

現場計測に基づく不連続性岩盤の変形特性の検討

Deformation characteristics of discontinuous rock estimated from field measurement

吉田次男*・大西有三**・西山哲**・平川芳明***・森聡***

Tsugio YOSHIDA, Yuzo OHNISHI, Satoshi NISHIYAMA, Yoshiaki HIRAKAWA, Satoshi MORI

It is important to know deformation characteristics of the rock mass in a reducing process of load in designing and constructing the rock structures. But it is difficult to estimate them through field test or laboratory test. So with field monitoring data during excavation of several caverns and slopes, deformation characteristics were estimated by back analysis. Then correlation was estimated between modulus of deformation and initial properties of discontinuities such as the frequency of discontinuities and RQD.

Key words: deformation, cavern, slope, frequency of discontinuity, RQD

1. はじめに

地下空洞、トンネル、斜面等の岩盤構造物を設計、施工する際には、掘削に伴う応力開放過程の岩盤変形特性を知ることが重要である。しかしながら、平板載荷試験などの原位置試験では、掘削に伴う応力開放過程の変形特性を適切に評価することができない。また、不連続面のスケール効果を考慮した変形特性を評価するためには、試験空洞等による大規模な試験を行う必要がある。

そこで、掘削に伴う応力解放過程の岩盤変形特性を評価するために、既設の地下発電所や斜面の掘削時における変位計測データを用いて、逆解析による分析を行った。岩盤の変形特性は、不連続面特性に大きく支配されることから、逆解析により得られた変形係数とボーリングコアの不連続面頻度や RQD との相関性を評価し、不連続面頻度が変形特性に与える影響について考察した。

2. 不連続面特性と変形特性の相関性評価手順

地下発電所や斜面の建設時の変位計測データを用いて岩盤変形特性評価を行う場合、構造物の形状や初期地圧を考慮する必要がある。そこで、逆解析により変形係数を評価した。得られた変形係数とボーリングコアの不連続面頻度、RQD との相関性を評価することで、不連続面特性が変形特性に与える影響を評価した。対象地点は、地下発電所 5 地点、斜面 2 地点である。このうち、地中変位計設置地点のボーリングのコア情報が得られる箇所、および、地中変位計周辺で複数のボーリングコア情報が得られる箇所を検討対象とした。評価手順は、以下のとおりである。

- ①弾性解析手法を用いた逆解析により、各計測ポイントの変位量と解析による変位量の残差の 2 乗和が最小となる変形係数を評価し変形係数 D とする。ここで、変形係数は、計測器設置後の変位を用いて評価した。
- ②計測箇所のボーリングコアやコア写真を用いて、不連続面頻度 N (1 m あたりの不連続面本数) と RQD の評価を行なう。

* 正会員 関西電力㈱ 電力技術研究所 構築研究室

** 正会員 京都大学大学院 工学研究科 都市環境工学専攻

***正会員 ㈱ニュージェック 電力土木部

③逆解析で評価した変形係数Dを実質部の弾性係数Eで基準化し、 $D/E \sim N$ の関係を各計測箇所毎に評価することで、不連続面頻度が変形特性に与える影響を評価する。同様に、 $D/E \sim RQD$ の関係を各計測箇所毎に評価することで、RQDの違いが岩盤の変形特性に与える影響を評価する。

3. 地点の概要

(1) 奥多々良木発電所（増設）

地下発電所は、図一1に示すとおり、空洞形状は弾頭型で、規模は幅 25m、高さ 47m、長さ 80mである。発電所周辺の地質は、主として流紋岩で構成され、 $C_H \sim B$ 級の良好な岩盤である。

検討対象の計測は、側壁部で行われた2箇所の岩盤変位計測（OZ-1, OZ-2）である。

計測箇所の不連続面頻度、RQD は、岩盤変位計を埋設するために行ったボーリングのコアより評価した。1 m 当たりの不連続面頻度、RQD は、OZ-1 では 7.0 本、56.5、OZ-2 では、6.3 本、62.2 である。

掘削時の岩盤変位は、OZ-1 では計測区間 20m の変位が 15.1mm、OZ-2 区間では計測区間 26m の変位が 14.8mm である。

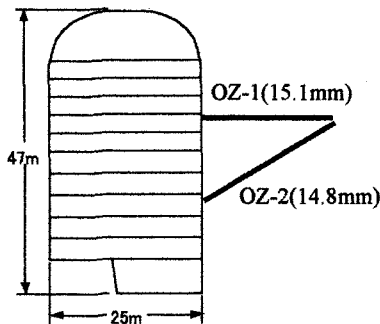
(2) 大河内発電所

地下発電所は、図一2に示すとおり、空洞形状は弾頭型で、規模は幅 24m、高さ 46.6m、長さ 134.5mである。発電所周辺の地質は、ひん岩で構成され、 C_H 級が主体の岩盤である。

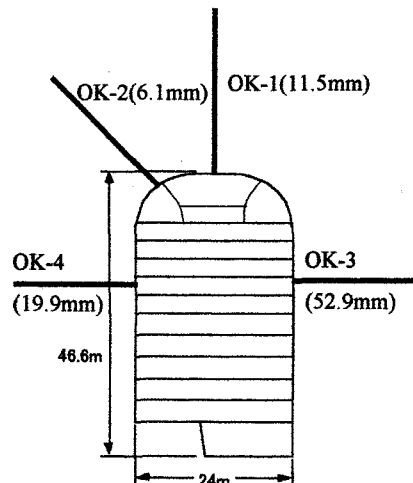
検討対象の計測は、アーチ部で行われた2箇所の岩盤変位計測（OK-1, OK-2）および、側壁部で行われた2箇所の岩盤変位計測（OK-3, OK-4）である。

計測箇所の不連続面頻度、RQD は、岩盤変位計を埋設するために行ったボーリングのコアより評価した。1 m 当たりの不連続面頻度、RQD は、それぞれ OK-1 では 6.7 本、78.9、OK-2 では 4.2 本、73.0、OK-3 では 12.5 本、34.7、OK-4 では 4.5 本、81.0 である。

掘削時の岩盤変位は、OK-1 では計測区間 30m の変位が 11.5mm、OK-2 では計測区間 26m の変位が 6.1mm、OK-3 では計測区間 20m の変位が 52.9mm、OK-4 では計測区間 20m の変位が 19.9mm である。



図一1 奥多々良木発電所（増設）



図一2 大河内発電所

(3) 喜撰山発電所

地下発電所は、図一3に示すとおり、空洞形状はきのこ型で、規模は幅 25.6m、高さ 49.6m、長さ 60.1mである。発電所周辺の地質は、主に粘板岩で構成され、 $C_M \sim C_H$ 級の岩盤である。

検討対象の計測は、放水路側の側壁で行われた岩盤変位計測（K-1）である。計測箇所の不連続面頻度、RQD は、計測箇所近傍の側壁で実施されたボーリングのコアより評価した。9本のボーリングコアの不連続面頻度は、8.4～13.6本で平均は12.8本である。RQDは、21～43で平均は26.9である。

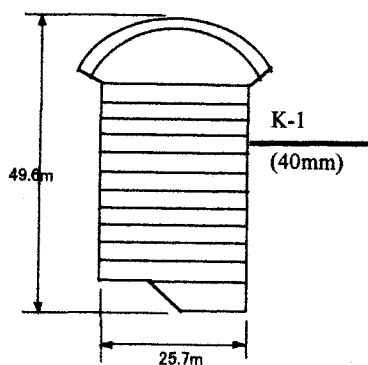
掘削時の岩盤変位は、計測区間15mの変位が40.0mmである。

(4) 奥多々良木発電所（既設）

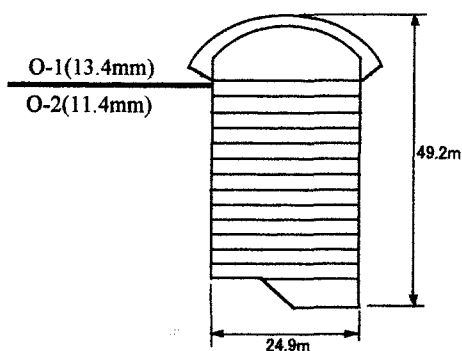
地下発電所は、図—4に示すとおり、空洞形状はきのこ型で、規模は幅24.9m、高さ49.2m、長さ133.4mである。発電所周辺の地質は、主として流紋岩で構成され、 C_H ～B級の良好な岩盤である。

検討対象の計測は、鉄管路側の側壁で行われた箇所の岩盤変位計測（O-1、O-2）である。計測箇所の不連続面頻度、RQDは、掘削前に地下発電所掘削箇所およびその周辺で実施された3本のボーリングのコアより評価した。3本のボーリングコアの不連続面頻度は、それぞれ6.2本、5.2本、4.5本であり、平均値は5.3本である。RQDは、それぞれ67.9、75.2、73.2であり、平均値は72.1である。

掘削時の岩盤変位は、計測区間30mの変位がO-1計測で13.4mm、O-2計測の変位は11.4mmである。



図—3 喜撰山発電所



図—4 奥多々良木発電所（既設）

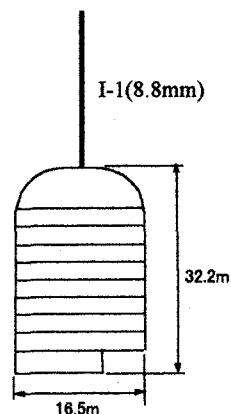
(5) 伊奈川第二発電所

地下発電所は、図—5に示すとおり、空洞形状は弾頭型で、規模は幅16.48m、高さ31.59m、長さ25.08mである。発電所周辺の地質は、主として花崗岩で構成され、B～ C_H 級の新鮮で堅硬な岩盤である。

検討対象の計測は、アーチ部で行われた1箇所の岩盤変位計測（I-1）である。

計測箇所の不連続面頻度、RQDは、岩盤変位計を埋設するために行ったボーリングのコアより評価した。1m当たりの不連続面頻度は12.5本、RQDは36.0である。

掘削時の岩盤変位は、計測区間20mの変位が8.8mmである。



図—5 伊奈川第二発電所

(6) 新船津発電所

発電所は半地下式で、急斜面の直下に深さ約17m、幅約11mの竖坑掘削により建設された。地質は、主に頁岩で構成され、 C_M ～ C_H 級の岩盤である。

検討対象の計測は、施工中、側壁で行われた岩盤変位計による岩盤変位計測である。掘削中、山側上部側壁にすべりに伴う大きな変位が生じ、追加補強が行われた。

検討対象の計測は、側壁で行われた岩盤変位計測（H-1）である。計測箇所の不連続面頻度、RQDは、掘削前に堅

坑周辺で実施された4本のボーリングのコアより評価した。4本のボーリングコアの不連続面頻度は、それぞれ13.6本、11.4本、10.6本、9.3本であり、平均値は11.2本である。RQDは、それぞれ34.2、33.1、46.7、30.4であり、平均値は36.1である。

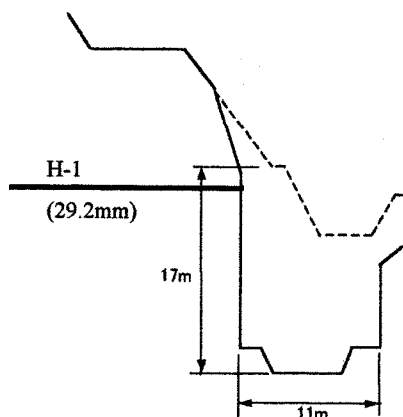
掘削時の岩盤変位は、計測区間20mの変位が29.2mmである。

(7) 新高津尾発電所

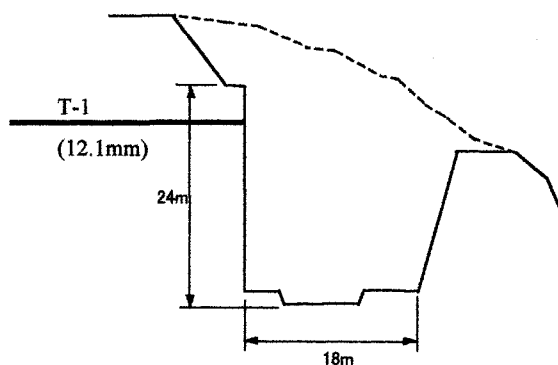
発電所は半地下式で、深さ約24m、幅約18mの堅坑掘削により建設された。地質は、主に頁岩で構成される。

検討対象の計測は、側壁で行われた岩盤変位計測(T-1)である。計測箇所の不連続面頻度、RQDは、掘削前に堅坑周辺で実施された3本のボーリングのコアより評価した。3本のボーリングコアの不連続面頻度は、それぞれ9.2本、8.4本、7.5本であり、平均値は8.4本である。RQDは、それぞれ25、32、46であり、平均値は34本である。

掘削時の岩盤変位は、計測区間19mの変位が12.1mmである。



図—6 新船津発電所



図—7 新高津尾発電所

4. 不連続面特性と変形特性の相関

表—1に各地点における変位計測データの逆解析により求めた変形係数、ボーリングコアより評価した亀裂頻度、RQDを示す。

表—1 逆解析による変形係数

地点名	計測	岩種	コア弾性係数 E(Mpa)	岩盤変形係数 D(Mpa)	RQD	不連続面頻度 (本/m)	D/E
奥多々良木発電所	OZ-1	流紋岩	55000	7100	56.5	7	0.13
(増設)	OZ-2	流紋岩	55000	4400	62.2	6.3	0.08
大河内発電所	OK-1	ひん岩	76000	4000	78.9	6.7	0.05
	OK-2	ひん岩	76000	16900	73	4.2	0.22
	OK-3	ひん岩	76000	1900	33	11.9	0.02
	OK-4	ひん岩	76000	15500	76.9	4.3	0.2
喜撰山発電所	K-1	粘板岩	90000	1700	26.9	12.8	0.02
奥多々良木発電所	O-1	流紋岩	38300	4100	72.1	5.3	0.11
(既設)	O-2	流紋岩	38300	3600	72.1	5.3	0.1
伊奈川第2発電所	I-1	花崗岩	57300	3000	36	12.4	0.05
新船津発電所	H-1	頁岩	41640	1260	36.1	11.2	0.03
新高津尾発電所	T-1	頁岩	19800	660	34	8.4	0.03

図一8は、逆解析で評価した変形係数Dを実質部の弾性係数Eで基準化したD/Eと亀裂頻度Nの関係を示す。図より、NとD/Eの間に相関性が認められ、亀裂頻度の増加に伴い変形性が增大する傾向が認められる。NとD/Eの関係は、一次関数よりも指数関数の方が相関性が高く、N=0の場合D/E=1となる条件の基で求めた相関式は以下の通りである。

$$\frac{D}{E} = \exp(-0.506N^{0.826}) \quad (1)$$

式(1)は、岩盤の変形性は亀裂の頻度に比例して増大するのではなく、亀裂頻度の増加に伴い加速的に増大することを示す。この理由として、

地下空洞掘削時のボアホールテレビ観察に見られるような以下の亀裂進展特性によるものと考えられる¹⁾²⁾³⁾。

- ①不連続面による岩盤変位は、既存不連続面の開口幅の増大や滑りによる変位のみでなく、新規不連続面に起因する変位によるところが大きい。
- ②不連続面が多く存在する領域では、新規不連続面の発生が多い。これにより、新規発生した不連続面による岩盤変位が大きい。

図一9は、RQDとD/Eの関係を示す。概略には、RQDとD/Eの間に相関性が認められ、RQDの増加に伴いD/Eが増大する特性が認められる。RQD=100の場合D/E=1となる条件の基で求めた相関式は以下の通りである。

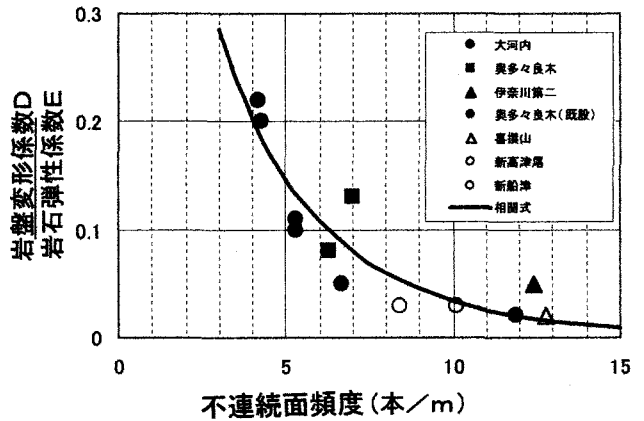
$$\frac{D}{E} = \exp[0.386(100 - RQD)^{0.507}] \quad (2)$$

式(2)は、RQDが比較的小さい場合は、相関が高いが、RQDがある程度大きい場合は、比較的大きなばらつきがあり、今回のデータに限れば、RQDとD/Eと相関は、NとD/Eの相関よりやや低いと言える。

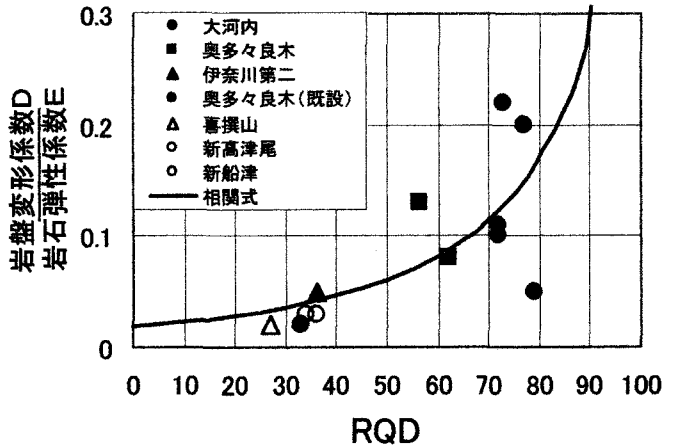
図一10はRMRと逆解析で評価した岩盤変形係数の関係を示したものである。図の実線は、以下の推定式より変形係数を評価したものである。

$$Em = 10^{\frac{RMR-10}{40}} \quad (3)$$

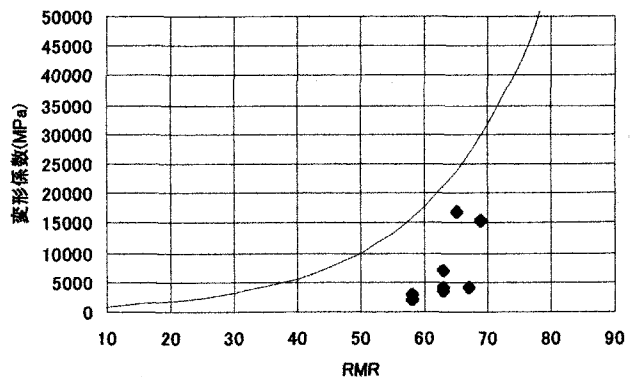
図より、RMRで評価した変形係数は、逆解析で評価したものと比較して、過大評価となる。この原因の1つとして、日本の岩盤は、RMRが提案された欧米の岩盤と比較して不連続面頻が高いことが挙げられる。



図一8 不連続面頻度と岩盤の変形性の相関



図一9 RQDと岩盤の変形性の相関



図一10 RMRによる変形係数評価

5. 原位置試験結果との比較

逆解析により評価した岩盤変形係数Dと調査時に行われた平板載荷試験より評価した変形係数Deの比較を表一2に示す。

表一2 原位置試験による岩盤変形係数との比較

地点名	逆解析による係数 D(Mpa) (1mあたり不連続面頻度)	原位置試験による岩盤変形係数De(Mpa)	D/De
奥多々良木発電所	7100 (7.0)	14000	0.51
(増設)	4400 (6.3)	14000	0.31
大河内発電所	4000 (6.7)	14000	0.29
	16900 (4.2)	14000	1.20
	1900 (11.9)	14000	0.14
	15500 (4.3)	14000	1.11
喜撰山発電所	1700 (12.8)	4600	0.37
奥多々良木発電所	4100 (5.3)	6800	0.60
(既設)	3600 (5.3)	6800	0.53
伊奈川第2発電所	3000 (12.4)	12900	0.23

表が示すとおり、今回検討した箇所においては、平板載荷試験で評価した変形係数の方が、大きな値である箇所が多い。図一10は、各検討箇所における不連続面頻度とD/Deの関係を示したものである。不連続面頻度が大きな箇所でD/Deが小さく、平板載荷試験の方がより大きな変形係数となる傾向にある。これらの理由として以下のことが考えられる。

- ①平板載荷試験では、応力の載荷過程の変形係数を評価しているのに対して、地下空洞など掘削に伴う応力変化は、応力開放に伴う応力比の変化が支配的である。
- ②実構造物の掘削時には、不連続面の滑りや開口により大きな変位が発生するが、このような挙動を原位置試験では、うまく評価できない²⁾⁴⁾。



図一11 岩盤変形係数の比較

参考文献

- 1) 森聡他：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，第30回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp88-92，2000。
- 2) 打田靖夫他：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，PP33-41，1995。
- 3) 森聡他：大規模空洞掘削に伴う空洞側壁の鉛直方向挙動，第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp48-52，1997。
- 4) 吉田次男他：奥多々良木発電所地下空洞掘削時の計測結果と考察，電力土木 No. 283，pp35-39，1999。