

不連続面特性の異なる大規模地下空洞の岩盤挙動について

THE BEHAVIORS OF DISCONTINUITIES AT TWO LARGE ROCK CAVERNS

森 聡*・吉田次男**・平川芳明*
 Satoshi Mori, Tugio Yoshida and Yoshiaki Hirakawa

The behaviors of discontinuities in side of walls at two large rock caverns during excavation were compared.

A correlation between the degree of initial discontinuities, as well as the total initial crack width and the difference of total crack width before and after excavations was observed.

Degree of initial discontinuities and the total initial crack width were the effective parameters to predict the deformation of the rock mass in the field.

1. はじめに

地下発電所などの大規模地下空洞の挙動は、岩盤中の不連続面の挙動に支配されることが知られている。

近年、これらの不連続面挙動に着目してBTV（ボア-テレビ）等を用いた岩盤内の不連続面挙動が観測されるようになり、空洞掘削に伴う不連続面の挙動がより明確に把握できるようになってきた。

関西電力(株)においても、大河内発電所および奥多々良木発電所の地下空洞掘削時に空洞側壁岩盤の不連続面観察が実施され、種々の知見が得られている。¹⁾

²⁾ しかしながら各地点毎の岩盤挙動と不連続面挙動に関する知見は得られているものの、掘削中の不連続面観察が実施されている地下発電所が少ないこともあり、多地点での不連続面特性と岩盤挙動の比較や掘削に伴う不連続面の変化と岩盤挙動に関する統一的な検討がなされた事例は少ない。

本稿では、不連続面特性の異なる地下発電所における岩盤挙動を不連続面観察結果に基づいて比較することを目的とし、関西電力(株)の大河内発電所地下空洞と奥多々良木発電所地下空洞における不連続面観察結果の事例を紹介するとともに、両地点での不連続面挙動を比較検討した。

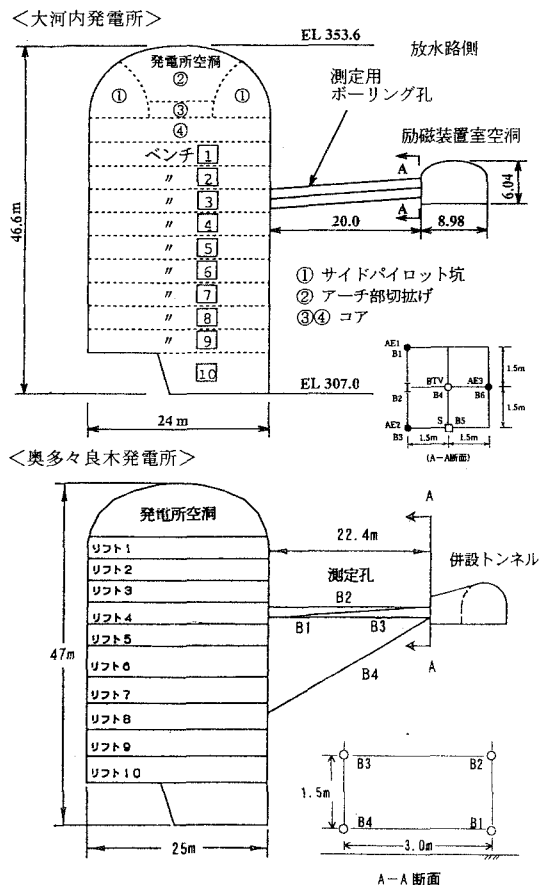


図-1 空洞形状と計測位置

* 正会員 株式会社 ニュージェック 技術開発部 地盤室
 ** 正会員 関西電力株式会社 総合技術研究所

2. 地点概要

検討の対象とした2地点の空洞形状および不連続面観察位置を図-1に示す。

空洞周辺の岩盤状況は、大河内地点は、中生代の生野層群に属するひん岩帯で、新鮮で硬質なCH級岩盤、奥多々良木地点は、風化の少ない新鮮かつ堅固なB～CH級の流紋岩帯である。

両地点の比較を表-1に示す。空洞形状は何れも弾頭型で高さは、約47m、幅は約25mとほぼ同規模の空洞である。その他、地山被り、空洞寸法、岩級、一軸圧縮強度、初期応力に関しても非常に類似している。

不連続面観察は、大河内地点では、放水路側に設置された励磁装置室からほぼ水平に掘削された裸孔（B4孔）においてBTVによって、奥多々良木地点では、同様に放水路側の併設トンネルから掘削された裸孔（B3孔）においてBSS（ポアホルスキャナシステム）によって実施されており、いずれの観測孔も本体空洞に対する配置は概ね同等である。

岩盤挙動を比較する上では、不連続面特性以外の特性は両地点でほぼ同等であり、岩盤挙動の差として表れる現象は、概ね不連続面特性の違いによるものであると考えられる。

3. 両地点の不連続面観察結果と比較

不連続面観察結果をもとに、掘削に伴う岩盤挙動の変化を初期状態と掘削に伴う変化に区別して整理した。

(1) 不連続面の方向

観察不連続面の極密度分布（下半球投影）を図-2に示す。初期状態（掘削前の状態）に着目すると、大河内B4孔では、N30W/70～90N、N30W/80～90Sすなわち、空洞壁面に対して急角度（60～90°）の流れ目、または、差し目が非常に多い、奥多々良木B3孔では、第1にN20E/V、N20W/Vの不連続面が卓越しており、両地点ともに2つの卓越不連続面群が確認できる。

次に、掘削により変化した不連続面（掘削により開口幅が変化した不連続面と鉱物脈の亀裂化も含む新規に発生した不連続面）は、大河内地点では、N20W/70～90Nすなわち空洞長軸方向にほぼ平行で、急角度なものが卓越し、奥多々良木地点ではN20E/70～90N、N20W/70～90Nと空洞長軸に±20°程度に交差する急角度なものが卓越している。何れの地点でも掘削面に対して高傾斜の流れ目または、さし目の不連続面の開口や亀裂化が多い。

(2) 不連続面の位置と開口幅

不連続面観察結果をそれぞれ水平面と鉛直面に投影したものを図-3に示す。図中不連続面の位置は、大河内地点に関しては、本体空洞からの距離として、奥多々良木地点に関しては、併設トンネルからの距離として記述している。また、これらの1m区間毎における成因別不連続面頻度分布を図-4に示す。

表-1 大河内発電所と奥多々良木発電所の比較

	大河内地点	奥多々良木地点
岩種	ひん岩	流紋岩
岩級	CH	CH～B
一軸圧縮強度	237MPa	187MPa
地山被り	約280m	210～280m
初期応力		

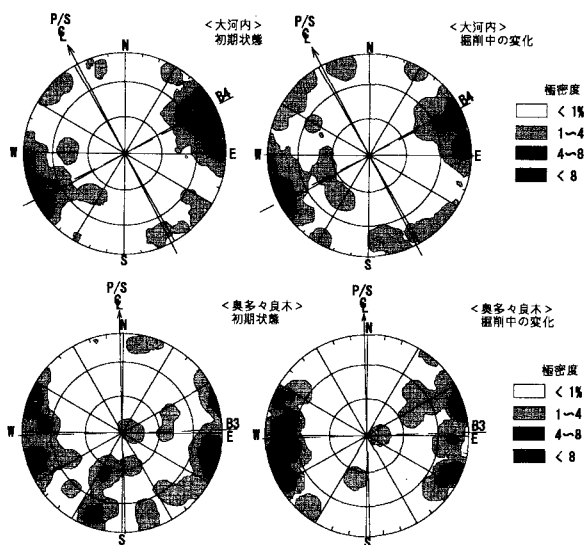


図-2 不連続面観察結果（極密度分布）

初期状態における個々の不連続面に着目すると、大河内地点は、初期状態では、測線全長にわたって、10本/m程度の不連続面分布を示している。

成因別の頻度を見ると、壁面から11~14m間では、方解石脈の頻度の高い領域があり、14m~18m間では、密着亀裂の頻度の高い領域がある。開口亀裂は、5~6m間、7~8m間、18~19m間で、他の区間の約二倍となっているが、全体的にその頻度は低い。全体的に、空洞長軸方向に平行な走向を有しているものが多い。

掘削中に変化した不連続面に着目すると、空洞近傍や4m~11m付近で、空洞長軸と走向がほぼ平行で、見かけの傾斜が高角度の不連続面に新規亀裂の発生および既存亀裂の開口が顕著である。また、新規亀裂の発生方向は、初期状態の不連続面の卓越方向によく一致している。

一方、奥多々良木地点では、大河内地点と比較すると全体的に亀裂頻度が低く、併設トンネル側から1~7m区間で密着亀裂の頻度が高い領域、5~14m間で鉱物脈の頻度の高い領域となっている。また、19~22.5m区間では、不連続面頻度が非常に低い傾向を示す。不連続面の方向は、1~4m間および14~17m間では、空洞長軸に平行で見かけの傾斜の高角度なものが多い。

掘削中に変化した不連続面に着目すると、1~2m間、14~17m間、21~22.5m間で既存亀裂の開口や新規亀裂の発生が確認できる。これらの新規亀裂も大河内地点と同様空洞長軸方向に平行で見かけの傾斜は高角度の流れ目となっている。

次に、掘削に伴う開口幅の累積値を図-5に示す。

大河内地点では、掘削に伴う不連続面変化の著しい本体空洞から約4m~11mまでの区間で開口幅の増加も著しい。この区間の部分的な亀裂開口ひずみ（亀裂開口幅の累積値を測線長で除した値）は約0.45%で岩盤の限界ひずみ（0.3%）を越えており、岩盤のゆるみ領域であると評価できる。奥多々良木地点では、掘削中に変化した不連続面が少ないため、亀裂開口ひずみが最大となる本体空洞近傍の区間でも0.2%程度と大きな開口ひずみにはつながっていない。

(3) 不連続面の頻度と開口幅の比較

初期状態、掘削中の変化および最終状態について、不連続面の種類別に頻度を算定したものを表-2に示す。

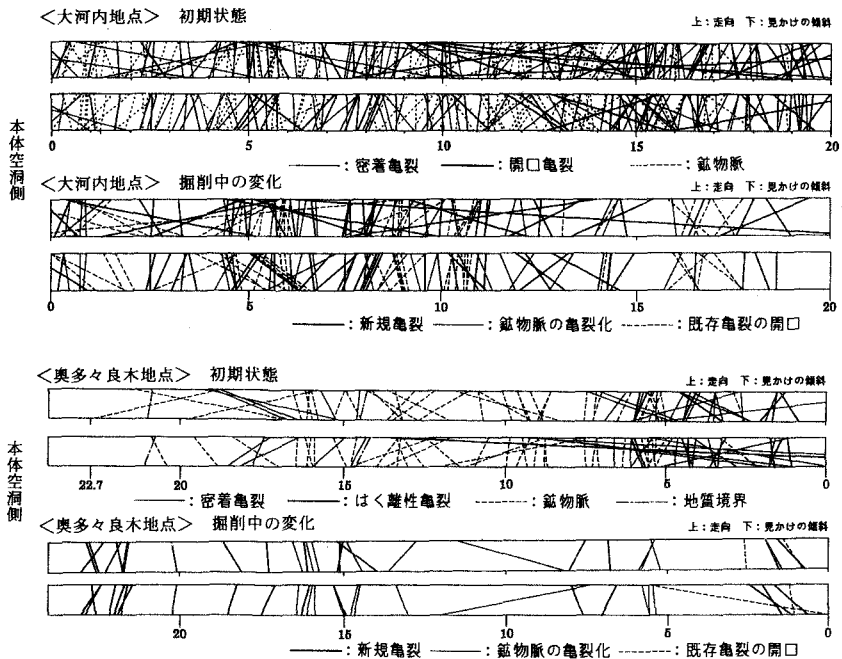


図-3 不連続面観察結果（走向、見かけの傾斜）

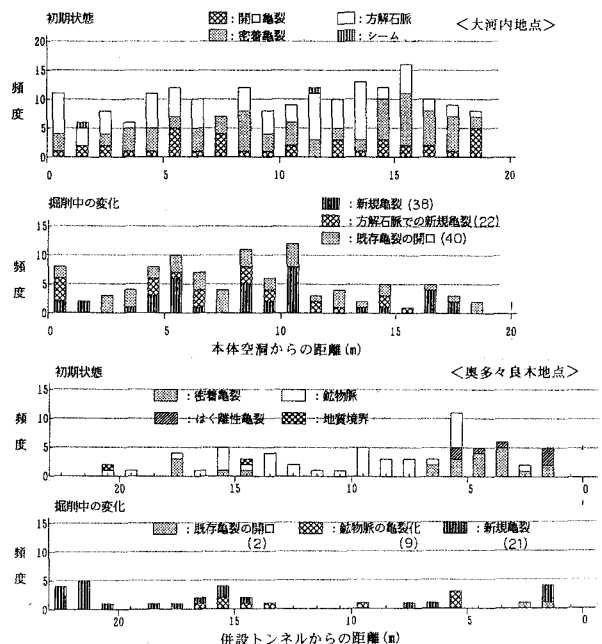


図-4 成因別不連続面頻度分布

ここで、不連続面の頻度は、観察測線全長にわたる性状別不連続面数を測線長で除して表している。また、表中には、亀裂開口幅についても整理して示した。

不連続面の頻度に着目すると、大河内地点においては、初期状態の亀裂(密着亀裂と開口亀裂の合計)が5.8本/m、鉱物脈が4.1本/m、不連続面全体で10本/mであったが、掘削により既存亀裂の開口、鉱物脈の亀裂化、新規亀裂の発生が生じ、最終状態では、12本/mとなる。掘削中に変化した不連続面頻度は、5.3本/mとなり、その内訳は開口幅が増大したものが38%、鉱物脈が亀裂化したものが23%、新規亀裂が39%である。

一方、奥多々良木地点においては、初期状態で亀裂が1.3本/m、鉱物脈が1.7本/m、不連続面全体で合計で3.1本/mであったが、最終状態では、4本/mとなっている。掘削による変化は、1.5本/mの頻度でその内訳は、開口幅の増大が8%、鉱物脈の亀裂化が24%、新規亀裂が68%となっている。

次に、掘削中に変化した不連続面頻度を成因別にみると、大河内発電所においては、既存亀裂の開口と新規亀裂の頻度が共に2本/m程度で多く、次いで鉱物脈の亀裂化となっている。一方、奥多々良木発電所においては、新規亀裂の発生頻度が最も多く、次いで鉱物脈の亀裂化、既存亀裂の開口となっている。このように、初期状態の亀裂頻度が小さい(1.3本/m)奥多々良木発電所では、既存亀裂の開口頻度が相対的に小さく、新規亀裂の発生頻度が相対的に高いという特徴を有している。

亀裂の開口幅に関しては、大河内地点では、初期状態の累積開口幅は約32mmであり、掘削により約55mm開口幅が増加した。累積開口幅を計測区間長で除した亀裂開口ひずみは掘削増分で0.29%と亀裂のみの変化ですでに限界ひずみと同等の大きさとなっている。一方、奥多々良木地点では、初期状態の累積開口幅は3.6mm、掘削による開口幅の増分は7.1mmであり亀裂開口ひずみも小さい。このように両地点で絶対値は異なるものの、掘削によって、初期状態の累積開口幅の2倍程度の亀裂開口幅の増加が生じている。

両地点における共通点としては、掘削による不連続面の変化は、初期状態の亀裂すべてに生じるわけではなく、一部の初期亀裂の開口と亀裂の発生(新規亀裂の発生と鉱物脈の亀裂化)という2つの機構によって生じること、掘削中に変化する不連続面頻度は、初期状態の亀裂頻度と概ね同等であること、掘削中に変化した

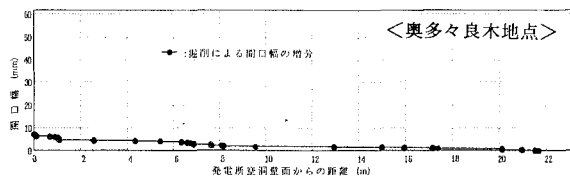
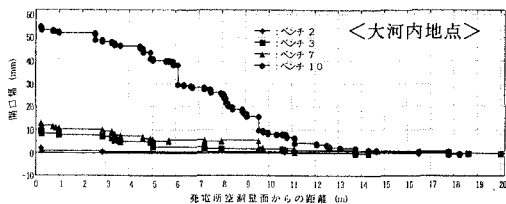


図-5 掘削に伴い変化した亀裂の累積開口幅

表-2 大河内地点と奥多々良木地点における不連続面の頻度と開口幅の変化

	大河内p/s(B4孔)				奥多々良木p/s(B3孔)			
	合計(本/m)	亀裂	鉱物脈	シーム	合計(本/m)	亀裂	鉱物脈	地質境界
初期状態	10.0	5.8	4.1	0.1	3.1	1.3	1.7	0.1
掘削中の変化	5.3	開口幅増大 2.0 (38%)	亀裂化 1.2 (23%)	新規亀裂 2.1 (39%)	1.5	開口幅増大 0.1 (8%)	亀裂化 0.4 (24%)	新規亀裂 1.0 (68%)
最終状態	12.0	9.0	2.9	0.1	4.0	2.7	1.2	0.1
開口幅	累積開口幅(mm)	亀裂開口ひずみ(%)	平均開口幅(mm)		累積開口幅(mm)	亀裂開口ひずみ(%)	平均開口幅(mm)	
	初期状態	32.32	0.17	0.29	3.60	0.02	0.12	
	掘削中の変化	54.80	0.29	0.55	7.10	0.03	0.22	
最終状態	87.00	0.46	0.51	10.70	0.05	0.18		

した亀裂の累積開口幅は、初期状態の亀裂の累積開口幅のおよそ2倍程度であることが挙げられる。

これらの亀裂の開口や亀裂の発生に関するメカニズムについては、現在のところ、言及することはできないが、不連続性岩盤をモデル化する場合に考慮しなくてはならない現象であると思われる。

また、不連続面特性と岩盤の変形量（ここでは、亀裂の開口量）の関係に着目すると、2地点での限られたデータではあるが、初期状態の亀裂頻度と掘削により変化した亀裂頻度および初期状態の亀裂の累積開口幅と掘削中に変化した亀裂の累積開口幅には、それぞれに相関が認められ、初期状態の亀裂頻度や初期状態の亀裂の累積開口幅が不連続性岩盤の変形量を予測するうえで有効な指標になる可能性を示している。

4. まとめ

不連続面特性の異なる大規模地下空洞の側壁部において実施した不連続面観察結果を比較した。

その結果、不連続面特性が異なる場合であっても、次のような共通点があることが明らかになった。

- ・掘削に伴う不連続面の変化は、初期状態で観察されたすべての亀裂で発生するわけではなく、一部の初期亀裂の開口と亀裂の発生（新規亀裂の発生と鉱物脈の亀裂化）という2つの機構によって生じる。
- ・開口する亀裂や発生した新規亀裂は、空洞側壁に対して高傾斜の流れ目もしくは、さし目である。
- ・初期状態の亀裂頻度は、掘削中に変化した不連続面頻度とほぼ同等である。
- ・掘削中に変化した亀裂の累積開口幅は、初期状態の亀裂の累積開口幅のおよそ2倍程度である。

また、以下のことが原位置不連続面観察により実証できた。

- ・初期状態における亀裂頻度や亀裂の累積開口幅が大きいほど掘削に伴い変化する亀裂頻度が高く、亀裂の開口量も大きい。（すなわち、亀裂頻度が高い岩盤ほど変形量大きい。）

参 考 文 献

- 1) 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，p.33-41
- 2) 吉田次男・打田靖夫・平川芳明・森 聡：大規模地下空洞掘削時の側壁岩盤の挙動，第19回西日本岩盤工学シンポジウム論文集，pp67～72，1998.7