

投稿論文
Paper
(In Japanese)

水力発電所地下空洞の掘削に伴う岩盤亀裂調査とその定量化

INVESTIGATION AND STEREOLOGICAL MODELING WITH EXCAVATION OF UNDERGROUND POWER STATION CAVERN

西村 毅*・草深守人*・大橋敏行*・西川 力**

By Tsuyoshi NISHIMURA, Morito KUSABUKA, Toshiyuki OHASHI and Chikara NISHIKAWA

The method to quantitatively understand discontinuities in the rock mass is studied based on the stereological theory. Modelling these discontinuities, distributing with orientation and frequency in the rock mass, is primarily important in estimating the mechanical behavior of the discontinuous rock mass. In this paper, proposed method is applied to the in-situ geological survey at the underground cavern for the Akaishi hydroelectric power plant. The 3-dimensional distribution of discontinuities is modeled using the geological survey data. The results demonstrates that the density of distribution and orientation of discontinuities in the rock mass are successfully modeled by the method.

Keywords: discontinuity, stereology, rock mass, underground cavern

1. ま え が き

日本国内の岩盤内地下空洞は、現在建設中のものまで含めるとすでに50地点に近い数に上る。これらの地下空洞は、そのほとんどが地下式の揚水あるいは一般水力発電を目的として建設されており、岩盤中の地下空洞の設計、施工にかかわる技術上の諸問題の多くが水力発電の分野で克服されてきたといえる。しかしながら建設コストの低減への要請、立地点の地質条件の悪化、あるいは最近の地下空洞の用途の多様化等に伴いさまざまな新たな技術的問題の解決がせまられている。これらの技術的課題のうち、地下空洞の力学的な安定性を適切に判断する技術の向上は、今もって岩盤力学の重要な課題といわざるを得ないし、事実、今日の多くの研究者の中心的テーマの1つとなっている。

岩盤を力学的に取り扱う難しさは、岩盤が節理等の亀裂面を含む不連続体であることに起因していることは周知のとおりであり、その技術的内容は、大きく岩盤の不連続状態の定量的把握に関するもの^{1)~3)}と、数値解析の

立場から不連続性岩盤をどのように力学的にモデル化するか^{4)~6)}にあるように思える。本論文では、このうち前者の不連続面の定量化について、中部電力赤石水力発電所地下空洞の建設において実施した亀裂の調査とその評価について述べる。

2. 地下発電所の概要と研究の目的

大井川は、南アルプスの赤石山脈間ノ岳(3189m)を源とする流路180kmにおよぶ大河川である。この水系における水力開発は、奥泉、井川水力発電所、畑薙第一、第二水力発電所を中核とした56万5千kWの発電施設を有している。赤石水力発電所は、同水系における水力開発地点の最上流での水資源の有効利用を図るための一貫として現在建設中のものであり、発電所は地下式となっている。

発電所は図-1に示すように、上部の高さ14.9m×幅15.0m×奥行き27.0mの発電機組立室と高さ10.0m×幅10.2m×奥行き12.7mの配電盤室、および下部のφ13.0m×高さ65.5mの発電機室立坑からなる。施工はいずれの空洞も吹付けコンクリートとロックボルトによるNATM工法が採用された。

当開発地域は、西側に中央構造線、東側に糸魚川静岡構造線で境され、諏訪湖を頂点とする赤石楔状地の北部

* 正会員 (株)間組技術研究所
(〒338 与野市本町西4-17-23)

** 正会員 中部電力(株)大井川上流水力建設所
(〒428-05 静岡市田代字鳥森1301-1)

に位置し、四万十層群中の白根帯～大井川帯に属する。大半は白根帯で、その地質は砂岩、頁岩あるいはそれらの互層が主体となっている。発電所の地質は、上部はおおむね $C_H \sim C_M$ 級の堅硬な砂岩層が主体であり、発電機据付け位置付近を境とした下部は、上部に比べてやや脆弱な $C_M \sim C_L$ 級の砂岩・頁岩の互層となっている。両者の境界は、山腹斜面に対して差し目となっている。

地下空洞の掘削にあたっては、空洞周辺の地質状況を岩盤力学的な視点から把握するために、まず組立室の掘削時に詳細な地質調査が実施され、その結果を立坑の設計・施工に反映させる努力がなされた。これは、大規模な立坑の掘削工法として NATM 工法がわが国で初めて採用されることに加えて、吹付けコンクリートとロックボルトが運転開始後の永久支保構造となることへの技術的配慮である。さらに、本工事の完成により今後、永久構造物として健全な大規模立坑を安全に、経済的に建設するための技術の向上に貢献することも重要な動機の一つである。

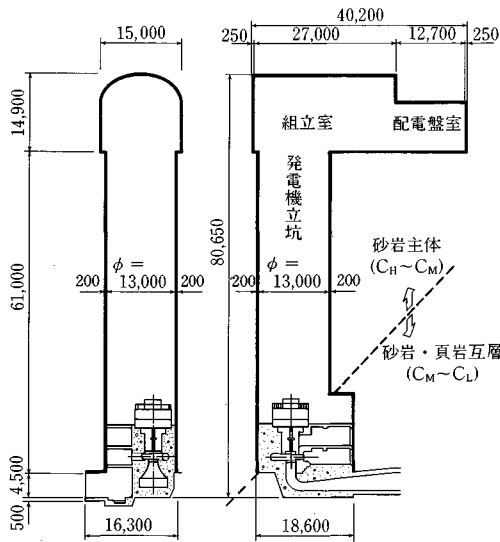


図-1 地下発電所空洞の諸元

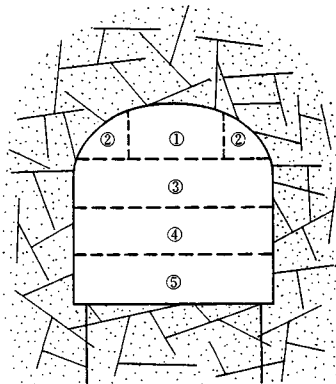


図-2 発電機組立室の掘削リフト

3. 発電機組立室の掘削に伴う地質調査

組立室は、図-2に示したようにアーチ部(①、②)を掘削後、全体を3リフト(③、④、⑤)に分けて掘削された。地質調査はこの3リフトについて、各リフト掘削ごとに空洞壁面で行われ、最終リフトでは、底盤面についても実施した。調査方法は、掘削面での地質観察と写真撮影の2つの方式が採用された。

地質観察では、岩盤等級や、観察される岩盤亀裂(発破によって生じたものと判断されるものは除く)のうちトレス長(掘削壁面と亀裂面の交線)が3m程度以上のものを中心にその方向、位置、開口程度、湧水状況、狭在物の有無等が調査された。この調査は、掘削壁面に存在する不安定なキープロックの検知とその支保対策工の検討など施工の安全管理のためのデータを提供することを主目的としているが、写真撮影調査データの解析結果の検証にも利用される。キープロックの解析等の施工管理を目的とした本調査については、別報で報告することとして本文では主に写真撮影による調査とその解析に絞って述べる。

掘削壁面の写真画像を利用した岩盤亀裂の調査は、図-3に示すような作業手順によってなされた。掘削面の

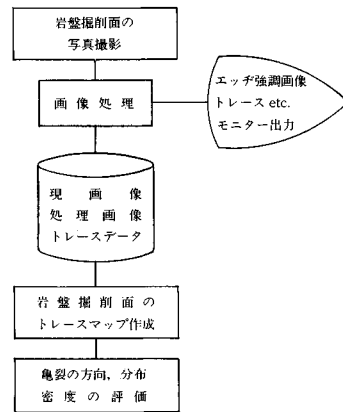


図-3 写真画像による亀裂分布の調査・評価手順

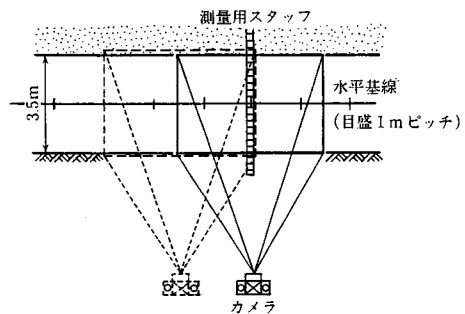


図-4 掘削壁面の写真撮影

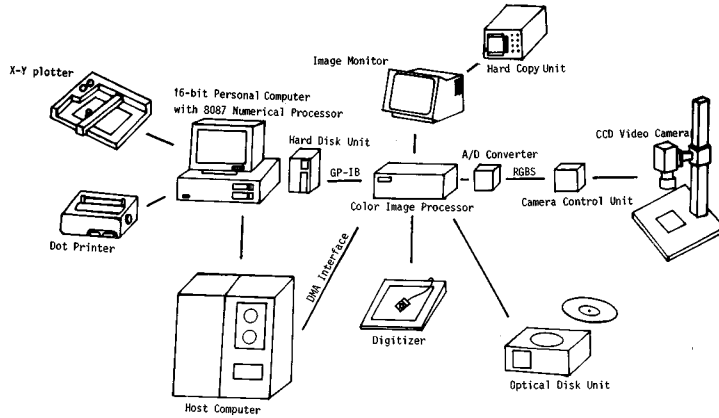


図-5 画像処理に用いたハードウェアの構成

写真は、各リフト掘削完了直後から吹付けコンクリートが施工されるまでの間に図-4に示すように、掘削正面より4~5m離れた位置から隣接撮影面と50%のオーバーラップ幅を確保して撮影された。また、空洞内に設定した座標系に対する各撮影画像の位置関係を明らかにすると同時に、画像のひずみを修正するため、掘削壁面上に図-4に示すように水平および鉛直方向のスケールを入れた。撮影された画像は図-5に示すような画像処理システムを利用して原画像のひずみ修正、亀裂トレース線の抽出を行った後、撮影日時、整理番号等の識別情報とともに光ディスク上に保存される。さらにこれらのトレースデータは、最終リフトの掘削が完了した時点で、発電機室側壁面、妻壁面、底盤面ごとに亀裂面のトレースマップとして合成される。このようにして作成されたトレースマップは、次章以降に述べる地下空洞周辺の岩盤内に存在する亀裂群の分布を推定するための基本データとして使用される。

4. 岩盤中に存在する亀裂面分布の評価手法

本発電所地下空洞周辺の岩盤中に存在する亀裂面群の空間的分布を推定するため、ステレオロジーの理論^{7),8)}を岩盤工学の分野に応用する目的で草深によって示された手法^{9),11)}を採用する。この手法は、岩盤の切断面(掘削面)で観察される亀裂面と切断面の交線(トレース)分布から、亀裂面の空間的な幾何学関係を利用することにより、岩盤内部の亀裂面の方向性と分布密度を推定しようとするものである。この方法の詳細は文献1)に述べられているのでここでは詳述しない。ただし次章の理解を容易にするために、互いに直交する3つの掘削面のうちいずれか2つの掘削面で観察されるトレースの卓越方向が岩盤中に設定した直交座標軸(通常は、直交する3つの掘削面の交線に一致させる)と平行となる特別な場合、すなわち1つまたは2つの掘削面に直交するよう

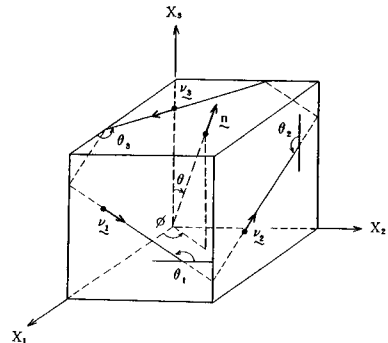


図-6 亀裂面およびトレースの方向ベクトルの定義

な亀裂面については、以下に紙面の許す範囲で詳細に解説しておくことにする。

なお本文では、岩盤の不連続性を特徴付ける因子を亀裂面の方向性と分布密度に絞って議論するが、もちろん空洞の力学的安定性等を検討する際には、亀裂面の開口幅、狭在物、湧水等の影響についても十分配慮することが必要である。

(1) 掘削面で観察される亀裂面のトレースの方向性と分布密度の推定

方向性をもつ亀裂面群が分布する岩盤を任意の掘削面(平面)で切ると、この掘削面に現われるトレースは、掘削面上に方向性をもって分布するものと考えられる。このような掘削面で観察されるトレースの方向性と分布密度は、ステレオロジーの理論を用いて次の手順に従って評価することができる。

a) 岩盤中に直交座標系(X_1, X_2, X_3)を固定し、それぞれ3つの座標軸に直交する観察掘削面を X_1, X_2, X_3 面とする。これら各掘削面上のトレースの方向 θ_i ($i=1, 2, 3$)を図-6に示すように X_i 面内で X_{i+1} 軸($i+1=4$ のときは $i+1=1$)の方向から左回転に計るものとする。

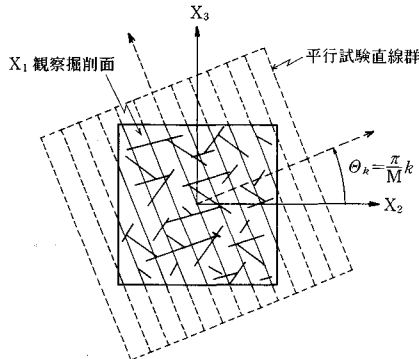


図-7 等間隔の平行試験直線群

b) 図-7に示すように、 X_i 面上に傾き θ_k の多数の平行試験直線を引く。

$$\theta_k = \frac{\pi}{M} k \quad 0 \leq \theta \leq \pi \quad (k=0, 1, 2, \dots, M-1)$$

.....(1)

c) θ_k 方向のすべての試験直線と X_i 面上に分布するトレースとの総交点数 N_k を数え、この方向の試験直線単位長さ当たりの平均交点数 \bar{N}_k を計算する。

$$\bar{N}_k = \frac{N_k}{L_k}$$

.....(2)

ただし、 L_k は θ_k 方向の試験直線の総長で図-7に示す試験直線群の実線部分の総長さである。

d) 係数 C, A_n, B_n を次式に従って計算する。

$$\left. \begin{aligned} C &\cong 2 \sum_{k=0}^{M-1} \bar{N}_k \frac{\pi}{M} = \frac{2\pi}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \bar{N}_k \\ A_n &\cong 2 \sum_{k=0}^{M-1} \bar{N}_k \cos\left(\frac{n\pi k}{M}\right) / \sum_{k=0}^{M-1} \bar{N}_k \\ B_n &\cong 2 \sum_{k=0}^{M-1} \bar{N}_k \sin\left(\frac{n\pi k}{M}\right) / \sum_{k=0}^{M-1} \bar{N}_k \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

e) X_i 面上に分布するトレースの分布密度関数 $f_i(\theta_i)$ は、次式で計算される。

$$f_i(\theta_i) = \frac{C}{8\pi} \left\{ 1 - \sum_{n=2}^{\infty} (n^2 - 1) \times (A_n \cos n\theta_i + B_n \sin n\theta_i) \right\}$$

.....(4)

(2) 座標軸に平行なトレースをもつ亀裂面群の分離
互いに直交する3つの掘削面で観察されるトレースの分布密度関数 $f_1(\theta_1), f_2(\theta_2), f_3(\theta_3)$ から座標軸と平行なトレースをもつ亀裂面群を分離する。ここで、亀裂面群とは、個々の亀裂面の方向がある1つの卓越方向によって代表される1つの母集団に属するような亀裂面の一群（その亀裂面群に属する個々の亀裂面の方向の平均値を卓越方向とするような亀裂面の母集団）をいうものと定義する。また、この亀裂面群によって掘削面上に現われるトレース群も図-8に示すようなある卓越方向を形成するものと仮定する。

3つの掘削面上のトレースの分布密度関数のグラフか

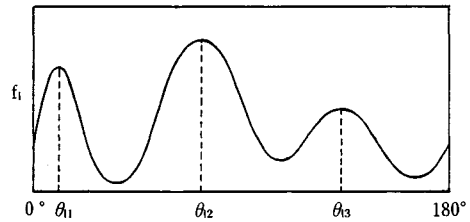
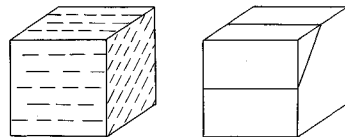
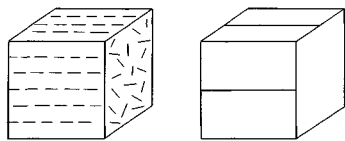


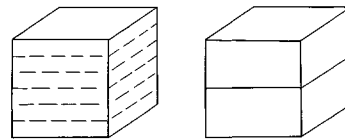
図-8 トレースの方向性とその卓越方向



(a) 互いに平行な亀裂面のトレースが1つの座標軸と平行に現われる場合



(b) 互いに平行でない亀裂面のトレースが1つの座標軸と平行に現われる場合



(c) 互いに平行な亀裂面のトレースが2つの座標軸と平行に現われる場合

図-9 座標軸と平行なトレースを有する亀裂面群

ら図-8に示すように、各掘削面上におけるトレースの卓越方向を卓越度合の大きい順に適当にそれぞれ n, m, l 個選び次のように表わす。

X_1 面： $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}, \dots, \theta_{1n}$

X_2 面： $\theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23}, \dots, \theta_{2m}$

X_3 面： $\theta_{31}, \theta_{32}, \theta_{33}, \dots, \theta_{3l}$

これらの3つの掘削面上におけるトレースの卓越角は、空間中に卓越した方向をもって分布する亀裂面群により作られるものであるとする。このように考えると、3つの掘削面上に現われるトレースは完全に独立した分布を与えるものではなく、互いに幾何学的な関連をもつことになる。したがって、ある1つの亀裂面群に対し、1組の卓越角の組合せ $(\theta_{1i}, \theta_{2j}, \theta_{3k})$ が決定されるはずである。

図-9は、直交する3つの掘削面上に現われる亀裂面のトレースのいずれか2つが座標軸と平行となる特別な場合についての基本的なトレースの分布パターンを示したものである。これらの基本形について亀裂面群の分離を行う。

- a) 1つの座標軸と平行なトレースに直交する切断面に他の2つの座標軸と平行でない一定方向のトレースが存在する場合

これは、図-9(a)の場合であり、考察を簡単にするために、図-10(a)に示すように X_1, X_3 面のトレースが X_2 軸に平行な単一亀裂面群を考えることにし、この亀裂面群の各掘削面におけるトレースの卓越角を $\theta_1=0^\circ, \theta_2=\theta, \theta_3=90^\circ$ 、対応するトレースの分布密度を $f_1(0), f_2(\theta), f_3(90)$ とする。これら3つの掘削面上でのトレースの分布密度 f_1, f_2, f_3 の間の関係を求めるために、図-10(b)に示すように座標軸 (X_1, X_2, X_3) を X_2 軸まわりに回転し、 X'_3 軸が X_2 掘削面上の亀裂面のトレース方向と一致するように新しい座標軸 (X'_1, X'_2, X'_3) を選ぶ。

(X'_1, X'_3) 平面上で X'_1, X'_3 軸を含む単位面積の正方形内には方向角の分割幅 $\Delta\theta$ として、 $\theta_2 \pm \Delta\theta/2$ の区間の方向を有するトレースが総長で $f_2(\theta)\Delta\theta$ 存在するから、 X'_1 軸に平行な単位長さの任意の試験直線 (X'_1 軸を含む) とトレースの交わる確率、すなわち、試験直線単位長さ当たりの交点数は $f_2(\theta)\Delta\theta/1=f_2(\theta)\Delta\theta$ である。一方、元の座標軸 X_1, X_3 軸方向の試験直線 (X_1, X_3 軸を含む) とトレースの交わる確率 (交点数) は、単位長さ当たり、それぞれ

$$\begin{aligned} X_1 \text{ 軸方向の試験直線単位長さ当たり} \\ \bar{S}_1 &= f_2(\theta)\Delta\theta |\cos(\pi-\theta_2)| = \Delta\theta f_2(\theta) |\cos\theta_2| \dots (5) \\ X_3 \text{ 軸方向の試験直線単位長さ当たり} \end{aligned}$$

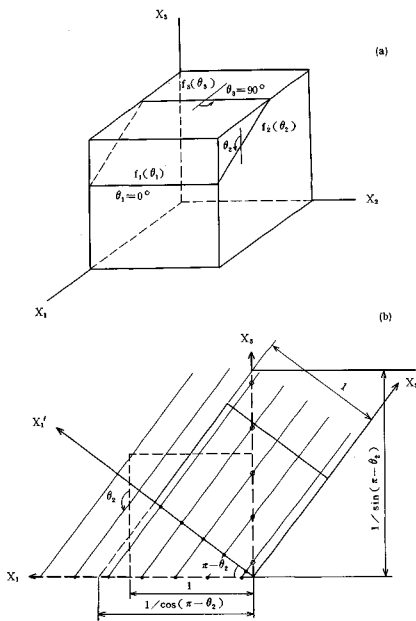


図-10 座標軸と平行な2つのトレースの分布密度と他の1つのトレースの分布密度の関係

$$\bar{S}_3 = f_2(\theta_2)\Delta\theta |\sin(\pi-\theta_2)| = \Delta\theta f_2(\theta_2) |\sin\theta_2| \dots (6)$$

となる。また、図-10(a)で X_1, X_3 掘削面上でのトレースの分布密度は $f_1(0), f_3(90)$ であるから、単位面積当たりのトレースの総長はそれぞれ $f_1(0)\Delta\theta, f_3(90)\Delta\theta$ である。

したがって、 X_3 掘削面上においた X_1 軸方向の試験直線および X_1 掘削面上においた X_3 軸方向の試験直線と各掘削面上のトレースとの交わる確率は、

$$\begin{aligned} X_1 \text{ 軸方向の試験直線単位長さ当たり} \\ \bar{S}_1 &= f_3(90)\Delta\theta/1 = \Delta\theta f_3(90) \dots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_3 \text{ 軸方向の試験直線単位長さ当たり} \\ \bar{S}_3 &= f_1(0)\Delta\theta/1 = \Delta\theta f_1(0) \dots (8) \end{aligned}$$

したがって、式(5)~(8)の4つの式から、 X_1, X_3 掘削面上でのトレースの分布密度と X_2 掘削面上でのトレースの分布密度の間に次式の関係が存在する。

$$\left. \begin{aligned} f_3(90) &= f_2(\theta_2) |\cos\theta_2| \\ f_1(0) &= f_2(\theta_2) |\sin\theta_2| \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

上式は、亀裂の方向がほとんど一定とみなせる微小角 $\Delta\theta$ の区間に分布する亀裂面群について考察した結果である。しかしながら実際問題では、ある卓越方向を中心に亀裂の方向がかなりの広い範囲に分布する亀裂をまとめて1組の亀裂面群として扱う場合がほとんどで、かつ実務的である。そこで図-8に示したようなトレースの分布図において、トレースの方向が1つの卓越角を中心とする1山分を1組の亀裂面群に対応させるものとし、かつ式(5)~(8)を利用できるものと仮定する。この仮定がどの程度認め得るものであるかについての厳密な理論的検討を要することはいうまでもないが、ここではそこまで深く立ち入らず、後述する実際の岩盤への適用結果の範囲でのみ考察するにとどめる。また、以下の記述を簡単にするため1つの亀裂面群によって構成される各掘削面上のトレースについて次式を定義する。

$$F_i(\theta_{ip}) = \int_{\theta_p} f_i(\theta) d\theta \quad (i=1, 2, 3) \dots (10)$$

ただし、 θ_{ip} は i 軸に直交する掘削面上のトレースの p 番目の卓越角を表わし、積分は卓越角 θ_p を中心とした $f_i(\theta)$ の1山分の積分を表わす。

以上の仮定に基づき、トレースの卓越方向が X_i 軸に平行となる場合について式(9)を書き直すと、

$$\left. \begin{aligned} F_{i+1}(90) &= \int_{90} f_i(\theta) |\cos\theta_i| d\theta \\ F_{i+2}(0) &= \int_0 f_i(\theta) |\sin\theta_i| d\theta \end{aligned} \right\} \dots (11)$$

ただし、 $i: 1, 2, 3$

$i+1, i+2: 4$ 以上の数字になる場合はその数字から3を引いた数字とする

- b) 1つの座標軸と平行なトレースに直交する掘削面

上のトレースの方向がランダムに分布する場合

図-9(b) は、2つの掘削面上のトレースが1つの座標面と平行で、他の1つの掘削面上のトレースは方向性をもたないランダムな分布を示す場合である。

X_2 軸に平行なトレースをもつ亀裂面群を考えることにすると、 X_2 掘削面上でのトレースの分布は方向 θ_2 に無関係に一定の分布密度 f_2 でランダムに分布する。この分布密度 f_2 に対応して、平行なトレースの現われる他の2つの掘削面 (X_3 掘削面, X_1 掘削面) 上にはそれぞれ等しい分布密度 $f_3(90) = f_1(0)$ のトレースが現われる。したがって、 X_2 掘削面上の微小角 $\Delta\theta$ に対応する X_3 および X_1 掘削面上の分布密度は式 (9) より、

$$f_3(90) = f_1(0) = 2 \int_0^{\pi/2} f_2 \cos \theta d\theta = 2 f_2 \dots \dots \dots (12)$$

である。前記 a) と同様な仮定を認めるものとして、上式を X_i 軸に平行なトレースをもつ亀裂面群について書き直すと、

$$F_{i+1}(90) = F_{i+2}(0) = 2 f_i \dots \dots \dots (13)$$

c) 1つの掘削面に平行な亀裂面群の場合

図-9(c) は、亀裂面が互いに直交する3つの掘削面のいずれか1つに平行な亀裂面群の場合であり、図から簡単に、

$$F_i(0) = F_{i+1}(90) \dots \dots \dots (14)$$

$F_{i+2} : F_i(0), F_{i+1}(90)$ に対応する f_{i+2} の卓越角は存在しない。

(3) 亀裂面群の空間的分布密度の推定

互いに直交する3つの掘削面上で観察されるトレースの分布 $f_1(\theta_1), f_2(\theta_2), f_3(\theta_3)$ をもつ亀裂面群の分布密度 D は、下式によって与えられる¹⁾。

$$X_1 \text{ 面 } D = \frac{F_1}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \phi}} \dots \dots \dots (15)$$

$$X_2 \text{ 面 } D = \frac{F_2}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta \cdot \sin^2 \phi}} \dots \dots \dots (16)$$

$$X_3 \text{ 面 } D = \frac{F_3}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta}} \dots \dots \dots (17)$$

ただし (θ, ϕ) は図-6に示すように亀裂面の単位法線ベクトル $\mathbf{n}(\theta, \phi)$ の方向を表わし、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ を用いて下式により決定される。

$$\cos \theta = \frac{-\cos \theta_i \sin \theta_j}{\sqrt{\cos^2 \theta_i + \sin^2 \theta_i \sin^2 \theta_j}} \dots \dots \dots (18)$$

$$\tan \phi = \tan \theta_i \tan \theta_j \dots \dots \dots (19)$$

すなわち、3つの掘削面で観察されるトレースの方向角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ によって決定される法線ベクトル \mathbf{n} をもつような亀裂面群は、岩盤の単位体積当たりに D の面積をもって存在することになる。

5. 地下発電所空洞周辺岩盤の亀裂面群の定量的評価

本章では、赤石水力発電所地下空洞周辺の岩盤中に存在する亀裂について、前章で述べたステレオロジーの手法に従ってその分布の形態を評価する。

写真撮影による亀裂調査結果は、前章で述べた岩盤内の亀裂分布の定量的評価に必要なデータを提供するものである。地下空洞の掘削岩盤面全域で撮影された写真画像から掘削面と亀裂面の交線、すなわちトレースのみを抽出・作成したトレースマップを図-11に示す。3. で述べたように、目視による地質観察ではトレース長が3m以上のものについてのみ調査したが、このトレースマップは写真撮影による調査で得られた画像から判読・抽出できるすべてのトレース(発破によるものと判断されるものを除く)が示されている。

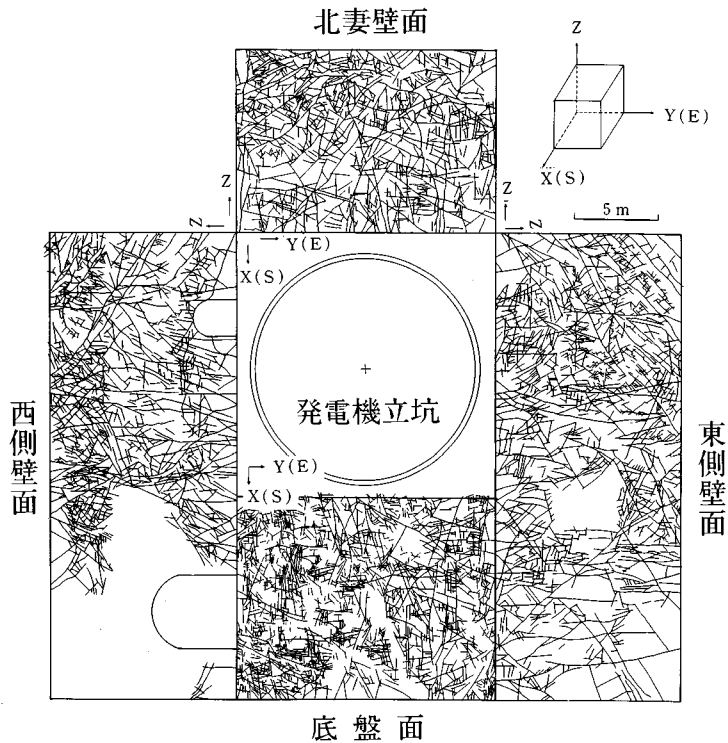
以下では、互いに直交する掘削面のうち、東側壁面、北妻壁面、底盤面の3つのトレースマップを利用して、本地下空洞周辺岩盤中に分布する亀裂面を定量化することとする。

まず基準となる岩盤中の座標系を図-11に示すように設定し、各掘削面上のトレースの分布密度関数 $f_x(\theta_x), f_y(\theta_y), f_z(\theta_z)$ を4.(1)で述べたa)~e)の手順に従って決定した。図-12は、東側壁、北妻壁、底盤面のトレースの分布密度の推定結果を示したものである。ただし、試験直線とトレースとの交点数の測定にあたっては、間隔0.5mピッチの試験直線群をこれら3つのトレースマップ上でそれぞれ角度 $\Delta\theta = 2^\circ$ ピッチで $0^\circ \sim 180^\circ$ まで回転させた。また、式(3)、式(4)の項数は、 $n=2, 4, 6, 8, 10$ の5項までとした。

図-12より、地下空洞周辺の岩盤中に存在する亀裂面群は、掘削面に現われるトレースが座標軸と平行(図-12では、北妻壁でY,Z軸に、底盤面でX,Y軸にそれぞれ平行な卓越方向をもつ2組のトレース群が存在)となる前章で述べた特別な場合に相当する。すなわち、存在する亀裂面群は、その卓越方向がA亀裂面群($\theta_x = 90^\circ, \theta_z = 0^\circ$, 対応する $f_r(\theta_r)$ のピーク値は存在しない)、B亀裂面群($\theta_x = 0^\circ, \theta_y = 40^\circ, \theta_z = 90^\circ$)、C亀裂面群($\theta_x = 0^\circ, \theta_y = 132^\circ, \theta_z = 90^\circ$)の3つに分解することができる。明らかに、図-13に示すようにA亀裂面群はY面に平行で、B,C亀裂面群のトレースとは完全に独立している。また、B,C亀裂面群のトレースはY面で互いに異なる卓越方向を示すものの、X,Z面においてY軸に平行に互いに重なり合って現われる。

以上の点に注意して、それぞれの亀裂面群の分布密度を前章の手法に従って推定する。

a) A亀裂面群 ($\theta_x = 90^\circ, \theta_z = 0^\circ$)



図—11 掘削岩盤面の写真画像より抽出された亀裂面のトレスマップ

この亀裂面群は図—9(c) の場合に相当し、式 (14) の積分範囲を θ_x に関して $50^\circ \sim 135^\circ$ 、 θ_z に関して $0^\circ \sim 40^\circ$ 、 $135^\circ \sim 180^\circ$ として図—12(b), (c) の f_x, f_z を数値積分すると、

$$F_x(90) = 1.22$$

$$F_z(0) = 1.35$$

を得る。これらの平均をとって、

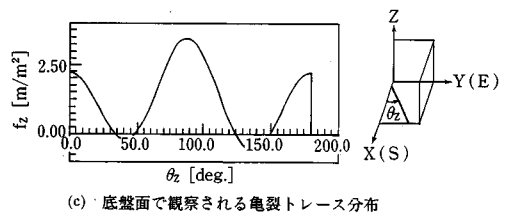
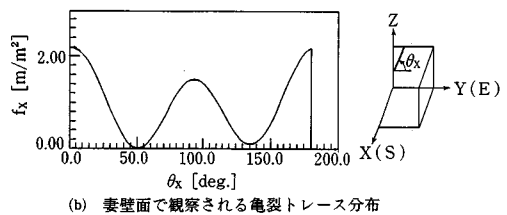
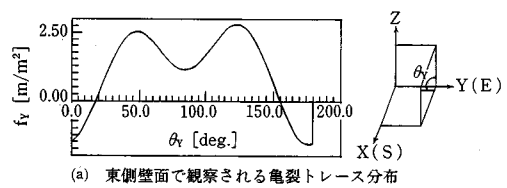
$$F_x(90) = F_z(0) = (1.22 + 1.35) / 2 = 1.28$$

と仮定する。厳密には、 $F_x(90) = F_z(0)$ でなければならないが上記の結果には約 10% 程度の誤差を生じている。これは、観察する掘削面の仕上り状態、写真撮影の証明条件等が直交する 3つの掘削面で完全に同一な理想的条件を整えることが現実には難しいこと、また亀裂面が必ずしも平面でなくかつ形状も等方的な広がりをもっていないなどの理由によるものと思われる。

次に、この亀裂面群の面積密度 D を式 (15) または式 (17) に従って計算すると、 $\theta = \phi = 90^\circ$ (極座標で表わした亀裂面の法線ベクトルの方向) であることから、 $D = 1.28 \text{ m}^2/\text{m}^3$ を得る。

b) B亀裂面群 ($\theta_x = 0^\circ, \theta_y = 40^\circ, \theta_z = 90^\circ$)

この亀裂面群は、図—9(a) の場合に相当するが、X面の卓越トレース角 $\theta_x = 0^\circ$ および Z面の卓越トレース角 $\theta_z = 90^\circ$ に対応するトレース群は、C亀裂面群と重な



図—12 トレースの分布密度関数の評価結果

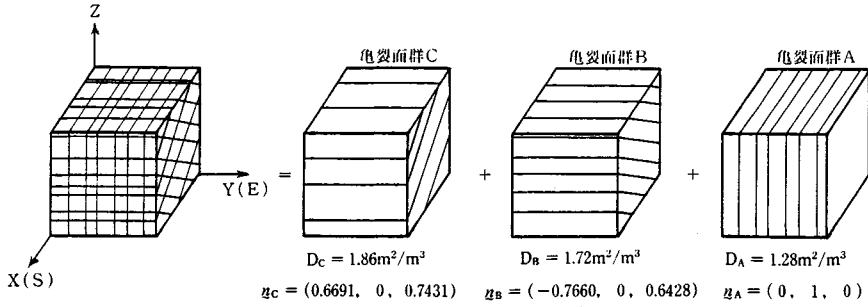


図-13 推定された3つの亀裂面群の方向と分布密度

り合っていることに注意する必要がある。すなわち、 $f_x(0)$ と $f_z(90)$ を用いてこの亀裂面群の分布密度 D を計算することはできず、後に述べる推定値のチェックのみに利用されることとなる。したがって Y 面の $\theta_y=40^\circ$ を卓越角とするトレース群を図-12(a)において、 $\theta_y=0^\circ\sim 85^\circ$ の区間で式(10)、式(11)を数値積分することにより、

$$F_y(40) = 1.72$$

$$F_z(90) = 1.32$$

$$F_x(0) = 1.10$$

となる。式(15)~(17)よりこの亀裂面群に含まれる亀裂面の面積密度は、この亀裂面群の法線ベクトルの方向 $\theta=50^\circ$ 、 $\phi=180^\circ$ を用いて $D=1.72 \text{ m}^2/\text{m}^3$ となる。

c) C亀裂面群 ($\theta_x=0^\circ$, $\theta_y=132^\circ$, $\theta_z=90^\circ$)

上記のB亀裂群と同様にして、 $\theta_y=132^\circ$ を卓越角とするトレース群を図-12において $\theta_y=85^\circ\sim 180^\circ$ の区間に含まれるトレースのすべてと仮定して式(10)、式(11)の積分を行うと、

$$F_y(132) = 1.86$$

$$F_x(0) = 1.38$$

$$F_z(0) = 1.24$$

となる。この亀裂面群の法線ベクトルの方向は $\theta=42^\circ$ 、 $\phi=0^\circ$ であるから、式(15)~(17)を用いて、亀裂面群の面積密度 $D=1.86 \text{ m}^2/\text{m}^3$ を得る。

d) $F_x(0^\circ)$ と $F_z(90^\circ)$ のトレース群

図-12(b)において、 $\theta_x=0^\circ$ を卓越角とするトレース群の分布密度 $F_x(0)$ は、積分範囲を $\theta_x=0^\circ\sim 50^\circ$ 、 $135^\circ\sim 180^\circ$ として、

$$F_x(0) = 2.01$$

同様に図-12(c)において、 $\theta_z=90^\circ$ のトレース群では、積分範囲を $\theta_z=40^\circ\sim 135^\circ$ として、

$$F_z(90) = 2.53$$

を得る。すでに述べたように、B、C亀裂面群のトレースは、 X 面、 Z 面において、その卓越方向が等しく重なり合って現われるから、上記の積分値はb)、c)で求めたそれぞれの値の和に一致することとなるはずであ

り、推定した亀裂面群の値の1つのチェックを与える。すなわち、b)、c)の結果より、

$$F_x(0) = 1.10 + 1.38 = 2.48$$

$$F_z(90) = 1.32 + 1.24 = 2.56$$

であり、 $F_z(90)$ については、ほとんど一致し、 $F_x(0)$ については約20%程度の差を生じた。

以上で、本地下発電所周辺岩盤に分布するであろう亀裂面群の方向性とその分布密度を岩盤掘削面で撮影された写真画像から抽出された亀裂面のトレース情報を用いて推定することができた。これらの結果をまとめて図-13に示すこととする。なお、同図中の D 、 \underline{n} は、各亀裂面群の分布密度(単位体積の岩盤中に含まれる亀裂面群の密度)と法線ベクトルを表わしている。

6. 考察と結果

5. では、実際の地下発電所空洞周辺の岩盤中に存在する亀裂面の分布について、4. で示したステレオロジック的手法を用いて評価した。本章では、この評価結果の妥当性について考察することとする。

図-14は、トレース長が3m以上の主要亀裂面につ

	ステレオネットによる方法		ステレオロジックによる方法	
	走行/傾斜	分布密度	走行/傾斜	分布密度
A	N20E88N	1.28 m^2/m^3	N 8 E 90N	1.28 m^2/m^3
B	N76W47N	1.72 m^2/m^3	N82W50N	1.72 m^2/m^3
C	—	1.86 m^2/m^3	N82W42S	1.86 m^2/m^3

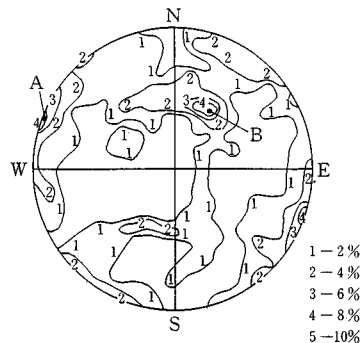


図-14 現位置で測定した主要亀裂のステレオマップ

いて、原位置において測定した走行・傾斜データのステレオマップである¹⁰⁾。図中A, Bで示した点は、卓越方向であり、それぞれN20E/88N, N76W/47Nである。また、前章での写真画像から抽出したトレースデータを用いて評価した亀裂面群は3種類あり、図-13に示すこれら3つのA, B, C亀裂面群の方向を走行・傾斜角に変換して表わすとそれぞれ、N8E/90N, N82W/50N, N82W/42Sとなる。

図-14中の表には、これら2種類の手法で求めた卓越方向をまとめて示した。両者の卓越方向を比較すると、AおよびB亀裂面群については良く一致しているが、C亀裂面群については、ステレオマップ上では卓越しているとは認められない。また、ステレオロジーでは各卓越方向に属する亀裂面群の密度が、単位体積中に含まれる亀裂面の面積として求まるが、これをみるとステレオマップでは現われなかったC亀裂面群が、 $1.86 \text{ m}^2/\text{m}^3$ で最も大きい。ステレオロジーによる方法がより短いトレースまで考慮に入れていることを考えると、A, B亀裂面群の方向はトレース長が数m以上の比較的大きな亀裂面が多く存在し、C亀裂面群についてはトレース長が数m以下の比較的小さい亀裂面が多数存在している可能性がある。その結果、全体としてはC亀裂面群の密度が大きいのではないかと考えられる。

また、同地点は砂岩層からなり、地質図から判断される層理面の方向はほぼB亀裂面群の卓越方向と一致しており、この方向と直交する方向にC亀裂面群の卓越方向がある。したがって、B亀裂面群は比較的大きなトレース長をもつ層理面に平行する亀裂面の一群であり、C亀裂面群の方向は、この層理面と共役な方向に存在する比較的小規模な亀裂面群と判断することができる。

7. あとがき

赤石地下発電所の建設工事では、発電機立坑直上の組立室の掘削において詳細な地質調査を行い、これら調査データに基づきステレオロジーを用いた亀裂分布の定量評価が試みられた。亀裂分布の調査・評価の直接的な目的は組立室直下に掘削される大規模な立坑 ($\phi 13 \text{ m} \times H 65 \text{ m}$) をわが国で初めて、NATM工法により掘削するため、岩盤の不連続性を考えた立坑の力学的安定性を検討するデータを得ることであった。また、この評価結果は、損傷力学に従う岩盤構造解析の入力情報として利用

され、発電機室立坑の力学的安定性の評価と、ロックボルト等の支保対策工の設計に利用された。現在、この立坑は掘削を完了し、上記目的を十分達成できたことをここに付記し、その結果については、また別の機会に報告したいと考えている。

最後に、本研究の機会を提供すると同時に、研究全般にわたって多くのご指導を頂いた中部電力大井川上流水力建設所 大橋所長、東側副所長、前田副長および関係諸氏に深く感謝致します。また、地下空洞内での岩盤調査において、多くの協力を頂いた間組大井川作業所の山元所長、門脇主任に謝意を表します。

参考文献

- 1) 草深守人・浜島良吉・川井忠彦：岩盤中に分布する中小規模亀裂面の定量評価手法、土質工学会論文報告集、Vol. 27, No. 4, pp. 176~188, 1987.
- 2) 菊池宏吉・斉藤和夫・金折裕司：土木構造物基礎岩盤中の節理分布性状の一解析手法、第5回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp. 121~126, 1977.
- 3) 緒方正彦：硬質岩盤における節理分布の数量モデルおよびその適用に関する考察、応用地質、Vol. 19, No. 1, pp. 12~20, 1978.
- 4) 京谷孝史・大橋敏行・川本眺万：岩盤の力学性評価における損傷テンソルの適用について、土木学会論文集、No. 358/III-3, pp. 27~35, 1985.
- 5) Kyoya, T., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T.: A damage mechanics analysis for underground excavation in jointed rock mass, Proc. Int. Symp. Eng. Complex Rock Formations, Science Press, Beijing, China, pp. 506~513, 1986.
- 6) 小田匡寛・鈴木健一朗：クラックテンソルによる不連続性岩盤のモデル化に関する研究、第15回岩盤力学シンポジウム、pp. 96~100, 1983.
- 7) Kanatani, K.: Stereological determination of structural anisotropy, Int. J. Eng. Sci., Vol. 22, No. 5, pp. 531~546, 1984.
- 8) 金谷健一：構造異方性によりひずみを決定するステレオロジーの理論、日本材料学会誌、Vol. 20, pp. 43~51, 1984.
- 9) 草深守人：岩盤中に分布する不連続面の定量評価手法と岩盤構造解析手法に関する基礎的研究、東京大学工学博士論文、1987.
- 10) 西村 毅・草深守人・大野博之・小島圭二：岩盤割れ目系の現地調査をもとにした確率統計的な評価、第23回土質工学研究発表会講演集、pp. 1119~1120, 1988.

(1989. 4. 22・受付)