한국철도학회논문집
제9권 제1호 2006년 ▌pp. 12-17

실교 가진시험을 통한 현수교의 고유진동특성 연구

Vibrational Characteristics of Suspension Bridge by Full-Scale Test

조선규† · 김선곤*
Sun-Kyu Chog · Sun-Kon Kim

Abstract

The bridge to be analyzed is a self-anchored suspension bridge which is constructed within the country. Forced vibration test was performed with oscillator for verification of safety, maintenance and management. In this study, the feasibility of deduction was verified with the modified analysis model by comparing natural frequency, natural mode and damping ratio of the real bridge, which are obtained from the vibration test of the whole bridge after construction of 3-dimensional self-anchored cable suspension bridge, with the eigenvalue of analytic computation model and evaluating them. As a result of study, the friction of bridge bearing must be considered to get the natural frequencies of flexural vibration, and evaluating the polar moment of inertia is critical factor in analysis modeling in case of torsional vibration. The logarithmic damping ratio of the test appeared to exceed the ordinary one assumed at the design phase.

Keywords : Full-Scale Test(실교시험), Suspension Bridge(현수교), Vibrational Characteristics(고유진동특성)

1. 서 론

현수교는 장경간의 교량에 적합한 형식이나 진동에 취약한 특성을 가지고 있다. 교량의 진동 응답은 교량 전체계의 고유진동 특성에 좌우되기 때문에 고유진동 특성의 파악은 설계에 있어 매우 중요한 사항이며, 이 값은 설계 시 전산해석 등을 통해 산정하고 있으나, 설계에 이용하는 해석 모델은 복잡한 실제 교량을 수학적으로 간략화해야 하는 것이 불가피하다. 또한, 고유진동 특성 중 감쇠율은 해석적인 추정이 불가능하기 때문에 기존의 실적 등을 참고로 하여 설계를 하고 있는 것이 일반적이다.

설계 시 가정된 진동특성의 검증은 실제교량의 계측이 유일한 방법이나 국내에서는 지금까지 이에 관한 실측자료가 매우 미미한 실정이다. 연구대상 교량은 국내에서 건설된 자정식 현수교이며 유지관리 및 안전성검증을 위해 기진기를 이용한 진동실험이 실시되었다[1].

본 연구에서는 계측에서 얻은 자료를 통하여 자정식 현수교의 실제 역학적 거동과 진동특성을 확인하여 분석하고 설계 시 가정한 수학적 모델의 타당성을 검토하여 설계모델과 실 교량과의 차이를 분석하였고, 향후 비슷한 형식의 교량 설계 및 유지관리 시 이용할 수 있는 자료로 확보하며 설계기준의 변경 등에 중요한 보완자료로 사용하고자 하는데 목적이 있다.

† 책임저자 : 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 부교수
E-mail : skcho@snut.ac.kr
TEL : (02)970-6512 FAX : (02)948-0043
* 현대산업개발 토목설계팀장

2. 교량제원 및 사전해석

2.1 실험대상 교량

2.1.1 교량의 특징

연구대상 교량은 도로, 철도 병용교이며 주 케이블을 앵커블록이 아닌 보강형의 끝에 고정시키는 자정식 현수교이다. 또한 일반적 현수교는 포물선으로 된 주 케이블에 행어로프를 수직으로 늘어트려 상판을 매달아 완성하는 것이 통상적 설계이나 연구대상 교량은 주 케이블이 현수교의 단부에서 교량 폭 만큼 벌어져 있다가 A형 주탑에서 좁아진 후 주경간부의 중앙에서 다시 벌어지는 형상으로 가설되어 행어로프도 수직이 아닌 경사를 이루며 가설되는 3차원의 케이블을 가지고 있다. 이는 교량의 내풍안정성 확보에 뛰어난 장점을 가지게 한다.

2.1.2 교량의 제원

상부구조는 상층부 도로6차로와 하층부 도로 4차로 및 철도복선으로 구성된 2층 구조형식이며 경간의 구성은 중앙경간 300m와 측경간 각각 125m로 전체연장은 550m로 구성되었다. 주탑의 형상은 다이아몬드식이며 강구조로 구성되어 있고 보강형의 단면은 Warren Truss형식으로 구성되었다.

2.2 사전해석

실험전 교량의 동적진동특성 파악을 위하여 다음과 같은 조건을 적용하여 사전해석을 수행하였다.

2.2.1 모델링

해석모델의 제원 및 모델링은 설계 시 모델과 동일하게 적용하였으나, 고정하중 강도는 완성계에 대한 고정하중 강도를 기초로 하여 진동실험 시점에 가설이 안 된 하로 철도관계 구조물 하중을 삭제하여 적용하였다. 전체 단면 내 고정하중 분포는 설계 시 모델과 같이 Fig. 2에 나타낸 것처럼 단면 내 3개점에 집중질량으로 분포시켰다. 또한 극관성모멘트는 상로, 하로 각 축선 주위의 극관성모멘트를 산출하고 이의 합을 상로 축선 중앙에 집중시켰다.

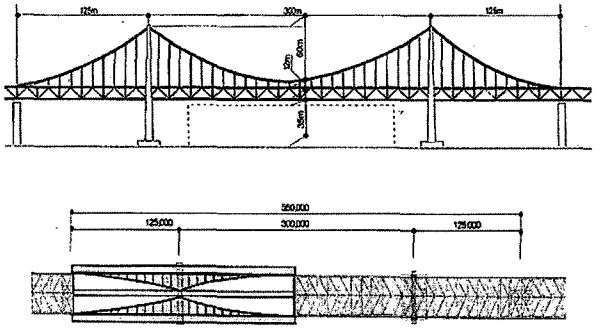


Fig. 1. 교량 일반도

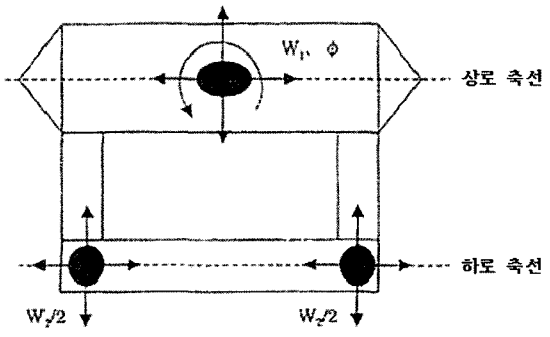


Fig. 2. 중량 및 극관성모멘트 분포점

2.2.2 해석조건 및 해석모드

진동실험 시의 실험상황 등을 고려하여 일부 해석조건을 달리하여 Table 1과 같은 네 가지 모델에 대해 해석을 실시하였다.

해석 및 실험대상 진동모드는 해석교량의 진동에 큰 영향을 주는 것으로 알려진 휨 대칭1차, 휨 역대칭1차, 비틀림 대칭1차 및 비틀림 역대칭1차 모드를 실험대상 모드로 하였다.

2.2.3 고유진동수 사전해석 결과

해석을 통해 구한 네 가지 모델의 고유진동수는 Table 2와 같고, 이 결과에서 부가물의 강성 및 기진기의 중량에 따른 해석교량의 고유진동수 변화는 미미한 것으로 나타났고 받침의 마찰고려는 해석결과에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

2.2.4 고유모드 사전해석 결과

해석으로 구한 교량의 진동모드는 Fig. 3과 같다.

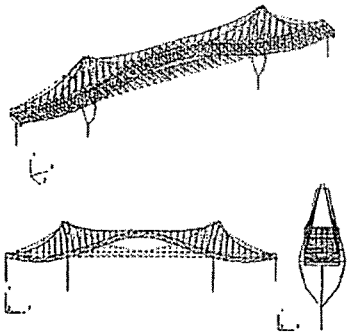
Table 1. 해석모델 구분

구분	모델명	특징
Case1	설계모델	강성과 경계조건을 설계제원과 같게 적용
Case2	부가강성고려 모델	난간 및 내풍 Fairing 등 첨가물의 강성을 고려
Case3	받침마찰고려 모델	받침의 마찰을 고려하여 경계조건을 고정으로 적용
Case4	기진기 중량고려 모델	기진기 설치위치에 기진기의 중량을 부가

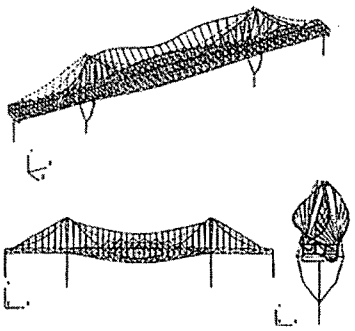
Table 2. 사전해석 모델의 고유진동수(Hz)

모드 구분	Case1	Case2	Case3	Case4
휨 대칭	0.442 (1.00)	0.445 (1.01)	0.489 (1.11)	0.440 (1.00)
휨 역대칭	0.716 (1.00)	0.728 (1.02)	0.830 (1.16)	0.713 (1.00)
비틀림 대칭	0.781 (1.00)	0.784 (1.00)	0.788 (1.01)	0.780 (1.00)
비틀림 역대칭	1.195 (1.00)	1.204 (1.01)	1.225 (1.03)	1.192 (1.00)

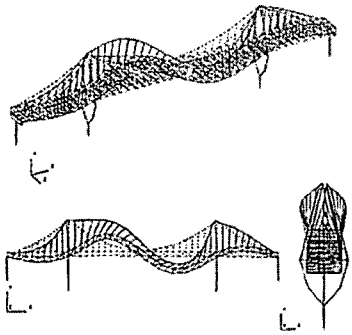
주: ( ) 속의 숫자는 Case1의 값을 1로 한 상대치임



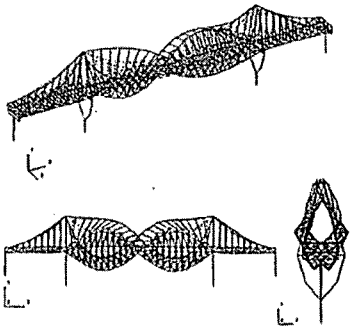
(a) 휨 대칭 1차 모드



(c) 비틀림 대칭 1차 모드



(b) 휨 역대칭 1차 모드



(d) 비틀림 역대칭 1차 모드

Fig. 3. 사전해석 고유모드(Case1)

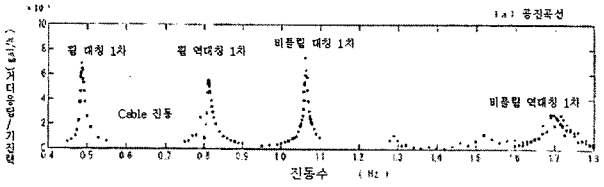
3. 가진실험

3.1 실험방법

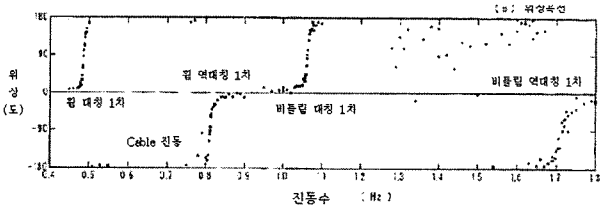
기진기는 장대교 가진용 Servomotor 구동방식의 대형 기진기 2대를 사용하였다. 기진기 설치 위치는, 시험 대상으로 삼는 전 모드에 대해 기진기를 이설하지 않고 가진 가능한 위치를 검토하여 중앙경간 L/3점으로 결정하였다.

2대의 기진기를 폭원방향 양단에 설치하고, 연직 휨 진동은 기진기 2대를 동상으로 운전하여 진동하였고, 비틀림 진동은 기진기 2대를 역상으로 운전하여 진동을 유발하였다.

사전해석에서 파악한 고유진동수 부근에서 정현파 가진을 실시하여 이에 대한 교량의 응답을 측정하였다. 또한 공진점에서의 정상 가진상태에서 기진기를 급정지하여 자유감쇠 진동파형을 구하여 교량의 감쇠응답을 측정하였다.



(a) 공진곡선



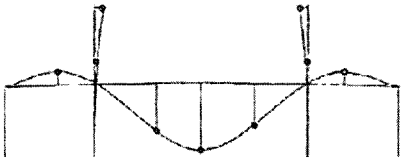
(b) 위상곡선

Fig. 4. 공진곡선 및 위상곡선

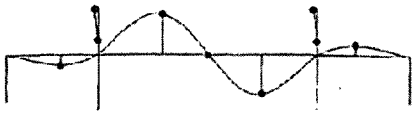
3.2 실험결과

3.2.1 정현파 응답실험 결과

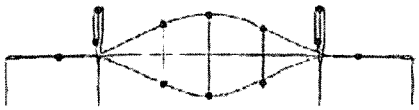
실험결과 4개 모드의 정현파 응답의 공진곡선과 위상곡선을 Fig. 4에 나타냈다. 각 모드의 공진점 부근에서 진폭이 최대가 되며 위상차가 약 180° 변화하고 있는 것으로부터 공진점이 확인되고 있다[2].



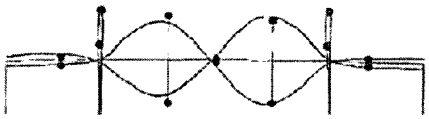
(a) 휨 대칭 1차



(b) 휨 역대칭 1차



(c) 비틀림 대칭 1차



(d) 비틀림 역대칭 1차

Fig. 5. 진동모드

진동모드는 측정결과와 실험치가 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 5에서 실선의 형상은 사전해석으로 구한 진동모드이고 실험에서 구한 실측치는 측정위치에 점으로 표시하였다.

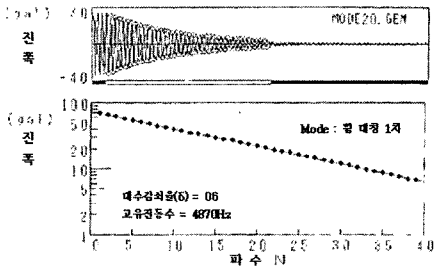
3.2.2 자유감쇠실험 결과

실험에서 구한 자유감쇠 파형으로부터 대수감쇠율을 구하였다. Fig. 6과 같이 각 모드는 모두 양호한 자유감쇠 파형을 나타냈으나, 휨 역대칭 1차 모드의 자유감쇠 파형은 Fig. 6(b)와 같이 Beat형으로 나타났다. 이것은 이 모드의 공진진동수 근처에 주 케이블의 공진점이 있어, 서로 간섭하고 있기 때문이라 판단된다.

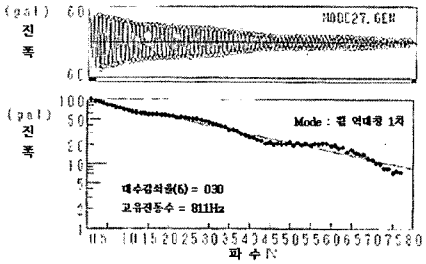
휨 역대칭모드에 대해서는 발생한 Beat형 응답곡선으로부터 모드분리를 통해 감쇠율을 구하였다.

이 Beating 현상은 당초 설계 시 해석을 통하여 거더와 케이블의 고유진동수를 비교하여 안정된 것으로 판단하였으나 완성된 교량의 고유진동수는 설계모델의 고유진동수가 차이를 보임에 따라 발생한 것으로 판단된다[3].

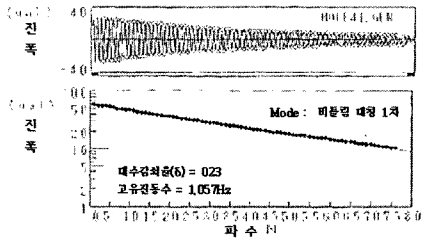
실측에 의해 구한 각 모드의 감쇠율은 각각 0.061(휨 대칭



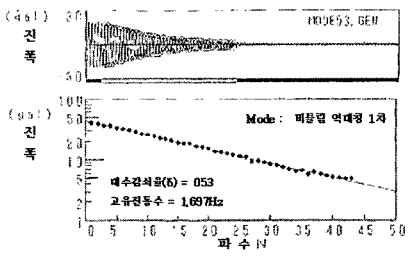
(a) 휨 대칭 1차



(b) 휨 역대칭 1차



(c) 비틀림 대칭 1차

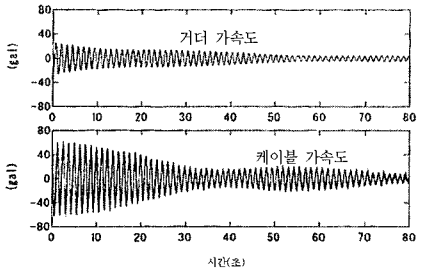


(d) 비틀림 역대칭 1차

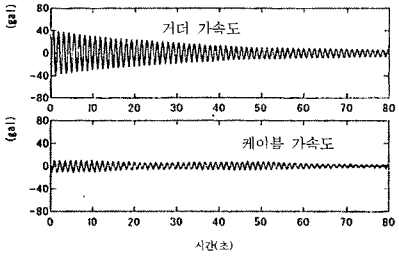
Fig. 6. 자유감쇠 파형

1차 모드), 0.034(휨 역대칭 1차 모드), 0.029(비틀림 대칭 1차 모드), 0.054(비틀림 역대칭 1차 모드)로 나타났다.

진폭과 감쇠율의 관계는 비틀림 대칭 1차 모드에서는 Fig. 8에서 보이는 것과 같이 진폭 증가에 따라 감쇠율이 증가하는 것으로 나타났으나, 다른 3개의 모드에서는 진폭의 변화에 따른 별다른 경향을 보이지 않고 일정한 수준을 유지하



(a) 계측파형



(b) 모드분리 후 파형

Fig. 7. 모드분리 파형(휨 역대칭 1차)

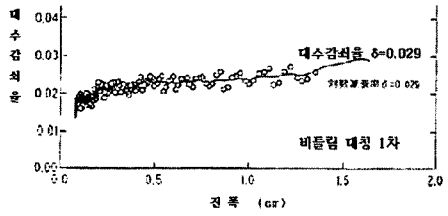


Fig. 8. 진폭에 따른 감쇠율 변화(비틀림 대칭1차 모드)

였다. 또 온도 및 풍속과 감쇠율의 관계도 특별한 경향이 나타나지 않았다.

4. 결과 분석 및 해석모델 수정

4.1 사전해석과 실험결과의 비교, 분석

휨 진동의 고유진동수의 실측치는 대칭, 역대칭 모두 사전해석의 Case1(설계모델)과는 10% 정도의 오차를 보였으나 사전해석의 Case3(받침마찰 고려 모델)과는 거의 일치하는 결과를 나타냈다. 이는 실제의 교량에서 진동발생 시, 교량받침이 마찰 때문에 미끄러지지 않고 강성에 기여하기 때문인 것으로 판단된다.

비틀림 진동의 고유진동수는 실측치와 해석치가 잘 대응하고 있지 않으며, 대칭, 역대칭 모두 실측치가 약 30% 정도 높은 값을 보이고 있다. 진동모드는 전 모드에서 모두 실측치와 해석치가 잘 일치하고 있다.

Table 3. 고유진동수의 실측치와 해석치 비교(Hz)

모드 구분	실측치	사전해석		실험 후 해석	
		Case1	Case3	Case1	Case3
휨 대칭	0.487 (1.00)	0.442 (0.91)	0.489 (1.00)	0.442 (0.91)	0.490 (1.01)
휨 역대칭	0.810 (1.00)	0.716 (0.88)	0.830 (1.02)	0.717 (0.89)	0.831 (1.03)
비틀림 대칭	1.060 (1.00)	0.781 (0.74)	0.788 (0.74)	1.035 (0.98)	1.044 (0.98)
비틀림 역대칭	1.700 (1.00)	1.195 (0.70)	1.225 (0.72)	1.682 (0.99)	1.710 (1.01)

주: ( ) 속의 숫자는 실측값을 1로 한 상대치임

휨 진동이 잘 일치하고 있는 것으로 보아 전체 강성 및 부재강성과 질량분포의 제원은 적정한 것으로 추정할 수 있으며, 전 모드의 모드 형상이 비교적 잘 일치하고 있다는 점에서 해석 시 적용한 경계조건은 타당한 것으로 판단되나 부재강성 및 질량 분포가 적정하며 비틀림 진동수가 크게 다른 것은 극관성모멘트의 평가에 오류가 있었던 것으로 판단된다.

4.2 해석모델 수정

위와 같은 고찰에 입각하여 실험 후 해석에서는 극관성모멘트 평가 문제를 배제할 수 있는 모델화 기법을 이용하였다. 즉, 사전해석에서는 거더 단면내 다수 개소의 고정하중을 3개소로 집약하고 극관성모멘트도 이 3개소로 집약하여 이것을 다시 1개소로 집약하여 해석을 실시하였으나, 실험 후 해석에서는 실제 고정하중과 극관성모멘트를 그대로 분포시켜서 모델화하는 방법을 적용하였다.

사전해석 결과로부터 Case1과 별다른 차이점이 없는 것으로 나타난 Case2와 Case4는 실험 후 해석에서 제외하였으며 해석대상은 Case1 및 Case3 두 가지만으로 한정하였다.

실험 후 해석에서 해석모델은 실제교량의 거동과 근접한 결과를 얻기 위하여 고정하중과 극관성모멘트의 분포를 수차례 반복 수정하였다.

Table 3에 고유진동수의 실측치와 모델링 수정 후 해석치를 비교하여 나타냈다.

모델링을 수정하여 재해석한 결과, 비틀림 대칭 1차, 비틀림 역대칭 1차 진동의 고유진동수 해석치는 사전 해석치에 비해 크게 높아지고 있으며 실측치와 잘 일치하는 결과를 나타냈다. 또, 휨 진동의 고유진동수에 대해서는 사전 해석치와 거의 변함이 없이 나타났다.

이와 같은 결과로부터 사전해석에서의 거더의 극관성모멘트는 과대평가된 것으로 판단할 수 있다.

Table 3에서 알 수 있는 것과 같이 받침의 마찰을 고려하고 질량과 극관성모멘트를 전체에 분포시킨 실험 후 해석의 Case3의 고유진동수는 전체모드에서 실제 교량의 고유진동수와 거의 일치하는 결과를 보여주고 있다.

진동모드형상은 사전해석 결과와 큰 차이가 없는 것으로 나타났고 실제 교량의 측정결과와도 잘 일치하고 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 실교의 주요 진동모드의 고유진동 특성치를 측정하여 해석치와 비교 검토하여 해석 대상 교량의 동적 모델링의 타당성을 검증할 수 있었다. 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 휨 진동의 고유진동수에 대해 실측치와 해석치를 비교한 결과, 실제의 교량에서 진동발생 시 교량받침은 마찰 때문에 미끄러지지 않고 강성에 기여하는 것으로 나타났다.

(2) 실측된 비틀림 진동의 고유진동수는 사전해석 모델의 해석치와 약 30%의 큰 오차를 발생시켰다. 이것은 사전해석 시 극관성모멘트 값을 과대평가하였기 때문으로, 이를 그대로 분포시켜서 모델화한 실험 후 해석모델 결과는 실측치와 잘 일치하였다.

(3) 실험대상 네 개의 주요 모드에 대한 고유모드형상은 실측치와 해석치가 잘 일치하였다.

(4) 실측된 각 모드의 감쇠율은 0.029~0.061 범위였으며, 이것은 국내설계기준에서 제안하는 값을 상회하는 결과이다[4]. 비틀림 대칭 1차 모드에서는 진폭 증가에 따라 감쇠비가 증가하는 것으로 나타났으나, 다른 3개의 모드에서는 진폭의 변화에 따른 별다른 경향을 보이지 않고 일정한 수준을 유지하였으며 온도와 풍속에 따른 감쇠율의 변화도 나타나지 않았다.

참 고 문 헌

1. 삼성물산, (2001). "영종대교 실험보고서"
2. Anil K. Chopra, "Dynamics of Structures- 2nd Edition", Prentice Hall.
3. I. Okauchi, et al, (1997), "Field Vibration Test of a Long-span Cable-Stayed Bridge Using Large Exciters". Proc. of JSCE. Vol. 14. No1.April., pp.83-92.
4. 대한토목학회, (2005.6), "케이블 강교량 설계지침(안)"