

論文 鋼コンクリート合成構造部材の変形性能とエネルギー吸収性能の評価法

土井 希祐*¹, 加藤 大介*¹

要旨：変動軸力の下で繰返し水平力を受けるSRC柱およびCFT柱の変形性能とエネルギー吸収性能に関する実験データベースを整備した。この実験データベースに基づいて、圧縮～引張の変動軸力の下で繰返し水平力を受けるSRC柱およびCFT柱の変形性能、ならびにエネルギー吸収性能について、一定軸力の場合に提案されている評価法が適用可能であるか否か検討を行った。その結果、変形性能およびエネルギー吸収性能共に、一定軸力を受ける場合の評価法で概ね評価できることが確認できた。

キーワード：鋼コンクリート合成構造, 変動軸力, 変形性能, エネルギー吸収性能

1. はじめに

一般的に、鉄骨鉄筋コンクリート（以下、SRCと表記）造建物、およびコンクリート充填鋼管（以下、CFTと表記）構造等の鋼コンクリート合成構造建物は高層であり、地震時に下層階の柱は大きな変動軸力を受ける。従って、変動軸力の下で繰返し水平力を受ける鋼コンクリート合成構造部材の変形性能とエネルギー吸収性能の評価法を確立することは、鋼コンクリート合成構造建物の合理的な耐震設計を行う上で重要であると考えられる。しかし、既往の実験研究の多くは一定軸力を受ける場合のものであり、変動軸力を受ける場合の研究は数少ない^{1)~11)}。著者等は、特にデータの不足している、十字形鉄骨を用いたSRC部材が水平力に比例した軸力変動の下で正負交番繰返し水平力を受ける場合の変形性能とエネルギー吸収性能について一連の実験的検討を行ってきた^{12)~15)}。本研究においては、これら一連の実験結果、および既往の実験資料に基づいて、変動軸力の下で繰返し水平力を受けるSRC部材およびCFT部材の変形性能とエネルギー吸収性能の評価法について検討することを目的としている。

2. 実験資料

本研究に用いた実験資料の詳細を**表-1**、および**表-2**に示す。SRC柱試験体は16体である。この内、十字形鉄骨を用いたSRC試験体は、文献^{1)~2)}の5体、および既報^{12)~14)}の4体の計9体、H形鋼を用いたSRC試験体は、文献^{3)~5)}の7体である。実験変数の範囲は、圧縮側最大軸力比 $\eta_c=0.23\sim0.78$ 、引張側最大軸力比 $\eta_t=-0.11\sim-0.33$ 、鉄骨曲げ強度比 $m_s=0.16\sim0.58$ 、帯筋比 $p_w=0.36\sim1.19$ 、シアスパン比 $=1.36\sim2.5$ となっている。ただし、変動軸力を受ける場合の実験データが少ないため、十字形鉄骨を用いた試験体のデータにはSRC-RC切替部を対象とした試験体のデータが²⁾、またH形鋼を用いた試験体のデータには柱脚接合部を含む試験体のデータが含まれている⁵⁾。なお、これらの試験体は、切替部および柱脚部において十分補強され、SRC部材としての破壊挙動を示していると報告されているものである。CFT柱試験体は12体であり、文献^{6)~8)}の角形断面試験体8体、および文献^{9)~10)}の円形断面試験体4体の計12体である。実験変数の範囲は、圧縮側最大軸力比 $\eta_c=0.33\sim0.70$ 、引張側最大軸力

*1 新潟大学工学部建設学科 教授 工博 (正会員)

比 $\eta_t = 0.0 \sim -0.33$, シアスパン比 = 2.63 ~ 5.6 となっている。使用材料については, SRC 試験体では普通強度のものが多く, CFT 試験体では高強度のものが多く。

3. 変形性能

変形性能の指標として, 最大耐力の80%まで強度低下したときの部材角 R_{80} を取った。一般

的に, SRC柱およびCFT柱は最大耐力以降の強度低下が小さく, 部材角 $R = 0.1rad$. 近い大変形時においても最大耐力の80%まで強度低下しないものもある。しかし, 高圧縮軸力の下で曲げ破壊する場合などは, 最大耐力以降に大きな強度低下を示すこと, および既往のSRC柱の変形性能評価式と比較を行う際の統一性を考慮して R_{80} を変形性能の指標として採用した。

表-1 実験資料一覧(SRC)

鉄骨形式	研究者	試験体名	b×D (mm)	a (mm)	鉄骨 (mm)	主筋	rdc (mm)	帯筋	f _{σy} (MPa)	w _{σy} (MPa)	r _{σy} (MPa)	h _{σy} (MPa)	c _{σB} (MPa)	η _c	η _t	m _s	p _w (%)	備考
十字	1) 浅川他	S3	180×220	300	H-160×50×4.5×6 & H-120×50×3.2×6	4-D10	18	4.5φ-30@	284	294	353	500	30	0.78	-0.33	0.53	1.19	直交方向で鉄骨断面異なる
		S4	180×220	300	H-160×50×4.5×6 & H-120×50×3.2×6	4-D10	18	4.5φ-30@	284	294	353	500	30	0.78	-0.33	0.53	1.19	直交方向で鉄骨断面異なる
	2) 今野他	HD-1	300×300	580	2H-200×75×5.5×8	12-D10	30	D6-50@	398	450	631	1132	62	0.50	-0.25	0.16	0.43	骨格曲線データのみ
		HD-2	300×300	580	2H-200×75×5.5×8	12-D10	30	D6-50@	398	450	631	1132	62	0.50	-0.25	0.16	0.43	骨格曲線データのみ
		HH1	300×300	580	2H-200×75×5.5×8	12-D10	30	D6-50@	397	449	631	1132	60	0.50	-0.12	0.34	0.43	柱鉄骨材端部(280mm)のみ
	12-14) 著者他	No.1	200×200	400	2H-125×60×6×8	4-D13	25	D6-50@	344	338	361	371	25	0.29	-0.12	0.58	0.64	
		No.3	200×200	400	2H-125×60×6×8	4-D13	25	D6-50@	309	378	364	327	26	0.29	-0.11	0.58	0.64	
		No.5	200×200	400	2H-125×60×6×8	4-D13	25	D6-50@	350	387	367	299	32	0.44	-0.19	0.56	0.64	
		No.6	200×200	400	2H-125×60×6×8	4-D13	25	D6-50@	350	387	367	299	32	0.43	-0.18	0.58	0.64	
	H形	3) 田中他	No.1	300×300	600	H-100×65×12×12	8-D19	30	4.5φ-45@	369	369	552	312	51	0.68	-0.22	0.16	0.95
No.2			300×300	600	H-100×65×12×12	8-D19	30	4.5φ-45@	369	369	552	312	51	0.68	-0.22	0.16	0.95	
4) 熊田他		C3	300×300	750	H-190×190×6×9	8-D19	30	4.5φ-60@	355	388	450	411	42	0.48	-0.16	0.29	0.71	
		C4	300×300	750	H-190×190×6×9	8-D19	30	4.5φ-60@	355	388	450	411	42	0.48	-0.16	0.29	0.71	
5) 称原他		No.3	400×400	600	H-194×150×6×9	24-D13	40	D10-100@	273	320	342	353	29	0.23	-0.19	0.18	0.36	非埋込柱脚(補強あり)
		No.6	400×400	600	H-194×150×6×9	24-D13	40	D10-50@	273	320	342	353	29	0.23	-0.16	0.18	0.72	非埋込柱脚(補強あり)
		No.7	400×400	600	H-194×150×6×9	8-D13	40	D10-50@	273	320	342	353	29	0.39	-0.22	0.20	0.72	埋込柱脚

表-2 実験資料一覧(CFT)

鉄骨形式	研究者	試験体名	鋼管 (mm)	a (mm)	s _{σy} (MPa)	c _{σB} (MPa)	η _c	η _t	備考
角形	6) 甲斐他	SR6-A-9-V	□-210×210×9	630	536	91.7	0.70	-0.30	
		SR6-C-9-V	□-210×210×6	630	540	91.7	0.70	-0.30	荷重-変形関係骨格曲線のみ
	7) 稲井他	SR8-A-9-V	□-210×210×9	630	824	94.5	0.70	-0.30	
		SR8-C-9-V	□-180×180×6	630	823	94.5	0.70	-0.30	荷重-変形関係骨格曲線のみ
	8) 辻他	CFT45v/12-2	□-125×125×4.5	700	324	37	0.50	-0.33	
		CFT45v/6-3	□-125×125×4.5	700	324	37	0.33	0.00	
		CFT60v/12-2	□-125×125×6.0	700	354	37	0.33	-0.17	
		CFT60v/6-3	□-125×125×6.0	700	354	37	0.50	-0.33	
円形	9) 藤本他	SC6-A-9-V	240φ×9	630	482	91.7	0.70	-0.30	
		SC6-C-9-V	180φ×9	630	504	91.7	0.70	-0.30	荷重-変形関係骨格曲線のみ
	10) 福元他	SC8-A-9-V	240φ×9	630	819	93.9	0.70	-0.30	
SC8-C-9-V		180φ×9	630	771	93.9	0.70	-0.30	荷重-変形関係骨格曲線のみ	

注) 表-1, 表-2中の記号は下記のとおりである。

b: 断面幅, D: 断面成, a: シアスパン, rdc: 主筋かぶり, f_{σy}: 鉄骨フランジ降伏応力度, w_{σy}: 鉄骨ウェブ降伏応力度, s_{σy}: 鋼管降伏応力度, r_{σy}: 主筋降伏応力度, h_{σy}: 帯筋降伏応力度, c_{σB}: コンクリート圧縮強度, η_c: 圧縮側最大軸力比(= N_{cmax}/Nu), η_t: 引張側最大軸力比(= N_{tmax}/Nu), m_s: 鉄骨曲げ強度比(= sMo/srcMo), p_w: 帯筋比。ただし, Nu: 軸圧縮強度, sMo: 軸力0での鉄骨の曲げ強度。ただし, ウェブのせん断強度が小さい場合はそれに等価な曲げ強度, Mo: 軸力0でのSRC部材の曲げ強度

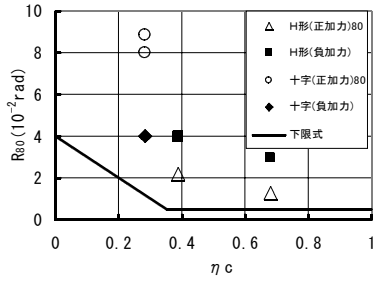


図-1(a) 限界変形角-最大圧縮軸力比関係(SRC)

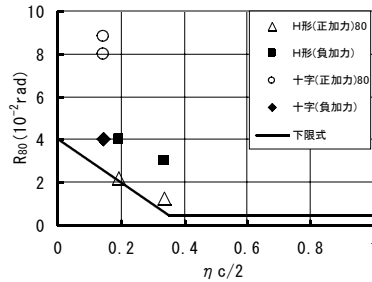


図-1(b) 限界変形角-平均圧縮軸力比関係(SRC)

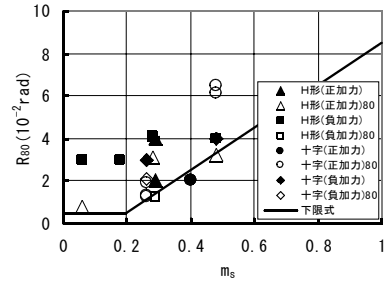


図-2 限界変形角-鉄骨曲げ強度比関係

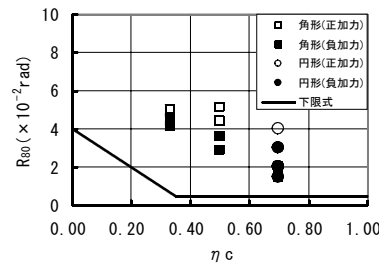


図-3(a) 限界変形角-最大圧縮軸力比関係(CFT)

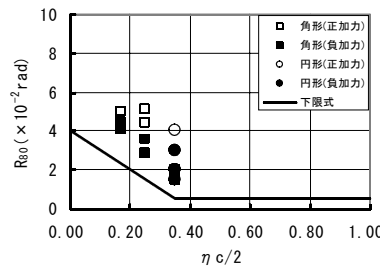


図-3(b) 限界変形角-平均圧縮軸力比関係(CFT)

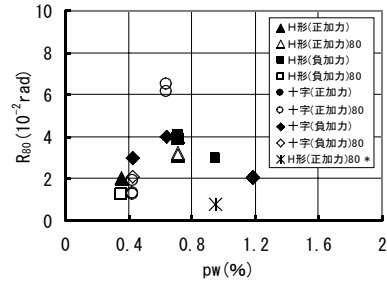
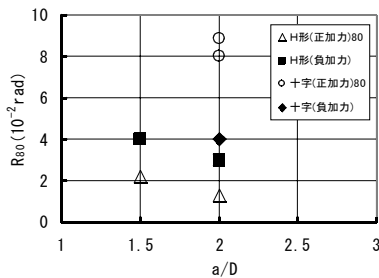
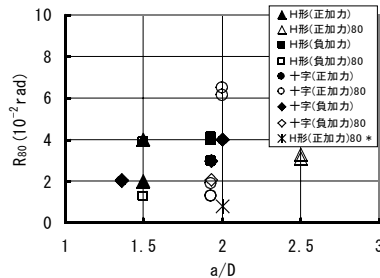


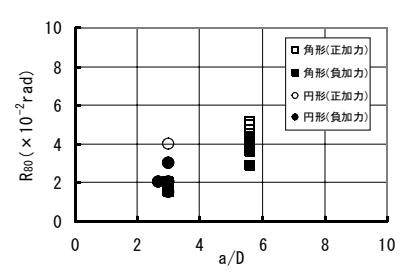
図-4 限界変形角-帯筋比関係(SRC せん断破壊)



(a) SRC 曲げ破壊



(b) SRC せん断破壊



(c) CFT

図-5 限界変形角-シアスパン関係

変動軸力の場合、特に、SRC柱では破壊モードが軸力の変動パターンにより影響を受けることが考えられる。しかし、検討に用いた実験資料は、圧縮側および引張側とも、最大耐力時に軸力も最大となるものがほとんどであった。また、SRC柱の耐力低下の原因となるコンクリートの劣化現象は主に圧縮軸力下において生じると考えられる。そこで、本論文においては、軸力が圧縮となる正加力側の最大軸力時における日本建築学会SRC計算規準¹⁰⁾による終局耐力の計算値によりSRC柱およびCFT柱の破壊モードを区分した。なお、表-2のCFT柱試験体は全て曲げ破壊している。

SRC試験体における曲げ破壊の場合の R_{80}

と、軸力が圧縮となる正加力側最大軸力比 η_c ($=N_{cmax}/N_u$)、および圧縮側平均軸力比 $\eta_c/2$ との関係を図-1(a)~(b)に、せん断破壊の場合の R_{80} と鉄骨曲げ強度比 m_s との関係を図-2に各々示す。また、CFT試験体における R_{80} と η_c および $\eta_c/2$ との関係を図-3(a)~(b)に各々示す。SRC試験体におけるせん断破壊の場合の R_{80} と帯筋比 p_w との関係を図-4に、SRC試験体およびCFT試験体における R_{80} とシアスパン比との関係を図-5(a)~(c)に各々示す。なお、図中の凡例の末尾に80の無いデータは、実験終了時においても最大耐力の80%まで強度低下していないため、 R_{80} を実験終了時の部材角としている。

図-1および図-3より、曲げ破壊の場合のSRC試験体およびCFT試験体では、 R_{80} は η_c が増大すると共に減少する傾向が認められる。次に、図-2より、せん断破壊の場合、 R_{80} は m_s が増大すると共に増加する傾向が認められる。

文献^{17)~18)}において、一定軸力を受ける場合の充腹形SRC部材の限界変形角 R_{80} の下限推定式が以下の様に与えられている。

曲げ破壊の場合、

$$R_{80}(\times 10^{-2} \text{ rad.}) = 4 - 10\eta > 0.5 \quad (1)$$

ここに、 η ：軸力比

せん断破壊の場合、

$$R_{80}(\times 10^{-2} \text{ rad.}) = 10m_s - 1.5 > 0.5 \quad (2)$$

ここに、 m_s ：鉄骨曲げ強度比

(1)式および(2)式は、一定軸力を受けるSRC部材の実験データの分析から、 R_{80} に対する主要な影響要因が、曲げ破壊の場合には軸力比、せん断破壊の場合には鉄骨曲げ強度比であるとして与えられたものである^{17)~18)}。SRC部材の変形性能に対する影響要因として、この他にも帯筋比、シアスパン比等をはじめとする諸要因が考えられるが、 R_{80} とこれら諸要因との相関が明瞭に認められなかったことから、本論文における評価式には取り入れていない。帯筋比およびシアスパン比の影響については、図-4および図-5に関する考察において詳述する。

図-1および図-3に、(1)式による R_{80} の下限推定値を示した。なお、図-1(a)および図-3(a)においては $\eta = \eta_c$ 、図-1(b)および図-3(b)においては $\eta = \eta_c/2$ とした。図-1(a)および図-3(a)と比較して、図-1(b)および図-3(b)の方が、(1)式と実験値の対応が良好である。これは、負加力側においては引張軸力を受けるため、コンクリートの損傷が一定圧縮軸力を受ける場合と比較して少ないことによると考えられる。以上より、CFT試験体を含めて、圧縮～引張の変動軸力を受ける場合も、 $\eta = \eta_c/2$ とすることにより、(1)式を適用することが可能であるとされる。

図-2において、一部に(2)式を下回るデータ

が存在しているが、(2)式は概ねせん断破壊の場合の R_{80} の下限値を押さえていると考えられる。

図-4において、 $p_w < 0.8\%$ の場合、 p_w が増大すると共に R_{80} が増大する傾向が見られる一方、 $p_w > 0.8\%$ の場合、 $p_w < 0.8\%$ の場合より R_{80} が低下しているように見える。これには、実験終了時に最大耐力に達していない試験体、および鉄骨曲げ強度比の小さい(=0.06)試験体(凡例に*を付した)のデータが含まれていることが影響していると考えられる。しかしながら、データ数が限られていること、および一定軸力の場合の分析結果^{17)~18)}から、本論文においては、 p_w を R_{80} に対する主要な影響要因として扱わないこととした。

図-5(a)および図-5(b)において、 R_{80} のばらつきが大きく、 R_{80} と a/D には明瞭な相関は認められない。一方、図-5(c)において、CFT柱の場合、 a/D が大きい方が R_{80} が大きい傾向が認められるが、一般的な傾向を導き出すのに十分なデータ数とは言えない。そこで、 p_w と同様、本論文においては、 a/D を R_{80} に対する主要な影響要因として扱わないこととした。

以上の結果より、本論文の対象とした実験資料の範囲内においては(1)式および(2)式が、変動軸力の場合にも、 R_{80} の下限推定式として概ね適用可能であると考えられる。ただし、限られたデータに基づくものであり、実務への適用を含めて、今後さらに、帯筋比、シアスパン比、材料強度をはじめとする諸要因を組み合わせた評価法を検討して行く必要があると考えられる。

3. エネルギー吸収性能

エネルギー吸収性能の指標として、等価粘性減衰定数 heq を取った。本論文においては、 heq の定義式として、文献¹⁷⁾と同様、破壊モードによらず(3)式を採用した。

$$heq = \Delta W / (2\pi W) \quad (3)$$

ここに

ΔW ：半サイクルで吸収するエネルギー（各変位振幅の2回目の定常ループから計算する。）

W : 等価弾性剛性に置き換えた弾性エネルギー (各変位振幅の最大変形点から計算する。) なお, heq は, 定常ループにおける1サイクルに対して定義されるものであるが, 変動軸力の

場合, 正加力側と負加力側における性状に大きな差異が見られる場合があるために, 正加力側と負加力側に分けて heq を求めた。

図-6~図-7に変動軸力試験体について, 正加力側と負加力側, および曲げ破壊とせん断破壊に分けて, 定常ループに対する heq と部材角 R の関係を各々示す。なお, 図-6(a)および図-7(a)には文献⁸⁾のCFT試験体データも併せて示している。部材角の増大に伴い heq は増大する傾向が認められる。

文献¹⁷⁾において, 一定軸力の場合の充腹形SRC部材の等価粘性減衰定数 heq の推定式が以下の様に与えられている。この推定式は, 最大点指向型の履歴ループを仮定して導かれたものであり, 曲げ破壊の場合は内蔵鉄骨による履歴ループの膨らみの影響を考慮している。

曲げ破壊の場合,

$$heq = 1.5 \cdot (1 - q \sqrt{R}) / \pi \quad (4)$$

せん断破壊の場合,

$$heq = (1 - q \sqrt{R}) / \pi \quad (5)$$

ここに, R : 部材角 ($\times 10^{-2}$ rad.)

$$q = 1 - 0.2 \cdot (R - 1) / (R_{80} - 1)$$

R_{80} : 限界変形角 ((1)式, (2)式による)

図-6および図-7に, $R_{80} = 4 \times 10^{-2}$ rad. (曲げ破壊の場合 $\eta_c = 0$, せん断破壊の場合 $m_s = 0.55$ に相当する) の場合の, (4)式および(5)式による heq の推定式を併せて示した。(4)式および(5)式は比較的精度よく実験結果を評価していると考えられる。ただし, 限られたデータに基づくものであり, 変形性能と同様に実務への適用を含めて, 今後さらに, 軸力比, 鉄骨曲げ強度比, 帯筋比, シアスパン比, 材料強度をはじめとする諸要因の影響について検討していく必要があると考えられる。

5. 結論

変動軸力の下で繰り返し水平力を受けるSRC柱およびCFT柱の変形性能, ならびにエネルギー吸収性能の評価法について, 実験資料に基づいて検討を行った。

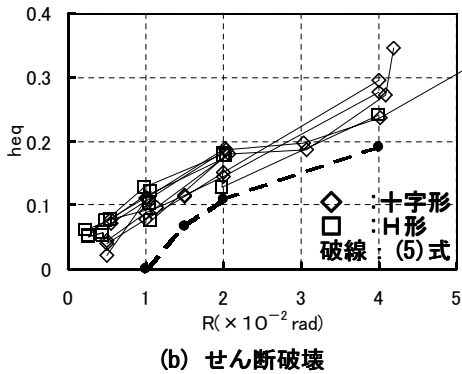
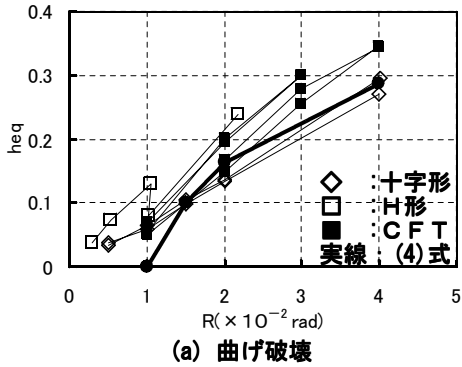


図-6 等価粘性減衰定数-部材角関係 (正加力側)

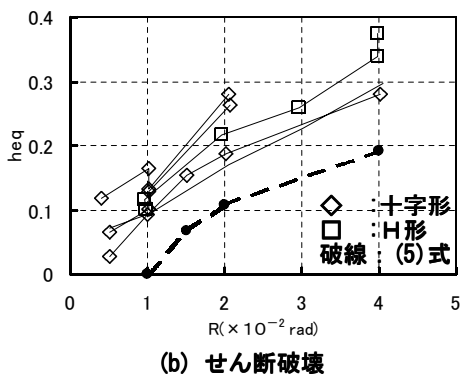
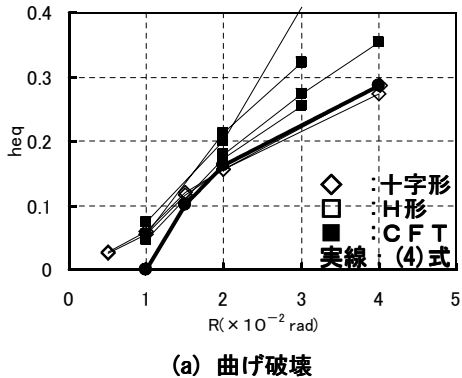


図-7 等価粘性減衰定数-部材角関係 (負加力側)

本論文の範囲内では、変形性能の指標である限界変形角 R_{80} について、軸力比 η を圧縮側平均軸力比 $\eta_c/2$ とすることにより、一定軸力の場合の下限推定式が、変動軸力の場合にも概ね適用可能であった。同様に、エネルギー吸収性能の指標である等価粘性減衰定数 heq についても一定軸力の場合の推定式が、変動軸力の場合にも概ね適用可能であった。

ただし、限られたデータ数に基づくものであり、実務への適用を含めて、今後さらに、帯筋比、シアスパン比、材料強度をはじめとする諸要因を組み合わせた評価法を検討して行く必要があると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、平成15年度文部科学省科学研究費補助金基盤研究(C)(2)(代表者：土井希祐新潟大学教授)により行った。

参考文献

- 1) 浅川敏雄ほか：ピロティを有する壁式プレキャスト構造の水平加力実験(その5：変動軸力を受けるSRC柱の部材実験)，日本建築学会大会学術講演梗概集，C，pp. 479-480，1994. 9
- 2) 今野修ほか：超高層建物における下層階へのSRC構造適用に関する実験的研究 その1～3，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp. 1029-1034，1998. 9
- 3) 田中清ほか：高強度コンクリートを用いたSRC短柱の力学性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 13，No. 2，pp. 451-456，1991. 6
- 4) 熊田康隆ほか：広幅H形鋼を用いたSRC柱の曲げせん断実験 その1～2，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp. 685-688，1995. 8
- 5) 称原良一，中澤春生：非埋込形柱脚によるSRC柱の耐震性能に関する実験(その1～2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp. 1319-1322，1998. 9
- 6) 甲斐誠ほか：ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(CFT-12)，コンクリート充填鋼管柱の曲げせん断性状 その4. 590N/mm²鋼を用いた角形柱の実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp. 1029-1130，1996. 9
- 7) 稲井栄一ほか：ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(CFT-14)，コンクリート充填鋼管柱の曲げせん断性状 その6. 780N/mm²鋼を用いた角形柱の実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp. 1033-1134，1996. 9
- 8) 辻文三ほか：変動軸力下におけるコンクリート充填角形鋼管柱の弾塑性挙動(その2 曲げせん断実験)，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp. 1265-1266，1999. 9
- 9) 藤本利昭ほか：ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(CFT-13)，コンクリート充填鋼管柱の曲げせん断性状 その5. 590N/mm²鋼を用いた円形柱の実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，C，pp. 1031-1132，1996. 9
- 10) 福元敏之ほか：ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(CFT-15)，コンクリート充填鋼管柱の曲げせん断性状 その7. 780N/mm²鋼を用いた円形柱の実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp. 1035-1136，1996. 9
- 11) 河野昭彦ほか：繰り返し水平力と変動軸力を受けるコンクリート充填円形鋼管柱の実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第547号，pp. 193-198，2001. 9
- 12) 土井希祐，片寄哲務，今泉晶宏：変動軸力を受けるSRC柱部材の静加力実験，鋼構造年次論文報告集，第8巻，pp517-524，2000. 11
- 13) 片寄哲務，土井希祐：変動軸力と斜め横力を受けるSRC柱部材の静加力実験，鋼構造年次論文報告集，第9巻，pp199-206，2001. 11
- 14) 片寄哲務，土井希祐：大変動軸力を受けるSRC柱部材の静加力実験，鋼構造年次論文報告集，第10巻，pp. 595-602，2002. 11
- 15) 土井希祐：変動軸力を受けるSRC部材の変形性能とエネルギー吸収性能の評価法，コンクリート工学年次論文集，Vol. 25，No. 2，pp. 1633-1638，2003. 7
- 16) 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. 1
- 17) 称原良一，土井希祐，SRC造建物の変形性能とDs値，日本建築学会構造系論文集，No. 540，pp. 149-154，2001. 2
- 18) 土井希祐：十字形鉄骨を用いたSRC部材の変形性能とエネルギー吸収性能，鋼構造年次論文報告集，第9巻，pp193-198，2001. 11