

大阪大学工学部 学生員 ○坂本 香織 大阪大学大学院 正会員 谷本 親伯
 大阪大学大学院 正会員 川崎 了 ハイテック (株) 舩屋 直

1. はじめに 敦煌莫高窟は、内部の壁画や彩色塑像とともに、世界遺産に登録されている。それらは、他の洞窟遺跡などに比べれば、比較的良好な状態で保存されているが、長い年月を経て、岩石の劣化や壁画・彩塑像の変色、壁画の剥離などの被害を受けている洞窟も存在する。壁画の剥離の大きな要因の一つとして、塩類の析出があげられ、この主な原因として、地盤内の水分が影響していると考えられている。現在、莫高窟の前面では、緑化のための散水が行われているが、これが地盤内を浸透し、下方に位置する洞窟の壁面での塩類の析出に影響を及ぼしている可能性があると考えられている。

大阪大学大学院工学研究科と敦煌研究院は、2000年1月に学術交流協定を結び、莫高窟の保全と、壁画保存のために調査を行っている。調査は地質調査・比抵抗測定・温湿度測定・原位置透水試験の4つのグループによって進めている。本研究では、2001年9月における現地調査の中で、原位置透水試験に関する調査結果について報告する。

2. 調査概要 図1に敦煌莫高窟の地層断面図を示す。2000年度に行われた調査では、原位置透水試験により莫高窟上部での水分移動にQ2-A層が関係していることが明らかになった。また、比抵抗測定により、莫高窟前面での散水箇所まで散水の影響が及んでいることが明らかになった。そこで本研究では、莫高窟下部での水分移動を調べることを目的とし、散水が行われている莫高窟前面の堆積層(Q4層)において、原位置透水試験を行った。また、原位置での透水試験が困難な場合、室内試験を行い透水係数を算出する方法があるが、その一つとしてQ4層で採取した砂礫層サンプルを用いて粒度試験を行い、透水係数の推定を試みた。

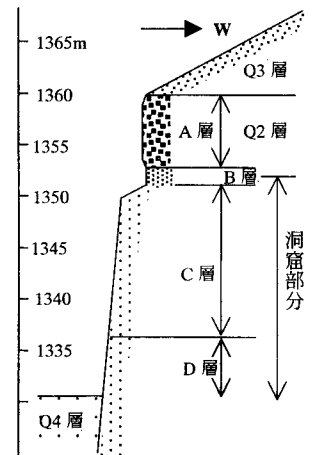


図1 莫高窟地層断面図

3. 原位置透水試験

i) 調査位置 2000年度の調査は、Q3層、Q2-A層で1ヶ所ずつ、Q2-C層で2ヶ所の合計4ヶ所で行われた。2001年度は、Q2-C層で2000年度と同じ試験孔を用いて1ヶ所、Q4層では莫高窟北側の崖前で、南北方向に約300mずつ離れた3ヶ所の合計4ヶ所で行った。

ii) 透水試験概要 原位置で定水位透水試験を行った。試験装置の概要は、図2に示すとおりである。試験孔の直径は約30cm、深さは約30cm、ケーシングは直径10cmである。透水係数 k の算出には、以下の式を用いた。

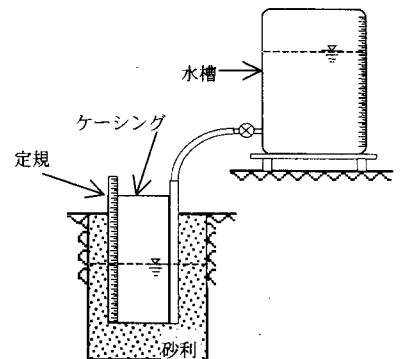


図2 原位置透水試験概要図

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2} \cdot \left(\frac{\eta_r}{\eta_{20}} \right) \cdot \left[2.3 \cdot \log \left[\frac{h}{r} + \left\{ \left(\frac{h}{r} \right)^2 + 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \right] - \left\{ \left(\frac{r}{h} \right)^2 + 1 \right\}^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{r}{h} \right) \right]$$

ただし、 $Tu > 3h$ である。ここに、 Q ：定常流量 (cm^3/s)、 h ：試験孔内水深 (cm)、 r ：試験孔半径 (cm)、 η_T ：任意の温度 T における水の粘性係数、 η_{20} ：20℃における水の粘性係数、 Tu ：試験孔内水面から地下水面までの深さ (cm) である。

iii) 結果 2000 年度と 2001 年度の調査結果を合わせて表 1 に示す。Q4 層の⑤、⑥、⑦と Q2-C 層の③、④は、それぞれ同じ層でありながら、透水係数は若干異なる値が得られた。これは、試験孔が掘られている地表面からの高さが異なり、その深さでの粒度分布や締め固めの程度が違ふことや地層の不均質性によるものであると推測される。また、固結した礫岩である Q2-C 層では、セメンテーション物質の量の違いも原因として考えられる。Q4 層の透水係数は高く、散水された水は比較的容易に莫高窟の崖面まで達することができると推定される。④では、同じ試験孔を用いたにもかかわらず、得られた透水係数には少し差が生じている。2000 年度と 2001 年度の試験時の気温等が違ふことや、同じ試験孔で繰り返し試験を行ったことで、試験孔の形状が少し変化してしまったこと等が理由として考えられる。以上より、各層における透水係数は、一つの値で代表させることは難しく、ある程度の幅を持った値で考える必要があるといえる。

4. 粒度試験 サンプルの採取は、Q4 層の試験孔⑦の真横にて行った。Q4 層は、未固結の砂礫層であり、シャベルで簡単に掘ることができる。掘った断面を見ると、含まれる礫は大きさも形状も様々であるが、亜円礫または円礫が多い。また、砂の多い層と礫の多い層が存在する。透水係数の推定には、粒度分布から得られる代表径から算出する Hazen の式と Creager の方法を用いた。表 2 に 2000 年度の

試験結果も合わせて示す。Q4 層においては、全ての結果がほぼ一致している。Q3 層は、Q4 層と同様に未固結の砂礫層であり、Q4 層ほどの一致は見られないが、透水特性としては同様の値を示す。よって、未固結の砂礫層である Q3 層と Q4 層においては、Hazen と Creager の結果から、およそその透水係数を推定することは可能であると考えられる。一方、Q2-A 層および Q2-C 層においては、代表径から求めたものは、原位置試験による結果より大きいものが得られた。Q2 層は固結した礫岩であり、粒度試験を行う際に凍結融解を繰り返して強制的にばらばらにしたが、細粒分までは分解されなかった。これが粒度試験結果に影響した可能性があると考えられる。よって、固結した礫岩である Q2 層においては、粒度試験の結果から透水係数を推定することは難しいと思われる。

5. まとめ 原位置透水試験から、Q4 層は透水性が高いことがわかった。よって、莫高窟前面で散水された水は、比較的容易に崖面まで達し、下方に位置する洞窟での塩類の析出に影響を及ぼしているものと推定される。また、未固結の砂礫層では、粒度試験により得られる代表径から、透水係数を推定することが可能であることがわかった。

今後は、データの信頼性を高めるために、透水試験を同じ地点で繰り返し行くと同時に、比抵抗測定により地盤内の水分の浸透の様子をモニタリングする必要がある。また、崖面に到達した水の洞窟内部での浸透経路を探るために、洞窟内での透水試験の実施とそれに伴う試験方法の再考を行う予定である。

表 1 透水係数の分布 (cm/s)

		2000 年度	2001 年度
①	Q3 層	1.11×10^{-3}	
②	Q2-A 層	6.50×10^{-3}	
③	Q2-C 層	5.61×10^{-5}	
④		1.62×10^{-4}	5.97×10^{-4}
⑤	Q4 層		6.56×10^{-3}
⑥			6.63×10^{-3}
⑦			1.08×10^{-2}

表 2 透水係数一覧 (cm/s)

	原位置試験	Hazen	Creager
Q4 層	1.08×10^{-2}	1.67×10^{-2}	1.40×10^{-2}
Q3 層	1.11×10^{-3}	7.33×10^{-4}	2.46×10^{-3}
Q2-A 層	6.50×10^{-3}	2.25×10^{-2}	3.52×10^{-1}
Q2-C 層	5.61×10^{-5}	2.36×10^{-3}	6.68×10^{-3}
Q2-C 層	1.62×10^{-4}	6.69×10^{-1}	3.81