

# 이축방향 교번반복하중을 받는 구형 철근콘크리트교각의 거동특성 시험

## Bi-Axial Alternate Cyclic Loading Test of Rectangular Reinforced Concrete Columns

김재관*	김익현**	이재호***	김남식****
KIM, Jae Kwan	KIM, Ick-Hyun	LEE, Jae-Ho	KIM, Nam-Sik

### ABSTRACT

The behavior of bridge column under multi-directional loading as well as uni-directional loading need to be studied because bridge columns will be subjected to the multi-directional cyclic loading during a strong earthquake. To evaluate the capacity of columns, uni-axial cyclic loading tests and bi-axial alternate cyclic loading tests were carried out. The number of cycles of alternate bi-axial loading were determined considering the ratio of natural frequencies in two orthogonal directions. From the test results, strength degradation and ductility reduction were observed in biaxial loading conditions. Their rates were found to be more rapid in the loading pattern that was determined considering the different natural frequencies.

### 1. 서 론

일반적으로 교각의 내진성능 평가를 위해서 준정적인 반복하중을 한 방향으로 가해서 거동특성을 확인하는 실험을 수행하게 된다. 이 실험을 통해서 하중을 재하하는 방향에 대한 교각의 거동특성과파괴 및 파괴형태를 파악할 수가 있다. 지진이 발생했을 경우 생기는 지진력을 단 한 방향으로만 가정한 AASHTO 시방서에서는 교각 설계시에 사용될 설계하중을 결정하기 위해서 지반운동의 방향성에 대한 불확실성을 설계에 반영해서 직교하는 두 수평방향을 고려한 뒤, 적절한 하중 조합을 통해 가장 불리한 경우를 사용하고 있다<sup>(1)</sup>.

실제 지진발생시에 지진하중은 교축방향과 교축직각방향에 대해서 임의적으로 작용하기 때문에 교각에 작용하는 교축방향 수평하중과 교축직각방향 수평하중을 모두 고려했을 때의 교각의 실제적인 거동특성을 살펴보아야 할 필요성이 있다. 이 경우 교축방향과 교축직각방향으로 수평하중을 재하함에 있어서 각 방향에 대해서 교번반복하중을 가했을 때의 거동특성을 단지 일축방향으로만 하중을 받는 경우와 비교해 볼 수 있다. 또한 이축방향 교번하중을 재하할 때, 단순히 같은 횡수

\* 서울대학교 토목공학과 부교수, 정회원  
 \*\* 울산대학교 토목공학과 조교수, 정회원  
 \*\*\* 서울대학교 토목공학과 박사과정  
 \*\*\*\* 현대건설기술연구소 차장, 정회원

로 재하하는 경우 이외에 각 방향에 따른 진동수비를 고려한 차등교번반복하중을 재하하는 실험을 수행하여서 나타난 결과를 비교분석 하였다

## 2. 실험의 개요

### 2.1 시험체의 형상

시험체 교각은 단변 40cm, 장변 60cm, 높이 240cm의 증실구형교각으로 동일한 형태로 4기를 제작하였다. 단변방향을 기준으로 한 종횡비(Aspect Ratio)는 6으로 휨파괴를 일으키도록 하였다. 주철근은 D13(SD30) 철근, 횡철근은 D10(SD30) 철근을 사용하였고 콘크리트 설계강도는  $240\text{kgf/cm}^2$ , 실제강도는  $251.8\text{kgf/cm}^2$ 이다. 소성힌지 구간에는 내진상세<sup>(2)</sup>를 적용하여 횡철근으로 심부구속을 하였고, 주철근의 겹이음을 없애서 겹이음 부위의 부착파괴가 발생하지 않도록 설계하였다. 철근에 대한 세부사항은 표 1과 같고, 단면형상 및 철근배치도는 그림 1,2와 같다.

표 1 철근 세부사항

철근강도( $f_y$ )	$3000\text{ kgf/cm}^2$
주철근비	1.06%
횡철근비	2.57%
주철근 상세	연속철근 사용
횡철근 상세	$135^\circ$ 갈고리
심부구속구간에서의 횡철근 간격	5cm

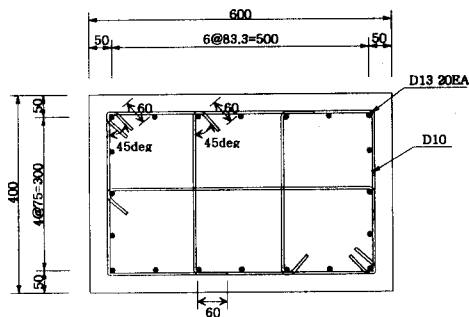


그림 1 교각의 단면도

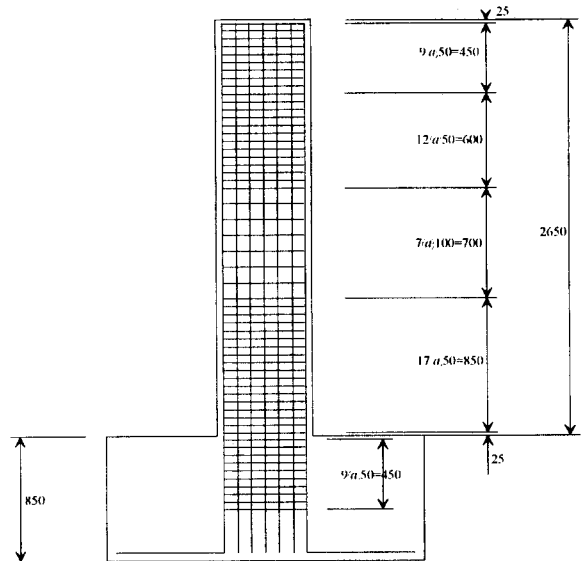


그림 2 정면 철근 배치도

### 2.2 하중 재하방법

(1) 교축방향 재하방법(LU) - 시험체 U1

교축방향으로 준정적 수평하중을 반복해서 재하한다.

(2) 교축직각방향 재하방법(TU) - 시험체 U2

교축직각방향으로 준정적 수평하중을 반복해서 재하한다.

(3) 이축방향 균등교번재하방법(AB) - 시험체 B1

교축방향과 교축직각방향으로 준정적 수평하중을 번갈아가며 재하한다. 이때 방향별 재하횟수를 동일하게 해서 재하한다

(4) 이축방향 차등교번재하방법(FDAB) - 시험체 B2

교축방향과 교축직각방향으로 준정적 수평하중을 번갈아가며 재하하되 교각의 진동특성을 고려해서 교축방향과 교축직각방향의 진동수비에 따라서 방향별로 다른 횟수만큼 재하한다.

(5) 재하횟수의 결정

교각의 주기  $T$ 는 식 (1)에 의해서 구해진다.

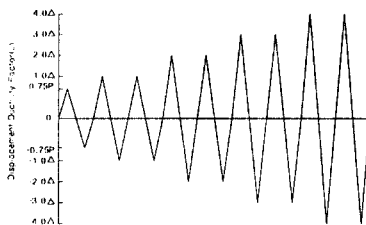
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gK_{eff}}} \quad (1)$$

이때, 교각의 방향에 따른 단면특성에 따라서 강성  $K_{eff}$  값이 변하고, 또 상부구조의 구속조건에 따라서 상부구조무게  $W$  값이 변한다. 이를 토대로 교축방향에 대한 교축직각방향의 진동수비( $f_T/f_L$ )를 구하면 대략 2가 나온다.

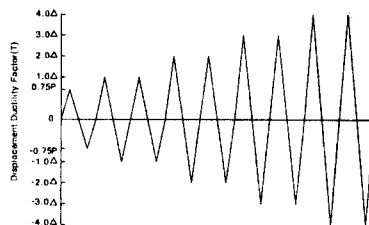
따라서, 일축방향재하의 기준횟수를 2회로 두면 표 2와 같이 하중단계별 재하횟수를 결정할 수 있게 된다. 각각 시험체의 재하 사이클은 그림 3으로 표시될 수 있다.

표 2 시험체별 하중재하방법 및 단계별 재하횟수

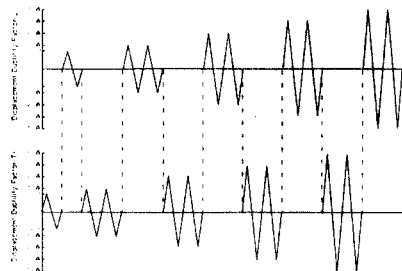
시험체명	재하방식	각 하중단계별 재하 횟수
U1	LU	교축방향 2회
U2	TU	교축직각방향 2회
B1	AB	교축방향 2회, 교축직각방향 2회
B2	FDAB	교축방향 2회, 교축직각방향 4회



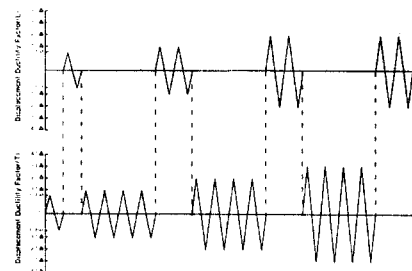
(a) 교축방향재하(U1)



(b) 교축직각방향재하(U2)



(c) 이축방향 균등교번재하(B1)



(d) 이축방향 차등교번재하(B2)

그림 3 시험체별 하중 재하 사이클

### 2.3 실험방법<sup>(3)</sup>

시험체의 하중재하를 위해서 최대 Stroke가  $\pm 250\text{mm}$ , 용량이 1000kN인 Actuator(MTS사 제작)를 사용하였다. 시험체별로 정해진 재하방식에 따라 준정적 수평하중을 재하하는 시험을 수행하였는데, 각 하중단계에 대해서 시험체의 방향별 항복변위  $\Delta$ 의 정수배로 변위제어 가력을 하였다. 이축방향 시험체의 설치모습은 그림 4와 같다.

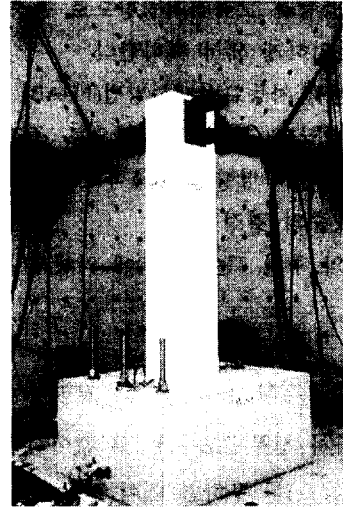


그림 4 시험체 설치모습

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 파괴양상

실험결과, 4기의 시험체 모두 휨파괴가 발생하였다. 낮은 하중단계에서는 기둥하단부터 중단까지 고른 분포로 균열이 발생하였지만, 하중단계가 진행될수록 교각 하단부의 휨균열의 폭이 커지면서 추가적으로 전단균열이 발생하였다. 4기의 시험체 모두 교각 하단 콘크리트의 Spalling이 발생하면서 주철근의 좌굴이 발생하기 시작하였고, 계속되는 하중재하에 의해서 모서리 쪽부터 철근의 파단이 발생하기 시작하였다. 주철근 파단 이후 하중은 급격히 감소하여 파괴에 도달하였다.



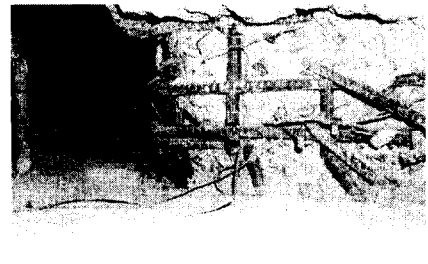
(a) Spalling 발생



(b) 주철근의 좌굴현상



(c) 스트럽의 벌어짐



(d) 주철근의 파단

그림 5 시험체의 파괴양상

### 3.2 하중-변위곡선

그림 6은 시험체 U1, B1, B2의 교축방향에 대한 하중-변위 포락곡선을 나타낸다. 그래프를 보면 일축재하일 경우에 비해서 이축재하일 경우에 최대내하력이 더 작다는 사실을 알 수 있다. 그리고, 최대내하력의 85% 만큼 하중이 떨어지는 지점을 파괴연성도( $\mu_f$ )로 볼 때, 이축재하에 의해 파괴연성도가 감소하고 있음을 알 수가 있다. 이러한 경향은 이축방향 차등교변하중재하일 경우에 더 뚜렷히 나타나고 있다. 그림 7은 시험체 U2, B1, B2의 교축직각방향에 대한 하중-변위 포락곡선을 나타내는데 역시 교축방향과 마찬가지로 이축재하에 의한 최대내하력 감소와 파괴연성도의 감소를 확인할 수 있다. 이는 기존 연구결과와 비슷한 양상을 나타내고 있다<sup>(4)(5)(6)</sup>

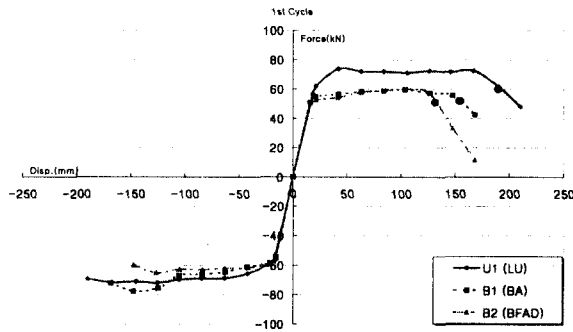


그림 6 하중-변위 포락곡선 (교축방향)

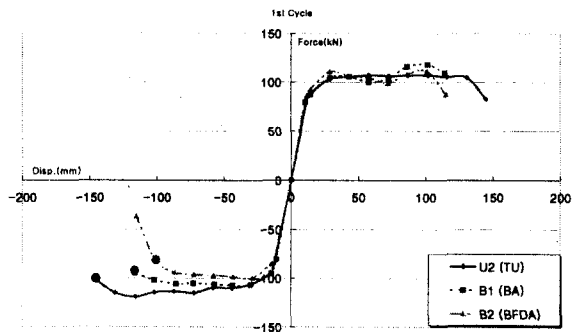


그림 7 하중-변위 포락곡선 (교축직각방향)

표 3 실험결과의 비교

Specimen		$P_{max}$ (kN)	Normalized $P_{max}$ (%)	$\Delta_y$ (mm)	$\mu_{max}$	$\mu_f$
Longitudinal Direction	U1	72.3	100	21	6	9
	B1	66.8	92.4	21	7	7.5
	B2	61.5	85.1	21	5	6.5
Transverse Direction	U2	112.3	100	14.4	8	10
	B1	111.0	98.8	14.4	6	8
	B2	101.2	90.1	14.4	6	7

#### 4. 결론

이 연구에서는 4개의 동일한 구형중실교각에 대해서 교축방향 반복하중, 교축직각방향 반복하중, 이축방향 균등교번반복하중, 그리고 이축방향 차등교번반복하중을 재하해서 그 거동특성을 살펴보았다. 시험체에 내진설계가 적용되었고 또 축력이 없는 상태에서 실험이 행해졌기 때문에 4기의 교각 모두 큰 연성도에서 파괴되었다. 일축방향으로 재하했을 때에 비해서 이축방향 교번하중을 재하했을 때에 교각의 최대내하력이 저하되었고 또한 더 작은 파괴연성도값을 가졌다. 특히 방향에 따른 진동특성이 반영된 이축방향 차등교번반복하중을 재하시에는 그 저하정도가 더 컸다. 이축방향 재하의 경우 하중단계가 올라감에 따라서 더 많은 하중의 반복으로 인하여 철근의 Low Cycle Fatigue로 인한 파괴가 일어나고 결과적으로 더 낮은 연성도에서 파괴가 일어나고, 그 내하력도 감소하게 된다.

이 연구는 이축방향으로 하중을 받는 교각의 거동특성을 살펴봄으로써 이축방향 하중을 고려하고 또 교량 시스템 내의 방향별 진동특성을 고려하여 교각의 내진성능을 평가를 할 때 합리적으로 사용할 수 있는 방법을 제시하는데 도움을 줄 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금과 2001년도 두뇌한국21사업의 지원금에 의한 것입니다. 또한 연구비의 일부분은 대림산업 주식회사로부터 지원을 받았습니다. 이에 감사드립니다. 실험을 위해서 많은 지원을 해주신 현대건설기술연구소 관계자 여러분께도 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. AASHTO, *Standard Specifications for Highway Bridges*, 16th Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 1996.
2. 건설교통부, 도로교 표준시방서, 서울, 1996
3. Stone, W.C., and Cheok, G.S., *Inelastic Behavior of Full-Scale Bridge Columns Subjected to Cyclic Loading*, NIST-BSS-166, U.S. Department of Commerce, Washington, Jan. 1989, 261 pp.
4. Low, S.S. and Moehle, J.P., *Experimental Study of Reinforced Concrete Columns Subjected to Multi-Axial Cyclic Loading*, Earthquake Engineering Research Center, UCB/EERC-87/14, California, Berkeley, Sep. 1987.
5. Wong, Y., Paulay, T. and Priestley, M.J.N., "Response of Circular Reinforced Concrete Columns to Multi-Directional Seismic Attack", *ACI Structural Journal*, Vol. 90 No. 2, Mar-Apr, 1993, pp. 180-191.
6. Bousias, S.N., Verzeletti, G. and Fardis, M.N., "Load-Path Effects in Column Biaxial Bending with Axial Force", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.121, No.5, May, 1995, pp. 596-605.