

合成版の熱伝導について

九州大学工学部 学生員○佐々木 徹
福岡大学工学部 正会員 黒木 健実

九州大学工学部 正会員 太田 俊昭
九州大学工学部 学生員 寺岡 大気

1 まえがき

最近、諸外国における相次ぐ原子力発電所の事故のため、原子力発電システムの管理・運営・設計に関する見直しが求められており、原子炉格納容器の設計に関してもより高い安全性が要求されている。従来の原子炉格納容器の設計にあたっては、非常事態に対して内圧5Kg/cm²の変化と内部温度300℃が考えられており一応の目安を与えている。しかしながら火災等の併発といった事故原因の多様性・不安定性を考えれば、600℃以上の高温下における格納容器の熱変形挙動やそれによる力学特性の劣化等についても、十分な検討をしておくことが望ましい。そこで本論文では、かかる設計分野の基礎的知見を得る目的で鉄筋コンクリート構造や鋼とコンクリートの複合構造の高温下の熱応力状態の理論的、実験的な解明を試みており、その成果の一部を報告する。

2 解析方法

本論文では、図-1に示すような梁モデルを平面的に取り扱い、厚さ方向に温度変化のない二次元モデルとして温度分布を解析する。熱伝導に関する基礎式は、次式で与えられる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = Q + \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad \text{—— (1)}$$

ここに $T(x, y, t)$ は、温度で、平面座標 x, y 、及び時間 t の関数である。 ρ は密度、 c は定常状態における物質の比熱、 κ_x, κ_y はそれぞれ x, y 方向の熱伝導係数、 Q は、熱量である。本論文では、周辺温度の変化による合成版内部の温度分布を解析するので、その他の熱に関する項（内部発熱、輻射、放射）は考慮しない。（1）式より要素 e に関する非定常熱伝導状態における有限要素式は、

$$[K_e] \{ \phi \} + [C_e] \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} = \{ F_e \} \quad \text{—— (2)}$$

とあらわすことができる。

時間が $t = t_0$ から $t = t_0 + \Delta t$ に変化する過程においては、時間に関する離散化手法として Crank-Nicolson の差分式を用いて、 $t_0 + \Delta t/2$ 後の温度及び、温度勾配を

$$\phi \left(t_0 + \frac{\Delta t}{2} \right) = \frac{\phi(t_0 + \Delta t) + \phi(t_0)}{2}, \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} \left(t_0 + \frac{\Delta t}{2} \right) = \frac{\phi(t_0 + \Delta t) - \phi(t_0)}{2}$$

と近似して、（2）式に代入すると、時刻 t_0 に対する Δt 後の温度ベクトル $\{ \phi(t_0 + \Delta t) \}$ は

$$\left(\frac{1}{2} [K] + \frac{1}{\Delta t} [C] \right) \{ \phi(t_0 + \Delta t) \} = \left(-\frac{1}{2} [K] + \frac{1}{\Delta t} [C] \right) \{ \phi(t_0) \} + \{ F(t) \}$$

によって表すことができる。

ここに $[K]$ は熱伝導マトリックス、 $[C]$ は熱容量マトリックス、 $\{ F(t) \}$ は熱流束マトリックスと呼ばれる。これにより逐次微小時間 Δt ごとの温度ベクトル $\phi(t)$ を計算する。鉄筋および鋼板は、単位幅あたりの量として換算して扱い一次要素として考える。その棒要素の両端にコンクリートによる二次元要素の節点を図-2に示すように配置して全体の熱伝導マトリックスに組み込んだ。解析モデルは、図-3に示すとおりである。

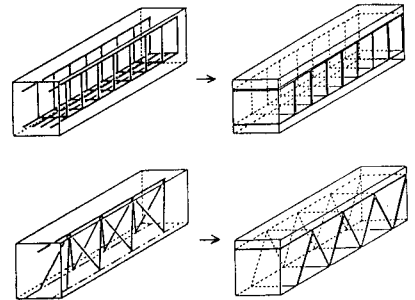


図-1

3 解析例

解析例として図-4、5、6にトラス型ジベルを有する合成版、RC版、ブレンコンクリート版の三通りについて上部表面温度が毎分20℃ずつ上昇するときの一时间後の温度分布を示す。使用係数は表1、および表2に示す通りである。実験との比較は、講演時に発表する。

表-1

	コンクリート	鋼材
熱伝導係数 κ (Kcal/m·K)	$2.2 - 0.00134T$ (t)	$4.8 - 0.0072T$ (t)
熱伝達係数 λ (Kcal/m ² ·K)	$20.41 + 10$	21.6
単位体積重量 ρ (Kg/m ³)	2419	7700
比熱 c (Kcal/kg·K)	0.28	0.16

ただし、Tは温度で、 κ 、 λ は、温度T、時刻tの関数になる

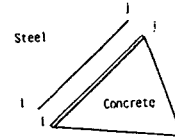
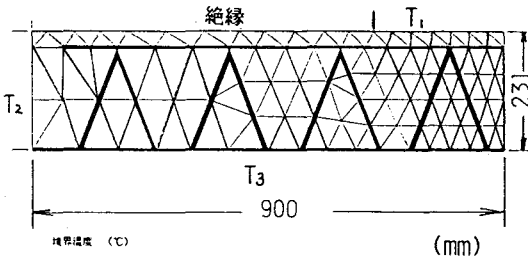


図-2

表-2

鋼材の単位厚さあたりの断面積 (m²)

RC	合成版
引っぱり鉄筋 0.0046	鋼板 0.0045
スタースラップ 0.0006	丸鋼、異形棒鋼 0.0006



$T_1 = 1200t + 10$ ($t < 1200$)

$T_2 = T_3 = 10$

図-3

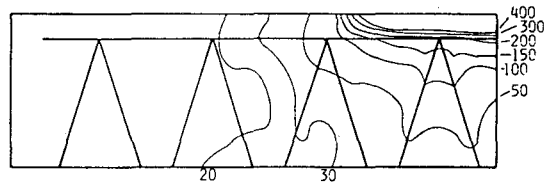


図-4

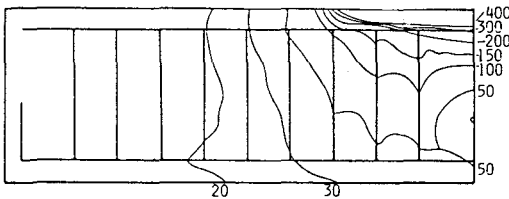


図-5

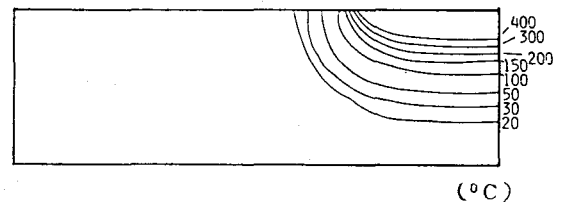


図-6

4 あとがき

本論文では、合成版内の熱伝導を二次元的に解析したが、その仮定として、一定の幅においては、温度分布が一様であるということを条件にいた。しかし、実際問題としては各々の部材についてはその配置が三次元的になるので、三次元的な熱伝導および熱応力解析が出来るプログラムの開発が今後の課題である。

参考文献 応用有限要素解析 川井：訳

流れと熱伝導の有限要素法入門 矢川

高温に於けるセメントモルタル 及びコンクリートの熱伝導率の変化 原田、日本建築学会
研究報告 No.49, pp.1-8, 1954

コンクリートの熱的性質 徳田 コンクリート工学 Vol.22, No.3, March 1984