

(14) 種々の鉄骨形状をもつSRC柱の
終局せん断耐力に関する理論解

RATIONAL ANALYSIS OF SHEAR IN STEEL REINFORCED CONCRETE
COLUMNS WITH VARIOUS STEEL SECTION

津田和征* 南宏一**
Kazuyuki TSUDA, Koichi MINAMI

For reinforced concrete members with shear reinforcement, a macromodel has already been proposed to predict analytically the ultimate shear resistance. The shear resistance is assumed to consist of two types of mechanism; beam mechanism and arch mechanism, that explain the contributions of shear reinforcement and concrete, respectively. Generally, there is no bond between the steel and reinforced concrete parts for steel reinforced concrete (SRC) members. Therefore, the reinforced concrete part is divided by the steel section, each of divided elements should resist the external shear force individually. To estimate the ultimate shear strength of SRC columns by cumulating the divided elements, the authors proposed the analytical procedure based on the theory of plasticity. It is applicable for SRC columns with various steel type, High-strength steel or light weight concrete. Theoretical predictions show good agreement with test data for SRC columns with cross shaped steel.

1. まえがき

コンクリート系部材の終局せん断強度を塑性解析の手法を用いて理論的に解明しようとする試みが行われている。¹⁾鉄筋コンクリート部材については、若林・南ら²⁾によりせん断抵抗機構としてははり機構 (Beam Mechanism) とアーチ機構 (Arch Mechanism) が混在すると考え、拡張累加強度理論に基づいて圧縮、曲げおよびせん断の組合せ応力状態に対する鉄筋コンクリート部材の終局せん断強度は理論的に求められ、その妥当性が検証されている。

SRC部材の終局せん断強度については、加藤・称原³⁾および若林・南ら⁴⁾⁻⁵⁾により鉄筋コンクリート部材と同様に塑性理論に基づきその理論解が求められている。一般に、SRC部材では鉄骨とコンクリートとの付着力は極めて小さく、終局状態では内蔵される鉄骨に相当する空洞ができコンクリート部分は幾つかの要素に分割されるものと考えられる。⁶⁾若林・南理論では分割されたコンクリート要素がそれぞれ独立して外力に抵抗するものと考え、拡張累加強度理論の適用により圧縮、曲げおよびせん断の組合せ応力状態に対するSRC部材の終局せん断強度を求めている。この手法が若林・南理論の特色であり加藤・称原理論と異なる点である。しかしながら、いずれの理論も強軸まわりのH形鋼を内蔵するSRC部材を対象としている。したがって、本論文では十字形および弱軸まわりのH形鋼を内蔵するSRC部材の終局せん断強度を若林・南理論を用いて求め、その理論解の適合性および妥当性について検討する。また、高張力鋼あるいは軽量コンクリートを用いた場合の妥当性についても併せて検討する。

2. セン断抵抗機構

図1(a)～(b) に一定圧縮力と逆対称曲げおよびせん断を受ける十字形鉄骨および弱軸まわりのH形鋼を内蔵するSRC柱のせん断抵抗機構の模式図をそれぞれ示す。H形鋼を内蔵するSRC柱材では、鉄骨とコンクリートとの付着力は極めて小さく終局状態では鉄筋コンクリート部分にH形鋼に相当する空洞が形成される。故に、鉄筋コンクリート部分は、断面幅 b 、鉄骨フランジ幅 s_b とすると、有効幅 $b' (=b-s_b)$ の長方形断面として、はり機構とアーチ機構が存在することになる。したがって、図1(a)に示すように5個の抵抗要素から構成される。すなわち、(a) 鉄筋コンクリート部分のはり機構、(b) 鉄筋コンクリート部分のアーチ機構、(c) フランジ外部コンクリート部分のアーチ機構、(d) フランジ内部コンクリート部分のアーチ機構、(e) 鉄骨部分のはり機構である。

弱軸まわりのH形鋼および十字形鉄骨を内蔵するSRC部材についても鉄骨とコンクリートとの付着力は期待できないものとする。また、鉄骨内部コンクリート部分は、強軸に直交する鉄骨ウェブにより2つに分割され、それぞれのコンクリート要素が独立にアーチ機構を形成するものとする。したがって、図1(b)、(c)に示すように(a) 鉄筋コンクリート部分のはり機構、(b) 鉄筋コンクリート部分のアーチ機構、(c) 鉄骨内部コンクリート部分のアーチ機構、(d) 鉄骨部分のはり機構の4つの抵抗要素から構成される。

上述の各抵抗要素に対する静的許容応力場を満足する強度(M_i, N_i, Q_i)を決定することで、SRC柱材としての強度(M, N, Q)は、拡張累加強度理論を適用することにより求められる。

$$M = \sum M_i, \quad N = \sum N_i, \quad Q = \sum Q_i \quad (1)$$

また、本論では逆対称の曲げ・せん断の組合せ応力状態を対象としているので(1)式には、

$$M_i = Q_i \cdot h / 2 \quad (h: \text{柱長さ}) \quad (2)$$

の関係を満たす必要がある。なお、各抵抗機構に対してそれぞれの強度が累加できる程度以上に塑性変形が生じるものとし、かつ、構成材料であるコンクリートは、シリンダーの1軸圧縮強度 f_c を保持したまま塑性変形を、鋼材は降伏応力度(σ_y あるいは $r_w \sigma_y$)を保持したまま塑性変形を生じるものとする。

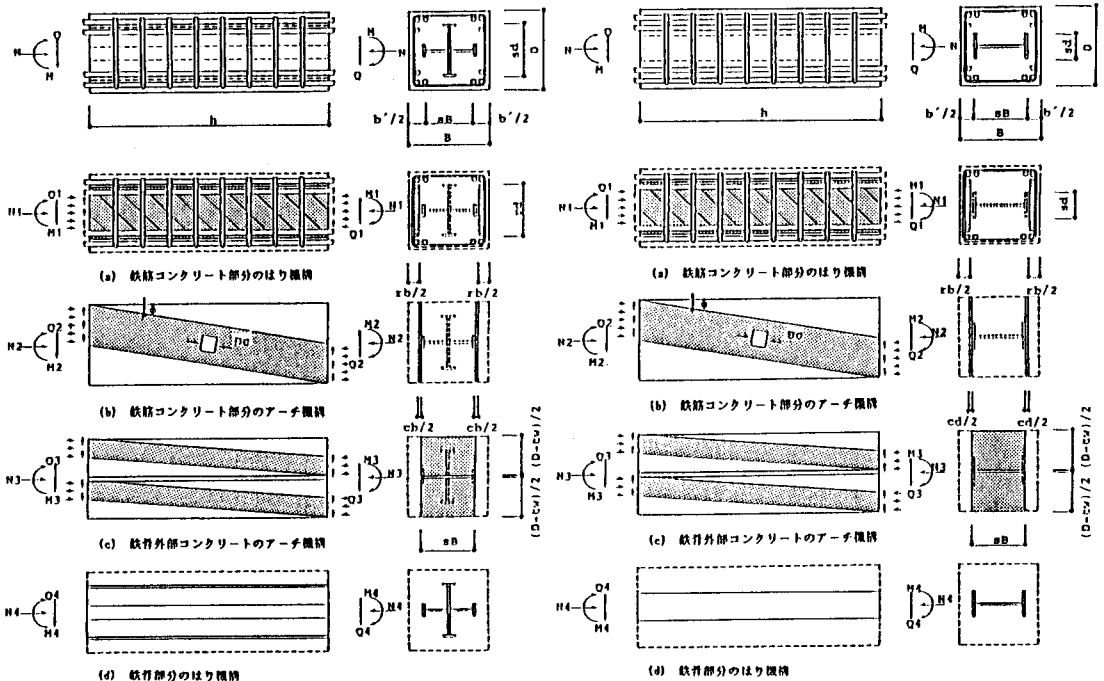


図1(a) セン断抵抗機構 (十字形鉄骨)

図1(b) セン断抵抗機構 (弱軸H形鉄骨)

3. 鉄筋コンクリート部分の $n_c n - r_c q$ 相関方程式

(a) 鉄筋コンクリート部分のはり機構に対する $n_1 - q_1$ 相関方程式

図2にはり機構による $n_1 - q_1$ 相関方程式を図式化したものを示す。鉄筋コンクリート部分のはり機構に対する $n_1 - q_1$ 相関方程式は圧縮力の大きさによって以下の3つの区間に分けられる。直線ACは引張主筋の降伏で強度が決定される(3)式を、直線ECは圧縮主筋の降伏で決定される(5)式を、また、直線BDはせん断補強筋の降伏で決定される(4)式をそれぞれ表す。点Cは上端と下端の主筋が同時に降伏する状態を示し、はり機構によって発揮されるせん断強度の最大値を与えることを示している。また、点B、Dはせん断補強筋の引張降伏と引張主筋あるいは圧縮主筋の降伏が同時に生じる状態を示している。

$$(i) \quad -2 \cdot r \Phi \leq n_1 < -2 \cdot r \Phi + b_1' \cdot r \Phi' w \cdot (rd_1 + \eta)$$

$$q_1 = (n_1 + 2 \cdot r \Phi) / (1 + \eta / rd_1) \quad (3)$$

$$(ii) \quad -2 \cdot r \Phi + b_1' \cdot r \Phi' w \cdot (rd_1 + \eta) \leq n_1 < 2 \cdot r \Phi + b_1' \cdot r \Phi' w \cdot (rd_1 - \eta)$$

$$q_1 = b_1' \cdot rd_1 \cdot r \Phi' w \quad (4)$$

$$(iii) \quad 2 \cdot r \Phi + b_1' \cdot r \Phi' w \cdot (rd_1 - \eta) \leq n_1 < 2 \cdot r \Phi$$

$$q_1 = (n_1 - 2 \cdot r \Phi) / (1 - \eta / rd_1) \quad (5)$$

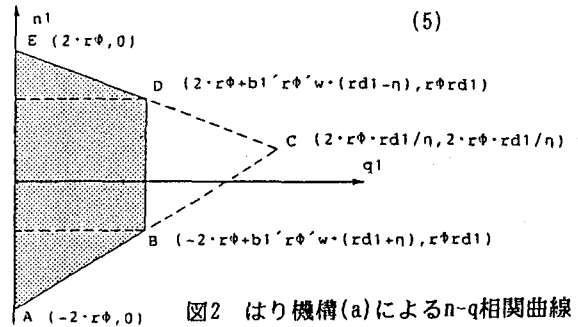


図2 はり機構(a)による $n - q$ 相関曲線

(b) 鉄筋コンクリート部分のアーチ機構に対する $n_2 - q_2$ 相関方程式

図3に示すように無筋コンクリートの両材端部の圧縮域に一樣な垂直応力度 $c\sigma$ と一樣なせん断応力度 $c\tau$ が作用して、その合力としての一軸圧縮応力度 σ が材軸に対して θ の角度を持つ方向に作用し、 σ が F_c の値になった時このアーチ機構の強度が発揮されると仮定すると、そのせん断強度 q_2 は、

$$q_2 = (\sqrt{4 \cdot n_2(1 - n_2/cb_1) + \eta^2} - \eta) \cdot cb_1 / 2 \quad (\text{ただし, } 0 \leq n_2 \leq cb_1) \quad (6)$$

あるいは、

$$(n_2 - cb_1/2)^2 + (q_2 + cb_1 \cdot \eta / 2)^2 = \{(cb_1 \cdot \sqrt{1 + \eta^2}) / 2\}^2 \quad (7)$$

と書き表せ、図3に示すように鉄筋コンクリート部分のアーチ機構に対する $n_2 - q_2$ 相関方程式は円の方程式で表される。なお、 $cb_1 (= cb/b)$ は鉄筋コンクリート部分のアーチ機構に使用するコンクリートの束材の幅 cb を断面幅 b で無次元化したもので前述した鉄筋コンクリート部分のはり機構を形成するために必要な束材の幅 $rb_1 (= rb/b)$ と $cb_1 + rb_1 = b_1'$ の関係にある。

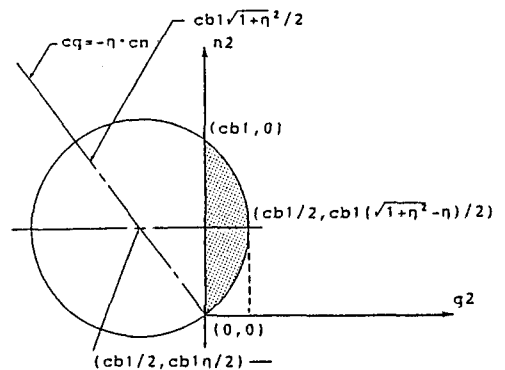
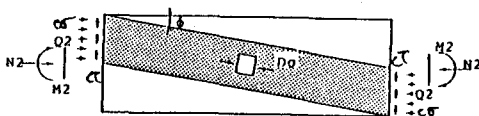


図3 アーチ機構(b)によるせん断抵抗機構および $n - q$ 相関曲線

(c) 鉄骨内部コンクリートのアーチ機構に対する n_3 - q_3 相関方程式

図4に鉄骨内部コンクリート部分のアーチ機構に対する n_3 - q_3 相関方程式の模式図を示す。相関方程式は3節(b)の方法に準じて求めると

$$q_3 = \{ \sqrt{n_3(2 \cdot coA1' - n_3) / (coA1')^2 + (\eta / cod1')^2} - (\eta / cod1') \} \cdot coA1' \quad (0 \leq n_3 \leq 2 \cdot coA1') \quad (8)$$

あるいは、

$$(n_3 - coA1')^2 + \{ q_3 + coA1' \cdot (\eta / cod1') \}^2 = (coA1')^2 + (\eta / cod1')^2 \cdot (coA1')^2 \quad (9)$$

となる。ここに、

$cod1' = cod' / D$ (cod' :鉄骨内部コンクリート断面せい)

$sbl' = \kappa \cdot sh / B$ (sh :鉄骨せい、 $\kappa (\leq 1)$:強軸方向と弱軸方向の鉄骨せい比)

$coA1' = sbl' \cdot cod1'$ である。

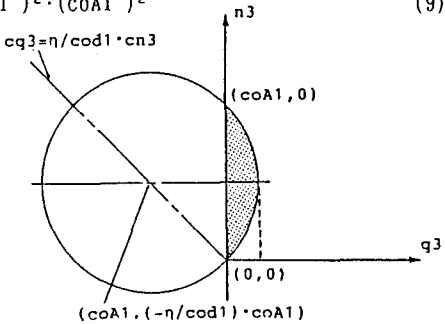


図4 アーチ機構(c)による n - q 相関曲線

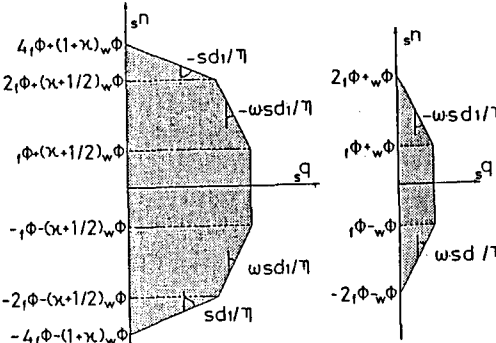
図5に弱軸H形および十字形鉄骨の s_n - s_q 相関方程式

を図式化したものを示す。鉄骨部分の終局せん断耐力は、材端の終局曲げ耐力から求められるせん断耐力

(sqr_u)と鉄骨ウェブの降伏せん断耐力(sqs_u)と

により、 $s_q = \min(sqr_u, sqs_u)$ (10)

として求める。本解析では、鉄骨部分の終局せん断耐力が sqr_u で決定される場合、すなわち鉄骨部分が曲げ降伏する場合のみを対象とする。



(i) 十字形鉄骨 (ii) 弱軸H形鉄骨

図5 鉄骨部分の s_n - s_q 相関曲線

5. SRC柱の n - q 相関方程式

(a) 十字形鉄骨を内蔵したSRC柱の終局せん断耐力

図1(a)に示すはり機構(a)、アーチ機構(b)およびアーチ機構(c)の累加により得られる鉄筋コンクリート部分の n - q 相関曲線は、強軸H形鋼を内蔵したSRC柱の場合と同様に、3つのケースに分けられる。6) (図6

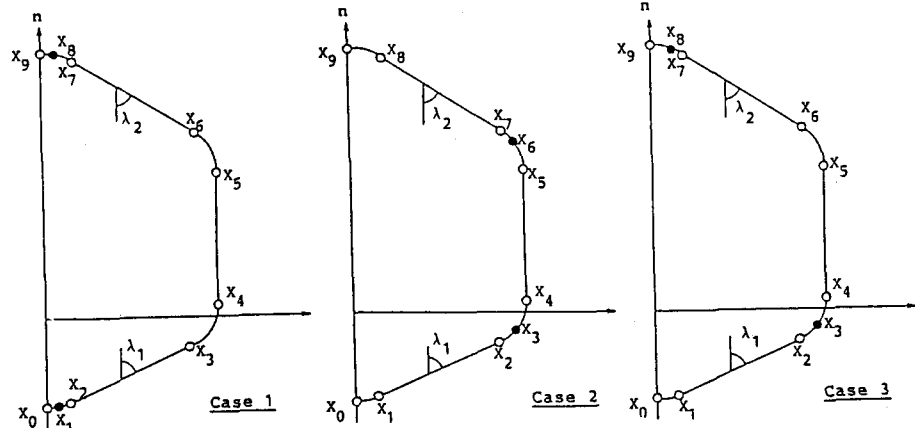


図6 鉄筋コンクリート部分の n - q 相関曲線

参照)したがって、十字形鉄骨を内蔵したSRC柱の終局せん断耐力は、それぞれのケースに鉄骨部分の耐力を累加するよって求めることができる。しかしながら、強軸H形鋼を内蔵したSRC柱の場合のように鉄筋コンクリート部分のn-q相関曲線上の特定点で鉄骨部分の耐力を累加することができない。そこで、本解析では鉄筋コンクリート部分のn-q相関曲線上で鉄骨部分の直線勾配と一致する点を決定し、その点に鉄骨部分の耐力を累加する方法を採用した。この方法によって求めた十字形鉄骨を内蔵したSRC柱の相関曲線を図式化したものを図7に示す。相関曲線は作用軸力の大きさ(n)によって17個の方程式で構成される。また、SRC柱としての最大せん断耐力q(軸力に無関係に一定値をとる領域。)は各々のせん断抵抗機構が保有する最大せん断耐力を累加し、便宜的に

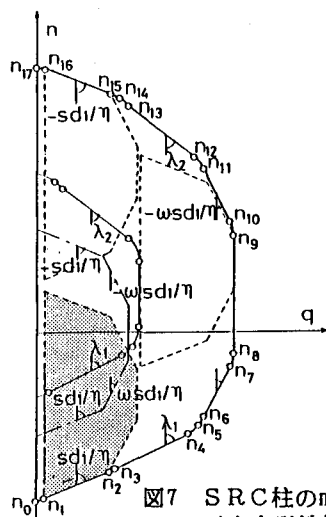


図7 SRC柱のn-q相関曲線
(十字形鉄骨)

$$q = b1' \cdot r\Phi w' \cdot rd1 - (b1' \delta' + sb1') \eta + 2 \cdot b1' \delta' \gamma + 2 \cdot b1' \delta' \gamma 1' + sq \quad (11)$$

ただし、 $b1' = b'/b$, $rd1 = rd/D$, $sb1' = sB/B$, $r\Phi w' = rw\sigma y \cdot rPw'/Fc$ (有効幅 b' のせん断補強筋係数)

$$\delta' = (1 - 2 \cdot r\Phi w') / 2, \quad \gamma = \sqrt{1 + \eta^2} / 2, \quad \gamma 1' = \sqrt{cod1' + \eta^2} / 2, \quad sq \text{ (鉄骨部分のせん断耐力)}$$

として求めることができる。なお、図中に示す鉄筋コンクリート部分の相関曲線はCASE3の場合を表し、鉄骨部分は曲げ降伏型の場合を表している。

(b) 弱軸H形鋼を内蔵したSRC柱の終局せん断耐力

十字形鉄骨を内蔵したSRC柱と同様に、鉄筋コンクリート部分のn-q相関曲線は3つのケースに分けられ、鉄骨部分の耐力をそれぞれのケースに累加するより弱軸H形鋼を内蔵したSRC柱の終局せん断耐力を求めることができる。鉄骨部分の耐力を鉄筋コンクリート部分のn-q相関曲線に累加する手法は、十字形鉄骨を内蔵したSRC柱の場合と同様である。弱軸H形鋼を内蔵したSRC柱の最大せん断耐力は、(11)式より与えられる。つまり、本解析手法では十字形鉄骨と弱軸H形鉄骨を用いた場合との終局せん断耐力の差はそれぞれの鉄骨が保有するせん断耐力に依存する形となっている。

6. 理論解の適合精度

本論文で提案した理論解の妥当性を検証するために、高張力鋼を用いた試験体21体⁷⁾、軽量コンクリートを用いた試験体6体⁹⁾、普通コンクリートを用いた試験体9体⁹⁾、計36体の試験体を選択した。図8に本解析手法による理論解と鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(SRC規準)¹⁰⁾で提案されている理論解との相関関係を示す。縦軸は拡張累加強度理論による理論耐力(Qsu)、横軸はSRC規準による理論耐力(Qu)を表す。図中の○、□、△印は強軸H形、十字形および弱軸H形の鉄骨を用いた試験体をそれぞれ表す。提案した理論解は、鉄骨形状に関わらずSRC規準による理論耐力より高い値を示している。つまり、塑性解析の手法に基づいた本理論解は部材が保有する耐力の下限值を与えることから、SRC規準式に比べてより合理的に耐力を評価できるものと思われる。図9に提案した理論解と実験結果から得られた最大耐力との比較を鉄骨形状別に示す。縦軸

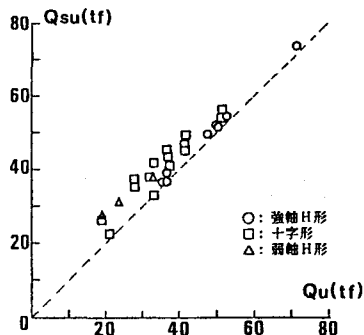


図8 本理論解(Qsu)とSRC規準による理論解(Qu)との比較

は実験値（正載荷時）、横軸は提案した理論解を示す。図中の○、□、△印は高張力鋼、普通コンクリート、軽量コンクリートを用いた試験体をそれぞれ表している。十字形鉄骨を用いた場合、鉄骨の材質及びコンクリートの種別に関わらず理論耐力は実験値に対して安全側の評価となる。一方、弱軸H形鋼を用いた場合には危険側の評価となる。これは弱軸H形鉄骨の場合、剛性が低いためSRC柱としての最大耐力時にその耐力を十分に発揮していないためである。

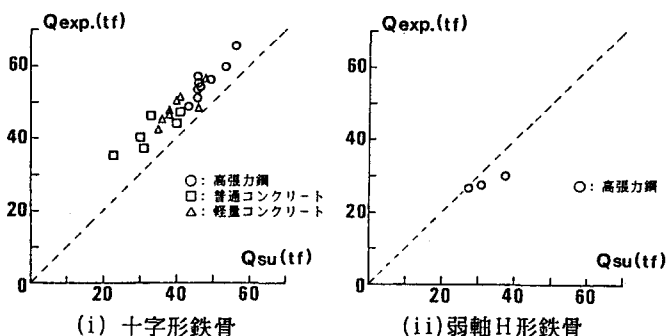


図9 実験値と本理論解との比較

十字形鉄骨を用いた場合、鉄骨の材質及びコンクリートの種別に関わらず終局せん断耐力は提案した理論解により評価できる。弱軸H形鋼を用いた場合には理論耐力は鉄骨の剛性が低いため危険側の評価となる。今後、鉄骨部分の耐力評価に対して若干の補正、検討を行う必要がある。

記号

B:柱幅(cm) D:柱せい(cm) rd:有効せい(cm) sd:鉄骨せい(cm) sB:鉄骨幅(cm) tw:鉄骨ウェブ厚さ(cm)
h:柱長さ(cm) η :柱長さ比(=h/D) $r\Phi$:引張鉄筋係数 $rw\sigma_y$:せん断補強筋の引張降伏応力度(kgf/cm²)

参考文献

- 1) 南 宏一 「せん断を受ける鉄筋コンクリート部材の極限解析について」 RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するJRC論文誌 1982年6月 pp.1-16
- 2) 南 宏一、若林 實 「鉄筋コンクリート部材のせん断強度について」 第2回コンクリート工学年次講演会論文集 1980年6月 pp.449-452
- 3) 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 第266号 1978年4月
- 4) 岡本浩一、南 宏一、若林 實 「SRC柱のせん断強度に関する理論解」 第7回コンクリート工学年次講演会論文集 1985年 pp.557-560
- 5) 若林 實、南 宏一 「コンクリート系構造部材のせん断強度について」 京大防災研究所年報 第24号 昭和56年4月 pp.245-277
- 6) 若林 實、南 宏一、岡本浩一 「突起付H形鋼を用いたSRC柱のせん断抵抗機構に関する研究(その2)」 京大防災研究所年報 第28号 昭和60年4月 pp.209-235
- 7) 出野上恵一、津田和征、南 宏一 「高張力鋼を用いたSRC柱のせん断破壊性状に関する実験的研究(その2)(その3)」 日本建築学会近畿支部研究報告集 平成元年5月 pp.489-496
- 8) 中野慎吾、津田和征、南 宏一 「L字形形状の帯筋で配筋されたSRC柱のせん断破壊性状」 日本建築学会近畿支部研究報告集 平成元年5月 pp.497-500
- 9) 畠 史子、津田和征、南 宏一 「コンクリート強度360kgf/cm²の第一種コンクリートを用いたSRC柱のせん断破壊性状」 日本建築学会近畿支部研究報告集 平成元年5月 pp.501-504
- 10) 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」 1987年度版