

論文 鋼板コンクリート耐震壁の最大耐力マクロモデル

鈴木紀雄*1・原 潔*2・松尾一平*2

要旨：H型の水平断面を持つ鋼板コンクリート耐震壁の最大耐力を算定するマクロモデルを開発した。このモデルは、終局強度理論の下界定理に基づき、トラス機構とアーチ機構の二つの機構が混在することを仮定したものである。既往の矩形断面を持つ鋼板コンクリート耐震壁の実験試験体に適用したところ、最大耐力を良好に推定できた。

キーワード：SC壁、終局強度理論、トラス機構、アーチ機構

1. はじめに

鋼板コンクリート耐震壁（「SC壁」）は、表面鋼板と、その中に充填されたコンクリートで形成されている。この構造には、施工の合理化が図れること、鋼板とコンクリートの合成効果により構造性能が向上することなどが期待されており、いくつかの実験的研究が行われている[1]。

解析的研究としては、鈴木弘之ら[2]や筆者ら[3]による、最大耐力を算定するモデルに関するものがある。鈴木弘之らのモデルは、矩形の水平断面を有するSC壁を対象としており、コンクリートの圧縮場と表面鋼板の引張り場を考慮したアーチ機構の形成が仮定されている。筆者らのモデルも、矩形断面のSC壁を対象としているが、曲げ補強材が無限に存在する場合のせん断耐力を算定するもので、アーチ機構とトラス機構の混在を仮定したものである。

実際に施工されるSC壁では、曲げ補強量は有限である。また、水平断面も矩形ばかりではなく、両端に柱型や直交壁が取り付けくことも多いと考えられる。そこで、本報告では、H型断面を有するSC壁の最大耐力を、曲げ補強材の降伏を考慮に入れて算定するモデルを示す。

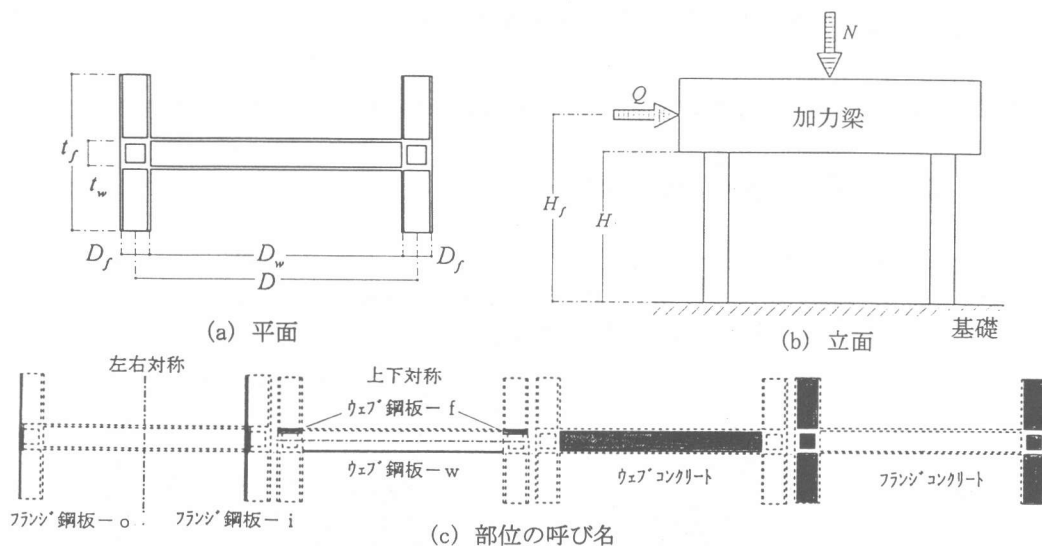


図-1 解析対象

*1 鹿島・小堀研究室、工博（正会員）

*2 鹿島・原子力設計部

2. 解析対象

解析の対象は、図－１に示すような、H型の水平断面を有するＳＣ壁である。壁版の交差部分と壁版部では、鋼板厚が異なっているがよい。上部と下部には、剛強な加力梁と基礎が取り付けられており、加力梁に鉛直方向の軸力と水平力が加えられるものとする。

3. 解析モデル

南[4]により、ＲＣ部材のせん断抵抗機構は「はり機構（トラス機構）」と「アーチ機構」の２つの機構が存在することが概念的に示されているが、この概念は、ＳＣ部材にも適用できる。本研究でも、終局強度理論の下界定理に基づき、トラス機構とアーチ機構の二つの機構を想定したモデルを作成する。コンクリートと鋼板に対して、次の前提を置く。

(1) コンクリートには、引張り応力によりひび割れが生じるので、圧縮応力のみを負担するものと仮定する。

(2) ウェブ鋼板には、圧縮応力によりしわが生じる。その後は、ある程度の圧縮応力を負担することもあり得るが、簡単のため、引張り応力のみを負担すると考える。

3.1 トラス機構

図－２にトラス機構で想定する力の伝達機構を示す。この機構では、斜め方向のコンクリート圧縮ストラットと、これに直交するウェブ鋼板の引張りストラットが形成され、両者とフランジ鋼板の鉛直方向応力が釣り合うものとする。ウェブ内とフランジ内で、応力の方向が異なる場合も考える。釣り合い条件は、以下ようになる。記号の意味は、末尾にまとめて示す。また、鋼板の区分と呼び方は図－１のとおりである。

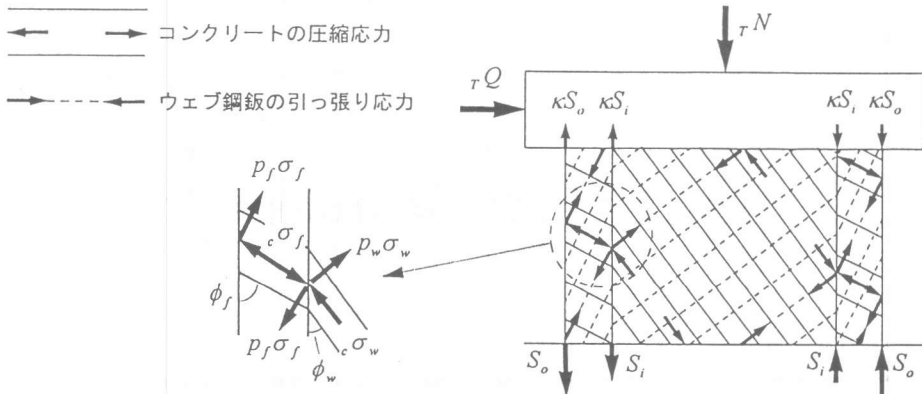
負担せん断力 ${}_T Q$ と軸力 ${}_T N$ は、次式となる。

$${}_T Q = t_w D_w p_w \sigma_w \cot \phi_w + 2 t_f D_f p_f \sigma_f \cot \phi_f \quad (1)$$

$${}_T N = t_w D_w p_w \sigma_w (\cot^2 \phi_w - 1) + 2 t_f D_f p_f \sigma_f (\cot^2 \phi_f - 1) \quad (2)$$

フランジ鋼板－oとフランジ鋼板－iにおける鉛直力の釣り合いは、次式となる。

$$t_f H p_f \sigma_f (\cot^2 \phi_f + 1) \sin \phi_f \cos \phi_f = (1 - \kappa) S_o \quad (3)$$



図－２ トラス機構

$$t_w H p_w \sigma_w (\cot^2 \phi_w + 1) \sin \phi_w \cos \phi_w - t_f H p_f \sigma_f (\cot^2 \phi_f + 1) \sin \phi_f \cos \phi_f = (1 - \kappa) S_i \quad (4)$$

ここで、コンクリートとフランジ鋼板の付着は十分に大きいと仮定している。

コンクリート、ウェブ鋼板—f、w、およびフランジ鋼板—o、i の応力度には、材料強度による以下の制限がある。

$${}_c\sigma_f = p_f \sigma_f \cot^2 \phi_f \leq f_c = v \sigma_B \quad (5)$$

$${}_c\sigma_w = p_w \sigma_w \cot^2 \phi_w \leq f_c = v \sigma_B \quad (6)$$

$$p_f \sigma_f \leq p_f \sigma_{fy} \quad (7)$$

$$p_w \sigma_w \leq p_w \sigma_{wy} \quad (8)$$

$$S_o \leq A_o \sigma_{oy} \quad (9)$$

$$S_i \leq A_i \sigma_{iy} \quad (10)$$

3.2 アーチ機構

トラス機構で使用された残りのコンクリートと鋼板で、図-3に示すようなアーチ機構が形成されるとする。コンクリートの圧縮ストラットに関しては、ウェブとフランジの境界で応力の方向が変化することを考慮する[5]。

下端水平断面における、軸力、せん断力、曲げモーメントの釣り合いは次式となる。

$$T_s - C_s' + P_b - A t_w f_c x \sin^2 \theta_1 - \gamma_A t_f f_c D_f \sin^2 \theta_2 + N_w \cos \theta_4 + A N = 0 \quad (11)$$

$$A Q - A t_w f_c x \sin \theta_1 \cos \theta_1 - \gamma_A t_f f_c D_f \sin \theta_2 \cos \theta_2 - N_w \sin \theta_4 = 0 \quad (12)$$

$$A Q H_f - \frac{D}{2} T_s - \frac{D}{2} C_s' + \frac{D - D_f}{2} P_b - A t_w f_c x \frac{D - D_f - x}{2} \sin^2 \theta_1 - \gamma_A t_f f_c D_f \frac{D}{2} \sin^2 \theta_2 - N_w \frac{H}{2} \sin \theta_4 = 0 \quad (13)$$

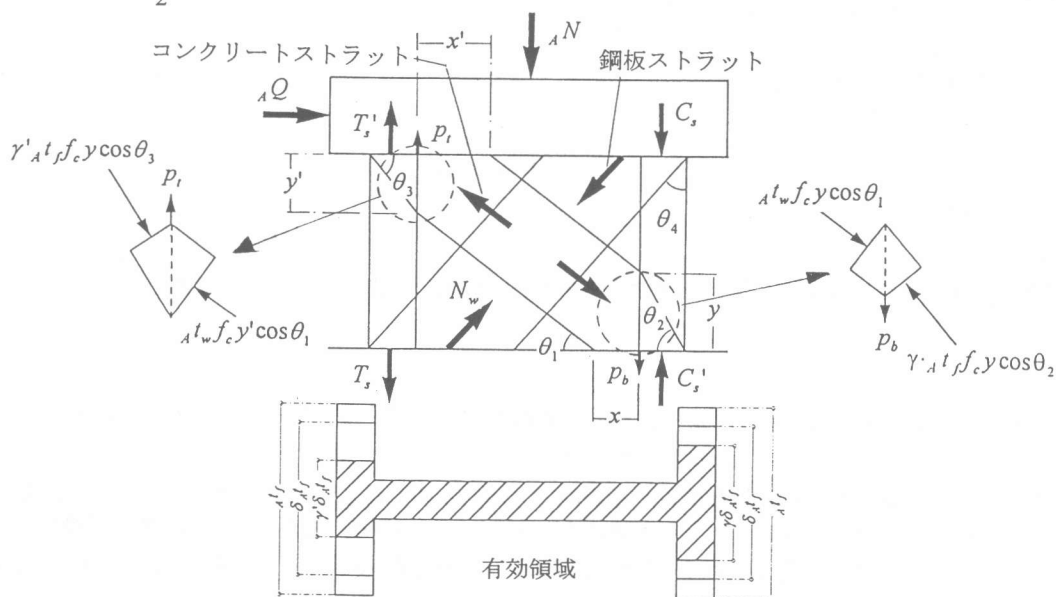


図-3 アーチ機構

上端水平断面における、軸力、せん断力の釣り合いは次式となる。

$$T_s' - C_s + P_i - {}_A t_w f_c x' \sin^2 \theta_1 - \gamma' {}_A t_f f_c D_f \sin^2 \theta_3 + N_w \cos \theta_4 + {}_A N = 0 \quad (14)$$

$${}_A Q - {}_A t_w f_c x' \sin \theta_1 \cos \theta_1 - \gamma' {}_A t_f f_c D_f \sin \theta_3 \cos \theta_3 - N_w \sin \theta_4 = 0 \quad (15)$$

上端水平断面における曲げモーメントの釣り合いは、式(11)から式(15)が満たされれば、自動的に満足される。

引張り側のウェブとフランジ境界における鉛直力と水平力の釣り合いは、

$$P_i = \gamma' {}_A t_f f_c y' \sin \theta_3 \cos \theta_3 - {}_A t_w f_c y' \sin \theta_1 \cos \theta_1 \quad (16)$$

$$\gamma' {}_A t_f f_c y' \cos^2 \theta_3 = {}_A t_w f_c y' \cos^2 \theta_1 \quad (17)$$

圧縮側のウェブとフランジ境界における鉛直力と水平力の釣り合いは、

$$P_b = \gamma' {}_A t_f f_c y \sin \theta_2 \cos \theta_2 - {}_A t_w f_c y \sin \theta_1 \cos \theta_1 \quad (18)$$

$$\gamma' {}_A t_f f_c y \cos^2 \theta_2 = {}_A t_w f_c y \cos^2 \theta_1 \quad (19)$$

上端断面では、フランジ鋼板 i は T_s' の分力 T_{si}' とストラットの向きを変える力 P_i を負担する。また、フランジ鋼板 o は T_s' の分力 T_{so}' を負担する。これらには、降伏強度による限界がある。

$$P_i + T_{si}' \leq S_{iy} - \kappa S_i \quad (20)$$

$$T_{so}' \leq S_{oy} - \kappa S_o \quad (21)$$

$$\text{ただし、} T_{si}' + T_{so}' = T_s, \quad T_{si}' : T_{so}' = (S_{iy} - \kappa S_i) : (S_{oy} - \kappa S_o) \quad (22)$$

同様に下端断面では以下の条件がある。

$$-S_{iy} + S_i \leq P_b - C_{si}' \leq S_{iy} - S_i \quad (23)$$

$$C_{so}' \leq S_{oy} - S_o \quad (24)$$

$$\text{ただし、} C_{si}' + C_{so}' = C_s', \quad C_{si}' : C_{so}' = (S_{iy} - S_i) : (S_{oy} - S_o) \quad (25)$$

3.3 耐力

耐力 Q は、トラス機構の負担せん断力 ${}_T Q$ とアーチ機構の負担せん断力 ${}_A Q$ の和である。

4. 解法

上記の釣り合い条件を満足する解の組み合わせは無限に存在する。しかし、下界定理に基づいているので、最大の耐力を与える解を正解と考える。

釣り合い式の数に比べて未知数の数が多いので、解くためには、いくつかの未知数の値を仮定しなければならない。ここでは、トラス機構のコンクリート応力の角度 ϕ_f と ϕ_w 、ウェブ鋼板の応力度 σ_f と σ_w 、アーチ機構における鋼板のストラット角度 θ_4 の5つを仮定する。 ϕ_f と ϕ_w には

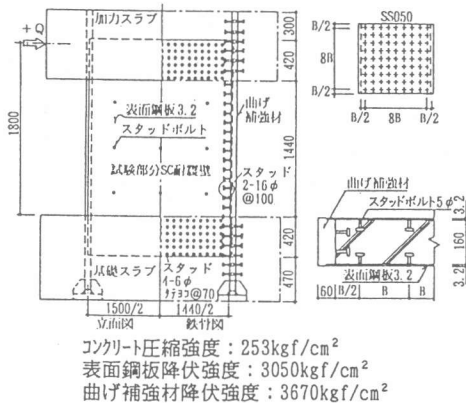
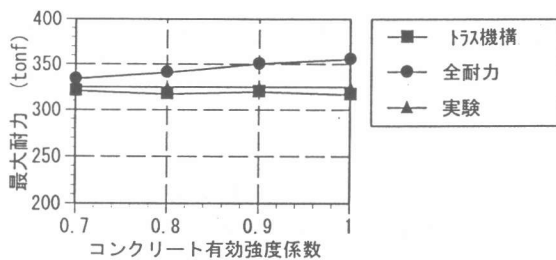
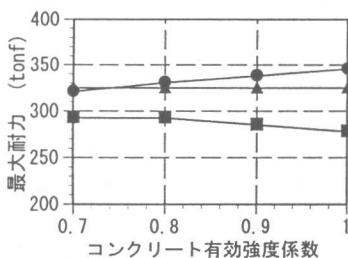


図-4 適用対象[2]



(a) ϕ_w 任意



(b) ϕ_w 45° 固定

図-5 解析結果

$0^\circ \sim 90^\circ$ 、 σ_f と σ_w には0～降伏強度、 θ_4 には $0^\circ \sim \tan^{-1}\left(H/(D_w + 2D_f)\right)$ という制限がある。計算では、これらのパラメータの値を、その制限範囲内で少しずつ変化させ、最大耐力を探すというプロセスをとった。

また、アーチ機構の引張り側フランジの力 T_s は降伏強度を仮定することを基本とするが、鋼材量が多い場合には解が存在しないことがある。このときには、 T_s を少しずつ低減させて解が得られるまで解き直す。

なお、パラメータを仮定した後の釣り合い式を代数的に解くことは不可能なので、繰り返しの収束計算によっている。

5. 適用例

本モデルで対象としているH型断面を有するSC壁の実験は、現在まで報告されていないので、今回は、図-4に示すような矩形断面の壁[2]を解析した。

解析では、コンクリートの有効強度係数 ν が問題となる。そこで、 ν をパラメータとして計算した最大強度を図-5(a)に示す。 ν を0.7程度にしたときに計算値は実験値に近い値となる。せん断破壊する鉄筋コンクリート造の壁の解析では、 ν は0.7程度に仮定されることが多いが、今回、解析対象としたSC壁でも、多数のせん断ひび割れが生じたことが報告されており、 ν を0.7程度にすることは妥当な仮定と考えられる。

解析モデル上は、トラス機構におけるコンクリートストラットの方向は、前述のように $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で任意の値を取りうるが、実際には、ひび割れ面でのせん断伝達能力の限界、フランジ鋼板とコンクリートの間の付着力の限界などから、制限を受けることが予想される。実験からは、この値は 45° 程度であるという指摘もされている。本試験体の解析では、この角度は 38° で 45° に比較的近い値となったが、鋼材量や形状の異なった壁を解析した場合には、極端な値になることも考えられる。そこで、 45° に固定した場合の解析結果を図-5(b)に示す。最大耐力は

それほど変わらないが、トラス機構とアーチ機構の負担割合が異なってくる。

なお、本試験体ではトラス機構の負担分が大部分となったが、他の壁では異なった割合になることが考えられる。

6. まとめ

H型水平断面を有するSC壁の最大耐力を算定するマクロモデルについて報告した。矩形断面をもつ実験試験体の耐力は良好に予測できたが、コンクリートの有効強度係数やトラス機構のコンクリートストラットの方向などに検討課題が残っている。今後は、H型断面をもつ壁の実験とその解析を通じて、課題を検討するとともに、モデルの妥当性の検証を行っていくことが必要である。

【記号の説明】

加力方向の寸法を「長さ」、加力直交方向の寸法を「厚さ」と称する。従って、フランジ壁については、通常の「長さ」「厚さ」の概念と逆になっていることに注意。

《寸法関連》 D_w ：ウェブ壁の長さ、 D_f ：フランジ壁の長さ、 D ：フランジ中心間距離、 H ：クリア高さ、 H_f ：水平力の加力点高さ、 κ ： $(H_f - H)/H_f$ 、 t_w ：ウェブ壁のコンクリート厚さ、 t_f ：フランジ壁のコンクリート厚さ、 $s_t w$ ：ウェブ鋼板-w（1枚分）の厚さ、 p_w ： $2_s t_w/t_w$ 、 $s_t f$ ：ウェブ鋼板-f（1枚分）の厚さ、 p_f ： $2_s t_f/t_f$ 、 A_o ：フランジ鋼板-oの断面積、 A_i ：フランジ鋼板-iの断面積、 N ：軸力

《材料関連》 σ_B ：コンクリートのシリンダー強度、 ν ：コンクリートの有効強度係数、 f_c ：コンクリートの有効圧縮強度で $\nu\sigma_B$ 、 σ_{wy} ：ウェブ鋼板-wの降伏強度、 σ_{fy} ：ウェブ鋼板-fの降伏強度、 σ_{oy} ：フランジ鋼板-oの降伏強度、 σ_{iy} ：フランジ鋼板-iの降伏強度

《トラス機構関連》 TQ ：負担せん断力、 TN ：負担軸力、 ϕ_w ：ウェブコンクリートのストラットが鉛直方向となす角度、 ϕ_f ：フランジコンクリートのストラットが鉛直方向となす角度、 $c\sigma_f$ ：フランジコンクリートの圧縮応力度、 $c\sigma_w$ ：ウェブコンクリートの圧縮応力度、 σ_w ：ウェブ鋼板-wの引張り応力度、 σ_f ：ウェブ鋼板-fの引張り応力度、 S_o ：フランジ鋼板-oの負担軸力、 S_i ：フランジ鋼板-iの負担軸力

《アーチ機構関連》 AQ ：負担せん断力、 AN ：負担軸力で $N-TN$ 、 T_s ：下端断面における引張り側フランジ鋼板の引張り力、 C_s' ：下端断面における圧縮側フランジ鋼板の圧縮力、 p_b ：圧縮側フランジとウェブ境界でコンクリートストラットの向きを変える力、 $A_t w$ ：ウェブコンクリートの等価厚さで $t_w(1 - c\sigma_w/\nu\sigma_B)$ 、 $A_t f$ ：フランジコンクリートの等価厚さで $t_f(1 - c\sigma_f/\nu\sigma_B)$ 、 $x, x', y, y', \theta_1, \theta_2, \theta_3$ ：コンクリートストラットの寸法を表す（図を参照）、 θ_4 ：ウェブ鋼板の引張り力が鉛直方向となす角度、 N_w ：ウェブ鋼板の引張り力で $t_w(D_w - H \tan \theta_4)(p_w\sigma_{wy} - p_w\sigma_w) + 2t_f D_f(p_f\sigma_{fy} - p_f\sigma_f)$ 、 γA_f ：圧縮側フランジの有効幅、 T_s' ：上端断面における引張り側フランジ鋼板の引張り力、 C_s ：上端断面における圧縮側フランジ鋼板の圧縮力、 p_i ：引張り側フランジとウェブ境界でコンクリートストラットの向きを変える力、 $\gamma' A_t f$ ：引張り側フランジの有効幅

【参考文献】

- [1] 関本恒、秋山宏、鈴木智巳、小林美亀雄、宇佐美滋、松尾一平、原潔：鋼板コンクリート耐震壁に関する研究（その1）（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）構造Ⅱ、1991年9月 pp. 1659～1662
- [2] 鈴木弘之、加藤勉：コンクリート充填構造要素のせん断耐力、日本建築学会論文報告集、第341号、昭和59年7月、pp. 27～36
- [3] 鈴木紀雄、原潔、松尾一平：鋼板コンクリート耐震壁のせん断終局耐力評価法、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）構造Ⅱ、1994年9月、pp. 1615～1616
- [4] 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、pp. 1～16
- [5] 井上範夫、鈴木紀雄、小鹿紀英、丸田誠：柱型を考慮したRC耐震壁の終局強度モデル、コンクリート工学年次論文報告集、10-3、1988年、pp. 373～378