

스트럿 타이 모델을 이용한 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 세그멘탈 박스거더 橋梁의 신축이음 세그먼트의 設計技法 研究

Design of Expansion Segment of Precast Prestressed Concrete Segmental Box Girder Bridges
Using Strut and Tie Model

오 병 환* 이 형 준** 김 익 현** 한 승 환**
Oh, Byung Hwan Lee, Hyung Joon Kim, Ick Hyun Han, Sueng Hwan

ABSTRACT

In recent years, precast prestressed concrete segmental box girder bridges have been increasingly constructed. Expansion diaphragm segment of this type bridge transfers forces from the superstructure onto bearing or column, and plays an important roll of anchorage zone for longitudinal prestressed forces. Non-linear stresses occur inside of diaphragms by these extensive concentrated forces. In this study, the strut-and-tie models are proposed to design an expansion segment rationally. A formula to determine the effective transverse prestressed forces is proposed on the basis of these models. The present study is expected to provide an effective tool to design expansion segment of prestressed concrete bridges rationally.

1. 서론

프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량 (prestressed concrete box-girder bridges)의 단면은 폐합단면이므로 비틀림 강성 및 단면의 종, 횡 방향에 대한 휨강성이 커서, 시공중이나 사용 단계에서도 탄성적인 안정성이 상당히 크기 때문에 최근에 많이 건설되는 교량형식이다. 이러한 PC 박스거더 교량에 있어서 상부구조의 하중을 베어링(bearing)이나 칼럼(column)으로 전달하거나 또는 단면의 평면 변형에 대한 강성을 증가시켜 단면 변형을 방지할 목적으로 박스거더 단면 내에 격벽을 설치하는데 이 다이아프램은 그 형상이 불연속성을 지니고 있고 또한 상부구조의 하중과 프리스트레스 힘에 의한 집중하중이 가해지기 때문에 다이아프램 내부는 응력 분포가 일정하지 않고 불연속, 교란된 성질을 나타내는 D영역(Discontinuity영역)이 된다.

스트럿-타이 모델은 보 해석을 위해 개발된 트러스 모델(truss analogy)을 일반화한 것으로 이런 D영역에서의 실제적인 하중 전달 메커니즘을 잘 나타내 준다. 깊은 보나 코벨과 같은 D영역에 요소에 대해 합리적인 설계를 수행할 수 있는 모델이라는 것이 많은 실험을 통해 입증되

었으며, 유럽에서는 최근들어 구조물의 설계에 있어 스트럿-타이 모델을 폭 넓게 사용하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 실제의 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 세그멘탈 박스거더 교량의 신축이음 세그먼트를 모델로 해서 구조 해석을 수행하고 주응력 궤적선을 도시하여 이 결과를 이용하여 각 경우의 신축이음 세그먼트의 응력분포를 가장 잘 표현할 수 있는 스트럿-타이 모델을 구성하였다. 또한 이 스트럿 타이 모델을 이용해서 신축이음 세그먼트 내부에 발생하는 인장력을 효과적으로 보강할 수 있도록 프리스트레스 힘(prestress force)을 결정하기 위한 식을 유도하여 제시하였다.

2. 스트럿-타이 모델(strut and tie model)

2.1 기본원리 및 개요

콘크리트 부재에 하중이 가해지면 하중재하점으로부터 어느 정도의 거리가 떨어지면 응력이 일정한 크기를 가지고 분포되게 된다. 그러나 지압판과 같이 큰 국부하중이 가해지면 지압판 바로 아래에서는 파열응력과 박리응력이 발생되어 횡방향으로 인장응력이 발생되고 이 응력에 의해 콘크리트 부재에 균열이 발생한다. 탄성해석은 균열이 발생하기 전의 모델의 응력 흐름을

* 정희원 서울대학교 토목공학과 교수

** 정희원 서울대학교 토목공학과 대학원

정확히 예측할 수 있지만 균열이 발생한 후에는 더 이상의 예측은 불가능하다. 균열이 발생한 철근 콘크리트는 주로 콘크리트의 압축응력과 철근의 인장응력으로 하중을 전달하게 되는데 중요한 균열이 발생한 후에는 주 압축응력의 궤적(principal compressive stress trajectory)이 직선으로 되는 경향이 있어 이를 압축 스트럿(strut)으로 간략화 할 수 있다. 이와 같이 응력이 교란된 영역을 D영역이라 하며 이 영역에서는 탄성응력의 궤적에 따라 스트럿-타이 모델을 구성할 수 있고 이렇게 구성된 스트럿-타이 모델은 구조체의 실제적인 하중 전달 메커니즘을 잘 나타내 준다.

2.2 스트럿-타이모델의 구성요소 및 치수결정

스트럿-타이 모델은 스트럿, 타이 및 절점에 의해서 구성되며, 치수결정 작업은 이들이 외부 하중에 의해 전달되는 힘을 지지 할 수 있도록 그 크기를 결정하는 것이다.

1) 스트럿

구조물에 있어 압축응력이 작용하는 영역으로 압축부재의 역할을 수행한다. 콘크리트의 압축응력장이 여기에 해당되며 이를 형상화하기 위해서 프리즘(prism), 팬모양(fan-shape), 병모양(bottle-shape)등 3가지 응력장이 이용된다. 안전조건을 만족하는 스트럿의 치수는 식(1)에 의해 결정된다.

$$\phi A_c f_{2max} \geq N_u \quad (1)$$

여기서, ϕ 는 강도감소계수이고 압축응력에 대해서는 $\phi=0.7$ 이다. A_c 는 스트럿의 유효면적, f_{2max} 는 스트럿의 유효 압축강도, N_u 는 하중계수가 곱해진 하중(외력)에 의해 스트럿에 발생하는 압축력이다. 스트럿의 유효 압축강도 f_{2max} 는 절점의 형태에 따라 달라진다. 즉 지압판과 스트럿으로만 구성되는 순수한 압축 스트럿에서는 $0.85 f_c'$ 이지만 인장 타이가 스트럿과 교차되면 인장 타이의 변형도에 따라 유효압축강도는 감소하며 이것은 식 (2)와 같이 나타낼수 있다.[1]

$$f_{2max} = \frac{f_c'}{0.8 + 170 \epsilon_1} \leq 0.85 f_c' \quad (2)$$

이때 인장 타이와 교차되는 스트럿의 파괴시의 주압축 변형도를 0.002로 가정하면 주인장 변형도 ϵ_1 은 식(3)과 같다.

$$\epsilon_1 = \epsilon_s + (\epsilon_s + 0.002) \cot^2 \alpha_s \quad (3)$$

여기서, ϵ_s 는 철근의 평균 변형도이고, α_s 는

타이와 스트럿의 교차각도이다.

2) 타이(tie)

구조물에 있어서 인장역할을 담당하는 영역으로 보강철근, 프리스트레스트 강선이 여기에 해당된다. 철근으로 보강된 보강영역의 중심은 스트럿-타이 모델에 있어서 타이의 축과 일치해야 한다. 타이의 하중수행 능력은 식 (4)와 같이 보강철근의 하중 수행능력과 프리스트레스트 강선이 담당할 수 있는 잔여하중 수행능력의 합으로 계산된다.

$$\phi (A_s f_y + A_{ps} f_{py}) \geq N_u \quad (4)$$

여기서, ϕ 는 일축인장에 대해서 $\phi=0.9$ 이고, A_s , A_{ps} 는 보강철근, 프리스트레스트 강선의 단면적이고, f_y , f_{py} 는 보강철근, 프리스트레스트 강선의 항복응력이다.

3) 절점(node)

절점은 스트럿과 타이가 만나는 곳으로 힘의 흐름이 어떤 길이와 폭을 가지고 전환되는 영역이다. 절점의 크기는 절점영역에서의 콘크리트 압축응력이 아래에 제시한 제한값 이내에 들도록 충분히 커야 한다. 즉, 인장응력의 작용 유무에 따라 다음과 같이 분류하며 인장응력이 교차될수록 강도의 감소를 고려한다. 따라서, 압축 스트럿과 지압판으로 이루어진 절점은 $0.85 \phi f_c'$, 한 방향으로 타이가 교차되는 절점은 $0.75 \phi f_c'$, 두 방향 이상으로 타이가 교차되는 절점은 $0.60 \phi f_c'$ 으로 취하며, 이때 ϕ 는 콘크리트의 지압에 대한 강도감소계수 0.7을 취한다.

3. 신축이음 다이아프램의 구조해석 모델링

3.1 교량형식 및 제한

본 연구에 이용된 다이아프램은 교폭 18.4m의 4차선인 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 세그멘탈 박스거더 교량의 신축이음 다이아프램 세그먼트이다. 본 교량은 한 경간의 길이가 50m인 7경간 연속교로 한 경간은 19개의 표준 세그먼트와 경간 양단의 교각 다이아프램 세그먼트, 또는 교대 다이아프램 세그먼트로 이루어져 있다. 신축이음 세그먼트의 폭은 17.8m이고 높이는 3m, 두께는 1m이다.

3.2 하중 및 경계조건

신축이음 다이아프램 세그먼트에 작용하는 하중은 연직하중과 종,횡방향 프리스트레스 힘에

의한 정착판 집중하중으로 나누어 고려하였다. 연직하중은 신축이음 세그먼트가 놓인 지점에 발생하는 최대 반력 850톤을 신축이음 다이아프램이 부담할 연직하중으로 설정하였다.

종방향 프리스트레스 힘(P)은 장기손실을 고려해서 산정하고 이를 표1과 같이 직교하는 3방향의 분력(P_x , P_y , P_z)으로 나누어 정착판의 집중하중으로 재하하였다. 이때 경계조건은 표준 세그먼트와 접하는 영역에서 수평 및 수직방향의 변위가 제한된 것으로 가정하였다.

표 1 종방향 프리스트레스 힘의 분력

텐던번호	P(톤)	P_x	P_y	P_z
1	315.0	-11.3	43.5	311.7
2	314.5	34.5	52.3	308.2
3	319.3	13.2	38.2	316.7
4	260.4	7.7	62.9	252.6
5	303.7	-9.2	49.4	299.5
6	302.3	14.3	80.9	290.9
7	308.3	-1.2	85.8	296.1
8	323.8	21.0	0.0	323.1

주) 텐던번호 및 X, Y, Z 방향은 그림4 참조

4 신축이음 세그먼트의 스트럿-타이 모델구성

본 연구에서는 신축이음 다이아프램 세그먼트에 대해서 적합한 스트럿-타이 모델을 구성하기 쉽도록 아래와 같은 세 가지 경우로 구분하여 구조해석을 수행하고 주응력의 방향을 도시하여 스트럿-타이 모델의 구성에 이용하였다.

4.1 연직하중을 받을 경우

그림1은 연속교를 3차원으로 해석하여 연직하중에 의해 발생하는 주응력선의 궤적을 나타낸 그림으로 다이아프램 상단부에 인장응력이 분포하고 압축응력이 웨브 및 복부를 통해 세그먼트 하부의 3곳의 지압판으로 전달된다. 따라서 연직하중에 의한 횡단면 스트럿-타이 모델은 그림3과 같이 구성할수 있고, 이 가상 트러스 모델을 해석하여 각 부재에 발생하는 부재단면력을 산출할 수 있다(표2 참조). 이때 스트럿-타이 모델의 상부에 재하한 하중 R_1 , R_2 는 교량의 종방향 해석에서 산출한 신축이음 세그먼트의 최대 반력(850톤)을 각각의 지압판이 부담하는 실제의 크기이다.

표2 횡단면 스트럿-타이 모델의 부재단면력(그림1)

부재번호	단면력 종류	단면력(t)	비고
T1	인장	237	
C1	압축	398	
C2	압축	213	
C3	압축	237	

4.2 종방향 프리스트레스 힘을 받을 경우

신축이음 세그먼트에 표1에 보인 종방향 프리스트레스 힘을 가하고 이를 3차원 해석한 후 V1 영역(그림3)에 대한 주응력 궤적선을 나타내면 전형적인 보 요소에서의 응력 궤적선과 일치한다. 따라서 본 연구에서는 신축이음 세그먼트를 그림4와 같은 영역으로 분할하고 각 영역에 대해서는 2차원 보요소로 스트럿-타이 모델을 구성하여 부재단면력(표3)을 산출하였다.

표3 스트럿-타이 모델의 단면부재력 (V1 영역)

부재번호	단면력 종류	부재력(t)	부재번호	단면력 종류	부재력(t)
T1	인장	713	C7	압축	443
T2	"	111	C8	"	209
T3	"	88	C9	"	356
T4	"	136	C10	"	365
T5	"	94	C11	"	224
C1	압축	287	C12	"	318
C2	"	430	C13	"	205
C3	"	261	C14	"	302
C4	"	202	C15	"	600
C5	"	272	C16	"	328
C6	"	223			

그림4는 V1 영역에서의 스트럿-타이 모델이며 안전검토는 순수한 압축절점인 절점A와 인장절점인 절점B(그림5)에서 검토하였다. 기타 영역에 대해서도 같은 순서로 모델을 구성하여 부재 단면력을 산출하고 안전을 검토할 수 있다.

(1) 절점A

가장 큰 부재단면력이 발생하는 스트럿 C7의 압축력이 허용 압축력 C_a 이내에 들어오는지를 검토한다. 순수한 압축절점에서의 콘크리트의 허용압축력 C_a 는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_a = 0.85 \phi f_c A_c \quad (5)$$

여기서, 강도감소계수 $\phi=0.7$ (식1 참조), 콘크리트의 일축압축강도 $f'_c=450\text{kg/cm}^2$ 이고, 스트럿의 유효면적 $A_c=20\text{cm}\times 85\text{cm}$ 이다(그림5 및 그림6). 따라서 허용압축력 $C_a=455(\text{t})$ 이다. 스트럿 C7의 압축력이 $443(\text{t})$ 이므로 안전하다.

(2) 절점 B

그림5 에서의 스트럿 C15와 C16의 합력을 C^* 라 하면 그림5는 절점 B에서의 평형상태를 나타낸다. 이때 스트럿의 부재단면력 C^* 은 식 (6)에 의해 $872(\text{t})$ 이 된다.

$$C^* = \frac{\sqrt{(T1)^2 + (R)^2}}{\sqrt{(713)^2 + (502)^2}} = 872 \quad (6)$$

따라서 스트럿 C^* 의 부재단면력이 인장타이가 교차되는 조건하에서 허용압축력 이내에 들어오는지를 검토한다. 우선, 스트럿의 폭과 유효 압축강도를 산출하기 위해 스트럿 C^* 과 인장타이 T1의 교차각을 그림6에서 산출하면 $\alpha_s = 35.1^\circ$ ($\tan \alpha_s = 502/713$)가 된다. 따라서 스트럿 C^* 의 폭은 식 (7)에 의해 36cm 이다(그림6).

$$a = l_b \sin \alpha_s + d_a \cos \alpha_s = 20 \sin 35.1 + 30 \cos 35.1 = 36(\text{cm}) \quad (7)$$

스트럿의 유효강도는 $f_{2\text{max}} = \frac{f_c}{0.8 + 170 \epsilon_1}$

이고, 주인장 변형도 ϵ_{1s} 은 식(3)과 같다. 철근량 $A_s = \frac{T1}{\phi f_y}$ 가 되도록 배근하면 철근의 변형도

는 $\phi \epsilon_y$ 가 된다. 따라서 스트럿(절점B)에서의 철근의 변형도는 0에서 $\phi \epsilon_y$ 까지 변하게 되고 평균 변형도는 $\epsilon_s = \phi \epsilon_y / 2$ 가 된다.[1] 즉 $\epsilon_s = 8.82 \times 10^{-4}$ 가 되므로 ($\phi=0.9$, $f_y=4000\text{kg/cm}^2$, $E_s=2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$), 식(3)에 의해 주인장 변형도 $\epsilon_1 = 6.71 \times 10^{-3}$ 이고, 식(2)에 의해 유효압축강도 $f_{2\text{max}}=232(\text{kg/cm}^2)$ 이된다. 따라서 스트럿 C^* 의 허용압축력은 식(5)에 의해 $484(\text{t})$ 이 되고 부재단면력은 $872(\text{t})$ 이므로 안전조건을 만족하지 않는다. 따라서 안전조건을 만족시키기 위해서는 절점의 크기를 증가시키거나 스트럿의 유효압축강도를 늘리는 방안을 생각해 볼 수 있으나 절점의 크기는 세그먼트의 크기에 의해 제한되어 있으므로 유효압축강도를 늘리는 것이 보다 효과적이다. 즉 인장영역에 적당한 프리스트레스 힘을 가하여 타이 힘T1을 감소시키면, 스트럿과 타이의 교차각이 크게 되어 스트럿의

유효압축강도가 커지게 되어 안전조건을 만족시키게 된다. 구성된 스트럿-타이 모델에서 스트럿 C^* 의 유효 압축강도를 최대값인 $0.85f'_c$ (식(2))이 되게하는 프리스트레스 힘을 구하면 다음과 같다. 식(2)로부터 스트럿의 유효압축강도 $f_{2\text{max}} = 0.85f'_c$ 일때의 주인장 변형도 $\epsilon_1 = 2.214 \times 10^{-3}$ 이다. 따라서 식(3)으로부터 $\cot^2 \alpha_s = 0.462$ 이므로 $\tan \alpha_s = 1.47$ 이 된다. 그림6으로 부터 $\tan \alpha_s = \frac{R}{T-P}$ 이므로 스트럿의 유효압축

강도를 최대로 하는 프리스트레스 힘 P는 식 (8)과 같게 된다.

$$P \geq T - \frac{R}{1.47} \quad (8)$$

식(8)로부터 프리스트레스 힘 P를 산출하면 $372(\text{t})$ 이 된다($T1=713$, $R=502$). 따라서 V1영역(그림8 참조)에서 인장영역을 372톤 의 프리스트레스 힘으로 보강하고 잔여힘을 철근으로 보강하면 안전조건을 충분히 만족하게 된다. 기타 영역에 대해서도 같은 방법으로 스트럿-타이 모델을 구성하여 타이 힘을 보강할 수 있다.

4. 횡단면 프리스트레스 힘을 받을 경우

본 연구에서는 V1영역의 인장타이힘(T1) 713톤 중 372톤을 PT강봉으로 보강하고 잔여 타이 힘은 철근으로 보강한다. 이때 PT강봉의 긴장력에 의해서도 단면내에 인장력이 추가적으로 발생하게 된다. 그림 6은 횡단면 프리스트레스 힘(PT강봉)에 의한 스트럿-타이 모델을 나타낸다. 이 스트럿-타이모델의 부재단면력을 산출하면 표4와 같다.

표4. 횡단면 프리스트레스힘에 의한 모델(그림6)

부재 번호	단면력 종류	부재력(t)	부재 번호	단면력 종류	부재력(t)
T1	인장	85	C3	압축	1
T2	"	7	C4	"	4
T3	"	4	C5	"	203
T4	"	1	C6	"	210
C1	압축	7	C6	"	183
C2	"	4	C8	"	189

5. 보강철근의 산정

4.2절에서와 같이 각 영역의 스트럿-타이 모델이 구성되면 식 (8)로부터 프리스트레스 힘 P를 산출하고, 그 P 이상의 긴장력으로 타이 힘을 보강하고, 잔여 타이 힘을 철근으로 보강하는 것이 효과적이다. 이때 철근량은 식 (4)를 이용해서 산출하고 철근의 배근 중심이 타이 축과 일치하도록 인장영역에 고루 분산시켜 배근한다. V1영역에서의 잔여 타이 힘(341톤)에 대한 철근량을 산정하면 다음과 같다.

$$\varphi(A_s f_y + A_{ps} f_{py}) \geq N_u$$

$$0.9[A_s \times 4000 + 50.4 \times (8350 - 6349)] \geq 341 \times 10^3$$

$$A_s \geq 69.5 \text{ (cm}^2\text{)}$$

각 모델에서의 타이 힘에 대한 보강 철근량을 산정한 결과를 표5에 나타낸다.

표 5. 인장 타이 힘의 보강 철근량

구분	부재 번호	단면력 (t)	철근량 (cm ²)	비고
연직하중	T1	237	65.8	그림6 참조
	T1	713	69.5	
중방향 프리스트레스 힘	T2	111	30.8	그림9 참조
	T3	88	24.4	
	T4	136	37.8	
	T5	94	26.1	
횡단면 프리스트레스 힘	T1	85	23.6	그림11 참조
	T2	7	1.9	
	T3	4	1.1	
	T4	1	-	

6. 결론

본 연구는 최근 들어 많이 건설되고 있는 프리캐스트 PC 박스거더 교량에 있어서 신축이음 세그먼트를 합리적으로 설계할 수 있는 모델을 제시하고자 하였다. 신축이음 세그먼트는 연직하중과 큰 중방향 프리스트레스 힘에 의해 내부에는 비선형적인 응력이 발생하는 구조체이다. 본 연구에서는 신축이음 세그먼트를 해석하여 세그먼트 내에 발생하는 주응력 크기 및 궤적을 구하여 이를 이용하여 세그먼트를 합리적으로 설계할 수 있는 스트럿-타이 모델을 구성하였다. 또한 이 모델을 이용하여 세그먼트 내부에 발생한 인장영역을 효과적으로 보강할 수 있도록 횡단면 프리스트레스 힘을 결정하는 식을 제안하

였다.

이와 같은 연구를 수행하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 스트럿-타이 모델은 집중하중이 재하되는 신축이음 다이아프램과 같은 구조물에 있어서 파열응력, 박리응력과 같은 인장영역의 힘을 산출하고 보강철근을 설계하는 데 있어서는 매우 합리적인 방법이며 또한 설계에 이용하기 쉽도록 표준화 작업도 가능하다.

2) 중방향 프리스트레스 힘이 신축이음 다이아프램에 직접 정착되면 정착부 반대편에 큰 인장력이 발생할 뿐 아니라 정착부 하단에도 상당한 크기의 인장력(파열응력)이 발생한다. 이때 발생하는 파열응력의 위치는 다이아프램 두께의 약 1/4지점 하단이며 방향은 정착부와 지지부를 잇는 직선에 직교하는 방향이다. 그리고 그 크기는 정착된 프리스트레스 힘의 약 20 ~ 30% 정도이다.

3) 정착부 반대편에 발생하는 인장력을 횡단면 프리스트레싱으로 효과적으로 보강할 수 있도록 인장보강용 횡단면 프리스트레스 힘 P를 스트럿-타이 모델로부터 타이 힘 T와 반력 R을 이용하여 아래 식을 유도하여 제시하였다.

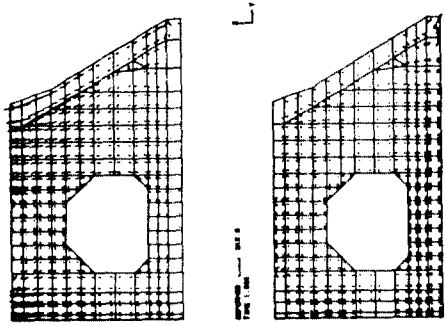
$$P \geq T - \frac{R}{1.47}$$

본 연구의 스트럿-타이 모델을 이용하여 프리스트레스 힘 P를 산출해 보면 그 크기는 타이 힘 T의 30 ~ 55% 정도이다.

본 연구는 앞으로 프리스트레스 콘크리트 박스거더 교량의 신축이음 세그먼트 해석 및 설계에 유용한 방안을 제시할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] M. P. Collins, D. Mitchell, "Prestressed Concrete Structures", Prentice Hall, Inc., 1991.
- [2] C. Menn, "Prestressed Concrete Bridges", Springer-Verlag, Wien, 1986.
- [3] IABSE Workshop Report, "Strut and Tie Models", University of Stuttgart, 1993.
- [4] K. H. Tan, M. A. Mansur, "Partial Prestressing in Concrete Corbels and Deep Beams", ACI J. Vol.89, No.3, May-June 1992, pp.251-262.



a) 주압축응력 제적선 b) 주인장응력 제적선
그림 1 연직하중에 의한 주응력 제적선

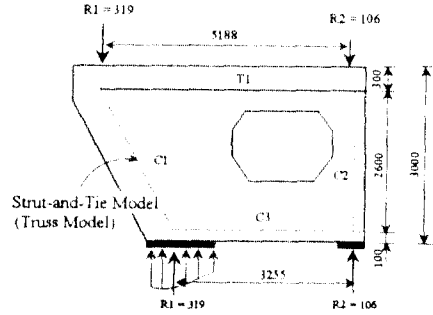
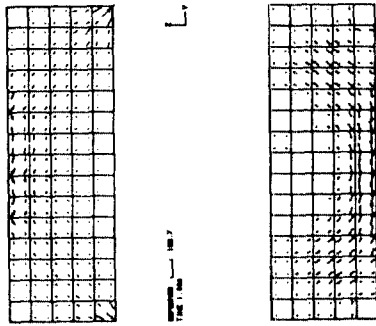


그림 2 연직하중의 스트럿-타이 모델



a) 주압축응력 제적선 b) 주인장응력 제적선
그림 3 종방향 프리스트레스 힘에 의한 주응력

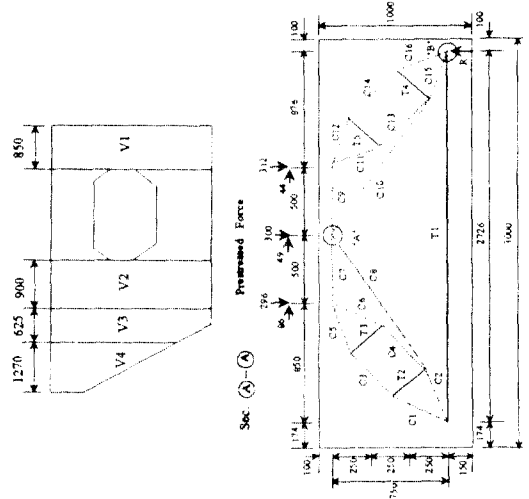


그림 4 세그먼트 영역분할 및 V1 영역의 스트럿-타이 모델

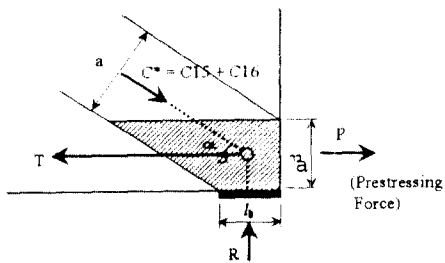


그림 5 절점B에서의 평형상태

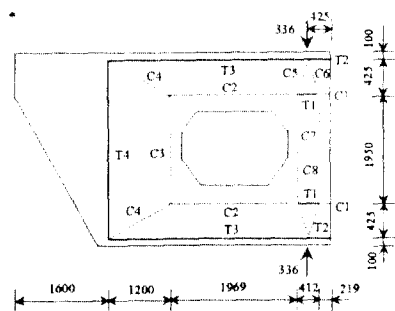


그림 6 횡단면 프리스트레스 힘에 의한 스트럿-타이 모델