

내진상세를 가진 2경간 2층 철근콘크리트 골조의 반복횡하중 실험

Reversed Cyclic Lateral Load Test of A 2-Bay 2-Story
Reinforced Concrete Frame with Seismic Detail



이한선*

Lee, Han Seon



우성우**

Woo, Sung Woo

요 약

이 연구의 목적은 지진과 같은 반복횡하중을 받는 연성 모멘트 저항 철근콘크리트 구조물의 탄성 및 비탄성 거동의 특성을 검토하고자 하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해 내진 상세를 가진 2경간 2층 평면 철근콘크리트 구조물을 설계했고 요구되는 상사법칙에 근거하여 1/2.5 크기의 부분구조 실험체를 제작하였다. 그 다음, 이 구조물에 변위 조절하에서 반복횡하중 실험을 실시하였다. 마지막으로 이 실험의 결과로부터 (1) 설계강도와 실제강도, (2) 강성과 강도 저하, (3) 파괴모드와 에너지 소산 및 (4) 국부변형 등에 대하여 분석하였다.

Abstract

The objective of this study is to investigate the characteristics of elastic and inelastic behavior of ductile moment-resisting reinforced concrete frame subjected to reversed lateral loading such as earthquake excitations. For this purpose, a 2-bay 2-story reinforced concrete plane frame with seismic detail was designed and one 1/2.5-scale

* 정회원, 고려대학교 건축공학과 조교수, 공박

** 영남대학교 건축공학과 석사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 2월 27일까지 학회로 보내
주시면 1997년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

subassembly was manufactured according to the required similitude law. Then, the reversed load test under the displacement control was performed statically to this subassembly. Finally, the results of this test were analysed regarding to (1) the design load vs actual strength, (2) degradation in stiffness and strength, (3) failure mode or energy dissipation, (4) local deformations.

Key words : reinforced concrete, moment-resisting frame, stiffness, strength, failure mode, elastic, inelastic deformation, energy dissipation

1. 서 론

우리나라는 지진학적으로 매우 불안정한 중국대륙과 일본 열도 사이에 위치해 있으며, 과거의 역사적 기록 뿐만 아니라 최근의 관측으로 볼 때에도 더 이상 지진에 대한 안전지대가 아님이 증명되고 있다. 또한 인구의 조밀화와 고도산업화에 따른 건축물의 고층화, 대형화 추세로 인해 지진발생시 대규모 피해가 우려되어 구조물의 내진설계, 내진공학의 필요성이 어느 때보다 절실히 요구되고 있으나, 이에 대한 국내 연구는 아직도 초보적인 단계에 있다고 볼 수 있다. 특히 간혹 부재 혹은 접합부 수준에서의 내진실험은 이루어지고 있으나 구조물 전체의 거동에 관한 실험은 매우 드문 실정이다.

구조물의 비탄성거동은 개개의 접합부나 부재의 강도 및 강성과 에너지 소산능력 뿐만 아니라, 인접한 부재와의 상호작용에 좌우되므로 접합부등 단일 부재의 실험만으로는 구조물의 내진특성을 규명하기가 어렵다. 또한 지진에 의한 구조물의 거동은 해석적인 방법으로도 비탄성영역까지 예측할 수 있으나, 이 해석법을 실용적으로 이용하기 위해서는 그의 신뢰성을 확보할 수 있는 실험적 근거가 필요하게 된다.

본 연구에서는 2경간 2층 철근콘크리트 모멘트-저항 구조물에 대해 미국 ACI code⁽¹⁾에 근거하여 극심한 지진이 예상되는 지역에서 요구되는 상세기준에 부합되게 설계하였다. 또 실험실의 여건상 1/2.5로 축소하여 실제 구조물을 대표하는 것으로 보았으며⁽²⁾ 정적 반복하중 실험을 변위조절에 의해 수행하여, 구조물 전체의 실제강도와 설계강도의 비교, 강성, 파괴양상, 연성(ductility), 변형능력,

성능저하 등에 대해 관찰하고 접합부, 부재 등의 국부적인 거동에 대해서도 관찰, 분석함을 목적으로 한다.

2. 실험체의 설계 및 제작

2.1 실험체의 설계

실물 크기의 대상 구조물은 Fig. 1과 같으며, 용도는 학교로 가정하였다. 이 구조물의 설계하중조건은 Fig. 2와 같으며, 지진하중의 계산에 적용된 관련계수 및 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V &= \frac{AISC}{R} W \\ &= \frac{(0.12)(1.0)(1.75)}{(4.5)} (81.13t) \\ &= (0.0467)(81.13t) \\ &= 3.79t \end{aligned}$$

여기서,

V : 밑면전단력

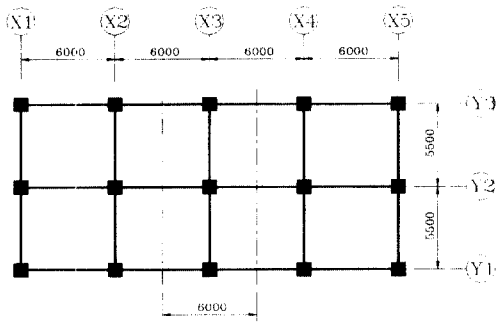
A : 지역계수

I : 중요도계수

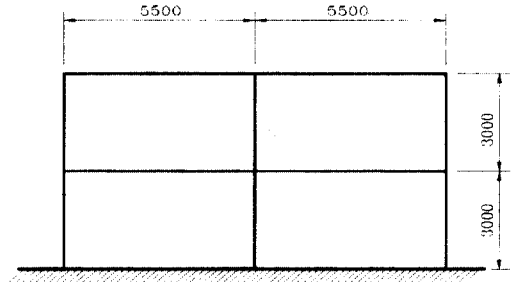
S : 지반계수

C : 동적계수(모멘트 골조인 경우 $T = 0.06h^{3/4} = 0.23$ 이므로 $C = 1/(1.2\sqrt{T}) = 1.738 > 1.5$, $C = 1.5$ 를 취하며 $C \times S > 1.75$ 이므로 1.75로 둔다.)

R : 반응수정계수
를 뜻한다.

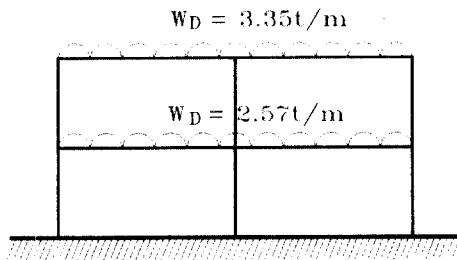


(a) Plan

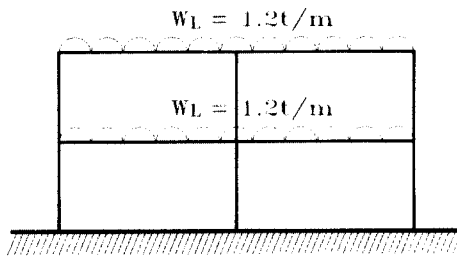


(b) Elevation

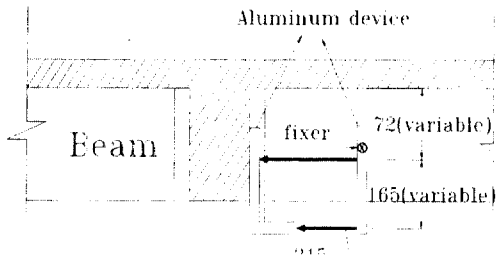
Fig. 1 Geometry of structure(unit : mm)



(a) Dead load



(b) Live load



(c) Earthquake load

Fig. 2 Load conditions

2.2 실험체의 제작

위와 같은 하중조건에 대하여 사용재료의 설계강도는 콘크리트 압축강도 $f_c = 210\text{kg/cm}^2$, 철근 항복강도 $f_y = 2400\text{kg/cm}^2$ 로 하였다. 그러나 실제 철근은 SD30($f_y = 3000\text{kg/cm}^2$)을 사용함으로써 25% 정도의 과설계를 초래하게 되었다. 실물크기 구조물의 단면에 치수 축소를 1/2.5을 적용하고, 재료의 실제 가용성을 고려하여 주근은 D10 횡보강근은 $\phi 4$ 철근을 사용하였으며, Fig. 3과 같은 1/2.5 실험체를 제작하여 실물 크기를 대표하는 것으로 보았다. 이 실험체에 사용된 콘크리트와 철근의 응력-변형도 관계가 Fig. 4에 주어져 있다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

본 실험에서 측정하고자 하는 힘, 변형, 변위는 다음과 같다.

- (1) 전체 횡하중, (2) 층 변위,
- (3) 국부 변형(소성현저 부분의 회전각),
- (4) 철근의 변형률.

이상을 측정하기 위한 실험장치 설치 상황은 Fig. 5와 같으며 Photo 1에서 사진으로 나타냈고, 실측계기의 위치는 Fig. 6과 같다. 국부에서의 회전각 측정을 위해서는 알루미늄으로 Fig. 7과 같이 설계, 제작하여 사용하였다.⁽³⁾ 지붕에 대한 횡력의

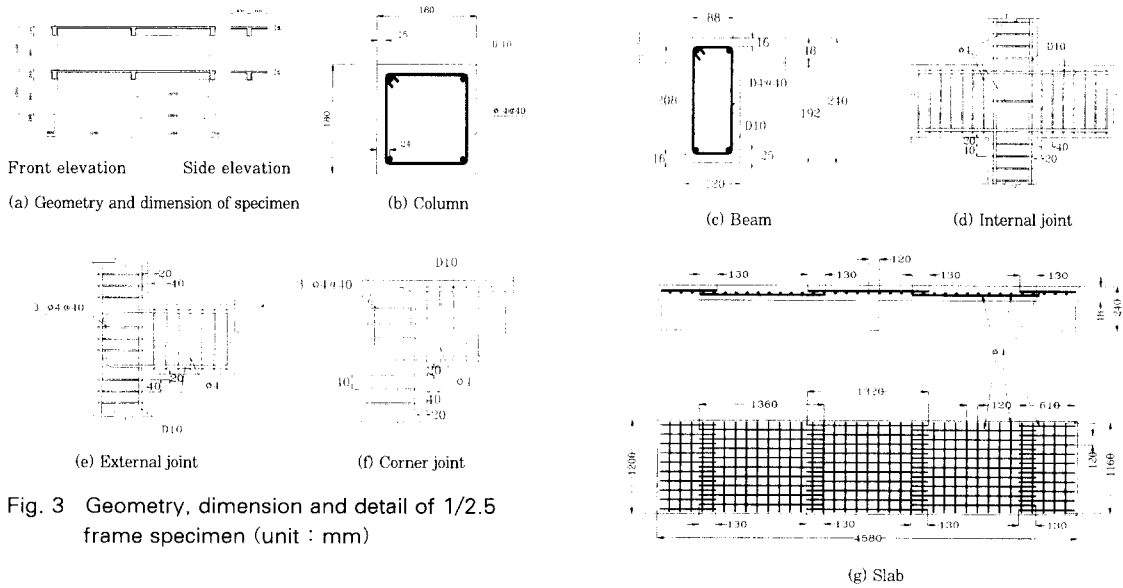


Fig. 3 Geometry, dimension and detail of 1/2.5 frame specimen (unit : mm)

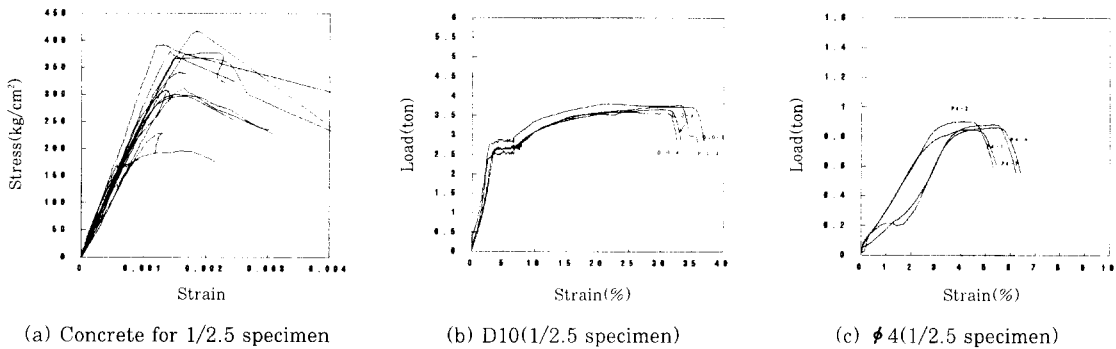
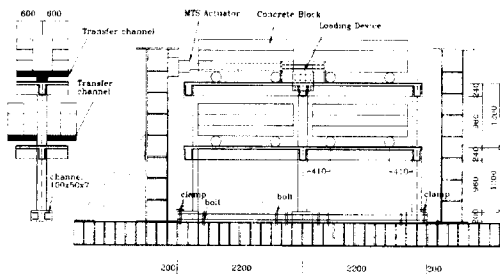
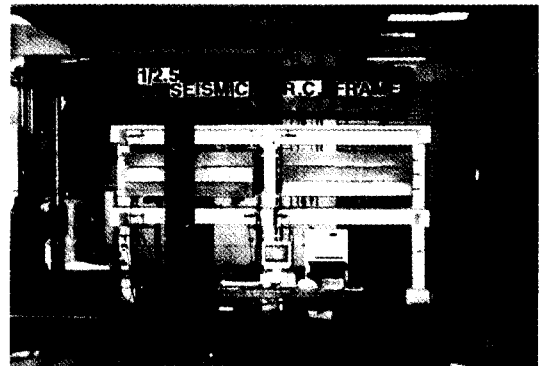


Fig. 4 Stress-strain curves of concrete and load-strain curves of reinforcements



▲ Fig. 5 Experimental set-up (unit : mm)

▶ Photo 1 Experimental set-up for 1/2.5 2-bay 2-story R.C. frame



가력시 경계조건이 구조체의 거동에 영향을 미치는 것을 최소화 하기 위하여 액튜에이터와 실험체 사이에 Fig. 5와 같은 가력기구 (loading device)를

제작하여 사용하였다. Fig. 2에서 층지진하중이 2층바닥과 지붕바닥에 각각 작용하고 있으나 본 실험에서는 사용가능한 가력기기 장치의 제한으로 지

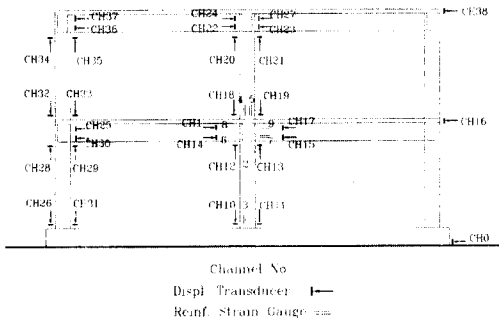
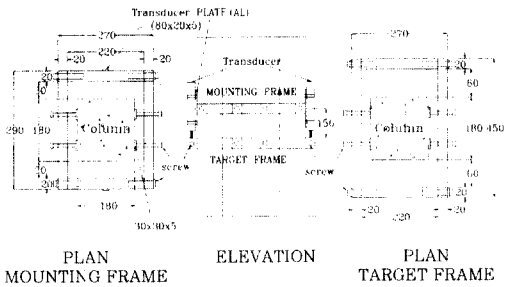
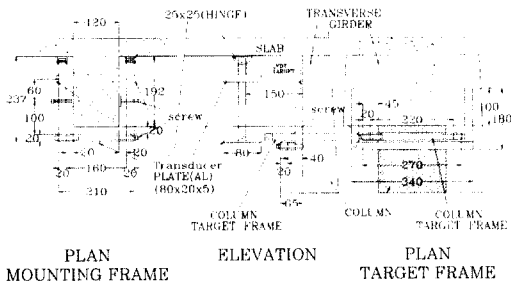


Fig. 6 Instrumentation



(a) For column



(b) For girder

Fig. 7 Details of aluminum device to measure the rotational angle in 1/2.5 specimen (unit : mm)

봉에만 가력하는 것으로 하였다.

3.2 실험방법 및 데이터 측정방법

본 실험에서는 상사법칙에 의거하여 축소율에 따라 자중을 보상하기 위하여 $W \times D \times L = 0.4m \times 0.2m \times 1.8m$ (약 350kg)의 콘크리트 블록을 제작하여 Fig. 5와 같이 설치하였다.⁽⁴⁾ 이때 작용점은 스패의 1/6 지점을 선택하여 보 단부에서의 전단

력과 모멘트가 실물크기에 상응하도록 하였다. 가력은 Fig. 8과 같이 미리 정해진 변위이력에 따라서 변위조절로써 수행하였다.

가력장치는 MTS 100KN 용량의 유압식 액튜에이터이며, 이 가력장치의 측정범위를 하중 $\pm 100KN$, 변위 $\pm 150mm$ 로 하였으며 데이터 취득은 미국 Measurement Group사의 시스템 4000을 이용하여 41개 채널에서 2초 간격으로 데이터를 읽어 들었다.

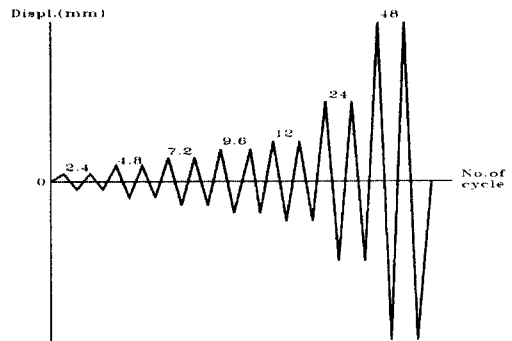


Fig. 8 Lateral displacement history at roof

4. 실험결과 및 분석

4.1 전체 층변위-휨력관계

Fig. 9로부터 실제 항복강도는 55.27KN으로 나타나고 있다. 이러한 사실은 설계강도 5.94KN ($3.79t(2.5)^2=0.606t$)의 9배 정도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 항복변위 δ 는 8mm 정도로서 δ_{max} 이 48mm인 점을 감안할 때 구조물 전체 변위 연성율(displacement ductility ratio)은 6.0 정도를 나타내고 있다. 2차 사이클에서의 강성저하는 초기에는 별로 뚜렷하게 나타나지 않고 있으나, 막바지 단계(24mm~48mm)에서 확연히 나타나고 있으며 2차 사이클에서의 강도저하는 마지막 단계(48mm)를 제외하고는 작은 것으로 나타나고 있다. 9.6mm 단계에서 구조물의 항복현상이 확실히 나타나고 있으며, 이후의 비탄성 변형이 주로 2층 기둥에 집중되어 있음을 Fig. 10에서 발견할 수 있다.

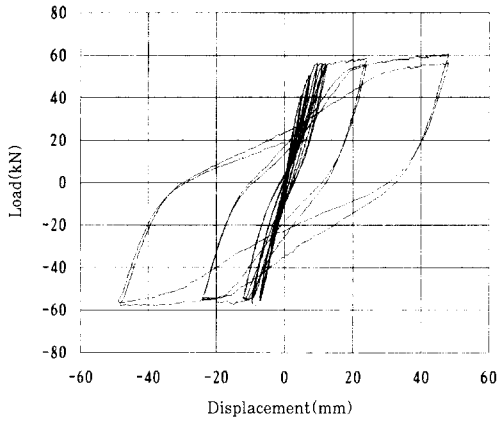
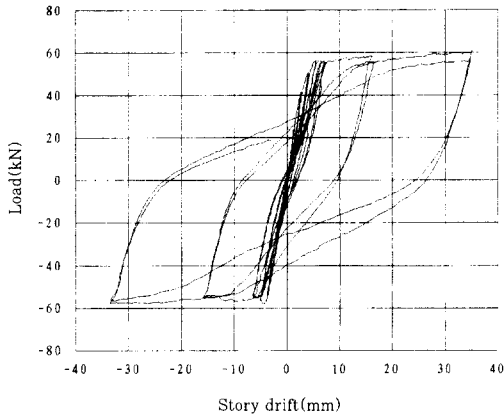
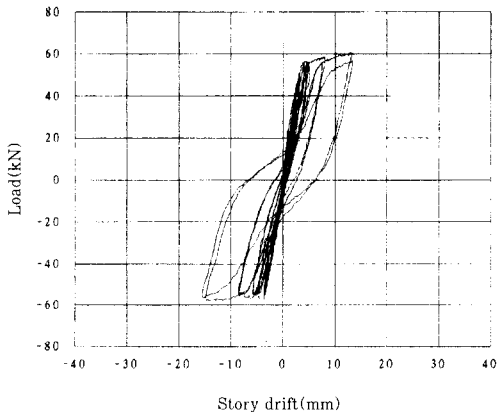


Fig. 9 Lateral load-roof displacement relation for 1/2.5 specimen



(a) Interstory drift at second story



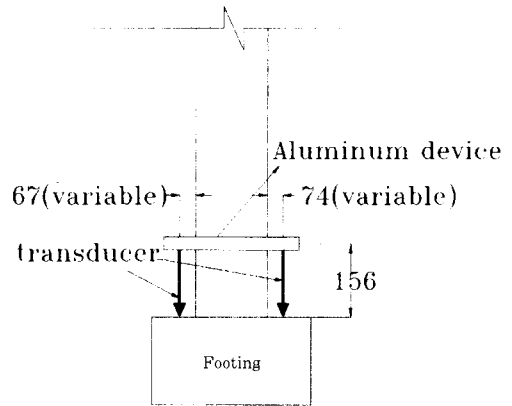
(b) Interstory drift at first story

Fig. 10 Lateral load vs interstory drift for 1/2.5 specimen

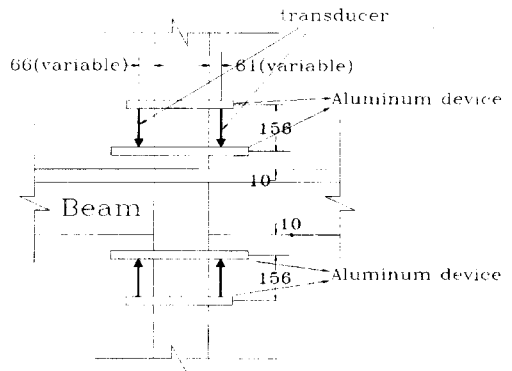
4.2 국부변형

4.2.1 기둥의 소성힌지 부분

기둥에서의 소성힌지 형성을 관찰하기 위해 Fig. 7과 같은 알루미늄 기구를 제작 사용하였다. Fig. 11과 같이 1층 기초와 기둥부분에서는 기둥과 기초의 접합면에서의 변형이 포함되게 측정하였다. 그 이외의 상부기둥에서의 변형은 이 접합면에서의 변형이 포함되지 않도록 기구를 설치함으로써 실제 많은 변형이 접합면에서 발생하였으나 이를 적절히 측정하지 못한 결과를 초래하게 되었다. 회전각을 측정할 간격(156mm)은 기둥 철근의 유효층(effective depth)와 같으며 이 구간내에서 대부분의 소성회전각이 발생한다고 보았다.



(a) Column-footing joint



(b) Beam-column joint

Fig. 11 Device set-up to measure the angle of rotation in column(1/2.5 Specimen)(unit : mm)

이들의 최대 회전각의 크기를 Fig. 12에 나타냈다. Fig. 12로부터 내부 중앙접합부에서의 회전각이 상대적으로 작게 나타남을 알 수 있다. 예로서 Fig. 13에서 1층 중앙기둥의 상하단 회전각에서 1층 내부접합부에 면한 기둥상단에서는 소성힌지가 형성되지 않았음을 발견할 수 있다.

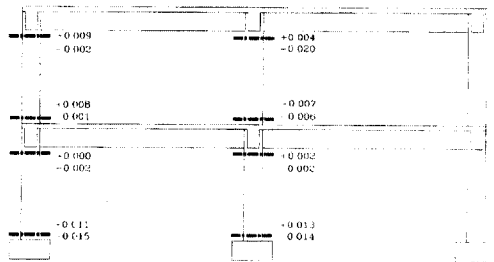
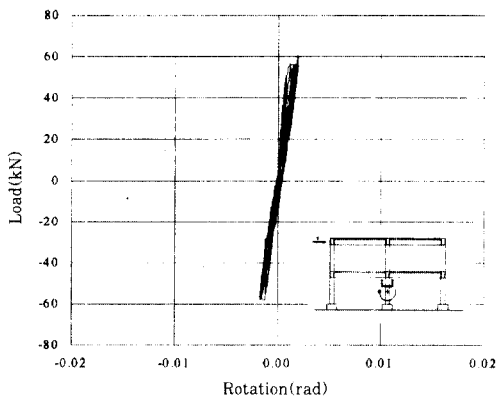
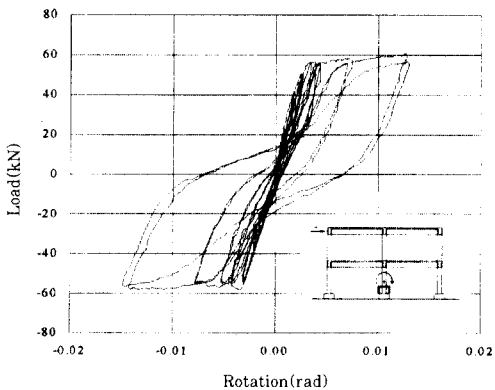


Fig. 12 Maximum angle of rotation in columns for 1/2.5 specimen(unit : rad)



(a) Top of internal column at first story



(b) Bottom of internal column at first story

Fig. 13 Angle of rotation in column(1/2.5 specimen)

4.2.2 보의 소성힌지 부분

보에서의 소성힌지 영역의 회전각을 측정하기 위해 Fig. 14와 같이 계기를 설치하였다. 이 실험으로부터 얻은 측정결과를 각 부위별로 국부 회전각과

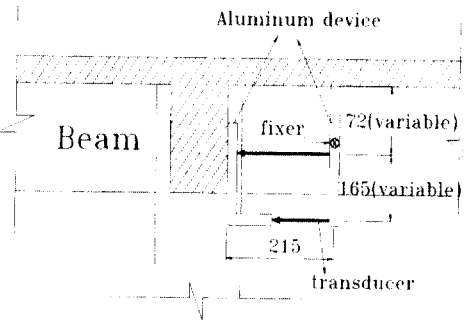
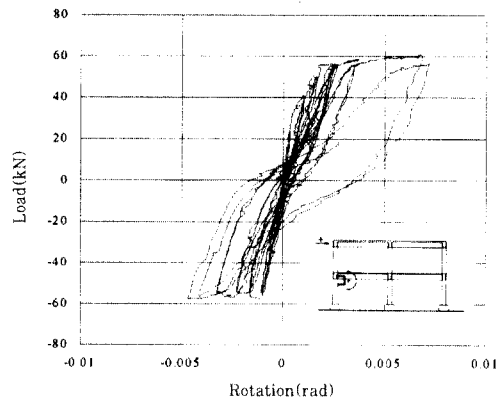
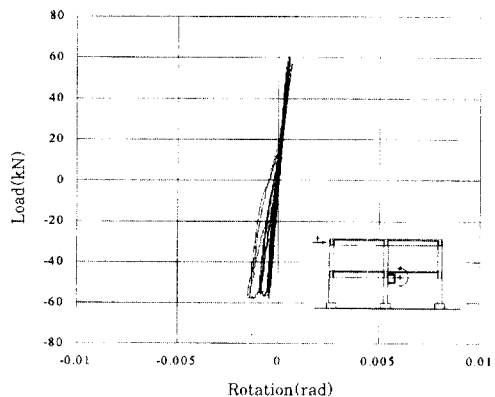


Fig. 14 Device set-up to measure the angle of rotation in beam(1/2.5 specimen)(unit : mm)



(a) External beam-column joint in left beam at second floor



(b) Internal beam-column joint in right beam at second floor

Fig. 15 Angle of rotation in beam(1/2.5 specimen)

횡하중과의 관계로 Fig. 15에 나타내었으며, 이들의 최대 회전각의 크기가 Fig. 16에 주어져 있다. Fig. 16으로부터 2층 바닥에서 내부 접합부보다 외부 접합부에 면한 부분에서 보의 회전각이 비교적

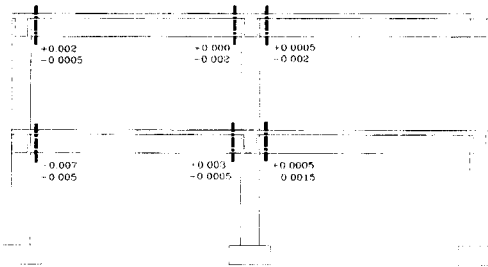


Fig. 16 Maximum angles of rotation in beams for 1/2.5 specimen(unit : rad)

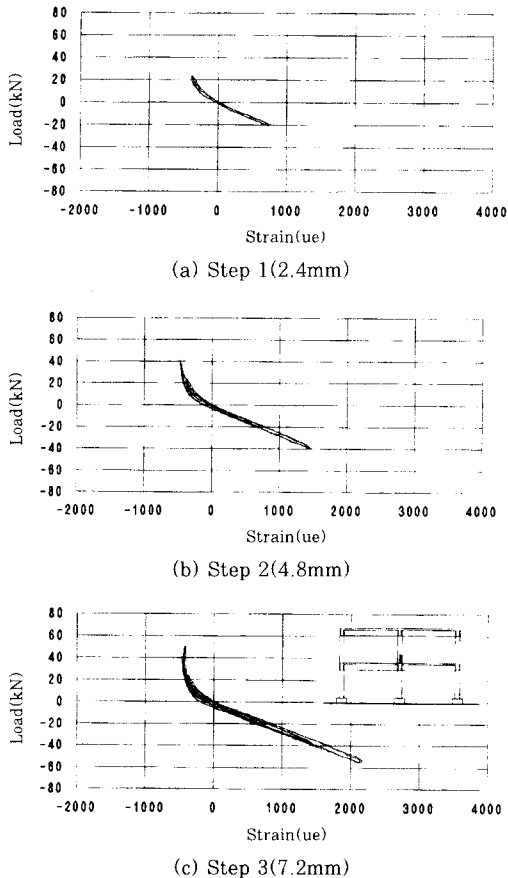


Fig. 17 Load and strain relation up to step 3 at strain gauge channel No.5 in 1/2.5 specimen

크게 발생한다는 사실을 발견할 수 있다. 한편 기둥에서의 회전각을 나타낸 Fig. 12와 비교하여 볼 때 상대적으로 적은 양의 회전각이 보에 발생하였음을 알 수 있다.

4.2.3 철근 변형을

철근 스트레인 게이지는 보, 기둥 접합부 또는 기초의 접합면으로부터 2cm 떨어진 위치에 철근의 안쪽으로 향한 면의 중앙에 부착하였다. 한 예로서 Fig. 17에서 2층 기둥 하단부(5번 채널)에서의 철근 거동을 살펴보면, 항복 시기는 항복 변형을 $f_y/E_s \cong 3000(\text{kg/cm}^2)/2100000(\text{kg/cm}^2) = 0.0014$ 로 추정할 때 7.2mm의 변위단계로 추측된다. 압축일 경우 하중의 증가에도 불구하고 거의 일정한 변형율을 나타내다가 인장을 받을 때만 작용 하중에 비례하여 변형율이 증가하는 현상을 나타내

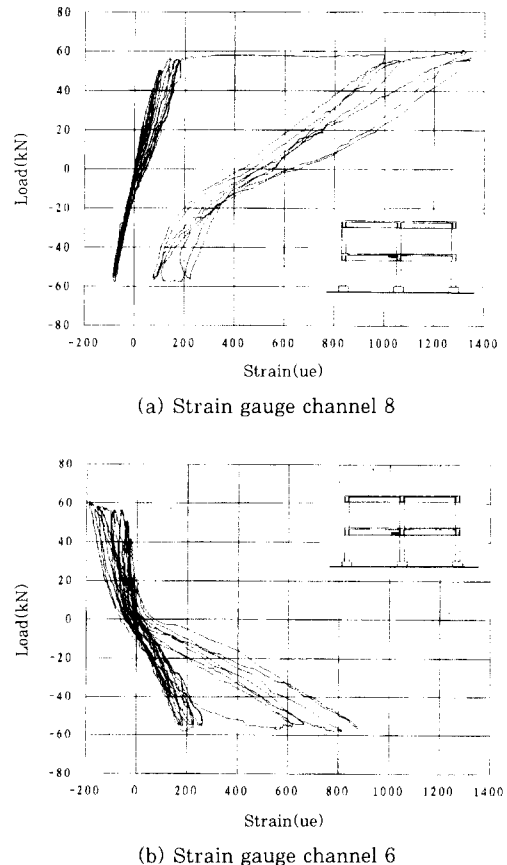


Fig. 18 Load and strain relations for 1/2.5 specimen

고 있다. 보의 상하부에 위치한 철근의 변형율은 Fig. 18에서 마지막 몇 단계에서 큰 변형이 발생하고 있음을 보여주고 있으나 마지막 단계까지 모두 항복변형율 0.0014보다 작게 나타나 여전히 탄성 범위내에 있음을 보여주고 있다.

4.3 파괴모드

전체적인 파괴모드는 Fig. 19에 나타나 있으며 단계별 균열 및 손상의 발전과정은 아래와 같다.

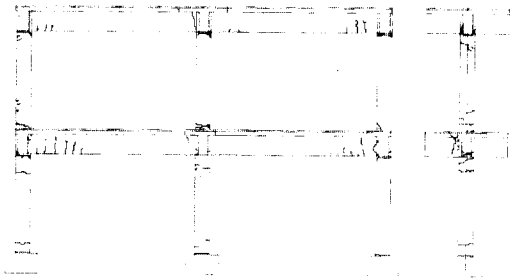


Fig. 19 Overall view of damaged 1/2.5 2-bay 2-story R.C. frame

최대변위 2.4 mm단계에서는 2층 중앙기둥 상부에서 및 우측기둥의 상부 접합부에서 균열이 일어났으며 지붕바닥 우측보 밑면에서 초기균열이 일어났다. 4.8mm단계에서는 2층 좌측기둥의 상부 접합부에서 균열이 발생하였고 계속적으로 균열이 증가하였다. 7.2mm단계에서는 1층 좌측기둥-보 접합부의 초기균열이 발생하였고 중앙기둥의 상부에도 균열이 발생하였다. 또, 1층 우측보에서도 우측단부에서 초기균열이 발생하여 압축측으로 진전하여 보-기둥 접합부 균열로 이어졌다. 2층에서는 좌측기둥의 상부에서 균열이 증가하였고 우측보의 균열이 압축측으로 확산되었으며 지속적인 균열의 증가가 발생하였다. 9.6mm단계에서는 1층 좌측보 좌측단부의 밑면에 균열이 발생하였고, 우측보에서 균열이 심화되었으며 기초 접합부의 균열도 발생하였다. 2층에서는 중앙기둥의 하부 접합부에서 균열이 발생하였다. 12mm단계에서는 1층 좌측보의 균열이 증가하여 더욱 압축측으로 확산되었으며 중앙기둥의 상부균열이 심화되고 기초 접합부의 균열이

발생하였고 우측기둥에서는 2층바닥 슬래브면까지 균열이 확산되었다. 2층에서는 각 기둥의 하부균열이 발생하였다. 24mm단계에서는 1층 좌측기둥의 기초 접합부에서 균열이 발생하였으며 보-기둥 접합부의 균열이 심화되었다. 또, 1층 중앙부에서는 슬래브면까지 균열이 확산되고 우측보에서의 균열이 심화되어 스패안쪽(L/3)까지 균열이 전파되었다. 2층에서는 접합면에서 점점 더 균열이 크게 심화되고 가력부 부근의 슬래브면에서 균열이 일어나기 시작했으며 48mm단계에서는 2층바닥에서 슬래브면까지 균열이 확산되고 2층에서는 좌측기둥 상하부 접합면에서 2~3mm정도 벌어지면서 균열이 심화되고 우측기둥에서도 상부 접합부의 파괴가 일어났다.

4.4 에너지 소산량

이 실험의 결과로부터 각 단계별로 층별에너지와 전체에너지 소산량을 구해보면 아래의 Fig. 20과 같다. 이 그림으로부터 7.2mm단계까지는 탄성기둥을 주로 나타냄으로써 소성변형에 의한 에너지 소산량이 매우 미미한 반면 9.6mm단계 이후부터 본격적으로 소성변형에 의한 에너지 소산현상이 나타나며, 대체로 들쭉 사이클이 첫째 사이클보다 에너지 소산량에서 15%정도 작아지는 것을 발견할 수 있다. 이미 언급한 바와 같이 2층에서의 에너지 소산량이 훨씬 많은 사실은 손상이 이 부분에 집중되어 있는 것을 나타낸다.

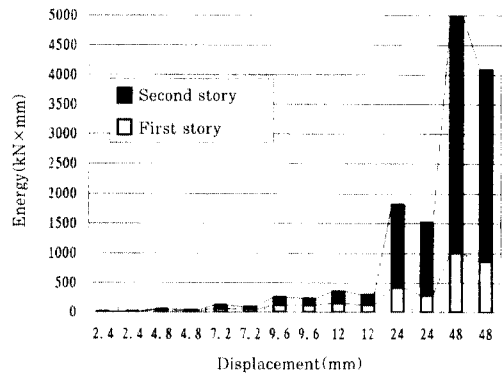


Fig. 20 Energy dissipation capacity

4.5 선형탄성 범위에서의 구조해석 결과와의 비교

본 구조물의 단면을 무근의 콘크리트 직사각형(rectangular) 단면으로 보고 균열이 없다고 가정하여 얻은 횡처짐-하중 관계와 실험결과 얻어진 첫 단계(2.4mm)에서의 횡처짐-하중을 Fig. 21에 나타내었다. 이 그림으로부터 보통 구조해석시 사용되는 무균열 무철근 콘크리트 구형단면의 가정이 실제와 상당히 일치하는 것을 발견할 수 있다.

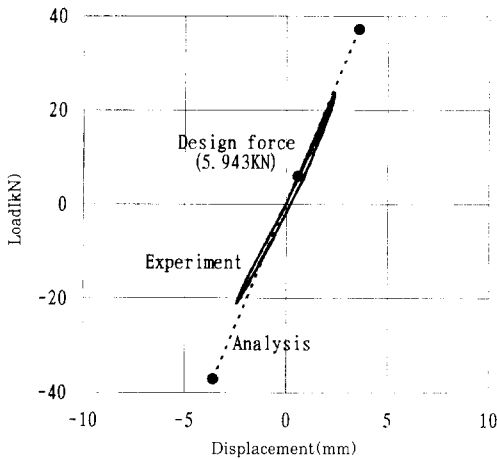


Fig. 21 Lateral load-lateral displacement relation at roof(2.4mm)

5. 결 론

본 실험의 결과분석으로부터 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

(1) 설계지진하중과 실제강도를 비교하여 볼 때에 약 9배 정도의 안전율이 나타나고 있다. 여기에는 극한강도설계법에서의 하중증가계수, 재료의 실제강도 증가, 단면의 과설계 및 초기 소성힌지의 발생 이후 구조물 자체의 붕괴메카니즘 형성까지의 자체적인 구조 과강도(overstrength)등을 이유로 들 수 있을 것이다.

(2) 내진상세를 가진 모멘트-저항 철근콘크리트 골조의 경우 구조물의 전체 변위 연성율은 6 정도로 나타나고 있어 내진성이 대단히 양호하다.

(3) 이 구조물에서는 기둥의 보-기둥 접합면의 시공 조인트에서 큰 폭의 균열이 발생하는 현상이 나타나 이 부분에 대한 철근 상세를 보강할 필요가 있다고 여겨진다.

(4) 구조물 전체는 선형거동을 나타내고 있더라도, 철근의 변형은 초기부터 외부하중과 비선형 관계를 나타낼 수 있다.

(5) 외부 보-기둥 접합부에 면한 보의 단부에 비탄성 거동이 집중되는 현상을 나타내고 있으며 한번의 손상이 가해지면 계속적으로 이 부분에 손상이 누적되는 현상을 보이고 있다.

(6) 보통 관계적으로 사용되는 무균열 무철근 콘크리트 직사각형단면의 가정으로 얻어진 선형탄성 해석결과는 실험에서 얻어진 초기결과와 매우 근사한 처짐값을 보여주고 있다.

(7) 실험이 수행된 내진상세를 가진 모멘트-저항 구조물의 비탄성 거동을 보다 면밀하게 분석하기 위해서는 비선형 해석기법을 이용한 보완 연구가 추후 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터의 지원에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI 318-89, 1989
2. 이한선, "철근콘크리트 축소모델의 거동상사성에 관한 연구", 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터, 1996. 2.
3. Hidalgo, P., Clough, R. W., "Earthquake Simulator Study of a Reinforced Concrete Frame.", University of California, Berkeley, EERC No. 74-13, December, 1974
4. Sabnis, G.M., Harris, H. G., White, R.N., and Mirza, M. S., "Structural Modeling and Experimental Techniques", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliff, New Jersey, 1983.

(접수일자 : 1996. 8. 23)