

격자 스트럿-타이 모델 방법을 이용한 철근콘크리트 깊은 보의 극한강도 평가

Evaluation of Ultimate Strength of Reinforced Concrete Deep Beams Using Grid Strut-Tie Model Approach

김 병 헌* 이 원 석** 윤 영 목***
Kim, Byung Hun Lee, Won Sdek Yun, Young Mook

ABSTRACT

Recently, many design codes including ACI 318-02 recommend the use of a strut-tie model approach for design of structural concrete with D-region(s). However, there are several unclear problems and shortcomings in the codes' strut-tie model approach. A grid strut-tie model approach was proposed to resolve these problems. In this study, the ultimate strengths of 17 deep beams, the most familiar type of D-regions, were evaluated for the validity check of the grid strut-tie model approach. The analytical results obtained by the approach are compared with those by the strut-tie model approach presented by CEB-FIP, AASHTO LRFD, and ACI 318-02.

1. 서론

스트럿-타이 모델은 1900년대 초에 소개된 트러스 모델을 근간으로 하고 있다. 1980년대 Schlaich et al⁽⁸⁾에 의해 기존의 트러스 모델을 일반화 시킨 스트럿-타이 모델로 체계화 되었다. 이후 유럽의 통합설계기준에서 스트럿-타이 모델 방법을 도입하면서 이를 개선시키기 위한 많은 연구가 수행되어졌다. 미국의 AASHTO-LRFD⁽⁴⁾와 ACI 318-02⁽²⁾ 설계기준을 비롯 각국의 주요 설계기준에서 연구결과를 토대로 스트럿-타이 모델을 설계방법으로 채택되기에 이르렀다. 그러나, 설계 기준에서 제시하고 있는 스트럿-타이 모델은 모델의 선정 및 형식, 구성요소의 유효강도 측면에서 몇몇 불확실성을 내포하고 있으며, 실무적 측면에서도 많은 수계산과 기하학적 판단과정을 수행하며, 여러 하중조합에 해당하는 각각의 스트럿-타이 모델을 선정해야 하는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 현행 스트럿-타이 모델 설계방법의 문제점을 해결하기 위해 제안된 격자 스트럿-타이 모델 방법⁽¹⁾과 설계기준의 스트럿-타이 모델 설계방법을 이용하여 철근콘크리트 깊은 보의 극한강도를 평가하였으며, 그 결과를 실험결과와 비교, 분석하여 격자 스트럿-타이 모델 방법의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 깊은 보의 극한강도평가

본 연구의 해석대상시험체는 Aguilar et al⁽⁶⁾, Uribe and Alcocer⁽³⁾, Smith and Vantsiotis⁽⁹⁾, 그리고

* 정회원, 경북대학교 사회기반시스템공학과 박사후과정
** 정회원, 경북대학교 사회기반시스템공학과 박사수료
*** 정회원, 경북대학교 사회기반시스템공학과 부교수

Ramirez et al⁽⁷⁾에 의해 실험, 파괴된 17개의 철근콘크리트 깊은 보 시험체이다. 시험체는 전단지간 대 유효깊이 비(a/d)에 따라 구분하였다. 표 1은 시험체의 재료특성값 및 배근철근량을 보여주고 있다. 본 연구에서는 17개의 시험체를 ACI 318-02, AASHTO-LRFD, CEB-FIP 설계기준⁽⁵⁾, 그리고 격자 스트럿-타이 모델을 이용하여 극한강도평가를 수행하였다.

표 1. 시험체의 재료특성값 및 배근철근량

시험체	a/d	f'_c	인장철근			압축철근			수직전단철근			수평전단철근			
			bars	E_s	f_y	bars	E_s	f_y	E_s	bars	f_y	bars	f_y		
A	ACI-I	1.11	32	6#8	2×10^5	420	2#3	2×10^5	450	2×10^5	#3@152	450	#3@10	450	
	STM-I		32	6#8	2×10^5	420	2#3	2×10^5	450	2×10^5	#3@152	450	#3@30	450	
	STM-H		28.5	6#8	2×10^5	420	2#3	2×10^5	450	2×10^5	#3@152	450	2#3	450	
	STM-M		28.5	6#8	2×10^5	420	2#3	2×10^5	450	2×10^5	#3@152	450	-	-	
B	ACI-II	1.30	35	12#8	2×10^5	445	4#8	2×10^5	445	2×10^5	2#4@140	429	6#4	429	
	3c1-20		21	3#5	1.86×10^5	431	1#2	2.01×10^5	437	2.01×10^5	2#2@114	437	1#2	437	
	3c3-21		16.5	3#5	1.86×10^5	431	1#2	2.01×10^5	437	2.01×10^5	2#2@114	437	3#2	437	
	3c4-22		18.3	3#5	1.86×10^5	431	1#2	2.01×10^5	437	2.01×10^5	2#2@114	437	4#2	437	
	3c6-23		19	3#5	1.86×10^5	431	1#2	2.01×10^5	437	2.01×10^5	2#2@114	437	6#2	437	
	4c1-24		1.43	19.6	3#5	1.86×10^5	431	1#2	2.01×10^5	437	2.01×10^5	2#2@83	437	1#2	437
	4c3-04		18.5	3#5	1.86×10^5	431	1#2	2.01×10^5	437	2.01×10^5	2#2@101	437	3#2	437	
	4c3-28		19.2	3#5	1.86×10^5	431	1#2	2.01×10^5	437	2.01×10^5	2#2@83	437	3#2	437	
	4c4-25		18.5	3#5	1.86×10^5	431	1#2	2.01×10^5	437	2.01×10^5	2#2@83	437	4#2	437	
	4c6-26		21.2	3#5	1.86×10^5	431	1#2	2.01×10^5	437	2.01×10^5	2#2@83	437	6#2	437	
C	beam1	2.15	39	2#8	2.03×10^5	276	2#8	2.03×10^5	276	2.07×10^5	2#3@133	345	-	-	
				2#9	1.90×10^5	322									
	beam3		42.7	2#8	2.03×10^5	276	2#8	2.03×10^5	276	2.07×10^5	2#3@133	345	-	-	
				2#9	1.90×10^5	322									
	beam10		31	2#8	1.93×10^5	334	2#8	1.93×10^5	234	2.17×10^5	2#3@133	345	-	-	
				2#9	1.90×10^5	325									

단위: f'_c (MPa), E_s (MPa), f_y (MPa), length(mm)

ACI 318-02 설계기준에서는 스트럿과 절점영역의 응력상태를 나타내는 계수 β_s 와 β_n 을 이용하여 다음 식과 같은 스트럿과 절점영역의 유효강도를 제시하였다.

$$f_{cs} = 0.85\beta_s f'_c, \quad f_{cn} = 0.85\beta_n f'_c \quad (1)$$

여기서, β_s 는 스트럿의 응력상태에 따라 1.0, 0.75, 0.60λ , 0.6, 0.4를 사용하며, β_n 은 절점영역에 접하는 인장타이의 수에 따라 0.1, 0.8, 0.6을 사용한다. AASHTO-LRFD 설계기준은 스트럿에 직교하는 철근의 평균인장변형률(ϵ_1)을 이용하여 다음과 같은 스트럿의 유효강도식을 제시하였으며, 절점영역의 유효강도는 ACI 318-02 설계기준과 동일한 개념을 적용하여 결정하였다.

$$f_{cs} = \frac{f'_c}{0.8 + 170\epsilon_1}, \quad f_{cn} = \alpha\phi f'_c \quad (2)$$

여기서 α 는 절점영역에 접하는 인장타이의 수에 따라 0.85, 0.75, 0.65를 사용한다. CEB-FIP 설계기준에서는 a/d 에 따라 그림 2와 같은 모델을 사용하도록 제안하고 있으며, 그림 2(b)의 모델은 부정정구조이므로 다음과 같은 하중분배율에 따라 각 정정구조의 하중을 계산하도록 하고 있다.

$$F_w = \frac{2a/z-1}{3-N_{sd}/F} F, \quad 0 \leq F_w \leq F, \quad \cot\theta = \frac{F_h}{F} \quad (3)$$

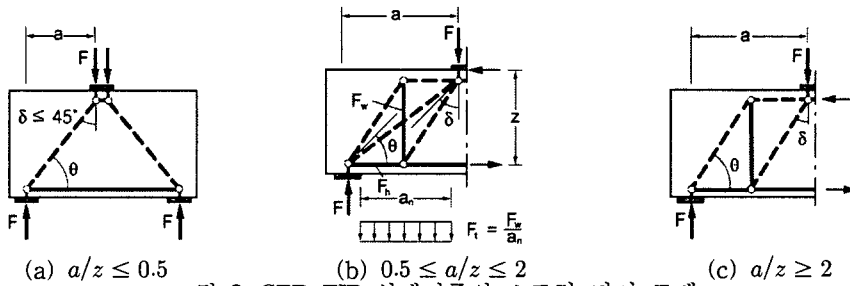


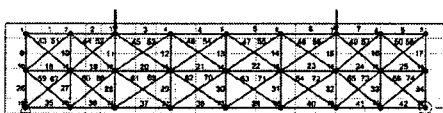
그림 2. CEB-FIP 설계기준의 스트럿-타이 모델

격자 스트럿-타이 모델 방법⁽¹⁾에 의한 해석은 절점의 기준으로 힘을 전달할 수 있는 모든 방향으로 요소를 배치하여 모델을 선정하고, 무근콘크리트 유한요소해석을 이용한 스트럿의 유효강도 결정방법, 그리고 스트럿의 최대단면적 및 필요한면적 결정방법과 같은 개념을 정의하여 수행하였다. 격자 스트럿-타이 모델 방법의 적용을 위해 개발된 STM 2D-Grid⁽¹⁾를 이용하여 깊은 보의 강도를 평가하였다.

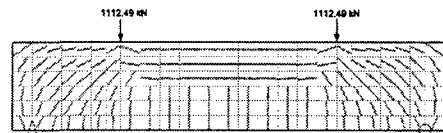
표 2. 철근 콘크리트 깊은 보의 극한강도 평가결과

시험체		파괴하중 (kN)	P_{cal}/P_{test}			
Group	부재명		ACI 318-02	AASHTO-LRFD	CEB-FIP	격자 스트럿-타이 모델방법
A	ACI-I	1357(f)*	0.71(f)	0.71(f)	0.34(s)	0.79(f)
	STM-I	1134(f)	0.85(f)	0.85(f)	0.41(s)	0.94(f)
	STM-H	1285(s)	0.77(f)	0.77(f)	0.37(s)	0.74(s)
	STM-M	1277(s)	0.77(f)	0.77(f)	0.19(s)	0.75(s)
B	ACI-II	1578(s)	0.96(s)	0.96(s)	0.77(s)	0.90(s)
	3c1-20	281.6(s)	0.38(s)	0.37(s)	0.35(s)	0.80(s)
	3c3-21	250.0(s)	0.34(s)	0.34(s)	0.32(s)	0.81(s)
	3c4-22	255.3(s)	0.37(s)	0.36(s)	0.34(s)	0.88(s)
	3c6-23	274.4(s)	0.35(s)	0.35(s)	0.33(s)	0.83(s)
	4c1-24	293.1(s)	0.34(s)	0.34(s)	0.32(s)	0.83(s)
	4c3-04	257.1(s)	0.37(s)	0.37(s)	0.34(s)	0.88(s)
	4c3-28	304.7(s)	0.32(s)	0.32(s)	0.30(s)	0.78(s)
	4c4-25	305.1(s)	0.31(s)	0.31(s)	0.29(s)	0.75(s)
	4c6-26	318.9(s)	0.34(s)	0.33(s)	0.31(s)	0.82(s)
C	Beam 1	474.6(s)	0.82(f)	0.74(f)	0.74(f)	0.89(f+s)
	Beam 3	511.1(s)	0.82(f)	0.74(f)	0.74(f)	0.7(s)
	Beam 10	386.5(s)	0.81(f)	0.71(f)	0.75(f)	0.96(s)
평균			0.57	0.55	0.42	0.83
표준편차			0.25	0.23	0.19	0.07

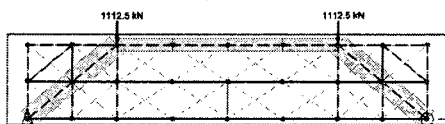
*() = 파괴모드, f = flexure failure, s = shear failure



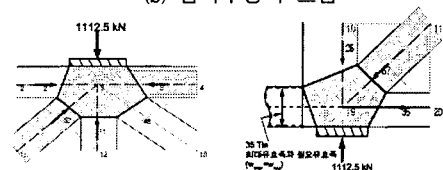
(a) 격자 스트럿-타이 모델



(b) 압축주응력 흐름



(c) 격자 스트럿-타이 모델의 차원화 결과



(d) 절점영역의 강도평가 결과

그림 3. ACI-I 시험체의 격자 스트럿-타이 모델과 해석결과

본 연구에서는 a/d 에 따라 지지점과 하중작용점을 2단 2열, 2단 3열, 2단 4열의 격자요소를 가지는 스트럿-타이 모델을 사용하였다. 격자 스트럿-타이 모델 방법에서는 스트럿-타이 모델의 기하학적 적합조건 및 절점영역의 안전성을 만족하는 하중 하에서 필요철근량과 배근철근량을 비교하여 극한강도를 결정하였다. 그림 3(a), (b)는 $a/d=1.11$ 인 ACI-I 시험체를 위한 모델과 압축주응력을 보여주고 있다. ACI-I 시험체는 실험파괴하중의 81%에서 경사스트럿의 단면적이 최대허용면적에 도달하였으나 38번 타이의 필요철근량이 배근철근량의 초과하였으므로 이 시험체의 극한하중은 38번 인장타이의 항복에 의해 결정되었으며, 파괴모드 또한 주철근의 항복에 의해 휨파괴로 결정되었다. 그림 3(c), (d)는 ACI-I 시험체의 차원화 결과와 절점영역의 강도검토 결과를 보여주고 있다. 표 3은 깊은 보의 실험파괴하중 및 파괴원인과 각 방법에 의해 평가된 극한강도 및 파괴원인을 나타내고 있다.

3. 결론

ACI 318-02, AASHTO-LRFD, 그리고 CEB-FIP 설계기준에 따른 극한강도는 파괴하중의 60%미만으로 다소 보수적인 결과를 나타내었으며, 또한 합리적인 모델 선정기준을 제시하지 못함으로써 시험체에 따라 극한강도 평가결과에 큰 차이를 나타내었다. 격자 스트럿-타이 모델 방법은 파괴하중의 83%를 극한강도로 예측하여 일관성있는 양호한 평가결과를 보였으며, 파괴모드 또한 비교적 정확히 예측하였다. 본 연구를 통해 기존 설계기준의 스트럿-타이 모델을 이용할 경우 스트럿-타이 모델의 선정이 설계결과에 큰 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다. 반면에 격자 스트럿-타이 모델 방법은 선정한 스트럿-타이 모델의 종류에 큰 영향을 받지 않고 철근콘크리트 깊은 보를 합리적이고 비교적 정확하게 설계 할 수 있는 방법으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 김병헌, "철근 콘크리트 부재의 설계를 위한 격자 스트럿-타이 모델 방법", 박사학위논문, 경북대학교 토목공학과, 2004.
- (2) ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02), American Concrete Institute, 2002.
- (3) ACI Subcommittee 445-1, "Examples for the Design of Structural Concrete with Strut-and-Tie Models: SP-208", American Concrete Institute, 2002.
- (4) American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 2nd ed., Washington, D.C., 1998.
- (5) CEB, CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford Services Ltd., 1993.
- (6) Aguilar, G., Matamoros, A. B., Parra-Montesinos, G. J., and Ramirez, J. A., "Experimental Evaluation of Design Procedures for Shear Strength of Deep Reinforced Concrete Beams", ACI Structural Journal, Vol. 99, No. 4, pp. 539-548, 2002.
- (7) Ramirez, J. A., and Anderson, N. S., "Effect of the Detailing of Stirrup Reinforcement on the Ultimate Strength and Behavior of Reinforced Concrete Members Failing in Shear", Structural Engineering Report No. CE-STR-87-2, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1987.
- (8) Schlaich, J., and Weischede, D., "Detailing Reinforced Concrete Structures", Canadian Structural Concrete Conference 1981, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, pp. 171-198, 1981.
- (9) Smith, K. N., and Vantsiotis, A. S., "Shear Strength of Deep Beams," ACI Journal. Proceedings Vol. 79, No. 3, May-June 1982, pp. 201-213.