

고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 내진성능 개선에 관한 실험적 연구

Improvement of Earthquake-Resistant Performance of R / C Beam-Column Joint Constructed with High-Strength Concrete Subjected to Cyclic Loading

하 기 주* 김 진 근** 정 란***
Ha, Gee Joo Kim, Jin Keun Chung, Lan

요 약

최근 철근콘크리트 건축물의 초고층화 추세에 따라 건축물의 설계시에 고강도의 건설재료, 부재단면의 축소, 직경이 큰 철근의 사용이 요구되고 있다. 이에 따라 구조물의 다른 부위에 비하여 접합부 영역의 응력 집중 현상이 커지고, 철근콘크리트 구조물에 고강도콘크리트를 적용함으로써 고정하중의 감소, 부재단면의 축소, 부재 내력의 증대, 장 스패 구조물의 축조 가능, 경제성의 향상을 가져올 수 있는 장점으로 인하여, 철근콘크리트 구조물에 고강도 콘크리트의 이용은 앞으로 더욱 증대할 것으로 예상된다. 그러나 고강도콘크리트는 보통콘크리트와 다른 특성, 특히 최대내력이후의 강도 저하가 현저하고 파괴상이 귀성적인 성질을 지니고 있으므로 실제 구조물에 적용하기 앞서 구조물의 안정성 측면에서 부재 실험을 통하여 정확한 역학적 특성을 규명할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 반복 주기하중을 받는 고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 거동을 파악하고, 접합부의 내진성능 개선을 위한 새로운 설계방법을 제안하여 실제 초고층 철근콘크리트 건축물의 설계를 위한 기초 자료로 제시하였다.

Abstract

With the increasing tendency to construct high rise reinforced concrete buildings, it is required to use high-strength materials, smaller member sections, and larger reinforcing bars. It is generally recognized that under severe seismic loads beam-column joints may become more critical structural components than other structural elements. In a ductile moment-resisting reinforced concrete frame, the connection of beam-column must be capable of resisting the large lateral forces caused by seismic actions.

The purpose of this experimental study is to evaluate and investigate the earthquake-resistant perform-

*성회원, 경북산업대학 건축공학과 전임강사

**성회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

***성회원, 단국대학교 건축공학과 부교수

ance of beam-column subassemblies constructed with high-strength concrete cast by the concrete of compressive strength of 700kg/cm² subjected to reversed cyclic loadings.

New approaches for moving the plastic hinging zone away from the column face and preventing the diagonal crack in the joint region are adopted to advance the earthquake-resistant performance of beam-column subassemblies using high-strength concrete under severe earthquake-type loading. Experimental results indicate that the modified new details which are introduced by intermediate reinforcement in the beam over a specific beam length adjacent to the joint are able to attain the stable hysteretic behavior and the enhancement of earthquake-resistant performance.

Keywords : high strength concrete ; beam-column joints ; seismic loads(reversed cyclic loading) ; earthquake-resistant performance ; plastic hinge zone ; diagonal crack ; intermediate reinforcement ; closed stirrup ; hysteretic behavior ; enhancement.

1. 서론

최근 건설분야에서 구조물의 대형화 및 고층화 추세에 따라 우수한 성능을 지닌 고강도의 건설재료가 요구되고 있다. 이에 따라 콘크리트의 고강도화가 시도되어 현재 각국에서 사용되고 있으며, 보다 나은 성능확보 및 정확한 재료 특성을 파악하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그리고 철근콘크리트 구조물에 고강도콘크리트를 적용함으로써 고정하중의 감소, 부재단면의 축소, 부재내력의 증대, 상스팬 구조물의 축조 가능 및 경제성등의 장점이 있으며, 이로 인해 철근콘크리트 구조물에서 고강도콘크리트의 이용은 앞으로 더욱 더 증가될 것으로 예상된다.

그러나 고강도콘크리트는 보통콘크리트와 다른 특성, 특히 최대 내력 이후의 강도 저하가 현저하고 파괴성상이 취약적인 성질⁽¹⁾이므로 실제 구조물에 적용하기에 앞서 부재 실험을 통하여 정확한 역학적 특성을 규명할 필요가 있다. 특히 고층철근콘크리트 건축물이 지진하중과 같은 심각한 비탄성 변형을 일으키는 반복 주기하중을 받을 때 보나 기둥의 부재요소보다는 접합부가 더욱 취약한 영역인 것으로 밝혀지고 있다.^(2,3) 따라서 지진하중을 받는 고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 구조성능에 대한 올바른 평가가 구조물의 안전성 확보 및 구조기술의 개발 측면에서 시급히 요구된다. 현재까지 선진외국에서는 주로 압축강도가 420 kg/cm² 이하의 보통콘크리트를 사용한 보-기둥 접합부에 관한 역학적 특성 규명 및 설계방법에 관하여 연구가 많이 진행되어 왔으며, 이 분야의 연구결과를 토대로 ACI-ASCE

352 위원회에서 권장안을 제시하고 있다. 그러나 지진하중을 받는 고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 구조성능에 관한 연구는 상대적으로 충분히 이루어지지 않고 있으며, 설계 방법에 관한 구체적인 자료도 미비한 실정이다. 또한 국내에서도 이에 관한 연구는 정관⁽⁴⁾, 이리형⁽⁵⁾, 신성우⁽⁶⁾ 등에 의해 시작 단계에 있다. 따라서 본 연구에서는 고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 역학적 특성 규명에 관한 연구로서, 접합부의 강도나 강성의 심각한 저하없이 에너지 소산능력을 증대시키기 위한 설계방법으로 중간철근을 이용하여 소성현지를 이동시키고, 내진성능을 향상시키는 배근방법에 관한 연구와 심한 지진하중하에서도 접합부의 균열방지 및 성능향상을 위하여 접합부 영역에서의 보 주근의 정착방법에 따른 효과를 실험을 수행하여 파악하고자 한다.

2. 고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 내진성능 개선 설계 방법

지진하중을 받을 때 철근콘크리트 구조물에서 매우 취약한 부위인 보-기둥 접합부의 내진성능 개선을 위하여, 본 연구에서는 크게 2가지 방법 즉, 보의 소성현지 이동 설계 방법과 접합부의 보 주근의 정착 방법에 관한 실험을 시행하여 그 특성을 파악하고자 한다.

2.1 보의 소성현지 이동 설계 방법 도입

철근콘크리트 구조물이 지진과 같은 반복 주기하중을 받을 때 소성현지 영역의 거동은 전체 구조물의 이력 기

동에 큰 영향을 미치며, 특히 큰 전단력이 발생할 때 그 영향은 상당히 커진다. 강 기둥-약 보의 설계 개념에 따라 설계된 접합부에서는 보의 단부에서 소성힌지가 형성되고 소성힌지 영역의 비탄성 변형은 부재의 강성 및 강도와 변형능력 및 이력 사이클수의 감소를 유발시킨다.

현행 ACI-ASCE 352 위원회 권장안에 따른 보-기둥 접합부의 설계는 기둥면에 인접한 보 단부에 보의 소성힌지가 형성되도록 되어 있다. 이 위치에 소성힌지가 형성되면 접합부의 강도와 강성의 감소가 발생할 우려가 있기 때문에 접합부의 강도와 강성의 감소를 제한하기 위하여는 접합부의 횡방향 철근량이 과다하게 필요하게 된다.

최근에 들어 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Fig.1 에서와 같이 접합부 영역에서 일정거리 떨어진 부위에 소성힌지가 발생하도록 보의 철근 상세를 바꾸어 설계하는 방법이 연구되고 있다. 이러한 소성힌지 이동을 위한 설계 상세에 대한 연구는 보통콘크리트를 대상으로 Bertero와 Popov⁽⁷⁾, Scribner와 Wight⁽⁸⁾, Abdel-Fattah⁽⁹⁾ 등에 의하여 연구되어 구조 성능이 상당히 개선됨을 규명하였다.

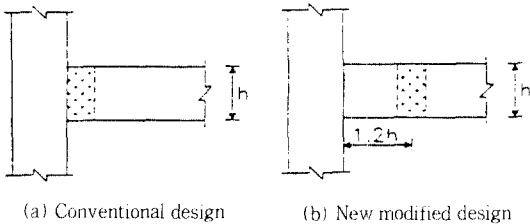


Fig.1 Locations of beam plastic hinge

따라서 본 연구에서는 고강도콘크리트를 사용한 철근 콘크리트 보-기둥 접합부에서 강 기둥-약 보의 설계 개념은 유지하되, 보의 소성힌지의 위치를 기둥면으로부터 이동시키기 위하여 Fig.2 (d), (e)와 같이 접합부에 인접한 보의 일정거리(1.5h, h: 보의 축)에 걸쳐 중간 철근을 추가 배근하였으며, 그와 같은 접합부에 대한 성능을 평가하였다.

2.2 접합부 내의 보 주근 정착 방법의 개선

접합부에 발생하는 사인상 균열을 방지하고, 접합부

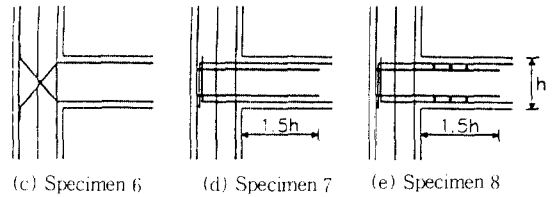
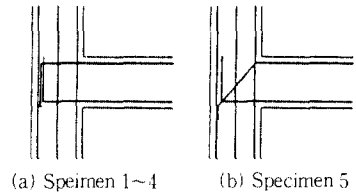


Fig.2 Typical longitudinal reinforcements of specimens tested in this investigation

의 내진성능을 개선하기 위하여 Fig.2 (b), (c)와 같이 보 주근의 정착 방법을 바꾸어 고강도콘크리트를 사용한 외부 보-기둥 접합부에 관한 내진성능 평가를 위하여 실험을 수행하였다.

3. 실험 계획

3.1 시험체의 형태 및 변수

반복 주기하중을 받는 고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 내진성능 개선을 위하여 실제 구조물의 1/3~1/4 정도의 크기로 축소된 보와 기둥으로 구성된 8개의 보-기둥 접합부를 제작하였다. 지진하중을 받는 철근콘크리트 보-기둥 접합부는 ACI Building Code (318-83)⁽¹⁰⁾ 및 ACI-ASCE 352 위원회(1985)⁽³⁾의 규정

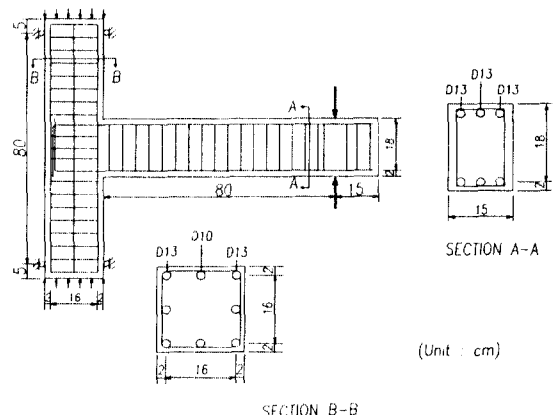


Fig.3 Details of beam-column subassembly

안에 따라 설계되었으며, 표준적인 보-기둥 집합부의 상재는 Fig.3에 나타나 있다. 그리고 각 시험체의 단면 성능 및 특성은 Table.1과 같다.

Table.1 Design parameters of beam-column subassemblage

Specimen Number	Concrete Strength (kg/cm ²)	Loading Type	Main Objectives & Design Method
1	420	Monotonic loading	<ul style="list-style-type: none"> · Evaluation of structural performance · ACI Building Code and ASCE-ACI 352 Recommendation
2		Cyclic loading	
3		Monotonic loading	
4	700	Cyclic loading	<ul style="list-style-type: none"> · Prevention of diagonal crack · Anchorage method for longitudinal bars of beam · Location of beam plastic hinge · Intermediate reinforcement with or without closed stirrup
5			
6			
7			
8			

Fig.2 (a)는 ACI Building Code (318-83) 및 ACI-ASCE 352 위원회(1985)의 규정에 따라 설계된 표준형의 고강도콘크리트 보-기둥 집합부 시험체이며, Fig.2 (b), (c)는 심한 지진하중을 받는 철근콘크리트 건축물의 집합부 영역에 발생하는 사인장 균열을 방지할 목적으로 설계되었다. 그리고, Fig.2 (d)는 집합부에 인접한 보 영역에서 발생하는 소성힌지를 집합부 영역에서 일정거리 떨어진 보 부분에 발생시키므로써 집합부의 성능 개선을 목표로 설계되었다. Fig.2 (e)도 (d)와 동일한 목표로 설계되었으나 보의 소성힌지 영역에서의 에너지 소산능력을 증가시킬 목적으로 보의 주근과 중간철근을 폐쇄형 스테리움을 추가하여 구축하였다.

3. 2 사용 재료 특성

1) 철근

시험체에 배근된 보강 철근은 국내에서 생산되는 SD 40의 고강도 철근이 사용되었으며, 보 및 기둥의 주철근은 D10, D13 등이 배근되었고, 횡보강 철근은 D6이 배근되었다. 그리고 본 실험에 사용된 철근의 재료 특성은

Table.2 Characteristics of reinforcement

Bar Size	f_y (kg/cm ²)	ϵ_y ($\times 10^{-6}$)	E_s (t/cm ²)
D 6	3,950	2,237	1,970
D 10	4,150	2,354	2,004
D 13	4,220	2,256	2,050

Table.2와 같다.

2) 고강도콘크리트의 배합 설계

콘크리트의 배합은 요구되는 강도와 시공성 및 선정된 재료의 최적설계비에 따라 설계되었으며 콘크리트의 배합표는 Table.3과 같다. 그리고 콘크리트 압축강도를 측정하기 위하여 각 시험체의 기부집에 콘크리트의 타설과 동시에 공시체를 제작하였다.

압축강도 시험용 공시체는 $\Phi 100 \times 200$ mm 모울드를 사용하여 KSF 2405에 따라 모울드를 3개층으로 나누어 각 층을 25회씩 붓다집하여 제작하였다. 공시체는 제작 후 즉시 비닐을 덮어 수분을 방지하였으며, 양생은 재령 28일까지 시험체와 동일한 조건에서 양생을 실시하였다. Table.3에 나타난 각 콘크리트 압축강도는 각각 공시체 6개의 시험 결과에 대한 평균값이다.

Table.3 Concrete mix design

Material	Quantity(kg/m ³)	
	I	II
Type I Cement	558	662
Fine aggregate	374	377
Water	223	198
Psi supper	-	6.62
Coarse aggregate	1291	800
Water-cement ratio	0.4	0.3
Slump	9cm	21.8cm

3. 3 시험체의 제작 및 양생

보 및 기둥에 시험체의 기둥 특성을 파악하기 위하여 철근에 스트레인 게이지를 부착한 후 보-기둥 집합부를 조립하였다. 믹서는 공칭용량 80 리터의 강제식 믹서를 사용하였으며, 조골재, 세골재, 시멘트, 배합수 등의 순서로 배합재료를 투입하여 2분간 충분히 긴비빔을 한 후 고성능감수제의 전체 첨가량의 2/3 를 투입한 후 3분간 비빔한 후 나머지 1/3 를 투입하고 다시 3분간을 비벼 타설하였다.

콘크리트 타설 후의 누수 방지, 기부집 제거시의 용이함, 그리고 콘크리트의 표면의 원활한 마무리를 위하여

거푸집 내부에 오일을 칠하는 대신에 비닐을 부착하였다. 그리고 봉형 진동기로 다졌으며 흡손으로 마감하였다. 또한 콘크리트를 타설한 후 급격한 건조를 피하기 위하여 습윤상태를 유지하는 모포를 덮어 보양하였으며, 보양시의 온도는 18~19℃를 유지하였다.

3. 4 시험장치 및 시험방법

1) 시험장치 및 시험체의 설치

각 시험체에 작용하는 하중 제어를 위하여 M. T. S. 시스템을 사용하였으며, 시험체는 Fig.4에서와 같이 시험을 위한 프레임에 기둥부분을 수평으로 놓아서 설치하였다. 그리고 기둥 축하중이 작용하는 기둥의 끝에 철판을 부착하여 하중을 균일하게 작용하도록 하였으며, 반복 주기하중이 작용하는 보의 변곡점 부분에는 시험체에 직경 4cm의 구멍을 내어 가압기(Actuator)의 머리 부분과 시험체의 면사이에 보강 철판을 대어 볼트를 이용하여 긴결시켰다.

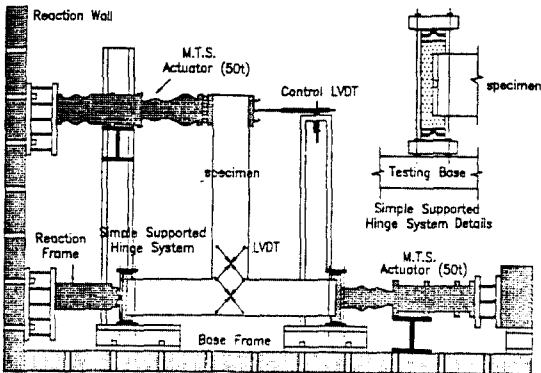


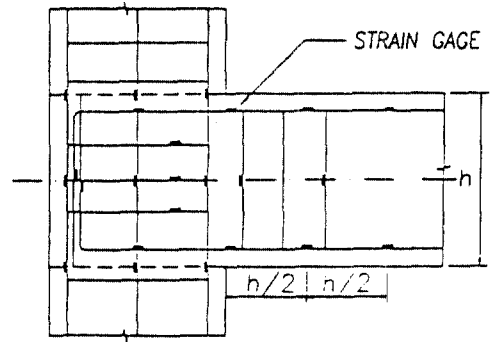
Fig.4 Schematic drawing of the testing frame

2) 측정장치의 부착

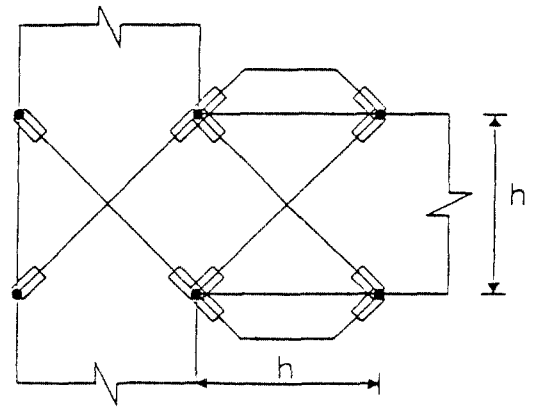
각 시험체에 작용하는 하중 조건에 따라 보-기둥 접합부의 기둥특성을 파악하기 위하여 보-기둥 접합부의 위험단면에 위치한 주근 및 스티럽과 접합부의 횡보강 철근에 24개의 스트레인 게이지를 Fig.5에서와 같이 부착하였고, 보의 변곡점에 작용하는 하중을 조절하고, 보의 소성힌지 영역 및 접합부 영역의 변형을 측정하기 위하여 7개의 변위계(LVDT)를 설치하였다.

3) 시험방법

고강도콘크리트로 제작된 보-기둥 접합부의 기둥을



(a)



(b)

Fig.5 Locations of strain gages and LVDT in Specimens

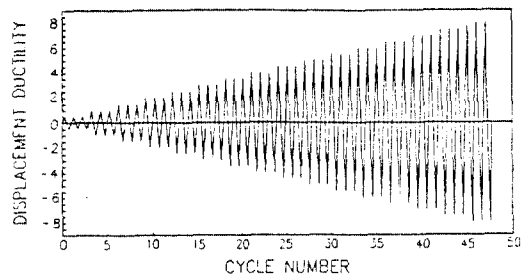


Fig.6 Loading history

파악하기 위하여 8개의 전 시험체에 기둥의 평형 축하중(balanced axial load)의 50%를 기둥에 일정하게 작용시켰다. 그리고 Fig.4와 같이 보의 변곡점에 로드셀을 부착한 가압기를 사용하여 변위제어에 의해 하중(단조하중, 주기하중)을 작용시켰으며, 반복 주기하중의 형태는 Fig.6과 같다. Fig.6에 나타난 변위연성은 각 싸이클의 종료시 변위에 대한 시험체의 항복변위의

비로써 정의한다. 항복변위는 단조하중 작용시 기동면의 보 주근이 항복하였을 때의 하중작용점의 변위로 정의했다.

4. 실험 결과 분석

4.1 이력 거동 특성

지진 지역에서 철근콘크리트 구조물의 설계 및 해석을 위하여 비탄성 범위에서 반복 주기하중을 받는 부재의 특성, 즉 부재의 연성, 에너지 소산능력, 강성 저하등을 파악하여야 하며, 이를 위해서 부재의 이력 거동 특성을 정확히 규명할 필요가 있다.

본 연구에서는 시험체 1, 3 에 단조하중을 가하여 기동면의 보 주근에 부착한 스트레인 게이지의 측정치가 항복변형에 이를 때 보의 하중 작용점의 항복변위를 먼저 구하고, 측정 기기를 점검하였다. 그리고 Fig.6과 같은 반복 주기하중을 가하여 각 시험체에 대해 Fig.7과 같은 작용하중과 하중 작용점의 변위와의 관계를 구하였다. 부재의 이력 거동 곡선은 콘크리트 강도, 중간 철근의 배근, 보 주근의 정착 방법의 변화에 따라 큰 차이를 나타내었고, 각 싸이클 또는 변위연성마다 각 시험체의 에너지 소산 능력, 강도 및 강성변화를 고찰할 수 있었다. 시험체 2, 4 는 ACI Building Code 및 ACI-ASCE 352 위원회(1985)의 권장안에 따라 설계되었으며, 콘크리트 강도는 각각 $420\text{kg}/\text{cm}^2$, $700\text{kg}/\text{cm}^2$ 이다. 시험체 2는 Fig.6과 같은 반복 주기하중이 작용할 때 전 구간을 통하여 Fig.7의 시험체 8 과 같이 안정적인 이력 거동을 나타내었다. 시험체 4는 작용 하중의 변위연성이 7 이하의 범위에서는 안정적인 이력 거동을 나타내었으나, 변위연성이 7 이상인 재하 후반부에서는 콘크리트의 고강도화에 따른 취성화 현상때문에 급격한 강도 및 강성의 저하를 가져오고 불안정한 이력 거동을 나타내었다. 시험체 5, 6 의 경우 표준시험체인 시험체 4 에 비하여 반복 주기하중 작용시 접합부의 대각 전단균열은 방지되었으나, 시험체 5 는 보와 기둥의 접합면 부근에서 미끄러짐 전단파괴가 발생하여 전형적인 편칭현상을 나타내었으며, 심한 강성 저하와 에너지 소산 능력의 감소 현상을 나타내는 불안정한 이력 거동을 나타내었다. 시험체 6도 역시 표준 시험체에 비하여 강도의 감소 현상을 나타내며, 에너지 소산능력

도 감소되었다. 따라서 요구되는 변위연성에 대하여 심각한 강성의 상실과 에너지 소산능력의 감소를 나타내므로 접합부 영역의 철근 상재에 대한 수정이 요구된다. 시험체 7은 표준시험체 4 에 비하여 내력과 에너지 소산능력의 증가를 보이고 있으며 안정적인 거동 현상을 보이고 있다.

시험체 8은 실험준비중 M. T. S. 의 조작실수로 인하여 초기 균열이 발생한 상태로 실험이 진행되었다. 초기 균열이 발생한 상태로 실험이 진행되었으므로 초기 강성은 매우 저하 되었으나, 강도 및 에너지 소산능력의 향상을 볼 수 있으며, 특히 반복 주기하중의 변위 연성이 큰 재하 후반부의 이력 거동을 보면 시험체 7에 비하여 더욱 안정적인 거동을 보임을 알 수 있었다. 그리고 시험체 7, 8은 실험중의 관찰을 통하여 소성힌지의 이동을 볼 수 있었으며, 소성힌지의 이동으로 인하여 비탄성 기동이 기동면으로부터 떨어져 발생하므로 재래의 설계 방법에 비하여 만족할만한 향상을 보이며, 따라서 접합부의 구조 성능을 향상시켜 접합부의 횡보강 철근량도 줄일 수 있을 것으로 사료되었다.

4.2 파괴형태

본 실험에 사용된 시험체 1,2,3,4 의 실험중 또는 종료시 파괴형태를 고찰하면 고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 경우 단조하중 및 반복 주기하중이 진행되는 동안 콘크리트 강도가 클수록 보와 기둥의 접합면에서 보의 내측으로 매우 넓은 영역까지 균열이 분포하였다.

그리고 시험체 5와 6의 경우 반복 주기하중의 반복 회수가 증가하여도 접합부 영역의 대각균열은 미소하게 나타났으나, 보와 기둥의 접합면에서 파괴가 발생하였으며, 나중에는 보에 인접한 접합부 영역 및 접합부 영역에 인접한 기둥부분까지 콘크리트의 부서짐이 발생하였다.

소성힌지 이동을 고려한 시험체 7, 8 에서는 초기 힌지 형성이 Fig.8에서와 같이 기동면에서 보의 유효폭과 유효폭의 2배 만큼 떨어진 부분사이에서 발생하였으며, 반복 주기하중이 계속 진행되는 동안 파괴 범위가 보의 내측으로 확대되어 갔다.

또한 시험체 7, 8을 제외한 모든 시험체에서 기동면에서 보의 유효높이 정도까지의 힌지 영역 밖의 보의 거동은 거의 동일하였으며, 하중 작용점과 힌지 영역사이의

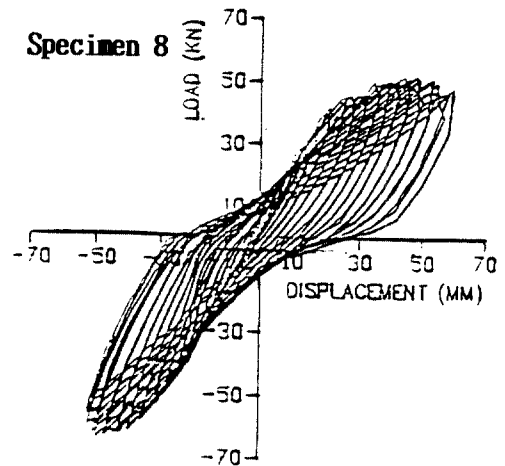
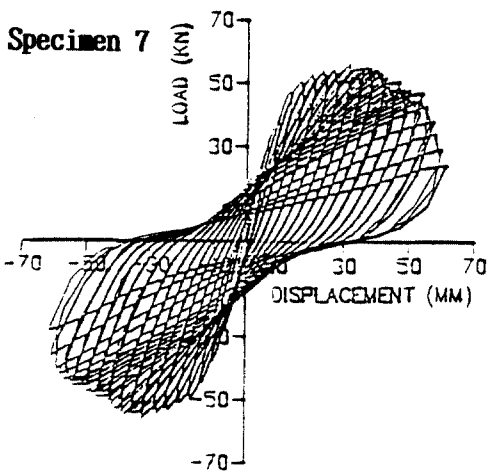
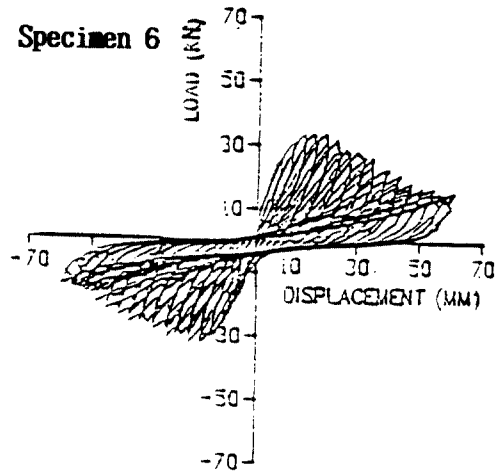
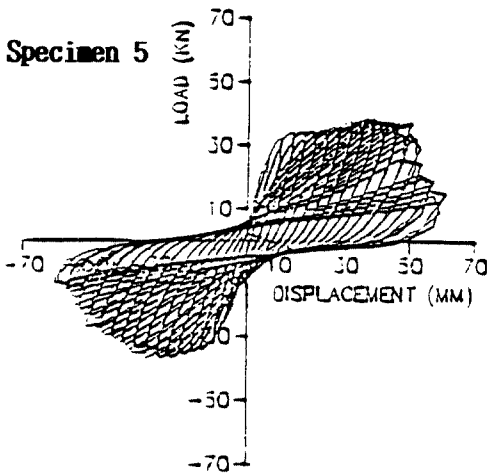
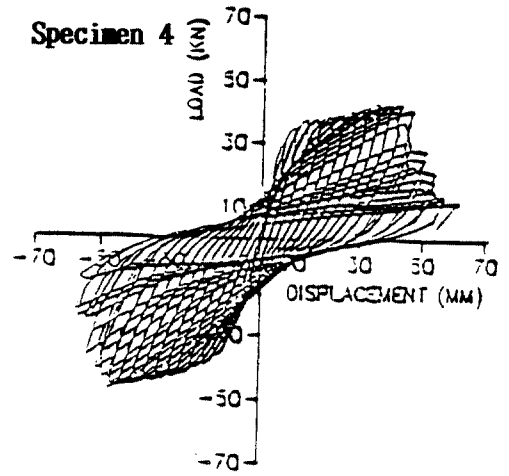
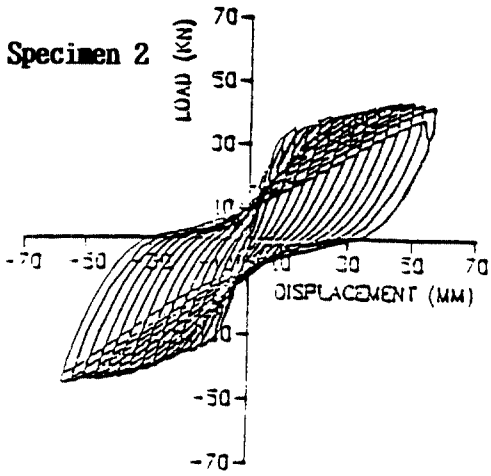
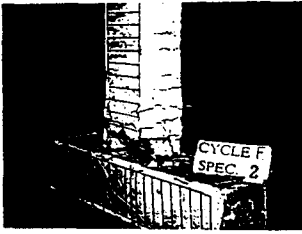


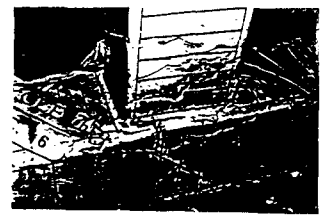
Fig.7 Load versus load-point displacement



Specimen 2



Specimen 4



Specimen 6



Specimen 3



Specimen 5



Specimen 7

Fig.8 Damaged specimens at final of tests

범위에서 경사균열이 발생하였다. 그러나 이러한 균열은 초기 반복 주기하중 작용시에 발생하였으며, 나중에는 더 이상 진전되지 않았다.

모든 시험체는 반복 주기하중이 진행되는 동안 소성 힌지 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 콘크리트의 균열과 파쇄가 일어났으며, 이로 인하여 파괴되거나 손상이 발생하였다. 그러나 손상의 성질, 정도, 속도는 각 시험체마다 달랐다. 그리고 힌지 영역의 보존은 균열을 따라 발생하는 콘크리트의 미끄러짐과 강성 저하 및 균열에 의해 형성되는 콘크리트의 갈록 및 조각의 이동을 제한하는 철근의 역할에 큰 영향을 받았다. 실험중 및 종료시 손상을 받은 각 시험체는 Fig.8에 나타나 있다.

4. 3 강성 및 강도 변화 특성

반복 주기하중을 받는 고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 실험을 통한 Fig.7의 각 시험체의 이력 기동을 근거로 각 시험체의 강성 변화에 대한 다음 두가지의 일반적인 기동이 파악되었다. 첫째, 각 시험체의 강성은 반복 주기하중이 작용하는 동안 반복 회수가 증가할수록 점차 감소하였다. 이러한 강성 감소의 주요 원인은 접합부 영역 및 인접 콘크리트의 균열, 기둥 철근의 슬립 및 보 철근의 뒤틀림 때문으로 사료된다.

둘째, 반복 주기하중이 작용하는 동안 변위가 0에 가까울 때 각 시험체의 강성은 더욱 작았다. 이러한 강성 손실의 원인은 기둥면에 발생한 균열이 완전히 닫히지 않은 때문이었다. 그리고, 반복 주기하중을 받을 때 각 시험체의 강도 손실을 비교하기 위하여 변위 연성(displacement ductility)과 각 시험체의 강도와 항복강도의 비와의 관계를 Fig.9에 도시하였다. 각 시험체의 항복하중의 산정은 기둥면의 보 주간에 부착한 스트레인게이지에 측정된 변형이 항복변형에 이를 때를 근거로 하였다.

항복강도에 대한 비의 산정은 각 사이클의 최대 정(+) , 부(-) 하중의 평균값에 대한 항복 강도의 비이다. Fig.9를 고찰하면 변위연성의 수준에 따라 각 시험체의 강도 변화 특성을 정확히 파악할 수 있다. Fig.9에서 변위연성이 7 혹은 그 이상의 값까지 항복강도를 잘 유지하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 시험체 5, 6은 각각 변위연성이 5, 8에 못 미쳐서 시험체의 내력이 항복강도 이하로 급격히 감소함을 보였다.

4. 4 에너지 소산능력

지진하중을 받는 철근콘크리트 구조물의 내진성능을 평가함에 있어 에너지 소산능력은 대단히 중요하며 구조물의 설계시 높은 에너지 소산능력을 갖도록 설계

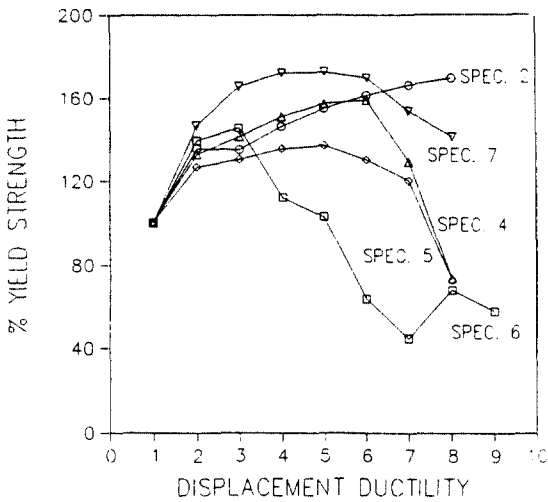


Fig.9 Maximum load carried by each specimen at various displacement ductilities

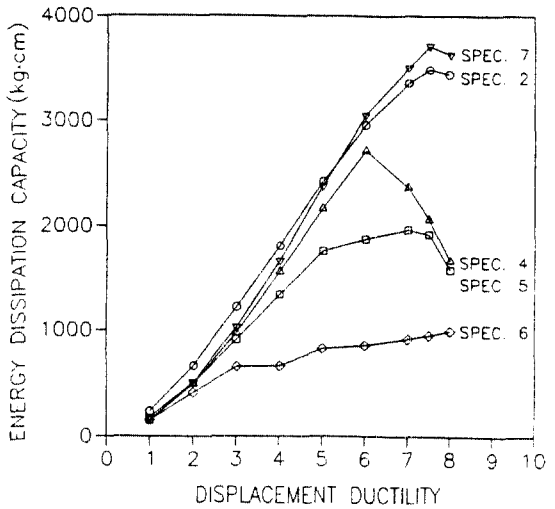


Fig.10 Comparison of energy dissipation capacity for each specimen at various displacement ductilities

되어야 한다. 일반적으로 에너지의 소산능력은 부재 또는 구조물의 이력 기동 곡선으로 둘러싸인 면적에 의하여 산정된다.

반복 주기하중을 받을 때 각 시험체의 에너지 소산능력을 비교하기 위하여 변위 연성과 각 시험체의 에너지 소산능력과 관계를 Fig.10에 도시하였다. Fig. 10을 고찰하면 변위 연성의 수준에 따라 각 시험체의 에너지 소산능력의 변화를 정확히 파악할 수 있다. 시험체 4를 제외한 모든 시험체는 실험이 진행되는 동안 변위연성이 증가함에 따라 에너지 소산능력이 증가함을 보였다. 그리고 시험체 7은 다른 시험체에 비하여 높은 에너지 소산능력을 나타내었다. 그러나 시험체 4는 변위연성이 6이상에서는 에너지 소산능력이 감소하였다.

4.5 보의 신장

보의 소성현저 영역의 변형을 측정하기 위하여 각 시험체에 Fig.5와 같이 4개의 변위계(LVDT)를 설치하여 각 시험체의 기동면에서 보의 유효높이의 범위에 걸친 보의 신장(elongation)을 측정하였다. 반복 주기하중이 작용하는 동안 보의 상부근 및 하부근은 교대로 인장을 받게 된다. 각 사이클마다 보의 신장은 각 사이클 동안에 발생하는 보의 최대 신장의 평균으로 구하였으며, Fig.11에 도시하였다. Fig.11에서와 같이 보의 소성현저 영역의 신장을 통하여 각 시험체의 과

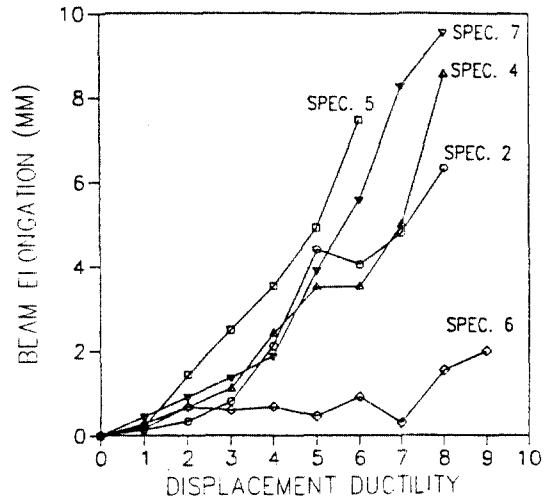


Fig.11 Elongation of beam hinging region for each specimen

과형태를 더욱 더 잘 고찰할 수 있다. 특히 시험체 6은 전 실험을 통하여 보의 신장이 미소하였다. 이와 같이 보의 신장이 미소한 것은 접합부 영역과 기동부분에 발생한 균열때문인 것으로 판단된다.

4.6 철근 슬립

지진 하중을 받는 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 강성 저하의 주요 원인은 접합부를 통한 기둥 철근의 슬립 및 접합부 내의 보 주근의 뽕힘에 의한 것인데, 접합부에 균열이 형성되면 접합부의 보 주근의 부착에

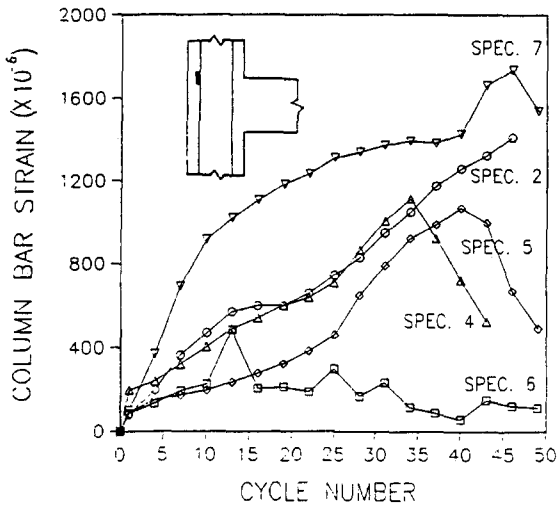


Fig.12 Maximum strain during each cycle of loading in column longitudinal reinforcement

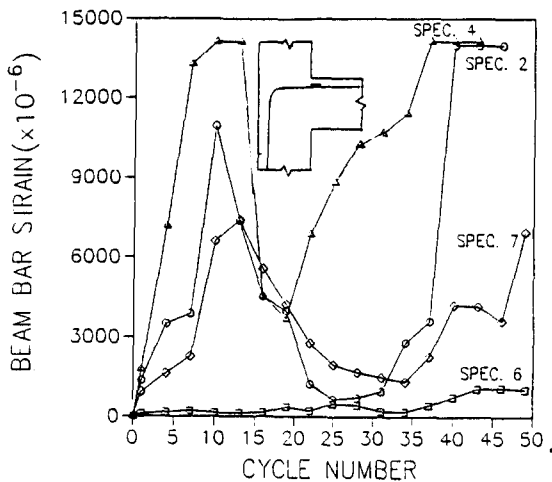


Fig.13 Maximum strain during each cycle of loading in beam longitudinal reinforcement

대한 저항 능력을 크게 상실하게 되고, 또한 보 주근이 항복함에 따라 집합부에서 부분적으로 뽑힘이 발생하게 된다.

본 연구에 사용된 시험체에서는 보의 뽑힘을 측정하기 위하여 보에 부착한 스트레인 게이지를 사용하였다. 시험체가 받는 최대 변위는 매 사이클마다 증대하기 때문에 보 주근의 변형은 매 사이클마다 증가하였다. 그리고 연속적인 두 사이클의 최대 변형이 동일하거나 감소하였다면 철근의 뽑힘이 발생한 것으로 판단

하였다.

실험을 통하여 Fig.12, Fig.13과 같은 각 사이클마다 기둥 및 보 주근의 변형도 관계를 구하였으며, 이를 통하여 각 시험체의 특성을 파악할 수 있다. Fig.12, Fig.13을 고찰하면 보 부분에서는 먼저 슬립이 일어나고 기둥 부분에서는 늦게 슬립이 일어나는데 이는 기둥과 보에서의 작용하중의 형태와 밀접한 관계가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 반복 주기하중을 받는 고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 내진 성능을 개선하기 위하여 기존의 설계방법에서 보의 소성힌지를 이동시킨 설계 개념과 집합부내 보 주근의 정착 방법을 변경한 설계 방법을 도입하여 8개의 시험체를 제작하여 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 보통콘크리트의 실험결과를 근거로 한 ACI Building Code 및 ACI-ASCE 352 위원회의 권장안에 따라 설계된 고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부는 변위연성이 5 정도까지는 비교적 안정적인 이력 거동을 나타내었다.

2) 반복 주기하중을 받는 철근콘크리트 부재의 거동은 콘크리트 강도에 의하여 큰 영향을 받게 되며, 변위연성이 6 보다 큰 범위에서는 고강도콘크리트의 취성화 현상 때문에 불안정한 이력 거동을 나타내었다. 따라서 심한 지진을 받는 지역에서는 구조 설계시 검토가 필요하고 내진성능 개선을 위한 연구가 요망된다.

3) 고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 구조성능을 향상시키고, 보-기둥 접합면에 인접하여 발생하는 소성힌지를 보의 내측으로 이동시키기 위하여 Fig.2 (d), (e)와 같이 중간철근을 배근함으로써 만족스런 소성힌지 이동을 이룰 수 있었다.

4) 보-기둥 접합부의 설계에서 보의 소성힌지를 이동시키고, 부재의 에너지 소산능력을 증가시킬 목적으로 Fig.2 (e)와 같이 중간 철근을 배근하고 이와 병행하여 보의 주근과 중간 철근을 폐쇄형 스테럽으로 구축한 시험체 8의 실험을 통하여 얻은 Fig.7의 이력 거동 곡선을 고찰하면 변위연성이 7보다 큰 재하 후반부에서 표준 시험체(시험체 4) 및 시험체 7에 비하여 훨씬 안정적인 거동을 보이며, 에너지 소산능력도 훨씬 증가하는 경향

을 고찰할 수 있었다.

5) 고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부에서 소성현지 이동을 고려하여 설계된 시험체 7은 재래의 설계 방법으로 설계된 시험체 4에 비하여 변위 연성이 4인 경우 최대 내력이 14%, 에너지 소산능력은 6%의 증가를 보였다.

6) 보-기둥 접합부의 접합부 영역에 발생하는 대각 균열의 방지를 위하여 접합부 내의 보 주근의 정착 방법을 Fig.2 (b), (c)와 같이 개선한 시험체의 실험을 통하여 대각 균열 방지의 목표를 달성할 수 있었으나, 보와 기둥의 접합면 부근에서 미끄러짐 전단파괴가 발생하여 전형적인 핀칭 현상을 나타내었고, 에너지 소산능력의 감소 현상을 나타내므로 접합부 영역의 보 주근의 정착 방법에 대한 수정이 요구된다.

7) 고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 내진성능 개선을 위한 실험을 통하여 보의 소성현지 이동 설계법과 대각 균열 방지 설계법을 조합한 설계방법을 도입하면 접합부의 균열 방지 및 골조의 내진성능 향상에 더욱 효과적인 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술재단의 목적기초연구(1987년)의 연구비 지원하에 이루어진 연구의 일부로서 관계자 제위와 연구수행에 도움을 주신 한국해사기술연구소의 이호섭박사, 신병철박사 등 관계자 여러분께 깊은 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

1. ACI Committe 363, "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete," (ACI 363R-84), American Concrete Institute, Detroit, 1984, 48 pp.
2. ACI-ASCE Committee 352, "Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures, ACI Journal, Proceedings Vol. 73, No. 7, July 1976, pp. 375-393.
3. ACI-ASCE Committee 352, "Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures," ACI Journal, Proceedings Vol. 82, No. 3, May-June 1985, pp. 266-283.
4. Chung, L., "Effects of Loading Rate on Response of Reinforced Concrete Model Beam-Column Joints and Anchorage-Bond," Ph. D thesis, Department Civil Engineering, Northwestern University, Evanston, 1987, 245 pp
5. 이리형 외 4인 "반복하중을 받는 철근콘크리트 보의 전단보강 및 소성현지 이동 (1), (2)" 대한건축학회 학술발표회 논문집, 제 9 권 제 2 호 1989, 10월 pp. 463-470
6. 신성우 외 3인 "반복하중을 받는 고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 휨강성비에 관한 연구" 한국콘크리트학회 학술발표 논문집, 제 2 권 제 2 호 1990, 11 월 pp. 63-67.
7. Bertero, V. V., and Popov, E. P., "Seismic Behavior of Ductile Moment Resisting Reinforced Concrete Frames," ACI-Publication, SP-53, Detroit, 1977, pp. 247-292.
8. Scribner, C. F. and Wight, J. K., "Strength Decay in R/C Beams under Load Reversals," Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 189 No. ST4, Proc. Paper 15360, April, 1980, pp. 861-875.
9. Abdel-Fattah, B. and Wight, K., "Study of Moving Beam Plastic Hinging Zones for Earthquake Resistant Design of R/C Buildings," ACI Journal, Proceedings V. 89, No. 84-S4, January February 1987, pp. 31-39
10. ACI Committee 318, "Commentary on Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83)," American Concrete Institute, Detroit, 1983.

(접수일자 : 1992. 2. 20)