

横浜国立大学工学部 正会員 椿 龍哉
横浜国立大学大学院 学生会員 江田 徹

1. まえがき

コンクリート表面の温度が外部環境の変化により周期的に変動するとき、コンクリート内部に発生する温度応力は表面温度変化に含まれるばらつきに応じた変化を示す。このような温度応力の変動は、コンクリート構造物の耐久性を考えるとときに考慮しておくべき要因の一つと考えられる。ここでは、温度応力の大きさやばらつきを解析的に推定するために、境界要素法を用いた手法を検討する。対象とする構造物は2次元平面ひずみ状態として扱えるものとし、温度変化は定常状態とする。

2. 温度応力解析法

コンクリート構造物表面で表面温度が次のように周期的に変化する場合を考える(図-1参照)。

$$\bar{\theta}(\xi, t) = \bar{\theta}_0(\xi) e^{i\omega t} \quad (1)$$

ここに、 $i = \sqrt{-1}$, $\omega = 2\pi/T$, t, T は各々時間と温度変化の周期を表わす。構造物が2次元等方的で温度分布が熱伝導方程式に従い定常的な場合、温度 θ や温度の法線方向勾配 g , および温度分布により生じる変位 u_i や表面力 f_i に関する境界 S 上の積分方程式は次のように表わされる¹⁾。

$$c(\xi)\theta(\xi) + \int_S g^*(\xi, \xi_1)\theta(\xi_1)dS(\xi_1) = \int_S \theta^*(\xi, \xi_1)g(\xi_1)dS(\xi_1) \quad (2)$$

$$C_{ei}(\xi)u_i(\xi) + \int_S f_{ei}^*(\xi, \xi_1)u_i(\xi_1)dS(\xi_1) = \int_S u_{ei}^*(\xi, \xi_1)f_i(\xi_1)dS(\xi_1) + b_{ei}(\xi) \quad (3)$$

ここに θ^*, u_{ei}^* は温度と変位の基本解であり、 g^*, f_{ei}^* はそれらに対応する温度の法線方向勾配と表面力である。 c, C_{ei} は一定温度または剛体変位の条件から求められる量である。 b_{ei} は温度により生じる見かけの物体力項である。領域内部における温度 θ , 変位 u_i , 応力 S_{ij} は次式より求められる¹⁾。

$$\theta(\xi) = \int_S \theta^*(\xi, \xi_1)g(\xi_1)dS(\xi_1) - \int_S g^*(\xi, \xi_1)\theta(\xi_1)dS(\xi_1) \quad (4)$$

$$u_{ei}(\xi) = \int_S u_{ei}^*(\xi, \xi_1)f_i(\xi_1)dS(\xi_1) - \int_S f_{ei}^*(\xi, \xi_1)u_i(\xi_1)dS(\xi_1) + b_{ei}(\xi) \quad (5)$$

$$S_{ij}(\xi) = \int_S D_{eij}^*(\xi, \xi_1)f_k(\xi_1)dS(\xi_1) - \int_S S_{eij}^*(\xi, \xi_1)u_k(\xi_1)dS(\xi_1) + \int_S D_{ij}^*(\xi, \xi_1)\theta(\xi_1)dS(\xi_1) - \int_S S_{ij}^*(\xi, \xi_1)\theta(\xi_1)m_{im}(\xi_1)dS(\xi_1) - \frac{\alpha E}{1-2\nu}\theta(\xi)\delta_{ij} \quad (6)$$

ここに、 E, ν, α は、各々、縦弾性係数、Poisson比、線膨張係数、 δ_{ij} は Kronecker のデルタである。また、係数 $D_{eij}^*, S_{eij}^*, D_{ij}^*, S_{ij}^*$ については参考文献(1)を参照された。コンクリートの粘弾性の影響を考慮するためには、 E を複素弾性係数 $\hat{E}$ で置き換えればよい。式(4),(5),(6)によって得られた解 θ, u_i, S_{ij} は、与えられた構造物の外表面における周期的温度変化に対する周波数応答関数になっているため、温度変化の振幅 $\bar{\theta}_0(\xi)$ が時間的に変動し、その平均および分散が、各々、0 および σ_θ^2 の場合には、各々の量の標準偏差は次のように与えられる。

$$\sigma_\theta(\xi) = \sigma_\theta |\theta(\xi)|; \quad \sigma_{u_i}(\xi) = \sigma_\theta |u_i(\xi)|; \quad \sigma_{S_{ij}}(\xi) = \sigma_\theta |S_{ij}(\xi)| \quad (7)$$

ここに、 u_i, S_{ij} は、たとえば x -座標系では、各々、変位成分 u_x, u_y , 応力成分 S_x, S_y, S_{xy}, S_{yz} 等を表す。

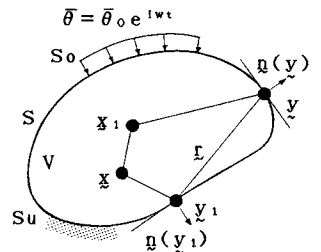


図-1 領域と境界

3. 数値計算例

図-2(a)に示すような2種のコンクリートから成るコンクリート構造物を考える。異なる種類のコンクリートが接する界面では、温度と変位が連続であると仮定する。境界要素は線形要素を用い、要素分割は図-2(b)に示す。計算上必要となる材料定数は表-1の値を用い、温度や応力に依らず一定とする。コンクリートの複素弾性係数は参考文献(2)の緩和弾性係数を用いて計算した。温度変化の周期が1日と365日の場合について、温度と応力の分布を図-3に示す。これらの分布図は式(7)からも明らかなように、温度と応力の定常的变化の振幅を表わすと同時に、構造物表面で与えられる周期的温度変化のばらつきにより生じた温度と応力のばらつきの標準偏差を表わす。各点における線分の長さは各々の量の絶対値を表わし、線分の傾きは表面の温度変化との位相のずれを表わす。温度に関しては、周期が長い場合は外表面の温度変化の影響が構造物内部に達しているのに対し、周期が短い場合は外表面付近のみが主として影響を受けることがわかる。また応力に関しては、周期が長い場合は境界における拘束が、また、周期が短い場合は温度勾配が支配的な影響を与えることがわかる。

4. あとがき

コンクリート構造物の外表面の温度がばらつきを含んだ周期的変化をする場合、コンクリート内部に発生する応力のばらつきを境界要素法を用いて解析的に推定することを試みた。従来の有限要素法等を用いた手法³⁾と同様の結果が得られることが確認された。

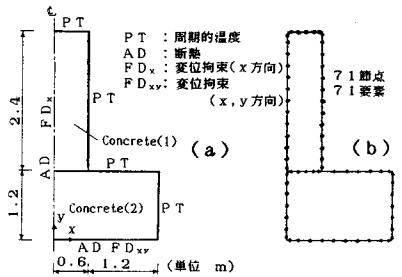


図-2 境界条件と要素分割

表-1 コンクリートの材料定数

材料定数	コンクリート(1)	コンクリート(2)
熱伝導率 K (kcal/m·day·°C)	57.6	45.6
密度 ρ (kg/m ³)	2300	2400
比熱 c (kcal/kg·°C)	0.24	0.27
熱膨張率 α (m ² /day)	1.044×10^{-1}	7.037×10^{-2}
材料 τ (days)	1825	3650
Poisson比 ν	0.17	0.17
線膨張係数 α (°C ⁻¹)	10×10^{-6}	10×10^{-6}
複素弾性係数 $\hat{E}$ (kgf/cm ²)		
($T=1$ day) R_e ($\hat{E}$)	2.158×10^5	2.191×10^5
1 m ($\hat{E}$)	2.221×10^3	1.317×10^3
($T=1$ yr.) R_e ($\hat{E}$)	1.906×10^5	2.024×10^5
1 m ($\hat{E}$)	1.570×10^4	1.233×10^4

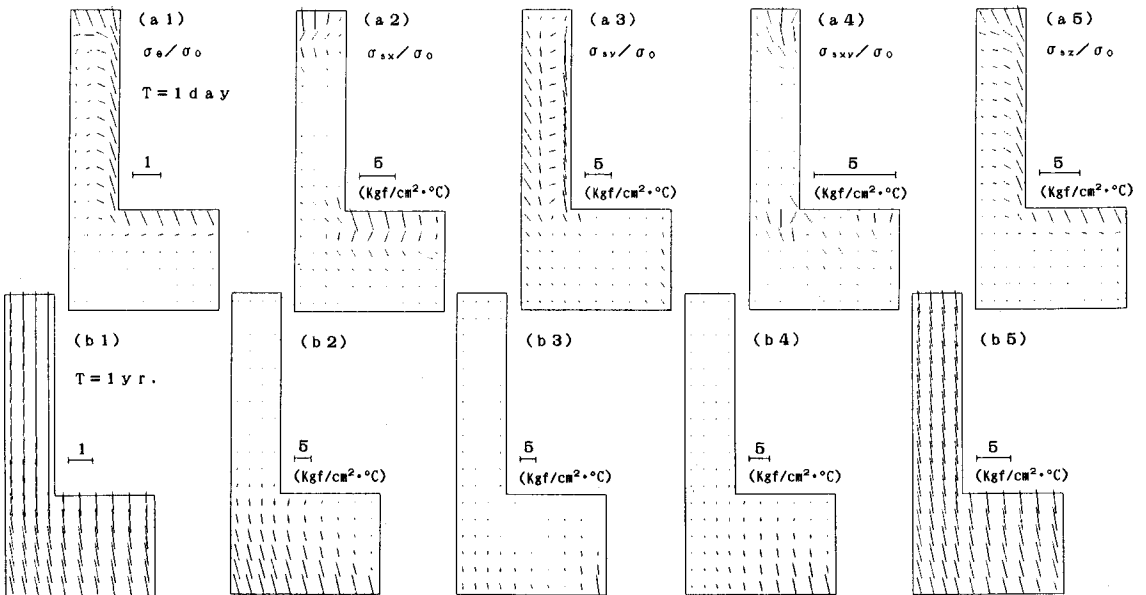


図-3 温度と応力の分布：(a) $T=1$ day；(b) $T=1$ yr.

【参考文献】

- 1) 橋：周期的な温度変化を受けるコンクリート内の温度応力，第6回コンクリート工学年次講演会講演論文集，日本コンクリート工学協会，1984年6月。
- 2) Baant·Wu：Rate-type Creep Law of Aging Concrete Based on Maxwell Chain, Materials and Structures, Vol.7, No.37, 1974.
- 3) 江田・橋・池田：周期的温度変化を受けるコンクリート構造物の有限要素法による熱応力解析，土木学会第38回年次学術講演会講演要旨集，第5部，1983年9月。