

道路橋脚マスコンクリートのフーチング温度測定

齋藤 二郎
田中 辰明

概要

最近大容量のコンクリートが打設されることが多く、コンクリート硬化時の水和熱によるひび割れが問題となっている。首都高速道路公団発注により建設された、隅田川や多摩川の水中の巨大な橋脚基礎は、コンクリート内に配管を行ない、河川の水を流すことにより水和熱の発散を促した。これらフーチングの温度分布変化の測定を行なうと同時に、アナログ電子計算機によりコンクリート硬化時の温度分布変化を求めた。

1. はじめに

最近の土木や建築構造物でマスコンクリートがしばしば打設されるようになった。橋脚の基礎などでは、従来からマスコンクリートが打たれていたダムとは違って、セメント量も多いことから、コンクリート硬化時の水和熱により、温度応力が起こり、亀裂の原因となることが問題となっている。コンクリートは温度の変化により、膨張または、収縮するが、この自由膨張または収縮が何らかの原因によって妨げられると、コンクリートは自然の状態からその妨げられた変形量だけ引張り、または圧縮のひずみを受けることになるから、それに応じた応力を内部に発生する。コンクリート硬化時の、ヤング率の変化、熱膨張係数の変化など未知のことがらも多く、現時点で、マスコンクリートの温度応力の実態を明確にすることはできないが、硬化時の温度分布変化を知ることはきわめて重要なことである。筆者らは首都高速道路公団発注による、多摩川や隅田川の水中に建設された、マスコンクリートの橋脚基礎温度分布変化を、通算4回測定し、一方では計算により温度分布変化を求め、一連の研究を行ってきた。今回は温度測定記録と、マスコンクリート硬化時の温度分布変化計算法、および計算結果について報告する。

2. マスコンクリート温度分布変化の計算

2.1. 計算にあたっての考え方

マスコンクリートの図-1にみるようなX方向に分布する温度変化を知ること考える。実際の場合は冷却パイプが、ある間隔で入れられるので、パイプが2

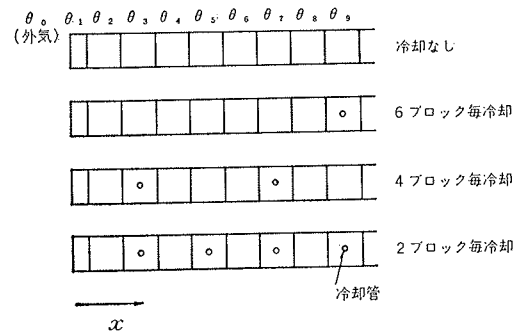


図-1 コンクリートの分割

ブロック間隔、4ブロック間隔、6ブロック間隔に入れられた場合、および全く冷却パイプの無い場合についての方程式を立てた。

2.2. 方程式

各ブロックについて次の方程式が成立する。

$$Q \frac{\partial \theta}{\partial t} + \lambda S \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = H - \alpha_w R (\theta - \theta_w) \dots (1)$$

ただし

Q コンクリート熱容量

H コンクリート水和熱量

$\alpha_w R (\theta - \theta_w)$ 冷却パイプによる除去熱量

しかしこのままでは解けないので、xに関しては、25cm 角に分割し、階差的に置き換えて解いた。

$$Q_i \frac{d\theta_i}{dt} + \frac{\lambda S}{\delta} (\theta_i - \theta_{i-1}) + \frac{\lambda S}{\delta} (\theta_i - \theta_{i+1}) = H - \alpha_w R (\theta_i - \theta_w) \dots (2)$$

ただし表面層のブロックのみは

$$\frac{1}{2} Q_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \alpha_0 S (\theta_1 - \theta_0) + \frac{\lambda S}{\delta} (\theta_1 - \theta_2) = \frac{H}{2} \dots (3)$$

ここで

- λ コンクリートの熱伝導率 (kcal/m·h·deg)
- S ブロックの断面積 (0.25m×0.25m)
- δ ブロック中心間の距離 (0.25m)
- α_w 水と冷却管の熱伝達率 (kcal/m²·h·deg)
- R ブロック内での冷却管外表面積 (m²)
- α₀ ブロック表面と空気 (外気) の熱伝達率 (kcal/m²·h·deg)

α_w 冷却水温 (°C)

これらのうち冷却しないブロックでは α_w=0 となる。Q, H, λS などは打設されるコンクリートの種類によって異なる。α_w は冷却水の水速, 打設の季節によって異なる。θ₀ は図-1にみるように外気温度であるから季節, 時刻によって変動する。(3)式は表面層に関する平衡式であるから, 表面に日射熱などふく射熱があたっている時は右辺にそれを加えなければいけない。ダムなどで表面が, 昼間は日射熱を受け, 夜間は大気ふく射により放熱している時などは, このふく射量も影響するが, 今回は橋脚基礎の計算ということで日射もあたらなことから, これを無視した。

2.3. コンクリートの熱的性質

計算式を解くのに, コンクリート硬化時の水和熱温度上昇, 比熱, 比重, 熱伝導率などを知らなければならない。この試験を小野田セメント中央研究所に依頼し, 筆者らと共同で試験を行なった。比較のため, 川砂利,

配合記号	骨材種類		単位セメント量 C+F (kg)	水セメント量 w/c+f (%)	細骨材率 S/a (%)	練りとりコンクリト容量 ρ (kg/m ³)
	粗骨材	細骨材				
N C	川砂利	川砂	320	50	40	2410
MCF	メサライト	メサライト	288+32	50	43	1600

表-1 コンクリート配合表(スランブの範囲) 8~10cm)

川砂コンクリート(NC)と, メサライト・フライアッシュ入りコンクリート(MCF)について試験を行なった。試験に使用したコンクリートの配合を表-1に示す。

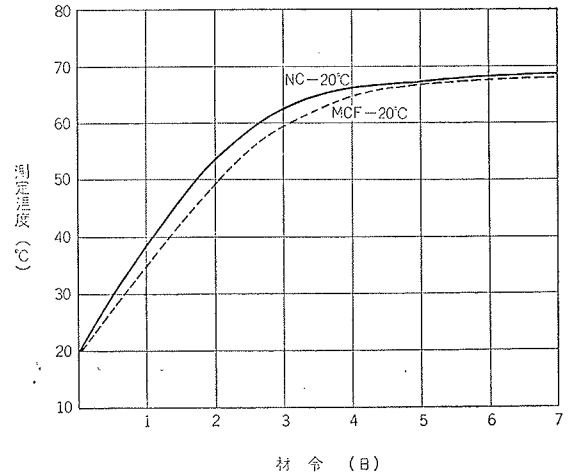


図-2 断熱温度上昇曲線

2.3.1. 断熱温度上昇試験 断熱温度上昇試験は, いわゆる土研式の測定装置を使った。試験の結果を図-2に示す。

2.3.2. コンクリートの熱特性試験 熱伝導率, 比熱, 比重は本来コンクリートの硬化と共に変化してい

配合記号	比熱 C (Kcal/kg°C)	温度伝播率 h ² (m ² /H)	熱伝導率 λ (Kcal/m·h·deg)	コンクリートの比重 ρ (kg/m ³)
N C	0.244	0.00356	2.15	2,410
MCF	0.346	0.00134	0.730	1,600

表-2 熱特性試験結果

くものであるが, これを測定するのは現在のところ不可能で, 材令14日の場合について試験を行なった。3

材令		0 ~ 7.5																
		0~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	3.0~3.5	3.5~4.0	4.0~4.5	4.5~5.0	5.0~5.5	5.5~6.0	6.0~6.5	6.5~7.0	7.0~7.5		
N C	1m×1m×1m (1m ³)	H/12h	6125	5275	4750	4150	3100	2100	1500	900	400	300	200	200	100	100	0	
		H/h	510	440	396	346	259	175	125	75	33.4	25.0	16.7	16.7	8.4	8.4	0	
	0.25m×0.25m×0.25m (0.0156m ³)	H/12h	95.5	82.5	74.2	64.7	48.3	32.8	23.4	14.0	6.25	4.68	3.12	3.12	1.56	1.56	0	
		H/h	7.97	6.89	6.18	5.40	4.03	2.74	1.95	1.17	0.52	0.39	0.26	0.26	0.13	0.13	0	
M C F	1m×1m×1m (1m ³)	H/12h	3320	4750	4325	3700	3250	2250	1600	1400	600	500	200	100	100	100	0	
		H/h	277	396	361	309	271	188	133	117	50	41.7	16.7	8.4	8.4	8.4	0	
	0.25m×0.25m×0.25m (0.0156m ³)	H/12h	51.8	74.2	67.5	57.7	50.7	35.1	23.0	21.8	9.4	7.8	3.12	1.56	1.56	1.56	0	
		H/h	4.32	6.20	5.63	4.81	4.23	2.93	2.08	1.82	0.78	0.65	0.26	0.13	0.13	0.13	0	

表-3 水和発生熱量 (kcal)

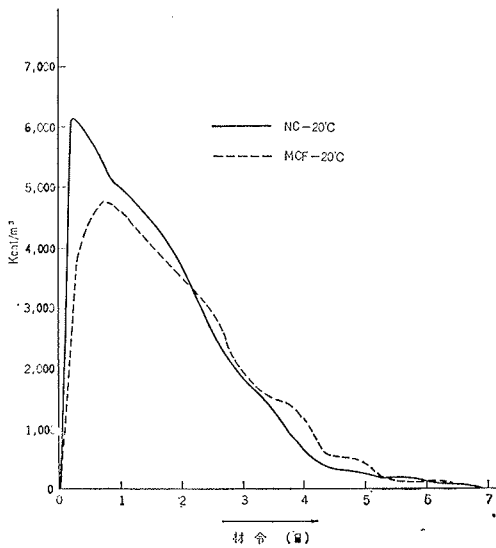


図-3 水和発熱量

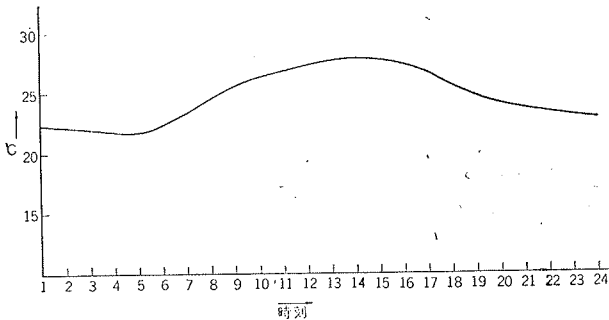


図-4 7月の毎時刻の平均温度(東京)

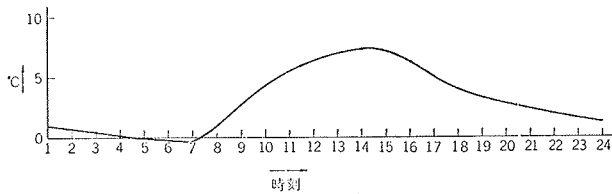


図-5 1月の毎時刻の平均温度(東京)

回の試験結果の平均を表-2に示す。

2.3.3. 計算に用いた値の決定 以上の試験結果からコンクリートの熱容量Qは、比熱Cと比重ρの積で求まる。水和発熱量Hは、断熱温度上昇試験の結果から、単位時間当りの温度上昇の割合に、そのコンクリートの熱容量を乗ずることによって求まる。1m³当りの発熱量を図-3に示す。断熱温度上昇試験で、最高値に達した7日目では、水和発熱がなくなったことを示し、図-3ではこの時水和発熱量Hが0となる。計算に便利のように図-3を数値になおし、表-3に示す。

外気温度θ₀は空調設備設計用に用いられる東京の設計外気温度を用いた。図-4、図-5に夏季、冬季の設計外気温度を示す。水温θ_wは冷却管の入口と出口の平均を考え、河川の平均水温から、冬季10°C、夏季25°Cと仮定した。

水と冷却管の熱伝達率α_wは次式により求まる。管

内の発達した乱流熱伝達で水の熱伝達率(注文献1)は、

$$\alpha_w = (2.20 + 0.03t_b) \times 10^4 M^{0.8} / d^{0.2} \dots\dots\dots (4)$$

ここに

t_b; °C 平均水温

d; m 管の内径

M; kgh/m³ 単位時間、単位面積当り質量流量

$$M = G/g = \rho_w = \gamma/g \cdot w$$

G; kg/m²·h 単位時間、単位断面積当り重量流量

$$G = \gamma_w$$

g; m/h² 重力加速度 g=1.27×10⁸

ρ; kg·h²/m⁴ ρ=γ/g

w; m/h 管内平均流速

γ; kg/m³ 流体比重

(4)式を計算すると、冬季に平均水温10°Cの時に、25Aの冷却管に2m/s, 1m/s, で水を流した時のα_wはそれぞれ次のようになる。

$$\alpha_w = 5120 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg} \quad (\text{流速} 2\text{m/s})$$

$$\alpha_w = 2970 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg} \quad (\text{流速} 1\text{m/s})$$

同様に夏季に平均水温25°Cで流したとすると、熱伝達率はそれぞれ次のようになる。

$$\alpha_w = 6050 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg} \quad (\text{流速} 2\text{m/s})$$

$$\alpha_w = 3500 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg} \quad (\text{流速} 1\text{m/s})$$

ブロック内での冷却管外表面積Rは、冷却管がいずれも25Aのガス管を使うとしていることから、この管の外径は34mmであり、単位ブロックを25cmとすればR=0.0268m²となる。

2.4. 計算結果について

夏に普通コンクリート(NC)を打設して2ブロック間隔、すなわち50cmピッチで冷却管を入れ、1m/sで冷却した場合の温度分布変化を図-6に示す。コンクリートの打設温度は25°Cで、冷却の平均水温は、25°Cである。したがって、θ₃, θ₅, θ₇など、冷却管の入っている点の温度は水温をそのまま示している。この点を拡大してみると若干の温度上昇がみられるが、図-6のスケールでは問題とならない。θ₁は表面層ブロックの温度であるから、図-4に示した外気温度の影響を受けて変動している。NCで2ブロック毎、1m/sで冷却した場合は打設後2日目でピークが現われ、33°Cまでしか上昇しないことを示している。一方打設後8日目で発熱は全て除去され、打ち込み温度に戻っている。図-7~図-8に同じNCで1m/sで冷却した4ブロック毎(1mピッチ)、6ブロック毎(1.5mピッチ)についての温度分布を示す。冷却管が少なくなるにしたがい、ピークの温度もあがり、打設温度に戻る時間も長くなっている。同様に図-9~図-11にMCFの夏に打設した場合、2ブロック、4ブロック、6プロ

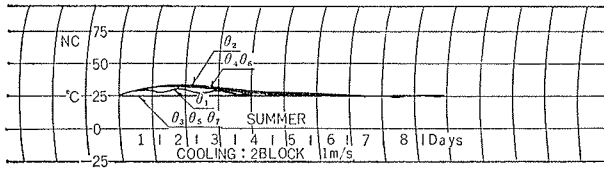


図-6 (50 cm 毎冷却)

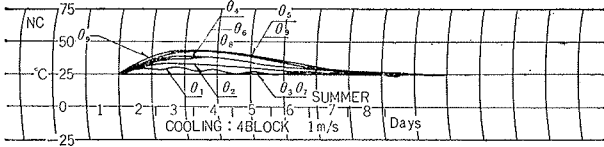


図-7 (1 m 毎冷却)

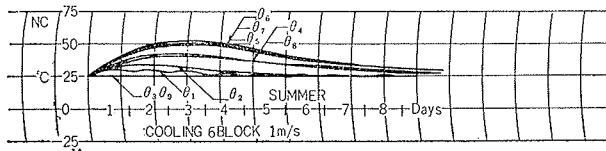


図-8 (1.5 m 毎冷却)

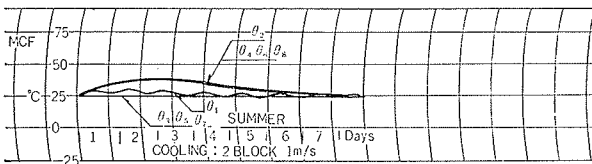


図-9 (50 cm 毎冷却)

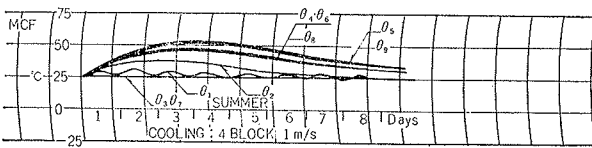


図-10 (1 m 毎冷却)

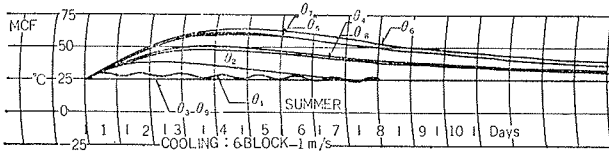


図-11 (1.5 m 毎冷却)

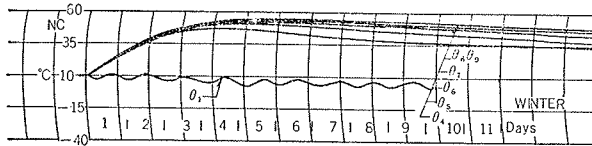


図-12 (冷却なし)

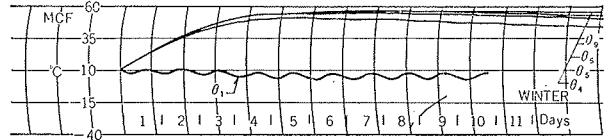


図-13 (冷却なし)

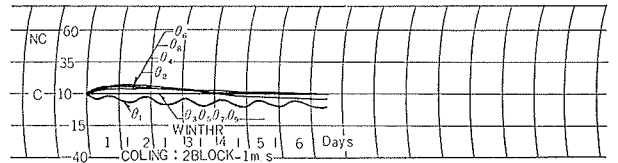


図-14 (50 cm 毎冷却)

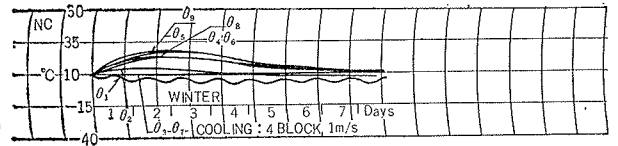


図-15 (1 m 毎冷却)

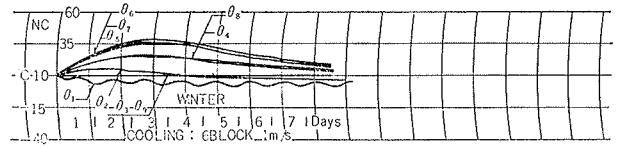


図-16 (1.5 m 毎冷却)

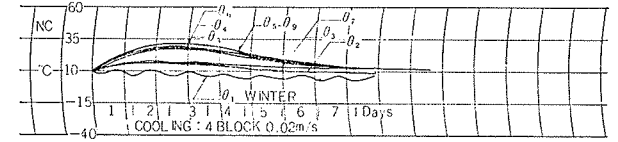


図-17 (1 m 毎冷却)

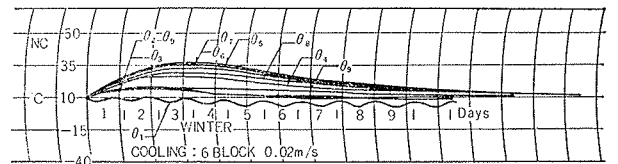


図-18 (1.5 m 毎冷却)

ック毎に冷却した例を示す。コンクリートの種類が NC から MCF に変わった例であるが、断熱温度上昇試験では NC の方が高くまで上昇しているにもかか

わらず、冷却を行なった場合はピークも MCF の方が高く、打設温度に戻るのにも多くの時間を費やしている。これは表-2に示したように温度伝播率が NC と MCF では 2 倍近く異なっているためである。結局 MCF の方が温度伝播率が小さく、発熱の発散が遅いことを示している。図-12、図-13は、それぞれ冷却を行なわず、冬季に外気温によってのみ自然冷却されていく例で、内部の方では断熱温度上昇試験と似た結果になり NC の方が MCF より高くなっている。冬季に 10°C で NC を打設し、平均水温 10°C、1m/s で冷却

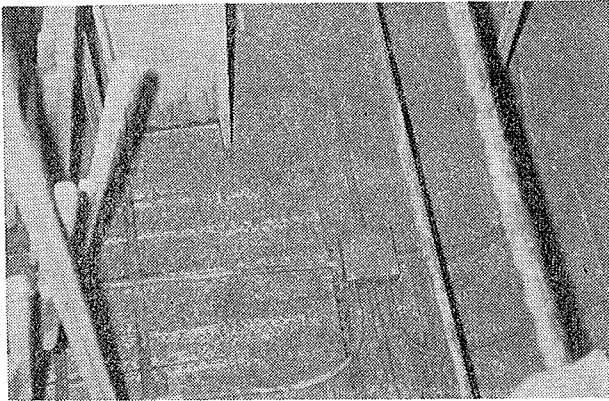
を行なった例を図一14～図一16に示す。夏季に比べ打設温度が低いので、そのままピーク値も低く出ている。

さて流速を変え 2m/s とした例についても解いたが、流速 1m/s で既に十分に速く、2m/s でも 1m/s でも各点の温度分布変化に変わりがなかった。流速を極端に遅くし 0.02m/s で冬季 NC を 4ブロック毎、6ブロック毎に冷却した例を図一17、図一18に示す。流速が遅いため 1m/s の例では水温上昇のみられなかった、冷却水自体にも温度上昇がみられた。それと同時に他の点でも打設温度に戻るまでに、流速の低下により長時間を費やしている。

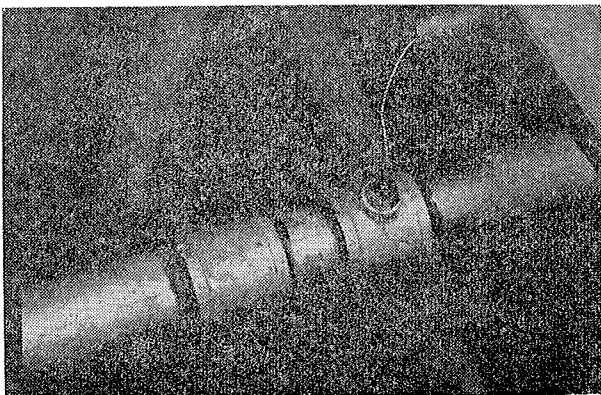
3. マスコンクリート温度分布変化の現場測定

3.1. 現場での測定方法

首都高速道路公団発注による、橋脚フーチングの温度測定を行なってきたが、いずれも銅コンスタントンの熱電対を使用、横河電機製電子管式指示記録計により電位差を記録し、温度に換算した。電子管式指示記録計は12打点式で、測定点の方が常に多かったため、タイマーにより自動的に切り換わる切り換えスイッチを日本電技(株)に試作させ使用した。電位差と温度の換算に先立ち大林組技術研究所において標準温度計を用い較正が行なわれた。フーチング内の熱電対はコ



図一19 コンジットパイプによる熱電対の配線



図一20 冷却水温の検出

ンクリート打設の際、切断されないように、コンジットパイプの中に通し保護した。冷却水が除去した熱量は冷却水出入口の温度を測定し、流量を乗ずることにより求めた。冷却水温は冷却水出入口のプラグより熱電対を挿入し測定した。熱電対配線の様子を図一19、図一20に示す。

3.2. 寒い時期に打たれたマスコンクリート

首都高速道路6号線618工区高架橋下部P21は底面で36m×16m、高さが4mという巨大なもので、コンクリート硬化の際、温度応力が生じそれがコンクリートに亀裂など悪影響を及ぼす恐れが生じた。このため下面より1.8mまでを昭和43年3月24日～3月25日に、その上を4月14日～15日の2回に分けて打ち水和熱の発散を促した。一方水和熱を少しでも除去するために、下端より50cmの所から上方向、横方向共1mピッチで25Aの黒ガス管をリバースリターン方式により配管し隅田川の水を流し冷却を行なった。冷却管のヘッダーを図一21に示す。温度測定のための熱電対埋込位置を図一22に、冷却配管の様子を図一23に示す。ここで使用されたコンクリートは次のようなものであった。

セメント	小野田普通ポルトランドセメント
砂	メサライト(骨材最大寸法15mm)
砂	メサライト砂
混和剤	常盤フライアッシュ
	ポゾリス No. 8 (分散剤)
	リタルル (凝結遅延剤)

設計基準強度 210kg/cm²

スランプ 7 cm

空気量 5～6.5%

水セメント比 50% (重量比)

細骨材率 S/A 43.0%

コンクリート1m³ に用いた材料

セメント 293kg F_A=33kg

水 163kg



図一21 冷却管ヘッダー

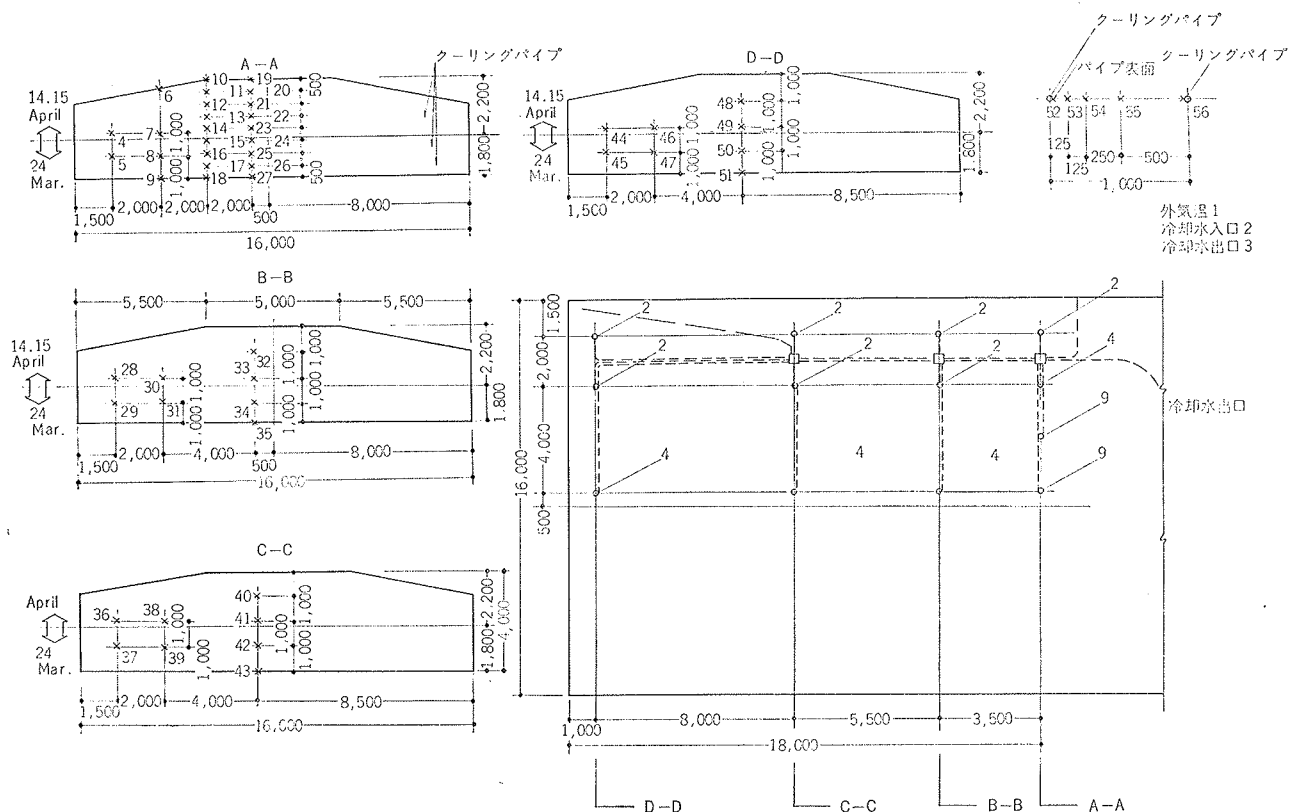


図-22 P₂₁ フーチング熱電対埋込図

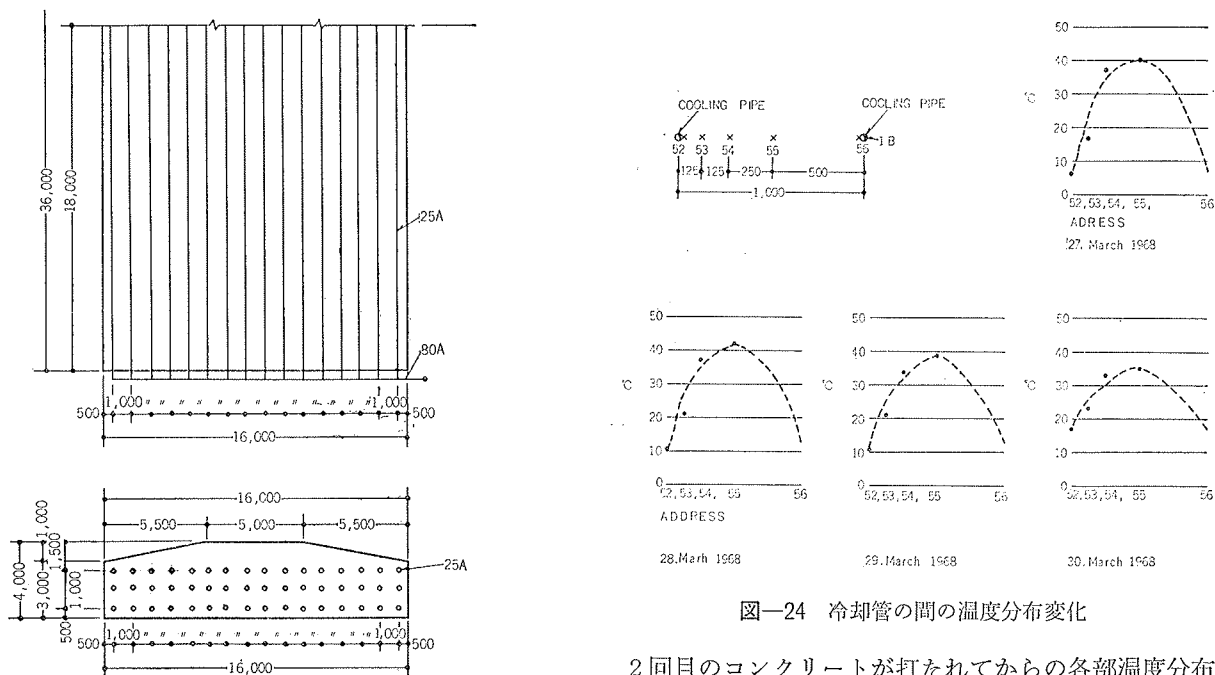


図-23 クーリングパイプ埋込図

図-24 冷却管の間の温度分布変化

砂 482kg (絶乾)
 砂利 484kg
 分散剤(ボゾリスNo. 8) 742.5g
 凝結遅延剤(リタル) 594g
 冷却管の間の温度分布変化を図-24, 図-25に示す。

2回目のコンクリートが打たれてからの各部温度分布変化を図-26, 図-27に示す。4月14日に11°Cで打設したものが、3日後には熱発散の悪い測点12で68°Cにまで上昇している。この結果は本来計算結果と一致するはずであるが、ピーク値が打設後3日目に来るといのは合っているものの、温度上昇は実測の方が高くなっている。これは外気温度が冬の計算例によるものより高かったのと、水和熱を測定するのに使った断

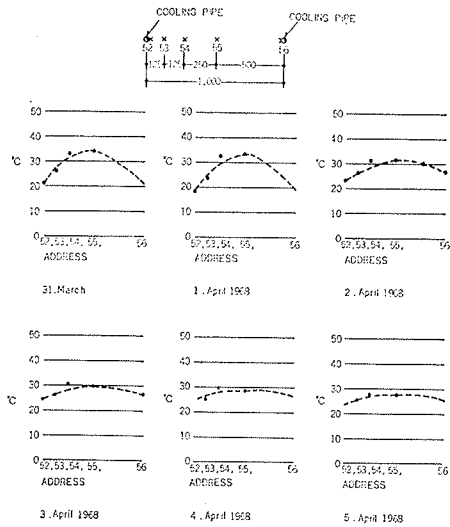


図-25 冷却管の間の温度分布変化

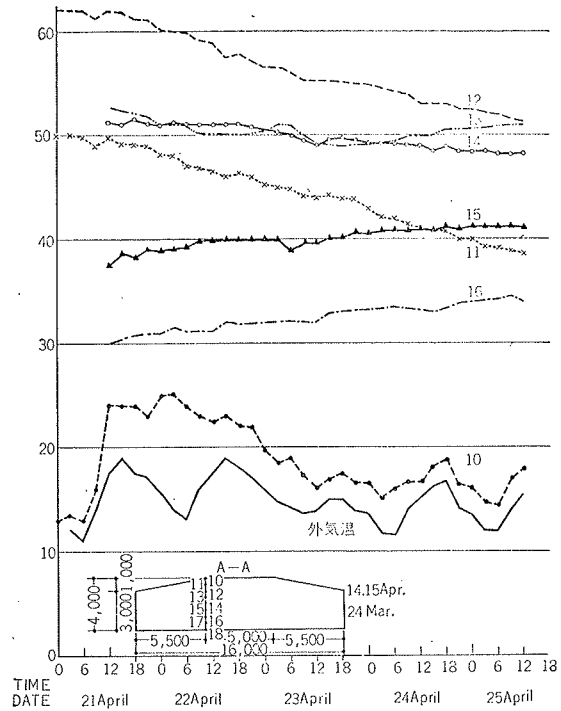


図-27 各部温度分布変化

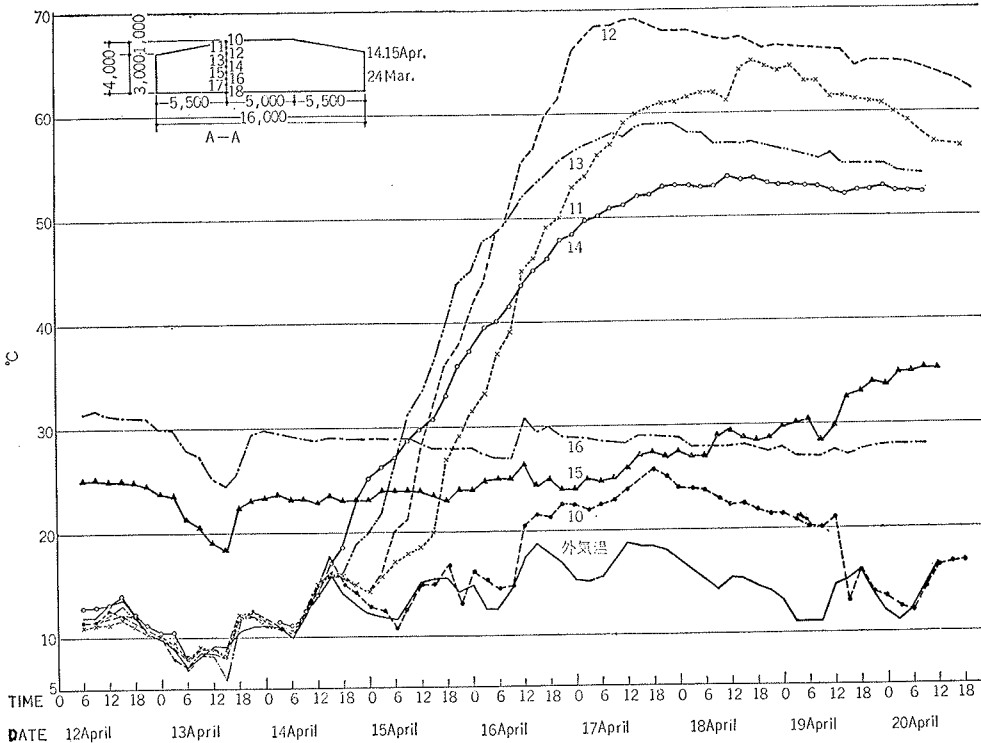


図-26 各部温度分布変化

熱温度上昇試験装置の不正確さが考えられる。この装置は魔法瓶の中にコンクリートを入れ温度上昇を測定するため、常に魔法瓶による吸熱のため、著者らが提案している装置に比べ温度上昇は低めにでている。これらの数値を入れ換えて計算を行えば実測値と計算値が一致するはずである。

冷却水による除去熱量は、冷却水入口、出口の水温

に、流量を乗ずる方法で求めたが、第1回目のコンクリートを打設して3日目の3月27日からの結果を図-28に示す。温度差に比べて流量が多いため、かなりの誤差も見込まれている。

3.3. 暑い時期に打たれたマスコンクリート
首都高速道路6号線618工区高架橋下部P22は底面で19m×19m、高さが4mという巨大なものであるため、下面より1.5mまでを昭和43年6月25日～26日に、その上を7月11日

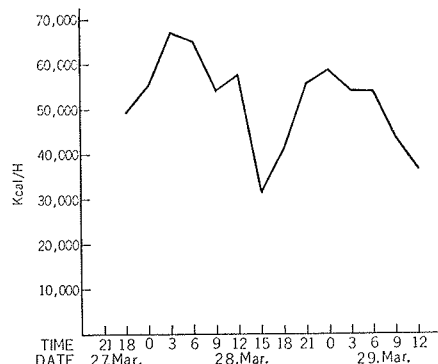


図-28 除去熱量の変化

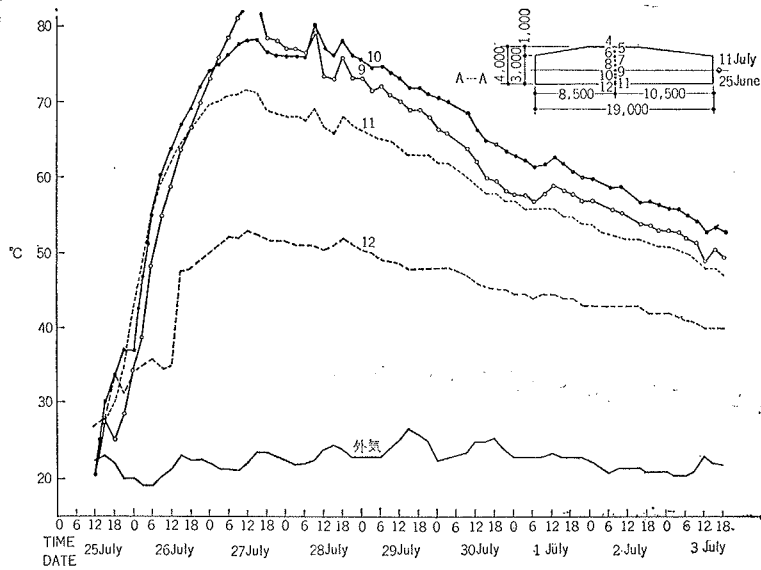


図-29

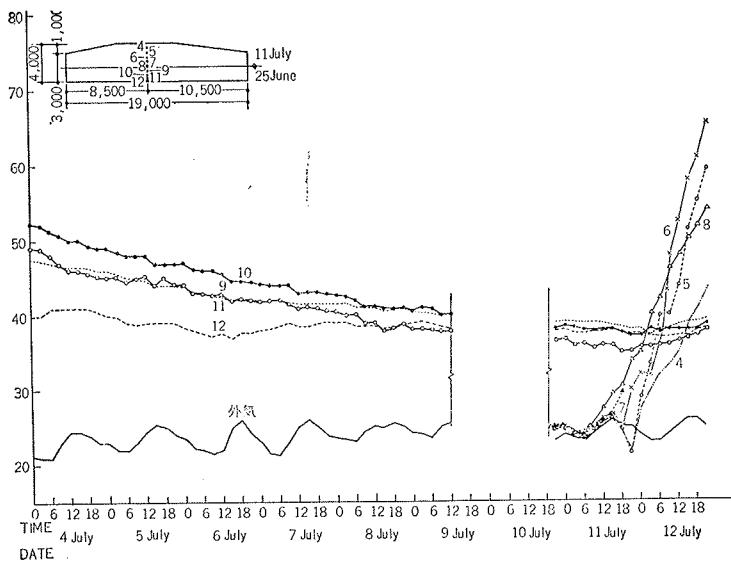


図-30

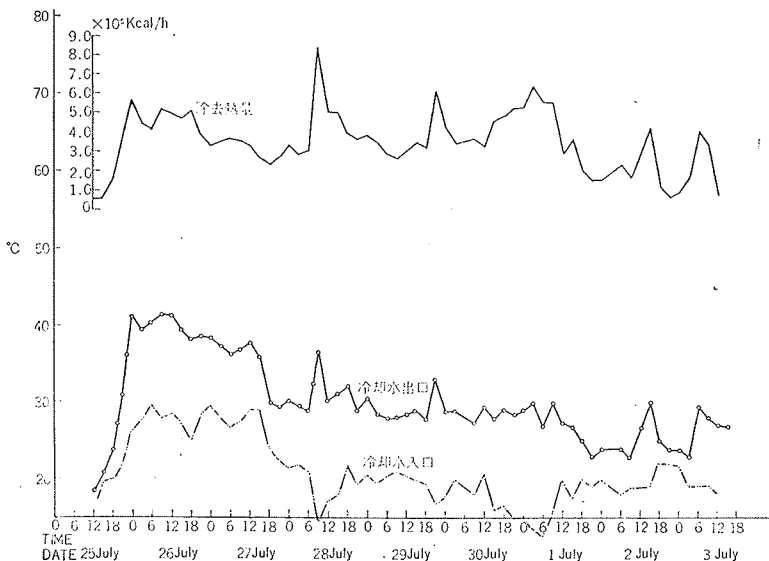


図-31 冷却水温と除去熱量の変化

～12日の2回に分けて打った。コンクリートの性質はP21の場合と同じで、凝結遅延剤リタールが多目に入れられた。測定結果の1部を図-29、図-30に示す。外気温の上昇により、80°C以上に上昇している点もある。計算結果の図-11の場合がこの測定例と同じ条件であるが、前述の理由により実測の方が高くまで上昇している。一方除去熱量の変化を図-31に示した。

4. おわりに

原子力発電所の工事を初め、土木や建築のあらゆる分野でマッシュなコンクリートが打たれる時代となってきた。ダムの工事では従来からコンクリートの発熱の研究がなされてきたが、一般にはあまり考慮されていない。著者らの一連の研究がいささかの参考ともなれば望外の喜びである。

謝 辞

現場測定を終始御支援下さった首都高速道路公団、大隅幸男所長以下大林組岡田川工事事務所の方々、コンクリートの熱特性試験をして下さった小野田セメントの中央研究所、アナログ電子計算機を貸与して下さい、技術指導をして下さった三菱電機株式会社に感謝の意を表します。また現場測定にあたっては、日本電技(株)藤枝能登茂氏が切り換えスイッチを試作して下さい、測定に協力して下さい、ことを記し謝意を表します。

参考文献

- (1) 伝熱工学資料 日本機械学会
- (2) 斎藤, 田中, 首都高速第618工区フォーミング温度測定 大林組技研報告書
- (3) 井上宇市 空気調和ハンドブック 丸善
- (4) 田辺四郎他 高速羽横線橋脚基礎温度・歪測定 1報, 2報, 大林組技研報告書