

[58] 太陽輻射入熱をうける軸対称コンクリート建造物の温度応力

正会員 ○田辺忠顕 (名古屋大学工学部)
 正会員 遠藤孝雄 (電力中央研究所)
 正会員 加藤 治 (電力中央研究所)

1. 序

コンクリート建造物における温度応力として従来から論じられて来ている主たるものは、水和熱によるものと水あるいは空気等の外雰囲気によって与えられる温度勾配によるものであった。近年、それら以外に、日射による温度応力成分が以外に大きくなることが明らかにされつつあり、注目され始めた。

本研究は、原子力発電所等でよく採用されている軸対称コンクリート建造物(例えば、コンクリート製の原子炉格納容器あるいは外部遮蔽壁など)などを対象として、日射による温度応力の推定を理論的に行ったものである。

2. 日射による熱入力

太陽から地球に到達する輻射熱は、太陽の輻射エネルギーの強さ(太陽常数)、太陽と地球との距離、空気層の厚さ、空気の透過度などによって影響される。太陽輻射エネルギーの強さは、近年宇宙衛星の観測によって精度よく求められており、1164 Kcal/m²/hrにほぼ等しいとされている。地球の公転軌道は完全な円ではないため、太陽と地球との距離は一定ではない。しかし、理論日射量を求めるにあたって、ここでは地球の公転軌道は完全円と仮定した。即ち、太陽と地球との相対位置を図-1のようにとり、{k}の単位ベクトルを太陽中心位置に図-1のように固定する。次に、地球中心に、その一つの成分k₂^{*}が常に太陽の方向へ向いている単位ベクトル列{k^{*}}を定める。公転角をξとし、夏至の時点から計るとすると、両単位ベクトルとの間に次の関係がなりたつ。

$$\begin{Bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \xi & \sin \xi & 0 \\ -\sin \xi & \cos \xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_1^* \\ k_2^* \\ k_3^* \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

次に考えている建造物の設置地点真南にn₂、地球の中心とを結ぶ方向にn₁、それらと直交する単位ベクトルn₃、からなりたつ単位ベクトル列{n}を考える(図-2参照)。図-2で示すように地軸の傾きをψとし、地球の自転角をθとし、建造物地点の緯度をφとすると、{n}と{k}との間に次の関係がなりたつ。

$$\begin{Bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & \cos \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi & -\sin \psi \sin \theta \cos \varphi + \cos \psi \sin \varphi \\ \cos \theta \sin \varphi & \cos \psi \sin \theta \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi & -\sin \psi \sin \theta \sin \varphi - \cos \psi \cos \varphi \\ -\sin \theta & \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

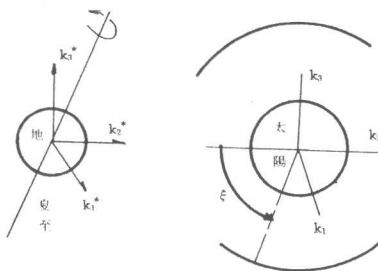


図-1 単位ベクトルの定義

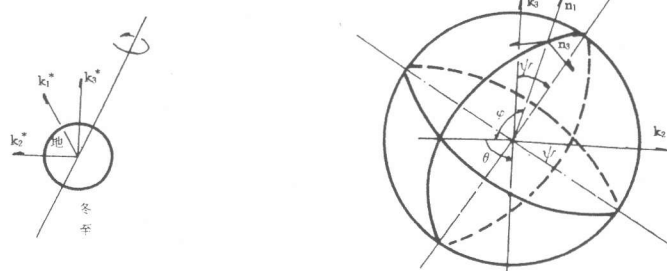


図-2 ψ, φ, θの定義

構造物がうける日射量 S は図-3 のように、構造物の考えている面にたてた外向き法線を \mathbf{N}^* とすると、地表面に到達する太陽輻射強度 I を用いて、

$$S = I \mathbf{N}^* \cdot \mathbf{k}^* \dots\dots\dots (3)$$

と、単位面積あたりについて求められる。

図-3 からわかるように、 \mathbf{N}^* も、構造物の各部位ごとに $\{\mathbf{n}\}$ で表わされ、 \mathbf{k}^* も (1), (2) 式から $\{\mathbf{n}\}$ で表わされるから、 I がわかれば (3) 式から、地球上の任意の地点の軸対称構造物の任意の部位の日射量が一年のうちの任意の時点、一日のうちの任意の時刻について求められる。

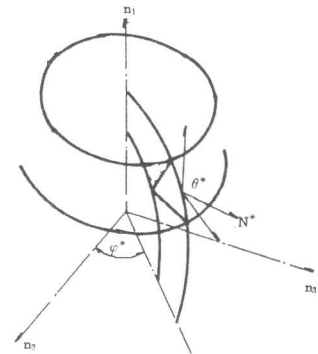


図-3 \mathbf{N}^* の定義

ここで、地表面に到達する直達日射強度 I_D は、輻射熱の大気圏における減衰がその位置における直達日射強度に比例するものとする、 k を比例定数、 m を大気圏における光の通過距離

$$I_D = I_0 e^{-km} \dots\dots\dots (4)$$

として (4) 式のように表わされる。太陽が天頂にある時の、地表面日射量と大気圏外日射量との比、即ち大気透過率を P とし、考えている地点における太陽高度 (太陽と地表水平面との角度) を h とすると、(4) 式は結局、

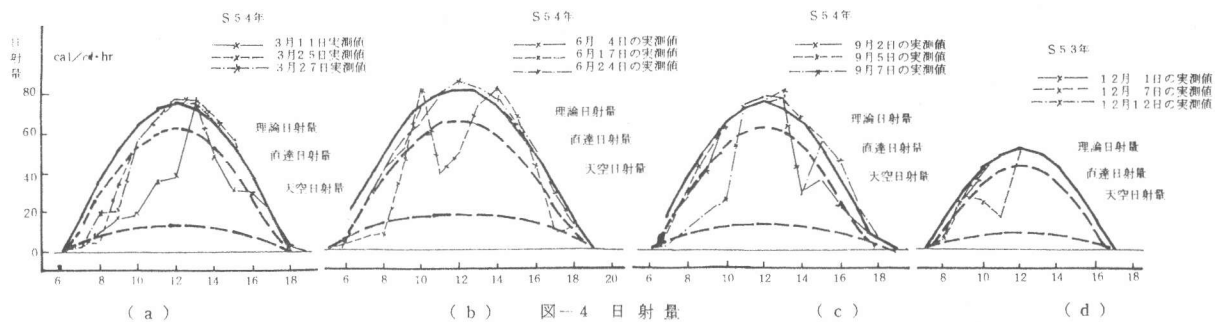
$$I_D = I_0 P \left(\frac{1}{\sinh} \right) \dots\dots\dots (5)$$

となる。ただし、 $\sinh = \mathbf{k}^* \cdot \mathbf{n}$ で与えられる。日の出の時刻は、(2) 式に (1) 式を代入して得られる \mathbf{n} の $\{\mathbf{k}^*\}$ による表示で、 \mathbf{k}^* 成分が零になる θ として求めることができる。

日射量は、(3) 式による直達日射量の他に天空の拡散による天空日射量成分がある。この成分に関しては、(6) 式の Berlarge の式を用いた。天空日射量を I_{sk} として、

$$I_{sk} = \frac{1}{2} I_D \sinh \frac{1-P \left(\frac{1}{\sinh} \right)}{1-1.4 \log_e P} \dots\dots\dots (6)$$

上記を適用したのが、A 原子力発電所の RC 製外部遮蔽壁である。同地点の緯度を ϕ に代入し、春夏秋冬の一日を適当に選んで計算値を出し、実測値と比較したのが、図-4 (a), (b), (c), (d) である。



理論日射量と実測値とを比較すると、午前中の理論値が、実測値よりも幾分大きめであるが、全体的には理論値と計算値が十分一致しており、この手法により、日射量を十分精度よく求められることが判明した。

3. 日射による温度分布

日射入熱量がわかれば、それをうける構造体の伝熱問題は、三次元の拡散方程式を解くことによって解決される。考慮している構造体は軸対称構造物であり、入熱荷重も軸対称であれば、準二次元問題に元数を減らし得るが、入熱荷重が非対称なので、解をフーリエ級数に展開して解くことにした。この手法の利点は、日射入熱分布が、かなりなだらかな分布であり、数少ないフーリエ項で近似できることである。

円筒座標を用いた場合の拡散方程式ならびに境界条件は次のように表わせる。

$$\text{支配方程式} \quad \frac{\partial}{\partial r} \left(r K_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{K_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + r Q (+) - r \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

境界条件

$$K_r \frac{\partial T}{\partial r} l_r + K_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z + q + h(T - T_\infty) = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、Tは構造体の温度、K_r, K_θ, K_zはそれぞれ、r, θ, z方向の熱伝導率、Q(t)は発熱率、Cは比熱、l_r, l_zは、境界面のr, z方向の方向余弦、qは境界面の熱流束、hは伝達率、T_∞は外気の温度である。

(8)式を境界条件とする(7)式の汎関数xは、

$$x = \int_V \left[\frac{1}{2} \left\{ rK_r \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \frac{K_\theta}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial \theta} \right)^2 + rK_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right\} - (rQ - r\rho c \frac{\partial T}{\partial t}) T \right] dV \\ + \int_S q T ds + \int_S \frac{1}{2} h (T - T_\infty)^2 ds \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。Tをθ方向のフーリエ級数、 $T = \sum_{n=0}^{\infty} (T_{nc}(r, z, t) \cos n\theta + T_{ns}(r, z, t) \sin n\theta)$ で表わし、T_{nc}, T_{ns}に適当な変位関数を用いて、 $T_{nc} = [N] \{T_{nc}\}^e$ 、 $T_{ns} = [N] \{T_{ns}\}^e$ とすると、これらを(9)式に代入し、直交関係を用いることによって、

$$\frac{\partial x^e}{\partial T_{inc}} = \left[\{T_{nc}\}^e \right]^T \int_V \left[rK_r \left[\frac{\partial N}{\partial r} \right]^T \left(\frac{\partial N_i}{\partial r} \right) \cos^2 n\theta + \frac{K_\theta}{r} [N]^T N_i n^2 \sin^2 n\theta + rK_z \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]^T \frac{\partial N_i}{\partial z} \right. \\ \left. \times \cos^2 n\theta \right] dV + \left[\left\{ \frac{\partial T_{nc}}{\partial t} \right\}^e \right]^T \int_V r\rho c [N]^T N_i \cos^2 n\theta dV \\ - \int_V rQ N_i \cos n\theta dV + \int_S q N_i \cos n\theta ds + \left[\{T_{nc}\}^e \right]^T \int_S h [N]^T N_i \cos^2 n\theta ds \\ - \int_S h T_\infty N_i \cos n\theta ds \quad \dots\dots\dots (10)$$

が導ける。同様に、 $\partial x^e / \partial T_{ins}$ に対して(10)式のsinをcos, cosをsinに変換した式が導かれる。全体系では $\partial \Sigma x^e / \partial T_{ins} = 0$, $\partial \Sigma x^e / \partial T_{inc} = 0$ だから、これらを用いて、

$$[F_1] \begin{Bmatrix} T_{nc} \\ T_{ns} \end{Bmatrix} + [F_2] \begin{Bmatrix} \frac{\partial T_{nc}}{\partial t} \\ \frac{\partial T_{ns}}{\partial t} \end{Bmatrix} + [Q] = 0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

が導ける。ここで[F₁]は(10)式の第1項、第4項を重ね合せたもの、[F₂]は第2項を重ね合せたもので、[Q]は、残りの項を重ね合せたものである。

上記の解析結果から明らかのように、太陽の輻射入熱は(10)式の第4項のqに相当するものである。他に熱荷重項としては(10)式の最後の項があり、これは外気温からの熱伝達によるものである。(10)式の第3項も熱荷重項であるがこれは水和反応熱のように内部発熱によるものであり、今考慮している対象外の荷重である。

適用の一例として、やはりA原子力発電所の半球ドームつけ円筒シエルの外部遮蔽壁について解析を行った。同構造物は、図-5に示したように、全長が57m、直径が38mのRCシエルで、壁厚が底部で90cm、上部で60cm弱となる。2月と8月を選んで解析を行ったが、これらの時点は一年の間で最高の温度応力を示すであろうと考えられる2時点である。輻射入熱のコンクリート表面に到達する量は(3)式で表わされるが、実際に吸収される熱量は表面のコーティングによって大幅にことなる。ここでは、その条件として吸収率0.65を用いた。また、外気温の気温変化は、8月の時点では、午後3時に最高31.2℃、午前3時に最低23.8℃となるsineカーブで近似した。2月の時点でも同様であるが、最高気温は10.3℃、最低温度は、3.8℃とした。シエル内部の雰囲気温度は、それらの平均値とし一定とした。コンクリートの熱伝導率、熱伝達率、比熱は、

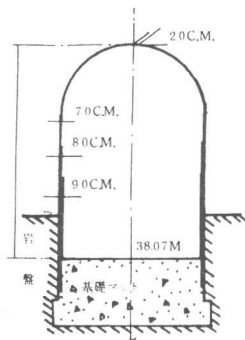


図-5 外部遮蔽壁

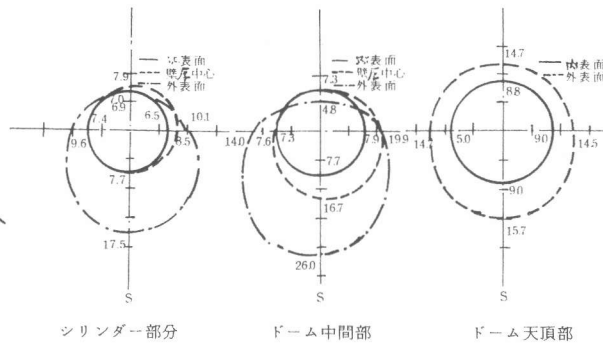


図-6 壁体の温度分布

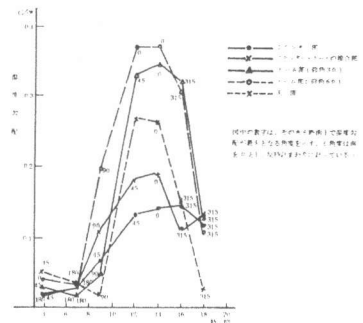


図-7 温度勾配

それぞれ $1.5 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$, $15.8 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$, $0.23 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ とした。図-6に、冬期2月下旬の午後2時のコンクリート壁の温度分布をシリンダー部, ドーム中間部, ドーム天頂部について示した。これらの図より, まず全体的な傾向として温度分布はなめらかな楕円状となり, その凸の部分が太陽の移動につれて, 引きずられるように太陽の方向へ移動することがわかる。最高温度は8月の時点では, ドーム部天頂部付近におこり, 40°C 以上にもなる。その時点での, その部位での温度勾配は 32°C/m である。冬期での壁体温度は, 夜明け方に外気温の最低値近くまで低下するが内部もかなり冷えるので温度勾配としては, 圧倒的に日中の方が大きくなる。冬期での最高温度は, ドーム-中間部分で 21°C 強になる。温度応力に影響を及ぼすのは最高温度の絶対値ではなく温度勾配なので, その冬期の例を, 図-7に示した。この例の場合には, 夏期よりも冬期に温度勾配は大きくなること, またシリンダー部分より, ドーム部分により大きな温度勾配が発生することが示された。本例の場合には, 最大の温度勾配は 37°C/m であった。

4. 日射による応力分布

応力分布は, 温度分布に対応するものであるから, 当然, 変位ならびに荷重もフーリエ級数に展開することになる。歪ならびに応力は変位の微分として表わされるからこれらの諸量もフーリエ級数となり, 最小ポテンシャルエネルギーの原理あるいは仮想仕事の原理から, 各フーリエ項ごとの荷重-変位についての連立方程式が導かれる。ここでは, 温度応力を自由膨張が拘束された時に発生する応力として, 初期歪問題として解くために, 各時間増分ごとに, 各フーリエ項ごとの初期歪増分を考えた。3.で述べた温度分布に対して応力を求めたところ次のような結果を得た。コンクリートのヤング係数は, $2.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ とし, 熱膨張係数は $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ とした。図-8に夏期・冬期の応力が最大になる時刻の発生モーメントを θ 方向, z 方向について示した。モーメントの最大値は温度勾配が最大となる冬期で $21 \text{ t} \cdot \text{m/m}$ の量が z, θ 両方向にシリンダー下部に発生する。しかし, 応力的には, 図-9に示したようにドーム部分で最大値が発生し, θ, z 両方向に約 19 kg/cm^2 の引張応力が発生することが示されている。これらの数値そのものは, 単に一例題についての値にすぎないが, それらは, 日射入熱の影響が決して少くないことを示している。原子力構造物のように透気性などの観点からびびわれ幅を問題にするような場合には, 決して無視しえない要因である。本研究の一連の手法から, これらの影響を解析的に推定するための一手段を提供し得たと考えている。

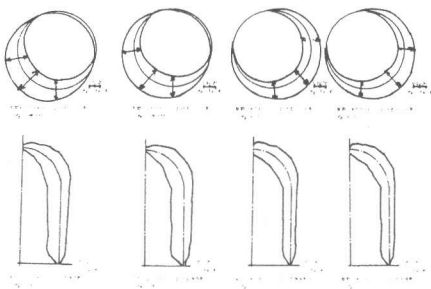


図-8 モーメント分布

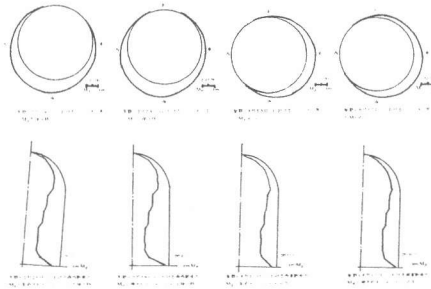


図-9 応力分布