

逆解析手法を用いた凍結地盤の熱特性の評価

近久博志¹・中原博隆²・松元和伸³・櫻井春輔⁴

¹正会員 工博 飛島建設株式会社 技術研究所 (〒270-02 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬5472)

²正会員 工修 飛島建設株式会社 技術研究所 (〒270-02 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬5472)

³正会員 工修 飛島建設株式会社 技術研究所 (〒270-02 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬5472)

⁴正会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

本文は、開発してきた有限要素法による熱伝導解析に非線形最適化手法を組み入れた逆解析手法を用いて、簡易な現場計測によって得られた地盤内の温度変化から凍結地盤の熱特性を評価し、凍結工法における逆解析手法の適用性について論及するものである。このために、厳密解を基にして、開発した逆解析システムの妥当性について検証した後に、凍結立坑工事の現場計測によって得られた凍土成長過程にある地盤内の温度変化から、本逆解析手法を用いて地盤の熱特性値や熱境界特性値を同定し、別途実施した室内試験によって得られた地盤の熱特性と比較することによって、本逆解析手法の現場計測による実地盤の熱特性の評価への適用性について検討する。

Key Words : *back analysis, finite element method, nonlinear programming, field measurement, freezing soil method, thermal characteristic*

1. はじめに

地盤凍結工法は、凍結管に冷凍液を循環させることにより凍結管周囲の地盤を冷却し、凍土を造成させて地盤改良を行う工法である。本工法は、地盤改良効果の確実性、均一性および無公害性などの理由から、シールド機の発進防護工や地中接合工に対する補助工法として採用される場合が多い。しかし、一般的に高価になりがちであること、地盤性状によっては凍結膨張・解凍沈下など周辺地盤への影響が大きくなること、地下水の流れの影響を受け易いことなど、解決すべき課題も残されている。こうした課題に対して、さまざまな方面からの取り組みがなされており、特に、電算機の技術革新に伴い数値解析手法¹⁾はめざましい発展を遂げている。しかし、数値解析手法の進歩に比べて、入力定数となる地盤の熱特性²⁾や熱境界特性の評価に関する研究の取り組みは少ない。また、地表面や構造物表面の熱伝達係数に関してはさまざまな研究が報告されているが、現地における状況を事前に評価することも難しいとされている³⁾。これらは、施工現場における状況を再現するためには、試験装置が、特殊になったり大

掛かりになったりするためである。

これに対して筆者らは、逆解析手法を適用することによってこれらの問題の解決に努めてきた⁴⁾。本逆解析手法は、有限要素法による熱伝導解析に非線形最適化手法⁵⁾を組み入れてあり、室内や現場における試験や計測によって得られた内部温度の変化から、試料や地盤の熱特性や熱境界特性を評価しようとするものである。

本文では、これまでの一連の研究を整理することによって、成長過程にある凍土の熱特性の評価に関する本逆解析手法の適用性について検討する。そして、本手法の適用によって、特殊な試験装置を必要とせず、室内や現場で得られた非定常な地盤内部の温度変化からでも、成長過程にある凍土の熱特性の評価ができることを示す。このためにまず、本逆解析手法の有意性を示すために、一次元的な凍土成長を表す Neumann 解⁶⁾の地盤の温度変化から、本逆解析手法を用いて、地盤の潜熱と凍土の熱伝導率を同定し、入力値と比較することによって本手法の有意性について考察する。つぎに、地下水流の影響が少なく、室内試験によって再現し易い環境で施工された凍結立坑工事の現場で計測された地盤内の温度変

化から、現地における地盤の潜熱と凍土の熱伝導率を同定する。そして、それらの結果と別途実施した室内試験によって得られた結果とを比較することによって、本逆解析手法の実工事への適用性について論及する。

2. 潜熱を考慮した熱伝導解析

(1) 熱伝導解析の有限要素法の定式化⁷⁾

非定常熱伝導問題の有限要素法の定式はつぎのように表される。

$$[C] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + [K] \{T\} = \{F\} \quad (1)$$

ここで、 $[C]$ 、 $[K]$ 、 $\{F\}$ は、それぞれ熱容量マトリックス、熱伝導マトリックスおよび熱流速ベクトルと呼ばれ次のように与えられる。

$$[C] = \int_{V_e} \rho c [N]^T [N] dV \quad (2)$$

$$[K] = \int_{V_e} k \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) dV + \int_{S_3} \alpha_c [N]^T [N] dS + \int_{S_4} \alpha_r [N]^T [N] dS \quad (3)$$

$$\{F\} = \int_{V_e} Q [N]^T dV - \int_{S_2} q_0 [N]^T dS + \int_{S_3} \alpha_c T_c [N]^T dS + \int_{S_4} \alpha_r T_r [N]^T dS \quad (4)$$

ここで、 T 、 ρ 、 c 、 k 、 Q は、それぞれ温度、密度、比熱、熱伝導率、物体内部の発熱量を表す。式中の境界条件は、次のように算定される。

a) S_1 : 温度が規定される境界:

$$T = T_{(on S_1)} \quad (5)$$

b) S_2 : 熱流束 q_0 が流出 (入) する境界:

$$q = q_0 \quad (on S_2) \quad (6)$$

c) S_3 : 熱伝達がある境界:

$$q = \alpha_c (T - T_c) \quad (on S_3) \quad (7)$$

ここで、 α_c と T_c は熱伝達係数と外部温度を表す。

d) S_4 : 熱放射がある境界:

$$q = \alpha_r (T - T_r) \quad (on S_4) \quad (8)$$

ここで、 $\alpha_r = \varepsilon \sigma F (T^4 - T_r^4)$ であり、 ε 、 σ 、 F 、 T_r は、それぞれ放射率、Stefan-Boltzman 定数、形状係数、放射源の温度を表す。

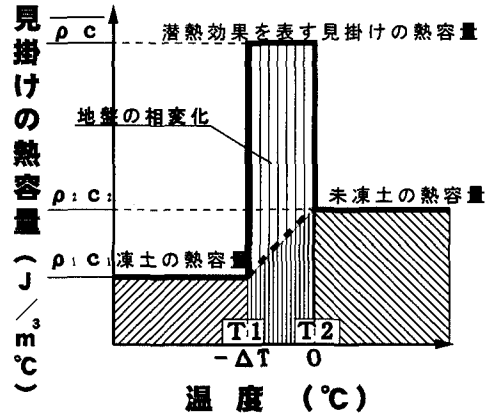


図-1 潜熱効果を評価するための見掛けの熱容量

以上のようにして求められる個別の要素と境界に対する熱容量マトリックス、熱伝導マトリックスおよび熱流速ベクトルを重ね合わせることによって、全体系の有限要素式を作成する。

(2) 潜熱効果の評価

常温時の熱伝導解析に、潜熱効果を組み込むことによって凍土の成長に関する熱伝導解析を行うことが可能となる。潜熱の算定法はさまざま提案されているが、ここでは、図-1に示すように、未凍土と凍土の境界で生じている相変化に必要な潜熱を、地盤の熱容量の変化として評価する⁸⁾。このとき、地盤の熱容量 ρc と相変化に対する潜熱 L と潜熱を含めた見掛けの熱容量 ρc の関係式は次のように求められる。

$$\int_{T_1}^{T_2} \rho c dT = L + \int_{T_1}^{T_2} \rho c dT \quad (9)$$

$$\rho c = L / \Delta T + (\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2) / 2$$

ここで、 T_1 と T_2 は、相変化の生じる温度範囲を示している。

(3) 非定常熱伝導問題の時間差分

熱伝導解析の時間差分は、次式のように表される Crank-Nicolson 法によることとする。

$$\left(\beta [K] + \frac{1}{\Delta t} [C] \right) \{T\}_{t+\Delta t} \quad (10)$$

$$= \left(-(1-\beta) [K] + \frac{1}{\Delta t} [C] \right) \{T\}_t$$

$$+ \beta \{F\}_{t+\Delta t} + (1-\beta) \{F\}_t$$

ここで、 Δt は時間増分、 β は0から1までの値をとるパラメータであり、 $\beta = 0.5$ の場合をCrank-Nicolson法と呼んでいる。 $\{T\}_t$ は時刻 t における温度を意味する。

3. 逆解析手法

順解析と呼ばれている通常の熱伝導解析の場合、

- ・解析範囲 …… 解析モデルとなる構造物の形状や解析対象範囲など
- ・境界条件 …… 外気、地盤温度、ブラインの温度、熱伝達係数、熱流入流出など
- ・熱特性 …… 比重、比熱、熱伝導、潜熱

などの入力定数が決まれば、材料内部の温度変化は一義的に求められることになる。逆解析では、順解析の結果として得られる材料内部の温度変化から、順解析時に入力定数として用いられる熱特性や熱境界特性を探索する。

本文における逆解析手法は、地盤のある位置での計測された温度と解析された温度との残差平方和 J （以後、目的関数と呼ぶ）が最小になるときの地盤の熱特性値や熱境界特性値を同定するものである⁹⁾。

$$J = \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T}_i)^2 \rightarrow \text{minimum} \quad (11)$$

ここで、 T_i は解析された温度、 \bar{T}_i は計測された温度、 n は計測点数を示す。

本文中で活用する非線形最適化手法は、未知数が1つの場合には格子探索法とし、未知数が2つ以上の場合にはSimplex法とした。

有限要素法は、非定常な熱伝導問題における複雑な構造境界や非定常な外気温などの境界条件を比較的簡単に評価することができるため、逆解析手法の適用に適している。しかしながら、例えば、解析理論上の比熱と比重は式(2)のように一次独立な関係になく、両者の積が一つの係数のように扱われている。このため、両者の積が一定である場合には、解析で得られる内部温度変化は同じ結果となる。こうした関係を考慮せずに逆解析を実施すると解析結果として得られた内部温度と入力値として用いた内部温度との一致は良いが、探索された未知数は、工学的な意味合いを失ってしまうことになる。また、間違っただけの解析条件の下で未知数を探索した場合も、当然のことながら同じことになる。このことは、逆解析を適用する上で重要なことであり、逆解析を実施する際に前提となる解析条件や求める未知数の工学的な意味合いにも十分に注意する必要がある。これに対して、本文では、評価しようとしている未知数

が最も明確に同定できるような試験方法や温度の測定位置を採用している。これによって、本研究では未知数とした熱特性や熱境界特性の物理的な意味合いから想定される実行可能領域において、複数個の局所最適解を持つことはなかった。このため、初期値の違いによって同定結果が違ってくるようなこともなく、同定結果は一義的に求められた。

(1) 格子探索法

未知数が一つの時に採用した格子探索法は、実行可能領域を等間隔に分割し、各点において求められた目的関数の値を比較することによって、最適解を探索する手法である。本手法は、探索効率が悪いが、非線形最適化手法の中で最も単純な手法であり、求める未知数の実行可能領域における目的関数の性状が理解し易い方法である。特に、目的関数の局所的な性質と無関係に、偏り無く調べられたため、目的関数が複数個の局所最適解が存在したり、不連続であったりする場合に、適している手法である。

(2) Simplex法⁹⁾

格子探索法は、未知数の数が増えてくると、探索時間が長くなり、適用することが難くなる。このため、未知数が複数個ある場合には、まず、実行可能領域における大略的な目的関数の性状を調べるために前述の格子探索法を活用し、局所最適解が一つであることが分かると探索効率の良いSimplex法を適用した。

Spendleyら¹⁰⁾によって開発され、NelderとMeadによって改良されたSimplex法¹¹⁾は、同定すべき未知数の n 次元ユークリッド空間上に、 $(n+1)$ 個の頂点からなる単体(Simplex)を作り、それらの頂点における目的関数の大きさを比較することによって、局所最適解を探索する手法である。このSimplex法は、制約条件のない非線形最適化手法に属するが、筆者らは、未知数の物理的な意味合いから想定される制約条件を設定した。この制約条件を基に初期の単体に改良を加えることによって、オーダーの違う未知数を同時に同定する場合の探索効率の改善を図った³⁾。この意味から、本文中に活用しているSimplex法は、制約付きの非線形最適化手法に属することになる。

(3) 同定間隔

非定常の熱伝導解析に際して、Crank-Nicolson法によって時間差分を行っている。このため、適用した時間差分毎に変化する温度が解析結果として得ら

れる。これに対して、本文の逆解析では、任意の時間のときに、測定された温度と同じ位置での解析された温度とが一番近くなる場合の未知数を探索している。例えば、後述する5章では、試験中に得られたモルタル供試体の内部温度の変化から、凍結管の熱伝達係数と供試体周囲（上部、側部、底部）の熱伝達係数を6時間毎に同定している。このことは、6時間毎に、有限要素法によって得られる地盤内温度が、試験によって得られた内部温度に一番近くなる時の各熱伝達係数を探索していることを示している。このため、同定間隔とした6時間は各熱伝達係数が一定であるが、6時間毎に各熱伝達係数が変化することになる。

4. 逆解析手法を用いた熱特性の評価手法

シートパイル冷却などのように、冷却面が平板状になる場合、凍土の成長は一次元的に成長することになり、潜熱を考慮した熱伝導問題の理論解は Neumann 解として知られている。ここでは、この Neumann 解から得られた温度変化を基にして、順解析の時に入力定数となる熱特性値を同定し、本逆解析手法の妥当性を検討する。

(1) Neumann 解による一次元的な凍土の成長時の地盤内温度変化

ここでは、一次元的な凍土の成長過程にある地盤内の温度変化を知るために Neumann 解⁹⁾を適用する。まず、冷却面が -30.0 °C の一定温度で、平板状である場合を想定すると、凍結面の成長は図-2のように表される。図中に示した測点1～測点5は地盤中に埋設された温度センサーの位置を表す。

表-1のように設定した地盤の熱特性値から測点1～測点5における10日間の経時温度変化は図-3の記号で表したような結果になる。

(2) 逆解析手法による熱特性の評価

図-4に示す有限要素モデルを用いて、逆解析手法によって地盤の熱特性値を同定する。図中の●印は逆解析時に入力値として用いる温度測点であり、このうち測点1～5は、図-2の温度測点に対応している。

同定する未知数は、地盤の潜熱と凍土の熱伝導率とし、他の熱特性値は前述の Neumann 解と同様に表-1の値を使うこととする。ここでは、各未知数の実行可能領域を示す制約条件は、 $0 \text{ kJ/kg} < (\text{潜熱}) \leq 126 \text{ kJ/kg}$, $0 \text{ W/m}\cdot\text{°C} < (\text{熱伝導率}) \leq 4.8$

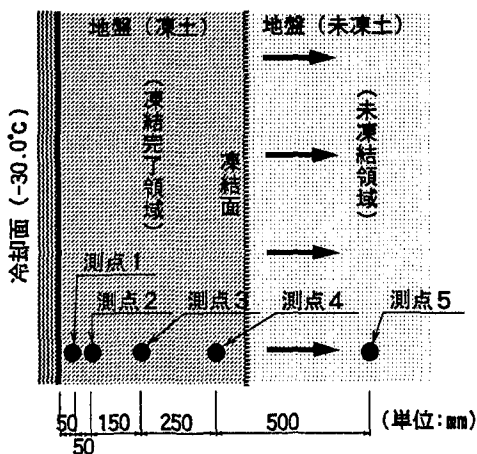


図-2 冷却面が平面の場合の凍結面の成長概念図

表-1 解析に用いた地盤の熱特性値

	未凍土	凍土
密度 (t/m ³)	1.72	1.65
比熱 (kJ/kg·°C)	2.06	1.30
熱伝導率 (W/m·°C)	1.42	2.69
潜熱 (kJ/kg)	106.78	
初期地盤温度 (°C)	14.0	
冷却面温度 (°C)	-30.0	

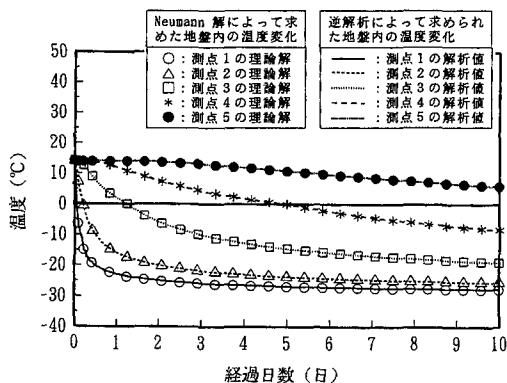


図-3 地盤内の温度変化図

表-2 同定結果と設定値の比較

		潜熱 (kJ/kg)	凍土の 熱伝導率 (W/m・℃)
設定値		106.78	2.69
同定	平均値	105.60	2.56
結果	標準偏差	5.17	0.11

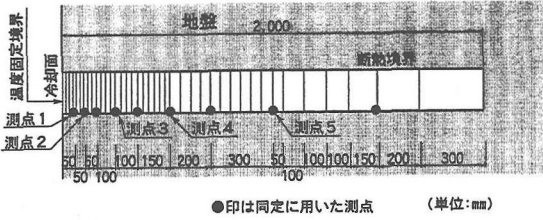


図-4 逆解析に用いた有限要素モデル

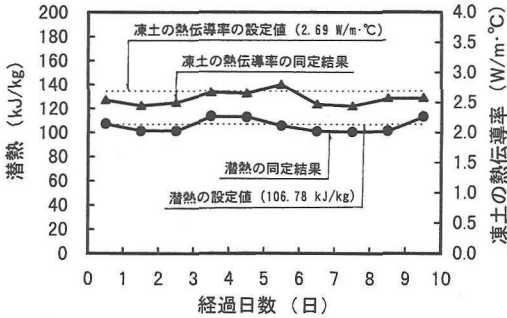


図-5 同定結果と設定値の比較

また、本逆解析手法を用いることにより、理論的には、試験や現場計測によって得られた地盤内の温度変化からでも、地盤の熱特性値を求められることが分かる。しかしながら、試験や現場での計測結果の評価に逆解析手法を適用する場合には、同定結果は、計測位置や観測データの誤差さらには評価に用いた解析モデルや既知とした入力値に影響を受けることになる。つぎに、試験や現場計測の評価に逆解析手法を適用した事例について論じる。

5. 逆解析手法を用いた熱境界特性の評価

実際の地盤凍結工法においては、通常、凍結管として使用されている外径 101.6 mm のガス管の中にブライン（冷凍液）を循環させて地盤を凍結させている。そして、地盤の潜熱を考慮した低温熱伝導解析を実施する場合には、凍結管の表面を温度固定境界として評価することが多い⁹⁾。しかし、この場合、とりわけ初期の段階においては、例えば、本章で述べる試験（図-6）では、試験装置内の温度変化は図-7のようになっている。凍結管に接しているモルタル供試体表面の節点は、ブラインが凍結管に流された直後にブライン温度になるのではなく、初期温度である 4℃から温度が低下しブライン温度（-30℃）に漸近していくように変化する。これに対して、ブラインが流された直後に凍結管表面をブライン温度と同じであると仮定すると、モルタル供試体から凍結管に急激な熱移動が行われたことになり、現実的な現象ではなくなる。また、この急激な温度変化に、適用している時間差分が追従できない場合には、解析結果としては内部温度が振動したような結果となることもある¹²⁾。この現実的でない振動している内部温度を基にして逆解析を実施すると、当然のことながら最適値の探索が出来なくなる。このため、凍結管の部分は、ブライン温度を外部温度とする熱伝達境界として評価する方がより現実に近い想定になるが、地盤凍結工法の凍結管の熱伝達係

W/m・℃とし、同定間隔は 1 日とする。

本逆解析結果のうち図-2に示した5つの測点における温度変化を示すと図-3の線で表したような結果になる。

(3) 熱特性値の同定結果

同定された地盤の潜熱と凍土の熱伝導率の同定結果を図-5に示す。また、同定された熱特性値と次式で求められる平均値と標準偏差を表-2に示す。

$$\text{平均値} : \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (12)$$

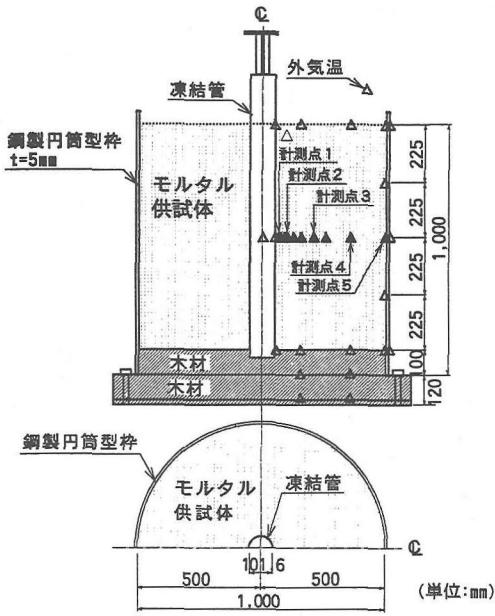
$$\text{標準偏差} : \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

ここで、 x_i : 同定された未知数

\bar{x} : 同定された未知数の平均値

n : 同定結果の個数

地盤の潜熱は、平均 105.60 kJ/kg、標準偏差 5.17 kJ/kg であり、凍土の熱伝導率は、平均 2.56 W/m・℃、標準偏差 0.11 W/m・℃であった。本章では、開発してきた逆解析プログラムのベンチマーク解析を実施したが、厳密解を基にしたこの解析では、比較的精度良く熱特性値を同定していることが分かる。



注) ・△▲印は計測点を表す
 ・▲印は同定に用いた計測点を表す

図-6 試験装置

表-3 モルタル供試体と木材の熱特性値

	供試体	木材
密度 (t/m ³)	2.23	0.43
比熱 (kJ/kg・°C)	1.34	1.30
熱伝導率 (W/m・°C)	2.23	0.20

数を試験したり評価した例はない。こうした背景から、凍結管の熱伝達係数を得るために、モルタル供試体を用いて実施した試験と解析結果について述べる。

(1) 凍結管表面の熱伝達係数の評価のための試験

a) 試験装置

凍結管表面の熱伝達係数を評価するために製作した試験装置を図-6に示す。試験装置は、熱電対が埋設された直径100 cm、高さ90 cmの円柱状のモルタル供試体の中央部に凍結管を設置してある。モルタル供試体の底面は木材で支えてあり、周囲は鋼製型枠であるが、試験中は外周をさらに断熱材を巻いた。試験に使用したモルタルと木材の熱特性値を表-3に、モルタルの配合を表-4に示す。

表-4 モルタル供試体の配合

単位量 (kg/m ³)		
セメント	水	細骨材
433	285	1,514

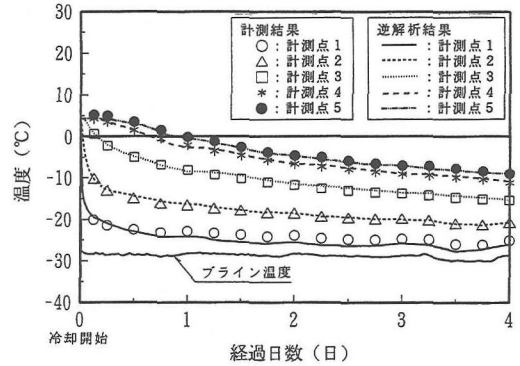


図-7 冷却時の供試体内の温度変化図

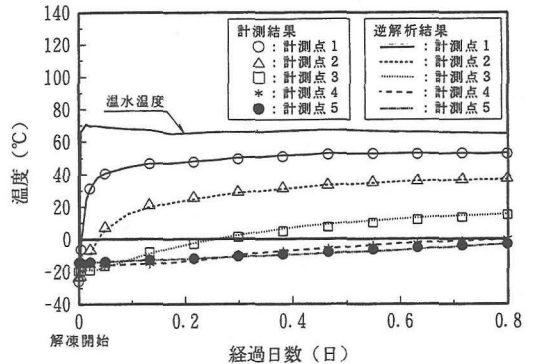


図-8 解凍時の供試体内の温度変化図

b) 試験方法

試験装置内のモルタルの水和反応がほぼ完了し、供試体の内部温度が安定したことを確認した後に、凍結管に約-30°Cのブラインを25日間循環させて供試体を冷却する。その後、凍結管に約70°Cの温水を2日間循環させて供試体を加熱する。

c) 計測結果

冷却開始から4日間と解凍開始から約0.8日間の供試体の内部温度の計測結果を図-7と図-8に示す。この計測結果を基にして、逆解析手法を用いて凍結管表面の熱伝達係数の評価を行う。

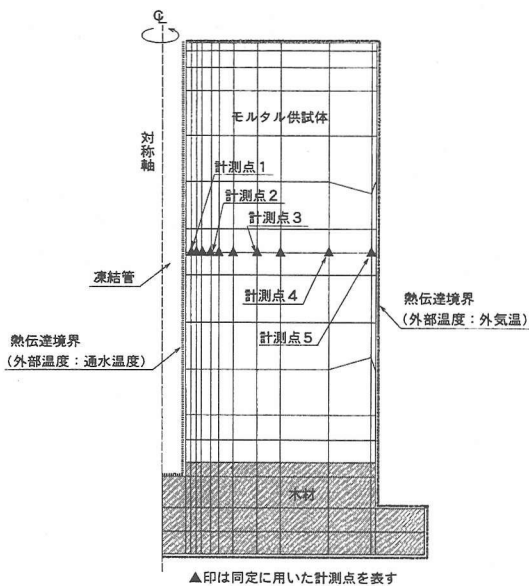


図-9 解析モデル

(2) 凍結管表面の熱伝達係数の評価方法

上記の試験装置に対して、図-9に示すような軸対称モデルを用いて逆解析を行う。凍結管の表面は、内部を循環させるブラインや温水の温度を外部温度とする熱伝達境界とし、外周部は、外気温を外部温度とする熱伝達境界として評価する。試験装置の底部に関しては、厳密には、木と地盤との熱伝導境界であるが、ここでは凍結管の熱伝達係数の評価が目的であるため、地盤内の温度を外部温度とする熱伝達境界として取扱うこととする。

図-9に▲印で示した節点に対応する図-6の温度の計測点の計測結果から、凍結管の表面の熱伝達係数と側面の鋼製型枠を省いた試験装置の周囲（上部、側部、底部）の熱伝達係数を6時間毎に同定する。このため得られた熱伝達係数は6時間毎の平均的な値となる。このとき、各熱伝達係数の実行可能領域を示す制約条件としては、ともに $0 \text{ W/m}^2\cdot\text{C} <$ （凍結管と試験装置周囲の熱伝達係数） $\leq 1163 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ とした。

(3) 逆解析手法によって同定された凍結管表面の熱伝達係数

図-10に上記の逆解析手法によって同定された凍結管表面の熱伝達係数を示す。温度計測点の設置位置の誤差や、図-7と図-8で見られるように急激かつ非定常な温度変化にもかかわらず比較的精度良く同定されている。未知数とした供試体表面の熱

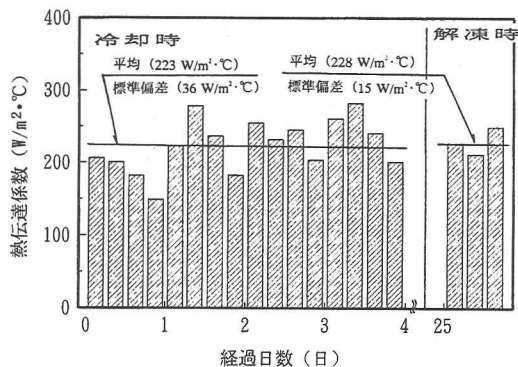


図-10 同定された凍結管の熱伝達係数

伝達係数は、すべての逆解析において、初期条件や解析手法に関係なく一義的に同定される、局所最適解を一つしか持たない誤差局面上での探索となっており、逆解析が適用し易い解析条件となっている。このうちの凍結管の熱伝達係数は、図-10に示すように冷却時は、平均 $223 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ 、標準偏差 $36 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ 、解凍時は、平均 $228 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ 、標準偏差 $15 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ となり、凍結管の内部温度に関係なく一定の値を示している。このことは、熱伝達解析上の熱伝達境界としての評価が妥当であることを示している。この時の凍結管の熱伝達係数は $230 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ 程度であることが分かる。

6. 実現場における地盤凍結時の熱特性の評価

実現場における地盤凍結時の熱特性を評価するために、図-11や図-12に示すように、内径 9 m、掘削深度 21.3 m の円筒形の凍結立坑工事において、立坑内部から熱電対を埋設して地盤内の温度計測を実施した¹³⁾。本工事は、シールド工事の中間立坑として計画されたものであり、周辺の土質は、地上から GL-8.75 m まではN値0~1の上部有楽町層の砂質シルトと砂混じりシルト、それ以深はN値0~1の下部有楽町層のシルトからなっている。本立坑は、軟弱な土中に下水幹線やガス管など多くの地下埋設物が錯綜しているため、地上から GL-8.3 m までは、コラムジェットを、それ以深は凍結立坑工法を補助工法として採用し、深礎工法で掘削後は鋼製セグメントを立込んで施工した。

(1) 現場計測によって得られた地盤内の温度

図-13に計測された地盤内温度とブライン温度

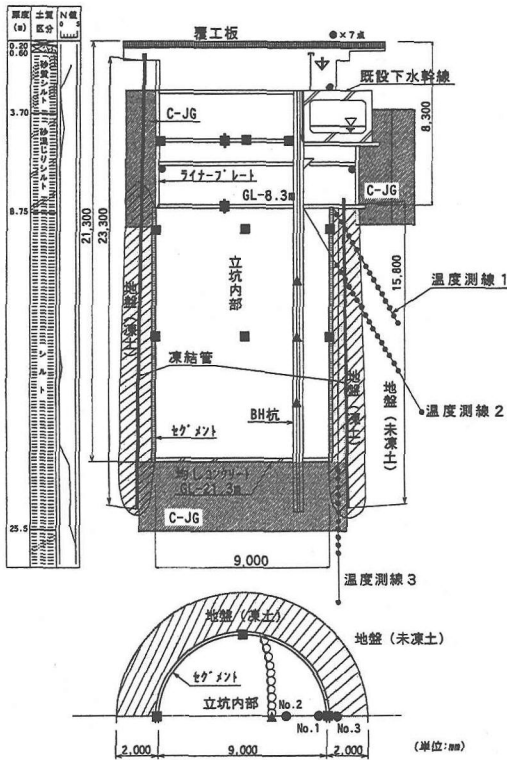


図-1-1 凍結立坑の概略図

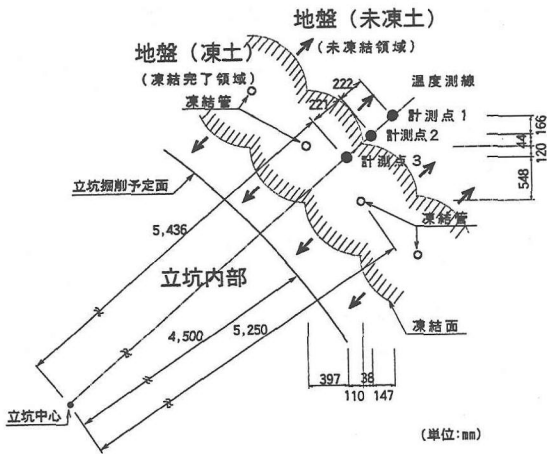


図-1-2 計測点位置の平面図

の経時変化を示す。本図から、地盤内の温度は凍結管にブラインが循環し始めると凍結管に近い位置から順に温度が低下し、地盤が凍結していく様子が分かる。

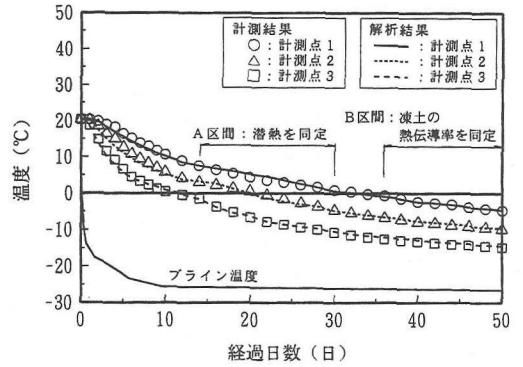


図-1-3 地盤内の温度変化と解析結果

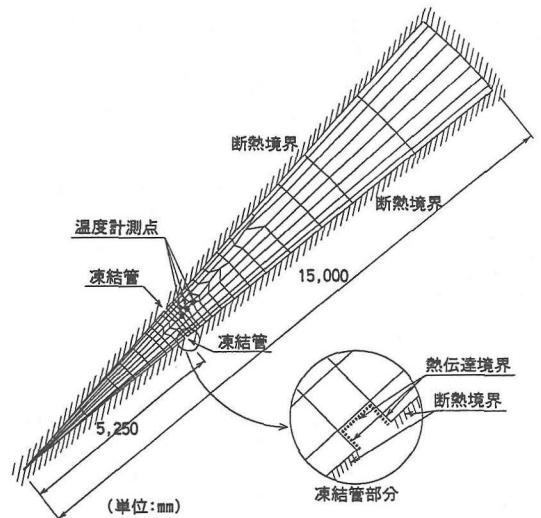


図-1-4 解析モデル

(2) 評価方法

図-1-4に示す2次元平面ひずみモデルを用いて、図中の●印で示す3測点の温度計測データから、地盤の潜熱と凍土の熱伝導率を同定する。凍結管部分は、ブライン温度を外部温度とする熱伝達境界として評価する。

ここでは、現地における熱電対の設置位置の誤差や温度測定点の少なさを考慮して、つぎのように2段階に分けて、逆解析を実施する。

- ① 温度計測点付近の地盤が完全に凍結したと考えられる凍結開始後36日から50日までに計測された地盤内の温度変化から凍土の熱伝導率を2日間隔で同定する。このとき熱伝導率の実行可能領域を示す制約条件は、 $0 \text{ W/m} \cdot \text{°C} < (\text{熱伝導率}) \leq 4.0 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$ とした。
- ② 上記で得られた凍土の熱伝導率を既知の値として、凍結面の成長が顕著な凍結開始後14日か

表-5 解析に用いた地盤の熱特性値

	未凍土	凍土
密度 (t/m ³)	1.69	1.62
比熱 (kJ/kg・°C)	1.93	1.38
熱伝導率 (W/m・°C)	1.23	同定
潜熱 (kJ/kg)	同定	
凍結管の熱伝達係数 (W/m ² ・°C)	230	

ら 30 日までに計測された地盤内の温度変化から地盤の潜熱を 2 日間隔で同定する。このとき潜熱の実行可能領域を示す制約条件は、 $0 \text{ kJ/kg} < (\text{潜熱}) \leq 209 \text{ kJ/kg}$ とした。

未知数とした凍土の熱伝導率や潜熱以外の熱特性値は、現地の土を採取して別途室内で実施した試験結果(表-5)を解析に用いる。また、凍結管の熱伝達係数は、前述した凍結管の熱伝達係数の試験結果から得られた $230 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ の値を用いる。

(3) 解析結果

図-15と図-16に同定された潜熱と凍土の熱伝導率を示す。地盤温度の計測結果と解析結果とを比較すると図-13のようになり、最大でも 0.9 °C程度の誤差であり、精度良く評価していることが分かる。また、同定された潜熱は、平均 113.05 kJ/kg、標準偏差 18.97 kJ/kgで、同定された凍土の熱伝導率は、平均 1.99 W/m・°C、標準偏差 0.51 W/m・°Cである。現地の地盤を直接採取して別途実施した室内試験結果と比較すると表-6のようになり、同定結果の平均値と試験結果が比較的良く一致していることが分かる。本逆解析では地盤の潜熱と凍土の熱伝導率を未知数として解析を実施した。本逆解析の探索過程の理解のために、一例として、解析された温度と計測された温度の誤差を示すことになる目的関数を図-17に示す。本図は、凍結開始後40日から42日までの温度計測結果を基にして凍土の熱伝導率を同定したときの熱伝導率と目的関数、16日から18日までの温度計測結果を基にして地盤の潜熱を同定したときの潜熱と目的関数とを重ねて作成したものである。各時間間隔毎に実施した逆解析とも、このように最適解が一つしかなく、同定結果以外の熱特性値では目的関数となる地盤内温度の計測値と解析値の差異が大きくなること分かる。このため、本現場における地盤の潜熱と凍土の熱伝導率は、一義的に同定されることになる。

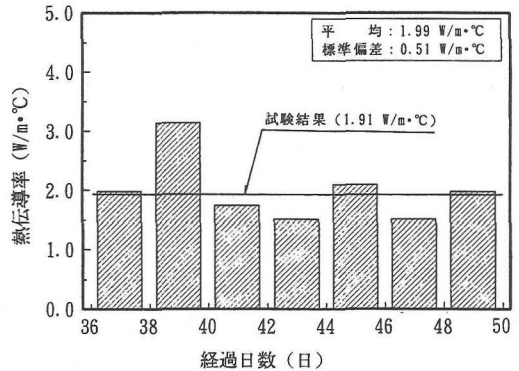


図-15 凍土の熱伝導率の同定結果

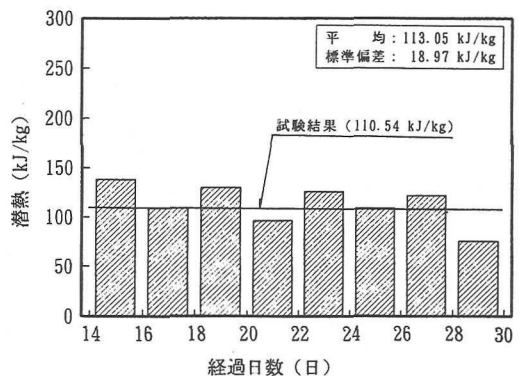


図-16 地盤の潜熱の同定結果

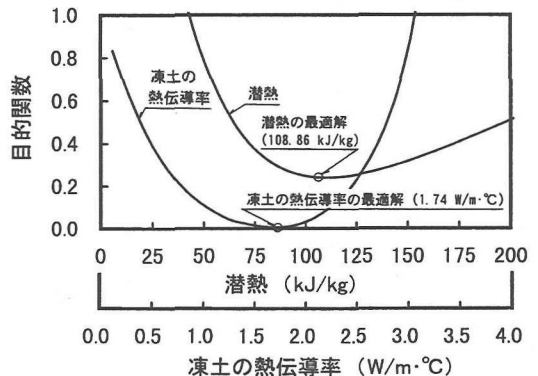


図-17 同定した未知数と目的関数の関係

表-6 同定結果と室内試験結果の比較

		潜熱 (kJ/kg)	凍土の熱伝導率 (W/m・°C)
室内試験結果		110.54	1.91
同定結果	平均値	113.05	1.99
	標準偏差	18.97	0.51

7. おわりに

今回、地盤の潜熱を考慮した有限要素法による熱伝導解析プログラムに非線形最適化手法を組み込んだ逆解析プログラムを活用して、現場計測によって得られた内部温度の変化から凍結地盤の熱特性や熱境界特性の評価を実施した。この結果、本逆解析手法を用いれば、特殊な試験装置を活用することなく、室内試験や地盤凍結時の現場計測によって得られた非定常な温度変化からでも凍結地盤の熱特性や熱境界特性が容易に評価できることが分かった。特に、現場計測に関しては、実際の適用性を勘案したために、いくぶん設置位置の精度が悪くなりがちであったが、結果的には、現地における手軽な温度測定結果からでも実用的な精度で地盤の熱特性の評価が可能であることが分かった。

これまで評価する理論や条件に一致するような環境を作り出す必要があったため、試験装置が特殊になったり複雑になったりする傾向にあった。しかし、本逆解析手法を適用すれば、複雑に変化するような周辺環境も理論的な評価ができるため、試験装置が簡単になったり、現地に製作した簡易な供試体からでも凍結地盤の熱特性や熱境界特性の評価が可能となる。本論文では、凍結地盤の熱特性の評価に逆解析手法を適用することの妥当性について検証することを目的にして、比較的問題が単純な地下水の影響のない均質な地盤として仮定できる現場を対象にした。しかしながら、今後、さらに凍結地盤の熱特性や熱境界特性に関する試験結果や現場計測結果の評価に逆解析手法を適用する場合、つぎのような課題が残されている。

- ① 効率的な最適化手法の活用
- ② 計測誤差や計測方法に関連する解の安定性
- ③ 地下水流の影響
- ④ 凍土の成長過程における凍結速度の影響
- ⑤ 凍結膨張や解凍沈下の現象

今後は、本逆解析手法をさらに発展させていくことによって、課題の解決を図りたい。そして、地盤凍結工法の調査設計段階における解析手法として本逆解析の活用を図ることによって、地盤凍結工法の設計や現場の計測管理の合理化に努めたいと考えている。さらに、本逆解析手法の適用現場の拡大を図り、地盤凍結工事の情報化施工技術として工期短縮や安全性の確保に役立てて行きたいと考えている。

謝辞：本研究において、現場での計測データを快く提供して頂きました東京都下水道局中部建設事務所

の（試験当時）萩原春男氏や建設事務所の皆様方に、ここに改めて本紙を借りてお礼申し上げます。

また、試験や現場計測に関しては、飛島建設㈱の藤原雅博氏や黒坂聡介氏らによるところが大きく、現場での計測データ収集においては、㈱精研の協力によるものであり、ここに改めて関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、西垣誠、河野伊一郎、梅田美彦：不飽和砂質地盤の凍結過程における土中水の移動、土木学会論文集、No.475, pp.39-48, 1993.
- 2) 山辺正、渡辺邦夫、黒沢聡、石山宏二：原位凍結融解試験の非定常熱応力解析、第28回土質工学研究発表会講演集、Vol.28, No.2-1, pp.1435-1436, 1993.
- 3) 近久博志、津崎淳一、荒井幸夫、桜井春輔：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, Vol.17, pp.39-47, 1992.
- 4) 近久博志、藤原雅博、中原博隆、小野一博：逆解析手法を用いた凍結地盤の熱特性、第28回土質工学研究発表会講演集、Vol.28, No.2-1, pp.1335-1336, 1993.
- 5) 近久博志、津崎淳一、中原博隆、桜井春輔：現場計測に基づくマスコンクリート構造物の熱特性の評価のための逆解析手法、材料、第42巻、475号、pp.436-441, 1993.
- 6) Jumikis, A.R. : Thermal Soil Mechanics, Rutgers Univ. Press, New Brunswick, 1966.
- 7) 鷲津久一郎、宮本博、山田嘉昭、山本善之、川井忠彦：有限要素法ハンドブックⅡ応用編、倍風館、pp.682-698, 1987.
- 8) Comini, G., Del Guidice, S., Lewis, R.W. and Zienkiewicz, O.C. : Finite element solution of non-linear heat conduction problems with special reference to phase change, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.8, pp.613-624, 1974.
- 9) 今野浩、山下浩、非線形計画法 ORライブラリー6、日科技連、pp.284-286, 1978.
- 10) Spendley, W., Hext, G.R. and Himsworth, F.R. : Sequential Application of Simplex Designs in Optimization and Evolutionary Operations, Technometrics, Vol.4, pp.441-461, 1962.
- 11) Nelder, J.A. and Mead, R. : A Simplex Method for Function Minimization, Computer Journal, Vol.7, pp.308-313, 1965.
- 12) Wood, W.L. and Lewis, R.W. : A Comparison of Time Marching Schemes for the Transient Heat Conduction

Equation, Int.J.for Numerical Method in Engineering,
Vol.9, pp.679-689, 1975.

立坑の計測と計測管理手法, 第26回土質工学研究発表
会講演集, Vol.26, No.2-2, pp.1557-1560, 1991.

13) 萩原春男, 小宮山清志, 近久博志, 黒坂聡介: 凍結

(1996. 10. 15 受付)

ESTIMATION OF THERMAL CHARACTERISTICS OF FREEZING SOILS BY MEANS OF A BACK ANALYSIS METHOD

Hiroshi CHIKAHISA, Hirotaka NAKAHARA, Kazunobu MATSUMOTO
and Shunsuke SAKURAI

For the purpose of some help toward the estimation method, authors developed back analysis scheme using nonlinear programming in heat conduction analysis based on the finite element method.

This paper demonstrates that the adotability of the back analysis method on the estimation of thermal characteristics of freezing ground is studied, and that the possibility of the back analysis method in the feedback system of field measurement results to design and temperature control in construction site using the soil freezing method is discussed.