

地山の不均質性が岩盤空洞の湧水量の予測に与える影響について

清水建設株式会社 正〇郷家光男, 正 戸栗智仁

1. はじめに 岩盤中に空洞を構築する際、計画・設計段階において地下水の湧水量を事前に予測・評価を行う場合、調査結果等から設定する各地層の透水係数等の物性値は均質であると仮定することが多い(例えば1)。しかし、均質な地層と見なしている場合でも、実際の地山の物性は場所ごとに変動していて、特に、不連続性岩盤に関しては、き裂の有無、き裂の透水性の変動、連結性等によって、透水性に不均質性が生じていると考えられる。したがって、均質と仮定して湧水量を評価する場合、本来、地山が持っている不均質性が湧水量に与える影響について把握しておく重要であると考えられる。本研究では、亀裂性岩盤を対象として不均質性を考慮した解析モデルを構築する方法を考案するとともに、湧水量の予測に対する透水性の不均質性の影響について予備的な評価を行った。

2. 解析方法 本研究では、亀裂性岩盤を対象としたことから、透水性の不均質性や湧水量は、岩盤中に存在する亀裂の特性に依存することになる。また、実プロジェクトに適用することを考慮すると、地上からのボーリング調査や露頭観察等の調査段階で得ることができる亀裂の情報を基に、不均質性を考慮した解析モデルを構築して、湧水量を予測できることが重要と考えた。そして、調査から得られる亀裂の特性データにはバラツキがあることから、特性データについては、確率論的に理解した方が合理的と考え、最終的に求めたい湧水量も確率論的に評価することにした。

ボーリング調査や露頭観察等から得られる情報としては、ボーリング孔内の区間透水係数、亀裂の方向分布、亀裂の透水量係数の分布、トレース長の分布等が想定され^{2,3)}、これらを亀裂発生条件とする。そして、解析領域と領域内に複数の仮想のボーリングと孔内透水試験区間を設定する。その後、亀裂発生条件に基づいて、中心位置、法線ベクトル、透水量係数および大きさの情報が付与された亀裂を1枚発生させる。そして、孔内透水試験区間に交わった亀裂の透水量係数から、以下の式を用いて区間透水係数 k_i を求める。

$$k_i = \frac{1}{L_i} \sum_{j=1}^{N_i} T_{ij} \quad (1)$$

ここに、添え字 i は孔内透水試験区間、 L_i は試験区間 i の区間長、 T_{ij} は試験区間 i に交わった亀裂の透水量係数、 N_i は試験区間 i に交わった亀裂の枚数を示す。

式(1)より求めた区間透水係数 k_i の対数平均値が、目標値に達するまで、亀裂の発生を続ける。

亀裂の発生完了後、個々の区間透水係数が実際のボーリング調査で求めた区間透水係数に相当するものとして、その間をクリギングで補間して、領域全体の透水係数を求める。このようにして得られた解析モデルは、亀裂の特性に応じて透水係数が不均質となる。解析モデルの構築フローをまとめると、図-1のようになる。図-1に示した解析モデルの構築フローを繰り返すことによって、複数の解析モデルを構築する。そして、それぞれの解析モデルに対して地下水流動解析を行って湧水量を求めて、それらを分析することで湧水量を確率論的に評価することができる。

3. 解析条件と結果 湧水量の予測に対する透水性の不均質性の影響を評価するために、前章で示した解析方法に基づいて簡単なモデルによる解析を行った。

亀裂の特性や発生完了とする区間透水係数の対数平均値の目標値等を表-1に示す。ここで、亀裂の方向分布、中心位置、透水量係数の分布については、既往の研究²⁾を参考にした。湧水量算定のための解析メッシュと境界条件を図-2に示す。空洞は10m×10mの矩形とし、地下水流動解析では飽和・定常条件としている。また、既往の研究⁴⁾を参考にし、解析モデルを20ケース作成することにした。

亀裂の発生例を図-3に示す。法線ベクトルの卓越方向を鉛直上向きとしたことで、水平方向の亀裂が卓越していることが分かる。試験区間の位置と区間透水係数の値を図-4に示す。試験区間は計729箇所とした。そして、図-4の区間透水係数を基にして、通常クリギング⁵⁾を用いて得られた領域全体の透水係数を図-5に示す。なお、クリギングを行う際には、各要素の重心を推定点とした。そして、20ケースの解析モデルを解析した結果から得られた湧水量の累積分布関数を図-6に示す。この図には、比較のために、岩盤の透水係数が 1×10^{-8} [m/s]と均質な場合の湧水量 (1.62×10^{-4} [m³/s]) も併せて示している。図-6より、不均質性を考慮した場合の湧水量は、今回の条件では、均質な場合よりも約80%の確率で多くなると予測されることが分かった。

下茂⁶⁾は、透水係数の対数平均値が同じでも、不均質性によって標準偏差が増加すると巨視的透水係数は増えることを示していて、その理由として、連続する高透水性の水みちの存在を指摘している。今回の結果も、不均質性を考慮したことにより、空洞近傍に高透水性を示す箇所が出現して、その影響が湧水量に現れたと考えられる。

4. おわりに 本研究では、亀裂性岩盤を対象として不均質性を考慮した解析モデルを構築する方法を示すととも

キーワード：亀裂性岩盤、透水性、不均質性、湧水量、確率論的評価

連絡先：〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1 Tel.: 03-3561-3919 Fax.: 03-3561-8673

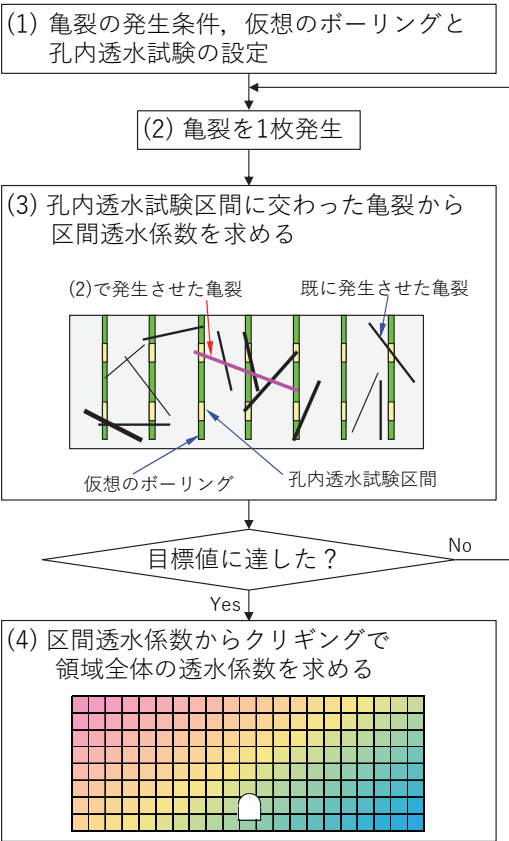


図-1 解析モデルの構築フロー

表-1 亀裂の発生条件

パラメータ	設定値
方向	Fisher分布 (Fisher係数: 20), 卓越方向: 鉛直上向き
形状	円形
半径	一様分布 (最小: 20m, 最大: 40m)
中心位置	ランダム
透水量係数	対数正規分布 (対数平均-8.99m ² /s, 対数標準偏差1.07m ² /s)
区間長	10[m]
目標値	1 × 10 ⁻⁸ [m/s]

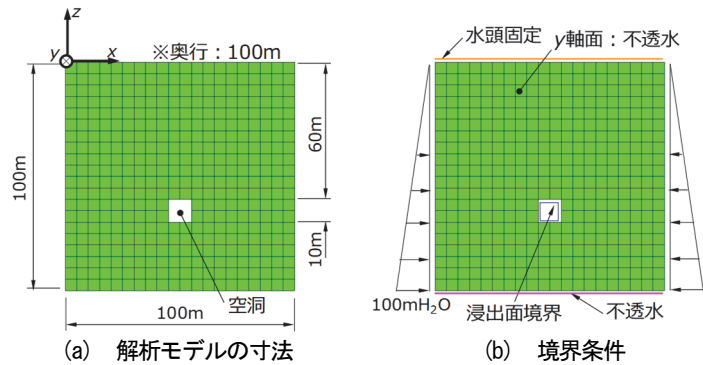


図-2 湧水量算定の解析モデルの寸法と境界条件

に, 湧水量の予測に対する不均質性の影響について予備的評価を行った. その結果, 均質と仮定した場合の湧水量は過小評価される可能性が高いことが分かった. 今後の課題としては, 実プロジェクトへの適用を視野に入れた大規模解析の対応や, 局所的な透水異方性の対応等が挙げられる.

謝辞: 本研究を進めるにあたり, 清水建設株式会社技術研究所の白石知成主任研究員と山本真哉主任研究員に御助言と

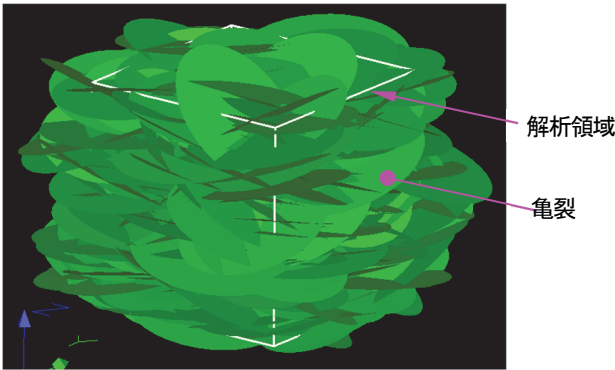


図-3 亀裂の発生例

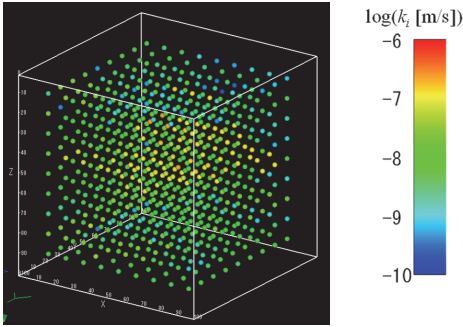


図-4 仮定のボーリングによる区間透水係数の分布

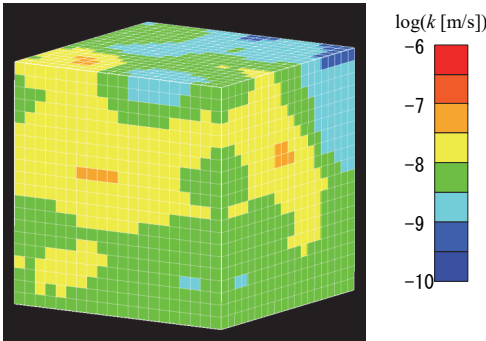


図-5 透水係数の推定例

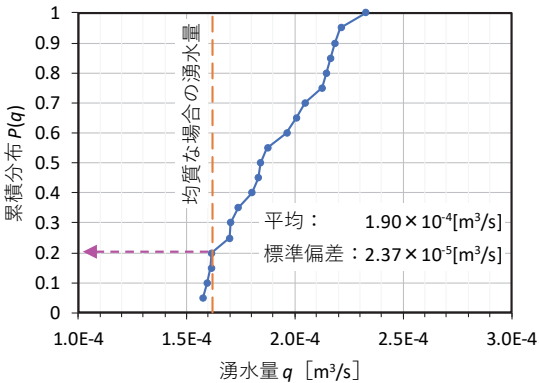


図-6 湧水量の累積分布関数

御協力を頂きました. ここに感謝の意を表します.

参考文献

1) 細野ら: 第14 岩の力学国内シンポジウム講演集, 講演番号 120, 2017. 2) 井尻ら: 土木学会論文集, No.694/III-57, pp.179-194, 2001. 3) 鈴木ら: 土木学会論文集 C, Vol.65, No.1, pp.185-195, 2009. 4) Goovaerts, P.: *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol.13, pp.161-182, 1999. 5) Deutsch, C. V. and Journel, A. G.: *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide* (2nd edition), Oxford University Press, pp.63-117, 1998. 6) 下茂: 第14 回岩の力学国内シンポジウム講演集, 講演番号 116, 2017.