

室内試験による岩盤の開口割れ目の力学的開口幅の変形量と 水力学的開口幅の変形量の比較

(財)電力中央研究所 正○池川 洋二郎

1. はじめに

深部岩盤のトンネル近傍に生じる掘削影響領域の奥側は、トンネル掘削による応力再配分により応力が増加し、透水係数が低下した同心円状に連続する領域が生じている。従来、この低透水領域は考慮されていないが、トンネル周辺の間隙水圧の分布を大きく支配する。この透水係数が低下する領域を予測するには、岩盤内に分布する開口割れ目の応力変化に伴う透水係数の応力依存性に関する水力特性の解明が必要である。

ここでは、室内実験により、片麻岩中の既存する開口割れ目の垂直応力と透水性の関係と、割れ目の垂直剛性を求め、力学的開口幅の変形量と水理学的開口幅の変形量を比較し、よい一致が得られたので、概要の報告を行う。

2. 室内の一軸圧縮による水力試験の概要

図-1の模式図に示ように、既存の開口割れ目を対象に室内で開口割れ目の水力的な物性試験を行った。トンネルの近傍で得られたボーリングコアから、単一割れ目を含む円柱供試体を作成した。供試体のサイズは、直径約60mm、高さ約120mmで、割れ目と供試体の端面の成す角は約22°、単位体積重量2.66 g/cm³である。また、円柱供試体は割れ目で上下に2分でき、図-1の供試体の断面図に示すように下部の供試体の軸中心部に直径約6mmの透水用の孔をあけた。材料試験機で一軸圧縮荷重を行い、既存の開口割れ目の中心から外側に向かう放射流れにおける透水量の計測を行った。

この実験では、初期荷重と透水試験に分けて実験を行った。初期荷重は、土被り相当圧の2倍になる20MPaと、0.5MPaの間で10回の繰返し荷重を行った。荷重ピーク時の加重保持時間は60秒である。ここで、荷重の最小値を0.5MPaとしたのは、応力が解放することで、割れ目の噛み合わせが乱れることを防ぐためである。

透水試験は、土被り相当圧と2倍の応力の間を4分割し、各応力(10, 13.5, 16.5, 20MPa)で荷重を保持し、透水圧を4段階変えて、流量Qを求めた。計測項目は、差圧計[D]で求まる流量Q、圧力計[P]で求まる水圧P、荷重加重の経時変化である。

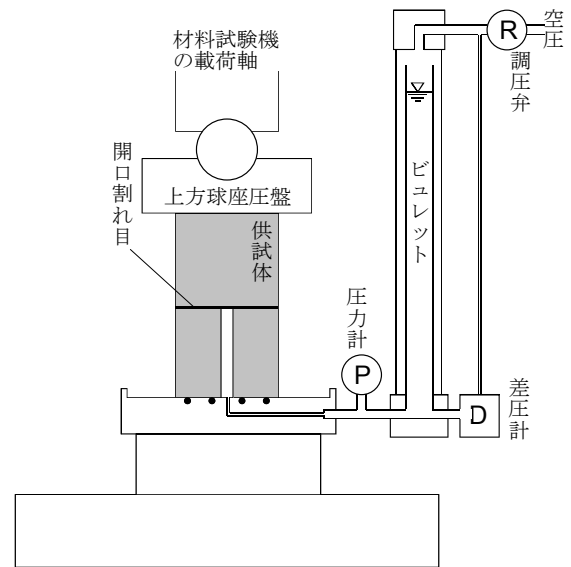


図-1 水力実験の模式図

3. 水理学的開口幅の評価概要

ここでは、図-1の模式図で示す水力試験において、ビュレットで計測される流量に基づいて、開口割れ目の透水係数の求め方の概要を示す。

水理学的開口幅は、図-2の模式図に示すように変水位透水試験に基づき、割れ目内の水の流れを滑らかな平行平板間の放射流とし、流量が開口幅の3乗に比例する三乗則が成り立つと仮定して求めた。

まず、円管内の水位の変化 dh と流量 Q の間に次式が成立つ。

$$A(-dh) = Qdt \quad (1)$$

次に、流量は水理学的開口幅 a の関数として次式で表される。

$$Q = 2\pi \frac{a^3}{12} \frac{g}{\nu} \frac{h_3 - h}{\ln(r_1/r_2)} \quad (2)$$

ここで、 A :ビュレットの断面積、 h :全出頭、 t :時間、 ν :動粘性係数、 g :重力加速度、 r :円柱供試体の中心からの距離である。また、 h は円管内の水位の高さである。式(1)と式(2)より、

$$2\pi \frac{a^3}{12} \frac{g}{\nu} \frac{1}{\ln(r_1/r_2)} dt = -A \frac{1}{h_3 - h} dh \quad (3)$$

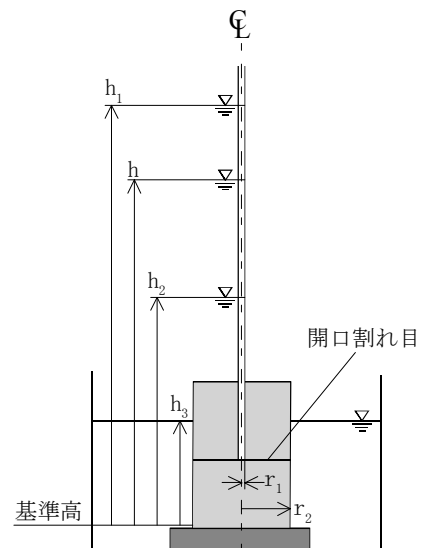


図-2 平行平板間の放射流を対象とした変水位透水試験の模式図

岩盤、割れ目、水力特性、変形、間隙水圧

〒270-1194 我孫子市我孫子1646 Tel.04-7482-1198, Fax.04-7183-8700

が得られ、さらに、時間 t_1, t_2 の時、全出頭が h_1, h_2 として、積分すると、

$$2\pi \frac{a^3}{12} \frac{g}{v} \frac{1}{\ln(r_1/r_2)} (t_2 - t_1) = A \ln \left(\frac{h_3 - h_2}{h_3 - h_1} \right) \quad (4)$$

となる。式(4)を水理学的開口幅 a^3 について解くと、

$$a^3 = \frac{12}{2\pi} \frac{v}{g} \ln \frac{r_1}{r_2} \frac{1}{t_2 - t_1} A \ln \left(\frac{h_3 - h_2}{h_3 - h_1} \right) \quad (5)$$

となり、式(5)より得られる水理学的開口幅を用いて、

$$k_w = \frac{a^2}{12} \frac{g}{v} \quad (6)$$

三乗則より、開口割れ目の透水係数は、(6)式で求まる。

4. 結果

図-3は、同じ供試体を用い、初期載荷と透水試験をそれぞれ3回行った試験結果から、載荷応力と(6)式で得られた透水係数の関係を示す。10MPaの低応力では、バラツキが大きくなっているが、20MPaの高応力では、バラツキが小さく良い一致を示す。また、図-4は、載荷応力と(5)式で得られる水理学的開口幅の関係を示す。

表-1は、図-2で用いた供試体を含む8個の同じ片麻岩の供試体を用いた、一軸載荷で得られた既存の開口割れ目の垂直剛性[2]の平均値を示す。垂直剛性は応力が10MPaから20MPaの範囲での3回の繰返し載荷において、載荷時の勾配から求めた。ここで、垂直剛性を2,000,000MPa/mとすると10MPaの応力変化による開口幅の変形量は $5 \mu\text{m}$ となる。

5. 考察

図-3の3回の結果では、同じ応力における透水係数の最大値は最小値の倍の範囲となるバラツキで、オーダーが変わるものではない。従い、ここでの室内試験の条件において、片麻岩の開口割れ目の透水係数は応力依存性にある程度の再現性があると言える。

図-4において載荷応力が10MPaと20MPaの水理学的開口幅の変形量は、 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 程度であり、表-1に示す垂直剛性から得られる力学的開口幅の変形量と、ほぼ一致していると言える。

図-3と図-4で示す透水係数と水理学的開口幅がバラツク理由としては、供試体を実験装置にセットするときの開口割れ目の初期の噛み合わせの状態が微妙に異なることが大きな要因と考えられる。また、水理学的開口幅の変形量と力学的開口幅の変形量が微少ながら異なる理由としては、繰返し載荷での繰返し回数が異なるなどの応力履歴が異なることによるものと考えられる。

以上のように、開口割れ目の噛み合わせの状況や応力履歴が異なることなどによる結果の違いは存在するが、応力の変化から開口割れ目の透水係数を予測することは、設計において利用可能な精度を示すと考えられる。

6. 最後に

ここでは、室内試験における検討を行ったが、室内と原位置における開口割れ目の状態の差を十分検討し、掘削影響領域の奥側に生じる低透水域の透水性の設計を考慮した調査、試験法の検討が必要であると考えられる。

参考文献

- [1]池川，中川：小規模空洞を使った水封式による圧縮空気貯蔵実験－残留した圧縮空気の挙動計測－，土木学会論文集，No.722/Ⅲ-61, pp.331-344, 2002.12.
- [2]池川：岩盤割れ目の垂直剛性と透水性に着目したトンネル周りの低透水域の評価，第47回地盤工学シンポジウム論文集，pp.335-342, 2002.11.
- [3]池川：片麻岩の開口割れ目の水力学的物性を用いた深部トンネル周辺に生じた低透水域の評価，第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.149-154, 2003.1.

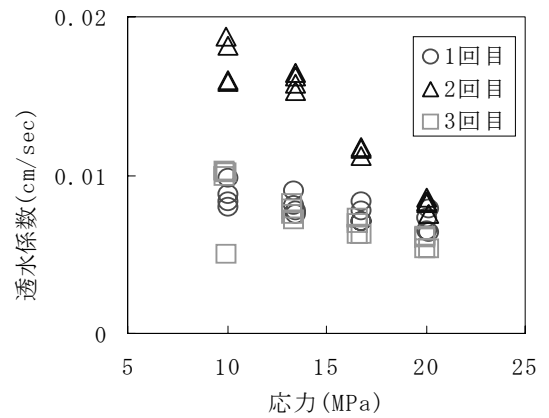


図-3 応力－透水係数の関係
(供試体名：C2-1. 15)

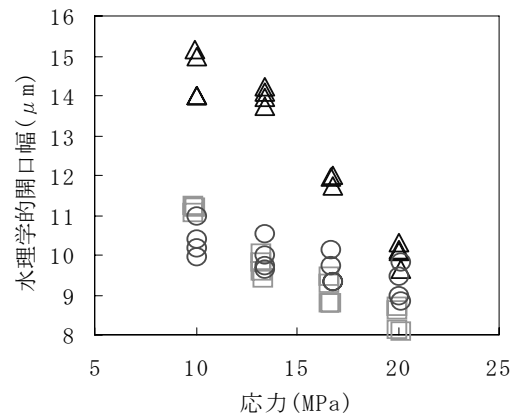


図-4 応力－水理学的開口幅の関係

表-1 開口割れ目の垂直剛性

垂直剛性kn	2,080,385MPa
--------	--------------

*同じ地点の8個の供試体の平均値[2]を示す。