

# 일반철도교의 내진성능 예비평가기법

## Preliminary Screen Method of Railway Bridges for Seismic Detailed Evaluation



차 철 준\*



김 의 현\*\*

\*한국시설안전기술공단 교량실 공학박사 토목구조기술사  
\*\*울산대학교 건설환경공학부 교수 공학박사

### 1. 서 론

철도 교량은 도로구조물과 함께 인적, 물적자원을 수송하는 국가의 기간시설물로서 지진 시 피해를 입게 되면 인적, 물자수송 등에도 큰 영향을 받아 국가경제에 지대한 영향을 미치므로 지진 시에도 그 기능을 확보할 수 있는 적절한 대책이 필요하다. 철도시설물의 경우 고속철도에서 1993년 내진설계를 처음으로 적용하였고, 기존 철도교량은 1996년(1995년 일본 고베지진 이후)부터 내진설계 기준 적용 및 열차 운행에 따른 진동을 고려하여 일반구조물보다 설계기준강도 상향을 적용하고 있다. 그러므로 기존 철도교량의 내진성능은 매우 취약하다고 할 수 있으며, 적절한 내진성능 확보방안이 강구되어야 할 것이다.

한국철도시설공단은 조적식 교량 118개소에 대하여 2001~2002년 내진성능평가 실시후 현재 내진 보강 중에 있으며, 내진설계 미반영 시설물 현황은 그림 1과 같이 단경간 교량을 제외한 500여 교량에 대하여 내진성능 향상을 통한 철도시설물의 안전성 향상 방안을 계획중이다. 하지만 내진설계가 수행되지 않은 많은 수의 교량에 대하여 동시에 내진성능을 평가하고 보강하는 것은 시간적, 경제적 측면에서 매우 비합리적이다. 내진성능평가를 보다 경제적이고 합리적으로 수행하기 위해서는 “내진성능 예비평가”를 통한 내진보강 여부 및 보강우선순위를 결

정함으로써 효율적인 계획을 수립할 수 있고, 국내 철도시설물에 적용 가능한 내진성능 예비평가방법의 필요성이 제시되었다.

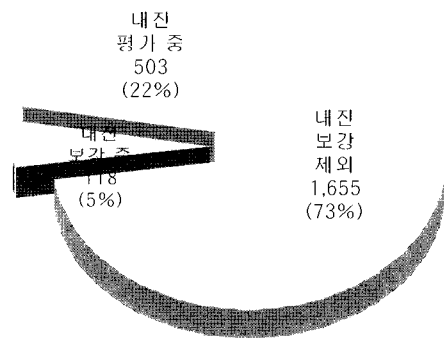


그림 1 내진설계 미반영 시설물 현황

본 연구에서는 기존 철도교량의 내진성능 상세평가 작업을 효율적으로 수행하기 위하여 국내외 자료를 비교·분석하여 우리나라 기존 철도교량에 적합한 내진성능 예비평가 기법을 개발하였다. 내진성능 예비평가에서는 교량이 위치한 지역의 지반가속도의 크기, 교량의 제원 및 구조적 특성, 교량의 중요도 등의 비교적 간단한 정보로부터 교량의 지진취약도를 산정하고 교량의 주위환경, 사회적, 경제적 영향 등을 종합적으로 판단하여 교량을 내진성능

에 따라 그룹화하여 내진성능 상세평가 및 보수보강을 위한 우선순위 선정방안에 대한 시스템을 제시하고자 한다. 게다가, 국내 도로교의 경우 내진성능평가 대상교량 많아 내진성능 예비평가를 위해서는 우선 손쉽게 입수 가능한 기본적인 데이터를 이용하여 간략식으로 평가하고 있다. 그러나 철도교의 경우 평가대상 교량의 수는 대략 1만개를 넘는 도로교 보다 매우 적어 도로교에 비하여 보다 정밀한 평가를 예비평가단계에서 수행할 수 있도록 평가방법을 제시하였다.

## 2. 국내외 내진성능평가 연구의 비교

### 2.1 내진성능 평가의 개요

시설물의 내진성능 평가의 최종목표는 내진성능이 부족한 시설물에 대해 적절한 보강작업을 수행하여 소요내진성능을 확보하는 것이다. 하지만 내진설계가 수행되지 않은 많은 수의 교량에 대하여 동시에 내진성능을 평가하고 보강하는 것은 시간적 및 경제적 측면에서 볼 때 매우 비합리적이다. 그러므로 내진성능평가를 보다 경제적이고 합리적으로 수행하기 위해서는 그림 2와 같이 “내진성능 예비평가”를 먼저 수행하여 교량의 내진성능을 개략적으로 평가하여 내진그룹을 분류하고, “내진성능 상세평가”가 시급한 교량부터 내진성능 상세평가를 수행하여 보수보강 해석 및 방안을 마련하는 것이 바람직하다. 내진성능 예비평가에서는 구조물의 내진성능에 대한 구조적 평가, 교량의 중요도, 구조물의 교체계획 및 사회경제적 영향도 등의 종합적 평가를 수행하여 보강여부를 합리적으로 판단할 필요가 있다.

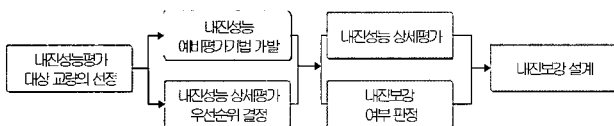


그림 2 내진성능 평가 개략 흐름도

### 2.2 국내외의 예비평가방법

미국의 연방도로 관리국(Federal Highway Administration)에서는 1995년 기존 도로교의 합리적인 내진성능평가 및 보강을 위한 메뉴얼을 발간하였다. 내진 평가시스템은 지진 위험 지역에 있는 교량의 독립된 내진 등급을 산정하는 프로그램이며, 구조적 취약성, 지진 및 토질공학적 취약도,

사회경제적 중요도를 고려한 교량 보수의 우선순위를 결정하는 내진성능예비평가 시스템이다.

미국의 National Center for Earthquake Engineering Research(NCEER)는 교량의 합리적인 내진보강을 위하여 교량의 취약도(V)와 중요도(I)를 기반으로 하는 우선순위 선정방법을 개발하였다.<sup>2)</sup> Caltrans나 ATC의 접근방법과는 달리 교량의 취약도(Vulnerability)를 지진도(Seismicity)의 함수로 고려하였다.

FEMA(Federal Emergency Management Agency)에서는 지진에 의한 시설물의 피해 및 이로 인한 사회적 손실을 예측평가하기 위한 내진성능평가 시스템인 HAZUS 프로그램을 개발하였다.<sup>3)</sup> HAZUS 프로그램에는 트랙/노반, 교량, 터널, 정거장, 유지시설, 연료시설 등의 철도 시설물의 내진성능평가가 포함된다. 이 프로그램은 각 시설물의 지진취약도 곡선을 개발한 후 지반운동의 세기에 따라 피해의 정도를 Minor, Moderate, Extensive, Complete로 등급화 함으로써 정량적인 내진성능을 평가한다.

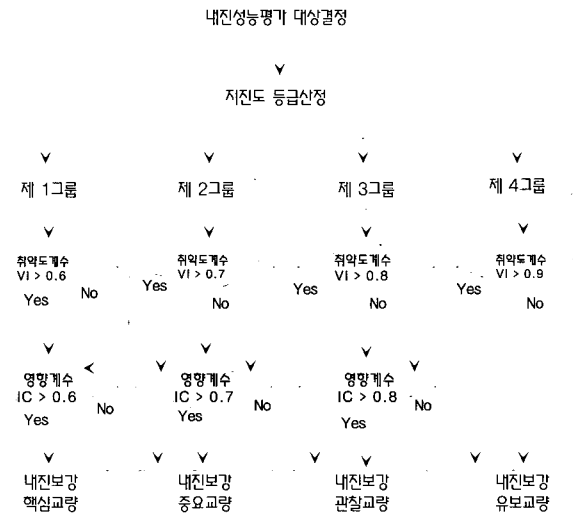


그림 3 국내 도로교의 예비평가방법

국내에서 교량의 내진성능 평가 방법에 대한 체계적인 연구의 시작은 1999년 한국시설안전기술공단의 국도상 교량에 대한 『기존교량의 내진성평가 및 보강방안 연구』이다.<sup>4)</sup> 교량의 내진성능 상세평가를 위한 우선순위 결정은 그림 3 지진도(Seismicity), 구조물의 위험도(Vulnerability), 사회경제적인 영향(Impact)의 세가지 요인에 의해 결정된다. 지진도에는 교량이 위치한 지역의 지진도와 지역적 특성이 고려되며, 구조물의 위험도에는 다음 식 (1)의 위험도지수의 항목과 같이 연속경간수, 교장, 교폭, 건설연도, 받침지리지길이 등의 교량 구조적 특성이 종합적으로 고려되며, 사회경제적 영향도

에는 식 (2)의 영향지수의 항목과 같이 차량통행량, 교량등급, 등이 고려되어 정량화되어 내진등급화 된다.

$$\begin{aligned}
 VI = & 0.2 \left( \frac{CONT_{정간수}}{3} \right) \\
 & + 0.15 \left( \frac{LENGTH}{100} \right)^{0.1} \cdot \left( \frac{WIDTH}{WIDTH_{기준}} \right)^{0.3} \\
 & + 0.05 \left( \frac{AGE_{현재}}{AGE_{기준}} \right) + 0.2 (PIER_{지수}) \\
 & + 0.1 (EARTH_{지수}) \times (PILE_{지수}) \\
 & + 0.1 (LIQ_{지수}) + 0.05 (DETIOR_{지수}) \\
 & + 0.1 \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( 1 - \frac{SUPPORT_{위어}}{SUPPORT_{기준}} \right)^2} \\
 & + 0.05 (SKEW_{지수})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

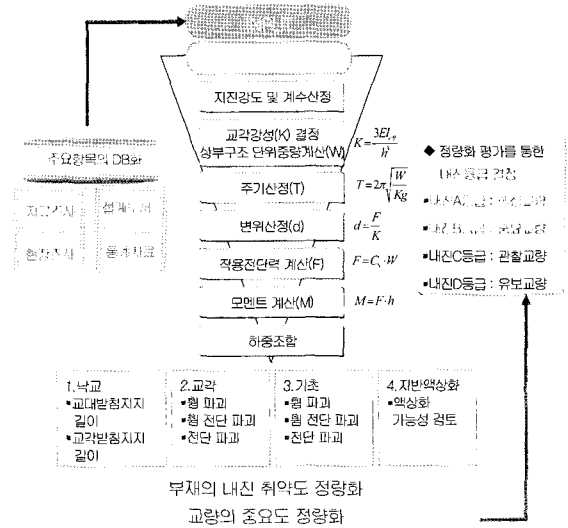


그림 4 철도교의 내진성능평가 방법

여기서,  $CONT_{정간수}$  = 최대 연속경간수,

$LENGTH$  = 최대연속경간장(m),

$WIDTH$  = 교량의 총폭원(m),

$WIDTH_{기준}$  = 교량의 폭원 기준(m)

$$\begin{aligned}
 IC = & 0.30 \text{Log} \left( 1 + \frac{ADT}{5000} \right) \\
 & + 0.35 (LEVEL)(CATEGORY) \\
 & + 0.15 (UTILITY) + 0.10 (FACILITY) \\
 & + 0.10 \left( \frac{DETOUR}{50} \right)^{0.25}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서,  $ADT$  = 일 평균교통량(대),

$LEVEL$  = 교량설계등급,

$CATEGORY$  = 시설물 종별,

$UTILITY$  = 교량하부를 통행하는 기간망,

$FACILITY$  = 중요시설물 부착 여부,

$DETOUR$  = 통행이 차단되었을 때 우회로 길이(km)

### 3. 내진성능 예비평가 방법

#### 3.1 기본방침 및 평가 절차

도로교의 경우 그 수가 많아 내진성능 예비평가를 위해서는 우선 손쉽게 입수 가능한 기본적인 데이터를 이용하여 간략식으로 평가하고 있다. 그러나 철도교의 경우 평가 대상 교량의 수는 대략 1만개를 넘는 도로교보다 매우 적어 도로교에 비하여 보다 정밀한 평가를 예비평가 단계에

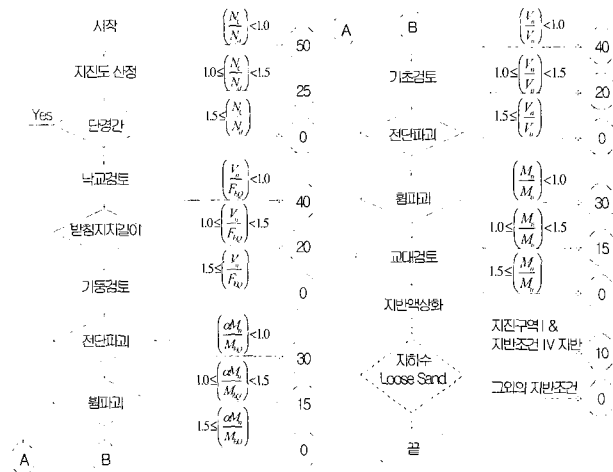


그림 5 내진취약도 정량화 방법

서 수행할 수 있다. 이에 철도교의 예비평가는 그림 4와 같이 현 도로교의 내진성능 상세평가와 유사한 평가기법으로 확립하도록 한다. 즉, 설계지진에 대해 교량이 요구되는 Demand와 교량이 보유하고 있는 Capacity를 직접 비교하여 평가한다. 다만, 예비평가이므로 간단한 정보로부터 이용 가능한 간략한 식을 사용한다. 예비평가 방법은 그림 4와 같이 우선 자료조사, 설계도서, 현장 조사 등을 수행하여 평가와 관련한 주요 항목들을 DB화하고, 교량의 내진취약도와 교량 중요도를 산정하여 내진등급을 결정한다.

#### 3.2 내진취약도 정량화

교량의 주요피해는 낙교(받침 및 지지기둥), 교각피해, 교대피해, 기초피해, 지반액상화를 들 수 있으며, 이들 구성 부재의 피해특성을 고려하여 그림 5와 같이 Capacity

와 Demand의 비(C/D 비)에 따라 정량화하였다. 교량의 Demand는 구조적 제원 특성으로부터 간이식을 사용하여 탄성지진력(전단력, 모멘트)과 탄성변위를 계산하여 산정하였다.

교량의 피해 중 낙교는 교량 기능이 중지되는 최악의 피해로 반드시 피해야 한다. 따라서, 가장 위험한 것으로 가정하여 50점을 부여하였다. 기둥의 경우 주요 파괴형태는 전단파괴와 휨 파괴로 전단파괴의 경우 교각에 발생하는 경사균열로 인해 상부구조를 지탱할 수 없는 경우가 종종 발생한다. 따라서, 휨 파괴 보다 위험한 것으로 하여 전단 파괴에 40점, 휨파괴 30점을 부여하였다. 기초파괴도 교각 파괴와 동일하게 적용하였다. 기초 저부에 액상화가 발생하면 교량이 더 그 기능을 수행하지 못하지만 액상화 평가와 관련한 자료(정보) 확보에 제약이 있어 10점으로 작게 평가하였다. 교대의 경우 구체 자체의 피해는 거의 발생하지 않아 생략 가능하다. 예비 평가 단계에서는 교량의 Demand와 Capacity를 간이식을 사용하여 산정하기 때문에 C/D 비가 1.5 이상인 경우에만 안전한 것으로 평가하였고, C/D 비가 1.0-1.5인 경우에는 평가점수를 1/2로 하였다.

### 3.3 교량의 중요도 정량화 및 내진등급화

교량의 중요도를 결정하는 데는 다양한 요소를 고려할 수 있으나 철도교에서는 건설연도와 통행 열차량을 중요 요소로 하여 표 1 및 표 2와 같이 정량화하였다. 교량의 내진취약도 점수 및 중요도 점수를 합산하여 표 3과 같이 내

표 1 교량의 건설연도에 따른 중요도 정량화

건설연도	평가점수
1985~현재	0
1965~1984	-5
~1965	-10

표 2 철도 통행열차량에 따른 중요도 정량화

환산 통행 열차량 (환산량/일)	평가점수
~500	0
500~1500	5
1500~	10

표 3 교량의 내진등급 분류 기준

예비평가 점수	내진등급
66 이상	A
56~65	B
41~55	C
40 이하	D

진A등급(내진보강 핵심교량), 내진B등급(내진보강 중요교량), 내진C등급(내진보강 관찰교량), 내진D등급(내진보강 유보교량)으로 내진등급화 한다. 이렇게 분류된 내진등급은 교량의 지진취약도와 중요도를 고려한 것으로 최종적인 내진등급은 관리주체의 정책적 판단에 따라 조정 가능하며 내진A등급의 교량부터 우선적으로 상세평가를 실시한다.

## 4. 부재의 내진성능평가 방법

교량의 Capacity 산정은 다음과 같다.

### 1) 낙 교

지진시 발생하는 큰 수평력에 의하여 받침부가 파손되거나 가동받침이 이탈하여 거더가 낙하되는 것을 방지하기 위하여 철도설계기준 내진설계편을 적용하였고, 낙교와 관련한 교량의 Capacity는 받침지지길이(교각 및 교대의 거더 단부끝단까지의 거리)이다.

$$N = (200 + 1.67L + 6.66H) (1 + 0.000125\theta^2) \text{ (mm)} \quad (3)$$

여기서, L = 인접 신축이음부까지 또는 교량단부까지의 거리(m),

H = 다음 각 경우에 대한 평균 높이(m)

$\theta$  = 경간의 직각방향에 따른 교각이나 교대의 사잇각(도)

### 2) 교각의 전단강도

콘크리트가 부담하는 전단강도( $V_c$ )와 압축력에 의해 발생하는 전단강도( $V_p$ )로 한다. 전단에 저항하는 철근의 배근 유무를 파악하기 힘들기 때문에 철근이 부담하는 전단강도( $V_s$ )는 평가에서는 제외한다. 철근콘크리트 교각의 공칭전단강도는 식 (4a), 식 (4b), 식 (4c)와 같이 Priestley 등<sup>5)</sup>의 제안에 따른다.

$$V_n = V_c + V_p \quad (4a)$$

$$V_c = k \sqrt{f_{ck}} A_c \quad (4b)$$

$$V_p = P \cdot \tan\alpha \quad (4c)$$

여기서,  $V_c$  = 교각의 전단강도에서 콘크리트가 부담하는 전단강도

$V_b$  = 교각의 전단강도에서 압축력 효과에 따른 전단 강도

$$A_e = 0.8 A_g \text{ (전체 단면적의 80\%)} \text{ (m}^2\text{)}$$

$f_{ck}$  : 콘크리트 압축 강도 (MPa)

$k$  : 변위연성도( $\mu_{\Delta}$ )에 의하여 결정되는 계수

$$\tan \alpha = \frac{D_c}{2L} = \text{캔틸레버 거동 교각}$$

$$\tan \alpha = \frac{D_c}{L} \text{ Frame 거동 교각}$$

$$D_c = 0.65 D \text{ (원형단면)}$$

$$D_c = 0.75 h \text{ (사각형단면)}$$

$P$  : 축력

$\alpha$  : 기둥중심축과 압축스트럿이 이루는 각도

$L$  : 교각길이

$D_c$  = 원형과 사각단면의 형태로 결정되고 여기서  $D$ 는 원형단면의 지름,  $h$ 는 사각형단면에서 전단력이 작용하는 방향으로의 단면크기

### 3) 교각의 휨강도

교각의 단면 휨강도는 주철근의 항복을 가정하여 단면 해석을 수행하여 산정할 수 있다. 그러나 오래된 교량의 경우 교각에 주철근이 배근되지 않았거나 배근되었더라도 철근의 휨에 대한 저항성능을 기대하기 어렵다. 이러한 경우의 휨강도는 교각의 균열모멘트이다. 본 연구에서는 1970년 이전에 건설된 교량에 대해서는 식 (5)과 같은 균열모멘트를 휨강도로 하고 그 이후에 건설된 교량에 대해서는 주철근의 저항력을 고려하여 휨강도를 산정한다. 다만, 예비평가인 점을 고려하여 식 (6)와 같이 개략적으로 산정한다.

$$M_n = M_{cr} = f_r S \tag{5}$$

$$M_n = A_s \cdot f_y \left(d - \frac{a}{2}\right) = \rho \cdot A_g \cdot f_y \cdot 0.8d \tag{6}$$

여기서,  $f_r$  = 파괴계수 ( $f_r = 2.0\sqrt{f_{ck}}$ ),

$S$  = 단면계수,

$A_g$  = 주철근의 단면적,

$f_y$  = 주철근의 항복강도,

$d$  = 교각단면의 유효깊이,

$a$  = 등가블럭의 깊이,

$A_g$  = 교각의 단면적,

$\rho$  = 주철근비(원형단면 0.08, 벽식 단면 0.05로 가정)

만약, 교각의 파괴유형이 휨파괴인 경우에는 단면의 휨강도는 교각의 변형성능을 고려하여야 한다. 기존 교량의 경우 대부분 소성현지역역내에 주철근의 겹침이음이 있어 변위연성도가 1.3을 넘지 않으므로 휨강도는 1.3배(1.3Mn) 한다.

### 4) 기초의 전단강도

지진력에 의해 기초에 작용하는 전단력( $V_u$ )은 기둥으로부터 전달되는 축력과 모멘트에 의해서 기초저면에 발생하는 압력에 의해 산정된다. 콘크리트가 부담하는 전단강도의 크기는 다음 식 (7)과 같이 적용한다.

$$V_n = V_c = 0.53\sqrt{f_{ck}} A_e \tag{7}$$

### 5) 기초의 휨강도

교각의 휨강도와 동일하다. 다만, 기초의 경우 교각과 달리 변형성능 특성이 없으므로 휨강도 산정시 변형성능에 따른 보정계수를 적용하지 않는다.

### 6) 액상화

액상화는 지하수위가 높은 사질토지반에서 발생한다. 예비평가 시 지반과 지하수위에 대한 정보가 없어 액상화를 판별하기가 쉽지 않다. 따라서 지진구역 I에 속하면서 비교적 지반조건 IV로 나쁜 지반을 액상화 잠재 위험지역으로 한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 기존 철도교량의 효율적인 내진성능 평가 및 보강을 위하여 내진성능 예비평가 기법을 개발하였다. 본 예비평가기법에서는 교량의 구조적 취약도와 사회적 중요도를 정량적으로 평가할 수 있도록 하였다. 구조적 취약도의 평가에서는 교량의 주요부재에 대하여 설계지진 시 교량에 요구하는 Demand와 교량이 보유한 Capacity를 비교하여 평가함으로써 상세평가와 유사한 평가기법을

도입하였다. 교량은 구조적 취약도와 중요도에 의해 내진 등급 A, B, C, D의 4개 등급으로 그룹화되며 내진등급 C 등급 이상의 교량에 대해서는 내진성능 상세평가가 요구되며 내진등급 A등급부터 우선적으로 상세평가를 수행하도록 하였다. 교량의 내진등급은 시설물 관리주체의 정책적 판단에 의해 등급을 조정할 수 있다.

### 참고문헌

1. Seismic Retrofitting Manual for Highway Bridges, U.S. Department Transportation Federal Highway Administration

Report No. FHWA-RD-94-052, 1994.

2. Prioritization of Bridges for Seismic Retrofitting, NCEER-95-0007 Report, 1995.

3. Earthquake Loss Estimation Methodology(HAZUS), Federal Emergency Management Agency, 1999

4. 기존교량의 내진성평가 및 보강방안, 시설안전기술공단, 1999

5. Priestley, M.J.N., Seible, F. and Calvi, G. M., Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley&Sons Inc., 1996. ↗