

# 스트럿-타이 모델을 이용한 PSC 깊은보의 부착활동영향의 평가

## Strut-Tie Model Evaluation of Bond-Slip Effects in PSC Deep Beams

윤 영 목\*                      강 병 수\*\*  
Yun, Young Mook              Kang, Byung Soo

### ABSTRACT

The algorithm and program which implement the bond-slip behavior of pre-tensioned concrete beams to the nonlinear strut-tie model approach, are developed in this study. The validity of the algorithm and program is verified through the strut-tie model evaluation of the strength and behavior of two pre-tensioned concrete deep beams which were failed by bond-slip.

#### 1. 서 론

강재와 콘크리트 사이의 마찰력에 주로 의존하여 강재의 큰 프리스트레스 힘을 전달하는 프리텐션 콘크리트 부재에서는 일반적인 철근콘크리트 부재보다 상대적으로 부착활동에 대한 연구가 중요하다. 그러나 지금까지의 대부분의 부착활동에 관한 연구는 이형철근이 사용된 철근콘크리트 보에 국한된 것이므로,<sup>(1-35)</sup> PS강재, 에폭시 피복된 이형철근, 그리고 원형철근 등이 사용되는 콘크리트 부재의 부착활동에 관한 더 많은 해석 및 실험 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 비선형 스트럿-타이 모델 방법<sup>(6)</sup>에 부착활동의 영향을 고려할 수 있는 알고리즘 및 프로그램을 개발하고, 부착활동이 일어난 실험·파괴된 2개의 프리텐션 콘크리트 깊은보의 거동 및 강도 평가를 통해 개발된 알고리즘 및 프로그램의 타당성을 검증하였다. 타당성이 검증된 알고리즘 및 프로그램은 일반적인 프리텐션 콘크리트 보의 해석·설계뿐 아니라 시간에 따른 프리스트레스 힘의 감소가 필요한 프리텐션 콘크리트 보의 설계에도 효과적으로 사용될 수 있을 것이다.

#### 2. 비선형 스트럿-타이 모델 방법에서의 부착활동

비선형 스트럿-타이 모델 방법을 통한 부착활동이 발생한 콘크리트 부재의 거동 및 강도 평가 알고리즘은 다음과 같다. 즉 다음의 식 (1), (2), 그리고 (3)에 의하여 평균부착응력  $\mu_{avg}$ , 임의 두 단면에서의 강재단면력의 차이  $\Delta T_i$ , 그리고 외부하중에 의해 강재 둘레에 발생하는 부착응력  $\mu$ 를 구한 후,  $\mu_{avg}$  및  $\mu$ 를 비교하여 부착활동 여부를 판단한다. 스트럿-타이 모델의 부재가 압축을 받고 있을 때는 부착활동이 일어나지 않는다고 가정한다. 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 부착활동의 영향을 고려하는 알고리즘은 Fig. 1의 흐름도로 요약할 수 있다.

$$\mu_{avg} = 6\sqrt{f_c} \left( \frac{c}{d_b} - \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

$$\Delta T_i = \frac{1}{2} \left\{ \frac{x_i}{x_{i+1} + x_i} (T_{i+1} - T_i) + \frac{x_i}{x_{i-1} + x_i} (T_i - T_{i-1}) \right\} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{\Delta T}{\Delta x \pi d_b} \quad (3)$$

\* 정희원, 경북대학교 토목공학과 부교수

\*\* 정희원, 다호컨설턴트 사원

식 (1) 및 (3)에서  $f_c'$ (psi)는 콘크리트의 압축강도,  $d_b$ 는 철근의 직경,  $c$ 는 철근의 중심에서 콘크리트 부재 표면까지의 거리와 철근 중심간 간격의 절반 중 작은 값, 그리고  $\Delta x$ 는 강재의 길이 즉 스트럿-타이 모델의 강재타이의 길이이다. 또한 식 (2)에서  $x_{i-1}$  및  $x_{i+1}$ 은 각각  $i$ 강재타이의 좌측 및 우측 강재타이의 길이이며,  $T_{i-1}$  및  $T_{i+1}$ 은 각각  $i$ 강재타이의 좌측 및 우측 강재타이의 단면력이다.

### 3. 프리텐션 콘크리트 깊은보의 해석

PS강재의 부착활동 영향을 고려할 수 있는 알고리즘을 접목시킨 비선형 스트럿-타이 모델 방법의 타당성을 Purdue대학교<sup>(4)</sup>에서 실험·파괴된 2개의 AASHTO Type 프리텐션 I형 깊은보 Beam I-3A 및 II-1A의 해석을 통해 평가하였다. 각 시험체의 단면형상, 철근배근도, 그리고 PS강재와 철근에 부착된 변형률 계이지의 부착위치는 Fig. 2와 같다.

Beam I-3A의 해석을 위한 스트럿-타이 모델의 산정을 위하여 첫 번째로 이 보의 평면응력 무근콘크리트 비선형 유한요소해석을 수행하여 압축주응력 흐름의 방향을 결정하였다. Fig. 3은 Beam I-3A의 실험과 파괴중 하에서의 압축주응력 흐름을 보여주고 있다. 그림에서 압축주응력이 양지지부 사이에서 교란되므로, 이 보의 스트럿-타이 모델을 양지지부 사이에서만 선정하였다. 선정된 스트럿-타이 모델은 Fig. 4와 같다. PS강재를 강재들의 중심에서 스트럿-타이 모델의 수평부재로 취하였으며, 전단지간 내에 있는 수직스터립을 수직부재로 취하였다. 압축주응력의 흐름에 근거하여 하중작용점과 지점사이에 대각선 스트럿과 이 보의 상단플랜지 위치에 수평 스트럿을 배치하였다. Beam II-1A의 스트럿-타이 모델은 평면응력 무근콘크리트 비선형 유한요소해석으로부터의 압축주응력 흐름과 철근 및 PS강재의 배근상세를 근거로 Beam I-3A의 경우와 동일하게 응력교란영역인 양지지부사이에서 선정하였다.

골재맞물림 작용의 영향을 고려하기 위하여 Fig. 4에서와 같이 스트럿-타이 모델의 40번 및 41번 스트럿의 위치에 추가적으로 각각 42번 및 43번의 골재맞물림 스트럿을 배치하였다. 또한 콘크리트의 인장저항 기능을 고려하기 위하여 단면적이  $25.13in^2$  (Beam II-1A의 경우  $35.7in^2$ )인 44~53번의 수평콘크리트 타이와 단면적이  $28.3in^2$ 인 54~62번의 수직콘크리트 타이를 강재타이의 위치에 중복으로 추가하였다.

Beam I-3A 및 II-1A에서의 프리스트레스 힘의 전달길이는 각각 30.8 및 30.6in로 계산되었다. 이들 보의 N-전단지간쪽의 유효프리스트레스 힘은 선형보간법을 이용하여 전달길이 안에 있는 스트럿-타이 모델 N-쪽의 절점에 분포시켰으며, S-전단지간 내민부는 전달길이보다 길므로 스트럿-타이 모델의 S쪽 첫 번째 절점에 모든 유효프리스트레스 힘을 작용시켰다. 작용된 하중은 그림 4에 나타나있다.

콘크리트 스트럿의 단면적은 강재에 의한 구속의 영향을 고려하여 결정하였다. Beam I-3A의 골재맞물림 스트럿 43번 및 44번의 단면적은 각각  $2.0in^2$  및  $0.5in^2$ 으로, Beam II-1A의 경우 각각  $6.0in^2$  및  $5.0in^2$ 으로 결정되었다. 수직스터립과 PS강재 위치에서의 타이의 단면적은 철근 및 PS강재의 단면적으로 취하였다. 선정된 2개 보의 스트럿-타이 모델은 모두 콘크리트 부재의 치수에 적합한 기하학적인 형상을 가지고 서로 중첩되는 인접한 콘크리트 스트럿이 없으므로 기하학적 적합성 조건을 만족시켰다.

본 연구의 비선형 스트럿-타이 모델 방법에서는 부착활동이 일어난 후의 PS강재 주변의 콘크리트 즉, 강재타이에 중복으로 배치된 콘크리트 타이가 힘을 모두 받는다고 가정하였다. 부착활동이 발생한 PS강재 타이에 위치한 콘크리트 타이의 단면적은 I-3A의 경우는  $105cm^2$ 이고, II-1A의 경우는  $125cm^2$ 이다. 평균부착응력식 (1)은 이형철근에 대한 식이기 때문에 PS강재의 평균부착응력식은 식 (1)에 감소계수를 곱한 수정식을 사용하여야 한다. 감소계수는 부착활동이 일어난 스트럿-타이 모델 자체의 비선형해석 중의 증분하중단계에서 식 (2) 및 (3)에 의한 부착응력  $\mu$ 와 식 (1)에 의한 부착응력  $\mu_{avg}$ 의 비로써, 본 연구에서는 부착활동이 일어난 Beam I-3A의 왼쪽 최하단부에 있는 스트럿-타이 모델 강재타이로부터 0.67로 결정되었다. 이 값은 Beam II-1A의 스트럿-타이 모델 해석 시에 평균부착응력  $\mu_{avg}$ 를 계산하는데 그대로 사용하였다.

선정된 스트럿-타이 모델 자체의 비선형 유한요소해석에서 식 (2)에 의해 계산된  $\Delta T$ 는 Table 1과 같다. Table 1에서는 가장 부착활동이 생기기 쉬운 프리스트레스 힘이 전달되는 길이와 보의 중앙부까지의 강선에 대한  $\Delta T$ 를 계산하였으며, 부착활동이 발생한 위치 및 발생하중단계가 표시되어 있다. Beam I-3A 및 II-1A에서는 각각 극한하중의 85% 및 95%단계에서 부착활동이 일어난 것을 알 수 있었는데, 이는 실험에

서 측정된 부착활동이 시작된 시기, 즉 극한하중의 87% 및 97%와 비슷한 하중단계이다. 이것은 부착활동을 고려한 비선형 스트럿-타이 모델 방법은 부착활동의 발생시점을 비교적 정확하게 예측할 수 있다는 것을 말해준다.

Fig. 5는 2개 보의 강선에서 측정된 내력을 부착활동의 유무를 고려한 비선형 스트럿-타이 모델에 의한 내력과 비교한 것으로, 부착활동을 고려한 비선형 스트럿-타이 모델 방법이 그렇지 않은 방법보다 비교적 실험결과에 근접한 내력을 평가하였음을 알 수 있다. Fig. 6은 2개 보의 중앙단면에서 측정된 처짐을 부착활동의 유무를 고려한 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 의한 처짐과 비교한 것이다. 부착활동이 일어나기 전의 프리텐션 보에서는 처음 PS강재에 주어진 프리스트레스 힘에 의해 콘크리트가 받는 압축력이 수직하중의 증가에 의해 점점 상쇄되어 콘크리트가 받는 압축력이 0에 가까워지게 되며, 그 이상의 하중을 받게 되면 콘크리트는 인장력을 받게 된다. 본 논문에서는 PS강재 위치에서의 콘크리트가 인장력을 받기 시작한 이후부터 부착활동이 발생할 수 있다고 보았다. 따라서 위의 평가결과로부터 부착활동을 고려하지 않은 경우와 비교해 볼 때 부착활동이 일어나기 전에는 부착활동을 고려하지 않은 경우나 부착활동을 고려한 경우 모두 비슷한 거동을 나타내지만 부착활동이 일어난 후에는 다소 차이가 있다는 것을 알 수 있다.

Beam I-3A에서 가장 위험한 국부영역인 하중판 아래의 절점영역의 강도를 검토하였다. Fig. 7은 절점영역에서의 압축주응력 흐름과 절점영역의 파괴형상을 보여주고 있다. 이 절점영역에서의 압축주응력의 흐름은 Fig. 3의 같은 영역에서의 압축주응력 흐름과 유사하다. 또한 95%의 극한하중이 작용할 때 이 절점영역에서는 실험에서 발생한 파괴양상과 유사한 하중판 밑의 분쇄에 의한 파괴메카니즘이 발생하였으므로, 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 의하여 실험파괴 하중의 95%에 해당되는 비교적 정확한 파괴강도를 예측하였다. 파괴메카니즘이 발생할 때 이 절점영역에서의 최대 압축주응력은  $1.07 f_c'$ 이었다. Beam II-1A에서 가장 위험한 국부영역인 절점영역의 강도를 검토하였다. 100%의 극한하중이 작용할 때 이 절점영역에서는 실험에서 발생한 파괴양상과 유사한 하중판 밑의 분쇄에 의한 파괴메카니즘이 발생하였으므로, 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 의하여 정확한 파괴강도를 예측할 수 있었다. 파괴메카니즘이 발생할 때 이 절점영역에서의 최대 압축주응력은  $1.13 f_c'$ 이었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 프리텐션 콘크리트 깊은보에 배치된 PS강재의 부착활동이 깊은보의 거동 및 강도에 미치는 영향을 고려할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 또한 개발된 알고리즘을 기존의 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 접목시켜 프리텐션 콘크리트 깊은보의 스트럿-타이 모델 해석 및 설계를 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

개발된 알고리즘으로 보완된 비선형 스트럿-타이 모델 방법은 실험·파괴된 모든 깊은보의 부착활동을 유발시키는 외하중의 크기를 정확히 예측하였다. 따라서 본 연구에서 채택한 감소계수가 적용된 이형철근의 부착강도식 및 PS강재의 부착응력을 계산하기 위한 기본가정, 그리고 PS강재의 인장력식은 타당한 것으로 판단된다.

PS강재의 부착활동의 영향을 고려할 수 있는 비선형 스트럿-타이 모델 방법은 실험·파괴된 깊은보의 처짐, PS강재의 내력, 그리고 극한강도를 비교적 정확하게 평가하였다. 따라서, 본 연구에서 개발된 부착활동을 고려할 수 있는 비선형 스트럿-타이 모델 방법은 프리텐션 콘크리트 깊은보의 해석에 적합한 방법임이 입증되었다. 또한 이 방법은 향후 프리텐션 콘크리트 보의 설계 시 PS강재의 정착파괴 발생여부를 효과적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- (1) Allwood, R.J. and Bajarwan Abdullah A., "Modeling Nonlinear Bond-Slip Behavior for Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures", *ACI Structural Journal*, September-October, pp. 538-544, 1996.
- (2) Esfahani, M.Reza and Rangan B.Vijaya, "Local Bond Strength of Reinforcing Bars in Normal Strength and High-Strength Concrete(HSC)", *ACI Structural Journal*, March-April, pp. 96-106, 1998.

- (3) Hwang, Shyh-Jiann., Leu, Yih-Ren. and Hwang Han-Lin., "Tensile Bond Strengths of Deformed Bars of High-Strength Concrete", *ACI Structural Journal*, January-February, pp. 11-20, 1996.
- (4) Kaufman, M.K. and Ramirez, J.A., *Structural Behavior of High Strength Concrete Prestressed I-Beams*, Report No. FHWA, IN JHRP-88/6, Joint Highway Research Project, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- (5) Yang, Shunsheng and Chen, Jiakui, "Bond Slip and Crack Width Calculations of Tension Members", *ACI Structural Journal*, July-August, pp. 414-422, 1988.
- (6) Yun, Y.M., "Nonlinear Strut-Tie Model Approach for Structural Concrete", *ACI Structural Journal*, Vol.97, pp. 581-590, 2000.

Table 1. 강재타이의 단면력 차이  $\Delta T$

(a) Beam I-3A						(b) Beam II-1A					
B \ A	1**	2	3	4	5	B \ A	1**	2	3	4	5
17*	30.19	20.42	1.49	0	0	17	62.93	0	16.15	7.97	0
18	30.63	23.87	1.49	0	0	18	65.34	0	18.77	8.41	0
19	30.63	23.88	1.49	0	0	19*	68.00	1.04	21.10	9.60	0
20	31.42	24.95	1.90	1.7	0	20	71.43	20.36	23.52	10.8	0

A: 강재타이의 번호, Fig. 4 참조;  
B: 충분하중단계

\*: 부작활동이 발생한 충분하중단계;  
\*\*: 부작활동이 발생한 강재타이의 번호

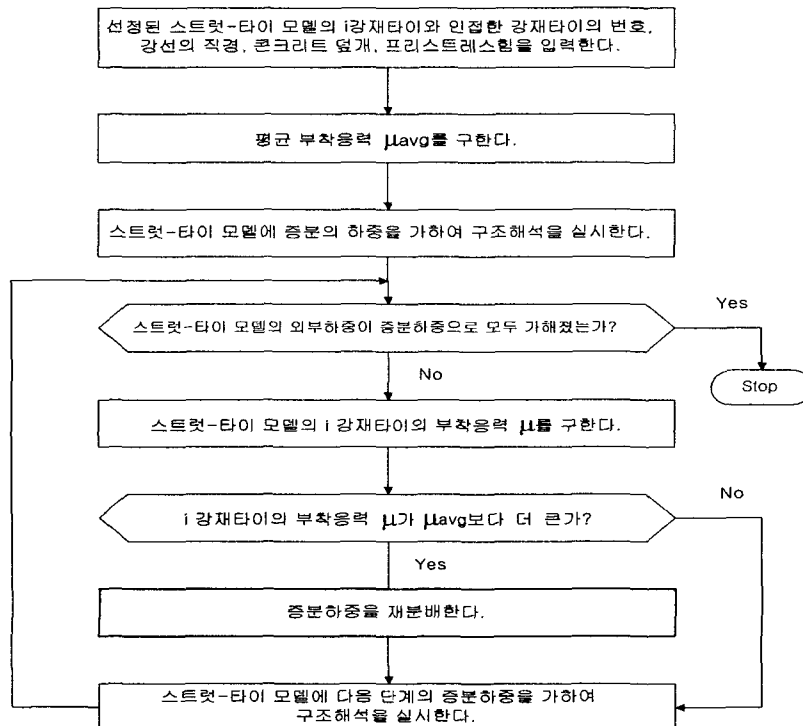
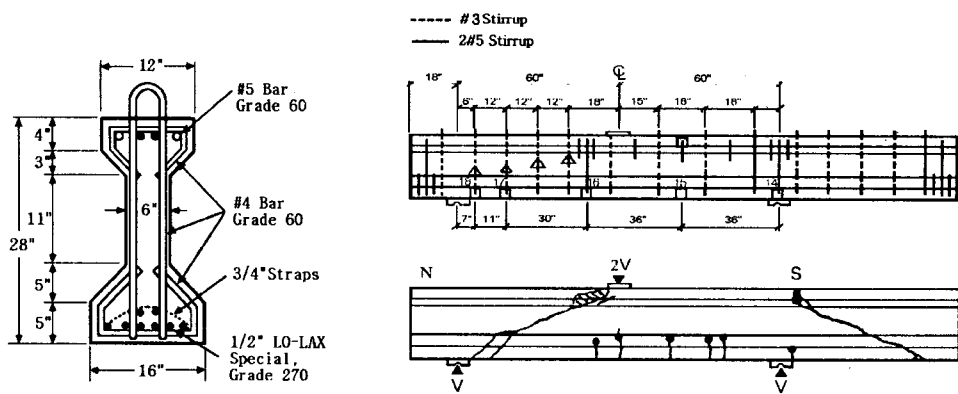
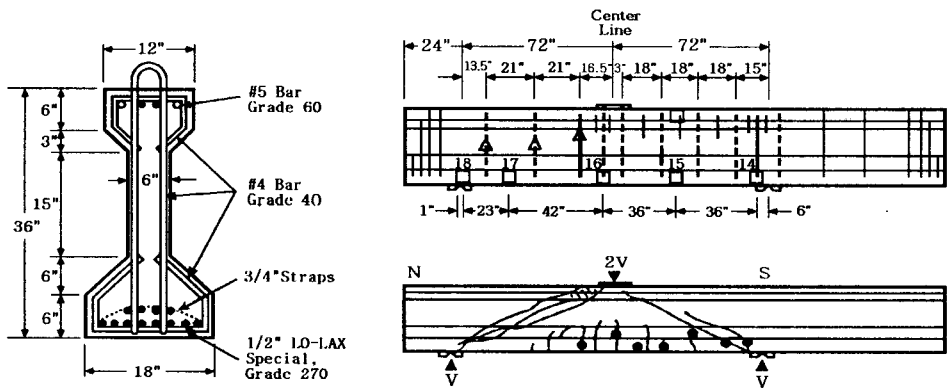


Fig. 1 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 부작활동영향을 고려하기 위한 알고리즘



(a) Beam I-3A



(b) Beam II-1A

Fig. 2 시험체의 단면형상 및 철근배근도

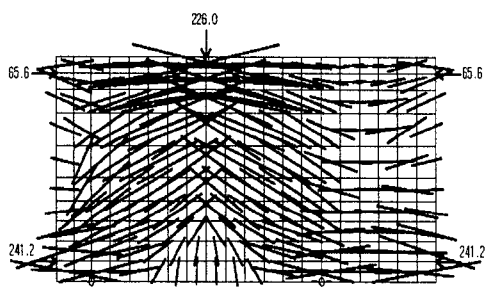


Fig. 3 Beam I-3A의 압축주응력 흐름

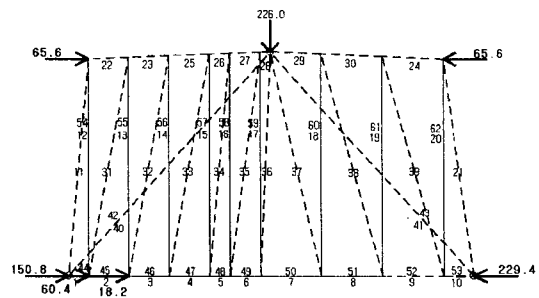
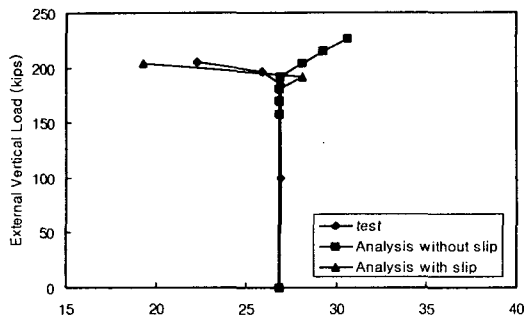
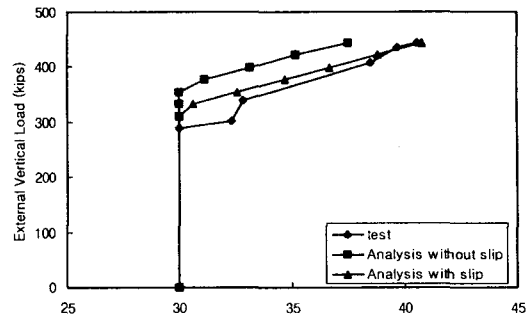


Fig. 4 Beam I-3A의 스트럿-타이 모델

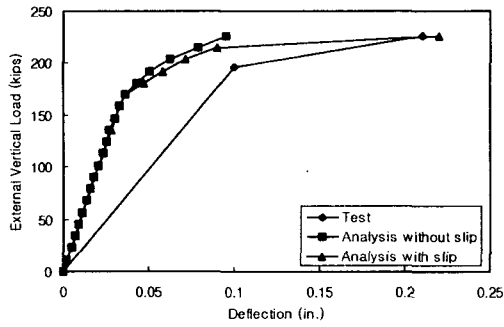


(a) Beam I-3A, Gage 18

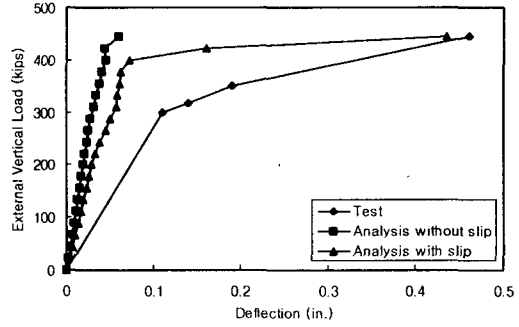


(b) Beam II-1A, Gage 16

Fig. 5 PS강재의 내력

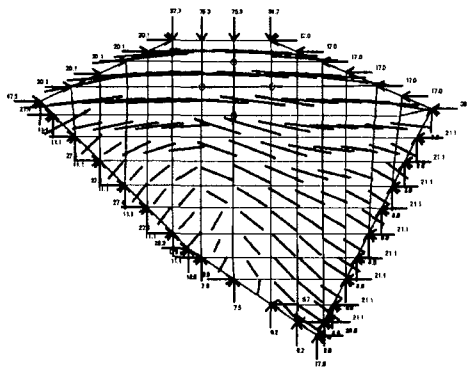


(a) Beam I-3A

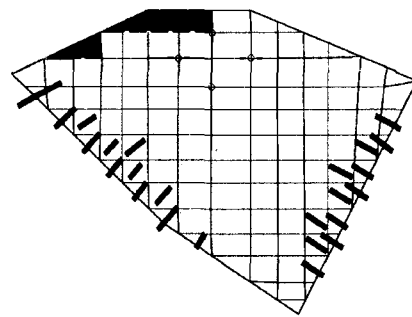


(b) Beam II-1A

Fig. 6 중앙단면에서의 처짐



(a) 압축주응력 흐름



(b) 95%극한하중하의 파괴메카니즘

Fig. 7 Beam I-3A 스트럿-타이 모델의 위험절점영역의 강도검토