

고강도 콘크리트를 사용한 보-기둥 접합부의 비 선형 거동에 관한 기초적 연구

A Fundamental Study of the Inelastic
Behavior of High Strength Concrete Beam-Column Joints.

민정규* 박헌수** 오정란***
Min, J.K. Park, H.S. Chung, L.

ABSTRACT

Six small-scale reinforced concrete beam-column joint specimens subjected to monotonic and cyclic loading were tested to investigate the effects of strength of concrete. Variables are 1) compressive strength of concrete ($f'_c=300, 700 \text{ kg/cm}^2$), 2) shear span to depth ratio ($a/d=4.7, 2.0$). The major results of this test were: 1) flexural strength of high strength concrete beam-column joint was not affected too much by the compressive strength of concrete, 2) flexural cracks emerge to inside of beam deeply for high strength concrete member.

1. 서론

근세 이후 구조재료로서의 콘크리트 사용은 물량적으로 기하 급수적인 증가를 보여왔는데 이렇게 널리 쓰이는 콘크리트의 가장 큰 결점은 무게에 대한 상대적으로 낮은 강도 (low strength-to-weight ratio)와 약한 인성 (low ductility)의 문제이다.

재료공학의 발달로 최근 초 고층 건물, 거대한 해양구조물 및 교량, 특수 토목 구조물 등 규모가 크면서도 다양한 콘크리트 구조물의 출현으로 구조재료로서 콘크리트의 고강도화 및 고인성화를 절실히 요구하고 있다.

이에 따른 콘크리트의 고강도화가 시도되어 현재 각국에서 시도되고 있으며, 고강도 콘크리트를 사용함으로써 일부 부재의 단면 및 고정하중의 감소, 부재내력의 증대, 장스팬의 가능 및 경제성의 향상을 가져왔다.

국내에서도 최근들어 고강도 콘크리트를 사용한 구조 부재의 거동에 관한 연구를 시작하여 휨 부재의 거동[1-3], 강섬유 보강 고강도 철근 콘크리트 보의 거동[4], 그리고 보-기둥 접합부의 비선형 거동[5,6] 등에 관한 실험결과들이 잇따라 발표되고 있다.

우리나라에서는 1988년 7월 부터 건설부 규준에 의해 6층 이상이나 특수 건축물의 건물에 대하여

의무화 시킨 내진설계로 인하여 고층 건물에 필요한 고강도 콘크리트를 이용할 때의 내진 설계기준을 제시하는 것이 필수적으로 요구된다. 특히 고강도 콘크리트는 보통 콘크리트와 다른 특성, 예를 들면 최대내력 이후의 급격한 강도 저하와 파괴가 일어 나므로, 앞으로 사용이 많이 요구되는 고강도 콘크리트에 대한 정확한 역학적 특성 및 올바른 평가로 인해 구조물의 안정성 확보 및 구조기술 개발이 시급히 요구되고 있다.

또한 지진하중과 같은 횡하중이 고층 철근 콘크리트 구조물에 작용될 때 구조물의 가장 취약 부분인 보-기둥 접합부에 급격한 파괴가 일어나지 않고 에너지 소산 능력을 증대 시키기 위한 설계방법이 요구되어 지고 있으며, 미국의 ACI Code [7]에서도 콘크리트의 압축강도를 420 kg/cm^2 (6000psi) 까지만으로 실험식의 사용을 제한하고 있다.

따라서 본 연구는 일반 강도와 고강도 철근 콘크리트 구조물인 보-기둥 접합부를 모델로 하여 반복하중의 작용시에 발생하는 비 선형 거동 및 균열 상태를 비교 분석 하였다.

2. 실험

2.1 시험체 설계

반복하중을 받는 일반 강도 및 고강도 콘크리트 보-기둥 접합부의 거동을 파악하기 위하여 6개의 시험체를 제작하였다. 시험체는 각각 3가지 종류 (A, B, C 형태)로 제작하였는데 A와 B는 같은 크기

* 정희원, 단국대학교 건축과 대학원 석사과
** 정희원, 단국대학교 건축과 대학원 박사과정
*** 정희원, 단국대학교 건축과 부교수, 공박.

로 제작되었으며 A 는 일반강도 콘크리트, B 는 고강도 콘크리트로 설계 되었다. A 와 C 는 같은 강도내에서의 전단 스펜비(a/d)값을 변수로 하여 거동을 비교하였다. 시험체의 보 부분은 ACI 318-83의 규정에 따라 설계되었으며 상세한것은 그림1 및 표1과 같다.

표 1. 시험체의 설계

시험체 No.	가력 방법	기둥 (cm)	보 (cm)	보주근	스터럽	a/d
A	1 단조	18x25x40	12x15x70	4-D13	D6	4.7
	2 주기					
B	1 단조	18x25x40	12x15x70	4-D13	D6	4.7
	2 주기					
C	1 단조	18x25x50	12x15x30	4-D13	D6	2.0
	2 주기					

2.2 사용 재료의 특성

1) 철근

보-기둥 접합부에 배근된 철근은 항복강도 대략 4000 kg/cm² 인 주근 D13 과 전단보강 철근 D6 가 시험체에 배근 되었다. 그리고 본 실험에 사용된 철근의 평균 항복강도와 평균 파괴강도의 인장시험 결과는 표 2 와 같다.

표2. 시험체에 사용된 철근의 평균 항복, 평균 파괴 강도

철근 NO.	단면적 (cm ²)	평균 항복강도 (kg/cm ²)	평균 파괴강도 (kg/cm ²)
D13	1.267	3,836.6	5,338.6
D6	0.137	3,550.2	4,163.0

2) 콘크리트의 배합 설계

콘크리트의 배합은 요구되는 강도와 시공성 및 선정된 재료의 최적 설계비에 따라 설계되었으며 고강도 콘크리트는 SP제를 첨가하여 강도를 높였다. 각 시험체의 배합은 표 3에 나타난 바와 같다.

표3. 콘크리트 압축 강도와 배합표

시험체	콘크리트 평균압축 강도 kg/cm ²	W/C (%)	콘크리트 배합량 (kg/m ³)				S.P.제 (%)
			시멘트	물	모래	회석	
A	304	55	388	213	388	647	0
B	702	30	527	184	305	703	1
C	307	55	392	217	393	654	0

그리고 콘크리트 강도를 측정하기 위하여 각 시험체의 거푸집에 콘크리트의 타설과 동시에 공시체(10*20cm)를 제작하였다. 표3에 나타난 각 콘크리트 강도는 3 개의 실린더(10*20cm) 강도를 측정한 평균치 이다.

2.3 시험체의 제작 및 양생

시험체는 방수합판으로 제작된 거푸집내에 철근을 먼저 얹어넣은 다음 콘크리트를 부어 시험체를 제작하였다. 믹서는 공칭 용량 80리터의 강제식

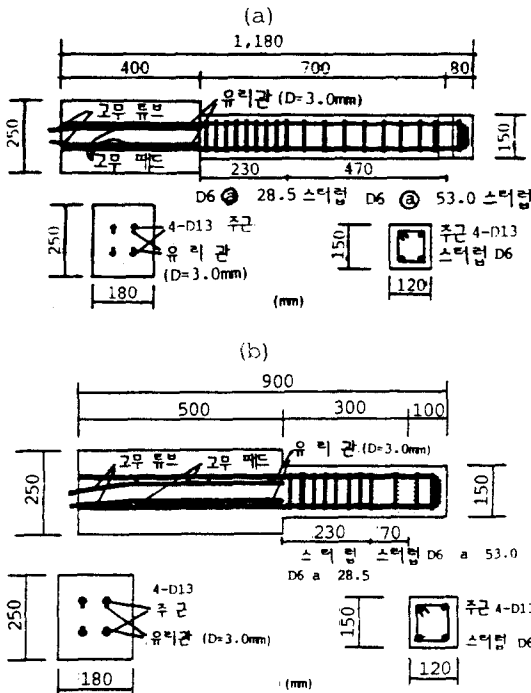


그림 1. 시험체의 설계

(a) a/d=4.7 specimen A,B

(b) a/d=2.0 specimen C

믹서를 사용하였으며 조골재, 세골재, 시멘트, 배합수등의 순서로 배합재료를 투입하여 충분히 건비빔을 한후 타설하였으며 고강도는 초기 배합후 3분간 비비고 고성능 감수제를 첨가한후 다시 5분간 비비 타설하였다. 콘크리트의 타설전에 누수방지와 시공 용이성및 제거시의 용이함과 콘크리트 표면을 원활하게 마무리 하기 위하여 거푸집에 오일을 도포한후 타설 하였다. 그리고 콘크리트 타설시 콘크리트가 거푸집에 밀실하게 채워 질수 있도록 진동 다짐기를 사용하였으며 흡손으로 마감하였다.

콘크리트를 타설한후 급격한 건조를 피하고 습윤을 유지하기위하여 젖은 모포로 감싸 두었다가 24시간이 지난후 탈형하여 수조에 담그고 수중히터를 작동시켜 32°C의 온도를 유지하여 28일 이상 충분히 양생하였다.

실험후 절단하여 내부 균열상태를 파악하기 위하여 미리 직경 3mm 의 유리관을 그림 1과 같이 삽입한후 콘크리트를 타설하였다.

2.4 실험 장치

이 연구의 목적에 알맞은 실험을 위하여 한국 기계연구소 부설 해사 연구소(구 선박 연구소) 구조 실험실의 MTS System을 임차하여 실험하였다. 실험에 이용한 MTS System은 actuator의 최대 하중은 5ton, 최대 stroke는 $\pm 7.5\text{cm}$ 이며 컴퓨터에 의해 제어되는 data acquisition system의 데이터 수집 속도는 2000개/sec로 64개의 channel로 이루어져 있다. 실험체의 기둥단부는 4개의 hinge를 이용하여 고정하였으며, 보 부분의 가력점도 회전을 고려하여 hinge로 처리되었다. 전체적인 실험장치는 그림 2와 같다. 시험체는 그림 2에서 보는바와 같이 시험을 위한 프레임에 기둥부분을 수평으로 눕혀서 설치하였다.

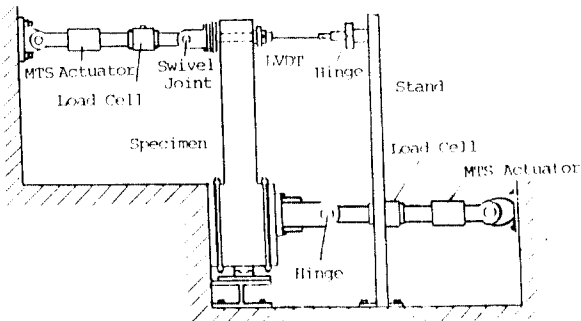


그림 2. Test set-up

2.5 실험 방법

시험체의 기둥에는 용량이 25ton인 actuator를 이용, 기둥평형하중 (balanced load of column)의 40% 정도인 대략 70kg/cm^2 의 압축응력을 일정하게 가하였다.

또한 그림 2에서 보는 바와 같이 보의 가력점에 로드셀을 부착한 Actuator를 사용하여 변위제어 (displacement control)로 단조하중과 반복주기 하중을 작용하였으며 반복주기하중의 변위이력은 그림 3과 같다.

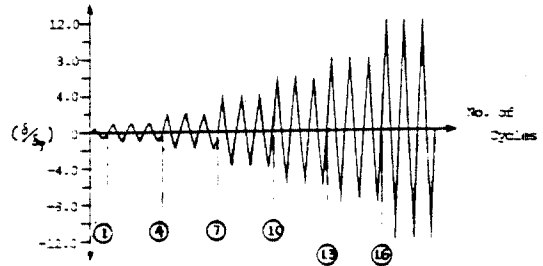


그림 3. 시험체에 작용된 변위이력

3. 실험결과와 분석

3.1 하중 이력 거동 특성

1) 단조하중 (monotonic loading)

단조하중이 작용된 시험체 A1, B1, C1 시험체의 하중-변위 곡선은 그림 4 와 같다. 이 그림에서 보는 바와 같이 A1 시험체의 최대하중은 약 1.68ton이며, B1의 최대하중은 1.8ton, C1 시험체는 약 4.3 ton 에 이르고 있는 바, 고강도 콘크리트 (700kg/cm^2) B1 시험체의 강도는 일반강도(300kg/cm^2)인 A1 시험체보다 약 7% 높은 최대강도를 보여주고 있다.

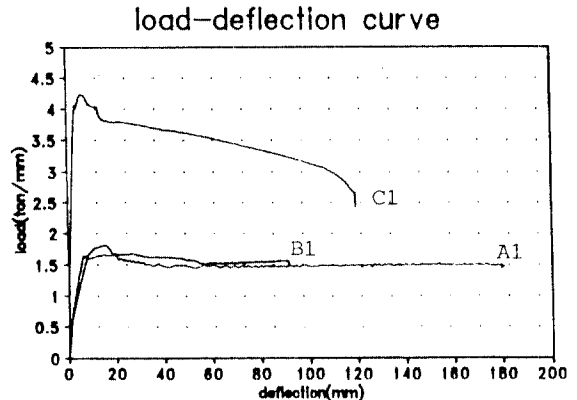


그림 4. 하중-변위 곡선 (specimen A1, B1, C1)

극한강도 설계법으로 구해지는 시험체의 이론적인 최대 휨강도(M_u)는

$$M_u = 0.85 f'_c ab(d-a/2) + A'_s f'_s (d-d') \quad [8]$$

로서 그림 5에 보이는 바와 같이 본 실험에서 얻어진 값은 이론치 보다 약간 크다.

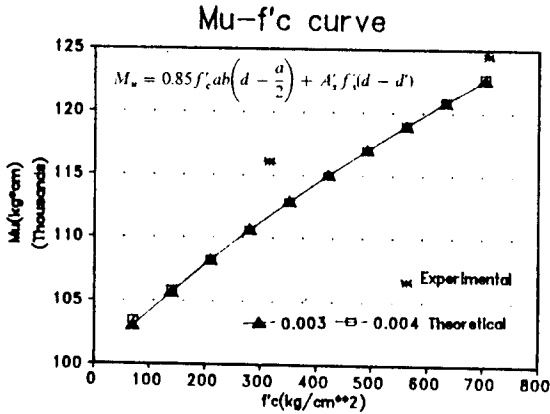
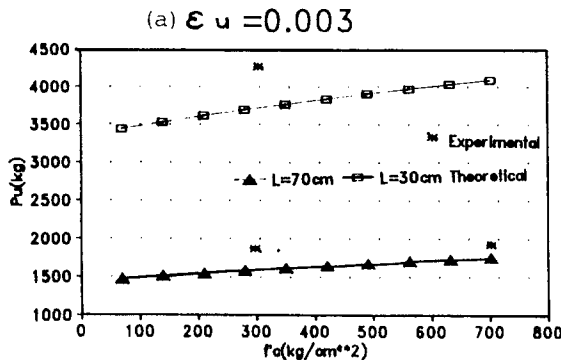


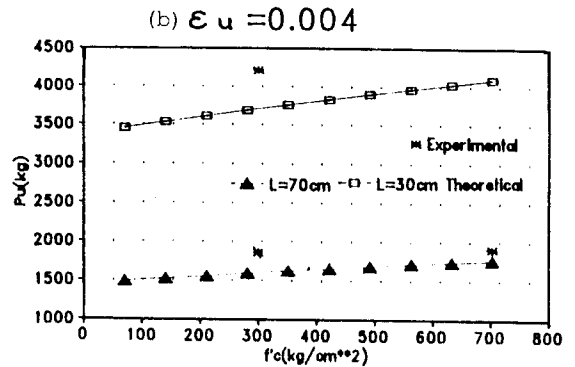
그림 5. 콘크리트 압축 강도에 따른 극한 모멘트의 이론값

그림 5는 ultimate strain = 0.003, 0.004 에 대하여 이론적인 극한 모멘트 값과 본 실험에서 얻어진 값을 비교하고 있으며 이식에 의하여 계산된 본 시험체의 극한 하중치는 그림 6에서 보여주고 있다.

그림 5에서 보는 바와 같이 콘크리트의 강도가 300kg/cm² 에서 700kg/cm² 까지 증가함에 따라 휨강도는 이론적으로 대략 10% 정도 증가하고 있다. 콘크리트 강도를 300에서 700kg/cm²까지 증가 시키는데 있어서의 비용과 시공 품질관리의 어려움을 고려할때 휨부재에 있어서도 이 정도의 강도 증가를 위하여 고강도 콘크리트를 사용해야 하는가 하는 문제가 있다.



(a) $\epsilon_u = 0.003$



(b) $\epsilon_u = 0.004$

그림 6. 콘크리트 압축 강도에 따른 극한 하중의 이론값 (a) $\epsilon_u = 0.003$ (b) $\epsilon_u = 0.004$

2) 반복 주기하중 (repeated cyclic loading)

반복적인 주기하중을 3개의 시험체(A2, B2, C2)에 하중속도 200 sec/cycle 로 각각 작용시켰으며 그결과는 그림 7 과 같다.

반복 주기하중을 작용시킨 A2 실험체는 A1 시험체의 최대하중이 약 1.68 ton인데 비하여 약 1.46 ton에 불과해 반복하중에 의해 최대강도가 약 11% 저하된것을 알수있으며, A1 시험체 에서 최대 변위가 17cm 에 이르러도 하중이 그다지 감소되지 않는 반면 A2 시험체에서는 약 7cm 정도에 이르러 강도가 급격히 떨어짐을 볼 수 있다. 또한 같은 변위 이력에 대하여 일반강도 콘크리트를 사용한 A1 시험체는 주기 하중이 작용할때(A2) 약 13% 정도 강도가 저하 되는데 비해서 고강도 콘크리트를 사용한 B1 시험체는 같은 주기 하중이 작용할 때에도(B2) 강도가 거의 같은 수준(1.8t)을 유지하는 것을 볼때, 주기하중에 대하여 고강도 콘크리트가 효과적이 아닌가 사료된다.

그러나 본 실험의 최대 변위가 하중가력 장치의 기계적인 한계(± 7.5 cm)로 인하여, 시험체의 강성 저하가 나타나는 범위까지를 커버하지 못한다 비하여 참고 문헌[5]를 살펴보면 고강도 콘크리트를 사용한 휨 부재의 강도는 극한 하중 발현 후 급격한 취성을 나타내는 것을 관찰 할 수있다(그림 8 참조). 따라서 내진 설계에서 요구하는 연성을 확보 하는데 있어서 참고 문헌 [9]에서 보고된 동적 하중에 의한 취성 증대 현상까지를 함께 고려할때, 고강도 콘크리트를 사용한 부재의 취성 증대 경향을 보완 할 수있는 방안을 반드시 강구해야 할것으로 사료된다.

C2 시험체의 하중-변위 곡선에서는 작은 전단 스판비(a/d)로 인하여 전단 변형에 의한 Pinching 현상, 전단파괴의 취성등 일반적으로 알려져 있는 특성을 그대로 보이고 있다.

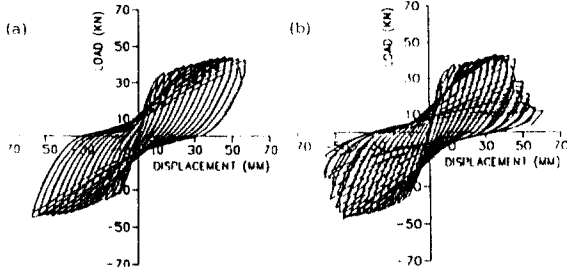
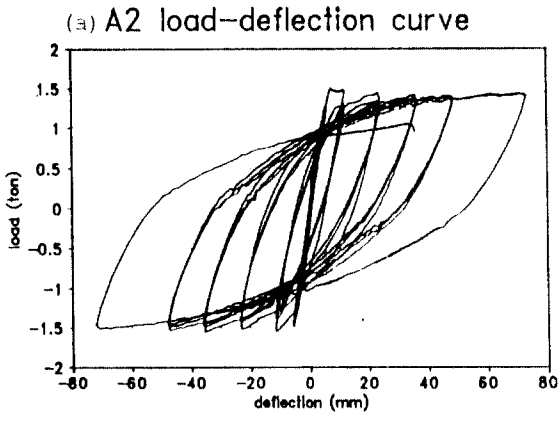
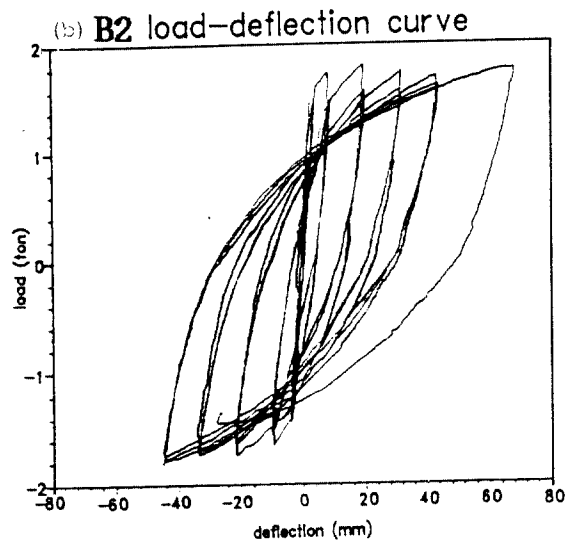


그림 8. 하중 변위 곡선 (참고 문헌 [5])
 (a) $f'c = 420 \text{ kg/cm}^2$ (b) $f'c = 700 \text{ kg/cm}^2$



3.2 강성 저하 현상

그림 9는 각 Cycle에서 측정된 최대 하중을 그때의 변위로 나눈 값을 보여주고 있다. Cycle이 진행됨에 따라 역시 a/d가 작은 C2 시험체의 강성저하가 뚜렷하며 B2 시험체는 A2 시험체에 비하여 초기 강성치만 높을뿐 6번째 Cycle 부터는 거의 같은 강성을 보이고 있음을 알수 있다.

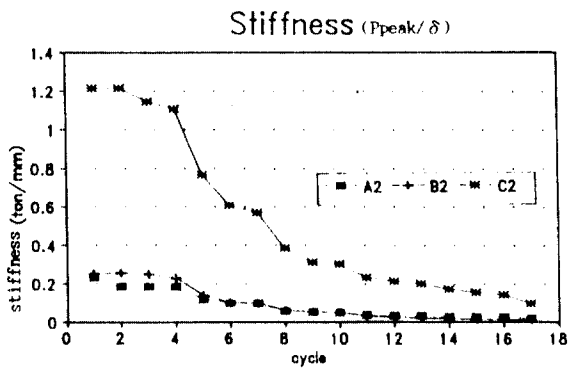
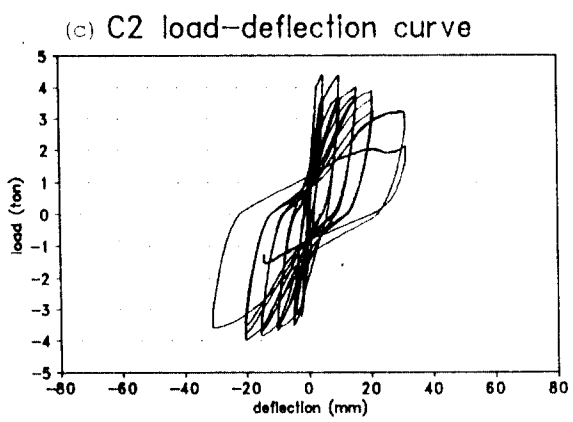


그림 9. 시험체의 강성 저하 곡선



3.3 파괴형태 (failure mode)

1) 단조하중

사진1 은 A1, B1, C1 시험체의 최종 파괴 모양을 나타내었다. 사진에서 보는 바와같이 일반강도인 A1은 실험 종료시까지 압축축의 피복부분의 바깥쪽 콘크리트만이 이탈 되었으나 고강도인 B1 시험체는 주근의 안쪽까지 깊숙히 균열이 침투하여 완전한 압축파괴 현상을 보여 주고 있다. 이로 인하여 그림4에서 보는바와 같이 B1시험체의 연성이 A1 시험체보다 작게 나타나고 있다. 전단스팬비가 작은 C1시험체는 뚜렷한 사인장 균열을 관찰할 수 있으며 동시에 B1 시험체와 마찬가지로 콘크리트의 압축 파괴를 보여주고있다.

그림 7. 하중-변위 곡선
 (a) specimen A2 (b) specimen B2 (c) specimen C2



사진 1. 시험체의 최종 파괴 형상 (a) A1 (b) B1 (c) C1

2) 반복 주기하중

반복 하중이 작용하여 휨파괴에 이른 A2, B2 시험체에서는 파괴 형태면에 있어서 뚜렷한 차이점을 관찰하지 못하였다. 그러나 C2 시험체에서는 실험 초기부터 사인장 균열이 형성되어 결국에는 전단 파괴에 이르렀다.

4. 결 론

본 실험에서 수집된 자료를 분석하여 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고강도 콘크리트 (압축강도 약 700 kg/cm^2)를 사용한 휨부재의 강도(flexural strength)는 일반 강도 콘크리트(압축강도 약 300 kg/cm^2)보다 대략 10% 정도 더 크다.
- 2) 반복 주기하중이 작용할때 고강도 콘크리트를 사용한 부재의 휨강도 저하 현상은 일반 강도콘크리트 부재 보다 덜 뚜렷하다.
- 3) 고강도 콘크리트를 사용한 부재는 연성비 6 정도 이후 급격한 강성 및 강도 저하 현상을 나타내었다.
- 4) 고강도 콘크리트를 사용한 부재는 일반강도 부재 보다 보의 안쪽으로 깊숙한 영역까지 큰 균열이 발생 하였다. 이는 고강도 콘크리트 부재의 취성 파괴 현상과 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국 과학 재단 목적기초 연구의 지원에 의하여 수행되었음을 감사히 생각합니다. 그리고 본 연구의 실험에 필요한 장소 및 실험장치를 제공하여 주신 대덕 해사 기술 연구소 이효섭 부장님, 신병천 박사님 이하 여러분들께도 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. 박태규, 박기철, 정현수, "고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 휨 거동에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 추계학술발표 논문집, 1990, pp.501-504.
2. 이덕한, 박기철, 정현수, "고강도 전단 보강근과 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 전단 강도에 관한 실험적연구 (I)", 대한건축학회 추계학술발표 논문집, 1990, pp.509-512.
3. 박기철, 이덕한, 이승열, "고강도 전단보강근과 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 전단강도에 관한 실험적연구 (II)", 대한건축학회 추계학술발표 논문집, 1990, pp.513-516.
4. 오정근, 이광수, 권영호, 신성우, "전단보강이 있는 강섬유 보강 고강도 철근콘크리트 보의 전단 및 연성에 관한연구", 대한건축학회 추계학술발표 논문집, 1990, pp.517-521.
5. 하기주, 김진근, 정란 "반복 주기 하중을 받는 고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 비선형 거동에 관한연구", 발표예정.
6. 하기주, 김진근, 정란, "고강도 철근 콘크리트 보-기둥 접합부의 내진 성능 개선에 관한 연구", 발표예정.
7. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89)" American Concrete Institute, Detroit, 1989.
8. R.Park and T.Paulay, "Reinforced concrete structures", pp. 80.
9. Chung, L., and Shah, S. P., "Effect of Loading Rate on Anchorage Bond and Beam-Column Joints", ACI Structural Journal, pp.132-142, March-April, 1989.