

[2050] 任意方向の曲げ・せん断を受ける二方向 X 形配筋柱の弾塑性挙動

正会員 ○倉本 洋（鴻池組 技術研究所）

宮井清忠（鴻池組 技術研究所）

正会員 南 宏一（大阪工業大学工学部）

正会員 若林 實（日本建築総合試験所）

1. まえがき

地震時に構造物が受ける水平力は、大きさが変化すると同時に、方向も刻一刻変化する。すなわち、柱は、あらゆる方向の外力に対して耐震的であることが必要である。筆者らは、既に、鉄筋コンクリート構造物において2方向の外乱に対して柱の耐震性能を向上させる構法として、二方向X形配筋法を考案した。さらに、二方向X形配筋柱の主軸方向曲げ・せん断に対する有効性を実験的および理論的に確認した[1][2]。本論では、主軸と異なる方向に曲げせん断力を受ける二方向X形配筋柱および平行配筋柱の弾塑性挙動を調べ、比較検討を行う。

2. 実験の概要

2.1 実験計画

表1に実験計画を示す。実験に用いた試験体は、平行配筋柱6体および二方向X形配筋柱6体の計12体である。実験変数は、主筋の配筋法のほかに、作用軸力および載荷方法を選択した。作用軸力は、10.6tfおよび31.8tf($N/bDFc=0.1$ および0.3)の2種類の圧縮力とした。二軸曲げせん断実験の載荷方法としては、2種類に大別できる。すなわち、1)2主軸と異なる方向に一方加力する方法[3]と、2)2主軸方向に異なるせん断力を同時に作用させる二方向加力法[4][5]である。本実験では、前者を選択し、載荷方向を $\theta=0^\circ$ 、 22.5° および 45° の3種類とした。載荷装置は、文献[1]で使用したものと同一とし、変位制御による正負漸増繰り返しせん断力載荷を行った。

2.2 試験体

図1に試験体の形状寸法を示す。柱長さは、 $l=60\text{cm}$ であり、柱断面は、 $b \times h=20\text{cm} \times 20\text{cm}$ である。主筋は、3種類の載荷方向に対して、それぞれ平行配筋柱と二方向X形配筋柱の曲げ耐力がほぼ等しくなるように、平行配筋柱では、12-D10(SD35)、4-D6(SD30)および二方向X形配筋柱では、4-D10(SD35)、4-D6(SD30)、4X-D13(SD35: X形主筋)を配筋した。なお、曲げ耐力の計算は、D10、D13およびD6の降伏応力度をそれぞれ $\sigma_y=3500$ 、3500および 3000kgf/cm^2 とし、コ

表1 実験計画

作用軸力 $N(\text{tf})$	$n(N/bDFc)$	載荷方向 θ	試験体		
			平行配筋柱	二方向X形配筋柱	
10.6	0.1	0°	P01	X01	
		22.5°	P21	X21	
		45°	P41	X41	
	0.3	0°	P03	X03	
		22.5°	P23	X23	
		45°	P43	X43	
平行主筋			12-D10 4-D6	4-D10 4-D6	
二方向X形主筋				4X-D13	
全主筋量 : $\Sigma a (\text{cm}^2)$			9.84	9.21	
せん断補強筋 : PCより線用素線 $3.56\phi @25$ ($Pw=0.4\%$)					
コンクリート強度 : 265 kgf/cm^2					

表2 曲げ強度計算値 :Qf(=2M/l)

試験体	曲げ強度(tf)	試験体	曲げ強度(tf)
P01	12.91	X01	11.43
P21	12.88	X21	11.57
P41	12.99	X41	10.90
P03	15.91	X03	15.06
P23	15.71	X23	14.56
P43	15.06	X43	13.44

ンクリート圧縮強度を $F_c = 270 \text{kgf/cm}^2$ として行ったが、実際の強度は、 $\sigma_y = 4066, 3327$ および 3141kgf/cm^2 、および $F_c = 265 \text{kgf/cm}^2$ であった。表2に実強度で計算した曲げ耐力を示す。帯筋にはP Cより線用素線 3.56ϕ ($\sigma_{wy} = 20500 \text{kgf/cm}^2$) を用いスパイラル配筋とし、帯筋比を $P_w = 0.4\%$ とした。

3. 実験結果

3.1 履歴曲線

図2に各試験体の履歴曲線を示す。縦軸は作用せん断力 Q を、横軸は部材角 R をそれぞれ示す。点線は転倒モーメントの影響を、一点鎖線は累加

強度理論[1]より求めた主軸方向に載荷した場合のせん断強度の理論値 Q_u をそれぞれ表わす。図中の▼印はひび割れ発生時を表わし、その番号は、1：曲げひび割れ、2：斜張力ひび割れ、3：平行主筋に沿うせん断付着割裂ひび割れ、4：柱材端の圧縮ひび割れ、5：X形主筋に沿うひび割れをそれぞれ示す。また、表3に各試験体の最大強度および主軸理論強度 Q_u を示す。

平行配筋柱では、各試験体ともにエネルギー消費能力の小さな逆S字形の履歴曲線を示す。また、同一作用軸力下では、載荷方向にかかわらず類似した履歴性状を示すが、最大強度以後の強度劣化は、載荷方向が $\theta = 45^\circ$ に近づくほど、若干大きくなる傾向にある。

二方向X形配筋柱では、各試験体ともにエネルギー消費能力が大きく、最大強度以後の強度劣化の小さい安定した履歴曲線を示す。さらに、平行配筋柱と同様に、同一作用軸力下における載荷方向の相違による履歴曲線の差異はほとんど認められない。しかしながら、 $n=0.3$ の試験体では、載荷方向が $\theta = 45^\circ$ に近づくほど、 $R=4.0\% \text{rad}$ 以後の変位振幅で、強度劣化が若干大きくなる

表3 最大強度

試験体	最大強度 (tf)			理論強度 $Q_u(\text{tf})$	試験体	最大強度 (tf)			理論強度 $Q_u(\text{tf})$
	正荷重	負荷重				正荷重	負荷重		
P01	12.88	12.48	10.49		X01	12.83	12.95	10.16	
P21	13.30	13.20			X21	12.63	12.50		
P41	13.13	12.08			X41	13.05	13.20		
P03	15.88	14.95	13.98		X03	15.80	16.15	13.97	
P23	15.08	14.80			X23	15.55	15.90		
P43	15.00	14.35			X43	15.33	14.85		

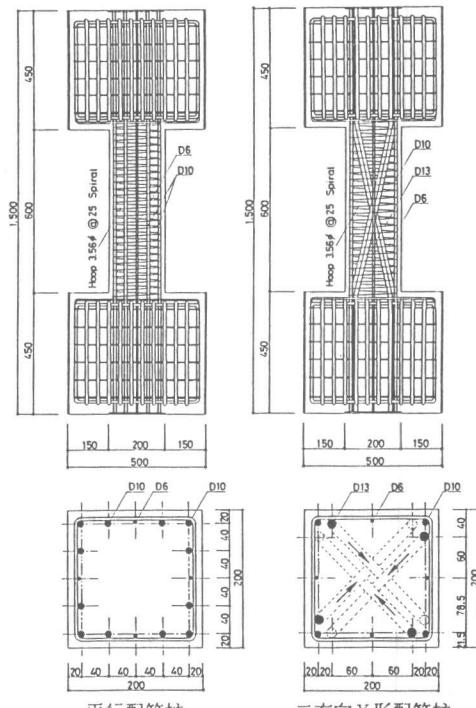


図1 試験体の形状

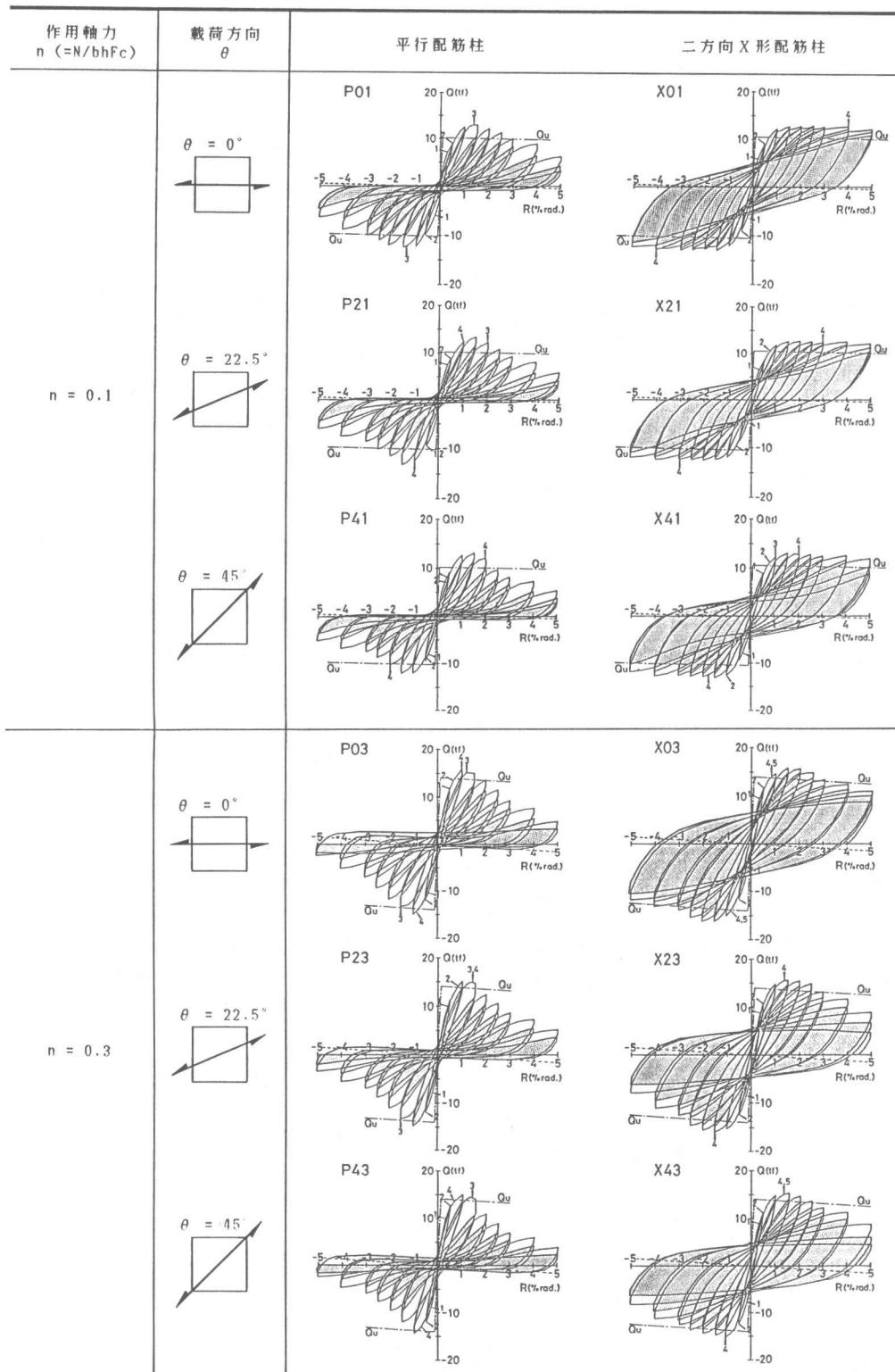


図2 履歴曲線

傾向にある。また、終局せん断強度は、平行配筋柱に比して全主筋量および曲げ耐力計算値が少ないにもかかわらず、 $n=0.1$ の試験体では平行配筋柱の強度とほぼ等しく、 $n=0.3$ の試験体では若干上回っている。

任意方向に一方向載荷された平行配筋柱および二方向X形配筋柱の終局せん断耐力は、主軸方向に一方向載荷された柱の終局せん断耐力とほぼ等しい。また、本実験では、試験体に高強度でかつ比較的多量の帶筋を施しているため、平行配筋柱では、曲げ降伏後のせん断破壊、および二方向X形配筋柱では曲げ降伏破壊の様相を呈し、終局せん断耐力も、曲げ耐力から求まるせん断耐力に近い値を示しているが、累加強度理論による主軸せん断強度によって安全側に評価することもできる。

3.2ひび割れ破壊状況

図3に試験体P03、P43、X03およびX43の最大強度時のひび割れ状況を一例として示す。なお、図中の番号は、図2のひび割れ番号と対応している。

平行配筋柱では、作用軸力の大きさおよび載荷方向にかかわらず斜張力ひび割れが柱材端の隅角部に生じた後、柱材の最大強度時付近で最外縁の主筋に沿う付着割裂ひび割れが発生した。

二方向X形配筋柱では、斜張力ひび割れを生じた後、X03の試験体ではX形主筋に沿うひび割れを生じたが、他の試験体ではX形主筋に沿うひび割れは顕著に認められなかった。この理由は、(1) $n=0.1$ の試験体では曲げ破壊が先行したこと、(2)載荷方向が $\theta=22.5^\circ$ および 45° の試験体では、X形主筋に沿うひび割れが生じる柱中央部で柱幅が大きくなっていることなどがあげられる。平行配筋柱および二方向X形配筋柱ともに載荷方向が $\theta=45^\circ$ に近くなるほど柱材端部の圧壊が小さな変形量で顕著に生じており、このことが、3.1節で述べたように $\theta=45^\circ$ に近づくほど最大強度時以後の強度劣化が大きくなつた原因の1つと考えられる。

ひび割れ状況のもう一つの特徴は、斜張力ひび割れ角度である。すなわち、P03では、斜張力ひび割れは載荷側面の柱材端にはほぼ 45° の角度で上下対称に生じている。それに対して、P43では、柱面全体

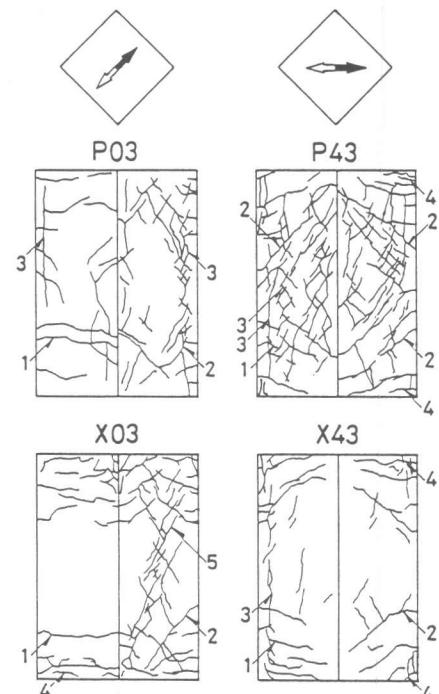


図3 ひび割れ状況

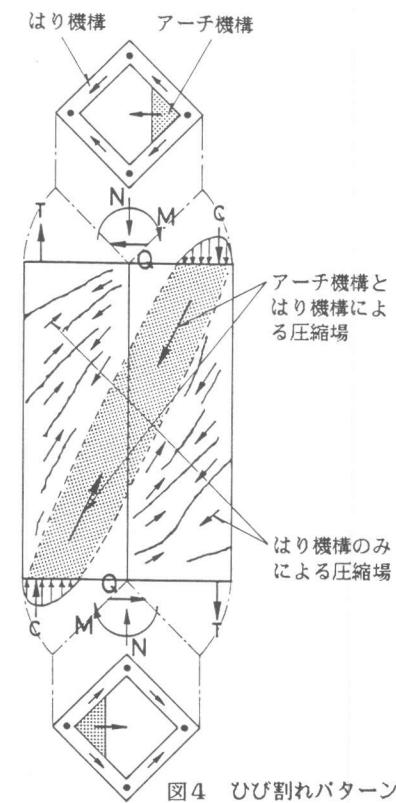


図4 ひび割れバターンと柱側面の力の流れ

に斜張力ひび割れが生じ、一面についてひび割れ角度を見ると、引張端では柱材軸に対して 50° 程度であり、圧縮端に近づくほど角度が小さくなっている。このような現象を説明するために図4に示すようなモデルを考える。同図は、主軸に対して 45° 方向に載荷された柱のひび割れ状態および柱側面での力の流れを模式化したものである。柱のせん断抵抗機構をa)主筋とせん断補強筋およびコンクリート圧縮束材で構成され、せん断補強筋に沿ってせん断力を伝えるはり機構、b)無筋コンクリートで構成され材端の圧縮域から他端の圧縮域に直接せん断力を伝えるアーチ機構とに分けられるものと仮定する。すなわち、柱材の圧縮端では、はり機構とアーチ機構の圧縮束材に生じる圧縮力の合力により圧縮場が形成されるが、引張端では、はり機構のみによる圧縮場が形成されているものと考えられる。

4. 二方向X形主筋の負担せん断力

主軸方向載荷された場合の二方向X形主筋の負担せん断力は、以下に示す式により評価できることが、既往の研究により明らかにされた[1][2]。

$$\text{d}n \leq 0 \text{ のとき} \quad \text{d}q = \tan \psi (\text{d}n + 2\text{d}\Phi \cos \psi) / \sqrt{2} \quad (1)$$

$$\text{d}n > 0 \text{ のとき} \quad \text{d}q = \tan \psi (\text{d}n - 2\text{d}\Phi \cos \psi) / \sqrt{2} \quad (2)$$

ここで、 $\text{d}q$ および $\text{d}n$ は二方向X形主筋の無次元化負担せん断力 $\text{d}Q/(bDF_c)$ および無次元化負担軸力 $\text{d}N/(bDF_c)$ である。さらに $\text{d}n$ は、無次元化作用軸力 $n (=N/(bDF_c))$ により次式で与えられる。

$$n \leq n_a \text{ のとき} \quad \text{d}n = -2\text{d}\Phi \cos \psi \quad (3)$$

$$n_a < n \leq n_b \text{ のとき} \quad \text{d}n = n - n_a - 2\text{d}\Phi \cos \psi \quad (4)$$

$$n_b < n \leq n_c \text{ のとき} \quad \text{d}n = 0 \quad (5)$$

$$n_c < n \leq n_d \text{ のとき} \quad \text{d}n = n - n_d + 2\text{d}\Phi \cos \psi \quad (6)$$

$$n > n_d \text{ のとき} \quad \text{d}n = 2\text{d}\Phi \cos \psi \quad (7)$$

$$\text{ここで、 } n_a = 1/2 - \gamma \sqrt{\tan^2 \psi / (2 + \tan^2 \psi)} - 2\rho \Phi - 2\text{d}\Phi \cos \psi$$

$$n_b = n_a + 2\text{d}\Phi \cos \psi$$

$$n_c = n_d - 2\text{d}\Phi \cos \psi$$

$$n_d = 1/2 + \gamma \sqrt{\tan^2 \psi / (2 + \tan^2 \psi)} + 2\rho \Phi + 2\text{d}\Phi \cos \psi$$

$$\gamma = \sqrt{1 + \eta^2} / 2 \quad \eta = 1 / D : \text{柱長さ比} \quad \psi : X \text{形主筋の折り曲げ角度}$$

$$\rho \Phi = p_{at} * p \sigma_y / (bDF_c) : \text{平行主筋の引張鉄筋係数}$$

$$\text{d}\Phi = d_{at} * d \sigma_y / (bDF_c) : X \text{形主筋の引張鉄筋係数}$$

任意方向載荷された場合の二方向X形主筋の負担せん断力は、主軸に対する載荷方向のなす角度 θ を用いて(1)、(2)式を修正することにより次式で与えられる。

$$\text{d}n \leq 0 \text{ のとき} \quad \text{d}q = \tan \psi (\text{d}n + 2\text{d}\Phi \cos \psi) \alpha \quad (8)$$

$$\text{d}n > 0 \text{ のとき} \quad \text{d}q = \tan \psi (\text{d}n - 2\text{d}\Phi \cos \psi) \alpha \quad (9)$$

$$\text{ここで、 } \alpha = \{ | \cos(45^\circ - \theta) | + | \sin(45^\circ - \theta) | \} / 2 \text{ であり、 } \text{d}n \text{ は(3)～(7)式で与えられる。}$$

図5に試験体X03、X23、およびX43の二方向X形主筋のひずみから求めた負担せん断力の履歴曲線を示す。縦軸は負担せん断力 $\text{d}Q$ を、横軸は相対部材角 R をそれぞれ表わし、一点鎖線は(8)、(9)式から求めた理論強度を示す。また、点線は部材の最大強度時の部材角 R_{max} を示す。

二方向X形主筋の降伏負担せん断力 $\text{d}Q_u$ は、X01、およびX03で3.56tf、X21およびX23で3.29tf、X41およびX43で2.52tfであり、載荷方向が $\theta = 45^\circ$ に近づくほど、 $\text{d}Q_u$ は小さくなるが、その差は、部材のせん断強度に比してわずかである。

X03およびX43では部材の最大強度時にX形主筋は降伏負担強度に達しており、X形主筋が部

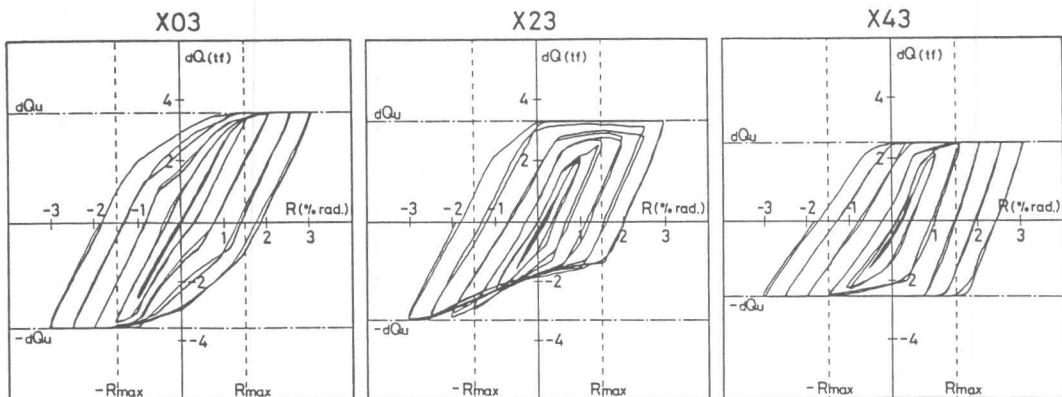


図5 二方向X形主筋の負担せん断力

材のせん断強度に対して有効に作用している。X23では、最大強度時に降伏負担強度の90%程度の負担せん断力となっている。また、X23およびX43では履歴曲線が非対称となっているが、これについては、部材に $n=0.3$ の軸力が作用しているため、圧縮主筋が引張主筋よりも小さな変形量で降伏したためであると考えられる。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 任意方向に一方向載荷された平行配筋柱および二方向X形配筋柱のせん断耐力は、断面の主軸方向に一方向載荷された柱のせん断耐力とほぼ等しく、累加強度理論による主軸せん断強度によって評価することが可能である。
- 2) 対称断面を有する平行配筋柱および二方向X形配筋柱の載荷方向の相違による復元力特性の差異はほとんど認められない。
- 3) 任意方向のせん断力に対する二方向X形主筋の負担せん断力は(8)、(9)式で評価できる。
- 4) 二方向X形配筋柱は、任意方向の曲げせん断力を受ける場合でも、X形主筋がせん断力に対して有効に作用し、平行配筋柱に比して極めて耐震的な性状を示す。

6. 参考文献

- [1] 倉本洋、宮井清忠、南宏一、若林實：二方向X形配筋柱の耐震性能、構造工学論文集、Vol. 1.32B、pp.171-182、1986.
- [2] 南宏一、倉本洋：X形配筋柱の耐震性能に関する二、三の問題、大阪工業大学紀要、Vol. 31、No.1、pp.27-57、1986.
- [3] 城攻、柴田拓二、他3名：任意方向の曲げせん断を受ける鉄筋コンクリート短柱の破壊性状について(1～3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1265-1270、1982.
- [4] 滝口克己、黒正清治、小林克己、他2名：水平2方向変位に対するRC柱の復元力に関する研究(その1)、日本建築学会論文報告集、第286号、pp.29-35、1979.
- [5] 梅原秀哲、丸山久一、J.O.Jirsa：水平2方向繰り返し荷重を受ける鉄筋コンクリート短柱のせん断耐力に関する実験的研究、コンクリート工学、Vol.21、No.3、pp.103-109、1983

7. 謝辞

実験の遂行に御協力を頂いた鴻池組技術研究所研究員、井川望氏および元大阪工業大学卒論生、尾崎充臣君に深謝いたします。