

현수교 동특성 계측 및 해석모델 업데이트

Identification of Dynamic Properties and Analysis Model Updating for a Suspension Bridge

김호경† · 김남식* · 이정휘** · 박진***

Kim, Ho-Kyung, Kim, Nam-Sik, Lee, Jeongwhee, Park, Jin

1. 서론

광안대교는 복층 트러스 현수교로서 2003년부터 사용되어 오고 있다. 당시 현수교의 실적이 별로 없었던 국내 실정을 감안하면 많은 관심을 받았던 교량이다. 이후 광안대로 유지관리사업소에서 이 교량의 유지관리 일환으로 형상측량을 수행하고 본 연구의 첫 번째 저자는 그 결과에 따라 해석모델을 업데이트 한 바 있다. 형상측량과 계측 행어장력, 그리고 시공 중 산정된 중량 등 가능한 한 실제 교량을 잘 표현할 수 있는 자료들을 활용한 결과, 당시의 완성된 교량 형상은 설계 시 목표하였던 것과 잘 일치하는 것으로 확인된 바 있다. 그러나 이는 교량의 완성 형상에 대한 검증 과정만을 대상으로 하는 것이었기 때문에, 현수교에서 보다 관심의 대상이 되는 동특성까지 잘 구현할 수 있느냐 하는 것에 대한 추가연구의 필요성이 도출되었다. 따라서 본 연구에서는 실교량의 고유진동수와 진동형상을 측정하고 이를 앞서 개발된 해석모델과 비교함으로써 현재 교량의 고유진동수와 잘 일치하는 해석모델을 제안하였다. 또한 이 과정에서 첫 번째 저자에 의해 제안되었던 계측기반 실교량 해석모델 개발 절차가 동적해석모델 업데이트 과정에서도 실교량과 근접한 기본모델을 제시할 수 있음을 입증하였다.

2. 기본 해석모델

첫 번째 저자에 제안되었던 계측기반 광안대교의 해석모델을 기본 모델로 하여 고유진동수를 계산하였다. 표 1은 주요 모드에 대한 해석결과를 나타내고 있다.

† 교신저자; 서울대학교 공과대학 건설환경공학부
E-mail : hokyungk@snu.ac.kr
Tel : (02) 880-7365, Fax : (02) 873-2684

* 부산대학교 공과대학 토목공학과
** 단국대학교 공과대학 토목공학과
*** 서울대학교 공과대학 건설환경공학부

표 1 Calculated natural frequencies of the baseline model

Mode	Natural frequency(Hz)	Classification
1	0.1154	Lateral (1 st)
5	0.2247	Vertical symmetric (1 st)
6	0.2364	Vertical anti-symmetric (1 st) in the center span only
7	0.3442	Vertical anti-symmetric (2 nd) in the both side span only
8	0.3537	Lateral (2 nd)
9	0.4035	Vertical symmetric (2 nd)
12	0.4865	Vertical symmetric (3 rd)
21	0.5704	Torsional (1 st)
23	0.6407	Vertical anti-symmetric (3 rd) in the center span only

3. 상시진동실험

광안대교에 대하여 상시진동실험을 수행하였다. 최소한의 가속도계로 주요 고유진동수와 고유진동형상을 측정하고자 그림 1과 같이 가속도계를 배치하였다. 고유진동수는 cross-spectral density 함수로부터 추출하였으며 모드형상은 Proper Orthogonal Decomposition 기법으로 구하였다.

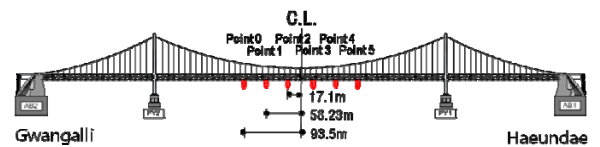


그림 1. 상시진동실험을 위한 가속도계 배치

표 2 Identified vertical frequencies and mode shapes at the center span

Vertical mode	Natural frequency (Hz)	Mode Shape
First symmetric	0.2435	
First anti-symmetric	0.2519	
Second symmetric	0.4630	

표 2 는 상시진동실험으로부터 얻은 고유진동수와 진동형상을 나타내고 있다. 현수교는 일반적으로 첫 번째 모드가 중앙절점에서 노드를 갖는 역대칭 모드이다. 그러나 광안대교의 경우, 설계 당시부터 해석 모델의 첫 번째 모드가 일반 거더교와 같이 대칭모드로 확인되었던 바 있다. 표 2 의 결과도 첫 번째 연직모드는 대칭모드임을 보여주고 있다. 이는 광안대교의 보강거더가 다차선의 복층트러스 형식으로 매우 강한 휨강성을 갖기 때문인 것으로 이해된다.

표 3 은 해석결과와 상시진동실험으로부터 도출된 고유진동수를 비교하여 정리하였다. 당초 기반모델이 계측된 자료를 활용하여 구성되었기 때문에 두 고유진동수가 어느 수준이상 잘 일치할 것으로 기대하였다. 그러나 표 3 에 따르면 연직 진동수에 대해서도 6~8% 오차가 있을 뿐 아니라 일부 모드는 20%의 오차를 보이기도 하였다. 전반적으로 계측된 고유진동수는 해석모델의 결과보다 더 강성이 강한 것으로 나타났다.

표 3 Comparison of identified and calculated natural frequencies (Hz)

Mode	Identified frequency	Calculated frequency of the baseline model	Calculated frequency of the composite deck model
Lateral (1 st)	0.1460	0.1154 (21.0%) ^{a)}	0.1221(16.4%)
Vertical symmetric (1 st)	0.2435	0.2247 (7.7%)	0.2454 (-0.8%)
Vertical anti-symmetric (1 st)	0.2519	0.2364 (6.2%)	0.2598 (-3.1%)
Vertical symmetric (2 nd)	0.4630	0.4035 (12.9%)	0.4594 (0.8%)
Vertical symmetric (3 rd)	0.5493	0.4865 (11.4%)	0.5245 (4.5%)
Torsional (1 st)	0.6228	0.5704 (8.4%)	0.5977 (4.0%)
Vertical anti-symmetric (3 rd)	0.7515	0.6407 (14.7%)	0.7232 (3.8%)

이는 당초 기대하지 못하였던 결과이다. 따라서 동적해석모델에 대하여 모델 업데이트 과정이 필요하다고 판단하였다.

4. 해석모델 업데이트

모델 업데이트는 몇 가지 방안을 생각할 수 있다. 역해석 기법을 활용하여 몇 개의 설계변수를 변화시키며 해석 고유진동수와 계측 고유진동수의 오차를 줄여가는 방법이 일반화 되어 있지만, 표 3 의 결과는 당초 기대와는 달리 그 오차가 일관적이며 매우 크기 때문에 인위적인 모델 업데이트 보다는 경계조건 등 형상해석과는 관계없이 전체구조계의 거동을 좌우할 수 있는 부분의 검토를 먼저 수행하였다.

상부나 하부 강바닥판의 세로보는 보강트러스의 수평재에 의해 지지되는데 그 사이에 받침이 설치되어 기본적으로 비합성 거동을 하도록 설계되었다. 그러나 미소한 바람이 작용하는 상시진동실험 시 과

연 이 연결부가 비합성 거동을 할지는 의문이다. 따라서 모든 연결부의 거동을 고정하여 합성거동하도록 모델을 수정해 보았다. 상하 바닥판은 교량을 따라 여러 개의 신축이음부가 구성되어 있으며 이 신축이음부는 정상적으로 해석 모델에 고려되었다.

그 결과 표 3 에 함께 나타낸 바와 같이 해석모델의 고유진동수가 계측값과 5% 이내로 잘 일치하게 됨을 알 수 있다. 이는 강바닥판과 트러스의 합성거동 여부 만을 수정한 것이기 때문에 전체시스템의 모델링과는 사실상 직접적 관계가 없다. 여기서 수평진동수는 여전히 차이를 보이고 있지만 수평진동수는 측정된 값이 아니라 다른 문헌에서 참고한 값이기 때문에 추후 수평진동수 측정을 포함하여 확인될 필요가 있다. 따라서 계측기반 해석모델 보정기법에 의해 작성된 해석모델은 고유진동수도 실제 교량과 부합되는 결과를 도출하는 역량도 함께 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

선행연구로 수행되었던 현수교의 계측기반 형상해석 결과로 도출된 정적해석 모델을 기반모델로 하여 광안대교의 실측 고유진동수와 부합되는 동적해석모델을 업데이트 하였다. 동적해석 모델은 정적해석 모델에 질량 성분을 추가하여 구성하였다. 이 때 질량은 정적해석 시 활용한 시공 중 계측 중량을 토대로 산정된 것이기에 이렇게 작성된 동적해석 모델은 실교량의 고유진동수를 잘 표현할 것으로 기대하였다. 그러나 대부분의 진동수에 대하여 그 결과가 잘 일치하지 않았다. 이는 기대 밖의 결과로서 그 원인을 분석하였다. 광안대교는 강바닥판과 트러스 수평재 사이가 비합성으로 거동하도록 설계가 되어 있지만 이 부분은 설계 당시부터 실제 거동이 어떻게 이루어질지는 불확실한 부분이었다. 따라서 이 연결부를 합성거동 하는 것으로 가정하고 연결조건을 수정한 해석모델은 추가의 업데이트 과정 없이 대부분의 모드에 대하여 계측값과 5% 내의 오차만을 보이는 고유진동수를 산정하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 해석모델은 광안대교 실제 고유진동수를 잘 구현함을 확인하였으며 또한 선행연구를 통해 제시하였던 현수교의 계측기반 해석모델 보정 기법의 유용성도 실교량을 통하여 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 지역특성화연구개발사업의 연구비지원(05 지역특성 B05-01)에 의해 수행되었습니다. 또한 기존 계측자료의 활용과 상시진동실험의 수행 협조 등 연구 진행을 도와주신 부산광역시 시설관리공단에 감사 드립니다.