

玉原発電所の立坑掘削及びスリップフォーム工法

Shaft Excavation and Lining by Slipform——Tambara Power Plant

北村 弘明*
Hiroaki Kitamura

西野 陸治**
Mutsuji Nishino

奥本 朗***
Akira Okumoto

要 約

東京電力㈱発注の玉原発電所工事のうち、放水口工区は高さ 53.3m の 2 本の放水口立坑と高さ 42.1m の放流立坑からなる。

両立坑ともロングステップ方式で掘削したが、放水口立坑については全断面で切下がる工法を採用し、放流立坑については導坑で切上がった後、全断面で切下がる工法を採用した。支保工は NATM 工法を応用した工法を適用した。

放水口立坑はフライミングロッド方式によるスリップフォームで、放流立坑はアップダウン方式によるスリップフォームで巻立て、バラ型枠と比べて工期、工費とも顕著な成果をあげた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 地質及び立坑工事の概要
- § 3. NATM 工法を応用した立坑掘削
- § 4. スリップフォームによる立坑巻立
- § 5. あとがき

§ 1. はじめに

玉原発電所は高瀬川発電所に続いて、東京電力が計画した、ピーク時電力補給を目的とする高落差・大容量の純揚水式発電所である。群馬県沼田市北方15kmにある玉原を源とする発知川最上流部にフィルダムを築造して上部調整池とし、過去に当社が施工した利根川水系の藤原ダムを下部調整池として、この2つの調整池を延長約3 kmの水路で結び、その間の有効落差 518m を利用して120万 kw の発電を行うものである。

この内当社は放水口工区を施工した。工事概要を Fig. 1 及び Table 1 に示す。この工事は昭和53年から55年の11～1月の間に、藤原ダム貯水池の水位を下げて施工された。

Table1 工事概要
Summary of the construction works

工 事 名	玉原発電所新設工事のうち土木工事(放水口工区)		
工事場所	群馬県利根郡水上町大字藤原地内		
工 期	昭和52年 6 月 6 日～昭和57年 6 月 30 日		
工 事 内 容	放水口工事	放水口	ベルマウス型 高さ6.7m×幅20m×2条
		水平坑	6.7m内空馬蹄形～円形 延長1号86.4m, 2号63.9m
		立 坑	断面2.2m×8.1m×高さ53.3m×2条
	放流設備工事	取水塔	表面取水ゲート 断面7.0m×12.4m×高さ43.4m
		水平坑	内径3.5m×延長376m
		立 坑	断面1.8m×4.5m×高さ42.1m
		減勢工	幅12.0m×高さ12.0m×延長53.8m
	空土の沢土捨場工事		1 式
	芦ノ田土捨場工事		1 式

この期間の当地は、積雪約 2 m、最低気温約 -10℃ で、地形が非常に急峻なこととあわせて、極めて厳しい条件下の工事であった。

工事は放水口工事と放流設備工事に分けられ、カーテングラウト等それぞれに特徴があるが、紙面の都合で放水口工事の立坑の掘削とスリップフォームによる巻立を中心に報告する。

*関東(支)玉原(出)所長

**関東(支)玉原(出)副所長

***関東(支)玉原(出)

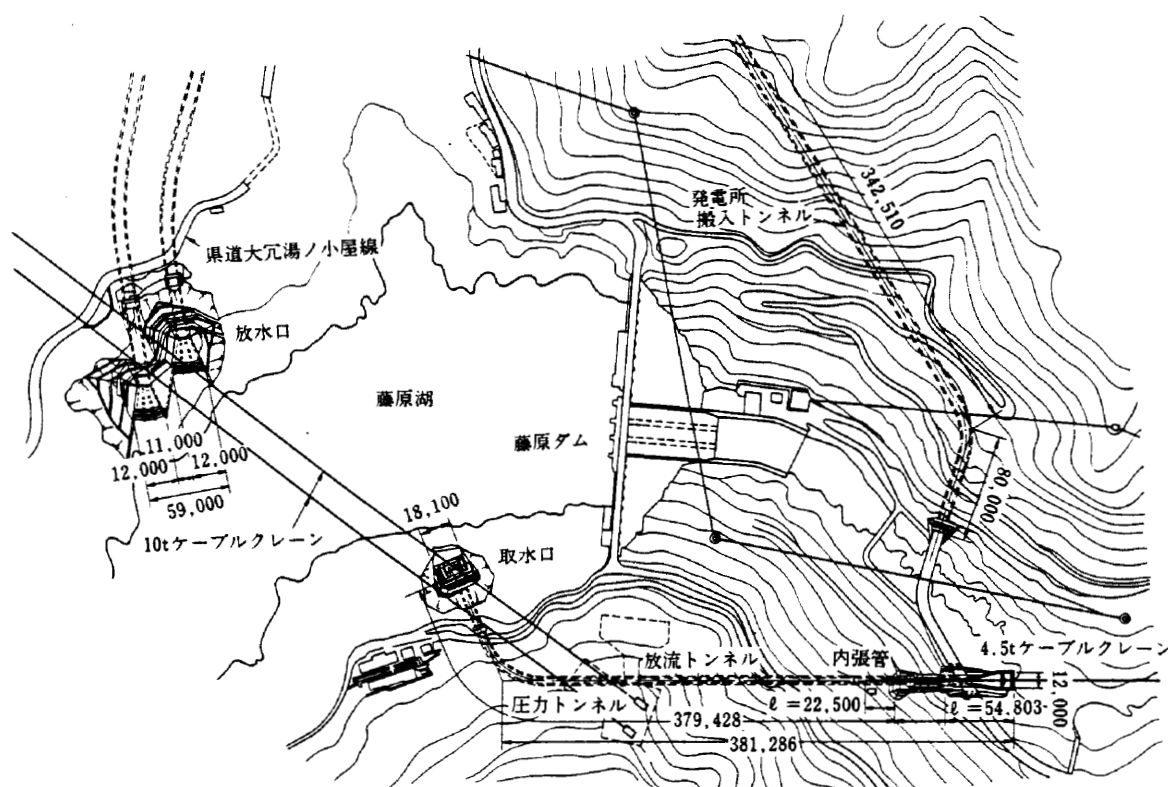


Fig.1 放水口工区全体平面図
Overall plan of the Drainage mouth contract

§ 2. 地質及び立坑工事の概要

2-1 地質

藤原ダム右岸放水口の岩盤は新第三紀層の礫岩に属し、全体にマッシュで比較的固結度が高く緻密であった。被覆層として、現世の崖錐堆積物及び上方の県道建設時の掘削礫が薄く分布していた。

左岸放流設備のうち取水口部は流紋岩層で、立坑から減勢工までは変巧安山岩層で、いずれも亀裂の少ない堅固な岩盤であった。取水口にも崖錐の薄い堆積がみられた。

2-2 立坑工事

工程的に冬期3ヶ月間に限定された他工事と比べて気象条件的にも、立坑工事は恵まれた工事であった。掘削工事は昭和53年11月から開始したが、それに先立って藤原貯水池からの湧水を抑制するためにカーテングラウト工事を実施した。

コンクリート巻立は放流立坑においては、掘削完了後直ちに実施したが、放水立坑では1年近く施工が見送られた。

巻立コンクリート完了後、水平坑との取合部4~5m間に岩盤内3.0mのコンソリデーショングラウトを実施した。グラウト工事については今回は割愛する。

§ 3. NATM工法を応用した立坑掘削

放水口立坑、放流立坑とも前述したように堅固な岩盤に位置しているため、両者ともロングステップ方式で施工した。放水口立坑は全断面切り下げ工法とし、放流立坑は導坑切り上げ工法とした (Fig.2)。

支保工として立坑上部の岩盤不良部に鋼製支保工と仮巻コンクリートを併用したが、下部にはロックボルト・菱形金網及び吹付コンクリートを用いる NATM を応用した工法とした。

3-1 放流立坑

放流立坑は放流トンネル掘削後導坑で切り、完了後導坑を礫シュートとして立坑上部から切上げた。導坑掘削は TY85 ストローパ2台を使用した。支保工は木製支保工を1.5m ピッチに建て込み、導坑内を礫シュート・人道及び材料坑に区分した (Fig.3)。

切上げ掘削は発破礫を足場にして、TY85 シンカーを2台使用した。支保工は立坑上部5.5mに H-125 の鋼製支保工を1.0m ピッチに建て込み、更に厚さ30cmの仮巻コンクリートを打設した。それ以下の高さには、ロックボルト・吹付コンクリートを施工した。発破礫は礫シュート、坑底の礫抜設備を経て4tダンプトラックに積み込み、水平坑から坑外に搬出した。

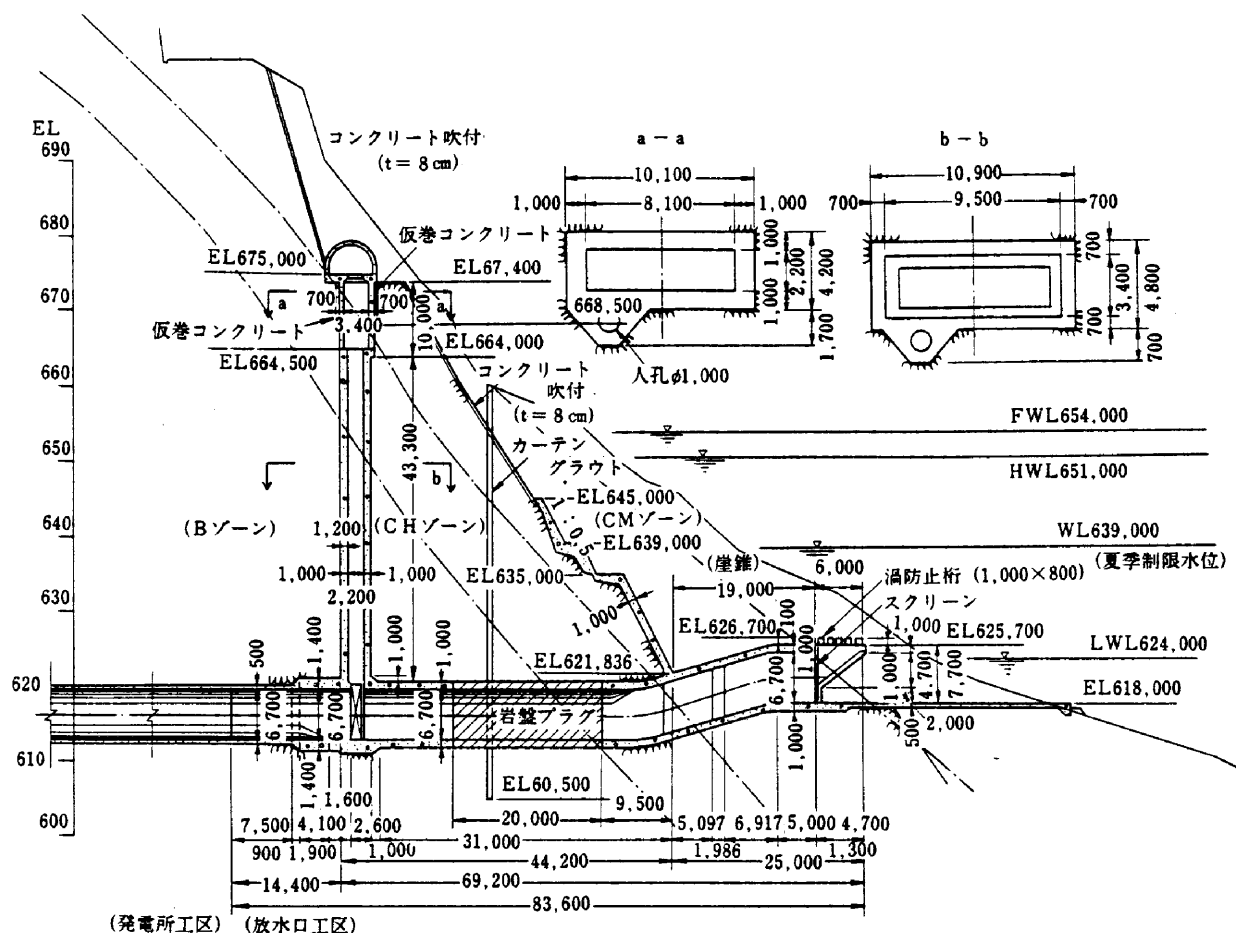


Fig.2 放水口構造図
Longitudinal sectional view of the
drainage mouth

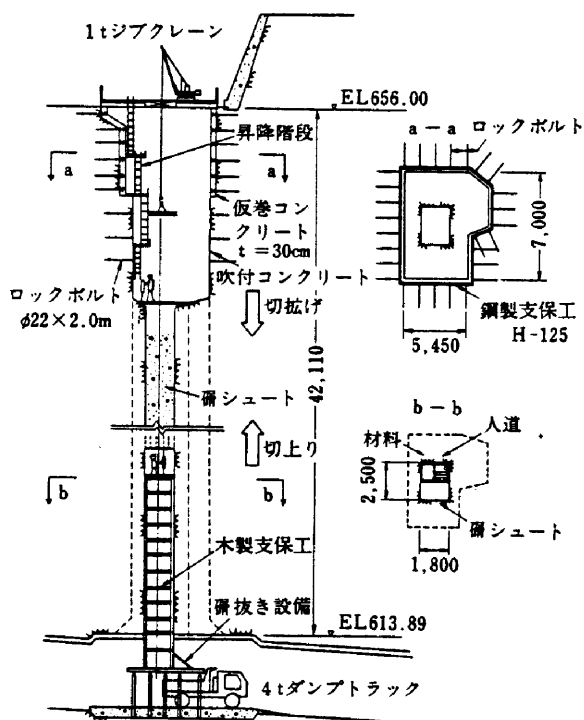


Fig.3 放流立坑掘削施工図
Working diagram of excavation at the
discharging shaft

立坑上部にはジブクレーン(1t)を設置し、坑口に設けた座張の開口から荷の揚げ卸しを行った。換気はコントラファン(φ600)を使用した。

3-2 放水口立坑

放水口立坑は全断面切下げ工法を採用した。立坑坑口は一部地山のままの斜面となっていたため、1号・2号立坑を連絡する仮設栈橋を設け、上部作業スペースとした。掘削は切羽が斜めの段階ではTY85シンカーを使用し、水平な切羽を得た時点でトンネルマスターTYCJ-2Xに切換えた（Photo 1）。

なお、削孔完了後の孔は土砂の流入による孔詰まりを防止するために、ローディングパイプ($\phi 38\text{mm}$, 12.0m)を挿入した。

礪出しは、電動バックホウ YS300E (0.35m³) で礪バケット (3.2m³) に積み込み、クローラクレーン 335AS で坑外に搬出した。更に、2号立坑では仮設棧橋上に軌条をもつバッテリーカー (6t) を用いてケーブルクレーン下に運び、1号立坑では直接ケーブルクレーンで渠道上部の礪置場に搬出した。

支保工は、立坑上部には鋼製支保工（H-125）を 1.0m



Photo1 施工中の放水口
View of drainage mouth under construction

間隔に建込み仮巻コンクリートを厚さ30cmに打設し、下部ではロックボルトと吹付コンクリートを打設した。

昇降設備としてはスーパーデッキで階段を設け、掘削の進行に伴って延長した。換気にはコントラファン(φ600mm)を使用した。

3-3 NATMを応用した施工

近来、トンネル工法としてNATMの普及が著しい。NATMは支保工としてロックボルト・吹付コンクリートを用いるもので、この方法を立坑に応用した。

トンネルにおいて、ロックボルト・吹付コンクリートを用いる支保工は、従来工法における鋼製支保工と比べて掘削サイクルに占める支保工の作業時間の割合が多く、必ずしも経済的ではないといわれるが、立坑に応用した場合にはトンネルの場合とは異なった特徴が見られた。

(1) プレスブリッチング

NATMにおいて発破壁面の過度の凹凸は、吹付コンクリートのね返り率を増すだけでなく、主要な支保工である吹付コンクリートの厚さにむらが生じ、応力集中を喚起し支保工としての弱点となるなど好ましくない点が多い。このため、制御発破が行われることが多く、本工事の放水口立坑においてもプレスブリッチング発破法を併用した。孔間隔は50~60cmとし、削孔径 $\phi_1=36$ mm、サンベックス400Pの薬包径 $\phi_2=20$ mmで、 ϕ_1/ϕ_2 (デカップリング指数)は1.8であった(Fig.4参照)。

プレスブリッチングを実施した区間と実施しなかった区間で余掘率を比較してみるとTable 2に示すようになった。これにより余掘率のかなりの改良がみられた

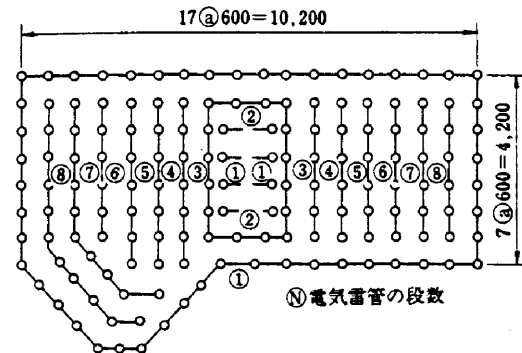


Fig.4 放水口立坑標準削孔パターン
(プレスブリッチング実施部)
Typical drilling pattern at the drainage shaft(using the pre-splitting method)

Table2 余掘率比較
Comparison of the out-break rates

発 破 法	余掘率	施工比率
プレスブリッチング法	8%	20%
一 般 発 破 法	17%	80%
全 体	15%	100%

が、削孔数の増大等のマイナス面との総合判断により、全区間の20%の施工にとどめた。

(2) ロックボルト

ロックボルトは、 $\phi 22\text{mm} \times 12.0\text{m}$ のエクспанション型のものを使用した。打設法はパターンボルトチングを原則とした。打設ピッチは周辺方向・深さ方向とも1.5mとしたが、立坑部の鋼製支保工部では支保工位置保持の意味もあって、1.0mピッチに使用した。

このように立坑の支保工に鋼製支保工を用いた場合に、支保工位置保持にロックボルトを使用することは不可欠なものとなり、作業サイクルタイムはNATM工法に近いものとなる。

(3) コンクリート吹付

NATMにおいてロックボルト・コンクリート吹付は早急な施工が原則であるが、一発破進行長が短い場合はサイクルタイムに占める割合が大きい。

本工事においても平均進行長が短いと、ほぼ3発破に1回(放水口立坑平均3.5m、放流立坑平均2.5m)吹付を行う方法を用いた。吹付機は、乾式のメナディエMG-76を使用した。材料練り混ぜはプラントを設置し現場練りを原則としたが、現場骨材の含水率の状況によりドライミックスコンクリートも併用した。コンクリートのリバウンド量は50%近く、その原因として掘削岩面の凹凸とノズルマンの不慣れが考えられた。

時間あたり吹付実績は実質作業時間あたり3～5 m³とかなりの能力を示したが、吹付ホースの閉塞等による損失が大きかった。原因として、細骨材のシルト分と含水率が高かったこと及び粗骨材に碎石を使用したことなどが考えられる。

吹付の設計厚は8.0cmで、最少厚は設計厚の70%以上とされた。菱形金網は50mm目の#10のものをを使用した(Fig.5, Table 3)。

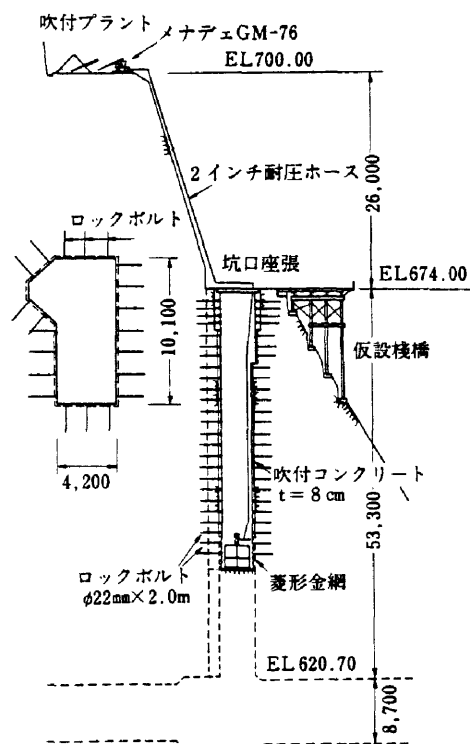


Fig.5 放水口立坑吹付コンクリート施工図
Working diagram showing concrete spraying at the drainage shaft

Table3 吹付コンクリート示方配合
Specified mix of the shotcrete

単位セメント量	骨材最大寸法	水セメント比	細骨材率	急結剤
340kg/m ³	20mm	50%	60%	Q P 500

(4)計測

NATM 工事は各種計測を行うことが肝要であるが、本工事においては良好な岩盤に恵まれた点でトンネルと異なり、不均等荷重を受け難い立坑工事である点などで特に測定器具を用いての計測は実施しなかった。

3-4 工事实績

(1) 実施工程

放水口立坑の実施工程を Fig.6 に示す。

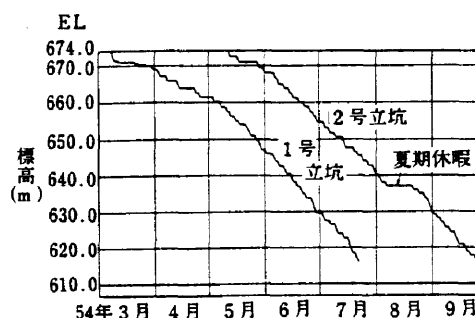


Fig.6 放水口立坑掘削実施工程
Actual progress of work at the drainage shaft

Table4 一発破進行
Advance per blasting

	全進行	一発破進行		
		発破回数	平均進行	最大進行
放水口1号立坑	58.0m	51回	1.1m	1.6m
放水口2号立坑	58.0m	45回	1.3m	1.6m
放流立坑導坑	39.1m	36回	1.1m	2.2m
放流立坑切抜	41.6m	44回	0.95m	1.5m

Table5 余掘率
Outbreak rates

	設計	支払
放水口1号立坑	13%	6%
放水口2号立坑	17%	10%
放流立坑	28%	17%

Table6 放水口立坑掘削標準サイクルタイム
Typical cycle time for excavating the drainage shaft

削 孔	6時間40分	整 地	2時間00分
装薬・発破	2時間50分	ロックボルト削孔	4時間20分
備 出	9時間50分	ラ ス 張	4時間40分
休けい・交代	6時間00分	ロックボルト打設	12時間20分
		階段取付	6時間10分
		算 仮 設	6時間00分
計	25時間20分	休けい・交代	6時間00分
25時間20分 × 3 + 35時間30分 = 111時間30分 = 4.65日		計	35時間30分

(2) 実績比較

放水口立坑と放流立坑で掘削の一発破進行長と余掘率について実績を比較したものを Table 4, 5 に示す。

(3) 放水口立坑実績

放水口立坑のサイクルタイムの実績を Table 6 に示す。

§ 4. スリップフォームによる立坑巻立

放水口・放流設備立坑は一般部と拡大部（立坑上部）とに区分され、一般部はスリップフォームで拡大部はバラ型枠で巻立コンクリートの施工を行った。スリップフォーム工法において、コンクリート打設は昼夜兼行作業を原則としているが、本工事においてはコンクリートプラントの作業時間の関係から昼夜のみの作業とし、夜間は打継目処理・鉄筋組立などを行った。

スリップフォーム工法を大別すると、打設したコンクリート中に埋め込んだロッドを反力として上昇する「クライミングロッド方式」と、上部の受桁鋼材を反力としてアップダウンジャッキとワイヤーロープにより上昇・下降する「アップダウン方式」の2つになる。放水口立坑においてはクライミングロッド方式、放流立坑においてはアップダウン方式を採用した。

本号において、東北（支）下郷（出）でアップダウン方式を用いて2次巻をした例が報告されているので、ここではクライミングロッド方式を中心に報告する。

4-1 スリップフォーム計画

Fig.7を参照して、放水口立坑で使用したスリップフォームの機器を個々に説明する。

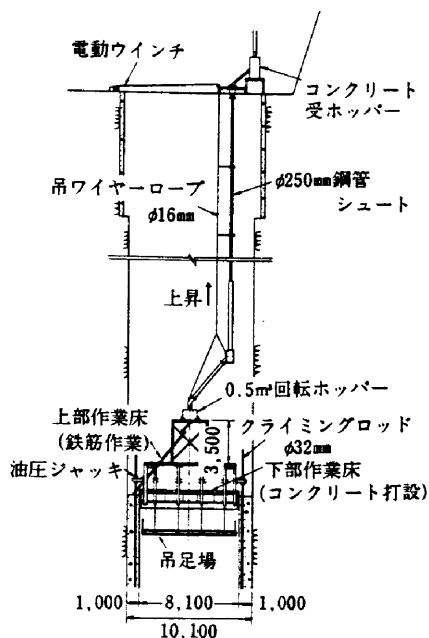


Fig.7 放水口立坑巻立コンクリート施工図
Working diagram of the concrete lining
at the drainage shaft

(1) スライドジャッキ

放水口、放流設備ともストローク70mmの70tfジャッキを1.75～2.0mピッチに使用した。ジャッキ総

能力をスリップフォーム総重量で除した安全率は5.6～5.8で、従来の採用安全率が1.5～2.0としている点で、規模の違いもあるが、安全率の大きな設計といえる。

(2) 型枠

型枠はメタルフォームと溝型鋼等の形鋼を使用した。スライド完了後の堰板の状態は、コンクリートの粗骨材で擦られて、木製のはささくれだら、メタルフォームは無数の擦り傷と凹凸がかなり激しく生じていた。耐久性は鋼製のものが大きいといわれるが、本工事のような30～40m程度のスライドでは、大きな差違は生じないようである。

(3) 足場設備

スリップフォームは、型枠系のほかに足場系や人荷揚卸系の設備を必要とする。このうち人荷卸系の設備は、掘削時に使用した昇降階段・クローラクレーン（ジブクレーン）を転用した。足場系設備としては型枠上部で鉄筋組並びにコンクリート打設を行うものと、下部でコンクリートの補修を行うものを必要とする。上部はヨーク継ぎ材を利用して足場を設け、下部は吊足場とした。

(4) コンクリート打設設備

コンクリートは途中2箇所の緩衝器を設けたφ250mmの鋼管シュートを使用し、スリップフォーム上に設けた0.5m³回転シュートで打設した。鋼管シュートは、コンクリート上昇に伴って逐次切離していった。

(5) 置き型枠

スリップフォーム工法では、スリップする断面形状が変化しないことが理想である。本工事においても断面の変化はないが、立坑人孔部のタラップの問題（30cmピッチで取付）、ゲート挿入部2次コンクリート用の差筋等の問題があった。これに対して、タラップについては取付部のみ型枠をスリップフォームと縁を切った置き型枠方式とした。差筋部もリブラスを用いスリップフォームと縁を切った。

4-2 コンクリート打設速度計画

(1) 算定式

コンクリート打設中、スリップフォームは継続的にスライドされ、コンクリートは数時間で型枠から開放されることになる。開放の条件は、コンクリートがその自重に耐えられるだけの圧縮強度を有することである。これを数式で表わすと次式のようなになる。

$$\sigma_a \geq K\gamma H$$

ここに σ_a ：開放直後のコンクリート躯体が
有すべき圧縮強度 (kgf/cm²)

K ：安全率

γ : コンクリートの単位体積量
($2.3 \times 10^{-3} \text{kgf/cm}^3$)

H : スリップフォーム堰板高(cm)

安全率は作業時の付加荷重・地震荷重並びに横方向荷重を考慮して2以上が必要とされている。

(2) コンクリートの圧縮強度

(1)で述べたように打設速度は、コンクリート初期強度に支配されている。従って、打設に先立って初期強度を試験により求めた。コンクリートの配合は Table 7 のとおりで、練上り温度18℃、養生温度20℃、湿度90%以上とした。試験結果を Fig.8 に示す。

Table7 コンクリート示方配合
Specified mix

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ の断面 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	細骨材 s	粗骨材G		混和剤 アインゾール (g)
								40mm ~20mm	20mm ~5mm	
40	10±2	4±1	62.5	44.9	175	280	816	507	507	83

設計基準強度 $\sigma_{ck} = 240 \text{kgf/cm}^2 = 23.52 \text{MN/m}^2$, $\text{FM} \geq 2.9$

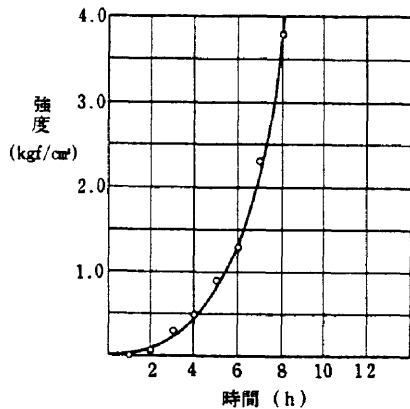


Fig.8 コンクリート圧縮強度
(各時間平均サンプル数: 3)
Compressive strength of concrete vs
elapsed time
(average samples per hour: 3)

(3) 打設速度

(1)の算定式により必要とされる圧縮強度を計算すると次のようになる。

$$\text{放流立坑: } \sigma_a \geq 2 \times 2.3 \times 10^{-3} \times 120 \\ = 0.552 \text{kgf/cm}^2 \text{ (54.1kN/m}^2\text{)}$$

$$\text{放水口立坑: } \sigma_a \geq 2 \times 2.3 \times 10^{-3} \times 150 \\ = 0.690 \text{kgf/cm}^2 \text{ (67.6kN/m}^2\text{)}$$

これは Fig.8 より4.5時間強度となり、打設速度の目標値を $1.5\text{m}/4.5\text{h} = 0.33\text{m/h}$ とした。これに対して実績は放水口1号立坑で 0.28m/h 、2号立坑で 0.25m/h となったが、この原因として坑内湧水によるスランブの低

Table8 スリップフォーム実績
Actual results of the slipform works

	段取	スライド	跡片付	計	スライド 高さ	スライド時 平均進行	最大進行
放水口2号立坑	10日	22日	4日	36日	43m	2.0m	2.6m
放水口1号立坑	9日	19日	3日	27日	43m	2.3m	3.1m
放流立坑	9日	19日	3日	31日	37m	1.9m	2.8m

下並びに養生温度の不足等が考えられた。

打設高さ実績は Table 8 に示すように1日平均で約2.0mだった。1日平均コンクリート打設時間5.5時間、前日平均スライド高さを0.6mとすると、1日平均打設高は

$$0.25\text{m/h} \times 5.5\text{h} + 0.6\text{m} \approx 2.0\text{m}$$

となる。前日スライド高は最大0.9mまで行ったが、あまり大きくすると型枠が不安定となり、施工精度を悪くする恐れがある。

以上より、コンクリート打設を昼間のみに限定した場合、堰板の高さの設計は打設速度に大きな影響を与える点で重要であると思われた。ちなみに、昼夜連続打設を行ったとした場合の1日進行は次のとおりである。

$$0.25\text{m/h} \times 24\text{h} = 6.0\text{m/日}$$

4-3 施工管理

(1)コンクリートの品質管理はスリップフォーム工法の場合、施工速度の決定の上で非常に重要であり Table 9 のとおり実施した。

Table9 コンクリート品質管理
Quality control of concrete

コンクリートの温度管理		生コン車2台に1回	
圧縮 強度	スランブ	生コン車1台目、5台目	
	若令強度9時間	3本	現場養生
	24時間	3本	現場養生
	3日強度	3本	現場養生
	7日強度	3本	試験室
	28日強度	3本	試験室

(2) 施工速度の決定

スリップフォームのスライド速度の具体的な決定は、(1)の試験結果と坑内温度を考慮した上で、コンクリートの針入度試験を行い、その貫入量により決定した。

(3) 測量及びスリップフォーム偏位の修正

スリップフォームの測量は、高さのある構造物の場合、光学測量機を用いるが、本立坑の場合、下げ振りと水準器を型枠の両端に2箇所設置して行った。測量の結果、型枠のねじれ・偏心が生じた場合、ジャッキのストローク長を型枠の両端で調整したり、型枠を横方向に引張って修正した。最大偏心量は放水口立坑で約80mm、放流立坑で約60mmであった。

4-4 工事実績

(1)工程

放水口立坑は昭和54年に掘削を始め、55年に巻立コンクリートを打設した。施工は2号立坑より行い、立坑一般部打設後、1号立坑に転用した。工期は両方で3月中旬から7月下旬の約5ヶ月であった。スライド実績をTable 8に示す。

スリップフォームとバラ型枠を比較すると、工期で約4倍、工事費で数10%、スリップフォームの方にメリットがあった。工事費において、労務費は50%近くスリップフォームの方が安くなったが、材料費で割高となった。

(2)サイクルタイム

Table 10に放水口立坑の昼方の標準サイクルタイムを示す。

Table10 放水口立坑巻立コンクリート標準サイクルタイム

Typical cycle time for the lining concrete at the drainage shaft

	全体(時間)		1日当り(時間分)	
	1号	2号	1号	2号
段 取	30	42	1:35	2:02
コンクリート打設	104.5	123	5:30	5:57
鉄 筋 組 立	25.5	30.5	1:20	1:28
跡 片 付	8	10	24	29
損 失	25.5	17.5	1:21	51
計	193.5	223	10:10	10:47
実 日 数	19日	22日		

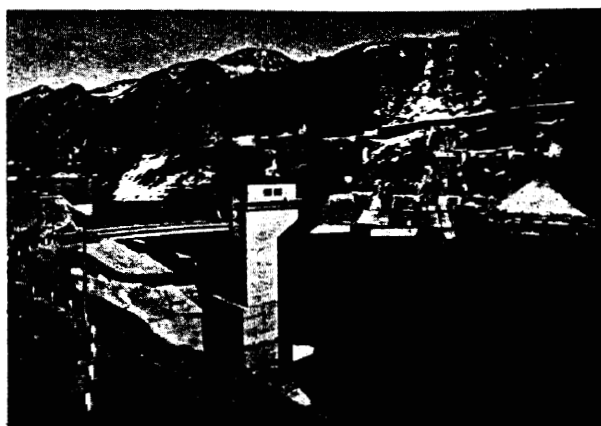


Photo2 完成後の全景
Overall view after completion

§5. あとがき

紙面の都合からカーテングラウト、放流立坑関係を大幅に割愛せざるを得なかった。また、使用機器等の表も省いてしまった。詳細なデータについては直接筆者に問い合わせて頂きたい。

最後に少々まとまりのない報告となったことをお詫びするとともに、執筆にご協力頂いた関係者に感謝致します。