

論文 Original Paper

松江城の石垣カルテと3Dスキャナを用いた変状の比較分析

橋本隆雄*¹・松尾拓*²・石作克也*³

Comparative analysis of Matsue Castle's stone wall medical record and deformation using 3D scanner

Takao Hashimoto*¹, Taku Matsuo*² and Katsuya Ishizukuri*³

Abstract: In order to analyze the causes of damage to the entire Matsue Castle stone wall after the 2000 Tottori Earthquake, there has been a survey of the areas where the stone wall collapsed. However, damage analysis including the ground of the entire castle wall has not yet been conducted. Therefore, the shape of the stone wall was recreated as before the earthquake based on existing literature and 3D scan surveying, and the strata structure was estimated by creating 3D spatial model of the ground from boring surveys and surface wave surveys. In this paper, we conducted a deformation analysis of stone wall damage caused by the Tottori Earthquake and damage history at 25 locations throughout Matsue Castle based on stone wall charts and tiered maps using 3D scan data. As a result, it became clear that the damage to stone walls was affected by the areas where the embankment and strong winds were thick, the width of the top of the stone wall, and the maximum slope.

Key words: stone wall, castle, castle wall, Matsue Castle, 3D scanner

1. はじめに

松江城は、宍戸湖と中海をつなぐ大橋川の北側、島根半島の山脈から派生する丘陵地である亀田山に縄張りされた平山城である。松江城は、慶長12年（1607年）から慶長16年（1611年）にかけて築城された。縄張りは内堀で囲まれた南北540m、東西350mの丘陵地に本丸、二之丸、二之丸下ノ段、中曲輪、腰曲輪、後曲輪、外曲輪、北之丸を配置し、内堀を隔てた南側平坦地に190m四方の三之丸（現県庁）を配置する^{1)~4)}。明治廃城以後の松江城は、昭和9年に国の史跡として指定を受け、建造物としては天守閣（重要文化財）を残すのみではあるが、石垣は往時の形態をよく留め、一部後世の切石による間知積みが見られるものの、自然石による野面積みや割石を用いた打ち込み接ぎの技法が随所に見られる^{5)~7)}。

2000年鳥取県西部地震では、図-1に示すように地震によって松江城の石垣が崩落・孕み出し、櫓・天端付近の6箇所に損壊などの甚大な被害が生じた。二之丸下ノ段南東角堀石垣では、写真-1のように石垣・天端下、



図-1 鳥取地震や要因不明による石垣被害状況



写真-1 鳥取県西部地震による二之丸下ノ段南東角堀石垣崩壊

*¹ 国士舘大学 理工学部まちづくり学系 特任教授

*² 株式会社日測, 業務推進室主任

*³ 株式会社日測, 取締役

崩落部周辺に孕みが生じた。本丸武具櫓下石垣では、天端付近の石1個及び間詰石数個が落下した。

中曲輪北東部石垣・本丸弓櫓下石垣では、天端付近の石1個及び間詰石数個が落下し、崩落部周辺に孕みが生じた。水之手門跡周辺石垣では、天端付近の間詰石数個が落下し、端部分に孕みが生じた。本丸北東角石垣では、天端付近の石1個及び間詰石数個が落下し、角石の石垣が変形した。また、昭和から平成にかけても原因不明の石垣被害が数多く生じている。

そこで、本論文では、松江城本丸付近の25箇所を対象に鳥取地震及び被災履歴による石垣被害について石垣カルテ及び3Dスキャンデータを用いた段彩図から変状分析を行った。石垣形状は既存の文献や3Dスキャン測量を基に地震前の形状を再現し、地層構造はボーリング調査や表面波探査等から地盤の3次元空間モデルを作成して推定した。

2. 松江城石垣の形状と被害

2.1 石垣のタイプ

松江城石垣のタイプは、本論文では表-1に示すように3つに分類した。

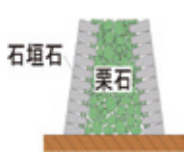
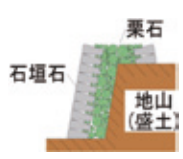
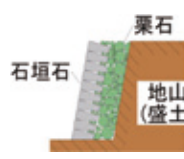
- ①石塁タイプ：石垣の内部が栗石のみで構成されているもの。平地に突出して建つ櫓台や郭部の石垣など。
- ②半石塁タイプ：石垣が背面側の地面より立ち上がり、背面が栗石層と地山（盛土）で構成されているもの。
- ③非石塁タイプ：石垣が築石と栗石層からなり、背面側

の地面より立ち上がりがなく背面が栗石層と地山のもの。

2.2 石垣タイプ毎の被害割合

図-2は平面図に各石垣タイプの位置を色別に表現したものである。図-3は松江城の3つの石垣タイプの割合を各石垣タイプ延長／全石垣延長で算出したものである。

表-1 石垣構造のタイプ

石塁	半石塁	非石塁
		

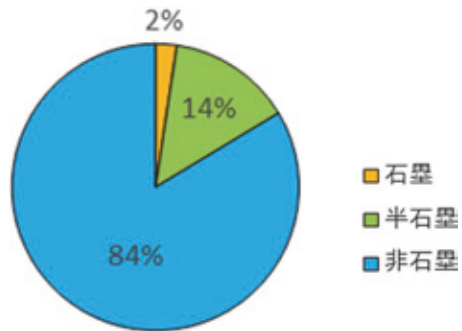


図-3 石垣型の分類

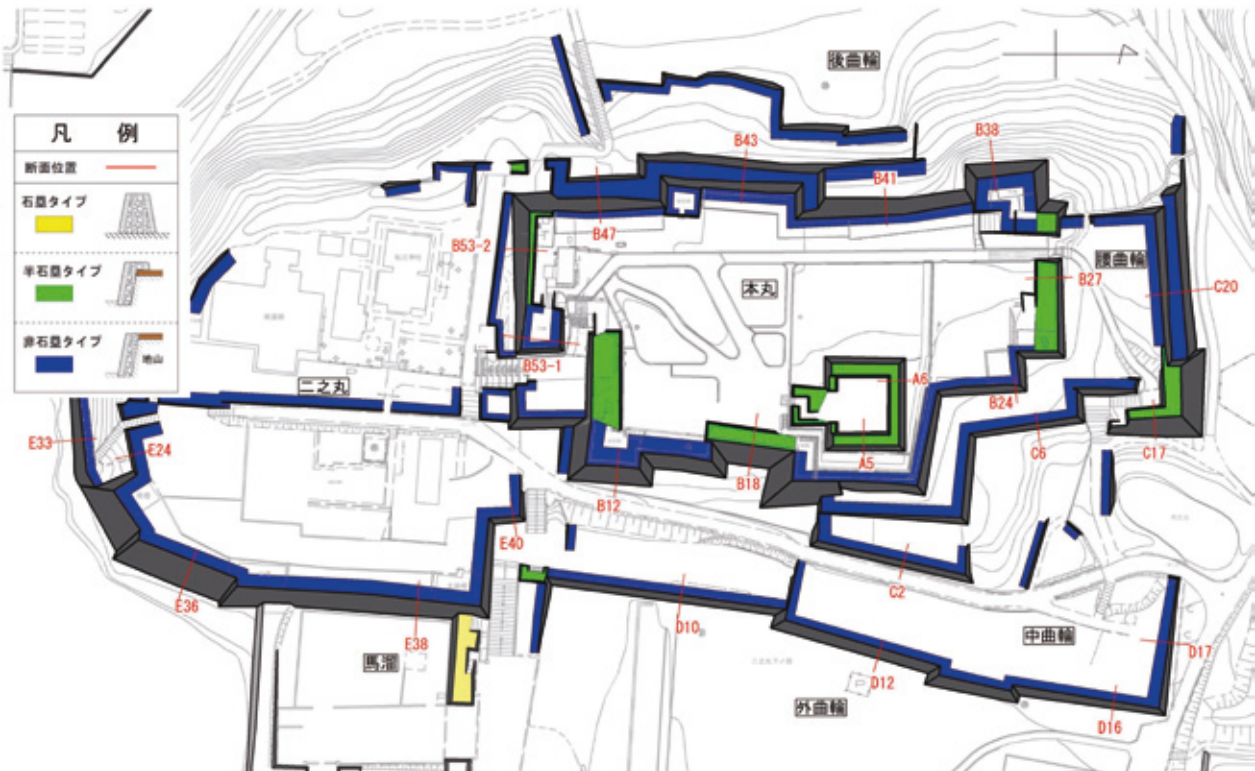


図-2 石垣タイプ及び検討断面位置図

石畳タイプは2%、半石畳タイプは14%、非石畳タイプは84%で構成されており、ほとんど非石畳タイプの石垣で曲輪が構成されていた。石畳タイプは馬溜曲輪の平場であり、半石畳タイプは主に本丸付近に配置されていた。図-4は石垣タイプ毎の被害形態の割合を被害延長/全石垣延長で算出したものである。石畳タイプの崩壊は12%、孕みは88%ですべての面で被害が発生している。一方、半石畳タイプの崩壊は0%、孕みは18%、非石畳タイプの崩壊は3%、孕みは12%で被害が軽微であることが分かる。

2.3 石垣タイプと勾配、高さの比較

石垣タイプの形状と被害の関係性を比較するため、図-5のように本丸付近の石垣から25面を選定し、それらの石垣表面の断面を作成した。なお、石畳タイプは1箇所しかないため選定から除外した。

図-6は25面における石垣形状の断面集合図である。断面線の色や線種は、鳥取地震、昭和・平成時（被害要因は不明）の被害状況を表現している。この図から石垣の形状は直線的な勾配だが、石垣高が高くなるにつれて勾配が緩くなり、石垣高は5m程度と9~13mとで分かれた。勾配が急な程崩壊の被害が多く、緩いものは孕みが多くなった。

図-7は半石畳タイプの断面集合図である。半石畳タイプは、石垣高が比較的低く勾配がきついグループと、石垣高が高く勾配が緩いグループに分かれ、被害は後者

のグループで発生していることが分かった。

図-8は非石畳タイプの断面集合図である。非石畳タイプは、石垣高が高くなるにつれ勾配が緩くなり、被害は石垣高が高い石垣より勾配が比較的きつい石垣に被害が発生していることが分かった。

3. 松江城石垣の被害分析

3.1 被害分析方法

石垣の被害は、これまでの橋本他の研究⁸⁾で平均勾配ではなく上部の最大勾配の影響を受けていることが分かっている。また、半石畳の場合は、背後の勾配の方が急

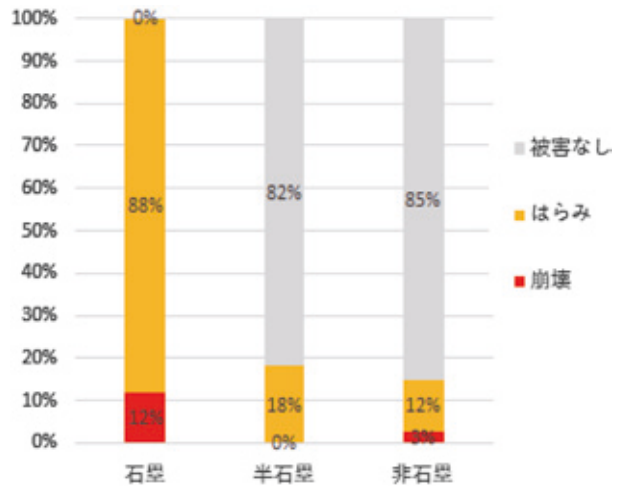


図-4 石垣タイプ毎の被害形態の割合

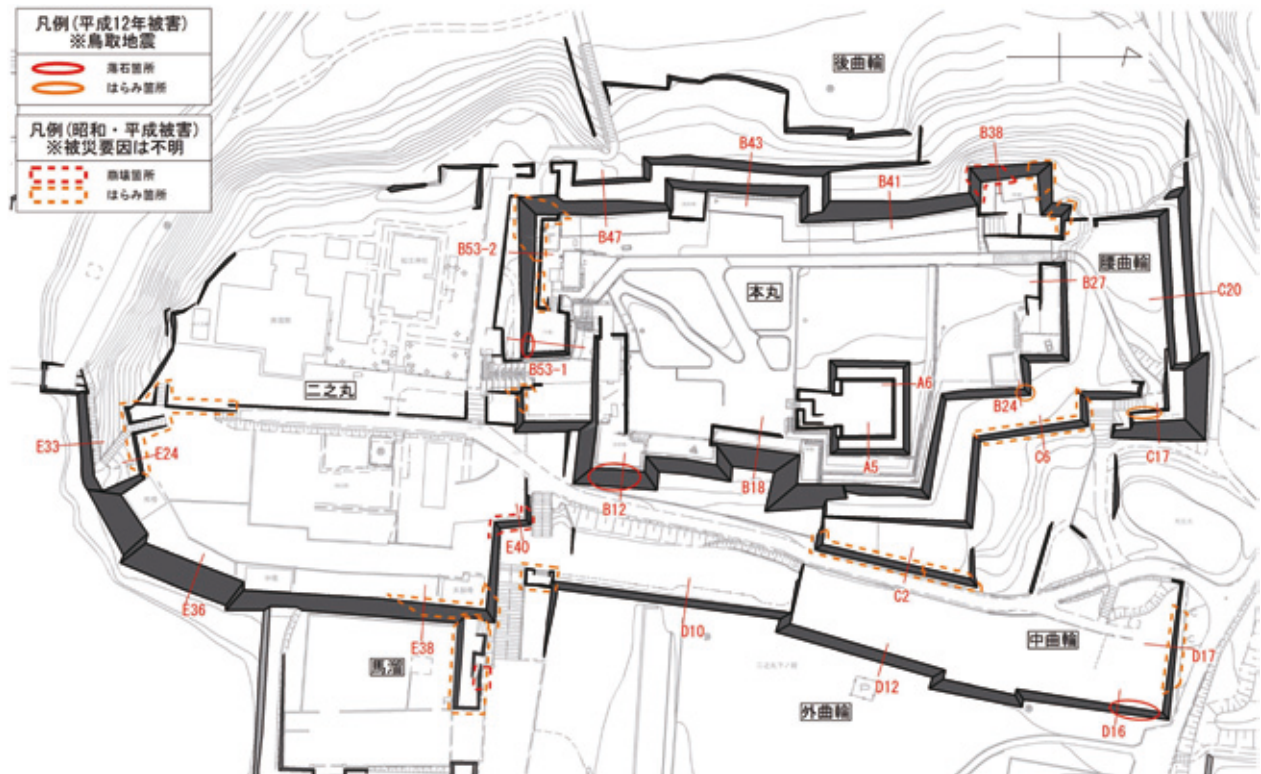


図-5 鳥取地震や要因不明による石垣被害状況

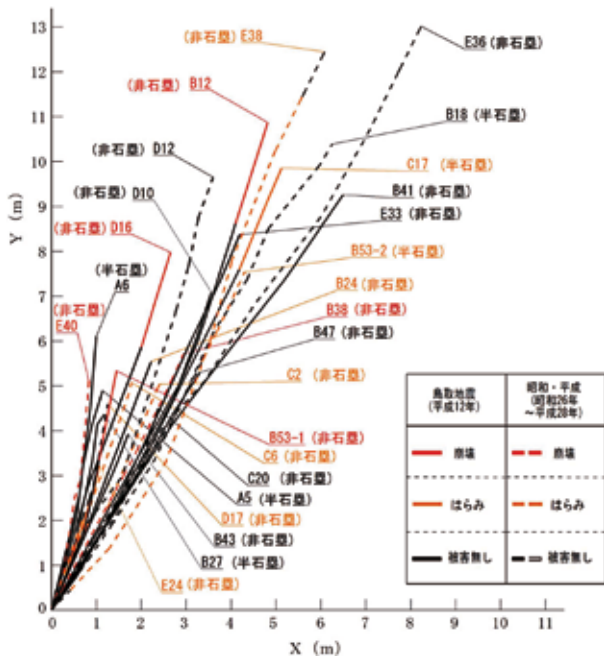


図-6 石垣タイプの断面と被害

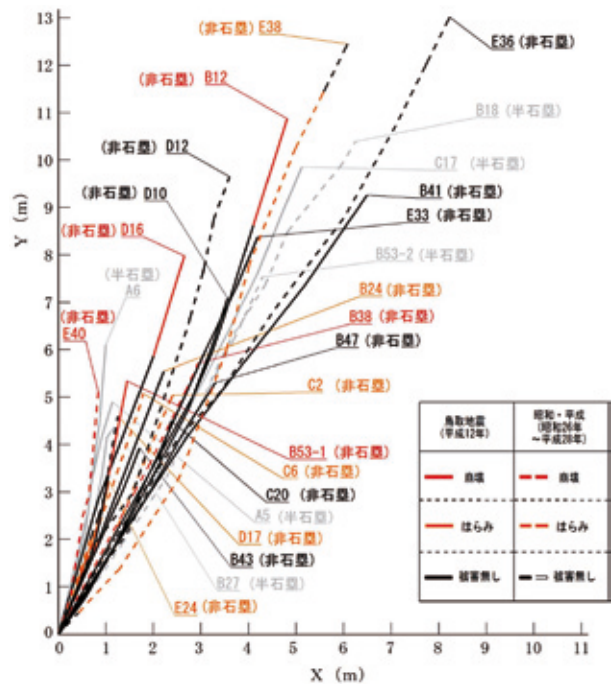


図-8 非石垣タイプの断面と被害

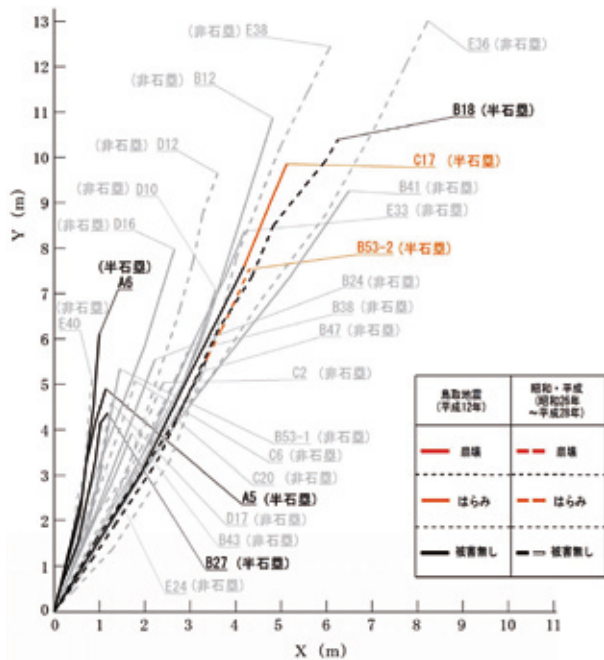
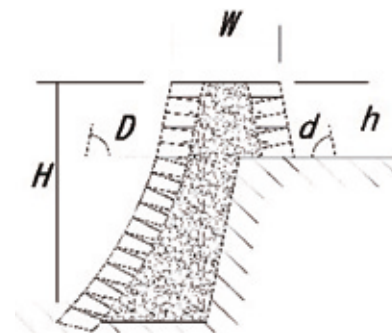


図-7 半石垣タイプの断面と被害



D: 上部勾配 d: 背後勾配 H: 高さ
h: 背後高さ W: 天端幅

図-9 石垣の各測定箇所

となっているものが多い。そこで、被害分析は石垣の各断面について、図-9に示すように石垣前面の高さと上部勾配及びの石垣背面の高さと背後勾配、動的FEM解析による加速度と速度を比較対象とした。ここで最大勾配とは、上部勾配D及び背後勾配dのうち値の大きい方のことをいう。

3.2 被害分析結果

石垣の各断面の分析は、全石垣タイプ、半石垣タイプ

について行った。図-10～12のプロットの形は各石垣構造型を、色は被害形態を示す。石垣構造としては、非石垣の崩壊が多い。石垣形状としては、以下の結果となった。

i. 全石垣タイプの被害分析 (図-10参照)

(a) 最大勾配と高さ

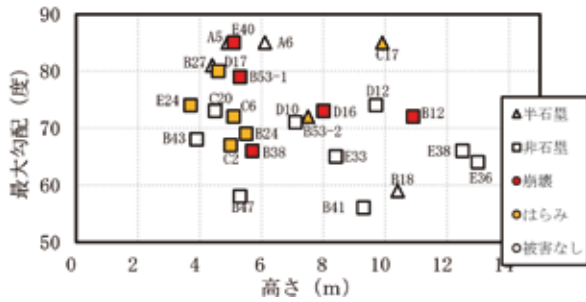
高さに関わらず、最大勾配が65度より急なほど崩壊や孕みが生じている。

(b) 高さ と 天端加速度, (c) 高さ と 天端速度

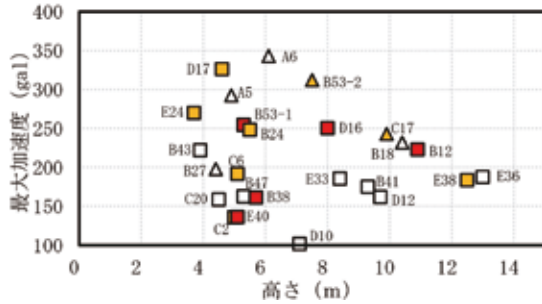
高さに関わらず、天端加速度や天端速度の大きいほど崩壊した石垣がある。半石垣は同じ高さの非石垣と比べると天端加速度や天端速度が大きくなりやすい。

(d) 最大勾配と天端加速度, (e) 最大勾配と天端速度

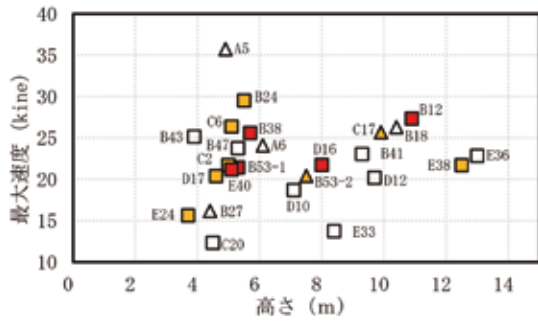
最大勾配が65度より急になると、天端加速度は大き



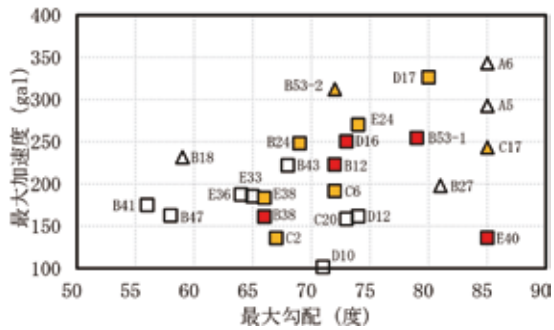
(a) 最大勾配と高さ



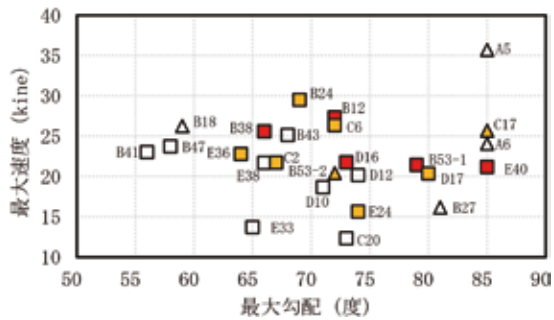
(b) 高さと同端加速度



(c) 高さと同端速度



(d) 最大勾配と同端加速度



(e) 最大勾配と同端速度

図-10 全石垣の被害分析結果

くなり崩壊や孕みの被害が生じ、天端速度は20kineを超えると被害が生じている。

ii. 半石型タイプの被害分析 (図-11参照)

背後勾配や天端幅の違いにより被害形態に特徴がみられた為これらの分析を行った。

(a) 最大勾配と高さ

高さが7mを超えると最大勾配が70度より急な石垣は孕みが生じている。

(b) 高さと同端加速度, (c) 高さと同端速度

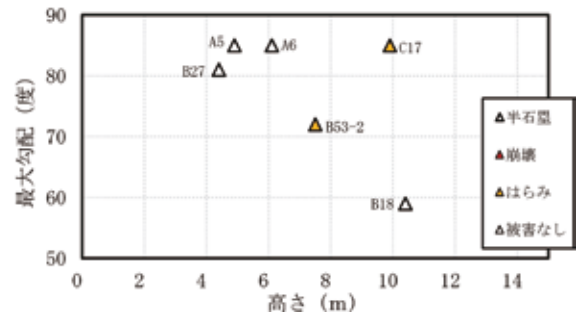
高さが7mを超えると天端加速度や天端速度に関わらず孕みが生じている。

(d) 最大勾配と同端加速度, (e) 最大勾配と同端速度

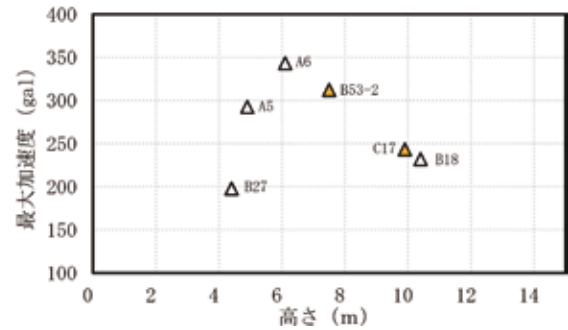
最大勾配と同端加速度や天端速度に関してはあまり関係がみられない。

(e) 背後高さと同端幅

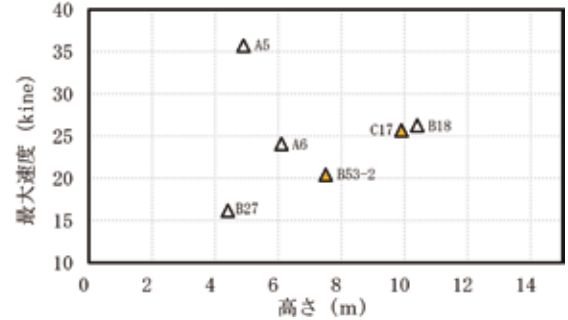
背後高さに関わらず、天端幅が狭いものほど孕みが生じている。



(a) 最大勾配と高さ

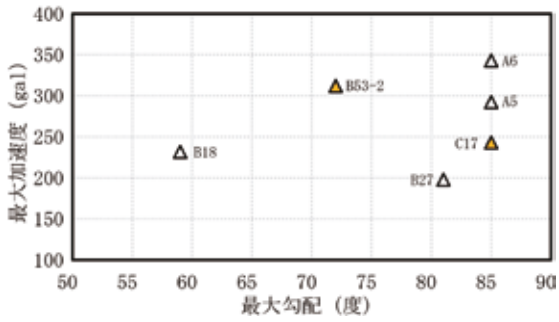


(b) 高さと同端加速度

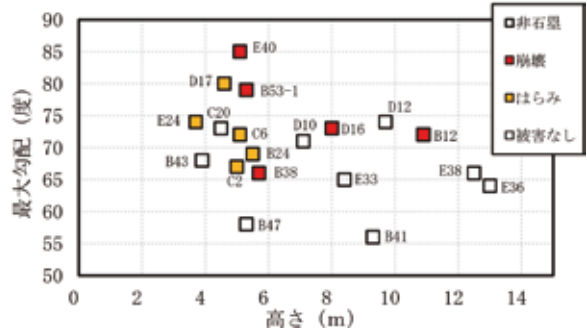


(c) 高さと同端速度

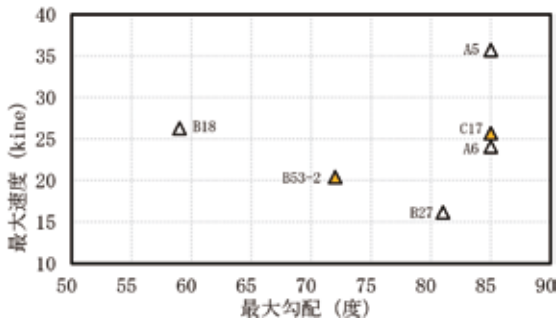
図-11 (1) 半石型タイプの被害分析結果



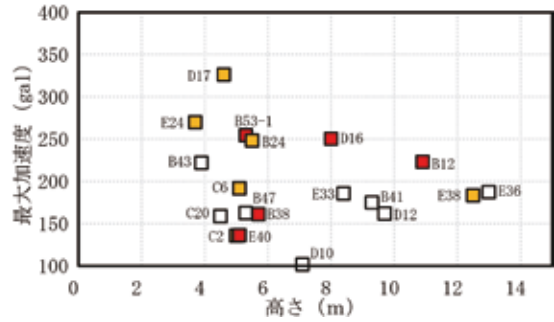
(d) 最大勾配と天端加速度



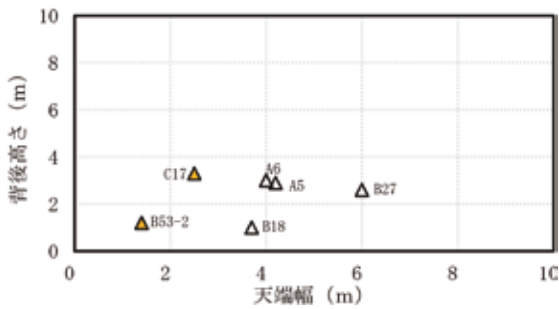
(a) 最大勾配と高さ



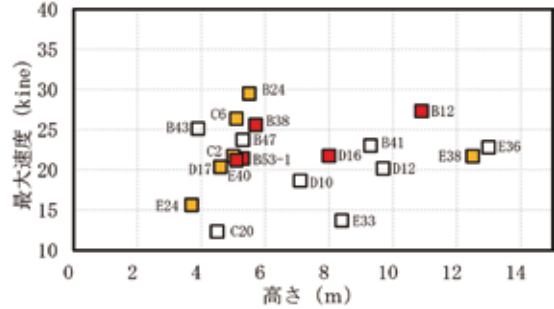
(e) 最大勾配と天端速度



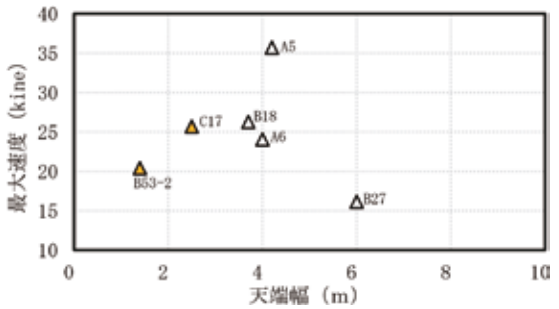
(b) 高さ と天端加速度



(f) 背後高さ と天端幅



(c) 高さ と天端速度



(g) 天端幅 と天端速度

図-11 (2) 半石塁タイプの被害分析結果

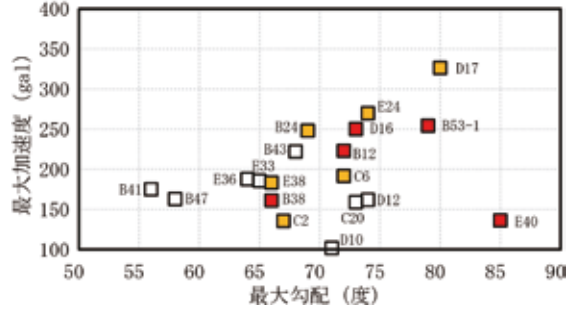
(f) 背後勾配と天端速度

天端速度に関わらず、天端幅が狭いものほど孕みが生じている。

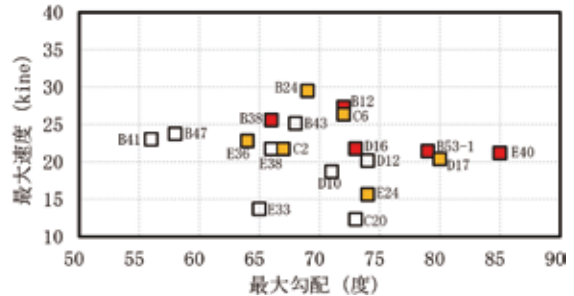
iii. 非石塁タイプの被害分析 (図-12参照)

(a) 最大勾配と高さ

最大勾配が65度を超える石垣に被害が生じており、高さが5mと超えると崩壊した石垣がある。



(d) 最大勾配と天端加速度



(e) 最大勾配と天端速度

図-12 非石塁タイプの被害分析結果

(b) 高さで天端加速度, (c) 高さで天端速度

高い石垣ほど、天端加速度や天端速度が小さくても崩壊や孕みが生じやすい。

(d) 最大勾配と天端加速度, (e) 最大勾配と天端速度

天端加速度は、最大勾配が急になるほど大きくなり崩壊や孕みが生じている。天端速度については、最大勾配が65度から75度の間で速度のばらつきが大きくなり、最大速度が大きいほど被害が生じている。

4. 石垣カルテと段彩図の比較

4.1 石垣カルテと段彩図

松江城の石垣カルテは平成24年から4年かけて作成された。石垣カルテを作成するため、目視調査と3Dレーザ計測による測量が行われた。計測された点群データより立面図と断面図が作成され、これらの調査結果を基に変状範囲が特定されている。

松江城の調査では断面図を用いて変状量の定量化を行っているが、面的な定量化を行える段彩図は作成されていないため、上記の点群データを用いて、段彩図を作成した。段彩図とは、点群データを加工することで石垣の変形等の発生範囲と変化量を色彩で表現する手法である。立面図と断面図を見比べる従来の方法に比べて変状把握がしやすいのが特徴であるが、変状前の基準となる勾配は現況の勾配から平均化したものを使用するため、全面にわたり変形したような石垣の場合は、本来の勾配を想定しなくてはならない。

4.2 石垣カルテと段彩図での変状の比較 (図-13参照)

i. 変状の大きい石垣

図-14より比較的変状の大きい石垣はB18, B24, B27, B38, B41, B43, B47, B53, C6, D10, E36が該当する。その特徴として、主にB区(本丸)の石垣が多く該当していることがわかる。

ii. 変状の小さい石垣

図-15より変状の小さい石垣はB13, C2, C17, C20, D16, D17, E24, E33, E38, E40が該当する。その特徴として、全体的に東側に多いことがわかる。

4.3 地質モデルと石垣被害の相関

松江城ではボーリング調査や表面波探査などの地質調査が行われている。この地質調査結果から地層の3次元空間モデルを地球統計学的手法の一つであるクリギング法⁸⁾を用いて作成した。

図-16は3次元空間モデルから盛土と強風化の厚さを色彩であらわしたものと、過去の被害箇所を合わせたものである。これによると本丸と二之丸の一部、中曲輪の一部で盛土+強風化が厚くなっていることがわかる。上

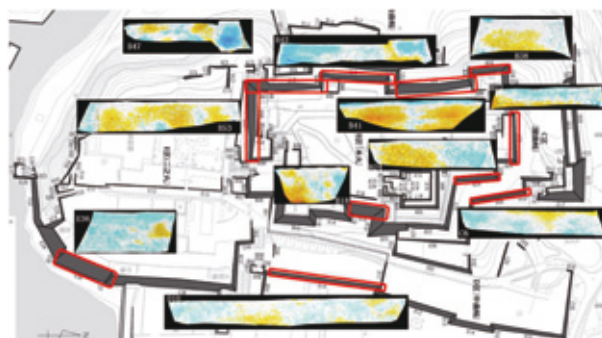


図-14 変状が大きい石垣 (赤枠)

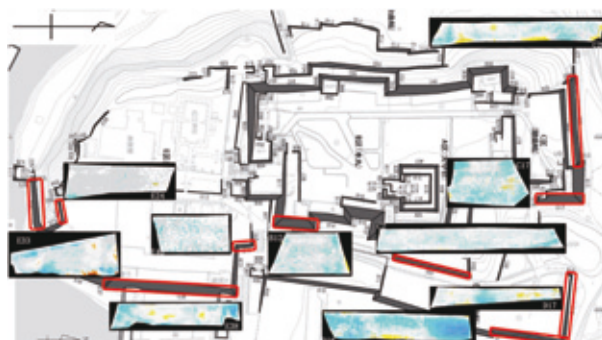


図-15 変状が小さい石垣 (赤枠)

記の箇所では過去に変状が発生している箇所が多かった。図-17の段彩図の結果と比較しても、盛土+強風化が厚くなっている箇所と段彩図での変状発生箇所は一致していることが分かった。なお、過去に大きな変状が発生したにもかかわらず段彩図では変状がみられないB12, C2, D16, D17, E24, E40については、変状発生後に解体修理をされた為である。

4.4 石垣変状比較の結果

石垣カルテと段彩図での変状比較を行った結果、変状がない石垣では分析結果は一致したが、石垣カルテで変状がみられる石垣では段彩図では変状箇所が一致するものもあるが、一致しないものもみられた。段彩図を作成する際は、その基準となる断面の精度が結果に大きく影響するため、変状前の断面等の測量結果がない場合は、慎重に基準となる断面を作成しなければならない。

3次元地質モデルの盛土+強風化コンタと段彩図での変状発生箇所は相関がみられた。

5. ま と め

本論文では、松江城本丸周辺の石垣を対象に、石垣の構造別に分類し過去の被害要因分析と、現在の石垣変状の把握方法の検証を行った。その結果以下のことが明らかになった。

(a) 石垣構造の被害要因としては石塁、天端幅の狭い半石塁、最大勾配がきつい非石塁の被害が多い。

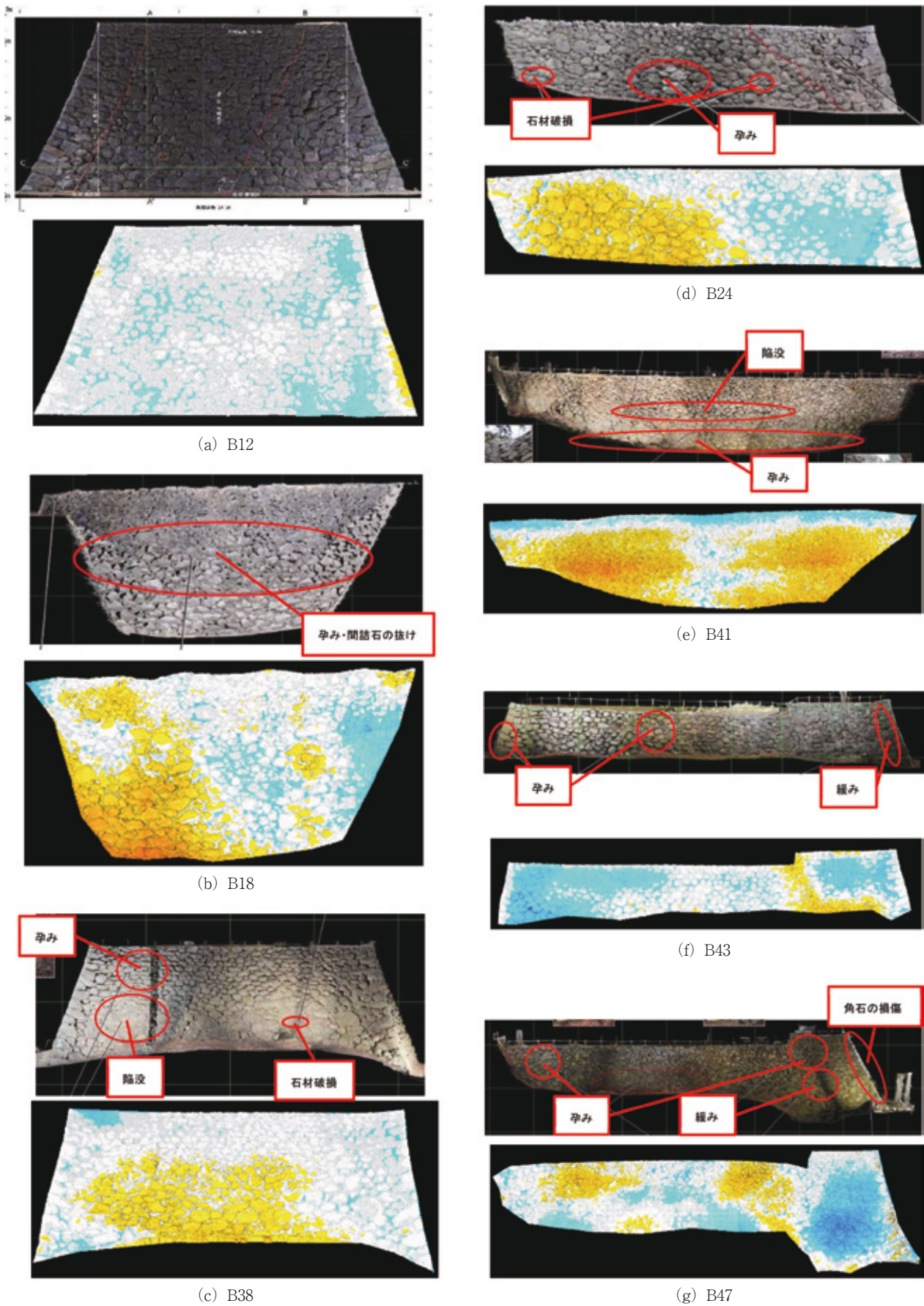


図-13 (1) 盛土+強風化の厚さコンタ

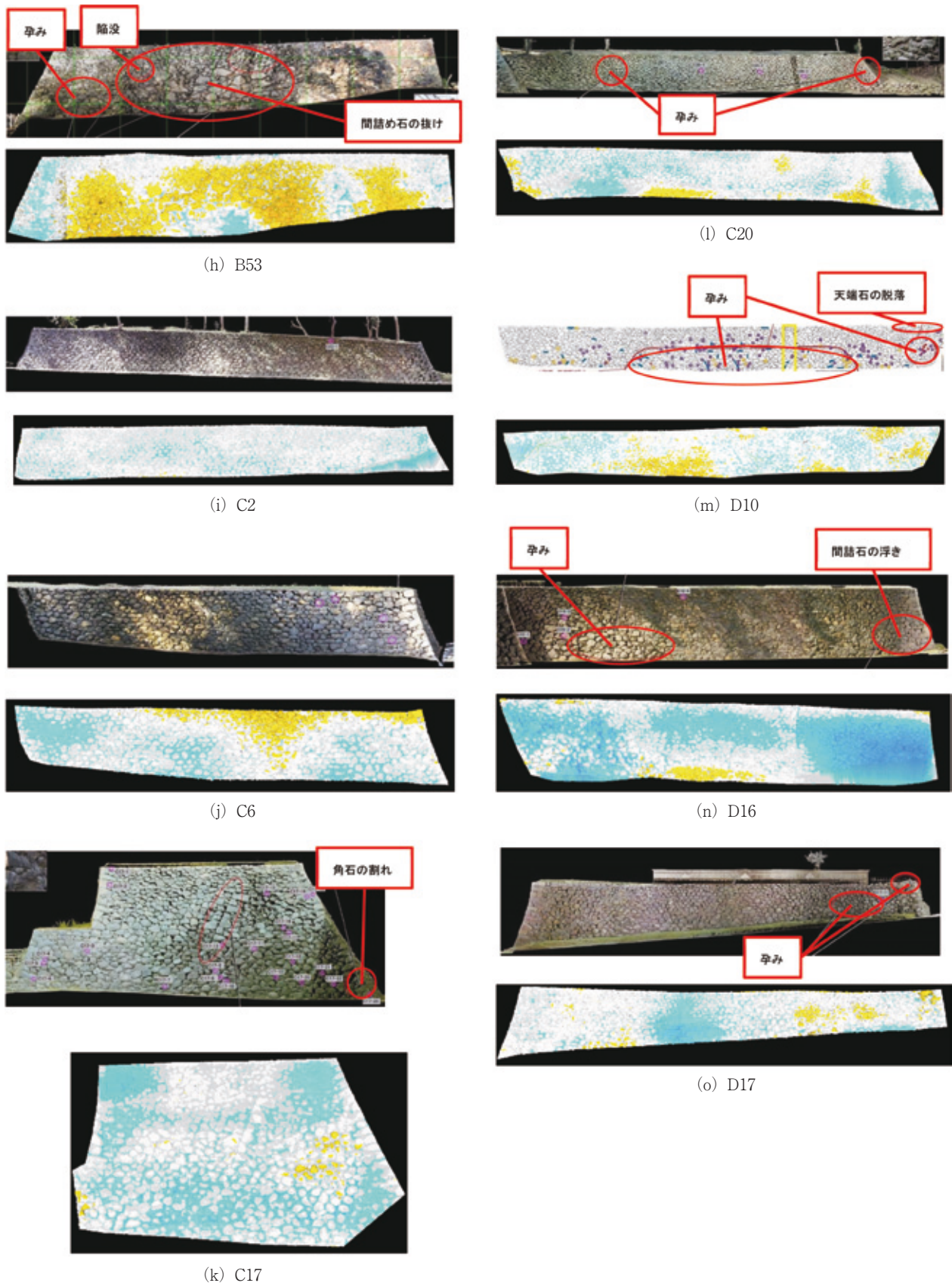
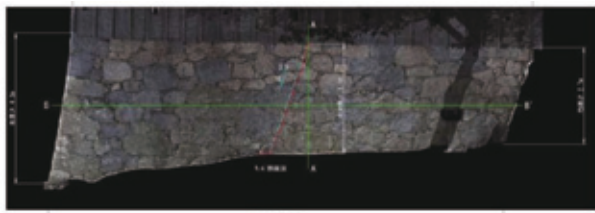


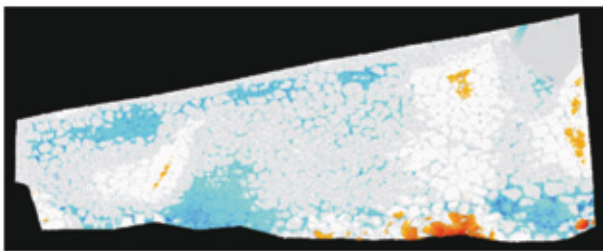
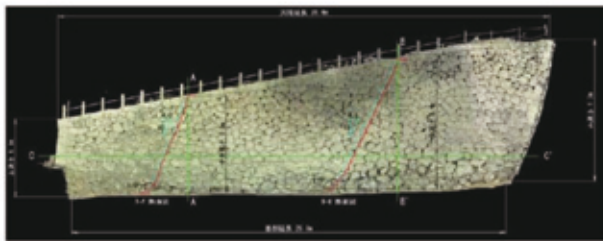
図-13 (2) 盛土+強風化の厚さコンタ



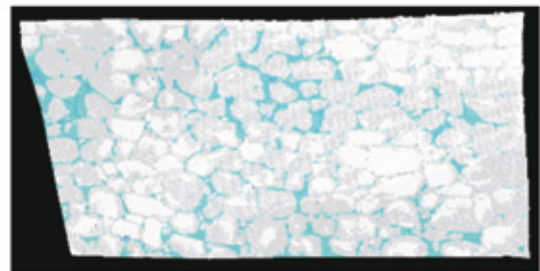
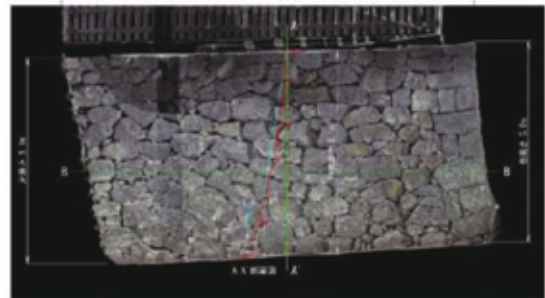
(p) E24



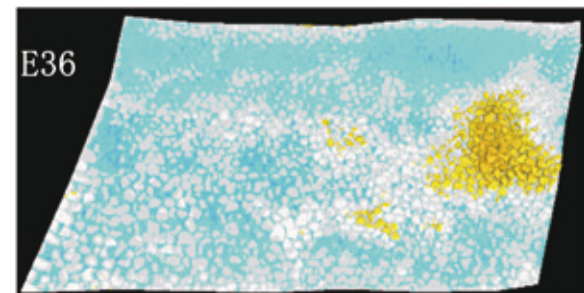
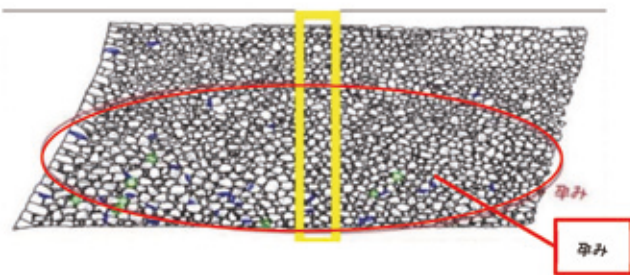
(s) E38



(q) E33



(t) E40



(r) E36

図-13 (3) 盛土+強風化の厚さコンタ

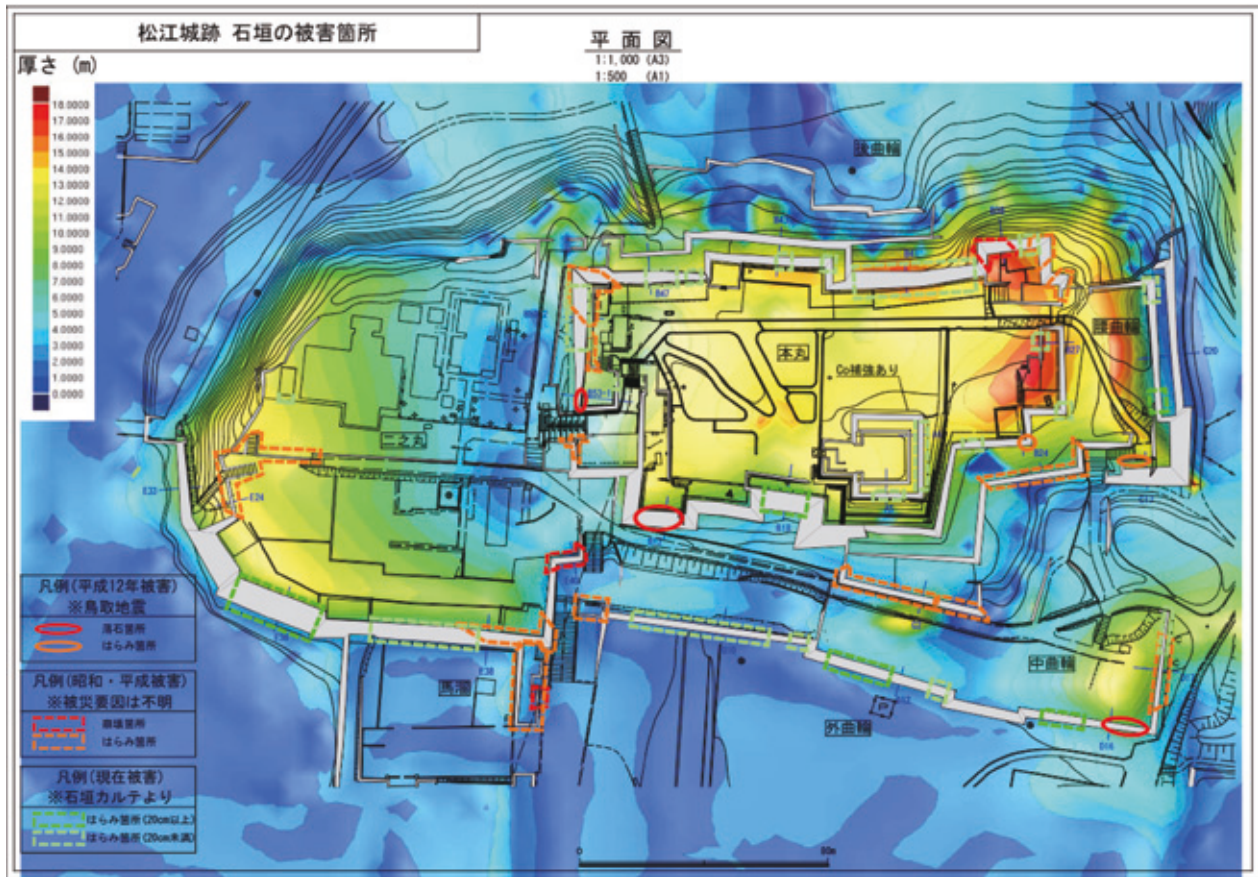


図-16 盛土+強風化の厚さコンタ

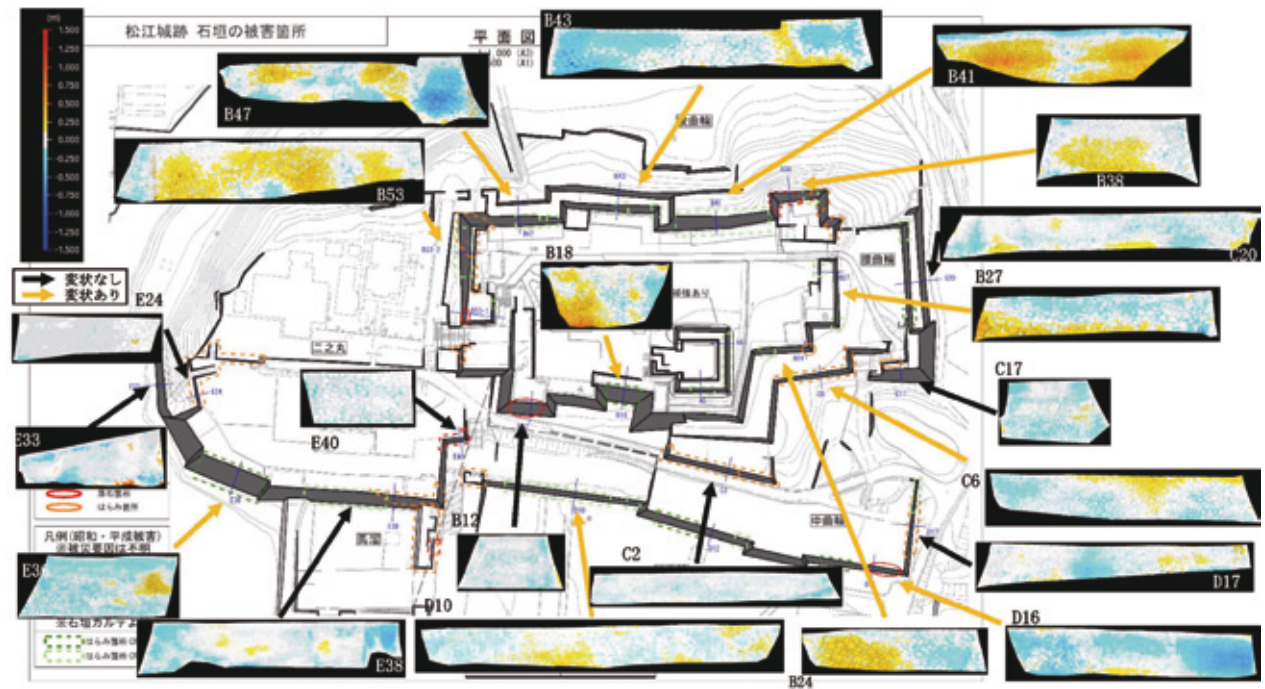


図-17 段彩図作成位置

- (b) 3Dスキャンを用いた石垣変状の把握は、目視調査結果との相関がみられた。
- (c) 石垣の被害要因としては、盛土+強風化が厚い箇所と石垣の天端幅や最大勾配の影響をうけている。

謝辞：本研究にあたって、文化庁文化資源活用課震災対策部門文化財調査官西岡様、松江市松江城・史料調査課飯塚課長、木下係長様に貴重な情報提供をしていただいた。また、国士館大学理工学部まちづくり学系2023年卒関 基希君、高階 託也君に図面作成の協力をしてくださりました。本研究は科学研究費助成事業基盤研究(B)「侍の英知である城郭石垣を守る変位計測と数値解析を併用した危険度診断システムの構築」の補助金を用いて行いました。ここに記し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松江市教育委員会：史跡松江城石垣修理報告書，松江市文化財調査報告書111，2007.
- 2) 松江市教育委員会，株式会社 文化財保存計画協会：『石垣調査報告書—史跡松江城—』，1996.
- 3) 松江市歴史まちづくり部まちづくり文化財課：史跡松江城石垣総合調査報告書，松江市文化財調査報告書第186集，2018.3.
- 4) 松江市歴史まちづくり部まちづくり文化財課（埋蔵文化財調査室）：松江市文化財調査報告書，第199集，2021.3
- 5) 新宮 敦弘，澤田 順弘，古川 寛子，乗岡 実：松江城石垣の石材調査報告2018.3.
- 6) 新宮 敦弘：松江城の石垣の石材とその起源，鳥根大学地球資源環境学研究報告34，， pp.105～115ページ，2016.3.
- 7) 先山 徹：石垣石材の分類と帯磁率に関する資料，松江市史別編 I 松江城，別編1 574-579，2017.
- 8) 橋本 隆雄，石作 克也，松尾 拓：熊本城の石垣タイプと被害の相関についての研究，国士館大学理工学部紀要，第12号（2019），pp.247-259，2019.