

V-34 拡張カルマンフィルタを用いたマスコンクリートの熱特性値の同定

東北学院大学大学院 工学研究科 学生会員 ○黒後 卓也
東北学院大学 工学部 正会員 遠藤 孝夫

1. はじめに

マスコンクリートの温度ひび割れを的確に制御するためには事前の温度解析を精度良く行う必要がある。通常、温度解析で与える熱特性値は室内実験の結果や示方書の値等を参考にして定められるが、コンクリートの打設条件や日射の影響などにより、解析の仮定と必ずしも一致しないこともあり、事前の予測値と温度実測値に差異が生ずることがある。

そこで本論文では、順解析に土木学会の標準示方書などの値を参考にして定めた基準値を用い、算出した温度計算値を現場コンクリートの測定値とみなし、日射の影響を考慮した拡張カルマンフィルタと有限要素法を組み合わせた非定常熱伝導逆解析手法により、マスコンクリートの温度分布に影響を及ぼすコンクリートの熱伝導率とコンクリートの日射吸収率の2つパラメータを推定可能であるかどうか検討した。

2. 日射の評価法

全日射量の算定は一日の中で大気透過率を変化させる佐々¹⁾らによる方法を採用し、温度解析場における日射の影響を、それと等価に換算する相当外気温の考え方を採用した。

相当外気温 t_e は、算定された全日射量 I_T を用いることにより次式のように表すことができる。

$$t_e = t_0 + Asu \cdot \frac{I_T}{\alpha_0} \quad (1)$$

ただし、 t_0 ：外気温

Asu ：コンクリート表面の日射吸収率

I_T ：全日射量

α_0 ：コンクリート表面の熱伝達率

3. 拡張カルマンフィルタによる熱特性値の推定理論

3.1 状態空間モデル

拡張カルマンフィルタは次式に示す非線形観測方程式と非線形システム状態方程式を基本としている。

$$y_t = h_t(x_t) + v_t \quad (2)$$

$$x_{t+1} = F_t(x_t) + G_t w_t \quad (3)$$

ここで、 x_t ：時刻 t における n 次元状態ベクトル

y_t ：時刻 t における p 次元観測ベクトル

w_t ： m 次元システム雑音ベクトル

v_t ： p 次元観測雑音ベクトル

F_t ： $n \times n$ 状態遷移マトリクス

G_t ： $n \times m$ システム雑音マトリクス

h_t ： $p \times n$ 観測マトリクス

3.2 有限要素法による非定常熱伝導解析

拡張カルマンフィルタに空間に関して離散化した系全体の有限要素法を組み込むための定式化を示す。

(a) 観測方程式

一般に有限要素法により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。

$$M \dot{\theta} + K \theta = Q \quad (4)$$

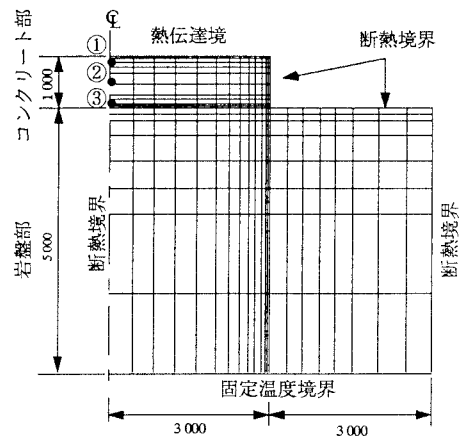


図-1 解析モデル (単位:mm)

表-1 解析条件

物性値	温度測定値作成用	
	コンクリート	岩盤
熱伝導率(kcal/cmh℃)	0.023	0.0194
熱伝達率(kcal/cmh℃)	0.0011	0.0012
比熱(kcal/kg℃)	0.28	0.25
終局断熱温度上昇量(℃)	46.0	
断熱温度上昇係数	1.10	
初期温度(℃)	20.0	15.0
固定温度(℃)		15.0
外気温(℃)	20.0+5sin π(t/12・2/3)	

ここに、 θ ：温度ベクトル

$\dot{\theta}$ ：温度の時間変化率ベクトル

K ：熱伝導に関するマトリクス

M ：熱容量マトリクス

Q ：熱流速ベクトル

式(4)をCrank-Nicolson法によって時間的な離散化を行うと、次の漸化式が得られる。

$$\theta_{i+1} = \left(M_{i+1} + \frac{\Delta t}{2} K_{i+1} \right)^{-1} \left(M_i - \frac{\Delta t}{2} K_i \right) \theta_i + \frac{\Delta t}{2} \left(M_{i+1} + \frac{\Delta t}{2} K_{i+1} \right)^{-1} (Q_i + Q_{i+1}) \quad (5)$$

観測値 y は接点温度 θ_{i+1} に観測ベクトル v を加えたものとなるので、観測方程式は次のように定義できる。

$$y = \theta_{i+1} + v = h(1) + v \quad (6)$$

(b) システム状態方程式

熱伝導率および日射吸収率は時刻ごとに状態量 x は変化しないので状態遷移マトリクス F_i を単位マトリクスとして考える。また、このようなシステムではノイズの混入が無いものと考えると式(3)によるシステム状態方程式は、次のようになる。

$$x_{t+1/t} = I x_{t/t} \quad (7)$$

I ：単位マトリクス

4. 適用例

本手法の有効性を検証するために適用例を示す。解析対象とした構造物は、高さ1.0m、幅3.0mのスラブ状マスコンクリートであり岩盤上に打設するものとした。境界条件はコンクリート上面が大気との熱伝達境界および日射発熱境界とし、コンクリートおよび岩盤側面では断熱境界、そして、岩盤底面は固定温度境界とし解析を行った(図-1)。また、解析条件を表-1に示す。

解析手順はコンクリート打設日を9月と仮定し、外気温を仙台の9月の平均気温20℃に振幅±5℃のsin関数で与えた。日射量算定法また相当外気温については2.で説明した方法を用いた。そして、熱伝導率は土木学会の標準示方書の値を参考し0.023kcal/cm h℃とし、日射吸収率は0.6で一定と設定した。有限要素法温度解析結果より得られたコンクリート上面より5cm、50cm、95cm部分の温度分布を図-2に示す。

次に、この順解析結果を現場コンクリートの計測値とみなし、逆解析を用いて熱伝導率と日射吸収率の値を推定し、順解析で設定した値と比較した。逆解析をする際は熱伝導率と日射吸収率の値を設定値から誤差を与えた値を用いて解析を行った。

逆解析結果を図-3、図-4に示す。熱伝導率、日射吸収率とも基準値と設定した値(コンクリートの熱伝導率=0.023ckcal/cm h℃、日射吸収率=0.6)にはほぼ収束しており、本手法の有効性が確認できた。

5. 結論

本研究では、拡張カルマンフィルタを用いてコンクリートの熱伝導率、日射吸収率を推定した。その結果拡張カルマンフィルタにもとづく逆解析は、熱伝導率、日射吸収率の推定に有効であることが示された。

参考文献

佐々信也ほか：日射量の算定に必要な大気透過率の同定，東北学院大学工部研究報告書，第34巻，pp21・26

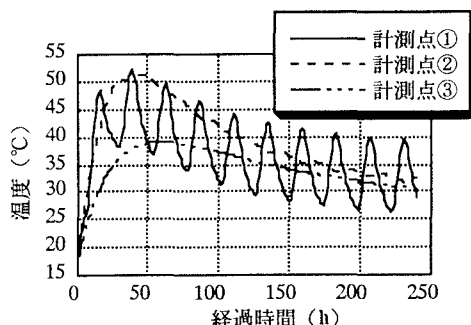


図-2 順解析結果 (接点温度経時変化)

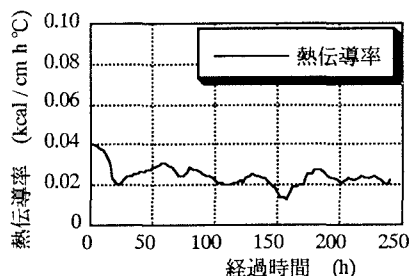


図-3 熱伝導率の推定結果

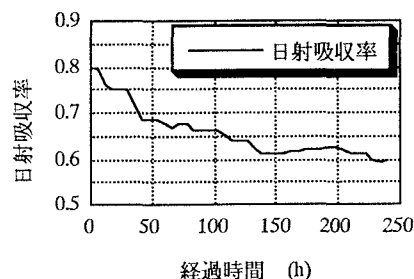


図-4 日射吸収率の推定結果