

京極地下発電所（地下大空洞）における掘削手法とコンクリート打設について

竹田直樹¹・鈴木雅浩¹・石原和典¹・名合牧人²・武田宣孝³

¹フェロー会員 大成建設株式会社 京極地下発電所（〒044-0112 北海道虻田郡京極町字春日122-1）

¹正会員 大成建設株式会社 京極地下発電所（〒044-0112 北海道虻田郡京極町字春日122-1）

¹正会員 大成建設株式会社 京極地下発電所（〒044-0112 北海道虻田郡京極町字春日122-1）

²正会員 大成建設株式会社 幌延地下施設作業所（〒098-3224 北海道天塩郡幌延町字北進432-2）

³正会員 北海道電力株式会社 京極水力発電所建設所（〒044-0101 北海道虻田郡京極町字京極149）

京極地下発電所（出力60万kW）を地下約400mの深度に建設中である。規模は幅24m、高さ46m、延長140m、最大断面積950m²となる地下大空洞で、掘削形状はアーチコンクリートを省略した弾頭型をしている。掘削は斜路方式で壁面の掘削精度を高く保ちつつ施工速度を守った。掘削管理は地質観察、計測、解析を3次元のかつ短時間で相互に対照し設計の妥当性の確認と対策工を検討する情報化施工を行った。コンクリート工は狭空間でポンプ車が進入できないために国内で使用例の少ないディストリビュータを用いた。また、スラブは過密鉄筋のため、細径でも締め固め能力の高い新型のバイブレータを使用している。側壁コンクリートの型枠は自然に優しいリサイクル、リユースの樹脂性大型型枠を用いている。

キーワード：地下発電所、情報化施工、斜路掘削、ディストリビュータ、バイブレータ、樹脂型枠

1. 京極地下発電所の概要

(1) 京極発電所の位置

京極発電所は図-1 に示すように、札幌近郊の北海道羊蹄山山麓の京極町北部に位置する。



図-1 京極発電所の位置

(2) 京極発電所の概要

京極発電所は、標高約 900m の台地上に上ダムを、パーペナイ川に下ダムを設け約 3km の水路で両者を結び有効落差 369m、最大使用水量 190.5m³/s により最大出力 60 万 kW の発電を行う純揚水式発電所で

ある。平成 14 年 2 月に着工し、平成 26 年 10 月に 1 号機 20 万 Kw の運転開始を目指している。このうち、地下発電所は図-2 に示すように上ダムの下流約 200m で地下約 400m の地中にある。図-3 の鳥瞰図に示すように、地上より延長約 1,500m、10%下り勾配の機器搬入トンネルを用いて地下発電所に至る。地下発電所本体近傍には調圧水槽、励磁室、排水トンネル、各種管理トンネルが配置されている。

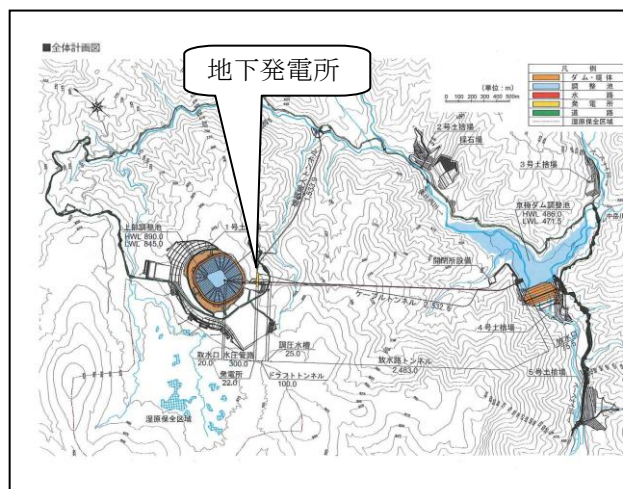


図-2 地下発電所配置

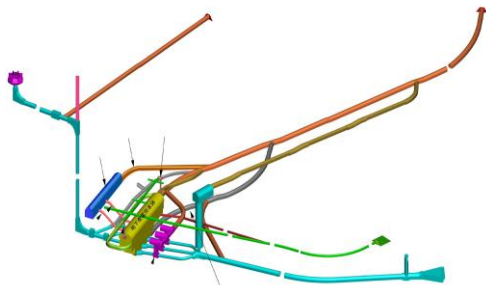


図-3 地下発電所鳥瞰図

(3) 地下発電所の形状

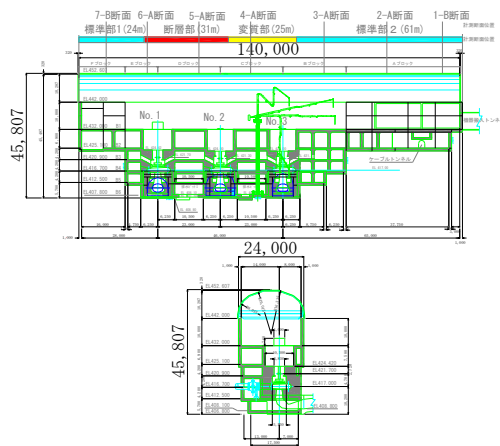


図-4 地下発電所の形状

地下発電所の形状は図-4 に示すように、高さ 45.8m、幅 24.0m、長さ 140.0m の弾頭形のアーチを有し、総掘削量約 11.6 万 m³、最大断面積 950m² にもなる大規模地下空洞である。

(4) 京極地下発電所の地形と地質

地形は羊蹄山の北北東に位置する台地の地下に位置し、地表には尻別川水系の支流であるペーペナイ川が流れている。当地区は、グリーンタフ地域にあり、新第三紀中新世の激しい海底火山活動を受けている。地下発電所の地質は火山礫凝灰岩が主流で凝灰角礫岩、凝灰岩が点在する。また、断層が本体を横断する形で存在し、ひん岩が貫入している。この地質分布を図-5 に示す。

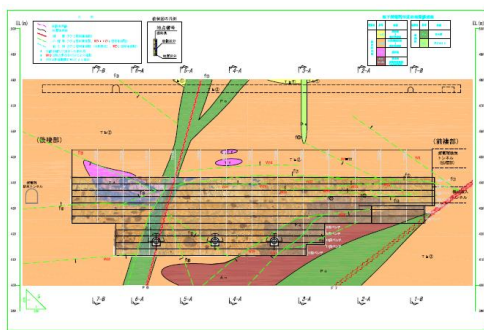


図-5 地質分布図

2. 掘削技術

(1) 掘削支保パターン

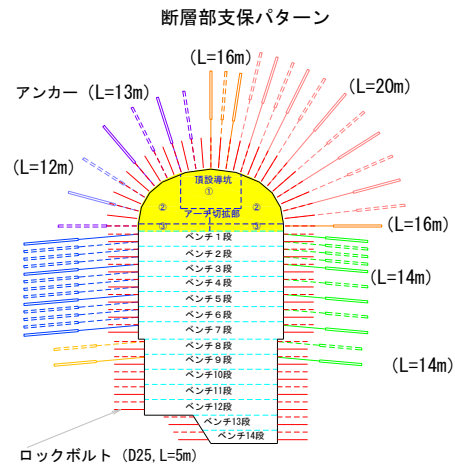


図-6 アンカー支保パターン図

地下発電所の坑壁の支保は、図-6に示すように吹き付けコンクリート（アーチ部：4層×8cm=32cm 繊維補強材入り、側壁部：3層×8cm=24cm 中央層のみ繊維補強材入り）とロックボルト（L=5m D25）、アンカー（約1,100本、長さ12～20m、導入力582～1400KN）より構成され岩盤壁面を保持する設計である。支保の当初設計は、調査坑内の地質観察、ボーリングコア観察、原位置岩盤試験を基に、FEM解析によりゆるみ域を算定し、そのゆるみ域を安定させるようにアンカーを配置した。その後に設計支保を配置したFEMの再解析を行い安全性の確認と管理基準Ⅰ（監視強化）を算定した。

(2) 掘削手順

掘削手順は図-6 に示す断面の加背割に従って上部より下部に向かって掘下がついていった。アーチ部は頂設導坑を最初に掘削し、左右に切広げと一段盤下げ掘削を行った。事前解析に基づき地山の安定が保たれるように、ベンチ部は掘削高さ 2.5m を標準に 1～14 段まで順次切り下がった。1 段のベンチ掘削の中央部、幅 20m 間は鉛直方向に装薬用の削孔を行い、ベンチ両端の各 2m 間は水平方向に削孔し、坑壁のゆるみ域発生を極力抑え平滑になるようにスムーズブラッシング発破を行った。

立体的に見ると図-7から上部より換気トンネル、機器搬入トンネル、底部連絡トンネルが地下発電所本体に取り付いている。この3トンネルを上方より順次斜路を設け掘削ずりの搬出と材料の搬入、施工機械の搬出入に利用した。この掘削状況を写真-1、

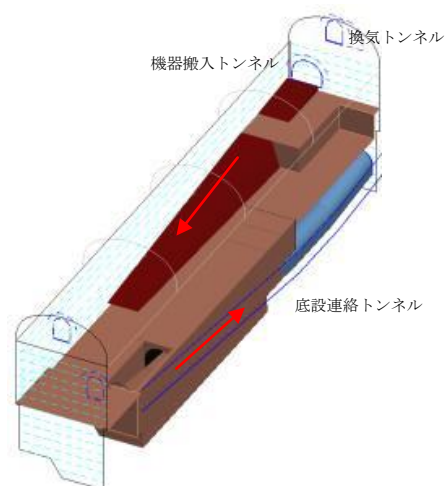


図-7 7段ベンチ掘削説明図

2に示す。斜路方式は通常のグローリーホールの使用と比較してのメリットは資機材の搬入が容易で、足場もすみやかに用意でき、情報化施工によるアンカーの増設等の支保変更にも柔軟に対応できる。また、壁面を水平削孔しスムーズブラスティングにより壁面を傷めずに精度良く掘削ができる。今回、はずり足場を設けアンカーの増設も行った。精度については、写真-2から壁面の平滑性が分かるが、数値的にみると側壁コンクリートの食い込み率が現在3%であることから、変形余裕と平均計測内空変位を考慮しても良い精度で掘削が行われたと言える。グローリー方式の掘削もアンカー工により速度が制約されるため、斜路方式で暦日310日（アンカー増設1か月含み）で掘削体積278m³/日、掘削高さ148mm/日が確保できグローリー方式と比較しても遜色はなかった。



写真-1 アーチ切上げ完了時



写真-2 ベンチ部掘削終了時

(3) アンカー施工技術

地下発電所本体のアンカー数量は1,100本、最大長さ20mにもなり、またアーチ部は上向きの施工となり、当初より削孔、挿入、注入、緊張作業に困難が見込まれた。このアンカーの施工効率が地下発電所の掘削工程を左右する。そこで、削孔機械、挿入機械の改造を考案し施工にあたった。削孔機械は写真-3、4に示すようにロケットブーマ195を使用し、ドリフター、油圧機構を改造した。また、特別にφ520mmの支圧面整形用の円形ビットを作成し、長さ20mのアンカー孔（全長89→135mm、坑壁より1.5m間は135→175mm、支圧板面は175→280→520mm）の削孔と拡径、整形を、結果として一方あたり5本行うことができた。



写真-3 削孔機械



写真-4 支圧面整形用ビット

また、アンカーは一本あたり重量が281kgあり、人力では上方に挿入ができないためにバックホウの先端にゴムキャタピラーをつけ鋼線を挟み込み送り出す装置を考案した。



写真-5 アンカー挿入装置

3. 情報化施工技術

(1) 情報化施工のフロー

従来の情報化施工においては、施工、計測、解析が主となり、地質要素の考慮が従となっていた。しかし、地下発電所工事では地山の安定に地質要素、特に亀裂の存在が及ぼす影響が大きい。本情報化施工ではこの地質要素を如何に早く、分かり易くし対策工の判断材料とするかが重要なポイントであった。そこで、地質観察結果を3次元化し、他の計測新技術と組み合わせ迅速に施工に反映させた。具体的には毎週の計測会議、アーチ部終了後などの節目でのステップ計測会議により対策工を決定し施工に反映させた。以降に新技術の概要と適用結果について述べる。

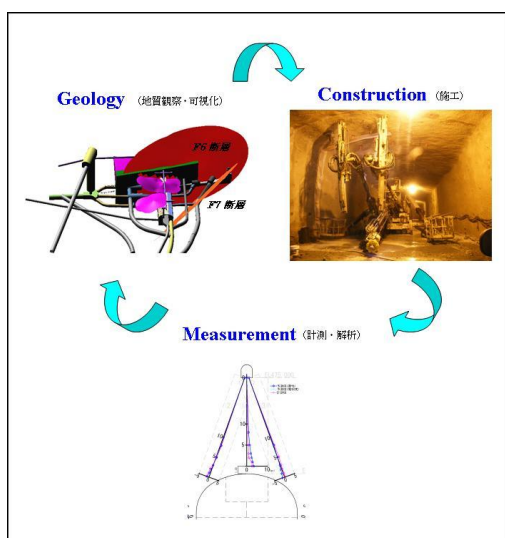


図-8 情報化施工のフロー

(2) 地質観察の3次元可視化

地質観察の可視化については、図-9で示すように3次元地質構造可視化ソフト（Geo-Graphia）をベースにしており、日々の地質観察結果を模型に貼りつけるような感覚でバーチャルの3次元壁面に貼りつけてゆく。この結果、断層、亀裂の走向や傾斜が今まで地質技術者の頭の中のみで描かれ理解されていたものが、土木技術者にも容易に理解できるようになった。図-10では断層や割れ目を円盤で表示しておりその円盤の重なりから、キープロックの形成状況も把握できる。さらに、アンカー、ロックボルト、掘削形状も同一の画面上で表現できるようになっているのでロックボルトがキープロックを縫い付ける状態も把握すること

ができる。画面は視点を変更できるのであらゆる角度から亀裂の分布も理解することができる。また、坑壁表面の地質分布だけでなく、DRISS（穿孔中に得られる機械データから穿孔速度、穿孔エネルギー、穿孔反力を算定し、地山の掘削実績と比較対照して地山性状を推定する手法）もアンカー孔削孔に適用しており地山背面の地質強度分布も把握してそれらを総合的に判断して対策工の有無を土木技術者が決定した。

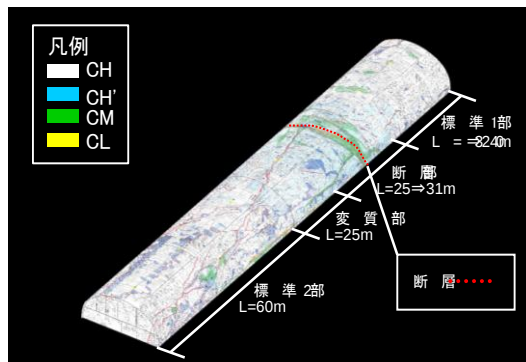


図-9 地質観察結果の3次元可視化

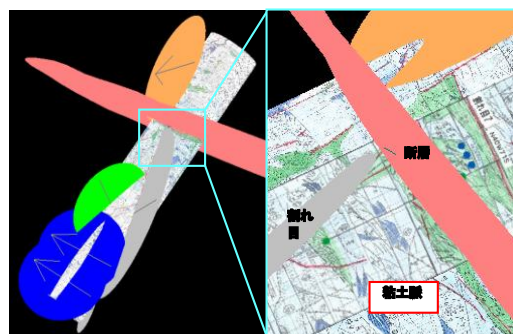


図-10 亀裂の3次元表現図

(3) 設計および解析手法

設計では前述したように電研式の有限要素解析を実施し、アンカーや吹き付け厚等の支保を検討している。この解析結果は日々の計測管理値に利用し、一定の施工段階、もしくは計測に異常な変化が現れた時にステップ解析を実施した。実施時期は、頂設導坑掘削終了時、アーチ切上げ完了、ベンチ2段、4段、6段、9段、10段、14段であった。ステップ解析では、計測値と解析値の整合を取るように地質分布、不連続面、地質定数を見直しながら再計算を行った。図-11に設計時と最終掘削時のゆるみ域の分布図を比較すると、ゆるみ域が当初の設計時より放水路側のスプリング部でやや拡大しているが大きな相違は出なかった。最終的に断面5Aのベン

チ部の解析値と計測値の比較を図-12で行うとモードは十分に追従しているが、絶対値はやや差が生じている、完全に合わせると他の箇所での整合性がくずれたり、合理的な地質定数から乖離するので、ここではモードを中心としてシュミレートした。

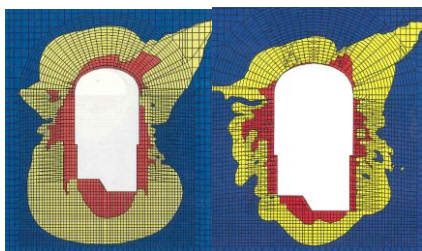


図-11 設計時と事後のゆるみ域比較 (5A 断面)

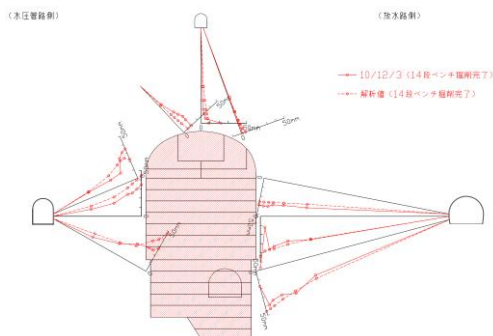


図-12 解析結果と計測結果の比較 (岩盤変位)

(4) 計測技術

計測断面は図-4 に示すように縦断方向に7断面であり、横断的に図-13 に示すように試験坑、排水トンネル、ドラフトトンネルから本体に向けて岩盤変位計を予め設置した。また、各掘削後にアンカー荷重計、ロックボルト軸力計、内空変位点を設置していった。内空変位は換気トンネルより自動追尾のトータルステーションにて計測し、ほこりの比較的小さい昼食時を狙って計測した。

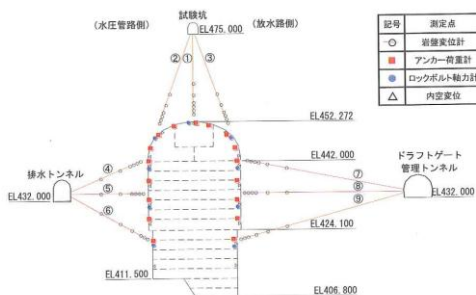


図-13 計測機器配置図 (5-A)

a) 3次元レーザスキャナー

空洞長軸方向の50mごとに3次元レーザスキャナー (GLS-1000, TOPCON) によるスキャニングを行った。測定はアーチ部完了時と2段ベンチ完了時に行い、その差分を表示した。測点は5,000,000点として図-14 ではスキャニングの精度が良いために削

孔機械も認識できる。図-15 の各測定点を、断面方向に投影した図が図-16 であり、平均 17.4mm の差分が生じた。スキャナーの機械誤差が 10~20mm と言われており、この差分は誤差範囲の中ではあるが、一様に内側に変位し、また、光波測距義では 19.6mm となり各変位値に整合性が取れている。変位量が大きくなればさらに有効な計測手段となりうる。また、各点の差分を3次的に表現したものが図-17 で、変位が大きい箇所を赤く表現し面的に把握できる。これにより対策工の範囲をより狭く限定することができ経済的な対策工が可能となる。

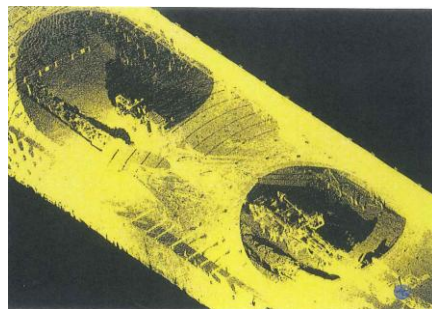


図-14 3次元スキャナー測定結果

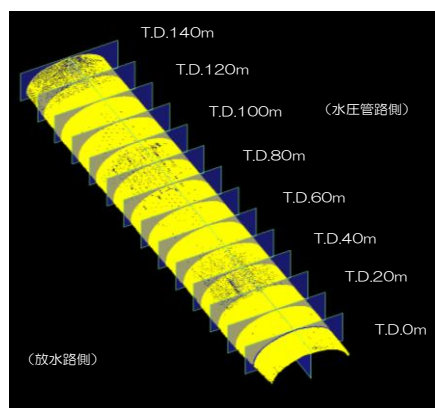


図-15 3次元スキャナー断面説明図

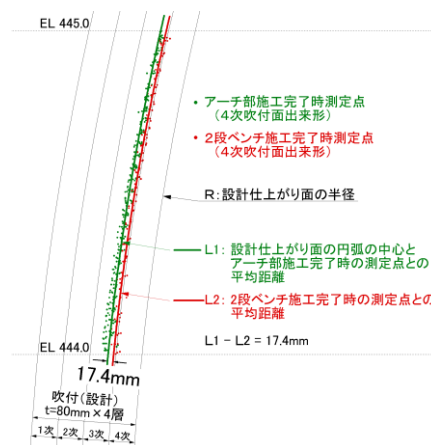


図-16 測定点の差分表示 (1-B 断面)

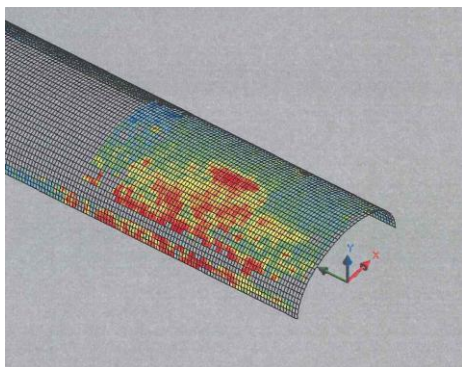


図-17 3次元内空変位分布

b) 無線データ転送技術

地下発電所の計測は、多くのセンサーを用いるので、スキャナーまでのケーブル配線の手間と発破防護が大きな問題であった。その解決方法として無線化が有効であるが、坑内では高压配線、チリ、湿気などの環境に問題があり、開発があまり進んでいなかった。本地点では、図-18 に示すシステムで写真-6 に示す 429MHz 帯の無線発信機を用いて見通せない位置で約 150m の距離に基地局を置き測定を行った。最大3回のリトライで欠測を防ぎ有効な測定結果を得ることができた。

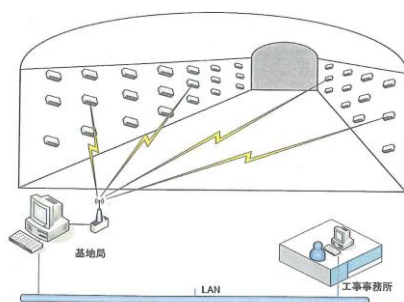


図-18 無線データ転送システム



写真-6 無線発信機と基地局

(5) 情報化施工実施結果

情報化施工により、アーチ部では図-19 に示す箇所ではキープブロックの補強ボルトを18本打設し、側壁部では不連続面対策として209本の補強ボルトを追加した。計測結果の挙動と管理値の監視よりアンカーについては打設位置の変更、48本の追加、3

9本の削減をおこない、経済的に空洞の安定を保持することができた。設計支保を考慮しつつ現場においてすみやかな対応により掘削の速度も確保できた。

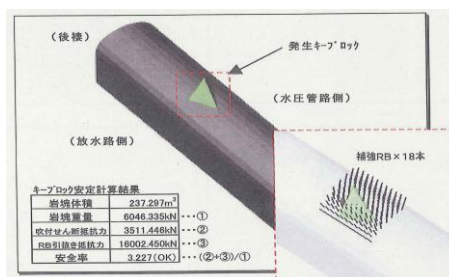


図-19 キープブロック対策

4. コンクリート施工技術

(1) コンクリート工の特徴

地下発電所のコンクリート工の特徴は以下のようである。

- ・本設クレーンを早期に使用できるように、側壁コンクリートを岩着させスラブより先行する打設となる。
- ・スラブコンクリートは重量物保持と振動を防ぐために、1m厚の過密鉄筋状態となる。発電機や止水バルブの搬入のために大型の開口部が設けられる。
- ・地下部に掘削されているために、コンクリート打設に必要な外部空間がない。

このような条件を満足して品質の良いコンクリート打設を行うために、以下に示す技術を駆使して施工中である。

(2) ディストリビュータ

スラブを打設後は上方の空間が制限されポンプ車が発電所内に進入できなくなり中央部の側壁、スラブコンクリートの打設が困難となる。写真-7に示すリーチ長が28.5mのデストリビュータ（JUNJIN JB-M29H）を24mの高さのタワー上に採用した。



写真-7 デストリビュータ

(3) 樹脂型枠を用いた大型型枠

地下発電所の側壁コンクリートは本設クレーンの架設のために早期に完了が必要で、そのために型枠は大型（高さ5m、幅20m）で軽量かつ転用回数が多くなる。この条件に合致する型枠材料が樹脂型枠である。特長は、軽い、光の透過性大、加工しやすい、多数回の転用に耐える、リユースがきき、CO2の排出量が26.9kg/m²木製の型枠材より節約できる。本工事では写真-8に示すように、さらにアクリル板を用いてコンクリート充填確認を可能としている。



写真-8 大型樹脂型枠（左がコンクリート側）

(4) 新型小型パイブレータ

地下発電所のベースコンクリートは厚さが1mあり、変圧器等の重量物が上載する。さらに開口部が多数存在する。このために鉄筋が最大D32、150ピッチダブルの過密鉄筋となる箇所がある。このような箇所では能力の高いφ50mmの太径は使いづらいため、小型（φ28mm）であるが、締固め能力が従来の同径の1.5倍ある今回開発されたパイブレータを使用した。打設効率はφ50mmのものとあまり変わらず、コンクリート出来栄も良く、クラックの発生もみられずに品質が確保できている。



写真-9 打設前の小型（φ=28mm）パイブレータ

(5) 打設継ぎ目処理

通常の構築物では側壁の打設後にスラブを連続して打設する順番であるが、本地点では側壁が先行し、スラブは数か月遅れて打設される。また、側壁は急速施工のために、大型型枠を使用するので、鉄筋を突出できず FD グリップという機械式継手を用いる。

予めこの FD グリップを型枠内部に設置し、打設面にフィルムタイプの非硬化材を貼っておく。型枠脱形後に打継面を高圧洗浄して FD グリップを露出させた後にスラブコンクリートと一体化させる。他の継ぎ目処理法のチッピングと比較して、コストが安い、短工程、コンクリートガラが発生が少、振動、騒音がないなどの面で優れている。

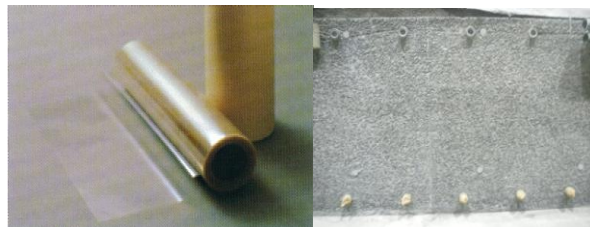


写真-10 フィルムタイプの非硬化材（右側は打継面）

(6) 開口部クラック防止

地下発電所はスラブにマシンハッチや検査孔用の開口部が数多く作られる。このために、クラックが発生しやすい開口部の角部に配筋を密にする以外に、今回は、高ジルコニア耐アルカリガラス繊維を角部に5mm程度コンクリートに沈ませて設置した。現在のところ目立つクラックはまだ発生していない。

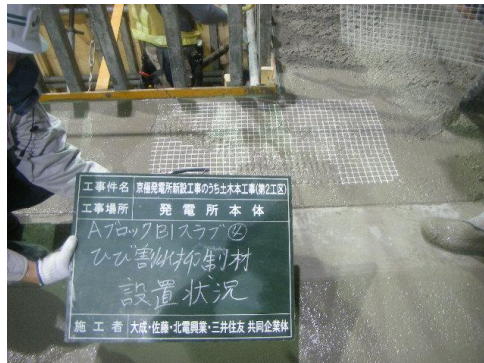


写真-11 開口部クラック防止メッシュ

(7) 中流動コンクリート

発電機を回転させた後に水が流れるドラフトチューブは写真-12に示すように中央部で形状が扁平な管状であり、また、過密鉄筋で配管がありリブも多く溶接されているのでパイブレータがかけづらくコンクリートが底部に十分行き渡りにくい。そこで、空隙を防ぐために流動性の良いコンクリートを用いる必要がある。しかし、高流動コンクリートは共用のマイプラントのためにコンクリートの供給量や打設日が指定される制限があるので、高性能 AE 減水剤と AE 助剤を加えてスランプフローを高めた中流

動コンクリートを用いる。図-20 にそのスランプフローを示すがプラントから打設位置までは約20分程度であるため十分使用に耐えると考える。



写真-12 ドラフトチューブの設置状況

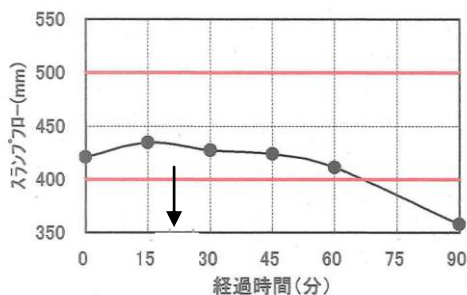


図-20 スランプフローの時間経過図

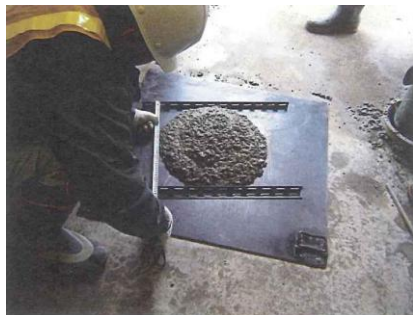


写真-13 スランプフローの測定状況

5. まとめ

地下発電所の掘削とコンクリート工について使用した最新の技術を本編に述べた。各技術についての詳細な説明については紙面の都合により他論文にゆずり、ここでは概略のみについて記した。地下発電所を工期内に高品質で完成させるために様々な技術を取捨選択し、調和的に利用してゆくことが必要である。これらの要素技術や素材を組み合わせることで地下発電所の要求事項を満足させることがひとつの統合技術であると考えられる。最後にこの論文作成にあたり、現場で実際に試行錯誤された技術者、作業員、技術開発された方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 重廣道子, 岩永昇二, 武田宣孝, 山上順民, 名合牧人, 竹田直樹: 3次元地質構造可視化ソフトを利用した情報化施工支援システムの導入, 土木学会第65回年次学術講演会VI—357, pp. 713-714, 2010.
- 2) 武田宣孝, 西村哲治, 毛馬内学, 高山正志: 大規模地下空洞掘削時の岩盤挙動とその対策, 土木学会第65回年次学術講演会III—100, pp. 199-200, 2010.
- 3) 名合牧人, 鈴木雅浩, 竹田直樹, 松原誠, 遠藤太嘉志, 重廣道子, 佐藤哲郎, 永田衛史: 大規模地下空洞の変状分析への3次元レーザースキャナの適用検討, 土木学会第65回年次学術講演会VI—491, pp. 981-982, 2010.
- 4) 松村謙治, 名合牧人, 青木智幸, 澤田栞伊, 武田幸司, 藤田行茂, 小泉圭吾: 大規模地下空洞の情報化施工における無線センサの利用, 土木学会第65回年次学術講演会VI—492, pp. 983-984, 2010.