

[2001] 新試験装置によるコンクリートの断熱温度上昇量

- 正会員 ○佐藤利幸 (住友セメント 技術開発センター)
- 正会員 鈴木康範 (住友セメント 技術開発センター)
- 正会員 原田修輔 (住友セメント 技術開発センター)
- 正会員 横田紀男 (住友セメント 技術開発センター)

1. まえがき

昭和61年に制定された土木学会のRC示方書およびJCIの『マスコンクリートのひびわれ制御指針』（以下、単にJCI指針と称する）では、マスコンクリート構造物におけるセメントの水和熱に起因する温度ひびわれおよび温度応力の検討方法についての一般の標準が示された[1, 2]。これらに規定されているように、マスコンクリート構造物の温度上昇量を推定する場合には、コンクリートの発熱量として断熱温度上昇量が用いられる。この断熱温度上昇量に関するデータの多くは、統一的な試験方法に基づいて得られたものではない。試験装置としても、数種類のものを使用されており、試験装置によってさまざまな値を示すことが指摘されてきた[3]。

著者らは先に、大型のマスブロック打設実験およびFEM解析により、従来の試験装置に比べて精度良く断熱温度上昇量を測定できる新しい試験装置を考案した[4]。本研究は、この新試験装置を用いて、コンクリートの断熱温度上昇量を測定し、RC示方書およびJCI指針の標準値と比較検討したものである。

2. 実験概要

2.1 実験の種類

本実験では、2つのシリーズに分けて合計70ケースの断熱温度上昇試験を行った。表1に、変化させた要因と水準をシリーズごとに示す。

シリーズIは、セメントの銘柄が断熱温度上昇量に及ぼす影響を調べるために、市販セメントの中から11銘柄の普通ポルトランドセメント(OPC)を用いて同一配合、同一打込み温度で実験を行った。

シリーズIIでは、セメントの種類、単位セメント量、打込み温度が断熱温度上昇量に及ぼす影響を調べるために、セメントの種類を4水準、単位セメント量を5水準、打込み温度を3水準に変えて実験を行った。

2.2 使用材料

シリーズIでは、市販されている11銘柄(A~K社製)のOPCを使用した。シリーズIIでは、A社製のOPC、中庸熱ポルトランドセメント(MHPC)、高炉セメントB種(BCB)、フライアッシュセメントB種(FCB)を使用した。BCBのスラグ混入率は40%、FCBのフライアッシュ混入率は20%である。実験が長期間にわたったため、打込み温度が20℃の場合に使用したセメントと10、30℃の場合に使用したセメントはロットが異なる。

表1 実験の要因と水準

実験の種類	要因	水準
シリーズI	セメント	市販OPC 11銘柄
	単位セメント量(kg/m ³)	300
	打込み温度(℃)	20
シリーズII	セメントの種類	OPC, MHPC, BCB, FCB
	単位セメント量(kg/m ³)	200, 250, 300, 350, 400
	打込み温度(℃)	10, 20, 30

シリーズⅠおよびシリーズⅡで使用したセメントの化学成分を表2および表3に、シリーズⅡで使用したセメントの物理的性質を表4に示す。

粗骨材は、最大寸法が40mmの碎石で、比重2.66、吸水率0.49%、粗粒率7.28である。細骨材は、川砂で、比重2.62、吸水率2.11%、粗粒率2.91である。

混和剤としては、遅延型のAE減水剤および空気量調整剤を使用した。

2.3 コンクリートの配合

コンクリートの配合は、単位セメント量を200kg/m³から400kg/m³まで50kg/m³ごとに変化させ、スランプが8cm、空気量が4%となるように定めた。その結果、水セメント比は37.5%から81.0%まで変化した。

2.4 断熱温度上昇試験装置

実験に用いた断熱温度上昇試験装置は、パイプまたは隔壁を配置した熱媒ジャケットを、断熱材を設けず供試体に密着させ、断熱温度上昇量を測定する形式のものである。

供試体は、直径60cm、高さ60cmの円柱である。計測は、打込み直後より一定時間間隔で材令7日まで行った。

表2 セメントの化学成分(シリーズⅠ)

セメントの種類	セメントの銘柄	化学成分(%)								
		ig. loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	合計
OPC	A	0.7	0.6	22.0	5.9	2.8	63.6	1.3	1.9	98.8
	B	1.3	0.4	21.1	6.2	2.9	64.1	1.1	1.8	98.9
	C	1.3	0.2	21.8	5.1	2.7	64.6	1.6	1.7	99.0
	D	0.5	0.4	22.4	5.9	2.8	63.2	2.0	1.9	98.6
	E	0.3	0.4	21.9	6.3	2.9	63.7	2.0	1.5	99.0
	F	0.3	0.1	22.4	6.0	2.8	64.4	1.7	1.3	99.0
	G	0.8	0.3	21.1	5.2	3.0	65.0	1.6	1.9	98.9
	H	0.9	0.3	21.5	5.4	2.8	64.1	1.8	2.1	98.9
	I	1.0	0.1	21.8	5.0	3.0	65.2	0.9	1.8	98.8
	J	1.5	0.2	21.6	5.6	2.8	64.2	1.2	2.0	99.1
	K	0.8	0.2	21.2	5.9	2.8	64.5	2.4	1.6	99.4

表3 セメントの化学成分(シリーズⅡ)

セメントの種類	化学成分(%)								
	ig. loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	合計
OPC	0.7	0.6	22.0	5.9	2.8	63.6	1.3	1.9	98.8
	0.5	0.3	21.8	5.9	3.1	64.4	1.2	1.8	99.0
MHPC	0.4	0.1	23.4	4.6	3.6	64.0	1.2	1.8	99.1
	0.5	0.2	23.4	4.0	4.1	63.9	1.4	1.8	99.3
BCB	0.6	0.6	24.6	7.9	2.1	57.2	3.4	2.1	98.5
	0.4	0.5	26.4	8.8	1.9	56.0	3.1	2.0	99.1
FCB	0.8	10.6	20.5	5.1	2.6	55.6	1.3	2.0	98.5
	1.0	11.8	19.5	4.8	2.7	56.4	1.2	1.8	99.2

[註] 上段は打込み温度20°C、下段は打込み温度10、30°Cのときに使用したセメントである。

表4 シリーズⅡで使用したセメントの強度および水和熱

セメントの種類	フロー値	曲げ強さ(kgf/cm ²)			圧縮強さ(kgf/cm ²)			水和熱(cal/g)		
		3日	7日	28日	3日	7日	28日	3日	7日	28日
OPC	255	39	53	70	152	251	394	56.6	72.2	84.6
	255	34	51	64	150	250	395	61.2	73.8	92.0
MHPC	253	25	40	59	102	185	365	48.9	63.2	81.5
	258	30	38	63	114	178	340	50.4	68.5	81.0
BCB	260	33	41	64	133	200	392	55.4	70.1	89.7
	260	33	46	68	144	223	431	58.0	75.6	90.1
FCB	261	30	47	66	141	214	348	52.9	66.5	82.7
	256	35	48	60	139	224	364	53.4	69.6	83.0

[註] 上段は打込み温度20°C、下段は打込み温度10、30°Cのときに使用したセメントである。

3. 断熱温度上昇量の近似式

断熱温度上昇量を近似する式としては、いくつか提案されているが [5] , その中で代表的なもの2つを次に示す。

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-rt}) \quad \dots \dots (1)$$

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-rt^{\delta}}) \quad \dots \dots (2)$$

ここに、 $Q(t)$: 材令 t における断熱温度上昇量、 Q_{∞} 、 r 、 δ : 実験定数

(1)式は、RC示方書およびJCI指針で採用している近似式である。

まず、実験値と近似式の適合性について検討する。最小二乗法により、実験値を(1)式および(2)式で近似した一例を図1に示す。なお、最小二乗法には、打込み直後より材令7日までの3時間おきのデータを用いた。

(1)式による近似は、打込み直後より材令1日までの間で実験値との適合性が悪く、最大で7°Cもの差が生じている。これに対して、(2)式による近似は、打込み直後より材令7日まで良く一致している。この傾向はシリーズIIの実験結果すべてについて認められ、本実験による断熱温度上昇量は(2)式によって表わすことのほうが適当と思われる。しかしながら、本研究は、RC示方書およびJCI指針で示された断熱温度上昇量の標準値との比較を目的としているため、以下の検討では(1)式により実験値を近似させた。なお、RC示方書とJCI指針の断熱温度上昇量は、打込み温度の影響の考慮方法が若干異なる。すなわち、RC示方書は、打込み温度が10、20、30°Cの場合についてそれぞれ標準値を示している。一方、JCI指針は、打込み温度が20°Cの場合について標準値を示し、他の打込み温度の場合には、これに補正係数を乗じて標準値を求めることとしている。しかし、本実験の範囲では、両者の差はほとんど認められなかったため、RC示方書に示された値により比較検討を進めるものとする。

4. 実験結果および考察

4.1 セメントの銘柄の影響

セメントの銘柄が断熱温度上昇量に及ぼす影響の一例を図2に示す。セメントの銘柄によって断熱温度上昇量はある程度のばらつきを示すことがこの図より認められる。シリーズIの11銘柄の Q_{∞} の平均値と標準偏差は、それぞれ49.59および1.802、 r の平均値と標準偏差は、0.912および0.110となる。 Q_{∞} の最大値は52.37、最小値は46.49、 r の最大値は1.168、最小値は0.741であった。 Q_{∞} の最大値と最小値との差は5.88で、 r については0.427であった。 Q_{∞} の平均値とRC示方書の標準値を比べるとおよそ9.5°C、また、 Q_{∞} の最小値と比べてもおよそ6.5°C実験値のほうが高い値となった。 r については、RC示方書の標準値は、実験値とほぼ同じ値となった。

4.2 セメントの種類の影響

打込み温度が20°Cで単位セメント量が300 kg/m³の場合について、セメントの種

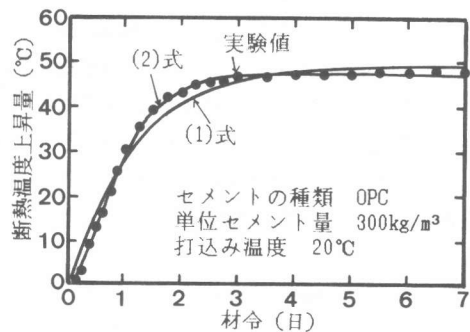


図1 実験値と近似式の適合性

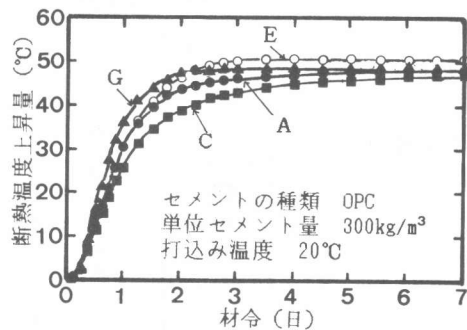


図2 セメントの銘柄の影響

類が断熱温度上昇量に及ぼす影響を示したのが図3である。この図より、セメントの種類が異なると、断熱温度上昇量は明らかに異なっている。これらの曲線の Q_{∞} の値は、OPC、MHPC、BCB、FCBに対して48.90、44.93、48.43、45.58となった。また、 r の値は、それぞれ0.950、0.555、0.846、0.617となった。

BCBは、OPCと比較すると、 Q_{∞} の値はほとんど同じであるが、 r の値は小さくなっており、温度上昇速度がOPCより緩やかとなっている。MHPCおよびFCBは、OPCと比較して、温度上昇速度が緩やかで、材令7日の温度上昇量もおおよそ5℃低くなっている。

4.3 単位セメント量の影響

図4は、打込み温度20℃で単位セメント量が増加した場合の断熱温度上昇量である。単位セメント量が増加するに従って、温度上昇速度が大きくなるとともに、材令7日の温度上昇量も大きくなっている。

打込み温度20℃における4種類のセメントの Q_{∞} および r と単位セメント量の関係を示したのが図5である。 Q_{∞} は、いずれのセメントにおいても、単位セメント量に比例して増加している。また r も、単位セメント量に比例して増加するが、セメントの種類によってその傾向は大きく異なっている。

表5は、打込み温度ごとに各セメントの Q_{∞} および r を単位セメント量の一次式で表わしたものである。たとえば、

OPCについて、単位セメント量が 10kg/m^3 増加するごとに断熱温度上昇量が 1°C 上昇すると言われているが、本実験では、約 1.2°C 上昇しており、かなりの差が認められた。

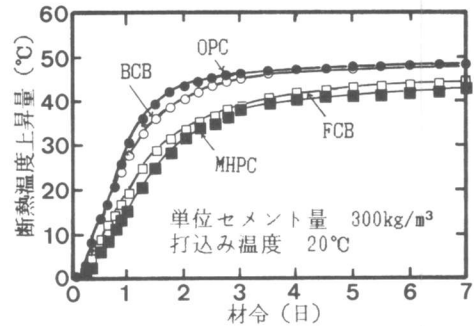


図3 セメントの種類の影響

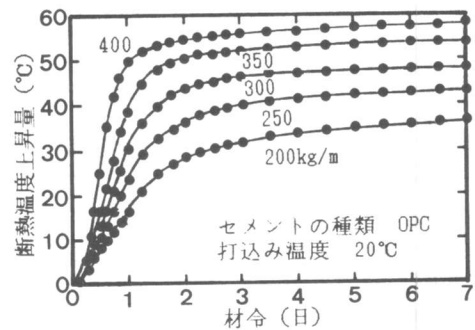


図4 単位セメント量の影響

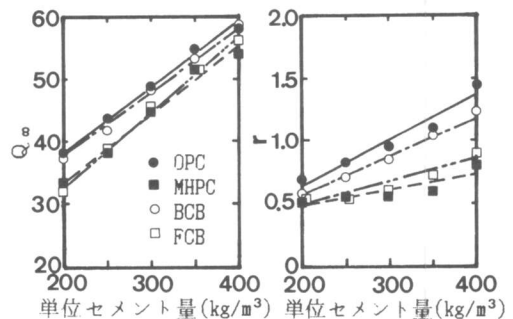


図5 Q_{∞} および r と単位セメント量の関係

表5 本実験による Q_{∞} および r と単位セメント量 C の関係

セメントの種類	打込み温度(°C)	$Q_{\infty}(C) = AC + B$		$r(C) = aC + b$	
		A	B	$a(\times 10^{-3})$	b
OPC	10	0.128	11.2	1.50	0.135
	20	0.107	16.3	3.72	-0.111
	30	0.120	12.1	4.09	0.337
MHPC	10	0.119	6.7	3.20	0.303
	20	0.109	11.7	1.31	0.210
	30	0.110	9.5	2.19	0.299
BCB	10	0.120	14.1	1.46	0.073
	20	0.105	16.5	3.40	-0.138
	30	0.101	16.0	3.50	0.332
FCB	10	0.156	-3.6	7.70	0.141
	20	0.121	8.4	1.95	0.073
	30	0.112	11.0	3.09	0.059

C: 単位セメント量(kg/m^3)

4.4 打込み温度の影響

単位セメント量 300kg/m^3 の場合について打込み温度が断熱温度上昇量に及ぼす影響を示したのが図6である。この図より、断熱温度上昇曲線は打込み温度の影響を強く受け、温度上昇速度は、打込み温度が高くなるに従って大きくなっている。しかしながら、材令7日の温度上昇量では、ほぼ一定とみなせる。これらの傾向は、図7に示すように他のセメントについても同様に認められるが、打込み温度が r に及ぼす影響の程度はセメントの種類によって異なっている。

4.5 RC示方書との比較

セメントの種類ごとに各打込み温度の Q_{∞} および r と単位セメント量の関係を示したのが図8～図11である。なお、図中にはRC示方書の標準値も併せて示してある。

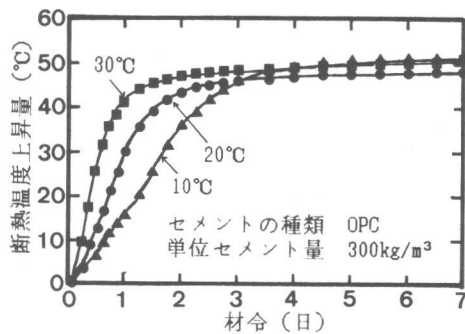


図6 打込み温度の影響

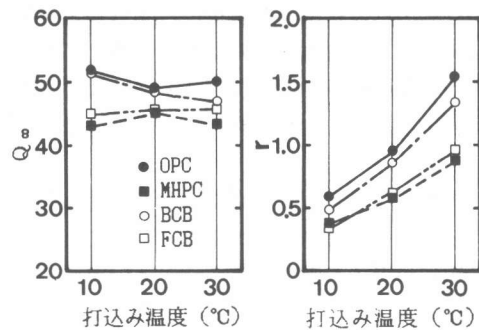


図7 Q_{∞} および r と打込み温度の関係

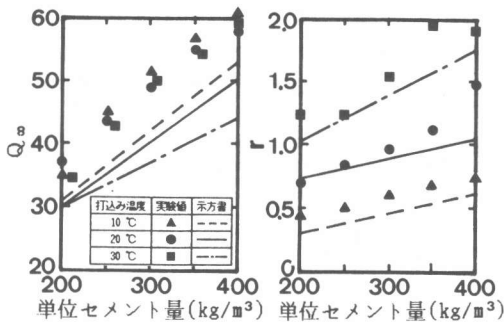


図8 Q_{∞} および r と単位セメント量の関係 (OPC)

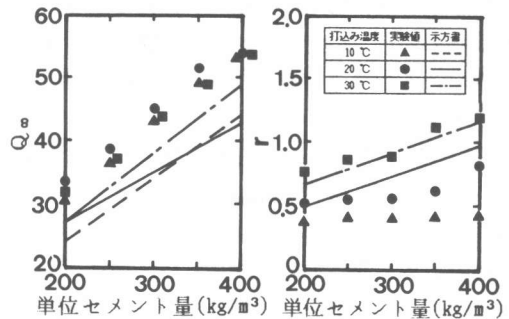


図9 Q_{∞} および r と単位セメント量の関係 (MHPC)

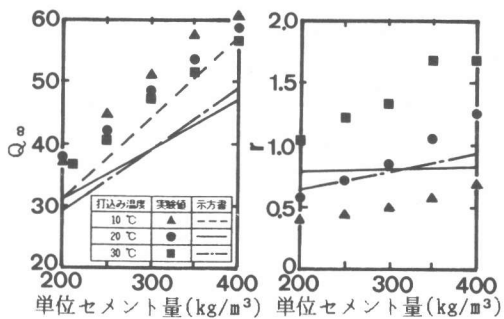


図10 Q_{∞} および r と単位セメント量の関係 (BCB)

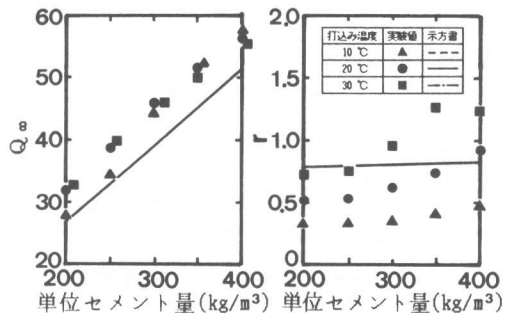


図11 Q_{∞} および r と単位セメント量の関係 (FCB)

Q_{∞} については、実験値はRC示方書の標準値に比べて、セメントの種類にかかわらず、いずれの打込み温度のときにも大きくなっている。たとえば、OPCでは、実験値とRC示方書の標準値は、打込み温度10°Cのときにおよそ4~9°C、20°Cのときに7~10°C、30°Cのときに4~15°Cの差が生じており、打込み温度が高く単位セメント量が多いときに、その差は広がっている。新試験装置によるOPCの Q_{∞} は、打込み温度にかかわらずほぼ一定であった。それに対して、RC示方書では、打込み温度が高い場合の単位セメント量の増加に伴うOPCの Q_{∞} の増加率を低く見積もっている。このため、このような差が生じたものと思われる。また、各種セメントについて、実験値の標準値に対する比率を求めてみると、打込み温度、単位セメント量によっても異なるが、大略2割程度大きくなっている。

r と単位セメント量の関係を実験値および示方書の値についてそれぞれ求めると、その傾向はセメントの種類によって大いに異なっている。たとえば、ポルトランドセメントでは、OPCを用いて打込み温度が高い場合および単位セメント量が多い場合を除いて、比較的良く一致している。一方、BCBやFCBなどの混合セメントでは、単位セメント量および打込み温度の増加に伴う r の増加率が、実験値と示方書の値では大幅に異なっている。従って、示方書の値によって求めた混合セメントの温度上昇速度には大きな誤差が生ずるおそれがある。

5. 結論

新試験装置によりコンクリートの断熱温度上昇試験を行い、 $Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt})$ によって近似し、 Q_{∞} と r についてRC示方書による値と比較検討した。本実験の範囲から以下の知見が得られた。

(1) セメントの銘柄によって、断熱温度上昇量はある程度のばらつきを示す。 Q_{∞} の平均値と標準偏差は、それぞれ49.59および1.802、 r については、0.912および0.110であった。 Q_{∞} の最大値と最小値との差は5.88で、 r については0.427であった。しかし、 Q_{∞} の平均値とRC示方書の標準値を比べるとおよそ9.5°C、また、 Q_{∞} の最小値と比べてもおよそ6.5°C実験値のほうが高い値となった。従って、RC示方書に示された Q_{∞} はセメントのパラツキ範囲内にあるとは言い難い。一方、 r については、RC示方書の標準値は、実験値とほぼ同じ値となった。

(2) 本実験によって得られた Q_{∞} は、RC示方書の標準値に比べて、セメントの種類にかかわらず、いずれの打込み温度のときにも大きくなった。各種セメントについて実験値のRC示方書に対する比率を求めてみると、打込み温度、単位セメント量によっても異なるが、大略2割程度大きくなっている。

(3) r と単位セメント量の関係を、実験値および示方書についてそれぞれ求めてみると、その傾向はセメントの種類によってかなり異なっている。ポルトランドセメントでは、OPCを用いて打込み温度が高い場合および単位セメント量が多い場合を除いて、比較的良く一致している。しかしながら、BCBやFCBなどの混合セメントでは、単位セメント量および打込み温度の増加に伴う r の増加率が実験値と示方書ではかなり異なっている。従って、示方書に基づく混合セメントの温度上昇速度には大きな誤差が生ずるおそれがある。

参考文献

- [1] 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひびわれ制御指針、1986.3
- [2] 土木学会：コンクリート標準示方書（昭和61年制定）施工編、p.p.119~136
- [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、p.p.7~10、1982.10
- [4] 横田紀男、鈴木康重、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、p.p.233~236、1985
- [5] 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、p.p.1~6、1982.10