

論文 単純圧縮力を受ける SRC 柱部材の強度と変形性能に関する研究

尹 航^{*1}・立崎 稔仁^{*2}・土井 希祐^{*3}

要旨: SRC 柱部材の構造性能を適切に評価する上で、内蔵鉄骨によるコンクリート拘束効果を考慮することは重要である。しかし、鉄骨によるコンクリート拘束効果の適切な評価法は明確にされていない。そこで、本研究においては、鉄骨によるコンクリート拘束効果を、鉄骨ウェブの寄与率 α を指標として評価することにより、単純圧縮力を受ける SRC 柱部材の軸力-軸歪関係をモデル化し、その最大耐力、初期剛性、および変形性能について検討した。最大耐力については計算値と実験値がほぼ一致した。初期剛性については計算値が実験値を下回った。変形性能については、その指標である限界歪の計算値が実験値と概ね一致した。

キーワード: SRC, 圧縮材, コンクリート拘束効果, 最大耐力, 初期剛性, 変形性能, 限界歪

1. はじめに

SRC 柱部材の構造性能を適切に評価する上で、内蔵鉄骨によるコンクリート拘束効果を考慮することは重要である¹⁾。しかし、鉄骨によるコンクリート拘束効果の適切な評価法は明確にされていない。そこで本研究では、コンクリートの拘束効果を考慮した単純圧縮力を受ける SRC 柱部材の軸力-軸歪関係モデルを提案し、その最大耐力、初期剛性、および変形性能について検討した。

$$\alpha = \frac{wT}{wT_y} \quad (1)$$

ただし、

$$wT = \frac{8 \cdot M_p}{b_f}$$

$$wT_y = t_w \cdot \sigma_y$$

$$M_p = \frac{t_f^2 \cdot \sigma_y}{4}$$

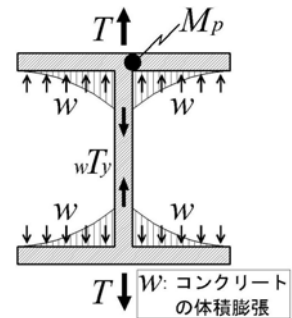


図-1 ウェブ寄与率

2. 検討対象試験体

本研究では、表-1 に示す十字形鉄骨または H 形鋼を内蔵した SRC 短柱試験体計 28 体を研究対象として用いた¹⁾⁻⁴⁾。いずれも中心圧縮試験を行ったものである。各試験体の使用材料の力学的特性を表-2 に示す。

ここに、 b_f : フランジ断面幅、

t_w : ウェブ厚、 t_f : フランジ厚、 σ_y : 鉄骨降伏応力度。ただし、 wT 、 wT_y 、 M_p は材軸方向の単位幅あたりの値である。

3. 検討方法

鉄骨フランジ部分の全塑性モーメント M_p に着目し、コンクリートの拘束効果に影響を及ぼす鉄骨ウェブ断面の寄与率 α を次式により算定する (図-1 参照)。

(1)式による寄与率 α に応じて算定されるウェブ断面の一部が鉄骨拘束領域 (図-2 参照) において横拘束材として働くとは定し、NewRC 式⁵⁾における横補強筋体

表-1 試験体諸元

	試験体名	内蔵鉄骨寸法	横補強筋
第1 ¹⁾ シリーズ	SRC-C-1	2-H100×50×5×7	φ4@50
	SRC-H-1	H100×90×6×8	φ4@50
第2 ¹⁾ シリーズ	SRC-C-2	2-H100×50×4.5×4.5	φ4@50
	SRC-H-2	H100×90×4.5×4.5	φ4@50
文献 ²⁾	C1-50,100	2-H140×50×4.5×6	D6@50,100
	C2-50,100	2-H140×50×2.3×6	D6@50,100
	C3-50,100	2-H140×50×4.5×2.3	D6@50,100
	M1-50	H140×50×4.5×6	D6@50
文献 ³⁾	18SRC(計3体)	H216×216×6×6	φ6@150
	24SRC(計3体)	H288×288×6×6	φ6@150
文献 ⁴⁾	#40-#42(計3体)	H200×150×4.5×6	D6@50
	#45-#49(計5体)	H200×150×6×9	D6@35~100
	#52-#54(計3体)	H200×150×9×12	D6@50

表-2 鋼材およびコンクリートの力学的性質

鋼種		σ_y	E_s	σ_B	E_c
第1 ¹⁾ シリーズ	十字形 PL-5/7	336/352	2.13/2.10		
	H形 PL-6/8	274/264	2.10/2.14		
	主筋 D10	365	1.94		
	帯筋 D6	332	1.68		
第2 ¹⁾ シリーズ	鉄骨 PL-4.5	274	2.04	26.8	2.37
	主筋 D10	352	1.80		
	帯筋 D6	320	1.74		
	帯筋 φ4	472	1.91		
文献 ²⁾	鉄骨 PL-2.3~6	322~407	2.08	30.8	2.68
	主筋 φ4	382	2.05		
	帯筋 D6	215	2.05		
文献 ³⁾	鉄骨 PL-6	573	2.05	25.6	1.30
	主筋 D16	453	2.05		
	帯筋 φ6	451	2.05		
文献 ⁴⁾	鉄骨 PL-4.5~12	291~842	2.05	35.7	2.75
	主筋 D16	380	2.05		
	帯筋 D6	342	2.05		

σ_y : 鋼材降伏点[N/mm²]

σ_B : コンクリート圧縮強度[N/mm²]

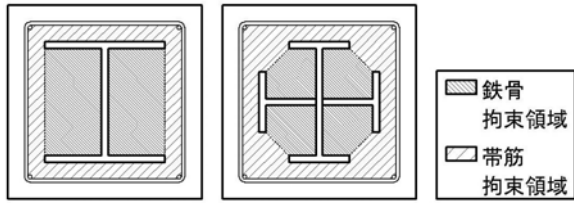
E_s : 鋼材ヤング係数[×10⁵N/mm²]

E_c : コンクリートヤング係数[×10⁴N/mm²]

*1 新潟大学大学院 自然科学研究科 修(工) (正会員)

*2 新潟大学大学院 自然科学研究科

*3 新潟大学教授 工学部建設学科 博(工) (正会員)



(a) H形鋼 (b) 十字形鉄骨
図-2 コンクリート拘束領域区分

積比 ρ_h を、帯筋拘束領域 (図-2 参照) においては(2)式、鉄骨拘束領域においては(3)式によりそれぞれ算定し、帯筋および鉄骨によるコンクリート拘束効果を評価した。

$$\rho_h = \frac{V_r}{rV_c} \quad (2)$$

$$\rho_h = \frac{V_s}{sV_c} \quad (3)$$

ここに、 ρ_h : 横補強筋体積比、 N_s : 鉄骨負担軸力、 V_r : 帯筋体積、 V_s : 鉄骨体積 ($\alpha \times_s V_w$)、 $_s V_w$: ウェブ体積 (試験体長さあたりの体積)、 A_f : フランジ断面積、 A_w : ウェブ断面積、 $_r V_c$: 帯筋拘束領域コンクリート体積 (帯筋間隔あたりの体積)、 $_s V_c$: 鉄骨拘束領域コンクリート体積 (試験体長さあたりの体積)

コンクリートの応力度-歪度関係を NewRC 式⁵⁾によりモデル化し、鉄骨および主筋の応力度-歪度関係は完全弾塑性モデルとして、平面保持の仮定により、コンクリート、鉄骨、および主筋の各負担軸力を累加することにより SRC 柱部材の軸力-軸歪関係を求めた。この際、(4)式に示すように横拘束に寄与したウェブ断面積を鉄骨断面積から差し引いて鉄骨の負担軸力 N_s を算定した。

$$N_s = \sigma_y \cdot A_f + \sigma_y \cdot A_w (1 - \alpha) \quad (4)$$

以上により求めた SRC 柱部材の軸力-軸歪関係に基づいて、表-1 に示す各試験体について、最大耐力、初期剛性、および変形性能の検討を行った。

4. 結果および考察

図-3 に、本研究において提案した SRC 柱部材の軸力-軸歪関係 (以下 NewRC モデルと表記) と実験結果の比較の例を示す。図-3 (a)~(c)は、最大耐力および初期剛性を比較しやすいよう $\varepsilon=0.005$ までの範囲とし、初期剛性の値を求めた N_{max} (最大耐力) / 3 の点を丸印で示した。図-3 (d)~(f)は、変形性能の指標である限界歪について比較しやすいよう、それぞれ $\varepsilon=0.03$, $\varepsilon=0.05$, $\varepsilon=0.06$ までの範囲とし、限界歪の値を求めた $0.85N_{max}$ の点を三角印で示した。なお、図中のマークは、NewRC モデルに

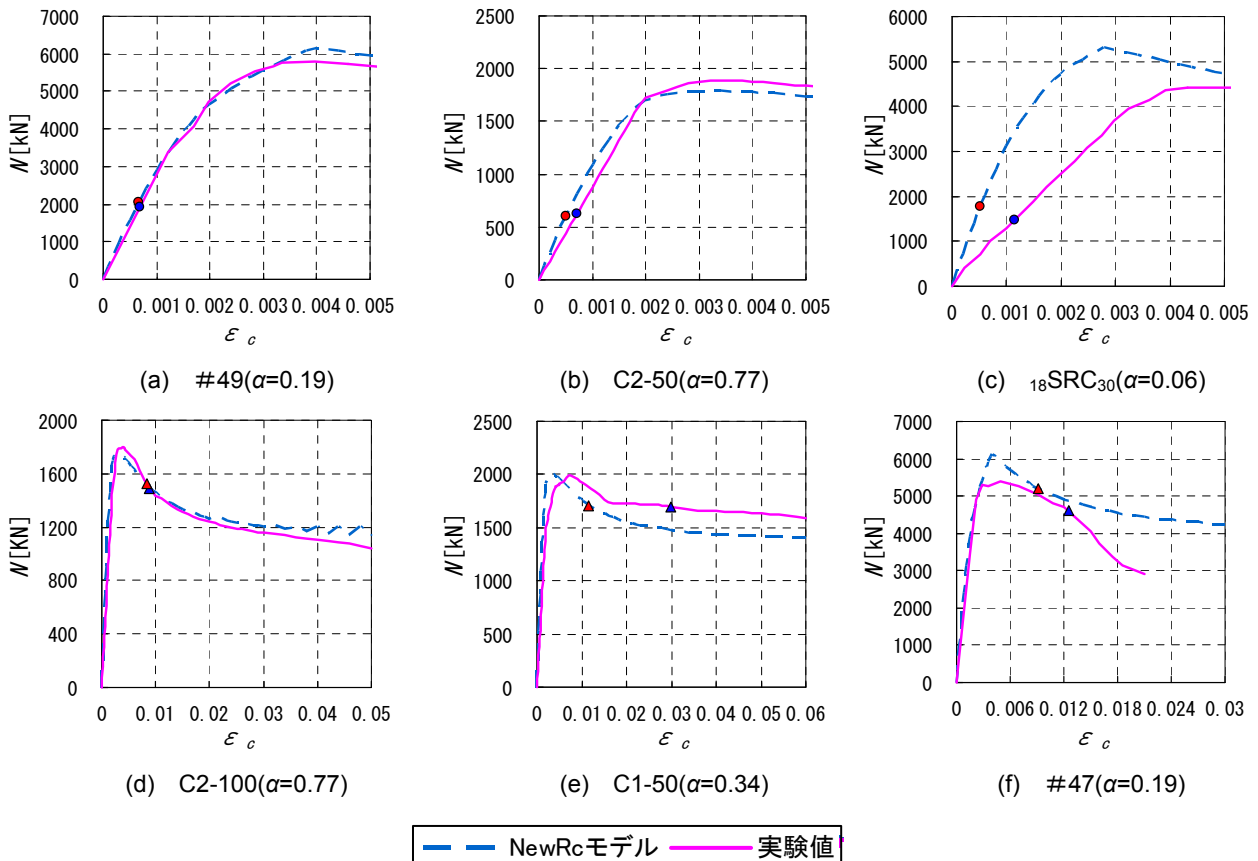


図-3 軸力-歪の関係

よる計算値を赤で、実験値を青でそれぞれ着色している。

最大耐力，初期剛性，および限界歪の全てにおいて，良好な評価をすることができた試験体が存在する一方で，実験値が NewRC モデルによる値を大幅に下回る結果となった試験体も存在している。以下に，NewRC モデルによる最大耐力，初期剛性，および限界歪の評価精度について検討を行った結果を示す。

4.1 最大耐力

表-3 および図-4 に，NewRC モデルより求めた最大耐力の計算値 N_{umax} と実験値 N_{max} の比較を示す。図-5(a)～(d)に，最大耐力の計算値と実験値の比 N_{max}/N_{umax} と，鉄骨ウェブのコンクリート拘束への寄与率 α ，鉄骨の軸力負担率 N_t/N_{umax} ，鉄骨フランジ幅厚比，および鉄骨ウェブ幅厚比との関係をそれぞれ示す。なお，図-4 の四角囲みの 0.8～1.2 の数値は， N_{max}/N_{umax} の等値線を表す。

表-3 より， N_{max}/N_{umax} の平均値 0.97，変動係数 0.12 となっており，全体的に良い評価が出来ていると言える。表-3 および図-4 を見ると，ほぼ全ての試験体の N_{max}/N_{umax} が 0.8～1.2 の間に収まっていることが分かる。図-5(a)～(d)を見ると， N_{max}/N_{umax} に対する α ，ウェブ幅厚比の影響はあまり大きくないと言える。フランジ幅厚比に関しては，その値が大きくなるにつれて N_{max}/N_{umax} は小さくなる傾向にあることが分かる。鉄骨断面形状の影響について見ると，H 形断面と十字形断面において大

表-3 NewRC 式・実験値の最大強度

	試験体名	N_{max}	N_{umax}	N_{max}/N_{umax}	α
第1 ¹⁾ シリーズ	SRC-C-1	1218	1299	0.94	0.41
	SRC-H-1	1050	1092	0.96	0.23
第2 ¹⁾ シリーズ	SRC-C-2	1144	1024	1.12	0.18
	SRC-H-2	1035	954	1.08	0.10
文献 ²⁾	C1-50	1995	2001	1.00	0.34
	C1-100	1796	1967	0.91	
	C2-50	1884	1789	1.05	0.77
	C2-100	1798	1755	1.02	
	C3-50	1898	1702	1.12	0.04
	C3-100	1717	1685	1.02	
文献 ³⁾	₁₈ SRC ₀	5488	6182	0.89	0.06
	₁₈ SRC ₂₀	4234	4973	0.85	
	₁₈ SRC ₃₀	4430	5305	0.84	0.04
	₂₄ SRC ₀	5488	6182	0.89	
	₂₄ SRC ₂₀	5978	6929	0.86	
	₂₄ SRC ₃₀	6272	7331	0.86	
文献 ⁴⁾	#40	4002	4041	0.99	0.11
	#41	4369	4586	0.95	0.09
	#42	4590	4701	0.98	0.12
	#45	4831	5243	0.92	0.16
	#46	5017	5272	0.95	0.16
	#47	5414	6114	0.89	0.19
	#48	4918	5288	0.93	0.16
	#49	5810	6154	0.94	0.19
	#52	5308	5511	0.96	0.21
	#53	5635	6084	0.93	0.22
#54	6545	7331	0.89	0.21	
平均値		-	-	0.97	-
変動係数		-	-	0.12	-

N_{max} :実験値[kN] N_{umax} :NewRCモデル[kN] $\alpha=T_w/T_y$

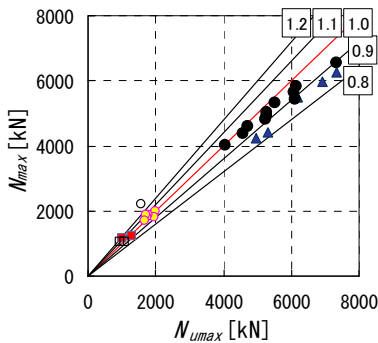
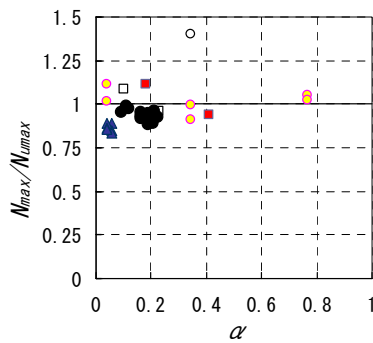
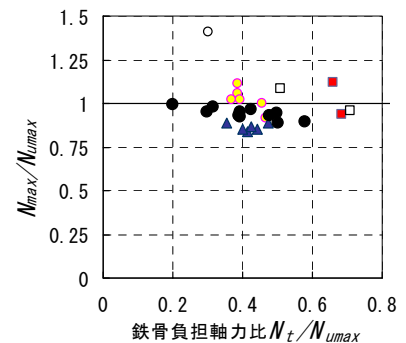


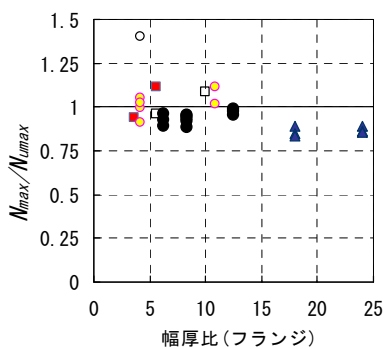
図-4 N_{max} と N_{umax} との関係



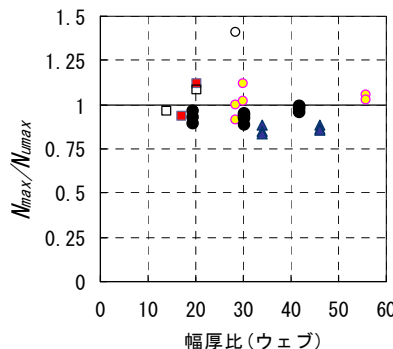
(a) ウェブ寄与率 α



(b) 鉄骨軸力負担率 N_t/N_{umax}



(c) 幅厚比 (フランジ)



(d) 幅厚比 (ウェブ)



図-5 N_{max}/N_{umax} と各種パラメータとの関係

きな差異は見られない。

4.2 初期剛性

初期剛性は、図-6 に示す $N_{max}/3$ の点における割線剛性とした。表-4 および図-7 に、NewRC モデルにより求めた初期剛性と実験値との比較を、図-8(a)~(d)に、初期剛性の計算値と実験値の比 K_{exp}/K_{cal} と、鉄骨断面積比 A_s/A 、鉄骨降伏応力度 σ_y 、フランジ幅厚比、および帯筋比 p_w との関係をそれぞれ示す。なお、図-7 の四角囲みの 0.4~1.2 の数値は、 K_{exp}/K_{cal} の等値線を示す。

表-4 より、 K_{exp}/K_{cal} の平均値は 0.71、変動係数は 0.30 となっており、全体的に NewRC モデルによる計算値は、コンクリート拘束効果を見逃し、構成材料の材料特性から求めた計算値（単純和）とほぼ同じ結果となった。また、図-7 を見ると、初期剛性に関しては、多くの試験

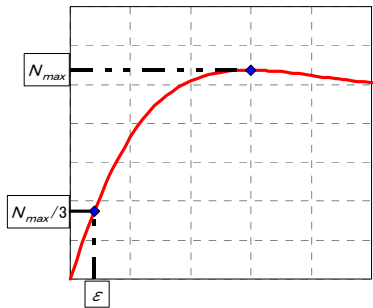


図-6 初期剛性の定義

表-4 初期剛性

	試験体名	K_{exp}	K_{cal}		K_{exp}/K_{cal}	
			NewRC式	単純和	NewRC式	単純和
第1 ¹⁾ シリーズ	SRC-C-1	21.1	20.4	20.1	1.04	1.05
	SRC-H-1	20.2	20.7	20.1	0.98	1.01
第2 ¹⁾ シリーズ	SRC-C-2	9.8	23.8	23.7	0.41	0.42
	SRC-H-2	23.5	24.0	23.7	0.98	0.99
文献 ²⁾	C1-50	13.0	22.3	26.8	0.58	0.49
	C1-100	12.3	22.5	26.8	0.55	0.46
	C2-50	16.3	22.3	26.8	0.73	0.61
	C2-100	14.1	22.5	26.8	0.63	0.53
	C3-50	15.3	23.5	26.8	0.65	0.57
	C3-100	13.8	23.7	26.8	0.58	0.51
文献 ³⁾	M1-50	27.0	21.1	26.8	1.28	1.01
	18SRC ₀	8.2	17.5	13.0	0.47	0.63
	18SRC ₂₀	8.5	18.3	13.0	0.46	0.65
	18SRC ₃₀	7.1	18.7	13.0	0.38	0.55
	24SRC ₀	10.9	18.2	13.0	0.60	0.84
	24SRC ₂₀	9.5	18.8	13.0	0.50	0.73
文献 ⁴⁾	24SRC ₃₀	8.3	19.1	13.0	0.43	0.64
	#40	22.5	28.1	27.5	0.80	0.82
	#41	20.5	28.6	27.5	0.72	0.74
	#42	22.2	27.8	27.5	0.80	0.81
	#45	19.9	28.3	27.5	0.71	0.73
	#46	20.6	27.5	27.5	0.75	0.75
	#47	21.3	27.6	27.5	0.77	0.77
	#48	20.6	27.4	27.5	0.75	0.75
	#49	25.1	27.5	27.5	0.91	0.91
	#52	18.6	27.2	27.5	0.68	0.68
#53	20.1	27.5	27.5	0.73	0.73	
#54	24.2	26.4	27.5	0.92	0.88	
平均値		-	-	-	0.71	0.72
変動係数		-	-	-	0.30	0.24

K_{exp} : 初期剛性実験値[N/mm²] K_{cal} : 初期剛性計算値[N/mm²]

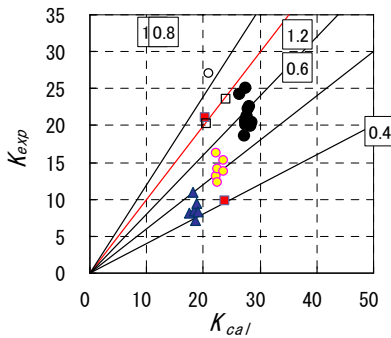
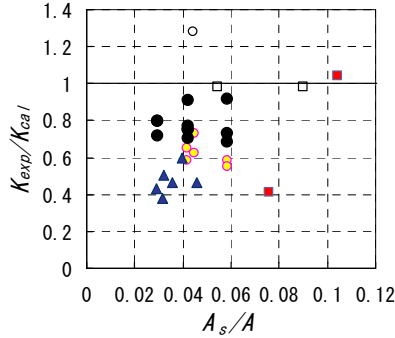
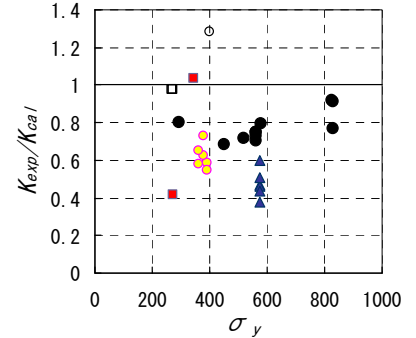


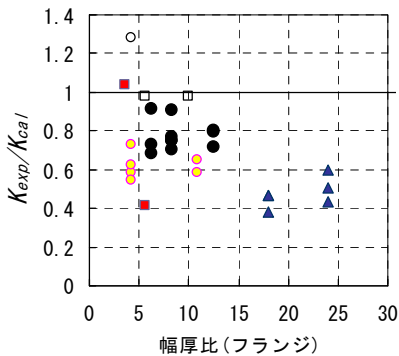
図-7 K_{exp} と K_{cal} との関係



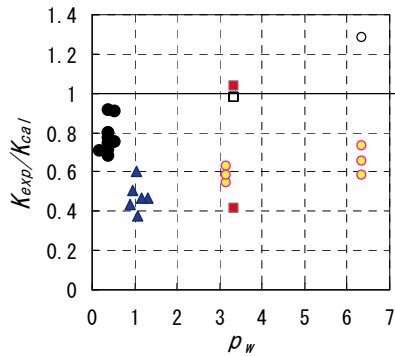
(a) A_s/A



(b) σ_y



(c) 幅厚比 (フランジ)



(d) p_w



図-8 K_{exp}/K_{cal} と各種パラメータとの関係

体において、計算値が実験値を大きく上回っていることが分かる。これについては、第1シリーズ¹⁾および第2シリーズ¹⁾では試験体に変位計を直接取り付けて軸歪を測定しているのに対して、文献³⁾および文献⁴⁾では試験機の加力治具間の変位測定値から軸歪を求めており、試験体端部の局所変形の影響を受けていることが考えられる。また、文献³⁾では軽量コンクリートを使用しており、素材試験によるヤング係数がコンクリート強度と比較してかなり小さいことも影響していると考えられる(表-2参照)。図-8(c)を見ると、フランジ幅厚比が大きくなるにつれて K_{exp}/K_{cal} の値が小さくなる傾向が見られる。鉄骨断面形状の影響について見ると、H形断面と十字形断面において大きな差異は見られない。

4.3 限界歪

変形性能の指標である限界歪は、曲げせん断を受ける SRC 部材に倣い、図-9 に示す(1)の軸力-軸歪関係において、 N_{max} 以降に $0.85N_{max}$ まで強度が低下した点の軸歪とした。(2)の軸力-軸歪関係のように $0.85N_{max}$ まで強度が低下する前に実験を終了している試験体や、(3)の軸力-軸歪関係のように終了時においても $0.85N_{max}$ まで強度が低下しない試験体については、実験終了時の軸歪を限界歪とした。

表-5 および図-10 に、NewRC モデルにより求めた限界歪の計算値と実験値との比較をそれぞれ示す。また、図-11 に限界歪の計算値と実験値の比 $\epsilon_{u exp}/\epsilon_{u cal}$ と、鉄骨断面積比 A_s/A 、鉄骨降伏応力度 σ_y 、フランジ幅厚比、および帯筋比 p_w との関係をそれぞれ示す。なお、図-10 の四角囲みの 0.5~2.5 の数値は、 $\epsilon_{u exp}/\epsilon_{u cal}$ の等値を示す。また、図-10 および図-11 において、 $0.85N_{max}$ まで強度が低下する前に実験を終了している試験体(図-9 参照)のマークを緑色で着色している。

表-5 より、 $\epsilon_{u exp}/\epsilon_{u cal}$ の平均値は 1.06、変動係数は 0.43 となっており、全体的に比較的良好な評価ができていけると言える。図-10 を見ると、多くの試験体において、限界歪の実験値が NewRC モデルによる計算値を上回っており、全体的に比較的良好な評価ができていけると言える。また、鉄骨断面形状の影響について見ると、十字形鉄骨を用いた試験体は $\epsilon_{u exp}/\epsilon_{u cal}$ が大きく、H形鋼を用いた試験体は $\epsilon_{u exp}/\epsilon_{u cal}$ が小さくなっていることが分かる。図-11(c)を見ると、フランジ幅厚比が小さい場合、計算値は安全側の評価となる場合が多い。図-11(d)を見ると、 p_w の値が大きい場合 $\epsilon_{u exp}/\epsilon_{u cal}$ のばらつきが大きくなることが分かる。

5. まとめ

鉄骨ウェブの寄与率を指標とし、鉄骨によるコンクリート拘束効果を考慮した SRC 柱の軸力-軸歪関係モデ

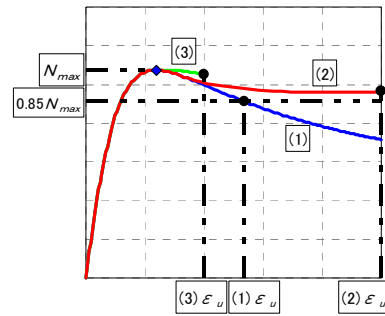


図-9 限界歪の定義

表-5 限界歪

	試験体名	$\epsilon_{u exp}$	$\epsilon_{u cal}$	$\epsilon_{u exp}/\epsilon_{u cal}$
第1 ¹⁾ シリーズ	SRC-C-1	0.0600	0.0600	1.00
	SRC-H-1	0.0600	0.0312	1.92
第2 ¹⁾ シリーズ	SRC-C-2	0.0075	0.0091	0.83
	SRC-H-2	0.0038	0.0079	0.48
文献 ²⁾	C1-50	0.0300	0.0116	2.57
	C1-100	0.0203	0.0100	2.03
	C2-50	0.0108	0.0104	1.04
	C2-100	0.0084	0.0089	0.94
	C3-50	0.0084	0.0067	1.26
	C3-100	0.0079	0.0058	1.35
	M1-50	0.0071	0.0076	0.93
文献 ³⁾	18SRC ₀	0.0056	0.0079	0.70
	18SRC ₂₀	0.0065	0.0065	1.01
	18SRC ₃₀	0.0068	0.0061	1.12
	24SRC ₀	0.0050	0.0066	0.75
	24SRC ₂₀	0.0055	0.0059	0.92
	24SRC ₃₀	0.0062	0.0057	1.10
文献 ⁴⁾	#40	0.0040	0.0052	0.77
	#41	0.0041	0.0057	0.72
	#42	0.0049	0.0058	0.85
	#45	0.0039	0.0063	0.62
	#46	0.0054	0.0067	0.80
	#47	0.0125	0.0091	1.37
	#48	0.0081	0.0071	1.14
	#49	0.0105	0.0095	1.10
	#52	0.0056	0.0078	0.73
	#53	0.0072	0.0088	0.81
#54	0.0100	0.0126	0.79	
平均値		-	-	1.06
変動係数		-	-	0.43

$\epsilon_{u exp}$: 限界歪実験値 $\epsilon_{u cal}$: 限界歪計算値

ルを提案し、最大耐力、初期鋼性、および変形性能の指標である限界歪について実験値と比較検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- ・最大耐力については、良好な評価ができた。
- ・初期剛性については、実験値を大幅に上回る試験体が多く、小歪領域における軸歪測定方法が実験値に及ぼす影響等について、さらに検討が必要である。
- ・限界歪については、全体的に比較的良好な評価ができていいる。しかし、一部に大きく安全側、あるいは危険側の評価となっている試験体も存在しており、さらに検討する必要がある。

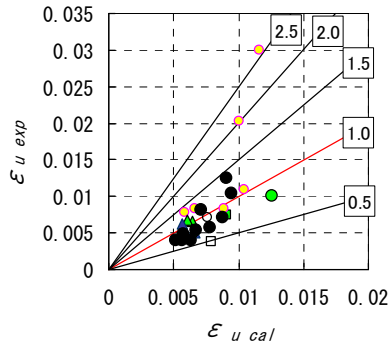
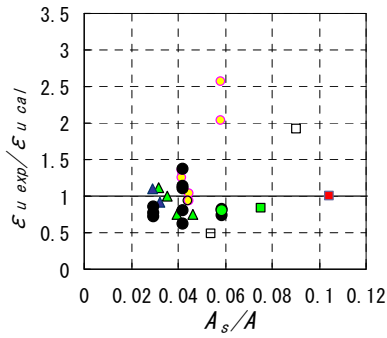
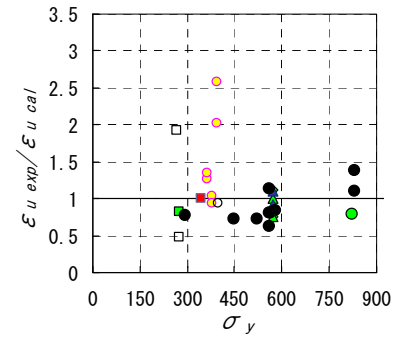


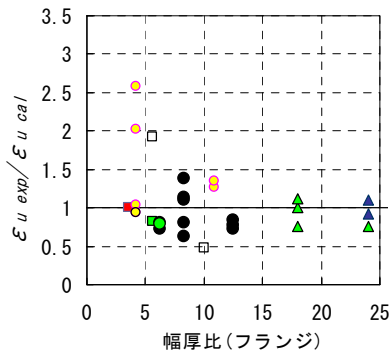
図-10 $\epsilon_{u\ exp}$ と $\epsilon_{u\ cal}$ との関係



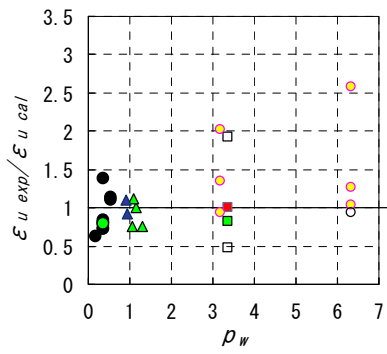
(a) A_s/A



(b) σ_y



(c) 幅厚比 (フランジ)



(d) p_w



図-11 $\epsilon_{u\ exp}/\epsilon_{u\ cal}$ と各種パラメータとの関係

参考文献

- 1) 土井希祐, 尹航: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1393-1398, 2008.7
- 2) 堺純一, 田中照久: 十字形鉄骨を内蔵した鉄骨鉄筋コンクリート部材のコンクリートの構成則に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.1157-1158, 2008.9
- 3) 仲威雄, 他: 鉄骨コンクリートおよび鉄骨鉄筋コンクリート部材の圧縮耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.1535-1536, 1973.10
- 4) SRC 造への高張力鋼適用に関する調査研究委員会: 高張力鋼を用いた SRC 構造の開発研究, 社団法人鋼材倶楽部, pp.86-96, 1989
- 5) 国土開発技術センター: 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, 平成4年度 NewRC 研究開発概要報告書, C-7), 1992