고강도 재료를 사용한 외부 보-기둥-슬래브 접합부의 지진응답

Seismic Response of Exterior Beam-Column-Slab connection using High-Strength Materials

장극관* 서대원** 양승호**
(Chang, Kuk-Kwan Seo, Dae-Won Yang, Seung-ho)

ABSTRACT

The purpose of this study is to compare the response of the high-strength concrete beam-column-slab subassembly with the response of a normal-strength concrete specimens. Four assemblies were designed 2/3 scale beam-column-slab joint(f_c'=240kg/cm^2, f_c' =700kg/cm^2) and tested to investigate seismic behaviour.

From the test results, 1) flexural cracks emerge to inside of beam deeply for high strength concrete member, 2) the high-strength specimens represented stable hysteretic behaviour for the displacement ductility 5.5. but, degradation in stiffness and strength, and unstable hysteretic behaviors were observed, owing to the brittleness of high-strength concrete beyond its range.

1. 서론

철근 콘크리트 구조체에서 보-기둥 접합부를 강접합으로 한 골조(rigid frame system)는 주거용 건물의 구조 시스템으로서 널리 사용되어지고 있으나, 수평재와 수직재가 만나는 접합부에서는 부재의 단면과 그에 따른 강성의 불연속으로 응력이 집중되고 바람, 지진등 수평하중의 작용에 의하여 휨모멘트와 전단력이 커져서 접합부나 그에 인접한 부재에 균열을 일으키게 된다.

특히 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트와 다른 특성, 예를 들면 최대내력이후의 강도저하가 현저하고 파괴성상이 취성적인 성질이 있다. 또한 현재 우리나라의 내진규준에서는 접합부 배근에 특별한 규정이 명시되어 있지 않다. 따라서 고층 철근 콘크리트 건축물이 지진하중과 같은 비탄성 변형을 일으키는 반복주기하중을 받을 때 보나 기둥의 부재요소보다는 접합부가 더욱 취약한 것으로 예상된다.

현재까지 선진외국에서는 주로 압축강도가 420 kg/cm^{2}이하의 보통콘크리트를 사용한 보-기둥 접합부에 관한 역학적 특성규명 및 설계방법에 관한 연구가 많이 진행되어왔으며, 이분야의 연구

* 서울산업대학교 건축공학과 교수, 정회원
**서울산업대학교 석사과정

결과를 토대로 ACI-ASCE 352 권장안을 제시하고 있다. 그러나 고강도철근콘크리트 보-기둥 접합부의 구조성능에 관한 연구는 상대적으로 충분히 이루어지지 않고 있다. 이러한 관점에서 이 연구에서는 실제의 중진지역 30층의 고강도 콘크리트 골조에서 보-기둥-슬래브 접합부의 수평하중에 의한 구조거동과 파괴형태를 실험적으로 조사하고 일반강도 콘크리트 접합부에 관한 실험과 비교 검토하여 콘크리트의 강도가 높아짐에 따른 효과 및 문제점을 조사하고자 한다.

2. 실험체 계획

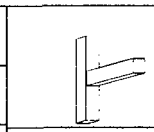
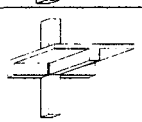
2. 1 일반사항

반복주기하중을 받는 고강도 철근 콘크리트 보-기둥 접합부의 거동특성을 파악하기 위하여 실제 서울지역의 30층 모멘트연성 골조 구조물의 10층 외부 보-기둥 접합부를 대상으로 그림 1과 같이 제작하였다. 실험체의 크기는 실제구조물의 2/3크기로 축소한 보와 기둥, 슬래브로 구성되었으며 일반강도 보-기둥 접합부, 고강도 콘크리트를 사용한 보-기둥 접합부를 제작하였다. 실험체는 보와 기둥으로 구성된 NBC, HBC 그리고 슬래브와 횡방향보가 있는 NBCBS, HBCBS으로 나누었으며 강도에 따른 효과를 보기 위하여 콘크리트 강도는 240kg/cm^2(NBC, HBCBS), 700kg/cm^2(BC, HBCBS)으로 분류하여 실험체를 계획했다. 철근의 배근은 실제 구조도면 배근을 2/3로 축소하여 실제 구조물과 같은 효과를 낼 수 있도록 배근하였으며, 실험체의 상세는 그림 2와 같으며 각 실험체의 형태 및 특징은 도표 1에 나타나 있다.

2. 2 사용재료 및 시험결과

실험체는 실험이 행해진 한양대학교 초대형구조실험동에서 현장제작을 하였으며, 타설된 콘크리트는 설계기준강도 240kg/cm^2, 700kg/cm^2, 두 종류이고, 슬럼프는 12 cm 로 제한하였다. 실험체의 보강근으로는 기둥의 주근은 D19, 보의 주근으로는 D16을 사용하였고, 전단보강근은 D10, 슬래브 보강근은 ϕ6을 사용하여 제작하였다. 콘크리트 타설시 KS F 2402 에 따른 슬럼프 측정을 실시하였고, 실험체의 압축강도 측정을 위하여 강도별로 각각 6개의 ϕ10×20 cm 공시체를 제작, 28일간 현장양생하여 강도실험을 실시하였다. 철근의 인장시험은 한양대학교 초대형구조실험동에서 실시하였다.

도표 1 실험체의 단면형상 및 배근상황

Specimens		Beam(200×300mm)		Column(250×250mm)		Slab	Connection Hoops	Compressive strength (kg/cm^2)
		Top / Bottom	Stirrup	Total bar	Hoops			
NBC		4-D16 / 3-D16	D10 @100	8-D19	D10 @150	ϕ6 @150	D10-1EA	240
HBC							D10-1EA	700
NBCBS							D10-1EA	240
HBCBS							D10-1EA	700

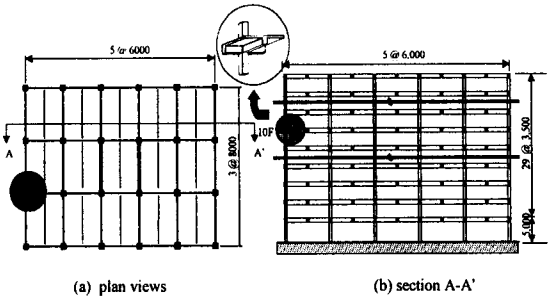


그림 1. 부분구조체 선정

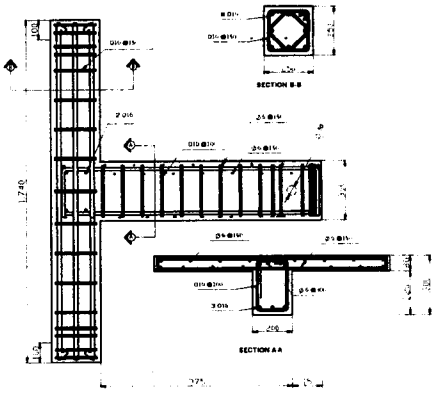


그림 2. 실험체 배근상세 (units=mm)

3. 실험체의 설치 및 실험 방법

3. 1 실험체의 설치

실험체의 설치는 그림 5와 같으며, 실제건물의 변형상태에서 반곡점이 재현되도록 시험체 기둥의 양단에 힌지를 제작하여 설치하였다. 또한 접합부부위의 변형을 측정하기 위해서 기둥과 보의 동일한 위치에 스트레인 게이지(strain gage) 17 개를 부착하였으며 슬래브가 있는 NBCBS와 HBCBS 1은 8개의 스트레인 게이지를 슬래브에 부착하였다. 부착위치는 그림 3에 나타나 있다. 또한 보의 변곡점에 작용하는 하중을 조절하고, 보와 접합부의 변형을 측정하기 위하여 그림 4와 같이 슬래브와 횡방향 보가 있는 NBCBS와 HBCBS는 17개, NBC와 HBC는 15개의 LVDT를 부착하였다.

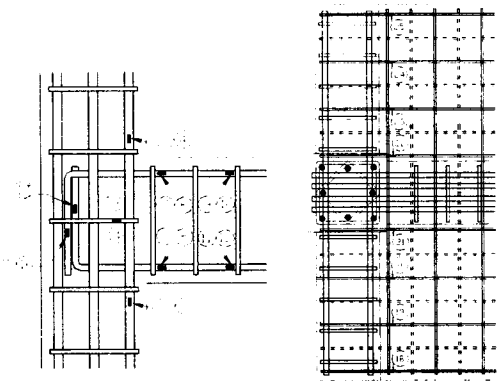


그림 3 스트레인 게이지의 부착위치

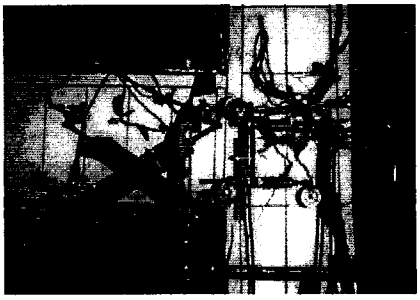


그림 4 LVDT의 설치위치

3. 2 실험 방법

그림 5와같이 설치된 실험체의 기둥에 축하중은, 먼저 선정된 기둥에 가해지는 축하중을 구하고 상사법칙의 축소율에 따라 오일 잭을 사용하여 일반강도 실험체 NBC, NBCBS는 30ton, 고강도 콘크리트 실험체 HBC, HBCBS은 60ton을 일정하게 실험 종료 시까지 재하하였다. 반복하중을 위한 가력장치는 MTS 25ton용량의 유압식 가력기(Actuator)를 사용하였으며, 보의 변곡점에 변위제어에 의해 하중을 작용시켰다. 반복 주기하중의 형태는 그림 6과 같다

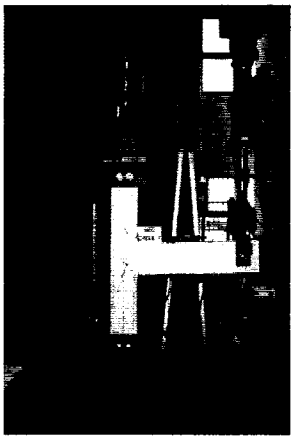


그림 5 실험체 설치

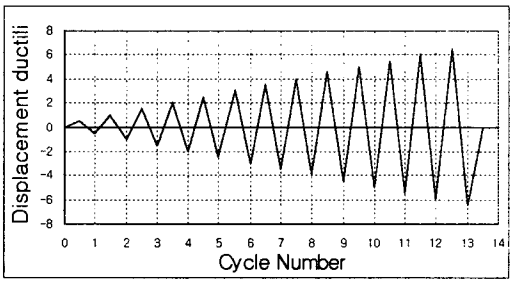


그림 6. 작용하중의 이력 형태

4. 실험결과 및 분석

4. 1 균열 및 파괴상황

그림 7은 각 실험체의 최종파괴 양상을 보이고 있다. 일반강도로서 횡방향보가 없는 NBC는 1 cycle에서 초기균열이 기둥면에서 20cm 정도 떨어진 보의 밑면에서 발생하였다. 접합면은 1 cycle에서 균열이 발생하여 4 cycle부터는 접합면에서의 전단균열이 두드러졌고, 9 cycle에서 기둥의 피복이 박리되었다. HBC의 경우 보의 초기균열은 거의 NBC와 유사하나, 접합부의 균열은 2 cycle에서 발생하였다. 이후 균열이 발전하여 10 cycle에서 기둥의 피복이 박리 되었다. 보의 균열은 NBC에 비해 많은 균열이 발생하였으며 기둥과의 접합면에서의 균열이 NBC에 비해 크게 나타났다.

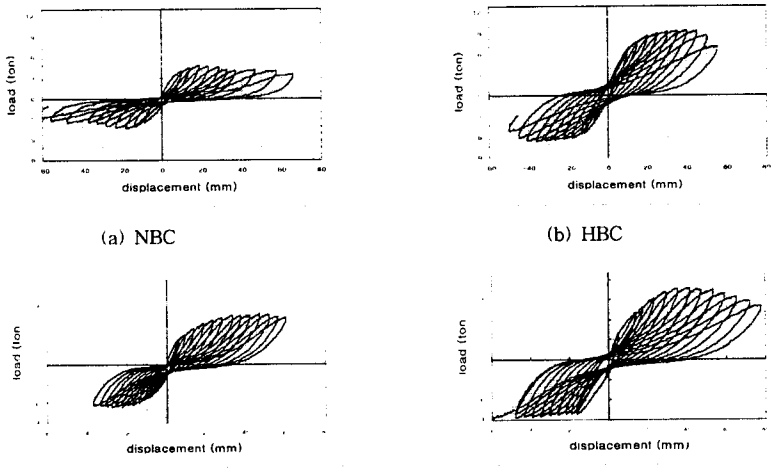
슬래브와 횡방향보가 있는 일반강도 실험체 NBCBS는 1cycle에서 슬래브 상부와 보 밑면에서 초기균열이 발생하였다. 접합부의 전단 균열은 3 cycle 이후에 발생하였고 최종 파괴상황은 횡방향보가 없는 실험체에 비해 양호하였다. 고강도 실험체 HBCBS는 접합부의 균열은 3 cycle에 발생, 11 cycle 이후에 급격히 진전되었는데, 이는 고강도 콘크리트의 취성적인 성질에 기인한 것으로 사료된다. 보의 균열 역시 일반강도 실험체에 비해 더 광범위하게 보 전반에 걸쳐 발생하였으며 균열의 진전도 빨랐다.

(a) NBC (b) HBC (c) NBCBS (d) HBCBS

그림 7 각 실험체의 파괴상황

4. 2. 하중-변위 곡선

그림 8은 각 실험체의 하중-변위 곡선을 보여주고 있다. 각 cycle이 증가할수록 균열폭과 수의 증가로 강도의 저하현상을 나타내고 있다. 또한, +방향 가력시에 -방향보다 강도가 크게 나타나 비대칭곡선을 보이고 있는데, 이는 철근의 단면적이 상단부가 25% 더 크게 배근되었기 때문으로 판단된다.



(a) NBC (b) HBC

(c) NBCBS (d) HBCBS

그림 8 실험체의 하중-변위 곡선

4. 3 강도, 강성, 연성

일반강도 콘크리트를 사용한 NBC, NBCBS는 초기강도가 고강도 실험체 HBC, HBCBS에 비해 작았으며,최대강도에 있어서도 큰 차이를 보였지만, 반복주기하중의 증가에 비교적 안정된 모습을 나타내었다. 일반강도 NBC에 비하여 HBC는 강도가 약 70%의 증가를 보였고, 횡방향 보와 슬래브가 있는 HBCBS는 일반강도 실험체 NBCBS에 비해 30%의 강도 증가를 보였다. 그러나 고강도

콘크리트를 사용한 HBC, HBCBS는 초기강도는 크지만 HBC는 8 cycle, HBCBS은 9 cycle 이후 강도가 떨어졌으며 이에따라 고강도 콘크리트 사용시 지진하중에 따른 강도의 저하를 고려해야 할 것으로 판단된다. 각 시험체의 강도변화는 그림 9에 나타내었다. 실험체의 형태에 따라 강도의 차이는 크게 나타났다. 횡방향보와 슬래브가 있는 실험체 HBCBS, NBCBS의 강도증가가 크게 나타났다. 이는 횡방향보가 접합부의 코아 콘크리트를 구속해줌으로서 접합부의 강도 및 강성에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

시험체의 강성은 그림 10과 같은 방법으로 구하였다. k는 각 하중 cycle에서 정(+)방향과 부방향(-)에서의 최대하중과 최대변위가 만나는 점의 기울기로 측정하였다. 그림 10에 나타낸 것처럼 초기 강성의 차이는 콘크리트의 강도와 형태에 따라 콘 차이를 보이지만 4 cycle 이후의 강성저하는 반복하중이 증가함에 따라 거의 비슷하게 감소하고 있음을 보이며, 콘크리트 강도에 따른 강성저하의 차는 그리 크지 않게 나타났지만 초기 강성이 컸던 고강도 콘크리트 실험체의 강성저하가 더 크게 나타났다.

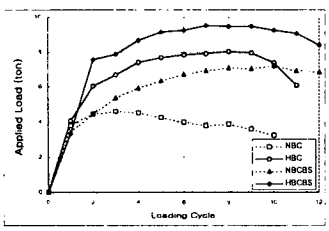


그림 9 각 실험체의 최대내력 비교

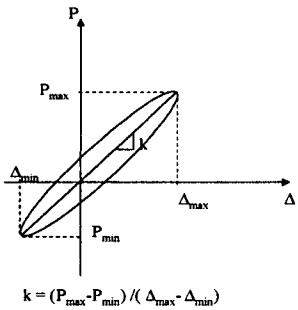


그림 10 강성 k의 산정

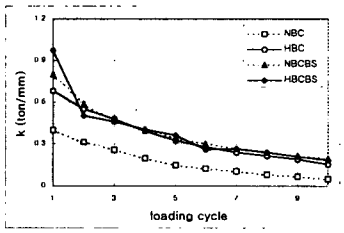


그림 11 각 실험체의 강성의 비교

4. 4 에너지 소산능력

지진하중을 받는 철근 콘크리트 구조물의 내진성능을 평가함에 있어서 에너지 소산능력은 대단히 중요하며 구조물의 설계시 높은 에너지 소산능력을 갖도록 설계되어야 한다. 일반적으로 에너지 소산능력은 하중-변위곡선으로 둘러싸인 면적에 의하여 평가된다. 이는 실험체가 지니고 있는 고유한 에너지 흡수능력을 평가하는데 적용되었다. 시험체별 소산된 에너지를 그림 12에 나타내었다. 전체적인 에너지 소산능력은 고강도 실험체가 높게 나타났다. 이는 본 실험체가 ACI에서 권장한 휨강성비 1.4보다 큰 2.3 및 2.9로 설계되었기 때문으로 판단된다. 또한 10 cycle이후 횡방향보가 있는 HBCBS가 HBC에 비해 에너지소산능력의 증가율이 적게 나타났다. 이는 접합면의 집중적인 피해에 의한 핀칭현상에 기인한 것으로 보여진다.

4. 5 보의 신장

보의 소성힌지 영역의 변형을 측정하기 위하며 각 실험체에 그림 4와 같이 LVDT를 설치하였

다. 반복주기하중이 작용하는 동안 보의 상부근과 하부근은 교대로 인장을 받게 된다. 각 cycle 마다 발생하는 보의 최대신장의 평균으로 구하였으며, 각 cycle별 보의 소성힌지 영역의 신장은 그림 13에 나타내었다. 보의 소성힌지 영역에서의 신장을 통하여 각 실험체의 파괴형태를 고찰할 수 있었다. 일반강도 시험체에 비하여, 고강도 실험체인 보의 신장이 초기에는 적게 나타났으나 횡방향보가 없는 NBC는 5 cycle 이후에, 횡방향보가 있는 NBCBS는 10 cycle 이후에 각각 같은 형상인 HBC, HBCBS보다 적게 나타났다.

4. 6 접합부 전단보강근의 변형도

접합부의 전단보강근의 변형도는 그림 13에서 나타낸 바와 같이 반복하중이 증가할수록 콘크리트의 강도보다는 횡방향보의 유무에 따라 변형도가 큰 차이를 보이고 있다. 이는 접합부가 횡방향 구속효과에 의해 보호되었음을 알 수 있다.

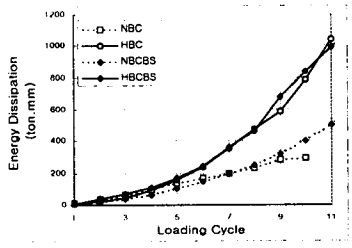


그림 12 각 실험체의 에너지소산능력 비교

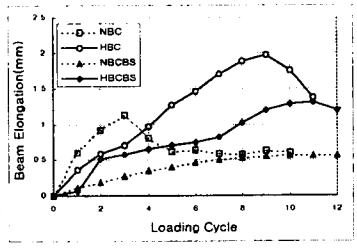


그림 13 보의 소성힌지영역의 신장

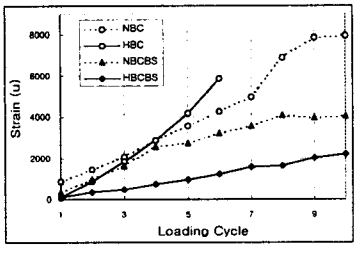


그림 14 접합부 보강근의 변형도 변화

5. 결론

이상과 같이 반복 주기 하중을 받는 외부 보-기둥-슬래브 접합부의 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 고강도 콘크리트를 사용한 국내 실제 건물의 외부 보-기둥 접합부는 변위연성이 5까지는 비교적 안정적인 이력거동을 나타내었다.
2) 반복 주기하중을 받는 고강도 철근 콘크리트 보-기둥-슬래브 접합부의 실험를 통하여 고찰된 파괴형태는 일반강도 콘크리트에 비하여 보의 매우 넓은 영역에 광범위한 균열이 발생하였다. 따라서 에에 대한 스터럽등의 보강이 필요하다.
3) 고강도 철근 콘크리트 보-기둥-슬래브 접합부는 10 cycle(변위연성 5.5)이후에는 고강도 콘크리트의 취성적인 성질로 인하여 강도의 감소가 나타났다.
4) 횡방향보가 있는 경우 구속효과로 인하여 균열이 적게 발생하고 접합부의 거동에 큰 영향을 미친다. 따라서 접합부의 보강시 횡방향 보의 구속효과를 고려하여 적절한 전단보강이 요구된다.
5) 접합부의 전단 균열에 의한 파괴에 대한 추가 보강 및 부재의 형태에 따른 추가연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초 (과제번호 : 07060201013) 연구의 일환으로 수행되었으며, 연구비를 지원해준 한국과학재단에 감사드립니다.

참고문헌

1. 하기주, "고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 이력거동 및 내진성능 개선", 한국과학기술원, 토목공학과 박사학위논문, 1992. 8
2. 장극관, 오영훈, 김윤일, "RC 보-기둥-슬래브 접합부내 횡보강근의 내진성능에 관한 실험적 연구", 대한건축학회논문집 13권 7호, 1997. 7, pp185-195
3. 이광수, 오정근, 권영호, 신성우, "반복하중을 받는 고강도 철근 콘크리트 보-기둥 접합부의 횡보강근 효과에 관한 연구", 대한건축학회학술발표논문집, 제10권 제1호, 1990. 4.
4. 서만식, 장준호, 김영문, "반복하중을 받는 비내진 저층 RC구조물의 외부 기둥-보 접합부의 거동, 콘크리트학회지제11권1호, 1992. 2
5. P. C. Cheung, "Seismic Design of Beam-Column Joint with Floor slab", Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Chrischurch, New Zealand, 1991.
6. Glenm M. Marquis, "Effect of High-Strength Concrete on The Seismic Response of Concrete Frames". M. Eng. Thesis, Department of civil Engineering and Applied Mechanics. McGill University. Montreal. Qubeic, 1997.
7. Gilson N. Guinmaraes, Michael. E. Kreger, Jamens O. Jirsa, "Reinforcement Concrete Frame Connection Constructed Using High-Strength Materials, Report No.89-1, Phill M. Ferguson Structural Engineering Laboratory, The University of Texas at Austin, August, 1989
8. ACI-ASCE Commitee 352, " Recommendation for design of beam-column joints for seismic resistance"(SP-123), ACI, Detroit, Mich, 1991.