京極発電所地下空洞掘削における情報化施工

西村 哲治1・角谷 英一郎1・武田 宣孝1*・毛馬内 学1・高山 正志2・名合 牧人2

¹北海道電力株式会社 京極水力発電所建設所 土木第二課(〒044-0101 北海道虻田郡京極町字京極149) ²大成建設株式会社 札幌支店 京極地下発電所作業所(〒044-0012 北海道虻田郡京極町字春日122-1) *E-mail: n-take@epmail.hepco.co.jp

北海道電力㈱が北海道虻田郡京極町に建設中の京極発電所地下空洞の掘削では、切羽の地質観察及び岩 盤挙動の計測管理を行い、周辺岩盤の挙動変化が確認された場合、その要因に応じて最適な支保を検討す る情報化施工を実施している.また、情報化施工の支援システムとして、三次元地質情報・施工状況可視 化システムを導入し、掘削進捗に応じた地質状況及び岩盤挙動の理解を促している.

アーチ部掘削時では,情報化施工による地質観察,計測結果に基づき,不連続面の岩盤挙動を精度良く 把握し,支保の補強を適切に実施するとともに,アーチ部掘削時の岩盤挙動を分析し,ベンチ部掘削時の 解析モデルに反映した.本報告では,これらの結果及びベンチ部掘削の計測状況について報告する.

Key Words : underground power plant, observational construction, measurement data management

1. はじめに

京極発電所は,有効落差 369 m,最大使用水量 1905 m³k を得て,最大出力 60 万 kW の発電を行う北海道電力 ㈱で初めての純揚水式発電所であり,平成 14年2月から 工事を開始し,平成 26 年 10 月に1 号機 20 万 kW の営業 運転開始を目指している.

地下空洞は、図-1 に示すとおり、高さ45.8 m,幅24.0 m,長さ141.0mの弾頭形を有し、総掘削量約12万m³、最大断面積約1,000m²におよぶ大規模地下空洞内に水車発電機3台(20万kW×3台)、変圧器2台を設置する計

画である¹⁾.

地下空洞の施工は、平成 21 年 1 月からアーチ部項設 導坑の掘削を開始し、平成 21 年 11 月にアーチ部掘削を 完了しているが、掘削時の切羽の地質観察及び岩盤の挙 動計測結果に基づき、その結果を設計・施工に反映させ る情報化施工を実施し、平成 22 年 9 月現在、ベンチ部 を施工中である.

本稿では、地下空洞掘削時における情報化施工計画, アーチ部掘削時の施工管理結果及び現在施工中であるベ ンチ部掘削の計測状況について報告するものである.



図-1 発電所概要図

2. 地下空洞の概要

(1) 地下空洞の地質概要

地下空洞周辺の地質は,新第三紀中新世の美比内川層 に属する凝灰角礫岩(Tb2)が主体であり,数十m規模 の凝灰岩(Tf)のブロック等が数箇所に分布する¹⁾.

断層については、発電所長軸方向に高角度でほぼ直交 するF6、F7断層が確認されている。岩級区分は、概ね C_H級(一軸圧縮強さ100 MPa程度)と堅硬であるが、断 層沿いには物性値の低下帯(一軸圧縮強さ30~40 MPa程 度)がありC_H'級とした。

地下空洞周辺の地質縦断図を図-2に示す.

(2) 地下空洞の施工

当地点では、支保部材は地山の有する強度を有効に活用するNATMの考え方に基づき、吹付コンクリート、ロックボルト及びPSアンカーを用いた.支保パターンは図-1に示すとおり、C_H級岩盤で構成される標準部1、2とC_H、級岩盤で構成される断層部及び変質部に区分して設定した³.断層部の支保パターンを図-3に示す.

地下空洞の掘削は、アーチ部の掘削とベンチ部の掘削 に大別され、アーチ部2ステップ(STEP1:頂設導坑、 STEP2:切拡げ掘削)及びベンチ部14ステップの計16ス テップで掘削する計画である.



図-2 地下空洞周辺地質縦断図



図-3 支保パターン(断層部)

3. 情報化施工計画

(1) 計測項目の配置計画

計測項目の配置計画は、図-1 に示すとおり、空洞全体の岩盤挙動を把握するため、空洞長軸方向にほぼ均等に計測断面(7 断面)を配置した.計測管理項目は、岩盤変位、アンカー荷重、ロックボルト軸力及び内空変位とし、岩盤変位については、掘削前に周辺トンネルから事前に岩盤変位計を設置し、先行変位が確認できる方式を採用した.計測機器の配置例を図-4 に示す.

(2)情報化施工の支援システム

情報化施工では、計測データを迅速に確認し、岩盤挙 動を分析・評価する必要があるため、計測データを北海 道電力㈱建設所及び請負者事務所まで自動伝送し、リア ルタイムで岩盤挙動及び支保応力の把握ができるシステ ムを導入している.

地質情報に関しては、切羽観察記録のデータベース化 により、地質構造の三次元 CG 化を図る三次元地質情 報・施工状況可視化システム ³を導入し、掘削進捗に応 じた地質状況及び岩盤挙動の理解を促すとともに、三次 元地質評価を行うことにより、合理的な補強工の検討

(補強範囲の限定)等に活用している.地質情報(不連続面)を三次元 CG 化したものを図-5 に示す.



図-4 計測機器配置図(5-A断面)



図-5 地質情報(不連続面)の三次元CG化

4. アーチ部掘削時における施工管理結果

(1) 地質観察結果

切羽観察の結果,アーチ部の岩盤分布は概ね想定通り の地質性状であり,F6 断層も概ね想定された位置で出 現した.しかし,C_H級・C_H、級岩盤の分布に関しては, F6 断層近傍において,同系統の粘土割れ目に伴う岩級 低下部が確認されたため,標準部1におけるC_H級区間 の一部をF6 断層の影響域とする断層部のC_H、級区間と 評価し,支保パターンを見直して施工した.切羽観察か ら得られたアーチ部岩級状況を図-6 に示す.

また,切羽観察結果と周辺ボーリング情報から推定されたアーチ部岩種分布を凝灰岩の3次元分布状況と併せて図-7に示すが,凝灰岩の出現位置については概ね想定通りであった.

(2) 計測結果

アーチ部掘削時における岩盤挙動の一例として,2-A 断面(図-8 参照)における岩盤変位の計測結果を示す. 比較的大きな変位を示した測線④の経時変化図を図-9 に,岩盤変位の分布状況を図-10に示すが,測線④にお いては,水圧管路側の掘削に伴い,岩盤変位が大きく増 加していることが分かる.また,アーチ部に比べて側壁 部の岩盤変位の方が大きい.更に当初設計における予測 解析値は,アーチ部では計測結果と概ね整合するが,側 壁部では計測結果に対して過小評価となっていた.



図-6 アーチ部岩級状況



図-7 アーチ部岩種分布状況

(3) 事後解析結果

側壁部において岩盤変位の予測解析値と計測結果に乖 離が認められたことから,解析モデル及び解析用物性値 の見直しを行い,事後解析により空洞掘削に伴う周辺岩 盤挙動の再現を図ることとした.なお,事後解析手法に ついては,当初設計と同様に非線形粘弾性 FEM を解析 手法として採用した¹⁾.

まず、空洞及び周辺トンネル掘削時の切羽観察結果及 び岩盤変位計設置時のボーリング結果に基づき、解析モ デルの見直しを行った.変更後の解析モデルを図-11 に 示す.なお、図-11 では小断層を含む弱層部を C_M級岩









図-10 岩盤変位の分布状況 (2-A 断面)

盤として追加したが、 C_M 級岩盤は当初設計の解析用物 性値には考慮されておらず、解析用物性値から設定する 必要があった.そこで、解析モデルを見直したうえで、 C_M 級岩盤の物性値に関するパラメータスタディを実施 した結果、 C_M 級岩盤の解析用物性値としては、物性値 の推定範囲内における下限値程度の物性値を与えること により、岩盤挙動の再現を図ることができた.事後解析 の結果を図-12に示すが、アーチ部のみならず、側壁部 の岩盤変位についても、計測結果が示す特徴と整合の取 れた解析結果を得ることができた.

(4) 穿孔検層結果による不連続面位置の推定

アーチ部掘削での PS アンカー施工時には、全てのア ンカー孔に対して穿孔検層(DRISS)を実施しており、 穿孔検層結果については、不連続面位置の推定等に活用 している.その一例として、1-B 断面で確認された不連 続面に起因する支保応力(アンカー荷重)の増加と不連 続面位置の推定結果を以下に示す.

1-B 断面アーチ部におけるアンカー荷重の経時変化図 を図-13 に示すが、アーチ天端のアンカー荷重(No.1)



図-11 解析モデルの変更 (2-A 断面)



図-12 計測結果と事後解析結果の比較(2-A断面)

が許容値に抵触する値を示した.また、アーチ部放水路 側の下半掘削時には、アーチ部放水路側肩部のアンカー 荷重(No.5)がアンカー荷重(No.1)と同調して増加する 傾向を示した.荷重増加要因はボーリング結果等から、 アーチ天端に板状節理で存在する不連続面(W0)の影 響であることが予想された.この不連続面位置の推定に 穿孔検層結果を用いて、推定精度の向上を図った.

1-B断面における穿孔検層結果を図-14 及び図-15 に示 す.図-14 に示すとおり,穿孔検層結果にて確認された 岩級低下部をトレースすることで,不連続面(W0)位 置を精度良く推定することが可能となる.また,図-15 に示すように,空洞縦断方向に対しても同様に穿孔検層 結果から不連続面(W0)位置を推定することで,不連 続面(W0)を三次元の位置情報として把握することが できた.他の不連続面位置についても,同様の手法にて 推定精度の向上を図り,三次元地質情報に追加した.







図-14 穿孔検層結果(1-B断面, アーチ部)



図-15 穿孔検層結果 (空洞縦断方向)

(5) アーチ部の岩盤補強

アーチ部ではキーブロックが3箇所確認された.この ため、形成されたキーブロックの岩塊重量に対し、設計 の支保パターンで設定している吹付コンクリートとロッ クボルトの抵抗力を考慮したキーブロック解析を行った 結果、設計安全率(FS>3)を確保できず、補強の必要が あると判断されたのは1箇所であった.そのキーブロッ クは自由落下型のモードであったため、補強範囲を限定 し、地下空洞の安定を図るための対策工としてロックボ ルトの追加補強(18本)を行った.追加補強を行った キーブロック位置と安定計算結果を図-16に示す.

アーチ部については、切羽観察結果及び計測結果を総 合的に判断したうえで小規模な補強対策(補強ロックボ ルト)を部分的に実施したが、情報化施工により適切な 追加補強を行うことで、切羽を停止させることなく、順 調に掘削を完了することができた⁴.

また,当初設計の地質モデルや解析用物性値を変更し て岩盤変位の解析予測値を計測値にフィッティングし, ベンチ部掘削以降の予測解析を行い,最終掘削完了時の 地下空洞の安定性を評価したが,アーチ部の設計支保を 見直すまでには至らなかった.

5. ベンチ部掘削の計測状況

現在,ベンチ部掘削を施工中であるが,6段ベンチ (STEP8) 掘削終了時までの計測結果の一例として,4 A断面(変質部)及び5-A断面(断層部)における岩盤 挙動の計測状況について報告する.

(1) ベンチ部掘削時の修正解析モデル

ベンチ部掘削時における4A断面(変質部)及び5-A断 面(断層部)の解析モデルについては、2-A断面と同様 に、アーチ部掘削時の切羽観察、岩盤挙動の計測結果等 から、空洞軸方向に連続し、放水路側から水圧管路側へ 傾斜20度程度の低角度で存在する小断層を含む弱層部

(C_M級)を解析モデルに追加した.また,4A断面(変 質部)については,2段ベンチ掘削完了後に岩級分布の



図-16 キーブロック位置,安定計算結果

一部見直し(C_H'級⇒C_H級)を行った. 4A断面(変質
部)及び5-A断面(断層部)の修正解析モデルを図-17及び図-18に示す.

(2) ベンチ部掘削時の岩盤挙動

4-A断面及び5-A断面における,6段ベンチ(STEP8) 掘削終了時の岩盤変位計の予測解析結果と計測結果との 比較分布図を図-19に示す.

図-19より,修正解析モデルを用いた予測解析結果は, 6段ベンチ(STEP8)まで掘削が完了している現状の計 測結果を概ね再現していると判断される.4A断面の放 水路側下方の岩盤変位計では,計測結果が予測解析結果 を上回っているが,これは周辺トンネル(ドラフトゲー ト立坑部)での掘削の影響が含まれていることが原因で あると推察している.また,5-A断面の水圧管路側水平 部の岩盤変位計では,解析結果が計測結果を上回ってい るが,現状の切羽観察結果では,当該箇所のみ局所的に 物性値を改善できる要因は確認されておらず,現状では 切羽観察結果を尊重して解析モデルを評価している.



図-17 修正解析モデル(4-A 断面)



図-18 修正解析モデル(5-A断面)



図-19 岩盤変位の予測解析結果と計測結果との比較分布図(左:4A断面,右:5-A断面)

6. まとめ

本報告では、北海道電力㈱が現在建設中の京極発電所 地下空洞掘削における情報化施工について報告した.

アーチ部掘削時の情報化施工管理では、地質観察、計 測結果に基づき、岩盤挙動の再現性を図ることで、解析 モデルの推定精度を向上させることができた.また、三 次元地質情報・施工状況可視化システムを導入し、穿孔 検層結果等から推定した不連続面位置を含む空洞背面の 地質情報を三次元表示することで、地質状況及び岩盤挙 動の理解を促し、最適な対策工を立案するうえで非常に 有用であった.

更にアーチ部掘削時の地質観察,計測結果に基づき, ベンチ部掘削時の解析モデルを修正したが,この修正解 析モデルに基づく予測解析結果を確認すると,現状6段 ベンチ(STEP8)までの計測結果を概ね再現している.

謝辞:最後に,地下空洞掘削における情報化施工管理の 実施にあたり,ご協力頂いた関係各位に対し深く感謝の 意を表します.

参考文献

- 1) 鈴木一巳, 宮永孝志, 小山俊, 八嶋和幸: 京極地下発電所 の調査・設計, 電力土木, No.305, 05, p11-15, 2003.
- 西村哲治,白戸伸明,武田宣孝:京極地下発電所地下空洞 掘削における情報化施工,電力土木, No.347, 05, p19-23, 2010.
- 3) 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.
- (4) 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.
- 5) 瀧 治雄,市田雄行,名合牧人,武田宣孝:地下発電所 空洞アーチ部掘削時の岩盤挙動とその事後解析,土木学会 第65回年次学術講演会III-101, pp.201-202, 2010.

OBSERVATIONAL CONSTRUCTION METHOD FOR THE UNDERGROUND CAVERN OF THE KYOGOKU HYDROPOEWR PLANT PROJECT

Tetsuji NISHIMURA, Eiichiro KAKUYA, Nobutaka TAKEDA, Manabu KEMANAI, Masashi TAKAYAMA and Makito NAGO

The Kyogoku Hydropower Plant is currently under construction in Hokkaido, Japan, where the cavern construction has been managed by observational construction method based on results of geological survey and measurement for the optimum support system and the construction safety. To facilitate the observational construction method, geological and measurement data management system has been introduced to the project. This paper describes how the observational construction method helped to increase understanding of the behavior of discontinuous planes and to improve the geological model during the arch-section excavation along with the state of the ongoing bench-section excavation.