

[140] SRC 柱のせん断強度に関する理論解

正会員 南 宏一 (大阪工業大学工学部)  
 正会員〇 岡本浩一 (大阪工業大学大学院)  
 正会員 若林 実 (日本建築総合試験所)

1. 序

コンクリート系部材の終局せん断耐力を塑性解析の手法を用いて把握しようとする試みが行われているが[1]、鉄筋コンクリート部材については、若林・南によって単純かつ明解な理論解が発表されている[2]。本論では、この方法を SRC 部材に応用し、SRC 部材の終局せん断耐力の理論解を求め、かつこの理論耐力にもとづいて誘導された SRC 規準改定案の終局せん断耐力の妥当性を検討する。

2. せん断抵抗機構

図 1 および図 2 に一定圧縮力  $N$  と逆対称の曲げおよびせん断を受ける強軸まわりの H 形鋼を内蔵する SRC 柱のせん断抵抗機構の模式図を示す。図 1 は鉄骨部材の存在を無視して、RC 部分のせん断耐力を[2]の方法によって求めるものであり、加藤・称原理論[4]に対応するものである(理論 1 とする)。しかしながら、H 形鋼が内蔵される SRC 柱では、鉄骨とコンクリートの付着作用は極めて小さく、終局状態では RC 部分には H 形鋼に相当する空洞ができるので[5]、図 2 に示すように SRC 部材では次の 5 つの抵抗要素が構成される。すなわち、鉄骨フランジ幅  $b$  により決まる有効幅  $b'$  ( $= b - s_b$ ) を持つ RC 部分のはり機構(a)とアーチ機構(b)のほか、鉄骨フランジ外部のかぶりコンクリート部分のアーチ機構(c)、鉄骨フランジ内部のコアコンクリート部分のアーチ機構(d)、および鉄骨部分のはり機構(e)である(理論 2 とする)。

3. 累加強度理論の適用

前述の理論 1 および理論 2 の各抵抗機構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 部材としての強度 ( $M, N, Q$ ) は拡張累加強度理論を適用することで求められる[3]。

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

一方、 $M_i = Q_i \cdot l/2$  の関係があるので、各抵抗機構の圧縮力  $N_i$  とせん断力  $Q_i$  に関する相関方程式を決定することで、SRC 部材のせん断耐力を解析的に求めることができる。 $b'$  の幅の RC 部分のはり機構に

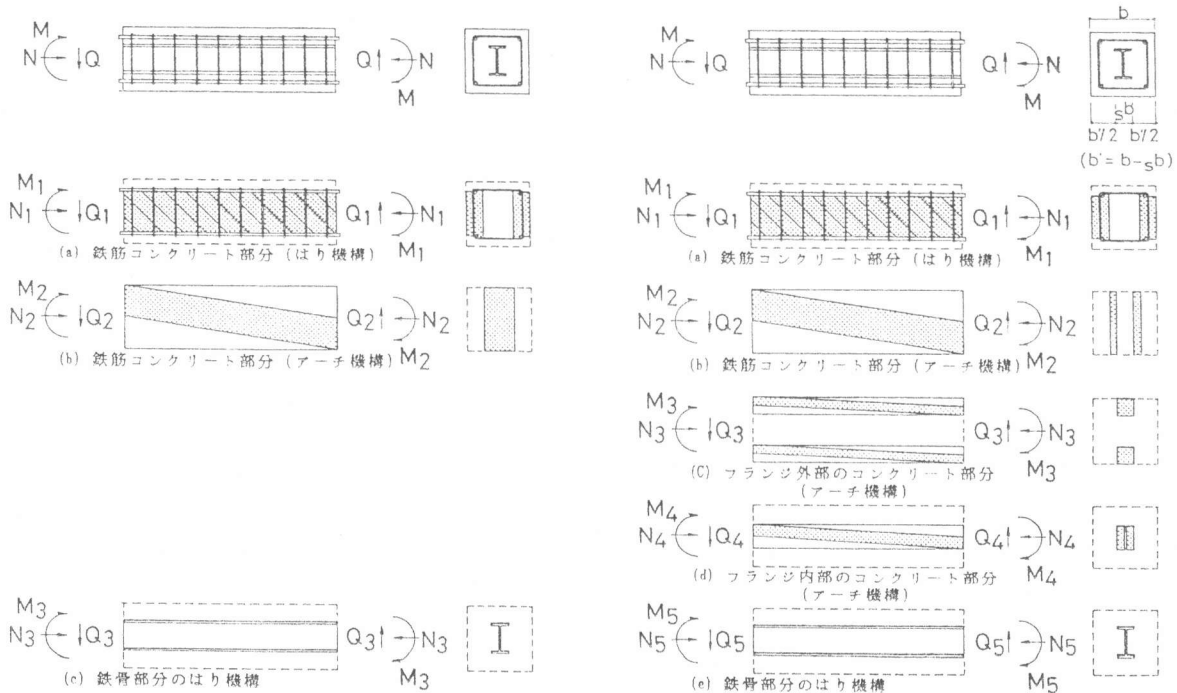


図 1 SRC 部材のせん断抵抗機構 (理論 1)

図 2 SRC 部材のせん断抵抗機構 (理論 2)

関する  $n(=N/bhF_c) - q(=Q/bhF_c)$  相関方程式は、 $b$  を  $b'$  に置換して、文献 [2] の方法をそのまま用いて求めることができるが、コンクリート部分のアーチ機構の  $n - q$  相関方程式は若干の修正を必要とする。すなわち、理論 1 のコンクリート部分のアーチ機構の  $n - q$  相関方程式は 1 つの円の方程式となるが [2, 3]、理論 2 では 3 つのアーチ機構 (図 2 の (b), (c), (d)) による 3 つの円の方程式で表される耐力の累加を行なうことになり、その累加則は複雑なものになる。通常の SRC 部材では、かぶりコンクリート部分のせん断耐力は極めて小さいので、解析を簡単にするために理論 2 ではかぶりコンクリート部分は圧縮力のみ抵抗すると仮定すると、アーチ機構による耐力は 2 つの円の方程式で表される耐力の累加を行なうことによって得ることができる。

#### 4. RC 部分の終局せん断耐力

図 3(a) にははり機構とアーチ機構による耐力の累加によって得られる、RC 部分の相関曲線の例を示す。図に示す  $rc^I_{su1}$  および  $rc^I_{su2}$  はそれぞれ、理論 1 および理論 2 による相関曲線を表す。また、 $rc^I_{fu}$  は材端の終局曲げ耐力を表す相関曲線を表す。図中の影を付した部分が理論 2 によるせん断耐力の低下域を示し、SRC 部材では理論 2 による抵抗機構を考える必要があることを示している。図 4 にその耐力の低下状況を検討したものを示す。理論 1 および理論 2 のはり機構によるせん断耐力は等しい

ので、鉄骨フランジ幅  $s_b$  を持つコンクリート部分について比較を行ったものであるが、ここでは精密解を検討するために、かぶりコンクリート部分のアーチ作用を考慮している。縦軸は理論 2 の最大せん断耐力  $qu_2$  を理論 1 の最大せん断耐力  $qu_1$  で除した値を、横軸は鉄骨せい比  $s_{d1}$  ( $=s_d/b$ ) をそれぞれ表す。図に示されるように  $qu_2/qu_1$  は、柱長さ比  $\eta (=l/h)$  にはほとんど影響しないが、 $s_{d1}$  の値に強い影響を受け、 $s_{d1} = 0.4$  程度で最も低下率が大きく、通常用いられる断面構成では 40~50% 程度となる。しかしながら、RC 部分としてのせん断耐力にははり機構の耐力が加算されるので、理論 1 と理論 2 によるせん断耐力の差はそれほど大きくなく、かぶりコンクリート部分のアーチ作用を無視しても図 3(a) に示す程度となる場合が多い。RC 部分の終局せん断耐力を理論 2 により評価するとその相関方程式は複雑な形となるが、最大せん断耐力  $rc^q_{su20}$  は、

$$rc^q_{su20} = b'_1 \cdot r_{d1} \cdot \Psi' - (2 \cdot b'_1 \cdot \delta' + s_{b1}) \cdot \eta / 2 + s_{b1} \cdot \gamma_1 + 2 \cdot b'_1 \cdot \delta' \cdot \gamma \quad (2)$$

ただし、 $b'_1 = b'/b$ 、 $r_{d1} = r_d/h$ 、 $s_{b1} = s_b/b$ 、 $\Psi' = \frac{r_{pw} \cdot \sigma_y}{r_w \cdot r_w \cdot \sigma_y / F_c}$  (有効幅  $b'$  のせん断補強筋係数)  
 $\delta' = (1 - 2\Psi')/2$ 、 $\gamma_1 = \sqrt{s_{d1}^2 + \eta^2}/2$ 、 $\gamma = \sqrt{1 + \eta^2}/2$

と簡便に表される。図 3(a) に示されるように、せん断破壊形の部材では最大耐力を示す相関曲線は圧縮力に関係せず一定値となり、最大せん断耐力を示す以外の相関曲線部分では終局曲げ耐力を示す相関曲線にはほぼ一致することが示される。そこで、RC 部分の終局せん断耐力を比較的簡単に求める方法を図 3(b) に示す。すなわち、前述の (2) 式のせん断耐力と終局曲げ耐力により、 $\min(rc^q_{su20}, rc^q_{fu})$  で終局せん断耐力を近似的に評価するものである。この方法による理論 2 との誤差は、図 3(b) の影を付した部分で極めて小さく、終局せん断耐力を十分評価できるものと考えられる。

#### 5. 鉄骨部分のせん断耐力

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  $s^q_{fu}$  と鉄骨ウェブの降伏せん断耐力  $s^q_{su}$  とにより、 $\min(s^q_{fu}, s^q_{su})$  として求める。図 5 に  $n - q$  相関曲線の例を示す。 $s^I_{fu}$  は  $s^q_{fu}$  を、 $s^I_{su}$  は  $s^q_{su}$  をそれぞれ表す相関曲線である。実際には、ウェブ部分の相関曲線により破線で示すようになるが、解析を簡単化するために実線で示す相関曲線に近似している。

#### 6. SRC 部材の終局せん断耐力

以上の理論 1 および理論 2 の RC 部分および鉄骨部分の耐力を表す相関曲線

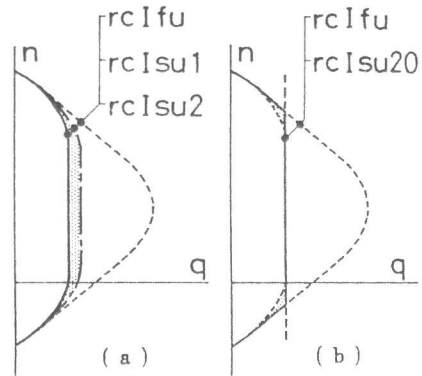


図 3 RC 部分の  $n - q$  相関曲線

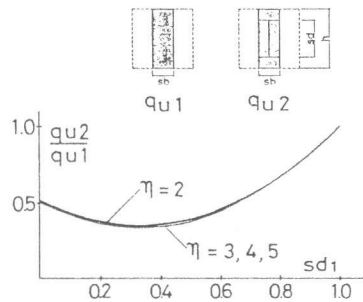


図 4 せん断耐力低下状況

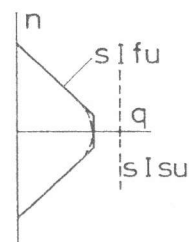


図 5 S 部分の  $n - q$  相関曲線

を累加することによって得られる SRC 部材の相関曲線の例を 図 6 に示す。図の  $rc^{I_{su1}}$  および  $rc^{I_{su2}}$  はそれぞれ理論 1 および理論 2 による相関曲線を表す。 $rc^{I_{fu}}$  は材端の終局曲げ耐力から求められるせん断耐力を表す相関曲線を表す。 $rc^{I_{fu}}$ ,  $rc^{I_{su1}}$  および  $rc^{I_{su2}}$  は図 3(a) に示す RC 部分の相関曲線を、 $s^{I_{fu}}$  は図 5 に示す鉄骨部分の相関曲線をそれぞれ表す。

### 7. 理論値と実験値の対応

図 7(a), (b) は文献 [4] および [5] の SRC 柱 64 体の実験耐力を理論耐力で除した値の頻度分布を表し、(a)は理論 1 を、(b)は理論 2 の場合をそれぞれ示す。理論 1 では平均値は  $m = 1.04$ 、標準偏差は  $\sigma = 0.10$  となるが、危険側の評価となる試験体が 40% 程度含まれる。一方、理論 2 では  $m = 1.14$ 、 $\sigma = 0.09$  となり、実験耐力との一致も良く、危険側の評価となる試験体は 10% 以下となる。破壊機構にもとづく本理論では下限値を与えることから、SRC 部材では理論 2 により終局せん断耐力を評価できることが示される。

### 8. SRC 規準改定案 [6] の SRC 部材の終局せん断耐力 (理論 3 とする)

前述のように、強軸まわりの H 形鋼を内蔵する SRC 部材の終局せん断耐力は、理論 2 による理論解により十分評価できることが示されたが、解が複雑な形で表されるために設計式として直接適用することは適当でない。しかしながら、4 章で示したように RC 部分のせん断耐力は図 3(b) に示される相関曲線により近似的に求めることが可能である。そこで、(2)式を簡単な式で表すことができれば、部材の終局せん断耐力を簡単に求められる。そこで、SRC 規準改定案では、(2)式に対応するせん断耐力を評価するために、短期許容せん断耐力の考え方を準用して、

$$rc^{q_{su30}} = \min (rc^{q_{u1}}, rc^{q_{u2}}) \quad (3)$$

として評価している。ここで、 $rc^{q_{u1}}$  および  $rc^{q_{u2}}$  は (4)式で表される。

$$\begin{aligned} rc^{q_{u1}} &= r_j^j \cdot (0.075 \cdot \alpha + 0.5 \cdot \Psi) \\ rc^{q_{u2}} &= r_j^j \cdot (0.15 \cdot b_1' + \Psi) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $\alpha = 7 / (n + 7/4)$ 、 $r_j^j = r_j^j / h$ 、 $r_j^j = 7 \cdot D / 8$ 、 $\Psi = r_w^p \cdot r_w^{\sigma} / F_c$  (せん断補強筋係数) 従って、RC 部分のせん断耐力は、図 3(b) にもとづいて、

$$rc^{q_{su3}} = \min (rc^{q_{su30}}, rc^{q_{fu}}) \quad (5)$$

と表される。鉄骨部分は、5 章と同じで、

$$s^{q_u} = \min (s^{q_{su}}, s^{q_{fu}}) \quad (6)$$

と表される。図 6 に示される  $rc^{I_{su3}}$  および  $src^{I_{su3}}$  は学会規準提案式にもとづいて得られる RC 部分および SRC 部材の  $n - q$  相関曲線の例である。

### 9. SRC 規準改定案のせん断耐力式の検討

SRC 部材のせん断耐力式のうち、鉄骨部分に関しては理論式と同じであるので、RC 部分の最大せん断

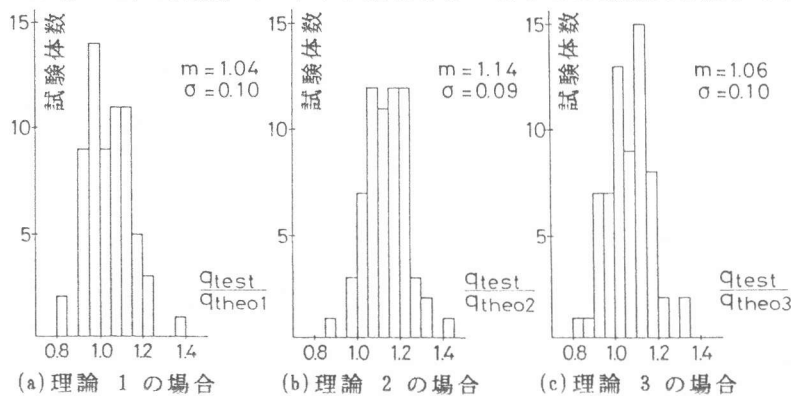


図 7 実験値/解析値の頻度分布

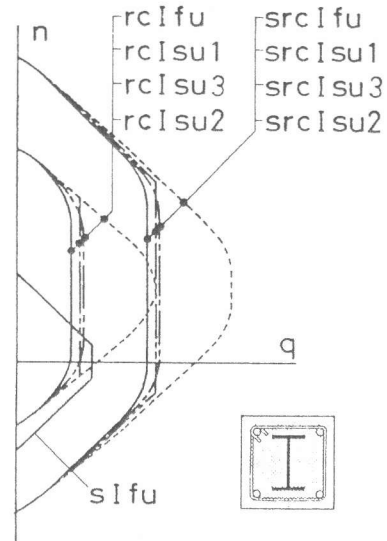


図 6 SRC 部材の  $n - q$  相関曲線

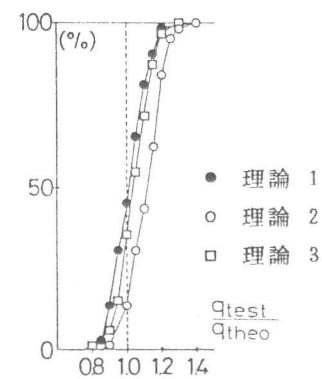
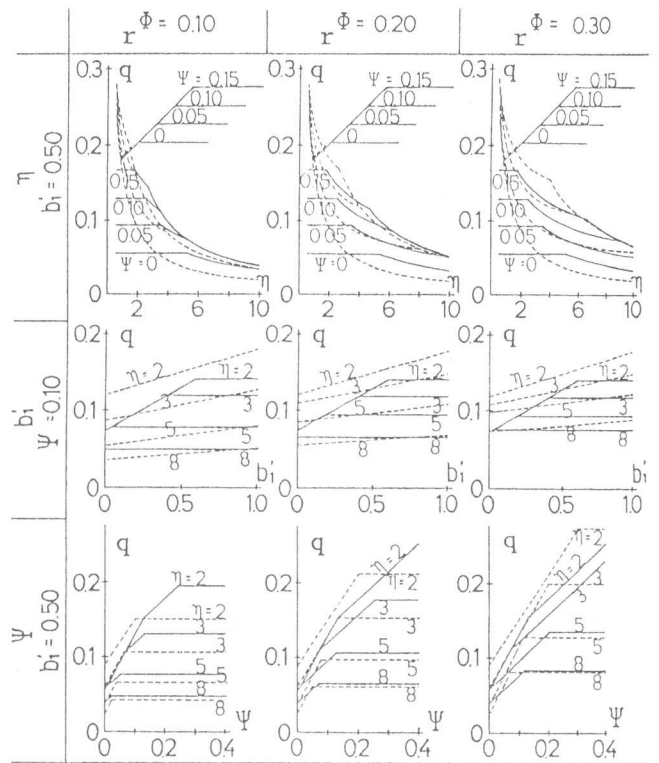


図 8 累積頻度分布

耐力を表す (2)式と (4)式について検討を行なう。図 9 は  $\eta$ ,  $b'_1$ ,  $\Psi$  および  $r\Phi$  (引張鉄筋係数 =  $r_p \cdot r_y \cdot \sigma_y / F_c$ ) を変数とした時のせん断耐力を比較したもので、 $r_j$ ,  $s^d_1$  および  $r^d_1$  はそれぞれ 0.85, 0.70 および 0.70 としている。図中の実線は (4)式によるせん断耐力を、破線は (2)式によるせん断耐力をそれぞれ示す。図の左側から右側に移るに従って主筋量が増加している。通常用いられる断面構成、せん断補強筋量および柱長さを持つ部材では、両者は比較的良い一致を示している。実験耐力との対応を検討するために、前述の 64 体の試験体の実験耐力を SRC 規準改定案の理論耐力で除した値の頻度分布を 図 7(c) に示す。平均値は  $m = 1.06$ 、標準偏差は  $\sigma = 0.10$  となり、実験耐力と良い一致を示している。図 8 は累積頻度分布を表したものである。●印は理論 1 を、○印は理論 2 を、および □印は学会規準改定案(理論 3)の場合をそれぞれ示し、学会規準提案式により SRC 部材の終局せん断耐力を評価することができる。図 9 は



— 学会式 (理論 3)      - - - - 理論式 (理論 2)  
 図 9 SRC 規準改定案の終局せん断耐力評価式の検討

### 1.0. 結論

1. SRC 柱の終局せん断耐力は、 $b'_1$  の有効幅を持つ RC 部分と鉄骨フランジ外部のコンクリート部分、鉄骨フランジ内部のコンクリート部分、および鉄骨部分の 4 要素の抵抗機構からなると仮定し、これらの抵抗機構による強度にもとづいて累加強度理論により評価することができる。
2. SRC 規準改定案の SRC 柱の終局せん断耐力評価式は、上述の理論解にもとづいて得られた比較的簡単な式で表すことができ、SRC 部材の終局せん断耐力を十分評価することができる。

### 1.1. 参考文献

- (1) たとえば、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コロキウム論文集、1982年6月、pp. 1 - 16.
- (2) 南 宏一・若林 実「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講演論文集(1980)、1980年6月、pp. 449 - 452.
- (3) 若林 実・南 宏一「コンクリート系構造部材のせん断強度について」、京都大学防災研究所年報第24号B-1、1981年4月、pp. 245 - 277.
- (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、第266号、1978年4月、pp. 19 - 29.
- (5) 若林 実・南 宏一「一定軸力と確定的な繰返し曲げせん断を受ける鉄骨鉄筋コンクリート柱のせん断強度に関する実験的研究」、コンクリート工学、Vol. 13, No. 3, 1975年3月、pp. 1 - 17.
- (6) 日本建築学会 SRC 分科会「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準改定案」、建築雑誌、No. 1224、1984年9月、pp. 51 - 66.

### 1.2. 主要な記号

- |                              |  |
|------------------------------|--|
| $r_j$ : 応力中心間距離 (cm)         | $r^D$ : 有効せい (cm)  |
| $b$ : 柱幅 (cm)                | $r^p_w$ : せん断補強筋比 (%)                                    |
| $b'_1$ : 鉄筋コンクリート部分の有効幅 (cm) | $r^p_w$ : 有効幅 $b'_1$ の場合のせん断補強筋比 (%)                     |
| $h$ : 柱せい (cm)               | $r^p_w \sigma_y$ : せん断補強筋の引張降伏応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| $l$ : 柱長さ (cm)               | $r^p_y$ : 主筋の引張降伏応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )              |
| $s^d_1$ : 鉄骨フランジ中心間距離 (cm)   | $F_c$ : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )               |
| $r^d_1$ : 主筋間距離 (cm)         |  |
| $r^p_t$ : 引張鉄筋比 (%)          |  |