

철도교량 PC보 솟음량 추정의 현장 적용 Field Application of Camber Estimation for PC Beams in Railroad Bridge

윤정섭* 김문재* 염재식* 이준기** 박성우**
Yoon, Jeoung-Seob Kim, Mun-Jae Yeum, Jae-Sik Lee, Jun-Ki Park, Sung-Woo

ABSTRACT

PC보의 솟음량은 강연선을 통한 인장력 도입에 따른 윗방향 변위량을 의미한다. 솟음량은 재료특성, 시공방식 등에 따라 많은 영향을 받기 때문에 이를 PC보의 품질을 나타내는 지표로 사용하고자 하는 노력이 있어왔다. 하지만, 현장 제작되는 PC보의 경우 재료 및 시공품질의 변동이 발생함에 따라 현장 조건을 솟음량 산정 시 반영하기가 어렵기 때문에 이를 관리지표로 적용 시 많은 제약이 있어왔다. 본 연구는 현장 타설되는 PC보 솟음량 산정의 유효성을 평가하는 것을 목적으로 실제 철도교량에 사용되는 PC보 2개에 대해 콘크리트 탄성계수, 인장력도입에 따른 단면 변형률 및 솟음량을 측정하여 이를 이론적 솟음량과 비교하여 보았다. 단순화된 해석모델을 사용하여 계산된 PC보의 솟음량은 실제 측정된 솟음량을 효과적으로 예측하였다. 위의 결과는 솟음량 추정에 대한 신뢰성을 높이기 위하여 현장 조건에 대한 적절한 고려가 수행되어야함을 의미한다.

This study aims to assess the field application of camber estimation for PC beams in the railroad bridge. Properties of two real-scaled PC beams were investigated by measuring material characteristics and sectional deformation of PC beams during tensioning procedure. The test results indicate that camber deflection was effectively predicted using the simplified analytical model. However, it is also emphasized that consideration on field conditions is required for reliable camber prediction.

1. 서 론

PC보 교량은 시공기간이 짧고 공정이 단순하여 국내철도교량에 다수 적용되고 있는 구조형식이다. 콘크리트는 높은 압축강도에 비해 낮은 인장강도를 가지고 있다. 이런 재료의 단점을 보완하기 위해 압축력을 재하하여 인위적으로 편심 모멘트를 발생시켜 인장응력을 상쇄하는 방식을 PC(Prestressed Concrete)라고 한다. 일반적으로 철도교량의 경우 콘크리트 타설 전 매립한 쉬스관에 강연선을 삽입하여 인장하는 포스트텐션(Post-Tensioning)방식을 취하고 있다. 도입된 압축력은 단면에 대해 편심모멘트를 발생시키며 이에 따라 PC보에는 윗방향 변위량이 발생하는데 이를 솟음, 혹은 캠버라고 한다. 이때 솟음량의 크기는 콘크리트 탄성계수, 압축력의 크기, PC보의 지점 조건 등에 의해 결정된다. 이에 따라 솟음량은 PC보의 재료 및 시공품을 종합적으로 나타내는 물리량으로 인식이 되고 있으며 일부 설계도서에서는 간접적 관리지표로 제시되고 있다[1,2]. 본 연구에서는 실제 교량에 적용되는 PC보 2개를 선정하여 솟음량을 측정한 후 현장조건을 고려한 솟음량 추정치와 비교하여 보았다.

* 삼성물산 건설부분, 토목사업본부

** 삼성물산 건설부분, 기술연구소 E-mail: jk0914.lee@samsung.com TEL:(02)2145-6512 FAX : (02)2145-6477



Fig1. PC보 시험체 현장전경

2. 현장 시험

2.1 PC보 시험체

본 연구에 적용된 구조물은 길이 24.90m, 높이 2.35m의 PC보로 양 끝단에서 4개의 12×Φ13mm의 강연선을 통하여 콘크리트 타설 후 인장력이 재하되는 포스트텐션 구조물이다. 콘크리트 타설 이후 증기양생을 통하여 콘크리트 강도를 조기에 발현하였다(도표 1.). 또한 양쪽 끝단에서 2개의 유압기를 통하여 동시 인장함으로써 인장력 손실을 감소시켰다.

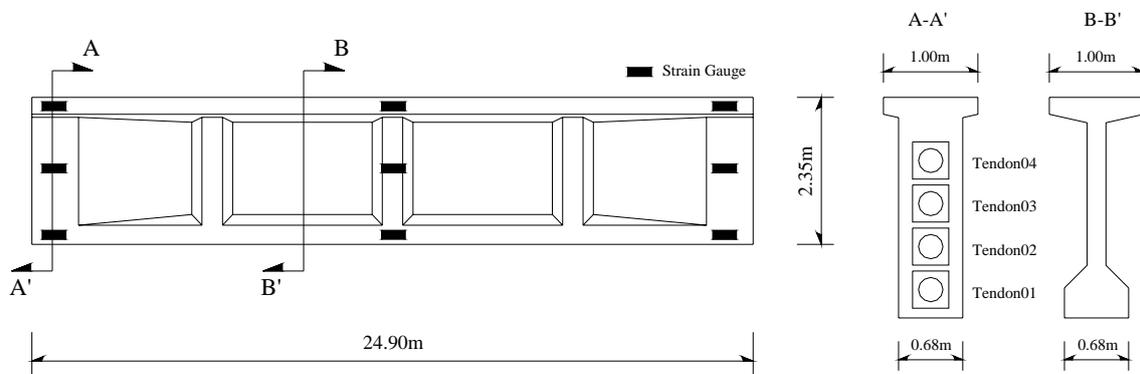


그림 2. PC보의 기하학적 형상

도표 1. 인장작업 시 PC보의 재령 및 압축강도

	재령(일)	강도(MPa)
Beam01	9	34.2
Beam02	10	34.5

2.2 콘크리트의 탄성계수 추정

인장작업 시 PC보의 탄성계수를 추정하기 위하여 증기 양생 후 재령에 따라 일축압축강도 시험을 수행하였다. 15개의 $\Phi 10 \times 20\text{cm}$ 공시체를 제작하여 현장상황과 동일한 조건으로 양생였으며, 재령별로 3개의 공시체를 사용하여 압축응력과 탄성계수의 관계를 관찰하였다. 콘크리트의 변형률은 2개의 스트레인 게이지를 공시체 표면에 부착하여 측정하였으며, 시험 후 값을 평균하여 재령별 대표값으로 사용하였다. 측정결과는 그림 3.에 요약되어 있다.

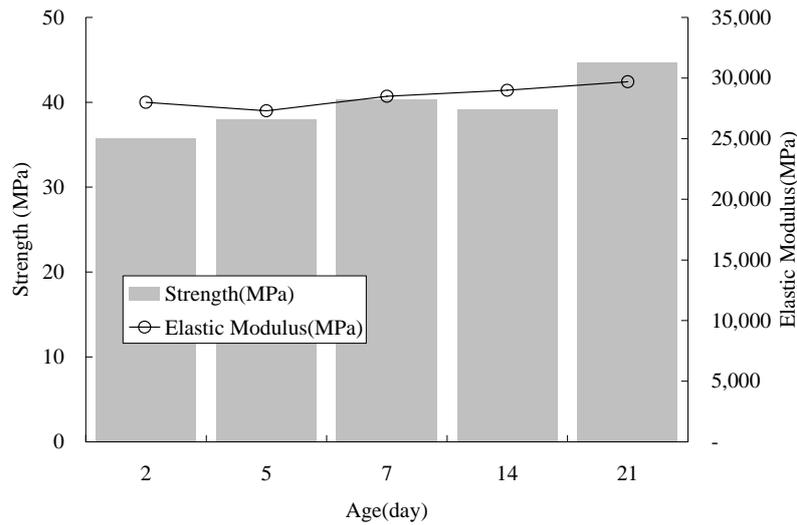


그림 3. 재령에 따른 압축강도 및 탄성계수

PC보의 콘크리트 압축강도는 재령 2일안에 설계 강도인 35MPa를 발현하였으며 재령이 증가함에 따라 강도가 증가하는 현상을 보였다. 콘크리트의 탄성계수는 초기 수치 28,000MPa에서 재령에 따라 증가하는 경향을 나타냈다. 본 연구에 사용된 PC보의 경우 인장작업 시 재령이 9,10일인 것을 고려하여, 솟음량 산정 시 콘크리트의 탄성계수를 28,500MPa로 적용하였다.

2.2 유효인장력 측정

PC보의 인장력은 구조물의 거동을 지배하는 중요한 물리량으로 도입된 인장력은 쉬스관의 마찰, 웬지 슬립, 인장기 마찰 등에 의한 손실이 발생하여 실제로 구조물에 작용하는 유효인장력은 설계 인장력과 차이를 보인다. 본 연구에서는 시공 시 PC보의 단부에서 5%의 손실이 발생하였다고 가정하였으며, 쉬스관의 곡률 및 파상마찰을 철도설계기준[3]에 따라 추정하였다. 추정된 유효인장력은 도표 2.에 요약되어 있다.

$$\Delta f_{pf} = f_{p0} [1 - e^{-(kl_x + \mu\alpha)}] \quad (\text{식 1.})$$

여기서, k : 긴장재의 단위 길이당 파상 계수 (0.0066)

l_x : 정착단으로부터 임의의 점 x 까지의 긴장재의 길이

μ : 곡률마찰계수 (0.30)

α : 정착단에서 임의의 점 x 까지의 프리스트레스 긴장재의 각의 총변화

도표 2. 유효 인장력 추정 (unit:kN)

텐던 No.	P _{estimated}			
	P _{end}		P _{cen}	P _{avg}
	Designed	After loss		
4	1,579	1,500	1,339	1,419
3	1,593	1,514	1,358	1,436
2	1,653	1,571	1,420	1,495
1	1,564	1,486	1,358	1,422

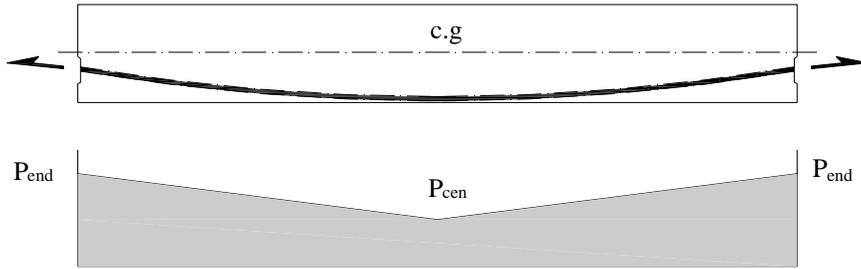


그림 4. 강선길이 방향의 유효 인장력 분포

2.3 인장작업에 의한 PC보의 단면변형

인장력의 도입은 PC보에 압축력과 편심모멘트를 발생 시키며 이에 따라 보 단면의 변형이 발생한다. 보 단면의 변형률 측정을 위해 PC보의 단부와 중앙부에 각각 3개의 스트레인 게이지를 설치하였다(그림 2). 인장작업에 의한 PC보의 최종 단면변형은 그림 5.에 나타나 있다.

PC 단면 변형은 각 텐던에 인장력이 도입됨에 따라 쉽게 관찰되었다. 하지만, 단면 변형은 쉬스관이 집중되어 있는 단면의 하부에 크게 발생하였을 뿐 단면의 상부에는 거의 발생하지 않았다. 이는 PC보의 거동이 발생된 편심모멘트에 의한 휨 변형보다 압축 변형에 의해 높은 영향을 받음을 나타낸다.

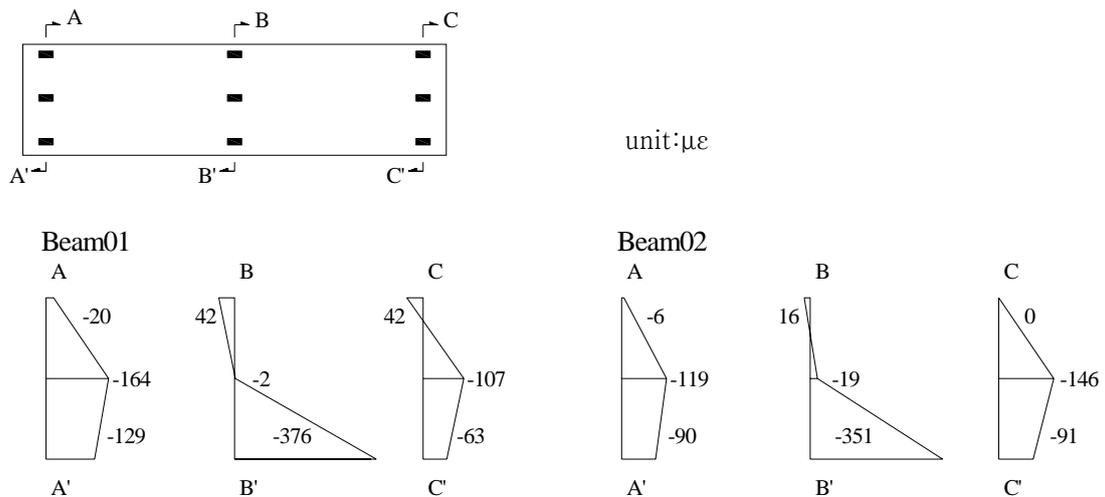


그림 5. 도입인장력에 의한 PC보 변형률

2.4 솟음량 측정

레이저 레벨을 사용하여 인장하중에 의한 PC보의 솟음량을 측정하였다. 레벨을 PC보에서 약 1~2m 떨어진 곳에 삼각대를 사용하여 고정시킨 후 인장 시공 전의 위치와 인장시공 후의 위치를 표시하여 그 차이를 최종 솟음량으로 정의 하였다(그림 6.). 레이저 레벨은 중앙단과 양 끝단 총 3개소에 설치하여 중앙부 윗방향 변위에 단부 아랫방향 변위를 평균한 값을 합하여 솟음량을 계산하였다. 도표 3.에 측정된 솟음량의 결과가 요약되어 있다.

그림 6. 레이저레벨을 사용한 솟음량 측정

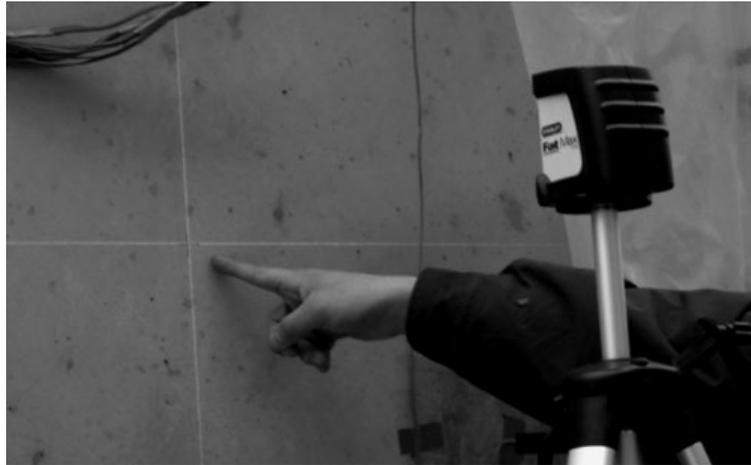
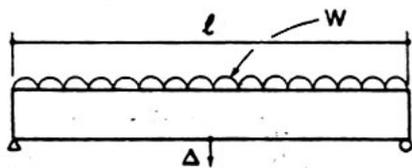


도표 3. 솟음량 측정결과(cm)

Beam01	Beam02
1.20	1.15

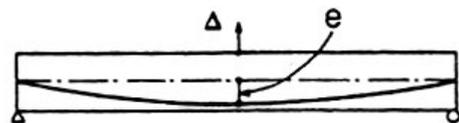
3. 솟음량 추정

PC보에 대한 솟음량은 일반적으로 그림 7.과 같이 단순화된 구조모델을 사용하여 계산된다. 부재의 변위는 자중에 의한 아랫방향 변위와 편심 모멘트에 의한 윗방향 변위의 합으로 결정된다. 실제의 구조물은 길이 방향으로 단면의 면적이 변화하지만, 계산의 편의를 위하여 부재의 자중 및 단면 2차 모멘트를 유효 자중과 유효 단면2차모멘트로 정의 하여 다음의 계산을 수행하였다(도표 4.).



$$\Delta_1 = \frac{5}{384} \frac{w l^4}{EI}$$

(a) Uniform loading



$$\Delta_2 = \frac{5}{48} \frac{P e l^2}{EI}$$

(b) Parabolic profile

그림 7. 하중별 처짐량 [4]

도표 4. 솟음량 계산

1. Material Properties			
$E_c(\text{MPa})$	28,500	$I_{\text{eff}}(\text{m}^4)$	0.6956
2. Self weight			
$\omega_\ell(\text{kN/m})$	30.02	$\ell(\text{m})$	24.90
$\Delta_1(\text{cm})$	-0.75		
3. Eccentric Moment			
$P \cdot e(\text{kN} \cdot \text{m})$	6,138.4		
$\Delta_2(\text{cm})$	2.00		
4. Total deflection			
$\sum \Delta(\text{cm})$	1.25		

계산결과는 솟음량 추정량이 측정치(도표 3.)와 10% 이내 차이를 보이고 있음을 나타낸다. 이는 단순화된 구조모델을 사용하여 계산된 값임을 고려하여 볼 때 유용한 오차 범위인 것으로 사료된다. 위의 결과는 적절한 현장조건에 대한 고려가 수행될 경우 솟음량을 품질관리지표로 사용할 수 있다는 가능성을 나타낸다.

하지만, 위의 해석모델은 강연선의 변형률이 콘크리트 단면과 일치한다는 가정을 사용하여 성립된 것으로 2.3절에서 관찰된 PC보의 변형률과는 차이를 나타내었다. 또한 위의 모델은 단순지지조건을 근거로 수립된 점을 인지하여야 한다.

4. 결 론

PC보의 솟음량은 다수의 재료 및 시공적 요소를 종합적으로 반영하는 물리량으로 신뢰성 있는 솟음량의 추정을 위하여 현장조건에 대한 적절한 고려가 필요함이 나타났다. 본 논문은 2개의 실 PC보에 대한 솟음량 추정결과를 서술하였으며, 추정된 수치는 실제 측정치에 잘 부합함을 보였다. 하지만, 위의 추정치는 간략화된 모델에 의거한 것임을 인지하여야 하며, 솟음량을 현장 관리지표로 사용할 경우 이를 적절히 고려하여야 할 것이다.

참고문헌

1. Tolerance Manual for Precast and Prestressed Concrete Constructoin (2006), Precast/Prestressed Concrete Institute, MNL 135-00
2. PCI Design Handbook 6th ed. (2004), Precast/Prestressed Concrete Institute, MNL 120-04
3. 대한토목학회 (2004), “철도설계기준(철도교편)”, 노해출판사
4. M. P. Collins, D. Mitchell (1991), "Prestressed Concrete Structures", Prentice-Hall, Inc.