

부착식 텐던의 긴장력과 유효 강성의 상관성 연구

A Study on the Correlation between the Prestress Force and the Effective Rigidity of the Bonded Tendon

장 정 범* · 이 홍 표** · 황 경 민*** · 송 영 철****

Jang, Jung-Bum · Lee, Hong-Pyo · Hwang, Kyeong-Min · Song, Young-Chul

요 약

프리스트레싱 시스템이 도입된 구조물의 사용수명이 오래됨에 따라, 이들 구조물의 잔존수명 평가와 보수 및 보강 등의 유지관리 차원에서 프리스트레싱 시스템의 현재 긴장력에 대한 평가는 매우 중요한 현안이 되어왔다. 따라서, 본 논문에서는 프리스트레싱 시스템의 현재 긴장력을 평가하기 위한 첫 단계로서 프리스트레싱 시스템의 긴장력이 구조계의 강성에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위하여 부착식 텐던 형식의 프리스트레싱 시스템이 도입된 시험체를 대상으로 SIMO sine sweep test를 수행하고 긴장력과 시험체의 유효 강성에 대한 상관성을 규명하였다. 그 결과, 프리스트레싱 시스템의 긴장력은 시험체의 유효 강성을 증가시키며, 저차 고유진동수가 긴장력과 높은 상관성을 지니는 것으로 나타났다.

keywords : 부착식 텐던, 긴장력, 유효 강성, Compression softening effect, SIMO sine sweep test

1. 서 론

토건구조물의 경우 주로 철근 콘크리트구조를 채택하여 왔으나, 1950년대 이후 프리스트레싱 시스템에 대한 기술력의 비약적인 발전으로 인하여 원자력발전소 및 장대교량 등 많은 토건구조물에 그 사용이 크게 증가하여 왔다. 그리고, 이들 프리스트레싱 시스템이 도입된 구조물의 사용수명이 오래됨에 따라, 이들 구조물의 잔존수명 평가와 보수 및 보강 등의 유지관리 차원에서 프리스트레싱 시스템의 현재 긴장력에 대한 평가는 매우 중요한 현안이 되어왔다. 따라서, 프리스트레싱 시스템의 현재 긴장력을 평가하기 위하여 비부착식 텐던의 경우에는 프리스트레싱 시스템에 직접 Lift-Off test를 수행하거나, 일부 비파괴시험을 이용하여 긴장력을 평가하는 기술이 개발되어 왔지만, 부착식 텐던의 경우에는 비파괴시험의 한계로 인하여 거의 기술개발이 전무한 실정이다(NCHRP, 1999). 특히, 프리스트레싱 시스템이 도입된 구조계의 강성에 미치는 긴장력의 효과를 정량화하기 위한 시도는 전무한 실정이다(Saïdi, 1994). 따라서, 본 논문에서는 프리스트레싱 시스템의 긴장력이 구조계의 강성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 부착식 텐던 형식의 프리스트레싱 시스템이 도입된 시험체를 대상으로 SIMO sine sweep test를 수행하고, 긴장력과 시험체의 유효 강성에 대한 상관성을 규명하였다.

* 정희원 · 한국전력공사 전력연구원 책임연구원 jbjang@kepri.re.kr

** 정희원 · 한국전력공사 전력연구원 선임보연구원 hplee@kepri.re.kr

*** 한국전력공사 전력연구원 선임보연구원 hkm316@kepri.re.kr

**** 한국전력공사 전력연구원 수석(갑)연구원 ycsong@kepri.re.kr

2. Compression Softening Effect

식(1)과 같이 이론적으로 균질한 보에 도입된 축방향력의 존재는 Compression softening effect 로 인하여 보의 고유진동수를 변화시킨다(Timoshenko, 1974). Compression softening effect 는 외부에서 작용하는 압축력이 보의 횡방향 강성을 약화시켜, 횡방향 하중으로 인한 처짐은 증가하고, 보의 고유진동수는 감소한다는 개념이다.

$$\omega_n^2 = -\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \frac{N}{m} + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^4 \frac{EI}{m} \quad (1)$$

여기서, n : 모드 수, L : 지간, N : 축방향력, m : 보의 단위길이 당 질량, E : 탄성계수, I : 보의 단면 2차 모멘트이다.

이러한 개념에 대하여 많은 연구자들이 상반되는 여러 주장을 제기하고 있지만 이들 모두 충분한 수학적, 해석적 증거를 제시하지 못하고 있어 많은 논란이 되고 있다(Kanaka, 1986; Miyamoto, 2000; Deak, 1996).

3. SIMO sine sweep test

부착식 텐던의 긴장력과 구조계의 강성에 대한 상관성을 분석하기 위하여 총 6개의 시험체가 제작되었으며, 이들 시험체의 길이는 8.0 m 이고 단면적은 $0.09(0.3 \times 0.3 \text{ m}) \text{ m}^2$ 이다. 시험체의 콘크리트 압축강도는 35.0 MPa 이고, 시험체에 도입되는 긴장력을 측정하기 위하여 시험체 한 끝단에 로드셀을 설치하였다. 일단 긴장방식으로 각 시험체에 도입된 최종 긴장력은 0 kN, 146 kN, 264 kN, 356 kN, 465 kN 및 523 kN 이다.

부착식 텐던의 긴장력과 구조계의 강성에 대한 상관성을 분석하기 위한 매개변수로서 식(1)과 같이 고유진동수를 선정하였으며, 긴장력에 대한 고유진동수의 변화를 분석하기 위하여 SIMO(Single Input Multiple Output) sine sweep test 가 수행되었다. 시험 중 발생하는 가속도 응답신호를 계속하기 위하여 그림 1과 같이 Piezo-electrical 형식의 가속도계 9 개를 시험체에 설치하였고, 또한 그림 1의 P7 지점에 가진기를 설치하여 2 ~ 150 Hz 의 주파수 범위에서 20 N 으로 가진하였다. 이때 가진 주파수 증가율은 0.05 Hz/s 이다.

SIMO sine sweep test 수행 결과, 각 긴장력별 측정된 고유진동수는 표 1과 같다. 표 1에서 알 수 있는 바와 같이 긴장력이 증가할수록 고유진동수도 그에 비례하여 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이는 식(1)에서 나타난 Compression softening effect 와 반대되는 경향으로서, Compression stiffening effect가 발생하는 것으로 판단된다.

4. 긴장력과 유효 강성의 상관성

4.1. Saiidi 의 연구결과

Saiidi 는 EI 로 정의되는 유효 강성과 고유진동수의 상관성을 분석하기 위하여 길이 12 ft, 단면이 20 in.^2 ($4 \text{ in.} \times 5 \text{ in.}$) 이며, 콘크리트 압축강도가 20.3 MPa 인 보를 제작하고, 다양한 긴장력에 대해 자유진동시험을 수행하였다. 자유진동시험을 위하여 균등한 간격으로 7개의 가속도계를 시험체에 설치하고 수직방향 가속도를 측정하였으며, FFT 를 이용하여 1 차 고유진동수를 구하였다. 그림 2에 Saiidi 가 측정한 1 차 고유진동

수에 의한 유효 강성과 긴장력의 상관성을 나타내었다.

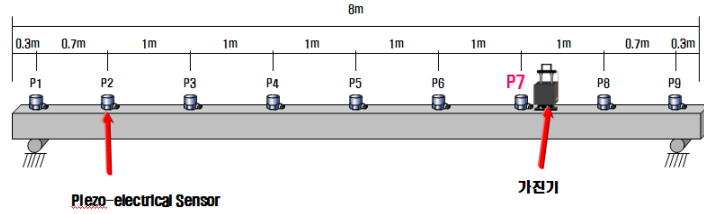


그림 1 SIMO sine sweep test

표 1 SIMO sine sweep test에 의한 고유진동수

긴장력 (kN)	1 st Mode (Hz)	2 nd Mode (Hz)	3 rd Mode (Hz)	4 th Mode (Hz)
0	7.567	28.223	101.095	133.812
146	8.190	26.609	100.727	135.912
264	8.498	29.583	102.160	145.208
356	8.672	30.269	102.814	144.053
465	8.690	30.331	104.474	144.280
523	8.757	30.241	103.231	144.522

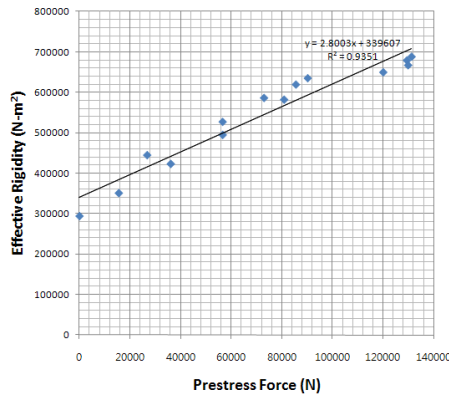


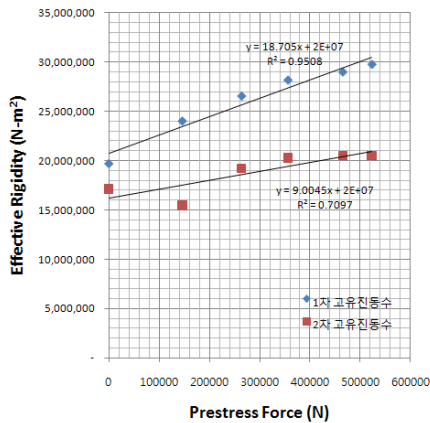
그림 2 Saïidi 에 의한 긴장력과 유효 강성의 상관성

4.2. 본 연구결과

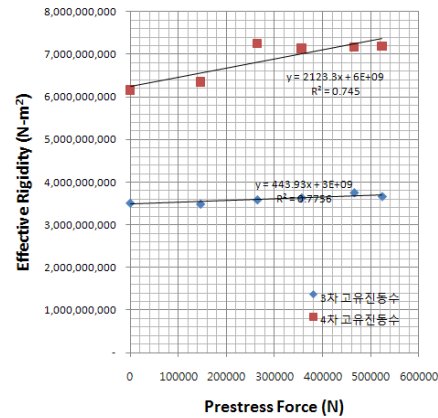
SIMO sine sweep test에 의하여 측정된 표 1의 고유진동수를 이용하여 긴장력과 유효 강성의 상관성을 분석하였고, 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 저차 진동수가 고차 진동수보다 긴장력과 큰 상관성을 지니는 것으로 나타났으며, 이는 식 (1)을 무차원화 하였을 때, 축방향력의 변화에 대한 고유 진동수의 민감도가 모드 수가 증가할수록 감소하는 경향과 일치함을 알 수 있다. 또한, 본 연구 및 Saïidi의 연구결과에서 나타난 것처럼 긴장력이 구조계의 강성에 Compression softening effect 보다는 Compression stiffening effect를 지니는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 프리스트레싱 시스템의 긴장력이 구조계의 강성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 부착식 텐던 형식의 프리스트레싱 시스템이 도입된 보를 대상으로 SIMO sine sweep test를 수행하고 긴장력과 보의 유효 강성에 대한 상관성을 규명하였다. 본 연구결과, 프리스트레싱 시스템의 긴장력은 Compression stiffening effect 로 인하여 시험체의 유효 강성을 증가시키며, 저차 고유진동수가 고차 고유진동수에 비하여 긴장력과 높은 상관성을 지니는 것으로 나타났다.



(a) 1차 및 2차 고유진동수



(b) 3차 및 4차 고유진동수

그림 3 본 연구결과에 의한 긴장력과 유효 강성의 상관성

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 원전기술 혁신사업으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- NCHRP (1999) Nondestructive Methods for Condition Evaluation of Prestressing Steel Strands in Concrete Bridges.
- Saiidi, M., Douglas, B., Feng, S. (1994) Prestress Force Effect on Vibration Frequency of Concrete Bridges, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 7, pp.2233~2241.
- Timoshenko, S., Young, D.H., Weaver, W.J.R. (1974) *Vibration Problems in Engineering*, Wiley.
- Kanaka, K., Venkateswara, G. (1986) Free Vibration Behavior of Prestressed Beams, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 112, No. 7, pp.433-437.
- Miyamoto, A., Tei, K., Nakamura, H., Bull, J.W. (2000) Behavior of Prestressed Beam Strengthened with External Tendons, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 9, pp.1033-1044.
- Deak, G. (1996) Prestress Force Effect on Vibration Frequency of Concrete Bridges-Discussion, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 122, No. 4, pp.458-459.