

九州大学 工学部 正員 徳光 善治

" " " " 松下 博通

" " " " 学生員 松下 求

1. まえがき コンクリートは硬化の際に徐々にではあるがかなりの発熱を伴う材料である。特に熱の放散が遅いマスコンクリートでは、その内部温度は表面温度にくらべてかなり高くなり温度応力によるひびわれ発生の危険性は高い。したがってマスコンクリートの発熱性状を研究することは重要な課題となっている。筆者らはコンクリートの発熱性状を調べるためのその内部温度変化を測定し、理論解析と比較検討した。その概要を報告する。

2. 実験方法および結果 コンクリートの発熱量は従来より単位セメント量に大きく影響されるといわれている。そこでスランブを $4 \pm 1 \text{ cm}$ 、AEコンクリートの空気量を $3.5 \pm 1\%$ にして単位セメント量を変えた(94, 14, 17, 20)場合のコンクリートの温度上昇を30cm立方体供試体(5cm厚の発ぼうスカラー製型枠を使用)の中心部で測定した。表1にコンクリートの性質、図1に単位セメント量と供試体中心部の最高温度上昇との関係を示す。打設温度が20℃の供試体は恒温恒温室で、10℃の場合には普通室内で養生した。コンクリートの内部温度上昇は(i)高炉セメントより普通セメントの方が、(ii)打設温度が高い方が、(iii)コンクリートの単位セメント量の大きいほど高くなること、図1に示されている。次に表2に示すコンクリートにより90cm立方体供試体の内部温度分布および温度変化を測定した。供試体は5cm厚の発ぼうスカラー製型枠を使用して断熱効果をあげるとともに、側面の温度変化を小さくするため土中に埋設した。図2に供試体中心部の温度-時間曲線の測定結果を示す。曲線のこう配は温度の上昇期より降下期の方が、また普通セメントより高炉セメントを使用したコンクリートのものがゆるやかであり、ともに中心部の温度が初期打設温度に戻るまでの時間は20日～30日である。

3. コンクリートの内部温度変化の解析方法 *コンクリートの断熱温度上昇曲線は①式で、比熱 C_c は②式で与えられる。① $\theta = W_c Q (1 - e^{-\lambda t}) / C_c \rho$ ----- ①

$C_c = \{ C_0 (W_c + W_w) + W_w \} / (W_c + W_w + W_s)$ ----- ② ここで、 W_c ; コンクリートの単位セメント量(kg/m^3)、 Q ; セメントの水和熱(Kcal/kg 、本実験においては普通セメントで $100 \text{ Kcal}/\text{kg}$ 、高炉セメントで $90 \text{ Kcal}/\text{kg}$ である。) ρ ; コンクリートの単位容積重量(kg/m^3 、本稿では $2500 \text{ kg}/\text{m}^3$) λ ; 実験常数

W_s ; 骨材の全重量(kg/m^3)、 W_w ; 単位水量(kg/m^3) C_0 ; 骨材およびセメントの平均比熱($\text{Kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C} = 0.2$)。一般にマスコンクリートの中心部の温度上昇履歴は数日初期(1m厚のコンクリートで1日程度)においてはコンクリートの断熱温度上昇履歴にはほぼ等しいと考えられるので、実験常数 λ は図2における材料1日までの供試体中心部の温度上昇の

測定結果から決定した。

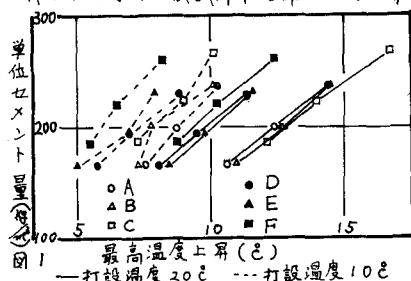


図1 最高温度上昇(℃) — 打設温度20℃ --- 打設温度10℃

種	セメント	W/c	C	Q ₂₈
A	普通セメント	1.4	167	187
		1.7	200	235
		2.0	237	250
B	ポルトランドセメント	1.4	167	191
		1.7	200	228
		2.0	237	240
C	ハイランド	1.4	186	208
		1.7	222	263
		2.0	263	318
D	高炉セメント	1.4	163	182
		1.7	195	234
		2.0	231	262
E	Bセメント	1.4	163	169
		1.7	195	207
		2.0	231	261
F	ハイランド	1.4	183	208
		1.7	219	256
		2.0	259	314

○粗骨材最大寸法80mm
和骨材 F.M. 2.72 表1
○混和剤は規定量使用

表2

種	W/c	S/a	W	C	S	G	Q ₂₈
A	54.0	27.8	119.3	221	554	1656	302
B	51.1	26.7	119.1	233	530	1674	289
C	60.0	30.0	131.4	219	612	1645	300
D	55.4	28.1	116.3	210	563	1659	279
E	53.2	27.1	116.3	219	541	1675	293
F	60.0	30.0	127.6	216	613	1645	285

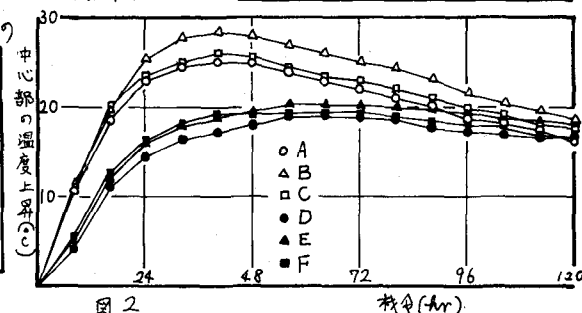


図2

材料(Arr)

* コンクリートの熱拡散率は骨材量と骨材の石質によって大きく異なりセメントの種類と水セメント比、コンクリートの温度等による影響は少ない。本稿では、コンクリートの熱拡散率を $0.003 \text{ m}^2/\text{hr}$ としている。

(1) シュミット法 コンクリートの内部温度変化を3次元で解析する場合にはシュミット法が最も簡便で、ある英の4時間後の温度は次式で表わされる。 $\theta'_n = \theta_n + \Delta\theta_n = \{(\theta_{n-1} + \theta_{n+1}) + (\theta_{2n-1} + \theta_{2n+1}) + (\theta_{4n-1} + \theta_{4n+1})\} / 6 \dots\dots ③$

$a \Delta t / \Delta l^2 = 1/6 \dots\dots ④$ (ここで、 θ : 温度、 t : 時間、 a : 熱拡散率、 Δl : 分割英間の長さ)。③、④式によれば、コンクリート構造物を長さ Δl で3次元格子状に分割し④式を満足するように Δl を定めれば、4時間後のある英の温度は隣接する6分割点の温度の平均値で表わされる。セメントの水和熱によってコンクリートの温度が上昇する場合には、4時間のコンクリートの断熱温度上昇の増加分を③式に加えればよい。③、④、⑤式を用い、境界条件としてコンクリートおよび周囲の初期温度を 0 (以後、周囲の温度は常に 0) とした場合について、シュミット法による計算を行うためにはコンクリートに仮想表面を考慮しなければならない。すなわち、コンクリート表面からの放熱による周囲と表面の温度差を消すために、コンクリートの厚さを増す必要がある。図3は配合A、Dについて前述の境界条件に基づいて、立方体の辺長を変えて計算した場合の温度-時間曲線で、図4はこの時の最高温度までの経過時間は立方体の辺長によって一義的に定まることが示している。

したがって図2、図4より仮想立方体の辺長を決定することができる。本稿では、普通セメントで $L=1.9\text{m}$ 、高炉セメントで $L=2.2\text{m}$ の立方体によって $L=0.9\text{m}$ 立方体(供試体)の中心温度および温度分布を求めた。(図5、図6)

(2) 野原氏による方法⁽⁴⁾ 3次元の熱拡散方程式を用いてコンクリートの温度変化の厳密解を求ることは困難であり実用的でない。またシュミット法は比較的簡便であるが、境界条件が単純でコンクリート表面からの放熱量を単にコンクリートの厚さを増すことによってしか考慮することができない。野原氏は実際のコンクリート構造物の発熱による温度上昇を推定する第1段階として、無限の広がりを持つ等厚版について最初の温度を与えられかつ内部で熱の発生のない場合の表面放熱によるコンクリートの冷却を考慮、実用計算に適するように図表化した。これを利用すれば、コンクリート表面からの放熱量を考慮した場合の立方体の温度を簡単に求めることができる。本稿では表面放熱量を $0.8 \text{ kcal}/\text{cm}^2 \cdot \text{hr}$ ととして計算した。

(図5) 計算結果の詳細は講演の席で述べる。

断熱 本実験は竹本油脂(株)星野実氏(現九州大学土木実験室の首長)に多大な援助を頂いた。ここに厚くお礼申し上げます。参考文献 1) 柳田力: マスコンクリートにおける上昇温度の実用的推定方法、土木技術資料 11-4 2) 建設省土木研究所: 各種セメントにAE剤を混入した場合の水和熱について、3) 電力中央研究所技術研究所: コンクリートの熱拡散率に及ぼす配合、75イアツと混和および骨材の石質の影響、4) 野原陽一: コンクリート打設後の温度計算方法についてコンクリートジャーナル(1967, Vol. 5, No. 8) 5) 塚山隆一: 富地田出男: 各種セメントを用いたコンクリートの温度上昇、セメント技術年報(1971)

(図5) 計算結果の詳細は講演の席で述べる。

断熱 本実験は竹本油脂(株)星野実氏(現九州大学土木実験室の首長)に多大な援助を頂いた。ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献 1) 柳田力: マスコンクリートにおける上昇温度の実用的推定方法、土木技術資料 11-4 2) 建設省土木研究所: 各種セメントにAE剤を混入した場合の水和熱について、3) 電力中央研究所技術研究所: コンクリートの熱拡散率に及ぼす配合、75イアツと混和および骨材の石質の影響、4) 野原陽一: コンクリート打設後の温度計算方法についてコンクリートジャーナル(1967, Vol. 5, No. 8) 5) 塚山隆一: 富地田出男: 各種セメントを用いたコンクリートの温度上昇、セメント技術年報(1971)

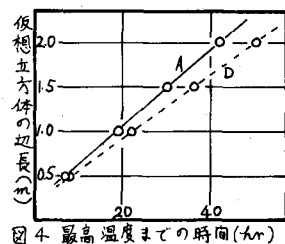


図4 最高温度までの時間(hr)

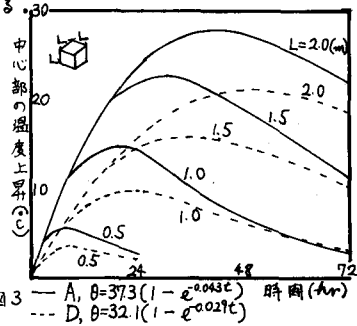


図3 — A, $\theta = 373(1 - e^{-0.043t})$ 時間(hr)
--- D, $\theta = 32.1(1 - e^{-0.021t})$

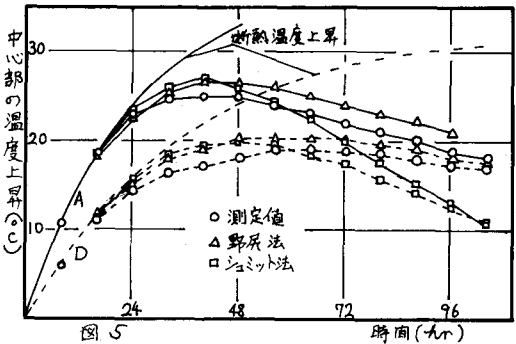


図5 断熱温度上昇

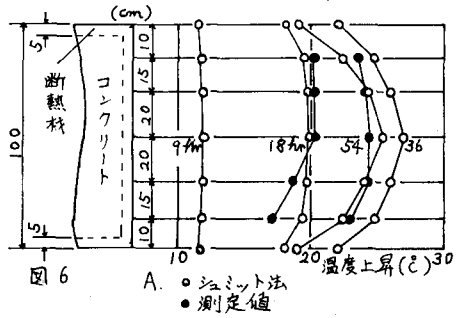


図6 A. ○ シュミット法
● 測定値