway roadbed and cavity

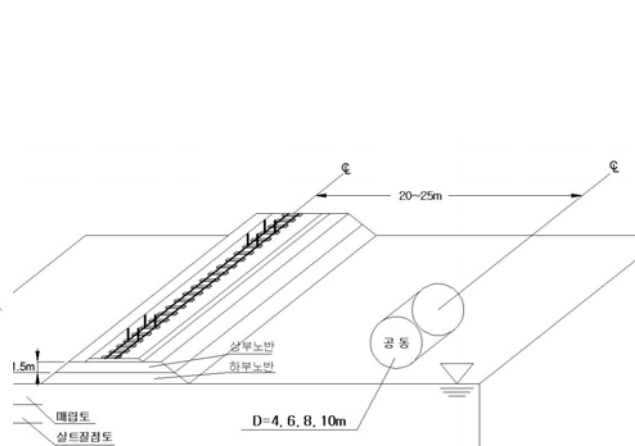


Fig. 2 Detailed configuration of railway roadbed and cavity

2.1.1 지반 물성치

수치해석에 사용된 지반의 물성은 Table 1과 같으며 성토지반은 하부노반, 상부노반, 자갈도상으로 하였으며, 자갈도상은 2급선을 기준으로 사용하였다[1].

Table 1 Physical properties of soil

	Height (m)	Unit weight (t/m ³)	Elastic modulus (t/m ²)	Poisson's ratio (ν)	Cohesion (t/m ²)	Friction angle (°)	Permeability coefficient (m/sec)
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	1.0x10 ⁻⁵
Silty clay	1.5	1.7	2.00	0.35	0.5	25	5.0x10 ⁻⁶
Weathered soil I	15.0	1.9	7.50	0.33	1	30	1.0x10 ⁻⁶
Weathered soil II	15.0	1.9	7.50	0.33	1	33	1.0x10 ⁻⁶
Weathered rock	7.0	2.0	11.00	0.31	6	42	1.0x10 ⁻⁷

2.1.2 레일 및 PC침목 물성치

Table 2~4는 수치해석에 사용된 레일 및 침목과 패드의 물성치를 나타낸다. 일반철도 주요 본선(경부, 호남선 등)의 레일 중량화 이후 사용된 KS60레일을 사용 하였으며, 일반적으로 널리 사용되는 PC(Prestressed Concrete)침목, 우레탄 재질의 TPU(Thermoplastic Poly Urethane) 패드의 물성으로 수치해석을 수행하였다.

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	21,000×10 ³	30,820×10 ⁻⁹	5,120×10 ⁻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

2.1.3 열차하중

지하철 열차하중은 도시철도 차량안전기준에 관한 규칙 제8조의 전동차 축중(P)인 16ton을 적용하였다[2]. 설계윤중(Q)은 P/2이고 캔트부족에 따른 윤중 증가율 20%를 고려한 유효하중(Q_{eff}) = Q × i 를 산정하였다[3].

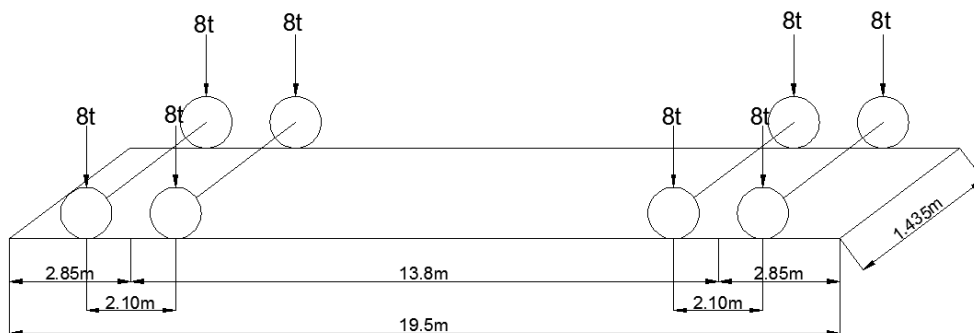


Fig. 3 Configuration of train load

2.2 유한차분해석 결과

Figs. 4~5는 궤도중심과 공동 중심의 이격거리 20m에서 발생한 직경 4m, 6m의 공동이 발생하였을 때 지하수위에 따른 수직변위 컨투어를 나타낸 것이다. Figs. 4~5의 (a),(b),(c)는 공동직경 4m 일 때 지하수가 없을 때, 지하수위(G.W.L)가 지표면과 12m에 있는 경우 수직변위 컨투어를 나타내며, Figs. 4~5의 (d),(e),(f)는 공동직경 6m 일 때 지하수가 없을 때, 지하수위(G.W.L)가 지표면과 12m에 있는 경우 수직변위 컨투어를 나타낸다. 공동의 직경이 커지거나 지하수위가 높을수록 지반변위가 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, Table 5의 궤도중심 노반침하량을 확인하면 직경 4m의 경우 지하수위 12m에서 직경 6m는 지하수위 13m 일 때 노반의 허용침하량[4]을 만족함을 알 수 있다.

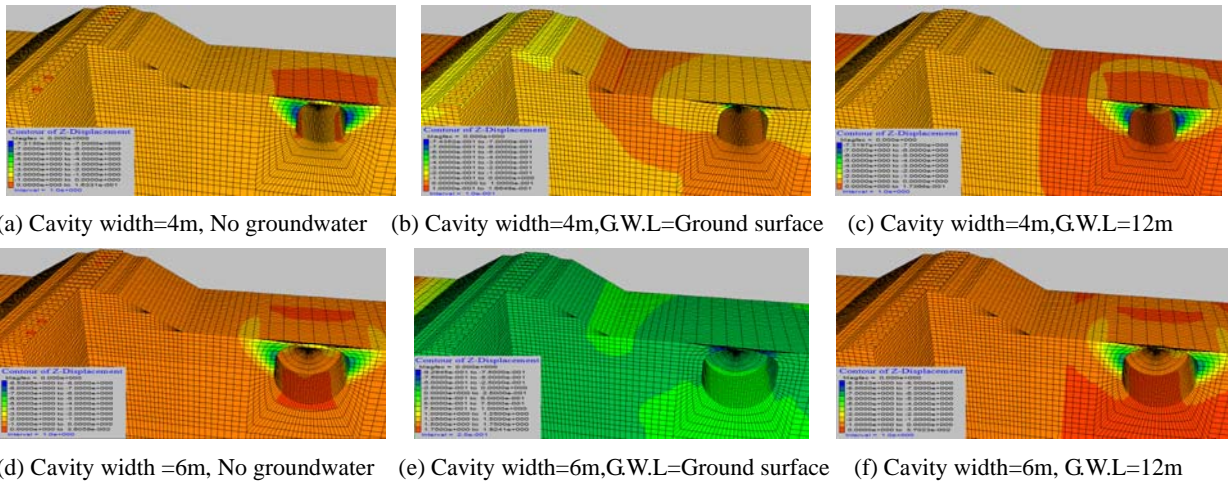


Fig. 4 Vertical displacement contour of ground w.r.t cavity width, groundwater level(G.W.L)

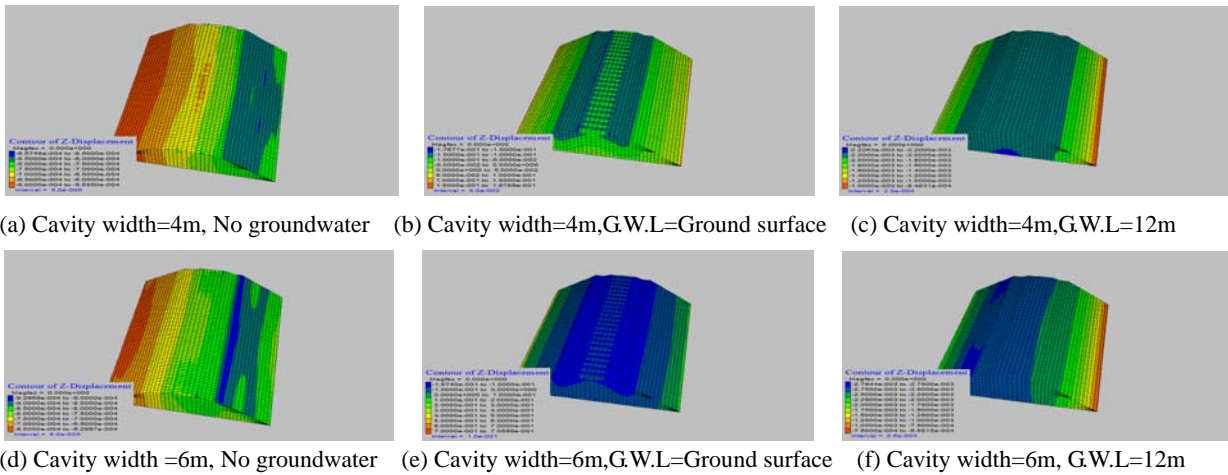


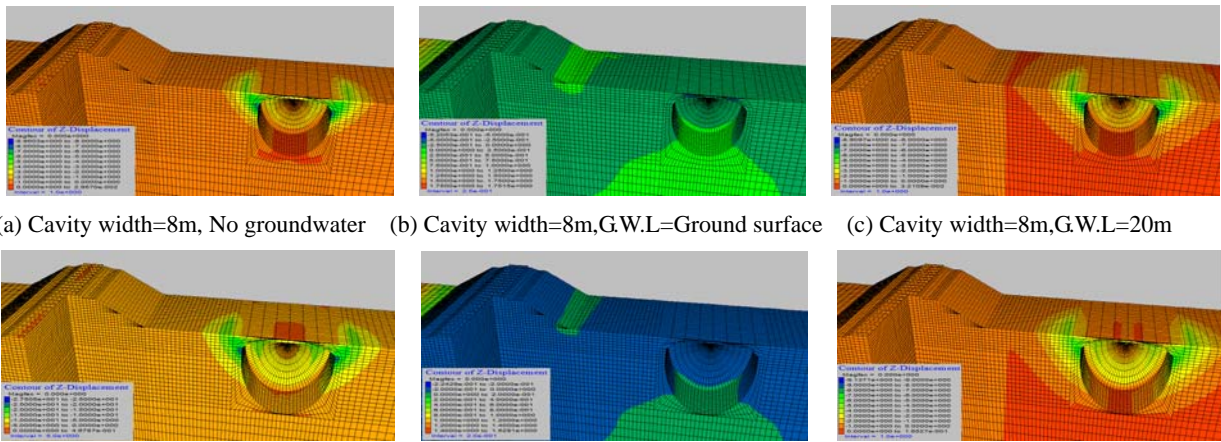
Fig. 5 Vertical displacement contour of roadbed w.r.t cavity width, groundwater level(G.W.L)

Table 5 Roadbed settlement(mm) – 20m distance from the center of roadbed

		G.W.L								
		-	0m	4m	6m	8m	10m	11m	12m	13m
Cavity width and depth	4m	0.7	148.0	37.0	16.9	5.6	3.0	2.6	2.3	-
	6m	0.8	163.0	69.0	55.0	14.0	4.5	3.5	2.8	2.2

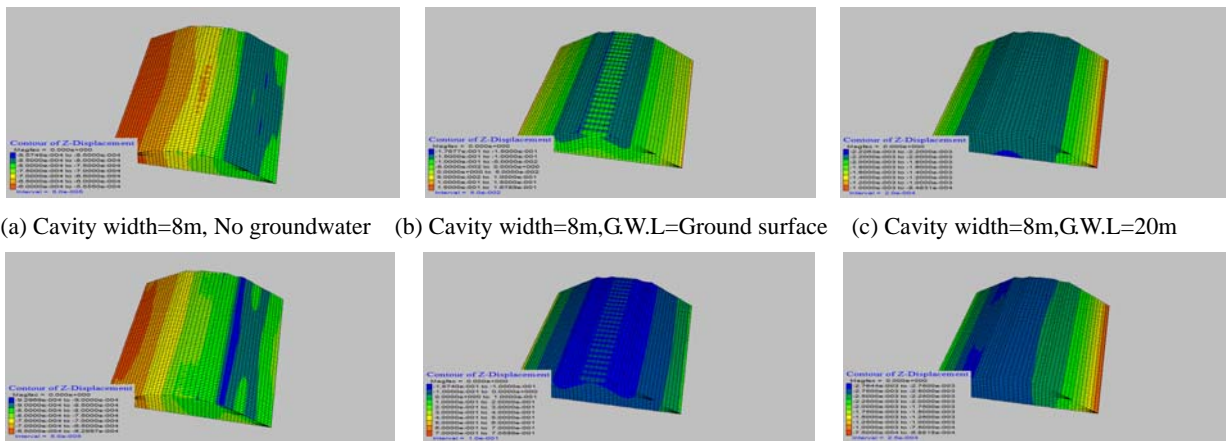
Figs. 6~7은 궤도중심과 공동 중심의 이격거리 25m에서 발생한 직경 8m, 10m의 공동이 발생하였을 때 지하수위에 따른 수직변위 컨투어를 나타낸 것이다. Fig. 6~7 (a),(b),(c)는 공동직경 8m 일 때 지하수가 없을 때, 지하수위가 지표면과 20m에 있는 경우 수직변위 컨투어를 나타내며, Fig. 6~7의 (d),(e),(f)는 공동직경 10m 인 경우 지하수가 없을 때, 지하수위가 지표면과 20m에 있는 경우 수직변위 컨투어이다.

지하수위가 지표면과 지표면 하부 10m에 있는 경우 노반의 침하량이 매우 크게 발생하나 15m이하인 경우에는 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 Table 6을 확인하면 직경 8m의 경우 지하수위가 지표면 하부 20m에 있는 경우 허용침하량을 만족하지만 직경 10m의 경우에는 지하수위가 지표면 하부 22m까지 내려가야 허용침하량을 만족함을 알 수 있다.



(a) Cavity width=8m, No groundwater (b) Cavity width=8m,G.W.L=Ground surface (c) Cavity width=8m,G.W.L=20m
 (d) Cavity width =10m, No groundwater (e) Cavity width=10m,G.W.L=Ground surface (f) Cavity width=10m, G.W.L=20m

Fig. 6 Vertical displacement contour of ground w.r.t cavity width, groundwater level(G.W.L)



(a) Cavity width=8m, No groundwater (b) Cavity width=8m,G.W.L=Ground surface (c) Cavity width=8m,G.W.L=20m
 (d) Cavity width =10m, No groundwater (e) Cavity width=10m,G.W.L=Ground surface (f) Cavity width=10m, G.W.L=20m

Fig. 7 Vertical displacement contour of roadbed w.r.t cavity width, groundwater level(G.W.L)

Table 6 Roadbed settlement(mm) – 25m distance from the center of roadbed

		G.W.L								
		-	0m	8m	10m	15m	17m	18m	20m	22m
Cavity width and depth	8m	0.7	176.0	80.0	35.0	3.5	2.8	2.4	2.1	-
	10m	0.8	169.0	140.0	100.0	13.0	4.5	3.5	2.8	2.4

3. 결 론

본 연구에서는 철도노반 주변지반에 공동발생시 지하수위 변화에 따른 유한차분해석 상용프로그램인 FLAC3D를 이용하여 노반 안정성을 분석하였다. 지하수의 유무와 지하수위 변화에 따라 노반 침하량에 영향이 큼을 알 수 있으며 궤도중심에서 공동중심까지의 이격거리가 20m일 때 공동직경 4m, 6m의 경우 지하수위가 지표면 하부 12m, 13m인 경우에 노반의 안정성을 확보함을 알 수 있으며, 공동직경 8m, 10m의 경우 궤도중심과 최소 25m의 이격거리, 각각의 지하수위가 지표면 하부 20m, 22m인 경우에 노반이 안정성을 확보 함을 알 수 있다. 노반의 침하는 열차의 궤도이탈 및 인명피해를 유발하므로 도시철도 주변지반의 공동 발생 유무와 지하수위에 따른 노반 안정성 검토를 실시하는 것이 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] Suwon facility management office (2014) *Railway Ballast*, Suwon facility management office, KORAIL, pp. 1-12.
- [2] <http://www.law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?lsiSeq=137691#0000> (Accessed 29 August 2016)
- [3] 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.
- [4] 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.