

石室解体準備状況について

I. 平成17年度報告概要

恒久保存方針の決定に基づく、石室解体に係る調査・実験等について

II. 現状報告

高松塚古墳石室解体に係る実験場の整備と治具の開発など

2006.06.29

独立行政法人文化財研究所

埋蔵文化財センター 保存修復科学研究室

I. 平成 17 年度報告概要

I-1 石室の石材に関する岩石学および力学的調査

(1) 石室を構成する石材の同定に関する調査

高松塚石室を構成する岩石（石材）について、現在観察可能な南壁石（閉塞石）、南天井、北天井、東南壁石、西南壁石、北天井石の一部を調査した結果、従来から報告されているいわゆる『二上山の流紋岩質凝灰角礫岩』である。観察の結果、基質の火山ガラスと各種の礫で構成されており、最も顕著な礫は、黒色で樹脂状光沢を呈する数 mm から数 cm 大におよぶ火山礫（溶結）凝灰岩の角礫と数 mm から数 cm 大におよぶ白色のパミスである（図 1）。この黒色溶結凝灰岩は下部ドンズルポー層に分布する火山礫（溶結）凝灰岩である。黒色の溶結凝灰岩は堅牢であるが、白色のパミスや基質は軟弱であり、風化の著しい石材では強度の不均衡が構造体への影響を及ぼす可能性がある。強度の不均衡と同様に、凝灰岩を構成する礫種による含水比の不均衡も大きいと予想される。

以上の特徴を示す凝灰岩は、岩相の類似性などから石材の採集地として鹿谷寺跡周辺域が推定される。なお、このタイプの凝灰岩は、古墳時代から奈良時代まで石材として多量に使用されており、キトラ古墳や石のカラト古墳などの古墳石室の構築部材として、また、平城宮跡では基壇の化粧石など建築部材として大量に使われていた。

(2) 石室石材の強度等の物理的性質に関する調査

高松塚石室石材の物理的性質に関する調査については、現地で測定可能な強度および含水比に関する調査を実施した。なお、石材の密度については現地で直接測定できないので、高松塚石室と同様な下部ドンズルポー層産の凝灰角礫岩を用いた実験を実施した。

密度の測定には、アルキメデス法、ピクノメータを用いた方法に加えて、高エネルギー X-CT による CTn（CT 値）から石材の密度分布を測定した（図 3）。なお、この測定においては下部ドンズルポー層産の凝灰角礫岩を用いた 1/10 の石室模型を製作して実施した。その結果、凝灰角礫岩の見掛け密度はおおよそ $1.6\text{-}1.8\text{g/cm}^3$ を示し、真密度は $2.2\text{-}2.4\text{g/cm}^3$ 前後を示した。

強度分布については、石室外側、つまり取り合い部から南天井側面、南壁石などについて調査した。また、参考として平城宮跡から出土した劣化の著しい凝灰岩についても測定した。測定には、軟岩ペネトロメータ

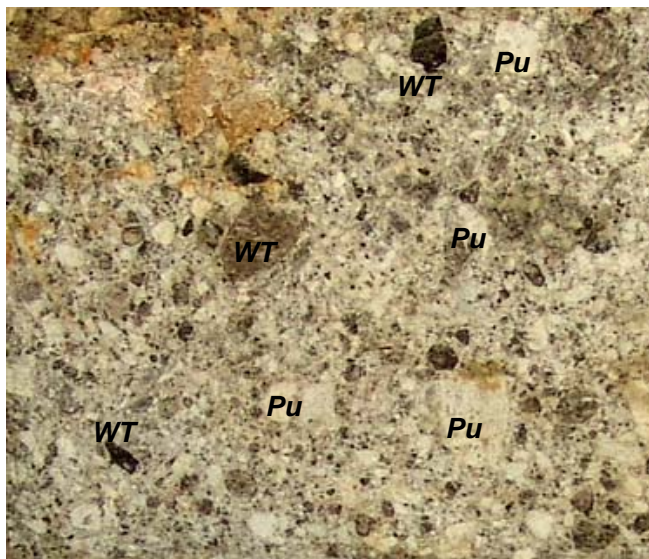


図 1. 北天井石の漆喰が剥落して石材の特長がよく観察できる部分（北東）、WT；溶結凝灰岩礫 Pu；パミス

を用いて針貫入勾配を求め、回帰式から一軸圧縮強度を推定した。測定部位は黒色の溶結凝灰岩礫はさけて、基質部分について測定を実施した。その結果、高松塚石室石材については、予想されたように強度のバラツキは大きい。黒色溶結凝灰岩の礫を除くと、平均的な値として天井石側面：54kgf/cm²(5.4MN/m²,5.4Mpa)、南壁：72kgf/cm²(7.2MN/m²,7.2Mpa)、東壁：73kgf/cm²(7.3MN/m²,7.3Mpa)を示した。これらの値は、すでに報告されている三村委員による調査結果と一致する(パミス部で50kgf/cm²、溶結凝灰岩部で、200kgf/cm²)。なお、凝灰岩は湿潤状態に比べて乾燥状態のほうが強度は大きい。乾燥しすぎると粒子間の膠着力が低下して、ねばりがなくなりクラック等に影響が生じると考えられるので、石室解体までは急激な乾燥はせずに、湿潤状態を持続することが望ましい。しかし、一方では過度な水分は石材の劣化を早めたり、カビやコケ(光がある場合)の発生原因となるので、将来的には石材が安定する自然状態の環境(異常な温度・湿度環境をさける)に適応させることが望ましい。

含水比(固形分に対する水の割合を百分率で示した値)については、赤外線吸光度法により、盗掘孔付近に見られる天井石などについて測定した。いずれも表面に土が付着しておりやや乾いた色調を呈していた。測定結果も5-15%とかなりバラツキを示すものの、予想していたよりは含水比はやや低い傾向を示した。平城宮跡から出土する著しく劣化した凝灰岩では最大含水比は30数%に達する(図2)。

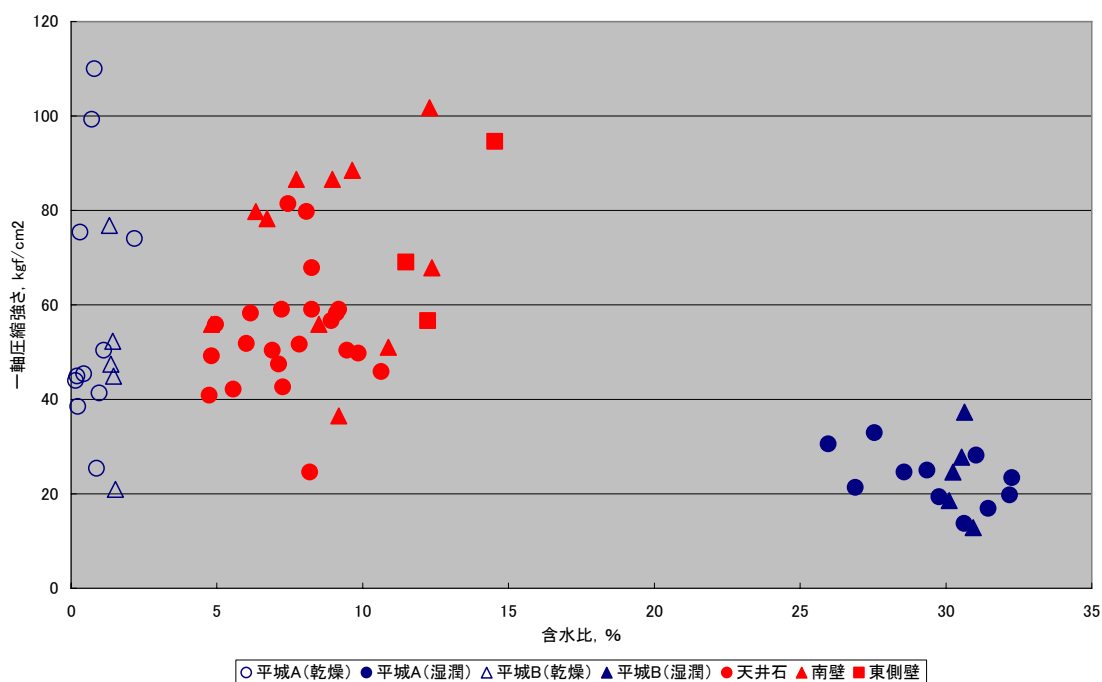


図 2. 各凝灰角礫岩の含水比と一軸圧縮強度。高松塚石室石材の一軸圧縮強度は40-60kgf/cm²に分布するが、それより高い数値を示すものもある。同質の凝灰岩では、含水比は高くなると強度は低下している。含水比が小さくなれば、強度は大きくなると言われているが、劣化の激しい凝灰岩では強度が大きくならないものもある。



高エネルギーX線 CT を用いた 1/10 石室模型（凝灰角礫岩）の密度分布測定

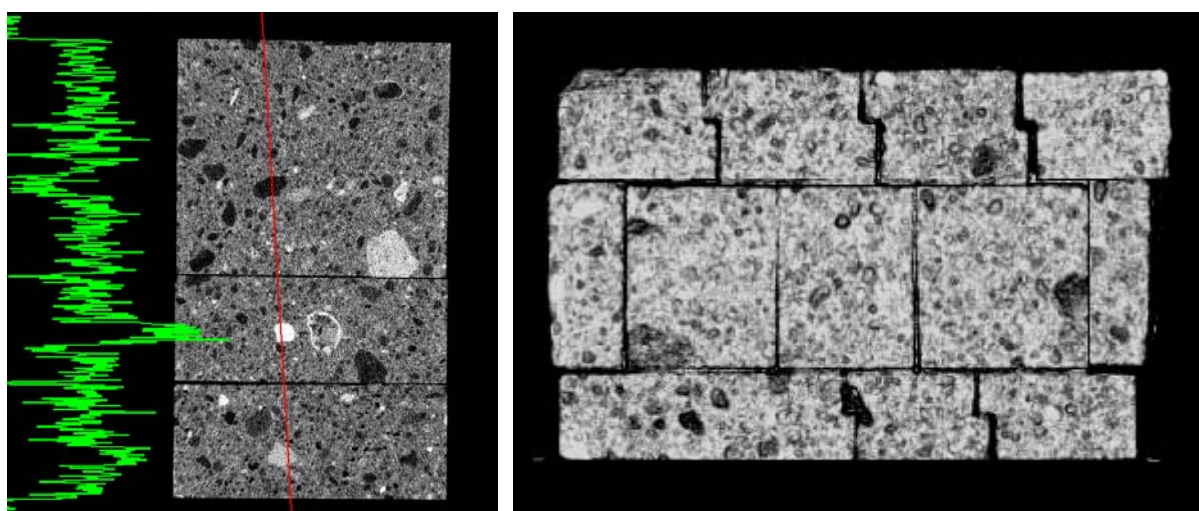


図 3. 凝灰角礫岩製の 1/10 石室模型の X 線 CT 画像、黒い部分は CT 値が低く（密度が小さい）、白い部分は CT 値が高い（密度が大きい）ことを示している。CTn:1010~4553 を示し、標準試料較正により密度を求めると、最小で 0.63g/cm^3 、最大で 2.4g/cm^3 を示した。パミスは水中でも浮くので、密度は 1.0 より小さくなる。劣化が著しいこのタイプの凝灰岩では、かさ比重（かさ密度）はより低下するので、1.2-1.3 を示した。石材の一軸圧縮強度は、ほぼ $57\text{-}157\text{kgf/cm}^2$ 。（注：右図と左図は明るさを変えている）

I-2. 石室解体に係る石室構造に関する予備調査

(1) 石室構造に関する調査

石室を解体して石材を取り上げるに際しては、石室の構造の詳細を検討しておく必要がある。特に石材のかみ合いを知るには、相欠きの状態を正確に把握しておく事が重要である。しかし、これらの情報は、石室外側からの観察や発掘調査の成果を待たなければならない。いっぽう、後述する解体実験などを進めるにあたっては、実物大の石室を構築する必要があるため、今回は内部から石材間の観察や検針による調査を行い、推定構造図の作成をおこなった。

調査の結果、基本的には石のカラト古墳、キトラ古墳、高松塚古墳の石室構造（相欠き状態）については、同じ可能性がきわめて高いという推定がなされた。推定詳細図については、図4に示した。

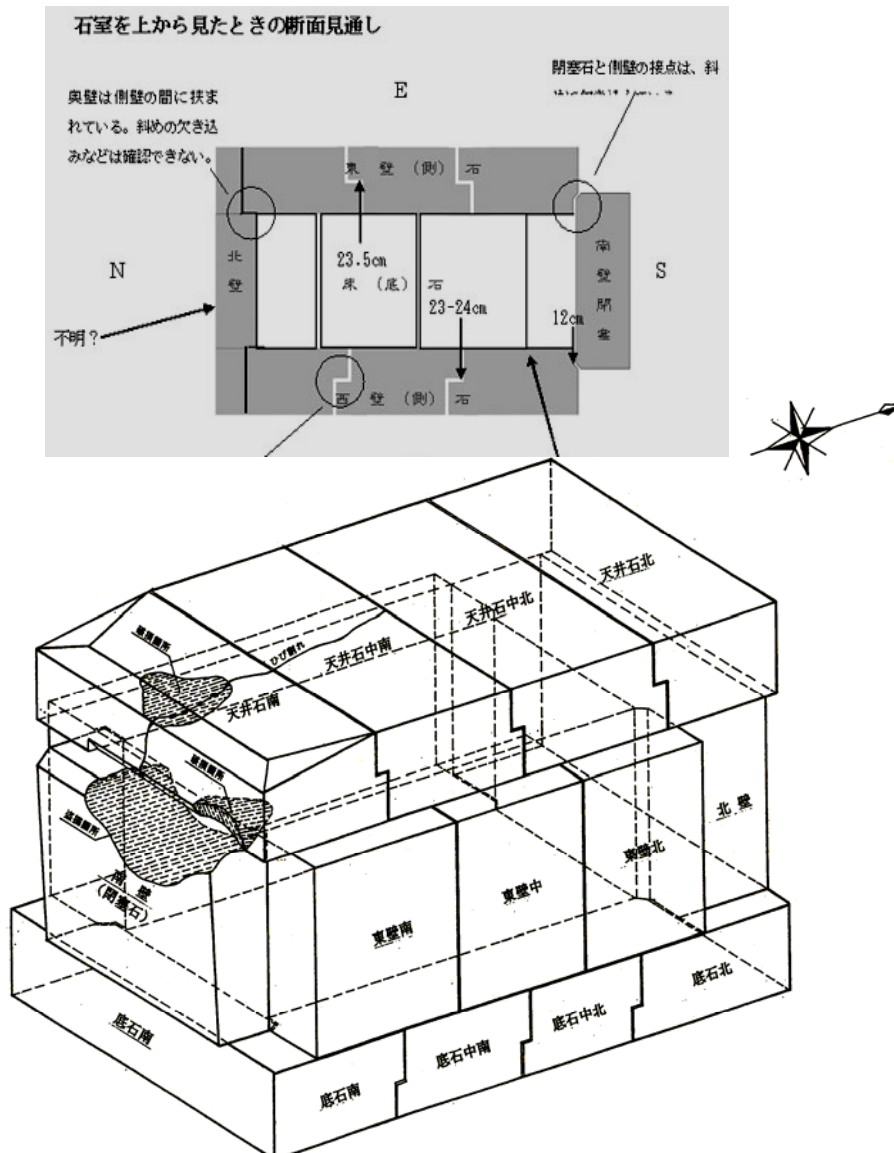


図4. 高松塚石室推定構造図（発掘調査の成果によらないと石組構造はわからない。ここでは、実物大石室模型を製作するため、推定による便宜的な図を作成した）

I-3. 石室解体に係る検証

高松塚石室解体の実施にあたっては、綿密な実験によって安全性が確保され、また安全性が検証される必要がある。実験にあたっては、2ヶ所に実験場を設けることによって、目的を達成するものである（便宜的に既設の実験場を第一実験場、新設した発掘遺構を模倣した実験場を第二実験場とする）。

(1) 石室石材の吊り上げ法に関する予備実験と石材吊り上げのための治具開発

天井石吊り上げ用に門型治具の開発と試作をおこなった。予備実験では、H鋼を組み合わせて、石材を把持する先端にボルトを差し込み、石材とボルトの間にゴムパッドを入れて摩擦力を高めて吊り上げるための第一世代の実験機の試作をおこなった。これが基本原型となり次世代型の開発へと引き継ぐことになる。

第一世代型治具を用いた石材の吊り上げ実験（200504-2005505）については検討委員会でも紹介した。この予備実験は、石材の把持から吊り上げまで、すべて手動操作によるもので、石材も高松塚古墳の石材の寸法とは異なる簡易な石室を構築して小型のものを用いた。その後、実物大石室模型を用いた天井石吊り上げのための本格的な基礎実験を開始するため、第一実験場において石室の構築を始め、さらにレールクレーンを設置するための鉄骨構造を組み上げると同時に、第二世代型の治具の開発と試作を開始した（図5）。

この第二世代型の門型治具は、従来型が一連であるのに対して、安全性を向上させるため、単式から3連式に改善し、さらに石材を把持するための接触箇所を片面に24箇所、合計48箇所て把持し、摩擦力を高めるため特殊ウレタンパッドを採用した。また、実験場においては、高松塚石室石材と同寸法に整形した底石3石を設置し、次いで東西の壁石各2石、南壁石（閉塞石）の設置、最終的に天井石2石を設置した。南天井石には、高松塚石室天井石と同様にひび割れを入れて忠実に複製を作製した。当実験場では関係者による視察を含めた公開実験を実施し、また検討会においても公表した。



図5. 第二世代型の天井石吊り上げ用門型治具（左）と壁石吊り上げ用L型治具（右）
第一実験場等で実験がおこなわれた。

公開実験では、断裂している南天井石の吊り上げと移動、さらに梱包したのち、空中での回転操作にわたる一連の実験を実施し、さらなる安全性向上のために、最新技術の導入を計画した。

いっぽう、壁石の吊り上げ法についても、様々な方法について検討と実験を実施したが、石材の吊り上げに関する制約が厳しく基本的には逆L型（二方向しか石材が見えないので、この二方向を用いて石材を吊り上げる）治具の開発をおこなう事を決定した。L型の治具は、その先端に石材を掴む先端金具を用意して、壁石間の隙間に先端金具を差し込んで、さらに底部も同様に石材間に挿入して底部を支えながら吊り上げる治具の開発と試作をおこなった。第一世代の逆L型治具は、先端金具を石材間に挿入した後、ボルトで固定するタイプで、すべて手動操作による方法であり、今後の開発の原型となるものであった。この壁石用の第一世代型の治具についても検討会で紹介し、その後、機械力による自動制御技術を用いた第二世代型治具の開発と試作をおこなった。

（2）実用化に向けた石室解体用第三世代治具および梱包フレームの開発と試作

天井石吊り上げ用の治具、南北壁石吊り上げ用治具、東西壁石吊り上げ用治具、梱包用フレームについては、第一実験場で実施した予備および基礎実験結果から改良点を整理して、実用化に向けた天井石用第三世代治具の開発と試作を実施した。最も大きな改良点は、人力によってボルトを締めて石材を把持する方法は、把持力が均一なりにくいこと、また、同時締め付けができず、速度調整不可能であること、いっぽう、機械力に頼りすぎると経験則にもとづく微調整がとれないなど問題点も生じるので、人力と機械力を併用した治具の設計・開発を実施した。また、石材強度等を考慮した把持力の正確な力学計測も同時に実施できる方式を考慮した。治具については、より安全性を考慮した事故対策もとられ、油圧ユニットと空圧ユニットを備えた従来にない新しい制御方式を採用した。同様に壁石用逆L型治具についても同様の技術を導入した第二世代型治具の開発と試作をおこない、第一実験場などにおいて実用化をめざした実験を実施した。

基本的な改善点は、石材間に挿入する先端金具の位置調整が可能な方式にすると同時に、把持力については、クレーンアームの伸縮技術を取り入れ、より安全性向上のために、把持開放時には空圧による方式を採用した。

石材固定用の特殊フレームについては、第一実験場で実施した結果から、設計、開発、試作からすべて見直して実用



図 6. 天井石の梱包のための特殊フレームの開発実験

化をはかっている。基本的な考え方は、現場でも取り扱いを考慮して軽量であり、かつ、回転した時にも構造的変形等が生じないなどに重点をおいた。また、石材に異常が生じた場合にも目視観察ができてすぐ対応可能なこと、すなわち、全体が隠れて覆うようなタイプは異変の察知がおくれるので危険性が大きいなどの点を考慮した開発と試作を実施した。今回は構造的な強化と軽量化、そして石材を確実に把持するための固定用パッド方式を採用した。天井石および壁石について実験を実施した結果、安全性に問題のないことを確認し、実用化にむけたパッドの形状等について検討している（図6）。

(3) 第二実験場における石室解体に係る準備

高松塚石室解体の実施にあたっては、綿密な準備によって安全性が確保され、また安全性が検証される必要がある。第2実験場においては実際の高松塚古墳石室解体における発掘現場を推定により再現したもので、遺構検出時の様子、そして推定される石室模型を遺構内に設置した遺構の復元作製を実施した。当実験場では、実際の解体プログラムにしたがった実験を実施するもので、当実験場で使用した機材もそのまま高松塚石室解体実施作業に使用する予定である。つまり、第2実験場で安全性に関する検証を加えて完成度の高い状態で、実施作業に取り組むことを計画した。具体的な復元遺構および石室などについては、これまでの検討会で報告したとおりである。

第二実験場については、これまで検討委員等による建設中における視察、天井石の吊り上げ実験についての視察が行なわれた。

今年の3月2日（050302）における公開実験は、高松塚古墳石室の解体を想定したもので、原寸の石材をはじめ、治具、ホイスト、サスペンションクレーンにいたるまで同じ機材の使用を念頭においたものであり、機材の性能をはじめ、力学的な安全性の検証をおこなったものである。その結果、石材の強度と把持力については問題のないことが明らかになった。今後、断裂した天井石について、さらなる補助装置の開発を計画しており、より安全性の向上に向けた実用化への実験に取り組んでいる。実験の内容については以下に概要を示す。



図7. 第二実験場における第三世代門型治具を用いた天井石吊り上げ実験

本実験は、北天井石を用いて、吊り上げ—移動に係わる状態変化等を把握して、より安全に石室解体が実施できるように検討するための基礎データを収集することを目的とした。把持する装置は、第三世代門型治具とこれに油圧系および空気圧系を接続するユニット、そして吊り上げと移動には実験場設置の2機の電動ホイストとサスペンション型クレーンを用いた。

油圧ユニットと空気圧ユニットは、耐圧ホースを用いてそれぞれのユニットと治具はカプラによってジョイントする方式にしている。

把持能力の性能検査には治具上部の梁の両端に合計6ヶ所に設置した歪センサー（図8.1, 8.2）からの信号を、把持開始から石材の吊り上げ、梱包場所へ移動、吊り下げ開放、把持開放までの状態をデータロガーに収集して解析した。それぞれの梁上部に設置され、センサーは、石材を拘束しているウレタンパッドの動きを間接的に伝えており、ウレタンパッドの拘束力に変化があった場合は、歪量の変化として梁に感知される仕組みである。また、石材の吊り上げ開始時、移動時、吊り上げ開放時などの記録には、ロードセルを用いて、石材重量測定からその変化量として捕らえて、歪センサーと同時にデータロガーに計測してそれぞれのデータを統合的に記録した。

石材の吊り上げは、まず門型治具を2機のホイストで吊り上げて、サスペンションクレーンを用いてレール軌道上を移動させ、所定の位置に到達したら、降下させて吊り上げ対象の石材（北天井石：第二実験場では高松塚の方位を使用し、現地方位を使用していない）を、両側面から覆うように静かに設置して拘束する。設置位置は重心のバランスを考慮して設置するが、相欠き状態など石材の構造、欠陥の状態にあわせて重心の位置より少しずらして設置するなど、経験的な要素も重要である。治具を吊り上げる石材に設置した後、油圧—空圧ユニットをカプラで接続する。また、治具を固定して石材を把持するため、まず、ボルト締めによる片チャンネル（ボルト反力側）の固定を手動操作で行い、均一な状態にして石材面とパッドが密着するようにセットする。もう一方のチャンネル（シリンダ出力側）は、油圧、空気圧ユニット一次圧力を調整して、シリンダ出力をコントロールして、把持力を得る方式にしている。つまり、ユニットの一次圧



図 8.1 門型治具の上部の梁（6ヶ所）に付けられた把持力等の評価に用いられる歪センサー

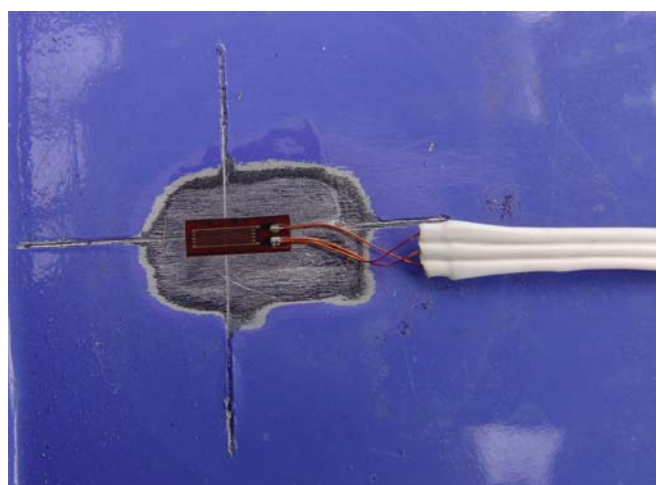


図 8.2 治具に設置した歪センサー（拡大）

とシリンダ出力の関係式を正確に求めておく必要があり、これにもとづいて、一次圧の調整をおこなった。また、吊り上げの条件設定のため、予備実験として、天井石の吊り上げ試験時の油圧ユニットの設定圧（一次圧）を6 Mpa からゆっくり低下させ、最低把持圧を決定して摩擦係数を求めた。図9および表1には摩擦係数計算パラメータに関するデータを示している（摩擦係数を実測するために使用した石材と第二実験場に用いている石材は同質であるが大きさ、重量は異なる）。実験の方法、結果等については2006年3月2日の実験視察の際に報告した（図10）。

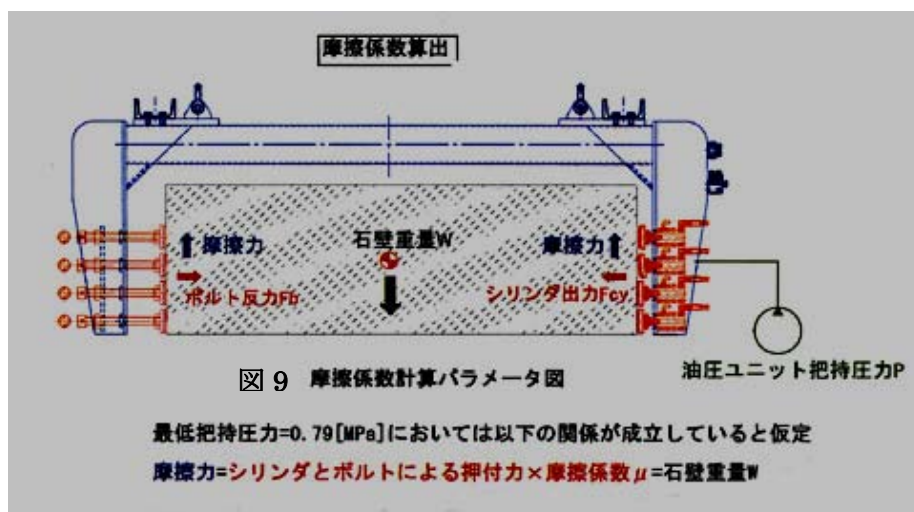
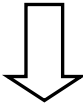


表4. 摩擦係数算出表

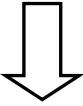
Parameter	unit	Value	算出方法
実験天井石重量 W	kgf	1940	ロードセルによる測定
油圧ユニット圧力 P	MPa	0.79	圧力計による実測
シリンダ出力 F_{cy}	kgf	98.42	$F_{cy}=124.58 \times$ シリンダ1本当
ボルト反力 F_b	kgf	98.42	$F_b=F_{cy}$
シリンダ本数		8	
ボルト本数		8	
押付力 F_{min}	kgf	1574.69	$F_{min}=(F_{cy} \times \text{シリンダ本数}) + (F_b \times \text{ボルト本数})$
摩擦係数 μ		0.81	$\mu = F_p/W$ (摩擦係数と石材重量が平衡であると仮定)

摩擦係数 $\mu = 0.81$ を前提に導出した第二実験場の北天井石の吊り上げ条件

石材の重量 (w) : 2900kgf, 比重 2.14, 含水比 (水分率) : 20%と仮定する
摩擦係数は実験値より得られた $\mu = 0.81$ より算出
最低押し付け力 F_{min} : 2349kbf ($F_{min} = W \times \mu$)



実際の吊り上げには約 3.8 倍の安全率を考慮して, 押し付け力 $F_p = 9000$ とした



把持面圧 (Ph) は, 7.5kgf/cm² となり、石材の強度よりはるかに小さな力で把持できるの、安全に吊り上げられる

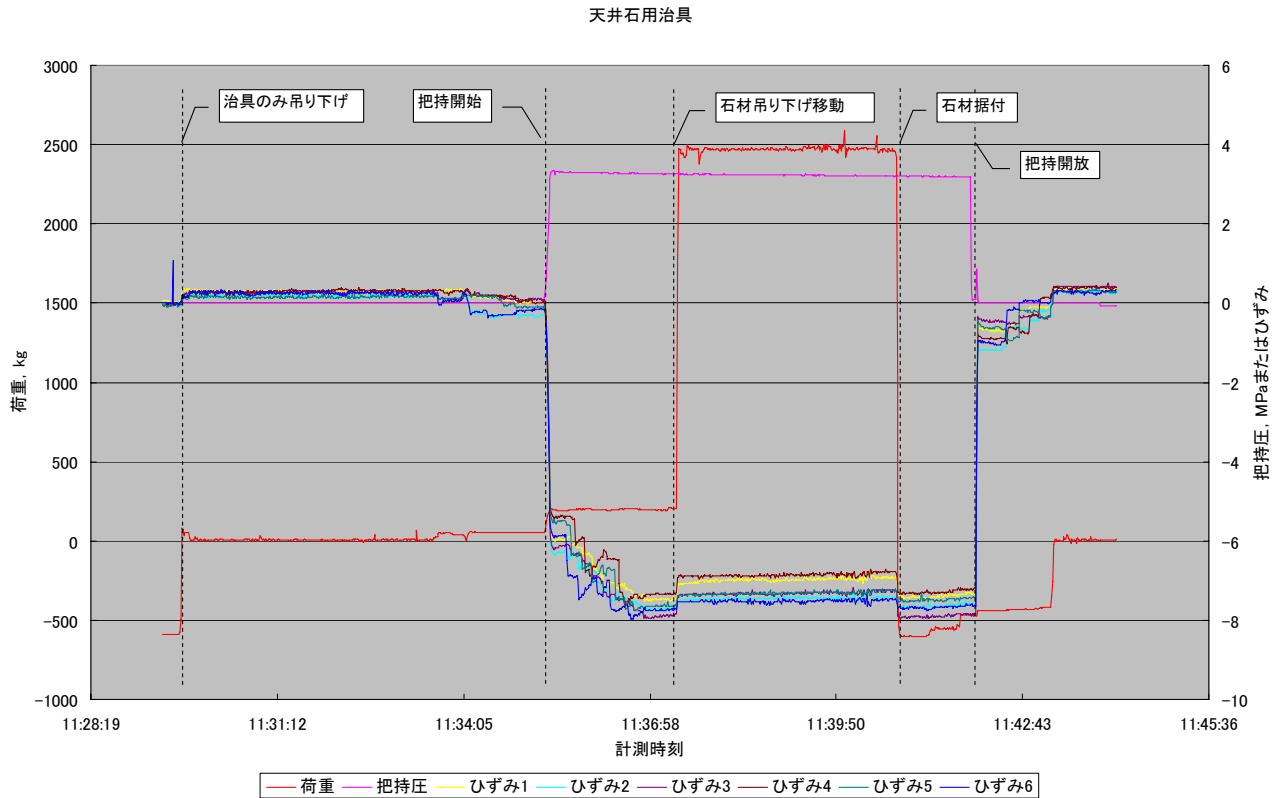
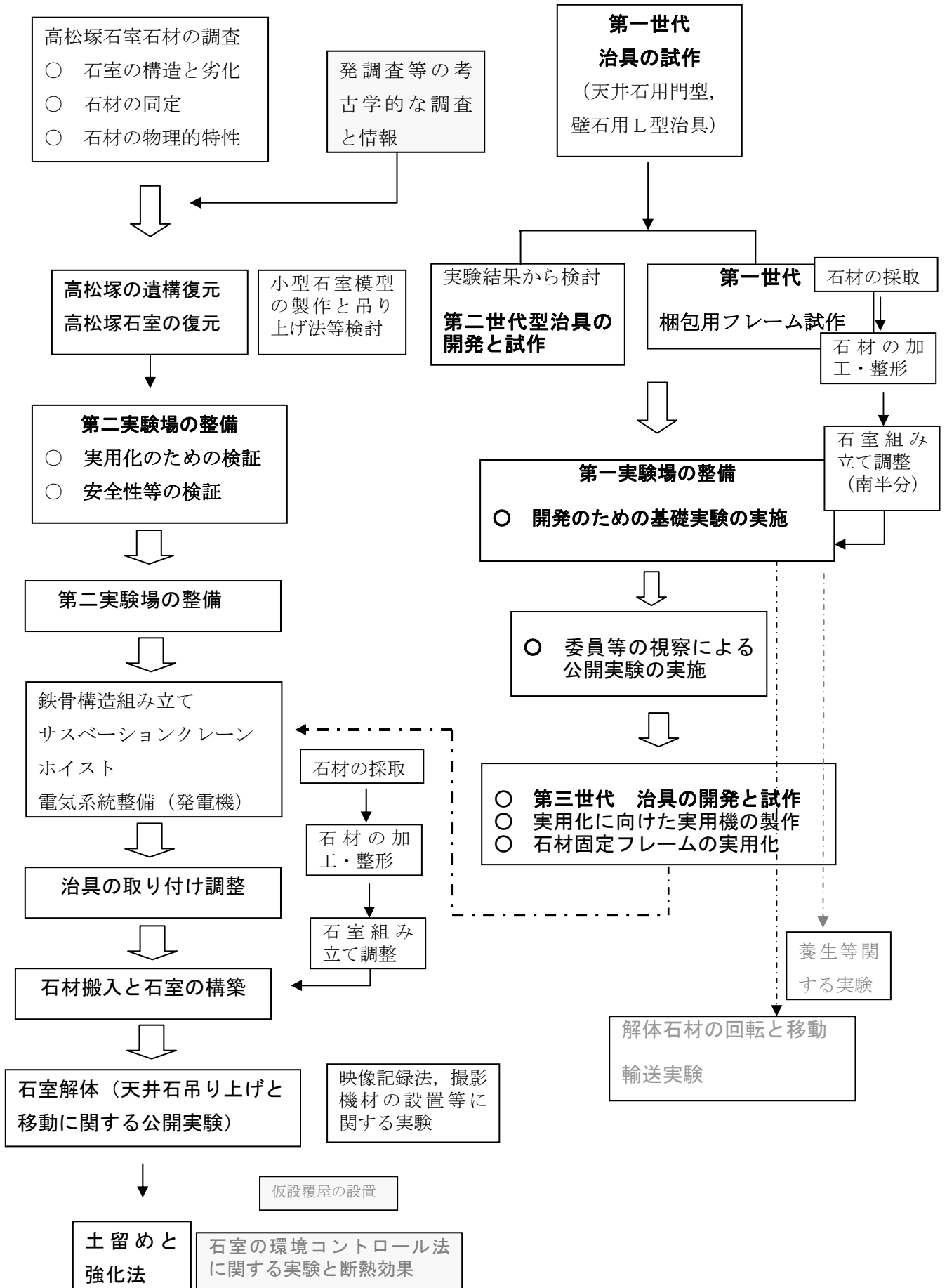


図 10. 歪センサーを取り付けた石材の挙動 (把持開始から終了まで)

第一，第二実験場における実験および作業内容フローチャート



Ⅱ.現状報告と実験予定

高松塚古墳石室解体に係る実験場の整備と治具の開発など

(1) 石室解体に係る環境制御のための内部覆屋整備状況（図 12）

実験場においては、クレーンやホイストなど石室解体に用いる機材が設置され、実物大石室が設置された後、天井石の吊り上げ等に係る実験が実施された。その後、高松塚古墳石室の発掘時において、天井石などが露出された状態になることを想定して、環境制御のための内部覆屋の設置等に関する実験のため、準備に着手した。

まず、クレーンをとりつける鉄骨支柱の外周部に作業用の単管による構造物をつくり、搬出場所にクレーン車を設置して、内部覆屋建設のための鋼材を組み立てた。鉄骨による骨組が完成した後、内部断熱材を鉄骨内側に取り付けるため、木枠を全面に設置した。

断熱材は断熱効果を高め結露を防止するため、押出法ポリスチレンフォーム 10cm 厚さを全面に取り付け、さらにその上に合板を設置した。外部は、雨風をさけるため、トタン波板による仕上げをおこなっている。なお、天井4ヶ所、東西側には合計6ヶ所の窓を設置して、採光している。なお、断熱効果を高めるため、屋根と天井の間には空間を設けている。



図 12. 環境制御のための内部覆屋の実験に向けた準備過程の写真

(2) 石室解体に係る石材の吊り上げ機材の開発、整備状況等

- ① 石材吊り上げおよび移動用サスペンションクレーン、ホイスト 2 基は完了。
- ② 天井石吊り上げ治具第三世代型 1 基（ほぼ完了） ただし、天井石の複雑な亀裂・断裂に対応できる補助装置については開発中（石室内石材劣化状態に関する再調査を実施した上で試作する必要がある）（図 13.1）
- ③ 東西壁石吊り上げ第二世代型治具 1 基（ほぼ完了）。 ただし、より安全性や作業性を向上させるための軽量化等の開発が必要（第三世代型は開発中）。また、壁石と底石の隙間に挿入する下部サポート挿入装置についても開発中（図 13.2）
- ④ 南北壁石吊り上げ治具第二世代型 1 基（試作完了）。南壁石（閉塞石）については、室内実験において安全性の確認をおこなっている。 ただし、北壁石については、寸法形状等は不明で、推定の域をでるものではなく、北壁の吊り上げについては、南壁石用治具が適用できるか、発掘中に検討を予定。南北の壁石がほぼ同じ寸法と形状であれば、まったく問題はないが、大きく異なる場合は、専用装置を開発する必要がある。（図 13.3）
- ⑤ 梱包用特殊フレームについては実験をとおして開発をおこなった。現在、天井石および、壁石各 1 基の試作を完了。ただし、実際の石材の寸法が不詳なので、発掘調査後に判明する形状と寸法にあわせて製作する必要も考慮しておく必要がある。
- ⑥ 輸送用特殊車両の開発については、やや遅れているが、7 月末頃には試作車が完成する予定。車両に取り付けられる各種データ収集装置（データロガー、温湿度計、変位計、加速度計、GPS 等を予定）については、車両本体と石材の相対比較を目的としたものである。
- ⑦ 保存修理施設に設置する台車の開発（設計計画段階）。 ただし、石材の寸法が判明した時点でフレームの実用化製作と同時進行で製作する必要があるため、今後の検討が必要。台車構造の基本設計は必要となる

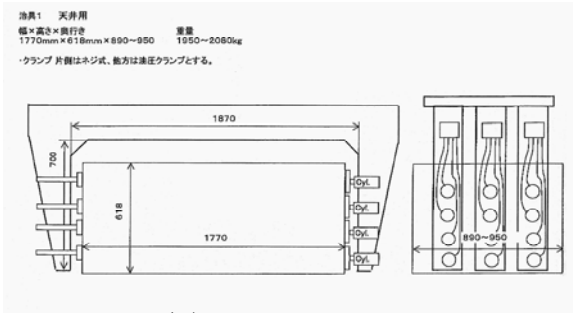


図 13.1

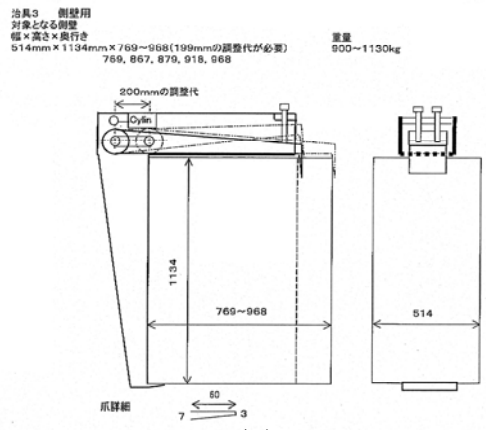


図 13.2

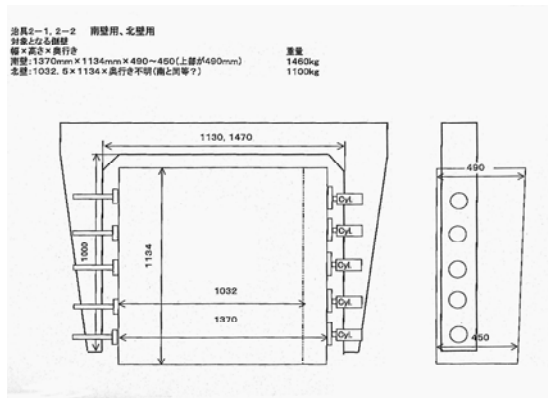


図 13.3



左から第一世代から第三世代型天井石吊り上げ用治具（試作から実用化へ）

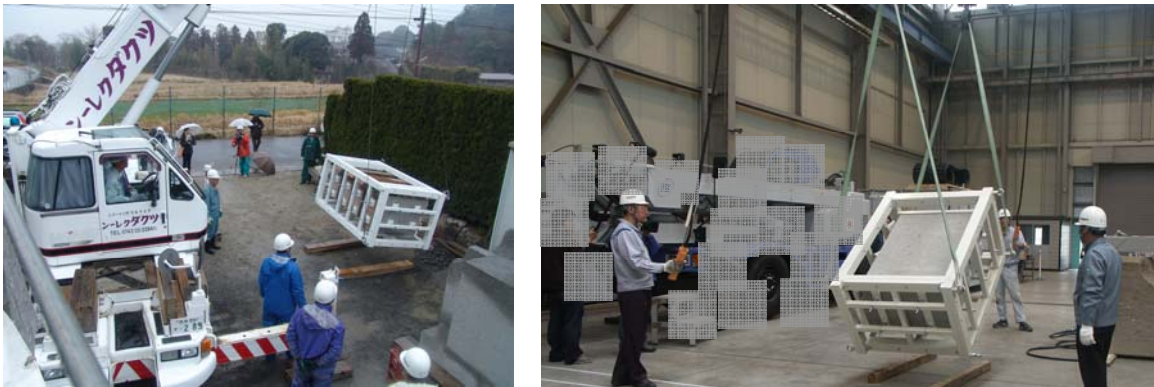


図 13.4 特殊梱包用フレームの開発と試作（左は天井壁石、右は東西壁石用）

(3) 石室解体に係る調査と実験予定（案）

- ① 高松塚古墳石室内部の石材劣化損傷状態に関する調査を実施して、天井石等の石材吊り上げ補助装置の開発等、安全性向上のための開発研究をおこなう予定。
- ② 第二実験場において、東西壁石・南北壁石・天井石の解体に関する実験と、それに伴う力学的データなどの収集をおこない、より安全性の向上を目指す。これらのデータを基本として、天井石用治具の補助強化装置の開発、東西壁石の吊り上げ用治具の小型軽量化とサポート装置の開発を予定する。なお、実験にあたっては、数回の公開実験を予定。
- ③ 第二実験場において、取り上げた石材を特殊梱包用フレームに固定して回転・積み込みに関する実験を予定する。公開実験にあたっては、現在開発が進められている特殊輸送車両が完成してからである。
- ④ 特殊輸送車両が完成後、各種センサーを設置して走行実験をおこなう。この実験では、石材を積み込んだ状態で、高松塚古墳から保存修理施設までの実際の経路に従って実験走行を予定している。
- ⑤ 第二実験場において、環境制御機器を設置して環境調整と環境測定に関する実験を予定する。
- ⑥ 石室の解体作業前に実施が予定されている、石材間にオーバーラップしていたり、剥落の危険が予想される部分の漆喰について、切り取り箇所等の分布図の作成を予定する。
- ⑦ 第一実験場において、石室石材に漆喰を塗布して、実際の分布図に照合して壁石漆喰の切断、転写法に関する実験を予定する。