격자 연화 스트럿-타이 모델 방법을 이용한 RC 코벨의 극한강도예측

Ultimate Strength Analysis of Reinforced Concrete Corbels Using Grid Softened Strut-Tie Model

윤 영 묵* 김 병 헌** 이 원 석** 신 효 정**
Yun, Young Mook Kim, Byung Hun Lee, Won Seok Shin, Hyo Jung

ABSTRACT

Predicting the failure modes of reinforced concrete corbels is difficult because the reinforced concrete corbels show the shapes of sudden shear failures at even slight deflection. For this reason, an exact analysis method is demanded highly. In this study, the validity of the grid softened strut-tie model method suggested for concrete member analysis was examined through the ultimate strength evaluation of the reinforced concrete corbels tested to failure. The evaluated ultimate strengths by the grid softened strut-tie model method were compared with those by the ACI 318-02 and the softened strut-tie model method.

1. 서론

코벨은 전단지간 대 유효높이의 비가 1보다 작은 값으로 제한되는 철근콘크리트 부재로서, 주인장 철근의 항복에 의한 파괴, 콘크리트 스트럿의 압축파괴, 하중의 기둥면을 따라 발생하는 전단파괴, 그리고 하중판 아래의 지압파괴 등의 여러 가지 형상의 파괴형태를 보인다. 특히 전단파괴 메카니즘은 미소한 처짐에도 불구하고 급작스런 전단파괴양상을 나타내는 취성파괴거동을 보이므로, 이러한 파괴 메커니즘을 예측하는 것은 상당히 어렵다. ACI 설계기준[2]의 등장이후 전단설계방법 개선을 위한 많은 노력으로 합리적인 설계 방법들이 제시되었다. 이 중에서 코벨의 설계를 위한 근본적인 접근은 스트럿-타이 모델을 사용하는 것이라고 할 수 있다. 이러한 스트럿-타이 모델 방법에 Hsu에 의해 제안된 연화효과개념[3]을 도입하고 그 모델을 격자로 형성한 것이 본 연구에서 제시한 격자 연화 스트럿-타이 모델 방법[1]이다. 본 연구에서는 철근 콘크리트 코벨의 극한강도 평가를 통해 ACI 설계기준, 연화 스트럿-타이 모델 방법[5] 그리고 격자 연화 스트럿-타이 모델 방법등에 의한 해석결과를 비교분석하여 철근 콘크리트 코벨의 해석에 합리적이고 적합한 방법을 제시하고자 한다.

2. 격자 연화 스트럿-타이 모델 방법

기존의 스트럿-타이 모델은 응력의 흐름에 따라 스트럿과 타이를 배치하여 설계자의 주관에 따라 여러 형태의 모델이 선정될 수 있다는 단점이 있었으나, 격자 스트럿-타이 모델은 스트럿-타이 모델의 선정에 대해 일관성을 가진다.

* 정회원, 경북대학교 토목공학과 부교수
** 정회원, 경북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

격자 연화 스트럿-타이 모델 방법에 의한 콘크리트 부재의 극한강도는 격자 스트럿-타이 모델의 단독 배치된 각 구성부재, 즉 콘크리트 스트럿, 콘크리트 타이, 그리고 철근 타이의 파쇄, 파단, 그리고 항복 등에 의해 결정된다. 콘크리트 스트럿의 극한강도를 결정하기 위해서는 Zhang과 Hsu[4]의 의해 제안된 그림 1(a)와 같은 연화된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 이용하여 각 증분하중 단계에서 단독 배치된 콘크리트 스트럿의 유효강도 σ_d를 식 (1)로부터 구한다.

$$\sigma_d = -\zeta f_c' 2\left(\frac{-\epsilon_d}{\zeta\epsilon_0}\right) - \left(\frac{-\epsilon_d}{\zeta\epsilon_0}\right)^2 \; for \frac{-\epsilon_d}{\zeta\epsilon_0} \le 1 \quad , \quad \sigma_d = -\zeta f_c' 1 - \left(\frac{-\epsilon_d/\zeta\epsilon_0 - 1}{2/\zeta - 1}\right)^2 \; for \frac{-\epsilon_d}{\zeta\epsilon_0} > 1 \qquad (1)$$

식 (1)에 의해 결정된 유효강도가 격자 스트럿-타이 모델의 해석으로부터 결정된 임의증분하중단계에서의 콘크리트 스트럿의 응력과 같아질 때 콘크리트 부재는 콘크리트 스트럿의 파쇄에 의해 파괴되었다고 본다. 단독 배치된 콘크리트 타이의 파단에 의한 콘크리트 부재의 극한강도는 인장을 받는 Zhang과 Hsu[4]에 의해 제안된 그림 1(b)와 같은 콘크리트의 응력-변형률 관계를 이용한다. 콘크리트 타이와 중복배치된 철근 타이의 항복에 의한 콘크리트 부재의 극한강도는 인장을 받는 Zhang과 Hsu[4]에 의해 제안된 그림 1(c)와 같은 콘크리트의 영향에 의해 연화되는 인장철근의 응력-변형률 관계를 이용한다. 격자 연화 스트럿-타이 모델 방법에 의한 콘크리트 부재의 극한강도 평가과정은 그림 2와 같다.

3. 철근콘크리트 코벨의 강도평가

본 연구에서는 Mattock et al.[6]에 의해 실험파괴된 28개의 코벨의 극한강도를 ACI 설계기준, 연화 스트럿-타이 모델 방법, 격자 연화 스트럿-타이 모델 방법 등을 이용하여 평가하였다. 평가부재의 제원은 표 1과 같다. 실험부재의 배근상세는 그림 3(a)와 같다. 실험에서 나타난 부재의 파괴형상은 A2와 A3부재에서 경사인장파괴형태(diagonal tension)를 보였고, 그 외의 부재들은 전단파괴형태(beam shear)를 보였다.

ACI설계기준을 이용할 경우 콘크리트가 저항하는 전단력에 의한 전단파괴관련 극한강도식과 수직하중에 의해 휨파괴관련 극한강도식을 비교하여 작은 값을 부재의 극한강도로 선택하였다. 연화 스트럿-타이 모델 방법에 의한 강도평가시 Hwang et al.[5]이 제시한 방법을 이용하였다. 그림 3(b)는 A2부재에 대한 해석모델을 나타낸 것이다. 격자 연화 스트럿-타이 모델 방법에 의한 강도평가시 그림 2의 알고리즘에 따라 극한강도평가를 수행하였으며, 그림 3(c)는 A2부재에 대한 격자 스트럿-타이 모델을 나타낸 것이다. 배근된 수직 및 수평 철근량은 배근 위치에서구성부재와의 거리비를 이용하여 각 수직 및 수평 구성부재의 단면적으로 분배하였다. 이렇게 구성된 격자 스트럿-타이 모델에 재료 비선형 유한요소해석을 수행하고, 각 증분하중단계마다 모든 구성부재의 응력과 변형률를 구하여 각 구성부재의 파쇄 혹은 파단여부를 판단한다. A2부재에서는 증분하중의 합이 131kN일때 20 및 23 구성부재에서 인장철근의 항복이 일어나는 것으로 나타나, 이 부재의 극한강도는 131kN으로 결정하였다. 표 2는 실험에 의해 결정된 전단강도에 대해 각 해석방법이 예측한 전단강도 비를 나타낸 것이다.

4. 결론

실험, 파괴된 28개의 철근콘크리트 코벨의 극한강도를 평가한 결과, ACI 설계기준에 의한 예측강도대 실험파괴강도의 비는 1.00로 나타났으나, 표준편차가 0.27로 강도예측결과가 부재에 따라 과대 또는 과소평가하는 것이 많은 것으로 나타났다. 이에 반해 연화 스트럿-타이 모델 방법 및 격자 연화 스트럿-타이 모델 방법에 의한 평가결과는 ACI 설계기준의 평가결과에 비해 표준편차가 0.17, 0.21로 양호하게 나타났으며, 강도비 또한 0.94, 0.96으로 철근콘크리트 코벨의 극한강도를 정확하게 평가하였다.

참고문헌

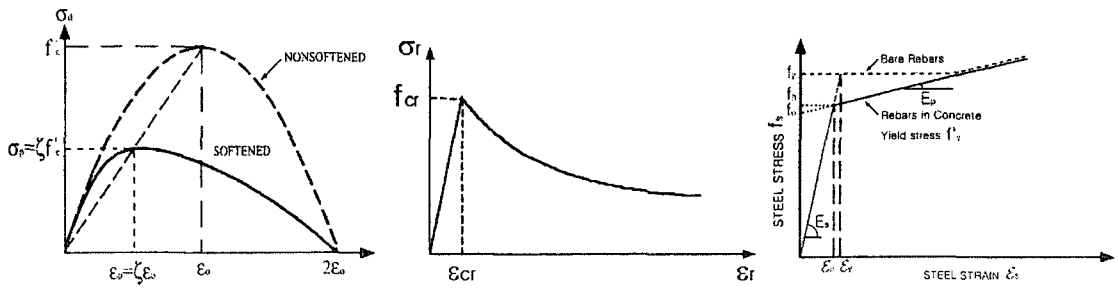
1. 박정웅, 윤영묵, "철근콘크리트 보의 강도해석을 위한 격자 연화 스트럿-타이 모델 (GS-STM)방법", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 2003, pp. 451-456.
2. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)," American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2002.
3. Mau, S. T. and Hsu, T. T. C., "Shear Strength Prediction for Deep Beams with Web Reinforcement," ACI Structural Journal, V. 84, No. 6, Nov-Dec. 1987, pp. 513-523.
4. Zhang, L. X. B. and Hsu, T. T. C., "Behavior of Analysis of 100MPa Concrete Membrane Elements," Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 124, No. 1, Jan.. 1998, pp. 24-34.
5 Hwang, S.J., Lu, H.W., and Lee, H.J., "Shear Strength Prediction for Reinforced Concrete Corbels," ACI Structural Journal, V. 97, No. 4, Jul-Aug. 2000, pp. 543-552.
6. Mattock, A.H., Chen, K.C., and Soongswang, K., "Behavior of Reinforced Concrete Corbels," PCI Journal, V. 21, No. 2, Mar.-Apr. 1976, pp. 52-77.

표 1 콘크리트 코벨의 제원

부재	a/d	파괴하중 (kips)	$\rho = \frac{As}{bd}$	콘크리트강도 (psi)	부재	a/d	파괴하중 (kips)	$\rho = \frac{As}{bd}$	콘크리트강도 (psi)
A2	0.67	35.6	0.0116	3675	E2	0.45	46.0	0.0210	4450
A3	1.01	28.0	0.0186	3850	E3	0.68	48.5	0.0243	4220
B1	0.44	47.0	0.0075	3630	E4	1.01	35.5	0.0297	4055
B2	0.67	38.9	0.0116	3450	F2	0.45	36.5	0.0210	3715
B3	1.01	42.1	0.0186	3760	F3	0.68	24.0	0.0243	3730
B3A	1.01	42.1	0.0186	4165	F4	1.01	24.0	0.0297	4035
C1	0.45	44.0	0.0203	4010	F4A	1.01	23.5	0.0297	3715
C2	0.68	40.0	0.0248	3715	G4	0.99	24.0	0.0147	3750
C2A	0.68	40.5	0.0223	3705	H1	0.23	67.0	0.0210	3920
C3	1.02	37.6	0.0310	4385	H2	0.45	50.0	0.0243	3930
D1	0.45	28.0	0.0165	3910	H3	0.68	47.4	0.0297	3855
D2	0.68	34.0	0.0203	3805	H3A	0.68	39.6	0.0297	3960
D3	1.01	32.8	0.0248	3700	H3B	0.68	46.1	0.0297	3820
E1	0.22	55.0	0.0189	4030	J4	1.01	21.5	0.0198	3645

표 2 콘크리트 코벨 부재의 극한강도 평가

부재	$V_{u,test}$ (KN)	$V_{u(cal.)}/V_{u(test)}$			부재	$V_{u,test}$ (KN)	$V_{u(cal.)}/V_{u(test)}$		
		ACI 설계기준	연화 STM방법	격자 연화 STM방법			ACI 설계기준	연화 STM방법	격자 연화 STM방법
A2	158.4	1.11	0.81	0.83	E3	215.7	0.73	0.72	0.86
A3	124.6	1.47	1.02	0.96	E4	157.9	0.98	0.88	0.92
B1	209.1	0.84	0.84	0.64	F2	162.4	1.03	1.00	0.89
B2	173.0	0.95	0.82	0.96	F3	106.8	1.46	1.34	1.39
B3	140.0	1.28	0.96	0.99	F4	106.8	1.47	1.29	1.33
B3A	187.3	0.98	0.82	0.81	F4A	104.5	1.51	1.24	1.31
C1	195.7	0.81	0.85	0.79	G4	106.8	1.49	1.19	1.28
C2	177.9	0.91	0.82	0.98	H1	298.0	0.61	0.81	0.57
C2A	180.1	0.80	0.78	0.89	H2	222.4	0.84	0.83	0.77
C3	167.2	0.99	0.96	0.91	H3	210.8	0.86	0.81	0.90
D1	124.6	0.78	1.15	0.99	H3A	176.1	1.06	0.98	1.08
D2	151.2	0.69	0.88	0.99	H3B	205.1	0.88	0.82	0.93
D3	145.9	0.79	0.84	0.87	J4	95.6	1.17	1.12	1.35
E1	244.7	0.76	0.87	0.85	평 균		1.00	0.94	0.96
E2	204.6	0.80	0.89	0.75	표 준 편 차		0.27	0.17	0.21



(a)콘크리트 스트럿 (b) 콘크리트 타이 (c)철근 타이

그림 1. 격자 연화 스트럿-타이 모델 구성부재의 응력-변형률 관계

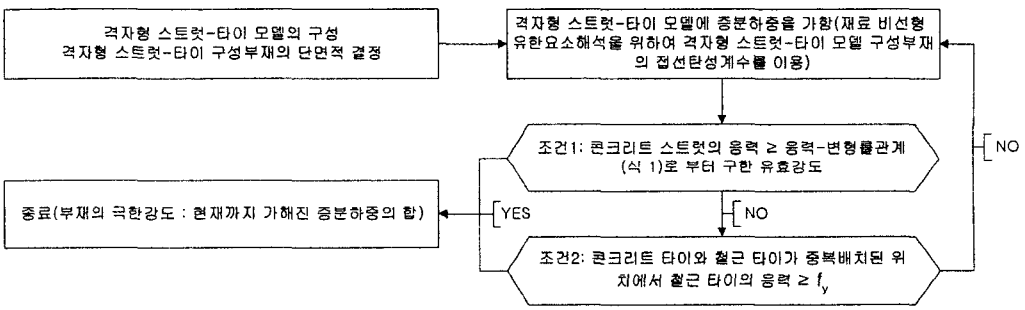
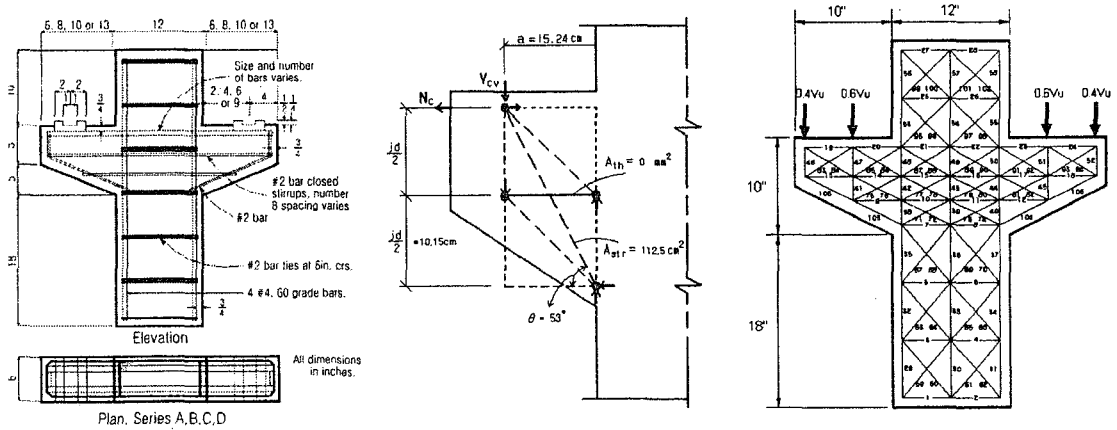


그림 2. 격자 연화 스트럿-타이 모델방법에 의한 극한강도평가 알고리즘



(a) 실험부재의 배근상세 (b) A2부재의 연화 스트럿-타이 모델 (c) A2부재의 격자 연화 스터럿-타이 모델

그림 3 콘크리트 코벨의 실험 및 해석 모델