

※資料 3-10 の詳細資料

1. 石垣構造の安定

1.1 背面構造における不安定要因

搦手馬出石垣が孕み出した原因の分析（参考資料 2）において、影響要因として背面構造の問題があることを示した。背面構造の不安定要因及びその対策について以下に示す。

1.1.1 傾斜硬化面の影響

硬化面の影響については、孕み出し原因（参考資料 2）のステップ⑤に示す通り、背面からの浸透水が硬化面の上を通ることにより細粒分が栗石層に集出すること及び背面の土塊の挙動が変化することに伴う土圧の集中が指摘される。この細粒分の集出と土圧の集中によりステップ⑥のように孕み出しが発生したと考えられる。

1.1.2 地震時の安定性

地震時においては、栗石層が揺すられることにより変形し、崩壊の要因となることが熊本地震による熊本城石垣の損傷状況等から明らかとなっている。栗石層の厚さは 1.5m～2 m 程度が一般的であるが、本丸搦手馬出石垣の天和期に復旧した部分は、栗石層の幅が 3～4 m であり一般的な箇所と比較して厚いといえる。したがって、地震時においてはこれが不安定要因となることが予測される。

1.2 不安定要因に対する対策

1.2.1 土圧集中に対する対策

石垣背面の埋め戻しは、発生土を改良することにより強度の向上を図る。掘削した土砂は乱された状態となるため、埋め戻したとしても短期的には強度を発揮できない可能性がある。そのため、石灰による土壌改良を行うこととする。添加率については土質試験結果等を検討して決定する。

孕み出し原因（参考資料 2）のステップ⑤にて示したとおり、傾斜硬化面が存在することにより、石垣下側へ土圧が集中し、これが石垣に孕み出しが生じる要因となったと推定した。土圧により実際にどの程度の応力が生じていたかを検証するために有限要素法による解析（FEM 解析）を行う。この解析を行うことにより、傾斜硬化面の影響をよりの確に示し、これが存在することにより石垣の安定性にどの程度影響するかを確認する。不安定となる要因であると認められる場合は部分的に撤去することについても検討する。

1.2.2 浸透水に対する対策

傾斜硬化面が水みちとなり背面の細粒分が集出することを防止するには、雨水等の浸透

を抑止する対策が有効である。

本丸搦手馬出石垣上部の構造は、北面、東面、南面の三方を2 m程度の石垣に囲まれており、東北隅には櫓台が存在する。また、北面には1箇所の排水口が存在する。こうした構造から石垣の背面に雨水が溜まりやすく、石垣の背面盛土に雨水の浸透が生じていたと考えられる。また、排水口は石造りのものであるためここからの漏水もあったと思われる。石垣背面からの雨水の浸透が長期間続くと孕み出し要因のステップ⑥のように栗石への細粒分の集出を引き起こす。したがって、修復に際しては天端への降雨の速やかな排水と背面盛土地盤内の地下水の排水を確実に行う必要があるため、以下の対策工を実施することを検討する。

- ① 表面排水工：天端には傾斜1 %程度の勾配を設けて、西側の道路へ雨水を導き排水する。また、地表面に真砂土舗装や防水シート等を設置して地表面からの浸透を抑える対策を行う。
- ② 中間排水層：盛土地盤内に浸透した雨水については、盛土内に外側へ傾斜する碎石層を設置することにより石垣背面に導入し、速やかな排水を行う。
- ③ 吸出防止層：石垣背面の細粒分が流出することを防止するため、石垣下部の栗石と背面盛土の境界に吸出し防止層を設置することを検討する。これは、傾斜硬化面付近に浸透水が流れたとしても背面土から細粒分の流出を防止するためのフィルターの役割を持つものであり、多様な粒形の碎石で構成される層である。

1.2.3 地震時の対策

搦手馬出石垣は修復後は観覧者を入場させ、櫓台の上などを観覧ルートとすることにより搦手側から外堀や二の丸への景観を見せるなど、最大限の活用をしていきたいと考えている。このような活用を行うためには観覧者の安全を確保するために安定した石垣とすることが求められる。本丸搦手馬出の石垣修復には、安定した石垣とするために、地盤補強として枠工を施工し、現在は慶長期と天和期の接点における不安定要因の対策を検討している。しかし、地震時の安定性については未検討である。

大きな地震（レベル2地震）が発生すると、その地震動により裏込めの栗石が不規則に動くことにより築石を押し出す。これが原因となり、石垣の崩壊が引き起こされる可能性が高いことが熊本地震等の事例から明らかになってきている。熊本地震では総栗の櫓台などで被害が見られた。

他城郭等で見られる標準的栗石層の厚さは1.5m～2 m程度であるが、本丸搦手馬出の栗石層は天和期に積み直された部分は4 m～5 mの厚さがあり、地震時には不安定となる要因となり得る。

このように栗石層厚や背面土形状など不安定要因となり得る構造について、F E M解析

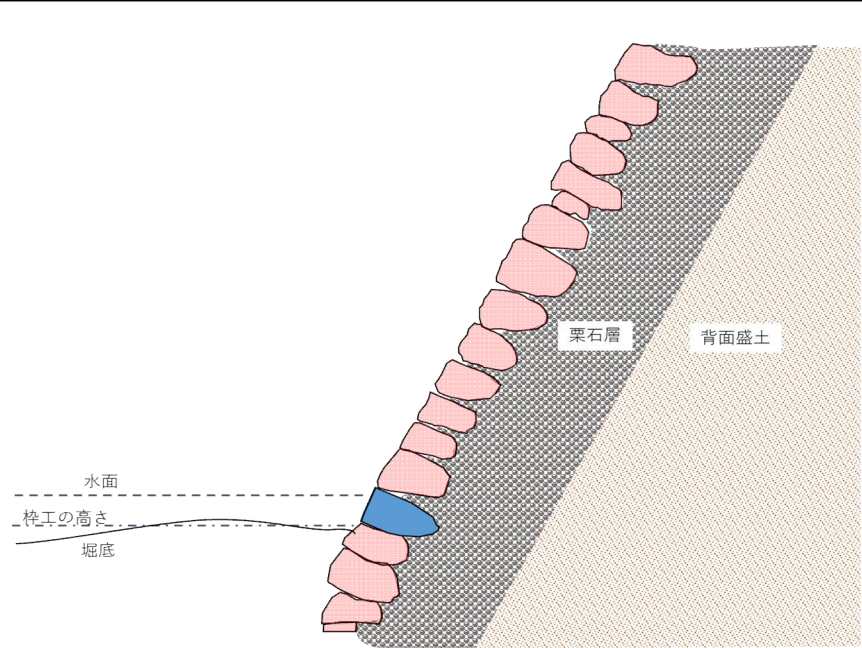
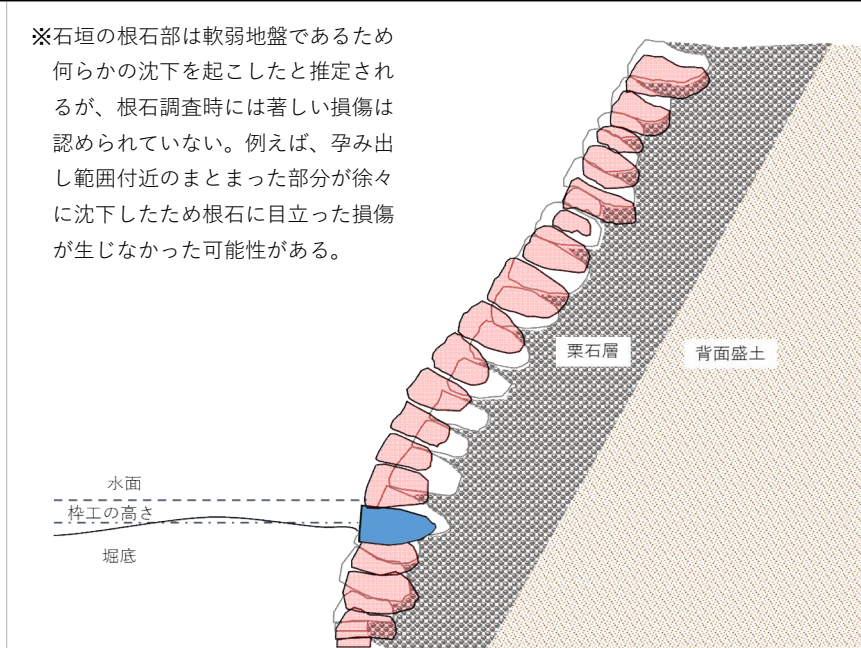
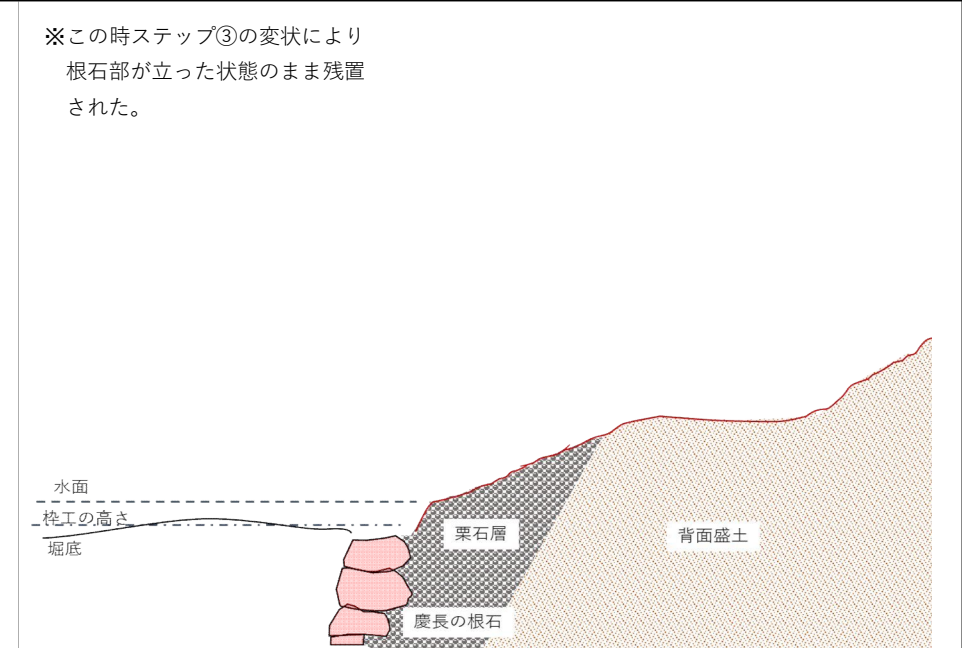
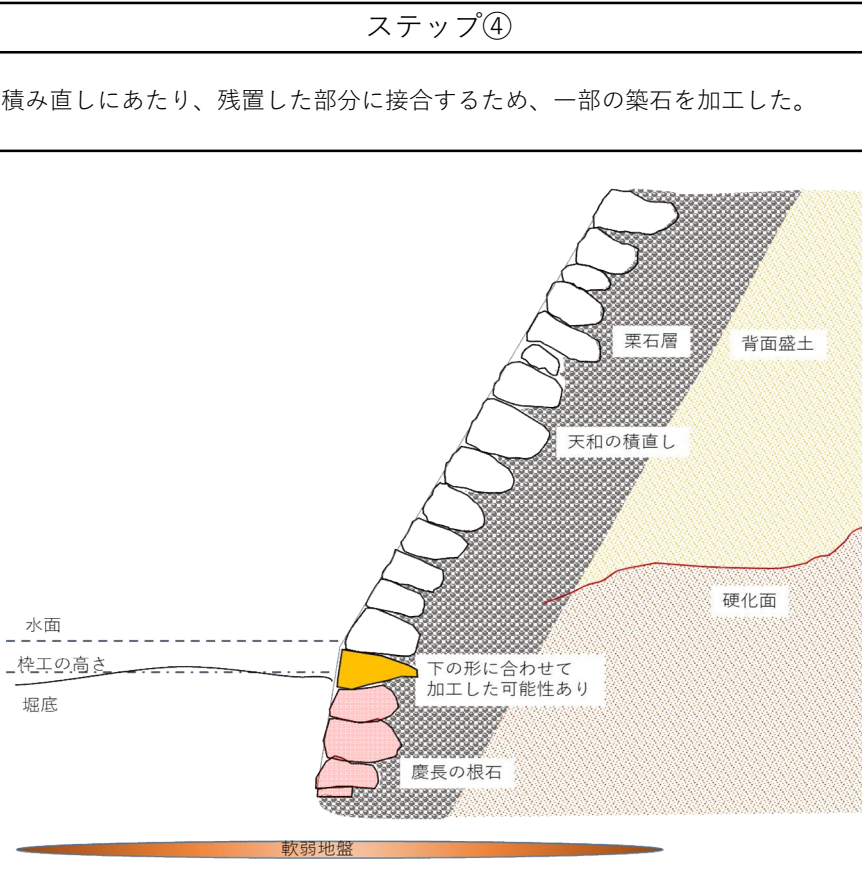
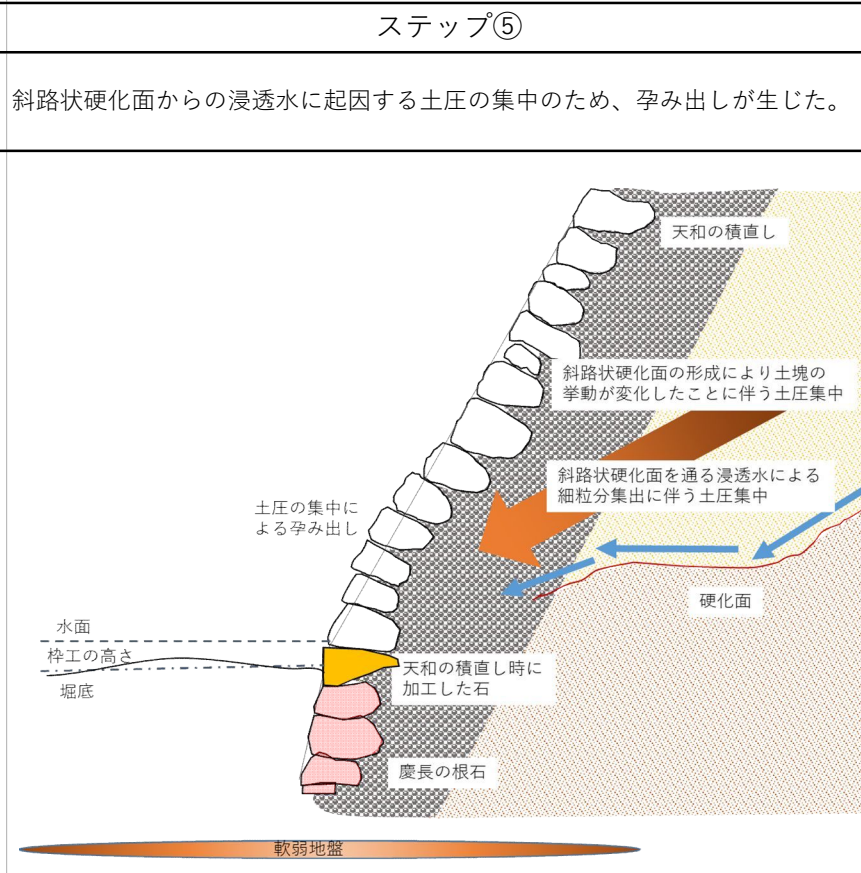
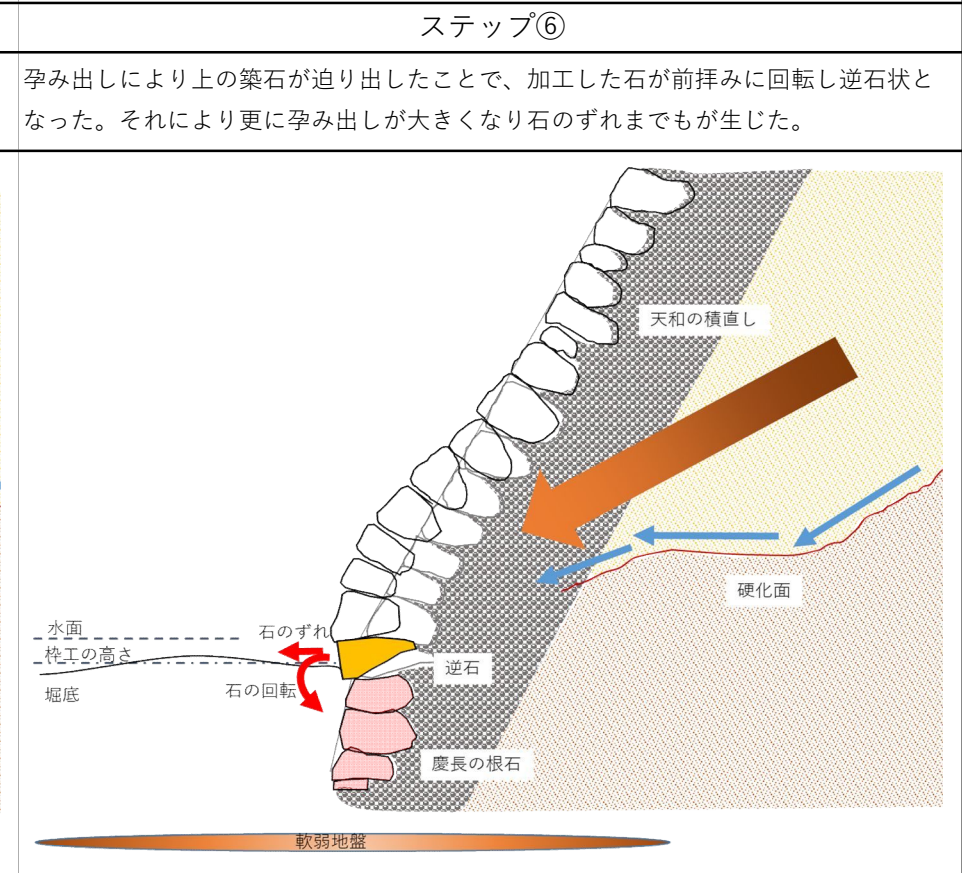
等の検討結果によっては構造を変更することによって安定性を確保することも考慮したい。また、栗石密度を最適化することにより、地震時に揺すられることによる変形が最小限とすることも検討する。なお、修復時に目標とする栗石密度については栗石密度試験等の結果等を参考に決定する。

地震時に栗石層が変形することへの対策として他城郭では、地震時に栗石が不規則に動くことを抑えるために、合成繊維のマットであるジオテキスタイルを栗石層に対して層状に設置した事例もある。

検討結果によっては、不安定要因となり得る構造を維持したとしても、ジオテキスタイル等の現代工法等を採用することにより地震時の安定性を確保することが可能と考える。

ジオテキスタイルは現代工法であるものの、築石等を改変するものではなく、次回に解体修理を行う際には撤去も可能であることから可逆的な工法であるとされている。地盤補強工法として杵工を採択した際に杵工は将来的には撤去が可能となる可逆的な工法である旨の提言が西田先生からなされた経緯がある。ジオテキスタイルは現代工法であるが、将来的に元通りにできるという性質があることから、安定性、安全性を確保するために設置したとしても、文化財としての価値を損なわないのではないかと考えている。

※ジオテキスタイルとは、合成繊維製の網状マットであり、裏込（土・栗石等）の内部に層状に敷き込むことによって層間を一体化し、構造的な強化を図るものである。

ステップ①	ステップ②	ステップ③
1612年（慶長17年）に石垣が構築された。	石垣構築後、軟弱地盤の影響により石垣及び背面盛土が沈下を起こした。	1682年（天和2年）までに積み直しの必要が生じたことから、慶長期の根石部を残して解体された。
	※石垣の根石部は軟弱地盤であるため何らかの沈下を起こしたと推定されるが、根石調査時には著しい損傷は認められていない。例えば、孕み出し範囲付近のまとまった部分が徐々に沈下したため根石に目立った損傷が生じなかった可能性がある。 	※この時ステップ③の変状により根石部が立った状態のまま残置された。 
ステップ④	ステップ⑤	ステップ⑥
積み直しにあたり、残置した部分に接合するため、一部の築石を加工した。	斜路状硬化面からの浸透水に起因する土圧の集中のため、孕み出しが生じた。	孕み出しにより上の築石が迫り出したことで、加工した石が前拌みに回転し逆石状となった。それにより更に孕み出しが大きくなり石のずれまでもが生じた。
	天和の積直し 斜路状硬化面の形成により土塊の挙動が変化したことに伴う土圧集中 斜路状硬化面を通る浸透水による細粒分集出に伴う土圧集中 土圧の集中による孕み出し 天和の積直し時に加工した石 慶長の根石 軟弱地盤 	天和の積直し 石のずれ 石の回転 逆石 慶長の根石 硬化面 軟弱地盤 

工法	1	2	3	4	5
概要	・慶長の石垣及び逆石の現状を維持したまま天和期の石垣を復元する。	・慶長の石垣及び逆石の現状を維持したまま前面に捨石・ふとんかごを設置して石垣を覆うことで安定化を図る。	・慶長期石垣の現状を維持したまま逆石の角度補正等を行う。（角度補正が不可の場合は新補石材とする）	・慶長期石垣の現状を維持したまま、逆石を全て新補石材とし、孕み出し前の勾配に復元する。	・根石部の慶長期石垣についても安定が確保できるよう解体修理を行い、孕み出し前の勾配に復元する。
イメージ図					
長所	・天和期に逆石状態で積みあげられた築石について、その状態を残すことができる。 ・工法 1 と比較して安定性を確保できる。	・天和期に逆石状態で積み上げられた築石について、その状態を残すことができる。 ・工法 1 と比較して安定性を確保できる。	・慶長期石垣の保護が可能である。 ・天和期石垣も復元想定勾配を維持し安定させることが可能。	・慶長期石垣の保護が可能である。 ・天和期石垣は当初勾配に復元し、安定させることが可能。 ・逆石を全て新補石材とすることにより安定性の向上を図ることができる。	・石垣を構造物として捉えた場合、最も安定したものとなる。
短所	・逆石がそのままの状態となるため、安定性や耐久性の面で非常に不安である。	・石垣全体を安定させようとすると、巾木石垣及びふとん籠による対策が大規模となる可能性がある。 ・対策が大規模になると、景観が変化することとなる。 ・対策として行った巾木石垣及びふとん籠自体が沈下する可能性がある。 ・押む方向に回転するような変状に対しては効果が限られる。 ・巾木石垣を設置すると犬走りのような構造ができるため曲輪が変化したように見える。	・逆石の一部を新補石材に差替えることにより、部分的であるが天和期に積み上げられた逆石は記録保存となる。	・天和期に逆石状態で積み上げられた築石は記録保存となる。	・築城期の石垣を一部とはいへ解体することになる。 ・枠工を一時的に取外す必要がある。 ・解体に伴い水堀部を掘削するため施工に大規模な仮設が必要になるとともに解体及び掘削にはかなりの時間を要する。
所見	・石垣全体の安定化が図れない。 ・孕みの原因を残すこととなり、解体修理を行ったことと整合しない。	・安定性とが両立させられるものの景観が大きく変化する。 ・沈下、回転などの他の問題が生じる可能性がある。 ・解体修理を行ったことと整合しない。	・推定天和期の形状を一部残しながら石垣全体の安定化を図るとともに、慶長期石垣の保存が可能となる。	・慶長期石垣の保存が可能であり、全体の安定化を図ることができるものの、天和期の真正性が失われる。	・石垣を安定した構造物とできるものの、慶長期の石垣は記録保存となる。 ・慶長期の石垣を残すために枠工を行ったことと整合しない。