

# PSC부재 단순 정착부의 스트럿-타이 모델 해석

## Strut-Tie Model Analysis of PSC Simple Anchorage Zone

손우현\*

윤영목\*\*

Son, Woo Hyun

Yun, Young Mook

### ABSTRACT

The anchorage zone of prestressed concrete members is a critical region where a large concentrated force due to prestressing by tendons is introduced. In this study, the ACI, AASHTO LRFD, CEB-FIP design criteria and the nonlinear strut-tie model approach are applied to the ultimate strength analysis of simple anchorage zones of 18 post-tensioned concrete members tested to failure. From the result of ultimate strength analysis, the advantages and disadvantages of each method are compared and discussed.

### 1. 서론

PSC부재의 프리스트레스 힘은 정착판에서 시작하여 구조물로 점차 퍼져 나가 일정한 거리에서는 거의 선형으로 변화한다고 볼 수 있다. 이 일정한 거리 이하에서는 프리스트레스 힘에 의해 응력상태가 교란되며, 이러한 응력교란영역을 정착부라 한다. 정착부는 정착판 앞의 큰 압축응력을 받는 국부 영역과 프리스트레스 힘이 구조물로 퍼져 나가면서 생기는 인장력을 받는 일반영역으로 구분할 수 있는데, 이는 정착부 내에서의 응력상태가 다르기 때문이다. 이러한 이유 때문에 AASHTO-LRFD<sup>(5)</sup>, ACI 318-05<sup>(4)</sup>, 그리고 CEB-FIP<sup>(7)</sup>등과 같은 세계 주요설계기준에서는 정착부를 두 영역으로 구분하여 설계 수 있는 설계규정을 제안하고 있다. 본 연구에서는 PSC부재의 정착부에 관한 AASHTO-LRFD, ACI 318-05, CEB-FIP 설계기준 및 비선형 스트럿-타이 모델 방법을 이용하여 Breen등<sup>(6)</sup>에 의해 파괴실험이 수행된 단순 정착부를 가진 18개 부재의 파괴거동 및 강도를 예측하였으며, 그 결과의 비교·분석을 통해 각 방법의 장단점을 평가하였다.

### 2. 기존 설계기준에 의한 PSC부재 정착부의 극한강도 평가

AASHTO-LRFD 기준의 경우 파열력, 정착장치 전면의 지압강도, 그리고 국부영역의 압축강도 중 작은 값을 극한강도로 보았다. 정착부의 파열력은 사각형 단면에 작용하는 단일 정착구에 대한 유효요소해석에 근거한 파열철근의 인장력에 대한 근사식으로부터 다음 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\Sigma P_v = \frac{T_{brst}}{0.25 \left(1 - \frac{a}{h}\right)} \quad (1)$$

\* 정회원, 경북대학교 토목공학과 박사과정

\*\* 정회원, 경북대학교 토목공학과 교수

여기서,  $T_{burst}$ ,  $P_u$ ,  $a$ , 그리고  $h$ 는 각각 정착장치 전면에서 긴장재축에 횡방향으로 작용하는 정착부에서의 인장력( $N$ ), 설계긴장력( $N$ ), 정착장치의 측면치수( $mm$ ), 그리고 단면의 측면치수( $mm$ )이다.

정착장치 전면의 지압강도( $P_r$ )는 식 (2)와 같으며, 이 때  $f_n$ 은 식 (3)의 두 값 중 작은 값을 취한다.

$$P_r = \phi f_n A_b \quad (2)$$

$$f_n = 0.7f_{ci}' \sqrt{\frac{A}{A_g}}, \quad f_n = 2.25f_{ci}' \quad (3)$$

여기서,  $\phi$ ,  $A$ ,  $A_g$ , 그리고  $f_{ci}'$ 는 각각 강도감소계수, 표면부의 최대면적( $mm^2$ ), 받침판의 전체면적( $mm^2$ ), 그리고 콘크리트의 공칭강도( $MPa$ )이다.

국부영역의 압축강도( $P_u$ )는 근사 응력해석법에 의해 일반영역을 설계할 경우 정착장치와 접해있는 콘크리트 압축응력  $f_{ca}$ 가 다음 값을 넘지 않도록 하는 규정으로부터 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$P_u = \frac{f_{ca} A_b \left[ 1 + l_c \left( \frac{1}{b_{eff}} - \frac{1}{t} \right) \right]}{0.6K} \quad (4)$$

여기서,  $P_u$ ,  $f_{ca}$ ,  $A_b$ ,  $b_{eff}$ ,  $l_c$ ,  $t$ , 그리고  $K$ 는 각각 설계긴장력( $N$ ), 콘크리트 압축응력( $MPa$ ), 유효지압면적( $mm^2$ ), 유효지압면의 측면치수( $mm$ ), 국부영역내의 구속철근의 축방향 길이( $mm$ ), 부재의 두께( $mm$ ), 그리고 다중정착부에서 근접배치되어 있는 정착구에 대한 수정계수이다. 단순정착부의 경우  $K$ 는 1이다.

ACI 318-05 기준에서는 파열력을 극한강도로 보았으며, AASHTO LRFD 기준의 세부기준들이 그대로 반영하고 있기 때문에 파열력에 관한 식은 식 (1)과 동일하다. CEB-FIP 기준에서는 파열력, 정착장치 전면의 지압강도 중 작은 값을 극한강도로 보았으며, 파열력의 계산은 다음 식 (5)와 같다.

$$N = \frac{F_{burst}}{0.3(1-a/d)} \quad (5)$$

여기서,  $N$ ,  $F_{burst}$ ,  $a$ , 그리고  $d$ 는 각각 총 하중( $N$ ), 파열강도( $N$ ), 하중판의 폭( $mm$ ), 그리고 유효깊이( $mm$ )이다. 지압강도는 다음 식 (6)과 같으며, 여기서 제한된 하중면 주위에서 횡방향 균열을 피하기 위해 압축응력  $f_{cc}^*$ 는 식 (7)로 제한된다.

$$P_n = f_{cc}^* \times A_1 \quad (6)$$

$$f_{cc}^* = f_{cc} \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 4f_{cc} \quad (7)$$

여기서,  $f_{cc}^*$ ,  $f_{cc}$ ,  $A_1$ , 그리고  $A_2$ 는 각각 콘크리트의 지압강도( $MPa$ ), 콘크리트의 압축강도( $MPa$ ), 재하면적( $mm^2$ ), 그리고 재하면과 유사한 하중을 지지하는 표면부의 최대면적( $mm^2$ )이다.

### 3. 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 의한 PSC부재 정착부의 극한강도 평가

비선형 스트럿-타이 모델 방법의 적용시 선정된 스트럿-타이 모델에 대해 구조적 안정조건과 기하학적 적합조건을 만족하는 최대하중을 구한 후, 이 상태에서의 위험절점영역을 형성하는 개개의 스트럿과 외부 하중판에 작용하는 하중을 위험절점영역의 유한요소절점에 수직 및 수평 성분으로 나누어 작용하여 위험절점영역의 강도를 평가하였다. 실제 파괴실험이 수행된 PSC부재 정착부의 파괴 형태는 하중판 밑의 콘크리트 파쇄에 의한 파괴가 주로 일어났기 때문에 비선형 스트럿-타이 모델의 적용시 하중판 밑의 콘크리트 파쇄로 파괴가 일어나는 집중하중 부근의 절점영역을 해석하였다.

콘크리트 스트럿의 유효강도는 Yun et al.<sup>(8)</sup>의 방법에 의해 일차적으로 결정하고 보강철근에 의한 구속정도를 고려하여 수정하였다. 즉 나선철근에 의해 실제 부재에 구속력이 수동적으로 가해짐으로 절점영역의 강도뿐 아니라 구속영역에 걸쳐있는 스트럿의 강도도 증가된다. 스트럿의 단면적은 스트럿의 유효강도를 감안하여 Yun et al.에 의해 제안된 방법으로 결정하였으며, 철근타이의 단면적은 철근타이의 위치에 해당되는 철근의 단면적과 같게 하였다. 그림 1~5는 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 의한 PSC부재 정착부의 극한강도 평가과정이다.

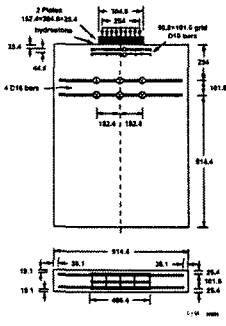


그림 1. 해석대상 시험체(A1)

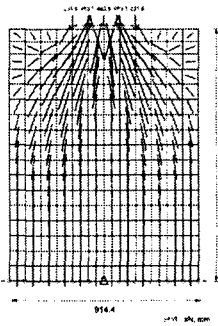


그림 2. 압축주응력흐름

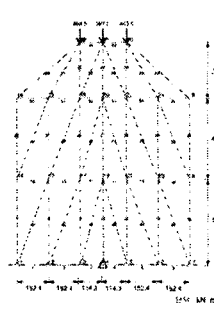


그림 3. 선정된 스트럿-타이 모델

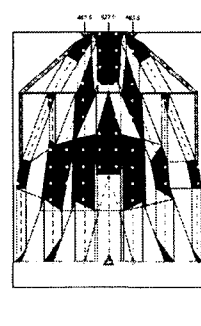


그림 4. 차원화된 스트럿-타이 모델

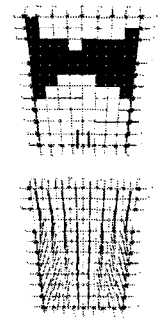


그림 5. 11번 절점 영역 강도검토 (84% 극한하중)

표 1. PSC부재 정착부의 극한강도 평가결과

시험체	실험파괴 강도(kN)	P <sub>evaluated</sub> / P <sub>test</sub>			
		AASHTO-LRFD	ACI 318-02	CEB-FIP	비선형 스트럿-타이 모델 방법
A1	1326	0.57	1.49	0.81	0.84
A2	1223	0.62	1.74	0.88	0.92
A3	1179	0.66	2.42	0.95	0.91
B1	1628	0.94	0.94	0.78	0.98
B2	1290	0.68	0.68	0.57	1.01
B3	1472	0.81	0.81	0.67	0.95
B4	1499	0.85	0.85	0.71	0.91
B5	943	0.84	-	1.47	0.92
B6	1321	0.73	0.97	0.81	1.04
B7	1317	0.97	0.97	0.81	1.04
B8	1228	1.04	1.04	0.87	1.04
C1	1646	0.70	0.70	0.58	0.81
E1	2113	0.74	2.46	0.80	1.16
E2	2224	0.75	2.46	0.83	1.04
E3	2322	0.74	2.36	0.81	0.85
E4	2224	0.73	2.46	0.79	0.88
E5	1477	0.76	1.06	0.75	1.10
E6	1548	0.51	0.51	0.43	1.00
평균 (표준편차)		72%(0.10)	188%(0.87)	80%(0.21)	97%(0.09)

본 연구의 비선형 스트럿-타이 모델 방법은 PSC부재 정착부의 극한강도를 실험파괴하중의 97%로 비교적 정확하게 평가하였으며, 다른 설계기준에 비해 일관된 평가결과를 나타내었다. 이러한 평가결과는 대표적인 응력교란영역인 PSC부재 단순 정착부의 설계방법으로서 본 연구의 비선형 스트럿-타이 모델 방법이 타당함을 보여주는 결과라 할 수 있다.

### 3. 결론

ACI 318-05 기준의 경우 다른 기준들과 달리 파열력만으로 극한강도를 평가함으로써 정착판과 부재의 크기, 일반영역의 철근량에 따라 평가 결과가 다르게 나타났다. 또한 국부영역에 보강된 나선철근의 영향 고려하지 못하며, 편심하중이 작용할 경우 정확한 결과를 예측하지 못하였다. AASHTO-LRFD와 CEB-FIP 기준을 적용한 결과 강도 예측이 다소 보수적임을 알 수 있었다.

비선형 스트럿-타이 모델을 이용하여 PSC부재 정착부의 극한강도를 평가한 경우 모든 부재의 강도 예측은 절점영역 해석에 의해 결정되었다. 절점영역의 강도평가에서 대부분이 주 경사 스트럿 단부의 파쇄로 인한 파괴가 일어났으며, 일부 부재에서는 하중판 밑의 콘크리트 파쇄로 인한 파괴가 일어나기도 했다. 비선형 스트럿-타이 모델 방법은 다른 세 가지 기준을 적용한 결과에 비해 부재의 세부적인 요소와 관계없이 비교적 정확하게 강도를 예측하였으며 표준편차도 작음을 알 수 있었다.

비선형 스트럿-타이 모델 방법에 고려된 여러 가지의 비선형 요소들에 의해 부재가 파괴될 때까지의 비선형 거동을 정확하게 추적할 수 있으므로 비선형 스트럿-타이 모델 방법은 적용범위의 제한이 없이 실제의 복잡한 기하학적 형상을 갖는 구조물의 정확한 파괴거동을 감안한 극한한계설계를 가능케 할 것으로 보인다.

### 참고문헌

1. 윤영목, 최명석, "포스트-텐션 부재의 정착부에 관한 AASHTO LRFD 설계기준의 평가", 대한토목학회 논문집, 21권 3호, pp. 317-330, 2001.
2. 윤영목, "스트럿-타이 모델에서 콘크리트 스트럿의 유효강도 (I): 결정방법의 소개", 대한토목학회 논문집, 25권 1호, pp. 49~59, 2005.
3. 윤영목, 신호정, "스트럿-타이 모델에서 콘크리트 스트럿의 유효강도 (II): 적합성 평가", 대한토목학회 논문집, 25권 1호, pp. 61~72, 2005.
4. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary ACI 318R-05, *American Concrete Institute*, 2005
5. American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 3rd Ed., Washington, D.C., 2004.
6. Breen, J. E., Burdet, O., Roberts, C., Sanders, D., and Wollmann, G. P., "Anchorage Zone Reinforcement for Post-tensioned Concrete Girders", Research Report for NCHRP, The University of Texas, Austin, Texas, 1991.
7. Comite Euro-International du Beton, CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford Services Ltd., 1993.
8. Yun, Y.M. "Nonlinear Strut-Tie Model Approach for Structural Concrete", *ACI Structural Journal*, V. 97, No. 4, 2000.