

2방향 수평력을 받는 고강도 철근콘크리트 기둥의 파괴거동에 관한연구

Damage Behavior of High Strength Reinforced Concrete Columns under Biaxial Lateral Loading

박 재 영

Park, Jae young

ABSTRACT

The behavior of high strength reinforced concrete columns subjected to uniaxial reversal loading and biaxial reversal circle path loading was investigated. Four full scale test specimens were tested. All specimens were adopted cantilever type, in order that the critical region is to locate only at the bottom of column. The parameters studied were transverse reinforcement ratio, uniaxial lateral loading and biaxial lateral loading. The damage features of columns by the biaxial loading are different from those of the uniaxial loading. However, the maximum strength and the draft angle at maximum strength were almost the same under uniaxial and biaxial loading. The transverse reinforcement under biaxial loading was very effective for increasing ductility of specimens.

1. 서론

지진이 발생하면 구조물은 일반적으로 2방향 수평력과 상하운동을 하게되어 복잡한 應答性狀을 보인다. 따라서, 내진설계시에는 구조물의 안전성을 확보하기 위하여 2방향 수평력에 대한 손상과정을 파악하는 것은 매우 중요하다고 본다.

철근콘크리트 구조물의 기둥에 대한 수평 2방향 재하실험은 많은 연구자들¹⁾에 의해 실시되었다. 각 연구자들의 1방향 가력과 2방향 가력에 의한 비교에서는 그 가력방법에 따라 많은 차이를 나타내었다. 1978년 일본 宮城沖(myagi oki)지진이 발생하였을 때 宮城縣 仙臺市에 있는 동북대학 공학부 토목건축 연구동 9층에서 얻은 건물의 지진응답 기록으로부터 얻은 NS-EW의 평면상의 변위이력은 원형 또는 타원형의 궤적을 나타내었다.

본 연구는 중층의 고강도 철근콘크리트 건물이 지진에 의한 2방향 수평력을 받는다고 가정하여, 건

* 김희권, 부원공과대학 건축디자인과 조교수, 공학박사

물 중앙부 기둥에 대한 1방향 수평가력과 위에서 설명한 변위이력을 고려한 2방향 원형 수평가력을 실시하여, 고강도 콘크리트 기둥의 손상 및 파괴과정을 알아보기 위한 것이다.

2. 실험방법

2.1 시험체

그림1은 시험체의 단면 및 모형을 나타낸다. 시험체는 힌지영역(hinge zone)만이 파괴되고 축방향 하중가력을 쉽게할 수 있도록 캔틸레버 형태로 하였다. 시험체의 단면은 35cm×35cm의 정방형이며 기둥높이는 74.8cm 이다. 수평하중의 가력높이는 기둥상부에 하중전달장치를 이용하여 105cm로 하였다. 주근은 12-D19를 사용하여, 인장철근비 $\rho_t = 0.94\%$ (전 주근비 $\rho_g = 2.9\%$)로 하였다. 주근은 JIS (일본 규격협회) G3112에 있는 SD50을 사용하였다. 측정된 주근의 항복강도는 6,222 kgf/cm²이었다. 주근은 기둥상부에 정착시키는 것이 용이하지 않아 기둥상부의 매립금구에 전 주근을 용접하여 정착시켰다. 기초부에서도 350mm×350mm×12mm의 강재판을 사용하여 전 주근을 용접시켜 정착을 확보하였다. 띠근은 □형과 冊형 두 개의 형태로 하였으며, 띠근 배근방법은 나선철근(spiral reinforcement) 형태를 취하였다. 띠근비 ρ_w 는 0.91%, 0.57%, 0.29%하였다. 띠근은 JIS G3109에 의한 SBPD 130/145를 사용하였으며, 항복강도 측정치는 14,368 kgf/cm² 이다. 띠근의 항복강도는 변형률 0.2% 오프셋(off-set)으로 하였다. 콘크리트의 설계기준강도는 600kgf/cm²이며, 28일강도는 측정하지 않았다. 실험시의 콘크리트 강도는 약 650 kgf/cm² 이다. 표1은 각 시험체의 명칭 및 구조특성을 나타낸다. 표2는 시험체의 재료특성을 나타낸다.

2.2 실험장치

그림2는 수평하중 재하장치를 나타낸다. 수평하중 재하장치는 남쪽과 서쪽에 수평반력용 강재골조를 사용하여, 각각의 강재골조와 2개의 압축·인장복동형 오일잭으로 되어있다. 수평 오일잭은 압축·인장용의 하중변환기, 위치선정 턴비클과 2방향으로 재하할 수 있는 핀기구 형태로 되어있다. 수평가력은 2대의 오일잭과 2대의 전동 오일잭을 사용하여, 1방향과 2방향의 강재변위제어에 의해 실시하였다. 축방향 하중장치는 축방향 가력이 가능토록 +자형 거더, 4개의 하이드로 센터홀잭(hydraulic center hole jack) 고장력 강봉과 압력 자동제어기구가 붙어있는 전동 오일펌프로 되어있다. 재축방향에 대한 가력은 자유단에 설치한 4대의 압축형 센터홀 오일잭(center hole oil jack)을 4개의 고장력 강재에 연결시켜, 고장력 강봉을 인장시킴으로서 축력이 작용할 수 있도록 하였다. 시험체의 기초는 수평가력에 의한 들뜸을 방지하기 위하여 실험실 바닥(testing floor)의 구멍과 시험체에 있는 고정용 구멍을 고장력 강봉으로 연결하여 완전히 고정시켰다.

2.3 가력방법

그림3은 1방향과 2방향의 변위이력을 나타낸다. 가력은 1방향 수평반복하중과 2방향 수평원형반복하중으로 하였다. 가력 부재각(R)은 $\pm 0.5/100$, $\pm 1.0/100$, $\pm 1.5/100$, $\pm 2.0/100$, $\pm 2.5/100$, $\pm 3.5/100$, $\pm 5.0/100$, $\pm 7.0/100$ 이 되도록 하였으며 각 부재각에서 1씩이클씩 가력하였다. 또한, 가력도중에 예정된 부재각 이전에 시험체가 축력을 지지하지 못할 경우에는 가력을 중지하였다. 시험체의 축력은 콘크리트강도(f_{ck})의 $0.4 f_{ck}$ 인 296 tonf을 가하였다.

2.4 측정방법

수평변위는 기초상부에서 105cm되는 지점으로 하여 N(북쪽)면과 E(동쪽)면에서, N면과 E면에 설치한 후레임에 베어링을 설치(기둥표면에서 150cm 떨어짐)하여, 기둥표면과 베어링 및 스트레인게이지식 변위변환기를 피아노선으로 연결시켜 기초에 대한 상대변위로 측정하였다. 측정위치는 기둥 중심선에서 좌우측 각 10cm위치로 하여, 수평변위는 각면 2개의 변위측정결과를 평균값으로 하였다. 재축방향의 변위는 N면과 E면에 대하여 각면 좌우측 2개소씩하여 측정하였다. 재축방향의 변위 측정높이는 기초상부로부터 0~35cm, 0~17.5cm, 17.5~35cm, 35~60cm로 하였다. 측정은 시험체의 측정높이에 설치한 앙카볼트를 이용하여 상대변위로 측정하였다. 가력중에는 시험체의 균열 및 박락을 쉽게 알기 위하여 흰색페인트를 칠하였으며, 가력중에는 기둥의 S(남쪽)면과 W(서쪽)면에 대하여 균열 및 박락이 발생함과 동시에 연필로 표시하였다. 또한, 1사이클 가력이 끝날때마다 기둥의 표면적과 같은 크기의 아크릴판에 수성사인펜으로 균열과 박락의 형태를 본뒀다.

3. 실험결과

3.1 균열 및 박락

그림 4는 각 사이클 마다 1사이클 가력후의 시험체의 균열과 박락현상을 나타낸다. 그림에서 띠근 비기 같은 HC-R1의 1방향 가력(uniaxial loading)과 HC-R2의 2방향 가력(biaxial loading) 시험체를 비교하면, 2방향으로 가력한 시험체가 1방향으로 가력한 시험체보다 작은 부재각(R)에서 균열과 박락현상이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한, 2방향 가력 시험체에서는 띠근비가 적을수록 균열과 박락이 조기에 발생되는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 보통 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 기둥 시험에서의 박락현상은 부재각이 증가되면서 조금씩 발생되어 파괴에 이르는 반면, 본 시험체는 콘크리트 덩어리가 갑작스럽게 박락되는 현상을 보였다. 전 시험체는 초기재하인 부재각 $R=0.5/100$ 의 피크가력 지점에서 기둥 주각부에서 압축파괴현상이 보였다. 두 번째 사이클 가력인 부재각 $R=1/100$ 가력중에는 주각부에서 피복두께(cover concrete)를 따라 기둥상부로 커다란 수직균열이 발생하였고, 부재각 $R=1/100$ 가력 피크시점에서는 수직균열 발생면을 따라 띠근이 있는 부분까지 갑작스런 박락현상을 보였다. 그로 인하여 일시적으로 수평하중이 약간 감소하는 현상이 나타났다. 1방향 가력인 HC-R1 시험체는 부재각 $R=5/100$ 에서 띠근이 완전히 노출되었으나, 최종가력 때까지 주근의 좌굴현상은 나타나지 않았다. 2방향 가력인 HC-R2, R3 시험체는 부재각 $R=1.5/100$ 에서 띠근이 노출되었고, 각각 부재각 $R=7/100, 5/100$ 에서 주근이 파단되었다. 주근의 파단은 주근이 좌굴한 후 주근이 인장력을 받을 때 발생하였다. HC-R4 시험체는 부재각 $R=1.5/100$ 에서 시험체 표면 전체가 급격히 박락현상을 나타냄과 동시에 주각부의 띠근이 노출되면서 기둥의 1D(시험체의 단면 폭)위치에서 주근의 좌굴현상을 볼 수 있었다.

3.2 하중-변형관계

그림5는 하중-변위관계를 나타낸다. 하중-변위 측정은 1방향 시험체는 N-S방향에 대하여, 2방향 시험체는 N-S와 E-W의 두방향으로 나누어 측정하였다. 그림에서 HC-R3 시험체는 부재각 $R=2/100$ 재하실험 직전에 측정용 프로그램에서 이상이 발생하여 실험을 일시적으로 중단하고, 시험체의 잔류변형과 하중을 0(원점)으로 강제가동시킨 후에 다시 가력하였다. 다시 재하할 때는 부재각 $R=2/100$ 부터 시작하였으며, 그림에서 점선으로 표시하였다. 1방향 가력인 HC-R1 시험체는 부재각 $R=1/100$ 피크근방에서 하중이 일시적으로 증가하지 않았으나 이것은 기둥의 주각부가 압축파괴현상을 보이면서 갑자

기 커다란 박락현상을 보였기 때문이다. 이 시험체는 최종가력 사이클인 부재각 R=7/100까지 내력이 증가하는 경향을 보였다. 2방향 가력인 HC-R2 시험체는 N-S방향과 E-W방향에서 부재각 R=1/100에서 최대하중을 나타내었고, 그 후로 부재각 R=7/100까지도 큰 하중감소는 없었다. N-S방향과 E-W방향의 부하중에서는 정하중보다 약 27%정도 낮은 하중값을 보였다. 2방향 가력인 HC-R3시험체는 부재각 R=1/100에서 최대하중을 나타내었고, 부재각 R=5/100까지도 하중감소는 보이지 않았다. 이 시험체는 부재각 R=5/100에서 주근이 파단되어 실험을 중단하였다. 2방향 가력인 HC-R4시험체는 부재각 R=1/100에서 최대하중을 나타내면서 피복두께(cover concrete)가 급격히 박락하는 현상을 보였다. 그 후 부재각 R=1.5/100에서는 하중이 급격히 감소하기 시작하여, 그 후 축력을 지지하지 못하여 실험을 중단하였다.

4. 결론

본 연구는 고강도 철근콘크리트에 기둥에 대한 2방향 수평반복하중에서의 손상 및 파괴과정을 파악하기 위한 것이다. 실험결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 동일한 조건하의 시험체에서 1방향 실험과 2방향실험에서의 균열 및 박락현상은 1방향 시험체보다 2방향 시험체가 작은 부재각에서 조기에 발생되었으며, 그 후 균열과 박락현상도 급격히 진행되어 조기에 파괴되는 양상을 보였다.
- 2) 동일한 조건하의 시험체에서 1방향 실험과 2방향 시험체와의 하중-변위관계에서는 최대하중 및 최대하중시의 부재각은 거의 일치하였으며, 최대하중 이후의 하중감소 경향도 큰 차이는 나타나지 않았다.
- 3) 2방향 시험체에서 띠근비의 증감에 의한 최대하중과 최대하중 이후의 하중감소 변화는 크게 나타나지 않았으나, 최대하중 이후에는 띠근이 적을수록 작은 부재각에서 주근좌굴과 동시에 축력을 견디지 못하고 붕괴되는 경향을 나타냈다. 이것은 2방향 수평력을 받는 기둥에서도 띠근에 의한 코어(core) 콘크리트의 구속 효과와 주근의 좌굴방지 효과가 매우 크다는 것을 나타낸다고 볼 수 있다.

참고문헌

1. 岡田 治, 桑田裕次 외: 二方向曲げせん断力下での柱のせん断性能に関する研究, 日本建築學會大會學術講演梗概集(關東), 1993年9月, pp.725-726
2. 上原 廣, 南 宏一: 繰返し2方向曲げせん断を受ける鉄筋コンクリート柱の弾塑性性狀, 콘크리트工學年次論文報告集 11-2, 1989, pp.223-228
3. 李康寧, 小谷俊介 외: 變動軸力と水平2方向地震力を受ける鉄筋コンクリート柱の舉動, 第8回콘크리트工學年次講演會論文集, 1986, pp.489-492
4. Murat Saatcioglu, Guney Ozcebe: Response of Reinforced Concrete Column to Simulated Seismic Loading, ACI Technical Paper, Jan.-Feb., 1989
5. F. A. Zahn, R. Park, M. J. N. Priestly: Strength and Ductility of Square Reinforced Concrete Column Sections Subjected to Biaxial Bending, ACI Technical Paper, Mar -Apr. 1989
6. 朴在泳, 小川淳二 외: 二軸円形バス載荷を受ける鉄筋コンクリート柱の耐震性能に関する實驗的研究, 第9回日本地震工學シンポジウム, 1994, pp.1423-1428

표1 시험체의 명칭 및 구조특성

시험체	가력 방법	데 근			주 근		축력 (tonf)	
		형상	명칭	간격	d_w (%)	명칭		d_t (%)
HC-R1	1방향	田	RB 7.1	@50	0.91	D19	0.94	294
HC-R2	2방향	田	RB 7.1	@50	0.91	D19	0.94	294
HC-R3	2방향	田	RB 7.1	@80	0.57	D19	0.94	294
HC-R4	2방향	□	RB 7.1	@80	0.29	D19	0.94	294

표2. 시험체의 재료특성(단위 : kgf/cm^2)

시험체	주 근		데 근		콘크리트강도	
	항복 강도	최대 강도	항복 강도	최대 강도	28일 강도	시험시 강도
HC-R1	6,222	8,339	14,368	15,334	-	640
HC-R2	6,222	8,339	14,368	15,334	-	661
HC-R3	6,226	8,276	14,368	15,334	620	530
HC-R4	6,226	8,276	14,368	15,334	620	507

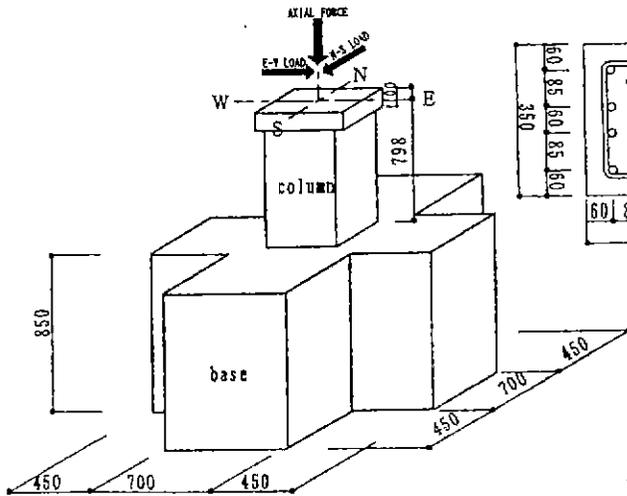


그림1. 시험체의 단면 및 모형도 (단위 : mm)

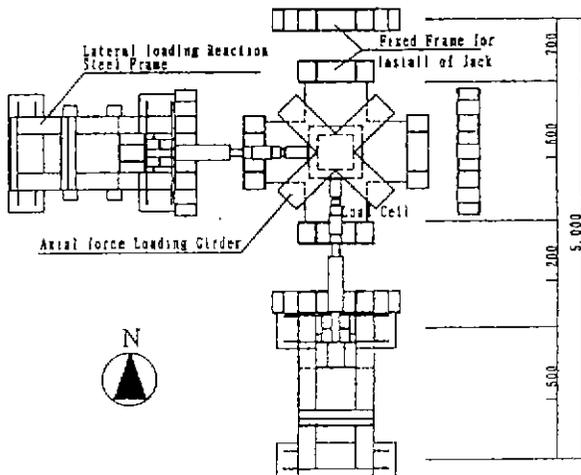


그림2. 수평하중 재하장치

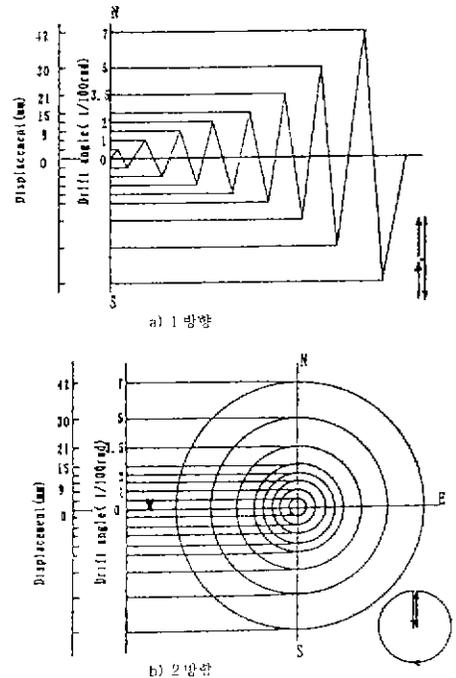


그림3. 1방향과 2방향 변위이력

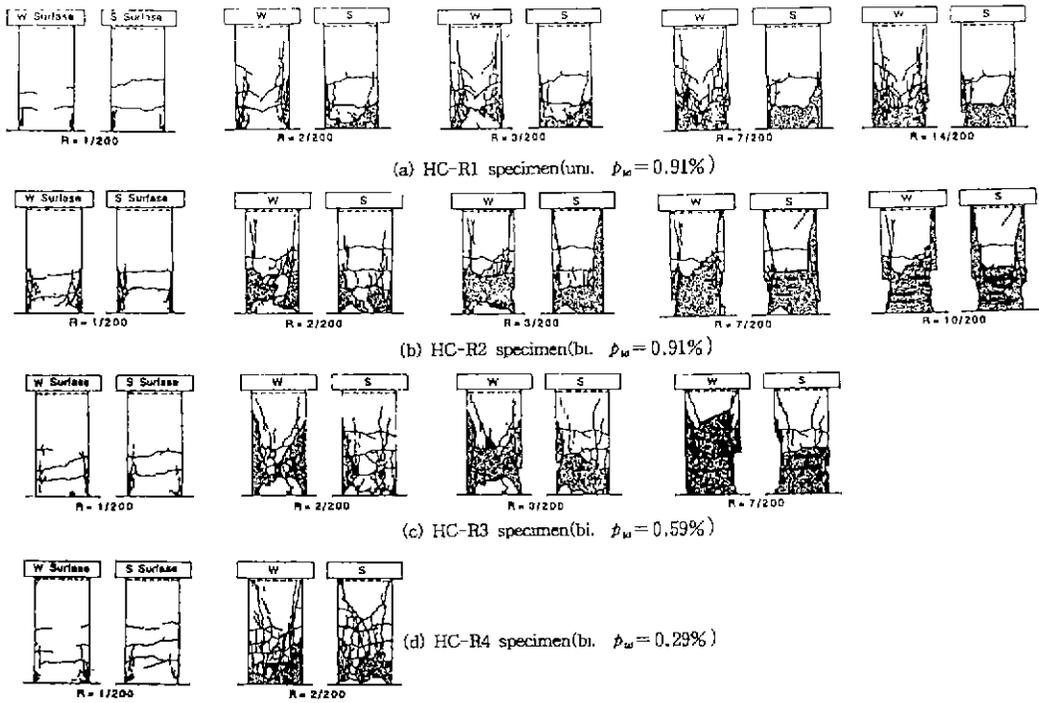


그림4. 시험체의 균열과 박락

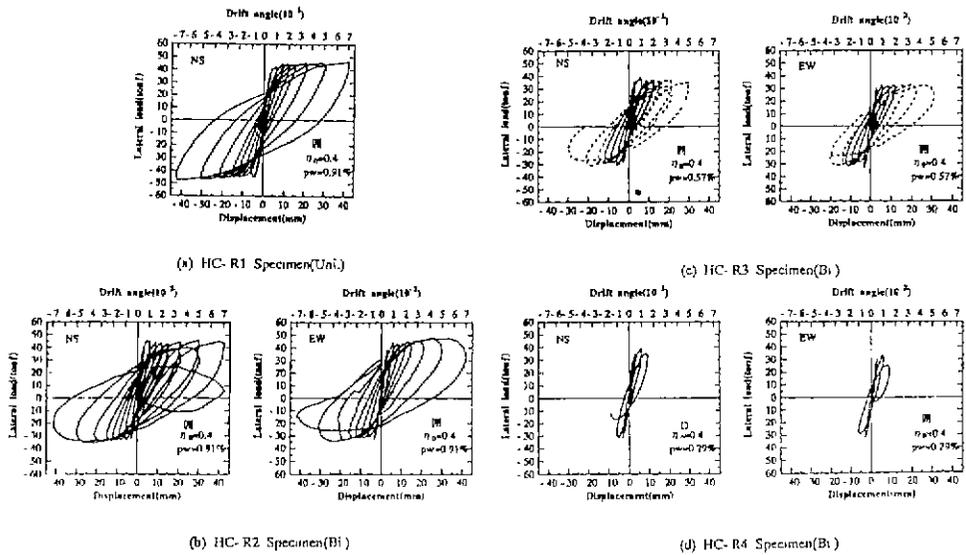


그림5. 각 시험체의 하중-변위관계