

# 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

## STUDIES ON VARIOUS FACTORS AFFECTING THE TEMPERATURE RISE OF MASS CONCRETE AND PROPOSAL OF A CALCULATION METHOD FOR THE TEMPERATURE RISE

小野 定\*

By Sadamu ONO

This paper discusses various factors affecting the temperature rise characteristics of massive concrete structures during construction on the basis of analyses of numerical values and actual measurements. Pertinent factors are concrete adiabatic temperature rise, thermal properties of concrete, placing temperature, ambient temperature, thickness of member, coefficient of heat transfer, and curing. The following became clear after the investigation on various factors affecting the temperature rise. The effect of concrete temperature rise appears clearly. If we show characteristics of it by an empirical equation,  $Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt})$ , the effect of  $Q_{\infty}$  and  $r$  on temperature rise is independent. Further, in the paper I wish to propose a simple method which permits us to arrive at a solution of sufficient accuracy by means of results obtained through the investigation on various factors affecting the temperature rise.

### 1. ま え が き

マスコンクリートの施工段階における、セメントの水和熱に起因する温度応力によるひびわれ（以下、温度ひびわれと称す）が、工学上の問題として研究され始めてから数十年の歳月が経過している。

特に、近年、長大橋の下部工、LNG 地下式貯槽の側壁・底版、原子力発電所のベースマツトなどにみられるように、コンクリート構造物の大型化に伴い、コンクリートダム以外の構造物においても温度ひびわれ制御が、構造物の安全上および機能上の観点から重要になっている。

温度ひびわれ制御について検討を行う場合、コンクリート打込み後のセメントの水和熱によるコンクリート温度を予測することがまず必要になる。このようなことから、マスコンクリート温度に関連する研究は1930年代のBoulder Damにおける研究<sup>1)</sup>に始まり、Carlson, McHenry, R.E. Glover, A.D. Rossらの研究に代表されるように、以来今日まで数多くの研究が行われてきている。しかし、その大多数は、コンクリート温度の解析問題に集中しており、コンクリート温度に及ぼす要因

の影響、推定精度などの問題についての研究は、実用上重要であるにもかかわらず、意外に少ないのが現状である。また、近年、コンピューターの普及により、全体系の解析法として有限要素法がマスコンクリートの温度解析法として、広く使用されるようになってきている<sup>2)</sup>。このような解析を行った場合、当然解析結果のチェックが必要であるが、従来から使用されているCarlsonの方法などでは境界条件が十分に考慮できないこと、またACIの方法<sup>3)</sup>、柳田の方法<sup>4)</sup>、野尻の方法<sup>5)</sup>などの簡易法では、解析精度および簡易性が満足できるものではないため実用上有効な簡易計算法がないのが現状である。

本研究は、コンクリートの断熱温度上昇、コンクリートの熱特性、打込み温度、外気温、部材寸法、熱伝達率および養生の7つの要因を取り上げて、マスコンクリート温度に及ぼす各要因の影響を数値実験および実測値により検討し、さらに、コンクリートの断熱温度上昇特性とコンクリート温度との関係を基礎にしたマスコンクリート温度上昇の計算法を提案したものである。

### 2. コンクリート温度に及ぼす各種要因の影響

#### (1) 断熱温度上昇特性<sup>6),7)</sup>

コンクリート温度に及ぼす断熱温度上昇特性の影響は、断熱温度上昇を  $Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt})$  で表わした場

\* 正会員 工修 清水建設(株) 土木技術部 (〒108 港区三田 3-13-16)

合、式中の実験定数  $Q_{\infty}$  および  $r$  の影響に置き換えて考えることができる。ここに、 $Q(t)$  は材令  $t$  における断熱温度上昇量 ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $t$  は材令 (日)、 $Q_{\infty}$  は終局断熱温度上昇量 ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $r$  は温度上昇速度に関する実験定数である。しかし、 $Q_{\infty}$  と  $r$  の影響を実験的に調べるには、それらを分離することが必要であるが、このことを実験的に調べるにはセメントの水和反応の面から困難であると考えられる。このため、本研究では数値実験により終局断熱温度上昇量  $Q_{\infty}$  および温度上昇速度に関する実験定数  $r$  がコンクリート温度に及ぼす影響について考察した。

表一に变化させた各要因の水準を示す。同表中に示した以外の要因の水準は表二に示すようである。数値計算は1次元の有限差分法により行った。図一に温度解析モデルの一例を示す。本研究では地盤の熱特性は一定にして解析しているが、その影響について検討した結果、表三に示すように部材厚が小さい場合には幾分影響が認められるが、部材厚が大きい場合にはほとんど影

表一 要因および水準

要因	水準
終局断熱温度上昇量 ( $Q_{\infty}$ )	25.8, 29.4, 33.1, 36.8 <sup>*</sup> 40.5, 44.2, 47.8
断熱上昇速度に関する実験定数 $r$	0.105, 0.262, 0.366, 0.418, 0.471, 0.523 <sup>*</sup> 0.575, 0.628, 0.690, 0.941, 1.0, 1.5, 2.0
部材寸法 $D$ (m)	0.75, 1.5, 3.0

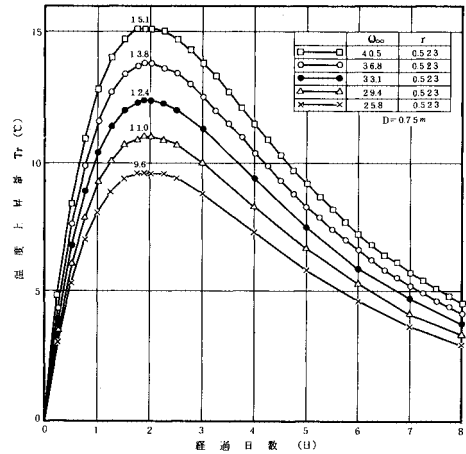
4 - 5 水準

表三 地盤の熱特性がコンクリート温度に及ぼす影響

Case No.	部材厚 $D$ (m)	地盤の比熱 $C_p$ ( $\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ )	地盤の熱伝導率 $\lambda$ ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ )	地盤の単位体積重量 $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	内部温度 $T_{i, \text{max}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	表面温度 $T_{s, \text{max}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{s, \text{max}}$ に対する $T_{i, \text{max}}$ の割合 (%)
1	0.75	0.84	0.108	1,300	12.7	3.5	1.8
2	0.75	0.14	2.32	2,870	14.4	3.6	1.9
3	1.5	0.54	0.108	1,300	21.9	4.4	2.9
4	1.5	0.14	2.32	1,870	24.1	4.2	2.4
5	3.0	0.54	0.108	1,300	37.4	4.9	5.3
6	3.0	0.14	2.32	1,870	32.7	3.9	5.5

表二 数値実験で基準とした要因および水準

要因	水準	要因	水準
1. コンクリート打込み温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	0	14. 実験定数 ( $Q_{\infty}$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )	36.8
2. 地盤 (or 旧コンクリート) 温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	0	15. " ( $r$ )	0.523
3. 最小部材厚 (m)	0.75~3.0	16. 外気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	0
4. コンクリートの単位体積重量 ( $\text{kg/m}^3$ )	2,278	17. 熱伝導率 ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ )	2.0 (2.326)
5. " 比熱 ( $\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ )	0.318 (1.332)	18. 蒸水厚 (m)	0
6. " 熱伝導率 ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ )	2.094 (2.435)	19. シート厚 (m)	0
7. " 熱拡散率 ( $\text{m}^2/\text{hr}$ )	0.0029	20. 空気厚 (m)	0
8. 地盤 (or 旧コンクリート) の単位体積重量 ( $\text{kg/m}^3$ )	2,278	21. 水の熱伝導率 ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ )	0.518 (0.602)
9. " 比熱 ( $\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ )	0.318 (1.332)	22. シート " ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ )	0.8 (0.930)
10. " 熱伝導率 ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ )	2.094 (2.435)	23. 空気 " ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ )	0.022 (0.026)
11. " 熱拡散率 ( $\text{m}^2/\text{hr}$ )	0.0029	24. 養生日数 (H)	3.0
12. 単位セメント量 ( $\text{kg/m}^3$ )	280	25. タイムインターバル ( $\Delta t$ ) (hr)	3.0
13. コンクリート断熱温度上昇式のタイプ		26. スペースインターバル ( $\Delta x$ ) (m)	0.25



図二 内部温度上昇量  $T_r$  に及ぼす  $Q_{\infty}$  の影響

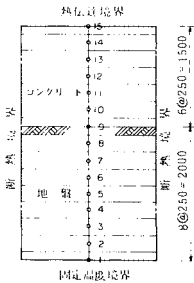
響しないことが認められる。

図二は、 $D=0.75\text{ m}$  の温度上昇の経時変化を示したものである。 $Q_{\infty}$  の増加に伴って、打込み温度からの内部温度上昇量の最大値  $T_{r, \text{max}}$  は増加しており、 $Q_{\infty}$  の影響が顕著に認められる。図三から図五は各部材寸法について、 $Q_{\infty}$  と  $T_{r, \text{max}}$  および  $T_{r, \text{max}}$  に達するまでの時間 ( $\text{DAY}_{\text{max}}$ ) の関係を示したものである。 $Q_{\infty}$  と  $T_{r, \text{max}}$  との間には高い正の相関関係が認められ、 $Q_{\infty}$  の増加に伴って  $T_{r, \text{max}}$  は直線的に増加することが明らかになった。また、その増加率は部材寸法の増加に伴って増加している。

一方、 $\text{DAY}_{\text{max}}$  は図三から図五の結果でわかるように、 $Q_{\infty}$  が変化してもほぼ一定であり、 $Q_{\infty}$  の影響を受けていないことが認められる。

図六は、部材寸法  $0.75\text{ m}$  について  $Q_{\infty}$  の基準値 ( $Q_{\infty} = 36.8$ ) を  $\pm 30\%$  変動させた場合の結果と基準値の場合の結果とを比較したものである。 $Q_{\infty}$  の変動に対応して、表面温度上昇量  $T_{s, r}$  の最大値は  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  増減しており、この増減量は  $Q_{\infty}$  の変動にほぼ一致している。また、 $Q_{\infty}$  が変化しても  $T_{s, r}$  が最大値に達するまでの時間は変化しておらず、内部温度上昇の傾向と同様である。

図七の結果からわかるように、コンクリート温度に及ぼす実験定数  $r$  の影響は  $Q_{\infty}$  に比べて複雑である。この結果から判断できる特徴的な影響は、 $r$  の増加に伴って  $T_{r, \text{max}}$  が増加し、 $\text{DAY}_{\text{max}}$  が小さくなることである。図八に部材寸法  $0.75\text{ m}$  の場合の  $r$  と  $T_{r, \text{max}}$  との関係を示す。この結果から、 $r$  の増加に伴って  $T_{r, \text{max}}$  は双曲線的に増加し、 $\text{DAY}_{\text{max}}$  は双曲線的に減少することが認められる。また、 $r$  が小さいほど  $T_{r, \text{max}}$  に及ぼす影響は大きくなっている。図九から図一〇に部材寸法  $1.5\text{ m}$ 、 $3.0\text{ m}$  の結果を示したが、これらの部材寸法についても  $0.75\text{ m}$  の場合と同様な傾向が認められる。



図一 温度解析モデル (部材寸法  $D = 1.5\text{ m}$  の場合)

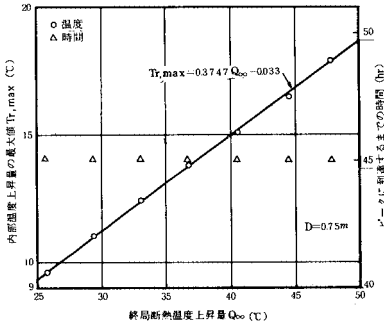


図-3  $T_{r,max}$ ,  $DAY_{max}$  と  $Q_{\infty}$  との関係 ( $D=0.75$  m)

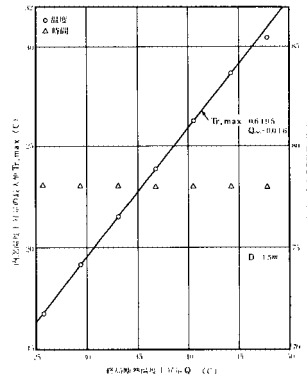


図-4  $T_{r,max}$ ,  $DAY_{max}$  と  $Q_{\infty}$  との関係 ( $D=1.5$  m)

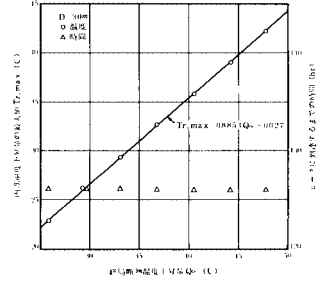


図-5  $T_{r,max}$ ,  $DAY_{max}$  と  $Q_{\infty}$  との関係 ( $D=3.0$  m)

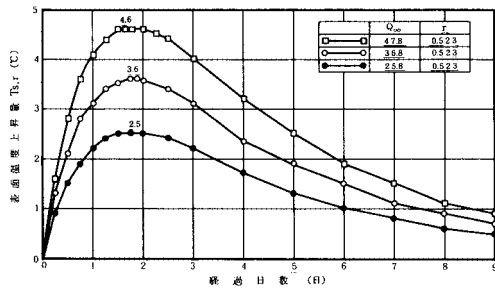


図-6  $T_{s,r}$  に及ぼす  $Q_{\infty}$  の影響

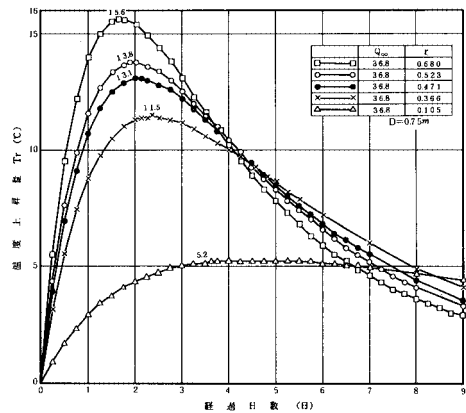


図-7  $T_{r,max}$  に及ぼす  $r$  の影響

図-11 に  $r$  と表面温度上昇量の最大値  $T_{s,r,max}$  との関係を示したが、内部温度の場合と同様な傾向を示している。

表-4 に  $Q_{\infty}$  および  $r$  がそれぞれ  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$ ,  $\pm 30\%$  変動した場合の  $T_{r,max}$  の変動幅を示す。基準値の  $T_{r,max}$  に対する、要因が変動した場合の  $T_{r,max}$  の変動割合は、 $Q_{\infty}$  の場合には要因の変動と 1 対 1 の関係にある。 $r$  の場合には、部材寸法の増加に伴って  $T_{r,max}$  に及ぼす  $r$  の影響は小さくなっており、 $D=3.0$  m では  $r$  が  $\pm 30\%$  変動しても  $T_{r,max}$  は約  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$  変動するにすぎない。

このように、コンクリート温度に及ぼす  $Q_{\infty}$  および  $r$  の影響は、定性的には前者は  $T_{r,max}$  に影響を及ぼし、後者は  $T_{r,max}$  と  $DAY_{max}$  の両者に影響を及ぼすことが明らかになった。次に、それらの影響の定量的傾向について考察した。

表-5 は、部材寸法 0.75 m および 3.0 m について  $Q_{\infty}$  および  $r$  がそれぞれ  $\pm 10\%$ ,  $\pm 30\%$  変動した場合の  $T_{r,max}$  を示したものである。 $D=0.75$  m の場合、基準値の  $T_{r,max}$  が  $13.8^{\circ}\text{C}$  であるのに対して、2 要因が  $-10\%$  変動した場合の  $T_{r,max}$  は  $11.7^{\circ}\text{C}$  である。すでに考察したように、 $Q_{\infty}$  および  $r$  がそれぞれ  $-10\%$  変動した場合、 $T_{r,max}$  は  $1.4^{\circ}\text{C}$ ,  $0.7^{\circ}\text{C}$  変動する。両者の和  $2.1^{\circ}\text{C}$

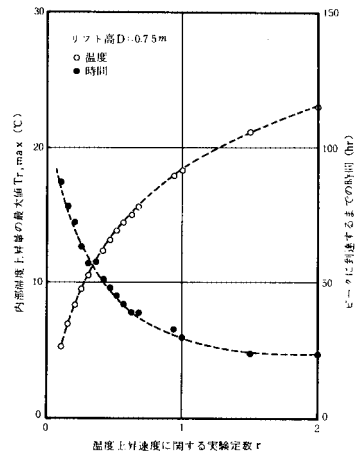


図-8  $T_{r,max}$ ,  $DAY_{max}$  と  $r$  との関係 ( $D=0.75$  m)

を  $11.7^{\circ}\text{C}$  に加えると  $13.8^{\circ}\text{C}$  となり基準値の  $T_{r,max}$  と一致する。また、 $DAY_{max}$  は  $r$  が  $-10\%$  減少した場合、図-8 からわかるように基準値より 6 時間大きくなるので、 $r$  を  $-10\%$  変動させた場合の 48 時間から 6 時間

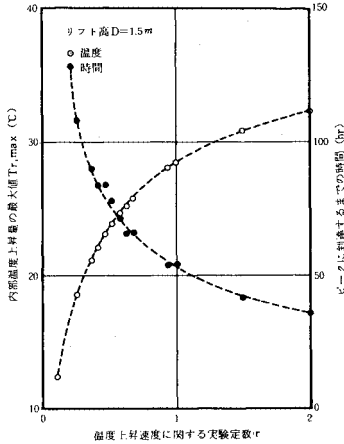


図-9  $T_{r,max}$ ,  $DAY_{max}$  と  $r$  との関係 ( $D=1.5$  m)

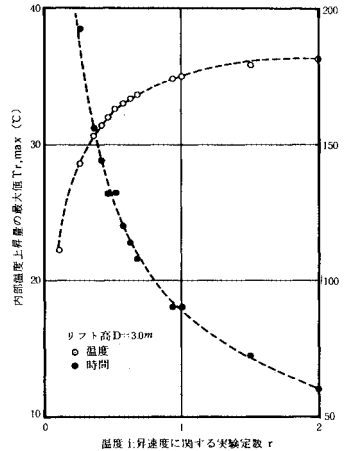


図-10  $T_{r,max}$ ,  $DAY_{max}$  と  $r$  との関係 ( $D=3.0$  m)

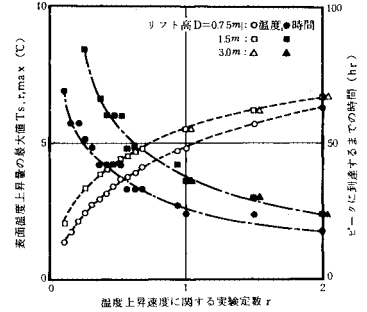


図-11  $T_{s,r,max}$  と  $r$  との関係

表-4 コンクリート温度に及ぼす  $Q_w$ ,  $r$  の影響

要因	リフト高 (m)	基準の内部温度上昇量の最大値 $T_{r,max}$ (°C)	要因が変動した場合の $T_{r,max}$ の変動幅 (%)		
			±10%	±20%	±30%
終局断熱温度上昇量 ( $Q_w$ )	0.75	1.38	(10) ±1.4	(20) ±2.8	(30) ±4.2
	1.50	2.39	(10) ±2.4	(20) ±4.8	(30) ±7.2
	3.00	3.29	(10) ±3.3	(20) ±6.6	(30) ±9.8
温度上昇速度に関する実験定数 $r$	0.75	1.38	(5) ±0.7	(10) ±1.4	(15) ±2.1
	1.50	2.39	(5) ±1.0	(7) ±1.6	(10) ±2.4
	3.00	3.29	(2) ±0.5	(3) ±1.0	(5) ±1.5

注)  $Q_w, r$  の基準値:  $Q_w = 368$ ,  $r = 0.523$   
 ・表中の ( ) 内の値は基準の  $T_{r,max}$  に対する  $T_{r,max}$  の変動の比率 (%)

表-5  $Q_w$  および  $r$  の影響の加法性の検討

リフト高 (m)	定数 $Q_w$ の変動幅	両方の定数が変動した場合の $T_{r,max}$ の変動		基準の $T_{r,max}$ (°C)	⑤ ⑥ $Q_w, r$ の変動を同時に考慮した場合の $T_{r,max}$	差 ⑦ (°C)	⑧ (⑦/⑥) (%)	
		① $Q_w$	② $r$					③ ④
0.75	+10%	+1.14	+0.7	1.38	1.59	1.58	-0.1	0.6
	+30%	+4.2	1.21	1.38	20.1	20.2	0.1	0.5
3.0	+10%	+1.33	+0.5	3.29	36.7	36.3	-0.4	1.1
	+30%	+9.8	+1.15	3.29	216	215	-0.4	0.9

注)  $Q_w, r$  の基準値:  $Q_w = 368$ ,  $r = 0.523$   
 $T_{r,max}$ : 内部断熱1.5m時の最大値

をひくと42時間となり基準値の  $DAY_{max}$  と一致する。部材寸法3.0mの場合にも同様な関係が成り立っている。

以上の結果から、コンクリート温度に及ぼす  $Q_w$  および  $r$  の影響は分離して評価できること、さらにそれぞれの影響は重ね合わせるにより評価できることが明らかになった。本研究で提案するマスコンクリート温度上昇計算法はこの関係を基礎にしたものである。

(2) コンクリートの熱特性

徳田の研究<sup>9)</sup>によれば、通常使用されているコンクリートの比熱  $C$  の範囲は  $0.2 \sim 0.8$  kcal/kg °C (837 ~ 3349 J/kg °C), 熱伝導率  $\lambda$  の範囲は  $0.5 \sim 3.0$  kcal/mh °C (0.582 ~ 3.489 W/m<sup>2</sup>°C) である。また、熱拡散率

$h^2$  の範囲は  $0.0003 \sim 0.0088$  m<sup>2</sup>/h である。このことから、本研究では表-6に示すような水準で数値実験によりコンクリート温度に及ぼす熱特性の影響について検討した<sup>10)</sup>。

図-12は、部材寸法1.5mの場合の  $h^2$  と  $T_{r,max}$  との関係を示したものである。 $T_{r,max}$  は  $h^2$  の増加に伴って双曲線的に減少している。 $h^2$  が小さいほど  $T_{r,max}$  に及ぼす影響は大きくなっており、 $h^2$  が  $50 \times 10^{-4} \sim 60 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/h の範囲ではその影響が1°C程度にすぎないが、 $10 \times 10^{-4} \sim 20 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/h の範囲では約4°Cである。

図-13は、部材寸法1.5mの場合の  $h^2$  と  $T_{s,r,max}$  との関係を示したものである。 $T_{s,r,max}$  とコンクリートの熱特性値との関係は、 $T_{r,max}$  のように  $h^2$  により一義的

表-6 要因および水準

要因	水準
比熱	0.2, 0.4, 0.6, 0.8 (kcal/kg °C)
熱伝導率	0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 (kcal/mh °C)
部材寸法	(m) 0.75, 1.5, 3.0

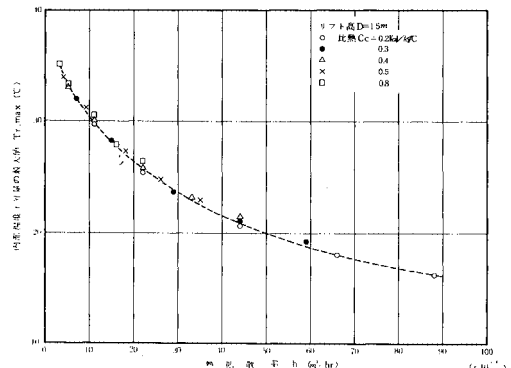


図-12  $h^2$  と  $T_{r,max}$  との関係

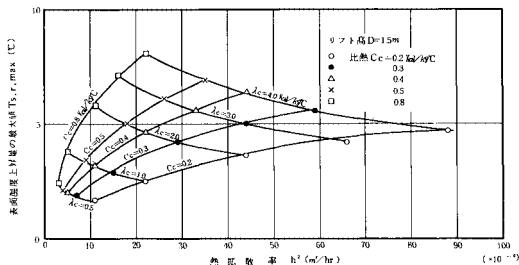


図-13  $h^2$  と  $T_{s,r,max}$  との関係

に關係づけることはできない。図-13からもわかるように、 $h^2$  が一定の場合  $C$  および  $\lambda$  の増加に伴って  $T_{s,r,max}$  は増加することが認められる。また、 $T_{s,r,max}$  は  $h^2$  の増加に伴って放物線的に増加している。一般のマスコンクリートの  $h^2$  の範囲 ( $20 \times 10^{-4} \sim 40 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{h}$ ) において、 $T_{s,r,max}$  に及ぼす  $h^2$  の影響は約  $5^\circ\text{C}$  以内であると考えられる。

(3) 打込み温度

コンクリート温度に及ぼす打込み温度  $T_p$  の影響は、断熱温度上昇特性の影響に置き換えて考えることができる。つまり、 $T_p$  が高くなると  $Q_\infty$  は減少し  $r$  は増加する。したがって、 $T_p$  が高くなると  $Q_\infty$  は減少するので  $T_{r,max}$  は減少する。しかし、 $r$  は増加するので  $T_{r,max}$  は増加する。これらのプラスマイナスが  $T_{r,max}$  に及ぼす影響になる。

表-7は、スラブ状マスコンクリートで測定したコンクリート温度の実測値を統計的方法により解析した結果である。表-7に示した回帰式の妥当性について検討した。 $T_p=20^\circ\text{C}$ 、 $D=0.75\text{ m}$  の場合、表-7の回帰式により  $T_{r,max}=14.4^\circ\text{C}$ 、 $T_{s,r,max}=8.2^\circ\text{C}$ 、 $\text{DAY}_{max}=1.4$  日となる。一方、有限差分法による計算値は図-3および図-6から  $T_{r,max}=13.8^\circ\text{C}$ 、 $T_{s,r,max}=3.6^\circ\text{C}$ 、 $\text{DAY}_{max}=1.9$  日となる。 $T_{r,max}$  はほぼ一致しているが、 $T_{s,r,max}$

表-7  $T_p$  とコンクリート温度に関する特性値との関係

特性値	対象 リフト高(m)	Data 数	相関係数	回帰式
$T_{r,max}$	0.75	64	0.64	$T_{r,max}=0.1887T_p+106$
$T_{s,r,max}$		50	0.35	$T_{s,r,max}=0.1257T_p+57$
$\text{DAY}_{max}$	0.75-D=0.55	64	0.58	$\text{DAY}_{max}=-0.0527T_p+202$
$T_{s,r,max}$		74	0.20	$T_{s,r,max}=0.3347T_p+87$
$\text{DAY}_{max}$	1.0-D=1.15	71	0.82	$\text{DAY}_{max}=0.023T_p+1.81$

表-8 要因および水準

要因	水準
外気温(°C)*	-10, 0, 10, 20, 30
部材寸法(m)	0.75, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0
打込み温度(°C)	10, 20, 30
終局断熱温度上昇量 $Q_\infty$ (°C)	3.51, 3.13, 2.99
実験定数 $r$	0.446, 0.892, 1.338

\* 外気温は絶対値である

および  $\text{DAY}_{max}$  は両者とも幾分差が認められる。 $T_{s,r,max}$  は有限差分法による計算値の熱伝達率が  $\beta=20 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  ( $23.26 \text{ W/m}^2\text{C}$ ) と実測値よりも大きいことを考慮すると両者の差は小さくなると推察される。このように、回帰式の推定精度には検討余地が残されているが、定性的には本式により打込み温度の影響を評価できると考えられる。

表-7に示した結果から、 $T_p$  と  $T_{r,max}$  との間には正の相関関係が認められ、 $T_p$  の増加に伴って  $T_{r,max}$  は増加する。これは  $T_{s,r,max}$  についても同様である。これらのことは、 $T_p$  の増加に伴って  $Q_\infty$  が減少する影響よりも、 $r$  の増加に伴う影響の方が卓越することを示している。 $\text{DAY}_{max}$  は  $T_p$  の増加に伴って小さくなっており、 $r$  の影響が出ていることが認められる。

(4) 外気温

外気温の影響については、数値実験および実測値により検討した。表-8に数値実験で変化させた要因および水準を示す。

図-14は外気温  $T_a$  および  $T_p$  をパラメーターにして、部材寸法と  $T_{r,max}$  との関係を示したものである。外気温が高くなるに従って  $T_{r,max}$  は増加しているが、増加する割合は部材寸法の増加に伴って小さくなっていく。部材寸法が4.0 m程度になると、 $T_{r,max}$  に及ぼす影響はほとんど認められない。

図-15に  $T_a$  と  $T_{s,r,max}$  との関係を示す。 $T_a$  と  $T_{s,r,max}$  との間には正の相関関係が認められ、また両者は直線関係で近似できる。 $T_p$  が低いほど  $T_{s,r,max}$  が大きくなっているのは、 $T_p$  を一定にして  $T_a$  を変化させているために、外気温が高くなるに従って部材内への外部からの熱量の流入が大きくなることに起因している。図-15の結果から、 $T_{s,r,max}$  に及ぼす部材寸法の影響はほとんどないものと考えられる。

次に、実測値によりコンクリート温度に及ぼす  $T_a$  の

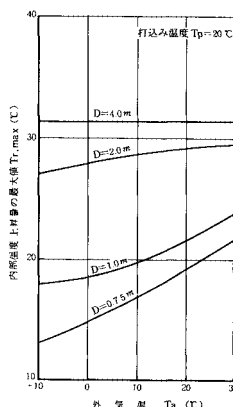


図-14  $T_a$  と  $T_{r,max}$  との関係

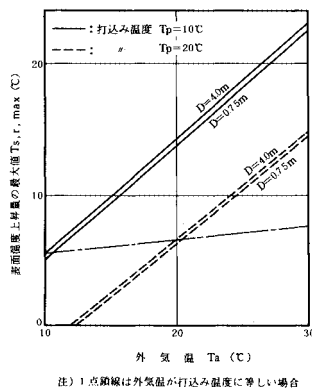


図-15  $T_a$  と  $T_{s,r,max}$  との関係

注) 1点線は外気温が打込み温度に等しい場合

表一〇  $T_a$  とコンクリート温度に関する特性値との関係

特性値	Data 数	相関係数	回 帰 式
$T_{r,max}$	64	0.52	$T_{r,max} = 0.199T_a + 11.10$
$T_{s,r,max}$	58	0.40	$T_{s,r,max} = 0.340T_a + 9.53$
$T_{m,max}$	35	0.97	$T_{m,max} = 1.067T_a + 13.79$
DAYmax	64	-0.50	DAYmax = -0.025T <sub>a</sub> + 1.81(日)

影響について考察した。表一〇に実測値を統計的方法により解析した結果を示す。数値実験の結果でみられたように、 $T_a$ が高くなるに従って  $T_{r,max}$ が増加する傾向が実測値でも認められる。さらに、 $T_{s,r,max}$ についても同様な結果である。

(5) 部材寸法

図一四に示した数値実験の結果から、部材寸法が大きくなるに従って  $T_{r,max}$  は放物線的に増加する傾向が認められる。また、 $T_{s,r,max}$  は図一五から部材寸法の影響をほとんど受けないことがわかる。

表一〇に実測値を統計的方法により解析した結果を示す。数値実験の結果でみられたように、部材寸法と  $T_{r,max}$  との間には正の相関関係が認められる。部材寸法と  $T_{s,r,max}$  との間の相関は小さく、 $T_{s,r,max}$  に及ぼす部材寸法の影響は小さいことが実測値により確認できる。

表一〇 部材寸法とコンクリート温度に関する特性値との関係

試 験 種	コンクリート種類 単位コンクリート量	サ ー シ ー 数	相 関 係 数	回帰式( $T_{r,max}$ 、 $T_{s,r,max}$ )	AD-DI A	B	
内部温度上昇部の 最大値( $T_{r,max}$ )	施工実態調査結果 18.75~18	90	0.83	17.55	1.13		
	240 <sup>+</sup> 280kg/m <sup>3</sup>	10	0.77	9.50	12.60		
	290 <sup>+</sup> 310kg/m <sup>3</sup>	8	0.78	16.5	2.55		
	290 <sup>+</sup> 300kg/m <sup>3</sup>	6	0.80	27.3	1.532		
	320 <sup>+</sup> 330kg/m <sup>3</sup>	15	0.41	6.07	2.540		
	270 <sup>+</sup> 280kg/m <sup>3</sup>	11	0.93	2.833	-2.09		
	FH	14	0.81	1.660	5.06		
	MBF 280 kg/m <sup>3</sup>	33	0.85	1.651	4.80		
	表面温度上昇部の 最大値( $T_{s,r,max}$ )		50	0.15	2.12	6.26	
		内部温度上昇部の 最大値による 期間 (DAYmax)	15 T <sub>p</sub> = 25°C	32	0.72	1.27	0.43
25 T <sub>p</sub> = 35°C			19	0.62	1.78	-0.27	
DAYmax (3日以内)	5 T <sub>p</sub> = 15°C	39	0.49	1.21	0.92		

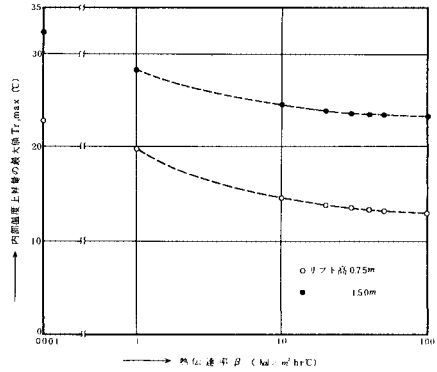
(6) 熱伝達率

表一四に数値実験で変化させた要因および水準を示す。

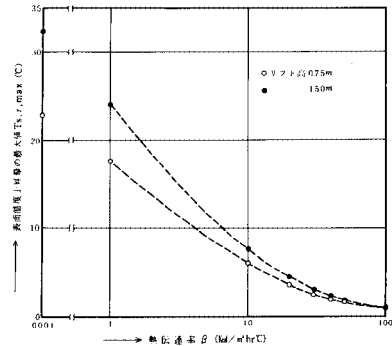
図一六に熱伝達率  $\beta$  と  $T_{r,max}$  との関係を示す。 $\beta$ の増加に伴って  $T_{r,max}$  は双曲線的に減少している。 $\beta$ が約 10 kcal/m<sup>2</sup>h°C (11.63 W/m<sup>2</sup>°C) 以上では、 $T_{r,max}$  が減少する割合は小さく、 $\beta$ が 10 (11.63 W/m<sup>2</sup>h) から

表一四 要因および水準

要 因	水 準
熱伝達率 $\beta$ kcal/m <sup>2</sup> h°C (W/m <sup>2</sup> °C)	0.001, 1, 10, 20 30, 40, 50, 100, 1000 (0.001, 1.163, 11.63, 23.26 34.89, 46.52, 58.15, 116.3, 1163)
部材寸法 D (m)	0.75, 1.5



図一六  $\beta$  と  $T_{r,max}$  との関係



図一七  $\beta$  と  $T_{s,r,max}$  との関係

1 000 kcal/m<sup>2</sup>h°C (1 163 W/m<sup>2</sup>°C) 変化しても  $T_{r,max}$  は約 2°C 変化しているにすぎない。このことから、 $\beta$ がある値以上では  $T_{r,max}$  に及ぼす  $\beta$  の影響は無視できると考えられる。また、一般のマスコンクリートで考えられる  $\beta = 5 \sim 30$  kcal/m<sup>2</sup>h°C (5.815 ~ 34.89 W/m<sup>2</sup>°C) の範囲においては、 $T_{r,max}$  は 2 ~ 3°C 変動している。

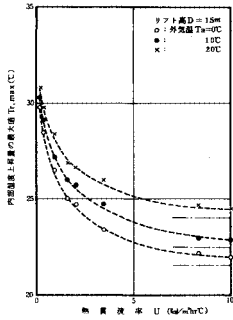
図一七に  $\beta$  と  $T_{s,r,max}$  との関係を示す。 $\beta$ の増加に伴って  $T_{s,r,max}$  は 0°C に漸近しており、 $\beta = 1000$  kcal/m<sup>2</sup>h°C (1 163 W/m<sup>2</sup>°C) ではほぼ 0°C になっている。 $T_{s,r,max}$  に及ぼす  $\beta$  の影響は大きく、通常の  $\beta$  の範囲 5 ~ 30 kcal/m<sup>2</sup>h°C (5.815 ~ 34.89 W/m<sup>2</sup>°C) において  $T_{s,r,max}$  は約 10°C 変動している。

(7) 養生<sup>12)</sup>

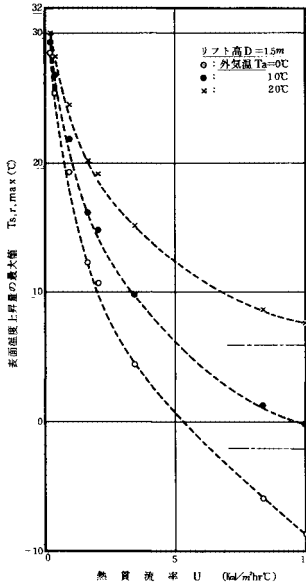
コンクリート温度に及ぼす養生の影響は、部材表面の熱貫流率  $U$  の影響として、数値実験により検討した。表一四に数値実験で変化させた要因および水準を示す。

表—12 要因および水準

要 因	水 準
熱 貫 流 率 $U$ kcal/㎡hr C (W/㎡C)	0.20, 0.38, 0.94, 1.67 2.04, 3.45, 8.33, 10.0 (2.373, 4.012, 9.688, 11.63)
部材寸法 $D$ (m)	0.75, 1.5, 3.0
外気温 $T_a$ (°C)	0, 10, 20
打込み温度 $T_p$ (°C)	20



図—18  $U$  と  $T_{r,max}$  との関係



図—19  $U$  と  $T_{s,r,max}$  との関係

図—18 に部材寸法 1.5 m の場合の  $U$  と  $T_{r,max}$  との関係を示す。  $U$  の増加に伴って  $T_{r,max}$  は双曲線的に減少しており、減少する割合は外気温が低いほど大きくなっている。さらに、  $T_{r,max}$  が減少する割合は、部材寸法が大きいほど小さくなっている。部材寸法が 3 m 程度になると  $T_{r,max}$  に及ぼす  $U$  の影響はほぼなくなる。

図—19 に  $U$  と  $T_{s,r,max}$  との関係を示す。  $U$  の増加に伴って  $T_{s,r,max}$  は双曲線的に減少している。  $U$  を一定とした場合、  $T_a$  が高くなるに従って  $T_{s,r,max}$  は比例的に増

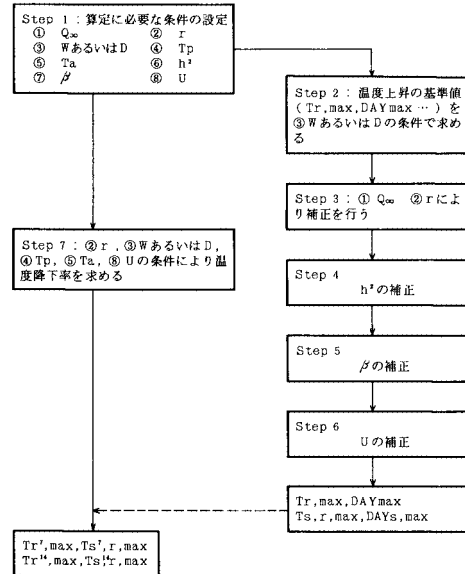
加する傾向が認められる。また、この増加する割合は  $U$  が減少するほど小さくなっており、  $U$  が小さくなるほど部材表面は断熱的な状態になるため  $T_a$  の影響を受けなくなることが認められる。

### 3. マスコンクリート温度簡易計算法の提案

#### (1) 計 算 法

マスコンクリートの温度ひびわれ制御について検討する場合、コンクリート温度に関して次のような特性値が必要と考えられる。特性値は、内部温度上昇量の最大値  $T_{r,max}$ 、  $T_{r,max}$  の生ずる材令  $DAY_{max}$ 、表面温度上昇量の最大値  $T_{s,r,max}$ 、  $T_{s,r,max}$  の生ずる材令  $DAY_{s,max}$ 、材令 7 日あるいは 14 日における  $T_{r,max}$  および  $T_{s,r,max}$  などである。これらの特性値をその都度、有限要素法などにより解析すればよいのであるが、汎用性あるいは経済性などを考慮すると合理性に欠ける。このようなことから、簡易計算により精度の高い結果を得ることができれば実用的に有意義であると考えられる。柳田、ACI、野尻らの提案している方法はこの考え方に沿ったものではある。

著者は、前述したようにコンクリート温度に及ぼす各種要因の影響を数値実験および実測値により明らかにした。また、コンクリート温度と断熱温度上昇特性との間



$Q_{\infty}$ : 終局断熱温度上昇量 (°C)	$T_{r,max}$ : 内部温度上昇量の最大値 (°C)
$r$ : 温度上昇速度に関する実験定数	$T_{s,r,max}$ : 表面温度上昇量の最大値 (°C)
$W, D$ : 壁厚, リフト高 (m)	$DAY_{max}$ : $T_{r,max}$ を示した材令 (hr)
$T_p$ : 打込み温度 (°C)	$DAY_{s,max}$ : $T_{s,r,max}$ を示した材令 (hr)
$T_a$ : 外気温 (°C)	$T_{r,max}^7$ : 材令 7 日の内部温度上昇量の最大値 (°C)
$h'$ : 熱拡散率 (㎡/hr)	$T_{r,max}^{14}$ : 材令 14 日の内部温度上昇量の最大値 (°C)
$\beta$ : 熱伝達率 (kcal/㎡hr°C)	$T_{s,r,max}^7$ : 材令 7 日の表面温度上昇量の最大値 (°C)
$U$ : 熱貫流率 (kcal/㎡hr°C)	$T_{s,r,max}^{14}$ : 材令 14 日の表面温度上昇量の最大値 (°C)

図—20 簡易計算法のフロー





W/m<sup>2</sup>C) 小さいので、それに相当する差分1.3°Cを基準値の  $T_{r,max}$  に加える。このようにして、順次各要因の基準値との差を重ね合わせて補正し、与条件に対する  $T_{r,max}$  などを計算することができる。

(2) 実測値による適合性の検討

実構造物における実測値により、提案した簡易計算法の適合性について検討した。表-13に実測値および計算条件を示す。

表-14に提案した方法によるマスコンクリート温度

表-14 提案した方法によるコンクリート温度計算結果

実測現場の 名称	有 限 差 分 法															
	$T_{r,max}$ (°C)		DAYmax (hr)		$T_{s,r,max}$ (°C)		DAYs,max(hr)		$T_{r,max}^I$ (°C)		$T_{s,r,max}^I$ (°C)					
	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値				
A	300	100	84	168	73	209	33	079	234	102	83	545	133	114	43	239
B	248	102	73	203	73	048	29	121	237	107	39	100	125	078	1.8	086
C	380	101	158	132	230	174	100	118	357	096	159	187	270	081	101	297
D	342	105	121	168	58	055	48	040	322	099	33	072	232	087	20	077
E	204	097	39	115	112	086	37	168	49	046	/	/	/	/	/	/
計算値の平均値	301		157		114		105		090		226		090		175	
不偏分散の平方根	0.03		0.34		0.73		0.48		0.25		218		0.16		110	
実験係数	0.03		0.22		0.64		0.46		0.28		0.96		0.18		0.63	

の計算結果を示す。この結果から、 $T_{r,max}$ 、 $T_{r,max}^I$ 、 $T_{s,r,max}^I$ の計算値と実測値とはよく一致していることが認められる。実測値に対する計算値の比率の平均値は、それぞれ1.01、0.90および0.90である。

(3) 各種計算法との比較

提案した方法と各種計算法との比較検討を行った。比較した計算法は、有限差分法、有限要素法、柳田の方法およびACIの方法である。

表-15に比較検討結果を示す。有限差分法による

$T_{r,max}$ 、 $T_{r,max}^I$ 、 $T_{s,r,max}^I$ の計算値/実測値は、それぞれ1.01、1.13および1.05である。有限要素法では、0.96、0.92および1.02である。また、計算値/実測値の変動係数は5~25%であり、提案した方法とはほぼ同じである。特に、 $T_{r,max}$ は提案した方法、有限差分法および有限要素法の各方法ともほぼ一致した結果を与えているが、提案した方法による計算値は他の2つの方法よりも変動係数が小さくなっている。以上のように、提案した方法は有限差分法や有限要素法などの高度な解析方法とほぼ同程度の結果を与えることが確認された。

次に、簡易法である柳田の方法、ACIの方

表-15 各種計算法によるコンクリート温度計算結果

実測現場の 名称	有 限 差 分 法												柳 田					
	$T_{r,max}$ (°C)		DAYmax (hr)		$T_{s,r,max}$ (°C)		DAYs,max(hr)		$T_{r,max}^I$ (°C)		$T_{s,r,max}^I$ (°C)		$T_{r,max}^I$ (°C)		$T_{s,r,max}^I$ (°C)			
	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値		
A	289	0.96	90	180	87	249	48	100	257	112	32	260	160	1.36	-25	0.81	36.4	1.21
B	34.3	1.01	66	183	5.2	0.34	42	1.75	2.44	1.10	1.7	0.44	114	0.71	-1.2	1.57	40.1	1.18
C	36.2	0.97	156	130	18.2	1.38	138	1.60	36.1	0.97	17.0	2.00	329	0.99	0.8	0.24	49.3	1.31
D	38.4	1.11	84	117	90	0.85	69	0.58	35.4	1.09	1.5	0.33	300	1.13	-1.3	1.50	45.3	1.31
E	21.0	1.00	36	106	144	1.11	30	1.36	14.6	1.36	/	/	/	/	/	/	19.2	0.91
計算値の平均値		1.01		1.43		1.23		1.26		1.13		1.34		1.05		1.03		1.18
不偏分散の平方根		0.06		0.36		0.80		0.47		0.14		1.13		0.27		0.63		0.16
実験係数		0.06		0.25		0.65		0.37		0.12		0.84		0.25		0.61		0.14

実測現場の 名称	有 限 要 素 法												A C I							
	$T_{r,max}$ (°C)		DAYmax (hr)		$T_{s,r,max}$ (°C)		DAYs,max(hr)		$T_{r,max}^I$ (°C)		$T_{s,r,max}^I$ (°C)		$T_{r,max}$ (°C)		DAYmax (hr)					
	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値				
A	27.4	0.91	96	192	78	223	48	100	24.3	1.06	3.9	295	16.1	1.36	-1.0	0.32	17.5	0.58	86	1.72
B	33.6	0.99	72	200	88	0.58	24	1.00	25.1	1.14	3.0	0.77	14.3	0.89	0.9	0.43	20.6	0.60	76	2.11
C	35.0	0.93	144	120	24.2	1.83	84	0.98	34.8	0.94	21.9	25.8	31.8	0.96	16.3	4.79	28.1	0.75	134	1.12
D	31.2	0.90	72	100	55	0.52	24	0.20	28.3	0.87	-4.1	1.89	22.9	0.86	-4.7	2.81	31.0	0.90	86	1.19
E	22.2	1.06	48	141	144	1.11	24	1.09	6.1	0.57	/	/	/	/	/	/	15.6	0.74	24	0.71
計算値の平均値		0.96		1.51		1.25		0.85		0.92		2.05		1.02		2.09		0.71		1.37
不偏分散の平方根		0.07		0.44		0.76		0.37		0.22		0.96		0.23		2.14		0.13		0.55
実験係数		0.07		0.29		0.61		0.44		0.24		0.47		0.23		1.02		0.18		0.40

法と比較検討した。これらの方法による計算結果を表—15に示す。この結果から、柳田の方法は過大な結果を、またACIの方法は過小な結果を与えることがわかった。両者の $T_{r,max}$ の計算値/実測値の変動係数は、それぞれ14%、18%であり、著者の提案した方法の4~6倍である。このように、提案した方法は従来の簡易法に比べて高い精度のマスコンクリート温度を与えることが確認された。統計的方法により平均値 $\bar{x}$ に関する検定を行った。この結果、提案した方法と有限差分法、有限要素法との間には有意差が認められず、柳田の方法、ACIの方法との間には有意水準1%で有意差が認められた。

以上の結果から、著者の提案する方法は有限差分法、有限要素法と同程度の精度でマスコンクリート温度を計算できることが明らかになった。

#### 4. ま と め

本研究は、数値実験および実測値により、マスコンクリート温度に及ぼす各種要因の影響について調べ、さらにこれらの結果に基づいてマスコンクリート温度の簡易計算法を提案したものである。得られたおもな成果を列挙すれば、次のとおりである。

(1) 終局断熱温度上昇量 $Q_{\infty}$ と打込み温度からの温度上昇量の最大値 $T_{r,max}$ の間には高い正の相関関係が存在し、 $Q_{\infty}$ の増加に伴って $T_{r,max}$ は直線的に増加する。また、 $Q_{\infty}$ は $T_{r,max}$ に達するまでの時間 $DAY_{max}$ にはほとんど影響を及ぼさない。

(2) 温度上昇速度に関する実験定数 $r$ の増加に伴って $T_{r,max}$ は双曲線的に増加し、 $DAY_{max}$ は双曲線的に減少する。

(3) コンクリート温度に及ぼす $Q_{\infty}$ および $r$ の影響は分離して評価することができる。さらに、両者の影響は、個々の影響を重ね合わせるにより評価できる。

(4) 通常のコングリートの熱拡散率 $h^2$ の範囲において、 $T_{r,max}$ に及ぼす $h^2$ の影響は約3°C以内である。また、打込み温度からの表面温度上昇量の最大値 $T_{s,r,max}$ に及ぼす影響は約5°C以内である。

(5) 外気温が高くなるに従って $T_{r,max}$ は増加するが、増加する割合は部材寸法の増加に伴って小さくなる。

(6) 外気温と $T_{s,r,max}$ は直線関係で近似でき、外気温が高くなるに従って $T_{s,r,max}$ は大きくなる。

(7) 部材寸法が大きくなるに従って $T_{r,max}$ は放物

線的に増加するが、 $T_{s,r,max}$ に及ぼす部材寸法の影響は小さい。

(8) 通常の熱伝達率の範囲では、 $T_{r,max}$ は2~3°C変動し、 $T_{s,r,max}$ は約10°C変動する。

(9) 熱貫流率の増加に伴って $T_{r,max}$ および $T_{s,r,max}$ は双曲線的に減少する。

(10) 断熱温度上昇特性の加法性をもとした著者の提案するマスコンクリート温度の簡易計算法は、有限要素法などと同程度の精度でマスコンクリート温度を推定することができる。

最後に、本研究を行うにあたり、北海道大学工学部藤田嘉夫教授から貴重な助言とご指導を受けたことに感謝致します。

#### 参 考 文 献

- 1) Boulder Canyon Project Final Report : Cooling of Concrete Dam, Denver, Colorado, 1949.
- 2) たとえば、田辺忠顕・原口 晃・阿部博俊：黒田ダム嵩上げ工事におけるコンクリート打設計画の検討(その2)、電力中央研究所報告、昭和51年8月。
- 3) ACI 207 Committee : Effect of Restraint Volume Change and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, ACI, July 1973.
- 4) 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, 1969.
- 5) 野尻陽一：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、Vol.5, No.8, 1967.
- 6) 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、1974.
- 7) 小野 定：マスコンクリートの温度上昇に及ぼすコンクリートの断熱温度上昇特性の影響、土木学会第6回関東支部研究発表会、1979-1.
- 8) 小野 定：マスコンクリート打込み後の温度上昇に関する二、三の考察、コンクリート工学、Vol.15, No.1, Jan. 1977.
- 9) 徳田 弘・庄谷征美：コンクリートの熱特性値の測定と二、三の考察、土木学会論文報告集第212号、1973-4.
- 10) 小野 定：マスコンクリートの温度上昇に及ぼすコンクリートの比熱、熱伝導率の影響、土木学会第5回関東支部研究発表会、1978-1.
- 11) 小野 定：マスコンクリートの温度上昇に及ぼす外気温の影響、土木学会第33回年次学術講演会、1978-9.
- 12) 小野 定：マスコンクリートの温度上昇に及ぼす養生方法の影響について、土木学会第32回年次学術講演会、1977-10.

(1983.12.26・受付)