

金山ダムマスコンクリートのひびわれ防止について

正員 ○小 浜 実*

正員 渡 辺 貞 夫*

正員 中 村 靖 治*

ま え が き

マスコンクリートの初期ひびわれの発生原因はいろいろとあるが、なかでも最も重要なものは熱応力を原因とするものである。中空重力式ダムにおいてもひびわれを嫌うことは他のダムと同じであるが、特に透水長が短いため、漏水防止の面からもひびわれは絶対に避けなければならない。中空重力式のダムでは熱放散面積が普通の重力ダムより大きいため、熱応力が幾分軽減されるとは云え、コンクリートは富配合になり、実際にひびわれの発生した例もあり軽視はできない。

金山ダムではひびわれ防止のため、使用セメントの改良、クーリング、養生の徹底など種々の対策を講じ、また熱応力の実体を把握するため埋設計器による測定を行なった。全コンクリート量の約40%を打設しおわった現在、ひびわれは全く見られず、良好な状態で建設を進めている。

1. ダムの概要

金山ダムは北海道における河川総合開発事業（建設省直轄）の多目的ダムとして桂沢ダムに次ぐ2番目のもので、石狩川の最大支川である空知川の上流部に北海道開発局が建設中のものである。高さ59.7m、堤頂長292.50m、堤体コンクリート体積約23万 m^3 の北海道では初めての中空重力式コンクリートダムである。その集水面積は470 km^2 で狩勝峠におよび、総貯水量1億5000万 m^3 （有効貯水量

1億3000万 m^3 ）を有し、貯水効率はきわめて大きい。

その目的とするところは次の3つである。

(1) 洪水調節：洪水待期容量5140万 m^3 をもってダム地点における計画洪水量1000 m^3/sec を240 m^3/sec に調節する。その結果石狩川合流点では530 m^3/sec の洪水量を軽減することになり、石狩川改修費など約39億円の節減をはかる。（建設費分担率57%）

(2) かんがい：貯溜水のうち、6500万 m^3 を利用して、下流空知川および石狩川沿岸の山部、富良野、美唄、浦臼4地区28,448haに対して農業用水の補給を行なう。これにより、年間約13億円の純益が期待できる。（建設費分担率35%）

(3) 発電：ダム直下に新設される最大出力25,000KWの金山発電所（北海道電力）で、年間8300万KWhの電力を得、また下流既設の野花南、芦別両発電所での増加発電量780万KWhがみこまれる。（建設費分担率8%）

基礎掘削（総量：土砂6万 m^3 、岩10万 m^3 ）は、昭和38年より本格的に始まり、同年10月よりコンクリート打設を開始し、現在まで約10万 m^3 を打設している。工事完成は昭和41年度の見込みである。

2. ひびわれ防止について

2-1. その必要性

冬期（12月～3月）における平均気温が常に零下であるような極寒の地にダムを建設するについては、いろいろと

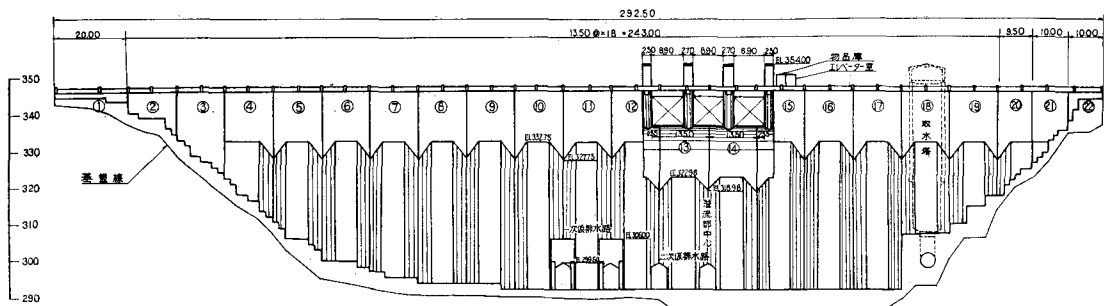


図-1(a) 金山ダム上流面図

* 北海道開発局石狩川治水事務所金山ダム建設事務所

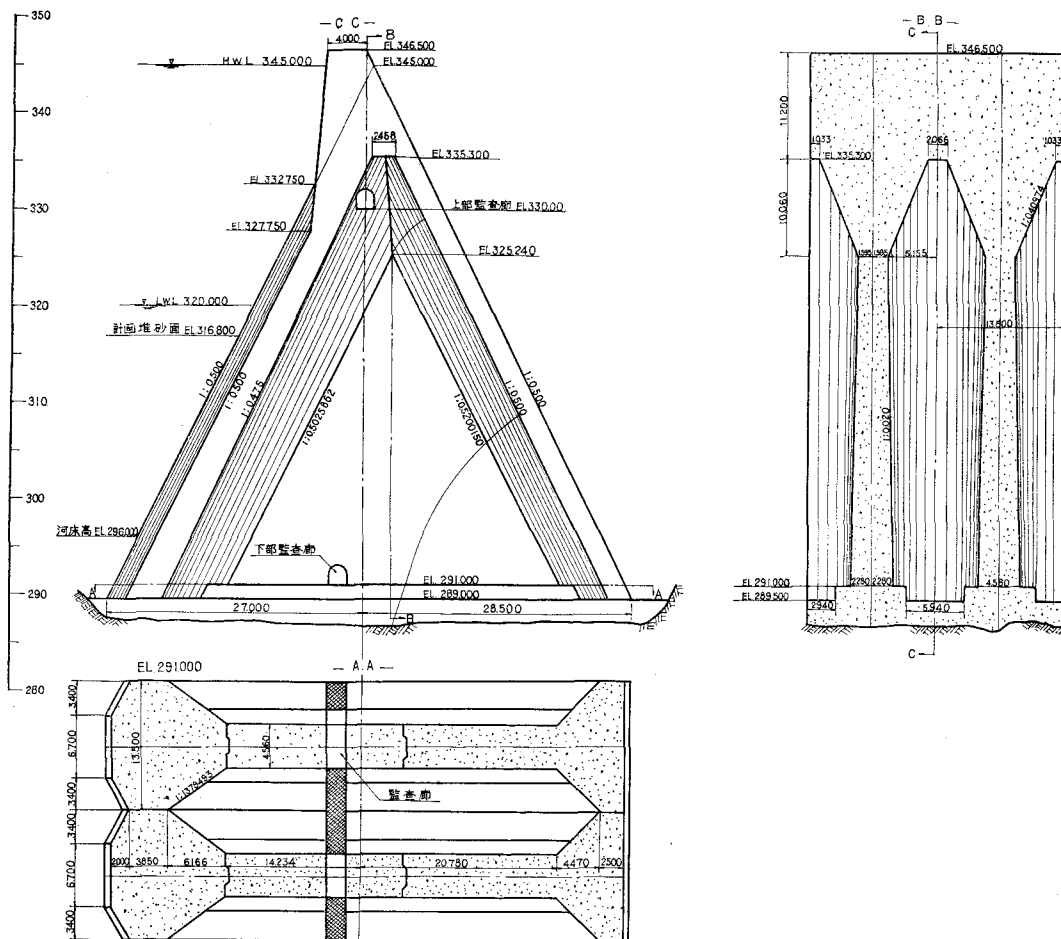


図-1 (b) 金山ダム標準断面図

問題がある。凍結融解の繰返しへの対策もその一つである
し、特に中空重力式ダムにおいては、その透水長が短いこ
とからして、漏水防止に充分注意しなければならない。

そのため縦継目の止水工は図-2に見られるように数段にわたって行ない、確実に期している。

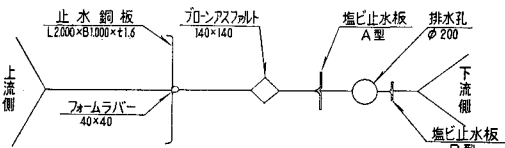


図-2 ダイヤモンドヘッド縦継目止水工

ひびわれについては四国電力の大森川ダムにその代表的な例が見られ、詳細な解析も行なわれている¹⁾。大森川ダムのひびわれは材齢の若いコンクリートに生じ、その原因はコンクリート内部に発生した熱応力と考えられる。この熱応力はダムコンクリート内部の、またダムコンクリートと外気との温度勾配により発生するものであり、外気温が極端にさがる北海道では更に悪い条件におかれるものと考

えられる。

2-2. その対策

ひびわれを防止するためには、コンクリート材料、施工方法（打設間隔、型枠スライド時期など）、クーリング、養生などの検討が必要である。以上各々について簡単に述べる。

(1) セメント²⁾ セメントは高炉セメント B 種を用いている。高炉セメントは経済的であり、長期材齢での強度が高く、凍結融解に対しても強いが、一方水和熱は必ずしも小さくない。そのためスラグの分量を 55% に増やし、粉末度を粗 ($3,400 \text{ cm}^2/\text{g} \pm 200$) にしたほか、更に 1.6% 前後だった SO_3 の添加量を $2.5\% \pm 0.2$ に増やした。これは長期強度には充分余裕があるのでややおとしても、初期の水和熱を引き下げ、初期の強度を引き上げようとしたものである。その結果、初期材齢の強度に対する水和熱の比を、良質のフライアッシュセメント使用の場合と同じ位小さい値に下げることができた。(図-3 および 表-1)

(2) クーリング 初期材齢におけるひびわれ発生におい

表 - 1

試験項目	製造実績					購入規格	JIS規格高炉B		
	I	II	III	IV	V				
物理試験	比重	3.00	3.01	3.01	3.01	3.01	2.95以上	2.90以上	
	粉末度 比表面積 (cm ² /g) 88μ残分 (%)	3,440 —	3,360 —	3,260 —	3,240 —	3,320 —	3,400±200 —	3,000以上 8以下	
	凝結 始発時間 (時・分) 終結時間 (")	2-55 5-10	3-15 5-05	3-40 6-30	3-25 6-05	3-10 5-35	1時間以後 10時間以内	1時間以後 10時間以内	
	安定性 オートクレーブ 煮沸法	0.02 良	0.02 良	0.04 良	0.04 良	0.03 良	0.1以内	— 膨脹性ヒビワレまたははソリが出 来てはならない。	
	水和熱 3日 7日 28日	43.2 57.3 74.8	43.0 56.5 77.2	48.6 62.9 77.0	45.5 58.7 77.1	47.8 61.0 74.1	— 70以下 80以下	— — —	
物理試験	フロー値	188	173	167	185	200	—	—	
	強度	曲げ	20.5 30.5 54.7	22.0 34.1 64.7	18.9 31.5 65.8	18.6 31.0 58.9	21.8 32.4 57.2	14以上 24以上 38以上	14以上 24以上 38以上
		圧縮	67 113 292	76 144 331	69 145 348	70 118 333	83 139 325	50以上 100以上 210以上	50以上 100以上 210以上
化学分析	強度	0.4	0	0.7	0.4	0.8	4.0以下	4.0以下	
	不溶分	1.2	1.3	1.0	1.4	1.2	—	—	
	シリカ	26.4	26.3	24.1	24.4	25.7	—	—	
	アルミナ	10.9	10.9	10.0	10.6	10.3	—	—	
	酸化第二鉄	1.9	2.0	1.9	1.9	1.9	—	—	
	酸化カルシウム	50.4	51.1	51.7	50.8	51.8	—	—	
	マグネシア	3.9	4.3	4.0	4.3	4.5	5.0以下	5.0以下	
	無水硫酸	2.7	2.4	2.5	2.4	2.6	2.5±0.2	3.0以下	
	遊離石灰	—	—	—	—	—	—	—	
	計	97.8	98.8	95.9	96.2	98.8	—	—	
備考	製造年月量	S 38.8.28 1,100	S 38.10.14 500	S 39.2.15 1,500	S 39.4.6 2,500	S 39.4.27 2,500	—	—	

物理試験は(北海道開発局)金山ダム現場試験室の試験結果で、また化学分析、水和熱は土木試験所の試験結果である

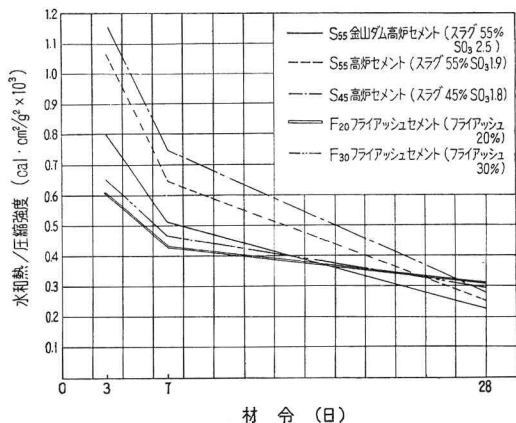


図-3 各種セメントによる(モルタル)水和熱、圧縮強度比と材齢

で最も重要な因子はコンクリート内部の温度勾配である。したがってダムコンクリートにとって、打設温度が高く、しかも外気温が下がり始める秋口が最も危険な時期となる。本年は特にこの時期に重点を置いてパイプクーリングを実施した。

クーリングは各リフト(1.5 m)に薄肉の電縫鋼管を埋込み、それに冷却水を通して行なった。冷却水は河水を使用した。各リフト中点に熱電対温度計(銅・コンスタンタン)を埋設してクーリングの効果を測定したが、その一例を図-4に示す。打設後2日までの温度が断熱上昇温度よりも高いのは下のリフトの影響と考えられる。

比較のためにクーリングをしていないブロックの温度履歴を

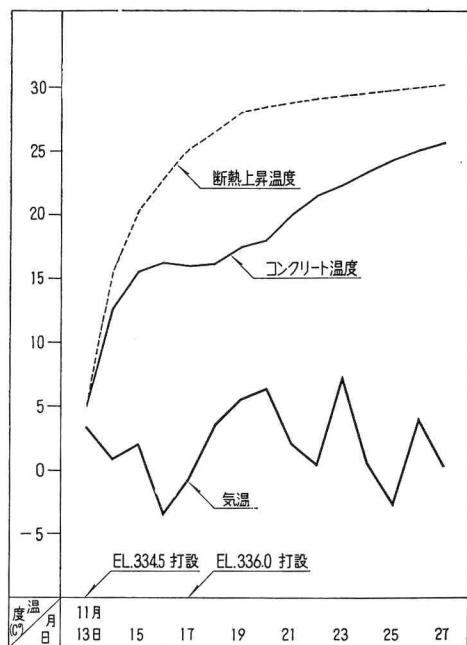


図-5 21 ブロック EL 334.50

歴を 図-5 に示してある。本ダムでは打設間隔を5日にとっているが、これはコンクリート温度がピークをわずかに過ぎたところで次のリフトを打つことになり、温度は再び上昇し、熱応力上好ましくない。クーリングにより二段目の温度上昇が押えられている様子がグラフから読みとられる。なお図-4の場合一段目の温度上昇が比較的低いのは外気温の影響と考えられる。

(3) 養生 養生は河水による散水養生のみを行なった。ダム表面(水平面は勿論、側面についても)を常に湿潤状態に保つため、3/4 インチのガス管に小孔をあけ、それに水を通すことにより散水を行なった。図-6の写真にその様子が示されている。小孔の間隔は約 20 cm である。

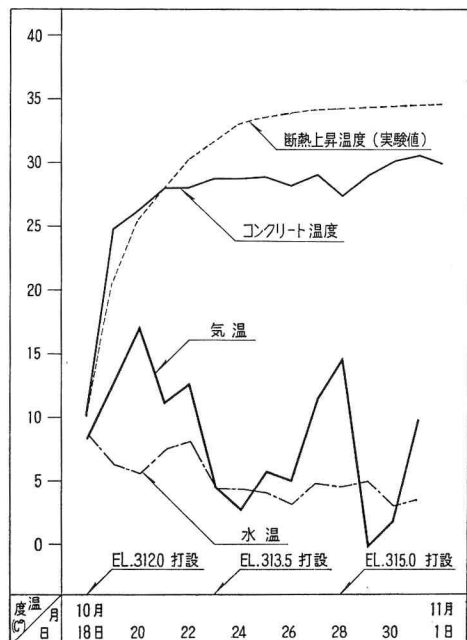


図-4 19 ブロックダイヤモンドヘッド EL 312.00

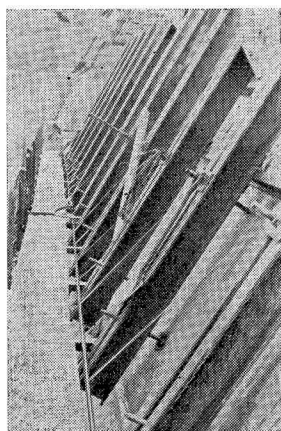
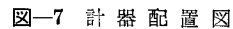


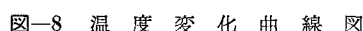
図-6

骨材は上流の水没予定地から川砂・砂利を採取使用している。粗粒率 F.M. は 2.50 である。

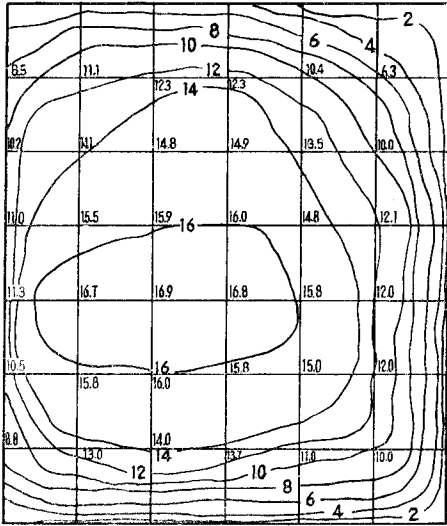
打設後の温度変化は図-8に見られる通りである。また材齢4日と14日の温度分布を図-9に示してある。外気温の影響が大きく表われるのは表面より1m程度までである。したがってこの部分の温度勾配が最も大きく、熱応力も大きくなる。



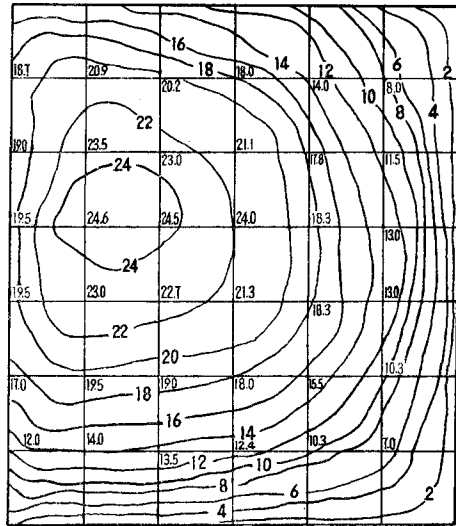
平面ひずみ状態で温度変化 $\theta(x, y)$ が生じた場合の熱応力は、境界条件を満し、かつ断面内のすべての点で次式を満足する応力関数 $\chi(x, y)$ を求めることによって得られる³⁾。



11月17日



11月27日



図—9 温度分布

$$\frac{\partial^4 \chi}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 \chi}{\partial x^2 \cdot \partial y^2} + \frac{\partial^4 \chi}{\partial y^4} = -\frac{\alpha \cdot E}{1-\mu} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

 α : 熱膨脹係数 E : 瞬間弾性係数 μ : ポアソン比

応力関数 χ が求まれば、応力は次式によって得られる。

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \chi}{\partial y^2}, \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \chi}{\partial x^2}, \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \chi}{\partial x \cdot \partial y} \quad (2)$$

(1) 式の厳密解を得ることは困難であるので、差分近似法により解を求める。

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial \chi}{\partial x} \right)_0 &= \frac{\chi_1 - \chi_0}{a} \\ \left(\frac{\partial^2 \chi}{\partial x^2} \right)_0 &= \frac{1}{a^2} (\chi_1 + \chi_3 - 2\chi_0) \\ \left(\frac{\partial^4 \chi}{\partial x^4} \right)_0 &= \frac{1}{a^4} (6\chi_0 - 4\chi_1 - 4\chi_3 + \chi_5 + \chi_{11}) \end{aligned} \right\}$$

同様にして

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 \chi}{\partial y^2} \right)_0 &= \frac{1}{a^2} (\chi_2 + \chi_4 - 2\chi_0) \\ \left(\frac{\partial^4 \chi}{\partial y^4} \right)_0 &= \frac{1}{a^4} (6\chi_0 - 4\chi_2 - 4\chi_4 + \chi_{10} + \chi_{12}) \\ \left(\frac{\partial^4 \chi}{\partial x^2 \cdot \partial y^2} \right)_0 &= \frac{1}{a^4} [4\chi_0 - 2(\chi_1 + \chi_2 + \chi_3 + \chi_4) \\ &\quad + \chi_5 + \chi_6 + \chi_7 + \chi_8] \\ \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right)_0 &= \frac{1}{a^2} (\theta_1 + \theta_3 - 2\theta_0) \\ \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right)_0 &= \frac{1}{a^2} (\theta_2 + \theta_4 - 2\theta_0) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(3) 式を (1) 式に代入して整理すれば、

$$20\chi_0 + 2(\chi_5 + \chi_6 + \chi_7 + \chi_8) + \chi_9 + \chi_{10} + \chi_{11} + \chi_{12} - 8(\chi_1 + \chi_2 + \chi_3 + \chi_4) = \frac{-\alpha E a^2}{1-\mu} (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 - 4\theta_0) \quad (4)$$

同様にして (2) 式は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{1}{a^2} (\chi_2 + \chi_4 - 2\chi_0) \\ \sigma_y &= \frac{1}{a^2} (\chi_1 + \chi_3 - 2\chi_0) \\ \tau_{xy} &= -\frac{1}{a^2} (\chi_5 + \chi_7 - \chi_6 - \chi_8) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

境界付近の格点では、格点数が不足して (4) 式を立てることができないが、この場合は境界付近の端格点および外部仮想点の関数値によって表わして求める。

温度変化により生じたひずみが持続された場合、コンクリートのクリープ現象により応力の緩和が起きる。これは応力緩和曲線によって補正する。緩和曲線は、弾性ひずみと時間増分によるクリープひずみとの和が載荷瞬間弾性ひずみを一定に保つような荷重を各時間間隔について求めていく近似的な区分計算法により求めることとする。

ひずみ計から応力を算定する場合のクリープ補正は平均対数法によることとする。これはクリープ速度が時間に逆比例すると仮定し $d\epsilon_c/dt = F(K)/(t+c)$ から求めるものである (ここに ϵ_c はクリープひずみ, $F(K)$ はクリープ係数, t は時間, c は常数である)。

この式の一般解は $t=0$ の時, $\epsilon_c=0$ として

$$\epsilon_c = F(K) \ln(t+1)$$

したがって単位応力による総ひずみ弾性ひずみ $1/E_t$ を加えて

$$\epsilon_{\text{total}} = \frac{1}{E_t} + F(K) \ln(t+1)$$

で表わされる。

3-2. 計算結果

材齢4日および14日の熱応力を図-10に示してある。
クリープテストは北海道開発局土木試験所で当ダムコンクリートを用いて行なった。その結果を他ダムのデータと一緒に図-11に示してある。試料数が少なく(各3), 1回しか行っていないので決定的なことは云えないが, 他ダムにくらべてクリープ係数が非常に大きい。何が原因でこのような結果が出たかははっきりしないが, 空気量の多いことと共に骨材の質および粒度分布の影響が考えられるかもしれない。いずれにしてもこれはひびわれ防止と云う点では非常に有利である。

図-10には計算値と共にひずみ計からの実測値も示してある。実測値にくらべ計算値が大きいのは, 温度変化がすべて応力になると仮定しての計算であるためと考えられる。

熱応力上最も危険なのは内部コンクリートが温度上昇を続けており, 表面では降下(もしくは上昇停止)が始まる材齢3~4日頃, および内部温度のピーク時, 材齢12~17日頃である。特に前者はコンクリートの強度が未だ出ていない時であるので注意を要する。

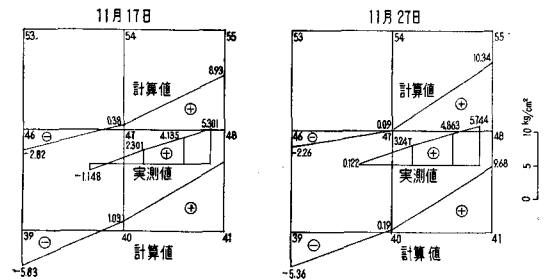


図-10 歪計, 温度計に依る σ_y の比較分布図 (クリープ補正後)

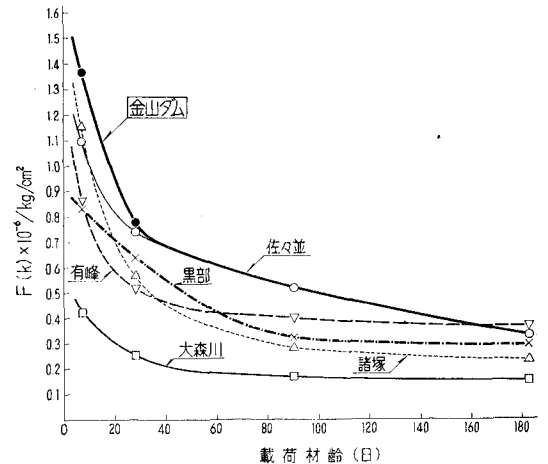


図-11 各ダムにおけるクリープ係数曲線 ($F(K)$)

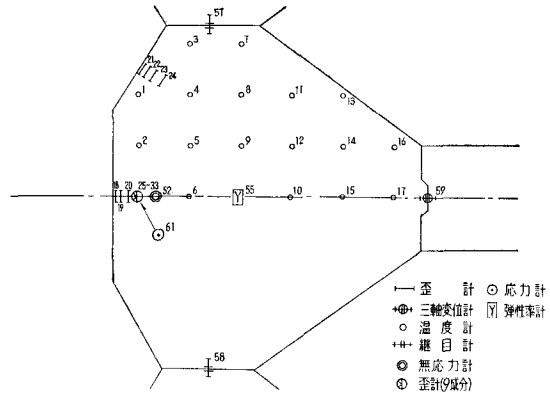


図-12 計器配置図

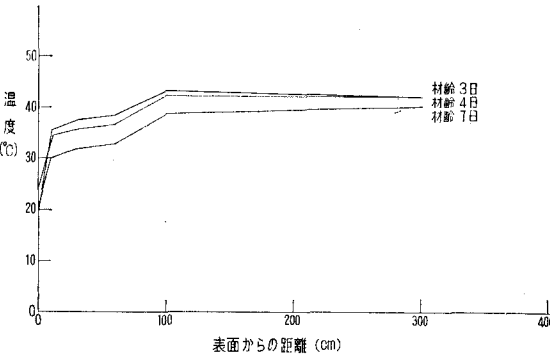


図-13 温度勾配曲線

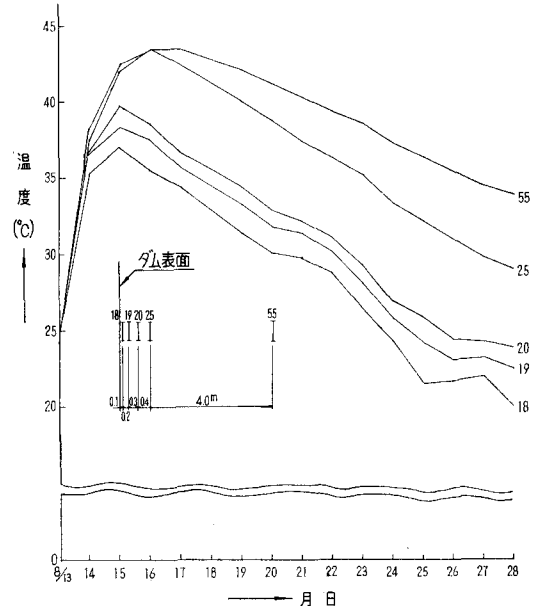


図-14 温度変化曲線

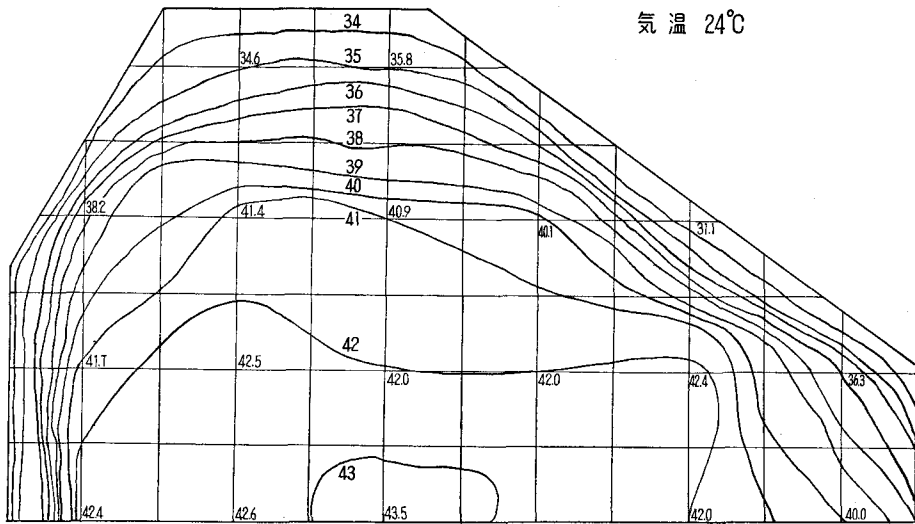


図-15 温度分布図 (材齢4日)

4. ダイヤモンドヘッドの熱応力の測定

テストブロックでの経験に基づき、本年は図-12のように計器を配置して、ダイヤモンドヘッドの熱応力の測定を行なった。温度計を格子状に配置したのは温度分布曲線から格点温度を決定する手間をはぶくため、あらかじめ格点に配置したものであるが、この配置ではもっとも温度勾配の大きい表面より1 m までの変化の様子がわからない。そのためひずみ計を表面より10 cm, 30 cm, 60 cm および1 m のところに配置した。

図-13に断面中心線での温度勾配曲線を示してある。この図では便宜上表面温度を気温に一致させているが、実際には一致しないので、この部分の勾配はもう少しゆるやかになるはずである。

温度変化図と材齢4日の温度分布図を図-14および図-15に示してある。図-14で材齢5日以降温度がかなり急激に下っているのは、次のリフトの打設が行なわれなかったためである。なお、このブロックはクーリングを行っていない。

5. あとがき

ダイヤモンドヘッドの熱応力については計算が完了しなかったため、今回は報告できなかった。次の機会に報告させて載くことにする。

この報告の作成に当っては北海道大学教授山岡勲氏、同4年目学生藤田達博氏に大変お世話になった。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 電力中央研究所・技術研究所：大森川ダム，ダイヤモンドヘッドの応力解析，埋設計器測定値の解析………(1959).
小沢章三：マスコンクリートの初期ひびわれとその防止対策に関する研究，発電水力；57, 59, (1962).
- 2) 山岡 勲：金山ダムのコンクリート，コンクリート講習会テキスト，川，(1964).
- 3) S. Timoshenko & J. N. Goodier：Theory of Elasticity. 461 (1951), Mc-Graw Hill.