

機械化施工による斜坑掘削の改善について

IMPROVEMENT ON MECHANICAL EXECUTION FOR INCLINED SHAFTS

金子 芳幸*

Yoshiyuki KANEKO

Okukiyotsu No.2 Hydro Power Plant is designed as a pumped storage power plant with an effective head of 470m, maximum working water flow 154m³/s, and maximum output 600MW. The penstock is divided into the upper stage portion of excavation with diameter 6.60m, extension about 400m, and gradient 51degrees; and the lower with diameter 5.30m, extension about 260m, and gradient 51degrees. For the upper stage portion, a pilot shaft of 2.7m x 2.7m was excavated with an Alimak Climber. For the lower, the raise drilling method was adopted. The pilot hole diameter was 270mm and the reaming hole diameter was 1470mm.

keywords: inclined shaft, Alimak climber, raise drilling

1. はじめに

奥清津第二発電所は、既設の奥清津発電所（新潟県湯沢町：最大出力100 万kW）の調整池をそのまま利用し、平成8年以降のピーク電力需要逼迫に対処すべく、緊急開発電源として平成8年に運転開始を目指して鋭意建設を進めている純揚水式発電所（最大出力60万kW）である。

水圧管路上段斜坑（勾配51°、延長約390m）、同下段斜坑（勾配51°、延長約250m）の各導坑の掘削については、工程及び地質状況等を勘案の上、それぞれクライマー及びレイズドリル用いた工法を選択した。

2. 上段斜坑導坑掘削（クライマー工法）

上段斜坑は、390mの掘削延長のうえに、急速施工を求められる工事であるが、幸い施工区間の岩盤が良好であることから、クライマー工法を選択した。クライマーはアリマック社製（スウェーデン）のRCM-6Mを使用した。RCM-6Mは従来のクライマー（RCM-6S）に以下の改良を加えたものである。

- ① 削岩機を駆動油圧1系統から2系統とし、作業性を向上させた。
- ② 作業ステージ上から操作していた油圧削岩機を、防護ゲージ内の運転席からの遠隔操作を可能なものとし、安全性を高めた。
- ③ アウトリガー取付位置をサイド部からボトム部へ変更し、本体支持能力を向上させた。
- ④ ガイドレール中間部にアンカーボルトベースを設け、アンカーボルト増設を容易にした。

- ⑤ 本体重量を5.5tから4.7tに軽量化し、ホイールベースを長くしたことにより、アンカーボルト1本当たりの負担荷重を軽減させた。

アリマッククライマーの全体図を図-1に、主要仕様を表-1に示す。

2・1 施工状況

(a) 地 質

上段斜坑区間の地質は、断層や節理が少なく非常に堅硬な石英安山岩であった。代表的岩盤の弾性係数は、50,000kgf/cm²程度である。地下水位は斜坑中・下部ではトンネルより上になり、薄い粘土を挟んだ小規模な断層の上盤から1,000ℓ/分程度の湧水が

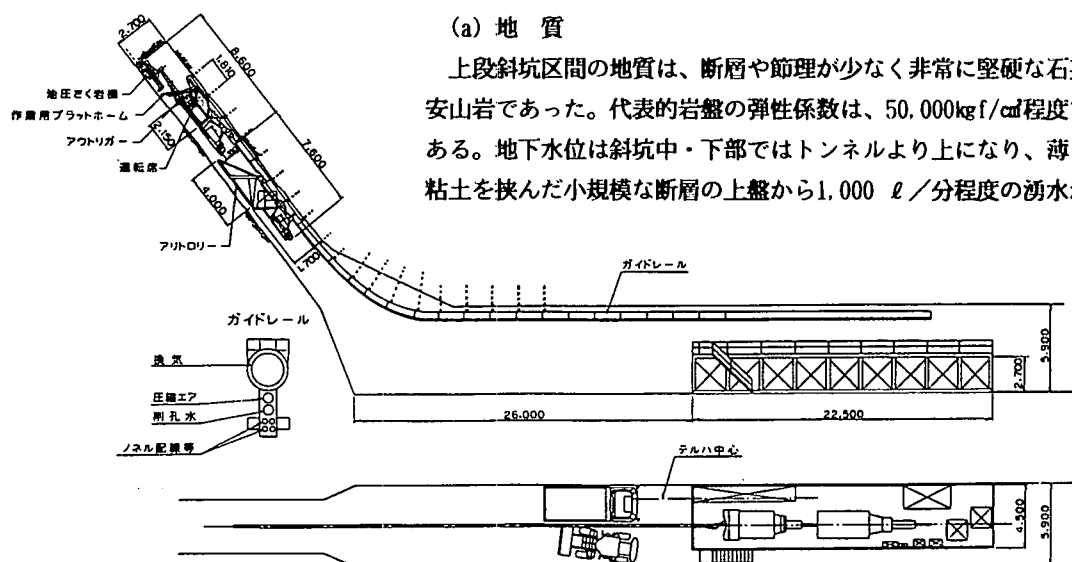


図-1 アリマッククライマー全体図

あった（導坑掘削時）。

(b) 掘削状況

図-1に示すようにクライマー基地等の仮設の配置を行った。導坑断面は、RCM-6M型の掘削最小断面である2.7×2.7mの矩形とし、本坑から50cm上がりの底設導坑とした。

本装置の動力は電動油圧ポンプであるので、漏洩電流による電気雷管の暴爆を防止するために装薬時には電源を切り、装薬後の降下は自重で行う必要がある。このような危険性や不便さを回避するために、発破方式に非電気式起爆システムであるノネルシステムを採用した。

換気については、ガイドレールに内蔵されたφ155mmの管

(図-1)を用い、送気方式で行った。

吹き付けについては、アイトローリ（本体とは別個稼働する運搬兼連絡車）の搭載量に限りがあるため、効率的な施工を考慮し次の2つの方式をとった。

- ① 下部より約70mの区間については、マテリアルホースを吹き付け箇所まで牽引し、クライマー基地よりSBS 乾式吹き付け機（乾式ではあるが、水セメント比が均一なコンクリートが製造され、粉塵とリバウンドが少ないとされている吹付機）にて圧送し吹き付けを

表-1 RCM-6M主要仕様

項 目	仕 様
(クライマー本体)	
上 昇 速 度	0～16m/分
下 降 速 度	0～40m/分
積 載 荷 重	1,000kg
電 動 機	30kw 660V 3相 50Hz/60Hz 共用
供 給 電 力	380V 3相 50Hz
削 岩 機	COP 1032型
ガイドレール用 アンカーボルト に加わる引 張荷重	7トン以下掘削中 3.0t以下 切 羽 掘 削 中 2.0t以下 走 行 中 1.5t以下
全 長	約8,600mm
全 重 量	約4,500kg
最大分解重量	約1,400kg
(アイトローリ)	
上 昇 速 度	0～16m/分
下 降 速 度	0～40m/分
積 載 荷 重	3,800kg
電 動 機	30kw 660V 3相 50Hz/60Hz 共用
供 給 電 力	380V 3相 50Hz
全 長	約7,600mm
全 重 量	約2,600kg
最大分解重量	約1,200kg
(ガイドレール)	ピンラック 2列
通 気 用	φ155mm
圧 縮 空 気 用	φ28mm
水 用	φ28mm
標準長さ	1,810mm
重 量	117kg

行った。

- ② 約70mより上部については、①の圧送能力の限界のため、アイトロリーに吹き付け機、ブースターポンプ及びプレミックスコンクリート（25kg/袋）を搭載し、吹き付け位置にてコンクリート・水を投入し吹き付けを行った。

ロックボルトについては、上部からの切り上げ掘削時に導坑支保としてのロックボルトが導坑閉塞の原因とならないようにグラスファイバーボルトを使用した。また、定着方法についてはレジン系定着剤を用い迅速に施工を行うようにした。

2・2 施工実績

クライマー基地等の仮設工事に約2週間を必要とした。導坑掘削を開始後、坑底より約150mの地点で湧水があり、坑内よりの水抜き、岩盤固結剤注入等の対策により10日程度進行が止まる事態が生じた。また、電気系・機械系の故障により全体で約600時間の休止時間があった。約3か月後に貫通させることができ、その後、約10日間でガイドレールを回収し、仮設工を含め約5か月で掘削を完了した。進捗については、平均一掘進長1.8mにて、平均日進（実稼働）4.4mとなった。掘削完了時にもなるとカイドレールやケーブル等の破損も進行しており、クライマー工法の国内最長級を実感するところであった。

3. 下段斜坑導坑掘削（レイズドリリング工法）

レイズドリリング工法は、先ずパイロット孔を掘削し、パイロット孔掘削用のビットをリーミングビットに交換し、パイロット孔掘削方向とは逆にリーミング掘削を行うものである。本工事では、ズリ処理の容易なパイロットダウン・リーミングアップ方式を採用した。機械の操作は全てレイズドリル横に据えつけられた操作小屋で可能で、動力源は電気であり安全・環境対策上非常に有利であるといえる。

同工法を選択するに当たって懸念されたことは、斜坑導坑として許容される精度でパイロット孔の掘削が可能であるか、また、リーミング掘削時に孔壁崩壊を抑えられるかであった。この問題については、地質状況と掘削延長を勘案した上、機器の改良、適切な施工管理で対処できると判断した。掘削機械には鉋研工業㈱が新規に製作したレイズドリル（BM-150A 型）を使用した。レイズドリルの主要仕様を表-2に示す。

3・1 施工状況

(a) 地 質

下段斜坑区間の地質も上段斜坑と同様に石英安山岩で構成されるが、断層がやや多く、断層や節理に沿って顕著な風化が進んでおり、岩質は全般にやや不良である。断層の周辺部を除く代表的岩盤の弾性係数は20,000kgf/cm²程度である。地下水位は斜坑下部でトンネルより上になり、200ℓ/分程度の湧水があった（導坑掘削時）。

(b) パイロット孔掘削

パイロット孔の掘削には、φ270mmのスリーコーンビット（チップインサート型）を使用した。掘削中は、500～600ℓ/分のベントナイト泥水を送水し、坑壁の保持・ビットの冷却・洗浄・掘削スライムの排出を行った。

レイズドリリング工法による導坑掘削の精度はパイロット孔の施工精度で決定され、大口径岩盤掘削機（BM型）による傾斜パイロット孔の精度の過去の実績は延長比で約1.3%であった。本斜坑導坑掘削では、パイロット孔を本坑掘削断面内に貫通させるために、孔曲がり精度を延長比で1%に抑えることが必要であった。本工事では、パイロット孔の精度の確保のために、孔曲がりの発生しにくい直進性の掘削ツールの編成を採用し、また考えられる各種の

表-2 BM-150A 主要仕様

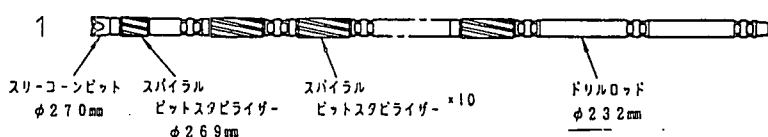
項 目	仕 様
パイロット径	270mm
リーミング径	1,470mm
スピンドル回転数	0～55rpm
スピンドルトルク	11.4tf・m
給進力前進	76tf
給進力後退	220tf
給進速度前進	80cm/分
給進速度後退	30cm/分
早送り速度前進	8m/分
早送り速度後退	3m/分
ストローク	2,200mm
計測表示項目	給進力 スピンドル回転数 スピンドルトルク 掘進速度
重 量	約15t

孔曲がりの発生要因に対して適切な掘削管理を行うことにより、精度の確保に努めた。

掘削ツール（ビット、スタビライザー、ロッド他）の編成に当たっては、下記の要因を考慮し、図-2に示す編成を採用した。

① スタビライザー 沿角編成

（ビットの近くに
取り付け、孔曲が
りとビットの振れ
止めの役目をする
もの）の長いほど
直進する傾向が強
い。



② スタビライザー

の外形がビット径
に近いほど曲がり
難い。



③ 一般的にツール
スの径が大きいほ
ど曲がり難い。

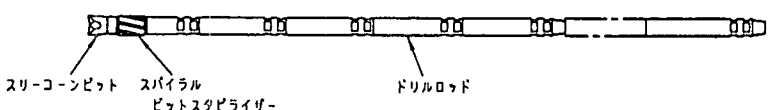


図-2 パイロットツールの編成

また、掘削中に孔曲
がりの発生する要因として次の項目が上げられる。

- ① 掘削機の据付け時の方向誤差
- ② 掘削時の不適切なビット荷重
- ③ 地層の変化、硬軟の互層

掘削機の据付け、口元ガイド管の設置は、掘削延長が長くなるほど、その誤差は大きくなることから、掘削開始後10mまで中心線の厳密なチェック修正を行った。

ビット荷重については、ビット荷重をかけ過ぎると、ビットの回転方向に孔曲がりが発生しやすい。特に、硬軟質岩が互層する不均質な岩盤では孔曲がりが増大する傾向にある。本工事では、当初計画ビット荷重を許容ビット荷重の40～50%とし、12.8～15.8tfの範囲で掘削を開始した。実際の孔曲がり、掘進率、ビット荷重、回転数、トルク及び地質などの条件によって影響される。このため、一定区間の掘削を行った後、記録された掘削データを基に、下記をパイロット孔掘削時の管理基準値とした。

- ① ビット回転数 30 rpm
- ② ビット荷重 10 tf
- ③ 泥水量 500 ～ 600 ℓ / 分

ビット荷重は、10tfを維持するように特に留意し、掘削速度を抑え、孔曲がり対策を優先させた。

以上の掘削管理は、半自動コントロールとし、機械を操作するコントロール盤にグラフィックパネル等を設置し、各種の掘削データ収録並びに機械操作を容易にした。レイズドリル、操作室等の坑内機械配置を図-3に示す。

孔曲がりの測定は村田式坑井記録式傾斜儀を使用した。本測定器は磁石式のため、掘削ロッド内で測定できず、20～30m掘削毎に掘削ロッドを揚管し、裸孔状態で測定を行った。測定間隔は約6.0mとし、測定器はワイヤーライン方式により降下させた。測定は、フィルムの読み取り誤差を防止するため、同一深度で2～3回の測定を行い、その平均値を採用した。

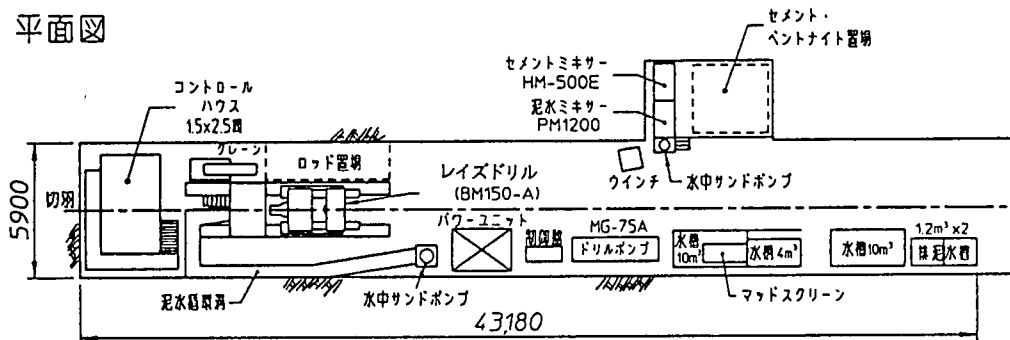
パイロット孔の孔曲がり鉛直方向（下向き）については、前述のツールズ編成の内、ロッドの撓みを利用

して孔の方向を上向きに修正する編成（増角編成、図-2）にて基本的には対応することとし、その他に、強制的に孔の方向を修正する方法としてホイップストック（鋼製の楔）を準備した。

（c）リーミング掘削

パイロット孔の貫通した下部導坑側で、パイロットビットを切り離し、リーミング面をパイロット孔と直角な面となるよう掘削成形した後、リーミングビットをロッド（パイロットロッドと共用）に連結した。

平面図



側面図

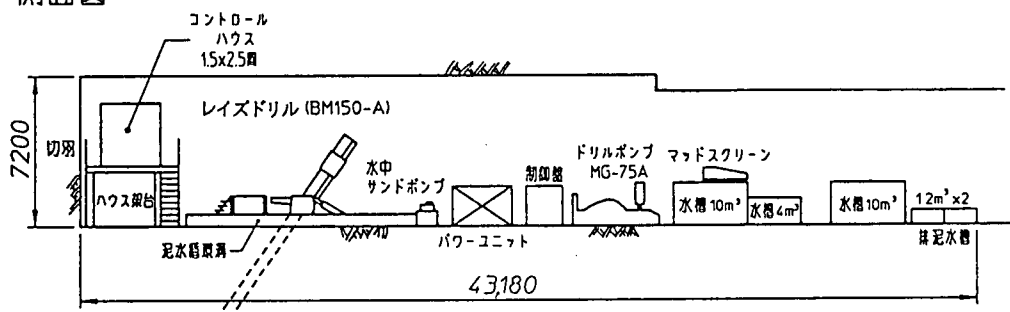


図-3 坑内機器配置

リーミングビットは、ローラーカッタ12個を搭載した2ステージ型、径1,470mmを使用した。リーミング坑掘削時の管理基準値は下記を標準とした。

- ① ビット回転数 15 rpm
- ② ビット給圧力 60 tf

掘削完了後、テレビカメラを上部より挿入し約80m間の掘削状況を調査したが、坑壁下半の軟岩部において壁面の小規模な崩落が認められた。原因は、掘削ズリ及び掘削水による影響と思われる。その他の坑壁は、比較的滑らかな切削痕を残していた。

（d）ライニング鋼管建込み

リーミング掘削の終了後、切り抜け掘削時の坑壁保護のためライニング鋼管建込みを行った。ライニング鋼管には、スパイラル鋼管1,200A、厚さ8.0mmを使用した。ライニング鋼管の挿入では、鋼管の先端にテーパーを付け、鋼管挿入時の引っ掛かりの防止を図るとともに、鋼管の自重で降下しない場合に備えて、最大36tの加圧挿入装置を配置した。結果的には、挿入装置を使用することもなく、順調に挿入することができた。また、鋼管にスリットを設けて、外水圧による圧壊防止を図った。

鋼管下部5.0m区間で鋼管と坑壁の間にセメントミルクを注入し、ライニング鋼管を固定した。

3・2 施工実績

機器の坑内搬入と据付け調整に約2週間かけた後、パイロット孔を約1か月で貫通させた（純掘進率の平

均は1.2～1.5cm/分)。リーミングの段取りに約10日かけた後、約40日間でリーミングを完了した(純掘進率の平均は1.2cm/分)。その後、機械撤去、ライニング鋼管挿入の段取りに約1週間、ライニング鋼管挿入と固定に1週間をかけ、レイズドリリング法による約250mの導坑掘削を合計約4か月で完了した。

貫通したパイロット孔の孔曲がり精度は、掘削長248.8mに対し、計画中心線からの偏位量は、水平方向0m、鉛直方向+1.04mの結果を得た。掘削長に対する偏位量は0.4%となり、本工事で設定した許容値1%を満足することができた。

スタビライザーの長さを十分にしたツールズ編成(沿角編成、図-2)とビット回転数、ビット荷重等を厳しく制御した掘削により、水平方向については、計画線に沿う軌道を保ち続けホイップストックによる修正は実施しなかった。鉛直方向については、孔曲がり測定から計画線より下方に偏位する軌道を認め、掘削中に2回の増角掘削を実施した。修正時は5～6mの掘進毎に傾斜のみロッド内で測定し、編成替えによる効果の確認を行った。

レイズドリリング工法での斜坑掘削での孔曲がり実績の比較(図-4)が示すとおり、今回の機器の改良と施工管理の実績により同工法の信頼性が飛躍的に増したと言える。但し、測定結果についてはパイロット孔の貫通予想位置とのズレ(上方に約4m)があり、測定方法の改善が今後の課題となる。

同工法の信頼性は向上したものの、全線にわたり底設導坑としての位置を確保するだけの精度は今回確立できなかった。切り上げ掘削においては、切羽を水平にし削岩機とパワーショベルを交互に搬入し掘削を進める工法を採用した。パイロット孔掘削時の測量技術等の改良により曲がりの抑制が可能となれば、切り上げ掘削においても効率の向上が期待できる。

4. あとがき

当発電所の建設は平成4年10月に本格工事が開始され、平成8年6月に運開の予定であり、土木工事の進捗率82%(平成7年6月現在)となっている。この期間の中で、冬期の拘束を受けながら、工

事を進めることは数々の配慮を必要とし、トンネル掘削の機械化は工程の確保、安全性等の面から有効であったと考える。今回用いた、クライマー、レイズドリリングは基本的には実績あるものであり、新しい物ではない。しかしながら、改良を加えて新たな適用を図った実績が今後の施工計画に寄与することが期待される。

参考文献

- 1) 金沢紀一・井澤一：奥清津第二発電所計画の概要，電力土木，No. 243，1993年 1月
- 2) 金沢紀一・井澤一：奥清津第二発電所建設計画の概要，建設の機械化，1993年 9月
- 3) 電源開発(株)・奥村組：平成6年度『建設機械と施工法シポジウム』

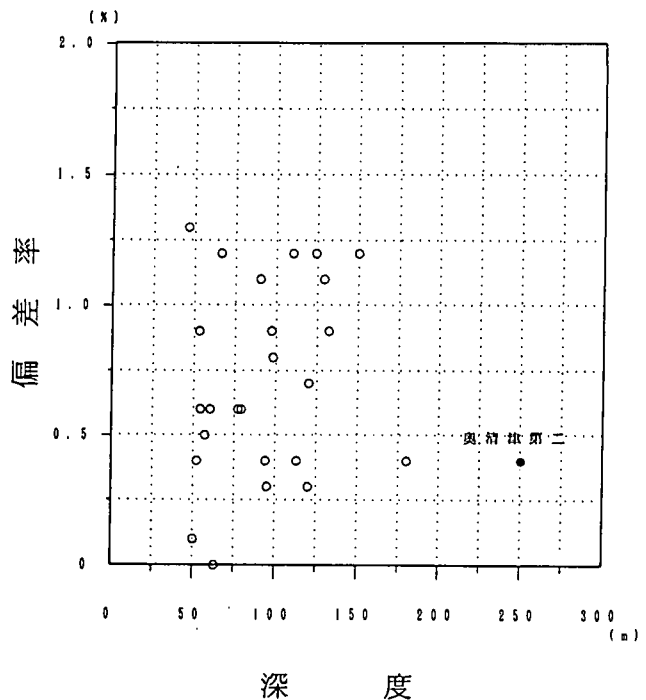


図-4 斜坑掘削での孔曲がり実績比較