한국도시방재학회논문집
제1권 제2호 2001년 9월
pp. 103 ~ 114

PSC Box Girder 정착부의 해석 및 설계

An Analysis and Design on the Anchorage of PSC Box Girder

임 정 순* / 방 윤 석** / 이 수 근***
Im, Jung Soun / Bahang, Yun Suk / Lee, Soo Keun

Abstract

As the results of comparison with several anchorage design methods of PSC box girder, stress superposition effect by the order of prestressing force can't be considered in the case of multi-anchorage design with existing design methods. In anchorage design by 3-D finite element analysis, estimation of stress concentration region and stress flow are correctly defined , but the estimation of sectional forces in anchorage is very complicated. In the case of anchorage design by strut-tie model method, the stress superposition effect can be considered and sectional forces in anchorage are easily calculated. Therefore, strut-tie model method is remarkably suitable to anchorage design if geometrical conditions of the truss members are carefully considered.

Keywords : anchorage, prestressing force, strut-tie model, stress superposition

요 지

PSC box girder의 정착부 설계방법들을 비교해본 결과, 기존 시방서에 따른 설계방법에서는 다수의 정착구에 긴장력이 작용할 때 긴장력의 작용순서와 그 크기에 따른 응력의 중첩효과를 고려할 수 없는 단점을 가지고 있었고, 3차원 유한요소해석을 이용한 설계에서는 응력집중부와 응력흐름을 정확히 파악할 수는 있지만 부재의 단면력을 산정하기가 매우 번거롭고 까다롭다는 단점을 가진다. 그러나 strut-tie 모델을 이용한 설계법에서는 긴장력의 긴장순서에 따른 응력중첩효과를 고려할 수 있고 부재의 단면력의 산정 또한 매우 간편하여 긴장력의 도입순서에 의해 변화하는 응력의 흐름을 잘 파악하여 strut-tie로 구성된 트러스 부재들의 기하학적 조건을 만족하도록 유의한다면 정착부의 설계에 가장 적합한 설계방법이라 할 수 있다.

핵심용어 : 정착부, 긴장력, 스트럿-타이 모델, 응력의 중첩

* 정회원, 경기대학교 토목환경공학부 교수
** 정회원, 경기대학교 토목환경공학부 겸임교수, (주) 대한콘설탄트 이사
*** 정회원, 경기대학교 대학원 박사과정

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

국내 교량 및 고가도로에 있어서 PSC box girder의 설계 및 시공이 일반화되고 있는 상태이며 이에 따라 그 설계 및 시공기술이 나날이 발전하고 있는 상태이나 아직까지 PSC box girder 정착부의 설계방법이 명확하게 정립되어 있지는 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 PSC box girder 정착부의 설계방법을 정립해 보고자 한다. 프리스트레스트 콘크리트 부재에는 매우 높은 집중하중의 도입으로 인하여 정착부에서 하중의 흐름이 매우 복잡하므로 이에 대한 정확한 해석과 설계방법의 개발이 절실히 요구되고 있다. 따라서 정착부에 대해서 하중 및 응력상태를 파악하고 설계상의 문제점과 대책을 도출하기 위하여 strut-and-tie 모델을 도입하여 정착부의 거동을 파악하고, 이로부터 정착부의 보강 철근의 설계기법의 도출 및 strut-and-tie 모델을 이용하여 실용에 적합한 설계법을 제안하는데 그 목적이 있다.

1.2 연구내용 및 범위

PSC box girder 정착부의 설계방법으로는 탄성이론에 근거한 설계법, FEM을 이용하여 정착부의 하중 및 응력상태를 파악한 후 부재치수를 결정하는 방법 그리고 strut-and-tie 모델 등을 적용하여 해석 할 수 있다.

각 설계방법들의 배경이론들과 그 이론들의 적용한계점 등을 규명해 보았고 PSC 정착부를 각각의 방법으로 해석해 보고 그 결과로부터 부재의 크기와 필요한 철근량을 산정하여 그 적정성과 문제점을 조사하였다. 또한 각 설계방법들의 비교를 통해서 strut-tie 모델의 설계 적용시에 생기는 문제점을 해결하여 실용에 적합한 PSC box girder 정착부의 설계방법을 제시하고자 한다.

2. PSC 정착부의 거동

2.1 응력분포

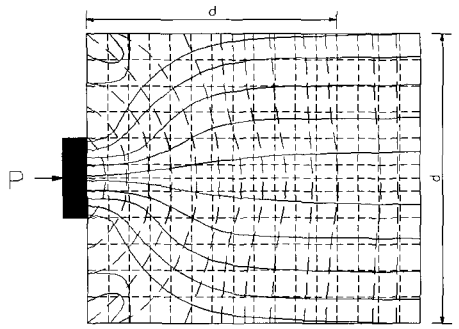
PSC 정착부에서는 하중이 큰 긴장력이 작은 면적을 갖는 정착구를 통해 전달되기 때문에 정착구 주위에는 국부적으로 큰 압축영역과 힘의 방향에 직각으로 인장응력이 발생하게 된다. 이러한 영역을 정착부라 하는데, 이러한 정착부에서는 구조부재의 다른 부분과는 전혀 다른 응력흐름을 갖는 응력교란구역을 가지게 되므로 정착부의 설계에 있어서 특별한 주의가 필요하다. Fig.1(a)에서는 간단한 형상의 부재에 하나의 집중하중이 작용할 때의 응력분포 양상을 나타내고 있다. 여기에서 나타나는 응력궤도는 S자 모양을 나타내고 있고 하중재하면 근처에서는 압축응력을 나타내고 있고 거리가 멀어짐에 따라 인장응력을 나타내다가 부재의 높이와 같은 거리 d에 가까이 가면 거의 평행해지고 단면내의 응력이 σ=P/bd 와 같이 균일하게 분포하게 된다. 이때 각각의 응력 궤도는 총하중의 일부분을 부담하는 스트럿이라고 볼 수 있다. 스트럿이 휘어지는 부분에서는 스트럿의 직각방향으로 분력이 발생하게 되고 이 분력이 횡방향으로 압축 또는 인장력을 유발시킨다. 횡방향 인장응력인 파열응력(bursting stress)은 응력궤도가 볼록한 경우에 발생하고, 긴장력을 콘크리트 부재에 전달하는 정착구 바로 아래의 응력궤도가 오목한 부분에서는 매우 큰 압축응력이 발생하는데 이를 지압응력(bearing stress)이라 한다. 그리고 하중 재하면의 양쪽 표면에서는 상당히 큰 인장응력이 발생하는데 이를 박리응력이라고 한다.

2.2 파열응력(Bursting Stress)

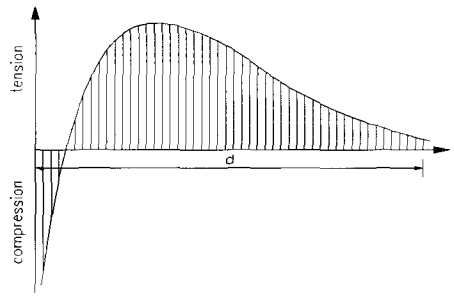
PSC 정착부에 작은 단면적을 가진 지압판을 통해 매우 큰 긴장력이 작용하면 지압판 바로 아래에 매우 큰 압축응력이 발생하게 되며, 지압판으로부터 어느 정도 떨어진 위치에서는 하중방향과 직각으로 인장응력이 발생하는데 이와 같은 응력분포를 파열응력이라 한다.

파열력과 파열응력의 크기는 정착부 부재 치수(d)에 대한 지압판의 크기(a)의 비에 주로 좌우된다.

Fig.2는 여러 가지 a/d에 따른 응력 σy의 분포를 나타내고 있다. a/d값이 작을수록 최대 파열응력의 발생 위치는 지압판에 가까워지고 크기는 증가되는 양상을 보인다. 지압판의 크기가 정착부 부재 치수에 비하여 매우 작다면 파열응력이 평균압축응력의 40%이상 발생할 수도 있으며, σy의 곡선을 적분하면 전체파열력을 구할 수 있다. Fig.2(a)는 지압판의 크기에 따른 파열력의 크기, 횡방향 응력이 압축에

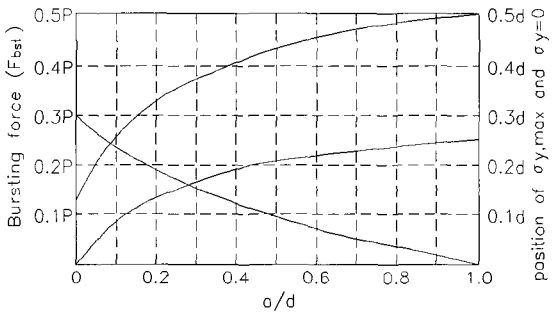


(a) 주응력흐름

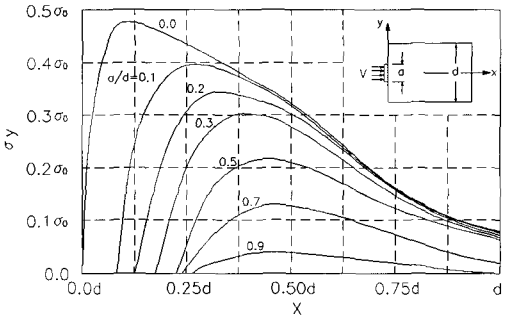


(b) 블록의 중심선에서의 응력

Fig.1. 정착부에서의 응력분포



(a) 파열력의 크기변화와 σy,max와 σy=0인 위치



(b) a/d 비의 변화에 따른 파열응력의 분포

Fig.2. 파열력과 파열응력의 크기 및 분포

서 인장으로 바뀌는 σy=0의 위치, 그리고 파열응력의 크기가 최대인 σy,max의 위치를 나타내고 있다.

Fig. 2(b)에서는 지압판의 크기에 따른 파열응력의 분포 와 크기를 나타내고 있다. Fig. 2의 값들을 횡방향 보강철근의 양과 분포를 결정하는데 사용할 수 있다. Fig. 2(a)에서 파열력의 크기 Fbst는 다음과 같은 간단한 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_{bst} = 0.3P\left(1 - \frac{a}{b}\right) \qquad (1)$$

2.3 박리응력(Spalling Stress)

긴장력이 정착부에 가해지면, 지압판에 평행하게 박리응력이 발생한다. 박리응력은 지압판 바로 아래에서 최대이며, 지압판에서 밑으로 내려갈수록 급격히 감소한다. 따라서, 박리력의 크기는 상대적으로 작은 값을 갖게되며, 이런 이유로 박리응력은 때로

표1. 각국 시방서에서의 파열력 산정

Code	Bursting force
ACI	$F_{bst} = 0.70Pe^{-3a/d}$
AASHTO	$F_{bst} = 0.25P(1-a/d)$
VSL End Block Design Guide	$F_{bst} = 0.30P(1-a/d)$
CEB-FIP	$F_{bst} = 0.30P(1-a/d)$
CIRIA Guide	$F_{bst} = cP/K$ K = 1.0 (하나의 정착구) 1.5 (한 방향으로 배치된 정착구) 2.0 (두 방향으로 배치된 정착구) a/d ≤0.3 0.4 0.5 0.6 0.7≤ c 0.23 0.20 0.17 0.14 0.11

무시되기도 한다. 그러나, 정착구 경사각이 있을 경우 최대 박리응력의 크기가 파열응력보다 크게 나타나는 경우도 있다. 각국의 시방서에서 규정하고 있는 긴장재 정착직후의 박리응력은 표 2와 같다.

표2. 각국 시방서에서의 박리력 산정

Code	Spalling force
ACI 343R-88	$F_{sp} = 0.04P \geq d\sqrt{f'_c}$
VSL End Block Design Guide	$F_{sp} = \frac{2M_{sp}}{h}$
CIRIA Code	$F_{sp} = 0.04P$ (대칭) $F_{sp} = 0.2P\ [\frac{d_1-d_2}{d_1+d_2}]^3$(비대칭)
German Code	$F_{sp} = P(\frac{e}{d}-\frac{1}{6}) \geq 0$

2.4 지압응력(Bearing Stress)

PSC 정착부에서는 긴장력이 작은 면적을 갖는 정착구를 통해 구조물로 전달되기 때문에 정착구 아래에서는 상당히 큰 압축응력이 집중하여 발생하는데, 이렇게 국부적으로 큰 압축응력을 지압응력이라 한다.

대부분의 시방서에서 허용지압응력을 규정하고 있다(표3). Driz와 Raths는 다음과 같은 허용지압응력식을 제안하였다[6].

$$f_b = 5.91\sqrt{f'_c}\ \sqrt[3]{\frac{a}{d}} \qquad (2)$$

그 후에도 여러 가지 식이 제안되었으며, 그 중 가장 널리 쓰이는 것이 Middendorf가 제안한 다음과 같은 형태의 식이다[8].

$$f_b = 0.50f'_c\ \sqrt[3]{\frac{A_2}{A_1}} \leq f'_{ci} \qquad (3)$$

한편 Niyogi는 지압응력의 편심 및 철근배근을 주된 변수로 하여 콘크리트 블록을 실험하여 하중의 편심은 지압강도를 감소시키고, 나선철근은 횡방향구속에 의해서 지압강도를 증가시키는 경향이 있다고 결론지었다[8, 9]

여러 시방서에서는 식(2)와 유사한 형태의 허용지압강도를 사용하며, 모든 경우에 똑같은 허용지압응력을 적용하도록 하고 있다. 하지만 정착구의 형상 및 경사각도, 긴장력의 편심, 텐던 경로, 긴장순서 등의 영향을 고려하고 있지 못하다. 그러므로, 현재 적용되고 있는 대부분의 식들은 텐던이 직선이며, 중심축 하중이 가해지는 경우에는 과다설계가 되며, 정착구의 경사각이 크고 편심 등이 작용하는 경우에는 안전측의 설계라고 할 수 없기 때문에 좀 더 세분화된 기준이 필요하다고 할 수 있다. 각국의 시방서에서 규정하고 있는 긴장재 정착직후의 허용지압응력은 표3과 같다.

2.5 정착부의 보강설계

primary 프리즘이란 정착구를 통해 콘크리트로 전달된 힘이 직접적으로 영향을 미치는 부분을 말한다. Fig.3에서 볼 수 있듯이, 다음의 값 중에서 작은 값 y0의 2배를 primary prism의 크기로 결정한다.

① 힘이 가해지는 정착구의 중심으로부터 가장 가까운 콘크리트 표면까지의 거리

② 정착구 중심으로부터 가장 가까운 정착구 중심까지의 반

Fig.3을 보면 정착구 1 주위는 가장 가까운 콘크리트 표면까지의 거리로 크기가 결정되었고, 2와 3은 정착구 사이의 간격으로 결정되었다.

표 3. 각국 시방서에서의 허용 지압응력

Code	Allowable bearing stress
ACI 343R-88	$f_b \leq 0.80f'_{ci}\sqrt{\frac{A_2}{A_1}-0.2} \leq 1.25f'_{ci}$
AASHTO	$f_b \leq 0.70f'_{ci}\sqrt{\frac{A_2}{A_1}}$
CEB-FIP	$f_b \leq f'_{ci}\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 4.0f'_{ci}$
Swiss Code	$f_b \leq 0.65f'_{ci}\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq f'_{ci}$
Korean Code	$f_b \leq 0.70f'_{ci}\sqrt{\frac{A_2}{A_1}-0.2} \leq 1.1f'_{ci}$

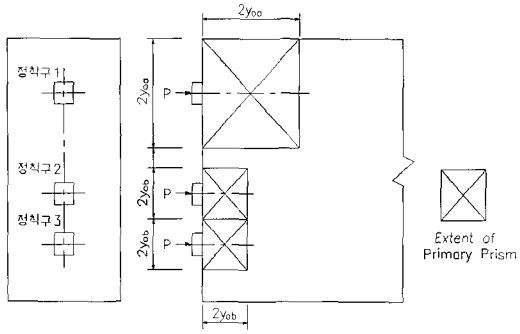


Fig.3. Primary 프리즘의 크기 결정

정착구나 지압판을 통해 하중을 받는 primary 프리즘의 파열력 Fbst는 앞에서 언급했듯이 재하면과 primary prism의 크기의 비 a/d에 따라 좌우된다. 2ypo는 재하면의 폭이며, P는 구조물의 시공중이나 사용중에 정착구에 가해질 수 있는 최대 하중이다. 『CIRIA Guide』 [5]나 『Conception and Design of Prestressed Concrete』 [11]에서는 다수의 정착구가 사용될 때에 파열력은 보정계수 K로 나누어 줄 수 있다고 규정하고 있다. 여기서 K는 정착부의 경계나 단일 정착구의 경우에는 1.0, 한쪽 방향으로 연속된 경우에는 1.5, 그리고 두방향으로 연속되어진 경우에는 2.0을 사용한다. 이 계수는 여러 개의 정착구가 사용될 때 내부의 정착구는 주위의 정착구에 의해 구속효과를 받으므로 균열이 억제된다는 것을 고려한 것이다.

파열력에 저항하기 위해 철근으로 보강을 할 때, 필요한 철근의 단면적 As는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_s = \frac{F_{bst}}{f_s} \qquad (4)$$

이 때 철근의 응력 Fs는 허용인장응력을 넘지 않아야 하고, 균열폭의 제어를 위해 변형률도 허용치를 넘지 않아야 한다. 이를 위하여 일반적으로 재하면에서 0.2yo 거리까지 보강하도록 규정되어 있다.

PSC box 정착부의 설계시에 정착부의 보강철근량의 산정 방법은 아래와 같다.

(1) 표면효과에 의한 철근량

As = 0.04×max(Fjo) / σs,lim

Fjo : 긴장력

σs,lim = (2/3)σy

(2) 파열효과에 의한 철근량

- 긴장력 도입시 콘트리트 인장강도 제한조건

조건1 : σtej=0.5×(1-aj/dj)×Fjo/(e'dj)<1.25ftj

조건2 : σxmj = Fjo/e'dj < 2/3σc'

- 보강철근량의 산정식

Abj = Rj / Kj× σs,lim

Rj = 0.30 (1-aj/dj) Fjo

(파열력 산정시 AASHTO에서 제안한 식 0.25 (1-aj/dj) Fjo은 파열력을 과소평가하는 경향이 있어 0.30 (1-aj/dj) Fjo을 사용하였다.)

aj : anchoring pad의 치수

dj : 대칭프리즘의 치수

kj = 1.0 for side tendons

= 1.5 for intermediate tendons

3. 스트럿-타이 모델에 의한 부재의 정착부 설계

최근 들어 콘크리트 부재 혹은 구조물의 설계시 포스트텐션 방법을 이용하는 것이 보편화되었다. 이 방법은 교량의 교각부나 상판, 건물의 바닥판, 긴 지간의 거더에 이르기까지 하중전달이 중요한 부분에서 많이 사용되고 있다. 포스트-텐션 부재에서 가장 중요한 부분은 PS강재의 프리스트레스를 구조물로 전달하는 정착부이다.

1998년 AASHTO에서는 포스트-텐션 부재의 정착부를 일반영역과 국부영역으로 구분하여 설계할 수 있는 시방규정을 제안하였다[2]. 그러나 이들 규정은 탄성응력해석, 실험, 그리고 소성이론 중 하부한계정리에 근거한 근사해석법 등에 의한 포스트-텐션 부재의 단순 및 단일 정착부에 관한 것이어서, 단순 및 단일 정착부의 극한거동을 감안한 정확한 설계가 어려울 뿐 아니라 복잡한 형상의 단일 및 복수 정착부 설계에의 적용이 어렵다. 따라서 단순 및 단일 정착부를 비롯한 복잡한 형상 및 하중조건을 갖는 포스트-텐션 정착부의 합리적이고 정확한 설계를 위한 새로운 시방규정 혹은 방법이 필요한 실정이다.

3.1 스트럿-타이 모델 방법의 절차

콘크리트 부재는 B-영역이라 불리는 부분과 D-영역이라 불리는 부분으로 구분할 수 있다. B-영역

은 보의 전단지간이 커서 보작용에 의하여 하중이 지지되며, 단면 변형률이 선형으로 되어 평면보존의 법칙이 성립되는 부분을 말한다. D-영역은 전단지간이 작아서 아치작용에 의하여 하중이 지지되며, 보 이론을 적용할 수 없는 부분을 말한다. 보 이론을 적용할 수 없는 대부분의 D-영역은 스트럿-타이 모델을 이용하여 설계한다.

그 절차는 일반적으로

① D-영역의 분리
② 하중과 경계조건의 결정
③ 스트럿-타이 모델의 선정
④ 스트럿과 타이의 재료특성 값 산정
⑤ 스트럿과 타이의 단면적 산정
⑥ 스트럿-타이 모델의 기하학적 적합성 검토
⑦ 절점영역의 강도 검토
⑧ 필요철근량의 산정 및 배근

등의 순서로 설계된다.

3.2 스트럿-타이 모델의 구성요소 및 강도

스트럿-타이 모델은 콘크리트 스트럿, 콘크리트 또는 철근 타이 그리고 절점의 3가지 기본적인 요소로 구성되어 있다. 스트럿과 타이의 설계강도 Pr은 축하중을 받는 부재의 강도로서 다음과 같이 간주한다.

$$Pr = \Psi Pn \quad (5)$$

여기서, Pn은 스트럿 혹은 타이의 공칭강도이며 Ψ는 스트럿 혹은 타이의 강도감소계수이다. 핀으로 연결된 트러스의 절점에 상응하는 스트럿-타이 모델에서의 절점은 스트럿과 타이의 단면력이 다른 스트럿과 타이로 전달되는 영역이다.

스트럿의 공칭강도는 다음과 같이 취한다.

$$Pn = \sigma c\ Acs \quad (6)$$

여기서, Acs 및 σc는 각각 콘크리트 스트럿의 유효단면적 및 유효강도이다. Acs의 값은 이용 가능한 콘크리트 면적과 스트럿 단부의 정착조건을 고려하여 결정하여야 한다. AASHTO에서는 스트럿의 유효강도는 다음과 같이 규정하고 있다

$\sigma c = \sigma c' / (0.8+170\varepsilon 1) \leq 0.85\sigma c'$

$\varepsilon 1=(\varepsilon s+0.002)\cot^2\alpha s$, σc′는 일축압축강도, αs는 스트럿과 타이사이의 최소각, εs는 타이방향의 콘크리트 인장변형률을 나타낸다.

타이는 스트럿-타이 모델의 인장부재이고 일반적으로 타이의 단면력은 힘의 작용선에 대해 대칭으로 위치한 철근에 의해 저항되며 이상적인 타이는 극한하중 상태에서 항복에 도달하도록 해야 한다. 타이의 공칭강도는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Pn = \sigma c\ Ast + Aps\ [\ \sigma pe + \sigma y\ ] \quad (7)$$

여기서, Ast 및 Aps는 각각 종방향 철근타이의 면적과 프리스트레싱 강재의 면적이며, σy 및 σpe는 각각 종방향철근의 항복강도 및 프리스트레스 손실 후의 프리스트레싱 강재의 응력이다.

절점영역은 스트럿-타이 시스템의 요소를 핀으로 연결하는 영역이며 형상은 3 또는 더 많은 스트럿과 타이의 교차점에 의해 결정된다. AASHTO에서는 절점영역의 콘크리트 압축응력은 다음과 같이 강도를 규정하고 있다.

스트럿과 지압면적에 의해 형성된 절점은 $0.85\psi\sigma_c'$, 1방향 철근타이를 정착하고 있는 절점 $0.75\psi\sigma_c'$, 2방향 이상의 철근타이를 정착한 절점의 강도는 $0.65\psi\sigma_c'$이다.

3.3 스트럿-타이 모델의 선정

스트럿-타이 모델의 선정은 내부하중의 흐름에 기본을 두고 있다. D-영역 자유도의 평형이 만족된 후에 하중 및 경계조건에 대한 응력흐름이 결정되며 결정된 하중경로를 따라 스트럿-타이 모델을 선정하여야 한다.

스트럿과 타이의 선형탄성거동에 의한 탄성변형에너지의 원리로부터

$$\sum F_i d_i = \text{Minimum} \quad (8)$$

여기서, Fi, di 는 각각 부재의 단면력과 변위를 나타내고 있다.

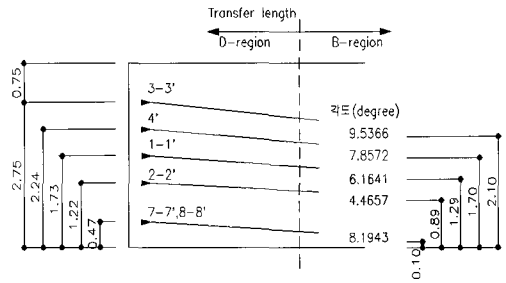
스트럿-타이 모델이 선정된 후에는 스트럿-타이 모델의 기하학적 적합성 검토, 절점영역의 강도 검토를 하여 만족하는 경우 필요철근량의 산정 및 배근의 절차에 따라 설계된다.

4. PSC 부재의 정착부의 설계

실제 PSC box girder 정착부에 대한 설계를 기존의 경험식들과 유한요소해석, 스트럿-타이 방법을 이용하여 해석 및 철근량을 산정해 보았다.

4.1 탄성이론에 근거한 설계

텐던은 prestressing A단계에서 2'→3→8-8', prestressing B단계에서 1-1'→2→3'→4'→7-7'의 순으로 긴장하였다.



4.1.1 표면효과

As = 0.04 × max(Fjo) / σs,lim

max(Fjo) = 375 ton

σs,lim = (2/3)σy = 2/3×4 = 2.667 t/㎠

As = 0.04 × 375 / 2.667

= 5.624㎠/tendon < D16-4EA = 7.94㎠

PRESTRESSING A 단계				PRESTRESSING B 단계			
텐던 기호	개수	F_{jo} (t)	긴장력 (t)	텐던 기호	개수	F_{jo} (t)	긴장력 (t)
2'	2	375	750	1-1'	4	375	1500
3	2	375	750	2	2	375	750
8-8'	4	375	1500	3'	2	375	750
				4'	2	375	750
				7-7'	4	375	1500

-종방향

텐던	단계	a(m)	d(m)	e'(m)	F_{jo}(t)	σ_{tej} (t/㎡)	판정 (조건1)
2'	A	0.32	0.75	0.66	375	219.7	만족
3	A	0.32	0.7	0.68	375	216.6	만족
8-8'	A	0.32	0.75	0.46	375	315.2	만족
1-1'	B	0.32	0.51	0.46	375	305.6	만족
2	B	0.32	0.51	0.46	375	305.6	만족
3'	B	0.32	0.51	0.46	375	305.6	만족
4'	B	0.32	0.51	0.67	375	209.8	만족
7-7'	B	0.32	0.75	0.46	375	315.2	만족

텐던	σ_{xmj} (t/㎡)	판정(조건2)	k_j	R_j	A_{bv} (㎠)
2'	757.6	만족	1.5	65.3	16.3
3	787.8	만족	1	61.9	23.2
8-8'	1087	만족	1	65.3	24.5
1-1'	1598	만족	1.5	43	10.8
2	1598	만족	1.5	43	10.8
3'	1598	만족	1	43	16.1
4'	1097	만족	1.5	43	10.8
7-7'	1087	만족	1	65.3	24.5

Abv = 24.5 ㎠/tendon/m

-횡방향

텐던	단계	a(m)	d(m)	e'(m)	F_{jo} (t)	σ_{tej} (t/㎡)	판정 (조건1)
2'	A	0.32	0.66	0.75	375	198	만족
3	A	0.32	0.68	0.7	375	211.4	만족
8-8'	A	0.32	0.46	0.75	375	171.3	만족
1-1'	B	0.32	0.46	0.51	375	251.9	만족
2	B	0.32	0.46	0.51	375	251.9	만족
3'	B	0.32	0.46	0.51	375	251.9	만족
4'	B	0.32	0.67	0.51	375	290.7	만족
7-7'	B	0.32	0.46	0.75	375	171.3	만족

텐던	σ_{xmj} (t/㎡)	판정 (조건2)	k_j	R_j	A_{bv} (㎠)
2'	757.6	만족	1	58.8	22
3	787.8	만족	1	60.4	22.6
8-8'	1087	만족	1	35.5	13.3
1-1'	1598	만족	1	35.5	13.3
2	1598	만족	1	35.5	13.3
3'	1598	만족	1	35.5	13.3
4'	1097	만족	1	59.6	22.4
7-7'	1087	만족	1	35.5	13.3

Abv = 22.6 ㎠/tendon/m

4.1.2 파열효과

(1) 인장력 도입시 콘크리트의 인장강도
제한조건

$\sigma tej < 1.25\ ftj$ ····· 조건 1

$\sigma tej = 0.5 \times (1-aj / dj) \times Fjo / (e' \leftarrow dj)$

$\sigma c,15 = 350kg/cm^2$

$\sigma c' = 400kg/cm^2$

$ftj,15 = 1.5\sqrt{350} = 28.06kg/cm^2$

$ftj = 1.5\sqrt{400} = 30kg/cm^2$

$1.25ftj,15 = 35.1kg/cm^2 = 351t/m^2$

$1.25ftj = 37.5kg/cm^2 = 375t/m^2$

$\sigma xmj = Fjo / e'dj < 2/3\sigma c'$ ··· 조건 2

$= 266.7kg/cm^2 = 2,667t/m^2$

$< 2/3\sigma c,15 = 2,333t/m^2$

(2) 파열효과를 고려한 철근량

$Abj = Rj / Kj \times \sigma s,lim$

$Rj = 0.30\ (1-aj/dj)\ Fjo$

$Ab = max\ (max(Abj),\ 0.15max(Fjo)/\sigma s,lim)$

$0.15max(Fjo)/\sigma s,lim = 21.09cm^2/tendon$

∴ 파열효과에 따른 철근보강량은 24.5㎠ 이다.

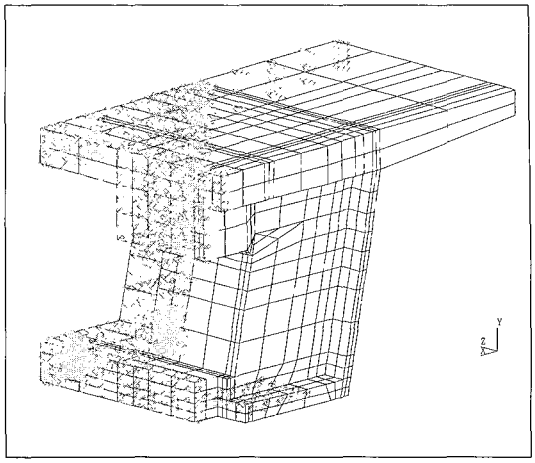
위에서 사용된 설계법의 경우, 다수의 정착구에서 긴장력이 작용할 때에는 그 작용순서와 그 크기에 따라서 응력의 중첩효과에 의해서 각각 한 개의 정착구에서 긴장력을 작용시킬 때와는 다른 결과를 나타내게 되는데 위의 설계법에서는 그 중첩의 효과는 고려되지 않고 계산되고 그 계산결과에 따라서 철근량을 산정하게 되는 단점을 가지고 있다.

4.2 정착부의 3차원 유한요소해석

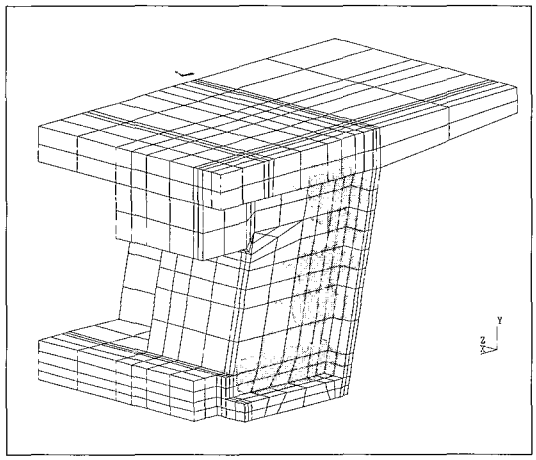
PSC 정착부의 긴장력에 의한 3차원적 응력분포를 파악하고 strut-tie 모델을 구성하기 위하여 solid 요소에 의한 3차원 구조해석을 수행하여 주응력의 응력흐름과 각 방향의 응력의 분포형상을 살펴보았다.

4.2.1 mesh 및 경계조건

PSC box girder 정착부 단면이 대칭이므로 단면의 반, 길이방향으로는 응력교란영역인 PSC box girder 높이 만큼의 거리를 모델링하였다.



4.2.2 긴장력

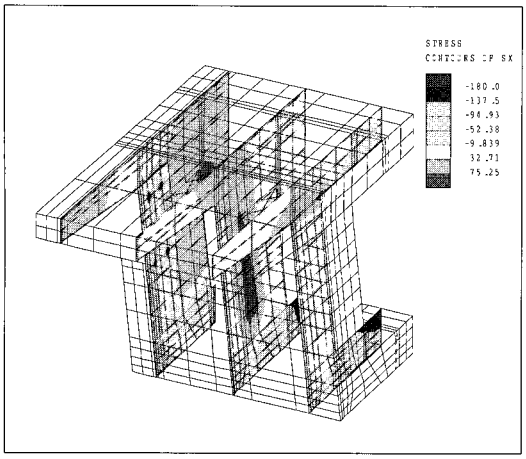


위의 모델에 재하된 하중은 긴장력을 지압판의 면적으로 나눈 분포하중을 정착부에 각 긴장순서에 따라 재하하였다.

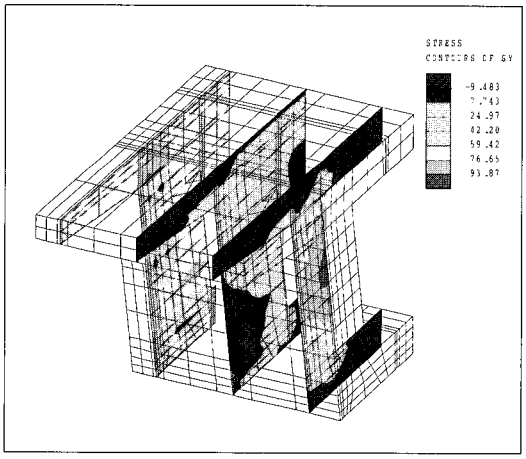
다음은 모든 긴장력이 재하된 경우의 응력분포양상을 나타내었다.

3차원 유한요소 해석을 통해서는 단지 정착부에서의 응력흐름의 파악, 응력집중부의 위치 및 응력분포만을 확인할 수 있다. 3차원 solid 모델에서는 그 응력흐름으로부터 가장 정확한 응력집중부의 위치와 응력분포 등을 알 수는 있지만 그 정착부 각 단면에서의 단면력을 산정하여 파열력에 저항하기 위하여 필요한 철근량을 결정하기에는 단면의 응력분포를 정량적으로 형상화하기에는 어렵고 번거로운 작업이

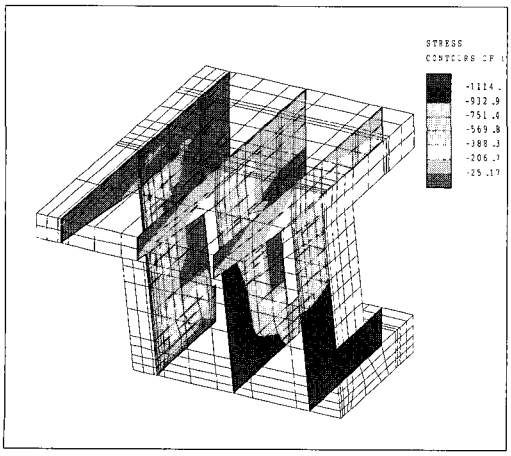
4.2.3 교축직각방향 응력(σX)



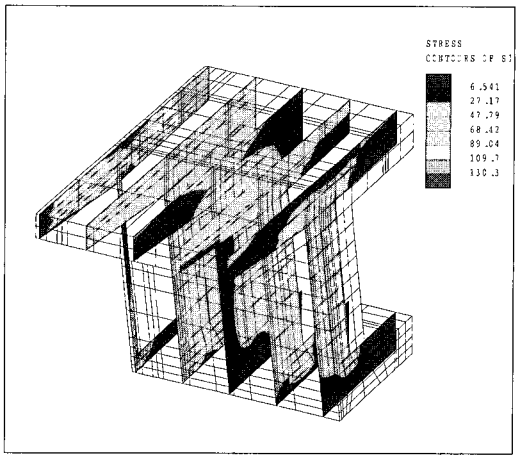
4.2.4 수직방향 응력(σY)



4.2.5 교축방향 응력(σZ)



4.2.6 최대 인장주응력(σ1)



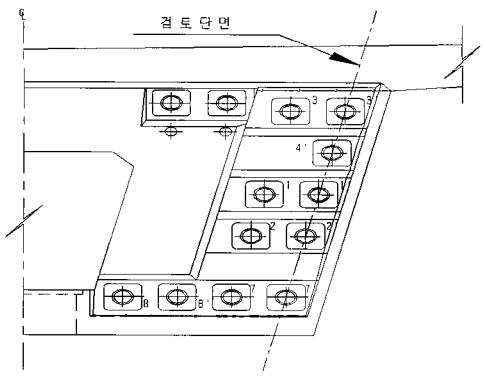
4.3 Strut-Tie Model에 의한 PSC 정착부 설계

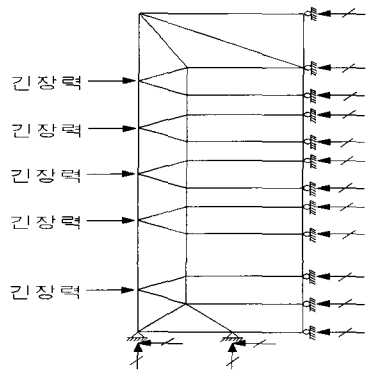
4.1의 내용은 정착구 1개에 대한 파열인장응력(bursting tensile stress)과 박리인장응력(spalling tensile stress, surface tensile stress)을 검토하였다.

그러나 강선의 긴장순서에 따라서 파열인장응력과 할렬인장응력은 변하게 되며 이로 인해 정착부에 발생하는 인장력 변화를 검토하기 위하여 다음의 계산에서는 strut-tie model을 형성하여 강선 긴장순서에 따른 정착부의 철근량을 검토할 수 있었다.

4.3.1 수직방향에 대한 철근량 검토

PSC box 단부의 web에 배치된 강선에 대하여 다음과 같은 2차원 트러스 모델을 형성하였다.





긴장순서	2'→7'→3'→1'→4'

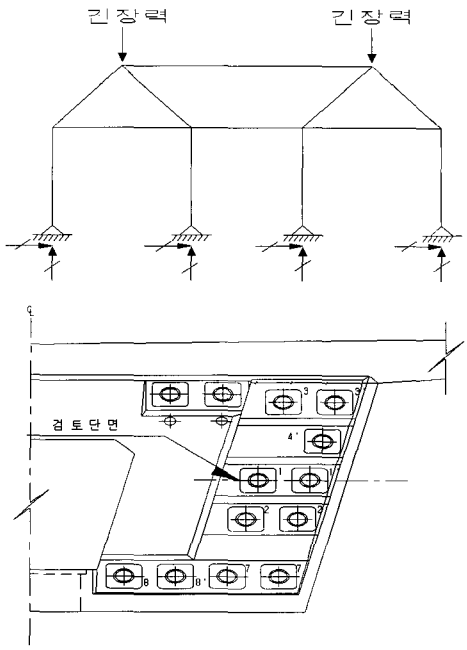
PSC box 단부의 높이만큼의 거리를 정착부의 응력교란영역(D영역)으로 보았고 각부재들과 절점의 제한조건을 만족하도록 스트럿-타이 모델을 구성하였다.

위의 모델과 긴장순서에 의하여 해석을 수행하였으며 그에 따른 각 강선에 발생하는 최대 파열력과 그로부터 산정된 철근량은 다음과 같다. 실제 설계시에 철근의 배근은 각 강선의 파열력에서 산정된 철근량중 가장 큰 철근량보다 그 이상으로 등간격으로 배근하는 것이 일반적이다. 따라서, 57.98cm2을 배근하였고, 실제 배근된 철근량과 계산된 철근량을 비교하여 그 적정성을 판단하였다.

강선 번호		3'	4'	1'	2'	7'
bursting effect	인장력(ton)	73.31	31.05	35.10	67.68	44.82
	필요 철근량(cm^2)	27.49	11.64	13.16	25.39	16.81
	배근량(cm^2)	57.98	57.98	57.98	57.98	57.98
	판 정	**만족**	**만족**	**만족**	**만족**	**만족**
spalling effect	인장력(ton)	10.16	7.64	12.41	0.21	0.35
	필요 철근량(cm^2)	3.81	2.86	4.65	0.08	0.13
	배근량(cm^2)	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94
	판 정	**만족**	**만족**	**만족**	**만족**	**만족**

4.3.2 수평방향에 대한 철근량 검토

PSC box 단부의 web에 배치된 강선에 대하여 수평방향으로 다음과 같은 2차원 트러스 모델을 형성하였다.



긴장순서	1' → 1

위의 strut-tie model과 긴장순서에 대한 해석결과 및 철근량 검토는 다음과 같다.

		1'	1
bursting effect	인장력(ton)	106.1	103.7
	필요 철근량(cm^2)	39.79	38.89
	배근량(cm^2)	41.71	41.71
	판 정	**만족**	**만족**
spalling effect	인장력(ton)	9.42	
	철근량(cm^2)	3.53	
	배근량(cm^2)	4.85	
	판 정	**만족**	

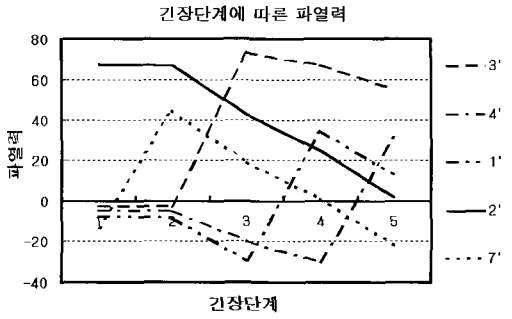
위의 strut-tie model에서는 정착부에서의 각 긴장단계별로 중첩되는 긴장력의 효과를 고려하여 strut와 tie에 작용하는 단면력을 산정할 수 있었으며, tie에 작용하는 최대 단면력을 선정하여 그 부재에서 필요로 하는 철근량을 산정할 수 있었다.

또한 3차원 유한요소해석에서와는 달리 각 부재에서의 단면력의 산정이 매우 간편하여 실제 설계에 사용하기에 편리한 장점을 가지고 있다.

5. PSC box 정착부 설계의 비교

PSC box의 정착부에서는 매우 큰 긴장력의 도입으로 인해서 그 정착부 주의에 매우 큰 국부응력들이 유발된다. 따라서, 긴장력의 작용시 그 주위에는 균열이 발생하게 되는데 발생하는 균열을 억제하기 위하여 많은 나선철근과 격자형의 철근들이 배근된다. 위에서 사용된 방법들은 모두 이러한 균열을 방지하기 위하여 필요한 철근량을 산정하고 정착구의 안전성을 판단하는데 그 목적이 있다.

기존의 탄성이론에 근거한 설계법의 경우는 하나의 정착구에서 긴장력이 작용하는 경우에 대한 식들로서 파열력을 산정하고 그 인장력에 저항하기 위한 철근량을 산정하여 정착구에 조밀하게 배치시키게 된다. 간단한 식들과 그래프를 이용하여 간단히 설계에 반영할 수 있는 장점을 가지고 있다. 반면에 다수의 정착구에서 긴장력이 작용할 때에는 그 작용순서와 그 크기에 따라서 응력의 중첩효과에 의해서 각각 한 개의 정착구에서 긴장력을 작용시킬 때와는 다른 결과를 나타내게 되는데 이 설계법으로는 그 중첩의 효과를 고려할 수 없다는 단점을 가지고 있는 것이 이 설계법의 맹점이다. 따라서 하나의 정착구를 갖는 간단한 구조에는 적용될 수 있지만 복잡한 형상을 가진 구조물에 대해서 적용시키기에는 여러 가지 문제점들을 가지고 있다. 다음으로 3차원 유한요소해석을 이용하는 경우, 긴장력이 작용할 때 그 정착구의 응력분포를 가장 정확하게 판단할 수 있다. 그러나 그 응력의 흐름을 가지고 설계시 사용되는 단면력을 산정하기가 매우 번거롭고 어려운 작업이라 실제 설계에 적용하기에는 무리가 있다.



마지막으로 strut-tie model을 이용한 방법은 여러 정착구를 갖는 구조물에도 적용할 수 있고 긴장력의 도입순서에 따른 긴장력들의 중첩에 의한 효과를 고려할 수 있다.

위의 그래프를 살펴보면 강선을 각 단계별로 긴장하는 경우에 강선을 긴장한 직후의 파열력이 가장 크고 다른 정착구에서 긴장시에는 이전에 긴장하였던 정착구에서의 파열력의 크기가 줄어드는 것을 확인할 수 있었고 다수의 정착구에서 강선을 순서대로 긴장할 때에는 한개의 정착구에서 긴장할 때와는 다른 양상을 보인다는 것을 알 수 있었다. 또한, 위의 경우와 긴장순서가 다르다면 파열력의 변화양상도 다른 경향을 나타낼 것이다.

또한 실제 설계시에 필요한 단면력의 산정이 매우 쉬운 장점을 가지고 있어 PSC box 정착부 설계시에 적합한 설계방법으로 판단된다.

6. 결 론

PSC box 정착부 설계시, 여러 가지 방법을 비교해 본 결과 각각의 설계법들이 모두 각각의 장·단점을 가지고 있었으나 그 중에 가장 편리하고 합리적으로 설계에 적용할 수 있는 것이 strut-tie model에 의한 방법으로 판단된다. 기존의 탄성이론에 의한 설계법과 strut-tie model에 의한 해석결과를 비교하여 보면 다음과 같다.

구 분	기존방법	strut-tie method
spalling 철근	5.62㎠	4.65㎠
bursting 철근	24.5㎠	27.5㎠

파열력에 의한 철근량의 경우strut-tie model method로 설계한 경우에 약간 큰 철근량을 나타냈는데 이 이유는 응력의 중첩에 기인한다고 판단되고 각 구조물의 형상, 긴장순서에 따라서 단면력 및 철근량은 변화할 수 있다. 3차원 유한요소해석의 경우는 실제 철근의 배근을 결정하는데 적용하기는 무리이고 단지 응력의 흐름 및 변화양상과 집중부를 판단하는데 유용하다고 판단된다. strut-tie method를 사용할 경우 유의할 점은 구조물의 형상과 긴장력의 도입순서 등에 의해 변화하는 응력흐름을 잘 파악하여 strut와 tie를 구성하여야 하고, strut와 tie로 구성된 각 트러스 부재들의 기하학적 조건을 만족하는 적합한 트러스를 구성하여야 한다는 것이다. 위의 유의사항만을 잘 지킨다면 PSC box 정착부 설계에 매우 적합한 설계방법으로 판단된다.

7. 감사의 글

본 연구는 2000학년도 경기대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] 건설교통부, 도로교 설계기준, 2000

[2] American Association of State Highway Transportation Officials, "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications", AASHTO

[3] ACI, "Note on ACI 318-99 Building Code Requirements for Structural Concrete"

[4] MacGregor, J. G., "Reinforced Concrete Mechanics and Design", Prentice Hall Inc.

[5] J. L. Clark, "A guide to the design of anchor blocks for post-tensioned prestressedconcrete", CIRIA Guide, London, 1976

[6] L. B. Kriz, C. H. Raths, "Connections in Precast Concrete Structures-Bearing Strength of Column Heads", Journal of Prestressed Concrete Institute, December 1963, No.6

[7] K. H. Middendorf, "Anchorage Bearing Stressed in Post-Tensioned Concrete", ACI Journal, Nobember 1960

[8] S. K. Niyogi, "Bearing Strength of Reinforced Concrete Blocks", ASCE Structural Division Journal, Vol.110, ST.5 May 1975

[9] S. K. Niyogi, "Bearing Strength of Concrete-Geometric variation", ASCE Structural Division Journal, Vol.99, ST.7, July 1973

[10] "CEB-FIP Model Code 1990", Comittee Euro-International Du Beton, 1991

[11] "Conception and Design of Prestressed Concrete", French Government Publication,BIS

[12] 배한욱, 송하원, 변근주, 변윤주"비선형 스트럿-타이 모델을 이용한 PSC구조물의 정착부 설계" 콘크리트학회지 10권 1998