

# 외부 비부착 강선에 의해 보강된 PSC보의 영향인자 분석

## Analysis of Influence Factors for PSC Beams with Unbonded External Tendons

곽효경\* · 손제국\*\* · 김선용\*\*\* · 박영환\*\*\*\*

Kwak, Hyo-Gyoung · Son, Je-Kuk · Kim, Sun-Yong · Park, Young-Hwan

### Abstract

Many uncertainties affecting to the structural behavior of prestressed concrete (PSC) bridges reinforced with the unbonded external tendons are analyzed on the basis of the analytical method introduced in the companion paper. Many design parameters, which must be considered in design procedure, such as friction slip at the deviators, number of deviators, time-dependent deformations of concrete, relaxation of tendon and influence of loading history in PSC bridges are reviewed, and a lot of valuable results are obtained through this parametric study. In advance, the structural responses according to the external tendon profiles are analyzed to grasp if an optimum tendon profile depends on the applied loading type, and the obtained results show that the most stable structural response is revealed when the locations of deviators are coincident with the loading points.

**Keywords :** *unbonded external tendon, deviator, eccentricity, friction slip, nonlinear analysis, time dependent behavior*

### 요 지

앞 편의 논문에서 제안된 수치해석을 토대로 외부 비부착 강선에 의해 보강된 PSC 부재에 영향을 주는 여러 인자들을 분석하였다. 설계과정에서 반드시 고려되어야 할, 편향부에서의 미끄러짐, 편향부의 개수, 콘크리트의 시간의존적 변형, 긴장재의 응력 이완, 그리고 하중이력의 영향과 같은 많은 설계변수들을 검토하였으며, 설계변수들의 연구를 통해 중요한 결과들을 얻었다. 나아가 최적 강선 배치형상이 작용하는 하중 형태에 의존하므로, 외부 비부착 강선의 배치형상에 따른 구조물의 거동을 파악하기 위해 분석하였다. 이를 통해 편향부의 위치와 하중의 위치가 일치할 때 가장 안정적인 구조물의 거동을 보임을 알 수 있었다.

**핵심용어 :** 외부 비부착 강선, 편향부, 편심량 변화, 미끄러짐 현상, 비선형 해석, 시간의존적 거동

### 1. 서 론

앞의 논문에서는 외부 비부착 강선에 의해 보강된 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 부재에서 외부 비부착 강선의 정착부와 편향부 사이에서의 직선 거동, 콘크리트와 긴장재의 다른 거동으로 인한 편심량 변화에 따른 2차 효과 그리고 편향부에서의 마찰력과 미끄러지는 힘(driving force)의 평형관계에 의한 미끄러짐 현상 등 다양한 영향인자를 고려한 비선형 해석 기법을 개발하였으며, 실험 결과 값들과의 비교를 통해 제안된 해석모델의 검증과 그 효율성을 비교하였다.

기존 PSC부재를 외부 비부착 강선을 이용하여 보강할 경우 다양한 영향인자에 의해 저항력에 많은 차이를 나타내게 된다. 따라서 이 논문에서는 개발된 비선형 해석기법을 토대로 편향부에서의 마찰계수와 미끄러짐 현상, 편향부 개수, 하중의 재하와 제하, 외부 비부착 강선배치 형상, 그리고 시간의존적 거동에 대하여 외부 비부착 강선의 보강에 따른 PSC 보의 거동 특성을 파악하여 보다 효과적인 구조물의

보강이 이루어지도록 하기 위한 방안을 강구하고자 한다. 따라서 다양한 설계인자의 변화에 따른 영향을 살펴보기 위해 그림 1에서 보는 바와 같이 길이 3 m, 높이 30 cm, 폭 30 cm의 T형 철근 콘크리트 단순보를 해석 대상 구조물로 설정하였으며, 콘크리트의 압축강도는  $f'_c = 34.3$  MPa이며, 철근은 인장(As1)과 압축(As2)측에 각각 4 cm<sup>2</sup>, 2 cm<sup>2</sup>가 배근된 것으로 항복강도는  $f_{sy} = 343.2$  MPa,  $f_{sy} = 539.4$  MPa를 각각 사용하였다. 그리고 철근은 보의 바닥을 기준으로 인장과 압축 철근이 각각 5.0 cm, 27.5 cm에 위치하는 것으로 설정하였다. 또한 외부 비부착 강선을 면적은 1.1 cm<sup>2</sup>이며, 항복강도는  $f_{py} = 1448.0$  MPa이고 극한강도는  $f_{pu} = 1861.6$  MPa으로 가정하였다.

### 2. 편향부에서의 마찰계수와 미끄러짐 현상에 따른 영향

편향부는 강선의 마찰력을 초과하지 않는 낮은 하중효과에서는 고정단으로 거동하나, 하중효과가 증가하여 편향부 양

\*정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 부교수(E-mail: khg@kaist.ac.kr)  
\*\*한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사(E-mail: sonjekuk@kaist.ac.kr)  
\*\*\*한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사(E-mail: kimsunyoung@kaist.ac.kr)  
\*\*\*\*정회원 · 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원(E-mail: yhpark@kict.re.kr)

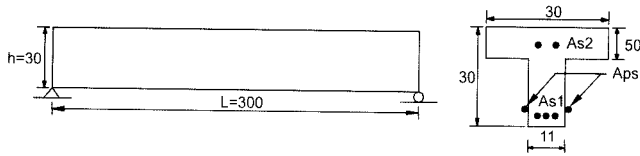


그림 1. 적용 대상 구조물의 형상 (단위: cm)

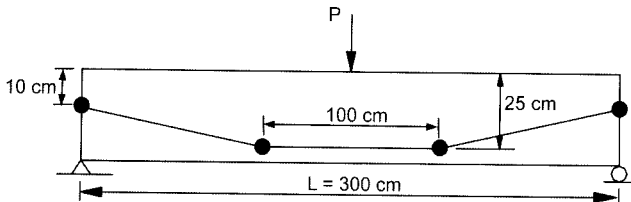


그림 2. 미끄럼과 마찰계수에 대한 외부 비부착 강선의 설치형상

쪽의 외부 비부착 강선에 작용하는 긴장력 차이가 편향부에 작용하는 마찰력보다 클 경우 편향부에서의 미끄럼 현상이 발생하여 외부 비부착 강선의 이동 및 프리스트레스 효과가 급격히 감소하는 현상을 유발하는 것으로 알려지고 있다 (Ariyawardena 등, 2002; Harajli 등, 1999; Rao, 1996). 따라서 마찰계수가  $\mu=0.0$ 인 경우는 저항하는 마찰력이 없기 때문에 편향부 양쪽의 외부 비부착 강선의 긴장력 차이가 있을 경우 미끄럼이 항상 일어나게 된다. 그러나 일반적으로 편향부에서의 마찰계수가 존재하므로 편향부에서 외부 비부착 강선의 긴장력 차이에 의한 미끄럼 현상이 일어난다면, 마찰력에 의해 미끄럼이 일어나지 않을 때까지 편향부 양쪽의 긴장력의 재분배가 일어난다.

앞 편의 논문에서 언급된 마찰력과 미끄러지는 힘(driving force)과의 차이에 따른 힘의 재분배를 통한 편향부에서의

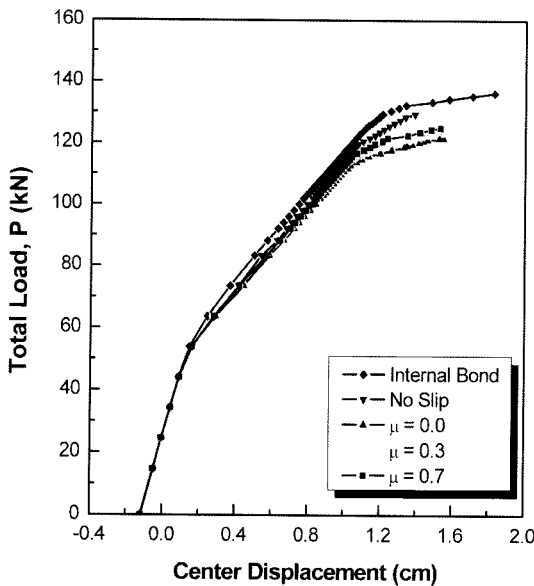
미끄럼 현상을 알아보기 위해 2개의 편향부와 절곡형태의 외부 비부착 강선이 배치된 PSC T형보를 그림 2와 같이 나타내었다. 그림 2에서 절곡형태의 외부 비부착 강선의 배치는 마찰계수에 따른 마찰력의 영향을 알아보기 위해서이며, 편심의 변화에 따른 2차 효과의 영향을 줄이기 위해서이다. 외부 비부착 강선의 초기 긴장력이  $0.8f_{py}=1176.8$  MPa으로 설정하였다.

그림 3은 내부 부착 강선과 편향부에서 미끄럼이 발생하지 않는 No Slip, 그리고 마찰계수( $\mu$ ) 값이 0.0, 0.3, 0.7인 미끄럼이 발생하는 경우에 대하여 중앙부의 집중하중에 대한 PSC 보의 중앙부 처짐과 외부 비부착 강선에 걸리는 응력을 나타내었다. 그리고 표 1에서 최대처짐, 극한하중, 그리고 강선의 최대응력을 비교하였다. 표 1과 그림 3에서 보는 바와 같이 내부 부착 강선에 대한 최대처짐, 극한하중 그리고 강선의 응력이 가장 큼을 알 수 있다. 이는 극한강도의 경우 외부 비부착 강선에 대한 편심의 2차 효과와 미끄럼 현상이 없이 긴장력에 의한 PSC 보의 보강이 이루어지기 때문이며, 외부 비부착 강선의 경우보다 처짐이 큰 이유는 외부 비부착 강선과 다르게 콘크리트 구조물에서 인장철근과 함께 인장을 부담해주는 역할을 수행하기 때문으로 판단된다. 그리고 외부 비부착 강선에 대한 처짐의 경우 편향부에서의 마찰계수에 대한 영향이 크지는 않지만, 마찰계수값이 커짐에 따라 최대처짐도 줄어들음을 알 수 있다.

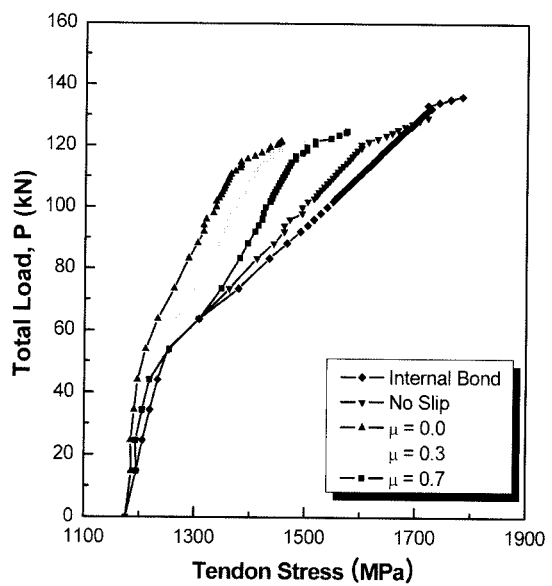
또한 극한하중의 경우는 표 1에서 보는 바와 같이 내부 부착과 완전슬립( $\mu=0.0$ )의 경우 약 12%의 극한하중의 차이를 가지는 것을 알 수 있으며, 마찰계수값이 커짐에 따라 극한하중값이 내부 부착 강선의 극한하중값에 근접해져서 미끄럼이 발생하지 않는 No Slip의 경우 내부 부착 강선의 극한하중값

표 1. 마찰계수에 따른 최대처짐, 극한하중과 강선의 최대응력

	Internal Bond	No Slip ( $\mu=$ )	$\mu=0.0$	$\mu=0.3$	$\mu=0.7$
최대처짐(mm)	18.3	13.9	15.5	15.4	15.3
극한하중(kN)	136.2	129.4	121.5	123.0	125.4
강선의 최대응력(MPa)	1781.6	1719.9	1454.3	1504.3	1573.9



(a) 하중과 중앙부 처짐 관계



(b) 하중과 중앙부 강선의 응력 관계

그림 3. 미끄럼 현상과 마찰계수에 따른 해석결과

에 근접함을 알 수 있다. 이는 No Slip 인 경우 마찰계수값이 커지므로 미끄러움이 발생하지 않아 중앙부의 긴장력이 재분배되지 않고 작용하게 되며, 외부 비부착 강선의 절곡형태로 인해 편심에 의한 2차효과의 영향이 작게 미치므로 거동이 내부 부착 강선과 비슷해지는 것으로 판단된다. 나아가 그림 3의 (b)에서 보는 바와 같이 마찰계수값이 클수록 힘이 상대적으로 크게 작용하는 중앙부 외부 비부착 강선의 응력이, 힘이 상대적으로 작게 작용하는 인접한 다른 영역으로 전달이 용이하지 않게 된다. 이에 미끄러움이 없는 경우 중앙부 외부 비부착 강선에서 가장 큰 응력을 나타내게 되어 내부 부착 강선의 값과 비슷하게 되는 것을 알 수 있다. 또한 긴장재에 의한 부모멘트 증가로 인해 더 많은 반대방향의 응력을 보강하게 되어 집중하중에 대한 정모멘트 저항력을 증가시키게 되므로 극한 하중이 가장 크고, 같은 하중에 대한 작용에서 처짐은 가장 작게 되는 것으로 판단된다.

### 3. 편향부 개수에 따른 영향

편향부는 외부 비부착 강선의 방향 전환 역할을 담당하며 편향부의 개수 증가에 따라 강선과 콘크리트 부재의 변위가 일치하게 되는 곳이 많아지게 된다. 따라서, 편향부의 수가 증가하게 되면 편심량 변화로 인한 주모멘트(primary moment)를 변화시키는 2차 효과(secondary effect)가 적게 발생하며, 편향부 개수가 적은 경우와 비교할 때 부재의 저항능력은 증가함을 알 수 있다. 그러나 편향부의 개수 증가로 인해 외부 비부착 강선을 이용한 보강공법의 장점인 경제적 이점이 줄어들게 되므로, 보강 대상 구조물에 따라 적절한 편향부의 개수를 판단하여 보다 효과적인 시공이 이루어지도록 할 필요가 있다.

따라서, 편향부 개수에 따른 영향을 알아보기 위하여 그림 4에서 보는 바와 같이 편향부 없이 외부 비부착 강선이 정착부에 의해 설치된 경우, 편향부가 1개, 2개, 3개, 그리고 5개 설치된 경우, 그리고 외부 비부착 강선의 거동과 비교하기 위하여 내부 완전부착 강선에 대한 구조물을 대상으로

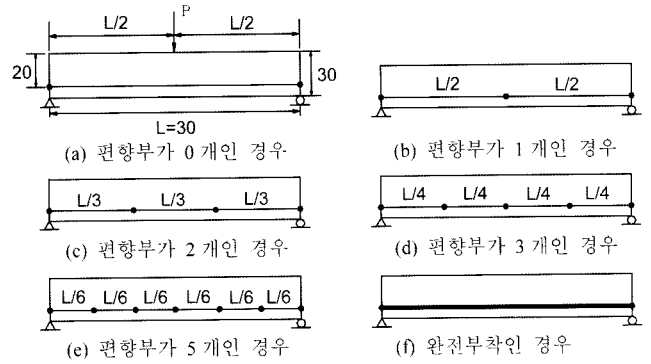


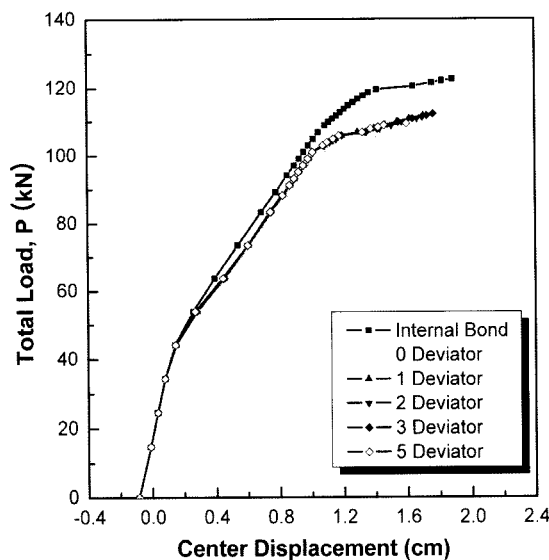
그림 4. 편향부 개수에 따른 영향 해석 대상 구조물(단위: cm)

해석하였다. 또한, 편향부에서 미끄러움에 대한 영향을 함께 검토하기위해 마찰계수  $\mu=0.0$ 인 경우와 미끄러움이 발생하지 않는 No Slip의 경우에 대해 각각 해석하였으며, 긴장재의 초기 긴장력은 1176.8 MPa로 설정하였다.

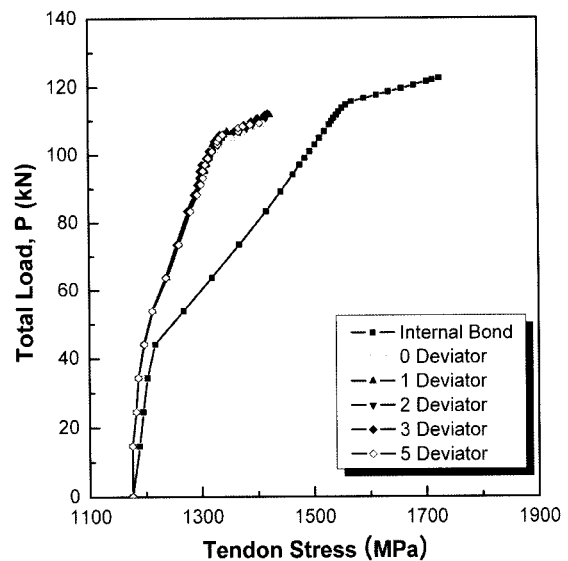
해석 결과를 나타내는 그림 5와 6에서 보는 바와 같이 초기 구조물에서 균열이 발생하지 않는 탄성구간에서는 편향부의 개수에 상관없이 거의 동일한 거동을 하는 것을 알 수 있다. 반면에 균열 이후, 내부 부착 강선과 외부 비부착 강선의 거동에서 보의 중앙부 처짐과 강선의 응력의 차이가 발생함을 알 수 있다. 또한 그림 5와 6에서 보는 바와 같이 내부 부착 강선과 외부 비부착 강선의 비교에서 약 10%정도 더 큰 최대처짐을 가지는 것을 알 수 있다.

그리고 그림 5와 표 2에서 마찰계수가  $\mu=0.0$ 인 완전슬립인 경우 편향부 개수가 0인 경우가 가장 작은 최대처짐, 극한하중 그리고 강선의 최대응력을 가지는 것을 알 수 있다. 그리고 나머지 편향부가 있는 경우는 거의 비슷한 거동과 최대처짐, 극한하중 그리고 강선의 최대응력을 가지는 것을 알 수 있다. 나아가 내부 부착 강선이 외부 비부착 강선의 경우 보다 약 10%정도 더 큰 극한하중을, 그리고 약 20% 정도 더 큰 강선의 최대응력을 가지는 것을 알 수 있다.

또한 그림 6과 표 2에서 보는 바와 같이 편향부에서 미끄러움이 없는 No Slip인 경우에는 극한하중은 내부 부착

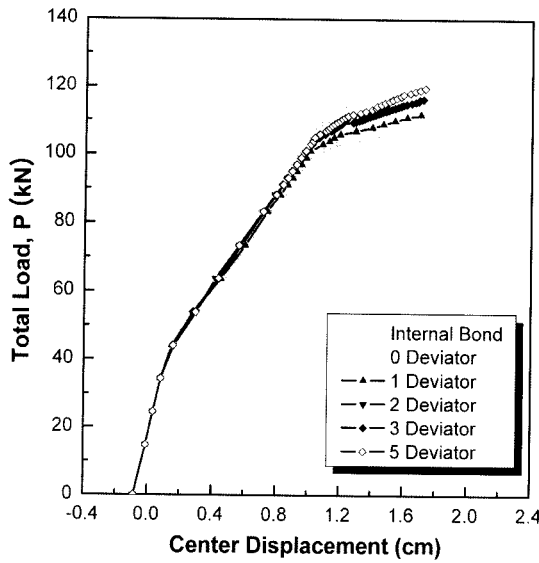


(a) 하중과 중앙부의 처짐 관계

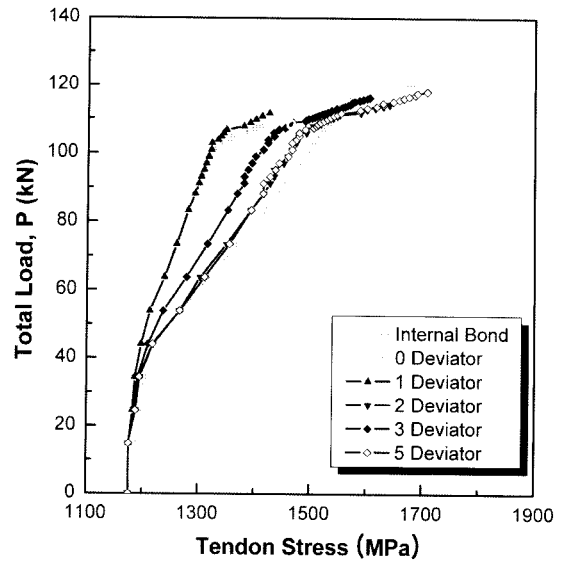


(b) 하중과 중앙부 강선의 응력 관계

그림 5. 편향부의 개수에 따른 해석결과 ( $\mu=0.0$ )



(a) 하중과 중앙부의 처짐 관계



(b) 하중과 중앙부 강선의 응력 관계

그림 6. 편향부의 개수에 따른 해석결과 (No Slip)

표 2. 편향부 개수에 따른 최대처짐, 극한하중과 강선의 최대응력

		Internal Bond	Dev.=0	Dev.=1	Dev.=2	Dev.=3	Dev.=5
$\mu=0.0$	최대처짐(cm)	1.89	1.70	1.70	1.69	1.76	1.60
	극한하중(kN)	122.5	107.8	111.72	111.23	112.21	112.7
	강선의 최대응력(MPa)	1725.8	1411.2	1423.9	1417.1	1420.0	1405.3
No Slip ( $\mu=0.0$ )	최대처짐(cm)	1.89	1.70	1.70	1.48	1.72	1.73
	극한하중(kN)	122.5	107.8	111.7	115.2	116.3	119.6
	강선의 최대응력(MPa)	1725.8	1411.2	1423.9	1639.5	1604.3	1717.9

강선과의 비교에서 편향부 0, 1, 2, 3, 그리고 5개에 대하여 각각 약 13%, 8%, 6%, 5%, 2%의 차이가 나며, 강선의 최대응력은 22%, 20%, 5%, 6%, 1%의 차이가 나는 것을 알 수 있다. 편향부 개수가 0과 1개인 경우는 마찰계수와 상관이 없으므로 그림 5의 마찰계수가  $\mu=0.0$ 인 경우와 같은 결과를 보여주지만, 편향부 개수가 2, 3, 5개의 경우 보의 중앙부 처짐과 강선의 응력의 차이에서 거동이 확연히 다르게 나타남을 알 수 있다.

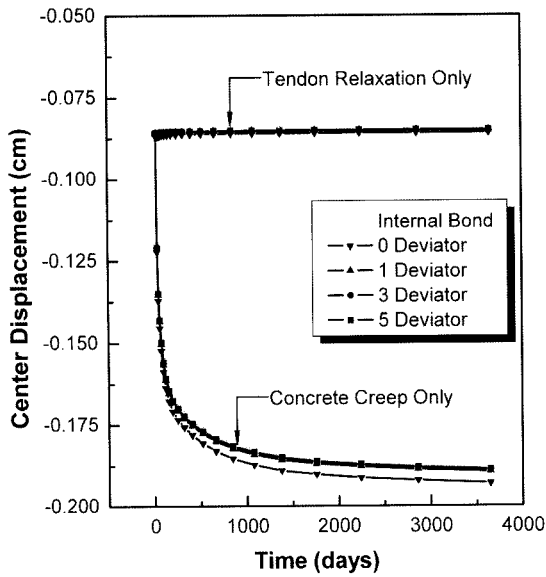
나아가 그림 5에서 보는 바와 같이 마찰계수가  $\mu=0.0$ 인 완전슬립인 경우 편향부가 1개 이상일 때 2차 효과 감소의 영향이 거의 같은 것으로 판단 할 수 있다. 그리고 그림 6에서 No Slip의 경우 편향부에 의한 2차 효과 감소의 영향이 있는 동시에 편향부에서의 부착에 대한 외부 비부착 강선과 PSC 보의 거동이 일체거동과 유사한 거동을 가지게 되므로 편향부 개수가 증가할수록 내부 부착 강선의 거동에 근접하게 되는 것을 알 수 있다. 이에 실제 편향부에서의 마찰계수가 0.0~1.0 사이의 경우에서 그림 5와 6에서 편향부 개수가 2개 이상일 때 각각의 최대처짐, 극한하중 그리고 강선의 최대응력은 약간의 차이가 있지만 비슷함을 알 수 있다. 따라서 편향부 2개일 때가 편향부 개수의 효율성 면에서 가장 적합할 것으로 판단된다.

#### 4. 시간 의존적 거동에 따른 영향

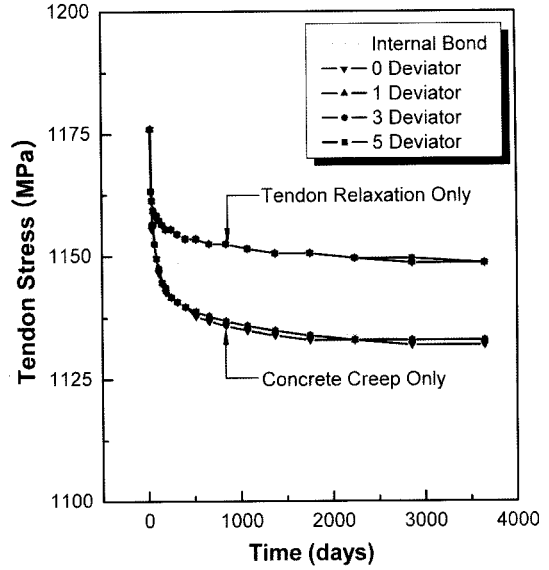
철근콘크리트 보는 콘크리트의 재료적 특성으로 인해 크리프, 건조수축과 응력이완(relaxation)으로 인하여 시간 의존적 거동을 가지게 된다. 외부 비부착 강선의 긴장력에 의한 보강이 적용되는 철근콘크리트 보에 대하여 콘크리트의 크리프와 긴장재의 응력이완(relaxation)으로 인한 시간 의존적 거동을 알아보려고 한다. 여기서, 콘크리트의 건조수축에 대한 영향은 상대적으로 그 크기가 크지 않은 관계로 고려하지 않았다.

앞의 그림 4에서 보는 바와 같은 동일한 적용 대상물을 사용하여 편향부가 0개, 1개, 3개, 5개 그리고 내부 부착 강선이 사용되는 경우로 나누어 외부 비부착 강선의 최초 긴장력은 1176.8 MPa로 작용하였으며, 콘크리트의 극한 크리프 계수는 2.35, 편향부에서의 마찰계수  $\mu=0.0$ 으로 가정하였다. 그리고 크리프와 응력이완에 따른 시간 의존적 거동의 영향을 알아보기 위하여 콘크리트 타설 후 28일에 강선에 긴장력을 도입한 후 철근 콘크리트 보의 10년까지의 거동을 살펴본 경우와 콘크리트 타설 후 10년에 강선의 긴장력을 적용하여 철근 콘크리트 보의 20년까지의 거동을 살펴본 경우의 두 경우에 대한 해석이 수행되었다.

그림 7과 8에서 보는 바와 같이 콘크리트 타설 후 28일에 강선의 긴장력을 적용하여 철근 콘크리트 보의 10년까지의 거동을, 그림 9과 10에서 콘크리트 타설 후 10년의 시간 경과 한 후 강선의 긴장력을 적용하여 철근 콘크리트 보의 20년까지의 거동을 각각의 콘크리트의 크리프와 강선의 응력이완의 경우, 그리고 콘크리트의 크리프와 강선의 응력이완을 모두 고려한 경우에 대한 시간에 따른 중앙부의 처

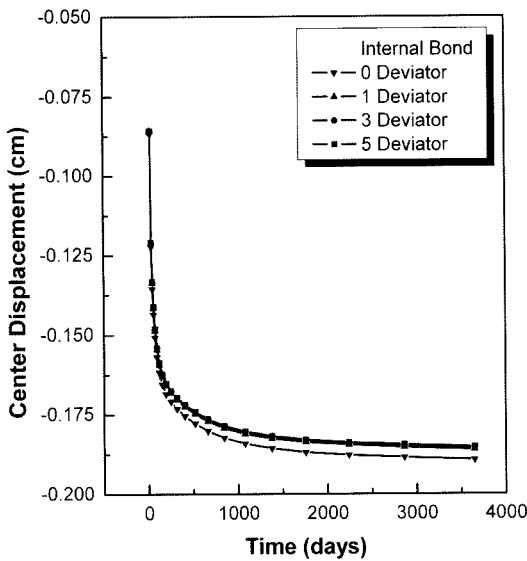


(a) 시간과 중앙부의 처짐 관계

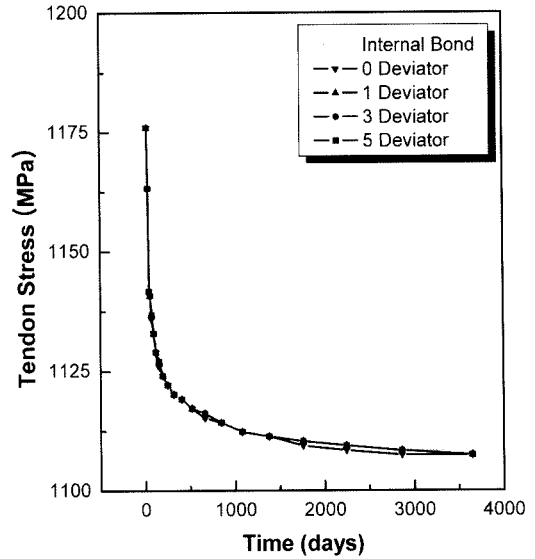


(b) 시간과 중앙부 강선의 응력 관계

그림 7. 28일 경과 후 각각의 콘크리트의 크리프와 강선의 응력이완을 고려한 경우

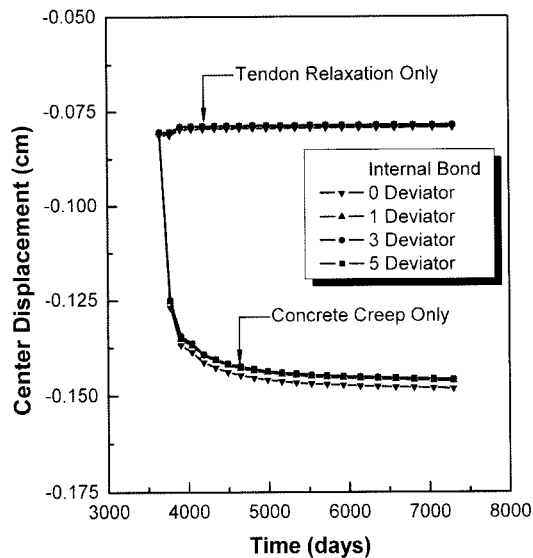


(a) 시간과 중앙부의 처짐 관계

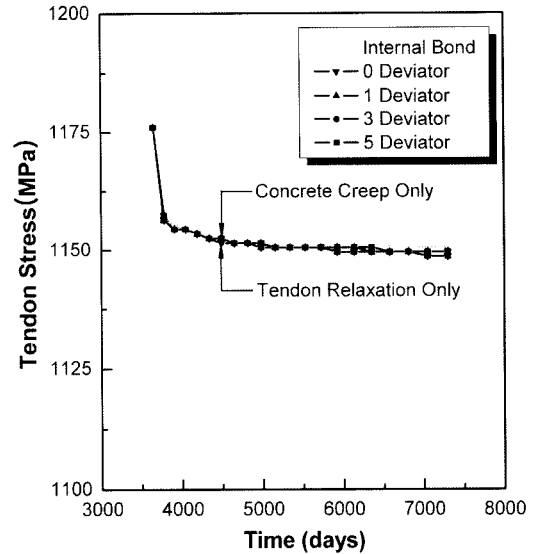


(b) 시간과 중앙부 강선의 응력 관계

그림 8. 28일 경과 후 콘크리트의 크리프와 강선의 응력이완을 모두 고려한 경우

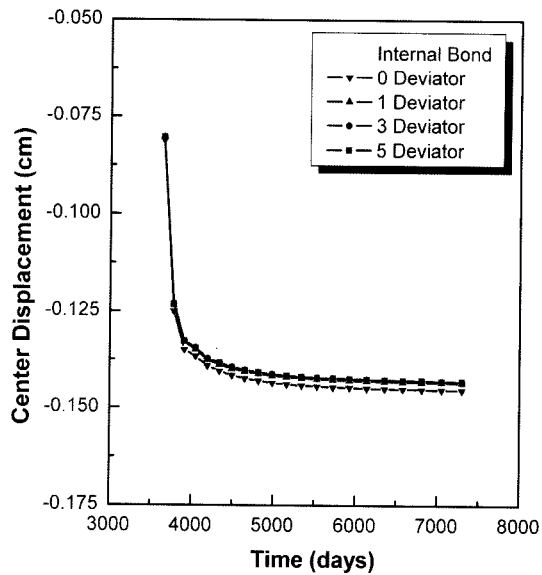


(a) 시간과 중앙부의 처짐 관계

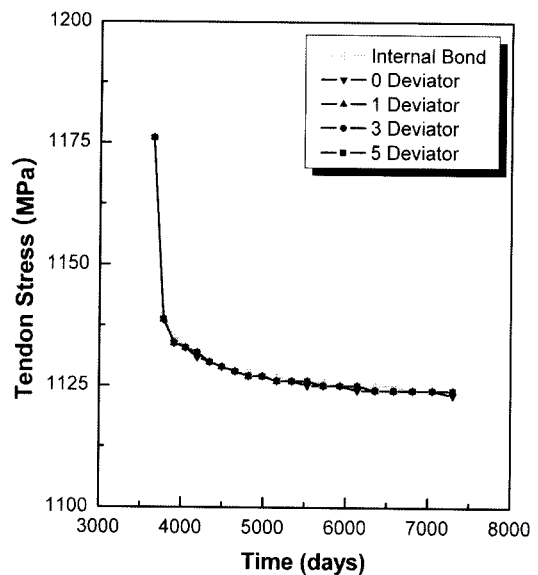


(b) 시간과 중앙부 강선의 응력 관계

그림 9. 10년 경과 후 각각의 콘크리트의 크리프와 강선의 응력이완을 고려한 경우



(a) 시간과 중앙부의 처짐 관계



(b) 시간과 중앙부 강선의 응력 관계

그림 10. 10년 경과 후 콘크리트의 크리프와 강선의 응력이완을 모두 고려한 경우

짐과 강선의 응력 관계를 나타내고 있다.

그림 7과 9에서 보는 바와 같이 시간에 따른 콘크리트의 크리프만을 고려한 경우 강선의 응력관계에서는 편향부 개수가 증가할수록 응력 감소가 작아지지만, 그 크기가 강선의 응력보다 상대적으로 작기 때문에 내부 부착 강선의 응력과 편향부 개수에 따른 외부 비부착 강선들의 응력들의 크기가 거의 비슷함을 알 수 있다. 그리고 콘크리트 보의 중앙부 처짐관계에서 내부 부착 강선의 경우가 가장 적은 처짐이 발생하며, 편향부 개수가 0개일 때 가장 많은 처짐을 가지는 것을 알 수 있다. 또한 나머지 편향부 개수가 증가함에 따라 처짐이 작아지면서 편향부 개수가 3개 이상인 경우 일정한 처짐값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 특히 편향부 개수 0개인 경우가 편향부를 가지는 경우보다 콘크리트 타설 후 28일에서는 약 2.2%, 10년에서는 약 1.7% 정도 처짐이 더 발생한다. 이는 편향부의 유무에 따른 외부 비부착 강선의 특징인 편심의 감소에 따른 2차효과(Secondary Effect)의 영향으로 편향부 개수가 증가함에 따른 2차효과가 감소하는 것으로 판단된다. 나아가 콘크리트의 크리프만에 의한 응력 손실량이 콘크리트 타설 후 28일에 강선의 긴장력을 적용할 때 10년에 강선의 긴장력을 적용할 때 보다 약 1.7배 정도 많이 발생함을 알 수 있다. 또한 콘크리트 초기 타설의 경우 콘크리트의 크리프 영향이 많기 때문에 콘크리트 타설 후 28일의 경우가 10년 시간 경과 후의 경우보다 시간에 대한 중앙부의 처짐은 약 1.3배정도 큰 처짐 변화량을 가지는 것을 알 수 있다. 이를 통해 크리프만을 고려할 경우 콘크리트가 초기재령일 때 응력손실량과 처짐이 많이 발생하는 것을 알 수 있다.

그리고 그림 7과 9에서의 시간에 따른 강선의 응력이완만을 고려한 경우 콘크리트 타설 후 각각 28일과 10년의 시간 경과 후에 강선의 긴장력을 적용할 때 약 2%정도의 응력 손실량이 편향부의 개수와 상관없이 거의 비슷한 크기를 가짐을 알 수 있다. 또한 응력 이완에 따른 처짐의 변화 또한 크지 않음을 알 수 있다. 나아가 콘크리트 타설 후 28일에 강선의 긴장력을 적용할 때와 콘크리트 타설 후 10년

의 시간 경과 후에 강선의 긴장력을 적용할 때 응력이완에 따른 응력손실이 거의 비슷함을 알 수 있으며 이는 응력이완에 따른 응력손실은 콘크리트 재령과 무관하게 발생되기 때문으로 판단된다.

또한 앞의 그림들에서 알 수 있는 바와 같이 10년 동안의 중앙부 처짐의 변화는 크리프에 의한 변화가 응력이완보다 주도적으로 처짐 변화를 차지하고 있음을 알 수 있으며, 10년 동안의 중앙부 강선의 응력의 변화는 응력이완에 의한 변화보다 크리프에 의한 변화의 경우가 상대적으로 크거나 비슷함을 알 수 있다. 따라서 콘크리트의 크리프와 강선의 응력이완을 모두 고려한 경우 그림 8과 10에서 보는 바와 같이 시간에 따른 중앙부 처짐의 변화는 크리프에 의한 변화가 큰 비중을 차지하는 것을 알 수 있으며, 중앙부 강선의 응력 손실량은 크리프에 의한 변화가 응력이완보다 상대적으로 크거나 비슷하게 차지함을 알 수 있다.

## 5. 하중 재하(Loading)와 하중 제하(Unloading)에 따른 영향

그림 11에서 보는 바와 같이 단면이 T 형보이며 집중하중이 경간 중간에서 작용하며 외부 강선의 위치가 단면의 밑바닥에서 10 cm위에 위치하는 단순 경간보를 대상 구조물로 사용하였다. 그리고 각각 내부 부착 강선을 사용하지 않은 철근 콘크리트(Reinforced Concrete: RC) 보와 내부 부착 강선을 사용한 프리스트레스트 콘크리트(Prestressed Concrete: PSC) 보로 구분하여 하중 재하(loading)와 하중 제하(unloading)에 따른 거동을 비교하였다. 그리고 RC보와 PSC 보에 사용되는 외부 비부착 강선의 긴장력은 343.2 MPa와 686.5 MPa 그리고 1176.8 MPa으로 세가지로 설정하여 각각 수행하였다. 이 때의 PSC 보의 내부 부착 강선은 단면 밑바닥에서 10 cm에 위치하며 초기 긴장력은 1176.8 MPa으로 설정하였다.

그림 12와 13에서 보는 바와 같이 RC 보와 PSC 보의 하중재하(loading)와 하중제하(unloading)에 따른 거동을 비

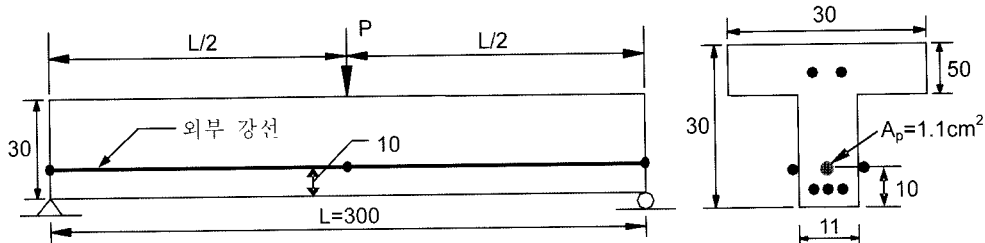


그림 11. 하중의 재하와 제하에 따른 영향 적용 대상 구조물 형상 (단위: cm)

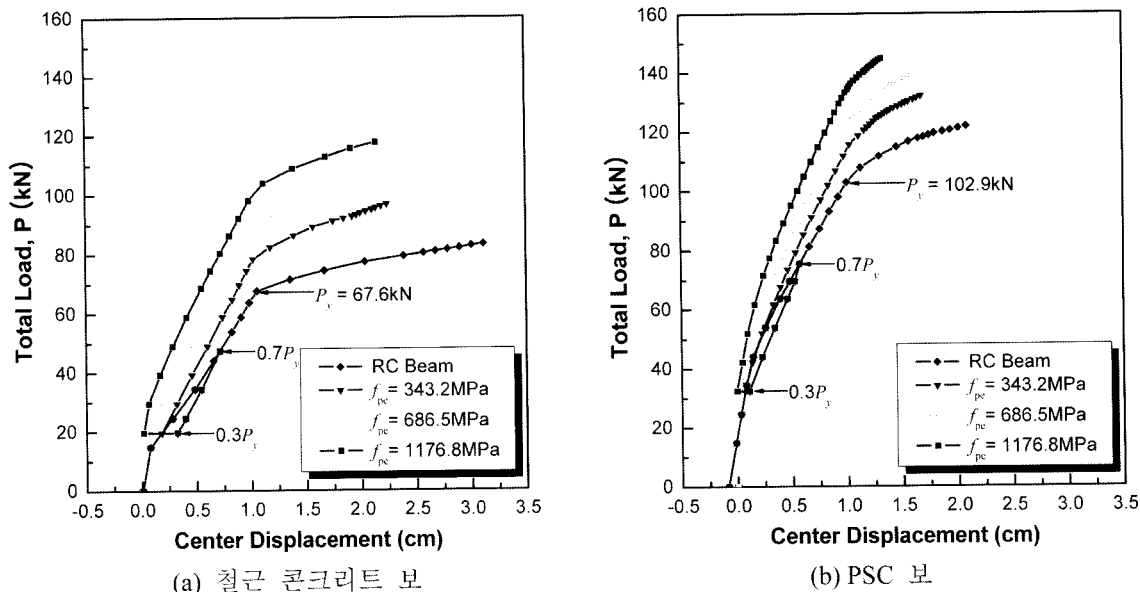


그림 12. 항복하중 70%에서 하중제하할 때 하중과 중앙부 처짐 관계

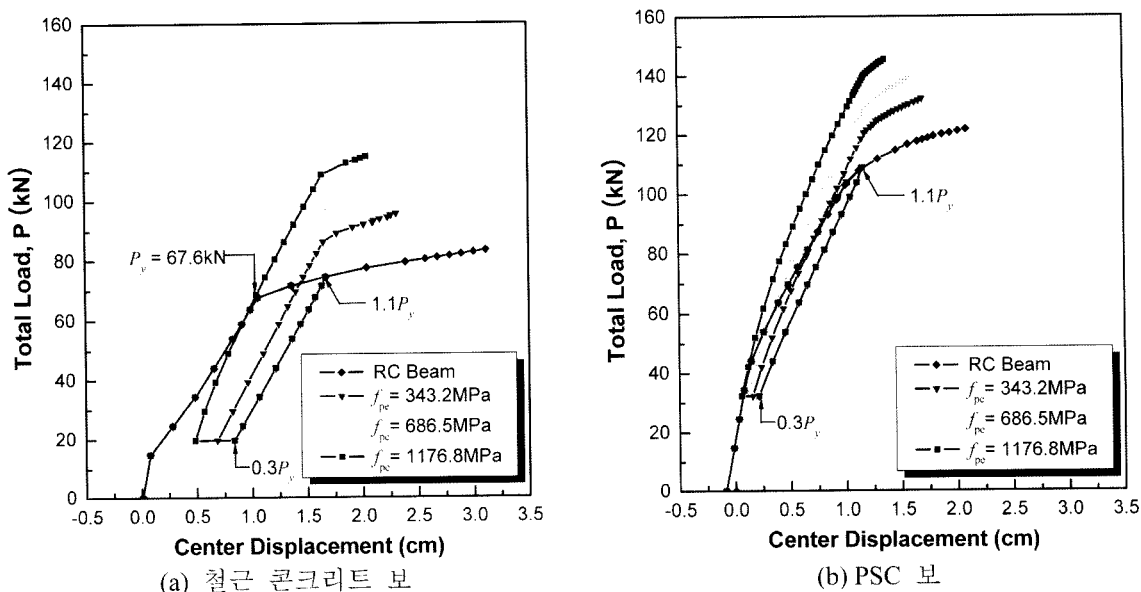
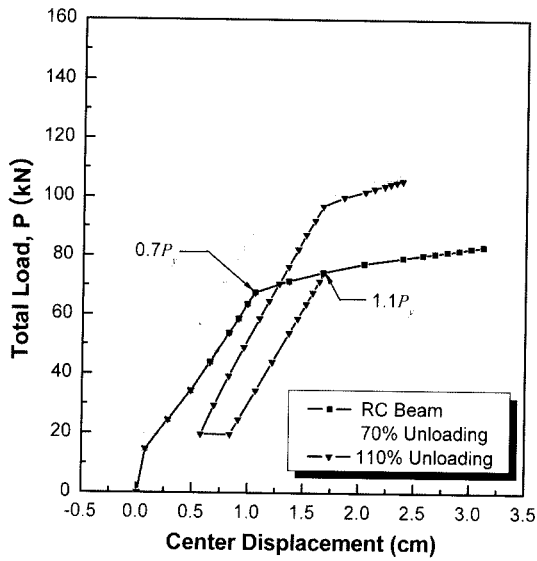


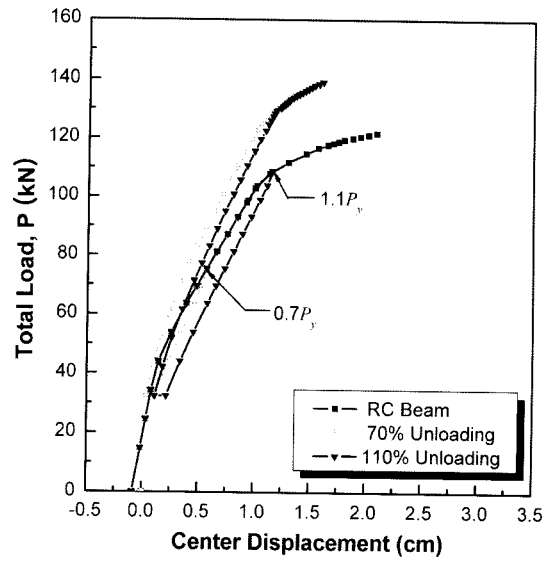
그림 13. 항복하중 110%에서 하중제하할 때 하중과 중앙부 처짐 관계

교하기 위하여 각각의 RC 보와 PSC 보의 항복하중(RC 보;  $P_y=67.6$  kN, PSC 보;  $P_y=102.9$  kN)의 70% 지점과 110% 지점까지 하중재하/loading)를 한 후 하중제하(unloading)를 하였다. 그리고 항복하중의 30% 지점에서 외부 비부착 강선의 긴장력에 의한 구조물 보강을 한 후 집중하중을 극한 하중까지 하중재하/loading)하였다. 그림 12와 13에서 각각의 RC 보와 PSC 보에서 항복하중의 70%와 110%에서 하중제하(unloading)을 하여 항복하중의 30%인 곳에서 외부 비부착 강선으로 보강할 경우, 외부 비부착 강선의 긴장력에

의한 보강의 크기가 클수록 거의 비례적으로 극한 하중의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 RC 보에 비해 PSC 보는 극한하중의 값의 크기는 상당히 크지만, 처짐은 상대적으로 작음을 알 수 있다. 이는 상대적으로 큰 긴장력에 의한 하중 저항능력은 증가하지만, 단면의 중립축은 내려오며 콘크리트의 압축응력은 증가하게 되어 콘크리트의 연성이 감소하기 때문으로 판단된다. 또한 그림 14에서 보는 바와 같이 RC 보와 PSC 보에서 외부 비부착 강선의 긴장력이 686.5 MPa으로 보강하는 경우에 대하여 각각 거동을

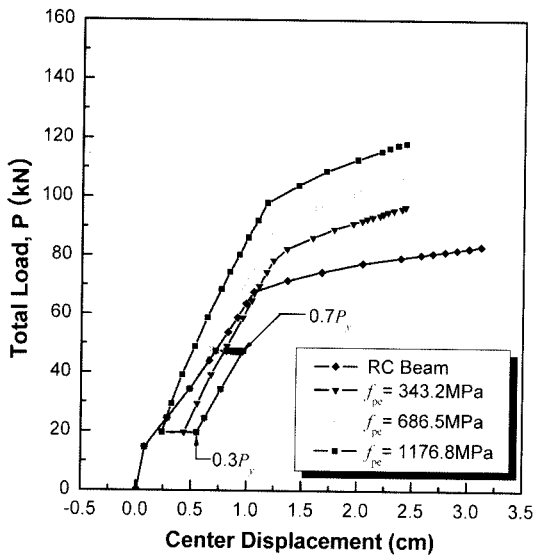


(a) 철근 콘크리트 보

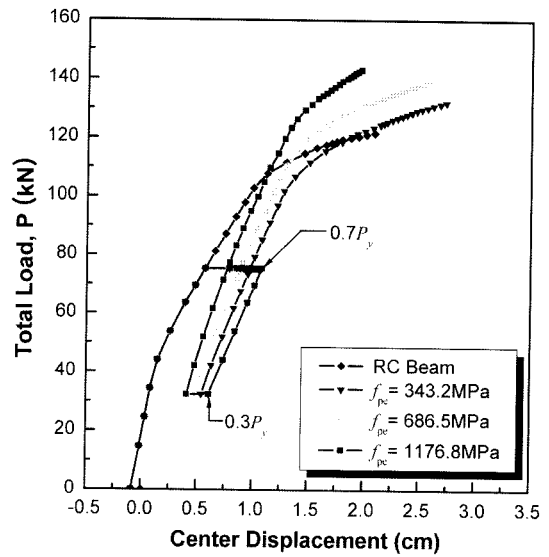


(b) PSC 보

그림 14. 항복하중 70%와 110%에서 하중제하할 때 하중과 중앙부 처짐 관계 비교

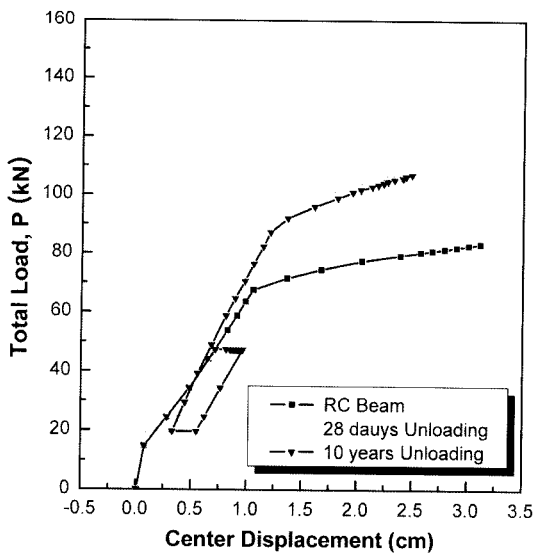


(a) 철근 콘크리트 보

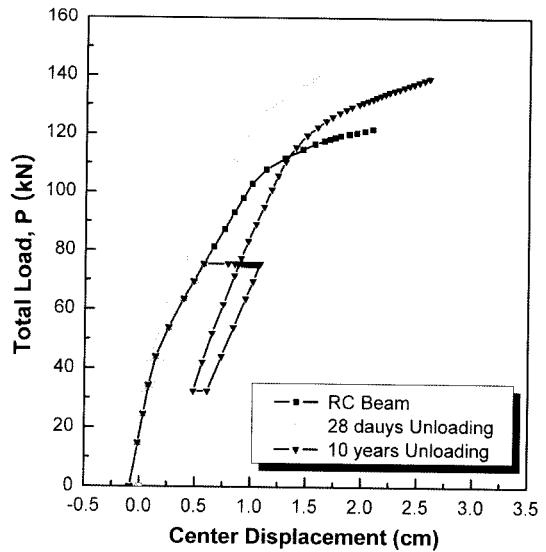


(b) PSC 보

그림 15. 28일에서 10년까지의 시간 경과에 따른 하중과 중앙부 처짐 관계



(a) 철근 콘크리트 보



(b) PSC 보

그림 16. 시간 경과 유무에 따른 하중과 중앙부 처짐 관계 비교

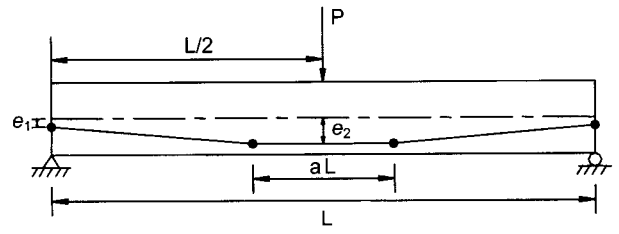


비교하면 항복하중의 70%와 110%에서 하중제하를 할 때 하중제하의 기울기와 하중제하의 기울기 그리고 항복 이후의 기울기가 비슷함을 알 수 있다. 이는 콘크리트와 철근의 응력-변형률 관계를 하중반전모델(load reversal model)을 기본으로 하중반전경로의 기울기가 초기 탄성계수와 같게 가정하였기 때문으로 판단된다.

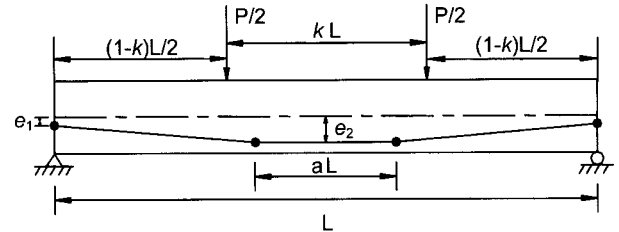
그림 15에서 보는 바와 같이 RC 보와 PSC 보의 시간 경과에 따른 하중재하/loading)와 하중제하(unloading)에 의한 구조물의 거동 특성을 알아보기 위해 집중하중의 하중제하를 항복하중의 70% 지점까지 한 후 28일에서 10년까지의 시간을 경과시켰다. 그리고 하중제하를 항복하중 30% 지점까지 한 후 각각 343.2 MPa와 686.5 MPa 그리고 1176.8 MPa의 세가지 외부 비부착 강선의 긴장력으로 보강하여 극한하중까지 집중하중을 하중재하하였다. 그림 15에서 항복하중의 70% 지점에서 28일에서 10년까지의 시간을 경과시킬 때 앞 절에서 설명하였듯이 크리프와 응력이완에 따른 처짐의 변화가 발생하게 되는 것을 알 수 있다. 이는 PSC 보의 내부 부착 강선의 응력이완에 따른 추가적인 처짐의 발생 때문으로 판단된다. 그리고 그림 16에서 RC 보와 PSC 보에서 외부 비부착 강선의 긴장력 686.5 MPa의 경우에 대하여 28일에서 10년까지의 시간 경과에 대하여 구조물의 거동을 비교하고 있다. 시간 경과에 따른 서로 다른 처짐을 가지지만 시간 경과의 유무에 상관없이 각각의 기울기는 비슷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 시간에 의해 크리프와 응력이완이 일어난 경우 구조물의 처짐 크기가 달라지게 되므로 구조물의 보강을 위한 외부 비부착 강선의 긴장력의 크기를 조절하여야 할 것으로 판단된다.

## 6. 외부 비부착 강선의 하중 형태에 따른 최적의 배치 형상

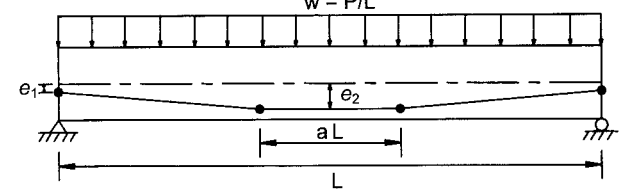
PSC 보를 외부 비부착 강선으로 보강할 경우 편향부의 위치에 따라 PSC 보의 부재력 분포가 다르게 나타나게 된다. 그림 17에서 보는 바와 같이 중앙부에 집중하중 하나가 작용하는 경우, 두 개의 집중하중이 작용하는 경우, 그리고 분포하중이 작용하는 경우에 대하여 각각의 PSC 보의 거동을 분석하여 최적의 편향부 위치를 알아보고자 한다. 편향부의 위치는 양 끝 단에서의 편심  $e_1=0$  cm, 중앙부의 편심  $e_2=12.8$  cm로서 편향부 사이의 간격을  $aL$ 로 정의하여  $a=0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 로 편향부 사이의 간격을 조정하며 각각의 하중 형태에 따른 최적의 배치 형상을 판단하고자 한다. 그리고, 두 개의 집중하중이 오는 경우 그림 17의 (b)에서 보는 바와 같이 두 개의 집중하중 간격을  $kL$ 로 정의하며 간격이 각각  $k=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 인 경우에 대하여 최적의 배치 형상을 판단하고자 한다. 외부 비부착 강선의 최초 긴장력은 1176.8 MPa으로 편향



(a) 중앙부 집중하중이 작용하는 경우



(b) 두 개의 집중하중이 작용하는 경우



(c) 분포하중이 작용하는 경우

그림 17. 외부 비부착 강선 배치형상에 따른 해석 대상구조물

부에서 마찰계수  $\mu=0.0$ 으로 항상 미끄럼이 있는 것으로 가정하였다.

그림 17에서 나타낸 강선 배치형상과 하중 형태에 따른 대상 구조물의 해석을 그림 18~20에서 보는 바와 같이 하중에 대한 중앙부 처짐으로 나타내었다. 그림 18~20에서 수행된 하중에 대한 중앙부 처짐의 관계를 토대로 하중 형태에 따른 편향부의 최적 간격을 표 3에 나타내었다. 먼저 그림 18에서 보는 바와 같이 편향부가 한 개인  $a=0.0$ 인 경우에 최대 극한하중을 가지는 것을 알 수 있으며,  $a=0.0$ 보다 큰  $a=0.2, 0.4, 0.6$ , 그리고  $0.8$ 에 따라 최대 극한하중이 순차적으로 작아짐을 알 수 있다.

그리고 그림 19에서 보는 바와 두 개의 집중하중이  $k=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 의 경우에 대하여 각각 하중 형태의  $k$ 와 편향부 위치를 나타내는  $a$ 가 일치할 때에 최대 극한하중을 가지는 것을 알 수 있다. 또한 편향부 위치를 나타내는  $a$ 가 점차적으로 커짐에 따라 하중형태의  $k$ 와 일치하기 전까지 최대 극한하중의 값이 커지다가  $k$ 와  $a$ 가 일치할 때 가장 큰 최대 극한하중을 가지며,  $a$ 가  $k$ 와 일치한 후 다시 최대 극한하중이 점차적으로 작아짐을 알 수 있다. 이는 하중 형태의  $k$ 와 편향부 위치  $a$ 가 일치하는 경우 하중 형태에 따른 모멘트 분포도 형태와 편향부 위치에 따른 강선의 긴장력에 의한 모멘트 분포도 형태와 유사하게 된다. 따라서 긴장력에

표 3. 하중 형태에 따른 편향부의 최적 배치형상

	한 개의 집중하중 ( $k=0.0$ )	두 개의 집중하중( $kL$ )				분포 하중
		$k=0.2$	$k=0.4$	$k=0.6$	$k=0.8$	
편향부 최적 간격( $a$ )	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.3

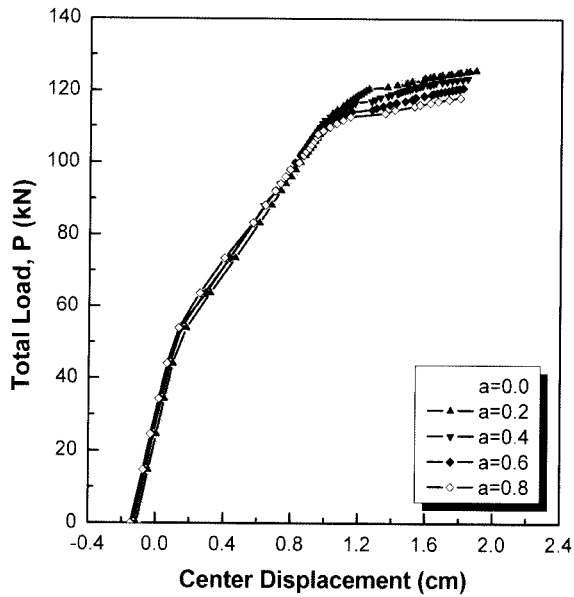


그림 18. 한 개의 집중 하중의 경우( $k=0.0$ )

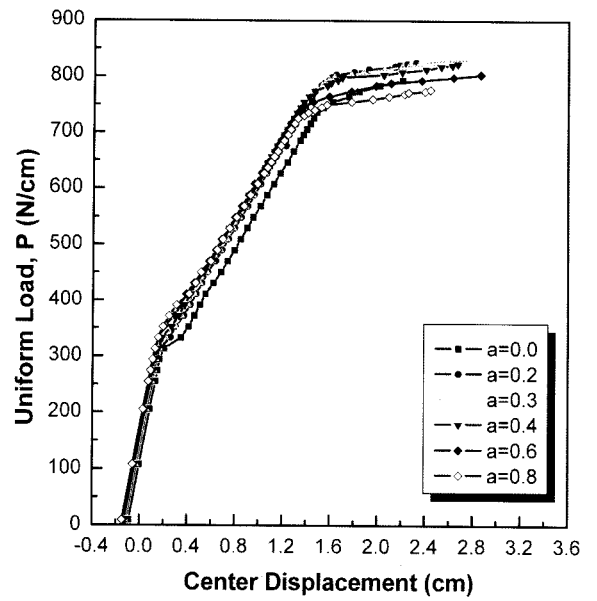
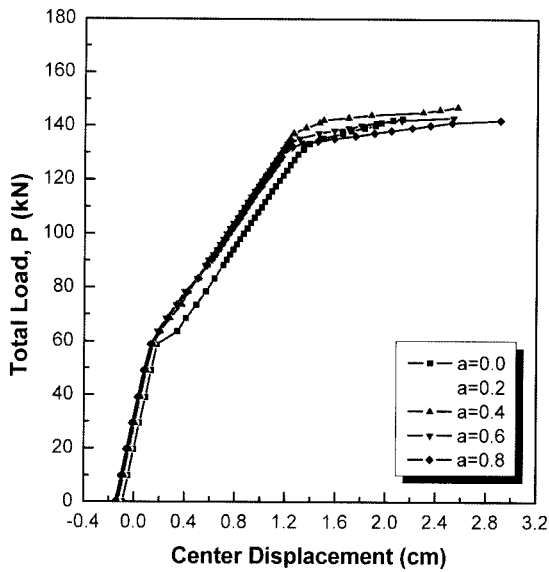
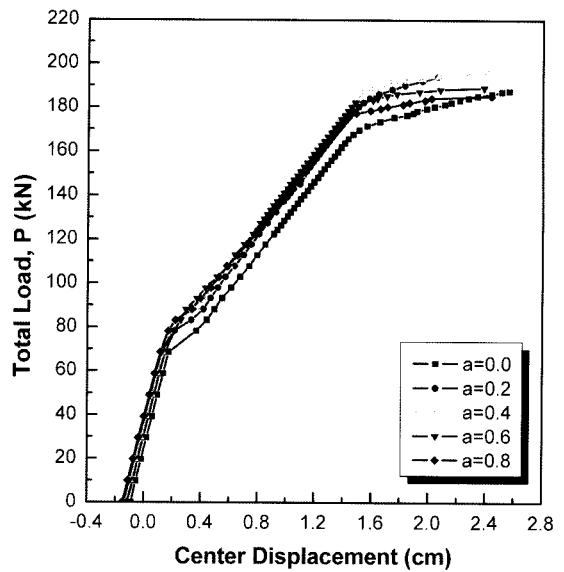


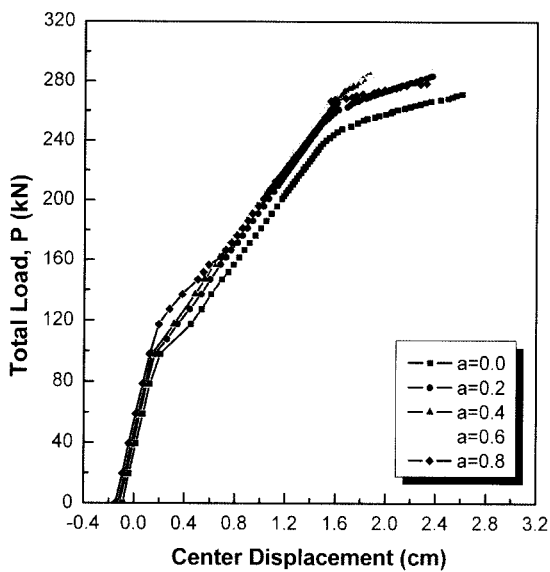
그림 20. 분포하중의 경우



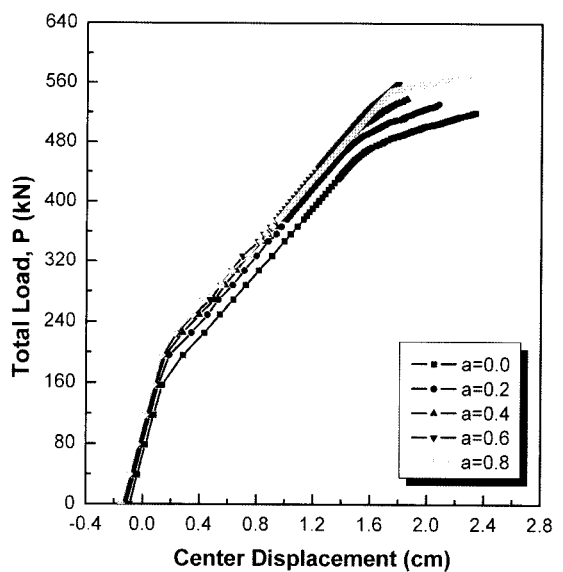
(a) 하중과 중앙부 처짐 관계( $k=0.2$ )



(b) 하중과 중앙부 처짐 관계( $k=0.4$ )



(c) 하중과 중앙부 처짐 관계( $k=0.6$ )



(d) 하중과 중앙부 처짐 관계( $k=0.8$ )

그림 19. 두 개의 집중 하중의 경우

의한 보강이 효과적으로 이루어져 가장 큰 최대 극한하중을 가질 수 있는 것으로 판단된다.

그림 20에서 보는 바와 같이 분포 하중의 경우,  $a=0.3$ 의 경우에 최대 극한하중을 가지며  $a=0.3$  이전에 점차적으로 최대 극한하중이 커지다가  $a=0.3$  이후에는 점차적으로 최대 극한하중이 작아짐을 알 수 있다. 이는 분포하중에 대하여 PSC 보가 갖는 모멘트 분포도 형태와 두 개의 편향부에 의한 외부 비부착 강선 보강의 모멘트 분포도 형태가 유사하게 되는  $a=0.3$ 에서 외부 비부착 강선의 최적 배치형상을 가지는 것으로 판단된다.

따라서, 각각의 하중 형태에 따른 외부 비부착 강선의 배치형상은 하중의 간격에 따른 모멘트 분포도 형태와 유사하게 되는 모멘트 분포도 형태를 갖는 경우에 최적으로 나타낼 수 있을 것으로 판단된다. 또한 외부 비부착 강선의 최적 배치형상을 토대로 효과적인 PSC 보의 보강이 수행될 수 있을 것으로 판단된다.

## 7. 결 론

이 논문에서는 외부 비부착 강선으로 보강된 PSC보에 영향을 주는 여러 설계인자들에 대한 비교연구를 통해 PSC 보의 거동 특성을 고찰하였다. 해석결과를 통해 알 수 있는 바와 같이 편향부에서의 미끌림과 마찰계수에 따른 영향은 마찰계수 값이 커짐에 따라 편향부를 중심으로 좌, 우측 강선의 응력분배가 더 잘 이루어지지 않으므로 강선의 긴장력이 편향부의 미끌림 발생하는 경우와 비교하여 더 크게 유지되며, 이로 인해 더 큰 극한 하중 값을 가진다. 따라서 미끌림이 발생하지 않는 경우 가장 큰 극한 하중 값을 가지는 것을 알 수 있다. 그리고 편향부 개수에 따른 영향에서 편향부 유무에 따라 2차 효과의 영향이 지배적으로 나타나는 것을 알 수 있으며, 편향부에 마찰력이 있는 경우 편향부 개수가 증가할수록 더 큰 극한하중을 가지게 된다. 또한 시간 의존적 거동을 고려한 경우 구조물의 전체적 거동에 있어서 내부 부착과 외부 비부착의 경우에 따라 크리프와 응력이완에 따른 처짐이 다르며 특히 콘크리트의 크리프만을 고려한 처짐에서 편향부 유무에 따른 2차효과의 영향이 크게 나타나며 상대적으로 작게 나타나지만 편향부의 개수

가 적을수록 커짐을 알 수 있다. 나아가 RC보와 PSC보에서 하중재하/loading)와 하중제하(unloading)의 경우 외부 비부착 강선에 의한 보강의 긴장력 크기에 따라 거의 비례적으로 극한 하중의 크기가 증가함을 알 수 있었다. 마지막으로 하중의 형태와 위치에 따른 외부 비부착 강선의 배치형상은 하중의 간격에 따른 모멘트 분포도 형태와 유사하게 되는 모멘트 분포도 형태를 갖는 경우에 최적으로 나타낼 수 있을 것으로 판단된다. 일반적으로 하중의 위치와 편향부의 위치가 일치하는 경우가 최대 극한하중을 가지며 최적을 편향부 위치인 것으로 판단할 수 있다.

이와 같이 외부 비부착 강선의 거동 특성인 미끌림과 마찰계수의 영향, 편향부 개수에 대한 영향, 시간의존적 거동, 하중 재하와 하중 제하에 따른 거동, 그리고 하중의 형태에 따른 최적의 편향부 위치에 대한 결론들로부터 외부 비부착 강선에 의해 보강된 PSC구조물의 보다 효과적인 시공이 이루어질 것으로 판단된다.

## 감사의 글

“이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 04핵심기술C02-02) 및 한국건설기술연구원의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.”

## 참고문헌

- Ariyawardena, N. and Ghali, A. (2002) Prestressing with unbonded internal of external tendons: analysis and computer model, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, No. 12.
- Harajli, M., Khairallah, N. and Nassif, H. (1999) Externally prestressed members: evaluation of second-order effects, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No. 10.
- Rao, P.S. (1996) Behavior of external ps concrete beams with multiple deviators, *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No.4.
- Virlogeux, M.P. (1988) Nonlinear analysis of external prestressed structures, FIP, pp. 318-340.
- Virlogeux, M.P. (1991) External prestressing, ACI SP-120.

(접수일:2004.8.2/심사일:2004.11.16/심사완료일:2005.12.5)