

# 論文 セン断破壊型 SRC 部材の安定限界変形量の評価に関する研究

土井 希祐\*1・山林 寛和\*2

**要旨:** セン断破壊型 SRC 部材の安定限界変形を、最大耐力の80%の耐力を保持する部材角  $R_{80}$  で定義する。充腹形 SRC 部材の荷重-変位関係データベースに基づいた分析結果から、セン断破壊型 SRC 部材においては、 $R_{80}$  は鉄骨耐力比と正の相関があることが確認された。さらに、アーチ機構を仮定した簡易な力学モデルに基づいた  $R_{80}$  の評価式を提案した。提案式は、繰返し载荷を受けるセン断破壊型 SRC 部材の  $R_{80}$  の下限値を概ね安全側に評価し得ることが明らかとなった。

**キーワード:** SRC 部材, セン断破壊, 安定限界変形, 鉄骨耐力比

## 1. はじめに

充腹形鉄骨を内蔵する鉄骨鉄筋コンクリート(以後 SRC と記す)部材は、セン断破壊する場合においても、最大耐力以後の耐力低下が小さく、大きな変形性能を示すものが多い。曲げ破壊する SRC 部材においては、その変形性能に軸力が大きな影響をおよぼすが<sup>1)~3)</sup>、セン断破壊する SRC 部材においては、軸力の影響は小さく、鉄骨耐力比の影響が大きいことが報告されている。<sup>2)・3)</sup> しかし、その安定限界変形量の評価法については、未だ解明されているとは言えない。本論文においては、充腹形鉄骨を内蔵するセン断破壊型 SRC 部材を対象とし、その安定限界変形量について、軸力比、帯筋比、および鉄骨耐力比の影響を中心に分析する。さらに、簡易な力学モデルによる安定限界変形量の評価法を示し、その妥当性を検討する。

## 2. セン断破壊型 SRC 部材の安定限界変形

充腹形鉄骨を内蔵するセン断破壊型 SRC 部材の変形性能は、後で述べるように、曲げ破壊型 SRC 部材と遜色ないことから、本論文では、曲げ破壊型 SRC 部材および RC 部材との比較を行う際の利便性も考慮し、その安定限界変形

を最大耐力の80%の耐力を保持する部材角  $R_{80}$  と定義する。実験終了まで最大耐力の80%を下回らない場合は、実験における最大変形を  $R_{80}$  とする。繰返し载荷の場合は、荷重-変位関係の包絡線を対象とする。セン断破壊の定義は、加藤・称原理論<sup>4)</sup>に従い、その耐荷機構モデルにおけるアーチ機構弦材が弾性状態で圧力場コンクリートが圧縮破壊する場合とした。

本論文において検討に用いた実験資料は、強軸方向のH形鋼を内蔵する SRC 部材の荷重-変位関係に関する既往実験データベース<sup>5)</sup>の内、逆対称加力により実験が行われた供試体に関するもので、データ数は、繰返し载荷43体、単調载荷19体である。<sup>5)・13)</sup> 概要を表-1に示す。

表-1 実験資料

	繰返し载荷	単調载荷
供試体数(体)	43	19
断面幅 b(cm)	$15 \leq b \leq 30$	b=20
断面せいD(cm)	$15 \leq D \leq 30$	D=25
軸力比 N/Ny	$0.09 \leq N/Ny \leq 0.32$	$0 \leq N/Ny \leq 0.43$
スパン比 M/QD	$1 \leq M/QD \leq 3$	$1 \leq M/QD \leq 2$
鉄骨比 ps (%)	$2.88 \leq ps \leq 8.44$	$4.60 \leq ps \leq 8.44$
主筋比 pt (%)	$0.44 \leq pt \leq 1.59$	$0.51 \leq pt \leq 1.59$
帯筋比 pw (%)	$0.03 \leq pw \leq 0.48$	$0.19 \leq pw \leq 0.48$
鉄骨降伏応力度 $\sigma_s$ (MPa)	$265 \leq \sigma_s \leq 370$	$271 \leq \sigma_s \leq 327$
主筋降伏応力度 $\sigma_y$ (MPa)	$330 \leq \sigma_y \leq 448$	$343 \leq \sigma_y \leq 385$
帯筋降伏応力度 $\sigma_w$ (MPa)	$289 \leq \sigma_w \leq 582$	$355 \leq \sigma_w \leq 582$
コンクリート圧縮強度 $\sigma_b$ (MPa)	$11.8 \leq \sigma_b \leq 39.2$	$12.7 \leq \sigma_b \leq 34.3$

\*1 新潟大学講師 工学部建設学科 工博(正会員)

\*2 新潟大学大学院 自然科学研究科環境システム科学専攻

図-1および図-2に $R_{80}$ と軸力比 $n$  ( $=N/N_y$ ,  $N_y$ : 1軸圧縮耐力)との関係を示す。繰返し載荷においては、 $R_{80}$ と $n$ との間に相関性は認められない。単調載荷においては、 $R_{80}$ と $n$ の間には負の相関が見られるが、 $n=0.2$ 付近にデータが集中しており、かつ $R_{80}$ のばらつきが極め

て大きく、明瞭なものではない。

図-3および図-4に $R_{80}$ と帯筋比 $p_w$ との関係を示す。繰返し載荷の負加力側において、 $R_{80}$ と $p_w$ に負の相関が見られるが、正加力側においては明瞭な相関は認められない。一方、単調載荷においては、 $p_w$ が小さく $R_{80}$ が大きいグル

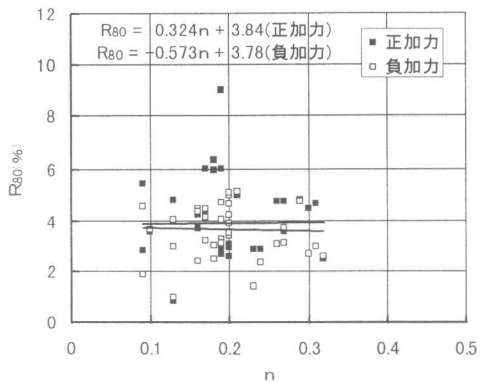


図-1  $R_{80}$ と軸力比(繰返し載荷)

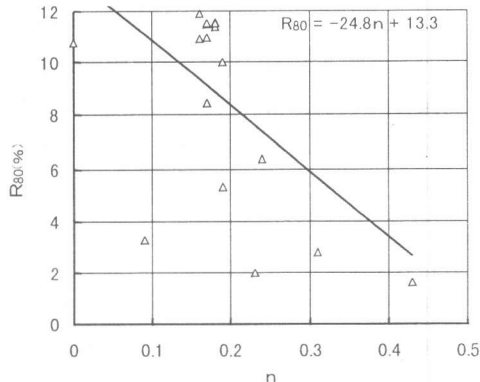


図-2  $R_{80}$ と軸力比(単調載荷)

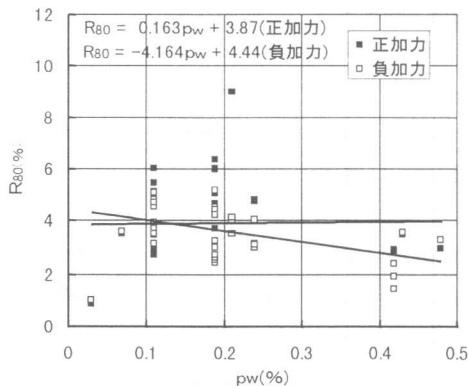


図-3  $R_{80}$ と帯筋比(繰返し載荷)

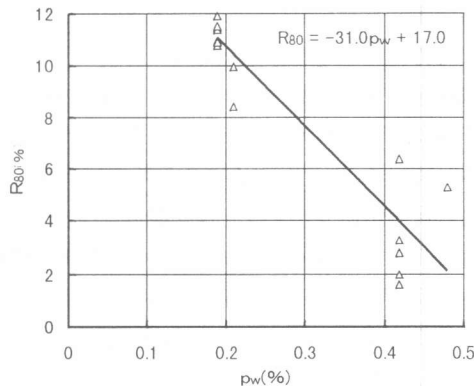


図-4  $R_{80}$ と帯筋比(単調載荷)

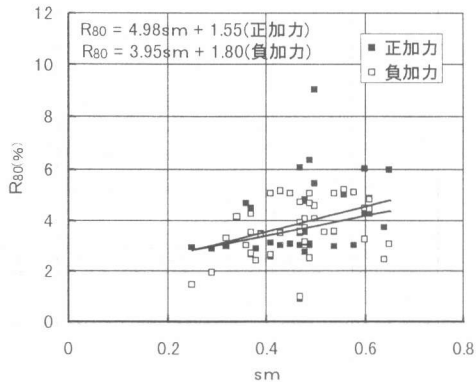


図-5  $R_{80}$ と鉄骨耐力比(繰返し載荷)

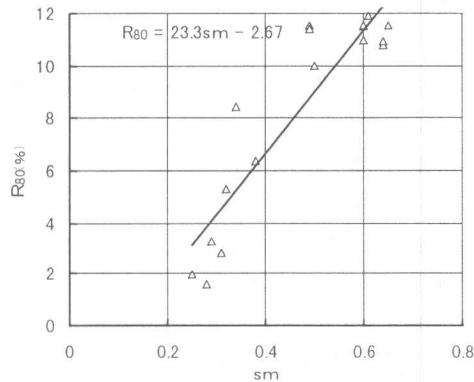


図-6  $R_{80}$ と鉄骨耐力比(単調載荷)

ープと、 $p_w$  が大きく  $R_{80}$  が小さいグループに二分されており、負の相関が見られる。しかし、これは帯筋比の影響というよりも、むしろ後で述べるように、両グループ間における鉄骨耐力比の差異によるものであると思われる。

ところで、 $p_w < 0.3\%$  においても、 $R_{80}$  が4%を上回る供試体が相当数存在し、曲げ破壊型SRC部材で帯筋比が同程度のもものと比較した場合、その変形性能に遜色はないと言える。<sup>1)</sup>

最後に、図-5および図-6に、 $R_{80}$  と鉄骨耐力比  $s_m$  との関係を示す。鉄骨耐力比  $s_m$  は、

$$s_m = sM / srcM \quad (1)$$

により求めた。ここに、 $sM$  および  $srcM$  は、加藤・称原式による鉄骨部分負担耐力および部材耐力である。<sup>3)</sup> 繰返し载荷、単調载荷の双方において、 $R_{80}$  と  $s_m$  には正の相関が認められ、特に単調载荷においては、軸力比および帯筋比との相関性と比較して明瞭である。なお、繰返し载荷の場合は、鉄骨耐力比が大きい領域において、単調载荷の場合と比較して  $R_{80}$  が相対的に低くなっている。これは、繰返し载荷においては、コンクリートの劣化の進展が大きく影響

しているものと考えられる。

### 3. 安定限界変形の評価法

せん断破壊するSRC部材においては、曲げ破壊する場合と異なり、材軸方向の曲率分布を仮定した曲げ変形解析では、最大耐力以後の大変形域における変形を計算することができない。そこで、本論文においては、安定限界変形  $R_{80}$  の評価法として、文献14) で提案したせん断破壊型SRC部材に対する限界変形部材角  $R_{uc}$  の算定法を用いることとした(図-7 参照)。

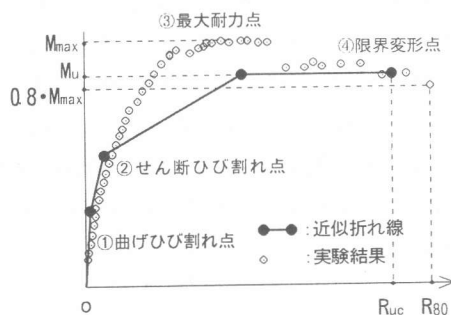


図-7 限界変形部材角  $R_{uc}$

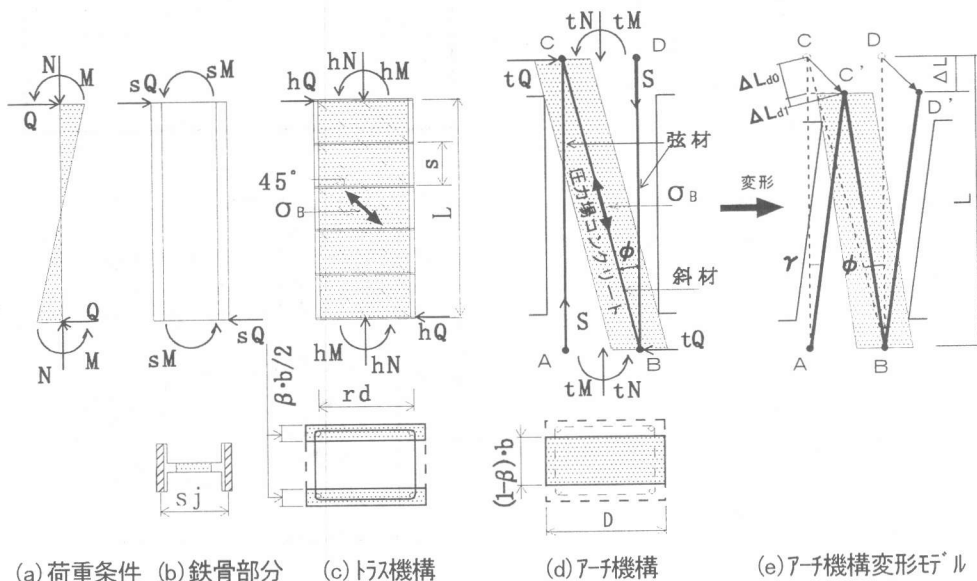


図-8 アーチ機構変形モデル

加藤・称原理論では、SRC部材の耐荷機構は、鉄骨部分、トラス機構、およびアーチ機構により構成される(図-8(b)~(d)参照)。これら3つの機構の中で、アーチ機構が最大耐力を発揮するときの変形が最も大きい。また、SRC部材は、大変形域において、鉄骨とコンクリート間に相対滑りを生じ、部材内部における変形の適合条件は成立しないと考えられる。そこで、図-7の限界変形点④における部材の変形は、図-8(d)に示す加藤・称原理論におけるアーチ機構の終局時の変形で与えられるものと仮定した。即ち、アーチ機構の弦材および圧力場コンクリートの軸方向変形により、図-8(e)に示すように節点CおよびDがC'およびD'へ各々移動し、せん断変形角 $\gamma$ が生じるものとした。

加藤・称原理論において、せん断破壊する場合のアーチ機構弦材は弾性状態にあり、その軸方向歪 $\epsilon_0$ は次式により与えられる。

$$\epsilon_0 = (tN - N_0/2) / (2Es \cdot A) \quad (2)$$

ここに、 $tN$ :アーチ機構作用軸力

$N_0$ :コンクリート断面圧縮耐力

$Es$ :鋼材Young係数

$A$ :アーチ機構の弦材断面積

図-8(e)から、アーチ機構の圧力場コンクリートの軸方向変形 $\Delta L_d$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta L_d &= \Delta L_{d0} + \Delta L_{d1} \\ &= \epsilon_0 \cdot L \cdot \cos \phi + \gamma \cdot L \cdot \sin \phi \end{aligned}$$

ここに、 $L_d$ :斜材BCの初期長さ(= $L \cdot \sec \phi$ )

$\phi$ :斜材BCが部材軸となす角度

よって、圧力場コンクリートの軸方向歪 $\epsilon_d$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \epsilon_d &= \Delta L_d / L_d \\ &= \epsilon_0 \cdot \cos^2 \phi + \gamma \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi \quad (3) \end{aligned}$$

(3)式より、アーチ機構のせん断変形角 $\gamma$ は次式で与えられる。

$$\gamma = \frac{\epsilon_d - \epsilon_0 \cdot \cos^2 \phi}{\sin \phi \cdot \cos \phi} \quad (4)$$

せん断破壊型の場合、終局時においては、せん断変形が支配的であると考えると、 $R_{uc} = \gamma$ とした。

せん断破壊型SRC部材では、曲げ破壊型S

RC部材ほど帯筋によるコンクリート拘束効果は期待できない。しかし、アーチ機構の圧力場コンクリートの限界ひずみ $\epsilon_d$ は、普通強度のコンクリートを用いたSRC部材やRC部材のかぶり部コンクリートの圧縮限界ひずみとして一般的に仮定されることが多い $\epsilon_u = 0.003$ より大きいと考えられる。そこで、限界変形時におけるアーチ機構の圧力場コンクリートの軸方向歪を $\epsilon_d = 0.004$ と仮定した。

(4)式により求めた限界変形部材角 $R_{uc}$ の計算値と実験結果から求めた $R_{s0}$ との対応を表-2、および図-9に示す。単調載荷においては、 $R_{uc}$ は $R_{s0}$ に対して大幅に安全側となっているが、概ね $R_{s0}$ の下限値を与えている。また、繰返し載荷においては、 $R_{uc}$ は $R_{s0}$ と安全側に比較的良好な対応関係を示している。

次に、 $R_{s0}/R_{uc}$ と軸力比 $n$ の関係を、図-10および図-11に示す。繰返し載荷においては、軸力比によらず概ね良好な対応を示している。一方、単調載荷においては、全般的に大幅に安全

表-2 計算値/実験値

	単調載荷	繰返し載荷
平均値	3.349	1.401
標準偏差	1.947	0.477
変動係数	0.581	0.341

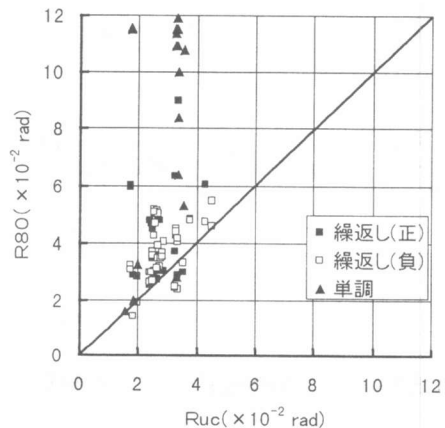


図-9 限界変形部材角計算値と実験値

側となっているが、計算値と実験値の対応度について軸力比との関連性は認められない。

次に、 $R_{80}/R_{uc}$ と帯筋比  $p_w$  の関係を、図-12 および図-13に示す。繰返し载荷においては、計算値と実験結果との対応度に帯筋比の影響は認

められない。一方、単調载荷においては、帯筋比が小さい場合により安全側の評価となった。

最後に、 $R_{80}/R_{uc}$ と鉄骨耐力比の関係を、図-14および図-15に示す。繰返し载荷においては、鉄骨耐力比によらず概ね良好な対応を示してい

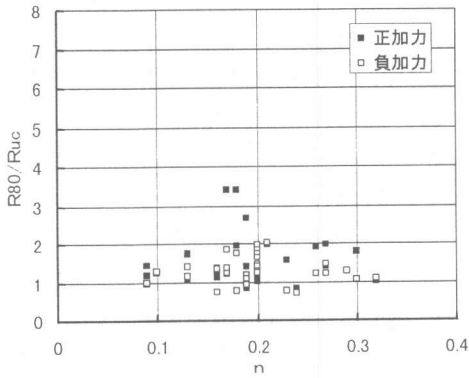


図-10  $R_{80}/R_{uc}$  と軸力比(繰返し载荷)

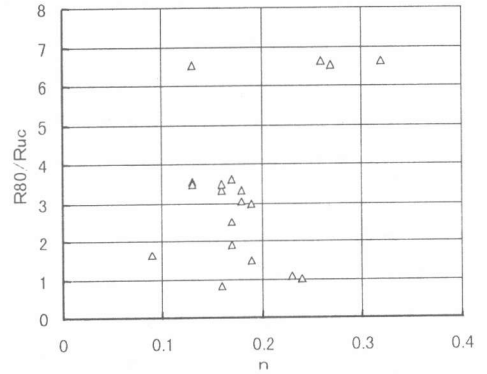


図-11  $R_{80}/R_{uc}$  と軸力比(単調载荷)

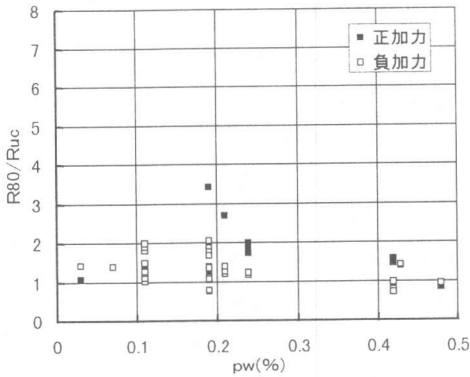


図-12  $R_{80}/R_{uc}$  と帯筋比(繰返し载荷)

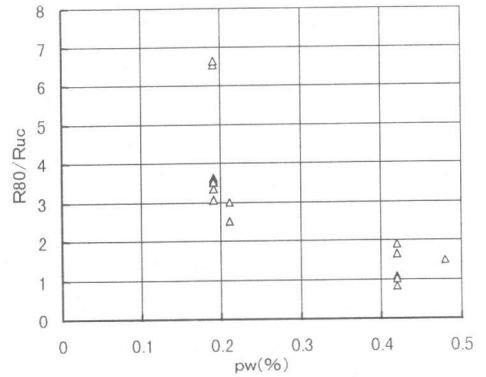


図-13  $R_{80}/R_{uc}$  と帯筋比(単調载荷)

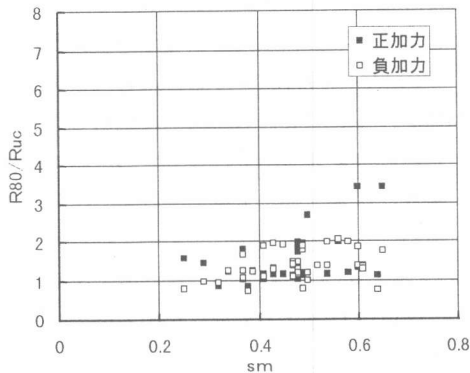


図-14  $R_{80}/R_{uc}$  と鉄骨耐力比(繰返し载荷)

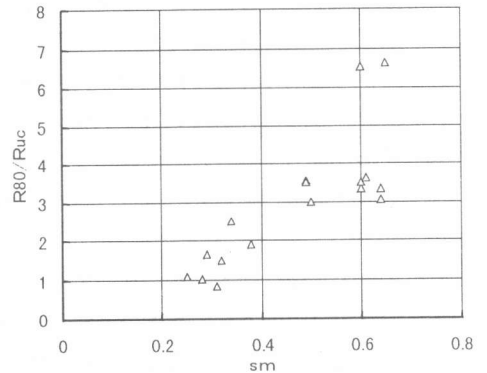


図-15  $R_{80}/R_{uc}$  と鉄骨耐力比(単調载荷)

るが、鉄骨耐力比が大きく、繰返し回数のない供試体においてかなり安全の評価となるものが一部に見られた。一方、単調載荷においては、計算値と実験値の対応度について、鉄骨耐力比との関連性がかなり明瞭に認められた。単調載荷の場合を含めて、繰返し回数が少なく鉄骨耐力比が高い供試体の場合に大幅に安全側の評価となるのは、大変形域においてもコンクリートの劣化が比較的少なく、一方で鋼材歪が歪硬化域にまでおよび、鉄骨部分が降伏耐力を大幅に上回る耐力を発揮するためと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究におけるデータベースの範囲内での検討の結果、せん断破壊するSRC部材の安定限界変形は鉄骨耐力比と正の相関があり、特に単調載荷において明瞭であることが確認された。軸力比および帯筋比との相関は、繰返し載荷においては殆ど認めらず、単調載荷においても鉄骨耐力比との相関ほどには明瞭ではなかった。

簡易力学モデルにより、安定限界変形を推定する評価式を提案した。繰返し載荷においては、提案式は安定限界変形を安全側に比較的精度良く評価している。単調載荷においては、提案式は安定限界変形の下限值を与えているが、鉄骨耐力比が大きい供試体において、極端に安全側の評価となる場合があった。

#### 参考文献

- 1) 土井希祐：SRC部材の安定限界変形量の評価に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20 No.3, pp805-810, 1998.6
- 2) 称原良一・松本良一郎：SRC柱梁部材の耐力と変形性能（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造II, 1111-1112, 1990.10
- 3) 萩原哲也・称原良一：SRC柱梁部材の耐力と変形性能（その4）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造II, 1707-1708, 1991.9
- 4) 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, pp.19-29, 1978.4

- 5) 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、東京大学博士論文, 1993.6
- 6) 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
- 7) 称原良一：鉄骨鉄筋コンクリート柱の耐力に関する実験的研究、東京大学修士論文, 1976.3
- 8) 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、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.2495-2496, 1983.9
- 9) 立花正彦ほか：鉄骨鉄筋コンクリート部材のスケルトンカーブに関する実験的研究（せん断降伏先行型の鉄骨要素を内蔵するせん断破壊先行型の場合）、日本建築学会大会梗概集, pp2713-2714, 1984.10
- 10) 若林実ほか：繰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, pp1105-1106, 1972.10
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 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柱の力学的性状に関する実験的研究、東北工業大学紀要 I 理工学編, 第4号, pp23-40, 1984.3
- 14) 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 スケルトンカーブモデルについて、構造工学論文集, Vol.41B, pp.403-410, 1995.3