

도시철도 역사 건전성 감시시스템 개발을 위한 역사 동적 거동 수치해석 연구 A Study on Dynamic Behavior of Subway Station for Structural Health-monitoring System

*#신정열¹, 김진호², 안태기³, 한석윤⁴, 황경필⁵, 김유승⁶

*J. R. Shin(jrshin@krii.re.kr)¹, J. H. Kim², T. K. Ahn³, S. Y. Han⁴, K. P. Hwang⁵, Y. S. Kim⁶
^{1,2,3,4} 한국철도기술연구원 도시철도표준화연구단, ^{5,6} 한국유지관리(주) R&D서비스사업부

Key words : Subway, Station, Structural Health-monitoring System, Earthquake, Dynamic Behavior

1. 서론

하루 수십만 명이 이용하는 도시철도는 도시민들의 가장 대표적인 대중교통수단으로 자리매김하고 있는 가운데, 역사구조물의 경우 점차 대형화 및 복합시설 공간으로 전환되어 단순히 도시철도를 타고 내리는 수단뿐만 아니라 쇼핑, 문화생활의 공간으로 활용되고 있다. 따라서, 지하 역사구조물은 오랜 기간동안 외부 하중과 건물의 노후화 등 외부 환경요인으로 인하여 공용연수 경과에 따라 결함 및 이상이 쉽게 발생할 수 있다. 여기에 더하여, 지진 등의 재난 발생으로 역사구조물의 붕괴될 경우 엄청난 인명 및 재산 피해를 야기할 수 있다. 또한, 최근 동탄, 판교 공사장 붕괴사고에서 보듯이, 빈번히 역세권 개발이 이루어지고 있는 상황에서 인접 공사에 의하여 역사에 결함이 발생할 수 있다. 승객의 이용편의를 위하여 일반 지상 철도구간과 도시철도와의 환승 뿐만 아니라, 무정차 도시철도의 도입으로 상부 통과하는 열차의 진동으로 인한 지하 역사구조물의 누적 결함으로 인하여 역사 본래의 구조적 성능이 저하될 수 있다. 따라서, 이를 실시간으로 감시하여 이상 감지시 사전에 보수 보강되어 인명 및 재산 피해를 예방하고자 지하 역사구조물 건전성 감시시스템 개발이 추진 중에 있다.

이에, 본 논문에서는 지능형 지하 역사구조물 건전성 감시시스템 기본 설계를 위하여 지진, 공사하중, 열차진동하중에 대하여 대규모 환승역사를 대상으로 동적 수치해석을 수행하였다. 이를 통하여 역사구조물의 동적 거동을 분석하여 지하 역사구조물 건전성 감시시스템 기본 설계에 반영토록 하기 위한 건전성 취약 부재를 선정하고 실시간 감시 항목을 추출하였다.

2. 수치해석 모델링

서울에서 운행 중인 지하철의 대표적인 환승역사인 신도림역을 대상으로 하여 상부 열차주행에 의한 하부 역사구조물의 거동과 지진 발생시 역사구조물의 거동 및 역사에 인접하여 터파기 공사시 역사구조물의 응력 변화를 분석하고자 ABAQUS를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 신도림역은 지상부에 국철이 운영되고 하부에 서울지하철 2호선이 운행되는 역사이다. 본 절에서는 역사구조물 및 차량 하중의 모델링과 수치해석방법에 대하여 간단히 언급하였다.

역사구조물은 Fig. 1과 같이 절점당 3자유도를 갖는 3차원 솔리드 요소로 모델링하였으며, 시간이력에 따른 열차 주행하중을 가하기 위하여 열차 주행선로(레일)를 1m 간격으로 절점당 6자유도를 갖는 3차원 보요소로 모델링하였다. 재료 물성치의 경우, 역사구조물은 Table 1에 나타난 바와 같이 일반적인 철근콘크리트 물성치를, 레일[1]은 UIC60 단면과 물성치를 적용하였다. 레일이 위치하는 역사구조물의 경우, 레일 보요소의 절점과 역사구조물의 솔리드 절점을 링크되도록 하여 레일에 작용하는 차량 수직 하중과 이로 인해 발생하는 모멘트 하중이 역사구조물에 전달되도록 하였다.

차량의 경우 차량을 직접 모델링하는 대신 차량 하중을 시간 이력에 따라 변하는 절점하중으로 변환하여 수치해석을 수행하였다. 또한, 지진하중의 경우 지진에 의한 지반-구조물의 상호작용을 고려하기 위하여 Fig. 2와 같이 역사구조물과 지반을 포함하여 모델링하였고, 지진과의 소산과 지반의 반무한성을 고려하기 위하여 경계조건을 무한요소로 모형화하여 시간이력해석을 수행하였다. Table 2에 지반 물성치와 높이를 나타내었다. 그리고,

역사 인접 터파기 공사의 경우 지반층의 내압변화로 인한 구조물 응력변화를 분석하고자 지반에 발생하는 초기 응력을 Geo-static 방법으로 입력한 후 터파기에 의한 응력변화 해석을 수행하였다.

Table 1 Concrete properties of station structure

Contents	Density (kg/m ³)	Poisson	Elastic modulus (MPa)	Compression Strength (MPa)
Concrete	2,500	0.17	2.37×10 ⁵	27

Table 2 Soil properties and its height

Contents	Density (kg/m ³)	Poisson	Elastic modulus (MPa)	Height (m)
Filling layer	1,940	0.362	4.83×10 ²	0~5.1
Weathered rock	2,140	0.340	1.96×10 ³	5.1~18.5
Soft rock	2,240	0.310	2.05×10 ⁴	18.5~28.0

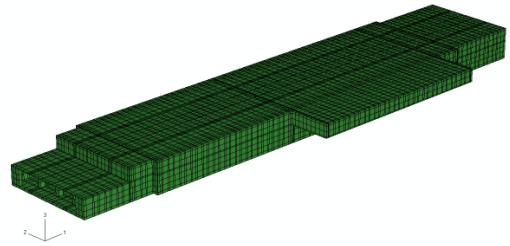


Fig. 1 Modeling of subway station structure

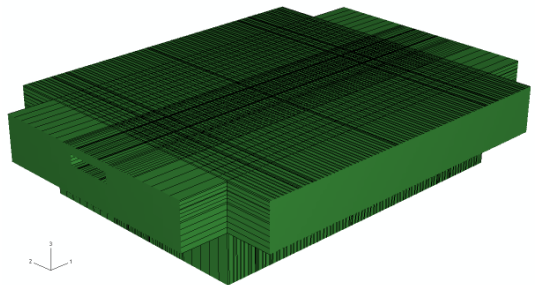
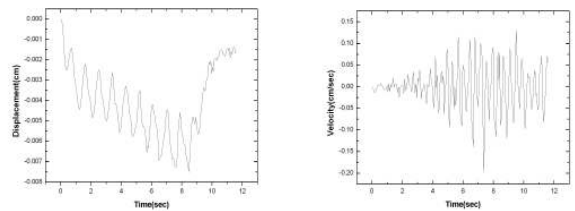


Fig. 2 Modeling of station structure and ground(soil)

3. 열차주행에 의한 수치해석 결과

신도림 지하역사구조물의 상부에 일반 국철 2개 노선이 지나는데, 열차가 이 2개 노선을 동시에 통과하는 경우의 지하역사구조물의 동적거동을 분석하였다. 본 해석을 위한 역사구조물과 인접 지반의 경계조건은 완전 고정으로 적용하였다. 열차의 통과속도는 도시철도의 주행속도인 80km/hr를 적용하였으며 열차가 지하역사구조물 상부를 완전히 통과하는 시간인 11.6초 동안의 시간이력에 따른 차량 하중의 변화를 고려하여 해석을 수행하였다. 본 해석을 통하여 시간이력에 따른 역사구조물의 응력 및 변위 변화와 진동속도 변화를 분석하였다.



(a) Displacement

(b) Vibration velocity

Fig. 3 Graphs of displacement and vibration velocity

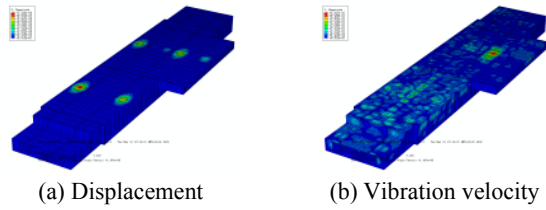


Fig. 4 Contours of displacement and vibration velocity

Fig. 3에 열차가 주행하는 선로 직하부 역사구조물 상판의 수직방향 변위와 진동속도의 변화 그래프를 나타내었고, Fig. 4에 수직방향 변위 및 진동속도 분포도를 나타내었다. 분석 결과, 상부 열차 주행시 진동에 의해 역사구조물에 작용하는 최대 Von-mises 응력값(0.936Mpa)은 허용치(27Mpa)보다 훨씬 작은 것을 알 수 있으며, 교량 상판에 발생하는 최대 진동속도는 85.4dB(V)로 철도 연변 인접 지역에서의 진동은 철도소음진동규 제법[2]에서 제시하고 있는 진동 규제 기준치(60~70dB(V))보다 낮을 것으로 예상되나 감시가 필요하다고 판단된다. 따라서, 상부 열차가 주행하는 선로 직하부 구조물의 슬래브 상판의 진동가속도를 감시항목으로 선정할 수 있겠다.

4. 지진에 의한 수치해석 결과

국내 구조물에 많이 적용되는 일본 Hachinohe의 지진가속도를 적용하여 시간이력해석을 통한 동적 지진응답해석을 수행하였다. Fig. 5의 일본 Hachinohe 지진은 1968년 일본 Tokachi 앞바다에서 발생한 규모 7.9의 최대지반가속도 0.17g의 장주기 지진파이다. 또한, Hachinohe 지진을 국내 설계응답스펙트럼(붕괴방지수준)에 부합되도록 수정하고, 3종류의 입력 지진파를 횡, 종 수평방향 및 연직방향 동시 재하로 지진하중 조합을 고려하여 지진 응답해석을 수행하고 연직방향 지진하중은 수평방향의 2/3을 적용하였다. Fig. 6에 지진하중 작용시 역사구조물의 횡방향 절대 변위와 응력의 분포도를 나타내었다. 분석 결과, 종, 횡, 연직 방향별 최대 절대변위(11.94cm, 12.63cm, 28.66cm)는 모두 기준치(30cm) 이내였으나 방향별 최대 휨압축 주응력은 각각 17.2MPa, 24.2MPa, 58.1MPa로 도로교설계기준[3]에서 제시하고 있는 허용응력치(14.3MPa)로 상당히 크게 발생함을 알 수 있었다. 여기에서, 허용응력치는 허용휨압축응력(0.4×압축응력)에 허용응력 증가계수(1.33)를 곱하여 산정하였다. 특히, 기둥과 슬래브 접촉부 및 벽체에 응력이 집중되었다. 그러므로, 지진발생시 변위보다는 기둥부위와 벽체부위의 응력변화에 대한 실시간 감시가 필요하다고 판단된다.

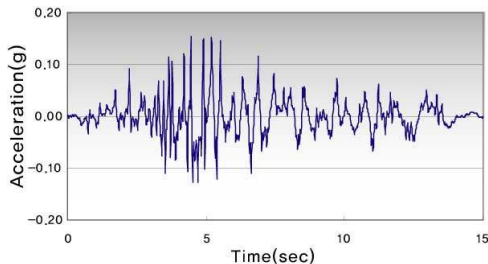


Fig. 5 Hachinohe earthquake

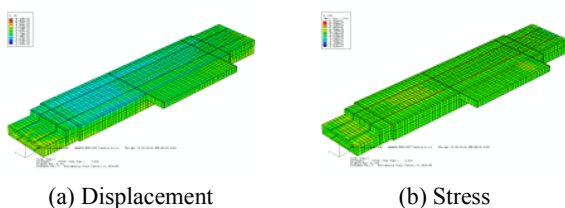


Fig. 6 Contours of displacement and stress

5. 역사인접 터파기공사에 의한 수치해석 결과

Geo-static 방법에 의해 각 지층별 초기 응력값을 구조물에 작용시킨 후, 구조물에서 3m 떨어진 지점에 40m×40m×5.1m의 터파기공사를 한 경우 역사구조물의 응력변화를 살펴보았다. 터파기공사시 널말뚝에 의해 지탱받는 토사가 무너질 경우를 모사하기 위해 토사의 횡압만큼을 구조물에 작용시켰다. Fig. 7에 변위와 응력 분포도를 나타내었다. 분석결과, 터파기공사의 경우 공사장과 인접한 역사 벽체면에 발생하는 응력 변화량은 크지 않은 것으로 나타났으며, 어떤 경향을 보일 정도의 영향력은 주지 않는 것으로 나타났다. 이에, 추후 수행될 공사시의 항타에 의한 진동이 구조물에 미치는 영향을 수행할 계획이다.

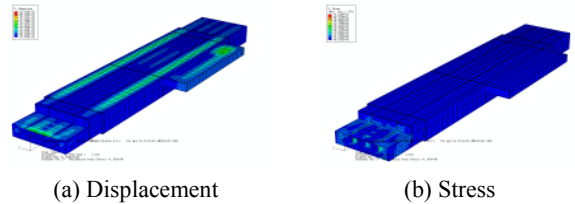


Fig. 7 Contours of displacement and vibration velocity

6. 결론 및 고찰

본 논문에서는 향후 지능형 지하 역사구조물 건전성 감시시스템 구축을 위한 첫 번째 기본 설계를 수행하기 위하여, 역사구조물에 지진하중, 공사하중, 열차진동하중이 작용하는 경우에 대하여 역사 구조물의 동적 거동을 살펴보고 건전성 취약 부재를 선정하고 실시간 감시 항목을 추출하였다. 향후 감시 항목별 적정 센서 사양들이 선정되고 해당 취약 부재의 정해진 센싱 위치에 센서가 설치되도록 상세설계가 수행될 예정이다. 추후 추가적인 역사구조물에 대한 수치해석이 수행될 예정이지만, 현재까지의 수치해석 결과를 분석한 것을 토대로, 상부 열차가 주행하는 선로 직하부 구조물의 슬래브 상판 진동가속도를, 지진시 대비하여 기둥 및 벽체의 변형을 및 기울기를 실시간 감시항목으로 선정하였다. 한편, 역사구조물 인접 공사의 경우에는 터파기에 의한 지반응력의 변화가 역사구조물에 어떤 경향을 보일 정도의 영향력은 주지 않는 것으로 나타났으며 추후, 항타 하중에 의한 역사구조물의 응력변화 영향을 분석한 후 공사장 인접 역사구조물의 감시 항목을 선정할 예정이다. 향후 연구로서, 실시간 센싱 데이터를 활용한 역사구조물의 건전성을 평가하는 프로그램을 구축하여 이상 감지를 어떻게 판별하고 그에 따라 적시에 대응할 수 있도록 하는 지능형 건전성 감시시스템을 구축할 계획이다.

후기

본 연구는 건설교통부 도시철도표준화2단계연구개발사업의 연구비지원(07도시철도표준화A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 철도레일규격(KS R9106)
2. 소음 진동 규제법, 2008 개정
3. 건설교통부, 도로교설계기준, 2005