

반복하중을 받는 고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 휨강성비에 관한 연구

THE EFFECTS OF FLEXURAL STRENGTH RATIO ON HIGH STRENGTH BEAM-COLUMN
JOINT SUBJECTED TO REVERSED CYCLIC LOADS

○ 이 광 수* 오 정 근* 문 정 일** 권 영 호*** 신 성 우****

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the effects of flexural strength ratio($M_r = \Sigma M_c / \Sigma M_b$) with High-Strength Concrete up to 800 Kg/cm^2 . Five specimens were tested under reversed cyclic loadings. The primary variables were flexural strength ratio of the beam-column, compressive strength of concrete and loading patterns. The results showed that the failure at the beam-column joint in case of high strength concrete was severe more than in case of normal strength concrete when flexural strength ratio 1.4. Thus the part for low limit of flexural strength ratio($M_r=1.4$) should be revised for high strength concrete.

1. 서 론

최근 건축구조물의 대형화 및 초고층화에 따라 고강도콘크리트의 사용은 급증하고 있으나 고강도 콘크리트를 사용한 보-기둥접합부에 관한 연구가 거의 없는 실정이다. 이에 따라 본 연구는 고강도 철근콘크리트 보-기둥시험체를 제작하여 지진과 같은 반복하중 하에서 고강도철근콘크리트부재의 거동을 조사, 분석하였다. R/C 보-기둥접합부에 관해 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔으며(1)(2)(3), 이들의 결과를 바탕으로 강한 기둥-약한 보(Strong Column-Weak Beam)로 설계하는 것이 보-기둥접합부 설계에 관한 기본적 개념으로 되어있다. 이는 철근콘크리트구조물에 있어서 보에 비해 기둥에서의 파괴는 다시 복구할수 없는 전체 구조물의 붕괴를 일으키기 때문이다. 여기에서 보-기둥접합부의 휨강성비($M_r = \Sigma M_c / \Sigma M_b$)에 대해 ACI-ASCE위원회352는 지진의 정도가 심한 지역에서는 보강성에 대한 기둥의 강성이 1.4이상이어야 함을 제안하고 있다(2)(4). 그러나 이러한 보고서는 콘크리트 강도가 420 kg/cm^2 이하의 범위에 대한 연구이기 때문에 콘크리트 강도가 420 kg/cm^2 를 넘는 고강도콘크리트를 사용한 부재에 대해서는 보-기둥의 휨강성비 제한에 따른 효과가 실험결과와 부족으로 의문시 되고 있다. 따라서 본 연구는 콘크리트 압축강도 800 Kg/cm^2 인 고강도콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보-기둥접합부에서 휨강성비를 변수로 선정하여 이들의 실험결과를 분석하여 기존의 보통 강도에 기준을 두고 있는 휨강성비 제한($M_r=1.4$)에 대한 기준의 적합성 여부를 검토하고자 한다.

2. 시험체 계획

2.1 보-기둥 시험체

R/C 라멘 골구조물에서 지진시 피해가 가장 심각한 부분인 저층부 외부 보-기둥의 접합부를 선택하였

* 정희원 한양대 대학원

** 한양대 대학원

*** (주)대우 건설기술연구소

**** 정희원 한양대 조교수, 공박

고, 시험체의 상세는 ACI 318-89를 기준으로 하였다. 시험체는 총 5개로서 전형적인 상세는 Fig.1에, 그리고 그의 특성은 Table1에 나타나 있다.

시험체를 구분하면 다음과 같다:

- 1) 보의 일정한 전단 Span 비 ($a/d = 4.5$)
- 2) 전단 보강 : 기둥접합면으로부터 첫번째 전단보강근 ($d/8$), 이후로는 $d/4$ 로 일정 배근
- 3) 기둥의 Hoop 간격은 $d/4$ 로 일정 배근
- 4) 보-기둥의 휨강성비

예를 들어 HJC3-R0는 다음을 의미한다.

H : High Strength Concrete (N : Normal Strength Concrete)

J : Beam-Column Joint

C : Cyclic Loads (M : Monotonic Load)

3 : Core내의 횡 보강근의 갯수 = 3개

R0 : 보-기둥의 휨강성비 ($M_r = \Sigma M_c / \Sigma M_b, 0=1.4, 1=1.6, 3=2.0$)

Table 1 Properties of Specimens

구분 시험체명	f'_c (Kg/cm^2)	동차 f'_c (Kg/cm^2)	하중 재하	a/d	Hoop 갯수 (Core)	M_r ($\Sigma M_c / \Sigma M_b$)	주근 (보)
HJC3-R0	328	308	C	4.5	3	1.4	3 D13
HJM3-R0	851	800	M	4.5	3	1.4	3 D13
HJC3-R0	851	800	C	4.5	3	1.4	3 D13
HJC3-R1	851	800	C	4.5	3	1.6	2 D13, 1 D10
HJC3-R3	851	800	C	4.5	3	2.0	1 D13, 2 D10

• 정차 $f'_c = 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 정사각형시편의 95% (28일 압축강도)
• C = Cyclic loads
• M = Monotonic Load

2.2 사용재료 및 배합 설계

실험에 사용된 시멘트는 S 사의 2중 수출용 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 세골재는 한강사, 조골재는 최대크기 10mm의 화강암 쇄석을 사용하였으며, 혼

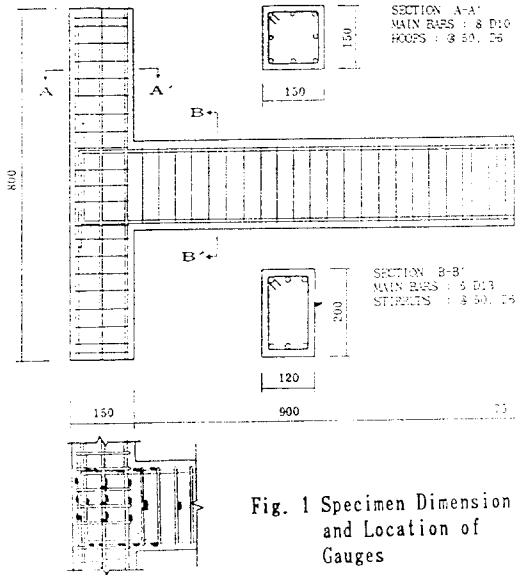


Fig. 1 Specimen Dimension and Location of Gauges

화재는 나프탈렌계 Super-20을 사용하였고, 기동철근은 SBD 40 10mm를, 보 주근으로 SBD 40 13mm, 10mm를 그리고 보와 기동에 각각 보강근으로는 SBD 24 6mm의 철근을 사용하였다. 콘크리트의 비빔은 rpm 25의 강제식 Mixer를 사용하여 1 Batch에 시험체 1개와 원통형공시체 4개를 제작하였으며, 타설과 동시 KSF 2402에 따른 Slump시험을 하였다. 제작된 시험체는 2일간의 대기양생후 탈형하여 실험 10일전까지는 약 25°C 정도의 온도에서 수중양생을 시켰다. 원통형공시체의 압축강도 및 인장강도는 Table 2에 나타나 있다.

Table 2 콘크리트 강도 실험결과

구분	크 기 (cm ²)	압축강도 (Kg/cm ²)	한열인장강도 (Kg/cm ²)	인장/압축 (%)
공시체				
No. 1	10X20	860	63.5	7.38
No. 2	10X20	845	58.0	6.86
No. 3	10X20	850	63.5	7.47
No. 4	10X20	845	63.5	7.52
No. 5	10X20	855	61.5	7.19
평균		851	62.0	7.29

• 각 공시체의 강도는 3개의 평균값임

3. 시험체 설치 및 진행

3.1 기기 설치

시험체의 설치 상황은 Fig. 2에 있는 시험 가력골조에 건물의 실제 상황을 유추하기 위하여 시험체 기동 상하부분에 반곡점(Inflexion Point)인 것으로 Hinge를 제작설치 하였다. 철근의 변형도를 측정하기 위하여 30개 정도의 전기 스트레인 게이지를 설치하였으며, 이들의 상세는 Fig. 1에 나타나 있다. 보가력점 부분에 1/1000mm까지 측정할 수 있는 Electric Dial

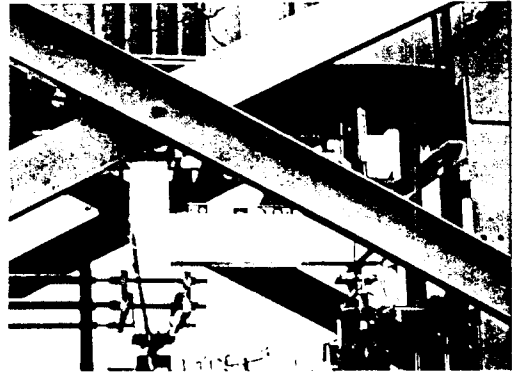


Fig. 2 Set up for Specimen

Gauge(100mm)를 평균값을 구하기 위하여 상하 부분에 2개씩 설치 하였다. 그리고 사용 기기는 기동에 최대 용량200ton의 Hydraulic Jack과 보에 최대용량 50ton의 Hydraulic Jack을 설치 사용하였으며 정확한 하중의 측정을 위하여 200ton과 50ton의 Load Cell을 사용하고, UCAM 및 Strain Indicator로서 각Gauge의 이상 유무를 확인한 후 영점을 조정하였다.

3.2 재하 방법 (Loading)

가력 골조에 시험체를 설치한 후에 기동의 축 하중은 기동 최대예상하중의 35% 정도로 각각의 시험체들에 일정하게 재하 하였으며 실험에 사용한 반복 하중의 양상은 Fig. 3에 나타나 있다. 일방향 단조하중을 받는 시험체의 경우에는 최대 예상하중의 1/3까지는 하중조절로서 가력하였으며 이후에서는 UCAM에 의한 변위조절로서 가력하였다. 반복 하중에 대한 재하는 정방향으로 일정 변위까지 가력한후, 하중을 풀어 나가면서 반대 방향으로 같은 변위까지 재하하였다. 가력하는 도중에 Data를 얻기 위하여 선택한 증가점에서 일시적으로 하중을 멈추었다.

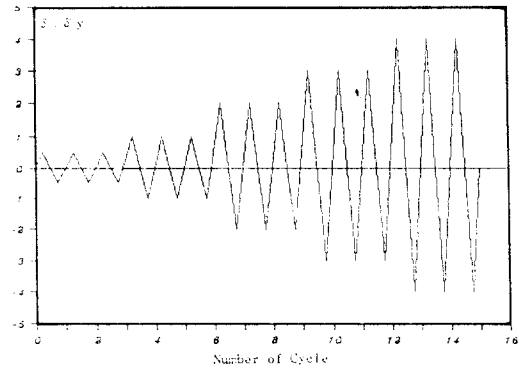


Fig. 3 Loading History

4. 실험결과 및 분석

4.1 균열 및 파괴 상황

각 시험체의 최종 Cycle후의 피해 상황이 Fig. 4에 나타나 있다. 모든 시험체들의 균열은 보-기동접합부 부근에서 초기균열이 발생하기 시작하였으며, 일방향 하중을 받는 시험체인 HJM3-R0는 보전반에 걸쳐 작은

균열이 발생한 후 접합부내로 역시 작은 균열이 진전되었으며, 이후 보-기둥 접합면이 열리면서 최종 파괴에 도달하였다. 이외의 반복 하중을 받는 시험체들은 1단계(1~3Cycle)에서 보-기둥 접합면으로부터 d/8에서 초기 미소균열이 발생하였다. 2 단계(4~6 Cycle)에서 휨 강성비가 1.4인 NJC3-R0와 HJC3-R0 시험체는 보-기둥접합면에 균열이 발생한 후 보전반에 걸쳐 균열이 진전되면서 접합부내(Core)에 미소한 대각균열이 나타나기 시작하여 3단계(7~9 Cycle)에서는 접합부내(Core)에 완전한 대각균열이 형성되었다. 4,5단계(10~12, 13~15Cycle)에서는 접합면에서의 균열이 진전되면서 최종파괴상황에 이르렀다. 그러나 휨 강성비가 1.6과 2.0인 시험체(HJC3-R1, HJC3-R3)는 2단계까지는 보전반에 균열이 발생하였으나 3단계이후에서는 접합면과 d/8 부위에 피해가 집중되었으며 접합부내(Core)로의 균열진전은 HJC3-R1(Mr=1.6) 시험체에서 미소균열만이 발생하였고 HJC3-R3(Mr=2.0) 시험체에서는 전혀 발생하지 않았으며 4단계 이후부터 접합면과 파괴에 따른 심한 미끄러짐전단에 의하여 보 주근의 구부러짐도 발생하였다.

4.1.1 압축 강도의 효과

휨강성비가 1.4의 경우에 보통강도콘크리트 시험체(NJC3-R0)에서는 균열이 보 전반에 걸쳐 확장된후 접합면과 d/8사이에서 최종파괴에 이르렀으나 고강도콘크리트시험체(HJC3-R0)에서는 보 전반에 균열확장후 폭이 큰 균열이 접합면에 집중되어 피해가 가중되는 현상을 보여주고 있다.

4.1.2 보-기둥 휨강성비의 효과

Fig. 4에 나타난 바와 같이 보-기둥의 휨강성비가 1.4인 시험체(HJC3-R0)는 접합면의 균열이 접합부내(Core)로 진전되었으며, 또한 접합면에 집중적 파괴양상을 보이고 있다. 그러나 휨 강성비가 1.6 그리고 2.0인 시험체(HJC3-R1, HJC3-R3)는 접합면의 균열이 접합부내(Joint Core)로 진전되지 않았으며 접합면과 접합면으로부터 d/8 사이에 걸쳐서 피해가 분담되는 양상을 보여주고 있다.

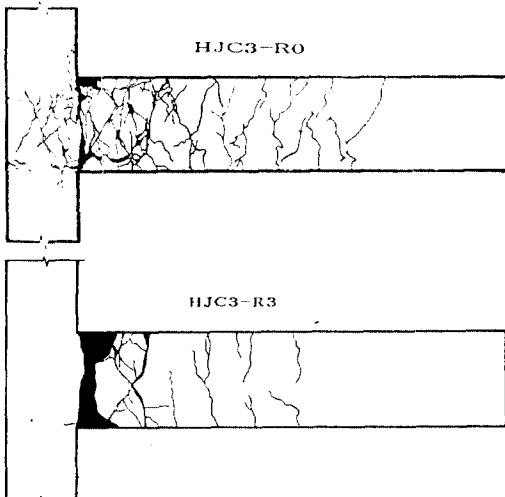


Fig. 4 Typical Crack Patterns of Specimen

4.2 하중 - 처짐 곡선

재하된 하중과 재하점에서의 하중-처짐곡선이 Fig. 5(a)~(e) 사이에 그려져 있다. 대체로 첫번째 반복 단계(1~3Cycle)이후에 3,4단계(9~12, 13~15Cycle)까지는 하중부담능력이 증가되는 경향을 보여주고 있으나, 이후에는 각각 요인에 따라 다른 양상을 보여주고 있다.

4.2.1 압축 강도의 효과

Fig.5(a)와 (c)는 NJC3-R0와 HJC3-R0의 각 Cycle에 대한 하중-처짐의 반복이력 특성들을 나타내고 있다. NJC3-R0는 압축 강도가 약 300Kg/cm² 정도로서 고강도 콘크리트(800Kg/cm²) 시험체인 HJC3-R0에 비해서 얼마간 낮은 하중 부담능력을 보여주고 있다. 강성을 나타내는 하중-처짐곡선의 기울기는 강도가 높을수록 기울기가 작아지는 강성저하 현상을 보여주고 있는데 이는 Fig.4에서 보듯이 고강도일 경우 주근의 미끄러짐등에 의한 접합면에서의 집중파괴에 요인 때문인 것으로 보인다.

4.2.2 하중 재하 방법 효과

일 방향 재하를 실행한 시험체인 HJM3-R0의 경우에는 접합부 대각균열의 발생이 반복 하중을 가력한 시험체에 비해 큰 하중(일 방향 재하 : 3.65 ton, 반복 반복 하중 재하 : 2.90ton)하에서 발생하기 시작하였으며, 일 방향 재하의 경우 최대 하중은 6.25ton이며 반복 하중의 경우는 4.55ton으로 일 방향 하중재하의 경우에 비해 반복 하중을 받는 시험체가 현저하게 하중 부담능력이 적게 나타났다(Table 3). 이는 반복하중에 따른 피로 현상 이외에도 전단변형과 주근의 부작 상실등의 급진적 비탄성 변형에 의한 피해가 증진되어 부재의 파손으로 이어지기 때문인 것으로 보여진다.

4.2.3 휨강성비(Mr)의 효과

휨강성비가 1.4인 시험체(HJC3-R0)의 경우에는 Cycle이 진전됨에 따라서 약간의 편칭현상을 보여주고 있으나 휨강성비가 1.4를 넘는 시험체(HJC3-R3)의 경우에는 상당히 완만한 곡선을 나타내고 있다. 이는 보-기둥접합면의 집중적인 피해를 받은 시험체(HJC3-R0)에 비해 접합면으로부터 d/8사이에서 고른 균열상황 이후 보주근자체의 거동에 의한 것으로 보인다.

Table 3 각 시험체별 최대하중

시험체	통기 C (Kg/cm ²)	기둥			보			하중 재하	최대 하중 (ton)
		단면	주근	Hoop	단면	주근	전단보강		
NJC3-R0	308	15X15	8D10	D6	12X20	4D13 2D10	D6	C	4.00
HJM3-R0	800	15X15	8D10	D6	12X20	6D13	D6	M	6.25
HJC3-R0	800	15X15	8D10	D6	12X20	6D13	D6	C	4.55
HJC3-R1	800	15X15	8D10	D6	12X20	4D13 2D10	D6	C	4.90
HJC3-R3	800	15X15	8D10	D6	12X20	2D13 4D10	D6	C	3.10

5. 접합면에서의 전단응력 고찰

보-기둥접합부틀 ACI-ASCE 352 Type2로 설계하였을 때 접합면에서의 전단응력에 대한 부재설계시의 이론값 그리고 실험결과값과 ACI-ASCE352의 상한한계값이 Table 4에 나타나 있다. 휨 강성비가 1.4인 보통강도 시험체(NJC3-R0)의 경우에는 이론값에 대한 실험값이 1.627배에 달하고 있으며 또한 휨 강성비가 1.6, 2.0

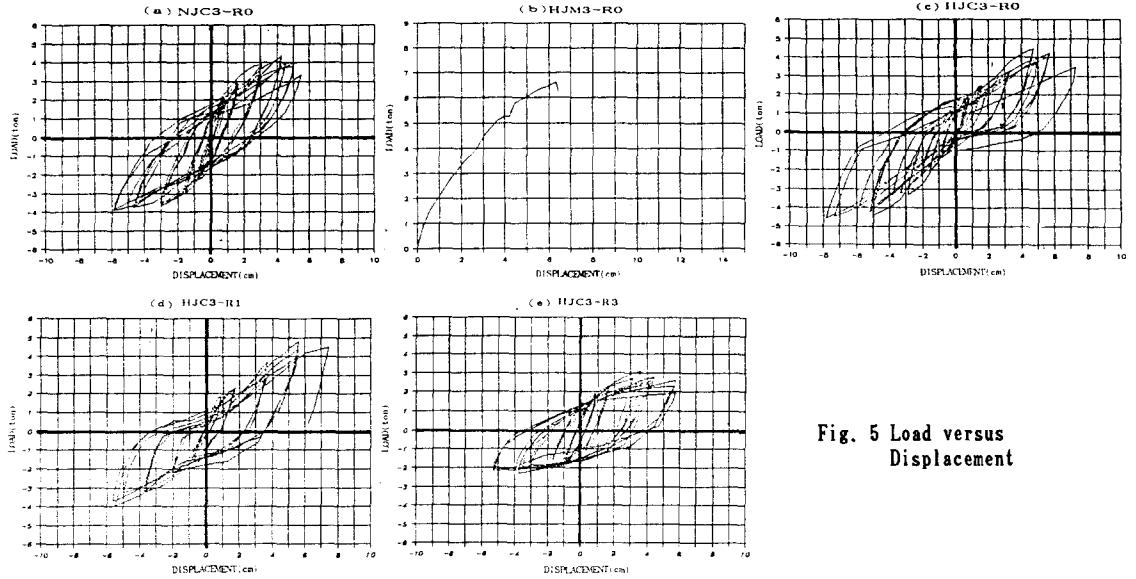


Fig. 5 Load versus Displacement

인 고강도콘크리트 시험체(HJC3-R1, HJC3-R3)에서도 1.641 그리고 1.573으로서 비교적 근사하나 휨강성비가 1.4인 고강도 콘크리트 시험체는 실험값과의 비교값이 1.34에 머물고 있으므로 휨 강성비의 현재 제한이 고강도콘크리트의 경우에 상향조정이 되거나 혹은 현재 휨강성비제한에 따른 경우 전단응력상수값(Γ)에 대한 ACI 352의 한계값이 상향조정되어야 할 것으로 보인다.

고 있는데 이는 보-기둥 접합면의 피해가 접합면에서부터 $d/8$ 까지에 이르는 하중부담능력등의 효과에 의한 것으로 보인다.

Table 4 Shear Properties of Test specimens

Specimen	Shear Stress Constant (Γ)			
	ACI 352 Type2(c)	Theoretical Calculation	Test Result	Test Theo. Cal.
NJC3-R0	12	14.040	20.714	1.627
HJM3-R0	--	10.865	21.232	1.952
HJC3-R0	12	10.865	14.640	1.345
HJC3-R1	12	9.408	15.442	1.641
HJC3-R3	12	6.937	9.973	1.573

* Γ = Shear Stress Constant for Eq. (4.5) in Ref.(5) for Joint = $V_u/bjhc/f'c$

6. 에너지 소산능력에 대한 고찰

각 시험체의 에너지 흡수능력에 대한 비교가 Fig.6에 나타나 있다. 에너지 소산능력은 접합면에서의 보-기둥 반복점을 기준으로 한 면적과 하중-변위곡선으로 이루어진 내부면적의 비로서 나타내어 지게 된다. 따라서 Fig. 6에서 변위증분에 따른 에너지 소산능력을 비교해 보면 휨 강성비가 1.4인 보통강도콘크리트 시험체(NJM3-R0)에 비해 고강도 콘크리트 시험체(HJC3-R0)는 낮은 값을 보여주고 있는데 이는 고강도콘크리트 시험체의 접합면에 집중적인 피해에 의한 조건의 편향현상에 의한 요인때문으로 보인다. 휨강성비가 1.6, 2.0인 시험체(HJC3-R1, HJC3-R3)의 경우에 휨강성비1.4인 시험체(HJC3-R0)에 비해 높은 값을 보여주

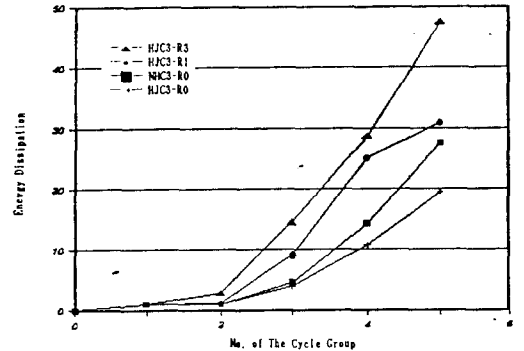


Fig. 6 Energy Dissipation of Each Specimen

7. 결론

콘크리트 압축강도 800Kg/cm^2 을 사용한 보-기둥접합부에 대한 실험 및 이론해석을 통하여 기존 주요부재 설계식의 검토 및 새로운 합리적인 구조 설계식의 기초자료를 제안하고자 하였으며, 이들의 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 고강도콘크리트의 경우 휨강성비가 1.4로서 일정하고 배근상태도 같은 경우 보통강도 콘크리트의 피해상황에 비해 접합면에 피해가 보다 집중되며 이에 수반되는 편향현상을 초래하므로 기존 ACI-ASCE352 접합부설계식에 적합하지 못하다.
- 2) 에너지소산능력에 있어서도 휨강성비가 1.4이 경우 고강도콘크리트의 시험체가 보통강도콘크리트 시험체에 비해 낮은 값을 보이고 있으므로 이에 대한 보완이 필요하다.
- 3) 높은 전단응력을 받는 시험체($M_r=1.4$)에 비해 휨

강성비가 1.6, 2.0인 경우에 전단응력 상수의 안전율이 보통강도의 안전율과 거의 일치함으로 휨강성비 하한 한계값 1.4에 대한 상향조정이 필요한 것으로 보인다.

- 4) 고강도콘크리트에 있어서 휨강성비가 1.4인 시험체에 비해서 휨강성비가 1.6, 2.0인 시험체가 약 2배정도의 에너지소산능력을 보유하고 있으므로 기존의 ACI-ASCE위원회 352의 휨강성비의 하한한계값 1.4에 대한 제안은 상향조정되어야 할 것으로 보인다

감사의 글

본 연구의 실험에 필요한 장소 및 실험장치를 제공하여 주시고, 또한 여러모로 조언을 해주신 (주)대우건설기술연구소의 소장님 이하 직원 여러분들께 감사드립니다.

8. 참고 문헌

- 1) Bertero, V.V.; Popov, E.P., Forzani, B. "Seismic Behavior of Light Weight Concrete Beam-Column subassemblages", Jr. of ACI, Jan./Feb., 1980.
- 2) Ehsani, M.R.; Wight, J.K., "Exterior Reinforced Concrete Beam-to-Column Connections Subjected to Earthquake Type Loading", Jr. of ACI, July/Aug. 1985.
- 3) ACI Committee 315, "Seismic Details Details for Ductile Frame ", Jr. of ACI, May 1970.
- 4) ACI 318-89, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary", ACI, MI., 1989.
- 5) ACI-ASCE 532, "Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures", ACI 352R-85
- 6) Paul R. Gefken and Melvin R. Ramey, "Increased Joint Hoop Spacing in Type 2 Seismic Joints Using Fiber Reinforcement Concrete" ACI, 1989.3
- 7) 권 영호, 이 광수, 오 정근, 신 성우, "전단보강이 있는 고강도 철근 콘크리트 부재의 전단강도에 관한 연구", 대한건축학회 추계학술발표회, 1989.10.
- 8) 신 성우, "나선 보강된 고강도콘크리트 기둥의 연성에 관한 연구", 대한건축학회 논문집 제5권 제6호, 1989.10. pp 327~334
- 9) 이 광수, 오 정근, 권 영호, 신 성우, "반복하중을 받는 고강도 철근 콘크리트 보-기둥접합부 횡보강근의 효과에 관한 연구", 대한건축학회 춘계학술발표회, 1990.4.