

大阪大学工学部 学生員 ○澤 加奈子 大阪大学大学院 正会員 谷本 親伯
 大阪大学大学院 学生員 山崎 誠之 大阪大学大学院 学生員 坂本 香織

1. はじめに 敦煌莫高窟は中国甘肅省に位置する世界遺産である(図1)。高さ約40m、長さ約2kmに及ぶ崖面の比較的固結度の良い礫層に石窟が掘られている。現在莫高窟は劣化が進んでおり、その中でも塩類晶出による壁画の剥離は問題となっている。塩類晶出は水分移動と密接な関係があるため、莫高窟周辺の水分移動を把握することは遺跡保存にとって重要な研究である。そこで莫高窟周辺地盤の透水性を調査するため、2000年、2001年と莫高窟周辺にて原位置透水試験が行われた。しかしながら原位置透水試験は塩害の原因となる水を地盤に流すため、石窟もしくは石窟近辺では行うことができない。よって、本研究では石窟近辺で採取された供試体を用いて室内透水試験を行い、原位置透水試験の結果との関係を考察する。また、水ではなく空気を通すことで地盤の透水性を調査する可能性を見出すため、透気性と透水性の相関について調査することを目的とする。

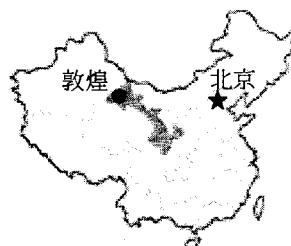


図1：敦煌の位置

2. 透気試験 本試験で用いた供試体は、石窟が掘られているQ2-C,D層にて採取された直径約5cmのボーリングコアから長さ約5cmから8cmのものを6個取り出した。この内、3つを鉛直方向に、他の3つを水平方向に透気、透水試験を行った。鉛直方向のものを供試体1, 2, 3、水平方向のものを供試体4, 5, 6とする。供試体の詳細を表1に示す。

表1：供試体の詳細			
供試体	1	2	3
質量(g)	285	327	350
間隙率(%)	7.82	14.72	11.97
供試体	4	5	6
質量(g)	444	417	458
間隙率(%)	12.15	5.18	10.00

まず、これらの供試体の透水させない面にシリコンを塗る。これを透水円筒に金網、砂利を敷いた上に設置し、透水円筒との間をシリコンで埋める(図2)。供試体を設置した透水円筒に空気を約10~50kgf/cm²の圧力に調節させながら透気させた。供試体を通して透水円筒から出てきた空気は水上置換させてメスシリンダーに集め、一定体積の空気が透気した時間を測定した。これを4回測定し、平均した結果を表2に示す。

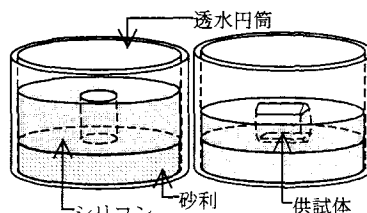


図2：供試体の設置

3. 透水試験 透気試験を行った供試体について、透水試験を行った。原位置透水試験からQ2-C,D層の透水係数は10⁻⁴~10⁻⁵cm/sという結果が得られている。よって本研究では変水位透水試験を採用した。変水位透水試験を行った結果、10⁻³cm/sを超えた供試体6に関しては定水位透水試験を再度行った。変水位透水試験、定水位透水試験の結果を表2に示す。どちらも5回計測した結果の平均値を表2に示す。

表2：透気試験・透水試験の結果(単位：cm/s)

供試体	透気係数	透水係数
1	8.86×10^{-4}	6.16×10^{-6}
2	1.65×10^{-2}	2.02×10^{-4}
3	1.51×10^{-2}	2.34×10^{-4}
4	2.73×10^{-2}	7.03×10^{-4}
5	7.73×10^{-4}	2.12×10^{-6}
6	3.00×10^{-2}	7.82×10^{-3}

表3：原位置透水試験の結果(単位：cm/s)

	2000年度	2001年度
地点1	5.61×10^{-5}	
地点2	1.62×10^{-4}	5.97×10^{-4}

4. 原位置透水試験との比較 2000年、2001年と莫高窟周辺のQ2-C,D層で行われた原位置透水試験の結果は表3の通りである。原位置試験の結果に比べて、室内試験の結果は幅のあるものとなった。原位置透水試験は地盤全体に対して全方向に透水させる方法であることに対して、室内試験は供試体を採取した地点を局部的に試験したものであり、また透水させる方向も定めて試験している。よって室内試験の結果の方がばらつきがあり、原位置試験の結果は室内試験の結果を含めたものであると推測される。また、供試体の間隙率と透水係数の関係を図3に表す。供

試体 3 と供試体 4 は近い間隙率でありながら、供試体 4 の透水係数は供試体 3 よりも高い。全体的に図 3 を見た場合も、水平方向の供試体の方が小さい間隙率に対して大きな透水係数を示していることがわかる。つまり、水平方向の方が鉛直方向よりも透水性が卓越しているということが言える。

5. 固有透過係数 透気試験、透水試験の結果から透気性と透水性の相関について考察した。この時、固有透過係数というものに着目をした。固有透過係数とは、流体経路が平行平板の中、あるいは管路内の理想的な流れと同様のものであれば、流体の粘性や密度に依存しない物理量である。この固有透過係数を用いて透水係数、透気係数を表すと次のように表される。

$$k_w = \frac{\rho_w \cdot g}{\eta_w} \cdot K \quad \text{..... (式 1)}$$

$$k_a = \frac{\rho_a \cdot g}{\eta_a} \cdot K \quad \text{..... (式 2)}$$

ここに、 k_w ：透水係数 (cm/s)、 k_a ：透気係数 (cm/s)、 K ：固有透過係数 (cm²)、 ρ_w ：水の密度 (g/cm³)、 ρ_a ：空気密度 (g/cm³)、 η_w ：水の粘性係数 (g/cm/s)、 η_a ：空気の粘性係数 (g/cm/s) とする。この式 1 と式 2 から、 $k_a/k_w = \eta_w/\eta_a$ が成り立つ。これより温度 15℃ の時、 $k_a/k_w = \eta_w/\eta_a = 0.01114/0.000179 \approx 64$ ということ言える。

6. 両試験結果からの考察 図 4 は、透気試験と透水試験の結果を比較したものである。先に述べたように理論上透気係数は透水係数の約 64 倍となるが、透水係数が 10⁻³cm/s 以上のものについて透気係数は透水係数の 10 倍以下となった。透水係数が 10⁻³cm/s 以上の供試体 6 は透水断面に大きな孔が見られ、この孔が広い透水経路となったと考えられる。そしてこの広い透水経路を水は通過したため、水の粘性の影響が小さくなり、透水係数が大きくなったと推測される。

透気試験の結果から算出された固有透過係数 K_a と、透水試験の結果から算出された固有透過係数 K_w との関係を図 5 に表す。固有透過係数は流体の粘性に依存しない物理量であるから、ひとつの供試体について $K_a = K_w$ が成り立つと言える。図 5 に試験結果から得られた固有透過係数 K_a と K_w を表したが、どの供試体も $K_a = K_w$ の直線から大きく外れたものではなく、ほぼ K_a と K_w は等しいと言える。

7. まとめ 室内透水試験の結果は、供試体を採取した地点や、透水させた方向によって幅のある結果が得られた。原位試験の結果はこの幅のある値を含めたものであると考える。また水平方向の供試体の方が、鉛直方向の供試体より透水係数が卓越していたことから、敦煌莫高窟周辺地盤の透水性には異方性があると言える。透気、透水試験の結果から、供試体に広い透水経路が見られた供試体 6 について、流体の粘性の影響が小さいため透気係数が透水係数の 10 倍以下となった。しかしながら、固有透過係数に着目すると各供試体ともほぼ K_a と K_w は等しいことが言えたことから、透気性と透水性には相関があると言える。以上のことから、透気試験によって敦煌莫高窟周辺礫岩の透水性を推測していくことを今後の課題とする。

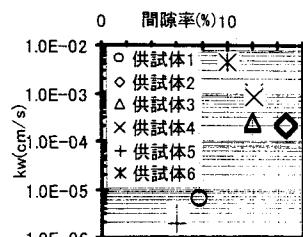


図 3：間隙率と透水係数

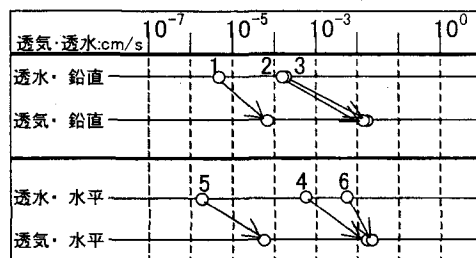


図 4：透気係数と透水係数の関係

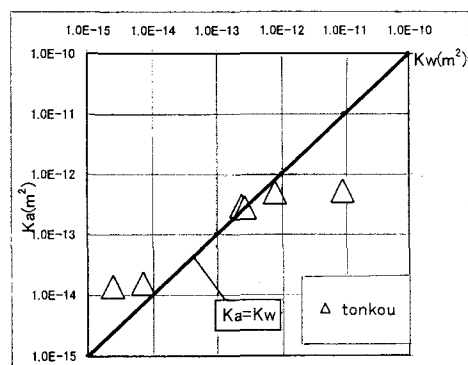


図 5：本試験から得られた K_a と K_w の関係