

大阪大学工学部	学生員	○伊藤 三彩恵
大阪大学大学院	正会員	小泉 圭吾
大阪大学大学院	正会員	小田 和広
大阪大学大学院	学生員	宮脇 知美
ハイテック(株)		朴 春澤
国際高等研究所		谷本 親伯

1. はじめに

乾燥地帯に存在する世界遺産・中国敦煌莫高窟において、塩害による壁画の剥落、損傷が問題となっている。塩害とは、地盤中の塩類が水分に溶けて、水分の蒸発に伴い地盤表面に析出する現象である。この塩害の発生メカニズムを解明するためには、莫高窟地盤内部の水分環境の把握が必要である。大阪大学では電気探査により、現地地盤の比抵抗を計測し、室内実験により比抵抗に影響を及ぼす水分と塩類の関係性について研究を行ってきた¹⁾。2011年9月に行った現地計測により、莫高窟崖面背後の砂礫層地盤内部におおよそ45Ω・mの低比抵抗帯が確認された。そこで本研究では、室内実験によりこの低比抵抗帯が分布する地盤内部の水分と塩類の関係を明らかにすることを目的とした。

2. 対象地の概要

第4紀の砂礫層で構成される敦煌莫高窟は、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面に、高さ40m、南北2kmに渡って掘削された石窟群である。写真1に東正面から見た莫高窟を示す。手前に大泉河、防砂のための植林が確認される。



写真1 東正面から見た莫高窟全景
表1 含浸塩量の試験パターン

試験名	NaCl 換算比
CaseA	0.756×10 ⁻³
CaseB	1.50×10 ⁻³
CaseC	3.14×10 ⁻³
CaseD	16.7×10 ⁻³

3. 実験手法

現地地盤で計測された45Ω・mの低比抵抗帯を再現するために、現地砂礫層の塩分濃度の違いによる水分飽和度と比抵抗の関係を把握するための実験を行った。供試体として莫高窟周辺から採取した砂礫岩を用いた。まず供試体を蒸留水中に湿潤させることで、供試体に含まれる塩を溶脱し、塩含有量を計測する。次に、塩が溶脱した供試体に定量の飽和塩を溶かした水溶液をスポイトで注入し、含浸させる。徐々に乾燥させながら、重量の計量と比抵抗測定を複数回繰り返す。含浸させる塩は乾燥重量に対するNaCl比を基準として表1に示す。CaseA～CaseDの4パターンとした。CaseAは実験に用いた全供試体の塩含有量の平均値、CaseBはCaseAの二倍、CaseCは実験に用いた供試体の塩含有量の最大値とした。また、CaseDには供試体の間隙水が飽和水溶液となる塩量を設定した。写真2に比抵抗測定に用いた電極装置を示す。

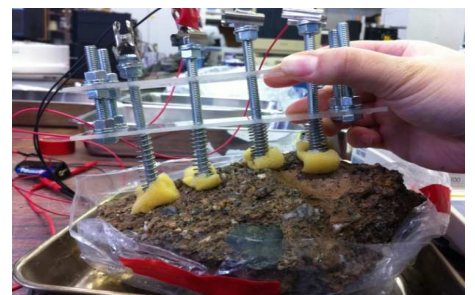


写真2 供試体の比抵抗測定

4. 実験結果と考察

測定結果を図1に、図2に図1の黒枠箇所を拡大したグラフを示す。

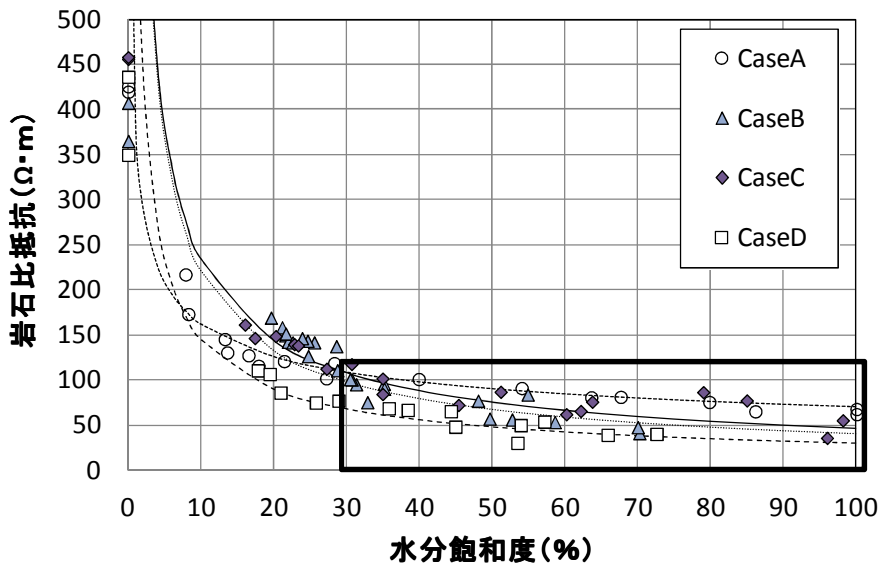


図1 塩含有量の変化による比抵抗特性

水分飽和度が減少するにつれ比抵抗値は除々に上昇し、飽和度が10%以下になるとその変化は急激に大きくなる。また、水分飽和度の高い範囲では、比抵抗値の変化は小さいことが確認される。また、含浸させた塩量が増えるほど、低い比抵抗値を示すことがわかる。莫高窟崖面背後の地盤で計測された $45 \Omega \cdot m$ の低比抵抗帯に着目して実験結果を考察すると、CaseBにおいて飽和度100%で $45 \Omega \cdot m$ を示すことがわかる。またCaseCで飽和度85%、CaseDで飽和度55%において、比抵抗値が $45 \Omega \cdot m$ を示すことがわかった。このことから莫高窟崖面背後の地盤における $45 \Omega \cdot m$ という低比抵抗帯は、少なくとも水分飽和度55%(NaCl換算比 16.7×10^3)以上の水分環境下にある可能性が確認された。

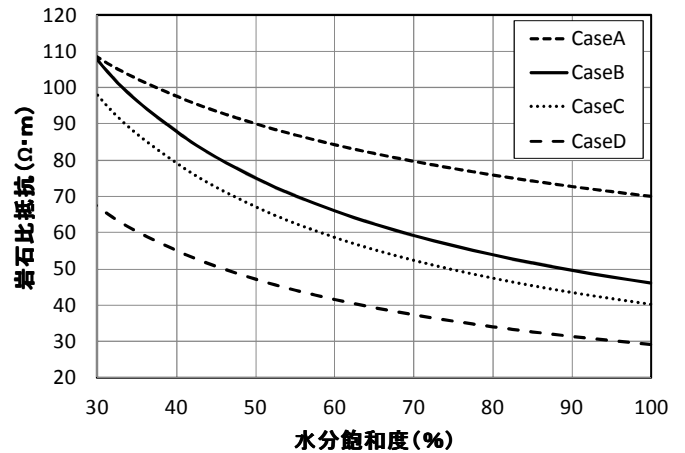


図2 低比抵抗帯拡大図

5. まとめ

本研究では、現地岩石を用いた室内実験により、莫高窟砂礫層の比抵抗特性を求めた。以下に得られた知見をまとめる。水分飽和度が減少するにつれ比抵抗値は除々に上昇し、飽和度が10%以下になるとその変化は急激に大きくなる。また供試体内の塩含有量が多いほど、低い比抵抗値を示す。現地地盤において電気探査を行った結果、莫高窟崖面背後地盤内部に $45 \Omega \cdot m$ の低比抵抗帯が確認された。この地盤の水分環境を塩含有量も加味して検討した結果、水分飽和度が最大で100%(NaCl換算比 1.50×10^3)、少なくとも水分飽和度が55%(NaCl換算比 16.7×10^3)以上の水分環境下にある可能性が確認された。今後はこれらの実験結果を基に、莫高窟崖面背後地盤全体の水分環境を推定し、水分の存在の有無および水分の移動に伴う塩害の可能性について研究を進める必要がある。

なお、本研究を遂行するにあたり、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次第である。