철도교량의 시공중 안전성 확보를 위한 지진하중 적용 연구

A Study on Earthquake Loading to Secure Safety During Railway Bridge Construction

최영환* · 장봉희** · 김정현*** · 이태규****

Choi, Young-Hown*, Jang, Bong-Hee**, Kim, Jung-hyun***, and Lee, Tae-Gyu****

Abstract

Railway bridges are widely built based on the national railway network and maintenance plans. As in the case of an earthquake in Pohang, the seismic safety of constructions in Korea is very important in the prevention of disasters. Therefore, the cases of damage caused by earthquakes and additional horizontal forces during bridge superstructure constructions were investigated among domestic and foreign earthquakes, and the details of overseas related design standards were confirmed. The horizontal forces based on the domestic seismic design standard (KDS 24 17 10: 2016) on the PSC beam, PSC box, steel box, and wind load were compared with the design codes based on the Eurocode 8 (Part 2), Japan Railway Technical Research Institute (RTRI), Japan Society of Civil Engineers (JSCE), and East Japan Railway Company (JR East).

Key words : Railway Bridge, Firder, Seismic Safety, Horizontal Seismic Force, Wind Load

요 지

철도교는 국가철도망 계획과 노후 철도교 개량 등에 따라 전국적으로 건설되고 있다. 국내의 경우 포항지진 사례를 통해 철도교 시공중 지진안전도 확보의 중요성이 부각되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 국내·외 철도교 시공중 상부구조물에 발생하는 지진의 영향 및 수평력 발생에 따른 손상사례와 국외 설계기준의 세부사항을 확인하였다. 또한, 국내 교량 내진설계기준(KDS 24 17 10)을 적용한 PSC Beam, PSC Box, Steel Box 형식의 상부구조물에 대하여 풍하중과 지진수평력 설계개념이 제시된 Eurocode-8 (Part2), 일본철도종합연구소(RTRI), 일본토목학회(JSCE), 동일본여객철도주식회사(JR-EAST) 설계기준에 따라 지진수평력을 각각 산정하여 비교·분석하였다.

핵심용어 : 철도교, 설계기준, 지진안전도, 지진수평력, 풍하중

1. 서 론

과거 국내는 환태평양 지진대 및 불의 고리(Ring of fire)에 위치하는 주변국보다 비교적 지진에 안전한 지역으로 인식되어 왔다. 그러나 최근 경주(리히터규모 5.8) 및 포항(리히터 규모 5.4)지진 등의 높아지는 지진발생 빈도와 유감지진

발생횟수 지역 확산으로 더 이상 지진 안전지대로 평가되지 않고 있다(Yang and Heo, 2016).

또한, 시공기술의 발전과 최적화된 형식의 상부구조물 개발이 진행됨에 따라 공사비 절감을 위한 철도교의 장경간화가 이루어지고 있어 상부구조물 시공중 위험성을 내포하는 수평력에 대한 검토가 중요시되고 있다.

*정회원, 국가철도공단 시설계획처장(E-mail: si7788@kr.or.kr)

Member, Railway Infrastructure Planning Div, Korea National Railway

**국가철도공단 건설본부장

Railway Construction Dept, Korea National Railway

***교신저자, 정회원, 코백주식회사 대표이사(Tel: +82-31-703-8410, Fax: +82-31-703-8432, E-mail: ceo@kobec.co.kr)

Corresponding Author, Member, President, KOBEC CO., LTD

****우송대학교 토목공학과 교수

Professor, Department of Civil Engineering, Woosong University

국내 설계기준인 교량 설계하중(KDS 24 12 20)과 철도설계기준 노반편에서는 시공중 가설단계별 방법과 구조를 고려하여 지진의 영향 등에 대한 안전도 검토를 해야한다고 규정되어 있다. 그러나 지진의 영향에 대한 검토방안이나 적용하중, 이외 세부사항에 대해서는 제시되어 있지 않다. 국외 설계기준인 유로코드에는 시공중 지진의 영향에 대한 검토방안이나 수평력 산정 등 세부사항들이 제시되어 시공 및 설계에 적용되고 있다(EN 1998-2, 2005).

철도교의 내진설계기준 비교와 관련한 선행연구는 Yun et al. (2012)의 지진 시 고속 철도교 열차 운행규정 연구와 Ha (2018)의 국내·외 철도 내진설계기준 비교 등 기본적인 지진 해석조건에 관한 연구가 있다. 이외에는 철도교 건설 후 내진에 관한 연구들이 대부분인 것으로 나타났다. 철도교 설계시 하부구조물에 대한 내진설계는 검토되고 있어 건설 후 내진성능이 확보되고 있지만 상부구조물의 시공중 내진설계는 검토되고 있지 않다. 일반적으로 상부구조의 신규 시공이나 노후화에 따른 교체시 감리단의 요청이 있을 때 시공에 대한 안전성 검토자료를 시공사나 설계사가 제출하고 있다. 그러나 자료에는 자중과 풍하중을 고려한 내용으로 검토되고 있으며 지진의 영향으로 인한 안전성 검토는 전무한 실정이다.

실제로도 지진발생에 따른 수평력으로 인해 국내 포항지진에서 상부구조물의 손상사례가 발생하여 안전진단과 긴급복공공사가 시행되었다(Chinhung Company, 2018). 국외의 경우에도 일본과 미국에서 시공중 수평력 발생으로 인한 손상사례들이 보고된 바 있으며 지진의 영향을 고려한 안전장치들의 설치사례가 확인되고 있다(Kinno et al., 2018).

따라서, 본 연구에서는 국내·외 설계기준의 조사 및 비교를 통해 시공중 지진의 영향을 고려한 수평력 산정방안 및 상부구조물의 형식에 따른 수평력을 산정하였다. 또한, 현재 시공중 풍하중에 의한 수평력으로 안전성이 검토되기 때문에 지진의 영향에 대한 수평력과 풍하중에 의한 수평력을 분석·평가하여 향후 시공중 안전성 검토를 위한 수평력에 대한 기본자료를 제시하였다.

2. 손상사례 및 안전장치 조사

2.1 국내사례

2.1.1 포항지진

2017년 포항지진 발생시 철도교 가설중 상부구조물이 종·횡방향으로 대변위가 발생하는 사례가 나타났다. 해당 교량은 내진 1등급, 지진 I 구역(가속도 계수: 0.154 g, 규모: 6.3)의 내진설계가 적용되었고 상부구조물은 단선(Single track), 구조형식은 PSC Beam, PF Beam, Steel Box 등이었다. 지진발생 시 하부구조는 시공완료 된 상태였으며 기초는 PHC Pile ($\varnothing 600 \times 9T$)로 시공되었다. 상부구조물의 거더 가설은 완료된 상태였고 일부 슬래브 타설이 진행중인 공정이었다. 이러한 공정중에 지진이 발생하여 횡방향으로 254 mm, 종방향으로 170 mm의 변위가 발생하였으며 지진발생에 따른 변형의 유사한 경향은 나타나지 않았다. Figs. 1과 2에는 상부구조의 변형과 받침부의 최대 가동단을 넘어선 전경을 나타내고 있으며 이에 대한 변위 발생량 측정결과는 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1. Displaced Superstructures

Fig. 2. Displaced Bearing

Table 1. Displacement of Bridge-2 Bearings

Items	Span 1		Span 2		Span 3		Span 4	
	A1	P1	P1	P2	P2	P3	P4	A2
Transversal displacement (mm)	+ 59.0	+ 29.0	+ 1.5	- 48.5	- 53.0	+ 52.0	+ 227.0	+ 53.0
Longitudinal displacement (mm)	+ 10.6		+ 1.8		+ 30.1		- 16.3	

2.2 국외사례

2.2.1 일본

2009년 국토교통성 중부지방 정비국에서 시행한 1호선 시즈오카 우회 제 2고가교 공사에서 PSC Beam (T-type)을 가설중 스루가만 지진(Suruga Bay Earthquake)이 발생하였다. 일본의 경우 교량 시공중 지진에 대한 안전성 확보를 위해 전도방지 장치 등의 안전장치를 필수적으로 설치하도록 규정하고 있어 스루가만 지진발생 당시에도 전도방지 장치와 횡간격 유지장치 고정을 위한 강선을 설치하였다. 그러나 지진발생으로 변위가 발생하여 스톱퍼가 파손된 사례가 나타났다. Fig. 3에는 시즈오카 진원지(Epicenter)와 규모, Fig. 4에는 상부구조물의 안전장치에 대한 설치개요를 나타내었다(Yonekura and Hibino, 2009). 또한, 철도교는 물론 이를 횡단하는 도로교의 시공중에도 상부구조 손상방지를 위하여 지진수평력을 산정 후 안전장치를 설치하도록 규정되어 있다. 이에 대한 지진 안전장치 사례(Seijin and Maruyama, 2015)를 Fig. 5에 나타내었다. 안전장치의 경우 거더와 거더 사이에 앵글(angle) 및 철관을 이용하여 고정시켜 수평력 및 전도에 대한 안전성을 고려하여 시공되고 있다.

2.2.2 미국

플로리다 포르 라우더데일-할리우드 국제공항(Lauderdale-Hollywood International Airport) 활주로 확장공사 시공중 거더(Precast girder)와 교좌 장치가 고정(welding)되지 않은

Fig. 3. Displaced Superstructures

Fig. 4. Fall Prevention Devices

상태였다. 이때 경사진 바닥판에 지지된 100 ft 길이의 철관(pipe)이 추가 설치되며 발생한 수평력으로 상부구조물의 붕괴가 발생하였다. 상부구조물은 동부 해안철도 소유의 선로 위에 붕괴되었다. Fig. 6에는 당시 선로 위에 낙고된 상부구조물을 나타내고 있다(Mohammad A, 2014).

3. 국내 · 외 설계기준

3.1 국내

상부구조물 시공은 크레인 및 기타 장비를 이용하여 하부 구조물에 거치 및 가로보 시공이나 바닥판 타설(양생) 등의 공사가 진행되는 것이다.

(a) Roadway bridge over Railway bridge

(b) Railway bridge

Fig. 5. Equipment for Seismic Safety

Fig. 6. Fallen and Displaced Precast Girders

국내 상부구조물 시공중 지진의 영향에 대한 설계기준을 검토하기 위해 국민안전처의 내진설계기준 공통 적용사항(MPSS, 2017)과 국토교통부의 내진설계 일반(Korea Construction Standards Center, 2018), 교량 내진설계기준 일반(Korea Construction Standards Center, 2016), 철도설계기준 노반편(Korea Construction Standards Center, 2017), 교량설계 일반사항(KDS 24 10 10), 철도계획(Korea Construction Standards Center, 2019)등에 제시된 설계기준 및 수평력 산정방안을 조사하였다.

조사결과 철도설계기준과 교량 설계하중에서 “시공중에는 가설단계별 가설방법과 가설중의 구조를 고려하여 자중, 가설장비, 기자재, 바람, 지진의 영향 등에 대한 안전도 검토를 해야 한다”고 규정되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 자중, 가설장비, 기자재의 경우에는 자중을 고려한 연직하중으로 안전성을 검토할 수 있으며 바람의 경우 철도설계기준에 제시된 설계기준으로 수평력을 산정하여 안전성을 검토할 수 있다. 하지만 상부구조물 시공중 지진의 영향에 대한 검토 방안은 모든 설계기준에서 제시되어 있지 않은 것으로 나타났다.

3.2 국외

3.2.1 일본

지진발생이 빈번한 일본은 1923년 Kanto 대지진을 계기로 내진설계 필요성이 부각되어 1924년부터 내진설계가 도입되었다. 이후 1949년 내진설계에 대한 법 제정 후 1981년 내진설계 기준이 체계적으로 정립되었다. 가설중 지진에 대한 영향은 Level 1과 2로 구분하여 설계하고 있다. Level 1 (이하, L1)은 구조물의 수명 동안 몇 번에 걸쳐 발생할 수 있는 지진이며 Level 2 (이하, L2)는 구조물의 수명 동안 한 번 발생할 확률을 가진 지진을 말한다. L1과 L2를 내진성능 분류로 정의하면 L1은 지진이 발생하여도 구조물의 기능을 유지하고 있어야 하며 L2는 지진발생 시 단시간에 기능을 복구할 수 있거나 지진으로 인하여 구조물 전체가 붕괴되지 않도록 하는 개념이다.

일본 토목학회에서 발간된 강구조 가설 설계 시공 지침(Japan Society of Civil Engineers Steel Structure Committee, 2012)에서는 일반가설의 경우 L1의 1/2을 지진으로 적용하고 철도횡단이나 고속도로 IC의 상부 횡단은 L2의 1/2을

적용하도록 제시되어 있다. 철도분야는 동일본여객철도주식회사(JR-EAST) 규정을 참고하여 제시하는데 열차운행과 작업의 영향범위에 따라 Fig. 7과 같이 제시하고 있다. ①은 선로상공 범위, ②는 선로 이외 작업 범위이다. Table 2에는 각각의 영향범위에 따라 시공중 요구되는 지진의 영향에 대해 정리하여 나타내었다. Train passing은 상부구조물 시공시 부득이한(수도권 전철) 경우나 상부구조를 거치 후 바닥판 공사 및 추가공정이 필요한 경우 적용하며, Train no passing은 국내와 유사하게 열차차단 후 공사하거나 교체할 시 적용하게 되는 영향이다.

3.2.2 유럽

유로코드에는 상부구조물 가설중 재현주기에 대한 지침이 Eurocode-8, Part 2: Bridge의 ANNEX-A에 제시되어 있다. 내용을 정리하면 상부구조물의 시공 및 시공중 공사기간에 대해서는 설계재현주기(475년)를 통해 공사기간을 고려한 Eq. (1)을 제시하고 있다. 이는 국내 가설공사표준시방서에 제시된 풍하중 및 중요도 계수 개념과 유사하다.

$$T_R = 1/(1-p)^{(1/t_L)} \quad (1)$$

재현주기가 5년 이하일 경우 및 시공 중 시공기간에 대해서는 Eq. (1)에 대해 단순화한 관계를 추정한 Eq. (2)로 제시하였다.

$$T_{Re} \cong \frac{t_C}{p} \quad (2)$$

Fig. 7. Range of over Track and Influence of Operating Line

Table 2. Seismic Stability Evaluation During Bridge Superstructure Erection

Installation Location	Range of over track (operating line) ①		Influence range of over track (outside of over track) ②	Other case
Time	Train passing	Train no passing	-	
Earthquake effect	No collapse, fall, overturn, displacement against Large-Scale earthquake of L2 motion half	Horizontal force (kh = 0.2) of Middle-Scale earthquake is below the allowable stress		Horizontal force half (kh = 0.1) of Middle-Scale earthquake is below the allowable stress

Eq. (1)에서 t_L 은 가설되는 기간을 1년에 대한 비율로 구한 값이며, t_c 는 상부구조물 시공기간을 의미한다. p 는 시공단계 동안의 설계지진 초과 확률을 의미하며 이 값은 최대 0.05 이내로 권장하고 있다. 또한, 재현주기 T_{Rc} 에 상응하는 설계 지반가속도 a_{gc} 는 설계지역 지진도에 따르며 이를 Eq. (3)에서와 같이 추정식으로 제시하고 있다.

$$\frac{a_{gc}}{a_{g,R}} = \left(\frac{T_{Rc}}{T_{NCR}} \right)^k \quad (3)$$

여기서 $a_{g,R}$ 은 시공기간을 고려한 재현주기 T_{NCR} 에 대한 최대 지반가속도이며, 지진발생 지역에 따른 지수 k 는 0.3-0.4 범위 값을 사용할 수 있도록 제시되어 있다.

4. 수평력 산정 및 분석

4.1 대상교량 선정 및 공사기간 산정

수평력 산정을 위한 상부구조물 형식은 철도건설사업 타당성 보고서(Korea Development Institute, 2021)에 수록된 경간 25 m의 PSC Beam, 경간 35 m의 PSC Box, 경간 45 m의

Steel Box로 선정하였으며 Fig. 8에는 상부구조물 각각의 형식 및 제원을 나타내었다. 시공중 재현주기를 고려한 공사기간 산정은 국토교통부 ‘공공건설공사의 공사기간 산정기준’과 ‘적정 공사기간 확보를 위한 가이드라인(KICT, 2020)’을 토대로 유로코드에 제시된 Eq. (4)에 따라 산정하였다.

$$E = A + B + C - D \quad (4)$$

공사중 시공기간(E)에 대한 산정은 비작업일수(A) 및 교량공사의 상부공(C)에 대해서 고려하였다. 비작업일수 고려시 가장 불리한 조건의 지역에서 가설하는 것으로 가정한다. 후 폭서기, 일강수량, 일최대순간풍속, 법정공휴일(B)에 대한 가이드라인 자료를 참고하여 적용하였다. 구조물의 형식이나 경간장, 형고 등에 따라 공사기간 중 시공기간의 차이는 다소 발생할 수 있으나 본 연구에서는 철도교의 대표적인 상부구조물의 지진발생 시 수평력을 검토해보는 사전적인 연구로 모두 동일한 것으로 가정하였다. 또한, 비작업일수 고려시 약 10%의 중복일수(D)를 고려하여 시공기간을 산정하였다. 이에 따라 적용된 시공기간은 Table 3에 나타내었다.

Fig. 8. Dimensions of Superstructures

Table 3. Construction Duration and Dead Load

Type	Dead Load (kN)	Non-working day (A)			National holiday (B)	Superstructure construction period (C)					Dates with duplicates (D)	Construction duration (E)
		Hot weather	Daily rainfall	Daily maximum instantaneous Wind Speed		Transportation and launching of girder	Support and form work	Rebar work	Concrete mixing	Concrete curing		
PSC Beam	2,109	14.6	7.7	0.5	8	1	12	5	1	7	5.88	51
PSC Box	6,415											
Steel Box	1,429											

Table 4. Seismic Return Period, Risk Factor

Design standard	Seismic Zone	Period (days)	Seismic zone factor	Return period (years)	Risk factor	Effective horizontal acceleration (Comparison)	Span
KDS	I	-	0.11	100	0.570	0.063 (100%)	-
Eurocode-8	I	51	0.11	2.795	0.214	0.024 (38%)	1
		186	0.11	10.192	0.316	0.035 (55%)	10
		336	0.11	18.411	0.377	0.041 (65%)	20

4.2 수평력 산정을 위한 변수

국외 설계기준을 검토한 결과 수평력 산정은 내진설계기준과 진도법, 열차운행상황의 범위를 고려한 방법으로 구분되었다. 또한, 수평력 산정은 설계재현주기를 고려한 위험도 계수와 유효수평지반가속도 계수, 자중을 고려하여 구할 수 있다. 국내 설계기준에서는 시공기간을 고려한 설계재현주기가 제시되어 있지 않기 때문에 철도설계기준 노반편에 제시되어 있는 열차주행안전성을 평가하는 기능수행 수준에 해당하는 100년 빈도의 설계재현주기를 적용하였다. 국내 설계기준에 따르면 철도교 설계시 내진 I등급에 대하여 1,000년, 내진 II등급은 500년, 열차주행안전성에 대해서는 100년 설계재현주기에 대한 내진설계를 통하여 안전성을 확보하고 있어 설계기준에 제시된 설계재현주기가 가장 짧은 100년을 적용하였다. 또한, 교량설계 일반사항에서는 ‘별도로 규정하지 않는 경우 철도교의 설계 내용기간은 100년으로 한다’라고 제시되어 있어 이를 적용하였다.

공사중 시공기간을 고려한 경우는 유로코드에 제시된 Eqs. (1)~(3)에 따른 설계재현주기를 통해 위험도 계수와 유효수평지반가속도 계수를 산정하였다. 유로코드의 경우 평균재현주기는 475년으로 국내 평균재현주기인 500년과 차이가 있어 이를 국내 설계기준의 평균재현주기와 동일 조건으로 비교하기 위해 선형보간법으로 보정한 위험도 계수와 유효수평지반가속도 계수를 적용하였다. 진도법과 열차운행 등을 고려한 수평력 산정은 일본철도종합연구소 (Railway Technical Research Institute, 이하 RTRI)의 철도구조물 설계기준과 해설:내진설계(RTRI, 2017)와 JSCE의 강구조

가설·설계 시공지침, JR-EAST에 제시된 설계기준을 통해 산정하였다.

유로코드에 따라 시공기간을 고려하여 산정한 위험도 계수와 유효수평지반가속도 계수는 국내 설계기준 대비 38% 수준임을 확인할 수 있었으며 20경간 장대교량의 시공기간을 고려한 산정결과도 65% 수준인 것으로 나타났다. 산정된 유효수평지반가속도 계수를 통해 수평력을 산정한 결과 지반분류 중 암반 외에는 풍하중의 수평력 범위 이내임을 확인할 수 있었으며 결과는 Table 4에 나타내었다.

4.3 지반분류에 따른 수평력

국내 설계기준인 교량 내진설계기준에서는 ‘상부구조와 교대 사이의 연결부에 대하여 고정하중 반력에 가속도 계수와 지반계수를 산정한 값의 수평력이 작용한다고 보고 중방향 및 횡방향에 대하여 안전하도록 설계해야 한다’고 제시되어 있다. 여기서, 가속도 계수는 지진구역 계수와 위험도 계수로 산정할 수 있다. 지반분류는 국내 설계기준 철도계획(KDS 47 10 15)에서 6종의 지반종류에 따라 암반지반 및 토사지반으로 분류 후 지반에 따른 설계지반운동의 가속도 표준 설계응답스펙트럼을 산정하도록 제시되어 있다. 국내·외 설계기준에 따른 유효수평지반가속도를 구한 결과 모두 0.1 이하이므로 지반분류에서 S_1 ~ S_3 까지는 이에 대한 단주기 증폭계수를 고려하였다. 지반분류 시 S_0 의 경우 ‘부지 고유의 특성평가 및 지반 응답해석이 요구되는 지반’으로 본 연구에서는 수평력을 산정에 적용하지 않았다. 지반분류에 따른 수평력 산정결과는 Tables 5와 6에 정리하였다.

Table 5. Horizontal force of Rock

Design standard	Superstructure	Acceleration factor (A)	Soil	2.8 A	Vertical load (kN)	Design horizontal force (kN)
KDS	PSC Beam	0.063	Rock (S1)	0.176	1,055	186
	PSC Box				3,208	565
	Steel Box				715	126
Eurocode-8	PSC Beam	0.024	Rock (S1)	0.068	1,055	72
	PSC Box				3,208	218
	Steel Box				715	49

Table 6. Horizontal Force of Soil Profile Type

Design standard	Superstructure	Soil profile type	Short-period coefficient (F_a)	Acceleration factor	Vertical load (kN)	Design horizontal force (kN)
KDS	PSC Beam	S2	1.4	0.063	1,055	93
		S3	1.7			113
		S4	1.6			106
		S5	1.8			120
	PSC Box	S2	1.4		3,208	283
		S3	1.7			344
		S4	1.6			323
		S5	1.8			364
	Steel Box	S2	1.4		715	63
		S3	1.7			77
		S4	1.6			72
		S5	1.8			81
Eurocode-8	PSC Beam	S2	1.4	0.024	1,055	35
		S3	1.7			43
		S4	1.6			41
		S5	1.8			46
	PSC Box	S2	1.4		3,208	108
		S3	1.7			131
		S4	1.6			123
		S5	1.8			139
	Steel Box	S2	1.4		715	24
		S3	1.7			29
		S4	1.6			27
		S5	1.8			31

4.4 진도와 열차운행, 선로영향범위를 고려한 수평력

일본 철도교 내진기준(Railway structure design standards and explanations, seismic design)은 지역계수, 지반계수를 적용하고 하부구조 형식(RC구조, SRC구조, CFT구조)에 따라 각각의 고유주기범위에 따른 진도(k_{ho})를 산정하고 있다. 본 연구에서는 하부구조 형식중 가장 사용성이 높은 RC 교각의 최대 설계수평진도(k_h) 값을 적용한 수평력을 산정하여 Table 7에 나타내었다.

선로 영향범위를 고려한 수평력 산정의 경우 L1, L2 지진을 고려하며 Table 2에 따라 선로상공 열차통과 중 상부구조물의 가설(고정상태 전)과 열차 미운행, 상부구조물의 가설 또는 선로 외측구간의 범위로 구분하며 이를 제외한 범위로 각각 구분하고 있다. 각각의 경우 설계수평진도(k_h)와 수평력 산정결과는 Table 8에 나타내었으며 열차운행 여부와 선로 영향범위를 고려한 것이다.

Table 7. Horizontal Force of Soil Profile Type

Design standard	Superstructure	Seismic zone factor	Soil profile type	Soil	Fundamental periods T_g (sec)	RC-pier seismic motion max-intensity k_h	Vertical load (kN)	Design horizontal load (kN)
JSCE (RTRI)	PSC Beam	1.0	1-Type	Rock, Bed-rock Diluvium	~0.25	0.39	1,055	411
			2-Type	Normal	0.25~0.5	0.42		443
			3-Type	Soft	0.5~1.5	0.43		454
			4-Type	Ultra soft	1.5~			454
	PSC Box		1-Type	Rock, Bed-rock Diluvium	~0.25	0.39	3,208	1,251
			2-Type	Normal	0.25~0.5	0.42		1,347
			3-Type	Soft	0.5~1.5	0.43		1,379
			4-Type	Ultra soft	1.5~			1,379
	Steel Box		1-Type	Rock, Bed-rock Diluvium	~0.25	0.39	715	279
			2-Type	Normal	0.25~0.5	0.42		300
			3-Type	Soft	0.5~1.5	0.43		307
			4-Type	Ultra soft	1.5~			307

Table 8. Horizontal Force Considering Installation Position and Time

Design standard	Superstructure	Erection location	Time	Seismic motion intensity k_h	Vertical load (kN)	Design horizontal force (kN)
JSCE (JR-EAST)	PSC Beam	Over track	Train passing	0.8	1,055	844
			Train no-passing	0.2		211
		Influence area of track				211
		Other case	-	0.1		106
	PSC Box	Over track	Train passing	0.8	3,208	2,566
			Train no-passing	0.2		642
		Influence area of track				642
		Other case	-	0.1		321
	Steel Box	Over track	Train passing	0.8	715	572
			Train no-passing	0.2		143
		Influence area of track				143
		Other case	-	0.1		72

4.5 국내 설계기준의 풍하중

풍하중은 설계시 내하력이나 시공중에 영향을 미칠 수 있는 하중으로 하중조합시 반드시 고려하는 하중이다. 국내 설계기준 철도설계기준 노반편에 풍하중은 교량에 대하여 1방향으로 수평 및 직각으로 작용하는 것으로 하고 열차의 유·무에 따라 적용한다. 본 연구에서는 공사중에 대한 상부 구조물 시공시에 대한 수평력을 산정하므로 열차가 없는 경우에 대한 값을 적용하였다. 열차가 없을 경우 풍하중은 연직투사면에 3.0 kN/m²의 값을 작용하중으로 고려하도록

제시되어 있다. 이를 대상구조물에 적용하여 산정된 수평력 결과를 Table 9에 나타내었으며 Fig. 9에는 연직투사면에 작용하는 하중의 형상을 나타내었다.

4.6 수평력 분석결과

풍하중에 의한 수평력은 국내 설계기준 철도설계기준 노반편에 제시된 작용하중을 토대로 산정하였으나 지진의 영향에 대한 수평력은 국내 설계기준에 명확한 세부사항이 제시되지 않아 국내 설계기준의 열차주행안전성을 검토하

Table 9. Horizontal Force Considering Wind Load

Design standard	Superstructure	Wind Load (kN/m ²)	Girder height (m)	Acting load (kN/m)	Span (m)	Design horizontal force (kN)
Korean Design Standard	PSC Beam	3	2.35	7.05	25	176
	PSC Box		2.75	8.25	35	289
	Steel Box		2.80	8.40	45	378

Fig. 9. Determination of Wind Load

는 수준인 100년 빈도의 재현주기와 유로코드에 제시된 시공중 공사기간을 고려한 재현주기를 적용하여 산정하였다. 일본 설계기준의 경우 RTRI에 제시된 지반계수와 고유주기를 고려한 지진수평력을 산정하였으며 JSCE와 JR-EAST에 제시된 열차운행과 선로영향범위를 고려한 수평력을 산정하여 분석하였다. Fig. 10(a)에 경간 25 m, 형고 2.35 m인 PSC Beam의 대한 수평력, Fig. 10(b)에는 경간 35 m, 형고 2.75 m인 PSC Box의 수평력, Fig. 10(c)에는 경간 45 m, 형고 2.80 m인 Steel Box의 수평력 산정결과를 정리하여 나타내었다. 풍하중을 고려한 25 m 경간 PSC Beam에 대한 수평력은 176 kN으로 국내 설계기준 철도계획의 열차주행 안전성과 유로코드의 시공중 공사기간을 고려한 수평력 중 최대값 186 kN의 95% 수준이었으며 일본 설계기준을 고려한 수평력 중 최대값 844 kN의 21% 수준인 것으로 나타났다. 풍하중을 고려한 35 m PSC Box의 수평력은 289 kN으로 열차주행안전성과 유로코드의 시공중 공사기간을 고려한 수평력 중 최대값 565 kN의 49% 수준이었으며 일본 설계기준을 고려한 수평력 중 최대값 2,566 kN의 11% 수준인 것으로 나타났다. 풍하중을 고려한 45 m Steel Box에 대한 수평력은 378 kN으로 국내 설계기준의 열차주행안전성과 유로코드의 시공중 공사기간을 고려한 수평력 중 최대값 126 kN보다 300% 이상 높은 것으로 나타났지만 일본 설계기준을 고려한 수평력 중 최대값 572 kN의 66% 수준인 것으로 나타났다.

국내 설계기준이나 유로코드의 공사중 시공기간을 고려하여 산정한 PSC Beam, Steel Box 구조물의 수평력 산정결과는 대부분 풍하중에 의한 수평력 산정결과 이내이거나 비슷한 값으로 나타났다. 그러나 PSC Box 형식의 상부구조물은

INDEX		Design Horizontal Force (Unit: kN)			
PSC Beam (25m)	Korean Design Standard (KDS)	Wind Load	S1	176	(176)
			S2	186	(186)
			S3	93	(93)
			S4	113	(113)
			S5	106	(106)
	Eurocode 8	Ground Classification and Coefficients	S1	120	(120)
			S2	72	(72)
			S3	35	(35)
			S4	43	(43)
			S5	41	(41)
	Railway Technical Research Institute (RTRI)	Ground Classification and Coefficients	1-Type	46	(46)
			2-Type	411	(411)
			3-Type	443	(443)
			4-Type	454	(454)
			Other case	454	(454)
	East Japan Railway Company (JR-EAST)	Installation Position	Over track	844	(844)
			Train passing	211	(211)
			Other track	211	(211)
			Train No passing	211	(211)
			Influence area of track	106	(106)

(a) Calculated horizontal force of PSC Beam

INDEX		Design Horizontal Force (Unit: kN)			
PSC Box (35m)	Korean Design Standard (KDS)	Wind Load	S1	289	(289)
			S2	565	(565)
			S3	283	(283)
			S4	344	(344)
			S5	323	(323)
	Eurocode 8	Ground Classification and Coefficients	S1	364	(364)
			S2	218	(218)
			S3	108	(108)
			S4	131	(131)
			S5	123	(123)
	Railway Technical Research Institute (RTRI)	Ground Classification and Coefficients	1-Type	139	(139)
			2-Type	1233	(1233)
			3-Type	1347	(1347)
			4-Type	1379	(1379)
			Other case	1379	(1379)
	East Japan Railway Company (JR-EAST)	Installation Position	Over track	2,566	(2,566)
			Train passing	642	(642)
			Other track	642	(642)
			Train No passing	642	(642)
			Influence area of track	321	(321)

(b) Calculated horizontal force of PSC Box

INDEX		Design Horizontal Force (Unit: kN)			
Steel Box (45m)	Korean Design Standard (KDS)	Wind Load	S1	378	(378)
			S2	126	(126)
			S3	63	(63)
			S4	77	(77)
			S5	72	(72)
	Eurocode 8	Ground Classification and Coefficients	S1	81	(81)
			S2	49	(49)
			S3	24	(24)
			S4	29	(29)
			S5	27	(27)
	Railway Technical Research Institute (RTRI)	Ground Classification and Coefficients	1-Type	34	(34)
			2-Type	279	(279)
			3-Type	300	(300)
			4-Type	307	(307)
			Other case	307	(307)
	East Japan Railway Company (JR-EAST)	Installation Position	Over track	572	(572)
			Train passing	143	(143)
			Other track	143	(143)
			Train No passing	143	(143)
			Influence area of track	72	(72)

(c) Calculated horizontal force of Steel Box

Fig. 10. Calculate Horizontal Force of Superstructures

풍하중에 의한 수평력 산정결과와 유사하거나 높은 것으로 확인되었다. 또한, 일본 설계기준에 따른 지진에 대한 수평력 산정결과는 풍하중에 의한 수평력 산정결과보다 모두 높은 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 철도교 상부구조물 시공중 위험성을 내포하는 풍하중과 지진의 영향 등에 대해 국내 설계기준의 안전도 검토 규정에 따라 세부 설계개념이 적용된 국외 설계기준들을 조사하였다. 조사된 자료를 바탕으로 국내 설계기준에 의해 도출된 풍하중과 지진수평력을 비교·평가하여 다음과 같은 결론을 도출되었다.

- 1) 국내 철도교 설계기준에 따라 100년 설계재현주기를 적용한 지진수평력은 PSC Beam과 PSC Box 구조형식의 S_1 조건에서 풍하중만 고려한 지진수평력 검토보다 5~195% 높게 나타나 현행 설계기준을 적용하여 가설할 시 지진의 영향에 대한 추가 안전도 검토가 필요할 것으로 판단된다.
- 2) 국내 가설공사표준시방서에서 적용중인 가설시공기간 및 중요도 계수 개념과 유사한 유로코드를 적용한 경우 위험도 계수 및 유효수평지반가속도 계수는 단경간 PSC Beam 형식의 경우 국내 설계기준 대비 38% 수준이고 20경간의 장대교량을 대상으로 검토해도 65% 수준인 것으로 나타났다.
- 3) L1, L2의 지진하중을 고려하는 일본 설계기준을 적용한 결과값은 국내 설계기준 규정의 재현주기를 적용하는 지반계수, 재현주기 및 하부구조 형식(RC-교각) 등을 적용하여 산정한 지진수평력 보다 426~476% 높은 것으로 나타났다.
- 4) 국내의 철도보호지구 지침과 유사한 개념인 열차운행에 따른 선로의 영향범위를 고려한 일본 설계기준에서는 국내 설계기준의 지진수평력과 비교할 때 약 450% 이상 높은 것으로 나타났다.
- 5) 일본 토목학회의 설계기준에 따른 열차운행 유·무에 상관없는 시공조건에서의 지진수평력은 PSC Beam과 PSC Box, Steel Box 형식의 일반 지반조건에서 모두 12~16% 높은 것으로 나타났다.
- 6) 국내 설계기준과 철도운영지침, 국외 설계기준을 고려하여 지진의 영향에 대한 수평력을 검토한 결과 풍하중에 의한 수평력보다 높은값이 확인됨에 따라 상부구조물의 시공중 안전도 확보를 위해 지진의 영향에 대한 검토가 병행되어야 할 것으로 사료된다. 또한, 풍하중과 지진의 영향에 대한 국내 설계기준 및 철도교 관련 규정의 적정한 세부설계 검토가 제정되어야 할 것으로 판단된다.

References

Chinhung Company. (2018). *The report diagnosis of safety about yeonhwa 4th railway bridge and namsong railway*

- bridge. Korea Construction Safety Association.
- EN 1998-2. (2005). *Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance - Part 2: Bridges, ANNEX A*.
- Ha, S.J. (2018). A study on the railway design codes for seismic design of railway structures. *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 10, No. 3, pp. 124-125.
- Japan Society of Civil Engineers Steel Structure Committee. (2012). *Steel structure temporary design construction guideline*.
- Kinno, R., Toyota, W., and Ikeda, Y. (2018). *Report on the Erection Bo*. Miyaji technical report No. 31, pp. 42-47.
- Korea Construction Standards Center. (2016). *Bridge seismic design standeards* (24 17 10). Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Korea Construction Standards Center. (2017). *Railway design criteria* (Subbase volume), Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Korea Construction Standards Center. (2018). *General detail of seismic design* (17 10 00). Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Korea Construction Standards Center. (2019). *Plan for railroad* (47 10 15). Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Korea Development Institute. (2021). *A report feasibility study, yeosu-wonju to railway construction projects*.
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). (2020). *Guidelines for estimation appropriate construction period of public construction works*. Korea Law Information Center.
- Korea Ministry of Public Safety and Security (MPSS). (2017). *Common application of seismic design standards*.
- Mohammad, A. (2014). *Investigation of the November 2, 2013 collapse of concrete beams at Fort Lauderdale-Hollywood Airport runway project*. U.S. Department of Labor Occupational Safety and Health Administration Directorate of Construction.
- Railway Technical Research Institute (RTRI). (2017). *Railway structure design standards and explanations : seismic design*.
- Seijin, Y., and Maruyama, T. (2015). *Construction plan of railroad pc girder bridge*. Civil Engineering Society Tohoku Branch Technical Research Presentation.
- Yang, W.J., and Heo, D.W. (2016). Cause and countermeasures on the korean peninsula earthquake. *Journal of Korean Society of Disaster & Security*, Vol. 9, No. 2, pp. 9-13.
- Yonekura, N., and Hibino, H. (2009). Prevention measures

fall of pretensioning T girders. *Kyoto Professional Civil Engineers Association*, pp. 335-337.

Yun, J.H., Choi, K.Y., and Chung, W.S. (2012). Study on standards of train operation based on moving load analysis of psc box railway bridge during an earthquake. *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 2012, No. 10, pp. 1175-1181.

Received	December 3, 2021
-----------------	------------------

Revised	December 7, 2021
----------------	------------------

Accepted	December 13, 2021
-----------------	-------------------