

# コンクリート構造物の熱パラメータ推定への PSOの適用

Estimation of Thermal Properties of Concrete Using Particle Swarm Optimization

中村 秀明\*・江本 久雄\*\*・河村 圭\*\*\*・宮本 文穂\*\*\*\*

Hideaki NAKAMURA, Hisao EMOTO, Kei KAWAMURA and Ayaho MIYAMOTO

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. However, the input data of thermal properties, such as the thermal conductivity of concrete has a direct influence on the precision of analysis. It is not always able to get reliable thermal properties in the field. The object of this paper is to estimate thermal properties of concrete using the Particle Swarm Optimization and FEM.

## 1. はじめに

耐久性の観点からコンクリート構造物のひび割れ制御に対して関心が高まっている。コンクリートの施工段階で発生するひび割れの多くは、セメントの水和熱に起因する温度ひび割れであり、コンクリート構造物に発生する温度ひび割れを予測するためには、まず始めに温度解析を行い、その結果をもとに温度応力解析が行われる。これら数値解析の精度は、入力す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。温度解析に必要な熱特性値は、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、密度などであるが、これらの値は、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。

そこで本研究では、信頼性の高い熱特性値を得るため、現場での温度計測結果に対して2次元非定常熱伝導有限要素解析とParticle Swarm Optimization (PSO)を組み合わせた逆解析手法を適用し、熱特性値の同定を試みた。PSOは、鳥の群れや魚の群泳など、群れを成して移動する生物の行動パターンを最適化に応用したもので、連続変数の最適化が可能である。

---

\* 山口大学助教授 理工学研究科環境共生系専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

\*\* (有)ミツワ電器 (〒755-0002 宇部市亀浦2-4-1)

\*\*\* 山口大学助手 理工学研究科環境共生系専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

\*\*\*\* 山口大学教授 理工学研究科環境共生系専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

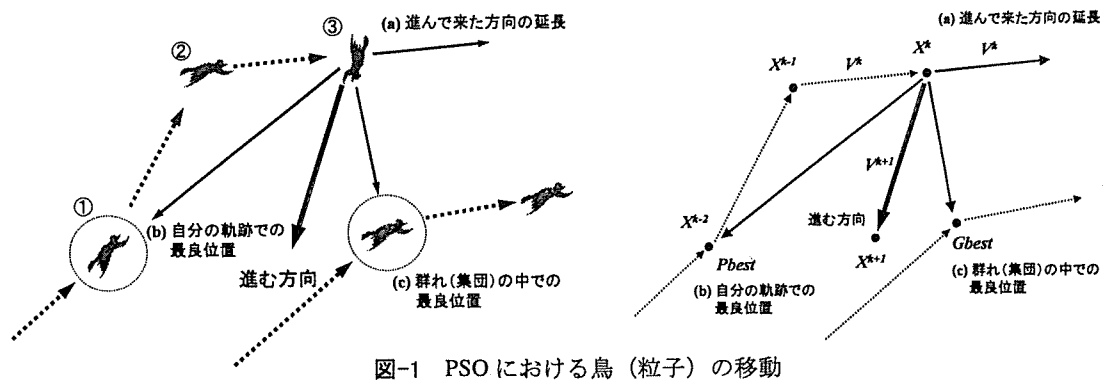


図-1 PSOにおける鳥（粒子）の移動

## 2. Particle Swarm Optimization (PSO)

### (1) PSOの概要

PSOは、Swarm Intelligence<sup>1)</sup>と云われる分野の一つである。Swarm Intelligenceは、日本語では群知能と訳され、社会性生物の習性をモデルとした手法であり、個々の個体は、単純な行動原理に従っているだけなのに、それが群れを成すと高い知性を発揮するというものである。PSOは、鳥の群れや魚の群泳など、群れを成して移動する生物の行動パターンを最適化に応用したもので、1995年にJames KennedyとRussell Eberhart<sup>2)</sup>によって提案された。PSOは、概念が非常にシンプルであり、また、種々の問題への適用も比較的簡単であることから、最近注目を集めている。

### (2) PSOの基本的アルゴリズム

Kennedyらによって提案されたPSOの基本的概念を以下に示す。

- ・ 多次元の解空間を粒子（Particle）が群れを成して動き廻り、その移動の過程で最適な位置（最適解）を見つける。
- ・ それぞれの粒子は、多次元空間の点として扱われ、自己の移動軌跡および他の粒子の移動軌跡によってそれぞれの粒子の移動が決まる。
- ・ それぞれの粒子は、解空間におけるこれまでの移動軌跡の中で最良の位置（Personal best position）を最適解として保持している。また、他の全ての粒子も含め、これまでの移動軌跡の中で集団内の最良の位置（Global best position）を最適解として保持している。

鳥の群飛行を例にPSOの基本的概念をさらに詳しく説明する。図-1にPSOにおける鳥（粒子）の移動を示す。鳥は、群れを成して飛んでおり、その中のある鳥は、①から②、②から③に飛んでいるものとする。ここで、③において次に飛ぶ方向について考える。PSOでは、次に飛ぶ方向として次の3つを考えている。

- 進んで来た方向の延長、
- 今までに自分が飛んできた軌跡の中で最良位置（Personal best position）の方向、
- 群れ（他の鳥を含めた集団全体）の中で最良位置（Global best position）の方向、

PSOでは、(a),(b),(c)の各ベクトルを足し合わせた方向が次に進む方向となる。次にPSOの実際の処理手順について図-2を参考に説明する。

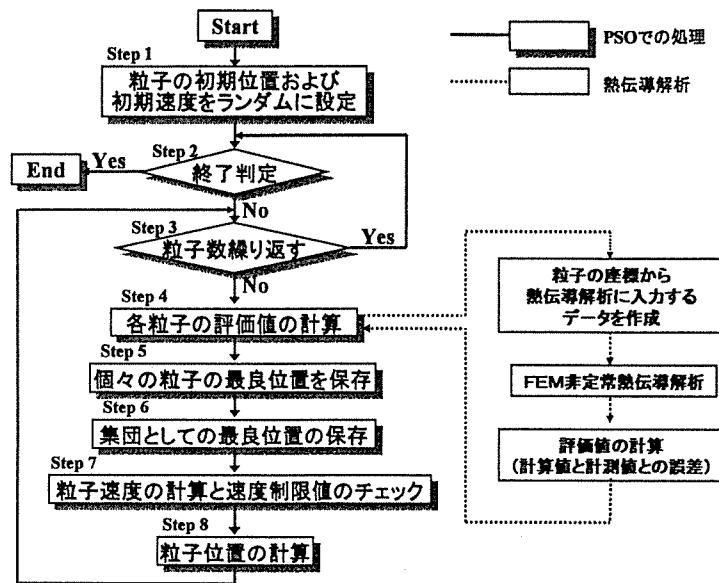


図-2 PSO のフローチャート

【Step 1】 粒子の初期位置および初期速度の設定

$n$  次元の解空間内において粒子の初期位置および初期速度をランダムに設定する。

【Step 2】 終了判定

最大計算ステップ数に達するか、あるいは解が収束したならば、計算を終わる。

【Step 3】 粒子ごとに計算

粒子ごとに Step 4～Step 8 を繰り返す。

【Step 4】 評価値の計算

個々の粒子の評価値を計算する。評価値が大きい(小さい)ほど、良い位置に居ると云える。

【Step 5】 個々の粒子の最良位置の保存

個々の粒子について、それぞれの粒子がこれまでに移動してきた軌跡の中での最良位置 (Personal best position : *Pbest*) での評価値との比較を行い評価値が大きい (小さい) ければその時の粒子の位置を *Pbest* に保存する。

【Step 6】 集団としての最良位置の保存

Step 5 で *Pbest* への保存が行われた場合、さらに集団全体におけるこれまでの最良位置 (Global best position : *Gbest*) での評価値との比較を行い、評価値が大きい (小さい) ければその時の粒子の位置を *Gbest* に保存する。

【Step 7】 粒子速度の計算と速度制限値のチェック

それぞれの粒子の速度を以下の式で計算する。

$$V_i^{k+1} = wV_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot \frac{(Pbest_i - X_i^k)}{\Delta t} + c_2 \cdot r_2 \cdot \frac{(Gbest - X_i^k)}{\Delta t} \quad (1)$$

ここに、

$V_i^{k+1}$  : 粒子*i*のステップ*k*+1における速度

$V_i^k$  : 粒子*i*のステップ*k*における速度

$X_i^k$  : 粒子*i*のステップ*k*における位置

$w$  : 粒子の慣性

$c_1, c_2$  : 認知的および社会的パラメータ

$r_1, r_2$  : 0~1の乱数

$\Delta t$  : タイムステップ

である。また、 $Pbest_i$ は、前述したように粒子*i*のこれまでの軌跡の中で一番評価値が大きい

(小さ)かった最良の位置であり、 $Gbest$ は全ての粒子における最良の位置である。

ここで、粒子の速度にはあらかじめ制限値 $V_{max}$ を設けておき、式(1)で計算された速度が $V_{max}$ を超えた場合には、式(1)の速度として $V_{max}$ を使う。

#### 【Step 8】 粒子位置の計算

それぞれの粒子の位置は、以下の式で計算する。

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \cdot \Delta t \quad (2)$$

全ての粒子について Step 4~Step 8 を繰り返す。

### (3) PSO におけるパラメータ

PSOで設定が必要なパラメータは、 $w, c_1, c_2, \Delta t, V_{max}$ の5つと、集団のサイズ*n*ならびに最大計算ステップ数 $k_{max}$ である。このうちタイムステップの $\Delta t$ は、単位時間を考えているので通常1が用いられる。 $w$ は粒子の慣性であり、大きな値を設定すると大域的動作となり、小さな値では局所的動作となる。 $c_1, c_2$ は、それぞれ認知的および社会的パラメータと呼ばれるもので、進む方向を選ぶとき、過去の自分経験に重みを置くか、それとも群れ(集団)の経験に重みを置くかのパラメータである。 $V_{max}$ は、速度を計算するときの制限値であり、大きく設定すると広い範囲の大まかな探索となり、小さく設定すると狭い範囲の細かな探索となる。集団のサイズ*n*は、遺伝的アルゴリズム(GA)<sup>3)</sup>における個体数と同様で、解空間の広さに応じて設定し、多く設定するほど細かい探索が可能になるが、計算時間が増大する。最大計算ステップ数は、十分収束すると思われる回数を設定する。なお、パラメータについては、安定性や収束性の理論的研究も行われている<sup>4)</sup>。本研究で設定したパラメータの一覧を表-1に示す。これらの値は、他の研究者らが設定している値を参考に、事前に行った何回かの試行により決定した。速度の制限値 $V_{max}$ については、始めは局所解に陥らないように大きな値を設定し、探索がある程度進んだ場合には、細かく探索できるように計算ステップに応じた可変値を採用している。

表-1 PSOのパラメータ

| パラメータ                | 設定した値                       |
|----------------------|-----------------------------|
| $w$ (粒子の慣性)          | 1.0                         |
| $c_1$ (認知的パラメータ)     | 2.0                         |
| $c_2$ (社会的パラメータ)     | 2.0                         |
| $\Delta t$ (タイムステップ) | 1.0                         |
| $V_{max}$ (速度の制限値)   | $\frac{Range(i)}{2} \sim 0$ |
| $n$ (粒子の数)           | 20                          |
| $k_{max}$ (最大計算ステップ) | 100                         |

※ $Range(i)$ : パラメータ*i*の範囲

### 3. PSOによる熱伝導逆解析

#### (1) コンクリートの熱伝導逆解析

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<sup>9)</sup>。

$$[K]\{\phi\} + [C]\left\{\frac{\partial\phi}{\partial t}\right\} = \{f\} \quad (3)$$

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(3)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(3)は最終的に次のようになる。

$$\left(\frac{1}{2}[K] + \frac{1}{dt}[C]\right)\{\phi(t+dt)\} = \left(-\frac{1}{2}[K] + \frac{1}{dt}[C]\right)\{\phi(t)\} + \{f\} \quad (4)$$

式(4)を解くことにより各節点での温度が求まる。

#### (2) PSO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(4)により計算された温度との残差平方和  $S$  (目的関数) が最小となるように熱特性値を同定する。

$$S = \sum_{i=1}^n (T_i - \phi_i)^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

ここに、 $T_i$  : 計測された温度 (°C)

$\phi_i$  : 計算された温度 (°C)

$n$  : 計測点の数

である。ここで、式(5)の最小化に、PSOを用いる。

PSOでは、同定する熱特性値の数を次元とする解空間をParticle (粒子) が群れを成して飛び廻り、その移動の過程で最適な熱特性値が同定される。例えば、熱伝導率、熱伝達率、熱容量の3つの熱特性値を同定する場合には、3次元の解空間となる。PSOによる同定では、あらかじめ解空間の範囲を設定しておくため、解空間をはずれた極端な値が同定されることはない。また、座標そのものが最適値 (同定値) になるので、遺伝的アルゴリズムのように2進数等へのコーディングの必要がない。

表-2 使用したコンクリートの配合と打込み日程

| 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      | 底版     | 打設     | 型枠の解体 |
|------------|----------|--------------------------|-----|-----|------|--------|--------|-------|
|            |          | セメント                     | 水   | 細骨材 | 粗骨材  |        |        |       |
| 54.0       | 44.8     | 299                      | 161 | 799 | 1045 | 11月18日 | 11月24日 |       |
|            |          |                          |     |     |      | 12月15日 | 12月22日 |       |

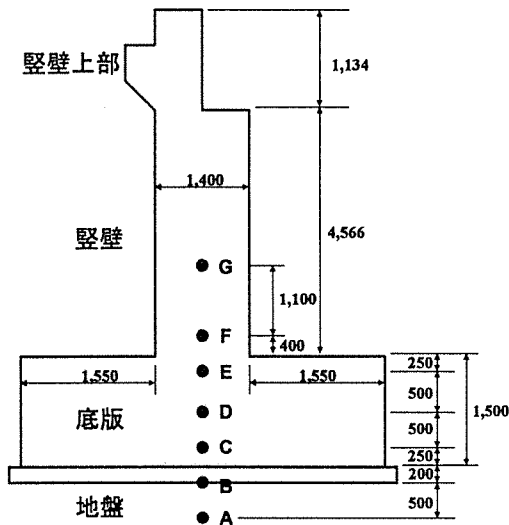


図-3 対象構造物 (壁式橋台)

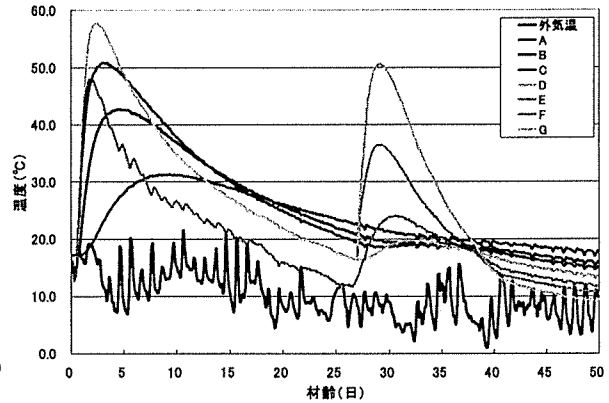


図-4 計測された構造物の温度履歴

#### 4. 実計測データによる熱特性値の同定

実計測データからの熱特性値の同定例として図-3に示す壁式橋台の熱特性値の同定を行う。この壁式橋台は、平成15年秋に福岡市に打込まれたもので、使用したセメントは、高炉セメントB種である。使用したコンクリートの配合と打込み日程を表-2に示す。温度の計測は、図-3中のA～Gの点で行われている。計測されたA～Gおよび外気温の温度履歴を図-4に示す。図-4中の計測点Eにギザギザが見られるのは、計測点Bは底版の表面付近であり、縦壁が打込まれるまでは外気温の影響を受けるためである。同定には実測外気温を用いているため同定に及ぼす影響は少ないと考えられる。

解析では、図-3の壁式橋台の縦壁上部を除き、左右対称の構造物として図-5のような有限要素メッシュを用いて、最小時間間隔3時間、最大時間間隔12時間のタイムステップで解析を行った。同定は、計測期間の50日間のデータを用いて行った。PSOによる逆解析で同定を行う熱特性値は、地盤およびコンクリートの熱伝導率と熱容量、型枠の熱伝達率、地盤およびコンクリートの熱伝達率の計7つである。断熱温度上昇特性については、今回のケースでは、断熱温度上昇試験が別途行われており、同定パラメータ数が増えることによる精度低下を防ぐため、断熱温度上昇試験の試験結果を用いた。温度解析の解析条件を表-3示す。PSOでは、これらの7つを次元とする解空間を粒子が飛び回り、実測値と計測値との差(式(5)に示す残差平方和)が一番小さくなるような位置を見つける問題となる。

表-3 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 <sup>3</sup>   | —    | 299                             |
| 断熱温度上昇式 |                     | —    | $Q_{\infty}=48.8, \gamma=0.696$ |
| 熱伝導率    | W/m°C               | 同定   | 同定                              |
| 密度      | kg/m <sup>3</sup>   | 同定   | 同定                              |
| 比熱      | kJ/kg°C             | 同定   | 同定                              |
| 熱伝達率    | W/m <sup>2</sup> °C | 同定   | 露出面：同定 型枠：同定                    |
| 初期温度    | °C                  | 16.0 | 16.0                            |
| 外気温     | °C                  | 実測値  |                                 |

※網掛け部分は、同定する熱特性値

※コンクリート密度と比熱は、熱容量（密度×比熱）として同定

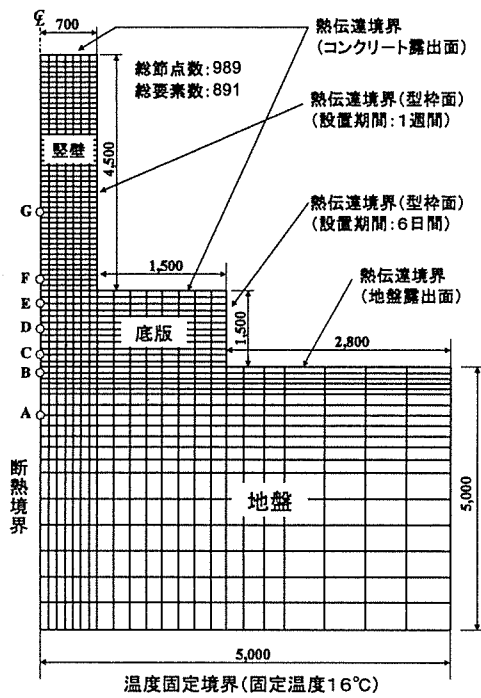


図-5 有限要素メッシュ

表-4 同定された熱特性値

|        |           | 同定された値 |                      | 解空間の設定値   |
|--------|-----------|--------|----------------------|-----------|
| コンクリート | 熱伝導率      | 3.40   | W/m°C                | 1.0~5.0   |
|        | 熱容量       | 5000   | kJ/m <sup>3</sup> °C | 1000~5000 |
|        | 熱伝達率(型枠)  | 12.2   | W/m <sup>2</sup> °C  | 1.0~20.0  |
|        | 熱伝達率(露出面) | 13.4   | W/m <sup>2</sup> °C  | 1.0~20.0  |
| 地盤     | 熱伝導率      | 2.2    | W/m°C                | 1.0~5.0   |
|        | 熱容量       | 3080   | kJ/m <sup>3</sup> °C | 1000~5000 |
|        | 熱伝達率(露出面) | 6.0    | W/m <sup>2</sup> °C  | 1.0~20.0  |

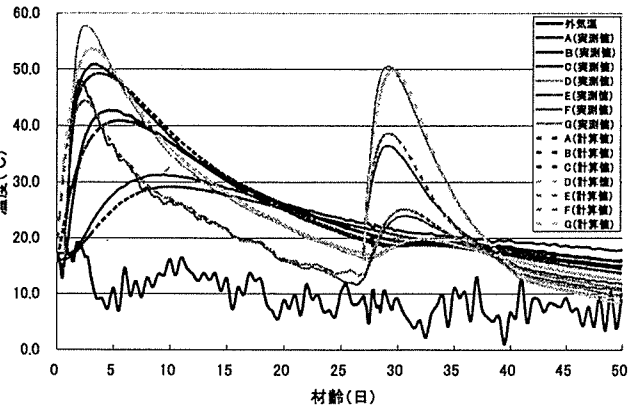


図-6 実測値と同定値を使った計算値との比較

同定された熱特性値を表-4に示す。また、実測値と同定された熱特性値を用いて解析した計算値との比較を図-6に示す。図-6によると同定された熱特性値を用いて解析した計算値は、ピーク温度が異なっているものの実測値と比較的良く一致している。同定された熱特性値と一般的に使われている値との比較を表-5に示す。一般的な値として用いられているものは、試験室で求められたものが多く、実規模コンクリートのものとは異なることが考えられる。またコンクリートの若材齢時の熱特性値は、硬化時のものと若干異なっている。本研究で同定したコンクリートの熱伝導率は、一般的な値よりも大きな値になっている。コンクリートの熱容量については、一般的な値よりもかなり大きな値となっている。コンクリートの密度を2,500kg/m<sup>3</sup>程度と仮定すると、ほぼ2倍近い値となっている。本研究での発熱モデルは、全断面で断熱状態と同様の発熱が起こると仮定しているが、実際は、

表-5 同定された熱特性値と一般的な熱特性値との比較

|                           |                                 | 同定値   | ひび割れ制御指針 <sup>6)</sup> | 示方書 <sup>7)</sup> | マスコン報告書 <sup>8)</sup> | 一般的な値 |
|---------------------------|---------------------------------|-------|------------------------|-------------------|-----------------------|-------|
| コン<br>ク<br>リ<br>ー<br>ト    | 熱伝導率 (W/m <sup>2</sup> C)       | 3.40  | 1.51~3.61              | 2.6~2.8           | 2.5~2.9               | 2.7   |
|                           | 比熱 (kJ/kg°C)                    | 5,000 | 0.884~1.047            | 1.05~1.260        | 1.13~1.30             | 1.2   |
|                           | 密度 (kg/m <sup>3</sup> )         |       |                        |                   |                       |       |
|                           | 熱伝達率 (型枠) (W/m <sup>2</sup> C)  | 12.2  | 2.9~11.6               | 8 (合板)            | —                     | 8     |
|                           | 熱伝達率 (露出面) (W/m <sup>2</sup> C) | 13.4  |                        | 14 (散水)           | 9.3~12.8              | 14    |
| 熱伝導率 (W/m <sup>2</sup> C) | 2.2                             | —     | 1.7~5.2                | —                 | 3                     |       |
| 地<br>盤                    | 比熱 (kJ/kg°C)                    | 3,080 | —                      | 0.71~0.88         | —                     | 0.8   |
|                           | 密度 (kg/m <sup>3</sup> )         |       | —                      | 2600~2700         | —                     | 2650  |
|                           | 熱伝導率 (W/m <sup>2</sup> C)       | 6.0   | —                      | —                 | —                     | 14    |

表面付近は、温度がそれほど上がらないため、発熱が抑えられる傾向がある。しかしながら、本研究で使っている発熱モデルは、全断面で同じ発熱が起こると考えているので、このように大きな熱容量となったものと思われる。熱伝達率については、露出面より型枠（合板）の方が若干小さくなっており、ほぼ妥当的な値と云える。ただし、熱伝達率については、計測されている温度が断面の中心付近であり、表面付近の計測点がないため、他の熱特性値に比べ信頼性は劣ると思われる。

地盤の熱特性値については、岩質や土質、砂質、空隙率や含水率等により大きく影響を受けるため、一般的な値を決めるのは難しいがほぼ妥当な値であると思われる。

## 5. まとめ

本研究では、2次元非定常熱伝導有限要素解析とParticle Swarm Optimization (PSO)を組み合わせた効果的な逆解析手法を提案した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) PSOを用いた逆解析では、市販の汎用コードから得られた結果だけを用いて同定が行えるので、汎用コードを使った逆解析が可能である。
- (2) PSOは、確率的に最適化（同定）を行うために、同定された値が一意的に決まらないといった欠点がある。
- (3) 本研究で行った実計測データを用いた逆解析では、7パラメータの同時同定が可能であり、同定された熱特性値は、一般的な値より大きなものもあるが、ほぼ妥当な値が同定された。

## 参考文献

- 1) Kennedy, J., Eberhart, R. and Shi, Y. : *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- 2) Kennedy, J. and Eberhart, R. : Particle Swarm Optimization, *Proc. The 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, vol. IV, pp.1942-1948, 1995.
- 3) Goldberg, D. E. : *Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-wesley, 1989.
- 4) Clerc, M. and Kennedy, J. : The Particle Swarm: Explosion, Stability, and Convergence in a Multi-Dimensional Complex Space, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, vol. 6, pp. 58-73, 2002.
- 5) 矢川元基 : 流れと熱伝導の有限要素法入門, 培風館, 1983.3.
- 6) 日本コンクリート工学協会 : マスコンクリートのひび割れ制御指針, pp.57-58, 1986.3.
- 7) 土木学会 : 2002年制定コンクリート標準示方書[施工編], pp.46-47, 2002.3
- 8) 日本コンクリート工学協会 : マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書, p.6, 1985.11.