

論文 単純圧縮力を受けるSRC柱部材の最大耐力および変形性能に及ぼす内蔵鉄骨のコンクリート拘束効果

土井 希祐^{*1}・尹 航^{*2}

要旨：日本建築学会SRC構造計算規準¹⁾におけるSRC柱部材の強度算定式では、鉄骨の存在による充填度の低下、圧縮歪限界等を考慮した低減係数を乗じたコンクリート圧縮強度が採用されている。十字形鉄骨等の充腹形鉄骨を内蔵したSRC柱部材では、内蔵鉄骨によるコンクリート拘束効果により、最大耐力以降においても高い強度と変形性能を保持することが明らかにされており、その効果をコンクリート強度低減係数の評価に考慮することが望まれている。本研究は、十字形鉄骨およびH形鋼を用いたSRC柱試験体の軸方向圧縮実験を行い、その強度と変形性能に及ぼす鉄骨によるコンクリート拘束効果の影響について検討した。

キーワード：SRC柱、コンクリート拘束効果、鉄骨断面形状、圧縮強度、変形性能

1. はじめに

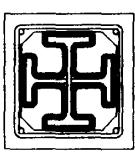
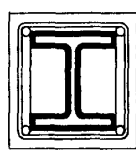
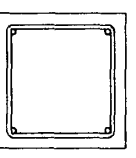
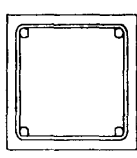
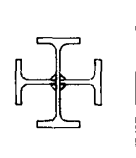
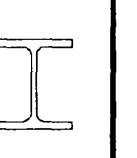
現行の日本建築学会鉄骨鉄筋コンクリート（以下SRCと表記）構造計算規準¹⁾において、SRC柱部材の強度算定式は、鉄骨（以下Sと表記）部と鉄筋コンクリート（以下RCと表記）部の強度を加算した累加強度式が用いられている。累加強度式において、鉄骨には、緩和された幅厚比制限の下で、座屈を無視した材料強度が採用されている。また、コンクリートには、鉄骨の存在による充填度の低下、圧縮歪限界等を考慮した低減係数を乗じた圧縮強度が採用されている。このうち、コンクリート圧縮強度の低減は、若林らによる山形鋼を鉄骨主材としたSRC柱に関する研究²⁾に基づいているが、十字形鉄骨等の充腹形鉄骨を内蔵したSRC柱部材について十分な検証が行われたとは言い難い。また、中村らの研究³⁾において、十字形鉄骨を内蔵するSRC部材は、内蔵鉄骨による

コンクリートの拘束効果により、H形鋼を内蔵する場合より変形性能が大きいことが明らかにされており、内蔵鉄骨の影響を性能評価に取り入れることが望まれている。しかし、最大耐力以後の挙動に及ぼす鉄骨によるコンクリートの拘束効果については十分明らかにされているとは言い難い。本研究は、文献⁴⁾に引き続いてSRC柱試験体の軸方向圧縮実験を行い、累加強度式に着目し、その強度と変形性能に及ぼす鉄骨によるコンクリート拘束効果の影響を、鉄骨断面形状の違いについて検討することを目的としている。

2. 実験計画

表-1に試験体断面一覧を示す。試験体は第1シリーズおよび第2シリーズからなり、各シリーズについて十字形鉄骨およびH形鋼を内蔵したSRC試験体を各々1体ず

表-1 試験体断面

試験体名	SRC-C-1	SRC-H-1	RC-C-1	RC-H-1	S-C-1	S-H-1	備考
鉄骨断面・配筋	2-H100×50×5×7 4-D6 Hoop-φ4.5@50	H100×90×6×8 4-D10 Hoop-φ4.5@50	4-D6 Hoop-φ4.5@50	4-D10 Hoop-φ4.5@50	2-H100×50×5×7	H100×90×6×8	第1シリーズ
鋼材断面積	2458mm ²	2315mm ²	113mm ²	285mm ²	2345mm ²	2030mm ²	
試験体名	SRC-C-2	SRC-H-2	RC-C-2	RC-H-2	S-C-2	S-H-2	備考
鉄骨断面・配筋	2-H100×50×4.5×4.5 4-D6 Hoop-φ4.5@50	H100×90×4.5×4.5 4-D10 Hoop-φ4.5@50	4-D6 Hoop-φ4.5@50	4-D10 Hoop-φ4.5@50	2-H100×50×4.5×4.5	H100×90×4.5×4.5	第2シリーズ
鋼材断面積	1812mm ²	1504mm ²	113mm ²	285mm ²	1699mm ²	1219mm ²	
断面形状							
	SRC造	SRC造	RC造	RC造	S造	S造	

*1 新潟大学教授 工学部建設学科 博(工) (正会員)

*2 新潟大学大学院 自然科学研究科 修(工)

つ製作した、また、同時に累加強度式の検討のための比較試験体として、各々のSRC試験体に対応するRC試験体、およびS試験体を各1体ずつ製作した。試験体SRC-C-1の概形、配筋等を図-1に示す。試験体SRC-H-1は主筋径が異なる他はSRC-C-1と同一の配筋である。また、試験体SRC-C-1とRC-C-1、および試験体SRC-H-1とRC-H-1の配筋は各々同一とした。帯筋は溶接閉鎖型(重ね長さ36mm)とした。第1シリーズと第2シリーズでは鉄骨の板厚が異なるが、鉄骨断面成、配筋等の条件は同一である。鉄骨はSS400、主筋はSD295、帯筋はSR235相当品、コンクリートは $F_c=21\text{N/mm}^2$ の普通コンクリートとした。使用材料の力学的特性を表-2および表-3に示す。コンクリート打設は、木製型枠を水平に置き、横打ちとした。加力は2,000kNアムスラー試験機による単調圧縮载荷とした。図-2に加力装置を示す。加力方法は下端固定、上端球座支持による軸方向加力とした。試験体端部が破壊しないように鋼板で拘束し側圧を与えた。測定は、荷重にはロードセルを、試験体の軸方向の変位(歪)には変位計(検長300mm)を、鉄骨・鉄筋・帯筋の歪には歪ゲージを各々用いた。

3. 実験結果

3.1 最大耐力および破壊性状

実験により得られた各試験体の最大耐力等の実験値を終局耐力計算値¹⁾と共に表-4に示す。表-5に、SRC試験体の最大耐力の実験値(N_e)、およびコンクリート強度を低減しない場合の単純累加最大耐力(N_{c1})、日本建築学会SRC構造計算規準¹⁾によるコンクリート強度低減係数 c_{ru} を考慮した累加最大耐力(N_{c2})、鉄骨によるコンクリートの断面欠損を考慮した累加最大耐力(N_{c3})を示す。また、耐力式を式(1)~(3)に各々示す。

$$N_{c1} = sA_s \sigma_y + mA_m \sigma_y + b \cdot D \cdot c \sigma_B \quad (1)$$

$$N_{c2} = sA_s \sigma_y + mA_m \sigma_y + b \cdot D \cdot c r_u \cdot c \sigma_B \quad (2)$$

$$N_{c3} = sA_s \sigma_y + mA_m \sigma_y + (b \cdot D - sA) \cdot c \sigma_B \quad (3)$$

$$c r_u = 0.85 - 2.5 p_c \quad (4)$$

ここに、 sA : 鉄骨断面積、 mA : 主筋断面積、 b : コンクリート断面幅、 D : コンクリート断面高、 $s\sigma_y$: 鉄骨降伏点、 $m\sigma_y$: 主筋降伏点、 $c\sigma_B$: コンクリート圧縮強度、 p_c : 圧縮側鉄骨断面積比である。

鉄骨板厚の厚い第1シリーズについて見ると、 N_{c1} は N_e に対してやや危険側となっているが、 N_{c2} は安全側に、 N_{c3} は N_e にほぼ等しくなっている。一方、鋼板板厚の薄い第2シリーズでは、全て安全側となっており、 N_{c2} は N_e を大きく上回っている。このことから、単純圧縮力を受

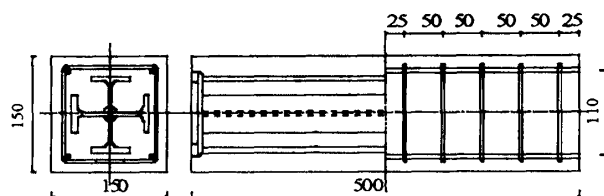


図-1 試験体概形 (SRC-C-1)

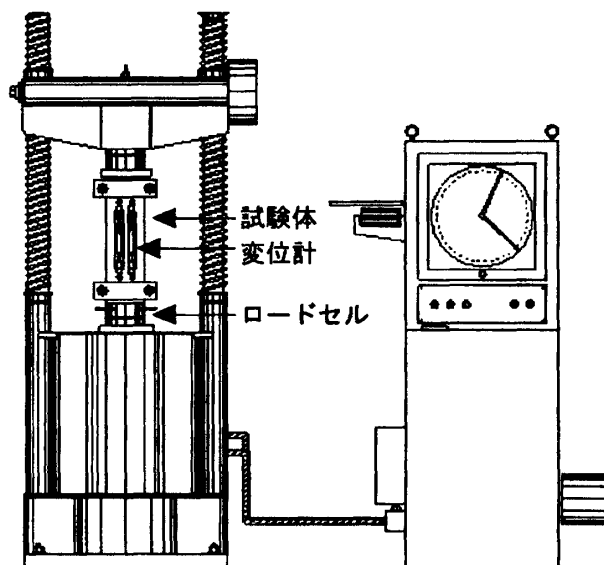


図-2 加力装置

表-2 鋼材の力学的特性

鋼種	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	ヤング係数 ($\times 10^5$ MPa)	備考
十字形鉄骨	フランジ	336	432	第1シリーズ
	ウェブ	352	444	
	フランジ	264	430	
	ウェブ	274	440	
主筋	D10	365	515	第2シリーズ
	D6	332	499	
帯筋	$\Phi 4$	523	558	
	PL-4.5	274	427	
主筋	D10	352	511	第2シリーズ
	D6	320	476	
帯筋	$\Phi 4$	472	520	

表-3 コンクリートの力学的特性

圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 ($\times 10^4$ MPa)	材齢 (日)	備考
22.6	2.01	32	第1シリーズ
26.8	2.37	30	第2シリーズ

ける場合、SRC計算規準¹⁾による累加強度式は充腹形SRC柱の最大耐力を安全側に比較的制度良く評価しているといえる。また、鉄骨によるコンクリートの断面欠損の影響を考慮すれば、コンクリート強度低減を無視しても概ね充腹形SRC圧縮柱の最大耐力を比較的制度良く評価することができる。

第1シリーズの試験体SRC-C-1および試験体SRC-H-1の最終状態を写真-1に示す。この写真から試験体は2

表-4 実験結果

試験体			SRC-C-1	SRC-H-1	RC-C-1	RC-H-1	S-C-1	S-H-1	SRC-C-2	SRC-H-2	RC-C-2	RC-H-2	S-C-2	S-H-2	
終局耐力計算値			kN	1,104	1,105	579	648	525	457	1,106	920	643	703	379	317
最大荷重	荷重	kN	1,218	1,050	527	603	822	690	1,143	1,034	472	699	666	407	
	軸歪	μ	3,792	2,813	4,008	3,075	70,218	40,778	2,512	1,817	3,453	2,357	29,008	6,885	
ひび割れ荷重	荷重	kN	804	851	276	326			1,020	840	448	420			
	軸歪	μ	1,010	1,157	633	712			2,227	1,100	2,517	658			
かぶり剥落	荷重	kN	1,218	995	527	597			-	-	-	-			
	軸歪	μ	3,792	4,757	4,008	3,475			-	-	-	-			
降伏	鉄骨	荷重	kN	1,041	851			547	457	788	730			417	373
		軸歪	μ	1,813	1,157			1,629	1,270	1,206	1,002			1,220	1,693
	鉄筋	荷重	kN	999	992	437	510			911	1,016	361	696		
		軸歪	μ	1,610	1,822	1,501	2,200			1,610	1,610	1,412	2,629		
座屈	鉄骨	荷重	kN	1,174	935			594	495	-	-			580	407
		軸歪	μ	69,715	66,063			1,813	2,440	-	-			3,218	6,885
	鉄筋	荷重	kN	1,086	976	318	284			-	-	-	-		
		軸歪	μ	31,235	30,153	18,512	22,578			-	-	-	-		
帯筋降伏	荷重	kN	1,131	979	418	513			-	-	-	-			
	軸歪	μ	7,148	24,147	9,632	6,395			-	-	-	-			
帯筋破断	荷重	kN	1,090	984	224	235			-	-	-	-			
	軸歪	μ	34,108	43,217	23,362	29,115			-	-	-	-			

表-5 SRC試験体最大耐力

		実験値	計算値					
		Ne(kN)	Ne1(kN)	Ne1/Ne	Ne2(kN)	Ne2/Ne	Ne3(kN)	Ne3/Ne
第1シリーズ	SRC-C-1	1,218	1,271	0.96	1,176	1.04	1,220	1.00
	SRC-H-1	1,050	1,104	0.95	989	1.06	1,056	0.99
第2シリーズ	SRC-C-2	1,143	1,090	1.05	986	1.16	1,044	1.09
	SRC-H-2	1,034	1,021	1.01	905	1.14	982	1.05

体とも主筋座屈、帯筋破断の後、最終的に鉄骨が座屈して破壊していることが分かる。なお、第2シリーズの試験体は、最大耐力に達した後、偏心圧縮状態となり、第1シリーズの試験体の様に帯筋破断、および明瞭な鉄骨の座屈が生じることなく実験を終了している。

3.2 軸力-軸歪関係

図-3に十字形鉄骨を内蔵したSRC試験体、図-4にH形鋼を内蔵したSRC試験体の軸力-軸歪関係を各々示す。図の縦軸は軸方向圧縮力N (kN)、横軸は変位計により測定した検長300mm区間の軸方向平均圧縮歪 ϵ (μ)である。図-3(a)、(c)、および図-4(a)、(c)には、各SRC試験体に対応する、S試験体およびRC試験体(表-1参照)の軸力-軸歪関係、ならびにS試験体とRC試験体の軸力-軸歪関係を累加した結果を併せて示した。なお、S試験体とRC試験体の累加において、RC試験体の軸力は、SRC試験体における鉄骨によるコンクリート断面の欠損を考慮した換算軸力(N_{RC}')を用いた。なお、 N_{RC}' は式(5)により求めた。

$$N_{RC}' = N_{RC} \cdot (1 - A/A_0) \quad (5)$$

ここに、 N_{RC}' : 鉄骨によるコンクリート断面欠損を考

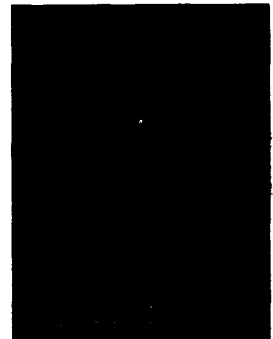


写真-1 試験体最終状態

慮したRC試験体の換算軸力、 N_{RC} : RC試験体の軸力の実験値、 A : RC試験体のコンクリート断面積、 A_0 : SRC試験体における鉄骨の断面積である。

図-3(a)、および図-4(a)より、軸歪 $\epsilon < 10 \times 10^3 \mu$ において、各SRC試験体の強度は、対応するS試験体とRC試験体の累加強度($S+RC'$)とほぼ一致している。しかし、さらに、 ϵ が増加すると、SRC試験体の強度が累加強度($S+RC'$)を上回るようになる。このことから、鉄骨によるコンクリートの拘束効果は、大変形域において顕著になるといえる。

図-3(b)、および図-4(b)より、主筋座屈、および帯筋破断によりRC試験体の強度が大きく低下する $\epsilon >$

$30 \times 10^3 \mu$ の大変形域においても、SRC試験体はS試験体の強度を大きく上回っていることから、鉄骨フランジによるコンクリートの拘束効果により、コアコンクリートの靱性が保持されているといえる。

図-3(c)、および図-4(c)より、内蔵鉄骨の板厚が薄い第2シリーズのSRC試験体では、第1シリーズのSRC試験体において見られた、被りコンクリートの剥落後の大変形域での強度の回復が認められないが、これは最大耐力に達した後、比較的早期に偏心圧縮状態となり、試験装置の制約から実験の継続ができなかったためである。

図-5は試験体SRC-C-1および試験体SRC-H-1の軸力-軸歪関係を、軸力を各々の試験体の最大耐力で基準化して比較したものである。最大耐力後の挙動を見ると、両試験体とも一旦強度が低下するものの再び緩やかに強度が上昇する。しかし、試験体SRC-C-1は $\varepsilon = 100 \times 10^3 \mu$ 近くまで強度上昇が続くのに対して、試験体SRC-H-1は $\varepsilon = 40 \times 10^3 \mu$ 辺りで強度低下が始まっている。このことから、H形鋼を内蔵する試験体よりも十字形鉄骨を内蔵する試験体の方が軸力保持性能は大きいといえる。これは、最大耐力以後の大変形域においては、H形鋼の場合と比較して、十字形鉄骨の方が鉄骨フランジによるコンクリートの拘束効果が大きいと考えられる。

以上のことから、高層建物の下層階柱など、大地震時に極めて大きな圧縮軸力を受ける部材を、充腹形鉄骨を

内蔵するSRC部材とすることにより、大きな余裕度を持たせた設計が可能となると考えられる。

3.3 拘束コンクリートモデルによる検討

単純圧縮力を受けるSRC柱部材の強度と変形性能を検討するため、大変形域までデータが得られた第1シリーズのSRC試験体について、各構成材料の応力度-歪度関係を以下のように仮定し、軸歪 $\varepsilon < 60 \times 10^3 \mu$ における軸力-軸歪関係の評価を試みた。

- (1) 鉄骨の応力度-歪度関係モデルは、歪硬化域を含めた引張試験結果をそのまま使用した。
- (2) 主筋の応力度-歪度モデルは、座屈前まで歪硬化域を含めた引張試験結果をそのまま用い、座屈発生後は強度が0となるものとした。なお、座屈歪はSRC試験体の実験から得られた値をそのまま使用した。
- (3) コンクリートの応力度-歪度関係モデルは文献⁹⁾に従い、帯筋で囲まれたコアコンクリートに拘束効果を考慮した。横拘材としては帯筋のみを考慮している。また、帯筋破断発生後は、破断した帯筋の効果を無視した。応力度-歪度関係モデル（以下、New RCモデルと表記）を図-6に示す。

上記(1)~(3)の仮定に基づき、同一歪における鉄骨、主筋、およびコンクリートの断面耐力を累加し、SRC試験体の軸力-軸歪関係を求めた。なお、軸力算定におい

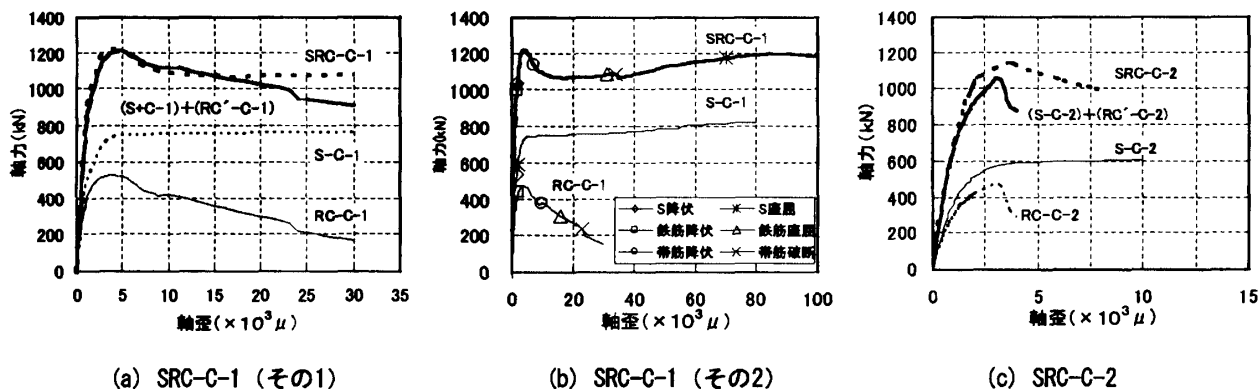


図-3 軸力-軸歪関係（十字形鉄骨）

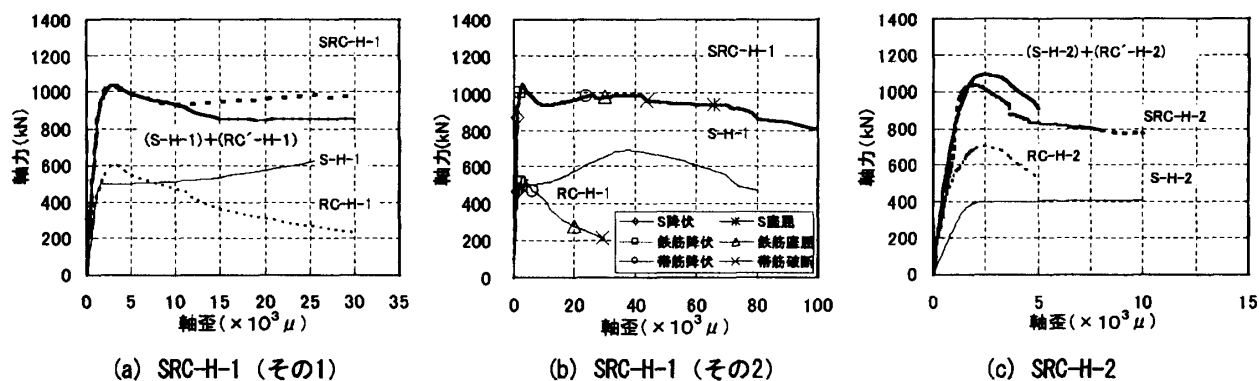


図-4 軸力-軸歪関係（H形鋼）

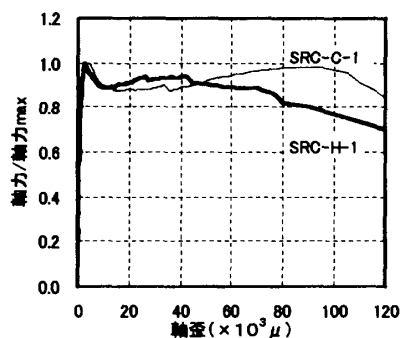


図-5 基準化軸力-軸歪関係

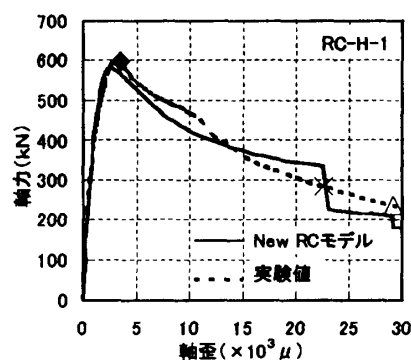
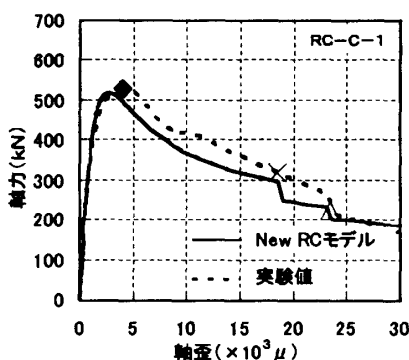


図-7 軸力-軸歪関係 (New RCモデルとの比較: RC試験体)

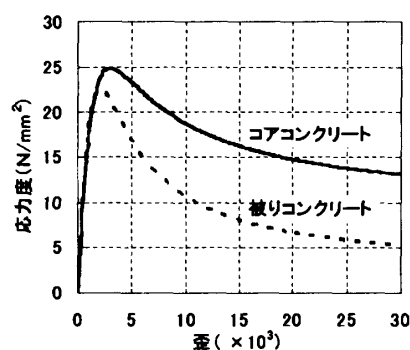


図-6 コンクリート応力度-歪度関係モデル (New RCモデル)

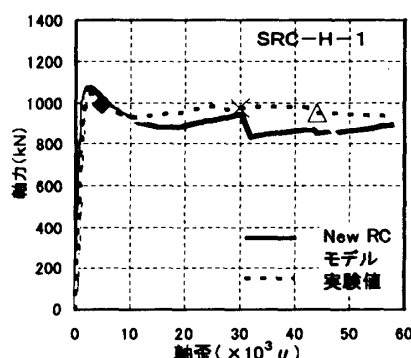
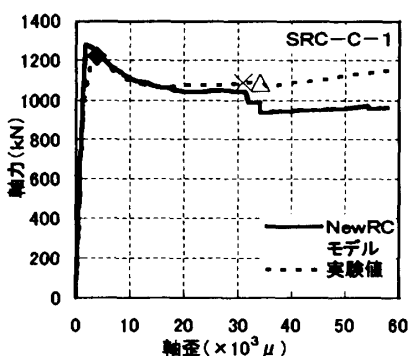


図-8 軸力-軸歪関係 (New RCモデルとの比較: SRC試験体)

注) 図-7, 図-8において

◆: コンクリートかぶり剥落開始, ×: 主筋座屈, △: 帯筋破断

て、鉄骨および主筋によるコンクリートの断面欠損を考慮した。

図-7にRC試験体のNew RCモデルによる計算値と実験値の比較を示す。また、図-8にSRC試験体のNew RCモデルによる計算値と実験値の比較を示す。図-7および図-8から、 $\epsilon=30 \times 10^3 \mu$ までは、SRC、RC両試験体とも計算値と実験値はほぼ一致している。また、RC試験体は、 $\epsilon=30 \times 10^3 \mu$ において最大耐力の約30~40%まで耐力低下している。しかし、SRC試験体においては、主筋座屈、帯筋破断が生じる $\epsilon > 30 \times 10^3 \mu$ においても耐力低下が殆ど見られず、New RCモデルによる計算値が実験結果を下回っている。また、図-3および図-4に見られるように、 $\epsilon > 30 \times 10^3 \mu$ の大変形域におけるSRC試験体とS試験体の耐力差は最終状態に至るまでほぼ一定である。以上のことから、SRC試験体では、主筋座屈、帯筋破断を生じる大変形域における軸力保持性能に、鉄骨のコンクリートの拘束効果によるコアコンクリートの靱性保持が寄与していると考えられる。

4. 結論

十字形鉄骨およびH形鋼を用いたSRC試験体、および比較のためのSおよびRC試験体の軸方向単調圧縮試験を行い、以下の知見を得た。

- (1) SRC柱試験体の最大耐力は、日本建築学会SRC構造計算規準に示されている、S部分の強度とコンクリート強度低減係数を考慮したRC部分の強度の累加強度により安全側に比較的精度良く評価できる。
- (2) 最大耐力を越え、主筋座屈、帯筋破断等が発生するまでは、鉄骨によるコンクリートの拘束効果は顕著ではない。
- (3) 主筋座屈、帯筋破断発生後の大変形域において、鉄骨によるコンクリートの拘束効果が明瞭となる。
- (4) H形鋼を内蔵する試験体よりも十字形鉄骨を内蔵する試験体の方がコンクリート拘束効果が高く、軸力保持性能が大きい。

今後さらに、偏心圧縮を受ける場合も含めて、鉄骨の幅厚比、耐力分担率、およびコンクリートを含めた材料強度の影響等について検討する必要がある。

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、2001年
- 2) 坪井善勝、若林実：鉄骨鉄筋コンクリートに関する実験的研究(その1)、偏心荷重を受ける柱の実験、日本建築学会論文集、第48号、pp40-49、1954.3
- 3) 中村信行、形山忠輝、穂田智佳、堺純一、南宏一：

- 高強度低降伏比の鋼材を用いたSRC 柱の弾塑性挙動
に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗
概集, pp1047-1052, 2003.9
- 4) 尹航, 土井希祐: 軸方向力を受けるSRC部材の強度
と変形性能, 鋼構造年次論文報告集, 第14巻, pp.833
-838, 2006.11
- 5) 国土開発技術センター: 平成4年度NewRC研究開発
概要報告書, C-7)コンファインドコンクリートの力
学特性に関する資料のとりまとめ, 1992