

내부 및 외부 긴장재로 보강된 PSC 거더의 가속도 응답 특성을 이용한 구조건전성 모니터링

Structural Health Monitoring using Acceleration Response Features of PSC Girder Strengthened with Internal and External Tendons

홍 동 수* · 박 재 형** · 김 정 태*** · 류 연 선****

Hong, Dong-Soo · Park, Jae-Hyung · Kim, Jeong-Tae · Ryu, Yeon-Sun

요 약

본 논문에서는 내부 및 외부 긴장재로 보강된 PSC 거더의 가속도 응답 특성을 이용한 구조건전성 모니터링을 위해 실험 및 수치해석 결과를 비교 분석하는 연구를 수행하였다. 첫 번째로, 내부 및 외부 긴장재로 보강된 모형 PSC 거더를 제작하였다. 두 번째로, 모형 PSC 거더의 형상, 재료 및 경계조건과 긴장재의 배치를 고려하여 초기 유한요소모델을 설계하였다. 세 번째로, 다수의 내부 및 외부 긴장력 조건하의 모형 PSC 거더에 대한 동특성 추출 실험 및 수치해석을 수행하였다. 마지막으로, 실험결과와 수치해석 결과를 비교 분석하여 가속도 응답 특성을 이용한 내부 및 외부 긴장재로 보강된 PSC 거더의 구조건전성 모니터링에 대한 적용성을 검토하였다.

keywords : 프리스트레스트 콘크리트 거더, 유한요소모델, 가속도응답, 구조건전성 모니터링, 긴장재

1. 서 론

구조물의 안전성을 평가하는 방법은 실험을 통해 얻어진 결과를 바탕으로 평가하는 것과 유한요소모델과 같은 수치해석을 통해 얻어진 결과를 바탕으로 평가하는 방법이 있다. 이들 실험해석과 유한요소해석을 상호 보완하는 방법들을 이용하여 개발된 모델들은 다양한 수치해석 기법을 적용할 수 있기 때문에 구조물의 안정성을 평가하는데 유용하게 활용될 수 있다.

본 논문에서는 내부 및 외부 긴장재로 보강된 PSC 거더의 가속도 응답 특성을 이용한 구조건전성 모니터링을 위해 실험 및 수치해석 결과를 비교 분석하는 연구를 수행하였다. 첫 번째로, 내부 및 외부 긴장재로 보강된 모형 PSC 거더를 제작하였다. 두 번째로, 모형 PSC 거더의 형상, 재료 및 경계조건과 긴장재의 배치를 고려하여 초기 유한요소모델을 설계하였다. 세 번째로, 다수의 내부 및 외부 긴장력 조건하의 모형 PSC 거더에 대한 동특성 추출 실험 및 수치해석을 수행하였다. 마지막으로, 실험결과와 수치해석 결과를 비교 분석하여 가속도 응답 특성을 이용한 내부 및 외부 긴장재로 보강된 PSC 거더의 구조건전성 모니터링에 대한 적용성을 검토하였다.

* 학생회원 · 부경대학교 해양공학과 박사과정 king2532@pknu.ac.kr

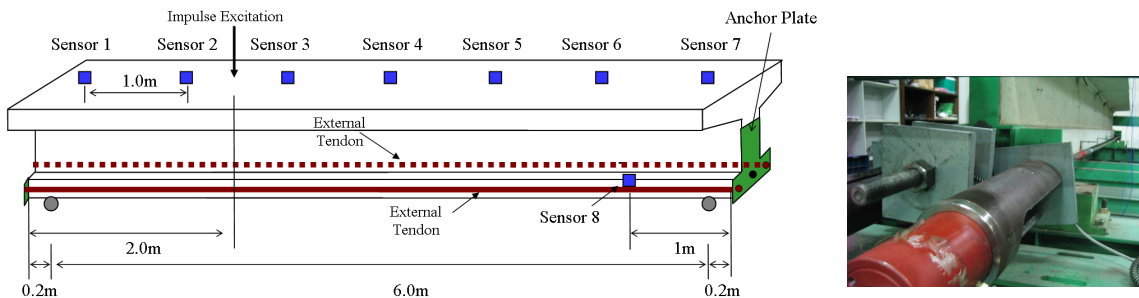
** 정회원 · 부경대학교 해양공학과 박사후연구원 cross96@pknu.ac.kr

*** 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수 idis@pknu.ac.kr

**** 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수 ysryu@pknu.ac.kr

2. 내·외부 긴장재로 보강된 PSC 거더의 실험모델

내·외부 긴장재로 보강된 PSC 거더의 구조건전성 모니터링을 위한 실험모델 및 유한요소모델위한 그림 1(a)과 같이 지간 6m의 모형 PSC 거더를 제작하였다. 긴장력은 포스트텐션방식으로 유압잭을 이용하여 제어되었다. 내·외부 긴장재는 지름 15.2mm의 Grade 250 7-연선을 사용하였다. 대상구조물에 대한 유한요소 모델 설계는 SAP2000을 이용하여 수행되었다. 콘크리트 거더부 및 긴장재는 solid 요소를 이용하여 설계되었으며, 정착판은 frame 요소를 이용하여 설계되었다. 유한요소모델에 사용된 콘크리트와 정착판의 재료 물성치는 다음과 같다. 콘크리트의 탄성계수 $E_c = 2 \times 10^{10} N/m^2$ 이며, 단위 질량 $\rho_{gc} = 2500 kg/m^3$ 이고, 프아송비 $\nu_c = 0.2$ 이다. 정착판의 탄성계수 $E_T = 2 \times 10^{11} N/m^2$ 이며, 단위 질량 $\rho_{gT} = 7850 kg/m^3$ 이고, 프아송비 $\nu_T = 0.3$ 이다. 긴장재의 단위 질량과 프아송비는 정착판과 동일하게 사용되었다. 하지만, 긴장재의 탄성계수는 실험 조건별로 다른 긴장력이 도입되는 것을 고려하여 긴장재를 등가 휨강성으로 가정하여 도입 긴장력을 산출하는 Kim 등(2004)에 의해 등가휨강성모델 식($E_T = L_r^2 T/n^2 \pi^2 I_s$)을 이용하여 산출하였다.



(a) 내부 및 외부 긴장재로 보강된 모형 PSC 거더 (b) 정착판 및 긴장재
그림 1 내부 및 외부 긴장재로 보강된 모형 PSC 거더의 실험구성

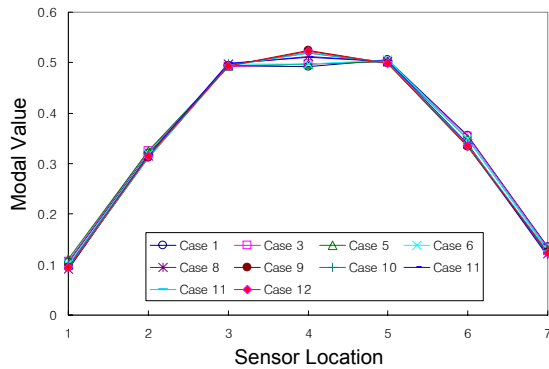
3. 내·외부 긴장재로 보강된 모형 PSC 거더의 진동실험 및 수치해석 결과

내·외부 긴장재로 보강된 모형 PSC 거더의 동특성인 고유진동수와 모드형상을 추출하기 위해 그림 1과 같이 압전형 가속도계(PCB393B04)를 등간격(1m)으로 총 7개(Sensor 1-7)를 콘크리트 거더위에 배치하였다. 또한, 외부 긴장재 위는 Sensor 7에서 0.8m 떨어진 위치에 1개(Sensor 8)를 배치하였다. 고무해머를 이용한 가진을 통해 500Hz의 샘플링 주파수로 60초 동안 가속도 신호를 계측하였다. 긴장력 단계는 표 1과 같이 초기 내부 긴장력 97.02kN과 외부 긴장력 29.40kN에서 내부 긴장력을 순차적으로 내리면서 실험을 수행(Case 1 - Case 5)하고 외부 긴장력을 순차적으로 내리면서 수행(Case 6 - Case 8)하였다. 다시 내부 긴장력을 순차적으로 내리면서 수행(Case 9 - Case 11)되었다. 그림 2는 모형 PSC 거더의 실험으로부터 추출된 거더의 초기 2개의 휨진동모드 형상을 보여준다.

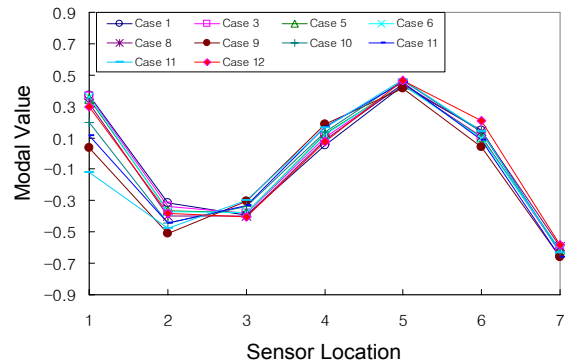
수치해석은 등가휨강성에 관한 식($E_T = L_r^2 T/n^2 \pi^2 I_s$)으로부터 긴장재의 단면 2차모멘트 $I_s = 2.62 \times 10^{-9} m^4$ 와 유효지간 $L_r = 6m$ 을 고려하여 긴장재의 탄성계수 $E_T = 1392199.47 \times T(N/m^2)$ 라는 식으로 간략히 표현할 수 있다. 이 식으로부터 각 긴장력에 대한 내부 및 외부 긴장재의 탄성계수를 계산한 뒤, 이를 유한요소모델에 적용하여 표 1과 같이 내부 및 외부 긴장재로 보강된 모형 PSC 거더의 고유진동수를 산출하였다. 또한, 그림 3은 수치해석을 통해 추출된 거더의 초기 2개의 휨진동모드 형상을 보여준다.

표 1 실험 및 수치해석으로부터 추출된 내·외부 긴장재로 보강된 모형 PSC 거더의 고유진동수

| Case | Tendon Force (kN) | | Total Tendon Force (kN) | Elastic Modulus (N/m ²) for Numerical Analysis | | Natural Frequency (Hz) | | | | | | | |
|------|-------------------|-----------------|-------------------------|--|-----------------|------------------------|--------|-----------------|--------|------------------|--------|-----------------|-------|
| | Internal Tendon | External Tendon | | Internal Tendon | External Tendon | Experimental Result | | | | Numerical Result | | | |
| | | | | | | Girder | | External Tendon | | Girder | | External Tendon | |
| | Mode 1 | Mode 2 | | Mode 1 | Mode 2 | Mode 1 | Mode 2 | Mode 1 | Mode 2 | Mode 1 | Mode 2 | | |
| 1 | 97.02 | 29.40 | 155.82 | 1.353E+14 | 4.099E+13 | 21.45 | 112.24 | 12.82 | 25.15 | 40.19 | 124.16 | 24.27 | 67.02 |
| 2 | 87.22 | 30.38 | 147.98 | 1.216E+14 | 4.236E+13 | 21.32 | 110.27 | 12.94 | 25.39 | 40.12 | 123.98 | 24.58 | 67.90 |
| 3 | 77.42 | 30.38 | 138.18 | 1.079E+14 | 4.236E+13 | 21.21 | 109.17 | 13.06 | 25.51 | 40.03 | 123.77 | 24.58 | 67.89 |
| 4 | 68.20 | 31.36 | 130.92 | 9.564E+13 | 4.372E+13 | 21.05 | 108.09 | 13.06 | 25.64 | 39.94 | 123.56 | 24.87 | 68.73 |
| 5 | 56.84 | 31.36 | 119.56 | 7.925E+13 | 4.372E+13 | 20.84 | 106.66 | 13.18 | 25.86 | 39.77 | 123.20 | 24.87 | 68.71 |
| 6 | 57.82 | 19.60 | 97.02 | 8.061E+13 | 2.733E+13 | 20.40 | 104.90 | 10.61 | 20.75 | 39.75 | 123.25 | 20.60 | 56.72 |
| 7 | 58.80 | 15.68 | 90.16 | 8.198E+13 | 2.186E+13 | 20.22 | 104.37 | 9.40 | 18.56 | 39.74 | 123.25 | 18.73 | 51.61 |
| 8 | 59.78 | 5.88 | 71.54 | 8.334E+13 | 8.198E+12 | 19.37 | 101.69 | 5.98 | 11.84 | 39.63 | 123.19 | 11.97 | 32.88 |
| 9 | 38.20 | 6.86 | 51.92 | 5.465E+13 | 9.564E+12 | 18.81 | 95.42 | 6.59 | 12.94 | 39.18 | 122.28 | 12.87 | 35.30 |
| 10 | 17.64 | 8.82 | 35.28 | 2.459E+13 | 1.230E+13 | 18.78 | 93.01 | 7.20 | 14.25 | 37.97 | 119.88 | 14.45 | 39.61 |
| 11 | 4.90 | 9.80 | 24.5 | 6.831E+12 | 1.366E+13 | 18.92 | 90.29 | 7.57 | 14.89 | 35.31 | 114.08 | 15.16 | 41.87 |

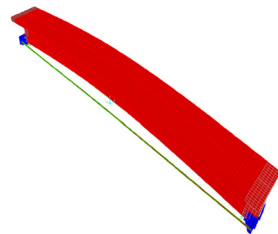


(a) 거더의 모드형상(Mode 1)

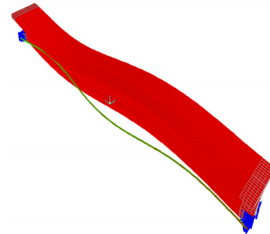


(b) 거더의 모드형상(Mode 2)

그림 2 내·외부 긴장재로 보강된 모형 PSC 거더의 진동모드 형상



(a) 거더의 모드형상(Mode 1)



(b) 거더의 모드형상(Mode 2)

그림 3 내·외부 긴장재로 보강된 모형 PSC 거더의 수치해석을 통해 추출된 모드형상 (Case 1)

4. 내·외부 긴장재로 보강된 PSC 거더의 긴장력과 고유진동수의 상관관계

그림 4는 내·외부 긴장재로 보강된 모형 PSC 거더의 실험 및 수치해석으로부터 도출된 고유진동수와 긴장력간의 상관관계를 나타낸다. 그림 4(a)와 4(b)는 거더부의 초기 2개의 모드(Mode 1과 Mode 2)에 대한 거더의 내부 긴장력과 고유진동수간의 상관관계를 보여준다. 그림 4(c)와 4(d)는 외부 긴장재의 초기 2개의 모드(Mode 1과 Mode 2)에 대한 외부 긴장재의 긴장력과 고유진동수간의 상관관계를 보여준다.

거더부 Mode 1과 Mode 2로부터 거더의 내부 긴장력과 고유진동수 상관관계는 실험의 경우, 15% 내외의 고유진동수 변화조건하에서 긴장력 변화를 모니터링하였다. 수치해석의 경우, 10% 내외의 고유진동수 변화조건하에서 긴장력 변화를 모니터링하였다. 외부 긴장재의 Mode 1과 Mode 2로부터 외부 긴장력과 고유진

동수 상관관계는 실험의 경우, 40% 내외의 고유진동수 변화조건하에서 긴장력 변화를 모니터링하였다. 수치해의 경우 37% 내외의 고유진동수 변화조건하에서 긴장력 변화를 모니터링하였다.

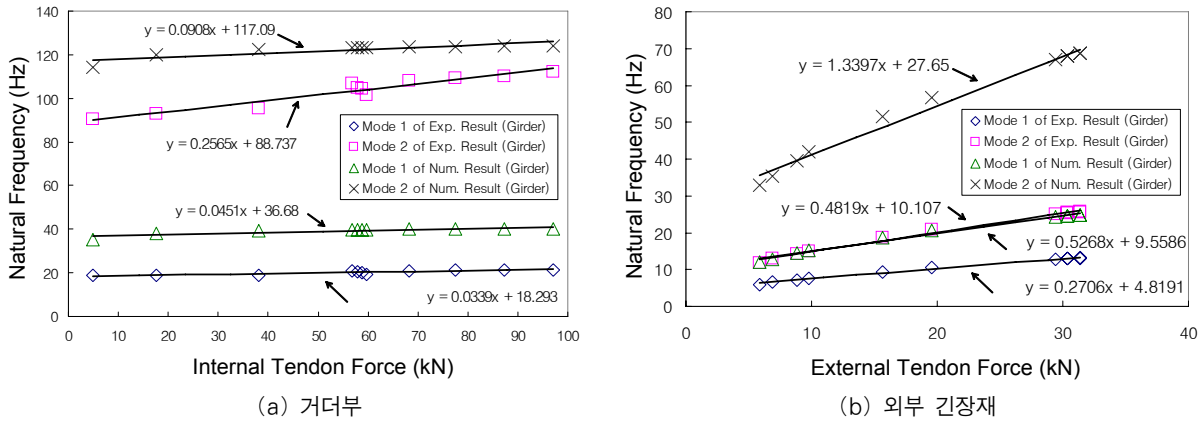


그림 4 실험 및 수치해석으로부터 추출된 고유진동수와 긴장력간의 상관관계

5. 내·외부 긴장재로 보강된 PSC 거더의 구조건전성 모니터링

그림 5와 같이 거더에서 도출된 고유진동수를 이용하여 긴장력 변화를 모니터링하였다. 모니터링을 위한 기법은 Kim 등(2004)에 의해 제안된 고유진동수기반 긴장력 손실검색 기법을 이용하였다. 이 기법을 적용하기 위해서는 기본적으로 긴장력이 완전히 제거된 상태의 고유진동수가 필요하다. 이에, 앞 선 고유진동수와 긴장력간의 상관관계로부터 도출된 선형관계식을 이용하여 긴장력이 제거된 상태의 고유진동수를 추론하였다. 실험의 경우, 18.29Hz(Mode 1)과 88.74Hz(Mode 2)를 도출하였으며, 수치해석의 경우, 36.68Hz(Mode 1)과 117.09Hz(Mode 2)를 도출하였다. 긴장력 변화를 모니터링한 결과, 실험의 경우 오차가 매우 적은 결과를 보였으나, 수치모델의 경우 오차가 매우 큰 결과를 보였다. 차후 수치해석 결과의 고유진동수가 실험과 다른 경향을 보이는 원인에 대한 구조식별 차원의 추가적인 연구가 필요하다.

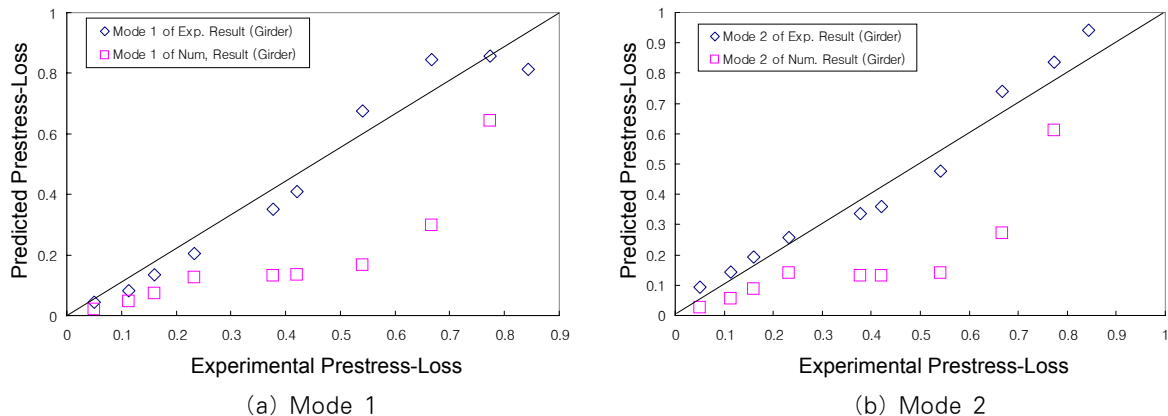


그림 5 실험 및 수치해석으로부터 추출된 고유진동수를 이용한 긴장력 변화 모니터링 결과

참고문헌

Kim, J.T., Yun, C.B., Ryu, Y.S., Cho, H.M. (2004) Identification of prestress-loss in PSC beams using modal information, *Structural Engineering and Mechanics*, 17(3-4), pp.467~482.