

고강도 철근 및 고강도 콘크리트를 사용한 보-기둥 접합부의 비선형 거동

Inelastic Behavior of High Strength Reinforced Concrete Beam-Column Joint

이 정 한* 조 중 현** 유 영 찬*** 이 원 호**** 정 현 수*****
Lee, Jung Han Cho, Joong Hyun You, Young Chan Yi, Waon Ho Chung, Heon Soo

ABSTRACT

The purpose of this study is to make a contribution to the construction of 40~60 story R/C high rise building by developing the reinforcing details which can improve the seismic performance of high-strength ($f'_c=700\text{kg/cm}^2$, $f_y=4000, 8000\text{kg/cm}^2$) R/C beam-column joints. The reinforcing details which can make beam plastic hinging zones moved and spreaded from the column face is proposed to insure the ductile behavior of high-strength RC beam-column joints. The intermediate reinforcement which is vertically anchored by interlinking each intermediate reinforcements is proposed and tested to examine the mechanical performance of proposed details. Main variables are the shape of the intermediate reinforcements and yield strength of rebars.

From the test results, the newly proposed intermediate reinforcement details can move and spread the beam plastic hinging zone about 1.0d from the column face.

1. 서론

최근 선진국에서는 건축물의 경량화, 고층화를 목적으로 고강도 재료를 사용한 새로운 철근콘크리트 조 건축물에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 50층 이상의 초고층 철근콘크리트 구조물을 실현하기 위해서는 고강도 재료의 사용은 필수적이라 할 수 있으며, 또한 초고층 구조물의 내진성능을 확보하기 위해서는 접합부에서의 변형능력을 확보할 수 있도록 구조물을 설계하여야 한다.

본 연구에서는 소성한지의 이동개념을 발전시킨 소성한지의 확산개념을 고강도 콘크리트 ($f'_c=700\text{kg/cm}^2$) 및 고강도 철근(SD40, SD80)을 사용한 철근콘크리트 구조부재의 설계에 도입하여, 구조체의 내진성능 향상 및 접합부의 변형능력을 확보할 수 있는 배근상세를 제시하고 이를 실험을 통하여 입증하고자 한다.

* 정회원, 광운대학교 대학원

** (주)ALT 구조사무실 과장, 공학석사

*** 정회원, 한국건설기술연구원 건축연구부 선임연구원, 공학박사

**** 정회원, 광운대학교 건축공학과 교수, 공학박사

***** 정회원, 중앙대학교 건축공학과 교수, 공학박사

2. 실험

2.1 일반사항

부재의 모델링은 중층(약 50층 정도) 규모의 철근콘크리트 모멘트 연성골조의 전형적인 외부접합부를 나타내도록 계획하며 강진시 가장 손상을 입기 쉬운 저층부를 선택하였고, 실험체의 형상은 저층부의 보-기둥 외부접합부를 보와 기둥의 반곡점 위치에서 잘라낸 평면 T자형으로 실제 건물의 부재크기를 약 1/2의 축척으로 줄여서 제작하였다.

2.2 실험체 설계

2.2.1 실험체 계획

본 실험의 실험체는 철근콘크리트 강도설계기준(건설교통부)에 따라 설계되었으며 그 외 ACI 318-89의 내진설계를 위한 특별규정 및 ACI-ASCE Committee 352의 규정을 참조하여 설계되었다. 실험체는 보 주근으로 SD40(항복강도 4000kg/cm²)의 철근을 사용한 일반 실험체(40CM-STAN), 흑크형 중간철근으로 보강한 실험체(40IV-1.0D10)와, 보 주근으로 SD80(항복강도 8000kg/cm²)의 고강도 철근을 사용한 일반 실험체(80CM-STAN), 흑크형 중간철근으로 보강한 실험체(80IV-1.0D10)로 구성되어 있다.

2.2.2 실험체 설계 및 제작

보의 설계에 있어서 일반적인 파괴모드인 휨·전단 파괴모드를 유도하기 위하여 보의 전단스팬비(a/d)를 4로 선택하여 보 길이를 140cm로 고정하였으며 기둥은 모멘트 반곡점을 포함한 260cm로 고정하였다. 기둥의 주근으로는 16개의 D19를 사용하였으며, 보의 주근은 SD40 철근을 사용한 경우에는 상·하단 모두 4개의 D16($\rho=1.06\%$)을 배근하였고, SD80 철근을 주근으로 사용한 경우에는 상·하단 모두 2개의 HD16($\rho=0.536\%$)을 배근하여 각 실험체의 항복내력이 상호 유사하도록 설계하였다.

실험체의 제작에 있어서 보 및 기둥의 전단보강근(hoop)의 구부림 각도는 내진설계 특별규정에 따라 135°로 하며 정착길이는 6d_b로 하였고, 기둥에 사용된 전단보조근(crosstie)은 한쪽은 135°, 다른 한쪽은 90°로 가공하고 정착길이는 모두 6d_b로 하였다. 다음의 표 1에 실험체 설계 및 제작에 관한 사항을, 그림 1에 실험체 배근상세를 나타내었다.

표1 실험체 설계 일람표

실험체	단면 b×D(cm)	상·하부철근		휨보강근비 ρ (%)	중간철근				스터립
		A _s (cm ²)	f _y (kg/cm ²)		사용철근	앵커형태	보강길이	A _v /A _s	
40CM-STAN	20×35	4HD16	4000	1.06	-	-	-	-	Φ6-@55
80CM-STAN	20×35	2HD16	8000	0.53	-	-	-	-	Φ6-@55
40IV-1.0 D10	20×35	4HD16	4000	1.06	2D10	수직앵커	1.0d	0.18	Φ6-@55
80IV-1.0 D10	20×35	2HD16	8000	0.53	2D10	수직앵커	1.0d	0.18	Φ6-@55

· f_{ys} = 전단보강근 항복강도 (4000 kg/cm²)
 · f_{ys} = 중간 철근 항복강도 (4000 kg/cm²)
 · f'_c = 콘크리트 압축강도 (700 kg/cm²)

2.3 재료 시험

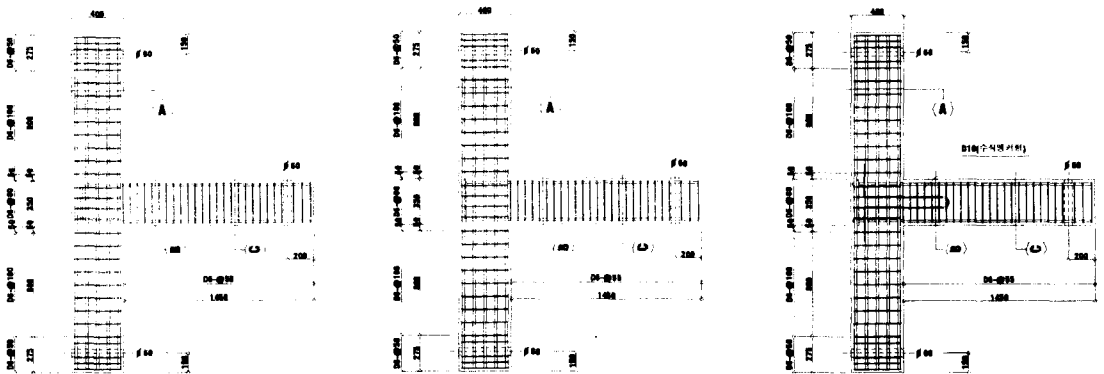
본 실험에 사용된 철근 및 콘크리트의 재료적 특성을 알아보기 위하여 KS B 0801의 라호 규정에 따라 시험편을 제작하여 KS B 0802 및 KS F 2404 규정에 따라 재료시험을 실시였으며 그 결과는 각각 표 2, 표 3과 같다.

표 2 철근의 인장강도 시험결과

구분	탄성계수 (t/cm ²)	항복용력도 (t/cm ²)	항복변형도 (× 10 ⁻⁶)	인장강도 (t/cm ²)	신율 (%)
HD19(SD40)	2117	4.12	1946	6.70	21.0
HD16(SD40)	1987	4.09	2058	6.45	19.8
HD16(SD80)	1886	9.189	4872	10.443	11.3
HD10(SD40)	1965	3.87	1969	5.75	21.4
HD6 (SD40)	1821	4.35	2800	5.70	14.3

표 3 콘크리트의 압축강도 시험결과

구분	압축강도 (kg/cm ²)			높이 (cm)	단면적 (cm ²)	탄성계수 (t/cm ²)	슬럼프 (cm)
	3일	7일	28일				
f'c = 700 (kg/cm ²)	429	549	696	20.2	78.6	410	21.4



(a) 40CM-STAN

(b) 80CM-STAN

(c) 80IV-1.0D10

그림 1 실험체 배근상세

2.4 실험방법

2.4.1 실험체의 설치 및 가력방법

실험체는 그림 2에서 보는 바와 같이 기둥 양 단부에서 회전이 가능한 힌지를 부착하여 수평방향으로 누워서 설치하였으며 일정축력의 가력을 위해서 실험체의 하부에 300t 용량의 복동식 오일잭(oil jack)을 설치하였다. 보의 반복하중은 보 단부에 미리 매립해 놓은 PVC 파이프를 통하여 반력프레임(reaction frame)에 부착된 50t 용량의 액츄에이터(actuator)를 연결하여 가력하였다.

2.4.2 데이터의 습득 및 측정방법

실험의 진행은 하중 작용점에 부착된 변위계(LVDT)의 변위를 연속적으로 측정하면서 의도된 변위 이력에 따라 가력하였다. 보 단부에 작용한 하중은 액츄에이터(actuator)의 헤드(head) 부분에 부착되어 있는 로드셀(load cell)에 의하여 측정하였으며 작용하중에 대한 보 단부에서의 변위는 작용 하중점에 부착된 변위계로써 측정하였고, 보-기둥 접합면으로부터 0.5d, 0.5d~1.0d, 1.0d~2.0d 부분에 그림 2

와 같이 변위계를 설치하여 전단변형을 측정하였다.

2.4.3 변위 이력(loading history)

첫번째 사이클에서는 보-기둥 접합부의 보 주근에 부착한 WSG의 변형도가 철근의 재료시험에 의해 구한 항복변형도에 이를 때까지 가력하여 초기 항복변위(δ_y)로 설정하였고 그림 3의 하중이력 곡선과 같이 $2\delta_y$ (연성비 2), $4\delta_y$ (연성비 4), $6\delta_y$ (연성비 6)로 가력하여 집중변위법과 일정변위법을 병행하여 가력하였다. 각 사이클에서의 일정변위 가력시에는 3회의 사이클로 가력하여 일정변위시의 강성 및 강도저하 특성을 파악하고자 하며 각 사이클에서의 최대하중이 실험체 항복하중의 75%이하로 떨어졌을 때 실험을 종료하였다.

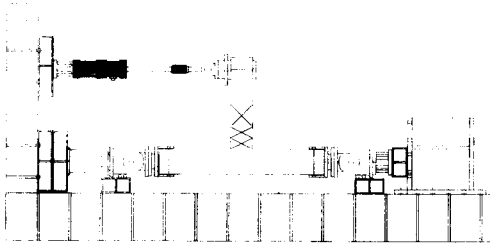


그림 2 실험체 설치

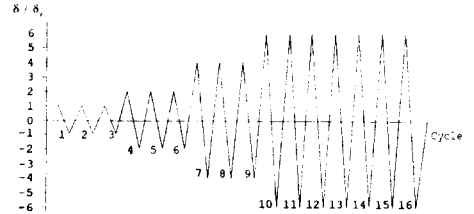
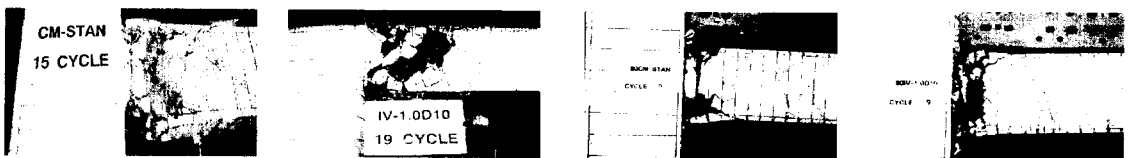


그림 3 하중 이력

3. 실험결과 및 분석

3.1 실험체별 균열 및 파괴상황

각 사이클에서의 최대하중이 실험체 항복하중의 75% 이하로 되었을 때의 파괴상황을 그림 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 40CM-STAN 실험체는 0.5d 부분에 X 자형 전단균열이 발생하여 주로 0.5d 부분에서 파괴가 집중되는 경향을 나타내고 있으며 80CM-STAN 실험체의 경우 소성힌지가 접합면에 발생하는 파괴양상을 보인 반면 수직앵커형 중간철근으로 보강된 40IV-1.0D10 실험체 및 80IV-1.0D10 실험체는 중간철근에 의해 소성힌지가 이동되는 1.0d 부분과 기존의 배근방법에 의한 소성힌지의 형성위치인 0.5d 부분으로 파괴가 분산됨에 따라 소성힌지가 확산되는 경향을 나타내었다.



(a) 40CM-STAN

(b) 40IV-1.0D10

(c) 80CM-STAN

(d) 80IV-1.0D10

그림 4 각 실험체의 파괴 상황

3.2 하중-변위 곡선

각 실험체에 대한 하중-변위 곡선은 그림 5와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 40CM-STAN 실험체는 한계변위가 $6\delta_y$ 인 9사이클 이후 내력의 감소현상을 나타내다가 10사이클부터 급격한 내력의 저하를 나타내고 있고 이에 대하여 1.0d 부분을 D10의 수직앵커형 중간철근으로 보강한 40IV-1.0D10 실험

체는 8사이클 이후부터 중간철근의 보강에 의해 소성힌지가 이동되는 1.0d 부분과 기존의 배근방법에 의한 소성힌지의 형성위치인 0.5d 부분으로 파괴가 분산됨에 따라 완만한 내력감소현상을 나타내고 있다. 80CM-STAN 실험체는 한계변위가 $4\delta_y$ 인 8사이클부터 급격한 내력의 저하를 나타내었고 이에 대하여 80IV-1.0D10 실험체는 중간철근의 보강에 의한 고른 균열의 확산에 의해 완만한 하중 지지를 보였으나, (-)8사이클 가력시 주근이 파단됨에 따라 내력이 급격히 저하되었다.

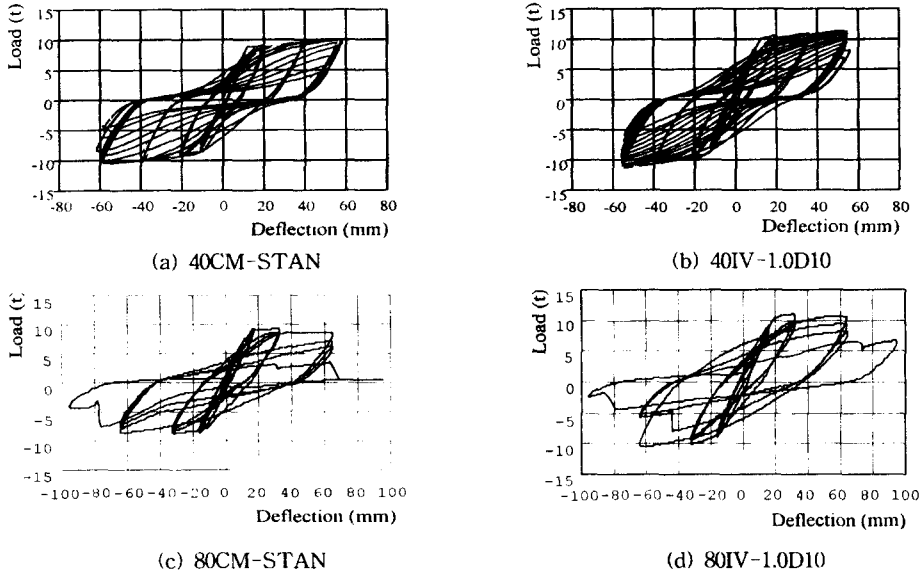


그림 5 실험체별 하중-변위 곡선

3.3 에너지 분산능력

각 실험체의 변형능력을 정량적으로 평가하기 위한 방법의 하나로서 각 사이클에서의 최대하중이 항복하중의 75% 이상인 사이클에 대한 부재의 에너지 분산능력을 비교하여 표 4에 나타내었다.

표4 에너지 분산능력 일람표

실험체	항복하중 P_y (t)		최대하중 P_m (t)		항복변위 δ_y (cm)		최대변위 δ_m (cm)		사이클 수 (n)			분산 에너지 (t · cm)
	+	-	+	-	+	-	+	-	$P_n > 0.75P_y$		실험 종료	
									+	-		
40CM-STAN	7.33	8.30	10.07	10.45	0.99	1.09	5.80	6.14	14	13	15	565.5
40IV-1.0D10	8.37	7.95	11.25	10.92	0.95	1.21	5.62	5.59	20	19	20	898.8
80CM-STAN	9.209	8.601	9.219	8.721	1.6726	1.6151	9.5455	9.5695	8	9	10	382.5993
80IV-1.0D10	9.159	9.045	11.045	10.425	1.6041	1.6043	9.4730	9.5980	10	8	10	449.5276

3.5 사이클별 최대 전단변형도의 변화

그림 6에서 보는 바와 같이 중간철근으로 보강한 40IV-1.0D10 실험체의 경우는 D1(0.5d) 구역의 전단변형도가 D2(1.0d) 구역의 전단변형도에 비하여 같거나 조금 큰 경향을 나타내고 있으며 D1 구역의

전단변형도의 절대값도 40CM-STAN 실험체에 비하여 약 60% 정도 감소되었고, 80IV-1.0D10 실험체의 경우 역시 80CM-STAN 실험체에 비하여 약 40% 정도 감소되는 경향을 보였다.

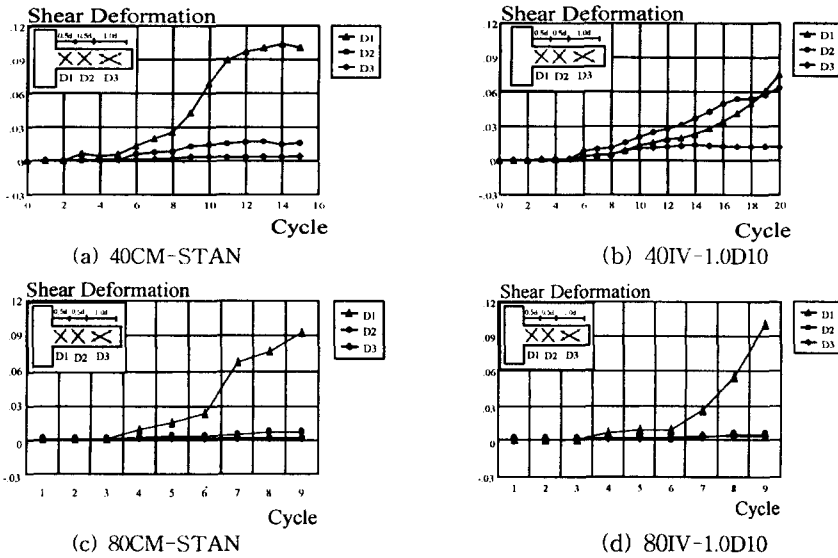


그림 6 사이클별 전단변형도의 변화

4. 결론

이상의 실험결과를 분석하여 얻은 결론을 기술하면 다음과 같다.

- 1) 보 단부의 1.0d 부분을 수직형 중간철근으로 보강하면 소성힌지를 보 단부의 1.0d 부분까지 이동 및 확산시킬 수 있다.
- 2) 중간철근을 수직으로 앵커하면 중간철근에 의한 소성힌지의 확산효과에 의해 에너지 분산능력이 SD40의 철근을 보 주근으로 사용한 경우 관례적인 보강방법에 따라 설계된 실험체보다 약 1.6배, SD80의 철근을 배근했을 경우에는 약 1.2배 증가 된다.
- 3) 보 주근의 고강도화에 따른 제안하는 배근상세는 관례적인 보강방법에 의한 보강방법보다 변형능력이 우수한 것으로 나타났지만, 고강도 철근의 사용에 있어서는 신율 등의 재료적 성능의 향상이 따라야 한다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. Abdel-Fattah, B.A. and J.K. Wight (1987). Study of Moving Beam Plastic Hinging Zones for Earthquake Resisting Design of R/C Buildings. ACI Structural Journal, 84, Jan-Feb., 31~39.
2. Al-Haddad, M.S. and J.K. Wight (1988). Relocating Beam Plastic Hinging Zones for Earthquake Resisting Design of Reinforced Concrete Buildings. ACI Structural Journal, 86, March-April, 123~133.
3. Hwang, T.H. and C.F. Scribner (1984). R/C Member Cyclic Response During Various Loadings. Journal of Structural Engineering, ASCE, 110, No. 3, Mar., 477~489