

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

1. はじめに 中国の敦煌莫高窟では、砂漠地域に特有の塩害による壁画の劣化が目立っている。砂漠地域の塩害は、雨水などの水分によって溶け出した塩類が析出するものである。つまり、塩類による劣化は水の移動と密接な関係にあり、洞窟内への水の浸入が壁画の劣化に大きく影響すると考えられる。敦煌の気候は砂漠気候に属し、年間平均降水量はわずか 32.9mm 程度で砂漠地域の中でもとりわけ降水量が少ない。現在、莫高窟前面では緑化のための散水が行われており、地表面に水溜りができるほどの水が撒かれている。この水が地盤内を浸透し、洞窟内の壁面で塩害を起こしている可能性が考えられる。そこで本研究では、比抵抗測定により散水された水の洞窟内への浸透の影響評価を試みた。

2. 調査概要 本研究では、散水が行われている莫高窟前面において二極法により比抵抗測定を行った。散水の影響を十分に把握するため、測線を 2.5m 間隔・32 電極・測線延長 77.5m に設定した。比抵抗を用いた理由としては、①非破壊で検査ができること、②水分・間隙などの地盤状況の変化を反映できること、③比較的容易に映像化できること、などがあげられる。一方、一般の礫岩の比抵抗と飽和度の関係については今まで多くの研究がなされており、その相関関係は明らかになっている。しかし、今回は砂漠地域という特殊な地盤を対象としたので、敦煌の礫岩においても比抵抗と飽和度の相関関係が成り立つのかどうかを検討する必要があると考え、原位置の礫岩を日本に持ち帰り室内試験を行った。また、原位置の比抵抗測定により地盤内の比抵抗分布を調べ、室内試験による測定結果とあわせて礫岩の含水状態に着目した比較・検討を実施した。

3. 室内試験による比抵抗と飽和度の関係 試験方法として、水を入れたデシケーター内に礫岩を入れ、真空状態で72時間放置し、礫岩の間隙を水で満たして、飽和度100%の状態とする。礫岩を水で飽和させる際、礫岩内の塩分が溶出するおそれがあり、測定された比抵抗の値が実際よりも高くなる可能性がある。これを避けるには、礫岩内部の水と同等の比抵抗を示す水を用いて礫岩を飽和させる必要があり、本研究では、まず比抵抗と食塩重量濃度の関係を求め、礫岩を満たす水に適した塩分濃度を算出し、敦煌礫岩の比抵抗と飽和度の関係を求めた。なお、比較のために蒸留水で間隙を飽和させた礫岩についても測定した。これにより、間隙を水分で満たす場合の塩分の流出がどの程度生じているのか判断できるものと予想される。

以上に述べた理由から、比抵抗と食塩重量濃度の関係を求める。試験方法は、まず初めに蒸留水と濃度を一定とした食塩水を用意する。次に、蒸留水の比抵抗を測定し、徐々に食塩水を加えていって濃度を高くしながらその時の重量濃度と比抵抗を測定する(図1)。図1から、比抵抗と食塩水の重量濃度には、高い相関関係があると言える。同図中の相関関係を用いれば、礫岩内部の水の塩分濃度を算出することができる。すなわち、粉碎した礫岩を蒸留水の中に入れ、礫岩内の塩類が十分溶出するように攪拌する。その後、水溶液の比抵抗を測定し、図1に示す食塩水における比抵抗と重量濃度の

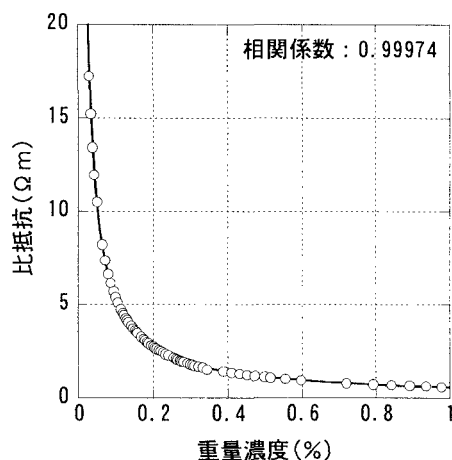


図1 比抵抗と食塩重量濃度の関係

関係より、水溶液の塩分濃度を算出する。蒸留水で間隙を飽和させたものを供試体 1, 2, 上記の礫岩内部の水と同等の比抵抗を示す食塩水を用いて飽和させたものを供試体 3, 4 とする。各供試体について飽和度 100%の時の礫岩重量を計測し、比抵抗測定を行った。以下、室内において供試体を自然乾燥させながら定期的に礫岩重量と比抵抗を測定した。飽和度が低下していき比抵抗に変化があまり見られなくなつてから、炉乾燥により礫岩を完全な乾燥状態とし、これを飽和度 0%の状態として礫岩重量および比抵抗を測定した。飽和度 100%のときの礫岩重量と飽和度 0%のときの岩石重量より、それぞれの礫岩重量における飽和度を算出し、測定した比抵抗との関係を図 2 に示す。

同図より、すべての供試体において一般の礫岩と同様に、水分飽和度が減少すると比抵抗が増加するという相関関係が見受けられた。また、蒸留水で間隙を飽和したものと、食塩水で間隙を飽和したものとでは、その傾向に違いがある。なお、同図中には蒸留水で間隙を飽和したものの代表として供試体 1 の回帰曲線、食塩水で間隙を飽和したものの代表として供試体 3 の回帰曲線を加えた。これらの違いは、礫岩内の塩分が溶け出したことの影響によるものであり、敦煌礫岩の比抵抗特性は礫岩内部の塩分の影響を受けることがわかる。また同図より、飽和した礫岩の比抵抗は 100Ωm 程度の値を示すことが知られる。

4. 原位置での測定結果および考察 図 3 に原位置での比抵抗測定結果および莫高窟と散水箇所の位置関係を示す。前述の室内試験より、比抵抗が 100Ωm 程度の地点は飽和状態に近いと考えられるため、散水箇所から地中深さ約 10~15m 程度までは撒かれた水が地盤内を浸透し飽和していると考えられる。西側の散水箇所から洞窟までの距離は約 10m なので、撒かれた水が地盤内を浸透し、壁面へ達しているものと推測できる。また、西澤りによると、毛管作用による毛管高さは 1.11m から 5.58m と算出されており、数メートルというオーダーでの水分の移動は十分考えられる。つまり散水が洞窟内の壁面で生じている塩害の原因となっている可能性が高いと考えられるので、現在の過剰な散水を停止し、適量の散水を実施することが望まれる。

5. まとめ 今回は散水箇所での比抵抗測定により、地盤内の比抵抗分布を把握できた。また室内試験により、敦煌の岩石の比抵抗特性を概ね把握することができた。今回現地で得られたデータは散水中のもので、今後は一定期間散水を停止した状態での比抵抗測定を行う予定である。それにより、より詳しく散水の地盤内への浸透の影響を評価できると考えている。

なお、本研究を遂行するに際して、敦煌研究院の王旭東副所長、汪万福副所長にご協力頂いた。末節ながら、ここに記して感謝の意を表するしだいである。

参考文献

- 1) 西澤亮総：比抵抗による敦煌莫高窟周辺の水分の分布に関する研究,大阪大学大学院修士論文,p.41,2001.

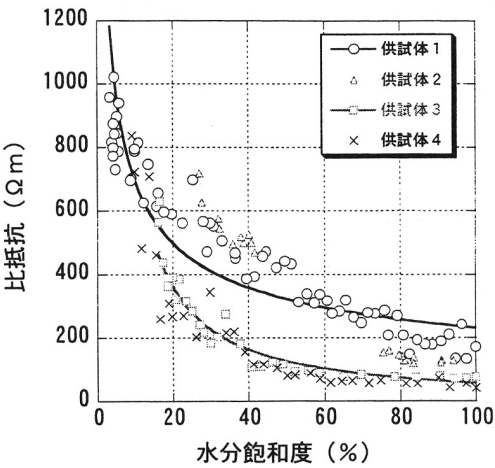


図 2 比抵抗と飽和度の関係

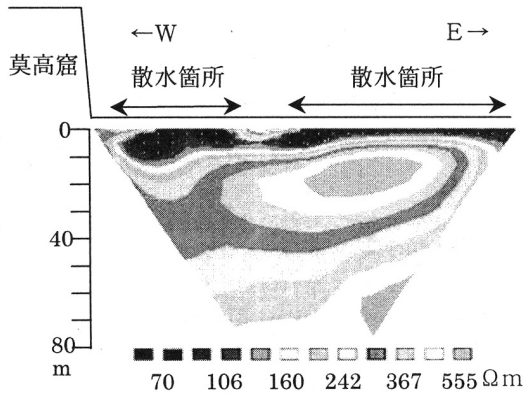


図 3 散水箇所での比抵抗分布