

III-418 注入試験ならびに割れ目情報を用いた岩盤透水係数の評価に関する検討

清水建設(株) 大崎研究室 正員 ○奥野 哲夫, 正員 百田 博宣

1. はじめに 原位置岩盤の透水性の評価にはルジオン試験などの注入試験が行われており、ボーリング孔から得られる割れ目情報から透水性を評価する試みが行われている。本研究では、このような注入試験ならびに割れ目情報から求まる透水係数について基礎的な知見を得ることを目的とし、二次元領域の割れ目系岩盤モデルを用い、注入試験のシミュレーションを行った。また、注入区間長の違いが岩盤透水係数の評価に与える影響についても検討したので以下に報告する。

2. 解析方法 解析の対象とした割れ目系岩盤モデルは、Longら¹⁾の数値実験と同様の方法で作成したものであり、表-1にその条件を示す。割れ目の分布特性としては、方向、トレース長さ、開口幅に関する確率密度関数と割れ目密度を設定した。この場合、割れ目の方向は直行する2つの卓越法線方向(Set)を持つものとし、各Set毎にトレース長さ、開口幅、密度を独立に設定した。ただし、今回の解析においては、2つのSetのトレース長さ、開口幅、密度を一致させ、全て等方的な透水性を持つ岩盤モデルを作成した。卓越法線方向と密度は表-1のとおりであり、トレース長さと開口幅に関する確率密度関数は、それぞれ平均値0.75m、0.10mmの負の指数分布とし、全Caseとも一致させた。なお、これらの分布特性はRouleauら²⁾などの測定結果を参考として設定した。以上の分布特性に従う二次元岩盤モデルを生成した後、注入試験のシミュレーションを行う。解析領域、境界条件ならびに注入区間の位置を図-1に示す。注入区間長の影響を調べる目的で、2つの解析モデルを設定している。解析モデル④では、長さ12.5mの注入区間からポテンシャル値一定(10m)の条件で注入を行うもので、注入区間をA~Cと変えて合計3回の解析を行った。解析モデル⑤では、解析モデル④の各注入区間を5分割し(長さ2.5m)、注入区間をA~Oと変えて合計15回の解析を行った。注入区間から左右2方向に水平流が生じるものとし、次式で注入量より透水係数 K_I を算出した。これは原位置試験においてルジオン試験から透水係数を算出する場合に対応する。

$$K_I = \frac{Q_{in} \cdot R}{2 \cdot l \cdot (P_{max} - P_{min})} \quad (1)$$

ここで、 Q_{in} :注入量(cm^2/s)、 R :影響距離(500cm)、 l :注入区間長(cm)、 P_{max} :注入ポテンシャル値(cm)、 P_{min} :無限遠方ポテンシャル値(cm)である。また、これとは別に注入区間と交わる割れ目情報から透水係数 K_C の算出を行った。図-2に示すとおり、注入区間に対して垂直方向に巨視的な動水勾配 J が生じるとすると、各割れ目の流量 Q_i は次式で与えられる。

$$Q_i = K_i \cdot t_i \cdot J \cdot \cos(\theta_i - \theta_l) \quad (2) \quad K_i = \frac{g \cdot t_i^2}{12 \cdot \nu} \quad (3)$$

ここで、 K_i :各割れ目の透水係数(cm/s)、 t_i :各割れ目の開口幅(cm)、 θ_i :X軸からの各割れ目の角度(°)、 θ_l :X軸からの注入区間法線の角度(°)、 g :重力加速度(cm/s^2)、 ν :動粘性係数(cm^2/s)である。したがって、注入区間と交わる割れ目(割れ目数 n)の流量の総和 Q と巨視的な動水勾配 J との関係から、 K_C が次式のように求められる。

表-1 解析条件一覧表

解析 Case	割れ目の分布条件				解析 モデル
	卓越法線方向 (°)		割れ目密度 (*/m ²)		
	Set1	Set2	Set1	Set2	
1	90°	0°	2.5	2.5	④
2	(75°~105°)	(-15°~15°)			⑤
3	60°	-30°			⑥
4	(45°~75°)	(-45°~15°)			⑦
5	90°	0°	3.5	3.5	④
6	(75°~105°)	(-15°~15°)			⑤
7	60°	-30°			⑥
8	(45°~75°)	(-45°~15°)			⑦
9	90°	0°	4.5	4.5	④
10	(75°~105°)	(-15°~15°)			⑤
11	60°	-30°			⑥
12	(45°~75°)	(-45°~15°)			⑦
備考	卓越法線方向(Set1, Set2)の値は一樣分布の平均値を示し、()内にその分布範囲を示している。解析モデルは図-1を参照。				

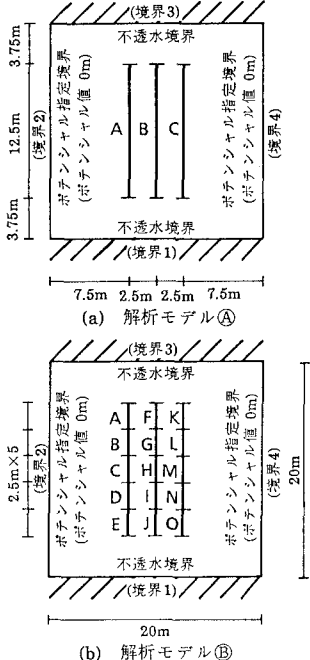


図-1 岩盤モデルの境界条件と注入区間位置

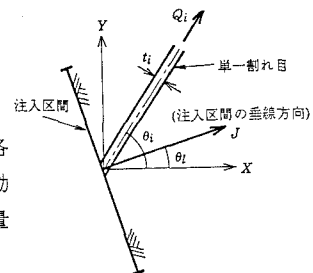


図-2 注入区間と交わる単一割れ目

$$K_C = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{l \cdot J} = \frac{1}{l} \cdot \sum_{i=1}^n K_i \cdot t_i \cdot \cos(\theta_i - \theta_l) \quad (4)$$

また以上の注入試験を行う前に、モデル領域全体の透水係数 K_A を求めるため、図-1の境界2と境界4にそれぞれポテンシャル値20mと0mを与え、X方向の透水係数 K_A を求めた。

3. 解析結果と考察 解析結果の一例を図-3~5に示す。図-3は解析Case-11および12で生成した割れ目系岩盤モデルである。図-4、5は図-3の岩盤モデルにおいて注入試験を行った場合の流量分布図であり、図-1に示した解析モデル④の注入区間Bと解析モデル⑤の注入区間Hで注入を行った結果である。これより注入区間から卓越する流路が形成されていることが確認でき、特に注入区間を短くした場合にその傾向が大きい。今回行った全解析について、注入区間と交わる割れ目数と K_I ならびに K_C の関係を示したのが図-6、7である。図-6は解析モデル④の結果であり、図-7は解析モデル⑤の結果である。両図とも K_C が K_I より著しく大きくなっており、特に割れ目数が少ないほどその差は大きくなっている。また、交わる割れ目数が大きくなると K_I が大きくなる傾向を示しているが、その相関はあまり大きくない。これらの現象は、岩盤の透水性が個々の割れ目の透水係数のみから決定されるのではなく、割れ目相互の連続性に大きく依存するためと考えられる。次に、注入試験から岩盤領域全体の透水係数を評価する方法について若干の考察を行う。この場合、注入試験の解析を行う前に、モデル領域全体の透水係数 K_A を求めているのでこれと比較する。図-8には K_A と K_I の関係を示している。ただし、注入区間が短い(2.5m)解析については、長い区間(12.5m)に対応する5区間の注入量の総和をとり、これを12.5m区間の注入量として(1)式より K_I を求めたものである。長い注入区間から一度に注入して求めた透水係数は、モデル領域全体の透水係数とよく一致している。これに対して、短い区間の注入量から求めた透水係数は2倍程度大きな値を示している。これは、注入区間を分割し試験を数回に分けて行った場合、各区間の流量の総和から全区間に対応する岩盤の透水係数を求めると、実際の値より大きく評価することを示している。

4. おわりに 本研究では割れ目系岩盤モデルを用いて注入試験のシミュレーションを行った。その結果、割れ目情報から透水係数を求めるには割れ目相互の連続性を評価する必要があると考えられる。また注入試験から岩盤の平均的な透水係数を求める場合、対象とする区間全長に対して同時に注入を行う方がよいことが明らかとなった。

参考文献 1) Long, J.C.S. et al., Water Resour. Res., Vol.18, No.3, pp645-pp658, 1987. 2) Rouleau, A. et al., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst., Vol.22, No.6, pp353-pp367, 1985.

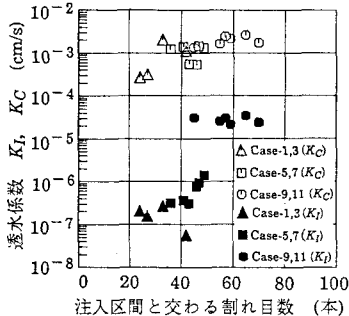


図-6 注入区間と交わる割れ目数と K_I, K_C の関係(解析モデル④)

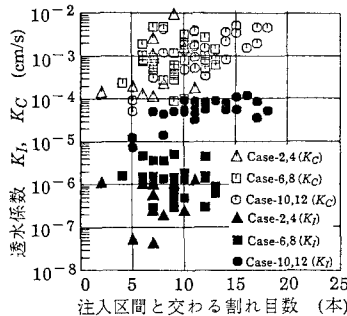


図-7 注入区間と交わる割れ目数と K_I, K_C の関係(解析モデル⑤)

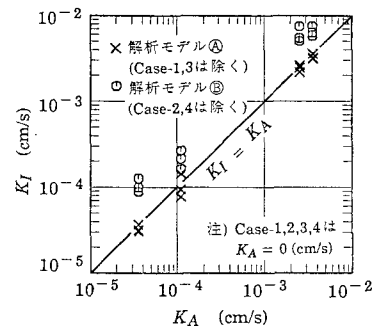


図-8 K_A と K_I の関係

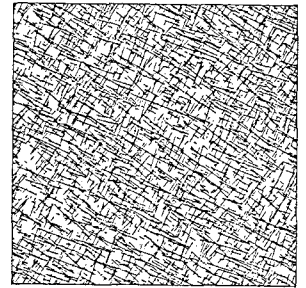


図-3 生成した割れ目系岩盤モデル (Case-11, 12のモデル)

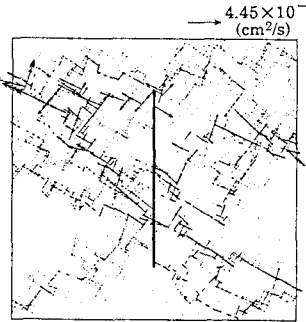


図-4 注入試験の流量分布図 (Case-11の区間Bから注入した場合)

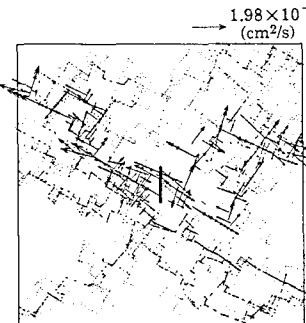


図-5 注入試験の流量分布図 (Case-12の区間Hから注入した場合)