

(67) 大規模地下空洞の掘削時の挙動実績

東京電力㈱ 正会員 ○前島 俊雄

東京電力㈱ 正会員 富田 敦紀

Rock Behavior of Large Underground Rock Cavern during Excavation

Toshio MAEJIMA, The Tokyo Electric Power Co., Ltd.

Atsunori TOMITA, The Tokyo Electric Power Co., Ltd.

Abstract

The project of the Sabigawa Pumped-Storage Power Station has got a rock cavern (height; 51m, width; 29m, length; 165m) excavated in rhyolite bedrock. Fifteen stages of 2.5m bench cutting have opened the space of about 1,500m² in cross section area. The rhyolite bedrock contains considerable joints and several fracture zones. During the construction of the cavern, many kinds of in-situ measurement were carried out, and at several stages of bench cutting, rock behavior was forecasted analytically based on the measurement of deformation. This paper describes the rock behavior during excavation paying attention to the stress induced in the rock especially. Rock behavior at the D-section is discussed in this paper based on the measurement data and the analysis of redistribution of stress which came up after the failure of the rock.

The measurement data indicate that stress concentration was brought about in the rock around the cavern after the existing stress was relieved by excavation. Then, after the stress exceeds the peak shear strength, the rock turns into plastic state. The measured rock behavior seems to be explained quite well in terms of displacement and stress by the stress softening model which handles plastic state of rock and geological discontinuities.

1. はじめに

蛇尾川揚水発電計画における地下発電所(高さ51m, 幅29m, 長さ165m)は, 約1500m²に及ぶ大断面空洞を天井アーチ部から空洞下部に向けて15層(掘削ベンチ高2.5m)に分けて逐次掘削を進めてきた。空洞周辺の岩盤は, 流紋岩を主体として節理が発達し, 破碎帯, シーム等の弱層が存在するなど, 不均質かつ構造が複雑であったため, 地質性状の把握を徹底するとともに計測データのリアルタイム処理ならびに予測精度の向上など, 設計施工, 計測, 予測面での諸工夫, 対策を講じながら工事を進め, 平成3年2月, 約3年の月日を経て無事終了した。

このような不均質・不連続性岩盤に対する調査・計測・予測解析技術の精度を向上させる基礎的アプローチとして, 掘削に伴う岩盤内応力の変化に着目した各種現場計測および挙動解析面での諸検討を実施した。本報告は, 当地点を代表するD断面の放水路側側壁において埋設した各種計測器により得られた計測データならびに岩盤応力がピーク強度を超えた応力状態を残留強度まで再配分するひずみ軟化解析による検討を踏まえ, 掘削に伴う周辺岩盤の挙動を岩盤内応力に着目して分析した結果について報告するものである。

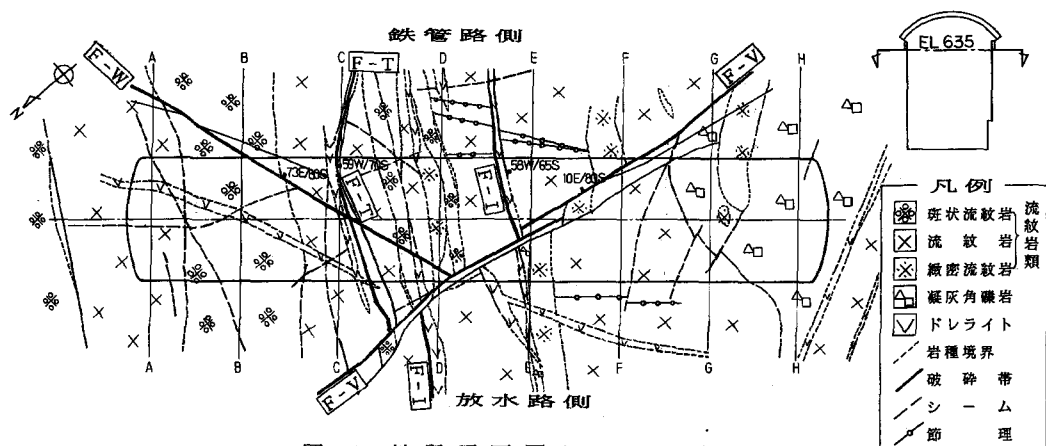


図-1 地質平面図 (EL. 635)

2. 地質概要

地下発電所を構成する地質は、新第三紀の流紋岩類を主体とし、一部に貫入岩脈さらに発電所南側(主変室側)には凝灰角礫岩が混在分布している(図-1)。

地下発電所周辺の破砕帯は、発電所と鋭角に交差するほぼ鉛直のF-V(幅10~50cm)とF-W(幅10~50cm)ならびに発電所横断方向で南急傾斜のF-I(幅10~20cm), F-T(幅100~150cm)の4本が認められた。D断面放水路側には、空洞側壁に近接(3~10m)して壁面にほぼ平行する破砕帯F-Vが存在し、鉄管路側には空洞壁面に対して流れ目の連続した節理が認められた。当サイトの岩石、岩盤の物性は表-1に示すとおりである。

表-1 岩石・岩盤の特性

項 目	物 性 値
弾 性 係 数 (kgf/cm ²)	30,000~50,000
強 度 定 数 (下限値)	$\tau = 10 + \sigma \cdot \tan 43^\circ$
一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	500~1,200
初 期 地 圧 (kgf/cm ²)	
第1主応力 (σ_1)	51 (N167°W, 下向き61°)
第2主応力 (σ_2)	40 (N 3°W, 下向き28°)
第3主応力 (σ_3)	29 (N 91°E, 下向き7°)

3. 計測項目

D断面における計測位置および項目は図-2に示すとおりである。空洞掘削に伴う側壁の水平方向変位測定には、多段式岩盤変位計を用いた。空洞掘削に伴う鉛直方向の岩盤内応力変化の計測には、1方向(鉛直)の応力増分を振動数を介して求める振動弦型地圧計ならびに1方向(鉛直)の微小ひずみの変化を測定する埋設ひずみ計を、周辺ドレーン坑から空洞(6ベンチ近傍)に向かって削孔したボーリング孔内に0.5m~1mピッチで盤下げ掘削前に設置した。さらに、これらの計測線近傍のボーリング孔内にA E波を計測するセンサーを14個埋設し、盤下げ掘削に伴う空洞周辺岩盤での破壊音発生位置、頻度を計測することとした。

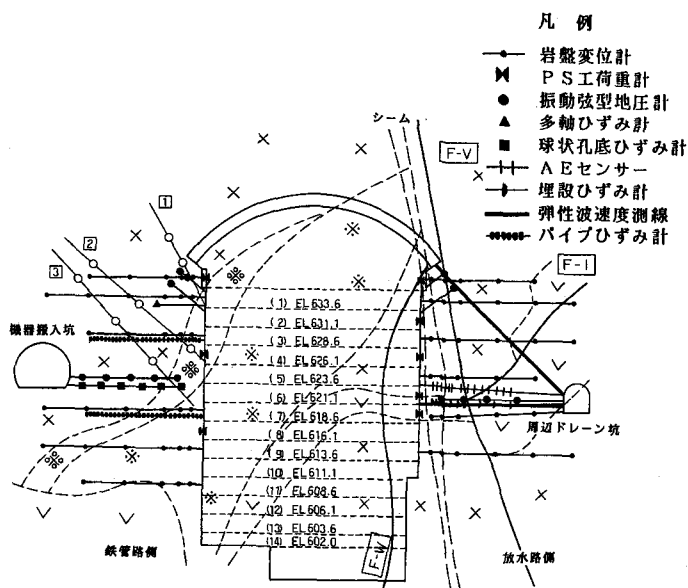


図-2 計測位置図 (D断面)

4. 空洞掘削に伴うD断面放水路側側壁での岩盤挙動

盤下げ掘削に伴う岩盤の挙動計測結果は、図-3に示すとおりであり、各計測器別に空洞側壁と周辺ドレーン坑間の計測位置における掘削ベンチごとの変化を示した。計測器を埋設している位置は、空洞中央部の掘削ベンチ高で6ベンチに相当するため、空洞掘削の先行的変化を示す1~5ベンチ掘削段階、次に計測器埋設の該当ベンチとなる6~10ベンチ掘削段階、さらにそれ以降の11~14ベンチ掘削段階の3段階に分けて整理した。なお、計測器を埋設した測線での破碎帯F-Vは、空洞壁面より8m付近に存在する。これらのデータの分析した結果は、以下のとおりである。

①鉛直方向岩盤応力の変化(振動弦型地圧計)

壁面より3m付近での応力変化は、1~5ベンチ掘削まで若干増加を示したが、6ベンチ掘削以降急激に減少し、11ベンチ掘削以降には、その変化は認められない。

また、破碎帯F-Vより外側で壁面より9m付近の応力変化は、1~5ベンチ掘削まで若干増加し、それ以降最終ベンチの14ベンチまで低下せず、変化は認められない。

②鉛直方向ひずみ(埋設ひずみ計)

1~5ベンチ掘削まで、いずれの計器もひずみの変化は小さいが、6ベンチ掘削以降10ベンチ掘削まで破碎

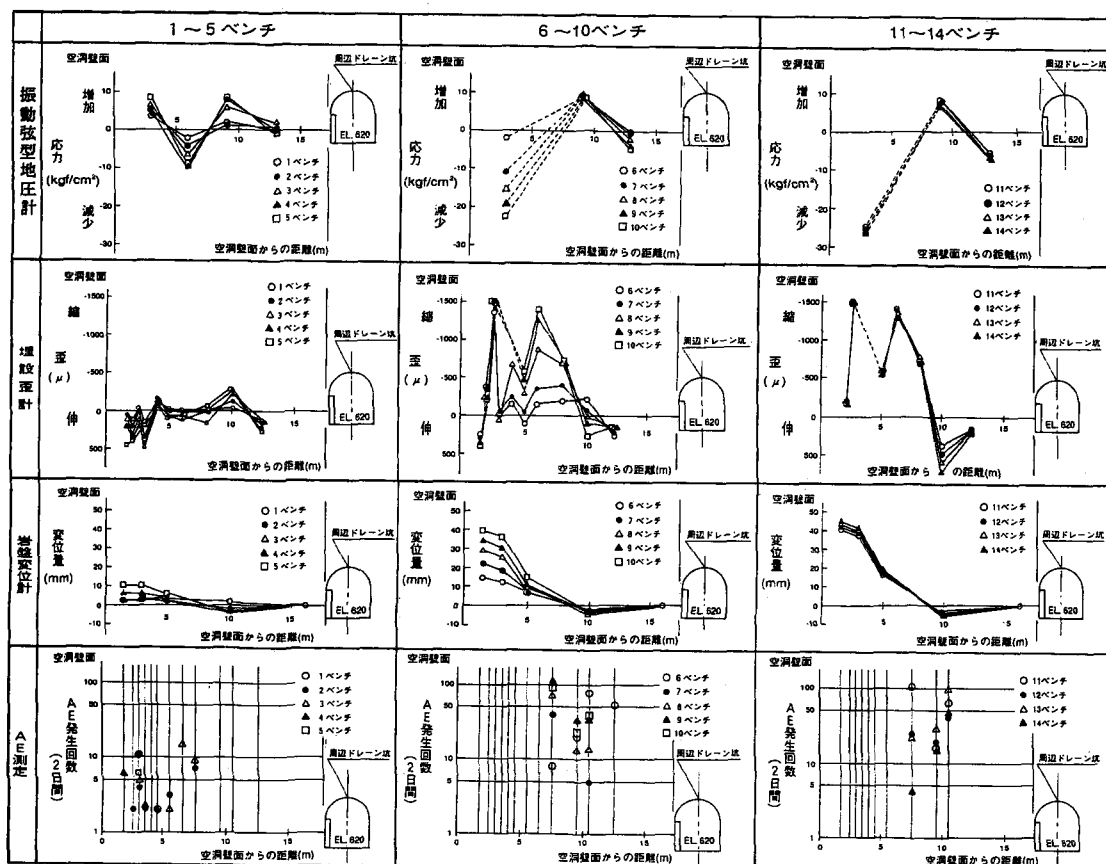


図-3 盤下げ掘削に伴う岩盤挙動の計測結果

帯F-Vに対して空洞側の壁面より3m~8m範囲でひずみが急激に圧縮側に増加し、特にその傾向は壁面より3m, 6m付近で著しい。なお、11ベンチ掘削以降の変化は認められない。

③水平方向変位(岩盤変位計)

1~5ベンチ掘削までいずれの計器も変化量は小さいが、6ベンチ掘削以降10ベンチ掘削まで壁面より3m~5m間と5m~10m間の変位が増加したが、11ベンチ掘削以降の変化は認められない。なお、変位が増加した区間には、シームおよび破碎帯F-Vが認められる。

④AE計測

AEの発生頻度は、1~5ベンチ掘削時には、破碎帯F-Vから空洞側の壁面より2~7m付近に発生していたものが、6ベンチ掘削以降は破碎帯F-Vより外側で壁面より7~12m付近に発生し、空洞壁面から2~7m付近は皆無となっている。また、11ベンチ掘削以降は、AEの発生頻度は沈静化してきている。

以上の計測結果より空洞掘削に伴う空洞側壁中央部岩盤の挙動を応力変化に着目してまとめると以下のとおりである (図-4)。

o 空洞壁面より3m付近の挙動

(壁面に対し破碎帯F-Vの内側)

- ・計測器を埋設した6ベンチより上部の1~5ベンチ掘削段階では、鉛直、水平方向のひずみ変化は小さいが鉛直方向の応力が若干増加していること、AEの発生が記録されたことなどから盤下げ掘削のベンチが近づき応力の集中がはじまった状態と考えられる。

- ・盤下げ掘削が進み計測器を埋設した6ベンチを通過した段階では、鉛直方向の応力が減少しはじめ鉛直方向のひずみが圧縮側に大きく変化するとともに、水平方向のひずみも増加傾向にあることなどから、掘削に伴う応力解放により水平方向応力が急激に減少し、岩盤応力が一軸状態となったものと考えられる。さらに掘削が進み9ベンチ掘削段階までは、鉛直方向応力の減少は継続しているが、鉛直・水平方向のひずみが殆ど増加していないこと、さらにAEの発生が記録されないことから、岩盤の一軸化が急激に生じた後岩盤のピーク強度を越え塑性状態になっているものと考えられる。

- ・11ベンチ掘削以降最終ベンチ掘削段階までは応力、ひずみ、AEいずれも変化が認められないことから、掘削に伴う応力解放の影響は6~10ベンチ掘削の間に生じ、それ以降の応力変化はないものと考えられる。

o 空洞壁面より9m付近の挙動(壁面に対し破碎帯F-Vの外側)

- ・計測器を埋設した6ベンチより上部の1~5ベンチ掘削段階では、いずれの計測データも変化は小さく掘削

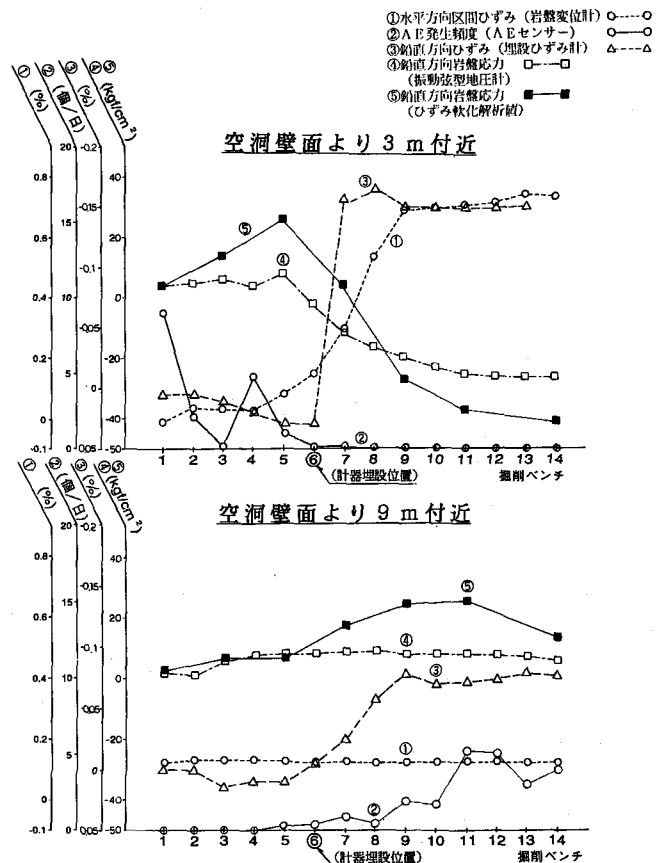


図-4 空洞壁面から3m, 9m付近の岩盤挙動の経時変化

による影響は少ないと考えられる。

- ・計測器を埋設した6ベンチから10ベンチ掘削段階では、鉛直方向応力の低下はなくほぼ横ばいとなっているが、鉛直方向のひずみが増加傾向を示していることならびにA Eの発生が記録されていることから、掘削に伴う応力解放により水平方向の応力が若干減少しているものの、岩盤のピーク強度には達していないと推定される。
- ・11ベンチ掘削以降最終ベンチ掘削段階までは、応力およびひずみには、いずれも変化が認められないが、A Eの発生が記録されていることから、応力は集中した状態になっているがピーク強度に達せず安定しているものと考えられる。

5. 岩盤応力の予測

当地点を代表する流紋岩は、岩石を対象としたひずみ制御三軸圧縮試験結果によると、ピーク強度を超えるとひずみ軟化が生じ、見掛け上の弾性係数を経て残留強度に至る特性を有している。この岩石特性が岩盤にも適用できると仮定し、ひずみ軟化解析を実施した。D断面の解析にあたっては、破碎帯F-V、流れ目の節理等の不連続面も考慮して解析を行った。

解析結果の1例として掘削完了時の応力状態を図-5に示した。これより、初期地圧状態にあった岩盤応力は、掘削に伴い壁面近傍に応力集中し、岩盤のピーク強度に達した時点で破壊が生じ、残留強度に見合うまで応力が再配分されて深部の新鮮な岩盤へ伝達された状態を示している。

掘削に伴う岩盤内の変位の発生状況を図-6に示した。これより解析値は実測値の変形モードと良く対応しており、破碎帯F-Vの影響を再現しているものと判断される。

また、空洞壁面より3mと9m付近の掘削に伴う鉛直方向応力の変化について今回実施した各種計測器のデータと対比させて図-4に示した。これより、実測の応力変化とほぼ対応した傾向を示しており、不連続面を有する岩盤の応力状態をほぼシミュレートできる見通しが得られた。

6. おわりに

大断面空洞の掘削に伴う周辺岩盤の挙動を岩盤応力に着目して分析した結果の一部を報告し

た。空洞側壁中央部に埋設した各種計測器より空洞掘削に伴う側壁周辺岩盤の応力変化に関する計測データが得られたとともに、不連続面をモデル化したひずみ軟化解析によりその応力状態をほぼシミュレートできる見通しが得られた。今後も空洞の安定解析ならびに支保設計の精度向上を追求していくこととしている。

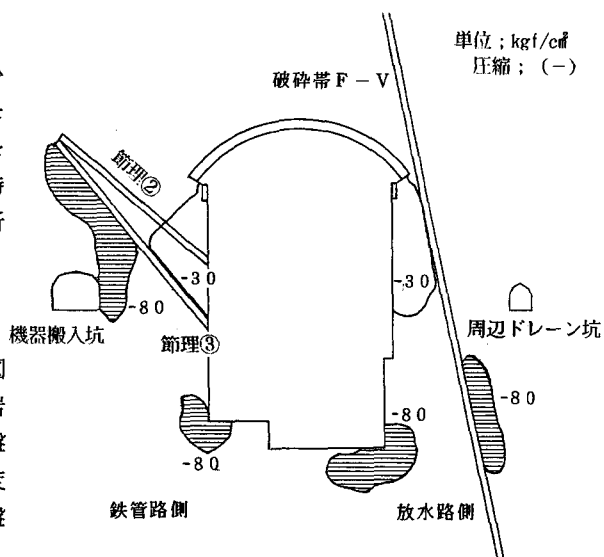


図-5 最大主応力分布（ひずみ軟化解析）

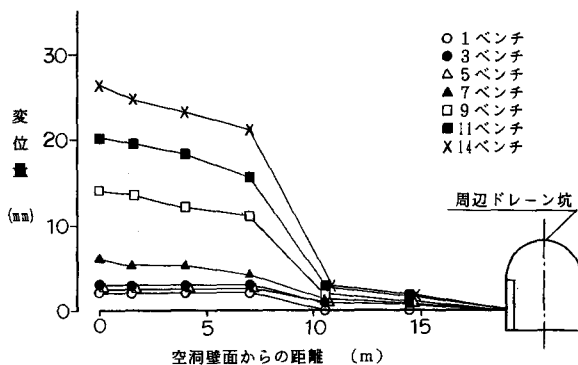


図-6 水平方向変位（ひずみ軟化解析）