

Ⅲ - 329

逆解析を用いた亀裂内透水係数の空間分布推定

清水建設（株） 和泉研究室 正会員 ○奥野哲夫、 西塚郎
同上 技術開発センター 正会員 斉藤章、 正会員 傳田篤

1. はじめに 岩盤構造物周辺の止水性を確保する目的から、グラウト改良効果の確認技術が必要とされており、主要な透水経路となる岩盤亀裂の透水性に顕著な不均質性がある場合は、グラウト改良効果の確認が困難になる。本研究では、グラウト注入の事前調査段階においてクロスホール透水試験を実施し、その観測値を用いて亀裂内の透水係数の空間分布を逆解析により推定した結果を報告する。

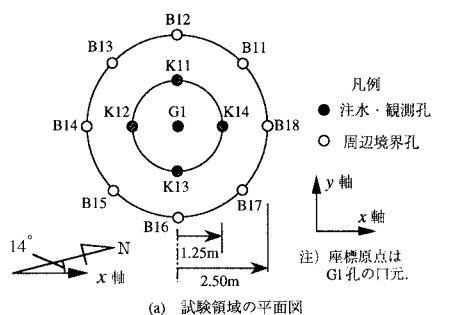
2. クロスホール透水試験 クロスホール透水試験は、ボーリング孔などを利用して注水区間を設け、そこからの注水に伴う圧力水頭の応答を他の観測区間で3次元的に観測するもので、透水場のモデル化に基づき解析理論は数種類に分類される。ここでは後述する亀裂モデルを主要な透水経路と考え、著者らが提案している逆解析手法に基づき亀裂内の透水係数の空間分布を推定する。試験位置は釜石鉱山の既設坑道内（海拔約500m、幅約6m×高さ3m×長さ130m）の一面に設けた試験場で、岩盤は接触交代作用により概ねガーネットスカルン（変成岩）である。試験位置の平面図とバックャー区間（注水・観測区間）の深度方向の配置を相対的位置関係で表示し図-1に示す。なお、後述の解析結果は図-1の座標系（右手系）に基づき表示している。

透水試験中の境界条件をできる限り明確に設定するため、試験領域の床盤周辺にコンクリート壁を施工し、その内部に水を溜めることにより床盤部分を等ポテンシャル境界（水位一定境界；G.L.0.4m）に設定した。さらに周辺境界孔であるB11～B18の8本は裸孔とし、孔底までの全水頭を床盤部分と同一水位（G.L.0.4m）に保った。この周辺境界孔で囲まれる円筒形岩盤領域を今回の試験対象領域（半径2.5m、深さ約10m）とし、周辺境界水位はこれらの8本のボーリング孔で制御した。しかし、実際の観測結果から必ずしも試験領域側面が適切に制御されていたとは判断できず、後述する逆解析における境界条件の設定には課題が残されている。図-2にはG1-1区間から注水した場合のK11孔の4区間での応答観測値を示す。図中、初期全水頭が0.4mになっておらず、初期条件および境界条件の制御に問題があることが判断できる。以下の解析では、G1-1区間から注水した場合の全17区間の応答観測値のうち、以下に示す主要な亀裂が交わる観測区間（9区間）の応答値のみ利用した。その際、初期状態では理想的に全水頭0.4mに制御されているものとし、これに応答観測値の増分をを加算して逆解析に用いた。

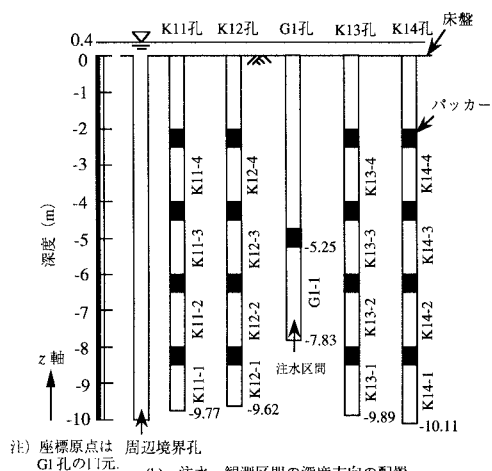
3. 逆解析手法と解析モデル 逆解析手法はすでに著者らが示している手法を用いた。ただし、今回の逆解析では亀裂内の浸透流を対象するため、有限要素法の定式化は百田²⁾らが示した方法に換えている。平行平板モデルでは透水係数ならびに単位奥行き当たりの流量は以下の式で与えられる。

$$k = \frac{1}{12\nu} \cdot g \cdot t_o^2 \quad (1) \quad q = k \cdot i \cdot t_o \quad (2)$$

ここで、 k :透水係数、 ν :動粘性係数、 g :重力加速度、 t_o :開口幅、 q :単位奥行き当たりの流量、 i :動水勾配、 t_o :亀裂幅であり、平行平板モデルでは開口幅と亀裂幅を等しいと仮定することが多い。式(1)の透水係数はPoiseuille則を仮定して導かれるが、実際の亀裂内には粘土鉱物などの充填物が存在し、計測される幾何学的



(a) 試験領域の平面図



(b) 注水・観測区間の深度方向の配置

図-1 試験領域の配置

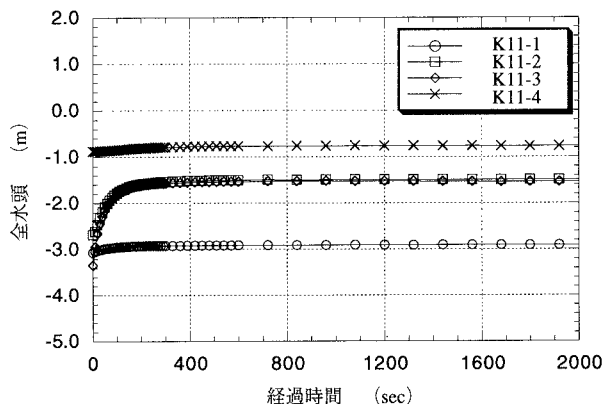


図-2 クロスホール透水試験の応答観測値
(注水区間：G1-1、観測孔：K11孔)

な開口幅と水理学的に有効な開口幅とは一致しないことが多い。さらに、グラウト改良効果を評価する目的からは必ずしも開口幅を正確に評価する必要はなく、透水性が評価されることが第一の目的である。これらの理由から開口幅は直接考慮せず、亀裂幅を一律0.1mmと仮定した。このことは式(1)から透水係数が与えられるのではなく、式(2)の亀裂幅 t_c （一定値0.1mm）の下でダルシー則と質量保存則を満たしつつ、観測値に基づいた透水係数 k の最適推定値が与えられることを意味する。したがって、以下で求め

られる透水係数は亀裂幅を0.1mmと仮定した場合の見かけの透水係数である点に注意を要する。ただし、逆解析を実施するに当たり透水係数の初期推定値は、上記の亀裂幅が開口幅と等しいと仮定して式(1)から換算される透水係数を与えた。なお、透水係数の相関特性や事前情報に関する詳細な説明は省略する。

次に、解析モデルを構築するため、BTV観察やコア観察から透水性に関与すると判断される主要な亀裂を評価した。その結果、表-1に示す4つの亀裂が選定された。試験対象領域内に存在するこれらの亀裂を平板でモデル化し、要素分割したもの（3次元表示）が図-3である。

4. 亀裂内透水係数の空間分布推定結果 クロスホール透水試験時の境界条件として、試験対象領域の側面と上面（床盤部）は全水頭0.4mの水位指定境界とし、底面は不透水境界とした。また、注水を行ったG1-1区間と交差する節点には注水量を与えた（流量指定境界）。以上の境界条件に基づく非定常解析を基礎とし、事前情報と観測地下水位（全水頭）から最適推定値を求めた。その結果を図-4に示す。図-4は図-3と同一方向から見た鳥瞰図に透水係数（単位cm/sec）の常用対数値のコンターを示したものである。前述のように、ここで求めた透水係数は亀裂幅を0.1mmと仮定した場合の見かけの透水係数であることから、絶対値を評価するよりも透水性を相対的に表す指標と考えるのが適切である。逆解析結果として亀裂内の透水係数の空間分布が推定され、部分的に大きな透水性を有する領域が認められる。しかし、この領域の透水係数は相対的にもかなり大きな値を示している。このような透水係数は事前情報とG1-1区間からの注水による1回の試験結果を用いた最適推定値である。本手法は、他のバックー区間から注水することによる複数の試験結果を用いることが可能で、新たな試験から得られる情報を逐次追加して推定結果を更に信頼できるものに更新することが可能である。

5. おわりに

以上の方法に基づき、亀裂内の透水係数の空間分布推定結果をグラウト注入前後で比較し、グラウト改良範囲と改良の程度が確認できるものと考えられる。今後、グラウト改良評価に応用し、本手法の適用性を検討する予定である。

謝辞 本研究の現場実験は通産省新発電技術実用化開発費補助金の下に実施したものであり、日鉄鉱業（株）および金石鉱山（株）の関係各位に協力頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献 1) 奥野、鈴木、市川：複数の揚水試験結果を用いた透水係数の空間分布推定と地下水流動の将来予測，土木学会論文集，No.493/III-27，1994。 2) 百田、佐藤：割れ目系地山のトンネル・空洞を対象とした地下水の三次元挙動の解析，土木学会論文集，No.364/III-4，1985。

表-1 主要亀裂の選定結果（座標単位：m）

亀裂番号	x 座標	y 座標	z 座標	走向	傾斜
1	0.0	0.0	-2.10	N83W	77SW
2	0.0	0.0	-3.70	N80W	57SW
3	0.0	0.0	-4.73	N52E	69SE
4	0.0	0.0	-6.46	N44E	44SE

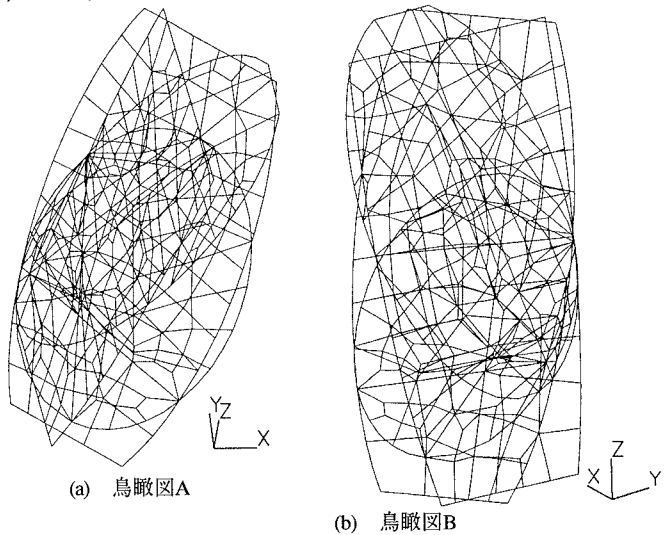


図-3 亀裂モデルの要素分割

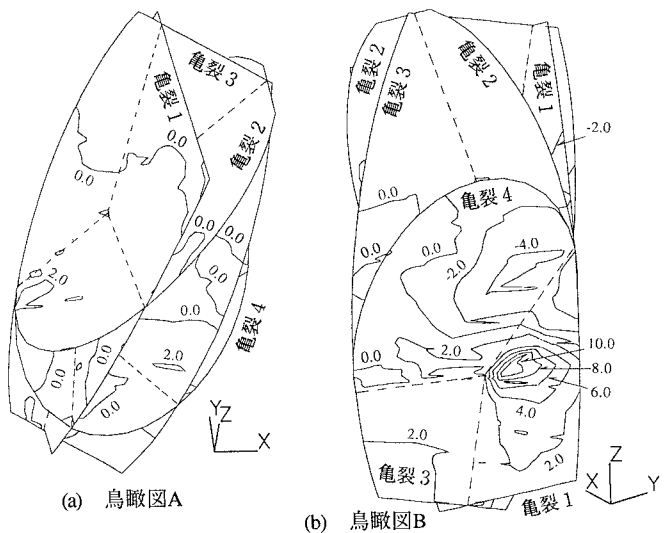


図-4 亀裂内の透水係数の空間分布推定結果
（単位cm/secの透水係数の常用対数値）