

스트럿-타이 모델 방법에 의한 콘크리트 구조물의 해석 및 설계 Analysis and Design of Concrete Structures with Strut-Tie Model Approach

윤 영목¹, 박 문호², 박 승진³

Abstract

This paper presents an evaluation of the strength and behavior of a tested simply supported rectangular reinforced concrete beam and a design example of a shear wall using two-dimensional strut-tie model with finite element nonlinear analysis. Strut-tie models reflecting the actual support and loading conditions are developed for the beam and shear wall. The strut-tie model not only provides simple solutions for large number of design situations dealing with the entire range of concrete structures which appear to be rather complicated but also predicts the behavior and strength of concrete members.

1. 서론

콘크리트가 구조용-재료로 사용된 이래 지금까지 역학적으로 안전하고 사용성이 좋은 완전한 구조물을 설계하기 위하여 콘크리트 설계규정에 엄청난 연구와 노력이 진행되어 왔다. 그러나 현재 사용되고 있는 많은 설계시방규정에 의하면 구조물의 어느 부분은 지나칠 정도의 정확도에 바탕을 두어 설계가 되며 반면에 다른 부분은 과거경험, 일반상식 혹은 rule-of-thumb 에 바탕을 두어 설계가 되고있다. 구조물을 형성하는 각 부분의 합성적인 거동이 구조물의 전체적인 거동을 지배함으로, 구조물의 각 부분의 요소 모두가 거의 같은 정도의 신뢰도와 중요성을 갖도록 설계규정이 보완되고 제정되어야 한다. 그러므로 콘크리트 구조물의 전 영역에 걸친 일관되고 통일된 합리적인 새로운 설계방법이 절실한 실정이다.

새로운 방법중의 하나가 45°-트러스 모델을 일반화한 스트럿-타이 모델로서, 이의 사용은 여러 복잡한 콘크리트 구조물의 설계에 배

우 효과적이라는 것이 많은 연구결과로부터 입증되고 있다. 스트럿-타이 모델은 콘크리트 구조물에 작용하는 하중, 반력 그리고 콘크리트와 철근에 작용하는 힘간의 평형을 연구하는데 이용되는 개념적인 도구로써, 콘크리트 구조물의 보강제 및 정착부에 대한 필요조건들의 결정과 콘크리트 응력의 결정에 기초가 된다. 스트럿-타이 모델에 의한 복잡한 콘크리트 구조물의 설계는 현재의 반 실험 및 rule-of-thumb 에 의한 설계절차를 개선할 것이며, 이방법에 근거를 둔 설계추천 규정들은 보다 합리적이고 안전한 설계 시방서의 제정과 역학적으로 보다 안전하고 사용성이 좋은 콘크리트 구조물의 설계를 가능케 할 것이다.

본 논문은 비선형 유한요소 해석에 바탕을 둔 2차원 스트럿-타이 모델을 이용하여 단순지지 철근콘크리트 보의 강도 및 거동을 평가하였으며, 스트럿-타이 모델을 이용한 개구가 있는 전단벽의 설계예를 소개하였다. 스트럿-타이 모델의 철근콘크리트 보의 해석과 전단벽의 설계에의 적용을 용이하게 하기위해 상호작용 컴퓨터 그래픽 프로그램을 이용하였다. 스트럿-타이 모델을 이용한 각 구조물의 해석 및 설계를 위해 지지 및 하중 조건을 잘 반영하는

¹ 전임강사, 경북대학교 토목공학과

² 교수, 경북대학교 토목공학과

³ 조교수, 인천시립전문대학교 토목공학과

스트럿-타이 모델을 선정하였다. 스트럿-타이 모델의 콘크리트 스트럿의 단면치수를 결정하기 위해 각 스트럿의 유효 압축강도를 결정하였다. 또한 콘크리트 응력이 집중되는 부분인 스트럿-타이 모델의 절점영역의 강도를 선형 혹은 비선형 유한요소 해석으로 검토하였다.

2. 연구의 연역

20세기 초부터 트러스 모델은 콘크리트 구조물의 설계규정의 제정에 많은 영향을 끼쳤다. 콘크리트 구조물의 설계에 이용되는 트러스 모델은 외부하중, 반력 및 콘크리트 보강재에 작용하는 내적힘간의 평형관계를 규명하는 중요한 하나의 요소이다. 트러스 모델은 Ritter⁽¹⁾가 처음 제안하였는데, 그는 수평축과 일정하게 45° 기울어진 압축 경사부재를 철근콘크리트 보의 트러스 모델에 사용하였다. Marsch⁽²⁾는 철근콘크리트 보의 트러스 모델이 45°와 다른 압축 경사부재를 이용하여 구성될수 있다는 가능성을 제안하였으며 또한 비틀림을 받는 부재의 트러스 모델을 소개하였다. 이러한 초기의 연구는 1960년대의 연구의 원동력이 되어 더욱 개선 확장되었으며, 트러스 모델의 개념이 소성 이론에 합리적으로 접목될 수 있는 과학적인 기초가 1970년대와 1980년대 초에 마련되었다. 콘크리트와 보강재의 실제 응력-변형도에 관계 및 구조물의 변형을 고려하여 전단, 비틀림 또는 이들의 조합을 받는 균열생긴 철근 콘크리트 부재의 거동을 예측하기 위한 트러스 모델이 많은 연구자들에 의해 개선되었다^(3,4). 1980년대 후반에 들어서 썸을 받는 콘크리트 부재의 거동과 극한강도를 예측하기 위한 트러스 모델이 스트럿과 타이의 형태로 전 콘크리트 구조물에 확장, 적용되었다⁽⁶⁻⁸⁾. 최근에는 스트럿-타이 모델을 이용한 콘크리트 구조물의 해석 및 설계를 용이하게 하는 그래픽 프로그램이 개발되었다^(9,10). 개발된 그래픽 프로그램을 바탕으로 한 스트럿-타이 모델이 높이가 큰 프리텐션 보의 해석과 복잡한 기하학적 구조를 가진 콘크리트 구조물의 설계에 적용되었다^(11,12).

3. 스트럿-타이 모델의 개발

콘크리트 구조물의 설계조건을 모두 만족시키는 스트럿-타이 모델의 선정은 구조물의

실제 기하학적 제약조건과 관련된 스트럿의 단면적과 구조물에 응력이 집중되는 곳의 강도에 영향을 미치는 절점영역의 형상이 스트럿과 타이 부재의 부재력에 따라 달라지므로 몇번의 반복과정을 필요로 한다. 반복과정은 ¹초기 트러스 모델의 선정, ²트러스 모델의 부재력 계산, ³콘크리트 및 보강재의 강도와 트러스 모델의 부재력에 바탕을 둔 각 부재의 단면적의 결정, ⁴스트럿-타이 모델의 부재력의 계산과 절점영역의 형성 및 강도검토 ⁵보강재의 위치, 필요량 및 배근형태의 결정 등의 순이다. 위의 반복과정을 거쳐 선정된 스트럿-타이 모델은 보강재의 정착길이가 혹은 콘크리트 파복두께 같은 실제적인 제약조건들도 만족시켜야 한다.

4. 스트럿-타이 모델의 적용

4.1 단순지지보의 해석

전술한 바와같은 반복과정에 따라 실험된 단순지지보를 스트럿-타이 모델을 이용하여 해석하였다. 본 논문에서 고려된 단순지지보 (Beam 3)는 스티럽이 철근콘크리트 보의 거동 및 강도에 미치는 영향을 연구하기 위해 퍼듀 (Purdue)대학 구조실험실에서 실험된 여러 단순지지보 중의 하나로서, 이 보의 배근 및 관련 자료는 그림 1과 표 1에 표기하였다.

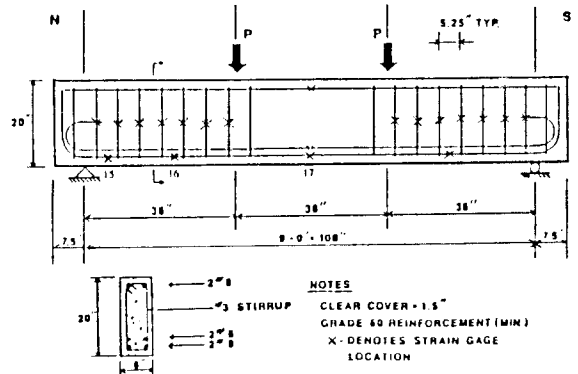


Fig. 1 Test Specimen of Simply Supported Beam 3

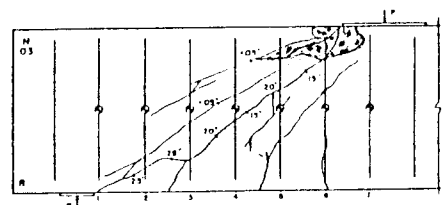


Fig. 2 Detailed Crack Plot for Beam 3

Table 1. Information of a Tested Simply Supported Rectangular R/C Beam

Bottom Steel			
Bars	E_s (ksi)	σ_y (ksi)	ϵ_y (in/in)
#8	29,500	62.0	0.0021
#9	27,500	77.5	0.0029
Top Steel			
Bars	E_s (ksi)	σ_y (ksi)	ϵ_y (in/in)
#8	29,500	62.0	0.0021
Web Steel			
Stirrup	E_s (ksi)	σ_y (ksi)	ϵ_y (in/in)
#3 @ 5.25"	30,000	77.5	0.0045

보 3에서 하중이 10^{kips} 일때 휨균열이 일정한 모멘트 지역에서 발생되었으며 하중이 40^{kips} 일때 휨-전단 및 복부-전단 균열이 발생되었다. 보3은 경사균열이 지점으로 부터 하중 작용점으로 발전되어 하중이 114.9^{kips} 일때 파괴되었다. 보가 파괴될때의 균열패턴은 그림 2에 상세히 표시되어 있다. 그림 2에서 작용하중 부근의 검게 표시된 부분은 콘크리트의 휨압축파괴 영역을 나타낸다.

보 3에 대한 스트럿-타이 모델의 선정에서, 철근의 위치는 인장을 받는 타이 부재의 위치로 사용되었고 압축스트럿의 위치 및 방향은 균열패턴 및 압축주응력의 방향에 근거하여 결정되었다. 그림 3에 나타난 유한요소 해석에 의해 결정된 압축주응력의 방향은 작용하중이 가까운 지점으로 작용하중을 지점으로 바로 전달하는 싱글 경사스트럿과 아치형태를 갖는 아치스트럿으로 전달됨을 보여주고 있으므로, 그림 4와 같은 스트럿-타이 모델을 선정하였다. 콘크리트 스트럿의 단면적은 참고문헌 (13)에서 제안된 방법에 의해 결정된 스트럿의 유효응력을 이용하여 결정되었으며, 스트럿과 타이의 단면적을 고려한 최종의 스트럿-타이 모델의 형상이 그림 5에 나타나 있다. 결정된 타이 부재의 단면적은 타이 위치한 곳의 보강재의 단면적과 같다.

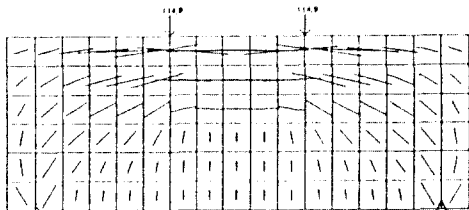


Fig. 3 Comp. Principal Stress Flows of Beam 3

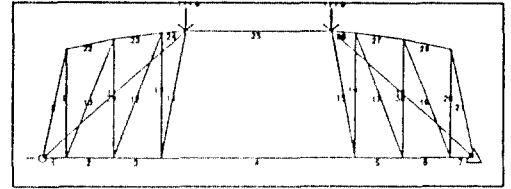


Fig. 4 Strut-Tie Model for Beam 3

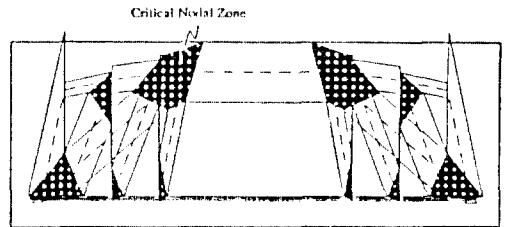


Fig. 5 Dimensioned Strut-Tie Model for Beam 3

보 3의 정확한 거동과 힘전달 미커니즘의 변화상태를 연구하기 위해 증분적인 외부하중을 가하는 비선형 유한요소 해석을 실행하였다. 비선형 해석에서 스트럿이 항복하기 전까지 아치작용 및 싱글 경사스트럿의 힘전달 미커니즘에 의해 외부하중이 지점으로 전달되었다. 작용하중이 73.9^{kips} 일때 스트럿 9, 13, 16, 20 이 항복하였으며 스트럿 11, 18 은 하중이 81.4^{kips} 일때 항복하였다. 스트럿은 항복후에도 비록 큰 변형을 겪지만 어느 정도의 힘을 지지할 수 있으므로 아주 작은 크기 ($0.001E_s$, E_s =초기탄성계수) 의 스트럿의 강성을 추가 증분하중을 받는 스트럿-타이 모델의 해석에 사용하였다. 작용하중이 79.5^{kips} 일때 싱글 경사 스트럿 29, 30 이 최고응력에 도달하였으므로 더 이상의 힘을 지점으로 전달 할 수 없으며, 따라서 각 스트럿의 강성을 0 에 가까운 값으로 택하였다. 반면에 항복한 스트럿과 아치부재들이 보가 파괴되기 까지 외부하중을 지점으로 전달하였다. 비선형 해석에 의한 각 부재의 파괴하중에서의 부재력은 표 2에 나타나 있으며 축방향 철근의 변형을 거동은 그림 6에 나타나 있다.

콘크리트의 응력이 집중되는 부분으로 스트럿-타이 모델의 스트럿 부재와 타이 부재의 연결점인 절점영역의 강도검토는 스트럿-타이 모델 방법의 콘크리트 구조물의 해석 및 설계에의 적용에 있어서 중요한 요소중의 하나이다.

보 3의 파괴는 N 쪽의 작용하중 부근의 휨압축영역의 콘크리트의 파쇄에 기인하였으며

Table 2. Member Forces at Failure Load in the Strut-Tie Model for Beam 3

Member	Force (kips)	Member	Force (kips)
1	136.4	12	-96.0
2	205.3	13	39.4
3	260.4	14	-79.9
4	260.7	22	-40.1
8	-88.7	23	-108.9
9	39.9	24	-172.5
10	-102.2	25	-300.8
11	41.5	29	-102.0

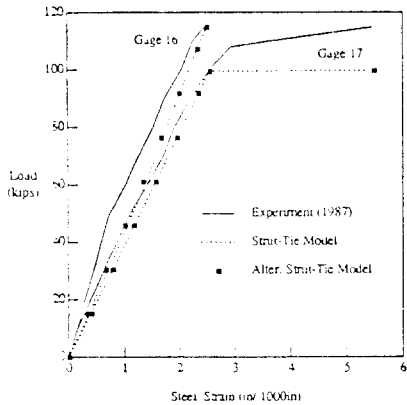


Fig. 6 Longitudinal Strain Behavior of Beam 3

로, 본 논문에서는 파쇄된 휨압축영역에 해당하는 스트럿-타이 모델의 절점영역을 비선형 유효요소로 해석하여 절점영역 및 부재의 강도를 검토하였다. 유효요소 해석에서는 20 단계의 충분한 하중을 사용하였다. 그림 7은 충분한 하중과 함께 절점영역의 압축주응력의 방향을 보여주며, 압축주응력의 방향은 그림 3의 해당부분의 압축주응력 방향과 비슷하다. 그림 8은 충분한 하중 작용시의 절점영역의 파쇄된 형상을 보여주며, 파괴하중시 (마지막 충분한 하중단계)의 절점영역의 파쇄된 형상은 그림 2의 해당부분의 파쇄된 형상과 비슷하다. 절점영역의 압축주응력 값은 63.9^{ksi} ($1.021 f_c$) 와 7.08^{ksi} ($1.158 f_c$) 사이이다.

4.2 개구가 있는 전단벽의 설계

전단벽이나 보와 같은 철근콘크리트 부재의 설계시 종종 필요한 사용성구조와 통로를 위한 개구를 넣을 때가 있다. 본 논문에서는 그림 9에 나타난 바와 같은 개구가 있는 전단벽을 스트럿-타이 모델을 이용하여 설계하였다.

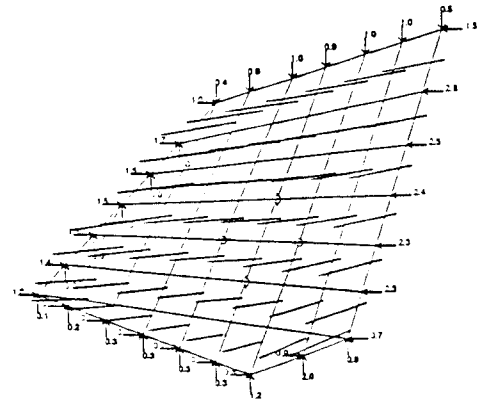


Fig. 7 Comp. Principal Stress Flows in the Critical Nodal Zone in the Strut-Tie Model for Beam 3

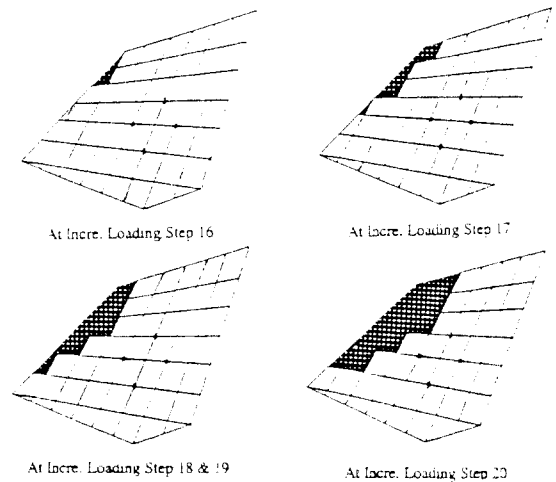


Fig. 8 Crushed Shape of the Critical Nodal Zone in the Strut-Tie Model for Beam 3

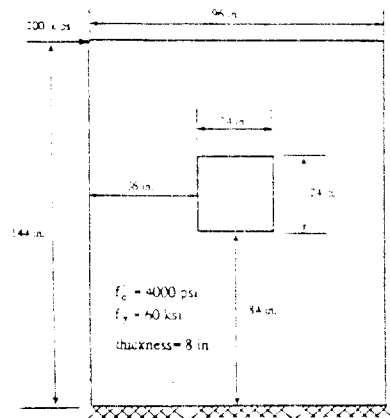


Fig. 9 Shear Wall with Opening

초기 스트럿-타이 모델의 스트럿 방향은 압축주응력의 방향을 근거하여 결정하였다. 그림

10 에서 나타난 바와 같이 수평하중 200^{kips} 는 다수의 아치를 통해 기초로 전달된다. 만약에 수평방향의 하중이 횡격막을 통해 전단벽으로 전달된다면 다른 하중전달 메커니즘이 필요할 것이다. 수평 및 수직방향의 압축스트럿 부재의 부재력을 수직, 수평 방향의 타이가 받도록 하였다.

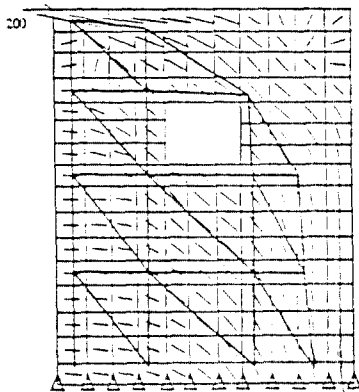


Fig 10 Comp. Stress Flows with Strut-Tie Model for the Shear Wall

압축 스트럿의 단면적을 결정하기 위해 $0.75 f_c$ 를 스트럿의 유효응력으로 사용하였으며, 실제 치수를 가진 스트럿-타이 모델이 그림 11 에 나타나 있다. 스트럿과 타이 부재의 부재력은 표 3에 나타나 있다. 선정된 스트럿-타이 모델은 스트럿 부재 6과 7에 의해 형성되는 절점영역이 높은 응력을 유발한다. 그러므로 이 절점영역의 강도를 유한요소 해석을 통해 검토하였으며 그 결과 최고 압축응력값이 $1.11 f_c$ 로서 절점영역의 파쇄나 균열에 의한 파괴메커니즘이 발생하지 않았다. 여기서 절점영역의 지지판의 폭은 $0.85 f_c$ 로 간주하여 결정하였다.

마지막으로, 필요한 철근량을 타이가 위치한 곳에 배치하였다. 가장 많은 양의 철근을 필요로 하는 곳은 타이부재 1, 11, 21, 28 이 위치한 곳으로서, 8#8 ($317.1/60 = 5.28 \text{ in}^2$) 을 2단으로 벽의 끝단에서 12 in. 떨어진 곳에서 부터 배근하였다. 수직 타이부재 3, 13, 23, 29 가 위치한 곳은 4#6 ($83.3/60 = 1.39 \text{ in}^2$) 철근을 2단으로 배근하였다. ACI 318-89 에 지정되어 있는 수직방향 철근의 최대간격에 관한 규정을 만족시키기 위해 2#6 철근을 두개의 수직 타이

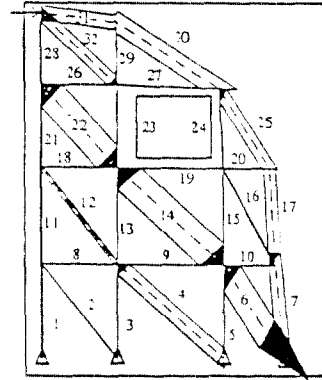


Fig. 11 Dimensioned Strut-Tie Model for the Shear Wall

Table 3. Member Forces in the Strut-Tie Model for Shear Wall

Member	Force (kips)	Member	Force (kips)
1	317.1	17	-89.8
2	0.0	18	10.7
3	73.9	19	40.2
4	-127.7	20	43.5
5	0.0	21	238.8
6	-225.5	22	-250.9
7	-98.4	23	0.0
8	0.0	24	-8.5
9	75.5	25	-101.6
10	-0.2	26	152.8
11	317.1	27	82.5
12	-22.0	28	99.0
13	0.0	29	83.3
14	-239.8	30	-155.5
15	-0.1	31	-131.3
16	-9.2	32	-106.7

사이에 추가로 배근하였다. 전단벽이 같은 크기의 반대 방향의 수평하중을 받을 수 있으므로 개구 오른쪽의 전단벽도 개구 왼쪽의 전단벽의 배근과 동일하게 수평, 수직 방향의 철근을 대칭적으로 배근하였다. 만약 개구가 전단벽의 중앙에 없다면 반복하중(reversed loading)에 의한 전단벽의 최악의 경우를 고려하는 다른 철근의 배근이 필요할 것이다. 수평 타이 부재 26, 27의 위치에는 6#6 ($152.8/60 = 2.55 \text{ in}^2$) 의 철근을 2단으로 배근하였다. 마지막으로 수평방향철근의 최대간격에 관한 규정을 만족시키기 위해 2#6 철근을 16 in. 간격으로 배근하였다. 전단벽의 철근의 배근은 그림 12에 나타나 있다.

5. 요약 및 결론

본 논문에서는 비선형 유한요소 해석에 바

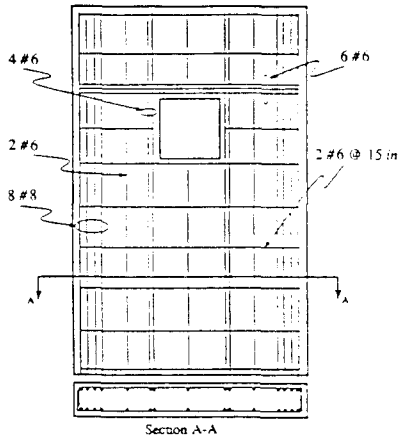


Figure 12 Reinforcement Details of the Shear Wall

탕을 둔 2차원 스트럿-타이 모델을 이용하여 단순지지 철근콘크리트 보의 거동 및 강도를 평가하였으며, 스트럿-타이 모델을 이용한 개구가 있는 전단벽의 설계예를 소개하였다. 스트럿-타이 모델을 이용한 단순지지보와 전단벽의 설계를 위해 지지 및 하중 조건을 잘 반영하는 스트럿-타이 모델을 선정하였다.

스트럿-타이 모델을 이용한 단순지지보의 해석결과, 즉 축방향 철근의 변형도 거동과 절첩영역의 응력검토 및 파괴형상의 연구를 통해 예측한 단순지지보의 파괴강도, 가 실험결과와 잘 일치함을 알수있었고, 단순지지보의 힘의 전달 및 재분배 메커니즘을 명확히 파악할 수 있었다. 또한 스트럿-타이 모델을 이용한 개구가 있는 전단벽의 설계는 필요한 철근량의 결정 및 주철근의 배근위치 결정과 장착문제의 해결에 있어서 효과적이라 여겨진다.

6. 참고문헌

- (1) Ritter, W., "Die Bauweise Hennebique (Hennebiques Const. Method)", *Schweizerische Bauzeitung (Zurich)*, Vol. 17, 1899, pp. 41-43, 49-52 and 59-61.
- (2) Morsch, E., "Concrete-steel Construction", English Translation by E.P. Goodrich, MacGraw-Hill, New York, 1909, 368 pp.
- (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, 1980, pp. 33-100.

(4) Vecchio, F.J. and Collins, M.P., "The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear", *ACI Structural Journal*, Vol. 83, 1986, pp. 219-231.

(5) Schlaich, J., Schaefer, K. and Jennewein, M., "Towards a Consistent Design of Structural Concrete" *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, Vol. 32, 1987, pp. 74-150.

(6) Anderson, N.S. and Ramirez, J.A., "Detailing of stirrup Reinforcement", *ACI Structural Journal*, Vol. 86, 1989, pp. 507-515.

(7) Adebar, P., Kuchma, D. and Collins, M.P., "Strut-and-Tie Models for the Design of Pile Caps: An Experimental Study", *ACI Structural Journal*, Vol. 87, 1990, pp. 81-92.

(8) Tan, K.H. and Naaman, A.E. "Strut-and-Tie Model for Externally Prestressed Concrete Beams", *ACI Structural Journal*, Vol. 90, 1993, pp. 683-691.

(9) Alshegeir, A. and Ramirez, J.A., "Computer Graphics in Detailing Strut-Tie Models", *Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE*, Vol. 6, 1992, pp. 220-232.

(10) Yun, Y.M. and Ramirez, J.A., "Nonlinear Analysis in the Computer Graphics Implementation of Strut-Tie Model Approach for Structural Concrete", *Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE*, in Review Process, 1994.

(11) Alshegeir, A. and Ramirez, J.A., "Strut-Tie Approach in Pretensioned Deep Beams", *ACI Structural Journal*, Vol.89, 1992, pp. 296-304.

(12) Yun, Y.M., Alshegeir, A. and Ramirez, J.A., "Strut-Tie Model Design of Disturbed Regions in Concrete Structures", *Proceedings, ASCE Structural Congress XII, 1994*, pp. 233-238.

(13) Yun, Y.M. and Ramirez, J.A., "Strength of Struts and Nodes in Strut-Tie Model" *Journal of Structural Engineering, ASCE*, in Process, 1994.

(14) Alshegeir, A., "Analysis and Design of Disturbed Regions with Strut-Tie Models", Ph. D Thesis, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1992, 274 pp.

7. 부록 : 단위 환산값

1 in = 25.4 mm ; 1 in² = 645.2 mm² ;

1 kip = 4.448 KN ; 1 ksi = 6.895 MPa