

コンクリート打込み後の温度上昇の推定への電算機の利用

清水建設(株) 正員 小 野 定

1. まえがき

コンクリートダムに代表されるマスコンクリート構造物は、これまでに数多く建設されてきた。従来マスコンクリートと言えばダムといった観念があったが、近年ダム以外の構造物、例えば橋脚の下部、構造物の基礎などに大規模なマスコンクリートが多く見受けられる。その傾向を反映して、土木学会のコンクリート標準示方書でも49年の改正で新たにマスコンクリートの規定が設けられた。

マスコンクリート構造物を施工する際、あらかじめコンクリート打込み後の温度上昇を推定して施工計画をたて、さらに施工管理を行なうことがコンクリートの品質管理上必要なことであると考えられる。しかしながら、温度上昇の推定には多くの要因が影響を及ぼし、またすべての要因を考慮して温度上昇を予測することは困難である。そのため、これまで多く用いられてきた温度上昇の計算方法は、初期条件や境界条件などに数学的ないしは工学的に簡単な仮定を導入したものである。その理由としては、実際の条件を考慮して熱伝導式を厳密に解くことが困難であったため、また計算に多大の労力を必要とするためであった。例えば、D. McHenry の方法(1937年)、Boulder Damにおける方法、R.W. Carlsonの方法、Schmidtの方法、およびR.E. Gloverの方法などが代表的な計算方法である。それらの計算方法は、比較的良い推定値を与えるといわれているが、解析上境界条件を単純化しているため、マスコンクリートの管理上重要なものであるコンクリート表面部の温度履歴を適確に把握できない場合が多い。また手計算による場合には多大の労力と時間を必要とする。

温度上昇の解析への電算機の利用は、その特徴を生かし数多くの要因を考慮して迅速に計算を処理し、現実的なマスコンクリートの施工計画の立案、またコンクリートの品質管理(温度ひびわれの防止)に大きく寄与している。本文は、比較的多く使用されているSchmidtの方法を例にして電算機を利用した場合の利点について述べ、さらに電算機を利用した温度上昇の計算例について報告するものである。

2. 温度上昇の解析方法について

コンクリートのように、発熱源をもつ物体の非定常熱伝導式は次のようになる。

$$\partial \theta / \partial t = h^2 (\partial^2 \theta / \partial x^2 + \partial^2 \theta / \partial y^2 + \partial^2 \theta / \partial Z^2) + Q(t) / c \rho \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 θ : 任意の時間の温度(°C)、 h^2 : 熱拡散係数(m²/hr)、 $Q(t)$: 単位時間当りの発熱量、 c : コンクリートの比熱(kcal/kg·°C)、 ρ : コンクリートの単位体積重量(kg/m³)

(1)式を実際の境界条件および初期条件を満足するように解けばよいのであるが、数学的に厳密な解は限られた条件でしか得られていない。McHenryの方法がその代表的なものである。この方法では、初期条件および境界条件を次のように仮定している。 $\theta_{x=0} = 0$ 、 $\theta_{x=a} = 0$ 、 $(\partial \theta / \partial t)_{x=0} = 0$ (a : コンクリートの厚さ)。1次元の熱伝導式 $\partial \theta / \partial t = h^2 (\partial^2 \theta / \partial x^2) + Q(t) / c \rho$ を上記の条件で解いた解は次のようになる。

$$\theta(t) = \frac{4m\theta_0}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^{-nt} - e^{-n^2 \cdot \pi^2 / 4a^2 t}}{n \{ h^2 \pi^2 / 4a^2 - m \}} \sin \frac{n\pi}{2a} x \quad \dots\dots\dots (2)$$

また一般にSchmidtの方法と呼ばれている解析方法は、差分法による解法である。1次元の熱伝導式を時間および長さの分割巾を Δt 、 Δx とし、また $\theta = h^2 \Delta t / (\Delta x)^2$ とおいて差分式に直すと次のようになる。

$$\theta_i^{p+1} = \theta (\theta_{i-1}^p + \theta_{i+1}^p) + (1 - 2\theta) \theta_i^p + \Delta T \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 θ_i^{p+1} : i 点の $(P+1)\Delta t$ 時間の温度(°C)、 ΔT : Δt 時間内の断熱温度上昇量(°C)

(3)式で $\theta = 1/2$ とすると(3)式は次のようになる。

$$\theta_{i+1}^p = (\theta_{i-1}^p + \theta_{i+1}^p) / 2 + \Delta T$$

上式が Schmidt の方法の基本式である。式の工学的な意味は、時間 (Δt) および長さ (Δx) を、 $h^2 \Delta t / (\Delta x^2) = 1/2$ を満足するように適当に選べば $(P+1) \Delta t$ 時間後の i 点の温度は両隣りの温度の平均値に、 Δt 時間内の断熱温度上昇量を加えれば求まることを示している。

Schmidt の方法では、初期条件および境界条件を次のように仮定している。つまり最初に内部温度および周囲の気温が 0°C であり、また周囲の気温は 0°C に保たれるとしている。また表面の熱伝達率を仮想厚 $(D' = \lambda / \alpha)$ 、ここに λ : コンクリートの熱伝導率、 α : 熱伝達率) に換算して表面温度を求めている。

3. Schmidt の方法による計算と電算機を利用した場合の計算との比較検討

塚山氏が“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”の論文で発表されている B 現場 (タービン基礎スラブ) の測定値および計算値を引用させていただいて、電算機を利用した場合の計算値 (F.D.M 解とする) と比較検討してみる。計算に用いた主な定数は、単位セメント量 300 kg/m^3 、 $\Delta x = 0.4 \text{ m}$ 、 $\Delta t = 24 \text{ hr}$ 、また断熱温度上昇式は $T(t) = 36.6 (1 - e^{-1.40 t})$ (ここに、 t : 材令 (日)、普通ポルトランドセメント使用) である。図-1 は実測値、Schmidt による計算値、および F.D.M. 解による計算値を示したものである。F.D.M. 解の計算条件は Schmidt 解とできるだけ同一にしている。異なる点は、Schmidt 解がスラブ厚を増加して表面温度を求めているのに対して、F.D.M. 解はスラブ表面と外気との間でニュートンの冷却則 ($\partial \theta / \partial x = \alpha (\theta_s - \theta_a)$)、ここに θ_s : コンクリート表面の温度、 θ_a : 外気温) が成り立つとしてスラブ厚を増加させないで表面温度を求めている。F.D.M. 解では熱伝達係数を $\alpha = 5 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ としている。

両者の比較検討の結果を要約すると次のようである。1) 両者の場合とも、境界条件の処理方法のいかんにより表面部の温度の計算値の変動巾が大きい。2) F.D.M. 解は実験定数 (熱伝達係数) を適確に知ることができれば、境界条件を物理的に考慮して温度上昇を推定できる。しかしながら Schmidt 解の場合には、境界条件の処理が機械的にできないため推定値の変動巾が大きい。3) コンクリート打込み後 7 日目までの計算に要する計算時間は、Schmidt 解が約 1 時間、F.D.M. 解が約 0.6 秒である。このように計算時間が大巾に短縮されており電算機の特徴が大きく活かされている。

4. 温度上昇の推定への電算機の利用例

利用例として川崎製鉄㈱が千葉製鉄所内に建設した熱風炉基礎スラブ (鉄筋コンクリート) の計算例を示す。本構造物の断面寸法は、縦 4.3 m 、横 6.8 m 、厚さが 5.6 m であり、またコンクリート量は約 $16,000 \text{ m}^3$ である。コンクリートは 3 リフトに分けて打込んでいる。図-2、3 に 1 次元および 2 次元の数値解析モデルが示してあり、表-1 には計算因子および計算定数が示してある。外気温および風速は Δt 時間ごとに実測値を入力している。図-4 は各リフト中心部と表面部の温度履歴の計算値と実測値とを比較したものであり、また図-5 はコンクリート打込み後 40 日目のリフト内の温度分布を示したものである。これらの計算値は 1 次元解析によるものであり、また実測値は平均的に中心部で測定したものである。図-6 には表面部の温度を 2 次元解析で計算したものが示してある。計算値は、風速、外気温の経時変化、さらに施工上考えられる主な要因 (例えば養生方法、型枠の種類、それらの実施期間、存置期間など) をほとんど考慮している。計算時間には $0.5 \sim 1.0$ 秒要している。結果より明らかなように計算値と実測値とは良い一致を示している。

以上、マスコンクリートの温度上昇の推定に電算機を利用した場合の利点について簡単に述べた。今後マスコンクリートを施工していく上で、品質的に満足できるコンクリートを得るためには、電算機をフルに利用して現実的な施工計画をたて、さらに管理を行なうことがより必要になると思われる。

No.	計算因子	計算ケース	CASE
1.	打込み温度 (°C)	11.0	
	骨材温度 (°C)	7.2	
	セメント温度 (°C)	37.3	
	練混ぜ水温度 (°C)	10.0	
2.	地盤温度 (°C)	10.0	
3.	リフト高さ (m)	1.8	
4.	コンクリートの熱的性質		
	比熱 (Kcal/kg°C)	0.264	
	熱伝導率 (Kcal/mh°C)	1.970	
5.	地盤の熱的性質		
	比熱 (Kcal/kg°C)	0.492	
	熱伝導率 (Kcal/mh°C)	1.225	
6.	コンクリートの単位体積重量 (kg/m³)	2290	
7.	地盤の単位体積重量 (kg/m³)	1720	
8.	セメントの種類	普通ポルト	
	単位セメント量 (kg/m³)	298	
	セメントの終局発熱量 (Kcal/kg)	87.0	
	実験定数 r	0.797	
9.	風速 (m/sec)		
10.	外気温 (°C)		
11.	コンクリート上面の養生		
	種類	むしろ	
	厚さ (m)	0.01	
	熱伝導率 (Kcal/mh°C)	0.2	
12.	型枠		
	種類	メタルフォーム	
	厚さ (m)	0.002	
	熱伝導率 (Kcal/mh°C)	58.0	
13.	養生日数 (日)	7	
14.	型枠存置期間 (日)	5	
15.	次元数	2	

表-1 計算定数

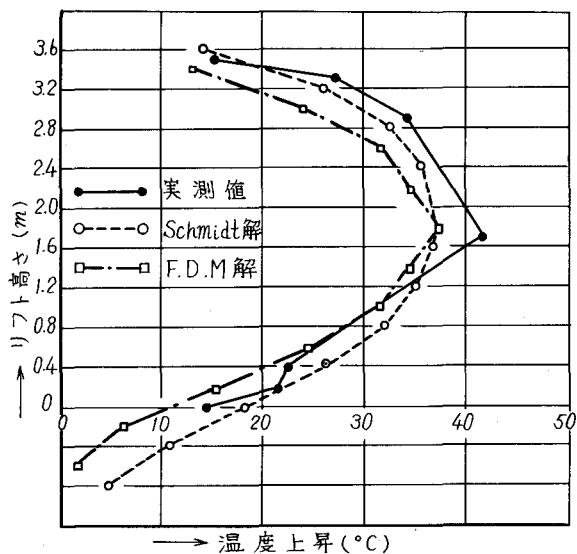


図-1 Schmidt法による計算値との比較

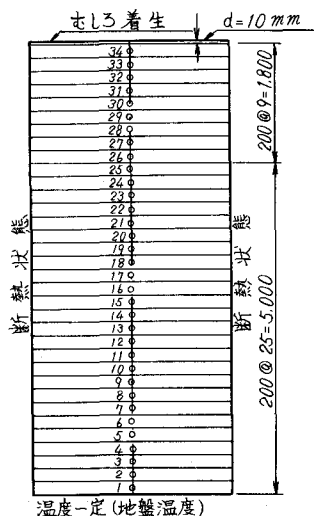


図-2 1次元数値解析モデル

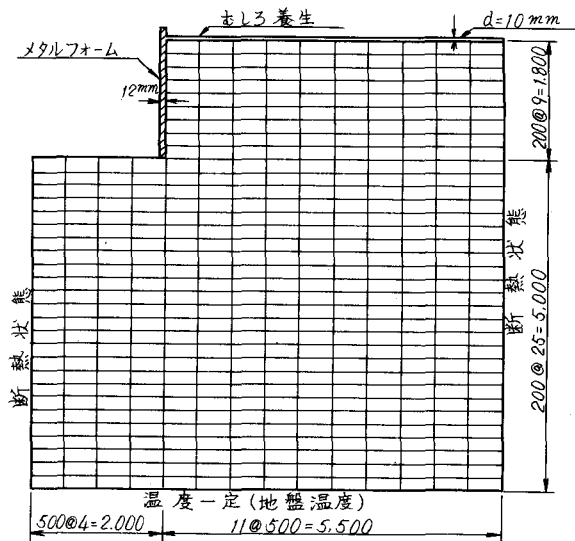


図-3 2次元数値解析モデル

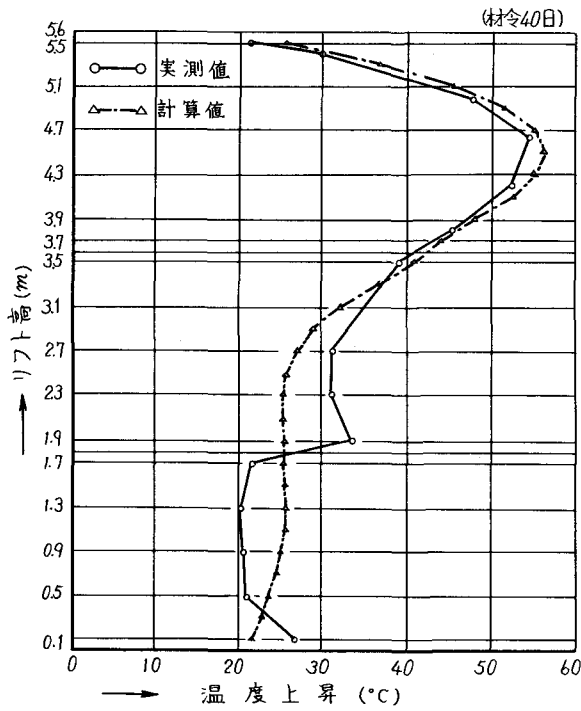


図-5 リフト内温度分布

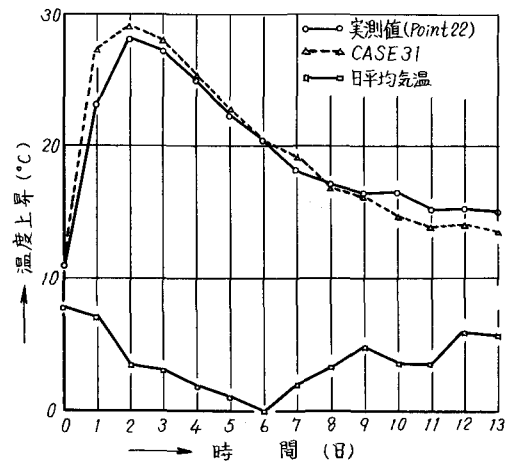


図-6 表面部の温度履歴

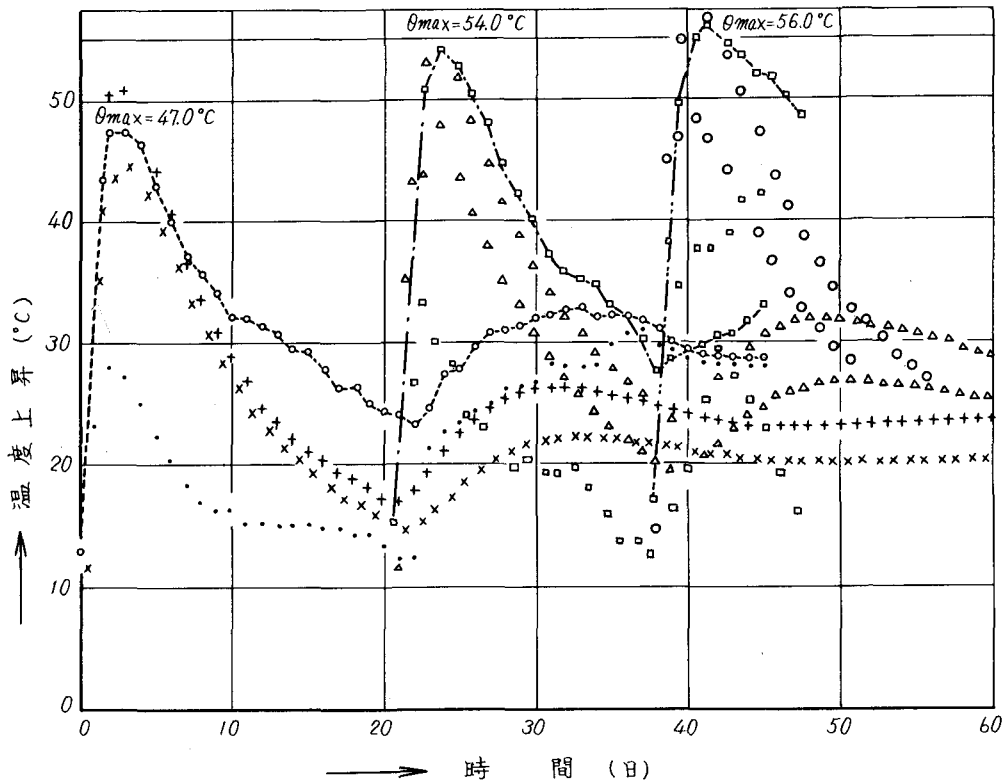


図-4 コンクリート打込み後の温度履歴