

스트럿-타이 모델에 의한 턱이진 보 설계방법의 평가

Evaluation of Dapped Beam Design Methods using Strut-Tie Models

윤 영목¹⁾

최 명석²⁾

Yun, Young Mook

Choi, Myung Suk

Abstract

Although dapped-end beams are widely used in bridge and building structures, there are not any specific and reasonable design regulations on dapped-end beams. In this study, the validity of the suggested experimental and empirical design methods, conventional strut-tie model approach, and nonlinear strut-tie model approach is evaluated through the analysis of dapped-end beams tested to failure. The nonlinear strut-tie model approach proved to be the most suitable method for dapped-end beam design.

1. 서론

교량이나 건물에서 턱이진 단부를 갖는 보가 많이 사용되고 있으나, 이 보의 단부에 발생하는 응력 분포가 복잡하여 이 보의 단부를 합리적으로 설계할 수 있는 시방규정이 없는 실정이다. 따라서 이러한 부재는 설계자의 주관에 따르거나 기존의 경험적인 방법에 의존하여 설계할 수 밖에 없다. 본 연구에서는 콘크리트 부재의 설계 및 해석에 새로운 방법으로 제시되고 있는 비선형 스트럿-타이 모델을 기존의 실험 및 경험적인 방법에 근거하여 제안된 턱이진 보의 단부 설계규정과 기존 스트럿-타이 모델 방법에 의해 설계·제작되고 실험·파괴된 턱이진 보의 해석에 적용하여 기존의 설계규정, 기존 스트럿-타이 모델 방법, 그리고 비선형 스트럿-타이 모델 방법 등의 타당성을 분석하고, 턱이진 보의 합리적인 설계방법을 제시하고자한다.

2. 턱이진 보의 설계방법

2.1 스트럿-타이 모델 방법

스트럿-타이 모델 방법에서는 1) 압축주응력의 흐름에 근거하여 스트럿의 위치 및 경사각을 결정하며 스트럿-타이 모델이 안정된 트러스 구조가 되도록 타이틀 추가하여 스트럿-타이 모델을 선정하고, 2) 스트럿과 타이의 유효강도를 결정하며, 그리고 3) 스트럿-타이 모델의 기하학적 적합성 및 절점영역의 강도 검토와 철근을 배근한다. 여기서 선정된 스트럿-타이 모델이 기하학적 적합성 조건을 만족

1) 정회원, 경북대학교 토목공학과 조교수

2) 경북대학교 토목공학과 박사과정

시키지 못하거나 스트럿-타이 모델 절점영역의 강도에 문제가 발생한다면 초기에 선정된 스트럿-타이 모델을 수정하여야한다.

2.2 PCI 방법

터이진 보의 단부설계를 위한 PCI 설계방법은 전단마찰이론을 스트럿-타이 모델에 접목시킨 것이다.⁽³⁾ 이 방법에는 두 가지의 기본적인 철근배근방법, 즉 직교배근방법 및 경사배근방법이 있으나, 본 연구에서는 직교배근방법만을 다루었다. 직교배근방법에 의하여 우선적으로 직교배근될 철근의 명칭은 Fig. 1에 나타난바와 같이 수직스터럽 A_{sh} 및 수평철근 A_s 이며 식 (1)의 조건을 만족시키도록 결정한다.

$$A_s > \frac{V}{f_y} \times \frac{a}{d}, A_{sh} > \frac{V}{f_y} \quad (1)$$

여기서 V 및 f_y 는 각각 터이진 단부에 발생하는 전단력 및 철근의 항복강도이며, a 및 d 는 Fig. 1에 정의되어있다. 다음으로 터의 구석부에서 발생·진전할 수 있는 수직균열에 대하여 전단마찰이론을 적용하고, 이로부터 추가로 필요한 수평철근량 A_h 를 결정하며 식 (2)의 조건을 만족시켜야한다.

$$\mu_e (A_s + A_h) f_y > V, A_h > 0.5A_s \quad (2)$$

여기서 $\mu_e (= 1000psi \cdot \mu bh / V)$ 는 유효마찰계수이다. 마지막 단계로 터이진 단부영역에 경사인장균열을 저지하기 위하여 국부전단철근 A_v 를 배근하여야 하며 식 (3) 및 (4)를 이용하여 결정한다. 적당한 철근량을 산정하는 것 이외에도 PCI 설계방법에서는 철근의 정착길이에 대한 세부조건을 만족하여야한다.

$$V < A_v f_y + A_h f_y + 2\sqrt{f'_c} bd \quad (3)$$

$$(A_v)_{MIN} = \frac{1}{2f_y} (V - 2\sqrt{f'_c} bd) \quad (4)$$

2.3 MF 방법

MF 설계방법은 미국 텍사스주립대학의 교통연구센터에서 Menon과 Furlong에 의해 수행된 연구에 기초를 두고있으며,⁽²⁾ TSDHPT의 터이진 보의 설계에 사용되고있다. MF 방법에서는 스트랩을 터의 상단부에서부터 비스듬히 전체단면의 하단부로 배치한다. 터이진 보 단부의 설계과정에서 첫 번째 단계는 전단마찰이론을 이용하여 균열면에 평행하게 작용하는 활동력에 저항하기 위한 수평철근량 A_s 를 식 (5)으로부터 결정하는 것이다.

$$\mu' (V \sin \alpha + A_s f_y \cos \alpha) > V \cos \alpha \quad (5)$$

여기서 α 는 단부의 수직면과 가정한 균열면이 이루는 각이며, $\mu' (= 300\mu_w / v + 0.5)$ 은 마찰계수이다. 터이진 보 단부의 설계과정에서 두 번째 단계는 스트랩을 설계하는 것이다. 경사균열은 Fig. 2에서와 같이 터이진 단부의 구석에서 사다리꼴의 형상으로 진행한다고 가정한다. 필요한 스트랩의 부재력은 터이진 단부의 구석에서 수평방향으로 터 높이의 두 배의 거리로 가정된 자유물체도의 B점에서 모멘트 평형조건으로부터 계산한다. 자유물체도에서의 스텐더는 터이 지지 않는 일반보의 전단설계방법으로부터 결정한다.

3. 시험체의 설계 및 실험결과

2.1-2.3절에서 소개된 각 설계방법이 터이진 보의 거동 및 강도의 평가 실험에 사용될 시험체의 단부설계에 적용되었다.⁽¹⁾ 각 설계방법에 의해 설계·실험된 시험체는 Fig. 3과 같으며, 이것은 대략 미국 텍사스주의 고속도로 및 일반도로에 많이 사용되는 TSDHPT 터이진 실물 보의 절반정도의 규모

이다. 세 가지 설계방법에 의해 설계·제작될 각 시험체 ST1, ST2, PCI, 그리고 MF의 초기설계하중은 100kips이며, 이들 시험체의 콘크리트 압축강도는 각각 6.28, 7.47, 7.47, 그리고 6.42ksi이다. 시험체에 배근된 철근의 항복응력은 60ksi이며, 스트랩의 항복응력은 48ksi이다.

턱이진 단부를 갖는 ST1 및 ST2 시험체의 단부설계를 위해 선정된 스트럿-타이 모델은 Fig. 4(a) 및 4(b)와 같은 단순 및 수정 스트럿-타이 모델이다. 단순 스트럿-타이 모델에서 경사스트럿의 각도 α 는 50°이며, 이 경사각을 기준으로 스트럿-타이 모델에서 스트럿과 타이의 단면력이 결정되었다. ST1 시험체의 철근배근도는 Fig. 5(a)에 나타나있다. 스트럿-타이 모델 방법에서 시험체의 파괴는 콘크리트의 강도와 무관하게 철근이 항복할 때 발생될 것이라고 가정되었다. 단순 스트럿-타이 모델에 의한 예상파괴강도는 수직철근의 항복에 의한 106kips이다. 수정 스트럿-타이 모델에서는 단순 모델과는 달리 A절점의 위치가 낮아졌다. ST2 시험체의 철근배근도는 Fig. 5(b)와 같다. 수정 모델에 의한 ST2 시험체의 예상파괴강도는 102kips이다. ST1 및 ST2 시험체의 실측강도는 예상파괴강도보다 각각 42% 및 27% 초과하였다.

PCI 방법에 의해 결정된 턱이진 단부의 수직스터럽 A_{sh} 및 수평철근 A_s 의 최소량은 Fig. 5(c)와 같이 배근되었다. PCI 시험체의 강도는 필요로 하는 강도에 비해 가장 작은 강도를 가진 철근에 의해 지배된다고 가정되었다. 이 경우에 수직철근 A_{sh} 에 의해 강도가 예측되며, 예측된 강도는 105.6kips이다. PCI 시험체의 실측강도는 예상파괴강도보다 52% 초과하였다.

MF 시험체에서 필요한 전단마찰철근량은 식 (5)에 의해 결정되었으며, 필요한 스트랩의 면적은 스트랩의 부재력으로부터 $1.0in.^2$ 으로 산정되었다. MF 시험체의 최종 철근배근도는 Fig. 5(d)와 같다. MF 시험체의 강도는 전단마찰파괴나 스트랩의 항복으로 인한 파괴로부터 예측될 수 있는데, 여기서는 스트랩의 항복으로 인한 파괴가 더 지배적인 것으로 나타났다. Fig. 2로부터 예측된 강도는 112kips이다. MF 시험체의 실측강도는 예상파괴강도보다 21% 초과하였다.

4. 설계방법의 평가

4.1 극한강도의 평가

본 연구에서는 ST1 시험체의 설계에 사용된 단순 스트럿-타이 모델과 ST2 시험체의 설계에 사용된 수정 스트럿-타이 모델을 비선형 스트럿-타이 모델 방법⁽⁶⁾에 적용하고 이를 위한 그래픽스 프로그램 NL-STM⁽⁵⁾을 이용하여 각 시험체의 극한강도를 예측하였다. 단순 및 수정 스트럿-타이 모델의 스트럿 유효강도는 Yun et. al^(4,7)이 제안한 방법을 이용하여 산정하였으며, 철근타이의 단면적은 철근타이의 유효폭 내에 배근된 철근 및 보강재의 단면적으로 취하였다. 콘크리트의 인장저항 기능을 비선형 스트럿-타이 모델 방법에서 고려하기 위해 철근타이가 위치한 곳에 콘크리트 타이를 추가하였다.

비선형 스트럿-타이 모델 방법에서의 극한강도는 스트럿-타이 모델의 기하학적 적합성, 스트럿-타이 모델의 안정성, 그리고 절점영역의 강도검토를 통하여 예측한다. ST1 시험체의 설계 및 해석을 위한 단순 스트럿-타이 모델에서는 실제강도의 73%의 하중을 가하였을 경우 단순 스트럿-타이 모델의 안정성과 기하학적 적합성에 문제가 발생하지 않았다. 또한 73%의 극한하중을 받는 차원화된 스트럿-타이 모델로부터 단순 스트럿-타이 모델의 각 절점영역에서의 강도를 검토하였다. 절점영역의 경계면 및 내부에 작용하는 하중은 Yun 및 Lee⁽⁸⁾의 논문에 소개된 방법에 의해 구하였으며, 절점영역의 경계조건은 실제 시험시의 경계조건과 유사하게 부과하였다. B 및 C 절점영역의 최대 압축주응력은 각각 $0.73f'_c$ 및 $1.23f'_c$ 이었으며 절점영역에 파괴미캐니즘이 발생하지 않았다. 따라서 단순 스트럿-타이 모델을 이용하여 ST1 시험체의 극한강도를 검토한 결과 73%의 실험강도, 즉 113kips의 극한강도를 예측할 수 있었다. 단순 스트럿-타이 모델의 경우와 동일한 방법으로 ST1 시험체의 극한강도를 수정 스트럿-타이 모델을 이용하여 검토한 결과, 기하학적 적합성 조건에 의하여 84%의 실험강도, 즉 130kips의 극한강도를 예측할 수 있었다. 같은 방법으로 다른 세 가지 시험체의 극한강도를 예측하였

으며, 예측한 극한강도를 Fig. 6에서 실험강도 및 Barton et. al.⁽¹⁾에 의한 예측강도와 비교하였다.

4.2 거동의 평가

각 시험체에서 측정된 타이의 단면력을 단순 스트럿-타이 모델을 이용한 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 적용시켜 얻은 예측결과와 비교하였다. Fig. 7은 ST1 시험체의 턱이진 단부에 근접한 첫 번째 수직스터럽근의 인장력과 단순 스트럿-타이 모델의 3번 및 4번 타이의 인장력을 비교한 것이다. ST1 시험체에서 변형률 게이지가 가장 큰 폭의 균열이 발생하는 수직스터럽의 중앙부에 위치하므로 수직스터럽근의 인장력 및 변형률이 수직스터럽근의 중앙부에서 가장 크게 발생할 것이며 중앙부에서 상하로 갈수록 이들 값은 감소할 것이다. 반면에 단순 스트럿-타이 모델의 3번 및 4번 타이에 발생하는 변형률 및 인장력은 이들 타이의 전 길이에 걸쳐 발생하는 평균값으로써, 단순 스트럿-타이 모델에 의해 예측된 게이지 위치에서의 변형률 및 인장력은 실측결과보다 작을 것이다. 따라서 보다 많은 수의 스트럿과 타이를 갖는 스트럿-타이 모델을 이용한다면 실측결과에 좀 더 근접한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한 Fig. 7에서는 부재하단에 배근된 수평철근의 인장력을 비교하였는데, 수평철근의 인장력은 수직철근의 경우보다 비교적 실측결과와 가깝다.

5. 결론

본 연구에서는 단순한 두 종류의 스트럿-타이 모델을 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 적용하여 현재의 턱이진 보의 단부 설계방법을 평가하였다. 현재에 일반적으로 사용되고 있는 턱이진 단부보에 관한 몇몇 설계규정에 근거하여 설계·제작되고 실험·파괴된 시험체의 극한강도가 설계시의 예측설계강도보다 큰 것으로 판명되었는데, 이는 배근된 보강철근만의 강도를 고려하여 설계강도를 예측하는 기존의 방법이 정확하지 않기 때문이다. 따라서 여러 가지 요인들을 종합적으로 고려할 수 있는 보다 정확한 극한 강도 예측방법이 필요하다. 그리고 시험체의 거동 및 강도 예측을 위해 선정된 스트럿-타이 모델이 지나치게 단순하며 또한 실험·파괴된 시험체에 배근된 철근의 면적으로부터 지나치게 단순한 스트럿-타이 모델의 철근타이의 단면적을 정확히 산정할 수 없었으므로, 단순 및 수정 스트럿-타이 모델을 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 적용하여 구한 해석결과는 실험결과와 정확히 일치하지 않았다. 따라서 시험체의 응력흐름을 고려한 보다 많은 수의 스트럿과 타이를 갖는 개선된 스트럿-타이 모델을 이용하여 시험체의 거동 및 강도를 예측하여야 할 것으로 판단된다. 비선형 스트럿-타이 모델 방법은 여러 가지의 비선형 요소들에 의해 부재가 파괴될 때까지 발생하는 비선형 거동을 정확하게 추적할 수 있으므로, 단순한 스트럿-타이 모델을 채택하여도 절점영역의 파괴강도, 스트럿-타이 모델의 안정성 조건, 그리고 스트럿-타이 모델의 기하학적 적합성 조건의 검토를 통해 실험·파괴된 콘크리트 부재의 극한강도를 비교적 정확하게 예측할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Barton, D.L., Anderson, R.B., Bouadi, A., Jirsa, J.O., and Breen, J.E., "An Investigation of Strut-And Tie Models for Dapped Beam Details" Research Report, Center for Transportation Research, Bureau of engineering Research, University of Texas at Austin, 1991.
- (2) Menon, G., and Furlong, R.W., "Design of Reinforcement for Notched Ends of Prestressed Concrete Girders", Research Report 196-1F, Center for Transportation Research, Bureau of engineering Research, University of Texas at Austin, 1977.
- (3) PCI Design Handbook, Prestressed Concrete Institute, Chicago, Illinois, 1985, pp. 6.28-6.32.
- (4) Yun, Y.M. and Ramirez, J.A., "Strength of Struts and Nodes in Strut-Tie Model", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 122, pp. 20-29, 1996.

- (5) Yun, Y.M., "Computer Graphics for Nonlinear Strut-Tie Model Approach" , *Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE*, Vol. 14, pp. 127-133, 2000.
- (6) Yun, Y.M. "Nonlinear Strut-Tie Model Approach for Structural Concrete", *ACI Structural Journal*, Vol. 97, pp. 581-590, 2000.
- (7) 윤영목, 최명석, "포스트텐션 부재의 정착부에 관한 AASHTO 시방규정의 평가", 대한토목학회지, 게재확정, 2000.
- (8) 윤영목, 이원석, "높이가 큰 프리텐션 콘크리트 보에서의 비선형 스트럿-타이 모델 방법", 대한토목학회지, 게재확정, 2000.

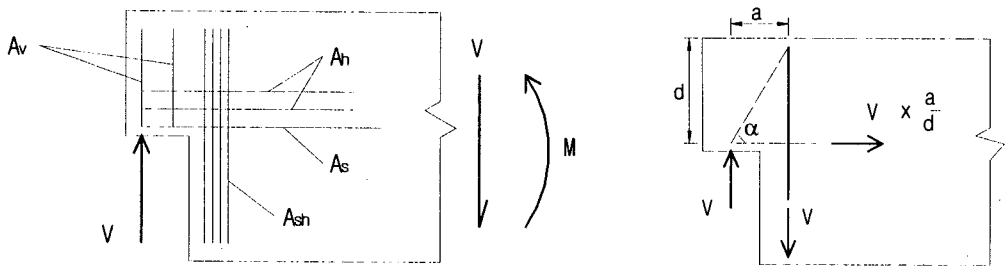


Fig. 1. Summary of PCI Design Method

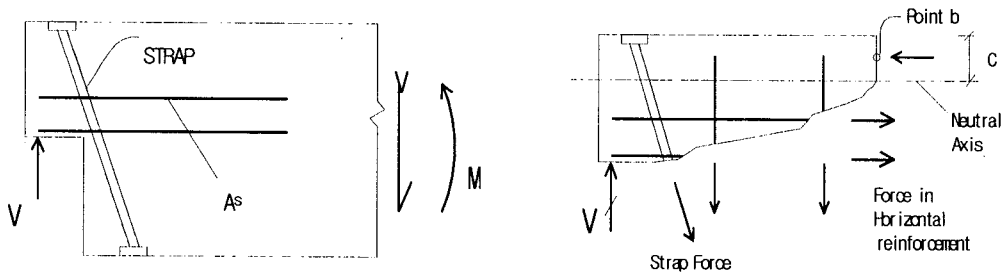


Fig. 2. Summary of MF Design Method

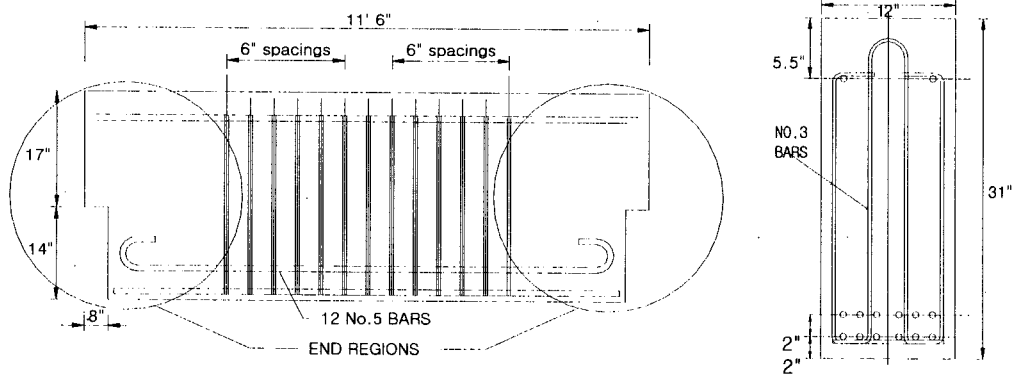


Fig. 3. Test Specimen Geometry

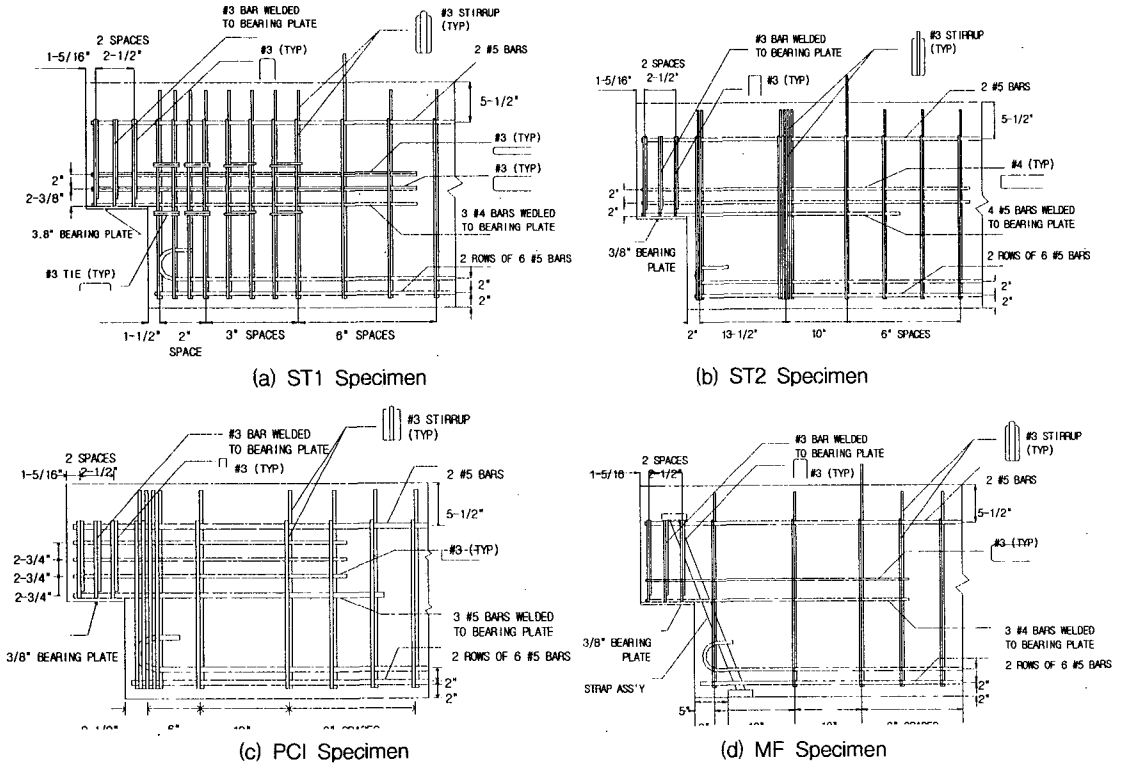
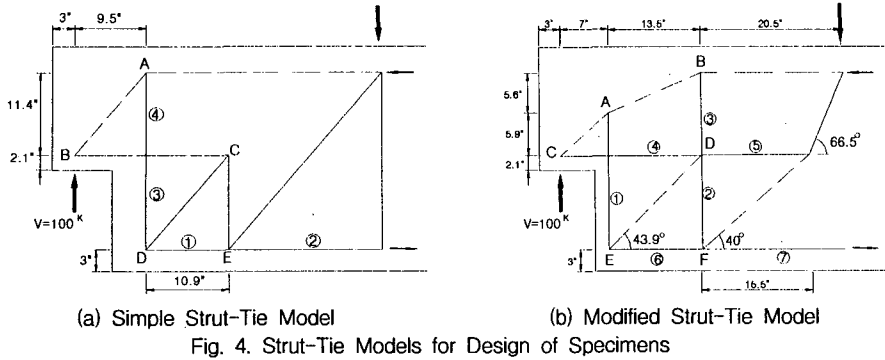


Fig. 5. Reinforcement Layout

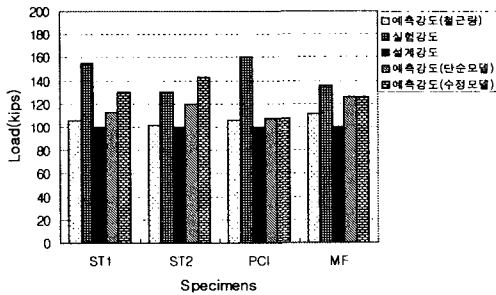


Fig. 6. Comparison of Specimens Ultimate Capacities

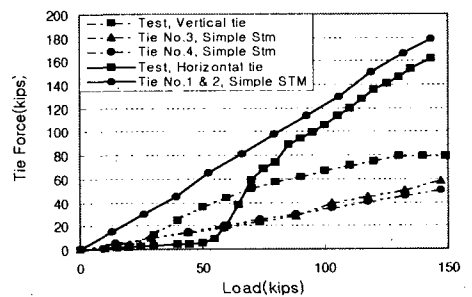


Fig. 7. Reinforcement Forces in ST1 Specimen