



지진취약도 분석을 통한 전차선로시스템의 내진성능

Seismic Performance of the Catenary System Using Fragility Analysis

박예진* · 김민수** · 한승룡*** · 최상현****

Park, Yejin* , Kim, Minseu** , Han, Seungryong*** , and Choi, Sanghyun****

Abstract

To date, while seismic design and reinforcement have been applied to railroad structures including bridges and stations to minimize earthquake damage, securing the seismic resilience of such facilities as electric, signal control, and communication systems is not sufficiently conducted. In this paper, the seismic fragility of the catenary system, one of the representative electric facility, is evaluated considering revising seismic design code based on domestic ground characteristics. The seismic excitation considers an artificial earthquake based on design spectra depending on various ground conditions as well as observed earthquakes, and the seismic fragility is built via analyzing failure modes of the catenary system. Considering recent construction status, two types of steel poles, H and tube sections, are analyzed. The analysis result reveals that the catenary system satisfies seismic design code, while more fragile to artificial earthquake than observed earthquakes. Also, the system with a H section pole is more fragile than with a tube section pole.

Key words : Catenary System, Catenary Pole, Fragility, Artificial Earthquake, Failure Mode

요 지

국내 철도시설의 경우 교량, 역사 등 토목구조물에 대해서는 내진설계나 보강을 통한 대비가 이뤄지고 있으나, 전철전력, 신호제어, 정보통신 등 열차의 안전운행에 필요한 설비 및 시설의 내진성능 확보에 대한 연구는 미흡한 상황이다. 이 논문에서는 국내 지반특성을 고려하여 개정될 내진설계기준과 다양한 관측지진을 이용하여 대표적인 전력시설인 전차선로시스템의 지진취약도 분석을 수행하였다. 지진하중은 다양한 지반조건에 따른 설계스펙트럼을 포괄하는 인공지진과 실측지진을 고려하였으며, 전차선 시설물의 파괴모드를 분석하여 지진취약도를 작성하였다. 전차선로시스템의 전철주 형식은 국내 부설 현황을 감안하여 H형강과 강관주를 검토하였다. 지진취약도 분석 결과 현재 부설되어 있는 전차선로시스템은 내진설계기준을 만족하며, 강관주 보다는 H형강주 사용 시 지진에 취약한 것으로 나타났다. 또한 관측지진 보다는 인공지진에 보다 취약한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 전차선로시스템, 전철주, 취약도, 인공지진, 파괴모드

*정회원, 한국교통대학교 철도공학부 석사과정(E-mail: pyj3134@nate.com)

Member, Graduate Student, Institute of Railroad Convergence Technology, Korea National University of Transportation

**정회원, 한국교통대학교 철도융합기술연구소 연구원(E-mail: minsul33@nate.com)

Member, Researcher, Institute of Railroad Convergence Technology, Korea National University of Transportation

***정회원, 한국전력기술 책임연구원(E-mail: hoanung@hanmail.net)

Member, Senior Researcher, KEPCO E&C

****교신저자, 정회원, 한국교통대학교 철도시설공학과 교수(Tel: +82-31-460-0564, Fax: +82-31-462-8205, E-mail: schoi@ut.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Railroad Facility Engineering, Korea National University of Transportation

1. 서론

최근 경주, 포항지진을 계기로 지진의 안전지대로 여겨졌던 국내에서도 지진에 대한 관심이 증가하였으며, 지진 피해를 방지할 수 있는 설계 및 보강에 대한 연구도 활성화되고 있다. 실제 2008년 쓰촨지진, 2011년 동일본대지진 등 한반도 인근 지역에서 대규모 지진이 발생한 바 있으며, 2013년에는 1978년 시작된 지진관측 이래 최초로 초진, 본진 및 여진을 포함한 연속지진이 발생하는 등 한반도에도 규모 6.0 이상 강진 발생을 우려할만한 환경이 조성되고 있어 지진에 대한 대비가 시급한 상황이다.

철도의 경우 규모 6.0 지진에 대하여 내진 설계된 고속철도 구조물 이외 일반철도를 포함하여 내진설계가 반영되지 않아 충분한 내진성능을 갖추지 못한 교량, 터널 등의 구조물에 대하여 내진보강을 수행하고 있으나(Kim and Jang, 2013), 전철전력, 신호제어, 정보통신 등 열차의 안전 운행과 관련한 철도시스템시설에 대한 검토는 미흡한 상황이다(Kim, 2007). 실제 지진 시 철도시스템시설의 손상 또는 파괴는 막대한 인적·물적 손실을 야기할 수 있다. 1995년 일본 고베지진 시 철도시설물에 3,439억엔에 달하는 큰 피해가 발생한 바 있으며, 2011년 동일본대지진 시 전차선로시스템의 손상(Fig. 1)이 1,150개소 발생하는 등 전력망을 포함한 각종 철도시스템시설의 손상으로 인한 전력공급능력 상실로 수개월 동안 열차 운행 제약을 초래한 바 있다(KRRI, 2012). 지진으로 인한 이러한 피해를 방지하기 위해서는 철도인프라시설에 대한 지진취약도 검토를 통해 요구내진성능을 확보하는 것이 필요하다.

철도시설물의 내진성능과 관련한 가장 대표적인 자료로는 미국의 HAZUS가 있다(KAERI, 2008). HAZUS는 철도시설을 기본적으로 선로/노반, 교량, 터널 및 시스템시설로 분류하고 있으며, 각 분류 별로 지진취약도 곡선을 제시하고 있다. 일본의 경우 고베지진 이후 변전소 내진 보강, 비상전 원용 발전기전원 지하설치, 설비의 전도방지 보강 등을 통하여 전기설비에 대한 내진보강을 완료하였으며, 전기통신설비공사공통시방서(國土交通省, 2010)에 따라 요구성능에 따른 시스템시설의 중요도를 구분하여 관리하고 있다. 최근에는 동일본대지진 시 발생한 신칸센 전차선 시설물 피해를 교혼삼아 전차선 시설물에 담퍼를 설치하여 내진성능을 향상시키려고 하는 연구도 수행된 바 있다(Miztani et al., 2016). 국내의 경우 한국원자력연구원(KAERI, 2008)은 미국 HAZUS를 참고하여 철도전기설비를 포함한 철도시설물의 지진취약도함수에 관한 연구를 수행하였으며, 한국철도기술연구원(KRRI, 2012)은 철도시스템시설에 대한 내진성능평가체계 및 기술 개발의 필요성을 지적한 바 있다.

이 논문에서는 대표적인 전철전력시설 중 하나인 전차선로시스템의 지진취약도를 분석하였다. 현재까지 국내에서 전차선로시스템의 내진성능과 관련한 연구는 없으나, 관련

연구로는 Lee et al.(2012)이 400 km/hr 속도에서 교량상 전철주의 구조안전성을 검토한 바 있으며, Lee(2013)는 전철주 기초의 저항모멘트강도에 대한 실험 및 해석적 연구를 수행한 바 있다.



(a) overturn of poles on a bridge



(b) overturn of poles on soil trackedbed

Fig. 1. Failure of Catenary Poles by Earthquake (Pitilakis, 2011; Shiomitsu, 2011)

전차선로시스템을 구성하는 주요 요소로는 기초부, 지주, 브래킷 및 케이블이 있다. 지진에 대한 일반 시설물의 거동은 대부분 지지부에 의하여 결정되는데, 케이블 등으로 상호 연결되어 있을 경우 그 거동이 보다 복잡하다. 이 연구에서는 기초부의 특성, 지주와 브래킷 형식별 특성을 고려하여 지진에 대한 거동을 평가하고, 지진취약도를 산정하여 전차선로시스템의 내진성능을 확인하였다.

2. 국내 전차선로시스템 현황 및 해석모델

2.1 국내 전차선로시스템 현황

국내 국유철도의 전철화 비율은 2004년 40%에서 2015년 71%로 급증하였으며, 본선의 가선연장 8,321 km에 달하고 있다. 전철주의 소재로는 2015년 기준 콘크리트주는 5,981

개, 철주는 114,776로 강재를 소재로 한 철주가 대부분을 차지하고 있다(Korail and KRNA, 2016).

현재 국내 부설되어 있는 전차선로시스템의 주요 전철주 형식은 문형, 단독주형 및 서스펜션빔형이 있으며, 전철주의 단면형태로는 강관주와 H형강주가 있다. 가동브래킷은 곡선당김금구의 위치에 따라 I형(In type)과 O형(Out type)으로 구분하며, 평형개소, 말단개소 또는 전차선의 무효부분에 설치하는 F형이 있다. 이 연구에서는 국내 가장 많이 부설되어 있어 있고, 가장 대표적인 단독주형 전철주에 대하여 고려하였다. 단면형식은 강관주와 H형강주로 나누어 검토하였으며, 가동브래킷은 I형, O형이 교차로 설치되어 있는 실제 설치형태의 모델을 사용하였다. Fig. 2는 H형 단면과 I형 및 O형 가동브래킷의 형상이다. Table 1은 전차선로시스템 해석에 적용된 전주, 전차선, 조가선, 급전선 및 기초의 역학적 특성이다.

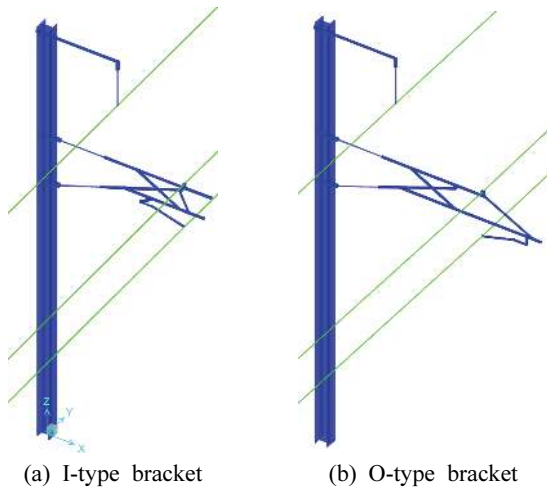


Fig. 2. Catenary Poles with the Bracket

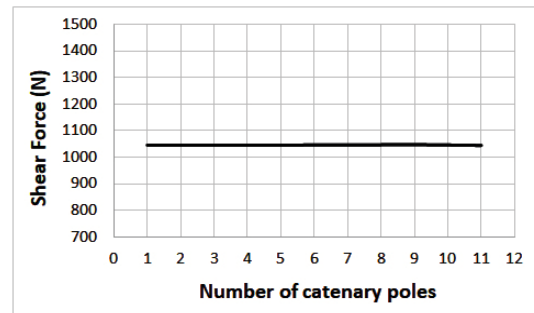
Table 1. Mechanical Properties of the Overhead Line System

| Properties | | Limit |
|-----------------------|------------------|---------------|
| Contact wire (Cu110) | allowable load | 38,220 N |
| | ultimate load | 12,400 N |
| Catenary wire (Bz65) | ultimate load | 42,198 N |
| Feed wire (ACSR240) | ultimate load | 58,702 N |
| Mast (H 250×250×9×14) | buckling moment | 596,100 N · m |
| Foundation | ultimate moment | 252,350 N · m |
| | allowable moment | 50,470 N · m |

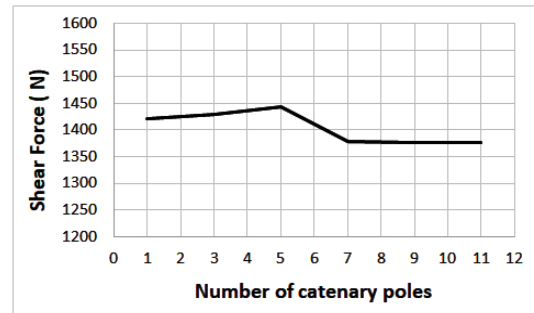
2.2 해석모델

전차선로시스템은 전차선, 조가선, 급전선과 같은 가공선 케이블과 브래킷, 지주가 연결되어 거동하며, 길이방향으로

는 연속체 구조로 거동하게 된다. 연속적으로 위치한 전철주와 케이블로 연결되어 발생하는 상호작용으로 인한 효과를 고려한다면, 해석모델에서 검토하여야 할 범위 및 케이블의 경계조건도 중요한 요소로 작용한다. 따라서, 전철주의 개수를 증가시키면서 지진해석을 수행하여 지진응답의 수렴도를 확인하였다. 동적해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 사용하여 직접적분법으로 수행하였다. Fig. 3은 전철주의 검토 개수에 따른 최대전단력 변화를 나타낸다. 검토 결과 선로방향에 대해서는 전철주 개수 증가에 따른 변화가 거의 없으나, 선로 직각방향에 대해서는 약 5% 이내의 값에서 변화하며 7개 이후로 수렴하는 것을 볼 수 있었다. 이 연구에서는 이러한 검토 결과를 참조하여 7개의 전철주를 갖는 해석모델을 사용하였다. 전차선로시스템의 지진취약도 분석을 위한 지진해석 해석모델은 Fig. 4와 같다.



(a) Track direction



(b) Perpendicular track direction

Fig. 3. Maximum Shear Force by Variation of the Number of Catenary Poles

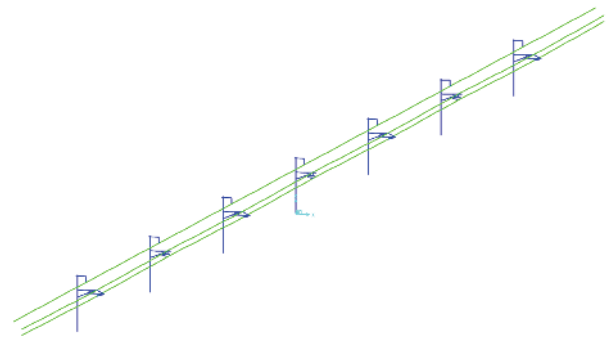


Fig. 4. Seismic Analysis Model of a Overhead Catenary System

3. 지진해석과 지진취약도

3.1 지진입력운동

지진취약도 분석을 위해서는 지진에 의한 소요강도를 계산하게 되는데, 지진하중에 의한 지진해석에 의하여 결정된다. 지진해석은 실제 지진기록에 기반한 관측지진파를 사용하거나 내진설계스펙트럼을 포괄하는 인공지진을 사용하는 경우로 나눈다. 본 연구에서도 실제 기록지진을 사용한 경우와 내진설계스펙트럼을 포괄하는 인공지진을 사용한 경우로 나누어 연구를 수행하였다. 지진취약도 분석에서는 지진의 영주기 가속도 혹은 설계지진가속도를 스케일하여 사용하기 때문에 지진의 진동수 성분에 의하여 그 결과가 결정된다. 따라서, 다양한 진동수 성분을 포함하는 Chichi, El-centro, Kobe, Loma-prieta, Northridge, Victoria의 6개 대표지진을 선정하여 관측지진을 이용한 지진해석에 사용하였다. 해석에 사용된 관측지진들의 진동수 성분에 대한 가속도 스펙트럼은 Fig. 5에 나타나 있다.

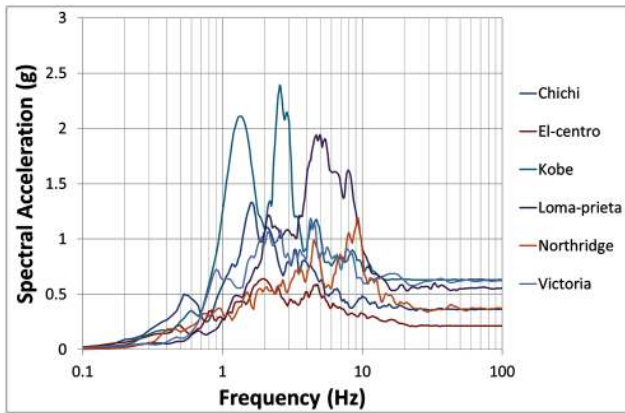


Fig. 5. Seismic Input Motions - Real Earthquake Records

관측지진은 해외 지역에서 발생한 지진에 대한 것이며, 국내의 경우 규모 6을 초과하는 강진기록이 없어 구조물에 피해를 야기할 수 있는 기록지진이 없는 상황이므로 내진설

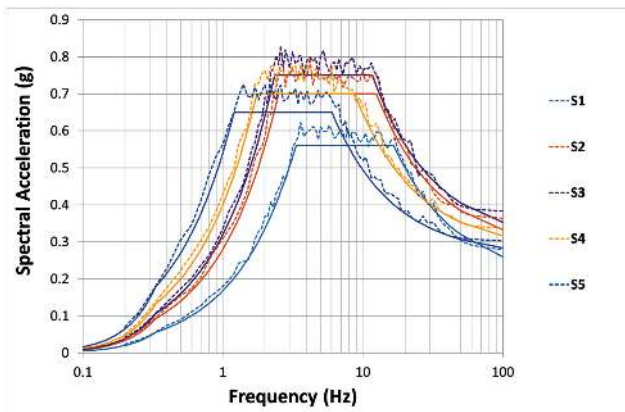


Fig. 6. Seismic Input Motions - Artificial Earthquakes

계지침에 제시된 설계스펙트럼을 포괄하는 인공지진을 작성하여 사용하였다. 국내 실정을 고려한 인공지진은 개정된 내진설계지침의 설계스펙트럼을 기준으로 작성하였다. 인공지진은 시간영역 스펙트럼 부합 프로그램인 RSPMatch를 사용하였으며, S1 지반부터 S5 지반까지 5개의 지반조건에 대하여 5% 감쇠비에 대한 가속도 스펙트럼을 포괄하는 방식으로 작성하였다(Fig. 6).

3.2 지진취약도

지진취약도 곡선이란 구성요소 및 시스템에 대하여 지진에 취약한 정도를 곡선으로 나타낸 것이다. 횡축은 지진의 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)가 되며, 종축은 파괴확률로 나타낸다. 지진의 최대지반가속도의 변화에 따른 시스템 전반에 대한 파괴양상을 도시하여 시스템의 내진성능을 평가할 수 있는 수단을 제시한다. 본 연구에서는 전차선로시스템에 다양한 지진을 재하하여 각 단면에 발생하는 최대하중을 산정하고, 전단력, 모멘트, 축력의 한계상태를 고려하여 지진취약도 곡선을 도시하였다. 전차선로시스템의 한계상태는 철주, 브래킷, 케이블, 지반의 발생하는 최대하중이 설계강도 및 극한강도(Ultimate strength)를 초과하는 경우로 정의하였다. 최대하중은 비선형 동적 해석을 기반으로 작성하였고, 다양한 크기의 지진 최대지반가속도로 변화시켜가며 지진해석을 수행하였다. 지진취약도는 최대지반가속도에 대한 조건부 파괴확률을 통해 얻게 된다. 조건부 확률은 Eq. (1)과 같다.

$$P_f = P[d \geq c | PGA = S_a] \quad (1)$$

여기서, d = 지진하중에 의해 계산된 소요강도(structural demand), c = 설계강도 (structural capacity)이다. P_f 는 지진입력운동의 PGA가 S_a 일 때, 소요강도 d 가 설계강도 c 를 초과할 확률을 나타낸다. Eq. (1)은 모멘트, 전단, 축력에 대한 한계상태 모두에 해당하고, 먼저 손상에 도달하는 부분의 PGA 별 조건부 확률로 계산된다.

Shinozuka et al.(2000)은 취약도 곡선을 대수정규분포함수로 표현하였으며, 누적확률분포로 나타낸 지진취약도 함수는 Eq. (2)와 같다.

$$F(a) = \Phi \left[\frac{\ln\left(\frac{a}{C}\right)}{\zeta} \right] \quad (2)$$

여기서, a 는 지진입력운동의 PGA, $\Phi[\cdot]$ 는 표준 정규분포함수의 누적확률분포, C 와 ζ 는 손상상태에 따른 대수정규분포함수의 중앙값과 대수표준편차를 각각 의미한다.

3.3 지진해석 결과

지진하중에 따른 소요강도를 계산하기 위하여 지진해석

을 수행하였다. 전차선로시스템의 지진취약도를 산출하기 위하여 각 부분에 소요강도와 설계강도를 비교하여 한계상태를 확인하였다. 전철주에 발생하는 모멘트, 전단에 대한 소요강도 양상은 Fig. 7과 같다.

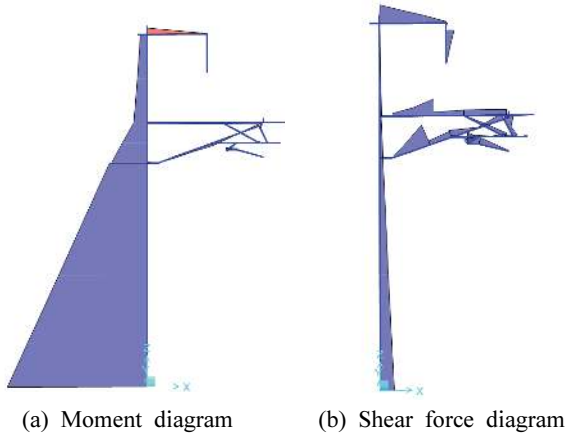
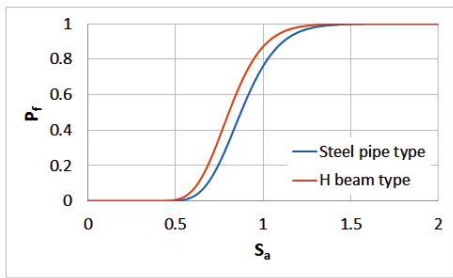


Fig. 7. Seismic Demand Diagram

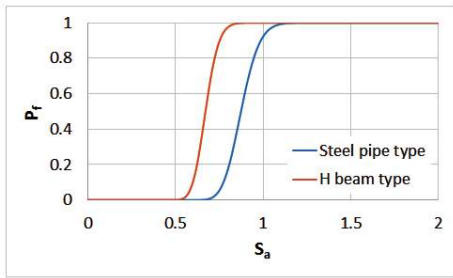
지진해석에 의한 소요강도의 양상을 검토하였을 때, 대부분 지반의 모멘트 하중이 설계강도보다 크게 나타났으며, 전철주, 브래킷, 케이블 보다 지반이 먼저 파괴되어 한계상태가 도달하는 것으로 나타났다.

3.4 지진취약도 검토

실제 기록지진과 인공지진의 PGA를 2 g까지 증가시켜가며 강관주, H형강주가 적용된 전차선로시스템에 대하여 지진해석을 수행하였다. Fig. 8은 실제 기록지진과 인공지진에



(a) for real earthquake records



(b) for artificial earthquakes

Fig. 8. Seismic Fragility Curves for Types of Catenary Poles

대한 지진취약도 결과이다. 전반적으로 H형강주가 강관주에 비해 취약하였다. 0.5 g 이내에서는 손상이 거의 발생하지 않았고, 2 g의 PGA에서는 모든 경우의 전차선로시스템이 파괴되었다. 지진입력운동의 종류에 대한 지진취약도는 중진동수 대역의 성분이 큰 해외의 강진 기록지진에 대한 지진취약도의 양상은 큰 차이가 없었지만, 중진동수 대역과 고진동수 대역에 걸쳐 다양한 지반의 특성을 반영한 인공지진에 대해서는 지진취약도의 양상의 변화가 큰 것을 볼 수 있다.

전철주 형태에 따른 지진취약도는 지진입력운동의 종류에 따라 차이가 큰 것을 볼 수 있다. 국내의 실정을 고려한 인공지진에 대한 전차선로시스템의 지진취약도는 전철주 형태에 따라 그 차이가 확연히 드러난다. 이는 실제 강관주와 H형강주의 내진성능의 차이가 국내형 지진에서 더 큰 것을 의미한다. 단순 지진해석을 통해서만 전차선로시스템의 지진취약도가 지진입력운동의 종류에 큰 영향이 없어 보였지만, 지진취약도 곡선의 추이를 분석함으로써 내진성능에 대한 보다 명확한 결론이 가능해졌다.

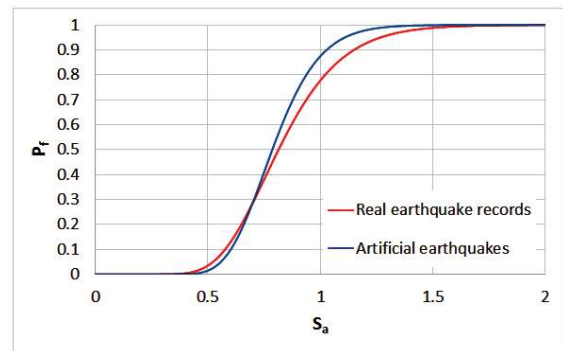


Fig. 9. Seismic Fragility Curves for Earthquakes

Fig. 9는 지진입력운동의 종류에 따른 전차선로시스템의 지진취약도를 나타낸 결과이다. 관측지진과 인공지진에 대한 지진취약도는 유사하나 약 0.7 g의 최대지반가속도를 기준으로 양상이 변화하는 것을 볼 수 있다. 전반적으로 국내 실정을 고려한 인공지진에 대하여 전차선로시스템이 보다 취약한 것으로 나타났다. 이는 관측지진은 상대적으로 진동수 대역의 폭이 좁아 낮은 최대지반가속도의 지진에서 전차선로시스템에 영향을 주지만, 인공지진의 경우 진동수 대역이 넓은 광대역 스펙트럼을 포괄하도록 작성되었기 때문에 전체 스펙트럼을 높은 최대지반가속도로 스케일링할 경우 전차선로시스템에 보다 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 이러한 결과를 고려할 때, 지진취약도 분석에서 보다 정확한 지진입력운동을 작성하기 위해서는 단순히 설계스펙트럼을 포괄하는 형태의 인공지진 대신에 부지고유 스펙트럼과 같이 실제 지진의 스펙트럼과 유사한 지진입력운동을 선택하여야 함을 알 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 전차선로시스템의 지진취약도를 평가하기 위하여, 다양한 전철선로시스템에 대한 지진해석을 수행하고 파괴모드를 분석하였다. 지진입력운동은 개정된 내진 설계기준의 설계스펙트럼에 따라 인공지진파를 작성하고, Chichi, El Centro, Northridge 지진을 포함한 해외 관측지진의 경우와 비교하여 그 영향성을 검토하였다. 지진취약도 평가를 위한 지진해석 모델은 지지부, 철주, 케이블, 브래킷 타입에 따른 형상을 반영하여 작성하였고, 동적해석을 수행하여 지진응답을 분석하였다. 상용프로그램인 SAP2000을 이용한 해석 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 전차선로시스템은 내진설계 수준 내의 지진에 대하여 전반적으로 안전한 것으로 나타났으며, 대수정규누적 분포로 가정한 지진취약도의 중앙값은 약 0.7 g 이상에 이르는 만큼 어느 정도의 여유치는 가지고 있는 것으로 분석되었다.
- (2) H형강주와 강관주의 취약도 비교 결과 강관주가 지진에 대해 보다 안전하며, 인공지진 보다는 관측지진에 대하여 상대적으로 안전여유도를 갖는 것으로 나타났다.
- (3) 관측지진과 인공지진에 대한 전차선로시스템의 지진 취약도는 대체로 유사하나, 약 0.7 g의 최대지반가속도를 기준으로 해외 관측지진보다 인공지진에 대하여 보다 취약한 것으로 나타났다. 이는 인공지진이 광대역 스펙트럼을 포괄하도록 작성되었기 때문에 전체 스펙트럼을 높은 최대지반가속도로 스케일링 할 경우 전차선로시스템에 보다 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(No. 2016R1A2B4013051).

References

KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) (2008) *The Evaluation of Seismic Fragility Functions for Railway Systems in Korea*.

Kim, D.-K., and Jang, H.-T. (2013) The Consideration of the Necessity of Seismic Retrofitting for Existing High Speed Rail Bridge in Accordance with Design

Guidelines Improvements. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 14, No. 1, pp. 445-453.

Kim, S.-I. (2007) Recent Developments of Earthquake-proof and Vibration Technology for Railway Structures. *Workshop*, Earthquake Engineering Society of Korea.

Korail (Korea Railroad) and KRNA (Korea Rail Network Authority) (2016) *Statistical Yearbook of Railroad*.

KRRI (Korea Railroad Research Institute) (2012) *Advancement in Seismic Design System for Railroad Infrastructure*. Planning Report.

Lee, J.-S., Seo, J.-W., Kim, M.-S., Joo, H.-J., and Ha, S.-Y. (2012) Structural Safety Review of Honam High-Speed Railway Bridges Applying to Catenary Pole of 400km/h Speed. *Proceedings of Fall Annual Conference*, Korean Society for Railway.

Lee, S.-H. (2013) Numerical Analyses on Moment Resisting Behaviors of Electric Pole Foundations According to Their Shapes. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 29, No. 11, pp. 85-97.

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (2010). *Standard Specification of Telecommunication Equipment Construction*(國土交通省 (2010) 電氣通信設備工事共通仕試放書).

Mizutani, T., Iijima, R., Takeda, T., Tsukishima, D., and Sasaki, T. (2016) Seismic Response Analysis and Vibration Control by Tuned Mass Damper of Overhead Catenary System Poles on Shinkansen Viaducts. *Journal of JSCE*, Vol. 72, No. 4, pp. 604-618.

Pitilakis, K., Argyoudis, S., Johansson, J., and Kaynia, A. M. (2011) *Deliverable 3.8 - Fragility Functions for Railway System Elements*. SYNER-G Project.

Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J.-H., and Naganuma, T. (2000) Statistical Analysis of Fragility Curves. *J. Eng. Mech.* 2000, Vol. 126, 1224-1231.

Shiomitsu, J. (2011) *120 Miles of Bullet Train Infrastructure Restored*. Voices from Japan.

| | |
|----------|------------------|
| Received | January 3, 2018 |
| Revised | January 8, 2018 |
| Accepted | January 11, 2018 |