

PSC 박스거더 철도교량의 해석 및 스트럿-타이 모델에 의한 격벽부 설계

Analysis of PSC Box Girder Railway Bridge and Design of its Diaphragm using Sturt-and-Tie Model

송하원*¹, 김형운*², 김영훈*², 변근주*³

Song, Ha-Won*¹ Kim, Hyoung-Woon*² Kim, Young-Hoon*² Byun, Keun-Joo*³

ABSTRACT

The functions of diaphragms at abutments and piers of PSC box girder railway bridge are to transfer forces from the superstructure onto bearings or columns and to stiffen the superstructure cross-section against in-plane deformation. Due to stress disturbance at diaphragm, the design for the diaphragm using conventional design method is relatively irrational than those for other structural 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 that 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 the diaphragm of prestressed concrete (PSC) box girder railway bridge constructed by the precast span method are analyzed by using three dimensional finite element modeling and using the strut-and-tie model design of the diaphragm are presented.

The modeling techniques used in this paper can be applied effectively to examine the causes of cracks at deck slab near diaphragm and to design diaphragm rationally.

Key Words : Prestressed Concrete (PSC), Box Girder Railway Bridge, Diaphragm, Deck Slab, 3D FEM, Strut-and-Tie Model

1. 서론

프리스트레스트 콘크리트 박스거더(Prestressed Concrete : PSC) 철도교량이 갖고 있는 단면상의 역학적 특성은 폐합단면이기 때문에 비틀림 강성과 종방향, 횡방향에 대한 휨강성이 커서 60m~70m 이상의 지간을 갖는 교량 등 비틀림

을 많이 받는 교량에 적합하다고 할 수 있다.1) 따라서 최근에 가설되는 콘크리트 교량은 지간이 길어짐에 따라 대부분이 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량으로 시공되고 있다. 콘크리트 박스거더 교량에서 1차부재인 상부플랜지, 하부플랜지, 웨브에 작용하는 외부하중을 베어링이나 교각에 전달하고, 비틀림으로 인한 횡방향 변형에 저항하도록 하는 2차부재를 격벽부

*¹ 연세대학교 토목공학과, 부교수
*² 연세대학교 토목공학과, 석사과정
*³ 정희원, 연세대학교 토목공학과, 교수

(Diaphragm)라 한다2)

이러한 박스거더 교량의 슬래브 설계3)시에 실제 격벽부 주위의 슬래브는 격벽부의 강성에 의하여 슬래브의 지지조건이 달라져 3차원 거동을 하게 되므로 2차원해석을 통한 설계로는 실제 거동을 반영한 적합한 설계를 하기가 어렵다. 그러므로 이러한 3차원 거동을 하는 격벽부 주위 슬래브에 대하여 3차원 모델링에 의한 해석을 통하여 응력집중에 따른 균열발생 여부 등의 평가를 위한 거동을 분석하는 것은 매우 중요하다.4) 또한, PSC 박스거더 교량의 격벽은 프리스트레싱에 의한 커다란 집중하중이 작용하여 단면 형상이 불연속성을 지니고 있으므로 격벽부 내부는 응력분포가 일정하지 않고 불연속, 교란된 성질을 나타내므로 이를 고려한 개선된 설계 방법이 필요한 실정이다.5) 따라서 역학적으로 응력이 교란된 구조부위에 대한 간단하면서도 정확도를 갖는 설계 방법으로서 도입된 것이 스트럿-타이(Strut-and-Tie) 모델이다.6),7)

특히 경부고속철도 일부 교량 구간에 적용되고 있는 PSM(Precast Span Method) 공법8)은 기 시공된 교량의 경간 위로 계속해서 시공될 경간까지 프리캐스트 세그먼트를 트레일러가 운반하여 연속 시공되므로 설계하중뿐 아니라 시공중 프리캐스트 세그먼트를 적재한 트레일러의 최대 편심하중을 고려한 해석 및 격벽부에 대한 합리적인 설계가 필요하다. 이를 위해 본 연구는 PSM 공법에 의해 시공되는 박스거더 철도교량에 대하여 3차원 유한요소해석 모델링을 통해 격벽부 주변의 슬래브 거동을 분석하고 스트럿-타이 모델에 의한 격벽부의 설계를 수행하였다.

2. PSM 박스거더 철도교량

연구의 대상교량은 PSM으로 시공되는 박스거더 철도교량으로, 1경간이 25m이고 폭이 14m인 2경간 연속교 형식과 3경간 연속교 형식으로 되어있다. 또한 PSC교량으로 종방향 텐던이 프

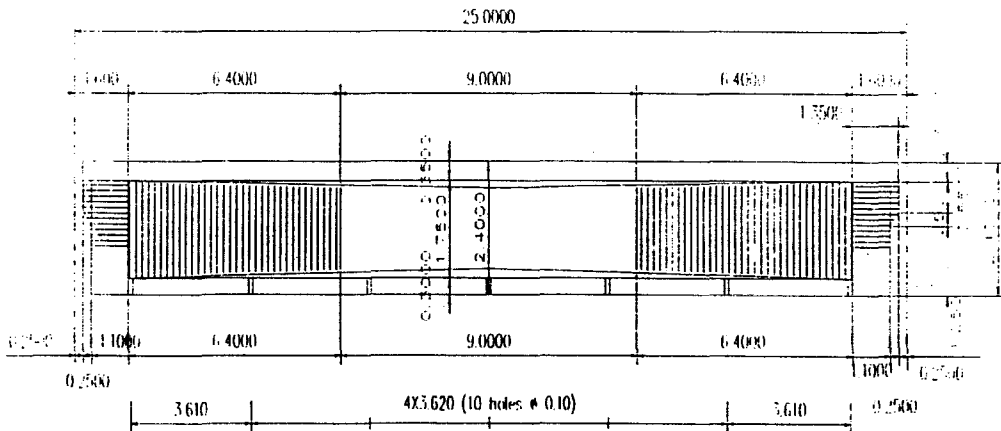


Fig. 1 Longitudinal Cross Section

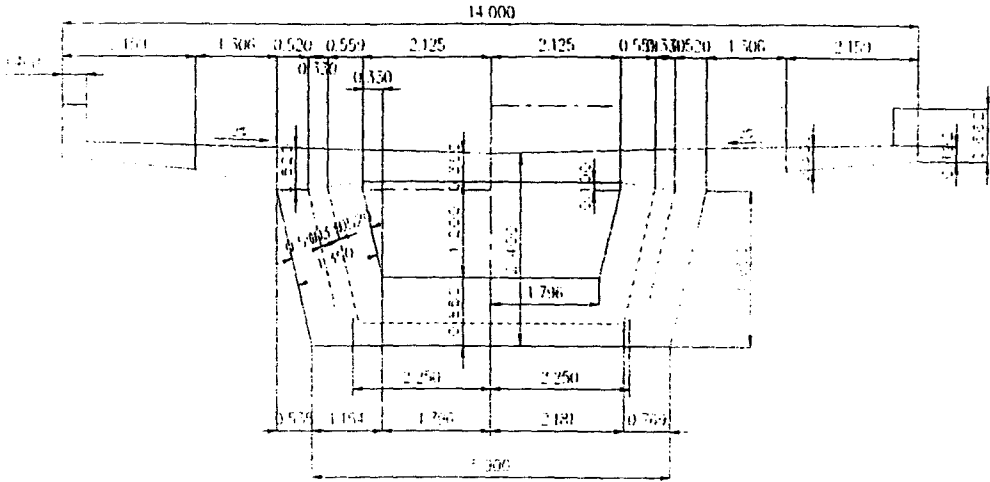


Fig. 2 Lateral Cross Section

리텐션(Pre-tention)과 포스트텐션(Post-tention)의 두가지 형식으로 긴장되어있다. 즉, 프리텐션 공법으로 1경간을 1세그먼트로 만든 프리캐스트

세그먼트를 트레일러가 먼저 시공된 프리캐스트 경간 위로 시공될 경간까지 운반·시공한 후 포스트텐션 공법으로 최종 긴장력을 도입하는 공

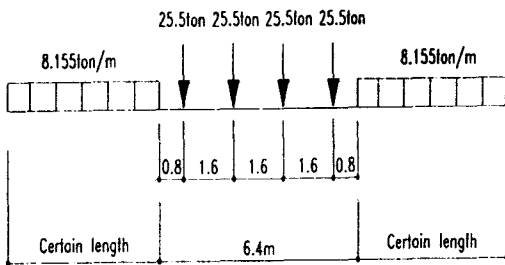
Table 1 Material Properties

Materials	Properties	
Concrete	Design Strength σ_{ck}	400 kg/cm ²
	Elastic Modulus E_c	280,000 kg/cm ²
	Unit Volumn Weight W_c	2,500 kg/cm ³
	Poisson's Ratio ν	0.2
PS Strand	Ultimate Strength of T15(ϕ 15.2mm) strand P_u	26,575 kg
	Jacking Strength P_j (75% of ultimate strength)	19,000 kg
	Elastic Modulus E_p	1,979,592 kg/cm ²
	Poisson's Ratio ν	0.3
	Anchorage Slip	7 mm
	Wobble Friction	0.004 mm ⁻¹
	Curvature Friction	0.3 rad ⁻¹
Steel (SD40)	Yield Strength σ_y	4,000 kg/cm ²
	Elastic Modulus E_s	2.04×10^6 kg/cm ²
	Allowable Stress σ_s	1,800 kg/cm ²

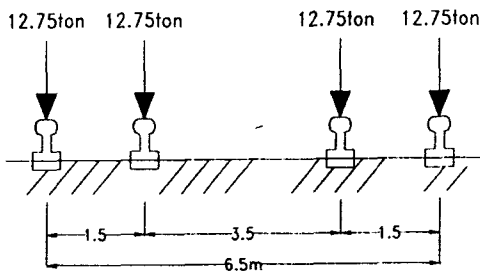
범으로 된 교량이다.

대상 교량의 유한요소 해석은 인접 경간의 시공을 위하여 프리캐스트 세그먼트를 적재한 길이 21.5m의 트레일러 하중에 대해 단순교 상 태로 있다고 가정하여 1경간 단순교에 대하여 실시하였다. Fig. 1는 해석 대상 경간의 종단면도 이고, Fig. 2는 해석 대상 경간의 횡단면도이다.

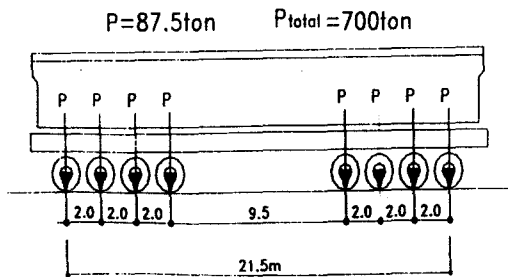
대상교량의 재료특성은 Table 1과 같으며 본 논문에서 고려한 2가지 하중인 열차 하중과 트 레일러 하중은 Fig. 3과 같다. 이러한 재료특성과 하중은 3차원 유한요소해석에 적용된다.



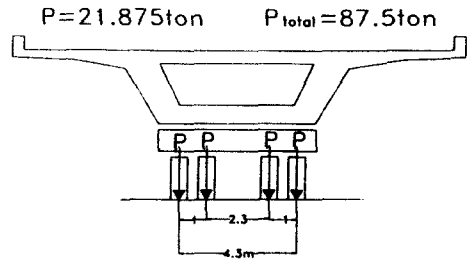
a) Longitudinal Train Loads



b) Lateral Train Loads



c) Longitudinal Trailer Loads



d) Lateral Trailer Loads

Fig. 3 Train Loads and Trailer Loads

3. 3차원 유한요소 모델링

본 논문에서는 범용 유한요소 프로그램인 DIANA9)를 이용하여 콘크리트 박스거더에 대해서는 4절점 Solid 요소(HX24L)(Fig. 4)를 사용하여 교량을 단부구간, 변화구간, 직선구간으로 구분하여 3차원으로 모델링하였다.

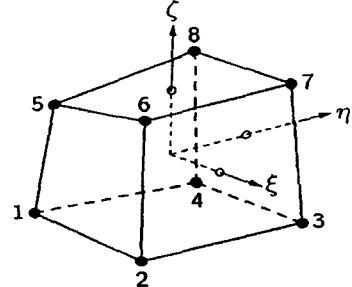
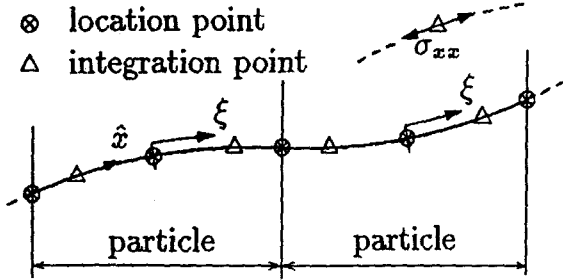


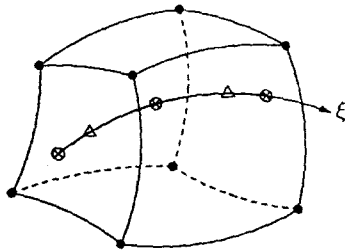
Fig. 4 Solid Element (HX24L)

프리스트레싱 텐던 모델링을 위해서는 Bar 요소(Fig. 5 a)를 사용하였는데 텐던 모델링은 Fig. 5 b)에서 처럼 Bar 요소를 Solid 요소 안에서 모델링하였다.

구조물에 이동하중이 작용할 때 임계하중이 발생하는 하중위치를 결정하는 문제는 구조물의 설계 및 해석에 있어서 매우 중요하다. 즉 구조물의 거동을 분석할 때는 하중이 구간내를 이동하는 동안에 구조물내에 발생하는 최대의 단면



a) Reinforcement Bar



b) Bar Particle in Solid Element

Fig. 5 Bar Element and Prestressing of Tendon

력을 기준으로 하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 대상교량에 트레일러가 이동할 때 임계하중이 발생하는 하중위치를 결정하기 위하여 영향선을 이용하여 최대 휨모멘트를 구하였다. 또한 시공과정중에 트레일러의 편심재하에 따른 교량의 거동은 매우 중요하므로 트레일러의 편심재하를 교량의 중앙에서부터 횡방향으로 변경하면서 재하하도록 하였다.

Fig. 6은 대상교량의 3차원 유한요소 모델링 형상이고 Fig. 7은 3차원 모델링된 교량의 종방향 단면 형상이다.

4. PSC 박스거더 철도교량의 3차원 유한요소해석

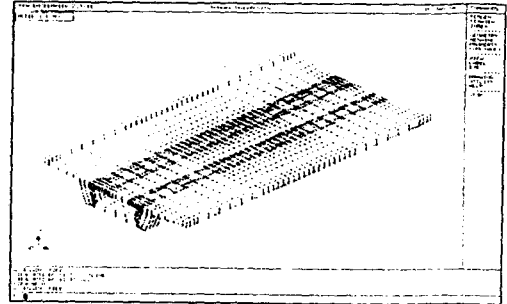


Fig. 6 3D Modelling Shape

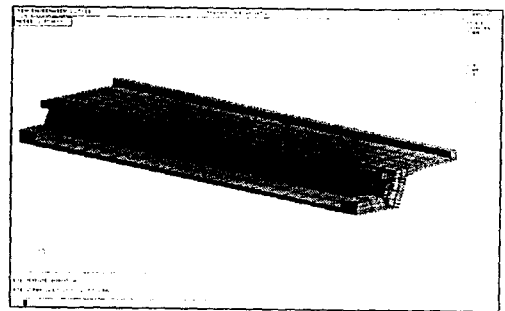


Fig. 7 3D Modelling Longitudinal Cross-Section

본 연구에서는 프리캐스트 세그먼트를 적재한 트레일러 하중재하에 대하여 PSC 박스거더 철도교량 슬래브의 거동을 규명하기 위하여 3차원 유한요소해석을 실시하였다.

Fig. 8~9는 프리캐스트 세그먼트를 적재한 트레일러가 최대 편심을 가지고 이동하는 가장 위험한 하중상태에 대한 주응력 분포를 나타낸 것이다. 3차원 구조해석 결과 최대처짐은 교량 상부슬래브 중앙에서 3.96mm이고, 최대주인장응력은 지점부근에서 141 kg/cm²로 나타난다.

박스거더 교량 슬래브의 설계는 교량의 종방향으로 작용하는 하중과 변위가 균등하다는 가정하에 2차원적인 해석을 바탕으로 단위폭에

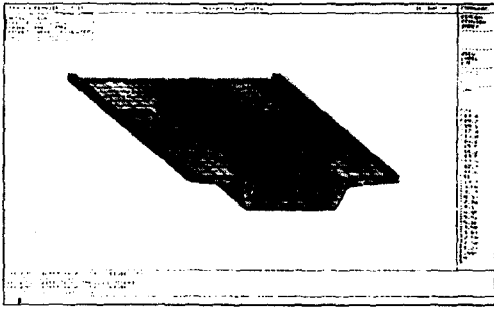


Fig. 8 Principal Stress of Upper Side

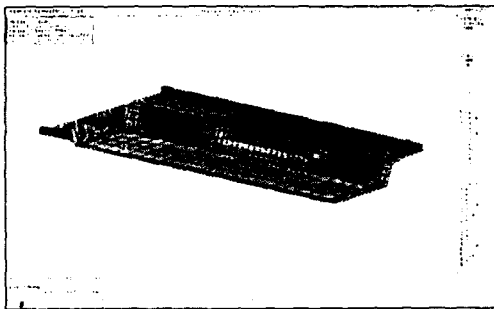


Fig. 9 Principal Stress of Lower Side

대한 1방향 슬래브로 설계가 이루어지는데, 이러한 2차원적인 설계 및 해석에서는 3차원적으로 분포하는 주응력분포 및 3차원적으로 거동하는 슬래브의 종방향 및 횡방향 모멘트가 정확히 반영되지 못한다. 또한 실제 교대, 교각, 내부 힌지의 위치에서는 격벽부의 강성에 의하여 슬래브의 지지조건이 2면지지된 거동보다는 3면이 지지된 거동을 보이게 되며, 2차원 해석에 근거한 설계는 실제 3차원 거동을 반영치 못해 격벽 주변의 슬래브에 균열이 발생하는 문제점이 야기될 수 있다. Fig. 10은 이러한 3면지지 슬래브를 나타낸 것이다.

특히 PSM으로 철도교량이 시공되는 경우 프

리캐스트 세그먼트를 적재한 트레일러가 편심을 가지고 이동하는 경우가 가장 위험한 하중상태이므로 3차원 구조해석을 통하여 격벽 주위 슬래브의 거동 분석이 필요하다. 따라서 트레일러의 편심하중에 따른 격벽 주위의 주응력을 검토하고, 이에 따른 3면지지 슬래브의 균열 발생 가능성이 있는 위험단면을 산정하였다.

Fig. 11은 트레일러의 50cm 편심하중일 때 3면지지 슬래브의 격벽과 접하는 단면의 주응력분포를 나타낸 것이다. 주응력이 크게 나타나는 부분은 3면지지 슬래브의 중앙 부위와 슬래브의 현치부분으로 나타난다.

Fig. 12~13는 3면지지 슬래브의 균열 위험단면이 있는 격벽방향으로 트레일러의 편심하중 위치가 이동되었을 때 격벽주위의 주응력 분포를 나타낸 것이다. 하중 재하 위치는 영향선에 의거하여 최대 모멘트가 발생하도록 재하한 것이다. 트레일러 편심하중이 50cm일때 Fig. 12~13에 표시한 부분이 주응력이 가장 크게 나타나는 위험단면으로 슬래브의 중앙부위와 슬래브의 현치부분임을 알 수 있다.

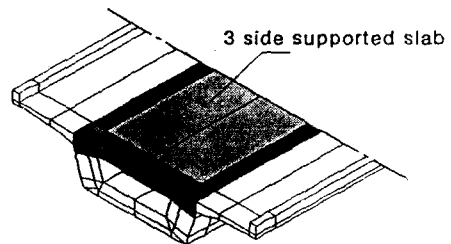


Fig. 10 Support Condition of Deck Slab

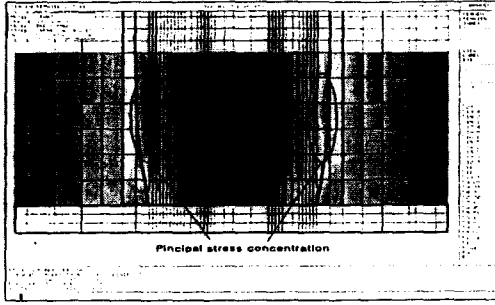


Fig. 11 Principal Stress of Cross Section Tangential with Diaphragm

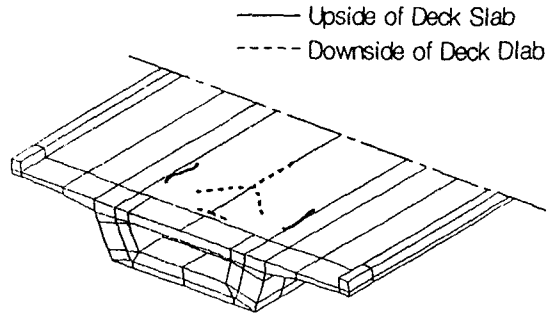


Fig. 14 Possible Cracks at Deck Slab

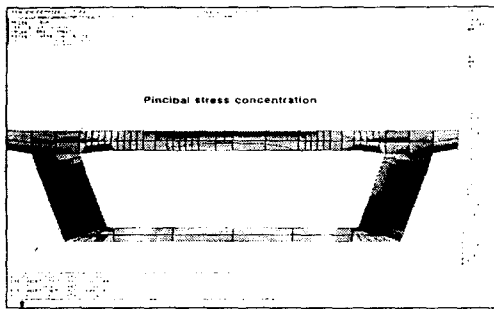


Fig. 12 Principal Stress in Upside

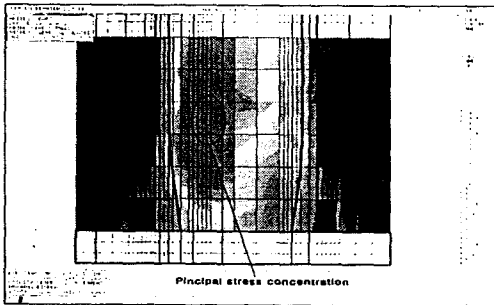


Fig. 13 Principal Stress in Downside of Deck Slab near Diaphragm

Fig. 14는 박스거더의 3차원 주응력 분석을 통하여 격벽주위 상부 슬래브에서의 균열 발생 가능 위치를 보여준다.

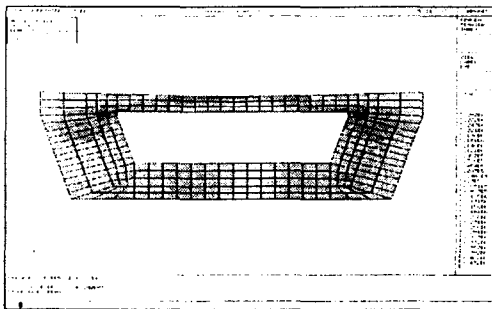
5. 스트럿-타이 모델에 의한 격벽의 해석 및 설계

프리스트레스트 콘크리트 교량은 기존이론으로 정확한 해석이 가능한 B영역(Beam or Bernoulli region)과 기하학적 또는 역학적 불연속성이 존재하여 해석에 어려움이 있는 D영역(Discontinuity or Disturbance region)으로 나눌 수 있다.10)

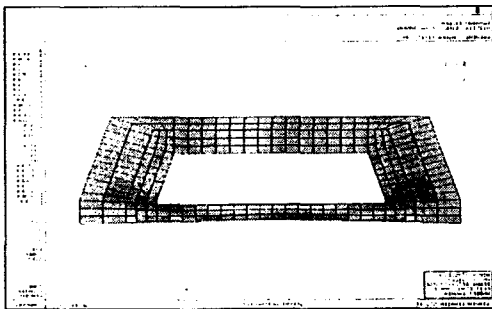
스트럿-타이(Strut-and-Tie) 모델은 어떤 하중 하에 있는 콘크리트 구조물의 내적 힘의 전달 메커니즘을 압축응력의 흐름을 대변하는 스트럿과 인장응력의 흐름을 대변하는 타이와 이 두 구성요소가 만나는 절점으로 구성하여 나타내는 것으로서, 콘크리트 부재에 작용하는 외부 하중 및 반력과 콘크리트 부재 내부의 콘크리트 및 철근에 작용하는 힘간의 극한상태에서의 평형을 알아내는데 사용되는 개념적 도구이다. 유한요소 해석을 통하여 탄성응력과 주응력계적을 얻을 수 있다면 이러한 D영역에 대한 모델 구성을 용이하게 할 수 있다. 즉, 스트럿-타이 모델은 유한요소해석을 통하여 구조물 내의 응력흐

를 바탕으로 스트럿과 타이를 배치시켜 구성하고, 이렇게 구성된 스트럿-타이 모델을 다시 유한요소 해석을 실시하여 구한 부재력을 이용하여 철근량을 산정하는 방법이다.

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. Fig. 15 a)는 열차하중 재하시의 응력분포이고, Fig. 15 b)는 트레일러하중 재하시의 응력분포이다. Fig. 16 a)와 Fig. 16 b)는 각각 열차하중에 대한 인장과 압축응력의 흐름을 나타낸다. Fig. 17 a)와 Fig. 17 b)는 각각 트레일러 하중에 대한 인장과 압축응력의 흐름을 나타낸다.

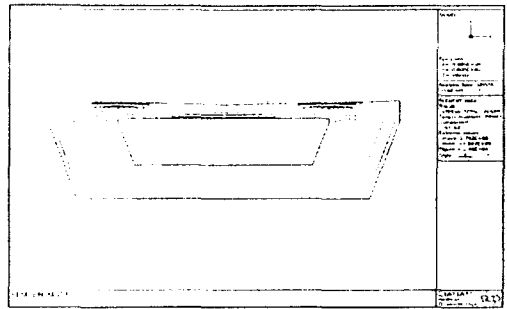


a) Train Loading

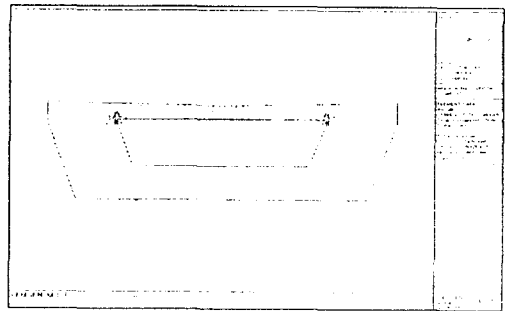


b) Trailer Loading

Fig. 15 Finite Element Analysis of Diaphragm

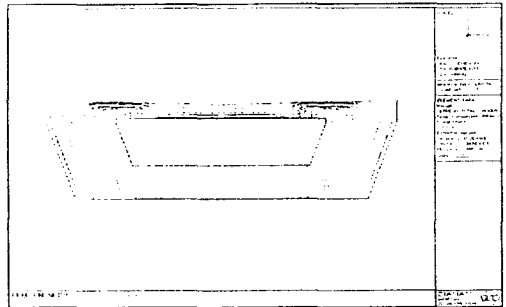


a) Tensile Stress Contour

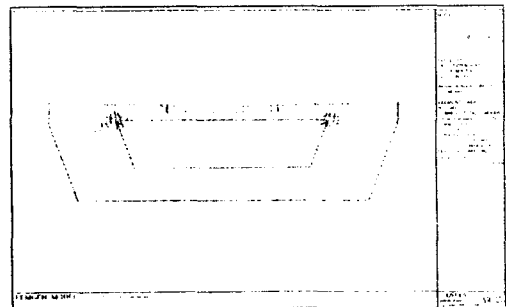


b) Compressive stress Contour

Fig. 16 Stress Contour under Train Loading



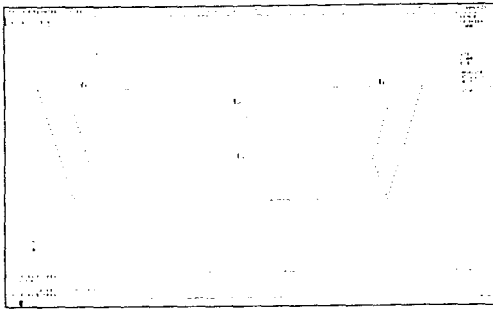
a) Tensile stress Contour



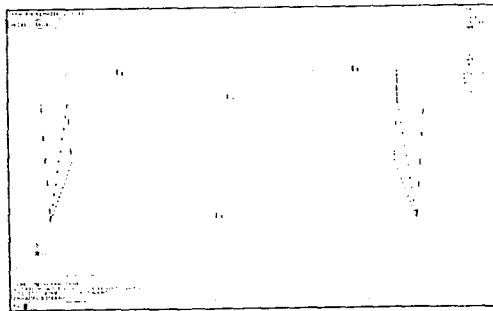
b) Compressive stress Contour

Fig. 17 Stress Contour under Trailer Loading

횡단면 구조해석을 통하여 얻어진 응력의 흐름을 바탕으로 열차하중과 트레일러하중에 대하여 각각 스트럿-타이 모델을 구성하고 해석을 통하여 부재력을 산정할 수 있다. Fig. 18 a)와 Fig. 18 b)는 각각 열차하중과 트레일러하중에 대한 스트럿-타이 모델의 구성을 나타내며 점선은 인장타이를 나타낸다.



a) Train Loading Case



b) Trailer Loading Case

Fig. 18 Strut-And-Tie model

열차하중과 트레일러 하중의 경우에 대해 구성된 스트럿-타이 모델로부터 산정된 인장타이의 부재력은 Table 3과 같다.

산정된 타이의 인장력으로부터 사용철근등급에 따른 철근량을 산정할 수 있으며 Table 4는 열차하중에 대한 스트럿-타이 모델에 의해 산정된 철근량과 기존 설계 방법에 의한 설계 철근량과 비교한 것이다. 기존 설계 방법은 슬래브 하단의 경우에 응력 흐름을 고려치 않아 상단과 동일하게 설계되었으며 지나치게 과다하게 설계되었음을 알 수 있다.

6. 결 론

Precast Span Method로 시공되는 프리스트레스 콘크리트 박스거더 철도교량의 3차원 유한요소해석 및 격벽부의 스트럿-타이 모델해석을 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) PSC 박스거더 철도교량 격벽부 주변의 슬래브는 격벽부의 강성에 의한 3면지지 경계조건 때문에 2차원 해석과 이에 따른 설계에서 고려할 수 없는 3차원 거동으로 인해 균열발생 가능성이 있음을 3차원적인 모델링과 해석을 통하여 규명하였다.
- 2) PSC 박스거더 철도교량 격벽에 대해 스트

Table 3 Member Force of Tie under Train Loading and Trailer Loading

Loading Case	Slabs	Member	Member Force(ton)	Total Member Force(ton)
Train Loading	Upper Slab	T1	44.4	100.2
		T2	55.8	
	Lower Slab	T3	14.9	14.9
Trailer Loading	Upper Slab	T1	5.69	59.49
		T2	53.8	
	Lower Slab	T3	13.3	13.3

Table 4 Comparison of Reinforcement by Strut-And-Tie Model and by Designed Reinforcement (Under Train Loading)

Slabs	Reinforcement by Strut-And-Tie Model			Designed Reinforcement			
	Yield Strength	Member	Total Area	Type of	Area	No. of	Total Area
	(kg/cm ²)	Force (ton)	(cm ²)	Bars	(cm ²)	Bars	(cm ²)
Upper Slab	4000	100.2	25.1	H22	3.80	10	38
Lower Slab	4000	14.9	3.73	H22	3.80	10	38

Table 5 Comparison of Reinforcement by Strut-And-Tie Model and by Designed Reinforcement (Under Trailer Loading)

Slabs	Reinforcement by Strut-And-Tie Model			Designed Reinforcement			
	Yield Strength	Member	Total Area	Type of	Area	No. of	Total Area
	(kg/cm ²)	Force (ton)	(cm ²)	Bars	(cm ²)	Bars	(cm ²)
Upper Slab	4000	59.6	14.9	H22	3.80	10	38
Lower Slab	4000	13.3	3.3	H22	3.80	10	38

럿-타이 모델을 구성하여 이로부터 격벽의 철근량을 산정하는 스트럿-타이 모델에 의한 설계를 수행하여, 기존 설계 방법에 의한 결과와 비교함으로써 스트럿-타이 모델에 의한 설계가 합리적임을 보였다.

참고문헌

1. E.C. Hambly, FICE, "Bridge Deck Behavior", 2nd Ed., Clays Ltd, England, 1991
2. Menn, C., "Prestressed Concrete Bridges", Birkh user Verlag, 1989
3. 건설 교통부, "도로교 표준 시방서", 대한토목학회, 1996
4. 연세대학교 공대부설 재해연구소, "PC Box Girder교량의 Diaphragm부 거동", 1997
5. Bergmeister, K., Breen, J. E., Jirsa, J. O., and Kreger, M. E., "Detailing for Structural Concrete", Research Report 1127-3F, Center for Transportation Research, 1993
6. 한국콘크리트학회, "철근 콘크리트 구조물의 설계와 해석을 위한 트러스 모델", 한국콘크리트 학회지 2월호 특집, 1998
7. 홍성걸, "트러스를 통해 본 철근콘크리트 구조설계 방법론", 도서출판 발언, 1996
8. 한국 고속철도공단, "고속철도", 통권 제42호, 1998
9. TNO Building and Construction Research, "DIANA User's Manual release 6.1", Netherlands, 1996
10. Schlaich, J. Schafer, K. and Jennewein, M., "Towards a Consistent Design of Structural Concrete", Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol. 32., 1987
11. Edward G. Navy, "Prestressed Concrete Bridges", Birkhauser Verlag, 1990
12. Prokop Maxa, "Theory of Box Girders", John Wiley & Sons, 1979