

# 論文 高強度コンクリートと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<sup>\*1</sup>・藤沢 清二<sup>\*2</sup>・藤沢 一善<sup>\*3</sup>・南 宏一<sup>\*4</sup>

**要旨**：従来の高強度鋼材に比べ、変形能力に優れた高強度低降伏比の鋼材と高強度コンクリートとの組み合わせによる SRC 柱の実験を行い、終局耐力と変形性能について検討を行った。高強度低降伏比鋼材を用いた SRC 柱の終局耐力は SRC 規準に準拠した一般化累加強度法によって安全率 0.95～1.53 の値を示した。しかし、コンクリートを用いる場合においては、塑性理論による終局耐力がより実験値に一致することを示した。

**キーワード**：SRC 柱, 高強度低降伏比鋼材, 一般化累加強度, 終局耐力, 弾塑性挙動

## 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 400 kN 級と 500 kN 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活用する要望が強くなってきている。

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た場合に関しては不明な点が多い。

そこで SRC 規準の終局曲げ耐力及び終局せん

断耐力の算定式を高強度コンクリートと高強度低降伏比の鋼材を用いた SRC 柱に適用する際の問題点の有無を検討し、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) にコンクリートおよび鋼材のいずれに対しても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。

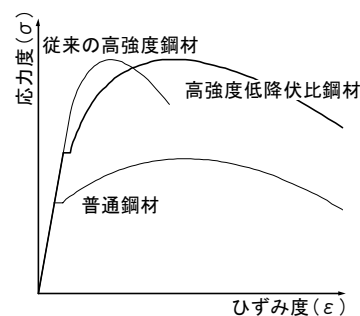


図-1 高強度低降伏比鋼材の力学特性

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

本研究では、高強度コンクリートの影響の比較を行なう為に既往で行なった実験(文献 2))に関連したシリーズ 1～3 を合わせて、表-1 に示す

\*1 株式会社 ADO 建築設計事務所 構造部 (正会員)

\*2 JFE スチール株式会社 建材センター 建材技術部 建築技術室副課長

\*3 JFE スチール株式会社 建材センター 建材技術部 建築技術室課長

\*4 福山大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

新たに7試験体(シリーズ4及び5)を計画した。なお本論では、実験計画および結果の概要に関してはシリーズ4~5のみを示す。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) 実験変数とした。各試験体の試験体形状、断面詳細を図-2に示す。また、従来の実験では同一のH形鋼を組

み合わせた十字形鋼を用いる事が多いが、本実験では強軸と弱軸に厚みの異なるフランジを用いることによってコンクリートの拘束効果の違いを考察する。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。

表-1 試験体諸元

	試験体名	断面形	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	900	1.5	30	0	200×80×9×16	-	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	200×80×9×9	-	D6@50mm (SD295)	-
	SRC-C2					0.3				
	SRC-C3					0.6				
シリーズ3	SH-1	H形(鉄骨のみ)	-	-	-	0	-	-	-	-
シリーズ4	SRC-H5	H形強軸	900	1.5	60	0.3	-	-	D6@50mm (SD295)	12-D13 (SD295)
シリーズ5	SRC-C4	H十字形	900	1.5	30	0.3	200×80×9×9	-	D10@50mm (SD785)	
	SRC-C5				60					
	SRC-C6		600	1.0	30				D6@50mm (SD295)	
	SRC-C7		900	1.5	60				0	
	SRC-C8					0.3				
	SRC-C9									

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

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
30	圧縮強度	26.5
	割裂強度	4.2
60	圧縮強度	59.5
	割裂強度	4.27

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
強軸ウエブ、弱軸鉄骨	455	580	21.9	0.78
主筋D13(SD295A)	325	467	13.7	0.7
帯筋D6(SD295A)	331	482	13.5	0.69
帯筋D10(RB785)	922	1106	6.0	0.83

ただし、降伏ひずみは、以下とする。

鉄骨：2000 $\mu$ 、鉄筋(SD295A)：2000 $\mu$ 、鉄筋(RB785)：9000 $\mu$

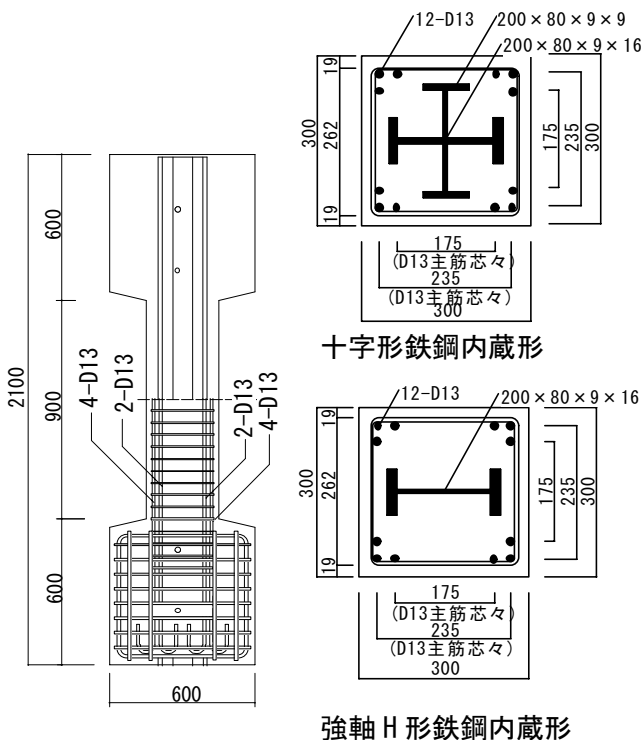


図-2 試験体寸法・配筋図(単位 mm)

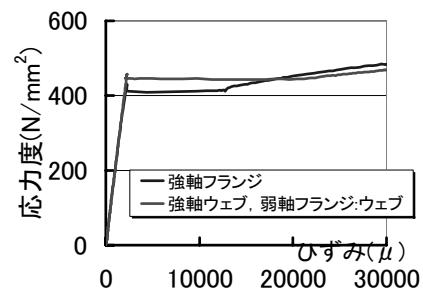


図-3 鉄骨の材料特性

## 2.2 荷重方法

実験装置は図-4 に示す建研式荷重装置を使い、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。荷重は 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。

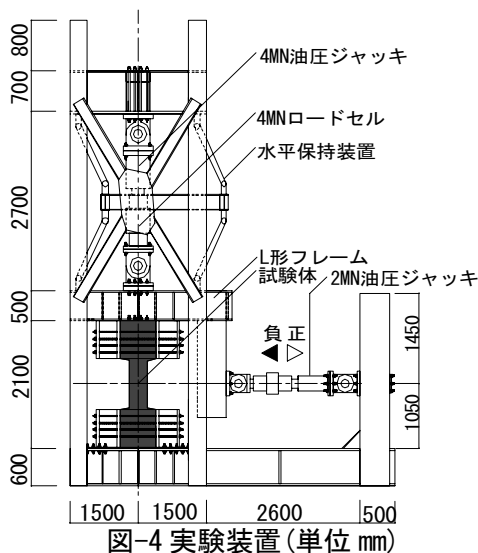


図-4 実験装置(単位 mm)

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 破壊性状

最大耐力時の破壊状況を図-5 に示す。実線が正側荷重時に生じたひび割れを示し、点線が負側荷重時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。

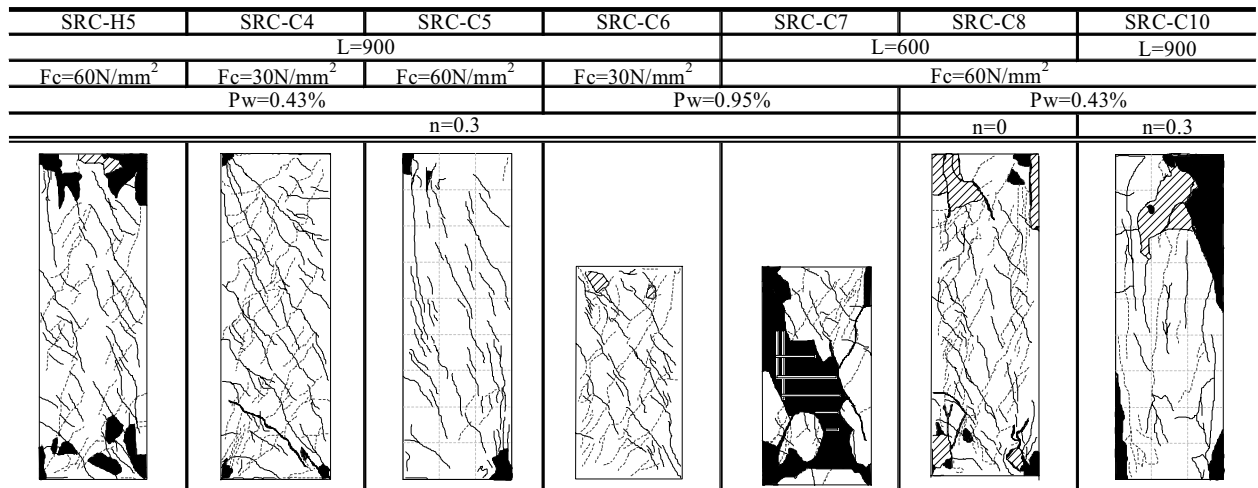
ひび割れの発生および破壊状況としては、(1) 補強筋比の違いによる初期せん断ひび割れの違いは見られず、補強筋比の大きな SRC-C4, C5 では柱頭、柱脚部の曲げ破壊がより卓越した。

(2) SRC-C6, C7 の短柱では斜めのせん断ひび割れが卓越し、補強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。

### 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、



註 L: 柱長さ,  $F_c$ : コンクリート強度, Pw: 帯筋比, n: 軸力比

図-5 最大耐力時の破壊状況

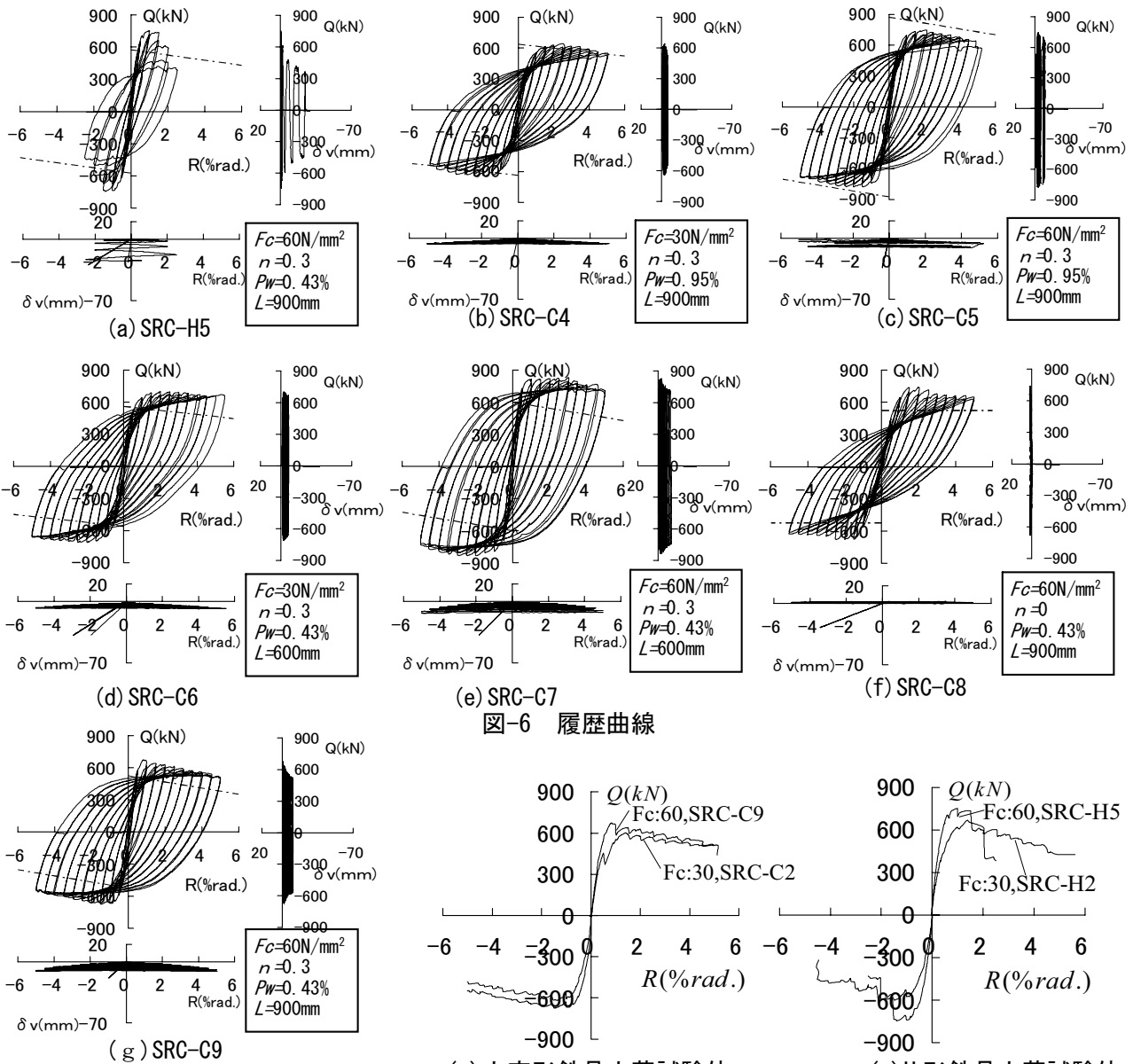
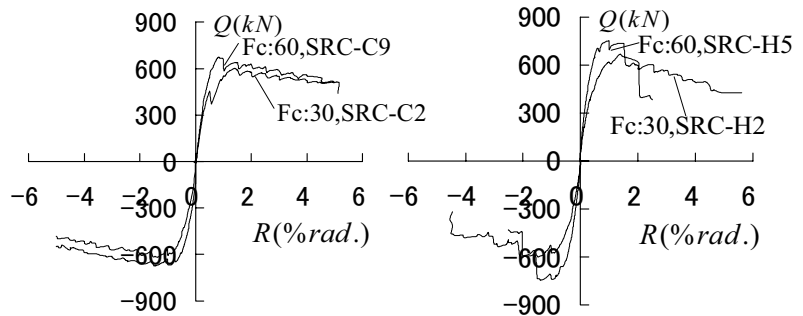


図-6 履歴曲線



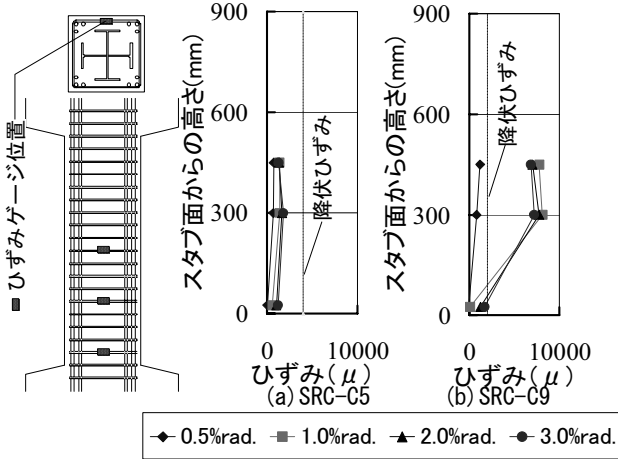
(a) 十字形鉄骨内蔵試験体 (a) H形鉄骨内蔵試験体  
図-7 コンクリート強度の違いによる包絡曲線比較

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。全試験体を通して最大耐力以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検討したが図-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試験体(SRC-C5)の場合、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のせん断抵抗力は増大するが、十字形鉄骨を用いた場合には鉄骨外周部の鉄筋コンクリート部分の終局せん断耐力は低下し、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。



注：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

### 3.4 SRC 柱における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、軸力比 0.3 とし、コンクリート強度と補強筋比を変数として選んでいるが、さらに、破壊モードの違いによってひずみの状況を示すためにせん断破壊と曲げ破壊に分けて考察する。なお、点線は主筋の、実線は鉄骨のひずみ分布をそれぞれ示している。

せん断破壊および曲げ破壊のいずれに対しても、引張側のひずみは降伏ひずみ程度を示しているが、圧縮側のひずみは、引張側に比べて大きい。せん断破壊を生ずる場合に、曲げ破壊

に比べて小さくなる傾向が見られる。

### 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-せん断力の関係を図-10 に示す。なお、図-10 に RC 部分、鉄骨部分の N-Q 関係を合わせて示す。また、同図に実験値をあわせて示している。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。その為、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。

シリーズ 1~5 までの試験体のの実験結果と解析結果との比較を図-11 に示す。ただし、図-11 (b)として、比較検討のために文献 3)の塑性理論による宮内式に基いて計算され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-11 (b)の塑性理論を用いた宮内式を用いた理論値に対しては、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する結果を示している。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破壊で決定する場合の試験体(SRC-C6,C7)では実験値を過小評価している。これは、SRC 規準

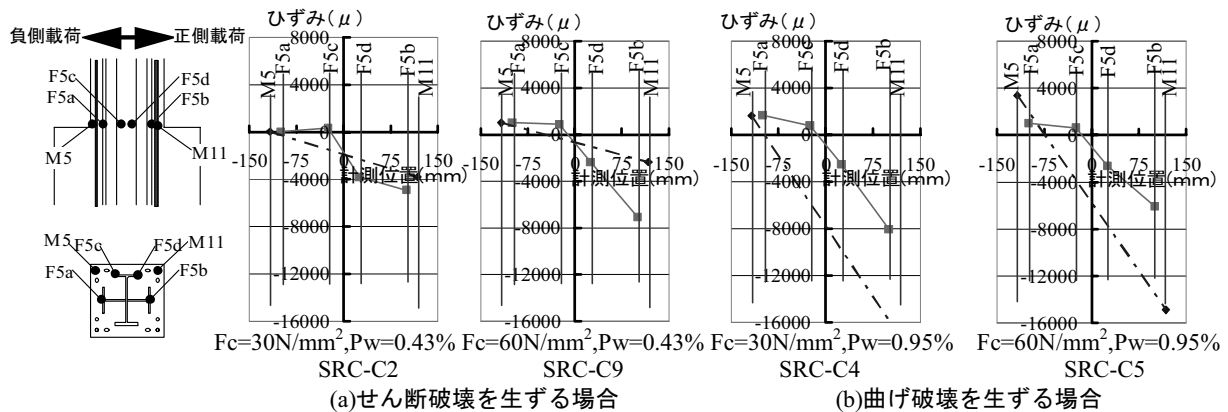


図-9 主筋、鉄骨ひずみ関係(変形部材角 R=1.5%rad. 時)

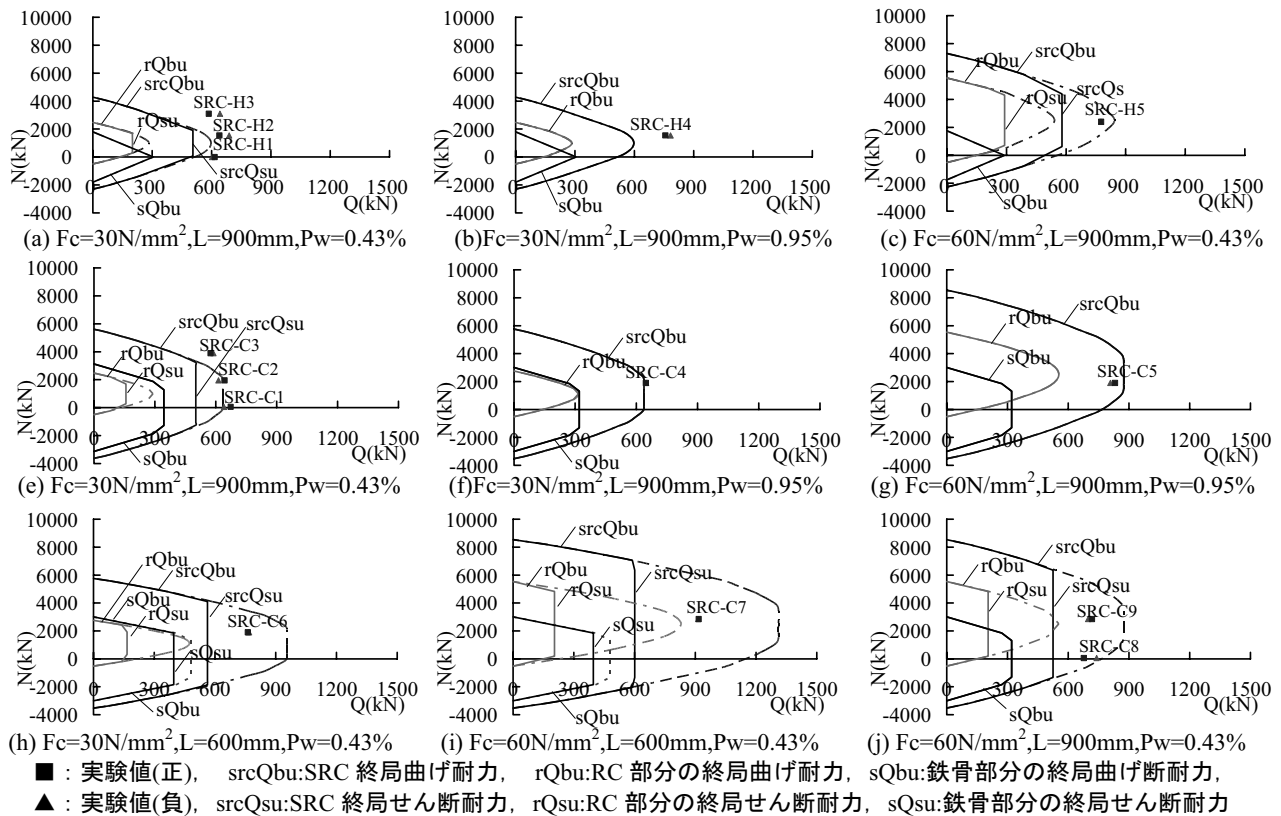


図-10 N-Q 相関関係

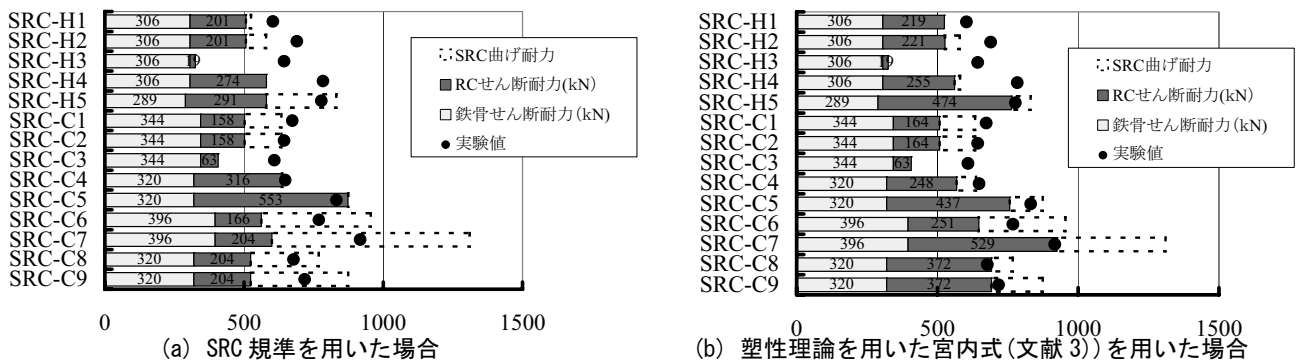


図-11 実験結果と解析値の比較

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、この場合も宮内式によって精度良く評価できることが示される。

#### 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、高強度材料を組み合わせた場合、SRC標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。したがって、高強度材料を用いたSRC部材の実用的な終局せん断

耐力の評価においては、SRC標準式にかわって塑性理論にもとづいた実用的な終局せん断耐力式の開発が望まれる。

#### 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