

静内ダムの温度規制について

正員 赤津行宏*

1. まえがき

マスコンクリートの施工に当り、特に重要な問題として基礎拘束による温度応力、向寒期における材齢の若いコンクリートの表面クラックなどがあり、又施工法によっては打継目における新旧コンクリートの材齢の相違による温度応力も無視出来ない。

静内ダムにおいても、ダムコンクリートの温度規制について種々検討した結果、自然河川水によるパイプクーリングの実施と、フライアッシュセメントの使用（フライアッシュ30% 現場混入）を行なった。現在ダムコンクリートは90%を打設完了しているが、これ等の検討結果についてその概要を報告する。

2. ダムの概要

静内発電所（最大出力 23,500 kW）は、北海道電力 K.K

が行なっている日高電源一貫開発計画の第6番目の発電所として建設中のもので、その概要は、昭和40年発行の“技術資料、第21号”に詳細を述べてある。静内ダムは、高さ66m、堤体積 173,800 m³の重力式ダムで、本道では初の三次元解析によるダムである（図-1及び写真-1参照）。

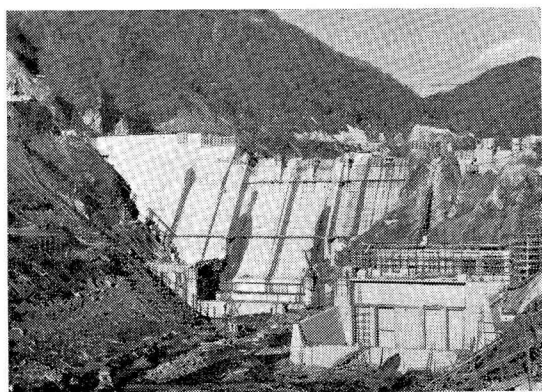


写真-1 静内ダム工事状況（昭和40年11月、背面より望む）

3. 温度計算

3-1 基礎拘束に対する温度規制の検討

堤体コンクリートは、打設後その硬化熱を放散して冷却する。その場合に生ずるコンクリートの収縮は、基礎岩盤に比し大きく、そのため接触面に相対変位を生ずべきであるが、両者はお互に拘束されその相対変位は阻止されているために、温度応力を発生することになる。

この応力と乾燥収縮に依って生ずる引張応力との和が、コンクリートの引張り強さを超過した場合に、ひびわれを生ずると考えられる。次に静内ダムの基礎拘束に対する検討を行なう。

1) 気象条件

a) 気温

ダム地点の気温を計算の便宜上図-2に示すように次の式で表わした。

$$T = 9.32 + 13 \sin \frac{2\pi}{12} (t - 4.9) \quad (t \text{ は或月の1日を示す})$$

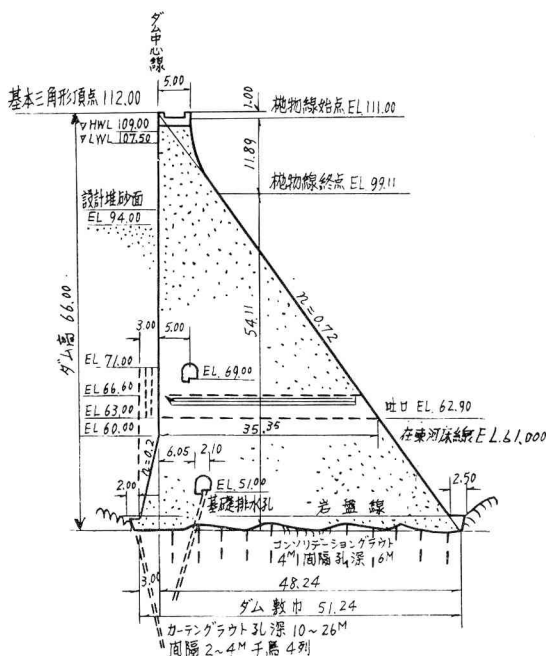


図-1 ダム横断面図（非越流部）

* 北海道電力株式会社 静内建設所

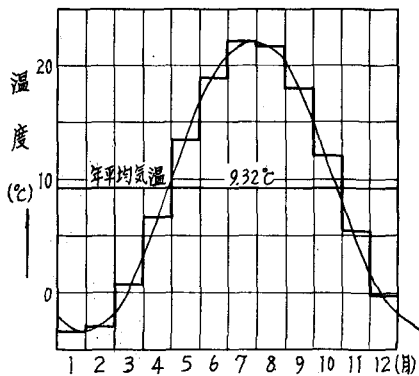


図-2 月平均気温

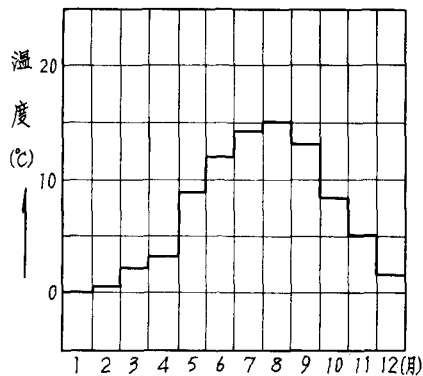


図-3 月平均水温

b) 水 温

水温は図-3に示す通りである。

2) ダムコンクリートの熱特性

温度計算に次の値を使用した。

コンクリートの単位容積重量

$$\rho_c = 2.51 \text{ t/m}^3 \text{ (単位セメン量 } 160 \text{ kg/m}^3\text{)}$$

" 比 熱

$$C = 0.22 \text{ Kcal/kg}^\circ\text{C}$$

コンクリートの熱拡散係数

$$h^2 = 0.00339 \text{ m}^2/\text{hr}$$

" 熱伝導率

$$K = 1.869 \text{ Kcal/mhr}^\circ\text{C}$$

" 断熱温度上昇

$$\theta = 19.80(1 - e^{-0.205 t}) \text{ (} t: \text{材 齢)}$$

コンクリートの示方配合を表-1に示す。

表-1 コンクリート示方配合

配 合 種 類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (cm)	単位水量 (kg)	単位セメント量		水セメント比 $\frac{W}{C+F}$ (%)	ポゾロン比 $\frac{F}{C+F}$ (%)	絶体細骨材率 $\frac{s}{a}$ (%)	単位細骨材量 A (kg)	単位粗骨材量 S (kg)	単位粗骨材量 G			単位AE 剤量 (cc)
					セメント量 (kg)	フライアッシュ量 (kg)						150 ~80	80 ~30	30 ~5	
外 部	150	3±1	4±1	96	154	66	44	30	25	2159	531	302	619	707	377
内 部	150	3±1	3±1	94	112	48	59	30	25	2252	554	315	646	737	280

3) ダムの最終安定温度

ダムコンクリートが水和熱を放散し終り、内部温度が最終の平衡状態に達した最終安定温度は、外周の条件によ

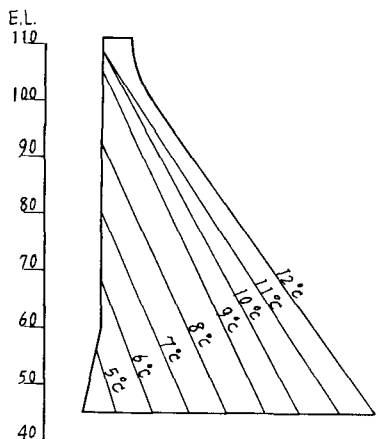


図-4 最終安定温度

て定まり図-4に示す通りである。

a) 上流面の温度

貯水池水温は $EL\ 109\text{ m}$ で年間平均 9.32°C 、 $EL\ 45\text{ m}$ で年間 4°C 一定と仮定し、その間は直線的に変化するものとする。

b) 下流面の温度

ダムの下流面は南面しているので、下流面における最終安定温度は年平均気温に太陽輻射熱による温度上昇を考慮する。

年平均気温 9.32°C 、太陽輻射熱温度上昇 2.78°C 、したがって下流面の最終安定温度は 12°C となる。

4) 温度計算法

a) 計 算 式

計算はカールソン氏の方法を用いた。

$$Z_n = \frac{1}{2S + 2 - Z_{n+1}}$$

$$C_n = t_{n-1} + (2S - 2) t'_n + t'_{n+1} + 2S \Delta\theta$$

$$L_n = (C_n + L_{n+1}) Z_n$$

$$t_n = L_n + Z_n t_{n-1}$$

$$S = \frac{\Delta X^2}{h^2 \Delta t}$$

ここに t_n : $x=x$ $t=t$ に於ける温度
 $\Delta\theta$: 時間間隔内の断熱温度上昇
 Δt : 時間間隔
 ΔX : 格点間隔
 n : 表面を 0 とした格点番号
 h^2 : 熱拡散係数
 S : 相似因子

熱の移動がなく熱的に対称となる点に対しては

$$Z_n = \frac{1}{S+1}$$

$$C_n = 2t'_{n-1} + (2S-2)t'_n + 2S\Delta\theta$$

$$L_n = \frac{C_n Z_n}{2}$$

$$t_n = L_n + Z_n t_{n-1}$$

b) 仮 定

- (i) 標準施工のリフト高は 2 m, 露出日数 5 日とする。

- (ii) 岩盤の温度は月平均気温に等しいものとする。
 (iii) 接岸部ではコンクリートの断熱温度の半分を考える。
 (iv) リフト打継目では両側(上下方向)で断熱温度が異なるが, 両側の平均値を用いる。
 (v) 岩盤とコンクリートの熱伝導率は同一とする。

(c) 温度計算

計算した結果を図-5 に示す。

最高上昇温度値 17.1°C, 岩盤上 6.0 m

月別コンクリート最高温度を表-2 に示す。

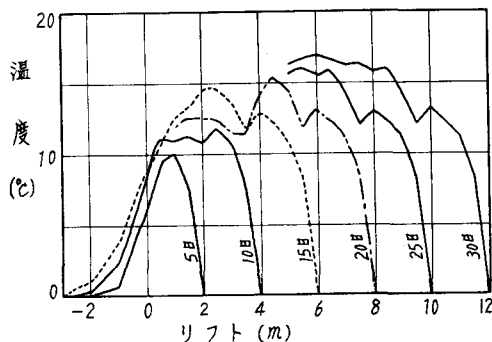


図-5 ダムコンクリート温度

表-2 月別コンクリート最高温度

打設月 温 度	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
コンクリート最高温度 (°C)	22.1	23.7	30.4	36.1	39.1	38.8	35.1	29.1	22.4	22.1
外 気 温 (°C)	0.6	6.6	13.3	19.0	22.0	21.7	18.0	12.0	5.3	-0.3

ただし 3 月 12 月は打設温度を 5°C とする。

5) ダムコンクリート内に生ずる温度応力

温度応力を推定する式としては, 次の 2 ケの式が用いられる。

$$\sigma_{t \max} = R E_c \alpha \{t_p + t_r - t_f\}$$

$$\sigma_{t \max} = R \alpha \{ (T_1 - T_3) E_{c2} - T_1 E_{c1} \}$$

ここで R : 拘束度

E_c : コンクリート弾性係数

E_{c1} : 材齢 1 カ月迄のコンクリート平均弾性係数

E_{c2} : 材齢 1 カ月後から最終安定温度に達する迄のコンクリートの平均弾性係数

α : コンクリートの熱膨張または収縮係数

t_p : コンクリート打設時温度

t_r : コンクリートの温度上昇

t_f, T_3 : コンクリートの最終安定温度

T_1 : 材齢 1 カ月のコンクリート温度

T_2 : コンクリートの最高温度

(a) 既設ダムに於ける温度規制の実例

(i) 上稚葉ダム

$\alpha = 0.00001/^{\circ}\text{C}$, $E_c = 210,000 \text{ kg/cm}^2$,

$R = 40\%$, $t_f = 15.6^{\circ}\text{C}$, $\sigma_t < 25 \text{ kg/cm}^2$

として $t_p + t_r - t_f < 29.7^{\circ}\text{C}$

(ii) 五十里ダム

15 m ブロックで $T_1 - T_3 = 43.5^{\circ}\text{C}$ 迄ひびわれが生じないであろうと推定, 温度規制計画を決めた。

(iii) 猿谷ダム

$\alpha = 0.000008/^{\circ}\text{C}$, $E_c = 140,000 \text{ kg/cm}^2$,

$R = 60\%$, $\sigma_t < 19 \text{ kg/cm}^2$

$t_p + t_r - t_f < 28^{\circ}\text{C}$

(iv) 八久和ダム

$\alpha = 0.00001/^{\circ}\text{C}$, $E_c = 150,000 \text{ kg/cm}^2$,
 $R = 65\%$, $\sigma_t < 21 \text{ kg/cm}^2$
 $t_p + t_r - t_f < 30.8^{\circ}\text{C}$

(b) 静内ダムの場合

$\sigma_t < 20 \text{ kg/cm}^2$ を基準とし温度許容降下量 ($t_p + t_r - t_f$) を 30°C 以内になる様に考慮した。

表-2より接岩部を6~8月に打設する場合露出日数を5日とすると、温度許容降下量 30°C を超過する。この場合、今打設速度を変更して立上る場合について計算を行なうと図-6の通りとなる。

図-6より例えば $EL 45 \text{ m}$ を8月に打設すると仮定すれば $t_f = 4^{\circ}\text{C}$, $t_p + t_r - t_f = 30^{\circ}\text{C}$, $t_p + t_r = 34^{\circ}\text{C}$ となり打上り速度を 15 cm/day とすれば安全である。

当ダムでは数幅の広い基礎部分は気温の低い時期に打設したので、パイプ冷却の必要を殆んど認めなかった。

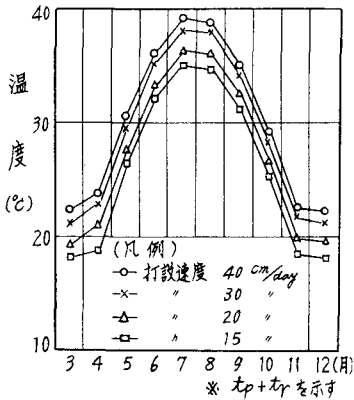


図-6 打設速度を変えた場合のコンクリート最高温度*

3-2 材齢の相異による新旧コンクリートの縦継目の温度応力の検討

静内ダムでは施工上の理由で、上流、下流のブロック差が6m以上で越冬せざるを得なかった。このため新旧コンクリートの温度差が大きくなり、温度応力の増大が懸念されこの検討を実施した。検討にさいしてはクーリングした場合、クーリングしない場合について温度応力の比較を行なった。

気象条件、ダムコンクリート熱特性、ダム最終安定温度は前記の通りである。

1) 初期温度計算(材齢28日於けるコンクリートの温度)
4月打設のものには外径1吋電縫鋼管を水平2m間隔に
5月打設のものは1.5m間隔に配管する。

計算方法は Boulder Canyon Project "Cooling of Concrete Dams" に準拠する。人工冷却として自然河水に依る、パイプクーリングを実施する。

内部配管は各リフト上面に設置する。
従って配管鉛直間隔はリフト高に等しい。
冷却管通水量は 16 l/min , 冷却通水期間28日。
小時間々隔終点に於ける、コンクリート平均温度は次式より求める。

$\theta_{cf} = \theta_{wei} + X(\theta_{ct} - \theta_{wei})$
 θ_{cf} : 小時間々隔終点に於けるコンクリート平均温度($^{\circ}\text{C}$)
 θ_{ct} : 小時間々隔始点に於けるコンクリート平均温度($^{\circ}\text{C}$)
 θ_{wei} : 冷却水のパイプ入口に於ける初期温度

計算した結果を表-3、図-7に示す。

表-3 冷却による初期温度

打 設 月	4 月	5 月
冷 却 管 間 隔	2.0 m	1.5 m
材 齢 28 日 に 於 ける 温 度	15.6 $^{\circ}\text{C}$	19.5 $^{\circ}\text{C}$

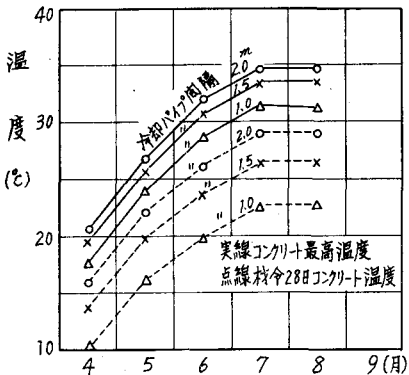


図-7 パイプ冷却に依るコンクリート温度

2) 温度分布計算
(a) 新旧縦継目附近に於ては、無限に広がる物体間の熱の伝導が行なわれるものとし、上流ブロックの初期温度分布は縦継目附近では気温と同じとする。互に物質を異にする二つの半無限固体が、平面 $x = 0$ で接触している時、初期温度として $x < 0$ では $\theta = \theta_0$, $x > 0$ では 0°C の場合である。
この解は次の基本方程式及び初期境界条件から求められる。

一次元の熱伝導に関する偏微分方程式は

$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} = h_1^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} (x < 0) \dots\dots$ 下流ブロック

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial t} = h_2^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (x > 0) \dots\dots \text{上流ブロック}$$

$$t = 0 \quad x < 0 \text{ に於て} \quad \theta_1 = \theta_0$$

$$x > 0 \quad \text{''} \quad \theta_2 = 0$$

$$x = 0 \quad t > 0 \quad \text{''} \quad \theta_1 = \theta_2$$

$$K_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial x} = K_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial x}$$

解は

$$\left. \begin{matrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{matrix} \right\} = -\frac{\theta_0}{2} \left\{ 1 \pm P \left(\frac{|x|}{\sqrt{4h^2t}} \right) \right\} \quad P(x): \text{確率積分}$$

計算した結果を表-4に示す。

表-4

x (m) 月	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	7.0
4 (°C)	5.34	6.09	6.81	7.39	8.25	8.69	8.87	8.96
5 (°C)	3.69	4.22	4.72	5.12	5.70	6.02	6.14	6.20

(b) 下流ブロックを版と考えその冷却は下流面及び縦接目に於て、夫々異なった露出温度にあるとする。

(a) の解に於て $x=0$ の θ_1, θ_2 は $\theta_1 = \theta_2 = \frac{\theta_0}{2}$

従って此の温度解析に於ては「一様な初期温度 θ_0 を有する版が一方に於て 0° 、他方に於て $\frac{\theta_0}{2}$ の露出温度に置かれている場合である。

この解は下の二つの場合の解を重畳して求める。

(i) 一様な初期温度分布を有する版の冷却

$$\theta = \theta_0 \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left[2 - P \left(\frac{n-1+\frac{x}{l}}{2\sqrt{\frac{h^2t}{l^2}}} \right) - P \left(\frac{n-\frac{x}{l}}{2\sqrt{\frac{h^2t}{l^2}}} \right) \right] \right\}$$

(ii) 一様に变化する初期温度分布を有する版の冷却

$$\theta = \frac{2\theta_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} e^{-\frac{h^2 n^2 \pi^2}{l^2} t} \sin \frac{n\pi}{l} x$$

計算した結果を表-5に示す。

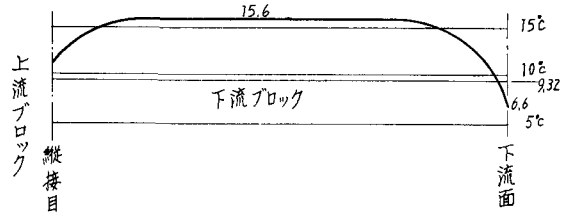
表-5

x/l 月	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
4 (°C)	6.72	8.60	8.96	8.96	8.96	8.96	8.96	8.78	7.71
5 (°C)	4.65	5.95	6.20	6.20	6.20	6.20	6.20	6.08	5.33

(c) 温度分布図

上の計算より温度分布図をかくと図-8の通りである。

α) 4月打設堤体温度分布(冷却管20間隔)



α) 5月打設堤体温度分布(冷却管15間隔)

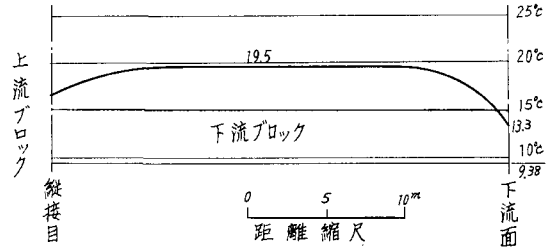


図-8 4, 5月堤体温度分布図

3) 温度応力の計算

温度応力は初期温度分布 (材齢 28 日) から、最終安定温度迄の温度降下の変化量について求める。

温度降下量とそれに対応する Compensation line を描き温度応力を算出する。

ダムが他の物体によって拘束されてなく、断面保持の法則が成立するとする。

温度変化をうけて応力が全く生じないものとする、温度変化後に断面は直線とならず、温度分布の曲線と Compensation line との間にかこまれた部分の温度 $\Delta\theta$ に相当する歪、 $\alpha\Delta\theta$ だけずれていることになる。

したがって平面保持の法則が成立するためには、この断面には $\alpha\Delta\theta$ の歪を打消すための直応力 $- \alpha E \Delta\theta$ を与える必要がある。

この応力が発生する熱応力である。

平面応力状態にあるときは、このように $- \alpha E \Delta\theta$ なる応力を生ずるのであるが、平面歪状態にあるときは発生応力は $\frac{- \alpha \Delta\theta E}{1-\nu}$ となる。

$$\text{応力} = \frac{- \alpha \Delta\theta E}{1-\nu} = \frac{- 2 \Delta\theta}{0.8} = - 2.5 \Delta\theta$$

ここで ν : ポアソン比 0.2

E : 持続弾性係数 $2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$

α : 熱膨脹係数 $1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

温度分布から温度応力を算出すると図-9のようになる。クーリングしない場合も同様の計算とし、比較すると表-6のようになる。

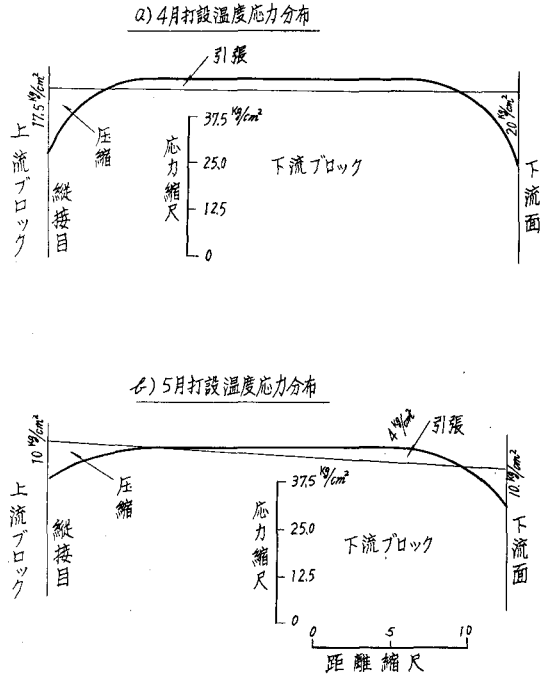


図-9 4, 5月打設堤体鉛直応力図

表-6

応 力	4 月		5 月	
	クーリング有無			
	クーリ ングし ない 場合 (kg/cm ²)	クーリ ングし た時 パイ プ 2.0 m 間 隔	クーリ ングし ない 場合 (kg/cm ²)	クーリ ングし た時 パイ プ 1.5 m 間 隔
最大圧縮応力	30	20	28	10
同上 比較		△10		△18
最大引張応力	10	3	9	4
同上 比較		△ 7		△ 5

以上の計算の様に4月においては最大引張応力10 kg/cm²が、クーリングすることにより3 kg/cm²に軽減し、クーリングの効果が認められる。

6月以降はリフト差がなく特に新旧継目の為のクーリングは必要としなかったが、次節にのべる許容ブロック長の制限の為冷却を行なった。

3-3 許容ブロック長(堤厚)の検討

基礎を離れた上部のコンクリートについては、基礎の拘束は全くないといえるから、この部分ではブロック長を制限する規準はない。

しかし既往ダムの実績より、15×15 mのブロックについて、コンクリートの最高温度は年平均気温上32°C程度に抑えた方が良くと言われていることから、ブロック長は温度差に反比例するという仮定で、図-7より許容ブロック長を算出すると、図-10に示す通りである。

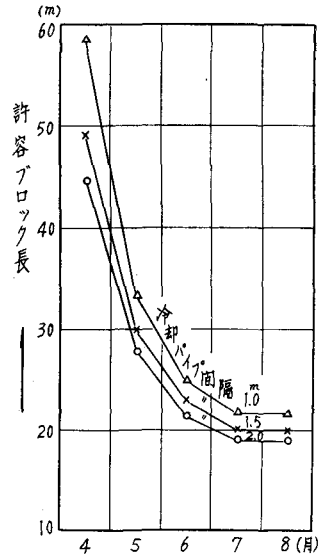


図-10 パイプ冷却による許容ブロック長

堤体中間部はこの制限を超過するためクーリングを行なった。

4. 冷却工と温度記録

堤体の打設は昭和39年9月末開始した。

数幅の広い基礎部を、気温の低い時期に打設したので、基礎拘束に依るひびわれの検討結果からも、パイプ冷却しないうで打設した。

41年4月初旬打設再開と同時に前節の検討結果より、ポヨップ沢の自然河川を利用して、1次クーリングを行なった。

ダム左岸 EL 140 mにある水槽(容量200 t)まで、ポンプ揚水された冷却水は、径6"パイプで EL 63 m堤内仮排水路下流側に設置した、水流切替装置に導かれ、ここからダム下流面に沿った径4"パイプ、および径4"立上がりデストリビューター2条を経て、堤体内管(径1"電縫鋼管)へ導水した。

またリターン水は堤内仮排水路を通して、上流側に放流した(図-11、写真2, 3参照)。

水流の切替は毎日行ない、1次クーリングは打設後28日行なった。

コンクリートの温度測定は、カールソン型の埋込温度計、及び挿込温度計で行ない、冷却水の流量は径1"サーフェスニップルの出口において測定した。

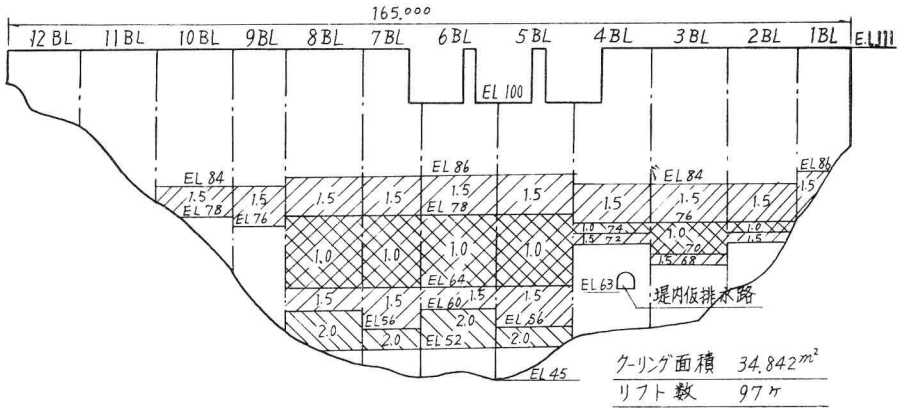
1) 各パイプ間隔についての温度履歴

(a) リフト厚2 m, パイプ間隔1.0 m

図-12の通りである。

(b) リフト厚2 m, パイプ間隔1.5 m

a) 冷却管間隔図



b) 冷却工事配管系統図

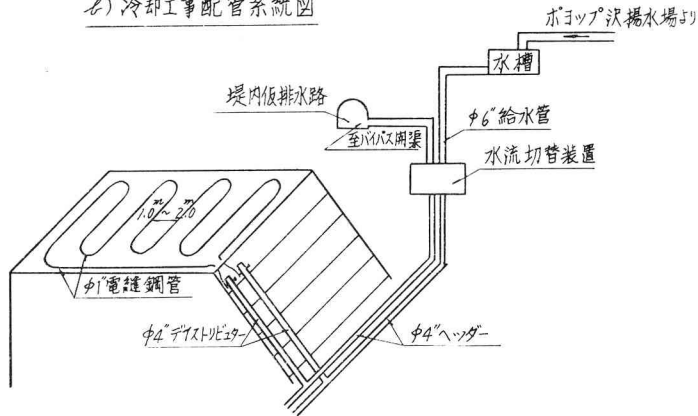


図-11 クーリング設計図

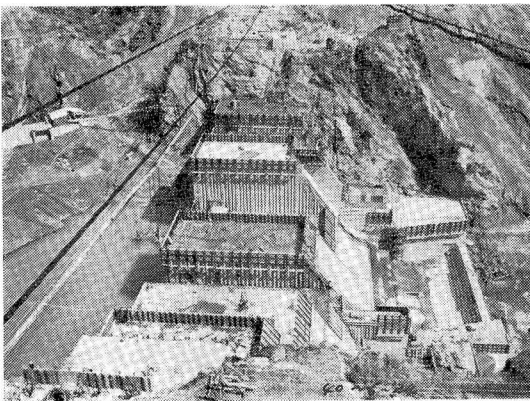


写真-2 冷却工事状況

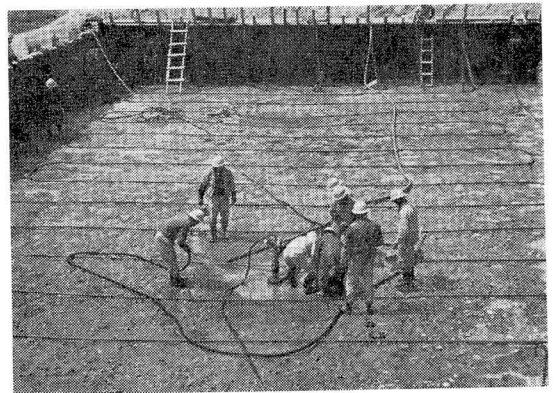


写真-3 堤内管配管状況

図-13 の通りである。

(c) リフト厚 2 m, パイプ間隔 2.0 m

図-14 の通りである。

ダムコンクリートの温度の実績と、計算値との関係は図-7 と比較すると、冷却間隔 1.0 m の場合計算では、打設

温度 19°C, 水温 12°C で最高平均温度 29°C, 上昇値 10°C であるのに対して図-1 では上昇値 15.2°C となっている。

この理由としては水和熱に依るコンクリートの断熱温度上昇が、時期により異なること、とパイプコイル長、露出日数、冷却水温、打込温度、温度測定などの諸因子が影響

している為と考えられる。

材齢 28 日に於いてはほぼ同じ 20°C になっている。

1.5 m 間隔の場合計算では、打設温度 20°C、水温 15°C で最高平均温度 33.5°C、上昇値 13.5°C であるのに対して図-13 では上昇値 16.6°C となっている。

材齢 28 日に於いてはほぼ同じ 27~28°C となっている。

2.0 m 間隔の場合計算では、打設温度 7.5°C、水温 4°C で最高平均温度 22°C、上昇値 14.5°C であるのに対して図-14 では上昇値 12°C である。

ダムブロックについて測定したコンクリートの最高温度上昇値など、調査して表-7 に示した。

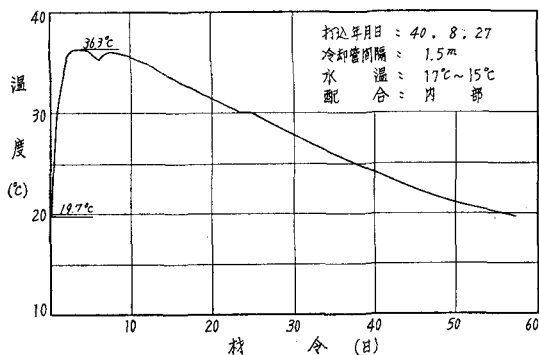


図-13 7 BL EL 80.00 温度履歴

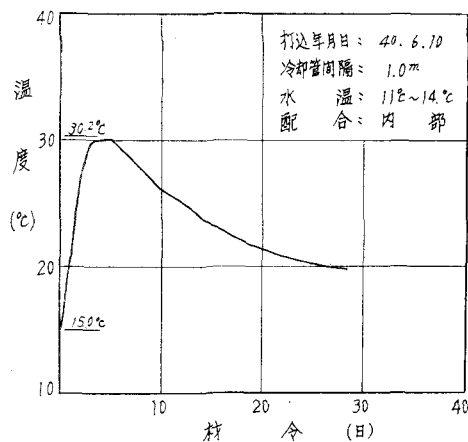


図-12 8 BL EL 68.00 温度履歴

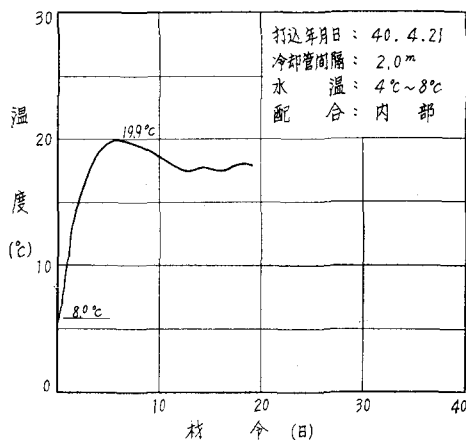


図-14 6 BL EL 56.00 温度履歴

表 - 7

BL	EL (m)	打設温度 (A) (°C)	最高温度 (B) (°C)	計算値 同左 (°C)	B-A (°C)	材齢28日 コンクリート温度 (°C)	計算値 同左 (°C)	打設期日	配 管
7	56.00	12.8	24.7		11.9	18.8		40. 5. 10	上 1.50 間隔 下 2.00
"	64.00	15.4	25.6		10.2	20.2		6. 7	1.00 1.50
"	80.00	20.0	36.2		16.2	27.3		8. 27	"
6	60.00	10.0	24.8		14.8	19.5		5. 9	"
"	64.00	14.0	30.8		16.8	20日 19.5		5. 20	1.00 1.50
8	65.50	13.0	26.6	26.0	13.6	18.0	18.0	6. 1	1.00 "
"	68.00	15.0	30.3	27.5	15.3	26日 19.9	19.0	6. 10	" "
"	72.00	17.0	30.8	29.0	13.8	20.5	20.0	6. 23	" "
"	76.00	18.0	"	31.0	12.8	22.4	22.0	7. 10	" "
"	78.00	19.0	33.8		14.8	26.1		7. 21	1.50 1.00
"	84.00	21.0	36.5	33.5	15.5	27.9	26.5	8. 8	1.50 "

これらを比較すると計算仮定および冷却の効果がほぼ満足すべきものであったと考えられる。

パイプ冷却を行わない図-15と対比すれば、パイプクーリングによるコンクリート最高温度の抑制が、どの程度かが大略うかがわれる。

(d) クーリングしない場合

図-15の通りである。

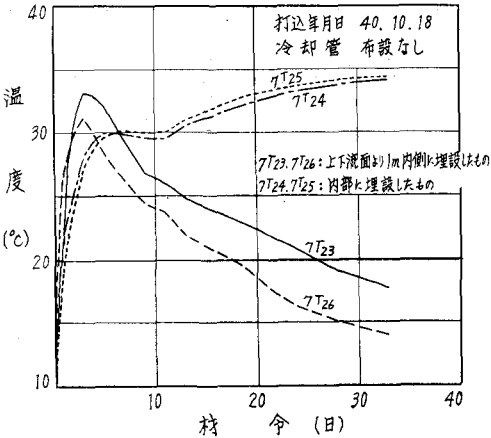


図-15 7 BL EL 94.00 温度履歴

2) 断面内温度分布

3-2で計算した温度分布と比較するため断面内温度分布を図-16に示す。

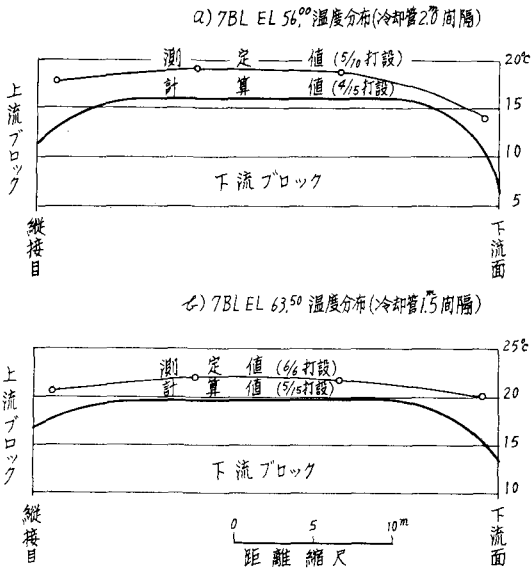


図-16 計算値実測値比較

測定した7 BLは他の BL に比べて打設の一番遅れた BL であり、計算に用いた打設予定日と約 20 日程遅れているが、計算値と測定値の差はわずかで、ほぼ満足すべきものと考えられる。

尚、この部分に五成分歪計、応力計を埋設して居り現在解析中である。

5. フライアッシュの特性

静内ダムコンクリートには、種々検討の結果材料学的にも経済的にも有利なフライアッシュセメントを用いた。フライアッシュセメントは、マスコンクリートに適した種々の特性を有している。

1) 水和熱の発生が少ない

コンクリートの硬化に伴う水和熱の発生は、使用セメントの種類、単位使用量等によって異なるが、マスコンクリートにおいては、水和熱の発生の大きいセメントを用いる事は温度応力の増大を招き、ひいてはひびわれ発生の原因ともなるので、使用セメントの決定には慎重な検討が望まれる。

各種セメントの水和熱の一例をあげれば表-8の通りである。

表-8 セメントの水和熱の例 (単位 cal/gr)

セメントの種類	7 日	28 日
普通セメント	70	89
普通セメント+F.A 20% 混入	60	80
普通セメント+F.A 30% 混入	49	68
中庸熱セメント	57	77
中庸熱セメント+F.A 30% 混入	47	58
高炉セメント (スラブ 55%)	60	80

またこれ等のセメントを使用したコンクリートの断熱上昇温度を計算した結果は図-17の通りである。但し単位セメント量 170 kg/m³とした。

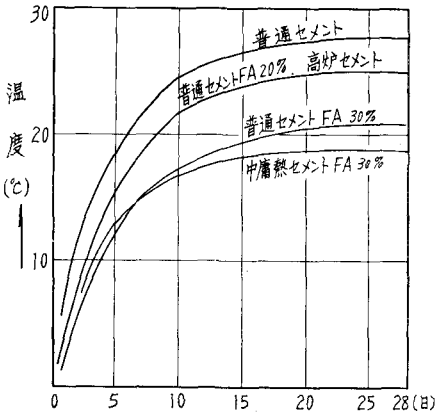


図-17 コンクリート断熱上昇温度 (使用量 170 kg/m³)

2) 圧縮強度の伸び率が大きい

初期強度が小さく、長期強度が大きい事はマスコンクリ

ートにとり望ましいものである。静内ダムの実績によると σ_{91}/σ_{28} は平均 1.38 (外部コンクリート) となる。又一般にフライアッシュセメントは他のセメントに比し曲げ強度と圧縮強度の比が約 10% 大きいと言われている。

3) クリープ歪が大きい

クリープ歪が大きい事は有効弾性係数が小さくなり、温度応力の緩和に有利である。

4) 乾燥収縮が小さい

コンクリートは、打設後その表面が外気にさらされると徐々に水分を失って乾燥し長さの変化を生ずる。この変化が拘束されると応力を生ずる。フライアッシュセメントは他のセメントに比し乾燥収縮が小さいといわれる。

5) 流動性が良くなり、所要軟度のコンクリートを得るための単位水量が減少する。

表—9 普通ポルトランドセメント試験成績表

試 料 番 号			規 格	1	2	3	4	5	6
比 重			3.05 以上	3.15	3.16	3.16	3.18	3.16	3.14
粉末度	ブレーン値 (cm/g ²)		2300 以上	3370	3430	3330	3240	3320	3360
	88 μ 残 分 (%)		10 以下	1.3	1.1	1.3	2.5	1.8	1.8
凝 結	始 発 (h)		1 以後	2-09	1-57	2-05	2-00	2-05	2-02
	終 結 (h)		10 以内	3-06	3-02	3-08	3-05	3-10	3-15
安定性	浸 水 法		良	良	良	良	良	良	良
	煮 沸 法		良	良	良	良	良	良	良
強 さ (kg/ cm ²)	曲げ強さ	7 日	25 以上	58.4	56.7	52.1	53.4	54.9	57.5
		28 日	36 以上	74.1	72.1	71.5	74.9	73.8	75.3
		91 日	—	79.1	—	87.2	79.8	—	83.9
	圧縮強さ	7 日	90 以上	248	232	238	258	252	241
		28 日	200 以上	404	400	418	423	421	408
		91 日	—	452	—	445	460	—	448
マ グ ネ シ ア (%)			5.0 以下	1.3	1.7	1.3	1.6	1.6	1.2
無 水 硫 酸 (%)			2.5 以下	1.5	1.6	1.6	1.5	1.5	1.6
強 熱 減 量 (%)			4.0 以下	0.7	0.7	0.6	0.8	0.7	0.7

製造工場 富士セメント K.K. 室蘭工場
試験箇所 北海道電力 K.K. 技術研究所

表—10 フライアッシュ試験成績表

試 料 番 号		規 格	1	2	3	4	5	6
比 重		2.0 以上	2.08	2.09	2.10	2.09	2.11	2.11
粉末度	ブレーション値 (cm/g ²)	3000 以上	3570	3610	3480	3340	3290	3310
	44μ 残 分 (%)	—	9.0	8.5	14.0	16.0	11.0	10.5
所 要 水 量 比 (%)		105 以下	95.3	95.0	94.5	94.9	95.1	95.8
圧縮強度比 (%)	7 日	55 以上	72.6	71.1	76.0	76.7	78.0	69.8
	28 日	90 以上	80.4	79.4	80.2	80.6	79.0	77.8
	91 日	—	98.0	—	104.0	101.0	—	99.0
化 学 成 分	シ リ カ (%)	40 以上	63.7	63.5	63.8	61.5	60.9	63.7
	湿 分 (%)	1 以下	0.04	0.05	0.07	0.07	0.10	0.06
	強熱減量 (%)	5 以下	0.4	0.5	0.5	0.5	0.7	0.5

生産箇所 北海道電力 K.K. 新江別火力発電所
試験箇所 北海道電力 K.K. 技術研究所

6) ブリージングが少ない。

7) 耐透水性が大きい。

静内ダムで用いたセメント及びフライアッシュの試験成績を表-9、10に示す。

6. フライアッシュの現場混入

フライアッシュセメントの使用法として、セメント製造工場で所定量のフライアッシュを混入したものと、現場において普通セメントにフライアッシュを混入するものがあるが、静内ダムでは次節に述べる経済性と、施工上の関連から現場混入を行なった。

現場混入の方法としては、フライアッシュを粉末のままコンクリートミキサー中に投入する乾式方法と、フライアッシュを予め60%程度の水で溶解し、ペーストとして投入する湿式方法がある。湿式の場合の得失をあげれば次の通りである。

利 点 1) 練り混ぜ均等性が良い。

2) 乾式の様なフライアッシュの固結による計量や放出の支障がなく、取扱い易い。

不利点 1) 溶解タンクで貯蔵中に攪はんしていても一部が沈澱し、濃度が変わる事もある。

2) 骨材の表面水が多い場合に、使用水量が多過ぎて所定のコンクリートが得られない場合がある。

静内ダムでは、ペーストによる使用法は使用水量の制約より難点があるので、乾式混合方法を用いた。即ち、今外部配合を例にとると、ペースト使用の場合の単位水量は次の様になり、単位使用水量96kgを超過するので調整が困難と思われた。

乾式混合の場合問題となる練上りコンクリートの均一性

細骨材の表面水 (7%)	531 kg×0.07	37 kg
粗骨材の表面水 (1%)	1,628 kg×0.01	16 "
ビンゾール使用水 (10倍)	0.38 kg×10	4 "
ペースト使用水 (60%)	66 kg×0.60	40 "
計		97 "

表—11 練り混ぜ均等性試験結果

	試料採取箇所			不均等係 数
	初め 1/3	中間 1/3	終り 1/3	
ス ラ ン プ (cm)	3.9	3.6	3.0	
空 気 量 (%)	4.8	4.3	4.4	
圧縮強度91日 (kg/cm ²)	210	220	213	2.8
単位容積重量 (kg/m ³)	2,362	2,367	2,370	0.2
静 弾 性 係 数 (kg/cm ²)	226×10 ³	210×10 ³	226×10 ³	
動 弾 性 係 数 (kg/cm ²)	312×10 ³	316×10 ³	324×10 ³	

については、予め試験を行なって支障のない事を確めた。試験は内部配合について行ない、均等法の比較は練り混ぜ量の1/3が排出される毎に試料をとり、40 mm フルイでウェットスクリーンした後に、スランプ、空気量の測定を行ない、更にφ15×30 cmの供試体を各々3本宛作成し、91日行日て試験を行なった。尚練り混ぜ時間は3分間とした。

以上の結果3分間の混合時間で充分均等性が満足されると判断された。尚不均等係数は次式によった。

$$\text{不均等係数 (\%)} = \frac{\text{ネハバの最大値}}{\text{平均値}} \times 100$$

また現在迄打設したダムコンクリートの圧縮強度管理結果は、表-12の通りで充分満足すべきものである。尚現場の混合設備の概要は図-18、表-13、写真-4、5、6に示す。

表—12 静内ダム圧縮強度管理実績表 (材齢 28 日)

	外部配合 (220 kg/m ³)		
	変 動 係 数 (%)	平 均 強 度 (kg/cm ²)	試 料 数 (ヶ)
39. 10	5.7	235	14
11	8.3	243	10
12	4.2	237	21
40. 3	7.3	229	16
4	6.2	231	12
5	5.7	238	22
6	6.3	238	25
7	5.8	243	37
8	5.5	230	41
9	7.2	233	33
平 均	6.2	236	—

	内部配合 (160 kg/m ³)		
	変 動 係 数 (%)	平 均 強 度 (kg/cm ²)	試 料 数 (ヶ)
39. 10	—	—	—
11	10.4	150	11
12	—	—	—
40. 3	—	—	—
4	5.8	156	13
5	6.6	147	21
6	8.5	143	18
7	9.4	135	34
8	8.7	142	31
9	10.1	137	23
平 均	8.5	144	—

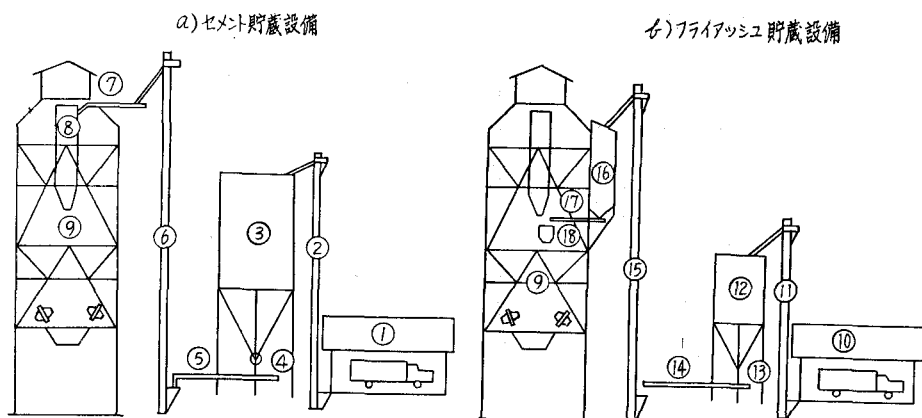


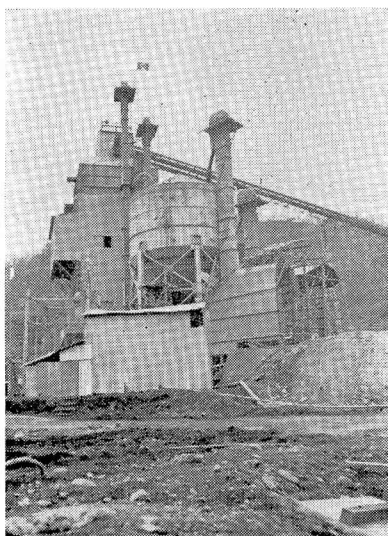
図-18 セメント、フライアッシュ貯蔵設備

表-13 セメントフライアッシュ貯蔵設備

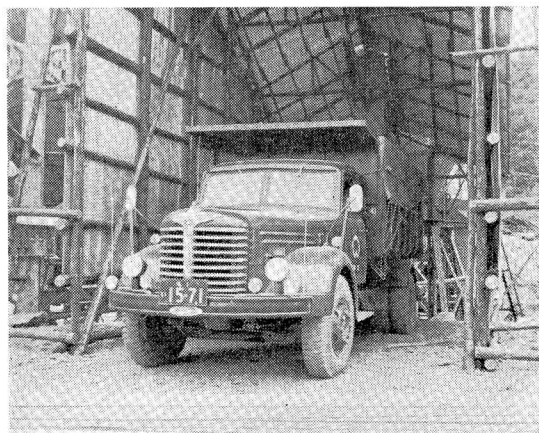
No.	名 称	仕 様	箇 数
セメントサイロ			
1	投入口上家	7.5 坪	1
2	バケットエレベーター	30 t/hr, 5.5 kW, 85 m/min	1
3	セメントサイロ	容量 500 t	1
4	ロータリバルブ	φ 300 mm	1
5	スクリーンコンベヤー	30 t/hr	1
6	バケットエレベーター	30 t/hr, 5.5 kW, 85 m/min	1
7	スクリーンコンベヤー	30 t/hr	1
8	セメント貯蔵ビン	容量 36 t	1
9	パッチャープラント	1.5 m ³ ×2 台, 1 人制御, 記録計付	1
フライアッシュサイロ			
10	投入口上家	7.5 坪	1
11	バケットエレベーター	20 t/ht, 3.7 kW, 85 m/min	1
12	フライアッシュサイロ	容量 100 t	1
13	ロータリバルブ	φ 300 mm	1
14	スクリーンコンベヤー	20 t/hr, φ 250 mm, 60 r.p.m.	1
15	バケットエレベーター	20 t/hr, 3.7 kW, 85 m/min	1
16	F.A 貯蔵ビン	容量 12 t	1
17	スクリーンコンベヤー	20 t/hr, φ 250 mm, 60 r.p.m	1
18	F.A 計量器		1



写真—4 主要仮設備全影



写真—5 コンクリート混合設備



写真—6 パラフライアッシュ運搬車

7. セメントフライアッシュの輸送

近年本道の道路事情は相当に改善され、かつ静内ダムはセメント生産地に比較的近い事より、セメントのバラ輸送を計画した。また前節で述べたフライアッシュの現場混合もあわせて経済比較を行なったが、その結果は表-14の通りである。

表—14 輸送方法の比較 (対称
40,000 t)

セメントの 種 類	F.A 現場混合		F.A 工場混合	
	セメント	フ ラ イ ア ッ シュ	F.A バラ セメント	F.A 袋詰 セメント
輸 送 方 法	バ ラ トラック	バ ラ トラック	バ ラ トラック	袋 詰 貨 車
金 額 (千円)	240,000		252,000	287,000

上記案の比較より、セメントフライアッシュ共バラ積ト
ラック輸送の上、現場混合案を採用した。当初は輸送の円
滑化に対して懸念が持たれたが、現在迄の経過では特に支
障はなかった。現場サイロがセメント 500 t、フライアッシ
ュ 100 t と僅かな貯蔵量で長距離バラ輸送が事故もなく成
功したのは、道路網の整備と直通連絡の迅速によるもので
あろう。尚輸送距離は、セメントは室蘭より 150 km、フラ
イアッシュは江別より 180 km である。

8. あとがき

静内ダムの温度規制について、特にクーリングとフライ
アッシュセメントの使用の面を取上げて報告したが、マス
コンクリートの施工にあたり、フライアッシュセメントの
使用は効果的と考えられ、また工事は現在継続中でもあり、
資料の取まとめ、内容に不備の点が多い事をおわびすると
共に、この報告が幾分でも皮様の御参考になれば幸いで
ある。

参 考 文 献

- 1) Boulder Canyon Project: “Cooling of Concrete Dams”.
- 2) 建設技術研究所: “ダムコンクリート冷却の研究”.
- 3) 近藤・村田: “王泊ダムの嵩上計画について”. 発電水
力, 25, 26, 27, 28 号.
- 4) フライアッシュ協会: “フライアッシュ文献集”.
No. 2.
- 5) 国分・他: “ペーストによるフライアッシュの使用に関
する研究”. 土木学会論文集, 71 号.