

## 論文 逆解析による断熱温度上昇量の推定に関する研究

石田 知子\*1・室木 寛司\*2・武市 秀昭\*3

**要旨：**より簡易に断熱温度上昇量を取得する手法として、温度制御を行わない簡易な試験装置により測定した温度履歴を基に、最小二乗法を用いてコンクリートの断熱温度上昇量を推定する方法を考案した。本手法により推定した断熱温度上昇量は、断熱温度上昇試験装置を用いて計測した断熱温度上昇量と比較的よく類似する挙動を示した。ただし、本手法適用時に使用する比熱により算出される断熱温度上昇が変化することから、その影響について壁状構造物を対象とした温度応力解析を実施した。結果、最小ひび割れ指数に大きな違いは認められなかったことから、本手法の適用の可能性を見出した。

**キーワード：**断熱温度上昇量, 温度応力解析, 比熱

## 1. はじめに

セメント水和熱に起因した温度ひび割れの制御あるいは抑制は、旧来からの重要な課題である。

近年では、コンピューター技術の発達により、温度ひび割れ発生の可能性について、温度応力解析を用いて評価することが汎用的となっている。

より精度の高い温度応力解析を実施するためには、対象とするコンクリートの物性をできる限り正確に把握する必要がある。特に、荷重データとなる温度変化を精度よく算定するためには、コンクリートの熱特性である断熱温度上昇量の評価が重要となる。

コンクリートの断熱温度上昇量は、セメントの種類や単位量、打込み温度などの影響を受けるうえに、骨材や混和剤等の使用材料によっても異なる。そのため、断熱温度上昇量をより正確に把握するためには、実際に使用するコンクリートを用いて断熱温度上昇試験を実施するのが良いとされている。

一般的に用いられる断熱温度上昇試験は、断熱状態に近い非常に大型なコンクリート供試体を作製する方法と、温度制御装置を有する断熱温度上昇試験装置を用いる方法の2種類が挙げられる。

このうち、断熱状態に近い大型のコンクリート供試体を用いる場合、試験が大掛かりとなり、経済的、設備的制約を受けることから、汎用的とは言い難い。

また、温度制御装置を有する断熱温度上昇試験装置についても、試験装置が高価であることから保有機関に限られている。また、装置は定置式であるため、試験機を保有する機関にコンクリートの使用材料を送付する必要がある等の物理的な制約を受ける。

そこで本研究では、より簡易に断熱温度上昇量を取得することを目的として、図-1 に示した温度制御を行わない可搬式の温度測定装置を用いて断熱温度上昇量を推

定する手法について検討した。本手法を用いることにより、実際に使用する材料を用いて、生コンプラントや現場等でもコンクリートの断熱温度上昇量を簡易に取得することが可能となると考えた。

本手法では、断熱温度上昇量を仮定し、図-1 に示した温度測定装置をモデル化した温度解析を行い、その解析結果と、実際の温度測定装置を用いた温度計測結果とを比較することにより、最適な断熱温度上昇量を推定する。本来は入力条件である断熱温度上昇量を逆に推定することから、以下、最適な断熱温度上昇量の推定手法を逆解析と称す。

本稿では、逆解析の概要と検討結果について述べる。

## 2. 逆解析による断熱温度上昇量の推定方法

## 2.1 温度計測装置

図-1 に示した温度履歴を採取する温度計測装置は、コンクリート供試体内の温度の変曲点を少なくし、かつ逆解析の迅速性を図るため円筒形とした。また、計測精度確保の観点から、供試体を断熱材料(発泡スチロール)で覆うことで温度上昇量の確保を図った。なお、コンクリート供試体のサイズは、ハンドリングのし易さを考慮し設定した。

## 2.2 断熱温度上昇予測手法の考え方

逆解析による断熱温度上昇量の推定手法の概要についてのイメージを図-1 に示す。温度制御を行わない簡易な試験装置により測定した温度履歴のデータに基づいて、逆解析によりコンクリートの断熱温度上昇量を推定する。

逆解析による断熱温度上昇量の推定のフローを図-2 に示す。逆解析では、まず算出対象とする材齢 ( $time_i$ ) における断熱温度上昇量 ( $Q(time_i)$ ) を求めるために、図-3 に示すように、前ステップの材齢 ( $time_{i-1}$ ) における断熱温度上昇量 ( $Q(time_{i-1})$ ) からの増分量 ( $\Delta Q(time_i)$ ) を

\*1 株式会社大林組 技術本部 技術研究所 課長 工博 (正会員)

\*2 株式会社マルイ 東京営業所 主任

\*3 株式会社マルイ 技術部 環境熱学グループ リーダー

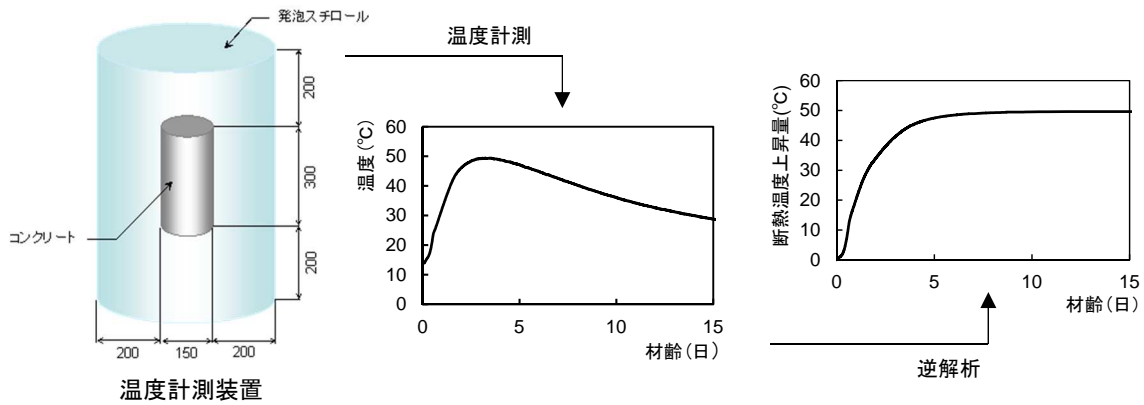


図-1 温度計測装置および断熱温度上昇量の推定手法の概要イメージ

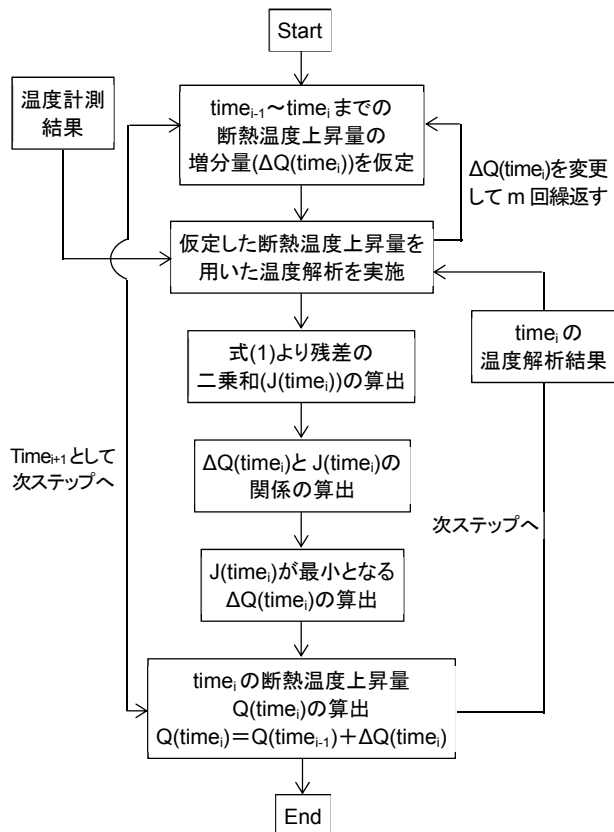


図-2 逆解析による断熱温度上昇量推定のフロー

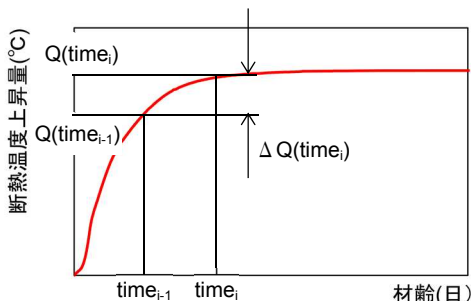


図-3 断熱温度上昇量の増分量のイメージ

仮定する。この増分量(ΔQ(time<sub>i</sub>))を複数変化させ、それぞれの増分量(ΔQ(time<sub>i</sub>))を用いて温度解析を実施する。次に、これらの温度解析結果と温度計測装置による温度計測結果を用いて、式(1)により計測値と解析値との差の二乗和(J(time<sub>i</sub>))を算出する。

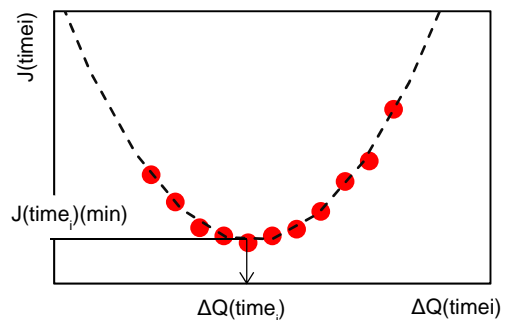


図-4 計測値と解析値との差の二乗和 J(time<sub>i</sub>) と増分量(ΔQ(time<sub>i</sub>))との関係

$$J_{time_i} = \sum_{i=1}^n \rho \cdot (T_m(x_i) - T_c(x_i))^2 \quad (1)$$

ここに、

$\rho$  : 計測点の重み係数

$T_m(x_i)$  : 計測点  $X_i$  の材齢  $time_i$  での温度の計測値

$T_c(x_i)$  : 推定断熱温度上昇量 (Q(time<sub>i</sub>)) を用いて算出した計測点  $X_i$  の材齢  $time_i$  での温度の解析値

この計測値と解析値との差の二乗和 (J(time<sub>i</sub>)) は、前ステップからの断熱温度上昇量の増分量 (ΔQ(time<sub>i</sub>)) の仮定した数だけ存在する。そこで、これらの計測値と解析値の差の二乗和 (J(time<sub>i</sub>)) と前ステップからの断熱温度上昇量の増分量 (ΔQ(time<sub>i</sub>)) との関係は算出する。

前ステップからの断熱温度上昇量の増分量 (ΔQ(time<sub>i</sub>)) が適切に定義できれば、計測値と解析値との差の二乗和 (J(time<sub>i</sub>)) と増分量 (ΔQ(time<sub>i</sub>)) との関係は、図-4 のイメージ図に示すように 2 次関数の近似曲線で表せる。そこで、この 2 次関数が最小 (J(time<sub>i</sub>)(min)) となる ΔQ(time<sub>i</sub>) を設定する。2 次関数を使用することにより、仮定した ΔQ(time<sub>i</sub>) の算出点以外での最適値も推測することができる考えた。

なお、式(1)で評価する温度計測を実施する位置は、コンクリートと発泡スチロールの両者を考慮することとした。そこで、計測点毎に重み係数 (ρ) を設定し、コンクリート温度については、この値を大きくすることで、コンクリート温度を重点的に評価できると考えた。ただし、本稿の検討においては、まずはこの重み係数を全ての計測点で 1.0 とし、同様に考慮することとした。

算出した計測値と解析値との差の二乗和が最小となる

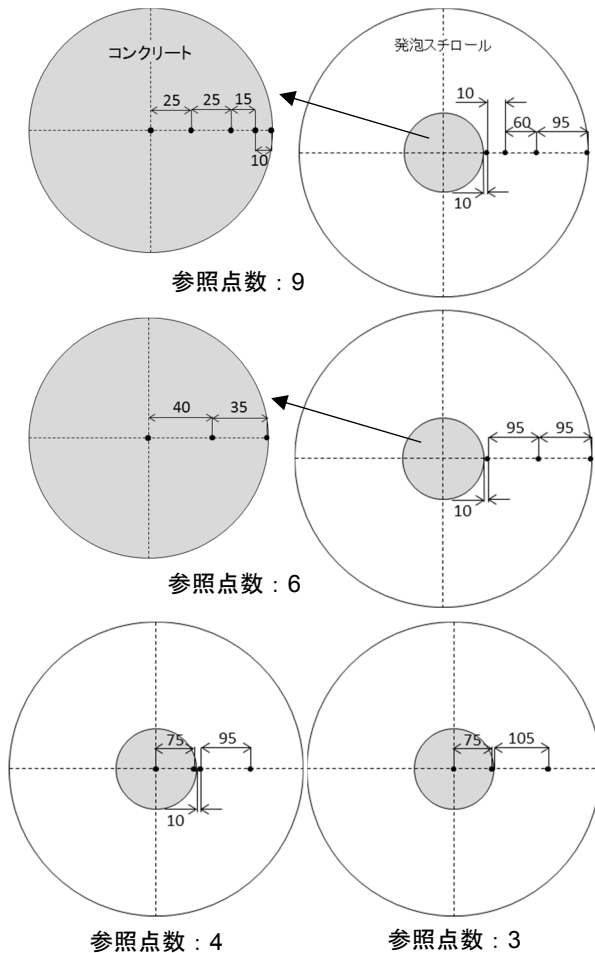


図-5 計測点位置

$\Delta Q(\text{time}_i)$ を前ステップまでの断熱温度上昇量に加算し、対象とする材齢 ( $\text{time}_i$ ) の断熱温度上昇量を算出する。

次に、この算出した材齢 ( $\text{time}_i$ ) の断熱温度上昇量を入力条件として温度解析を実施し、解析モデルにおける各節点の材齢 ( $\text{time}_i$ ) における温度を算出し、この温度を初期値として、次ステップの材齢 ( $\text{time}_{i+1}$ ) について、同様の推定作業を繰り返す。

以上の作業を計測ステップ毎に逐次行うことにより、断熱温度上昇量を算定する。

### 2.3 計測点数および検討幅の分割数の設定

#### (1) 計測点数の設定

温度計測装置の計測点を設定するため、計測点の数が断熱温度上昇量の推定結果に及ぼす影響について、計測点数をパラメータとした感度解析により検討を行った。

本検討では、仮定した断熱温度上昇量を用いて温度計測装置をモデル化した温度解析を実施し、その解析結果から得られた計測点位置の温度変化を用いて逆解析を行い、得られた結果と仮定した断熱温度上昇との比較を行った。解析時の外気温は  $20^\circ\text{C}$  一定とした。

逆解析時に使用する計測点の数は、高さ方向の中心断面において図-5に示したように4ケース変化させた。

逆解析により得られた断熱温度上昇量と、仮定した断

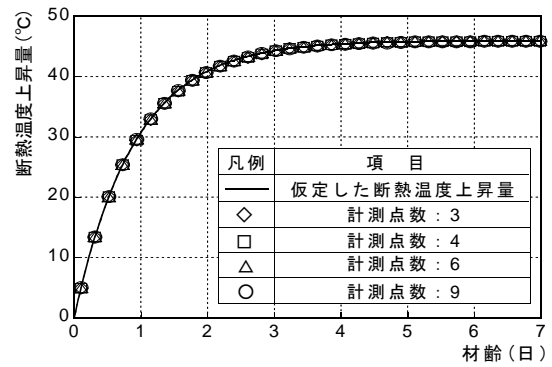


図-6 断熱温度上昇量の比較

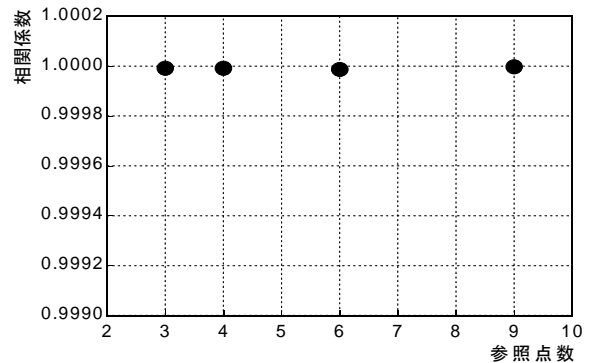


図-7 断熱温度上昇量の相関係数と計測点数との関係

熱温度上昇量の各計測点数における比較を 図-6 に示す。また、逆解析により算出した断熱温度上昇量と仮定した断熱温度上昇量との相関係数と計測点数の関係を 図-7 に示す。

逆解析により算出した断熱温度上昇量は、計測点の数に関わらず仮定した断熱温度上昇量と良く一致する結果を示した。また、逆解析により算出した断熱温度上昇量と仮定した断熱温度上昇量との相関係数は、計測点の数に関わらずほぼ 1.0 に近い値を示した。したがって、計測点の数は3点以上あれば、十分精度良く断熱温度上昇量を推定できると考えられる。そこで、計測点は、コンクリートで2点、発泡スチロール内で1点、計3点とすることとした (図-5 参照点数: 3 参照)。

#### (2) 検討幅の分割数の設定

$\Delta Q(\text{time}_i)$ の算出にあたっては、図-4に示した複数仮定した  $\Delta Q(\text{time}_i)$ を用いて2次関数の近似曲線を算出する必要がある。そこで、この2次関数の近似曲線を作成するために必要なデータ数を設定する目的で、 $\Delta Q(\text{time}_i)$ のデータ数をパラメータとした感度解析を行った。

本検討では、前述の計測点数の検討時と同様に、仮定した断熱温度上昇量を用いて温度計測装置をモデル化した温度解析を実施し、その解析結果から得られた計測点位置の温度変化を用いて、 $\Delta Q(\text{time}_i)$ のデータ数を変化させた逆解析をそれぞれ行い、得られた結果と仮定した断熱温度上昇との比較を行った。

$\Delta Q(\text{time}_i)$ のデータ数は、最大の  $\Delta Q(\text{time}_i)$ を仮定し、その  $\Delta Q(\text{time}_i)$ を等分割した場合の分割数を変化させるこ

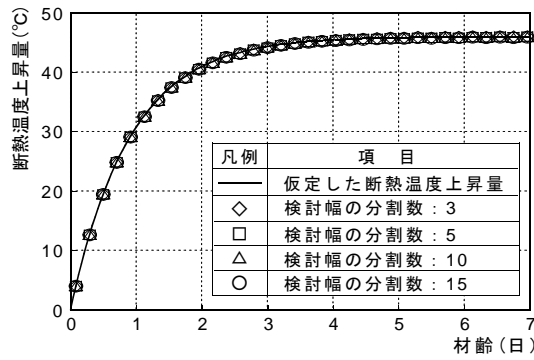


図-8 断熱温度上昇量の比較

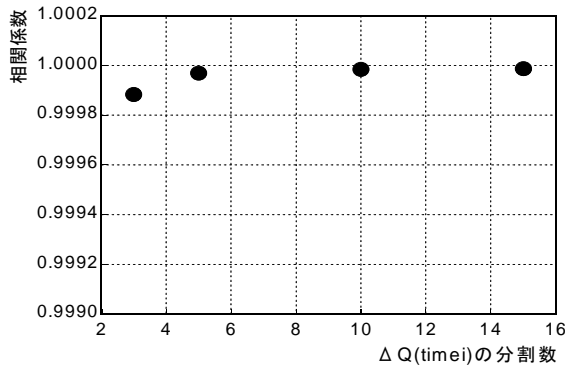


図-9 断熱温度上昇量の相関係数と  $\Delta Q(\text{time}_i)$  の分割数との関係

とで考慮し、分割数を3, 5, 10, 15と変化させた4ケースについて検討した。なお、外気温は20°C一定とした。

逆解析により得られた断熱温度上昇量と仮定した断熱温度上昇量の各分割数における比較を図-8に示す。また、逆解析により算出した断熱温度上昇量と仮定した断熱温度上昇量との相関係数と分割数の関係を図-9に示す。

逆解析により算出した断熱温度上昇量は、 $\Delta Q(\text{time}_i)$ の分割数に関わらず仮定した断熱温度上昇量と良く一致する結果を示した。また、逆解析により算出した断熱温度上昇量と仮定した断熱温度上昇量との相関係数は、わずかではあるが、分割数が増えるに従い1.0に漸近する傾向を示し、分割数10でほぼ1.0となる結果となった。したがって、分割数は10以上あれば、精度良く断熱温度上昇量を推定できると考えられる。

そこで、本検討では、2次関数の近似曲線作成のために10の $\Delta Q(\text{time}_i)$ を仮定することとした。

### 3. 断熱温度上昇量の推定方法の実測による検証

逆解析による本手法の検証は、温度制御装置を有する断熱温度上昇試験装置を用いた断熱温度上昇量の計測結果と比較をすることにより行った。

検証では、使用材料(セメント種類、骨材、混和材)、配合が異なるコンクリートを用いて、コンクリート打込み温度も変化させた21種類のコンクリートの配合について検証を行った。検証を行ったコンクリートの一覧を

表-1 コンクリート一覧

試験No.	セメント種類*	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			打込み温度(°C)	比	
			W	C	BF		Q <sub>e</sub>	γ
1	N	53.3	160	300	—	20.3	0.99	0.98
2	N	47.1	160	340	—	21.8	1.01	0.86
3	N	35.0	175	500	—	22.2	1.03	0.87
4	N	47.1	160	340	—	31.9	1.00	0.94
5	N	47.1	160	340	—	12.7	1.01	0.88
6	BB	50.0	174	348	—	22.0	1.17	0.77
7	BB	47.1	160	340	—	20.5	1.01	0.84
8	BB	47.1	160	340	—	11.8	0.92	0.93
9	MBB	48.3	145	300	—	20.3	0.94	0.86
10	MKC	50.0	159	318	—	18.2	1.08	1.06
11	MKC	50.0	162	324	—	17.5	1.09	1.04
12	MKC	50.0	174	348	—	21.5	1.17	0.82
13	M	27.0	170	630	—	20.5	1.00	0.88
14	M	23.0	170	740	—	20.5	0.94	1.14
15	M	36.0	170	473	—	21.9	0.93	1.13
16	M	50.0	163	326	—	19.6	1.05	1.11
17	M	50.0	174	348	—	22.1	1.03	0.91
18	MFC	61.8	105	170	—	22.0	1.35	0.65
19	L	53.3	160	300	—	21.3	1.08	0.70
20	L	35.0	170	486	—	21.3	0.93	0.92
21	L+BF	31.8	175	388	162	20.2	0.91	1.14

N: 普通ポルトランドセメント, BB: 高炉セメントB種  
 MBB: 中庸熱高炉セメント, MKC: 低熱高炉セメントB種  
 M: 中庸熱ポルトランドセメント, L: 低熱ポルトランドセメント  
 BF: 高炉スラグ

表-1に示す。

逆解析による本手法では、断熱温度上昇量を仮定して温度解析を実施し、温度計測装置で得られた計測値との比較をすることで断熱温度上昇量を算出している。そこで、仮定した断熱温度上昇量を用いて温度解析を実施する際に、他のコンクリートの熱特性(比熱・熱伝導率)を想定する必要がある。

そのため、逆解析による断熱温度上昇量の推定値は、逆解析時に設定するコンクリートの熱特性(特に比熱)の影響を受ける。

示方書設計編<sup>2)</sup>では、一般のコンクリートの比熱は、1.05~1.26kJ/kg°C程度であるとしている。そこで、逆解析時に設定する比熱の影響を検討するため、表-1に示したコンクリートの配合のうち、温度ひび割れ抑制対策として比較的使用頻度が高い、中庸熱ポルトランドセメントを用いたNo.17について、比熱を1.05, 1.15, 1.26kJ/kg°Cとして逆解析により断熱温度上昇量を推定した結果を図-10に示す。また、図-10には断熱温度上昇試験装置による計測値も併せて示す。

図-10では、比熱が小さいほど、断熱温度上昇量が大きくなる傾向を示した。これは、熱伝導の基本方程式か

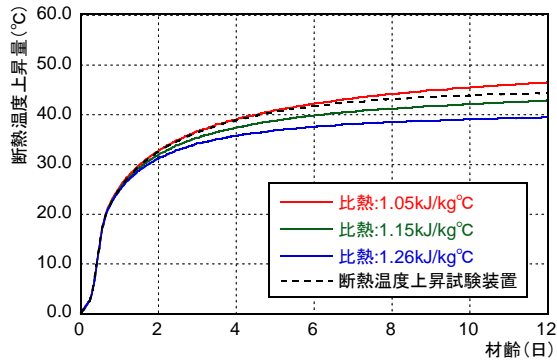


図-10 比熱の違いによる影響 (No.17)

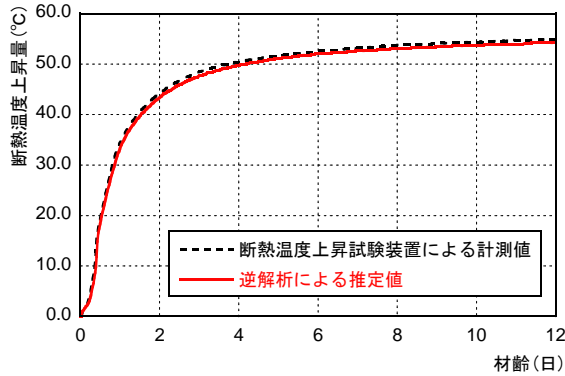


図-11 断熱温度上昇量の比較 (No.1)

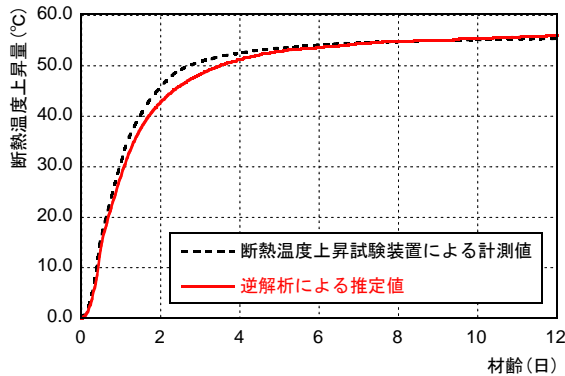


図-12 断熱温度上昇量の比較 (No.7)

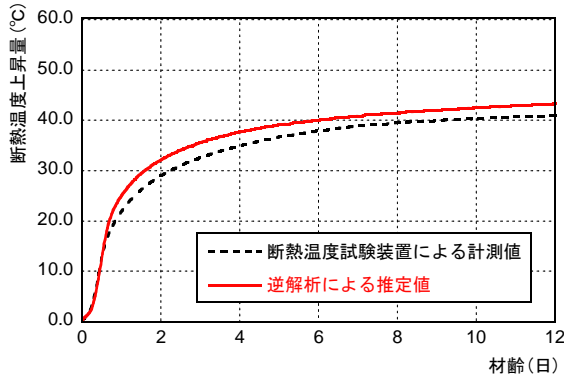


図-13 断熱温度上昇量の比較 (No.16)

らも明らかである。

そこで、逆解析による断熱温度上昇量の推定時は、コンクリートの比熱を、断熱温度上昇量が最も大きくなる 1.05 kJ/kg°Cとして検討を行った。

表-1 に示したコンクリートのうち、セメント種類が異なり W/C が 50%前後の比較的一般的な配合で、打込

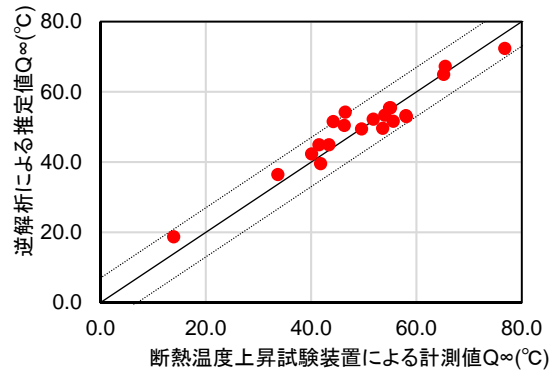


図-14 Q\_infinityの比較

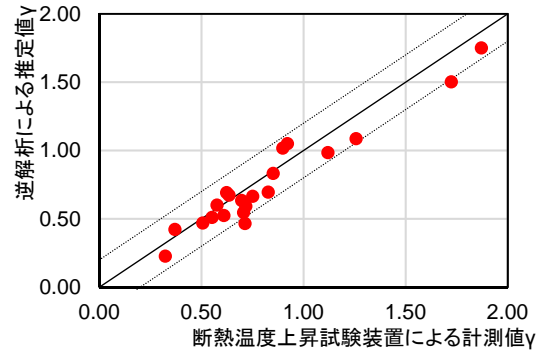


図-15 gammaの比較

み温度が 20°C前後の試験ケース (No.1, No.7, No.16) について、逆解析により得られた断熱温度上昇量の推定値と断熱温度上昇試験装置を用いて得られた断熱温度上昇量の計測値の比較を図-11 ~ 図-13 に示す。

いずれのケースにおいても、逆解析により得られた推定値は、断熱温度試験装置により得られた計測値と、比較的類似した挙動を示していると考えられる。

表-1 に示した全ての検討ケースにおいて、逆解析による推定値と断熱温度上昇試験装置を用いて得られた計測値を式(2)で近似し、得られた  $Q_{\infty}$  と  $\gamma$  を比較した結果を図-14 および図-15 に示す。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - \exp(-\gamma \cdot t)) \quad (2)$$

ここに、

$Q(t)$  : 材齢  $t$  日における断熱温度上昇量 (°C)

$Q_{\infty}$  : 終局断熱温度上昇量 (°C)

$\gamma$  : 温度上昇速度に関する定数

逆解析による推定値と断熱温度上昇試験装置を用いて得られた計測値の差は、 $Q_{\infty}$  で  $\pm 7^{\circ}\text{C}$  程度、 $\gamma$  で  $\pm 0.2$  程度となった。参考として、従来の断熱温度上昇試験装置の試験機の違いによる計測値の差異は、既往の研究<sup>1)</sup>では、 $Q_{\infty}$  で最大  $6^{\circ}\text{C}$  程度、 $\gamma$  で 0.3 程度となる。

表-1 には、全試験ケースの  $Q_{\infty}$  と  $\gamma$  の逆解析による推定値と断熱温度上昇試験装置を用いて得られた計測値との比 (逆解析による推定値/断熱温度上昇試験装置による計測値) を示す。全ケースの  $Q_{\infty}$  に対する比の平均値は 1.03、 $\gamma$  に対する平均値は 0.93 となった。全体的な傾向として、断熱温度上昇試験装置に比べ、逆解析では  $Q_{\infty}$  は

同等もしくは多少大きめに推定し、 $\gamma$ は小さめに推定すると考えられる。すなわち、逆解析の場合、断熱温度上昇試験装置に比べ、最終温度上昇量はほぼ同等かそれ以上となるが、温度上昇に対する速度は小さく推定する傾向が認められる。この傾向は特にセメント量が極端に少ない場合 (No.18) に顕著となった。

#### 4. 温度応力解析による検証

断熱温度上昇量の測定の目的は、温度応力解析によりひび割れの発生の可能性を推定することにある。

前述の通り逆解析による断熱温度上昇量の推定値は仮定する比熱の影響を受けることから、No.17 のケースを対象に異なる比熱と断熱温度上昇量の組合せを用いて、基礎スラブ上に施工する壁状構造物を模擬した温度応力解析を行い、比熱の違いによる断熱温度上昇量の違いが最小ひび割れ指数へ及ぼす影響について検討を行った。

なお、対象とした壁状構造物は、長さ (20m)、高さ (3m) は一定とし、壁厚を 1.0m、2.0m、3.0m と変化させた。また、全ケースにおいてコンクリートの打込み温度は 20°C とし、外気温も 20°C 一定とした。

解析結果の一覧を表-2 に示す。なお、最小ひび割れ指数は、貫通ひび割れを対象として抽出した。

また表-2 には、断熱温度上昇試験装置による計測値を使用した解析結果についても併せて示す。

逆解析により得られた断熱温度上昇量を用いた解析結果のうち、最高温度の差は、比熱の違いにより、壁厚 1.0m で最大 0.4°C、壁厚 2.0m で 0.7°C、壁厚 3.0m で 1.6°C となった。これは、3 ケースの平均温度上昇量の 2~5% 程度の違いであり、微小であると考えられる。最小ひび割れ指数については、比熱の違いにより、その差は壁厚 1.0m で最大 0.03、壁厚 2.0m で 0.02、壁厚 3.0m で 0.04 と小さく、ほぼ同等の結果を示した。したがって、示方書設計編<sup>2)</sup>の一般のコンクリートの範囲内で比熱を設定する限りでは、比熱の違いによる断熱温度上昇量の違いが最小ひび割れ指数へ及ぼす影響は小さいと考えられる。

特に若材齢でのコンクリートの比熱の測定は技術的に難しいことから、従来の断熱温度上昇試験装置による計測値を使用する場合、比熱は示方書設計編<sup>2)</sup>に準拠し想定するのが一般的である。そこで、本検討では断熱温度上昇試験装置による計測値を使用し、一般のコンクリートの比熱の平均値 (1.15 kJ/kg°C) を用いた従来の解析手法との比較を行った。その結果、最小ひび割れ指数の差は、壁厚 1.0m で最大 0.04、壁厚 2.0m で 0.03、壁厚 3.0m で 0.05 となり、従来の方法に対してもほぼ同等の結果を示した。

したがって、逆解析を用いた本手法の適用の可能性は、十分考えられる。今後は、さらにデータを蓄積し、本手

表-2 解析結果一覧

断熱温度 上昇量種類	壁厚 (m)	比熱 (kJ/kg°C)	最高温度 (°C)	最小ひび 割れ指数
簡易断熱 <sup>*1</sup>	1.0	1.05	42.9	0.90
		1.15	43.1	0.88
		1.26	43.3	0.87
断熱試験 <sup>*2</sup>		1.15	42.3	0.91
簡易断熱 <sup>*1</sup>	2.0	1.05	51.0	0.83
		1.15	50.7	0.84
		1.26	50.3	0.85
断熱試験 <sup>*2</sup>		1.15	49.0	0.86
簡易断熱 <sup>*1</sup>	3.0	1.05	54.8	0.83
		1.15	54.1	0.85
		1.26	53.2	0.87
断熱試験 <sup>*2</sup>		1.15	52.2	0.88

\*1 簡易断熱：逆解析による推定値

\*2 断熱試験：断熱温度上昇試験装置による計測値

法の精度向上および適用性の検証を行う予定である。

#### 5. まとめ

より簡易にコンクリートの断熱温度上昇量を取得することを目的に、温度制御を行わない可搬式の簡易なコンクリートの温度測定装置により測定した温度履歴を用いて、断熱温度上昇量を推定する手法について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 逆解析時に使用する温度の計測点は、計測点数を変化させた感度解析の結果から 3 点とした。(計測位置：図-5 参照点数 3 参照)
- (2)  $\Delta Q(\text{time}_i)$  の算出に必要な 2 次関数の近似曲線を作成するためのデータ数は、データ数を変化させた感度解析から 10 とした。
- (3) 逆解析により得られた推定値は、断熱温度試験装置による計測値に比べ、最終温度上昇量はほぼ同等かそれ以上となるが、温度上昇に対する速度は小さく推定する傾向が認められ、その傾向はセメント量が極端に少ないと顕著となる。
- (4) 逆解析により得られた推定値は、解析時に使用する比熱の影響を受ける。しかし、壁状構造物を対象とした解析では、比熱の違いによる断熱温度上昇量の違いが最小ひび割れ指数へ及ぼす影響は小さく、ほぼ同等の最小ひび割れ指数となった。

#### 参考文献

- 1) 社団法人 セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-50 コンクリートの断熱温度上昇試験方法に関する研究，1999.3
- 2) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書設計編，20