

스트럿-타이 모델에 의한 콘크리트 부재 설계방법의 고찰

Strut-Tie Model Design Approaches of Structural Concrete

윤 영 목*

Yun, Young Mook

ABSTRACT

This paper presents four types of strut-tie model design approaches of structural concrete through the anchorage zone design of a post-tensioned concrete I-beam. The differences and distinctive feature of each approach in terms of structural type of selected strut-tie model, external force acting on strut-tie model, effective strength of concrete strut, and strut-tie model design procedure are analyzed and compared. The outcomes of present study enable structural designers to understand the merits and demerits of each strut-tie model design approach, and thus to conduct reasonable and accurate design of structural concrete.

1. 서론

콘크리트 구조물 혹은 부재의 설계에 사용되고 있는 대표적인 네 가지 유형의 스트럿-타이 모델 방법은 여러 측면, 즉 스트럿-타이 모델의 구조형태, 스트럿-타이 모델에 작용시키는 하중, 스트럿의 유효강도 산정방법 및 산정여부, 스트럿과 타이의 단면적 및 단면력 산정방법, 스트럿-타이 모델의 기하학적 적합성조건의 검토여부, 스트럿-타이 모델 절점영역 강도의 검토방법, 그리고 스트럿-타이 모델을 이용한 콘크리트 부재 강도의 평가·예측 방법 등에서 큰 차이를 보인다. 이는 많은 설계자로 하여금 선정된 스트럿-타이 모델 자체의 합리성 및 타당성, 콘크리트 부재 설계에의 적용방법 및 적용여부, 그리고 콘크리트 부재 설계결과와 신빙성 등에 대한 우려와 의문을 유발케 하고있다. 따라서 본 연구에서는 포스트텐션 콘크리트 I형보의 정착부를 대상으로 네 가지 유형의 스트럿-타이 모델 방법에 의한 콘크리트 부재의 설계절차 및 설계방법을 상세히 소개하고, 각 방법 간의 차이점 및 특징들을 비교분석 하였다. 본 연구의 결과는 많은 설계자로 하여금 스트럿-타이 모델 방법의 장단점을 정확히 이해케 할 뿐만 아니라 이에 근거한 콘크리트 구조물 혹은 부재의 정확한 스트럿-타이 모델 설계를 가능케 할 것으로 판단된다.

2. 포스트텐션 콘크리트 I형보의 정착부 설계

스트럿-타이 모델 설계를 위한 포스트텐션 콘크리트 I형보 정착부의 단면형상은 Fig. 1과 같다. I형보에 사용된 PS강재의 극한강도 f_{pu} 는 270ksi이며, 이 강재는 직경이 0.5in인 네 개의 저릴렉세이션 강연선으로 이루어져있다. 긴장 시 발생하는 PS강재의 최대응력은 $0.75 f_{pu}$ 이며, 콘크리트의 일축압축강도는 5ksi이다. 하나의 정착판을 통해 정착부의 복부에 가해지는 극한하중 P 는 165kips ($= 4 \times 0.153 \times 270$)이다. 네 가지 유형의 스트럿-타이 모델 방법의 차이점을 비교하기 위하여 Fig. 2와 같은 동일한 형태의 스트럿-타이 모델을 설계 시 사용하였다.

2.1 Collins-Mitchell 방법(유형 A)에 의한 설계⁽³⁾

정착판 전면 지압응력의 검토: 각 정착판 전면의 지압응력은 $3.60ksi [= 165 \div (7 \times 7 - \pi \times 2^2 \div 4) = 0.72f_c']$ 이며,

* 정회원, 경북대학교 토목공학과 부교수

정착판 전면의 허용지압응력은 3.80ksi ($=0.85\phi f'_c = 0.765f'_c$)이다. 여기서 ϕ 는 ACI 318-99⁽²⁾에서 제안된 지압응력에 관한 강도감소계수로서, 0.9이다. 따라서 정착판 전면에서 발생하는 지압응력이 허용지압응력 보다 작으므로 $7\times 7\text{in}$ 의 정착판을 사용할 수 있다.

스트럿-타이 모델의 선정: 응력교란영역 밖에서는 0.683ksi ($=4\times 165\div 966$)의 균등한 응력이 발생하므로, 상하단 플랜지 및 복부에 전달되는 하중은 각각 191 및 277kips 임을 알 수 있다. 따라서 정착부 복부의 PS강제에 의한 하중전달 메커니즘을 Fig. 2와 같은 스트럿-타이 모델로 나타내었다.

타이 단면력의 산정: 스트럿-타이 모델 절점에서의 힘 평형방정식을 이용하여 타이의 단면력 P_{st} 를 산정하였다. 산정된 타이 AB, BC, 그리고 MN의 단면력은 각각 126.7, 173.9, 그리고 39.4kips 이다.

주철근량의 산정 및 주철근의 배근: 철근의 항복강도가 60ksi 인 #4철근을 폐합스터럽으로 사용한다면 복부에서는 8.05 [$=P_{st}\div(\phi_s A_{st} f_y) = 173.9\div(0.9\times 0.4\times 60)$]개의 스테럽이 필요하다. 여기서 ϕ_s 는 타이의 강도감소계수, A_{st} 는 철근타이의 단면적, 그리고 f_y 는 철근타이의 항복강도이다. Fig. 3과 같이 9개의 #4 폐합스터럽을 정착단에서 36in 떨어진 곳의 전후에 등간격으로 배근하였다.

2.2 AASHTO-LRFD 방법(유형 B)에 의한 설계⁽¹⁾

정착판 전면 지압응력의 검토: AASHTO-LRFD에서는 정착판 전면의 지압응력에 관한 강도감소계수 ϕ 를 0.7로 제안하고 있으므로, 이 경우 정착판 전면의 허용지압응력이 2.975ksi ($=0.85\times 0.7\times f'_c = 0.595f'_c$)로 되어 $7\times 7\text{in}$ 의 정착판을 사용할 수 없다. 따라서 정착판 전면에서 2.928ksi [$=165\div(7\times 8.5 - \pi\times 2^2\div 4)$]의 응력을 유발하는 $7\times 8.5\text{in}$ 의 정착판을 사용하였다.

스트럿-타이 모델의 선정: 유형 A에서 사용된 모델과 유사한 형태의 Fig. 4(a)와 같은 스트럿-타이 모델을 선정하였다. 정착판의 크기가 다르므로 스트럿-타이 모델의 절점 E, F, G, 그리고 H의 좌표가 Fig. 2 모델의 동일 절점의 좌표와 다르다.

스트럿과 타이의 유효강도, 단면력, 그리고 단면적의 산정: AASHTO-LRFD의 유효강도 산정식을 이용하여 스트럿의 유효강도를 산정하였다. 타이의 유효강도는 철근의 항복강도로 취하였다. 스트럿 및 타이의 단면력 P_{st} 및 P_{tr} 는 스트럿-타이 모델 절점에서의 힘 평형방정식으로부터 산정하였다. 스트럿 및 타이의 단면적 A_{strut} 및 A_{tie} 는 각각 $P_{st}/(\phi_s f_{cs})$ 및 $P_{tr}/(\phi_t f_y)$ 로부터 산정하였다. 여기서, ϕ_s 및 ϕ_t 는 각각 스트럿과 타이의 강도감소계수이며, f_{cs} 및 f_y 는 각각 스트럿의 유효강도 및 타이의 유효강도(철근의 항복강도)이다.

기하학적 적합성의 검토: 각각 4.6in 및 7.0in 의 단면폭을 갖는 스트럿 EF 및 FG는 I형보의 외곽경계면을 벗어나므로 선정된 스트럿-타이 모델은 기하학적 적합성조건을 만족시키지 못한다. 따라서 외곽경계면과 Fig. 4(a)의 절점 E, F, G, H의 간격을 2in 에서 4in 로 넓혀서 스트럿-타이 모델을 수정하였다. 그 결과 스트럿의 유효응력은 종전과 같았으며, 수정된 스트럿-타이 모델은 기하학적 적합성조건을 만족시켰다.

절점영역 강도의 검토: Fig. 4(a)의 E, F, G, 및 H 절점에서의 각 절점영역을 형성하는 모든 스트럿의 유효강도는 $0.85f'_c$ 이므로, 각 절점영역의 경계면에 발생하는 압축응력 P_{st}/A_{strut} 은 $0.595f'_c$ ($=\phi_s f_{cs} = 0.7\times 0.85f'_c$)이다. 이것은 AASHTO-LRFD의 절점영역 경계면에서의 허용압축응력 $0.595f'_c$ ($=0.85\times 0.7f'_c$)과 동일하므로 절점영역의 강도조건을 만족한다.

주철근량의 산정 및 주철근의 배근: 최대인장력이 발생하는 곳에서 필요한 주철근량은 2.87in^2 이다. 따라서 철근의 항복강도가 60ksi 인 #4 폐합스터럽의 필요개수는 7.18 ($=2.87/0.4$)개이다. 8개의 폐합스터럽을 정착단에서 36in 떨어진 곳의 전후에 등간격으로 배근한다.

2.3 MacGregor 방법(유형 C)에 의한 설계⁽⁴⁾

정착판 전면 지압응력의 검토: 이 방법은 AASHTO-LRFD 방법과는 달리 극한하중을 강도감소계수 0.85로 나눈 하중을 스트럿-타이 모델에 작용시켜서 콘크리트 부재를 설계하는 것이다. $7\times 7\text{in}$ 정착판을 사용할 경우 정

착판 전면에서 발생하는 지압응력은 $0.847f_c'$ [= $(165 \div 0.85) \div (7 \times 7 - \pi \times 2^2 / 4)$]가 되어 절점영역 경계면에서의 허용응력 $0.762f_c'$ ($= \nu_1 \nu_2 f_c'$, $\nu_1 = 1.0$, $\nu_2 = 0.762$)을 초과한다. 따라서 정착판 전면에서 $0.734f_c'$ 의 응력을 유발하는 $7 \times 8in$ 의 정착판을 사용하였다.

스트럿-타이 모델의 선정: Fig. 4(a)와 동일한 형태의 Fig. 4(b)와 같은 스트럿-타이 모델을 선정하였다.

스트럿과 타이의 유효강도, 단면력, 그리고 단면적의 산정: 스트럿의 유효강도는 MacGregor에 의해 정리·소개된 식으로부터 산정하였다. Fig. 3.5의 스트럿 AE, BF, CG, 그리고 DH의 유효강도는 $0.61f_c'$ ($= \nu_1 \nu_2 f_c'$, $\nu_1 = 0.8$, $\nu_2 = 0.762$)이며, 그 이외의 스트럿의 유효강도는 $0.762f_c'$ ($= \nu_1 \nu_2 f_c'$, $\nu_1 = 1.0$, $\nu_2 = 0.762$)이다. 극한하중을 0.85로 나눈 하중에 대한 스트럿 및 타이의 단면력 P_{rs} 및 P_{rt} 는 스트럿-타이 모델 절점에서의 힘 평형방정식으로부터 산정하였다. 스트럿 및 타이의 단면적 A_{strut} 및 A_{tie} 는 각각 P_{rs}/f_{cs} 및 P_{rt}/f_y 로부터 산정하였다.

기하학적 적합성의 검토: 각각 $4.6in$ 및 $6.6in$ 의 단면폭을 갖는 스트럿 EF 및 FG는 I형보의 외곽경계면을 벗어나므로 선정된 스트럿-타이 모델은 기하학적 적합성조건을 만족시키지 못한다. 따라서 외곽경계면과 Fig. 4(b)의 절점 E, F, G, H의 간격을 $2in$ 에서 $3.5in$ 로 넓혀서 스트럿-타이 모델을 수정하였다. 그 결과 스트럿의 유효응력은 종전과 같았으며, 수정된 스트럿-타이 모델은 기하학적 적합성조건을 만족시켰다.

절점영역 강도의 검토: Fig. 4(b)의 E, F, G, 및 H 절점에서의 각 절점영역을 형성하는 모든 스트럿의 유효강도는 $0.61f_c'$ 으로서, 절점영역 경계면에서의 허용응력 $0.762f_c'$ 보다 작다. 따라서 이들 절점은 정착판의 하중을 절점에 연결된 스트럿으로 안전하게 전달할 수 있다.

주철근량 산정 및 주철근의 배근: 최대 인장력이 발생하는 곳에서 필요한 주철근량은 $3.09in^2$ 이다. 따라서 철근의 항복강도가 $60ksi$ 인 #4 폐합스터립의 필요개수는 7.73개이다. 8개의 폐합스터립을 정착단에서 $36in$ 떨어진 곳의 전후에 등간격으로 배근한다.

2.4 Yun 방법(유형 D)에 의한 설계^(5,6)

정착판의 설계: 정착판의 크기는 스트럿-타이 모델의 정착단 부근에 위치한 절점영역의 형상에 영향을 미친다. 2.2절에서 설명되었듯이 절점영역의 형상은 정착판, 스트럿, 그리고 타이에 의해 형성되므로 정착판의 크기는 절점영역에서의 파괴메카니즘 발생여부, 즉 절점영역에서의 강도검토를 통해 결정된다. Fig. 5와 같은 스트럿-타이 모델에서 절점영역의 강도검토를 통해 결정된 정착판의 크기는 $7 \times 7in$ 이다.

스트럿-타이 모델의 선정: Fig. 5는 선정된 스트럿-타이 모델을 보여주고 있다. 이 모델에서는 2.1~2.3절에서 선정된 모델에 스트럿 4, 6, 15, 그리고 19가 추가되었는데, 추가된 스트럿은 수치해석과정에서 스트럿-타이 모델이 안정된 트러스 구조가 되도록 하기 위한 것이다. 추가된 스트럿의 강성은 매우 작은 값으로 취하였다.

스트럿과 타이의 유효강도, 단면적, 그리고 단면력의 산정: Yun 방법에 의해 스트럿의 유효강도를 산정한 결과, 스트럿 17의 유효강도는 $0.887f_c'$ 이었으며 나머지 스트럿의 유효강도는 콘크리트의 일축압축강도와 같다. 스트럿과 타이의 단면적은 몇 번의 반복과정을 필요로 하는 Yun⁽⁵⁾이 제안한 알고리즘에 의해 결정되었으며, 단면력은 스트럿-타이 모델의 유한요소해석을 통해 결정되었다. 이때 각 정착판에 해당되는 스트럿-타이 모델의 절점에 $165kips$ 의 하중을 부과하였다.

기하학적 적합성의 검토: 선정된 스트럿-타이 모델은 Fig. 6과 같이 기하학적 적합성조건을 만족시켰다. 선정된 모델의 정착단 부근 절점의 위치는 2.1~2.3절에서 소개된 모델에 해당되는 절점의 위치와 동일하지 않는데, 이는 선정된 스트럿-타이 모델이 기하학적 적합성조건 및 절점영역 강도조건을 만족시키도록 수정되었기 때문이다.

절점영역 강도의 검토: 가장 큰 압축응력을 받는 정착단 부근의 절점 3 및 4 (Fig. 6) 절점영역에서의 강도를 Yun의 방법에 의해 검토하였다. 그 결과 절점 4 절점영역에서 균열이 조금 발생하였으나 파괴메카니즘은 발생하지 않았다. 따라서 선정된 스트럿-타이 모델은 정착부 설계에 적합한 모델이라 할 수 있다. 이들 두 절점영역에서의 최대 압축응력은 각각 $0.877f_c'$ 및 $0.809f_c'$ 이다. Fig. 7은 극한하중이 작용할 때의 절점 4 절점영역에서의 압축응력 흐름 및 균열양상을 보여주고 있다.

주철근량 산정 및 주철근의 배근: 최대인장력이 발생하는 곳에서 필요한 주철근량은 $3.08in.^2$ 이다. 따라서 철근의 항복강도가 $60ksi$ 인 #4 폐합스터럽의 필요개수는 $7.70 (=3.08/0.4)$ 개이다. 8개의 폐합스터럽을 정착단에서 $36in$ 떨어진 곳의 전후에 등간격으로 배근한다. 각 설계방법에 의한 정착부의 설계결과는 Table 1 및 2에 비교되어 있다.

3. 요약 및 결론

본 논문의 2장에서는 포스트텐션 콘크리트 I형보의 정착부를 네 가지 유형의 스트럿-타이 모델 방법에 의하여 설계하였다. 이를 바탕으로 각 설계방법간의 차이점 및 특징을 비교하고 분석하였다. 먼저, 유형 A 및 B, C, 그리고 D에서의 스트럿-타이 모델의 구조형태는 각각 단순정정, 단순정정 혹은 정정화된, 그리고 정정 혹은 부정정의 트러스 구조이며, 유형 A-C 및 D에서의 스트럿과 타이의 단면력은 각각 평형방정식 및 평형방정식 혹은 유한요소법과 같은 수치해석법에 의해 결정된다. 따라서 유형 A-C 및 D는 각각 스트럿-타이 모델의 단순함 및 다양한 콘크리트 부재의 해석·설계 가능함의 장점을, 스트럿-타이 모델 해석·설계 적용범위의 제한 및 스트럿-타이 모델 자체의 해석을 위한 수치해석기법 적용 필요성의 단점을 지니고 있다. 하중조건 및 기하학적 형상조건이 복잡한 콘크리트 부재의 설계를 위해 선정된 부정정 트러스 구조의 스트럿-타이 모델을 몇몇 실험결과에 근거한 지나칠 정도의 여러 가정들을 도입하여 정정 트러스 구조의 스트럿-타이 모델로 치환한다는 것은 설계결과의 신빙성에 문제가 있을 뿐 아니라 많은 설계자로 하여금 스트럿-타이 모델 방법의 장점인 '실험적이며 경험적인 설계 요소가 배제된 논리적인 모델에 의한 합리적인 설계방법'의 의미를 의심케 할 것이다.

유형 A, B, D와는 달리 유형 C의 스트럿-타이 모델 방법에서는 스트럿-타이 모델에 작용시키는 하중은 극한 하중을 0.85 로 나눈 값을, 스트럿과 타이의 단면적 산정 시 스트럿과 타이의 강도감소계수는 1.0 의 값을 사용한다. 여기서 0.85 는 ACI 318-99 및 AASHTO-LRFD 설계기준에 의한 전단강도 감소계수로서, 스트럿-타이 모델 설계는 전단설계와 밀접한 관련이 있다고 본 것이다. 그러나 하중조건 및 기하학적 형상조건이 복잡하고 다양한 콘크리트 부재의 스트럿-타이 모델 설계는 항상 전단설계와만 밀접하게 관련되어 있다고 볼 수 없다. 또한 스트럿 및 타이는 일반적으로 각각 콘크리트 및 철근(혹은 PS강재)으로서, 이들의 강도감소계수를 동일하게 취하는 것은 여러 설계기준서의 극한강도설계의 기본개념과 상이하다.

콘크리트 부재의 해석·설계를 위해 선정된 스트럿-타이 모델의 타당성 검토, 즉 기하학적 적합성조건 및 절점영역의 강도조건 등의 검토를 수행하지 않는 유형 A의 스트럿-타이 모델 방법은 옳지 못한 방법이라 볼 수 있다. 유형 B 및 C 방법에서는 기존의 전통적인 스트럿-타이 모델 방법에서 추구해온 하중 및 기하학적 형상 조건이 대체로 단순한 콘크리트 부재 설계용의 단순정정 트러스 구조의 스트럿-타이 모델 자체를 '개발'하며, 반면에 유형 D 방법에서는 하중 및 기하학적 형상 조건이 복잡 다양한 콘크리트 부재 해석·설계용의 정정 혹은 부정정 트러스 구조의 스트럿-타이 모델을 '선정'한다.

참고문헌

- (1) American Association of State Highway Transportation Officials, "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications", AASHTO, Washington D.C., SI Units, 2nd Edition, 1998.
- (2) American Concrete Institute, "Building Code Requirements for Structural Concrete (318-99) and Commentary (318R-99)", ACI, Farmington Hills, Michigan, 391 pp., 1999.
- (3) Collins, M.P. and Mitchell, D., "Shear and Torsion Design of Prestressed and Non-Prestressed Concrete Beams", *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, Vol. 83, pp. 32-100, 1980.
- (4) MacGregor, J.G., "Reinforced Concrete Mechanics and Design", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 939 pp., 1997.
- (5) Yun, Y.M., "Design and Analysis of 2-D Structural Concrete with Strut-Tie Model", *Ph. D. Thesis*, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, 247 pp., 1994.
- (6) Yun, Y.M., "Nonlinear Strut-Tie Model Approach for Structural Concrete", *ACI Structural Journal*, Vol. 97, pp. 581-590, 2000.

Table 1. 스트럿의 유효강도계수 ν

		Collins-Mitchell	AASHTO-LRFD	Mac-Gregor	Yun
$\nu = f_{cs}/f_c$	AE	-	0.850	0.610	0.887
	BF	-	0.850	0.610	1.000
	EF	-	0.850	0.762	1.000
	FG	-	0.850	0.762	1.000
	AI	-	0.850	0.762	1.000
	BJ	-	0.850	0.762	1.000
절점좌표 (in.)		2.0	4.0	3.5	3.3

* : 정착단으로부터의 거리

Table 2. 정착부 설계결과와의 비교

	정착판의 크기	타이의 최대단면력	필요 철근량	배근 철근량*
Collins-Mitchell	7×7in.	173.9kips	3.22in. ²	9#4
AASHTO-LRFD	7×8.5	154.7	2.87	8#4
Mac-Gregor	7×8	185.2	3.09	8#4
Yun	7×7	166.5	3.08	8#4

* : 폐합스터럽

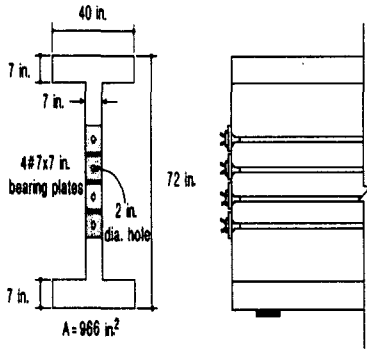


Fig. 1. 포스트-텐션 I형보의 단면형상

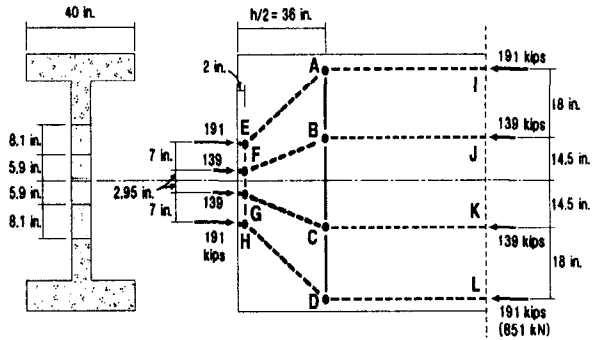


Fig. 2. 정착부의 스트럿-타이 모델 (by Collins-Mitchell)

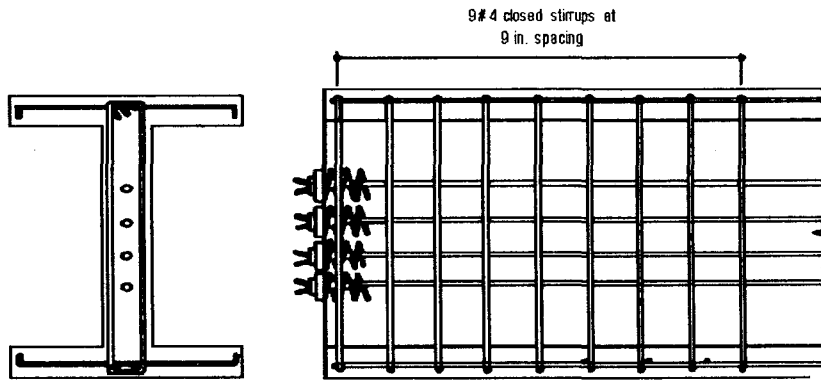


Fig. 3. 정착부의 배근상세 (by Collins-Mitchell)

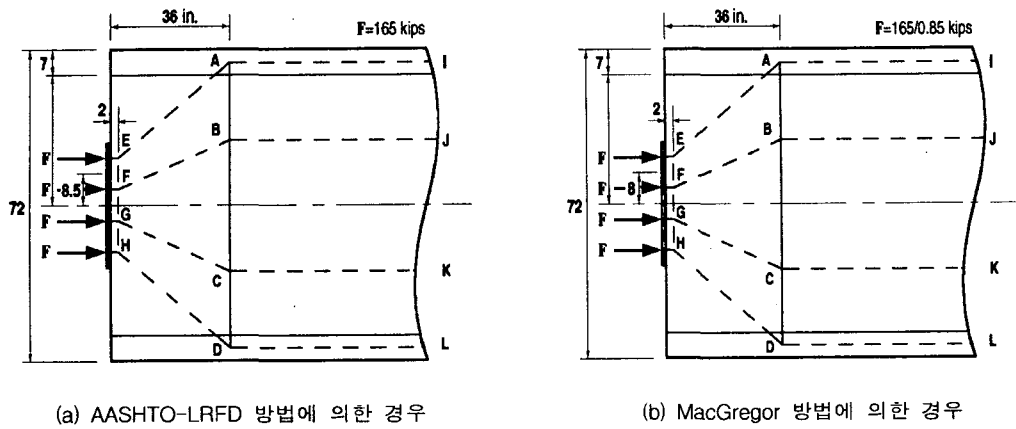


Fig. 4 포스트텐션 I형보의 복부설계용 스트럿-타이 모델

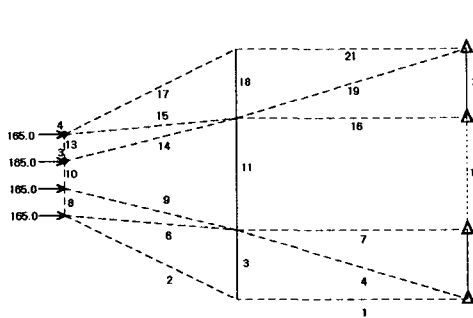


Fig. 5 Yun 방법에 의한 I형보의 복부설계용 스트럿-타이 모델

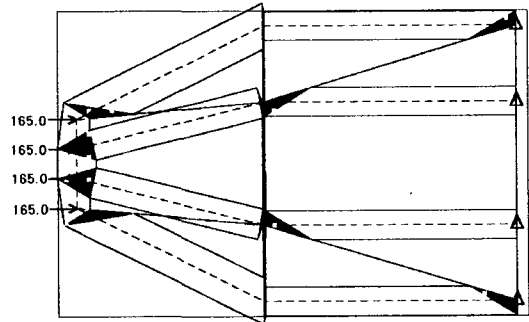


Fig. 6 차원화된 스트럿-타이 모델

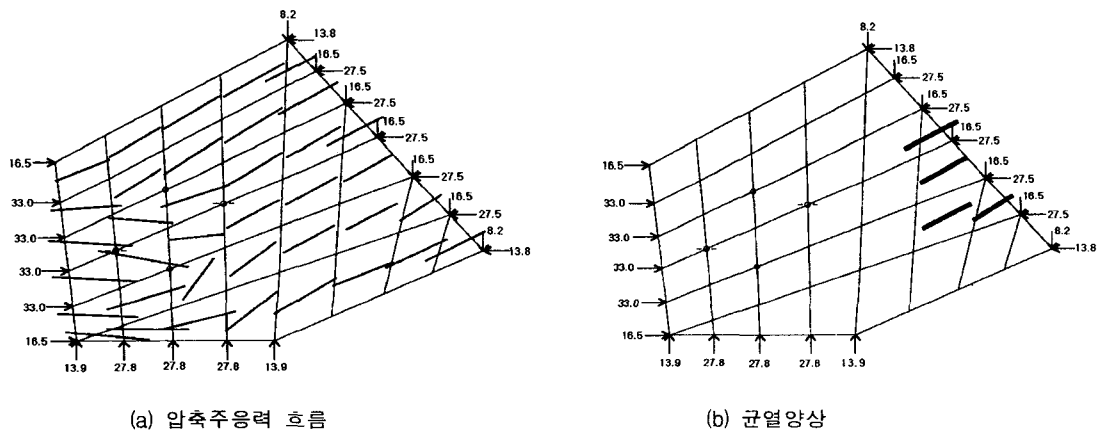


Fig. 7 그림 5의 절점 4번 절점영역의 강도검토