

トピックス TOPICS

高松塚古墳石室解体用吊上げ治具の開発

山本 耕治・坂井 敬通・小阪 孝幸

1972年3月高松塚古墳壁画が発見されて以来、今日に至るまで石室壁画の劣化を防ぐために、さまざまな対策がなされてきたにもかかわらず、壁画の劣化を止めることはできなかった。国宝高松塚古墳壁画恒久保存対策検討会で検討が重ねられ、2005年6月、ついに壁画保存修復のために石室の解体が選択された。2007年4月5日に最北側の天井石4の解体(写真-1)から始まり、2007年8月21日に最後の4枚の床石まで、壁画は元より、壁石をも全く損傷させることなく、高松塚古墳石室の解体は無事完了した。本報告では、石室解体用にどんな治具を開発し、どのように解体に活用したかについて解説する。

キーワード：高松塚古墳、国宝、壁画、治具、解体

④壁石が1300年の経年変化により脆くなっており、その強度は明確でないこと。また、切り出して強度確認はできないこと。

⑤石室は、解体直前まで埋もれており、詳細寸法が全くわからないこと。

写真-2：最北側の天井石4。

写真-3：最北側の天井石4の解体後。北壁石の上面だけが見えている。

⑥自然環境保護のため、作業領域は最小限に狭く、治具の大きさに制限があること。ちなみに、古墳石室

1. はじめに

2005年6月高松塚古墳石室の解体協力依頼の第一報がはいってきた。古墳のことなど何も知らない筆者らにとって、初めは何のことやらさっぱりわからなかった。依頼元である奈良文化財研究所、並びに飛鳥建設の適切な指導をいただきながら説明を聞いているうちに、この解体が大変な難作業であることが見えてきた。

- ①壁画が国宝であり、損傷は許されないこと。
- ②壁画面に一切触れてはいけないこと。
- ③壁石も傷つけてはいけないこと。そのため、下面が使えないこと。



写真-1 最北側の天井石4の解体 (1128 kgf, 162 × 103 × 46 cm)



写真-2 最北側の天井石4の解体前日



写真-3 最北側の天井石4の解体後

解体作業領域（写真—1）は、3.8 m × 4.8 m である。その内石室は 1.8 m × 3.8 m ある。

このような未知と多くの制限の中、壁石の吊上げ治具の開発を 2006 年 4 月より開始した。

2. 吊上げ治具の検討

石室の構造と依頼元からの条件により、治具タイプを大きく分けてⅡ型とⅠ型の 2 種類とした。

天井石、北壁石、南壁石などは、図—1 の A—A 面を把持して吊上げることができるのでⅡ型治具で対応することにした。整列している東西側壁は、側面を把持できないため、2 箇所 の B 部を押付けて吊上げるⅠ型治具で対応することにした。

(1) Ⅱ型治具

(a) 把持力による変形

壁石を把持したときの把持部の広がり変形が大きいと、壁石を吊下ろしたとき、変形が戻り、パットが壁石を擦り、傷つける恐れがある。そのため、把持部の広がりをできる限り小さく、3 mm 以下とした。同時に、パット部に自由度を持たせた（図—1）。

(b) すべり安全率 (S_f) と圧縮強度安全率 (S_p)

Ⅱ型治具は、壁石を挟んで吊上げるとき、パット把持力 (F_f) が小さいと、壁石 (W) は落下する。また、壁石の推定圧縮強度 (P_s) は、5 MPa 程度と低く、落下させないように把持力を上げすぎると壁石自身を破壊させてしまう。そこで、凝灰岩の実寸大の壁石で実験を繰り返し行い、初めに、落下しない限界摩擦力 (F_l) を求め、摩擦係数 (μ) を算定した。実際の壁石を吊上げて確認ができないので、安全性を考え、把持力は限界摩擦力 (F_l) の 4 倍以上とるようにした。また、そのときの把持力による壁石の面圧強度が壁石推定圧縮強度 (P_s) の 1/4 以下になるように、壁石を押付けるパットの面積 (A_p) とパット数 (N) を求めて治具設計した。

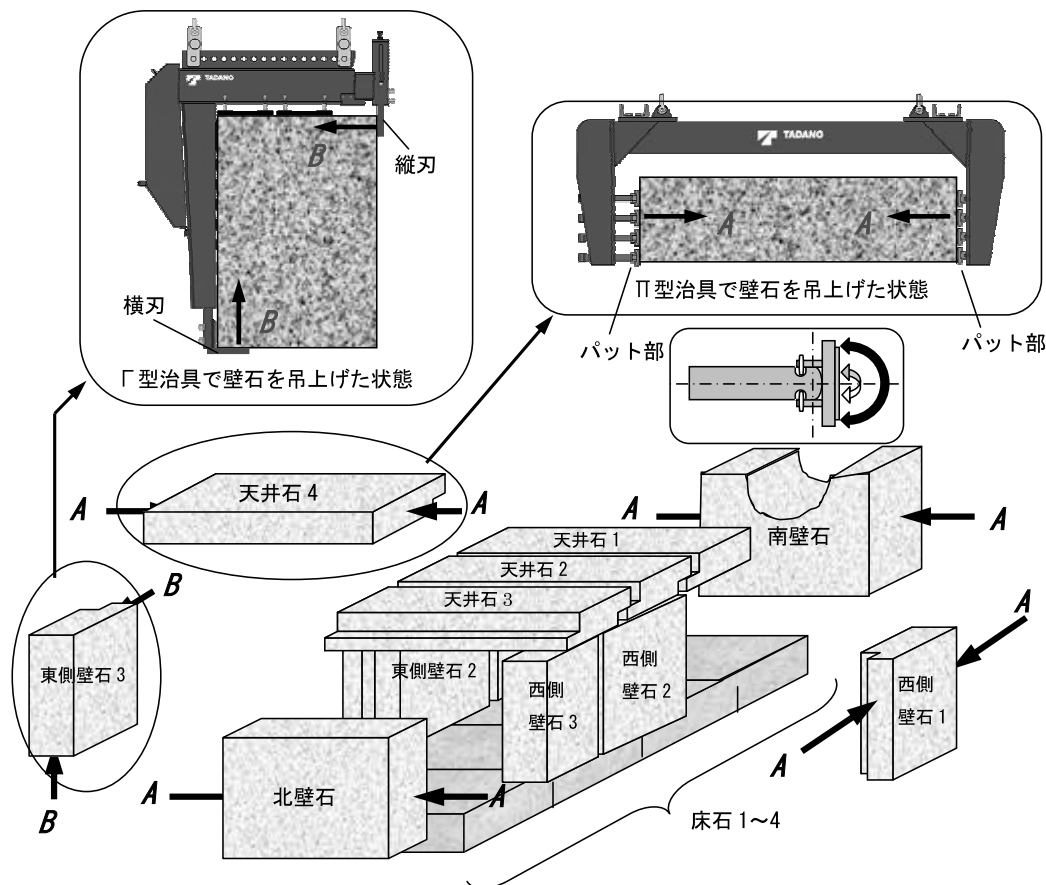
$$\mu = W/F_l \text{-----} \textcircled{1}$$

$$S_f = F_f \times N/F_l \text{-----} \textcircled{2}$$

$$S_p = (F_f/A_p)/P_s \text{-----} \textcircled{3}$$

(2) Ⅰ型治具

縦刃には、壁石の僅かなモーメント力しかかからないが、横刃には壁石の全重量がかかる。ここでも、Ⅱ型治具同様に、圧縮強度安全率を 1/4 以下になるよう



図—1 石室の壁石名称と治具で押付けられる面

に、横刃の面積を決定した。ただし、刃は側壁と床石の隙間に挿入することが前提であるため、厚くできない。そのため、刃幅を広くし、面積を大きくすることで強度を確保した。

3. 治具の開発

当初、石室の解体は、発掘を全て完了してから実施する計画で、発掘後、壁石の状態や寸法などの情報が十分得られる予定であったので、治具開発は解体前には万全の体制がとれると考えていた。しかし、発掘初期段階になり、地震の影響で石室が倒壊する恐れがあるとの判断により、1壁石ごとに発掘と解体を並行することになった。そのため、事前に寸法など壁石の正確な情報が全く得られないままに治具（表—1、2）を開発せざるを得なかった。解体期間中は、予想以上に壁石の寸法の違いや新たな亀裂などが見付き、壁石は1つとして同じものではなく、治具の改良・改造の連続であった。しかし、形状、寸法の違いに何とか対応できたのは、治具に融通性を持たせてあったことが大きかったと考える。特に、単独でも組合せでも使用できるようにしていたことが好奏した（写真—4～6）。ただ、開発、製作までしながら活用できずに表に載せられなかった治具もあったことは、開発者として残念であった。

4. 解析

どの治具も壁石を固定したとき、変形をできる限り小さくするため剛性の高い構造を心掛けた。図—2、図—3は、FEM解析結果である。II型治具、Γ型治具共に、強度は全く問題なく、壁石を吊上げたときの

表—1 II型治具

吊り具名称	把持方法*	適用幅	適用高さ
天井石用	C - B	1760 ~ 1850	400
	B - B	1500 ~ 1800	400
	TB - TB	1420 ~ 1720	400
(補助具)	B - B	900 ~ 1080	540
南壁石用	C - B	1360 ~ 1450	930
北壁石用	C - B	1480 ~ 1570	930

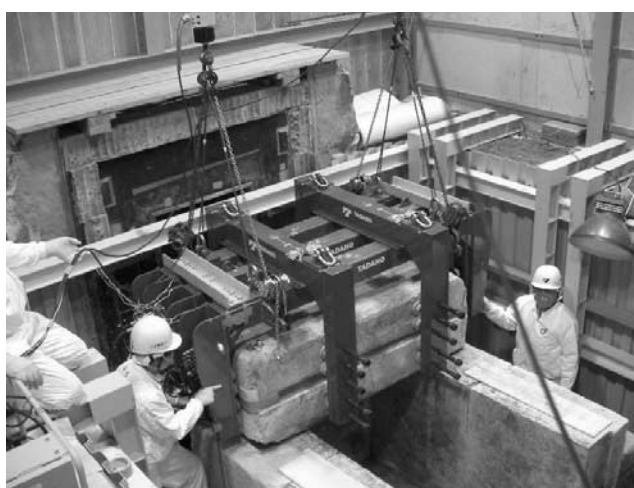
※C：シリンダー，B：ボルト，TB：ツインボルト
ツインボルトは、1連のII型治具にボルトが2列配置

表—2 Γ型治具

吊り具名称	適用幅	適用高さ
側壁用 Ver.2	805 ~ 1055	1175 ~ 1205



写真—4 II型治具南壁石用使用 南壁石 (835 kgf, 118 × 137 × 54 cm)



写真—5 天井石用と補助具との組合せ 天井石 1 (1400 kgf, 180 × 98 × 61 cm)



写真—6 Γ型治具使用 東側壁石 3 (685 kgf, 116 × 89 × 42 cm)

変形は3mm以内に押さえられた。実験でもよくその結果は一致した。またこの解析より、壁石の状態を確認するために、壁石の荷重に比例して歪の変化が計測できる歪センサーの適正な位置を求めた。

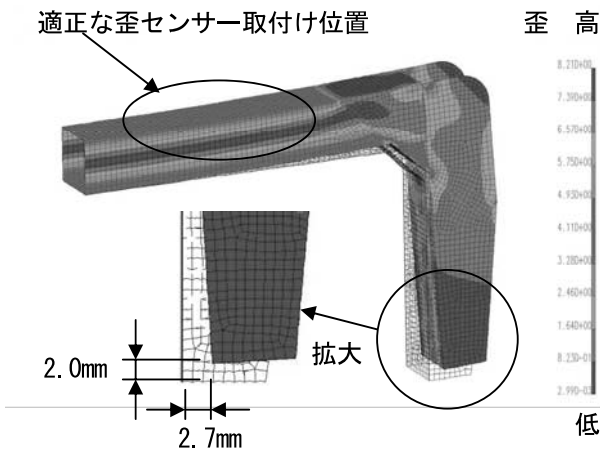


図-2 II型治具のFEM解析結果

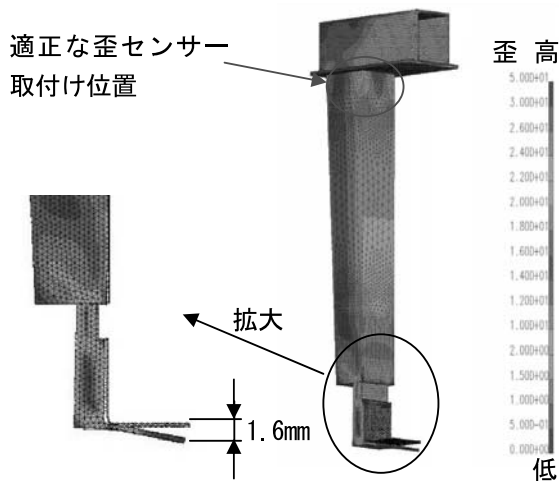


図-3 Γ型治具のFEM解析結果

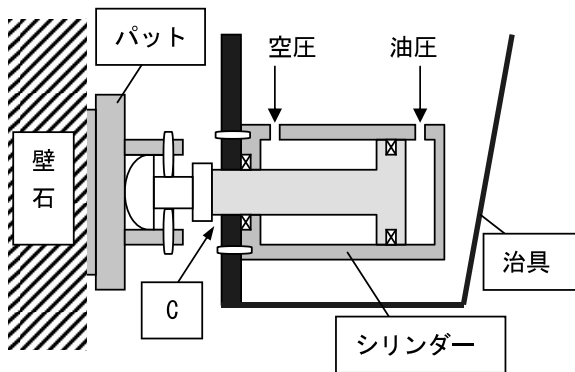


図-4 II型治具パット&シリンダー

5. 油圧システム

II型治具は壁石を把持する動力源として、Γ型治具は縦刃で壁石を押し付ける動力源として油圧を活用することにした。ただし、作動油が万が一にも壁石にかからないようにする必要がある。そのため、圧力は5 MPa以下と低圧にし、油漏れが考えられる部分は、

完全密封した。しかし、II型治具の場合、図-4のC部分から、シリンダーの構造上油漏れが僅かに発生する恐れがあったため、把持の動力源は油圧としたが、把持解除の動力源は空圧にすることにした。また、常に壁石を解体するたびに作動時の漏れ確認を徹底した。全ての解体が完了するまで、一度も油漏れはなかった。

6. 計測

各壁石の吊上げから吊下ろしまでの作業工程において、壁石が正常に吊られているか、亀裂進展はないか、異常に壁石に負荷はかかっていないかなど壁石の状態をリアルタイムに測定監視した(図-5)。

(1) 圧力センサー

油圧システムから油圧シリンダーで壁石を徐々に把

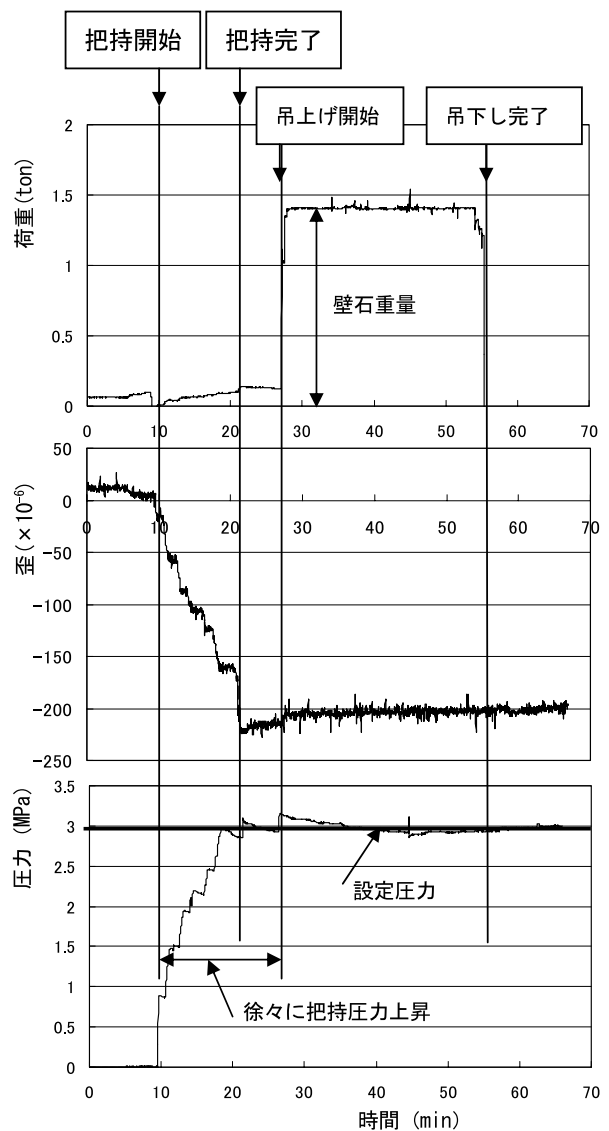


図-5 天井石1の計測結果

持していきながら、目視で壁石の異常確認をした。もし、把持で破壊された場合、圧力が下がっていく。設定圧力まで、壁石を把持したが、全く圧力に異常はなかった。吊上げた瞬間、吊り具のワイヤーの影響で圧力が若干上昇しているが、すぐに設定圧力に戻って、正常に壁石が吊上げ・吊下しができた。

(2) 歪センサー

治具の歪変化により、治具が壁石に正常に固定したことの確認および、壁石を吊上げ・吊下ろしたときの壁石の異常変化を確認する。歪は、圧力と比例関係にあることがわかる。また、吊上がったときの歪は、予測どおりの値であった。

(3) ロードセルセンサー

壁石の重量を計測し、壁石の把持力の変更や壁石を吊上げ・吊下ろしたときの壁石重量の異常変化を確認する。吊上げ開始から吊下し完了まで、全く問題なかった。また、吊上げて初めて、予想より壁石が軽いことがわかった。比重を凝灰岩の含水も考慮して2.25と予測していたが、約1.6であった。壁石が予想より軽かったことで、すべりや圧縮強度をより安全に取ることができた。

(4) 圧力感知紙

壁石を把持したとき、壁石に対するパットの当たりの程度を確認する(写真-7)。約60%以上確実に当たっていることを圧力感知紙により確認できた。このことから、パットがきれいに壁石にそって固定されていることや、パットに使用したウレタンゴムの弾性効果が適正であることが証明された。



写真-7 所定圧力時の感圧状態



写真-8 玄武

7. おわりに

高松塚古墳解体は無事完了した。初めは治具の開発だけの予定が、いつの間にか解体班のメンバーになり、治具の取付け、解体時の計測などを担当していた。その中で奈良文化財研究所、並びに飛鳥建設の適切な指導をいただきながら、我々の役目を果たせ、壁画・壁石を損傷することなく完遂できたことは、本当によかったと実感している。また、建設機械とは全く違う世界での経験は、全てが新鮮で本当に勉強になった。また、高松塚古墳の解体を通じて次のような技術が残せた。

- ①すべり安全率、圧縮強度安全率の決定
- ②Π型治具、Γ型治具の開発
- ③石室を安全に解体するための計測の確立

最後に、筆者が解体前に亀裂状態を確認するために古墳の中に入ったとき印象深かった、北壁に描かれている玄武を写真-8に示す。 JICMA

【筆者紹介】



山本 耕治 (やまもと こうじ)
 (株)タダノ
 技術研究所 企画調査ユニットマネージャー
 博士 (工学)



坂井 敬通 (さかい たかみち)
 (株)タダノ
 技術研究所 企画調査ユニットチームリーダー



小阪 孝幸 (こさか たかゆき)
 (株)タダノ
 開発企画部 企画管理ユニット 主任