

冷却システムの可能性調査を目的とした水道水の温度計測とその評価に関する一考察

地熱利用, 逆解析, 冷却システム 山口大学 正会員 ○近久 博志, 正会員 田口 岳志
光市水道局 藤井 訓司, 和田 誠
(株)ソイル・ブレイン 河村 志朗, 河村 重行

1. はじめに

横浜市に近代水道が施設されて120年が経過し、日本の水道普及率は97.2%に達するようになってきている。一方、急速な普及率の向上という拡張期の終焉を迎えた現在の水道事業は、安心・安全な水の供給の確保や、将来にわたり安定的な給水を行うための施設の強化など、質的な向上が求められる段階に入ってきた。この機を捉えて、山口県光市では、平成20年に10年後の水道事業のあり方を『ひかりかがやく水のまち～光市水道光合成プラン～』と題して光市地域水道ビジョンをまとめた。この中で、水道水の品質向上として、夏期の水道水の温度を20℃以下にすることを目標に挙げている。これに対して、筆者らは、水道水の温度の現状を調べて、地盤の冷熱源を活用した水道水の冷却の可能性について検討を加えてきた¹⁾。本文では、実施した一連の調査の中から現地で得られた計測結果の評価と、得られた解のばらつきと収束性について考察する。

2. 現地における計測

2.1 計測計画

現地の温度分布の状況を把握するために、つぎのような2種類の計測を実施した。なお、調査地点の地質は、領家変成帯に属する片麻状花崗岩～珪質縞状片麻岩を基盤として、その上位に沖積層が分布している。

(1) 温度計測A

地域全体の水道水の温度の変化を把握することを目的に、温度計測Aとして図-1に示すような6カ所（浄水場、配水場、計測断面No.1～3とNo.5）で水道水の温度を計測した。特に、計測断面No.1～3とNo.5では、水道管から分岐している消火栓内の水温を計測した。

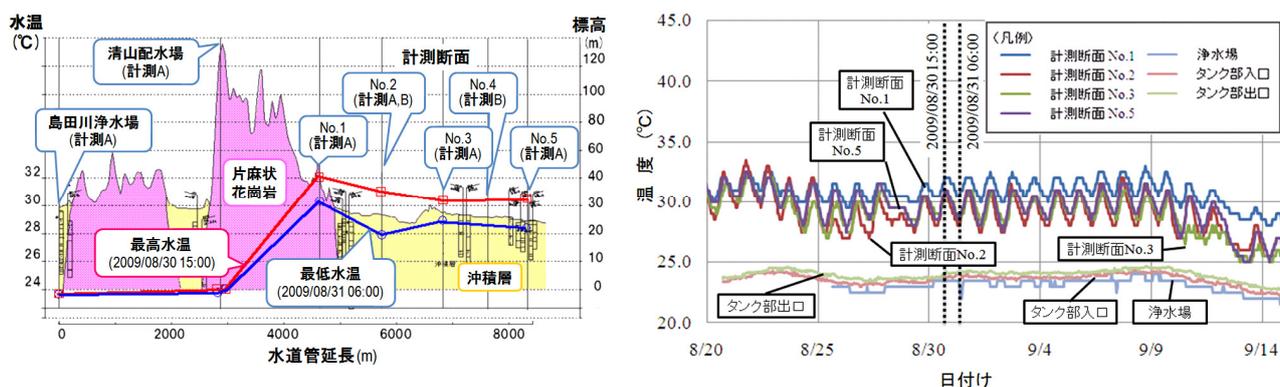


図-1(a) 夏期における水道水の温度の日中変化(最大値と最小値)

図-1(b) 水道水の温度の経時変化

図-1 広域にわたる水道水の温度の計測結果(温度計測A)

(2) 温度計測B

水道水の温度や周辺環境を把握することを目的にして、図-1に示す配水タンク部と水道管部（計測断面No.2とNo.4）において現場計測（温度計測A）を実施した。

① 配水タンク部・・・配水タンク部における水道水の温度とタンク周辺からの熱の流入出を把握する目的で、タンク内水温、タンク壁面温度、気温、日射量を計測した。

② 水道管部・・・計測断面No.2とNo.4における水道管と周辺地盤との熱の流入出，周辺地盤や境界の熱特性を把握する目的で，**図-2**に示すように，水道管の周辺地盤温度(Tタイプ熱電対，TC-31K)，気温，日射量(日射計CMP-3，D1日射A; D1-009A)，降雨量を計測した。

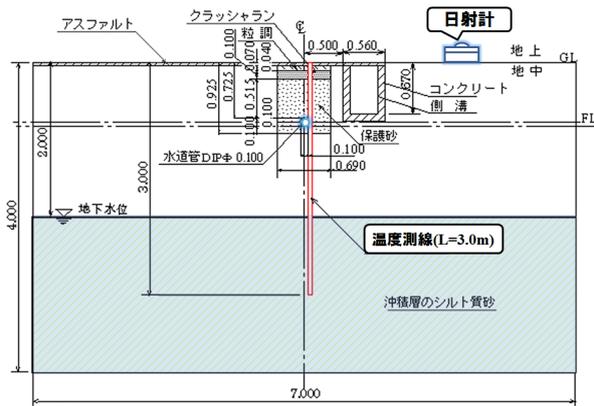


図-2(a) 計測断面 No.2 (光井 2 丁目)
水道管に沿って GL-0.045 ~ GL-3.000 の深度で 15 測点の熱電対を設置

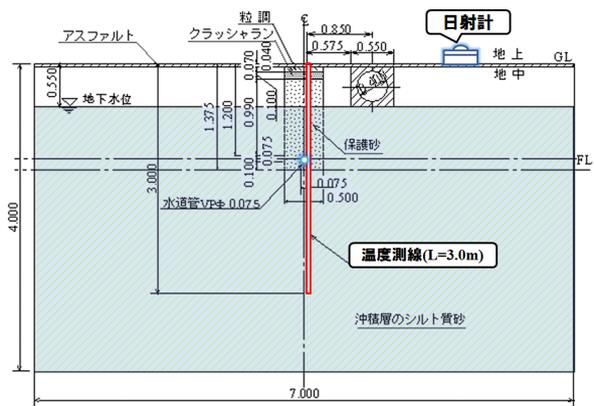


図-2(b) 計測断面 No.4 (室積大町)
水道管に沿って GL-0.040 ~ GL-3.000 の深度で 15 測点の熱電対を設置

図-2 温度計測 B の計測計画

2.2 計測結果

(1) 温度計測A

図-1に，消火栓内の水道水の温度変化の一例として，猛暑日となった2009年8月31日の最大温度と最小温度を示す。島田川で取水された伏流水は消毒処理後に清山配水タンクを通じて，各家庭に送られる。この日，浄水場から送られた水道水は，外気温や日射の影響を大きく受けることなく24℃前後のまま，配水タンクまで送られている。そして，配水タンクから各家庭に給水されることになるが，消火栓内の水道水の温度は，配水タンクに一番近い計測断面No.1に至るまでに，外気温や日射に影響を受けて，日中32℃，夜間30℃まで上昇している。その後，周辺地盤に冷やされたり，暖められたりしながら，28～31℃の温度になっている様子が分る。

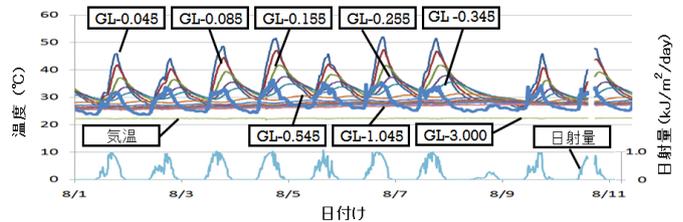


図-3(a) 計測断面 No.2 (光井 2 丁目) の計測結果

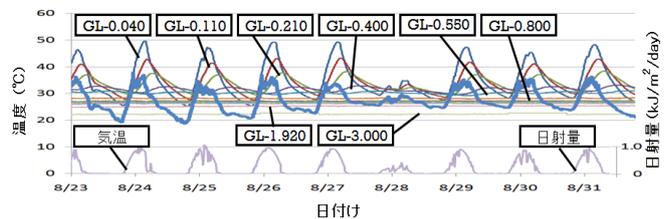


図-3(b) 計測断面 No.4 (室積大町) の計測結果

図-3 地盤内温度と気温と日射量の計測結果

(2) 温度計測B

計測断面No.2とNo.4における気温，周辺地盤温度，日射量の計測結果を**図-3**に示す。計測期間（8月1日から8月31日）の中で，8月9日と28日は，曇っていたが，その他の日は快晴であった。日射量は，日の出とともに増加し始めて，日没とともに無くなり，太陽が最も高くなる正午に，最大値（約 1 kJ/m²/day）を示している。一方で，地盤温度は，日の出直前に最低値を示し，13～15時に最大値を示している。しかしながら，地盤から3mの深さに設置された計測点での温度は，計測断面No.2とNo.4ともに 22℃程度の一定値を示しており，計測期間中は日射や気中温度の影響を殆ど受けていないことが分かる。

3. 計測結果の評価

3.1 非定常熱伝導解析の逆解析手法

通常の非定常熱伝導解析（本文では，以後，順解析と呼ぶ）では，事前に調査試験などによって求められた材料と境界の特性を用いて，地盤や構造物の内部温度の変化を算定する。これに対して，逆解析手法では，現場計測などによって得られた一部の気中や地盤の温度から，順解析時に入力値として用いられているパラメータを求めることが出来る。さらに，この手法を用いれば，現地で直接計測できないような場

所の温度変化や境界面での熱の流入出などを推定することも可能になる。構造物の現場計測の結果を評価するための逆解析手法は、主に、トンネル²⁾、斜面掘削³⁾および基礎地盤⁴⁾などの地盤工学の分野における情報化施工技術として発達してきたため、解析の対象が、応力変形問題へ適用されてきた。そして、ここで用いられている逆解析手法は、大きく逆定式化手法と直接法とに分類できる。櫻井ら²⁾は、有限要素法に最小二乗法を適用した逆定式化手法による解析システムを開発して、トンネルや長大法面の安定性の検討を行っている。一方、Cividini⁴⁾らは、基礎地盤の力学特性を評価するために、直接法の一つであるSimplex法を有限要素法に適用している。Spendley⁵⁾らによって開発されたSimplex法は、同定すべき未知数のn次元ユークリッド空間Rⁿ上にある(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最適解を求めようとする手法である。これに対して、NelderとMeed⁶⁾は、目的関数の性状に応じて単体の形状を変化させる機能を追加することによって、探索過程における収束性の向上につなげた。筆者らはNelderらの手法にさらに改良を加えた修正Simplex法を有限要素法の非定常熱伝導解析⁷⁾に適用して、計測された地盤内の温度変化から地盤の熱特性と熱的境界特性の評価をするための解析システムを開発した。ここでは、目的関数として、つぎのような地盤のある位置での計測温度と解析温度との残差平方和Jを仮定している。

$$J = \sum_{i=1}^n (T^i_m - T^i_c)^2 \quad (1)$$

式中の T^i_m 、 T^i_c 、 n は、計測温度、解析温度、計測点数を表す。そして、解析ステージ毎に、反復計算によって、この目的関数が最小になるときの地盤や境界の熱特性を求めることになる。本解析では、未知数として取り扱う熱特性値は、ステージ毎に一定値として仮定して同定している。このため、同定結果は、ステージ毎の平均値として求められることになる。このことを勘案して、解析ステージは、日の出(06:00)、最高日射(12:00)、日の入り(18:00)が、区切りになるように3時間間隔に設定する。

3.2 解析モデル

逆解析に用いた解析モデルを表-1と図-4に示す。解析モデルの左右の境界は、断熱境界を仮定する。また、日射や気温の影響が受けていない深さ3m以深は、計測された温度を入力値として用いる温度指定境界として取り扱う。

表-1 逆解析に用いた解析モデルの節点数と要素数

計測断面	No.2(光井2丁目)	No.4(室積大町)
節点数	1974	1755
要素数	2152	1905
解析ステージ	76	63

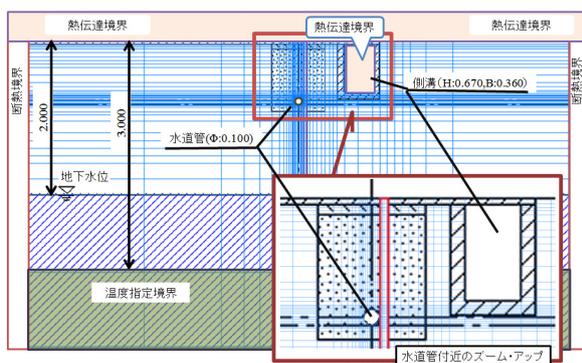


図-4(a) 計測断面No.2 (光井2丁目)

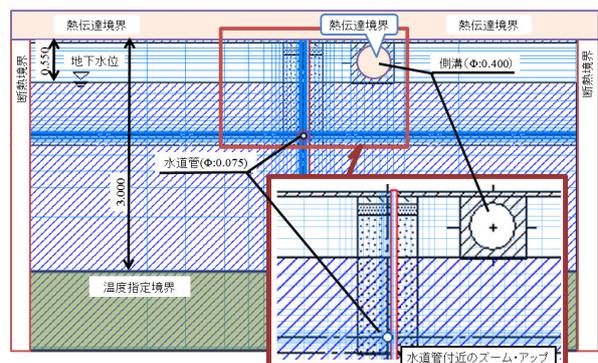


図-4(b) 計測断面No.4 (室積大町)

図-4 熱特性の評価に用いた有限要素モデル

3.3 入力データ

表-2の薄墨を施していない熱特性値が、本逆解析手法に用いた入力定数である。また、図-3に示した計測温度の中で、気温と深さ3mの以深の地盤温度は既知の境界条件として用いる。ここでは、現地や室内では求め難い水道管への熱の流入出、含水比や粒度分布が均質でない地盤の熱特性を求めることを目的としている。このため、比較的測定し易いアスファルトやコンクリートの熱特性は、別途実施した逆解析によって同定された結果を用いて、既知の定数値と仮定する。また、地表面では、地盤と大気との熱伝達と日射による熱流入が生じているが、両者は一次独立な関係にないため、同時に、同定することは出来ない。このため、ここでは、別途、パラメトリック・スタディによって算定した日射の吸収率(3%)を用いることとする。

3.4 解析期間

計測された地盤内の温度分布を再現するために、つぎのような解析を実施する。そして括弧内には、計測断面No.2で実施した解析の期間を示す。

- ① 気温の年変動の影響・・・順解析 (2008年4月22日0時～2009年8月1日20時)
- ② 気温の日変化と日射の影響・・・逆解析 (2009年8月1日20時～8月2日9時)
- ③ 熱特性と熱境界特性の同定・・・逆解析 (2009年8月2日9時～8月12日6時)

気温の年変動を正弦曲線で仮定した時に年平均気温となる4月22日から解析を開始する。このため、解析モデルは、当該地域での年平均気温(16℃)を初期値として設定して、気温の年変動に対する地盤内の温度変化を解析する。つぎに、現地において気温の日変化や日射の影響などの影響を受けた計測値に、地盤内温度分布を一致させるために、逆解析を実施する。そして、この地中内の温度分布を初期値として、地盤、側溝および水道管などの熱特性や熱境界特性を同定するための逆解析を実施する。

4. 解析結果

4.1 地盤内温度の同定結果

逆解析によって得られた地盤内の温度を図-5に示す。地盤内の温度の計測値(図-3)と解析値(図-5)は良く似た結果が得られていることが分かる。このことは、後述の目的関数の収束値(図-9)からも分かる。

4.2 地盤と境界の熱特性の同定結果

(1) 同定された地盤と境界の熱特性

表-2(薄墨部)に、逆解析によって同定された地盤と境界の熱特性を示す。薄墨を施したカラムの上部と下部は、それぞれ計測断面No.2とNo.4の同定結果を表す。また、カラム内の数字は、同定された熱特性の平均値を、括弧内は標準偏差を示す。

埋戻し土として用いられている調粒やクラッシュ・ランや保護砂は、不均質な材料であるため、計測断面No.2とNo.4の同定結果は同じ結果になりにくいと考えられていた。しかし、特に、不飽和領域の保護砂の熱性は、非常に似た結果を示しており、熱特性としては同じような材料が使われていることが分かる。一方、周辺のシルト質砂層は、埋め戻し土よりは均質だと考えられるが、飽和領域の熱特性に差異があることから、組成はよく似ているが、熱特性(例えば、固結度や含水比など)の違った土質であることが分かる。また、計測期間中に降雨はなかったため、地表面と大気の熱伝達係数は、側溝コンクリートと大気との熱伝達係数とは同じような結果が同定されたということは、地表面における日射量の吸収率(3%)の妥当性を示していることになる。

表-2 逆解析に用いた入力定数と同定結果

地盤材料	CODE	体積熱容量 (kJ/m ³ /°C)	熱伝導率 (kJ/m/day/°C)	初期温度 (°C)
1 不飽和地盤(シルト質砂)	1201	4243 (29.3) 4170 (1210)	122 (92.0) 132 (147)	16.0
16 飽和地盤(シルト質砂)	1201	3420 (108) 4350 (1320)	111 (22.8) 75.2 (12.6)	16.0
2 アスファルト	1201	3570	63.1	16.0
11 調粒	1201	2510 (9.6) 2500 (187)	112 (22.9) 314 (272)	16.0
3 埋戻し土 クラッシュ・ラン	1201	1900 (12.7) 3650 (228)	217 (130) 147 (20.8)	16.0
4 埋戻し土 保護砂(不飽和)	1201	5010 (33.4) 4440 (1730)	195 (94.1) 134 (17.2)	16.0
19 埋戻し土 保護砂(飽和)	1201	- 2970 (1570)	- 131 (20.7)	16.0
12 側溝コンクリート	1201	3780	138	16.0

境界要素	CODE	熱伝達係数	熱移動	外部温度 もしくは日射量
		(kJ/m ² /day/°C)	(kJ/m ² /day)	(°C)
17 日射	3251	-	3%	計測値
9 地盤表面と大気の熱伝達境界	3251	70.8 (56.0) 64.1 (17.6)	-	材料番号No.6
10 水道水と地盤の熱移動	3251	-	-0.002 (0.084) 0.107 (0.076)	-
13 側溝コンクリート表面と大気の熱伝達境界	3251	62.4 (39.7) 71.9 (11.3)	-	材料番号No.6
8 地盤の境界温度	3263	-	-	計測値(GL-3m)
6 外気温	261	-	-	計測値

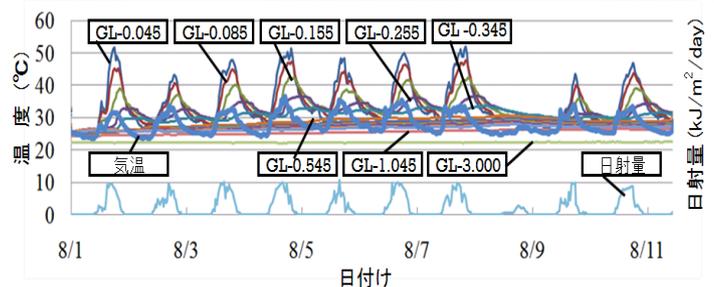


図-5(a) 計測断面 No.2 (光井 2 丁目) の逆解析結果

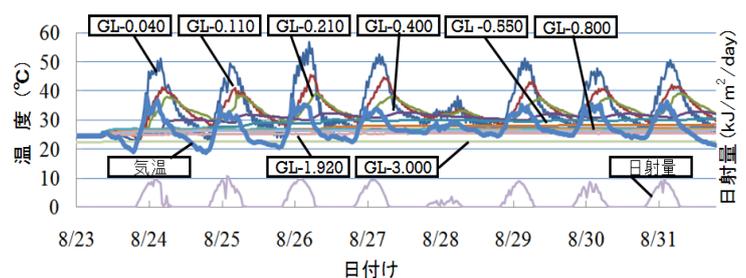


図-5(b) 計測断面 No.4 (室積大町) の逆解析結果

図-5 逆解析によって得られた地盤内の温度変化

(2) 同定された側溝コンクリートと側溝内の大気との熱伝達係数

側溝コンクリートと側溝内の大気との熱伝達係数の同定結果を図-6に示す。図-6(a)に示した各解析ステージで同定された熱伝達係数の頻度分布をみると、違った計測データと違った解析モデルを用いたにも拘わらず、計測断面No.2とNo.4で同定結果は、非常に良く似た結果となっている様子が分かる。さらに、それぞれの同定結果の平均値は、62と71 ($\text{kJ/m}^2/\text{day}/^\circ\text{C}$)である。一方、一般的によく知られている無養生のコンクリート表面の熱伝達係数⁸⁾は57 ($\text{kJ/m}^2/\text{day}/^\circ\text{C}$)であり、両者は良く一致している。地表部とは違い、側溝内は日射の影響を受けないため、理論上の熱の流入出は、側溝コンクリートと側溝内の大気との熱伝達だけになる。このため、これらの結果は、非常熱伝導問題における逆解析手法の妥当性を示しているものと判断している。

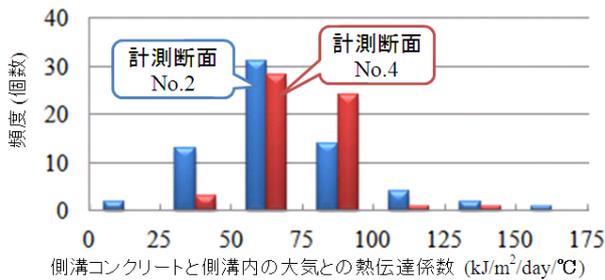


図-6(a) 同定結果の頻度分布



図-6(b) 同定結果のステージ変化

図-6 同定された側溝コンクリートと側溝内の大気との熱伝達係数

(3) 同定された水道管と周辺地盤の熱の流入出

同定された水道管と周辺地盤の熱の流入出を図-7に示す。図-7(b)に示した解析ステージの熱の流入出の変化をみると、計測断面No.2では、解析当初、正值であったのが、解析ステージが進むにつれて、次第に、負値に移っている。このことは、当初、周辺地盤は水道水によって暖められていたが、日時が進むにつれて、逆に、冷やされるようになってきたことを示していることになる。一方、No.4では、全体的に正值となっており、計測期間中ずっと周辺地盤は、水道水によって暖められていることが分かる。

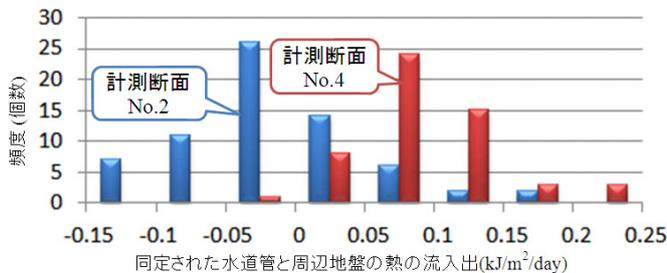


図-7(a) 同定結果の頻度分布

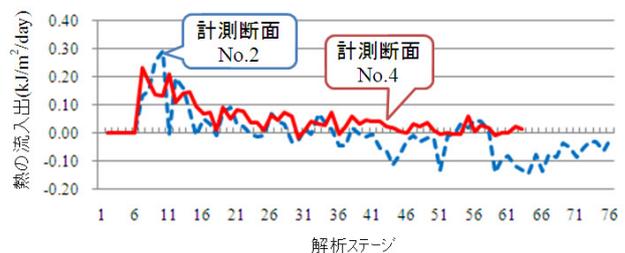


図-7(b) 同定結果のステージ変化

図-7 同定された水道水と周辺地盤の熱移動

(4) 逆解析によって得られた地盤内の温度分布

今回、地盤内に埋設された計測線（長さ3m）によって水道管周辺の15カ所の部分的な地盤内温度を計測した。そして、この計測結果から算定される地盤内の温度分布は、例えば、図-8ようになる。このように、本逆解析手法を用いれば、設置した温度測線で計測された部分的な地盤内温度から、計測されていない地中の温度分布の推定が可能になる。

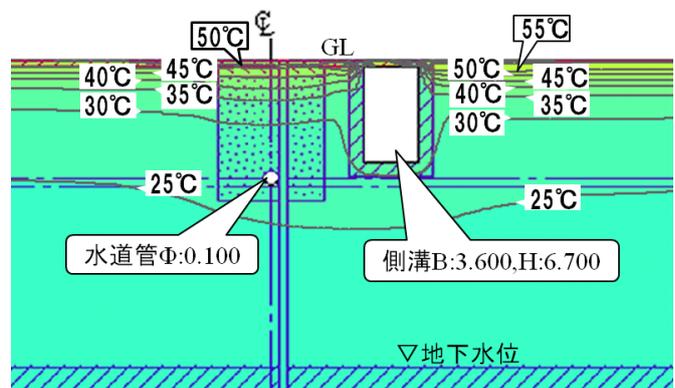


図-8 逆解析によって算定された地盤内の温度分布の一例
(計測断面 No.2 ; 光井 2 丁目, 2009 年 8 月 5 日 15 時)

(5) 各ステージの目的関数の収束状況

図-9に、目的関数の収束値とステージ毎の目的関数の収束状況を示す。計測断面No.2とNo.4は、地下水位の違いから、取り扱う未知数の数は、それぞれ13と15となっている。多くの未知数を同時に同定したにも拘わらず、収束性の良い、安定した結果が得られている。特に、14ステージ以降は、両解析共に目的関数が0.2以下の安定した収束状況にあることが分かる。



図-9(a) 目的関数の収束値

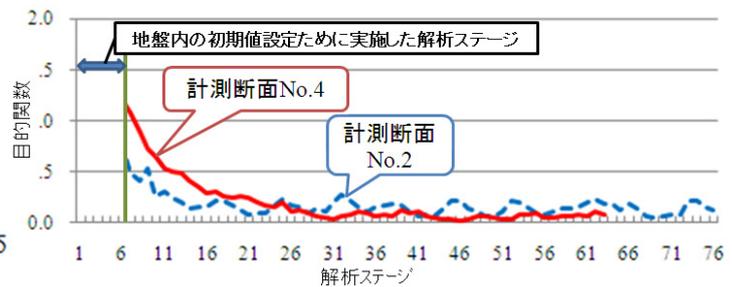


図-9(b) 各ステージの目的関数の収束値の変化

図-9 本逆解析における各ステージの目的関数の収束値

5. おわりに

本論文では、現場計測で得られた気温と地中の温度変化から地盤と境界の熱特性の評価を行った。特に、ここでは、13~15個の未知数を同時に同定したにも拘わらず、収束性の高い解が得られることが分かった。さらに、条件の違う2つの計測断面 (No.2とNo.4) の計測データを用いて実施した逆解析であるが、両計測断面で同定された大気とコンクリート間の熱伝達係数や不飽和領域のシルト質砂の熱特性 (体積熱容量と熱伝達係数) は、ともに良い一致を示している。特に、前者の熱伝達係数は、4.2(2)項で説明したように施設や設備の設計に用いられる設定値と良く似た結果となっている。これらのことは、有限要素法を基にした逆解析手法は、地盤の非定常熱伝導問題への適用性が高く、さらには、現地における熱特性や熱的境界特性をうまく同定していることを示しているものと考えられる。また、現地におけるシルト質砂などのような自然地盤は、箇所毎の含水比や粒度分布の違いから熱特性値は大きく変化し⁹⁾、現地で測定することは難しい。しかしながら、現場で得られた計測データから同定された熱特性は、現地の地盤内の温度変化を再現するために最も相応しい値を示しており、本逆解析手法を用いれば、現地における地盤の平均的な熱特性をうまく評価しているものと判断している。さらに、通常の計測器では測定が難しい水道水と周辺地盤との熱の流入出も、本手法を用いれば、熱特性値と一緒に同定することが出来ることが分かった。

今後、本手法によって得られた結果の妥当性を確認すると共に、地盤内の冷熱源による一般家庭へ供給する夏期の水道水に対する冷却効果の検討を実施する予定です。末尾ながら、本研究が今後の同様の研究の一助となれば幸いです。

参考文献

- 1) Chikahisa, H., Taguchi, T., et al.: Field measurement and evaluation of thermal characteristics of the ground and the boundary for the utilization of cold source within the ground, *EUROCK'2010*, pp.849-852, 2010
- 2) 櫻井春輔, 武内邦文: トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析手法, 土木学会論文集, 第337号, pp.137-145, 1983
- 3) Kirsten, H.A.D.: Determination of rock mass elastic moduli by back analysis of deformation measurements, *Exploration for Rock Engineering*, Balkema, Vol.1, pp.165-172, 1976
- 4) Cividini, A., Jurian, I., et al.: Some aspect of characterization problems in geomechanics, *Inter Journal of Rock Mechanics, Mining Science and Geoengineering*, Vol.18, pp.487-503, 1981
- 5) Spendly, W., Hext, G.R., et al.: Sequential application of simplex designs in optimization and evolutionary operations, *Technometrics*, Vol.4, pp.441-461, 1962
- 6) Nelder, J.A., Mead, R.: A simplex method for function minimization, *Computer J.*, Vol.7, pp.308-313, 1965
- 7) 近久博志, 津崎淳一, 中原博隆, 櫻井春輔: 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
- 8) マスコンクリートのひび割れ制御指針, 日本コンクリート工学協会, p.58, 1986
- 9) 日本冷凍空調学会冷凍空調便覧改訂委員会編, 冷凍空調便覧, 冷凍空調応用編, 日本冷凍協会, Vol.3, pp.174-175, 2006