

# 경계조건에 따른 기존고속철도 교량의 내진 안전성 비교 연구

## Comparison of Seismic Safety of Existing High-speed Railway Bridges in Accordance with the Boundary Conditions

민경주\*†, 우용근\*\*, 정진환\*\*\*

Kyung-Ju Min\*†, Young-Geun Woo\*\*, Jin-Han Cheung\*\*\*

**Abstract** Korean design and construction of high speed railway bridges in relatively recent years has been reflected seismic design. However, the repair and reinforcement to re-evaluate the seismic performance of existing structures as the design seismic force increases after construction. The bridge design is highly valued than the safety design criteria, taking into account various uncertainties. The designer in consideration of the human error, etc., which may be generated in construction or maintenance, Without the fully stress design, empirically reflect a little more safety in the design. Therefore, an increase in the seismic force not greater, The existing safety will also be accepted. In this respect, application of the boundary conditions and considering the resistance and fracture behavior of structural systems were reviewed, including the seismic safety of high-speed railway bridges.

**Keywords** : High-speed Rail Bridge, Boundary Conditions, Seismic Safety, Seismic Design

**초 록** 우리나라 고속철도교량은 비교적 근래에 설계·시공되어 내진설계가 반영되었으나 시공 후 설계지진력이 증가함에 따라 기존구조물의 내진성능을 다시 평가하여 보수보강하고 있다. 교량설계는 향후 교량의 공용기간 중에 발생될 수 있는 하중이나 저항의 불확실성을 고려하여 설계기준에 상당부분 안전성을 높게 평가하며, 설계자는 설계과정에서 향후 설계기준을 벗어난 하중이나 저항과 시공 및 유지관리에서 발생될 수 있는 인간오류(human error) 등을 고려하여 완전응력설계(fully stress design)를 하지 않고 경험적으로 일정 부분 안전마진을 설계에 반영시킨다. 따라서 설계지진력의 증가가 획기적으로 크지 않다면 기존의 설계마진은 이들을 수용할 수도 있을 것이다. 이러한 관점에서 경계조건의 적용방법과 구조시스템의 저항과 파괴거동 등을 고려하여 고속철도교량의 내진안전성을 검토하였다.

**주요어** : 고속철도 교량, 경계조건, 내진안전성, 내진설계, 유지관리

## 1. 서 론

우리나라에서도 최근 울산과 경주지역에서 진도 5이상의 지진이 발생되었으며 2016년 9월 12일 경주에서 발생한 진도 5.8의 지진은 최대 지진으로 기록되었고 여진은 4일간 1.3~3.0의 지진이 322회 발생되었다.

\*† 교신저자: (주)철도안전연구소 선로시설연구소(kjmin1@nate.com)

\*\* 한국철도공사 경주고속철도 시설사무소

\*\*\* 부산대학교 사회환경시스템공학과

내진설계는 1992년 도로교설계시방서에 반영되었으나 이 이전에는 내진이 고려되지 않았으며 이후 내진설계 기준을 강화시켜 1.54g의 지진하중에 대하여 안전성을 확보시킨다. 내진 미반영교량이나 내진설계 초기기준이 반영된 교량에 대해서는 내진안전성을 검토하여 보강설계 및 내진보강공사를 수행하고 있다.

교량설계는 향후 교량의 공용기간 중에 발생될 수 있는 하중이나 저항의 불확실성을 고려하여 설계기준에 상당부분 안전성을 높게 평가하며, 설계자는 설계과정에서 향후 설계기준을 벗어난 하중이나 저항과 시공 및 유지관리에서 발생될 수 있는 인간오류(human error) 등을 고려하여 완전응력설계(fully stress design)를 하지 않고 경험적으로 일정 부분 안전마진을 설계에 반영시킨다. 따라서 설계지진력의 증가가 획기적으로 크지 않다면 기존의 설계마진은 이들을 수용할 수도 있을 것이다. 또한 설계하중 중 종방향력으로 시제동하중은 일반교량에 비하여 매우 크게 고려되고 일반교량에는 없는 장대레일 축력도 종하중으로 고려하여 설계에 반영되며 이들은 내진의 주방향에 영향을 미친다.

고속철도교량의 대부분은 PC Box거더로 교량받침은 고정단은 포토받침과 가동단은 탄성받침으로 구성되어 있다. 내진보강에서 탄성받침의 종방향 저항력을 대부분 무시하고 장대레일의 역할도 생략한다. 그러나 탄성받침 자체의 전단저항이 있으며 고정단 포토받침에서도 마찰과 제작허용 유격이 존재하므로 이들을 모두 반영하지 않는 것은 실제 거동과 차이가 있을 수 있다. 철도노반설계기준에서도 탄성받침의 경우 스프링요소 등을 사용하여 탄성받침의 강성을 적용하게 되어 있으며 이들의 적용치가 작더라도 경계조건의 변화는 동적거동에 많은 영향을 미칠 수 있으므로 이들을 고려하는 것이 합리적일 것이다. 특히 교량상 장대레일은 주변 노반시설에 연속된 구조임을 고려한다면 현재와 같이 레일의 역할을 무시하는 것은 지진하중에 의한 교량의 종방향 거동에 많은 영향을 미치게 될 것이다.

장대레일의 적용 여부는 교량에서 수직이나 횡방향에는 크게 영향을 미치지 못할 것이나 종방향으로는 상당한 강성을 가지고 있으며 비록 느슨한 구조적 결합이지만 교량상부구조를 교량받침과 함께 상단과 하단에서 안정되게 효과적으로 결합하는 형상임을 고려해야 한다. 장대레일은 앞에서 밝힌 바와 같이 교량구조물을 연속화시키고, 이는 교량뿐만 아니라 교량 전후 노반과도 연속시키는 역할을 하며 붕괴 방지에도 일정부분 기여할 것이다.

본 연구는 특정 철도교량을 대상으로 받침의 탄성력이나 마찰과 장대레일을 구조해석에 포함시켰을 때와 포함시키지 않은 경우 응답스펙트럼(Response Spectrum)법과 시간이력(Time History)법으로 해석하여 결과를 비교하고 안정성을 고찰하였다.

## 2. 내진설계기준 및 해석

### 2.1 기존교량 내진검토

교량의 내진설계는 1990년대 초 필요성이 대두되었으며 이후 LA지진 및 고베지진을 겪으면서 1997년 건설교통부에서 국가기간시설물에 대한 내진성능기준을 제정하였고, 이에 따라 철도, 도로, 건축물, 터널, 댐 등의 하위개념의 설계기준이 정립되었다.

고속철도시설물의 내진설계기준은 1991년에 처음으로 고속철도 콘크리트구조물 설계표준

시방서(안)에서 등가정적하중법을 이용하여 가속도계수 0.14g 수준으로 설계하도록 규정하였다. 이후 고속철도시설물 내진설계기준(한국고속철도공단, 2000), 고속철도설계기준(한국철도시설공단, 2005), 및 철도설계기준(한국철도시설공단, 2011) 등으로 개정되면서 현재는 응답스펙트럼해석 또는 시간이력해석을 이용하여 가속도계수 0.154g 수준으로 설계하도록 규정하고 있다. 내진설계 이전에 설계된 교량이나 2000년 고속철도시설물 내진설계기준 이전 설계된 교량구조물들에 대하여 현행 내진설계기준 적합성을 검토하여 부적합한 경우 내진보강을 수행하고 있다.

기존철도교량의 교량의 내진검토에서 가동단의 탄성받침에 대한 종방향 저항력이나 장대레일의 역할을 대부분 무시한다. 여기서는 이들의 특성을 고려하여 레일과 레일체결구를 해석모델에 포함시키며, 탄성받침은 탄성받침의 전단저항력(종방향스프링)을 고려하였다.

레일체결구 하중-변위 거동은 궤도-교량 종방향 상호작용해석(KR C-08080/한국철도시설공단, 2014)의 ‘궤도유형 및 열차하중-변위 선도’ (아래그림참고)를 적용시켰다.

탄성받침의 종방향스프링은 받침규격에 나타나 있으나 실제 거동은 상당한 차이가 있을 것으로 판단되고 실제 해석결과 종방향 변위가 대부분 50mm 이내로 나타나므로 비선형성이 크지 않은 것으로 가정하여 탄성스프링으로 모델링하였다. 탄성받침의 높이가 100mm이고 적층철판의 두께4mm, 층수 5개임을 고려한다면 고무의 허용형변위는 160mm(고무높이×200%)이므로 탄성으로 가정해도 결과에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 사료된다. 탄성받침 종방향스프링 상수는 무시하는 경우(0 kN/m), 1000kN/m, 10000kN/m, 30000kN/m로 가정하여 해석하고 고찰하였다. 이는 탄성받침 종방향스프링 상수를 이상적인 가동단부터 3ton/mm 사이에 있을 것으로 판단하였다. 일반적으로 가동단의 종방향 스프링력에 비례하여 내진저항에 유리할 것으로 판단되나 다양한 동적 진동임을 고려한다면 정적해석에서와 같이 반듯이 유리한 것은 아닐 것이다. 내진해석 교량은 콘크리트도상이 부설된 경부고속철도 교량으로 대부분 형식인 2@40m PC Box 거더 및 3@25 PC Box 거더를

선정했으며, 비교를 위해 기초가 암반에 설치된 교량으로 교각의 지지조건은 고정으로 모델링 하였다.

또한 교량받침까지의 지진하중효과를 비교적 단순하게 비교할 수 있도록 하부구조의 지진하중을 재하한 경우와 재하 하지 않은 경우로 나누어 해석하였다.

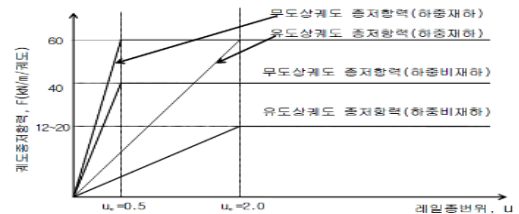


Fig. 1 Mutilinear Spring Fastener Longitudinal Direction



Fig. 2 Bridges Cross-section

## 2.2 내진해석

해석모델에서 레일과 교각은 H-형과 중공원형관 뼈대요소로, PC Box는 셸요소로, 레일체결구는 multilinear elastic으로, 교량받침은 탄성스프링으로 모델링하였다. 해석은 응답스펙트럼해석(AASHTO 2006 USC94SC)과 시간이력해석을 수행하였고 시간이력해석의 가속도파형은 El-Centro 지진(N-S) Acceleration History를 사용하였고 국내 내진 1등급 교량의 붕괴방지 수준 가속도 계수인 0.154g를 적용하였다.

레일은 교량 시중점 전후로 10m 모델링하였으며, 레일의 시중점부는 종방향스프링을 설치하였고 교각기초는 암반에 설치한 확대기초이므로 고정단으로 가정하였다.



Fig.3 Analysis Model

## 3. 해석결과 및 분석

### 3.1 해석결과

해석은 응답스펙트럼해석과 시간이력해석을 수행하였으며, 레일의 유무, 교각의 지진력 유무, 가동받침의 스프링상수 4가지(0, 1000, 10000, 30000kN/m)적용하여 해석하였다.

아래 그림들은 해석결과를 나타낸 것이다. 아래 그림들을 살펴보면 레일 포함된 경우가 무시한 경우보다 구조체의 거동에 연속성이 나타나고 응답스펙트럼해석보다는 시간이력해석에서 구조체의 거동에 연속성이 나타남을 알 수 있다. 이러한 거동은 내진에서 구조물의 안정성을 높이고 붕괴방지도에 기여할 것이다. 교량받침이나 교각에 붕괴수준의 손상을 받은 경우에도 손상이 추가로 진행되는 과정에서 장대레일이 저항할 수 있으며 하중을 분산시키는 역할을 할 수 있다. 이는 시간이력해석의 레일축력 분포형상에 나타나 있다. 지진력이 교량 시중점에서 종점부로 발생될 때 교량 시중점 노반에 있는 장대레일은 인장력으로 종점부 노반 레일은 압축력으로 이 지진력에 일부 저항하게 될 것이다.



Fig. 4 Displacement (Including Rail/R.S)



Fig. 5 Displacement (Including Rail/T.S)



Fig. 6 Longitudinal Displacement (Ignore Rail/R.S)

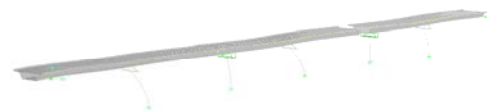


Fig. 7 Longitudinal Displacement (Ignore Rail/T.S)



Fig. 8 M33(Including Rail/R.S)



Fig. 9 M33(Including Rail/T.S)

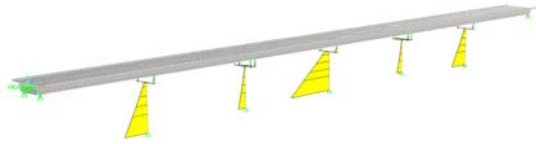


Fig. 10 M33(Ignore Rail/R.S)

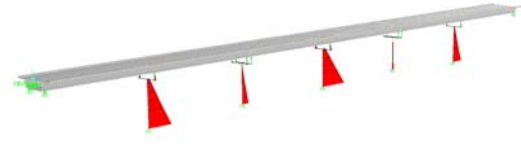


Fig. 11 M334(Ignore Rail/T.S)

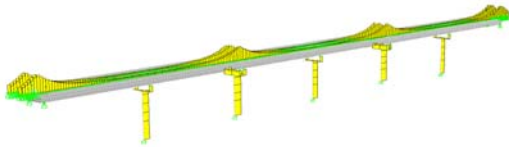


Fig. 12 Axial Rails(R.S)



Fig. 13 Axial Rails(T.H)

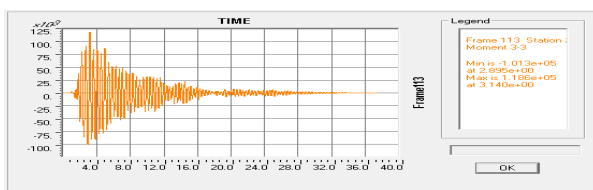


Fig. 14 Piers Longitudinal Moments Shape(Including Rail)

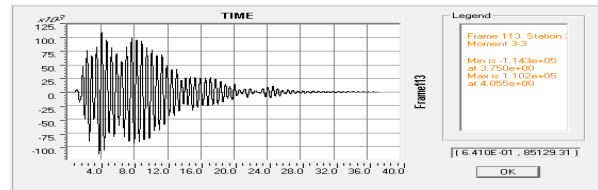


Fig. 15 Piers Longitudinal Moments Shape(Ignore Rail)

### 3.2 내진해석결과 분석

내진해석 결과를 이들을 요약하여 그림16~그림19에 나타냈다. 응답스펙트럼해석에서는 장대레일을 포함시킨 경우 약 40%의 지진하중효과가 감소되었으며 가동단 탄성받침의 스프링력이 증가되면 지진하중효과도 그에 따라 유사한 형태로 감소됨을 알 수 있다. 그러나 시간이력해석에서는 레일의 유무에 크게 차이를 보이지 않고 있으며 오히려 레일을 무시한 경우가 상대적으로 크게 나타나는 경우도 있다. 이는 레일에 의해 구조계가 느슨한 결합이나 같이 거동함으로 지진가속도와 구조물의 진동특성에의 한곳에 집중되기 때문인 것으로 판단된다. 즉 피크치가 커지는 대신 다른 곳에서의 하중효과는 낮게 나타나므로 하중효과의 피크치는 하중이 낮은(지진에너지를 덜 받는) 곳으로 이동 될 것이며 전체적인 하중효과의 총화는 낮게 나타난다. 이들에 대해서는 보다 많은 연구가 필요할 것이다.

교량받침에서 작용하는 최대 전단력은 레일을 고려한 경우 2,928kN이고 고려하지 않은 경우 5,123kN으로 나타났다. 고정단에서 교량받침에 작용되는 수직하중 약 10,000kN과 강재와 콘크리트의 마찰계수 0.5 이상이고 콘크리트에 삽입된 스테드의 전단력이 3,000kN 이상임을 고려한다면 내진안전성을 확보한 것으로 판단된다. 특히 레일을 고려한 경우에는 마찰력 또는 스테드볼트의 전단저항력으로도 종횡방향 모두 충분히 안전한 것으로 판단된다. 물론 본 연구에서 많은 가정을 하였으나 계산된 지진하중에 의한 전단력도 여러 가지 경계조건들에서 가장 불리한 최대치를 사용하였으므로 판정결과에 큰 영향은 없을 것으로 사료된다.

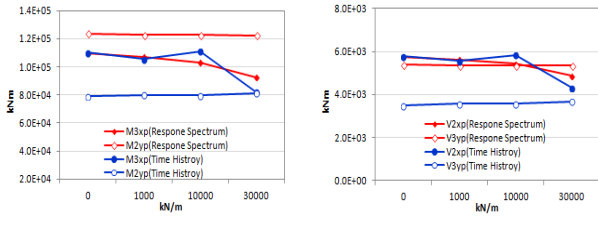


Fig. 16 Rail(○) Column(×)

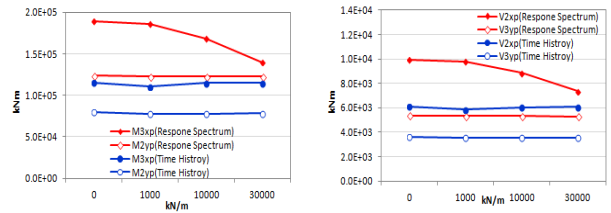


Fig. 17 Rail(×) Column(×)

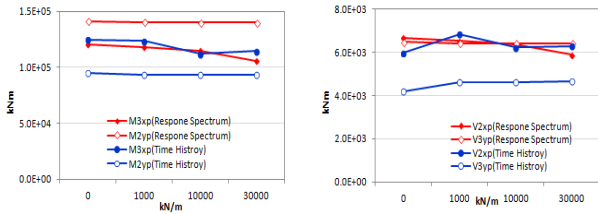


Fig. 18 Rail(○) Column(○)

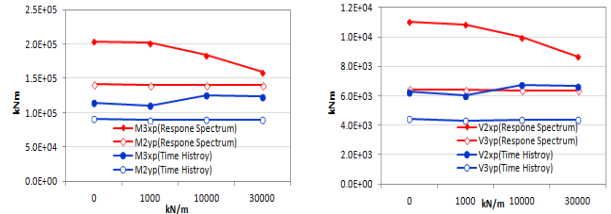


Fig. 19 Rail(×) Column(○)

### 3. 결론

본 연구는 고속철도 교량의 탄성받침의 종방향탄성스프링과 장대레일을 포함시켰을 때와 이들을 고려하지 않은 경우에 대하여 응답스펙트럼 해석과 시간이력 해석 결과를 비교분석하였다. 응답스펙트럼해석에서는 장대레일을 포함시킨 경우가 비포함에 비하여 지진하중효과를 약 40% 감소시켰으며 탄성받침의 스프링력을 증가시키면 지진하중효과는 감소되었으나 시간이력해석에서는 레일의 유무에 크게 차이를 보이지 않는다. 이는 구조계가 레일에 의해 느슨한 결합으로 거동함으로 지진가속도와 구조물의 진동특성에 따라 한곳에 집중되기 때문인 것으로 판단되며, 지진력이 레일에 의해 분산되는 효과가 있으므로 레일은 하중여유도를 추가시키는 유용한 효과도 있다. 지진하중에 의한 교량받침에 작용하는 최대 전단력은 레일을 고려할 경우 내진 안전성은 충분히 확보되는 것으로 나타났다. 또한 교량받침과 상하부구조물과의 마찰계수가 최소 0.5 이상임을 고려한다면 이 마찰력은 구조계 거동에서 상존하는 것으로 내진보강설계에서 이를 반영하는 것이 합리적일 것이다.

### 참고문헌

- [1] 한국철도시설공단(2015), 철도설계지침(노반편)
- [2] 한국철도시설공단(2013), 고속철도 기존시설물 내진성능평가 및 보강방안 수립용역
- [3] 윤지홍, 최권영, 정원석 (2012), "PSC BOX 철도교의 지진 시 이동하중해석을 통한 열차 운행기준에 대한 분석", 한국철도학회, 추계학술발표회 논문집

**Table. 1** Bridges Cross-section

해석조건			Response Spectrum						Time Histroy					
레일	교각	가동단 Spring (kN/m)	M3xp (kN-m)	V2xp (kN)	V2xc (kN)	M2yp (kN-m)	V3yp (kN)	V3yc (kN)	M3xp (kN-m)	V2xp (kN)	V2xc (kN)	M2yp (kN-m)	V3yp (kN)	V3yc (kN)
○	X	0	109327	5757	2879	123728	5384	2692	110003	5771	2860	79194	3488	1751
		1000	107001	5634	2818	122717	5344	2672	105563	5560	2780	79951	3594	1800
		10000	102963	5419	2711	122678	5343	2671	111082	5848	2928	79668	3564	1783
		30000	92589	4873	2438	122510	5337	2668	82084	4321	2158	81216	3686	1843
X	X	0	188586	9926	4963	123789	5352	2676	115673	6085	3043	80289	3584	1792
		1000	186074	9794	4900	122786	5313	2656	110962	5841	2921	78127	3509	1755
		10000	168158	8851	4425	122745	5311	2656	114770	6041	3026	78138	3513	1756
		30000	139489	7342	3670	122572	5305	2652	115233	6066	3032	78479	3533	1766
○	○	0	120347	6672	2480	141413	6481	2908	124944	5987	2663	94729	4196	1977
		1000	118011	6541	2787	140185	6425	2887	123808	6850	3045	93342	4621	1956
		10000	114756	6374	2698	140146	6424	2886	111856	6229	2806	93096	4629	1953
		30000	105700	5901	2457	139973	6418	2883	114781	6298	2816	93431	4648	1957
X	○	0	204181	11002	5123	141373	6437	2890	114702	6256	2967	90985	4400	1860
		1000	201578	10859	5061	140156	6383	2869	110114	6039	2797	89550	4323	1805
		10000	184653		4609	140113	6381	2868	124905	6759	3216	89707	4362	1825
		30000	159170	8677	3895	139939	6375	2965	123367	6681	3117	89871	4357	1819

주) O:포함, X:비포함, x:종방향, y:횡방향, p:교각하단 c: 교각상단