

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月25日現在

機関番号：74330

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22254003

研究課題名（和文）

石造遺跡（莫高窟・龍游石窟）の割れ目と空洞安定性に関する調査研究

研究課題名（英文）

Study on Stability of Stone Monuments through Geological Discontinuities

研究代表者

谷本 親伯（TANIMOTO CHIKAOSA）

財団法人国際高等研究所チーフリサーチフェロー

研究者番号：10109027

研究成果の概要（和文）：

短期・長期的な自然作用により、壁画や石窟自体が損傷を受けている、中国敦煌莫高窟の背後地盤の比抵抗探査、RI 検層、室内実験および数値解析により、石窟の位置する深度 50m 付近は相対的に多くの塩を含んだ地層であることが確認された。また、自記録地震計（万点計）を洞窟内に設置し、継続して測定を行った結果、記録装置は十分な精度を有すること、また、振動伝播経路・地盤条件・振動特性について貴重な知見を得た。

研究成果の概要（英文）：

The Mogao Grottoes and the wall paintings in the caves are damaged due to various natural weathering processes in short- period and long-period. To clarify the ground condition behind the Mogao Grottoes, various in-situ measurements have been applied, namely electric resistivity method, RI (radio-isotope) logging through the 130 m long drill holes above the cliff and water conductivity tests.

The seismic activities around Mogao, Dunhuang Area were clarified in the relation with epicentral distance in the 500 km range, and the actual damages were confirmed with the document records from the estimated intensity point of view. And also, micro tremors in individual caves were measured with a set of 3 compact earthquake recorders, which enabled 6 month continuous logging in 6 caves. The dynamic response behavior near identical fissures was analyzed. The logging system, which we brought to the Mogao Caves, satisfied the required accuracy and function, fitting to the preservation works.

The research, which we carried out at the Mogao Caves by aid of the 2010-2012 JSPS Fund, provided a valuable database for the preservation of stone monuments, including its risk against seismic activities, and clarified the local and global movements of ground-water and salinization through the continuous climate observation over 14 years as well as the electric resistivity distribution.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2011年度	14,100,000	4,230,000	18,330,000
2012年度	12,900,000	3,870,000	16,770,000
総計	34,800,000	10,440,000	45,240,000

研究分野：地盤工学

科研費の分科・細目：工学・地盤工学

キーワード：石造遺跡、塩害、断層、水分、比抵抗、地震、莫高窟、保存科学

1. 研究開始当初の背景

(1) 莫高窟崖面内部の水分環境調査

本申請研究チームの前身である大阪大学学術調査隊は、過去の調査研究より、石窟崖面の低比抵抗帯（水分分布の可能性）および石窟壁面背後の岩盤中の高湿度環境（深度 30cm で相対湿度 80%以上）を確認し、石窟崖面が高湿度環境化に置かれ、その岩盤中の塩が潮解状態にある可能性を報告した。

一方、その後の莫高窟崖上でのボーリング調査により、少なくとも崖上から深度 120m までに地下水の存在は確認されなかった。これは、莫高窟背後地盤において、下層の石窟の存在する位置から、70mの深度までには明瞭な地下水面が存在しないことを示しており、この環境下における、岩盤中の水分と塩分の石窟壁面に及ぼす影響度を評価することが本研究の課題として挙げられた。

(2) 莫高窟周辺の地震調査

石造文化財の地震リスクに関する研究は、今日まで見られない。石造文化財地点の自然環境、すなわち地形・地質、石造文化財周辺の地盤物性、地下水等の状態の調査を進めてゆくと、断層や岩盤内の亀裂（割れ目）などの不連続面の存在が問題視される。そして、地震による影響を文化財リスクとして取り上げることが必然的となった。このような背景を受けて、今回の科学研究費補助金による研究調査では、他に先駆けて石造文化財地点（中国敦煌莫高窟および大

分県白杵石仏群）の地震時挙動を観測することとした。

莫高窟の地震リスクは、敦煌研究院においても問題視され、蘭州地震研究所と共に観測体制を整備する意向を持っていた。そこで、国際高等研究所と敦煌研究院、そして蘭州地震研究所の三者が国際共同研究として莫高窟の地震観測を行うことに同意した。中国における広域の地震活動の情報を蘭州地震研究所が、莫高窟における洞窟周辺の挙動と局地的環境の影響を国際高等研究所と敦煌研究院が担当することになった。

2. 研究の目的

(1) 莫高窟崖面内部の水分環境調査

過去の調査研究により、低比抵抗帯の影響が水分のみならず塩類の存在によるものであることは既に報告されているものの、地盤内部の低比抵抗帯の水分と塩分の存在を定量的に評価するには至っていない。そこで本申請研究は、この課題を解決するために、現地での塩分量調査、物理探査、室内実験および数値解析により、莫高窟崖面背後地盤の水分環境を定量的に評価することを目的とする。

(2) 莫高窟周辺の地震調査

2010年に断層分布と予備調査を、翌年より現地での自動観測システムを準備し、万点計システ

ム(3組)を設置することとした。現地での観測は、地震観測と地点毎の常時微動測定を2012年6月より着手した。中国各地で発生した地震動の敦煌に到達するまでの挙動を調査し、敦煌到達時の地震動(莫高窟地点に対する入力波)が洞窟の設置環境にどのように影響するか、洞窟毎の受信波を調査する。また、常時微動から地点毎の振動特性を特定し、地震リスクを評価する。

3. 研究の方法

(1) 莫高窟崖面内部の水分環境調査

本研究では、ボーリング孔内および崖上での比抵抗探査を行い、現地での電気伝導率測定による塩分量推定、室内実験による比抵抗値の解釈および数値解析を行うことで、地盤内部の塩分と水分の関係性を把握する。この結果の妥当性をRI検層によって評価することで、地盤内部の含水比、飽和度、体積含水率および塩分量を把握し、石窟壁面付近の水分と塩分がどのような状態にあるのかを、窟内での比抵抗探査結果と合わせて解釈する。以下に、主要な研究項目を記す。

- ①ボーリング孔を用いた比抵抗探査
- ②比抵抗値と水分・塩分量の関係を評価するための室内実験
- ③莫高窟周辺地盤における塩類の分布調査
- ④数値解析による莫高窟周辺地盤の水分環境の把握
- ⑤莫高窟背後地盤の水分環境調査を目的としたRI検層
- ⑥108窟西壁での比抵抗探査

(2) 莫高窟周辺の地震調査

電池駆動(単1電池24個)にて6か月間の自動記録を可能とする万点計システム(変位速度型)3組を莫高窟内外に設置することにより、無人にて長期間測定を実施する。最初に、現地観測により、併せて電源の安定と寿命を確認し、

観測波形の精度を検証した。十分な感度を有し、中国全土のみならず太平洋西域・インド洋等広範囲の地震動を正確に記録していることが確認された。

また、常時微動観測は、顕著な不連続面や地盤特性の異なる地点を選び、設置環境の相違を調査した。多量のデータが取得され、これらのデータ解析を能率的に推進する手法も求められている。

4. 研究成果

(1) 莫高窟崖面内部の水分環境調査

①ボーリング孔を用いた比抵抗探査結果

測定結果を図-2に示す。深度50~100mの間に $45\Omega\cdot m$ 程度の低比抵抗帯が分布する。この結果は、2000年から2005年に測定した崖上水平方向で測定した比抵抗探査結果および今回、崖上の水平方向で測定した比抵抗探査結果とほぼ同じ値を示すことが確認された。

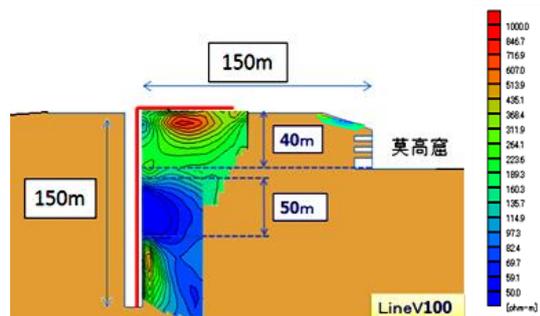


図-2 ボーリング孔を用いた比抵抗探査結果

②室内実験による現地比抵抗探査結果の解釈

測定結果を図-3に示す。現地地盤の低比抵抗帯を示す $45\Omega\cdot m$ 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。

③莫高窟周辺地盤における塩類調査結果

地表面から鉛直深度 40cm までに塩類が集積しており、土粒子の単位重量当たりの塩量は 0.002~0.02g であると推定された。

108 窟における電気伝導率は地点ごとにばらつきはあるものの、鉛直深度 40cm までの電気伝導率とほぼ等しい。このことは、108 窟では、潜在的に多くの塩類が含まれており、それが顕著に移動していないことを示唆している。

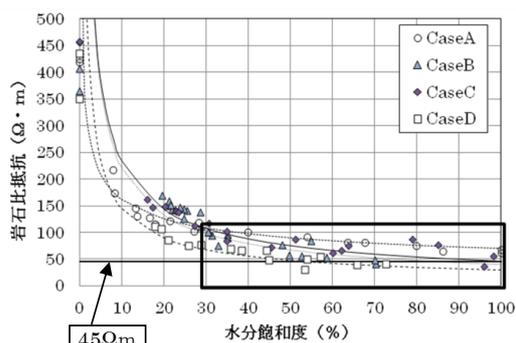


図-3 塩含有量の違いによる比抵抗特性

④数値解析による莫高窟周辺地盤の水分環境の推定

数値解析を用いて、比抵抗探査の結果が示すような水分分布を再現することができた。

数値解析では、深度 50m~100m における水分飽和度は 55% であると推定された。

⑤RI 検層による崖面背後地盤の水分環境の推定

G.L. -40~80m に存在する飽和度が高い領域は、比抵抗探査で低比抵抗を示した深度と概ね一致していることが確認され、その平均飽和度は 55%~60% 程度と、室内実験において塩分濃度が最大の場合を推定した結果と一致することがわかった。

⑥108 窟西壁表層地盤内部の比抵抗探査結果

本調査結果より、壁面のある深度で比抵抗値に大きな差が見られることがわかった。この境界層の深度は 2002 年 6 月が 80cm, 2012 年 9 月が 60cm, 2013 年 2 月が 30cm と異なることが確認された。2012 年 9 月, 2013 年 2 月の結果から、

境界深度の違いは経年による変化というよりも、季節変化による影響が大きいものと推測される。つまり、夏から冬にかけて、比抵抗値の境界層が壁面側に近づいていることが考えられる。

⑦まとめと今後の課題、展望

水分の移動に着目すると、既往の研究より、夏季から冬季にかけて、岩盤内部と石窟内部の温度勾配が逆転することから、冬季の方が岩盤内部から石窟への水蒸気の移動量が多くなることが指摘されている。このことから、108 窟西壁で季節により低比抵抗帯と高比抵抗帯の境界層深度が変化する原因は、水蒸気の移動によるものであり、低比抵抗帯は水蒸気により塩が潮解している範囲を示しているものと推測される。さらに、この結果を考慮すると、冬季の 108 窟での低比抵抗帯の前線は西壁水平深度 30cm 程度に停滞していることから、扉が設置された現在の石窟環境においては、壁面表面付近では塩の潮解する可能性は低いものと考えられる。一方、扉が設置されていなかった過去の石窟環境下では、冬季の壁面内部と石窟内の温度勾配は現在よりも大きくなることから、その時点においては、塩の潮解が壁面近傍に及んでいた可能性が考えられる。以上の点を明確にするためには、今後の継続した調査研究が必要となるが、比抵抗探査により、石窟壁面内部の塩の潮解範囲を推定できるならば、同様の石造遺跡における塩害の原因究明と対策の検討に役立つ簡便な測定手法として提案することができる。

(2) 莫高窟周辺の地震調査

①敦煌莫高窟にて採用した万点計システムは、十分な精度と信頼性を有し、北・西太平洋周辺からインド・東南アジアで発生した M4 以上の地震を的確に記録した。

②文献調査および現地聞き取り調査から有史以来の大地震と被害との関係を調査した。敦煌は、シルクロードの要所であったが、被害の実態を定量的に特定できる情報はほとんど残っていない、

清朝初期からはかなり克明な記録が確認できた。

③莫高窟の洞窟の地震動に対する不安定性は、上部窟から中部、そして下部；主要部が崖面に近いもの；洞窟部および近辺に割れ目が認められるもの；割れ目の規模の大きいものの順に特定される。割れ目の存在により崖面側と背面側とで3倍の振幅差が認められたが、データ数が少なく、定量的評価には至らなかった。

④今後、継続的な地震記録体制を整えれば、地震カタログの整備と共に敦煌でのリスク評価が十分に可能であることを確認した。

⑤莫高窟崖面の割れ目分布との関連で地震カタログと共に常時微動測定を実施すれば洞窟の設置環境の視点から洞窟補強策の提言が可能となる。ただし、各洞窟において多数の測定データを必要とする。

⑥大分県臼杵石仏群においても敦煌とほぼ同様な知見を得た。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① Y. IWASAKI : MICRO TREMOR MEASUREMENTS AT MOGAO GROTTOS, DUNHUANG, CHINA FOR PRELIMINARY DYNAMIC CHARACTERIZATION FOR PERFORMANCE UNDER EARTHQUAKE, 第5回日中地盤工学シンポジウム、査読有、2013年、掲載確定
- ② C. Piao、C. Tanimoto : Earthquake Environments at Mogao Grottoes, Dun Huang, China, 第5回日中地盤工学シンポジウム、査読無、2013、掲載確定
- ③ 小田和広、宮脇知美、小泉圭吾、伊藤三彩恵、朴春澤、谷本親伯、郭青林、王旭東 : 中国・敦煌莫高窟背後地盤における塩類の現地調査と水分移動の数値解析, 第57回地盤工学シンポジウム平成24年度論文集,

査読有、2012年、pp.127-134

- ④ 伊藤三彩恵、小泉圭吾、小田和広、宮脇知美、朴春澤、谷本親伯、郭青林、王旭東 : 電気探査を用いた敦煌莫高窟崖背面地盤の水分環境に関する研究, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2012 論文集, 査読有、2012年、pp.105-110
- ⑤ C. Tanimoto、K. Koizumi、C. Piao、K. Yano、X. Wong and Q. Guo : Proc. of Special Session on Geo-Engineering for Conservation of Cultural heritage and Historical Sites, ATC19 Committee, 査読有, 2011, pp.154-159
- ⑥ K. Koizumi、C. Tanimoto、Y. Iwasaki、L. Lifui、L. Li and F. Yan : Proc. of Special Session on Wireless Sensor Network for Engironmental Monitoring in Longyou grottoes, ATC19 Committee, 査読有, 2011, pp.137-142
- ⑦ 小泉圭吾、朴春澤、谷本親伯、上野陽平、岩田修一、李最雄、王旭東、郭青林 : 割れ目系と植生分布に着目した敦煌莫高窟周辺の水分移動経路の推定, 土木学会論文集 C, 査読有、2010年、Vol.66, No.4, pp.836-844

[学会発表] (計6件)

- ① 伊藤三彩恵、小泉圭吾、小田和広、宮脇知美、朴春澤、谷本親伯 : 電気探査を用いた敦煌莫高窟崖背面地盤の水分環境に関する研究, 第47回地盤工学研究発表会, 2012年7月13日~15日、八戸工業大学
- ② 宮脇知美、小田和広、小泉圭吾、伊藤三彩恵、朴春澤、谷本親伯、楊善龍、郭青林、王旭東 : 中国・敦煌莫高窟崖背面における水分の深度分布の推定に関する数値シミュレーション, 第47回地盤工学研究発表会, 2012年7月13日~15日、八戸工業大学
- ③ 小泉圭吾、谷本親伯、岩崎好規、MariaFeng,

FuYan, 矢野公一：無線センサネットワーク
による中国龍游石窟の環境モニタリング,
第 46 回地盤工学研究発表会, 2011 年 7 月 5
日、神戸国際会議場

- ④ 小田和広, 岩崎好規, 谷本親伯, 小泉圭吾,
楊善龍, 郭青林, 浅野祐也：莫高窟背面地
盤における温度・湿度調査, 第 46 回地盤工
学研究発表会, 2011 年 7 月 5 日、神戸国際
会議場
- ⑤ 小泉圭吾, 谷本親伯, 岩崎好規, MariaFeng,
FuYan, 矢野公一：無線センサネットワー
クによる中国龍游石窟の自動環境モニタリ
ングシステム, 第 55 回システム制御情報学会,
2011 年 5 月 17 日、大阪大学
- ⑥ 小泉圭吾：世界遺産 中国敦煌莫高窟保存
のための学術調査, 第 26 回ジオテク研究
会, 2011 年 1 月 27 日、大阪大学中之島セン
ター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷本 親伯 (TANIMOTO CHIKAOSA)
財団法人国際高等研究所・チーフリサーチフ
ェロー
研究者番号：10109027

(2) 研究分担者

小田 和広 (ODA KAZUHIRO)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00185597
小泉 圭吾 (KOIZUMI KEIGO)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：10362667
尾池 和夫 (OIKE KAZUO)
財団法人国際高等研究所・所長
研究者番号：40027248
岩崎 好規 (IWASAKI YOSHINORI)
一般財団法人地域地盤環境研究所・専務理事
研究者番号：80450899