

PS 콘크리트 교량의 진동기초 손상검색체계

Vibration-Based Damage Identification Scheme for Prestress Concrete Bridges

김 정 태* 류 연 선* 조 현 만** 정 성 오***
Kim, Jeong-Tae Ryu, Yeon-Sun Cho, Hyun-Man Chung, Sung-Oh

ABSTRACT

A practical damage identification scheme for PS concrete bridges via modal testing and system identification (SID) procedures is presented. The potential damage types are classified and the possible approaches which can be implemented into each damage type are designed. Damage identification algorithms are developed on the basis of the SID and modal analysis. The feasibility of the algorithms is verified from experimental tests to detect damage in PS concrete beam structures.

1. 서 론

기존의 NDE기술에 의한 대형구조물의 손상검색의 어려움을 극복하는 관점에서 구조물의 진동거동 특성의 변화를 감지하여 구조거동 및 구조특성의 변화를 검색하려는 연구 노력은 보편화되고 있으며, 대형 교량의 구조손상을 검색하기 위해서는 진동기초 손상검색기술의 개발이 매우 절실하다. 또한, 현재까지 많이 의존하고 있는 대형구조물의 전역적 손상검색알고리즘은 진동모드특성치 변화량의 직접적 산정방법(예, MAC, CoMAC 등)에 의존하고 있다. 이에 비하여, 손상 발생 전과 후의 대상구조물의 진동모드 특성치를 계측하고, SID기법을 통해 진동모드민감도를 계산하고, 이를 사용하여 구조손상도를 검색하는 진동기초 SID방법의 개발에 대한 연구가 활발하다.^{(1),(2)}

본 연구에서는 다수의 복합거동이 발생하는 PS콘크리트 교량 구조물의 프리스트레스 긴장력의 감소 또는 구조강도의 저하 등의 구조손상도를 진동모드실험과 SID체계를 이용하여 추정하는 비파괴진단체계를 발표하고자 한다. 연구의 대상인 PS콘크리트 교량은 연속인장부재인 케이블과 콘크리트 부재의 조합으로 구성되

* 부경대학교 해양공학과 교수

** 부경대학교 해양공학과 박사수료

*** 부경대학교 해양공학과 석사과정

어 복합적인 진동거동이 발생하며, 극히 적은 수의 진동모드만이 작은 계측오차 범위에서 측정 가능한 구조

물이다. 이를 위하여 다음의 세 단계로 연구를 수행하였다. 첫째, PS콘크리트 교량 구조물의 구조특성과 손상특성을 파악하고 손상추정전략을 설정하였다. 둘째, 진동모드실험과 SID체계를 이용하는 PS콘크리트 교량 구조물의 비파괴 손상추정체계를 설계하였다. 셋째, 기존의 발표된 실험실 축소모형 실험 결과를 사용하여 PS콘크리트 손상추정체계의 적합성과 적용성을 검증하였다.

2. PS콘크리트 교량의 손상유형과 손상추정전략

PC부재의 긴장력은 여러 가지 원인에 의해 감소되는데, 이는 크게 두 가지 형태로 분류할 수 있다. 먼저, 프리스트레스 도입 시에 콘크리트 탄성변형과 마찰 및 정착 단의 활동에 의하여 프리스트레스 긴장력이 감소한다. 다음으로, PC부재의 사용 중에 콘크리트의 건조수축과 크리프, PC강재의 리랙세이션, PC강재의 응력 부식과 PC 강재의 피로균열 등의 원인에 의한 긴장력 감소가 발생한다. 이와 같은 프리스트레스량의 감소는 콘크리트 부재의 휨 저항 능력의 감소를 유발시키며, 전역적인 구조손상으로 분류된다.

PC 강선의 긴장력의 변화가 콘크리트 부재의 휨 강성을 변화시키는 거동은 고유진동해석으로부터 관찰될 수 있다. 하지만, 최근까지 프리스트레스 긴장력의 감소에 의한 휨 강성의 저하를 고유진동특성의 변화로부터 추정하려는 연구들은 성공적이지 못하였다. Saiidi⁽³⁾는 PS콘크리트 교량을 대상으로 PC강선의 긴장력의 변화가 모드특성에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. PS콘크리트 교량의 진동모드거동에 관한 수학적 인 모델의 해석결과와 실험계측결과와의 차이를 규명하기 위하여 PC강재의 긴장력과 콘크리트 구조체의 휨강성간의 상호관계에 관한 경험식을 제시하였다. Williams⁽⁴⁾는 최근 발표된 연구결과에서, Saiidi의 연구와 유사한 관점에서, 포스트텐션 슬래브의 긴장력 감소와 고유진동특성의 변화와의 관계를 실험적으로 제시하였다. 이 연구에서는 프리스트레스 긴장력을 모델링하는 수치해석적 시도가 없었으며, 계측된 고유진동수를 이 상적인 수학모델의 고유진동수 값과 비교하였다.

콘크리트 보의 균열은 휨 부재 사용성 및 안정성에 영향을 미치는 중요한 인자이며, 이와 같은 균열을 방지하기 위해서는 부재의 소요강성이 확보되어야 한다. 콘크리트 자체의 문제, 긴장력의 감소 및 기타 여러 문제에 기인하여 발생하는 콘크리트 휨 인장균열은 구조체의 휨 강성의 국부적 또는 전역적인 감소를 초래한다. 또한 이와 같은 콘크리트 구조체의 국부적 또는 전역적인 휨 강성의 변화를 모드특성의 변화로부터 추정하려는 연구들이 활발히 수행되고 있다. Kim⁽⁵⁾은 콘크리트 슬래브 구조물을 대상으로 공동형태의 콘크리트 균열이 진동모드 특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 계측된 진동특성의 변화를 해석하여 도입된 콘크리트 손상부위를 색출할 수 있는 손상검색체계를 제시하였다.

3. PS콘크리트 구조의 진동기초 SID 손상추정방법

긴장된 인장부재인 케이블의 동적 진동모드해석에 대한 기존의 연구들로부터 긴장력과 보의 휨 강성과의 기본적인 관계를 이해할 수 있다. 그림 1은 정적 축 방향 하중 N 하의 단순 지지된 케이블을 보여준다. 이 구조부재에 대한 동적 평형방정식과 경계조건으로부터 다음과 같은 고유진동수 식을 유도할 수 있다.⁽⁶⁾

$$\omega_n^2 = \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \frac{L}{m} \quad (1)$$

여기서, n =모드번호, L =지간길이, N =긴장력, m =단위길이당 부재질량이다.

만일 인장된 인장부재를 동등한 경계조건과 기하학적 형상을 갖는 휨 부재로 변환한다면, 이는 다음과 같이 단순 보의 고유진동수에 관한 식으로 표현할 수 있다.

$$a\omega_n^2 = \left(\frac{n\pi}{L}\right)^4 \frac{EI}{m} \quad (2)$$

긴장된 단순지지 인장 케이블의 고유진동수와 변환된 단순보의 고유진동수에 대한 식(1)과 식(2)로부터 긴장력과 휨 강성의 관계식을 얻을 수 있다.

$$aEI^* = fN \frac{L}{n\pi} \quad (3)$$

여기서, 매개수 N 는 인장케이블의 긴장력, f 는 계수, aEI^* 는 등가 변환된 휨 강성이다.

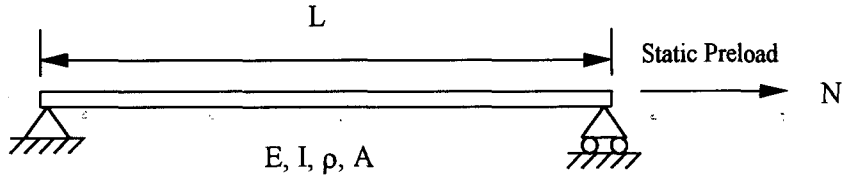


그림 1. Preloaded cable

이상의 식(1)-식(3)의 적용으로부터 PS콘크리트 교량 구조물에 대한 2가지 형태의 해석이 가능하게 된다. 첫째는, 계측된 PC 강선의 긴장력을 콘크리트 휨 부재의 등가 휨 강성으로 모델화하는 작업이 가능케 된다. 이로부터 PS콘크리트 구조물의 기본모델(baseline model)을 구할 수 있게된다. 둘째는, 첫 번째 과정의 역 해석 과정으로서, 계측된 고유진동수로부터 휨 부재의 휨 강성 및 등가 변환된 인장케이블의 긴장력을 추정할 수 있게된다.

4. PS콘크리트 구조 손상추정방법의 검증

4.1 실험구조물

실험대상 구조물은 그림 6과 같은 PS콘크리트 보로서 Saiidi등에 의해 Nevada 대학의 실험실에서 실험되었다.⁽³⁾ 철근콘크리트 보는 Grade 60의 종방향 인장철근과 압축철근, 그리고 수직방향 스테럽으로 보강되었다. 프리스트레스 긴장재로서는 Grade 250의 직경 7연선을 사용하였는데, 0.5inch 직경의 연선을 그라우팅되지 않은 1in 직경의 쉬스에 위치시켰다. 콘크리트는 포틀랜드 시멘트와 최대직경 0.5inch 굵은골재를 사용하여 만들어졌는데, 28일 압축강도가 2,950 psi 였다.

전체 7개의 가속도계가 보의 고유진동특성을 측정하기 위해 수직방향으로 설치되었으며, 여러 축방향하중 레벨에서 진동모드실험이 수행되었다. 먼저, 각각의 계획된 프리스트레스력으로 정하중을 재하하여 케이블을

단에 정착한 후에 수직방향 충격가진을 사용하여 진동모드 반응이 측정되었다. 최대 프리스트레스 긴장력은 29,510lb였으며, 0 으로부터 29,510 lb 까지 프리스트레스 긴장력을 증가하며 고유진동 계측실험을 수행하였다. 계측된 진동반응은 FFT분석기를 통해 초기 2개 진동모드인 첫 번째 휨 진동모드와 두 번째 휨 진동모드의 고유진동수로 분석되었다. 선정된 10개의 시나리오의 2개 진동모드의 고유진동수 계측 값이 표1에 요약되었다.

표 1. Experimentally Measured Frequencies

Case	Prestress Force (lb)	Frequency	
		Mode 1 (f1)	Mode 2 (f2)
1	0	11.41	43.99
2	3492	12.09	44.11
3	6010	13.47	44.89
4	8108	12.89	44.69
5	12723	13.63	45.42
6	18180	14.49	45.57
7	20280	14.72	46.32
8	26990	14.72	45.86
9	29090	14.97	46.10
10	29510	15.07	45.87

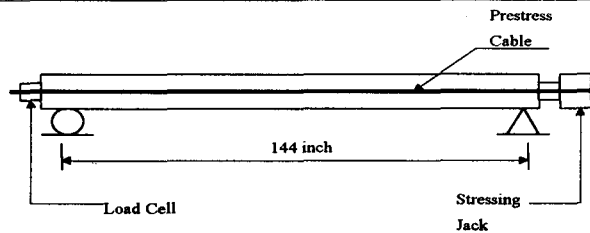


그림 2. Prestressed Concrete Beam (1in=25.4mm)

4.2 시스템 식별

FE Model

초기 유한요소모델 (initial FE model)은 전체 28,512개의 8절점 3-D block 요소로 구성되었다. 기본모델 추정을 위하여 2개의 요소그룹으로서 Concrete 그룹과 Steel-Tendon 요소 그룹을 선정하였다. 구조물 기하학적 형상 및 경계조건은 그림 3에 도시되었다. 또한 초기유한요소모델의 역학적 특성으로서 (1)Concrete 요소그룹의 경우 : 프아송비 $\nu=0.18$, 탄성계수 $E = 3.6 \times 10^6$ psi, 밀도 $\rho=2.27 \times 10^{-4}$ lb · s²/in⁴ (2) Steel-Tendon 요소그룹의 경우 : $\nu=0.3$, 탄성계수 $E = 30 \times 10^6$ psi, 밀도 $\rho=7.33 \times 10^{-4}$ lb · s²/in⁴ 등을 입력하였다.

다음과정으로서, 요소그룹 "Concrete"와 "Steel-Tendon"의 진동모드에 대한 민감도를 검토하였다. 초기2개의 진동모드에 대하여 두 요소 그룹 모두 매우 큰 민감도를 보였다. Steel-Tendon 요소그룹의 강성도 특성치는 상대적으로 신뢰할 수 있으며, 요소그룹의 개선과정에서 값을 고정하였다. 또한, 단일요소그룹 "Concrete"를 튜닝하기 위하여 첫 번째 모드만을 사용하였다. 식(1)-식(3)이 계산되었으며, 구조물의 고유진

동수는 표 1의 프리스트레스 긴장력의 "0"인 경우의 $f_1=11.41$ Hz를 사용하였다. 식(3)의 구조 강성도와 고유진동수의 관계로부터 유한요소모델의 최적화가 수행되었다. 표 2와 표 3에는 최적화 반복과정으로부터 얻어진 구조특성치와 고유진동수 값을 각각 요약하였다. 실험계측 고유진동수에 비교하여 초기유한요소모델의 고유진동수는 큰 차이를 보였으며, 개선된 모델의 고유진동수는 대단히 수렴한 결과를 보여주고 있다. 그림 4는 개선된 유한요소모델의 모드 1과 모드 2의 모드형상을 보여주고 있다.

Math Model

PS콘크리트 보가 프리스트레스 긴장력을 받으면, 휨강성의 변화가 발생하며 고유진동수의 변화로 관찰될 수 있다. 먼저, PC강선이 긴장된 경우에 적합하도록 Math Model을 유도하였으며, 식(3)으로부터 긴장력 N 과 PC 강선의 등가변환 휨 강성 aEI^* 을 계산하였다.

$$aEI^* = 8.175 \times 10^7 + 2.103 \times N (lb \cdot in^2) \quad (4)$$

다음으로, 표 1의 긴장력을 식(4)에 대입하여 PS콘크리트 보의 휨 강성을 계산하고, 이 값을 사용하여 고유진동수를 추정하였다. 긴장력 각각의 경우에 대하여 개선된 FE Model과 Math Model의 고유진동수가 예측되었다. 표 4는 계측된 공유진동수와 두 모델로부터 추정된 고유진동수들을 요약한 결과이다. 고유진동수 예측치와 추정치의 비교를 통해 두 모델 모두 오차범위가 1%~4%임을 알 수 있었다.

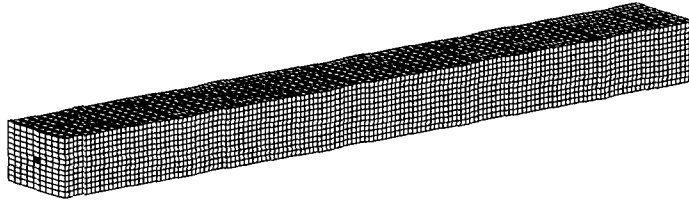


그림 3. Schematic of FE Model



(a) Mode 1



(b) Mode 2

그림 4. Mode Shapes of the Updated FE Model

표 2. FE Model Update

Element Group	Initial FE Model		Updated FE Model	
	E (psi)	ρ (lb · s ² /in ⁴)	E* (psi)	ρ (lb · s ² /in ⁴)
Concrete	3.6×10^6	2.27×10^{-4}	1.962×10^6	1.8×10^{-4}
Steel-Tendon	30×10^6	7.33×10^{-4}	30×10^6	7.33×10^{-4}

표 3. Modal Identification

Mode	Frequency (Hz)			
	Experiment	Initial FE Model	Updated FE Model	Math Model
1	11.41	17.177	11.196	11.409
2	43.99	42.300	44.074	45.635

4.3 손상추정

계측된 고유진동수의 변화와 SID알고리즘을 사용하여 손상유형인 “프리스트레스 긴장력의 감소”를 추정하고자 앞 절에서 제시된 모델을 사용하였으며, 고유진동수의 변화를 PS콘크리트 보의 휨 강성의 변화를 추정하고, 이를 통해 긴장력의 변화를 예측하였다. 먼저 식(2)로부터 고유진동수 계측치의 변화와 PS콘크리트 휨 강성의 변화를 연관시키는 식을 유도하였다.

$$\Delta(EI) = (EI)_T - (EI)_L \tag{5}$$

여기서, $\Delta(EI)$ = 휨 강성의 변화량, $(EI)_T$ = 완전한 긴장력하의 휨강성, $(EI)_L$ =긴장력이 감소할 때의 휨 강성이다. 식(5)로부터 추정된 PS콘크리트 보의 휨 강성의 변화량은 케이블 부재의 긴장력의 변화량 (ΔN)로 산정되었다.

$$\Delta N = \Delta E_s \cdot g(L, I_s) \tag{6}$$

여기서, ΔE_s 는 PC강선의 탄성계수 변화량이며 I_s 는 PC강선의 단면2차모멘트이다.

표 1의 10개 손상시나리오에 대하여 긴장력을 예측하였다. 먼저, Case 10의 계측 진동수를 사용하여 긴장력을 예측하였으며, Case 1~Case 9의 각각의 경우를 Case 10과 비교하여, 고유치의 상대적 감소를 긴장력의 감소로 예측하였다. 표 5과 그림 6은 실제 실험 측정된 긴장력과 예측된 긴장력을 비교한 것이다.

표 4. Measured Frequencies Vs Analyzed Frequencies

Case	N (lb)	Experiment		FE Model		Math Model	
		f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)	f ₁ (Hz)	f ₂ (Hz)
1	0	11.41	43.99	11.196	44.047	11.409	45.635
2	3.492	12.09	44.11	11.689	46.047	11.808	47.233
3	6.010	13.47	44.89	12.032	47.403	12.088	48.352
4	8.108	12.89	44.69	12.311	48.503	12.316	49.266
5	12.723	13.63	45.42	12.902	50.836	12.804	51.217
6	18.180	14.49	45.57	13.568	53.461	13.358	53.433
7	20.280	14.72	46.32	13.816	54.437	13.565	54.262
8	26.990	14.72	45.86	14.578	57.438	14.207	56.828
9	29.090	14.97	46.10	14.809	58.346	14.402	57.608
10	29.510	15.07	45.87	14.855	58.525	14.441	57.763

표 5. Measured Prestress Force Vs Predicted Prestress Force

Case	Measured Prestress Force (lb)	Measured Prestress Force Level (A)	Predicted Prestress Level (B)
1	0	0.0	0.019
2	3492	0.118	0.181
3	6010	0.204	0.538
4	8108	0.275	0.368
5	12723	0.431	0.581
6	18180	0.616	0.827
7	20280	0.687	0.895
8	26990	0.915	0.895

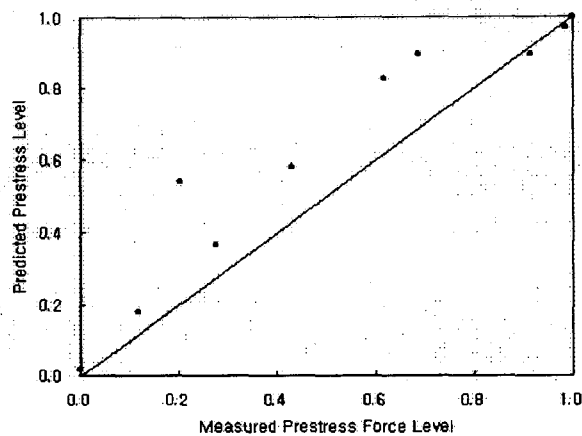


그림 6. Prediction of Prestress Level

5. 결 론

PS콘크리트 구조물에 프리스트레스 긴장력의 감소 및 구조강도의 저하로 인한 손상이 발생하였을 때, 이를 진동모드실험과 SID체계를 이용하여 추정할 수 있는 알고리즘을 제시 하였다. PS콘크리트 교량은 연속 인장부재인 케이블과 콘크리트 부재의 조합으로 구성되어 복합적인 진동거동이 발생하며, 극히 적은 수의 진동모드만이 작은 계측오차 범위에서 측정가능한 구조물이다. 프리스트레스 긴장력의 변화와 부재 휨 강성의 변화가 진동모드 특성치에 미치는 영향에 대한 연구는 유럽과 미국을 중심으로 진행되어 왔으며, 역 해석과정으로서, 진동모드 특성치의 변화를 사용하여 구조부재 특성의 변화를 역 해로서 추정하는 데에 관한 연구의 어려움이 제기되어 왔다.

본 연구의 연구결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저, PS콘크리트 교량구조물의 구조특성과 손상특성을 파악하고 손상추정전략을 설정하였다. 다음으로, 진동모드실험과 SID체계를 이용하는 PS콘크리트교량 구조물의 손상추정모델들을 설계하였다. 본 논문에서는 이들중에서 프리스트레스력의 저하 형태의 구조 손상도를 추정할 수 있는 진단 모델에 대해서만 언급되었다. 마지막으로, 기존의 발표된 실험실 축소모형실험의 실험

결과를 사용하여 PS콘크리트 손상추정체계의 적합성과 적용성을 검토하였다.

실험구조물로서 진동모드 특성치가 계측된 PS콘크리트 단순보가 사용되었으며, 다음과 같은 연구결과를 얻었다. 첫째, 제시된 “고유진동수의 변화와 시스템 식별 개념”을 사용하여 PC긴장력의 변화를 콘크리트 보의 휨 강성으로 환산하였다. 프리스트레스 긴장력하의 콘크리트 보의 고유진동수가 환산된 보의 고유진동수와 근사하게 일치하였다. 둘째, 유도된 추정모델과 계측된 고유진동수를 사용하여 역 해로서 PC긴장력의 변화 추이를 예측하였다. 모드실험 오차와 추정모델의 오류에 기인하는 긴장력 예측오차를 보였다.

감사의 글

본 연구는 98년도 한국과학재단 핵심연구비(과제번호 981-1201-003-1) 지원에 의한 연구의 일부로서 한국과학재단의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Kim, J.T., and Stubbs, N., "Model Uncertainty and Damage Detection Accuracy in a Plate-Girder Bridge", J. of Structural Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 10, 1995.
2. Yun, C.B., Lee, H.J., and Lee, C.G., "Efficient Damage Assessment of Structures using Substructural Identification", Proc. of APCOM '96, Vol. 2, pp. 1067-1072, 1996.
3. Saidi, M., and Douglas, B., and Feng, S., "Prestress Force Effect on Vibration Frequency of Concrete Bridges", J. of Structural Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 7, 1994.
4. Williams, M.S., and Falati, S., "Modal Testing of a Post-Tensioned Concrete Model Floor Slab", Proc. of IMAC, Vol. 1, 1998.
5. Kim, J.T., "Damage Detection in Reinforced Concrete Structures using Modal Response Parameters", 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 6, No. 1, 1994.
6. Clough, R.W., and Penzien, J., Dynamics of Structures, McGraw Hill, USA, 1982.