

寒冷地道路トンネルにおける断熱材設計 のための地山熱定数の同定

須藤 敦史¹・三上 隆²・菲澤 憲吉³・斉藤 知秀⁴

¹正会員 博士(工学) (株)地崎工業 技術開発部 主任研究員(〒105 東京都港区西新橋2-23-1)

²フェロ-会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 博士(工学) 北海道大学助教授 工学部土木工学科(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

⁴正会員 修士(工学) 東北電力(株) 東新潟火力発電所(〒957-01 新潟県北蒲原郡聖籠町東港)

寒冷地における道路トンネルは、冬期間の凍上防止のために断熱材を施工する例が多くなっており、施工性・経済性の観点から、断熱材の合理的な設計が課題となっている。断熱材の設計厚はトンネル周辺地山の熱定数(熱伝導率・熱容量)やトンネル内の気温に大きく依存する。しかし、実際の地山熱定数は不均質性を有し、試験値は誤差を含むため、その正確な推定は難しく信頼性の高い断熱材の設計計算が行えないのが現状である。

そこで本論文は、断熱材設計における解析の精度向上とその基礎資料収集を目的として、地山熱定数の同定を拡張カルマンフィルタを基本とした手法と有限要素法の非定常熱伝導解析により試み、その妥当性を実際に観測した温度履歴を用いた数値解析により検証している。

Key Words: load tunnel, heat conduction, climate, parameter identification, estimation, extended kalman filter, finite element method

1. はじめに

寒冷地や高地に施工される道路トンネルは、冬期間のつららや側氷の発達・地山の凍上による覆工の変形などの凍害を受ける危険性が高く、例えば北海道内において在来工法で施工された道路トンネルの約半数は、何らかの変状が認められている¹⁾。そこで冬期間における地山の凍結防止のため、NATM工法により新設されるトンネルでは一次覆工と二次覆工の間に、既設トンネルでは覆工壁面に、断熱材を施工する例が多くなっており、その施工性・経済性の観点から断熱材の合理的な設計が課題となっている。

断熱材の材料選定やその設計厚さに関する研究では、鉄道トンネルでは岡田・松本^{2), 3)}により算定式が提案されており、また道路トンネルでは著者らの一人が実用的な温度算定式を提案している⁴⁾が、断熱材の設計厚さは算定式のパラメータとなるトンネル周辺地山の熱定数(熱伝導率・熱容量)や入力値となるトンネル内気温の推定精度に大きく依存する。

しかし、実際の地山において熱定数等是不均質性を有するものであり、かつ各種試験より得られる値は観測誤差を含む値であるため、その正確な推定は難しく、信頼性の高い断熱材の設計計算が行えないのが現状である。そこで、地山における効率的な熱定数を正確に推定するためには、このような状況を考慮した手法により、熱定数を同定する逆解析的なア

プローチが必要となる。

そこで、本研究は道路トンネルにおける断熱材設計のための基礎資料を得ることを目的として、まず有限要素法における一次元非定常熱伝導解析の熱伝導率・熱容量を拡張カルマンフィルタの未知量として定式化し、それらの同定を一般国道37号豊浦町礼文華トンネル(昭和40年竣工)で得られた温度観測値を用いて行っている。次に、同定値により再現した温度履歴と得られた温度観測値を比較し、本研究の妥当性を考察している。加えて、熱伝導率・熱容量の同定に際する効率的な観測位置や観測点の個数、季節変化による覆工コンクリートに対する熱伝達率や熱の流れの状況等の考察も行っている。

このように、トンネル-地山系の温度履歴が正確かつ安定に再現できれば、断熱材の設計計算の精度向上が図られるばかりではなく、その効果の検証や保守等にも利用できる。加えて長期観測を行うことによりトンネル周辺地山の安定性の評価や覆工コンクリートの材質変化の検討にも利用できる可能性を有している。

一方、カルマンフィルタを用いて観測値より地盤定数等を同定する逆解析⁵⁾⁻⁹⁾は数多く行われており、地盤の熱伝導に関する逆解析では小島ら¹⁰⁾が、地温の制御を目的とした熱伝導率の同定を非線形最小二乗法を用いて行っている。しかし、本研究では合理的に断熱材設計を行う上の資料を得ることを目的としているため、複数の熱定数(熱伝導率・熱容量)の同定を行い、

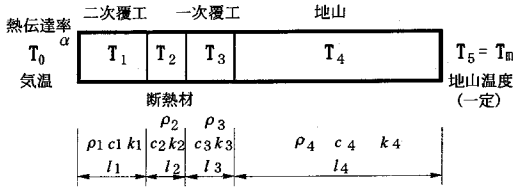


Fig. 1 トンネル断熱材・地山モデル

覆工コンクリート断熱材-地山における熱伝導状態の把握とその考察を主眼としている。

2. 非定常熱伝導問題の解析

(1) 解析モデル

トンネルにおいて地山や断熱材、覆工コンクリートの温度履歴は、本来空間については三次元問題として取り扱うべきであるが、解析を簡略化するために次元問題として考える。

本研究で用いる覆工コンクリート断熱材-地山系の解析モデルをFig. 1に示す。なお、トンネル内空側の空気層と覆工コンクリート表面の熱伝達条件を考慮するものとする。

ここで、Fig. 1に示す次元モデルにおいて温度分布 $T(x, t)$ を支配する非定常熱伝導方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$a^2: \text{温度伝播率}, a^2 = \frac{k}{\rho c}$$

k : 熱伝導率 (kcal/m·h·°C), ρ : 比熱 (kcal/kg·°C)

c : 密度 (kg/m³), ρc : 熱容量 (kcal/m³·°C)

上式において境界条件は、トンネル内空側と地山側でそれぞれ以下の式となる。

$$q = \alpha(T - T_0) \quad (2. a)$$

$$T = T_m \quad (2. b)$$

q : 熱流束 (kcal/h)

α : 熱伝達係数 (kcal/m·h·°C)

ここで、 T_0 はトンネル内空側の空気層において時々刻々と変化する温度である。また、 T_m は地山の境界点における温度履歴であり、地山の厚さ(深さ) l_m を十分に大きくとれば、一般に T_m はトンネル施工箇所における年平均気温に一致することが知られている。

そこで、本研究では地山の厚さ l_m を半無限体、覆工コンクリート境界面でその温度が年周期変動 ($\sin pt$, $p = 2\pi/(365 \times 24)$) をするものと仮定し、 l_m の位置における温度変動の振幅が表面の1%以下に減衰する深度を地温が年平均気温 T_m に一致する深度として次式より算定している¹⁾。

$$l_m = 243.16 \sqrt{k_4(\rho c)_4} \quad (3)$$

(2) 次元非定常熱伝導方程式の離散化

本研究では空間に対する離散化には有限要素法を採用する。加えて、解析対象を有限な要素に分割し要素内の温度分布は線形的に変化すると仮定する。ここで、解析対象における全体の熱伝導に関する有限要素式は個々の要素を集めて組み立てることにより、次式のようなマトリクス方程式で表現できる。

$$[C] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + [K] \{T\} = \{F\} \quad (4)$$

$\{T\}^T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$: 全体の節点温度ベクトル

(n : 全節点数), $\{F\}$: 熱流束ベクトル

$[C]$: 熱容量マトリクス, $[K]$: 熱伝導マトリクス

また、各要素の熱容量マトリクス $[C_e]$ と熱伝導マトリクス $[K_e]$ は以下の式で与えられる。

$$[C_e] = \frac{(\rho c)_e l_e}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5. a)$$

$$[K_e] = \frac{k_e}{l_e} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} \quad (5. b)$$

ただし、サフィックス e は各要素における熱定数および要素長さに関する諸量を表し、熱伝導マトリクス $[K_e]$ の右辺の第二項はトンネル内の空気層に接する要素のみに対して有効となる。また、各要素の熱流束ベクトル $\{F_e\}$ においても、次式に示すようにトンネル内空側に接する要素を除いて零ベクトルとなる。

$$\{F_e\} = \begin{Bmatrix} \alpha T_0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

次に、未知節点温度と既知節点温度に関する各マトリクスおよびベクトルにサフィックス u, k を付けて区別し、マトリクス方程式 (4) を再整理すると次式となる。

$$\begin{bmatrix} C_{uu} & C_{uk} \\ C_{ku} & C_{kk} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial T_u}{\partial t} \\ \frac{\partial T_k}{\partial t} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{uu} & K_{uk} \\ K_{ku} & K_{kk} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_u \\ T_k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_u \\ F_k \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$\{T_u\}$: 未知節点温度, $\{T_k\}$: 既知節点温度

ここで、地山側において温度が規定される境界条件式 (2. b) を考慮すると、時間に対するマトリクス方程式は次式のように変更される。

$$[C_{uu}] \left\{ \frac{\partial T_u}{\partial t} \right\} + [K_{uu}] \{T_u\} = \{P_u\} \quad (8)$$

$$\{P_u\} = \{F_u\} - [K_{uk}] \{T_k\} \quad (9)$$

ここで、式 (8) はトンネル内空側の空気層とトンネル壁面における熱伝達条件 (式 (2. a)) を考慮した場合であるが、トンネル内空側の境界条件として温度が規定される場合 ($T = T_0$) には、全体の熱伝導マトリクス $[K]$ と熱流束ベクトル $\{F\}$ の作成段階で熱伝達係数 $\alpha = 0$ と置けば、式 (8) の時間に関するマトリクス方程式が得られるが、 T_0 が時間とともに変化するため式 (9) は次式となる。

$$\{P_u\} = \{F_u\} - [C_{uk}] \left\{ \frac{dT_k}{dt} \right\} - [K_{uk}] \{T_k\} \quad (10)$$

よって、式(8)を時間方向に積分すれば全要素の未知温度が求められる。

次に時間に対する離散化に対しては、無条件安定なステップであるCrank-Nicolson法を採用する。ここで時間刻みの幅を Δt とすると以下に示す漸化式(11)が得られる。

$$\left[\frac{[K_{uu}]}{2} + \frac{[C_{uu}]}{\Delta t} \right] \{T_u\}_{N+1} = \left[\frac{[C_{uu}]}{\Delta t} - \frac{[K_{uu}]}{2} \right] \{T_u\}_N + \frac{1}{2} \{ \{P_u\}_{N+1} + \{P_u\}_N \}, N = 0, \Delta t, 1 \cdot \Delta t, \dots \quad (11)$$

Δt : 時間刻み

ここで、上式の右辺は既知であるため、非定常熱伝導問題は、式(11)を用いることにより逐次解くことができ、初期条件と境界条件が与えられれば未知節点の温度履歴が求められる。

3. 拡張カルマンフィルタを基本とした手法による地山熱定数(熱伝導率・熱容量)の同定

(1) 拡張カルマンフィルタ

拡張カルマンフィルタは、ベイズ理論を基礎として観測値を確率量の実現値としてとらえ確率的にベイズ推定を扱い、地盤調査等から得られる状態(未知)量の事前分布を観測値により更新し、事後分布を推定する最適化手法である。具体的には、以下に示すように非線形連続型状態方程式(12)と非線形離散型観測方程式(13)より構成され、未知量と観測値に含まれるベイズのガウシ性を仮定した逐次適合型の最小自乗法である

$$\frac{dX_t}{dt} = f(X_t, t) + G_t w_t \quad (12)$$

$$Y_t = h(X_t, t_k) + v_t \quad (13)$$

X_t, X_{t_k} : 連続型, 離散型状態量

w_t, v_t : システムノイズ, 観測ノイズ

Y_t : 観測量, G_t : 変換行列

上記の基本式(12), (13)を推定未知量近傍で線形化し、漸化的な推定アルゴリズムを構成したものである。ここで、アルゴリズムの詳細は参考文献(12)等に委ねる。

(2) 一次元非定常熱伝導方程式との組み合わせ³⁾

熱伝導解析においてその精度に及ぼす影響が大きい各地山要素の熱伝導率 k_e と熱容量 $(\rho c)_e$ を未知量とし、かつこれらが定常性(時間に対して変化しない)を示すものと仮定すると、拡張カルマンフィルタの状態量推定アルゴリズムにおける状態遷移マトリクスは単位マトリクスとなり、式(12)は式(14)のように変更される。

$$X(t_{k+1}|t_k) = [I]X(t_k|t_k) + w_t \quad (14)$$

ここで、熱伝導に関する有限要素方程式(11)において一部の節点 n_1 の温度履歴が観測されるものとする、拡張カルマンフィルタの観測方程式(13)は次式のよう

に熱伝導の関係式で表せる。

$$Y_{t_k} = T_{t_k} + v_{t_k} = h(X_{t_k}) + v_{t_k} \quad (15)$$

$$h(X_{t_k}) = \{T_u\}_{N+1}^{n_1} \quad (16)$$

n_1 : 観測節点数($n_1 < n$)

$$\therefore \{T_u\}_{N+1} = \left[\frac{[K_{uu}]}{2} + \frac{[C_{uu}]}{\Delta t} \right]^{-1} \left(\left[\frac{[C_{uu}]}{\Delta t} - \frac{[K_{uu}]}{2} \right] \{T_u\}_N + \frac{1}{2} \{ \{P_u\}_{N+1} + \{P_u\}_N \} \right)$$

ここで、拡張カルマンフィルタでは未知量の推定に際して、次式に示すような観測方程式を推定量において偏微分した変換行列(接続勾配) $M\{t_k; \hat{X}(t_k|t_{k-1})\}$ が必要となる。

$$M\{t_k; \hat{X}(t_k|t_{k-1})\} = \left[\frac{\partial h(X_{t_k}, t_k)}{\partial X_j} \right] X_{t_k} = \hat{X}(t_k|t_{k-1}) \quad (17)$$

$\hat{X}(t_k|t_{k-1})$: t_{k-1} 時刻における推定状態量

しかし、観測方程式(15)は熱伝導の有限要素法で構成される。加えて各要素の熱定数(熱伝導率・熱容量)は式(5. a), (5. b)に示すように熱容量マトリクス $[C_e]$ と熱伝導マトリクス $[K_e]$ の中にある。したがって、式(15)は熱伝導率・熱容量に対して非線形な関数となり、変換行列を算出する手順は煩雑となる。

そこで、次式に示すように差分近似を用いて変換行列を求める¹⁴⁾。

$$\frac{\partial h_i(X_{j,t_k})}{\partial X_j} = \frac{h_i(\hat{X}_{j,t_k} + \Delta \hat{X}_j, e_j) - h_i(\hat{X}_{j,t_k})}{\Delta \hat{X}_j} \quad (18)$$

$h_i(\hat{X}_{j,t_k})$: $h(X)$ の*i*番目の観測点

$\Delta \hat{X}_j$: X_j の微小増分, e_j : j 番目の要素が1の単位ベクトル

この近似により変換行列が容易に算定できることになり、拡張カルマンフィルタと有限要素法による各地山要素の熱伝導率 k_e と熱容量 $(\rho c)_e$ の同定が可能になる。

(3) 収束性向上のためのアルゴリズム修正¹⁵⁾

拡張カルマンフィルタによる未知量推定の際に、推定結果が不安定になる主な要因として、非線形な観測方程式を線形化する線形化誤差と未知量の推定誤差が大きくなっても推定誤差共分散行列 $P(t_{k+1}|t_k)$ の値が小さくなってしまふ点が挙げられ、加えて推定誤差共分散行列の値は、未知量の更新量を決定する値の一つである。

そこで、これらの要因を抑制するために式(19)に示すように、未知量推定の各ステップで推定誤差共分散行列に対して重み W を乗ずる操作を導入したBK-WLI法を用いる。

$$P(t_{k+1}|t_k) = W \cdot P(t_k|t_k) \quad (19)$$

W : 重み ($W > 1$)

この操作を行うことで観測方程式の線形化による推定誤差を減少することができ、かつ誤差共分散行列の値が W 倍に修正されるため、観測(値)情報によ

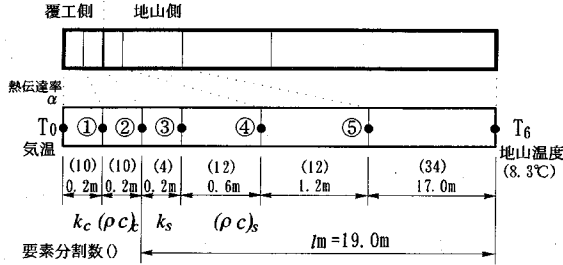


Fig. 2 解析モデルと温度観測点

る未知量の収束速度が向上する。ここで、拡張カルマンフィルタにおける最適推定値は、式(20)に示すように、事前情報(右辺第一項)と事後情報(右辺第二項)より構成される目的関数 θ を最小化する問題となる¹⁶⁾。このことは、未知量の推定誤差と観測誤差の相互をバランスさせることにより最適値を求めている。

$$\theta = \frac{1}{2} \{ (\hat{X}_{t_k} - \bar{X})^T P^{-1} (\hat{X}_{t_k} - \bar{X}) + [Y_{t_k} - h(\hat{X}_{t_k})]^T R^{-1} [Y_{t_k} - h(\hat{X}_{t_k})] \} \quad (20)$$

θ : 目的関数(拡張カルマンフィルタ)
 \bar{X} : 未知量の平均値(真値)
 Y_{t_k} : 観測値, $h(\hat{X}_{t_k})$: 推定観測値
 P : 未知量の推定誤差共分散マトリクス
 R : 観測誤差の分散マトリクス

しかし、各種調査・試験において得られる値は観測誤差を含み、地山の物理的な熱定数を示すことは希である。したがって、上式において初期推定の誤差(右辺第一項)の影響を少なくすれば、安定した推定値が得られ、かつ収束性も向上する。

したがって、本研究で用いている拡張カルマンフィルタの修正アルゴリズムは推定誤差共分散行列に重みを乗ずるため、初期推定(事前情報)誤差の影響を早期に解消し、観測情報を重視した未知量の推定を行っている。言い替えれば、各ステップにおいて重みを乗ずる度に拡張カルマンフィルタにおける目的関数 θ の右辺第一項を小さくして、第二項により最適推定値を求める最尤法の目的関数 θ_1 の式(21)に順次移行している。

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \{ [Y_{t_k} - h(\hat{X}_{t_k})]^T R^{-1} [Y_{t_k} - h(\hat{X}_{t_k})] \} \quad (21)$$

θ_1 : 目的関数(最尤法)

4. 実観測値による地山熱定数の同定

実際に施工されたトンネルにおいて、覆工コンクリートと地山の熱伝導解析により地山の熱伝導率 k と熱容量 (ρc) を同定する問題を、一般国道37号豊浦町礼文華トンネルで得られた観測温度履歴により実施するが、本トンネルでは断熱材の施工がなされていないため、覆工コンクリート-地山をFig. 2に示すように領域を6(要素分割数

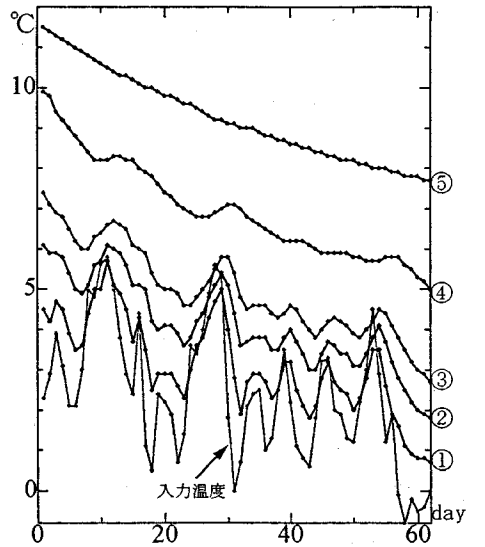


Fig. 3(a) 観測温度履歴(冬期間)

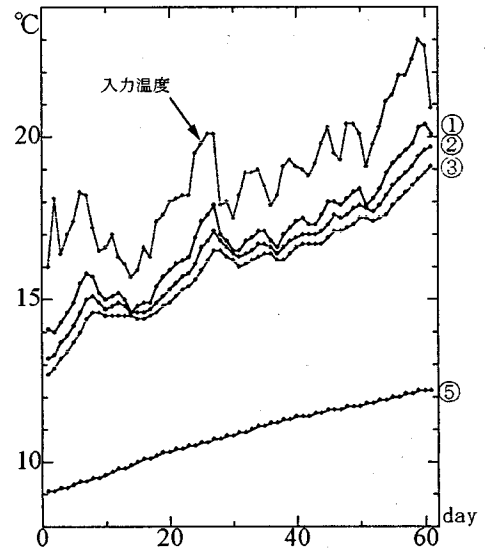


Fig. 3(b) 観測温度履歴(夏期間)

72)分割した解析モデルを用いて解析を行っている。

また、冬期・夏期間に観測された温度履歴をFig. 3(a), (b)に示す。

ここで、トンネル内空側の温度 T_0 は観測気温、地山の境界深度は式(3)より求めた $l_m = 19.0m$ 、定常温度はトンネル施工箇所付近の平均気温より $T_6 = T_m(8.3^\circ C)$ としている。加えて観測地山温度において、冬期データはNo. ①~⑤までの5点の温度観測履歴(Fig. 4(a))を用いているが、夏期データではNo. ④が欠損しているため、④を除く4点の観測履歴(Fig. 4(b))を用いて熱定数の

Table 1 熱伝達係数による同定値

熱伝達率\同定値・残差	熱伝達率(k)s	熱容量(ρc)s	mP(残差)	
Winter 覆工(ρc)c=400 (k)c=1.0	5	1.0	280	10.64
	10	1.0	340	4.18
	20	1.1	380	2.83
	50	1.1	400	1.87
	100	1.1	410	1.67
	∞	1.1	420	1.56
Summer 覆工(ρc)c=400 (k)c=1.0	5	1.1	360	10.45
	8	1.1	420	7.45
	10	1.1	450	7.20
(k)c=1.5	5	1.2	460	5.73
	8	1.3	570	5.14
	10	1.3	610	5.64
(k)c=2.0	5	1.2	540	3.71
	8	1.4	680	4.49
	10	1.4	750	5.86

同定を行っている。

(1) 熱伝達率αの影響と同定値

トン内空側の温度は覆工コンクリート表面で測定された値ではないため、空気層と覆工表面間を移動する熱量の相違が熱伝導の解析結果に影響を及ぼし、地山の熱伝導率と熱容量が正確に同定されない状況が生じる。

そこで、本節では同定値に対する熱伝達率αの影響の検討を行う。加えて夏期において覆工コンクリートの湿度・含水状態により、覆工部の熱伝導率が変化すると考えられるため、熱伝導率の設定を(k)_c = 1.0~2.0に変化させ地山の熱伝導率・熱容量の同定を行った結果をTable 1に示す。

ここで、同定値の評価は式(23)に示すように、同定値による再現温度と観測温度の残差を評価関数Pとしている。

$$P = \frac{1}{mn_1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_1} (T_{ij} - T_{ij}^*)^2 \quad (23)$$

m: データ数(日), n₁: 観測点数
T: 再現温度, T*: 観測温度

Table 1より、冬期データにおいて熱伝達率を大きく設定するにつれ、推定値の残差mPは小さくなっており同定精度は向上している。これによりトン内空側の空気層が激しく移動している(風が吹き抜けている)現象が推測され、冬期における厳しいトン内環境を表す結果であると言える。

また、夏期データでは覆工コンクリートの熱伝導率を冬期に比べて大きく設定し、かつ小さい熱伝達率を用いた場合の方が残差mPは小さくなるが、同定した地山の熱伝導率と熱容量を考慮すると覆工コンクリートの熱伝導率はk_c = 1.0~1.2を用いた結果が安定している。

したがって、夏期においてはトン内空側の空気層はあまり移動しないと考えられるため、冬期に比べて穏やかな気象条件下の観測値を用いる場合は覆

Table 2 熱伝導率・熱容量の同定値

熱伝達率\同定値・残差	熱伝達率(k)s	熱容量(ρc)s	mP(残差)	
Winter 覆工(ρc)c=400 (k)c=1.0	∞	1.1	420	1.56
Summer 覆工(ρc)c=400 (k)c=1.0~1.5	5	1.1	420	5.73
	8	1.2	460	7.45

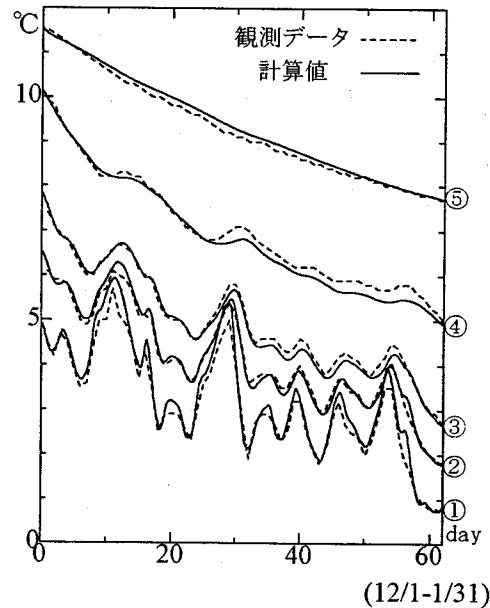


Fig. 4(a) 冬期再現値(α = ∞, (k)_c = 1.0, (ρc)_c = 400)

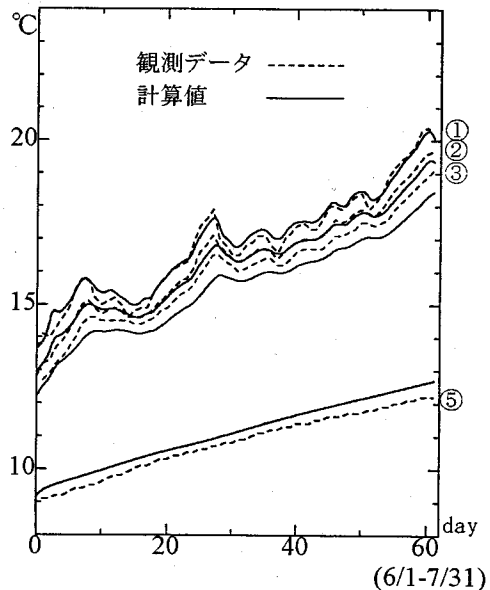


Fig. 4(b) 夏期再現値(α = 5, (k)_c = 1.5, (ρc)_c = 400)

Table 3 観測点数・位置による同定値

観測点\同定値・残差	熱伝導率(k/s)	熱容量(ρc)s	mP(残差)	
Winter	①②③④⑤	1.1	420	1.56
覆工(ρc)c=400 (k)c=1.0 $\alpha = \infty$	①(覆工内)	1.0	290	10.26
	②	1.1	410	1.62
	③	1.1	440	1.68
	④	1.2	460	2.00
	⑤	1.1	390	2.02
Summer	①②③⑤	1.2	460	5.73
覆工(ρc)c=400 (k)c=1.5 $\alpha = 5$	①(覆工内)	0.9	670	11.02
	②	1.1	430	4.62
	③	1.0	310	6.41
	⑤	1.3	610	8.64

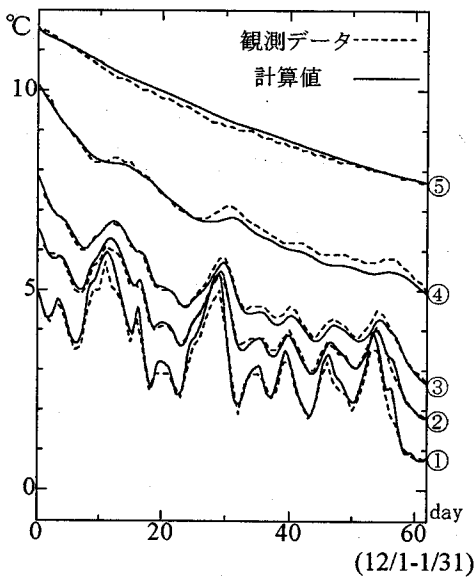


Fig. 5(a) 観測点①②③④⑤による再現値と観測値

工コンクリートに対する熱伝達率 α を考慮して、地山の熱伝導率と熱容量の同定解析を行わなければならないことを示唆している。

ここで、地山の熱伝導率・熱容量の同定値と冬期・夏期間の覆工コンクリートの熱伝導率・熱容量とそれに対する熱伝達率の最適値をTable 2に示し、加えて地山温度の再現値と観測履歴をFig. 4(a), (b)に示す。Fig. 4(a), (b)より、夏期においては熱伝達率や覆工コンクリートの熱伝導率・熱容量等の影響を受けるため、冬期に比べて再現精度は良くない。

(2) 観測点数による同定精度の比較

一般に同定解析において数多くの観測値を用いれば、地山の熱定数等は正確に同定できる可能性が大きい。しかし、経済的な状況等により少ない観測点でかつ観測位置はできるだけ覆工コンクリートに近い(浅い)点が望ましい。

そこで本節では、同定解析における地山熱定数の

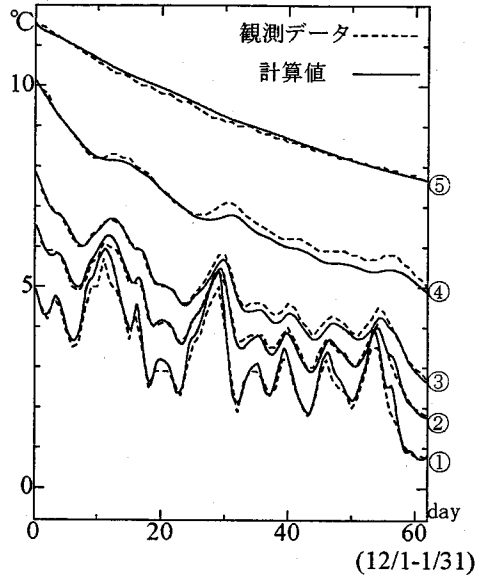


Fig. 5(b) 観測点②による再現値と観測値

収束性とともに観測点数・位置と同定値の安定性を比較し、地山熱定数の同定における効率的な観測点数とその位置について検討する。

ここで、観測点数・位置に対する熱伝導率・熱容量の同定値と残差をTable 3に示す。

まず、冬期データでは全観測点による同定精度と覆工内の観測点①を除く他の1観測点による同定精度に違いはなく、地山中の観測点(1点)を用いれば熱伝導率・熱容量の同定が行える。次に夏期データにおいても同様の傾向を示しているが、熱の流れが冬期の場合と逆(覆工コンクリート→地山)になるため、計測器の設置深度が深い観測点を選定した場合の同定精度は悪くなる。したがって、熱伝導率・熱容量の同定には覆工コンクリート境界面近傍において1~2点の観測点を必要とする結果となる。

ここで、冬期データを用いた観測点数の違いによる地山温度の再現値と観測値をFig. 5(a), (b)に示す。再現値を見る限り、適切な観測点を選定すれば観測点数は再現精度にあまり影響を与えない。

(3) 地山2層モデルによる熱定数の同定

前節までは地山を1層と仮定して、熱伝導率・熱容量の同定を行った。しかし、覆工境界部付近の地山では、掘削や長期にわたる凍害などにより変状し、境界部と深部ではその熱特性が異なっている可能性を有するため、地山-覆工系の正確な熱伝導解析を行うには実際の状況に則した解析モデルを用いることが必要となる。

そこで本節では、地山を異なる熱定数を有する2層モデルとし、それぞれの熱伝導率・熱容量(未知量計4個)の同定を行った。なお、境界面の深度は覆工背面より0.5(m)と1.0(m)の2つの場合とし、観測値は冬期・夏期ともに全観測点の値を用いている。

Table 4 地山2層モデルによる同定値

境界(m) \ 同定値・残差	熱伝導率(k)s	熱容量(ρc)s	mP (残差)
Winter 覆工(ρc)c=400 (k)c=1.0 $\alpha=\infty$	0.5 (1層目) 1.1 (2層目) 1.2	310 450	1.37
	1.0 (1層目) 1.2 (2層目) 1.5	290 480	1.32
Summer 覆工(ρc)c=400 (k)c=1.5 $\alpha=5$	0.5 (1層目) 1.2 (2層目) 0.9	330 510	2.72
	1.0 (1層目) 1.1 (2層目) 0.6	530 400	3.23

Table 5 覆工の熱伝導率・熱容量の同定値

観測点 \ 同定値・残差	熱伝導率(k)c	熱容量(ρc)c	mP (残差)	
地山 (ρc)s=400 (k)s=1.1 $\alpha=50$	①②③④⑤	1.1	420	2.20
	① (覆工内)	1.1	430	2.20
	② (境界面)	1.2	530	3.19
地山 (ρc)s=420 (k)s=1.1 $\alpha=\infty$	①②③④⑤	1.3	580	4.97
	① (覆工内)	1.3	610	4.89
	② (境界面)	1.3	550	5.07

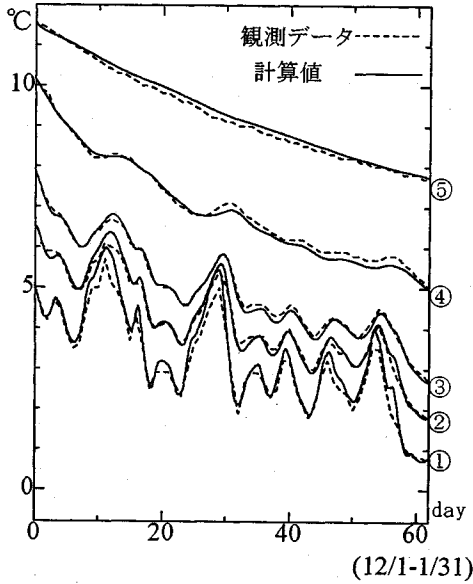


Fig. 6(a) 地山2層モデルによる再現値(冬期)

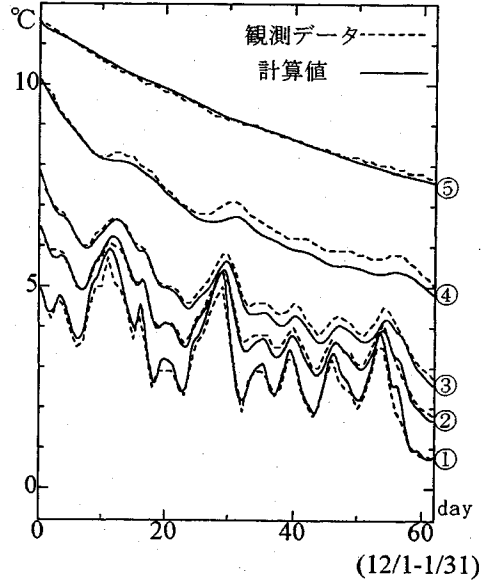


Fig. 7 覆工コンクリートの熱定数による再現値($\alpha=50$)

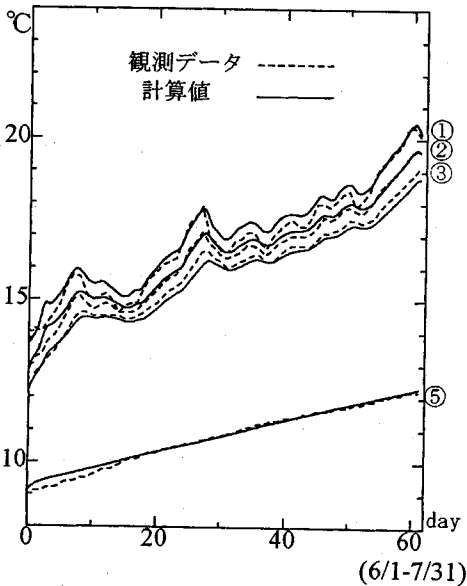


Fig. 6(b) 地山2層モデルによる再現値(夏期)

ここで、地山を2層とした場合の熱伝導率・熱容量の同定結果をTable 4に示す。

Table 4より、2層目(深部層)における熱伝導率・熱容量の同定値は、地山1層モデルの同定値に近い値を示しており、加えて再現値の残差も小さい値を示している。

したがって本手法は、多層モデルの場合における異なる熱定数の同定が可能である。また、このことより力学的特性の間接的な推定に応用ができる可能性を有しているが、熱特性と力学的特性との相関関係の解明や境界面の設定など課題は残る。

ここで、層境界面0.5(m)の時の温度履歴再現値と観測値をFig. 6(a), (b)に示す。Fig. 6(a), (b)より、地山1層モデルとした場合より再現精度は良い。

(4) 覆工コンクリートの熱定数推定

断熱材の材質変化の確認を行う場合には、極めて短い深度に対して、しかも温度履歴が非定常に変化する区間の熱伝導解析を行わなければならない。覆工コンクリートの熱定数が解析に影響を与える可能性が生じる。

そこで本節では、前節までに得られた地山の熱伝

導率・熱伝達率を用いて、冬期データにおける覆工コンクリートの熱伝導率(k_c)・熱伝達率(ρc_c)を未知量とした場合の同定解析を行い、覆工コンクリートの熱定数が解析に与える影響を考察する。

その解析結果をTable 5に示す。Tableより、覆工コンクリートの熱伝導率・熱容量の同定には、覆工内や境界面の観測点を用れば可能となるが、残差は地山の熱伝導率・熱容量の同定の際における残差より大きい値を示している。

したがって、短い区間を対象とした同定解析を行う場合には、覆工コンクリートの熱伝導率・熱容量がその結果に影響を及ぼす。

ここで、全観測点を用いた時の温度履歴再現値($\alpha=50$)と観測値をFig. 7に示す。

5. 結論

本研究では、寒冷地道路トンネルにおいて合理的な断熱材設計や精度向上を図るための基礎解析として、トンネル周辺地山や覆工コンクリートの熱伝導率・熱容量の同定と熱伝導状態の把握とその考察を行った結果、以下に示す事項が得られた。

- (1) 拡張カルマンフィルタを基本とした手法により地山の熱伝導率・熱容量の安定した同定が行え、加えて覆工コンクリート-地山における熱の伝導状態の把握が可能となった。
- (2) 熱伝導率・熱容量の同定解析を行う際には、観測値の得られた季節や環境により熱伝達率や覆工コンクリートの熱伝導率の設定に考慮が必要となる。
- (3) 観測点が多い場合では、多層地山モデルによる複数の熱伝導率・熱容量の同定が可能である。このことより、地山の力学的特性を間接的に推測できる可能性を有している。
- (4) 本研究では寒冷地道路トンネルに対し合理的な断熱材設計や精度向上を図るための基礎資料を提供した。

参考文献

- 1) 坂本稔, 川北稔, 五十嵐敏彦: 道路トンネルの変状実態-北海道の場合-, トンネルと地下, 第20巻5号, pp.31~35, 1989.

- 2) 岡田勝也, 松本嘉司: 断熱二重巻覆工によるトンネルつらら防止工法の断熱材の最適化の関する研究, 土木学会論文集, No.388号/Ⅲ-8, pp.71~76, 1987.
- 3) 岡田勝也, 松本嘉司: 既設トンネルにおける気象条件の確率量を考慮したつらら防止工の断熱材の最適化, 土木学会論文集, No.400号/Ⅲ-10, pp.171~177, 1988.
- 4) 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号/Ⅵ-24, pp.87~93, 1994.
- 5) 村上章, 長谷川高士: kalmanフィルタ有限要素法による逆解析と観測点配置, 土木学会論文集, No.388, pp.227~235, 1987.
- 6) 鈴木誠, 石井清: 拡張カルマンフィルタによる土質定数の空間分布推定, 土木学会論文集, No.406/Ⅲ-11, pp.71~78, 1989.
- 7) 門田俊一, 斉藤悦明, 和久昭正, 後藤哲雄: 繰り返しカルマンフィルタによる異方性岩盤物性の同定と地下空洞計測管理への適用, 土木学会論文集, No.406/Ⅲ-11, pp.107~116, 1989.
- 8) 奥野哲夫, 鈴木誠: 不圧地下水を対象とした拡張カルマンフィルタによる透水係数の空間分布推定法, 土木学会論文集, No.469/Ⅲ-23, pp.93~102, 1993.
- 9) 長谷川高士, 村上章, 浜口俊雄: 拡張kalmanフィルタによる地下水モデルのパラメータ同定と地下水変動評価による揚水量決定, 土木学会論文集, No.505/Ⅲ-29, pp.165~174, 1994.
- 10) 小島啓市, 鈴木誠一, 川原陸人: 地盤の熱伝導問題におけるパラメータの同定および地温制御に関する研究, 土木学会論文集, No.522/Ⅵ-28, pp.155~164, 1995.
- 11) 芳村仁, 三上隆, 小山田欣裕: 寒冷地道路トンネルの地山温解析(非定常熱伝導解析), 土木学会北海道支部論文報告集, 昭和63年度, pp.109-112, 1988.
- 12) A.H.Jazwinski: *Stochastic Process and Filtering Theory*, Academic Press, 1970.
- 13) 須藤敦史, 星谷勝: EK-WLI法と有限要素法を用いた逆解析, 土木学会論文集, No.466/Ⅰ-19, pp.177~185, 1992.
- 14) W.G.Yeh: Review of Parameter Identification Procedures in Groundwater Hydrology (The Inverse Problem), *Water Resources Research*, 22(2), pp.95~108, 1986.
- 15) 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/Ⅰ-17, pp.203~211, 1991.
- 16) 地盤工学における逆解析(講座), 地盤工学会, 土と基礎, No.43-4~6, 1995.

(1996. 6. 21 受付)

A BASIC CONSIDERATION ON THE PARAMETER IDENTIFICATION OF ROAD TUNNEL WITH HEAT INSULATOR

Atsushi SUTOH, Takashi MIKAMI, Noriyoshi NIRASAWA and Tomohide SAITO

In this study consists of the following two topics, one is a basic consideration on the extended Kalman filter in parameter identification problems of road tunnel, and the other is estimated for a thermal behavior in tunnel-ground from identified parameters. In the former study, the extended Kalman filter which was incorporated with the one-dimensional finite element thermal analysis in order to identify unknown thermal parameters in ground.

In the latter one, the estimated tunnel-ground temperatures from identified parameters, compared with the observed temperatures of actual tunnel. Finally, numerical examples are worked out to demonstrate the usefulness of this method in identification of the thermal characteristics and estimation of thermal behavior in ground.

パソコン用、地下水解析トータルシステム

PC/UNISSF Ver. 3.5 for Windows

PC/UNISSF Ver. 3.5 for Windowsは、すでに汎用機やEWSで実績のある準3次元広域地下水変動解析プログラムと断面2次元飽和／不飽和浸透解析プログラムに強力なプリポスト処理プログラムを付加し、Windows版として、生まれ変わったPC用地下水解析トータルシステムです。

準3次元版

PC/UNISSF(H)

¥980,000

断面2次元版

PC/UNISSF(V)

¥700,000

セットの場合

¥1,400,000

プログラムの特徴

■プリ処理 [(H)、(V)共通]

- ★モデル作成のためのメッシュジェネレート機能
- ★地層データ(PC/UNISSF(H)のみで使用)、初期水位データ等の自動発生機能
- ★モデル図を参考しながら、境界条件等各種データの入力、修正が可能
- ★マウス入力とメニュー形式による操作性の向上

■解析機能

[準3次元版PC/UNISSF(H)]

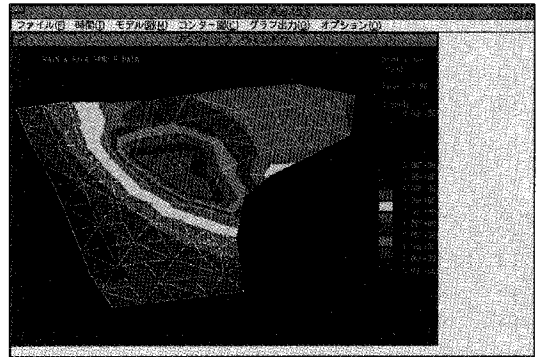
- ★汎用機、EWS版と同一機能(順解析)、同一データフォーマット
- ★約3000~10000節点までのモデルが解析可能
- ★降雨・揚水井・浸出面の取り扱いが可能
- ★水位・流量の経時変化
- ★境界条件の変更、材質の変更
- ★掘削機能・簡易漏水機能
- ★初期定常計算・非定常計算・最終定常計算

[断面2次元版PC/UNISSF(V)]

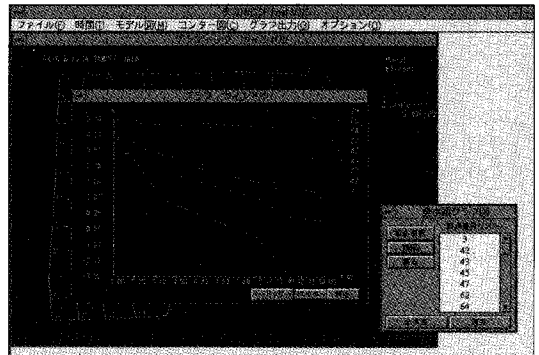
- ★収束状態により Δt を変化
- ★降雨および水位の経時変化に対応可能
- ★鉛直二次元解析だけでなく軸対称解析が可能
- ★自由地下水面を求めることが出来る
- ★浸出点の位置と浸出量を求めることが出来る
- ★①定常計算、②非定常計算、③定常計算を行ったのち非定常計算の3通りが可能

■ポスト処理 [(H)、(V)共通]

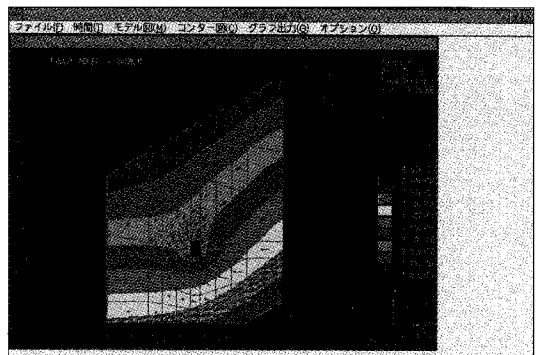
- ★線画に加えて画面塗りつぶし処理が可能
- ★水位の時間変化が簡単にグラフ化可能
- ★マウス入力とメニュー形式による操作性の大幅な向上



PC/UNISSF(H)：全水頭コンター図



PC/UNISSF(H)：水位時間変化グラフ



PC/UNISSF(V)：圧力水頭コンター図と流速ベクトル図

動作環境	Windows Ver. 3.1
	CPU:80486DX 33MHz以上
	RAM: 8MB以上
	ハードディスク空容量: 10MB以上

* Windowsは米国マイクロソフト社の商標です。
* UNISSFは情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。

問い合わせ先

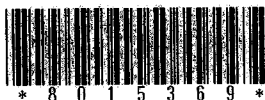
株式会社 **CRC** 総合研究所

科学システム営

日本技術開発株式会社

TEL: 06-241

営業第1部/担



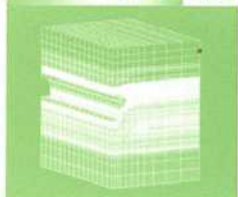
p

CIVAS; Civil Engineering Analysis Service

CRC総研がお届けする土木・建設分野向けサービス

地盤解析には 3次元地盤FEM解析プログラム for Windows®

Mr.SOIL-3D 95



【Mr.SOIL-3D for Windows 95】
トンネル掘削による土圧カウンター図

450本を超える販売実績をもつ地盤FEM解析の定番ソフトです。3D解析を可能にしており、FEM解析初心者でも、使い易い3Dプリポストプロセッサも完備。もちろん2D解析も可能で非線形弾性解析（電中研法、Duncan-Chang法）、弾塑性解析（歪み軟化、硬化）等の多岐にわたる解析が選択できます。ステップ解析機能を有し、施工順序に従って地盤の挙動を把握できます。

'97.1 リリース

'96.9 リリース

地下水解析には 広域地下水変動解析プログラム for Windows®

PC/UNISSF 95



【UNISSF for Windows 95】
掘削に伴う水位低下カウンターと流達ベクトル図

データ作成、結果の表示等のFEM解析に必要な諸作業がすべてマウスで行える強力なプリポスト機能を備えた浸透流解析ソフトです。準3次元解析版と断面2次元解析版があります。工事施工時の周辺地下水影響解析等の定常/非定常解析が可能です。降雨・掘水井・浸出面が取り扱え、水位・流量の経時変化に加え、浸出点の位置、流量を求めることができます。

実力の解析ツール群 続々登場!

連成解析には 応力・浸透・熱連成解析プログラム for Windows®

CONHEAT 95



【CONHEAT for Windows 95】
地中温排水パイプ周りの温度と流達分布図

圧密解析から、応力・浸透・熱の連成問題まで解析が可能な2次元FEM解析ソフトです。多段階掘削・盛土や降雨条件が扱え、経時観測記録より、変形・透水係数を逆解析で求めることができます。弾性・非線形弾性・弾塑性・弾粘塑性を示す地盤に適用でき、凍結についても適用可能です。プリポスト完備で優れたユーザーインターフェースを実現しています。

'96.11 リリース

'96.11 リリース

地質解析には 3次元地質解析プログラム for Windows®

GEORAMA 95



【GEORAMA for Windows 95】
3次元地質モデル図

EWS版で好評を得た3D地質解析ソフトのWindows95対応版です。地形データやボーリングデータ等の情報から地質面を3次元的に推定後、3D地質モデルを構築し、任意断面及び、3Dの各種地質関連画面を出力表示します。人手に頼っていた地質図作成、地質モデルデータベース管理等に大幅なコストダウンをもたらします。計画立案等のプレゼンテーションを強力にサポートします。

東京設計企業

CRC

東京本社

西日本事業部

株式会社CRC総合研究所

〒136 東京都江東区南砂2-7-5
科学システム事業部 営業第1部
TEL:03-5634-5790 FAX:03-5634-7337
〒541 大阪市中央区久太郎町4-1-3
西日本事業部 科学システム営業部
TEL:06-241-4730 FAX:06-241-4136

新製品リリース時に発売キャンペーンを実施!
キャンペーン期間中、新規ユーザー向け特別価格
&旧バージョンユーザー向け優待価格を設定。
また、上記プログラムを用いての受託解析サービスも展開。詳しくは左記までお問い合わせください。

- 掲載の社名・製品名・ロゴは各社の各国での商標・登録商標です。
- UNISSFは、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発した製品です。
- 製品の仕様・価格は将来予告なしに変更することがあります。