

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

西田德行¹・潮田和司²・土橋吉輝³・松井邦人⁴

- ¹正会員 西松建設株式会社 技術研究所技術部主任 (〒242神奈川県大和市下鶴間2570-4)
²正会員 工修 西松建設株式会社 技術研究所技術部 (〒242神奈川県大和市下鶴間2570-4)
³正会員 西松建設株式会社 技術研究所技術部副課長 (〒242神奈川県大和市下鶴間2570-4)
⁴正会員 Ph.D. 東京電機大学教授 理工学部建設工学科 (〒350-03埼玉県比企郡鳩山町石坂)

コンクリートの施工においては、一般にセメントの水和熱に起因する温度応力によるひび割れ発生および制御の可能性を検討する温度応力解析が行われている。この温度応力解析に必要なコンクリートの物性値は数多く、それぞれ既往のデータあるいは試験結果を参考に平均的な値が用いられている。これらの値は示方書などに提示されているが、施工現場の環境条件や使用材料の違いにより異なることが知られている。本研究では、既に提案した逆解析による熱特性推定手法を現場計測データに適用し、現場におけるコンクリート熱特性値推定の可能性を検証し、また、これに伴う問題点について考察した。

Key Words : massive concrete, inverse analysis, thermal properties, Gauss-Newton method, heat of hydration

1.はじめに

コンクリート構造物の機能や耐久性を損なう温度ひび割れの調査・研究は、我国では1970年代後半から精力的に数多くなされた。これらにより、温度ひび割れの危険度を定量的に評価できるシステムが確立され^{1,2)}、実用に供するようになった。

温度ひび割れの発生予測には、セメントの水和発熱過程とコンクリートの熱特性、若材齢時のコンクリートの力学的特性、ひび割れ発生条件を仮定する必要がある。これらが予測精度に影響を及ぼすことは言うまでもない^{3)~6)}。温度ひび割れ予測は、まず、温度解析によってコンクリート構造物躯体内の温度分布を正確に把握することから始まる。したがって、この温度解析にはセメントの水和発熱モデルと、複数のコンクリートの熱特性パラメータを適切に与える必要がある。一般的にコンクリートの温度解析の発熱モデルは、断熱温度上昇試験結果から得られた発熱曲線を時間の関数に置き換えたモデルとし、あらゆる位置に用いている。これに対し、鈴木ら⁷⁾と原田ら⁸⁾はセメントを単一物質とし、化学反応速度論におけるアーレニウス則を適用して、温度依存性を考慮した水和発熱モデルと非定常温度解析を提案している。しかし、従来の簡易的な発熱モデルが普及しているのが現状である。

温度解析に必要なパラメータは、試験結果や既往のデータを参考とした基準値あるいは平均値などが

ら確定量として設定されている。しかし、現場でのコンクリート打設では、環境条件などの影響により事前の解析条件の設定と異なる場合があり、予測値が計測値と一致しないことが多い。この問題を解決する1つの手法として、現場計測データから解析に必要なパラメータを推定することが考えられる。これは一種の逆問題であり、結果から原因を推定する順問題の逆命題をなすもので、色々な分野で研究が進められている^{9~13)}。過去の研究において、近久ら¹³⁾は、NelderとMeadによるシンプレックス法¹⁴⁾を室内試験結果および現場計測結果について適用し、熱伝達率の評価を行っている。著者ら^{15),16)}は、示方書に提示された発熱モデルとFEMにより温度解析を行うこととし、それに必要なコンクリートの5個のパラメータをGauss-Newton法を用いて効率的に推定する方法を提案した。しかし、逆解析は本来、非常に不安定な問題であり、特に実測データを用いると、解を得られない状況に度々遭遇する。

本研究では、既に提案した熱特性値の推定手法を5セットの外気温とコンクリート温度の現場計測データに適用し、現場におけるコンクリートの熱特性を推定することの可能性を検証し、また、これに伴う逆解析の問題点について考察した。

2. 熱伝導解析

セメントの水和反応による発熱は、コンクリート

躯体内部の温度を上昇させ、躯体表面からそれを取りまく外環境へ伝達する。ここでは簡単にするためコンクリート躯体は、図-1のように岩盤の上に広がっているスラブ状コンクリートを仮定する。コンクリートと岩盤の熱特性値が温度の影響を受けないと仮定するなら、コンクリート躯体内の温度の支配方程式は、式(1)となる。

$$K_C \frac{\partial^2 T_R}{\partial x^2} + \dot{Q}(t) = \rho_C C_C \frac{\partial T_C}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 K_C 、 ρ_C 、 C_C は、それぞれコンクリートの熱伝導率、密度、比熱である。また、 T_C はコンクリート躯体の温度であり、位置 x と時間 t の関数である。 $\dot{Q}(t)$ は水和発熱速度を表す解析的モデルであり、一般的に式(2)のように定義されている。

$$\dot{Q}(t) = \rho_C C_C Q_\infty \gamma e^{-\gamma t} \quad (2)$$

ここに、 Q_∞ と γ は終局断熱温度上昇量と温度上昇速度に関する定数である。岩盤内部の熱特性値も温度の影響を受けないと仮定すると、岩盤内部では発熱しないので支配方程式は、次式のように書くことができる。

$$K_R \frac{\partial^2 T_R}{\partial x^2} = \rho_R C_R \frac{\partial T_R}{\partial t} \quad (3)$$

K_R 、 ρ_R 、 C_R は、それぞれ岩盤の熱伝導率、密度、比熱である。また、 T_R は岩盤内部の温度で、位置 x と時間 t の関数となる。これらの式を解くにあたり、初期条件と境界条件が必要になる。初期条件はコンクリート打設時の初期温度 T_{C0} とそのときの岩盤の温度 T_{R0} であり、それぞれ

$$T_C(x, 0) = T_{C0} \quad (4)$$

$$T_R(x, 0) = T_{R0} \quad (5)$$

と書くことができる。岩盤の十分に深いところでは、コンクリートの発熱の影響を受けず、常に一定温度 T_B と考えることができる。

$$T_R(x_B, t) = T_B \quad (6)$$

コンクリートと岩盤の境界では熱流束が等しく、

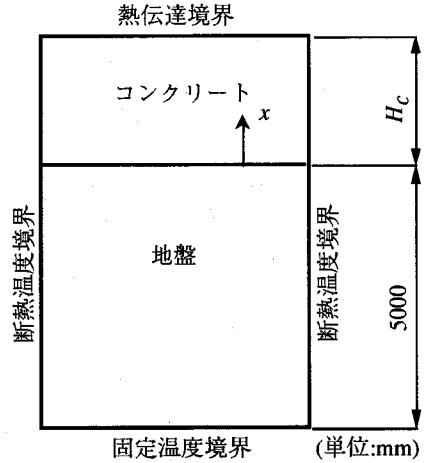


図-1 解析モデル

$$K_C \frac{\partial T_C}{\partial x} = K_R \frac{\partial T_R}{\partial x} \quad (7)$$

の関係となるが、解析を簡単にするため工学的には境界でコンクリートと岩盤の温度は等しいと仮定して差し支えない。そして初期温度には両者の平均値を用いている。したがって、この境界面では、

$$T_C(0, t) = T_R(0, t) \quad (8)$$

としている。コンクリートと大気との境界での条件は複雑である。既往文献(16),(17)によると、この境界でのエネルギーの伝達 q は、コンクリート表面温度 T_s と大気温度 T_{air} との差により生じる対流熱流束 q_c 、コンクリート躯体の放射熱流束 q_r および太陽からコンクリートへ伝わる輻射熱流束 q_s の影響を足しあわせたものとなる。すなわち、

$$q = q_c + q_r + q_s \quad (9)$$

で表すことができる。 q_c はコンクリートと大気間の熱伝達率 α_c を用いると、

$$q_c = \alpha_c (T_s - T_{air}) \quad (10)$$

と書くことができる。 α_c はコンクリート表面の粗度や風速の影響を受けるものであり、

$$\alpha_c = \alpha_0 + \beta V \quad (11)$$

の関係があるとされている。α_rは風速ゼロの時のコンクリートと大気との間の熱伝達率であり、Vは風速、βは定数である。コンクリートから大気への放射q_rは、放射熱伝達率α_rを用いて、

$$q_r = \alpha_r (T_s - T_{air}) \quad (12)$$

と表される。α_rは大気温度、コンクリートの放射熱、ステファン・ボルツマン定数に依存すると言われている。また、太陽からの放射熱S₀をコンクリート表面で吸収することによる熱流束q_sは、

$$q_s = \alpha_s S_0 \quad (13)$$

α_sは吸収係数と呼ばれ、0 < α_s < 1である。太陽の放射熱は1日の中でも時間により変動し、また、季節による変動もある。コンクリート構造物のある緯度や高度、天候、日影条件によっても放射熱の影響は違ってくる。このように大気に接するコンクリート表面の熱収支は複雑であり、この影響をすべて考慮することは現時点では不可能である。本研究では式(10)のみをコンクリートと大気との境界条件と考え、複雑な現象をすべてα_cに含めるものとする。

以上のことを考慮して有限要素法を適用すると、

$$[A] \left\{ \frac{dT}{dt} \right\} + [B] \{T\} = (\rho C Q_{\infty} \gamma e^{-\gamma t}) \{F_1\} + \{F_2\} \quad (14)$$

$$\{T(0)\} = \{T_0\} \quad (15)$$

と書くことができる。ここに、[A]は熱容量マトリックス、[B]は熱伝導マトリックス、{T}は節点温度ベクトル、{T₀}は初期温度ベクトル、{F₁}は内部発熱に関する熱流束ベクトル、{F₂}は熱伝達に関する熱流束ベクトルである。ここでは式(14)、(15)を固有値解析により解いている。

3. 熱特性値の推定方法

ここでの熱特性値の推定は、現場で打設されたコンクリート躯体内の温度に係わるパラメータ、すなわち、コンクリートから大気への熱伝達率α_c、コンクリートの熱伝導率K_C、熱容量ρ_CC_C、式(2)の発熱特性に含まれるQ_∞、γの5個のパラメータを現場計測データから求めることである。これらのパラメータをまとめてX=(X₁, X₂, X₃, X₄, X₅)^Tで表すことにす

る。解析温度は5個のパラメータの関数となるので、式(14)、(15)を解いて得られた着目点iの解析温度が、測定温度u_i(t)とできる限り一致するように、Xの値を定めればよい。温度計測を行った着目点の総数をNとすると、一斉度の評価関数を

$$f(X) = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^N \left\{ u_i(t) - T_i(X, t) \right\}^2 dt \quad (16)$$

と設定する。t₀, t₁は逆解析に使用する測定データの時間領域の下限と上限を意味している。式(16)は熱特性パラメータXに関する非線形関数であり、この式が最小となるXが求めたいコンクリートの熱特性値である。このようなXを求めるには一般に繰り返し計算が必要である。式(16)が最小となるXに関する導関数がゼロとなる必要条件を用いると、5個の非線形方程式が得られる。Newton-Raphson法を適用してこの非線形連立方程式を解くと、T_i(X, t)のXに関する2階の偏微分係数が必要となり、計算が煩雑となる。そこで、次の1次近似を考える。

$$T_i(X + \Delta X) = T_i(X) + \sum_{j=1}^5 \left(\frac{\partial T_i}{\partial X_j} \right) \Delta X_j \quad (17)$$

式(17)を式(16)に代入しXを与えられているものとする。式(16)はΔX_j(j=1, 2, 3, 4, 5)に関する2次関数となる。式(16)を最小とするための必要条件は、

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^5 \left\{ \int_{t_0}^{t_1} \left(\sum_{i=1}^N \frac{\partial T_i}{\partial X_j} \frac{\partial T_i}{\partial X_k} \right) \Delta X_j \right. \\ \left. = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^N \left\{ u_i(t) - T_i(X, t) \right\} \left(\frac{\partial T_i}{\partial X_k} \right) dt \right. \end{aligned} \quad (18)$$

である。このような逆解析の定式化をGauss-Newton法という。式(18)を解くには、偏微分係数∂T_i/∂X_j (i=1, ..., N; j=1, 2, 3, 4, 5)の値が必要である。この偏微分係数を計算するためには、式(14)の右辺を{F}とおいて、式(14)、(15)をX_jについて偏微分する。

$$\begin{aligned} [A] \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial T}{\partial X_j} \right\} + [B] \left\{ \frac{\partial T}{\partial X_j} \right\} \\ = \left\{ \frac{\partial F}{\partial X_j} \right\} + \left\{ \frac{\partial A}{\partial X_j} \right\} \left\{ \frac{dT}{dt} \right\} + \left\{ \frac{\partial B}{\partial X_j} \right\} \{T\} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\left\{ \frac{\partial T}{\partial X_j} (0) \right\} = \{0\} \quad (j = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (20)$$

式(19)は式(14)と同じ微分演算子であり、したがって式(14)と同様に解くことができる。式(19)を式(20)の条件で解くと、式(18)を作成できる。式(18)は ΔX_j に関する線形連立方程式であるが、右辺の係数マトリックスは特異マトリックスに近いので、解くときには注意を要する。後の計算例では、その不安定性を配慮し特異値分解を用いて解いている。以下の計算の概略手順を図-2に示す。

- step 1: 初期値 X_j ($j=1,2,3,4,5$)を仮定する。
 - step 2: 式(14),(15)を解いて、着目点の解析温度 $T_i(X,t)$ ($i=1,\dots,N$)を求める。
 - step 3: 式(19),(20)を解いて、 $\partial T_i / \partial X_j$ ($i=1,\dots,N$; $j=1,2,3,4,5$)を計算する。
 - step 4: 式(18)を作成し、 ΔX_j ($j=1,2,3,4,5$)について解く。
 - step 5: 式(16)と X_j の変化量 Δf 、 ΔX_j を調べ、 $|\Delta f/f| \leq \epsilon_1$ と $|\Delta X_j/X_j| \leq \epsilon_2$ のとき、計算を打ち切る。 ϵ_1, ϵ_2 は十分に小さな正数で、 $\epsilon_1, \epsilon_2 = 0.001 \sim 0.0001$ を用いている。この条件を満足しないとき、 $X_j = X_j + \Delta X_j$ とにおいてstep 2に戻る。
- 式(17)の関係を利用していることから上記の計算手順の中で ΔX_j が大きくなりすぎるのを防ぐため、 $|\Delta X_j| \geq X_j/10$ となるとき、 $\Delta X_j = \text{sign}(\Delta X_j) X_j/10$ となるようにムープリミットを設定している。

4. 現場計測データ

ここでは、提案する熱特性推定手法の実用性を検討・評価するため、現場計測データを用いた逆解析を行った。使用したデータは、1987年～1992年に関東および中部地方の4カ所のスラブ状コンクリートの施工現場において収集した5セット(構造物A～E)の外気温とコンクリート構造物の躯体温度である。それらの概要を表-1、各コンクリート躯体における温度測定位置を図-3に示す。なお、温度測定には熱電対を用い、測定期間は基本的にコンクリート打設から約1カ月間(ただし、構造物Bは60日間)である。

(1)外気温および日射

外気温の測定は、逆解析を行う上で重要である。著者ら^{9,10)}は、感度解析から温度応力解析において外気温が解析結果に与える影響が大きいことを示した。一般的な外気温は、百葉箱などに設置された温

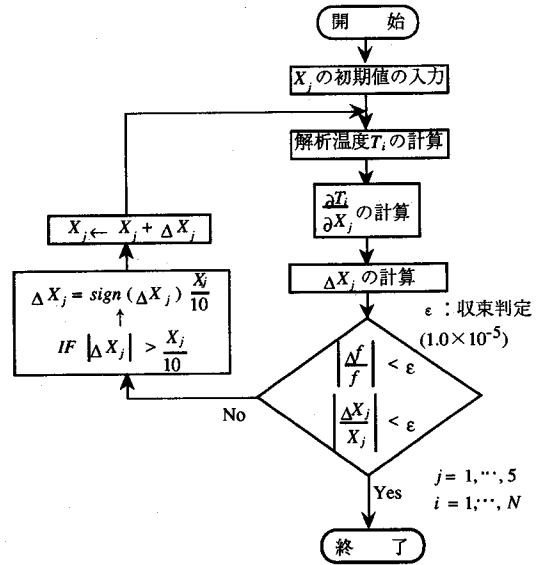


図-2 計算の流れ図

度計の値である。しかし、現場計測の場合、外気温はコンクリート温度と同じ時間でのサンプリングが必要となることから熱電対を用いた同一システムでの測定となる。本計測データでは施工現場の環境条件(風向、風速、地形など)を配慮し、打設場所に近い位置に測点を設置した。しかしながら、施工現場の作業に支障をきたすことなく、適当な位置に外気温の測点を設けることは、なかなか難しいのが現状である。構造物Dの計測データは10月末～11月末のものであるが、外気温用熱電対の配置が悪かったため、最高温度が35℃程度、日内気温差は25℃程度であった。2章に示した日射の影響については過去に種々の検討がなされている。清水ら¹⁹⁾は、外気温と日射の影響を考慮したコンクリート表面部の相当外気温を比較した結果、相当外気温は外気温の数倍程度大きくなり、特に水平面で顕著になると報告している。日射量やコンクリート表面の熱伝達率に影響する風速²⁰⁾の測定は別系統の測定になったり、データ処理が複雑になることなどから、あまり実施されない。本計測データは、日射および風速の詳細なデータがないものである。

(2)測定ノイズ

熱電対を用いた計測を行う場合、測定データにノイズが発生することがある。この原因は、熱電対の先端の絶縁(防水)処理が不十分であること、コンクリート中の鉄筋から漏洩する電流、供給電圧が不安定、アース処理が不十分、データロガーおよびスイッチボックスの設置場所の環境(大型電動機・変

表-1 現場計測データの概要

構造物	日数(日)	躯体高さ(m)	測点数	上部測点位置(mm)	セメント種類	水セメント比(%)	セメント量(kg/m ³)	単位容積質量(kg/m ³)	打設温度(℃)	養生方法(マツト+散水)
A	45	1.0	5	10	普通	56.0	284	2295	27.0	3日間
B	60	1.5	3	15	普通	58.5	243	2326	12.6	6日間
C	34	2.5	5	10	普通	57.1	280	2320	17.7	7日間
D	35	3.0	5	30	高炉B種	57.1	251	2351	14.0	5日間
E	27	3.5	5	35	普通	58.5	243	2326	16.2	6日間

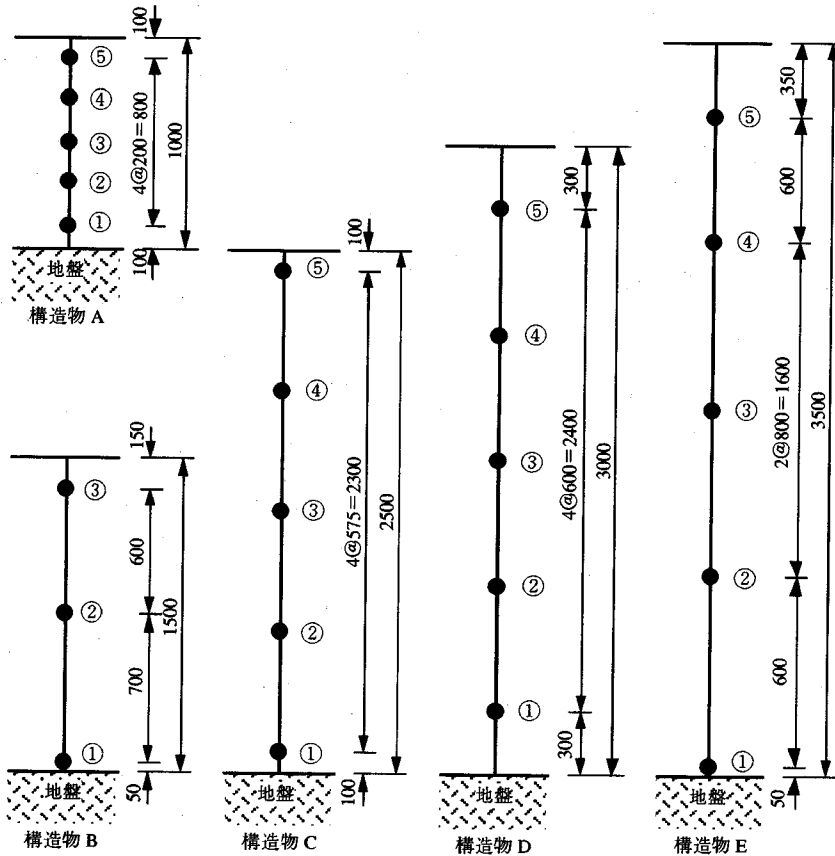


図-3 コンクリート躯体内の温度測定位置

圧器や溶接器が近くにある、高温・高湿下にある、激しい振動下にあるなどの影響を受けるためとされている。なお、構造物C,Eの測定データには、明確なノイズが含まれていた。

5. 逆解析結果と考察

逆解析は表-2に示す既知パラメータを既往文献を

参考に設定し、コンクリート躯体の熱伝導率 K_C 、比熱 C_C 、終局断熱温度上昇量 Q_∞ と温度上昇速度に関する定数 γ 、コンクリートと空気間の熱伝達率 α_c の5個のパラメータを未知パラメータとして行った。また、未知パラメータの初期値は示方書2)の一般的な値の範囲から設定した。使用した測定データの期間は、コンクリート打設から3日間、7日間、14日間および全期間の4種類であり、各構造物とも全

表-2 既知としたパラメータの値

構造物		A	B	C	D	E
K_R	地盤の熱伝導率(W/m $^{\circ}$ C)	2.33	1.74	1.98	1.74	1.74
C_R	地盤の比熱(J/kg $^{\circ}$ C)	795	2093	917	2093	2093
T_A	外気温($^{\circ}$ C)	実測値を使用				
T_B	固定温度境界面の地盤温度($^{\circ}$ C)	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
T_{CO}	コンクリートの初期温度($^{\circ}$ C)	27.0	12.6	17.7	14.0	16.2
T_{RO}	地盤の初期温度($^{\circ}$ C)	T_B と T_{CO} の差の直線分布				
ρ_C	コンクリートの密度(kg/m 3)	2295	2326	2320	2351	2326
ρ_R	地盤の密度(kg/m 3)	2600	1800	2600	2600	1800

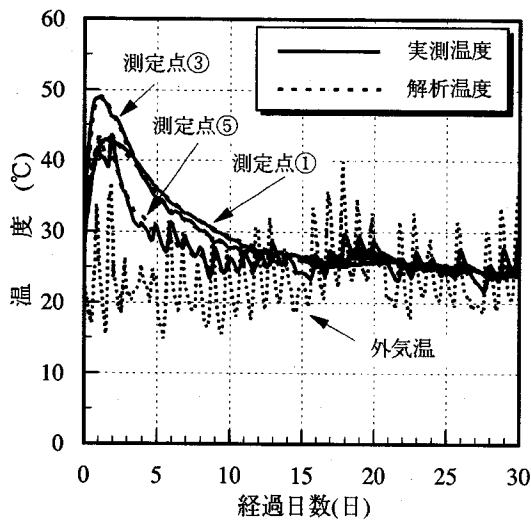
表-3 測定データ期間を変えて逆解析を行った結果 (全測点使用)

構造物	データ期間(日)	K_C (W/m $^{\circ}$ C)		C_C (J/kg $^{\circ}$ C)		α_c (W/m 2 $^{\circ}$ C)		Q_{∞} ($^{\circ}$ C)		γ (1/day)	
		初期値	同定値	初期値	同定値	初期値	同定値	初期値	同定値	初期値	同定値
A	3	2.67	2.76	1256	1478	12.8	10.4	43.3	30.2	1.344	1.956
	7		2.90		1394		11.1		31.5		1.839
	14		3.06		1440		10.7		31.0		1.900
	45		2.87		1448		11.9		31.3		1.860
B	3	2.67	2.29	1256	398	12.8	19.1	40.0	95.9	0.600	0.462
	7		2.28		222		15.3		200.0		0.242
	14		2.66		1419		19.3		44.6		0.961
	60		2.49		1381		18.7		44.5		0.976
C	3	2.67	×	1256	×	12.8	×	44.0	×	0.919	×
	7		×		×		×		×		
	14		2.98		1340		7.2		29.8		1.109
	35		2.83		1134		7.8		31.9		0.964
D	3	2.67	3.91	1256	1762	12.8	36.2	41.0	53.8	0.588	0.887
	7		4.08		2018		25.8		54.0		0.846
	14		4.12		2566		32.1		52.5		0.876
	28		4.34		2637		32.2		52.6		0.874
E	3	2.67	×	1256	×	12.8	×	39.9	×	0.740	×
	7		1.88		419		21.1		52.6		0.487
	14		2.00		975		72.8		41.6		0.608
	27		2.20		1227		53.9		39.5		0.649

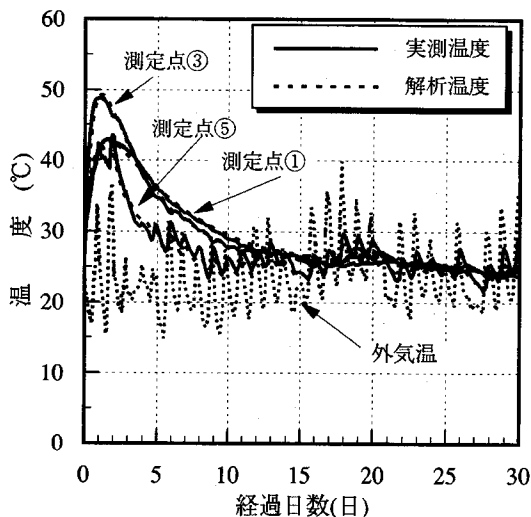
×印は、収束しなかったことを示す。

測点を用いた。なお、コンクリートは打設直後の液相に近い状態から固相へと大きく様相が変化するため、その過程で熱特性のような物性値も位置と時間に依存して変化すると考えられる。しかし、そのような変化を考慮することは、現状では問題を複雑にして実用的ではない。よって、本研究では同定値を使用したデータ期間において一定なコンクリート

体内の平均値と仮定した。表-3に逆解析の結果、得られた同定値を示す。また、著者ら¹⁵⁾は既知パラメータの誤差が未知パラメータに及ぼす影響について検討した。その結果、地盤の熱伝導率と熱容量の誤差は10%程度であれば、ほとんど影響なく、コンクリートの熱伝導率と熱容量に約5%程度影響することを数値シミュレーションにより確認している。



(1)測定データ3日間の場合



(2)測定データ30日間の場合

図-4 実測温度と同定結果を用いた解析値との比較 (構造物 A)

以下、逆解析について、測定データの長さおよびノイズの影響、収束性と測点数および測点位置の影響を考察し、既往値と同定値の比較をする。

(1)測定データの長さ

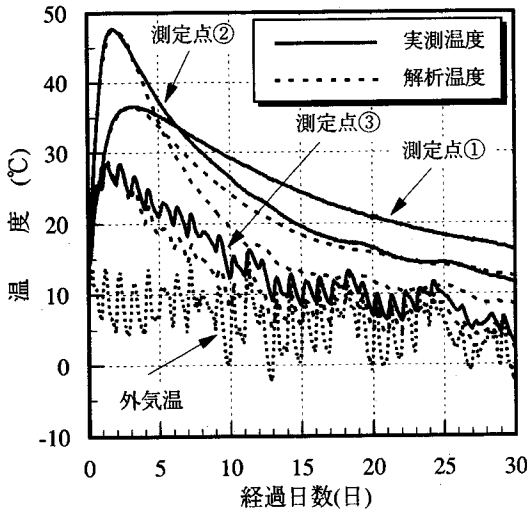
通常、コンクリート躯体内部の温度は打設後3日程度で最大値に達し、その後徐々に降下する。逆解析のアルゴリズムからも明らかなように、温度測定データから任意の時間区間を取り出して逆解析することも可能であり、そのデータが十分な情報を含んでいればアルゴリズムの収束性も安定する。

利用するデータの長さにより同定値は表-3に示すように異なっており、この傾向は構造物によっても異なっている。構造物Aでは測定データの長さによるパラメータの推定値に大きな差はなく、図-4に示すように3日間および30日間とも実測値と解析値が良く一致している。一方、構造物Bではコンクリートの比熱 C_c と終局断熱温度上昇量 Q_∞ の値が大きく異なった。図-5に示すように3日間の同定値を用いると、その区間では実測温度と解析温度は良く一致するが、それ以外では必ずしも一致していない。全データを用いると全体にわたり実測温度と解析値は良く一致するが、ピーク温度までの範囲では必ずしも良い一致は得られない。これは、若材齢の期間は温度依存性のあるセメントの水和反応が活発に進行する不安定な時期であり、放熱の影響などを受けたと考えられる。よって、この問題に対しては解析手法あるいは発熱モデルの検討が必要であろう。

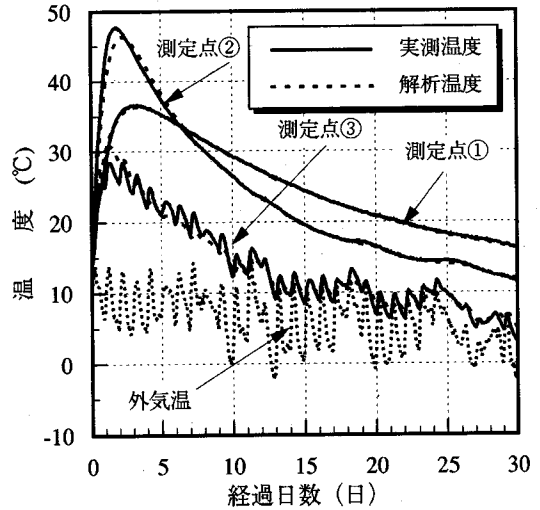
なお、構造物Cの3日間と7日間、構造物Eの3日間では値が収束しなかったが、これらの構造物のデータは、ノイズが含まれているものであった。したがって、若材齢のコンクリートの不安定さに加え測定ノイズの影響を受けたため、収束しなかったと考えられる。また、コンクリートの厚さが小さく、外気温の影響を大きく受ける躯体の場合は、外気温を正確に測定するだけでなく、躯体表面での熱収支を正しく取り入れないと、収束しないと予想される。

(2)測定ノイズの影響

構造物Cの測定データは、測定ノイズが大きく混入しており、決して良質のデータではない。このような測定データを用いて逆解析を行い、同定結果が得られたとしても、実測値と解析値が一致しなければ意味がない。そこで、測定データにノイズを含む構造物Cにおいて、測定期間30日の同定結果を用いた解析温度と実測温度の経時変化の比較を図-6に示す。この図から、解析温度はあたかも実測温度を滑らかにしたような結果となっており、解析温度と実測温度が良く一致していることがわかる。また、測定ノイズを含む構造物Eも同様の結果であった。しかし、誤差がプラス側かマイナス側のどちらか一方に現れるような系統的な誤差であれば、未知パラメータの推定に影響を及ぼすことは明らかであり、注意を要する。なお、構造物Cに発生した測定ノイズは外気温の日変化に類似した形をとっていることから、データロガーまたはスイッチボックスの環境



(1)測定データ3日間の場合



(2)測定データ30日間の場合

図-5 実測温度と同定結果を用いた解析値との比較 (構造物B)

温度が、直射日光などの影響により高くなったことが原因と考えられる。

(3) 収束性

逆解析の繰り返し回数は、計算時間および費用に影響するだけでなく、逆解析アルゴリズムの信頼性の目安の1つになる。そこで、逆解析計算の収束過程と測点数について検討した。

構造物Bの測定期間30日のデータにおいて、測点数の数と位置を変えて逆解析を行ったときの同定パラメータの収束過程を図-7に示す。中央1点での温度データを用いると、逆解析アルゴリズムは収束しない。測点数が2点以上であれば、いずれのパラメータも10回以内の繰り返し計算で変動がなくなり、収束の遅い熱伝達率 α_c でも20回程度の繰り返し計算で収束している。これは、他の構造物データを用いた場合も同様であった。しかし、得られる解は測点2点の場合、多少異なることがあるため測定点は3点使用することが望ましい。例えば、温度上昇速度に関する定数 γ は、他のパラメータの収束過程と異なり、測点数と位置によって値が違っている。

(4) 測点の数と位置の影響

現場計測における測点は数と位置により、2つの視点から推定する熱特性値に影響を及ぼすと予想される。すなわち、1点目は測定値が逆解析を可能とする十分な情報を含んでいるか。2点目は熱特性値が、本来、空間的に異なるものとする、どのよう

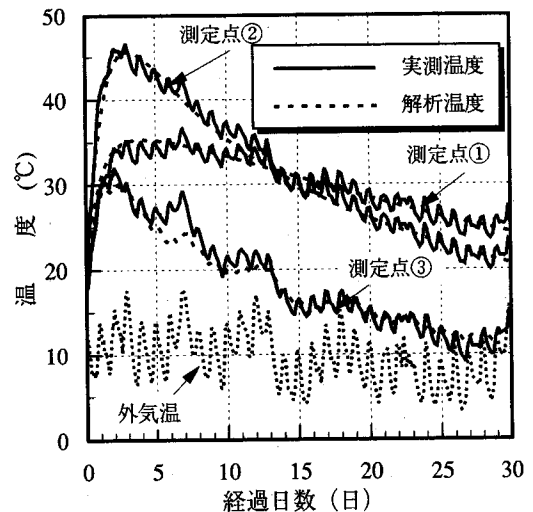


図-6 ノイズを含む実測温度と解析値の結果 (構造物C)

な測点配置をすると平均的な熱特性値が得られるかということである。例えば、熱伝達率 α_c を求めるには躯体と大気との熱収支であるので、比較的境界に近い点が重要であろう。構造物D,Eでは上部測点位置がコンクリート表面から30cm以下にあり、表-3に示すように熱伝達率は他に比べて大きくなっている。また、残りの4種類の熱特性値はコンクリート躯体全体に係わっているため、測点配置には注意する必要がある。つまり、偏った測点配置は、誤った結果につながる事が予想される。したがって、具

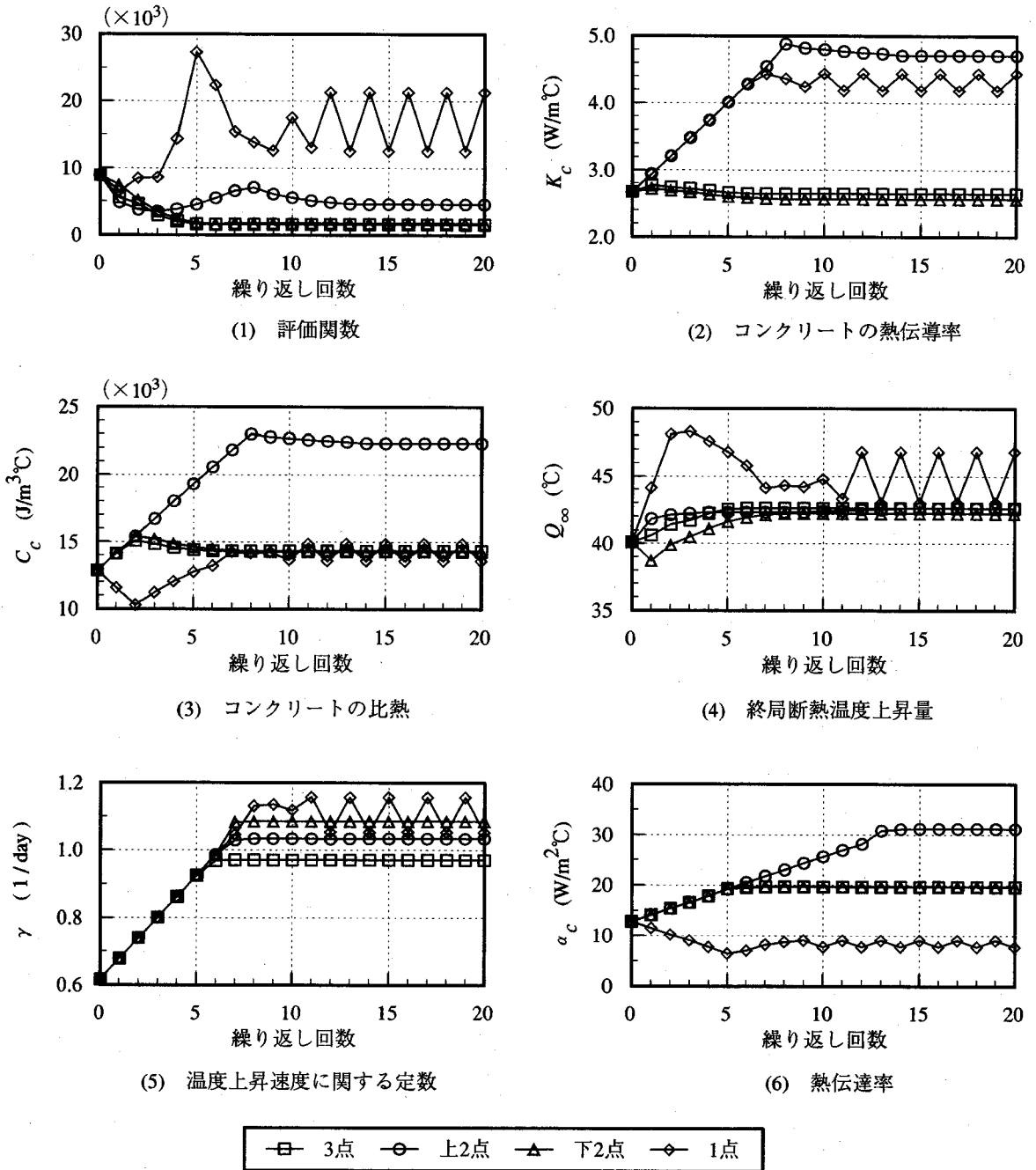


図-7 同定パラメータの収束過程 (構造物B)

体的にはコンクリート躯体の内部温度分布を考慮した上中下の3点を計測する必要があると考える。なお、上部測点は、コンクリート表面から10cm程度までの表面に近い位置とすることが望ましい。

(5) 既往値との比較

逆解析により同定された結果が、実用的で信頼性があるかは重要な問題である。逆解析からの同定値は、既述のとおり解析手法および発熱モデル、測定データの影響を受ける。また、使用コンクリートの熱特性は、一般に体積の70~80%を占める骨材の石

表-4 コンクリート熱特性の既往値

	熱伝導率 K_C (W/m 2 °C)	比熱 C_C (J/kg°C)	熱伝達率* α_C (W/m 2 °C)	備考
徳田らの研究 ²⁰⁾	0.58~4.65	837~3349	—	
マスコン指針 ¹⁾	1.50~3.61	837~1047	2.9~11.6	一般的な値
示方書 ²⁾	2.56~2.79	1047~1256	1.7~14.0	一般的な値
多目的ダムの建設 ²¹⁾	1.74~2.91	837~1256	11.6	一般的な値
近久らの研究 ¹³⁾	—	—	13.3~56.8	室内試験 (風速0~7.4m/sec)

*：マスコン指針および示方書の熱伝達率は、断熱養生からコンクリート露出面の平均的な値

質や単位量、コンクリートの含水状態や空隙量に影響を受けること、熱伝導率 K_C 、単位容積質量 ρ_C 、比熱 C_C および熱拡散率 h^2 の間に $K_C = \rho_C C_C h^2$ の関係があることが知られている。既往文献による熱伝導率、比熱および熱伝達率の値を表-4に示す。なお、徳田らの研究²⁰⁾で熱伝導率が大きいのは骨材に珪岩を使用したコンクリートであり、比熱が大きいのは骨材にパーライトを用いたものである。

表-3に示す各データ期間の同定値は、期間3日および7日の若材齢時の収束しなかったものを除いて表-4の既往値の範囲内にある。しかし、一般的な値と比べると範囲から外れるものもある。特に、構造物Dはデータ期間28日で熱伝導率4.34(W/m 2 °C)、比熱2637(J/kg°C)、熱伝達率32.2(W/m 2 °C)と大きくなった。現在、この原因を明確にすることは難しいが、構造物Dのコンクリートは単位容積質量がもっとも大きく、高炉セメントB種を用いていることが特徴である。測定データには4章(1)に示したように日射の影響により外気温が大きな値となっている。なお、対策としてパラメータ間に相関関係がある場合は、あるパラメータの相違が他に影響を及ぼすため、重みや幅の設定検討をすることも考えられる。

熱伝達率は型枠の有無・種類・厚さ・存置期間、風速や養生方法によって異なることが知られている。しかし、表-3からは養生の有無による熱伝達率の明確な違いは認められない。また、構造物D、Eでは一般的な値の2~3倍の値となった。これは5章(4)で既述のとおりコンクリート躯体内上部の測点位置が他に比べて深いことに起因するものと考えられる。今後は、現場計測における測点配置などの測定技術のマニュアル化が必要であろう。

終局断熱温度上昇量 Q_∞ は表-3の初期値との差が大きいもので28%程度であった。初期値は示方書²⁾の推定式から求めたが、これは各社セメントの平均的なものであり、誤差を含んでいる。また、本解析

の発熱モデルは、温度依存性を考慮していないことから、構造物Aのように厚さが小さいコンクリートでは、5章(1)で既述のとおり断熱状態とは異なり、終局断熱温度上昇量 Q_∞ は小さくなったと考える。したがって、厚さの小さいコンクリートでは温度依存性を考慮した発熱モデルが必要であろう。温度上昇速度に関する定数 γ についても同様である。

なお、他分野の逆解析と比較した場合、コンクリート熱特性値の推定結果は、ばらつきが小さく、解は安定しているようである。例えば、FWD試験など^{11),12)}では舗装の表面たわみを測定し、その値から舗装を構成する各層の弾性係数を推定している。これに対し、本解析はコンクリート躯体内部の測定温度を使用するため、安定すると考えられる。

以上、本解析手法による現場計測データからのコンクリート熱特性の同定値は、パラメータ間の相関関係の考慮、測定データ、発熱モデルなどの問題があるが、既往値にあり得ない値ではない。よって、本解析手法の実用性はあり、今後、これらの修正により、さらに信頼性の高いものになり得る。

本研究では、逆解析システムを適用し、現場計測データが適用できることを検証し、問題点を確認したことに大きな意味がある。著者らは、これにより、現場条件を考慮した解析パラメータのデータを蓄積することが可能となったと考える。

6. 結論

熱特性値推定の逆解析アルゴリズムを詳述し、過去に蓄積した5セットの現場計測データを用いて、温度解析時に必要となるコンクリートの熱特性パラメータ5個を一度に推定し、その実用性と問題点について考察した。本研究において得られた主な知見は、以下のとおりである。

(1) 提案した逆解析手法は、現場計測データ用い

た場合、測定データの長さにより解が求められないこともあるが、全体的に安定して解が収束することが検証された。

(2) 測定ノイズが大きく混入したデータについても、本手法を用いることによって実測値と良く一致する同定結果を得ることは可能である。

(3) 現場計測データを用いた場合、本逆解析アルゴリズムでは外気温とコンクリート躯体内の3点以上の測定データを使用すれば、10~20回の繰り返し計算で安定してパラメータを同定できる。

(4) より正確で安定した同定値を得るには、上中下の3点以上の測定データを使用し、コンクリート躯体内の上部測点は、コンクリート表面の熱伝達率に影響するため、表面から10cm程度までの表面に近い位置とすることが望ましい。

(5) 本逆解析手法により推定したコンクリートの熱特性値は不安定な若材齢を除くと、既往値にあり得ない値ではないが、一般的な値よりも大きなものもあった。

(6) コンクリート表面での熱収支および外気温測定に注意を要すること、温度依存性を考慮した発熱モデルの必要性などが確認された。

今後は、さらにデータを蓄積し、同定パラメータ間の相関関係を明確にする必要がある。また、逆解析は不安定な問題であり、計測データの影響を大きく受けるため現場計測の技術マニュアルの作成などが必要である。

謝辞:本研究を進めるにあたり、東京電機大学理工学部建設工学科卒業生(現:西松建設) 亀谷英樹君には、プログラム作成と多くの計算作業に協力を頂いたことを記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートの温度ひびわれ制御対策指針, 1986年3月.
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 [施工編], 1993年9月.
- 3) 小野 定: マスコンクリートの温度上昇に及ぼす各種要因の影響およびコンクリートの上昇温度計算法の提案, 土木学会論文集第348号/V-1, pp.123-132, 1984年8月.
- 4) 中村秀明・浜田純夫: 材料の不確定性を考慮したコンクリート構造物の熱伝導有限要素解析, 土木学会論文集No.496/V-24, pp.71-80, 1994年8月.
- 5) K.Matsui, N.Nishida, Y.Dobashi and K.Ushioda: Sensitivity Analysis and Reliability Evaluation of Thermal Cracking in Mass Concrete, International Symposium on Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, RILEM, pp.305-312, October 1994.
- 6) 西田徳行, 潮田和司, 土橋吉輝, 松井邦人: CL法を用いたスラブ状コンクリートの温度ひび割れ指数に及ぼす解析パラメータの影響評価, コンクリート工学論文集, Vol.6, No.2, pp.34-42, 1995年7月.
- 7) 鈴木康範, 辻 幸和, 前川宏一, 岡村 甫: コンクリート中に存在するセメントの水和発熱過程の定量化, 土木学会論文集, 第414号/V-12, pp.155-164, 1990年2月.
- 8) 原田修輔, 前川宏一, 辻 幸和, 岡村 甫: 温度依存性を有するセメントの水和発熱過程と熱伝導との連成を考慮した非線形温度解析, 土木学会論文集, 第426号/V-14, pp.167-176, 1991年2月.
- 9) 久保司郎: 逆問題, 培風館, 1992年.
- 10) 本城勇介: 地盤工学における逆解析 5.逆解析における事前情報とモデルの選択(その1), 土と基礎, No.43, Vol.7, pp63-68, 1995年7月.
- 11) FWD研究会: FWDに関する研究(その2), 1995年12月.
- 12) 松井邦人, 笠原 篤, 岡田貢一: 逆解析弾性係数にする測定たわみと構造モデルの誤差の影響, 土木学会論文集, No.526/V-29, pp.55-62, 1995年11月.
- 13) 近久博志, 津崎淳一, 荒井幸夫: 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年8月.
- 14) Nelder, J. A. and R. Mead: A Simplex Method for Function Minimization, *The Computer Journal*, 7, pp.308-313, 1965.
- 15) 松井邦人, 西田徳行, 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年6月.
- 16) 潮田和司, 亀谷英樹, 松井邦人: 実測データに基づくマスコンクリートの熱特性値の推定, 土木学会第49回年次学術講演会, pp.1146-1147, 1994年9月.
- 17) Incropera, F.P. and Dewitt, D.P.: *Fundamentals of heat and mass transfer*, 3rd edition, John Wiley & Sons, 1990.
- 18) Duffie, A.J. and Beckman, W.A.: *Solar engineering of thermal processes*, 2nd edition, John Wiley & Sons, 1991.
- 19) 清水昭男, 伊藤 洋, 坂口雄彦: マッシュなコンクリート構造物の温度ひびわれ発生に及ぼす日射の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.8, No.1, pp.13-16, 1986年6月.
- 20) 徳田 弘, 庄谷征美: コンクリートの熱特性の測定と二, 三の考察, 土木学会論文集, No.212, pp89-98, 1973年4月.
- 21) 建設省河川局監修: 多目的ダムの建設—第3巻—設計V編, 1987年.

(1995.6.13 受付)

ESTIMATION OF THERMAL PROPERTIES OF CONCRETE ON-SITE MEASUREMENTS OF TEMPERATURE

Noriyuki NISHIDA, Katsushi USHIODA, Yoshiteru DOBASHI and Kunihito MATSUI

Prior to casting concrete, thermal stress analysis is often performed in order to examine a possibility of crack occurrence due to cement hydration. Many parameters are involved in the analysis, for which their average values are chosen considering existing references or the experiment conducted for that purpose. However the values could differ depending on the environmental conditions at construction sites as well as materials in use.

The objective of this study is to demonstrate the effectiveness of the inverse analysis algorithm for estimating thermal parameters from on-site measurement data and to examine the results obtained.