고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 외부 보-기둥 접합부의 거동 평가

Evaluation of Structural Behavior of Reinforced Concrete Exterior Beam-Column Joints with High-Strength Concrete

이 범 식¹⁾ 김 경 덕²⁾ 김 상 우³⁾ 김 길 희⁴⁾ 이 정 윤^{5)*}
Bum-Sik Lee Kyung-Duk, Kim Sang-Woo Kim Kil-Hee Kim Jung-Yoon Lee

Abstract

This paper reports the test results of reinforced concrete exterior beam-column joints with high-strength concrete. The main parameters of eight specimens were joint failure modes, the compressive strength of concrete, and the head shapes of steel bars. All specimens were designed according to ACI 352R-02 design recommendations. Two types of failure modes were considered; J-failure and BJ-failure. The longitudinal steel bars were anchored by 90 degree standard hooks or headed reinforcement. Experimental results indicated that the current ACI design recommendation limited by the compressive strength of concrete somewhat underestimated the strength of beam-column joints with high-strength concrete. In the specimens showed joint shear failure, the strength of beam-column joints with headed bars was approximately 10 percent higher than that of joints with 90 degree standard hooks.

Keywords : High-strength concrete, Beam-column joint, Failure mode, Shear strength, Headed bar

1. 서 론

최근 건물의 초고층화, 대형화 및 복합화로 인하여 고강도 콘크리트의 사용이 증가하고 있다. 고강도 콘크리트는 고정 하중의 감소, 부재단면의 축소, 부재내력의 증대, 경제성 등의 장점이 있어 초고층 건물에 많이 사용되는 재료이며, 현재에도 현행 설계기준을 초과하는 초고강도 콘크리트의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트와 다른 특성을 지니기 때문에 고강도 콘크리트를 적용한 구조물의 역학적 특성을 규명할 필요가 있다.

모멘트 저항 골조 구조물의 보-기둥 접합부는 지진하중과 같은 반복하중이 작용할 때 휨모멘트 보다는 전단력과 부하력에 의한 지배를 받아 파괴시에 취성적인 거동을 하기 때문에 구조물의 안전성 확보를 위하여 중요한 구조 부재이다.

기둥과 접합부는 탄성 상태를 유지한 상태에서 보의 소성힌지가 형성되도록 설계된 경우 안전한 거동이 가능하지만, 그렇지 않은 경우에는 접합부에서 전단파괴가 일어나게 되면서 취성파괴가 발생하여 전체 구조물의 붕괴에 영향을 주게 된다. 따라서 설계자는 접합부의 내력을 정확하게 평가하여 구조물의 안전성을 확보할 필요가 있다.

고강도 콘크리트를 사용한 보-기둥 접합부에 관한 연구는 여러 연구자에 의하여 진행되어 왔다. Ehsani and Alameddine (1991)은 접합부내 횡보강근량과 고강도 콘크리트 (55, 76, 97MPa) 접합부의 전단강도에 대한 연구를 하였고, Sugano et al. (1991)은 고강도 재료를 사용한 보-기둥 접합부의 거동에 관한 연구를 통하여 세 가지 강도의 콘크리트 (40, 60, 80MPa)를 사용한 접합부의 거동을 비교하였다.

국내의 고강도 콘크리트 보-기둥 접합부에 대한 연구는

1) 정회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 연구위원
2) 정회원, 삼성물산 주임
3) 정회원, 공주대학교 건축공학과 연구교수
4) 정회원, 공주대학교 건축공학과 부교수
5) 정회원, 성균관대학교 건축토목공학부 교수, 교신저자

* Corresponding author : jungyoon@skku.edu

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2015년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Lee et al. (1991), Ha et al. (1992), Chang and Suh (2000), Woo (2001) 등의 여러 연구가 있었지만 대부분 70MPa 이하의 콘크리트를 사용한 연구이다. Lee (1995)는 80MPa, Kim et al. (2008)이 93~97.4MPa의 고강도 콘크리트를 사용한 보-기둥 접합부의 연구를 하였으나 여전히 실험 자료나 적용사례가 부족한 실정이다. 콘크리트 구조설계기준에 사용되고 있는 경험식이나 실험식은 주로 70MPa 이하의 콘크리트를 대상으로 하고 있으므로, 70MPa를 초과하는 고강도 콘크리트를 적용한 구조물에 현 구조설계 기준을 적용하기 위하여 고강도 콘크리트를 사용한 구조물의 거동 및 성능을 명확하게 검증하여야 할 필요가 있다.

이 연구에서는 철근콘크리트 보-기둥 외부접합부에 70MPa 이상의 고강도 콘크리트를 사용하여 고강도 콘크리트의 적용이 보-기둥 접합부의 파괴유형과 연성능력에 미치는 영향을 평가하였다. 또한, 보-기둥 접합부의 내진성능을 개선하기 위한 설계방법으로 접합부내 보 주근의 정착방법 중 시공성, 경제성이 기대되는 확대머리철근 (headed bar)을 실험변수로 추가하여 90°표준갈고리 이형철근과의 성능을 비교평가 하였다.

확대머리철근은 최근 활발히 연구되고 있는 대표적인 기계적 정착장치로, 이형철근의 단부에 사각형 또는 원형 단면의 강판을 용접 또는 볼팅하여 제작한 것이다. 접합부와 같이 배근이 집중되는 곳에서는 정착 길이나 갈고리의 제작 및 배근이 어렵고 콘크리트의 충전성도 저하될 수 있다. 접합부에 확대머리철근을 사용하면 철근의 배근 및 콘크리트 타설이 용이해지기 때문에 시공성과 경제성이 모두 우수해 질 수 있다.

Ha et al. (2007)의 연구에 따르면 보통강도 콘크리트를 사용한 외부 보-기둥 접합부 실험결과 보 주근을 90°표준 갈고리로 정착한 실험체보다 확대머리철근으로 정착한 실험체에서 변위 연성비 및 변형성능이 상대적으로 우수한 것으로 나타났고, 최종 파괴 시점에서도 상대적으로 손상을 덜 입은 상태로 파괴되었다. 본 연구에서는 보통강도 콘크리트를 사용한 외부 보-기둥 접합부와 고강도 콘크리트를 사용한 외부 보-기둥 접합부에 보 주근을 확대머리철근으로 정착하였을 때의 거동을 90°표준갈고리 이형철근과의 성능을 비교하여 고찰하였다.

2. 보-기둥 접합부 실험

보-기둥 접합부는 일반적으로 3가지 파괴모드로 구분할 수

있다. 보가 휨 항복하기 전에 접합부가 먼저 파괴되는 J파괴, 보가 항복한 이후 접합부가 파괴되는 BJ파괴, 보에서 소성힌지가 발생한 후 휨 파괴할 때 까지 접합부가 탄성 상태를 유지하는 B파괴가 있다. BJ파괴에서는 인접 보의 주인장철근이 항복하여 소성힌지가 형성된 후 증가된 소성힌지 구역의 철근변형률이 접합부를 관통하는 보 주철근의 변형률을 증가시켜 접합부의 내력이 감소하게 된다. BJ파괴와 B파괴는 강기둥 약보의 설계개념에 따른 이상적인 파괴형태로 볼 수 있다.

이 연구에서는 접합부가 파괴하는 BJ파괴형과 J파괴형에 대한 실험을 계획하였으며, 접합부 파괴형 실험체를 통하여 보의 소성힌지 발생 후 또는 순수 접합부 파괴 시의 거동을 고찰하였다.

2.1 실험체 계획

이 연구에서는 고강도 콘크리트가 적용된 보-기둥 접합부의 거동을 알아보고 확대머리철근으로 정착된 접합부의 거동을 고찰하기 위하여 총 8개의 보-기둥 접합부 실험체를 제작하였다. 실험체는 층고 3.5m, 경간 5.4m의 철근콘크리트 모멘트 저항 골조에서 외부 보-기둥 접합부를 대상으로 하되 실제 구조물의 약 75% 크기로 축소하였다.

실험체 상세와 각 실험체의 크기 및 배근상세는 Table 1과 Fig. 1에 각각 나타내었다. 실험체 기둥과 보의 총 길이는 각각 2,600mm와 2,200mm이며, 기둥 단면의 크기는 450×450mm, 보 단면의 크기는 380×500mm이다. 콘크리트 압축강도 (37.7MPa, 98.3MPa)와 보 주근 정착방법 (90°표준갈고리, 확대머리철근)을 변수로 하여 고강도 콘크리트가 사용된 보-기둥 접합부의 거동을 보통강도 콘크리트가 사용된 보-기둥 접합부와 비교하였다. 이 연구에서는 실험체 각각에 단일한 콘크리트를 적용하였으며, 확대머리철근은 접합부의 압축스트럿에 충분히 매립되어 정착되도록 계획하였다.

파괴모드별로 접합부 전단강도비 (접합부 내력과 인접 보의 항복시의 접합부 내력의 비)를 유사하게 계획하기 위하여 보와 기둥 주근의 양은 실험체별로 다르게 하였다. 동일한 파괴모드를 나타내는 BJ파괴형과 J파괴형 실험체의 전단강도비는 각각 약 1.3과 0.8로 계획하였다.

실험체 접합부의 내력은 ACI 352R-02 (ACI-ASCE Joint Committee 352, 2003)의 철근콘크리트 보-기둥 접합부 설계 방법 중 Type 2 (내진구역 설계)의 접합부 내력 평가식에 의하여 계산하였다. Table 1의 콘크리트 압축강도와 보 주철근

Table 1 Properties of specimens

Specimens	f_{ck} (MPa)	Beams					Columns				V_j / V_{jy}
		Tension rebars	f_{by} (MPa)	Stirrups	Span (mm)	$b \times h$ (mm)	Longi. rebars	Hoops	Height (mm)	$b \times h$ (mm)	
BJ-N-MS	37.7	10-D16	491	D10@100	2,200	380×500	4-D25	D10@90	2,600	450×450	1.35
BJ-N-HB	37.7	10-D16	491				4-D25				1.30
BJ-H-MS	98.3	8-D22	494				4-D29				1.26
BJ-H-HB	98.8	8-D22	494				4-D29				1.23
J-N-MS	37.7	8-D22	494	D10@50	2,200	380×500	4-D32	D10@50	2,600	450×450	0.84
J-N-HB	37.7	8-D22	494				4-D32				0.84
J-H-MS	98.3	6-D32	521				4-D32				0.74
J-H-HB	98.8	6-D32	521				4-D32				0.70

BJ: BJ-failure, J: J-failure, N: normal-strength concrete, H: high-strength concrete, MS: standard hooks, HB: Headed bars, f_{ck} : compressive strength of concrete, f_{by} : yield strength of longitudinal bars in the beam, f_{cy} : yield strength of longitudinal bars in the column, V_j : shear strength of the joint (ACI type2), V_{jy} : shear strength of the joint at yielding of the beam, and the yield strength of transverse reinforcement (D10) = 329.9 MPa

(a) MS series specimens

(b) HB series specimens

(c) BJ-N-MS

(d) BJ-N-HB

(e) BJ-H-MS

(f) BJ-H-HB

(g) J-N-MS

(h) J-N-HB

(i) J-H-MS

(j) J-H-HB

Fig. 1 Details of specimens

Fig. 2 Position of strain gauge

Fig. 3 Test setup of specimen

항복강도는 실제 재료시험 결과이며, 이에 따른 접합부 전단 강도비는 계획한 값과 다소 차이가 발생하였다.

접합부와 인접한 보와 기둥의 주철근 변형률을 측정하기 위하여 접합부 면에서 30mm 떨어진 위치에 Fig. 3과 같이 변형률 게이지를 설치하였다. 접합부 내에서 보 주철근과 기둥 횡보강근의 변형률을 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 변형률 게이지를 부착하였다. 또한 보의 전단철근 항복 유무를 판별하기 위하여 접합부면에 인접한 보의 전단보강근에 변형률 게이지를 부착하였다.

2.2 실험 방법

실험체 세팅현황 및 실험전경을 Fig. 3과 Fig. 4에 각각 나타내었다. 기둥 양 단부에 힌지를 두어 공칭 축 내력의 10%로 일정한 축하중을 가력하였다. 횡하중은 변위제어방식으로 보의 단부에 가력하였으며, 항복변위 δ_y 의 절반인 $0.5\delta_y$ 를 한 사이클로 하여 최대하중의 75%까지 내력이 감소될 때까지 각 하중을 2회 반복가력 하였다.

Fig. 4 View of test setup

접합부의 변위를 측정하기 위하여 보 단부 가력위치의 측면에 2개의 변위계 (LVDT)를 설치하였다. 접합부의 전단변형률과 부재 회전 및 보 소성힌지 구역의 변형을 측정하기 위하여 접합부 구역에 수직, 수평, 대각으로 6개의 LVDT를 설치하였다. 접합부 면에서 $d/2$ 와 d (단면의 유효높이) 위치의 보 양 측면과 접합부에서 $d/2$ 위치의 기둥 상하부에 각각 4개와 2개의 LVDT를 설치하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 하중-변위 관계

각 실험체의 하중-변위 곡선은 Fig. 5에 나타내었다. 또한 각 실험체의 정 (+), 부 (-)방향 항복하중 (P_y), 항복변위 (Δ_y), 최대하중 (P_p), 최대하중 시점의 변위 (Δ_{max}), 극한하중 (P_u)과 극한변위 (Δ_u), 변위연성비 (μ_u)를 Table 2에 나타내었다. Fig. 5에서 고강도 콘크리트가 적용된 실험체는 보통강도 콘크리트가 적용된 실험체와 유사한 거동을 보였다. BJ파괴 실험체의 경우 최대하중 도달 이후 내력저하가 서서히 나타났으며, J파괴 실험체는 급격한 내력저하를 보여 각 파괴모드 별 거동을 명확히 보여주고 있다.

실험체의 최대하중은 사용된 콘크리트 강도 차이에 의하여 큰 차이를 보이며, 동일한 콘크리트 강도에 대하여 BJ파괴 실험체보다 J파괴 실험체가 높게 나타났다. 고강도 콘크리트를 적용한 J파괴 실험체인 J-H-MS는 3사이클에서 최대내력에 도달한 이후 J-N-MS 실험체와 같이 급격한 내력의 감소를 보이는 J파괴 모드를 보였다. Table 2에서 BJ-H-MS 실험

(a) BJ-N-MS

(b) BJ-N-HB

(c) BJ-H-MS

(d) BJ-H-HB

(e) J-N-MS

(f) J-N-HB

(g) J-H-MS

(h) J-H-HB

Fig. 5 Load versus displacement relationships of tested specimens

Table 2 Experimental results of tested specimens

Specimens	P_y (kN)		Δ_y (mm)		P_{max} (kN)		Δ_{max} (mm)		P_u (kN) ($0.75P_{max}$)		Δ_u (mm)		μ_u (Δ_u/Δ_y)		μ'_u (Δ_u/Δ_{max})		Failure modes
	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	
BJ-N-MS	130.3	121.8	15.6	12.2	228.0	196.0	47.3	35.6	171.0	147.0	76.1	65.0	4.9	5.3	1.61	1.83	BJ
BJ-N-HB	199.6	268.9	27.1	24.7	258.7	212.3	57.7	38.8	194.0	159.2	92.0	88.8	3.4	3.6	1.59	2.29	BJ
BJ-H-MS	280.9	205.8	28.7	18.5	386.5	268.5	67.1	44.8	289.9	201.4	100.0	81.0	3.5	4.4	1.49	1.81	BJ
BJ-H-HB	207.1	243.7	19.9	22.3	353.7	335.8	57.7	41.2	265.3	251.9	104.2	103.7	5.2	4.7	1.81	2.52	BJ
J-N-MS	198.0	-	29.4	-	252.5	301.5	46.6	47.6	189.1	226.1	88.6	92.2	3.0	-	1.90	1.94	J
J-N-HB	265.3	228.3	34.6	29.6	322.8	287.8	64.7	45.9	242.1	215.9	93.2	91.7	2.7	3.1	1.44	2.00	J
J-H-MS	324.4	-	30.3	-	476.0	389.4	80.6	54.3	357.0	292.1	116.0	102.8	3.8	-	1.44	1.89	J
J-H-HB	375.3	286.8	33.2	23.5	517.1	483.8	61.1	64.7	387.8	362.9	102.5	97.6	3.1	4.2	1.68	1.51	J

험체의 변위연성비는 보통강도 콘크리트가 적용된 BJ-N-MS 실험체에 대한 값보다는 다소 작게 나타났다. 하지만, 정·부 방향 변위연성비 모두 4에 근접하거나 더 높아 연성적 거동을 나타내었다.

BJ-H-HB 실험체는 다른 실험체와 비교하여 편칭이 적고 변위연성비는 크게 나타났다. BJ-H-HB 실험체의 경우 다른 실험체와 비교하여 보의 휨 균열이 많이 발생하였으며 균열 폭도 커 보의 소성변형으로 인한 에너지 소산이 다른 실험체에 비하여 컸던 것으로 판단된다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이, 접합부의 전단파괴로 인하여 모든 실험체는 이력곡선의 에너지 소산이 작은 편칭거동을 나타내었다. 확대머리 이형철근으로 정착된 실험체는 90°표준갈고리 이형철근으로 정착된 실험체에 비하여 편칭 효과가 다소 적은 경향을 나타내었다. 실험체의 최대강도는 확대머리철근을 사용한 실험체에서 큰 경향을 나타내었다. 보 주근을 확대머리 이형철근으로 정착한 J파괴 실험체 J-N-HB와 J-H-HB는 90°표준갈고리 이형철근으로 정착한 실험체와 비교하여 최대강도가 각각 7.1%와 8.6% 크게 나타났다.

최대 하중 시점의 변위 Δ_{max} 는 보통강도 콘크리트를 사용한 실험체의 경우 90°표준갈고리 이형철근으로 정착된 실험체에 비하여 확대머리철근으로 정착된 실험체가 크게 나타났다. 반면 고강도 콘크리트를 사용한 실험체의 경우 확대머리철근으로 정착된 실험체의 Δ_{max} 는 더 작게 나타났다. 이러한 결과로부터 보 주철근을 확대머리철근으로 정착하였을 경우 접합부 강도 측면에서 효과가 있을 것으로 판단되며 고강도 콘크리트에도 적용이 가능하리라 판단된다.

접합부 전단파괴를 명확히 알아보기 위하여 각 실험체 접합부에 설치한 LVDT로 접합부의 대각변형률 분포를 분석하여 Fig. 6에 나타내었다. BJ파괴 실험체와 J파괴 실험체 모두 정·부 모멘트 작용 시 변형률의 차이가 0.04~0.06으

로 크다는 것을 확인할 수 있다.

BJ파괴인 보통강도 콘크리트를 사용한 BJ-N-MS 실험체보다 고강도 콘크리트를 사용한 BJ-H-MS 실험체의 접합부 내 대각변형률이 높았다. 대각변형률의 값은 Attaalla (2004)와 Hwang and Lee (2000)의 논문에서 사용된 접합부 구역의 콘크리트 스트럿 압축강도 연화효과와 밀접한 관계가 있으며, 대각 변형률 값이 상대적으로 큰 고강도 콘크리트를 사용한 실험체가 보통강도 콘크리트를 사용한 실험체에 비하여 연성계수가 더 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

이상의 실험결과를 종합해보면 고강도 콘크리트를 사용한 외부 보-기둥 접합부는 보통강도 콘크리트를 사용한 실험체와 유사한 거동을 나타내었고 실험체 모두 유도한 파괴모드를 잘 나타내었다. BJ-H-MS 실험체의 변위연성비는 보통강도 콘크리트를 사용한 실험체에 비하여 다소 작게 나왔으나 정·부 방향 모두 4에 근접하는 것으로 보아 비교적 연성 거동을 한 것으로 판단된다. BJ-H-MS 실험체는 보통강도 실험체에 비하여 접합부 대각변형률이 크게 나타났으나 변위연성비는 작게 나타났다. 또한 고강도 콘크리트를 적용한 J파괴 실험체의 경우 동일한 변위연성비에서 보통강도 콘크리트를 적용한 실험체보다 심한 파괴가 관찰되었고, 변형 또한 크게 나타났다. 확대머리철근을 사용한 실험체는 90°표준갈고리 이형철근을 사용한 실험체보다 큰 내력을 가지는 것으로 실험결과 확인되었다.

3.2 균열 및 파괴 상향

실험체의 최종파괴 양상을 나타낸 Fig. 7에서 보는 바와 같이, 모든 실험체는 설계에서 유도한 파괴 형태인 접합부 내 대각방향으로 최종 전단파괴가 발생하였다. 실험 진행 과정에서 각 가력 단계별로 파괴모드와 콘크리트 압축강도 차

(a) BJ-N-MS

(b) BJ-N-HB

(c) BJ-H-MS

(d) BJ-H-HB

(e) J-N-MS

(f) J-N-HB

(g) J-H-MS

(h) J-H-HB

Fig. 6 Diagonal strain versus member rotation relationships of tested specimens

(a) BJ-N-MS

(b) BJ-N-HB

(c) BJ-H-MS

(d) BJ-H-HB

(e) J-N-MS

(f) J-N-HB

(g) J-H-MS

(h) J-H-HB

Fig. 7 Crack patterns of specimens after failure

이에 의하여 균열진행상황이나 균열 폭에서 다소 차이가 발생하였다.

3.2.1 BJ-N-MS 실험체

BJ-N-MS 실험체는 1사이클 ($\Delta=14.1\text{mm}$)에서 보의 초기 휨균열과 접합부 대각균열이 발생하였고 이후 균열 개수가 증가하였다. 3사이클 ($\Delta=35.5\text{mm}$)에서 접합부 대각 균열 폭이 최대 2mm로 커졌으며 접합부 부근 기둥에서 수평균열이 발생하였다. 4사이클 ($\Delta=47.4\text{mm}$) 이후에는 접합부 대각 균열 폭이 약 4mm 정도로 증가하였으며 보-기둥 접합면에서 압괴가 발생하였다. 5사이클 ($\Delta=59.2\text{mm}$)에서 압괴로 인한 피복콘크리트가 박리되었고, 접합부 대각 균열이 급격히 확장되었다. 6사이클 ($\Delta=71.1\text{mm}$)에서는 균열 폭이 약 10mm까지 증가하였으며 접합부의 피복콘크리트는 탈락하였다. 실험은 7사이클 ($\Delta=83\text{mm}$) 정 (+)방향으로 1회 가력 후 종료하였다.

3.2.2 BJ-N-HB 실험체

BJ-N-HB 실험체는 보와 접합부에 균열이 발생 후 3사이클 ($\Delta=58\text{mm}$)에서 최대하중에 도달하였다. 3사이클에서 접합부 대각 균열의 폭이 약 4mm 정도로 증가하였으며 보와 기둥 접합면에서 압괴가 발생하였다. 3사이클 두 번째 정 (+) 방향 가력 시 접합부 대각 균열 폭이 약 6mm로 커졌다. 4사이클 ($\Delta=77.4\text{mm}$)에서 파괴가 심화되었고 보의 휨 균열 폭이 약 2mm로 증가 하였다. 5사이클 ($\Delta=96.8\text{mm}$)에서는 정 (+)방향과 부 (-)방향으로 1회 반복 가력 후 실험이 종료되었다.

3.2.3 BJ-H-MS 실험체

BJ-H-MS 실험체는 보와 접합부 균열 발생 후 2사이클 ($\Delta=44.5\text{mm}$) 두 번째 정 (+)방향 가력 시 접합부 외부 기둥에서 수평균열이 발생하였다. 2사이클 부 (-)방향으로 가력하던 중 압축측 접합면에서 콘크리트 압괴가 발생하였다. 3사이클 ($\Delta=66.7\text{mm}$) 두 번째 정 (+)방향 가력 후에는 보 접합부 균열 폭이 약 10mm로 커져 보 뒹침이 발생하였다. 4사이클 ($\Delta=89\text{mm}$)에서 기둥 접합부 외측 피복콘크리트가 박리되었으며, 부 (-)방향 가력 후 실험을 종료하였다.

3.2.4 BJ-H-HB 실험체

BJ-H-HB 실험체는 보와 접합부 균열 발생 후 2사이클 ($\Delta=41.4\text{mm}$)에서 기둥 균열이 발생하였다. 3사이클 ($\Delta=62.1\text{mm}$)

에서 보의 휨 균열 폭이 약 2mm로 증가하였고 접합부 대각 균열 폭이 약 3mm로 증가하였다. 4사이클 ($\Delta=82.8\text{mm}$)에서 접합부 대각 균열의 연장으로 기둥 길이방향 균열이 진행되었다. 4사이클 두 번째 부 (-)방향 가력 시 접합부 대각 균열은 약 5mm로 증가하였다. 5사이클 2회 반복 가력 후 실험을 종료하였다. BJ-H-HB 실험체는 다른 실험체들과 비교하여 보의 휨 균열이 두드러지게 나타났다.

3.2.5 J-N-MS 실험체

J-N-MS 실험체는 2사이클 ($\Delta=46.9\text{mm}$)에서 접합부 압괴에 의한 파괴가 시작되었다. 2사이클 두 번째 가력 중 접합부 균열이 4.5mm까지 증가하였으며 기둥면에 수평균열이 발생하였다. 3사이클 ($\Delta=70\text{mm}$)에서 접합부 전단균열 폭이 약 8mm까지 커졌고 보 접합모서리의 콘크리트 압괴로 피복콘크리트가 떨어져 나갔다. 4사이클 ($\Delta=94\text{mm}$)에서는 접합부 피복콘크리트가 탈락되었으며 최대하중의 75% 이하로 내력이 떨어져 실험을 종료하였다.

3.2.6 J-N-HB 실험체

J-N-HB 실험체는 1사이클 ($\Delta=21.2\text{mm}$)에서 접합부 미세 균열이 발생하였다. 2사이클 ($\Delta=46.0\text{mm}$)에서 접합부 균열의 개수가 증가하였고 정 (+)방향 두 번째 가력 시 접합부 콘크리트의 압괴가 발생하였다. 3사이클 ($\Delta=69.0\text{mm}$)에서 콘크리트 압괴가 발생하여 피복콘크리트가 박리되었다. 부 (-) 방향 두 번째 가력 시 접합부 균열폭이 약 5mm로 증가하였다. 4사이클 ($\Delta=92.0\text{mm}$)에서 접합부에서 기둥 길이방향으로 균열이 크게 발생하였고 접합부 균열폭은 약 10mm로 커졌다. 4사이클 2회 반복가력 후 실험을 종료하였다.

3.2.7 J-H-MS 실험체

J-H-MS 실험체는 최초 균열이 발생한 이후 균열 개수와 폭이 증가하다가 2사이클 ($\Delta=53.7\text{mm}$)에서 기둥에 수평균열이 발생하였다. 3사이클 ($\Delta=80.6\text{mm}$)에서 대각선 균열 폭이 6mm까지 증가하였고 접합부 압축측 콘크리트 압괴로 피복콘크리트가 박리되었다. 4사이클 ($\Delta=107.4\text{mm}$)에서 접합부 다른 쪽 기둥의 피복콘크리트가 탈락되었고 접합부 균열 확장으로 심한 파괴가 관찰되었다. 4사이클 두 번째 가력 시 접합부 파열로 철근이 보였고 최대하중의 75% 이하로 떨어졌다. 5사이클 ($\Delta=134.3\text{mm}$) 정 (+)방향 1회 가력 후 실험을 종료하였다.

3.2.8 J-H-HB 실험체

J-H-HB 실험체는 보와 접합부 균열 발생 후 2사이클 ($\Delta=43.0\text{mm}$)까지 보 휨균열 및 접합부 대각 균열이 증가하였다. 3사이클 ($\Delta=64.5\text{mm}$)에서 접합부 모서리 부분의 콘크리트가 압괴 파괴 되었고 접합부 균열 폭이 약 4mm로 증가하였다. 4사이클 ($\Delta=86.0\text{mm}$)에서 접합부 대각 균열의 확장으로 기둥 콘크리트 파단과 압축 측 보 접합면 콘크리트 탈락이 심하게 관찰되었다. 5사이클 ($\Delta=107.5\text{mm}$)에서 콘크리트가 박리되었으며, 5사이클 2회 반복 가력 후 실험을 종료하였다.

3.3 접합부의 전단강도

ACI 352R-02 (ACI-ASCE Joint Committee 352, 2003) 기준식에서는 접합부의 전단강도를 콘크리트 압축스트레치의 작용을 고려하여 평가하고 있다. 이 연구에서는 ACI 352R-02의 Type 2 (내진구역 설계)에 대한 기준식을 사용하여 실험체 접합부의 전단강도를 예측하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$V_j = 0.083 \gamma \sqrt{f_{ck}} b_j h_c \quad (1)$$

여기서 V_j 는 접합부의 전단내력, γ 는 접합부의 형태 및 내진구역에 관한 계수로 외부 접합부인 경우 비내진구역 (Type 1)은 15 내진구역 (Type 2)은 12, b_j 는 접합부의 유효폭, h_c 는 전단이 고려되는 방향의 기둥 단면의 깊이이다.

계산된 접합부의 전단강도와 실험결과를 나타낸 Table 3에 나타낸 바와 같이, ACI 기준식은 BJ파괴 실험체보다 J파괴 실험체에서 실험결과를 더 안전측으로 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 BJ파괴 실험체의 경우 보가 항복한 이후 접합부의 내력이 감소하기 때문이다.

BJ파괴 실험체에서는 확대머리철근의 사용이 ACI 기준식의 예측결과에 미치는 영향은 크지 않았다. 반면에 J파괴 실험체에서는 확대머리철근을 사용하는 경우 실험결과와 해석 결과 사이의 오차가 약 10% 정도 증가하였다. 이는 확대머리철근이 J파괴 실험체의 접합부 전단강도를 보다 효과적으로 증가시켰기 때문으로 판단된다.

J파괴 실험체에서 ACI 기준식은 콘크리트 압축강도가 고강도화 됨에 따라 정착의 종류에 관계없이 접합부의 전단강도 실험결과를 약 20% 더 과소평가 하였다. 이는 Ehsani et al. (1991)의 연구결과에서 보통강도 콘크리트보다 고강도 콘크리트를 적용한 실험체가 ACI 기준식과 잘 맞지 않음을

Table 3 Comparison of experimental and analytical results

Specimens	Shear strength of beam-column joint (kN)		$\frac{V_{j,exp.}}{V_{j,ACI}}$
	$V_{j,exp.}^*$	$V_{j,ACI}$	
BJ-N-MS	1053.9	1142.1	0.92
BJ-N-HB	1195.8	1142.1	1.05
BJ-H-MS	1948.3	1844.2	1.06
BJ-H-HB	1783.0	1844.2	0.97
J-N-MS	1519.8	1142.1	1.33
J-N-HB	1627.2	1142.1	1.42
J-H-MS	2783.5	1844.2	1.51
J-H-HB	3023.9	1844.2	1.64

* $V_{j,exp.} = T_b - V_c$, T_b =tensile force acting on the beam at joint face, and V_c =shear force acting on the column

보고한 내용과 유사한 결과이다.

4. 결 론

고강도 콘크리트가 사용된 보-기둥 접합부의 거동을 알아보기 위하여 콘크리트 압축강도와 주철근 정착 방법을 실험 변수로 철근콘크리트 보-기둥 외부접합부 실험을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 보 주철근을 확대머리철근으로 정착한 실험체는 90° 표준갈고리 이형철근으로 정착한 실험체와 비교하여 보통강도 콘크리트를 사용한 실험체는 약 7%, 고강도 콘크리트를 사용한 실험체는 약 8.5% 정도 최대강도가 높게 나타났다. 고강도 콘크리트를 사용한 접합부에 보 주철근을 확대머리철근으로 정착시켜도 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.
- (2) 고강도 콘크리트를 사용한 BJ파괴 실험체인 BJ-H-MS는 보통강도 콘크리트를 사용한 실험체에 비하여 접합부 대각변형률이 크게 나타났고, 변위연성비는 작게 나타났다. 하지만 정·부 방향 변위연성비는 모두 4에 근접하거나 더 높아 연성적 거동을 나타내었다. 고강도 콘크리트를 사용한 J파괴 실험체인 J-H-MS의 경우 동일한 변위연성비에서 보통강도 콘크리트를 적용한 실험체 보다 심한 파괴가 관찰되었고, 변형 또한 크게 나타났다.
- (3) ACI 352R-02의 접합부 전단강도 식은 BJ 파괴보다 J 파괴 실험체의 실험결과를 더 안전측으로 예측하였다. 특히 J파괴 실험체에서 ACI 기준식은 콘크리트 압축

강도가 고강도화 됨에 따라 실험결과를 약 20% 더 과소평가하였음은 물론, 표준갈고리 정착보다 확대머리 철근에 의한 정착에서 약 10% 정도 실험결과를 과소평가 하였다. 따라서 접합부 파괴형태와 철근 정착 및 콘크리트 압축강도를 고려한 보-기둥 접합부의 전단강도 예측 식에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부 05건설핵심기술연구개발사업 (과제 번호 : 05건설핵심 D11)의 지원 하에 수행된 ‘고강도 콘크리트를 이용한 초고층 공동주택 적용 방안’ 연구의 일부로 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한 이 논문은 2013년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 연구 (2013006697)이며, 2009년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업 (2012-0006682)으로 수행된 연구입니다. 이에 감사드립니다.

References

1. ACI-ASCE Joint Committee 352 (2003), Recommendations for Design of Beam-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures, American Concrete Institute, Farmington hills, Michigan, 2003.
2. Attaala, S. A. (2004), General Analytical Model for Nominal Shear Stress of Type 2 Normal and High-Strength Concrete Beam-Column Joints, *ACI Structural Journal*, 101(101-S08), 65-75.
3. Chang, K. K., and Suh, D. W. (2000), Shear Strength of Beam-Column Joints Using High-Strength Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 12(2), 53-62.
4. Ehsani, M. R., and Alameddine, F. (1991), Design Recommendations

- for Type 2 High-Strength Reinforced Concrete Connections, *ACI Structural Journal*, 88(3), 277-291.
5. Ha, G. J., Kim, J. K., and Lan, C. (1992), Improvement of Earthquake-Resistant Performance of R/C Beam-Column Joint Constructed with High-Strength Concrete Subjected to Cyclic Loading, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 4(1), 135-145.
6. Ha, S. S., Choi, D. U., and Lee, C. H. (2007), Application of Headed Bars with Small Head in Exterior Beam-Column Joints Subjected to Reversed Cyclic Loads, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 19(4), 411-420.
7. Hwang, S. J., and Lee, H. J. (2000), Analytical Model for Predicting Shear Strengths of Interior Reinforced Concrete Beam-Column joints for Seismic Resistance, *ACI Structural Journal*, 97(1), 35-44.
8. Kim, Y. I., Kim, M. S., Lee, Y. K., and Han, H. S. (2008), Experimental Study on the Shear Strength of Ultra High-Strength Concrete Exterior Beam-Column Joints under Cyclic Loads, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure and Construction*, 24(3), 61-70.
9. Lee, K. S., Oh, J. G., Shin, S. W., and Choi, M. S. (1991), The Investigation of the Effects on Bent-Up Bars within Beam-Column Joint Core with High-Strength Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 3(2), 123-132.
10. Lee, S. S. (1995), Experimental Study on the Behavior of High-Strength Concrete Interior Beam-Column Joints, Master's thesis, Chungnam National University.
11. Sugano, S., Nagashima, T., Kimura, H., and Ichikawa, A. (1991), Behavior of Beam-Column Joints Using High-Strength Materials, *ACI Special Publication*, SP-123, 359-378.
12. Woo, J. R. (2001), A Study on the Hysteretic Behavior and Nonlinear Analysis of RC Interior Beam-Column Joints Using High-Strength Concrete, Doctoral thesis, Gyeongsang National University, 44-87.

Received : 04/11/2014

Revised : 06/03/2014

Accepted : 06/09/2014

요 지

이 논문은 고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 외부 보-기둥 접합부의 실험결과를 보고한 것이다. 실험체의 주요 실험변수는 접합부 파괴모드, 콘크리트 압축강도, 철근의 정착 방법이다. 모든 실험체는 ACI 352R-02 기준에 바탕을 두어 J파괴와 BJ파괴가 되도록 계획하였다. 주철근은 90도 표준갈고리로 하거나 확대머리철근으로 하였다. 실험결과는 콘크리트 압축강도에 제한되는 현행 ACI 설계 기준식이 고강도 콘크리트를 사용한 보-기둥 접합부의 강도를 다소 과소평가하고 있음을 보여준다. 또한 확대머리철근을 가진 J파괴형 보-기둥 접합부의 강도는 표준갈고리를 가진 접합부보다 약 10% 이상 높게 평가되었다.

핵심 용어 : 고강도 콘크리트, 보-기둥 접합부, 파괴모드, 전단강도, 확대머리철근