

敦煌莫高窟周辺の比抵抗値が表す地盤の状態

大阪大学工学部 学生員 ○田辺 充祥 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 大阪大学大学院 学生員 足立 健
 ハイテック（株） 舩屋 直

1. はじめに 世界遺産である中国の敦煌莫高窟では、地盤中の塩類が水分の蒸発に伴って壁面に晶出し、その圧力で壁画が剥落することが問題となっている。莫高窟周辺の地盤には多量の塩類が含まれていることが分かっており、水分の供給源としては降雨や莫高窟背後の地下水などが考えられる。そこで、莫高窟上の地面に到達した雨水の挙動と莫高窟背後の地盤の状況について、2001年9月11日から22日にかけての莫高窟周辺における比抵抗測定の結果をもとに考察した。このうち、本報告では莫高窟背後の比抵抗分布と、その比抵抗値が表す地盤の状態についての考察を述べる。

2. 調査概要 莫高窟は高さ 40m 以上の崖面にあり、その背後には風成砂層による砂漠平野が、西方約 1km に位置する鳴沙山麓まで続いている。この莫高窟背後の地盤状況を把握するため、崖面の沢部分から鳴沙山麓にかけて、地下の比抵抗測定をおこなった。測線は、崖面から南西方向に一直線上に、間隔をあけて 155m で 3 本設置し、順に LineA、LineB、LineC とする。また、莫高窟崖面は図 1 に示すように、風成砂層 Q3 と堆積礫岩層 Q2 で構成され、Q2 はさらに堆積状況によって Q2-A,B,C,D に分けられる。このうち石窟が集中している Q2-C,D の礫岩を日本へ持ち帰って室内試験を実施した。さらに、莫高窟周辺の Q2-C,D において撒水を行い、地下の比抵抗の変化を計測した。

3. 莫高窟周辺の比抵抗分布 莫高窟背後における比抵抗測定の結果を逆解析して得た、地下の真の比抵抗分布を図 2 に示す。LineA は莫高窟の背後や上部の様子を表す。特に、崖面方向に下る沢になっている斜面部の地下は $150\Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗を示し、地表面も湿っていたことから、水分の含有状況を表していると考えられる。LineB は防砂フェンスと直交しているために盛り上がった形の比抵抗分布を示しているが、実際の地下は水平な層状構造であると考えられる。LineC は鳴沙山麓に沿った防砂林と直交している。地下は全体に $150\Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗分布が広がっている。特に防砂林直下の浅部における低比抵抗部は $60\Omega\text{m}$ 程度であり、灌漑に由来する水分が多く含まれていることを表している可能性がある。

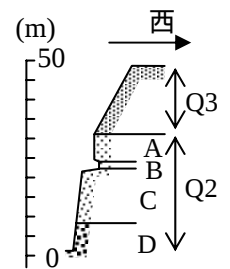


図1 崖面の地層

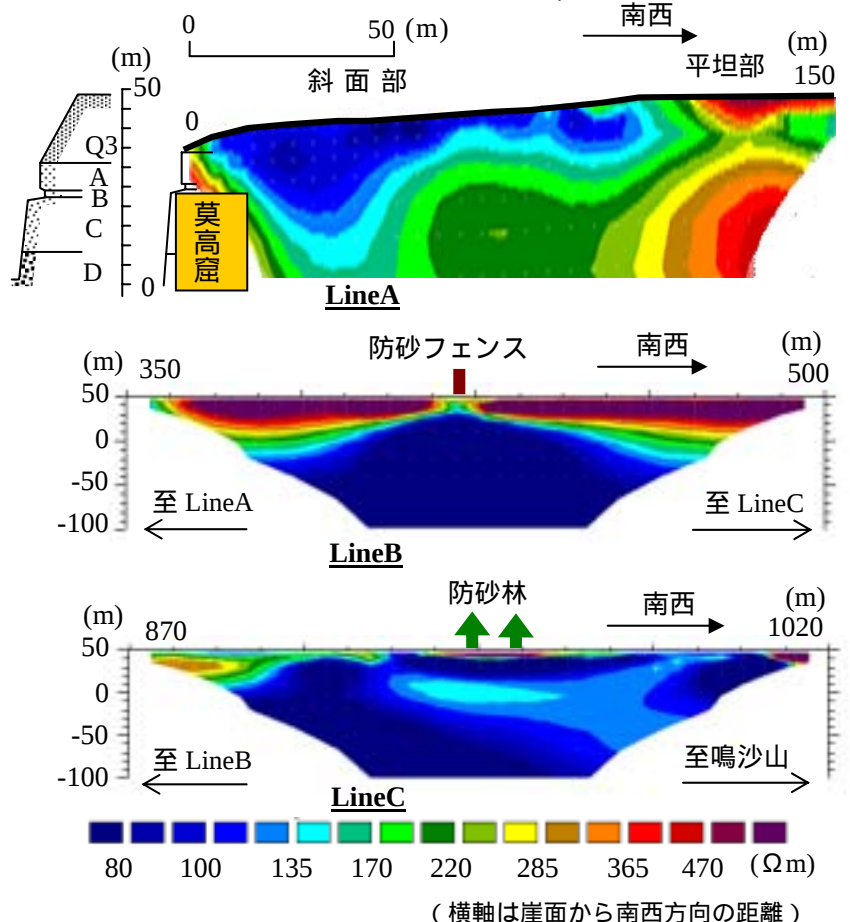


図2 窟背後地下の比抵抗分布

敦煌莫高窟 比抵抗 塩類晶出

大阪府吹田市山田丘 2-1 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 谷本研究室(Tel/Fax : 06-6879-7558)

4. 礫岩試料を用いた室内試験 石窟が集中している Q2-C,D の礫岩を日本へ持ち帰り，以下の手順で室内試験を実施している．あらかじめ礫岩に含有される塩類の濃度を測定し，その濃度の食塩水(3Ωm)で飽和させた礫岩(試料 1,2)と，蒸留水で飽和させた礫岩(試料 3,4)を作る．続いてその礫岩試料を乾燥させながら比抵抗を測定し，比抵抗と水分飽和度の関係をグラフ化する．今回はさらに，塩類の濃度による比抵抗の違いも反映したグラフにするため，高濃度の食塩水(0.17Ωm)で飽和させた礫岩(試料 5)で同様の試験を実施した．その結果を図 3 に示す．蒸留水で満たした礫岩は，含有していた塩類が溶け出すことで塩濃度が低下し，比抵抗は本来より高く測定される．よって，試料 3,4 の比抵抗値が現地における自然な状態の地盤の比抵抗値の上限を表し，試料 5 の比抵抗値が下限を表すと見なすことができ，現地の礫岩層の比抵抗値はその間に分布していると考えられる．すなわちこの図から，莫高窟周辺の地下の比抵抗分布の各値が，地盤のどういう状態を表しているかを推定することができる．さらに，比較的高い水分飽和度においては水分飽和度による比抵抗値の変化は小さく，塩濃度の影響が大きいことが分かる．

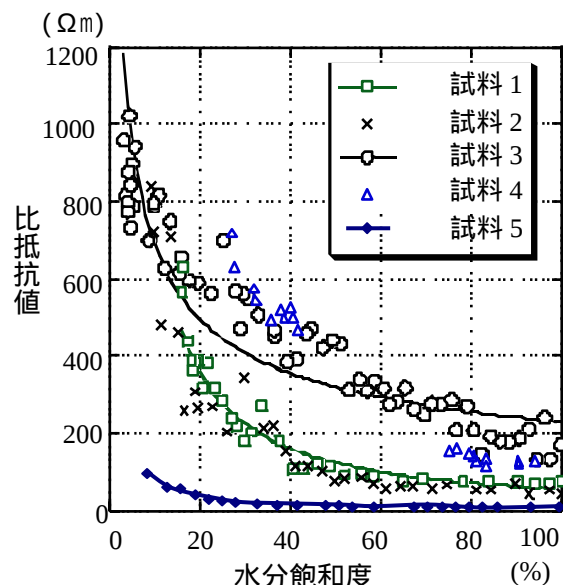
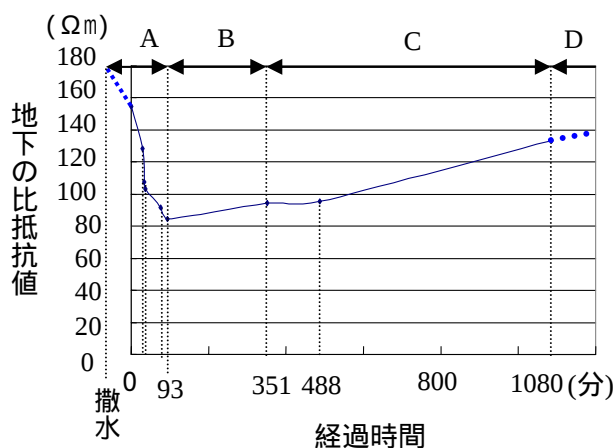


図 3 比抵抗と水分飽和度と塩濃度の関係

5. 撒水下の地盤の比抵抗の変化 莫高窟周辺の Q2-C,D において撒水を続け，地下 1m の地点 Z の比抵抗の変化を計測した結果が図 4 である．測定開始時には既に撒水しており，A 区間では水の浸潤に従って比抵抗が低下している．B 区間において比抵抗値は最小に至ったと推測でき，C 区間では撒水を続けたにもかかわらず比抵抗値は増大した．水分飽和度は上昇するのに比抵抗値が増大するという現象は，塩類が水とともに移動したことによると考えられる．つまり，A 区間では水分飽和度が上昇して Z より浅い地盤の塩類が Z 方向に移動することで比抵抗が低下し，B 区間ではその水分と塩類の集積がピークを迎えて最小比抵抗値をとる．その後は Z より浅い部分の塩類はさらに深いところへ流されて，Z における比抵抗値は増大する．比抵抗の最小値は分からないが，莫高窟周辺で測定さ



A 区間：撒水開始時～最小比抵抗値時（93 分）

B 区間：93 分～次の測定時（351 分）

C 区間：351 分～測定終了時（1080 分）

D 区間：測定終了後

図 4 撒水下の比抵抗値の変化

れている低比抵抗値は 60Ωm 程度である．また，A 区間の途中から地表に水溜まりが形成されていたことから，撒水中の地下はかなり高い水分飽和度を有していたと考えられる．よって，D 区間で撒水を続けた場合にどこまで比抵抗値が増大するかは分からないものの，室内試験の結果と同様に，水分飽和度が高いときは塩濃度によって数十から 200Ωm 程度という幅広い比抵抗値を示すことがいえる．

6. まとめ 以上のように，Q2-C,D の比抵抗値が地盤の水分・塩類のどのような状態を表しているかを概ね推定することができる．しかし，間隙率など，その他の比抵抗を変化させる要因についても考慮する必要がある．例えば lineC の灌漑下の低比抵抗は高い水分飽和度と高い塩濃度，さらにその他の比抵抗を低くする要因によると考えられる．また，風成砂層 Q3 の比抵抗値がどういう状態を表すかについても調査し，さらに莫高窟周辺の水分移動に伴う塩類の挙動についても調査する予定である．