

遺伝的操作による2次元熱伝導逆解析に関する研究

2-DIMENSIONAL NONLINEAR INVERSE HEAT TRASFER ANALYSIS WITH GENETIC OPERATION

中村秀明*, 江本久雄**, 王 桂萱***, 宮本文穂****

Hideaki NAKAMURA, Hisao EMOTO, Wang Guixuan and Ayaho MIYAMOTO

*博士(工学) 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

**修士(工学) 山口大学大学院 理工学研究科博士後期課程システム工学専攻

***博士(工学) 大連大学教授 土木情報技術研究所

****工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科

Controlling thermal cracking caused by the heat of hydration of cement in the massive concrete structure is necessary to predict the distribution of temperature in the concrete structure. Numerical methods such as FEM have been applied on thermal prediction problem with the spread of computer in recent years. However, the input data of thermal properties, such as the thermal conductivity of concrete has a direct influence on the precision of analysis. The input data necessary to analyze thermal distribution of concrete are calorific character, heat conductivity, heat-transfer coefficient and specific heat. It is not always able to get reliable thermal properties in the field.

The purpose of this paper is to estimate thermal properties of concrete using the genetic algorithm and FEM.

Key Words: Inverse analysis, Hear transfer, Genetic algorithm(GA), Thermal properties

1. はじめに

耐久性のある構造物を造ることは、建設技術者の責務であり、コンクリート構造物のひび割れの抑制に対して関心が高まっている。コンクリート構造物のひび割れの発生を予測するためには、まず始めに温度解析を行い、その結果を基に温度応力解析が行われる。これら数値解析の精度は、入力される材料特性値によるところが大きく、正確な材料特性値を入力しなければ、正確な解析結果は得られない。コンクリート構造物の温度解析に必要な熱特性値としては、コンクリートの発熱特性、コンクリートおよび地盤の熱伝導率、熱伝達率、比熱、密度などがあるが、これらは、コンクリートの配合や、コンクリートおよび地盤の湿潤状態などによって影響されるものであり、実際の現場において信頼性の高い熱特性値を得ることは非常に難しい。必要に応じて、実験室内での小試料を用いた室内試験などで、求められるが、試験方法自体定まったものがなく、また、小試料と実際の構造物では条件が大きく異なることから、特別な場合を除いて、既往のデータが用いられる場合が多い。

コンクリート構造物の現場での熱特性値を逆解析により求めた研究もある。近久ら¹⁾は、有限要素法と非線形計画法を用いた逆解析によりコンクリートの熱伝達率を求めている。松井、西田^{2,3)}らは、1次元問題を対象にGauss-Newton法を用いて複数の熱特性の同定を行っている。著者ら⁴⁾も拡張カルマンフィルタと有限要素法により熱伝導率の同定を行っている。これらの逆解析によって熱特性値の同定を行った場合には、同定された

熱特性値が、一般的に使われている値とかけ離れている場合が多々ある。これは、計測値や推定される熱特性値以外に設定した熱特性値が誤差を持っており、この影響が推定される熱特性値に凝集されるためである。

そこで、本研究では、2次元非定常熱伝導有限要素解析と遺伝的操作を組合せた逆解析手法により、推定する熱特性値以外の変動もある程度許容しながら、熱特性値の同定を行う方法について提案する。

2. 遺伝的操作による熱伝導逆解析手法

(1) コンクリートの熱伝導解析

一般に有限要素法で離散化された非定常熱伝導方程式は、次のように表すことができる。

$$[K]\{\phi\} + [C]\left\{\frac{\partial \phi}{\partial t}\right\} = \{f\} \quad (1)$$

ここに、 $[K]$ 、 $\{\phi\}$ 、 $[C]$ 、 $\left\{\frac{\partial \phi}{\partial t}\right\}$ は、それぞれ熱伝導マトリクス、温度ベクトル、熱容量マトリクス、温度の時間変化率ベクトルであり、 $\{f\}$ は熱流束ベクトルである。

式(1)は、空間的には離散化されているものの、時間に関しては未処理のままである。そこでCrank-Nicolsonの方法により時間的な離散化を行うと、式(1)は最終的に次のようになる。

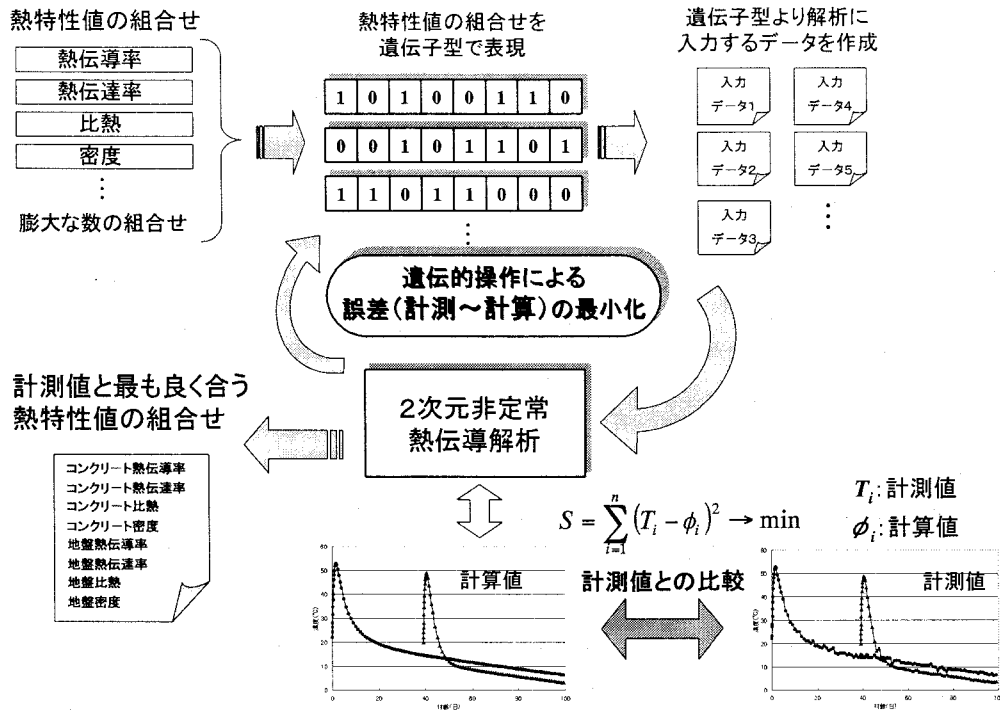


図-1 熱特性値の同定

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

式(2)を解くことにより各節点での温度が求まる。

(2) 遺伝的操作による熱特性値の同定

熱伝導逆解析では、施工後のコンクリート構造物のある位置で計測された温度と式(2)により解析された温度との残差平方和およびペナルティの和 S (目的関数) が最小となるように熱特性値を同定する。

$$S = \sum_{i=1}^n (T_i - \phi_i)^2 + \alpha \times \text{Penalty} \rightarrow \min \quad (3)$$

ここに、 T_i : 計測された温度 (°C)

ϕ_i : 解析された温度 (°C)

n : 計測点の数

α : ペナルティの重み

式(3)の最小化には、遺伝的アルゴリズムを用いる (図-1参照)。ここで、本研究では、逆解析で同定する熱特性値以外の熱特性値についてもある程度の変動を許容している。しかしながら、変動の許容をできるだけ少なくするため、設定値から離れた場合、すなわち変動が大きくなった場合には、ペナルティを与える。ペナルティの与え方を図-2に示す。ペナルティの重みは、係数 α でコントロールし、すなわち α が大きければ変動を許容せず、 α が小さければ変動をある程度許容する。

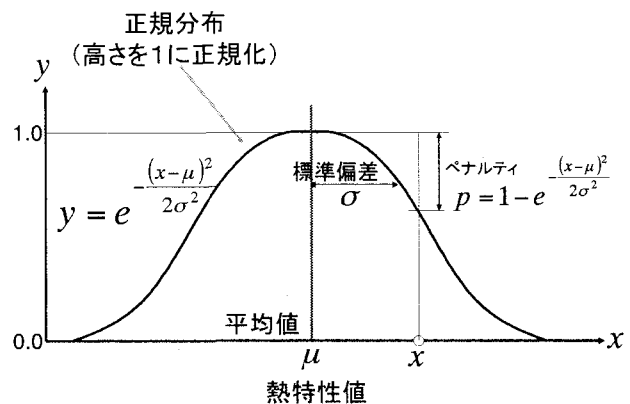


図-2 ペナルティの与え方

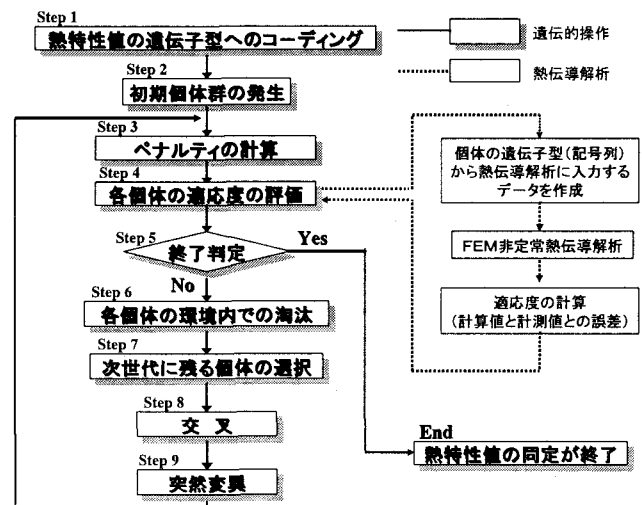


図-3 遺伝的アルゴリズムのフロー

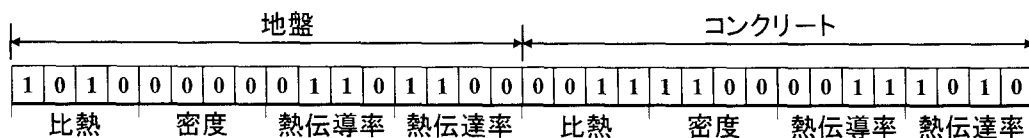


図-4 本研究で用いた遺伝子型

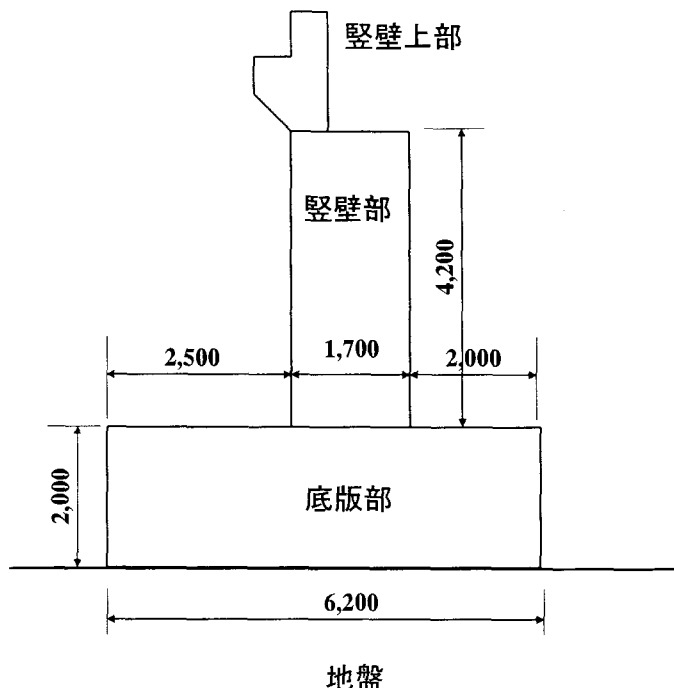


図-5 解析対象構造物

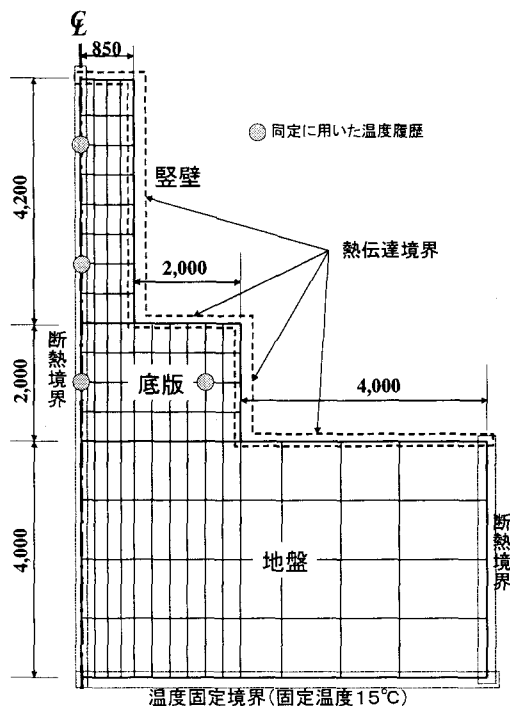


図-6 有限要素メッシュ

表-1 温度解析の解析条件

項目	単位	地盤	コンクリート
セメントの種類		——	高炉セメントB種
単位セメント量	kg/m ³	——	300
断熱温度上昇式		——	$Q_{\infty}=45.0, \quad r=0.957$
熱伝導率	W/m℃	2.0	2.7
密度	kg/m ³	2600	2500
比熱	kJ/kg℃	0.8	1.2
熱伝達率	W/m ² ℃	14.0	14.0
初期温度	℃	15.0	20
外気温	℃	20.0	

図-3に遺伝的アルゴリズムのフローを示す。遺伝的操作等は、通常の単純GA (Simple GA) と同じである。GAパラメータを表-2に示す。通常のGAと異なるのは、Step 3のペナルティの計算であり、このステップでは、同定する熱特性値以外の熱特性値について、ペナルティを計算し、Step 4の適応度評価の際に計算されたペナルティを考慮する。

(3) 遺伝子のコーディング

本研究で用いた遺伝子型を図-4に示す。遺伝子は、各熱特性値それぞれ4ビット16段階で表現されており、全体として32ビットとなっている。

表-2 GAパラメータ

世代数	40 世代
個体数	30 個体
遺伝子長	32 ビット
交叉率	0.4
突然変異率	0.1
選択法	エリート選択
交叉法	1 点交叉

3. 数値シミュレーションによる検証

現場での実計測データを使う前段階として、本手法の妥当性を数値シミュレーションにより検証する。

表-3 熱特性値の設定値

No	2進数		地盤				コンクリート			
			比熱	密度	熱伝導率	熱伝達率	比熱	密度	熱伝導率	熱伝達率
0	0000	-2 σ	0.64	2080.0	1.60	11.2	0.96	2000.0	2.16	11.2
1	0001		0.66	2154.3	1.66	11.6	0.99	2071.4	2.24	11.6
2	0010		0.69	2228.6	1.71	12.0	1.03	2142.9	2.31	12.0
3	0011		0.71	2302.9	1.77	12.4	1.06	2214.3	2.39	12.4
4	0100		0.73	2377.1	1.83	12.8	1.10	2285.7	2.47	12.8
5	0101		0.75	2451.4	1.89	13.2	1.13	2357.1	2.55	13.2
6	0110		0.78	2525.7	1.94	13.6	1.17	2428.6	2.62	13.6
7	0111	平均	0.80	2600.0	2.00	14.0	1.20	2500.0	2.70	14.0
8	1000	平均	0.80	2600.0	2.00	14.0	1.20	2500.0	2.70	14.0
9	1001		0.82	2674.3	2.06	14.4	1.23	2571.4	2.78	14.4
10	1010		0.85	2748.6	2.11	14.8	1.27	2642.9	2.85	14.8
11	1011		0.87	2822.9	2.17	15.2	1.30	2714.3	2.93	15.2
12	1100		0.89	2897.1	2.23	15.6	1.34	2785.7	3.01	15.6
13	1101		0.91	2971.4	2.29	16.0	1.37	2857.1	3.09	16.0
14	1110		0.94	3045.7	2.34	16.4	1.41	2928.6	3.16	16.4
15	1111	+2 σ	0.96	3120.0	2.40	16.8	1.44	3000.0	3.24	16.8

(1) 解析対象構造物

検討に用いた解析対象構造物を図-5に示す。このモデルは、橋台であり、厚さ2.0mの底版部、高さ4.2mの縦壁部および高さ1.8mの縦壁上部から構成されている。コンクリートの打ち込みはまず、底版部を打設した後、2週間後に縦壁部を打設している。使用したセメントは、高炉セメントB種で、単位セメント量は 300kg/m^3 とする。温度解析の解析条件を表-1に示す。

温度解析では、縦壁上部は、結果にあまり影響がないため、底版部、縦壁部のみを解析の対象とする。なお、断面は左右対称ではないが、解析を簡易に行うため、左右対称として解析を行っている。解析対象の有限要素メッシュを図-6に示す。地盤下部は、温度固定境界（固定温度 15°C ）とし、中央断面および地盤の端は断熱境界としている。

(2) 数値シミュレーションによる検証

数値シミュレーションによる検証では、まず始めに表-1で表される熱特性値を用いて温度解析を行い、その結果得られた温度履歴から、表-1に示す熱特性値が同定できるかどうかの検証を行った。遺伝子の各ビットには、表-3で示される熱特性値が設定されており、この値に対して同定を行った。同定で用いた温度履歴は、図-6中の4点を用いた。解析では、熱伝導率の同定を主としており、熱伝導率以外の熱特性値については、表-3で与えられた平均値をはずれた場合には、ペナルティを与えた。誤差、ペナルティおよび誤差とペナルティの和である目的関数の推移を図-7に示す。ほぼ25世代程度で収束している。

同定された熱特性値を表-3中に網掛けで示す。表-1で設定した値とほぼ同様の値となっており、熱特性値の同定はうまく行われていると思われる。コンクリートの比熱と密度が本来の値より外れているが、解析上、比熱および密度は、熱容量（比熱 $\times$ 密度）として扱われるため、このような結果になったものと思われる。

4. まとめ

本研究は、2次元非定常熱伝導有限要素解析と遺伝的操作を組合せた逆解析手法により、推定する熱特性値以外の変動もあ

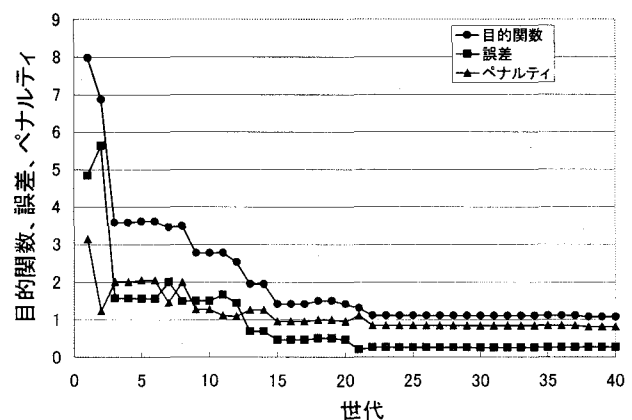


図-7 目的関数、誤差、ペナルティの推移

る程度許容しながら、熱特性値の同定を行う方法について提案を行った。数値シミュレーションでの検証であるが、本手法により熱特性値の同定が可能であると思われる。今後は、実データを用いた検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 近久博志, 津崎淳一, 荒井幸夫, 桜井春輔: 逆解析手法によるマスコンクリートの熱伝達係数の評価, 土木学会論文集, No.451/V-17, pp.39-47, 1992.8.
- 2) 松井邦人, 西田德行, 土橋吉輝, 潮田和司: 逆解析手法によるマスコンクリートの熱特性値の推定, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, 1994.6
- 3) 西田德行, 潮田和司, 土橋吉輝, 松井邦人: 現場計測データに基づくコンクリートの熱特性値の推定とその考察, 土木学会論文集, No.544/V-32, pp.89-100, 1996.8.
- 4) 中村秀明, 浜田純夫, 田中周次, 秋本悟志: 拡張カルマンフィルタによるコンクリート構造物の熱特性値の推定, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.1125-1130, 1992.6.