기존 철도 교량의 내진성능 평가

Seismic-Performance Evaluation for Existing Railway Bridges

임 남 형[1)] 강 영 종[2)] 양 재 성[3)] 엄 주 환[4)]
Lim, Nam-Hyoung Kang, Young-Jong Yang, Jae-Seong Um, Ju-Hwan

ABSTRACT

This is the basic study on the evaluation of seismic performance for existing railway bridges. This study presents an evaluation items and a progressive method of seismic performance for existing railway bridges. In the evaluation of seismic performance, a two-stage is used. Firstly, according to the seismic performance evaluation categories, preliminary screening of bridges is recommended. And using the seismic rating system, seismic rank of bridges is calculated. Secondly, for the selected bridges in the first stage, detailed evaluation is recommended.

1. 서 론

내진설계의 역사가 가장 오래된 것으로 알려진 일본의 경우, 1964년 이후에 교량의 내진설계 개념을 도입한 후 1971년이 되어서야 본격적인 교량 내진설계가 이루어졌다고 할 수 있다. 미국의 경우는 1971년 San Fernando 지진이후, 교량 내진설계에 대한 필요성이 제기됨과 함께 활발한 연구 수행 결과로서 1983년이 되어서야 비로소 최초의 교량 내진설계 기준이 제정되었다. 이에 영향을 받아 우리나라에서는 1992년에 개정된 도로교 표준시방서에 그리고 1991년 9월에 고속철도 표준시방서에 처음으로 내진설계편이 도입되었다.

우리나라는 일반적으로 지진에 대한 안전지대로 인식되어 왔기에 지진활동에 대한 연구나 구조물등의 내진성을 확보하기 위한 연구가 미비하였으나, 최근들어 크고 작은 지진이 많이 발생함과 아울러 그 관심 또한 고조되어 현재는 각 분야에서 활발하게 연구가 진행되고 있는 실정이다.

지질학자 및 지진공학자들을 중심으로 과거지진기록자료의 정리 및 분석을 통한 지진위험도의 재평가에 대한 연구가 수행되고있으며, 구조공학자들은 구조물의 내진 및 면진에 대하여 많은 연구를 수행하고 있으나 아직까지 만족할 만한 연구결과를 도출하고 있지 못하며 대부분의 연구가 신설될 구조물의 내진 설계 기법 연구에 집중되어 왔다.

기존 철도 교량의 대부분이 지진의 영향을 고려하지 않은 채 설계, 시공되어 있으며 상당수 구조물이 사용년수가 오래 경과하여 노후화가 많이 진행되어 있다. 이러한 철도 교량에 예상치 못한 지진 발생시 그 피해는 매우 광범위하게 발생할 가능성이 크며 이로 인한 열차운행의 중단으로 국가의 경제, 사회에 미치는 손실은 막대할 것으로 예상된다.

1) 고려대학교 토목환경공학과 박사과정
2) 고려대학교 토목환경공학과 교수, 정회원
3) 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원
4) 한국철도기술연구원 연구원

그러므로 신설될 구조물의 내진 설계는 물론 노후화 되거나 내진설계가 되어있지 않은 기존 철도 교량에 대한 내진 성능을 파악하고 내진 성능을 향상 시키기 위한 내진 보강은 필수적인 작업이라 할 수 있다.

본 연구에서는 외국의 지진피해 사례들을 분석하여 내진성능 평가시 반드시 수행되어야 할 평가 인자들을 소개하고 전반적인 내진성능 평가 기법의 흐름을 제시하고자 한다.

2. 평가 인자

국내의 지진에 의한 교량 구조물의 피해 사례는 없으므로 외국(미국, 일본 등)의 지진피해 사례를 조사, 분석하고 교량 구조물의 피해 유발 부재들을 정리하여 내진성능 평가를 위한 기본 자료를 획득하고자 한다. 외국의 지진피해를 분석하면 크게 두 가지로 분류된다. 첫 번째로, 교량 구조물의 교좌장치와 신축이음부에서의 피해로 이러한 피해는 교량 상부구조물의 낙교에 직접적인 원인을 제공한다. 두 번째로, 교량 구조물의 교각, 교대 및 지반 액상화에 의한 피해로 이러한 피해는 교량 전체 구조물의 붕괴를 유발할 수도 있다.

2.1 교좌장치

과거의 많은 지진피해 현상을 분석하여 보면 교좌장치의 피해가 가장 많이 나타났으며 교량 구조물을 형성하는 여러 구조 부재들 중에서 가장 취약한 것으로 판단된다.

그림1.은 1976년 Guatemala 지진시, 교량의 교좌받침 지지길이의 부족으로 인한 교량 상부구조의 낙교를 보여주고 있다. 그림2.은 1995년 Kobe 지진시 anchor볼트의 파괴로 인한 교좌받침부 이탈을 보여주고 있다.

그림1. 상부구조 낙교

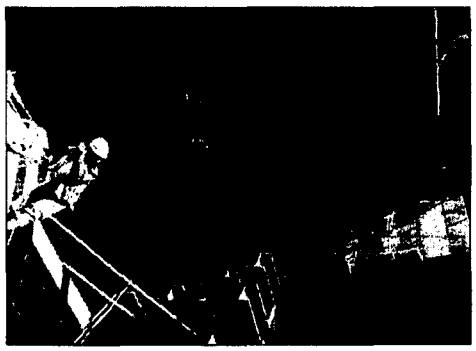

그림2. 교좌받침부 이탈

그림처럼 교좌장치부의 지진에 의한 취약성은 교량 상부구조의 낙교를 일으킬 수 있는 위험한 현상이므로 내진성능 평가 시, 반드시 받침지지길이 확보 여부를 평가하여야 한다. 또한 교좌장치의 성능이 우수하다고 하여도 교각과 연결하는 anchor볼트의 성능이 떨어지면 anchor볼트의 전단파괴로 인해 상부구조와 하부구조의 분리를 야기시킬 수 있으므로 교좌장치 자체의 성능 평가뿐 아니라 anchor 볼트의 상태와 성능도 평가 되어야 한다.

2.2 교각과 기초

지진시 철근콘크리트 교각과 기초는 항복을 하여 소성힌지를 형성할 수 있으며 교각의 항복여부가 교량 전체 구조계의 파괴형상을 결정하게 된다. 이러한 교각의 파괴형상은 교각의 철근 상세에 따라 달라진다. 철근 상세에 따른 파괴형상을 정리하면 다음과 같다.

① 교각 기둥 축방향 철근의 기초에의 정착길이 부족

→ 지진시 기초로부터 뽑히며 발생되는 휨강도의 저하

② 겹이음이 있는 교각 기둥 축방향 철근

→ 겹이음 부분의 할렬균열 발생에 따른 휨강도의 저하

③ 불충분한 횡방향 철근

→ 축방향 철근의 좌굴과 콘크리트 덮개의 파괴에 따른 휨강도의 저하

④ 교각 기둥의 전단

→ 전단강도의 감소로 인한 취성파괴

그림3.은 1971년 San-Fernando 지진시, 교각 기둥 축방향 철근이 기초로부터 뽑히며 발생한 교량 전체 구조계의 붕괴를 그리고 그림4.는 1995년 Kobe 지진시, 겹이음 철근 부위의 파괴 형상을 보여주고 있다. 이러한 축방향 철근의 정착 길이와 겹이음 철근의 길이와 존재 여부등도 반드시 평가 되어야 한다.

그림3. 정착길이 부족으로 인한 붕괴

그림4. 겹이음 철근 부위의 파괴

그림5.는 1994년 Northridge 지진시, 불충분하게 배근된 횡방향 철근으로 인한 축방향 철근의 좌굴 및 파괴를 그리고 그림6.은 1989년 Loma Prieta 지진시, 2층 고가교 교각의 전단파괴를 보여주고 있다. 이와 같은 횡방향 철근은 교각 기둥의 항복시에 충분한 휨강도를 유지시키기 위한 것으로 횡방향 철근의 양뿐만 아니라 그 간격도 매우 중요하므로 교각의 내진성능 평가 시 반드시 평가 되어야 한다. 그리고 이러한 횡방향 철근은 교각 기둥의 전단파괴에도 매우 큰 영향을 미칠 수 있다.

그림5. 불충분한 횡방향 철근으로 인한 파괴

그림6. 교각의 전단 파괴

2.3 교대

지진시 교대의 파괴는 보통 교량 구조물의 전체적인 붕괴를 유발하지는 않는 것으로 평가되며

이러한 교대의 파괴는 일시적으로 교량 접근 통로를 상실시킬 수 있는 피해로 사료된다. 이러한 침하 정도는 교대 형식의 다양성, 뒷채움토 특성의 다양성, 그리고 지하수 위치의 다양성 때문에 차이를 보이고 있다.

그림7.은 1995년 Kobe 지진시, 교대 뒷채움토의 침하로 인한 교량의 피해를 보여주고 있다.

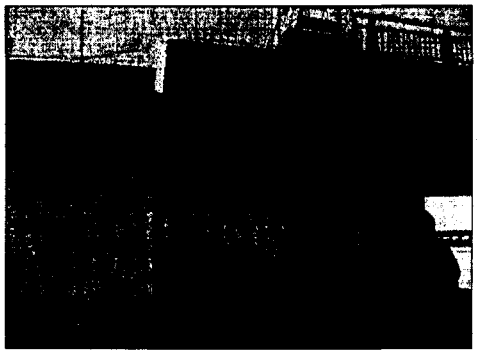

그림7. 뒷채움토의 침하로 인한 피해

그림8. 지반액상화로 인한 피해

2.4 지반 액상화

지진시 교량 구조물에 피해를 주는 지반의 파괴 형상으로 액상화(liquefaction), 산사태(landsliding), 단층파괴(fault rupture)등이 있으나 이 중에서 액상화에 의한 지반의 불안정이 가장 위험한 파괴 형상이라 할 수 있다. 과거의 많은 액상화에 의한 교량 구조물의 지진피해를 검토하여 보면 연속 교량들은 액상화에 의한 지반의 큰 변위에도 약간의 보수만이 필요한 피해를 받았으나 연속 교량이 아니거나, 교량 하부구조의 연성이 불충분한 교량들은 심각한 피해를 받은 것으로 분석되었다. 그림8.은 1964년 Niigata 지진시 지반의 액상화에 기인한 교각 기초의 과다한 변위로 발생된 교량 상부구조의 붕괴를 보여주고 있다.

3. 내진성능 평가

기존 철도 교량에 대한 내진성능 평가는 두 단계를 거쳐 수행되는 것이 경제적, 사회적, 행정적으로 효율적이다. 첫 번째 단계는 내진성능 평가를 위한 대상 교량들을 선별하고 이렇게 선별된 교량들을 대상으로 하여 상대적인 지진 위험도 순위를 산출하는 것이다. 두 번째 단계는 첫 번째 단계에서 지진 위험도 순위가 높은 교량들을 차례대로 정밀 내진성능을 평가하는 것이다.

3.1 대상교량 선별 및 우선순위 결정

대상교량 선별 및 우선순위 결정은 대상 지역내의 지진 위험도가 있는 교량에 대하여 내진성능 평가의 필요 여부와 시급한 정도를 정하여 줌으로서 한정된 자원을 효율적으로 운영하는데 판단 기준을 제시하는 단계이다.

3.1.1 대상교량 선별

대상교량의 선별은 과다한 노력의 낭비를 줄이고 효율적인 평가를 위하여 1차적으로 내진성능을 평가할 필요성이 있는 교량만을 추출하는 작업이다. 이러한 대상교량 선별에는 대상부지의 지진재해도(Seismic Hazard)와 대상 교량의 중요도(Importance)의 구성으로 선별 가능하다.

지진재해도는 평균재현주기별 최대지반가속도 값으로 표현될 수 있으며 또한 지진구역으로 표현될 수 있다. 교량의 중요도는 내진등급으로 표현될 수 있다.

3.1.2 우선순위 결정

대상교량 선별 과정에서 선별된 교량들을 대상으로 내진성능 평가의 상대적인 시급한 정도를 제공함으로서 한정된 자원을 효율적으로 운영하는데 판단기준을 제시하는 단계이다. 이러한 우선순위 결정은 대상 교량의 구조적 취약도와 지진도를 고려한 정량적 평가와 경제, 사회, 행정적인 측면들을 고려한 정성적 평가로 구성된다. 또한 정성적 평가에는 인접 교량과의 관계, 지진외적인 요건에 의한 대상 교량의 잔존수명 그리고 보수, 보강 계획의 추진 여부등을 고려한 대상교량의 현재 상태등이 포함될 수 있다.

정량적 평가에는 다음과 같은 항목들이 포함되어 평가되어야 한다.

(1) 구조적 취약도 평가

① 교좌장치, 받침지지길이에 대한 평가

② 교각에 대한 평가

③ 교대에 대한 평가

④ 지반 액상화에 대한 평가

(2) 대상부지의 지진재해도 평가

①지반종류에 따른 최대지반가속도

3.2 정밀 내진성능 평가

정밀 내진성능 평가는 3.1의 대상교량 선별 및 우선순위 결정 단계에서 정밀평가가 요구되는 교량들을 우선적으로 수행한다. 이러한 정밀 내진성능 평가는 교량을 구성하는 중요한 평가 인자들을 대상으로 수행하여 취약한 인자들의 내진성능 보강 혹은 교체 여부를 합리적으로 결정하는 것이다.

3.2.1 대상교량에 관한 문헌자료 검토

정밀한 내진성능 평가를 하기 위해서는 교량의 현장상태를 정확히 파악하여야 한다. 이러한 작업을 위해서는 교량의 실시 설계도, 시공 기록, 유지 관리 기록등의 검토가 선행되어야 하며, 가능하면 실시 구조계산서와 설계 당시의 설계기준 등도 검토되어야 한다.

3.2.2 현장조사

3.2.1의 문헌자료 검토를 바탕으로 현장조사를 실시하여 대상교량의 상태를 확인하고 문헌자료에서 얻은 결과를 검증한다. 이러한 현장조사에는 다음과 같은 항목들이 포함된다.

① 열차하중에 의한 예기치 않은 수평변위

② 교좌장치부의 손상 및 기능발휘 여부

③ 설계시 반영되지 않은 사하중 여부

④ 기초부위의 침하 여부

⑤ 교각과 교대의 변위 여부

⑥ 교량의 지진응답에 영향을 미친다고 판단되는 이외의 항목 등

3.2.3 교좌장치에 대한 정밀 내진성능 평가

교좌장치의 받침지지길이와 수평 지진력에 대해서 평가를 수행한다. 받침지지길이에 대한 기준은 시방규정에서 제시하는 최소받침지지길이 또는 지진해석에 의해 산출되는 상부와 하부구조의 상대변위를 사용할 수 있다. 수평 지진력에 대한 기준은 교량의 중요도에 따라 시방규정에서 제시하는 최소 수평 지진력 또는 지진해석에 의해 산출되는 수평 지진력을 사용할 수 있다.

교좌장치의 수평 지진력에 대한 성능은 장치 자체의 성능뿐 아니라 anchor볼트 등의 연결 상태도 검토되어야 한다.

3.2.4 교각과 기초에 대한 정밀 내진성능 평가

철근콘크리트 교각과 기초는 하나의 일체구조로 지진지반운동에 저항하게 된다. 그러므로 교각과 기초를 따로 구분하지 않고 일체로 고려하여 내진성능을 평가하여야 한다. 2.2 교각과 기초에서 언급한 파괴형상 별 저항능력은 철근 상세에 따른 연성지수로 평가할 수 있다.

이러한 연성지수는 교각과 기초의 상호작용으로 인해 매우 복잡한 성향을 보이고 있으며 교각의 항복 여부와 기초의 전도 및 기초 철근의 항복 여부등의 영향을 받는다. 그러므로 교각과 기초의 상호작용과 철근 상세들을 합리적으로 고려한 내진성능 평가 기법의 개발이 필요하다.

3.2.5 교대 및 지반액상화에 대한 정밀 내진성능 평가

교대에 대한 내진성능은 2.3 교대에서 언급하였듯이 교량 구조물의 전체적인 붕괴는 유발하지 않고 교량에의 접근성 상실을 유발한다. 그러므로 교대 뒷채움토의 지진시 예상되는 침하량을 산출하여 평가하여야 한다.

지반액상화에 대한 정밀 내진성능 평가는 지질학자나 지반학자들에 의해 평가되어야 하며 과거의 피해 사례 등도 검토하여 대상 지반의 안정성을 확인하여야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 외국의 지진피해 사례들을 분석하여 내진성능 평가시 반드시 수행되어야 할 평가 인자들을 소개하고 전반적인 내진성능 평가 기법의 흐름을 제시하였다. 앞으로 수행되어야 할 연구과제로는 다음과 같다.

① 대상교량간의 상대적인 지진위험도를 나타내는 우선순위 결정단계에 대한 합리적인 순위 평가 시스템

② 교각과 기초의 파괴형상과 철근상세를 고려한 합리적이며 정확한 연성지수의 산출

참고문헌

1. M.J.N. Priestley(1996) , "Seismic Design and Retrofit of Bridges" , John Wiley & Sons
2. ACI(1986) , "Seismic Design for Existing Structures"
3. SEAOC(1995) , "VISION 2000"
4. ATC-6-2(1983) , "Seismic Retrofitting Guidelines for Highway Bridges" , ATC
5. ATC-14 , "Evaluating The Seismic Resistance of Existing Buildings" , ATC