

## 서해대교 유한요소모델 업데이트와 활용

### Updating and Application of Finite Element Model of Seohae Cable-stayed Bridge

박종칠†·이일근\*·길홍배\*\*

Jongchil Park, Ilkeun Lee and Heungbae Gil

#### 3. 유한요소모델 업데이트

##### 1. 서 론

서해대교와 같은 대형 케이블교량에는 체계적인 유지관리와 객관적인 안전성 평가를 위하여 전산화된 교량관리시스템과 함께 계측시스템이 운영되고 있다. 서해대교의 주요 부위에 설치된 계측센서로부터 수집된 데이터는 실시간으로 관리소에 전송되며, 교량의 거동과 및 데이터베이스 축적을 통해 유지관리에 활용된다.

2000년 준공 이후, 서해대교 사장교 구간을 대상으로 구조계를 구현할 수 있는 유한요소모델을 구축하였으며, 이를 계측결과와 실제 교량의 특성을 반영하여 모델 업데이트를 수행하였으며, 그 결과를 유지관리 및 계측시스템 재구축에 활용하였다. 본고에서는 이러한 과정을 논하고자 한다.

##### 2. 대상교량

서해대교 사장교는 총연장 990m의 5경간 연속교(60+200+470+200+60m)로써 강합성형이다(그림 1). 보강형은 폭이 34m이며, H형의 콘크리트 주탑은 높이 182m이다. 케이블은 총 144본으로 37~91가닥의 강연선(strand,  $\phi 15.7\text{mm}$ )으로 구성되어 있다.



그림 1. 서해대교 사장교 전경

##### 3.1 기존자료 및 해석모델을 위한 단면산정

현재의 구조계의 특성을 제대로 반영할 수 있는 해석모델을 만들기 위해 시공 당시의 자료를 최대한 활용하였다. 서해대교 설계 시 사용된 구조계산서에서 시작하여 유지관리 시 활용한 자료까지 모두 검토하였다. 수집된 자료를 토대로 해석모델의 재료상수, 단면상수, 부재 질량, 경계조건 등을 재산정하였다. 구조계산서에서는 재령 28일 기준 탄성계수를 사용하였으나 준공 후의 시간경과에 따른 경화현상을 고려하여 ACI와 CEB/FIP의 산정식을 통해 약 19% 정도 탄성계수가 증가한 것으로 하였다. 보강형의 질량의 경우, 구조계산서의 설계중량과 실측중량과는 차이가 있었으며, 실측중량은 점검레일 등이 포함되어 당초보다 약 4% 증가하였다.

##### 3.2 매뉴얼 튜닝에 의한 기저모델 작성

매뉴얼 튜닝(manual tuning)은 유한요소모델에 입력된 값들을 수동으로 조작하여 모델을 측정치에 맞추는 방법이다. 요소(element) 종류에 따른 영향, 케이블 기하강성행렬의 고려 유무, 주탑과 보강형의 초기축력에 의한 기하강성의 고려 유무, 새그가 고려된 케이블 탄성계수의 고려 유무, 질량 재하방법, 주탑과 보강형의 경계조건, 난간의 강성 고려여부 등의 매개변수 연구를 수행하여 기저모델을 작성하였다. 또한 고유진동수는 온도에 따라 변하는 것이 밝혀졌기 때문에(박종칠 등, 2006) 온도에 의한 고유진동수의 변화를 해석모델 작성에 반영하고자 하였다. 즉, 장기간 계측데이터가 축적된 1~4차 연직모드는 온도와 고유진동수의 상관식을 사용하여 보정하였으며, 그 외 모드들은 이들 네 개 모드 보정계수의 평균값을 취해 보정하였다.

##### 3.3 민감도 기반 최적화를 이용한 모델 개선

서해대교 사장교와 같은 대규모 자유도를 갖는 유한요소 모델 업데이트에서는 일반적으로 실 계측이 가능하고 해석적으로 유의미한 모드를 기준으로 하여 업데이트를 실시한다. 여기서는 2006년 12월에 측정된 계측값에 대해 온도 보정이 수행된 고유진동수를 기반으로 하여 10개 모드를 기준으로 하여 업데이트를 수행하였다. 10개 모드에는 7개

† 교신저자; 한국도로공사 도로교통연구원  
E-mail : pjseven@ex.co.kr  
Tel : (031)371-3338, Fax : (031)371-2715

\* 한국도로공사 도로교통연구원

\*\* 한국도로공사 도로교통연구원

의 연직모드를 포함하여 1개의 수평모드와 2개의 비틀림모드를 포함하였다.

기저 유한요소모델을 업데이트하기 위한 설계변수로서 표 1과 같은 9개의 변수를 선정하였다. 선정된 각 설계변수는 각각의 불확실성을 고려하여 5~15%의 허용 변화폭을 제한폭으로 하였다. 제시한 방법을 통하여 총 14번의 반복계산을 거쳐 초기 5~15%였던 고유진동수의 오차를 0~6%로 줄인 업데이트된 유한요소모델을 얻을 수 있었다. 모델에서 해석된 값이 예측값보다 전체적으로 낮았으며, 모델을 업데이트하면서 고유진동수가 예측값에 접근함을 확인할 수 있었다(표 2).

표 1. 모델 업데이트 후 설계변수의 변화

No.	Parameter	초기설계값	업데이트값	변화율(%)	허용폭(%)
1	강재의 탄성계수	2.10E+07	2.17E+07	3.38	10
2	콘크리트의 탄성계수	3.33E+06	3.74E+06	12.13	15
3	케이블의 탄성계수	1.93E+07	2.11E+07	9.21	10
4	Edge Girder 부재의 단면적	4.25E-01	4.03E-01	-5.11	15
5	Edge Girder의 부재의 단면2차모멘트	5.48E-01	5.94E-01	8.47	15
6	Center Stringer 부재의 단면적	1.10E+00	1.08E+00	-1.69	15
7	케이블의 단면적	1.00E+00	1.09E+00	9.32	10
8	Stringer, Beam 부재의 중량	1.00E+00	1.00E+00	0.33	5
9	Deck 부재의 중량	1.00E+00	9.63E-01	-3.66	5

표 2. 초기모델과 업데이트 모델의 비교

모드 번호	측정 고유진동수 (Hz)	초기모델		업데이트된 모델		모드형상
		고유진동수 (Hz)	오차 (%)	고유진동수 (Hz)	오차 (%)	
1	0.2557	0.2383	-6.80	0.2582	0.98	연직 1차
2	0.3256	0.2909	-10.66	0.3190	-2.03	연직 2차
3	0.3725	0.3197	-14.17	0.3502	-5.99	수평 1차
4	0.4555	0.4268	-6.30	0.4566	0.24	비틀 1차
5	0.5290	0.4896	-7.45	0.5336	0.87	연직 3차
6	0.5762	0.5235	-9.15	0.5767	0.09	연직 4차
7	0.6250	0.5721	-8.46	0.6277	0.43	연직 5차
8	0.7171	0.6798	-5.20	0.7592	5.87	연직 6차
9	0.8140	0.7403	-9.05	0.8081	-0.72	연직 7차
10	0.8333	0.7571	-9.14	0.8255	-0.94	비틀 2차

#### 4. 업데이트된 모델의 활용

서해대교 사장교에서는 2000년 말 준공 이후로 기설치된 점성댐퍼에서 오일 누유 등의 이상 현상이 관측되었다. 일부 케이블에서는 이러한 현상이 계속적으로 반복되어 케이블 댐퍼의 효율적인 유지관리를 위해 케이블의 정밀한 분석이 요구되었다. 이에 사장교 계측결과 정밀분석 및 버페팅 해석을 수행하여 케이블의 parametric excitation 가능성 검토 및 케이블 댐퍼의 적절한 용량기준을 검토하였다. 이 때 정밀 버페팅 해석에는 업데이트된 모델을 사용하였으며, 케이블 고정점에서의 모드별 최대 변위량을 구하였다. 이를 토대로 parametric excitation 가능성이 높은 28개 케이블을 선정하고, 적절한 댐퍼를 설계하여 교체하였

다.



그림 2. 교체된 케이블 댐퍼

서해대교 개통과 더불어 운영을 시작한 계측시스템은 계측장비와 통신장비의 노후화로 인하여 2008년과 2009년에 재구축사업이 수행되었다. 재구축사업에서는 장기적인 관점에서 효율성이 떨어지는 센서는 줄이거나 제외하였으며, GNSS(global navigation satellite system)를 새롭게 도입하였다. 이 때 6개의 GNSS 수신기의 설치위치 설정시 업데이트된 모델을 이용하여 교량의 거동 및 모드형상이 가장 잘 파악되는 위치를 잡았다(그림 3). 또한 24개의 케이블장력계의 배치를 기존 위치에서 진동 모니터링이 유리한 위치로 효율적으로 재배치하였다.

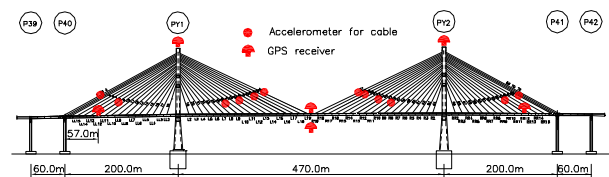


그림 3. GNSS 수신기와 케이블장력계 위치

#### 5. 결 론

서해대교 사장교 구간을 대상으로 계측결과와 실제 교량의 특성을 반영하여 모델 업데이트를 수행하였으며, 그 결과를 유지관리 및 계측시스템 재구축에 활용하였다.

#### 후 기

이 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업 초장대교량사업단(08기술혁신E01)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. 박종칠, 박찬민, 김병화, 이일근, 조병완(2006) 장기계측에 의한 서해대교 사장교의 동특성 평가. 한국지진공학 회논문집, 한국지진공학회, 제10권, 제6호, pp. 115-123.