

## 論文 地盤の熱特性を含めたマスコンクリート熱特性の同定

潮田和司\*1・西田德行\*2・土橋吉輝\*3・松井邦人\*4

要旨：本論文は、地盤の熱特性(熱伝導率、熱容量)を含めた逆解析手法を提案し、コンクリートの熱伝導率、熱容量および熱伝達率を精度良く同定することを試みた。しかし、地盤の熱特性を含めた逆解析は、少なくともコンクリートの熱伝導率、熱容量、地盤の熱伝導率および熱容量のうち1個以上のパラメータを既知としなければならない。上記目的を得るためには、提案した逆解析手法においてコンクリートの熱伝導率あるいは熱容量を既知として逆解析を行う必要があることがわかった。また、地盤の熱特性を含めた逆解析では、計測点を地盤中に少なくとも1個以上設けると逆解析が安定することがわかった。

キーワード：マスコンクリート、逆解析、地盤の熱特性、測定位置、同定精度

## 1. はじめに

温度測定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。このように逆解析から得られた熱特性値は、情報化施工を行う場合に有効に使用される。

これまで、温度解析に必要なコンクリートの熱特性は、室内試験結果や既往のデータを参考にして設定された。このように設定した熱特性値は、必ずしも実構造物コンクリートの熱特性値ではない。そこで著者等は、測定温度からコンクリートの熱特性を同定する逆解析についての研究を行った<sup>1)~4)</sup>。文献2)では、実構造物コンクリートの熱特性を同定した。文献3), 4)では、コンクリートの熱伝導率、熱容量および熱伝達率の同定精度は、終局断熱温度上昇量および温度上昇速度に関する定数の同定精度より劣ることを確認した。コンクリートの熱伝導率、熱容量および熱伝達率の同定精度が悪くなる原因は、逆解析時の地盤の熱伝導率、熱容量および初期温度の誤差の大きさに依存するためである。逆解析における地盤の熱伝導率および熱容量の誤差の大きさは、コンクリートの熱伝導率、

熱容量および熱伝達率の同定精度に線形で影響することも確認した。

そこで、本研究は、地盤の熱伝導率および熱容量に関する事前情報がなく、逆解析時のこれらの入力値の誤差が相当大きくなる場合に、コンクリートの熱伝導率、熱容量および熱伝達率を精度良く同定することを目的とした。また、地盤の熱伝導率および熱容量を精度良く同定することも目的とした。本論文では、既往の研究で行った5個(コンクリートの熱伝導率、熱容量、終局断熱温度上昇量、温度上昇速度に関する定数および熱伝達率)のパラメータ同定に加え、地盤の熱伝導率および熱容量を含めた7個のパラメータを同定する逆解析手法について述べた。しかし、上記7個のパラメータを全て同時に同定できない。少なくともコンクリートの熱伝導率、熱容量、地盤の熱伝導率および熱容量のうち1個以上のパラメータを既知としなければならない。本論文では、これら4個のパラメータの内、どのパラメータを既知とした場合が、最もコンクリートの熱伝導率、熱容量および熱伝達率を精度良く推定できるかを検討した。

\*1 西松建設(株)技術研究所技術部土木技術課 工修 (正会員)

\*2 西松建設(株)技術研究所技術部土木技術課係長 工博 (正会員)

\*3 西松建設(株)技術研究所技術部土木技術課主任研究員

\*4 東京電機大学教授 理工学部建設工学科 Ph. D. (正会員)

## 2. 地盤の熱特性を含めた逆解析手法

地盤上に打設したマスコンクリートの温度解析を行う場合、一次元でモデル化した熱伝導方程式は一般に式(1)～(7)で表すことができる。

[コンクリート]

$$\text{熱伝導方程式: } K_c \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + \dot{Q}(t) = \rho_c C_c \frac{\partial T_c}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{初期条件: } T_c(x, 0) = T_{c0} \quad (2)$$

$$\text{境界条件: } K_c \frac{\partial T_c}{\partial x} + \alpha_A (T_c - T_A) = 0 \quad (3)$$

$$\text{発熱特性: } \dot{Q}(t) = \rho_c C_c \cdot Q_m \cdot \gamma \cdot e^{-\gamma t} \quad (4)$$

[地盤]

$$\text{熱伝導方程式: } K_R \frac{\partial^2 T_R}{\partial x^2} = \rho_R C_R \frac{\partial T_R}{\partial t} \quad (5)$$

$$\text{初期条件: } T_R(x, 0) = T_{R0} \quad (6)$$

$$\text{境界条件: } T_R(x_0, t) = T_B \quad (7)$$

ここに、 $T_c$ : コンクリート躯体の温度分布、 $T_R$ : 地盤の温度分布、 $K_c$ : コンクリートの熱伝導率、 $\rho_c C_c$ : コンクリートの熱容量、 $Q_m$ : 終局断熱温度上昇量、 $\gamma$ : 温度上昇速度に関する定数、 $\alpha_A$ : コンクリート躯体から外気への熱伝達率、 $K_R$ : 地盤の熱伝導率、 $\rho_R C_R$ : 地盤の熱容量、 $T_A$ : 外気温、 $T_B$ : 固定温度、 $T_{c0}$ : コンクリートの初期温度、 $T_{R0}$ : 地盤の初期温度、である。

地盤の熱特性を含めた逆解析は、式(1), (3), (4), (5)中の  $K_c$ ,  $\rho_c C_c$ ,  $Q_m$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha_A$ ,  $K_R$ ,  $\rho_R C_R$  の7個のパラメータを同定することになる。ここで、順解析において、 $K_c' = \beta \cdot K_c$ ,  $\rho_c C_c' = \beta \cdot \rho_c C_c$ ,  $\alpha_A' = \beta \cdot \alpha_A$ ,  $K_R' = \beta \cdot K_R$ ,  $\rho_R C_R' = \beta \cdot \rho_R C_R$  としても同じ解が得られる。すなわち、上記7個のパラメータをすべて同定する場合、 $K_c$ ,  $\rho_c C_c$ ,  $\alpha_A$ ,  $K_R$ ,  $\rho_R C_R$  を  $\beta$  倍した値が同定結果となり得る。この場合、解は無数に存在することになり、確定した解が得られないため逆解析は不可能になる。

そこで本論文では、地盤の熱特性を含めた逆解析を行う場合、 $K_c$ ,  $\rho_c C_c$ ,  $K_R$ ,  $\rho_R C_R$  のいずれか1個以上のパラメータを既知とし逆解析を行った。

## 3. 数値計算例

本節では1. で述べた検討内容を数値シミュ

表-1 解析条件

項目		基準値	
同定パラメータ	$K_c$	コンクリートの熱伝導率(W/m <sup>2</sup> ・℃)	2.67
	$\rho_c C_c$	コンクリートの熱容量(MJ/m <sup>3</sup> ・℃)	2.70
	$Q_m$	終局断熱温度上昇量(℃)	46.0
	$\gamma$	温度上昇速度に関する定数(day)	1.100
	$\alpha_A$	コンクリートと外気温の間の熱伝達率(W/m <sup>2</sup> ・℃)	12.7
	$K_R$	岩盤の熱伝導率(W/m <sup>2</sup> ・℃)	2.33
既知パラメータ	$\rho_R C_R$	岩盤の熱容量(MJ/m <sup>3</sup> ・℃)	2.07
	$T_A$	外気温(℃)	15.0
	$T_B$	固定温度境界面の岩盤温度(℃)	15.0
	$T_{c0}$	コンクリートの初期温度(℃)	20.0
	$T_{R0}$	岩盤の初期温度(℃)	15.0

レーションで検討する。

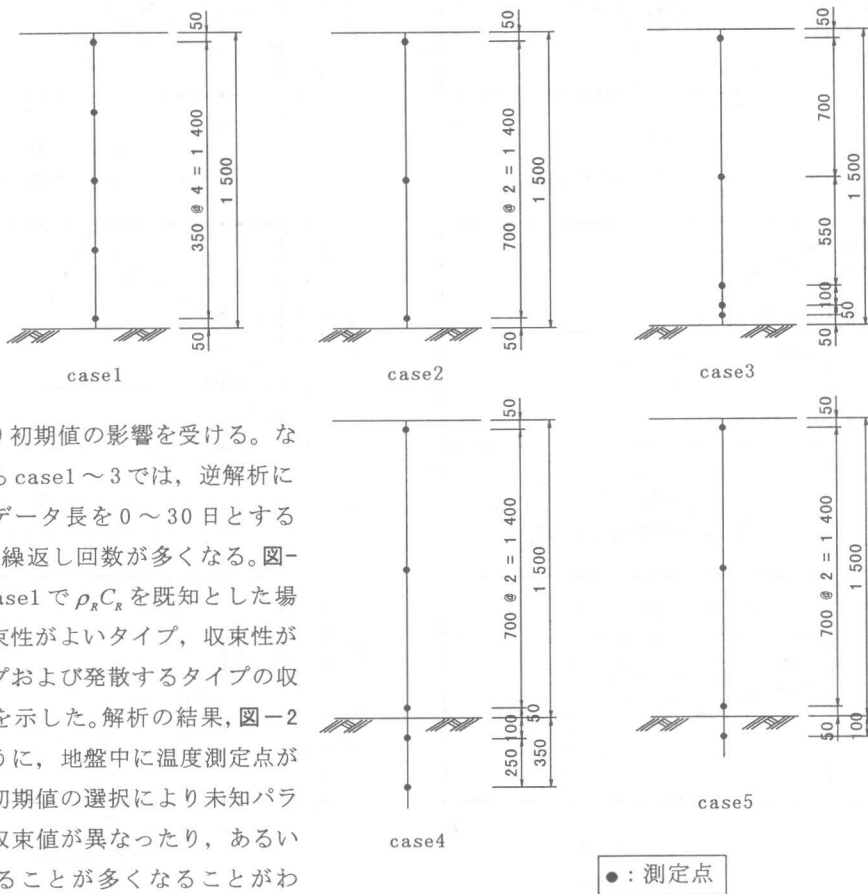
### 3.1 初期値と温度測定位置の影響

逆解析問題では、問題の不安定性が強いほど初期値の選択により未知パラメータの収束値が異なったり、あるいは発散することが多くなる。選択した初期値の組み合わせが、アルゴリズムの収束性に影響するかどうか、また同じ結果に収束するかどうかを以下のように確認した。ここでは、表-1中の  $K_c$ ,  $\rho_c C_c$ ,  $Q_m$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha_A$ ,  $K_R$ ,  $\rho_R C_R$  の値を基準値として、それらの50%~200%の範囲で100組の1様乱数を発生させ、100組の初期値を作成した。また、測定位置の影響を調べるために、図-1に示す5ケースの測定位置を想定した。さらに、逆解析に使用するデータ長の影響を調べるために、データ長を0~7日間とした場合と0~30日間とした場合の2ケースを設定した。これらの解析結果を表-2、図-2に示す。表-2には、100個の初期値のうち収束しなかった初期値の数と、平均繰返し回数を記した。表-2から、測定位置に関しては、少なくとも1点地盤中に測定点を設ければ(case4またはcase5)地盤の熱特性を含めた逆解析でも安定して収束し、かつ繰返し回数も少ない。case1~3では、データ長を0~7日、地盤の  $K_R$  あるいは  $\rho_R C_R$  を既知として逆解析を行う場合(Ⅲ, Ⅳ)と、データ長が0~30日で地盤の  $K_R$  を既知として逆解析を行う場合(Ⅲ)

表-2 初期値，計測位置およびデータ長の影響

データ長	ケース	収束しない数				平均繰返し回数			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
0~7日	case1	5/100	4/100	41/100	34/100	12	13	17	24
	case2	4/100	2/100	35/100	23/100	12	13	16	20
	case3	6/100	4/100	40/100	23/100	12	13	18	20
	case4	0/100	0/100	0/100	0/100	9	9	9	9
	case5	0/100	0/100	0/100	0/100	9	9	9	9
0~30日	case1	0/100	0/100	30/100	5/100	113	113	67	101
	case2	0/100	0/100	22/100	4/100	104	105	69	101
	case3	0/100	0/100	30/100	6/100	119	120	69	95
	case4	0/100	0/100	0/100	0/100	9	9	9	9
	case5	0/100	0/100	0/100	0/100	9	10	9	11

注) I : コンクリートの熱伝導率 ( $K_C$ ) を既知とした場合  
 II : コンクリートの熱容量 ( $\rho_C C_C$ ) を既知とした場合  
 III : 地盤の熱伝導率 ( $K_R$ ) を既知とした場合  
 IV : 地盤の熱容量 ( $\rho_R C_R$ ) を既知とした場合

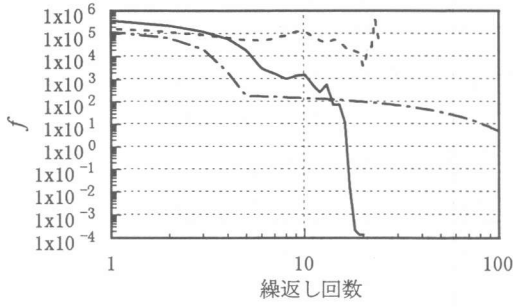


は、かなり初期値の影響を受ける。なお、これら case1~3 では、逆解析に使用するデータ長を 0~30 日とすると、極端に繰返し回数が多くなる。図-2 には、case1 で  $\rho_R C_R$  を既知とした場合に、収束性がよいタイプ、収束性が悪いタイプおよび発散するタイプの収束過程図を示した。解析の結果、図-2 に示すように、地盤中に温度測定点がないと、初期値の選択により未知パラメータの収束値が異なったり、あるいは発散することが多くなることがわかった。

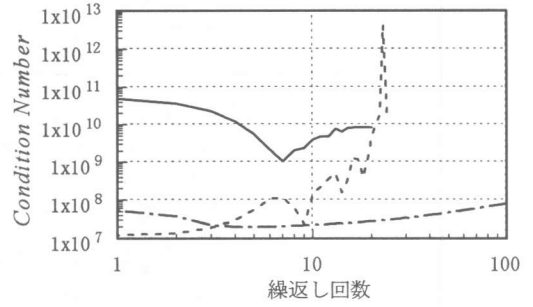
### 3.2 同定結果の精度

本論文の第一目的は、2. で提案した地盤の熱特性を含めた逆解析において、

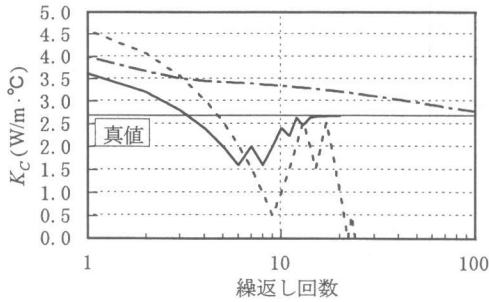
既知パラメータに誤差が含まれる場合、コンクリートの熱伝導率、熱容量および熱伝達率を精度良く同定する方法を見いだすことである。第二の目的は、地盤の熱伝導



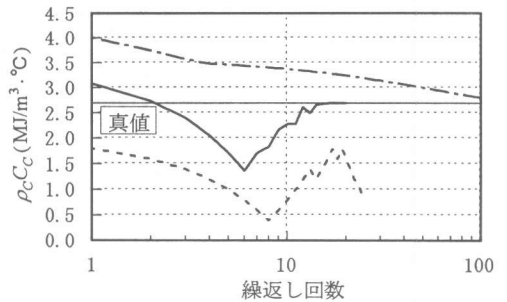
(1) 評価関数



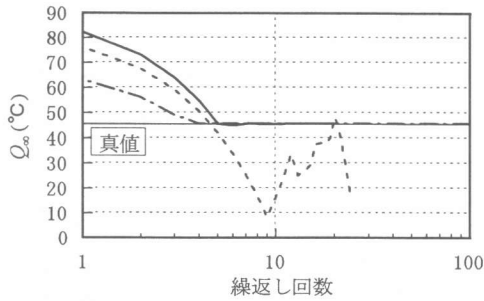
(2) 条件数



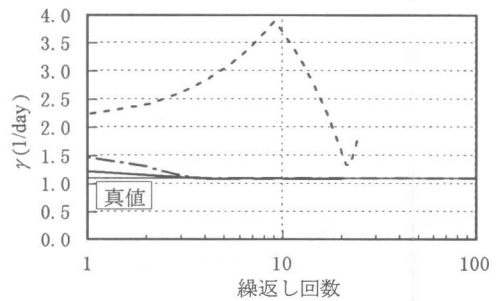
(3) コンクリートの熱伝導率



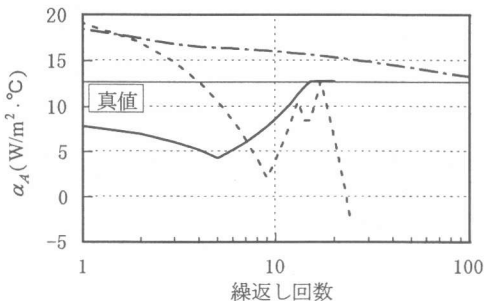
(4) コンクリートの熱容量



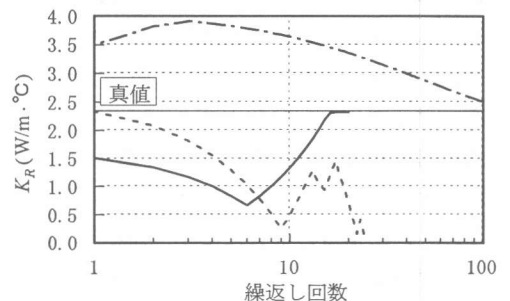
(5) 終局断熱温度上昇量



(6) 温度上昇速度に関する定数



(7) 熱伝達率



(8) 地盤の熱伝導率

図-2 収束過程

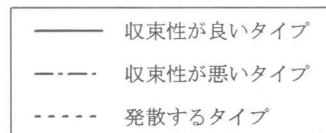


表-3 case1 の場合の同定結果の精度

固定した パラメータ	統計量	$K_c$ (W/m <sup>2</sup> ·°C)	$\rho_c C_c$ (MJ/m <sup>3</sup> ·°C)	$Q_\infty$ (°C)	$\gamma$ (1/day)	$\alpha_A$ (W/m <sup>2</sup> ·°C)	$K_R$ (W/m <sup>2</sup> ·°C)	$\rho_R C_R$ (MJ/m <sup>3</sup> ·°C)
$K_c$	平均値	2.67	2.68	45.9	1.093	12.7	3.10	2.42
	標準偏差	0.270	0.279	0.31	0.0380	1.53	2.458	1.435
	変動係数(%)	10.1	10.4	0.7	3.5	12.1	79.4	59.2
$\rho_c C_c$	平均値	2.69	2.70	45.9	1.093	12.8	3.11	2.44
	標準偏差	0.279	0.280	0.30	0.0377	1.57	2.527	1.382
	変動係数(%)	10.4	10.3	0.7	3.4	12.2	81.4	56.7
$K_R$	平均値	4.74	4.83	46.0	1.107	22.7	2.38	11.00
	標準偏差	4.121	4.293	0.31	0.0408	19.32	0.699	24.511
	変動係数(%)	86.9	88.8	0.7	3.7	85.0	29.4	222.7
$\rho_R C_R$	平均値	4.09	4.06	45.8	1.080	19.3	8.29	2.04
	標準偏差	2.998	2.931	0.31	0.0363	13.99	11.477	0.611
	変動係数(%)	73.2	72.2	0.7	3.4	72.4	138.5	30.0
$K_R$ および $\rho_R C_R$	平均値	2.59	2.61	46.0	1.102	12.5	2.35	2.03
	標準偏差	0.601	0.613	0.34	0.0498	3.02	0.691	0.631
	変動係数(%)	23.2	23.5	0.7	4.5	24.3	29.4	31.1

注) 網掛け：逆解析時に既知としたパラメータ

表-4 case5 の場合の同定結果の精度

固定した パラメータ	統計量	$K_c$ (W/m <sup>2</sup> ·°C)	$\rho_c C_c$ (MJ/m <sup>3</sup> ·°C)	$Q_\infty$ (°C)	$\gamma$ (1/day)	$\alpha_A$ (W/m <sup>2</sup> ·°C)	$K_R$ (W/m <sup>2</sup> ·°C)	$\rho_R C_R$ (MJ/m <sup>3</sup> ·°C)
$K_c$	平均値	2.68	2.70	46.1	1.101	12.9	2.33	2.10
	標準偏差	0.270	0.281	0.51	0.0514	1.60	0.241	0.341
	変動係数(%)	10.1	10.4	1.1	4.7	12.4	10.4	16.2
$\rho_c C_c$	平均値	2.68	2.70	46.1	1.101	12.9	2.33	2.11
	標準偏差	0.291	0.281	0.51	0.0514	1.68	0.250	0.379
	変動係数(%)	10.9	10.4	1.1	4.7	13.0	10.7	18.0
$K_R$	平均値	2.72	2.74	46.1	1.101	13.1	2.37	2.14
	標準偏差	0.773	0.783	0.51	0.0515	3.84	0.674	0.669
	変動係数(%)	28.4	28.5	1.1	4.7	29.3	28.4	31.3
$\rho_R C_R$	平均値	2.70	2.73	46.1	1.102	13.0	2.36	2.09
	標準偏差	0.822	0.856	0.51	0.0517	4.08	0.741	0.586
	変動係数(%)	30.4	31.4	1.1	4.7	31.4	31.4	28.1

注) 網掛け：逆解析時に既知としたパラメータ

率および熱容量を精度良く同定する方法を見いだすことである。そこで、既知パラメータの誤差を以下のように仮定し、同定パラメータの精度を検討した。コンクリートの熱伝導率と熱容量は事前情報がある（硬化コンクリートによる試験結果や過去の実績等）とし、誤差の大きさを基準値に対して変動係数で10%と仮定する。地盤の熱伝導率と熱容量は事前情報が全くないとし、誤差の大きさを基準値に対して変動係数で30%と仮定する。外気温およびコンクリートの初期温度は、現場計測では測定値が得られることを考慮し、誤差の大きさを基準値に対して変動係数で5%とする。その他のパラメータにつ

いては、参考文献<sup>4)</sup>と同様10%とする。これらの誤差は正規分布すると仮定し乱数をそれぞれ500個発生させ、500組の組合せを作った。同定パラメータの精度は、この500組の組合せでモンテカルロシミュレーションを行い算出した。この時、 $K_c$ 、 $\rho_c C_c$ 、 $K_R$ 、 $\rho_R C_R$ のいずれかを既知として逆解析を行った。そして、 $K_c$ 、 $\rho_c C_c$ 、 $K_R$ 、 $\rho_R C_R$ のうちどのパラメータを既知とした場合が、 $K_c$ 、 $\rho_c C_c$ 、 $\alpha_A$ を精度良く同定できるか、あるいは $K_R$ 、 $\rho_R C_R$ を精度良く同定できるかを検討した。測定位置はcase1とcase5の場合を行い、case1は $K_R$ および $\rho_R C_R$ とも既知とした場合の逆解析も行った。case1

に関する解析結果を表-3に、case5に関する解析結果を表-4に示す。以下に記す同定精度は、変動係数の大きさを評価しており、変動係数が小さいほど同定精度が良いことを意味する。

まず、case1の場合（コンクリート中にのみ測定点を設ける場合）について述べる。 $K_c$ 、 $\rho_c C_c$  および  $\alpha_A$  の同定精度に関しては、 $K_c$ 、 $\rho_c C_c$ 、 $K_R$ 、 $\rho_R C_R$ のうち、 $K_c$ あるいは $\rho_c C_c$ のいずれか一方を既知として逆解析を行うと、 $K_c$ 、 $\rho_c C_c$ および $\alpha_A$ の同定精度は10~12%となる。しかし、 $K_R$ あるいは $\rho_R C_R$ のいずれか一方、 $K_R$ および $\rho_R C_R$ とも既知として逆解析を行うと、 $K_c$ 、 $\rho_c C_c$ および $\alpha_A$ の同定精度は23%以上となる。よって、 $K_c$ 、 $\rho_c C_c$ および $\alpha_A$ を精度良く同定するためには、 $K_c$ あるいは $\rho_c C_c$ のいずれか一方を既知として逆解析を行う必要がある。 $K_R$ および $\rho_R C_R$ の同定精度に関しては、 $K_c$ 、 $\rho_c C_c$ 、 $K_R$ 、 $\rho_R C_R$ のうちいずれを既知として逆解析を行っても、 $K_R$ および $\rho_R C_R$ の同定精度は60%以上と悪い。よって、case1の場合、 $K_R$ および $\rho_R C_R$ は精度良く同定できないことを示唆している。

次に、case5の場合（少なくとも1点地盤中に温度測定点を設ける場合）について述べる。 $K_c$ 、 $\rho_c C_c$  および  $\alpha_A$  の同定精度に関しては、case1の場合と同様なことが言える。 $K_R$ および $\rho_R C_R$ の同定精度に関しては、 $K_c$ あるいは $\rho_c C_c$ のいずれか一方を既知として逆解析を行うと、 $K_R$ および $\rho_R C_R$ の同定精度は10~18%となる。しかし、 $K_R$ あるいは $\rho_R C_R$ のいずれか一方を既知として逆解析を行うと、 $K_R$ および $\rho_R C_R$ の同定精度は30%前後となる。よって、 $K_R$ および $\rho_R C_R$ を精度良く同定するためには、 $K_c$ あるいは $\rho_c C_c$ のいずれか一方を既知として逆解析を行う必要がある。以上より、case5の場合（少なくとも1点地盤中に温度測定点を設ける場合）は、 $K_c$ あるいは $\rho_c C_c$ のいずれか一方を既知として逆解析を行うと、 $K_c$ 、 $\rho_c C_c$ 、 $\alpha_A$ 、 $K_R$ および $\rho_R C_R$ とも精度良く同定できる。

#### 4. まとめ

本研究より得られた知見を以下に記す。

- (1)地盤の熱特性を含めた逆解析では、地盤中に少なくとも1点温度測定点を設けると、逆解析の安定性、収束性がよくなる。
- (2)地盤の熱特性( $K_R$ あるいは $\rho_R C_R$ )を既知として逆解析を行うより、コンクリートの熱特性( $K_c$ あるいは $\rho_c C_c$ )を既知として逆解析を行うほうが、逆解析の安定性、収束性がよくなる。
- (3)コンクリートの熱特性の誤差が地盤の熱特性の誤差より小さいと仮定し、コンクリート中にのみ温度測定点を設けて逆解析を行う場合、コンクリートの熱特性( $K_c$ あるいは $\rho_c C_c$ )を既知として逆解析を行うと、地盤の熱特性( $K_R$ あるいは $\rho_R C_R$ )を既知として逆解析を行うより、 $K_R$ あるいは $\rho_R C_R$ の誤差の影響が小さくなる。
- (4)コンクリートの熱特性の誤差が地盤の熱特性の誤差より小さいと仮定し、地盤中に少なくとも1点温度測定点を設けて逆解析を行う場合、コンクリートの熱特性( $K_c$ あるいは $\rho_c C_c$ )を既知として逆解析を行うと、 $K_R$ あるいは $\rho_R C_R$ の誤差の影響が小さくなり、かつ $K_R$ および $\rho_R C_R$ も精度良く同定できる。

#### 【参考文献】

- 1)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, pp. 1347-1352, 1994
- 2)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
- 3)潮田和司・西田德行・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
- 4)潮田和司・西田德行・土橋吉輝・松井邦人：熱特性同定におけるデータ長の設定と既知パラメータ誤差の影響評価，コンクリート工学年次論文集，第9巻第2号，pp. 53-64, 1998. 7