V-29　RC部材の温度勾配による変形拘束モーメントの解析法に関する研究

防衛大学校　正会員 ○ 佐藤良一
電力中央研究所　正会員　青柳征夫
電力中央研究所　正会員　金津努

1. まえがき

温度勾配下にあるRC部材の自由変形が拘束されるとモーメント($M=EI\cdot\alpha\Delta T/h$)が生じる。このモーメントを算定することは，ひびわれ発生以前では，温度変化による物性値の変化があってもそれほど困難ではない。しかし，ひびわれ発生後では，曲げ剛性 EI が各断面で異なるため相当困難であることが知られている。本報告は，温度降下による物性値の変化を考慮し，鉄筋とコンクリートの付着応力－相対すべり量($\tau_{xy}-\delta_x$)曲線に基づいた低温度領域の温度勾配下にあるRC部材の拘束モーメントの解析方法の確立を目的としたものである。

2. 仮定（図－1参照）

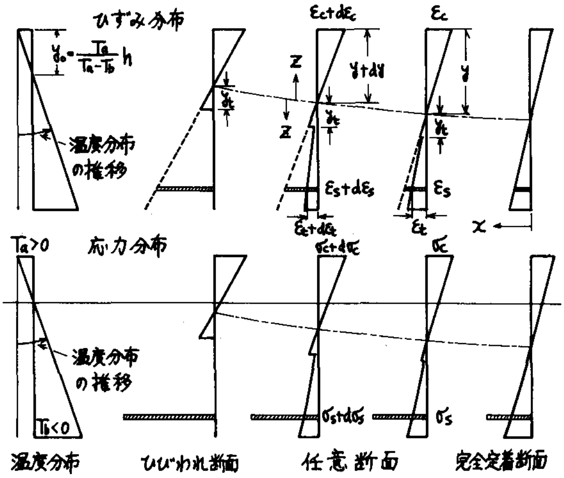
i) コンクリートは弾性体である。

ii) ひびわれはひびわれ間中央断面に対して対称でありかつすべてのひびわれは等間隔に発生する。

iii) 圧縮部コンクリート，中立軸近傍引張部コンクリートおよび鉄筋は平面保持が成立する。

iv) 引張部コンクリートのひずみは中立軸からの距離 Z に比例する。

v) 温度勾配は線形であり，各断面とも同一温度条件下にあるとする。



図－1 温度分布と任意断面における応力とひずみ分布の1例

3. 物性値の温度変化（0℃以上は常温とする。）

図－1に示した温度分布を中立軸からの距離 Z で表わせば次式のようになる。

$$T(z)=\left\{T_a+(T_b-T_a)\frac{y}{h}\right\}\mp(T_b-T_a)\frac{z}{h}\quad ,z>0 \qquad \text{—}(1)$$

ここで，マイナスは圧縮側を意味する(以下同様)。

i) コンクリートの弾性係数および応力

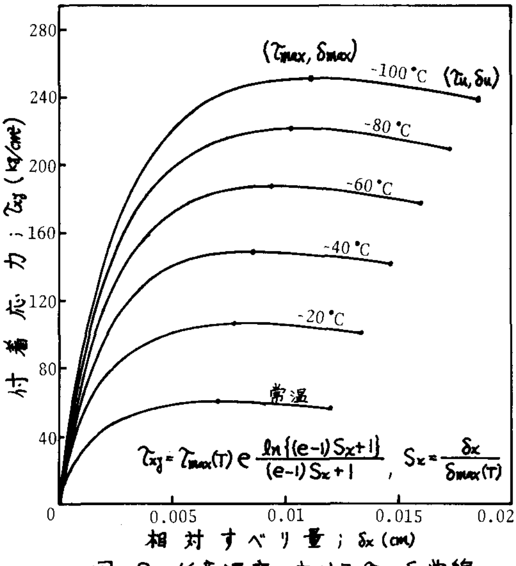
低温度下におけるコンクリートの弾性係数は岡沢[1]，後藤[2]，岡田ら[3]の実験値を参考にして次式で表わされるものとした。

$$E_c(T)=\Delta E_c\cdot T^2\times10^{-4}+E_{c,N} \qquad \text{—}(2)$$

ただし，ΔE_c は温度降下による増加量であり，ここでは $\Delta E_c=17.5\times10^4\,\mathrm{kg/cm^2}$ とした。また，N は常温を意味する。式(1)，(2)から断面内のコンクリートの弾性係数および応力は中立軸からの距離 Z で次のように示される。

$$\left.\begin{aligned}&E_c(z)=g_1z^2\mp(2g_1y+g_2)z+(g_1y^2+g_2y+g_3)\\&\left.\begin{matrix}\sigma_{c,T}(z)\\\sigma_{T,T}(z)\end{matrix}\right\}=\frac{\varepsilon_s}{d-y}\left\{g_1z^3\mp(2g_1y+g_2)z^2+(g_1y^2+g_2y+g_3)z\right\}\end{aligned}\right\}\text{—}(3)$$

ただし，$\sigma_{c,T}(z)$，$\sigma_{T,T}(z)$ は圧縮および引張応力であり，



図－2 任意温度における $\tau_{xy}-\delta_x$ 曲線

また，$g_1=\Delta E_c\left(\frac{T_b-T_a}{h}\right)^2$，$g_2=2\Delta E_c\frac{T_a(T_b-T_a)}{h}$，$g_3=\Delta E_c T_a^2+E_{c,N}$ である。

ii) コンクリートの引張強度

弾性係数同様上記文献より次の4次式で近似した。

$$\sigma_{tu}(T)=\Delta\sigma_{tu}\{1-(1-T/\{T\}_{\Delta\sigma_{tu}})^4\}+\sigma_{tu,N} \quad \text{—— (4)}$$

ただし，$\Delta\sigma_{tu}$は温度降下による増加量であり，$\Delta\sigma_{tu}=60\,kg/cm^2$，$\{T\}_{\Delta\sigma_{tu}}=-100°C$とした。$\sigma_{tu,N}$は1.5倍して用いた。

iii) 付着応力－相対すべり量曲線

$$\left.\begin{aligned}\tau_{max}(T)&=\Delta\tau_{max}\{1-(1-T/\{T\}_{\Delta\tau_{max}})^3\}+\tau_{max,N}\\ \delta_{max}(T)&=\alpha_{\delta_{max}}\cdot T+\delta_{max,N}\\ \delta_u(T)&=\alpha_{\delta_u}\cdot T+\delta_{u,N}\end{aligned}\right\}\text{—(5)}$$

$\tau_{xy}-\delta_x$曲線は六車ら(4)の提案式を用い，温度依存性は上式により表わした。ここで，$\Delta\tau_{max}=390\,kg/cm^2$，$\{T\}_{\Delta\tau_{max}}=-400°C$，$\alpha_{\delta_{max}}=-0.0000417$，$\alpha_{\delta_u}=-0.0000667$とした。これにより実用に供する温度範囲で得られる$\tau_{xy}-\delta_x$曲線を示せば図－2のとおりである。

4. 基礎微分方程式

基礎となる方程式は，釣り合い条件が任意断面で成立し，さらにモーメントが部材全長にわたり一定という条件から基本的には文献(5)同様次のように誘導される。

$$\left.\begin{aligned}\frac{d^2\delta_x}{dx^2}&=\frac{U_s}{A_sE_s}\{1-P(y)\}\tau_{xy}=\frac{U_s\tau_{max}e}{A_sE_s}\{1-P(y)\}\frac{\ln\{(e-1)\delta_x/\delta_{max}+1\}}{(e-1)\delta_x/\delta_{max}+1}\\ \varepsilon_s&=\{\varepsilon_s\}_{x=0}+\int_{y,x=0}^{y,x=x}Q(y)\,dy\\ \varepsilon_t&=F_1(y)\,\varepsilon_s+F_2(y)\end{aligned}\right\}(6)$$

ここで，$P(y)$，$Q(y)$，$F_1(y)$および$F_2(y)$は中立軸高さyのみの関数であることを示す。境界条件は図－3より次のように与えられ，この種問題は2点境界値問題であることがわかる。

$x=0$ ；　$\delta_x=0$，$\frac{d\delta_x}{dx}=0$ － 完全定着領域がある場合

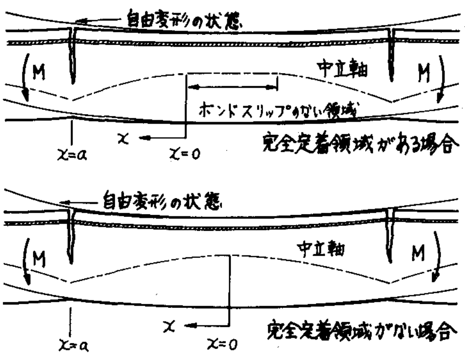
　　　　　$\delta_x=0$ － 完全定着領域がない場合

$x=a$ ；　$\frac{d\delta_x}{dx}=\varepsilon_s$ － ひびわれ断面

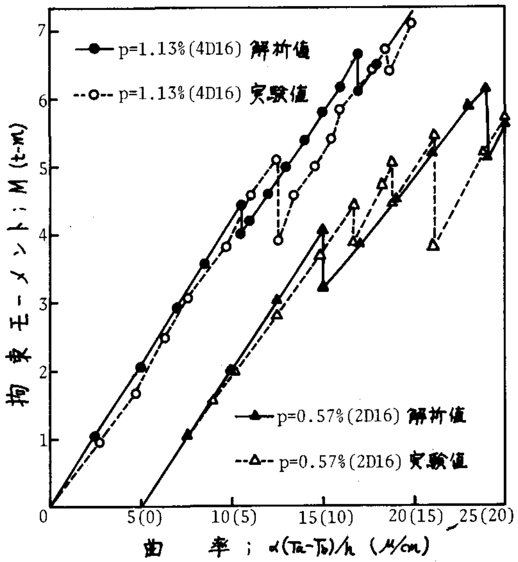
5. 解析結果

図－4，図－5は筆者らが先に行なった実験値(6)と本解析値を拘束モーメント－曲率，鉄筋応力度－温度差で比較して示したものである。解析結果は温度降下に伴なう物性値の向上により拘束モーメントがひびわれ発生にも拘らずそれほど低下しない現象や，鉄筋応力度におよぼす鉄筋比の効果などの実験結果をうまく表現しており，本解析法の妥当性が認められる。

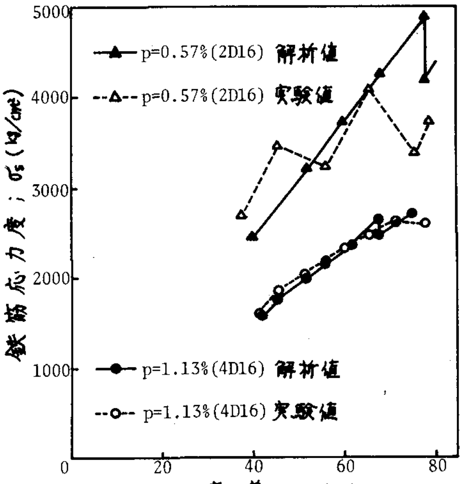
参考文献：(1) 岡沢；電研報告,昭55，(2) 後藤；コンクリート工学,昭52，(3) 岡田ら；コンクリート工学,昭52，(4) 六車ら；建論報,昭42，(5) 佐藤ら；[illegible],昭54，(6) 青柳ら；セメント・コンクリート,昭54



図－3 温度勾配によるRC部材の自由変形と拘束時の状態



図－4 拘束モーメントと曲率の関係



図－5 鉄筋応力度と温度差の関係