

(66) 孔内亀裂の進展から見た大規模地下空洞掘削時の岩盤挙動

(株)ニュージェック 正会員 ○中村 隆浩 浦山 克
関 西 電 力(株) 正会員 打田 靖夫 原田 俊之
(財)電力中央研究所 正会員 金川 忠 宮腰 勝義
山 口 大 学 工 学 部 正会員 石田 毅

Rock Behavior by Crack Development during Underground Cavern Excavation

Takahiro NAKAMURA, Masaru URAYAMA,

NEWJEC Inc.

Yasuo UCHITA, Toshiyuki HARADA,

The Kansai Electric Power Co., Inc.

Tadashi KANAGAWA, Katsuyoshi MIYAKOSHI,

Central Research Institute of Electric Power Industry

Tsuyoshi ISHIDA,

Yamaguchi University

Abstract

Mechanical rock behavior with underground cavern excavation was investigated mainly using the data of BTV observation. The borehole cracks found by BTV was classified into two type: the newly generated cracks and the other ones. On the former the location, generating period and progressing state, and on the latter the location where and the period when crack width increased were clarified. And this development of cracks clarified by the BTV observation was compared with the measured data of vertical strains, horizontal relative displacements and AE. As the result, the investigation gave us important information to get better understanding of the rock behavior with the excavation.

1. はじめに

地下発電所空洞や石油地下備蓄空洞等の大規模地下空間に対する社会的ニーズが最近高まってきている。そこで著者らは、将来の大規模地下空洞設計への一助とする目的で、地下式揚水発電所の空洞掘削工事を利用し、空洞掘削に伴う空洞周辺岩盤の挙動をBTV(ボアホールテレビジョン)による孔内観察、鉛直ひずみ測定、区間水平変位測定(スライディング・マイクロメータ)、AE(Acoustic Emission)計測、孔間弾性波速度測定、低圧透水透気試験を同一箇所ですべて集中的に実施した。その結果のうち本論文では、BTVによる孔内観察結果で認められた亀裂を新規亀裂と既存亀裂に分類し、新規亀裂については発生時期・位置及び進展、既存亀裂については開口幅の増大時期・位置に分けて検討を行った。次にこれらの亀裂の進展を鉛直ひずみ測定、区間水平変位測定、AE計測を用いて検討を行い、空洞掘削に伴う岩盤挙動の推定を行った。

2. 測定概要

今回、測定を実施した地下空洞は、図-1に示す幅24m、高さ46.6m、長さ134.5mの我国初の弾頭型の大規模地下発電所¹⁾で、かぶり厚約280mの地下深部に位置する。この地下空洞には図-1に示す様に本体空洞から20m離れた位置に併設トンネルが設けられている。今回実施した各種測定は、この併設トンネルより発電所本体に

向け水平方向下向き4°で穿孔した6本のボーリング孔を用いた。ボーリング孔は図-2のボーリング孔正面図に示す様に1.5mの格子状に配置しており、ボーリングNo.B1,B3,B6孔には各孔8個づつ計24個の67KHz共振型AEセンサー²⁾、B2孔には11個の鉛直ひずみ計³⁾、B5孔には16区間測定可能な水平相対変位測定用固定ジグ⁴⁾を埋設した。また、ボーリングNo.B4孔ではBTVによる孔内観察⁵⁾、AEセンサーを利用した孔間弾性波速度測定、低圧透水・透気試験⁷⁾を実施した。これらの各種計器の埋設位置及び測定区間を図-3に示した。各種測定の初期値は、図-1のサイロット①の掘削が終了した時点で実施した。BTVによる孔内観察、区間水平変位測定は各ベンチ掘削後に測定を行い、AE計測は、図-4のような計測対象領域を設定し、発破直後から2時間まで連続計測を行った。また、鉛直ひずみ測定は図-4の計測対象領域内での掘削時の発破30分前、発破直後、発破後15分、30分、2時間、6時間、12時間、24時間で測定を行い、その他の場合は1日1回の自動測定を実施した。

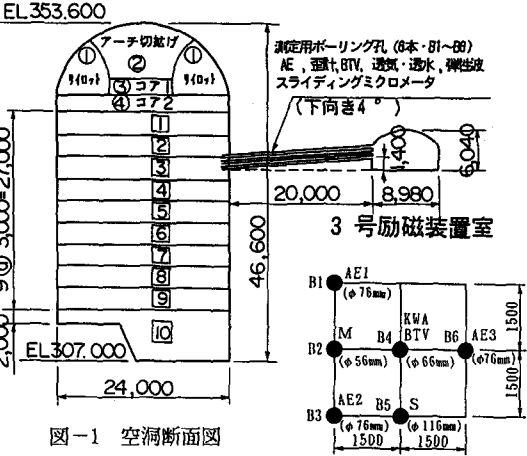


図-1 空洞断面図

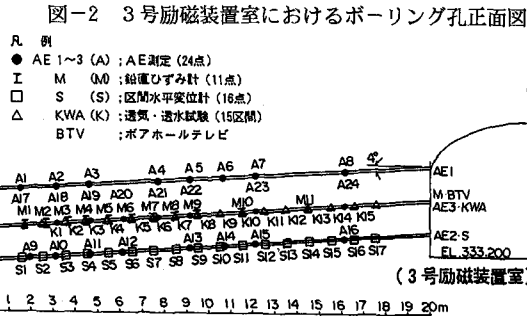


図-2 3号励磁装置室におけるボーリング孔正面図

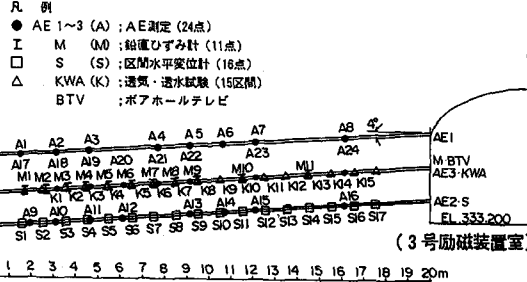


図-3 計器の埋設位置及び測定区間

3. 測定結果

3.1 掘削に伴って生じる孔内亀裂の進展

BTVによる孔内観察は、空洞掘削によって生じる空洞側壁部の岩盤挙動を把握するために実施した。孔内観察結果を図-5に示す。図-5 Aは、サイロット①掘削後の初期状態における1m当りの密着亀裂と開口亀裂の本数を示している。この図より、密着亀裂と開口亀裂の合計本数は、空洞側壁から14mまではほぼ一定であるが、14m~20mの位置では多く存在している。

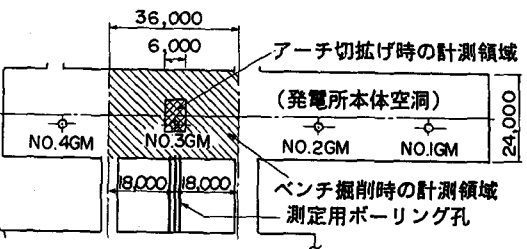


図-4 計測対象領域平面図

特に18m~20mでは開口亀裂の本数が多くみられる。このことより、併設トンネルの掘削の際に生じた岩盤の損傷領域の範囲は、併設トンネル側壁から2m付近までおよんでいると考えられる。図-5 B~Eは、空洞掘削によって生じる新規亀裂の発生及び進展、既存亀裂の開口幅の変化が見られた亀裂本数の増分を示している。ここでの新規亀裂の定義は、初期の観察で亀裂が認められなかった位置において、ベンチ掘削が進むにつれ新たに発生した亀裂としている。また既存亀裂の定義は、初期観察の時点で認められた密着亀裂、開口亀裂としている。図-5 Bの初期状態~ベンチ②掘削後での亀裂本数の増分はあまり見られない。図-5 Cのベンチ②掘削後~ベンチ③掘削後での亀裂本数の増分は、空洞側壁より0m~2m, 4m~6m, 10m~11m, 14m~17mの区間で新規亀裂が多く発生している。図-5 Dのベンチ③掘削後~ベンチ⑦掘削後での亀裂本数の増分は、空洞側壁より8m~12mの区間で新規亀裂、開口幅に変化が見られた既存亀裂が増加している。しかし、亀裂発生本数の増分の絶対数は図-5 Cに比べ減少している。図-5 Eのベンチ⑦掘削後~空洞掘削完了での亀裂本数の増分は、空洞側壁より4m~13mの区間で亀裂開口幅に多くの変化が見られる。この亀裂の特徴としては、開口幅の変化が生じた亀裂はベンチ③掘削後以降に発生した新規亀裂の進展によるものが多いことが挙げられる。

3.2 水平方向の岩盤挙動

水平方向の岩盤挙動は、最初の計画では区間水平変位計を用いて測定する予定であったが、ベンチ④掘削後の測定で不能となった。この原因を究明する為、計測孔にファイバースコープを挿入して直接観察したところ、孔口より1mの位置において塩ビパイプの左上部が押されるような変形を生じているのが確認された。さらにB4孔の1.5m上部のB3孔でも図-6に示す様な変形が、孔口より1.9mの位置で肉眼で確認された。また、この現象が始まった時期は、水平変位測定でゾンドを挿入する際、塩ビパイプに接触し、やや入りづらかったことから推定すると、ベンチ③掘削時と考えられる。図-7は、1m区間における水平変位を各測定ベンチ毎の増分で示したものである。図-7にはベンチ③掘削後以降のデータを補うため、BTVによる孔内観察結果から得られた水平変位の結果も示している。図-7A,Bの初期値〜ベンチ②掘削後では、区間水平変位の変化はあまり見られない。図-7Cのベンチ②掘削後〜ベンチ③掘削後では、区間水平変位の変化は空洞側壁近傍から5m付近までの位置において増大が見られる。また、図-7A,B,Cより、BTVによる孔内観察結果から得られた水平変位の増分の分布と、

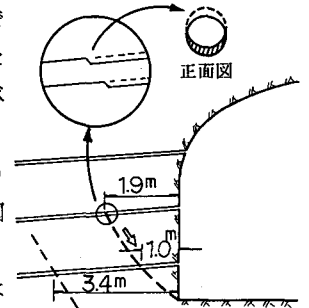


図-6 併設トンネル側壁の岩盤の動き

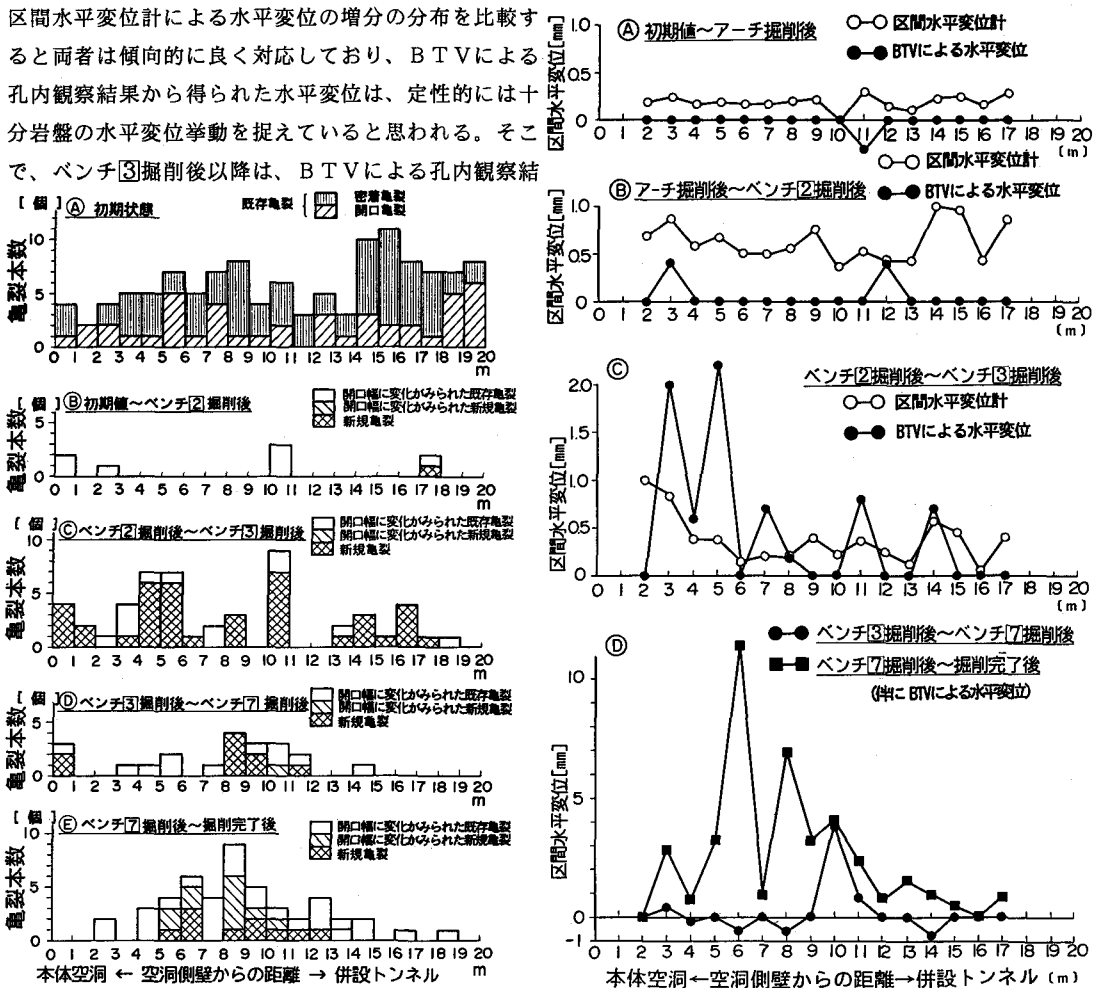


図-5 初期の亀裂状態及び掘削に伴って変化がみられた亀裂数の増分

図-7 掘削に伴う区間水平変位の変化

果から得られた水平変位を用いて岩盤挙動の検討を行う。図-7Dの●印で示されたベンチ③掘削後～ベンチ⑦掘削後での区間水平変位の変化は、空洞側壁より10m付近で顕著な増大が見られる。図-7Dの■印で示されたベンチ⑦掘削後～本体掘削完了での区間水平変位の変化は、空洞側壁より5m～9m付近で顕著な増大が見られる。図-5D,Eと図-7Dを比較すると、水平変位の増大位置と時期は新規亀裂の発生及び進展に密接な関係がある事がわかる。

3.3 鉛直方向の岩盤挙動

鉛直方向の岩盤挙動は、今回の測定では鉛直ひずみの増減、新規亀裂の発生、AEの発生といった現象で捉えることができる。図-8の棒グラフは各ベンチ掘削対象領域内の掘削によって生じたAEの発生個数、●印はAE計測期間中に变化した鉛直ひずみの増分、○印は鉛直ひずみの初期値からの累積を示している。図-8Aの初期値～アーチ切り上げ掘削後における鉛直ひずみ増分は、空洞側壁より4.5m～5.5m, 8.5m位置で圧縮側に増加している。AEにおいては、空洞側壁側に若干の発生が見られるが、鉛直ひずみの変化位置との対応は見られない。図-8B,Cのベンチ①, ②掘削対象領域における鉛直ひずみ増分は、空洞側壁から1.7m～2.7mの位置で引張り側に向かう傾向がある。ベンチ①掘削時のAE個数は、空洞側壁より1.7mの位置で多く発生し、鉛直ひずみの増分が引張り側に変化する位置と良く対応している。ベンチ②掘削時のAE個数は、空洞側壁から4.7mの位置で多く発生しているが、この時点では鉛直ひずみ増分との関係はあまり認められない。図-8Dのベンチ③掘削対象領域における鉛直ひずみ増分は、空洞側壁から1.7m, 2.7mの位置において、これまで引張り側にあったものが、鉛直ひずみの累積を初期の状態に戻すように圧縮側へと変化している。これらに変わり、これまで空洞側壁から4.5mの位置で圧縮側にあった鉛直ひずみ増分は引張り側に変化し、空洞側壁から5.5mの位置ではその荷重を受けもつ様に圧縮側に変化している。これらの荷重の移動に対応するように、AEの発生も空洞側壁より4.7mの位置で最大値をとっている。このAEの発生位置はベンチ②掘削中でもAEが多く発生しており、上述の兆候をベンチ②の時点で捉えていた可能性がある。また、この位置は図-5C, 図-7Cにおいて、新規亀裂の発生、水平変位の増大も見られる。図-8Eのベンチ④掘削対象領域における鉛直ひずみ増分は、ベンチ③掘削時の傾向が顕著に継続している。この現象は、

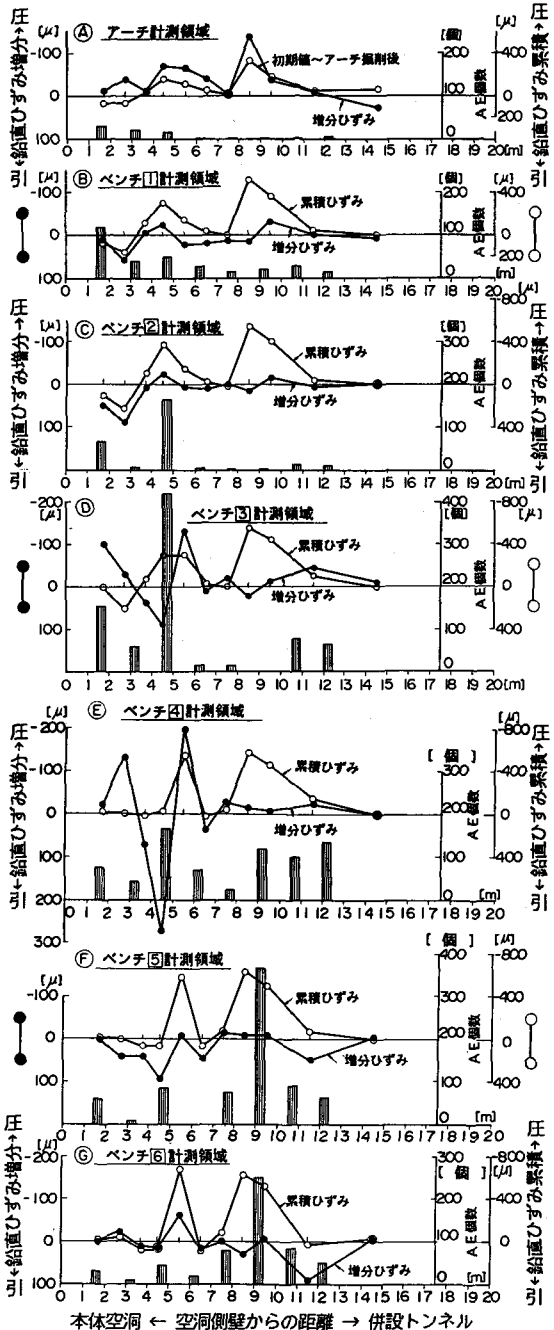


図-8 掘削に伴う鉛直ひずみ、AEの発生の変化

図-8C,D,Eの鉛直ひずみの累積値である○印に着目すると、空洞側壁より4.5mから5.5mの位置へ圧縮側のピークが遷移する現象として現われてくる。また、空洞側壁より1.7m~4.5mの位置では、ベンチ③掘削後まで引張側及び圧縮側にあった鉛直ひずみの累積値が、ベンチ④掘削時以降では初期の状態に戻っている。そのため、ベンチ③掘削後以降、図-5D,Eに見られるように、この位置では開口幅に変化が見られる亀裂はあまり生じていない。ベンチ④掘削対象領域におけるA Eの発生は空洞側壁より4~5m, 9~12mの位置で多く発生しており、4~5mについては鉛直ひずみ増分の変化と良く対応している。しかし、空洞側壁より9~12mの位置のA Eの発生については、鉛直ひずみ増分の変化量とは対応はつかない。図-8F,Gのベンチ⑤, ⑥掘削対象領域における鉛直ひずみ増分は、ベンチ⑤においては空洞側壁より4.5m, 11.5m, ベンチ⑥においては11.5mにおいて引張側に移動しているが、ベンチ④掘削時までには比べると変化量は小さくなっている。A Eの発生はベンチ⑤, ⑥共に空洞側壁から9~10mの位置で多く発生しているが、このベンチでもA E発生位置と鉛直ひずみ増分の変化位置とはあまり対応は見られない。このA Eの発生原因を、図-5D, 図-7Dのベンチ③掘削時からベンチ⑦掘削時のBTVによる孔内観察結果から推定すると、この位置において新規亀裂の発生と水平変位の増加が捉えられており、このA Eの発生原因は水平方向成分の挙動によるものと考えられる。

4. まとめ

今回の測定結果では、計器埋設位置の岩盤の挙動は、この位置を掘削する上下で大きく変わることが捉えられている。1).掘削位置が計器埋設位置より上部の場合は、顕著な岩盤の動きはみられない。2).掘削位置が計器埋設位置の真横にあたるベンチ③掘削時では、空洞側壁近傍から5m付近までにおいて水平変位が増大している。この水平変位が増大位置においては、発破による岩盤の損傷、側方拘束力の減少によるものと考えられる新規亀裂が多く発生している。この新規亀裂の発生に伴い、これまで荷重を受け持っていた空洞側壁から4.5mの位置で岩盤が荷重を受けもたなくなり、荷重を受けもつ位置が5.5mの位置に移動している。また、A Eにおいても、この一連の岩盤挙動を捉えるようにこの位置付近で多く発生している。3).掘削位置が計器埋設位置より下部にあたるベンチ④掘削時以降の場合では、空洞側壁より9m付近において、空洞掘削に伴い水平変位が増大が生じている。この水平変位が増大位置においては、亀裂の開口幅が増大している。このことは、ベンチ掘削の進行により、側方拘束力の減少した側壁岩盤の領域が増加したため、さらに水平変位が生じやすくなったためと考えられる。この亀裂の開口は、既存亀裂の開口量の増大よりも、新規亀裂の開口幅の進展による開口量の増大による影響が大きい。また、この亀裂が開口した位置は、鉛直ひずみの累積値が圧縮側にピークを示し、かつA Eも多く発生している。

参 考 文 献

- 1) 原田・片山・矢田；大河内水力発電所地下発電所空洞の設計と施工，電力土木，pp.46~57,1991.1。
- 2) 石田・金川・土山・百瀬；高周波A E測定による地下発電所空洞掘削時岩盤挙動の観測，第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集に投稿中。
- 3) 石田・金川・矢田・田仲；空洞掘削時の応力再配置に着目した岩盤ゆるみ域測定法の提案，第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.227~231。
- 4) Kovari, K. and Petter, G. ; Continuous strain monitoring in rock foundation of a large gravity dam, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.16, pp.157~171, 1983
- 5) 亀和田・遠藤・国分・西垣；BIPシステムの装置とその能力について，第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.196~200。
- 6) 打田・原田・金川・浦山；地下発電所空洞掘削における側壁岩盤の挙動，第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集に投稿中。
- 7) 中村・浦山・打田・内藤・中川・宮腰；大規模地下空洞掘削に伴うゆるみ計測について，土木学会，第46回学術講演会，pp.618~619。