

イドウトのmastaba地下埋葬室母岩の劣化調査 および補強対策

伊藤淳志^{*,**} 西形達明^{*,***}

Stability Investigation and Reinforcement of Mother Rock in Burial Chamber of Mastaba Idout

Atsushi ITO^{*,**} Tatsuaki NISHIGATA^{*,***}

1 はじめに

サッカラにあるイドウトの地下埋葬室の壁画（紀元前2360年頃）は、歴史的・芸術的価値が非常に高いものであるが、母岩からの剥離・剥落が著しく、危機的な状況にあった。そこで、2005年より修復作業が開始され、2009年には修復された部分の壁画の仮止めが終了した。この壁画の剥落は、下地となる母岩の長年月の風化による劣化に起因するところが大きく、壁画の将来的な保存活用のために母岩を強化することが重要な課題となっている。そこで、壁画の修復作業と並行して、筆者らは母岩の劣化状況に関する各種の調査を行い、さらに母岩の一部について補強試験および補強工事を実施した。

2 埋葬室の母岩の状況

Photo 1 に北側から撮影した地下埋葬室を示す。埋葬室は泥灰岩と粘土質石灰岩とからなる台地の地下約9mにあり、南北約10.5m、東西約4.3m、高さ約3.1mの石室空間である。Fig.1に埋葬室の断面図を、Fig.2に平面図を示した。Fig.1には付近の掘削ピットで撮影した地層の写真を付記したが、埋葬室の壁上部60~70cmの幅に見られる泥灰岩層は黄色から緑色をした頁岩、灰色で半硬質の粘土質石灰岩、緑がかった泥灰土などが互層になっており、特に風化が進行した脆弱な地層となっている（Photo 2）。また、この層からなると考えられる天井表層部は、埋葬室の北半分において風化が顕著であり、層状に

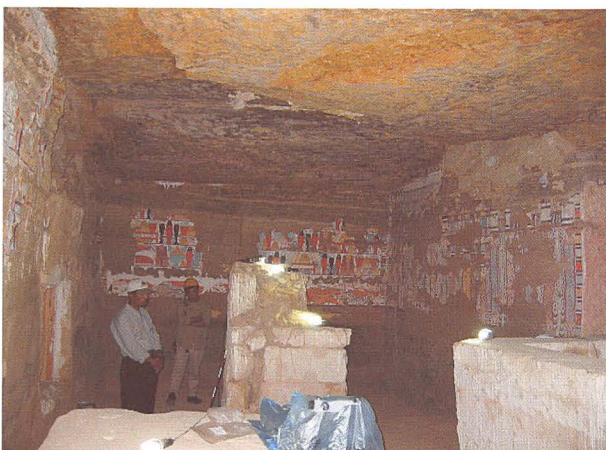


Photo 1 地下埋葬室（南側）



Photo 2 壁上部の泥灰岩層の劣化

* 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）

*** 関西大学名誉教授（Emeritus Professor, Kansai University, Japan）

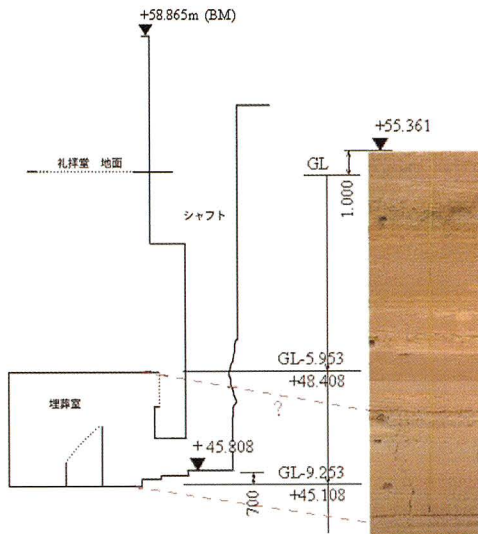


Fig. 1 地下埋葬室断面図

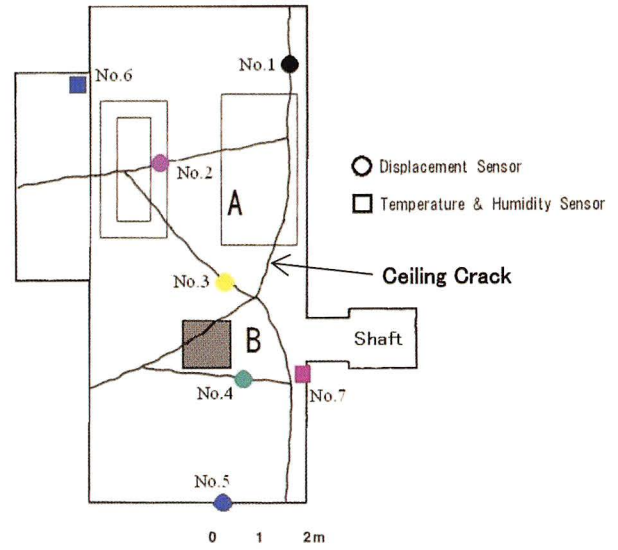


Fig. 2 地下埋葬室平面図

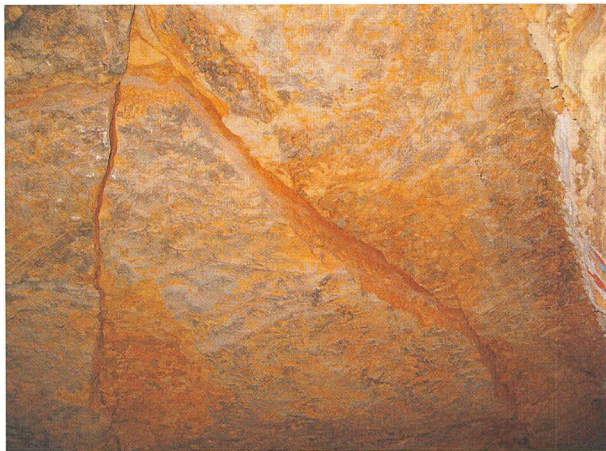


Photo 3 天井ブロック A の亀裂



Photo 4 天井ブロック B の亀裂

母岩から剥離または剥落している。さらに天井部には Fig.2 に示したように東西方向と南北方向に大きな亀裂が存在しており、中央部の三角形ブロック A (Photo 3) および B (Photo 4) では周辺と鉛直方向に最大で10数 cm の段差が生じている。

壁画は埋葬室周囲の壁に直接石膏を塗って、その上に顔料で描かれているが、4千年以上もの時の経過による母岩の風化と伸縮の繰返しや雨水の浸入などによって、壁画の描かれた石膏部が浮き上がり、場所によっては完全に剥落していた (Photo 5)。1935年の調査では壁画全体の約 1/3 が剥落していたとの報告があり、2003年に吹田らが行った調査により、さらに 1/3 が剥落していることが判明した (本報告書 1-2 参照)。

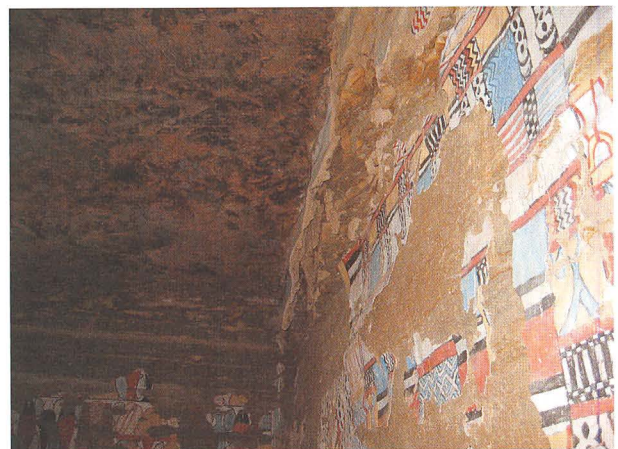


Photo 5 壁画下地石膏の浮き上がり

3 母岩の物理・力学性状

埋葬室母岩の物理・力学性状を把握するため、2009年8月に母岩のコアボーリングを行い、採取試料について試験を実施した。ただし、埋葬室内での採取ができないため、イドゥートのマスタバから南東約20mで埋葬室天井のレベルとほぼ同じ深さまで露頭した地層でボーリングを行った（Photo 6、Photo 7）。ボーリングは直径60mmで、鉛直方向5本、水平方向4本実施したが、削孔途中で割れるものが多く、最長のもので200mm程度であった（Photo 8）。また、採取した鉛直方向のコアには塩の結晶と考えられる厚さ2mm程度の灰白色層を含んでいるものが見られた。

コア供試体はナショナル・リサーチ・センターにおいて Table 1 に示す物理・力学試験が行われた。圧縮強度は5体の平均で38.2MPaとそれほど大きくはないが、半硬岩に分類されるものである。



Photo 6 コアボーリング現場

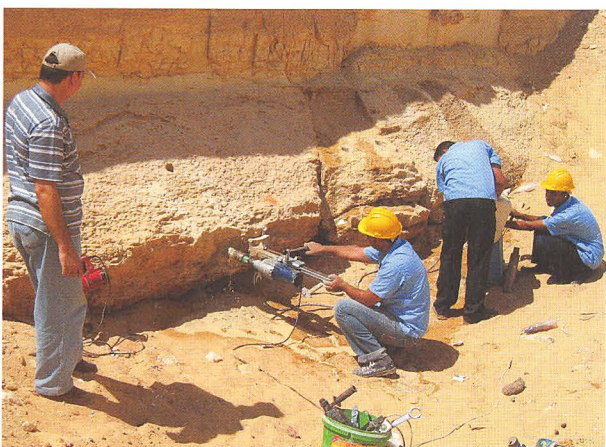


Photo 7 母岩のコアサンプリング



Photo 8 母岩のコア供試体

Table 1 母岩の物理・力学試験結果

試験項目	試験数	試験結果(平均)
見かけの密度	3	2.45 g/cm ³
真の密度	3	2.61 g/cm ³
間隙率	3	7.50 %
吸水率	5	2.76 %
圧縮強度	5	38.2 MPa
曲げ強度	4	29.5 MPa

4 埋葬室内岩盤の亀裂変位

埋葬室天井部の岩盤亀裂の動向を調べるために、2006年8月に Fig.2中に示す No.1～5の○印の位置でそれぞれの亀裂をまたぐようにして亀裂変位計を取り付け、観測を継続している（Photo 9、Photo 10）。なお、No.5の変位計は南側壁面（床から約1.3mの高さ）に取り付けられている。同時に埋葬室内（Fig.2のNo.6およびNo.7）と外部（マスタバ屋上）との気温と湿度の計測も西浦により実施された（本報告書1-3参照）。

Fig.3は埋葬室内外の3年間の気温変動を示したものである。外部では夏期と冬期の温度差は20℃程度であり、日最高と最低の温度差は約15℃である。一方、埋葬室内は年間を通じて20～25℃の範囲であり非常に安定していることがわかる。Fig.4に埋葬室内外の相対湿度の変化を示した。気温と連動して湿度も変化しているが、埋葬室内は年間を通じて40～60%の範囲にあり、1日のうちの変化も比較的小さい。

次に、各亀裂変位計によって測定した変位量の変動を Fig.5に示す。記録は2006年8月～2017年11月の間であり、図の変位量の正值は亀裂幅が広がることを、負値は狭まることを示している。位置により多少傾向は異なるが、概ね毎年11月頃から亀裂幅が

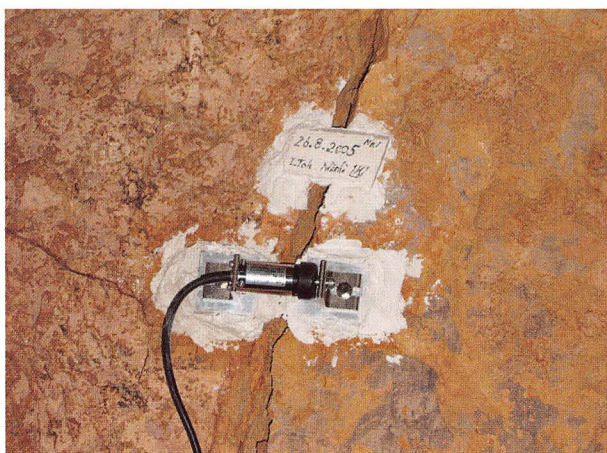


Photo 9 亀裂変位計

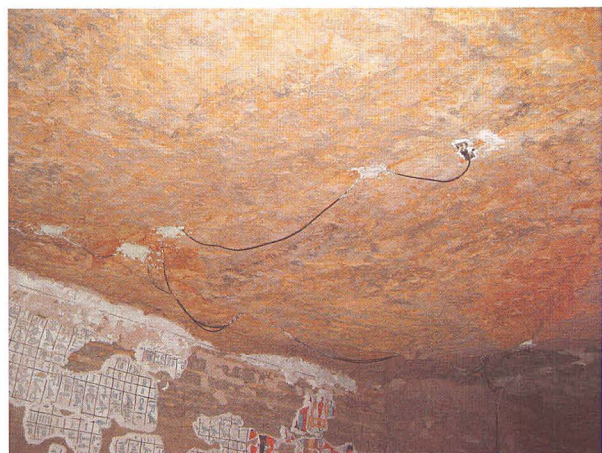


Photo 10 亀裂変位計取り付け状況

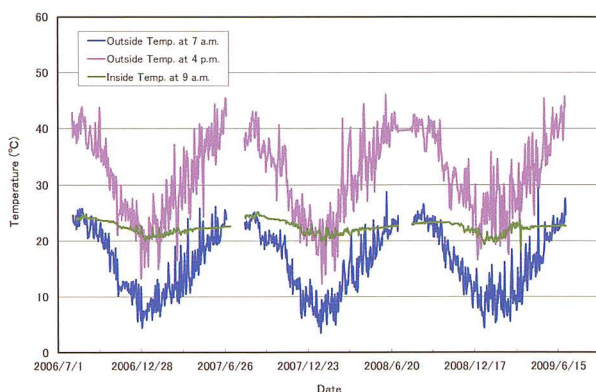


Fig. 3 埋葬室内外の気温の変動

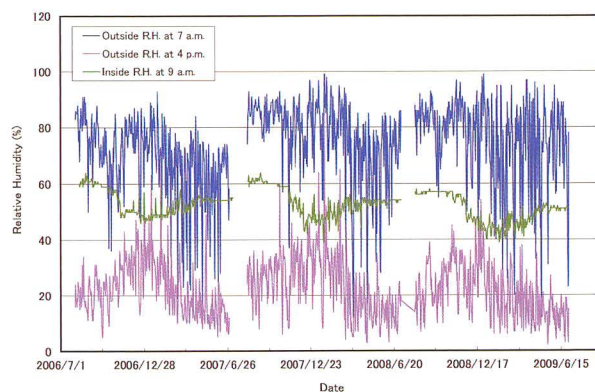


Fig. 4 埋葬室内外の相対湿度の変動

増加し、3月頃から減少する周期的な増減の繰り返しであることから、Fig.3およびFig.4の温湿度の変化と対応しているものと考えられる。すなわち、温度および湿度が上昇すると岩盤が膨張して亀裂幅が減少し、温湿度が下降すると岩盤が収縮して亀裂幅が増大するものと考えられる。これが母岩の劣化を進行させる一因といえる。なお、No.3の亀裂は増大傾向にあり、No.2およびNo.5の亀裂は減少傾向にあるが、その絶対量はいずれもごく僅かであることから、岩盤全体は安定しているものと考えられる。

5 レーダー探査による母岩の劣化調査

地下室内での壁画修復作業の環境あるいは将来の地下埋葬室の活用を考えると、前章で述べた岩盤表面に走る大きな亀裂の挙動もさることながら、風化による岩盤表層部の劣化や、岩盤内側の比較的浅い所に表面とほぼ平行に存在する微細な亀裂に関する対策が非常に重要である。とくに表層部の剥離崩

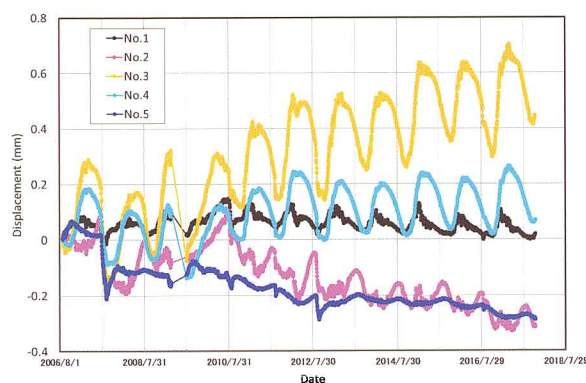


Fig. 5 亀裂変位量の変動

壊が顕著な個所については、早急な対応が必要である。そこで、電磁波による地中レーダー探査 (Ground Penetrating Rader, GPR) により地下埋葬室の岩盤内部の調査を実施した。

5.1 調査方法

GPRの適用に当たっては、事前の確認調査を実施した結果から、イドウトの地下埋葬室の岩盤は電磁波の減衰が大きな岩質であり、また密閉された石

室内での測定であるためノイズレベルが非常に高い環境にあることが判明した。そこで、低周波の使用による岩盤深部に至るまでの調査は困難であると判断し、本調査では1.5GHzの高周波数のアンテナを用いて、岩盤表面から20~30cm程度内に存在する明瞭なクラックを把握することに目的を絞った。使用した機材は、SIR-3000システム（米国GSSI社製）の1.5GHzアンテナ（米国GSSI社製）である（Photo 11、Photo 12）。

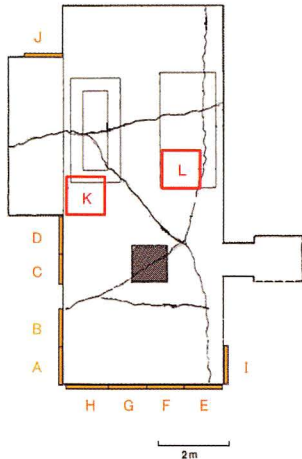


Fig. 6 GPR調査区の位置

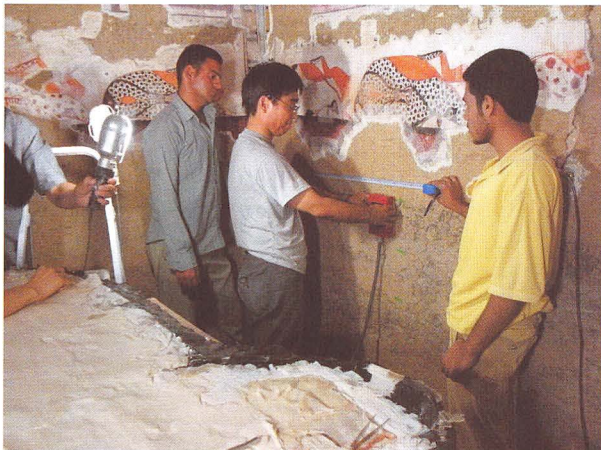


Photo 11 GPRアンテナ

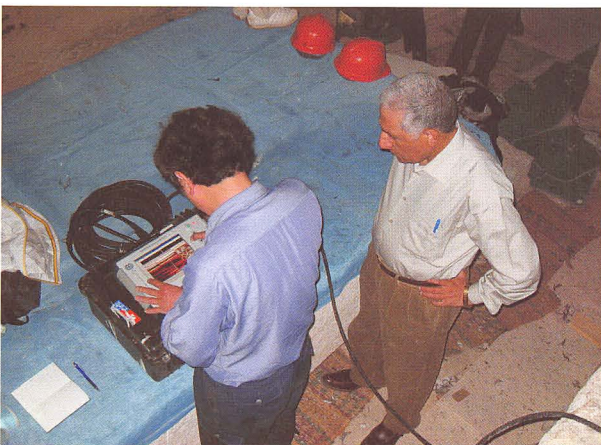


Photo 12 GPR解析システム

測定箇所として埋葬室内の劣化の著しい部分を選定した。調査区を Fig.6に示す。地下埋葬室の西壁南側にA、B区、西壁中央にC、D区、南壁全体にE、F、G、H区、東壁南側にI区、西側掘込み部北壁にJ区、天井中央にK、L区の計12箇所である。それぞれの調査区は約1m四方であり、Photo 13に示すように10cm間隔に並行する測線をそれぞれ設定することで、面的な劣化情報を取得した。なお、壁に設定した調査区は床面から高さ1mまでの範囲としている。

5.2 測定結果

以下に壁面および天井面の測定記録を1例ずつ示す。詳細は別途報告書[応用地質株式会社 2009]を参照されたい。

(1) A区（西壁南側）

A区（Photo 13）およびその北側のB区には壁面表面に縦方向の開口クラックが認められ、いずれも床面に達しており、Photo 14示すように床面上でクラックが交差している。

Fig.7にGPRの測定記録例を示す。横軸が測線上の距離程、縦軸が岩盤表面からの距離である。この距離は、アンテナを発信した電磁波がアンテナに戻ってくるまでの伝播時間と電磁波の伝播速度とから換算したものであり、今回は埋葬室岩盤の電磁波伝搬速度を最も一般的な値である10cm/nsとした。Fig.7の記録では表面に見える開口クラックを通過した位置に、表面の凹み、段差としてその反応が現れている。図中にその位置を示しておいた。このように、壁面に現れる開口クラックが壁面に対して低角度で開口したまま岩盤内に連続していればGPRで追跡することができる。A区の表面にある開口クラックは、途中で一旦消えややずれた位置に再び現れるように見える。GPRの記録ではその周辺に反射が現れている。オレンジ色の範囲は表面直下にあたり、表層の劣化を示していると考えられる。藍色の範囲は内部の反射体であり、内部の岩盤が複雑に割れている状況を捉えた可能性がある。

A調査区のすべての測線における測定結果を総合すると、Fig.8のような岩盤内部状況の推定図が作成できる。図より、この調査区では壁面に見られる開口クラックの内側（深さ約10~20cm）にほぼ全面にわたって分離面が存在することがわかる。このように、壁面近くに壁面とほぼ平行に分離面が存在する個所は崩落の危険性が高いものと考えられることから、確実な修復が必要であるといえる。

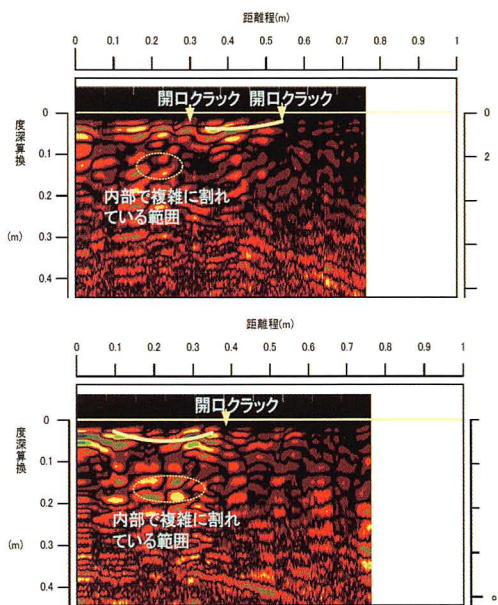


Fig. 7 A区のGPR測定記録例
(上: A050 測線、下: A040 測線)

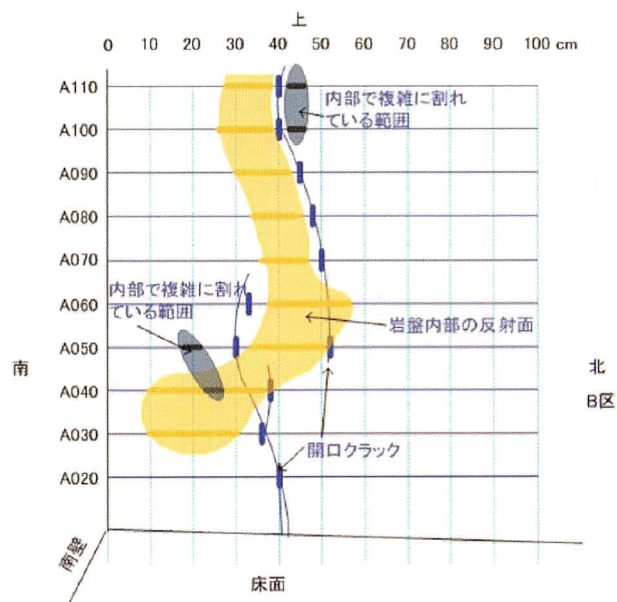


Fig. 8 A区の岩盤内部状況の推定

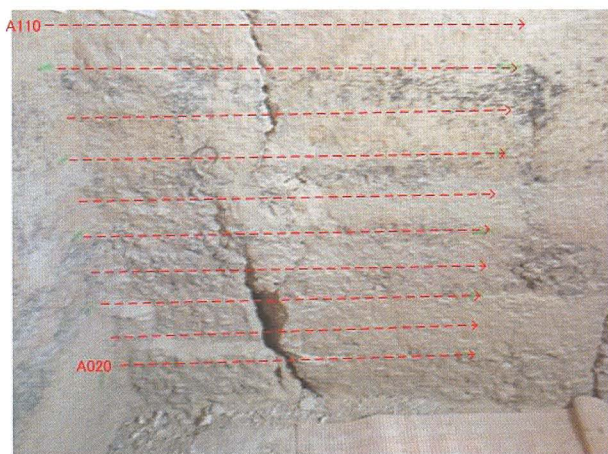


Photo 13 A区における測線

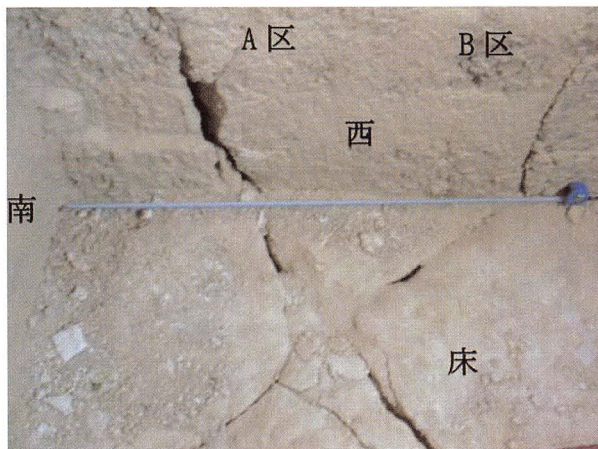


Photo 14 A区のクラック発生状況

(2) L区 (天井中央東側)

Fig.9にGPR測定記録例を示す。天井部では水平方向の地層堆積境界が天井表面と並行するため、GPRの測定ではそれらが反射面として現れやすい。そのため地層境界が表面と直角の関係にある壁面の記録に比べ、天井では多数の反射が現れている。また、天井部の表面には凹凸があるため、段差のある位置では壁面で見られた開口クラックと同じような反応が現れている。この測定結果から、岩盤内部状況の推定図をFig.10に示す。明瞭な反射面が分布する範囲が1箇所認められる。この反射面は非常に明瞭であるため、この部分に面状の分離面が存在するものと考えられる。他の天井部においても、このような分離面が存在する可能性は高いものと推察されることから、天井部についてはほぼ全面的な補修が必要であると考えられる。

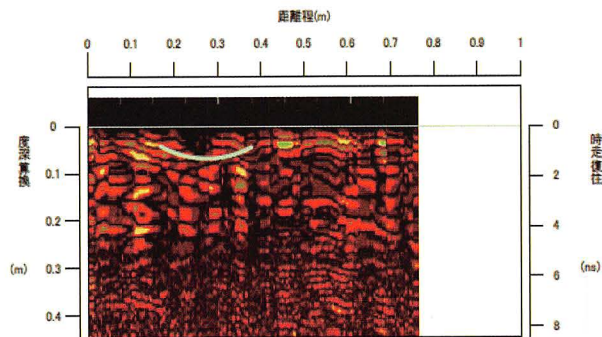


Fig. 9 L区のGPR測定記録例 (L070 測線)

以上の各計測区の調査結果をまとめて地下埋葬室における劣化の激しい部位を示すと、Fig.11のようになる。以上の岩盤内の劣化部の推定結果から、地下埋葬室の岩盤補修箇所は、主に西面の壁と天井部であることがほぼ明らかとなった。

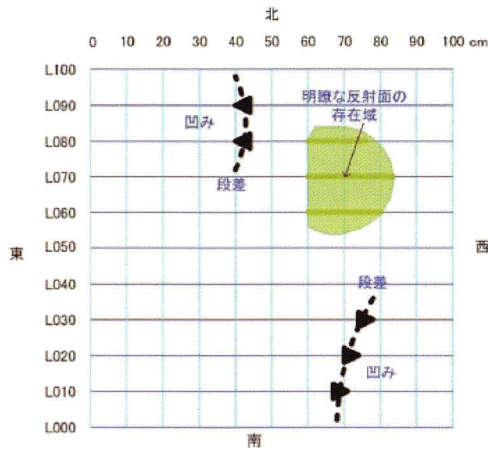
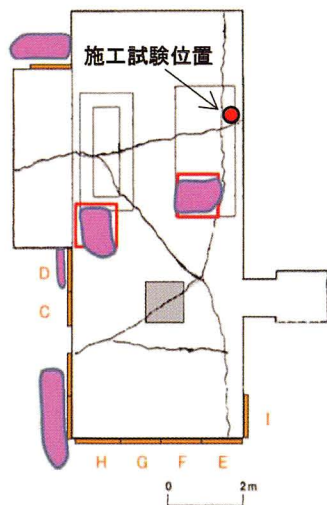


Fig. 10 L区の岩盤内部状況の推定



■:劣化の顕著な場所

Fig. 11 岩盤劣化の状況

6 母岩の補強施工試験

前節までで示した調査結果のとおり、埋葬室の母岩は全体的には安定しており、崩落などの可能性は低いと考えられる。しかし、表層の風化による劣化が激しいため、壁においては、現在仮止めの壁面を恒久的に固定するためには、レーダー探査で確認されたような浅い部分の分離面を含めて、表層から数10cmの範囲内を強化安定する必要がある。また、天井については、表層部の剥離・剥落を防止するため、壁と同様に強化安定させることが要求される。

補強にあたっては、埋葬室がエジプトの歴史的な

文化遺産であることや、将来的に内部を一般に公開する可能性もあることなどを考慮すると、視覚的に現状を出来るだけ維持することが望ましい。また、埋葬室空間の大きさや壁画を傷つけないことなどを考えると、使用する機材や材料には制限があり、基本的には手作業による施工を考慮しなければならない。そこで、補強の方法として、壁、天井ともに、分離面や剥離層間にエポキシ樹脂などの非揮発性の材料を注入、剥落の可能性が高い部位にはピンニング（小径のアンカーボルト）を併用することが最適と考えられる。

6.1 石灰岩塊による補強材料の性能確認試験

埋葬室母岩の補強施工試験に先立ち、マスタバ周辺の地上部で採取した石灰岩塊を用いて使用材料の性能確認試験を実施した。今回採用した材料は、①エポキシ樹脂A（2液型、薄茶色）、②エポキシ樹脂B（2液型、薄赤色）、③浸透性無機硬化剤（液体、透明）、④超微粒子セメント（粉体、灰色）の4種類であり、いずれも日本国内において調達して現地に搬入した。これらの材料は、岩やコンクリートなどの補強・補修用として一般的であり、入手し易いことを考慮して選定した。

以下、それぞれの材料の性能確認試験について述べる。

(1) エポキシ樹脂Aの2液を混合し、さらに色調整のため石灰岩塊をドリルで削孔して出た粉体を混ぜ合わせ、あらかじめ2分割しておいた石灰岩塊を接着した（Photo 15）。これを24時間野外で養生した後は、ハンマーで打撃したり投石したりしても分離することがなく、完全に接着していることを確認した。

(2) エポキシ樹脂Bは、アンカーボルトをコンクリート中に定着させるための材料であり、2液混合

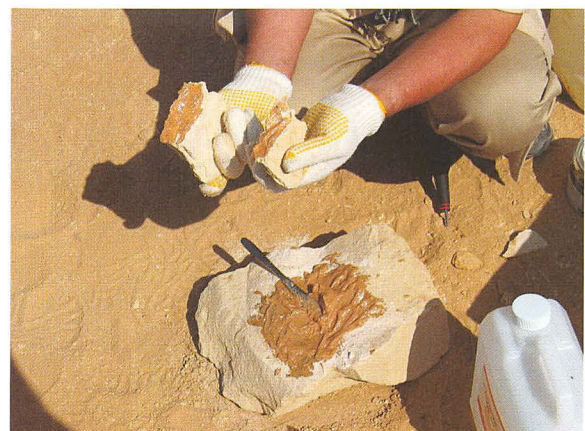


Photo 15 エポキシ樹脂Aによる石灰岩塊の接着

用の注入ガンによって削孔内に注入することができる。まず、あらかじめ2分割しておいた石灰岩塊を縫うようにしてハンマードリルで直径10mm、深さ125mmに削孔した (Photo 16)。このハンマードリルは、集塵機能を有するとともに比較的の小音・低振動であり、埋葬室内での作業において周囲への影響ができるだけ少ない機種として選定した。次いで、エアープンプおよびブラシで孔内を清掃した後、エポキシ樹脂Bを注入し (Photo 17)、さらにステンレス製の全ネジボルト (直径φ 8 mm ×長さL200mm)を挿入して補強した (Photo 18)。これを24時間野外で養生した後は、ハンマーで打撃したり投石したりしても分離することがなく、完全に結合していることを確認した。

別途、(1)と同様に石灰岩塊2つをエポキシ樹脂Bのみで接着し、エポキシ樹脂Aと同等の接着性があることを確認した。

(3) 浸透性無機硬化剤および超微粒子セメント (水を加えてペースト状にしたもの) は、母岩への浸透性および補強効果を確認するため、比較的風化が進行して、薄層に剥がれやすい石灰岩塊の表面 (層に平行な面および垂直な面) に刷毛で塗布した。いずれの材料も、岩塊のごく表層にのみ定着するだけで、岩塊内部には浸透せず、十分な補強効果は認められなかった。ただし、浸透性無機硬化剤は、透明であることから、比較的健全な母岩表面の安定用として利用可能であると判断された。

6.2 埋葬室天井の補強試験

埋葬室内の天井の約400mm四方の部分 (東壁面から約0.5m、北壁面から約3mの位置、Fig.11参照) について母岩の補強施工試験を実施した。当該部分は風化がかなり進行しており、石灰岩の薄層間に隙間が生じているとともに、表面の薄層が落下している部分もある。

Fig.12に概略図を示したように、まず薄層間の隙間の奥に、エポキシ樹脂Bを直径約10mmのチューブを通して入るだけ注入した (Photo 19)。次いで隙間の見付け部分に下記の材料を調合したエポキシ樹脂Aを手で詰めて表面を整形した (Photo 20)。

- ・エポキシ樹脂Aの主剤300g
- ・エポキシ樹脂Aの硬化剤100g
- ・ナツメヤシの皮の繊維を長さ5mmに切断したもの50g
- ・粒径1mm以下にふるい分けた砂 (マスタバ周辺の地表から採取) 1000g

ここで、ナツメヤシの皮の繊維は補強材として、ま

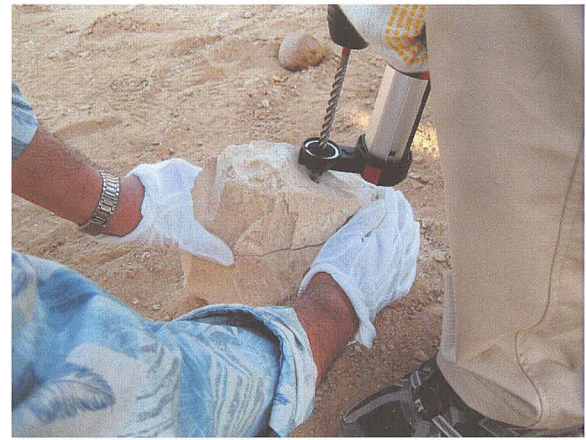


Photo 16 ハンマードリルによる削孔



Photo 17 エポキシ樹脂Bの注入

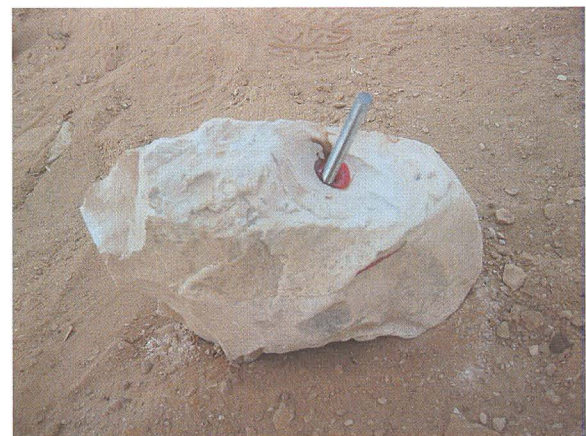


Photo 18 アンカーボルトの挿入

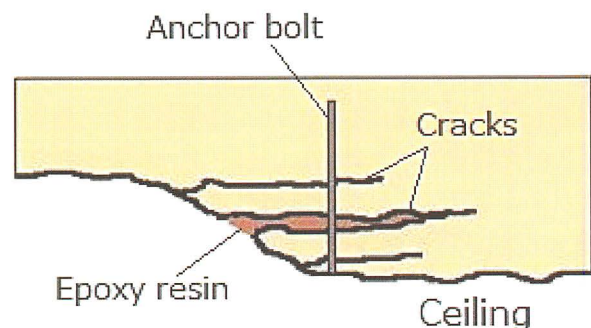


Fig. 12 天井補強の施工概略図

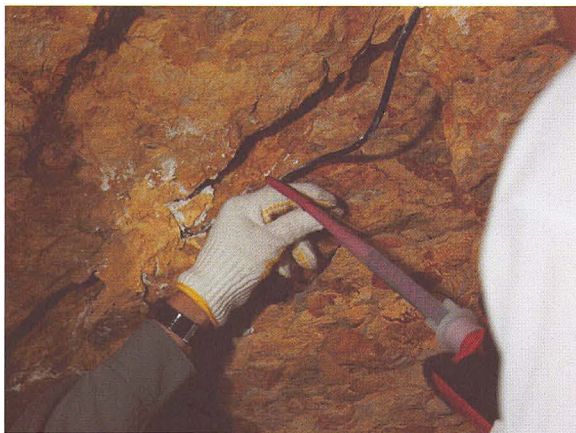


Photo 19 クラック内部へエポキシ樹脂 B 注入



Photo 20 エポキシ樹脂 A による補修

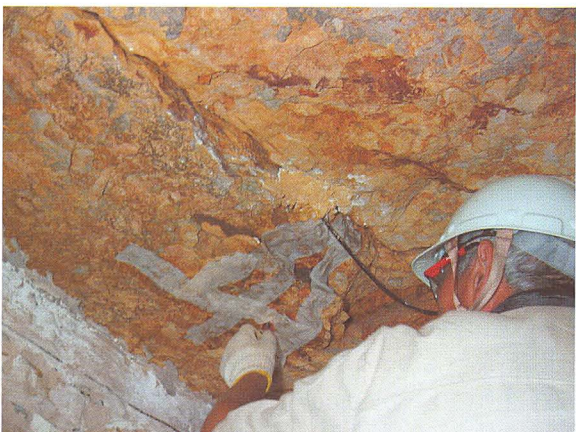


Photo 21 アンカーボルト挿入

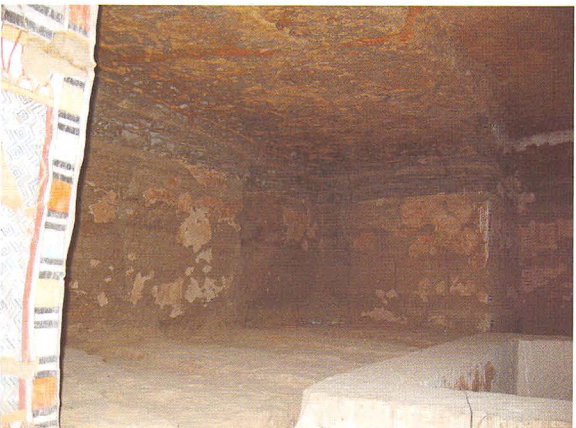


Photo 22 西側掘込み部 (2005年 8月)

た砂は石灰岩との色合わせおよび骨材としての効果を期待したものであり、いずれも現地で調達可能な材料として選定した。さらに表層の剥落防止の仮止めとして、幅約50mmに切断したガーゼ帯をパラロイド B72 (壁画表面の保護用の溶剤) を刷毛で塗布しながら母岩表層に貼り付けた。

翌日、補強部の中央付近に前述のハンマードリルで鉛直方向に200mmの深さまで削孔し、エポキシ樹脂 B を注入した後、ステンレス全ネジボルトを挿入した (Photo 21)。削孔の際、表層付近は比較的柔らかい感触であったが、奥の70mm程度は堅い感触であったことから、天井表層から130mm以上は母岩が比較的健全なものと推測される。なお、ドリルによる振動は比較的少なく、周辺の母岩表層が剥落することはなかった。

この補強部分は施工1週間後においても健全であり、剥落等は認められなかった。

7 埋葬室天井の補強工事

地下埋葬室の西壁面北側には、床面から約1.3m上がったところに、幅約4.3m×高さ約1.7mの範囲が奥行き約1.5mまで掘り込まれている (Photo 22)。これは、遺体の埋葬時に石棺の蓋を仮置きしておき、入棺後横にスライドさせて蓋をするための場所と考えられている。この壁面にも色彩を施した壁画が部分的に残っている。以下、この空間部分を西側掘込み部と称する。

前述したとおり、埋葬室の壁上部の幅60~70cmの部分は、頁岩、粘土質石灰岩、泥灰土などの互層になっており、とくに風化が激しく岩片の剥落も多い。したがって、それに続く天井表面も劣化が著しく、表層部の剥離・剥落が多く見られる。さらに、西側掘込み部の天井は埋葬室の天井との段差約250mmの部分が上部と分離した状態で数cm幅の水平亀裂が掘込み部の全幅に渡って認められる。このため、壁画修復作業時の安全確保のため、2007年に木板と鋼製支柱8本で仮設のサポートを設置していた (Photo 23)。

7.1 補強計画

西側掘込み部天井の安定化のための補強を計画した。補強方法として、2010年の調査において施工試験を行った小径のアンカーボルト (直径φ10mmのステンレス製全ネジボルト) の打設を採用することとした。Fig. 13に示すように、幅約4.3m、奥行き約1.7m、厚さ約250mmの剥離層を上部の母岩とアン

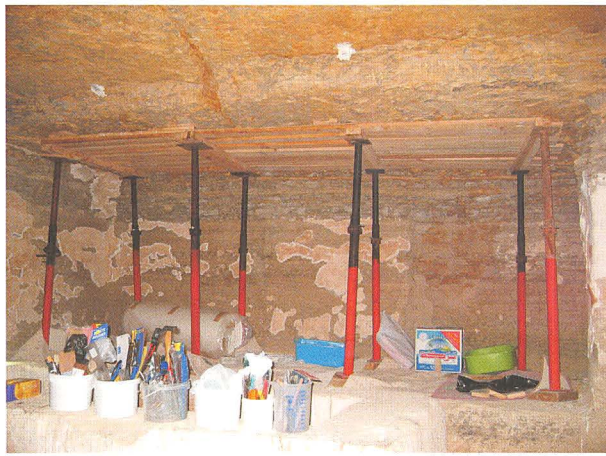


Photo 23 仮設のサポート (2007年7月)



Photo 24 ハンマードリルによる削孔

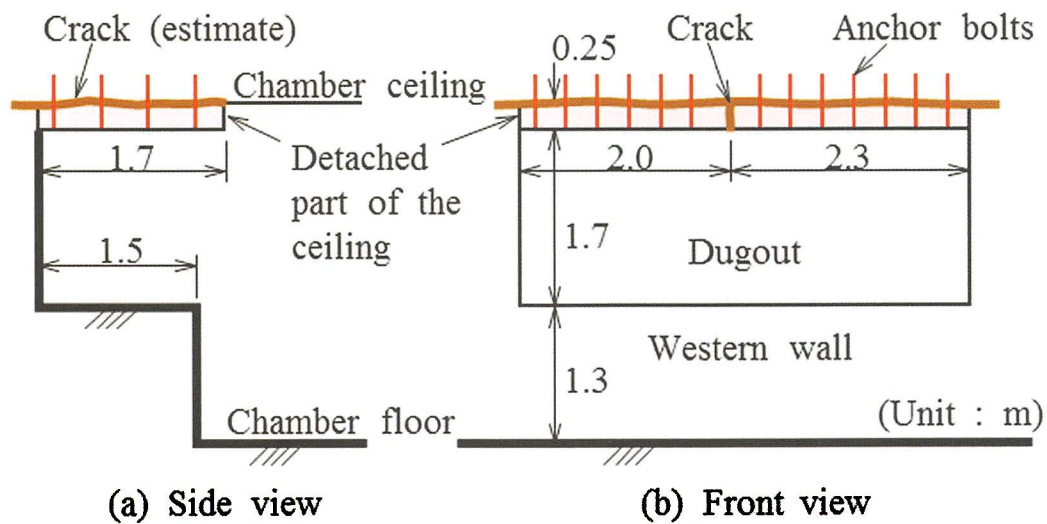


Fig. 13 補強計画概略図

カーボルトで緊結する。剥離層の落下を防止する観点から考えると、アンカーボルトの長さは500mm (剥離層の定着長さ250mm + 上部母岩への定着長さ250mm) あればよいことになる。したがって、この250mmの定着部の付着力が分かれば剥離層の重量から打設本数が決定できる。しかし、アンカーボルトの定着のため注入するエポキシ樹脂と母岩との付着力が不明確であることから、かなりの安全を見込んで、300mm 間隔の千鳥配置で打設する計画とした。

7.2 アンカーボルトの引抜き耐力確認試験

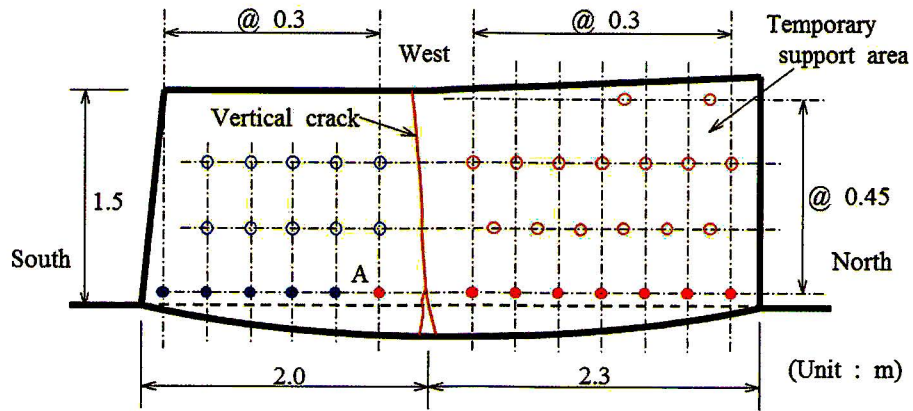
掘込み部天井の補強工事に先立ち、アンカーボルトの引抜き耐力を確認するための試験を実施した。試験場所は、2009年に物理・力学試験のためのコアボーリングを行った岩盤付近 (イドウトのマスタバから南東約20mで埋葬室天井のレベルとほぼ同じ深さ) とした。

まず、ハンマードリルで直径φ12mmのビットを

使用して下向きに深さ約500mm削孔した (Photo 24)。次いで、エアーポンプおよびブラシで孔内を清掃した後、エポキシ樹脂 (2液型) を注入し、ステンレス製の全ネジボルト (直径φ10mm × 長さL500mm) を深さ460mmまで挿入した。約24時間養生した翌日、引抜き試験機を用いて引抜き耐力の測定を行った (Photo 25)。結果として、15kNまでの引抜き力を加えたが引き抜くことはできず、ボルト周囲の岩盤にもクラックなどの異常は認められなかった。この引抜き力は計画段階で想定した必要引抜き耐力の6倍以上となっており、埋葬室の母岩についてもかなり大きな付着力が期待できるものと考えられた。

7.3 補強工事

補強工事は、作業日程の関係から、掘込み部天井中央付近の鉛直亀裂より北側と南側とを分けて2年間で施工することとした。なお当初は、作業の安全



Anchor bolts

- 1st period (installed before the removal of the support structure)
- 2nd period (installed after the removal of the support structure)
- 3rd period (installed before the removal of the support structure)
- 4th period (installed after the removal of the support structure)

Fig. 14 アンカーボルト打設平面位置

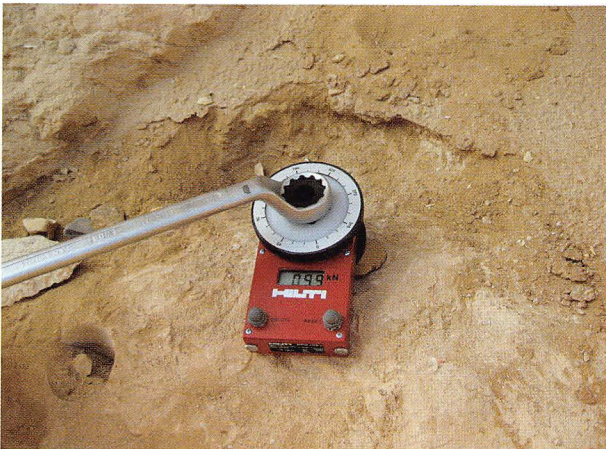


Photo 25 引抜き試験



Photo 26 ハンマードリルによる削孔

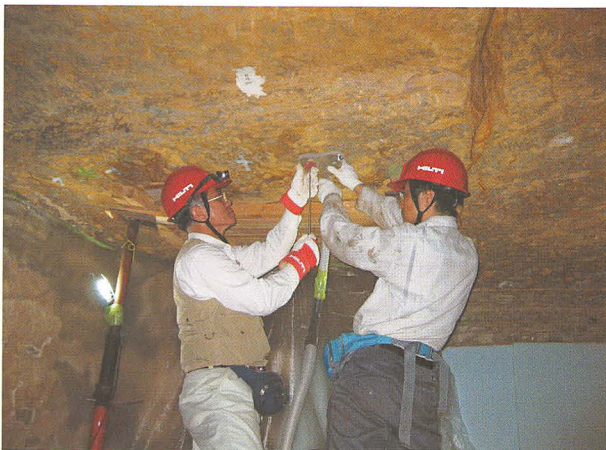


Photo 27 孔内の清掃

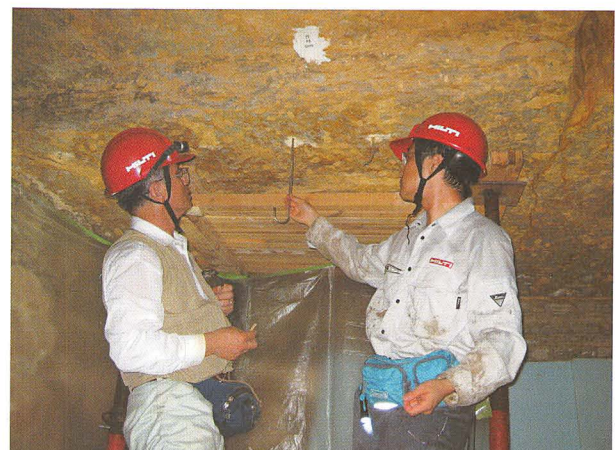


Photo 28 チューブ挿入

のため仮設のサポートを設置したまま、木板を貫通してハンマードリルで削孔し、エポキシ樹脂とアンカーボルトを挿入する計画であった。しかし、ハンマードリルによる削孔長を確保しにくいことや、削孔時の集塵が困難であることなどのため、まずサポートの木板より埋葬室側に突き出している剥離層の

部分を施工し、翌日サポートを撤去して奥の部分を施行する計画に変更した。Fig.14にアンカーボルトの配置および施工順序を示す。同図のAの位置のアンカーボルトは鉛直亀裂の南側であるが、安全を考慮して第1期に施工を行った。また、削孔は鉛直方向より多少斜めに行い、各アンカーボルトでその方



Photo 29 エポキシ樹脂注入



Photo 30 アンカーボルト挿入



Photo 31 ボルト頭部補修

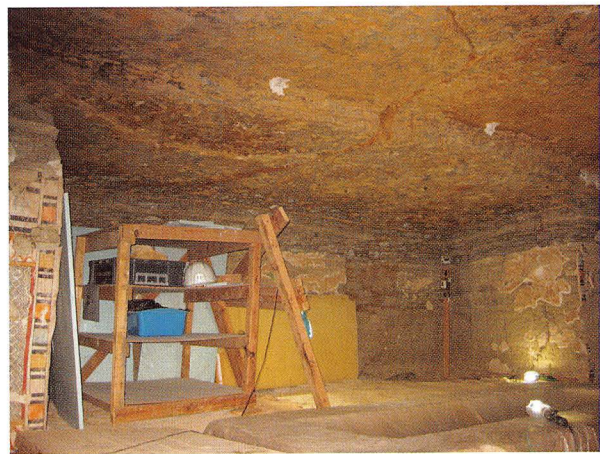


Photo 32 西側掘込み部の天井補強工事完了後

向を変化させて施工した。なお、第1期施工後のサポート撤去前に、前日施工したアンカーボルトの1本について、引き抜き試験を実施し、7.6kNまでの引抜き抵抗を確認した。

アンカーボルトの施工手順は次のとおりである。

- ①ハンマードリルによる削孔 (Photo 26) : $\phi 12\text{mm}$ のビットを使用し、施工性および集塵性を考慮して長さを170、270、370、470、610mmの順に取り替えながら500mmまで削孔した。
- ②ダストポンプおよびブラシによる清掃 (Photo 27)
- ③エポキシ樹脂注入用のチューブを挿入 (Photo 28) : 先端キャップを取り付け、ステンレス棒で深さ500mmまで押し込む。
- ④エポキシ樹脂 (2液型) 注入 (Photo 29) : 注入ガンを使用し、チューブを引き出しながら先端から注入する。中間の水平亀裂付近では横方向へもある程度注入した。
- ⑤ステンレス製全ネジボルト ($\phi 10\text{mm}$ 、L500mm) 挿入 (Photo 30) : 天井母岩表面から数mm深く挿入し、ボルト頭部を木製楔および綿布で保持して養生した。

- ⑥ボルト頭部の補修 (Photo 31) : 翌日、木製楔と綿布を除去し、ボルト頭部を石灰岩片で同色補修した。補強を実施した天井岩盤 (Photo 32) は、その後変状は認められず、安定しているものと判断される。今回の補強工事により、石灰岩に対するエポキシ樹脂の性能およびハンマードリルによる短尺のアンカーボルトの施工性および有効性が確認されたものと考ええる。

8 おわりに

— 歴史的地盤構造物の修復への近代工法の適用と考え方 —

わが国でも古墳、城郭石垣、石造磨崖仏など多くの遺跡の修復がなされているが、このような巨大な歴史的地盤構造物は文化財であると同時に、安全で快適な都市を構築するための重要な社会基盤施設でもある。社会基盤施設の一つと考えるならば、遺跡そのものが構造的に安全であることが要求される。この安全確保のために近代工適用を余儀なくされる

場合があるが、対象が歴史的価値を持つ文化財である限り、安全性の確保だけを目的とした工法をむやみに導入することは避けなければならない。修復工法の採用にあたっては、歴史的な観点と建設工学の両面から十分検討する必要があることは言うまでもない。

そこで、工学の立場から歴史的地盤構造物の修復にあたっての手法と考え方をまとめたものがFig.15である。地盤工学の分野でも、歴史的構造物の構造形態調査およびそれを構成する土や岩の材料調査とその物理化学試験から始まることは他と変わりがない。ただ、地盤工学を専門とする立場からみると、長い年月を経過した土材料の物理化学特性に及ぼす影響は非常に興味ある工学的問題である。さらに、歴史的地盤構造物の調査から、土構造物の劣化と不安定現象の発現状況など、通常では得られない時間効果に関する多くの知見を得ることが可能である。その意味で、古い土構造物は、地盤の材料学的な研究を行う上で非常に有効な情報源であり、今後このような歴史的構造物の地盤工学への有効活用を考えるべきであろう。以上のような技術情報から修復技術の解明がなされると、歴史学や考古学の発展に有効な情報を提供できる可能性があり、ひいては現代の構造物への古い技術の利用や、将来の新しい建設技術の開発にも繋がる。

Table 2は、歴史的地盤構造物に使用された古代技術と、ほぼそれに相当すると考えられる近代技術を列挙したものである。両者の技術は、名称と使用する材料には若干の違いがみられるが、工法の原理

そのものは大きく異なるものではない。表中にあるような元来の工法によって構築された歴史的な地盤構造物に対して、どの程度の現代技術を使用しうかが今後の重要な検討課題であろう。一方で、わが国では新設の高速道路の側壁部の建設に対して、旧来の石垣の構築技術が現代工法のブロック積み工法にとって代わって使用され、高速道路の中で新しい風景が創り出されていることもある。

しかし、文化財とくに歴史的な地盤構造物に対する修復保存手法に定まったものがないため、各地で様々な修復作業が実施されているのが実情である。中には歴史的価値を喪失してしまうような修復事例も見られ、早急な修復技術の確立、あるいは修復に対する考え方の提示が必要である。西田は姫路城の石垣の保存と修復に際して、基本的な考え方をまとめているが[西田 2008]、その中で主なものは以下のようである。

- (1) 歴史的経緯からの技術レベルの把握と長期情報の抽出。
 - (2) 現地の観測による定性的情報と調査結果に基づく定量的、科学技術情報の導入。
 - (3) 原状に復すること、すなわちオーセンティシティー (authenticity) の原則に従う。
 - (4) 修復にあたって、現代技術と工法を利用する必要が出てくるが、オーセンティシティーの原則からその適用には限界を設けるべきであるとともに、将来優れた技術が開発された場合、それに取り替えができるようリバーシブル (reversible) なものにする。
- イドゥートの岩盤調査においては、上記の (1)

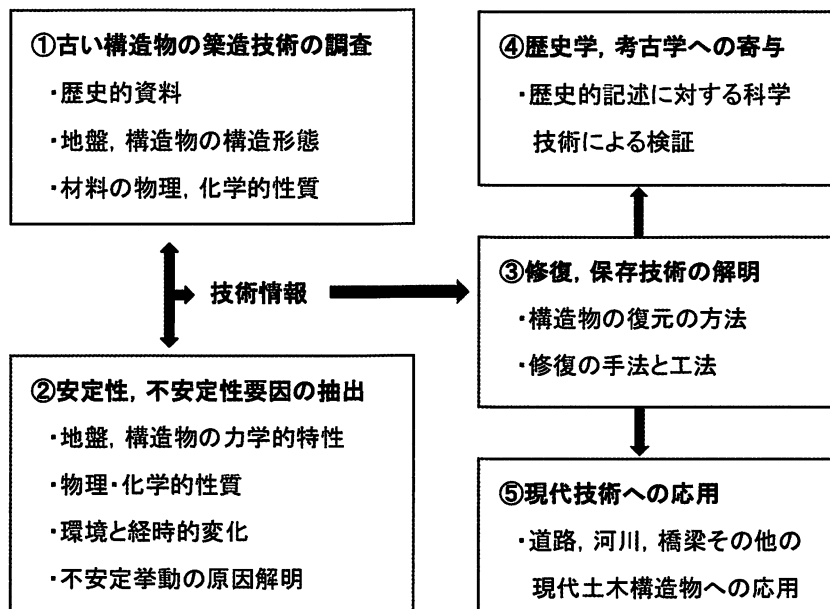


Fig. 15 歴史的な地盤構造物に対する修復の考え方

Table 2 歴史的地盤構造物の修復技術

保存対象物	歴史的地盤構造物に使われた工法	工法の原理	保存のための現代技術
古墳盛土	版築盛土	圧密, 締固め	ドレーン工法, 重錘落下工法
堤体盛土	敷葉工法, 敷粗朶	補強	ロックボルト, ジオシンセティックス
基礎	たたき (三和土など), 杵工	固結, 補強	地盤改良工法, 杭工
護岸, 河川堤防	石積み, 杵工	遮水, 部材による 構造的安定	遮水シートパイル, ブロック積み工法, 杭工

と(2)に相当する作業が実施され、岩盤の劣化調査とその長期挙動計測が安全な壁画修復のために寄与したものと考えられる。岩盤の修復補強作業では現状を維持することを主眼としたために、そのオーセンティシティーには取り立てて考慮はなされなかった。しかしながら、セメントによる固化や樹脂の含浸による強化ではなく、小径のアンカーボルト打設による補強対策を採用したことで、岩盤の性質そのものの変更を最小限に留めたことは、(3)のオーセンティシティーの原則を十分とは言えないまでもそれなりに担保できたものと考えられる。地盤構造物は長い時間の経過とともに形と性質が徐々に変化していることから、原状に復することを考えるときには、安全性を考慮したうえで、どの時期(どの状態)に復原するかを検討することが重要である。

(4)のリバーシブルな工法の選択は歴史的地盤構造物の修復にとって新しい考え方である。リバーシブルな工法を言い換えると、いつでも撤去可能な修復方法ということができる。すなわち、永久的な修復だけではなく、一時的な延命工法も選択肢の一つとして考えるべきである。アンカーボルトによる補強工法は、従来から建設分野において仮設工事にも使用されることがあるため、比較的撤去容易な工法である。したがって、歴史的地盤構造物の安定性に対する延命対策に有効な手法であると考えられる。

謝辞

本報告における埋葬室母岩のレーダー探査にあたりご協力いただいた応用地質株式会社、また補強工事にあたりご協力をいただいた株式会社タイセイ総合研究所、大成建設株式会社、日本ヒルティ株式会社の諸氏にお礼申し上げます。さらに、母岩の劣化調査においてご助言・ご協力をいただいた関西大学国際文化財・文化研究センターの沢田正昭氏、西浦忠輝氏および吹田浩氏に謝意を表する次第です。

参考文献

- 応用地質株式会社 2009『イドウト石室 GPR 適応性確認調査報告書』。
- 西田一彦 2008「姫路城石垣の形態、地盤と保存、修復」、『特別史跡姫路城石垣総合調査報告書』、pp.166-167。