

수치해석을 통한 도시철도 하부지반 공동의 변위발생 민감도 분석

Sensitivity Analysis of the Deformations caused by Cavity Generation in Subway Trackbed Foundation using the FEA

이성진*, 이진욱*, 정영남**, 조호진**, 임유진**†

Sung Jin Lee*, Jin Wook Lee*, Yeungnam Jung**, Hojin Cho**, Yujin Lim**†

Abstract Cavities are found many times recently in downtown of metropolitan cities due to old and damaged pipes installed in the ground. The cavities are generated by spilling out of water from pipes mostly. The cavities generated below subway track can make irregularities and unstability of the track. In this study, a finite element program ABAQUS is used to analyze the structural behavior of the track in cases of existence of cavities in subway trackbed foundation. It is found from the FE analysis that there can be a lot of differences in displacement of the track, depending on load frequency, soil modulus, depth and diameter of cavity. The most important influence factors on the structural stability of track can be provided from the analysis in case of cavity existence in the trackbed foundation.

Keywords : Cavity, Subway track, Displacement, Numerical analysis

초 록 최근 상하수도관 등 도시내 매설된 지중구조물의 노후화에 따른 누수, 변형 및 지하수위 변화 등에 의하여 공동발생이 급증하고 있다. 이와 같은 공동발생은 지반 침하 및 함몰 등을 유발하여 인명 및 경제적 피해를 야기시킨다. 특히, 도시철도 근접부에 발생하는 공동은 궤도의 침하와 틀림을 발생시켜 궤도 안정성에 심각한 문제가 될 수 있다. 본 연구에서는 지하 도시철도 궤도하부의 공동발생 유무에 따른 거동 차이를 분석하기 위하여 ABAQUS 유한요소해석 프로그램으로 공동발생 구간에 대한 동적 구조해석을 실시하였다. 구조 해석결과로부터 도시철도 하부지반에 발생하는 공동의 크기(D) 및 깊이(z), 지반의 탄성계수, 하중 주파수에 따라 변위 차이가 발생하는 것을 확인하였으며 이로부터 하부지반에 발생하는 공동이 궤도구조 전체의 구조적 안정성에 미치는 영향 요소를 결정할 수 있었다.

주요어 : 공동, 도시철도, 변위, 수치해석

1. 서 론

현재 도심지 내 도시철도 주변지반에서는 상하수도관 노후화에 따른 누수와 지하수위 변화로 인한 공동발생이 빈번하게 발생하고 있다. 도시철도 근접부의 공동으로 인하여 발생하는 지반 침하 및 함몰 등은 궤도의 침하와 틀림현상을 유발하여 궤도 안정성에 심각한 문제를 야기할 수 있다.

† 교신저자: 배재대학교 공과대학 건설환경철도공학과(yujin@pcu.ac.kr)

* 한국철도기술연구원

** 배재대학교 건설환경철도공학과

본 연구에서는 지하 도시철도 하부지반의 공동발생 유무에 따른 변위발생 민감도 분석을 위하여 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 도시철도의 궤도 및 하부구조를 모사하고, 도시철도차량의 동적 하중을 적용하여 공동의 유무, 크기(D), 깊이(z) 및 지반의 탄성계수(E)에 따른 변위 발생을 분석하여 하부지반에 발생하는 공동이 전체 궤도구조의 구조적 안정성에 미치는 영향 요소를 결정 하고자 하였다.

2. 수치해석을 이용한 공동발생 구간 민감도 분석

2.1 유한요소 해석조건 및 해석방법

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 도시철도 하부지반 내 발생하는 공동 유무에 따른 궤도상 변위 발생량을 비교, 분석하였다. 궤도 및 하부지반의 단면은 Fig. 1과 같이 공동의 크기 및 깊이를 고려하여 깊이 5m, 폭 7m로 모델링 하였다. 모델의 경계조건은 무한요소(Infinite element)를 사용하여 진동과의 반사에 의한 영향을 최소화 하였다. 공동발생 유무에 따른 궤도상 발생변위(δ)를 비교, 분석하기 위하여 공동의 직경(D)=0.3, 0.6, 1.2m, 깊이(H)=0.6, 1.2, 1.8m 및 궤도중심으로부터 수평 이격거리(L)=0, 0.8, 1.5, 2.8m에 공동의 발생 위치를 가정하여 모사하였다. 궤도 및 하부지반의 물성치는 Table 2와 같이 적용하였다. 모델 전체에 자중($g=9.8m/s^2$)을 적용하여 지중응력이 발생하도록 하였으며, 도시철도 차량의 운행 중 최고 속도인 80km/h에 해당하는 동적하중(86kN)을 레일 상면부에 Fig. 2와 같이 실험대차간격으로 반복재하 하였다.

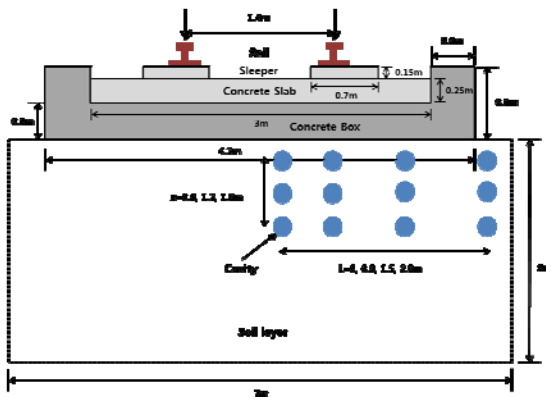


Fig. 1 Finite element mesh

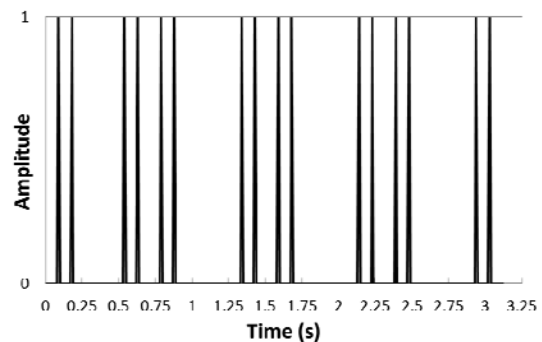


Fig. 2 Modeling of load repetition

Table 1 Material input values used in numerical analysis

Division	Modulus E(MN/m ²)	Poison's ratio ν	Density ρ (ton/m ³)	Damping	
				α	β
Rail	210,000	0.167	7.85	30.81	5.00E-05
Sleeper	30,000	0.17	2.8	0.4	0.00073
Concrete Slab	30,000	0.17	2.8	0.4	0.00073
Concrete Box	23,000	0.15	2.4	0.4	0.00073
Soil	50, 80, 120	0.3	2	0.4	0.00073

수치해석 결과로부터 획득한 궤도 중앙부의 침하량(Δs)을 취득하여 공동 유무 등에 따른 민감도 분석을 실시 하였다.

2.2 유한요소해석 결과

Fig. 3은 도시철도 하부노반의 탄성계수를 80MPa로 균질하게 모사하여 공동의 유무 및 위치에 따른 수직 변위를 해석한 결과이다(공동직경 0.6m). Fig. 4는 유한요소해석 결과 중 궤도 상단 중앙부의 수직 변위량을 하중 재하 경과시간에 따라 나타낸 것이다. 도시철도 하부지반 중앙부에 공동이 발생할 경우 공동이 없는 경우보다 약 2% 정도 크게 발생하였다. 또한 Fig. 3(c)와 같이 궤도 중앙부보다 궤도 측면부에 공동이 발생하였을 때 약 10% 큰 수직 변위가 발생하였다.

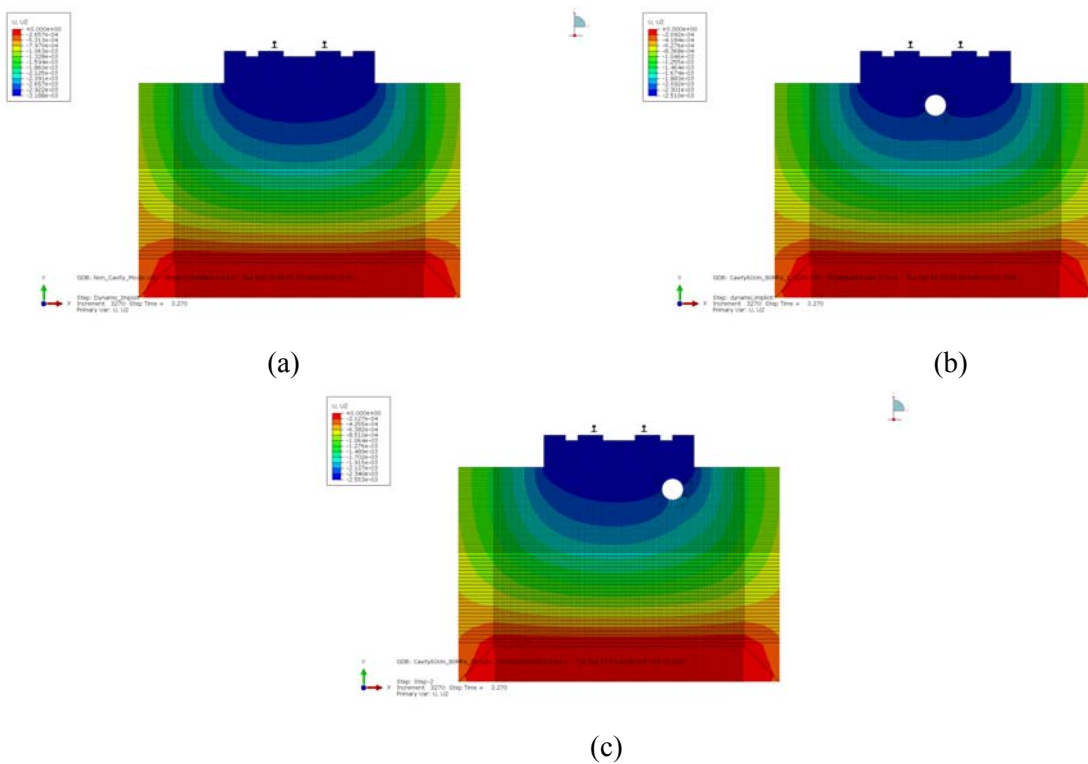


Fig. 3 Displacement contours : (a) without cavity (b) with cavity (Center) (c) with cavity (Side)

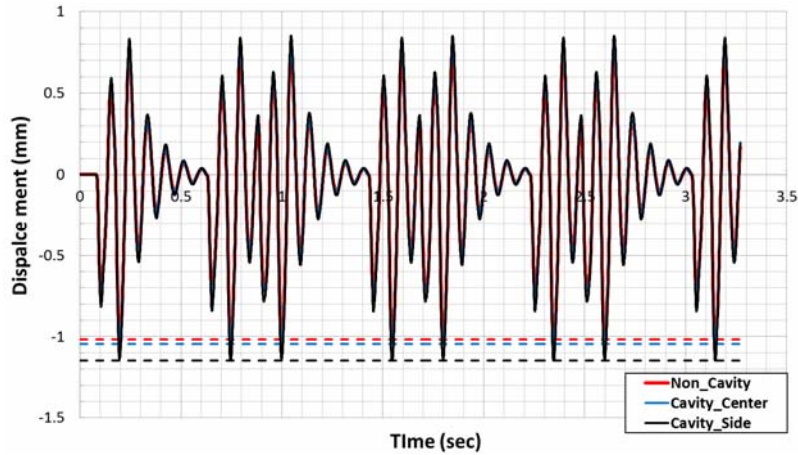


Fig. 4 Obtained results in case of cavity existence: displacement variation with time

Fig. 5는 도시철도 차량 하중에 의해 발생하는 궤도 상단 중앙부의 시간에 따른 침하량(Time domain)을 FFT(Fast Fourier Transform) 변환을 실시하여 주파수에 따른 진폭(Frequency domain)으로 나타낸 결과이다. 공동 유무 및 위치에 따른 주파수 대역에서의 변위발생은 큰 차이가 없었으나, 수직변위진폭(Amplitude)의 크기는 공동유무에 따라 최대 12%정도의 차이를 보였다. 추후 공동 크기(D), 깊이(z) 및 이격거리(L)와 콘크리트 슬라브 및 Box의 두께변화 등에 따른 주파수 특성을 추가적으로 분석할 예정이다. 이로부터 도시철도 하부지반에 발생하는 공동 특성에 따른 민감도 분석을 실시하여 구조적 안정성을 판단할 수 있는 영향 요소 및 판정기준을 제시할 예정이다.

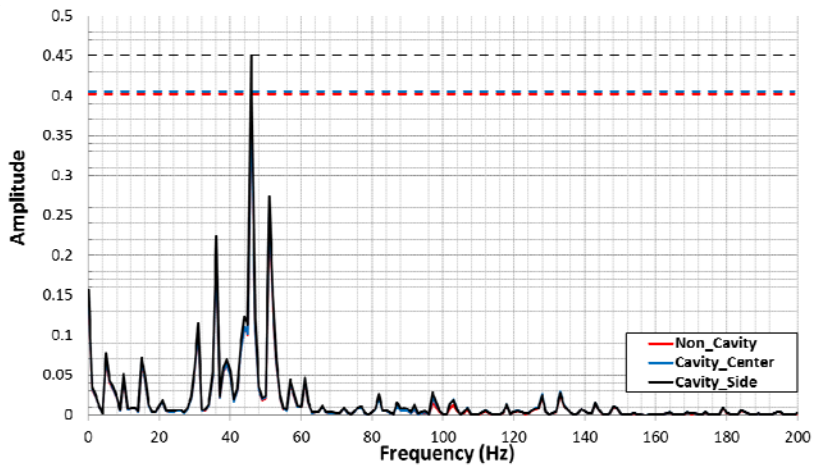


Fig. 5 Obtained results in case of cavity existence: displacement amplitude variation with frequency

3. 결론

본 연구에서는 지하 도시철도 하부지반의 공동발생 유무에 따른 변위발생 민감도 분석을 위하여 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 도시철도의 궤도 및 하부구조를 모사하고, 도시철도차량의 동적 하중을 적용하여 공동의 유무, 크기(D), 깊이(z) 및 지반의 탄성계수(E)에 따른 변위 발생을 분석하여 하부지반에 발생하는 공동이 전체 궤도구조의 구조적 안정성에 미치는 영향 요소를 결정 하고자 하였다. 도시철도 하부지반의 공동의 위치(깊이와 수평거리) 및 궤도노반의 강성 변화를 매개변수로 유한요소 해석을 실시하여 산정된 수직 침하량으로부터 궤도 하부구조의 안정성을 분석하였다. 이로부터 아래와 같은 결론을 도출하였다.

(1) 2차원의 단순해석 및 비교시(공동직경 $D=0.6m$), 두꺼운 콘크리트 박스구조물 상에 궤도를 부설하는 도시철도의 경우, 궤도상 발생하는 수직 변위는 공동이 없는 경우보다 궤도 중앙부에 공동이 발생한 경우에서 약 2% 정도 크게 발생하였다. 공동 발생시 궤도하부구조의 구조적 안정성이 떨어질 수 있음을 확인 할 수 있으나 공동이 다소 작고 궤도중앙부에 발생하였을 경우 콘크리트 박스구조물이 상당한 크기의 휨저항을 제공할 수 있어 궤도 전체의 안정성을 유지할 수 있음을 알 수 있다. 향후, 공동의 크기를 증가시키면서 콘크리트 박스구조물과 궤도구조물에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다.

(2) 공동의 발생 깊이가 일정(0.6m)하고 공동위치가 궤도중앙부와 측면부에 각각 발생하였을 경우를 비교하면, 측면부에서 공동이 발생한 경우에서 약 10% 더 큰 수직침하량을 보였다. 이는 콘크리트 박스를 포함한 상부 슬래브가 공동이 발생한 측면부로 회전(rotation) 이동하여 처짐이 더욱 크게 발생한 것으로 사료된다.

(3) 공동의 발생위치(중앙부 및 측면부)에 따른 수직변위의 주파수반응 스펙트럼(FRF)은 거의 동일한 대역에서 나타났으며, 궤도상 수직변위의 진폭(Amplitude)의 크기는, 공동이 측면부에서 발생한 경우에서 최대 12%정도 더 크게 발생하였다. 추후 공동 크기(D), 깊이(z) 및 이격거리(L)와 콘크리트 슬라브 및 Box의 두께 등에 따른 주파수 특성을 추가적으로 분석할 예정이다. 이로부터 도시철도 하부지반에 발생하는 공동 특성에 따른 민감도 분석을 실시하여 구조적 안정성을 판단할 수 있는 영향 요소를 제시할 예정이다.

후 기

이 연구는 국가과학기술연구회 실용화형 융합연구단사업(사물인터넷(IoT) 기반 도시 지하매설물 모니터링 및 관리시스템 기술 개발)의 지원을 받아 수행된 성과물로서 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] C. Carranza-Torres, T. Reich & D. Saftner (2013) Stability of shallow circular tunnels in soils using analytical and numerical models, *Department of Civil Engineering, University of Minnesota, Duluth Campus, Minnesota, USA*.
- [2] Ki-II Song, Gye-Chun Cho (2010) Numerical study on the evaluation of tunnel shotcrete using the Impact-Echo method coupled with Fourier transform and short-time Fourier transform, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Deajeon 305-701, Korea