

## [7] 温度解析における断熱温度上昇試験結果の適用性

正会員○鈴木 康範（住友セメント 中央研究所）  
 正会員 原田 修輔（住友セメント 中央研究所）  
 正会員 前川 宏一（長岡技術科学大学 建設系）  
 正会員 辻 幸和（群馬大学工学部建設工学科）

### 1. まえがき

マスコンクリートの打込み後の温度上昇をFEM解析等を用いて推定するためには、コンクリートの熱特性値をあらかじめ求めておく必要がある。コンクリートの熱特性値のうち、温度上昇を推定する際に、推定結果に重要な影響を及ぼすものはコンクリートの発熱量である。従来、この発熱量にコンクリートの断熱温度上昇量が用いられてきたが、その適用に当り2つの問題点が存在すると思われる。

問題点のうちの1つは、コンクリートの断熱温度上昇量が試験装置によつて異なることで、場合によつてはコンクリートの正確な断熱温度上昇量を示さないことがある。もう1つの問題点とは、温度推定における発熱量として、コンクリートの断熱温度上昇量をそのまま適用することの出来る範囲に関するものである。すなわち、一般に、マスコンクリートの温度推定において、構造物の断面形状・寸法にかかわらず、発熱量としてコンクリートの断熱温度上昇量を与えていた。しかし、構造物の断面が比較的に小さな場合には、構造物の内部は断熱状態とは言いがたく、断熱温度上昇量に基づく温度解析だけでは不十分と思われる。

本報告は、正確な断熱温度上昇量を求めるのに適切な試験装置について実験的な検討を加え、次に構造物の温度推定における発熱量としてコンクリートの断熱温度上昇量の適用範囲について明らかにしようとしたものである。

### 2. 実験概要

著者らが測定を行った幅が1m、高さが1.2mの断面を有する長さが14.4mの壁体内部における温度の経時変化の実測値と、一種の空気循環式の断熱温度上昇試験装置による結果に基づくFEMの推定値を比較したものが図1である。なお、熱伝導率、熱伝達率、および比熱は、発熱過程がほぼ終了するまで断熱状態に保った2m立方のブロック試験体を、大気に冷却させた時の実測値に一致するように数値実験により定めた。この図より、推定値は実測値より低目の値を示すことが認められる。そこで、断熱温度上昇試験装置の性能とその試験結果の適用性の検討を目的に、2つ

のシリーズに分けて実験を行った。

第1シリーズでは、全面を厚さ20cmの発泡スチロールの断熱材で被覆した2m、1mおよび0.5m立方のブロック試験体内の温度履歴をコンクリート打込み直後より測定し、2種類の断熱温度上昇試験装置による温度上昇量との比較を行った。なお、セメントの水和発熱が急速な場合に断熱温度上昇試験装置の信頼性に疑問が持たれているので、この実験では単位セメント量が多く、かつ練り上がり温度の高いモルタルを用いた。次に、第2シリーズでは、単位セメント量が少なく、練り上がり温度が低いコンクリートを用いて、2m立方のブロック試験体について第1シリーズと同様な実験を行った。また、厚さ20cmの発泡スチロールの断熱材を長さ方向端面のみに配置した幅が1m、高さが1mおよび幅が0.4m、高さが1mの断面を有する長さが2mの試験体の温度履歴も測定し、断熱温度上昇量に基づいたFEMによる推定値と比較した。

実験に用いたセメントは、普通ポルトランドセメントである。各シリーズの配合を表1に示す。

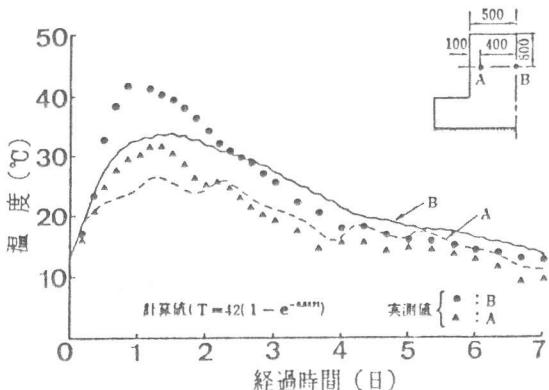


図1 壁体試験体の温度の経時変化

表1 モルタルおよびコンクリートの配合

実験の種別	W/C (%)	S/A (%)	単位量 (kg/m³)				
			W	C	S	G	A/E剤
第1シリーズ モルタル	75.1	—	266	352	1525	—	0.106
第2シリーズ コンクリート	74.5	42.1	158	212	812	1118	0.424

実験に用いた断熱温度上昇試験装置は、水循環式(タイプA)と空気循環式(タイプB)の2種類である。水循環式試験装置は、従来のものとは若干異なり、パイプを密に配置したジャケットを、断熱材を設けず供試体に密着させ、供試体の中心温度に熱媒ジャケット内の水温を追随させて、供試体を断熱状態に保ち、断熱温度上昇量を測定する形式のものである。なお、供試体は、直徑が60cm、高さが60cmの円柱である。一方、空気循環式試験装置は、供試体の周囲にコルク製の断熱材を設け、試験槽内の温度を中心温度に追随させて、供試体を断熱に保ち断熱温度上昇量を測定する形式である。なお、供試体は、直徑が29cm、高さが30cmの円柱である。

各シリーズに用いたモルタルまたはコンクリートの熱拡散率は、GLOVER法により、温水温度を60°C、冷水温度を20°C、また供試体の直徑を20cmとして求めた。比熱は、コンクリートの各構成材料の比熱をそれぞれ双子型恒温壁熱量計を用いて求め、配合割合より算定した。熱伝導率は、上述の手法により実験的に求めた熱拡散率と比熱、および単位体積重量より算定した。これらの熱特性値を一括して表2に示す。

### 3. 断熱温度上昇試験装置の性能

2m立方のブロック試験体の中心温度と2種類の断熱温度上昇試験装置による断熱温度上昇量を併せて示したもののが図2である。この図より、タイプAの試験装置による断熱温度上昇量は、断熱状態に近いと思われるブロック試験体の中心温度とほとんど一致していることが認められる。また、タイプBの試験装置による断熱温度上昇量は、ブロック試験体の中心温度に比べて、打込み初期から低い値となっており、時間が経過するに従い、その差は大きくなっている。第1シリーズで最大約10°C、第2シリーズで最大約4°Cの差が生じ、セメントの水和発熱が急速な場合にその差が大きくなることが認められる。

この原因の1つとして、供試体を覆う断熱材の存在の影響が考えられる。供試体の断熱状態を保つには、供試体の中心温度に供試体の表面温度を追随させればよいが、この際、断熱材が存在すると試験装置により供給される熱量の移動を遅延させ、その影響が蓄積されて供試体の表面温度が中心温度より常に低い状態となり、熱流が供試体の中心から断熱材へ生じ、断熱材の温度上昇にセメントの水和発熱量の一部が消費されてしまい、みかけの断熱温度上昇量が小さくなると推測される。すなわち、コンクリートの断熱温度上昇量を求めるには、供試体の周囲に断熱材を用いることなく、適切な熱媒を用いて供試体の表面において断熱状態を得る形式の装置が適当と思われる。

発泡スチロールの断熱材で被覆したブロック試験体内部といえども、常に断熱材を通じて外部へ熱流が生じており、完全な断熱状態ではない。そこで、タイプAの試験装置による断熱温度上昇量の妥当性を検討するために、その値を用いて、第1シリーズおよび第2

表2 モルタルおよびコンクリートの熱特性値

実験の種別	熱 特 性 値			
	熱伝導率 (kcal/mhr°C)	比 熟 (kcal/kg°C)	比重 (kg/m³)	熱拡散率 (10³ m²/hr)
第1シリーズ	1.89	0.299	2145	2.95
第2シリーズ	2.02	0.247	2300	3.55

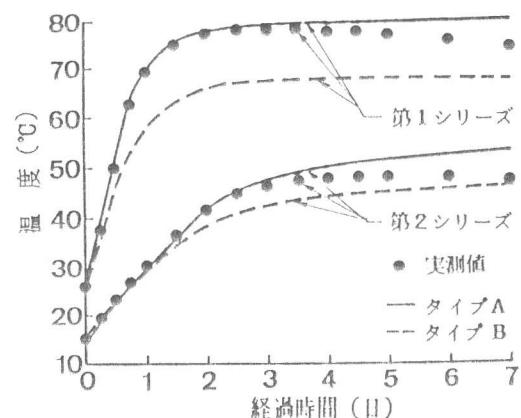


図2 2m³立方ブロックの温度実測値と断熱温度上昇

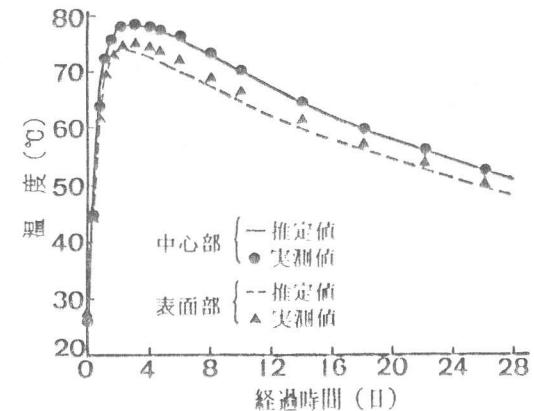


図3 2m³立方ブロックの温度推定結果(第1シリーズ)

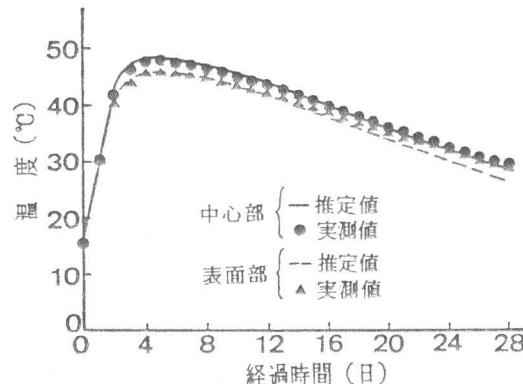


図4 2m³立方ブロックの温度推定結果(第2シリーズ)

シリーズの2m立方の各ブロック試験体について、FEM解析により温度推定を行った。熱伝達率を除く熱特性値は、実験で求められた値を用いた。熱伝達率 $\alpha$ は、第1シリーズの断熱材で被覆した2m立方ブロック試験体について、発熱がほぼ終了したと思われる材令14日から28日までの試験体の中心温度の推定値が、実測値の±0.5 °Cの範囲になるように $\alpha = 0.425 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}^{-1} \text{ °C}$ と定めた。解析対象断面は、ブロック試験体の実測温度分布を参考にして各試験体断面の4分の1とした。外気温は、各シリーズの実測値を用いた。また、断熱温度上昇量を時間の関数として実験式に当てはめると、そのための誤差が少なからず生じるので、実測値をそのまま用い、単位時間当たりの温度上昇量に熱容量を乗じて発熱量を求めた。

各シリーズの2m立方ブロック試験体の中心と表面の温度実測値と推定値の経時変化を示したのが図3および4である。なお、第2シリーズの熱伝達率は第1シリーズと同じ値を仮定した。第1シリーズでは、表面の温度は実測値に比べて約1.6 °C低い値となることが認められる。これは、熱拡散率および比熱の実験誤差と、これらの値の温度依存性を考慮していないためと思われる。第2シリーズにおいては、ブロック試験体の中心および表面の温度推定値は実測値と良く一致している。また、図5に示す断面内の温度分布の一例によれば、温度推定値は実測値と良く一致していることが認められる。すなわち、タイプAの試験装置による断熱温度上昇量は正確な値であり、しかも、上記の方法で求めた熱伝達率の値は、各シリーズの実験の実施時期が異なるにもかかわらず同一の値で推定可能であり妥当なものと言える。

#### 4. 温度解析への断熱温度上昇量の適用性

寸法が0.5mと1.0m立方のブロック試験体についての温度履歴の解析値と実測値を図6および7に示す。断熱温度上昇量は、タイプAの試験装置で求めた値を、また熱伝達率は、2m立方ブロック試験体と同じ値を用いた。なお、熱伝達率が3.0 kcal/m<sup>2</sup> hr °Cで他の熱特性値が前節と同じ値と仮定して、これらのブロック試験体が断熱材で被覆されない場合に換算すると、それぞれ1.5m立方および2m立方となる。

図6より、1m立方ブロック試験体では、その中心および表面の温度推定値は実測値と良く一致していることが認められる。すなわち、発熱量としてコンクリートの断熱温度上昇量を与えることにより、断熱材で被覆しない場合には2m立方程度のブロック試験体の温度履歴の推定が可能であることが明らかとなった。しかしながら、ブロック試験体の寸法が0.5m、すなわち換算寸法にして1.5m程度と小さくなると、推定値は実測値より若干高目の値となることが、図7より認められる。この原因の一つとして温度履歴によりセメントの水和発熱速度が異なることが考えられる。

断熱材で被覆しない幅が1m、高さが1m（A試験体）および幅が0.4m、高さが1m（B試験体）の断面を有する第2シリーズの試験体の温度解析を行った。解析対象断面は、試験体断面内の実測温度分布を参考にして全断面の半分とした。熱伝達率は、前節と同じ方法でA試験体の中心温度の推定値が、実測値の±0.5 °Cの範囲になるように定め、この値は、3.0 kcal/m<sup>2</sup> hr °Cとなった。また、熱伝達率を除く他の熱特性値は実験値を用いた。

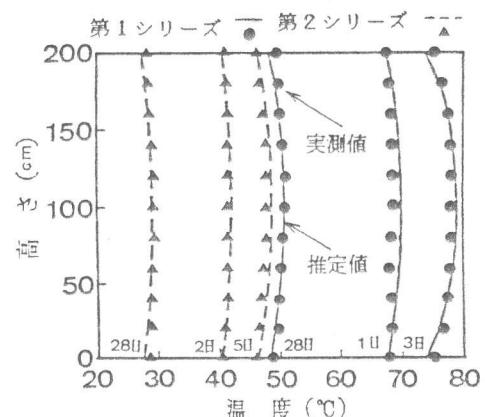


図5 2m立方ブロックの温度分布

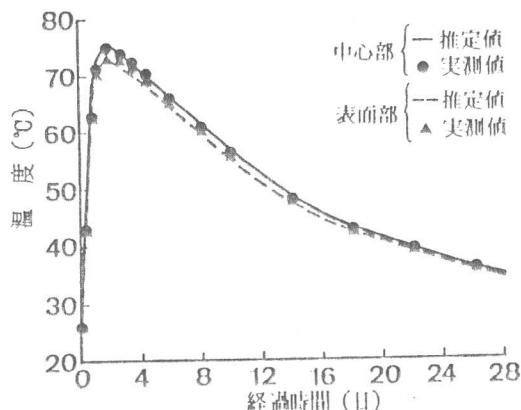


図6 1m立方ブロックの温度推定結果

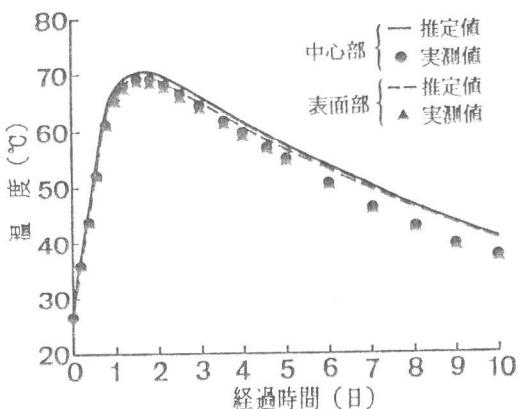


図7 0.5m立方ブロックの温度推定結果

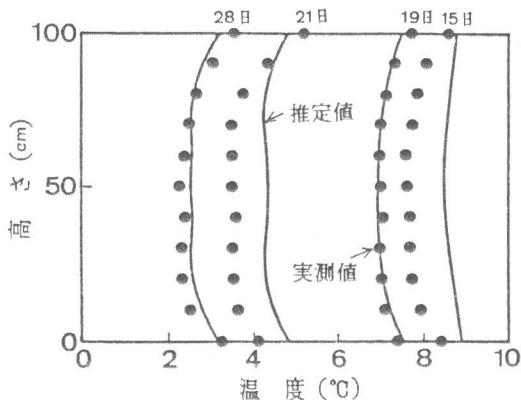


図8 B試験体の温度分布(材令14日以降)

図8は、A試験体より断面寸法が小さいB試験体の断面内の温度分布を示している。この図より、A試験体について求めた熱伝達率をB試験体の温度解析に適用した場合、実測値との誤差も最大で1°C以内に収まっている。また、実験が無風の屋内で行われたことを考慮すれば、熱伝達率の推定値は妥当なものと考えられる。

熱伝達率は上記の値を、また断熱温度上昇量としてタイプAの試験装置で求めた値をそれぞれ用いて、コンクリートの打込み直後から14日間の温度履歴を推定した結果を、実測値とともに示したもののが図9および10である。これらの図より、A・B両試験体とともに、実測値よりかなり大きく推定されることが認められる。このように、構造物の断面形状・寸法によっては、コンクリートの発熱量として断熱温度上昇量を用いるだけでは良好な推定結果が得られない場合がある。コンクリートの発熱量はセメントの水和反応に起因するものであり、温度履歴の影響を受ける。よって、これらを考慮した解析方法が必要となる。

## 5.まとめ

コンクリートの断熱温度上昇試験装置の性能ならびにその適用範囲について検討を行った結果から、以下の知見が得られた。

- ①大型ブロック試験体における温度の実測値と推定値の比較から、コンクリートの正確な断熱温度上昇量を求めるには、供試体の周囲に断熱材を用いることなく、適切な熱媒を用いて供試体の表面において断熱状態を維持できる形式が良いことが明らかとなった。
- ②断熱材で被覆した1m<sup>3</sup>立方、断熱材で被覆しない場合に換算して2m<sup>3</sup>立方以上と十分にマッシュブなブロック試験体の温度履歴を、適切な装置による断熱温度上昇量と実験的に求めた他のコンクリートの熱特性値を用いたFEM解析により、精度良く推定できることが、温度実測値との比較により確認された。
- ③幅が1m、高さが1mおよび幅が0.4m、高さが1mと、さほど大きくない断面を有する試験体の温度解析を②と同じコンクリートの熱特性値を用いて行ったところ、実測値より高目の値を示す解析結果となつた。このことは、構造物の断面形状・寸法によっては、発熱量に断熱温度上昇量を用いるだけでは、他の熱特性値が正確でも、精度の良い温度解析が期待できず、温度履歴によりセメントの水和反応速度が異なることを考慮した解析方法が必要なことを示唆するものである。

## 謝辞

本研究を実施するにあたり、適切な御助言ならびに御支援をいただいた住友セメント㈱ 横田紀男氏、佐藤利幸氏に感謝の意を表します。

[文献] 1)前川宏一、鈴木康範、原田修輔、辻 幸和:『膨張コンクリートを用いたマスコンクリートの温度応力解析』、第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム、JCI, 1984.3.  
2)山川秀次、田辺忠顯、笠原 清:『熱伝達率の試験ならびに実測例』、マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム、JCI, 1982.9.

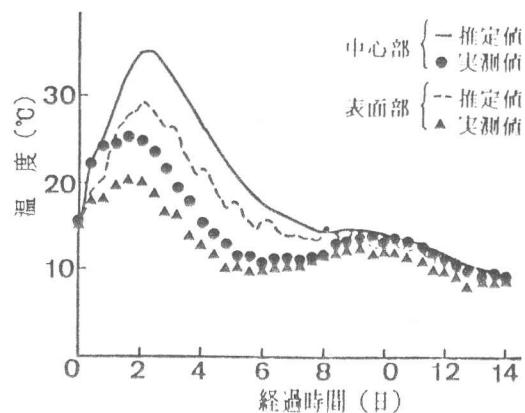


図9 A試験体の温度推定結果(材令14日以前)

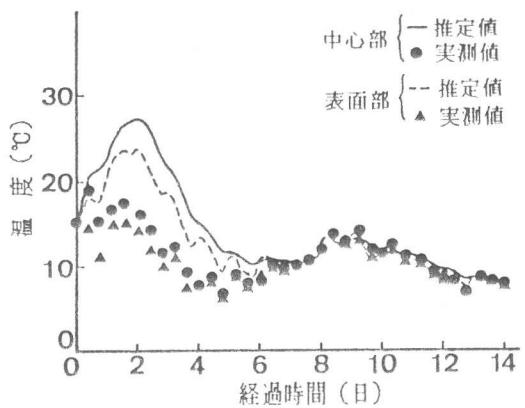


図10 B試験体の温度推定結果(材令14日以前)