

新試験装置によるコンクリートの断熱温度上昇量の定量化

EVALUATION OF ADIABATIC TEMPERATURE RISE OF CONCRETE MEASURED WITH THE NEW TESTING APPARATUS

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

The influence of different types of cement, cement content per unit volume of concrete, and concreting temperatures on adiabatic temperature rise were evaluated during this study. The Adiabatic temperature rise was measured with a new testing apparatus, with high reliability that has been confirmed through comparison with time-dependent temperature changes in mass concrete structures. Before the evaluation, the most suitable equation for approximating the adiabatic temperature rise as a functional formula of time was selected based on the experimental results. Further, comparison of the above approximate values with standard values proposed by JSCE or JCI was done, and problems involved in these standard values were pointed out.

Keywords: adiabatic temperature rise, types of cement, cement content, concreting temperature, standard values by JSCE or JCI

1. ま え が き

マスコンクリート構造物では、セメントの水和熱に起因するいわゆる温度ひびわれが、使用性や耐久性の観点から重要な問題となる。したがって、温度ひびわれの発生を予測し、有効な手段を講じる目的で、事前にマスコンクリート構造物の温度および温度応力を計算しなければならない。ところで、温度の解析においては、有限要素法のような数値計算手法がすでに確立されており、コンクリートの熱特性値が適切ならば、精度のよい解析結果が得られるようになっている^{1),2)}。コンクリートの熱特性値のうち、温度の解析結果に最も大きな影響を及ぼすものは、セメントの水和熱に起因するコンクリートの発熱量である。

コンクリートの発熱量を求めるためには、溶解熱法または伝導型微少熱量計により、セメントの水和熱を測定して算出する方法と、コンクリートの断熱温度上昇量を

直接測定する方法がある。前者は、一定温度下におけるセメントの水和熱を測定するために、測定値をそのままマスコンクリートの温度解析に適用することはできない³⁾。一方、後者は測定値をそのまま温度解析に適用することが可能であるといわれている⁴⁾。

この断熱温度上昇量に影響を及ぼす要因のうち、セメントの種類、単位セメント量およびコンクリートの打込み温度の3要因が支配的であるといわれてきた。しかしながら、最近では前記の要因に加えて、試験装置そのものの影響がきわめて大きいことが明らかになってきた^{4),5)}。したがって、試験装置が供試体をより完全な断熱状態に近づけているか否かなどの試験装置そのものの性能についての検討が不可欠である。また、断熱温度上昇量を表示する近似式は、これまでいくつか提案されているが、その適合性についても十分な検討がなされているとはいえないのである⁴⁾。

本研究では、まず供試体をより完全な断熱状態に近づけ得ることを確認した新試験装置を用いて、セメントの種類、単位セメント量および打込み温度が、コンクリートの断熱温度上昇量に及ぼす影響を求める。次に、この実験値に基づいて、断熱温度上昇量を表示するのに最適な近似式についての検討を加える。そして最後に、この近似式とRC示方書⁶⁾およびJCI指針⁷⁾に示された標準

* 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

*** 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)

値との比較を行うものである。

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に関する研究成果は、約30年前から報告されはじめ、その後、多くの研究者および技術者によってデータの蓄積がなされてきた。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^{4),5)}。したがって、断熱温度上昇量を測定するのに先立ち、用いた試験装置の性能の確認方法を明示する必要がある。

コンクリートの断熱温度上昇量を表す近似式の適合性は、塚山が検討している⁶⁾。これによれば、普通ポルトランドセメント(OPC)では以下に示す式(1)が、また、超早強ポルトランドセメントを用いた場合、練り上がり温度が低い場合、および遅延剤を添加した場合には、式(2)が、それぞれ適合性がよいと報告している。一方、宮路らは、OPCを用いた場合でも、式(1)は打込み後初期における適合性が悪いと指摘している⁹⁾。同様に、山川らも、OPCを用いた場合でも、暑中かつ富配合のコンクリートでは、式(1)では適合性が悪いと指摘している¹⁰⁾。さらに、平賀は、コンクリートの断熱温度上昇量を近似する式として、式(3)および式(4)も併せて提示するとともに、一般のコンクリートおよび遅延剤を用いた場合の両方について、断熱温度上昇量の実験値と近似式の誤差の標準偏差により、式(3)を含めた近似式の適合性について検討している。そして、一般のコンクリートの場合にも、式(1)よりは式(2)が、また遅延剤を用いた場合には、式(1)および式(2)よりは、式(3)のほうが、それぞれ適合性がよいと報告している⁴⁾。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - \exp(-rt)) \dots \dots \dots (1)$$

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - \exp(-rt^s)) \dots \dots \dots (2)$$

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - \exp(-r(t-t_0)^s)) \dots \dots \dots (3)$$

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - (1+rt)\exp(-rt)) \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $Q(t)$ ：材令 t 日における断熱温度上昇量

Q_{∞} , r , s , t_0 ：実験定数

現在、RC示方書およびJCI指針では、コンクリートの断熱温度上昇量は必要に応じて試験により決めるのを原則としているが、試験によらない場合には、式の簡便さを考慮して与えられた、式(1)による断熱温度上昇量の標準値を用いてよいとしている^{6),7)}。しかし、実験値との適合性の面からは、再検討の余地があると思われる。

断熱温度上昇量の近似式の各係数の定量化に関しては、塚山が式(1)の Q_{∞} および r に及ぼす単位セメント量および打込み温度の影響を求めており、式(1)

中の係数 Q_{∞} および r は、セメントの種類ごとに単位セメント量の一次式で表わせるとしている。また、打込み温度が各係数に及ぼす影響は、係数により若干異なっており、 Q_{∞} は打込み温度に伴い減少し、 r は反対に打込み温度に比例して増加することを明らかにしている。さらに、打込み温度を絶対温度で表わしたときの逆数と係数 r との関係を求めると、化学反応速度に関するアレニウスの法則が成立することも示している⁸⁾。

一方、RC示方書では、各種のセメントを用いた場合、式(1)中の係数を、10°C、20°Cおよび30°Cの各打込み温度ごとに単位セメント量の一次式で与えている⁶⁾。また、JCI指針では、各種セメントについて、打込み温度が20°Cの場合の式(1)中の係数の基本値を単位セメント量の一次式で与えており、打込み温度の影響は、200 kg/m³から400 kg/m³の間で50 kg/m³ごとの各単位セメント量に対して、打込み温度の一次式で基本値に対する補正係数を与えることで考慮している⁷⁾。しかしながら、これらの方法では、打込み温度あるいは単位セメント量の間値に対する各係数の算定に手間がかかる。したがって、各係数の実測値に対する近似の適合性をあまり損なうことなく、各係数を容易に算定する方法が必要と思われる。

3. 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、図-1に示すように、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、断熱温度上昇量を測定する形式のものである¹¹⁾。

本試験装置は、断熱状態の良否の確認だけでなく、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断熱温度上昇量の比較により、その性能を確認している¹¹⁾。

供試体は、直径が60 cm、高さが60 cmの円柱である。計測は打込み直後より30分間隔で行い、大部分は7日間で打ち切ったが、発熱が緩やかで、打込み後7日間経過してもかなりの温度上昇が認められた場合には、計測期間を10日間ないし14日間まで延長した。

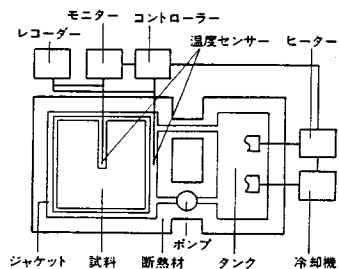


図-1 断熱温度上昇試験装置

4. 断熱温度上昇試験に用いたコンクリート

新試験装置で測定したコンクリートの断熱温度上昇量の定量化を目的とし、セメントの種類、単位セメント量および打込み温度を変化させて、合計72ケースの断熱温度上昇試験を行った¹²⁾。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 (FCB) の4水準に変化させた。一方、単位セメント量は、200 kg/m³ から 400 kg/m³ まで 50 kg/m³ ごと 5水準に変化させた。また、打込み温度は10°C、20°C および 30°C の3水準に変化させたが、打込み温度が断熱温度上昇量に及ぼす影響を詳細に検討するために、単位セメント量が 300 kg/m³ の場合については、上記の3水準の打込み温度に、5°C、15°C および 25°C の3水準を追加した。使用したセメントの化学成分ならびに水和熱を表一に示す。なお、BCBのslag混合率は40%、FCBのフライアッシュ混合率は20%である。

コンクリートの配合は、粗骨材の最大寸法が40 mm

の碎石を用いて、スランプが8 cm、空気量が4%となるように定めた。なお、単位セメント量は200 kg/m³ から 400 kg/m³ まで 50 kg/m³ ごとに変化させているので、水セメント比は81.0%から37.5%まで変化している。また、混和剤としては、遅延型のAE減水剤を単位セメント量の0.25%、また空気量調整剤を所定の空気量が得られるように、それぞれ用いた。

5. 断熱温度上昇量の近似式の適合性

コンクリートの断熱温度上昇量を近似する式として提案されている、前記の4つの式のうち、式(3)は式(2)を修正したものである。この式は、遅延型の減水剤を使用したコンクリートのように、打込み後初期の断熱温度上昇量が比較的緩やかであるが、その後の温度上昇速度が大きい場合のコンクリートの断熱温度上昇量を近似するのに適しているといわれている。しかしながら、本実験の範囲で得られた断熱温度上昇量を式(3)で近似した場合には、式(2)で近似した場合とほとんど差が生じなかった。そこで、近似式の適合性を検討するにあたっては、式(1)、式(2)および式(4)を対象とした。近似式の係数は、最小二乗法により、打込み直後より計測を打ち切った材令までの間において、30分間隔で得られたデータを用いて求めた。

近似式の適合性を示した一例が図-2である。式(1)による近似は、打込み直後より材令1日までの間は実験値が小さく、それ以後4日頃まで逆に実験値が大きくなって、最後にまた実験値が小さくなっている。特に、材令1日までの実験値との適合性が悪く、最大7°Cも、実験値が近似式による値より小さくなっている。これに対して、式(2)および式(4)による近似は、打込み

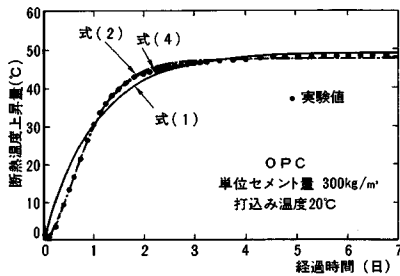


図-2 近似式の適合性

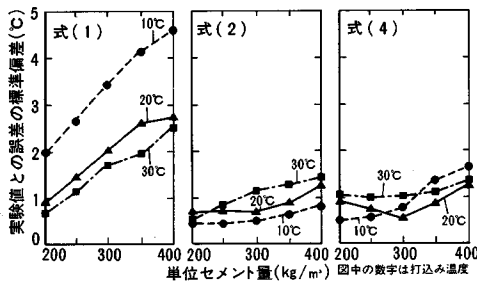


図-3 近似式の誤差 (OPC の場合)

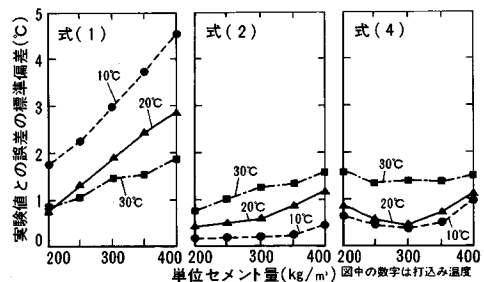


図-4 近似式の誤差 (MHPC の場合)

表一 セメントの化学成分と水和熱

| セメント種類 | 化 学 成 分 (%) | | | | | | | | | 水 和 熱 (cal/g) | | |
|--------|-------------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----------------|------|---------------|------|------|
| | ig. loss | insol | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | 合計 | 3日 | 7日 | 28日 |
| OPC | 0.5 | 0.3 | 21.8 | 5.9 | 3.1 | 64.4 | 1.2 | 1.8 | 99.0 | 61.2 | 73.8 | 92.0 |
| MHPC | 0.5 | 0.2 | 23.4 | 4.0 | 4.1 | 63.9 | 1.4 | 1.8 | 99.3 | 50.4 | 68.5 | 81.0 |
| BCB | 0.4 | 0.5 | 26.4 | 8.8 | 1.9 | 56.0 | 3.1 | 2.0 | 99.1 | 58.0 | 75.6 | 90.1 |
| FCB | 1.0 | 11.8 | 19.5 | 4.8 | 2.7 | 56.4 | 1.2 | 1.8 | 99.2 | 53.4 | 69.6 | 83.0 |

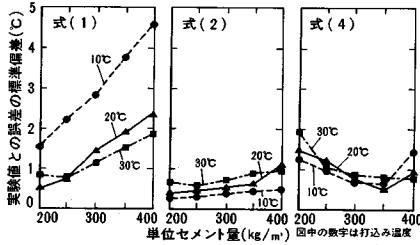


図-5 近似式の誤差 (BCBの場合)

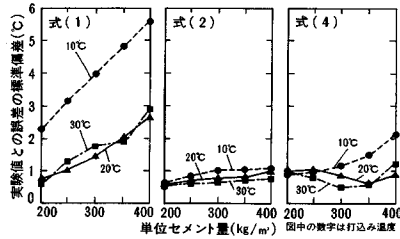


図-6 近似式の誤差 (FCBの場合)

直後より材令7日までの全般にわたって、よく一致しており、実験値との誤差は最大でも2°C程度である。

各種セメントについて、上記の3つの近似式と実験値とのそれぞれの誤差について、その標準偏差で示したものが、図-3～図-6である。これらの図より、式(1)の適合性は、式(2)および式(4)と比較し、全般的に劣ること、またセメントの種類にかかわらず、式(1)と実験値の誤差は単位セメント量が多く、打込み温度が低いほど、大きくなることが認められる。一方、式(2)および式(4)の適合性に関しては、単位セメント量や打込み温度の影響は、式(1)の場合ほど明瞭ではない。また、両式の適合性は、式(1)の場合と比較すれば、かなり良好なことが明らかである。なお、式(2)と式(4)の適合性の優劣はほとんど差がないが、BCBやFCBのような混合セメントを用いる場合に限り、式(2)の実験値との誤差は式(4)の場合と比較して、単位セメント量や打込み温度の影響が少なく、式(2)の適合性がやや優れているといえる。

FEM等によりマスコンクリート構造物の温度解析を行う場合には、単位時間当たりの温度上昇速度も、解析結果に重要な影響を及ぼす。実験値と上記の3つの近似式による温度上昇速度を比較した一例が図-7である。実験値の温度上昇速度は、30分間隔で測定したデータの、もよりの3点を2次の放物線で結び、その曲線を時間で微分した値とした。

実験値の温度上昇速度は、打込み直後においてセメントの初期発熱によるとと思われるピークを示した後、いったん減少する。その後再び上昇し、約7時間および約1日後に2つのピークを示し、その後徐々に減少する。ピー

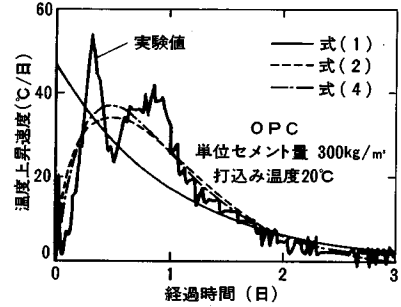


図-7 近似式の温度上昇速度に対する適合性

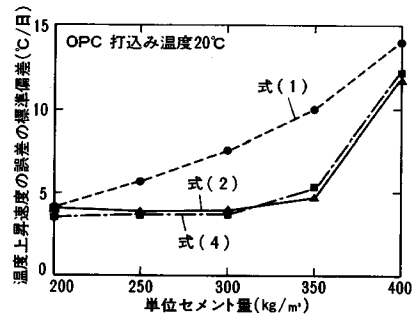


図-8 近似式の温度上昇速度に対する誤差

クの大きさやその時期は、セメントの種類、単位セメント量および打込み温度により大きく異なる。そして、打込み温度が低く、しかも単位セメント量が少なく、発熱が緩やかな場合には、初期発熱後に1つのピークしか明瞭に示さないものも見受けられた。

コンクリートの断熱温度上昇量を、式(1)により近似すると、その温度上昇速度は、図-7に示すように、打込み直後より単調に減少する曲線となるため、温度上昇速度にピークが存在する実験値とは、大幅に異なる。したがって、実験値にピークが存在する打込み後1日までの間、式(1)による適合性は著しく劣っている。

式(2)および式(4)による温度上昇速度は、実験値の打込み直後のピーク、およびその後の2つのピークを近似するには至っていない。しかしながら、両式は実験値の温度上昇速度の経時変化の傾向を比較的よくとらえており、実用上十分な適合性を備えているといえる。なお、温度上昇速度に対する両式の優劣については、図-8に示す、OPCを用いた場合の実験値との誤差でも明らかのように、両式ともほとんど差がないといえる。

以上のように、断熱温度上昇量の近似式の適合性について検討した結果、断熱温度上昇量およびその温度上昇速度に対する誤差から判断して、従来より用いられている式(1)よりも、式(2)および式(4)が、その適合性において優れていることが判明した。また、式(2)と式(4)では、その適合性にほとんど差がないが、式

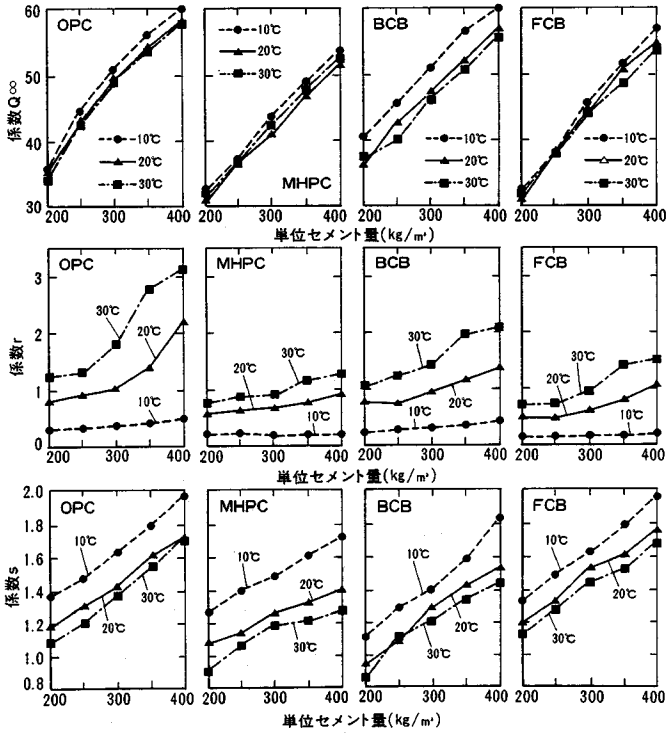


図-9 近似式の各係数と単位セメント量の関係

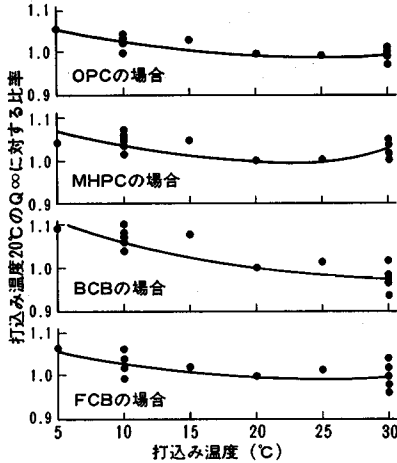


図-10 打込み温度による Q_{∞} の補正曲線

(2)の方が混合セメントに関しては若干優れている。したがって、以後の新試験装置によるコンクリートの断熱温度上昇量の検討に際しては、式(2)によって断熱温度上昇量を近似し、その場合に得られた係数を用いるものとする。

6. 近似式の係数の定量化

各種セメントについて、打込み温度および単位セメン

表-2 各種セメントの断熱温度上昇量の近似式の係数

| 打込み温度(°C) | セメントの種類 | 単位セメント量 (kg/m³) | Q_{∞} | r | S | | | |
|-----------|---------|-----------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5 | OPC | 300 | 51.5 | 0.264 | 1.642 | | | |
| | | MHPC | 42.5 | 0.119 | 1.563 | | | |
| | | BCB | 51.7 | 0.211 | 1.407 | | | |
| | | FCB | 46.7 | 0.101 | 1.629 | | | |
| | 10 | OPC | 200 | 35.1 | 0.296 | 1.367 | | |
| | | | 250 | 44.3 | 0.333 | 1.478 | | |
| | | | 300 | 51.0 | 0.386 | 1.634 | | |
| | | | 350 | 56.0 | 0.443 | 1.806 | | |
| | | 15 | OPC | 400 | 80.0 | 0.484 | 1.959 | |
| | | | | MHPC | 22.4 | 0.269 | 1.269 | |
| | | | | 250 | 36.9 | 0.245 | 1.404 | |
| | | | | 300 | 43.7 | 0.228 | 1.487 | |
| 20 | | | OPC | 350 | 48.9 | 0.225 | 1.617 | |
| | | | | 400 | 53.4 | 0.212 | 1.729 | |
| | | | | 200 | 40.3 | 0.278 | 1.115 | |
| | | | | 250 | 45.6 | 0.303 | 1.291 | |
| | 25 | | OPC | 300 | 51.0 | 0.340 | 1.409 | |
| | | | | 350 | 56.7 | 0.370 | 1.598 | |
| | | | | 400 | 60.1 | 0.445 | 1.832 | |
| | | | | 200 | 32.2 | 0.153 | 1.328 | |
| | | 30 | OPC | 250 | 37.5 | 0.143 | 1.501 | |
| | | | | 300 | 45.7 | 0.198 | 1.638 | |
| | | | | 350 | 51.9 | 0.177 | 1.734 | |
| | | | | 400 | 56.9 | 0.200 | 1.970 | |
| 5 | | | OPC | 300 | 50.2 | 0.494 | 1.598 | |
| | | | | MHPC | 43.0 | 0.383 | 1.372 | |
| | | | | BCB | 51.1 | 0.495 | 1.378 | |
| | | | | FCB | 45.1 | 0.253 | 1.508 | |
| | 10 | | OPC | 200 | 35.1 | 0.782 | 1.181 | |
| | | | | 250 | 42.6 | 0.916 | 1.309 | |
| | | | | 300 | 48.9 | 1.043 | 1.429 | |
| | | | | 350 | 54.0 | 1.411 | 1.618 | |
| | | 15 | OPC | 400 | 58.1 | 2.228 | 1.734 | |
| | | | | MHPC | 200 | 30.6 | 0.604 | 1.070 |
| | | | | 250 | 36.4 | 0.659 | 1.151 | |
| | | | | 300 | 41.0 | 0.644 | 1.259 | |
| 20 | | | OPC | 350 | 46.7 | 0.768 | 1.321 | |
| | | | | 400 | 51.7 | 0.940 | 1.407 | |
| | | | | 200 | 36.6 | 0.770 | 0.949 | |
| | | | | 250 | 43.0 | 0.760 | 1.090 | |
| | 25 | | OPC | 300 | 47.4 | 0.938 | 1.285 | |
| | | | | 350 | 52.5 | 1.153 | 1.429 | |
| | | | | 400 | 57.5 | 1.392 | 1.540 | |
| | | | | 200 | 32.0 | 0.485 | 1.195 | |
| | | 30 | OPC | 250 | 37.9 | 0.475 | 1.313 | |
| | | | | 300 | 44.2 | 0.621 | 1.537 | |
| | | | | 350 | 50.7 | 0.771 | 1.606 | |
| | | | | 400 | 55.2 | 1.103 | 1.765 | |
| 5 | | | OPC | 300 | 48.7 | 1.316 | 1.402 | |
| | | | | MHPC | 41.2 | 0.818 | 1.185 | |
| | | | | BCB | 48.2 | 1.012 | 1.199 | |
| | | | | FCB | 44.8 | 0.752 | 1.362 | |
| | 10 | | OPC | 200 | 34.3 | 1.249 | 1.083 | |
| | | | | 250 | 42.7 | 1.300 | 1.204 | |
| | | | | 300 | 49.4 | 1.812 | 1.381 | |
| | | | | 350 | 53.4 | 2.833 | 1.554 | |
| | | 15 | OPC | 400 | 58.3 | 3.108 | 1.729 | |
| | | | | MHPC | 200 | 32.0 | 0.781 | 1.080 |
| | | | | 250 | 36.5 | 0.853 | 1.080 | |
| | | | | 300 | 42.6 | 0.881 | 1.182 | |
| 20 | | | OPC | 350 | 47.6 | 1.151 | 1.204 | |
| | | | | 400 | 52.6 | 1.273 | 1.286 | |
| | | | | 200 | 37.3 | 1.005 | 0.866 | |
| | | | | 250 | 40.3 | 1.232 | 1.106 | |
| | 25 | | OPC | 300 | 46.5 | 1.410 | 1.223 | |
| | | | | 350 | 50.9 | 1.987 | 1.351 | |
| | | | | 400 | 56.0 | 2.079 | 1.440 | |
| | | | | 200 | 31.7 | 0.718 | 1.125 | |
| | | 30 | OPC | 250 | 38.6 | 0.725 | 1.291 | |
| | | | | 300 | 44.6 | 0.955 | 1.453 | |
| | | | | 350 | 49.0 | 1.446 | 1.522 | |
| | | | | 400 | 54.0 | 1.509 | 1.700 | |

表-3 打込み温度が20°Cの場合の Q_{∞} と単位セメント量 C^* (kg/m³) との関係

| セメントの種類 | 断熱温度上昇量の計算値 $Q_{\infty} = A0 + A1 \times C^*$ | |
|---------|---|-------|
| | A0 | A1 |
| OPC | 13.16 | 0.115 |
| MHPC | 9.78 | 0.105 |
| BCB | 16.62 | 0.103 |
| FCB | 6.24 | 0.125 |

表-4 打込み温度 T^* (°C) による Q_{∞} の補正曲線の係数

| セメントの種類 | Q_{∞} の補正係数 $p = A0 + A1 \times T^* + A2 \times T^{*2}$ | | |
|---------|--|---------|---------|
| | A0 | A1 | A2 |
| OPC | 1.083 | -0.0063 | 0.00011 |
| MHPC | 1.118 | -0.0109 | 0.00026 |
| BCB | 1.168 | -0.0120 | 0.00019 |
| FCB | 1.088 | -0.0075 | 0.00016 |

ト量に変化した場合における断熱温度上昇量を、式(2)で近似した場合の各係数を示したものが表-2である。また、各係数と単位セメント量の間をセメントの種類ごとに示したのが図-9である。

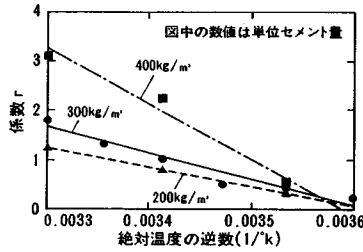


図-11 係数 r のアーレニウスプロット

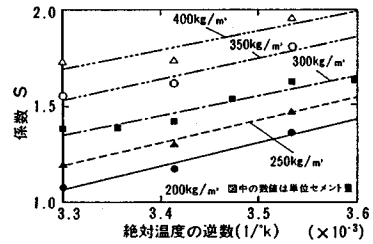


図-14 係数 s のアーレニウスプロット

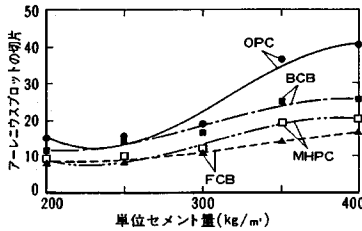


図-12 係数 r のアーレニウスプロットの切片と単位セメント量の関係

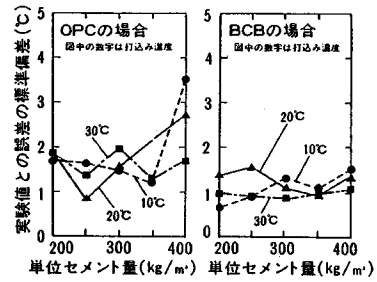


図-15 定量化における誤差

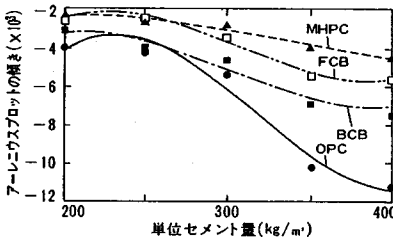


図-13 係数 r のアーレニウスプロットの傾きと単位セメント量の関係

表-5 r のアーレニウスプロットの切片および傾きと単位セメント量 C^* (kg/m^3) との関係

| 種別 | セメントの種類 | 三次式の係数 $V=A0+A1C^*+A2C^{*2}+A3C^{*3}$ | | | |
|----|---------|---------------------------------------|---------------------|---------|-------------------------|
| | | A 0 | A 1 | A 2 | A 3 |
| 切片 | OPC | 310.20 | -3.189 | 0.01085 | -1.140×10^{-5} |
| | MHPC | 37.62 | -0.320 | 0.00108 | -0.103×10^{-5} |
| | BCB | 112.51 | -1.167 | 0.00425 | -0.469×10^{-5} |
| | FCB | 157.81 | -1.642 | 0.00573 | -0.821×10^{-5} |
| 傾き | OPC | -8.910×10^4 | 9.175×10^2 | -3.123 | 3.288×10^{-3} |
| | MHPC | -1.090×10^4 | 0.942×10^2 | -0.318 | 0.305×10^{-3} |
| | BCB | -3.186×10^4 | 3.316×10^2 | -1.209 | 1.337×10^{-3} |
| | FCB | -4.496×10^4 | 4.688×10^2 | -1.637 | 1.776×10^{-3} |

表-6 s のアーレニウスプロットの切片および傾きと単位セメント量 C^* (kg/m^3) との関係

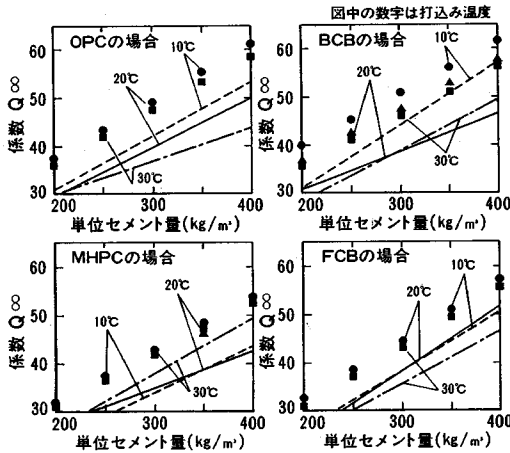
| 種別 | セメントの種類 | 二次式の係数 $U=A0+A1C^*+A2C^{*2}$ | | |
|----|---------|------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | | A 0 | A 1 | A 2 |
| 切片 | OPC | -5.861 | 1809×10^{-2} | -1.891×10^{-5} |
| | MHPC | -11.833 | 6.263×10^{-2} | -11.699×10^{-5} |
| | BCB | -17.575 | 11.495×10^{-2} | -20.344×10^{-5} |
| | FCB | -4.463 | 2.170×10^{-2} | -4.091×10^{-5} |
| 傾き | OPC | 1.979×10^3 | -5.061 | 0.663×10^{-2} |
| | MHPC | 3.605×10^3 | -17.272 | 3.339×10^{-2} |
| | BCB | 5.204×10^3 | -32.287 | 5.894×10^{-2} |
| | FCB | 1.466×10^3 | -5.303 | 1.165×10^{-2} |

打込み温度が 20°C の場合における、 Q_{∞} と単位セメント量との関係は、この図-9からも、単位セメント量の一次式で表わせることは明らかである。そこで、 Q_{∞} を単位セメント量の一次式で表示した場合の係数を、まとめて表-3に示す。また、図-10は、 Q_{∞} に及ぼす打込み温度の影響を、打込み温度が 20°C の場合における Q_{∞} に対する比率で示したものである。この図より、打込み温度が Q_{∞} に及ぼす影響は、図中に示される打込み温度の二次式で考慮するのが適当と思われる。表-4には、各種セメントの打込み温度による Q_{∞} の補正曲線の係数をまとめて示している。なお、本研究の範囲では、既往の研究で指摘されているほど、打込み温度が断熱温度上昇量の終局値を表す Q_{∞} への影響は大きくなかった。

r は、温度上昇速度、すなわち化学反応速度に密接な関係のある係数である。そこで、OPCについて、 r と、打込み温度を絶対温度で表わしたものの逆数との関係で求めたものが図-11である。両者の間には、化学反応

速度に関するアーレニウスの法則が成立することが認められる。しかし、アーレニウスプロットの直線式は、単位セメント量によっても異なっている。そこで、アーレニウスプロットの直線式の切片および傾きを、それぞれ、単位セメント量ごとに求め、さらにこれらの値を単位セメント量の三次式として表わしたものが、図-12および図-13であり、また、各種セメントについて、上述の三次式の係数をまとめて示したものが表-5である。したがって、任意温度下の r は、単位セメント量の三次式で示されるアーレニウスプロットの切片および傾きと、打込み温度から求めることができるのである。

s は、温度上昇速度を調整する役割を担う係数である。



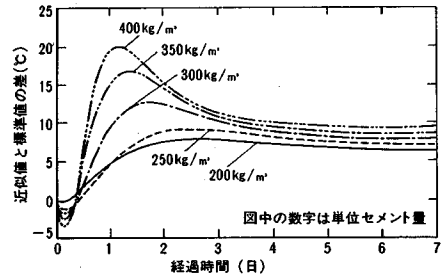
図—16 係数 Q_{∞} の近似値と標準値との比較
(プロットは近似値を、線は標準値を示す)

そこで、OPC について、 s と、打込み温度を絶対温度で表わしたものの逆数との関係を求めたものが図—14 である。この場合にも、両者の間には、化学反応速度に関するアーレニウスの法則が成立していることが認められる。また、アーレニウスプロットの直線式は、単位セメント量によっても異なっている。そこで、 r の場合と同様に、アーレニウスプロットの直線式の切片および傾きを、それぞれ、単位セメント量ごとに求め、さらにこれらの値を単位セメント量の二次式として表わし、各種セメントについて、上述の二次式の係数を示したものが表—6 である。したがって、任意温度下の s は、単位セメント量の二次式で示されるアーレニウスプロットの切片および傾きと、打込み温度から求めることができるのである。

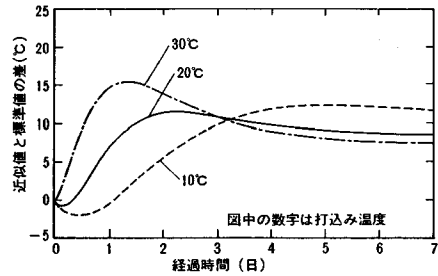
以上のように、任意の条件下における断熱温度上昇量を式 (2) で近似した場合の各係数は、上記の手順により算定が可能となる。ところで、図—15 は、上述の手順により算定した係数を用いた式 (2) の適合性を、実験値との誤差の標準偏差で示した一例である。この図より、本手法が実験値に対する近似の適合性をさほど損なうことなく、定量化していることが認められる。

7. RC 示方書および JCI 指針の標準値との比較

セメントの種類ごとに、6. の手順に従って算定した場合の式 (2) の Q_{∞} (以下、単に近似値) と、RC 示方書および JCI 指針に与えられている標準値とを比較したものが図—16 である。なお、RC 示方書と JCI 指針の標準値は、打込み温度が 10°C と 30°C の BCB および打込み温度が 30°C の MHPC を除いて大差がないので、RC 示方書の標準値を用いて比較を行うものとす



図—17 単位セメント量が変化した場合の近似値と標準値の差の一例



図—18 打込み温度が変化した場合の近似値と標準値の差の一例

る。ただし、RC 示方書の標準値が欠落しているものについては、JCI 指針の標準値を用いた。

近似値は標準値と比較して、セメントの種類にかかわらず、いずれの打込み温度の場合も大きくなっている。たとえば、OPC では近似値と標準値は、打込み温度 10°C の場合におよそ 4~6°C、20°C の場合に 5~9°C、30°C の場合に 5~12°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場合に、その差が広がっている。近似値は、打込み温度の減少に伴い若干増加するが、その程度はさほど大きくない。それに対して、標準値は、打込み温度が高い場合のセメント量の増加に伴う OPC の Q_{∞} の増加率を低く見積っている。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、近似値の標準値に対する比率を求めると、打込み温度や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。

OPC の場合について、打込み温度を 20°C とし、単位セメント量が増えた場合の近似値と標準値の断熱温度上昇量の差の経時変化を示したものが図—17 である。5. の近似式の適合性の項ですでに述べたように、式 (1) で近似している標準値は、打込み時より温度上昇速度が存在するため、打込み後約半日以内では近似値よりも標準値の方が大きな値となっている。しかし、その後は近似値の方が標準値を上回るようになり、その差は単位セメント量が多いほど大きくなる傾向がある。そして、単

位セメント量が 300 kg/m^3 の場合で最大で約 13°C 、また単位セメント量が 400 kg/m^3 の場合では、約 20°C の差が生じている。単位セメント量が少ない場合は、温度上昇速度が標準値と比較して小さいため、近似値と標準値の差の経時変化は、ほぼ Q_∞ の差以下となっている。これに対して、単位セメント量が多い場合には、近似値は標準値と比較して温度上昇速度もかなり上回る場合が多いので、近似値と標準値の差の経時変化は、それぞれの Q_∞ の差以上となる傾向がみられる。したがって、断面寸法が比較的大きく、かつ温度ひびわれの危険性が高い構造物では、近似値に基づく温度解析値と、標準値に基づく解析値では、温度応力を検討するうえで重大な差が生じる危険性がある。

BCB の場合について、単位セメント量を 300 kg/m^3 とし、打込み温度が変化した場合の、近似値と標準値の断熱温度上昇量の差の経時変化を示したものが図-18 である。打込み温度が高くなると、近似値の打込み直後からの温度上昇速度も大きくなるため、近似値は標準値を打込み直後から常に上回るようになる。両者の差は、温度上昇速度の差の影響も加わり、さらに大きくなる。しかし、最終的には両者の Q_∞ の差に収束するようになる。なお、打込み温度が 10°C および 20°C の場合には、最大で 12°C 、また 30°C の場合には 15°C もの差が生じている。

以上のように、セメントの種類、単位セメント量および打込み温度の各要因の組合せによっては、近似値と標準値との差は、 Q_∞ の差以上に大きくなるのである。

8. 結 論

本研究では、供試体をより完全な断熱状態に近づけ得ることを確認した試験装置を用いて、セメントの種類、単位セメント量および打込み温度の各要因が変化した場合におけるコンクリートの断熱温度上昇量を測定し、その定量化を行った。本研究の範囲から、以下の知見が得られた。

(1) 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、断熱温度上昇量とその温度上昇速度の実験値との適合性から、次式が適当と思われる。

$$Q(t) = Q_\infty (1 - \exp(-rt^s))$$

ここで、 $Q(t)$ ：材令 t 日における断熱温度上昇量

Q_∞ , r , s ：実験定数

(2) 上式中の各係数に及ぼすセメントの種類、単位セメント量および打込み温度の影響を、次のように定量化した。

Q_∞ は、セメントの種類ごとに単位セメント量の一次式で表わせる。また、打込み温度の影響は、打込み温度が 20°C の場合の Q_∞ に対して、打込み温度の二次式で

補正することによって考慮するのが適当である。

r は、化学反応速度に密接な関係がある係数であり、打込み温度を絶対温度で表わしたときの逆数との間にアーレニウスの法則が成立する。また、アーレニウスプロットの切片と傾きは、単位セメント量の三次式で表わせる。

s は、温度上昇速度の調整を担う係数であり、 r と同様に、打込み温度を絶対温度で表わしたときの逆数との間にアーレニウスの法則が成立し、アーレニウスプロットの切片と傾きは、単位セメント量の二次式で表わせる。

したがって、各種セメントについて、任意の単位セメント量および打込み温度の断熱温度上昇量の近似式が得られるのである。

(3) 本研究で得られた断熱温度上昇量は、RC 示方書および JCI 指針の標準値と比較し、最終的な温度上昇量の差では大略 2 割、また両者の差の経時変化は、それ以上に大きいことが判明した。

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、実験の実施や論文の作成にあたり、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) 田辺忠頼：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.1-27，1986.8.
- 2) 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.
- 3) 内田清彦・榊原弘幸・斎藤 豊：積算発熱量に基づくセメントの水和発熱速度の定式化と温度上昇の予測，コンクリート工学，Vol.24，No.4，pp.105-113，1986.4.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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，pp.119-136，1986.10.
- 7) 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・同解説，1986.3.
- 8) 塚山隆一：マッシュ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.
- 9) 宮路栄二・梶川春樹：コンクリートの水和熱による断熱温度上昇測定，日本建築学会大会，pp.45-46，1968.
- 10) 山川秀次・原口 晃・阿部博俊：暑中に打設した富配合なマスコンクリートの断熱温度上昇特性に関する一考察，土木学会年次学術講演会，第 36 回，pp.41-42，1981.

- 11) 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.
- 12) 佐藤利幸・鈴木康範・原田修輔・横田紀男：新試験装置によるコンクリートの断熱温度上昇量，第9回コンクリート工学年次講演会，pp.1～6，1987.
(1987.11.4・受付)
-