

土 木 研 究 所 資 料

コンクリートダムの温度応力に
関する考察（Ⅱ）

建 設 省 土 木 研 究 所
ダ ム 構 造 研 究 室

Copyright © 55年度 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行なってはならない。

ま え が き

ダムコンクリートを打設する際必ず問題となるのが温度規正の問題である。コンクリートは硬化時に多量の水和熱を発生する。ダムのような巨大な構造物ではその熱放散が悪いことから、水和熱はダム堤体に大きな温度変化をもたらし、熱膨張ないしは熱収縮による体積変化を生じさせる。この体積変化が拘束されると温度応力が発生し、ひいてはクラックの発生となって現われることになる。クラックが堤体の安定性に及ぼす影響はその発生個所や大きさに依存するが、クラックの発生は極力避けるべきであり、これを行う手段が温度規正である。温度規正法に対する理論的アプローチは既に土研資料第1558号の「コンクリートダムの温度応力に関する考察(1)」で報告済みであり、本報告は主としてコンクリートの材料としての熱的特性について材料試験を行った結果を中心に取りまとめたものである。

昭和56年 3 月

ダム構造研究室 水 野 光 章
永 山 功
矢 沢 克 敏

目 次

まえがき

1. 温度応力の発生機構からみたコンクリートの材料特性	1
1.1 温度応力の発生機構	1
1.2 ダムコンクリート内に温度変化を与える要因	1
1.3 ダムコンクリート内に温度応力を与える要因	2
2. コンクリートの熱的特性	3
2.1 実験概要	3
2.1.1 コンクリートの配合	3
2.1.2 熱拡散率の測定	3
2.1.3 比熱の測定	4
2.1.4 コンクリートブロックの温度履歴の測定	4
2.2 実験結果と考察	5
2.2.1 熱拡散率	5
2.2.2 比熱	6
2.2.3 熱伝導率	6
2.2.4 熱伝達率	7
2.2.5 コンクリートの水和熱	8
3. コンクリートの力学的特性	18
3.1 実験概要	18
3.1.1 コンクリートの配合	18
3.1.2 弾性係数の測定	18
3.1.3 圧縮強度の測定	19
3.1.4 引張強度の測定	19
3.2 実験結果と考察	19
3.2.1 弾性係数	19
3.2.2 圧縮強度	22
3.2.3 引張強度	22
3.2.4 弾性係数, 圧縮強度, 引張強度の関係	22

4. クラック発生防止のための温度規正法	27
4.1 概説	27
4.2 外部拘束によるクラックの発生防止のための配慮	27
4.3 内部拘束によるクラックの発生防止のための配慮	29
5. まとめ	31
5.1 コンクリートの熱的特性について	31
5.2 コンクリートの力学的特性について	31
5.3 コンクリートの発熱特性について	31
5.4 ダムコンクリートの温度規正について	32
参考資料	33

1. 温度応力の発生機構からみたコンクリートの材料特性

1.1 温度応力の発生機構

我々が温度規正によって規正しようとする温度応力は引張応力であり、これによって発生するクラックである。ダムコンクリート内に引張応力の

発生する要因は2つある。その1つは、打設直後ないしはコンクリートが徐々に冷却される過程で、コンクリート表面と内部の間に生ずる温度差によって変形が拘束されコンクリート表面に発生する引張応力であり、これを“内部拘束”による温度応力と呼ぶ。また、このような引張応力はクーリングパイプ周辺にも発生するのが一般である。他の1つは、コンクリート全体が徐々に冷却される過程で、収縮変位が外的な条件（たとえば基礎岩

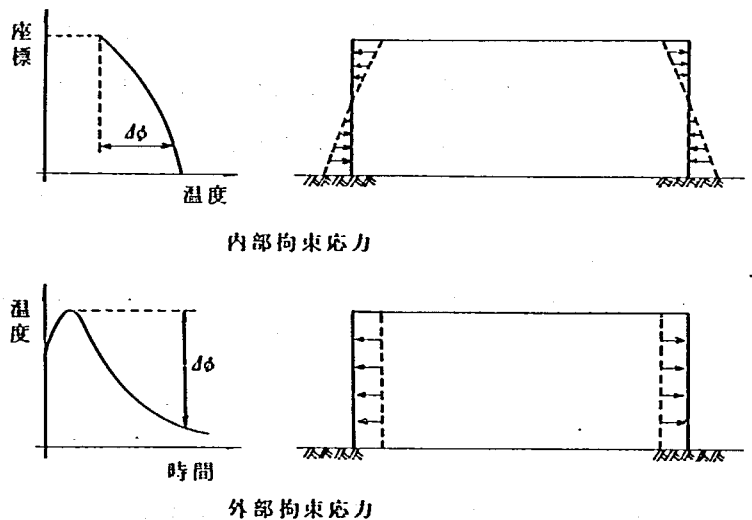


図1-1 内部拘束、外部拘束の概念図

盤)によって拘束を受け発生する引張応力であり、これを“外部拘束”による温度応力と呼ぶ。(図1-1参照)

もちろんこの2つの温度応力は独立に取扱えるものではなく、実際に生ずる応力分布は両者が複合した結果の応力分布である。いま打設されたコンクリート内の平均温度を ϕ_m 、任意の点での温度を $\phi(x)$ とすれば、

$$\phi(x) = \{\phi(x) - \phi_m\} + \phi_m \quad (1)$$

と表わすことができる。従って、上式の第1項が内部拘束による温度応力に関係する温度、第2項が外部拘束による温度応力に関係する温度と解釈することができる。また(1)式より、内部拘束による温度応力は場所的な温度変化による応力、外部拘束による温度応力は時間的な温度変化による応力と解釈することもできる。

1.2 ダムコンクリート内に温度変化を与える要因

打設されたダムコンクリート内に温度変化を与える要因として、当然ながらまず第1にコンクリートの水和熱が挙げられる。その大きさはセメントの水和反応式より容易に求め得るが、我々がさらに知りたいことはその反応速度である。急激な反応は大きな温度上昇をもたらす、緩慢な反応は熱放散と相俟って温度上昇を小さく抑えることが可能であろう。この熱放散に影響を与えるのが熱伝導率(k)、熱拡散率(h^2)であり、また熱伝達率(α)である。

熱伝導率は単位温度勾配において単位面積から単位時間内に流出する熱量を表わし、 $\text{kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot \text{deg}$ の次元を有する。熱拡散率は熱伝導率を比率(c)と密度(ρ)の積で除したものであり、温度勾配の場所的

変化（温度勾配の変化率）による単位時間当りの温度変化量を表わし、 m^2/hr の次元を有する。これを数学的に表現すれば、式(2)のようになる。

$$h^2 \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{\rho c} - \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0$$

$$h^2 = \frac{k}{\rho c} \text{----- (2)}$$

ここに、 Q は単位体積内に単位時間中に発生する発熱量を表わしている。熱伝達率は単位面積当りの固体表面から単位温度差を有する外気に単位時間当りに放散される熱量で $kcal/m^2 \cdot hr \cdot deg$ の次元を有する。これを数学的に表現すれば式(3)のようになる。

$$q = \alpha (\phi_s - \phi_o) \text{----- (3)}$$

ここに、 ϕ_s : 固体表面の温度、 ϕ_o : 外気温である。

今回の実験に当って直接測定を行った項目は、熱拡散率、比熱、密度の3つであり、熱伝導率は式(2)より求めている。また、コンクリートの水和熱、熱伝達率については、コンクリートブロックを打設し、その温度変化から解析的にこれを求める方法を採用している。

1.3 ダムコンクリート内に温度応力を与える要因

ダムコンクリート内に温度応力を与える要因は既に 1.1 で述べたところであるが、その温度応力の大きさは、温度変化量、コンクリートの熱膨張率(α)とコンクリートの変形能（これを仮りに弾性係数(E)で表わす)によって定まる。しかし、実際に温度応力の発生する過程では時間的な要因、たとえばクリープのような粘性が影響してくる。すなわち、同じ温度変化が生じた場合でもその変化率が緩慢であれば、クリープによって発生する応力は小さくなるであろうし、また、一旦発生した応力はリラクゼーションによってその値を減ずるであろう。

コンクリートの水和過程を考えた場合、温度応力の発生機構は一段と複雑になる。それは、弾性係数の経時変化による影響である。すなわち、かりにコンクリートの粘性の影響を無視したとしても、同じ温度変化に対する温度応力がその材令によって変化する。従って、温度がもとの状態に再び戻っても温度応力はもとの状態には戻らず、ヒステリシスを示すことになる。

また、クラックの発生の有無を論ずる場合には、引張応力と引張強度の関係について考慮しなければならない。コンクリートの引張強度は材令と共に増加する。従って、引張応力が等しくとも材令が異なればクラックの発生の有無は異なることになる。これは、上に述べた弾性係数の場合と同じ議論である。

今回の実験に当っての測定項目は、コンクリートの（圧縮および引張）強度および弾性係数の経時変化のみとし、クリープの測定については実験装置、測定方法の関係上省略している。また、コンクリートの熱膨張率については比較的よいデータが現場計測で得られているので、これも実験対象から除いている。

2. コンクリートの熱的特性

2.1. 実験概要

2.1.1 コンクリートの配合

コンクリートの比熱，熱伝導率，熱拡散率は主としてコンクリート内に含まれる骨材の特性と骨材率によって左右される。一方，供試体の寸法から供試体用コンクリート中に含まれる最大骨材寸法（Gmax）は，40 mm以下に制限される。このようなことからコンクリートの熱的特性を求めるためのコンクリート配合は，表2-1に示した各ダムの示方配合に対し，W：C：（S＋G）の比を一定に保ちつつコンクリートとしての最低の性質を確保することを条件に決定し，表2-2に示す通りとした。なおセメントは全て中熱セメントである。

表2-1 各ダムの示方配合

ダム名	骨材名	Gmax (mm)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	F (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)			
							150～ 80 mm	80～ 40 mm	40～ 20 mm	20～ 5 mm
Od	砂 岩	150	98	150	0	521	548	366	366	382
Ok	川砂利 (砂岩)	80	102	90	30	691	0	596	447	447
K	安山岩	150	98	172.5	57.5	520	452	420	355	388
S	砂質片岩	80	105	90	30	752	0	519	444	519
N	砂 岩	150	103	150	0	556	495	495		606

注) Nダムの粗骨材の粒度区分は150～70 mm，70～30 mm，30～5 mmである。

表2-2 熱的特性を求めるための示方配合

ダム名	骨材名	Gmax (mm)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	F (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	
							40～20 mm	20～5 mm
Od	砂 岩	40	98	150	0	536	927	720
Ok	川砂利 (砂岩)	40	102	90	30	449	1024	708
K ₁	安山岩	40	98	172.5	57.5	534.4	889.3	711.3
K ₂	安山岩	40	146	257.1	85.7	775.1	529.1	578.3
S	砂質片岩	40	105	90	30	488.7	986.7	758.6
N	砂 岩	30	103	150	0	633	1519	

注) K₂配合は温度履歴測定用供試体の配合である。

N配合の粗骨材の粒度は30～5 mmである。

2.1.2 熱拡散率の測定

熱拡散率の測定は「土木材料実験」に示す方法に準拠して行うものとする。すなわち，中央に熱電対を埋設した材令14日の円柱供試体（φ20×40 cm）を高温水槽中で一様な温度（約30℃）とした後，低温水槽（約10～15℃）で冷却して供試体内部の温度変化を冷却開始から1時間測定し，温度変化が比較的一様になった

20～60分の間の測定値から熱拡散率を求めるものである。これには図2-1に示したような図表が作成されており、容易に熱拡散率が求められるようになっている（Gloverの方法）。図中、 θ_0 ：温湯と冷水の温度差、 θ ：冷却途中での供試体中心の温度と冷水温度の差、 D ：供試体直径、 t ：冷却開始時よりの時間である。

2.1.3 比熱の測定

比熱の測定は断熱カロリメータ法に準拠して行う。すなわち、中央に孔を配した材令14日の円柱供試体（ $\phi 20\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ ）を断熱水槽に入れ初期温度（ T_s ）を測定する。30分放置後内孔に設けたヒータおよび熱攪拌機を用いて45分間加熱し、この間5分毎に温度を測定する（ $T_i; i = 0, 1, \dots, 9$ ）。ついで、ヒータを切り75分間温度変化を5分毎に測定し（ $T_i; i = 10, 11, \dots, 24$ ）、さらに30分経過した後最終温度（ T_c ）を測定する。この時、コンクリートの比熱は次式で求められる。

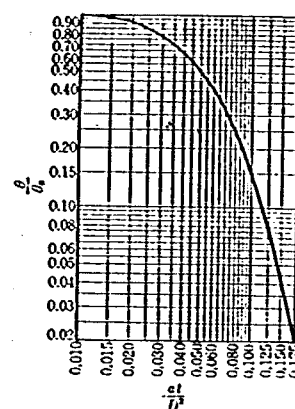


図2-1 熱拡散率を求めるための計算図表

$$c_c = \frac{Q - Q'}{W_c \times (T_{24} - T_0 + T_c)} \quad \text{----- (3)}$$

式中、 Q ：ヒータで与えた熱量、 Q' ：カロリメータおよび水の吸収熱量、 W_c ：供試体の重量、 T_c ：容器から外に失われた熱量に対する補正温度である。 Q' は

$$Q' = (T_{24} - T_0 + T_c) \times (W_w c_w + q) \quad \text{----- (4)}$$

で与えられる。式中、 W_w ：水槽中の水の重量、 c_w ：水の比熱、 q ：カロリメータの比熱の水当量である。また T_c は

$$T_c = 4(T_0 - T_s) + \frac{4(T_{24} - T_s) - 4(T_s - T_0)}{(T_{24} + T_c)/2 + (T_s + T_0)/2} \times \left\{ \frac{1}{24} \sum_{i=0}^{23} \frac{T_i + T_{i+1}}{2} - \frac{T_s + T_0}{2} \right\} \quad \text{----- (5)}$$

で与えられる。

2.1.4 コンクリートブロックの温度履歴の測定

コンクリートの温度履歴の測定試験は、底面および側面を厚さ5 cmの断熱材で保護し近似的に1次元モデルで取扱えるように工夫した縦80 cm × 横80 cm × 高さ40 cmのコンクリートブロックを打設し、この中に図2-2に示したように埋設したC-C型（銅-コンスタンタン型）熱電対型温度計10個によって、コンクリートブロック内の温度分布およびその経時変化を20日間にわたり1時間毎に測定するものである。また、これと併行して一般にコンクリートダム内に埋設または挿入されるひずみゲージ型温度計の精度を検定するものである。

供試体の温度上昇を大きくして測定誤差を減じるため、その配合は最も富配合な K_2 配合とした。なお、これは後述する力学試験に用いた配合と同一な配合である。

また、コンクリートの発熱が終了し、コンクリートブロックの温度が最終安定温度に達した後、熱伝達率を測定するため、外気温の変化によるコンクリート内部の温度変化を2日間にわたり1時間毎に測定を行うものとした。

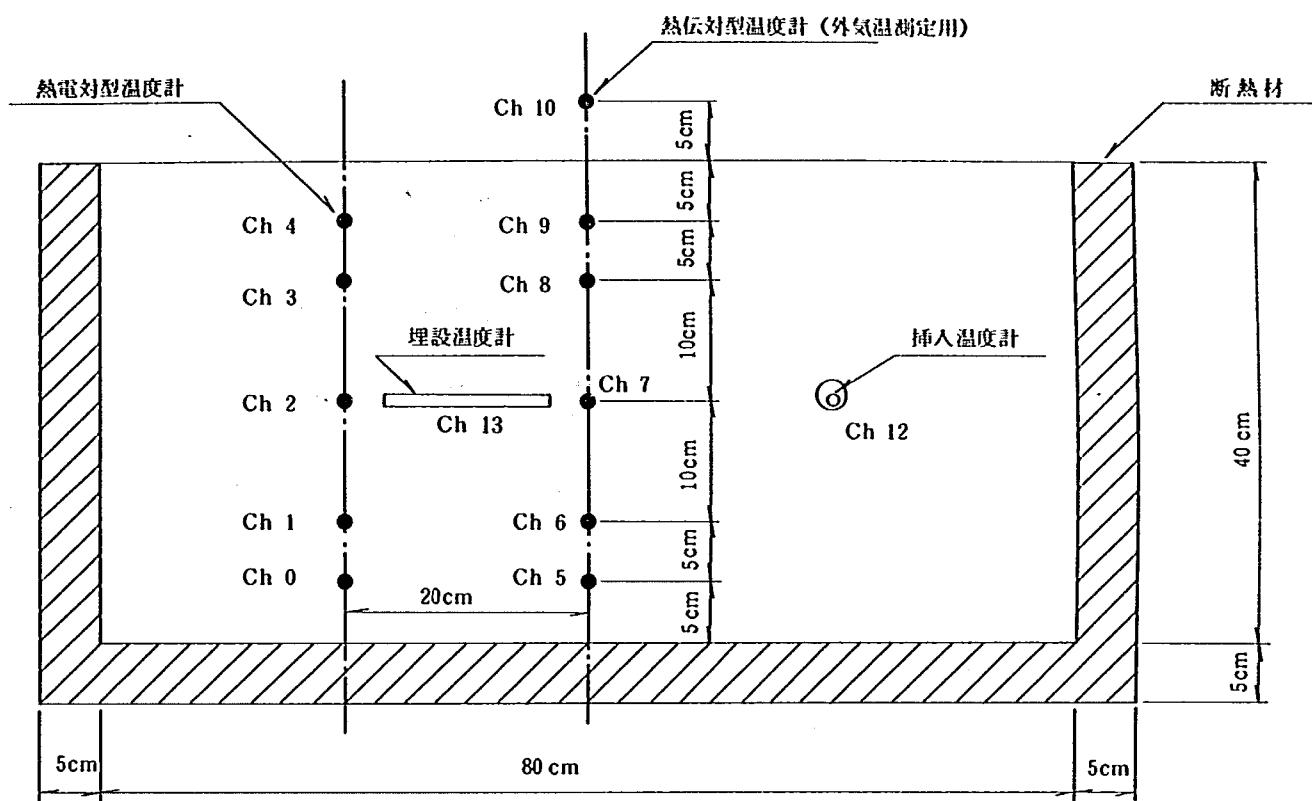


図2-2 温度計埋設位置

2.2 実験結果と考察

2.2.1 熱拡散率

熱拡散率はコンクリート内に含まれる骨材量によって影響を受け、またこれは比熱のように骨材とセメントの重量比によって直線的に変化するものでもない。従って、その正確な値を把握するためには実際のダムコンクリート配合と同じ骨材率のコンクリートを用いて試験を行うことが望ましい。このようにして求めた試験結果を示したのが表2-3であり、また、骨材率と熱拡散率の関係を示したのが図2-3である。 K_1 、 K_2 配合から明らかなように、一般に骨材率が増加すれば熱拡散率は増加する。

表2-3 熱拡散率の大きさ

ダム名	骨材名	骨材率(%)	熱拡散率 ($\times 10^{-3}$ m ² /hr)	測定値のバラツキ
Od	砂岩	90	3.25	3.25, 3.26, 3.24
Ok	川砂利(砂岩)	91	3.00	3.02, 2.90, 3.09
K_1	安山岩	87	3.02	2.99, 3.02, 3.05
K_2	安山岩	79	2.79	2.76, 2.87, 2.75
S	砂質片岩	91	3.49	3.43, 3.58, 3.45
N	砂岩	90	3.61	3.62, 3.72, 3.49

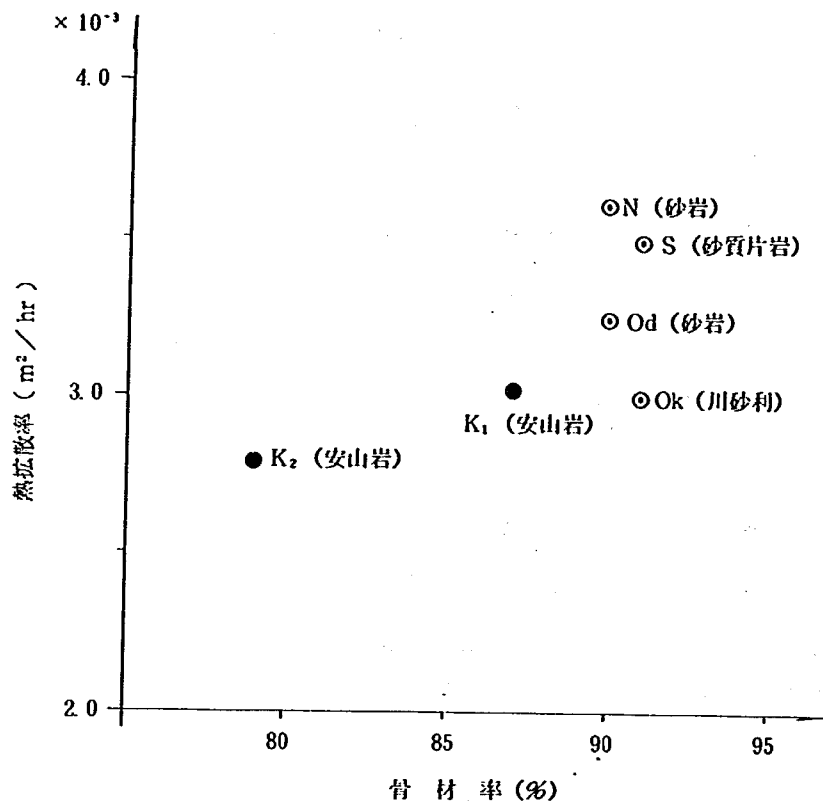


図 2-3 熱拡散率と骨材率の関係

2.2.2 比熱

比熱はコンクリート内に含まれる骨材量によって影響を受け、また、これは骨材とセメントの重量比によって直線的に変化する。ここでは、実際のダムコンクリート配合と同じ骨材率のコンクリートを用いて直接にダムコンクリートの比熱を求めている。これをまとめたのが表 2-4 である。また、比熱と骨材率の関係を示したのが図 2-4 である。一般に骨材率が増加すると比熱は減少する。

表 2-4 比熱の大きさ

ダム名	骨材名	骨材率(%)	比 熱 (kcal/kg·deg)	測定値のバラツキ
Od	砂 岩	90	0.237	0.241, 0.239, 0.232
Ok	川砂利(砂岩)	91	0.239	0.244, 0.233
K₁	安 山 岩	87	0.231	0.230, 0.227, 0.236
K₂	安 山 岩	79	0.253	0.255, 0.255, 0.249
S	砂 質 片 岩	91	0.242	0.242, 0.216, 0.268
N	砂 岩	90	0.209	0.226, 0.188, 0.212

2.2.3 熱伝導率

熱伝導率はコンクリート内に含まれる骨材量によって影響を受ける。ここで求めた熱伝導率はさきに求めた熱拡散率と比熱とから

$$k = \rho c h^2 \dots\dots\dots (6)$$

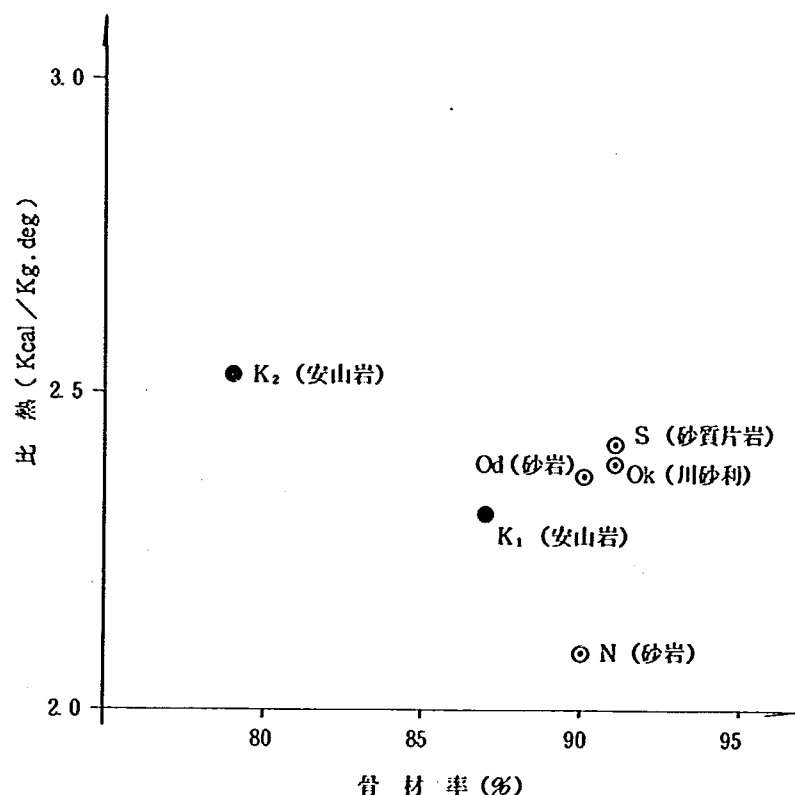


図2-4 比熱と骨材率の関係

によって求めたものである。これをまとめたものが表2-5である。また、熱伝導率と骨材率の関係を示したのが図2-5である。しかし、骨材率と熱伝導率の関係は他の2つに比べ明白でない。

表2-5 熱伝導率、比熱、熱拡散率の関係

ダム名	骨材名	骨材率(%)	熱伝導率 (kcal/m·hr·deg)	比熱 (kcal/kg·deg)	熱拡散率 ($\times 10^{-3}$ m ² /hr)	密度 (kg/m ³)
Od	砂岩	90	1.90	0.237	3.25	2460
Ok	川砂利(砂岩)	91	1.76	0.239	3.00	2460
K ₁	安山岩	87	1.72	0.231	3.02	2470
K ₂	安山岩	79	1.74	0.253	2.79	2460
S	砂質片岩	91	2.11	0.242	3.49	2500
N	砂岩	90	1.86	0.209	3.61	2470

2.2.4 熱伝達率

従来、ダムコンクリートの温度履歴計算では、コンクリート表面の温度は外気温に等しいとして取扱われてきたが、このような条件で解を求めると実測値との間に誤差が生じるのが一般である。(これについては2.2.5で述べる。) 一般に固体表面から気体等の流体に熱が放散される場合、その熱量はNewtonの熱拡散方程式

$$q = \alpha (\phi_s - \phi_o) \quad \text{----- (7)}$$

で表わされる。ここに、 α : 熱伝達率、 ϕ_s : コンクリート表面の温度、 ϕ_o : 外気温である。熱伝達率の大き

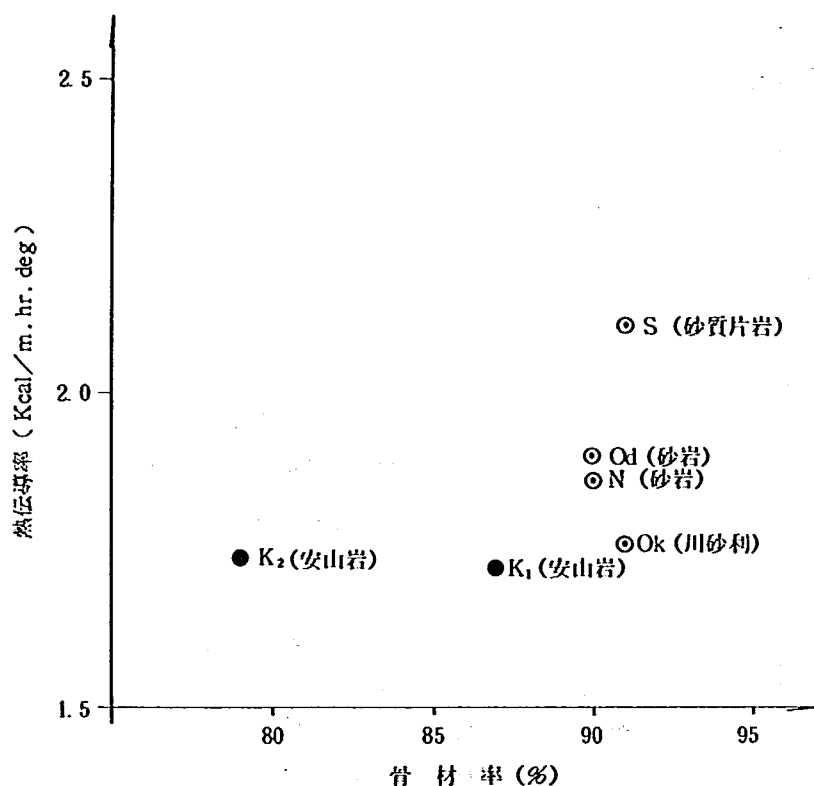


図2-5 熱伝導率と骨材率の関係

さは、外気の種類、風速、コンクリート表面の粗度などによって定まる定数である。表面温度＝外気温の条件は α が十分大きい場合に成立する式である。

今回の実験では、一様な初期温度分布を有するコンクリートブロックに対して外気温を刻々と変化させ、コンクリートブロック内の温度変化を測定することによって、解析的に熱伝達率を求める方法を採用している。

コンクリートブロックの配合はK₂配合（表2-2参照）であり、その熱特性は表2-5で与えられる。実験条件に合わせ、これをCarlsonの方法（1次元差分法）でシュミレートして温度履歴を計算で求め実測値と比較した結果が図2-6であり、コンクリートブロック中央断面における温度分布を示したものが図2-7である。これより熱伝達率の大きさは

$$\alpha \doteq 10 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{deg} \text{ ----- (8)}$$

で表わすのが最も適当であることがわかる。

2.2.5 コンクリートの水和熱

打設されたコンクリートの温度上昇はセメントの水和熱に基くものであるから、その大きさは他の条件が同一であれば、コンクリート内に含まれるセメント量（単位セメント量）に比例する。いま外部に熱の流出流入がない断熱過程を考えると、コンクリートの断熱温度上昇は一般に次式で表わされる。

$$\phi_{ad} = \frac{C}{\rho c} \int_0^t Q(t) dt \text{ ----- (9)}$$

ここに、 $Q(t)$ ：セメント単位重量当りの発熱量（水和熱）， ρ ：コンクリートの密度， c ：コンクリートの

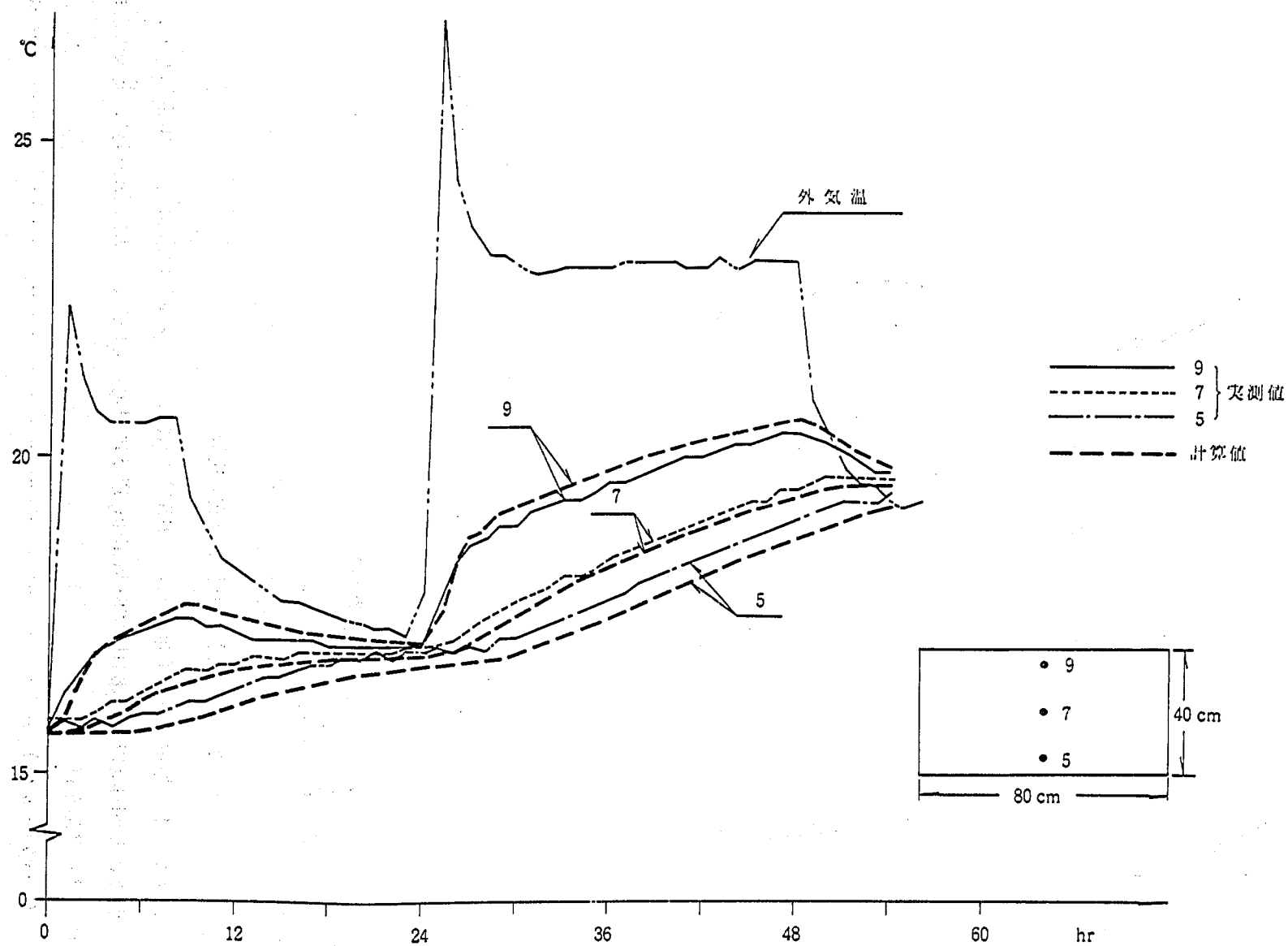


図2-6 実測と計算の温度履歴の比較

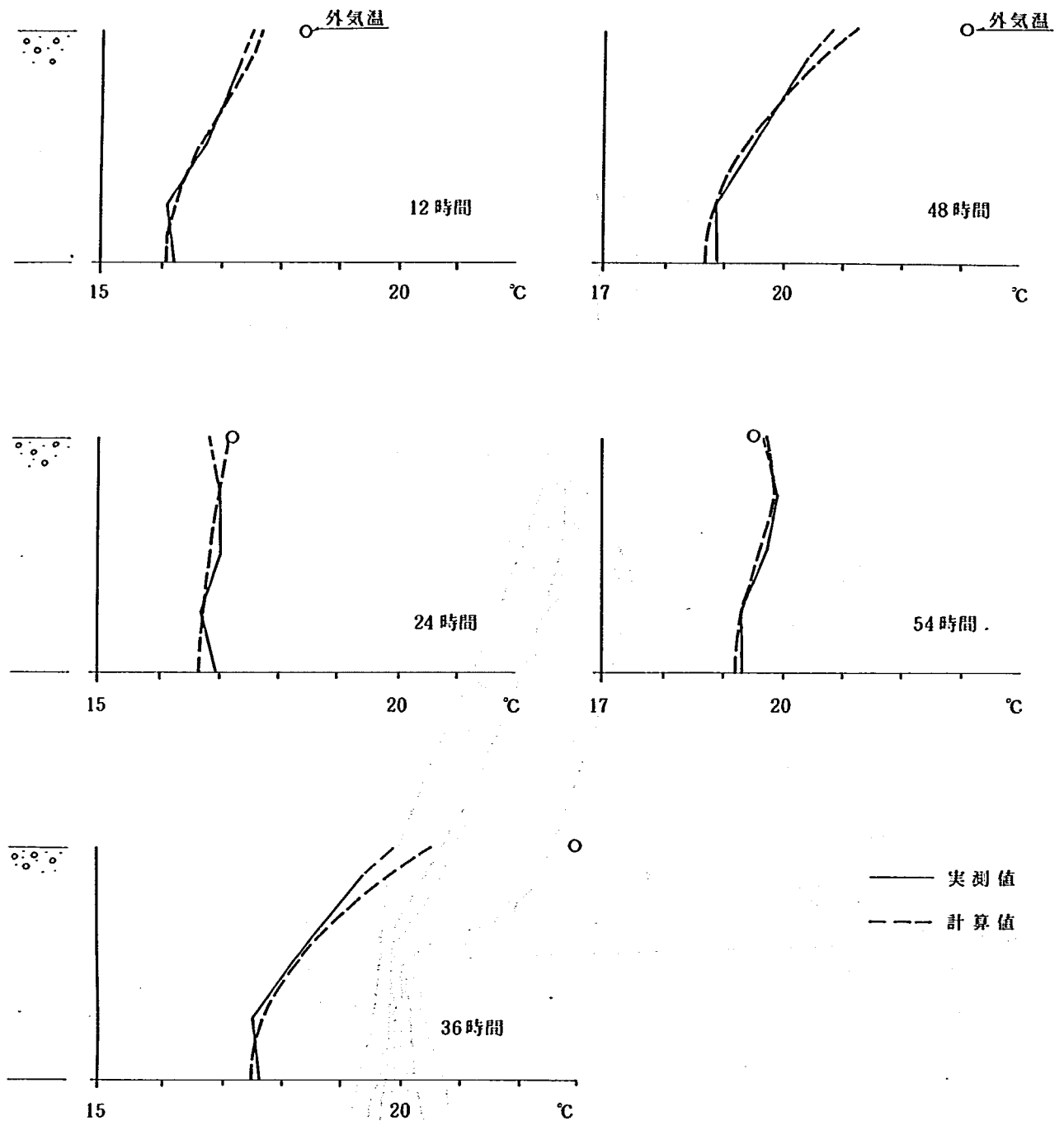


図 2-7 実測と計算の温度分布の比較

比熱， C ：コンクリートの単位セメント量である。JISによれば，セメントの総水和熱は，中庸熱セメントに対し，7日間で70 kcal/kg以下，28日間で83 kcal/kg以下に規定している。一方過去の実験によれば，材令 t における発熱量は

$$Q(t) = Q_0 \exp(-mt^A) \quad (10)$$

で近似できるとされており，また A はほぼ1に近いとされ

$$Q(t) = Q_0 \exp(-mt) \quad (11)$$

と近似することも多い。なお、厳密な扱いをすれば、水和反応は温度上昇と共に活発化するはずであり、 $Q(t, \phi)$ なる関数で表わされるはずである。今

$$Q(t, \phi) = Q_1(t) Q_2(\phi) \dots\dots\dots (12)$$

と表わされるものとし、 $Q_1(t)$ が (10) 式で表わされるものとすれば、

$$Q(t, \phi) = Q_2(\phi) \exp(-mt^A) \dots\dots\dots (13)$$

となる。また、 $Q_2(\phi)$ を $\phi = \phi_0$ で Maclaurin 展開し、温度変化による発熱量の変化は比較的滑らかとして、その 2 次項以降を無視すれば、

$$Q(t, \phi) = \{ Q_2(\phi_0) + (\phi - \phi_0) \frac{d}{d\phi} Q_2(\phi_0) \} \exp(-mt^A) \\ = \{ A(\phi_0) \phi + B(\phi_0) \} \exp(-mt^A) \dots\dots\dots (14)$$

と近似される。しかし、取扱いの容易さから、一般には (10) ないし (11) 式が用いられている。

本実験においては、コンクリートブロックを打設し、その温度上昇を測定することから解析的にコンクリートの水和熱を求める方法を採用した。また併せて、コンクリートダムに埋設されるひずみゲージ型温度計の精度を検証している。

コンクリートブロックの温度上昇は恒温室内で外気温一定の条件をつくって測定した。測定結果を図 2-8 に示す。ここに各測点の位置は図 2-2 に示したとうりである。また、中央断面における温度分布を示したのが図 2-9 である。

これを見るとコンクリートブロック表面の温度が外気温と必ずしも一致していないことが分かる。これは 2.2.4 で既に述べたように熱伝達率の影響が無視できないことを示すものであり、コンクリートの発熱量を求める場合には熱伝達率を考慮しなければならないことを示している。

Carlson の方法を用いて 1 次元差分法によりコンクリートブロックの温度上昇をシュミレーションすると、図 2-10、図 2-11 のようになる。なお、便宜上計算では外気温を一定として取扱った。この場合の物性値の設定は表 2-6 のとうりである。なお、断熱温度上昇は何回かの試行により最近似値を求めたものである。

表 2-6 解 析 条 件

	Case 1	Case 2	Case 3
熱 拡 散 率	$2.79 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{hr}$		
比 熱	$0.253 \text{ kcal/kg} \cdot \text{deg}$		
熱 伝 導 率	$1.74 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot \text{deg}$		
密 度	2460 kg/m^3		
セメント量	$C = 257.1 \text{ kg/m}^3$	$F = 85.7 \text{ kg/m}^3$	
総 発 熱 量	15870 kcal/m^3		24000 kcal/m^3
断熱温度上昇	$\phi_0 \{ 1 - \exp(-mt^A) \}$		
	$\phi_0 = 25.5 \text{ deg}$ $m = 0.87 (1/\text{day}^{0.68})$ $A = 0.68$	$\phi_0 = 25.5 \text{ deg}$ $m = 0.6 (1/\text{day})$ $A = 1$	$\phi_0 = 38.6 \text{ deg}$ $m = 0.6$ $A = 1$
熱 伝 達 率	$10.0 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{deg}$		考慮せず

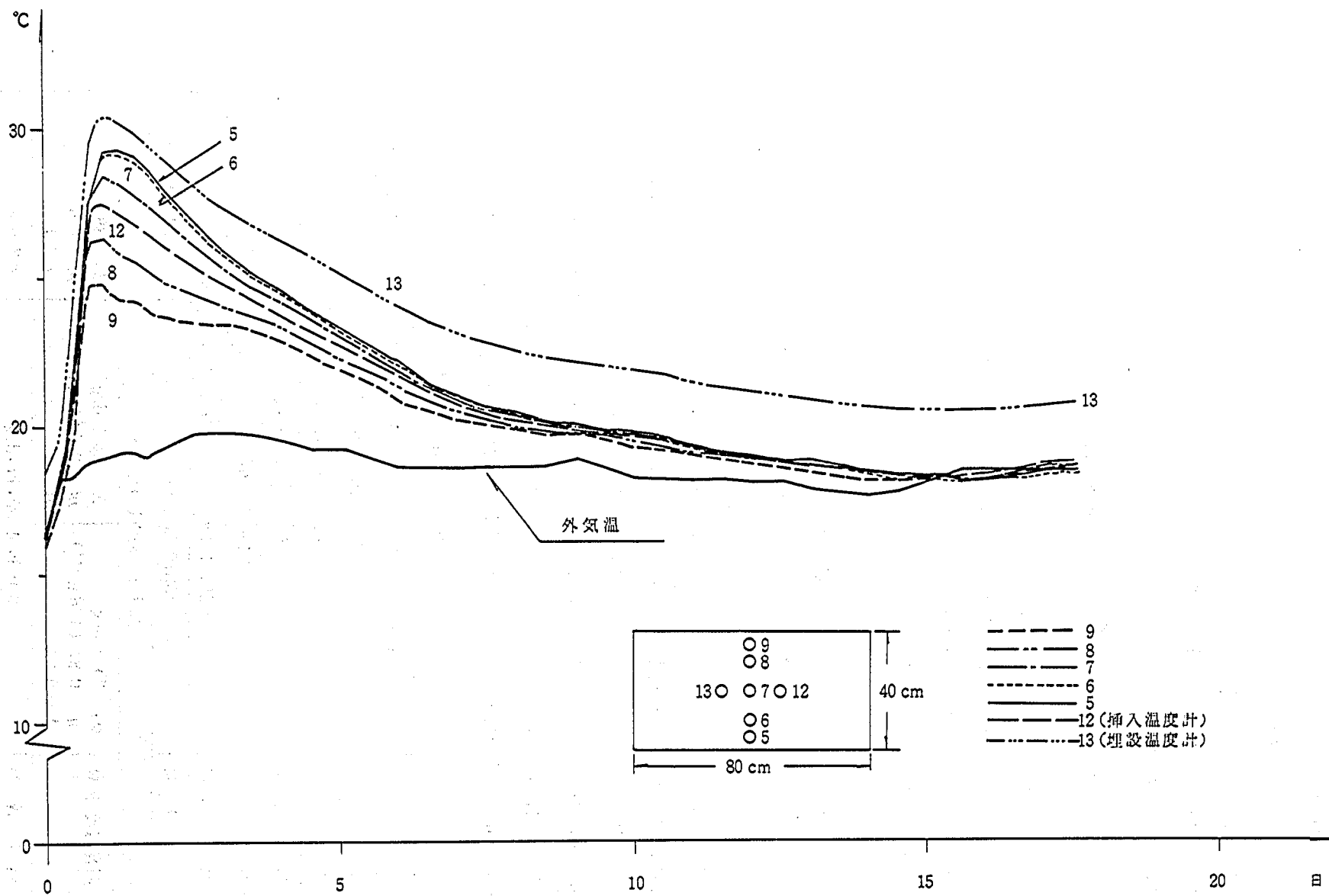


図 2-8 実測によるコンクリートブロックの温度履歴

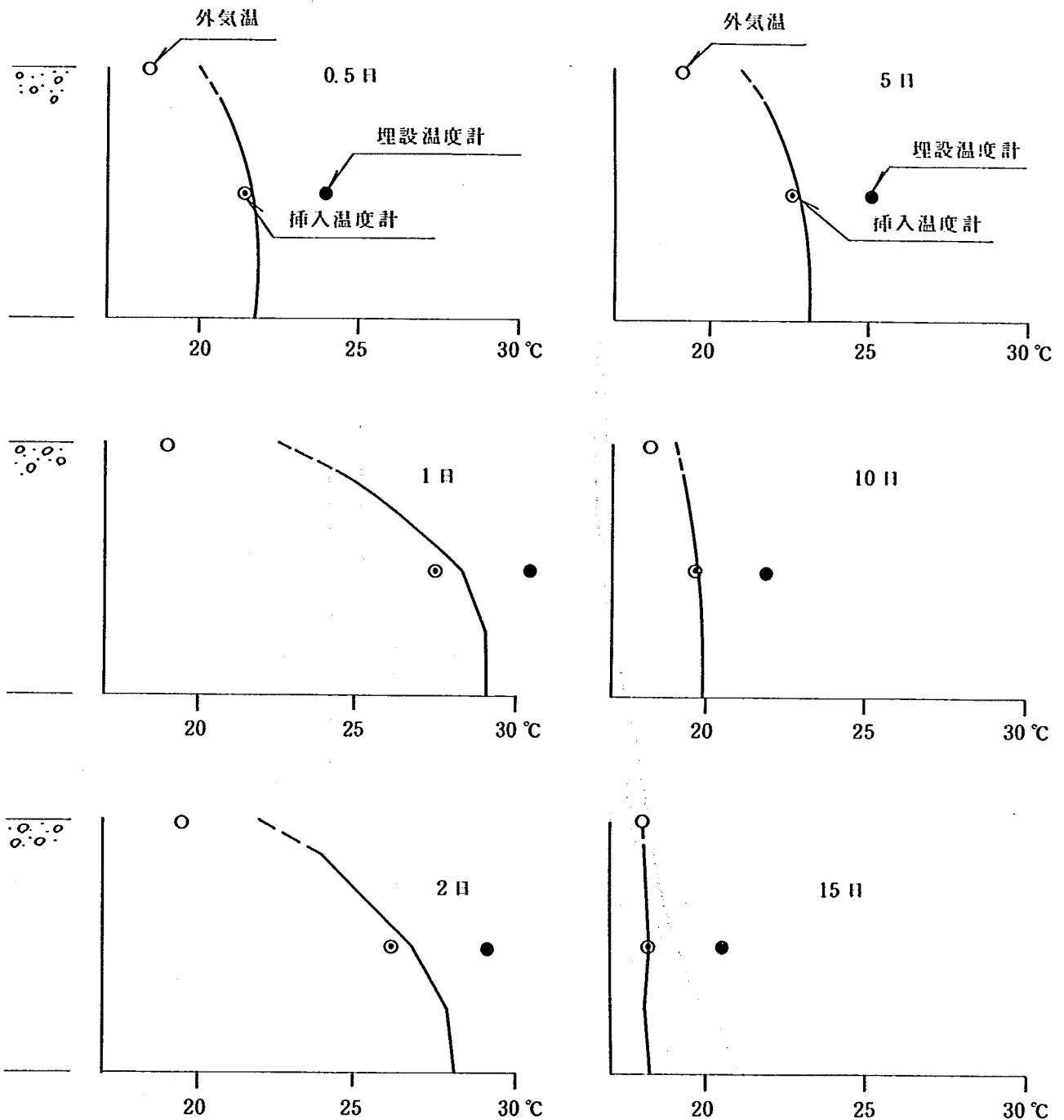


図2-9 実測によるコンクリートブロック内の温度分布

図2-10, 図2-11より, 温度履歴, 温度分布ともに, Case 1 が最も実測値と一致している。Case 2 は $A=1$ として計算した場合であるが, 最高温度に達する材令が遅れてしまうことがわかる。逆に, 最高温度に達する材令を一致させようとするとも最高温度の値や温度降下速度が大きく狂ってしまう。このようなことから, コンクリートの温度履歴を厳密に求める場合には, 発熱量を

$$Q(t) = Q_0 \exp(-mt^A) \dots\dots\dots (15)$$

で表わした方が適切であるといえよう。

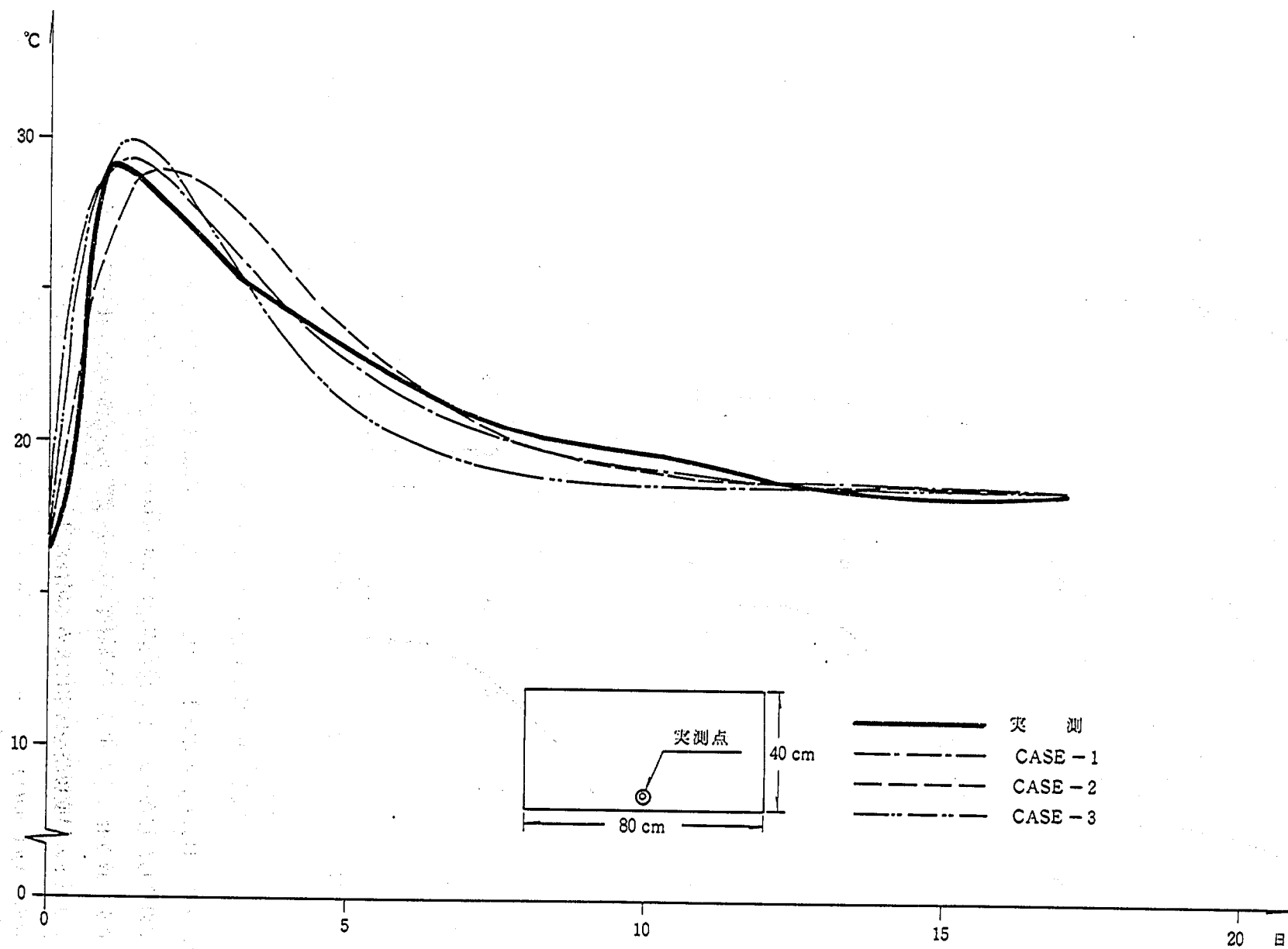


図 2 - 10 (1) 実測と計算の温度履歴の比較 (ch 5)

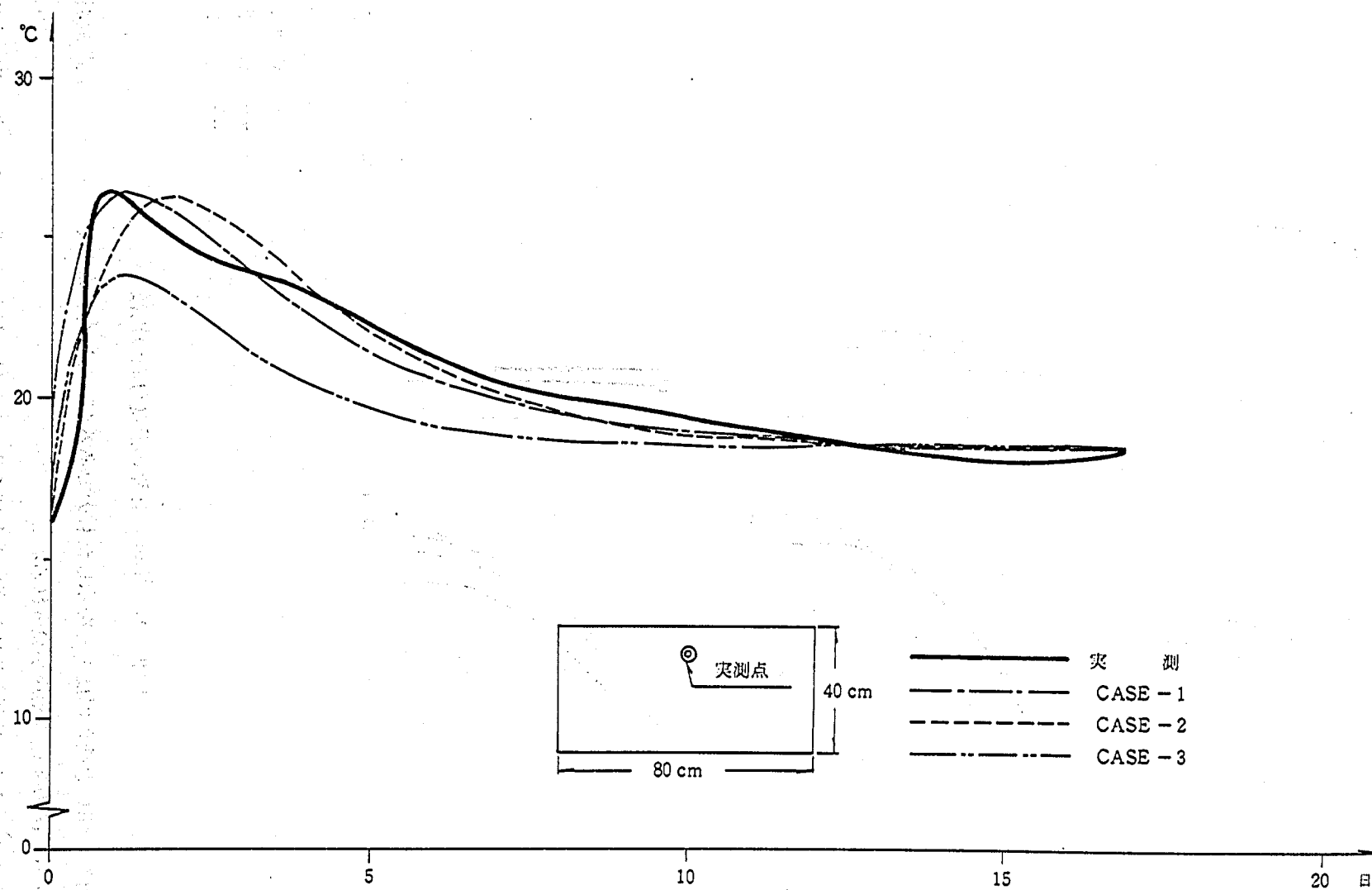


図 2 - 10 (2) 実測と計算の温度履歴の比較 (ch 8)

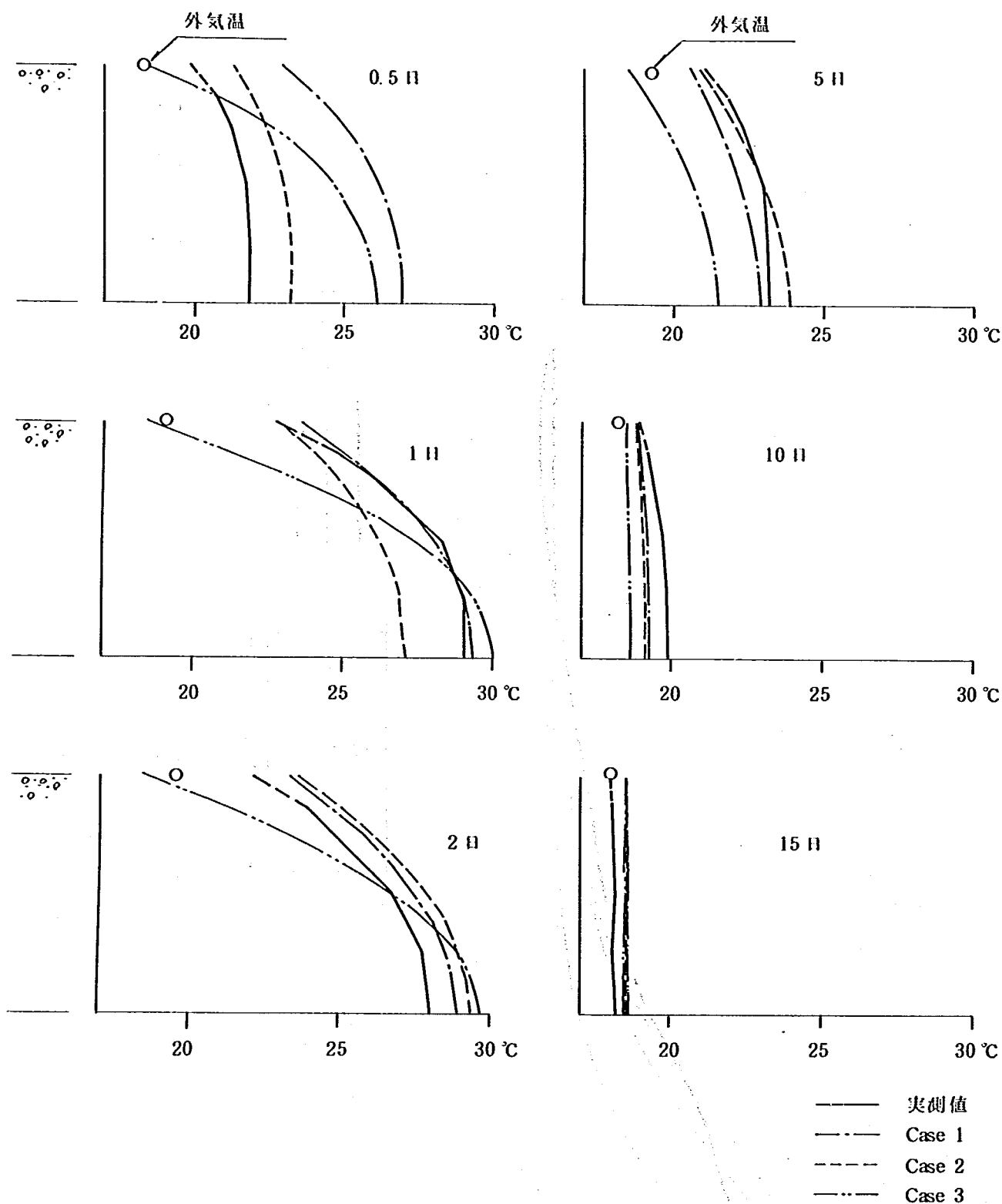


図2-11 実測と計算の温度分布の比較

図2-12は計算に用いた断熱温度上昇を示したものであるが、これを従来よく用いられてきた断熱温度上昇曲線と比較すると次の2点で相違が見られる。

1つは初期材令における発熱量が極めて高いことである。これは、JIS-R 5203に規定されている試験が定温状態(20℃)における試験であり、断熱状態に比べ反応速度が鈍ることが起因していると思われる。

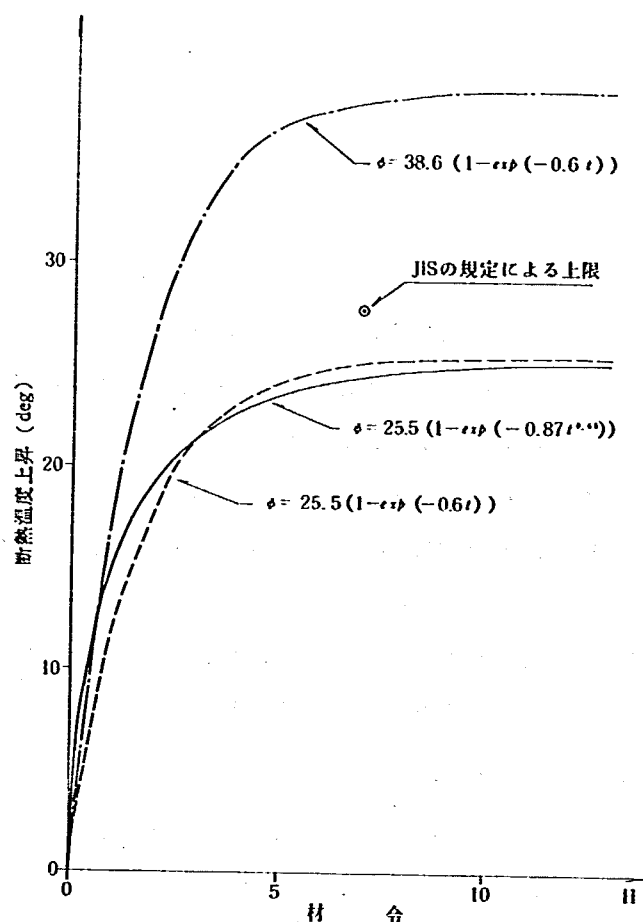


図2-12 コンクリートの断熱温度上昇

実測値と比較的一致しているが、ブロック断面内の温度分布は実測値と大きくかけ離れてしまう。従って熱伝達率を無視した解析は好ましくない。

次に、ひずみゲージ型温度計の温度履歴を熱電対型温度計の温度履歴を比較してみると、図2-8および図2-9に示すようになる。埋設型温度計の場合、図上では誤差が大きいが零点補正值が検定値とずれていたと考えれば、温度履歴は熱電対型温度計と極めてよく一致する。この場合たまたま零点補正值がずれていたことも十分考えられるが、その設置に際しては零点補正を十分検証する必要がある。挿入型温度計の場合、零点補正は検定値とよく一致していたが、温度上昇は熱電対型温度計に比べ10%ほど低下している。これは挿入パイプ内の空気の流れのため、測定点の温度とコンクリートの温度が完全に一致していないためと思われる。

もう1つは断熱温度上昇が意外に低いことである。すなわち、Case 1、Case 2よりセメントの総発熱量を求めると、従来より言われているようにフライアッシュの発熱量を中庸熱セメントの1/2とした場合には53 kcal/kg、フライアッシュの反応がまだ進行していないとしてその発熱量を無視した場合には62 kcal/kgとなる。しかし、これは材令7日前後の温度履歴を下に算出し、なおかつコンクリートの水和熱を(4)式または(4)式で近似したための結果であり、セメントの反応は計算上発熱量を0とみなした後も極めて緩慢に進行しているものと考えられる。これは温度降下速度が実測値の方が緩慢であることから裏づけられる。ただしその発熱量(発熱速度)は極めて緩慢であり、温度変化量は概ね無視できるものと考えてよい。

Case 3は、JISに規定されているセメントの総発熱量のほぼ上限にあたる80 kcal/kgから断熱温度上昇を推定し、かつ熱伝達率を無視して計算したものである。この場合、ブロック下部の測点の温度履歴は

3. コンクリートの力学的特性

3.1. 実験概要

3.1.1 コンクリートの配合

コンクリートの弾性係数、圧縮強度、引張強度はコンクリートの単位セメント量と骨材の性質によって左右される。これら力学的特性を知るためには、ダムコンクリートと同じ配合と供試体を用いて試験を行ってこれを求めることが望ましいが、供試体の寸法から供試体の最大骨材寸法（Gmax）は40mm以下に制限される。このようなことからコンクリートの力学的特性を求めるためにはダムコンクリートをウェットスクリーンにかけ40mmオーバーの骨材をふるった後の配合で試験が行われる。ダムコンクリートの力学的特性とこのような供試体の力学的特性が同一であるかは、特に若い材令においてはいささか疑問が残るが、ここでは便宜上両者の特性は同一であると仮定することにする。なお、ミキサーの関係上ウェットスクリーンを行う代わりに、40mm以上の骨材をあらかじめ除去した配合で供試体の作製を行った。試験に用いた示方配合は表3-1の通りである。なお各ダムのコンクリート示方配合については表2-1を参照されたい。

表3-1 力学的特性を求めるための示方配合

ダム名	骨材名	Gmax (mm)	C + F W	W (kg/m³)	C (kg/m³)	F (kg/m³)	S (kg/m³)	G (kg/m³)	
								40~ 20mm	20~ 5mm
Od	砂岩	40	1.53	149.6	229.0	0	795.4	558.8	583.2
Ok	川砂利(砂岩)	40	1.18	131.6	116.1	38.7	391.5	576.7	576.7
K	安山岩	40	2.35	146.0	257.1	85.7	775.1	529.1	578.3
S	砂質片岩	40	1.14	130.6	111.9	37.3	935.1	552.1	645.4
N	砂岩	30	1.45	164.4	239.5	0	887.6	967.4	

注) N配合の粗骨材の粒度は30~5mmである。

3.1.2 弾性係数の測定

弾性係数の測定は「土木材料実験」に示す方法に準拠して行う。すなわち、図3-1に示すように円柱供試体（φ15cm×30cm）に長さ30mmのひずみゲージ4枚を貼り付け、想定される破壊荷重の1/2までの荷重を材令に応じて表3-2に示す載荷速度で載荷し、1分毎に載荷重およびひずみを測定する。弾性係数の測定は材令1, 2, 3, 4, 5, 7, 14, 21, 28日の各日に行う。

弾性係数はひずみが 50×10^{-6} の点と応力が破壊強度の40%の点から次式によって求められる。

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - 50 \times 10^{-6}} \quad (1)$$

ここに、 σ_1 ：ひずみが 50×10^{-6} の時の応力、 σ_2 ：破壊強度の40%、

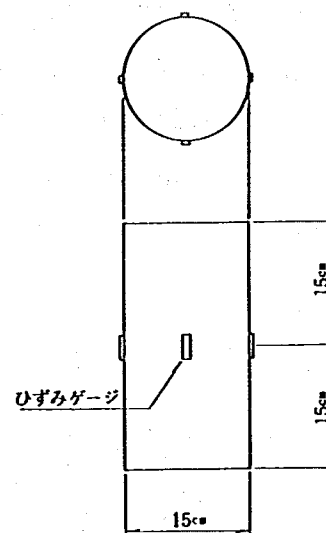


図3-1 ひずみゲージ取付位置

ϵ_2 : 破壊強度の40%の応力時のひずみである。

ただし、破壊強度が求められない場合は、 σ_2 、 ϵ_2 として最大荷重時の応力、ひずみを用いるものとした。

3.1.3 圧縮強度の測定

圧縮強度の測定は JIS-A 1108 に準拠して行う。すなわち、円柱供試体 ($\phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$) を用いて弾性係数測定試験終了後の状態から、材令に応じて表 3-3 に示す載荷速度で載荷し、圧縮強度を求める。なお、試験に際してはこの間20秒間隔で荷重およびひずみを測定する。圧縮強度の測定は材令 1, 2, 3, 4, 5, 7, 14, 21, 28日の各日に行う。

3.1.4 引張強度の測定

引張強度の測定は JIS-A 1113 に準拠して割裂法によって行う。すなわち、円柱供試体 ($\phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$) を横にして直径方向に荷重を載荷し引張強度を求める。載荷速度は材令に応じて表 3-4 に示す値とする。引張強度の測定は材令 1, 2, 3, 4, 5, 7, 14, 21, 28日の各日に行う。

割裂試験から引張強度を求めるには次式を用いる。

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dl} \quad (2)$$

ここに、 P : 載荷重、 d : 供試体の直径、 l : 供試体の長さである。

3.2 実験結果と考察

3.2.1 弾性係数

コンクリートの初期材令の弾性係数の把握は、弾性係数をどのように定義するかを別としても非常に難しい。すなわち、極めて若い材令の場合にはセメントが十分硬化していないため、コンクリートの弾性係数は主として骨材の弾性係数、骨材のかみあわせの効果などが大きな影響を占める。従って、骨材の種類によっても大きな差が生じるし、また、骨材の形状、コンクリートの締固め度によっても大きなバラツキが生じることになる。

実験結果を各ダムの配合に対してまとめた結果が表 3-5 であり、また、弾性係数の経時変化を示したのが図 3-2 である。また、代表的な応力ひずみ曲線を K, Od, Ok ダムについて示したのが図 3-3 から図 3-5 である。

コンクリートの応力ひずみ曲線は一般に直線関係がないが、図 3-3 から 5 でも明らかなように材令が若

表 3-2 弾性係数試験時の載荷速度

材 令	荷 重 の 増 加 (kg/min)	応 力 の 増 加 (kg/cm ² /min)
1 日	350	2
2	700	4
3	1000	6
4	1400	8
5	1800	10
7~28	2000	12

表 3-3 圧縮強度試験時の載荷速度

材 令	荷 重 の 増 加 (kg/min)	応 力 の 増 加 (kg/cm ² /min)
1 日	1000	6
2	2000	12
3	3000	18
4	4000	24
5	5000	30
7~28	6000	36

表 3-4 引張強度試験時の載荷速度

材 令	荷 重 の 増 加 (kg/min)	応 力 の 増 加 (kg/cm ² /min)
1 日	500	0.7
2	1000	1.4
3	1500	2.1
4	2000	2.8
5	2500	3.5
7~28	3000	4.2

いはどまた強度が低いほどこの傾向は著しい。

表 3 - 5 弾性係数の大きさ

単位： $\times 10^5 \text{ kg/cm}^2$

材令(日) ゲム名	1	2	3	4	5	7	14	21	28
Od	0.23	0.78	1.07	1.32	1.32	1.43	1.80	1.89	2.42
Ok	0.40	0.17	0.27	0.24	0.57	0.62	0.81	0.88	0.99
K	0.47	0.95	1.77	1.98	1.97	2.77	3.12	3.29	3.16
S	0.09	0.25	0.24	0.41	0.61	0.83	0.89	1.42	1.37
N	0.36	0.87	1.48	1.34	1.60	1.61	1.68	1.87	2.07

注) 試験値のパラツキについては巻末参考資料参照のこと。

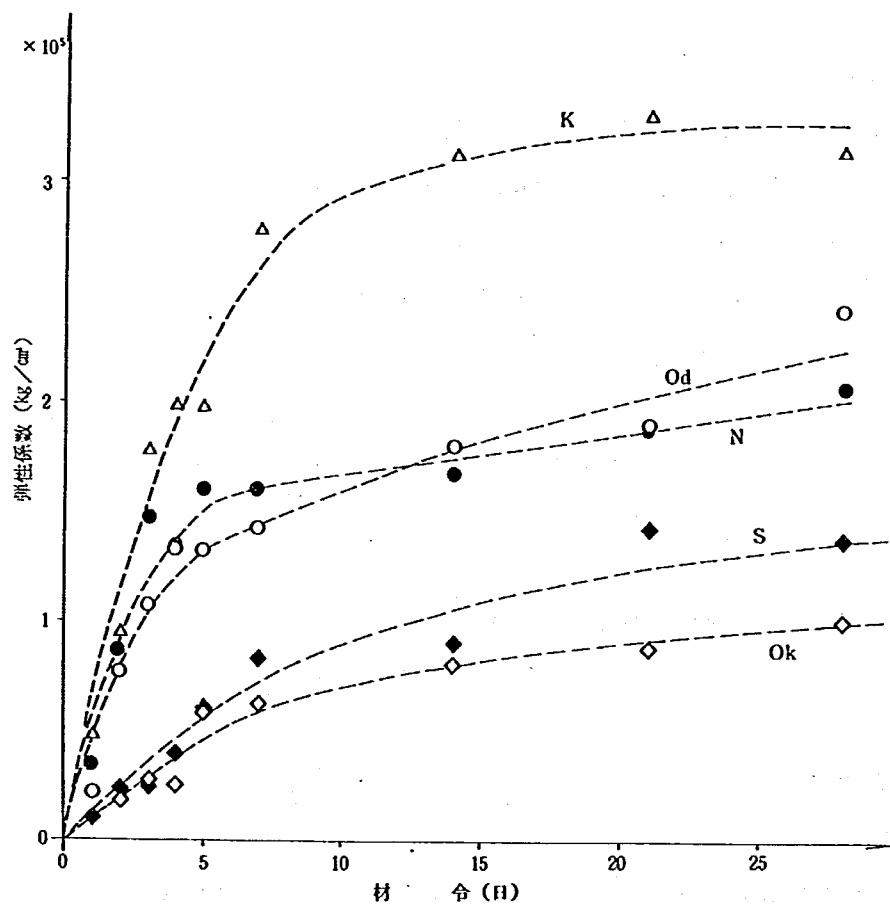


図 3 - 2 弾性係数の経時変化

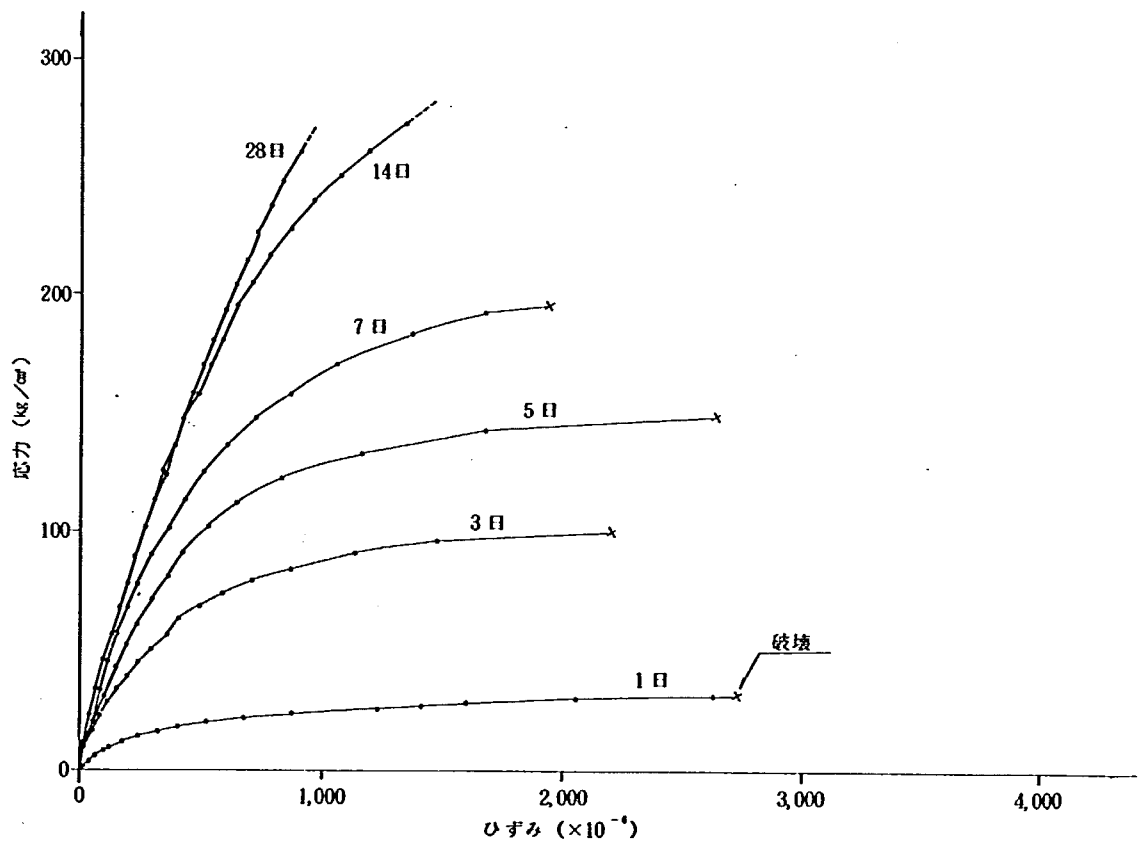


図3-3 応力・ひずみ曲線 (Kダム)

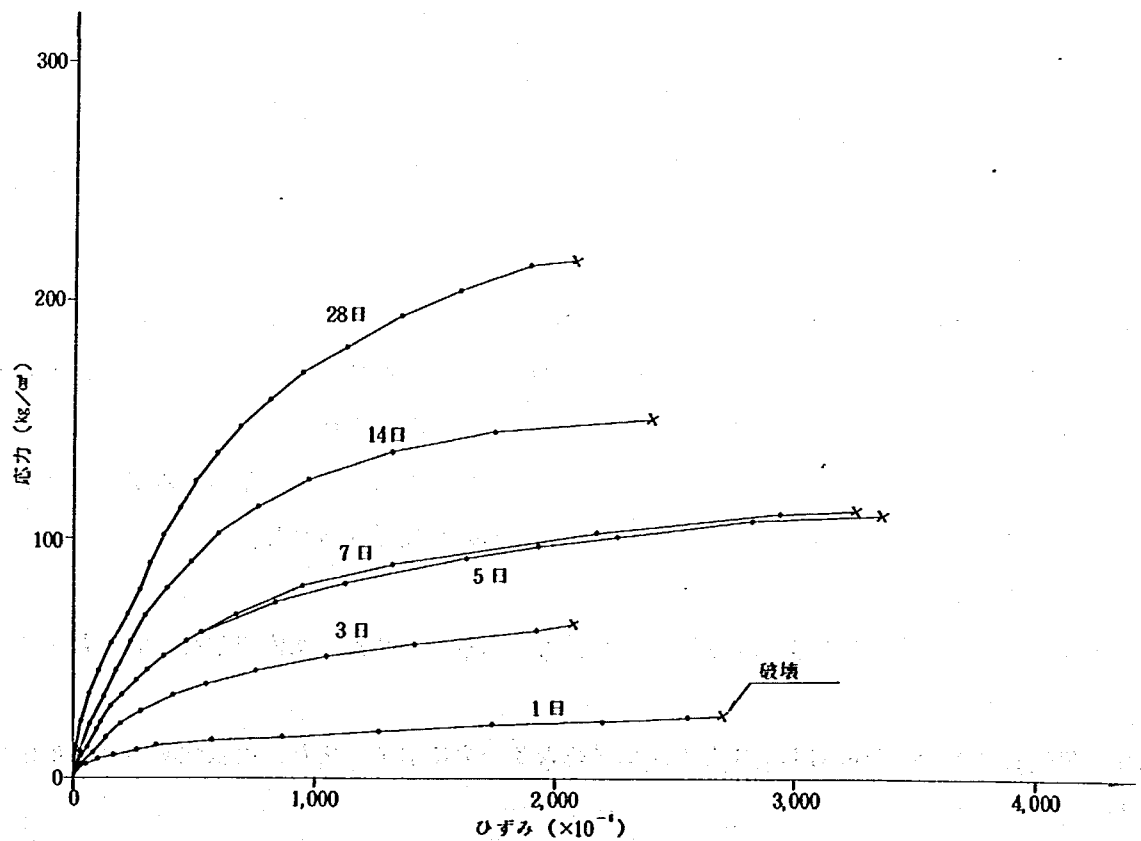


図3-4 応力・ひずみ曲線 (Odダム)

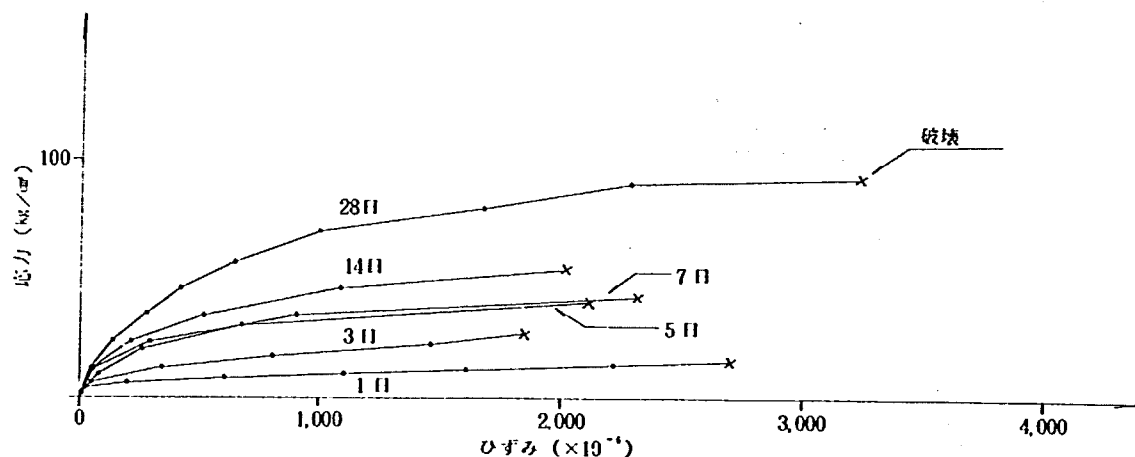


図3-5 応力・ひずみ曲線 (Okダム)

3.2.2 圧縮強度

実験結果を各ダムの配合に対してまとめた結果を表3-6に示す。また、圧縮強度の経時変化を図3-6に示す。

表3-6 圧縮強度の大きさ

単位: kg/cm²

材令(日) ダム名	1	2	3	4	5	7	14	21	28
Od	26.6	45.0	68.0	80.2	95.5	106.5	139.8	169.0	210.9
Ok	13.3	16.0	26.2	24.6	38.4	42.9	50.4	63.1	91.8
K	33.6	66.2	95.4	124.9	142.5	196.5	—	—	—
S	8.1	17.1	24.3	32.0	44.4	52.7	67.6	85.3	93.1
N	23.1	44.8	71.1	79.4	83.4	105.4	130.1	165.0	205.1

注) 試験値のバラツキについては巻末参考資料参照のこと。

試験値のバラツキは、初期材令においても、弾性係数のバラツキに比べ比較的小さかった。これは、弾性係数の大きさは骨材の形状、かみあわせなどのように強いところの条件で定まるのに対し、圧縮強度の大きさはセメントの強度といった弱いところの条件で定まるためと考えられる。

また、コンクリートの圧縮試験における破壊形態は一般にせん断破壊と考えられるが、材令1日程度の若い材令の供試体には割裂のように縦にひびわれのはいるものが見受けられた。

3.2.3 引張強度

引張強度の測定は引張試験によって求めるのが妥当であるが、装置の関係で割裂試験をもってこれに代用した。

試験結果を各ダムの配合に対してまとめた結果を表3-7に示す。また、引張強度の経時変化を図3-7に示す。

3.2.4 弾性係数、圧縮強度、引張強度の関係

硬化したコンクリートの弾性係数、圧縮強度、引張強度の関係を種々の配合に対して比較した例は多いが、

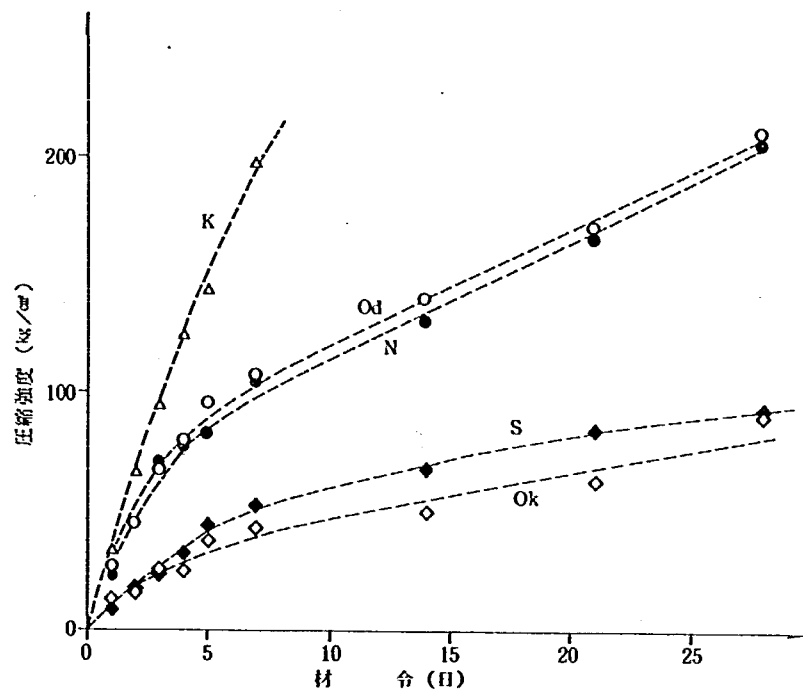


図3-6 圧縮強度の経時変化

表3-7 引張強度の大きさ

材令(日) ダム名	1	2	3	4	5	7	14	21	28
Od	3.3	5.6	8.3	9.4	10.9	11.8	14.4	18.4	21.1
Ok	1.5	1.6	3.6	4.0	4.3	4.8	5.9	6.6	10.4
K	3.7	7.7	10.5	13.8	15.5	22.0	25.9	28.9	34.4
S	1.2	2.5	3.5	4.9	5.7	5.8	9.3	10.8	11.2
N	2.7	5.5	6.3	8.5	9.9	11.4	15.1	19.7	21.8

注) 試験値のバラツキについては巻末参考資料参照のこと。

初期材令時のコンクリートの弾性係数、圧縮強度、引張強度の関係を調べた例は少ない。図3-8は材令1～28日のコンクリートの弾性係数と圧縮強度の関係を示したものである。硬化したコンクリートの弾性係数と強度の関係は、例えば

$$E = a\sqrt{\sigma} \text{ ----- (3)}$$

などで表わされているが、硬化過程を経時変化的に見れば、図3-8のように弾性係数と圧縮強度はほぼ比例関係にあることが分かる。また同図をさらに詳しく見ると、相対的に貧配合のコンクリートほど、圧縮強度の増加に対する弾性係数の増加率が圧縮強度の小さな段階で頭打ちになることが分かる。(3)式はこのような現象を捕えたものと解釈される。

圧縮強度と弾性係数の関係は骨材の種類、性質にもより、図3-8の関係は必ずしも普遍的なものではないが、弾性係数の大きさは圧縮強度より推定することが可能である。

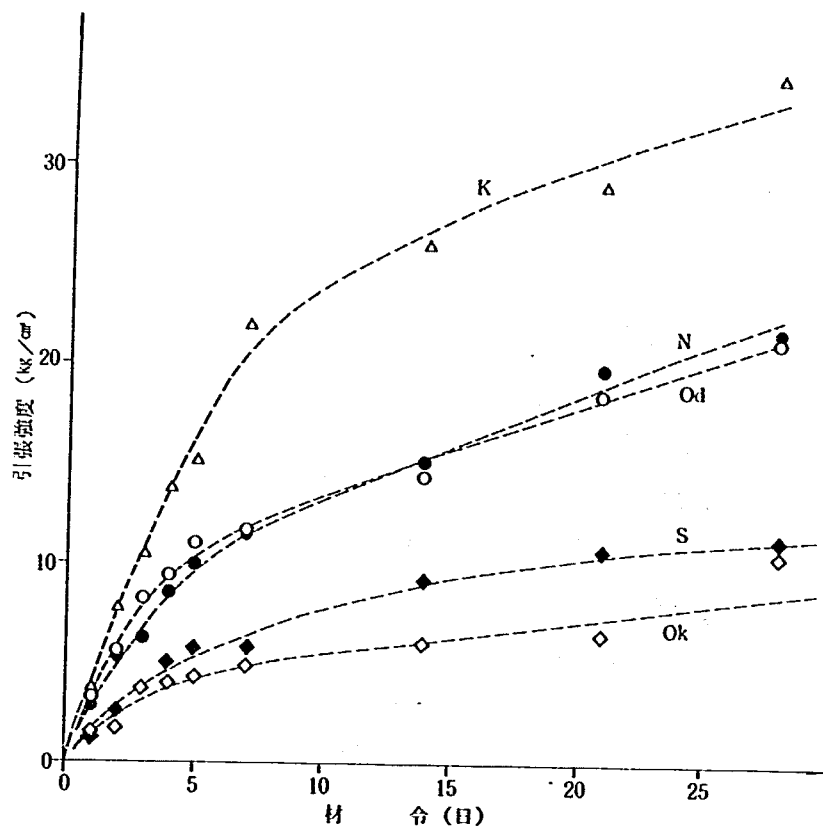


図 3 - 7 引張強度の経時変化

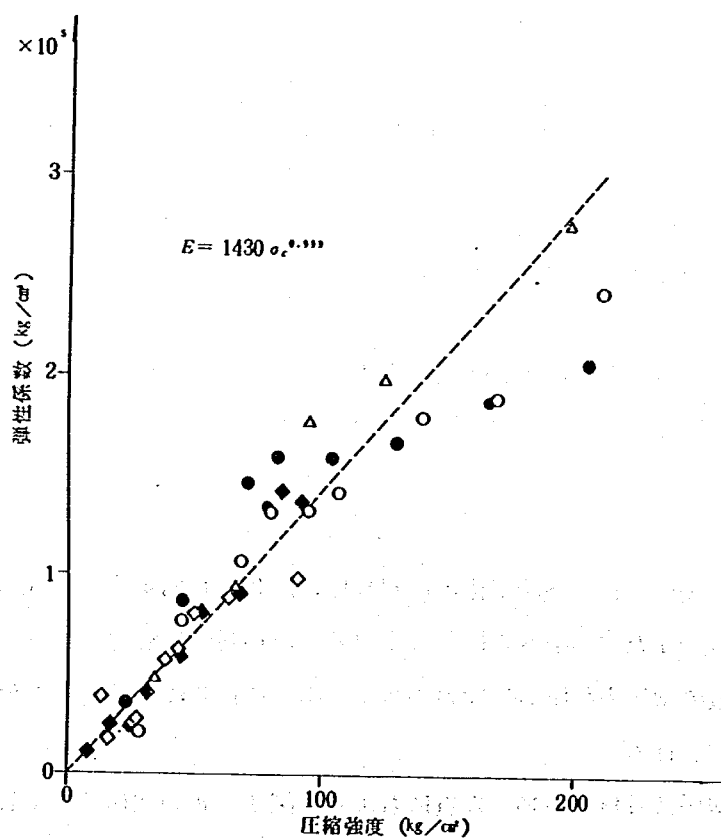


図 3 - 8 圧縮強度と弾性係数の関係

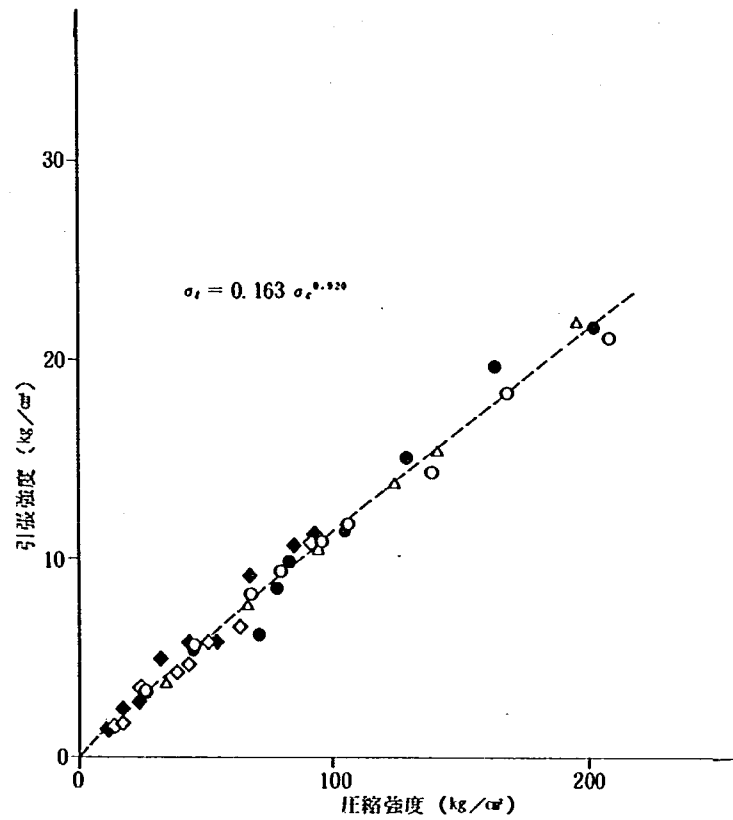


図 3 - 9 圧縮強度と引張強度の関係

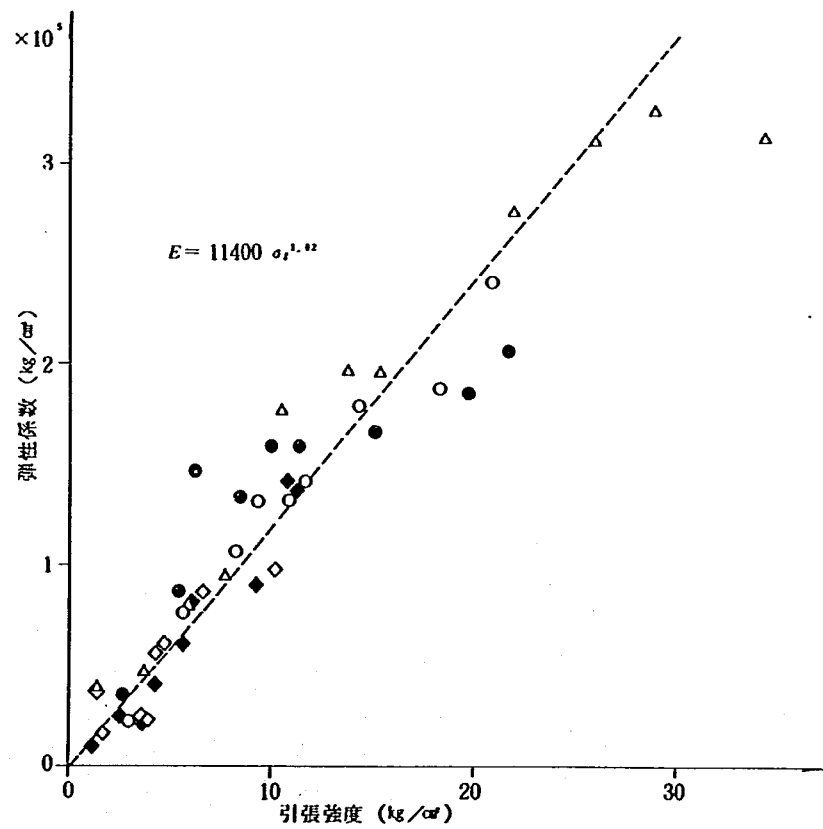


図 3 - 10 引張強度と弾性係数の関係

図3-9は同様に引張強度と圧縮強度の関係を示したものであるが、非常に高い相関性を有していることが分かる。従って引張強度は圧縮強度より精度よく推定することが可能である。

図3-10は引張強度と弾性係数の関係を示したものであり、今回の実験のうち最も重要な結果のうちの1つである。引張領域における応力ひずみ関係は、圧縮領域における応力ひずみ関係よりも直線性があると思われるから、これを完全な直線関係と見なせば、破壊時の引張ひずみは図3-10の相関式より

$$\begin{aligned}\epsilon_t &= 8.77 \times 10^{-5} \sigma_t^{-0.02} \\ &\doteq 8 \sim 9 \times 10^{-5} \dots\dots\dots (4)\end{aligned}$$

で表わされることになる。すなわち、クラックの発生原因として限界ひずみを考えれば、概ね引張ひずみが 1×10^{-4} に達した時点でクラックが発生すると考えることができる。このように仮定すれば、温度応力によるクラックを考える場合にこれを無次元化して考えることが可能となり、解析上の取扱いが容易になる。これについては次章で詳しく説明しよう。

4. クラック発生防止のための温度規正法

4.1 概 説

ダムコンクリート内に発生するクラックはダムの一体性を損い、ダムの構造上または機能上の障害となる。そこでダムコンクリート内に温度応力に基づくクラックが発生するのを防止するために種々の温度規正法が考えられている。温度規正法をクラックの発生要因別に整理すると次のように区分できよう。

① 外部拘束によるクラックを防止するための温度規正法

- (1) 収縮継目の設置による外部拘束度の低減
- (2) セメント使用量の抑制による温度上昇度の低減
- (3) リフト打設による熱放散の助長
- (4) 打設温度の規正による最高温度の低減。夏期の打設制限またはプレクーリング
- (5) パイプクーリングによる温度上昇の抑制

② 内部拘束によるクラックを防止するための温度規正法

- (1) セメント使用量の抑制による温度上昇、温度勾配の低減
- (2) リフト厚の調整による温度上昇、温度勾配の低減
- (3) パイプクーリングまたはプレクーリングによる温度上昇または温度勾配の低減

次にこれらの方法を具体的に適用するにあたっての配慮について考慮しよう。

4.2 外部拘束によるクラックの発生防止のための配慮

一般に温度上昇による圧縮応力の影響はコンクリートがまだ十分硬化しておらず十分な弾性係数は発揮されない。また、クリープ等の影響も大きいとして、これを無視した取扱いが行なわれている。この場合、外部拘束による温度応力は外部拘束度を用いて次式より算出することができる。

$$\sigma_t = RE_c \alpha \phi \quad (1)$$

ここに、 E_c ：コンクリートの弾性係数、 α ：コンクリートの熱膨張率（約 1.0×10^{-5} ）、 ϕ ：コンクリートの温度降下量、 R ：外部拘束度であり、外部拘束度の大きさは長方形ブロックに対して図4-1のように与えられる。（長方形ブロック以外に対しても同様なグラフが描けるが、ここでは省略する。例えば完成したダムの外部拘束度については土研資料第1558号を参照。）

いま、温度降下時の弾性係数をほぼ一定と仮定し、また、第3章で述べたように引張破壊時の限界ひずみを

$$\epsilon_t \doteq 1 \times 10^{-4} \quad (2)$$

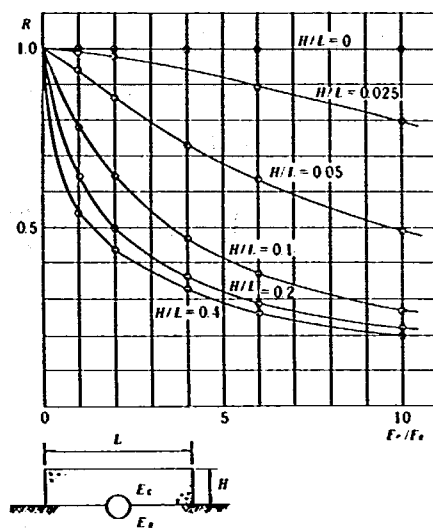


図4-1 長方形ブロックに対する外部拘束度

で表わせば(1)式より許容最大温度降下量は

$$\phi = \frac{\epsilon_t}{Ra} \quad (3)$$

となり、図4-2のように表わすことができる。なお、同図には安全率が考慮されていないことに注意されたい。

ここで、クリープの影響を無視して考えれば、図4-2から明らかなように、コンクリートブロックの打設高 H が大きいほど、また、コンクリートの弾性係数が大きいほど許容最大温度降下量は大きくなることはいえる。従って、ダムコンクリートが最高温度に達するまでは別として、その後に温度降下をもたらすような過冷却は一般には好ましくない。

最高温度の規正が十分行い得ない場合、また場合によっては、積極的にクリープの効果を期待して若い材令のうちに温度を徐々に降下させる方法が考えられる。クリープを考慮した応力ひずみ関係は、

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_c(k)} + \sigma f(k) \ln(t+1) \quad (4)$$

で与えられる。ここに、 $f(k)$ ：材令 k 日でのクリープ係数、 t ：載荷日数である。いま、材令 k 日において温度変化 $d\phi$ を与えた時、全ひずみ量 ϵ は不変として t 日後の温度応力を求めると(4)式より、

$$\sigma(k+t) = E_c(k) \{ Ra d\phi - E_c(k) Ra d\phi f(k) \ln(t+1) \} \quad (5)$$

となる。従って材令 k 日から t 日間 $\partial\phi/\partial t$ の割合で温度降下を与えた場合の温度応力は、

$$\sigma(k+t) = \int_0^t E_c(k+\tau) Ra \frac{\partial\phi}{\partial\tau} \{ 1 - E_c(k+\tau) f(k+\tau) \ln(t-\tau) \} d\tau \quad (6)$$

で表わされることになる。いま破壊規準として

$$\frac{\sigma(k+t)}{E_c(k+t)} = \epsilon_t \doteq 1 \times 10^{-4} \quad (7)$$

を仮定すれば、

$$\epsilon(k+t) = \int_0^t \frac{E_c(k+\tau)}{E_c(k+t)} Ra \frac{\partial\phi}{\partial\tau} \{ 1 - E_c(k+\tau) f(k+\tau) \ln(t-\tau) \} d\tau \quad (8)$$

が任意の時刻において(7)を満足しなければならない。いま、クリープ係数として図4-3に示す値の下限值を用い、弾性係数として図3-2のOdダムの例を用い、例えば最高温度に達する材令を5日、クーリング期間をその後25日間として一定温度降下速度で冷却したとすれば、外部拘束度を一定として

$$\epsilon \doteq 0.7 Ra\phi \quad (9)$$

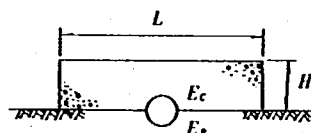
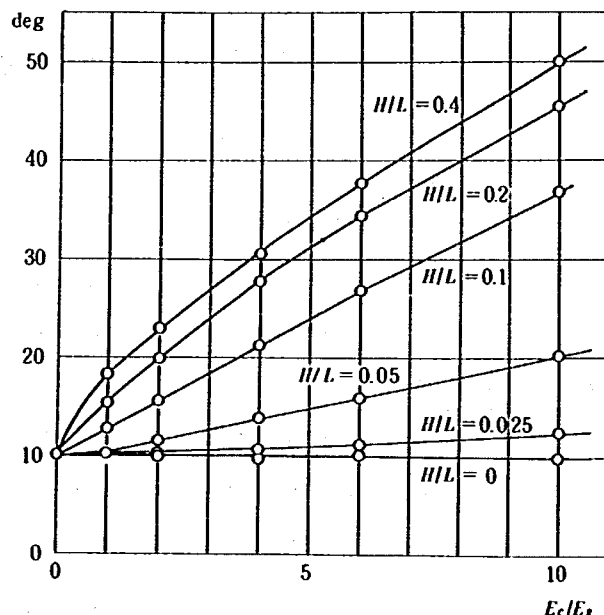


図4-2 長方形ブロックに対する
許容最大温度降下量

が得られる。従って、許容最大温度降下量は図4-2のおよそ1.5倍ということができる。ただし、この場合外部拘束度はほぼ1に近い値となることに注意しなければならない。

クリープの効果を期待して若い材令のうちに冷却するか、またコンクリートが十分打上って外部拘束度が小さくなった後に冷却するか判断は、諸々の条件を判断して決定しなければならないが、重力ダムのようにレヤが長い場合には、クリープの効果を期待して急速に冷却するよりも打設高が大きくなるのを待って徐々に冷却する方が一般に好ましいといえよう。また、アーチダムのようにレヤが短かく外部拘束度が小さい場合には、急速に冷却しても余り大きな問題は生じない。

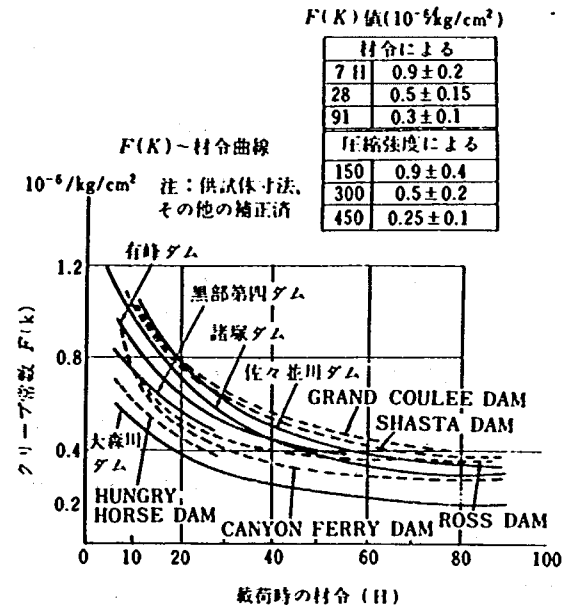


図4-3 クリープ係数 (君島による)

4.3 内部拘束によるクラックの発生防止のための配慮

内部拘束による温度応力の厳密解は弾性理論またはこれにさらにクリープの影響を加味した解析を試みなければならないが、ここでは平面保持の原則が成立するものとして弾性体としての内部拘束による温度応力を求めてみよう。いまコンクリートのブロック内の温度分布を $\phi(x)$ で表わせば、

$$\phi(x) = \phi_m + \{\phi(x) - \phi_m\} \quad \text{----- (1)}$$

が成立するから、この第1項を外部拘束による温度応力に関する項、第2項を内部拘束による温度応力に関する項と考えることができる。ただし、 ϕ_m はブロック内の平均温度である。ここで、新たに打設された1リフトのコンクリートを考えよう。この場合、当該リフトの温度変化による曲げ変形の影響は十分小さいと考えられるため、平面保持の原則に従えば、 $\{\phi(x) - \phi_m\}$ は全て拘束応力に転化されることになる。(実際には平面保持の原則は成立しないから部分的な変形が生じ、拘束応力はここで計算された値よりも小さくなる。)

いま、等温度面に垂直な方向の変形は自由であると考えられるから、温度勾配による温度応力は平面応力状態の応力ひずみ関係式で近似でき、

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{E\alpha}{1-\nu^2} [\{\phi(x) - \phi_m\} + \nu \{\phi(x) - \phi_m\}] \\ &= \frac{E\alpha}{1-\nu} \{\phi(x) - \phi_m\} \quad \text{----- (2)} \end{aligned}$$

で表わされることになる。さらにコンクリートの硬化過程を考えた場合、(2)式は

$$\sigma(t) = \int_0^t \frac{E(\tau)\alpha}{1-\nu} \left\{ \frac{\partial \phi(x, \tau)}{\partial \tau} + \frac{d\phi_m(\tau)}{d\tau} \right\} d\tau \quad \text{----- (3)}$$

と表わされることになる。一軸引張の場合と二軸引張の場合とで限界ひずみが等しいかどうかは明らかではないが、いまこれが等しいものと考え、破壊規準として

$$\frac{(1-\nu)\sigma(t)}{E(t)} = \epsilon_t \doteq 1 \times 10^{-4} \quad \text{----- (4)}$$

を仮定すれば

$$\epsilon(t) = \int_0^t \frac{E(\tau)}{E(t)} \alpha \left\{ \frac{\partial \phi(x, \tau)}{\partial \tau} + \frac{d\phi_m(\tau)}{d\tau} \right\} d\tau \quad \text{----- (5)}$$

が任意の時刻、場所において(4)式を満足しなければならない。内部拘束によるクラックの発生は(5)式を実際に求めればよいわけであるが、例えば、一般に内部拘束が問題となる打設直後の温度変化を考えれば、弾性係数の変化は直線的であり、また温度の変化速度はほぼ一定であるから、打設温度を一定として(5)式は

$$\epsilon(t) \doteq 0.5 \alpha \{ \phi(x, t) - \phi_m(t) \} \quad \text{----- (6)}$$

で近似することができよう。また、コンクリートが硬化した後の温度変化、または急激な温度変化に対しては弾性係数は一定とみなせるから、

$$\epsilon(t) = \alpha \{ \{ \phi(x, t) - \phi_m(t) \} - \{ \phi(x, t') - \phi_m(t') \} \} \quad \text{----- (7)}$$

で近似することができよう。従って、(6)ないしは(7)式から、内部拘束による温度応力が発生するのを防止するためには、任意の点の温度と平均温度との温度差を10～20 deg 以下に抑える必要がある。勿論、これは内部拘束の影響のみを考慮した場合の条件であり、実際にはこれに外部拘束による温度応力を加算して考える必要がある。この場合、(5)式は

$$\epsilon(t) = \int_0^t \frac{E(\tau)}{E(t)} R(\tau) \alpha \frac{d\phi_m(\tau)}{d\tau} d\tau + \int_0^t \frac{E(\tau)}{E(t)} \alpha \left\{ \frac{\partial \phi(x, \tau)}{\partial \tau} - \frac{d\phi_m(\tau)}{d\tau} \right\} d\tau \quad \text{----- (8)}$$

と改められる。式中、外部拘束度を $R(\tau)$ と時間の関数としたのは、打設高、コンクリートの弾性係数が外部拘束度の大きさに影響を与え、これが時間の関数として表わされるためである。

5. ま と め

5.1 コンクリートの熱的特性について

コンクリートの重要な熱的特性には、熱拡散率、比熱、熱伝導率、熱膨張率がある。このうち、今回は前の3つの項目について測定を行った訳であるが、これら物理量の大きさは骨材の種類もさることながら、骨材量によっても大きく影響を受ける。従って、その測定に当っては実際に用いるコンクリートと同じ骨材率の材料を用いて実験を行うことが望ましい。

一般に、熱拡散率の大きさは骨材率の増加とともに増加し、比熱の大きさは逆に減少する。また、熱伝導率についてはその影響は小さい。

5.2 コンクリートの力学的特性について

コンクリートの重要な力学的特性には、圧縮強度、引張強度、弾性係数、クリープ係数がある。このうち、今回は前の3つの項目について、特に初期材令における特性に着目して測定を行った。圧縮強度、引張強度、弾性係数の関係を経時的に見ると、これら3つの物理量はほぼ比例関係にあることが分った。またこの関係は骨材の種類、単位セメント量によらず概ね一定であった。これらの関係式は

$$\begin{aligned} E &= 1430 \sigma_c^{0.999} \dots\dots\dots (1) \\ \sigma_t &= 0.163 \sigma_c^{0.920} \\ E &= 11400 \sigma_t^{1.02} \end{aligned}$$

で表わされる。

ただし、材令が大きくなりコンクリートが十分に硬化してくると、これらの関係は成立せず、圧縮強度、引張強度に対する弾性係数の伸びは低下する傾向にある。

引張領域においては、ひずみ量が小さいことから応力ひずみ関係を直線とみなすことができよう。この場合、引張強度と弾性係数の関係から、引張破壊時のひずみ量は、材令によらず

$$\epsilon_t \doteq 1 \times 10^{-4} \dots\dots\dots (2)$$

と考えることができる。

5.3 コンクリートの発熱特性について

コンクリートの発熱量は実用上

$$Q(t) = Q_0 \exp(-mt^A) \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。この時 A は一般には1とならない。但し、1としても m の値を適当に定めれば大きな誤差は生じない。(1)式は材令の若い時期のみに適用され得る式であり、実際の発熱はさらに長期間、緩慢な速度で進行するものと考えられる。

断熱温度上昇は(1)式を積分して

$$\phi(t) \doteq \frac{1}{\rho c} \int_0^{\infty} Q(t) dt \times \{1 - \exp(-mt^A)\} \dots\dots\dots (2)$$

で表わされるが、 $Q(t)$ が初期材令における近似式であることを考えると、セメントの総発熱量 $\int_0^{\infty} Q(t) dt$ から断熱温度上昇の近似式を推定するのは必ずしも妥当でない。この場合、

$$\phi(t) = \phi_0 \{ 1 - \exp(-mt^A) \} \quad \text{----- (3)}$$

は必ずしもよい近似式でなくなってしまう。

ダムコンクリートの温度履歴を計算する場合、一般に熱伝達率の影響を考慮する必要がある。その大きさは

$$\alpha = 10.0 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{deg} \quad \text{----- (4)}$$

である。これを無視した場合、温度上昇は計算値が実測値よりも下回る。

5.4. ダムコンクリートの温度規正について

引張強度に対する引張ひずみが概ね

$$\varepsilon_t \doteq 1 \times 10^{-4} \quad \text{----- (1)}$$

で表わされることから、外部拘束、内部拘束によるクラックの発生を防止するためには、次のような条件が満足されなければならない。すなわち、外部拘束に対しては、許容最大温度降下量は外部拘束度を R として

$$\Delta\phi \leq \frac{10}{R} \text{ deg} \quad \text{----- (2)}$$

内部拘束に対しては、ブロック全体の平均温度差は

$$\phi(x, t) - \phi_m(t) \leq 10 \sim 20 \text{ deg} \quad \text{----- (3)}$$

とならなければならない。ただしクリープの効果が期待できる場合は、その材令にもよるが、上記値を50%程度までは割増することができるようである。

参 考 資 料

1. 実験における測定データ一覧
2. 各ダムの実測温度履歴と計算値との照合

1991	1992	1993	1994	1995	1996
1997	1998	1999	2000	2001	2002
2003	2004	2005	2006	2007	2008
2009	2010	2011	2012	2013	2014
2015	2016	2017	2018	2019	2020
2021	2022	2023	2024	2025	2026
2027	2028	2029	2030	2031	2032
2033	2034	2035	2036	2037	2038
2039	2040	2041	2042	2043	2044
2045	2046	2047	2048	2049	2050
2051	2052	2053	2054	2055	2056
2057	2058	2059	2060	2061	2062
2063	2064	2065	2066	2067	2068
2069	2070	2071	2072	2073	2074
2075	2076	2077	2078	2079	2080
2081	2082	2083	2084	2085	2086
2087	2088	2089	2090	2091	2092
2093	2094	2095	2096	2097	2098
2099	2100	2101	2102	2103	2104
2105	2106	2107	2108	2109	2110
2111	2112	2113	2114	2115	2116
2117	2118	2119	2120	2121	2122
2123	2124	2125	2126	2127	2128
2129	2130	2131	2132	2133	2134
2135	2136	2137	2138	2139	2140
2141	2142	2143	2144	2145	2146
2147	2148	2149	2150	2151	2152
2153	2154	2155	2156	2157	2158
2159	2160	2161	2162	2163	2164
2165	2166	2167	2168	2169	2170
2171	2172	2173	2174	2175	2176
2177	2178	2179	2180	2181	2182
2183	2184	2185	2186	2187	2188
2189	2190	2191	2192	2193	2194
2195	2196	2197	2198	2199	2200

1. 実験における測定データ一覧

1.1 弾性係数の測定結果

(単位: $\times 10^5 \text{ kg / cm}^2$)

ダム名 材令(口)	供試体名	Od	Ok	K	S	N
1	1	0.33	0.95	0.53	0.49	0.80
	2	0.07	0.53	0.46	0.11	0.27
	3	0.15	0.06	0.45	0.07	0.44
	4	0.36	0.74	0.42		
2	1	1.01	0.27	0.94	1.51	0.80
	2	0.69	0.13	1.04	0.10	1.17
	3	0.78	0.12	0.91	0.39	0.64
	4	0.65	0.15	0.91		0.86
3	1	1.18	0.27	1.46	0.21	0.86
	2	1.06	0.22	1.70	0.16	1.92
	3	1.17	0.32	2.17	0.36	1.99
	4	0.88	0.88	1.74		1.16
4	1	1.32	0.13	1.74	0.45	1.92
	2	1.49	0.33	1.72	0.46	1.30
	3	1.24	0.27	2.49	0.42	1.17
	4	1.24	0.24	1.32	0.29	0.96
5	1	1.30	0.74	2.25	0.71	1.23
	2	1.37	0.35	2.00	0.52	1.28
	3	1.29	0.76	2.15	0.60	1.95
	4	1.33	0.44	1.48		1.95
7	1	1.52	0.70	3.16	1.14	1.59
	2	1.30	0.51	2.94	0.70	1.51
	3	1.53	0.37	2.43	0.75	1.76
	4	1.37	0.88	2.54	0.74	1.57
14	1	1.69	0.60	3.30	0.97	1.80
	2	2.07	0.59	2.89	0.50	1.65
	3	1.70	1.17	3.21	1.01	1.55
	4	1.72	0.89	3.06	1.07	1.72
21	1	2.05	0.72	3.27	1.28	1.49
	2	1.81	1.04	2.80	1.62	1.84
	3	1.81	0.88	3.35	1.37	1.81
	4	1.90		3.73		1.97
28	1	2.31	1.01	3.28	1.37	1.85
	2	2.52	0.78	2.76	1.17	2.27
	3	2.20	1.06	3.23	1.56	1.84
	4	2.65	1.12	3.35		2.32

1.2 圧縮強度の測定結果

(単位: kg / cm²)

ダム名 材令(日)	供試体 名	Od	Ok	K	S	N
1	1	25.92	10.87	32.03	7.39	24.00
	2	26.88	12.51	30.79	8.04	20.83
	3	27.62	15.62	34.97	8.72	24.45
	4	25.81	14.01	36.62		
2	1		17.23	63.27	18.39	45.95
	2	41.31	13.92	67.91	16.69	41.37
	3	41.99	13.07	66.78	16.24	44.99
	4	51.61	19.69	66.78		47.03
3	1	66.21	27.16	96.21	23.54	73.01
	2	63.44	23.77	96.15	25.13	73.12
	3	75.61	27.05	90.44	24.34	72.21
	4	66.78	26.66	98.70		66.21
4	1	80.70	26.37	119.98	30.84	78.66
	2	81.21	24.34	122.81	30.65	80.70
	3	77.48	25.01	127.05	33.16	79.23
	4	81.27	22.52	129.60	33.16	79.00
5	1	84.66	43.12	147.59	44.14	86.02
	2	99.04	34.63	142.61	44.88	85.57
	3	109.79	39.45	150.25	44.26	90.55
	4	88.29	36.56	129.60		71.31
7	1	107.81	42.44	193.89	53.93	99.60
	2	112.05	43.80	214.77	49.01	97.79
	3	99.04	42.11	205.72	54.56	111.21
	4	107.24	43.41	171.48	53.08	113.07
14	1	136.11	54.90	(以下, 50 t アムス	65.08	133.56
	2	151.95	45.84	ラーでは破壊せず)	68.48	134.41
	3	133.56	46.97		65.37	127.33
	4	137.52	54.05		71.31	125.07
21	1	161.86	59.99		80.65	
	2	169.50	62.93		86.02	159.03
	3	180.81	63.38		89.13	160.16
	4	163.84	66.21			175.72
28	1	198.08	93.38		92.25	187.32
	2	206.85	84.04		87.44	209.68
	3	215.51	95.08		99.60	218.17
	4	223.26	94.79			204.87

1.3. 引張強度の測定結果

(単位: kg / cm²)

ダム名 材令(口)	供試体名	Od	Ok	K	S	N
1	1	3.65	1.33	3.44	0.94	2.99
	2	3.03	1.54	3.41	1.48	2.33
	3	3.48	1.62	4.31		2.75
	4	3.03		3.57		2.85
2	1	5.39	1.71	7.83	2.63	5.43
	2	5.39	1.33	8.05	2.18	5.85
	3	5.96	1.67	7.87	2.43	5.61
	4	5.73	1.50	6.99	2.62	5.27
3	1	8.06	3.25	11.63	3.52	7.29
	2	8.29	3.81	10.19		5.98
	3	7.98	3.73	10.25	3.42	5.85
	4	8.87	3.69	9.96	3.55	5.95
4	1	10.01	4.01	12.74	4.74	8.90
	2	9.14	3.93	13.37	5.26	7.90
	3	9.17	4.01	15.08	4.83	8.69
	4	9.34	3.95	14.03	4.71	8.35
5	1	12.78	4.95	14.50	5.88	10.25
	2	9.37	3.33	16.08	5.13	10.72
	3	11.43	4.39	16.11	5.76	8.98
	4	9.85	4.62	15.10	5.86	9.75
7	1	11.06	4.79	21.88	5.69	10.42
	2	12.34	4.31	22.59	5.99	9.78
	3	12.50	4.24	22.89	5.58	11.71
	4	11.24	5.78	20.70	5.89	13.64
14	1	13.71	6.01	25.20	9.32	13.99
	2	14.84	5.94	27.84	8.90	16.55
	3	14.11	5.49	22.64	9.51	15.53
	4	15.05	6.00	27.88	9.62	14.48
21	1	17.32	6.55	35.69	9.99	19.27
	2	18.84	6.71	24.94	11.28	18.41
	3	17.30	7.27	28.42	11.29	20.56
	4	20.03	6.03	26.70	10.70	20.41
28	1	19.76	12.40	34.90	11.44	23.93
	2	22.80	9.78	29.73	11.01	21.44
	3	21.20	10.59	37.08	10.40	21.34
	4	20.77	8.71	36.03	12.08	20.68

2. 各ダムの実測温度履歴と計算値の照合

最後に、室内実験より得られた各ダムコンクリートの熱的特性の測定結果を下に、各ダムで埋設された温度計によって測定された温度履歴を、Carlsonの方法で数値解析し、両者の照合性を検討してみる。

以下に示した図は実測値と計算が比較的良好に一致した例を選び出したものであり、一般に現場の実測値を十分な精度で数値解析することはむずかしい。この理由としては以下の点が指摘されよう。

① 解析条件による誤差

- (i) 断熱温度上昇曲線の妥当性：実際の関数形は数多くのパラメータをもった複雑な関数形である。
- (ii) 境界条件の妥当性：平均気温が境界条件を代表しているか。（刻々の気温変化，太陽の輻射熱，風速，湛水（散水）養生などの因子の影響はどの程度であるか。）
- (iii) 打設工程の妥当性：各リフトは瞬時に投設されるものではなく，また打設温度も一様でない。

② 測定条件による誤差

- (i) 温度計の設置方法：温度計は正しい位置に設置されているか。温度計を固定する棒（鉄筋）との断熱

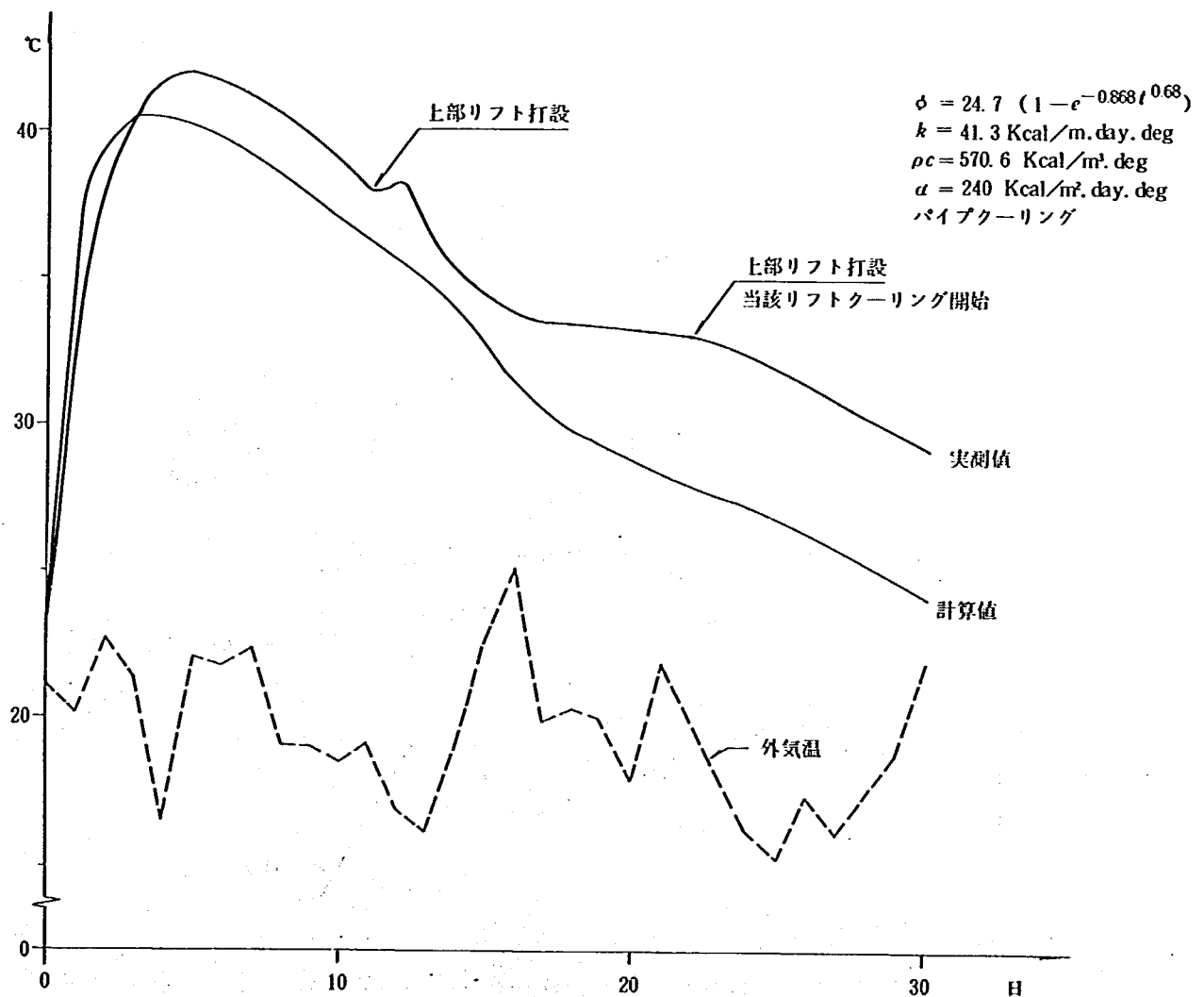


図-1 実測値と解析値の比較 (Kダム)

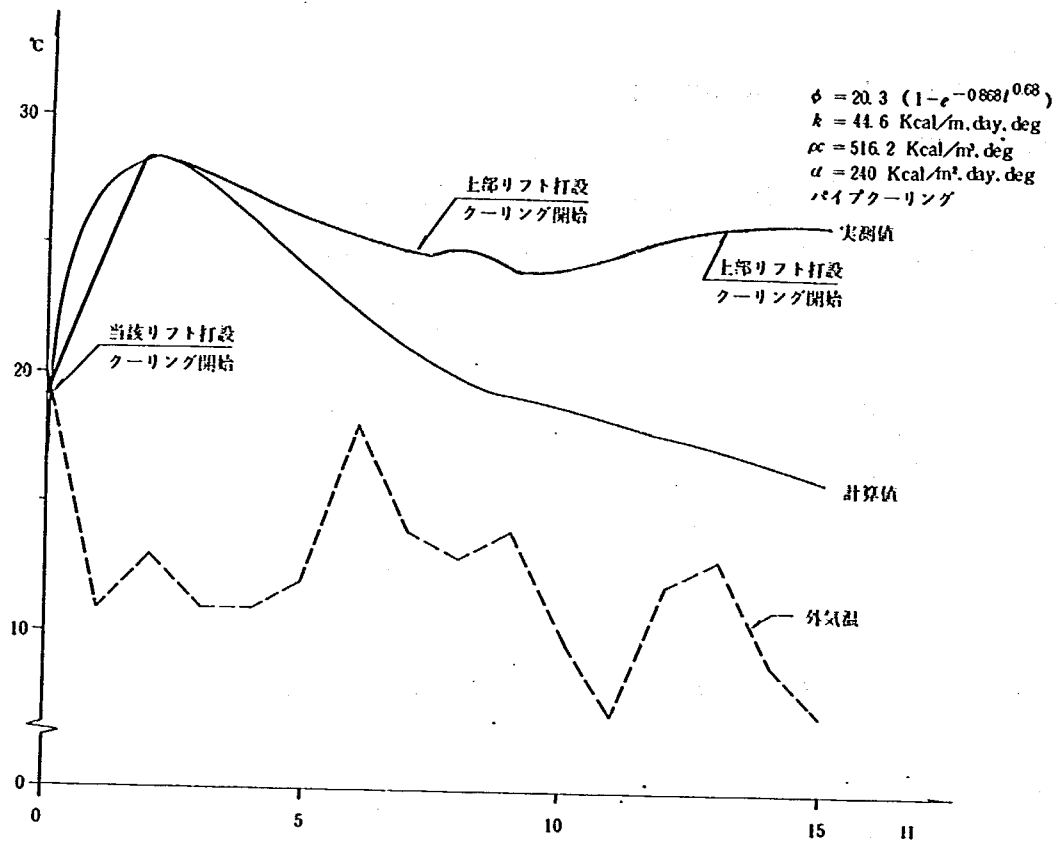


図-2 実測値と解析値の比較 (Nダム)

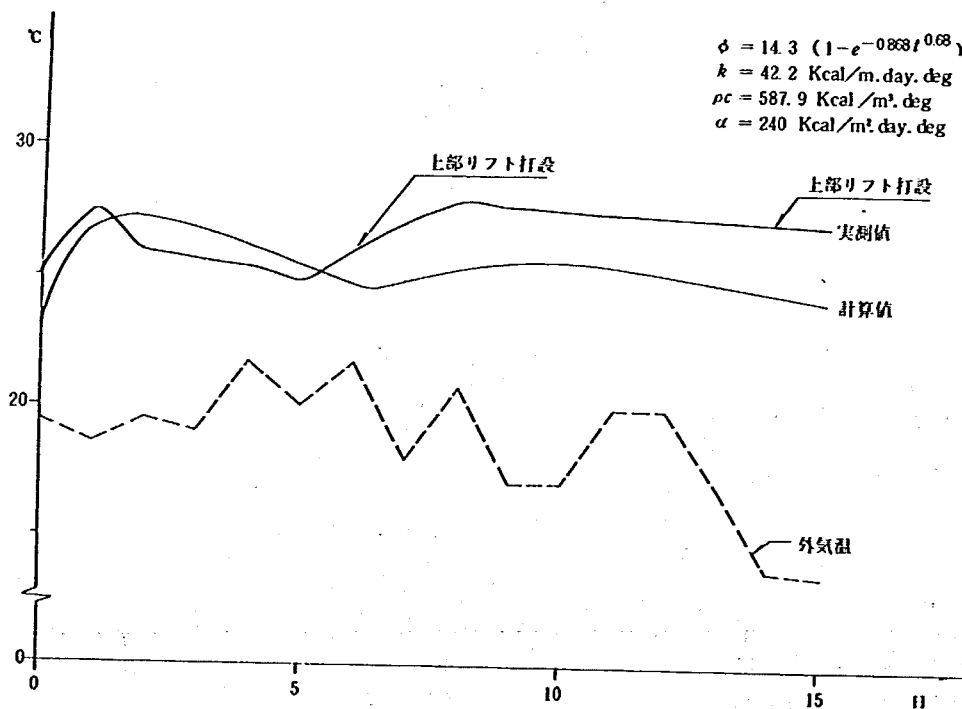


図-3 実測値と解析値の比較 (OKダム)

性は十分あるか。温度計周辺コンクリートの発熱特性の影響は十分小さいか。クーリングパイプの影響を受けすぎていないか。

(ii) 気温の測定方法：測定された気温は日気温変化を代表するものか。またダムサイト（打設リフト表面）の気温を代表するものか。

(iii) 打設温度の測定法：打設温度は打設された時点でのコンクリート温度を代表するものであるか。

(iv) 計測方法：計測は精度よく行われているか。クーリング温度はどこで測定されているか。

コンクリートダムの温度応力に
関する考察 (II)

ISSN 0386-5878
土研資料第1658号
昭和56年3月

ダム構造研究室 水野 光章 永山 功 矢沢 克敏

キーワード：ダムコンクリート、温度応力、温度規正、比熱、熱伝導率、熱拡散率、弾性係数、引張強度

要旨 コンクリートの熱的特性・初期材令における力学特性についての試験結果をとりまとめ、これについてコンクリートダムの温度規正法について考察したものである。



郵便はがき

いは郵便
つて切
下手を
下さを

3 0 5 - □ □

建設省土木研究所
ダム部ダム構造研究室 御中

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第1658号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印