

강합성 2주형 사장교의 시공중 내풍 안정성 확보 방안 연구

Temporary Stabilizing Measures during Construction of a Steel Composite 2-Edge Girder Cable Stayed Bridge

김영민* · 김대영**

Kim, Young-Min · Kim, Dae-Young

Abstract

The bridge deck section composed of a concrete slab resting on two I-beam girders are known to be susceptible to flutter instability and vortex shedding. Moreover, the cable stayed bridge in construction is more vulnerable to wind rather than in service when the free cantilever construction method is applied. This paper describes the effect of the dynamic wind loads on the bridge during construction and the effect of alternative temporary stabilizing measures. Therefore, a series of wind tunnel tests and numerical analysis were carried out to determine if any countermeasures were required.

key words : Cable stayed bridge, Temporary stabilizing measures, Wind tunnel test

1. 서 론

사장교 가설에서 흔히 사용되는 캔틸레버 가설 공법은 완성계에 비하여 시공중에 더 바람에 취약한 구조를 가진다. 특히, 1940년에 바람에 의하여 붕괴된 Tacoma Narrows 교량과 같은 강합성 2주형 판형교 형식은 풍공학적으로 매우 불안한 구조임에도 불구하고 뛰어난 경제성과 시공성 때문에 사장교에서 많이 채택되고 있다. 사장교의 캔틸레버 가설 공법 적용시 내풍안정성 확보를 위하여 흔히 내풍케이블이란 임시 케이블을 설치하여 시공중 태풍시 바람에 안전하도록 조치를 취하고 있으나, 내풍케이블에 의한 설치방법은 해상 교량의 경우 해저면에 중력식 콘크리트 블록이나 임시 파일기초 등을 설치하고 공사가 끝나면 철거를 해야 하므로 가설 비용이 증가하고 환경오염을 유발시킬 수 있는 단점이 있다. 또한, 시공중 선박통행에도 문제를 발생시킬 수 있다. 이에 비하여 TMD 등에 의한 진동제어장치를 도입하여 시공중에 안정성을 확보하는 방안은 해저면의 기초설치나 철거의 문제가 없고 선박통행에도 지장을 주지 않으며 환경친화적인 공법이라는 장점이 있는 반면에 신뢰성 있는 엔지니어링이 필요하다.

2. 대상교량 및 연구 방법

본 연구에서는 (주)대우건설에서 시공하고 있는 부산~거제간 연결도로(거가대교)의 강합성 2주형 3주탑 사장교(108m-230m-230m-108m)와 2주탑사장교(222m-475m-222m)를 대상으로 하여 해석적 접근방법과 풍동실험을 통하여 내풍케이블 및 TMD 등에 의한 시공중 태풍시 내풍안정성 확보 방안을 살펴보고자 하였다.

3주탑 사장교의 가설단계는 그림 1과 같이 균형 캔틸레버 상태에서 주경간 107m, 측경간 104m가 시공된 가설단계 96%에 대하여 1:150 크기로 축소한 공탄성 모형을 이용하여 풍동실험 결과에 의하여 검토하였으며, 2주탑 사장교는 그림 2와 같이 주경간 83m, 측경간 71m가 시공된 가설단계 34%와 주경간 215m, 측경간 213m가 시공된 가설단계 93%에 대하여 1:140 크기로 축소한 공탄성 모형에 의한 풍동실험 결과 및 동적구조(버퍼팅)해석 결과를 이용하여 검토하였다.

* 정희원 · (주)대우건설 기술연구원 시험연구팀 · 선임연구원 · 공학박사 · E-mail : ymkim@dwconst.co.kr

** (주)대우건설 기술연구원 시험연구팀장 · 수석연구원 · 공학박사 · 건축구조기술사

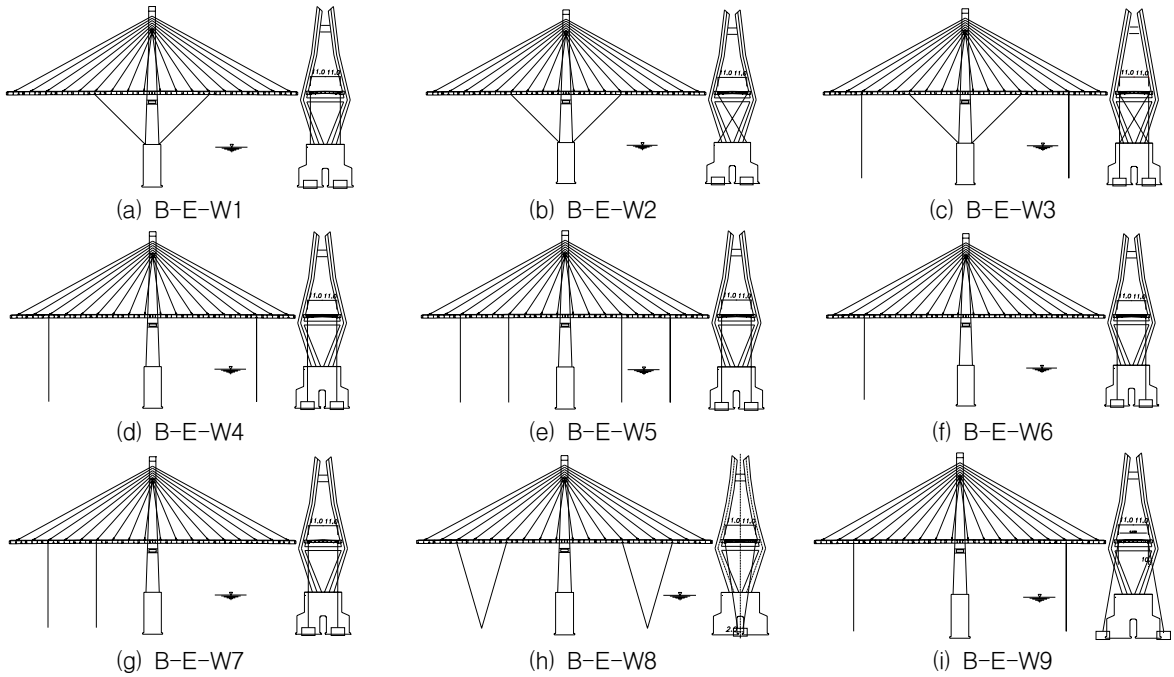


그림 1. 3주탑 사장교의 내풍안정성 확보 방안

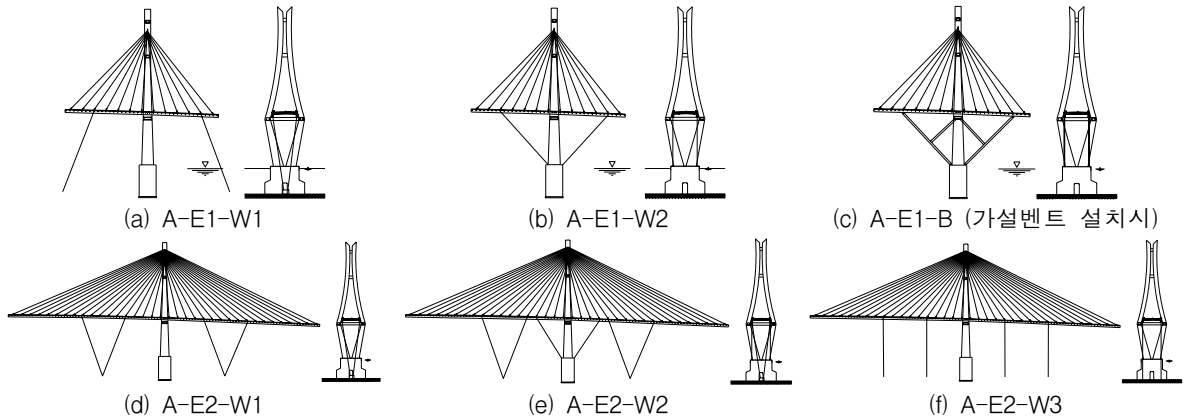


그림 2. 2주탑 사장교의 내풍안정성 확보 방안

3. 풍동실험 (Wind Tunnel Test)

3주탑 사장교의 시공중 태풍시 내풍안정성 확보를 위한 풍동실험은 (주)대우건설 기술연구원의 경계층 풍동(3m×2m×20m)에서 수행하였으며, 2주탑 사장교의 경우는 FORCE Technology-DMI의 대형 경계층 풍동(13.6m×1.7m×15.5m)에서 수행하였다. 내풍안정성 방안의 효율성을 평가하기 위하여 주경간장 중앙에서 수직변위를 측정하고, 시공중 설계풍속 및 한계풍속에서의 RMS값을 그림 3과 같이 정리하였다.

시공중 설계풍속 및 한계풍속에서 3주탑 사장교 주경간장 중앙의 수직변위 RMS는 양쪽 캔틸레버 경간에 적어도 2개 이상의 임시 케이블을 설치한 경우(B-E-W3, W4, W5, W8, W9)에 내풍안정성 확보 방안이 적용되지 않은 경우에 비하여 각각 10~15%와 19~23%로 크게 감소하였다. 따라서 양쪽 캔틸레버 경간에 적어도 2개 이상의 임시 케이블을 설치할 경우 제진 효과는 매우 뛰어났으며, 케이블의 경사와 수량 증가 여부는 크게 영향을 미치지 않았다. 주탑 케이슨에 임시 케이블을 설치한 경우(B-E-W1, W2)에는 각각 78%와

90~93%로 감소의 정도가 적었다. 한 쪽 캔틸레버 공간에만 임시 케이블을 설치한 경우(B-E-W6, W7)에는 각각 40%와 67%로 감소하였다. 시공중 폐합전 가장 큰 하중을 받는 2주탑 사장교 가설단계 93%의 경우 시공중 설계풍속 및 한계풍속에서의 수직변위 RMS는 본 임시 케이블이 설치될 경우(A-E2-W1, W2, W3) 배치 형태와 관계없이 각각 39~44% 및 50~52%로 감소하였다.

기본적으로 가설단계의 내풍안정성 확보 방안의 목표는 주요 구조부재가 공용중에 받을 수 있는 최대 하중 이상을 시공중에 부담하지 않도록 제어하는 것이다. 부산~거제간 연결도로 사장교의 주탑은 곡선형 다이아몬드 형식으로서 미관과 경제성을 고려하여 최적설계를 하였고, 시공중 제어 대상은 주탑 케이슨 하단부에 걸리는 모멘트로 판단된다. 풍동실험은 평균해수면(M.S.L.)을 풍동의 바닥면으로 설정하였기 때문에 주탑 하단부 해발 약 3.8m 위치에 변형률계를 부착하여 응력을 구하고 모멘트로 환산하였다. 시공중 설계풍속 및 한계풍속에서 주탑 하단부 모멘트의 RMS값은 그림 4와 같다.

시공중 설계풍속 및 한계풍속에서 3주탑 사장교 주탑 하단부 모멘트의 RMS는 양쪽 캔틸레버 공간에 적어도 2개 이상의 임시 케이블을 설치한 경우(B-E-W3, W4, W5, W8, W9)에 각각 26~35%와 41~53%로 감소하였다. 이는 주경간장 중앙 수직변위 RMS의 제진 정도보다는 적지만 양쪽 캔틸레버 공간에 적어도 2개 이상의 임시 케이블을 설치할 경우 모멘트 감소 효과가 매우 뛰어났으며, 마찬가지로 케이블의 경사와 수량 증가 여부는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 주탑 케이슨에 임시 케이블을 설치한 경우(B-E-W1, W2)에는 시공중 설계풍속에서는 91%로 감소하였지만 한계풍속에서는 오히려 103~107%로 모멘트가 증가하고 있음을 알 수 있었다. 본 구조물의 경우 주탑의 강성이 상대적으로 크지 않으므로 주탑 케이슨에 임시 케이블을 설치하는 방안은 바람직하지 않은 것으로 사료된다. 2주탑 사장교 가설단계 34%에서 가설벤트를 이용하는 방법은 제진효과가 뛰어났으나 경제성이 떨어져 검토 대상에서 제외하였다. 2주탑 사장교 가설단계 93%의 경우에 내풍 케이블이 설치된 경우 설계풍속 및 한계풍속에서 49~51% 및 58~62%로 감소하였다.

실험 결과 수직 및 경사 방향 내풍 케이블 배치의 제진 효과는 모두 우수하였으나, 해상 교량의 경우 임시 케이블 설치를 위한 가설 기초에 경사 케이블을 설치하는 방안은 시공성과 경제성이 떨어지므로, 실용성과 효율성을 고려할 때 수직방향 임시 케이블을 설치하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

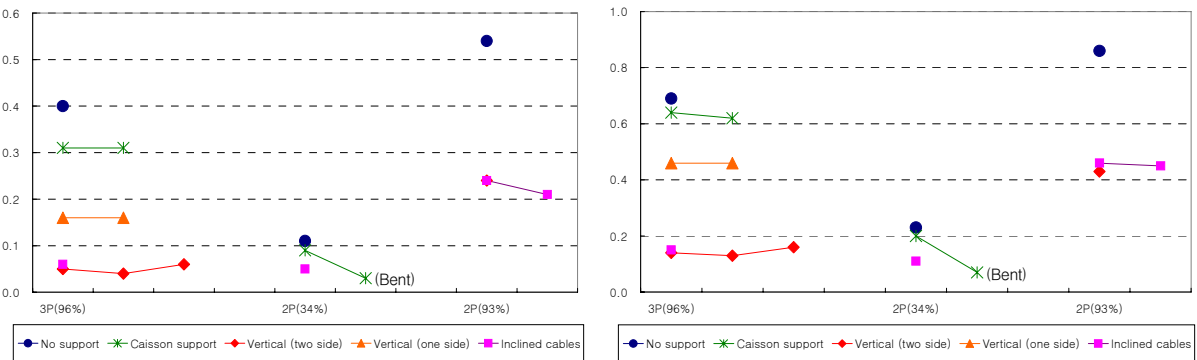


그림 3. 시공중 설계풍속 및 한계풍속에서 주경간장 중앙 수직변위의 RMS (m)

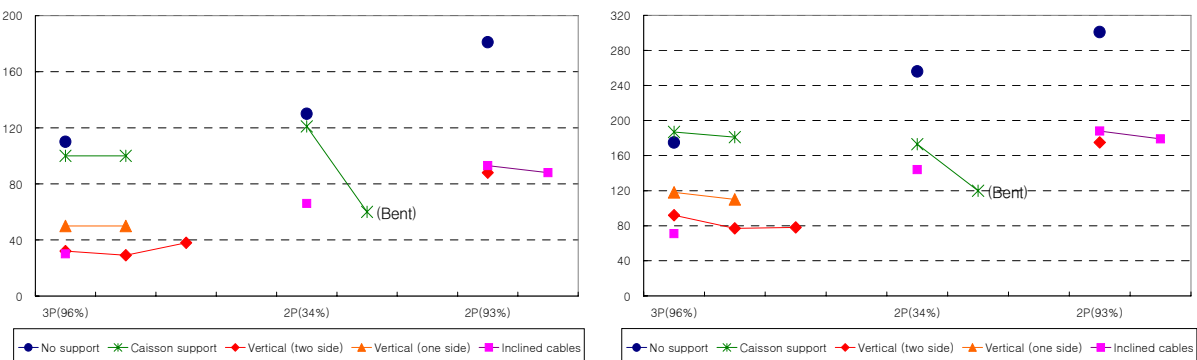


그림 4. 시공중 설계풍속 및 한계풍속에서 주탑 하단부 모멘트의 RMS (MN·m)

4. 동적구조해석 (Dynamic Wind Analysis)

풍하중에 대한 동적구조해석은 Davenport 가 제안한 거스트 풍하중에 대한 버펫팅 해석 이론에 근거하여 COWI에서 2주탑 사장교에 대하여 수행한 임시 케이블을 수직배치(이동위치 및 고정위치), 경사배치, 주탑 케이슨 지지, 주탑 침두 고정(Back stay)하여 내풍 안정성을 확보하는 방안들에 대하여 검토하였다. 그림 5의 주탑 케이슨 하단부 모멘트 해석 결과에 의하면 주탑 침두 고정 방법이 가장 우수한 것으로 보인다. 그러나 이 방법은 주탑 침부에 정착부를 설치하여 앵커피어까지 임시 케이블을 긴장시켜야 하므로 실용성이 없으므로 선택 대상에서 제외하였다. 주탑 케이슨에 지지하는 방법은 앞선 실험 결과와 같이 제진 효과가 거의 없었으며, 이동위치 수직배치가 고정위치 수직배치에 비하여 효율성이 약간 높지만 모든 세그먼트마다 임시 케이블의 정착부를 설치하는 것은 경제성이 떨어진다. 동적구조해석 결과는 임시 케이블의 경사배치가 수직배치에 비하여 상당히 효과적인 것으로 나타나고 있으나, 효율성이 유사한 것으로 나타난 풍동실험 결과와는 다소 차이가 있다. 이는 버펫팅 해석시 필요한 공기력계수 파라미터를 풍동실험에 의한 자료 부재로 인하여 평판(Flat plate)에 대한 수치해석(CFD) 결과값을 적용하였기 때문에 정확성이 떨어진 것으로 사료된다.

3주탑 사장교의 경우 2주탑 사장교에 비하여 교량의 규모가 작고 내풍 케이블 설치를 위한 말뚝기초공사 기반조건이 열악함에도 불구하고 같은 방식의 내풍 케이블 설치 방법을 적용하는 것은 불합리해 보인다. 동적구조해석 및 풍동실험 결과를 분석해 보면 상판의 수직하중을 유발하는 주요 원인은 주탑의 1차 진동모드이다. 3주탑 사장교 주탑의 1차(0.219Hz) 및 2차(0.535Hz) 진동모드의 질량참여율은 57%로서 수평방향 40%나 수직방향 6%에 비하여 지배적이다. 이러한 고유 진동수와 진동량은 TMD(Tuned Mass Damper)를 이용하여 제어가 가능한 것으로 판단된다. 반면에 2주탑 사장교의 경우 주탑의 1차 진동수(0.119Hz)가 매우 낮기 때문에 장주기 제어를 위하여 능동제어방식과 같은 특수한 장치가 필요할 것으로 사료된다.

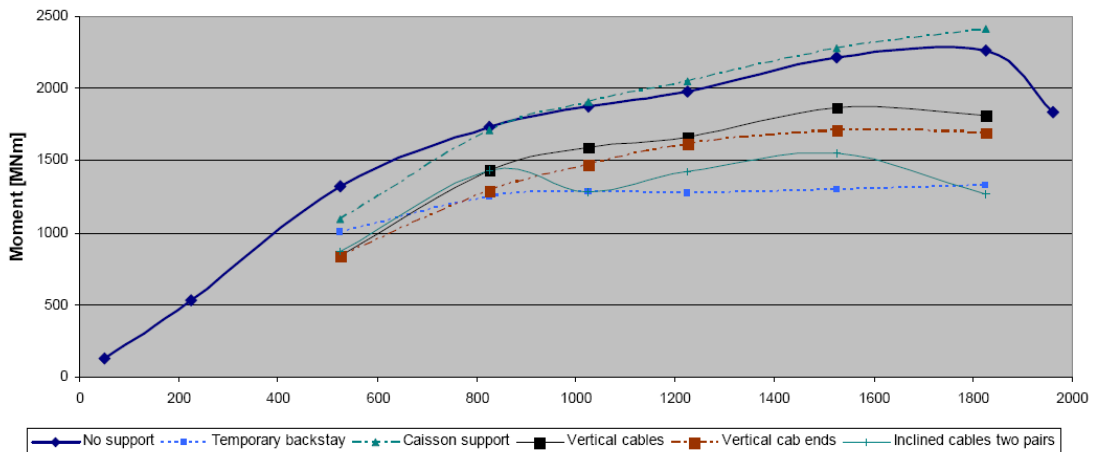


그림 5. 내풍안정성 확보 방안에 따른 주탑 케이슨 하단부 최대 모멘트 (2주탑 사장교)

5. 결 론

캔틸레버 가설 공법이 적용된 강합성 2주형 사장교의 시공중 태풍시 내풍안정성 확보 방안에 대하여 부산~거제간 연결도로 3주탑 및 2주탑 사장교를 대상으로 하여 내풍 케이블의 배치 방법에 따라 수직 배치, 경사 배치, 주탑 케이슨 지지, 주탑 침두 고정 방법, 가설벤트 설치 방법 및 TMD 설치 방안에 대하여 풍동 실험 및 동적구조해석을 통하여 검토하였다. 실용성과 효율성을 고려하여 검토한 결과 주경간장 230m의 3주탑 사장교는 TMD를 이용하여 제진하고 주경간장 475m의 2주탑 사장교는 태풍시 수직방향 내풍케이블을 설치하는 방안이 가장 바람직한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 조재영, 김영민, 이학은 (2007) 내풍케이블 배치에 따른 가설 중 사장교의 공기역학적 거동 비교, 한국강구조학회 논문집, 제19권 2호, pp. 147-160.