

[1029] コンクリートの現場断熱温度上昇試験方法に関する提案

正会員 ○山川 秀次 (電力中央研究所)
 野池 悦雄 (中部電力)
 東側 豊二 (中部電力)
 正会員 川原場博美 (電力計算センター)

1. まえがき

マスコンクリート構造物の温度応力を解析により精度良く推定するためには、その前段としてコンクリート躯体の温度履歴を正確に求めておくことが不可欠な要件となる。

マスコンクリート構造物の施工時温度履歴を一般に左右する要因として、コンクリートの水和発熱特性、養生方法等が挙げられる。このうち水和発熱特性は解析結果に最も大きな影響を及ぼす要因であり、一般に断熱温度上昇試験を実施することにより求める場合が多い。

現在、わが国で使用されているコンクリートの断熱温度上昇試験装置は、既往の研究成果より10種類程度と考えられるが、打設温度、材料およびコンクリートの配合が同じ場合でも、使用する装置により試験結果の異なることが最近の研究成果^{1), 2)}により明らかにされている。

そこで著者らは、コンクリートの断熱温度上昇試験結果が使用する装置により異なることを考慮して、大型ブロック試験体を用いた現場断熱温度上昇試験を実施し、その試験結果及び解析結果の比較・考察を行い、高精度でしかも簡易に行える現場断熱温度上昇試験方法を提案した。

なお、現場断熱温度上昇試験に先立ち、予備解析を行い、ブロックの大きさ、試験体の断熱方法等につき事前検討を行っているため、その結果についても報告する。

2. 予備解析による現場断熱温度上昇試験方法の検討

断熱温度上昇試験装置を用いた試験結果には、種々の原因による誤差が含まれるものと考えられるので、大型ブロック試験体を用いた現場断熱温度上昇試験方法について予備解析により検討した。

2.1 解析概要

解析で対象としたコンクリート試験体の形状は、事前に実施した解析結果を参考にして、保温性(断熱温度上昇曲線の推定精度)の観点から、縦：1 m、横：1 mおよび奥行：1 mの立方体とした。

また、現場断熱温度上昇試験では、試験体の外周部を断熱材で覆い、コンクリート躯体からの放熱を出来る限り防止する対策を採用する予定であったため、断熱材の厚さ(20cmと40cm)をパラメータとする有限要素法による2次元非定常熱伝導解析を実施するとともに、一般にバラツキが大きいと言われている断熱材の熱伝導率をカタログ値の約1/10、1.0および約10倍とした解析も併せて実施した。

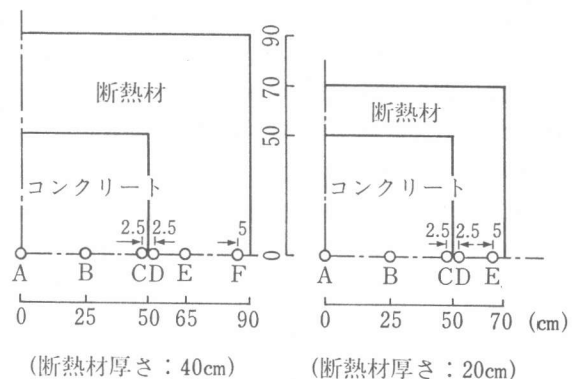


図-1 解析モデルおよび解析結果表示位置

解析モデルを図-1に示す。また、解析

で使用した物性値および解析ケース

を表-1 および表-2 に示す。なお、断熱温度上昇曲線は下式に示すように既知なものと仮定し、コンクリート試験体の外周部からの放熱に伴い中心温度が降下しやすいように終局断熱温度上昇量の大きいものを選んだ。

$$T = 53.42 (1 - \exp(-1.21 t^{1.673}))$$

ここに、T：上昇温度(°C)

t：材令(日)

また、コンクリートの熱伝導率、比熱および密度は実際に試験を実施した類似配合のものと同じ値と仮定した。なお、コンクリートおよび断熱材の初期温度は26°Cとし、外気温は一定値26°Cと仮定した。

2.2 解析結果および考察

解析結果およびその結果に基づく考察は以下に示す通りである。

① コンクリートの中心位置と外表面との温度差が最も大きくなるのは、コンクリート試験体が最高温度に到達する材令である(表-3 および表-4 参照、なお、表中の記号A~Fは図-1を参照)。また、この材令における内外温度差は、断熱材の厚さが薄くなる程、ならびに熱伝導率の値が大きくなる程、多くなる傾向が認められるが、断熱材の厚さが20cmで熱伝導率の値をカタログ値の10倍と仮定した場合でも高々3.9°Cである。すなわち、各材令においてコンクリート躯体内外部における有意な温度差(A-C)は、断熱材の厚さが20cm程度あれば、その保温効果によりほとんど生じないと考えられる(表-3 および表-4 参照)。

② コンクリート躯体の最高温度到達後の降下量は、断熱材の厚さが厚い程、ならびに熱伝導率の値が小さい程少ない(表-4 参照)。断熱材の熱伝導率の値をカタログ値と仮定し、その厚さが20cmと40cmとした解析結果を比較すると、材令30日における試験体中心位置における最高温度到達後の降下量は、それぞれ約20°Cおよび10°C強であり、少なくとも40cm程度の断熱材の厚さを必要とすることが示された(表-3 および表-4 参照)。

③ 現地試験結果の評価に当り、断熱材の物性値としてはカタログ値をそのまま使用することが不

表-1 解析で使用した物性値

項目	単位	コンクリート	断熱材
熱伝導率(K)	Kcal/m·hr·°C	2.98	0.018
比熱(C)	Kcal/kg·°C	0.299	0.20
初期温度(T ₀)	°C	26.0	—
密度(ρ)	kg/m ³	2430	30.0
熱伝達率(H)	Kcal/m ² ·hr·°C	—	7.5

表-2 解析ケースおよび断熱材の厚さと熱伝導率

解析ケース	断熱材	
	熱伝導率(kcal/m·hr·°C)	厚さ(cm)
1	0.2	20
2*	0.018	20
3	0.002	20
4	0.2	40
5*	0.018	40
6	0.002	40

*：解析ケース2および5の熱伝導率はカタログ値である。

表-3 解析結果(ピーク材令における温度分布)

測定点 解析ケース	A	B	C	D	E	F	温度差		断熱材の厚 (cm)	熱伝導率 (kcal/m·hr·°C)
							A-C	D-F		
1	71.0	69.9	67.1	62.1	39.3	—	3.9	—	20	0.2
2	78.3	78.1	77.7	71.3	39.4	—	0.6	—	20	0.018
3	79.2	79.2	79.1	72.5	39.4	—	0.1	—	20	0.002
4	74.2	73.5	71.7	68.7	54.9	33.7	2.5	35.0	40	0.2
5	78.7	78.6	78.4	75.1	58.6	32.7	0.3	42.4	40	0.018
6	79.2	79.2	79.2	75.8	58.8	32.7	0	43.1	40	0.002

表-4 解析結果(材令30日における温度分布)

測定点 解析ケース	A	B	C	D	E	F	温度差		断熱材の厚 (cm)	熱伝導率 (kcal/m·hr·°C)
							A-C	D-F		
1	26.7	26.7	26.7	26.6	26.2	—	0	—	20	0.2
2	58.7	58.6	58.4	54.3	34.4	—	0.3	—	20	0.018
3	76.9	76.9	76.9	70.5	38.8	—	0	—	20	0.002
4	30.3	30.3	30.1	29.8	28.6	26.7	0.2	3.1	40	0.2
5	66.7	66.6	66.5	63.9	51.2	31.2	0.2	32.7	40	0.018
6	78.1	78.0	78.0	74.7	58.3	32.4	0.1	42.3	40	0.002

適当な場合も予想される。このため、断熱材内部の温度分布を現地試験において計測することが不可欠となる。図-2および図-3は、断熱材の厚さと熱伝導率をパラメータとした解析結果の代表例を示している。これらの結果より、コンクリート試験体中心位置における温度履歴と断熱材内部における温度履歴には非常に密接な関係が認められる。すなわち、コンクリート試験体内部の単位時間当りの温度降下量が大きい程、断熱材内部における温度降下量も大きく、しかも断熱材内部の温度差(D-F)には明瞭な有意差が認められることである(表-3および表-4参照)。

以上の検討結果より、以下に示す試験方法を得た。

- 1) 試験体の寸法は保温性の観点から縦：1 m、横：1 mおよび奥行：1 mの1 m³の立方体とする。
- 2) 断熱材の厚さは40cmとし、発泡スチロール製のものを使用する(但し、内外面に木製の型枠を用いるとともに、水分蒸発防止用にビニールシートを使用する)。
- 3) 試験結果の信頼性を高めるため、雰囲気温度を可能ならば、試験体中心温度になるべく近い温度(但し、若干低めの温度)に調節する。
- 4) 計測期間は材令2週間以降での温度上昇の有無を確認するため少なくとも3週間程度とする。
- 5) 計測対象は、コンクリート試験体、雰囲気温度および断熱材とする。
- 6) 試験結果の評価に当っては、コンクリート躯体のみならず断熱材内部の温度履歴と解析結果とを精度良く合せることが必要となる。このためには、少なくとも断熱材の温度測定点数は、コンクリート試験体の温度測定点数と同程度とする必要がある。

3. 現場断熱温度上昇試験の概要

現場試験では、コンクリート(19点)、断熱材(21点)及び雰囲気(1点)温度を計測するため合計41点のC.C熱電対(銅-コンスタンタン)を設置するとともに、成形用に木製の型枠を、および水分の蒸発防止用にビニールシートを配置した。

計測期間は長期材令(2週間以上)での温度上昇の有無を確認するためコンクリート打設後4週間とし、低発熱タイプの単位セメント量が異なる2種類の配合(ダムコンクリート内部用140kg/m³ならびに外部用200kg/m³)のコンクリート試験体を同じ車庫内に配置し、雰囲気温度を上昇量の低い方のコンクリート(内部用)の中心温度になるべく近づくように石油ストーブの燃焼量を1日3回(朝、昼、夜)調節(但し、コンクリートの中心温度を上廻らないように)した。

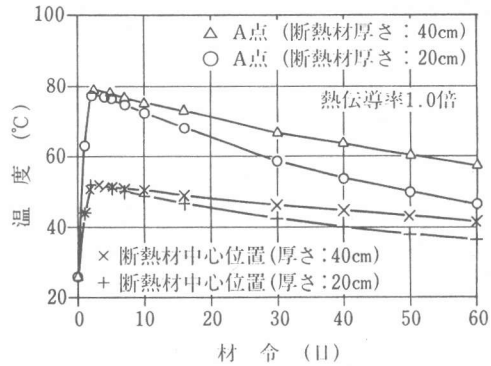


図-2 コンクリートおよび断熱材の温度履歴

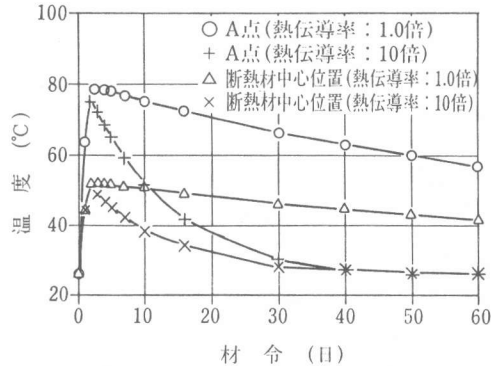


図-3 コンクリートおよび断熱材の温度履歴

その他の条件は前述した通りであった。

なお、発熱特性の異なる2種類の試験体を製作し、雰囲気温度の同じ場所に配置したのは、試験結果の評価に当り、断熱材外表面の熱伝達率ならびに断熱材の熱特性を試験結果と解析結果との照合により決定する必要があったこと、および、雰囲気温度の調節をどの程度迄ラフに行っても良いかを確認する必要があったためである。さらに、使用セメントに低発熱タイプのもを用いたのは、この種のセメントの水和反応が長期間継続し、しかも単位時間当りの温度上昇量がかなり小さいため、試験方法の妥当性を検証するのに最も適していると考えられたためである。

試験結果を要約すると以下通りである。なお、長期材令の温度測定結果には、試験体表面からの放熱による影響を含むことも考えられたため、試験解析結果より試験結果の妥当性を検証した。

コンクリート(外部用)の中心位置と雰囲気では若干の温度差が常に存在する試験条件であったため、コンクリート(外部用)の試験結果には温度降下が少し認められたが、コンクリート(内部用)の試験結果には長期材令における温度降下(逆に材令20日で1日当り約0.1℃の温度上昇あり)は実測の範囲では認められなかった。結果の詳細は以下の解析結果との比較で示す。

4. 試験の解析

前述した現場断熱温度上昇試験結果を評価するため、試験の解析を実施した。

4.1 解析概要

現場断熱温度上昇試験に基づき、単位セメント量 140kg/m³のコンクリート(内部用)および 200kg/m³のコンクリート(外部用)について、現地の雰囲気温度条件等の境界条件を考慮した一次元非定常熱伝導解析を実施した。

一次元モデルの材料構成図および境界条件を図-4に示す。

4.2 解析に用いた物性値

解析に用いた物性値は表-5に示す通りであり、これらの値は別

途実施した熱特性試験により求めたものである。

4.3 断熱温度上昇曲線

コンクリートの断熱温度上昇曲線は下式で表されるものとした。

$$T = K (1 - \exp(-\alpha (t - t_0)^\beta))$$

ここに、T: 上昇温度 (℃)

K、α、β、t₀: 特性値

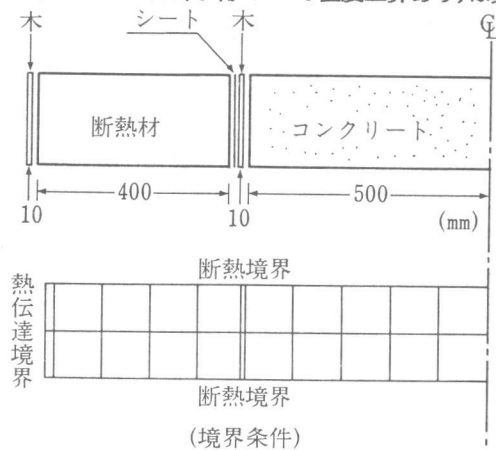


図-4 解析モデルの材料構成および境界条件

表-5 解析に用いた物性値(試験解析)

項目	単位	コンクリート		断熱材	型枠(木)
		内部	外部		
熱伝達率(K)	Kcal/m·hr·℃	2.98	2.98	0.035	0.35
比熱(C)	Kcal/kg·℃	0.329	0.299	0.29	0.29
密度(ρ)	kg/m ³	2350	2430	17	170
熱伝達率(H)	Kcal/m ² ·hr·℃	—	—	—	8
初期温度(T ₀)	℃	15.6	16.2	15.6(16.2)*	15.6(16.2)*

断熱材……カタログ値、木……推定値

* 断熱材および型枠の初期温度はコンクリートの打設温度と等しいものと仮定した。

表-6 断熱温度上昇式

項目	C-140	C-200	C-200*
K	15.56	20.11	20.61
α	0.594	0.707	0.707
β	0.538	0.605	0.605
t ₀	0.167	0.2	0.2

C-200* は実測値に基づき0.5℃高くした。

t : 材令 (日)

特性値K、 α 、 β 、および t_0 は、コンクリートの中心位置における実測温度を用い、最小2乗法により近似して求めた(表-6参照)。

4.4 解析手順

コンクリートの断熱温度上昇曲線として、一般にコンクリートの中心位置における実測結果をそのまま用いることはできない。これは、雰囲気温度とコンクリートの中心位置との温度差によりコンクリートの外周部を覆った断熱材からの放熱に伴う熱損失があるためである。

そこで、本解析では、先ずコンクリートの断熱温度上昇曲線を求めるために、コンクリートの中心位置における実測結果に最小2乗法を適用し、断熱温度上昇曲線の第1次近似式を求めた。次に、この得られた第1次近似式を用いた非定常熱伝導解析結果と実測結果とを照合(許容誤差約 0.1°C)することにより、最終的な断熱温度上昇曲線を決定した。

4.5 実測結果と解析結果との比較・検討

コンクリート躯体内部および断熱材の温度実測結果と解析結果との比較・検討を行った。単位セメント量 $140\text{kg}/\text{m}^3$ のコンクリート(内部用)の断熱温度上昇試験結果と解析結果との比較の1例を図-5に示す。この図からコンクリートの中心位置において両者が非常に高精度で一致していることが示された。また、コンクリートの中心位置における温度が長期材令においても低下していないことから、雰囲気温度の調節方法ならびに断熱方法(断熱材厚さの選択等)が適切に行われたものと考えられる。

単位セメント量 $200\text{kg}/\text{m}^3$ のコンクリート(外部用)の断熱温度上昇試験結果と第1次近似式を用いた解析結果とを比較すると、断熱材部における解析結果と実測結果とは非常に良好な一致を示すが、コンクリート中心位置における解析結果は実測結果に比較して約 0.5°C 低いこと、および長期材令における実測結果に温度降下の傾向が認められた。これは、雰囲気温度をコンクリート(内部用)の中心温度と一致するように調節したことにより、断熱材からの放熱に伴う熱損失が生じた結果と考えられる。従って、コンクリート(外部用)の断熱温度上昇曲線として、実測結果より算出した第1次近似式をそのまま用いるのは不適切と考えられた。このため、断熱温度上昇曲線の第2次近似式として第1次近似式の終局断熱温度上昇量に 0.5°C を加算したものをを用いた解析を行った。その結果は

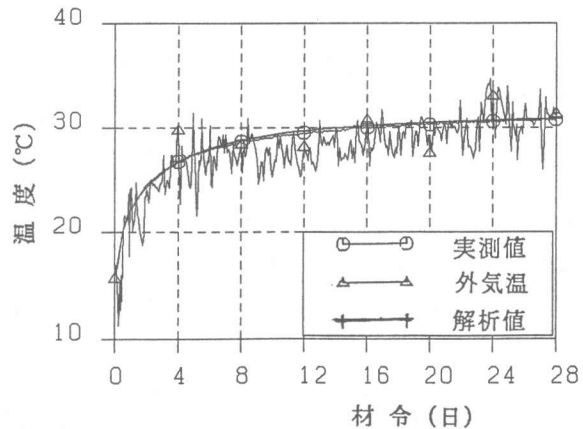


図-5 コンクリート(内部用)の断熱温度上昇試験結果

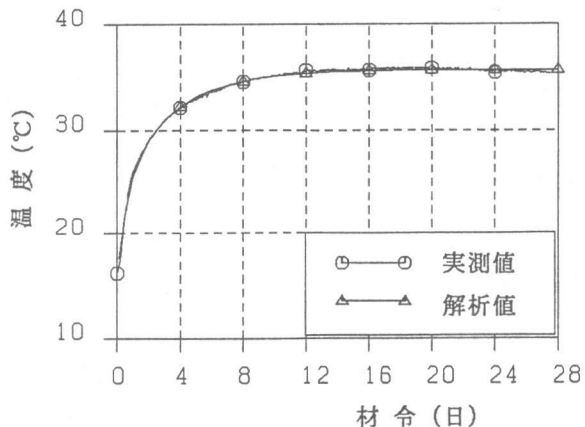


図-6 コンクリート(外部用)の断熱温度上昇試験結果

図-6に示す通りであり、この図より、コンクリートの中心位置において両者が非常に高精度で一致することが示された。また、長期材令におけるコンクリートの中心位置での解析結果と実測結果の温度降下量ならびに勾配が非常に高精度で一致したことにより、解析で用いた熱特性が妥当であることが示された。解析の信頼性をさらに向上させるため、断熱材の熱伝導率（カタログ値の10倍および1/10倍）及び熱伝達率（10および3 kcal/m²・hr・°C）をパラメーターとした解析を行ったが、解析で用いた物性値の妥当性を示す結果が得られていることを付け加えておく。

5. 現場断熱温度上昇試験方法の提案

前述した試験方法により、コンクリートの断熱温度上昇試験が高精度でしかも簡易に行えることから、現場断熱温度上昇試験におけるコンクリート試験体の寸法、断熱材の厚さならびに種類および雰囲気温度の調節を以下のようにすれば良い。

コンクリートの寸法：縦：1 m、横：1 mおよび奥行：1 mの1 m³の立方体

断熱材の厚さと種類：厚さ40cmの発泡スチロール

温度測定位置：コンクリート躯体の中心位置ならびに外表面および断熱材の厚さ方向の中心位置と外表面。さらに、雰囲気温度およびコンクリート躯体外表面から25cmの位置。

試験結果の整理方法：前述した解析手順に従い、コンクリートの中心位置における温度実測結果を用いて、断熱温度上昇曲線の第一次近似式を求める。次に、この近似式を用いた非定常熱伝導解析結果（境界条件および雰囲気温度考慮）と温度実測結果とを照合し、近似式の終局断熱温度上昇量の補正を行う。なお、計算は両者の温度差が0.1°C程度になるまで繰り返す。

雰囲気温度の調節方法：石油ストーブの燃焼量を1日3回程度調節する。

なお、雰囲気温度については、かなりラフな調節（図-5参照）で良いものと考えられるため、終局断熱温度上昇温度に取れんする材令が比較的短い、暑中および富配合コンクリートについては、1週間程度の調節を行えば良いものと考えられる。また、コンクリートの他の熱特性は通常用いられる範囲の値のものを使用して良い（最終結果に対する大きな誤差要因とはならない）。

6. まとめ

コンクリートの断熱温度上昇試験結果が使用する試験装置により異なることを考慮して、現場断熱温度上昇試験を実施し、試験結果と試験解析結果に基づき、高精度でしかも簡易に実施可能な現場断熱温度上昇試験方法を提案した。また、本試験方法を用いることにより、従来の方法では計測が困難であった低発熱タイプのコンクリートの特徴である長期材令における微小な温度上昇量（材令20日で約0.1°C）も正確に計測できることが示された。なお、試験体の寸法については、断熱材の厚さを厚くすることにより小さくできる可能性もあるため、本手法により現場断熱温度上昇試験を実施する場合には、経済性およびハンドリング性を含めた検討を事前に行い、最適な試験体の寸法および断熱材の厚さを決定されるのが望ましいものと考えられる。

7. 参考文献

- 1) 小野定：各種断熱温度上昇試験方法の比較、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論文集、1982、p. 7
- 2) 鈴木康範、原田修輔、前川宏一、辻幸和：温度解析における断熱温度上昇試験結果の適用性、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、1985、p. 25