

論文 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

土井 希祐^{*1}

要旨：水平力に比例した変動軸力の下で繰返し水平力を受ける，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に関する一連の実験結果を取りまとめた。さらに，変動軸力の下で繰返し水平力を受ける，H形鋼および十字形鉄骨を用いたSRC部材の変形性能およびエネルギー吸収性能について，既往文献資料の試験体を含めた荷重－変形関係に関する実験データを用いて，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明らかとなった。

キーワード：SRC部材, 変動軸力, 変形性能, エネルギー吸収性能

1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート（以下SRCと表記）構造は，耐震性に優れた構造形式として，わが国において中高層建物に広く採用されてきたが，1995年兵庫県南部地震により初めて深刻な被害を受けた¹⁾。一般的に，SRC造建物は高層であり，地震時において下層階の柱は大きな変動軸力を受ける。しかし，既往の実験研究の殆ど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^{2)~3)}。著者等は，特に実験資料の不足している，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および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^{4)~7)}。その結果，軸力が引張から圧縮に転じる際，履歴ループが逆S字形の傾向を示し，エネルギー吸収性能が低下する場合があることが明らかとなった。本論文においては，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充腹形SRC部材の変形性能および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。なお，SR

C造建物の外柱にはT字形，隅柱にはL字形等の非対称断面鉄骨が用いられることが多い。しかし，本研究においては，変動軸力の影響に焦点を絞り，その影響を明らかにすること，およびピロティの上層階に耐震壁が存在する場合は内柱も大きな変動軸力を受けること等から，充腹形鉄骨を用いた対称断面SRC部材を研究対象とした。

2. 実験概要

実験の詳細は，文献^{4)~7)}にて発表している。ここでは，試験体，実験方法，および荷重－変形関係に関する実験結果の概要について述べる。

2.1 試験体

表-1に示すように，No.1～No.6の計6体の試験体を計画した。試験体の形状寸法を図-1に示す。試験体は高層建築物の下層階の柱を想定し，実構造物の1/4～1/5の縮小モデルとした。柱部には十字形鉄骨（2H-125×60×6×8）を，上下の加力スタブにはH形鋼（H-175×60×7.5×11）を内蔵している。なお，試験体 No.1, No.2, および No.5と試験体 No.3, No.4, および No.6で加力スタブの形状が異なっているが，

*1 新潟大学 工学部建設学科教授 工博（正会員）

表-1 実験計画

試験体	軸力比	水平力方向	文献
No. 1	+0.3~-0.1	主軸方向	2)
No. 2	0.3(一定)	主軸方向	2)
No. 3	+0.3~-0.1	主軸と45° 方向	3)
No. 4	0.3(一定)	主軸と45° 方向	3)
No. 5	+0.5~-0.2	主軸方向	4)
No. 6	+0.5~-0.2	主軸と45° 方向	4)

形状の違いにより実験結果に影響が生じないよう、柱部より強度、剛性とも十分大きいものとなるよう設計した。鋼材は、柱鉄骨が SS400 または SN400、鉄筋が SD295 である。コンクリートは、設計基準強度 21N/mm^2 、粗骨材最大寸法 15mm の普通コンクリートとした。

2.2 載荷方法

載荷は図-2に示す加力装置により行った。試験体左右の2本の油圧ジャッキ②により試験体上部の加力スタブを水平に保持し、油圧ジャッキ①および②により試験体柱部に所定軸力を作用させ、油圧ジャッキ③により漸増振幅交番繰返し水平力を作用させた。また、水平力は試験体 No. 1, No. 2, および No. 5では断面の主軸方向、試験体 No. 3, No. 4, および No. 6では断面の主軸と 45° の方向に作用させた(図-1参照)。

試験体 No. 1, No. 3, No. 5, および No. 6には、地震時における柱降伏型骨組の下層階柱を想定し、図-3に示すような水平力に比例した変動軸力を作用させた。なお、圧縮側の最大軸力比 $+0.5$ は、日本建築学会SRC計算規準⁸⁾における制限軸力(付録参照)を上回るものである。また、試験体 No. 2および No. 4は、比較のための一定軸力試験体(軸力比 $+0.3$)である。

水平力の載荷履歴は、部材角 $R = 5, 10, 15, 20, 40 \times 10^{-3}\text{rad.}$ で各々2サイクルずつ、計10サイクルの正負繰返し載荷を行った後、正方向に加力装置の限界まで載荷した。

3. 実験結果

3.1 最大耐力および限界変形

実験により得られた最大耐力点および限界

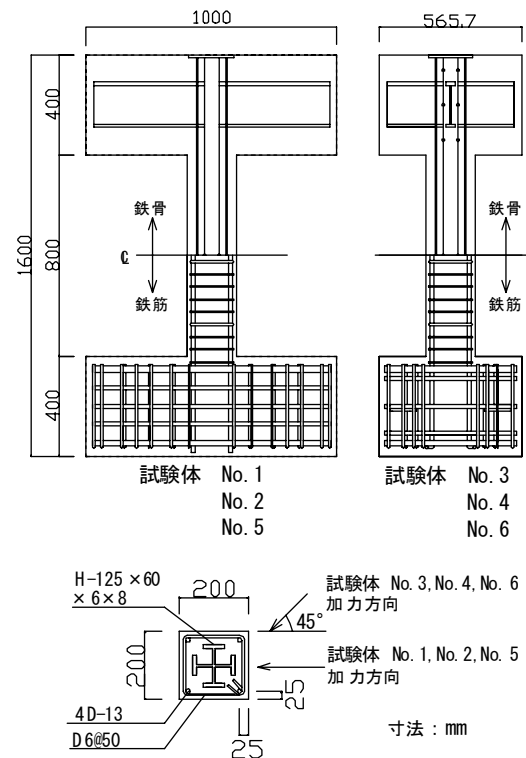


図-1 試験体

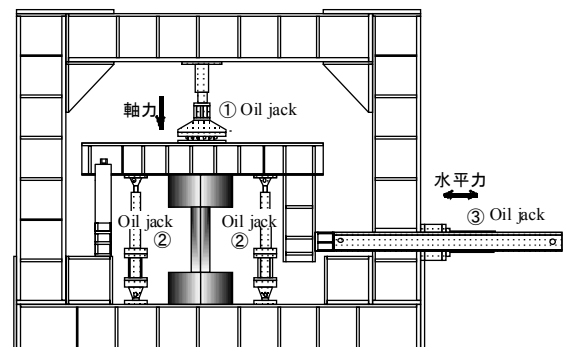


図-2 加力装置

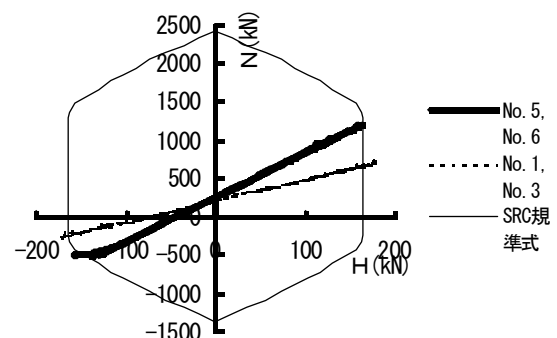


図-3 水平力-軸力関係

変形点をまとめて表-2に示す。限界変形点は、最大耐力の80%まで強度が低下した点とした。なお、表-2中の荷重にはP- Δ 効果を考慮して

いない。また、表-2には、日本建築学会SRC計算規準⁸⁾による断面主軸方向の終局耐力計算値を示した。ただし、耐力計算は、危険断面が柱端にあるものとして行った。変動軸力試験体の負加力側、および一定軸力試験体では、実験終了時においても最大耐力の80%まで強度が低下しなかった。また、変動軸力試験体では、45°方向加力の方が、主軸方向加力の場合より、最大耐力はやや高いが、限界変形はやや小さくなっている。

3.2 荷重－変形性状

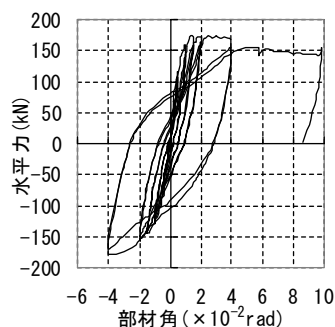
図-4に、水平力－部材角関係を示す。変動軸力試験体においては、正加力側の履歴ループが逆S字形の傾向を示すが、負加力側では外に凸の傾向を示しており、負加力側の履歴ループ面積が正加力側と比較してやや大きくなっている。この傾向は、軸力変動幅の大きい試験体 No. 5および No. 6において大きかった。これは、負加力側において支配的な引張軸力により材端部コンクリート断面に生じる引張りひ割れの開閉の影響によるものと考えられる。また、負加力側においては、 $R = -4 \times 10^{-2} \text{ rad}$ においても耐力低下が見られず、最大耐力の実験値が計算値を上回ったが、これは、 $P-\Delta$ 効果の影響が大きかったためと考えられる(図-4(e), (f)参照)。ただし、試験体 No. 5および No. 6(軸力比+0.5～-0.2)は、試験体 No. 1および No. 3(軸力比+0.3～0.1)と比較して最大耐力が低かった。

最大耐力以後の耐力低下は、試験体 No. 5および No. 6の方が、試験体 No. 1および No. 3より大きく、変形性能は低下していた。しかし、何れの試験体

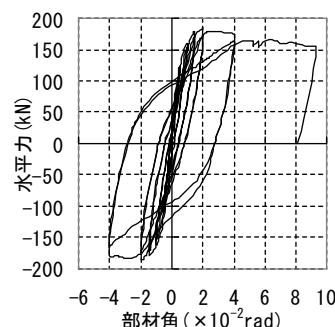
表-2 最大耐力と限界変形

		最大耐力点			限界変形点			終局耐力計算値(kN)
		荷重(kN)	変形($\times 10^{-2} \text{ rad}$)	(+/-)	荷重(kN)	変形($\times 10^{-2} \text{ rad}$)	(+/-)	
No. 1 (変動軸力)	正	173	2.50	(+9)	138	8.82	(+11)	158
	負	-179	-3.75	(-9)	-	-	-	-153
No. 2 (一定軸力)	正	185	2.00	(+7)	-	-	-	158
	負	-186	-2.00	(-7)	-	-	-	-158
No. 3 (変動軸力)	正	181	3.24	(+9)	145	7.98	(+11)	158
	負	-174	-4.00	(-9)	-	-	-	-153
No. 4 (一定軸力)	正	179	2.26	(+9)	-	-	-	158
	負	-175	-2.01	(-7)	-	-	-	-158
No. 5 (変動軸力)	正	165	2.00	(+7)	129	6.51	(+11)	166
	負	-160	-4.00	(-9)	-	-	-	-145
No. 6 (変動軸力)	正	179	2.00	(+7)	133	6.05	(+11)	166
	負	-175	-4.01	(-10)	-	-	-	-145

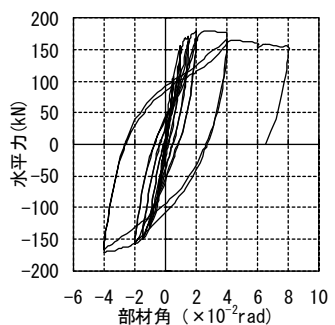
注1) 限界変形点：最大耐力の80%まで耐力が低下した点。記載なしは、実験終了まで最大耐力の80%まで耐力が低下しなかった場合を表す。
注2) 変形の()内の数値は加力サイクルを示す。



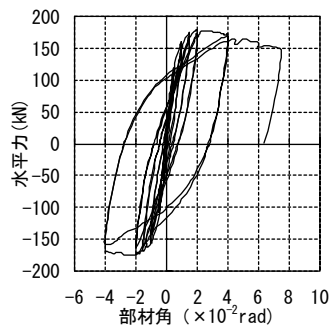
(a) No. 1 (主軸加力, 変動軸力)



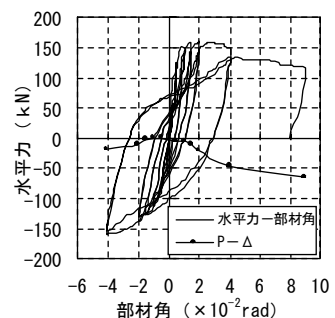
(b) No. 2 (主軸加力, 一定軸力)



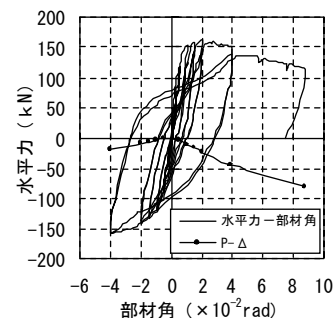
(c) No. 3 (45° 加力, 変動軸力)



(d) No. 4 (45° 加力, 一定力)



(e) No. 5 (主軸加力, 変動軸力)



(f) No. 6 (45° 加力, 変動力)

図-4 水平力－部材角関係

も、前述のように、P- Δ 効果による付加モーメントを考慮すると最終状態においても耐力低下は殆どなく、共に大きな変形性能を示した(図-4参照)。

図-5に、変動軸力試験体の各変位振幅における2回目の繰返しループ(以下、定常ループと表記)に対する等価粘性減衰定数 h_{eq} を示す。各試験体とも、 h_{eq} は部材角 R が大きくなるに従い増加しており、 $R=1\sim2\times10^{-2}$ rad. においては負加力側の方が正加力側より大きかった。これは、正加力側の履歴ループが逆S字形であることに対応している。負加力側においては、引張軸力により材端部コンクリートのひび割れが開き、鉄骨はほぼ全断面引張となるため、鉄骨部材の性状に近くなり、履歴ループが外に凸の形状となる一方、正加力側においては、材端部コンクリートのひび割れが閉じるまで、コンクリートが圧縮力を受け持てないことにより、履歴ループが逆S字形となることが影響したと考えられる。なお、 h_{eq} でみたエネルギー吸収性能は、試験体No.5およびNo.6の方が、試験体No.1およびNo.3と比較して、正加力側ではほぼ同等、負加力側でやや大きかった。

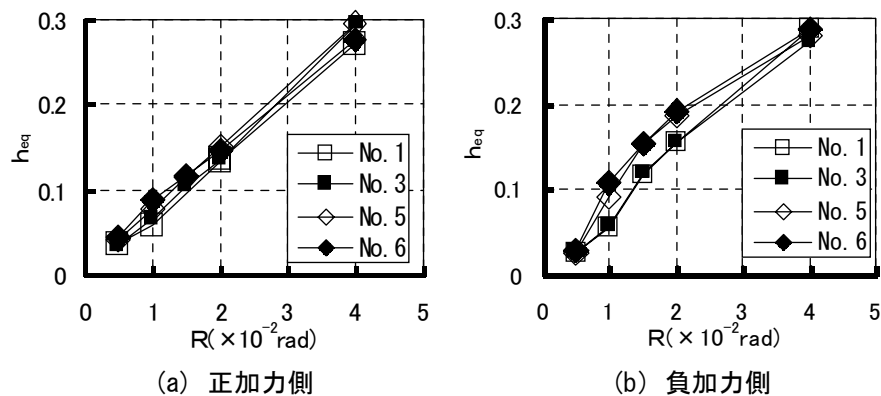


図-5 等価粘性減衰定数一部材角関係(定常ループに対する値)

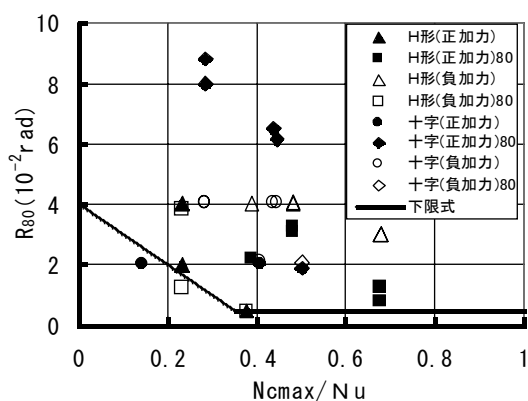


図-6 限界変形角-軸力比関係

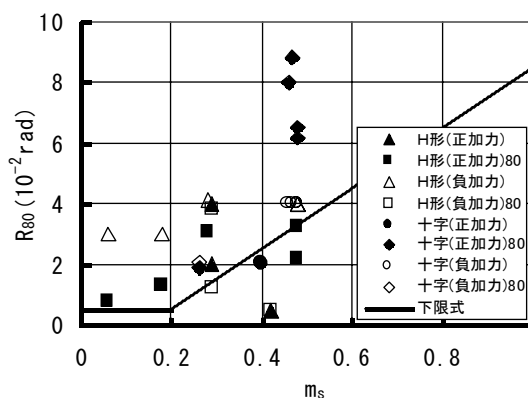


図-7 限界変形角-鉄骨強度比関係

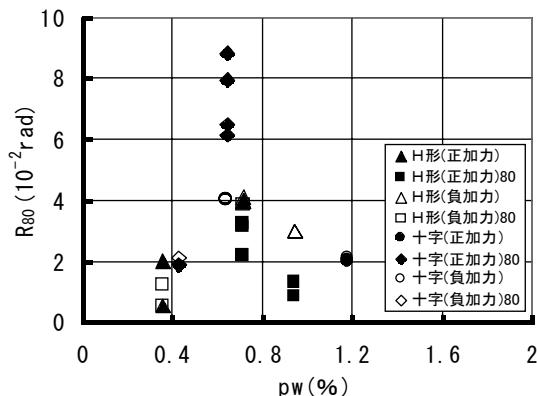


図-8 限界変形角-帯筋比関係

4. 変形性能とエネルギー吸収性能の評価

4.1 変形性能

変形性能の指標として、限界変形角 R_{80} を取り、 R_{80} と、軸力が圧縮となる正加力側の最大軸力比 N_{cmax}/N_u 、鉄骨曲げ強度比 m_s 、および帯筋比 p_w との関係を図-6～図-8に各々示す。図中には、本研究の変動軸力試験体4体(表-1参照)の他、文献^{2)~3)}の十字形鉄骨を用いた試験体3体、および文献^{9)~11)}のH形鋼を用いた試験体8体のデータを併せて示している。変動軸力のデータが少ないため、H形鋼を用いた試験

体データには、柱脚接合部を含む試験体のデータも一部含まれている¹¹⁾。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、R80を実験終了時の部材角としている。

文献^{12)~13)}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R80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、

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

せん断破壊の場合、

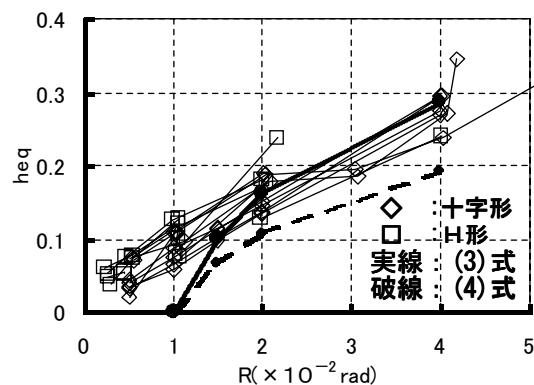
$$R_{80}(\times 10^{-2} \text{ rad.}) = 10m_s - 1.5 > 0.5 \quad (2)$$

ここに、 η ：軸力比、 m_s ：鉄骨曲げ強度比

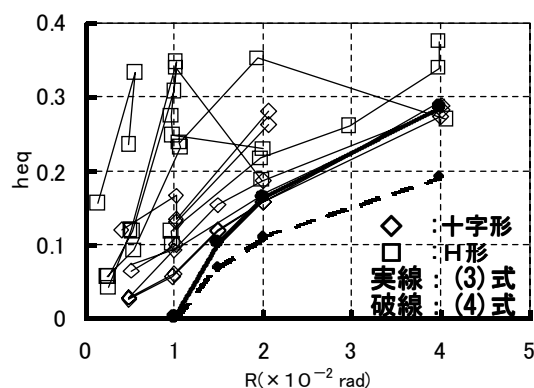
図-6および図-7に、(1)式および(2)式によるR80の下限推定式を各々示した。なお、(1)式および(2)式では、曲げ破壊型とせん断破壊型で場合分けしているが、変動軸力試験体の場合、どの軸力レベルで破壊モードを定義するか不明確なこと、およびデータ数が少ないこともあり、破壊モードを区別せず表示した。R80は、概ねNcmax/Nuが増大すると共に減少し、 m_s が増大すると共に増大する傾向が認められる。データ数は少ないが、(1)式および(2)式が、変動軸力の場合にも、概ね適用可能であると考えられる。なお、図-7において、一部に下限推定式を大きく下回るデータが存在しているが、これは、非埋込形柱脚を含む試験体に関するものであり、 m_s が過大評価されていることによるものと考えられる。また、 p_w が増大すると共にR80も増大する傾向が見受けられるが、Ncmax/Nu、および m_s ほど明瞭ではない。

4.2 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。既往の実験結果^{4)~6)}によれば、 heq は、変動軸力試験体No.1およびNo.3と一定軸力試験体No.2およびNo.4において殆ど差異が認められなかった。そこで、変動軸力試験体のみについて、正加力側と負加力側に分けて、定常ループに対する heq と部材角Rの関係を図-9に示す。図中には、本研究



(a) 正加力側



(b) 負加力側

図-9 等価粘性減衰定数一部材角関係

の変動軸力試験体4体(表-1参照)の他、文献²⁾の十字形鉄骨を用いた試験体2体、および文献^{10)~11)}のH形鋼を用いた試験体8体の計10体のデータを併せて示している。

文献¹²⁾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。

曲げ破壊の場合、

$$heq = 1.5 \cdot (1 - q/\sqrt{R}) / \pi \quad (3)$$

せん断破壊の場合、

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

ここに、R：部材角($\times 10^{-2}$ rad.)

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

図-9に、軸力比0の場合の、(3)式および(4)式による heq の推定式を併せて示した。 heq は、負加力側でばらつきが大きいものの、部材角が大きくなるに従い概ね増加しており、正加力側および負加力側共に、(3)式または(4)式により、その下限値を概ね推定できるものと考えられる。

5. 結論

地震時における高層建物の下層階柱を想定し、水平力に比例した変動軸力の下で、断面の主軸方向および主軸と45°方向の繰返し水平力を受ける、十字形鉄骨を用いたSRC部材の静加力実験の結果を取りまとめた。

軸力変動幅が大きい場合(+0.5~-0.2)は、軸力変動幅が小さい場合(軸力比+0.3~-0.1)と比較して、正加力側における最大耐力以降の耐力低下は大きく、変形性能の低下が認められた。ただし、P-Δ効果を考慮した断面耐力では耐力低下は殆ど見られなかった。また、正加力側の履歴ループの逆S字形の傾向がより明瞭となったが、等価粘性減衰定数でみたエネルギー吸収性能は、正加力側でほぼ同等、負加力側ではやや大きかった。

限定されたデータに対してではあるが、変形性能の指標である限界変形角、およびエネルギー吸収性能の指標である等価粘性減衰定数について、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るといえる。

今後さらに、非対称断面鉄骨を内蔵する場合、および圧縮軸力下での軸力変動を受ける場合等の検討を行う必要があると考えられる。

付録

SRC柱の制限軸力 N_1 は以下のように与えられる⁸⁾。

$$N_1 \leq b \cdot D \cdot F_c / 3 + 2 \cdot sA \cdot sfc / 3 \quad (\text{付-1})$$

ここに、 b ：断面幅、 D ：断面高、 F_c ：コンクリート設計基準強度、 sA ：鉄骨断面積、 sfc ：鉄骨許容圧縮応力度。

参考文献

- 1) 日本建築学会阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告建築編-2，丸善，1998.8
- 2) 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，構造Ⅱ，pp.479-480，1994.9

- 3) 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，構造Ⅲ，pp.1029-1034，1998.9
- 4) 土井希祐ほか：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，Vol.8，pp.517-524，2000.11
- 5) 片寄哲務，土井希祐：変動軸力を受けるSRC柱部材の変形性能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.23，No.1，pp.661-666，2001.6
- 6) 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，Vol.9，pp.199-206，2001.11
- 7) 土井希祐ほか：変動軸力を受けるSRC柱部材の変形性能とエネルギー吸収性能，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.2，pp.1345-1350，2002.6
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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（北海道），構造Ⅲ，pp.685-688，1995.8
- 11) 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（九州），構造Ⅲ，pp.1319-1322，1998.9
- 12) 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
- 13) 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，Vol.9，pp.193-198，2001.11