

PRC 보-기둥 접합부의 내진성능

Earthquake Resistance of Prefabricated Reinforced Concrete Beam-Column Connection

송진아* 박홍근**
Song, Jin-Ah Park, Hong-Gun
이창남*** 엄태성****
Lee, Chang-Nam Eom, Tae-Sung

Abstract

Prefabricated reinforced concrete (PRC) uses prefabricated re-bars for fast construction and cost-saving. In the present study, prefabricated re-bar details for beam-column connection were developed. Cyclic loading tests were performed to evaluate the earthquake resistance of interior and exterior beam-column connections. The beam-column connections were designed in full scale to satisfy the requirements of the special moment frame specified in KCI 2007 and ACI 318-08. For the PRC method, re-bar welding, coupler splice, headed bar anchorage, and high strength steel (SD500W) were used in the specimens. Test results showed that the PRC connections showed deformation capacity greater than the minimum story drift ratio of the special moment frame, 3.5 %, specified in ACI 374.1-05. The load-carrying capacity, yield stiffness, and energy dissipation capacity of the PRC connections were comparable to those of conventional reinforced concrete connection. The major failure modes of the PRC connections were flexural crushing of concrete and re-bar fracture at the beam plastic hinge region. The re-bar welding and coupler splice did not significantly affect the performance of the specimens.

키워드 : 철근 선조립 공법, 보-기둥 접합부, 내진설계, 고강도 철근, 철근콘크리트

Keywords : Prefabricated Reinforced Concrete, Beam-column Connection, High Strength Re-bar, Seismic Design, Reinforced Concrete

1. 서론

인건비, 원자재 가격, 적재장소 부족 등으로 인하여, 국내 철근콘크리트 공사 현장에서 공장 철근조립 공법의 적용이 점차 확대되고 있다. 국내외 건설현장에 적용되고 있는 대표적인 공법으로 BauTech 사의 BauGrid WRG(welded reinforcement grid)¹⁻³⁾공법과 센구조의 TSC 공법⁴⁾이 있다. 이들 공법은 수직 부재인 기둥의 경우 철근을 공장용접하여 제작하지만, 수평부재인 보는 기존 철골보 또는 TSC 합성보를 사용한다. 따라서 기존의 현장조립 철근콘크리트 구조를 완전하게 대체하는 공법으로 사용하기는 어렵다.

본 연구에서는 철근콘크리트 구조를 위한 철근 선조립 공법으로 PRC (prefabricated reinforced concrete, 그림1) 공법을 개발하였다. PRC 공법은 기둥뿐만 아니라 보의 철근을 선조립 제작하는 공법으로, 공장용접으로 선조립된 보와 기둥의 철근 케이지를 현장에 반입하여 조립·

설치한다. 공사 현장에서는 간단한 추가 배근과 함께 선조립된 보 및 기둥 철근 케이지에 거푸집을 설치한 다음 콘크리트를 타설하여 철근콘크리트 공사를 수행한다. 따라서 현장에서 철근 적재 및 가공 공정의 생략으로 공기 단축 및 청결한 현장관리가 가능하고, 공장에서 철근을 가공·조립하므로 절단 및 절곡 과정에서 발생하는 철근 토막들의 손실을 최소화할 수 있어 경제적이다.

구조적인 관점에서 PRC 공법은 기존 철근콘크리트 공법과 동등한 일체화된 보-기둥 접합부 시공이 가능하다. 그러나 PRC 공법은 효율적인 보-기둥 접합부의 제작 및 조립을 위하여 용접, 커플러 이음, 기계적 정착 등이 사용되므로, 접합부의 성능에 대한 명확한 실험적 검증이 필요하다. 본 연구에서는 PRC 공법을 위한 보-기둥 접합부의 내진 상세를 개발하고, 내부 및 외부 보-기둥 접합부에 대하여 반복재하 실험을 실시하였다. 실험 결과를 분석하여 하중재하능력, 강성, 변형능력, 파괴모드, 에너지소산능력 등 비탄성 거동을 보이는 PRC 보-기둥 접합부의 내진성능을 평가하였다.

2. 상세 개발 및 연구 목적

그림1은 철근 선조립에 의한 PRC 모멘트골조의 시공

* 서울대학교 건축학과 석사과정
** 서울대학교 건축학과 교수, 공학박사
*** (주)센구조연구소 대표이사, 건축구조기술사
**** 대구가톨릭대학교 건축학부 조교수, 공학박사
(교신저자, E-mail : tseom@cu.ac.kr)

과정을 보여준다. 그림1(a)에 나타난 바와 같이, 먼저 기둥의 주근과 띠철근을 용접하여 철근 케이지를 제작하고 공사 현장에 설치한다. 보-기둥 이음부에는 보와 기둥의 철근 연결이 용이하도록 특수 제작된 강판(steel plates)을 선조립 기둥 철근 케이지에 미리 용접한다. 강판에는 접합되는 보 주근의 개수와 위치에 맞추어 구멍을 뚫거나 U형 홈을 가공한다. 보 철근 케이지는 상하 주근 4개(top and bottom bars), 수직 전단철근(stirrups), 대각철근(diagonal bars) 등으로 구성되며 공장용접하여 미리 제작한다.(그림1(a)) Stirrup detail에 나타난 바와 같이 용접된 수직 전단철근은 폐쇄형의 고리이므로, 보의 소성힌지 영역에서 콘크리트를 횡보강할 수 있다. 대각철근은 상·하 주근 및 수직 전단철근과 트러스 구조를 형성하여, 별도의 지지대 없이 수직방향으로 작용하는 자중 및 일정 시공하중에 저항하는 역할을 한다.

다음으로 선제작된 보 철근 케이지를 선조립된 기둥 철근 케이지에 접합하여 내부 보-기둥 접합부를 조립한다. 그림1(b)의 보와 기둥의 이음부 상세에 나타난 바와 같이, 보 철근 케이지의 상·하 주근 4개는 커플러(coupler splice)로 긴결한다. 이때 커플러는 기둥에 설치된 강판에 밀착되도록 시공하여 보 주근의 미끄러짐 변형이 발생되지 않도록 한다. 만약 기둥 근처에서 부모멘트에 저항하는 보 상부근이 추가로 필요하거나 또는 보의 중앙부에서 정모멘트에 저항하는 보 하부근이 추가로 배치되어야 하는 경우, 필요한 개수만큼 배근한다. 그림1(c)는 외부 보-기둥 접합부의 상세를 보여주는데, 내부 접합부와 동일한 방법으로 제작한다. 다만, 외부 정착부에서는 확대머리 철근(headed bar)을 사용하여 보의 주근을 정착시킨다.

개발한 PRC 보-기둥 접합부를 중간 및 특수 내진구조와 같이 연성능력이 요구되는 내진구조용 접합부에 사용하기 위해서는 다음의 사항에 대하여 충분한 검증이 이루어져야 한다.

1) 그림1(b)에 나타난 바와 같이 보 상·하부 주근의 커플러 이음부가 최대 휨모멘트가 발생하는 위험단면에 위치한다. 따라서 커플러 이음부에 응력이 집중되어 커플러에 소성변형이 발생되거나 또는 조기에 커플러의 인장

파단이 발생할 우려가 있다.

2) 일반적으로 용접부는 용접열에 의하여 철근의 조직이 변화되거나 또는 철근 단면의 불연속이 발생되므로, 응력집중이 발생되기 쉽다. 따라서 현행 설계기준⁵⁻⁶⁾에서는 중간 및 특수내진구조에 대하여 소성변형이 집중되는 위치에서 보와 기둥 주근의 용접을 허용하지 않는다. 그러나 PRC 공법에서는 철근 케이지의 제작을 위하여 보 소성힌지 위치에서 전단철근을 상·하부 주근에 용접된다. 따라서 용접으로 인하여 철근의 연신률이 감소되고, 그 결과 부재 및 접합부의 변형능력이 저하될 수 있다.

3) PRC 공법은 철근물량, 가공비, 인건비를 줄이기 위하여 SD500/SD500W 이상의 고강도 철근을 사용한다. KCI 2007⁵⁾에서는 큰 연성능력이 요구되는 중간 및 특수내진구조에 대하여 설계항복강도가 400 MPa 이하인 철근을 사용하도록 요구하고 있다. 따라서 보-기둥 접합부에 설계항복강도가 500 MPa인 SD500/SD500W 고강도 철근을 적용하는 경우에도 접합부 변형능력을 확보할 수 있는 지에 대한 실험적 검증이 필요하다.

3. 실험 계획

PRC 공법에 의한 보-기둥 내부 및 외부 접합부를 실험 크기로 제작하여 실험하였다. 실험군으로 PRC 공법이 적용된 +형 내부 접합부 PRC1 및 PRC2와 T형 외부 접합부 PRC3를 제작하였고, 비교를 위하여 기존 공법의 현장배근 +형 내부 접합부 RC를 제작하였다. 표1에 각 실험체의 주요 실험 변수를 나타냈다. 모든 보-기둥 접합부 실험체는 보에서 소성힌지가 발생되도록 강기둥-약보 개념으로 설계되었고, KCI 2007⁵⁾ 및 ACI 318-08⁶⁾에 제시된 특수모멘트골조에 요구되는 배근 상세를 적용하였다.

그림2(a)는 +형 내부 접합부 PRC1의 형상, 치수, 배근 상세 등을 보여준다. 기둥 순높이와 보 순길이는 각각 2100 mm 및 4760 mm이고, 기둥과 보의 단면 크기는 각각 600 mm × 700 mm, 400 mm × 500 mm이다. 기둥 철근 케이지는 6D29 및 4D22의 주근과 D13의 띠철근을 용접하여 제작하였고, 그림1(a)에 나타난 바와 같이 보-기둥 접합부의 철근 선조립이 용이하도록 보와 기둥이 만나는 이음부 주변에 8개의 강판을 용접하여 설치하였

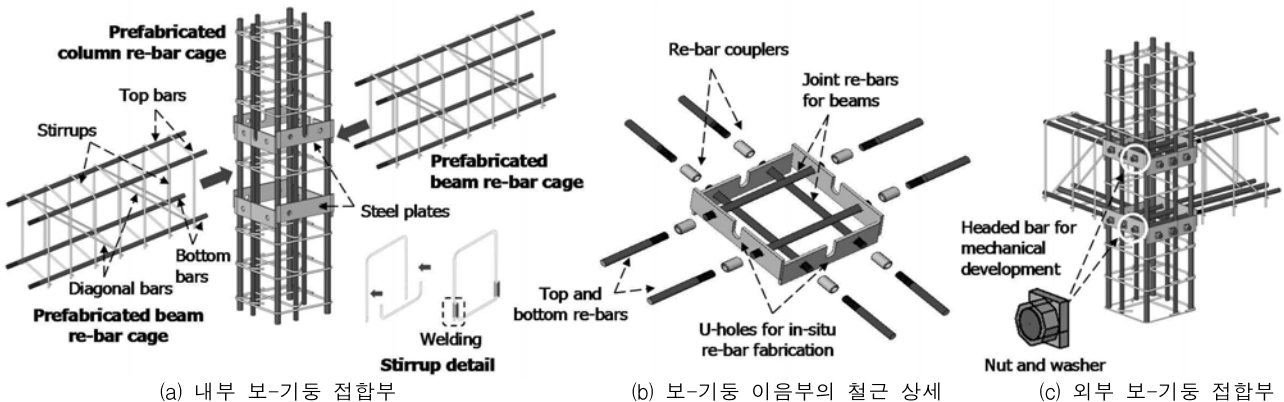
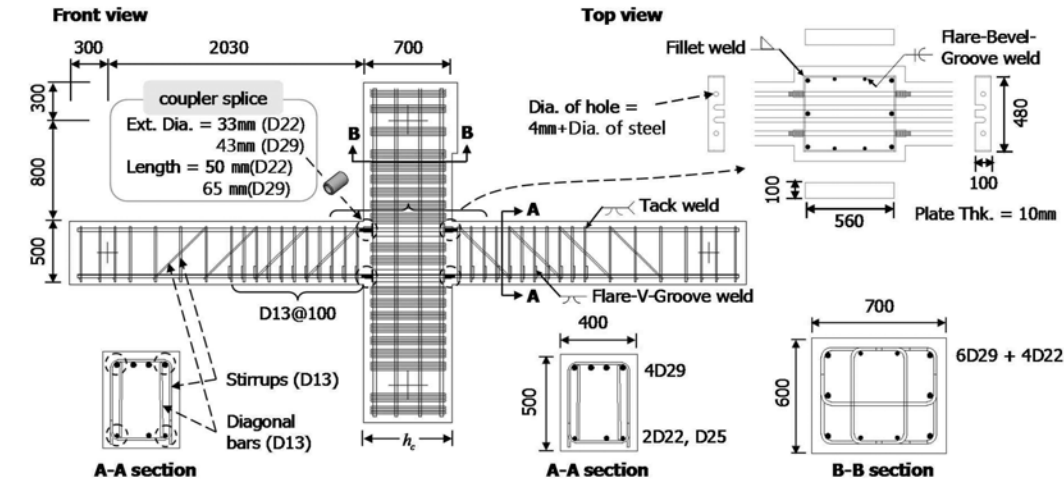


그림 1. 프리캐브 철근콘크리트 공법 (PRC 공법)

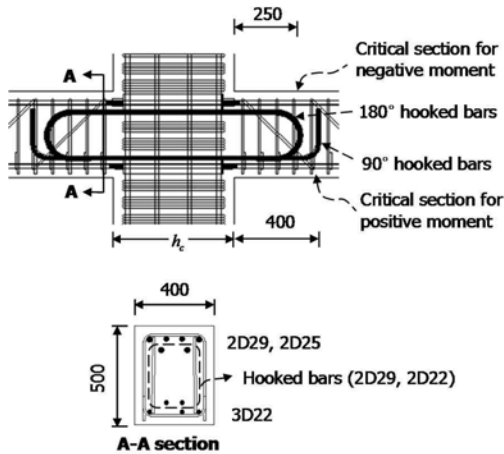
표 1. 실험변수

실험체	접합부 형태	보 철근			기둥 철근	보-기둥 이음부	
		상부근 (ρ_t , %)	하부근 (ρ_b , %)	스터립 (ρ_v , %)	기둥 주근 (ρ , %)	h_c/d_b ¹⁾	보강 여부
RC	내부 접합부	4D29(1.49)	2D22+1D25(0.73)	D13@100mm (0.36)	6D29 + 4D22(0.80)	24.4	X
PRC1	내부 접합부	4D29(1.49)	2D22+1D25(0.73)	D13@100mm (0.36)	6D29 + 4D22(0.80)	24.4	X
PRC2	내부 접합부	2D29+2D25(1.33)	3D22(0.66)	D13@100mm (0.36)	6D29 + 4D22(0.80)	41.8 ²⁾	O
PRC3	외부 접합부	4D29(1.49)	2D22+1D25(0.73)	D13@100mm (0.36)	6D29 + 2D22(1.20)	17.4	X

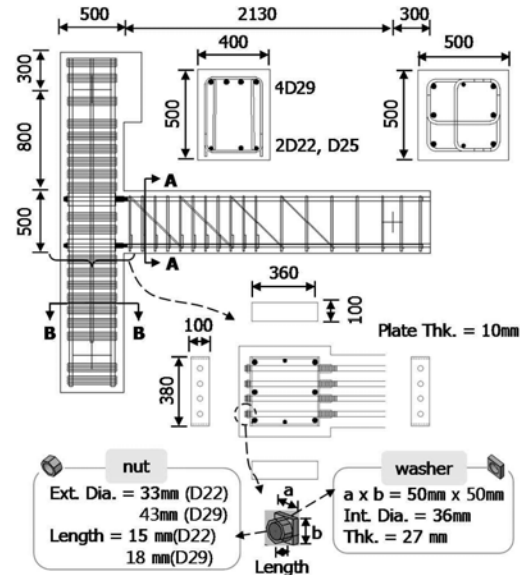
1) h_c = 기둥 단면의 전체 깊이, d_b = 보 주근 직경
 2) PRC2의 경우 좌우 보 소성힌지 위험단면 사이의 거리를 h_c 로 사용한다. (그림2(b) 참조)



(a) 실험체 PRC1



(b) 실험체 PRC2



(c) 실험체 PRC3

그림 2. 실험체 형상 및 치수

다. 강관에는 보 상·하부 주근의 개수와 위치에 맞추어 구멍을 뚫거나 U형 홈을 가공하였다.(그림1(a) 및 (b) 참조) 보 철근 케이지는 상부와 하부에 각각 4D29($\rho_t = 0.0149$)와, 2D22 및 1D25($\rho_b = 0.0073$)의 주근을 수평으로 배치하였다. 기둥과 보 철근 케이지의 조립 시 보의 네 모서리 주근(상부근 2D29 및 하부근 2D22)을 관련 기준⁷⁾

에 적합한 커플러로 이음하고, 이후 나머지 3개의 상·하부 주근(상부근 2D29와 하부근 1D25)은 보-기둥 이음부를 관통하도록 배근하였다.(그림2(a) 및 (b) 참조)

수직 전단철근(D13)은 KCI 2007의 특수모멘트골조의 배근상세를 만족하도록 기둥면으로부터 50 mm 떨어진 지점부터 시작하여 100 mm 간격으로 주근에 용접하였다. ($\rho_v = 0.0036$) 그림2(a)에 나타난 바와 같이 상·하 U형

철근을 덧댄 후 용접하여 보 주근을 둘러싸는 폐쇄형 전단철근을 제작하였다. 또한 선조립 철근 케이지의 자립을 위하여, 보의 양 옆면에 각각 4개의 D13 대각철근을 보 주근과 용접하였다. 보의 주근과 수직 전단철근 및 대각철근의 용접은 한국산업규격 KS B ISO 17660-1:2007 (용접-철근용접)에 제시된 표준용접상세를 적용하였다. (그림3 참조) 주근을 중심으로 수직 전단철근과 대각철근은 각각 외측과 내측 방향에서 용접되었고, 용접두께 a 는 전단 및 대각철근 직경의 0.3배 이상을 확보하였다.

그림2(b)는 +형 실험체인 PRC2의 배근상세를 보여준다. PRC2의 형상, 치수, 기둥 배근은 PRC1과 동일하다. 다만, 보-기둥 접합부 손상을 방지하기 위해 보 위험단면 및 소성힌지의 위치를 기둥면으로부터 멀리하기 위하여 보-기둥 이음부를 관통하는 갈고리 보강근(hooked bars)을 추가로 배치하였다. 갈고리 보강근이 끝나는 지점에서 급격한 응력변화를 완화하기 위하여, 하부 보강근 길이를 상부 보강근보다 150 mm 연장하였다. 따라서 상부 180° 갈고리 보강근은 기둥면에서 250 mm, 하부 90° 갈고리 보강근은 400 mm 지점까지 연장된다.(그림2(b) 참조) 보의 상·하부 주근은 각각 2D29 및 2D25($\rho_t = 0.0133$)와 3D22($\rho_b = 0.0066$)로서 PRC1에 비하여 작은 단면적의 주근이 사용되었다. 그러나 보의 위험단면 및 소성힌지가 기둥면으로부터 250 mm 및 400 mm 이동되므로, PRC2 접합부의 공칭강도가 PRC1보다 약간 크도록 설계하였다.

그림2(c)는 T자 외부 접합부인 PRC3의 형상, 단면 치수, 배근 상세를 보여준다. 기둥 순높이와 보 순길이는 각각 2100 mm 및 2030 mm이고, 기둥과 보의 단면 크기는 각각 500 mm × 500 mm, 400 mm × 500 mm이다. 표1과 그림2(c)에 나타난 바와 같이, 보의 주근, 전단철근, 대각철근의 배근은 PRC1과 동일하다. 다만, 보 주근이 연속되지 않으므로 단부에 너트와 와셔를 보-기둥 이음부의 강판에 기계적으로 정착시켰다.(그림1(c) 참조) 보 주근의 기계적 정착부 성능은 ACI318-08 기준에 따라 검토하였다.

현장조립으로 제작된 기존 보-기둥 접합부 실험체 RC는 PRC1과 동일한 형상, 치수, 보 및 기둥 철근을 갖는다. 다만, 철근 용접, 커플러 이음, 강판, 대각철근 없이 일반 배근상세를 사용하였다.

재료 시험으로 구한 콘크리트와 철근의 재료 강도는 표2에 정리하여 나타냈다. 콘크리트는 40 MPa 이상의 고강도 콘크리트를 사용하였고, 철근은 용접용 고강도 철근 SD500W를 사용하였다. 또한 보 주근의 커플러 이음부에는 SD500/SD500W 철근용 커플러를 사용하였다. 대각철근 및 수직 스테럽의 용접은 500 MPa 강제용 용접재료인 YFW-C50DR을 사용하여 CO2 플럭스코어드 아크용접(FCAW)을 적용하였다.

그림4는 보-기둥 접합부 실험체의 가력 및 경계조건을 보여준다. 경계조건으로 기둥 하부는 힌지에 의해, 보의 양단부는 횡방향 변위를 허용하여 수직 방향으로만 지지되었다. 기둥 상부 힌지에 1000 kN 가력기를 설치하여 수평 방향으로 변위를 제어하며 재하하였다. 재하 초기에

는 횡변위비 $\delta = \Delta/h$, (Δ = 가력기의 수평 변위, h = 기둥 상하 지점 사이의 거리로서 2100 mm)를 0.25 %씩 증가시키고, 횡변위비가 1.0 %를 넘어선 이후에는 0.5 %씩 증가시키며 가력하였다. 모든 횡변위비에서 3회 반복가력하였다. 기둥 힌지 및 보 수평 물러에 변위계(LVDT)를 설치하여 실험 중 발생하는 지지점 변위를 실시간으로 계측하였고, 계측된 지지점 변위를 사용하여 가력기에서 계측한 횡변위를 보정하였다.

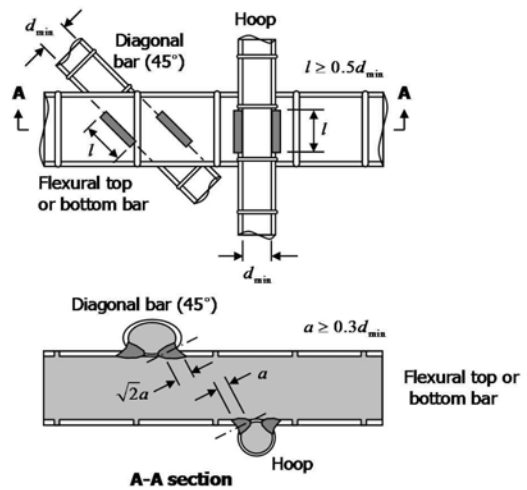


그림 3. 철근용접 상세

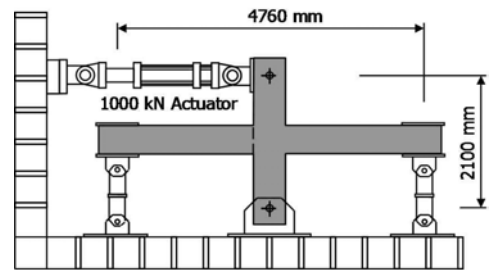


그림 4. 가력 및 경계조건

표 2. 재료 강도

콘크리트 (MPa)				
실험체	RC	PRC1	PRC2	PRC3
압축강도 (f_{ck})	47	53	61	61
철근 (MPa)				
철근 사이즈	D22	D25	D29	
항복강도 (f_y)	538	564	519	
인장강도 (f_u)	684	594	661	

4. 실험 결과

4.1 하중-변위 관계 및 파괴 양상

그림5는 접합부 실험체의 하중-변위 주기곡선을 보여주고, 그림6은 실험 종료 후 각 실험체의 균열 및 파괴 양상을 보여준다. 각 실험체의 최대강도 P_u , 최대변형 Δ_u (최대변위비, δ_u), 연성도 μ , 파괴모드, 항복강성 등

표 3. 실험 결과

실험체		하중재하능력 (kN)			변형능력 (mm, %)			항복강성 (kN/mm) $k_y (=P_y/\Delta_y)$	이음부 전단강도(kN)		파괴 모드	
		계측값 P_u	예측값 P_n	P_u/P_n	항복 $\Delta_y (\delta_y)$	최대 $\Delta_u (\delta_u)$	연성도 $\mu (= \Delta_u/\Delta_y)$		계측값 $V_{ju}^{(2)}$	예측값 $V_{ju}^{(3)}$	보 소성힌지 영역 ¹⁾	보 주근 커플러 이음
내부 접합부	RC	509	466	1.09	23.1 (1.10)	89.5 (4.26)	3.87	20.8	2115	2389	EC, BF	N/A
	PRC1	531	471	1.13	25.8 (1.23)	103.7 (4.94)	4.02	19.4	2093	2538	EC, BF	Pull-out
	PRC2	571	507	1.13	28.4 (1.35)	76.2 (3.63)	2.69	19.6	2224	2722	EC, WC, BF	No failure
외부 접합부	PRC3	+356	298	1.19	34.2 (1.63)	80.0 (3.81)	2.34	10.0	1396	1751	EC	No failure
		-164	-156	1.05	30.9 (1.47)	104.0 (4.95)	3.37	4.9	708	1751	BF	No failure

- 1) EC: 휨에 의한 단부콘크리트 압괴, BF: 철근 인장파단, WC: 복부 콘크리트 압괴
- 2) 최대 이음부 전단력 $V_{ju} = A_s \alpha f_y - V$ (ACI 352R-02)
- 3) 공칭 이음부 전단강도 $V_{ju} = 0.083 \gamma \sqrt{f_{ck}} b_j h_c$ (ACI 352R-02)

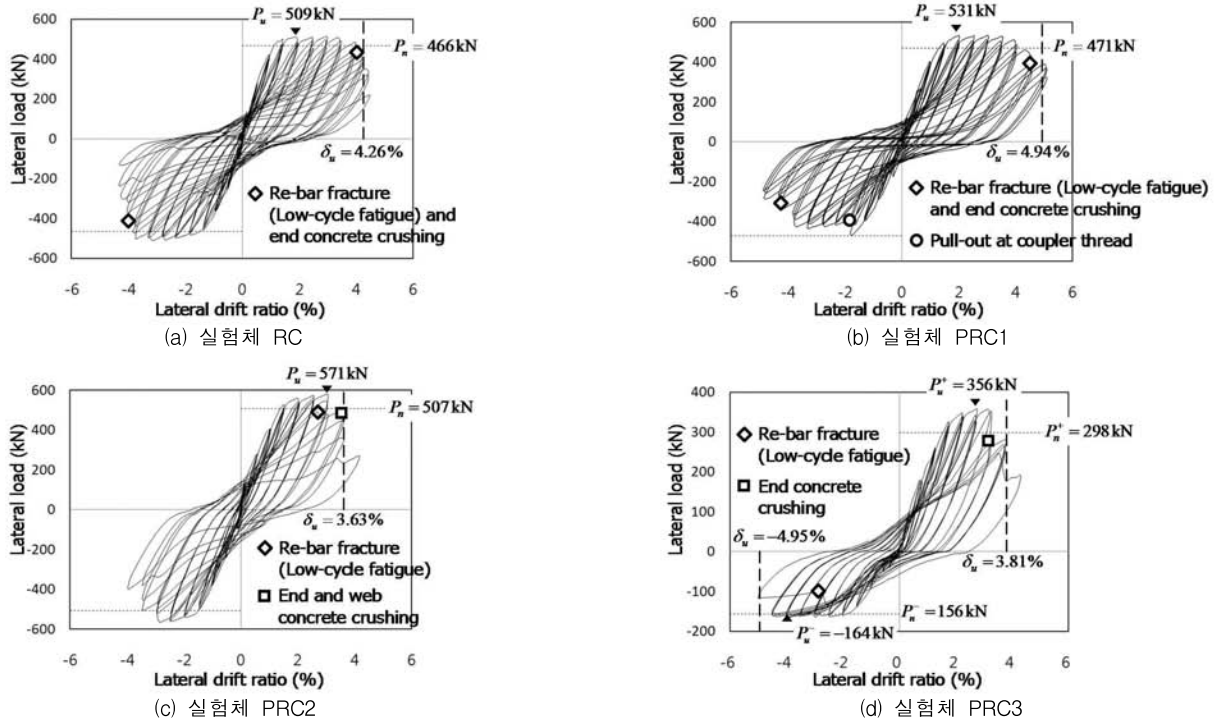


그림 5. 하중-변위 관계

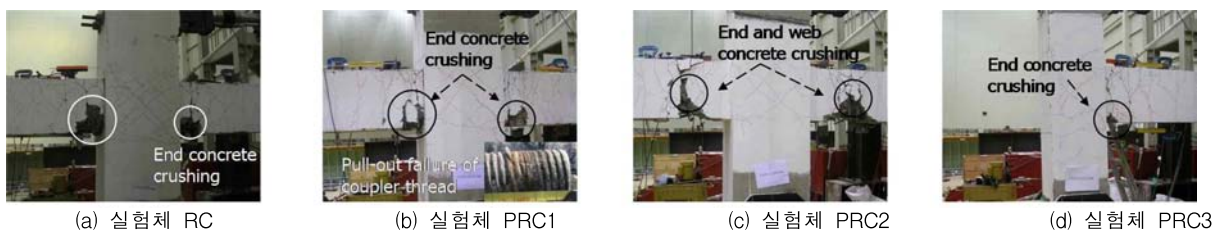


그림 6. 균열 형상 및 파괴모드

을 정리하여 표3에 나타냈다. 항복변형 Δ_y 는 그림8(b)에 나타낸 포락곡선을 사용하여 에너지 등가원리를 이용해 정의하였다. 최대변형 Δ_u 는 실험체의 하중재하능력이 최대 강도의 75%까지 저하된 지점의 변형으로 정의하였다.

그림5(a)에 나타난 바와 같이 현장조립 보-기둥 접합부 RC는 SD500W 고강도 철근이 사용되었음에도 불구하고, SD400을 사용한 기존 보-기둥 접합부들과 유사한 하중-변위 관계를 나타냈다. 1.10 %의 횡변위비에서 접합부가 항복하였고, 항복 이후 반복 재하에도 큰 강도저하 없이 연성거동을 보이다가 4.26 %의 횡변위비에서 파괴되었다.

그림6(a)는 RC의 파괴 양상을 보여주는데, 대부분의 소성 변형이 보에 집중되었고, 반복적인 인장-압축 거동으로 인하여 4.26 %의 횡변위비에서 보 소성힌지 하부에서 주근의 인장파단과 단부 콘크리트의 휨압괴로 파괴되었다.

표1에 나타낸 바와 같이 RC는 보 주근의 직경(d_b) 대비 기둥 단면 폭(h_c)의 비가 $h_c/d_b = 24.4$ 로서 ACI 352⁷⁾에서 요구하는 최소값 $23.8(= (20f_y)/420)$ 보다 크다. 또한 보-기둥 이음부 패널존의 콘크리트 전단강도 V_{ju} 은 실험에 의한 최대 이음부 예상 전단력 V_{ju} 보다 크다.(표3 참조) 그 결과, 보-기둥 이음부에는 미세한 대각균열만이

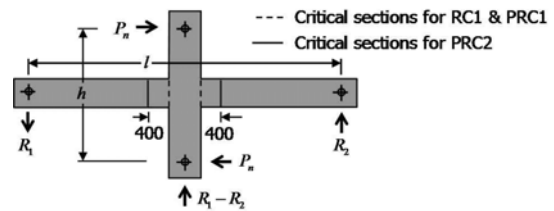
관찰되었고, 주기거동 내내 보 주근의 부착파괴 및 슬립 변형이 거의 발생되지 않았다.(그림5(a) 참조)

그림5(b)와 그림6(b)는 각각 철근 선조립 공법에 의한 +형 보-기둥 접합부 PRC1의 주기곡선과 최종 파괴 양상을 보여주는데, 현장조립된 RC와 거의 동일한 실험 결과를 나타냈다. 주기거동 내내 대부분의 소성변형은 보의 소성힌지에 집중되었고, 반복적인 인장-압축 거동으로 인하여 4.94 %의 횡변위비에서 보 주근의 인장 파단 및 단부 콘크리트 휨압괴로 파괴되었다. 주근의 인장 파단은 소성영역에서 반복적인 인장-압축 거동을 하는 철근에 나타나는 전형적인 저주파 피로(low-cycle fatigue)로 나타났다. 보-기둥 이음부에서는 미세한 대각균열이 관찰되었지만 횡변위비가 증가하더라도 더 이상 크게 발전하지 않았다.($h_c/d_b = 24.4$, 표1 참조) 그 결과, 주기거동 동안 보 주근의 부착강도 손실 및 슬립변형이 크지 않은 양호한 접합부 거동을 보였다. 그러나 PRC1 접합부 실험체는 그림5(b)에 나타난 바와 같이 -1.85 % 횡변위비의 두 번째 재하 중 갑자기 작은 강도저하가 나타났다. 실험이 종료된 이후 실험체를 해체하여 조사한 결과, 이러한 강도저하는 보 단면의 상·하부 주근에 사용한 8개의 커플러 이음 중 1곳에서 커플러와 철근의 나사선이 충분히 밀착되지 못하여 발생한 철근의 미끄러짐(re-bar pull-out at coupler splice)로 판명되었다. 그러나 완전한 철근 뽑힘파괴가 발생하지 않았으며, 미끄러짐 후에도 커플러 이음부에서 다소간의 힘이 전달된 것으로 판단된다.

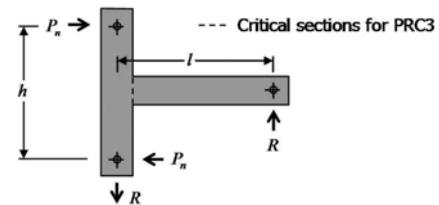
그림5(c)는 갈고리 보강근을 사용하여 보-기둥 이음부를 보강한 내부 접합부 실험체 PRC2의 하중-변위 관계를 보여준다. 동일한 내부 접합부 RC 및 PRC1에 비하여, 최대강도가 약 9.8 % 증가하였고 반면 변형능력은 감소하여 횡변위비 3.63 %에서 파괴되었다. 그림6(c)에 나타난 바와 같이, 보-기둥 이음부를 관통하는 갈고리 보강근으로 인하여 보의 소성힌지가 기둥면으로부터 400 mm 및 250 mm 떨어진 지점에 발생되었고, 반복적인 인장-압축 거동에 의한 보 주근의 인장파단, 단부 콘크리트 휨압괴, 복부 콘크리트 압괴 등에 의하여 파괴되었다. 보 주근의 이음을 위하여 커플러(8개)가 사용되었지만 커플러의 인장파단 또는 나사선 파괴 등 커플러 이음과 관계된 파괴는 발생되지 않았다. 보-기둥 이음부의 보강으로 인하여 보의 소성힌지가 기둥면으로부터 멀어졌으므로 PRC2 접합부는 보 주근의 부착성능을 나타내는 h_c/d_b 가 41.8로 증가되었다.(표1 참조) 그 결과 보-기둥 이음부의 대각균열, 부착파괴, 슬립변형 등이 억제된 매우 양호한 이음부의 거동을 보였다.

그림5(d)는 철근 선조립 공법에 의한 외부 접합부 실험체 PRC3의 하중-변위 관계를 보여준다. 보 단면의 하부근의 단면적이 상부근 단면적의 1/2이므로, 비대칭의 주기곡선을 나타냈다. 정방향 재하에 의한 최대강도가 부방향 최대강도의 약 두 배였고, 반면 정방향 및 부방향의

최대변형이 각각 3.81 % 및 4.95 %로서 부방향 재하에 의한 변형능력이 더 컸다. 그림6(d)에 나타난 바와 같이 대부분의 소성변형은 보의 소성힌지에 집중되었고, 정방향 재하 동안 보 소성힌지의 단부 콘크리트 휨압괴로 하중재하능력이 급격히 재하되었고, 이후 부방향 재하시 반복적인 인장-압축 거동에 의하여 철근파단이 발생되며 파괴되었다. $h_c/d_b = 17.4$ (표1 참조)로서 ACI 352에서 확대머리 철근(headed bar)의 최소 부착길이인 $366.0 \text{ mm} (= \alpha f_u d_b / (6.2 \sqrt{f_{ck}}))$ 이상을 확보하였다.^{8,9)} 그 결과, 보-기둥 이음부에는 미세한 대각균열만 발생되었고 반복 재하 동안 보 주근의 부착파괴 및 슬립변형이 거의 발생되지 않는 등 양호한 접합부 거동을 보였다.(그림5(d) 및 그림6(d) 참조) 또한 보 주근의 커플러 이음에서 어떠한 파괴도 발생되지 않았다. 보-기둥 이음부에 정착된 보 주근의 기계적 정착부(headed bar, 그림2(c) 참조)에도 거의 균열이 발생되지 않았다.



(a) 내부 접합부 실험체 RC, PRC1, PRC2



(b) 외부 접합부 실험체 PRC3
그림 7. 하중재하능력의 계산

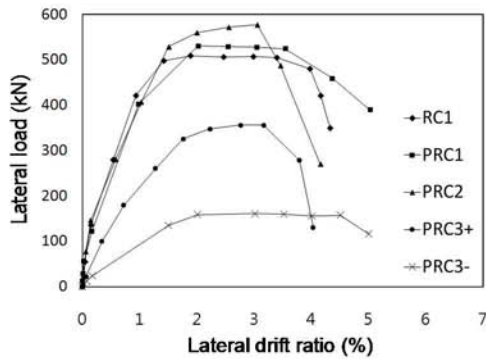
4.2 하중재하능력

강기둥-약보로 설계된 PRC 보-기둥 접합부의 하중재하능력은 위험단면 위치에서 보가 항복하는 것으로 가정하여 구할 수 있다. 그림7(a)와 (b)는 각각 내부 및 외부 접합부에 작용하는 지지점 반력을 보여주는데, 접합부의 하중재하능력은 다음과 같이 구할 수 있다.

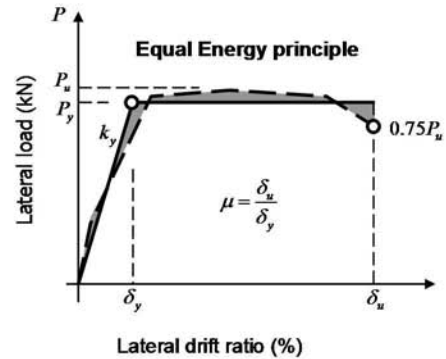
$$P_n = (R_1 + R_2) \left(\frac{l}{2h} \right) \text{ for interior connection} \quad (1)$$

$$P_n = R \left(\frac{l}{h} \right) \text{ for exterior connection} \quad (2)$$

여기서, P_n = 접합부의 하중재하능력으로 기둥 지점의 수평반력, R_1, R_2, R = 보의 지점의 수직반력, h = 기둥 상·하 지점 사이의 거리, l = 보 지점의 수직반력 사이의 거리이다. 보 지점의 수직 반력 R_1, R_2, R 은 보 위험단면의 소성모멘트를 위험단면과 보 지점 사이의 거리로 나누어 계산한다.(그림7 참조) 소성모멘트의 계산 시



(a) 보-기둥 접합부 실험체의 포락곡선



(b) 항복강도, 항복변형, 연성도

그림 8. 포락곡선 및 연성도

재료시험으로 구한 콘크리트 및 철근의 실제 재료강도를 사용한다.

식(1) 또는 (2)를 사용하여 예측한 접합부의 하중재하능력 P_n 을 표3에 나타냈다. 그림7에 나타낸 바와 같이, RC, PRC1, PRC 3 실험체의 경우, 기둥과 바로 인접한 보의 위험단면(critical section)에서 소성힌지가 발생하는 것으로 가정하여 접합부의 하중재하능력을 구하였다. 반면, 보-기둥 이음부의 보강에 의하여 소성힌지가 이동된 PRC2 실험체의 경우 보강근의 갈고리 정착이 끝나는 위치의 위험단면에서 소성힌지가 발생하는 것으로 가정하여 접합부의 하중재하능력을 구하였다. 표3에 나타난 바와 같이, 실험 대비 예측된 접합부의 하중재하능력의 비율 P_u/P_n 은 1.05 ~ 1.19로 비교적 안전측으로 예측되었다. 이러한 안전측의 평가는 소성영역에서 반복적인 인장-압축 거동에 의하여 발생하는 철근의 변형률경화거동을 고려하지 않았기 때문으로 판단된다.

4.3 변형능력 및 연성도

그림8(a)는 접합부 실험체들의 포락곡선을 비교하여 보여준다. 정량적인 연성능력의 비교를 위하여, 그림8(b)와 같은 에너지 등가원리를 이용하여 2선형으로 이상화시킨 포락곡선으로부터 항복변형 및 항복변위비(Δ_y 및 δ_y)을 정의하고, 이로부터 각 실험체의 변위 연성도 $\mu (= \delta_u/\delta_y)$ 를 구하였다. 각 실험체의 최대 횡변위비 및 연성도는 표3에 나타냈다. 그림8 및 표3에 나타낸 바와 같이 SD500W 고강도 철근이 적용된 기존 현장조립 RC와 철근 선조립 공법이 적용된 PRC1, PRC2, PRC3은 모두 내진구조용 모멘트접합부에 요구 중간변위비인 3.5%를 초과하는 횡변위비 $\delta_u = 3.63 - 4.95 \%$ 를 보였다. 접합부 실험체의 변위 연성도는 $\mu = 2.34 - 4.02$ 로 횡변위비보다 큰 차이를 나타냈는데, 이는 각 실험체의 항복변위비가 다르기 때문이다.

SD500W 철근을 사용한 RC 실험체와 철근 선조립 PRC1 실험체는 모두 횡변위비 4.26 %를 초과하는 변형능력을 보였고 변위연성도 μ 가 3.87 이상으로, KCI 2007

에서 규정하는 특수모멘트골조의 배근상세가 적용된 일반 보-기둥 접합부와 동등한 수준으로 판단된다. 보-기둥 이음부에 갈고리 보강근을 배근하여 소성힌지의 위치를 기둥면으로부터 이격시킨 PRC2 실험체는 $\delta_u = 3.63 \%$ 및 $\mu = 2.69$ 로서 RC 및 PRC1에 비하여 작은 변형능력 및 연성도를 나타냈다. (표3 참조) 이러한 변형능력 저하의 원인은 다음과 같다. 첫째, 이음부의 갈고리 보강근이 끝나는 지점에서 급격한 철근 단면적의 감소로 인하여 응력집중이 발생하였다. 둘째, 보-기둥 접합부의 횡변위비가 동일하더라도 변형 적합 조건에 의하여 PRC2의 소성힌지에 요구되는 소성회전각의 크기가 RC1 및 PRC1의 소성힌지에 요구되는 소성회전각이 더 크다. 외부접합부 실험체인 PRC3은 정방향 및 부방향의 비대칭 변형능력을 보였는데, 보에 전단력이 크게 작용하는 정방향 재하에서 $\delta_u = 3.81 \%$ 및 연성도 $\mu = 2.34$ 의 변형능력을 나타냈고, 반면 부방향 재하에서 $\delta_u = 4.95 \%$ 및 연성도 $\mu = 3.37$ 의 변형능력을 나타냈다.

4.4 강성 및 에너지 소산 능력

표3은 각 접합부 실험체의 항복강성 $k_y (= P_y/\Delta_y)$, 그림8(b))를 비교하여 보여준다. 표3과 그림8(a)의 포락곡선에 나타난 바와 같이, 철근 선조립 공법에 의한 PRC1 및 PRC2 실험체의 항복강성은 기존의 현장배근 RC 접합부와 거의 동일하였다.

철근 선조립 공법에 의한 PRC 접합부 및 기존 RC 접합부의 주기 당 에너지 소산량 E_D 를 비교하여 그림9에 나타냈다. 주기 당 에너지 소산량 E_D 는 한 사이클의 주기곡선으로 둘러싸인 면적으로 정의된다. 주기거동에 의한 에너지 소산량 E_D 는 RC 및 PRC1에 비하여 보-기둥 이음부에 갈고리 보강근을 배치하여 보의 소성힌지를 이동시킨 PRC2에서 다소 개선된 결과를 보였다. 이는 PRC2의 경우 보 주근의 부착성능을 나타내는 h_c/d_b (표1 참조)가 증가하여 주기거동 동안 보 주근의 슬립변형이 전혀 없었고, RC 및 PRC1에 비하여 최대강도가 약간 증가하였기 때문으로 판단된다. 외부 접합부인 PRC3은 보

의 소성힌지가 하나이므로 주기거동에 의한 에너지 소산량이 작게 나타났다.

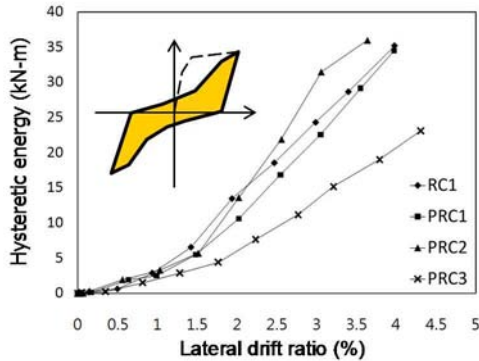


그림 9. 주기 당 에너지 소산량

5. 결 론

본 연구에서는 SD500W 고강도 용접용 철근을 사용한 철근 선조립(PRC) 보-기둥 접합부의 내진구조 적용성을 실험적으로 검증하였다. PRC 내부 및 외부 보-기둥 접합부에 대하여 반복재하 실험을 수행하였고, 일반 현장 철근조립 보-기둥 접합부와 비교를 통하여 PRC 접합부의 항복강성, 하중재하능력, 변형능력, 에너지소산능력, 파괴모드 등을 평가하였다. 주요 연구 결과와 설계 고려사항은 다음과 같다.

1) 철근 선조립 PRC 접합부는 기존 철근콘크리트 공법과 거의 동등한 하중재하능력, 변형능력, 에너지소산능력, 항복강성 등을 확보한 것으로 나타났다. 따라서 일반 철근콘크리트 구조와 동일한 방법으로 구조설계를 수행할 수 있다.

2) ACI 352R-02에서 제시하는 보 주근의 정착길이(철근직경비 $h_c/d_b \geq (20 f_y) / 420$)를 확보하고 보-기둥 이음부의 전단강도 조건($V_u \leq \phi 0.083 \gamma \sqrt{f_{ck}} b_j h_c$)을 만족하도록 PRC 접합부를 설계하는 경우, 보-기둥 이음부에서 철근 미끄러짐 및 전단에 의한 콘크리트 대각균열이 크지 않은 것으로 나타났다.

3) PRC 공법에 의한 보-기둥 접합부에서는 편리한 시공을 위하여 보 주근의 커플러 이음부가 최대 휨모멘트가 발생하는 보 위험단면에 위치한다. 하지만 PRC 접합부에 대한 반복재하 실험 결과, 과도한 응력 집중으로 인하여 커플러에 소성변형이 발생되거나 인장파단이 발생한 경우는 없었다.

4) 커플러 이음부의 응력 집중을 피하기 위하여 그림 2(b)와 같이 갈고리 보강근을 사용하여 보 위험단면 및 소성힌지의 위치를 커플러 이음부로부터 이격시킬 수 있다. 다만, 이러한 상세를 사용하는 경우 보-기둥 접합부의 변형능력이 감소되지 않도록 보 소성힌지에 충분한 휨보강이 이루어져야 한다.

5) PRC 공법에서는 주철근과 횡철근을 용접한다. 실험 결과, 기존의 무용접 철근 접합부인 RC와 철근 용접이 사용된 PRC1, PRC2, PRC3 모두 약 3.6 - 4.3 %의 횡변위비에서 보 소성힌지의 콘크리트 휨압괴 후 주근의 인장 파단으로 파괴되었다. 이러한 주근의 인장 파단은 반복적인 인장-압축 거동에 의한 철근의 전형적인 저주파피로 현상이며, 철근 용접부의 파괴는 없는 것으로 나타났다. 이는 PRC 공법에서 직경이 작은 전단 및 대각철근이 직경이 큰 주근에 용접되더라도 보-기둥 접합부의 파괴특성 및 변형능력에 미치는 영향은 거의 없다는 사실을 가리킨다.

6) KCI 2007에서는 보통 및 특수내진구조에 적용 가능한 주근의 설계 항복강도를 400 MPa 이하로 제한하고 있다. 실험 결과, 설계 항복강도가 500 MPa인 SD500W 고강도 철근이 적용된 기존 RC 및 PRC 보-기둥 접합부 모두 연성적인 파괴 특성인 보의 휨파괴를 나타냈고, 층간변위비 3.5 % 이상의 변형능력을 확보하는 것으로 나타났다. 이는 SD500/SD500W 철근을 적용하더라도 내진 설계기준에서 요구하는 보통 및 특수 내진구조의 변형능력을 확보할 수 있다는 사실을 보여준다.

참고문헌

1. Saatcioglu, M. and Grira, M. "Confinement of R/C Columns with Welded Reinforcement Grids," ACI Structural Journal, Vol 96, No. 1, 1999
2. Choi, C. S. and Saatcioglu, M. "An Experimental Study on the Structural Behavior of Concrete Columns Confined with Welded Reinforcement Grids," Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 11, No. 2, pp.187-196, 1999.
3. 최창식, Murat Saatcioglu, "용접 띠철근 보강된 콘크리트 기둥의 역학적 거동에 관한 실험적 연구", 콘크리트학회지 제11권 제2호, 1994
4. 황현중, 박홍근, 이철호, 박창희, 이창남, 김형섭, 김성배, "콘크리트채움 U형 강재보-콘크리트 기둥 접합부의 내진성능", 한국강구조학회논문집 제23권 1호, 2011
5. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회 2007
6. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-08, American Concrete Institute, 2008.
7. ACI Committee 439, Types of Mechanical Splices for Reinforcing Bars, ACI 439.3R-07, American Concrete Institute, 2007
8. ACI Committee 352, Recommendations for Design of Beam-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures, ACI 352R-02, American Concrete Institute, 2002
9. 천성철, 이성호, "외부 보-기둥 접합부에 정착된 확대머리철근의 파괴유형과 강도", 대한건축학회논문집, 제25권 제5호, 2009

(接受: 2011. 4. 4)