

# 高強度低降伏比の鋼材を用いた SRC 柱の弾塑性挙動

穂田智佳\* 藤澤一善\*\* 藤沢清二\*\* 難波隆行\*\*\* 堺 純一\*\*\*\* 南宏一\*\*\*\*\*

Experimental Study on Elastic-Plastic Behavior of SRC Columns with High Strength Steel

Tomoyoshi AKITA\*, Kazuyoshi FUJISAWA\*\*, Seiji FUJISAWA\*\*, Takayuki NANBA\*\*\*  
Junichi SAKAI\*\*\*\* and Koichi MINAMI\*\*\*\*\*

## ABSTRACT

The demand to use high strength and high performance material because of large span and high rise of building in recent years. As to use of high-strength steel in composite steel and reinforced concrete structures, it remains to be clarified whether the ductile behavior can be ensured, especially when the high-strength steel is used in combination with high-strength concrete. This paper describes the arch mechanism and the truss mechanism by using the technique of the plastic analysis as a shearing resistance mechanism of the SRC column. In addition, The result of the experiment which uses full scale specimen is described, and the size effect is considered, and the size effect influenced it. Ultimate shear strength of SRC column was well predicted by using the technique of the plastic analysis.

キーワード: SRC, 終局せん断耐力, 高強度コンクリート, 高強度低降伏比鋼材  
弾塑性挙動, 寸法効果

Keywords: Steel Reinforced Concrete Structures, Ultimate Shear Strength  
High Strength Concrete., High Strength Steel, Elastic-plastic Behavior, Scale Effect

### 1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート(以下SRCと称す)構造の柱材は鉄骨と鉄筋コンクリートを合成した部材であるため、部材の弾塑性挙動に及ぼす影響因子が複雑であり、未だに明らかにされているとは言い難い点がある。建築分野で使用されるSRC構造には、従来400kN級と500kN級の鋼材が用いられてきたが、最近では建築物が高層化、大スパン化されてきたために、より高強度の材料を使用し、合成構造の分野において高強度材料を組み合わせる要望が強くなってきている。

SRC構造は鉄骨構造に比べて、座屈が生じにくいことや、剛性が高いなど、高強度鋼の使用に関して有利になる面が多い。そこで、高張力鋼を用いたSRC構造の開発研究については、文献1)にその問題点が

指摘されているが、図-1に示す様な力学特性をもつ高強度低降伏比鋼材を用いた鉄骨がRC部分と一体に働くか否かなど、その利用に先立って解明しておくべき点も少なくない。また、既往の研究で高強度低降伏比の鋼材と普通コンクリートを用いたSRC柱の力学特性について文献2)に示されているが、高強度コンクリート、高強度せん断補強筋等の高強度材料の組み合わせに関しては不明な点が多い。主な問題点と

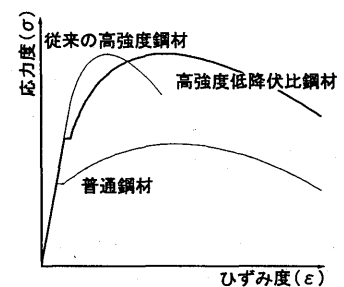


図-1 高強度低降伏比鋼材の力学特性

\* 株式会社 ADO 建築設計事務所

\*\* 株式会社 JFE スチール

\*\*\* 株式会社 JFE 技研

\*\*\*\* 九州共立大学工学部建築学科

\*\*\*\*\* 福山大学建築学科

表-1 試験体緒元

試験体名	断面形	柱断面 mm	柱長さ mm	せん断スパン比	コンクリート強度 N/mm <sup>2</sup>	軸力比	鉄骨		帯筋	主筋					
							強軸鉄骨	弱軸鉄骨							
シリーズ1	SRC-H1	H形強軸	300×300	1.5	30	0	200×80×9×16	200×80×9×9	D6@50mm (SD295)	12-D13 (SD295)					
	SRC-H2					0.3									
	SRC-H3					0.6									
	SRC-H4					0.3									
シリーズ2	SRC-C1	十字形		900	-	-			0	-	-	D6@50mm (SD295)	-		
	SRC-C2								0.3						
	SRC-C3								0.6						
シリーズ3	SH-1	H形(鉄骨のみ)		600	1.5	60			0	200×80×9×9	-	-	-		
シリーズ4	SRC-H5	H形強軸							1.5					60	0.3
	SRC-H6				0.6										
シリーズ5	SRC-C4	H十字形	1.0		30	0.3	-	-	D10@50mm (SD785)					12-D13 (SD295)	
	SRC-C5														60
	SRC-C6														30
	SRC-C7		1.5		60	0									
	SRC-C8														0.3
	SRC-C9														0.6
シリーズ6	FSRC-C1	十字形	650×650		1300	1	30	0.3	400×200×9×16					400×200×9×16	D10@50mm (SD785)
	FSRC-C2		1950	1.5											

\*註 軸力比 $n=N/N_u$ , N: 載荷軸力,  $N_u$ : 終局圧縮耐力

しては、高強度低降伏比鋼材を用いたSRC柱の場合には降伏ひずみ度が大きくなるため、鉄骨部分が十分強度を発揮しないうちに鉄筋コンクリート部分の耐力が低下して、両者の協働性が不十分にならないかということが上げられる。

そこでSRC標準の終局曲げ耐力及び終局せん断耐力の算定式を適用する際の問題点の有無および、一般化累加強度理論を適用する際の問題点について検討し、高強度低降伏比の鋼材をSRC柱に適用する是非について考察する。なお、文献3)に高強度材料を用いたSRC柱の力学的性状について詳細に検討されている。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

本研究では、SRC柱における高強度コンクリート強度の影響の比較を行なう為に既往で行なった実験(文献2))シリーズ1~3関連づけて、表-1に示す新たに11試験体(シリーズ4~6)を計画した。試験体は内蔵鉄骨の形状、柱長さ、コンクリート強度、補強筋比(補強筋強度SD295, SD785)を実験変数とした。シリーズ4, 5ではシリーズ1, 2に対して高強度コンクリートを用いた実験を基本にして、曲げ破壊の特性を検討する為に高強度せん断補強筋を用いた場合、柱長さを変えることでせん断スパン比の影響の検討を行なった。シリーズ6では、実寸法に近い柱断面650mm×650mmのSRC柱の実験を行い、数多くの既往の縮小模型によるSRC柱の研究から得た成果を実寸法のSRC柱に適用する場合の適合性を検討する。すなわち、コンクリート系部材では実寸法

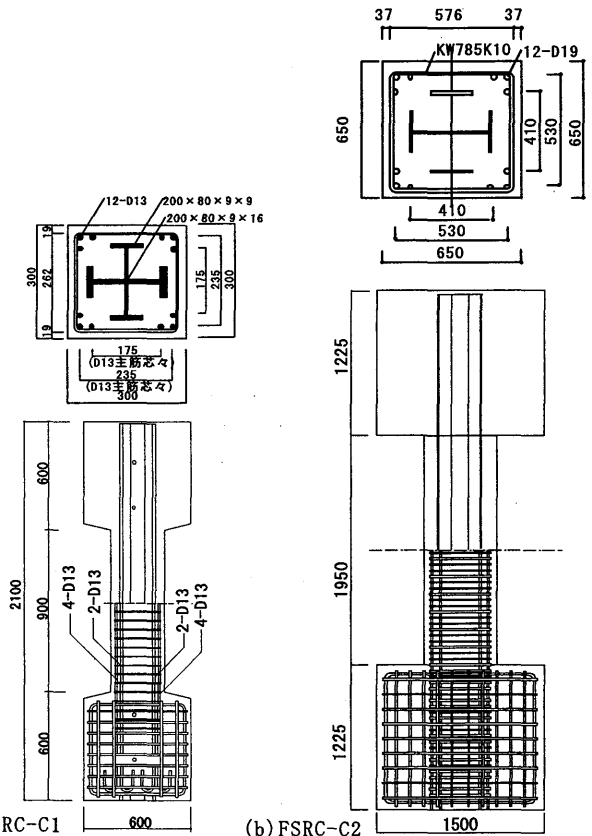


図-2 試験体寸法・配筋図(単位mm)

表-2 コンクリート強度

コンクリート設計強度 (N/mm <sup>2</sup> )	発生強度推移(N/mm <sup>2</sup> )		
	28日強度	実験時	
シリーズ1~2	圧縮強度	26.6	27.9
	割裂強度	3.3	3.7
シリーズ4~5	圧縮強度	26.5	30.1
	割裂強度	4.2	3.7
シリーズ4~5	圧縮強度	59.5	68.5
	割裂強度	4.27	5.24
FSRC-C1	圧縮強度	29.2	34.6
	割裂強度	3.3	4.6
FSRC-C2	圧縮強度	27.3	27.9
	割裂強度	4.2	3.7

になるに伴って強度が低下すること(寸法効果)が知られており、シリーズ6ではSRC柱の寸法効果について検討を行なう。なお、SRC柱の寸法効果を的確に把握するために鉄骨比、主筋比、せん断補筋筋比等はシリーズ1～5の試験体に一致させている。各試験体の試験体形状、断面詳細の例を図-2に示す。

コンクリートの材料試験結果を表-2に示す。鋼材の材料試験結果を表-3に示し、高強度低降伏比の鋼材の応力ひずみ関係を図-3に示す。

## 2.2 荷重方法

シリーズ4～5における実験装置としては建研式荷重装置を用い、鉛直ジャッキに圧縮4MN、水平ジャッキに2MNの油圧ジャッキを用いる。シリーズ6においては図-4に示す大型の建研式荷重装置を用いた。荷重方法はL型フレームを介して柱脚部の柱長さの1/2の点に水平荷重を作用させる。柱頭の水平変位制御とし、軸力比 $n(=N/N_u, N_u$ :中心圧縮耐力)の圧縮軸力を荷重した後、軸力(N)を一定に保持し

ながら柱の部材角(R)を油圧ジャッキの引張側の荷重を正とし、0.25%rad.を1サイクル荷重したのち0.5%rad.から正負の荷重方向に0.5%rad.ずつ増加させ、5.0%rad.まで繰返し荷重を行う。また、所定の軸力保持が不可能になった場合、その段階で実験を終了する。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 破壊性状

終局時の破壊状況を図-5に示す。実線が正側荷重時に生じたひび割れを示し、点線が負側荷重に生じたひび割れを示す。またコンクリートのはく離部分は塗りつぶしで示す。

ひび割れの発生および破壊状況としては、(1)補筋筋比の違いによる初期せん断ひび割れの違いは見られず、補筋筋比の大きなSRC-C4, C5では柱頭、柱脚部の曲げ破壊がより卓越した。

(2)SRC-C6, C7の短柱では斜めのせん断ひび割れが卓越し、補筋筋内部のコンクリートにも大きな損傷が見られる。(3)コンクリート強度による大きな違いは見られず、強軸方向の鉄骨フランジに沿って付着割裂ひび割れが進行し、大きくコンクリートが剥落した。

表-3 鋼材の材料強度

鋼材種	降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	破断伸び %	降伏比 %
強軸フランジ	418	571	23.7	0.73
強軸ウェブ、弱軸鉄骨	455	580	21.9	0.78
主筋 D13(SD295)	325	467	13.7	0.70
帯筋 D6(SD295)	331	482	13.5	0.69
帯筋 D16(SD785)	922	1106	6.0	0.83

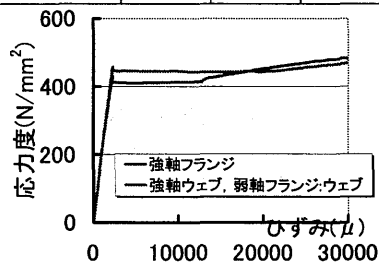


図-3 鉄骨の材料特性

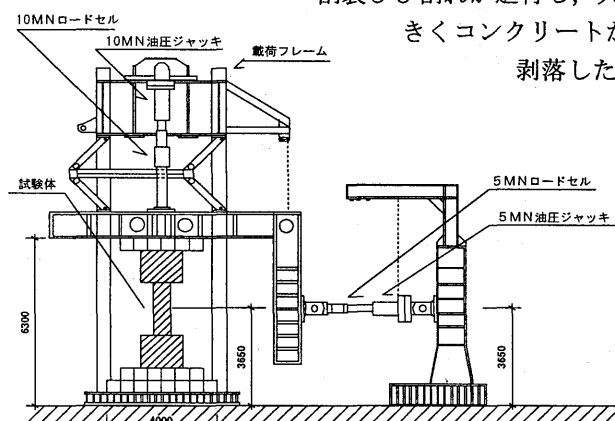


図-4 実験装置(単位mm)

SRC-H5	SRC-C4	SRC-C5	SRC-C6	SRC-C7	SRC-C8	SRC-C10
L=900			L=600		L=900	
Fc=60N/mm <sup>2</sup>	Fc=30N/mm <sup>2</sup>	Fc=60N/mm <sup>2</sup>	Fc=30N/mm <sup>2</sup>		Fc=60N/mm <sup>2</sup>	
Pw=0.43%			Pw=0.95%		Pw=0.43%	
n=0.3			n=0		n=0.3	

註 L:柱長さ, Fc:コンクリート強度, Pw:帯筋比, n:軸力比

図-5 終局破壊状況図

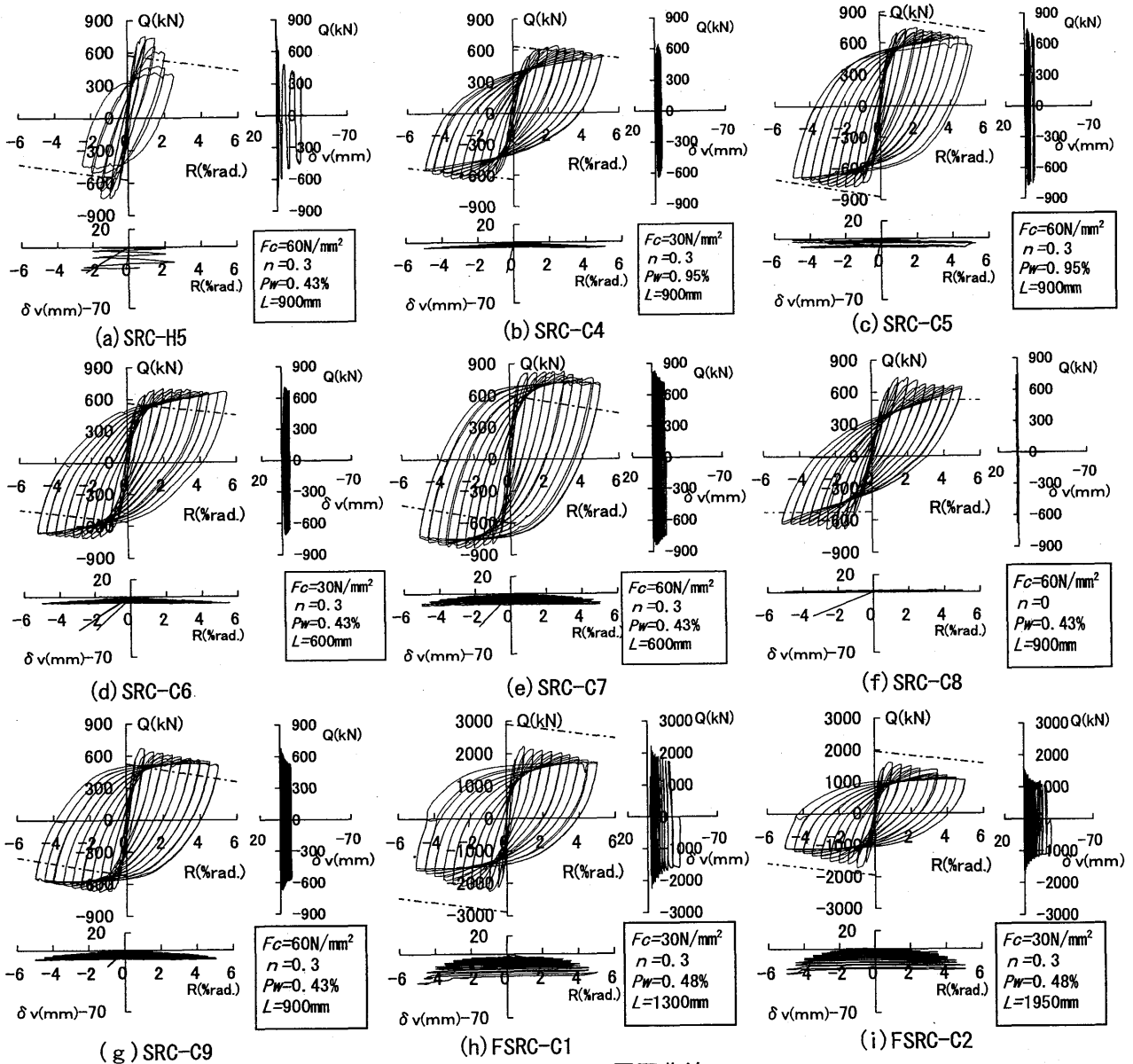
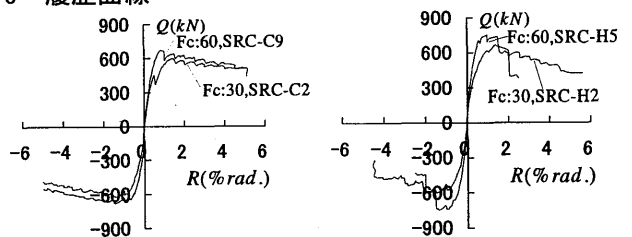


図-6 履歴曲線

### 3.2 履歴性状

図-6に履歴曲線、図-7に包絡曲線の比較を既往の実験結果と合わせて示す。縦軸を水平荷重  $Q$  (kN)、横軸を部材角  $R$  (%rad.) を示す。図-6の破線は軸力による転倒モーメントを考慮した終局耐力  $Q_u$  (kN) を示している。鉛直変位の関係では縦軸を荷重 (kN)、横軸を鉛直変位 ( $\delta v$ ) と縦軸を鉛直変位 ( $\delta v$ )、横軸に荷重 (kN) と共に示し、圧縮軸力による縮みをマイナスとした。

高強度コンクリート強度を使用した場合には、普通強度のコンクリートを用いた場合に比べ、早期に最大耐力を示す傾向が見られ、H形鉄骨内蔵の場合は限界部材角にも大きな違いが見られた。全試験体を通して塑性変形後の耐力低下が小さくなっており、これは低降伏比鋼材である為、鉄骨のひずみ硬化に



(a) 十字形鉄骨内蔵試験体 (b) H形鉄骨内蔵試験体

図-7 コンクリート強度の違いによる包絡曲線比較

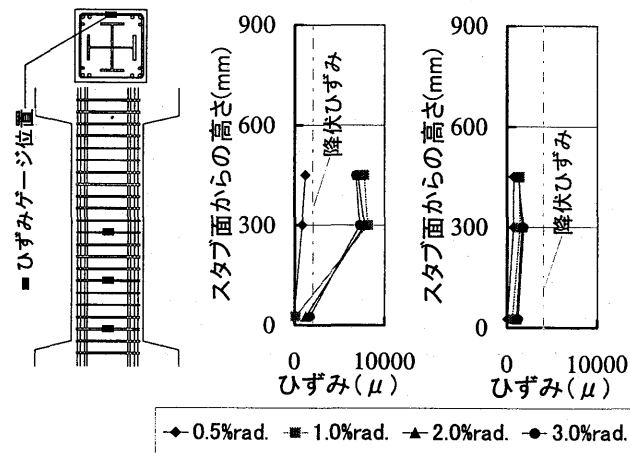
より鉄骨部分の耐力上昇によって、塑性変形後の耐力減少が小さくなるためである。せん断破壊が生じた場合、高強度低降伏比鋼材と高強度コンクリートの組み合わせたSRC柱では、紡錘形の安定した履歴性状を持つことを示した。なお、高強度コンクリートを用いた場合は内蔵鉄鋼の形状による履歴特性への大きな相違が示された。

### 3.3 せん断補強筋のひずみ状況

本実験では、高強度コンクリート、高強度低降伏比の鋼材、高強度せん断補強筋という高強度材料を組み合わせた場合についても検討した。図-8 にせん断補強筋のひずみ状況を示す。図-8 に示すように高強度せん断補強筋を用いた(SRC-C5)場合、補強筋が降伏ひずみ達していないことが分かる。これは、十字形鉄骨を内蔵することで鉄骨内部のコンクリートを拘束することができるが、しかしながら、内蔵する鉄骨によって、鉄筋コンクリートの有効幅は減少し、鉄筋コンクリート部分の終局せん断耐力が低下するために、高強度せん断補強筋の効果が十分に発揮されないためである。

### 3.4 SRC柱での高強度低降伏比鋼材の特性

最大耐力時の鉄骨の効果を検討する為に、部材角(R)1.5%rad.の正加力時1回目の柱脚部の主筋と鉄骨のひずみの関係を横軸に柱断面での位置と縦軸にひずみとして図-9 に示す。圧縮ひずみを負の値で示す。比較対象としては、同軸力比0.3とし、コンクリート強度と補強筋比の変数で理論計算値の破壊モードを曲げ破壊とせん断破壊とで分けて示した。



註: ひずみゲージが剥がれていない事を確認している  
図-8 せん断補強筋のひずみ状況

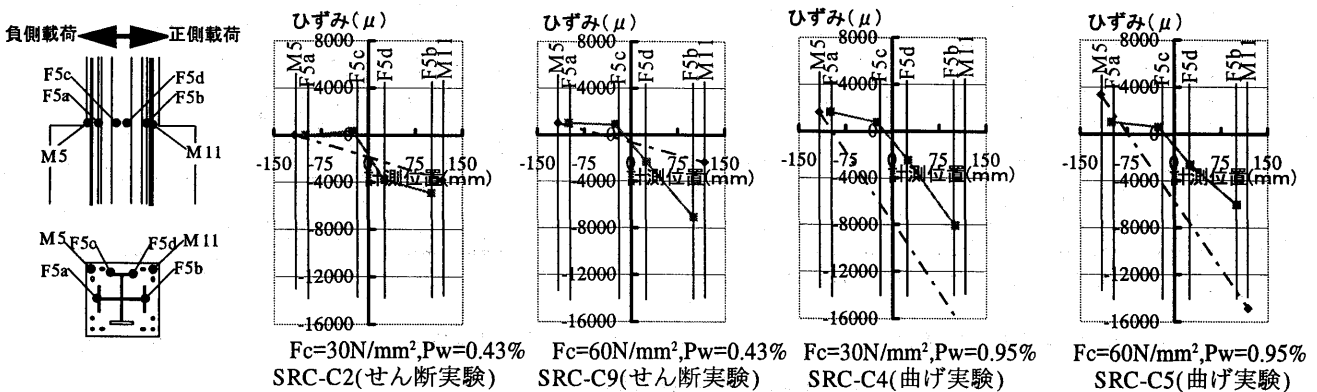


図-9 主筋、鉄骨ひずみ関係(変形部材角R=1.5%rad.時)

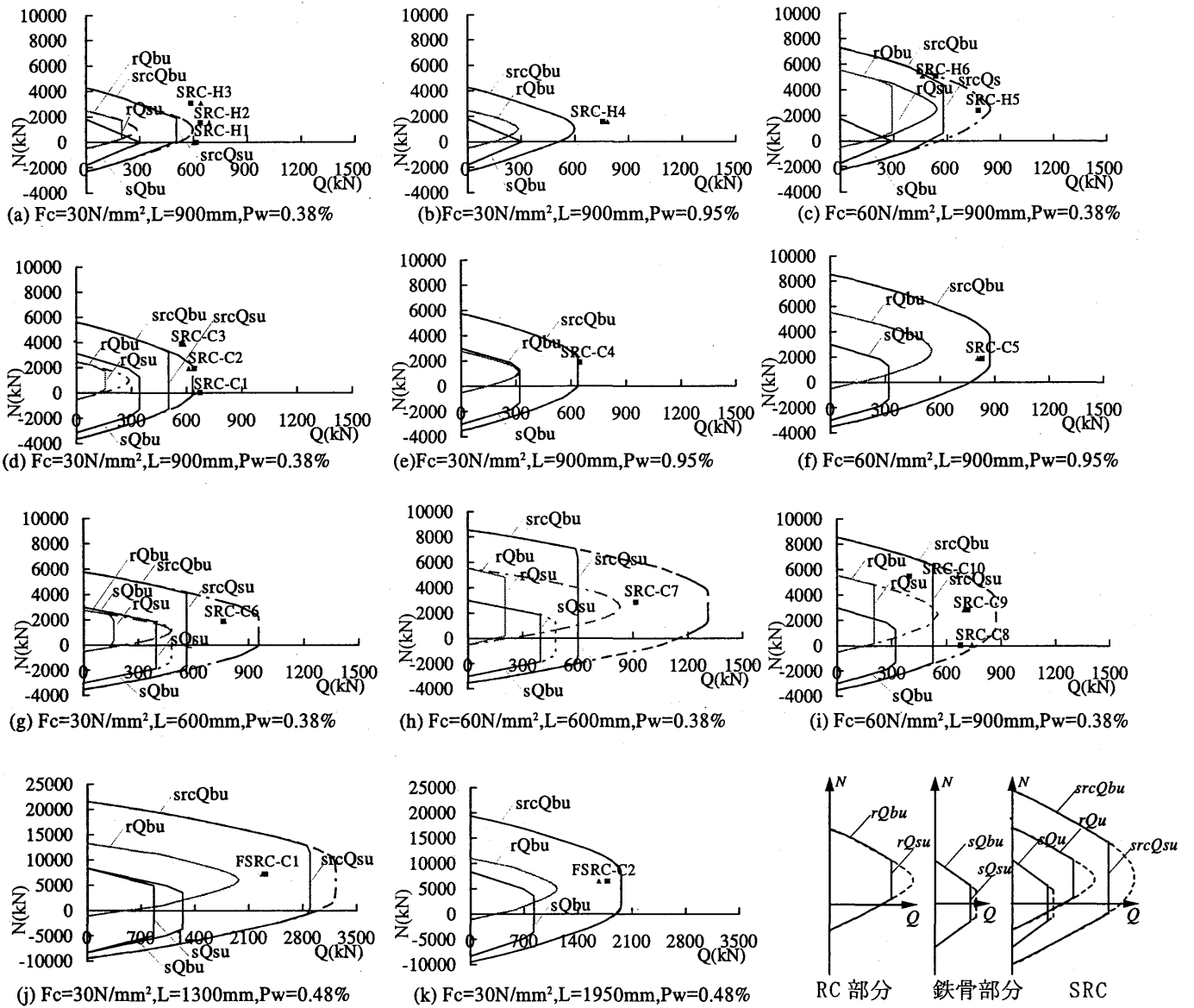
全試験体で高強度低降伏比鋼材は、軸力による圧縮ひずみの影響で引張側では降伏ひずみ(4000 μ程度)に達していないが、圧縮側では降伏ひずみに達していることから、高強度低降伏比鋼材をSRC柱に適用するにあたり十分な性能を発揮している。

### 3.5 終局耐力に関する解析

SRC部材の終局耐力は文献4), 5)に記載されているように、RC部分、鉄骨部分のそれぞれの曲げ耐力とせん断耐力のいずれか小さい値の累加によって求められる。一般化累加強度理論を用いて得られる軸力-せん断力の関係に実験値を表記したN-Q関係を図-9に示す。また、図-9にRC部分、鉄骨部分のN-Q関係を合わせて示す。実験計画において、RC部分、鉄骨部分のそれぞれの破壊モードがせん断破壊、曲げ破壊で決まるように計画されている。実験値は転倒モーメントを考慮しているが、SRC規準による終局せん断耐力の計算値においては材料強度等の上限は考慮していない。高強度せん断補強筋を用いたSRC-C4, C5試験体では理論値に対して実験値がわずかに危険側の値を示す傾向を示した。但し、高強度補強筋の上限を考慮すると安全側の評価を示し、高強度低降伏比の鋼材と高強度コンクリートを用いた場合でも一般化累加強度理論の適用することで安全側に評価できることが明らかになった。但し、シリーズ6における実大実験においては、SRC規準の理論値よりも実験値が小さい値を示しており、この結果は既往の実験を含めて今後検討していく必要がある事を示した。

また、内蔵鉄骨の形状で比較して、内蔵鉄骨を十字形にしてもH形鉄骨内蔵の試験体と最大耐力が大きく変わらないのは、前述したように十字形鉄骨を内蔵しているためにRC部分のせん断の有効断面の減少によってせん断力の影響を受けやすいためである。

高強度低降伏比の鋼材を用いたSRC柱の実験結果と解析結果との比較の一覧を図-10に示す。ただし、図-10(b)として、比較検討のために文献3)の塑性理



■ : 実験値 (正), srcQbu:SRC 終局曲げ耐力, rQbu:RC 部分の終局曲げ耐力, sQbu: 鉄骨部分の終局曲げ耐力,  
 ▲ : 実験値 (負), srcQsu:SRC 終局せん断耐力, rQsu:RC 部分の終局せん断耐力, sQsu: 鉄骨部分の終局せん断耐力

図-10 N-Q 相関関係

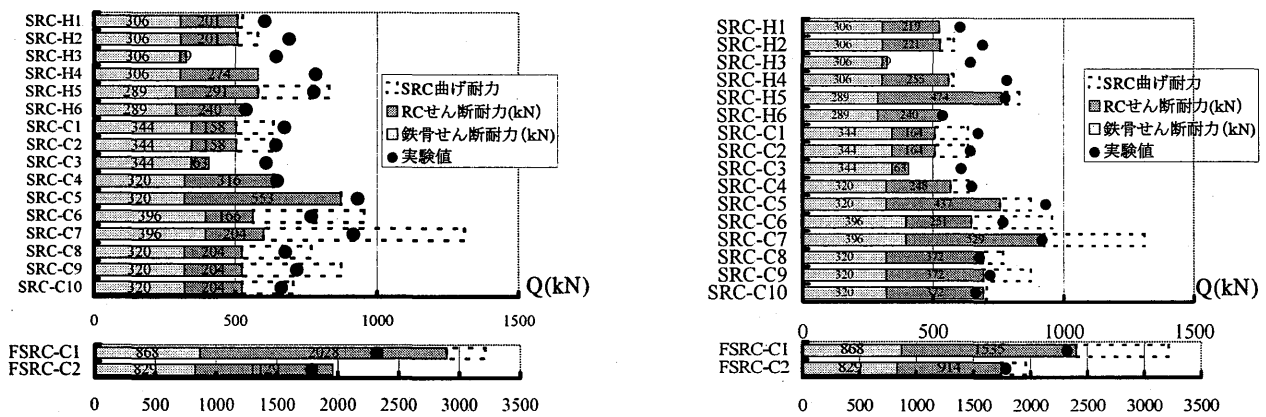


図-11 実験結果と解析値の比較

論による宮内式に基づいて計算した終局せん断耐力を示している。高強度コンクリートを用いた場合 SRC 規準のせん断耐力式による計算値は、実験値を過小評価しているが、図-10(b)の塑性理論を用いた宮内式を用いた理論値との比較を行なうと、普通強度のコンクリートを用いた場合に比べてより実験値と一致している。RC 部分のみがせん断耐力で決定する場合に比べ、鉄骨部分、RC 部分のいずれの場合もせん断耐力で決定する場合の試験体(SRC-C6, C7)が実験値を過小評価している。これは、SRC 規準でのせん断耐力式にせん断スパン比の影響が考慮されていない為であるが、この場合も宮内式を用いることによって評価できる。

### 3.6 鉄骨部分とRC部分の耐力の相関関係及び寸法効果の影響

鉄骨部分とRC部分の相互のせん断力の負担関係を考えるにあたって、鉄骨の履歴モデルをシリーズ3の実験より Ranberg-Osgood 関数の考えに従って下式によって求めた。

$$\frac{R_i}{R_y} = sQ_i / sQ_y + \frac{0.1(sQ_i / sQ_y)^3}{1.1} \quad (1)$$

ここに、 $R_i$ : 部材角  $R_y$ :  $sQ_y$  に達した時の部材角

$sQ_i$ : 鉄骨の負担せん断力

$sQ_y$ : SRC 規準式による鉄骨のせん断力

図-11に(1)式による鉄骨部分のモデルとRC部分の耐力の関係を示した包絡曲線を示す。なお、鉄骨の軸力負担はないものとしてモデル化を行なっている為、部材角が大きくなるに従い、鉄骨の負担割合

が大きくなっている。シリーズ6(実寸法試験体)とシリーズ1~5(既往の実験サイズに基づいた試験体)の比較を行なうと最大耐力時の負担関係が大きく異なっている。このことが、図-10のシリーズ6の実験値が理論値を下回っていることの原因の一つと考えられるが、既往のSRCの実験結果を実寸法のSRCに適用するに当たっては更なる検討が必要である。寸法効果はRC部分においてのみ働かず、SRC部材の寸法効果は図-12に図-11に示したRC部分の包絡線において検討した結果を示す。さらに、試験体の大きさの相違による耐力を一致させる為に、平均せん断応力度で評価した結果を図-13に示す。図-13によるとせん断スパン比のいずれに対しても大型試験体の実験結果は中型試験体に比して小さい値を示しておりSRC柱においても寸法効果が影響することが明らかになった。

### 4. まとめ

SRC柱に高強度低降伏比の鋼材と高強度コンクリートを組み合わせた場合でも、一般化累加強度理論が安全側に適用できることを明らかにした。しかしながら、実寸法試験体を含め高強度材料を組み合わせた場合、SRC規準のせん断耐力式を用いた場合に比べて、塑性理論にもとづいたせん断耐力式の方がより良い結果が得られるので、高強度材料を用いたSRC部材の終局せん断耐力式の評価においては、塑性理論にもとづいた耐力式の開発が望まれる。変形性能を増大させるには、鉄筋コンクリート部分の

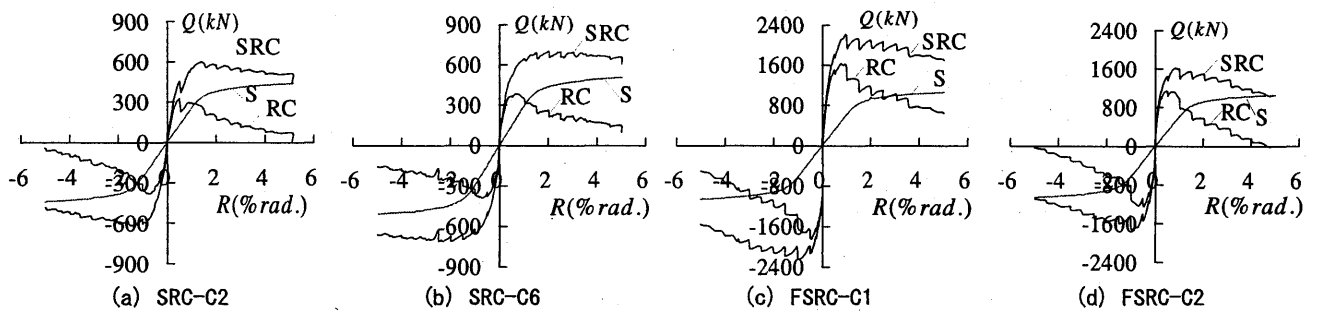


図-12 鉄骨部分とRC部分の耐力の相関関係

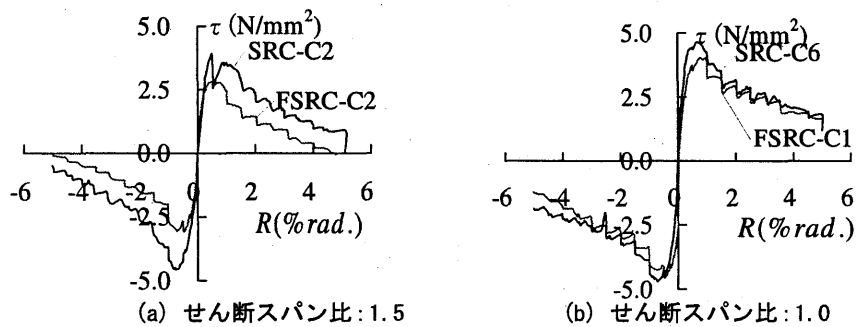


図-13 寸法効果の影響

耐力低下を小さくするのがよく、そのため帯筋によるコンクリート拘束効果を図り、コンクリートと高強度低降伏比鋼材の協同性についても更なる検討が必要である。なお、本実験において、SRC 柱のせん断耐力の評価において寸法効果の影響を考慮することが必要であることが示された。

#### 参考文献

- 1) 社団法人 鋼材倶楽部 SRC 造への高張力鋼適用に関する調査研究委員会：鋼材倶楽部高張力鋼を用いたSRC 構造の開発研究，1989 年
- 2) 穂田智佳，中村信行，南宏一：高強度低降伏比の鋼材を用いたSRC 柱の終局耐力と変形性能，コンクリート工学年次論文集，vol. 26，No. 2，pp. 1387-1392，2004. 6
- 3) 宮内靖昌：高強度材料を用いた鉄骨鉄筋コンクリート柱の力学性状に関する研究，東北大学学位請求論文，平成14 年2 月
- 4) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規程・同解説-5 章 保有水平耐力の検討，2001 改定(第4 次)pp175-180，2001 年3 月
- 5) 若林實，南宏一，谷資信，平野道勝：新建築学大系42 合成構造の設計 4 章鉄骨鉄筋コンクリートの設計，pp83-209，1986 年8 月

#### 謝辞

本研究は、穂田智佳の福山大学大学院工学研究科修士課程建築学専攻の平成16 年度の修試研究[研究題目：高強度低降伏比の鋼材を用いたSRC 柱の弾塑性性状に関する基礎的研究]として行われたものである。本実験の実施においては、平成15 年度、16 年度の南・寺井研究室卒業研究生の尽力をいただいた。また、試験体の製作にあたっては、株式会社JFE スチールより、ご援助をいただいた。ここに記して、深甚の謝意を表わします。