

# 論文 コンクリートの上・下面部計測データを既知温度境界とした逆解析

潮田和司<sup>\*1</sup>・高橋誠二<sup>\*2</sup>・土橋吉輝<sup>\*3</sup>・松井邦人<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本論文は、より精度良くコンクリートの熱特性の同定を行うための逆解析手法を考案した。本逆解析手法の特徴は、計測点における温度データを既知温度境界とし、コントロールボリューム法を用いてコンクリート躯体内の温度を計算することである。コンクリートの上・下面部の計測データを既知温度境界とし温度解析すると、日射・放射のモデル化の影響、あるいは岩盤に関するパラメータの設定誤差の影響を受けずにコンクリート躯体内の温度を計算することができる。この解析温度を逆解析に使用することにより、精度高くコンクリートの熱特性を同定することができる。

**キーワード:** マスコンクリート、コントロールボリューム法、逆解析、輻射熱

## 1. はじめに

温度計測データからコンクリートの熱特性を同定する逆解析は、実構造物コンクリートの熱特性を評価するうえで有効な手段である。しかしながら、逆解析における解析モデルは実現象を正確にモデル化できないため、得られる同定値はモデル誤差の影響を受けたものとなっている。これまで著者らは、岩盤上に打設するスラブ状コンクリートを対象に逆解析を行ってきた<sup>1)~3)</sup>。これまで行ってきた逆解析方法は、岩盤に関するパラメータを既知パラメータ、コンクリート表面を対流熱伝達のみの熱伝達境界とした。このような逆解析で得られる同定値は、既知パラメータの設定誤差の影響を受ける。また、コンクリート表面では日射、放射等の輻射熱の影響が大きいことが指摘されているが<sup>4), 5)</sup>、同定値は輻射熱の影響も受けていると考えられる。

そこで、本論文は、日射・放射等の輻射熱に関するモデル化の影響、および岩盤に関するパラメータの設定誤差の影響を受けないでコンクリートの熱特性を同定する逆解析手法を考案した。考案した逆解析手法は、コンクリートの上・下面部の計測データを既知温度境界として温度

解析を行い、この解析温度を用いてコンクリートの熱特性を同定する。なお、温度解析にはコントロールボリューム法を、逆解析手法にはGauss-Newton法を用いている。

## 2. 温度計測データを利用した温度解析

### 2.1 コントロールボリューム法による温度解析

一般に、1次元非定常熱伝導方程式は次のように与えられる。

$$K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{Q} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 $K$ : 热伝導率、 $C$ : 比熱、 $\rho$ : 密度、 $\dot{Q}$ : 発熱特性である。ここで、発熱特性 $\dot{Q}$ は、岩盤は発熱しないため $\dot{Q}=0$ 、コンクリートはセメントの水和反応で熱が発生し、一般に次式を用いている。

$$\dot{Q} = \rho C \cdot Q_{\infty} \cdot \gamma \cdot e^{-\gamma t} \quad (2)$$

ここに、 $Q_{\infty}$ : 終局断熱温度上昇量、 $\gamma$ : 温度上昇速度に関する定数である。

本論文では、式(1)の熱伝導方程式をコントロールボリューム法で解く。コントロールボリューム法は、着目する節点と隣接する節点を含む要素で、着目する節点に流入・流出する熱

\*1 西松建設㈱技術研究所技術研究部土木技術研究課 工修 (正会員)

\*2 西松建設㈱中部支店

\*3 西松建設㈱技術研究所技術研究部土木技術研究課主任研究員

\*4 東京電機大学教授 理工学部建設工学科 Ph.D. (正会員)

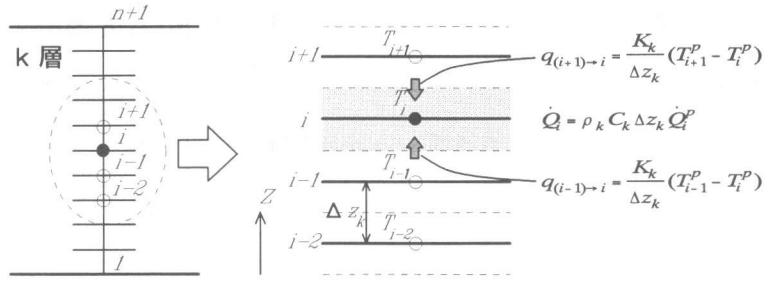


図-1 解析モデル

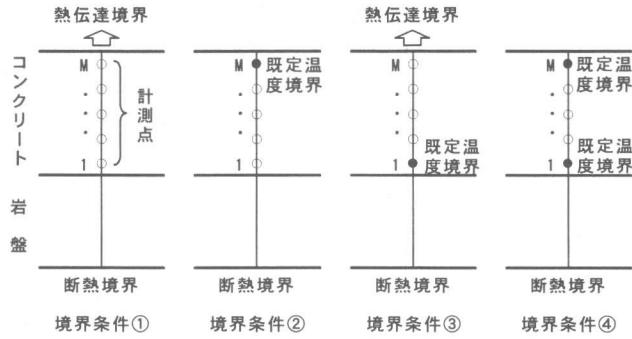


図-2 境界条件

エネルギーの収支を表したものである。いま、 $k$ 番目の層を要素厚 $\Delta z_k$ で $n$ 分割したモデルの温度解析を考える。解析モデルは図-1に示すとおりである。図-1に示す節点 $i$ でのエネルギー収支は次のようになる。

$$\rho_k C_k \Delta z_k \frac{T_i^P - T_i^{P-1}}{\Delta t} = \frac{K_k}{\Delta z_k} (T_{i-1}^P - T_i^P) + \frac{K_k}{\Delta z_k} (T_{i+1}^P - T_i^P) + \rho_k C_k \Delta z_k \dot{Q}_i^P \quad (3)$$

式(3)を書き直すと、

$$-\frac{K_k}{\Delta z_k} T_{i-1}^P + \left( \frac{\rho_k C_k \Delta z_k}{\Delta t} + \frac{2K_k}{\Delta z_k} \right) T_i^P - \frac{K_k}{\Delta z_k} T_{i+1}^P = \frac{\rho_k C_k \Delta z_k}{\Delta t} T_i^{P-1} + \rho_k C_k \Delta z_k \dot{Q}_i^P \quad (4)$$

となる。なお、 $p$ は時間ステップを表す。式(4)で得られた差分表示を系全体としてまとめると、各要素の代表温度を未知とした連立方程式が構成される。これを数値的に計算して解が得られる。

## 2.2 計測点を既知温度境界とした温度解析

コンクリート躯体内で温度データが得られる場合、この温度データを利用して温度解析を行うことができる。いま、図-1に示した節点 $i$ の温度は計測を行って分かっているものとする。この節点 $i$ の温度を既知温度( $T_i^P$ )とした既知温度境界とすると節点 $(i-1)$ での関係式は式(4)から次のようになる。

$$-\frac{K_k}{\Delta z_k} T_{i-2}^P + \left( \frac{\rho_k C_k \Delta z_k}{\Delta t} + \frac{2K_k}{\Delta z_k} \right) T_{i-1}^P = \frac{K_k}{\Delta z_k} T_i^P + \frac{\rho_k C_k \Delta z_k}{\Delta t} T_{i-1}^{P-1} + \rho_k C_k \Delta z_k \dot{Q}_{i-1}^P \quad (5)$$

同様に、節点 $(i+1)$ での関係式も得られる。既知温度境界とした節点を除いた未知節点数分の連立方程式が構成される。これを数値的に計算して解が得られる。

## 2.3 境界条件の設定および逆解析

本論文では、岩盤上に打設するスラブ状コンクリートを対象とする。コンクリート躯体内では $M$ 個の温度計測点が設けられているものとする。温度計測データを利用して温度解析する場合、例えば、図-2に示す境界条件で温度解析を行うことができる。境界条件①は一般に用いている境界条件で、コンクリート躯体内の温度は、コンクリート表面における熱伝達のモデル化および岩盤の熱物性の影響を受ける。境界条件②はコンクリート表面に近い計測点を既知温度境界とするモデルである。フィールドでの温度計

表-1 解析条件

項目	記号	単位	基準値
コンクリートの熱伝導率*	$K_c$	$W/m \cdot ^\circ C$	2.67
コンクリートの熱容量*	$\rho_c C_c$	$MJ/m^3 \cdot ^\circ C$	2.70
終局断熱温度上昇量*	$Q_\infty$	$^\circ C$	46.0
温度上昇速度に関する定数*	$\gamma$	$1/day$	1.100
岩盤の熱伝導率	$K_R$	$W/m \cdot ^\circ C$	2.33
岩盤の熱容量	$\rho_R C_R$	$MJ/m^3 \cdot ^\circ C$	2.07
コンクリートの初期温度	$T_{C0}$	$^\circ C$	20.0
岩盤の初期温度	$T_{R0}$	$^\circ C$	15.0
外気温	$T_{air}$	$^\circ C$	実測値
露点温度	$T_{dp}$	$K$	実測値
熱伝達率*	$h_c$	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	7.33
アルベド	$\alpha$	—	0.3
射出率	$\varepsilon$	—	0.8

注) \* : 同定パラメータ

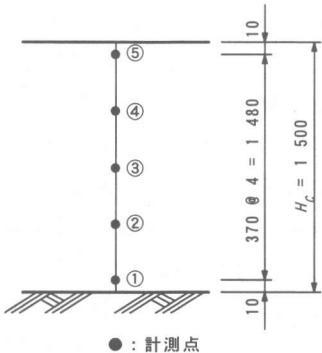


図-3 対象構造物

測のように輻射熱の影響を受ける場合、輻射熱をモデル化した熱伝達境界とする必要がある。しかし、境界条件②は輻射熱をモデル化する必要がない。境界条件③はコンクリート下面に近い計測点を既知温度境界とするモデルである。このモデルにより、曖昧な岩盤の熱物性を設定せずにコンクリートの温度を計算することができる。境界条件④は、境界条件②と③を組み合わせたモデルで、熱伝達のモデル化および岩盤の熱物性の影響を受けず、コンクリートの温度を計算することができる。

ここで、コンクリートの温度計測データからコンクリートの熱特性を同定することを考える。コンクリートの熱特性を同定する場合、同定精度を上げるために、できる限りモデル誤差を少なくすることが重要である。これまで、境界条件①で逆解析を行ったが<sup>1)～3)</sup>、このモデルで同定したコンクリートの熱特性は、輻射熱および岩盤の熱物性の影響を受ける。そこで、境界条件④で逆解析を行うことにより、輻射熱および岩盤の熱物性のモデル化の影響を受けずに、コンクリートの熱特性を同定することができる。

### 3. 数値計算例

#### 3.1 輻射熱を考慮した温度解析

数値計算例として、岩盤上に打設するスラブ

状コンクリートの温度解析を行う。解析モデルは、岩盤の厚さを5m、コンクリート厚さを1.5mとし、岩盤底面を断熱温度境界、コンクリート表面を輻射熱を考慮した熱伝達境界として、1次元でモデル化した。対象構造物を図-3に示す。なお、図-3中の①～⑤は計測点を表す。

コンクリート表面では、対流熱伝達、日射、放射熱あるいは水分蒸発による気化熱による熱収支があることが知られている<sup>4), 5)</sup>。軸体表面における熱収支 $q$  [ $W/m^2$ ]は以下のように表すことができる。

$$q = q_{con} + q_{sol} + q_{sky} \quad (6)$$

ここで、 $q_{con}$  は対流熱伝達量 [ $W/m^2$ ]、 $q_{sol}$  は正味全日射量 [ $W/m^2$ ]、 $q_{sky}$  は正味赤外線放射量 [ $W/m^2$ ] である。ここで、正味とは、(入射量-反射量) を意味する。なお、本論文では、水分の気化熱による熱損失量は、不明な点が多いため考慮しない。

式(6)中の右辺の各項は以下に示す式から算出できる。

$$q_{con} = h_c (T_{air} - T_s) \quad (7) \quad q_{sol} = (1 - \alpha) (S_0 \downarrow) \quad (8)$$

$$q_{sky} = \varepsilon \sigma (T_{sky}^4 - T_s^4) \quad (9)$$

$$T_{sky} = T_{air} \left[ 0.8 + \frac{T_{dp} - 273}{250} \right]^{0.25} \quad (10)$$

ここに、 $h_c$  は対流熱伝達率 [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]、 $T_{air}$  は外

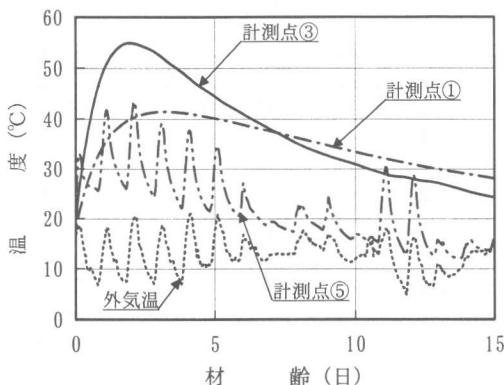


図-4 コンクリート軸体内の温度履歴

気温[℃],  $T_s$ はコンクリートの表面温度[℃],  $\alpha$ はアルベド,  $S_0 \downarrow$ は上からの全日射量[W/m<sup>2</sup>],  $\varepsilon$ は射出率,  $\sigma$ はステファン・ボルツマン定数( $=5.67 \times 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^4 \cdot \text{K}^4)]$ ),  $T_{sky}$ は天空温度[K],  $T_{dp}$ は露点温度[K]である。

式(7)～(10)中の全てのパラメータが温度解析に必要である。このうち、外気温( $T_{air}$ )、上からの全日射量( $S_0 \downarrow$ )、露点温度( $T_{dp}$ )は、文献4)の実験で得られた実測値を用いた。また、アルベド( $\alpha$ )、射出率( $\varepsilon$ )も文献4)の実験で得られた値を用いた。熱伝達率( $h_c$ )は、輻射熱の影響が考慮されていない値を用いるのが望ましいため、文献6)から以下の式を用いて設定した。

$$h_c = 3.1 + 2.1\nu \quad [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{°C}] \quad (11)$$

なお、 $\nu$ は風速であり2m/sとした。その他、コンクリートおよび岩盤の熱特性値と初期温度、コンクリートの断熱温度上昇特性は、文献2)を参考に設定した。ここで、温度解析で使用した各パラメータの設定値を表-1に示す。

表-1の値を用いて温度解析した結果を図-4に示す。

### 3.2 コンクリート熱特性の同定

本論文は、コンクリートの温度計測データを用いて、コンクリートの熱特性を精度良く同定することを目的としている。コンクリート軸体表面では対流熱伝達、日射、放射による熱収支がある。しかし、これまで行ってきた温度解析および逆解析<sup>1)～3)</sup>は、対流熱伝達のみしか考慮

しなかった。そのため、コンクリート表面に近い計測点で実測温度と解析温度を比較した場合、あまり良く一致しなかった。また、実測温度を用いた逆解析では、コンクリートの熱特性の同定値が標準値と乖離した値となつた例があつた<sup>1)</sup>。また、岩盤に関するパラメータを既知パラメータとして逆解析を行つたが、既知パラメータに誤差が含まれる場合、同定値はこれらの誤差の影響を受けた値となる<sup>2)</sup>。

そこで本論文は、コンクリート表面の熱収支(対流熱伝達、日射、放射)の影響および岩盤に関するパラメータの設定誤差の影響を受けない逆解析手法を2.で提案した。2.で提案した逆解析手法をここで検証する。輻射熱の影響を受けたフィールドでの温度データを想定し、逆解析に使用した温度データは3.1で解析した計測点①～⑤の温度データとした。岩盤パラメータの設定誤差の影響を調べるために、表-1に示した岩盤の熱伝導率、熱容量および初期温度に関し、誤差を加えた値を入力し逆解析を行つた。なお、岩盤パラメータの設定誤差の大きさは、示方書に提示されている岩盤の熱伝導率、熱容量の範囲を参考に設定した。岩盤の熱伝導率は基準値に対して50%大きい値の3.50[W/m·°C]、熱容量は基準値に対して10%大きい値の2.28[MJ/m<sup>2</sup>·°C]、岩盤の初期温度は基準値に対して50%小さい値の7.5[°C]とした。そこで、2.で提案した逆解析手法を検証するために設定した条件は、以下のとおりである。

#### [境界条件]

(a) コンクリート表面を対流熱伝達のみの熱伝達境界とした場合(図-2の境界条件①)

(b) コンクリート表面部の計測データ(⑤)を既知温度境界とした場合(図-2の境界条件②)

(c) コンクリート表面部の計測データ(⑤)と下面部の計測データ(①)を既知温度境界とした場合(図-2の境界条件④)

#### [岩盤パラメータの設定誤差]

(i) 岩盤パラメータの設定誤差なし

(ii) 岩盤パラメータの設定誤差あり

表-2 逆解析の解析ケース

ケース	境界条件		岩盤パラメータ誤差		コメント	
	(a)	(b)	(c)	(i)	(ii)	
1	○			○		日射、放射が同定結果に及ぼす影響を評価
2	○				○	ケース1に加え、岩盤パラメータの誤差が同定結果に及ぼす影響を評価
3		○		○		日射、放射が同定結果に及ぼさないことを評価
4	○				○	岩盤パラメータ誤差のみが同定結果に及ぼす影響を評価
5			○	○		日射、放射が同定結果に及ぼさないことを評価
6			○		○	日射、放射および岩盤パラメータ誤差が同定結果に及ぼさないことを評価

よって、解析ケースは、表-2に示すように上記の条件の組合せの6ケースとなる。

表-2に示した各ケースで逆解析を行い、基準値とのずれを比較し提案した逆解析手法の検証を行った。解析結果を表-3に示す。

表-3から、ケース1は、日射および放射の影響を受け同定結果が基準値からずれている。ケース2は、ケー

ス1に加え岩盤パラメータの設定誤差の影響を受けている。ケース3は、コンクリート表面部の計測データを既知温度境界とすることにより、日射、放射の影響を受けずに基準値に収束している。しかし、ケース4は、ケース3と同じ境界条件であるが岩盤パラメータの設定誤差があるためこれらの影響を受け基準値とずれている。ケース5,6は、日射、放射および岩盤パラメータの設定誤差の影響を受けずに基準値に収束している。

したがって、コンクリート表面部の計測データおよび下面部の計測データを既知温度境界とし逆解析を行えば、日射、放射および岩盤パラメータの設定誤差の影響を受けずに、精度良くコンクリートの熱特性を同定できる。

なお、計測点⑤において、表-1の基準値を用いて計算した温度（輻射熱考慮）とケース1の同定結果（表-3）を用いて計算した温度（対流熱伝達のみ考慮）を比較した図を図-5に示す。図-5から、計測点⑤では輻射熱の影響の差が顕

表-3 同定結果

ケース	$K_c$ (W/m°C)	$\rho_c C_c$ (MJ/m³·°C)	$Q_\infty$ (°C)	$r$ (1/day)	$h_c$ (W/m²·°C)
基準値	2.67	2.70	46.0	1.100	7.33
1	2.56	2.44	48.9	1.108	9.58
2	4.40	4.46	47.3	1.092	16.75
3	2.67	2.70	46.0	1.100	—
4	4.61	4.89	44.7	1.177	—
5	2.67	2.70	46.0	1.100	—
6	2.67	2.70	46.0	1.100	—

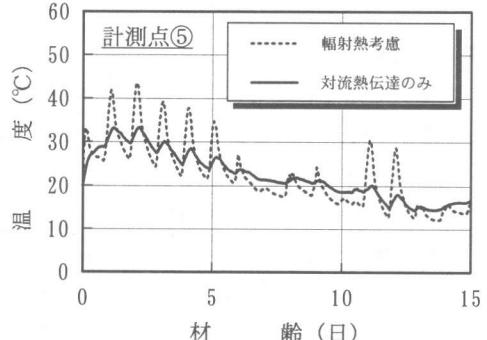


図-5 境界条件の違いによる温度比較

著に現れていることがわかる。すなわち、輻射熱の影響を受けている温度データにもかかわらず、対流熱伝達のみの熱伝達境界で逆解析を行うことが、コンクリートの熱特性を正確に同定できない要因となっている。

### 3.3 測点数の個数が逆解析に及ぼす影響

逆解析は、逆解析に使用する測点数の個数が少ないほど、不安定となったり、解が得られない場合がある。そこで、本論文で提案した逆解析手法において、測点数の個数が逆解析に及ぼ

表-4 測点数の個数が逆解析に及ぼす影響を検討するための解析ケースおよび解析結果

解析ケース	収束回数
I : 境界条件は(b)とし、測定データ①～④を使用した場合	10
II : " , 测定データ①を使用した場合	10
III : " , 测定データ③を使用した場合	14
IV : " , 测定データ④を使用した場合	10
V : 境界条件は(c)とし、測定データ②～④を使用した場合	10
VI : " , 测定データ②を使用した場合	10
VII : " , 测定データ③を使用した場合	11
VIII : " , 测定データ④を使用した場合	10

す影響を調べた。検討は表-4に示した8ケースで行い、収束回数および同定値を確認した。解析の結果、表-4に示した全てのケースは基準値に収束し、収束回数は表-4に示すとおりであった。すなわち、数値シミュレーションで検証した限りでは、測点数が1個でも基準値に収束し、また収束回数も1個以上用いた場合とほとんど変わらなかった。なお、ケースI～IVにおけるコンクリートの熱伝導率の収束過程を図-6に示す。

#### 4.まとめ

本論文をまとめると以下のようになる。

- (1) 温度計測データを既知温度境界とした逆解析手法を考案した。
- (2) コンクリート表面を対流熱伝達のみの熱伝達境界としてコンクリートの熱特性を同定した場合、同定値は日射および放射の影響を受けた値となる。また、岩盤に関するパラメータに設定誤差がある場合、同定値はそれらの影響も受ける。
- (3) コンクリート表面部の温度計測データを既知温度境界し逆解析を行うと、同定値は日射、放射の影響を受けない。
- (4) コンクリート下面部の温度計測データを既知温度境界とし逆解析を行うと、同定値は岩盤に関するパラメータの設定誤差の影響を受けない。

#### 【参考文献】

- 1) 西田徳行・潮田和司・土橋吉輝・松井邦人：

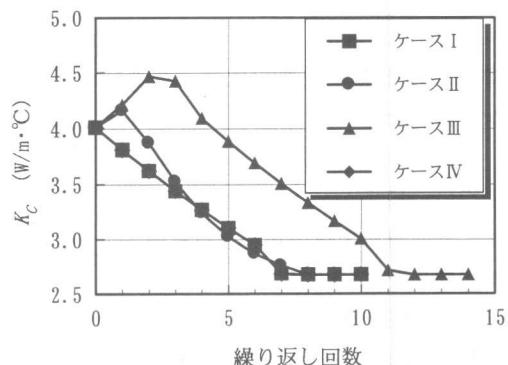


図-6 収束過程図（コンクリートの熱伝導率）

現場計測データに基づくコンクリートの熱特性の推定とその考察、土木学会論文報告集, No. 544/V-32, pp. 89-100, 1996.8

- 2) 潮田和司・西田徳行・土橋吉輝・松井邦人：既知パラメータのばらつきがマスコンクリートの熱特性値同定におよぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, pp. 1293-1298, 1996
- 3) 潮田和司・西田徳行・土橋吉輝・松井邦人：地盤の熱特性を含めたマスコンクリート熱特性の同定、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 2, pp. 1195-1200, 1999
- 4) 西田徳行・椎名貴快・松井邦人・Theodore F. Smith：気象現象の計測とコンクリート躯体温度への影響、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 2, pp. 1165-1170, 1999
- 5) 秋田宏・尾坂芳夫：日射を受けるコンクリート壁の温度分布に関する考察、土木学会論文集, 第378/V-6, pp. 147-155, 1987.2
- 6) B.Molineaux, B.Lachal, and O.Guisan: Thermal Analysis of Five Outdoor Swimming Pools Heated by Unglazed solar Collectors, Solar Energy, Vol.53, No.1, pp.21-26, 1994