

取り上げた石材の劣化損傷状態について

はじめに

石材の劣化損傷状態の調査は、石室解体にともなう石室構造等の調査（2005 年度および 2006 年度）の際に石室内部から実施した。次いで石材の損傷状態に関する調査は、石室解体前の事前調査の一環として実施し、その結果については検討会や作業部会において報告している。

2005 年度および 2006 年度に実施した石室内部からの調査は、天井石、側石、床石の限定された範囲内での調査であり、全体像を把握するに至らなかったが、天井石の 2 石に見られた南北に貫通する大きな亀裂、東西側石の石材間に接する上部のブロック状ないし、破碎状の割れなどについて報告し、構造体としての安定性に大きな問題があることを指摘した。一方、石室解体前に実施した外観からの調査では、新たな亀裂が多数見つかかり、当初の予想をはるかにこえる石材の損傷状態が明らかになった。また、石室解体直前にペネトロ計により実施した石材強度データは、高い数値を示す部分もあるが、ほぼ当初の予想をこえるものではなかった（石材の平均的な一軸圧縮強度は、ほぼ 40-60MPa）。しかし、側石底部については、含水比がやや高く石材を損傷させる危険があったので測定していない。

今回は、仮設修理施設において、個々の石材をさまざまな角度から観察を行い、その現状について報告する。なお、今回は、石材の亀裂状態などから劣化損傷の程度を便宜的に分類したので、以下に記す。

観察結果

<分類Ⅰ>：石材を分断する危険な亀裂を有する石材。

床石 2（南北方向の走行）

床石 4（東西方向の走行）

天井石 1（南北方向の走行）

天井石 2（南北方向の走行）の 4 石がある。

このなかで、天井石 1 は現状において分断していると考えてよい。他の 3 石についても、大きな振動や衝撃を与えることにより分断・崩壊する危険な状態にあると推定される。石材が完全に拘束されていない現状での取り扱いや移動等については、特別な注意を要する状態にある。現状ではベルトによる拘束をおこなっているが、パッド等による拘束法とは異なり、ベルト自身が緩むので、前回の検討会において提案した方法による対応を早急に実施する必要がある。

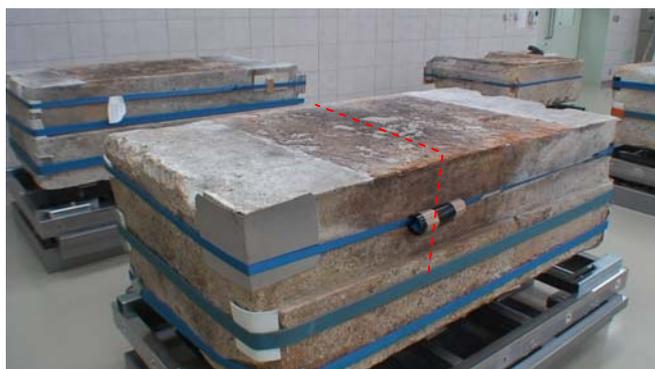


図 1. <分類Ⅰ>（大きな亀裂のある石材はベルトで拘束されている。手前は天井石 2）

<分類Ⅱ>：塊状（ブロック状）の大きな割れを有し、石材全体の形状に大きく影響を与える石材である。

天井石 3（北側面から東側面に走行する大きな塊状の割れ、南側面の西側に広がる板状の割れ）
天井石 2（北側面と東側面の角に存在する塊状の割れ、東側面の南側に存在する板状に伸びる割れ）

東側石 2（壁画面の下部南側に存在する塊状の割れ）

南側石（東側面上部に存在する北 45 度南に走行する大きな塊状を示す複雑な亀裂）



天井石 3
図 2. <分類Ⅱ> 相欠き部分のブロック状の割れ。ベルトで拘束しないと崩落する状態にある

いずれも現状で、ベルトなどによる拘束がなされているが、ベルトの緩みなどが原因して崩落する危険性は極めて高い。

<分類Ⅲ>：比較的小規模の破碎、亀裂、もしくは石室解体作業前後に取り外した破片等を含む石材で、石材全体の形状に重大な影響を与えるものではない。

床石 1（床面北中央からやや西側の亀裂、床面北の中央からやや東側の亀裂）

床石 3（北面に存在する目地漆喰の崩落）

床石 4（東面と北面の角部分の亀裂、床面の南側中央よりやや西に見られる塊状の亀裂）

西側石 1（上部壁面から北面にわたる塊状破片はすでに取り外されている。底面と南側面の角に存在する板状から塊状の亀裂）

西側石 2（上面の南側面相欠き部分の崩落寸前の亀裂）

西側石 3（壁画面と底面と南側面の頂点からの三角錐状片はすでに取り外されている。南側面下部付近の相欠き部分の損傷など）

天井石 3（東側面と壁面の稜部分の損傷、西側面も同様であるが、築造当時の損傷の可能性あり）

天井石 4（東側面と南側面と壁面の交点からの三角錐状の割れで、破片は取り上げられている？）

天井石 1（北面から東面の下部の板状の割れは、すでに取り上げられている。）

東側石 1（東側石 2 に接する相欠き上部の亀裂、底面の壁面側の北側の三角錐状の割れについては、すでに取り上げられている）

東側石 2（壁面の北側上部の破碎石材片については、解体前に回収されている）

東側石 3（壁面上部南側の三角錐状片は解体前に回収されている。底部壁面側で南側の角部に少しの損傷）

北側石（壁面底部の東側の角の小破片と亀裂、小片については解体前に回収されている？、壁面上部の東角部分の三角錐状小片についても回収されている）

全体的には石材の角部分や稜、相欠き部分に多く発生している。

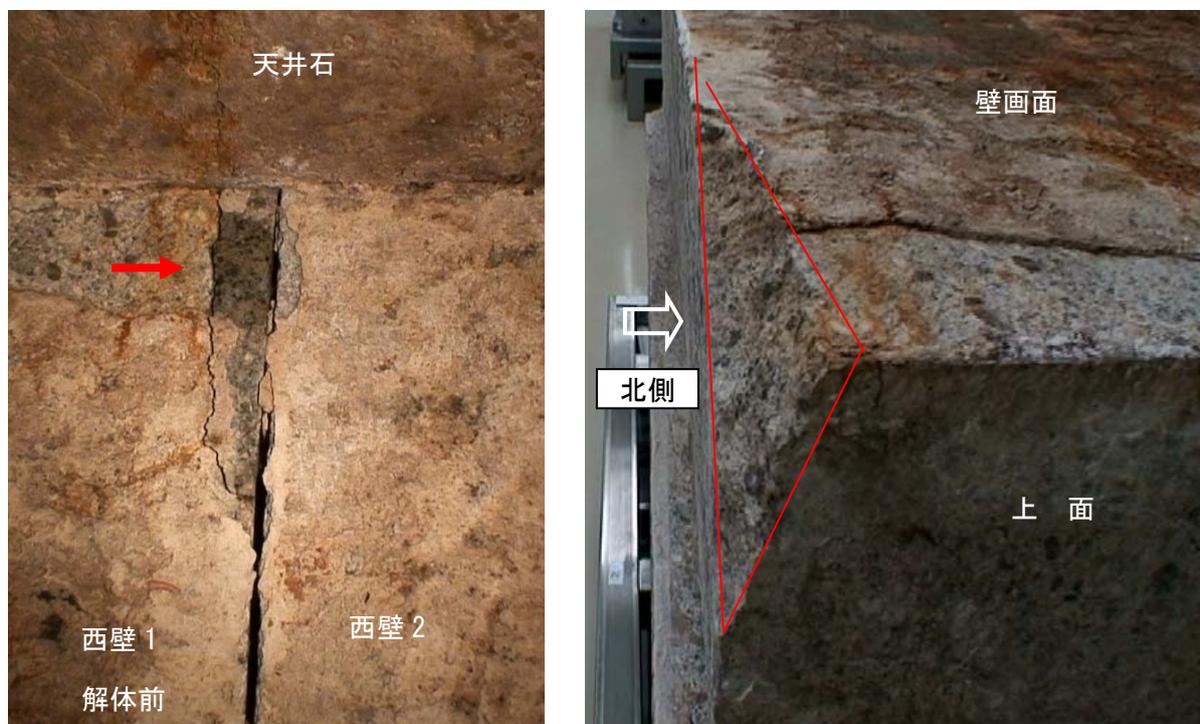


図3. <分類Ⅲ> 石室解体前に遊離している石材片は取り外された。また、石室解体中においても、危険な箇所の石材片は取り除かれている。いずれも比較的小型の破片である。保存修理時に接合可能なものは、元にもどす予定である。いっぽう、東側石2のように複雑に破碎されているものについては、復元的な修理も必要となる。

＜分類Ⅳ＞：現状の目視観察で確認できる比較的大きな亀裂のある石材であるが、もともと潜在的にあった所謂「山キズ」が原因しているとも考えられるものもあり、現状では大きな影響を与えるものではないと判断されたものですが、危険度が高い。今後精密な調査を要する石材である。

西側石 2（底面の中央より外面側付近に存在する南北につながる亀裂、現状観察では亀裂の拡大は認められないが、大きな亀裂と平行する亀裂も認められるので、石材の拘束など取り扱う上では注意を要する）、

天井石 4（北側面と東側面の角部分からそれぞれの方向に伸びる亀裂、この亀裂は、北面と東面の角部が大きく破損している面の下部に平行する面として広がっており、凝灰岩の堆積環境による層理面が関与したものとも考えられる。将来に大きくこの面が脱落するとは考えにくい、面的な浮きの状態を考慮すると、この部分に荷重がかからない方法で設置することも考慮する必要があるのかもしれない）

以上の目視観察等などの結果から石室石材の劣化損傷原因を推定すると、発掘調査で明らかになったように地震による影響が大きく関与した石材の破砕が著しく石材の劣化を進めていると考えられる。もちろん、壁画面の痕跡が示すように水分による化学的な風化も石材の劣化に大きく関与したことは言うまでもない。



図4. ＜分類4＞ 石材を取り上げた後に発見された西側石の底面を南北に走行する亀裂。亀裂がどの程度石材の奥に潜り込んでいるか不明である。今後、このタイプの亀裂に対して面的な浮きの状態を調査する必要がある。



図5. 現在、ベルトによって拘束されている石材は、床石2、天井石1、天井石2、天井石3、東側石2、南側石の6石である。修理期間中や保管にあたっては、ワイヤーやフレームで拘束することが望ましい。

保存対策

保存対策については、前回の保存対策検討会（2007.09.28）で提案したように、劣化損傷状態の分類Ⅰ、および分類Ⅱに相当する石材については、ワイヤーやフレームなどを組み立てて拘束する方法が望ましい。分類Ⅲのなかで石室解体時に取り外した遊離した石材片について、元にもどせる状態にある破片については接合しておく方が望ましい。ただし、接合にあたっては石材の状態により軟弱なものは含浸強化する必要がある。また、接合面についても強化処置が必要となる。いっぽう、凝灰岩の含浸強化には、亀裂の発生などのリスクも伴っているので十分な検討も必要となる。

保存修理の含浸強化におけるリスク

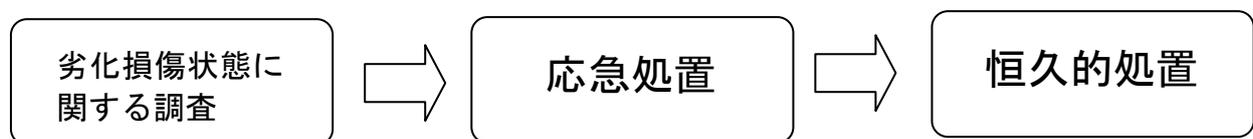
高松塚古墳の石室を構築している流紋岩質凝灰角礫岩は、多孔質で空隙率は20-30%におよぶと推定され、密度も0.6-2.4と広範囲におよび構成礫種もパミス礫のように強度が小さなものから溶結凝灰岩礫のように大きいものなど不均質に分布している。このことが、石材全体の、強度や密度の不均衡となり「凝灰岩特有の脆さ」を示しているとも考えられる。一方、風化状態も部分的に異なり、出土部材では、乾燥にともなうチョーキングにより指で擦っても粒子が崩落する部分もあれば、表面が硬く状態が良好に見える部分もある。しかし、硬くて良好に見えても、多くの場合風化殻の形成に他ならず、割れた破片を観察すると、内部は爪でこすっても崩落するほど軟弱になっていることも見かける。一方、肉眼的に観察できる亀裂以外にも、亀裂部に土や風化微粒子が充填固化して見えないことも多く、乾燥に伴って発見されることも少なくない。もちろん、石材に存在する「浮き」部分も肉眼で発見することも困難で、乾燥時に発見されたり、含浸処理後に発見されることも少なくない。

石材の保存修理においては、凝灰岩は最も困難な石材の一つと考えて良い。凝灰岩は風化しやすく、部分的に粘土化していたり、強度の不均衡がより進むことなどが原因して、含浸強化後に含浸強化材（アルキルシリケート系など）の加水分解が進んだ状態や、溶剤タイプの樹脂を使用した場合は、乾燥固化時にひび割れが新たに発生したり、層状に剥離することもある（石材の浮き部分によく見られる）。

一方、含浸効果については表層部の強化には効果的であるが、デッピング法（液中で浸透含浸させる方法）においても石材全体を強化することは不可能である。高松塚古墳石室に用いられている凝灰岩と同質の凝灰岩では、デッピング法によっても表層から1-2cm溶液が浸透する程度である。表層のチョーキングを止めたり接合面の強化程度であれば可能である。

つまり、小片の強化処置や接合は十分可能であるが、数Kg以上におよぶ石材片を含浸強化して、接着剤のみで接合することは石材の状態から考慮すると避けるべきである。接合片が剥がれた場合は、接着面の石材を大きく損なうことになる。

これからの作業の進め方



- 緊急度の高いものから応急対策を進める。分類Ⅰ、Ⅱ、(Ⅳ)については、前回は提案した石材を拘束する方法による。
- 取り外した遊離石材片の接合（分類Ⅲ）。

石材を拘束・接合する実験

各劣化状態に応じた応急対策を検討するため、さまざまな実験を実施しているのを報告する。なお、石材の拘束実験については、実験用石室石材を用いた実験を行なう必要があるため、第一実験場において進めている。

＜天井石や床石に発生している石材を二分する亀裂の拘束、分類Ⅰの対応＞

これらの石材に対しては、搬入時の一時的なベルトによる拘束からワイヤーを用いた方法に取り替える必要がある。

今回おこなった実験では、それぞれの角にコーナ金具（内側にはシリコンゴムを貼り付けている）を取り付けて、4mmφのワイヤーで拘束する方法である。各ワイヤーの締め付けが調整できるように締め付け金具を用いている。今回の実験では締め付け金具は各ワイヤーの対角する2ヶ所にした。今後さらに実験をおこなって、ターンバックル（締め付け金具）を特注の六角柱状のボルト方式に改善するなどの検討をおこなっている。また、ここでは相欠きの上下2段にわけて拘束している金具を接続するなどについても検討しているが、全体像としては図7に示すイメージである。



図 6. 実験ではステンレスワイヤーを引っ張るのにターンバックルを使用した。改善する



図 7. 中央に大きく断裂する実験用天井石を拘束した完成時のイメージ

＜西側石2（白虎）の底部の拘束（分類Ⅳへの対応）＞

実験西側石2用（実物大）石材を用いて、同様な亀裂を発生させた。この亀裂は底部に東西方向に走行するもので、現状では安定しているようにも観察されるが、亀裂が拡大した場合は石材が大きく損傷する危険が伴うと推定されるものであり、その対応策を立てておく必要がある。対策方法として、樹脂を充填する方法もあるが、1mm幅にも満たない亀裂に樹脂を注入してもほとんど効果が期待できるものではない。むしろ、亀裂が拡大して石材ブロックが落下しないように固定できる対策を立てるべきと考えた。今回の実験では、石材の両側に14.5-15.5mmφ、150mm（L）の孔をそれぞれの2ヶ所にあけてステンレス棒を差し込んで、石材の底部（現位置、元は側石の西面下部）からステンレスフレームで受ける方式を考案した。



図 7. 実物と同様な亀裂を入れる



図 8. 支持棒を挿入するため、振動の少ないドリルにより孔をあける



図 9. 支持用ステンレス棒を差し込んで一体化



図 10. フレームとステンレス棒を調整金具で接続



図 11. 同様に反対側も接続して、締め付ける



図 12. 側面下部（元位置）を受けるステンレスフレーム

＜大きなブロック片を拘束、分類Ⅱの対応＞

大きなブロック片を接着剤で接合することは、困難であるので応急的にワイヤーとフレームを用いて、石材ブロックを拘束する。実験では天井石 2 を例にした拘束実験をおこなった。コーナ部のブロック片を支えられるフレームを作製して、全週からワイヤーで拘束する方法をおこなった。



図 13. 実物と同様な亀裂を作る



図 14. 形状にあわせてフレームを作る



図 15. 両角部分のフレームが完了して、ビニールシート（アクリル板）を入れて保護する。



図 16. 全周囲をワイヤーで拘束する

＜小さな破片の接合、分類Ⅲの対応＞

石室解体等において予め外しておいた小破片は、破断面の強化処置をおこなった後に、元位置にもどして接合する。破断面の含浸材料として、さまざまな種類の強化材料があるが、凝灰岩の強化材料としては、浸透性、強度、粒子間結合に優れる OM-20 を使用した。OM-20 は WSS-OH $[\text{Si}(\text{OCH}_2\text{CH}_3)_4]$ と WSS-MES100 $[\text{CH}_3\text{Si}(\text{O})_{1.1}(\text{OCH}_3)_{0.8}]$ を 8 : 2 の混合液（触媒はあらかじめ添加している）である。石材片の大きさ、劣化の程度によりアクリル系材料も使用する場合もある。ただし、アクリル系材料は表面に染み出すと濃い色調を呈し、斑点状に染み付くこともある。

接合にあたっては、熱可塑性合成樹脂接着剤も検討したが、岩石の接合にあたっては、金属遺物や土器などと異なり、接着強度や、耐候性に問題があるので熱硬化性合成樹脂接着剤の使用をおこなっている。つまり、接合片は取り外さないことを前提としており、もともと石材と一体になっているものが、なんらかの原因で破壊したもので、将来にわたり接合部分を取り外す必要がないと判断した。

接着剤は、エポキシ系を使用し、接合対象石材片の破断面の状態、劣化状態により材料を選定している。比較的欠損部の多い石材片の接合にあたっては、粘性が大きく、比較的短時間で硬化するタイプ（アラルダイト 2012 など）、密着性に良い接合面を有する石材で、比較的大きなものは粘性が低く、長時間で硬化するタイプ（AER2400, HY837 など）などを使い分ける。また、欠損部が大きく、支持強度に問題のあるものについては、エポキシ系充填材を補填する方針である。補填後の調整については、カップリング剤を塗布した後、同質石材破砕物を混合した OM20 により調整をおこなうことを検討している。



図 17. 大型から小型の凝灰岩を用いた実験



図 18. ガンを用いて主剤と硬化剤を混合



図 19. 対象面への均一な塗布



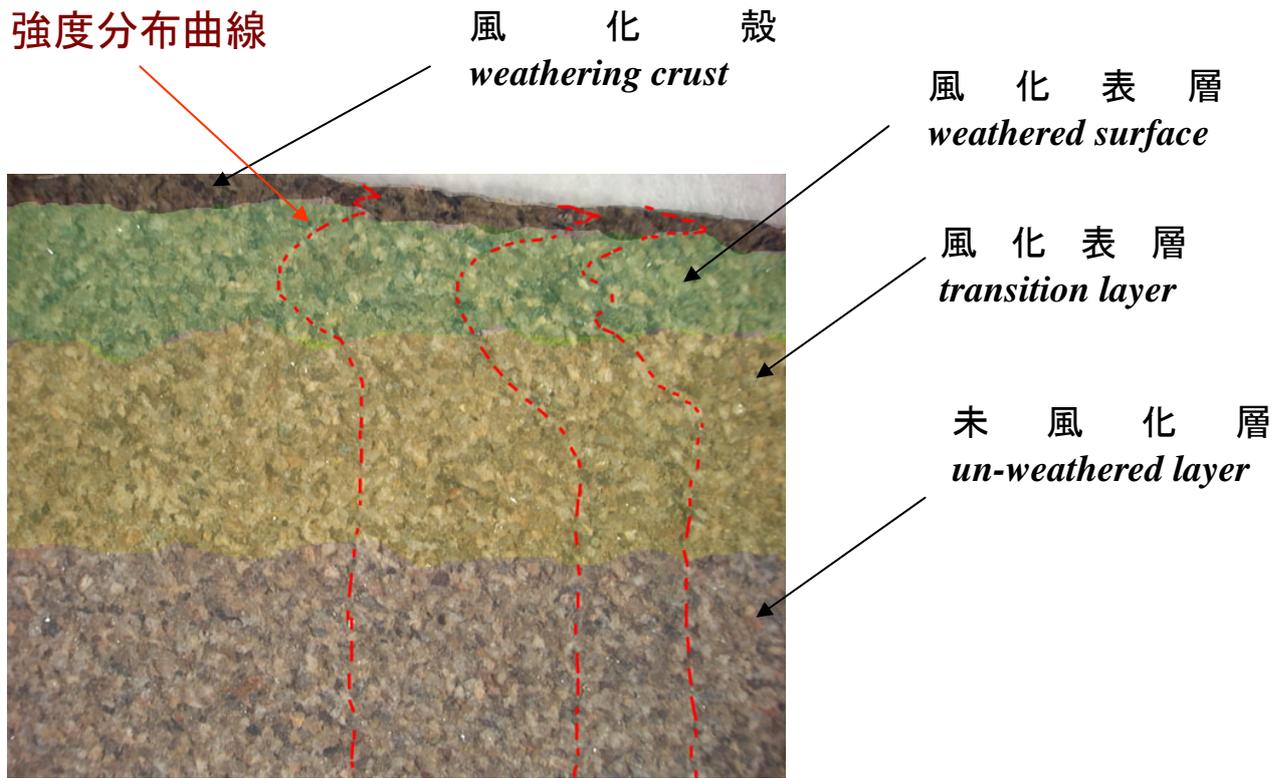
図 20. 接合にあたっては位置に注意する



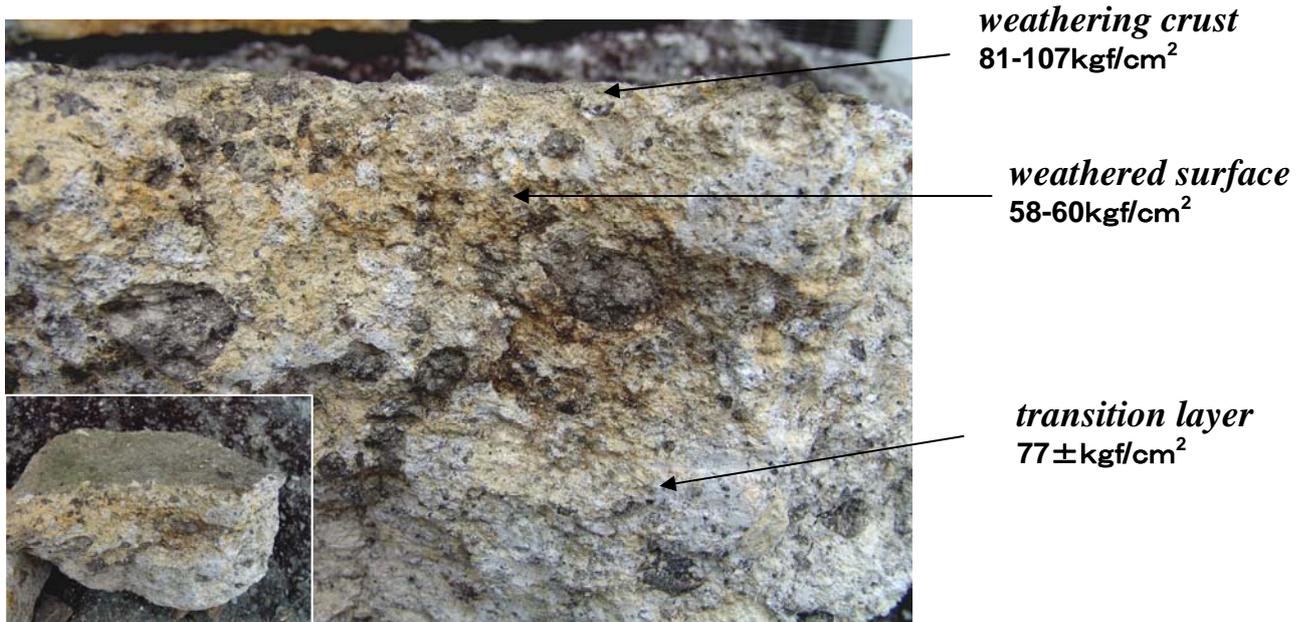
図 21. 高松塚古墳と同質の凝灰岩で実験



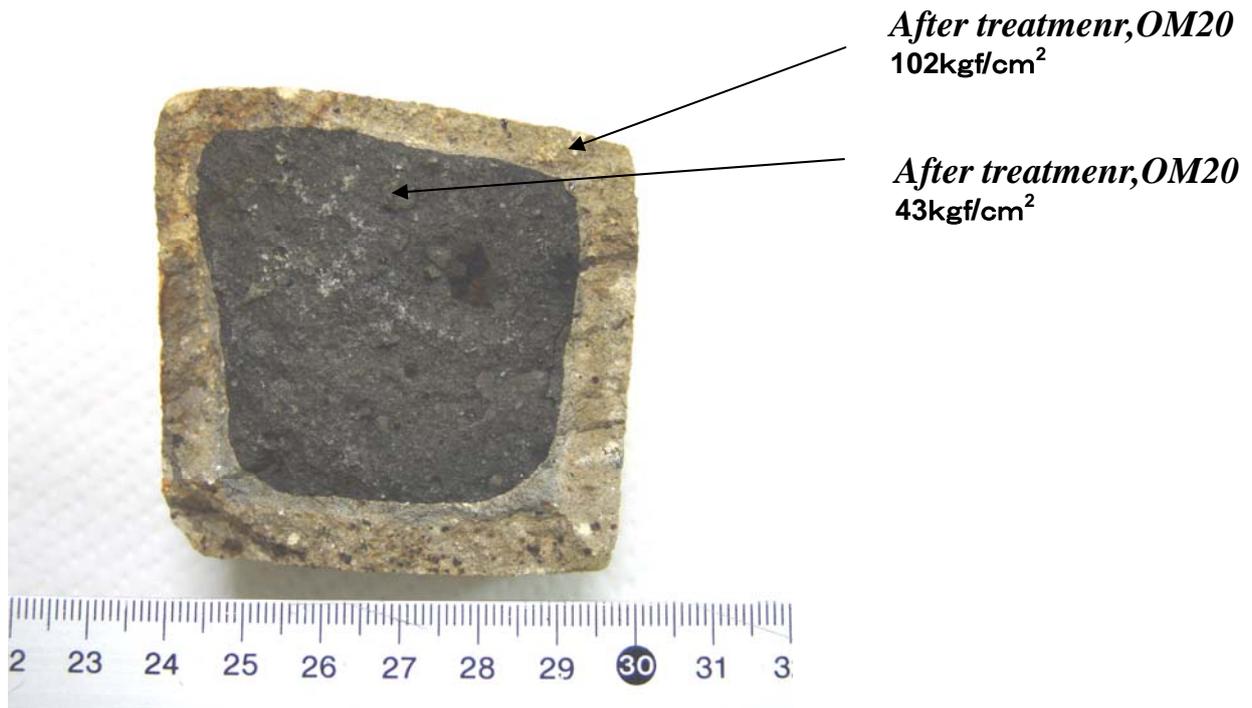
図 21. 欠損部が多く、硬化後に補填する



一般に風化殻は硬くて薄いので、風化層表面から剥がれやすい。振動の多い環境では特に注意。また、強化含浸処理にあたっては、急激な蒸発による強化材の濃縮による強度の不均衡は、岩石を破壊する危険があるので、含浸直後は蒸発等を遅らせることや風化表層まで含浸する必要がある。凝灰岩の多くは、岩石全体が風化しており、処理により表層のみが強化されて、風化殻と同様な状態になるので、十分な検討を要する



高松塚古墳石室石材と同質の凝灰角礫岩を用いた調査例から



浸透性に優れるアルキルシリケート系含浸強化材（OM20）を用いた凝灰岩の強化試験を実施して、硬化後に岩石を破碎して、その浸透性を着色法にて観察する。黒色部分は強化剤が全く浸透していないことを示しており、風化の著しい岩石では不連続面を形成する。

石材の含浸強化剤として、WSS-OH [Si(OCH₂CH₃)₄]が使用されることが多いが、粒子間の接着効果を必要とする場合には WSS-MES100 [CH₃Si(O)_{1.1}(OCH₃)_{0.8}] が適している。しかし、浸透がやや悪いこと、硬化後においては光沢は生じないものの色調が濃くなることや、硬すぎるなどから、これらの改良を加えて、OM20(OH80-MES20)が作られた。撥水性を有することや耐候性に優れていること、合成高分子材料に比べて浸透性に優れることなどから、凝灰岩等の石材に利用されている。ただし、石材の種類、劣化状態、環境条件等により使用できないこともある。