

## 第 部門

## 敦煌莫高窟の地盤比抵抗および地盤内温湿度に関する研究

|          |     |        |
|----------|-----|--------|
| 大阪大学工学部  | 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   |
| 大阪大学大学院  | 学生員 | 吉富 敦史  |

## 1. はじめに

中国・敦煌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て、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、敦煌莫高窟の比抵抗特性および温湿度測定結果から水分や塩類の挙動を把握することを目的としている。地盤内の水分や塩類の挙動を把握することで、塩害のメカニズムを解明し、壁画の剥落を防ぐことができると考える。

## 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。写真 1 に東側から見た莫高窟全景を示す。

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。表 1 に対象地盤内の塩類と各潮解湿度を示す。<sup>1)</sup>。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。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. 現地比抵抗測定概要

図 1 に示すように、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、北へ約 70m 離れた 85 窟において、2004 年 9 月に比抵抗測定を実施した。両窟とも、莫高窟を構成する窟の中で最も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。窟内壁面のうち、特に西壁下部での剥落が著しいため、本論では西壁の壁画が剥落している箇所を調査対象とした。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、本論では比抵抗法の中でも、地盤内浅部において詳細なデータが取得できる、ウェンナ法電極配置を採用した。108 窟における測線の詳細は、西壁床上 1.1m、最小電極間隔 0.2m、電極数 31 本、測線延長 6.0m である。

また、85 窟における測線の詳細は、西壁床上 0.5m、最小電極間隔 0.3m、電極数 30 本、測線延長 8.7m である。比抵抗測定には McOHM PROFILER-4 (応用地質株式会社製) を使用した。



写真 1 莫高窟崖面と大泉河

表 1 地盤内の塩類と各潮解湿度

| 塩類の種類                                               | 温度 ( ) | 潮解湿度(%) |
|-----------------------------------------------------|--------|---------|
| NaCl                                                | 20     | 75      |
| Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ・10H <sub>2</sub> O | 19     | 92      |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ・10H <sub>2</sub> O | 20     | 93      |
| CaSO <sub>4</sub> ・5H <sub>2</sub> O                | 20     | 98      |

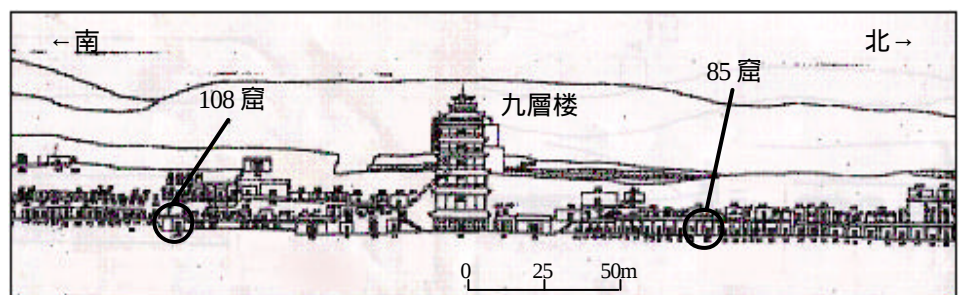


図 1 調査実施窟の配置図

#### 4．比抵抗測定結果

現地での測定から得られた比抵抗分布図を図 2 に示す。まず、(a)108 窟西壁での結果より、地盤深度 0.5m 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付近に大量の水分が存在しているとは考えにくいので、地盤内の塩が地盤内にわずかに存在する水分を吸湿し、潮解現象を起こして低比抵抗となっていると考えられる。

次に(b)85 窟西壁での結果より、108 窟同様に深度 0.5m 付近から低比抵抗帯が広がっている。ここで 108 窟および 85 窟の結果の比較を行うと、深度 0.5m 以深における比抵抗分布に差異が見られる。前者は層状に比抵抗が低下していくのに対し、後者は低比抵抗帯がまばらに存在している。このことから、108 窟と 85 窟とでは壁面背後からの水分供給の度合いが異なり、108 窟のほうが一様に水分供給されやすい状態にあると考えられる。

ここで、大阪大学が 2002 年 6 月に行った 108 窟西壁での比抵抗測定結果を図 3 に示す。測線の詳細は西壁床上 1.3m、最小電極間隔 0.25m、電極数 35、測線延長 8.5m である。この結果と図 2(a)との比較

を行う。窟内温湿度の年間計測の結果から、季節の違いによる温湿度の違いは見られず、比抵抗測定方法も同じである。測定箇所が鉛直方向で 0.2m の違いはあるものの、深度 1.0m より浅い部分で比抵抗分布に明らかな差異が見られる。2002 年の比抵抗分布では 3000  $\Omega m$  以上の高比抵抗であるのに対し、2004 年の比抵抗分布は先述した通り深度 0.5m から低比抵抗となっている。このような差異は地盤内の水分・塩類分布の恒常的な変化によるものであり、溶解した塩類が壁面表面付近にまで供給されうる可能性が考えられる。

#### 5．108 窟西壁内における温湿度測定結果

108 窟西壁内部の温湿度測定を行った。測定箇所は比抵抗測線左端から 0.2m 下に位置する、水平方向の掘削孔を利用した。測定期間は比抵抗測定時を含む 30 時間測定し、各深度の温湿度には時間変動がほとんど見られなかったため各深度の平均値をその深度における値とした。その結果を表 2 に示す。この結果と、108 窟西壁の比抵抗分布を比較すると、比抵抗が急激に低下する深度 0.5m では地盤内湿度が 66~74%であることがわかる。このことから、現地地盤に含まれる塩類の中で、潮解湿度が最も低い NaCl の潮解湿度 75%以下の湿度環境下でも、地盤内の塩類は水分を保持している可能性が考えられる。

#### 6．まとめ

本論から得られた知見として 1.莫高窟壁面内部から表面への水分・塩類の供給は窟によってその度合いが異なること、2.地盤内湿度が NaCl の潮解湿度である 75%以下でも塩類が水分を保持していること、3.地盤内の水分・塩類は 2 年間の間にも恒常的に変化し、表面付近へと移動しうること、などが考えられる。

なお、本研究を遂行するに際して、敦煌研究院の方々にご協力頂いた。末節ながら、ここに記して感謝の意を表する次第である。

**参考文献** 1) 北野康, 馬淵久夫, 三浦定俊, 西浦忠輝, 佐野千絵, 朽津信明, 門倉武夫, 日下部実, 段修業: 敦煌周辺の天然水と中国の砂漠の析出塩の化学組成, 保存科学, No.33, pp.11~22, 1993.

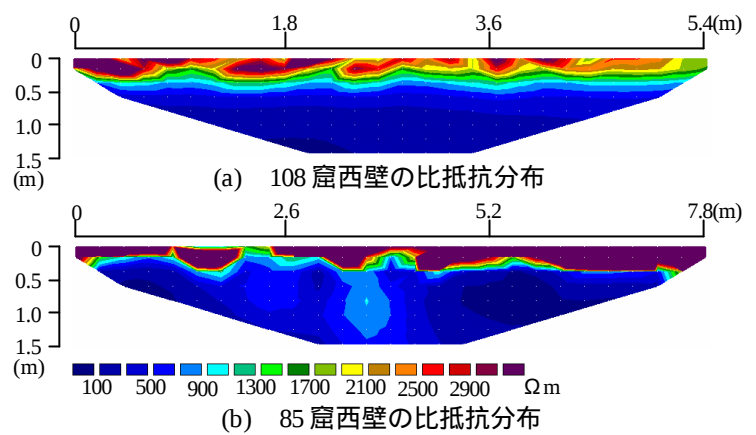


図 2 測定結果

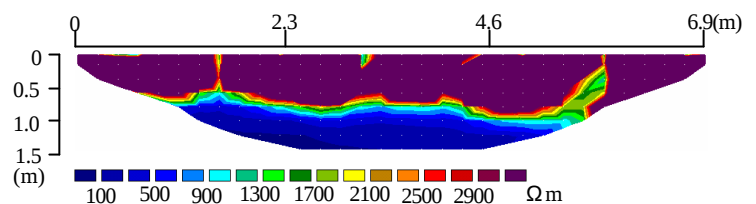


図 3 2002 年 6 月の 108 窟西壁比抵抗分布

表 2 深度ごとの温湿度の平均値

| 深さ (m) | 温度 (°C) | 相対湿度 (%) |
|--------|---------|----------|
| 0.0m   | 16.33   | 41.02    |
| 0.2m   | 15.41   | 58.07    |
| 0.4m   | 14.96   | 66.46    |
| 0.6m   | 14.62   | 74.61    |
| 0.8m   | 14.42   | 81.27    |
| 1.0m   | 14.22   | 85.81    |