

[2002] 新試験装置による断熱温度上昇量に基づく温度応力解析結果

○正会員 鈴木康範（住友セメント 技術開発センター）
 正会員 佐藤利幸（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. はじめに

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）は温度ならびに温度応力の計算方法を示すとともに、計算に必要なコンクリートの熱特性値や力学的特性値についても具体的な数値を与えている[1, 2]。これらの数値のうち、コンクリートの発熱量として用いられる断熱温度上昇量は、温度解析結果のみならず温度応力解析結果にも大きな影響を及ぼすことが知られている。ところで、RC示方書およびJCI指針の数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等によりかなりばらついた値であることが報告されている[3]。一方、著者らは、新たな断熱温度上昇試験装置を考案し、その性能を実験ならびにFEM解析により確認した上で、各種のセメントについて断熱温度上昇量を求めた[4]。

本研究は、断熱温度上昇量として、新装置により実測した値とRC示方書に示された値をそれぞれ用いて、スラブおよび壁形式の代表的な構造物を対象に温度応力解析に関する数値実験を行い、断熱温度上昇量の相違が温度応力解析結果に及ぼす影響を求めたものである。

2. 数値実験の概要

2.1 数値実験の種類

本研究では、全部で3つのシリーズに分けて数値実験を行った。そして、セメントの種類、セメントの銘柄、単位セメント量、打込み温度および構造物の寸法の5つの要因を取り上げた。解析の対象としたスラブおよび壁体は、図1に示すような寸法比率とした。

第1シリーズでは、単位セメント量が変化した場合について求めた。このシリーズでは、リフト高さ3mのスラブおよび幅1.5mの壁体を対象とし、各種セメントについて打込み温度が20°Cとして解析を行った。ここでは、単位セメント量を200kg/m³から400kg/m³の範囲で50kg/m³ごとに変化させた。また、セメントの種類は普通ポルトランドセメント(OPC)、中庸熱ポルトランドセメント(MHPC)、高炉セメントB種(BCB)およびフライアッシュセメントB種(FCB)の4水準に変化させた。

第2シリーズでは、OPCの銘柄が解析結果に及ぼす影響を、スラブのリフト高さおよび壁体の幅が変化した場合について求めた。セメントの銘柄は、市販の11社のOPCについて実験で得られた断熱温度上昇量の最大値と最小値、および平均的な値の3水準に変化させた。また、スラブのリフト高さは、1m、1.5m、2m、2.5m、3m、

対象構造物 構造物の概観	スラブ		壁体	
	L ₁ /H ₁	L ₂ /L ₁	H ₁	B ₁ /B ₂
	4	2	3m	1
	3	2	2	2
	8		L/H ₁	10

図1 解析対象断面

(Lは奥行き)

表1 新試験装置による断熱温度上昇量

打込み度 (°C)	セメント量 (kg/m³)	OPC		MHP		BCB		FCB	
		Q∞	r	Q∞	r	Q∞	r	Q∞	r
20	200	36.6	0.683	33.3	0.502	37.7	0.567	32.0	0.511
	250	43.6	0.821	38.3	0.547	42.0	0.702	38.3	0.532
	300	48.9	0.950	44.9	0.555	48.4	0.846	45.6	0.617
	350	54.7	1.104	51.5	0.602	53.3	1.045	51.2	0.727
	400	57.7	1.472	53.9	0.801	58.2	1.245	56.1	0.901
10	300	51.3	0.588	—	—	—	—	—	—
30	300	50.0	1.527	—	—	—	—	—	—

4mおよび5mの7水準に、同じく壁体の幅も0.5m、0.75m、1m、1.25m、1.5m、2m、および3mの7水準に変化させた。

第3シリーズでは、打込み温度が変化した場合について求めた。このシリーズでは、第1シリーズと同様にリフト高さ3mのスラブおよび幅1.5mの壁体を対象とし、OPC

について単位セメント量が300kg/m³として解析を行った。打込み温度は、10°C、20°Cおよび30°Cの3水準とした。

2.2 温度解析方法

スラブおよび壁体とも2次元非定常熱伝導問題として、FEMにより解析を行った。標準的な解析対象物であるリフト高さ3mのスラブでは、岩盤も含めて256節点、249要素に、また同様に幅1.5mの壁体では120節点、114要素に分割した。なお、リフト高さおよび幅が変化した場合についても、上記に準じた要素分割を行った。解析プログラムで使用した要素は、4節点アイソバラメトリック要素である。

境界条件として、コンクリート上面ならびに側面および岩盤上面を熱伝達境界、岩盤底面を固定温度境界とした。更に、対称境界となる中心面上ならびに岩盤側面を断熱温度境界とした。

初期温度条件としては、コンクリート部分は打込み温度とし、また、岩盤内では上面より3m下方を15°Cの一定温度とし、上面より一定温度に至る部分は、温度分布が直線的に変化するものとした。

本研究では、RC示方書およびJC指針との比較を主眼としたので、新装置による断熱温度上昇量は、表1に示すように実験値を $Q(t) = Q_\infty(1 - e^{-rt})$ の式で近似した。RC示方書とJC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。しかし、本研究では、RC示方書に従ってセメントの種類と打込み温度の組み合わせごとに、単位セメント量の関数で与えられている、 Q_∞ と r の回帰式より断熱温度上昇量を求めた[1]。コンクリートおよび岩盤の各種熱特性値は、文献を参考に表2に示すとおりに定めた[5]。

外気温は、コンクリートの打込み温度と等しく、かつ一定とした。また、熱伝達率は10 kcal/m² hr °Cとした。なお、時間きざみは、時間差分の安定条件を満足するように各解析ケースごとに定め、コンクリート温度が打込み温度にほぼ収束するまで解析を行った。

2.3 温度応力解析における解析条件

温度応力解析にはCompensation Plane法を用いた。コンクリートの力学的特性値は、RC示方書に従って定めた[1]。なお、材令91日のコンクリートの圧縮強度は、断熱温度上昇試験を実施した後の供試体から切り取った、直径が15cmで高さが30cmの4本のコア供試体の平均値より求めた。コンクリートの熱膨張係数は、 $10 \times 10^{-6}(1/\text{°C})$ とした。

拘束体の剛性は、被拘束体の応力に大きな影響を及ぼす。そこで、拘束体のヤング係数を 10^4

表2 コンクリートおよび岩盤の熱特性値

熱特性値	コンクリート	岩盤
熱伝導率 (kcal/m·hr·°C)	2.54	1.94
熱容量 (kcal/m³·°C)	715	650
熱拡散率 (10⁻³ m²/hr)	3.55	2.98

および 10^5 kgf/cm^2 として、それぞれ軸拘束係数および曲げ拘束係数を算出し、応力解析を行った。

3. 解析結果

3. 1 単位セメント量が変化した場合

単位セメント量が変化した場合に、新装置および示方書のそれぞれの断熱温度上昇量に基づいて解析すると、平均温度上昇量の最大値（以下、単に平均温度上昇量と称する）にどの程度差が生ずるかを示したのが図2、3である。

壁体にOPCやMHPGを用いた場合には、単位セメント量にはほぼ比例して、平均温度上昇量の差も増加している。一方、スラブでは、その差の増加割合は頭打ちの傾向を示している。また、BCBを用いた場合には、構造物の種類にかかわらず、ほぼ同様な割合で、平均温度上昇量の差は増加している。更に、FCBを用いた場合には、構造物の種類によって、平均温度上昇量の差の増加傾向が異なる。このように、単位セメント量の増加に伴う、平均温度上昇量の差の増加傾向は、構造物やセメントの種類によってかなり異なる。

なお、最高温度上昇量および最大温度差は、平均温度上昇量以上に差が生じた。

スラブについて、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} と最高温度上昇量の関係を、それぞれ新装置と示方書の差で示したものが図4である。図中の白丸は、温度上昇量速度に関する実験定数 r に関して新装置の値が示方書の値より大きい場合を、黒丸はその逆を示している。最高温度上昇量の差は、 Q_{∞} のみならず r によってもかなりの影響を受け、新装置の r が示方書の値を上回る場合は、最高温度上昇量の差も拡大する傾向がこの図より認められる。すなわち、単位セメント量が変化した場合に、新装置と示方書に基づく最高温度上昇量の差が、構造物の寸法やセメントの種類により大いに異なるのは、セメントの種類によって新装置と示方書の Q_{∞} と r の差が異なり、しかもそれらの差が温度上昇量へ及ぼす影響の程度が寸法により異なるためと思われる〔6〕。

断熱温度上昇量の相違が温度応力解析結果に及ぼす影響を定量化するにあたり、温度ひびわれ指数の最小値（以下、単に温度ひびわれ指数と称する）を用いて検討するものとした。

単位セメント量が変化した場合の一例が図5、

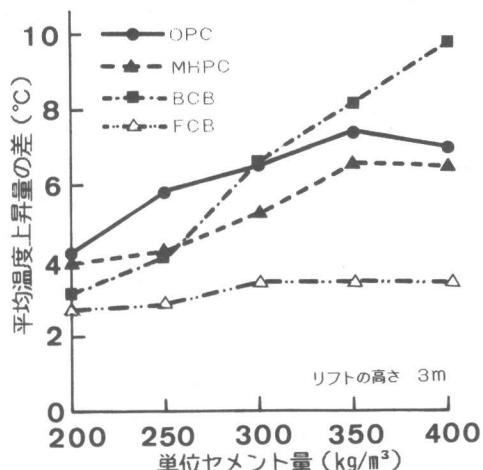


図2 単位セメント量が変化した場合の平均温度上昇量の差（スラブ）

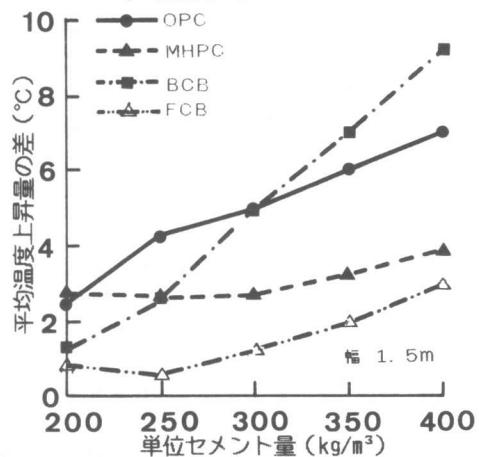


図3 単位セメント量が変化した場合の平均温度上昇量の差（壁体）

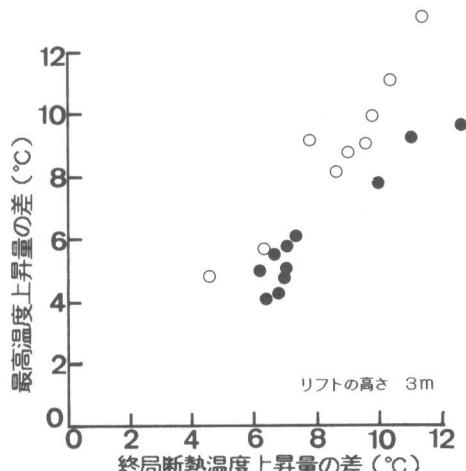


図4 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} と最高温度上昇量の差の関係

6である。単位セメント量が増加するに伴い温度ひびわれ指数は減少するが、新装置に基づく温度ひびわれ指数は常に示方書に基づく値より小さいことが、これらの図より認められる。

温度ひびわれ指数と単位セメント量の関係を、示方書の断熱温度上昇量に対する温度ひびわれ指数の比率で示したものが図7である。温度ひびわれ指数を求めるべき位置は岩盤の剛性により変化し、しかもその指数が得られる材令も、 $Q\infty$ と r の組み合せによって変化するので、新装置と示方書の解析ケースでは異なる。従って、その温度ひびわれ指数の比率は、単位セメント量や岩盤の剛性に変化するものと思われる。しかし、本数値実験の範囲では、単位セメント量の増加により温度上昇量差が増加しても、その比率は岩盤の剛性にかかわらずほぼ一定とみなすことができる。これは、解析においては応力を増分形で求めており、有効ヤング係数の発現の相違や岩盤との剛比の変化が単位セメント量により異なるので、温度上昇量の差が応力に及ぼす影響が小さくなつたものと思われる。

スラブと壁体の両方について、各種セメントの温度ひびわれ指数の比率を求めて表3に示した。この表より、平均温度上昇量でさほど大きな差が生じなかつたFCBの場合が約90%であるのを除いて、温度ひびわれ指数の比率は約80%となっている。従って、現行の示方書の値に基づいて温度ひびわれ指数を算定すると、約20%危険側に誤差を生じ、温度ひびわれ対策に誤りを生ずるおそれがある。

3.2 セメントの銘柄が変化した場合

スラブおよび壁体において、それぞれリフト高さと幅が変化した場合に、OPCの銘柄が平均温度上昇量に及ぼす影響を求めたものが図8、9である。なお、図中には第1シリーズに用いた新装

表3 単位セメント量が変化した場合の温度ひびわれ指数の比率

セメントの種類	スラブ	壁体
OPC	0.82	0.82
MHPC	0.79	0.83
BCB	0.81	0.82
FCB	0.87	0.91

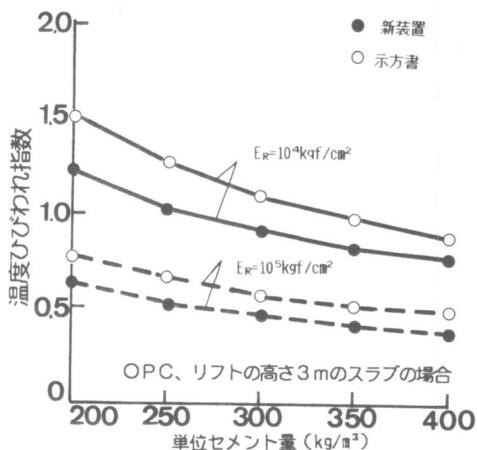


図5 単位セメント量が変化した場合の温度ひびわれ指数（スラブ）

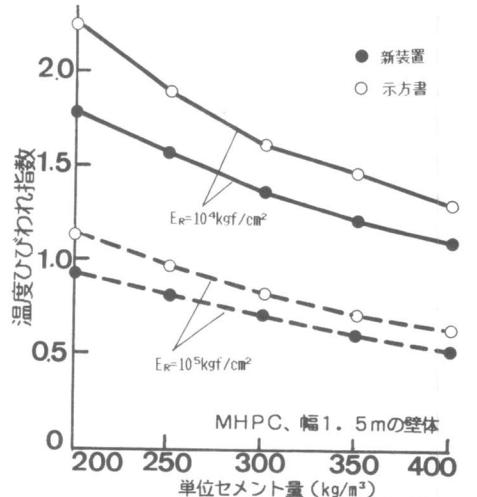


図6 単位セメント量が変化した場合の温度ひびわれ指数（壁体）

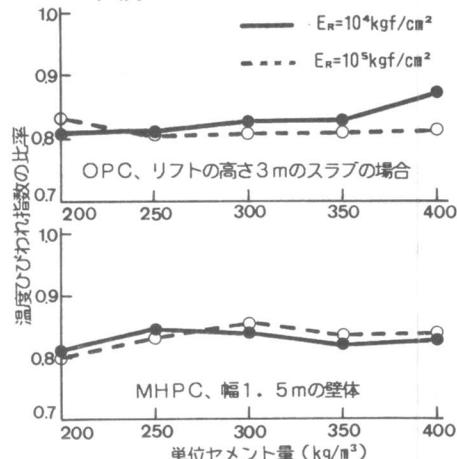


図7 温度ひびわれ指数の比率

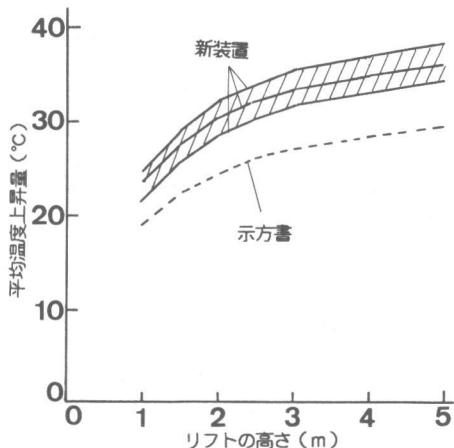


図8 O P Cの銘柄が平均温度上昇量に及ぼす影響(スラブ)

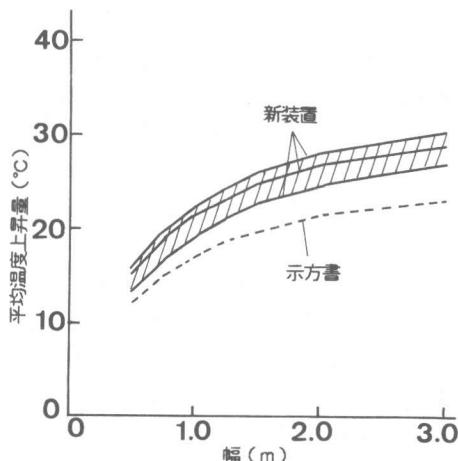


図9 O P Cの銘柄が平均温度上昇量に及ぼす影響(壁体)

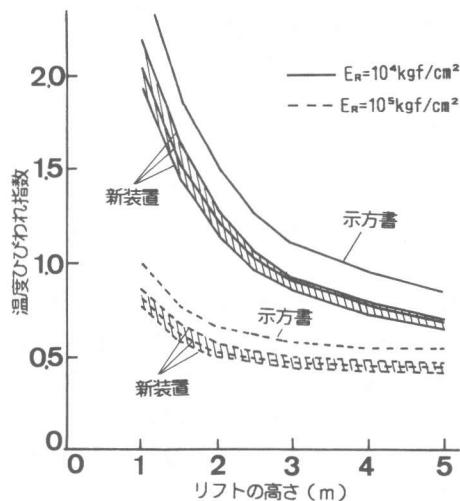


図10 O P Cの銘柄が温度ひびわれ指数に及ぼす影響(スラブ)

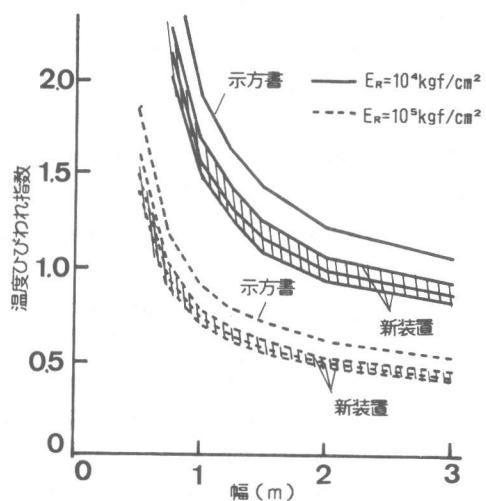


図11 O P Cの銘柄が温度ひびわれ指数に及ぼす影響(壁体)

置による平均的な断熱温度上昇量および示方書の値に基づく解析結果も併せて示した。セメントの銘柄により、平均温度上昇量はかなり異なり、スラブではリフト高さ5mで最大3.8 °C、また、壁体では幅3mで最大3.5 °Cの差が生じている。しかしながら、今回実験を行った11銘柄のうち最小の断熱温度上昇量に基づく平均温度上昇量でも、示方書の値に基づく解析値より高い値となっている。従って、示方書の値がセメントの銘柄のバラツキの範囲内にあるとは言いがたい。

O P Cの銘柄が温度ひびわれ指数に及ぼす影響を示したのが図10、11である。構造物の寸法が増加するに伴い温度ひびわれ指数が減少する。しかし、セメントの銘柄による温度ひびわれ指数の変動幅は、平均的な断熱温度上昇量に基づく値に対してほぼ一定の比率を保っている。そして、その比率は約11%である。これは、寸法の増加により温度上昇量の差が増加しても、L/Hの関係から岩盤の拘束が弱まり、温度上昇量の差ほど応力差が生じないためと思われる。また、最小の断熱温度上昇量に基づく温度ひびわれ指数でも、示方書に基づく値より約16%小さくなっている。

3.3 打込み温度が変化した場合

打込み温度が平均温度上昇量に及ぼす影響を求めたものが図12である。平均温度上昇量の差は、スラブと壁体で若干異なるが、打込み温度の20°Cの場合に最小となっている。これは、既に3.1で述べたように新装置および示方書の Q_{∞} と r の相違によるものである。

打込み温度が変化した場合に、新装置による断熱温度上昇量とRC示方書の値との相違が温度ひびわれ指数に及ぼす影響を、示方書に基づく値に対する比率で求めると表4のようになる。打込み温度が20°Cの場合より、10°Cおよび30°Cの場合に温度ひびわれの危険性が高くなっている。これは、応力解析における有効ヤング係数の発現を、打込み温度にかかわらず同一としており、温度上昇量の差が応力に顕著に現われたものと思われる。

4. 結論

新装置により実測した断熱温度上昇量とRC示方書に示されている値との相違が、マスコン

クリートの温度および温度応力解析に及ぼす影響を数値実験により求めた。本数値実験の範囲から以下の知見が得られた。

①単位セメント量が増加すると、構造物の温度上昇量の差は増加する傾向が見られる。平均温度上昇を例にとれば、リフト高さ3mスラブでは、OPCで約7°C、BCBで約10°Cの差が生じた。一方、Compensation Plane法により求めた温度ひびわれ指数は、単位セメント量が増加するといずれも減少するが、示方書に基づく値に対する温度ひびわれ指数の比率は一定で、しかも構造物の種類にかかわらず、同一セメントでほぼ同じ値が得られた。新装置の断熱温度上昇量に基づく温度ひびわれ指数は、示方書の値に基づくものと比較し、FCBで約10%、その他のセメントでは約20%小さく危険側となった。従って、現行の示方書の値に基づいて温度ひびわれ指数を算定すると、場合によっては温度ひびわれ対策に誤りを生ずるおそれがある。

②OPCの銘柄が変化すると、温度ひびわれ指数は平均的な断熱温度上昇量に基づく値に対して約11%変動した。しかし、今回測定した最小の断熱温度上昇量に基づく温度ひびわれ指数でも、示方書に基づく値より約16%小さくなつた。

③OPCの場合に打込み温度が変化すると20°Cでの温度上昇量の差が最小となった。また、示方書に基づく温度ひびわれ指数に対する比率も同様な傾向を示し、20°Cと比較し、10°Cおよび30°Cで温度ひびわれの危険性が高くなつた。

参考文献

- 1)土木学会：昭和61年度制定 コンクリート標準示方書 施工編、p. p. 119 ~136、1986年10月
- 2)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抑制指針・同解説、1986年3月
- 3)田辺忠顯：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 p. p. 12、1986年8月
- 4)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、p. p. 25~28、1985年5月
- 5)JCIマスコンクリートの温度応力研究委員会報告書：外部拘束係数の同定とそれに基づく温度応力計算方法の提案、日本コンクリート工学協会、p. p. 61 ~67、1985年11月
- 6)小野 定：マスコンクリートの温度上昇に及ぼす各種要因の影響およびコンクリート温度上昇計算法の提案、土木学会論文集 第348号/V-1、p. p. 123 ~132、1984年8月

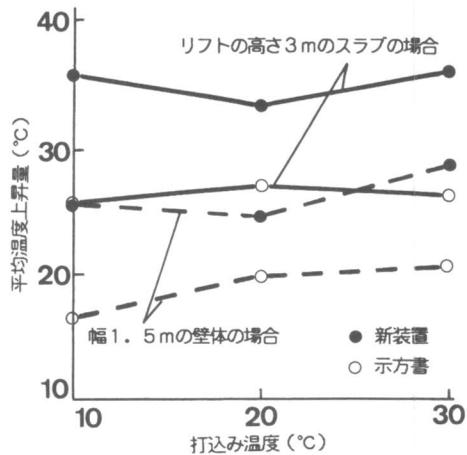


図12 打込み温度が平均温度上昇量に及ぼす影響

表4 打込み温度が変化した場合の温度ひびわれ指数の比率

構造物 の種類	打込み温度(°C)		
	10	20	30
スラブ	0.71	0.82	0.73
壁 体	0.75	0.80	0.74