

大規模地下空洞掘削に伴う空洞側壁の鉛直方向挙動

Vertical direction behavior of large rock cavern side wall due to excavation

森 聡・平川 芳明・吉田 次男

Satoshi Mori, Yoshiaki Hirakawa and Tsugio Yoshida

It is very important to get the behavior of rock mass around the large rock cavern for evaluation of stability of the cavern like the underground power station. We have done various measurements to grasp them during excavation of a underground power station. In this report, We paid attention to the perpendicular direction displacement, which was measured by newly developed device, in various measurement results and discussed the perpendicular direction behavior of rock mass. As a result, in the cavern sidewall, the perpendicular direction showed discontinuous behavior, and the tendency is especially remarkable in the area where new cracks are occurred by excavating.

1. はじめに

地下空洞周辺岩盤の挙動は、不連続面の存在に大きく支配されることが経験的に知られている。著者らは、大河内地下発電所（関西電力株）の地下空洞掘削時における各種測定結果より、側壁岩盤（ひん岩）の挙動に関する多くの知見を得た^{1) 2) 3) 4)}。すなわち、その挙動は、流れ目とさし目の不連続面群の存在および掘削に伴う応力再配分の影響で、側壁岩盤が滑りを生じたものであり、その過程で岩盤内の鉛直方向応力分布は深度方向に不規則な形状を示した。しかし、これらの知見は必ずしも一般性のあるものとは断定できず、特に空洞周辺岩盤の応力分担機構や変形挙動は、空洞周辺岩盤の応力状態や不連続面の幾何学的な形状に大きく支配されることが予想される。著者らは、大河内地点で得られた岩盤の挙動に関する知見をさらに一般的なものに拡張することを目的として、流紋岩質で卓越不連続面群の方向が大河内地点と異なり、連続性の高いシーム等もの少ない奥多々良木増設地下発電所の地下空洞（平成8年6月掘削終了）において空洞掘削時の側壁岩盤挙動の計測を行った。当地点の岩盤は、大河内地点にくらべて不連続面が少なく、B～C_H級の比較的マシな岩盤である。本報では、各種計測結果のうち鉛直方向相対変位測定結果、岩盤内鉛直ひずみの測定結果とボアホールスキャナーによる亀裂観察結果にから検討した岩盤挙動について報告する。

2. 地点概要

奥多々良木増設発電所は、多々良木川左岸、眉谷の南側のほぼ西側に40°で傾斜する屋根の直下に位置する、高さ47m、幅25m、長さ80mの弾頭型地下空洞である。土被りは210～280mであり、地質的には、発電所のほぼ中央から両側にかけてひろく流紋岩質凝灰岩が分布し、これを取りまくように、流紋岩質凝灰岩、凝灰角礫岩が分布する。岩質はいずれも風化の少ない新鮮かつ堅硬なB～C_H級岩盤が占める。

* 正会員 株ニューージェック 技術開発部

** 正会員 株ニューージェック 技術開発部

*** 正会員 関西電力株総合技術研究所

不連続面は破碎帯および岩脈（ひん岩）は、NS- $N30^{\circ}W/70\sim90^{\circ}E$ が卓越している。節理シームは、 $N70^{\circ}W\sim EW/80^{\circ}N$ が卓越しており、この2方向が空洞全体における卓越方向となる。前者は空洞長軸方向とほぼ水平な走向を有し、後者はほぼ垂直な走向方向である。図-1に、事前調査段階における不連続面の卓越方向を示す。

3. 計測方法

3. 1 計測概要

奥多々良木地点の地下空洞の形状、掘削ステップおよび計測測線の配置を図-2に示す。測定は、放水路側壁岩盤を対象とし、事前に掘削されるバイパストネル（既設発電所連絡横坑）より合計4本のボーリングを実施して、計測を行った。計測項目は、ボアホールスキャナーによる孔内観察、鉛直方向変位測定、水平方向および斜方向の相対変位測定、岩盤内微小ひずみ測定である。表-1に、ボーリング坑における計測項目および計器の仕様を示す。測定断面は、最大断面となるB断面とした。計器は、ひん岩の岩脈が空洞壁面から5~10mの範囲で出現すると推定されていたので、空洞側壁から15m付近までの範囲に集中的に計器を配置することとした。

3. 2 計測方法

ボアホールスキャナーによる孔内観察は、B1孔~B4孔において計器埋設時、およびB1孔でリフト3, 5, 7, 9, 10掘削後に行った。観測は、センサー部であるプローブを孔奥にセットし、毎秒約1~2cmの速さで巻きとりながら、孔内を撮影した。観測画像は、すべてデジタルデータレコーダーおよびビデオテープレコーダーにデジタルデータとアナログデータとして記録した。なお、B1孔については、高精度の深度計（精度0.1mm）を併用し、孔長の測定も精密に行ったため、巻きとり速度は0.2~0.3cm/sとした。

鉛直方向変位は、各リフト掘削後に行い、著者らの考案した水圧計型の装置⁵⁾を用いた。測定は、ボーリング孔口とボーリング孔内の水頭差を孔軸方向に50cmピッチで測定し、各掘削段階における水頭差を鉛直方向の相対変位とした。

水平方向（B2孔）および斜方向（B4孔）の相対変位測定には地中変位計を使用した。アンカー点数は、いずれも8点である。しかし掘削中計測器に事故が発生したため途中から6点式に変更している。変換器部の外径はφ70mmであり、φ76mmのボーリング孔に埋設できる。測定範囲は0~100mmであり、変換器はポテンショメータ型である。

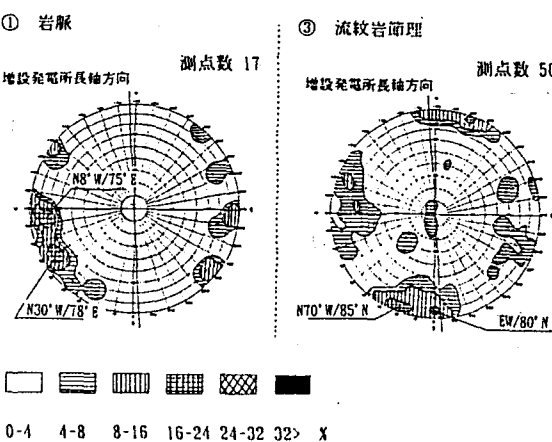


図-1 不連続面の卓越方向

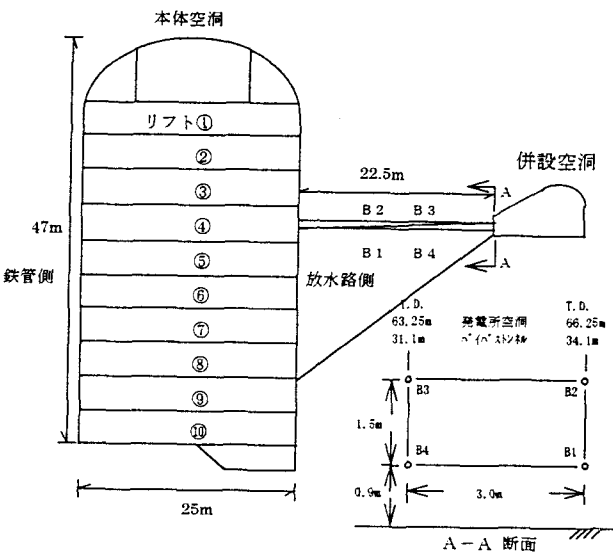


図-2 空洞形状と計測位置

表-1 各計測孔と計測項目			
孔番号	孔径	角度	測定項目
B1	86mm	水平	BTBによる孔内観察 鉛直方向相対変位測定
B2	76mm	水平	水平方向相対変位測定
B3	66mm	下向き4°	岩盤内微小ひずみ測定
B4	76mm	下向き30°	斜方向相対変位測定

岩盤内微小ひずみの測定には、電中研式地圧測定ゲージのゲージ素子として実績のある BS-5B 型小標点距離ひずみ計を改良した埋設型微小ひずみ計⁹⁾を用いた。岩盤変位と岩盤内微小ひずみは、1日1回の自動計測とした。

3. 3計測地点の岩盤物性

先に述べたように計測に際し4本のボーリングを行っている。このボーリング孔とコアを用いて孔内載荷試験およびポイントロード試験を行っている。孔内載荷試験はバイパストネル孔口より1mピッチで行った。ポイントロード試験も同様にボーリングコアに対し1mごとにサンプリングを行いこれを試験に供した。試験結果を表-2、3に示す。孔内載荷試験結果、ポイントロード試験結果は、いずれのボーリング孔においても深度方向や岩種によらずほぼ一定値を示しており、計測地点の岩盤がほぼ均一であることが明らかになった。また、変形係数、一軸圧縮強度から計測地点の岩盤はB～C_H級と推定される。

表-2 孔内載荷試験結果

	流紋岩	ひん岩
最大値	71400	60600
最小値	1200	55500
平均値	55000	57300
標準偏差	4700	800

単位:kg/cm²

表-3 ポイントロード試験結果

	流紋岩	ひん岩
最大値	2400	2400
最小値	160	310
平均値	1220	1330
標準偏差	410	510

単位:kg/cm²

4. 空洞側壁の岩盤挙動計測結果とその考察

4. 1 岩盤状況

B1孔におけるRQD値および岩級、岩種を図-3に示す。図はバイパストネル孔口を基準にしている。岩級はC_H級が全体の55%、C_M級が32%、C_L級が10%、B級が3%である。岩種は流紋岩とひん岩で流紋岩体にひん岩の岩脈が2本貫入している。地質境界はいずれの境界も完全に密着状態である。RQD値は孔口から6mまでの範囲でRQD値が低い領域が存在する。この傾向はB1孔以外の計測孔でも確認されておりバイパストネル掘削による影響であると考えられる。

4. 2 水平変位測定結果による岩盤挙動

B1孔から1.5m鉛直方向に離れたB2孔で得られた水平変位測定結果を図-4に示す。空洞掘削終了までのほらみだしは15mmであり、0～5m、14.5～16.5m、18.5～20.5mの区間で不連続な傾向が見受けられる。各計測区間における見かけのひずみは最大値となる18.5～20.5m区間でも0.2%程度にとどまり、巨視的にみれば岩盤の挙動は比較的弾性体的な挙動をしていると考えられる。

4. 3 亀裂観察結果

B1孔における亀裂観察結果を図-5に示す。上段は掘削終了時の全亀裂を下段には掘削によって発生した新規亀裂のみを示している。亀裂方向は孔軸にほぼ垂直な走向を有し急な傾斜を持つものが多い。今回初期値としたリフト5掘削終了時に観測された亀裂は61本、掘削により発生した新規亀裂は9本である。亀裂を、はく離亀裂、密着亀裂、鉱物脈に分類すると、全初期亀裂61本の内16本がはく離亀裂、27本が密着亀裂(地質境界も含む)、18本が鉱物脈であり、新規亀裂は9本中2本がはく離亀裂、7本が密着亀裂である。観察した亀裂の分類を表-4に示す。また、観察結果から求めた1m当たりの亀裂頻度分布と開口幅の増分分布を図-6に示す。亀裂は4～5m、8～9m、15～17m、20～23mで発生しているが1m当たり1、2本であり、その分布は不規則である。方向は空洞長軸方向にほぼ水平な走向を持つ急傾斜のものが多い。

表-4 観察した亀裂の分類

区分	初期状態	掘削後	合計
鉱物脈	18	0	18
密着亀裂	27	7	34
はく離亀裂	16	2	18
合計	61	9	70

単位:本

開口幅に関しては新規亀裂の発生している近傍で初期亀裂の開口幅が増加している傾向があるが、そ大きさは0.2～0.6mmにとどまる。また、孔口から21m区間における開口幅の増分の累計は2.4mmとなり水平変位にしめる亀裂の開口に

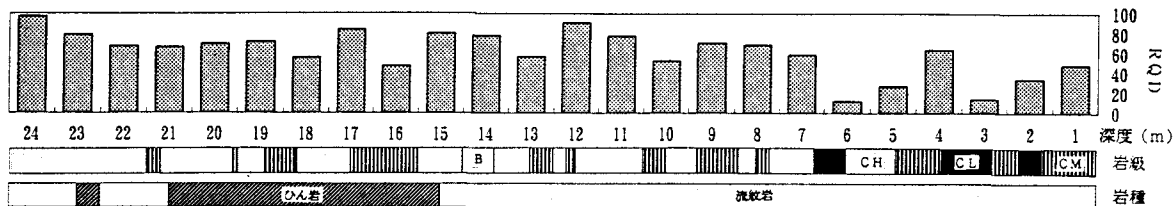


図-3 B1孔周辺の岩盤状態

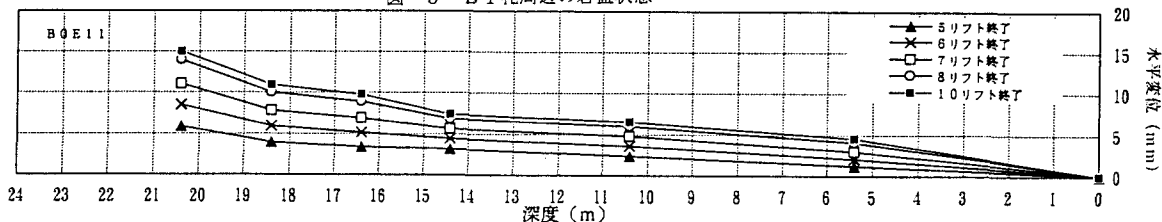


図-4 水平方向変位計測結果

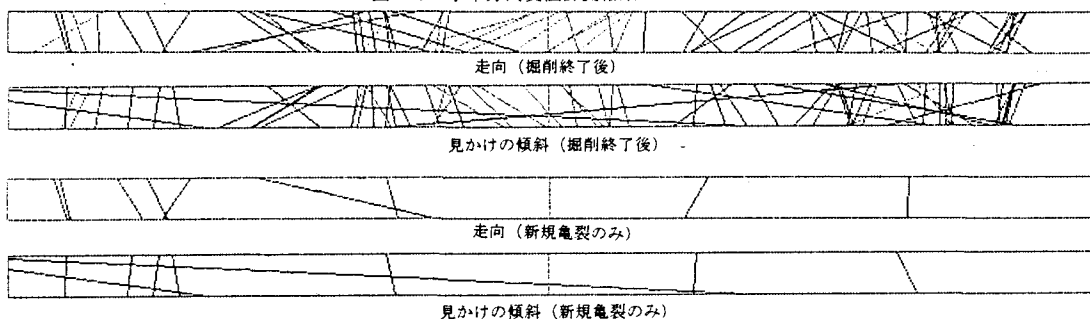


図-5 亀裂観察結果

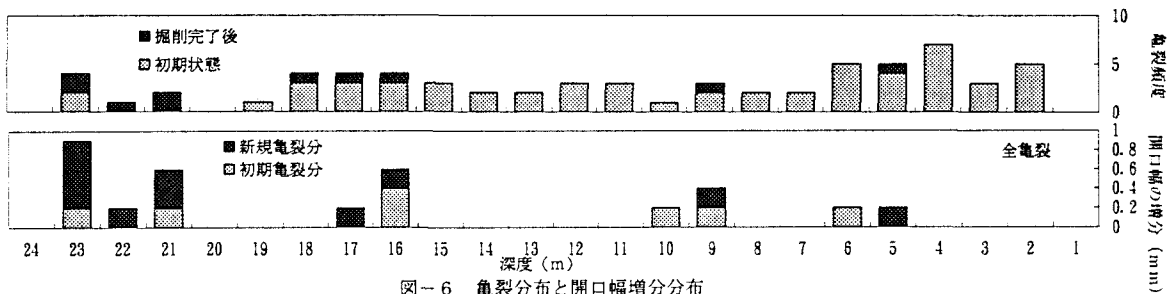


図-6 亀裂分布と開口幅増分分布

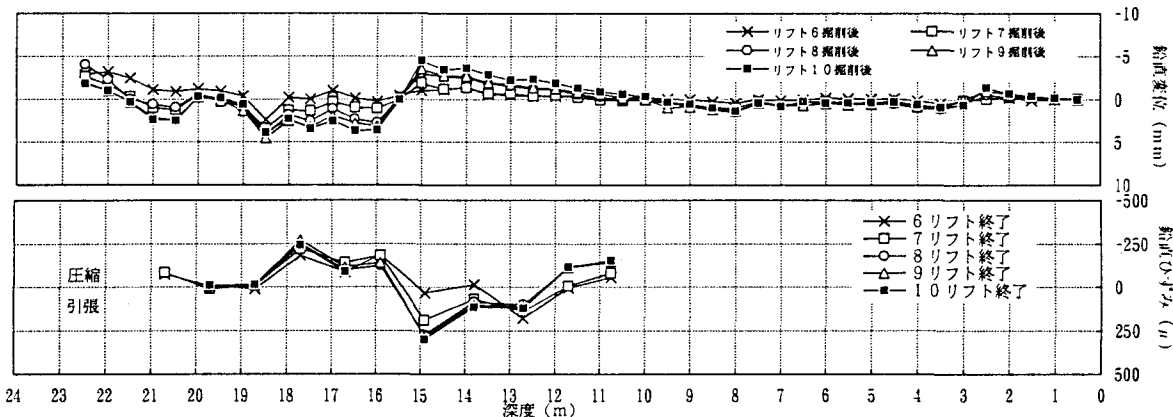


図-7 鉛直方向相対変位と鉛直ひずみの分布

よる割合は24%程度で、水平方向の変位は岩盤中の亀裂を考慮しても弾性変形などの亀裂の開口以外の変形が支配的であると考えられる。

4. 4岩盤側壁の鉛直方向挙動

鉛直方向の挙動計測結果として5リフト以降の掘削における鉛直方向相対変位の変化および岩盤内鉛直方向ひずみの変化を図-7に示す。鉛直方向の挙動として次の特徴が認められる。鉛直方向変位は、深度が11～15mの区間で本体空洞に向かって連続的に隆起する傾向がある。15.5mの位置で連続的に隆起傾向にあった変位が急激に沈下傾向を示し分布が不連続になる。16～18m間と20.5～21.5m間で沈下傾向を示し、この区間内の変位量は、ほぼ一定である。また、この区間の前後で変位分布は不連続になる。このような挙動から16～18m間と20.5～21.5m間では岩盤が1～2m程度の岩塊として挙動していることが推察される。

鉛直ひずみは16m以深ではほとんど変化がみられないが14～15mでひずみの緩和、10.5～13mで圧縮の傾向が見られ、その分布は不規則である。亀裂観察結果と比較すると亀裂の発生や亀裂の開口幅が増加する近傍で鉛直変位分布やひずみ分布は不連続になる傾向が見受けられ、新規亀裂や亀裂の開口が不連続的な変位挙動や、ひずみ挙動の要因となっていることは明らかである。このような亀裂の影響による岩盤の不連続体的な挙動は大河内地点で得られた知見と類似している。しかし、本計測結果から得られた不連続体的な岩盤の挙動は、大河内地点で計測された、ゆるみ領域の形成要因となる不連続面の滑りや、はく離のような、岩盤の構造系を大きく変化させる挙動ではなく、岩盤全体は概ね弾性体的な挙動を示すが、部分的な不連続面の変化、つまり岩盤全体かみると微視的な構造系の変化によるものであると考えられる。

5 まとめ

奥多々良木増設地下発電所の地下空洞において空洞側壁岩盤挙動を計測した。その内ボアホールスキャナーによる亀裂観察結果と、鉛直方向相対変位測定結果を中心に岩盤挙動を検討し、次のことが明らかとなった。

- ①空洞掘削にしたがって側壁岩盤が沈下傾向を示す領域が発生し、その挙動は不連続である。
- ②岩盤内微小ひずみの分布は不規則になる。
- ③鉛直変位が沈下傾向になる近傍では亀裂の発生や開口幅の増加がみられる。
- ④空洞側壁付近の岩盤は1m～2mの岩塊として挙動していることが推測される。

本報では、鉛直方向の変位測定を試みたB1孔の挙動を中心として報告したが、今後、岩盤内微小ひずみ測定結果の詳細な検討や大河内地点との比較検討も行う予定である。

参考文献

- 1) 打田靖夫・原田俊之・金川忠・中川加明一郎・浦山克・中村隆浩・石田毅：地下発電所空洞掘削における側壁岩盤の挙動、第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.316～320、1992.02
- 2) 打田靖夫・原田俊之・前田稔・浦山克・平川芳明：大規模地下空洞掘削過程における不連続性岩盤の挙動、第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.336～340、1993.02
- 3) 平川芳明・浦山克・打田靖夫・吉田次男・金川忠：大規模空洞掘削時のゆるみ領域の進展に関する一考察、第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.695～700、1994.01
- 4) 打田靖夫・吉田次男・浦山克・平川芳明：ボアホールテレビによる亀裂観察結果から見た大規模空洞掘削時の岩盤挙動の検討、土木学会論文集、No.517/Ⅲ-31、1995.6.
- 5) 吉田次男・森 聡・平川芳明：孔内挿入型の鉛直方向相対変位装置の開発と原位置への適用、トンネル工学研究論文・報告集第6巻、pp.275～278、1996.11
- 6) 石田毅・金川忠・矢田篤・田中正弘：空洞掘削時の応力再配分に着目したゆるみ領域測定法の提案、土木学会論文集、No.457/Ⅲ-21、pp.41～50、1992.12.