

64. 節理密度ダイアグラム用いた最適なグラウチング注入孔設定手法の検討

Examination of effective grouting borehole direction by Joint Density Diagram

○宇津木慎司（間組），水戸 義忠（京都大学）

Shinji UTSUKI, and Yoshitada MITO

1. はじめに

ダム基礎岩盤として採用される事例の多い節理性岩盤における透水性は、節理面などの割れ目を通過する流れが岩質部を通過する流れに対して十分に卓越するため、その浸透流は節理系を主たる経路とすると考えられている。これらの割れ目にセメントミルクを注入し、基礎岩盤の遮水性および力学的特性を改良することを目的として実施されるのがグラウチング工であるが、その注入孔の設定方向は通常、鉛直下方に設定される。これについて、「グラウチング技術指針・同解説」¹⁾では、例えば連続性の良い高角度の割れ目が分布する場合などでは、割れ目と斜交するように注入孔を設定させた方が効果的な場合もあると記載されている。

これに対して、筆者は、基礎岩盤において主要な水みちを形成する岩盤の割れ目について、その走向・傾斜のデータをもとに、一般に複数存在する卓越した割れ目系に対して最も交差しやすい削孔方向を算定する節理密度ダイアグラムを用いた評価手法を開発した。本論文においては、このダイアグラムの具体的な内容について詳述するとともに、実際のダム現場へ適用した事例について述べる。

2. 節理密度ダイアグラムの概要

土木・岩盤構造物基礎岩盤の調査においては、地質構造の解明や岩盤性状の評価を目的として、掘削面および切羽などの地質観察やボアホールカメラの観察などにより、割れ目などの地質学的不連続面の方向性が検討される。測定された割れ目は、シュミットネットなどの球面投影法を用いて整理されるが、これらの手法は、方向性の定性的な評価に利用されるに留まっており、節理分布性状に起因する岩盤の異方性を考慮するまでには至っていない。これに対して筆者²⁾は、この球面投影法を用いて節理分布を評価し、定量的に設計・施工に反映できる新しい図的解法を提案した。

土木・岩盤構造物基礎岩盤の調査において、割れ目を観察する手法としては、図-1に示すように、掘削面などの平面で割れ目を観察する方法と、調査線を設定しそれに交差する割れ目を観察する方法とに大別される。そして、この図には、等間隔で分布する複数の割れ目系を記載しているが、図中の調査線の設定方向によってそれぞれの割れ目のサンプリング頻度が異なる。

このような偏向を補正するにあたっては、母数を推定する際に各節理を等質に取り扱うのではなく、それぞれの節理について抽出される確率を加重した統計計

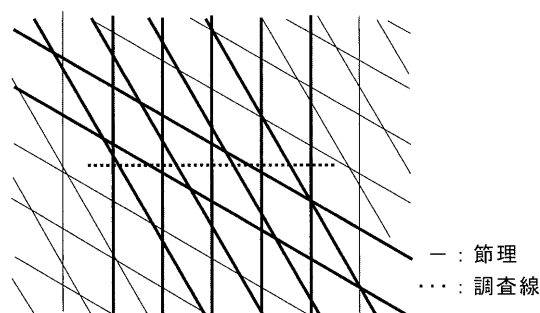


図-1 節理調査手法模式図

算により推定量を求め、これに実現値を代入することによって、不偏性・有効性を備えた推定値を求めればよい。割れ目の調査線観察における、方向性による偏向に関する加重値 W_i は以下の式で表される。

$$W_i = \operatorname{cosec} \left\{ \frac{\pi}{2} - \cos^{-1}(\hat{n}_i \cdot \hat{n}_L) \right\} \cdots \text{式 1}$$

$$= \frac{1}{|\hat{n}_i \cdot \hat{n}_L|}$$

但し、 $\hat{n}_L$: 調査線の単位方向ベクトル
 $\hat{n}_i$: i 節理面の単位法線ベクトル
 $0 \leq \cos^{-1}(\hat{n}_i \cdot \hat{n}_L) \leq \frac{\pi}{2}$

ここで、任意の削孔方向 m において交差する割れ目の頻度を算定するには、サンプリングされた個々の割れ目を調査線の設定方向による偏向を式1)で補正した上で、 m 方向における交差頻度を算定し、その後、全ての割れ目について実施した計算結果を足し合わせる必要がある。具体的には、図-1に示すような調査線長さ L において観察された個々の割れ目 i について、サンプリング方向による影響を排除する目的で式1)の加重平均を考慮すると、この割れ目 i の法線方向における分布頻度 ρ_{Ri} は式2)のように表すことができる。

$$\rho_{Ri} = \frac{W_i}{\sum L} \cdots \text{式 2)}$$

但し、 W_i : 調査偏向を補正する加重値
 $\sum L$: 調査線の長さの合計

このとき、任意の削孔方向 m における i 節理の見掛けの1次元密度 $\rho_{Pi}(m)$ は、式3)で表される。

$$\rho_{Pi}(m) = \rho_{Ri} |\hat{n}_i \cdot \hat{n}_m|$$

$$= \frac{W_i |\hat{n}_i \cdot \hat{n}_m|}{\sum L} \cdots \text{式 3)}$$

$\hat{n}_m$: 原点を始点、計測点を終点とする単位ベクトル

したがって、 m 方向における節理密度 $\rho(m)$ は、全ての割れ目に関する1次元密度を合算することにより、式4)によって与えられる。

$$\rho(m) = \sum_{i=1}^N \rho_{Pi}(m)$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^N (w_i |\hat{n}_i \cdot \hat{n}_m|)}{\sum_{i=1}^N L} = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{n}_i \cdot \hat{n}_m}{\sum_{i=1}^N \hat{n}_i \cdot \hat{n}_L} \dots \text{式 4)}$$

そして、上記した式で算出した任意の方向における節理密度を全ての方向において算出し、その結果を図-2に示すようにシュミットネットに整理したのが節理密度ダイアグラムである。なお、本システムは、施工現場における即時性のある対応を目的としていることから、表計算ソフトとして汎用性の高いマイクロソフト社製Excel2007でプログラムを作成した。

3. ダムサイトにおける具体的な検討結果

検討を実施したダムサイトの地質は、中生代白亜紀の花崗閃緑岩である。当ダムでは、調査横坑において測線を用いた割れ目調査が実施されており、測線長1,362m区間で得られた2,337個の割れ目が得られている。その結果、NE-SW走向高角度系の割れ目が最も卓越しており、それと雁行するE-W走向高角度系および概ねそれと直交するNNW-SSE走向高角度系のものも比較的多く分布していることが判明した。

これに対して、前章で詳述した節理密度ダイアグラムを用いて、この2,337個の割れ目に対して、任意の方向に削孔した際に交差する割れ目の密度を算出した結果を図-2に示す。これをみると、①最も割れ目と交差しやすい方向はN25W方向で南東に20°傾斜させる方向であり、③最も交差しにくい向きはN30W方向で北西に60°傾斜させる方向であることが分かる。なお、実際の不連続面密度値については、①方向が約1.0個/mに対して、通常のグラウチング施工で採用される②鉛直下方が約0.8個/m、最も交差しにくい③方向では約0.6個/mと、削孔方向により最大4割程度、割れ目の交差しやすさが異なることが判明した。

当ダムにおいては、上記した検討結果を検証する目

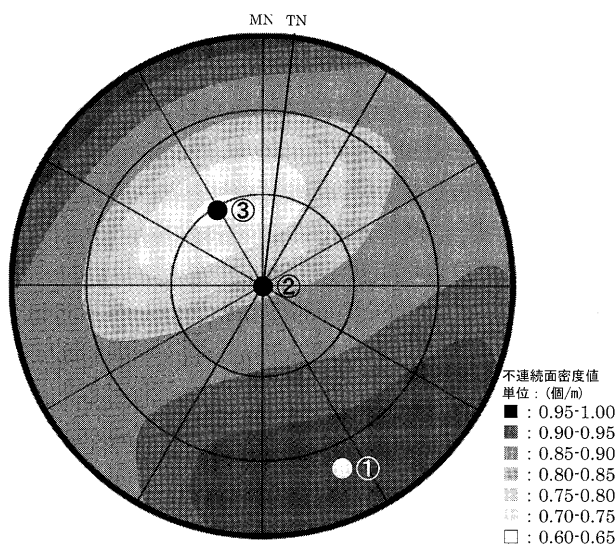


図-2 節理密度ダイアグラム検討結果

的で、地質状況や割れ目の卓越傾向が同一の地点において、(1)既往の鉛直下方に設定した孔と(2)上記検討結果より鉛直下方から東側に60°傾斜させた孔で透水試験を実施することにより、試験結果の差異を確認した。ここで、図-3に2つの削孔方向ごとのルジオン値の対数頻度分布を示す。この図は、透水試験結果について、①CH級岩盤における結果、②CM～CL級岩盤における結果、そして③その両者を足し合わせた河床部全体の結果を示したものであるが、既往の施工事例の大半を占める(1)鉛直孔よりも(2)60°傾斜孔の方でルジオン値の最小値、平均値、そして平均値－標準偏差値が大きくなっていることが分かる。これは、上述した検討結果に従って注入孔を傾斜させることにより、鉛直孔と比較してより多くの割れ目と交差し高透水を呈していることを示唆していると推察される。

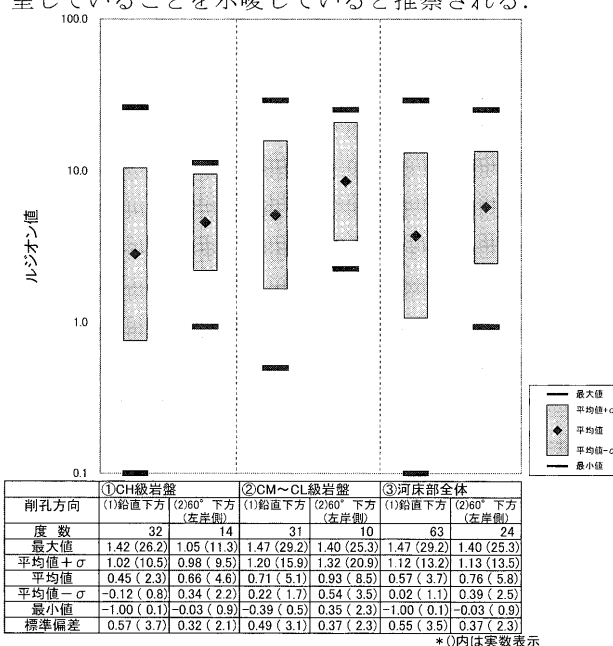


図-3 削孔方向ごとのルジオン値対数頻度分布

4. まとめ

最適なグラウチング孔の設定を目的として、任意の削孔方向において交差する割れ目の密度を算出する節理密度ダイアグラムを開発した。また、その検討結果をもとに、実際のダム基礎岩盤において削孔方向を傾斜させ透水試験を実施したところ、鉛直下方に設定した場合と比較してルジオン値が高いことを確認した。

今後、多種の岩盤におけるダム施工現場において本検討を実施することにより、その適用性をより高めていき、それぞれのダムサイトの地質状況に応じて最適な検討方法を確立していく所存である。

参考文献

- 財団法人国土技術研究センター：グラウチング技術指針・同解説，大成出版，2003。
- 水戸義忠：節理分布性状の確率モデルを用いた節理性岩盤の解析に関する基礎研究，京都大学博士論文，1993。