

차세대 고속철도 특수교량의 설계 및 기술사양 조사

Investigation of Design and Technical Specifications on Cable Supported Bridges for Next-Generation High-Speed Railways

박만호* 문제우* 김성일** 홍성모* 김종태*
Park, Man-Ho Mun, Je-U Kim, Sung-Il Hong, Seong-Mo Kim Jong-Tae

ABSTRACT

Mo-Am arch bridge is only the long-span bridge (with 125m span) in the Kyong-Bu high-speed line in service, while other bridges are PSC box girder bridges and steel composite bridges with span lengths of 25~50m. However, in foreign high-speed lines, special cable-supported bridges like cable-stayed bridges and extradosed bridges are being adopted in earnest with technical specifications. The cable supported bridge is recognized as one of the indices of technology in civil engineering field, and thus it is being adopted with a sense of rivalry in countries with advanced technology in railway engineering. In this paper, to apply the top-level cable-supported bridge technology to the domestic high-speed line up to 400km/h by establishing the technical specifications on cable-supported bridges including span length, the requirements for securing the dynamic stability and running safety of high speed train are analyzed through case studies for domestic and foreign cases.

1. 서론

현재 운행 중인 경부고속철도의 경우 대부분 경간 25~50m의 PSC 박스거더 교량과 일부 도로횡단 구간의 소수주형 강합성형거더 교량으로 고속도로를 횡단하는 모암아치교만이 주경간 125m의 특수교량이라고 할 수 있는 실정이다.

케이블 장대교량은 시공의 어려움, 설계과정 및 시공과정에서의 면밀한 단계별 검토 등이 필요하나, 미관의 수려함과 지형상 장대교량이 필요한 구간 등에 각국의 기술력에 대한 선도적 지표로서 경쟁적으로 계획 및 건설되고 있는 상황이다. 그림 1은 해외의 사장교 및 현수교의 연대별, 지간장별 건설현황을 나타낸다. 특히 철도교의 경우에는 케이블 장대교량 특유의 유연성으로 인해 도로교에 비해 주행안전성 및 승차감에 대한 면밀한 검토가 추가적으로 필요하다.

해외 고속철도의 경우에는 사장교와 Extradosed 교량 등 장대교량의 기술사양을 정립하여 본격적으로 설계 및 시공에 적용하고 있으며, 국내에서도 이에 대한 기술력 확보가 국내 건설 및 해외시장 진출을 위해 필요할 것이다. 본 논문에서는 400km/h급 차세대 고속철도에 적용 가능한 특수교량의 경간장 및 기술사양을 정립하여 세계적 수준의 장대교량 기술을 국내 고속철도 분야에 적용하기 위한 첫단계로서 국내외 시공 및 설계 사례를 분석하고 장경간 케이블교량의 특이점을 분석하고자 하였다.

* 정회원, 한국철도시설공단 KR기술연구소, E-mail : manetic3@hanmail.net

Tel : (042)607-3399, Fax : (042)607-3322

** 정회원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부

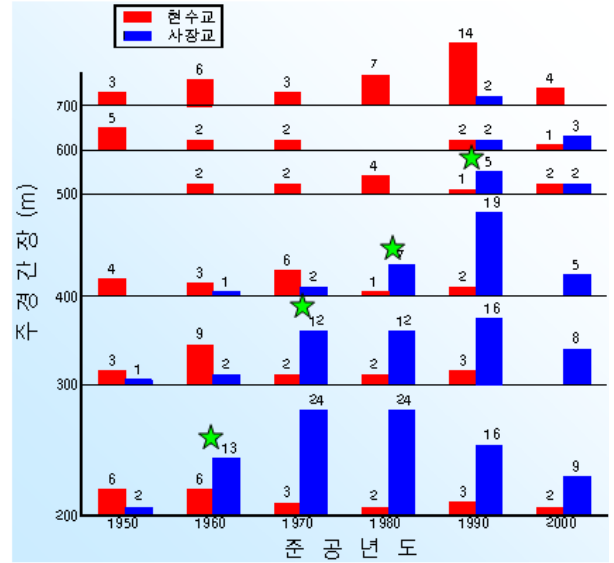
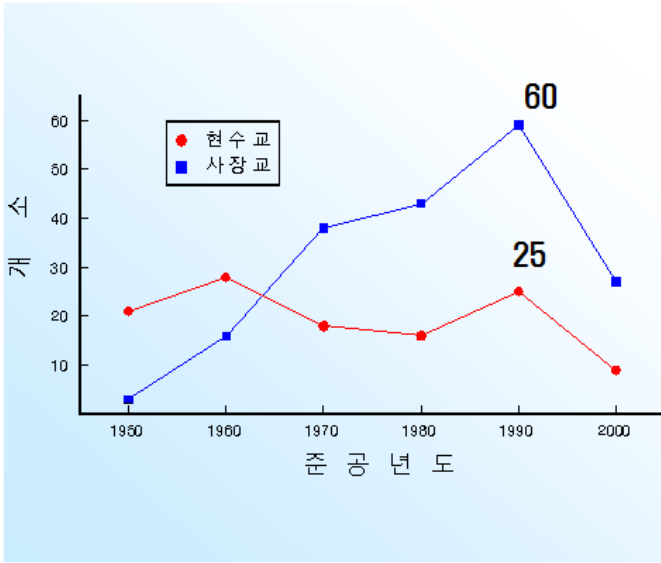


그림 1. 세계의 현수교 및 사장교의 연도별, 주경간장별 건설 현황

2. 국내 철도의 특수교량

국내 경부고속철도의 교량은 대부분 PSC 박스거더 형식으로 구성되어 있다. 2@40, 3@25의 구성을 주로 하고 있으며, 이는 진동 및 소음에 비교적 유리하다고 알려진 형식이기 때문이었다. 이 외 도로 횡단 구간 등 일부구간에 소수주형 강합성형 거더 교량이 40~50m 구성으로 적용되었으며, 경부고속도로를 횡단하는 구간에 모암아치교가 설치된 바 있다. 경부고속철도 2단계 구간에도 아치교량이 일부 존재하며, 호남고속철도에도 일부 특수교량이 설계 중이다.



그림 2. 경부고속철도 모암아치교

일반철도에서는 현수교인 주경간 300m의 영종대교(125+300+125m)가 존재한다. 영종대교는 특히 복층 교량으로서 상부 6차선의 도로전용 구간, 하부층은 4차선은 도로구간이며 중앙부는 복선 철도로서 공항철도가 통행하고 있다. 특수 장대 철도교량으로서 가장 핵심적인 사항인 주행안정성에 대해 열차 주행시, 풍하중 및 지진하중 작용에 대해 일본기술진에 의해 실험 및 이론적으로 상세히 검토된 바 있다. 열차가 지진시, 강풍 시 등의 환경하중을 받는 상태에서 주행 시 다음 두 가지 항목에 대하여 주행안정성을 평가하였다.

탈선계수 : $Q/P = 0.8$ 이하

윤증감소를 또는 윤증비 : $\Delta P/P=0.7$ 이하 혹은 $(P-\Delta P)/P=0.3$ 이상 (1)

여기서, Q =차륜의 수평방향 힘, P =차륜의 연직방향 힘, ΔP =윤증감소



그림 3. 복층 현수교인 영종대교의 전경

또한, 케이블 교량으로서 그림 4에서 보이는 바와 같이 보성-임정리 구간에 국내 최초로 중앙경간 100m의 사장교와 PSC거더의 장점을 혼합한 Extradosed 교량이 시공될 예정이다.

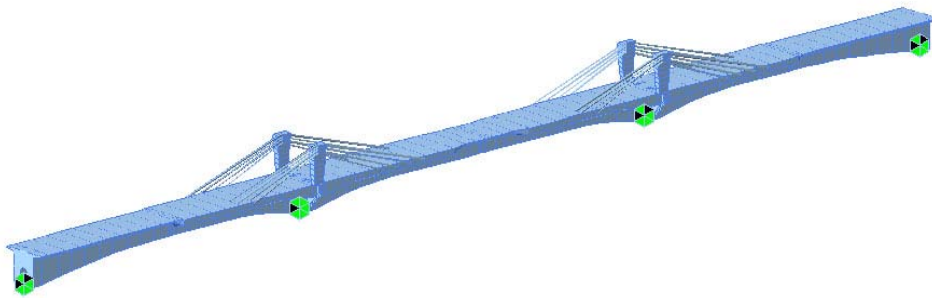


그림 4. 보성-임정리간 Extradosed 교량

3. 국외의 케이블 특수교량 현황

고속철도 교량으로서 케이블 교량은 중국의 Tianxingzhou 교량, 이탈리아 밀란-볼로냐 구간의 PO river 교량, 신간선 상의 사장교 및 Extradosed 교량 등이 존재한다.

3.1 PO River 교량

이탈리아의 밀란-볼로냐 고속철도 신선 상에 존재하는 사장교인 PO river 교량은 2006년 완공된 교량으로서 전체경간 1.2km이며, 사장교 구간은 주경간 192m, 측경간 102m이다. 케이블 장대교량으로는 매우 고속인 설계속도 360km/h, 운행속도 300km/h를 목표로 설계되었으며 이를 위해 Eurocode의 동적성능 검토 및 많은 이론적, 실험적 연구를 수행하였다. 현재 실 열차에 의한 300km/h 주행시험을 계획 중에 있다.



그림 5. PO River 교량의 전경

3.2 Tianxingzhou 교량

중국고속철도 Beijing과 Guangzhou를 연결하는 고속철도 선로에 건설 중인 Tianxingzhou 교량은 양쯔강을 횡단하는 교량으로서 전체경간 4.6km, 주경간이 504m에 달하는 도로 및 철도 공용 복층 사장교이다. 철도선로도 총 4개로 구성되어 있으며 2개는 화물열차를 위한 선로이며 2개는 고속열차를 위한 선로이다. 설계 및 주행안전성 등 특수사항에 대한 검토는 프랑스 설계회사인 SYSTRA에서 수행하고 있다.

Tianxingzhou 교량에 대해서는 일반적으로 수행하는 트랙의 불규칙성을 고려한 연직방향 동적검토 외에, 교량의 대형화에 따른 횡방향 거동에 대해서도 면밀한 동적검토가 이루어졌다. 교량의 동적안정성에 대한 검토와 열차의 주행안전성에 대한 검토는 고속열차(TGV) 및 화물열차에 대해 모두 수행되었다

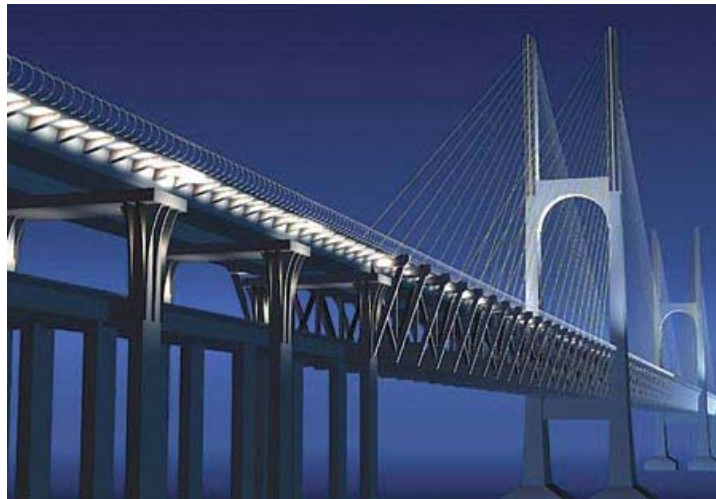


그림 6. Tianxingzhou 교량의 전경

3.3 신간선 상의 케이블 교량

일본의 신간선 상에는 다수의 사장교 및 Extradosed 교량 등 케이블 교량이 존재한다. 그림 7은 나가노 신간선 선로 상의 Extradosed 교량인 야시로난보쿠 교량과 사장교인 제2 치쿠마가와 교량을 나타낸다.



(a) 아시로난보쿠 Extradosed 교량



(b) 제2 치쿠마가와 사장교

그림 7. 나가노신간선 상의 케이블 교량

이 외에도 최근 건설 중인 혹은 계획 중인 케이블 교량이 다수 존재한다. 그림 8은 최근 건설 중인 4경간연속 PSC Extradosed교 (경간 75+150+150+75m: 주경간 150m는 일본 신간선 콘크리트 철도교로서는 최대)에 대한 일반도이며, 복선교량이며, 3-cell 박스형 단면의 주거터는 주탑에서 케이블로 하중 분산되어 매달려 있고, 주거터는 P1, P5 교각에서 단순지지, P2, P4 교각에서는 댐퍼식 스토퍼로 지지, P3 교각에서는 고정단으로 구성되어 있다.

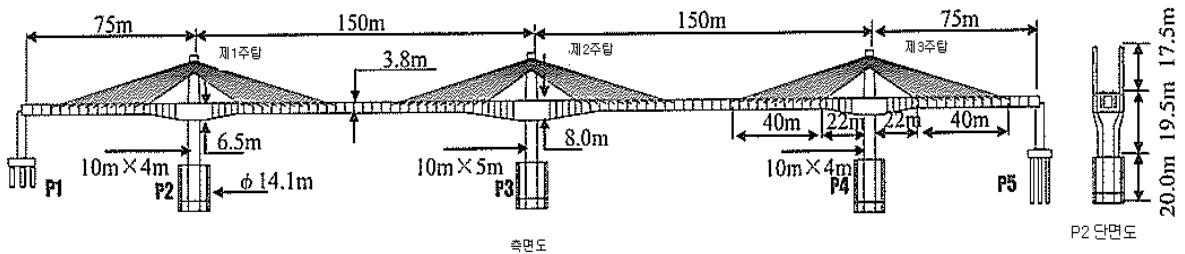


그림 8. 건설 중인 일본 신간선 상의 4경간 연속 Extradosed 교량

일본의 철도종합연구소(RTRI)에서는 그림 9와 같이 중앙경간 150m의 상기 Extradosed 교량에 대해 실열차 주행 시의 충격계수를 분석하고 윤중감소를 및 객차의 연직가속도를 분석하여 주행안정성 및 승차감을 분석하였다.

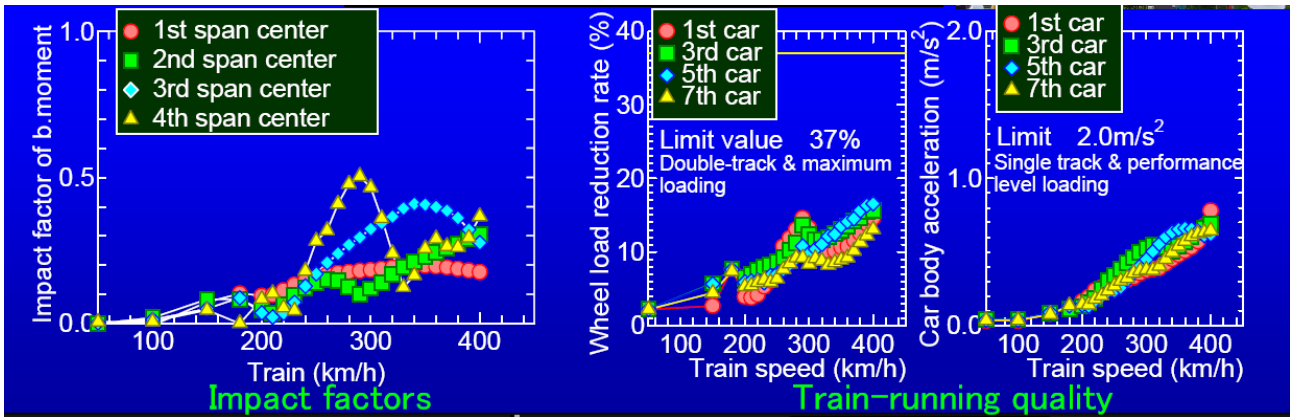


그림 9. 일본 RTRI의 4경간 Extradosed 교량에 대한 동적응답 및 주행안정성 분석

4. 철도 특수교량의 핵심설계요소

4.1 시공단계 검토

케이블 교량은 시공 중 구조계 및 단면 변화, 특히 시공 중 케이블의 장력변화에 대한 면밀한 단계별 분석 및 검토가 필요하다. 이는 도로 및 철도의 케이블 교량 모두에 해당하는 공통적인 사항이다. 또한 그림 10과 같이 시공단계별 케이블 및 거더 처짐에 대한 형상관리가 필수적이며 이에 따른 장력보정 혹은 케이블 길이 보정 등이 뒤따른다.



그림 10. 케이블 교량의 형상관리의 전형적인 과정

4.2 주행안정성 분석

열차의 주행안전성 분석은 차륜에 작용하는 횡압 Q 를 동적인 윤중 P 로 나눈 탈선계수 Q/P 로 평가하는 것이 일반적이다. 통상적으로 이 값이 0.8을 넘지않도록 구조물의 변위를 제한하고 있다. 일본의 경우 2006년 제정된 변위기준을 통해 이를 교량의 연직변위로 환산하여 검토할 수 있도록 하고 있다. 그러나 주경간이 100m 이상인 케이블 장대교량의 경우 윤중감소율에 의해 직접적으로 주행안전성을 검토하고 있다.

4.3 승차감 분석

Janeway, ISO 등의 국제적 승차감 지표에 대해 교량-열차 상호작용 해석을 통해 열차 객차 내부의 연직가속도 레벨을 검토함으로써 케이블 장대교량의 승차감(진동사용성)에 대한 평가를 수행할 수 있다.

4.4 지진시 열차주행안정성 평가지표

케이블 특수교량의 경우에는 일반적인 열차 주행시에 대한 검토 외에 지진하중, 강풍하중 등 환경하중 작용시에 대한 검토도 추가적으로 필요하다.

그림 11은 지진 시 열차주행성에 관한 평가지표의 개념도를 보여준다. RTRI에서 분석한 평가지표에는, 레일과 차륜의 상대수평 이동량을 이용하고, 그 한계치는 70mm로 정하고 있다. 지진 시 차량의 탈선모드는 대체로 0.8Hz이하에서 탁월한 것(lower-center rolling)과 약 1.3Hz 이상에서 탁월한 것(upper-center rolling)으로 크게 나뉘는데, 이것은, 차체의 수평방향 움직임과 롤링모션의 위상에 따라 판별된다.

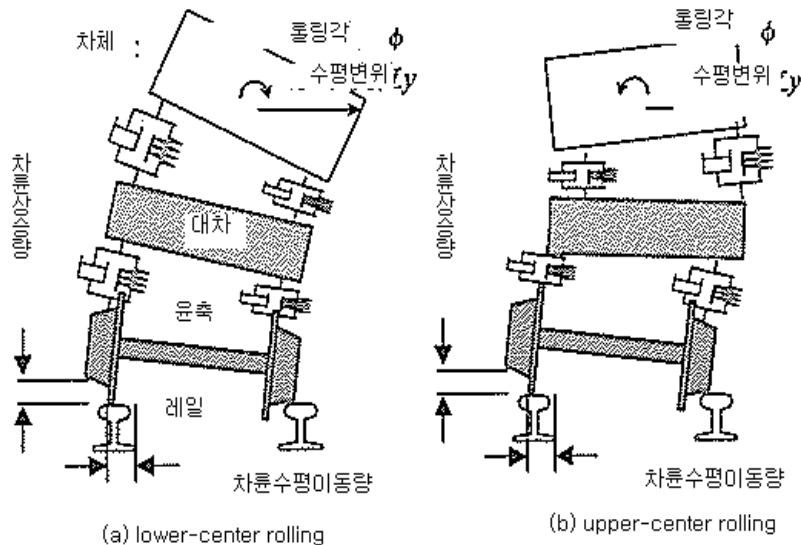


그림 11 지진 시 열차주행성에 관한 평가지표의 개념도

5. 결론

케이블 장대교량은 토목구조기술에 대한 선도적인 지표로 인식되고 있으며, 각 국가의 기술력을 상징한다. 특히 열차가 고속으로 주행하는 고속철도 상의 케이블 장대교량은 특유의 유연성으로 인해 주행안전성 및 승차감에 대한 면밀한 검토가 필요하다. 일본, 중국 및 유럽에는 각국을 대표하는 교량이 완공 혹은 시공 중인데 반하여 현재 국내 고속철도 상에는 케이블 장대교량이 전무한 상황이다.

본 논문에서는 400km/h급 차세대 고속철도에 적용 가능한 특수교량의 경간장 및 기술사양의 정립을 위한 첫단계로서 국내의 시공 및 설계 사례를 분석하였다. 향후 이와 같은 교량의 설계핵심요소, 주행안전성 및 승차감에 대한 분석을 통해 고속열차 주행에 적합한 설계사양을 제시하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(차세대고속철도기술개발사업)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. ERRI D214/RP9 Final Report, 1999, Rail Bridges For Speeds > 200km/h.
2. Eurocode 1 : Actions on Structures - Part 2 : Traffic Loads on Bridges, 2003.
3. Eurocode - Basis of Structural Design, 2005.12
4. 한국철도시설공단(2004), 철도설계기준(철도교편), 한국철도시설공단
5. 한국철도시설공단(2005), 고속철도설계기준 - 노반편, 건설교통부
6. 일본 국토교통성철도국 (2006), 철도구조물등설계기준/동해설 - 변위제한, 철도종합연구소
7. 김성일 외 (2007), 철도교량 동적안정성 및 동적설계기준에 관한 연구 (중간보고서), 한국철도기술연구원
8. Masamichi Sogabe et al. "A Study on Train-Running Quality during Earthquake for PC Extradosed Bridge ", RTRI REPORT Vol. 21, No.12, Dec.2007