

스트럿-타이 모델에 의한 프리스트레스트 콘크리트 박스교 격벽부의 상세 설계

Design of Diaphragm of Prestressed Concrete Box Bridge by Strut-Tie Model

선 민호* 김 영훈** 송 하원*** 변 근주****
Sun, Min-Ho Kim, Young-Hoon Song, Ha-Won Byun, Keun-Joo

ABSTRACT

This paper is about design for diaphragm of prestressed concrete box bridge using strut-tie model. In this paper, equivalent loads for the diaphragm are computed by considering loading conditions on continuous prestressed concrete box bridge and analyses for both longitudinal section and transverse section of the diaphragm are done by considering the equivalent loading and the prestressing. Based on principal stress trajectory obtained from the analyses, strut-tie model for each sections are constructed. By analyzing the constructed strut-tie model for each sections, the amounts and the locations of reinforcement for the diaphragm are obtained. The application of strut-tie model in this paper shows that the design by strut-tie model for the diaphragm of prestressed concrete box bridges can be rationally performed.

1. 서 론

최근 건설되고 있는 교량중 상당량이 프리스트레스트 콘크리트 박스 거더교로 가설되고 있다. 프리스트레스트 콘크리트 박스 거더교는 단면이 폐합단면이기 때문에 비틀림 강성과 종방향, 횡방향에 대한 휨강성이 커서 60m~70m 이상의 지간을 갖는 교량, 스쿠 교량 등 비틀림을 많이 받는 교량에 유효하다고 할 수 있다. 박스 거더교에서 비틀림으로 인한 횡방향 변형에 저항하도록 하는 2차 부재를 설치하는데 이를 격벽부라고 한다¹⁾. 종래의 격벽부 설계는 격벽부 형상이 기하학적으로 불연속 이어 응력이 교란되기 때문에 과거의 설계경험이나 일반상식등에 바탕을 두어 수행되었다.²⁾³⁾ 이러한 응력교란 영역에 관한 설계방법중의 하나가 트러스 모델⁴⁾⁵⁾⁶⁾에 바탕을 둔 스트럿-타이 모델에 의한 설계이다. 즉 대상구조물에 대한 해석을 통하여 주응력의 흐름을 구하고 이를 근거로 스트럿-타이 모델을 구성하여 스트럿과 타이의 부재력을 구하고 타이의 부재력으로 부터 철근량을 산정하고 타이의 위치에 철근을 배근하는 합리적인 설계방법이다. 본 논문은 프리스트레스트 콘크리트 박스 연속교량의 격벽부에 대해 격벽부 단면 상부슬래브에 재하한 등가하중에 의하여 구한 주응력 궤적선도를 바탕으로 스트럿-타이 모델을 구성하였고 AASHTO에서 제안한 식⁷⁾으로 위험 절점에서 안정검토를 하였으며 3차원 설계효과를 얻고자 횡단면 설계와 종단면 설계를 수행하였다.

* (주)건화엔지니어링 구조부 사원
*** 연세대학교 토목공학과 부교수, 정희원

** 연세대학교 토목공학과 대학원 석사과정
**** 연세대학교 토목공학과 교수, 정희원

2. 격벽부의 등가하중의 산정

격벽부에 대한 연구대상 교량은 경간의 길이가 50m인 10경간 연속교로서 FSM공법으로 가설된 교량이며 단면의 제원은 그림1과 같으며 격벽부의 스트럿-타이 모델을 적용하기 위해 대상교량에 작용하는 설계하중에 대해 설계대상 격벽부에 비틀림과 전단력을 가장 크게 발생시키는 등가 외부하중을 구하였다.

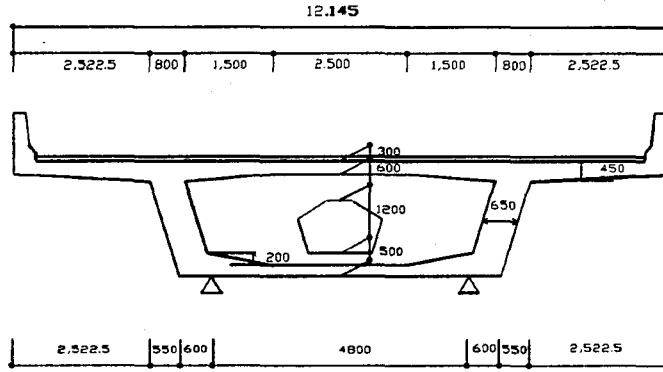


그림1. 교량 격벽부의 단면제원

2.1 횡단면 등가하중

DB하중과 DL하중을 1차선 재하경우부터 전차선 재하경우에 대해 비틀림과 전단력을 가장 크게 일으키는 경우의 반력을 구했다. DB하중과 DL하중에 대해 2차선 편측 재하의 경우가 전단력과 비틀림 모멘트가 가장 크게 나타났으므로 이때의 반력을 다시 하중으로 결정했다. 그림2는 결정된 재하 활하중과 PC멘턴의 위치 그리고 포트베어링의 위치를 나타낸다. 한편 스트럿-타이 모델을 구성한 후 등가하중을 재하 할 때는 트러스 모델이라는 점을 감안하여 트러스 절점에 하중을 재하 하였다. 이때 절점 재하 하중은 집중하중들간의 거리 비에 따라 다시 재분배하였다.

2.2 종단면 등가하중

종단면에 대해 교축방향의 휨모멘트와 PS강선의 압축력으로 인한 캔틸레버보 거동을 고려하여 수직 철근량을 산정하기 위해 교축방향의 휨모멘트와 PS강선의 압축력을 고려하여 종단면 등가하중을 결정 하였다. 여기서 교축방향 휨모멘트는 우력으로 치환하여 집중하중으로 재하하였고 PS강선의 압축력은 PS강선 한 본당의 긴장력을 고려하여 재하했다. 그림3은 종단면의 PS강선의 압축력과 교축 방향으로 작용하는 부모멘트를 우력으로 환산한 값과 포트베어링에 의한 지점조건을 보여준다. 여기서 우력의 팔길이 2.54m는 유효 높이이다.

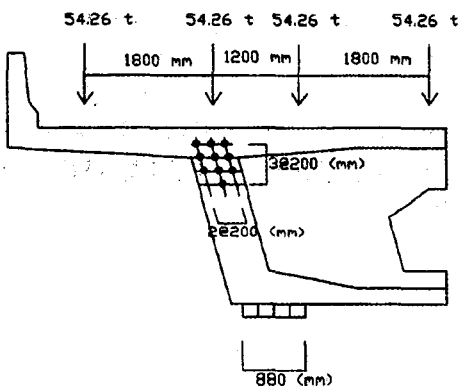


그림2. 횡단면 등가하중

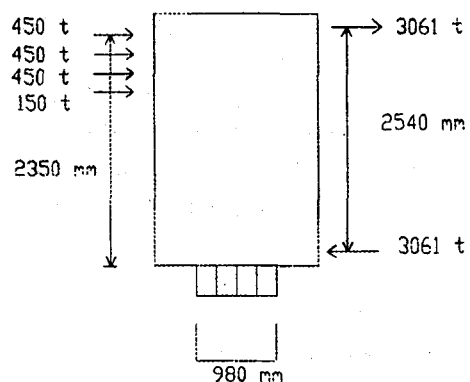


그림3. 종단면 등가하중

표1은 등가 활하중과 사하중을 보여준다.

표1. 사하중과 활하중의 작용력

1) $V = 1478.55 \text{ ton (D)} + 217.05 \text{ ton (L)}$
2) $M = 6888 \text{ t} \cdot \text{m (D)} + 887.86 \text{ t} \cdot \text{m (L)}$
$P = (6888 + 887.56) / 2.54 = 3061 \text{ ton}$
3) PS 강선의 압축력 (1본당) = 150 ton

2.3. 지점조건

교각 격벽부 지점에서는 양방향고정과 일방향 가동단의 포트베어링을 사용했으므로 지점조건을 포트 베어링의 크기를 고려하여 반영했다. 종방향 해석 시에는 횡단면의 지점조건을 그대로 주고 상부, 하부 플랜지에는 교축 방향의 변위를 제한하였다.

3. 주응력 궤적의 산출과 스트럿-타이 모델의 구성

3.1 주응력 궤적

그림4,5,6,7은 횡단면의 등가재하 사하중과 활하중에 대한 주응력 궤적선도를 보여주며 그림 8,9,10,11은 PS강선의 압축력과 우력에 대한 주응력 궤적선도를 보여준다.

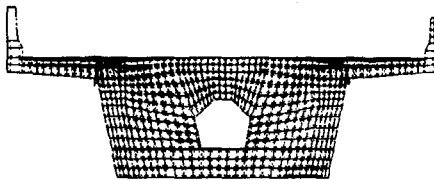


그림4. 횡단면 사하중의 인장응력 궤적선.

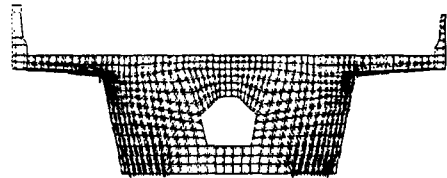


그림5. 횡단면 사하중의 압축응력 궤적선

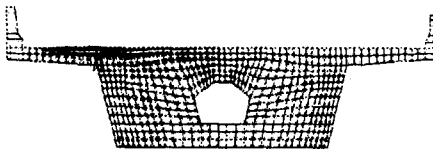


그림6. 횡단면 활하중의 인장응력 궤적선

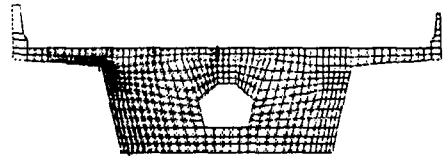


그림7. 횡단면 활하중의 압축응력 궤적선

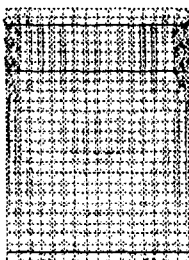


그림8. 종단면 PS강선의 인장응력 궤적선

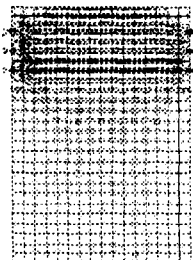


그림9. 종단면 PS강선의 압축응력 궤적선

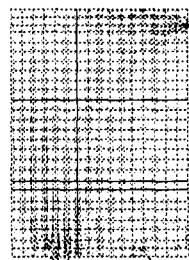


그림10. 종단면우력모멘트 인장응력 궤적선

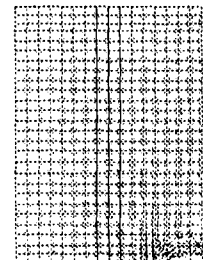


그림11. 종단면우력모멘트 압축응력 궤적선

3.2 스트럿-타이모델 구성

2차원 평면해석을 수행하여 구한 주응력 궤적선도를 바탕으로(그림4~11) 그림12~15와 같이 스트

릿-타이 모델을 구성했다. 그림에서 C부재는 스트럿을 T부재는 타이틀 의미한다.

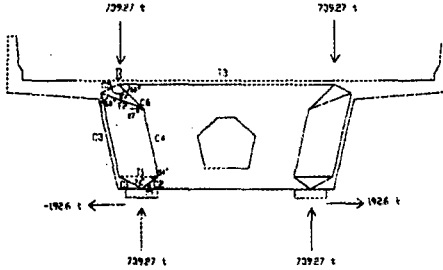


그림12. 횡단면 사하중에 대한 STM

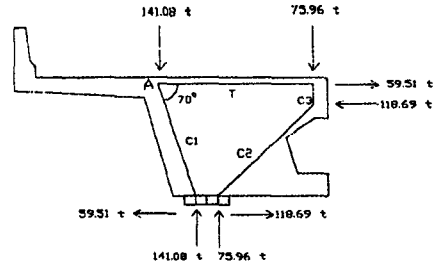


그림13. 횡단면 활하중에 대한 STM

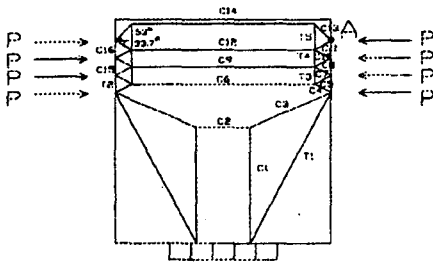


그림14. 종단면 PS강선 압축력에 대한 STM

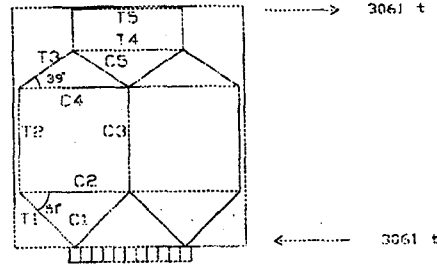


그림15. 종단면 우력에 대한 STM

4. 스트럿-타이모델 해석

4.1 스트럿-타이모델의 부재력

구성된 스트럿-타이 모델에 사하중과 등가 활하중이 작용하는 경우에 각각 부재력을 산정 하였다.

1) 사하중에 의한 부재력

외부하중 $P_t (=739.27 \text{ ton})$ 는 사하중에 의한 반력으로부터 구하여졌으며 이를 다시 하중으로 스트럿-타이 모델 트러스상에 그림12와 같이 재하했다. 횡단면 사하중에 대한 스트럿-타이 모델의 부재력은 표2와 같다. 해석결과 얻어진 횡단면 사하중에 대한 스트럿-타이 모델의 부재력은 표2와 같다.

2) 활하중에 의한 부재력

외부하중은 4개의 바퀴하중을 스트럿-타이 모델에 재하하기 위하여 그림13과 같이 다시 재분배 하였다. 이때 재하 하중 P 는 P_1 과 P_2 로서 다음 식1,2에 의해 얻어진다.

$$P_1 = 53.26 + 53.26 + 53.26 \times 0.6 = 141.08t \quad (1)$$

$$P_2 = 53.26 + 53.26 \times 0.4 = 75.96t \quad (2)$$

해석결과 얻어진 횡단면 활하중에 대한 스트럿-타이 모델의 부재력은 표3과 같다.

표2. 사하중에 대한 부재력

인장 부재	부재력 (TON)	압축 부재	부재력 (TON)
T1	473.92	C1	688.95
T2	411.56	C2	532.77
T3	192.6	C3	385.93
		C4	378.04
		C5	341.48
		C6	703.60

표3. 활하중에 대한 부재력

인장 부재	부재력 (TON)	압축부재	부재력 (TON)
T1	59.52	C1	153.12
		C2	140.92
		C3	75.96

3) PS강선 긴장력에 의한 부재력

종단면 PS강선의 긴장력은 초기 손실을 고려하여 그림14과 같이 PS텐던 1본당 $P=150t$ 을 재하하였다.

중단면 PS강선 긴장력에 대한 스트럿-타이 모델의 부재력은 표4와 같다.

4) 우력에 의한 긴장력

중방향 부모멘트를 그림15와 같이 우력으로 대체해서 재하였다. 이때 교축방향의 인장력은 상부, 하부 슬래브와 북부에서 담당하는 것으로 간주하고 이에 대한 철근량은 격벽부 철근량에서 제외했다. 중단면 우력에 대한 스트럿-타이 모델의 부재력은 표5와 같다.

표4. 중단면 PS강선 긴장력에 대한 STM 부재력

인장 부재	부재력 (TON)	압축 부재	부재력 (TON)	압축 부재	부재력 (TON)
T1	55.80	C1	51.28	C9	435.74
T2	50.12	C2	96.22	C10	225.31
T3	133.32	C3	109.30	C11	310.00
T4	192.72	C4	91.20	C12	453.38
T5	243.65	C5	331.45	C13	306.00
		C6	352.44	C14	183.20
		C7	208.03	C15	18.64
		C8	313.71	C16	68.34

표5. 중단면 우력에 대한 STM 부재력

인장 부재	부재력 (TON)	압축 부재	부재력 (TON)
T1	165.40	C1	703.53
T2	127.06	C2	253.13
T3	203.40	C3	158.03
T4	317.65	C4	203.40
T5	3061.00		

4.2 스트럿-타이모델의 철근량 산출 및 안정검토

철근량의 산출은 높이별과 단위폭당으로 산출하고, 스트럿-타이 모델의 안정검토는 AASHTO 제안 식을 따랐다. 계산 과정과 결과는 표6~9와 같다.

표6. 횡단면 사하중에 대한 철근량 산출 및 안정검토

<p>※ 높이에 따른 철근량 산출.</p> <p>2.6 m ~ 2.3 m : T3가 부담하는 영역</p> $A_{sh} = \frac{T_3}{0.9 \times \sigma_y} = 53.5 \text{ cm}^2$ <p>1.3 m ~ 1.5 m : T2가 부담하는 영역</p> $T_2 \times \cos 27^\circ = 366.70 \text{ t (수평력)}$ $T_2 \times \sin 27^\circ = 186.84 \text{ t (수직력)}$ $A_{sh} = \frac{T_{2h}}{0.9 \times \sigma_y} = 101.86 \text{ cm}^2$ $A_{sv} = \frac{T_{2v}}{0.9 \times \sigma_y} = 51.9 \text{ cm}^2$ <p>0.8 m ~ 0.25 m : T1이 부담하는 영역</p> $A_{sh} = \frac{T_1}{0.9 \times \sigma_y} = 131.64 \text{ cm}^2$ <p>- 절점 A (C-C-C node)</p> $f_{allow} = 0.85 \phi f_c = 238 \text{ kg/cm}^2$ $A_c = 98 \times 88 = 8624 \text{ cm}^2$ $C = \sqrt{C1^2 + C2^2 + 2C1C2 \cos 74^\circ} = 980 \text{ t (계속)}$	$\sigma_c = \frac{C}{A_c} = 113.63 \text{ kg/cm}^2 < f_{allow}$ <p>- 절점 B (C-C-T node)</p> $f_{allow} = 0.75 \phi f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ $A = 8624 \text{ cm}^2$ $C = \sqrt{C5^2 + C6^2 + 2C5C6 \cos 83^\circ} = 818.7 \text{ t}$ $\sigma_c = \frac{C}{A_c} = 94.93 \text{ kg/cm}^2 < f_{allow}$ <p>- 스트럿 C6</p> $\epsilon_r = \frac{T}{A_r E_r} = 0.001765$ <p>스트럿과 타이의 교차각 $\alpha = 60^\circ$</p> $\epsilon_1 = \epsilon_r + (\epsilon_r + 0.002) \cot^2 \theta = 0.00302$ $f_{2max} = \frac{f_c}{0.8 + 170\epsilon_1} = 304.5 \text{ kg/cm}^2$ $\leq 0.85 f_c = 340 \text{ kg/cm}^2$ $\phi A_s f_{2max} = 1838 \text{ t}$ $\geq N_u = 609.34 \text{ t}$
---	--

표7. 횡단면 활하중에 대한 철근량 산출 및 안정검토

<p>2.6 m ~ 1.7 m : T₁이 부담하는 영역</p> $A_{sh} = \frac{T_1}{0.9 \times \sigma_y} = 16.53 \text{ cm}^2$ <p>- 절점 A (C-C-C node)</p> $f_{allow} = 0.85 \phi f_c = 238 \text{ kg/cm}^2$ $A_c = 98 \times 88 = 8624 \text{ cm}^2$ $C = C1 \times \cos 74^\circ = 143.77 t$ $\sigma_c = \frac{C}{A_c} = 16.67 \text{ kg/cm}^2 < f_{allow} \quad (\text{계속})$	<p>- 스트럿 C1</p> $\epsilon_s = \frac{T}{A_s E_s} = 0.001765$ <p>스트럿과 타이의 교차각 $\alpha = 70^\circ$</p> $\epsilon_1 = \epsilon_s + (\epsilon_s + 0.002) \cot^2 \theta = 0.0022637$ $f_{2max} = \frac{f_c}{0.8 + 170\epsilon_1} = 337.6 \text{ kg/cm}^2$ $\leq 0.85 f_c = 340 \text{ kg/cm}^2$ $\phi A_s f_{2max} = 2038 t \geq N_u$ $N_u = C1 \times \cos 20^\circ = 143.88 t < \phi A_s f_{2max}$
---	---

표8. 종단면 PS강선에 대한 철근량 산출 및 안정검토

<p>* 폭에 따른 철근량 산출.</p> <p>0.0 m ~ 0.25 m : T₁과 T₂가 부담하는 영역</p> $A_{sv} = \frac{T_1 \times \cos 12^\circ + T_2}{0.9 \times \sigma_y}$ $= 29.89 \text{ cm}^2$ <p>0.25 m ~ 1.0 m : T₃, T₄, T₅가 부담하는 영역</p> $A_{sv} = \frac{T_3 + T_4 + T_5}{0.9 \times \sigma_y}$ $= 158.58 \text{ cm}^2$ <p>- 절점 A (C-C-C node)</p> $A_c = 28 \times 28 = 2352 \text{ cm}^2$ $C = \sqrt{C13^2 + C11^2 + 2C13C11 \cos 86.7^\circ}$ $= 447.94 t \quad (\text{계속})$	$\sigma_c = \frac{C}{A_c} = 190.45 \text{ kg/cm}^2$ $< f_{allow} = \phi f_c = 238 \text{ kg/cm}^2$ <p>- 스트럿 C11</p> $\epsilon_s = \frac{T}{A_s E_s} = 0.001764$ <p>스트럿과 타이의 교차각 $\alpha = 33.7^\circ$</p> $\epsilon_1 = \epsilon_s + (\epsilon_s + 0.002) \cot^2 \theta = 0.01023$ $f_{2max} = \frac{f_c}{0.8 + 170\epsilon_1} = 157.54 \text{ kg/cm}^2$ $\leq 0.85 f_c = 340 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{표 2-1 참조})$ $\phi A_s f_{2max} = 259.37 t$ $\geq N_u = 257.91 t$
---	--

표9. 종단면 우력에 대한 철근량의 산출

<p>0.0 m ~ 0.25 m : T₃, T₂, T₁이 부담하는 영역</p> $A_{sv} = \frac{T_3 \sin 39^\circ \times 1/2 + T_2 + T_1 \sin 39^\circ}{0.9 \times \sigma_y}$ $A_{sv} = 67.53 \text{ cm}^2$ <p>0.25 m ~ 1.0 m : T₃, T₁이 부담하는 영역</p> $A_{sv} = \frac{(T_3 \sin 39^\circ + T_1 \sin 39^\circ) \times 1/2}{0.9 \times \sigma_y}$ $A_{sv} = 32.24 \text{ cm}^2$ <p>∴ A_{sv} = (67.53 + 32.24) × 2</p> $= 199.52 \text{ cm}^2$
--

5. 철근의 배근

편의상 수평철근과 수직철근으로 나누고 소요철근을 구하였다. 소요철근량은 표10과 같다.

표10. 소요 철근량

1) 수평철근
$\Sigma A_{th} = 125.015 \text{ cm}^2/m$
$\therefore \text{used } A_s = H22-21^{EA} + H19-18^{EA} = 132.861 \text{ cm}^2$
2) 수직철근
$\Sigma A_{sv} = 219.945 \text{ cm}^2/m$
$\therefore \text{used } A_s = H22-22^{EA} + H19-48^{EA} = 222.682 \text{ cm}^2$
☞ 2.6m ~ 2.3m 사이의 철근량은 상부 슬래브 철근량이기 때문에 격벽부 철근량에서 제외.

수평철근은 횡단면 고려에서 높이별로 구한 단위폭 당 철근량 H22-21EA와 H19-18EA를 배근하였다. 수직철근은 횡단면 고려에서 구한 철근량 H22-22EA와 종단면 고려에서 구한 단위폭 당 철근량 H19-48EA를 배근하였다. 따라서 최종 주철근 배근은 그림16과 같다.

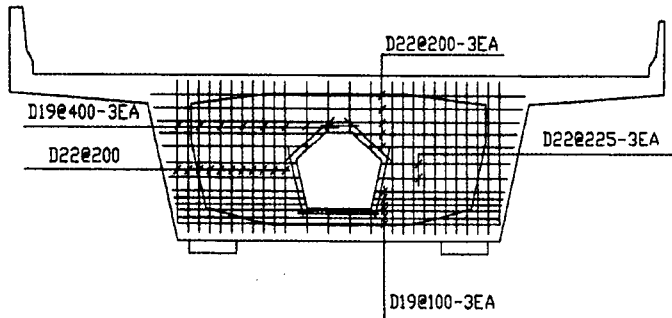


그림16. 주철근의 배근

6. 비교분석

스트럿-타이 모델에서 구한 철근량과 기존 구조계산방법²⁾으로부터 구한 철근량을 비교하였다. 기존의 구조 계산에서 구한 철근량과 스트럿-타이모델에서 구한 철근량이 표11과 같이 거의 일치하였음을 알 수 있다.

표11. 소요철근량의 비교

비교	구조계산서	스트럿-타이 모델
수평 철근량	H22 - 36 ^{EA} 139.4 cm ²	H22 - 21 ^{EA} , H19 - 18 ^{EA} 132.861 cm ²
수직 철근량	H22 - 56 ^{EA} 216.8 cm ²	H22 - 22 ^{EA} , H19 - 48 ^{EA} 222.682 cm ²

7. 결 론

스트럿-타이 모델에 의한 프리스트레스트 콘크리트 박스교 격벽부를 설계하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 명확한 하중재하 위치의 선정이 난해한 프리스트레스트 콘크리트 박스연속교의 격벽부에 전단력과 비틀림의 영향을 고려한 등가하중을 적용하여 종단면 및 횡단면 스트럿-타이 모델을 구성하였다.
2. 구성된 스트럿-타이 모델에 대해 종단면 및 횡단면의 해석을 실시하여 철근을 산출하였고 주철근 배근까지의 3차원 상세설계를 수행하였다.
3. 스트럿-타이 모델에 의해 산정된 철근량은 기존의 구조 계산으로 구한 철근량과 거의 일치하였으며 스트럿-타이 모델에 의한 방법은 합리적 철근배근을 가능하게 하였다.

참고문헌

- 1) C.Menn "Prestressed Concrete Bridges", *Birkhäuser Verlag AG*, 1990, pp 211-265.
- 2) 건설교통부, 도로교 표준시방서(설계편), 1996, pp.470-476.
- 3) Bergmeister, K., Breen J.E., Jirsa, J.O., and Kreger, M.E.: *Detailing for Structural Concrete*, Research Report 1127-3F, Center for Transportation Research, October 1990.
- 4) Marti, P., "Basic Tools of Reinforced Concrete Beam Design", *ACI Structural Journal*, Vol. 82, No. 1, 1985, pp 45-56.
- 5) "철근 콘크리트구조물의 설계와 해석을 위한 트러스모델", *콘크리트학회지*, Vol. 10, No. 1, 1998. 2, pp 4-48.
- 6) 홍성걸, "트러스 모델을 통해 본 철근콘크리트 구조설계 방법론", *발언*, 1996, pp.103-118.
- 7) AASHTO, *Standard Specification for Highway Bridge*, 17ed, 1996.