

イドゥートのマスタバ地下埋葬室における岩盤等の補強対策と品質評価

鶴田浩章^{*,**} 中村吉伸^{*,***} 伊藤淳志^{*,**} 肥後時尚^{*,****}
吹田 浩^{*,*****} アフメド・シュエイブ^{*,*****}

Strengthening Counter-measures and Quality Estimation of Bedrocks in Mastaba Idout

Hiroaki TSURUTA^{*,**} Yoshinobu NAKAMURA^{*,***} Atsushi ITO^{*,**}
Tokihisa HIGO^{*,****} Hiroshi SUITA^{*,*****} Ahmed Shoeib^{*,*****}

1 はじめに

「国際文化財・文化研究センター」(Center for the Global Study of Cultural Heritage and Culture)では、エジプト・アラブ共和国における文化財保存修復活動に取り組んでいる。エジプトでは、サッカー遺跡にあるイドゥート(第6王朝:紀元前2360年頃)のマスタバ墓の地下埋葬室における壁画の保存修復事業を進めている。サッカー遺跡に位置するイドゥートのマスタバ墓は、古代エジプト古王国第6王朝時代に王女イドゥートのために建造された。このマスタバは、1927年にG.ファースによって発見され、その後1935年にR.マクラマッラーによって最初の発掘報告書が公開された[Macramallah 1935]。その他の同時代の墓の建築様式と同様に、このマスタバは、地上に建造された上部構造と地下の埋葬室から成っており、地下埋葬室には、壁面のプラスター上に描かれた4000年以上前の色鮮やかな壁画が現存している。しかしながら、イドゥートの地下埋葬室には、壁上部や天井部分にマール層と呼ばれる脆弱部が存在しているため、岩盤表層からの壁画の剥離や剥落が懸念されている。ここの岩盤の主な岩質は泥灰岩と粘土質の石灰岩で、全体的に風化

が進行している[西形・伊藤 2012]。

そこで、著者らは、それらのプロジェクトにおいて岩盤の補強対策や岩盤の品質評価を行い、今後の遺跡の保存や修復のための技術開発に有益なデータの取得を目指している。本稿では、まず、イドゥートの地下埋葬室における岩盤の品質評価を行い、脆弱な部分に対して岩盤強化剤を適用することや亀裂へのセメントスラリーの充填による補強を試みた。そして、それら補強対策の効果について非破壊試験による評価を行った。さらに、岩盤強化剤の品質評価試験を行い、岩盤強化剤の特性を明確にすることを試みた。そして、今回適用した補強対策や品質評価手法について客観的に定量的に評価することを試みた。

2 エジプトにおける試験の概要と適用箇所

2.1 使用した材料

岩盤の補強対策として、岩盤強化およびき裂の補修を検討し、以下の2種の材料を使用して補修・補強の検討を行った。

- 1) 土と石の強化保存剤(A社製);ケイ素を含有するアルコキシド溶液に、エチルアルコール等を

* 関西大学国際文化財・文化研究センター (Center for the Global Study of Cultural Heritage and Culture, Kansai University, Japan)

** 関西大学環境都市工学部 (Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University, Japan)

*** 大阪工業大学工学部 (Faculty of Engineering, Osaka Institute of Technology, Japan)

**** 関西大学大学院文学研究科 (Graduate School of Letters, Kansai University, Japan)

***** 関西大学文学部 (Faculty of Letters, Kansai University, Japan)

***** カイロ大学考古学部 (Faculty of Archaeology, Cairo University, Egypt)

溶剤として加え、そのアルコキシド溶液を加水分解重縮合させたもの

2) 無収縮セメント (B 社製) ; 流動性に優れ、複雑な形状の空隙も隅々まで充填することができるモルタルを作製可能

2.2 材料の適用箇所

上記 2 種の材料を適用したのは、Fig. 1 に示すイドウトの地下埋葬室の天井部および側壁部である。天井部には土と石の強化保存剤を使用し、側壁部の亀裂には無収縮セメントを使用した。

2.3 材料の使用方法

1) 土と石の強化保存剤 (TOT、A 剤と称する)

地下埋葬室の天井部の岩石表面に刷毛を使って、A 剤を 3 kg/m^2 の割合に達するまで Fig. 2 のようにして繰り返し塗布した。塗布箇所は、Fig. 3 に示すような $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ の正方形形状である。

2) 無収縮セメント

スラリー状で使用するために、無収縮セメント 0.2 kg に対して、水を 0.036 kg 使用して水結合材比 W/B

= 18% の混練物 (B 材) を作製した。施工箇所は、Fig. 4 のような亀裂部であり、最大で約 10 mm 程度の亀裂幅となっている部分である。前日に亀裂内に水を流し込んで水が漏出する部分 (Fig. 4 のシール部) を B 材でシールして、翌日に B 材を注射器 (注射針なし) に詰め、Fig. 5 のように亀裂部上部 (Fig. 4 の充填部) に差し込んだホースに流し込んで亀裂を充填した。



Fig. 1 適用箇所

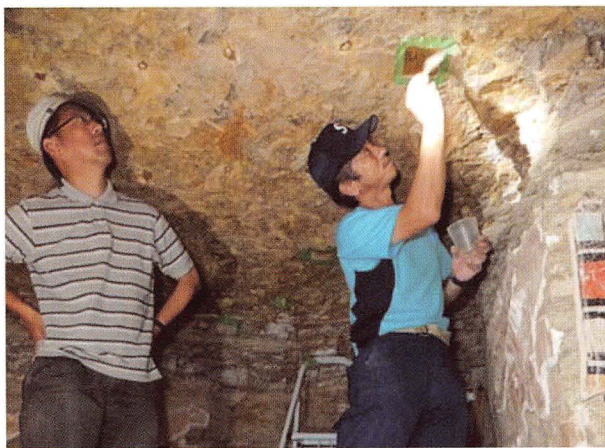


Fig. 2 A 剤の施工状況



Fig. 3 A 剤の適用箇所

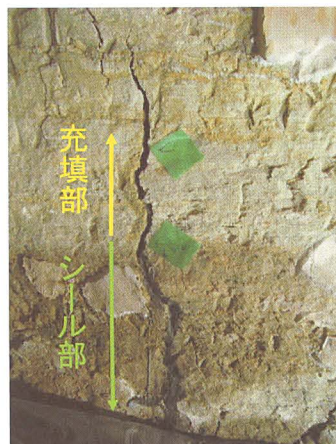


Fig. 4 B 材適用箇所

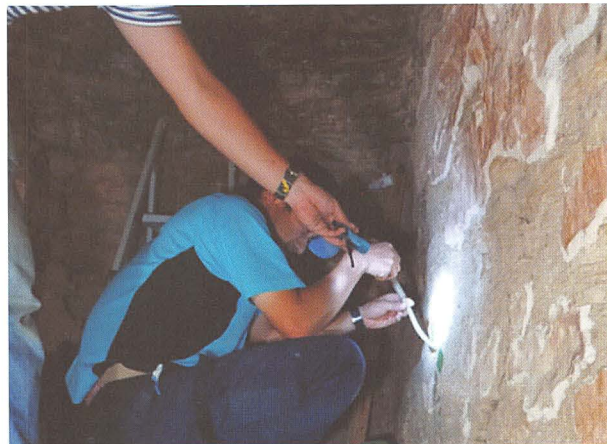


Fig. 5 B 材の施工状況



Fig. 6 周波数測定装置



Fig. 7 周波数測定時の打診位置例

2.4 評価方法

1) 外観観察

A 剤の適用箇所においては、塗布面の色の変化や剥落状況の確認を行った。B 材の適用箇所では、充填後に硬化した無収縮セメントスラリーと周辺岩盤の色の違い、充填部における乾燥による収縮ひび割れや剥離の有無を確認した。

2) 打診棒を使用した周波数測定

A 剤および B 材の適用箇所における補修や補強の効果を確認するために、Fig. 6 のような市販の周波数および波形測定装置（C 社製）を使用した。この装置は、測定対象物の表面を打診棒でたたき、それにより発生する波を加速度センサーで受信し、装置本体に周波数と波形を表示するものである。本試験における受信センサーの位置と打診棒で叩く場所の一例を示したものが Fig. 7 である。図中で「※」が受信センサーの位置、「x」が打診棒で叩いた場所の一例を示している。測定に当たっては、試験の条件によっても異なるが、受信センサーと打診棒で叩いた場所の距離は、10cm 程度である。周波数の値が大きければ、測定した対象物の組織が緻密で高品質であり、周波数の値が小さければ、対象物の組織が粗であり品質が高くないことを意味する。

3 エジプトにおける試験結果および考察

3.1 外観観察の結果

A 剤の適用箇所においては、塗布面の色がやや白っぽくなる状況が見られたが、著しい変色や剥離は認められなかった。B 材の適用箇所では、亀裂に無収縮セメントスラリーが充填され、亀裂が埋まることで、周囲の岩盤と無収縮セメントスラリーの色の

違いがやや目立つ状態であったが、充填部分に収縮ひび割れや剥離などは認められなかった。さらに、5 か月後に確認した際にも異常は認められなかった。

3.2 周波数測定装置を用いたイドゥートの地下埋葬室における試験結果

1) 地下埋葬室周辺の屋外の岩盤の状況

地下埋葬室において試験を行うに先立って、その周辺の屋外の岩盤で予備試験を行った。測定を行った場所は、Fig. 8 に示される屋外であるが、地下埋葬室と同等の高さにあるとみられる場所である。図中の (A) は高品質であると判断される岩盤で、①はやや品質が低下していると考えられる岩盤、②はかなり脆弱な層と考えられる岩盤である。それぞれ「※」部分に受信センサーを設置し、その周囲 5~15 cm 程度離れた地点を叩くことで測定を行った。その結果について、Table 1 に示す。表よりわかるように、(A) 高品質部、①やや品質低下部、②脆弱部の順に周波数の測定値が低下している。また、標準偏差からもばらつきが大きくなる傾向が見られ、(A)、①、②の順に大きくなっている。これも、岩盤の品質低下を示唆しているものと考えられる。

2) 地下埋葬室の天井部岩盤の状況

1) と同様に地下埋葬室において、岩盤の試験を行った。試験部は 2.3 1) に示した天井部であり、A 剤を塗布する前と塗布した翌日に測定を行い、A 剤の効果も検討した。測定は、Fig. 7 に示される「※」部に受信センサーを設置し、「x」を叩いて行った。その結果を Table 2 に示す。表からわかるように、塗布前後で周波数が 1.4 倍程度に増加しており、A 剤の塗布により岩盤表面の品質がやや向上しており、補強効果が認められると考えられる。

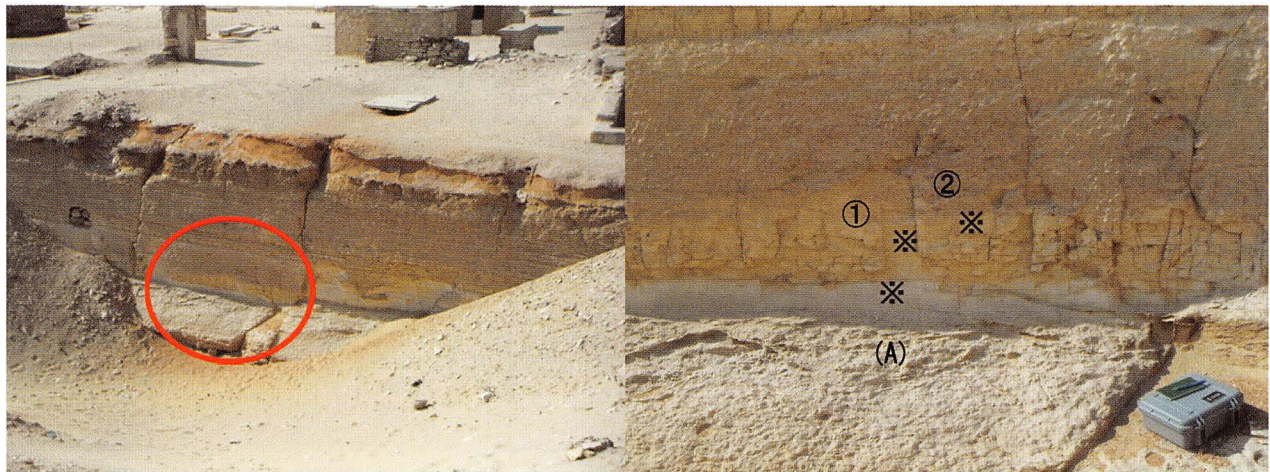


Fig. 8 屋外の測定箇所（左の赤丸部分の拡大写真が右）

Table 1 屋外における測定結果

	(A) 高品質部	①やや品質低下部	②脆弱部
周波数の 測定値 (Hz)	3,984	3,652	1,349
	3,633	3,144	1,505
	4,336	2,956	576
	3,516	2,820	1,281
	3,867	2,507	2,562
平均値 (Hz)	3,867	3,016	1,455
標準偏差 (Hz)	286	380	639

3) 地下埋葬室の壁部の岩盤の状況

地下埋葬室で壁画を復元している壁部分に対しても試験を行ったが、平均周波数が3,406 Hzとなり、一部の壁部は低品質ではないことが確認できた。そこで、大きな亀裂が発生している壁部 (Fig. 1 参照) に対して、無収縮セメントを使用した補修を行い、その効果を周波数測定で検討した。測定に当たっては、Fig. 9 に示すように、亀裂を挟んで、左に受信センサーを置き、亀裂の右側5か所を叩いて測定を行った。図中の「※」は受信センサーの位置、「×」は叩いた場所を示している。測定結果については、Table 3 に示し、充填された亀裂部の状況は Fig. 10

に示す。表より、充填部においては無収縮セメントスラリーの充填前後で周波数に明らかに変化が見られており、充填により表面に近い部分が密に充填され、波の伝播が改善されたものと考えられる。一方、シール部では、周波数の増加は認められなかった。これは、無収縮セメントスラリーの充填がシール部の少し上から少しずつ流し込みながら、徐々に上部に移動していく方法をとったことから、シール部表面よりも内部深くに充填されたのではないかと考えられる。

4 日本における岩盤強化剤の品質試験

本章では、2章および3章で使用した岩盤強化剤の他に、イドゥートにおいて中村教授が主に検討したOM50、OM25、OH100についても品質試験を行った。これは、イドゥート遺跡地下埋葬室に適用するにあたって、岩盤の強化の効果とともに、岩盤の呼吸性をこれまでの状況にできるだけ近い状態で補強ができるかどうかを確認する試験である。例えば、これらの薬剤を岩盤面全面に塗布した場合に、岩盤の呼吸性が一変することにより、埋葬室の状態が悪

Table 2 地下埋葬室の天井部における測定結果

	天井部 A剤塗布前	天井部 A剤塗布後
周波数の 測定値 (Hz)	1,250	1,328
	820	2,070
	1,328	1,484
	1,172	1,875
	742	938
平均値 (Hz)	1,062	1,539
標準偏差 (Hz)	236	401

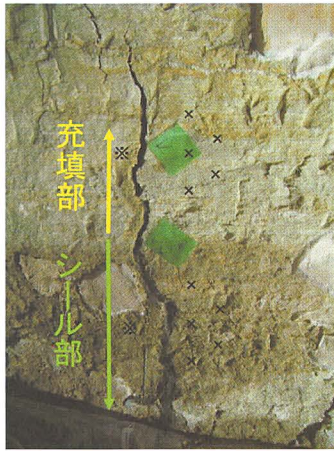


Fig. 9 測定部の状況



Fig. 10 充填された亀裂部の状況 (充填部)

Table 3 地下埋葬室の壁部における測定結果

	充填部		シール部	
	充填前	充填後	充填前	充填後
周波数の 測定値 (Hz)	2,031	2,852	1,719	1,641
	1,602	2,305	1,328	1,250
	1,641	2,891	2,070	1,523
	1,680	3,594	1,719	1,602
	1,694	2,266	2,188	1,445
平均値 (Hz)	1,730	2,782	1,805	1,492
標準偏差 (Hz)	154	484	303	139

化するのを防ぐためである。しかし、エジプトでの試験が日程的に困難であったことや、埋葬室や埋葬室周辺からサッカラ遺跡の岩石を日本に持ち帰ることができないことから、日本においてエジプトの岩石に近いものとして、琉球石灰岩を入手し実験を行うこととした。

4.1 使用した材料

使用した岩盤強化剤は4種類で、いずれもアルコキシシラン系の材料のOH100、TOT、OM25、OM50である。OM25とOM50はOH100の高強度タイプの材料である。

4.2 供試体作製方法

今回の供試体作製は、コンクリート用表面保護工法に関連する土木学会規準 JSCE-K571-2010 表面含浸材の試験方法に準拠して行った。供試体は、透水試験用、透湿度試験用および圧縮強度試験用の3種である。試験に用いた琉球石灰岩は100×100×100mmの立方体 (Fig. 11) であったため、透水試験には、そのままで使用したが、透湿度試験にはダイヤモンドカッターで厚さ約20mm×5枚にスライスし、

圧縮強度試験にはコアドリルで直径20×40mmのコアを抜き出して成形した。各試験の供試体と寸法をTable 4に示す。

透水試験用供試体以外の供試体の作製の流れは、以下のとおりである。まず、所定の寸法に切断し、試験面以外をシールするためにエポキシ樹脂を塗り、試験面に薬品を塗布した。その後、7日間20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室内で気中養生した後で、それぞれの試験を開始した。透水試験用供試体も薬品の塗布以降は、上記と同様である。薬品1種につき3個の供試体を準備し、試験を行った。

琉球石灰岩は多孔質で孔が多いため塗布面はできる限り孔の少ない面を選定した。薬品の塗布量は薬品に記載がないもの (TOT以外) は、表面含浸材の基準としている200g/m²と同様の塗布量で塗布を行った。TOTについては施工マニュアル通り2000g/m²塗布した。圧縮強度試験用供試体には全面薬品の塗布を行った。さらに、土木学会規準では、塗布前の母材の水分率を測定しなければならないため、今回も同様に表面水分率をコンクリート・モルタル水分計で測定した。その結果、供試体の表面水分率は1.3~2.1%の範囲であった。

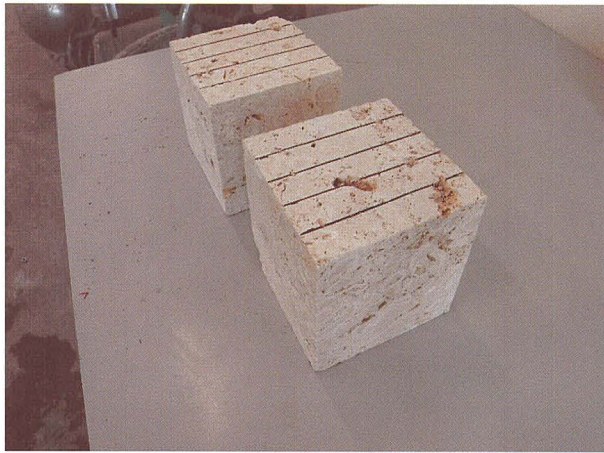


Fig. 11 琉球石灰岩供試体

4.3 実験方法

(1) 透水試験

透水試験を行うには透水試験装置を作製する必要がある。使用するのは直径75mmの漏斗と50mlのメスピペットと水中ボンドである。漏斗とメスピペットは水中ボンドで接合し、ビニルテープで固定して、鉛直になるように供試体に水中ボンドで接着した (Fig. 12)。

試験は、JIS A 6909の7.12 (透水試験B法) に準じて行った。透水試験装置と供試体が固定できたら、洗浄瓶を使用し、メスピペット上部から精製水を注水した。すべて固定しており空気の逃げ道が無く水

が漏斗内に入っていないため、スポイトゴムで水と空気を押し込むようにして注水した。メスピペットの0ml 辺りまで水を注入し終わったら、供試体に振動を与え空気を追い出し、アルミテープを上部に取り付け水が蒸発しないようにし、水頭位置の始読を行った。透水試験は、恒温恒湿室 (温度20℃、湿度60%) に静置し行った。透水試験は水頭差が重要なため、注水する量は大体同じくらいの値にした。コンクリートの場合、7日間で透水する量は比較的少ないが、今回の琉球石灰岩は空隙や凹凸が多く透水する速さがかなり速いために試験方法を変更して行った。透水が多いものでは注水後すぐに、底から水が漏れるという状況だったため、バットの上に供試体を載せ質量と時間を管理しながら透水量を測定した。琉球石灰岩は孔と孔が内部でつながっているものが多く、ある一定の高さまで水を貯めると表面の違う孔から水が漏れだす状況となった。その状況を Fig. 13に示す。さらに、透水が少ないものでもコンクリートと比較するとかなり透水速度が大きいいため、本来の試験では7日間継続して行うが、今回は1時間という短い時間で透水量を測定した。注水後すぐは、供試体が吸水すること等で透水量が増えるため、安定してきた値を透水量算出に用いた。

また、次式によって、試験体および原状試験体 (薬品を塗布していない供試体) の透水量から、透水比

Table 4 各種試験用供試体の寸法と外観

透水試験用	透湿度試験用	圧縮強度試験用
<p>10cm 10cm 10cm</p>	<p>10cm 2cm 10cm</p>	<p>4cm 2cm</p>

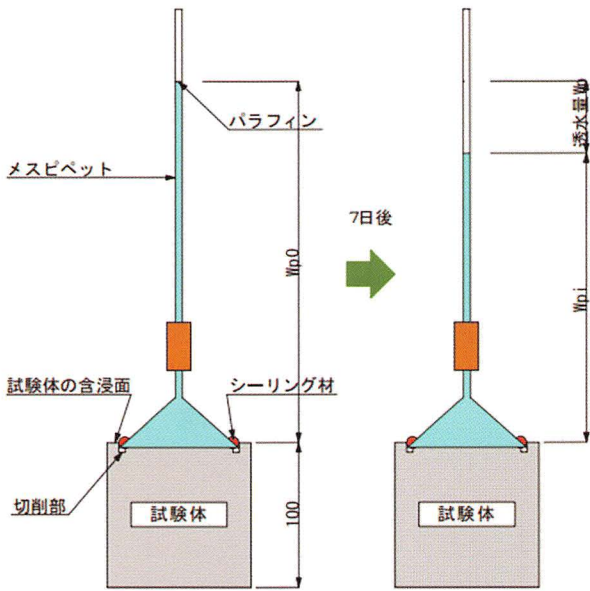


Fig. 12 透水試験方法

を算出し、四捨五入によって、整数に丸めて示した。
 透水比 (%) = 試験体の透水量 / 原状試験体の透水量 × 100

(2) 透湿度試験

- 1) 試験体の含浸面および原状試験体の試験面が水面より10mm程度高くなるように水中に浸漬し、試験体の含浸面および原状試験体の試験面に対向する面（吸水面）から、72時間吸水させた。水中浸漬時には、試験体をつり下げて、試験体の吸水面が容器底面から20mm程度になるようにした (Fig. 14)。
- 2) 吸水後、直ちに試験体を取り出して、試験体表面の水を乾いた布で拭き取り、吸水面を浸透性のない粘着テープで包み込むようにしてシールし



Fig. 13 水漏れの状況

た。この際、テープとテープの重なり部、試験体のエッジ部および吸水面とテープとの密着性を確保した。

3) 吸水面をシールした試験体の質量 (W_{v0}) を 0.01g まで測定して、透湿度試験前の質量とした。その後、温度20℃、湿度60%の恒温恒湿室に、試験体の含浸面を上にして7日間静置して試験を行った。

4) 7日後の静置後、試験体の質量 (W_{vi}) を測定して、次式によって透湿度 (W_v) を算出した。透湿度は、3個の試験体の平均を算出し、四捨五入によって、小数点以下2桁の値に丸めて示した。

$$W_v = W_{v0} - W_{vi}$$

ここに、 W_v : 透湿度 (g)

W_{v0} : 透湿度試験前の試験体質量 (g)

W_{vi} : 透湿度試験後の試験体質量 (g)

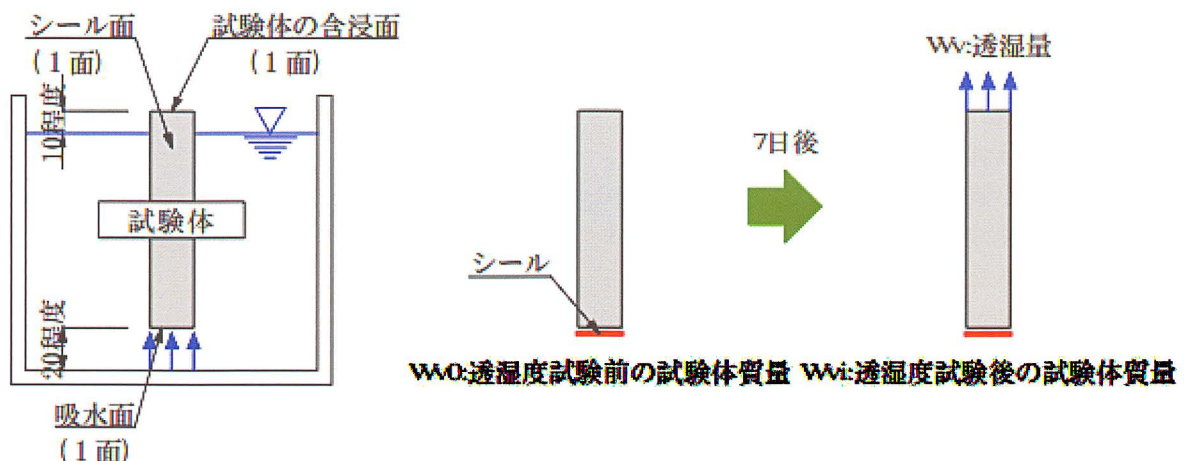


Fig. 14 透湿度試験の状況

また、次式によって、試験体および原状試験体の透湿度から、透湿比を算出し、四捨五入によって、整数に丸めて示した。

$$\text{透湿比(\%)} = \frac{\text{試験体の透湿度}}{\text{原状試験体の透湿度}} \times 100$$

(3) 圧縮強度試験

琉球石灰岩の立方体供試体からコアドリルで抜いたコア供試体に薬剤を塗布し、JIS A 1107に準じて圧縮強度試験を行った。研磨機での表面研磨ができなかったため、切断したまま圧縮強度試験に使用した。

- 1) コア供試体の上下高さの1/4付近および高さの中央付近で、互いに直交する2方向の直径を0.1mmまで測定し、その平均値を供試体の平均直径とした。
- 2) コア供試体の高さは、4か所において0.1mmまで測定し、最大値と最小値の平均値を供試体の平均高さとした。
- 3) 供試体の質量は、質量の0.1%以内の精度で測定した。
- 4) 圧縮強度は、次式によって算出し、四捨五入を行って有効数字3桁に丸めた。

$$f_c = \frac{P}{\pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

ここに、
 f_c : 圧縮強度 (N/mm²)
 P : 最大荷重 (N)
 d : 供試体の直径 (mm)

4.4 試験結果

(1) 透水量試験

Fig. 15に透水量試験の結果を、平均値を棒グラフで表し、最大最小値を黒線で表した。また、Fig. 16はそれぞれの条件で最も効果を示した場合のデータを示したものである。これらの結果よりとてもばらつきが大きいことがわかる。これは、琉球石灰岩が有する多孔質性と空隙の存在の影響であると考えられる。平均値で考えると、無処理より結果的には大きいですが、OH100あるいはOM25が最も高い透水抵抗性を示し、最小値で考えると、無処理と比較して最も透水抵抗性を示したのはTOTであった。

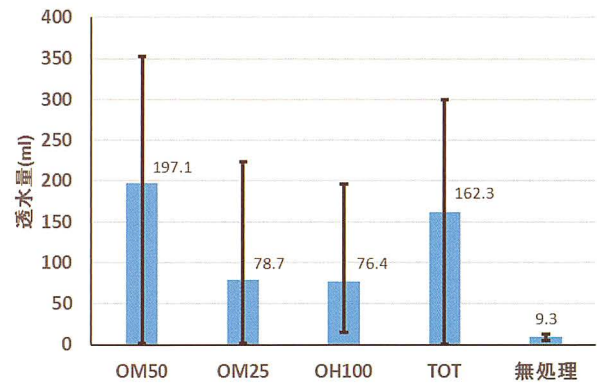


Fig. 15 透水量試験結果

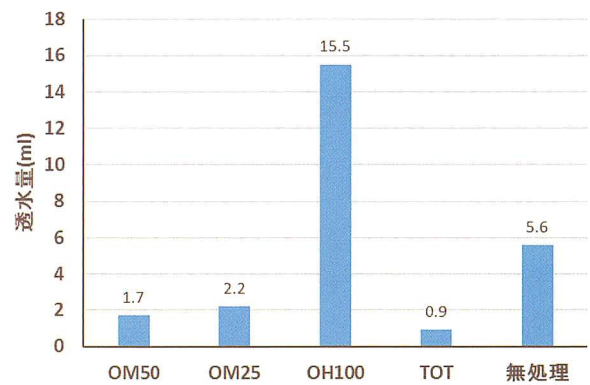


Fig. 16 透水量試験結果 (最も効果を示したもの)

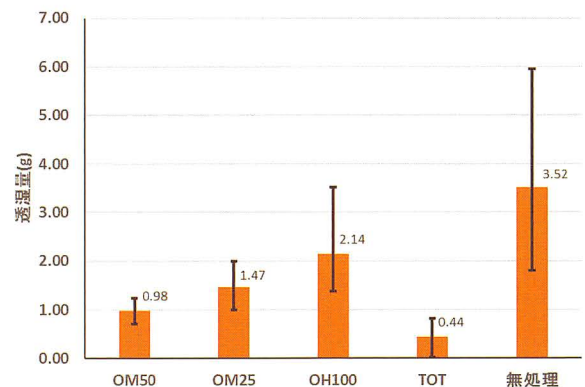


Fig. 17 透湿度試験の結果

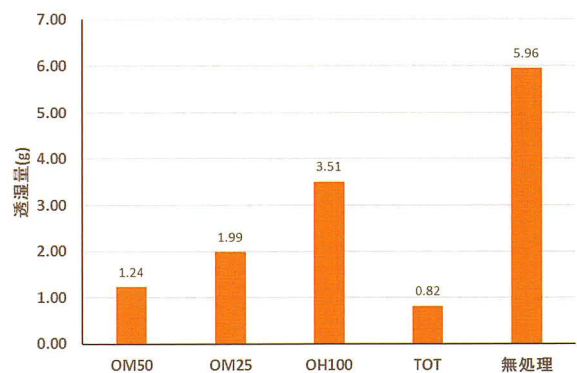


Fig. 18 透湿度試験結果 (最も効果を示したもの)

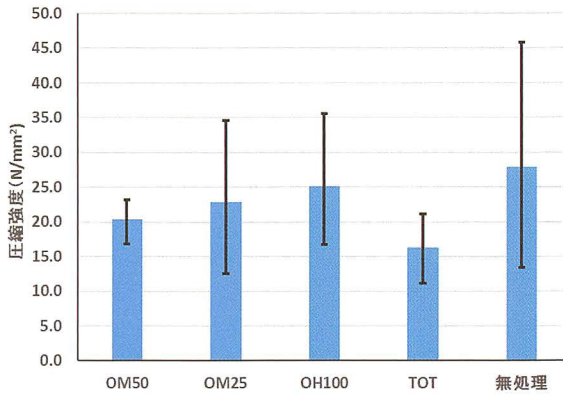


Fig. 19 圧縮強度試験結果

(2) 透湿度試験

Fig. 17に透湿度試験の結果を、平均値を棒グラフで、最大最小値を黒線で示す。また、Fig. 18は透湿度試験結果のうち、最も効果を示したものをプロットしたものである。無処理について多く透湿しているのは、OH100であり、逆に透湿に対する抵抗が大きいのはTOTである。

(3) 圧縮強度試験

Fig. 19は、琉球石灰岩の立方体供試体から抜き出したコア供試体の圧縮強度を示したものであり、平均値を棒グラフで示し、最大最小を黒線で表したものである。この結果より、無処理、いわゆる琉球石灰岩の強度に対して、薬剤を塗布した場合には平均圧縮強度がやや低下する傾向がみられ、その中でもOH100が最も強度低下が低いことが分かった。強度については、琉球石灰岩の成形の難しさや試験本数の影響もあり、強度のばらつきが大きいこともあり、強度低下が大きいとは言えず同程度とも考えられる。成形精度の向上や試験本数の増加等にも配慮の上、判断する必要があるものと考えられる。

以上のことより、透水抵抗性を有し、透湿度量も多く、強度への悪影響が小さいのは、OH100ということになる。

5 まとめ

- (1) A剤（石と岩の強化保存剤）の適用箇所では、著しい変色や剥離は認められず、塗布後の周波数は塗布前より大きくなっていることが確認できた。しかし、補強の程度は大きいものではないと考えられる。
- (2) B材（無収縮セメントスラリー）の適用箇所では、亀裂を充填した部分において、施工後の周波数が施工前より大きく増加しており、補修の効果が認められた。また、施工5か月後においても乾燥収縮ひび割れや剥離などは確認されなかった。
- (3) イドウトの地下埋葬室の岩盤は、打診試験により壁画復元部以外の壁部や天井部では、屋外での測定結果と比較しても、品質が低下していることが確認できた。
- (4) 日本において琉球石灰岩を用いて行った品質試験では、OH100が透水抵抗性を有し、透湿度量も多く、強度への悪影響が小さく、地下埋葬室岩盤の補強材料として優位性を有していることが明らかとなった。

謝辞

本調査については、材料や測定装置に関して（株）田中地質コンサルタント、住友大阪セメント（株）、（株）マルイにご協力をいただいた。また、材料の選定に当たっては、ショーボンド建設（株）山崎大輔氏に助言をいただいた。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- Macramallah, M. 1935, *Le Mastaba d'Idout*, Cairo.
- 西形達明、伊藤淳志 2012「劣化したイドウト地下埋設室母岩の安定性と修復対策」、『Semawy Menu（関西大学文化財保存修復拠点紀要）』第4巻、1-7。

Abstract

As part of the conservation and restoration work conducted under the aegis of Center for the Global Study of Cultural Heritage and Culture, this study estimates the quality of bedrocks at Idout in Saqqara.

The Mastaba Idout was built around 2360 B.C. at Saqqara in Egypt. The underground burial chamber of Mastaba Idout contains weak bedrock. The condition and quality of the bedrock were studied and 4 kinds of strengthening methods for the same were considered. This paper reports the results of quality tests conducted on the bedrock in Egypt and of quality test for coating agents for soil and stones in Japan. The quality tests include measuring the frequency of the accelerating wave generated by hitting the rock surface with an impact hammer. The repair methods include strengthening using a coating agent for the soil and stones and injecting the cracks with a non-shrink cement slurry.

This work demonstrated that the weak bedrock exhibited very low quality. The strengthening methods were found to be effective for the bedrock in Egypt. As a result of quality test for coating agents for soil and stones, it was found that OH100 has good permeability, moisture permeability and small bad effects for compressive strength of rocks.