

逆解析を用いたマスコンクリートの熱特性値の推定

東北学院大学 工学部 学生会員 ○黒後 卓也
 東北学院大学 大学院 学生会員 高橋 真一
 東北学院大学 工学部 正会員 遠藤 孝夫

1. はじめに

マスコンクリートでは、セメントの水和熱による躯体内の温度変化に伴って温度応力が発生し、それが原因で温度ひび割れがコンクリート内に発生する可能性がある。温度ひび割れは構造物の設計・施工において無視できない影響を与える。温度ひび割れ予測は、まず、温度解析によりコンクリート躯体内の温度分布を予測することから始まる。精度の良い温度解析を行うためには、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。現場でのコンクリート打設では、境界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、より精度の良い温度解析をするため逆解析による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事が考えられる。

本研究は、実測値の代わりに順解析による温度解析結果を用い、マスコンクリートの温度分布に影響を及ぼす4つのパラメータをGauss-Newton法により推定を試み、Gauss-newton法がマスコンクリートの熱特性値の推定に適用可能かどうかを検討する。

2. 熱特性値の推定方法

逆解析の手法には大別して2つの方法がある。それは確率論的手法と確定論的手法である。確定論的手法は逆定式化法と直接定式化法に分類できる。

前者は、計測変位量を既知として、通常解析とは逆の定式化を行うものである。一方、後者は、通常のプログラムと最適化プログラムを組み合わせることによって逆解析が可能となる。しかし、この方法では、初期値を与えた後繰り返し計算をおこない最適化を推定するため、前者に比べて計算時間がかかる。本研究で用いるGauss-Newton法は直接定式化法に属する。

推定する熱特性値は下記の4つである。

- ① K_C : コンクリートの熱伝導率 (kcal / cmh $^{\circ}$ C)
- ② α_A : コンクリートの熱伝達率 (kcal / cm 2 h $^{\circ}$ C)
- ③ Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量
- ④ γ : 温度上昇速度に関する係数
- ③④については式(1)の関係がある。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma t}) \quad (1)$$

ここで、 $Q(t)$: 材令(t)におけるコンクリートの断熱温度上昇量

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量

γ : 温度上昇量に関する定数

t : 材令

前述の4つのパラメータをまとめて表すと

$$X = (X_1, X_2, X_3, X_4)^T \quad (2)$$

と表せる。

以下、Gauss-Newton法による定式化を示す。

Gauss-Newton法は、非線形最小二乗法の一つであり測定温度(u_i)と解析温度(T_i)の評価関数 f を式(3)のように設定する。

$$f(X) = \int_{t_0}^{t_n} \sum_{i=1}^N \{u_i(t) - T(X, t)\}^2 dt \quad (3)$$

式(3)は、熱特性パラメータ X に関する非線形の関数であり、この式を最小とする X が求めたいコンクリートの熱特性値である。すなわち、式(4)が必要条件で

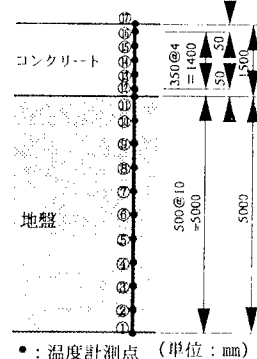


図-1 熱特性値の解析モデル

表-1 コンクリート及び岩盤の熱特性値

項 目		基準値	初期値(50%)	初期値(200%)
未知パラメータ	K_C コンクリートの熱伝導率 (kcal / cmh $^{\circ}$ C)	0.023	0.0115	0.046
	α_A コンクリートの熱伝達率 (kcal / cm 2 h $^{\circ}$ C)	0.0012	0.0006	0.0024
	Q_{∞} 断熱温度上昇量推定値	34.0	17.0	68.0
	γ	0.654	0.327	1.308
既知パラメータ	C_C コンクリートの比熱 (kcal / kg $^{\circ}$ C)	0.31		
	K_R 岩盤の熱伝導率 (kcal / cmh $^{\circ}$ C)	0.0194		
	C_R 岩盤の比熱 (kcal / kg $^{\circ}$ C)	0.25		
	T_A 外気温 ($^{\circ}$ C)	20.0		
	T_B 固定温度境界の岩盤温度 ($^{\circ}$ C)	15.0		
	T_{CO} コンクリートの初期温度 ($^{\circ}$ C)	20.0		
	T_{RO} 岩盤の初期温度 ($^{\circ}$ C)	15.0		
	ρ_C コンクリートの密度 (kg / cm 3)	0.0023		
	ρ_R 岩盤の密度 (kg / cm 3)	0.0026		

ある. $\frac{\partial f}{\partial X_K} = 0 \quad (K = 1, 2, 3, 4)$ (4)

式(3)はXの陰関数となり, 最小値を求めるには繰り返し計算が必要となる. そこで, Xに関して次ぎのような1次のTaylor展開を考える.

$$T_i(X + \Delta X, t) = T_i(X, t) + \sum_{j=1}^4 \Delta X_j \quad (5)$$

式(5)の右边を式(3)の $T_i(X, t)$ に代入し, 式(4)の必要条件を適用すると式(6)が得られる.

$$\sum_{j=1}^4 \left\{ \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^N \frac{\partial T_i}{\partial X_j} \frac{\partial T_i}{\partial X_K} \right\} \Delta X_j = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^N \{ u_i(t) - T_i(X, t) \} \left(\frac{\partial T_i}{\partial X_j} \right) dt \quad (6)$$

以上がGauss-newton法による定式化である.

3. 解析例

図-1は解析に用いたモデル図である. 又, 解析に用いた物性値を表-1に示す. 未知の4個のパラメータの基準値を50%したものと, 200%したものを初期値とし81組作成した. また, 測点数の影響を調べるため5点すべての温度計測点を用いたとき, $i = 12, 13, 15, 16$ の4点を用いたとき, $i = 12, 14, 16$ の3点を用いたとき, $i = 14, 16$ の2点を用いたとき, $i = 16$ の1点のみを用いたときについて81組の初期値を用いて逆解析を行った. ここでは順解析にSchmidt法による1次元温度解析を, 逆解析にはGauss-Newton法を用いて解析した. 外気温は, $1) 20^\circ\text{C}$, $2) \{20 + 5\sin \pi(t/12 - 2/3)\}^\circ\text{C}$ の2種類を外気温とした.

4. 解析結果及び考察

未知パラメータの収束過程の一例を図-2に示す. 未知パラメータは, 10回以内で収束した. 初期値と温度計測点と外気温の関係を表-2で示す. 温度一定の場合は計測点1点のとき81組中6組発散している, 2点以上はすべて収束している. sin波のときは1点のとき81組中5組発散していて, 2点のとき81組中6組発散している. 3点以上は全て収束している. 計測点と収束性の関係を図-3に示す. 一定の初期値を1組だけ決め, 計測点だけ変えて解析した. 温度上昇に関する定数と, コンクリートの熱伝導率に関しては温度計測点の数に関係なく収束過程は安定しているが, その他の3個の未知パラメータは測点数が3個以上のときほとんど差がないが, 2個以下のときは, 収束過程に少し不安定な兆しが見える.

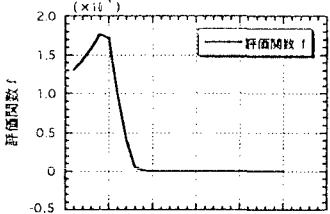


表-2 初期値と温度計測点の影響

測点数	外気温	20°C一定	sin波
case1		75 / 81	76 / 81
case2		81 / 81	75 / 81
case3		81 / 81	81 / 81
case4		81 / 81	81 / 81
case5		81 / 81	81 / 81

※ 収束した組数 / 初期値の組数

- 注) case1: 計測点 $i = 12, 13, 14, 15, 16$ のデータ
case2: 計測点 $i = 12, 13, 15, 16$ のデータ
case3: 計測点 $i = 12, 14, 16$ のデータ
case4: 計測点 $i = 14, 16$ のデータ
case5: 計測点 $i = 16$ のデータ

5. 結論

本研究ではGauss-Newton法がコンクリートの熱特性値の推定に対して有効であるかを検討するために解析条件をそれぞれ, 初期値81組, 外気温2種類, 温度計測点5組を組み合わせ逆解析を行った. その結果, 次のような結果を得られた.

- 1) Gauss-Newton法に基づく逆解析は, 熱特性パラメータの推定に有効である.
- 2) 本研究で解析を行った範囲では, いずれの組み合わせを用いても基準値に収束するといえる.
- 3) 温度計測点が多いと安定した収束過程を得られる. しかし, 計測点が1点や, 2点の場合収束過程に不安定な兆しがある. 安定した収束過程が得たい場合には計測点の数を増やすことが望ましい.

<参考文献>

- 1) 松井司郎, 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, Vol.16, No.1, pp.1347-1352, 1994年6月

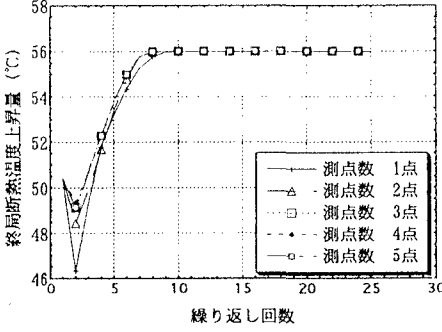


図-3 終局断熱温度上昇量 まとめ