

# 論文 SRC 部材の 2 軸せん断耐力に関する実験的研究

付 長徳<sup>\*1</sup>・若尾 健二<sup>\*2</sup>・福知 保長<sup>\*3</sup>・市之瀬 敏勝<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本論は、鉄骨鉄筋コンクリート (以下 SRC と称す) 柱の実験結果に基づき、SRC 部材の 2 軸せん断耐力の評価法について検討したものである。軸力比  $n$  と鉄骨比  $P$  をパラメーターとし、その組合せにより試験体を計画した。実験結果より、SRC 部材の 2 軸せん断耐力は提案式を使用した累加強度式が実験値の評価に適切であることを確認した。また、SRC 部材の 2 軸せん断耐力相関関係は提案した相関関係式  $(\frac{Q_x}{Q_{ux}})^{\alpha} + (\frac{Q_y}{Q_{uy}})^{\alpha} = 1$  により適切に評価をできる。指数  $\alpha$  の値は軸力比と鉄骨比の変化によって 2.2~5.0 の範囲となった。  
**キーワード:** 2 軸せん断耐力,  $Q_x$ - $Q_y$  相関関係, 入力角度, 軸力比, 鉄骨比

## 1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート (SRC) 構造、特に充腹形の SRC 構造は中高層建物に広く用いられ、SRC 部材に関する研究も盛んである。既往の研究<sup>5), 6), 7), 8), 9), 10)</sup>において 2 方向入力を受ける場合の曲げ破壊性状に関する研究がなされ、その耐力評価法が提案されている。しかし、部材の破壊性状に関して曲げだけでなく、せん断破壊性状に関しても考慮する必要がある。これに対して、2 方向入力を受ける場合のせん断破壊性状に関する研究はわずかしか行われておらず、破壊性状と各パラメーターとの関係を十分に解明し得ていない。

そこで本研究では、せん断スパン比の 2.0 程度のせん断破壊が先行するようなモーメント勾配を有する SRC 試験体を製作する。その試験体における、各パラメーターの中から特にせん断破壊性状に大きな影響を与えると思われる鉄骨比と軸力比に着目して実験を行う。そして、その破壊性状及び変形能力と各パラメーターとの関係について検討するものである。

## 2. 実験

### 2.1 実験計画

任意方向水平力を受ける鉄骨鉄筋コンクリート柱の弾塑性挙動および変形能力を調べるため、柱脚固定、柱頭は水平方向でのみ変形をできる境界条件をもつ SRC 片持ち柱試験体を設計し (図-1 参照)、2 軸せん断実験を計画した。

実験パラメーターの範囲は以下の通りである。

- 1) 鉄骨比  $P$ : 1.36%, 2.69%, 3.01%, 3.53%, 4.47%。

( $P = \text{鉄骨断面積}_s A / \text{柱の断面積} A$ )。

- 2) 軸力比  $n$ : 0.02, 0.18, 0.36。

( $n = N/N_u$ ,  $N_u = \sigma_c \cdot \sigma_B$ ,  $N$ : 載荷軸力,  $N_u$ : 柱の断面軸圧縮耐力計算値,  $\sigma_c$ : コンクリートの圧縮強度)。

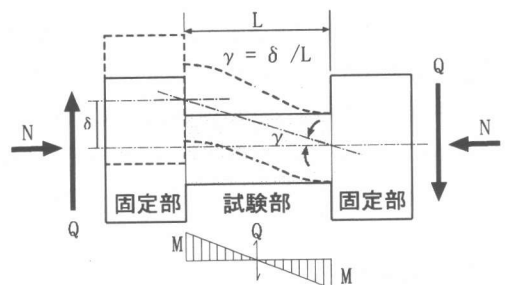


図-1 試験体の受力状態

\*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (正会員)

\*2 飛鳥建設 (株) 建築事業本部 技術営業部 工修 (会員外)

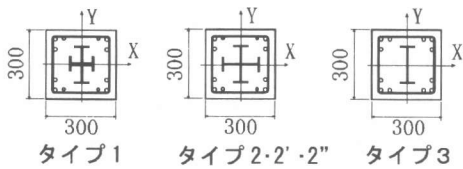
\*3 名古屋工業大学教授 工学研究科社会開発工学科 工博 (正会員)

\*4 名古屋工業大学教授 工学部システムマネジメント工学科 工博 (正会員)

表一 試験体一覧

試験体名	曲げ耐力 (kN)	鉄骨比 sP (%)	軸力比 n	軸力 N (kN)
I-000-1	693	sP=3.01	n=0.02	29.4
I-225-1	663			
I-450-1	643			
I-675-1	650			
I-900-1	673			
II-000-2	930	sP=3.53	n=0.19	392
II-225-2	990			
II-600-2	1033			
II-450-2'	1300			
II-000-2'	947	sP=4.47		
III-000-2''	870	sP=2.69	n=0.19	392
III-450-2''	1010		n=0.36	784
III-000-2'''	977			
III-450-2'''	1007			
IV-000-1	740	sP=3.01	n=0.02	29.4
IV-450-1	680			
IV-000-2''	740	sP=2.69	n=0.02	29.4
IV-450-2''	697			
IV-000-3	667	sP=1.36	n=0.02	29.4
IV-450-3	663			

sP: 内蔵鉄骨比 シリーズ 鉄骨断面タイプ  
 n: 軸力比,  $n=N/N_u$  □-□□□-□ 入力角度



図一 試験部断面

載荷はすべての試験体に対して、単調載荷とした。

## 2.2 試験体

表一に試験体一覧を示す。試験体の断面寸法を図一に示す。試験体の断面寸法は300×300mmで、内蔵鉄骨はSS400の鋼板による組み立てH形・十字形鋼である。試験体は曲げ降伏をしないように主筋はSD345のD22異形棒鋼12本で、全主筋比 $P$ は5.2%である。帯筋はSR295のD6異形鉄筋を用い、間隔 $s$ は100mm、帯筋比 $\rho_w P=0.2\%$ とした。

## 2.3 材料特性

材料特性を調べるため、鋼材の引張試験とコンクリート圧縮試験を行った。コンクリートの養生は試験体上面にビニールシートを被せ常に濡れた状態にした。試験結果は表二に示す。

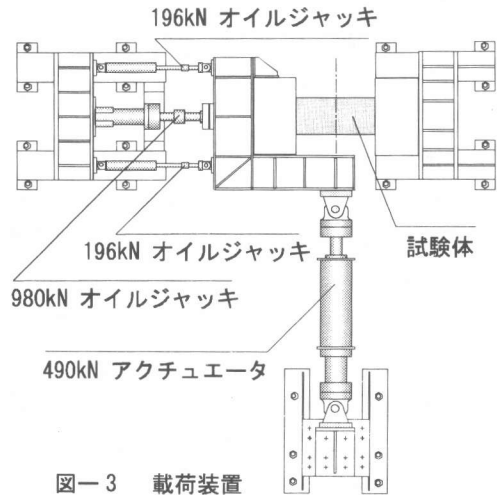
## 2.4 実験方法

表二 素材試験一覧 (単位: N/mm<sup>2</sup>)

材料名	シリーズ							
	I		II		III		IV	
	$\sigma_y$	$\sigma_b$	$\sigma_y$	$\sigma_b$	$\sigma_y$	$\sigma_b$	$\sigma_y$	$\sigma_b$
PL4.5	303	411	—	—	283	435	314	448
PL6.0	348	442	334	492	—	—	—	—
PL9.0	—	—	284	459	266	436	—	—
D6.0	423	514	369	528	418	511	424	530
D22	375	545	424	543	399	572	402	562
C	—	20.0	—	25.0	—	27.0	—	28.0

PL: 鉄骨 D: 鉄筋 C: コンクリート

$\sigma_y$ : 降伏強度  $\sigma_b$ : 最大強度



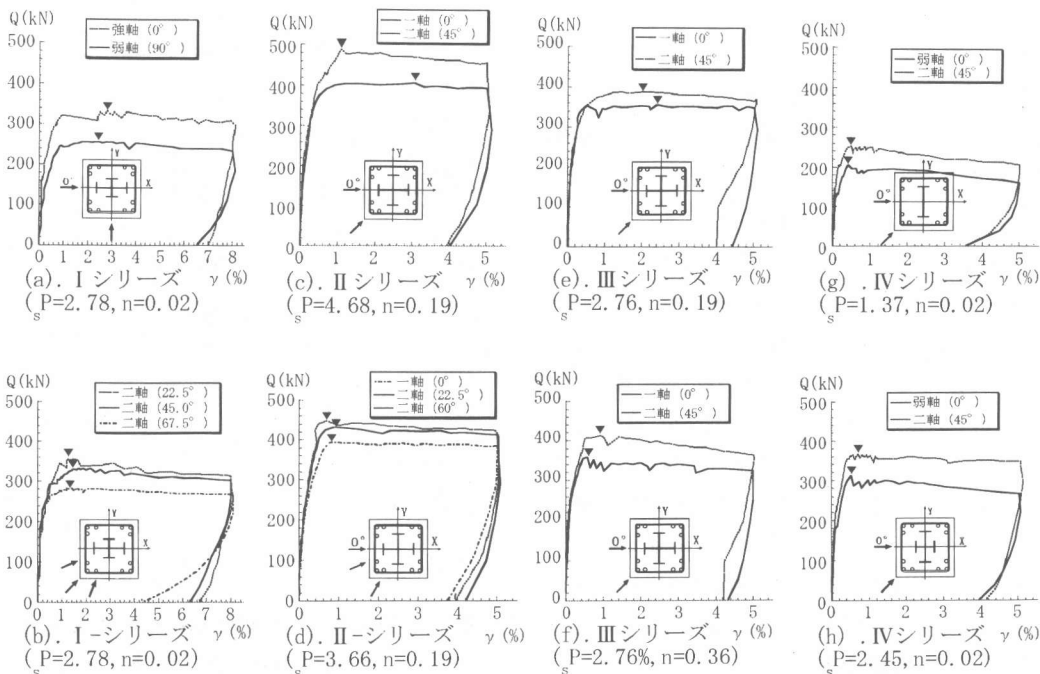
図一 3 載荷装置

載荷装置を図一に示す。本装置では試験体の固定部の回転変形を拘束されるフレームを用い、軸力 $N$ は980kNオイルジャッキにより、所定軸力まで負荷し、一定に保持したあとに、水平入力を自動加力装置で部材角 $\gamma$ による制御変位振幅としてアクチュエータ(490kN)により負荷した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 荷重 - 変位関係

各試験体の履歴曲線を図一に示す。図中、横軸は部材角 $\gamma$ (%)、縦軸は作用せん断力 $Q$ (kN)である。▼の印は最大せん断耐力の点を示す。図中試験体断面横の矢印は各試験体の入力角度である。いずれの試験体においても最大耐力発生後急激な耐力低下は見られず大きな変形性能を示している。しかし、1方向入力試験体に関してX・Y方向でせん断耐力に差異がある試験体で最大耐力発



生後に若干耐力低下がみられる。また2方向入力試験体に関して鉄骨が弱軸配置となる試験体で耐力低下もみられ、その劣化勾配は1方向入力試験体とほぼ同じである。図-4の(c)と(d)をくらべると、鉄骨耐力比のSRC部材のせん断耐力への影響がみられ、せん断耐力は鉄骨耐力比と正の相関がある。(e)・(f)では軸力の影響があらわれ、軸力比の増加につれ、最大耐力がある程度上昇し、最大耐力発生後の耐力低下がみられる。(g)・(h)と(i)からみると、任意方向入力せん断力に対しては、X・Y方向で同じ断面性能をもち、かつ、十字形鉄骨を内蔵する場合においてもっとも良好な靱性発揮することができると推測される。

### 3.2 鉄骨のひずみ状態

図-5に最大耐力が発生した時内蔵された十字形鉄骨ウェブ中央でのひずみのモール円を示す。図中の $\epsilon$ はそのときの横方向ひずみ、 $\gamma_{xy}$ はせん断ひずみをあらわしている。また、弱軸ウェブ面積と強軸ウェブ面積の比は0.86:1である。 $\theta = 22.5^\circ$ 時、強軸ウェブが降伏し、弱軸のひずみが $554 \mu$ で降伏ひずみの4割になったことから、両ウェブのせん断応力度比は約1:0.4と考えられる。 $\theta = 45^\circ$ 、弱軸ウェブが降伏し、強軸のひず

みが降伏ひずみの8.8割になったことから、両ウェブのせん断応力度比は約1:1と考えられる。すなわち、入力角度 $\theta$ の変化によって、両ウェブが負担しているせん断力も異なる

図-4 荷重-変形関係

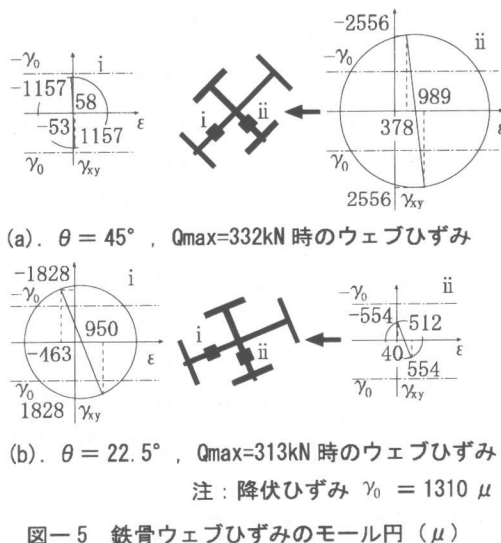


図-5 鉄骨ウェブひずみのモール円 ( $\mu$ )

ることが観察される。

### 3.3 破壊性状

コンクリートのひび割れは各試験体ともせん断、曲げ、付着ひび割れの順に発生した。一方向入力試験体について、せん断ひび割れは入力方向と平行の面に集中する現象がみられる。2方向入力試験体について、4面ともほぼ同じなひび割れが発生する。作用軸力比にかかわらず、一方向入力試験体では、最大耐力以前に圧壊が生じたが、二方向入力試験体では、最大耐力が発生後、変形の増大に伴って圧壊が生じた。圧壊後、柱中央付近のかぶりコンクリートは大きく崩落し、フープ筋の露出がみられた。また、軸力比・鉄骨比及び入力角度の増大に伴って、圧壊及び剥離面積が広範囲におよぶ傾向がある。最終的な破壊状況は各試験体ともせん断破壊の状態であった。

### 3.4 $Q_x$ - $Q_y$ 相関曲線

本研究はSRC部材の2軸せん断耐力相関関係式(1)を提案し、この式を利用して、算出した実験

$$\left(\frac{\text{src}Q_x}{\text{src}Q_{ux}}\right)^\alpha + \left(\frac{\text{src}Q_y}{\text{src}Q_{uy}}\right)^\alpha = 1 \quad (1)$$

$\text{src}Q_x$ ・ $\text{src}Q_y$  : X・Y 軸方向の耐力  
 $\text{src}Q_{ux}$ ・ $\text{src}Q_{uy}$  : 主軸せん断耐力

値の  $Q_x$ - $Q_y$  相関曲線を図-6に示す。縦軸および横軸は、X軸( $Q_x$ ) また Y軸( $Q_y$ ) に作用する主軸せん断耐力である。SRC部材の2軸せん断耐力はX・Y方向での耐力差、鉄骨耐力比及び軸力比による影響を受ける。具体的にいえば、図-6の(a)と(c)に示すようにX・Y方向での耐力差が小さくなると、2軸せん断耐力相関関係は外側に凸の傾向が顕著にあらわれ、逆に増加するとその傾向があまりみられない。また、(b)に示すようにSRC部材の2軸せん断耐力にしめる鉄骨及びRC要素の耐力比に関して、鉄骨耐力比が大きい場合外側に凸の傾向が強くなり、それは2軸せん断耐力が増加している意味であり、RC耐力比が大きい場合その傾向があまり見られない。(c)では軸力比の影響が見られる。軸力比による上昇の割合は入力角度 $\theta$ によって変化している。

### 3.5 相関関係式(1)の指数 $\alpha$

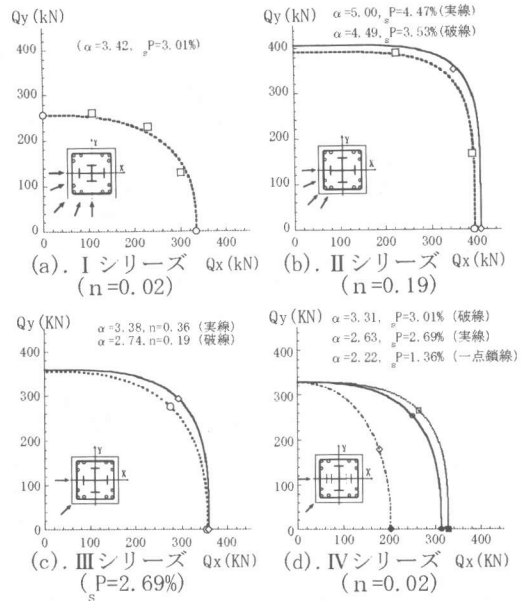


図-6 SRC部材の2軸せん断耐力相関関係

注: 図中のマークは実験値である。

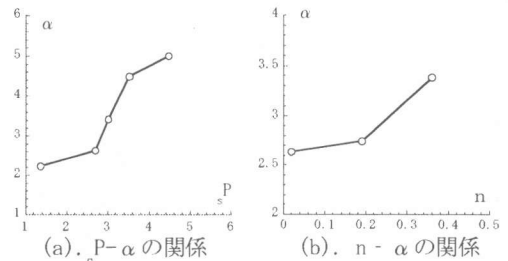


図-7  $\alpha$  と鉄骨比  $P_s$  及び軸力比  $n$  の関係

図-7(a)に指数 $\alpha$ と鉄骨比 $P_s$ 及び軸力比 $n$ の関係を示す。実験結果より、鉄骨比の増加に伴い、指数 $\alpha$ は増加する。つまり2軸せん断耐力は増加することが分かる。軸力比と $\alpha$ の関係を考察するため、鉄骨比 $P_s=2.69\%$ のデータを抽出し、分析結果を図7(b)に示す。軸力比の増加につれ、 $\alpha$ の値も増加する。

## 4. SRC部材2軸せん断耐力評価法

$$Q_{\text{src}} = Q_{\text{rc}} + Q_{\text{s}} \quad (2)$$

$Q_{\text{src}}$  : SRC部材の2軸せん断耐力

$Q_{\text{rc}}$  : RC部分の受け持つ2軸せん断耐力

$Q_{\text{s}}$  : 鉄骨部分の受け持つ2軸せん断耐力

SRC規準<sup>1)</sup>ではSRC部材の主軸方向せん断耐力

Table-3 二軸加力によるせん断耐力の変化

	実験値 / 計算値		軸力比 n	指数 $\alpha$
	$\theta = 22.5^\circ$	$\theta = 45^\circ$		
実験IV	—	0.92	0.00	1.6
実験III	—	0.94	0.20	1.7
実験III	—	1.02	0.40	2.2
文献 <sup>2)</sup>	—	1.09	0.20	2.6
文献 <sup>3)</sup>	1.04	0.97	0.40	2.2
文献 <sup>4)</sup>	1.08	0.98	0.45	2.3

を、鉄骨及びRC要素においてそれぞれ曲げで決まる耐力  $Q_{bu}$  とせん断で決まる耐力  $Q_{su}$  のいずれか小さい方の耐力をもとめ、その後それらの耐力を累加することによりSRC部材耐力を算出している。そこでSRC部材の2軸せん断耐力についても同様の考え方を導入し、鉄骨及びRC部分の2軸せん断耐力相関関係を求め、それぞれの2軸せん断耐力を導き、それらの耐力の累加によりSRC部材の2軸せん断耐力を評価し、(2)式により算出する。

本研究では解析において以下の条件を仮定する。

- 1) 鉄骨の座屈現象は考慮しない。
- 2) RC部分の主筋が十分強く、SRC部材は曲げ降伏をしない。

#### 4.1 RC要素

RC部材の2軸せん断耐力に関しては、既往の研究によりその相関曲線が種々の条件下で提案されているが、その一例を本試験体に適用する。軸力の相違によって相関曲線が変化するため、既往の研究<sup>2), 3), 4)</sup>の実験値に本実験値を含めて、入力角度  $\theta$  の変化による2軸せん断耐力の変化を検討した。実験諸元は幾分異なるが、相関関係式(1)と同様に、その  $\alpha$  の値に関して解析した結果は表-3に表示のようになる。

#### 4.2 鉄骨要素

図-8に示すような任意方向入力を受ける十字鉄骨断面の応力状態を考察する。今回実験のデータを分析すると、SRC部材に内蔵される十字断面鉄の両ウェブは特別な角度以外の場合、同時にせん断降伏する状況が少ない。逆に、片方が降伏すれば、最大耐力に達する試験体が多い。前述した鉄骨ウェブひずみ状況より、式(3)、(4)を導出する。図-9に示すように鉄骨の2軸せん断耐力は

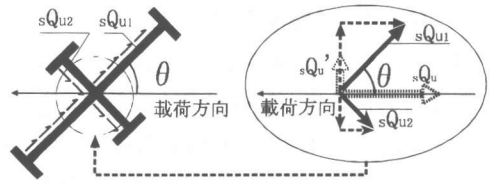


図-8 鉄骨の応力状況

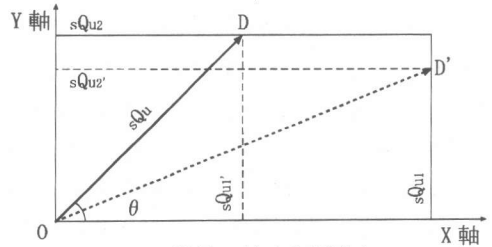


図-9 鉄骨2軸せん断耐力

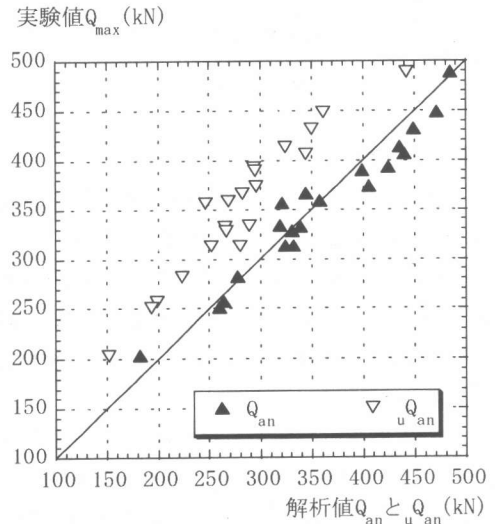


図-10 実験値と解析値の比較

(3), (4)式により切り取られるベクトルOD或はOD'の絶対値とする。

$\theta < \tan^{-1}(s_{Qu1}/s_{Qu2})$  時、

$$s_{Qu} = (s_{Qu1} \times \cos \theta + s_{Qu2}' \times \sin \theta) \quad (3)$$

$\theta > \tan^{-1}(s_{Qu1}/s_{Qu2})$  時、

$$s_{Qu} = (s_{Qu1}' \times \cos \theta + s_{Qu2} \times \sin \theta) \quad (4)$$

ここで、 $\theta$ : 加力角度 ( $0 \leq \theta \leq 2/\pi$ )

$s_{Qu1}$  と  $s_{Qu2}$ : SRCの主軸せん断耐力

$s_{Qu}$ : 鉄骨の2軸せん断耐力

$Q_{u1}'$ : 載荷方向と垂直の分力

## 5. 解析値と実験値の比較

本研究において提案した耐力評価法を利用して算出した各試験体の解析値 $Q_{an}$ と実験値 $Q_{max}$ の比較、また、SRC規準<sup>1)</sup>より算出した終局せん断耐力 $Q_{an}$ と実験値 $Q_{max}$ の比較を図-10に示す。 $Q_{an}$ はRC部分の一軸せん断耐力を荒川mean式で算出し、鉄骨部分の一軸せん断耐力をせん断方向のウェブ断面積がせん断降伏するものとして求め、これを累加したものをSRC柱の一軸せん断力、更に(1)で $\alpha$ を軸力比、鉄骨比に応じて2.2~5.0の範囲で変化させて求めた。 $Q_{max}$ は $Q_{an}$ より一割前後低くなる場合が多い、これは、RC部分アーチ機構が鉄骨によって、阻害されたためと思われる<sup>1)</sup>。解析値と実験値は多少のばらつきが見られるものの、ほぼ良い対応を示したことからSRC部材の2軸せん断耐力は本研究が提案した解析法により適切に評価されているといえる。

## 6. まとめ

本研究では解明されていない部分の多いSRC部材に関し、実験を通じてSRC部材の2軸せん断耐力における破壊性状及び力学的特性さらに相関関係について、実験的、理論的に考察を行い、2軸せん断耐力の評価を行ってきた。得られた結果を以下に述べる。

1) せん断スパン比が一定の場合、SRC部材の2軸せん断耐力相関関係は、鉄骨比及び軸力比に影響を受ける。つまり、鉄骨比と軸力比の増加につれ、相関関係式(1)の指数 $\alpha$ の値が増加する。

2) 軸力下におけるSRC部材の2軸せん断耐力相関関係は、本研究で提案した鉄骨及びRC要素の2軸せん断耐力相関関係の累加により適切に評価できる。2軸せん断耐力は相関関係により算出されるそれぞれの部材耐力の累加により推定することが可能である。

3) 軸力比0.02~0.36の範囲ではSRC部材の2軸せん断耐力相関関係では、曲げ耐力相関関係における(1)式の $\alpha$ の値より大きいので、2軸曲げを考慮して曲げ検定された柱の2軸せん断耐力は、その安全性は自動的に保証される。

## 謝辞

本研究は実験に際してご協力を下さった当時名古屋工業大学工学部社会開発工学科福知研究室文部技官若松慎三氏、4年生森川 満氏、宗宮 由典氏に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」1987年改定
- 2) 筒井他「二方向せん断力を受ける鉄骨鉄筋コンクリート柱のせん断破壊性状」日本建築学会学術講演梗概集(九州)1998.9 1059~1060
- 3) 溝口他「二軸曲げせん断力と変動軸力を受ける鉄筋コンクリート柱せん断抵抗性状」コンクリート工学年次論文報告集12-2 1990 345~350
- 4) 荒川他「二軸曲げせん断力を受ける鉄筋コンクリート短柱せん断抵抗性状」コンクリート工学年次論文報告集11-2 1989 471~476
- 5) 松井他「45°方向から載荷されたSRC柱の二軸曲げ耐力」コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.2. 1996. 599~604.
- 6) 若松他「SRC柱の2軸曲げに関する-考察」日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) 2000.9. 1109~1110
- 7) 森野他「軸力と2軸曲げを受ける鋼・コンクリート複合断面の終局強度相関関係」日本建築学会大会学術論文集(北陸)1992.8 1731
- 8) 南他「2軸曲げを受けるSRC部材の耐力と変形(その3)」日本建築学会大会学術論文集(東海)1994.9 1749~1750
- 9) 筒井他「軸方向力と2方向曲げモーメントを受けるSRC柱の終局曲げ耐力」日本建築学会大会学術講演梗概集 1992.8、1733-1734
- 10) 筒井他「SRC柱の二軸曲げ耐力」コンクリート工学年次論文報告集16-2 1994 889~894