

CS-25

拡張カルマンフィルタを用いたトンネル地山の熱定数の同定

㈱東北電力	正 員	齊藤 知秀
北海道大学	正 員	三上 隆
㈱地崎工業	正 員	須藤 敦史

1. はじめに

寒冷地等の気象条件の厳しい地点や標高の高い地点に建設される道路トンネルは、つららや側水の発達、地山凍結による覆工の変形など、いわゆる凍害を受ける危険性が大きい。そのため、NATM工法で施工される新設トンネルの内部断熱や、既設トンネルの補修のための外部断熱に断熱材が用いられているが、その厚さ等は地山の熱定数(熱伝導率・熱容量)に大きく依存する¹⁾。しかし地山の熱定数は、空間的に変動する等の不均質性を有するものと考えられ、また物性値試験より得られる値や観測データは観測誤差等のばらつきを含む値である。そこで空間的不均質性や観測誤差等のばらつきをノイズとすることにより熱定数の不確定性を処理することができる拡張カルマンフィルタ^{2, 3)}を用いて、地山の熱定数を同定を試みた。

2. 非定常熱伝導方程式の離散化解析

非定常熱伝導方程式の解法には離散化手法を用いることにし、ここでは空間に関しては有限要素法を、時間に関してはCrank-Nicolson法を用いて離散化する。

有限要素法の適用の結果、熱伝導微分方程式は次の時間に関するマトリクス方程式となる。

$$[C]\{dU/dt\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad (1)$$

$\{U\}$: 節点温度ベクトル, $\{F\}$: 熱入出力ベクトル, $[C]$: 熱容量マトリクス, $[K]$: 熱伝導マトリクス
式-(1)にCrank-Nicolson法を適用すれば、時間に関する次の漸化式-(2)が得られる。

$$\left(\frac{2}{\Delta t}[C] + [K]\right)\{U\}_{t+1} = \left(\frac{2}{\Delta t}[C] - [K]\right)\{U\}_t + 2\{F\}_t \quad (2)$$

ここで Δt は時間刻みである。

3. 拡張カルマンフィルタ

従来のような解析手法においては空間的不均質性や観測誤差を考慮に入れ、誤差を有する観測値を用いた熱定数の正確な推定は難しく、信頼性の高い予測解析を行えない。本解析に用いている拡張カルマンフィルタでは、ベイズ理論により確率的にデータを取り扱い観測値を確率量の実現値としてとらえ、地盤調査等の事前分布を観測値により更新し、事後分布を推定している。拡張カルマンフィルタは対象となるシステムの状態量と観測量に含まれるノイズのガウス性を仮定し、観測値が得られる度に条件付き確率密度関数を更新する逐次適合型の最適化手法である。

4. 数値解析例

4.1) トンネル・地山モデル

トンネル地山の熱定数の同定は、トンネル内空温度や地山の温度が測定されている一般国道37号のAトンネルを対象に行った。図-1にトンネル地山の一次元モデルを示す。覆工の厚さは40cmであり、覆工部の熱伝導率と熱容量をそれぞれ $(k)_c$ 、 $(\rho c)_c$ で、地山部のそれらを $(k)_s$ 、 $(\rho c)_s$ で表す。尚、覆工部の熱定数は確定値として以下の値を用いた。

覆工部 熱伝導率; $(k)_c = 1.0 \text{ (Kcal/mh}^\circ\text{C)}$ 熱容量 ; $(\rho c)_c = 400 \text{ (Kcal/m}^3\text{ }^\circ\text{C)}$

解析では、図-1に示すに地山側の温度 U_6 は年平均気温で与えられるものとし、トンネル内空側の入力温度および覆工中央部(点①)と地山部(点②～点⑤)において観測された温度履歴を図-2に示す。

4.2) 同定値を用いた温度時間履歴

地山の熱定数同定に関して、効率的な観測位置を考察するため、同定値を用いて温度時間履歴を再現することとし、再現した温度時間履歴の一例を図-3に示す。次に式-(3)のような評価関数(観測履歴と同定値による再現履歴との残差)を指標とし、同定値による順解析の結果より、地山の熱定数(熱伝導率・熱容量)の同定に関する効率的な観測位置を考察する。表-2は着目観測位置別の同定値と評価関数 P の値を整理したものである。

$$P = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (U_{ji} - \hat{U}_{ji})^2 \quad (3)$$

ここで i は時間的観測点、 m は日データ数、 j は空間的観測点、 n は観測地点数、 U は同定値を用いて計算された温度、 $\hat{U}$ は観測温度(実観測データ)を表している。

表-1を見ると、全観測データ(①②③④⑤)を用いて同定した場合が最も残差が小さくなっている。単点同定で最も残差が小さいのは覆工地山境界の観測データ②を用いて同定した場合である(図-3)。逆に最も残差が大きいのは覆工中央の観測データ①を用いて同定した場合となっている。

5. まとめ

今回、用いたデータのみから判断すれば、以下のようにまとめられる。

- 1) 地山の熱定数の同定において拡張カルマンフィルタは有効な手法である。
- 2) 多くの正確な観測データがあれば、より正確な地山の熱定数が同定されるが、多くの観測点をとらなくても適切な1点をとれば地山の熱定数の同定は可能となる。しかし、覆工区内で得られたデータを用いて、同定することは困難である。地山の熱定数を同定するには、少なくとも1点は地山部の影響を反映する観測点が必要である。覆工側に近くかつ覆工と地山の両方に接している覆工地山境界が効率的な観測位置であろうと思われる。

<参考文献>

- 1) 三上隆・林憲造・権田静也：寒冷地道路トンネルの断熱材設計のための実用的な温度算定式の提案；土木学会論文集，No.498/VI-24，pp.87～93，1994。
- 2) 須藤敦史・星谷勝：拡張カルマンフィルタの基本的考察とEK-WLI法の提案；土木学会論文集，No.437/pp.203～211，1991。
- 3) 須藤敦史・星谷勝：EK-WLI法によるパラメーター同定；土木学会北海道支部論文集，第49号/pp.289～293，1993。

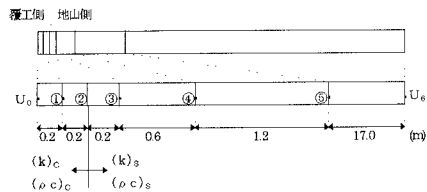


図-1 解析モデル

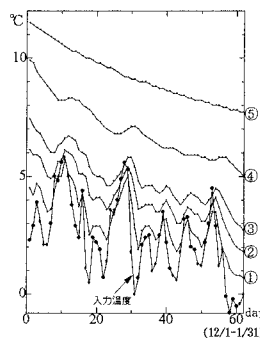


図-2 実観測データ

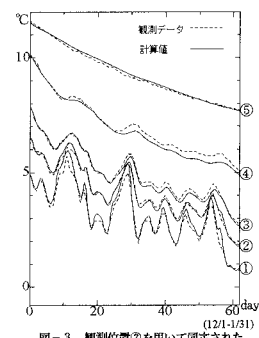


図-3 観測位置②を用いて同定された再現温度時間履歴

表-1 着目観測点別による同定値と残差の比較

観測点\同定値	熱伝導率(k) _s	熱容量(ρc) _s	P(残差)
①②③④⑤	1.1	420	0.025
①	1.0	290	0.166
②	1.1	410	0.026
③	1.1	440	0.027
④	1.2	460	0.032
⑤	1.1	390	0.033