【報　告】

上椎葉アーチダム工事について（その二）

熊　川　信　之*

4. ダムコンクリート

（1）コンクリートの配合，セメント　上椎葉アーチダムのコンクリートの特徴はその強度が従来施工の重力ダム以上のものを要求されたことである。すなわちコンクリートの圧縮応力が 60 kg/cm² 以上にも達し，これは重力ダムの応力に比し，かなり大きい応力であり，この程度の応力に対してコンクリートの品質も高いものが要求されるわけである。上椎葉ダムでは，コンクリートの 91 日強度を基準にし安全率 5 をとつたが，これに対してコンクリートの 91 日の強度は 400 kg/m³ 以上を要求されることになつた。骨材としては後述のごとく現場産の砕石，砕砂を用いた。特に砕砂はその粒形，粒度の点においてコンクリートに適するかどうかの問題もあり，コンクリートの配合決定に当つてはこの点が特に考慮された。工費の節減，コンクリートのひびわれ防止の点から，セメントの使用量の超過は極力避けたいわけで，その点ＡＥ剤使用や骨材製造にともなう不備の補足およびコンクリート製造の品質管理を合理化する目的で，セメント使用量の最小量を決定した。強度上および施工上の要求から最大骨材 80 mm の場合 250 kg/m³ のセメント使用量ほか**表—5** の代表例のような A,B,C の 3 種の配合が決められた。

A, B, C の配合は，それぞれ応力に応じて打設されたもので，主としてA配合は岩盤沿いの高い応力部分，B, C 配合は内部で，C配合はダム上部におもに打設された。A配合のうち骨材最大寸法 80 mm のものは堤体表面の部分および引張応力の部分に打設された。セメントは所要の強度を満足すべきことはもちろんであるが，前述のごとくアーチダムなるための強度の要求からその使用量が多くなるので，水和熱の発生はできるかぎり少いことが必要であり，小野田セメント津久見工場，日本セメント佐伯工場，宇部セメント宇部工場に同一仕様の中庸熱セメントを註文し，混用された。購入に当つては各社ロットごとに 7 日，28 日，および 91 日強度，その他物理試験，化学分析に立会試験

表—6　ダム用中庸熱セメントの規格および実績

項目			単位	規格	実績
化学成分	強熱減量		%	<2.0	0.93
	不溶解残分		〃	<0.75	0.33
	珪酸	SiO_2	〃	—	28.84
	礬土	Al_2O_3	〃	—	4.38
	酸化第二鉄	Fe_2O_3	〃	—	4.00
	石灰	CaO	〃	—	63.46
	苦土	MgO	〃	<3.0	1.35
	無水硫酸	SO_3	〃	<2.0	1.29
	珪酸三石灰	$3CaO\cdot SiO_2$	〃	<50	38.3
	珪酸二石灰	$2CaO\cdot SiO_2$	〃	—	39.5
	礬土酸三石灰	$3CaO\cdot Al_2O_3$	〃	<7.5	4.8
	水和熱	7 日	cal/g	<70	58.5
		28 日	〃	<80	72.8
		91 日	〃	—	82.9
物理試験	比重			JIS	3.20
	粉末度		cm^2/g	>1 700	1 824
	安定度		%	<0.5	0.05
	凝結時間	温度	°C	JIS	—
	始発時間		hr-m	JIS	2～21
	終結時間		〃	JIS	3～29
	圧縮試験	3 日	kg/cm^2	>(40)	81
		7 日	〃	>90	144
		28 日	〃	>220	283
		91 日	〃	>320	461
	曲げ強度	3 日	kg/cm^2	JIS	23.7
		7 日	〃	JIS	35.7
		28 日	〃	JIS	56.9
		91 日	〃	—	77.0

表—5　代表的なコンクリート配合例

名称		150 mm A配合		80 mm A配合		B 配合		C 配合	
配合番号		206 A-1		176 A-1		207 B-1		303 C	
W/C (%)		51.5		53		57.1		65.8	
G/S		3.0		2.3		3.0		2.6	
単位		示方 kg/m³	現場 lbs/2.5 m³	示方 kg/m³	現場 lbs/2.5 m³	示方 kg/m³	現場 lbs/2.5 m³	示方 kg/m³	現場 lbs/2.5 m³
セメント		235	1 300	250	1 380	210	1 160	190	1 050
水		121	590	132	650	120	580	125	620
砂		514	2 830	607	3 340	519	2 840	574	3 160
砂利		1 542	8 580	1 396	7 780	1 558	8 660	1 492	8 300
内訳	玉石	463	2 560			467	2 580	404	2 220
	大砂利	463	2 560	698	3 860	467	2 580	492	2 720
	中砂利	308	1 710	419	2 340	312	1 740	298	1 660
	小砂利	308	1 750	279	1 580	312	1 760	298	1 700
AE剤（プロテックス）		82 cc	7 オンス	88 cc	7.8 オンス	74 cc	6.5 オンス	67 cc	5.9 オンス

* 正員，九州電力ＫＫ顧問，前　九州電力ＫＫ土木部長

を行つた。3者混用による振れを制御するため各社の工場試験のほか現場で物理試験を行つて品質管理を行つた。セメント91日強度の変異係数は各社とも4～5%を示している。**表—6** はダム中庸熱セメントの化学成分および物理試験の規格および実績の代表的平均値をだしたものである。セメントの輸送は南延岡より延長 57 km の単線式索道（能力 40 t/h）で袋詰めによつて現場まで運搬の上解袋し，750 t サイロ2基に貯蔵した。バッチャプラントまでの小運搬は骨材と同じくベルトコンベヤを使用した。

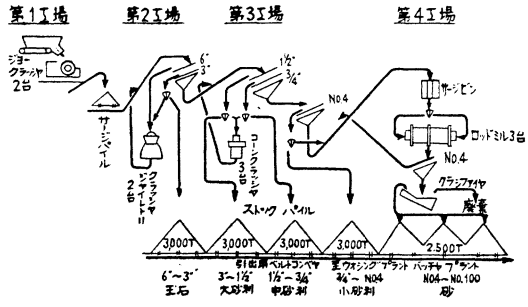
（2） コンクリート用骨材について 上椎葉ダムコンクリートの一特徴は，その骨材をすべて現地において製造してその品質を特に厳重に仕様したことである。ダム地点支流桑木原川上流の原石山で坑道取式大発破方式によつて硬砂岩原石を採取，これを砕石工場にダンプトラックで運搬，砕石および砕砂を製造し，これらを粗骨材および細骨材とした。原石山で採取せられた原石は当初の予想に反し均質かつ堅牢な硬砂岩のみをうることが困難であり，ある程度の風化をみたものも混入する状況にあつたが，これを A，B，C，D 級の4種別の原石に分級し，歩留りを犠牲にしつつ，C，D 級骨材の使用は相当に制限を設けた。

表—7 骨材原石の判別基準

項目 / 級別	比　重	吸水率 (%)	色および風化程度	圧縮強度 (kg/cm²)
A	2.72 以下	0.04	全部青色，風化無し	1 870～2 690
B	2.65	0.98	青色，一部褐色，一部風化	1 100～2 360
C	2.62	1.44	褐色，一部青色，大部風化	730～1 700
D	2.53 以下	3.69	全部褐色，全部風化程度に差がある	170～1 170

骨材は粗骨材最大寸法を 150 mm として砕石工場において4種の砕石および砕砂に分類した。すなわち玉石（150～80 mm），大砂利（80～40 mm），中砂利（40～20 mm），小砂利（20～5 mm），砕砂（5 mm 以下）である。**図—8** は砕石工場のフローシートを示したもので，第1工場，第2工場および第3工場は砕石設備，第4工場は製砂設備である。ジッキング法により骨材の最大密度をうる上記4種の粗骨材混合割合を求めた結果，最大骨材寸法 150 mm に対してそれぞれ 30：30：20：20 であつたが骨材製造に当つて砕石および砕砂の生産量を玉石 22～20%，大砂利 23～24%，中砂利 15～14%，小砂利 15～14%，砕砂 25～28% とした。A，B，C の各配合に対して粗骨材の粒度を設計したが，**表—8** はこれを示したものである。粗骨材のこの設計粒度に対して各配合につき骨材全体の設計粒度分布を示したものが，**表—9** である。砕石工場で試料を採取してふるいわけ試験を行い，各混合率にもとづいて，大略の粗骨材の使用粒度を求めたが，ほぼ設計粒度に近いものが得られた。

図—8 砕石製砂フローシート



表—8 粗骨材の設計程度

配合別	粗骨材最大寸法 (mm)	粗骨材設計程度 (%) 玉石 150～80	大砂利 80～40	中砂利 40～20	小砂利 20～5	粗粒率 F. M.
AB配合	150	30	30	20	20	8.60
A 配合	80	---	50	30	20	8.20
C 配合	150	27	33	20	20	8.57

表—9 上椎葉ダム使用骨材粗度分布の比較

フルイ目	粒度 (残留 %) 米国推奨 各個	累加	Norris ダム 各個	累加	上椎葉ダム A，B 配合 各個	累加	上椎葉ダム C 配合 各個	累加
150 mm	0	0	0	0	0	0	0	0
80 〃	20	20	14	14	22	22	19	19
40 〃	15	35	18	32	22	44	24	43
20 〃	13	48	13	45	15	59	15	58
10 〃	10	58	11	56		(67)		(66)
5 〃	7	65	9	65	16	75	15	73
F. M.	8.48		8.25		8.60		8.57	
2.5	6	71	8	73	2	77	2	75
1.2	8	79	9	82	6	83	6	81
0.6	7	86	7	89	7	90	8	89
0.3	5	91	4	93	4	94	5	94
0.15	5	96	3	96	4	98	4	98
受皿	4	100	4	100	2	100	2	100
F. M.	2.79		3.10		2.75		2.75	
混合 F. M.	6.48		6.45		7.09		6.96	
砂百分率 (%)	35		35		25		25	

写真—6 クラッシングプラント全景

第1工場より砕石工場全景を望む。手前より第2，第3，第4工場および骨材貯蔵場（右側トタン屋根は砂貯蔵所）

種砕砂機械による実験を行い，ロッドミルによる湿式粉砕方式を採用することに決定したが，砕石工場設置に先立つて，実際使用のものと同寸法のモデルプラントによる製砂試験が行われたコンクリート用細骨材としての砕砂の具備すべき条件としては，粒形が角ばつたり，扁平に過ぎず立方または球形であること，また大小粒が適度に混合されていることなどであるが，これら粒形粒度をうるためのロッド重量，ミル回転数，供給水量など諸種の実験が行われた。ロッドミルは 6′×12′ のセンタペリファラル・ディスチャージ型である。実験を重ねて，ようやく良好なる製砂に成功し，AE 剤の使用と相まつて砕砂のみでコンクリート用骨材として使用可能なことが確認せられた。実験の結果，次の諸傾向が認められた。

a） ロッドの型状および重量と粒度との関係　ロッドの直径が小さくなればなるほど落下時の衝撃が少なくなるので，一定の粒度の原石一定量を供給した場合には粒度は粗くなる。またロッドの重量がおよぼす影響については，ロッドの重量が多いほど粒度は細かくなり，少なければ粗くなる。

b） ミルの回転数と粒度との関係　回転数の粒度におよぼす影響は回転数の少ない場合には，ロッドの落下による衝撃が減少するため，同一容量の原石供給に対して粗いものができる傾向にある。採用された回転数は 22.6 rpm である。

c） 砕石の粒形とロッド重量の関係　自然砂であれば同一粒度の砂がモルタルフロー値およびコンクリートのスランプの値におよぼす影響は一定に近いが，砕石の場合は同一粒度であつても製造時のロッドのトン数によつてこれらフロー値，スランプ値におよぼす影響が異なつてくる。これは粒子の形状が影響するものと考えられるが，ロッドのトン数 5,10,15,20 t のそれぞれの場合について，同一粒度の砕砂でモルタルフローおよびコンクリートのスランプ試験を行うと，ロッドのトン数の大きい場合の砕砂ほど大きい値を示す。また興味あることは粒度が粗くなるに従つてロッドのトン数が 5,10,15,20 t のいづれもモルタルフロー値は大きくなるが，コンクリートスランプは，いづれのロッドのトン数の場合も F.M.＝2.50～3.00 のとき最大を示した。上椎葉で砕砂粒度の規格を F.M.＝2.50～3.00 を目標にしたものは上記の理由による。

d） 原石供給量とロッド挿入量　ロッド挿入重量と原石供給量とは，供給粒度のいかんにかかわらず，限界ロッド重量までは比例するが，限界点を越えると，ロッド挿入量が増大するにつれて粉砕能力が急激に減ずる傾向となる。供給原石の最大値は 37 t/h であつた。

e） 水の供給量と粒度との関係　水の供給量と粒度との関係については，水を多くすれば粗くなり，少なければ細かくなる。濃度，すなわち原石と水との混合比（pulp density）と製品の粒度は原石の粒度により変化するがほぼ反比例する。

実際の砕石工場における製砂に関して設けられた規格は次のごとくであつた。すなわち標準粒度は F.M.＝2.75 標準フルイ残留％が 2,8,20,27,18,14,8％ であること。粗粒率の許容範囲 2.75±0.2，比重 2.60 以上 100 メッシュ以下の重量％が 7～10％ 洗い試験で失われる量 5％ 以下であることなどである。供給される原石はその硬さ，粒度などが日々異なるために製砂工程の管理のいかんはただちに砕砂の諸性質に直接影響する。砕石工場およびバッチャプラントの 2 カ所で試料を採取し，粒度，比重，吸水率，泥土量などの試験を行い，特に粒度の管理については十分意を用いた。**表—10** はバッチャプラントにおけるこれら試験の結果である。粗粒率について砕石工場およびバッチャプラントにおける平均値および変異係数を求めたがそれぞれ F.M.＝2.85, 2.79，変異係数＝3.5, 2.5％ であつた。一般に粒度に関しては後者のものが前者より均等性を示したが，これは運搬過程が自然にかきまぜ作用をともなつたためと思われる。

（3） 打　設　コンクリートの混合は 4 yd³ (3 m³)

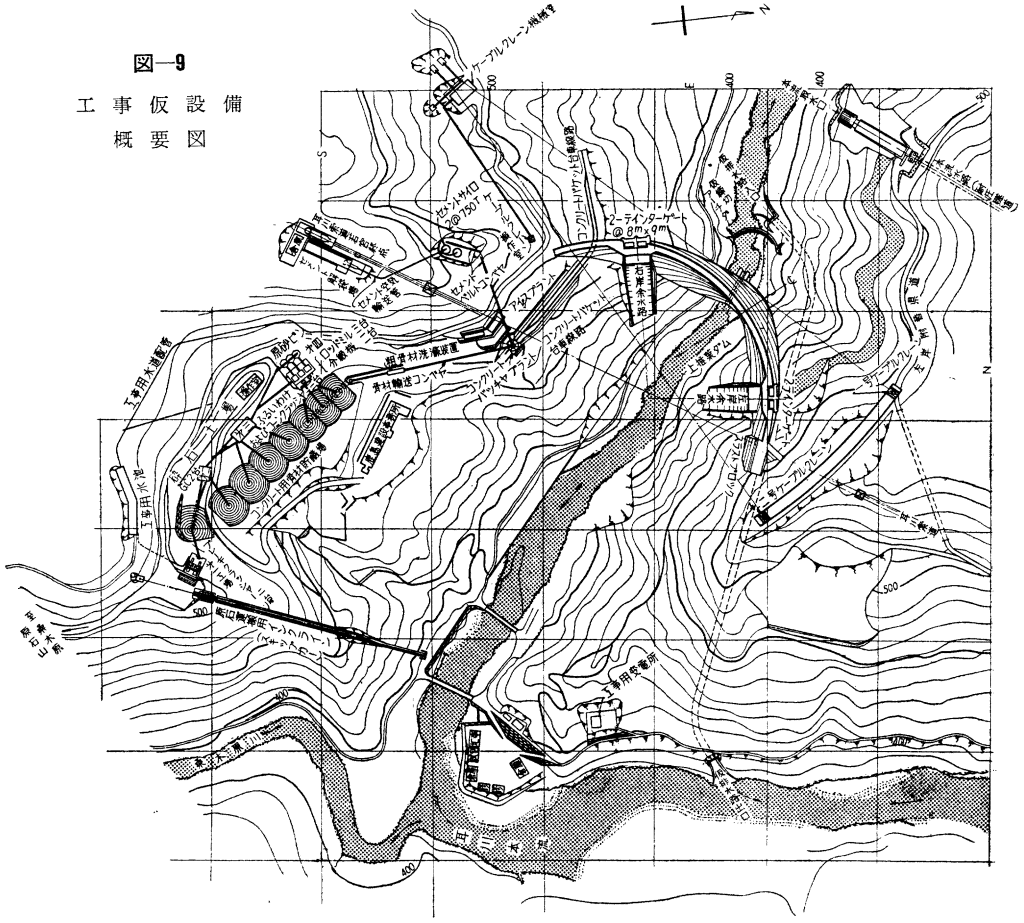
表—10　バッチャプラントにおける砕砂試験結果
（昭．28.8.～30.3. 月平均）

No.	年月日	試料採取日数	フルイ分け試験 5.0	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	PAN	F.M.
1	昭28	11	3 3	10 13	24 37	25 62	17 79	13 92	8 100	2.86
2	8	9	3 3	8 11	22 33	26 59	18 77	14 91	9 100	2.74
3	10	2	3 3	9 12	22 34	25 59	18 77	15 92	8 100	2.77
4	11	20	3 3	10 13	22 35	25 60	18 78	14 92	8 100	2.81
5	12	30	3 3	11 14	24 38	25 63	17 80	13 93	7 100	2.91
6	昭29 1	22	4 4	11 15	22 37	24 16	18 79	13 92	8 100	2.88
7	2	15	3 3	10 13	23 36	25 61	18 79	13 92	8 100	2.84
8	3	24	3 3	9 12	23 35	26 61	19 80	13 93	7 100	2.84
9	4	23	2 2	8 10	22 32	27 59	19 78	14 92	8 100	2.73
10	5	24	2 2	6 8	21 29	28 57	20 77	15 92	8 100	2.65
11	6	10	3 3	8 11	22 33	27 60	19 79	13 92	8 100	2.77
12	7	20	2 2	7 9	23 32	28 60	19 79	14 93	7 100	2.75
13	8	15	2 2	7 9	19 28	27 55	20 75	16 91	9 100	2.60
14	9	14	2 2	9 11	17 28	28 56	18 74	17 91	9 100	2.62
15	10	26	3 3	10 13	17 30	27 57	18 75	17 92	8 100	2.70
16	11	25	2 2	10 12	18 30	27 57	18 75	17 92	8 100	2.68
17	12	23	3 3	11 14	19 33	27 60	17 77	16 93	7 100	2.80
18	昭30 1	4	3 3	12 15	19 34	26 60	17 77	15 92	8 100	2.81
19	2	14	4 4	13 17	20 37	26 63	16 79	14 93	7 100	2.93
20	3	10	3 3	14 17	20 37	26 63	16 79	14 93	7 100	2.92

ミキサ3台を備えたジョンソン会社製のバッチャプラントで行い，混合されたコンクリートは 13.5 t，ケーブルクレーン（コンクリートバケット容量 5 m³）2基により運搬打設した。打設総量は 370 000 m³ で，1日最大 2 400 m³，1日平均 850 m³ の打設を行つた。上椎葉ダムはアーチダムなので，各ブロックは半径の方向に1個しかなく従つて湛水後の漏水防止の上から，十分な水密性の良好なコンクリートを打設する機会は1回だけとなる。各リフト打継目の表面処理，打設コンクリートの締固めなど種々の点に意を用いた。リフトは従来標準とされていた 1.5 m をさらに大きく 2.0 m とし，岩盤沿いや長く放置されたコンクリートの上は 1.0 m リフトが採用された。リフト厚増大によるひびわれの可能性は人工冷却を採用することによつて解消された。コンクリート1層の厚さは 40 cm とし大部分のコンクリートは層状式打設法によつた。ブロックの上下流は2 m の間をA配合の富配合として，その内側はBおよびC配合のコンクリートとした。アーチの切線方向に上下流半分ずつ，ケーブルクレーン2基でそれぞれ打設してゆくこの方法は，バケットの操作往復時間の短縮ができ，比較的良結果であつた。ただしこれには各層間に水が溜るなどの欠点が見られた。雨天またはその心配のあるときは，アーチの切線方向に下流から上流に階段状打設法がとられたが，これには各層の上流側法面は完全にバイブレーターがかけられぬため粗骨材の露出が多くなること，法面にいわゆるコールドジョイントができやすいこと，また2基のケーブルクレーンを交互に動かすので，その走行に時間がかかるなどの欠点があつた。バイブレーターは林製作所製 No. 3 バイブレーターを用い，バケット1台につき6台を準備し，1バケットの山を4台でならし，別の2台で 60 cm 間隔で締固めを行つた。寒中コンクリートについては上椎葉地点の気温が比較的高いので，特に規定は設けなかつた。降雨時のコンクリート打設は前記打設法がとられたほか，降雨 4 mm/h 以下の場合は打設をゆるし，その程度によりセメントを 10～15 kg/m³ 程度増加した。強度や水密性が特に要求されただけに降雨時の施工カ所でコンクリート硬化後，コアーをとり強度試験を行つたものや，穿孔して洩水試験を行つたカ所もある。コンクリート打設中にいろいろ事故で打設が中断されコンクリートの表面が硬化した場合，いわゆるコールドジョイントとなるが，これは水密性に大きく影響するところから極端に嫌つた。コンクリートが硬化するまでの時

図—9

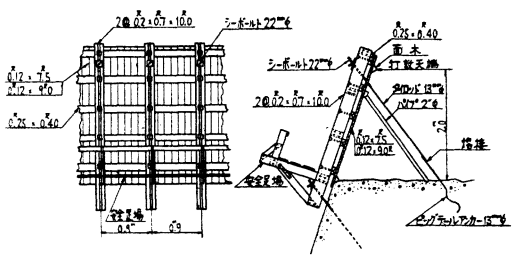
工事仮設備概要図



間は気温，湿度，日当り，風当りなどに左右されるので一概に言えないが，大略の基準としてバイブレーターがコンクリート表面に多少でも挿入できるまではコールドジョイントでないとした。この硬化の時間は夏1～3時間，春秋6～10時間，冬 12～20 時間程度であることが経験された。打継目の清掃すなわちレイタンスの除去はすべて空気，水のジェットによる清掃を行つた。その時期は前記硬化の時間を標準とした。方法としては，空気，水のジェットで表面のレイタンスを洗い流し（20×20 cm のブロックで約1時間），その後は4時間ごとに3回表面を洗つた。グラウトストップ，特に水平ストップの付近は，ジョイントグラウト時漏失の原因になることが認められたので，鉛直ストップ付近は骨材の最大寸法 80 mm，水平ストップ付近は 40 mm のA配合のコンクリートとした。水平ストップの下面はコンクリート打設時の水溜りとなり，これがのちの漏水の原因になるので，特に注意を要した。バッチャープラントにおける管理としては，各材料の計量誤差（基準1% 以下）のほかに細骨材の表面水量，スランプ，連行空気量の測定を1時間ごとに行つた。ミキサの練り時間は1バッチ 2.5 m³ として 2.5 分と決めた。スランプと空気量の管理基準は 5±1 cm，3.2～4.2% であつた。砕石の表面水量はストックパイルにおける水切りに大いに影響されたが，パイルの山を3つにし，製造，水切り，使用にそれぞれあてたこと，砕石使用の盲溝を設けた排水設備などで約 12～14 時間で 6～7% 程度の表面水量とすることができた。型ワクについて述べると上椎葉ダムは定角型アーチダムであるため，標高により半径と中心の位置が，変化するので，上下流面は3次元的に変化する。同じ標高では半径は一定であるが，クラウンとアバットでは横断勾配が違つてくる。これらの要求を満足する型として **図—10** のごとき型ワクが用いられた。この型ワクは横断勾配が比較的小さいので各リフトごとに変化させ（各リフトごとに型ワクのポイント測量を行う）リフト間は直線であり水平回線はリフトの上下端で各別個の曲線がつけられるようになつている。型ワクは各打継目で横断勾配を変えうるよう，また材料の節約上ずり上げて数リフトに使用した。

（4） 現場コンクリートの実験結果 バッチャプラントでコンクリート供試体をとり，各ブロック，各リフトごと，毎配合ごとに7本をとり1本は7日，3本は 28 日，他の3本は 91 日の強度試験を行うとともに標準偏差，変異係数などを求め，管理の完全を期した。各配合の 91 日強度およびその変異係数はA配合：406 kg/cm² 12.1%，B配合：367 kg/cm² 11.9%，C配合：325 kg/cm² 13.1% で供試体の個数は 415 個である。

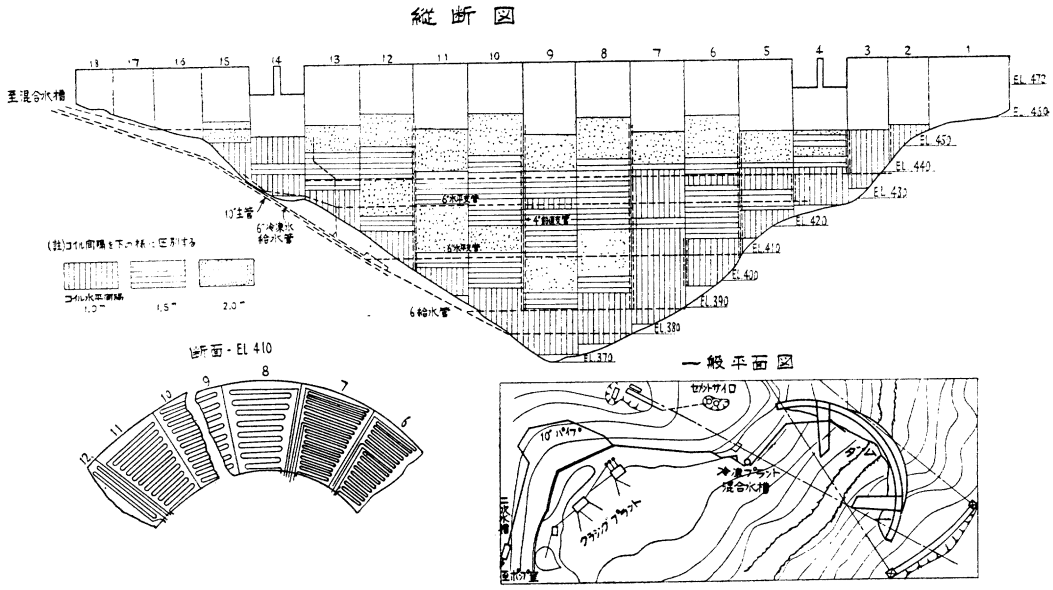
図—10 ダム上下流面型ワク図



5. 人工冷却

ダムの施工に当つてセメント水和熱にもとづいてコンクリートの最高温度上昇を抑制する必要のあることは言うまでもない。また貯水池湛水前に各ブロックの平均温度を下げ，ブロックの収縮を完了せしめて収縮継目のグラウト填充を完全ならしめねばならない。これらは重力式高ダムについても言えることであるが，アーチダムの場合は上記のほかにダム温度の降下にもとづく応力（温度降下による応力は，水圧などの下流向き応力に重畳され，危険な応力を生ずる）を小さくする目的から，収縮継目グラウト時の温度をなるべく低くして，その後のダム温度降下量を小さくする必要がある。これら諸種の目的から，前述のようにダムコンクリートに使用するセメントの水和熱を制限するのみならず，人工冷却を行つて建設中のコンクリート最高温度を抑制するとともに，収縮継目グラウト時までにブロック平均温度を本地点の年平均温度（15.6°C）まで冷却する計画とした。人工冷却の方法としてはプレクーリングおよびパイプ冷却を併用する方法をとつた。コンクリート最高温度とリフト厚，ブロック幅との間には相関的な関係がある。人工冷却によつてひびわれを生じない程度の抑制が可能であれば，リフト厚，ブロック幅（収縮継目の間隔）もできるかぎり大きくできるわけである。わが国従来のダムではリフト厚 1.5 m，ブロック幅 15 m が標準とされたがコンクリート打継目からの漏水防止の目的から厚さの薄いアーチダムではなるべく打継目の処理を少くしたいこと，アーチダム特有の面倒な型ワク測量の手間をはぶきたいなどの理由から，リフト厚を 2.0 m とし，またブロック幅も温度抑制により拘束度が減少すること，打設設備の能力に対し経済的で能率的なコンクリート打設が不可能などの見地から，最近の欧米の例と相まつて天端アーチの軸線に沿い 20 m とした。その鉛直方向の面は各標高ごとに半径方向の捩れた面である。プレクーリングはコンクリート混合水として，1～3°C 冷凍水を用い，さらにチューブアイスを混入してコンクリート打設温度を低くする方法をとつた。氷の混入割合は，製氷設備（30 t/day）と打設速度に制約を受け混合用水の 10～20% 程度であつたが，練上り温度を 2～4°C は低下し得た。パイプの冷却の大要は **図—11** に示してあるが，外径 1″，厚さ 1.4 mm の電縫鋼管をコイル状にリフトコンクリート打設前，下部リフト表面に布設し，コンクリート打設

図—11 ダムのパイプ冷却施工図



と同時に冷却水を循環せしめ，一段階で連続冷却した。パイプ冷却の効果に最も大きく影響するのは，パイプ水平間隔と冷却水の温度である。基礎岩盤による拘束を大きく受ける岩盤沿いの部分は，パイプ水平間隔を 1.0 m，ダム上部は 2.0 m，中間ゾーンは 1.5 m を原則とした。パイプコイル 1 本の長さは最大 300 m とし，大きいブロックでそれ以上の長さを必要とする場合は 2 本とした。循環水の流向は適宜変更した。冷却水は河水と冷凍水を使用し，夏期および打設直後の高温の時期には冷凍水，冬期の河水温度の低い時期は河水を使用した。冷却水温はほぼ 7～17°C であつた。冷却水の循環速度はパイプ内の水流が渦流となる速度として 0.7～1.0 m/s 程度であつた。上記冷却工事に当てられたクーリングプラントの冷凍容量は 380 冷凍トンであつた。EL. 455 以上の部分は，ダム厚薄く，自然冷却によつて，ある程度の冷却効果が予想され，後述の再注入グラウトバルブを使用することによつてパイプ冷却を行わない計画とした。図—12 はパイプ冷却および自然冷却の比較図である。堤体内には抵抗温度計，およびカールソンヒズミ計が埋設され，各種冷却効果が測定された。これら測定の結果および冷却工事を通じて次の諸点が明らかになつた。

a) 上椎葉ダムではプレクーリングとパイプ冷却を併用したが，プレクーリングのみによつて効果をあげるとすれば，骨材の冷却をも行うべきである。

b) パイプ冷却による冷却速度は，場所や冷却作業によつて差はあるが，ほぼコイル間隔 1 m で 0.7～0.8°C/day，1.5 m で 0.6°C/day 前後，2.0 m で 0.3～0.5°C/day であつた。

c) パイプ冷却のみによる最高温度の抑制量は 6～7°C 程度である。コンクリートの最高温度上昇は，全期間を通じてせいぜい 26°C 前後であつた。

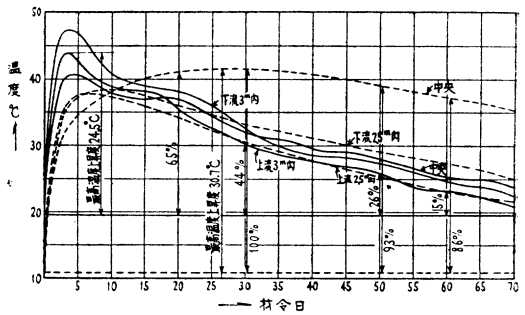
d) パイプ冷却は水平面内の温度差をなくし，ダム内部および表面の温度差にもとづく拘束応力を緩和し，ひびわれ防止に有効である。

e) コンクリートの熱拡散率は，当初の計画より比較的小さい値を示し実測および実験の結果から 0.003 m²/hr 程度であつた。

f) コンクリート 1 m³ 当りの冷却費はコンクリート単価の約 3% であつた。

g) ブロック幅 20 m，リフト厚 2 m は上椎葉で採用

図—12 自然冷却と人工冷却との比較



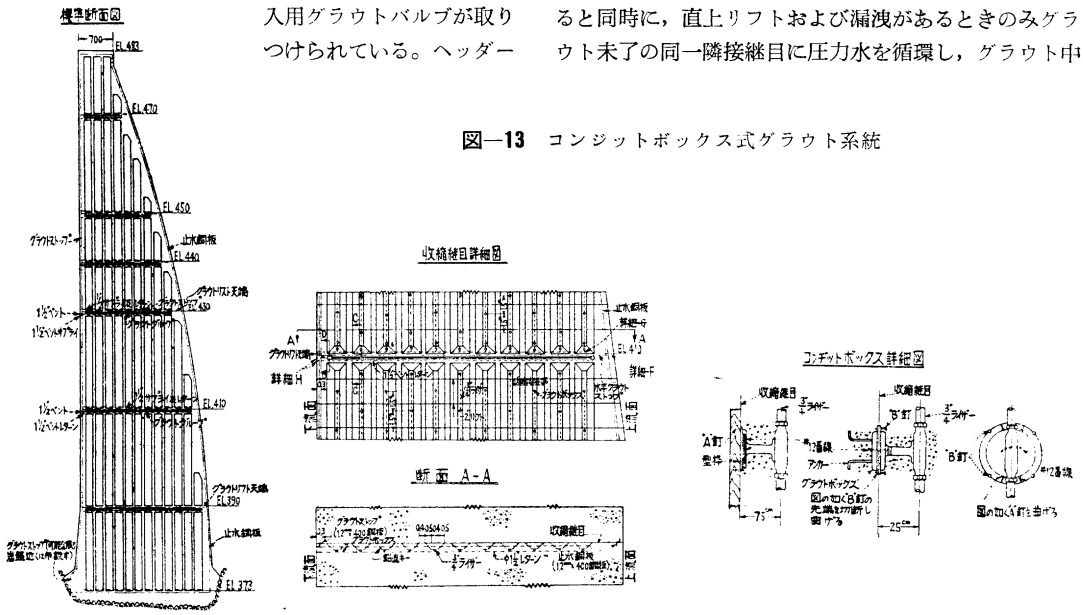
註：—— BL. 7, EL. 450（人工冷却の場合）ダム厚さ＝16.4 m
…… BL. 9, EL. 470（自然冷却の場合）ダム厚さ＝10.6 m
温度の対比は中央の温度計について算定したもの

符号		打設月日	最高温度上昇度	同材令	両者の比	各材令ごとの温度が最高上昇温度に対する比(%)					
						20日	30日	40日	50日	60日	70日
——	人工冷却	8月7日	24.5	3日	0.8	65	44	33	26	15	4
……	自然冷却	11月3日	30.7	26日	1.0	97	100	98	93	86	80

された冷却設備に対してひびわれは生ぜず，かつまた打設速度も従来の標準より大きくとれ，ほぼ妥当な寸法であつたと思われる。

6. 収縮継目グラウト，コンタクトグラウト

（1） **収縮継目グラウト**　パイプ冷却により年平均気温まで冷却され，収縮継目の十分開いたのち，グラウトを行いダムを一体化する。グラウトリフトは図—13のようにダムの全高を7リフトに分けたが，EL. 430～EL. 450 が 10 m の2リフトおよび EL. 470～EL. 483 が 13 m リフトのほかは 20 m リフトである。継目の周囲にはグラウトストップが埋込まれたが，上下流面のストップは 1.2×400 mm のZ型，水平グラウトストップは 1.2×600 mm のU型である。材料は銅板または鉄板で，上流側ストップは止水板をかねている。各ストップは真鍮蠟づけされた。グラウト系統はコンジットボックス式系統を主体として，ダム上部は湛水までは十分冷却が完了しないことが予想されたので，完全冷却後再びグラウト可能な再注入式系統が併用された。EL. 440 以下は前者のみ，EL. 440～EL. 450，EL. 460～EL. 470 は両者併用，EL. 470～EL. 483 は後者のみとなつている。コンジットボックス式の埋設管はほぼ米国開拓局の例にならつたもので，サプライヘッダー（外径1½″）→ライザー（外径 ¾″）→コンジットボックス→継目→グラウトグルーブ→エアーベント（外径 1½″）の系列である。各パイプは薄肉（1.2, 1.6 mm）電縫管でライザー水平間隔およびコンジットボックスの鉛直間隔はそれぞれ2.0および 3.0 m で再注入式と併用のカ所は，いづれも 4.0 m である。再注入式系統はサプライおよびレターン用のヘッダー（1″ガス管）に再注入用グラウトバルブが取りつけられている。ヘッダーは鉛直に 4 m 間隔でグラウトバルブは EL. 440～EL. 450 および EL. 460～EL. 470 では水平間隔 4 m，EL. 470～EL. 483 では 2 m 間隔に配置した。再注入用バルブはフランス製で特製チーズと中空ゴム製バルブよりなり，グラウト終了後，系統内をある圧力（1～2 kg/cm²）で水洗すれば，水がバルブを通して継目に入ることなく管内を洗滌できるので，後日再びグラウトできる利点がある。図—12，13 はこれら2つのグラウト系統を示している。再注入式系統については，目下グラウト施工中であるので，すでに施工されたコンジットボックス式系統についてグラウトの大要を述べてみよう。グラウトの順序は下部リフトの中央継目より開始し，左右交互に一つ置きに一継目づつグラウトし，同一全リフトが終了してから順次上部リフトに進行するのを原則とした。グラウト開始前に継目は十分なる洗滌後，漏水試験を行う。この試験はできるかぎり同一高さのリフト全部，および直上リフトにも行い，隣接継目および直上リフト間の内部連結，グラウトストップおよび止水板の良否，表面漏洩の有無などを調べた。この圧力による継目の開きは最大 0.8 mm までとして 20～60psi の圧力とした。表面漏洩はコーキングされた。継目からの漏洩は特に面倒で，この部分は継目を縦三角溝に沿つて，ノミまたはピックハンマーの類で穿ち，マキハダ，糸鉛などを詰め込み，その上をモルタル填充するなどの方法によつた。グラウト作業は視野のよくきく早朝より開始し，特別の事故のないかぎり，夕刻までに完了するようにした。すべての準備が終了したら，グラウト前日にグラウトポンプで水圧試験を4時間行い注入状態を調べ，グラウト濃度，セメント量などの資料をうる。引続き明朝グラウト直前まで湛水し，継目の面を湿潤状態にした。この水を脱水すると同時に，直上リフトおよび漏洩があるときのみグラウト未了の同一隣接継目に圧力水を循環し，グラウト中



図—13　コンジットボックス式グラウト系統

の継目の過度のタワミを防ぐとともに，流入したグラウトを洗出す作用をさせた。これらの水張り並びに漏水試験に使用する圧力水はすべて工事用水の自然落差によつた。継目開き測定用のダイヤルゲージ取付け，グラウトポンプ，ミキサ，グラウトライン，コックなどの最終検査ののちグラウトを開始した。容積比 4：1 の薄いグラウトを 1～2 バッチ（1バッチ 600 l）注入し，潤滑剤とした。続いて 1：1 のグラウトを最終まで注入したエヤーベントに設けた圧力計で測定される圧力は 20～60 psi で，いづれのブロックにおいてもグラウト中の継目開きは最大 0.8mm におさえた。使用セメントは普通ポルトランドセメントで #30 のフルイでふるつたものを使用した。グラウトポンプは Gardner Denver グラウトポンプ2台を設備した。継目グラウトの注入成績は表—11 に示す。

表—11 グラウト実績

グラウトリフト	継目数（ジョイント）	平均注入時間（時間/ジョイント）	面積（m^2）	注入セメント（袋）	面積/セメント（m^2/袋）
EL 370～390	3	20.15	1 046	129.88	8.05
390～410	6	16.68	2 621	342.07	7.66
410～430	9	11.89	3 641	779.58	4.67
430～440	11	8.55	2 186	479.67	4.56
440～450	13	6.61	2 116	400.28	5.29
450～470	16	6.57	4 037	546.12	7.39
計	58	9.54	15 647	2 677.60	5.84

グラウト作業，継目を通してのコアー採取，種々の実験などから継目グラウトについて次の結論を得た。

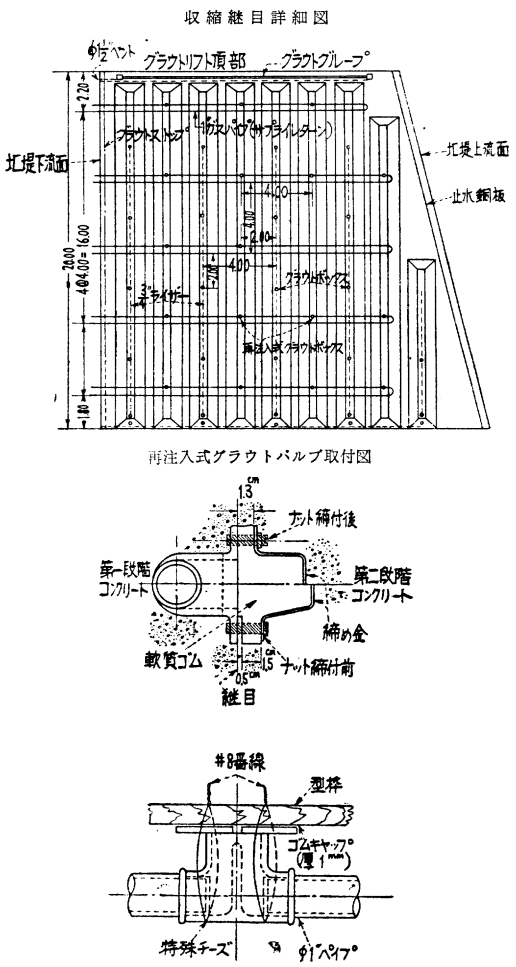
a） 継目を完全に塡充して付着強度の強いグラウトをえるには，硬化セメントペーストが白色チョーク状（$CaCO_3$ 成分が多く粒状または無定形結晶状）に変化するのを防ぐべきで，このためには継目の開きは 1 mm 以上であること，継目面はなるべく簡単，平滑，かつ清浄であること，使用セメントはなるべく粒子の細かいこと，グラウト濃度はなるべく濃いものであること，作業はなるべく短時間で完了すること，などである。

b） コアーの採取の結果は，硬化グラウトは表面より内部深く進むほど良好であつた。これは軽い $CaCO_3$ の多いグラウトやレイタンスが，周辺に押し出されて溜ること，継目が周辺ほど開きの小さかつたことによると思われる。

c） グラウト作業中のサプライヘッダー，およびエアーベント間の圧力の調整，従つて余剰水の排出を円滑にし，グラウトを効果的ならしめるには，リフトがなるべく低いほどよい結果が得られる。かつまたグラウト圧力によるタワミは，特にアーチダムの場合大きくなりやすく，好ましからざる引張圧力，およびセン断応力などを生ずる原因となる。この点からもリフトを小さくして，過剰なタワミを避けることが望ましい。上椎葉の 10m リフトでの結果は，この点非常に良好であつた。

（2） **コンタクトグラウト** 急傾斜の基礎岩盤では，

図—14 注入式グラウト系統

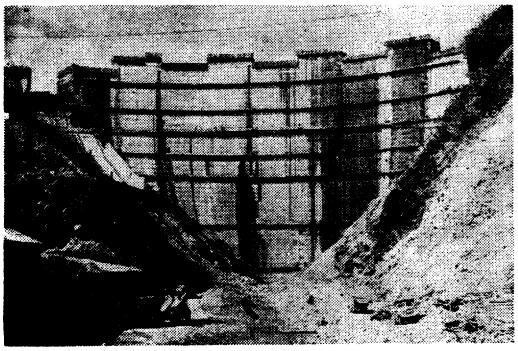


冷却によるコンクリートの収縮，堤体ブロックの移動や傾斜などのために，岩盤とコンクリートとの間に間隙を生ずることが予想され，これは洩水の原因や揚圧力の増大などの好ましからざる状態を惹起する。間隙を生ずることは，継目計の読みや，建設中肉眼からも左岸の急斜面で見受けられたが，この間隙をグラウトし，岩盤とコンクリートの密着をよくし，十分水密性を保たせるために，水平となす角が 45° 以上の急傾斜の部分にグラウトが行われた。前記継目グラウトにおけると同様のコンジットボックスが基礎面積 9m に 1 個の割合で埋設され，1ブロックに 1～2 系統に配管された。グラウト濃度はほぼ 4：1 で注入セメント量は 3 177 m^2 に対して 95.71 袋であつた。

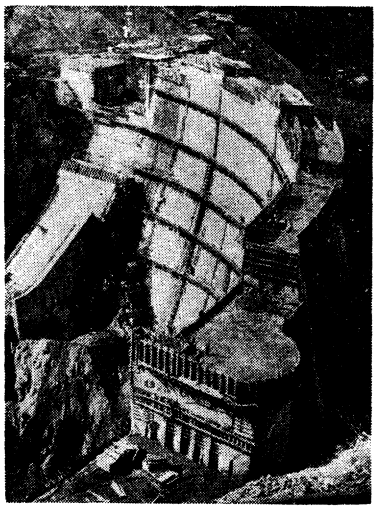
7. 上椎葉地点の地震，ダム振動実験

アーチダムの耐震性の問題は上椎葉ダム建設に当つて一つの焦点となつた。この問題究明のためにダム地点の過去の震央の調査，および寒天，ゴム模型による振動試験を行い，過去の地震の震央，九州地点の震度およびダ

写真—7 ダム建設工事中（昭.29.10）
下流より望む



写真—8 同　　上
左岸より望む



ム固有周期などが求められた。機械観測の発達した比較的近年のもの（1930 年以降），およびそれ以前の記録に残る古い地震資料とに分け，その震央の位置，地震に対する震度階の分布を九州全土にわたり地域的に詳細に求めた。これによると，上椎葉地方に起つた地震の記録はなく，また地震による災害の記録もない。この地方に影響をおよぼしたと思われる地震は，日向灘などいわゆる日本外側地震帯の地震が主である。前記震度分布からわかることは，上椎葉地点の過去に受けた最高震度階はせいぜい Ⅲ～Ⅳ 程度（14～45 gals）のものである。目下ダム地点，およびダム上に地震計が取りつけられ，地動の観測およびダムの地震加速度などの観測がされている。今後これら観測が十分行われれば，構造物のとるべき設計震度にも，もつとはつきりした数値を与えることになると思われる。1/1 000，1/667，1/500 の寒天模型，および 1/400 のゴム模型による振動実験が行われたが，相似率の点から寒天模型では空虚時のみの実験であつたが，ゴム模型については満水時の場合も行われた。相似率から実際のダムに換算された固有周期は寒天の場合，1 次振動で 0.25～0.27 sec，3 次振動で 0.17～0.19 sec であり，ゴム模型については，空虚時 0.36 sec から満水時の 0.45 sec に変化している。現在までダム地点の地震計がとらえた記録では，陸地内地震においては，その卓越周期は比較的短く，0.1 sec 前後であり，海底地震においては，一般に震源距離が大きくなるにつれて卓越周期が長くなつている。実験からみると，上椎葉ダムの固有周期は，0.3 sec 前後と考えられるが，この周期を与える地震は日向灘などの海底地震が多く，これは震源距離の大きいものであるから，そのエネルギーは小さく，ダムの安定性を脅かすほどのものではない。アーチダム地点は堅岩で囲まれており，岩盤のエネルギー吸収性などを考察すれば上記の事実などから上椎葉ダムの耐震性は十分あるものと推定される。

8. ダムに関する各種測定

ダムのヒズミ，温度，継目の開き，およびタワミなどの測定が試まれた。実際に築造されたダムの応力状態を知ることは，ダムの安全率を知るため最も有効な手がかりであることは論をまたない。この目的のために米国製カールソンヒズミ計を埋設し，ヒズミを（熱度補正のための温度も同時測定），またヒズミ計による応力のチェックのためにカールソン応力計を埋設，直接応力を測定した。人工冷却による冷却効果，各種熱度測定，収縮継目の開きなどの測定のために，抵抗温度計や継目をまたいで，カールソン継目計が埋設された。ダム応力については，これと平行して行われた基礎実験とともに目下解析中であり，これら諸実測については，後日その詳細を発表する機会があると思う。埋設された計器は，ヒズミ計 210 個，応力計 29 個，温度計 178 個，継目計 26 個である。

9. 結　語

以上一部設計を含め上椎葉アーチダム工事の大要を述べてきた。近来発電用のみにかぎらず，洪水調節，砂防用などのダムとして，アーチダムが各所に建設される気運にあり，これらに対し本稿がいくらかでも資するところがあれば筆者の幸とするところである。ダムの応力計算法，安全率，経済的な洪水余水吐き，耐震性など，また工法についても今後に究明すべき点は多い。これらの諸研究発展によつて今後より経済的かつ安定性あるアーチダムが建設されんことを祈つて止まない。終りに当つて，本ダム建設のために種々御協力下され，御指導を賜わつた建設省，通産省などの各官庁，および電力技術研究所の関係各位，東京大学，九州大学，各セメント会社，研究所などの関係各位に謝意を表する。