

せん断破壊透水試験における透水係数の簡易算定法

清水建設株式会社 正会員 郷家光男

1. はじめに 岩盤中に空洞を掘削すると、周辺岩盤の力学特性、水理学特性、地球化学特性などが変化する領域が生じることが知られている¹⁾。このような領域は掘削影響領域と呼ばれ、放射性廃棄物処分場の地下施設の安全性に影響を与えることが懸念されている。特に、高レベル放射性廃棄物の場合、地下 300m 以深に最終処分することが法律で定められていることから、比較的強度の低い軟岩サイトでは坑道の周辺岩盤に塑性領域が発生することも考えられ、このため、基質部の非弾性的な変形の進行に伴う透水性の増大が懸念されている。そのため、筆者は、これまでに堆積軟岩を対象としてせん断破壊の進行に伴う透水係数の変化を調べる室内試験（以下、せん断破壊透水試験と称する）を行ってきた^{2), 3)}。そこで行った透水試験は完全な二次元の放射流ではないことから、供試体の透水係数を求めるためには数値解析に頼らなくてはならない課題があった。そこで、本研究では、せん断破壊透水試験に対する透水係数の簡易な算定式を提案して、その適用性について検討を行うことにした。

2. せん断破壊透水試験の概要 せん断破壊透水試験とは、供試体がせん断変形を受ける過程で透水性がどのように変化するかを調べるために行う試験である。この試験では、三軸圧縮試験中に所定の応力状態、または、ひずみ状態に達したときに、軸方向の変位を一定に保持した状態で定水位法によって透水試験を行う。さらに、せん断破壊面が供試体に形成されたとき、その影響を考慮できるように放射流による方法を採用している。

試験装置については、図-1 に示すような送・排水経路の改造を行っている。すなわち、円筒形の供試体中央に非貫通の注水孔を設け、供試体下端とペDESTALの間に溝付き排水板を挟み、側面を排水材に巻き、その外側をメンブレンで覆っている。注水孔と供試体側面に一定の差圧を与えたときに、注水孔から供試体内に流れ込んだ水は供試体側面、排水材、排水板の溝の順に通過して排水されて流量を計測することができる。そして、有限要素法による定常浸透流解析を用いて透水係数を求める。解析の境界条件は、図-2 に示すように、上下の端面を不透水とし、注水孔の水頭 h_1 と側面の水頭 h_2 については、水頭差 $\Delta h (=h_1-h_2)$ が透水試験時の差圧の水頭換算値と同じになるように与える。そして、解析により側面から

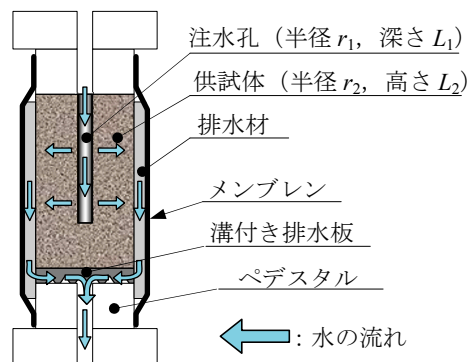


図-1 放射流による透水試験の送・排水経路

出てくる水の流量を求め、その流量が計測された流量と合うまで、供試体の透水係数を変えて解析を繰り返す。

3. 透水係数の簡易算定法 図-1 に示すように注水孔が供試体を貫通していないことから、これまで、解析により透水係数を算定してきた。しかし、供試体の外形や注水孔の寸法が同じであれば、差圧の水頭換算値 Δh や流量 Q が変化しても、放射流の理論式⁴⁾より求めた透水係数と数値解析によって求めた透水係数の比は変わらないことが、これまでの検討でわかっている。また、この透水係数の比は供試体の外形や注水孔の寸法によって変化することから、放射流の理論式に供試体の形状によって決まる換算係数 a を乗じた、以下のような簡易算定式によって、供試体の透水係数 k を求めることができると考えた。

$$k = a \frac{Q}{2\pi L_2 \cdot \Delta h} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (1)$$

ここに、 L_2 は供試体の高さ、 r_2 は供試体の半径、 r_1 は注水孔の半径である。

換算係数 a については、供試体の解析モデルに透水係数と水頭差を与えて、解析によって側面から出てくる流量を求め、その流量から放射流の理論式による透水係数を算定し、最後に、解析モデルに与えた透水係数を理論式から得られた透水係数で除することによって得ることができる。そこで、本研究では、供試体の半径 $r_2=25\text{mm}$ 、高さ $L_2=100\text{mm}$ の条件のもと、注水孔の半径 r_1 と深さ L_1 に関するパラメトリックスタディを実施して、様々な注水孔の寸法に対応する換算係数 a を算定することにした。パラメトリックスタディに用いた注水孔の半径 r_1 と深さ

キーワード：透水試験，放射流，三軸圧縮試験，せん断破壊，軟岩，掘削影響領域

連絡先：〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目 4-17 清水建設株式会社 技術研究所 Tel.: 03-3820-8438

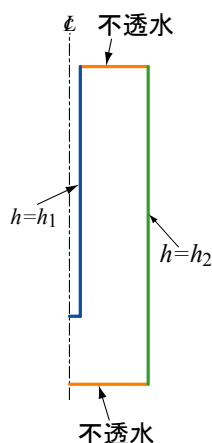


図-2 境界条件

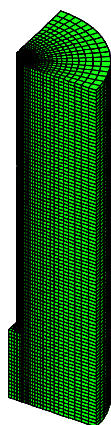


図-3 パラメトリックスタディに使用した解析メッシュの例

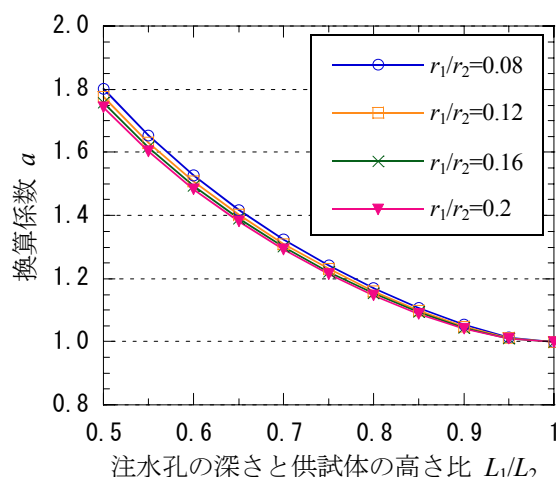


図-4 換算係数

表-1 パラメトリックスタディに使用した注水孔の半径と深さ

直径: r_1 (mm)	2, 3, 4, 5
深さ: L_1 (mm)	50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100

L_1 を表-1に示す。また、解析に際しては対称性を考慮して1/4モデルを使用した。解析に使用したメッシュの例を図-3に示す。

パラメトリックスタディの結果として、注水孔の深さと供試体の高さの比 L_1/L_2 と換算係数 a の関係を図-4に示す。この図より、注水孔が深くなると、放射流の理論式から求められる透水係数は、解析モデルに与えた透水係数に近づいていき、 $L_1/L_2 = 0.9$ 以上では、両者の差は10%以下となっていること、また、換算係数 a は注水孔の半径 r_1 の変化にあまり影響を受けないことがわかった。

4. 来待砂岩のせん断透水試験への適用 ここでは、来待砂岩に対するせん断破壊透水試験のデータを基にして、式(1)の簡易算定式の適用性について検討を行った。検討の対象としたのは、文献2の“Case1”のデータである。このケースの供試体の寸法は、半径 $r_2=24.57\text{mm}$ 、高さ $L_2=103.16\text{mm}$ 、また、注水孔の半径 $r_1=3.1\text{mm}$ 、深さ $L_1=81.8\text{mm}$ であった。

透水試験時の差圧 ΔP と流量 Q 、および、解析によって得られた透水係数を表-2に示す。そして、 $r_1/r_2 = 0.12$ 、 $L_1/L_2 = 0.8$ として、図-4より、換算係数 $a=1.16$ と設定し、供試体の寸法、差圧 ΔP の水頭換算値 Δh 、流量 Q を式(1)の簡易算定式に適用して供試体の透水係数を求めた。さらに、解析により求めた透水係数と簡易算定式により得られた透水係数の差を誤差として求めた。簡易算定式による透水係数と誤差の算定結果も表-2に示す。簡易算定式により得られた透水係数は注水孔の寸法を正確に反映させたものではないが、その誤差は2%以下とな

表-2 透水係数の算定結果

軸ひずみ (%)	差圧 ΔP (MPa)	流量 Q (cm^3/s)	解析による透水係数 (m/s)	簡易算定式による透水係数 (m/s)	誤差 (%)
0	0.499	1.43E-3	1.03E-10	1.05E-10	1.5
0.14	0.491	1.20E-3	8.72E-11	8.86E-11	1.6
0.36	0.490	1.40E-3	1.02E-10	1.04E-10	1.7
0.42	0.497	2.89E-3	2.08E-10	2.11E-10	1.7
0.48	0.296	5.57E-3	6.72E-10	6.82E-10	1.5
0.58	0.103	1.18E-2	4.12E-9	4.18E-9	1.5
0.71	0.100	7.37E-3	2.63E-9	2.67E-9	1.5
1.1	0.096	1.07E-2	3.97E-9	4.03E-9	1.5
3.6	0.003	6.98E-1	9.32E-6	9.36E-6	1.6
5.0	0.004	6.90E-1	5.63E-6	5.72E-6	1.6

っていることから、実用上、式(1)の簡易算定式でも十分な精度で求められていると考えている。

5. おわりに 三軸圧縮試験中に行う放射流の透水試験に対する透水係数を算定する方法として、換算係数と二次元の放射流の理論式を組み合わせた簡易算定式を提案した。そして、この式を来待砂岩のせん断破壊透水試験のデータに適用した結果、解析によって得られた透水係数と比較しても、十分な精度で求められることがわかった。今後、他の試験データとの比較を行うなどして、更に検証を進めていきたいと考えている。

謝辞 数値解析を行うにあたり、清水建設株式会社の白石知成主任研究員に御指導をいただきました。ここに、深く感謝します。

参考文献

- 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性，地層処分開発第2次取りまとめ，総論レポート，JNC TN1400 99-030，pp.III-71，1999。
- 郷家，石井，木下，船山：せん断変形下における軟岩基質部の透水特性の変化，第32階岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.167-172，2003。
- 郷家，岸野：軟岩の掘削影響領域における透水性変化モデルの提案，土木学会トンネル工学委員会，トンネル工学論文集，第19巻，pp.59-68，2009。
- 地盤工学会：岩の調査と試験，地盤工学会，pp.369-400，1989。