

3차원 스트럿-타이 모델을 이용한 외측 보-기둥 접합부의 강도 예측

Strength Prediction of Exterior Beam-column Joint using 3D Strut-Tie Model

윤영목* 김병헌** 이원석*** 신호정****
Yun, Young Mook Kim, Byung Hun Lee, Won Seok Shin, Hyo Jeong

ABSTRACT

The current design procedures of ACI 318-02 and CEB-FIP for the exterior beam-column joints do not provide engineers with a clear understanding of the physical behavior of the beam-column joints. In this paper, the failure strengths of the exterior beam-column joint specimens tested to failure were evaluated using the approach implementing 3-dimensional strut-tie models, design criteria of ACI 318-02, ACI-ASCE committee 352 and Park and Paulay, and softened strut-tie model approach. The analysis results obtained from the 3-dimensional strut-tie models were compared with those obtained from the other approaches, and the validity of the approach implementing 3-dimensional strut-tie models were examined.

1. 서론

최근 철근콘크리트 구조물의 고층화, 대형화로 인한 고강도 콘크리트의 사용으로 구조물의 부재단면의 치수가 줄어들고, 연성파괴를 유도하기 위한 배근규정이 강화됨에 따라 구조물의 연결부인 보-기둥 접합부의 중요성이 증가하고 있다. 특히 보-기둥 접합부에서의 큰 전단응력과 부착응력의 발생은 전단파괴와 정착파괴로 나타난다. 이러한 파괴는 구조물의 내력을 급격하게 저하시켜 취성적인 파괴를 유발시킴으로서 인명과 구조물에 치명적인 피해를 입히게 된다. 그래서 ACI(4), CEB-FIP(5) 등의 설계기준에서는 이러한 보-기둥 접합부의 취성적인 파괴를 방지하기 위해 보-기둥 접합부의 내진 설계기준을 규정하고 있다. 그러나 보-기둥 접합부에 대한 설계기준은 같은 설계조건에 대해서도 서로 다른 설계결과를 나타내고 있으며, 각각의 설계방법에 대한 차이를 감안하더라도 적지 않은 불확실성을 내포하고 있다. 따라서 본 연구에서는 3차원 스트럿-타이 모델을 이용하여 기존의 파괴실험이 수행된 외측 보-기둥 접합부 시험체의 파괴강도를 평가하고, 그 결과를 ACI 318-02, ACI-ASCE Committee 352(3), 연화 스트럿-타이 모델 방법(6), 그리고 Park & Paulay(9) 방법에 의한 평가결과와

* 정회원, 경북대학교 사회기반시스템공학과 부교수

** 정회원, 경북대학교 대학원 사회기반시스템공학과 박사

*** 정회원, 경북대학교 대학원 사회기반시스템공학과 박사수료

**** 정회원, 경북대학교 대학원 사회기반시스템공학과 박사과정

비교·분석하여 외측 보-기둥 접합부의 3차원 스트럿-타이 모델을 이용한 설계의 적합성을 평가하였다.

2. 외측 보-기둥 접합부의 강도해석

본 연구의 해석대상 구조물은 Kaku et al.⁽⁷⁾에 의해 실험·파괴된 16개의 외측 보-기둥 접합부의 시험체로, 지진하중 재하시 기둥에 작용하는 축력과 전단철근의 배근량에 따른 부재의 거동을 평가하기 위하여 제작되었다. 그림 1은 실험된 시험체의 기하학적 형상 및 배근상세를 나타내며, 표 1은 시험체의 제원 및 실험결과를 나타낸다.

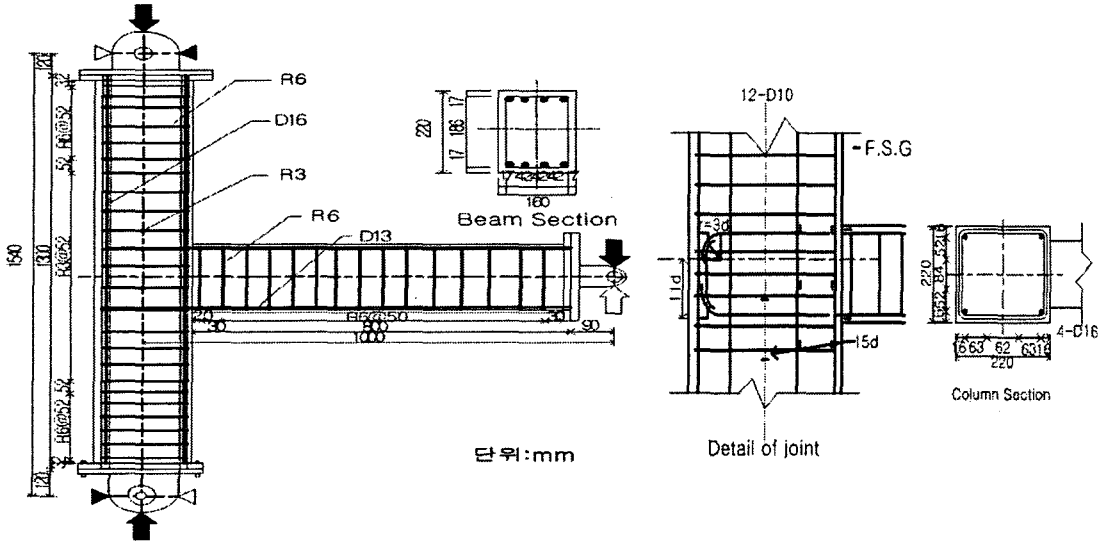


그림 1. 시험체의 기하학적 형상 및 배근상세

표 1. 시험체의 제원 및 실험결과

Specimen	f'_c (MPa)	Column			Joint		V _{jh, test} (kN)	파괴모드
		Reinforcement	A _s (mm ²)	Axial Load N/(A _g *f' _c)	Reinforcement	A _s (mm ²)		
1	31.1	4-D16	796	0.17	R6	252	249	J
2	41.7			0.10		252	244	J
3	41.7			0.00		252	212	J
4	44.7			R3	0.17	63	236	J
5	36.7				0.09	63	220	J
6	40.4				0.00	63	208	J
7	32.2	12-D10	856	0.12	R6	252	249	J
8	41.2			0.08		252	243	J
9	40.6			0.00		252	234	J
10	44.4			R3	0.17	63	241	J
11	41.9				0.08	63	229	J
12	35.1				0.00	63	207	J
13	46.4	4-D13, 8-D6	764	0.04	R6	252	207	J
14	41.0			R3	0.08	63	224	J
15	39.7				4-D13, 4-D10	793	0.08	63
16	37.4	12-D13	1524	0.00	R6	252	250	J

J: 콘크리트 압괴에 의한 접합부 파괴

ACI 318-02 설계기준은 접합부의 구속여부에 따라 결정된 최소 횡구속 철근량을 규정하여, 접합부의 구속형태와 유효단면적으로부터 접합부의 공칭전단강도를 정의한다. ACI-ASCE Committee 352 설계기준은 ACI 318-02와 동일한 방법으로 전단강도를 정의하나 접합부의 유효단면적을 다르게 정의한다. 연화 스트럿-타이 모델 방법은 접합부의 전단저항 메커니즘을 구성하여 전단강도를 결정하는 방법으로 참고문헌(6)에 자세히 소개되어 있다. Park & Paulay가 제안한 방법에 의한 접합부의 전단강도는 기둥의 압축력의 영향을 고려한 콘크리트의 전단저항강도와 철근의 전단저항강도의 합으로 정의한다.

본 연구의 3차원 스트럿-타이 모델을 이용하는 방법^(1,2)은 접합부의 3차원 무근콘크리트 유한요소 해석과 하중 전달 메커니즘인 3차원 스트럿-타이 모델의 해석을 수행하여 접합부의 전단강도를 평가한다. 외측 보-기둥 접합부의 3차원 유한요소모델 및 3차원 스트럿-타이 모델은 그림 2(a), (b)와 같다.

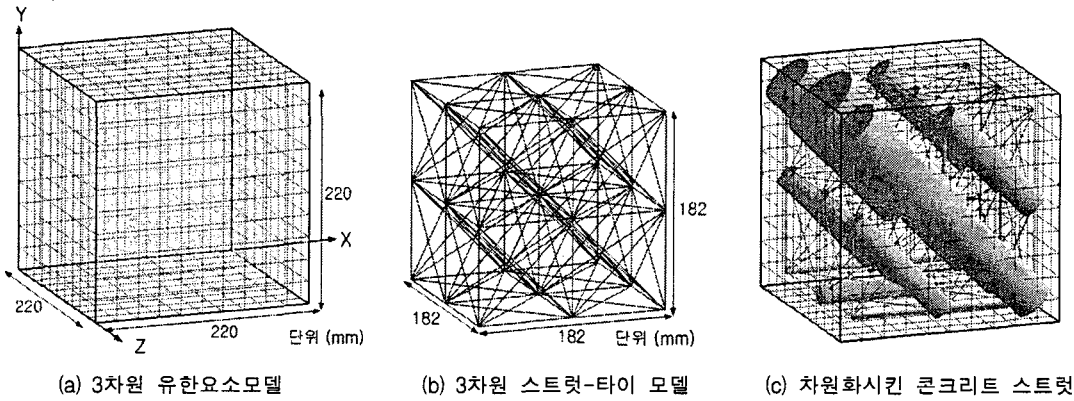


그림 2. 시험체 1의 3차원 스트럿-타이 모델 및 해석결과

표 2. 실험된 부재의 파괴강도 평가결과

시험체	파괴하중 ($V_{jh,test}$, kN)	$V_{jh,cal} / V_{jh,test}$				
		ACI 318-02	ACI-ASCE Committee 352	Softened STM Method	Park & Paulay	3D-STM (Present)
1	249	1.08	0.94	1.07	0.52	0.72
2	244	1.28	1.10	1.23	0.17	0.86
3	212	1.47	1.27	1.06	0.20	1.04
4	236	1.37	1.18	1.48	0.57	0.86
5	220	1.33	1.15	1.13	0.05	0.90
6	208	1.47	1.27	1.01	0.06	1.15
7	249	1.10	0.95	0.96	0.17	0.87
8	243	1.27	1.10	1.10	0.17	1.06
9	234	1.31	1.13	0.92	0.18	1.02
10	241	1.33	1.15	1.30	0.56	1.03
11	229	1.36	1.18	1.12	0.05	1.16
12	207	1.38	1.19	0.88	0.06	1.04
13	207	1.59	1.37	0.98	0.20	1.19
14	224	1.38	1.19	1.17	0.05	0.97
15	229	1.33	1.15	1.02	0.05	1.27
16	250	1.18	1.02	0.86	0.17	0.95
평균		1.33	1.15	1.08	0.20	1.01
표준편차		0.13	0.11	0.16	0.18	0.14

본 연구의 방법에서는 기하학적 적합조건을 만족하는 최대의 하중범위 내에서 철근이 항복하는 단계의 하중을 파괴하중으로 결정한다. 시험체 1은 실험파괴하중의 72%에서 경사스트럿의 면적이 최대허용면적에 도달하는 것으로 나타났으며, 철근의 항복은 발생하지 않았다. 그러므로 경사스트럿의 기하학적 적합조건에 의해 파괴하중이 결정되었다. 그림 2(c)는 시험체 1의 차원화시킨 콘크리트 스트럿을 보여주고 있다. 표 2는 각 방법에 의해 결정한 각 시험체의 파괴강도 평가결과를 나타내고 있다.

3. 결론

ACI 318-02 설계기준과 ACI-ASCE Committee 352 설계기준으로 평가한 외측 보-기둥 접합부의 강도는 실험파괴하중의 115~133%로, 대체적으로 과대평가되었다. 이는 반복하중으로 인한 접합부에 발생하는 균열을 무시한 것으로 보인다. 연화 스트럿 타이 모델 방법은 비교적 양호한 평가결과를 나타낸다. Park & Paulay 방법은 실험파괴강도의 20%정도에 해당하는 강도를 평가하였다. 이는 축력에 의한 기둥의 응력값이 $0.12fc'$ 이하 일 경우 콘크리트의 전단저항력을 무시하고 철근에 의해서만 저항한다는 가정 때문인 것으로 보인다. 본 연구의 3차원 스트럿-타이 모델을 이용하는 방법은 실제 실험 결과와 비교하여 양호한 결과를 나타내었으며, 따라서 이 방법은 외측 보-기둥 접합부의 극한강도평가 및 설계를 위한 적절한 방법으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 박정웅, "3차원 스트럿-타이 모델을 이용한 철근콘크리트 부재의 해석 및 설계", 박사학위논문, 경북대학교, 대구, 2003.
- (2) 김병헌, "철근 콘크리트 부재의 설계를 위한 격자 스트럿-타이 모델 방법", 박사학위논문, 경북대학교, 대구, 2004.
- (3) ACI-ASCE Committee 352, "Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures", ACI Journal, Vol. 82, No. 3, pp. 266-283, 1985.
- (4) ACI Committee 318, "Building Code requirements for Structural Concrete(ACI 318-02) and Commentary(ACI 318R-02)", American Concrete Institute, 2002.
- (5) Comite Euro-International du Beton, "CEB-FIP Model Code 1990", Thomas Telford Services Ltd., 1993.
- (6) Hwang, S. J., and Lee, H. J., "Analytical Model for Predicting Shear Strengths of Interior Reinforced Concrete Beam-Column Joints for Seismic Resistance", ACI Structural Journal, Vol. 97, No. 1, pp. 35-44, 2000.
- (7) Kaku, T, and Asakusa, H., "Ductility Estimation of Exterior Beam-Column Subassemblages in Reinforced Concrete Frames, "Design of Beam-Column Joints for Seismic Resistance, SP-123. J.O. Jirsa, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 167-185, 1991.
- (8) Meinheit, D. F., and Jirsa, J. O., "Shear Strength of R/C Beam-Column Connections", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 107, No. 11, pp. 2227-2244, 1981.
- (9) Park, R., and Paulay, T., "Reinforced Concrete Structures", A Wiley-Interscience Publication, New York, 1975.