

## 論文

## [2068] 柱型を考慮した RC 耐震壁の終局強度モデル

正会員 井上 範夫 (鹿島建設技術研究所)

正会員 ○鈴木 紀雄 (鹿島建設小堀研究室)

正会員 小鹿 紀英 (鹿島建設小堀研究室)

正会員 丸田 誠 (鹿島建設技術研究所)

## 1. はじめに

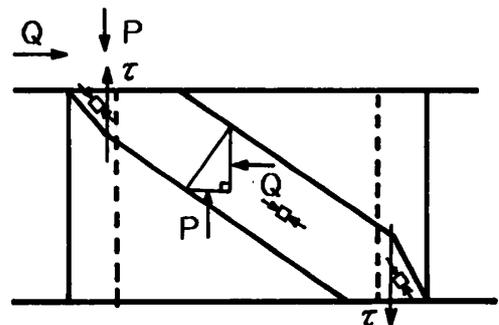
本年1月に、JCIによって開催された「RC耐震壁のマクロモデルとFEMマイクロモデルに関するパネルディスカッション」<sup>1)</sup> (以下「PD」と呼ぶ)では、極限解析法に基づいたRC耐震壁の終局強度モデルの有用性が示される一方で、いくつかの問題点が残されていることが指摘された。付帯柱の効果の取り入れ方もその一つである。

この問題について、現在最も良く考えられているモデルの一つとして、白石らのモデルがあげられる<sup>2)</sup>。このモデルは、FEM解析より明らかとなった付帯柱のせん断力負担を取り入れる形で称原らのモデル<sup>3)</sup>を修正したものであり、カンチレバーとした場合の柱の曲げ終局強度より柱の負担せん断力が評価されている。しかし、この方法は、本来、連続体である壁と柱を切り離して考えているため、必ずしも実情に適合していない。例えば、このモデルでは、「柱の負担せん断力が、せん断耐力を越えることがある」ということが指摘されているが、これも柱を単独に考えるために生じた問題といえる。

一方、塩原は後述するように、定性的にはあるが、壁と柱を連続体として考えた場合の、壁から柱への力の流れ方を説明している<sup>4)</sup>。本論文は、この考え方に従って新たに作成した、付帯柱の効果を実量的に取り入れた耐震壁のマクロモデルについて報告するものである。

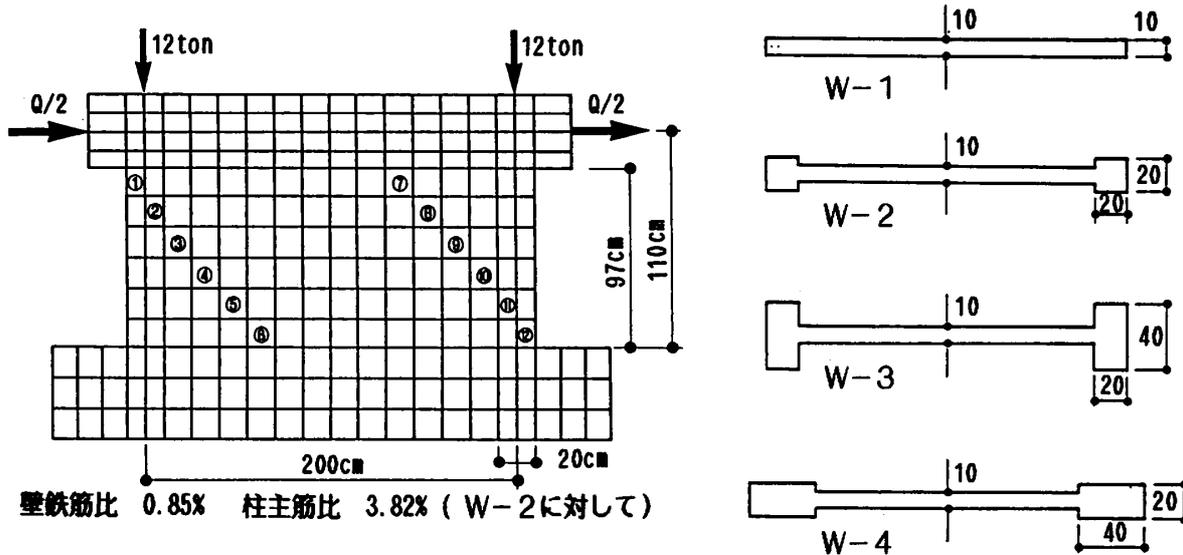
## 2. 塩原の考え方、及びFEMモデルによる検証

塩原による付帯柱がある耐震壁のコンクリートストラットの概念を図-1に示す。この概念では、コンクリートの圧縮ストラットの傾きが、柱で大きくなることにより、せん断耐力が上昇する機構が考えられている。ストラットの傾きを変える力は、柱内側の主筋から付着によって伝達される軸方向力である。また、傾きが大きくなることにより柱ではストラットの幅が小さくなるが、柱の厚みが補うことにより、壁のストラットが柱で受けとめられている。

図-1 塩原によるストラットの概念<sup>3)</sup>

この考え方の妥当性を確認するために、弾塑性FEM解析による終局強度時の応力と歪を検討する。ここで示すのは、図-2に示す4体の試験体のうちのW-1とW-3の2体の解析結果である。この4体の試験体内、W-2はJCIせん断コロキウム<sup>5)</sup>のマイクロモデル検証用試験体#1”に相当する。他の3体は、柱主筋量はそのままで、柱の断面のみを変化させたものである。

図-3に、図-2中に番号を付けた要素の圧縮主応力の角度を示す。付帯柱があるW-3では、圧縮柱の脚部で主応力の傾きが大きくなっていることがわかる。一方、付帯柱がないW-1では、圧縮柱の脚部での主応力の方向の変化は小さい。また、引張柱の頭部では、付帯柱の有無にかかわらず、主応力の方向変化はほとんどない。



壁鉄筋比 0.85% 柱主筋比 3.82% (W-2に対して)

図-2 解析例とする試験体

表-1 材料定数

|        |                            |     |                            |
|--------|----------------------------|-----|----------------------------|
| コンクリート | 圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> ) | 鉄筋  |                            |
|        | 297                        | 壁筋  | 降伏強度 (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|        |                            | 柱主筋 | ヤング係数 (t/cm <sup>2</sup> ) |
|        |                            |     | 3620                       |
|        |                            |     | 1730                       |
|        |                            |     | 3680                       |
|        |                            |     | 1950                       |

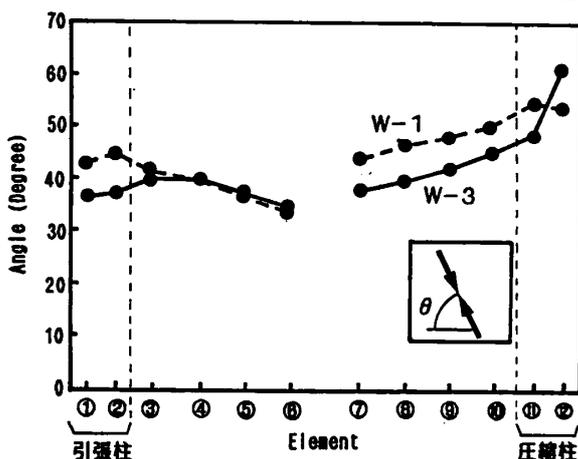


図-3 ストラットの角度

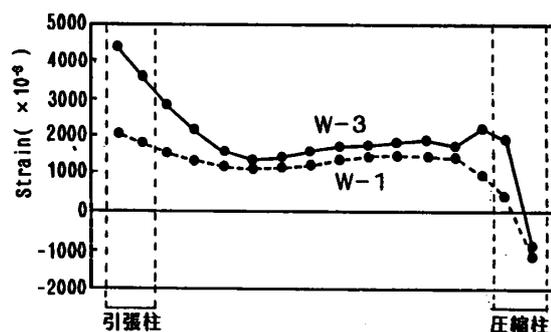


図-4 縦筋の歪

図-4は、脚部断面での縦筋の歪分布を示す。付帯柱がある場合には、圧縮柱の内側の主筋が大きな引張り力を受けていることが分かる。

このように、FEM解析の示す力の流れ方は、塩原の考え方とほぼ同様である。

### 3. 付帯柱を考慮したモデル化

付帯柱の効果を取り入れて、称原らのモデルに変更を加えることにする。称原らのモデルは、図-5のような軸力と水平力を受ける耐震壁の終局耐力機構を、トラス機構とアーチ機構に分離し、両機構の耐力の和を耐震壁の終局耐力とするものである。

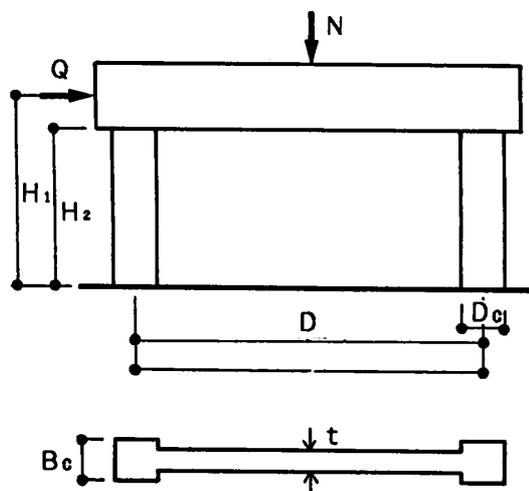


図-5 解析対象

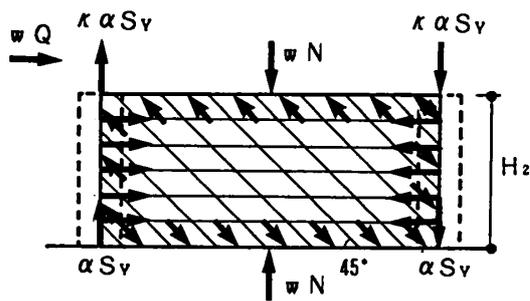


図-6 トラス機構

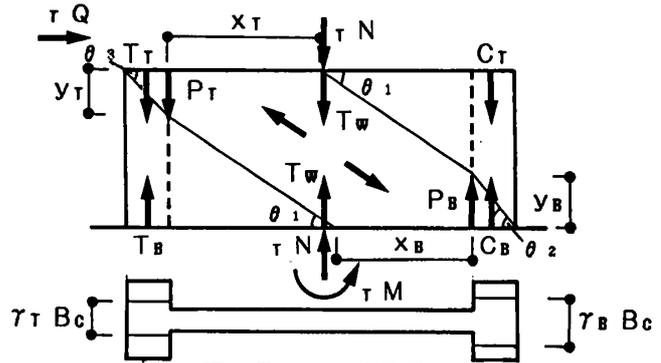


図-7 アーチ機構

(1) トラス機構 (この部分は称原による。記号は称原とは異なる。記号の意味は末尾にまとめる)  
 柱主筋と壁横筋及び、一軸圧縮を受ける45°のストラットにより図-5に示す機構が成り立つと仮定する。この機構による耐力  $wQ$  は、以下ようになる。

$$wQ = wN = \rho_{wH} \sigma_{wy} t_w D = \beta t_w D F_c / 2 \quad (1)$$

$$wM = \alpha S_v D = wQH_2 / (1 - \kappa) \quad (\kappa = (H_1 - H_2) / H_1) \quad (2)$$

$$\alpha = \rho_{wH} \sigma_{wy} t_w H_2 / S_v (1 - \kappa) \leq 1 \quad (S_v = \rho_c \sigma_{cv} B_c D_c) \quad (3)$$

$$\beta = 2 \rho_{wH} \sigma_{wy} / F_c \leq 1 \quad (4)$$

(2) アーチ機構

トラス機構に使われた残りの柱のコンクリートと主筋、壁の縦筋とコンクリートのストラットにより成り立つ機構を考える。モデルを図-7に示す。

<仮定>

(I) 引張柱の主筋と壁の縦筋は原則として降伏し、圧縮ストラットの境界は、引張柱と加力梁の交点、及び圧縮柱と基礎の交点を通る。これは、筆者らが行ってきたFEM解析や、称原のプログラム<sup>1)</sup>を使用した計算より判断して設けた仮定である。

(II) 塩原の考え方では、圧縮ストラットの方向の変化は柱の内側の主筋位置でおこるが、ここでは簡単のため、壁と柱の境界で変化がおこるとする。

(III) 柱内側の主筋量は、全柱主筋量の1/2とする。

(IV) 柱の幅が大きい場合に柱の全幅が有効とすると、壁のストラットと柱のストラット、及び柱主筋の引張力が釣り合わなくなることが考えられる。これは鉄筋の引張力には、降伏による限界があるためである。そこで柱のコンクリートの有効幅を引張側と圧縮側で別々の変数とする。

(V) コンクリートの圧縮強度の低減は、今なお議論の分かれるところであるが<sup>6)</sup>、ここでは称原らにならない、低減を行わない。

<釣り合い式>

仮定 (I) より

$$T_B = (1 - \alpha) \rho_c \sigma_{cv} B_c D_c \quad (5)$$

$$T_w = \rho_{wv} \sigma_{wy} t_w (D - D_c) \quad (6)$$

下端断面、上端断面でのモーメントと軸力、及び水平力の釣り合いから、

$$\tau N = -T_B - C_B - P_B - T_w + F_c t_w' x_B \sin^2 \theta_1 + F_c \gamma_B B_c D_c \sin^2 \theta_2 \quad (7)$$

$$H_1 \tau Q = T_B D / 2 - C_B D / 2 - P_B (D - D_c) / 2 + F_c t_w' x_B \sin^2 \theta_1 (D - D_c - x_B) / 2 + F_c \gamma_B B_c D_c \sin^2 \theta_2 D / 2 \quad (8)$$

$$\tau N = -T_T - C_T - P_T - T_w + F_c t_w' x_T \sin^2 \theta_1 + F_c \gamma_T B_c D_c \sin^2 \theta_3 \quad (9)$$

$$(H_1 - H_2) T Q = T_T D / 2 - C_T D / 2 + P_T (D - D_c) / 2 - F_c t_w' x_T \sin^2 \theta_1 (D - D_c - x_T) / 2 - F_c \gamma_T B_c D_c \sin^2 \theta_3 D / 2 \quad (10)$$

$$T Q = F_c t_w' x_B \sin \theta_1 \cos \theta_1 + F_c \gamma_B B_c D_c \sin \theta_2 \cos \theta_2 \quad (11)$$

壁と柱の境界では、図-8のような力の釣り合いが成り立っているので、

$$F_c t_w' y_B \cos^2 \theta_1 = F_c \gamma_B B_c y_B \cos^2 \theta_2 \quad (12)$$

$$P_B = -F_c t_w' y_B \cos \theta_1 \sin \theta_1 + F_c \gamma_B B_c y_B \cos \theta_2 \sin \theta_2 \quad (13)$$

$$F_c t_w' y_T \cos^2 \theta_1 = F_c \gamma_T B_c y_T \cos^2 \theta_3 \quad (14)$$

$$P_T = -F_c t_w' y_T \cos \theta_1 \sin \theta_1 + F_c \gamma_T B_c y_T \cos \theta_3 \sin \theta_3 \quad (15)$$

また、引張柱と圧縮柱の内側の主筋は、それぞれ柱の軸力 $T_T$ 及び $C_B$ の1/2と、ストラットの向きを変えるのに必要な力 $P_T$ 、 $P_B$ を同時に受け、降伏強度以下なので、次式が成り立つ。

$$P_B + C_B / 2 \leq (1 + \alpha) S_v / 2 \quad (16)$$

$$P_T + T_T / 2 \leq (1 - \alpha) S_v / 2 \quad (17)$$

<解法>

(I) (16) (17) 式の制限が満足されると仮定して、柱は全幅有効 $\gamma_B = \gamma_T = 1$ とし、式(7)~(15)を連立させる。未知数は、 $T Q$ 、 $P_T$ 、 $T_T$ 、 $C_T$ 、 $C_B$ 、 $P_B$ 、 $x_B$ 、 $y_B$ 、 $y_T$ の9個である( $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $x_T$ は $x_B$ 、 $y_B$ 、 $y_T$ で表現可能)

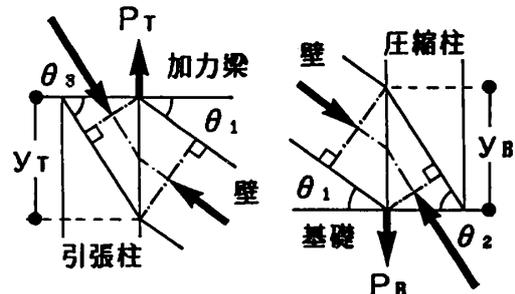


図-8 壁と柱の境界での力の釣り合い

ただし、代数的に解くことが困難なので、イテレーションにより解く。

(II) (I) で求めた解が式(16)(17)の制限を満たせば解である。満たさないときは、ストラットの方向を変える柱主筋の力の限界により、柱を全幅有効とはできないことを意味している。特に引張柱では柱主筋は壁の全体曲げによる引張力を受けるため、ストラットの方向を変える余力は圧縮側の柱より小さいと考えられる。そこで式(16)は満たされるが、式(17)で等号が満足される状態を想定する。すなわち $\gamma_B = 1$ 、 $\gamma_T < 1$ とし、式(5)~(15)と式(17)の等号が成り立つ式を連立させる。未知数は(I)の9個に $\gamma_T$ が加わる。

(III) (II) の解が式(16)を満たせば解である。満たさないときは、さらに $\gamma_B$ も未知数とし、式(16)の等号が成り立つ式を加えて解く。

(IV) 最後に、圧縮柱主筋の軸力が、降伏耐力以下であることを確認する。

### (3) 全耐力

トラス機構における横筋の量をゼロから実際量まで変化させ、アーチ機構との和が最大となるときを全耐力とする。

## 4. 解析例

### (1) 柱寸法をパラメータとした解析

図-2に示す4体について、解析を行った。結果を表-2と図-9に示す。図中の既往のマクロモデルの結果は、PDで井上らが示したもの<sup>7)</sup>である。どの試験体でも、引張側の柱の主筋はストラットの方向を変える余力がないため、柱の有効幅は壁の厚みに等しい。W-1とW-2では、圧縮柱は全幅有効であるが、他の2体では、柱寸法が大きいため全幅有効とはなり得ていない。FEM解析と比較すると、壁のストラットの方向は良く一致し、ストラットの方向が圧縮柱で変わること、引張柱ではあまり変化しないことなど対応している。耐力は、W-1ではFEMより大きい、他の3体ではほぼ一致しており、柱型の変化による耐力の変動を良く表している。

表-2 耐力の比較

| W-1  | 耐力<br>(ton) | 圧縮柱<br>(ton)* | トラス<br>(ton)** | ストラット角度 <sup>○</sup> |     |
|------|-------------|---------------|----------------|----------------------|-----|
|      |             |               |                | 壁中央                  | 圧縮柱 |
| FEM  | 126         | 25            | —              | 40                   | 54  |
| 本モデル | 137         | 29            | 0              | 38                   | 38  |
| 称原   | 137         | —             | 0              | 38                   | —   |
| 南    | 110         | —             | —              | —                    | —   |
| 白石   | 144         | 38            | 0              | 41                   | —   |
| 塩原   | 127         | —             | —              | 45                   | —   |

| W-2  | 耐力<br>(ton) | 圧縮柱<br>(ton)* | トラス<br>(ton)** | ストラット角度 <sup>○</sup> |     |
|------|-------------|---------------|----------------|----------------------|-----|
|      |             |               |                | 壁中央                  | 圧縮柱 |
| 実験値  | 141         | —             | —              | —                    | —   |
| FEM  | 148         | 44            | —              | 37                   | 55  |
| 本モデル | 149         | 55            | 0              | 36                   | 55  |
| 称原   | 137         | —             | 0              | 38                   | —   |
| 南    | 110         | —             | —              | —                    | —   |
| 白石   | 148         | 44            | 0              | 40                   | —   |
| 塩原   | 139         | —             | —              | 43                   | —   |

| W-3  | 耐力<br>(ton) | 圧縮柱<br>(ton)* | トラス<br>(ton)** | ストラット角度 <sup>○</sup> |     |
|------|-------------|---------------|----------------|----------------------|-----|
|      |             |               |                | 壁中央                  | 圧縮柱 |
| FEM  | 156         | 59            | —              | 36                   | 55  |
| 本モデル | 151         | 56            | 0              | 36                   | 56  |
| 称原   | 137         | —             | 0              | 38                   | —   |
| 南    | 110         | —             | —              | —                    | —   |
| 白石   | 151         | 48            | 0              | 40                   | —   |
| 塩原   | 156         | —             | —              | 40                   | —   |

| W-4  | 耐力<br>(ton) | 圧縮柱<br>(ton)* | トラス<br>(ton)** | ストラット角度 <sup>○</sup> |     |
|------|-------------|---------------|----------------|----------------------|-----|
|      |             |               |                | 壁中央                  | 圧縮柱 |
| 実験値  | 165         | —             | —              | —                    | —   |
| FEM  | 160         | 75            | —              | 34                   | 52  |
| 本モデル | 159         | 93            | 0              | 33                   | 48  |
| 称原   | 141         | —             | 0              | 38                   | —   |
| 南    | 108         | —             | —              | —                    | —   |
| 白石   | 171         | 78            | 0              | 34                   | —   |
| 塩原   | 154         | —             | —              | 38                   | —   |

\* 圧縮柱の負担せん断力 \*\*トラス機構の負担せん断力

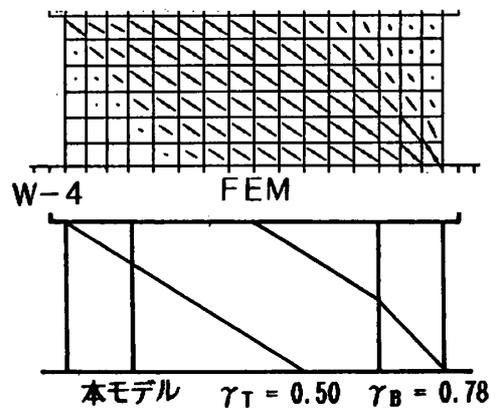
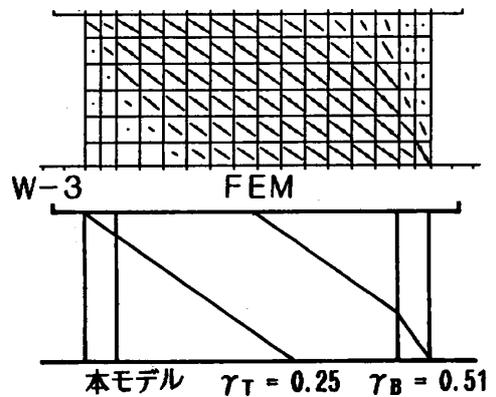
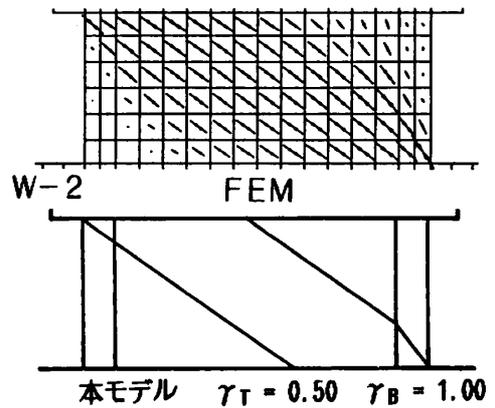
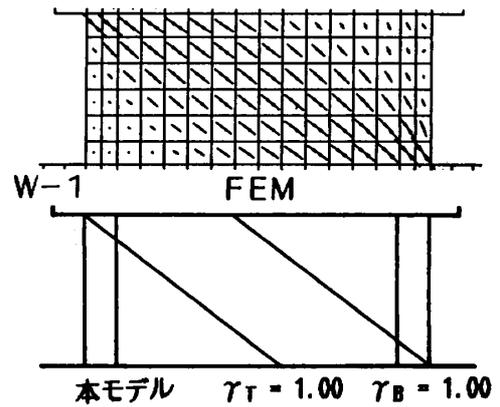


図-9 コンクリート主応力の比較

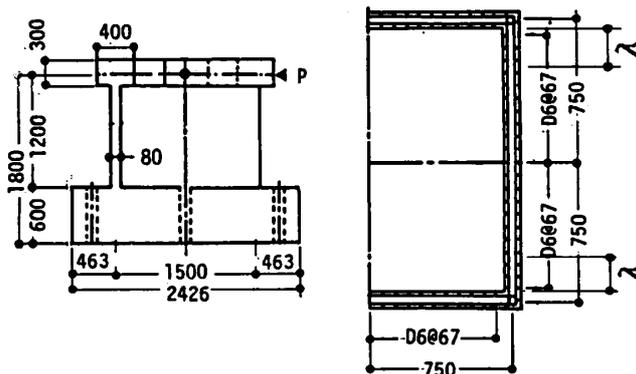


図-10 ボックス型試験体

表-3 耐力の比較

|      | 耐力<br>(ton) | 圧縮柱<br>(ton) | トラス<br>(ton) | ストラット<br>角度° |
|------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 実験値  | 138         | —            | —            | —            |
| 本モデル | 135         | 35           | 0            | 48           |
| 称原   | 119         | —            | 0            | 44           |
| 南    | 97          | —            | —            | —            |
| 白石   | 128         | 40           | 0            | 45           |
| 塩原   | 171         | —            | —            | 48           |

(2) ボックス型耐震壁の解析

図-10に示すボックス型耐震壁を解析した。対称条件より壁厚を2倍としたH型の壁としてモデル化した。表-3に解析結果を示す。図中の既往のマクロモデルの結果は、PDで称原らが示したもの<sup>8)</sup>である。本モデルの結果と実験との一致度は良好である。また、他のマクロモデルでは、フランジ型の有効幅を仮定する必要がある(ここでは全幅有効と仮定)が、このモデルでは、自動的に算定でき、コンクリートの有効幅は圧縮側で、7cm、引張側で0cmとなる。

5. まとめ

付帯柱の効果を取り入れて称原らのモデルを修正したRC耐震壁の終局強度算定モデルについて報告した。このモデルは、壁と柱の一体性を考慮した全体としての力の流れを表現している点に特徴があり、力学的に明解であると言える。特に、柱のコンクリートの有効幅も解として得ることができる(ただし、この有効幅は、2次元解析における力の釣り合いより求められるものであり、3次元的な応力度分布より求められるものではない)ので、ボックス壁なども解析可能であり、付帯柱の形状に関しては適用性が広いモデルと考えられる。

**謝辞** 貴重なご助言を頂いた鹿島建設、菅野忠博士、宇佐美滋氏に感謝致します。また、マクロモデルによる計算には、『JCI 鉄筋コンクリート構造の有限要素解析と設計法研究委員会』において、各モデル提案者より提供いただいたプログラムを使用させていただきました。

文献

- 1) RC耐震壁のマクロモデルとFEMマイクロモデルに関するパネルディスカッション, 昭和63年1月
- 2) 白石一郎, 狩野芳一, 町田巨寛: 鉄筋コンクリート造耐震壁の最大せん断耐力に関する一考察, 日本建築学会論文報告集, 第365号, 昭和61年7月, pp. 145~155
- 3) 称原良一, 加藤勉: 鉄筋コンクリート連層耐震壁の最大耐力, 日本建築学会論文報告集, 第343号, 昭和59年9月, pp. 24~30
- 4) 塩原等: 塑性理論を応用した鉄筋コンクリート造耐震壁の終局強度算定法, コンクリート工学, Vol. 25, No. 8, 1987, pp. 101~104
- 5) 第2回 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, 昭和58年10月
- 6) 白井伸明, 白石一郎, 村上利憲: RC耐震壁の終局強度に関する既往のマクロモデルについて, 文献1), pp. 5~20
- 7) 井上範夫, 白石一郎, 野口博: FEMによるRC耐震壁のマクロモデル検証の試み, 文献1), pp. 67~80
- 8) 称原良一, 白井伸明, 野口博: RC耐震壁のマクロモデル間の解析結果の比較および実験値との比較, 文献1), pp. 41~60

記号

$f_c$ : コンクリート強度,  $\sigma_{cy}$ : 柱主筋降伏強度,  $\sigma_{wy}$ : 壁筋降伏強度,  $H_1$ : 加力点高さ,  $H_2$ : クリア高さ,  $D$ : 柱芯間距離,  $D_c$ : 柱せい,  $t_w$ : 壁厚,  $B_c$ : 柱幅,  $D_c$ : 柱主筋比,  $D_{wy}$ : 壁縦筋比,  $D_{wh}$ : 壁横筋比,  $wQ$ : トラス機構のせん断力,  $wN$ : トラス機構の軸力,  $wM$ : トラス機構の脚部モーメント,  $\alpha$ : トラス機構における柱主筋の応力の降伏耐力に対する比,  $\beta$ : トラス機構における必要壁厚と実際の壁厚の比,  $\tau Q$ : アーチ機構のせん断力,  $\tau N$ : アーチ機構の軸力,  $\tau M$ : アーチ機構の脚部モーメント,  $T_w$ : 壁縦筋の力,  $T_T, T_B$ : それぞれ上端と下端での引張柱主筋の力,  $C_T, C_B$ : それぞれ上端と下端での圧縮柱主筋の力,  $P_T, P_B$ : それぞれ上端と下端でのストラットの方向を変える力,  $x_T, x_B$ : それぞれ上端と下端でのストラットの水平幅,  $y_T, y_B$ : それぞれ引張柱と圧縮柱にぶつかるストラットの高さ,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ : ストラットの角度,  $\gamma_T, \gamma_B$ : それぞれ引張柱と圧縮柱の有効幅比,  $t_w'$ : アーチ機構の壁厚(= (1- $\beta$ ) $t_w$ )