

敦煌莫高窟の地盤を対象とした比抵抗探査法に関する研究

大阪大学大学院	学生員	石田 祐也
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
ハイテック（株）		舩屋 直

1. はじめに

本論の対象地域は、中華人民共和国・甘肅省・敦煌市南東に位置する敦煌莫高窟である。莫高窟の窟内において、塩の析出に伴い壁画が剥落する塩害が深刻になっている。塩害は、地盤中の塩類が水分に溶け、水分の蒸発に伴って地盤表面に析出する現象である。本論では、塩類が析出する過程において地盤内で生じている塩類の潮解現象に着目し、窟内床面の比抵抗特性を二つの異なる測定方法より把握することを目的としている。一つは地表面に測線を設置し、ウエナ法を用いて比抵抗分布を測定するものであり、もう一つは深度 0.6m の二つの掘削孔を利用し、二極法を用いて地盤内部の点における比抵抗値を測定するものである。前者の測定方法によって得られる比抵抗値は、電極周辺の影響を反映したものであり、地盤内部の広い範囲の見掛け比抵抗である。また、後者の測定方法から得られる比抵抗値は、地盤内部の真の比抵抗値に近づくと考えられ、この結果から前者の測線データの妥当性を検討する。

2. 莫高窟の地質と塩類の析出

敦煌莫高窟は、かつての河川によって作られた古期扇状地堆積物を、南から流れる大泉河が浸食してできた崖の西側崖面に、高さ 50m、南北 2km にわたって掘られている。現在、南側のダムによって水が堰き止められており、莫高窟の前を流れる大泉河には水がほとんど流れていない。また、莫高窟を構成する地盤内には多量の塩が含有されていることが確認されている。ここで、本論で着目する潮解現象とは、地盤内の塩類が潮解湿度以上の湿度環境下において水分を吸収し溶解することである。溶解した塩類は移動しうる状態にあり、それらが壁面へと移動し、塩類が析出する可能性が考えられる。乾燥地域である敦煌の地表面が高比抵抗であるのに対して、潮解した塩や水分を含む地盤は低比抵抗となることから、比抵抗法により地盤内部の水分・塩類の挙動を把握する。

3. 地表面からの現地比抵抗測定結果

莫高窟の象徴である九層楼から南に約 80m に位置する 108 窟において、2004 年 9 月に比抵抗測定を実施した。108 窟は莫高窟を構成する窟の中で低い下層に位置する。下層の窟は壁画剥落の被害が多く見られ、塩が析出している箇所も多く見られる。本論では地下水の影響を最も受けやすいと考えられる床面を調査対象とした。比抵抗法の特徴としては 1.非破壊探査が可能であること、2.水分・塩類などの地盤状況のわずかな差異を反映できること、などが挙げられる。また、地表面に設置した測線 Line108Nb で採用したウエナ法電極配置は、地盤内浅部において詳細なデータが取得できる。Line108Nb は北壁から 0.05m の位置に東西方向に設置し、最小電極間隔 0.3m、電極数 35 本、測線延長 10.2m である。図 1 に 108 窟の概要と測線位置、次項に述べる掘削孔の位置図を示す。窟内では西壁下部での剥落が著しいため、本論では床面に東西方向の Line108Nb を設置することで、床面内部の東西方向の水分分布を調査することとした。比抵抗測定には McOHM PROFILER-4(応用地質株式会社製)を使用した。図 2 に測定から得られた比抵抗分布図を示す。掘削孔を利用した比抵抗測定における測定箇所も合わせて示す。

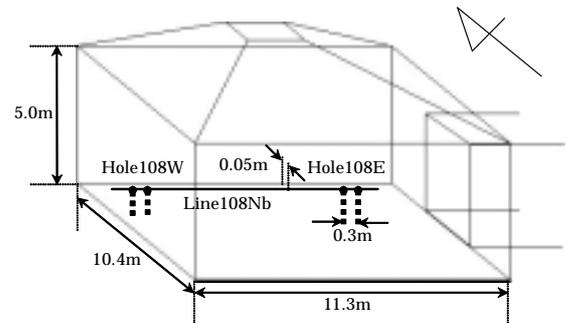


図 1 108 窟測線概要

図 2 より、表面から 0.3m 程度の深さまで 3000 Ωm 以上の高比

キーワード 敦煌莫高窟, 比抵抗, 潮解, 電極配置係数

連絡先 〒565-0871 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 TEL 06-6879-7558

抵抗帯が層状に分布している。また、深さ 0.4m 付近で比抵抗値が急激に低下していることがわかる。乾燥地域である敦煌地盤の表面に大量の水分が存在しているとは考えにくい。ため、地盤内の塩がわずかに存在する水分を吸湿し、潮解現象を起こしていると考えられる。また、西側から中央部にかけて比抵抗が高くなっている。これは、地盤内の西側と東側とで塩類や水分分布に違いがあると考えられ、床面内部を塩が移動することは十分考えられる。

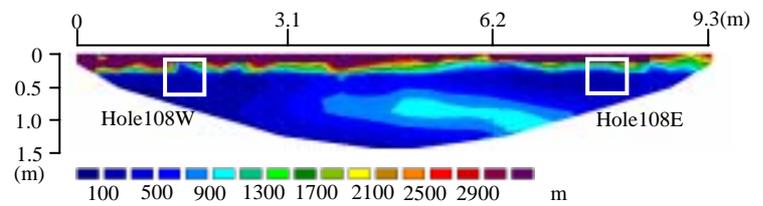


図2 108窟床面の比抵抗分布

4. 掘削孔を利用した比抵抗測定模擬試験

掘削孔を利用した比抵抗測定は電極を地盤内部に設置する。そのため平面での測定とは測定条件が異なると考えられる。そこで、式(1)¹⁾より測定値から比抵抗値を算出する際に必要な、電極の配置方法によって決まる固有の電極配置係数 K に着目し、室内における模擬試験から K を求めることとした。

$$= K \cdot \frac{V}{I} \quad \dots(1)^{1)}$$

: 見掛け比抵抗, K : 電極配置係数, V : 測定電位, I : 電流

模擬地盤として水槽(0.3(L)×0.18(W)×0.24(D)m)に比抵抗値が既知な電解質水溶液を入れ、現地測定における電極間隔 0.3m および深度 0.2, 0.4, 0.6m を 1/30 のスケールで模擬した電極を設置した。使用する測定器および通電電流の大きさは現地測定と同じものを使用し、得られた比抵抗値、電位を式(1)に代入して K を求めた。電解質溶液には、複数の異なる比抵抗値を示す NaCl 溶液を用い、電解質溶液の濃度によって K は変化しないことを確認した。深度ごとにそれらの平均値を採用する電極配置係数とし、結果を表 1 に示す。

表1 模擬試験から得られた電極配置係数

測定深度(m)	0.2	0.4	0.6
$K(m)$	3.10	4.07	4.59

5. 掘削孔を利用した現地比抵抗測定結果

現地地盤内における比抵抗測定は、前述した Line108Nb 上の東西二組の掘削孔を利用した。西側の Hole108W は 0.3m 間隔、西壁から 2.35m と 2.65m の位置であり、深度 0.2, 0.4, 0.6m の位置に電極を設置した。東側の Hole108E は 0.3m 間隔、東壁から 2.35m と 2.65m の位置であり、同様に電極を設置した。模擬試験から得られた電極配置係数を適用させた、各深度における

表2 掘削孔を用いての比抵抗測定結果

深度(m)	Hole108W 比抵抗値(m)	Hole108E 比抵抗値(m)
0.2	577.2	591.7
0.4	534.4	738.6
0.6	552.2	945.6

比抵抗値を表 2 に示す。表 2 より、西側の Hole108W では 0.2m~0.6m までさほど変化がないのに対し、東側の Hole108E では 0.2~0.6m の間で比抵抗が上昇するという結果を得た。また、どの深度においても 500 m 以上の比抵抗を示しており、深部でも 1000 m に近い高い値となった。

6. 両測定方法からの考察とまとめ

Line108Nb の西側掘削部分に着目すると、比抵抗値は 0.4m で 500 m 程度であり、Hole108W からの結果と同等の値となっている。一方、東側の掘削部分の比抵抗分布では 100 m 程度の非常に低い比抵抗値を示しており、Hole108E の測定結果とは大きな差がある。電極設置時に観察した際、掘削孔内部は岩盤のような硬質の物体が存在するような手ごたえがあった。そのことから、塩の潮解現象が起きていると考えられる低比抵抗帯は、床部直下には存在していないと考えられる。この結果から、比抵抗探査における電流は電気抵抗がより小さな地盤のほうへと流れ、比抵抗分布図が電極周辺の影響に大きく左右されることが確認できた。また、以上のことから敦煌の地盤比抵抗が $10^2 \sim 10^3$ m の値をとることがわかった。

今後の課題として、掘削孔内の接地抵抗をより低くし、地盤内部の真の地盤比抵抗測定を可能にすることで、地表面からの測定のキャリブレーションを行うことなどが言える。

参考文献 1) 島裕雅・梶原和彦・神谷英樹：建築・防災・環境のための新しい電気探査法 比抵抗映像法，古今書院，pp.18-20，1995