

스트럿-타이 모델을 이용한 PSC 박스거더 교량의 End Diaphragm의 설계 연구

Design of End Diaphragms in PSC Box Girder Bridges Using a Strut-and-Tie Model

이 창 훈* 윤 영 수** 이 만 섭*** 김 병 석****
Lee, Chang Hoon Yoon, Young Soo Lee, Man Seop Kim, Byung Suk

ABSTRACT

In recent, the design of diaphragm which is representative disturbed region in PSC box girder bridge have been performed according to the empirical method or beam theory. But, these methods couldn't be described the behavior of the end diaphragm, and placed reinforcements accurately. As the compressive stress transferred by the web concentrated on the lower parts of diaphragm, it was demonstrated that the basic assumption of 2-D strut-and-tie model for the diaphragm that the compressive stress acts on the upper parts of the diaphragm is wrong.

Meanwhile, in this research, after analyzing the variables of end diaphragm, the 2-D strut-and-tie models appropriate to each cases are proposed. And, the problems of 2-D strut-and-tie model were analyzed, so 3-D strut-and-tie model is proposed as well. There is no codes which include the demonstration of safety of 3-D strut-and-tie model. Hence, for nodes, the stresses at the elements which included the singular node in strut-and-tie model were investigated using the finite element analysis. And, the stress states of strut has one direction, so effective stresses were considered at the stage, dimensioning of the model.

From the results, 3-D strut-and-tie model could predict the behavior of end diaphragm accurately, and design of reinforcement could be performed economically.

1. 서론

Strut-and-Tie Model은 임의의 하중을 받는 콘크리트 구조물에 있어서, B구역(Beam or Bernouilli Region)과 D구역(Discontinuity or Disturbance Region)에 대해서 극한상태의 힘의 평형(Saint-Venant Principle)을 이용하여, 구조물에 작용하는 내부응력을 계산한 후, 콘크리트 부재의 정확한 치수와 철근량을 산정할 수 있도록 만들어진 개념적인 설계 도구라 할 수 있다.

* 정회원, 고려대학교

** 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수

*** 정회원, L&P 주식회사 대표이사

**** 정회원, 한국 건설 기술 연구원 수석 연구원

다시 말하면, Strut-and-Tie Model은 콘크리트 구조물이 받는 하중에 대한 내적 힘의 전달 mechanism을 압축응력의 흐름을 대변하는 Strut과 인장응력의 흐름을 대변하는 Tie로 구성하여 나타내는 것으로서, 콘크리트 부재에 작용하는 외부 하중 및 반력과 콘크리트 부재 내부의 콘크리트 및 철근에 작용하는 힘 간의 극한상태에서의 평형을 이용하여 부재를 설계하는 도구이다. 이러한 Strut-and-Tie Model은 Deep Beam, Cabel, Beam-Column Joint 등과 같은 Disturbed Region을 갖는 구조물에 주로 사용되며, 이의 정확도 및 효율성은 많은 실험과 연구를 통해 입증되었다. 따라서, PSC Box Girder 교량에 있어서, 격벽 부나 정착부와 같은 D Region을 갖는 구조물의 경우 기존의 이론으로는 해석 또는 설계를 하기에는 적합하지 않다는 것은 여러 연구를 통해 입증되었다.

이에, 본 논문에서는 격벽에서 발생할 수 있는 여러 가지 변수에 대해 각각의 2차원 스트럿-타이 모델을 제안하고, 또한 2차원 스트럿-타이 모델의 문제점을 분석 및 해석을 실시하여, 최종적으로 3차원 스트럿-타이 모델을 제안하였다.

2. 2차원 스트럿-타이 모델의 제안

2.1 박스 형태에 따른 격벽부 스트럿-타이 모델

단일박스의 스트럿-타이 모델은 Fig. 1에 나타내었으며, 이는 유한요소를 통한 주응력 흐름을 기본으로 하였다. 이 경우, 박스거더를 통해 격벽의 상부로 전달된 압축응력은, prismatic으로 가정된 스트럿을 통해 지점으로 전달된다. 또한, torsion에 대한 영향을 고려할 경우, 사선방향의 인장력이 발생하게 된다. 대각선 타이의 경우, 일방향 토션을 고려한 것이기 때문에, 임의의 하중을 고려할 때, 양방향으로 실제 배근이 이루어 져야 할 것으로 판단된다.

또한, 3개의 지점조건을 가진 복합박스(2실구조)의 경우, 지점으로 전달되는 압축력을 bottle shape으로 가정한 것이 특이할 만한 점이다. 여기서, 사용된 대상교량의 경우, 직교교량으로 토션의 영향이 거의 없기 때문에, 이를 무시하였다. 또한, Fig. 2에서도 알 수 있듯이, 복합박스의 경우, 그 폭이 비교적 넓기 때문에(≈25m), 그 응력분포가 단일박스에 비해, 많이 퍼짐을 알



Fig. 1 단일박스 격벽의 스트럿-타이 모델



Fig. 2 복합박스 격벽의 스트럿-타이 모델

수 있다. 대개, 지점조건에서 전달되는 스트럿의 모양은 교폭이 넓을수록, 또는 복부경사가 클수록 퍼지는 현상이 발생하는 것을 유한요소 해석을 통해 검증할 수 있었다.

2.2 지점조건에 따른 격벽부 스트럿-타이 모델

2개의 지점 및 3개의 지점을 갖는 스트럿-타이 모델의 경우는 2.1절의 박스 형태에 따른 격벽부 스트럿-타이 모델에 나타내었기 때문에, Fix의 지점조건에 대한 스트럿-타이 모델을 Fig. 3 및 4에 나타내었다.

한편, Fix된 지점의 경우 T-joint거동을 하기 때문에, 압축부와 인장부로 나뉘질 수 있다. 따라서, Fig 3 및 4와 같은 2개의 스트럿-타이 모델로 나뉘질 수 있다. 압축부의 스트럿-타이 모델에서는 Saint-Venant Theory에 따라, 격벽부 하단으로 짧은 변의 길이(즉, 격벽의 두께)만큼의 거리만큼 교각구역이 형성되기 때문에, 이를 고려하여, 스트럿-타이 모델을 구성하였다. 인장부의 스트럿-타이 모델을 보면, 교각에서부터 격벽부 상단까지 타이가 구성되며, 이는 교각부의 철근을 연장해서 배근할 수 있다. 또한, 타이의 양쪽으로 형성된 스트럿은 실제, 압축부에 전달되는 것을 모사한 것으로서 평형을 맞추기 위해 사용되었

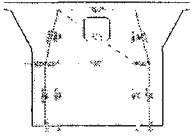


Fig. 3 Fix 지점을 갖는 격벽부 스트럿-타이 모델 (압축부)

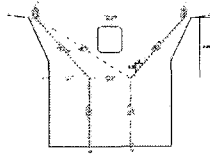


Fig. 4 Fix 지점을 갖는 격벽부 스트럿-타이 모델(장부)

다. 하지만, 실제의 배근시에는 임의 하중에 의해 인장부와 압축부의 작용이 바뀔수 있기 때문에, 실제 타이의 배근은 압축부와 인장부 모두에 적용하는 것이 효율적이라 판단된다.

3. 3차원 스트럿-타이 모델의 제한

3.1 2차원 스트럿-타이 모델의 문제점

현재 시공되고 있는 PSC Box Girder 교량의 격벽부 설계에 사용되고 있는 스트럿-타이 모델은 Fig. 5와 6에서 보는 바와 같이 다음과 같은 2가지 유형이 있다. 현재 사용되는 대부분의 Strut-and-Tie Model의 경우, 종방향으로 전달되는 수직 전단력을 지점부인 격벽부 상부에서 2개의 집중하중으로 작용한다고 가정하거나, 격벽 상부와 중간부에서 각각 2개의 집중하중(총 4개의 집중하중)으로 작용한다고 가정하여 Strut-and-Tie Model을 구성하며 해석한다.

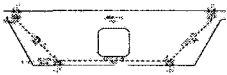


Fig. 5 현재 사용되는 스트럿-타이 모델 1

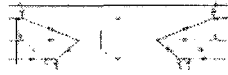


Fig. 6 현재 사용되는 스트럿-타이 모델 2

하지만, 해석 결과 Fig. 7에서 보는 바와 같이 수직 전단력은 거더를 통해 전달되어 최종적으로 격벽의 1/3지점으로 작용하게 된다. 이는 현재 사용되고 있는 Strut-and-Tie Model에서, 격벽의 상부에 2개의 집중하중으로 작용한다는 기본가정에 부합되지 않는다고 할 수 있다. 이는,

격벽에서부터 일정거리 떨어진 지점 역시 격벽부와 마찬가지로 교란 구역을 형성하기 때문이다. 따라서, 격벽부의 정확한 응력 흐름 모사와 정확한 설계를 하기 위해서는 수직 전단력을 격벽부 일정거리 전에서 압축력을 lift-up시켜주는 것이 필요하다고 할 수 있다.

따라서, 현행 사용되는 스트럿-타이 모델을 실제 응력흐름에 맞추어 재구성해본다면 Fig. 8 및 9와 같이 두 개의 유형으로 나타낼 수 있다. Fig. 8은 격벽 하단부에 작용하는 압축응력이 격벽 내부에서는 결과적으로



Fig. 7 교축방향의 압축응력의 흐름

인장력으로 작용하는 것을 나타낸 것이며, Fig. 9는 격벽 내부에서 경사 타이를 이용하여, 격벽 상단부 까지 응력을 전달시키는 것을 의미하는데 이에 대한 철근량을 계산하면 적게는 2배에서 7배까지의 차이를 나타낸다.

2차원 스트럿-타이 모델의 경우, ACI-02시방규준과 CSA규준을 이용하여 각각의 스트럿 및 절점에서의 유효응력을 비교할 수 있는데, 이 두 개의 시방규준은 콘크리트의 유효응력 산정 방법면에서 큰 차이를 보이는데, ACI 규준의 경우 상수를 이용하지만, CSA는 철근에 의한 응력교란으로 인해 발생하는 콘크리트의 변형률을 이용한다는 특성을 가진다.

3.2 3차원 스트럿-타이 모델의 구성

3차원 스트럿-타이 모델은 단일박스거더 교량을 대상으로 하였으며, 앞서 제안된 2차원 스트럿-타이 모델을 기본으로 하였다. 여기서, lift-up 타이, 7, 8, 9, 10은 MCFT를 기본으로 하여, 균열각을 예측한 이후, 이의 수직 수직방향으로 배근하는 것을 기



Fig. 8 압축응력을 인장력으로 작용 스트럿-타이 모델-Case I

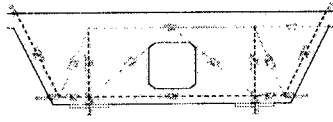


Fig. 9 격벽내부에서 압축응력 끌어 올린 스트럿-타이 모델 - Case II

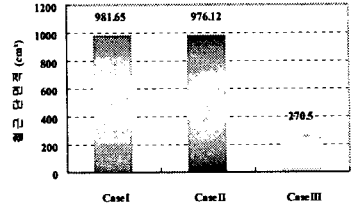


Fig. 10 현재 사용되는 스트럿-타이 모델의 철근량 비교

본 가정으로 하였다. 본 논문에서는, 작용된 하중을 바탕으로 MCFT를 이용한 예측된 균열각은 34° 이며, 교축방향 bending에 의해, 격벽부 하단에 압축력이 작용하게 되는데 이는 2개의 스트럿으로 나타내었으며, 이는 Fig. 11에 나타나 있다. 또한, 이러한 압축력에 평형을 맞추기 위해, 16, 17, 18, 19, 20, 21의 추가적인 타이를 배근하였다. 따라서, 이의 차원화는 기하학적 적합조건을 만족시키도록 하였으며, 이에 대한 값은 Table 1 및 Table 2에 나타내었다.

3.3 3차원 스트럿-타이 모델의 검증

전술한 바와 같이 3차원 스트럿-타이 모델에 대한 안전성 검토 방법은 몇몇 학자들에 의해 연구되고 있지만, 아직 명확한 방법이 제시되어 있지는 않다. 따라서, 본 논문에서는 실제 철근을 유한요소 해석에 포함하여, 그 결과를 검토해 봄으로써, lift-up효과와 3차원 스트럿-타이 모델의 안전성 검토를 실시하였다. 해설 결과, 그림 12와 13에서 알 수 있듯이, lift-up철근을 배근하기 전에는 박스거더를 통해 전달되는 압축응력이 격벽부의 하단에 집중되었으나, 배근 이후에는 격벽에 걸쳐 고루 분포함을 알 수 있으며, 그 응력값 역시 줄어들음을 알 수 있다. 따라서, lift-up철근을 배근함으로써, 격벽부의 과밀 배근을 피할 수 있는 장점이 있다.

4. 해석 결과 비교

4.3 3차원 Node의 안전성 검토

3차원 스트럿-타이 모델에서의 node의 안전성 검토는 현재까지 뚜렷한 방법론이 제기 되고 있지 못하다. 따라서, 본 논문에서는 제안된 3차원 스트럿-타이 모델에서, 대표적으로 3차원의 응력상태를 갖는 node에 대한 안전성 검토를 유한 요소 해석을 통해 검증하였다. 본 논문에서 선택된 대상교량은 실제로 가장 많이 사용되는 형식인 단일박스거더이다. 이를 3차원 스트럿-타이 모델을 적용하였을 때, 다음과 같은 대표적인 3가지 3차원 절점이 형성된다.

- ① 타이가 교차하지 않는 압축절점
 - ② 1개의 타이가 교차하는 압축절점
 - ③ Anchorage절점(여러개의 타이가 교차하는 절점)
- 지점조건은 실제 시공된 bearing plate의 크기와 동일하게 가정하였으며, load는 node의 성립조건에 따라, 각 경계면에서 다른 밀도의 응력이 작용하는 것을 피하며, 만약 발생하더라도, 가정된 경계면 내부에서 발생할 수 있도록 외부에 동일한 밀도의 응력을 갖는 stress를 가하였다. 2차원 스트럿-타이 모델에서 결과된 절점의 유효응력과 유한요소해석을 근거로 한 3차원

스트럿-타이 모델 절점에서의 유효응력의 비교는 Fig. 14, 15, 16에 각각 나타내었다. 이 때, 3차원 응력은 유한 요소 해석을 통해 결과된 cauchy's stress를 주응력값으로 변환하여 비교하였다. 이로 볼 때, 2차원 스트럿-타이 모델은 실제응력상태(3차원)보다 보수적임을 알 수 있다. 몇몇의 2D 스트럿-타이 모델의 유효응력이 ACI 또는 CSA 규준값과 거의 일치함을 알 수 있다.

Table 1. Properties of Struts

Element ID	Member Force (ton)	Effective Width			Effective Stress (kg/cm ²)
		b (cm)	h (cm)	Area (cm ²)	
3	-1700.00	100.00	81.70	8170.00	208.08
5	-208.00	100.00	12.00	1200.00	173.33
6	-1800.00	100.00	81.70	8170.00	220.32
11	-518.00	100.00	37.50	3750.00	138.13
12	-518.00	100.00	37.50	3750.00	138.13
13	-1500.00	100.00	45.00	3750.00	333.33
14	-518.00	100.00	37.50	3750.00	138.13
15	-518.00	100.00	37.50	3750.00	138.13
22	-540.00	89.25	37.50	3346.88	161.34
23	-540.00	89.25	37.50	3346.88	161.34
24	-540.00	89.25	37.50	3346.88	161.34
25	-540.00	89.25	37.50	3346.88	161.34

Table 2. Properties of Ties

Element ID	Member Force (tonf)	Reinfo. Area (cm ²)	Number of Reinfo. (H25)	Reinfo. Area (cm ²)	ϵ_s
1	343.00	100.88	20	102.00	0.0017
2	632.00	185.88	36	183.60	0.0017
4	208.00	61.17	12	61.20	0.0017
7	900.00	264.71	52	265.20	0.0017
8	900.00	264.71	52	265.20	0.0017
9	900.00	264.71	52	265.20	0.0017
10	900.00	264.71	52	265.20	0.0017
16	504.00	148.24	29	147.90	0.0017
17	504.00	148.24	29	147.90	0.0017
18	504.00	148.24	29	147.90	0.0017
19	504.00	148.24	29	147.90	0.0017
20	504.00	148.24	29	147.90	0.0017
21	504.00	148.24	29	147.90	0.0017

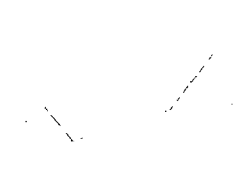


Fig. 11 3차원 스트럿-타이 모델

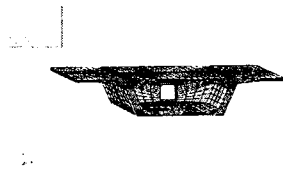


Fig. 12 철근 배근 전 유한요소 해석 결과

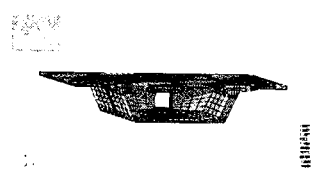


Fig. 13 철근 배근후 유한요소 해석 결과

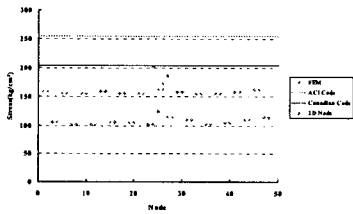


Fig. 14 Stress Comparison at the Compression Node without Tie

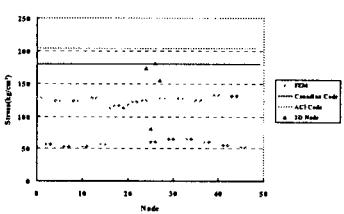


Fig. 15 Stress Comparison at the Compression Node with One Tie

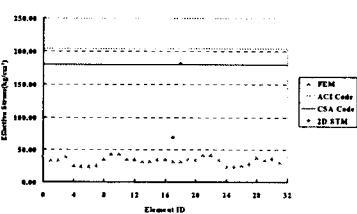


Fig. 16 Stress Comparison at the Compression Node with an Anchorage Node

타이가 교란되지 않는 압축 절점에서 보면, 실제 3축방향의 힘을 받는 콘크리트의 경우 압축강도 이상에서 파괴된다는 것은 여러 실험을 통해 증명되었다. 따라서, 2차원적인 응력검토는 prestressing을 받는 거더의 경우 교축방향으로의 압축력을 고려한다면 보수적이라 할 수 있다. 또한, 이를 이용하여, bearing plate 크기 역시 줄일 수 있다는 장점이 있다. 또한 한 개의 타이가 교차하는 압축절점의 경우는, 실제로 타이에 의한 교란 효과가 anchorage 절점에 비해 적기 때문에, 해석 결과 역시

콘크리트의 인장강도 이상의 응력을 나타내지는 않았다. 이 경우 역시, bearing plate에서 발생하는 실제 응력이 2D 스트럿-타이 모델에서 예측하는 유효응력보다 작기 때문에, plate의 크기 또는 보강 철근의 양을 감소시킬 수 있다. 마지막으로, anchorage 절점의 해석 결과를 보면, 국부적으로 콘크리트의 인장응력 이상의 값을 보이는 절점이 있지만, 이는 균열철근을 추가적으로 배근한다면, 해결할 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 PSC 박스거더의 end diaphragm의 설계에 있어서, 스트럿-타이 모델 적용의 타당성을 검토하고, 효율적인 스트럿-타이 모델의 제안에 목적을 두었으며, 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 여러 변수중에서 지점조건은 스트럿-타이 모델을 변화시키는 가장 중요한 변수이며, 이에 따른 스트럿-타이 모델은 본 논문에서 제안하였다. 또한, 박스 거더의 복부 경사는 스트럿-타이 모델에 크게 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이는 대부분의 경우, 복부 경사에 비해 구성되는 스트럿의 경사가 작기 때문이다. 하지만, 복부 경사의 경우, 구성되는 스트럿의 모양을 바꾸는데 영향을 미친다.
- 2) 현재 스트럿-타이 모델이 적용되는 대표적인 시방 기준인 ACI와 CSA를 비교해 볼 때, CSA가 ACI에 비해 보수적인 예측을 하지만, 실제 응력 상태에 근접하였다.
- 4) 유한요소 해석을 통한 결과 거더를 통해 전달된 압축응력은 격벽의 하단에 집중되는 것으로 나타났으며, 이는 교축방향의 타이를 추가적으로 구성할 수 있다. 이는, 2D 스트럿-타이 모델이 가진 문제점 중 하나이며, 3-D 스트럿-타이 모델을 구성하므로 해결될 수 있다.
- 5) 교축방향의 타이를 배근하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있지만, 시공 편의성을 고려할 때는 일반 이형철근을 이용하여 배근하는 것이 효율적이라 할 수 있지만, 텐던을 이용한 방법 역시, 과밀 배근을 피할 수 있다는 장점이 있지만, 추가적인 정착구에 대한 경제성을 검토해야 한다.
- 6) 본 논문에서는 격벽주변에 배근 상세는 전단철근과 lift-up 철근을 모두 경사 철근으로 배근하였다. 그 결과 격벽 및 그 주변(교란구역)에 배근되는 철근량이 2차원 스트럿-타이 모델을 이용하는 것에 비해 감소함을 알 수 있었으며, 이는 Fig. 17에 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 건설기술연구원 "01' 건설교통기술혁신사업(R&D/01S14-01)"의 "PSC 박스거더교 설계선진화를 통한 물량절감 및 품질향상 방안 수립" 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. J. Schlaich, Kurt Schafer, Mattias Jennewein, "Toward a Consistent Design of Structural Concrete", PCI Journal, 32(3), 1987, pp.74~146

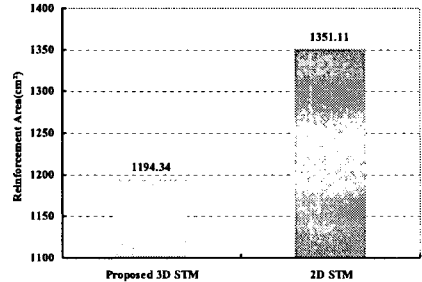


Fig. 17 철근량 비교(2차원 STM vs. 3차원 STM)