

PSC 빔교의 구조안전성 검토 사례 연구

A Case Study on the Structural Safety Assessment of Prestressed Concrete Beam Bridge

은충기 · 채원규 · 손영현* · 홍성욱**

신구대학 토목과 · *현대건설 기술연구소 · **한림정보산업대학 토목과

1. 서 론

본 연구에서는 PSC 빔교의 안전성 검토에 대한 기초자료를 제공하기 위하여, PSC 빔교의 구조안전성 검토 과정 및 방법에 대한 사례를 연구하였다.

PSC 빔교의 구조안전성 평가를 위하여 대상 PSC 교량을 선정하여 단면특성 계산, 하중 계산, 구조체에 대한 모델링, 하중조합 등의 일련의 구조해석을 수행하였으며, 설계하중 작용시 구조물의 각 부재에 발생하는 최대 단면력을 산출하였다.

본 연구에서는 최종적으로 이들 구조해석 결과를 이용하여 PSC 빔교의 슬래브 및 슬래브와 PSC 빔의 합성단면에 대한 구조안전성을 강도설계법으로 검토하였다.

2. 구조해석 모델

2.1. 대상 구조물

본 연구의 대상 PSC 빔교는 5경간 연속교로서 지간은 127.6m, 폭은 10.0m, PSC 주형간의 간격은 2.40m 이며, 설계하중은 DB-18, DL-18이다.

2.2. 재료적 특성

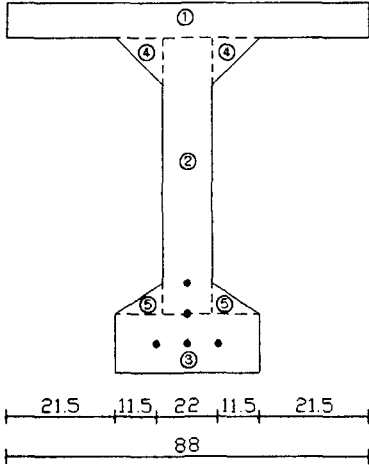
본 연구의 대상 구조물인 PSC교에 사용된 콘크리트, 철근 및 PSC 강재의 재료적 특성은 <표 1>과 같다.

<표 1> 콘크리트, 철근 및 PSC 강재의 재료적 특성

재료	재료적 특성	
콘크리트	슬래브의 설계기준강도	$f_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$
	PSC 빔의 설계기준강도	$f_{ck} = 350 \text{ kgf/cm}^2$
	프리스트레스 도입시의 설계기준강도	$f_{ci} = 280 \text{ kgf/cm}^2$
철근	슬래브 철근의 항복강도	$f_y = 3000 \text{ kgf/cm}^2$
	PSC 빔 철근의 항복강도	$f_y = 2400 \text{ kgf/cm}^2$
PSC 강재 (KSD 7002 5-12 ϕ 7)	항복점응력	$f_{py} = 13500 \text{ kgf/cm}^2$
	인장강도	$f_{pu} = 15500 \text{ kgf/cm}^2$
	탄성계수	$E_{pu} = 2.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$

2.3. 단면특성값 계산

본 연구에 사용된 대상 구조물의 단면은 <그림 1>과 같으며, 계산된 단면 특성값은 <표 2>와 같다.



<그림 1> PSC 빔의 단면 [단위:cm]

<표 2> 단면 특성값

No	A	y	A · y	A · y ²	I
①	17 × 88 = 1496.0	8.5	12716	108086	36029
②	103 × 22 = 2266.0	68.5	155221	10632639	2003333
③	45 × 15 = 675.0	127.5	86063	10972969	12656
④	10 × 11.5 = 115.0	20.3	2335	47390	639
⑤	11.5 × 25 = 287.5	111.7	32114	3587106	9983
계	4839.5		288449	25348190	2063640

여기서,

A : 단면적 (cm²)

y : Beam 상단에서 도심까지 거리 (cm)

I : 단면 2차 모멘트 (cm⁴)

3. 구조해석

3.1. 하중 계산

본 연구에서는 대상 구조물인 PSC 빔교에 작용되는 고정하중과 활하중을 계산하였으며, 그 계산 절차는 다음과 같다.

가. 고정하중

① 아스콘 : $1.0 \times 0.05 \times 2.3 = 0.115t/m$

② 콘크리트 : 슬래브 및 PSC 빔의 자중은 구조해석 프로그램에서 자동계산

나. 활하중

① 충격계수 : $i = \frac{15}{(40 + L)} \leq 0.3 \therefore i = \frac{15}{(40 + 25.65)} = 0.23$

② 차륜 1개의 유효폭 산정

$E = 1.2 + 0.06L \leq 2.1m \therefore E = 1.2 + 0.06 \times 25.65 = 2.739m > 2.1m E = 2.1m$

③ 하중재하 차선수 선택 (Wc = 8.5m, 설계차선수 N = 2)

가) 1차선 재하시 : $P_1 = 2P / (1.8 + 2.1) = 0.513P$

나) 2차선 재하시 : $P_2 = 4P / (1.8 \times 2 + 1.2 + 2.1) = 0.580P$

\therefore 2차선 재하 선택

④ 하중 계산

가) DB-18

$$\cdot P_r = 0.580 \times 0.4 \times 18 \times (1 + 0.23) \times 2.4 = 12.328t$$

$$\cdot P_f = 0.580 \times 0.1 \times 18 \times (1 + 0.23) \times 2.4 = 3.082t$$

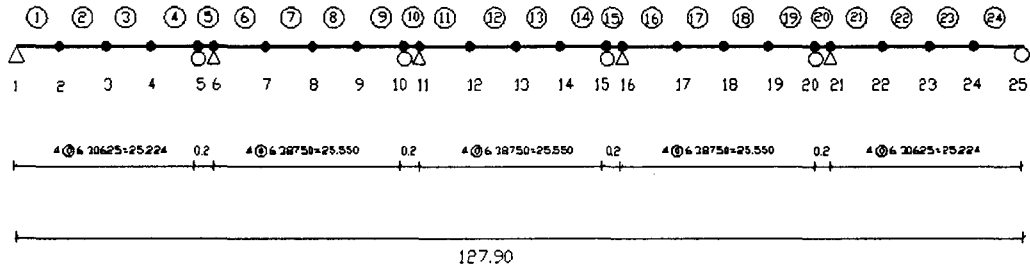
나) DL-24

$$\cdot P_m = 8.1 \times (1 + 0.23) / 3.0 \times 2.4 = 7.970t$$

$$\cdot W_f = 0.95 \times (1 + 0.23) / 3.0 \times 2.4 = 0.935t/m$$

3.2. 모델링

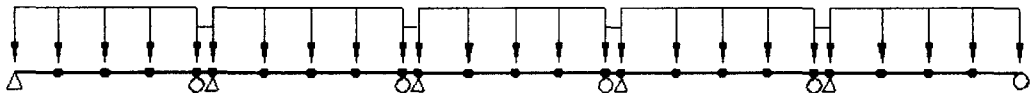
본 연구에서는 구조해석시 대상 구조물인 5경간 연속 PSC 빔교를 <그림 2>와 같이 2차원으로 형상화하여 25개의 절점과 24개의 부재로 모델링 하였다.



<그림 2> 구조해석 모델링 [단위 : m]

3.3. 하중경우 및 하중조합

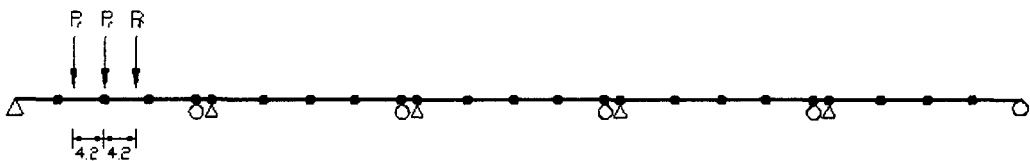
본 연구에서 구조해석시 사용한 하중경우는 모두 9가지이며, 이들 하중경우에 대한 하중조합은 모두 8가지를 사용하였다. 고정하중이 작용된 Load Case 1과 활하중이 재하된 Load Case 2, 3에 대한 하중재하 상태는 각각 <그림 3>~ <그림 5>와 같다.



<그림 3> 하중 경우 1 (고정하중)

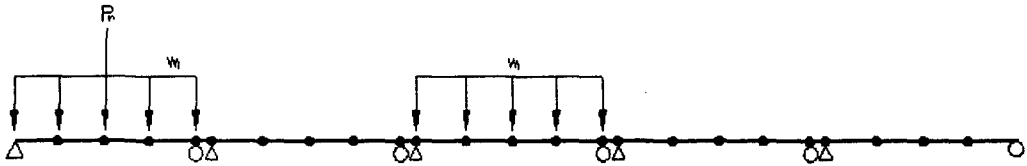
$$R = 3.0816 (t/m)$$

$$R = 12.3216 (t/m)$$



<그림 4> 하중 경우 2 (활하중 DB-18, 1경간 +M 최대)

$$w = 0.9353 \text{ (t/m')} \\ P_r = 7.9704 \text{ (t/m')}$$



<그림 5> 하중경우 3 (활하중 DL-18, 1경간 +M 최대)

3.4. 슬래브의 구조안전성 검토

본 연구에서는 구조해석 결과에 의해 대상 PSC교의 당초 설계하중인 DB-18, DL-18 하중에 의한 설계강도와 극한강도를 비교 검토하여 슬래브의 안전성 검토를 수행하였다.

(1) 극한강도 산정

① 고정하중 모멘트

$$W_D = 0.18 \times 2.5 \times 1.0 + 0.05 \times 2.3 \times 1.0 = 0.565 \text{ t/m}$$

$$M_D = (0.565 \times 2.18^2) / 10 = 0.269 \text{ t} \cdot \text{m}$$

② 활하중 모멘트(주철근이 주행방향과 직각)

$$\text{충격계수 } i = \frac{15}{40 + L} = \frac{15}{40 + 2.18} = 0.356 > 0.3 \quad \therefore i = 0.3$$

$$M_L = \frac{2.18 + 0.6}{9.6} \times 7.2 \times 0.8 \times (1 + 0.3) = 2.168 \text{ t} \cdot \text{m}$$

③ 극한 모멘트

$$M_u = 1.3M_D + 2.15M_L = 1.3 \times 0.269 + 2.15 \times 2.168 = 5.011 \text{ t} \cdot \text{m}$$

(2) 설계강도 산정

$$f_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2, \quad f_y = 3000 \text{ kgf/cm}^2$$

$$b = 100 \text{ cm}, \quad d = 14 \text{ cm}, \quad A_s = 20.268 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\eta = \frac{A_s \cdot f_y}{0.85 f_{ck} \cdot b} = \frac{20.268 \times 3000}{0.85 \times 240 \times 100} = 2.981 \text{ cm}$$

$$M_d = \phi A_s \cdot f_y \left(d - \frac{\eta}{2} \right) = 0.85 \times 20.268 \times 3000 \times \left(14 - \frac{2.981}{2} \right) \\ = 646533.5 \text{ kgf} \cdot \text{cm} = 6.465 \text{ t} \cdot \text{m}$$

(3) 슬래브의 안전성 검토

$$\therefore M_d > M_u$$

3.5. 슬래브-PSC 빔 합성단면의 구조안전성 검토

본 연구에서는 구조해석 결과를 이용하여 대상 PSC교의 당초 설계하중인 DB-18, DL-18 하중에 의한 설계강도와 극한강도를 비교 검토하여 슬래브와 PSC 빔 합성단면에 대한 안전성 검토를 수행하였다.

(1) 유효폭

$$16tf + bw = 16 \times 18.0 + 22.0 = 310.0 \text{ cm}$$

$$\text{주형 중심간 거리} = 240.0 \text{ cm}$$

$$\text{보의 지간}/4 = 2548.75/4 = 637.2 \text{ cm}$$

$$\therefore b = 240.0 \text{ cm}$$

(2) P.C 강제비

$$A_p = 5 \times 4.62 = 23.1 \text{ cm}^2 \quad d_p = 140.2 \text{ cm}$$

$$\therefore \rho_p = \frac{A_p}{b \cdot d_p} = \frac{23.1}{240.0 \times 140.2} = 0.000687$$

(3) P.C 강재의 응력

$$\gamma_p = 0.4 \quad (\because \frac{f_y}{f_{pu}} = \frac{13500.0}{15500.0} = 0.871 > 0.85)$$

$$\beta_1 = 0.85 \quad (\because f_{ck} = 240.0 < 280.0)$$

$$\therefore f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \cdot \rho_p \cdot \frac{f_{pu}}{f_{ck}} \right]$$

$$= 15500.0 \times \left[1 - \frac{0.4}{0.85} \times 0.000687 \times \frac{15500.0}{240.0} \right] = 15176.37 \text{ kgf/cm}^2$$

$$(4) \text{ 중립축 } a = \frac{A_p \cdot f_{ps}}{0.85 f_{ck} \cdot b} = \frac{23.1 \times 15176.37}{0.85 \times 240.0 \times 240.0} = 7.16 \text{ cm} < 18.0 \text{ cm}$$

\therefore 직사각형 단면으로 휨강도 계산.

(5) 강제지수

$$\omega_p = \rho_p \cdot \frac{f_{pu}}{f_{ck}} = 0.000687 \times \frac{15500.0}{240.0} = 0.044$$

$\therefore \omega_p < 0.36\beta_1 (= 0.306)$, 저보강 PSC보 \rightarrow 다음 식으로 공칭강도 산정.

(6) 공칭강도

$$M_n = A_p \cdot f_{ps} \cdot \left(d_p - \frac{a}{2} \right) = 23.1 \times 15176.37 \times \left(140.2 - \frac{7.16}{2} \right) = 478.954 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$M_d = \phi M_n = 0.85 \times 478.954 = 407.111 \text{ t} \cdot \text{m}$$

(7) 계수모멘트

$$M_D = 155.61t \cdot m, \quad M_L = 122.25t \cdot m$$

$$M_U = 1.3 \times 155.61 + 2.15 \times 122.25 = 465.131t \cdot m$$

(8) 슬래브 - PSC 빔 합성단면의 안전성 검토

$$\therefore M_d < M_u$$

3.6. 구조해석 고찰

본 연구에서 대상 구조물인 PSC 빔교에 당초 설계하중인 DB-18 및 DL-18 하중을 적용하여 구조해석을 수행한 결과는 <표 3>과 같다.

<표 3> 구조해석 결과

검 토 부 재	극한 휨모멘트 Mu [t·m]	설계 휨모멘트 Md [t·m]	안전도 판정
슬래브 단면	5.011	6.465	O.K
슬래브와 PSC 빔의 합성단면	465.131	407.111	N.G

<표 3>의 결과에서, 대상 구조물의 슬래브 구조는 극한 휨모멘트가 설계 휨모멘트의 약 78%로 안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났으며, 슬래브와 PSC 빔의 합성단면은 극한 휨모멘트가 설계 휨모멘트를 초과하여 구조적으로 불안전함을 알 수 있다. 이에 대해서는 적절한 보수 또는 보강이 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 PSC 빔교의 구조안전성 검토에 대한 기초자료를 제공하기 위하여, 대상 PSC 빔교에 대한 모델링, 지점조건 설정, 단면특성 산정, 하중계산, 하중조합 등의 일련의 구조해석을 수행하였고, 구조해석 결과에 의해 대상 구조물에 발생하는 최대 단면력을 정리하였으며, 강도설계법에 의해 극한강도 및 설계강도를 비교·검토함으로써 대상 구조물의 안전성을 평가하였다.

본 연구에서 수행된 PSC 빔교의 안전성 검토 결과, 대상 구조물의 슬래브 구조는 극한강도가 설계강도 보다 적게 나타나 구조적인 안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 한편 슬래브와 PSC 빔의 합성단면에 대한 안전성 검토에서는, 극한강도가 설계강도를 초과하여 구조적으로 불안전함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. "콘크리트 표준시방서", 건설교통부, 1996년.
2. "콘크리트 구조설계기준", 건설교통부, 1999년.
3. "도로교 표준시방서", 건설교통부, 1996년
4. Computer & Structures Inc., "SAP 2000 Nonlinear Structural Analysis User Manual", 1999.