

# コンクリートの断熱温度上昇試験装置に関する 性能試験方法について

## METHOD FOR EVALUATING PERFORMANCE OF TESTING APPARATUS FOR ADIABATIC TEMPERATURE RISE OF CONCRETE

鈴木康範\*・原田修輔\*\*・前川宏一\*\*\*・辻 幸和\*\*\*\*

By Yasunori SUZUKI, Shusuke HARADA, Koichi MAEKAWA and Yukikazu TSUJI

There is no reliable method to evaluate performance of testing apparatus for adiabatic temperature rise of concrete.

This paper reports measurement of specimens of different size, measurement for a long term, repeated measurement and measurement discrepancy among testing apparatus of the same type.

Comparison is also made between the time-dependent temperature change in mass concrete and the experimental adiabatic temperature rise under the same concrete placing conditions.

The series of tests has revealed that not only achievement of adiabatic condition in testing apparatus, but also comparison with time-dependent temperature changes in mass concrete is necessary to evaluate performance of the testing apparatus.

*Keywords*: testing apparatus, performance, adiabatic temperature rise, FEM

### 1. ま え が き

マスコンクリート構造物については、温度ひびわれの発生の有無を予測し、有効な手段を講じる目的で、一般に温度および温度応力の計算が行われている。この温度解析においては、コンクリートの発熱量として、コンクリートの断熱温度上昇量が通常用いられている。

コンクリートの断熱温度上昇量を測定する装置は、従来より数多く考案、試作され、改良が重ねられてきたにもかかわらず、その性能が十分に検討されてきたとはいえない。たとえば、RC示方書およびJCI指針の断熱温度上昇量の標準値の根拠となった実験データは、試験方法および試験装置自体の相違により、かなりばらついた値であったことが報告されている<sup>1)</sup>。また、断熱温度上昇試験装置そのものの性能試験方法についても不明な点が多い。

本研究では、試作した断熱温度上昇試験装置について

\* 正会員 住友セメント(株) 技術開発センター  
(〒274 船橋市豊富町585)

\*\* 正会員 工修 住友セメント(株) 技術開発センター  
(同上)

\*\*\* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科  
(〒113 文京区本郷7-3-1)

\*\*\*\* 正会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科  
(〒376 桐生市天神町1-5-1)

行った装置自体の性能試験方法と、打ち込まれるコンクリートの諸条件を同一として実構造物あるいはそれに類する大型試験体の温度履歴と断熱温度上昇量との比較をとりまとめて報告するものである。

### 2. 既往の研究

わが国におけるコンクリートの断熱温度上昇量に関する研究は、約30年前から報告されている。しかしながら、統一した試験方法がないために、各研究者および技術者によって、採用したコンクリートの断熱温度上昇試験装置はまちまちである<sup>2),3)</sup>。

また、試験装置の性能の確認方法も、各研究者および技術者によって異なっている。高野らは、燃研式断熱カロリメーターを改良した一種の水循環式の試験装置を考案しており、その性能を、大型の断熱カロリメーターによる値と比較して確認している<sup>4)</sup>。柳田らは、土研式と呼ばれる一種の水循環式の試験装置を考案し、供試体の容器に一定温度の温水を入れて、その後3~4日間の試験装置の断熱状態を測定することにより、性能の確認を行っている<sup>5)</sup>。塚山は、ダムコンクリート用の空気循環式の試験装置を大型化し、試料の量を増加し、また制御面での応答速度を速めることにより、その性能を高めた。そして、発熱速度が速いコンクリートの断熱温度上

昇量を新旧両装置で測定し、その改良効果を確認している<sup>6)</sup>。

一方、マスコンクリート構造物における温度測定例が、近年数多く発表されている。その中のいくつかの報告では、従来発表されているコンクリートの断熱温度上昇量の試験結果は、実構造物の温度測定値を大幅に下回るとの指摘がなされている<sup>7)~9)</sup>。

これまで用いられてきたコンクリートの断熱温度上昇試験装置は、ダムコンクリートのように単位セメント量が少なく、比較的断熱温度上昇量が少ないコンクリートを対象としてきた。しかしながら、今日、RC構造物で温度ひびわれが問題となっているものは、単位セメント量が300 kg/m<sup>3</sup>程度以上といった比較的富配合であり、発熱が急速なコンクリートの場合も多い。したがって、統一した試験方法が確立されていない現状では、打ち込まれるコンクリートの配合条件等を同一とし、断熱状態と考えられる大型の実構造物あるいはそれに類する大型試験体で実測した温度履歴と試験装置で測定された断熱温度上昇量とを比較して、コンクリートの断熱温度上昇試験装置の性能を確認することも必要と思われる。

3. 実験に用いた断熱温度上昇試験装置

本研究では、図一に示すコンクリートの断熱温度上昇試験装置を用いた。本試験装置は、著者らが新たに考案した試験装置であり、内径が60 cm、内高が60 cmの隔壁構造の循環経路を有する熱媒ジャケットを、断熱材を設けずに供試体に密着させ、供試体の中心温度に熱媒ジャケット内の熱媒の温度を追従させて、供試体を断熱状態に保ち、コンクリートの断熱温度上昇量を測定する形式のものである<sup>10),11)</sup>。その際、最大で30°C/h程度を想定した中心温度の急激な変化にも、ジャケット内の熱媒の温度を追従させるため、遅れ補正演算器を備え、0.2°C以内の精度で制御を可能にした。なお、供試体および熱媒の温度は、白金抵抗体 (JIS 0.2級) で検出している。

熱媒としては、主に水を用いた。また、単位セメント量が多くかつ打込み温度が高く、断熱温度上昇量の値が100°C以上の高温となる場合にも、コンクリートの断熱温度上昇量が測定できるように、水のほかにもシリコンオイルを熱媒としたものも一部試作した。また、本試験装置は、粗骨材の最大寸法に合わせて十分均一な試料が得られるように、供試体の寸法を、直径が30 cmで高さが30 cm、および直径が60 cmで高さが60 cmの円柱の2通りに、熱媒ジャケットごと交換ができるものとした。

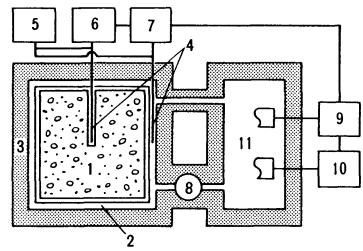
4. 断熱温度上昇量に影響を及ぼす諸要因

(1) 供試体の寸法の影響

供試体の寸法が異なる場合の断熱温度上昇量を求めたものが図二である。実験に用いた配合は、表一中のC1で、単位セメント量が350 kg/m<sup>3</sup>の場合である。この図より、直径が60 cmで、高さが60 cmの円柱供試体は、直径が30 cmで高さが30 cmのものに比べて、それぞれの寸法で2倍、すなわち体積が8倍と大きくなっても、コンクリートの断熱温度上昇量は最大でも0.5°C程度大きい値を示すだけであった。

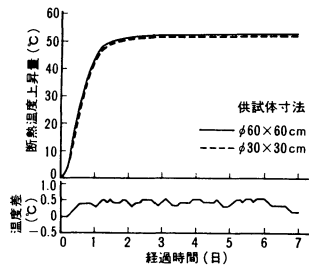
(2) 断熱状態の維持能力の確認ならびに試験結果の再現性

中庸熱ポルトランドセメントをベースとして、高炉スラグおよびフライアッシュを混合した3成分系のセメントを用いた、表一に示す配合C2のコンクリートについて、打込み温度を20°Cとして、試験装置の再現性を



1 コンクリート 2 熱媒ジャケット (内径61cm、内高60.5cm 吐出し 内径31cm、内高30.5cm)  
 3 断熱材 (最小厚さ10cm) 4 温度センサー (精度±0.2°C) 5 温度記録計  
 6 中心温度指示計 (精度±0.2°C) 7 周囲温度調節計 (精度±0.2°C)  
 8 ファン(130l/min) 9 加熱機(6KW) 10 冷凍機(1.5KW) 11 タンク(80l)

図一 断熱温度上昇試験装置の概要



図二 異なる供試体寸法の断熱温度上昇量

表一 実験に用いたコンクリートの配合

種別	記号	水セメント比 (w/c)	細骨材率 % (s/a)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				打込み温度	
				水	セメント	細骨材	粗骨材		
コンクリート	C1	42.3	40.4	148	350	736	1113	1.750	20.0
コンクリート	C2	50.8	39.0	132	260	726	1164	0.650	20.0
コンクリート	C3	50.0	40.6	150	300	760	1129	0.750	30.0
モルタル	M1	75.1	—	226	352	1525	—	0.106	26.0
コンクリート	C4	74.5	42.1	158	212	812	1118	0.425	15.2
コンクリート	C5	44.0	40.5	169	384	707	1078	0.960	26.0

確認するために、繰り返し実験を行った。測定期間は14日とした。両実験に用いた材料は同一であり、約1か月の間隔をおいて実験を実施した。

図-3に示す実験結果より、1回目と2回目の測定値は最大で0.9°Cの差しか生じておらず、試験の再現性は良好であるといえる。また、1回目および2回目とも、打込み後10日以降は断熱温度上昇量がほとんど変化しない、いわゆる断熱状態を示している。そして、その状態が4日間ほど継続して維持されている。

(3) 同一タイプの試験装置間の測定誤差

表-1中のC3に示す配合のコンクリートを用いた場合に、同じタイプの3台の装置間にもどの程度の誤差が生じるかを示したのが図-4である。3台の試験装置のうち2台は、熱媒として水を用いており、残りの1台は、シリコンオイルを用いている。また、3台の試験装置は、約1年間ごとの間隔をおいて製作したものである。

熱媒として水を用いた2台の試験装置による測定値の差は非常に小さく、図-4にはそれらの大きい方の測定値を示している。同一タイプの試験装置間では、水とシリコンオイルという異なる熱媒を用いているにもかかわらず、断熱温度上昇量の終局値が約50°Cのコンクリートについて全測定期間を通じて生じた両者の誤差は、最大でも1.5°Cであった。

5. 大型ブロック試験体の温度上昇量との比較

試験装置により求めたコンクリートの断熱温度上昇量と、全面を厚さ20cmの発泡スチロールの断熱材で被覆した2m立方の大型ブロック試験体の中心部における温度履歴との比較を行った。実験は、単位セメント量が多く、かつ打込み温度が高いモルタルを用いて、セメントの水和発熱が急速な場合、および逆に単位セメント量が少なく、かつ打込み温度が低いコンクリートを用いて、セメントの水和発熱が緩やかな場合の両方(表-1の中のM1とC4)について行った。

コンクリートの断熱温度上昇量と、大型ブロック試験体の中心温度の経時変化を併せて示したものが図-5である。コンクリートの断熱温度上昇量は、打込み後3日頃までは、断熱状態にはほぼ近いと思われるブロック試験体の中心部における温度の経時変化に対して1.0°C以内の範囲に納まっており、温度上昇過程においてはほぼ一致しているといえる。

温度上昇過程において、試験装置による断熱温度上昇量が大型ブロック試験体の中心温度にほぼ一致したからといって、ただちにその値が正確な断熱状態の値と認めることはできない。なぜなら、厚さ20cmの発泡スチロールの断熱材で被覆した1辺が2mのブロック試験体中心部といえども、常に断熱材を通じて外部へ熱流が

生じており、その影響が打込み後2~3日を経過すると徐々に顕著となり、試験装置による断熱温度上昇量の終局値の正確さが確認できないからである。そこで、試験装置によるコンクリートの断熱温度上昇量の全般にわたる妥当性を検討するために、その値を用いて、各大型ブロック試験体内の温度経時変化をFEM解析により推定し、その結果と実測値を比較した。

FEM解析で用いた熱特性値は、熱伝達率 $\alpha$ を除いてすべて実験により求めた。すなわち、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、また供試体の直径を20cmとして求めた。比熱は、モルタルまた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、それぞれの配合割合より算定した。熱伝

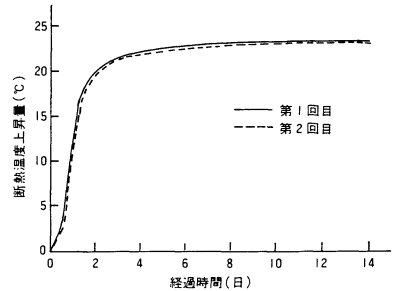


図-3 断熱状態の維持能力および試験結果の再現性

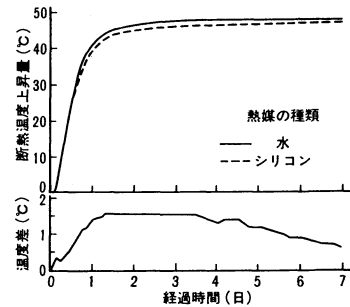


図-4 同一の試験装置の誤差(最大値と最小値)

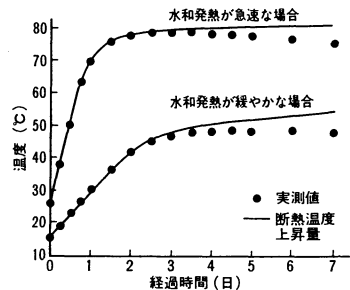


図-5 2m立方ブロック試験体の中心温度の経時変化と断熱温度上昇量

導率  $\lambda$  は、上述の手法により実験的に求めた熱拡散率と比熱、および密度を用いて、式 (1) により算定した。

$$\lambda = c\rho h^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\lambda$ ：熱伝導率 (kcal/mh°C)

$c$ ：比熱 (kcal/kg°C)

$h^2$ ：熱拡散率 (m<sup>2</sup>/h)

$\rho$ ：密度 (kg/m<sup>3</sup>)

熱伝導率  $\alpha$  は、水和発熱が急速な場合の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打込み後 14 日から 28 日までの中心温度の推定値が、実測値の  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  の範囲に収まるように、FEM 解析により  $\alpha = 0.425 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  と定めた。したがって、熱伝導率はコンクリートの発熱量とは無関係に、実験的に求められた他の熱特性値により算定されたのである。これらの熱特性値は、表—2 にまとめて示す。

温度解析の対象断面は、ブロック試験体の実測温度分布を参考にして、試験体断面の 4 分の 1 とした。試験体表面は、熱伝達境界と仮定し、発泡スチロール断熱材は要素とみなさず、上述のように等価熱伝達率に換算して、その影響を考慮した。外気温は、実測値を用いた。なお、試験装置より得られたコンクリートの断熱温度上昇量を時間の関数として近似式に当てはめると、そのための誤差が少なからず生じるので、実測値の単位時間当たりの温度上昇量に熱容量を乗じて、そのまま発熱量として用いた。

2 m 立方の大型ブロック試験体の中心部と表面部の温度実測値と解析値の経時変化を示したのが図—6 および図—7 である。なお、水和発熱が緩やかな場合にも、熱伝導率は、水和発熱が急速な場合と同一の値を仮定した。

水和発熱が急速な場合には、表面部の温度の解析値は、実測値と比較して、最大でも約  $1.6^\circ\text{C}$  しか誤差が生じていない。なお、表面部における実測値と解析値の誤差は、熱拡散率および比熱の実験誤差、さらにこれらの熱特性値に温度依存性を考慮していないことも原因と思われる。

水和発熱が緩やかな場合にも、大型ブロック試験体の中心部および表面部の温度の解析値は、実測値と良く一致している。さらに、図—8 に示す断面内の温度分布より、温度の解析値は、実測値と断面内の全域で良く一致していることが認められる。

### 6. 実構造物の温度上昇量との比較

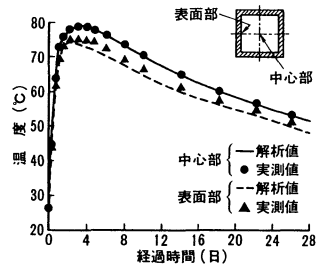
コンクリートの断熱温度上昇量と、図—9 に示すように 1 回の施工区画が幅が 11 m、長さが 4.4 m、高さが 7 m とマッシュな防波堤コンクリートの温度履歴と比較し、その値の適用性を検討する<sup>12)</sup>。なお、用いた配合は表—1 中の C5 であり、工事現場において打ち込まれた

コンクリートと同一の材料および配合で、しかも同一の打込み温度により断熱温度上昇試験を行った。

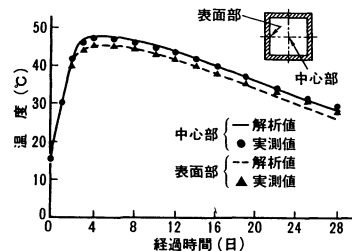
コンクリートの断熱温度上昇量と、打込み後 2~3 日程度までのほぼ断熱状態とみなせる図—9 中の測定点 No. 4 の温度経時変化を併せて示したものが図—10 である。コンクリートの断熱温度上昇量は、温度上昇過程においては測定点 No. 4 の温度経時変化とほぼ一致しているが、大型ブロック試験体の場合よりも誤差がやや大きく、最大で約  $2.2^\circ\text{C}$  となった。防波堤コンクリー

表—2 大型ブロック試験体の熱特性値

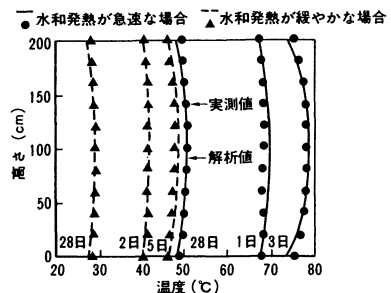
実験の種類	モルタルまたはコンクリートの熱特性値				熱伝導率 (kcal/m <sup>2</sup> h <sup>o</sup> C)
	熱伝導率 (kcal/mh <sup>o</sup> C)	比熱 (kcal/kg <sup>o</sup> C)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	熱拡散率 (10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /hr)	
水和発熱が急速な場合	1.89	0.299	2145	2.95	0.425
水和発熱が緩やかな場合	2.02	0.247	2300	3.55	0.425



図—6 2 m 立方ブロック試験体の温度解析結果と実測値 (水和発熱が急速な場合)



図—7 2 m 立方ブロック試験体の温度解析結果と実測値 (水和発熱が緩やかな場合)



図—8 2 m 立方ブロック試験体の温度分布

トはトレミー工法により打ち込まれる水中コンクリートであり、材料分離が少なからず生じることも誤差がやや大きくなった原因と考えられる。

防波堤コンクリートの場合も大型ブロック試験体と同様で、完全な断熱状態ではない。そこで、得られたコンクリートの断熱温度上昇量を用いて、防波堤コンクリートの温度解析をFEMにより行い、その断熱温度上昇量の全般にわたる妥当性を検討した。

断熱温度上昇量以外のコンクリートの熱特性値は、既往の文献を参考にして定めた<sup>13)</sup>。ただし、熱伝達率は、5.の大型ブロック試験体の場合と同様に、防波堤下部の断面中心部に位置する測定点No. 4の打込み後14日から28日の温度の実測値の降下勾配に、推定値が±0.5°Cの範囲内に収まるように、FEM解析により求めた。これらの熱特性値は表—3に示すとおりである。

解析対象断面は、底部の岩盤および既設の防波堤コン

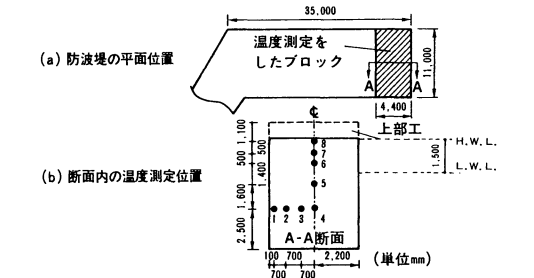
クリートを含むもので、図—11に示すような要素分割を行った。空気または海水と接するコンクリート上面と側面ならびに岩盤の上面で熱伝達境界とし、さらに岩盤の上面より4 m下方の位置で固定温度境界とした。

陸上部で施工される上部工に近い測定点では、その打込みの影響が温度の実測値に顕著に現われた。そこで、解析では図—11に示す要素分割で、水中コンクリート部分の温度解析を上部工打継ぎ時まで行い、その時点の各節点温度を求めた。次に、上部工を含む要素分割を新たに行い、境界条件を修正した後、この値を初期温度として与え、再び解析を行った。なお、外気温および海水温度は、実測値より日平均温度を求めて用いた。

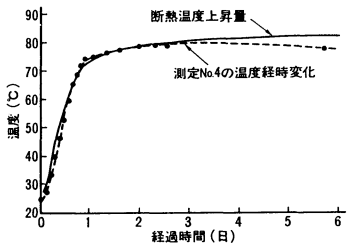
防波堤コンクリートの温度の実測値と解析値との比較を示したものが、図—12および図—13である。これらの図より、防波堤下部だけでなく、上部工の打込みの影響が現われる防波堤上部においても、温度の実測値と解析値は比較的良く一致していることが認められる。

### 7. 結 論

本研究では、まず試作した断熱温度上昇試験装置についての装置自体の性能を検討した。その後打ち込まれる



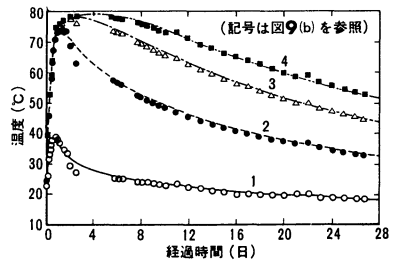
図—9 防波堤コンクリートの平面位置および断面内の温度測定位置



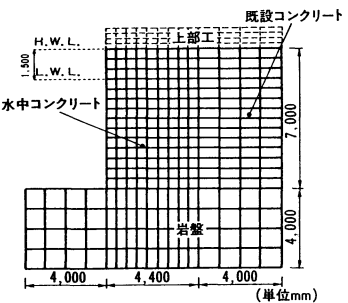
図—10 防波堤中心部の温度の経時変化と断熱温度上昇量

表—3 防波堤コンクリートの温度解析に用いた熱特性値

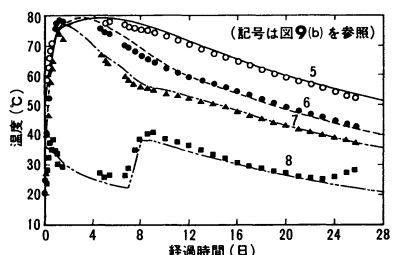
種類	熱特性値	数値
コンクリート	熱容量 (kcal/ m <sup>3</sup> °C)	715
	熱伝導率 (kcal/ m hr °C)	2.4
	熱拡散率 (10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> / hr)	3.36
岩盤	熱容量 (kcal/ m <sup>3</sup> °C)	650
	熱伝導率 (kcal/ m hr °C)	2.0
	熱拡散率 (10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> / hr)	3.25
熱伝達率 (kcal/ m <sup>2</sup> hr °C)		50



図—12 防波堤コンクリートの温度解析結果と実測値 (その1)



図—11 防波堤コンクリートの要素分割図



図—13 防波堤コンクリートの温度解析結果と実測値 (その2)

コンクリートの諸条件を同一として、実構造物あるいはそれに類する大型試験体の温度履歴と断熱温度上昇量との比較を行った。本研究の範囲からは、以下の知見が得られた。

(1) 試作した試験装置においては、供試体の寸法が体積で8倍となっても、コンクリートの断熱温度上昇量は最大でも0.5°C程度の差しか生じなかった。また、断熱温度上昇量の増加がほとんど生じなくなる、打込み後11日から14日の4日間においても断熱状態を維持できること、同一材料および同一打込み温度で試験を繰り返して実施した場合の試験結果には約0.9°Cの温度差しか生じないこと、さらに、同一タイプの試験装置間では、全測定期間を通じての差は、最大で1.5°Cであることが認められた。

(2) 打ち込まれるコンクリートの諸条件を同一とした、実構造物あるいはそれに類する大型試験体の温度履歴と試作した試験装置により測定された断熱温度上昇量の比較では、コンクリートの発熱が急速な場合および緩やかな場合も、断熱温度上昇量は断面内の中心部の温度とほぼ一致した。ただし、断熱温度上昇量と断面内の中心部の温度との誤差は、実構造物の場合の方が大型試験体より大きくなった。

(3) コンクリートの断熱温度上昇試験装置の性能を確認するのに、打ち込まれるコンクリートの諸条件を同一とし、ほぼ断熱状態と考えられる大型試験体や、実構造物の温度履歴との比較を行うことは上述のごとく有効である。ただし、構造物の最小寸法によっては、中心部でも断熱状態を保持することが困難なため、断熱温度上昇量の終局値の精度も併せて検討することが重要である。その場合、FEM解析による断面内各部の温度経時変化の解析値と実測値の比較は、有力な手法である。

謝 辞：本研究を行うにあたり、東京大学 岡村 甫教授には、有益なご助言、ご指導を頂きました。また、住友セメント(株)横田紀男氏、佐藤利幸氏には、実験の実施や論文作成にあたり、適切なご助言、ご支援を頂

きました。ここに深く感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 田辺忠顕：マスコンクリートの温度応力制御技術の現状，土木学会論文集，第372号/V-5，pp.1~16，1986.8.
- 2) 平賀友晃・倉林 清：コンクリートの断熱温度上昇特性に関する既往の研究成果について，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，pp.1~6，1982.10.
- 3) 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，pp.7~10，1982.10.
- 4) 高野俊介：打込み温度がマスコンクリートの強度に及ぼす影響の研究，土木学会論文集，第26号，pp.5~6，1955.5.
- 5) 柳田 力・上野裕康：コンクリートの断熱温度上昇測定装置について，セメント技術年報 XIV，pp.317~319，1965.
- 6) 塚山隆一：マッシブな鉄筋コンクリートの温度上昇ならびに温度ひびわれに関する基礎研究，学位論文(東京大学提出)，pp.75~96，1974.
- 7) 後藤貞雄：LNG地下タンク底版コンクリートの温度ひびわれ制御，マスコンクリートのひびわれ制御指針，pp.191~200，1986.3.
- 8) 吉田 隆・久保田信雄・中内博司：温水養生によるマスコンクリートの温度履歴，温度応力に関する現場実験，第35回土木学会年次学術講演会，pp.165~166，1980.
- 9) 中山 誠・吉浪康行：ケーソン中埋コンクリート打設時の温度上昇と温度応力，第35回土木学会年次学術講演会，pp.177~178，1980.
- 10) 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，pp.25~28，1985.
- 11) 横田紀男・鈴木康範・原田修輔・佐藤利幸：断熱温度上昇試験方法に関する一考察，セメント技術年報39，pp.233~236，1985.5.
- 12) 横田紀男・鈴木康範・原田修輔・佐藤利幸：防波堤コンクリートの温度ひびわれに関する一考察，セメント技術年報40，pp.395~398，1986.5.
- 13) マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書：日本コンクリート工学協会，pp.17~23，1985.11.  
(1988.4.19・受付)