

# 接合部パネルの変形と，それを考慮した鋼構造ラーメンの応力解析

仲 威 雄\*

加 藤 勉\*

山 田 周 平\*

## 1 序

従来，ラーメン解法上の大きな仮定として，柱はり接合部は剛なものとし，かつ，大きさを持たない点として計算されることが普通であった。これによって構造計算は容易になり，また従来の静的解法による限り，筆算にも適し，十分な実用性があったと考えられる。しかし，近年建物の高層化が進み，応力の動的解析が重要な計算過程として組込まれるに至ると，骨組の諸係数に，より精密なものが要求される。高層建物では一般に純鉄骨構造が採用されるが，純鉄骨ラーメンでは通常接合部パネルゾーンの剛性が低く，その部分の変形による影響は無視できないものがある。柱・はり各部材についても，曲げ剛性に比して，剪断剛性が低く，剪断変形な計算に取入れることが必要であると思われる。

このように，水平荷重に対しては，接合部や各部材の剪断変形が重視される反面，鉛直荷重に対しては，それらの量は一般にわずかであり，全体の剛性に与える影響は無視して差支えないと思われる。特に接合部については，局部変形に対する考慮を払ってあれば，剛と仮定して計算して充分であると思われる。

本論文では，弾性範囲内における水平荷重時の柱はり接合部の変形について一般的に論じ，次にその変形及び部材の剪断変形を導入した応力解析法について述べる。

## 2 柱はり接合部の剪断変形

### 2.1 応用函数による解法

鋼構造ラーメンでは，柱には， $W_F$ ，角鋼管，鋼管などが一般に使用され，はりには $W_F'$ が用いられる。それらの接合部の形式は，柱を貫通し，はりフランジの取付け位置には，強剛な水平スチフナーが配され（柱はり相貫型）局部変形を防止しているのが普通である。以下の議論は，このような接合部形式の場合で， $W_F$ ・角鋼管などの柱の場合に一般になりたつことである。

多層，多スパンのラーメンに水平荷重が作用した時のモーメント図は，図-1のようになる。この中の一節点を取り出し，接合部パネルゾーンに加わる応力を図示したのが，図-2である。図中， $M$ ，および $Q$ は接合部外周に沿って柱，はり部材より伝わる曲げおよび剪断力である。

---

\* 東京大学工学部

\*\* 同 上

\*\*\* 同 上

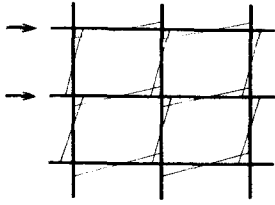


図-1

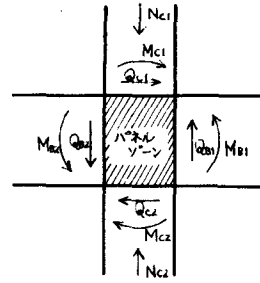


図-2

この曲げ応力のうち、部材のフランジから伝わる応力は、接合部内のフランジのたはスチフナを介してウェブ部分に剪断応力として伝わる。図-2の例で言えば、接合部ウェブ部分の上側(柱C<sup>1</sup>側)に加わる剪断力Q<sub>c1</sub>は、

$$Q_{c1} = C_{B1} + T_{B2} - Q_{c1} \quad (2-1)$$

ただし C<sub>B1</sub>: 右側はりフランジ 端部の圧縮力

T<sub>B2</sub>: 左側はりフランジ 端部の引張力

柱・はり部材端部のウェブに分布する曲げおよび剪断応力は、そのまま接合部ウェブ部分(以下、単にパネルゾーンと称する。)に伝わりと考えてよい。パネルゾーン周辺に沿って働らく外力を図示すると、図-3のようになる。

今、パネルゾーン周辺と、柱はり材端との間の適合条件を無視して、各材端の曲げ応力が直線分布していると仮定すると、図-3中に示した各応力の値は次のようになる。(符号は図-3の矢印の方向を正とする。)

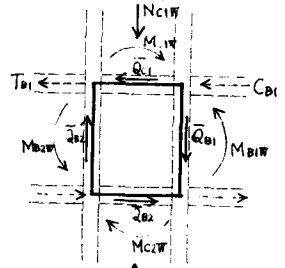


図-3

$$N_{c1w} = \frac{A_{c1w}}{A_{ci}} N_{ci} \quad (2-2)$$

$$M_{B1w} \text{ (or } M_{c1w}) = \frac{Z_{B1w}}{Z_{Bi}} M_{Bi} \text{ (or } \frac{Z_{c1w}}{Z_{ci}} M_{ci}) \quad (2-3)$$

$$\bar{Q}_{Bi} = \frac{M_{c1}}{Z_{c1}} A_{c1F} + \frac{M_{c2}}{Z_{c2}} A_{c2F} - Q_{Bi} \pm \frac{N_{c1} - N_{c2}}{2} \quad (2-4)$$

$$\bar{Q}_{ci} = \frac{M_{B1}}{Z_{B1}} A_{B1} + \frac{M_{B2}}{Z_{B2}} A_{B2F} - Q_{ci} \quad (2-5)$$

ただし  $i = 1, 2$

$A_{ci}$  : 柱断面積

$A_{ciw}, A_{ciF}$  : 柱ウェブおよびフランジ断面積

$Z_{Bi}, Z_{ci}$  : はりおよび柱の断面係数

$Z_{Biw}, Z_{ciw}$  : はりおよび柱のウェブのみの断面係数

注：図-3に示したように、パネルゾーン各フランジ厚さの中央面で切り取られる長方形のパネルとする。各部材のウェブについても同様で、各材の  $Z$  もフランジ厚さの中央面で算定する。

$Airy$  の応力函数を用いて、これらの外力条件を満足するパネルゾーンの応力分布、変形および耐力を計算することができる。しかし、問題を変形だけに限定すると、軸力も含めて対称応力を無視し、逆対称応力のみによって計算しても、大きい誤差は生じない。

曲げ応力が直線分布するという仮定から、4次の応力函数を用いると、

$$\phi = \frac{a}{6} x^3 y + \frac{b}{6} x y^3 + c x y \quad (2-6)$$

は適合条件式

$$\frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} = 0 \quad (2-7)$$

を満足し、 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  は次式で与えられる。

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = b x y \quad (2-8)$$

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = a x y \quad (2-9)$$

$$\tau_{xy} = - \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} = \frac{a}{2} x^2 - \frac{b}{2} y^2 - c \quad (2-10)$$

これらを図示したのが図-4である。パネルゾーンの大きさを図のように高さ  $2h$ 、幅  $2\ell$ 、厚さ  $t$  で与えると、各係数は次のようになる

$$a = \frac{3}{2} \frac{M_{cw}}{\ell h^2 t p} = \frac{6}{V p^2} M_{cw} \quad (2-11)$$

$$b = -\frac{3}{2} \frac{M_{Bw}}{\ell h^3 t_p} = -\frac{6}{V_p h^2} M_{Bw} \quad (2-12)$$

$$c = \frac{\bar{Q}_B}{2 t_p h} - \frac{a \ell^2}{6} - \frac{b h^2}{2} = \frac{1}{V_p} (2\bar{Q}_B \ell + 3M_{Cw} + M_{Bw})$$

$$= \frac{Q_c}{2 t_p \ell} - \frac{a \ell^2}{6} - \frac{b h^2}{2} = \frac{1}{V_p} (2\bar{Q}_c h + M_{Cw} +$$

$$3M_{Bw}) \quad (2-13)$$

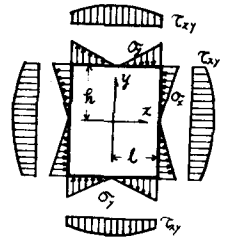


図-4

ただし  $V_p = 4h \ell t_p$  : パネルゾーンの体積

$$M_{Bw} = \frac{M_{B1w} + M_{B2w}}{2}, \quad M_{Cw} = \frac{M_{C1w} + M_{C2w}}{2}, \quad \bar{Q}_B = \frac{\bar{Q}_{B1} + \bar{Q}_{B2}}{2}, \quad \bar{Q}_c = \frac{\bar{Q}_{c1} + \bar{Q}_{c2}}{2}$$

(2-8, 9, 10) 式を積分して, パネルゾーンの剪断変形量  $\gamma_p$  を求めると, 次式を得る。

$$\gamma_p = -\frac{1}{3E} \left\{ \{ b - (1+2\nu) a \} \ell^2 + \{ a - (1+2\nu) b \} h^2 \right\} - \frac{c}{C}$$

$$= \frac{1}{GV_p} \left\{ Q_B \ell + Q_C h + \frac{M_{Bw}}{1+\nu} \left( 1 + \frac{\ell^2}{h^2} \right) + \frac{M_{Cw}}{1+\nu} \left( 1 + \frac{h^2}{\ell^2} \right) \right\}$$

$$= \frac{1}{GV_p} \left\{ \sum_{i=1,2} \frac{M_{Bi}}{Z_{Bi}} A_{Bi} F h + \frac{1 + \frac{\ell^2}{h^2}}{2(1+\nu)} \right.$$

$$\left. + \sum_{i=1,2} \frac{M_{ci}}{Z_{ci}} \left\{ A_{ci} F \ell + \frac{1 + \frac{h^2}{\ell^2}}{2(1+\nu)} \right\} \right\}$$

$$- \frac{Q_{B1} + Q_{B2}}{2} \ell - \frac{Q_{C1} + Q_{C2}}{2} h \quad (2-14)$$

(2-14) 式を用いて算定した結果は, 種々の実験においても実測値と非常によく一致している。

図-5にその1例を掲げる。

2.2 近似計算法 —— その1

(2-14) 式からも分るように、パネルゾーンの変形は剪断応力によるものが支配的である。そこで、部材からパネルゾーンに伝えられる曲げ応力は全てフランジに集中していると仮定すると、次のような近似式が得られる。

(式中の文字については図-3を参照)

$$\begin{aligned} \gamma_p &= \frac{\bar{Q}_B}{2ht_p G} = \frac{\bar{Q}_c}{2\ell t_p G} \\ &= \frac{(M_{c1} + O_{c2}) - (O_{B1} + Q_{B2})\ell}{GV_p} \\ \text{ここに} \quad &= \frac{(M_{B1} + M_{B2}) - (O_{c1} + Q_{c2})h}{2} \quad \text{----- (2-15)} \end{aligned}$$

$$O_B = \frac{M_{c1} + M_{B2}}{2O} - \frac{O_{B1} + O_{B2}}{2}$$

$$O_c = \frac{M_{B1} + M_{B2}}{2h} - \frac{OGV_p + OG'V_p}{2}$$

であって、(2-4~14) 式の場合と異なる。

この近似計算による誤差率  $e$  は次のように考えられる。

部材ウェブから伝えられる曲げモーメントのみによるパネルゾーンの変形角  $\gamma_{pw}$  は次式で与えられる。

$$\gamma_{pw} = \frac{2}{EV_p} \left( M_B w \left( 1 + \frac{\ell^2}{h^2} \right) + M_c w \left( 1 + \frac{h^2}{\ell^2} \right) \right) \quad \text{----- (2-16)}$$

ここで  $M_B w = M_c w = M_w$  において、更にそれに等価な剪断力  $Q_B, Q_c$  ( $O_B \ell = O_c h$ ) に置き換えた場合(図-6)の角変形量  $\gamma_{pws}$  は次のようになる。

$$\gamma_{pws} = \frac{2M_w}{GV_p} = \frac{4(1+\nu)M_w}{EV_p} \quad \text{----- (2-17)}$$

$\gamma_{pws}$  が含む誤差率  $e_1$

$$e_1 = \frac{\gamma_{pws} - \gamma}{\gamma} = \frac{2\nu - K}{2 + K} \quad \text{----- (2-18)}$$

ただし

$$K = \frac{\ell^2}{h^2} + \frac{h^2}{\ell^2}$$

で与えられ、通常のパネルゾーンは  $2 < K < 4$  の範囲であるから、 $e_1$  の範囲はほぼ  $-0.35 < e_1 < -0.6$  (2-19)

全体の変形に対する誤差率  $e$  は

$$e = \frac{\gamma_{pws} - \gamma_{pw}}{\gamma_p} \doteq \frac{Z_w}{Z} \frac{2\nu - K}{2(1+\nu)} \quad (2-20)$$

通常のパネルゾーンでは、部材の形状にしたがって

$$-1.3 \frac{Z_w}{Z} < e < -0.54 \frac{Z_w}{Z} \quad (2-21)$$

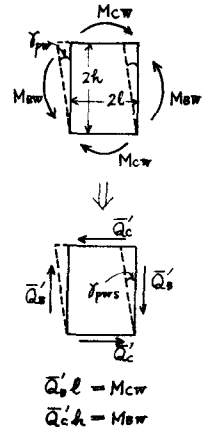


図-6

の範囲で計算値に誤差が生じる。

例として、柱・はり共、フランジ断面積とウェブ断面積が等しい  $W F$  材を用いた場合、

$$Z \doteq 2 A F h, \quad Z_w = \frac{1}{3} A_w h = \frac{Z}{6}$$

ただし  $A F$ : フランジ断面積

$A_w$ : ウェブ断面積

$h$ : 部材及びパネルゾーンのせいであるから、 $e$  の範囲は  $-22 \sim -9\%$  である

しかしこの程度の誤差は、骨組の剛性低下を起すパネルゾーンの変形の影響量から見て、実用上無視してよいと思われる。図-5にこのような近似計算の結果を、1例として併記した。

### 2.3 近似計算法 ———— その2

実際の構造物の応力解析や周期計算等を行う場合、(2-15)式でもなお煩雑である。(2-15)式から  $Q$  に関する項を省略すると、次の近似式を得る。柱側の曲げモーメントより

$$\gamma_{pc} = \frac{M_{c1} + M_{c2}}{C V_p} \quad (2-22)$$

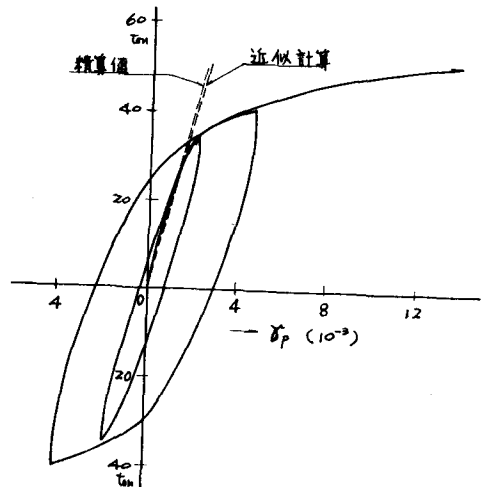


図-5 パネルゾーン実験及び計算例

はり側の曲げモーメントからは

$$\gamma'_{PB} = \frac{M_{B1} + M_{B2}}{GV_p} \quad (2-23)$$

図-7はラーメンの1節点を、柱・はり反曲点位置で切り取ったものを示している。この節点の接合部変形を(2-22)式および(2-23)式で計算した場合の、(2-15)式の結果に対して含む誤差率は次のように表わせる。図-7を参照して、(2-22)式の場合、

$$e_2 = \frac{\gamma_p c' - \gamma_p}{\gamma_p} = \frac{(O_{B1} + O_{B2}) \ell}{(M_{C1} + M_{C2}) - (O_{B1} + O_{B2}) \ell}$$

$$= \frac{(O_{B1} + O_{B2}) \ell}{(O_{B1} L_1 + O_{B2} L_2) - (Q_{C1} + Q_{C2}) h} \quad (2-24)$$

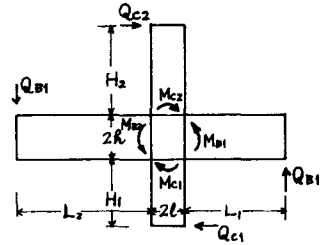


図-7

かりに反曲点が各部材の midpoint にあるとすると、(2-24)式は

$$e_2' = \frac{n}{m n - m - n} \quad (2-25)$$

となる。ただし

$m$ : 柱幅に対するスパン長さの比

$n$ : はりせいに対する階高の比

同様に(2-23)式によれば、

$$e_3 = \frac{(Q_{C1} \cdot Q_{C2}) h}{(Q_{C1} H_1 + Q_{C2} H_2) - (Q_{B1} + Q_{B2}) \ell} \quad (2-26)$$

反曲点位置が各部材の midpoint にあるとすれば、

$$e_3' = \frac{m}{m n - m - n} \quad (2-27)$$

で表わせ、通常のラーメンでは、 $e_2'$  は10~30%、 $e_3'$  で20~40%の値とする。(2-15)式で生じる誤差が負の値を有し、(2-22)あるいは(2-23)式によって生じる誤差は正の値であることから、両者は相殺され、(2-22)式によった場合は全体として-20~+20%程度の誤差範囲に入ることが期待される。

### 3 部材および接合部の剪断変形を考慮した撓角法

#### 3.1 節点方程式

部材  $AB$  の剪断変形を考慮した材端曲げモーメントの基本公式で与えられる。(図-8 参照)

$$M_{AB} = k_{AB} \left( \frac{2+\eta_{AB}}{1+2\eta_{AB}} \varphi_A + \frac{1-\eta_{AB}}{1+2\eta_{AB}} \varphi_B + \frac{1}{1+2\eta_{AB}} \varphi_{AB} \right)$$

$$= k_{AB} \frac{(2+\eta_{AB})\varphi_A + (1-\eta_{AB})\varphi_B + \varphi_{AB}}{\quad} \quad (3-1)$$

$$M_{AB} = k_{AB} \frac{(2+\eta_{AB})\varphi_B + (1-\eta_{AB})\varphi_A + \varphi_{AB}}{\quad} \quad (3-2)$$

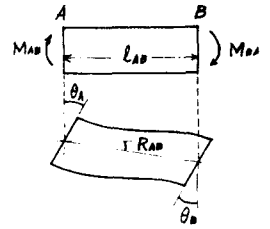


図-8

ここに  $k_{AB} = \frac{k_{AB}}{k_0}$  (剛比)

$$k_{AB} = \frac{k_{AB}}{1+2\eta_{AB}} \quad (\text{有効剛比})$$

$$\eta_{AB} = 12(1+\nu) \frac{I_{AB}}{Ae l_{AB}}$$

$Ae$ : 剪断力に対する有効断面積  $WF$ , 角鋼管ではウェブ断面積。

鋼管パイプの場合断面積の半分としてよい。

$l_{AB}$ : 部材  $AB$  の長さ。

$\varphi_A = 2Ek_0\theta_A$        $\theta_A$ :  $A$  点の材端回転角

$\varphi_B = 2Ek_0\theta_B$        $\theta_B$ :  $B$  点の材端回転角

$\varphi_{AB} = -6EK_0 R_{AB}$        $R_{AB}$ :  $AB$  材の部材角

図-9-a) のようなラーメンに水平荷重を加えると図-9-b) のような変形が起る。この図によっても明らかなように、各部材の材端回転角、部材角は、それぞれ従来の意味の接点回転角(接点間)部材角とは異なる。図-9の0節点について、節点方程式を導こう。

a)  $\theta, \theta'$  及び  $\varphi, \varphi'$

0節点に集まる柱の端部回転角とはりのそれとの間には、次の様な関係がなりたつ。

$$\theta_0 = \theta'_0 + r_0 \quad (3-3)$$

ただし  $\theta_0$ : 柱の0端の回転角。

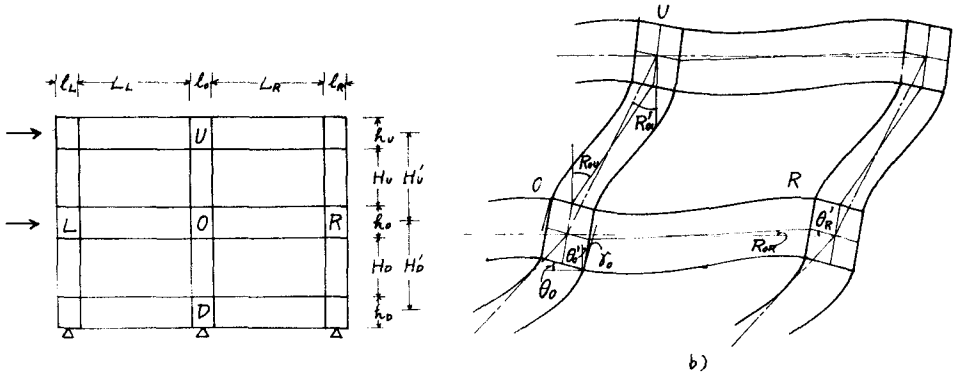


図-9

$\theta_0$  : はりの0端の回転角。

$\gamma_0$  : 0節点パネルゾーンの剪断変形角。

$\theta_0$  :  $\theta_0$ ,  $\gamma_0$ はそれぞれ図-9に示した方向を正とする。

(3-3)式の両辺に  $2EK_0$  をかける。

$$\varphi_0 = \varphi_0 - \beta_0 \quad \text{-----} \quad (3-4)$$

ここに  $\beta_0 = -2EK_0\gamma_0 \quad \text{-----} \quad (3-5)$

b)  $R, R, \text{および} \varphi, \varphi$

柱OUの部材角と接点間部材角の間には、次の関係がある。

$$R_{0u} = \frac{H_0}{H_u} R_{0u} - \frac{1}{2} \left( \frac{h_u}{H_u} \theta_0 + \frac{h_u}{H_u} \theta_u \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{h_0}{H_u} \gamma_0 + \frac{h_u}{H_u} \gamma_u \right) \quad \text{-----} \quad (3-6)$$

ただし、  $H_u = H_0 + \frac{h_0}{2} + \frac{h_u}{2}$  (軸間階高)  $R_{0u}$  : 柱部材OUの部材角

$R_{0u}$  : 節点O, Uを結ぶ、節点間部材角。

$h$  : 接合部パネルゾーンのせい。  $H_u$  : 柱部材長さ。

(3-6)式の両辺に  $-6EK_0$  を乗ずる。

$$\varphi_{0u} = \frac{H_u}{H_u} \varphi_{0u} + \frac{3}{2} \left( \frac{h_0}{H_u} \varphi_0 \right) + \frac{3}{2} \left( \frac{h_0}{H_u} \beta_0 + \frac{h_u}{H_u} \beta_u \right) \quad \text{-----} \quad (3-7)$$

ただし、  $\varphi_{0u} = -6EK_0 R_{0u}$

はりORの部材角は、節点中心の上下の変位は無視すると、接合部の回転によってのみ生じる。

$$R_{0R} = -\frac{1}{2} \left( \frac{\ell_0}{L_R} \theta_0 + \frac{\ell_R}{L_R} \theta_R \right) \quad (3-8)$$

-6EK<sub>0</sub>を両辺に乘じ

$$\varphi_{0R} = \frac{3}{2} \left( \frac{\ell_R}{L_R} \varphi_R \right) \quad (3-9)$$

c) 材端モーメント

(3-1, 4, 7, 9.)式より, 柱0U, はり0Rの材端曲げモーメント次式で表わされる。

$$M_{0u} = k_{0u} \left( 2 + \eta_{0u} + \frac{3h_0}{2H_u} \right) \varphi_0 + \left( 1 - \eta_{0u} + \frac{3h_u}{2H_u} \right) \varphi_u$$

$$+ \frac{H_u}{H_u} \varphi_0 + \frac{2}{3} \left( \frac{h_0}{H_u} \beta_0 + \frac{h_u}{H_u} \beta_u \right) \quad (3-10)$$

$$M_{0R} = k_{0R} \left( 2 + \eta_{0R} + \frac{3\ell_R}{2L_R} \right) \varphi_0 + \left( 1 - \eta_{0R} + \frac{3\ell_R}{2L_R} \right) \varphi_R$$

$$+ (3 + \eta_{0R}) \beta_0 + (1 - \eta_{0R}) \beta_R \quad (3-11)$$

柱0D, はり0Lの材端曲げモーメントは(3-10), (3-11)式のサファイックスUをDに, RをLに変えれば得られる。

d) 節点方程式

節点0の中心回りのモーメントは, 柱0U側から

$$M_{0u} = M_{0u} + M_{0uQ} \quad (3-12)$$

M<sub>0uQ</sub> は剪断力によるモーメントの項で, 次式で与えられる。

$$M_{0uQ} = \frac{h_0}{2H_u} (M_{0u} + M_{0u}) = \frac{3h_0}{2H_u} k_{0u} \left( 1 + \frac{h_0}{H_u} \right) \varphi_0 + \left( 1 + \frac{h_u}{H_u} \right) \varphi_u$$

$$+ \frac{2H_u}{3H_u} \varphi_0 + \left( \frac{h_0}{H_u} \beta_0 + \frac{h_u}{H_u} \beta_u \right) \quad (3-13)$$

はり0 R側から同様に

$$M'_{0R} = M_{0R} + M_{0RQ} \quad (3-14)$$

$$M_{0RQ} = \frac{\ell_0}{2L_R} (M_{0R} + M_{R0})$$

$$= \frac{3\ell_0}{2L_R} k_R \left(1 + \frac{\ell_0}{L_R}\right) \varphi_{00} + \left(1 + \frac{\ell_R}{L_R}\right) \varphi_{R0} + (\beta_0 + \beta_R) \quad (3-15)$$

節点方程式は次のようになる。

$$(M_{0R} + M_{0RQ}) + (M_{0L} + M_{0LQ}) + (M_{0u} + M_{0uQ}) + (M_{0D} + M_{0DQ}) = 0 \quad (3-16)$$

### 3.2 層方程式

各階ごとに、節点間部材角Rが一定であると仮定すれば、層方程式は一般に次式で与えられる。

$$\begin{aligned} & \sum_i (M_{12i} + M_{21i}) \\ &= 3 \sum_i k_{12i} \left(1 + \frac{h_1}{H_{12}}\right) \varphi_{1i} + \left(1 + \frac{h_2}{H_{12}}\right) \varphi_{2i} + \frac{2H_{12}}{3H_{12}} \varphi_{12} \\ &+ \left\{ \frac{h_1}{H_{12}} \beta_{1i} + \frac{h_2}{H_{12}} \beta_{2i} \right\} = -Q_{12} H_{12} \quad (3-17) \end{aligned}$$

サフィックスの意味は

1, 2 : それぞれ第1層, 第2層のはり筋  $i$  : 第1番目の柱通り,

12i : 節点1iと2i, の間, または節点1i 節点2iを表わす。

### 3.3 $\beta$ について

(2-14)式によれば、図-9の節点0について $\beta_0$ は次のように表わせる。

$$\beta_0 = \alpha_0 \left\{ a_{0D} M_{0D} + a_{0L} M_{0L} + b_{0R} M_{0R} + b_{0L} M_{0L} \right. \\ \left. - \frac{\ell_0}{2L_R} (M_{0R} + M_{R0}) - \frac{\ell_0}{2L_L} (M_{0L} + M_{L0}) \right\}$$

$$-\frac{h_0}{2H_0} (M_{0R} + M_{R0}) - \frac{h_0}{2HD} (M_{0D} + M_{D0}) \quad (3-18)$$

ただし  $\alpha_0 = \frac{4(1+\nu)K_0}{V_{P0}} \quad (3-19)$

$$a_{0u} = \frac{1}{2Z_{0u}} \left\{ A_{0uF} \ell_0 + \frac{1 + \frac{h_0}{\ell_2}}{1+\nu} \right\}$$

$$b_{0R} = \frac{1}{2Z_{0R}} A_{0vF} h_0 + \frac{\frac{\ell_0}{1+\nu}}{\frac{h_0^2}{1+\nu}}$$

しかし、これでは実用的でないので、(2-15)式または(2-22)式を用いる。

(2-15)式によれば

$$\begin{aligned} \beta_0 &= \alpha_0 (M_{0u} + M_{0D}) - \frac{\ell_0}{2LR} (M_{0R} + M_{R0}) - \frac{\ell_0}{2LL} (M_{0L} + M_{L0}) \\ &= \frac{\sigma_0}{1 - \alpha_0 C_0} (a_{0v} k_{0v} + a_{0D} k_{0D} + a_{DR} k_{0R} + a_{0L} k_{0L}) \varphi_0 \\ &+ b_{0u} k_{0u} \varphi_u + b_{0D} k_{0D} \varphi_D + b_{0R} k_{0R} \varphi_R + b_{0L} k_{0L} \varphi_L \\ &+ \frac{H_u}{H_v} \varphi_{0v} + \frac{H_D}{H_D} \varphi_{0D} \\ &+ \frac{3h}{2H_u} k_{0v} \beta_{0v} + \frac{3h_D}{2HD} k_{0D} \beta_{0D} - \frac{3\ell_0}{2LR} k_{0R} \beta_{0R} - \frac{3\ell_0}{2LL} k_{0L} \beta_{0L} \quad (3-20) \end{aligned}$$

ただし、

$$a_{0u} = 2 + \eta_{0u} + \frac{3h_0}{2H_u}$$

$$a_{0D} = 2 + \eta_{0D} + \frac{3h_0}{2HD}$$

$$b_{0v} = -\frac{3\ell_0}{2LR} \left(1 + \frac{\ell_0}{L_R}\right)$$

$$a_{0L} = -\frac{3\ell_0}{2LL} \left(1 + \frac{\ell_0}{LL}\right)$$

$$b_{0u} = 1 - \eta_{0u} + \frac{3\ell_u}{2H}$$

$$b_{0D} = 1 - \eta_{0D} + \frac{3h_D}{2HD}$$

$$b_{0R} = -\frac{3\ell_0}{2L_R} \left(1 + \frac{\ell_R}{L_R}\right) \qquad b_{0L} = -\frac{3\ell}{2L_L} \left(1 + \frac{\ell_L}{L_L}\right)$$

$$c_0 = \frac{3}{2} \left( \frac{h_0}{H_U} k'_{0U} + \frac{h}{H_D} k'_{0D} - \frac{\ell_0}{L_R} k'_{0R} - \frac{\ell_0}{L_L} k'_{0L} \right)$$

(2-22) 式によれば、更に簡単になって、 $\beta = \sigma_0 \cdot (M_{0U} + M_{0D})$

$$= \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0 C'_0} (a_{0U} k'_{0U} + a_{0D} k'_{0D}) \varphi_0 + b_{0U} k'_{0U} \varphi_U + b_{0D} k'_{0D} \varphi_D$$

$$+ \frac{H'_U}{H_U} \phi'_{0U} + \frac{H'_D}{H_D} \phi'_{0D} + \frac{3h_U}{2H_U} \beta_U + \frac{3h_D}{2H_D} \beta_D \quad \text{————— (3-21)}$$

ただし、 $a_{0U}$ 、 $a_{0D}$ 、 $b_{0U}$ 、 $b_{0D}$  は前式と同じである。

以上、撓角法公式について概略述べたが、実際の計算例については、別の機会に譲る。ただ、 $WF$  を用いて、5層のラーメンを想定し各層に同じ大きさの横力を加えた場合を計算した結果では、従来の方法で解いたものに比べ、水平変位が30~50%もの増加を見せている。これによっても、接合部の変形が、いかに影響が大きいかが分るであろう。

#### 参考文献

1. 日本建築学会論文報告書 No. 101号  
(接合部パネルのせん断線形を考慮した等角法)  
大阪市立大学 日置教授他
2. 日本建築学会論文報告集 No. 101号  
(水平加重を受ける鋼構造柱梁およびその接合部の挙動について(報告その2))  
東京大学 仲 教授他
3. 彰 国 社  
(鉄骨高層建築の構造設計)  
東京大学 仲研究室
4. カ ラ ム No. 12.  
(鋼構造における接合部の設計)  
東京大学 仲研究室