

豊平峡ダムの設計・施工と管理について

正 員 橋 本 識 秀 *

1 ま え が き

産業化社会における経済文化の発展は、東京以北の大都市札幌にも人口の集中を招き、畑地の宅地化と都心部の高層化が急激に進んでいる。

豊平峡ダムは、このように膨脹を続ける札幌の躍動と発展を支えるため、水資源の確保と治水安全度の向上を計ることにより、札幌住民の明日のエネルギーの補給と生活基盤の安定を維持する目的で、豊平川の上流に建設されたものである。

豊平峡ダムは北海道初的大型アーチダム（非対称不等厚放物アーチダム）として注目を集め、また大都市の上流に位置することから設計施工に最新の技術と細心の注意が払われた。豊平峡ダムの完成するまでには、調査2年、計画設計2年、建設6年の合計10年の歳月と多数の技術者の知恵とそして84億5千万円の巨費が投じられた。

本工事報告は豊平峡ダム本体の完成までの経緯とその後の管理に主眼を置いて、計画上の問題点、アーチダムの構造設計と施工管理、ダム管理システムと湛水後の挙動について報告するものである。

2 計画と今後の問題点

豊平峡ダムの計画は、昭和36年、37年の2洪水を契機として豊平川の流量改訂（ $2000\text{m}^3/\text{s}$ → $2650\text{m}^3/\text{s}$ ）による増量分の処理方法が検討されていたことと、札幌市の水道用水が昭和45年頃には不足することが予測されたことから急速に具体化したものである。

豊平峡ダムの計画は、昭和40年、41年の2ケ年で纏められ、昭和42年より建設着工の運びとなつたが、この頃より大都市での水不足が報道紙上を騒がせ、最近では水系内のダムを統合管理することにより、新たな水資源の開発が論じられている。

しかし、豊平峡ダムの計画当時は、単一ダムとしての開発方式が社会概念として認識されていたため、ダムサ

* 北海道開発局河川計画課 企画係長

写真-1

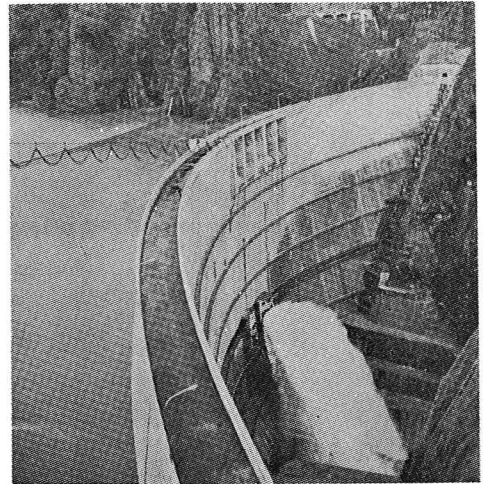


表-1 貯水池諸元

名 称	諸 元	名 称	諸 元
満水標高	EL 475.00m	堆砂及死水量	10,000,000 m^3
低水標高	EL 437.80m	洪水待期容量	20,200,000 m^3
利用水深	37.20m	基本高水	820 m^3/s
総貯水量	47,100,000 m^3	調節流量	680 m^3/s
有効貯水量	37,100,000 m^3		

表-2 札幌市上水道計画

基 本 計 画

	第3期拡張	主体計画
計 画 目 標 年 次	昭和50年	昭和70年
市 域 内 人 口	1 120 000人	1 600 000人
給 水 区 域 内 人 口	1 030 000人	1 550 000人
給 水 普 及 率	72 0%	90 3%
給 水 人 口	742 000人	1 400 000人
1人1日最大給水量	360ℓ	454ℓ
1日最大給水量	267 000 m^3	635 000 m^3

イトの選定においてもダム の築造可能地点における夫々

の経済効率が決定条件を支配していた。

表－3 豊平峡ダム発電所計画

	豊平峡発電所	砥山発電所
最大出力	50,000 KW	10,000 KW
最大使用水	26.4m ³ /sec	21.5m ³ /sec
有効落差	221.0m	54.7m
年間可能電力量	145,762 MWH	58,819 MWH
換算電力量	129,261 MWH	52,313 MWH
渇水期尖頭出力	50,000 KW	10,000 KW
〃 平均出力	12,195 KW	5,120 KW
常時換算出力	38,659 KW	8,536 KW

すなわち、2ダムまたは3ダムを同時に考えることなく治水計画および利水計画の社会的需要も段階的であつたと言える。

これは、供給量が十分余裕ある時点までは問題にならないが、札幌市の近年の発展は特に加速度的であり、昭和60年には豊平川の開発可能水量100万m³/日では不足し他水系に水を求めなければならないことが予測されている。

また札幌市の社会経済の発展は、治水安全度の格昇が必要となり、現計画の1/100年超過確率から1/150年超過確率になっており、さらに近年の公害問題、人間疎外から高水敷の公園開発を積極的に行うとともに、河川維持用水の新たな需要も発生している。

従来、ダム規模は計画時点の新規需要に基づいて定められて来たが、一度建設されたダムの改築は不可能であり、水資源の絶対量が将来不足することが明確化した現在、ダム規模の決定に関する社会概念も次第に変化して来ており地形地質および水文上から可能最大限のダムを築造することが認められて来ている。

豊平川の治水利水の最適配分を考える時に、和水分題では豊平峡ダムからの発電取水が一つの条件であり、治水問題では、安全度の向上による豊平峡ダムの主放水ゲートの放流能力に不足があり、何れも、今後豊平川の総合計画の中で解決して行かなければならない問題であろう。

3 アーチダムの設計

アーチダムは、水圧の大半が左右地山にアーチスラストとして作用するため、ダム基盤となる地山の強さが設計上問題となる。又近年良質なダムサイトが少くなり水資源の涸渇問題からダムサイトの改良開発及びフィルダムの採用

表－4 豊平峡ダム計画諸元

河 山 名	石狩川水系豊平川	副ダム	型式	アーチ式コンクリートダム
位 置	北海道札幌市定山溪		高さ	27.00m
流域面積	豊平川本流 134Km ² 薄別川 25Km ²	ゲート	堤頂長	60.00m
地 質	熔岩、自破砕熔岩		クレスト標高	E L469.00m
型 式	放物線アーチ式コンクリートダム		クレストゲート	5門
堤標高	E L477.50m		高さ	30m 幅 6.00m
ダム高	102.50m		コンジットゲート	標高EL420.00m
堤頂長	305.00m		コンジットゲート	2門
ダム体積	275,000m ³			

河口堰の建設がその数を増している。

ダムサイトの特殊基礎処理による改良開発も近年の岩盤力学の発達により、十分安全且つ経済的なダムの建設を可能ならしめている。

アーチダムの破壊は、アーチスラストによる地山のせん断破壊が支配的であり、ダム基礎として十分期待出来る堅岩線を求め、アーチスラストに対し、所要の安全率と地山の厚みが十分得られるように、アバットメントの根入深さ及び位置を決定することが大切である。

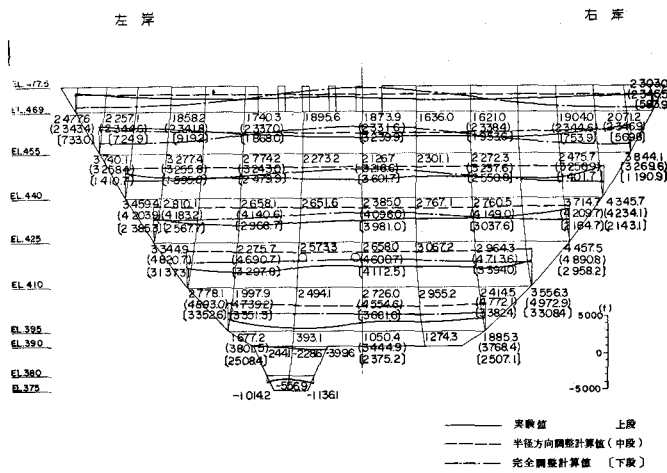
表－5 アバットメントのせん断摩擦安全率
(完全調整計算による)

n	EL	$\tau(\frac{t}{m})$	せん断摩擦安全率		
			半径方向すべり	上向きすべり	合成すべり
	右岸				
6.0	469	150	12.8	8.8	7.3
5.0	455	150	14.3	8.0	8.2
4.0	440	200	8.4	9.0	6.1
3.0	425	200	6.8	10.5	5.3
2.0	410	200	6.1	17.2	5.7
1.0	395	200	5.3	17.7	5.0
	左岸				
1.0	395	250	6.1	86.3	6.1
2.0	410	250	6.3	13.5	5.7
3.0	425	250	7.1	8.5	5.4
4.0	440	250	9.9	7.4	5.9
5.0	455	250	15.4	7.8	7.0
6.0	469	250	26.5	7.7	7.4

ダムのように大きな構造物では、局所的な調査試験による挙動及び応力特性のみによりダム基礎としての全体の強さとする事は危険である。基礎の調査には地質的な弱点及び設計上の問題となる恐れのある地質構造につ

いて十分な追跡調査を行い、徹底してその成因及び力学的な意義について肌で感じ取ることが設計する際に要求される。

図-1 アーチラスト比較図

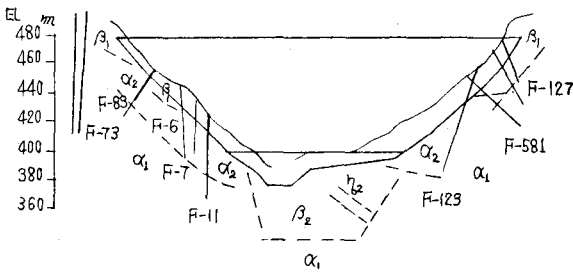


豊平峡ダムサイトについて見ると、右岸から河床部へかけての自破碎熔岩、左岸及び右岸～河床部深部の正規熔岩に大きく分類される。自破碎熔岩については、マトリックス及びマテリアルの大きさ、堅硬度によって3種類に分類し、正規熔岩は岩塊の大きさ、密度により2種類に分類した。

表-6 ダムサイト地質の力学的評価

岩種	細分	比重	片断強度 (kg/cm^2)	せん断強度 (t/m)	弾塑性係数 (kg/cm^2)
α	α_1	2.60	1 000	300～	120 000～
	α_2	2.40	700	250～300	80 000～140 000
	β_1	2.40	500	250～	80 000～120 000
β	β_2	2.20	300	170～	50 000～70 000
	β_3	2.11	400	200～	70 000～100 000
	1	2.05	250	150	30 000～60 000
	2	2.10	250	150	50 000～70 000
	3	2.05	200	120	30 000～60 000
η	η_1	2.00	200	100	20 000～50 000
	η_2	2.00	200	100	20 000～50 000

図-2 地質上流面図



ダムサイト河床部の自破碎熔岩がマトリックス及びマテリアルも小さく最も軟質であることから、河床部岩盤の強さを基準値として豊平峡ダムサイトの地質の強さを評価した。

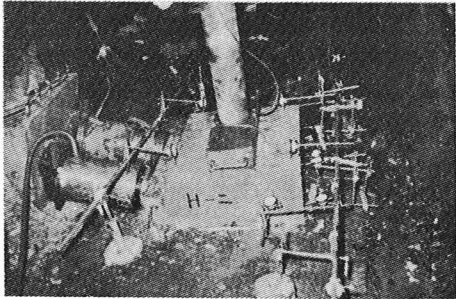
また、地質構造について見ると、走向は河道にはほぼ平行 (N 20° E) なもの、EW方向のものおよびN 50° E方向の3方向が主なもので、いずれも断層相互の間隔は、25～40m 程度の場合が多く、断層部の連続性は比較的良好、傾斜は一般に急 (70°垂直) でゆるい湾曲を示す

この中、断層の規模、性状から設計上重要な断層は、F-73からF-69、F-7およびF-11があり、設計に際しては、アーチスラストに対する方向性から検討を加えダムに最も有利になるよう両アバットメントの位置及び根入れ深さを決定した。

従来アーチダムの中心角は110～120のものが最も望ましいと言われていたが、アーチスラストを出来るだけ山側に向け、地山の安全を計るためアーチの中心角を小さくすることが試みられてきた。

アーチダムの中心角は小さいほど有利とはならず、或る角度で極大値を取りそれ以下では、スラストよりもセン断力が増すため不利となる。また中心角が小さくなる

写真-2



につれてアーチクラウンでの曲げモーメントが大きくなりダム本体が不安定となる。この2つの問題点を解消するダム形状として、変半径アーチダムが開発された。

図-3 河床部岩セン断強さ

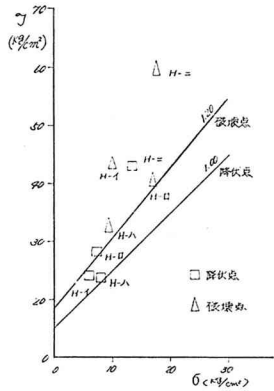
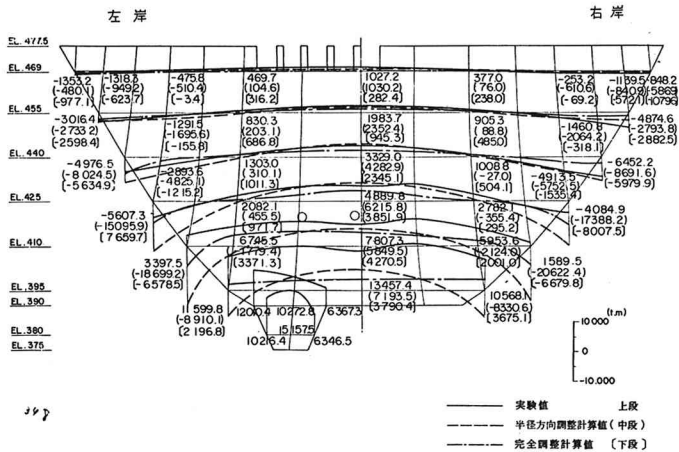


表-7 左岸断層とその性状

断層名	位置	走向傾斜	性状	アバットメントまでの距離
F-11	EL420m以下	N25°E90°N	幅40cm、色粘土5~20cm緩い蛇行を示す	EL415mでアバットメントに出る
F-83	EL455m以下	N35°~70° E70°N	幅40cm砂岩40cm 行構造を示し局所する	EL448 "
F-73	EL420m以下	N28°E90°N	幅50~60cm粘土20~40cm平面性大、上流で出側へ深く逃けている。	EL475で20m

図-4 アーチモーメント比較図



豊平峡アーチダムは右岸地山の厚みを十分取り、且つ左岸断層に対する安全を確保するため放物線アーチを作した。すなわち、アーチ中心角はほぼ定角75°を採用し底巾20m、天端巾5m、高さ102.5mとし、河床部の軟質部にはサドルを設けて、河床部への応力の分散を計りせん断長の延長を計つた。

図-5 ダム形状軌跡図

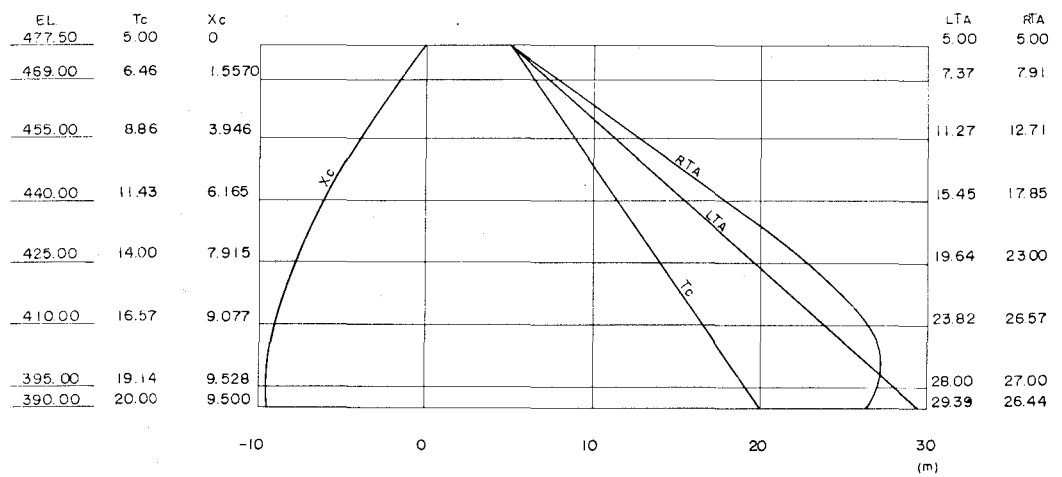
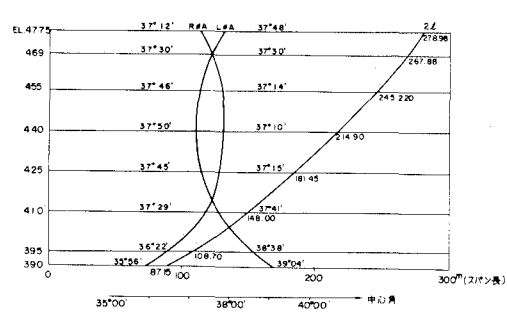


図-6 ダム形状軌跡図



アーチダムの構造計算は、変位としての半径方向たわみ接線方向たわみ、鉛直軸傾れ角の3変位に対し、アーチ及び片持梁の半径方向荷重、接線方向荷重及び片持梁に作用する捩れモーメント荷重とアーチに作用する曲げモーメント荷重を、片持梁とアーチの交点で変位が一致するように夫々の荷重を求める荷重分配法によつた。計算に用いた片持梁要素及びアーチ要素数は下図の通りであ

る。模型実験は、実物の $\frac{1}{160}$ の大きさで製作誤差、実験誤差を少なくするため、同一模型を同時に2個製作して、土木研究所で実施された。模型における基礎岩盤の弾性係数をもとに、実物の $\frac{1}{5}$ とした。

設計荷重表、応力計算結果及び模型実験結果を下図に示す。

表-8 設計条件

(1) ダム諸元		岩盤の純せん断強さ	150~250t/m ²
ダム天端標高	E L477.5m		
基礎岩盤標高(河床部)	E L375 m	岩盤の純せん断強さ(河床部)	150t/m ²
基礎岩盤標高(段丘地部)	E L390 m	岩盤の摩擦係数	0.2
常時満水位	E L475 m	コンクリートのポアソン比	0.2
異常洪水水位	E L475 m	岩盤のポアソン比	0.2
堆砂位	E L427.6m	コンクリートの熱膨脹係数	1×10 ⁻³ /°C
(2) 設計に用いる基本数値		地震の水平震度(2K)	0.3
貯水の単位体積重量	1.0t/m ³	風による波浪高V=30m/sec	0.9m
コンクリートの単位体重量	2.3t/m ³	F=1.2Km	
堆砂の水中重量	1.0t/m ³	地震による波浪高	1.5m
土圧係数	0.6	r=1.0sec	
コンクリートの弾性係数		K=0.3	
岩盤の弾性係数		岩盤の摩擦係数	1.2
岩盤の弾性係数			

图-7 主应力图上流面完全调整计算值

(图-38) a 主应力图上流面完全调整计算值

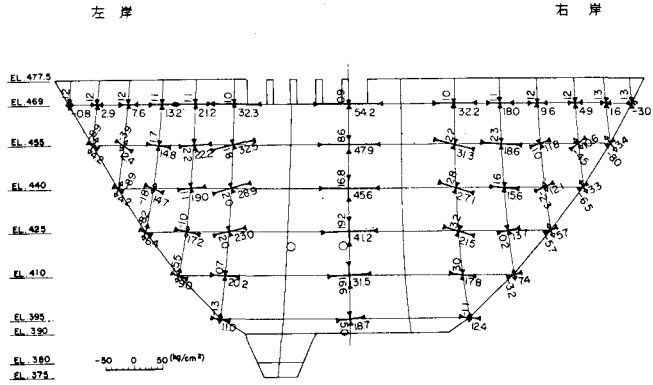


图-8 主应力图下流面完全调整计算值

(图-38) b 主应力图下流面完全调整计算值

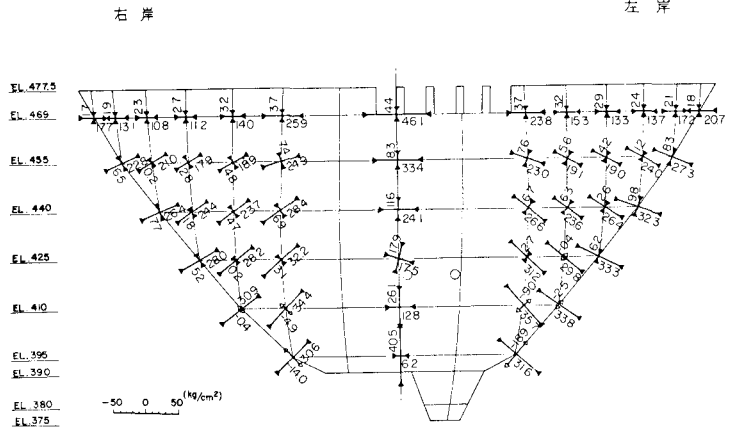


图-9 主应力图上流面实验值

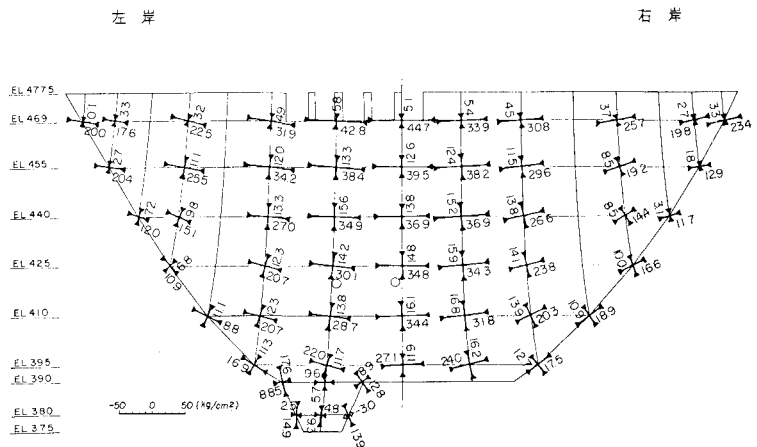


图-10 主应力图下流面实验值

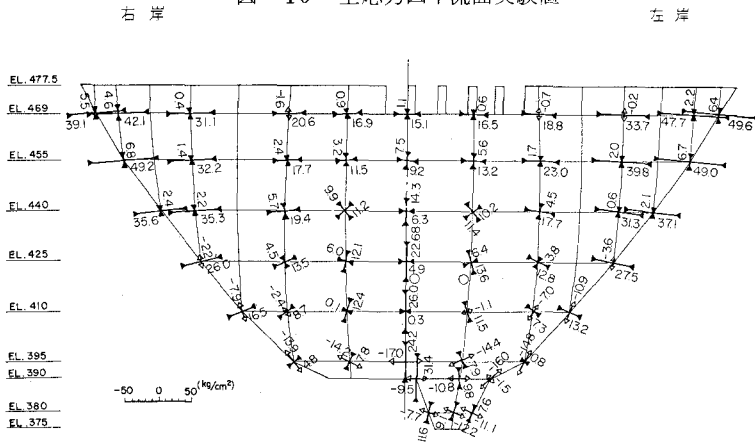


图-11 水平方向应力上流面比较图

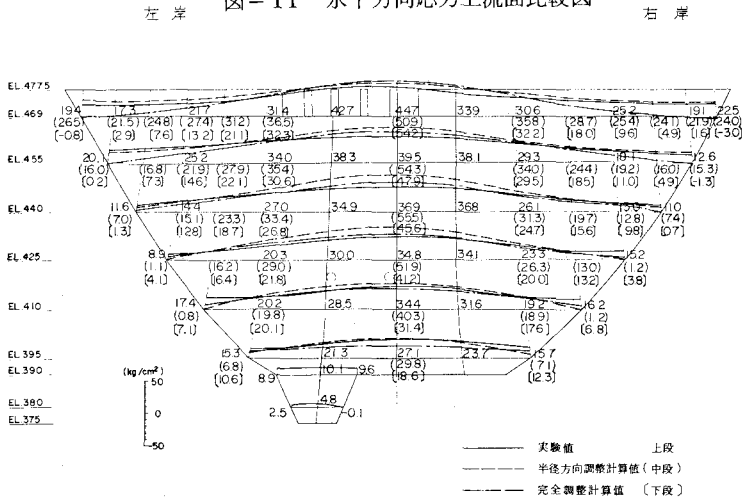


图-12 水平方向应力下流面比较图

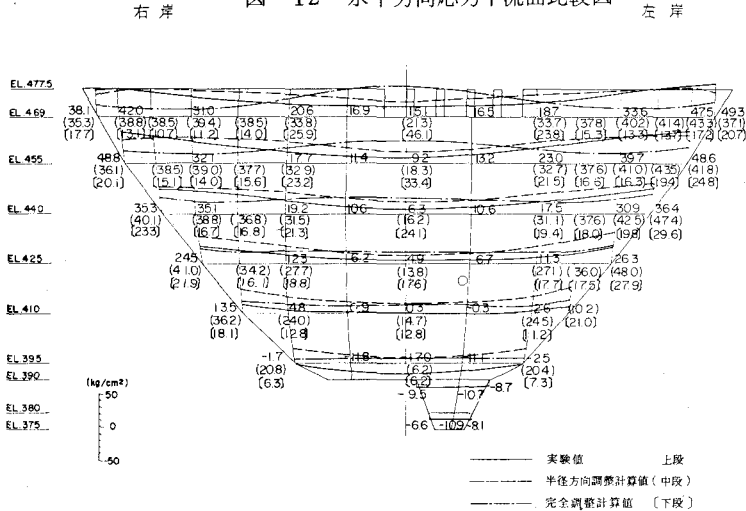


図-13 鉛直方向応力上流面比較図

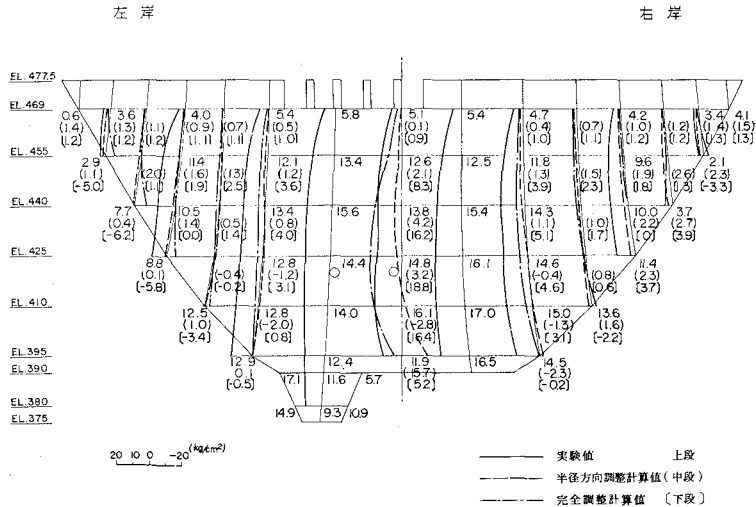
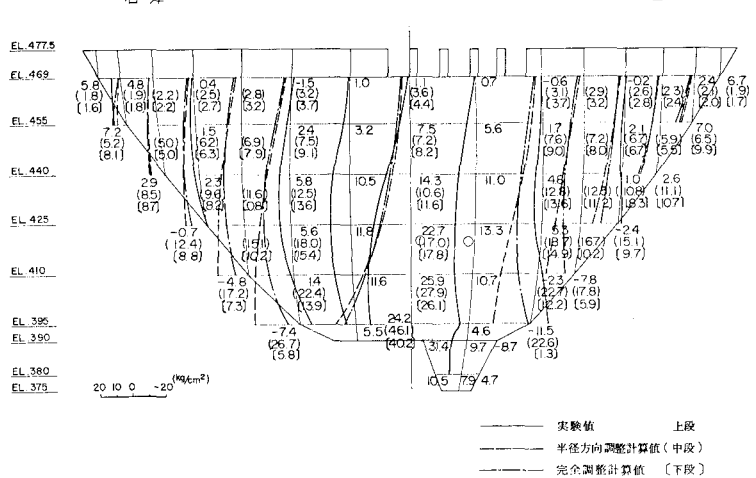


図-14 鉛直方向応力下流面比較図



応力計算及び模型実験結果について考察を加えて見ると、実験値に対する一般的傾向は半径方向調整値に近く、数値的には完全調整の方が近い値を示すが、全般的に大きくなっている。

最大応力は上流面アーチクラウン沿いが大きく、半径方向調整ではEL 440 mで55.5Kg/cm²を示している。地震時はこれに地震荷重 ($K=0.3$) を加えると上部標高ほど影響が大きくEL 455 mで93.2Kg/cm²となる。また実験値ではアバットメント下流面の上部標高で、49.0Kg/cm²を大きな値を示している。これは計算仮定においてEL 469.0m以上を片持梁として計算しているのに対し、模型では大きな応力の流れを示していることが解る。

引張応力について見ると、完全調整では上流面アバットメント片持梁沿いに-6 kg/cm²の値を出している。一方実験値では下流面低標高部アーチクラウンに-17. Kg/cm²の引張応力が生じている。また完全調整及び実験値では下部標高アバットメント沿いに-16Kg/cm²程度の引張応力が傾斜アーチに直交する方向に生じている。

これらの引張応力の中、下流面下部標高の引張応力によるクラックはある深さに達すると有効アーチが動き二次的安定が得られるものであり、またブロックジョイントが有効な働きを行うものと考えられる。次にアバットメント沿いに発生する引張応力によるクラックは、傾斜アーチ状にアーチクラウン方向へ際限なく伸びる性質のものであるが上流側に伸びる事はない。

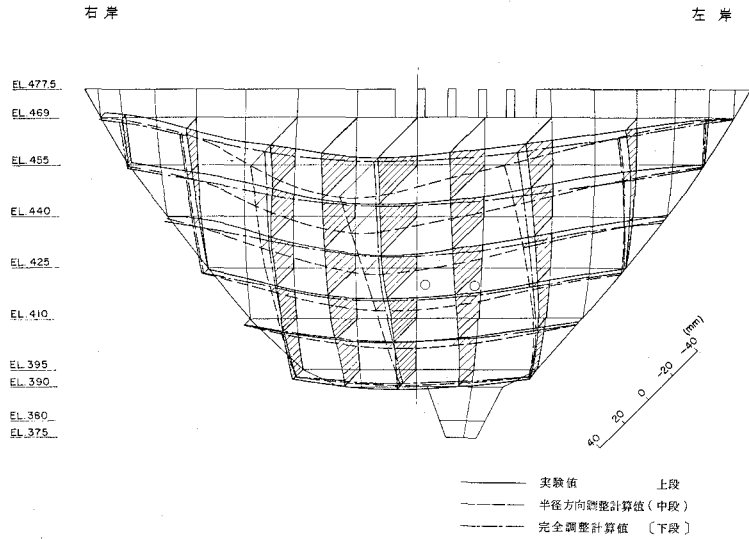
引張応力の生ずる力所には何らかの補強が必要であるが施工に対して散水等十分の養生を行うことが肝要である。

コンジット（EL420m $\phi 220\text{m} \times 2$ ）による応力の影響は小さく、上流面で $1\text{Kg}/\text{cm}^2$ 下流面アバウトメントで $10\text{Kg}/\text{cm}^2$ 程度の増加となつている。

一般に下部標高でのアーチモーメントが増大し、コンジット付近では、片持梁モーメントが減少する傾向を示す。

ダムのかみについて見るとアーチクラウンが最大で、半径方向調整値で $65.5\text{m}/\text{m}$ 、完全調整値で $35.5\text{m}/\text{m}$ 、模型実験では $32.6\text{m}/\text{m}$ で、実験値と完全調整値に近い値を示している。又実験値では上部標高アバウトメント付近で上流側へ変位している。

図-15 アーチ、エレメント半径方向かみ比較図

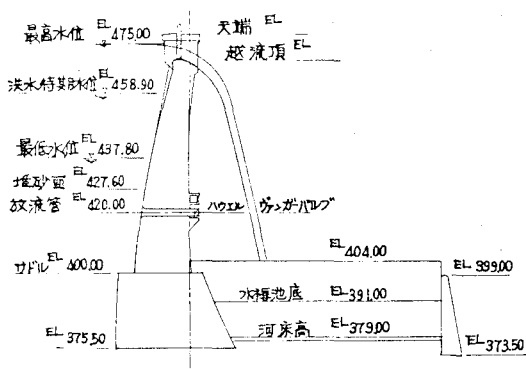


ダムのデザインでは、トップ放物線アーチの曲線美とその安定感を誇張するため、アルミ高欄を使用するとともにクレストゲート及びコースターゲートの操作室上屋が高欄の下になるよう設計し、上流からもアーチ全貌が眺められるようにした。またダムの立体感とアーチの陰影を表現するため、施工の許す範囲内でトップアーチの拡巾を計った。管理用エレベーターについてもダムの安定及び美観上から右岸アバウトメント下流面沿いにインクライン方式を採用した。

アーチダムの放流設備にコンジットを採用するについて日本のように洪水量の大きい国では、ダム応力の安定上から当初問題視され、ダム中央部に穴を開けることを避けてスキージャンプ方式を採用した。しかし最近ではアーチダムの応力の流れは弱い部分よりも剛の部分に集中することが種々の検討結果明らかにされ、ダム中腹に穴を開け高水圧放水管により洪水調節を行うことが操作上も有利と考えられるに致つた。

豊平峡ダムの主放水ゲートは、EL420mにコンジット（ $\phi 2200\text{m}/\text{m} \times 2$ 門）により基本高水（ $820\text{m}^3/\text{S}$ ）を計画高水（ $140\text{m}^3/\text{S}$ ）に調節するものとし、主ゲートにはハウエルバンパーバルブ（ $\phi 2100\text{m}/\text{m}$ ）を採用し、放水によるエネルギーを空中で消滅させ水叩規模の縮小を計つた。

図-16 豊平峡ダム放流設備

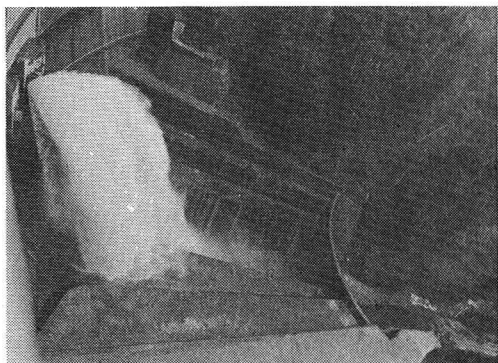


また上流面にはスクリーンおよび主ゲート故障時の予備ゲートとしてコースターゲートを設けた。

異常洪水流量（860 m^3/s ）はクレストゲート（6.0 $\times$ 6.0m）5門により行うこととし、ゲートはアーチの美観を考慮し巻上げ方式をやめ、跳出し式特殊ローラゲートを設計した。

また水叩部はクレストからの越流水落下エネルギーを減少させダム下流部基礎岩盤の崩壊を防ぐため、80m下流に副ダム（同心円アーチ）を設け水褥池水深を放流時に12mに保てるように設計した。

写真－3



4 湛水後の挙動と安全管理

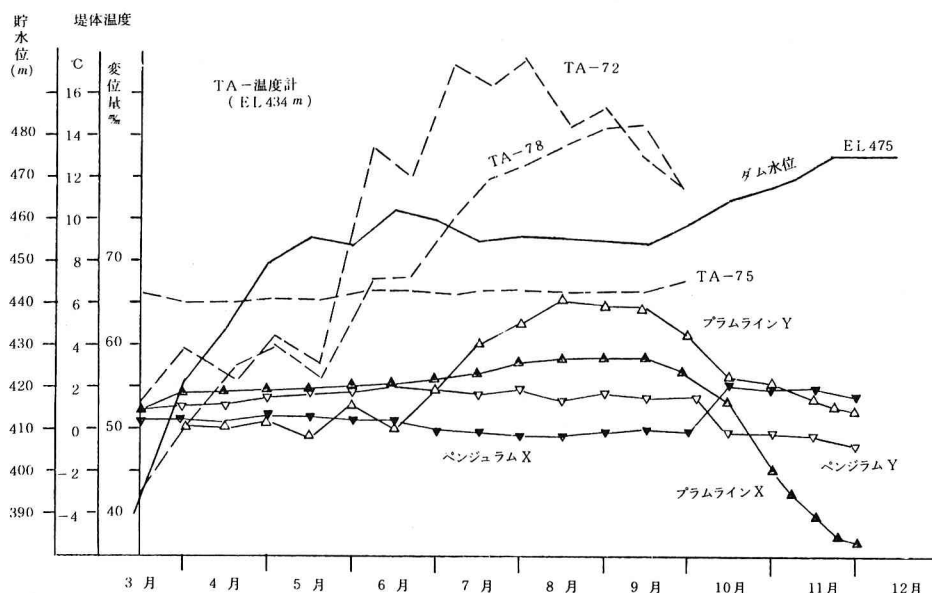
豊平峡ダムの湛水は昭和47年3月から開始され、6月20日にEL 467mまで水位を上昇させ、その後7月1日から洪水待期に入るためEL 454mまで水位を降下させた。10月に入つてからは冬期間の水道用水確保のため、再度水位の上昇を始め11月21日に満水位EL 475 mに達した。また洪水待期間中の9月17、18日に台風20号による出水があり建設後初めての洪水調節を行つた。

アーチダムの安全管理上基準となるものは、ダム水位の変動に対する漏水量の増減及びダムのたわみ量の増減である。この他豊平峡ダムでは岩盤中に変位計が埋込まれているのでその変位量も目安となる。一般にアーチダム等で事故が発生する前には、多量の漏水及びダムの変位に異常が現われるのが通常で、これはアーチスラストあるいはその他の原因により地山の移動に起因する場合が多く、又大量の漏水量によるパイピング現象等によりアバットメントを移動ならしむ場合もあり得る。

豊平峡ダムの設計についてはこれ等の点にも配慮し十分の安全性が確保されている。

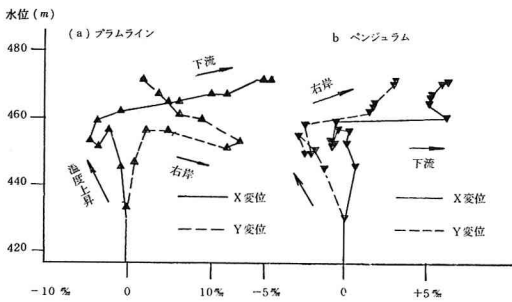
さて、豊平峡ダムにおける10月以降の湛水に伴うダムの挙動について考察して見ると、水位がEL 460m以上からダムのたわみ量及び堤体内のアップリフトの上昇

図－17 10BL、水位たわみ図



が見られEL470mまでにアーチクラウンで基礎岩盤が下流へ5m/m移動し、ダム本体のたわみも20m/m前後の増加を示した。またダムが非対称アーチであることから、ダム軸方向の移動も示し基礎岩盤は左岸に3m/m程度移動していたものが水位上昇後右岸へ3m/m程度変位を示した。ダム本体では13m/m前後右岸へ変位していたものが湛水前の位置に戻っている。

図-18 10BL、ダムたわみ図



一般に処女湛水では、満水位以下5m位いから上で種々の問題が生ずることが多く、豊平峡ダムでもEL470mまでにアプリーフト及び変位の増加を示したことから、EL470mで水位を保ちその後の挙動を観察した。

しかしその後の変位量も2m/m程度の増加で収斂しており監査路内におけるアプリーフトの増加もなく、漏水量も100ℓ/mm以下と少い。ダム本体の挙動も計算値や実験値に比べて全般的に小さい所から、満水位まで0.3m/dの上昇を計り11月21日にEL475mに達した。

この間ダムの基礎及び本体の挙動も良好で他のダムに見られるような漏水の問題もなく、またダムのたわみについて見ると、EL470mまでに18m/mの変位に対し満水位で22m/mと計算値の35.5m/m、実験値の32.6m/mに比べて小さな値を示している。ダム応力についても応力計の精度の問題はあるが小さめの値である。

これ等の諸値はダム堤体温度等により大きな影響を受けるものであり、水荷重及び温度荷重による変位量及びダム応力等の解析は今後のデータの蓄積を待つて、多重回帰解析を行わなければならない。

また、洪水待期中の洪水調節は、台風20号が日本海を北上し、9月17日12時頃本道南西部に接近停滞したため、17日早朝より全道的に豪雨をもたらし、豊平川流域でもダム上流中山峠で総雨量254mmに達する大雨となつたためである。この雨により豊平峡ダムサイト流入量は、348m³/sを記録し、この中263m³/sをダムでカットして

ダム放流量60(85)m³/sに調節した。この結果、雁来地点流量673m³/sを得て洪水調節による効果は2062m³/sと計算され十分の機能を果たしたものと評価される。

図-19 台風20号による豊平川の出水

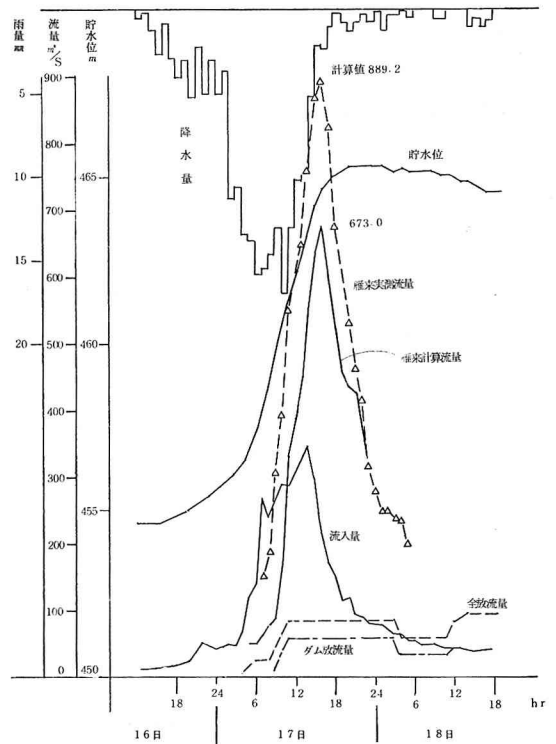
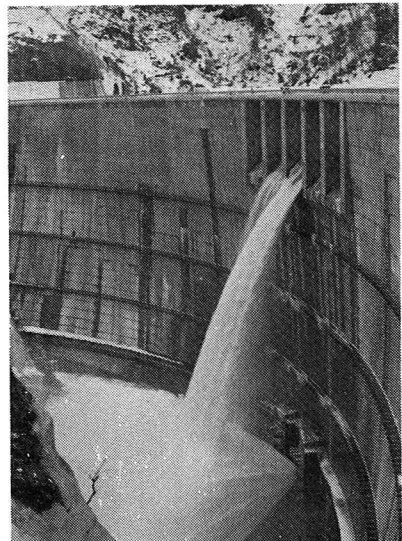


写真-4



あ　と　が　き

調査を含めて10年の歳月を要した豊平峡ダムも、その巨大なアーチは豊平峡の峡谷を堰止め、現在腹一杯に水を呑み込んでいる。豊平峡ダムは今後100有余年の間札幌住民の安全と、そして水資源の供給を行うとともに、春にはエゾ松、トド松の合い間に咲く桜花を、秋には豊平峡の峡谷を埋める紅葉を湖面に映し、札幌市民の憩の場となるであろう。

ダム本体の挙動も計算値や実験値に比べて小さ目の値を示しており、管理上の問題はないものと考えられる。今後は小樽内ダム及び白井ダム等の建設に伴い豊平川のダム統合管理を考えて行かなければならない。

また、本工事報告では紙面の通合からダム建設における施工管理上の問題及びダム管理施設の設計に関する項目を除いたので、発表当日に補足いたします。