

第 部門 地盤の透水性に着目した敦煌莫高窟周辺地盤の水分移動に関する研究

大阪大学工学部 学生員 榎村 博仁 大阪大学大学院 正会員 谷本 親伯
 大阪大学大学院 正会員 小泉 圭吾 大阪大学大学院 学生員 谷本 泰雄

1. はじめに

中国・敦煌莫高窟の石窟内において、塩類風化による壁画の剥落が深刻な問題となっている。塩類風化とは、地盤内の塩類が水分に溶けて移動し、水分の蒸発に伴って地盤表面に析出する現象である。地盤内での塩類移動は、水分の移動に伴って生じるものであるため、地盤内の水分移動を解明することが極めて重要である。本論では、莫高窟周辺地盤の透水性に着目し、石窟内部へ供給される水分の移動について検討する。

2. 莫高窟の地質と水分の供給源

敦煌莫高窟は、その前面を流れる大泉河によって浸食されてできた崖面に、高さ 40m、南北 2km にわたって掘られた石窟群である。図 1 に、崖面の地層区分と石窟の位置を示す。崖面を構成する堆積物はその堆積状況によって Q3 層と Q2 層に分けられ、Q2 層はさらに上から A 層、B 層、C 層および D 層に分けられる。このうち、A 層と B 層、C 層と D 層は、それぞれ同年代に堆積したもので、同等の地質であると考えられている。

莫高窟で問題となりうる水分の供給源としては、崖前で撒かれている灌漑水、降雨および周囲から流入する地下水が挙げられる。上層の石窟では雨水の浸透によって、下層の石窟では灌漑水や地下水からの水分供給によって、塩類風化が生じることが確認されている。本論では、これらの水分移動のうち、飽和に近い状態で起こっていると考えられる降雨と灌漑水の挙動について考察する。

3. 莫高窟周辺地盤の透水試験結果

大阪大学では、原位置透水試験および室内透水試験を行い、莫高窟周辺地盤の透水性を調査してきた。図 2 にそれらの結果をまとめて示す。図 2 より、原位置試験で得られた Q2-C 層の透水係数は、莫高窟周辺の他の層と比べて小さいことがわかる。一方、Q2-C 層および D 層の室内試験結果では、同じ水平方向の透水係数でも 1000 倍以上

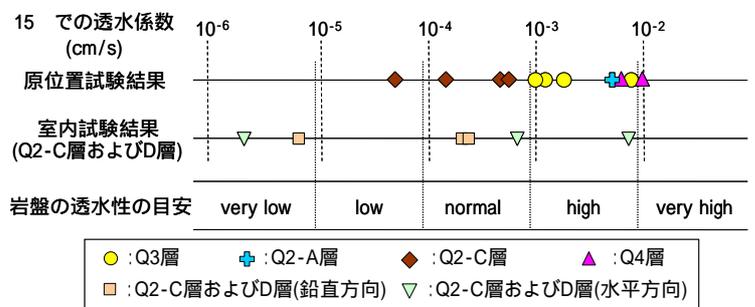


図 2 透水係数の比較

の開きが見られ、他層と同等の良好な透水性を示す箇所も存在することがわかる。これらの室内実験に用いた供試体には、割れ目の状態に大きな差があることが目視によって確認されている。つまり、Q2-C 層および D 層には、割れ目が場所によって不均一に存在し、それによって透水性が大きく変化すると考えられる。

4. 飽和地盤内での水分移動に関する考察

4.1 灌漑水の浸透挙動に関する考察

石田¹⁾は、崖前で行われている灌漑が石窟内に及ぼす影響を調べるために、45 窟前で比抵抗探査を実施した。図 3 にその結果を示す。図 3 より、灌漑地点直下では 50 m 程度の低比抵抗帯が見られることから、深度約 20m までが飽和状態であることがわかる¹⁾。

図 1 に示すとおり、この灌漑地点直下に広がるのは Q4 層であり、石窟の下には Q2-D 層が分布している。図 2 より、Q2-D 層の水平方向の透水係数には、Q4 層と同等の 10⁻³ (cm/s) のオーダーを示すものも見られることから、石窟の地

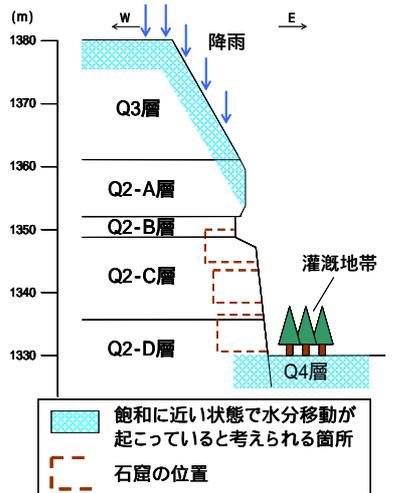


図 1 崖断面の模式図

下に広がる Q2- D 層においても、水分が水平方向に浸透しやすい箇所が存在することは十分に考えられる。灌漑地点の地表から深さ約 20m までが飽和状態になっているのに対し、灌漑地点から石窟までの水平距離は 10m 程度であることから、灌漑水が拡散しながら Q4 層を浸透し、さらに Q2-D 層を水平方向に浸透して、石窟の地下まで到達している可能性は十分に考えられる。図 4 に示したとおり、石窟の地下まで浸透した水分は、石窟地下の飽和度を恒常的に高くし、液状水あるいは水蒸気形で地盤内を移動して、石窟の床面や壁面に到達しうる。

以上のことから、撒かれた灌漑水が石窟直下の礫層へ浸透し、壁画の劣化の一因となっていることは十分に考えられる。

4.2 崖上地盤内での降雨浸透に関する考察

崖上で降った雨水の浸透挙動を解明するため、坂本²⁾は、2003 年度の現地調査において、2mm の降雨が観測された翌日から、毎日崖上 Q3 層の地表面付近を掘って、雨水の浸透具合を調べた。その結果を表 1 に示す。表 1 より、崖上 Q3 層において、2mm 程度の降雨では、雨水は地中深くまで浸透していかないことがわかる。この結果を考慮すると、仮により多量の雨が降った場合でも、雨水が 20m もの厚さで堆積している Q3 層を浸透し、その下の Q2 層にまで到達するとは考えにくい。

一方、莫高窟の崖面近傍の地盤では多数の割れ目が発達していることが確認されている。Q2-C 層および D 層の室内透水試験結果より、割れ目の状態の差異によって透水係数が 1000 倍以上の差が生じることが明らかになっている。このことから考えると、崖面近傍の Q2-A 層の中には、割れ目の存在によって、透水係数が 10^{-3} (cm/s) オーダーよりもはるかに大きい地点が存在する可能性がある。さらに、図 1 に示すとおり、崖面近傍では Q3 層が薄くなっている。以上のことから考えると、図 5 に示すとおり、雨水は崖面近傍の Q2-A 層のうち、特に割れ目が発達している箇所を浸透して石窟内部にまで到達する可能性があるといえる。

降雨の浸透挙動をより詳しく把握するために、崖面近傍の Q2-A 層の透水係数分布を詳しく調べていくことが、今後の課題として挙げられる。

降雨の浸透挙動をより詳しく把握するために、崖面近傍の Q2-A 層の透水係数分布を詳しく調べていくことが、今後の課題として挙げられる。

5. 結論

本論で得られた知見は以下のとおりである。

1. 崖前で撒かれた灌漑水は、Q4 層および Q2-D 層を比較的容易に浸透して、石窟の地下まで到達する可能性がある。石窟の地下まで浸透した水分は、液状水あるいは水蒸気形で礫岩内部を移動して、石窟の床面や壁面に到達しうる。
2. 崖上で降った雨水は、崖面近傍の Q2-A 層のうち、特に割れ目が発達している箇所を浸透して上層の石窟まで到達する可能性があると考えられる。

参考文献 1) 石田祐也：石造遺跡保存への電気探査の応用，大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 平成 18 年度修士論文，pp.30～58，2007.

2) 坂本香織：敦煌莫高窟窟内微気象と壁画の被害に関する研究，大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 平成 15 年度修士論文，pp.42～44，2004.

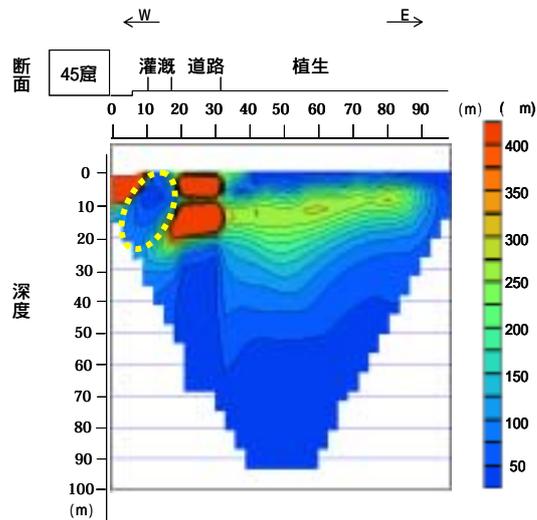


図 3 45 窟前の比抵抗分布¹⁾

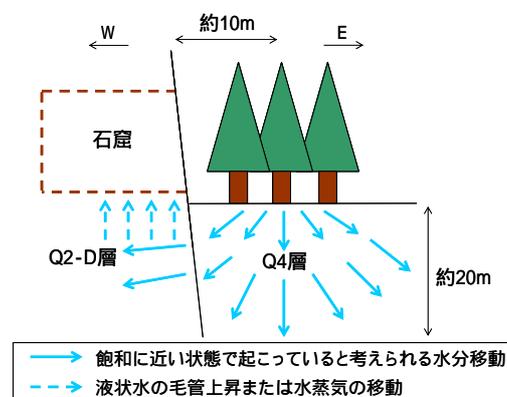


図 4 灌漑水の浸透形態の模式図

表 1 坂本による崖上 Q3 層の降雨浸透調査の結果²⁾

観測日	湿っていた深さ (cm)
降雨1日後	0～8
降雨2日後	2～8
降雨3日後	4～10
降雨4日後	4～13
降雨5日後	4～12
降雨6日後	4～12

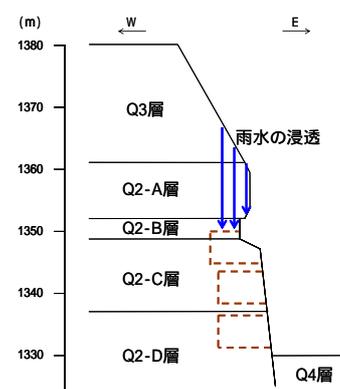


図 5 降雨の浸透形態の模式図