

진동 시험을 통한 PSC 보의 손상탐지에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on Damage Detection of PSC Beams using Vibration Test

정 우 태* 박 증 섭** 박 영 환*** 유 영 준*
Jung, Woo-Tai Park, Jong-Sup Park, Young-Hwan You, Young-Jun

Abstract

PSC bridges are deteriorated by many reasons and are difficult to measure residual prestressing forces. It is considered that one of the methods for measuring the prestressing forces is vibration test.

This study reports on the change of natural frequency for damaged PSC beams using vibration test which have been carried out to evaluate the effects of cross-section and Prestressing forces on natural frequency of PSC beams. According to the results of vibration test results, natural frequency is more sensitive to the changes of cross-section than those of prestress.

1. 서론

PSC 교량은 시공 후 또는 외부 프리스트레스 보강 후, 시간이 지남에 따라 여러 가지 요인에 의하여 성능저하 현상이 발생한다. 이러한 현상은 교량의 경우 중차량 및 통행차량의 증가 요인에 의해 발생되며 프리스트레스 및 단면 손실이 가속화되어 보강을 필요로 하게 된다. 이러한 손실에 의한 구조물의 성능을 평가하기 위한 방법으로 내하력 평가방법이 사용되고 있지만 PSC 교량의 경우 잔존 프리스트레스 힘의 측정이 어려우므로 여러 가지 추정방법에 의해 프리스트레스 힘을 추정하고 있는 실정이다. PSC 교량의 프리스트레스 힘의 추정에 관한 기존의 연구 중에서 기존 구조물에 손상을 주지 않으면서도 프리스트레스 힘을 효과적으로 측정할 수 있는 방법은 진동법이라 판단된다.

따라서, 본 논문은 PSC 교량 및 외부 프리스트레스 보강공법의 성능 평가에 있어서 진동법의 적용성을 고찰하기 위해 고유진동수의 영향인자를 분석하고, 긴장력과 보강방법 등을 변수로 한 고유진동수 측정을 수행하였다.

* 한국건설기술연구원 연구원

** 한국건설기술연구원 선임연구원

*** 한국건설기술연구원 수석연구원

2. 고유진동수의 영향 인자 분석

단순 지지된 보에 있어서 고유진동수는 식(1)을 사용하여 단순식으로 계산할 수 있다. 식(1)에서 알 수 있듯이 고유진동수는 부재의 질량과 강성, 지간길이의 영향을 받는다. 일반적으로 공용중인 교량에 있어서 눈에 띄는 손상이나 추가 하중이 없다면 지간길이와 고유진동수를 실측하는 것에 의해 교량의 강성 변화를 추정할 수 있다. 고유진동수에 영향을 미치는 또 다른 인자로 축력의 변화가 연구되었다. 표 1의 식(2)~(5)는 이러한 연구에서 제안된 축력을 고려한 고유진동수를 산정하는 추정식들이다.

표 1 고유진동수 추정식

연구자	제안식	
	$f_n = \frac{\pi^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	식(1)
Tse	$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-\left(\frac{\pi m}{L}\right)^2 \frac{N}{m} + \left(\frac{\pi m}{L}\right)^4 \frac{EI}{m}}$	식(2)
M. Saiidi	유효강성 $(EI)_e = \left(1 + 1.75 \frac{N}{f_c A_c}\right) EI_g$	식(3)
	$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-\left(\frac{\pi m}{L}\right)^2 \frac{N}{m} + \left(\frac{\pi m}{L}\right)^4 \left(1 + 1.75 \frac{N}{f_c A_c}\right) \frac{EI_g}{m}}$	식(4)
A. Dall'Asta	$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m} \left[\frac{n^4 \pi^4}{L^4} \left(E_b \frac{N}{A_b} \right) I_b - \frac{n^2 \pi^2}{L^2} N \right]}$	식(5)

3. 실험 개요

본 실험은 PSC 콘크리트 교량의 성능저하나 교통하중의 변화로 인해 교량의 성능을 향상시킬 필요가 발생할 경우를 가정하여 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer) 및 외부 긴장으로 보강했을 경우의 성능 회복 효과 및 성능 향상 정도를 고유진동수 측정으로 검토하기 위한 것으로서 DB18로 설계된 폭 8.5m, 경간장 30m인 PS 콘크리트교의 표준도(건설연구사, 1974)를 근거로 하여 지간 6m의 축스 모형 실험체를 제작하였다. 콘크리트 압축강도는 주형과 바닥판이 각각 350, 240kgf/cm², 내부 긴장재는 SWPC 7B로서 공칭직경이 12.7mm이었다. 또한, 상기 표준도의 안전계수(공칭강도/소요강도)를 동일하게 고려하여 실험체에 도입할 긴장력을 결정하였다. CFRP 쉬트는 H사의 NR72 제품을 주형 하부에 대해 시공하였으며, 외부 프리스트레싱은 12.7mm 강선 두 가닥을 2점 절곡으로 배치한 후 각 강선별로 3tonf의 인장력으로 프리스트레스(이하 PS)를 도입하였다. 4점 휨재하를 실시하였으며, 설계 PS가 모두 도입된 실험체와 손실이 발생한 것을 모사하기 위해 PS력의 30%를 임의 손실시킨 실험체에 대해 각각 CFRP 쉬트와 외부 프리스트레싱에 의해 보강을 실시하였다. 실험변수는 앞서 이론적으로 고찰한 축력의 변화와 EI의 변화를 변수로 설정하였다. 고유진동수 계측은 그림 2와 같이 시험체 중앙에 가속도계를 부착하고 시험체의 일부분에 고무망치로 일정한 충격을 준 후 가속도계로부터 응답을 측정하였다. 진동수 계측은 손상전 고유진동수와 손상후 고유진동수의 변화를 측정하기 위해 손상 전후에 각각 측정을 실시하였다. 손상전의 진동수 계측은 주로 긴장력 손실 및 추가된 긴장력이 고유진동수에 미치는 영향을 검토하기 위함이며, 손상후의 진동수 계측은 단면 손실이 고유진동수에 미치는 영향을 검토하기 위함이다. 데이터 수집장치로는 OPTIM Electronics의 MEGADAC과 AD 684H-1 모듈을 사용하였으며, 본 연구에 사용된 모든 신호처리는 범용프로그램인 nSoft를 사용하였다.

표 2 PSC보 실험체 명칭 및 변수

변수명	보강방법	보강량	설계프리스트레스힘	실험변수
CONTROL	무보강	-	39.177 tonf	내부긴장력 100%
T30NR	무보강	-	27.424 tonf	내부긴장력 70%
CFRPT100	CFRP	25cm × 2매	39.177 tonf	내부긴장력 100% + 외부긴장력 30% 추가
CFRPT70		25cm × 2매	27.424 tonf	내부긴장력 70% + 외부긴장력 30% 추가
EXPT100	외부 긴장	6tonf	39.177 tonf	내부긴장력 100% + 외부긴장력 30% 추가
EXPT70	외부 긴장	6tonf	27.424 tonf	내부긴장력 70% + 외부긴장력 30% 추가

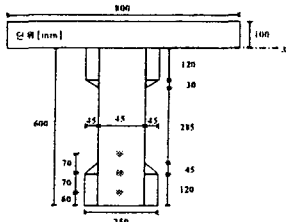


그림 1 중앙단면 제원

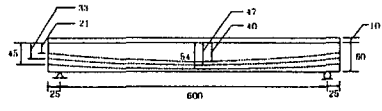


그림 2 내부 긴장재의 위치(단위 : cm)

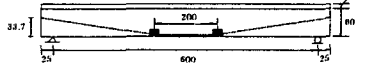


그림 3 외부 긴장재의 위치(단위 : cm)

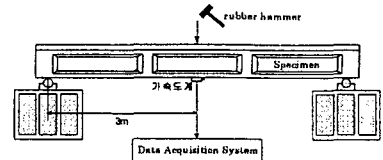


그림 4 진동 측정

4. 실험결과 및 분석

4.1 손상전 고유진동수의 변화

4.1.1 긴장력 변화 및 변화에 따른 고유진동수

표 3은 식(1), 식(2), 식(4), 식(5)을 통해 각 시험체의 고유진동수를 나타냈으며, 그림 5는 control 시험체를 기준으로 하여 각 시험체에 다르게 적용된 긴장력의 비율을 고유진동수의 변화와 비교하여 나타내었다. 내부 긴장력 손실에 대한 변수를 살펴보면 30%의 내부 긴장력이 손실된 t30nr 시험체는 control 시험체에 비해 1.1% 감소되었다(식(4)). 또한, control 시험체에 대하여 내부 긴장력 손실이 없는 외부 긴장 보강 시험체 expt100의 고유진동수는 1.1% 증가하였고 내부 긴장력이 손실된 외부 긴장 보강 시험체 expt70의 고유진동수 변화는 없는 것으로 나타났다. 시험체에 도입된 긴장력의 차이가 50%로 가장 큰 t30nr과 expt100 시험체의 고유진동수는 2.2%로 그 차이가 작게 나타났다. 이론식에 의한 시험체의 긴장력 손실 및 추가 긴장력에 대한 고유진동수의 변화는 도입되는 긴장력이 50%나 차이나더라도 고유진동수의 변화에 2.2%에 불과하였다. 그림 6은 CFRP 슈트 보강에 의한 단면 변화에 따른 고유진동수의 변화를 나타내었다. 이론값에 의한 고유진동수의 변화는 CFRP 슈트 강에 대한 I값의 변화가 control에 비해 0.8%로 미미한 증가를 보였으며, 고유진동수의 변화는 0.4% 증가로 차이가 더 작은 것으로 나타났다.

표 3 고유진동수(이론값) [Hz]

	control		t30nr		expt100		expt70		cfrpt100		cfrpt70	
	①	①/①	②	②/①	③	③/①	④	④/①	⑤	⑤/①	⑥	⑥/①
식(1)	30.77	1	30.77	1	30.77	1	30.77	1	30.90	1.004	30.90	1.004
식(2)	30.70	1	30.72	1	30.68	0.999	30.70	1	30.83	1.004	30.85	1.004
식(4)	31.98	1	31.62	0.989	32.33	1.011	31.97	1	32.12	1.004	31.76	1.004
식(5)	30.70	1	30.72	1	30.70	1	30.72	1	30.83	1.004	30.85	1.004

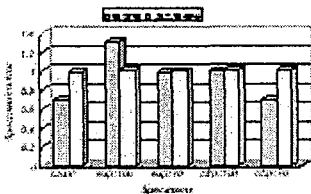


그림 5 긴장력 변화에 따른 고유진동수의 변화

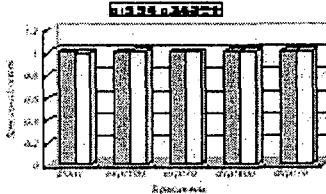


그림 6 I 변화에 따른 고유진동수의 변화

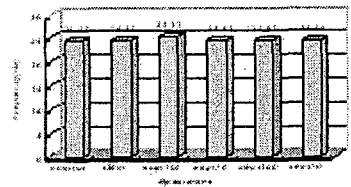


그림 7 실측된 고유진동수

4.1.2 각 시험체에서 실측된 고유진동수

그림 7은 진동 측정으로 얻어진 실측 고유진동수를 나타내었다. t30nr과 expt70 및 cfrpt100과 cfrpt70의 실측 고유진동수를 살펴보면 내부 긴장력의 손실과 외부 긴장 보강은 고유진동수에 영향을

미치지 않는 것으로 나타났다. t30nr과 cfrpt70을 살펴보면 내부 긴장력이 손실된 같은 조건에서 CFRP 쉬트 보강된 cfrpt70은 무보강 시험체 t30nr과 비교해 볼 때 고유진동수의 증가가 거의 없는 것으로 나타났다. 또한, 내부 긴장력이 30% 감소된 시험체를 외부 긴장 보강을 한다거나 CFRP 쉬트로 보강했을 때 보강에 대한 고유진동수의 변화가 없으므로 진동법에 의해 외부 긴장 보강 및 CFRP 쉬트로 보강한 구조물의 보강 효과를 판단하기에는 미흡한 것으로 판단된다.

4.2 손상 후 고유진동수의 변화

시험체에 대한 두 번째 고유진동수 측정은 강성의 변화에 따른 고유진동수의 변화를 살펴보기 위하여 정적 재하에 의해 압축축 균열이 발생할 정도로 시험체에 손상을 가한 후 실시하였다. CFRP로 보강된 시험체의 경우 정적 재하 도중 CFRP의 부착과파괴가 발생하여 가속도 측정을 하지 않았으며, 최종적으로 손상 후의 고유진동수 측정은 control, t30nr, expt100, expt70 시험체에 대해 실시하였다. 표 4는 이론적인 해석에 의하여 각 시험체에 대해 손상 후의 단면 2차 모멘트를 유효 단면 2차모멘트로 대입하여 고유진동수를 산정하여 나타낸 것이다. 유효단면 2차 모멘트 계산결과, 손상 후의 I_e 는 손상 전의 I 의 10% 정도인 것으로 나타났으며, 이에 따른 고유진동수의 변화는 표 4에서와 같이 손상 전 고유진동수의 30% 정도로 나타났다. 따라서 균열 발생 이후의 유효단면의 변화가 손상 전에 비하여 크게 감소하고 고유진동수의 변화도 크므로, 고유진동수 측정으로 단면의 손상을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

표 4 파괴 후 고유진동수(Hz)

계산 근거	control	t30nr	expt100	expt70
식(1)	9.77	9.75	10.61	10.03
식(2)	9.55	9.59	10.35	9.82
식(4)	9.96	9.88	10.93	10.24
식(5)	9.55	9.59	10.41	9.88
손상 후(식(4))/ 손상 전(식(4))	0.31	0.30	0.34	0.32

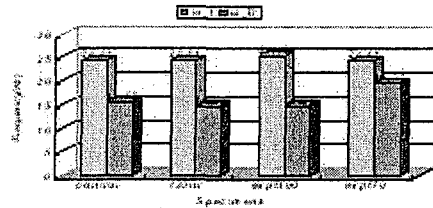


그림 8 손상전후의 고유진동수 변화

5. 결론

본 실험 결과로 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 축력이 고유진동수에 미치는 영향이 미미하므로 진동 측정으로 긴장력 손실의 영향 및 보강효과를 검증하는 것은 어려울 것으로 판단된다.
- (2) 고유진동수 산정시 축력의 영향이 미미하므로 일반적인 단순식으로도 고유진동수를 충분히 산정할 수 있으리라 판단된다.
- (3) 파괴 후 고유진동수의 변화가 확연히 드러나므로 건전 상태의 고유진동수를 측정한다면 단면 손실에 따른 손상 정도를 진동수 측정으로 가늠할 수 있으리라 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부, 콘크리트 교량의 보수보강 재료 품질기준 및 공법 평가기준 개발, 2003.
2. M. Saiidi, "Prestress Force Effect on Vibration Frequency of Concrete Bridges", Journal of Structural Engineering, V. 120, No. 7, 1994.
3. 심중성 외 1명, "진동시험을 통한 R/C Beam의 보강효과 검증기법", 콘크리트 학회, 1994년도 가을 학술발표회 논문집, pp.255-260.
4. 건설연구사, "<건설부제정>표준설계도집원", 1974.