

袖壁付き柱の終局耐力の評価法に関する基礎的研究

若林 實・南 宏一・藤原 悌三
中村 武・社家 寛子

A FUNDAMENTAL STUDY FOR EVALUATION OF THE ULTIMATE STRENGTH OF COLUMNS WITH WING WALLS

By *Minoru WAKABAYASHI, Koichi MINAMI, Teizo FUJIWARA,*
Takeshi NAKAMURA and Hiroko SHAKE

Synopsis

Proposed in this paper is a trial to provide an evaluation of strength and deformation behavior of columns with wing walls under combined state of compression, bending and shear by applying the extended additive strength theory, which is simple and plain theory to analytical approach.

The analysis make use of the extended additive strength theory based on beam and arch mechanism concept.

Theoretical solutions are compared with past test results which were applicable to the proposed solutions in this paper.

In view of this comparison, the correlation between these past test results and this theoretical solutions was satisfactory.

1. 序

新潟地震（昭和39年）、十勝沖地震（昭和43年）等において、日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準に従って設計された鉄筋コンクリート建物が、数多くの被害を受け、耐震設計史上、多くの教訓を与えた。

そのひとつに、従来、骨組の構造計算の際に非構造材とみなして、単にその重量だけを考慮したり、耐力に関しては余力とみなす程度で十分に考慮されないまま設計されていた骨組内の腰壁・たれ壁・袖壁などの小壁体の問題が挙げられる。震害における破壊状況からも、これらの小壁体が骨組の力学的挙動および破壊状況に大きな影響を及ぼすことは、容易に観察できる。

また、壁を無視して純ラーメンとして計算した場合と薄い壁もすべて構造材とみなして計算した場合とは、骨組の剛性が相違するであろうことは、簡単な応力計算によっても容易に想像できる。

それゆえに、構造計画および構造設計時に何らかの形でその影響を適切に評価すべきであることは改めて言うまでもない。

しかしながら、実際の構造計算の際、応力計算および部材の断面算定に、このような小壁体をいかに取り扱うと適切であるかは大変むずかしい問題であり、現状では確立された方法がないばかりか、これら小壁体が、はり柱と一体となった部材の弾塑性挙動に関する研究資料も不十分であり、今後さらに多くの研究が望まれる問題のひとつである。

本論は、曲げ・圧縮およびせん断の組合せ応力下における、腰壁・たれ壁・袖壁付き部材の終局強度を理

論的な取り扱いが簡単で明解な拡張累加強度理論を応用した解析法で評価することを試み、過去の実験資料との比較によって解析解の妥当性を述べるものである。

2. 鉄筋コンクリート部材

2.1 終局曲げ強度

腰壁・たれ壁・袖壁などの小壁体が、はり・柱に付加された断面についても、通常の曲げ終局強度理論を適用して強度を計算することは可能である。ここでは、学会の RC 規準・付20¹⁾ の理論を応用した袖壁付き柱の略算式を示す。このとき、袖壁付き柱の強度は無筋コンクリート部分の強度と柱主筋および壁縦筋の強度の累加で与えられるものとし、模式図を Fig. 1 に示す。ただし、壁縦筋は両側の袖壁中央に集中しているものとし、また、与えられた圧縮力に対して、中立軸が断面内に存在する場合を対象とする。

それぞれの中立軸位置において得られる $m-n$ 相関方程式を Table 1 に示し、そのときの特定点を Table 2 に示す。ここに、 m : 無次元化曲げモーメント (M/bD^2F_c)、 n : 無次元化圧縮力 (N/bDF_c)

2.2 終局せん断強度

袖壁付き鉄筋コンクリート柱の終局せん断強度を考える場合のせん断抵抗機構として、Fig. 2 に示す 2 つのメカニズムを仮定する。せん断抵抗機構 (I) では、柱部分と両側に取り付く袖壁部分を分離して取り扱い、せん断抵抗機構 (II) では、袖壁部分は柱を貫通する一連の壁柱として考慮し、柱部分は全幅より壁厚を差し引いた幅を新たな柱幅とした長方形断面を有するものとして取り扱うことになる。いずれの抵抗機構も、壁縦筋は両側の袖壁中央に集中しているものとし、壁横筋は、一般にその影響は小さいので、解析を簡略化するために無視することにした。

柱、壁それぞれの抵抗機構に対して静的許容応力場を満足する曲げ・圧縮およびせん断に対する強度 ($M, {}_cN, Q$) および (${}_mM, {}_mN, {}_mQ$) が決められると、部材としての曲げ・圧縮およびせん断に対する強度 (M, N, Q) は、拡張累加強度理論に基づいて、

$$M = {}_cM + {}_mM, N = {}_cN + {}_mN, Q = {}_cQ + {}_mQ \dots\dots\dots(2 \cdot 1)$$

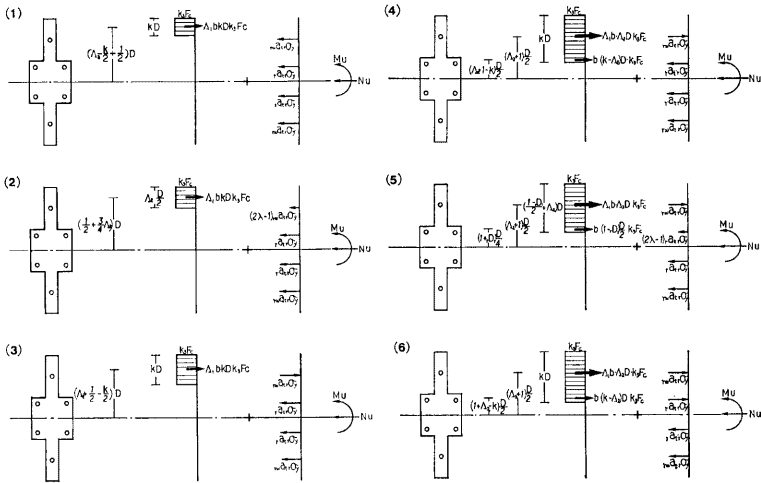


Fig. 1 Stress at ultimate state

と与えられる。ただし、本論では、逆対称の曲げ・せん断の応力状態を対象としているので、部材長を h として、

$$M/Q = eM/eQ = {}_wM/{}_wQ = h/2 \dots \dots \dots (2 \cdot 2)$$

の関係を満たす必要がある。

Table 1 $m-n$ equation for RC column with wing walls

Axial Force	$m-n$ Interaction Equation
n_0	$m = \{A_1 k_3 (1 + 2A_2) - (n_r \mu_t + 2_r \mu_t + 2_r \mu_t)\} (n + 2_r \mu_t + 2_r \mu_t) / 2 A_1 k_3$
n_1	$m = (2 + 3A_2) A_1 A_2 k_3 / 8 + (n + 2_r \mu_t + 2_r \mu_t - A_1 A_2 k_3 / 2) (1 + A_2) / 2$
n_2	$m = \{A_1 k_3 (1 + 2A_2) - (n + 2_r \mu_t)\} (n + 2_r \mu_t) / 2 A_1 k_3 + r_w \mu (1 + A_2)$
n_3	$m = \{1 + A_1 A_2 - (n + 2_r \mu_t) / k_3\} \{(n + 2_r \mu_t) / k_3 - A_1 A_2\} k_3 / 2 + (1 + A_2) (A_1 A_2 k_3 / 2 + r_w \mu)$
n_4	$m = \{n + 2_r \mu_t - A_1 A_2 k_3 - (1 - r D_1) k_3 / 2\} r D_1 / 2 + (1 - r D_1^2) k_3 / 8 + (1 + A_2) (A_1 A_2 k_3 / 2 + r_w \mu)$
n_5	$m = \{(1 + A_1 A_2 - n / k_3) (n / k_3 - A_1 A_2) k_3 / 2 + r \mu_t r D_1 + (1 + A_2) (A_1 A_2 k_3 / 2 + r_w \mu)\}$
n_6	$m = -\{n - 2_r \mu_t - A_1 A_2 k_3 - (1 + r D_1) k_3 / 2\} r D_1 / 2 + (1 - r D_1^2) k_3 / 8 + (1 + A_2) (A_1 A_2 k_3 / 2 + r_w \mu)$
n_7	$m = \{1 + A_1 A_2 - (n - 2_r \mu_t) / k_3\} \{(n - 2_r \mu_t) / k_3 - A_1 A_2\} k_3 / 2 + (1 + A_2) (A_1 A_2 k_3 / 2 + r_w \mu)$
n_8	$m = \{2A_2 - (n - k_3 - 2_r \mu_t) / A_1 k_3\} \{(n - k_3 - 2_r \mu_t) / k_3 + A_1\} k_3 / 2 + r_w \mu (1 + A_2)$
n_9	$m = -(n - 2_r \mu_t - 2_r \mu_t - k_3 - 3A_1 A_2 k_3 / 2) (1 + A_2) / 2 + (2 + 3A_2) A_1 A_2 k_3 / 8$
n_{10}	$m = \{2A_1 A_2 k_3 - (n - 2_r \mu_t - 2_r \mu_t - k_3)\} \{(n - 2_r \mu_t - 2_r \mu_t - k_3) + A_1 k_3\} / 2 A_1 k_3$
n_{11}	

Table 2 Specific value

X_i	n_i	m_i
X_0	$n_0 = -2(r \mu_t + r_w \mu)$	$m_0 = 0$
X_1	$n_1 = -2(r \mu_t + r_w \mu) + A_1 A_2 k_3 / 2$	$m_1 = (2 + 3A_2) A_1 A_2 k_3 / 8$
X_2	$n_2 = -2_r \mu_t + A_1 A_2 k_3 / 2$	$m_2 = (2 + 3A_2) A_1 A_2 k_3 / 8 + r_w \mu (1 + A_2)$
X_3	$n_3 = -2_r \mu_t + A_1 A_2 k_3$	$m_3 = (1 + A_2) (A_1 A_2 k_3 / 2 + r_w \mu)$
X_4	$n_4 = -2_r \mu_t + A_1 A_2 k_3 + (1 - r D_1) k_3 / 2$	$m_4 = (1 + A_2) (A_1 A_2 k_3 / 2 + r_w \mu) + (1 - r D_1^2) k_3 / 8$
X_5	$n_5 = A_1 A_2 k_3 + (1 - r D_1) k_3 / 2$	$m_5 = (1 + A_2) (A_1 A_2 k_3 / 2 + r_w \mu) + (1 - r D_1^2) k_3 / 8 + r \mu_t r D_1$
X_6	$n_6 = A_1 A_2 k_3 + (1 + r D_1) k_3 / 2$	$m_6 = m_5$
X_7	$n_7 = 2_r \mu_t + A_1 A_2 k_3 + (1 + r D_1) k_3 / 2$	$m_7 = m_4$
X_8	$n_8 = 2_r \mu_t + k_3 (1 + A_1 A_2)$	$m_8 = m_3$
X_9	$n_9 = 2_r \mu_t + k_3 (1 + 3A_1 A_2 / 2)$	$m_9 = m_2$
X_{10}	$n_{10} = 2(r \mu_t + r_w \mu) + k_3 (1 + 3A_1 A_2 / 2)$	$m_{10} = m_1$
X_{11}	$n_{11} = 2(r \mu_t + r_w \mu) + k_3 (1 + 2A_1 A_2)$	$m_{11} = m_0 = 0$

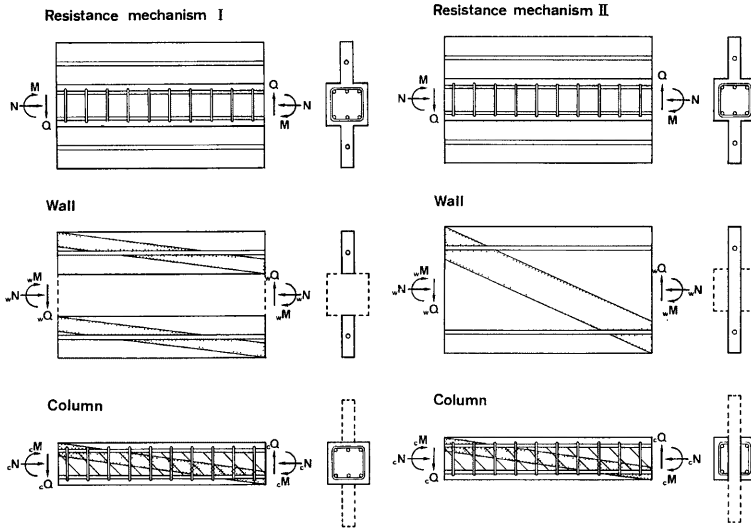


Fig. 2 Shear resistant mechanism

(1) 各抵抗要素の強度

(a) 柱部分の強度

柱部分の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) の2つが存在する²⁾。Fig. 3 に示すように、はり機構は、主筋・せん断補強筋および、 b の幅を有するコンクリート束材から構成される。コンクリート束材のなす角度 φ は、主筋の材長に対する付着力を最大にする条件から、 $\varphi=45^\circ$ とした。アーチ機構は、柱幅 b から、 b を差し引いた残りの幅を有し、部材全長にわたる無筋コンクリート斜材によって構成される。

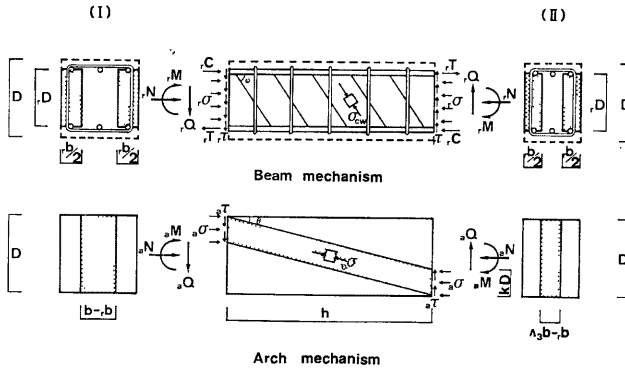


Fig. 3 Resistant mechanism for column

はり機構による抵抗力は、作用圧縮力の大きさによって、Fig. 4 に図式化するように3領域に対して与えられる。

(i) $-2_r\mu_t \leq n < -2_r\mu_t + r\mu_w(rD_1 + \eta)$
 $r q = (r n + 2_r\mu_t) / (1 + \eta / r D_1) \dots\dots (2 \cdot 3)$

(ii) $-2_r\mu_t + r\mu_w(rD_1 + \eta) \leq r n < 2_r\mu_t$
 $+ r\mu_w(rD_1 - \eta)$
 $r q = r\mu_w \cdot r D_1 \dots\dots (2 \cdot 4)$

(iii) $2_r\mu_t + r\mu_w(rD_1 - \eta) \leq r n \leq 2_r\mu_t$
 $r q = (r n - 2_r\mu_t) / (1 - \eta / r D_1) \dots\dots (2 \cdot 5)$

ここに、 $r n$: 無次元化圧縮力 ($r N / b D F_c$)
 $r q$: 無次元化せん断力 ($r Q / b D F_c$)
 $r \mu_t$: 引張鉄筋係数 ($r a_t \cdot \sigma_y / b D F_c$)
 $r D_1 = r D / D$
 $r \mu_w$: せん断補強係数
 $(r b_w \cdot \sigma_y / F_c)$, $\eta = h / D$

一方、アーチ機構による抵抗力は、無次元化圧縮力 $a n$ ($= a N / b D F_c$) と無次元化せん断力 $a q$ ($= a Q / b D F_c$) によって、

$$(a n - a b_1 / 2)^2 + (a q + a b_1 \cdot \eta / 2)^2 = (a b_1 \sqrt{1 + \eta^2} / 2)^2 \dots\dots (2 \cdot 6)$$

と与えられる。ここで、 $a b_1$ はアーチ機構に寄与する無筋コンクリート斜材の無次元化幅であり、

せん断抵抗機構 (I) では、
 $a b_1 = (b - r) / b \dots\dots (2 \cdot 7)$

と与えられ、せん断抵抗機構 (II) では、

$$a b_1 = (d_3 b - r) / b = \{(1 - D_1) b - r\} / b \dots\dots (2 \cdot 8)$$

と与えられる。

Fig. 5 に示すように、アーチ機構による $a n - a q$ 相関方程式は、中心点 $(a b_1 / 2, -a b_1 \cdot \eta / 2)$ 、半径 $a b_1 \sqrt{1 + \eta^2} / 2$ の円の方程式を表わしている。

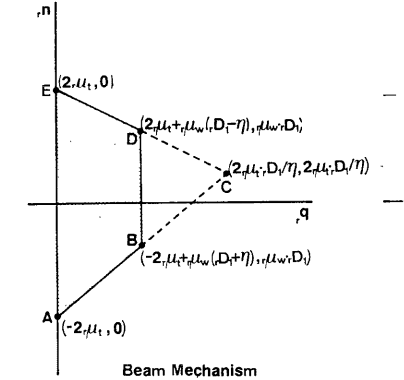
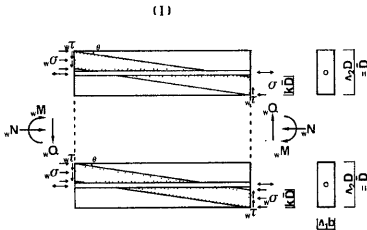


Fig. 4 Interaction relationships between compression and shear for beam mechanism

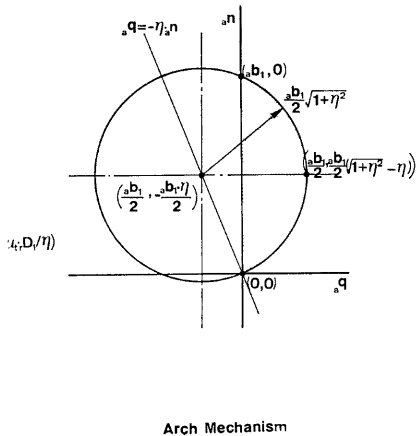


Fig. 5 Interaction relationships between compression and shear for arch mechanism

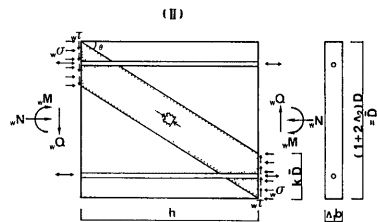


Fig. 6 Resistant mechanism for wall

(b) 袖壁部分の強度

袖壁部分の強度は、Fig. 6 に示すように、壁厚を幅とし、部材全長にわたる無筋コンクリート部分のアーチ機構による強度と、壁縦筋による強度の累加の形で表わされる。

アーチ機構による強度は、柱の場合 (2・6式) と同様に次のように表わせる。

$$(w_a n - A_1 \cdot w D_1 / 2)^2 + (w_a q + A_1 \cdot w D_1 \cdot w \eta / 2)^2 = (A_1 \cdot w D_1 \sqrt{1 + w \eta^2 / 2})^2 \dots\dots\dots (2 \cdot 9)$$

ここに、 $w_a n$: 無次元化圧縮力 ($w_a N / b D F_c$)

$w_a q$: 無次元化せん断力 ($w_a Q / b D F_c$)

$$w D_1 = \begin{cases} 2A_2 & \text{(抵抗機構 (I))} \\ 1 + 2A_2 & \text{(抵抗機構 (II))} \end{cases}$$

$$w \eta = \begin{cases} h / A_2 D = \eta / A_2 & \text{(抵抗機構 (I))} \\ h / (1 + 2A_2) D = \eta / (1 + 2A_2) & \text{(抵抗機構 (II))} \end{cases}$$

A_1 : 袖壁幅比, A_2 : 袖壁張り出し長さ比

壁縦筋の強度は、コンクリートとの間の付着を無視し、単独で軸方向力のみ抵抗するものと仮定し、

$$w_r n = \pm 2 r_w \mu \dots\dots\dots (2 \cdot 10)$$

と与える。

ここに、 $r_w \mu$: 壁縦筋係数 ($r_w a_r \cdot r_w \sigma_y / b D F_c$)

(2) アーチ機構による n - q 相関方程式

本解析モデルでは、アーチ機構として、壁部分によるアーチ機構と柱部分によるアーチ機構がある。そこで本論では、拡張累加強度理論を適用する場合に、まず、2つのアーチ機構による強度を累加し、そのうえで柱部分のはり機構による強度と壁縦筋の強度を累加する方式を探る。

2つのアーチ機構を累加する場合、原点と円中心点を結ぶ直線の勾配によって、得られる相関曲線が異なる。Fig. 7 に、 $w \eta \leq \eta$ における累加則の構成図を示す。相関曲線は、 $\widehat{X_0 X_1}$, $\widehat{X_1 X_2}$, $\widehat{X_2 X_3}$ の3つの円弧で

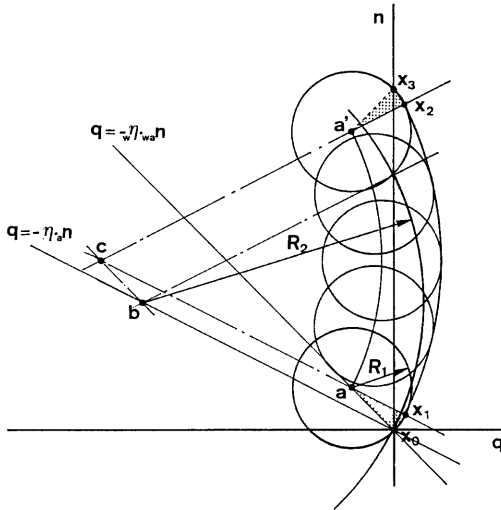


Fig. 7 Additive strength concept for arch mechanism

構成される。ここで、 $\widehat{X}_0\widehat{X}_1$ 、 $\widehat{X}_2\widehat{X}_3$ はそれぞれ点 a および a' を中心とする壁部分のアーチ機構による円弧を表わし、 $\widehat{X}_1\widehat{X}_2$ は柱部分のアーチ機構による円中心点 b を壁部分のアーチ機構による円中心点 a だけ移動させた点 c を新たな円中心とする半径 R_1+R_2 の円弧を表わす。

$$\begin{aligned} \text{ここに, } a(n', q') &= (A_1 \cdot_w D_1 / 2, -A_1 \cdot_w D_1 \cdot_w \eta / 2) \\ a'(n', q') &= (ab_1 + A_1 \cdot_w D_1 / 2, -A_1 \cdot_w D_1 \cdot_w \eta / 2) \\ b(n', q') &= (ab_1 / 2, -ab_1 \cdot \eta / 2) \\ c(n', q') &= ((ab_1 + A_1 \cdot_w D_1) / 2, -(ab_1 \cdot \eta + A_1 \cdot_w D_1 \cdot_w \eta) / 2) \\ R_1 &= A_1 \cdot_w D_1 \sqrt{1 + \eta^2} / 2, \quad R_2 = ab_1 \sqrt{1 + \eta^2} / 2 \end{aligned}$$

この3つの円弧を解析的に表現すると、

$$\begin{aligned} \circ n'_0 \leq n' < n'_1 \\ q' &= \sqrt{(A_1 \cdot_w D_1 \sqrt{1 + \eta^2} / 2)^2 - (n' - A_1 \cdot_w D_1 / 2)^2} - A_1 \cdot_w D_1 \cdot_w \eta / 2 \quad \dots\dots\dots (2 \cdot 11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \circ n'_1 \leq n' < n'_2 \\ q' &= \sqrt{\left(\frac{A_1 \cdot_w D_1 \sqrt{1 + \eta^2} + ab_1 \cdot \sqrt{1 + \eta^2}}{2} \right)^2 - \left(n' - \frac{A_1 \cdot_w D_1 + ab_1}{2} \right)^2} - \frac{A_1 \cdot_w D_1 \cdot_w \eta + ab_1 \cdot \eta}{2} \\ &\quad \dots\dots\dots (2 \cdot 12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \circ n'_2 \leq n' \leq n'_3 \\ q' &= \sqrt{(A_1 \cdot_w D_1 \sqrt{1 + \eta^2} / 2)^2 - (n' - ab_1 - A_1 \cdot_w D_1 / 2)^2} - A_1 \cdot_w D_1 \cdot_w \eta / 2 \quad \dots\dots\dots (2 \cdot 13) \end{aligned}$$

と与えられる。

$$\begin{aligned} \text{ここに, } n'_1 &= A_1 \cdot_w D_1 (1 - \sqrt{1 + \eta^2} / \sqrt{1 + \eta^2}) / 2 \\ n'_2 &= ab_1 + A_1 \cdot_w D_1 (1 + \sqrt{1 + \eta^2} / \sqrt{1 + \eta^2}) / 2 \\ n'_3 &= ab_1 + A_1 \cdot_w D_1 \end{aligned}$$

以上は、勾配関係が $w\eta \leq \eta$ の場合の累加則であるが、 $w\eta > \eta$ の場合は、前述の柱と壁の立場が逆転する。つまり、 $\widehat{X}_0\widehat{X}_1$ 、 $\widehat{X}_2\widehat{X}_3$ は柱のアーチ機構による円弧を表わすことになる。考え方は同様であるので、本論では $w\eta \leq \eta$ として以下の議論を進める。

(3) 袖壁付き鉄筋コンクリート部材の $n-q$ 相関方程式

袖壁付き鉄筋コンクリート柱の $n-q$ 相関方程式は、はり機構による $n-r, q$ 相関方程式 ((2・3)~(2・5)式) と壁縦筋による強度 ((2・10)式) およびアーチ機構による $n'-q'$ 相関方程式 ((2・11)~(2・13)式) に基づいて、Fig. 8 に示す累加則を適用して求めることができる。

$n-q$ 相関曲線は、9区間に分けて表現される。その方程式を Table 3 に、特定点を Table 4 に示す。

$$\begin{aligned} \text{ここに, } \lambda_i &= \frac{\alpha \cdot w_i - \{\alpha \cdot \gamma + \sqrt{(\alpha \cdot \gamma)^2 - w_i \cdot \rho_i}\} \gamma}{\beta_i \cdot w_i - \{\beta_i \cdot \gamma + (-1)^i \sqrt{(\beta_i \cdot \gamma)^2 - w_i \cdot \rho}\} \gamma} \\ L_i &= \sqrt{1 + \lambda_i^2} \\ \alpha &= (r D_1 + \eta) / 2, \quad \beta_i = (r D_1 - (-1)^i \cdot \eta - 1) / 2 \\ w_i &= \alpha^2 + \beta_i^2, \quad \rho = \gamma^2 - \alpha^2, \quad \rho_i = \gamma^2 - \beta_i^2 \quad (\text{ただし, } i=1, 2) \\ \delta &= A_3 - 2r\mu_w, \quad \gamma = \sqrt{1 + \eta^2} / 2, \quad w\gamma = \sqrt{1 + \eta^2} / 2 \\ A_3 &= \begin{cases} 1 & (\text{抵抗機構 (I)}) \\ 1 - A_1 & (\text{抵抗機構 (II)}) \end{cases} \end{aligned}$$

なお、 $r\mu_w$ が $r\mu_{w0}$ ($=2r\mu_l/\eta$) よりも大きい場合には、 $r\mu_w = r\mu_{w0}$ として計算する。

2.3 荷重-変形関係³⁾

前述した力学的モデル—すなわち、はり機構、アーチ機構によって構成されるせん断抵抗モデル—を応用して、水平力—変形関係を予測するための方法の展開を試みる。

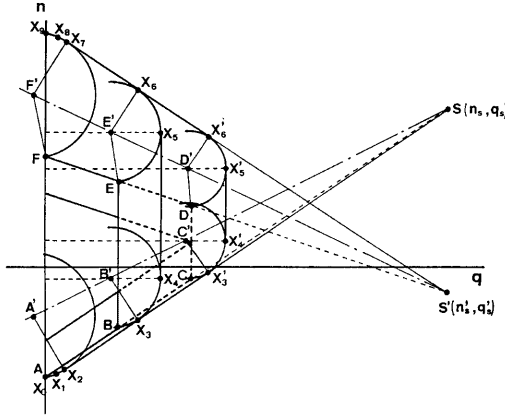


Fig. 8 Envelope of the curves obtained by the extended additive strength concept

Table 3 $n-q$ interaction equation for RC column with wing walls

Axial Force	$n-q$ Interaction Equation
n_0	$q = \sqrt{(A_{1w}D_{1w}\bar{r})^2 - \left\{n + 2(r\mu_t + r_w\mu) - \frac{A_{1w}D_1}{2}\right\}^2} - \frac{A_{1w}D_{1w}\eta}{2}$
n_1	$q = \sqrt{(A_{1w}D_{1w}\bar{r} + A_3\bar{r})^2 - \left\{n + 2(r\mu_t + r_w\mu) - \frac{A_{1w}D_1 + A_3}{2}\right\}^2} - \frac{A_{1w}D_{1w}\eta + A_3\eta}{2}$
n_2	$q = \lambda_1(n - n_2) + q_2$
n_3	$q = \sqrt{(A_{1w}D_{1w}\bar{r} + \delta\bar{r})^2 - \left\{n + 2(r\mu_t + r_w\mu) - r\mu_w(rD_1 + \eta) - \frac{A_{1w}D_1 + \delta}{2}\right\}^2} + r\mu_w r D_1 - \frac{A_{1w}D_{1w}\eta + \delta\eta}{2}$
n_4	$q = A_{1w}D_{1w}\bar{r} + \delta\bar{r} + r\mu_w r D_1 - \frac{A_{1w}D_{1w}\eta + \delta\eta}{2}$
n_5	$q = \sqrt{(A_{1w}D_{1w}\bar{r} + \gamma\delta)^2 - \left\{n - 2(r\mu_t + r_w\mu) - r\mu_w(rD_1 - \eta) - \frac{A_{1w}D_1 + \delta}{2}\right\}^2} + r\mu_w r D_1 - \frac{A_{1w}D_{1w}\eta + \delta\eta}{2}$
n_6	$q = \lambda_2(n - n_7) + q_7$
n_7	$q = \sqrt{(A_{1w}D_{1w}\bar{r} + A_3\bar{r})^2 - \left\{n - 2(r\mu_t + r_w\mu) - \frac{A_{1w}D_1 + A_3}{2}\right\}^2} - \frac{A_{1w}D_{1w}\eta + \delta\eta}{2}$
n_8	$q = \sqrt{(A_{1w}D_{1w}\bar{r})^2 - \left\{n - 2(r\mu_t + r_w\mu) - A_3 - \frac{A_{1w}D_1}{2}\right\}^2} - \frac{A_{1w}D_{1w}\eta}{2}$
n_9	

Table 4 Specific value

X_i	n_i	q_i
X_0	$n_0 = -2(r\mu_t + r_w\mu)$	$q_0 = 0$
X_1	$n_1 = -2(r\mu_t + r_w\mu) + \frac{A_{1w}D_1}{2} \left(1 - \frac{w\tilde{r}}{\tilde{r}}\right)$	$q_1 = \frac{A_{1w}D_1}{2} \left(\eta \frac{w\tilde{r}}{\tilde{r}} - w\eta\right)$
X_2	$n_2 = -\frac{\lambda_1}{L_1} (A_{1w}D_{1w}\tilde{r} + A_3\tilde{r})$ $-2(r\mu_t + r_w\mu) + \frac{A_{1w}D_1 + A_3}{2}$	$q_2 = \frac{1}{L_1} (A_{1w}D_{1w}\tilde{r} + A_3\tilde{r})$ $-\frac{A_{1w}D_{1w}\tilde{r} + A_3\tilde{r}}{2}$
X_3	$n_3 = -\frac{\lambda_1}{L_1} (A_{1w}D_{1w}\tilde{r} + \delta\tilde{r}) + r\mu_w(rD_1 + \eta)$ $-2(r\mu_t + r_w\mu) + \frac{A_{1w}D_1 + \delta}{2}$	$q_3 = \frac{1}{L_1} (A_{1w}D_{1w}\tilde{r} + \delta\tilde{r}) + r\mu_w r D_1$ $-\frac{A_{1w}D_{1w}\tilde{r} + \delta\tilde{r}}{2}$
X_4	$n_4 = -2(r\mu_t + r_w\mu) + r\mu_w(rD_1 + \eta)$ $+ \frac{A_{1w}D_1 + \delta}{2}$	$q_4 = A_{1w}D_{1w}\tilde{r} + \delta\tilde{r} + r\mu_w r D_1$ $-\frac{A_{1w}D_{1w}\tilde{r} + \delta\tilde{r}}{2}$
X_5	$n_5 = 2(r\mu_t + r_w\mu) + r\mu_w(rD_1 - \eta)$ $+ \frac{A_{1w}D_1 + \delta}{2}$	$q_5 = q_4$
X_6	$n_6 = -\frac{\lambda_2}{L_2} (A_{1w}D_{1w}\tilde{r} + \delta\tilde{r}) + r\mu_w(rD_1 - \eta)$ $+ 2(r\mu_t + r_w\mu) + \frac{A_{1w}D_1 + \delta}{2}$	$q_6 = \frac{1}{L_2} (A_{1w}D_{1w}\tilde{r} + \delta\tilde{r}) + r\mu_w r D_1$ $-\frac{A_{1w}D_{1w}\tilde{r} + \delta\tilde{r}}{2}$
X_7	$n_7 = -\frac{\lambda_2}{L_2} (A_{1w}D_{1w}\tilde{r} + A_3\tilde{r})$ $+ 2(r\mu_t + r_w\mu) + \frac{A_{1w}D_1 + A_3}{2}$	$q_7 = \frac{1}{L_2} (A_{1w}D_{1w}\tilde{r} + A_3\tilde{r})$ $-\frac{A_{1w}D_{1w}\tilde{r} + A_3\tilde{r}}{2}$
X_8	$n_8 = 2(r\mu_t + r_w\mu) + A_3 + \frac{A_{1w}D_1}{2} \left(1 + \frac{w\tilde{r}}{\tilde{r}}\right)$	$q_8 = q_1$
X_9	$n_9 = 2(r\mu_t + r_w\mu) + A_3 + A_{1w}D_1$	$q_9 = 0$

解析に用いた材料の応力-歪関係および各抵抗要素の変形モデルを Fig. 9 に示す。ここで、コンクリートは引張には効かないものとし、鉄筋は弾性係数 2100 t/cm² で一定とする完全塑性型とした。また、はり機構に寄与するコンクリート幅 r と縦筋量 A_{rt} を横筋 A_w を降伏させるに十分な量とし、残りのコンクリートおよび縦筋 A_{ra} はアーチ機構に寄与するものとした。

変形の適合条件式および力の釣合い式をたて、増分型で表わすと次のようになる。

(i) はり機構

$$\Delta \varepsilon_{ct} = (\Delta \varepsilon_w - \Delta R)/2 \dots \dots \dots (2 \cdot 14)$$

$$\Delta \varepsilon_{tt} = (\Delta \varepsilon_w + \Delta R)/2 \dots \dots \dots (2 \cdot 15)$$

$$A_w \cdot r \cdot D / X \cdot E_w \cdot \Delta \varepsilon_w + b \cdot r \cdot D (E_{ct} \cdot \Delta \varepsilon_{ct} + E_{tt} \cdot \Delta \varepsilon_{tt}) / 2 = 0 \dots \dots \dots (2 \cdot 16)$$

$$\Delta Q_t = r \cdot b \cdot r \cdot D (E_{tt} \cdot \Delta \varepsilon_{tt} - E_{ct} \cdot \Delta \varepsilon_{ct}) / 2 \dots \dots \dots (2 \cdot 17)$$

(ii) アーチ機構

$$\Delta \varepsilon_{ca} = (\Delta \varepsilon_{ra} - \beta \cdot \Delta R) / (1 + \beta^2) \dots \dots \dots (2 \cdot 18)$$

$$\Delta \varepsilon_{ta} = (\Delta \varepsilon_{ra} + \beta \cdot \Delta R) / (1 + \beta^2) \dots \dots \dots (2 \cdot 19)$$

$$2A_{ra} \cdot E_s \cdot \Delta \varepsilon_{ra} + (b - r) \cdot D \cdot (E_{ca} \cdot \Delta \varepsilon_{ca} + E_{ta} \cdot \Delta \varepsilon_{ta}) / 2 (1 + \beta^2) = 0 \dots \dots \dots (2 \cdot 20)$$

$$\Delta Q_a = (b - r) \cdot D (E_{ta} \cdot \Delta \varepsilon_{ta} - E_{ca} \cdot \Delta \varepsilon_{ca}) / 2 (1 + \beta^2) \dots \dots \dots (2 \cdot 21)$$

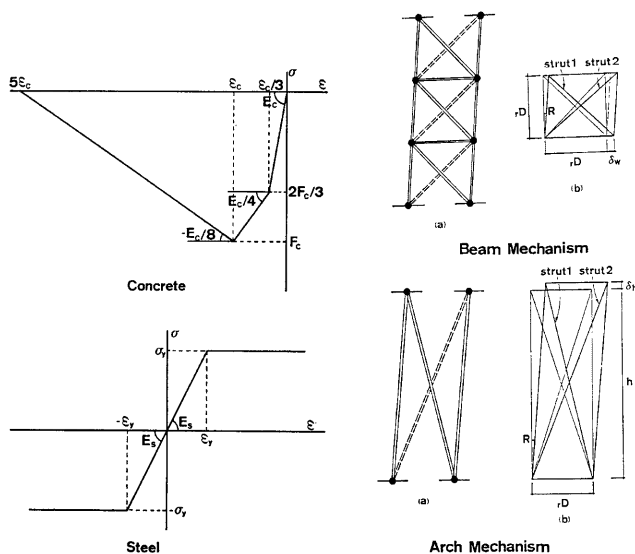


Fig. 9 Stress-strain relationship and model

各載荷段階において、変形の適合条件と力の釣合い条件を満たすように、各要素の剛性と有効断面積を与えれば、水平力と変形の関係が求められることになる。

3. 鉄骨鉄筋コンクリート部材

3.1 終局曲げ強度

袖壁付き鉄骨鉄筋コンクリート柱の終局曲げ強度は、前章で得られた鉄筋コンクリート部分の強度に、鉄骨部分の強度を累加することによって表わせるものとする。

鉄骨部分の強度は、作用圧縮力の大きさによって、次の3領域に対して、

$$\circ - (2_s\mu_f + s\mu_w) \leq s'n < -s\mu_w/2$$

$$-(s'n + s\mu_w)/2_s\mu_f + s'n/s\mu_f \cdot sD_1 = 1 \quad \dots(3 \cdot 1)$$

$$\circ -s\mu_w/2 \leq s'n < s\mu_w/2$$

$$s'm = (s\mu_f + s\mu_w/4) \cdot sD_1 \dots\dots\dots(3 \cdot 2)$$

$$\circ s\mu_w/2 \leq s'n \leq 2_s\mu_f + s\mu_w$$

$$(s'n - s\mu_w)/2_s\mu_f + s'm/s\mu_f \cdot sD_1 = 1 \quad \dots\dots(3 \cdot 3)$$

と与えられる。

ここに、 $s\mu_f$: 鉄骨フランジ係数 ($sA_f \cdot s\sigma_y / bDF_c$)

$s\mu_w$: 鉄骨ウェブ係数 ($sA_w \cdot s\sigma_y / bDF_c$)

$sD_1 = sD / D$, sD : 鉄骨のせい

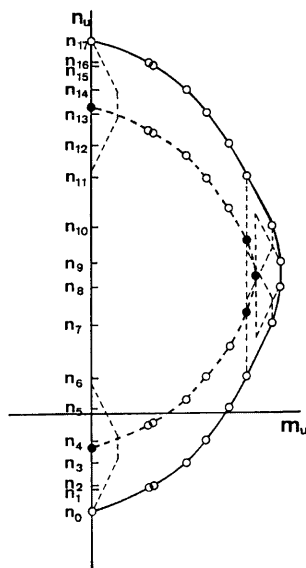


Fig. 10 Summary of theoretical analysis for SRC member

得られる相関曲線は、Fig. 10 に示すように、鉄骨の相関曲線の原点が鉄筋コンクリート部分の耐力曲線上を移動したときの包絡線となる。

3.2 終局せん断強度

この場合も、考え方は前節と同様で、鉄筋コンクリート部分の強度に、次のように与えられる鉄骨の強度を累加して表わされるものとする。

◦ $s n_0 \leq_s n <_s n_1$

$$s q = (s n + 2_s \mu_f +_s \mu_w) \cdot_s D_1 (\sqrt{3}_s D_1 + \eta) \dots\dots\dots (3 \cdot 4)$$

◦ $s n_1 \leq_s n <_s n_2$

$$s q = s q_1 \dots\dots\dots (3 \cdot 5)$$

◦ $s n_2 \leq_s n \leq_s n_3$

$$s q = -(s n - 2_s \mu_f -_s \mu_w) \cdot_s D_1 / (\sqrt{3}_s D_1 + \eta) \dots\dots\dots (3 \cdot 6)$$

ここに、 $s n_0 = -(2_s \mu_f +_s \mu_w)$

$s n_3 = 2_s \mu_f +_s \mu_w$

$s \mu_w \geq 2\sqrt{3}_s \mu_f \cdot_s D_1 / \eta$ のとき

$$\left. \begin{matrix} s n_1 \\ s n_2 \end{matrix} \right\} = \mp \frac{\eta}{\sqrt{3}_s D_1 + 2\eta} \left(s \mu_w - \frac{2\sqrt{3}_s \mu_f \cdot_s D_1}{\eta} \right)$$

$s q_1 = (4_s \mu_f +_s \mu_w) \cdot_s D_1 (\sqrt{3}_s D_1 + 2\eta)$

$s \mu_w < 2\sqrt{3}_s \mu_f \cdot_s D_1 / \eta$ のとき

$$\left. \begin{matrix} s n_1 \\ s n_2 \end{matrix} \right\} = 2_s \mu_f \mp \frac{s \mu_w \cdot \eta}{\sqrt{3}_s D_1}$$

$s q_1 = s \mu_w / \sqrt{3}$

得られる相関曲線は、Fig. 11 に示すように、鉄骨の $s n - s q$ 相関方程式の勾配、

$$S = \mp_s D_1 / (\sqrt{3}_s D_1 + \eta) \dots\dots\dots (3 \cdot 7)$$

と、鉄筋コンクリート部分の相関曲線のもつ直線部の勾配、 λ_1 および λ_2 との関係によって2ケースに分け

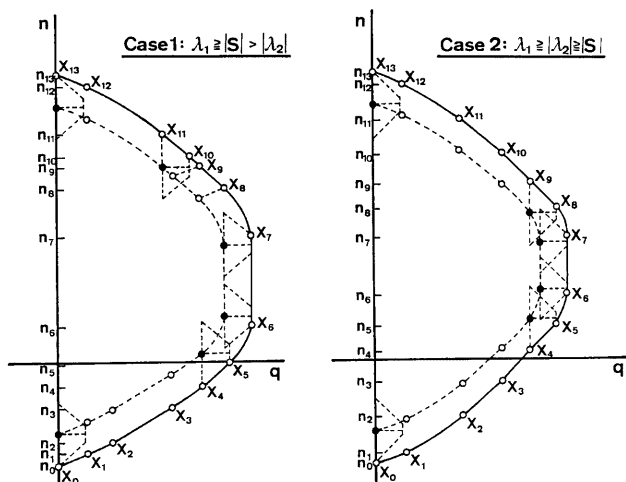


Fig. 11 Summary of theoretical analysis for SRC member

られる。

4. 考 察

ここでは、既往の実験資料に基づいて、前述した解析法による理論解の妥当性を検討する。

4.1 終局強度

図中、曲線ⅠおよびⅡは、前述のせん断抵抗機構(Ⅰ)および(Ⅱ)による解析結果を表わし、曲線Ⅲは終局曲げ強度(ここでは、曲げと圧縮を付けて曲げ破壊する際の材端モーメント M_u より、 $2M_u/h$ によってせん断力を算定した)を表わす。

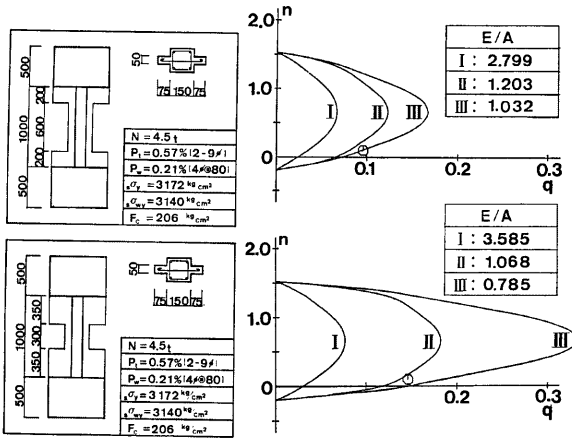


Fig. 12 Comparison of theoretical prediction with experimental results

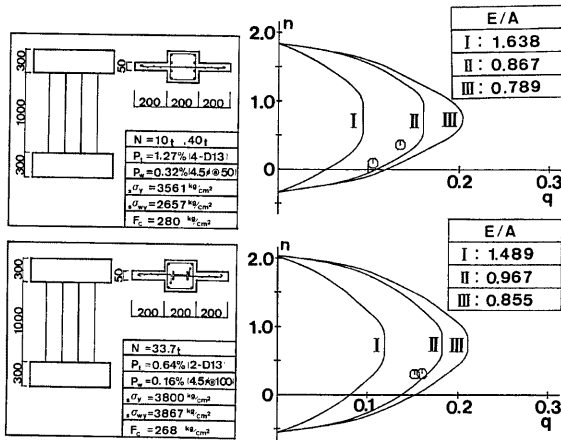


Fig. 13 Comparison of theoretical prediction with experimental results

(a) 壁・たれ壁・袖壁付き鉄筋コンクリート柱⁴⁾

Fig. 12 に得られた $n-q$ 相関曲線と試験体の断面構成を示す。上が曲げ破壊, 下がせん断破壊したものである。腰壁・たれ壁が併設された場合, 壁高さとしては, 腰壁・たれ壁間の内法高さを採る。図中に示した点が実験値であり, E/A は解析値との比である。この場合, 曲げ破壊した試験体の実験値は, 終局曲げ強度に近くなり, せん断破壊した試験体の実験値は, 曲線 II 一つまり, 壁を, 柱を貫通する壁柱とした解析値一に近くなる結果となる。

(b) 袖壁付き RC 柱⁵⁾と SRC 柱

Fig. 13 に解析結果を示す。上が鉄筋コンクリート柱, 下が鉄骨鉄筋コンクリート柱である。下図における黒丸印は壁が偏心して柱に付加した試験体の実験値である。図中に示した E/A は, RC 柱においては低軸力ものを, SRC 柱においては柱芯・壁芯の一致したものに對する値で, いずれも実験値は曲線 II に近くなる結果を示す。

(c) 抵抗機構 (II) による解析結果の検討

Fig. 14 に抵抗機構 (II) による解析値と実験値との比の度数分布を示す。本解析法が適用できる既往の実験資料^{4), 6)~13)} に対するものが(a)で, そのうちせん断破壊した資料を取り出したものが(b)である。縦軸に資料数, 横軸に実験値と解析値の比 (E/A) をとっている。(a)において, 柱の E/A の平均値1.059 (柱芯・壁芯の一致しているもの1.136, 偏心しているもの0.918), (b)では平均値1.034 (柱芯・壁芯の一致しているもの1.065, 偏心しているもの0.985)となる。偏心して壁が柱に取り付く場合に, やや危険側の分布傾向を示しているのは, 偏心の影響を考慮せず, 柱芯・壁芯の一致している場合と同様の解析法を用いているためである。従来より提案されている実驗式の精度と比べれば, 抵抗機構(II)一つまり, 壁を柱内貫通の壁柱とする抵抗機構一による解析解は, 比較的良好な対応性を示しているといえる。

4.2 荷重変形関係

Fig. 15 に解析結果を示す。図中, 破線は実験による⁸⁾ 履歴曲線の包絡線を示し, 曲線 I, II はそれぞれ, 前述のせん断抵抗機構(I), (II)による解析結果を示している。いずれの場合でも, 終局強度の解析結果と同様に, 抵抗機構(II)による解析解が最も良く挙動を追跡できている。柱長さ比 2.0 の比較的短い柱については, 初期剛性に関してはほぼ把握できているものの, 最終段階では耐力にかなりの差ができてしまう結果となる。

5. 結 論

前章の考察に基づいて, 本論文としての結論を以下に示す。

- (1) 袖壁付き鉄筋コンクリート柱の曲げ理論強度は, 学会の RC 規準・付20の理論を応用して表わせる。
- (2) 袖壁付き鉄骨鉄筋コンクリート柱の曲げ理論強度は, 鉄筋コンクリート部分の強度に鉄骨の強度を累加した形で表わせる。
- (3) 袖壁付き鉄筋コンクリート柱のせん断理論強度は, せん断抵抗機構を仮定して, 柱部分と壁部分の強度を拡張累加強度理論によって累加した形で表わせる。

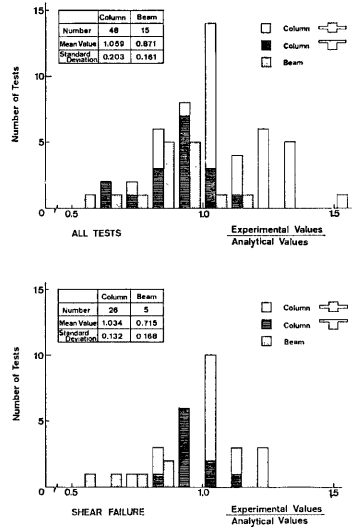


Fig. 14 Histogram of the ratios of experimental values to analytical values

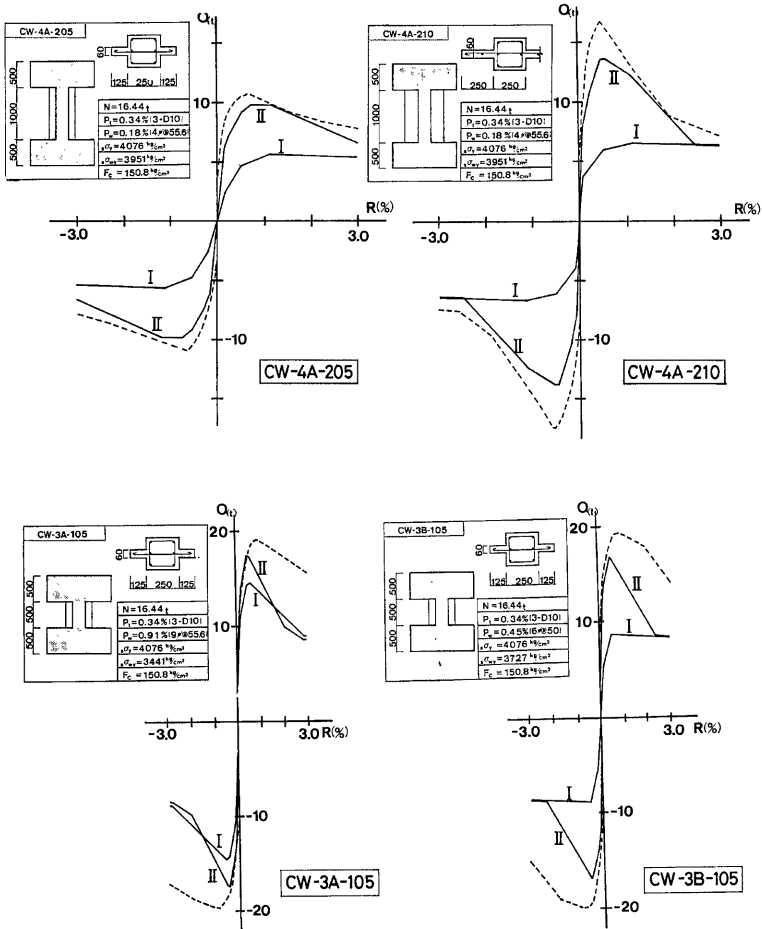


Fig. 15 Comparison of theoretical prediction with experimental results

(4) 袖壁付き鉄筋コンクリート柱のせん断理論強度において、抵抗機構(II)つまり、壁を柱内貫通の壁柱とする抵抗機構一による解析解が、実験値に対して1.05程度の安全率を示し、従来からの提案実験式に比べると、良好な対応性を示す。

(5) 変形性状の評価に関しても、耐力評価と同様の解析モデルが適用でき、十分な精度で挙動を追跡できていないけれど、定性的傾向は把握できる。

(6) 袖壁付き鉄骨鉄筋コンクリート柱のせん断理論強度も、曲げ強度と同様に、鉄筋コンクリート部分の強度に鉄骨の強度を累加した形で表わせる。

記 号

本論で用いた主な記号を以下に示す。

A_{ra} : アーチ機構に用いられる引張鉄筋量

A_{rt} : はり機構に用いられる引張鉄筋量

A_w : セン断補強筋量

sA_f : 鉄骨フランジ断面積

sA_w : 鉄骨ウェブ断面積

b : 柱幅

r_b : はり機構に寄与する幅

D : 柱せい

rD : 柱主筋間距離 ($rD_1 = rD/D$)

sD : 鉄骨せい

E_{ct} , E_{tt} , E_{ca} および E_{ia} : コンクリートの弾性係数

E_s および E_w : 鉄筋の弾性係数

F_c : コンクリート圧縮強度

h : 柱長さ

M : 曲げモーメント

m : 無次元化曲げモーメント ($=M/bD^2F_c$)

N : 圧縮力

n : 無次元化圧縮力 ($=N/bDF_c$)

Q : セン断力

q : 無次元化せん断力 ($=Q/bDF_c$)

R : 材端相対回転角

x : セン断補強筋間隔

η : 柱長さ比 (h/D)

A_1 : 袖壁幅比

A_2 : 袖壁張り出し長さ比

$r\mu_t$: 引張鉄筋係数 ($=r_a r_t \sigma_y / bDF_c$)

$r_w\mu_t$: 壁縦筋係数 ($=r_w a_t r_w \sigma_y / bDF_c$)

$r_t\mu_w$: セン断補強筋係数 ($=r_t p_w \sigma_y / F_c$)

$s\mu_f$: 鉄骨フランジ係数 ($=s A_f \sigma_y / bDF_c$)

$s\mu_w$: 鉄骨ウェブ係数 ($=s A_w \sigma_y / bDF_c$)

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会；鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1975年。
- 2) 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，京都大学防災研究所年報，第24号 B-1，昭和56年4月，pp. 245-277。
- 3) 若林 實・中村 武・大橋直也・田中 宏；鉄筋コンクリート柱の復元力特性に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），1983年9月，pp. 2093-2094。
- 4) 東 洋一・大久保全陸；鉄筋コンクリート袖壁付き柱の逆対称繰返し加力実験（その1），日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），1973年10月，pp. 1405-1406。
- 5) 北山陸子・南 宏一；そで壁付き鉄筋コンクリート柱の終局強度，日本建築学会近畿支部研究報告集，第23号構造系，昭和58年6月，pp. 37-40。
- 6) 大久保全陸・東 洋一・飯田 研；腰壁，たれ壁付き鉄筋コンクリート梁の弾塑性挙動に関する実験的研究（その1），日本建築学会論文報告集，第204号，昭和48年2月，pp. 1-8。
- 7) 大久保全陸；同上（その2），日本建築学会論文報告集，第207号，昭和48年5月，pp. 9-18。
- 8) 建設省建築研究所；総合技術開発プロジェクト「新耐震設計法の開発」昭和48年度報告書「大変形下における鉄筋コンクリート柱の変形性能に関する資料集」昭和49年3月。
- 9) 東 洋一・大久保全陸・藤又 康；鉄筋コンクリート袖壁付き柱の逆対称繰返し加力実験（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），昭和49年10月，pp. 1289-1290。
- 10) 東 洋一・大久保全陸・山本嘉考・山根一博・磯 健一；鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究（その37），日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），昭和51年10月，pp. 1417-1418。
- 11) 王子和臣・入江善久・藤本一郎；袖壁付き鉄筋コンクリート柱の挙動に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），昭和51年10月，pp. 1433-1434。
- 12) 野村設郎・大森茂樹；RC造垂れ壁・袖壁・腰壁付き柱の剛域及び復元力特性，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），昭和56年9月，pp. 1451-1452。
- 13) 武田 寛；鉄筋コンクリート造雑壁付き柱の耐力及び変形性状に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），昭和59年10月，pp. 1753-1754。