

資料 3-4

古墳壁画の保存活用に関する検討会（第 11 回）

H 2 5 . 3 . 2 7

キトラ古墳

墳丘埋戻し時の天井石の力学的安定性に関する検討

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

三村 衛

1. 概要	1
2. 検討モデル	1
3. 凝灰角礫岩の特性	3
3.1. 物理特性.....	3
3.2. 力学特性.....	3
4. 荷重条件	4
4.1. 土圧	4
4.2. 天井石ブロックの相互作用力.....	4
5. 安定性検討	6
5.1. 検討方法.....	6
5.2. 天井石 1 第 1 ブロック (C1-1)	7
5.3. 天井石 1 第 2 ブロック (C1-2)	8
5.4. 天井石 2 第 1 ブロック (C2-1)	9
5.5. 天井石 2 第 2 ブロック (C2-2)	10
5.6. 天井石 2 第 3 ブロック (C2-3)	11
6. 結論	12
参考文献	12

1. 概要

墳丘の埋戻し後の天井石の力学的安定性を検討した結果についてまとめる。墳丘の埋戻しに伴い、上載荷重が天井石に作用した際、発生する危険性が高いと予想される石室の破壊形態は、亀裂によって分割された天井石が石室内側へ転倒する場合である。したがって、本検討では、石室の破壊形態のうち、天井石の転倒に関する安定性を検討した。

2. 検討モデル

天井石は、計 4 石からなるが、このうち力学的安定性に影響を及ぼすと考えられる亀裂がみられるのは、石室南側の 2 石（天井石 1、天井石 2）であるため、これらを対象に検討モデルを設定した。天井石 2 石と、これらを支持する壁石および閉塞石の主な寸法を表-1 に示す。部材寸法は、対称に設置された部材であっても計測値には若干の差があり、また墳丘に覆われているために計測できない部材もある。そのため、本検討では、天井石を矩形とした単純化したモデルを用いることとした。ただし、計測値を極力反映するよう、たとえば天井石の二つの短辺の寸法の平均値を両短辺の寸法とするなどして、モデルの寸法を設定した。モデルは、図-1 に示すように、石室内部および南側から天井石を撮影した写真（写真-1、写真-2）にみられる亀裂にそって、天井石 1 については 2 分割(C1-1, C1-2)、天井石 2 については 3 分割(C2-1, C2-2, C2-3)した計 5 つのブロックに分割した。亀裂の位置と長さは、写真と部材寸法の計測値に基づいて決定し、すべての亀裂は天井石の水平面に対して、鉛直方向に生じていると仮定した。

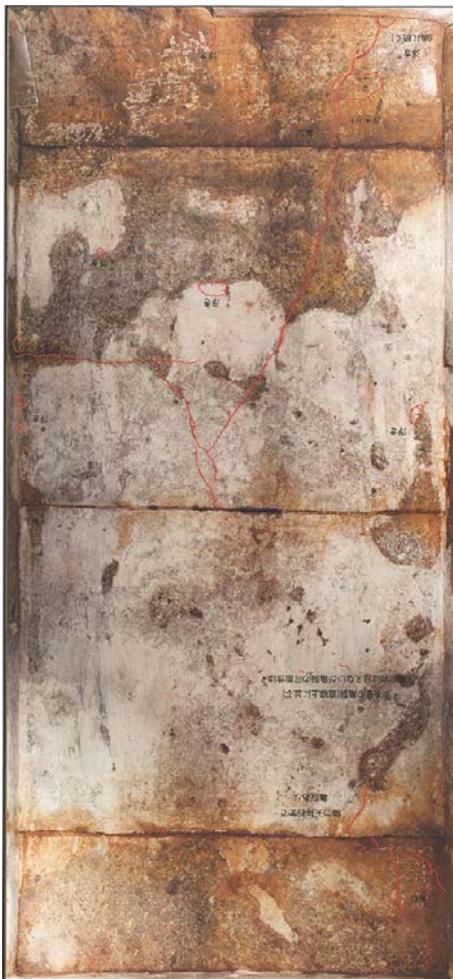
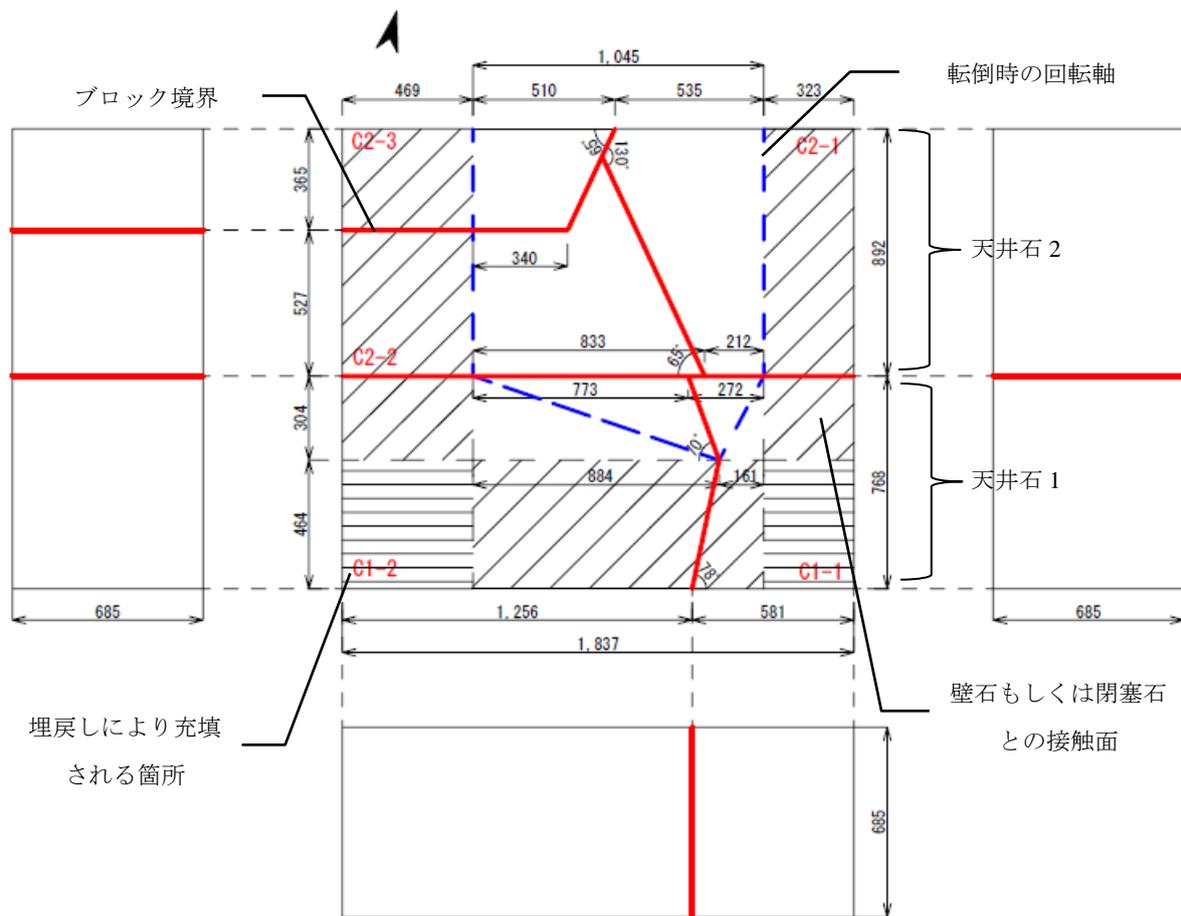


写真-1 (左) 天井石下面 (写真上部が天井石 1)

写真-2 (右) 天井石の南側側面

表-1 検討モデルの寸法値¹⁾

部材 (○: 検討モデルの寸法に使用)		寸法 (mm)	計算方法 (空欄の場合は実測)	
天井石1	○ 1	長辺	1837	
		2 内法長辺 (北)	1042	
		3 内法長辺 (南)	1054	
	○ 4	内法長辺平均	1045	2, 3, 11, 12の平均
	○ 5	短辺	768	
		6 内法短辺 (東)	308	
		7 内法短辺 (西)	299	
	○ 8	内法短辺平均	304	6, 7の平均
	○ 9	厚さ	685	
天井石2	○ 10	長辺	1837	1と同一とする
		11 内法長辺 (北)	1041	
		12 内法長辺 (南)	1042	
	○ 13	内法長辺平均	1045	2, 3, 11, 12の平均
	○ 14	短辺	892	17と同一とする
		15 内法短辺 (東)	894	
		16 内法短辺 (西)	890	
	○ 17	内法短辺平均	892	15, 16の平均
西側壁石1	○ 18	厚さ	685	9と同一とする
西側壁石2	○ 19	厚さ	469	
東側壁石1	○ 20	厚さ	469	19と同一とする
東側壁石1	○ 21	厚さ	323	1から4と19を差し引く
東側壁石2	○ 22	厚さ	323	22と同一とする
閉塞石		23 短辺	1054	
		24 内法短辺 (上)	1054	
		25 内法短辺 (下)	1042	
	○ 26	短辺・内法短辺	1045	4と同一とする
		27 厚さ	495	
	○ 28	厚さ (天井石接触部)	464	5から8を差し引く



(単位 : mm)

図-1 検討モデル

3. 凝灰角礫岩の特性

3.1. 物理特性

天井石の石材と類似すると予想される二上山で採取された凝灰角礫岩の基本的な物理特性を表-2 に示す。天井石の自重を算定する際に必要となる石材の密度は、石材の含水状態によって変化するが、本検討では、自然状態での密度を用いることとした。

表-2 凝灰角礫岩の物理特性²⁾

自然密度 (g/cm ³)	1.303	含水比 (%)	2.315
表乾密度 (g/cm ³)	1.595	吸水率 (%)	25.2
絶乾密度 (g/cm ³)	1.274	有効間隙率 (%)	32.1
飽和度 (%)	9.2		

3.2. 力学特性

天井石の亀裂面に作用する摩擦力を推定するため、前述の凝灰角礫岩を対象に実施された一面せん断試験を参照した²⁾。一面せん断試験は、円盤状に成形された2枚の石材を重ね合わせた供試体を、垂直応力を作用させた状態で、一定速度でせん断したときにせん断面に生じる応力を測定するものである。数

種類の垂直応力について試験を実施し、垂直応力とせん断応力の関係を整理したものを図-2 に示す。天井石の亀裂面に作用する垂直力がわかれば、この関係を用いることにより、亀裂面に生じる最大の摩擦力を推定できる。ただし、本検討では、粘着力 c (垂直応力がゼロのときに発揮されるせん断応力に相当) は期待せず、垂直力と摩擦係数 $\mu=0.767(=\tan 37.5^\circ)$ の積で最大摩擦力を評価することとした。

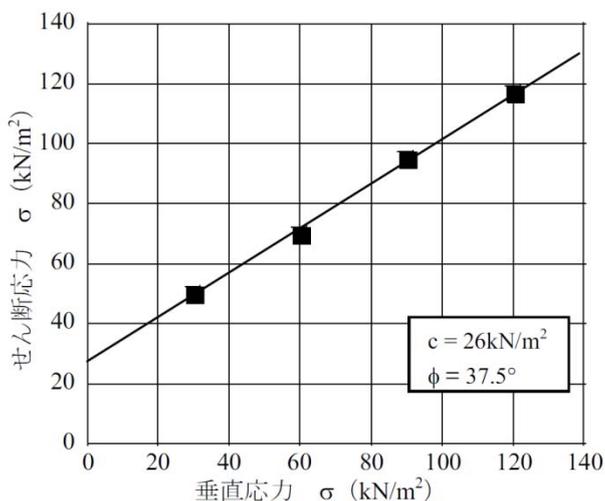


図-2 凝灰角礫岩亀裂面の力学特性²⁾

4. 荷重条件

4.1. 土圧

土に接する構造物は、境界面において土から圧力（土圧）を受ける。天井石は、墳丘に接する上面と側面に土圧を受けている。上面の土圧（上載圧）は、墳丘土の密度と墳丘の層厚（土被り）の積で算定できる。墳丘土の湿潤密度 γ_t は、類似した地盤材料を用いて築造されたと考えられる高松塚古墳の版築土を参照し、 $\gamma_t=16.43\text{kN/m}^3$ とした²⁾。また、土被りは、実際には 2.5m 程度と考えられるが、1m 厚く見積もった¹⁾。一方、側面の土圧については、水平方向に作用する土圧は鉛直方向の半分（静止土圧係数 0.5）と仮定して算定した。以下に算定式を示す。

上載圧

$$16.43 \times 3.5 = 57.51 \text{ kN/m}^2$$

側面土圧（天井石側面中央高さで算定）

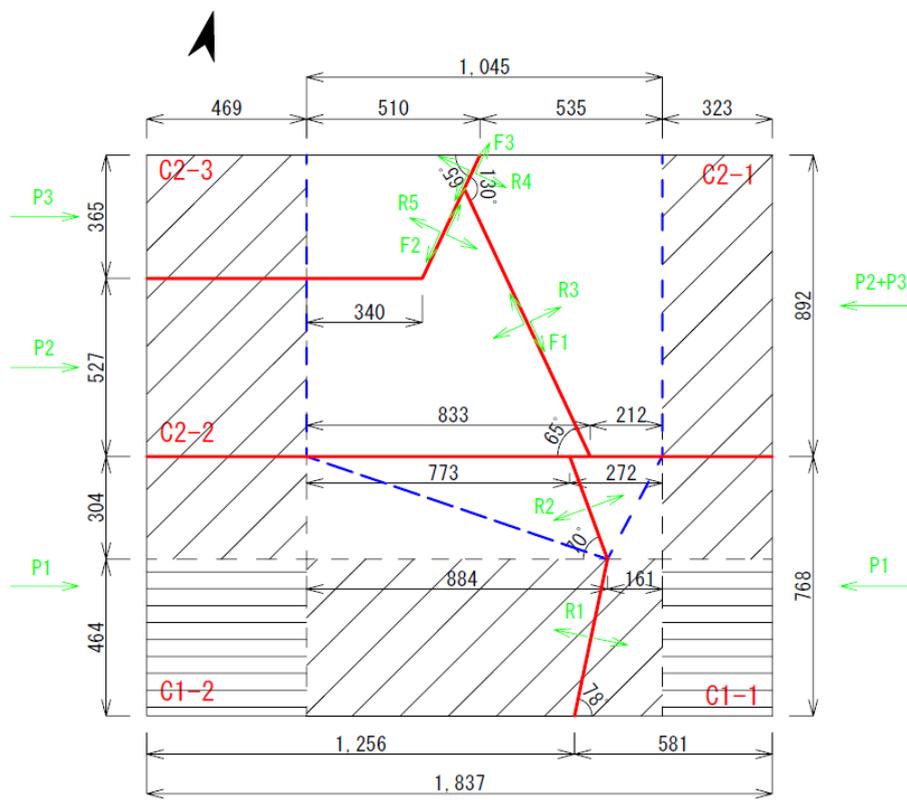
$$16.43 \times \left(3.5 + \frac{0.685}{2}\right) \times 0.5 = 31.57 \text{ kN/m}^2$$

4.2. 天井石ブロックの相互作用力

天井石ブロックの転倒に関する安定性を検討する際、自重と土圧に加えて、ブロック境界にはたらく相互作用力を把握する必要がある。相互作用力は、天井石上下面に対して水平な成分と鉛直な成分に分けられる。鉛直成分は、ブロックが石室内へ転倒しようとするときに、これを食い止める摩擦力である。ここでは、ブロックの水平面上の力のつり合いから水平成分を算定する。

水平成分をさらに境界面に対して垂直な成分（R1～R5）と平行な成分（F1～F3）に分けたものを図-3 に示す。天井石間には隙間があるため、天井石間や天井石の長辺に平行な亀裂面には相互作用力がはた

らかないものとした。また、平行成分は、ブロックの水平面上のすべりに抵抗する摩擦力であるため、すべりが生じないと考えられる天井石 1 の 2 つのブロックの境界では、平行成分は生じないものとした。天井石側面が受ける土圧による荷重については、ブロック境界に生じる相互作用力とのつりあいを考えるため、短辺に作用するものだけを考慮した (P1~P3)。埋戻し後に天井石 1 の南側の長辺は墳丘に接するため、土圧による荷重を受けるが、接触していない天井石 2 からは反力を受けないため、天井石と壁石・閉塞石との間にはたらく付着力や摩擦力とつりあうと考えられる。



(単位 : mm)

図-3 天井石ブロックの相互作用力

以下に示す各ブロックの水平面上の力のつり合い式を解いて算定した各成分力を表-3 に示す。

天井石 1 第 1 ブロック (C1-1) ・天井石 1 第 2 ブロック (C1-2)

$$P1 = R1 \sin 78^\circ + R2 \sin 70^\circ$$

$$R1 \cos 78^\circ = R2 \cos 70^\circ$$

天井石 2 第 1 ブロック (C2-1)

$$P2 + P3 = (R3 + R4) \sin 65^\circ + (F1 + F3) \cos 65^\circ$$

$$(R3 - R4) \cos 65^\circ = (F1 - F3) \sin 65^\circ$$

天井石 2 第 2 ブロック (C2-2)

$$P2 = (R3 - R5) \sin 65^\circ + (F1 - F2) \cos 65^\circ$$

$$(R3 + R5) \cos 65^\circ = (F1 + F2) \sin 65^\circ$$

天井石 2 第 3 ブロック (C2-3)

$$P3 = (R4 + R5) \sin 65^\circ + (F2 + F3) \cos 65^\circ$$

$$(R4 + R5) \cos 65^\circ = (F2 + F3) \sin 65^\circ$$

$$R4/R5 = F3/F2 = 110/293 \text{ (荷重の作用面積の比)}$$

表-3 天井石ブロックに作用する荷重 (単位: kN/m²)

土圧による荷重	P1	16.61	ブロック境界の 相互作用力 (垂直成分)	R1	10.72
	P2	11.40		R2	6.52
	P3	7.89		R3	15.53
ブロック境界の 相互作用力 (平行成分)	F1	7.24		R4	1.95
	F2	2.43		R5	5.20
	F3	0.91			

5. 安定性検討

5.1. 検討方法

天井石ブロックが石室内側へ転倒しようとするとき、ブロック境界にはたらく鉛直方向の摩擦力的によって、転倒が食い止められるが、摩擦力が上限に達すると転倒する。本検討では、ブロックの転倒に関する安定性の検討方法のひとつとして、静止状態を維持する際に動員されている摩擦力の最大摩擦力に対する余裕度を評価した。

動員摩擦力 V は、ブロックの自重と上載荷重による回転軸まわりのモーメントとつりあうモーメントを生じる力として算定した。各ブロックは、重心を算定しやすいよう適宜小さな領域に分割し、モーメントは、石室内側へ転倒する向きを正とした。なお、自重と上載荷重によるモーメントが負の場合は、摩擦力がはたらかなくても転倒しないことを意味し、 $V=0$ となる。

安全率は、摩擦係数 μ と動員摩擦係数 μ' の比で定義した。安全率が 1 を上回る場合は、周囲のブロックが固定されている条件下では静止状態を維持できることを意味し、安全率が 1 を下回る場合は、実際には、 μ' は μ を上回ることはできないため、転倒することを意味する。 μ' は、 $V = \mu' \times R$ (ブロック境界にはたらく垂直力) で表されるものとして算定した。ただし、複数の境界面で動員摩擦力がはたらく場合については、すべての境界面の μ' は等しいとした。

5.2. 天井石 1 第 1 ブロック (C1-1)

表-4 自重と上載荷重によるモーメント (C1-1)

領域	面積 (m ²)	厚さ (m)	体積 (m ³)	重量 (kN)	上載荷重 (kN)	回転軸からの距離 (m)	モーメント (kN・m)
①	0.015	0.685	0.010	0.133	0.876	0.080	0.081
②	0.026	0.685	0.018	0.228	1.497	0.080	0.138
③	0.024	0.685	0.017	0.214	1.407	0.047	-0.076
④	0.023	0.685	0.015	0.197	1.294	0.116	-0.173
⑤	0.075	0.685	0.051	0.653	4.296	0.180	-0.891
⑥	0.248	0.685	0.170	2.170	14.265	0.322	-5.292
total	0.411	-	0.282	3.595	23.636	-	-6.213

動員摩擦力によるモーメント 0 kN・m

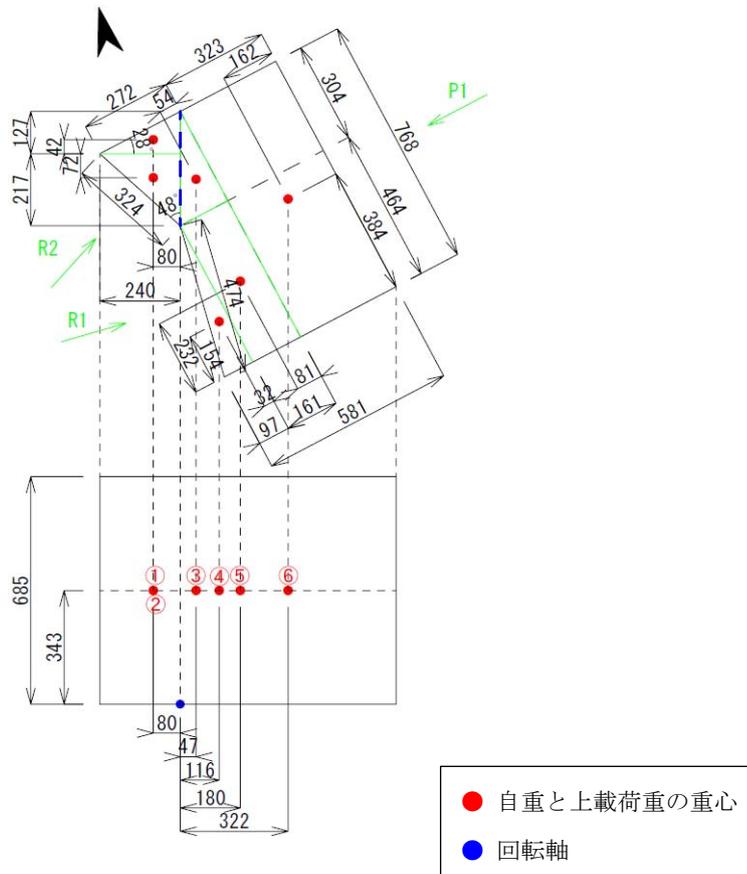


図-4 重心位置と回転軸からの距離 (C1-1) (単位: mm)

5.3. 天井石 1 第 2 ブロック (C1-2)

表-5 自重と上載荷重によるモーメント (C1-2)

領域	面積 (m ²)	厚さ (m)	体積 (m ³)	重量 (kN)	上載荷重 (kN)	回転軸からの距離 (m)	モーメント (kN・m)
①	0.360	0.685	0.247	3.151	20.713	0.439	-10.476
②	0.365	0.685	0.250	3.194	20.999	0.379	-9.169
③	0.023	0.685	0.015	0.197	1.294	0.167	-0.249
④	0.134	0.685	0.092	1.175	7.727	0.096	-0.855
⑤	0.092	0.685	0.063	0.802	5.276	0.084	0.511
⑥	0.026	0.685	0.018	0.224	1.472	0.084	0.142
total	1.000	-	0.685	8.743	57.481	-	-20.096

動員摩擦力によるモーメント 0 kN・m

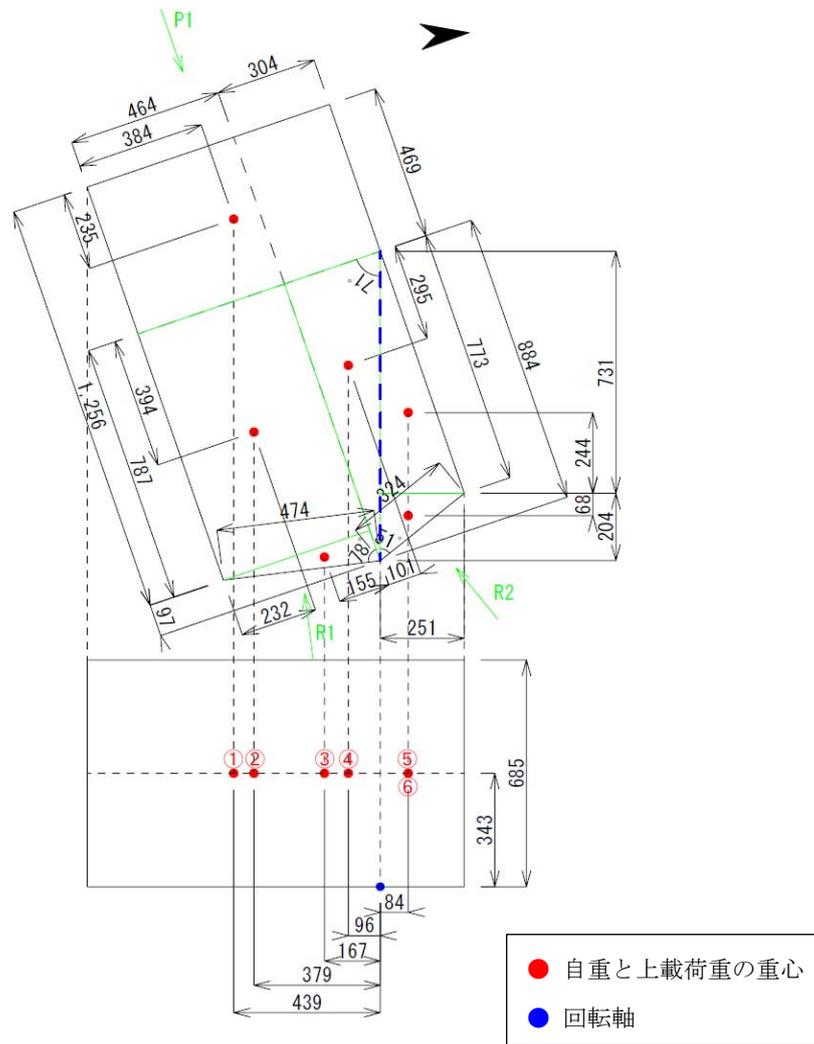


図-5 重心位置と回転軸からの距離 (C1-2) (単位 : mm)

5.4. 天井石 2 第 1 ブロック (C2-1)

表-6 自重と上載荷重によるモーメント (C2-1)

領域	面積 (m ²)	厚さ (m)	体積 (m ³)	重量 (kN)	上載荷重 (kN)	回転軸からの距離 (m)	モーメント (kN・m)
①	0.002	0.685	0.002	0.020	0.132	0.550	0.084
②	0.032	0.685	0.022	0.283	1.857	0.374	0.800
③	0.146	0.685	0.100	1.278	8.403	0.335	3.243
④	0.189	0.685	0.130	1.654	10.874	0.106	1.328
⑤	0.288	0.685	0.197	2.520	16.568	0.162	-3.092
total	0.658	-	0.451	5.755	37.835	-	2.363

動員摩擦力によるモーメント 2.363 kN・m

	動員摩擦係数	動員摩擦抵抗角 (°)	動員摩擦力 (kN)	回転軸からの距離 (m)	モーメント (kN・m)
V1	0.326	18.043	5.058	0.397	2.008
V2	0.326	18.043	0.636	0.558	0.355
total					2.363

$$\text{安全率} = \frac{\mu}{\mu'} = \frac{0.767}{0.326} = \frac{\tan 37.5^\circ}{\tan 18.043^\circ} = 2.35$$

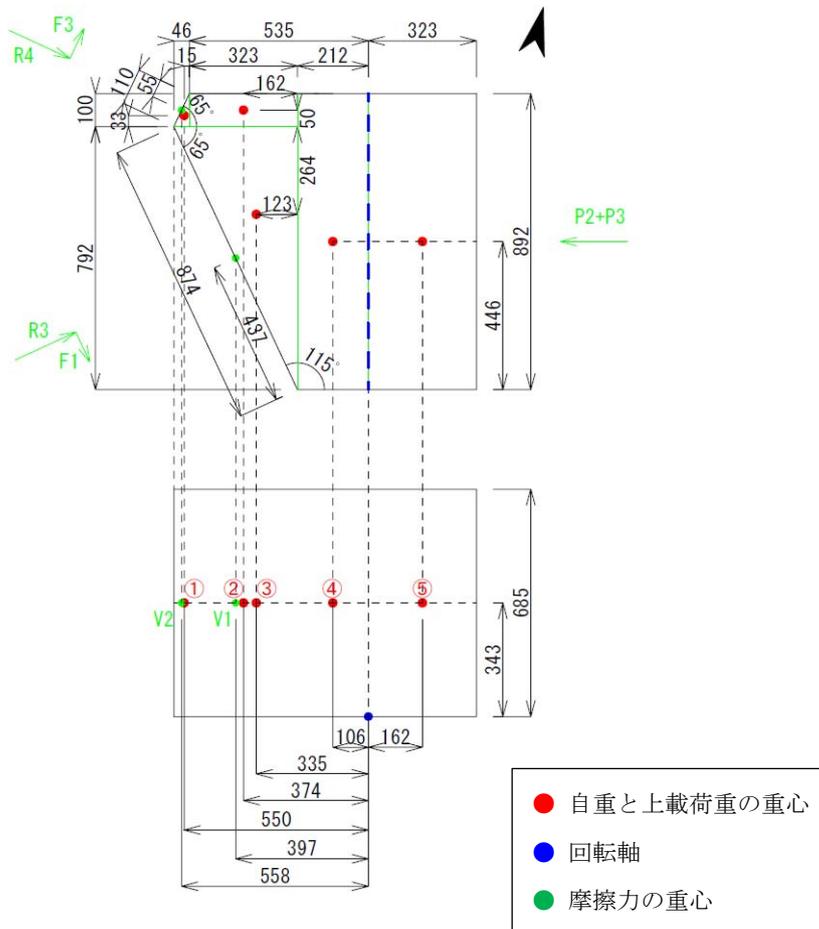


図-6 重心位置と回転軸からの距離 (C2-1) (単位: mm)

5.5. 天井石2第2ブロック (C2-2)

表-7 自重と上載荷重によるモーメント (C2-2)

領域	面積 (m ²)	厚さ (m)	体積 (m ³)	重量 (kN)	上載荷重 (kN)	回転軸からの距離 (m)	モーメント (kN・m)
①	0.247	0.685	0.169	2.162	14.213	0.235	-3.848
②	0.245	0.685	0.168	2.139	14.062	0.232	3.759
③	0.016	0.685	0.011	0.144	0.945	0.422	0.459
④	0.146	0.685	0.100	1.278	8.403	0.587	5.683
total	0.654	-	0.448	5.723	37.622	-	6.052

動員摩擦力によるモーメント 6.052 kN・m

	動員摩擦係数	動員摩擦抵抗角 (°)	動員摩擦力 (kN)	回転軸からの距離 (m)	モーメント (kN・m)
V1	0.498	26.475	7.733	0.648	5.011
V3	0.498	26.475	2.590	0.402	1.041
total					6.052

$$\text{安全率} = \mu / \mu' = 0.767 / 0.498 = \tan 37.5 / \tan 26.475 = 1.54$$

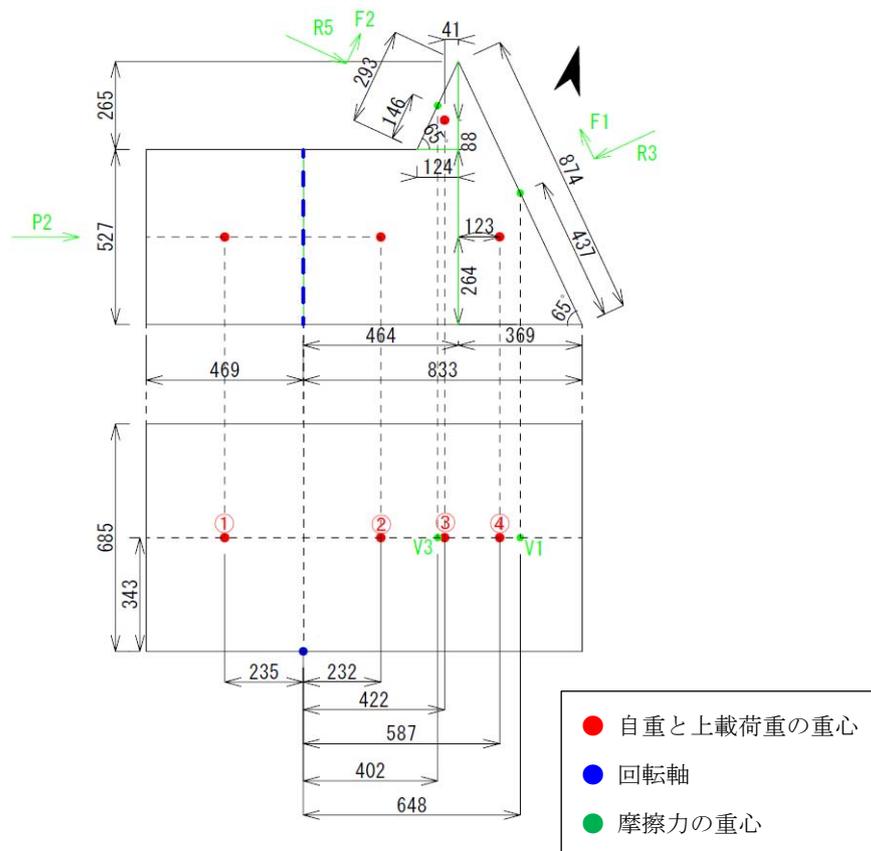


図-7 重心位置と回転軸からの距離 (C2-2) (単位 : mm)

5.6. 天井石 2 第 3 ブロック (C2-3)

表-8 自重と上載荷重によるモーメント (C2-3)

領域	面積 (m ²)	厚さ (m)	体積 (m ³)	重量 (kN)	上載荷重 (kN)	回転軸からの距離 (m)	モーメント (kN・m)
①	0.171	0.685	0.117	1.497	9.844	0.235	-2.665
②	0.124	0.685	0.085	1.086	7.136	0.170	1.398
③	0.031	0.685	0.021	0.271	1.784	0.396	0.814
total	0.326	-	0.224	2.854	18.764	-	-0.454

動員摩擦力によるモーメント 0 kN・m

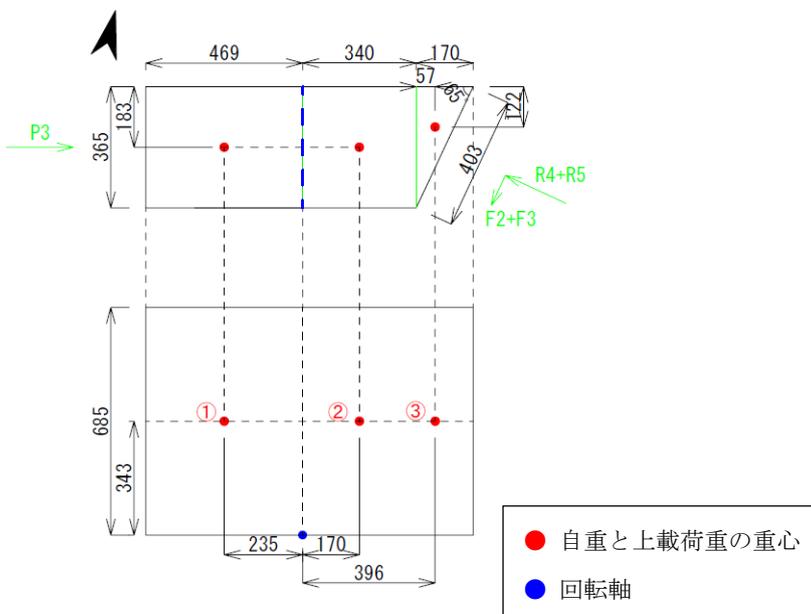


図-8 重心位置と回転軸からの距離 (C2-3) (単位 : mm)

6. 結論

天井石 1 の 2 つのブロックと天井石 2 の第 3 ブロックについては、周囲のブロックを取り除いたとしても、石室内部へ転倒する危険性は極めて低く、安定していることがわかった。一方、天井石 2 の第 1 ブロックと第 2 ブロックについては、転倒しないためには、周囲のブロックとの境界面に摩擦力がはたらく必要があることがわかった。ただし、いずれのブロックも、転倒を抑止するために動員される摩擦力は最大摩擦力以下であり、どちらかのブロックが固定されている条件下では、転倒は生じないと考えられる。なお、実際には、本検討では考慮していない亀裂面の粘着力や天井石と接する壁石・閉塞石との摩擦や付着により、さらに転倒の危険性は低いと考えられる。

参考文献

- 1) 特別史跡キトラ古墳発掘調査報告, 2008.
- 2) 三村衛, 吉村貢: 高松塚古墳石室解体に伴う石室石材および墳丘版築地盤の安定性評価について, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.3, pp.597-608, 2009.