

# 埋め込み鉄筋モデルによる コンクリート部材の熱伝導解析

九大工学部 正 員 山口栄輝

九大工学部 学生員 金田克明

九大工学部 正 員 太田俊昭

## 1. 緒言

コンクリート構造物を有限要素法で解析する場合、鉄筋のモデル化手法が計算効率、解析精度に大きな影響を及ぼす。この点に関して著者らは、埋め込み鉄筋モデルをRC梁の構造解析に用いれば高精度の解が効率よく求められることを示した<sup>1)</sup>。本報告では、この鉄筋モデルをコンクリート部材の2次元熱伝導解析に適用し、その有効性について検討を加える。なお、ここでは定常問題のみを取り扱う。

## 2. 基礎式

図-1に示すように、埋め込み鉄筋モデルではアイソパラメトリック要素内の任意の位置に鉄筋が存在することを許し、鉄筋の挙動は要素の形状関数により規定されると仮定する。熱源が領域内に存在せず、境界条件として熱伝達のみを考えた場合、この仮定に基づいた熱伝導解析の基礎式は次のように表示される。

$$(K_1 + K_2) T = F \quad (1)$$

ここで  $T$  は節点温度ベクトルを示す。またテンソル指標  $i, j$  を用いれば、行列  $K_1, K_2$  およびベクトル  $F$  は一要素につき

$$K_{1ij}^a = \int_{V^a} k_c N_i^a N_j^a dV + \sum \int_{L^a} k_s A_s R_{si} R_{sj} N_i^a N_j^a ds \quad (2)$$

$$K_{2ij}^a = \int_{A^a} h N_i^a N_j^a dA, \quad F_i^a = \int_{A^a} h T_c N_i^a dA \quad (3), (4)$$

と表すことができる。上式において、 $k_c, k_s$  はそれぞれコンクリート、鉄筋の熱伝導係数、 $A_s$  は鉄筋の断面積、 $h$  は熱伝達係数、 $T_c$  は外部温度、 $V^a, A^a, L^a$  はそれぞれ要素の領域、境界面および鉄筋長を表している。また、添え字の  $a, b$  は節点番号を意味し、 $N^a$  は節点  $a$  の形状関数を示している。埋め込み鉄筋モデルでは鉄筋を1次元部材として取り扱うため、式(2)の右辺第二項は鉄筋に沿った線積分となっている。なお、この項に現われる  $R_s$  は積分経路の向きを示す方向余弦ベクトルである。

上式の積分には数値積分法を適用するが、鉄筋に沿った線積分を行う際には、要素の局所座標系における鉄筋の位置を知る必要があり、全体座標から局所座標を求めることが要求される。低次要素の場合にはこの計算を解析的に行うことが可能であるが、高次要素では特別な場合を除き、何らかの数値解法を用いる必要が生じる。

## 3. 数値計算例および考察

解析対象部材としては対角線上に1本の鉄筋を有する、一辺 2.0 m のコンクリート板を考えた(図-2)。厚みは 1.0 m とし、この方向に熱の移動はないと仮定した。材料定数には  $k_c = 2.0 \text{ kcal/m}^\circ\text{C}$ ,  $k_s = 60.0 \text{ kcal/m}^\circ\text{C}$  を用い、境界条件として上辺には  $T_c = 1000^\circ\text{C}$ ,  $h = 24 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ , 下辺には  $T_c = 15^\circ\text{C}$ ,  $h = 8 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  を与

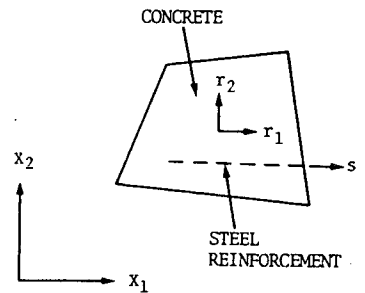


図-1 鉄筋を埋め込んだ有限要素

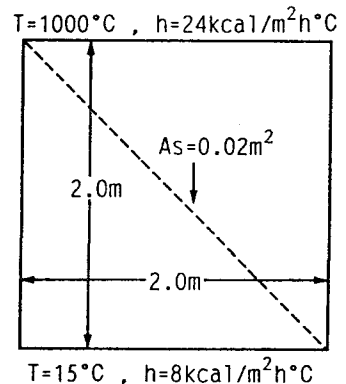
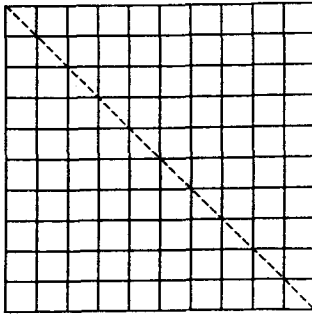
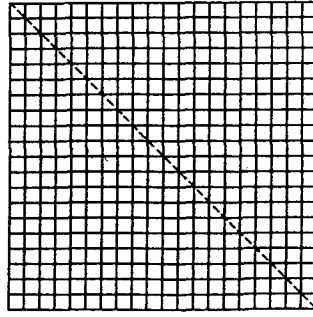


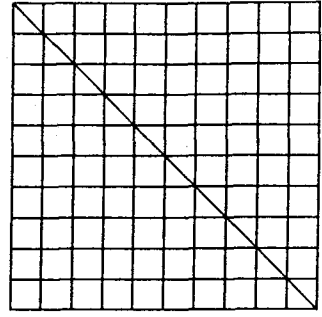
図-2 コンクリート板



(a)



(b)



(c)

図-3 要素分割

えた。また、左右の辺は断熱境界であると仮定した。

解析には図-3に示す3種類の要素分割を用いた。(a)は9節点四角形要素に埋め込み鉄筋モデルを適用したものであり、(b)では低次要素(4節点四角形要素)に埋め込み鉄筋モデルを適用している。さらに、この鉄筋モデルの解析精度を検討するため、3節点棒要素で鉄筋をモデル化し、6節点三角形要素と9節点四角形要素でコンクリートをモデル化した、いわゆる離散鉄筋モデルでも解析を行った。この場合の要素分割を示すのが(c)である。この3種類の要素分割では、要素数こそ異なるものの、節点数は441で一定となっており、すべて同じ自由度数を有している。

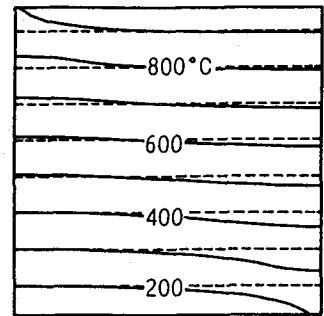


図-4 温度分布

計算結果として等温線を図-4に実線で示しているが、モデル化の違いによる差は全く生じなかった。この解析例では鉄筋が節点を結ぶように要素分割されているため、次に、節点の位置を鉄筋からずらした要素分割を用いて計算を行ったが、その場合にも同じ等温線図が得られた。これらの結果より、埋め込み鉄筋モデルは熱伝導解析において有効であること、およびこの鉄筋モデルは低次要素にも適用できることが結論づけられる。また図-4には無鉄筋の場合の温度分布を破線で示しているが、この図より、鉄筋を挿入すれば高温部では温度が下がり、低温部では温度が上昇する傾向のあることが理解される。

文献2)では埋め込み鉄筋モデルを高次要素に適用するよう示唆しているが、本研究では低次要素にも十分適用可能であると結論づけている。低次要素には、全体座標から局所座標が解析的に求められる、計算量を減らす工夫が容易にできる<sup>3)</sup>などのメリットがあり、この結論は計算速度を問題にする際には重要になると思われる。

#### 参考文献

- 1) 山口栄輝・太田俊昭・奥石正巳・川野清：コンクリート構造物の有限要素解析における埋め込み鉄筋モデルについて、構造工学論文集, Vol.36A, 1990年。
- 2) ASCE Committee on Concrete and Masonry Structures : A state-of-the-art report on finite element analysis of reinforced concrete, Task Committee on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, ASCE Spec. Publ., 1981.
- 3) Koh, B.C., and Kikuchi, N. : New improved hourglass control for bilinear and trilinear elements in anisotropic linear elasticity, Comput. Meths. Appl. Mech. Engrg., Vol.65, pp.1-46, 1987.