

横浜国立大学 正会員 橋 龍哉
 横浜国立大学 学生会員 ○山本 直人
 横浜国立大学 正会員 池田 尚治

1. まえがき

コンクリート構造物が温度変化を繰返し受けると、内部に発生する応力によりひびわれが発生し、構造物の劣化が進行する。このような場合を想定し、以下においては周期的温度変化を受ける多層断面から成るコンクリート曲げ部材について、温度応力の大きさをコンクリートの粘弾性を考慮に入れて解析的に検討する。

2. 各層における温度分布

多層断面から成る曲げ部材の上面に一定周期の温度変化が長期間与えらる時、第r層下面の温度 T_r' と熱流束 F_r' は次のようになる¹⁾(図-1参照)。

$$\begin{Bmatrix} T_r' \\ F_r' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ F_1 \end{Bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_r & B_r \\ C_r & D_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{r-1} & B_{r-1} \\ C_{r-1} & D_{r-1} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A_r = \cosh k_r l_r (1+i), \quad B_r = -\frac{\sinh k_r l_r (1+i)}{K_r k_r (1+i)},$$

$$C_r = -K_r k_r (1+i) \sinh k_r l_r (1+i), \quad D_r = A_r \quad (2)$$

ここに $k_r = \sqrt{\omega / (2K_r)}$, K_r : 熱伝導率, $\omega = 2\pi / T_p$, T_p : 温度変化の周期, l_r : 各層の厚さ, K_r : 熱伝導率, $i = \sqrt{-1}$ である。式(1)は各層の境界において完全な熱伝導を仮定している。式(1)を与えられた境界条件の下で解くと第r層の温度分布は次のようになる。

$$T_r(s_r) = P_r \sinh k_r l_r (1+i) + Q_r \cosh k_r l_r (1+i) \quad (0 \leq s_r \leq l_r),$$

$$P_r = \frac{T_r' - Q_r \cosh k_r l_r (1+i)}{\sinh k_r l_r (1+i)}, \quad Q_r = T_r' \quad (3)$$

3. 各層における応力分布

便宜上、ここでは上下対称の断面を扱う。断面内の任意の点における直応力 σ_{xx} は次のように与えられる²⁾。

$$\sigma_{xx} = -\alpha E T + \frac{P_T}{A} + \frac{M_{Tz}}{I_z} y, \quad P_T = \int_A \alpha E T dA, \quad M_{Tz} = \int_A \alpha E T y dA,$$

$$A = \int_A dA = \sum_{r=1}^m n_r l_r b, \quad I_z = \int_A y^2 dA = \sum_{r=1}^m (n_r l_r b y_r^2 + \frac{n_r b l_r^3}{12}), \quad n_r = \frac{E_r}{E_0} \quad (4)$$

ここに α : 熱膨張係数, E : 弾性係数, b : 断面の幅, y : 断面図心からの距離, y_r : 第r層図心のy座標, E_r : 第r層の弾性係数, E_0 : 基準となる弾性係数である。式(4)に式(3)を代入すると次の関係式が得らる。

$$P_T = \sum_{r=1}^m \alpha_r E_r b [P_r I_s(l_r) + Q_r I_c(l_r)], \quad M_{Tz} = \sum_{r=1}^m \alpha_r E_r b \{ [P_r J_s(l_r) + Q_r J_c(l_r)] + \bar{y}_r [P_r I_s(l_r) + Q_r I_c(l_r)] \},$$

$$I_s(l_r) = \frac{\cosh k_r l_r (1+i) - 1}{k_r (1+i)}, \quad I_c(l_r) = \frac{\sinh k_r l_r (1+i)}{k_r (1+i)}, \quad J_s(l_r) = \frac{1}{k_r^2 (1+i)^2} [k_r l_r (1+i) \cosh k_r l_r (1+i) - \sinh k_r l_r (1+i)],$$

$$J_c(l_r) = \frac{1}{k_r^2 (1+i)^2} [k_r l_r (1+i) \sinh k_r l_r (1+i) - \cosh k_r l_r (1+i) + 1] \quad (5)$$

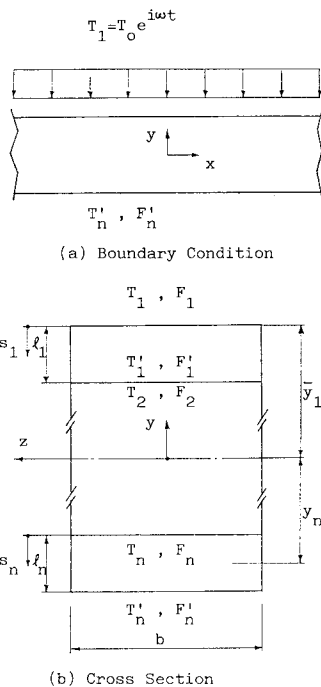


図-1 温度変化を受ける曲げ部材

ここに $\bar{y}_1 = -\bar{y}_2$, \bar{y}_1 : 第 ν 層上面の座標である (図-1 参照)。

4. コンクリートの粘弾性の影響

コンクリートは長期間作用する外荷重に対しては粘弾性的性質を示す。ここではコンクリートの粘弾性を一般化 Maxwell モデルによって表わし、その熱応力への影響を考える。³⁾ 緩和弾性係数 $E_R(t, \tau)$ とそれに伴う複素弾性係数 E_c はコンクリートのエイジングを考慮に入れると一般的に次のようになる。⁴⁾

$$E_R(t, \tau) = \sum_{j=1}^m E_j(\tau) e^{-(t-\tau)/\tau_j} + E_\infty(\tau), \quad E_c = \sum_{j=1}^m \frac{E_j i\omega}{i\omega + \frac{1}{\tau_j}} + E_\infty \quad (6)$$

ここに、 t : 温度変化作用後の経過時間, τ : 温度変化が与えられた時の材令, τ_j : 緩和時間である。温度と応力の変化が定常的である場合を仮定すると、コンクリートの粘弾性の影響を考慮するためには、式(4)、(5)に含まれるコンクリートの弾性係数を複素弾性係数で置換すればよい。

5. 数値計算例

以上に示した解は断面を構成する材料が異なる場合、たとえばコンクリートと鋼材の場合にも成立する。ここでは2種類のコンクリートから成る断面を考える (図-2 参照)。材料定数は $K_1 = 2.5 \text{ (kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot \text{°C)} = 2 K_2$, $k_1 = 0.005 \text{ (m}^2/\text{hr)} = 2 k_2$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 1.0 \times 10^{-5}$, $T_P = 24 \text{ (hrs)}$, $\tau_1 = 60 \text{ (days)}$, $\tau_2 = 3650 \text{ (days)}$, $T_0 = 1 \text{ (°C)}$ である。また、式(6)に含まれる定数は参考文献4)の Ross Dam に関する数値を用いた。断面下面での境界条件は断熱状態を仮定した。温度と応力の各々の絶対値を図-2に示す。この場合、温度変化が断面の上半分では比較的大きいことが

わかる。また応力分布はコンクリートの材令の影響で弾性係数が内部の層で大きいため各層の境界で不連続になっている。応力の最大値は 10°C 位の温度変化を考えると構造物にとって無視できない値

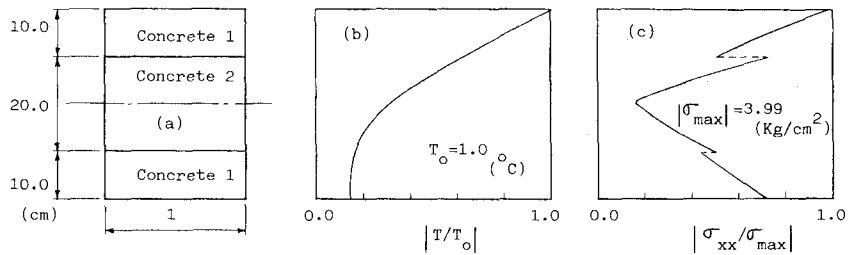


図-2 温度分布および応力分布

になる。図-2に示された量は、各々温度と応力の周波数応答関数である。したがって温度変化の振幅 T_0 の平均値や分散が与えられる場合は各点における温度や応力の平均値、分散は容易に求めることができる。

6. あとがき

多層断面をもつコンクリート曲げ部材が周期的温度変化を受けた場合の温度応力をコンクリートの粘弾性の影響も含めて求めた。実際のコンクリート構造物は複合断面が多く、以上の解を任意の形状の部材に適用できるように一般化することが今後必要であろう。また非定常状態の段階を検討することも必要と思われる。

[参考文献]

- 1) Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., "Conduction of Heat in Solids", 2nd ed., Clarendon Press, Oxford, 1959.
- 2) Boley, B.A. and Weiner, J.H., "Theory of Thermal Stresses", Wiley, New York, 1960.
- 3) 椿 龍哉: 「不規則な湿度変化を受けるコンクリートスラブの応力変化」, 土木学会 第36回年次学術講演会講演概要集, 第5部.
- 4) Bazant, Z.P. and Wu, S.T., "Rate-Type Creep Law of Aging Concrete Based on Maxwell Chain", Materials and Structures, Vol. 7, No. 37, 1974, pp. 45-60.