PSC철도교량 격벽부의 3차원 거동 및 스트럿-타이 모델 해석
3-D Behavior and Strut-and-Tie Model Analysis of Diaphragm in PSC Train Bridge

송하원* 변근주** 김형운*** 김영훈***
Song, Ha-Won Byun, Keun-Joo Kim, Hyoung-Woon Kim, Young-Hoon

Abstract

The function of diaphragms at abutments and piers of prestressed concrete (PSC) box girder train bridge is to transfer forces from the superstructure onto bearings or column and to stiffen the superstructure cross-section against in-plane deformation. Due to large stress disturbance at diaphragm, the design for the diaphragm using conventional design method is relatively irrational than designs for other structual members. And, due to contribution to boundary condition of deck slab by the diaphragm, the behavior of deck slab near the diaphragm is different from behavior of the deck slab obtained from two dimensional analysis of the bridge, which is basis for the design of deck slab.

In this paper, three dimensional behavior of deck slab near diaphragm of PSC box girder train bridge constructed by the precast span method are analyzed by using three dimensional finite element modeling. Then, strut-and-tie model is applied to design the diaphragm of PSC box girder train bridge. The modeling techniques in this paper can be applied effectively to examine the causes of cracks at deck slab near diaphragm and to design diaphragm rationally.

1. 서론

최근에 가설되는 콘크리트 교량은 지간이 길어짐에 따라 대부분이 프리스트레스트 콘크리트(Prestressed Concrete : PSC) 박스거더 교량으로 시공되고 있다. 이러한 PSC 박스거더 교량에 있어서 슬래브(Deck slabs)는 자중과 활하중을 박스거더 웨브에 전달하는 기능을 가지며, 격벽(Diaphragms)은 상부구조의 하중을 받침부나 기둥으로 전달시키고 단면의 평면 변형에 대한 강성을 증가시켜 단면 변형을 방지할 목적으로 단면내에 설치된다[1].

박스거더 교량 슬래브의 설계는 교량의 종방향으로 작용하는 하중과 변위가 균등하다는 가정하에 2차원적인 해석을 바탕으로 철근배근등의 설계가 이루어 지고 있으나, 실제 격벽부 주위의 슬래브는 격벽부의 강성에 의하여 슬래브의 지지조건이 달라져 2차원 구조해석에서 얻어지지 못하는 3차원 거동을 하며 이에 따라 2차원 해석에 근거한 설계에서 반영치 못한 균열이 발생하는 문

* 연세대학교 토목공학과 부 교 수
** 연세대학교 토목공학과 교 수
*** 연세대학교 토목공학과 석사과정

제점이 있다. 따라서 격벽부의 슬래브에 대해 3차원 모델링에 의한 해석을 통하여 격벽부 주위 슬래브의 거동을 분석하는 것은 매우 필요하다[2]. 한편 PSC 박스거더 교량의 격벽은 주변 박스거더와 다른 기하학적인 형상의 변화와 상당한 프리스트레스트 힘에 의한 집중하중이 가해지기 때문에 응력분포가 일정하지 않고 불연속, 교란된 성질을 나타나게 된다. 이러한 교란된 응력 때문에 합리적인 설계를 수행하는데 많은 문제점이 있다[3]. 최근 이러한 역학적 불연속성이 존재하는 구조 부위에 대해 간단하면서도 정확도를 갖는 설계 방법으로서 도입된 것이 스트럿-타이(Strut-and-Tie) 모델이다[4]. 특히 PSM(Precast Span Method)에 의하여 시공되는 PSC 박스거더 철도교량은 기 시공된 교량의 경간 위로 계속해서 시공될 경간까지 프리캐스트 세그멘트를 트레일러가 운반하여 연속시공되므로 설계하중뿐만 아니라 프리캐스트 세그멘트를 적재한 트레일러의 최대편심하중에 의한 격벽부의 합리적인 설계 및 안정성 검토가 필요한 실정이다. 이를 위해 본 연구는 PSM 방식에 의해 시공되는 박스거더 철도교량에 대해 격벽부 슬래브의 3차원 모델링에 의한 해석을 통해 격벽부 슬래브의 거동을 분석하였고 격벽에 대해서도 스트럿-타이 모델에 의한 설계를 수행하였다.

2. PSM 박스거더 철도교량

본 연구의 대상교량은 종방향 텐던으로 내부 긴장되고 PSM으로 시공되는 박스거더 철도교량으로, 1경간이 25m이고 폭이 14m인 2경간 연속교 형식과 3경간 연속교 형식으로 되어있다. 대상교량의 유한요소 해석은 프리캐스트 세그멘트를 적재한 길이 21.5m의 트레일러 하중에 대하여 교량이 단순교 상태가 더 위험하므로 1경간 단순교에 대하여 해석을 실시하였다. 그림 2.1은 해석 대상 경간의 종단면도이고, 그림 2.2는 해석 대상 경간의 횡단면도이다.

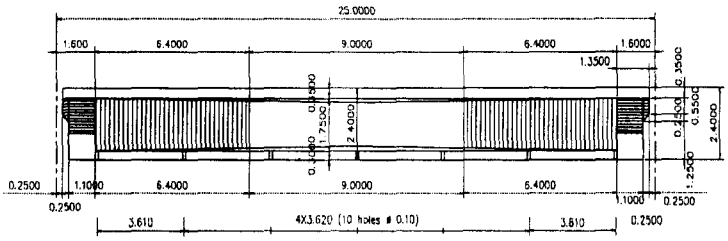


그림 2.1 해석 대상 경간의 종단면도

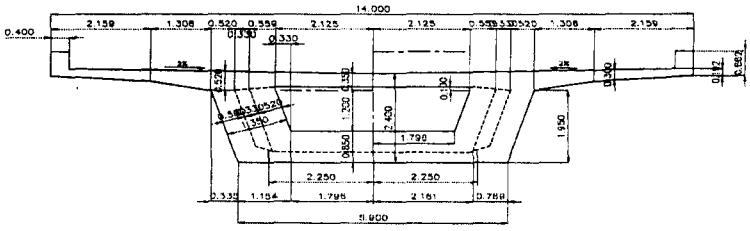
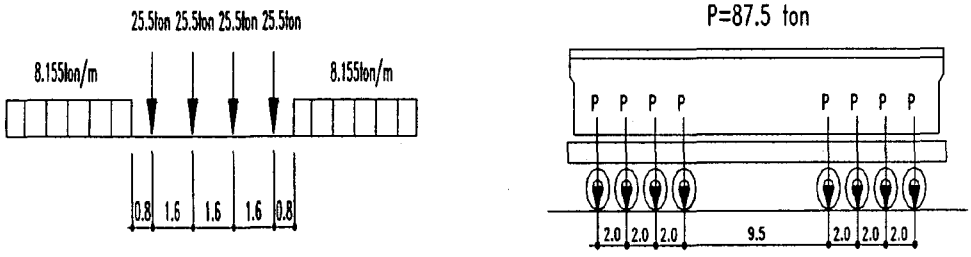


그림 2.2 해석 대상 경간의 횡단면도

대상교량의 재료특성은 표 2.1과 같으며 본 논문에서 고려한 2가지 하중인 열차 하중과 트레일러 하중은 그림 2.3과 같다.

표 2.1 재료특성

(1) 콘크리트	
① 설계 기준 강도 σ_{ck} = 400 kg/cm^2 ② 탄성 계수 Ec = 280,000 kg/cm^2 ③ 단위 중량 Wc = 2500 kg/cm^3 ④ 포아송비 ν = 0.2	⑤ 프리스트레스 콘크리트 허용응력 허용휨압축응력 : $0.4\sigma_{ck}$ = 160.0 kg/cm^2 허용휨인장응력 : $1.5\sqrt{\sigma_{ck}}$ = 30.0kg/cm^2 ⑥ 균열응력 $\sigma_{ru} = 2.0\sqrt{\sigma_{ck}}$ = 40.0 kg/cm^2
(2) PS 강연선	
① T15(ϕ15.2㎜)강연선의 극한 강도 Pu = 26,575kg ② Jacking strength = 19,000kg (75% of ultimate strength) ③ 탄성 계수 Ep = 1,979,592 kg/cm^2	④ 포아송비 ν = 0.3 ⑤ Anchorage slip = 7㎜ ⑥ 파상 마찰 계수 = 0.004 mm^{-1} ⑦ 곡률 마찰 계수 = 0.3 rad^{-1}
(3) 철근 (SD40)	
① 항복강도 : σ_y = 4,000kg/cm^2 ② 탄성계수 : $E_s = 2.04\times10^6 kg/cm^2$	③ 허용응력 : σ_{sa} = 1,800kg/cm^2

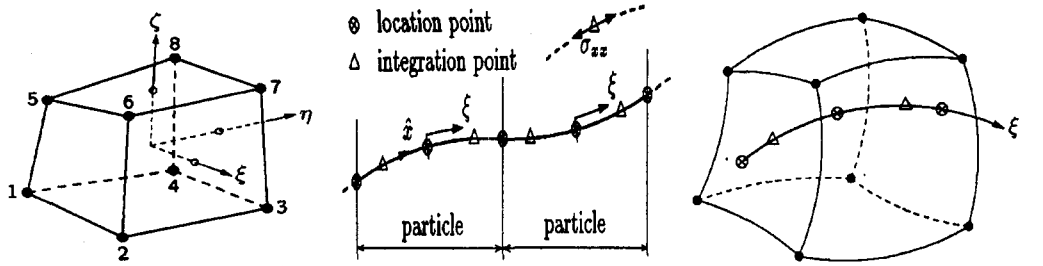


(a) 열차 하중 (b) 트레일러 하중

그림 2.3 열차 하중과 트레일러 하중

3. 3차원 유한요소 모델링

대상교량의 격벽부 주위 해석 모델링은 범용 유한요소 프로그램인 DIANA[5]의 3차원 Solid요소를 사용하여 3차원으로 모델링하였고 하중도 윤하중과 윤하중에의한 영향면 및 모멘트를 종방향 및 횡방향으로 모두 고려하였다. 그림 3.1는 해석에 사용된 Solid요소와 Bar요소 그리고 Solid요소에 매입된 Bar요소를 보여준다.



(a) Solid Element (b) Bar Element (c) Bar Particle in Solid Element

그림 3.1 사용 유한요소

표 3.1는 각 요소를 사용한 교량 모델링과 하중의 구체적 상세를 보여준다.

표 3.1 모델링 상세

(1) 콘크리트 박스 거더 모델링
① 3차원 Solid element를 사용하여 모델링 - 총 Element 수 : 5736 , 총 Node 수 : 8699 ② 실제의 스판형상과 동일하게 단부구간, 변화구간, 직선구간으로 나눔 ③ 재료의 특성을 모두 고려하여 재료의 구성방정식을 선정 ④ 지점 조건은 실제 교량 받침이 위치하는 지점을 고정 및 일방향 가동 으로 처리
(2) PC 강재 모델링
① 3차원 Bar element를 사용하여 입체적으로 모델링 ② Bar의 전체 길이는 몇 개의 Particle로 나누어져 Location point들이 유한요소 모델 안에서 Particle들의 위치를 결정 ③ 프리스트레싱력을 하중값으로 산정하여 Load case에 입력할 수 있도록 함 ④ 재료의 물성치를 고려하여 구성방정식을 선정 ⑤ 긴장력은 트레일러 이동시에 Pre-tension만 고려함 - 트레일러의 이동시 Post-tension에 의한 긴장재는 배치가 안된 상태임 ⑥ 최종적 Post-tension을 고려
(3) 트레일러의 편심 및 하중 모델링
① 트레일러의 편심 0 ~ 50 ㎝에서 변화 시키면서 해석 ② 1개의 스판을 실은 트레일러의 중량을 모든 바퀴에 등분포 재하함 ③ 하중조건 - 교량의 자중 : 단위중량으로 고려함

그림 3.2는 대상교량의 3차원 유한요소 모델링 형상이고 그림 3.3는 3차원 모델링된 교량의 단면 형상이다.

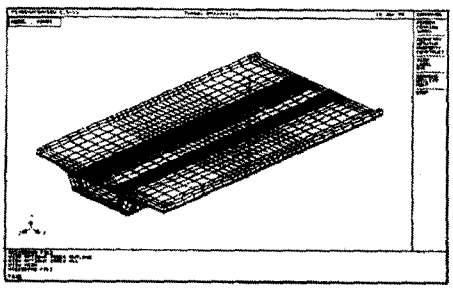


그림 3.2 3차원 모델링 형상

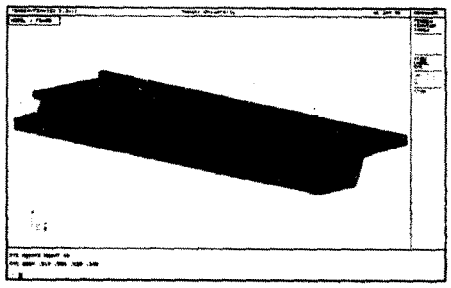


그림 3.3 3차원 모델링 단면

4. 격벽부 슬래브 유한요소해석

박스거더 교량의 슬래브는 단위폭에 대한 1방향 슬래브로 설계되는 것이 보통이지만, 실제 교대, 교각, 내부 힌지의 위치에서는 격벽 때문에 복잡한 3변지지 슬래브의 거동을 보인다. 특히 PSM으로 철도교량이 시공되는 경우 프리캐스트 세그멘트를 적재한 트레일러가 편심을 가지고 이동하는 경우가 가장 위험한 하중상태이므로 3차원 구조해석을 통하여 격벽 주위 슬래브의 거동을 분석하였다. 즉, 트레일러의 편심하중에 따른 격벽 주위의 주응력을 검토하고, 이에 따른 3변지지 슬래브의 균열 발생 가능성이 있는 위험단면을 산정하였다. 그림 4.1은 트레일러의 50㎝ 편심하중일 때 격벽주위 주응력 분포도에 따른 3변지지 슬래브를 나타낸 것이다. 주응력이 크게 나타나는 부분은 3변지지 슬래브의 중앙 부위와 슬래브의 헌치부분으로 나타난다. 그림 4.2~4.4는 3변지지 슬래브의 균열 위험단면이 있는 격벽방향으로 하중 재하 위치가 이동되었을 때 격벽주위의 주응력 분포를 나타낸 것이다. 하중 재하 위치는 영향선에 의거하여 최대 모멘트가 발생하도록 재하한 것이다. 트레일러 편심하중이 50㎝일때 그림 4.4에 점으로 표시한 부분이 주응력이 가장 크게 나타나는 위험단면으로 슬래브의 중앙부위와 슬래브의 헌치부분임을 알 수 있다.

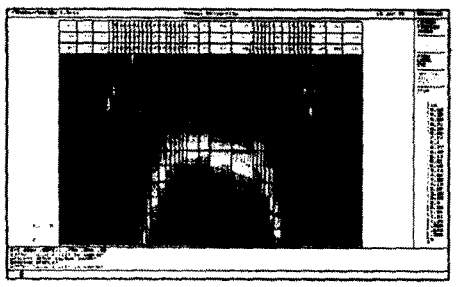


그림 4.1 50㎝편심하중 재하시의 주응력분포 (격벽주위의 상부슬래브 하부)

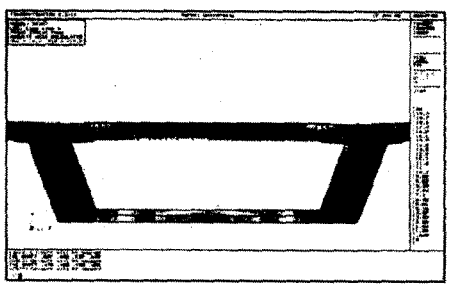


그림 4.2 격벽부근에 편심하중 재하시의 주응력분포(격벽과 접하는 단면)

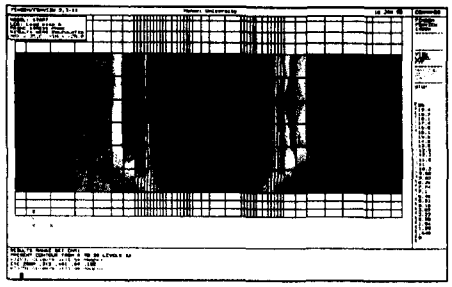


그림 4.3 격벽부근에 편심하중 재하시 주응력분포(격벽주위 슬래브상부)

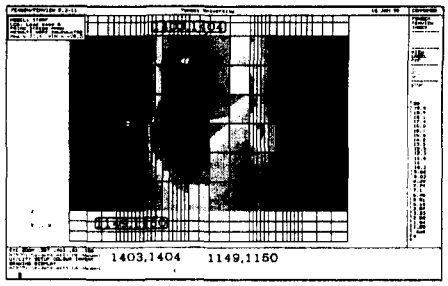


그림 4.4 격벽부근에 편심하중 재하시 주응력분포(격벽주위 슬래브하부)

그림 4.5는 주응력 분석을 통하여 격벽주위 상부 슬래브 하면에서의 균열 발생 위치를 나타낸다. 표 4.1은 균열위치 ①,②에서의 균열폭 계산결과와 콘크리트 표준시방서[6]의 허용균열폭과의 비교를 보여준다.

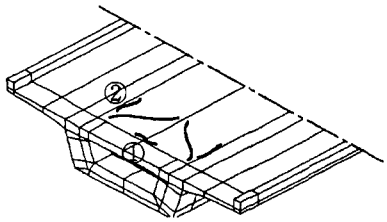


그림 4.5 격벽주위 상부슬래브(하면)의 균열위치

표 4.1 위험단면의 횡방향 균열폭 검토결과

검토 위치	균열폭(㎜)	허용균열폭(㎜)
슬래브의 중앙 (①)	0.170	0.200
슬래브의 헌치 (②)	0.177	0.250

5. 스트럿-타이 모델에 의한 격벽의 해석 및 설계

프리스트레스트 박스거더교의 격벽부를 평면 모델링하여 열차하중과 트레일러 하중에 대하여 2차원 유한요소해석을 수행하여 응력의 분포를 구하였다. 열차하중의 경우에는 선로의 위치에 하중을 재하시킨 경우에 대하여 해석하였고, 트레일러 하중의 경우도 편심이 없는 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 그림 5.1은 열차하중 재하시의 응력분포이고, 그림 5.2는 트레일러하중 재하시의 응력분포이다. 그림 5.3과 그림 5.4는 각각 열차하중에 대한 인장과 압축응력의 흐름을 나타낸다. 그림 5.4와 그림 5.6은 각각 트레일러하중에 대한 인장과 압축응력의 흐름을 나타낸다.

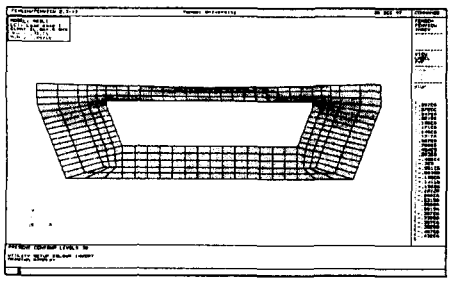


그림 5.1 열차하중재하시 응력분포

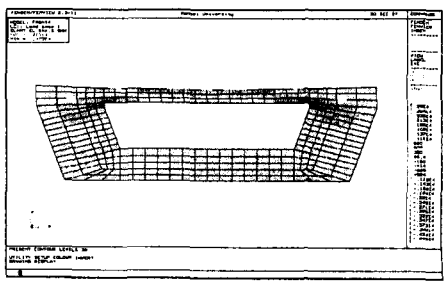


그림 5.2 트레일러하중재하시 응력분포

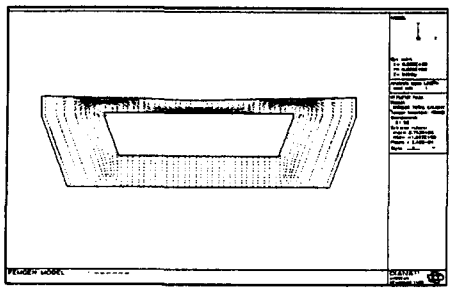


그림 5.3 열차하중재하시 인장응력흐름

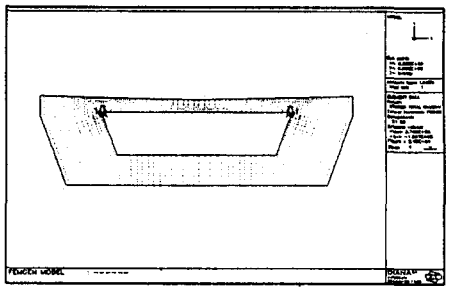


그림 5.4 열차하중재하시 압축응력흐름

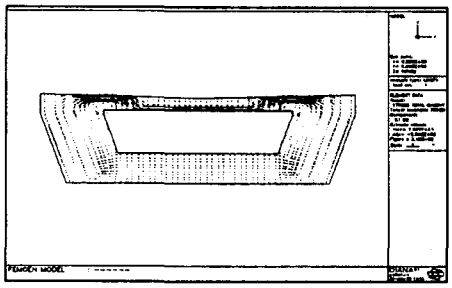


그림 5.5 트레일러하중재하시 인장응력흐름

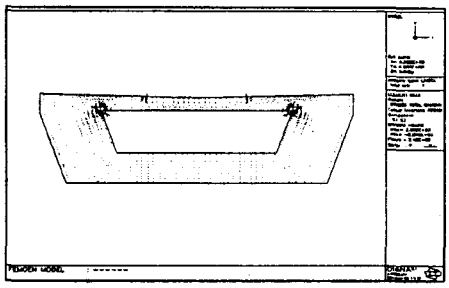


그림 5.6 트레일러하중재하시 압축응력흐름

횡단면 구조해석을 통하여 얻어진 응력의 흐름을 바탕으로 열차하중과 트레일러하중에 대하여 각각 스트럿-타이 모델을 구성하고 해석을 통하여 부재력을 산정할 수 있다. 그림 5.7과 그림 5.8은 각각 열차하중과 트레일러하중에 대한 스트럿-타이 모델의 구성을 나타내며 점선은 인장타이를 나타낸다.

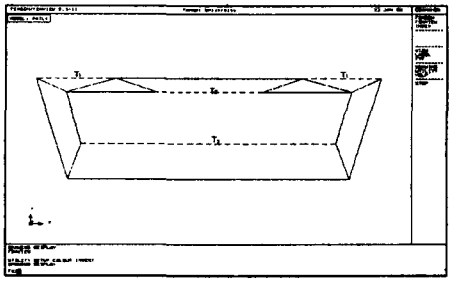


그림 5.7 열차하중의 스트럿-타이 모델

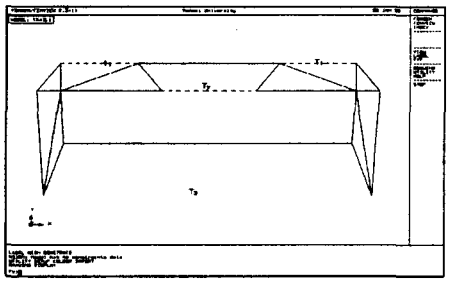


그림 5.8 트레일러하중의 스트럿-타이 모델

열차하중과 트레일러 하중의 경우에 대해 구성된 스트럿-타이 모델로 부터 산정된 인장타이의 부재력은 표 5.1과 같다.

표 5.1 열차하중과 트레일러하중의 경우에 대한 타이의 부재력

하 중	부재위치	부재력	부재력의 크기(ton)	부재력의 총합 (ton)
열 차 하 중	상부슬래브	T1	44.4	100.2
		T2	55.8	
	하부슬래브	T3	14.9	14.9
Trailer 하중	상부슬래브	T1	5.69	59.49
		T2	53.8	
	하부슬래브	T3	13.3	13.3

산정된 타이의 인장력으로부터 사용철근등급에 따른 철근량을 산정할 수 있으며 표 5.2는 열차하중에 대한 스트럿-타이 모델에 의해 산정된 철근량과 기존 설계 방법에 의한 설계 철근량과 비교한 것이다.

표 5.2 스트럿-타이 모델에 의한 철근량과 기존 설계 철근량 비교 (열차하중의 경우)

구 분	스트럿-타이 모델에 의한 철근량			설계 철근량			
	항복응력 (kg/cm^2)	부재력 (ton)	총단면적 (cm^2)	철근종류	단면적 (cm^2)	갯 수 (개)	총단면적 (cm^2)
상부슬래브	4000	100.2	25.1	H22	3.80	10개	38
하부슬래브	4000	14.9	3.73	H22	3.80	10개	38

한편, 표 5.3은 트레일러하중에 대한 스트럿-타이 모델에 의해 산정된 철근량과 기존 설계 철근량과 비교한 것이다.

표 5.3 스트럿-타이 모델에 의한 철근량과 기존 설계 철근량 비교 (트레일러하중의 경우)

구 분	스트럿-타이 모델에 의한 철근량			설계 철근량			
	항복응력 (kg/cm^2)	부재력 (ton)	총단면적 (cm^2)	철근종류	단면적 (cm^2)	갯 수 (개)	총단면적 (cm^2)
상부슬래브	4000	59.6	14.9	H22	3.80	10개	38
하부슬래브	4000	13.3	3.3	H22	3.80	10개	38

6. 결 론

PSC철도교량 격벽부의 3차원 거동 및 스트럿-타이 모델해석을 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 격벽 주위의 슬래브는 격벽부의 강성에 의한 3변지지의 경계조건 때문에 2차원 해석과 이에 따른 설계에서 고려치 못한 균열의 발생 가능성이 있음을 3차원 모델링을 통하여 규명하였다.

2) 격벽의 합리적인 설계가 가능하도록 무근 콘크리트 격벽에 대한 유한요소 해석결과로부터 응력 궤적을 도출하고 도출된 응력 궤적에 근거한 스트럿-타이 모델을 구성하여 이로부터 격벽의 철근량을 산정하는 스트럿-타이 모델에 의한 설계를 수행하였다.

참고문헌

1. Menn, C.(1989), "Prestressed Concrete Bridges", Birkhäuser Verlag.
2. 연세대학교 공대부설 재해연구소(1997), "PC Box Girder교량의 Diaphragm부 거동".
3. Bergmeister, K., Breen, J. E., Jirsa, J. O., and Kreger, M. E.(1993), "Detailing for Structural Concrete", Research Report 1127-3F, Center for Transportation Research.
4. 한국콘크리트학회(1998), "철근 콘크리트 구조물의 설계와 해석을 위한 트러스 모델", 한국콘크리트 학회지 2월호 특집.
5. TNO Building and Construction Research(1996), "DIANA User's Manual release 6.1", Netherlands.
6. 건설 교통부(1995), "콘크리트 표준 시방서", 대한토목학회.