

論文 鉄骨鉄筋コンクリート部材の荷重－変位履歴特性モデルに関する研究

土井 希祐*1)

要旨：SRC(鉄骨鉄筋コンクリート)部材を加藤・称原の耐力理論に基づいて曲げ破壊型部材とせん断破壊型部材に分類し、各々に対して、スケルトンカーブと履歴ループの組み合わせによるSRC部材の荷重－変位履歴特性モデルを提案した。スケルトンカーブは、可能な限り力学モデルに基づくモデル化を行った。また、履歴ループについては、曲げ破壊型RC部材の履歴特性モデルである Takeda モデルに基づいて、SRC部材の特徴である履歴ループの膨らみを表現できるよう修正する事によりモデル化を行った。簡略なモデルであるにも関わらずモデルと実験結果の対応は良好であった。

キーワード：SRC部材, 荷重－変位関係, 履歴特性モデル, スケルトンカーブ, 履歴ループ

1. はじめに

SRC構造物の合理的な耐震設計を行うためには、その復元力特性を明らかにすることが必要である。SRC構造の復元力特性モデルに関しては、立花等の研究がある[1]。しかし、立花等のモデルにおいては、実験式に依っている部分も多く拡張性に疑問が残る。そこで、本論文においては、可能な限り力学モデルを取り入れたSRC部材の荷重－変位履歴特性のモデル化を試みた。本論文においても、一般的に行われているように、スケルトンカーブと履歴ループの組み合わせにより荷重－変位履歴特性のモデル化を行う方法を採用した。さらに、実験資料データベースに基づいてモデルの妥当性を検討した。モデル化の対象は、H形鋼を用いたSRC部材が、一定軸力下でH形鋼断面の強軸回りの繰返し曲げせん断力を受ける場合とする。荷重－変位関係は、図1に示すように、材端曲げモーメントMと、部材角Rの関係で表すものとする。また、SRC部材においては、せん断破壊する場合であっても、耐力低下が少なく、比較的安定した荷重－変位関係を示すものが多く見られる。そこで、曲げ破壊型部材だけでなく、せん断破壊型部材についてもモデル化を行った。破壊モードは、加藤・称原の耐力理論[2]に基づいて、表2に示すように区分した。

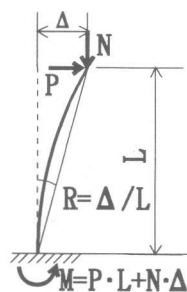


図-1 荷重条件

表-2 破壊モード区分(逆対称加力)

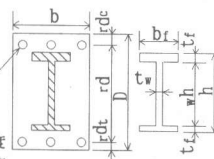
断面耐力条件	軸力の範囲	破壊モード
$rM_p < wQ_y \cdot L$ かつ $rM_p < hQ_y \cdot L$	—	曲げ破壊
$rM_p \geq wQ_y \cdot L$ または $rM_p \geq hQ_y \cdot L$	$-2S_0 \leq tN \leq N_1$	曲げ破壊
	$N_1 < tN < N_2$	せん断破壊
	$N_2 \leq tN \leq N_3$	曲げ破壊

2. スケルトンカーブモデル

2. 1 曲げ破壊型部材

図3に示すように、曲げ破壊型部材の荷重－変位関係スケルトンカーブは3本の折れ線で近似できるものと仮定した。①～③

注) $rM_p = t \cdot b \cdot f \cdot \sigma_y \cdot (h - t_f)$, $wQ_y = t \cdot w \cdot h \cdot \sigma_y / \sqrt{3}$
 $rM_p = r \cdot a \cdot r \cdot \sigma_y \cdot r_d$, $hQ_y = p \cdot w \cdot b \cdot r_d \cdot h \cdot \sigma_y$
 $N_1 = N_0 / 2 - 2 \cdot S_0$, $N_2 = N_0 / 2 + 2 \cdot S_0$, $N_3 = N_0 + 2 \cdot S_0$
 tN : 圧力場作用軸力(文献[2]参照)
 N_0 : 圧力場コンクリート断面圧縮強度()
 S_0 : 圧力増強材降伏強度()
 p : 帯筋比, L : シアスパン
 $f \sigma_y$: 鉄骨フランジ降伏応力度, $r \sigma_y$: 主筋降伏応力度
 $w \sigma_y$: 鉄骨ウェブ降伏応力度, $h \sigma_y$: 帯筋降伏応力度



*1 新潟大学助手 工学部建設学科、工博(正会員)

表-1 各折れ点の材端曲げモーメント fMi 、及び材端曲率 $f\phi_i$

	第1折れ点[1]	第2折れ点	変形限界点
$fMi(i=1\sim3)$	$fM_1=(2.4\sqrt{Fc}+\sigma_0)\cdot Ze$	$fM_2=M_p$	$fM_3=M_u$
$f\phi_i(i=1\sim3)$	$f\phi_1=fM_1/(Ec\cdot Ie)$	$f\phi_2=c\cdot \varepsilon_c/X_p$	$f\phi_3=c\cdot \varepsilon_u/X_u$

注) σ_0 : 鋼材を考慮した平均軸方向応力度、 Ie 、 Ze : 鋼材を考慮した等価断面2次モーメント、及び断面係数
 κ : 断面形状による係数 [$=1.2$ (長方形断面の場合)]、 n : 鋼材とコンクリートのヤング係数比
 s_j 、 r_j : 鉄骨部分、及びRC部分応力中心間距離、 β : 鉄骨ウェブ材による係数 [$=n\cdot tw\cdot sj/(b\cdot rj)$]
 Gc 、 Ac : コンクリートのせん断弾性係数、及び断面積(図7参照)

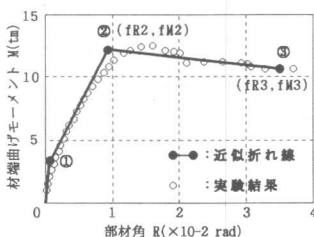


図-2 スケルトンカーブモデル(曲げ破壊型)

の各点における材端曲げモーメント $fMi(i=1\sim3)$ は表1、及び図5、6 に示すように定めた。また、部材角 $fRi(i=1\sim3)$ は、次式により定めた。

$$fR_i=(\Delta f_i+\Delta s_i+\Delta B_i)/L, i=1\sim3 \quad (1)$$

ここに、

Δf_i : 曲げ変形(表1、及び図3参照)

Δs_i : せん断変形($=\kappa\cdot fMi/\{Gc(1+\beta)\cdot Ac\}$)

ΔB_i : 定着部鋼材の抜け出しによる付加変形
(図4参照、 $\tau_{av}=30\text{kg/cm}^2$)

2. 2 せん断破壊型部材

図7 に示すように、せん断破壊型部材の荷重-変位関係スケルトンカーブは4本の折れ線で近似できるものと仮定した。第1折れ点①、及び第2折れ点②点における材端曲げモーメント $sMi(i=1\sim2)$ は表2、及び図8に示すように定めた。また、部材角 $sRi(i=1\sim2)$ は、曲げ破壊型モデルの場合と同様の方法により求めた。

第3折れ点③、及び変形限界点④における材端曲げモーメント $sMi(i=3\sim4)$ は、加藤・称原理論[2] による終局モーメントにより定めた。また、部材角 $sRi(i=3\sim4)$ は、図9 に示す変形モデルのせん断変形 γ により定めた。

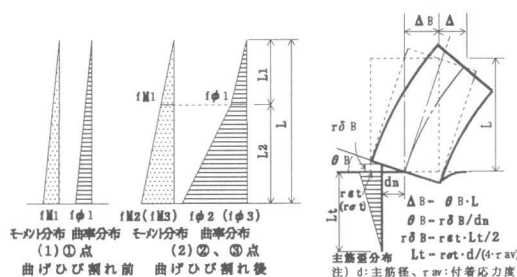


図-3 曲率分布

図-4 定着部鋼材の抜け出しによる付加変形

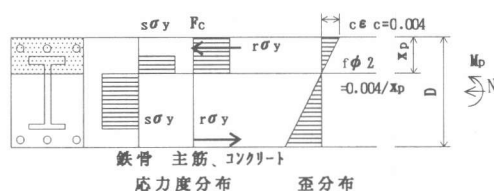


図-5 第2折れ点モーメント、曲率

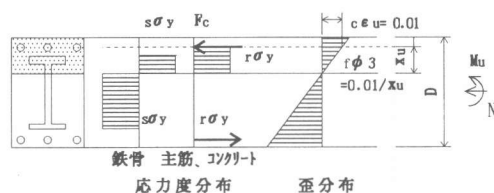


図-6 第3折れ点モーメント、曲率

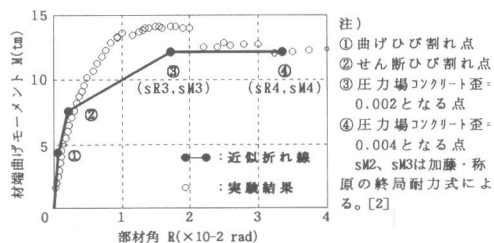


図-7 スケルトンカーブモデル(せん断破壊型)

表-2 各折れ点の材端曲げモーメント sM_i 、及び材端曲率 $s\phi_i$

	第1折れ点[1]	第2折れ点
$sM_i(i=1\sim 2)$	$sM_1 = (2.4\sqrt{Fc} + \sigma_0) \cdot Ze$	$sM_2 = (1 + \beta)b \cdot r_j \cdot \left\{ \frac{0.14kc \cdot (500 + Fc)}{M/Q \cdot rd} + 0.1\sigma_0 \right\} \cdot L$
$s\phi_i(i=1\sim 2)$	$s\phi_1 = sM_1 / (Ec \cdot I_e)$	$s\phi_2 = c \varepsilon_c / X_s$ (平面保持解析による、図8参照)

注) kc : 断面寸法による係数

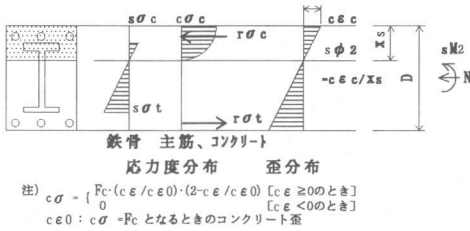


図-8 第2折れ点モーメント、曲率

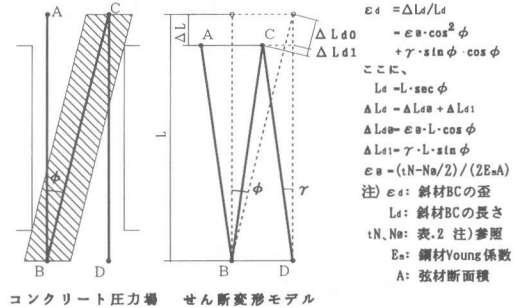


図-9 セン断変形モデル

$$sR_i = \gamma_i, i=3\sim 4 \quad (2)$$

$$\gamma = (\varepsilon_d - \varepsilon_0 \cdot \cos^2 \phi) / (\sin \phi \cdot \cos \phi) \quad (3)$$

ただし、

ε_d : 圧力場コンクリートの軸方向歪(③点において $\varepsilon_d = 0.002$ 、④点において $\varepsilon_d = 0.004$)

ε_0 : 圧力場斜材の軸方向歪(図9 参照)

ϕ : 圧力場コンクリートが部材軸となす角度(図9 参照)

2. 3 スケルトンカーブ面積の対応

部材のエネルギー吸収能力の指標として、限界変形点までの範囲で、スケルトンカーブと横軸の間の面積を取り、計算値 $Scal$ と実験値 $Sexp$ の対応を図10に示す。モデルと実験で変形限界点異なる場合は、両者の内の小さい変形までの部分についての面積を比較した。

曲げ破壊型、せん断破壊型共にモ

デルと実験結果との対応は良好であると考えられる。なお、検討にあたっては、最大耐力の80%を下回る荷重、或いは限界変形部材角を越えるまで実験が行われた繰返し载荷供試体96体、単調载荷供試体42体の実験データのみを用いた。[4]～[17]

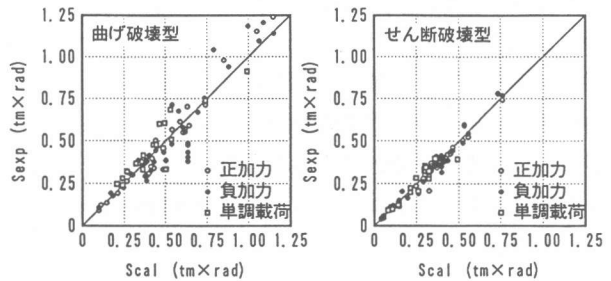


図-10 スケルトンカーブ面積の対応

3. 履歴ループモデル

一般的に、H形鋼等の充腹形鉄骨を内蔵するSRC部材においては、曲げ破壊型、せん断破壊型共に紡錘形の履歴ループを示す。そこで、本論文においては、履歴ループモデルについて、曲げ降伏型RC部材の復元力特性モデルであるTakedaモデル[3]を以下のように修正して適用することとした。

3. 1 曲げ破壊型部材の履歴ループモデル

曲げ破壊型部材の履歴ループモデルを図11(a)～(b)に示す。図11(b)に示すように、変位振幅が第3折れ点変形を越えた場合について、内蔵鉄骨の影響による履歴ループの膨らみを表現できるように、Takedaモデルを修正することとした。即ち、再負荷開始時剛性 K_p を次式で与える。

$$K_p = \eta s \cdot \mu s \cdot (K_r - K_s) + K_s \quad (4)$$

ここに、 ηs :ハースンガ-効果係数(=0.5)

μs :鉄骨耐力比(= $sM_p / srcM_p$)

sM_p :鉄骨断面全塑性モーメント

$srcM_p$:全断面全塑性モーメント

また、除荷剛性 K_r は次式で与えられる。

$$K_r = K_v \cdot (R / fR_2)^\alpha \quad (5)$$

ここに、 K_v :基準剛性[= $(fM_2 + fM_1) / (fR_2 + fR_1)$]

α :剛性低下係数

3. 2 せん断破壊型部材の履歴ループモデル

せん断破壊型部材の履歴ループモデルを図12(a)～(b)に示す。図12(a)に示すように、変位振幅が第3折れ点変形を越えた場合について、曲げ破壊型と同様に鉄骨の影響による履歴ループの膨らみを表現できるように、Takedaモデルを修正することとした。即ち、再負荷開始時剛性 K_p を次式で与える。

$$K_p = \eta s \cdot \mu s \cdot (K_r - K_s) + K_s \quad (6)$$

ここに、

ηs :ハースンガ-効果係数(=0.5)

μs :鉄骨耐力比(= $sM_u / srcM_u$)

sM_u :鉄骨部分終局モーメント

$srcM_u$:SRC終局モーメント

また、除荷剛性 K_r は次式で与えられる。

$$K_r = K_v' \cdot (R / sR_3)^\alpha \quad (7)$$

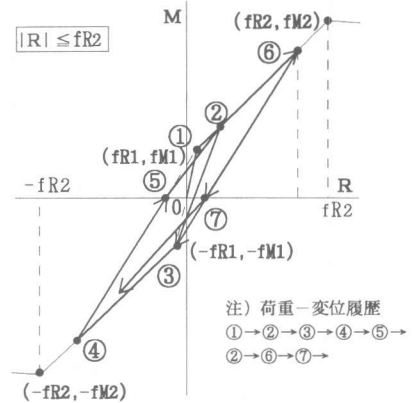


図-11 (a) 履歴ループモデル(曲げ降伏型)

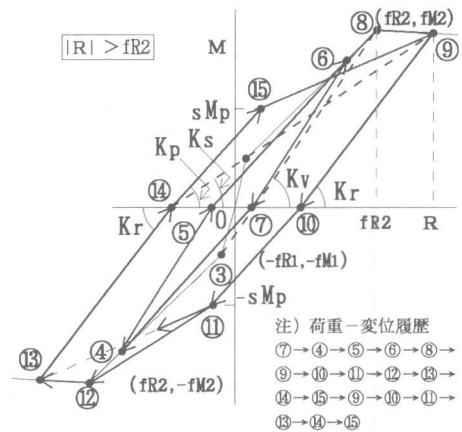


図-11 (b) 履歴ループモデル(曲げ降伏型)

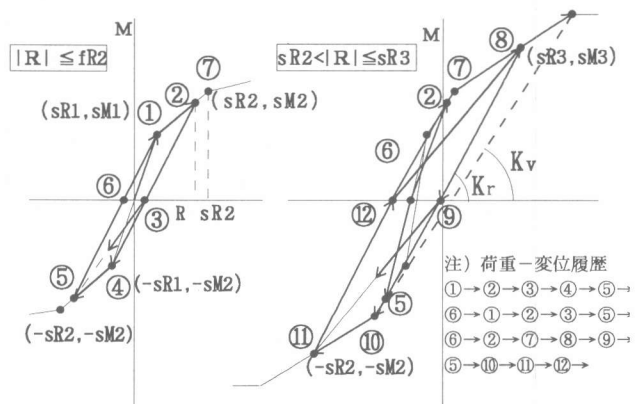


図-12 (a) 履歴ループモデル(せん断破壊型)

ここに、 K_v' : 基準剛性 $[(sM_3+sM_2)/(sR_3+sR_2)]$

α : 剛性低下係数

3. 3 除荷剛性低下係数 α

図13 に、曲げ破壊型の場合は $\log(R/fR_2)$ と $\log(K_v/K_r)$ との関係を、せん断破壊型の場合は $\log(R/sR_3)$ と $\log(K_v'/K_r)$ との関係を各々示す。線形回帰分析により、曲げ破壊型、及びせん断破壊型共、除荷剛性低下係数 $\alpha=0.5$ とした。

3. 4 履歴特性モデルと実験結果との対応

(1) モデルと実験結果の対応例

モデルと実験結果との対応の例を図14に示す。モデルと実験結果(文献[4]、[7]参照)の対応は 概ね良好であると考えられる。

(2) 履歴ループ面積

部材のエネルギー吸収能力の指標として、各変位振幅毎の半サイクルの履歴ループ面積を取り、基準化面積の計算値 A_{0cal} と実験値 A_{0exp} の対応を図15に示す。履歴ループ面積の計算に当たっては、文献資料 [4]～[17] から収集した繰り返し载荷供試体 137体の荷重変位履歴曲線データを用いた。なお、履歴ループ面積の基準化は、図16に示す方法により行った。モデルと実験結果は概ね良好な対応を示しているものと考えられる。

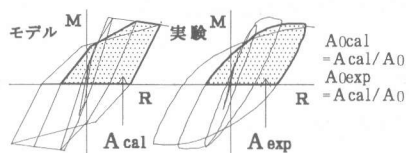


図-16 履歴ループ面積の基準化

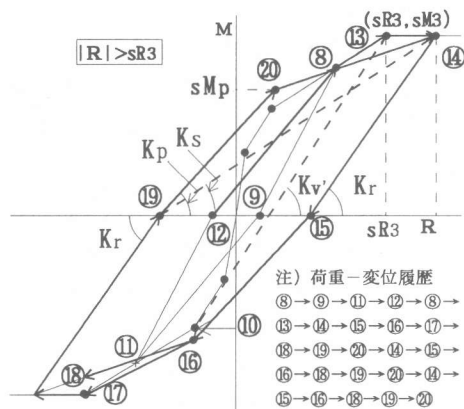


図-12(b) 履歴ループモデル(せん断破壊型)

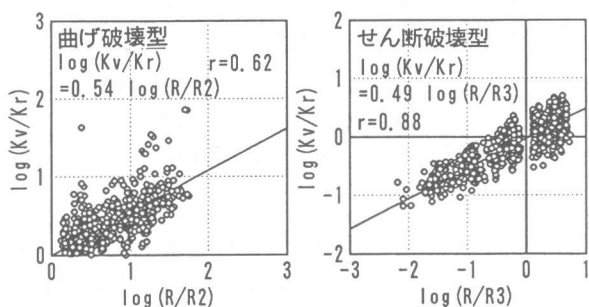


図-13 除荷剛性 K_r と部材角 R の関係

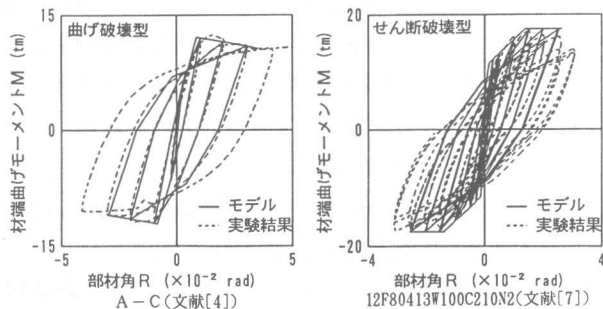


図-14 履歴特性モデルの例

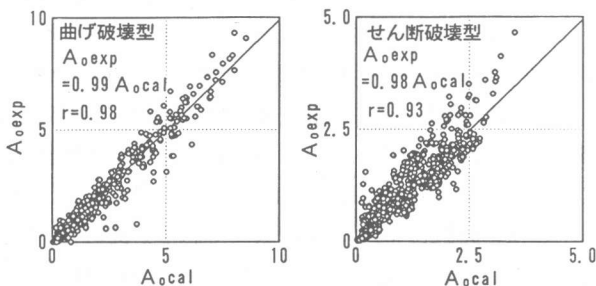
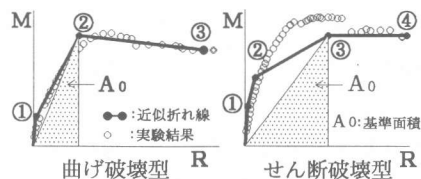


図-15 履歴ループ面積の対応

4. まとめ

曲げ降伏型 R C 部材における Takeda モデルを修正し、S R C 部材に対して、内蔵鉄骨の影響による履歴ループの膨らみを表現できる荷重－変位履歴特性モデルを提案した。本モデルは、比較的単純なものであるが、実験結果との対応は比較的良好であった。

参考文献

- 1) 立花正彦ほか：曲げ破壊型鉄骨鉄筋コンクリート部材の復元力特性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. 9、No. 2 pp513-518、1987. 7
- 2) 加藤勉、称原良一：鉄骨鉄筋コンクリート部材の耐力、日本建築学会論文報告集、266号 pp19-29、1978. 4
- 3) Takeda T., et al : Reinforced Concrete Responce to Simulated Earthquakes , Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 96 No. ST12, pp. 2557~2573, 1970
- 4) 土井希祐：鉄骨鉄筋コンクリート部材の荷重－変位履歴特性モデルに関する研究、東京大学学位論文 1992. 12
- 5) 後藤真、土井希祐：S R C 部材の力学的性状に関する実験研究、土木学会新潟会研究調査発表会論文集、pp282-285、1989. 11
- 6) 土井希祐：曲げ降伏先行型 S R C 柱部材の荷重－変形状に関する実験的研究(その 2)、日本建築学会大会梗概集、1695-1696、1991. 9
- 7) 西田理：鉄骨鉄筋コンクリート部材の曲げせん断破壊に関する実験的研究、東京大学修士論文 1974. 3
- 8) 加藤勉、秋山宏、称原良一：鉄骨鉄筋コンクリート柱の曲げせん断破壊に関する研究、日本建築学会大会梗概集、pp1209-1210、1975. 10、pp1523-1524、1976. 10
- 9) 仲威雄ほか：鉄骨鉄筋コンクリート柱の耐力と履歴特性に関する実験的研究、日本建築学会論文報告集、232号 pp89-99、1975. 6、(その 2) 260号 pp47-58、1977. 10
- 10) 中野清ほか：高強度スパイラルせん断補強筋を用いた鉄骨鉄筋コンクリート部材に関する実験的研究、日本建築学会大会梗概集、pp2495-2496、1983. 9
- 11) 若林実ほか：繰り返し荷重を受ける鉄骨鉄筋コンクリート柱の弾塑性性状に関する実験的研究 その 2、日本建築学会大会梗概集、pp115-1106、1972. 10
- 12) 若林実ほか：鉄骨鉄筋コンクリート柱のせん断付着破壊強度に関する実験的研究(その 1、2)、日本建築学会大会梗概集、pp1469-1472、1977. 10
- 13) 南宏一ほか：鉄骨鉄筋コンクリート柱のせん断破壊に関する実験的研究、日本建築学会大会梗概集、(その 3～5) pp1545-1550、1973. 10、(その 7) pp1365-1366、1974. 10
- 14) 小西昌治ほか：高張力鋼を用いた S R C 構造の開発研究 No. 13 高張力鋼を用いた S R C 柱の終局曲げ耐力と変形性能(その 1)、日本建築学会大会梗概集、pp1339-1340、1981. 8
- 15) 木村衛ほか：曲げ降伏型鉄骨鉄筋コンクリート柱の弾塑性々状－繰り返し逆対称曲げ実験－、日本建築学会論文報告集 306号、pp31-39、1981. 8
- 16) 鈴谷二郎、川名秀人：高強度鉄筋を用いた鉄骨鉄筋コンクリート部材に関する実験的研究、日本建築学会大会梗概集、(その 1) pp2115-2116、1981. 9、(その 2)、pp2249-2250、1982. 10、(その 3) pp2479-2480、1983. 9、(その 4) pp2717-2718、1984. 10
- 17) 鈴谷二郎、川名秀人：S R C 柱の耐力と破壊性状に関する実験的研究、日本建築学会大会梗概集、pp1291-1292、1986. 8、pp1279-1280、1988. 10