

도시철도 구조물의 내진설계 및 평가 현황조사

Current Status on Seismic Design/Evaluation of Metropolitan Rapid Transit System

김종민*
Kim, Jong-Min

김진호**
Kim, Jin-Ho

임남형***
Lim, Nam-Hyoung

강영종****
Kang, Young-Jong

ABSTRACT

Many structural engineers believed that RC underground structures like subway system might not be seriously damaged during earthquakes, until the Great Hanshin earthquake(a.k.a Kobe earthquake). But there is only one domestic seismic code of rapid transit system that established by Ministry of Construction & Transportation in 2005. Therefore, to investigate of current status on seismic design and evaluation method of rapid transit system is essential to estimate seismic performance of subway structural systems. In this study, comparing domestic codes and seismic evaluation methods with foreign system is performed.

1. 서론

도시철도와 같은 개착식 터널로 시공되는 지중구조물의 경우에는 지진에 의한 피해사례가 전무한 실정이었지만 1995년 일본 고베에서 발생한 한신 대지진에 의하여 철근콘크리트 구조물의 도시철도 지하철역사가 붕괴 되는 등 지중구조물의 지진피해도 간과할 수 없음을 일깨워 주었다. 현재 국내에서는 2005년 건설교통부에서 고시된 ‘도시철도 내진설계 기준’이 도시철도 내진설계에 대한 최초의 기준으로, 동 기준의 적용성과 신뢰성 확보를 위해서 도시철도 이외 구조물의 내진설계 기준과의 차이점 및 국외 도시철도 내진설계 기준과의 비교 및 검토가 필요한 실정이다. 또한 2005년 이후에 시공되는 도시철도 구조물에 대해서는 동 기준이 적용되고 있는지의 여부를 조사할 필요가 있고, 2005년 이전에 설계 및 시공된 도시철도 구조물의 내진설계현황을 조사하여 동 기준에 의한 내진성능 확보 여부를 평가하고 성능을 보강할 필요가 있다. 그리고 국외 도시철도 구조물의 내진설계현황 실정을 조사하여 국내 도시철도 내진설계도입현황과 비교해 보는 등 해외동향을 파악하는 것도 중요하다.

따라서 본 연구에서는 도시철도 역사 및 터널에 대한 내진설계 현황을 분석하고, 국내의 지중구조물 내진설계기법 및 내진성능 평가방법의 조사 및 분석, 국외 도시철도 시설물의 지진피해 현황조사 등을 수행하여 도시철도 시설물의 내진설계 및 내진성능평가의 현황과 문제점을 도출하고자 한다.

2. 지진피해 사례

* 고려대학교, 건축사회환경공학과 강구조연구실, 정희원

E-mail : jongmin07@korea.ac.kr

TEL : (02)921-5166 FAX : (02)921-5166

** 한국철도기술연구원

*** 충남대학교

**** 고려대학교

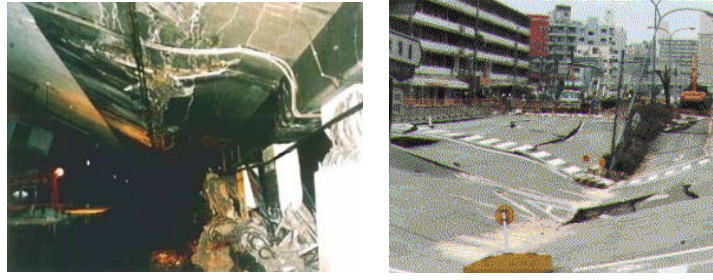


그림 1. 고베지진에 의한 승강장 붕괴 및 도로의 침몰(일본 다이카이역)

지진에 의한 도시철도 지중구조물의 붕괴사례는 1995년 1월에 발생한 고베지진에 의한 일본 다이카이역 붕괴사례가 유일무이하다. 그림 1과 같이 승강장이 완파되면서 기둥들이 붕괴되었고, 지상위 도로가 함몰되는 피해가 발생하였다. 승강장 단면형상에 따라 피해정도가 다르게 나타났는데, 우선 파괴가 일어난 부분의 단면은 파괴가 일어나지 않은 단면에 비해 주변을 감싸고 있는 지반과의 상대적 강성이 작았으며, 파괴가 일어난 단면 기둥의 변위는 4.0cm 이었지만 나머지 단면들은 3.0cm 이하로 나타났다(Huo외, 2005).

고베지진이 지나간 도시철도 지중구조물 중에서 다이카이역은 구조물과 지반과의 거리가 피해가 경미했던 다른 구간에 비해 구조물 근입깊이가 상당히 얕은 4.8m 아래에 위치하였다. 이는 지상에 가까운 지중구조물 일수록 지진 피해가 크게 발생했음을 알려준다. 또한 다이카이역은 대표적인 개착식 공법으로 건설된 지중구조물로서, 개착식 공법으로 시공된 지역의 지반상태는 다시 되메운 흙과 기존의 흙이 서로 상이한 동적거동을 하여 피해가 더욱 크게 발생했을 가능성이 있다.

구조물의 큰 피해를 안겨주었던 고베지진 후 국내에서도 기존의 자연재해 대책법을 전면 개정하여 지하철을 포함한 17개 각종시설에 대해 내진설계 기준을 제정 시행토록 하였고, 이를 근간으로 제정된 ‘도시철도 내진설계 기준’에서도 다이카이역의 사례를 교훈삼아 개착식 공법으로 건설된 터널에서만 내진설계를 도입하고 있는 실정이다.

3. 국내 도시철도 내진설계 도입현황

2007년 10월 현재 국내 도시철도 내진설계 도입현황 조사결과 전국 23개 노선 중에서 6개 노선에서 반영되고 있었으며 건설예정인 1개 노선에서 내진설계가 반영예정 상태이다. 6개노선으로는 서울 9호선 1단계, 신분당선, 부산 3호선 2단계, 대구 2호선 경산연장, 인천 송도 연장, 광주 1호선이 있다. 나머지 16개 노선에서는 내진설계가 미반영 되거나 일부구간에만 반영되고 있었다. 내진설계 미반영된 노선에서는 건설교통부에서 2006년부터 내진성능 예비평가를 실시하여, 내진보강이 필요한 노선을 검토하고 있는 실정이다.

표 1의 내진설계가 반영되고 있는 노선에서는 주로 ‘내진설계기준 준칙’과 ‘도시철도 내진설계기준’을 적용하고 있어, 대부분의 노선에서 건설교통부에서 고시된 내진설계기준을 반영하고 있음을 알 수 있다. 또한 서울도시철도 건설본부의 지하철 9호선 구간에는 건설교통부 기준이 아닌 ‘지하철 9호선 구조물 내진설계(안)’이라는 자체 기준을 제정하여 내진설계에 반영/검토 하고 있다. 신분당선에서는 국내기준과 일본의 기준을 추가로 검토하고 있다.

내진설계 반영된 6개노선중에서 지하철 9호선 914정거장과(이하 9호선) 신분당선 강남정거장의(이하 신분당선) 내진설계에 적용된 방법을 ‘설계가속도계수’, ‘내진해석방법’, ‘액상화 검토부분’ 크게 3항으로 나누어 ‘도시철도 내진설계 기준’ 과 비교해 보았다.

3.1 설계가속도 계수

9호선과 신분당선에서의 지진구역 계수, 위험도 계수, 지표면 가속도 계수의 산정근거는 모두 ‘도시철도 내진설계 기준’을 반영하고 있다. 설계가속도계수는 내진설계의 상위개념으로 분류되는데, 국내 모든 내진설계 기준의 상위개념은 1998년 건설교통부의 ‘내진설계준칙’에 근거하고 있는 실정이다.

3.2 내진해석 방법

9호선에서는 ‘최적응답변위법’, ‘응답변위법’, 그리고 동적해석으로 ‘시간이력해석법’을 해석방법으로 검토하고 있으며, 신분당선에서는 ‘응답변위법’을 고려하고 있다. 9호선 내진설계시 사용되는 방법 중 하나인 ‘최적응답변위법’은 ‘도시철도 내진설계 기준’에서는 제시하고 있지 않은 방법으로서 기존의 ‘응답변위법’에 비해 좀 더 간편하여 실무에서 손쉽게 적용할 수 있는 방법이라 하겠다.

3.3 액상화 검토

9호선 내진설계에서의 액상화 검토 시에는 현장시험 및 실내시험 값을 반영하고, 간편예측법으로 ‘Seed & Idriss’의 식을 사용하고 있는데, 이는 ‘도시철도 내진설계 기준’에 명시된 내용과 일치한다. 하지만 액상화 상세예측법으로 제시하고 있는 ‘Ishihara’ 또는 ‘Iwasaki & Tatsuoka’의 식은 ‘도시철도 내진설계 기준’에 명시되지 않은 부분이다. 신분당선에서는 따로 액상화를 검토하고 있지는 않으나, 액상화 발생원인중 하나인 지하수위 유무여부에 따라 내진설계를 따로 하고 있어, 어느 정도 액상화에 대한 검토를 반영하고 있다고 하겠다.

4. 일본 도시철도 내진설계 기준

일본의 도시철도에 대한 내진설계 기준으로는 ‘터널표준시방서’와 ‘철도구조물 설계표준’이 있다. 이 두 기준을 살펴보면 구조물의 해석방법으로 구조물 주변의 지반의 변위를 강성스프링으로 치환하여 해석하는 응답변위법을 사용하고 있으며, 보다 정밀한 해석을 하고자 할 때에는 동적해석법을 사용하고 있는데, 이는 국내 ‘도시철도 내진설계 기준’과도 유사한 부분이라고 하겠다. 또한 일본 기준에서는 간이용답변위법을 제시하고 있는데 이는 기존 응답변위법 보다 더욱 간편하게 내진해석을 실시할 수 있는 방법으로, 서울 지하철 9호선 내진설계에서도 ‘최적응답변위법’이라는 간편법을 사용하고 있다.

그리고, 일본 시방서의 표준응답스펙트럼에서 지역계수가 가장 낮은 지역의 응답스펙트럼과, 국내 시방서의 지역계수가 가장 큰 지역의 응답스펙트럼을 비교해 보았다. 일본에서는 리히터규모 7.5에서 8.0 정도로 설계되고 있는데 반해, 국내에서는 리히터규모 5.5에서 6.0 정도로 설계되고 있으므로 일본의 응답스펙트럼에서의 최대가속도가 더욱 크게 나타는 것을 알 수 있다(그림 2).

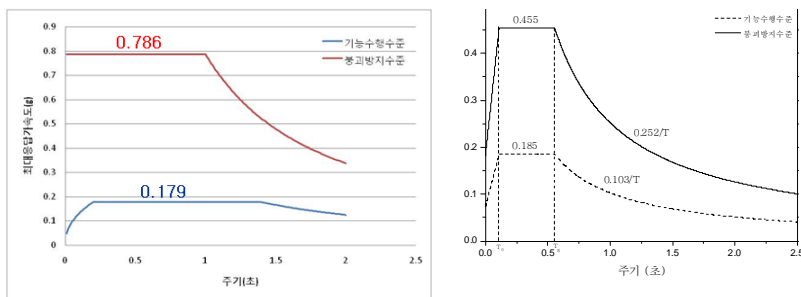


그림 2. 표준응답스펙트럼(일본(좌), 국내(우))

5. 국내외 내진성능 평가방법

국내의 내진성능평가 방법은 내진설계가 반영되지 않은 기존 구조물을 단순히 내진설계 기준에 의거하여 안전, 불안전을 판정하는데 그치고 있다. 불안전 평가를 받은 구조물에 한해서는 내진보강을 계획하고 있다. 이처럼 모든 구조물에 동일한 기준을 적용하여 내진성능을 평가하는 국내 방식은 미국의 선진화된 성능평가 방법에 비해 비합리적인 방법이라 하겠다. 미국의 예서는 FEMA273에 나타난 바와 같이 구조물의 성능목표와 요구성능을 세분화 하는 등 성능중심설계 개념을 도입하여 내진성능을 평가하고 있으며, 현행 비선형 정적해석에 바탕을 둔 방식에서 비선형 동적해석 수행으로 넘어가는 단계에 있다. 향후 국내에서도 성능중심 기반의 내진설계가 도입되어, 구조물의 특성에 따라 차등화된 평가방법을 실시하는 것이 필요하다고 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 도시철도 시설물에 대한 내진설계 및 내진성능평가의 현황을 조사하고 문제점을 분석하였다. 이는 향후 “도시철도 시설물 내진설계 기준 개정안”과 “도시철도 시설물 내진성능 예비 및 상세평가 지침” 마련을 위한 기초연구로 활용될 수 있으며, 나아가 국내 실정에 맞는 내진설계 기준을 마련하고 도시철도 시설물에 대한 안전 이미지를 마련하는데 이바지 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술평가원에서 시행한 2007년도 미래도시철도기술개발사업 (과제번호: A01)의 연구비 지원에 의하여 수행되었기에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부(1998), “내진설계기준연구Ⅱ”
2. 건설교통부(2007), “지하철 내진설계 반영현황 및 보강계획“, 건설교통부
3. 건설교통부(2005), “도시철도 내진설계 기준”
4. 건설교통부(2005), “건축구조설계기준”
5. 광주지하철건설본부(2006), “광주도시철도 1호선 2단계 건설공사 내진검토 보고서”
6. 서울특별시 지하철건설본부(2003), “지하철 9호선 909공구 건설공사 실시설계보고서”
7. H. Huo, A. Bobet, G. Fernandez, J. Ramirez(2005), “Load Transfer Mechanisms between Underground Structure and Surrounding Ground: Evaluation of the Failure of the Daikai Station”, Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)
8. 國土交通省鐵道局, 鐵道綜合技術研究所(1999), “鐵道構造物等設計標準 同解説(耐震設計)”
9. 土木學會(2006), “トンネル標準示方書(開削工法?同解説)”