

論文

[2067] 鉄骨鉄筋コンクリート柱の圧縮性状に関する研究

正会員○村田耕司 (竹中工務店技術研究所)

正会員 東端泰夫 (竹中工務店技術研究所)

1. はじめに

本研究は、通常より高強度のコンクリート ( $F_c=390\text{kg/cm}^2$ )を用いた、SRC柱の基本的な性状を把握するための実験的研究である。特に鉄骨の断面寸法および帯筋の拘束効果に着目して、それらが柱の圧縮性状に与える影響を、最大耐力と大変形時の保有強度に主眼を置いて検討する。

前報<sup>1)</sup>では、鉄骨成/柱成が0.35程度の比較的小さなH型鋼(軸鉄骨)を用い、帯筋を囲型に配したSRC柱の中心圧縮実験を行い、その有効性を確認した。また、破壊面を仮定し、軸力抵抗機構を想定することで、軸ひずみ3%時点の保有強度を推定した。

そこで本実験は、前報の実験結果を踏まえ、クロスH型鉄骨を用いて鉄骨の成・幅・厚および帯筋の強度・量・配置がSRC柱の圧縮性状に及ぼす影響を検討する。

2. 実験計画

2.1 試験体

表1に試験体一覧を示す。試験体は、以下に示す変動要因とその水準を組み合わせたSRC柱が23体、比較のためのRC柱が6体、S柱が2体で、合計31体である。

- ①鉄骨成/柱成 :  $sD/D=0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$
- ②帯筋量 :  $p_w = 0.29$  (中子無しの口型配筋),  
0.57 (中子有りの囲型配筋) %
- ③帯筋強度 :  $w\sigma_y = 4000$  (L), 8000 (U)  $\text{kg/cm}^2$
- ④鉄骨量 :  $p_{sg}=3.0$  (S), 4.5 (M), 8.0 (L) %
- ⑤鉄骨幅/柱幅 :  $r_B/B=0.16, 0.32$
- ⑥中子位置 :  $n_B/B=0.4, 0.5, 0.6$

試験体の形状および断面は図1に示すように、 $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ の正方形断面で、高さはその3倍の75cmとし、試験部分は高さ中央の50cmとした。なお、主筋は12-D10、帯筋は $4\phi - @35$ で全試験体共通とした。試験体には、粗骨材に13mm以下の砕石を用いた普通コンクリートを使用し、鉄骨にSM50材、主筋にSD35相当材、帯筋にSD30相当の焼き入れ鋼線と高強度鋼線を使用した。

2.2 加力・計測方法

加力は1000ton試験機を用いて圧縮力を载荷した。軸方向変位は、試験体の試験部分両端に取り付けたボルトを用いて測定し(実験結果には表裏2ヶ所平均値を用いた)、また高さ中央部において、鉄骨・主筋・帯筋のそれぞれにひずみゲージを貼付して各材のひずみを計測した。荷重は、各使用材料の短期許容応力度を単純累加した値で1回除荷し、その後単調载荷して試験体の軸ひずみ度で3%程度まで载荷した。

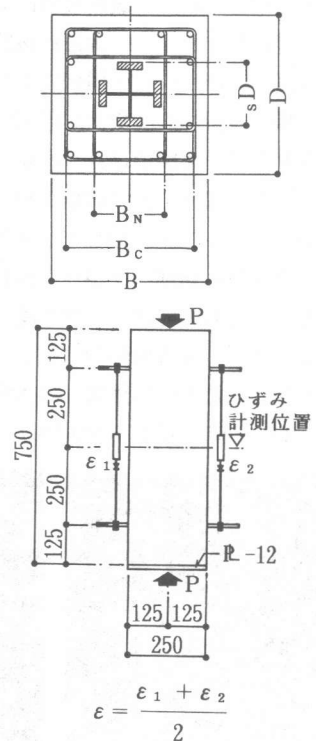


図1. 試験体形状および断面

$$\epsilon = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$$

### 2. 3 使用材料の特性

コンクリートは、大ひずみ時の性状を確認するため、低ひずみ速度による載荷を行い、図2に示す圧縮試験結果を得た。クロスH型鉄骨の各鋼板と主筋・帯筋の引張試験結果を表2に示す。この結果より鋼材の圧縮特性を推定することとした。

### 3. 実験結果

#### 3. 1 実験経過と破壊性状

SRCおよびRC造の各試験体の破壊経過は次のとおりである。①短期許容軸力までは、まず試験体上下端部に縦ひび割れが発生し、中央部に進展していった。②最大耐力(全体降伏時荷重)までは、試験体中央部に斜めひび割れが顕著に見られた。③最大耐力に至ると同時に、表面のコンクリートがはく落した。④囲型帯筋のものは、軸ひずみが増大しても外周帯筋内のコンクリートは健全であったが、□型帯筋のものは、軸ひずみが2%を越える辺りから帯筋の破断が見られた。破断位置は全て帯筋の中央部付近となっている。⑤最終破壊状態(軸ひずみ3%)では、前報と同様にコンクリートを斜めに横切るすべり破壊面が観測できた。図3は、SRC柱を実験後に鉄骨をはつり出した状況(左図)とS柱の最終破壊状況(右図)である。帯筋がLシリーズのものは高さ中央部の全てのフランジに局部座屈が見られたが、帯筋がUシリーズのものは、鉄骨の座屈現象はほとんど見られず、鉄骨内部のコンクリートは健全であった。S造の試験体は、最大耐力以降高さ中央部が一方に振れる全対座屈の性状を示した。

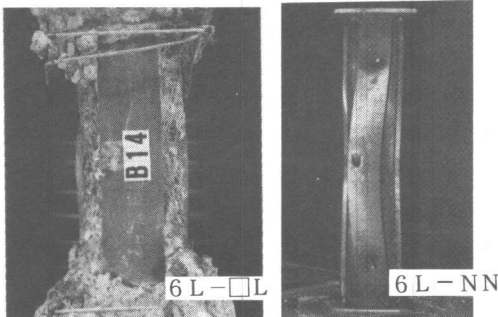


図3. 鉄骨の座屈状況

表1. 試験体一覧

sD/D	鉄骨 サイズ	帯筋			
		□L	囲L	囲U	
0.8	WH-200x80x4.5x12 (Psg=6.65%)	8 L			8 L-囲U
0.7	WH-175x80x4.5x12 (Psg=8.29%)	7 L			7 L-囲U
0.6	WH-150x80x4.5x12 (Psg=7.93%)	6 L	6 L-□L	6 L-囲L	6 L-囲U
	WH-150x40x4.5x12 (Psg=4.85%)	6 M		6 M-囲L	6 M-囲U
	WH-150x40x3.2x8 (Psg=3.41%)	6 S	6 S-□L	6 S-囲L	6 S-囲U
0.5	WH-125x80x4.5x12 (Psg=7.57%)	5 L		5 L-囲L	5 L-囲U
	WH-125x40x4.5x12 (Psg=4.50%)	5 M		5 M-囲L	5 M-囲U
	WH-125x40x3.2x8 (Psg=3.15%)	5 S	5 S-□L	5 S-囲L	5 S-囲U
0.4	WH-100x80x4.5x12 (Psg=4.13%)	4 M		4 M-囲L	4 M-囲U
	WH-100x40x3.2x8 (Psg=2.90%)	4 S	4 S-□L	4 S-囲L	4 S-囲U 4 S-囲U'
RC	中子-n <sub>B</sub> /B=0.6	6 N		6 N-囲L	6 N-囲U
	中子-n <sub>B</sub> /B=0.5	5 N		5 N-囲L	5 N-囲U
	中子-n <sub>B</sub> /B=0.4	4 N		4 N-囲L	4 N-囲U
S	WH-150x80x4.5x12	6 L		6 L-NN	
	WH-100x40x3.2x8	4 S		4 S-NN	

特記事項 1) 4S-囲U'は、中子-n<sub>B</sub>/B=0.6 (B<sub>N</sub>/B=sD/D)  
 2) 軸鉄筋: 12-HD10, P<sub>g</sub>=1.37%  
 3) 軸鉄骨: SM50  
 4) コンクリート: F<sub>c</sub>=390 kg/cm<sup>2</sup>  
 5) 帯筋  
 □L: p<sub>w</sub>・w<sub>o</sub>y=11.6 kg/cm<sup>2</sup>, L4φ □型@35  
 囲L: p<sub>w</sub>・w<sub>o</sub>y=22.8 kg/cm<sup>2</sup>, L4φ 囲型@35  
 囲U: p<sub>w</sub>・w<sub>o</sub>y=45.6 kg/cm<sup>2</sup>, U4φ 囲型@35  
 L4φ s<sub>o</sub>y=4000 kg/cm<sup>2</sup>  
 U4φ s<sub>o</sub>y=8000 kg/cm<sup>2</sup>  
 囲型は、□型外周フープと□型中子フープ2個による。

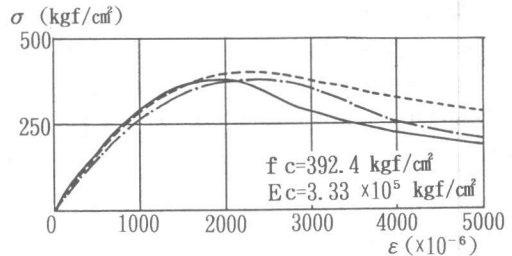


図2. コンクリートの圧縮試験結果

表2. 鋼材の引張試験結果

鋼材種類	降伏強度 σ <sub>y</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 σ <sub>t</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 E <sub>s</sub> (x10 <sup>4</sup> ) (kgf/cm <sup>2</sup> )	降伏ひずみ ε <sub>y</sub> (x10 <sup>-4</sup> )	伸び ε <sub>t</sub> (%)	備考
鉄骨	R-12	3767	5341	2.18	2103	27.5 7377
	R-8	4118	5741	2.19	2322	22.5 7377
	R-4.5	2493	3645	2.14	1273	35.6 957
	R-3.2	3063	3894	2.17	1638	31.6 957
鉄筋	D10	3727	5409	1.88	2042	16.7 主筋
	4φ	4029	4468	2.13	1892	19.4 帯筋
	4φ#1	9342	10343	2.22	4208	16.1 帯筋
	4φ#2	10269	11205	2.18	4711	13.8 帯筋

特記事項 1) 値は、各々3本の平均を示す。  
 2) 4φは3種類あり、以下のように使用した。  
 #1: sD/D=0.6 #2: sD/D=0.5, 0.4

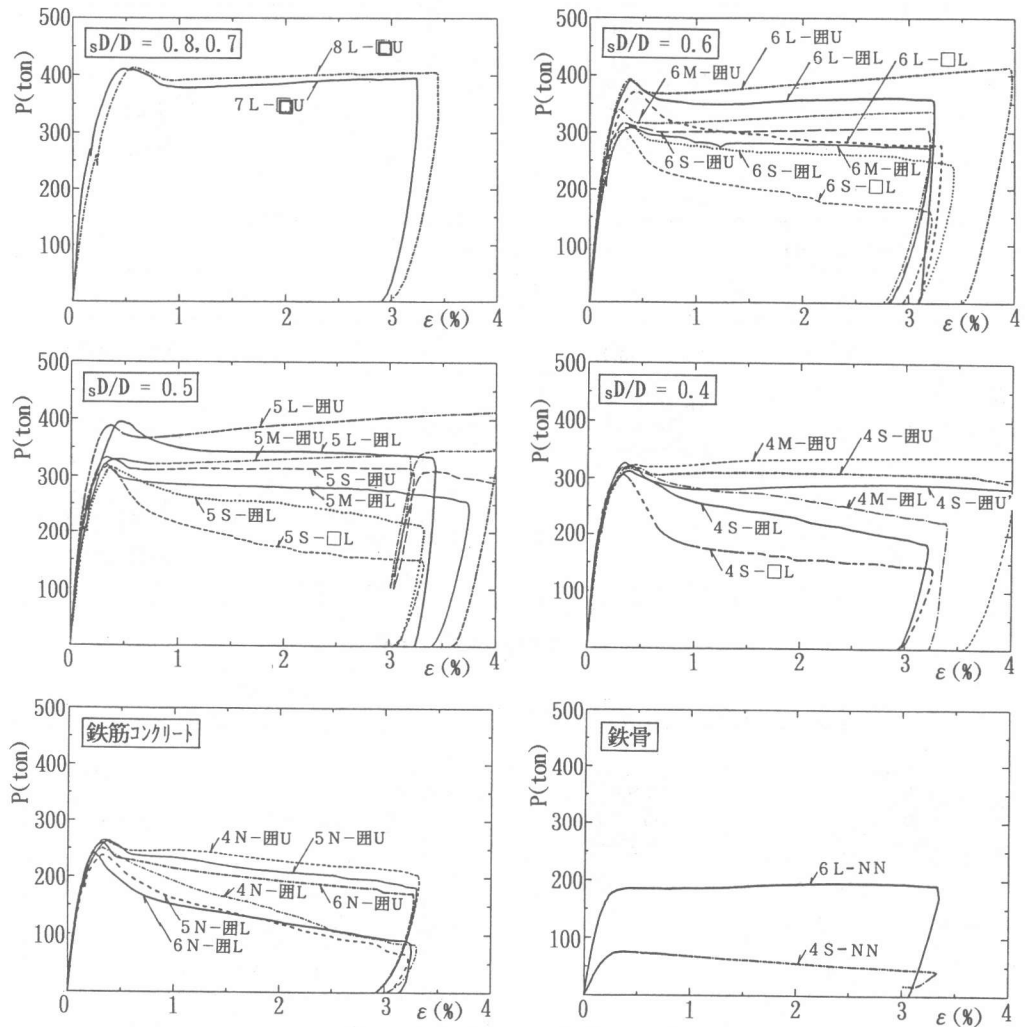


図4. 荷重-変形関係

### 3. 2 荷重-軸ひずみ関係

各試験体の軸方向荷重 $P$ と軸ひずみ $\epsilon$ の関係を図4に示す。SRC造のものでは、鉄骨量の増加にともない最大耐力が増加しており、その後の挙動は帯筋の量と強度によって異なっている。帯筋が○Uのものは、最大耐力以降の耐力低下が生じるが、その後徐々に耐力が上昇する傾向にあった。これに対し□Lのものは、最大耐力以降の耐力上昇はなく、安定しているものの若干荷重が低下傾向にある。さらに□Lのものは、最大耐力以降の耐力低下傾向は著しいものであり、これらの傾向は、鉄骨量が少ないほど顕著になっている。

一方純RC造のものでは、帯筋強度の大きなものは、最大耐力以降徐々に荷重が低下しているものの安定した挙動を示している。しかし、帯筋強度の小さなものでは最大耐力以降の安定状態がなく、一様な耐力低下の傾向を示している。

S造の2体では、断面積の大きなものは、降伏棚が表われ、わずかにひずみ硬化の傾向も見られたが、断面積の小さなものは、降伏後徐々に荷重が低下している。

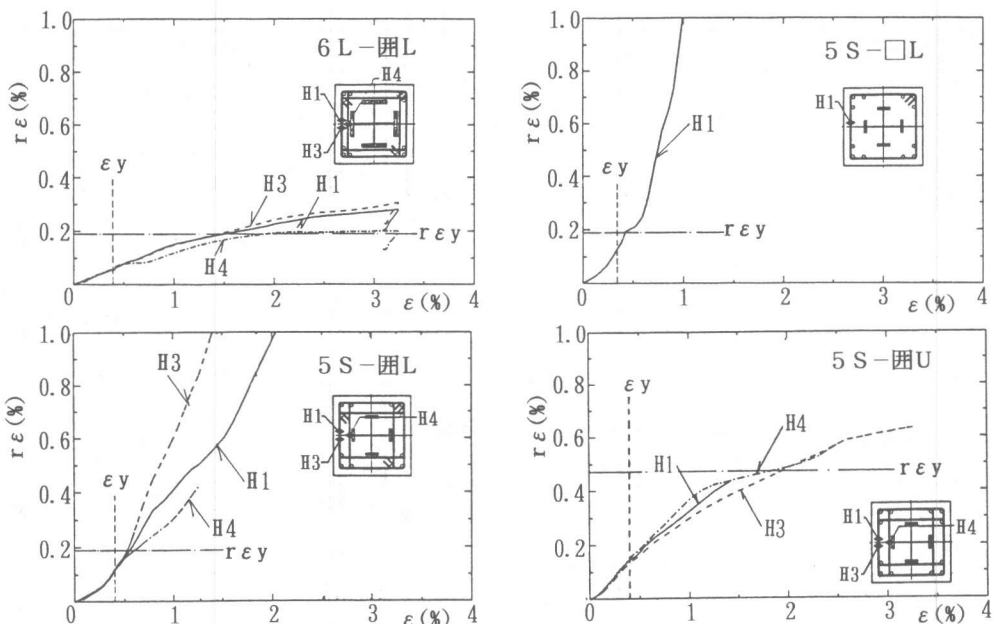


図5. 帯筋のひずみ状況

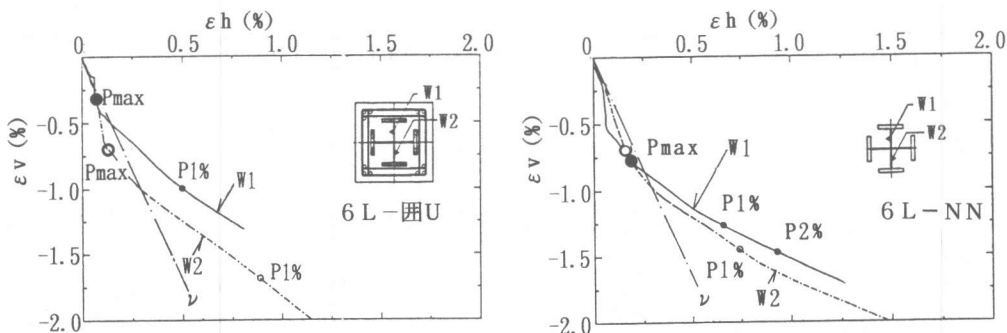


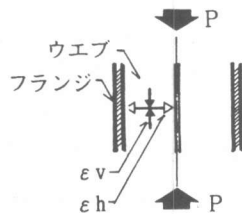
図6. 鉄骨ウェブのひずみ状況

$$\nu = \frac{\varepsilon h}{\varepsilon v} = 0.3$$

### 3. 3 各部のひずみ状況

いずれの試験体も軸鋼材および主筋の軸ひずみは、最大耐力前に降伏ひずみに達していた。図5に柱の全体軸ひずみと帯筋各点のひずみとの関係を示す。帯筋が□Lのものはすべての帯筋が最大耐力付近で降伏し、その後ひずみが急激に増加している。帯筋が□Lのものでは、最大耐力後に降伏しており、鉄骨が小さいものでは、□Lとほぼ同様の性状を示したが、鉄骨が大きなものでは全般的にひずみ量は少ない。また帯筋が□Uのものでは、軸ひずみが1%~2%程度で降伏し、その後のひずみ量に著しい増加は見られない。帯筋の各部のひずみでは、いずれの試験体も最大耐力時までは位置の違いによる変化はなく一様な増加傾向を示しているが、その後は、鉄骨が小さく中子位置が内部に入るほど外周部分に比べて中子のひずみ量が大きくなっている。鉄骨が大きく中子が外周に近いものでは帯筋位置によるひずみ量の違いは見られない。

図6は代表的なSRC柱とS柱について、鉄骨ウェブの軸方向と水平方向のひずみを示したも



のである。両者のひずみは、初期においてはポアソン比に従って増加し降伏後も変化がないが、最大耐力に達すると同時に水平方向のひずみが増大している。この傾向はすべての試験体に共通であった。これより、S柱は全体座屈に伴って面外曲げによりウェブのひずみが増大していると考えられる。一方、SRC造の場合は、軸鉄骨の全体座屈はコンクリートの拘束により抑制されており、大変形時には軸鉄骨が内部のコンクリートを拘束することによりウェブのひずみが増加し、その結果大変形時においてフランジの板座屈が生じているものと思われる。

#### 4. 考察

##### 4.1 コンクリートの負担応力度に対する鉄骨量と $p_w \cdot w\sigma_y$ の影響について

図7は、コンクリートの圧縮性状に主眼を置き、主筋と軸鉄骨の分担軸力を全体から差し引いたコンクリート部分だけの負担応力を算出し、最大耐力時  $\sigma_{max}$  と大変形時  $\sigma_{3\%}$  (軸ひずみ3%) において鉄骨量との関係を示したものである。なお、鉄骨と主筋の荷重-変形関係は素材試験結果をBi-linear に置換してコンクリートの分担軸力を算出した。

鉄骨量の増加に伴い、 $\sigma_{max}$  は一様な減少傾向が見られ、 $\sigma_{3\%}$  に関しては、帯筋強度の高いものでは鉄骨量による差はほとんどないものの、帯筋強度が低いものでは鉄骨量の増加にともなう顕著な増加傾向が見られる。これより、軸鉄骨の断面積の増加は、コンクリートの最大耐力を減少させる傾向があるが、大変形時の耐力確保に有効であると考えられる。また、 $p_w \cdot w\sigma_y$  が大きいものでは、 $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{3\%}$  とも増大している。その傾向は  $\sigma_{max}$  では緩慢であるが、 $\sigma_{3\%}$  では非常に顕著になっている。

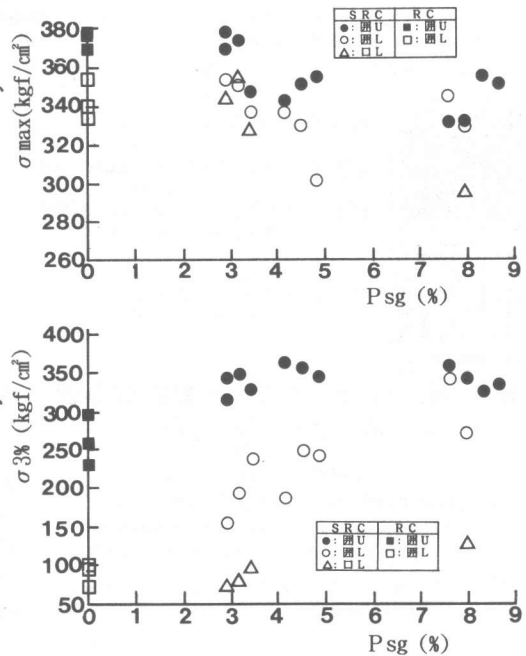


図7. 最大耐力時および3%軸ひずみ時のコンクリートの負担応力

##### 4.2 最大耐力の推定

帯筋による拘束効果とその閉鎖型の内部のコンクリートのみならず及ぶものと考え、図8に示すように帯筋により分割された各グリッドがそれぞれ異なった拘束量を受けるものとして、(1)式に示す算定式により最大耐力を推定した。ただし、3.3節の各部のひずみ状況を考慮して、帯筋による拘束効果に上限を設け、さらに図8の下図に示す範囲では、鉄骨のポアソン比に従った断面内の膨張によるコンクリートに対する支圧力を差し引いた。図9に計算値と実験値の関係を示す。図より両者は比較的高い相関性を示しており、上記の算定法は囲型帯筋を用いたSRC柱の最大耐力を推定する簡便な手法であると考えられる。

##### 4.3 大変形時保有強度の推定

前報<sup>1)</sup>では断面内全域に45度の破壊面を仮定し、そのすべり抵抗機構より大変形時の保有強度を推定した。しかし、今回の実験で軸鋼材に囲まれたコンクリート部分は大変形時にも健全な状態であったことより、SRC柱では図10のように断面内で2種類(A, B)の抵抗機構が存在すると考えられる。そこで、図11の下図のように断面内の抵抗機構を分離し、さらにすべり

抵抗部分については、最大耐力時と同様に、図11の上図に示すグリッドと拘束力を想定して、(2)式により大変形時の保有強度を推定した。実験値（軸ひずみ3%時強度）との対応を図12に示す。図より、計算値は良い対応を示しており、RC造も含めて、軸鉄骨の大小および帯筋の配置の違いにかかわらず、上記の算定方法で、軸ひずみ度が3%時点での実験値を概ね推定できるものと思われる。

記号一覧

$P_{w1}, w_{0y}$ : 各ブロックを拘束する帯筋の鉄筋比、降伏応力度	$A_{cw1}$ : 各ブロックの断面積
$f_c, E_c$ : コンクリートの圧縮強度、ヤング率	$a_s$ : 軸鉄骨の断面積
$A_c$ : コンクリートのみの断面積	$a_r$ : 主筋断面積
$A_{s1}, s_{0y}$ : 軸鋼材の断面積、降伏応力度	$a_w$ : 帯筋断面積
$t_w, B_r$ : 軸鉄骨のウェブ厚、フランジ幅	$s$ : 帯筋ピッチ
	$\mu$ : 摩擦係数 (=0.6)

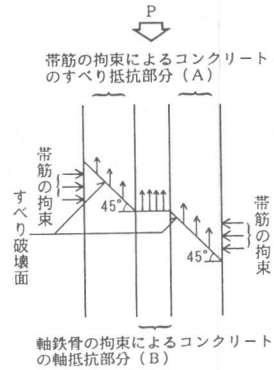


図10. 大変形時の抵抗機構

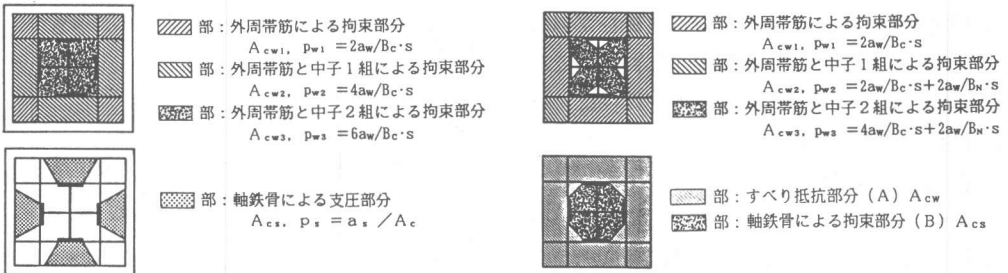


図8. 最大耐力時の鉄骨及び帯筋の影響範囲

図11. 大変形時の鉄骨および帯筋の拘束範囲

$$P = \frac{P_c}{1} + \frac{P_s}{2} + \frac{P_{cw}}{3} + \frac{P_{cs}}{4} \quad (1)$$

- ① コンクリートの軸抵抗力:  $P_c = 0.85f_c \cdot A_c$
- ② 軸鋼材の軸抵抗力:  $P_s = \sum A_{s1} \cdot s_{0y}$
- ③ 帯筋の拘束によるコンクリートの強度上昇分:  $P_{cw} = \sum (P_{w1} \cdot w_{0y} \cdot A_{cw1})$   
 $P_{w1} \cdot w_{0y} \leq 0.85f_c / 6$
- ④ 鉄骨の支圧によるコンクリートの強度減少分:  $P_{cs} = -0.3P_s \cdot s_{0y} \cdot A_{cs}$

$$P = \frac{P_{cw}}{1} + \frac{P_s}{2} + \frac{P_{ac}}{3} + \frac{P_c}{4} + \frac{P_{cs}}{5} \quad (2)$$

- ① すべり破壊抵抗力<sup>1)</sup>:  $P_{cw} = \sum \left\{ \frac{(1+\mu)}{(1-\mu)} \times P_{w1} \cdot w_{0y} \times A_{cw1} \right\}$
- ② 鋼材の軸抵抗力:  $P_s = \sum (A_{s1} \cdot s_{0y})$
- ③ 主筋のダボ力<sup>1)</sup>:  $P_{ac} = 0.05 \cos 45^\circ a_r \cdot \sqrt{0.1f_c} \cdot 0.1E_c$
- ④ 鉄骨内部のされたコンクリートの軸抵抗力:  $P_{cs} = 0.85 f_c \cdot A_{cs}$
- ⑤ 鉄骨の拘束によるコンクリートの強度上昇分:  $P_{cs} = t_w / B_r \cdot s_{0y} \cdot A_{cs}$

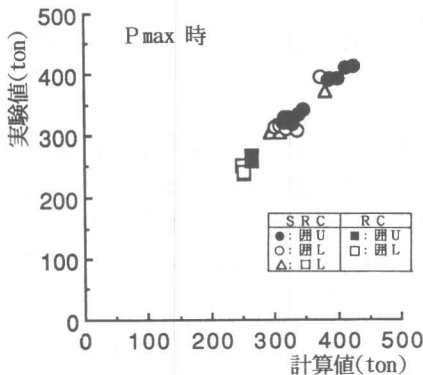


図9. 最大耐力の算定結果

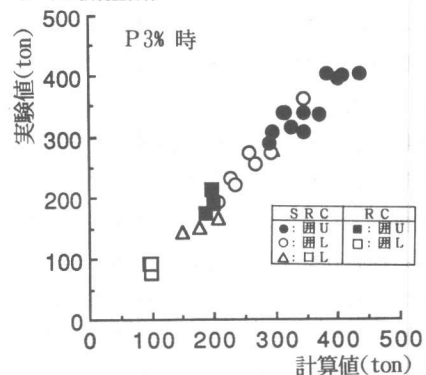


図12. 大変形時 ( $\epsilon = 3\%$ ) の保有強度算定結果

## 5. 結論

鉄骨の断面寸法と帯筋の量・強度・配置を因子とするSRC柱の圧縮実験を行い、コンクリートに対する帯筋と軸鉄骨の拘束効果を、その影響範囲を想定して定量的に評価することにより、SRC柱の圧縮性状における最大耐力と大変形時の保有強度を推定することができた。

参考文献

- (1) 宮内、東端: 「軸鋼材を内蔵するコンクリートの圧縮性状に関する研究」コンクリート工学年次論文報告集 11-2 1989