

論文

[2086] 600キロ級の高強度コンクリートを用いたRC柱の2軸曲げせん断耐力

桑田裕次\*1・中山昭夫\*2・南 宏一\*2

1. はじめに

本研究は、建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量化・超高層化技術の開発」[1]の一環ととして行われたものである。本論文では、強度が600kgf/cm<sup>2</sup>級の高強度コンクリートを用いたRC柱の2軸曲げせん断に対する破壊性状および終局せん断耐力を検討するため、6体の試験体を用いた実験研究を行った。

2. 実験

2.1 実験計画

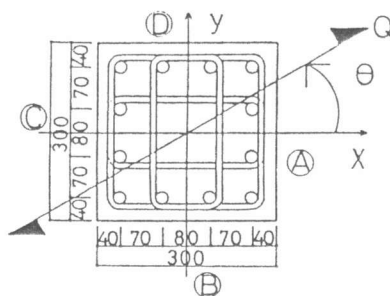
本実験では、文献[2]に示される600キロ級のコンクリートを用いたRC柱の一方せん断実験と比較できるように実験計画はたてられ、試験体の柱部分の形状および断面構成は文献[2]と同じである。ただし、せん断補強筋量  $P_w \cdot \sigma_{wy}$  は、文献[2]において実験変数としているなかから中間的な値を選択し、公称値として  $P_w \cdot \sigma_{wy} = 41.7 \text{ kgf/cm}^2$  とした。本研究の実験変数は作用軸力比  $n (N/bD\sigma_B)$  と載荷角度  $\theta$  であり、表-1のように実験を計画した。軸力比は  $n=1/6$  と  $1/3$  の2種類、載荷角度  $\theta$  は  $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$  の3種類である。

2.2 試験体形状・材料強度

図-1に試験体の断面構成を、図-2に試験体の形状をそれぞれ示す。試験体の断面構成は、 $b \times D = 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$  で柱長さは  $L = 90 \text{ cm}$  である。柱主筋には12-D19(SD685相当品)を用い、帯筋にはD10(SD345)を用いた。帯筋はフラッシュバット溶接による閉鎖形の中子筋方式としX, Yの全ての主筋に対して帯筋を配置した。帯筋の間隔は全て8cm( $P_w = 1.19\%$ )である。コンクリートは文献[2]と同様に4週強度が  $\sigma_B = 600 \text{ kgf/cm}^2$  となるように調合し、表-2に調合表を示す。粗骨材は広島県福山市郷分町産の砕石を使用し、比重2.70、FM6.00である。細骨材は広島県豊田郡瀬戸田町高根島産の海砂を使用し、

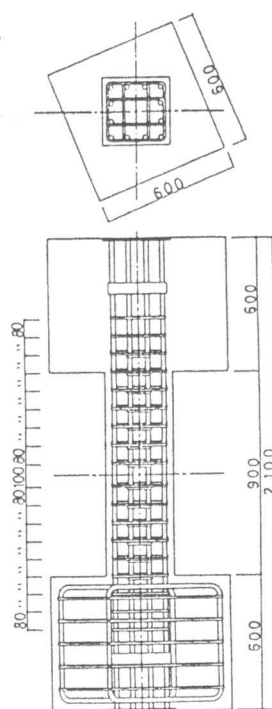
表-1 実験計画

試験体名	載荷角度 $\theta^\circ$	軸力比 $n = (N/bD\sigma_B)$
CC06-6-1	0	1/6
CC06-6-2	22.5	
CC06-6-3	45	
CC06-3-1	0	1/3
CC06-3-2	22.5	
CC06-3-3	45	



Long. Reinf. ; 12-D19(SD685)  
 Web Reinf. ; 4-D10, @80(SD295)  
 $P_w = 1.19\%$   
 (単位 : mm)

図-1 断面構成



(単位 : mm)

図-2 形状・寸法

\*1 福山大学助手 工学部建築学科 (正会員)

\*2 福山大学教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

比重2.53、FM2.75である。なお、高性能AE減水剤を用いてコンクリートの適正な流動化を図った。各々の材令における、コンクリートの圧縮強度を表-3(a)に示す。実験材令は70日から126日のため、70日と126日の平均値の683 kgf/cm<sup>2</sup> を実験時のコンクリート強度とした。コンクリート割裂強度は材令35日と53日および126日の平均値53kgf/cm<sup>2</sup>を用いた。主筋D19[SD685相当品]および帯筋D10[SD345]の引張降伏応力および引張強度を表-3(b)に示す。

### 2.3 実験

実験は文献[2]と同様に、建研式逆対称曲げせん断実験装置を用いて行った。せん断力の載荷方向は柱断面の載荷角度に一致させ、柱材のねじり変形を拘束して繰り返し載荷を行った。試験体の変形の測定方法および載荷プログラムは文献[2]と同様である。

## 3. 実験結果

### 3.1 破壊状況

実験終了時の各試験体の破壊状況を写真-1に示す。表-4に初期ひび割れ荷重、変位部材角  $R = \pm 0.01 \text{ rad}$ . における耐力および最大耐力を示す。なお、初期曲げひび割れ・初期斜張力ひび割れおよび最大耐力については、その変位部材角もあわせて示している。試験体の水平変位に応じて柱軸力による付加転倒モーメントが作用し、さらに軸力用油圧ジャッキが鉛直線に対して傾くことによる付加的な水平力が作用するが、これら  $P-\delta$  効果を考慮した各耐力をそれぞれ  $\bar{Q}_F$ 、 $\bar{Q}_D$ 、 $\bar{Q}_{R1}$ 、 $\bar{Q}_{max}$  で表している。

各試験体とも曲げひび割れが生じた後、斜張力ひび割れが生じた。軸力比の大きさは、ひび割れ状況には、ほとんど影響しなかったが、それに対して、載荷角度は強い影響を与えた。

$\theta = 0^\circ$  の試験体では対角線状のせん断ひび割れが卓越する典型的なせん断破壊を生じ、せん断付着割裂破壊の様相は認められなかった。 $\theta = 22.5^\circ$  の場合には主たる加力面にあるBとD面に対角線状のせん断ひび割れが卓越し、AとC面には若干のせん断ひび割れは認められるものの、せん断破壊の様相は認められない。 $\theta = 45^\circ$  の場合にはA・B・CおよびDの各面でそれぞれ対角線状のせん断ひび割れが卓越し、AとB面あるいはCとD面を対角線状に横切るひび割れはほとんど観察されなかった。

表-2 コンクリートの調合表

G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	スラブ (cm)	空気量 (%)	S/A (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	AD
10	35	23.0	2.0	41.0	194	554	633	972	11.08

G<sub>max</sub> ; 粗骨材の最大寸法      W ; 水      G ; 粗骨材  
W/C ; 水セメント比      C ; セメント      AD ; 混和剤  
S/A ; 細骨材率      S ; 細骨材

表-3 使用材料の機械的性質 (単位: kgf/cm<sup>2</sup>)

(a) コンクリート			(b) 鉄筋		
材令	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>		$\sigma_y$	$\sigma_u$
7日	487		主筋 D19	7596	9443
14日	570		帯筋 D10	3761	5254
21日	598				
28日	614				
35日	630	49			
45日	633				
70日	678	53			
126日	688	57			

F<sub>c</sub> ; 圧縮強度       $\sigma_y$  ; 降伏点  
F<sub>t</sub> ; 割裂強度       $\sigma_u$  ; 最大耐力

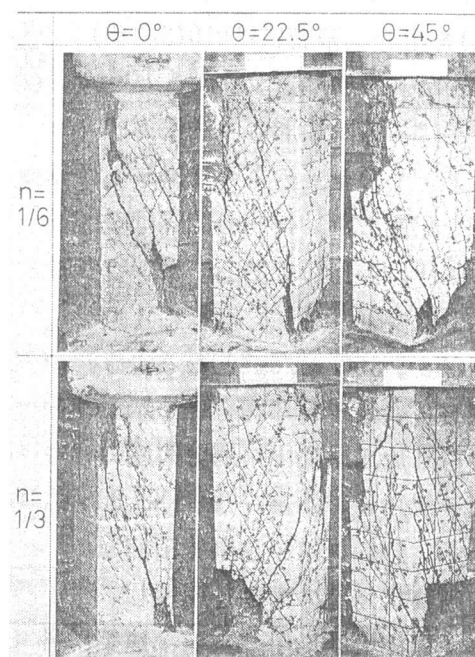


写真-1 破壊状況

表-4 実験結果 (単位: N; tf, Q; tf, R;  $\times 10^{-2}$ rad.)

試験体名	作用軸力 tf	曲げひび割れ		斜張力ひび割れ		R = $\pm 0.010$ rad.		最大耐力		補正したせん断力 (1)					
		正	負	正	負	正	負	正	正	負	正	負	正		
		$Q_F$ ( $R_F$ )	$-Q_F$ ( $R_F$ )	$Q_D$ ( $R_D$ )	$-Q_D$ ( $R_D$ )	$Q_{R1}$	$-Q_{R1}$	$Q_{max}$ ( $R_{max}$ )	$\bar{Q}_F$ ( $R_F$ )	$-\bar{Q}_F$ ( $R_F$ )	$\bar{Q}_D$ ( $R_D$ )	$-\bar{Q}_D$ ( $R_D$ )	$\bar{Q}_{R1}$	$-\bar{Q}_{R1}$	$\bar{Q}_{max}$ ( $R_{max}$ )
CC06-6-1	96	27.45 (0.27)	-17.50 (-0.10)	40.00 (0.58)	-39.75 (-0.51)	51.25	-54.35	64.35 (2.00)	27.82 (0.27)	-17.64 (-0.10)	40.79 (0.58)	-40.44 (-0.51)	52.60	-55.70	67.06 (2.00)
CC06-6-2	100	19.80 (0.19)	-19.95 (-0.09)	30.00 (0.32)	-35.15 (-0.31)	50.95	-57.05	61.70 (2.30)	20.07 (0.19)	-20.08 (-0.09)	30.45 (0.32)	-35.59 (-0.31)	52.36	-58.46	64.94 (2.30)
CC06-6-3	103	25.05 (0.28)	-22.55 (-0.09)	42.50 (0.57)	-40.00 (-0.40)	55.15	-55.00	69.05 (2.33)	25.46 (0.28)	-22.68 (-0.09)	43.33 (0.57)	-40.58 (-0.40)	56.60	-56.45	72.39 (2.33)
CC06-3-1	198	37.35 (0.34)	-37.55 (-0.24)	40.00 (0.38)	-55.05 (-0.66)	51.90	-59.80	59.50 (1.28)	38.30 (0.34)	-38.22 (-0.24)	41.06 (0.38)	-56.89 (-0.66)	54.69	-62.59	62.59 (1.28)
CC06-3-2	189	34.95 (0.32)	-44.95 (-0.35)	45.00 (0.48)	-49.95 (-0.45)	57.55	-60.75	67.35 (2.00)	35.71 (0.32)	-45.78 (-0.35)	46.14 (0.48)	-51.02 (-0.45)	59.93	-63.13	72.12 (2.00)
CC06-3-3	171	25.00 (0.21)	-22.55 (-0.04)	44.95 (0.48)	-47.50 (-0.36)	62.75	-57.50	62.80 (1.73)	25.51 (0.21)	-22.65 (-0.04)	46.11 (0.48)	-48.37 (-0.36)	65.16	-59.91	66.97 (1.73)

註(1); 転倒モーメントの影響を考慮したせん断力であり、 $Q = Q + N \cdot R \{1 + (h/L)\}$  より求める。  
(ただし、R; 部材角, h; 柱長さ, L; 軸力用ジャッキの支承間距離)

### 3.2 主筋および帯筋の応力度推移状況

図-3にCC06-3-2試験体の主筋および帯筋の応力度推移状況を一例として示す。図中の○印、●印および□印は、斜張力ひび割れ発生時、変位部材角 $R=1.00\%$ rad.時および最大耐力時の応力度を示し、点線は主筋あるいは帯筋の降伏応力度を示す。主筋および帯筋の応力度の状況は、載荷角度の影響を強く受けるが、軸力比に対しては、ほとんど影響しないことが示される。最大耐力時の主筋と帯筋の応力度の分布状況は載荷角度に対して次のような特色を示す。

1)  $\theta = 0^\circ$ の場合の帯筋について、外周筋(A筋)と加力方向の中子筋(B筋)および加力方向と直交する中子筋(C筋)の加力方向の応力度は、いずれもほぼ降伏する。加力方向と直交する方向の応力度は、降伏していない。

2)  $\theta = 22.5^\circ$ と $\theta = 45^\circ$ の場合、A筋・B筋およびC筋の全てに対して、直交する全ての方向の帯筋が降伏している。

3)  $\theta = 0^\circ$ の場合、一段筋の隅角部の主筋は降伏しない。

4)  $\theta = 22.5^\circ$ および $\theta = 45^\circ$ の場合、隅角部の引張および圧縮側の主筋はいずれも降伏する。

このように、一軸せん断に対してせん断破壊する柱材は、2軸せん断の状態になると、直交するいずれの方向の帯筋も一様な引張応力度を生じ、かつ、最大耐力時には降伏する。また、主筋についても、2軸せん断の状態になると隅角部の主筋は降伏する状態となり、耐力性状としては曲げ破壊的になることが示される。

### 3.3 履歴曲線および包絡線

図-4(a)~(f)に各試験体の履歴曲線を、図-5(a)、(b)に各試験体の正荷重の包絡線をそれぞれ示す。縦軸は作用せん断力  $Q(tf)$  を、横軸は柱部材角  $R(\times 10^{-2}rad.)$  である。図中の▽印は曲げひび割れ発生時を、▼印は斜張力ひび割れ発生時を、▽にMが付記された印は最大耐力時をそれぞれ表す。図中の点線は  $P-\delta$  効果を示す。また $\theta = 0^\circ$ における、初期剛性および文献[3]における終局せん断耐力のA法およびB法による計算値 $AQ_{U0}$ 、 $BQ_{U0}$ をそれぞれ示している。履歴

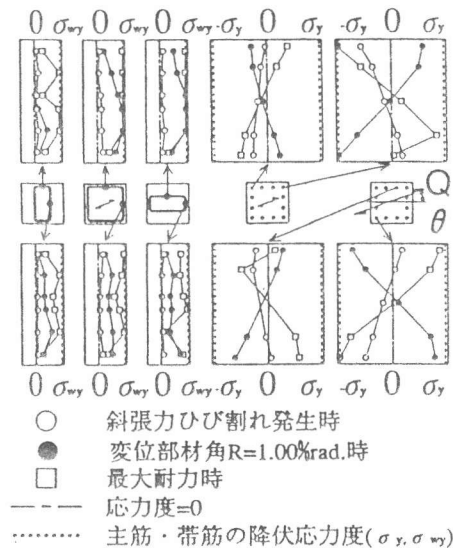


図-3 帯筋・柱筋の応力度分布 (CC06-3-2試験体の場合)

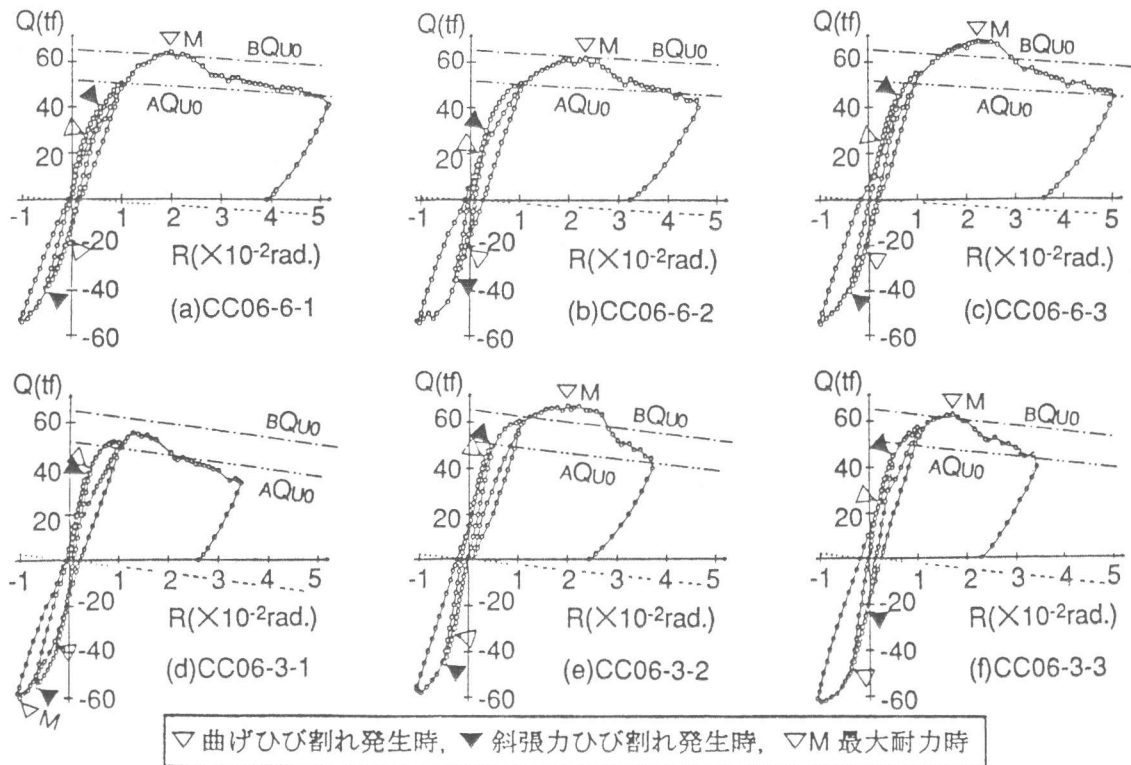


図-4 履歴曲線

曲線および包絡線の比較検討によって次のことが認められた。

- 1) 同一軸力比において、初期剛性や最大耐力に達するときの変形量および最大耐力以降の耐力の劣化状況は、載荷角度に対して大きな影響を受けない。
- 2) 載荷角度の如何にかかわらず、軸力比が大きいほど初期剛性が大きく、最大耐力以降の剛性や耐力の低下率も大きい。
- 3) 最大耐力は、作用軸力の大きさおよび載荷角度に対してあまり影響が見られない。

#### 4. 理論解析の検討

##### 4.1 斜張力ひび割れ耐力の検討

図-6 に斜張力ひび割れ耐力を  $Q_x - Q_y$  平面で検討した結果を示す。縦軸は  $y$  方向のせん断力  $Q_y (tf)$  を、横軸は  $x$  方向のせん断力  $Q_x (tf)$  をそれぞれ表わす。図中の  $\circ$  および  $\bullet$  印は実験値を表す。実験値は  $P - \delta$  効果の影響を考慮した耐力を、載荷角度  $\theta$  に対して放射線状にプロットしている。横軸  $Q_x$  と図中の破線が交わる点は、載荷角度  $\theta = 0^\circ$  の時の斜張力ひび割れ耐力を主応力度理論で求めた理論値  $Q_{D0}$  を表し、 $Q_{D0}$  を式(1)に示す。

$$Q_{D0} = 2 \cdot b \cdot D \{ \sqrt{(\sigma_N \cdot \sigma_t + \sigma_t^2)} \} / 3 \quad \text{----- (1)}$$

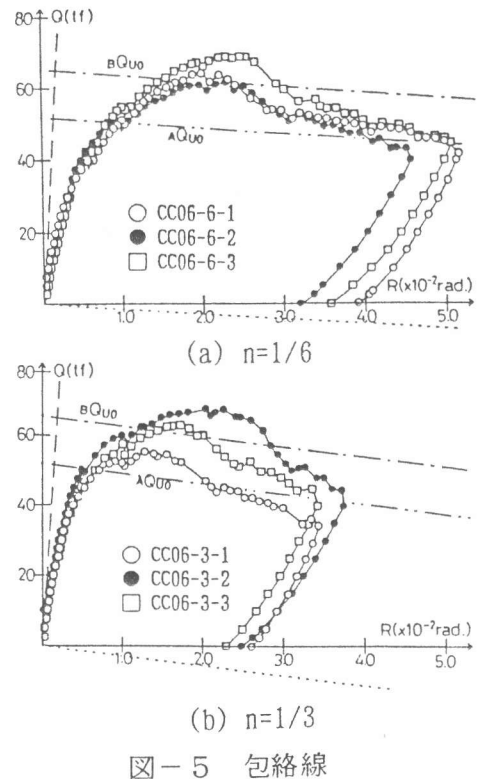


図-5 包絡線

ここに  $\sigma_N = N/b \cdot D$  (圧縮力が正の値)  
 $\sigma_t$ : コンクリート引張強度  
 (割裂強度  $F_t$  とする)

破線は式(2)を用いて  $Q_{D0}$  を  $Q_x - Q_y$  平面での  
 円弧の相関曲線で表している。

$$(Q_x/Q_{D0})^2 + (Q_y/Q_{D0})^2 = 1 \quad \text{----- (2)}$$

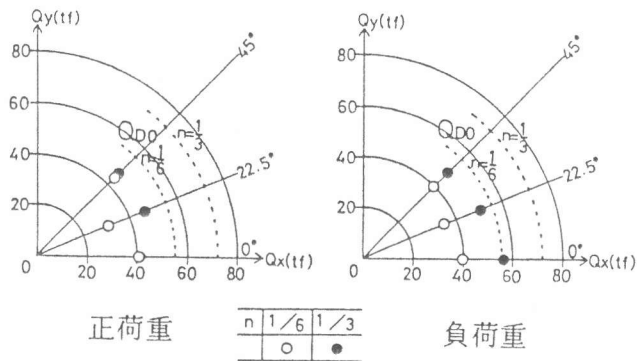


図-6 斜張力ひび割れ耐力の  $Q_x - Q_y$  関係

文献[4]～[5]ではコンクリート強度  $\sigma_B = 210 \sim 300 \text{ kgf/cm}^2$  の場合、文献[7]では  $\sigma_B = 600 \text{ kgf/cm}^2$  級の場合について、それぞれ二軸曲げせん断を受ける鉄筋コンクリート柱のせん断ひび割れ荷重が載荷角度に関係なくほぼ一定の値であることが示されているが、本実験研究の場合も同様な傾向が確認された。すなわち図-6によると斜張力ひび割れ耐力は、載荷角度  $\theta$  に対してほぼ円弧状に分布することが認められる。

また、圧縮力によって斜張力ひび割れ耐力が増加する傾向は、(1)式の主応力度理論から求めた  $Q_{D0}$  と実験値は整合している。しかしながら、 $Q_{D0}$  を(2)式の相関曲線で示した値に対して、実験値は50～70%と小さい。主応力度理論から求めた値に対して実験値が小さい原因は、コンクリート引張強度  $\sigma_t$  の値としてコンクリート割裂強度  $F_t$  を用いたことに一因があると考えられる。

#### 4.2 終局せん断耐力の検討

斜張力ひび割れ耐力の場合と同様、終局せん断耐力を  $Q_x - Q_y$  相関曲線で検討した結果を図-7に示す。○および●印の実験値は、 $P - \delta$  効果の影響を考慮した耐力であり、載荷角度  $\theta$  に対して放射線状にプロットしている。図中に  $\theta = 0^\circ$  のときの理論値として、文献[3]における終局せん断耐力のA法およびB法による値をそれぞれ  $AQ_{U0}$ 、 $BQ_{U0}$  で示している。なお、計算では主筋中心間隔に、塑性重心間距離  $j_t$  を用いた。算定した終局せん断耐力値を用いて、 $Q_x - Q_y$  の円弧状の理論相関曲線を式(3)と式(4)で求め、A法による理論耐力を2点鎖線で、B法による理論耐力を1点鎖線でそれぞれ示す。

$$(Q_x/AQ_{U0})^2 + (Q_y/AQ_{U0})^2 = 1 \quad \text{----- (3)}$$

$$(Q_x/BQ_{U0})^2 + (Q_y/BQ_{U0})^2 = 1 \quad \text{----- (4)}$$

図-7によると、終局せん断耐力は載荷角度  $\theta$  に対してほぼ円弧状に分布することが認められた。文献[4]～[6]では普通強度のコンクリート柱の2軸曲げせん断耐力について、載荷角度に関係なく、せん断耐力がほぼ一定であることが示されている。また文献[7]では高強度コンクリート柱の場合もこのような関係が成立することが示されているが、本実験研究においても同様な傾向が確認された。すなわち、文献[3]のB法を用いて算定した終局せん断耐力を  $Q_x - Q_y$  の平面で円弧状に相関した曲線に対して、実験値はほぼ一致することが示された。

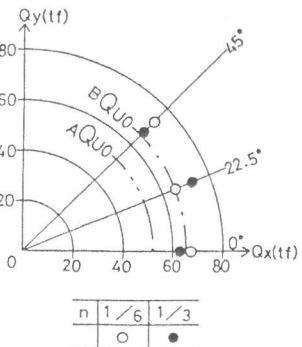


図-7 終局せん断耐力の  $Q_x - Q_y$  関係

## 5. 結論

- 1) 柱材のひび割れおよび破壊状況は、軸力比に対して強い影響はみられないが、載荷角度には強い影響を受ける。
- 2)  $\theta = 22.5^\circ$  の載荷に対して主たる加力面のみでせん断破壊の様相がみられ、 $\theta = 45^\circ$  の場合には各面でそれぞれの対角線状のせん断ひび割れが卓越し、柱材を対角線状に横切るひび割れは生じない。
- 3) 2軸せん断状態に対しては、外周筋および中子筋のいずれの帯筋も一様な引張応力度を生じ、かつ最大耐力時には降伏する。また主筋は、2軸せん断状態において隅角部の主筋は降伏する状態になり、耐力性状としては曲げ破壊的になる。
- 4) 斜張力ひび割れ耐力および終局せん断耐力は、載荷角度に対して影響を受けず、いずれの載荷角度に対してもほぼ一定の耐力を示し、2軸のせん断に対して円弧状の相関関係を示す。
- 5) 軸力比の大きさは、破壊性状および最大耐力には強い影響を与えないが、変形性状には強い影響を与える。

## (参考文献)

- 1) 建設省総合技術開発プロジェクト：鉄筋コンクリート造建築物の超軽量化・超高層化技術の開発、平成4年度構造分科会報告書、(財)国土開発技術研究センター、1993.3
- 2) 桑田裕次・中山昭夫・南宏一：600キロ級の高強度コンクリートを用いたRC柱のせん断耐力、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、pp.473-478、1993.6
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990.11
- 4) 荒川卓・荒井康幸・溝口光男・吉田稔：二軸曲げせん断力を受ける鉄筋コンクリート短柱のせん断抵抗性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11、No.2、pp.471-476、1989.6
- 5) 城 攻・柴田拓二ほか：任意方向の曲げ剪断を受ける鉄筋コンクリート短柱の破壊性状について、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp1265-1268、1982.10
- 6) Shimazu, T. : On the Strength and Deformation Capability of Reinforced Concrete Columns Subjected to Biaxial Bending and Shear, Transactions of the Architectural Institute of Japan, No.332, pp.47-56, Oct.1983
- 7) 溝口光男・荒川卓・荒井康幸：二軸曲げせん断力と変動軸力を受ける高強度RC柱の強度性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.2、pp457-462、1991.6
- 8) 岡田治・桑田裕次・南宏一：二方向曲げせん断応力下での柱のせん断性能に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集C分冊、pp.725-726、1993.9

## (謝辞)

本研究は、建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量化・超高層化技術の開発」(委員長 青山博之東大教授)の一環として行われた。本実験の実施にあたり、せん断補強筋のフラッシュバット溶接加工では(株)諏訪熔工に、コンクリート調合では(株)中国宇部生コンに、ご協力を頂きました。また、本研究は岡田治君(現、(株)鴻池組)の1992年度福山大学工学部建築学科の卒業研究として行われた。ここに記して、各位に心より謝意を表します。