Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 19, No. 4, pp. 411~420, August, 2007

반복하중을 받는 외부 보-기둥 접합부에서 작은 헤드를 사용한 Headed Bar 적용

하상수[1)*] · 최동욱[2)] · 이창호[2)]

[1)]한경대학교 건설공학연구소 [2)]한경대학교 건축학부

Application of Headed Bars with Small Head in Exterior Beam-Column Joints Subjected to Reversed Cyclic Loads

Sang-Su Ha[1)*], Dong-Uk Choi[2)], and Chang-Ho Lee[2)]

[1)]Center for Construction Engineering Research, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea
[2)]Dept. of Architectural Engineering, Hankyong National University, Anseong 456-240, Korea

ABSTRACT The applicability of headed bars in exterior beam-column joints under reversed cyclic loading was investigated. A total of ten pullout tests were first performed to examine pullout behavior of headed bars subjected to monotonic and cyclic loading with test variables such as connection type between head and bar stem (weld or no weld), loading methods (monotonic or cyclic loading), and head shape (small or large circular head and square head). Two full-scale beam-column joint tests were then performed to compare the structural behavior of exterior beam-column joints constructed using two different reinforcement details: i.e. 90° standard hooks and headed bars. Both joints were designed following the recommendations of ACI-ASCE Committee 352 for Type 2 performance: *i.e. the connection is required to dissipate energy through reversals of deformation into inelastic range.* The pullout test results revealed that welded head to the stem did not necessarily result in increased pullout strength when compared to non-welded head. Relatively large circular head resulted in higher peak load than smaller circular and square head. Both beam-column joints with conventional 90° hooks and headed bars behaved similarly in terms of crack development, hysteresis curves, and peak strengths. The joint using the headed bars showed better overall structural performance in terms of ductility, deformation capacity, and energy dissipation. These experimental results demonstrate that the headed bars using relatively small head can be properly designed for use in external beam-column joint.

Keywords : headed bar, standard hook, exterior beam-column joint, embedment length, head cross-sectional area

1. 서 론

철근콘크리트 구조물에서 철근의 직선 정착길이를 충분히 확보할 수 없는 경우에는 표준갈고리를 사용할 수 있다[1,2]. 그러나 철근이 종종 과밀하게 배치되는 외부 보-기둥 접합부에 표준갈고리를 사용하는 경우, 접합부의 철근 배근 및 콘크리트 타설 등 시공 상 어려움이 많이 발생하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 대안으로 headed bar를 사용할 수 있다. Headed bar를 사용하면 철근의 배근이 간편해지고, 따라서 콘크리트 타설이 보다 용이하므로 시공성 향상 및 공기 단축에 따른 경제성 증가를 기대할 수 있다.

Headed bar는 보통 원형 또는 사각형 단면으로 일정한 두께를 갖는 강재 헤드와 이형철근 (보강근)으로 구성되고, 정착길이는 헤드 형상 및 면적 등에 의하여 영향을 받는다[3].

Headed bar는 일종의 기계적 정착장치이므로 보강근 항복강도의 125% 이상 충분한 인장 저항을 할 수 있는 묻힘길이를 확보하여야 한다[1,2]. Headed bar를 충분히 깊이 묻은 경우, 즉 충분한 묻힘길이 (Fig. 1의 h_{ef})가 확보된 상태에서는 보강근 항복강도 이상의 응력을 발휘할 수 있고, 따라서 보강근을 인장파괴시킬 수 있다. 반대로 묻힘길이가 충분하지 못하면 Fig. 1의 갑작스런 콘크리트 파괴 (concrete breakout)가 발생하게 된다. 1990년대 이후 미국, 일본, 캐나다 및 독일 등 유럽에서의 연구를 바탕으로 headed bar의 기계적 물성, 인장 실험 등에 관한 요구 조건이 활발히 제시되고 있지만, 구체적인 구조설계지침의 제정은 아직 미흡한 실정이다[4,5]. 또한, 건축 구조물에서 headed bar를 효과적으로 적용할 수 있는 부재인 보-기둥 접합부에서 headed bar에 대한 설계지침이 마련되어 있지 않아 현장 적용에 어려움이 있다

*Corresponding author E-mail : drhaha@naver.com
Received September 13, 2006, Accepted May 14, 2007
©2007 by Korea Concrete Institute

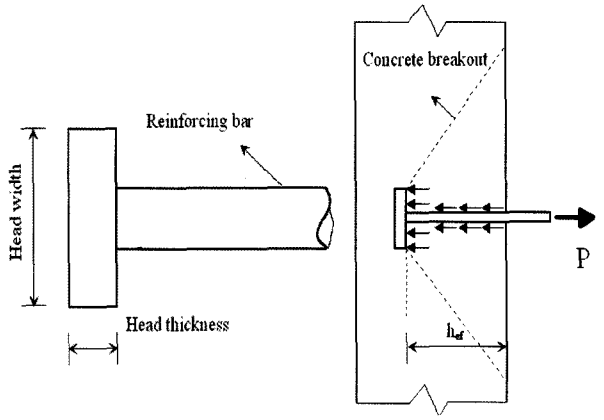


Fig. 1 Geometric shape of a headed bar

(참고로 미국 등에 관련 설계지침이 부분적으로 제시되어 있지만, 포괄적인 지침이 아니며 아직 일반적으로 받아들여지고 있지는 않은 것으로 사료된다)[6].

본 연구의 목적은 외부 보-기둥 접합부에 headed bar를 적용할 수 있는 실용적인 작은 헤드를 설계하고, 이 헤드를 사용한 headed bar의 정착길이를 결정하고, 이를 이용한 외부 보-기둥 접합부의 구조 실험을 통하여 headed bar의 현장 적용성을 평가하는 것이다. 본고는 이에 관련한 세 개의 논문 중 마지막으로서 첫 두 개의 논문은 작은 헤드의 설계 및 이를 사용한 headed bar의 적정한 묻힘길이를 결정하기 위한 인발 실험의 과정 및 결과를 주로 다루었고[7,8], 이를 근거로 본 연구의 외부 보-기둥 접합부 설계에 적용하였다.

2. 선행 연구

2.1 Headed bar 제작 관련 기준

Headed bar가 인장을 받는 경우, Fig. 1과 같이 헤드의 콘크리트에 대한 지압과 함께 콘크리트에 묻혀있는 철근과 콘크리트 사이의 부착도 동시에 가력에 저항하게 된다. Headed bar에 관한 초기의 연구는 주로 헤드의 지압 저항만을 고려하여 충분히 큰 크기의 헤드를 요구하였다. Wallace 등은 헤드의 지압 면적 (지압 면적 = 헤드 단면적 - 보강근 단면적)이 보강근 단면적의 4배 이상이어야 한다고 주장하였고[9], ASTM A 970-98에서는 보강근 단면적 9~10배 수준의 헤드 면적을 요구하였다[4]. 그러나 headed bar의 정착 성능에 관한 최근의 연구 결과는 인장을 받는 headed bar에서 헤드의 지압 저항뿐만이 아니라, 보강근과 콘크리트 사이의 부착 저항도 상당히 중요한 것으로 평가하고 있다[10]. 따라서 최근 개정된 ASTM A 970-04에서는 헤드 크기에 관한 요구 사항이 삭제되고, headed bar의 기계적 물성, 인장시험 등에 관한 조건만이 요구되고 있다[5]. 또한 헤드와 보강근 사이의 용접에 의한 headed bar의 제작만을 시방한 1998년의 ASTM과 비교하여 2004년 ASTM에는 헤드와 보강근 사이의 볼팅에 의한 조립 및 제작도 가능하도록 변경되었다.

2.2 Headed bar의 정착길이에 관한 연구

Choi 등[7]은 보강근 단면적 약 3배의 지압 면적을 갖는 작은 사각형 헤드를 설계하고, 이를 사용한 headed bar의 적정 묻힘길이를 결정하기 위하여 총 48개의 인발실험을 수행하였다. 인발실험의 결과, headed bar와 표준갈고리를 각각 사용한 실험체에서 강성, 최대 하중 등 하중-변위 곡선을 포함한 표준갈고리와 headed bar의 인발거동은 서로 유사하였다. 콘크리트는 압축강도 27 MPa의 보통 강도 콘크리트를 사용하고, 묻힘길이를 보강근 직경의 10배로 한 경우 인발강도는 두 가지 철근 (headed bar 및 표준갈고리)에서 모두 보강근 항복강도의 120%를 상회하였다. 이 실험의 결과로부터 작은 헤드와 보통강도 콘크리트를 사용하는 경우, 묻힘길이 10 d_b (d_b는 보강근 공칭직경) 이상에서 정착이 대체적으로 만족되는 것을 알 수 있었다.

외부 보-기둥 접합부에서는 철근이 종종 과밀하게 배근되고 따라서 철근이 서로 인접하여 설치된다. 이 경우 서로 인접한 headed bar로 인하여 각 headed bar의 인발강도는 감소된다. Choi[8]는 서로 인접하여 설치된 다수의 headed bar에 대한 총 32개의 인발실험을 수행하였다. 실험의 결과 인접하여 설치된 headed bar의 인발강도가 단일 headed bar에 비교하여 감소하지만, 보조철근을 사용하면 인발강도가 증가하는 것을 확인하였다. Choi는 이 연구의 결과로 다수의 인접한 headed bar를 사용하는 경우 보통강도 콘크리트에서 적정한 묻힘길이는 보강근 직경의 13배 이상이고, 콘크리트 파괴 등 취성적인 파괴형태를 방지하기 위하여 보조철근의 사용이 필요하고, 보조철근은 headed bar와 평행한 방향으로 체적비 0.6% 이상 및 headed bar와 직각 방향으로 1% 이상이 적정하다고 주장하였다. 이것을 도식적으로 표현하면 Fig. 2와 같다. 즉, Fig. 2에서 외부 보-기둥 접합부에 설치된 보 상부근 (headed bar)의 정착을 만족시키기 위한 조건은 (1) 묻힘길이 (헤드 지압면과 기둥 측면 간 거리) 13d_b 이상, (2) headed bar와 직각 방향 철근 (이 경우 기둥 주철근) 1% 이상, 그리고 (3) headed bar와 평행한 철근 (이 경우 띠철근) 0.6% 이상이다. 또한 띠철근에 의한 구속이 효

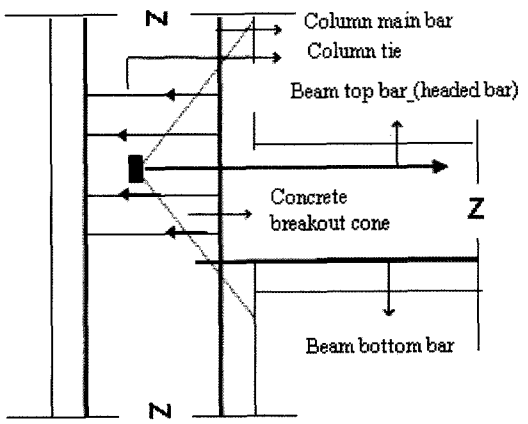


Fig. 2 Headed bars used in exterior beam-column joint

과적이기 위하여 띠철근은 headed bar 중심으로부터 $0.45h_{ef}$ 이내의 거리에 위치하여야 한다[8].

3. 실험 계획 및 방법

3.1 Headed bar 제작

본 연구에서 사용된 headed bar는 모두 D19 이형철근으로서 Table 1 및 Fig. 3과 같이 세 가지 작은 헤드 (사각형 단면, 비교적 큰 원형 단면 및 작은 원형 단면)가 사용되었다. 모든 헤드는 보강근 단부에 나사선을 가공(길이 = 헤드 두께, 헤드 재질은 SS400 사용)하고 헤드와 보강근을 볼팅하는 방법으로 체결되었다.

3.2 인발실험

본 연구에서 묻힘길이 $10d_b$로 설치된 총 10개의 단일 headed bar에 대한 인발실험이 수행되었다. 전술한 바와 같이 선행 연구로부터 보통강도 콘크리트에 단일 headed bar를 묻힘길이 $10d_b$로 설치하면 정착이 만족된다는 결론을 얻었으나, 본 인발실험의 목적은 동일한 묻힘길이에 대한 보다 다양한 실험변수를 검증하기 위한 것이었다. 실험변수는 (1) 볼팅된 헤드가 보강근과 용접된 경우 및 용접되지 않은 경우, (2) 가력 방법 (단조하중 및 반복하중), (3) 헤드 형상 (Table 1의 세 가지 다른 헤드)이다.

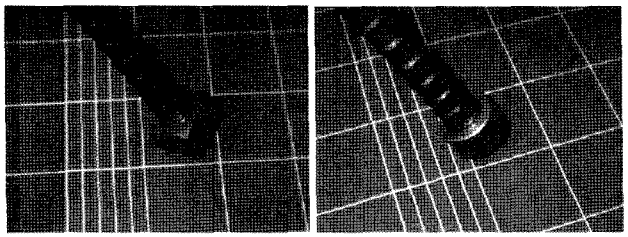
외부 보-기둥 접합부가 반복하중을 받게 되면 접합부 내에 정착되어 있는 headed bar 역시 반복하중을 받게 되므로 이때 단순 볼팅된 헤드와 보강근 사이의 일체 거동 여부를 파악하기 위하여 헤드와 보강근간 용접 유무를 실험변수로 하였다. 또한 단조 가력 대비 반복 가력은 headed bar의 반복되는 인장하중에 대한 거동을 검증하기 위한 것이었다. 반복하중에 대한 인발실험의 변수를 Table 2에 나타내었다.

Table 2와 같이 headed bar의 묻힘길이는 190 mm($10d_b$)로 모두 동일하고, 각각의 실험체에 대해 단조하중(monotonic load, M) 또는 반복하중 (cyclic load, C)을 가력하였다. 반복하중은 재료 시험으로부터 결정된 보강근의 항복강도 (f_y = 465 MPa) 값을 기준으로 $0.25f_y$, $0.5f_y$, $0.75f_y$, $1.0f_y$, $1.25f_y$에 해당되는 인장하중을 각 3회씩 반복하여 가력하였다. 반복 가력 종료 후 다시 단조하중을 가력하여 headed bar의 인장파괴 혹은 콘크리트 파괴가 발생할 때까지 실험하여 하중-변위 곡선 및 최대 강도를 기록하였다. Fig. 4에 실험 setup을 나타내었다. Fig. 4(a)는 콘크리트 블록 (700×700×700)에 묻힌 headed bar의 가력 상황으로서 실험에 사용된 강재, 하중 측정용 로드셀 및 500 kN 중공 유압실린더를 나타내고 있다. Fig. 4(b)와 같이 콘크리트에 묻힌 헤드의 미끄러짐을 정확히 측정하기 위하여 헤드 밑면에 강접된 ϕ5 mm 강봉을 콘크리트 블록 내부 (헤드 하부)에 설치된 PVC 튜브를 통하여 아래쪽으로 연장하였고 강봉의 단부에 LVDT를 설치하였다[11]. PC와 연결된 data logger를 이용하여 힘 및 변위를 초당 1세트 이상 기록하였다.

Table 1 Geometry of head

Index	d_o or b (mm)	d_i or h (mm)	thk. (mm)	A_b (mm^2)	A_{net} (mm^2)	A_{net}/A_b
SQ	32.0	32.0	19.0	284	792	2.79
CL	45.0	17.2	19.0	284	1,358	4.48
CS	35.0	17.2	19.0	284	730	2.57

Note: SQ = square head, CL = large circular head, CS = small circular head, d_o, d_i = outside and inside diameter of a circular head, respectively, b, h = width and height of a square head, thk. = head thickness, A_b = cross-sectional area of a reinforcing bar, A_{net} = net bearing area of a head



(a) Square head: SQ (b) Small circular head: SC

Fig. 3 Head shape

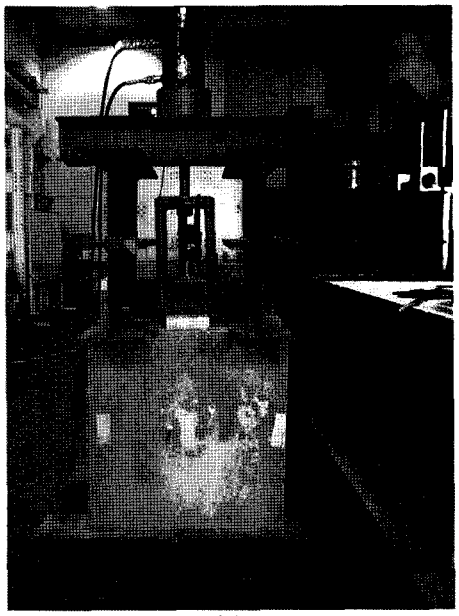
3.3 외부 보-기둥 접합부 실험

외부 보-기둥 접합부에 대한 headed bar의 현장 적용성을 평가하기 위하여 90° 표준갈고리 및 headed bar를 사용하여 설계한 실물 크기 접합부 실험체를 각각 1개씩 제작하여 구조적 성능 실험을 실시하였다. 접합부의 설계는 ACI 352 위원회의 Type 2 접합부 (심각한 소성영역의 변형에 저항할 수 있는 구조적 성능) 설계지침을 따라서 수행하였고, 묻힘길이, 헤드 면적 등 headed bar에 대한 설계는 선행 연구의 결과를 토대로 계획하였다[7,8,12].

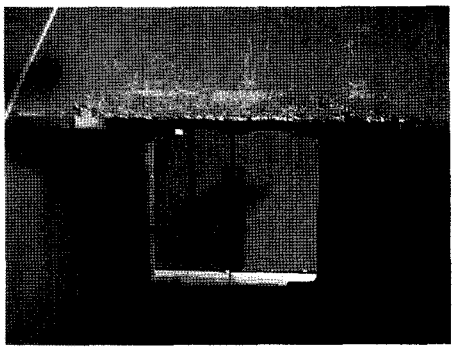
Table 2 Pullout test: summary of test variables

Index	Head type	Welding	f_{ck} (MPa)	h_{ef} (mm)	Load type
CSN-M	CS	No	35.1	190	M
CSW-M	CS	Yes	35.1	190	M
CLN-M	CL	No	35.1	190	M
CLW-M	CL	Yes	35.1	190	M
CSN-C	CS	No	35.1	190	C
CSW-C	CS	Yes	35.1	190	C
CLN-C	CL	No	35.1	190	C
CLW-C	CL	Yes	35.1	190	C
SQN-M	SQ	No	35.1	190	M
SQW-M	SQ	Yes	35.1	190	M

Note: CS = small circular head, CL = large circular head, SQ = square head, welding = welding between head and bar stem, M or C = monotonic or cyclic load



(a)



(b)

Fig. 4 Pullout test setup

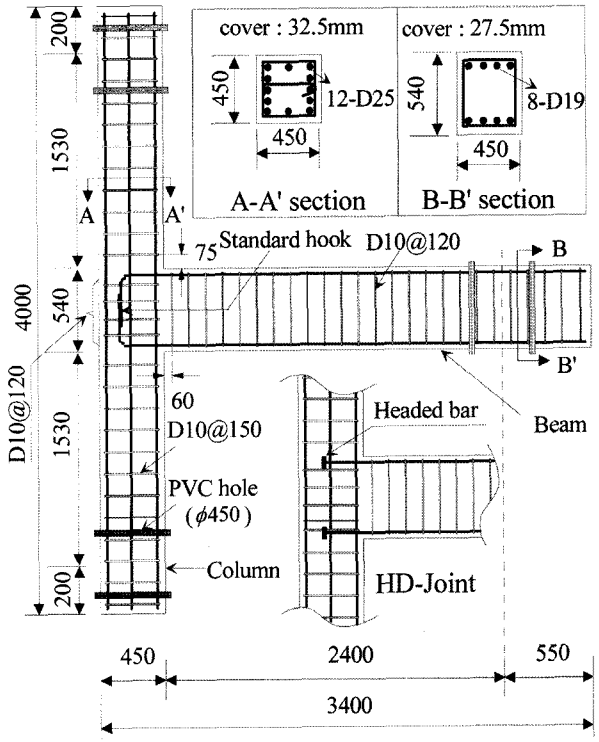


Fig. 5 Beam-column joint details (unit = mm)

접합부 실험체 제작 후 ACI 352 위원회의 접합부 설계 지침이 다소 수정되었으므로 개정된 설계지침에 대하여 설계를 재확인하였고, 이 결과 접합부가 현행 지침을 만족하는 것을 확인하였다[6]. 두 개의 실물 크기 외부 보-기둥 접합부 실험체는 90° 표준갈고리와 headed bar를 각각 사용한 접합부의 구조적 성능을 직접 비교하기 위하여 접합부 내 보 주철근 (90° 표준갈고리 또는 headed bar)을 제외하고 모두 동일하게 제작하였다. Fig. 5에 90° 표준갈고리를 사용한 실험체 (SH joint)와 headed bar를 사용한 실험체(HD joint)의 형상 및 배근 상세를 나타내었다. Fig. 5는 층고 3.6 m, 경간 5.25 m의 철근콘크리트 모멘트 저항 골조에서 외부 보-기둥 접합부에 해당하는 상하부 기둥의 각 1/2, 보 1/2 및 접합부의 조합이다. Table 3에 보, 기둥 및 접합부의 배근 상세를 요약하여 나타내었다.

Fig. 5 및 Table 3에 나타낸 것과 같이 기둥 단면은 450 mm × 450 mm, 보 단면은 450 mm × 540 mm ($b \times h$)이다. 기둥 주철근은 12-D25 (주철근비, ρ_{st} = 3.0%), 보의 상하부 주철근은 각각 4-D19 (표준갈고리 또는 headed bar)로 배근하였다. 접합부는 ACI 352에 따라서 강기둥 약보 ($M_{n.c} > 1.25\, M_{n.b}$)로 계획하였다[6]. 접합부 내 보의 상하부 주철근 사이에 ACI 352의 Type 2 접합부에 대한 다음 식 (1)의 요구 사항에 따라서 띠철근 (4-D10)을 수평 방향으로 배치 (접합부 내 A_{sh} = 856 mm^2)하였다.

$$A_{sh} = 0.3\frac{s_h h'' f_{ck}}{f_{yh}}\left(\frac{A_g}{A_c} - 1\right) \geq 0.09\frac{s_h h'' f_{ck}}{f_{yh}} \qquad (1)$$

식 (1)에서, s_h = 띠철근 배치 간격 (mm), h'' = 띠철근으로 구성된 기둥 코어의 폭 (mm), f_{yh} = 띠철근 항복강도 (MPa), A_g = 기둥 전체 단면적 (mm^2) 및 A_c = 기둥 코어 단면적 (mm^2)이다. S_h는 또한 주근 직경의 6배 이하 및 150 mm 이하이어야 한다[6].

현행 구조설계기준에 의하면 접합부에서 표준갈고리의 정착길이는 14.9 d_b이다[1,2]. 따라서 Fig. 5 및 Table 3에서 표준갈고리의 묻힘길이는 15 d_b (285 mm)이고, headed bar 역시 동일한 15 d_b의 묻힘길이를 적용하였다. 사용된 헤드는 원형 단면의 작은 헤드 (Table 1 및 Fig. 3의 CS)이었다. 헤드와 보강근은 용접하지 않은 상태로 나사선

Table 3 Beam-column joint test specimen details

No.	Index	Column			Beam				Panel zone		
		Section ($b \times h$)	Main bar	Column ties	Section ($b \times d$)	Top bar	Bot. bar	Stirrups	Ties	Anchor'g	h_{ef} (mm)
1	SH	450×450	12-D25	D10@150	450x490	4-D19	4-D19	D10@120	D10@120	Hook	285
2	HD	450×450	12-D25	D10@150	450x490	4-D19	D19	D10@120	D10@120	Head	285

으로 볼팅하였다. 접합부 실험체에 사용한 콘크리트의 실험 시 압축강도는 29.1 MPa이었다. 실험체에 사용된 철근의 물성을 파악하기 위하여 인장 시험편을 각각 3개씩 제작하여 인장시험을 실시하였으며, 인장시험 결과는 Table 4와 같다. Table 4에서 기둥 주철근의 항복강도는 설계 시 가정과 유사 (SD400)하지만, 보 주철근은 headed bar와 갈고리 철근 모두 설계 시 가정한 항복강도 (400 MPa)를 각각 20.3% 및 15.0% 초과하는 것으로 나타났다.

Fig. 6에 나타낸 것과 같이 반력상 (reaction floor) 상부에 설치한 지지대 위에 외부 보-기둥 접합부를 90° 회전시킨 후 기둥 양단을 회전단으로 구속하고, 반력벽 (reaction wall)으로부터 1,000 kN 액츄에이터를 보 단부에 회전단으로 구속한 후에 반복하중을 수평 방향으로 가력하였다. 반복하중은 가력점의 수평 방향 변위를 보 길이 (2,400 mm)로 나눈 부재각 각각 +/- 0.5%, 0.8%, 1.2%, 2%, 3%, 4%로 하고, 변위 제어 방식으로 각 사이클을 3회씩 반복하여 가력하였다[13]. 하중의 가력에 따른 보의 변위, 접합부의 전단변형 등을 측정하기 위하여 총 11개의 LVDT를 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 설치하였다.

Fig. 7에 배근이 완료된 후 접합부의 상세를 나타내었다. Fig. 7에서 headed bar의 사용으로 인하여 접합부의 복잡한 철근이 잘 정리되어 있음을 확인할 수 있다.

4. 인발실험의 결과 및 분석

인발실험의 결과 중에서 단조하중을 가력한 실험체의 하중-변위 곡선을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)의 세 가지 실험의 결과는 헤드와 보강근을 용접하지 않고 단순

Table 4 Properties of materials used in beam-column joint test

Reinforcement	f_y (MPa)	e_y ($\times 10^{-6}$)	f_{ult} (MPa)	E_s (GPa)	e_{ult} (%)
D10	570	2,790	697	204	12.8
D19 (head)	481	2,410	575	200	14.8
D19 (hook)	460	2,300	580	200	13.9
D25	407	2,000	602	204	14.3

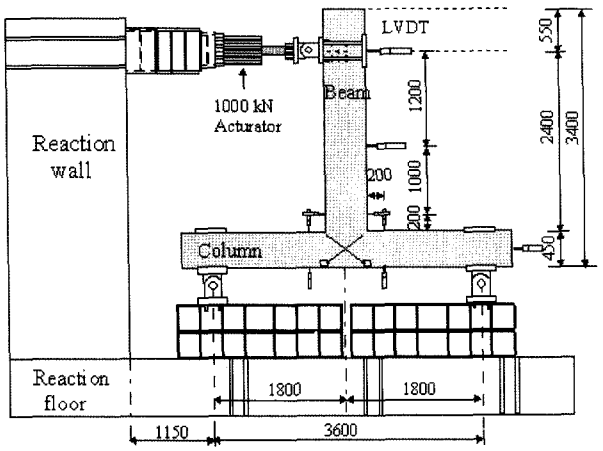


Fig. 6 Beam-column joint test setup (unit : mm)

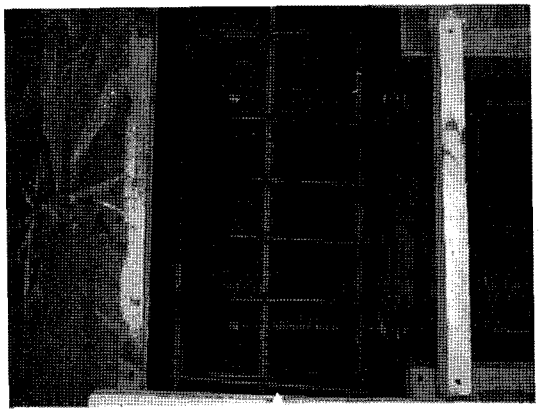
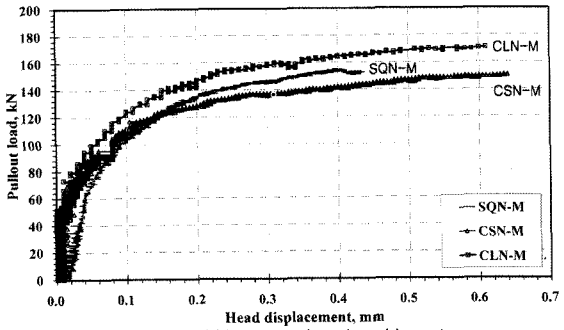
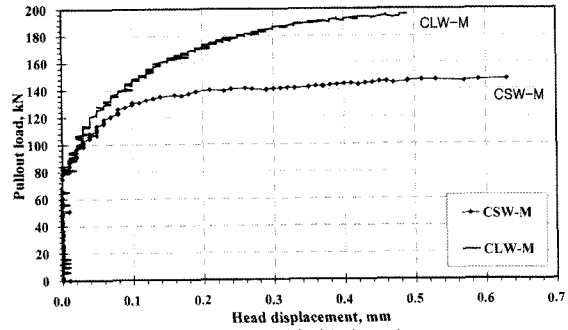


Fig. 7 Close-up view of a joint using headed bars



(a) No weld between head and bar stem



(b) Head welded to bar stem

Fig. 8 Load-displ. plot of p/o test specimens: Monotonic load

히 볼팅으로 체결한 경우를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)에서 헤드 지압 면적이 작은 사각형 헤드 (SQ) 및 원형 헤드 (CS) 실험체보다 비교적 지압면적이 큰 원형 헤드 (CL)를 사용한 경우 실험체의 성능이 우수하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 하중의 증가에 의해 헤드의 콘크리트에 대한 지압이 증가함에 따라 헤드의 지압면적이 상대적으로 작은 실험체에서 국부적인 콘크리트 압괴가 진행된 것으로 판단된다. Table 5에 인발실험의 결과를 요약하여 나타내었다. Table 5에 나타낸 것과 같이 세 가지 실험체 모두 최대 강도 (σ_{max})는 보강근 항복강도 (f_y = 465 MPa)의 113%를 상회하였다.

Fig. 8(b)에 단조하중을 사용 가력된 실험체 중에서 CL 헤드와 CS 헤드의 하중-변위 곡선을 비교하여 나타내었다. Fig. 8(b)에서 보강근과 용접된 CL 헤드의 하중-변위 곡선은 Fig. 8(a)에 나타난 동일한 헤드에 비하여 우수한 거동을 보이고 있으나, CS 헤드의 경우는 헤드가 보강근에 용접된 경우와 그렇지 않은 경우 거의 차이가 없음을

Table 5 Summary of pullout (p/o) test results

Index	Head type	Welding	Loading type	σ_{max} (MPa)	σ_{max}/f_y (%)
CSN-M	CS	No	Mono.	525	113
CSW-M	CS	Yes	Mono.	514	111
CLN-M	CL	No	Mono.	596	128
CLW-M	CL	Yes	Mono.	683	147
SQN-M	SQ	No	Mono.	569	118
SQW-M	SQ	Yes	Mono.	530	114
CSN-C	CS	No	Cyclic	502	108
CSW-C	CS	Yes	Cyclic	495	106
CLN-C	CL	No	Cyclic	630	135
CLW-C	CL	Yes	Cyclic	624	134

Note: σ_{max} = max. stress developed in the bar stem, f_y = 465 MPa

알 수 있다. Fig. 8의 실험 결과로부터 지압면적/보강근 단면적 비가 상대적으로 작은 헤드 (SQ : 2.79, CS : 2.57)는 면적비가 4.5 이상인 헤드 (CL)에 비하여 헤드 부근의 지압 파괴가 상대적으로 일찍 진행된다는 것과 헤드와 보강근 간 용접은 하중-변위 거동에 도움을 줄 수도 있지만 큰 영향은 미치지 않는다는 결론을 도출하였다.

인발실험의 결과 중에서 반복하중을 가력한 실험체의 하중-변위 곡선을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9 (a)와 (b)는 모두 작은 원형 헤드 (CS)를 사용한 경우이고, Fig. 9(c)는 비교적 큰 원형 헤드 (CL)를 사용한 경우이다. 실험의 결과 인발 실험체는 $0.75f_y$ 이상의 하중이 반복 가력되는 모든 경우에 헤드 부근의 국부적인 지압 파괴를 나타내었다. Fig. 9 (a)와 (b) 하중-변위 곡선의 비교 결과, 헤드와 보강근을 용접한 경우와 용접하지 않은 경우 초기 강성 및 최대 강도는 모두 유사하게 나타났다. 그러나 비교적 큰 헤드의 경우는 단조하중을 가력한 Fig. 8과 마찬가지로 작은 헤드 보다 큰 최대 하중을 보였다. 이상의 인발실험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 헤드와 보강근의 용접 유무는 headed bar의 하중-변위 거동에 큰 영향을 미치지 않았다.
(2) 비교적 큰 원형 헤드는 작은 원형 헤드 보다 약 23% 이상 더 큰 최대 강도를 나타내었다.
(3) 최대 강도는 모든 헤드에서 철근의 항복강도를 상회하였고, 단조하중의 경우 $1.11f_y$, 반복하중의 경우 $1.06f_y$ 이상이었다.
(4) 반복 가력된 모든 헤드에서 응력이 $0.75f_y$를 상회하는 경우, 헤드 부근에서 국부적인 콘크리트의 압괴 현상을 보였다.

5. 외부 보-기둥 접합부의 실험 결과

5.1 실험체 균열 진전 및 파괴 형상

외부 보-기둥 접합부 실험체에서 헤드는 작은 원형 헤드 (CS)가 사용되었다. 인발실험의 결과, 헤드 지압면적/보강근 단면적 비가 큰 원형 헤드 (CL)의 거동이 더 우수하였다. 그러나, CS 헤드 (헤드 지압 면적/보강근 단면적 비 =2.57)의 경우에도 $0.5f_y$ 이하의 사용 하중 상태에서는 반복하중에 의한 손상을 보이지 않았고, 또한 본 접합부 실험은 headed bar의 현장 적용을 위하여 가능한 한 작은 헤드를 실험하고자 하였으므로 접합부 실험에는 작은 원형 헤드를 사용하는 것으로 결정하였다. Fig. 10에 실험 중인 외부 보-기둥 접합부, Fig. 11에 변위 제어 과정을 나타내었다.

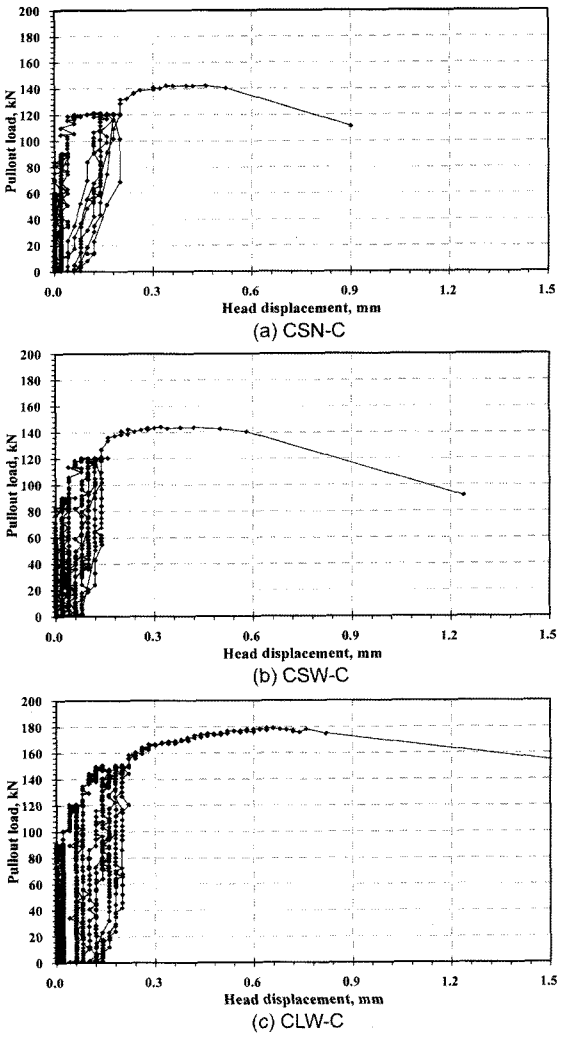


Fig. 9 Load-displ. plot of p/o test specimens: cyclic load

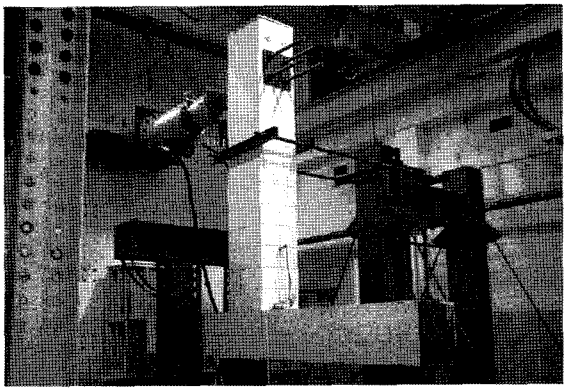


Fig. 10 Beam-column joint test under progress

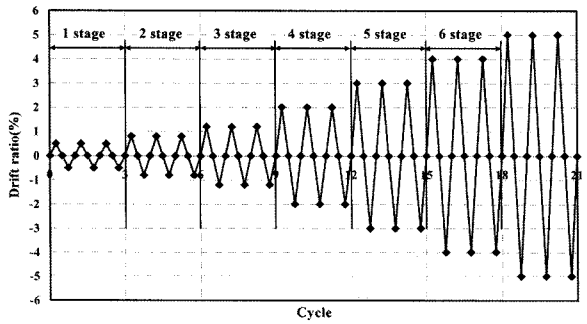


Fig. 11 Beam-column joint test schematics: test sequence of displacement controlled cycles

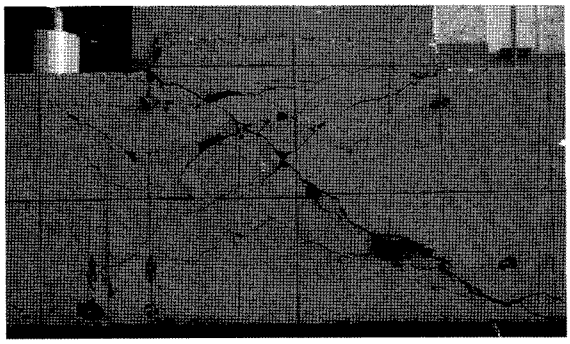
반복하중의 가력에 따라 부재각 0.5%에서 기둥면으로부터 약 400 mm 떨어진 보의 인장 영역에서 초기 휨 균열이 발생하였다. 하중이 반복되면서 추가 균열이 계속 발생하였다. 1단계 (부재각 +/– 0.5%를 3회 반복 가력, Fig. 11의 1_{st} stage)에서 발생한 균열은 모두 휨 균열이었으며, 평균 균열 간격은 약 200 mm로 보 전체 길이의 약 50% (1,200 mm) 범위까지 발생하였다. 2 단계 (부재각 +/– 0.8%를 3회 반복, Fig. 11의 2_{nd} stage)에서 균열은 보 및 접합부에서 모두 발생하였다. 보의 휨 균열은 1단계에서 발생된 균열이 진전, 또는 새로운 균열이 추가로 발생하였고, 접합부에서도 대각 방향으로 균열이 발생하기 시작하였다. 3단계로부터 최종 파괴 시까지의 균열은 대부분 접합부에서 발생하였고, 보의 휨 균열은 새로 추가되거나 크게 진전되지 않았다. 하중이 증가함에 따라 접합부에서의 균열 폭이 증가하고 새로운 균열이 추가적으로 발생하였으며, 6 단계 (부재각 +/- 4%)에서 접합부의 콘크리트 피복이 박리되고 하중이 저하되면서 최종적으로 파괴되었다. 초기 균열, 균열의 진행 방향, 균열의 발생 범위 등은 두 개의 실험체 모두 거의 비슷한 양상으로 진행되었다. 접합부 실험 시 하중에 따른 균열의 발생 상황을 Table 6에 정리하여 나타내었다.

5.2 하중-변위 곡선

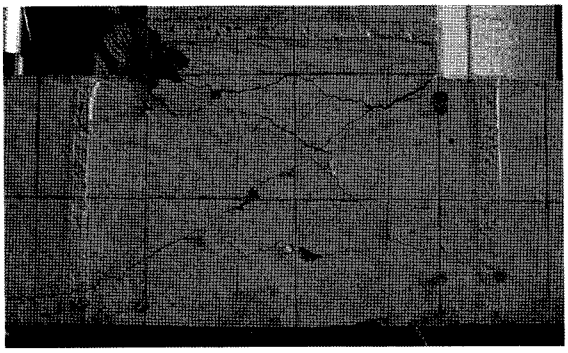
90° 표준갈고리 및 headed bar를 사용한 보-기둥 접합부 실험체의 하중-변위 곡선을 각각 Figs. 13과 14, 항복하중 (P_y), 최대 하중 (P_u), 파괴하중(P^*_u) 및 이에 상응하는 변위 (δ_y, δ_u, δ^*_u)를 Table 7에 나타내었다. Figs. 13 및 14에서 실험체의 최대 강도는 정부 가력에서 모두 SH joint (+116 kN, –128 kN)와 HD joint (+111 kN, –127 kN)가 유사하였다. Fig. 13에서 SH joint는 정부 가력에 대하여 각각 4단계의 첫 번째 cycle 및 5단계 첫 번째

Table 6 Type crack patterns developed during test

Stage	1	2	3~6
Drift ratio (cycles)	0.5% (1-3)	0.8% (4-6)	1.2, 2, 3, 4% (7-18)
Type of cracks	Flexural	Flexural diagonal	Diagonal
Position of cracks	Beam	Beam panel zone	Panel zone



(a) SH Joint (standard hook)



(b) HD Joint (headed bar)

Fig. 12 Crack patterns at failure

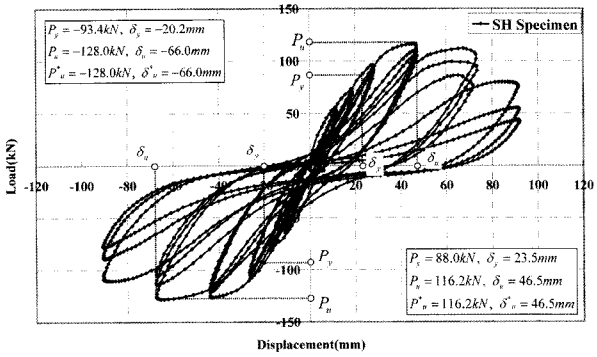


Fig. 13 Load vs. displacement: SH joint

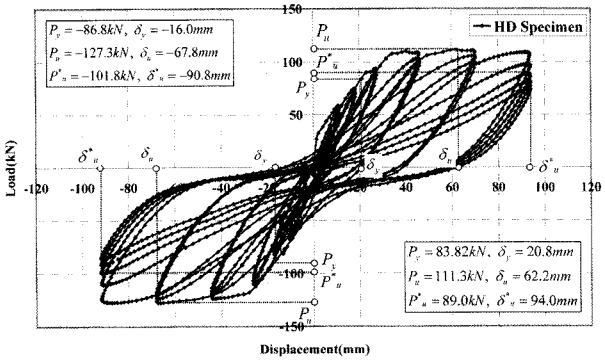


Fig. 14 Load vs. displacement: HD joint

cycle에서 최대 하중에 도달하였고, 5단계 반복 가력 중에 급격한 내력 저하가 발생하였으며, 6단계 3회 반복 가력 중에 최종 파괴되었다. Fig. 14에서 HD joint는 정부 가력에 대하여 모두 5단계의 첫번째 cycle에서 최대 강도에 도달하였고, 5단계의 반복 가력 중 심각한 내력

Table 7 Summary of beam-column joint test results

No.	Specimen		P_y (kN)	δ_y (mm)	P_u (kN)	δ_u (mm)	P^*_u (kN)	δ^*_u (mm)	μ	θ_u (%)	Prediction			Test	V_{test} / V_u
											$M_{pr,c}$ (kN·m)	$M_{pr,b}$ (kN·m)	V_u (kN)	V_{test} (kN)	
1	SH	+	88.0	23.5	116	46.5	116	46.5	1.98	1.94	412	270	499	584	1.17
		-	93.4	20.2	128	66.0	128	66.0	3.27	2.75				643	1.29
2	HD	+	83.8	20.8	111	62.2	89	94.0	2.99	3.92				559	1.20
		-	86.8	16.0	127	67.8	102	90.8	4.24	3.78				640	1.28

P_{cr} : initial cracking load, P_y : yield load, δ_y : displacement at yield, P_u : max. load, δ_u : displacement corresponding to P_u, P^*_u : failure load, d^*_u : displacement at failure, μ : displacement ductility ratio (δ_u / δ_y), θ_u : deformation capacity ($d^* / 2{,}400$), $M_{pr,c}$ or $M_{pr,b} = A_s\,(a)\,f_y\,*(d - a/2)$, $V_u = A_s\,(a)\,f_y - V_{col}$

저하 현상이 나타나지 않았고, 6단계의 5회 반복 가력 중에 최종 파괴되었다. 그러므로 최대 강도 도달 후 90° 표준갈고리로 정착된 SH joint는 비교적 급격한 내력 저하가 발생된 반면, HD joint는 상대적으로 내력 저하 없이 연성적인 거동을 보여준 것으로 판단된다.

Table 7에서 항복하중 (P_y)은 Figs. 15 및 16에 나타난 바와 같이 보의 상부 주철근에 부착된 변형률 게이지가 최초로 항복변형률에 도달되었을 때의 하중을 항복하중으로 정의하였고, 파괴하중 (P^*_u)은 [참고문헌 13]의 정의에 따라서 최대 강도 이후 거동에서 가력이 최대 강도의 75%에 도달하는 마지막 cycle의 하중으로 결정하였다.

보-기둥 접합부의 실험 결과를 요약한 Table 7에서 두 개 접합부 실험체의 항복하중, 최대 하중 및 이에 상응하는 변위는 유사한 값을 보이고 있다. 그러나 Figs. 13 및 14에서 최대 하중에 도달한 후 파괴하중 및 변위, Table 7에서 변위 연성비 (μ) 및 변형 성능 (θ_u) 등은 모두 headed bar를 사용한 실험체가 상대적으로 우수하였다.

Figs. 15 및 16은 SH 실험체와 HD 실험체에서 하중 단계별 보 상부철근의 변형률을 각각 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 철근이 부재각 1.2%인 7_{th} cycle (3_{rd} stage)에서 최초로 항복하기 시작하였으며, 철근 항복 후 최종 파괴 시까지 지속적으로 항복변형률 이상의 값을 보여주고 있다. 이는 접합부 최종 파괴 시 보의 주철근이 항복강도 이상의 휨 내력을 발휘하고 있음을 의미한다. Fig. 17에 나타낸 누적 에너지소산 면적은 하중-변위 곡선에 의해 둘러싸인 면적으로 평가되어지며, 반복하중 하에서 부재가 경험한 손상 정도를 나타내는데 중요한 지표가 된다. Fig. 17과 같이 headed bar로 정착한 HD joint의 누적 에너지소산 면적이 SH joint보다 상대적으로 우수하게 나타났다.

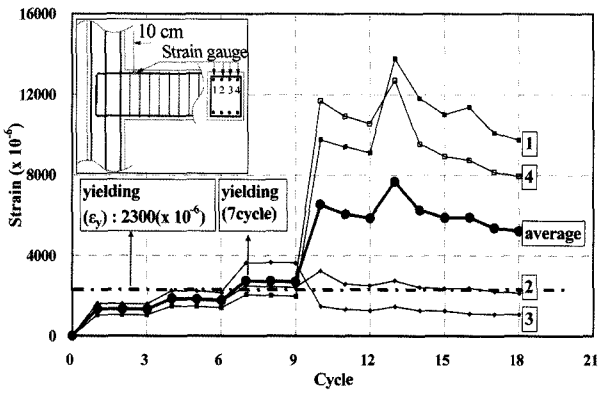


Fig. 15 Beam main bar strain: SH joint

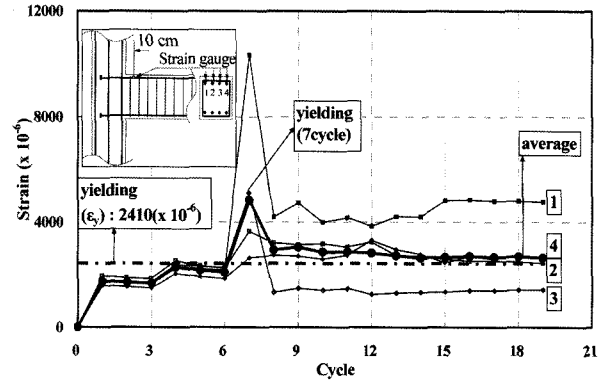


Fig. 16 Beam main bar strain: HD joint

5.3 접합부 강도 및 실험 결과 비교

Fig. 18에 보의 휨 내력에 의해 발생한 접합부의 소요 전단강도 (V_u)를 나타내었다. 각 접합부의 소요 전단강도 계산에서 f_y는 공칭항복강도 (400 MPa)를 사용하였고, Fig. 18의 ACI 352 과정에 의한 소요 전단강도 산정에서 a는 Type 2 접합부에서 철근의 변형 경화를 고려하여 1.25를 적용하였다. Table 7과 같이 실험 결과 최대 전단강도 (V_{test})는 소요 전단강도 (V_u)를 약 20% 이상 초과하는 것

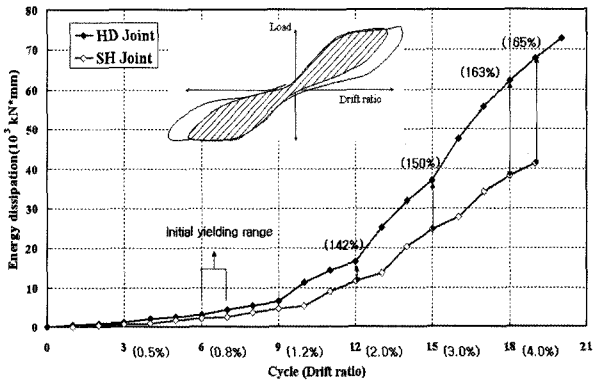


Fig. 17 Comparison of accumulated energy dissipation

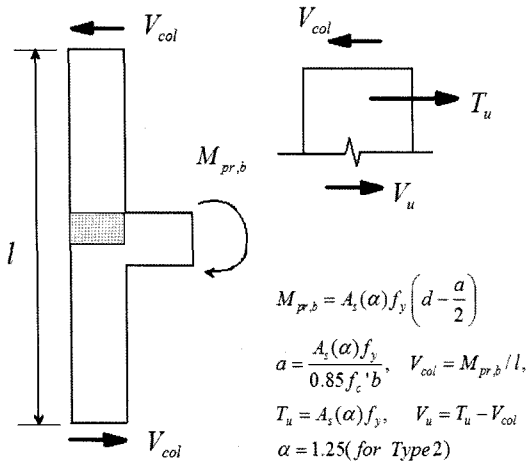


Fig. 18 Joint shear strength[6]

으로 나타났으며, 보의 휨 철근이 항복 후 변형 경화에 도달한 이후에 접합부 파괴가 나타난 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구는 외부 보-기둥 접합부에 대한 headed bar의 현장 적용성을 평가하기 위한 실험적 연구로서, 작은 헤드를 사용한 headed bar의 적정 묻힘길이, 연성 거동을 확보하기 위한 보조철근의 필요성, 선행 연구 결과의 검증 등을 목표로 수행되었으며, 연구의 결론은 다음과 같다.

1) Headed bar의 단조하중 및 반복하중 인발실험 결과, 묻힘길이 $10d_b$ (190 mm)에서 헤드 지압면적이 큰 실험체 (CL)가 비교적 작은 SQ, SC 실험체보다 더 우수하였다. 그러나 헤드와 보강근 사이 용접의 필요성은 크게 나타나지 않았고, 반복하중에 대한 영향도 크지 않은 것으로 나타났다.
2) 실물 크기 외부 보-기둥 접합부를 사용한 표준갈고리와 headed bar의 성능 비교 실험에서는 현행 표준갈고리 정착 규정에 의하여 결정된 묻힘길이 $15d_b$가 확보된 상태에서 작은 원형 헤드 (SC, 순지압면적 $2.57A_b$)를 사용하여 실험한 결과, headed bar를 사용한 접합부의 거동이 변위 연성비 및 변형 성능에서 표준갈고리를 사용한 접합부 보다 상대적으로 다소 우수한 것으로 나타났다.
3) 외부 보-기둥 접합부 실험 결과, 초기 균열, 균열 진행 방향, 균열 발생 범위 등 두 실험체 모두 거의 비슷한 양상을 보여주고 있으며, 최종 파괴 시점에 이르러서는 headed bar로 정착된 HD joint가 표준갈고리로 정착된 SH joint에 비해 상대적으로 손상을 덜 입은 상태로 최종 파괴되었다.
4) 외부 보-기둥 접합부에서 헤드로 정착할 경우, 선행 연구 및 본 연구 결과, 주철근비 1% 이상, 보조 철근 체적비 0.6% 이상, 묻힘길이 $13d_b$ 이상 확보되어야 하며, 이 값은 참고문헌 6)을 사용하여 설계한 접합부의 기본적인 부재 크기 및 배근 상세에서 대부분 만족되기 때문에 보-기둥 접합부에 작은 헤드의 사용이 가능할 것으로 판단된다.
5) 본 접합부 실험에서 ACI 355.2 과정에 의하여 설계된 headed bar와 표준갈고리의 성능을 비교 실험하고, headed bar의 우수한 구조적 성능 및 연성 거동을 입증하였다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 정부재원 (교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2005-050-D00017) 및 한경대학교 건설공학연구소의 지원 하에 이루어진 연구 결과로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2003, pp.115~227.
2. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05M) and Commentary (ACI 318R-05M)*, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2005, pp.305~342.
3. Park, H. K., Yoon, Y. S., and Kim, Y. H., "The Effect of Head Plate Details on the Pull-Out Behaviour of Headed Bars", *Magazine of Concrete Research*, Vol.55, No.6, 2003, pp.485~496.
4. American Society for Testing and Materials, *Standard Specification for Welded or Forged Headed Bars for Concrete Reinforcement*, ASTM A 970/A 970M-98.
5. American Society for Testing and Materials, *Standard Specification for Welded or Forged Headed Bars for Concrete Reinforcement*, ASTM A 970/A 970M-04a.
6. ACI-ASCE Committee 352, *Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures (ACI 352R-02)*, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2002.
7. Choi, D. U., Hong, S. G., and Lee, C. Y., "Test of Headed Reinforcement in Pullout", *KCI Concrete Journal*, Vol.14, No.3, 2002, pp.102~110.
8. Choi, D. U., "Test of Headed Reinforcement in Pullout 2: Deep Embedment", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Korea Concrete Institute, Vol.18, No.3E, 2006, pp.151~159.
9. Wallace, J. W., *Headed Reinforcement A Viable Option*, ACI Concrete International, Dec. 1997, pp.47~53.
10. Thompson, M. K., Ziehl, M. J., Jirsa, J. O., and Breen, J. E., "CCT Nodes Anchored by Headed Bars - Part 1: Behavior of Nodes", *ACI Structural Journal*, Vol.102, No.6, 2005, pp.808~815.
11. DeVries, R. A., Jirsa, J. O., and Bashandy T., "Anchorage Capacity in Concrete of Headed Reinforcement with Shallow Embedments", *ACI Structural Journal*, Vol.96, No.5, 1999, pp.728~736.
12. ACI-ASCE Committee 352, *Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete*

Structures (ACI 352R-91), American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1991, pp.1~21.
13. ACI ITG/T1.1-99, *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing*, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1999.

요 약 본 연구는 반복 수평 하중을 받는 외부 보-기둥 접합부에서 작은 헤드를 사용한 headed bar의 사용성을 검증하기 위해 90° 표준갈고리로 정착한 실험체와 headed bar로 정착한 접합부 실험체를 제작하여 각각의 실험 결과를 비교하였다. 또한, headed bar 정착 성능에 영향을 주는 헤드 단면적, 단조 및 반복 가력 여부, 헤드와 보강근의 용접 여부 등의 headed bar 인발 성능에 관한 영향을 구명하기 위한 인발실험을 병행하였다. 인발실험의 결과, headed bar의 인발강도는 헤드 면적 증가에 따라 증가하였고, 헤드와 보강근의 용접 유무, 가력 조건 (단조하중 및 반복하중)은 실험 결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 외부 보-기둥 접합부 실험의 결과, 90° 표준갈고리로 정착한 실험체와 headed bar로 정착한 실험체가 초기 균열, 균열의 발생 등 모두 거의 비슷한 양상이었으나, 최종 파괴 시에는 headed bar로 정착된 실험체가 90° 표준갈고리로 정착된 실험체에 비해 최대 강도 도달 이후 연성 거동, 연성비 및 변형 성능, 에너지소산 면적 등에서 우수한 거동을 보여주었다. 따라서 ACI 352 위원회의 설계지침을 따라서 제작된 접합부 상세와 동일한 조건으로 표준갈고리 대신 상대적으로 작은 headed bar를 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : headed bar, 표준갈고리, 외부 보-기둥 접합부, 묻힘길이, 헤드 단면적