

九州大学工学部 正員 山崎 徳也

" " " 樗木 武

清水建設 K.K. " " 堤 敬一郎

1. 緒言 土木、建築の各分野において、板と骨組とが結合した構造物が多く見受けられるが、かかる構造物を一体解析するためには、その連続条件から両者を同一函数系により解く必要がある。すなわち、板の解が一般にフーリエ級数で与えられるゆえ、骨組もまたフーリエ級数により解かねばならない。本研究は先に著者らが発表したフーリエ級数による平面骨組構造の解法を立体ラーメンに拡張したもので、板と骨組とからなる構造物の一体解析における基礎理論となるものである。

2. 部材列の弾性曲線および捩り角曲線

図-1(a)に示すごとく立体ラーメンにおいて直列に剛結された部材系を部材列と称し、下より第1層、手前より第1列のそれを部材列 $\eta\eta$ とし、端Aを原点、はり中心軸を γ 軸、それに直交して α, β 軸をもつ直交座標系 (α, β, γ) を導入する。一般に部材列 $\eta\eta$ は両端A, B他に中間節点 $1, 2, \dots, m$ をもち、ここで α, γ -平面内の部材が部材列 $\eta\eta$ に対して直交するものとす。しかるとき部材列 $\eta\eta$ は各節点において各結合部材より α, β 方向の M, P 三軸まわりのモーメントを受けるゆえ、これを次のごとく記号表示する。

$V_{\eta\eta}^{\alpha}$; α 方向の力 $M_{\eta\eta}^{\alpha}$; α 軸まわりのモーメント
 $V_{\eta\eta}^{\beta}$; β 方向の力 $M_{\eta\eta}^{\beta}$; β 軸まわりのモーメント
 $(\eta = 1, 2, \dots, m) \quad M_{\eta\eta}^{\gamma}$; γ 軸まわりのモーメント

また、部材列 $\eta\eta$ の全長を l とし、これに作用する α 方向の任意荷重を $p_{\eta\eta}^{\alpha}(\gamma)$ 、 β 方向のそれを $p_{\eta\eta}^{\beta}(\gamma)$ とすれば、部材列 $\eta\eta$ に作用する諸力は図-1(b)に示すごとなり、各面内における曲げ成分および捩り成分に分解すれば図-2(a), (b), (c)となる。図-2(a), (b)の弾性曲線および γ 軸まわりの捩り角曲線はフーリエ級数を用いて、次のごとく得られる。

$$y_{\eta\eta}^{\alpha}(\gamma) = \frac{1}{E_{\eta\eta}^{\alpha} I_{\eta\eta}^{\alpha}} \sum_{n=1}^{\infty} f_{\eta\eta}^{\alpha n} \left(\frac{l_{\eta\eta}^{\alpha}}{n\pi} \right)^4 \cdot \sin \frac{n\pi}{l_{\eta\eta}^{\alpha}} \gamma + d_{\eta\eta}^{\alpha\alpha} + \frac{d_{\eta\eta}^{\alpha\beta} - d_{\eta\eta}^{\beta\alpha}}{l_{\eta\eta}^{\alpha}} \gamma \quad \frac{dy_{\eta\eta}^{\alpha}(\gamma)}{d\gamma} = \frac{1}{E_{\eta\eta}^{\alpha} I_{\eta\eta}^{\alpha}} \sum_{n=1}^{\infty} f_{\eta\eta}^{\alpha n} \left(\frac{l_{\eta\eta}^{\alpha}}{n\pi} \right)^3 \cos \frac{n\pi}{l_{\eta\eta}^{\alpha}} \gamma + \frac{d_{\eta\eta}^{\alpha\beta} - d_{\eta\eta}^{\beta\alpha}}{l_{\eta\eta}^{\alpha}} \quad (1)$$

$$y_{\eta\eta}^{\beta}(\gamma) = \frac{1}{E_{\eta\eta}^{\beta} I_{\eta\eta}^{\beta}} \sum_{n=1}^{\infty} f_{\eta\eta}^{\beta n} \left(\frac{l_{\eta\eta}^{\beta}}{n\pi} \right)^4 \cdot \sin \frac{n\pi}{l_{\eta\eta}^{\beta}} \gamma + d_{\eta\eta}^{\beta\beta} + \frac{d_{\eta\eta}^{\alpha\beta} - d_{\eta\eta}^{\beta\alpha}}{l_{\eta\eta}^{\beta}} \gamma \quad \frac{dy_{\eta\eta}^{\beta}(\gamma)}{d\gamma} = \frac{1}{E_{\eta\eta}^{\beta} I_{\eta\eta}^{\beta}} \sum_{n=1}^{\infty} f_{\eta\eta}^{\beta n} \left(\frac{l_{\eta\eta}^{\beta}}{n\pi} \right)^3 \cos \frac{n\pi}{l_{\eta\eta}^{\beta}} \gamma + \frac{d_{\eta\eta}^{\alpha\beta} - d_{\eta\eta}^{\beta\alpha}}{l_{\eta\eta}^{\beta}} \quad (2)$$

ただし $f_{\eta\eta}^{\alpha n} = p_{\eta\eta}^{\alpha n} - \frac{2}{l} \sum_{k=1}^m V_{\eta\eta}^{\alpha k} \sin n\pi \delta_{\eta\eta}^{\alpha k} + \frac{2n\pi}{l_{\eta\eta}^{\alpha}} \sum_{k=1}^m M_{\eta\eta}^{\alpha k} \cos n\pi \delta_{\eta\eta}^{\alpha k}$ $p_{\eta\eta}^{\alpha n} = \frac{2}{l} \int_0^{l_{\eta\eta}^{\alpha}} p_{\eta\eta}^{\alpha}(\gamma) \cdot \sin \frac{n\pi}{l} \gamma \cdot d\gamma$
 $f_{\eta\eta}^{\beta n} = p_{\eta\eta}^{\beta n} - \frac{2}{l} \sum_{k=1}^m V_{\eta\eta}^{\beta k} \sin n\pi \delta_{\eta\eta}^{\beta k} + \frac{2n\pi}{l_{\eta\eta}^{\beta}} \sum_{k=1}^m M_{\eta\eta}^{\beta k} \cos n\pi \delta_{\eta\eta}^{\beta k}$ $p_{\eta\eta}^{\beta n} = \frac{2}{l} \int_0^{l_{\eta\eta}^{\beta}} p_{\eta\eta}^{\beta}(\gamma) \cdot \sin \frac{n\pi}{l} \gamma \cdot d\gamma$
 $E_{\eta\eta}^{\alpha}, E_{\eta\eta}^{\beta}$ は部材列 $\eta\eta$ の α および β 方向の弾性係数 $I_{\eta\eta}^{\alpha}, I_{\eta\eta}^{\beta}$ は部材列 $\eta\eta$ の α および β 軸に垂直な断面二次モーメント
 $d_{\eta\eta}^{\alpha\alpha}, d_{\eta\eta}^{\alpha\beta}$ および $d_{\eta\eta}^{\beta\alpha}, d_{\eta\eta}^{\beta\beta}$ は部材列 $\eta\eta$ の両端A, Bにおける α および β 方向の変位

また、図-2(c)の荷重状態に対して任意変位 δ における部材列 $\eta\eta$ の捩り角を $\theta_{\eta\eta}(\gamma)$ とすれば、次のごとくえられる。すなわち、部材列 $\eta\eta$ に作用する捩りモーメントをすべてフーリエ級数式に展開すれば、部材列 $\eta\eta$ に作用する全捩りモーメントはその総和である次式で与えられる

$$M_t(\gamma) = \sum_{n=1}^{\infty} M_{tn} \cdot \sin \frac{n\pi}{l_{\eta\eta}} \gamma \quad (3)$$

$$\text{ここに } M_{tn} = m_{\eta\eta}^{\alpha n} - \frac{2}{l_{\eta\eta}^{\alpha}} \sum_{k=1}^m M_{\eta\eta}^{\alpha k} \sin n\pi \delta_{\eta\eta}^{\alpha k} \quad m_{\eta\eta}^{\alpha n} = \frac{2}{l_{\eta\eta}^{\alpha}} \int_0^{l_{\eta\eta}^{\alpha}} m_{\eta\eta}^{\alpha}(\gamma) \sin \frac{n\pi}{l_{\eta\eta}^{\alpha}} \gamma \cdot d\gamma$$

式(3)の捩りモーメントが作用する両端固定はりの任意変位 δ における捩り角 $\theta_{\eta\eta}(\gamma)$ は次式のごとく求められる。

$$\theta_{\gamma\eta}(r) = \frac{1}{G_{\gamma\eta} J_{\gamma\eta}} \sum_{k=1}^{\infty} M_{\gamma\eta} \left(\frac{k_{\gamma\eta}}{n\pi} \right)^2 \sin \frac{n\pi}{l_{\gamma\eta}} r \quad G_{\gamma\eta} J_{\gamma\eta} : \text{接り剛性} \quad (4) \quad (\gamma-\alpha \text{面})$$

部材列 \$\gamma\eta\$ の接りに対して不連続固定状態にある場合、すなわち両端 \$A, B\$ に接り角 \$\theta_{\gamma\eta}^{\alpha\beta}, \theta_{\gamma\eta}^{\beta\alpha}\$ が生じる場合の接り角曲線は式(4)と \$\theta_{\gamma\eta}^{\alpha\beta}, \theta_{\gamma\eta}^{\beta\alpha}\$ の値で表わされ式となる。

$$\theta_{\gamma\eta}(r) = \frac{1}{G_{\gamma\eta} J_{\gamma\eta}} \sum_{k=1}^{\infty} M_{\gamma\eta} \left(\frac{k_{\gamma\eta}}{n\pi} \right)^2 \sin \frac{n\pi}{l_{\gamma\eta}} r + \theta_{\gamma\eta}^{\alpha\beta} + \frac{\theta_{\gamma\eta}^{\beta\alpha} - \theta_{\gamma\eta}^{\alpha\beta}}{l_{\gamma\eta}} r \quad (5)$$

3. 基本連立方程式の誘導

(1) 部材列の変形条件 (i) \$\gamma-\alpha\$ 面について ; \$\gamma-\alpha\$ 面に

ありて部材列 \$\gamma\eta\$ の各節点 \$1, 2, \dots, i, \dots, m\$ における \$\alpha\$ 方向の変位をそれぞれ \$d_{\gamma\eta}^{\alpha}, d_{\gamma\eta}^{\alpha}, \dots, d_{\gamma\eta}^{\alpha}, \dots, d_{\gamma\eta}^{\alpha}\$ 及び角を \$\theta_{\gamma\eta}^{\alpha}, \theta_{\gamma\eta}^{\alpha}, \dots, \theta_{\gamma\eta}^{\alpha}, \dots, \theta_{\gamma\eta}^{\alpha}\$ とし部材列 \$\gamma\eta\$ の両端 \$A, B\$ のたわみ角を \$\theta_{\gamma\eta}^{\alpha\beta}, \theta_{\gamma\eta}^{\beta\alpha}\$ とすれば、各節点において式(1)より求めた部材列 \$\gamma\eta\$ のたわみ \$y_{\gamma\eta}^{\alpha}(r)\$ およびたわみ角 \$\frac{d y_{\gamma\eta}^{\alpha}(r)}{d r}\$ のこれら諸変位に等しいことより次のとき一連の変形条件式をうる。

$$d_{\gamma\eta}^{\alpha} = \{ y_{\gamma\eta}^{\alpha}(r) \}_{r=\delta_{\gamma\eta}^{\alpha} l_{\gamma\eta}} \quad \theta_{\gamma\eta}^{\alpha} = \left\{ \frac{d y_{\gamma\eta}^{\alpha}(r)}{d r} \right\}_{r=\delta_{\gamma\eta}^{\alpha} l_{\gamma\eta}} \quad (6)$$

式(6)に式(1)を代入し演算の上整理すれば

$$\sum_{k=1}^m \bar{D}_{\gamma\eta}^{\alpha k} \bar{V}_{\gamma\eta}^{\alpha k} - \frac{\pi}{l_{\gamma\eta}} \sum_{k=0}^{m+1} \bar{H}_{\gamma\eta}^{\alpha k} M_{\gamma\eta}^{\alpha k} = \frac{l_{\gamma\eta}}{2} K_{\gamma\eta}^{\alpha} + \lambda_{\gamma\eta}^{\alpha} \{ \delta_{\gamma\eta}^{\alpha} d_{\gamma\eta}^{\alpha} + (1-\delta_{\gamma\eta}^{\alpha}) d_{\gamma\eta}^{\alpha\beta} - d_{\gamma\eta}^{\alpha\beta} \} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$\Rightarrow \bar{D}_{\gamma\eta}^{\alpha k} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\alpha} \sin n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\alpha} \quad \bar{H}_{\gamma\eta}^{\alpha k} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cos n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\alpha} \sin n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\alpha} \quad K_{\gamma\eta}^{\alpha} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} p_{\gamma\eta}^{\alpha} \sin n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\alpha} \quad \lambda_{\gamma\eta}^{\alpha} = \frac{\pi^2 E_{\gamma\eta}^{\alpha} I_{\gamma\eta}^{\alpha}}{2 l_{\gamma\eta}^2} \quad i=0, 1, 2, \dots, m, m+1 \quad (8)$$

$$\Rightarrow \bar{D}_{\gamma\eta}^{\alpha k} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\alpha} \cos n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\alpha} \quad \bar{H}_{\gamma\eta}^{\alpha k} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cos n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\alpha} \cos n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\alpha} \quad K_{\gamma\eta}^{\alpha} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} p_{\gamma\eta}^{\alpha} \cos n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\alpha} \quad \lambda_{\gamma\eta}^{\alpha} = \frac{\pi^2 E_{\gamma\eta}^{\alpha} I_{\gamma\eta}^{\alpha}}{2 l_{\gamma\eta}^2}$$

(ii) \$\gamma-\beta\$ 面について ; 3. (1)(i) と全く同様であり \$\alpha\$ と \$\beta\$ とを入れ換えれば変形条件式がえられる式となる(図-2(b) 参照)

$$\sum_{k=1}^m \bar{D}_{\gamma\eta}^{\beta k} \bar{V}_{\gamma\eta}^{\beta k} - \frac{\pi}{l_{\gamma\eta}} \sum_{k=0}^{m+1} \bar{H}_{\gamma\eta}^{\beta k} M_{\gamma\eta}^{\beta k} = \frac{l_{\gamma\eta}}{2} K_{\gamma\eta}^{\beta} + \lambda_{\gamma\eta}^{\beta} \{ \delta_{\gamma\eta}^{\beta} d_{\gamma\eta}^{\beta\alpha} + (1-\delta_{\gamma\eta}^{\beta}) d_{\gamma\eta}^{\alpha\beta} - d_{\gamma\eta}^{\alpha\beta} \} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$\Rightarrow K_{\gamma\eta}^{\beta} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} p_{\gamma\eta}^{\beta} \sin n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\beta} \quad \lambda_{\gamma\eta}^{\beta} = \frac{\pi^2 E_{\gamma\eta}^{\beta} I_{\gamma\eta}^{\beta}}{2 l_{\gamma\eta}^2} \quad \bar{D}_{\gamma\eta}^{\beta k} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\beta} \sin n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\beta} \quad \bar{H}_{\gamma\eta}^{\beta k} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cos n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\beta} \sin n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\beta} \quad i=0, 1, 2, \dots, m, m+1 \quad (10)$$

$$\Rightarrow \bar{D}_{\gamma\eta}^{\beta k} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} p_{\gamma\eta}^{\beta} \cos n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\beta} \quad \lambda_{\gamma\eta}^{\beta} = \frac{\pi^2 E_{\gamma\eta}^{\beta} I_{\gamma\eta}^{\beta}}{2 l_{\gamma\eta}^2}$$

(iii) \$\gamma\$ 軸まわりの接り ; 図-2(c) のごとく部材列 \$\gamma\eta\$ の各節点 \$1, 2, \dots, i, \dots, m\$ における接り角をそれぞれ \$\theta_{\gamma\eta}^{\alpha}, \theta_{\gamma\eta}^{\alpha}, \dots, \theta_{\gamma\eta}^{\alpha}, \dots, \theta_{\gamma\eta}^{\alpha}\$ とすれば各節点で式(5)より求めた部材列 \$\gamma\eta\$ の接り角 \$\theta_{\gamma\eta}(r)\$ は、これら諸変位に等しくなければならぬ。すなわち

$$\theta_{\gamma\eta}^{\alpha} = \{ \theta_{\gamma\eta}(r) \}_{r=\delta_{\gamma\eta}^{\alpha} l_{\gamma\eta}} \quad (11)$$

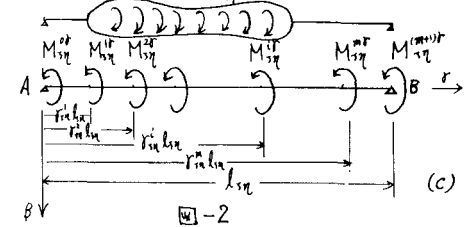
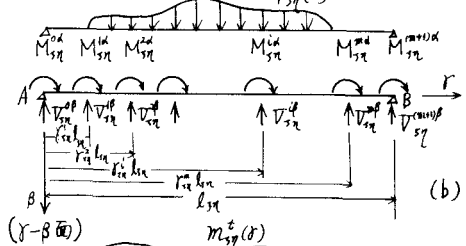
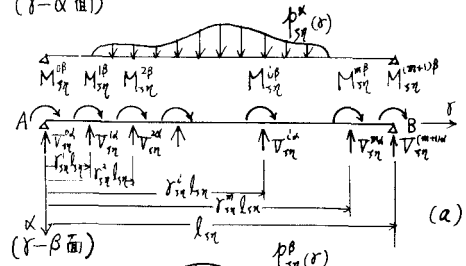
式(11)に式(5)を代入し演算の上整理すれば次に示すとき変形条件式をうる。

$$\frac{\pi}{l_{\gamma\eta}} \sum_{k=1}^m S_{\gamma\eta}^{\alpha k} M_{\gamma\eta}^{\alpha k} = \frac{\pi}{2} K_{\gamma\eta}^{\alpha} + \lambda_{\gamma\eta}^{\alpha} \{ \delta_{\gamma\eta}^{\alpha} \theta_{\gamma\eta}^{\alpha} + (1-\delta_{\gamma\eta}^{\alpha}) \theta_{\gamma\eta}^{\alpha\beta} - \theta_{\gamma\eta}^{\alpha\beta} \} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (12)$$

$$\Rightarrow S_{\gamma\eta}^{\alpha k} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\alpha} \sin n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\alpha} \quad K_{\gamma\eta}^{\alpha} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} m_{\gamma\eta}^{\alpha} \sin n\pi \delta_{\gamma\eta}^{\alpha} \quad \lambda_{\gamma\eta}^{\alpha} = \frac{\pi^2 G_{\gamma\eta} J_{\gamma\eta}}{2 l_{\gamma\eta}^2}$$

(2) 基本連立方程式の誘導

図-1(a)に示す部材列 \$\gamma\eta\$ 上の点 \$r\$ にありて部材列 \$\gamma\eta\$ と \$\gamma-\beta\$ 面内および \$\gamma-\alpha\$ 面内の部材が結合しているものとし、それらの部材をそれぞれ \$r(j-1)\eta\$ 部材、\$r(j+1)\eta\$ 部材、\$r(j-1)\eta\$ 部材、\$r(j+1)\eta\$ 部材と



名づける。炭素において部材345ηが各結合部材より受ける α, β 方向の軸まわりのモーメント成分をそれぞれ $M_{3\eta}^{R\alpha}, M_{3\eta}^{R\beta}$ および $M_{3\eta}^{Rr}$ とすれば、これらは前記の4つの結合部材の各軸まわりの端モーメントの和として与えられ、符号を考慮して次式のようになる

$$\left. \begin{aligned} M_{3\eta}^{R\alpha} &= -M_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} - M_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} - M_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\delta} - M_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\gamma} \\ M_{3\eta}^{R\beta} &= M_{\beta\beta\eta}^{35-1} + M_{\beta\beta\eta}^{35+1} - M_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\delta} - M_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\gamma} \\ M_{3\eta}^{Rr} &= M_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} + M_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} - M_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\delta} - M_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\gamma} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

ここで $M_{\alpha\alpha\eta}^{35-1}, M_{\alpha\alpha\eta}^{35+1}, M_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\delta}, M_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\gamma}, M_{\beta\beta\eta}^{35-1}, M_{\beta\beta\eta}^{35+1}, M_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\delta}, M_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\gamma}$ とし既往の曲げ理論におけるたわみ角式を、また $M_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\delta}, M_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\gamma}, M_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\delta}, M_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\gamma}$ とし既往の接り理論による接り角式を用いければ、式(13)は結局次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} M_{3\eta}^{R\alpha} &= -\left\{ 2E_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} + 2E_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} + g_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\delta} + g_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\gamma} \right\} \varphi_{3\eta}^{R\alpha} - E_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} \varphi_{3\eta}^{R\alpha} - E_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} \varphi_{3\eta}^{R\alpha} + g_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\delta} \varphi_{3\eta}^{R\alpha} + g_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\gamma} \varphi_{3\eta}^{R\alpha} \\ &\quad - E_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} \psi_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} - E_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} \psi_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} - C_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} - C_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} - T_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\delta} - T_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\gamma} \\ M_{3\eta}^{R\beta} &= -\left\{ g_{\beta\beta\eta}^{35-1} + g_{\beta\beta\eta}^{35+1} - 2E_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\delta} - 2E_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\gamma} \right\} \varphi_{3\eta}^{R\beta} + g_{\beta\beta\eta}^{35-1} \varphi_{3\eta}^{R\beta} + g_{\beta\beta\eta}^{35+1} \varphi_{3\eta}^{R\beta} + E_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\delta} \varphi_{3\eta}^{R\beta} + E_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\gamma} \varphi_{3\eta}^{R\beta} \\ &\quad + E_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\delta} \psi_{\beta\beta\eta}^{35-1} + E_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\gamma} \psi_{\beta\beta\eta}^{35+1} + T_{\beta\beta\eta}^{35-1} + T_{\beta\beta\eta}^{35+1} - C_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\delta} - C_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\gamma} \\ M_{3\eta}^{Rr} &= 2\left\{ E_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} + E_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} + E_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\delta} + E_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\gamma} \right\} \varphi_{3\eta}^{Rr} + E_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} \varphi_{3\eta}^{Rr} + E_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} \varphi_{3\eta}^{Rr} + E_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\delta} \varphi_{3\eta}^{Rr} + E_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\gamma} \varphi_{3\eta}^{Rr} \\ &\quad + E_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\delta} \psi_{\beta\beta\eta}^{35-1} + E_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\gamma} \psi_{\beta\beta\eta}^{35+1} + E_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\delta} \psi_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} + E_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\gamma} \psi_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} - C_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} - C_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} - C_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\delta} - C_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\gamma} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

ここに $E = \frac{EI}{L}, \frac{I_0}{E_0 I_0}, g = \frac{GJ}{L}, \frac{I_0}{2E_0 I_0}, \frac{2E_0 I_0}{L}, \theta = \varphi, -\frac{6E_0 I_0}{L}, R = \psi$ C, T は曲げおよび接りの荷重変次に変換における方向力の $V_{3\eta}^{R\alpha}$ (炭素における $R(3\eta-1)$ 部材および $R(3\eta+1)$ 部材からの軸力 $N_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\delta}, N_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\gamma}$ と $R(3\eta-1)$ 部材および $R(3\eta+1)$ 部材からのせん断力 $\bar{S}_{\alpha\alpha\eta}^{35-1}, \bar{S}_{\alpha\alpha\eta}^{35+1}$ との和)と与えられ、次のようになる。

$$V_{3\eta}^{R\alpha} = N_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\delta} - N_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\gamma} - \bar{S}_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} - \bar{S}_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} \quad (15)$$

$$\bar{S}_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} = S_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} + \frac{1}{L_{3\eta}^{35-1}} (M_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} + M_{\alpha\alpha\eta}^{35+1}) \quad \bar{S}_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} = S_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} - \frac{1}{L_{3\eta}^{35+1}} (M_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} + M_{\alpha\alpha\eta}^{35+1}) \quad (16)$$

次に $S_{\alpha\alpha\eta}^{35-1}$ および $S_{\alpha\alpha\eta}^{35+1}$ は $R(3\eta-1)$ 部材および $R(3\eta+1)$ 部材の単純化(はり)とみなしたときの荷重による変換力。式(16)を式(15)に代入し、さらに式(13)の場合と同様に、各端曲げモーメントにたわみ角式を用いければ、

$$\begin{aligned} V_{3\eta}^{R\alpha} &= N_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\delta} - N_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\gamma} - S_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} - S_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} - 3\left\{ \frac{E_{\alpha\alpha\eta}^{35-1}}{L_{3\eta}^{35-1}} - \frac{E_{\alpha\alpha\eta}^{35+1}}{L_{3\eta}^{35+1}} \right\} \varphi_{3\eta}^{R\alpha} - 3\frac{E_{\alpha\alpha\eta}^{35-1}}{L_{3\eta}^{35-1}} \varphi_{3\eta}^{R\alpha} + 3\frac{E_{\alpha\alpha\eta}^{35+1}}{L_{3\eta}^{35+1}} \varphi_{3\eta}^{R\alpha} \\ &\quad - 2\frac{E_{\alpha\alpha\eta}^{35-1}}{L_{3\eta}^{35-1}} \psi_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} + 2\frac{E_{\alpha\alpha\eta}^{35+1}}{L_{3\eta}^{35+1}} \psi_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} - \frac{1}{L_{3\eta}^{35-1}} (C_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} + C_{\alpha\alpha\eta}^{35+1}) + \frac{1}{L_{3\eta}^{35+1}} (C_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} + C_{\alpha\alpha\eta}^{35+1}) \end{aligned} \quad (17)$$

同様に部材345ηの炭素における β 方向の力 $V_{3\eta}^{R\beta}$ について考察すれば、 $R(3\eta-1)$ 部材および $R(3\eta+1)$ 部材からの軸力 $N_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\delta}, N_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\gamma}$ と $R(3\eta-1)$ 部材および $R(3\eta+1)$ 部材からのせん断力 $\bar{S}_{\beta\beta\eta}^{35-1}$ および $\bar{S}_{\beta\beta\eta}^{35+1}$ の和と与えられ、変換結果のみ示せば次式の通りとなる。

$$\begin{aligned} V_{3\eta}^{R\beta} &= N_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\delta} - N_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\gamma} - S_{\beta\beta\eta}^{35-1} - S_{\beta\beta\eta}^{35+1} + 3\left\{ \frac{E_{\beta\beta\eta}^{35-1}}{L_{3\eta}^{35-1}} - \frac{E_{\beta\beta\eta}^{35+1}}{L_{3\eta}^{35+1}} \right\} \varphi_{3\eta}^{R\beta} + 3\frac{E_{\beta\beta\eta}^{35-1}}{L_{3\eta}^{35-1}} \varphi_{3\eta}^{R\beta} - 3\frac{E_{\beta\beta\eta}^{35+1}}{L_{3\eta}^{35+1}} \varphi_{3\eta}^{R\beta} \\ &\quad + 2\frac{E_{\beta\beta\eta}^{35-1}}{L_{3\eta}^{35-1}} \psi_{\beta\beta\eta}^{35-1} - 2\frac{E_{\beta\beta\eta}^{35+1}}{L_{3\eta}^{35+1}} \psi_{\beta\beta\eta}^{35+1} - \frac{1}{L_{3\eta}^{35-1}} (C_{\beta\beta\eta}^{35-1} + C_{\beta\beta\eta}^{35+1}) + \frac{1}{L_{3\eta}^{35+1}} (C_{\beta\beta\eta}^{35-1} + C_{\beta\beta\eta}^{35+1}) \end{aligned} \quad (18)$$

式(14),(17),(18)をそれぞれ式(7),(8),(9),(10),(12)に代入すれば、立体系の基本連立方程式があまり次式のようになる。

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^m D_{1\eta}^{ik} \left[N_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\delta} - N_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\gamma} - 3\left\{ \frac{E_{\alpha\alpha\eta}^{35-1}}{L_{3\eta}^{35-1}} - \frac{E_{\alpha\alpha\eta}^{35+1}}{L_{3\eta}^{35+1}} \right\} \varphi_{3\eta}^{R\alpha} - 3\frac{E_{\alpha\alpha\eta}^{35-1}}{L_{3\eta}^{35-1}} \varphi_{3\eta}^{R\alpha} + 3\frac{E_{\alpha\alpha\eta}^{35+1}}{L_{3\eta}^{35+1}} \varphi_{3\eta}^{R\alpha} - 2\frac{E_{\alpha\alpha\eta}^{35-1}}{L_{3\eta}^{35-1}} \psi_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} + 2\frac{E_{\alpha\alpha\eta}^{35+1}}{L_{3\eta}^{35+1}} \psi_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} \right] \\ + \frac{\pi}{L_{1\eta}} \sum_{k=0}^{m-1} H_{1\eta}^{ik} \left[(2E_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} + 2E_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} + g_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\delta} + g_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\gamma}) \varphi_{3\eta}^{R\alpha} - g_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\delta} \varphi_{3\eta}^{R\alpha} - g_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\gamma} \varphi_{3\eta}^{R\alpha} + E_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\delta} \varphi_{3\eta}^{R\alpha} + E_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\gamma} \varphi_{3\eta}^{R\alpha} \right. \\ \left. + E_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\delta} \varphi_{3\eta}^{R\beta} + E_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\gamma} \varphi_{3\eta}^{R\beta} + E_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\delta} \psi_{\beta\beta\eta}^{35-1} + E_{\beta\beta\eta}^{R\alpha\gamma} \psi_{\beta\beta\eta}^{35+1} \right] = \frac{1}{2} K_{1\eta}^{ia} + \lambda_{1\eta}^{ia} \left\{ x_{1\eta}^{ia} d_{1\eta}^{imod} + (1-x_{1\eta}^{ia}) d_{1\eta}^{ia} - d_{1\eta}^{ia} \right\} \\ + \sum_{n=1}^m D_{2\eta}^{ik} \left[S_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} + S_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} + \frac{1}{L_{3\eta}^{35-1}} (C_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} + C_{\alpha\alpha\eta}^{35+1}) - \frac{1}{L_{3\eta}^{35+1}} (C_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} + C_{\alpha\alpha\eta}^{35+1}) \right] \\ + \frac{\pi}{L_{1\eta}} \sum_{k=0}^{m-1} H_{1\eta}^{ik} \left[T_{\alpha\alpha\eta}^{35-1} + T_{\alpha\alpha\eta}^{35+1} - C_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\delta} - C_{\alpha\alpha\eta}^{R\alpha\gamma} \right] \quad \lambda_{1\eta}^{ia} = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^m \bar{D}_{\eta\eta}^{ik} [N_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} - N_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} - 3 \{ \frac{E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma}}{L_{\eta\eta+1}} - \frac{E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma}}{L_{\eta\eta-1}} \} \varphi_{\eta\eta}^{k\delta} - 3 \frac{E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma}}{L_{\eta\eta+1}} \varphi_{\eta\eta-1}^{k\delta} + 3 \frac{E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma}}{L_{\eta\eta+1}} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta} - 2 \frac{E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma}}{L_{\eta\eta+1}} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta} + 2 \frac{E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma}}{L_{\eta\eta+1}} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta}]$$

$$+ \frac{\pi}{L_{\eta\eta}} \sum_{k=0}^{m+1} \bar{H}_{\eta\eta}^{ik} [(2 E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + 2 E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} + g_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + g_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma}) \varphi_{\eta\eta}^{k\delta} - g_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta-1}^{k\delta} - g_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta} + E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta} + E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta-1}^{k\delta} + E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta}] + \frac{\pi^3}{4 L_{\eta\eta}} \cdot \varphi_{\eta\eta}^{i\beta} = \frac{L_{\eta\eta}}{2} K_{\eta\eta}^{i\beta} + \bar{\lambda}_{\eta\eta}^{i\beta} (d_{\eta\eta}^{o\delta} - d_{\eta\eta}^{o\delta})$$

$$+ \sum_{k=1}^m \bar{D}_{\eta\eta}^{ik} [S_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + S_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} + \frac{1}{L_{\eta\eta}} (C_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + C_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma}) - \frac{1}{L_{\eta\eta}} (C_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + C_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma})]$$

$$+ \frac{\pi}{L_{\eta\eta}} \sum_{k=0}^{m+1} \bar{H}_{\eta\eta}^{ik} [T_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + T_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} - C_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} - C_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma}] \quad \lambda = 0, 1, 2, \dots, m, m+1 \quad (20)$$

$$\sum_{k=1}^m \bar{D}_{\eta\eta}^{ik} [N_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} - N_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} + 3 \{ \frac{E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma}}{L_{\eta\eta+1}} - \frac{E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma}}{L_{\eta\eta-1}} \} \varphi_{\eta\eta}^{k\delta} + 3 \frac{E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma}}{L_{\eta\eta+1}} \varphi_{\eta\eta-1}^{k\delta} - 3 \frac{E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma}}{L_{\eta\eta+1}} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta} + 2 \frac{E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma}}{L_{\eta\eta+1}} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta} - 2 \frac{E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma}}{L_{\eta\eta+1}} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta}]$$

$$+ \frac{\pi}{L_{\eta\eta}} \sum_{k=0}^{m+1} \bar{H}_{\eta\eta}^{ik} [(2 E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + 2 E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} + g_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + g_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma}) \varphi_{\eta\eta}^{k\delta} + E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta-1}^{k\delta} + E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta} - g_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta-1}^{k\delta} - g_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta} + E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta} + E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta-1}^{k\delta}] = \frac{L_{\eta\eta}}{2} K_{\eta\eta}^{i\beta} + \bar{\lambda}_{\eta\eta}^{i\beta} \{ d_{\eta\eta}^{i\delta\gamma} + (1 - \delta_{\eta\eta}^{i\delta\gamma}) d_{\eta\eta}^{o\delta} - d_{\eta\eta}^{i\delta\gamma} \}$$

$$+ \sum_{k=1}^m \bar{D}_{\eta\eta}^{ik} [S_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + S_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} + \frac{1}{L_{\eta\eta}} (C_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + C_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma}) - \frac{1}{L_{\eta\eta}} (C_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + C_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma})]$$

$$- \frac{\pi}{L_{\eta\eta}} \sum_{k=0}^{m+1} \bar{H}_{\eta\eta}^{ik} [C_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + C_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} + T_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + T_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma}] \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

$$\sum_{k=1}^m \bar{D}_{\eta\eta}^{ik} [N_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} - N_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} + 3 \{ \frac{E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma}}{L_{\eta\eta+1}} - \frac{E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma}}{L_{\eta\eta-1}} \} \varphi_{\eta\eta}^{k\delta} + 3 \frac{E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma}}{L_{\eta\eta+1}} \varphi_{\eta\eta-1}^{k\delta} - 3 \frac{E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma}}{L_{\eta\eta+1}} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta} + 2 \frac{E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma}}{L_{\eta\eta+1}} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta} - 2 \frac{E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma}}{L_{\eta\eta+1}} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta}]$$

$$+ \frac{\pi}{L_{\eta\eta}} \sum_{k=0}^{m+1} \bar{H}_{\eta\eta}^{ik} [(2 E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + 2 E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} + g_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + g_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma}) \varphi_{\eta\eta}^{k\delta} + E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta-1}^{k\delta} + E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta} - g_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta-1}^{k\delta} - g_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta} + E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta} + E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta-1}^{k\delta}] + \frac{\pi^3}{4 L_{\eta\eta}} \cdot \varphi_{\eta\eta}^{i\beta} = \frac{L_{\eta\eta}}{2} K_{\eta\eta}^{i\beta} + \bar{\lambda}_{\eta\eta}^{i\beta} (d_{\eta\eta}^{o\delta} - d_{\eta\eta}^{o\delta})$$

$$+ \sum_{k=1}^m \bar{D}_{\eta\eta}^{ik} [S_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + S_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} + \frac{1}{L_{\eta\eta}} (C_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + C_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma}) - \frac{1}{L_{\eta\eta}} (C_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + C_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma})]$$

$$- \frac{\pi}{L_{\eta\eta}} \sum_{k=0}^{m+1} \bar{H}_{\eta\eta}^{ik} [C_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + C_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} + T_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + T_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma}] \quad \lambda = 0, 1, 2, \dots, m, m+1 \quad (22)$$

$$\frac{1}{L_{\eta\eta}} \sum_{k=1}^m S_{\eta\eta}^{ik} [2 (E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} + E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma}) \varphi_{\eta\eta}^{k\delta} + E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta-1}^{k\delta} + E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta} + E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta} + E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta-1}^{k\delta} + E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta-1}^{k\delta} + E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta} + E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta+1}^{k\delta}] - \frac{\pi^2}{2 L_{\eta\eta}} \lambda_{\eta\eta}^{i\beta} \{ \delta_{\eta\eta}^{i\delta\gamma} \varphi_{\eta\eta}^{i\delta\gamma} + (1 - \delta_{\eta\eta}^{i\delta\gamma}) \varphi_{\eta\eta}^{o\delta} - \varphi_{\eta\eta}^{i\delta\gamma} \}$$

$$= \frac{1}{2} K_{\eta\eta}^{i\beta} - \frac{1}{L_{\eta\eta}} \sum_{k=1}^m S_{\eta\eta}^{ik} \{ C_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} + C_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} - C_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} - C_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} \} \quad \lambda = 1, 2, \dots, m \quad (23)$$

式(19)~(23)を各部材列の各節点において求めれば、未知数と同数の連立方程式が与えられ、これらを連立に与へれば、各不静定力および各部材のたわみ角が明らかとなり、従つて図-1(a)に示す立体ラーメンが解けることになる。

(3) 計算例 図-3に示すごとく立体ラーメンについて

式(19)~(23)の基本連立方程式を求め、各部材のたわみ角

および各結合部材の軸力を求めれば、次値の結果となる。

$$N_{23}^{10} - N_{10}^{10} = -0.105447 P \quad N_{12}^{20} - N_{10}^{20} = -0.105447 P$$

$$N_{23}^{10} - N_{21}^{10} = 0.153455 P \quad N_{23}^{20} - N_{21}^{20} = 0.153455 P$$

$$N_{12}^{10} = N_{21}^{10} = N_{12}^{20} = N_{21}^{20} = -0.572404 P$$

$$\varphi_{11}^{10} = 0.0043549 Pl \quad \varphi_{21}^{20} = 0.0043549 Pl$$

$$\varphi_{12}^{10} = -0.0043549 Pl \quad \varphi_{22}^{20} = -0.0043549 Pl$$

上式を式(14)および式(17)(18)に代入してえられる結果を式(1),(2)

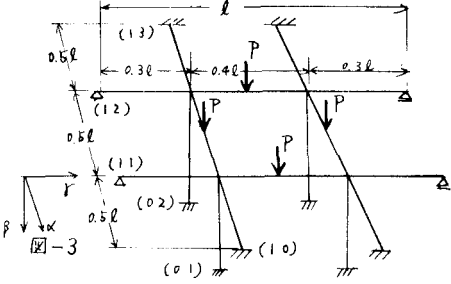
および式(5)に代入すれば、各部材列の弾性曲線、たわみ角曲線

および撓り角曲線が求まることになる。

本研究には文部省科学研究費の補助を受けた。記して謝意を表す。

参 考 文 献 (1) 山崎・櫻木; フーリエ級数による連続はりおよびラーメンの解法 九州大学工学集報 第39巻第3号 S, 41, 10

(2) 山崎・櫻木・今岡; 両端に任意の境界条件をもつ連続はりおよびラーメンの解法 " " 第40巻第2号 S, 42, 3



$$E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} = E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} = E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} = E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} = 2.0$$

$$E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} = E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} = 1.5 \quad E_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} = E_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} = 1.0$$

$$g_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} = g_{\eta\eta-1}^{k\delta\gamma} = 1.0 \quad g_{\eta\eta+1}^{k\delta\gamma} = 0.5$$