

「3D計測データを活用した熊本城石垣の災害復旧」



平成28年 熊本地震

◆平成28年4月14日 21時26分 前震 (M6.5、熊本市中央区:震度5強)

平成28年4月16日 1時25分 本震 (M7.3、熊本市中央区:震度6強)

◆熊本城の被害(本震後)

国指定重要文化財建造物 13棟全て

県指定重要文化財建造物 1棟

石垣 517/973面

23,600/79,000m²(崩落229面、8,200m²)

地盤 70箇所、12,345m²

再建・復元建造物 20棟全て

公園施設26棟 など → (人的被害0)

熊本地震主要被害箇所 1

⑨ 不開門



⑧ 北十八間櫓



⑦ 東十八間櫓



【凡例】

- 石垣
- 重要文化財建造物
- 再建・復元建造物

① 西出丸北側



② 宇土櫓



③ 南大手櫓門



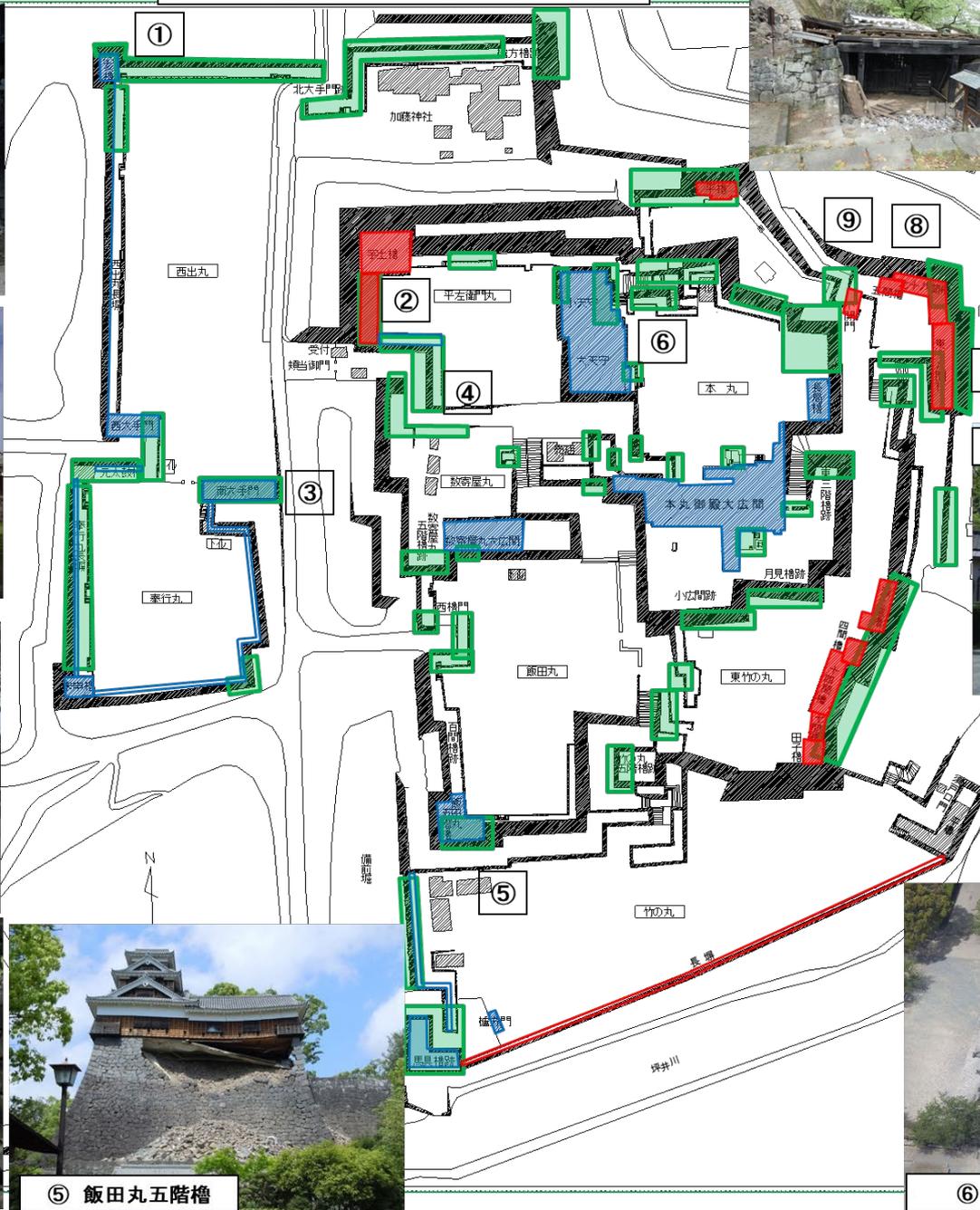
④ 類当御門



⑤ 飯田丸五階櫓



⑥ 天守閣



熊本地震主要被害箇所 2



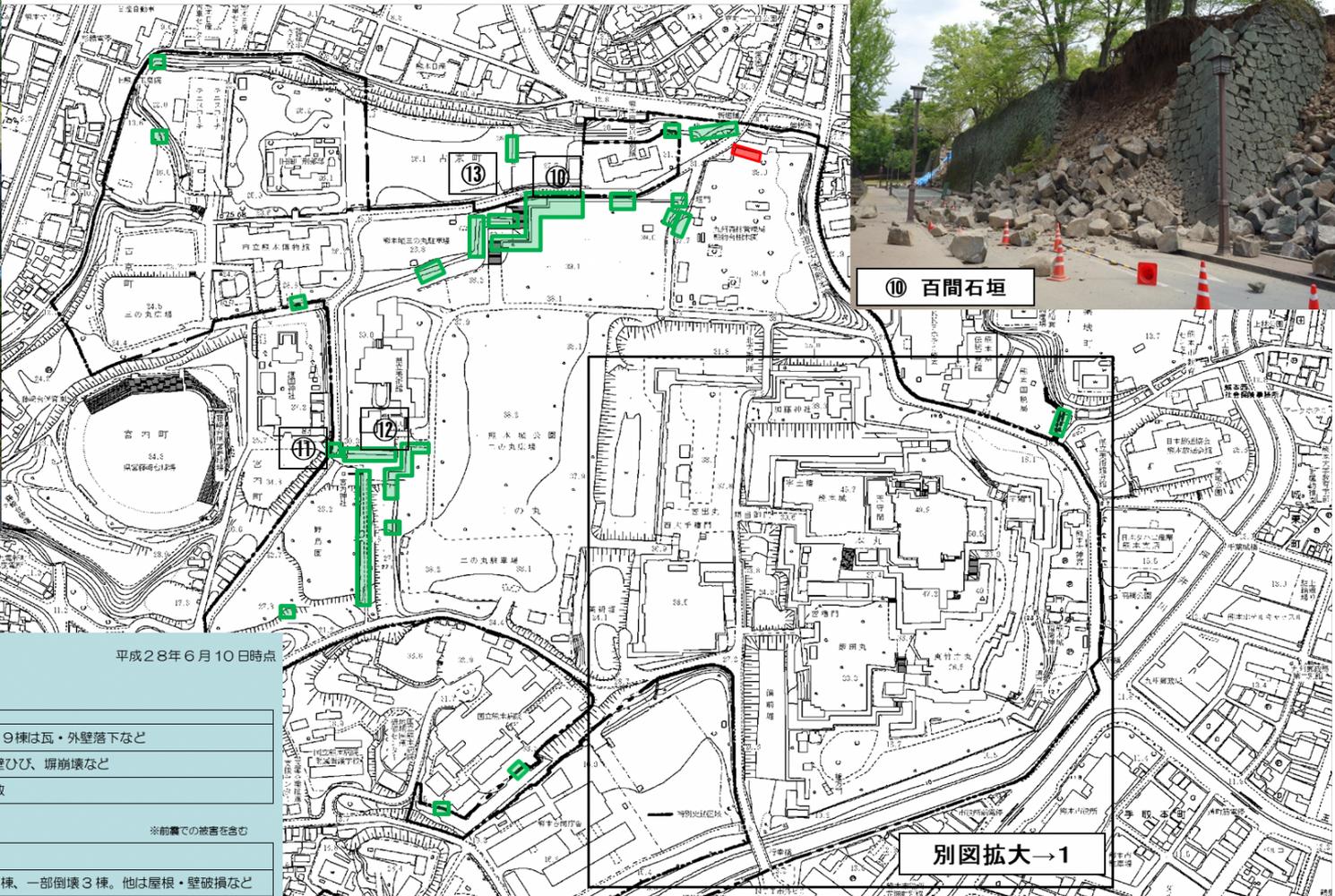
⑪ 宮内橋下石垣



⑫ 美術館南側石垣



⑩ 百間石垣



別図拡大→1

速報「熊本城の地震被害」

平成28年6月10日時点

平成28年4月14日 21時26分「前震 M6.5」

| 種類 | 被害数量 | 内容 |
|----------|-------|----------------------|
| 重要文化財建造物 | 10棟 | 長塀 80m崩壊、9棟は瓦・外壁落下など |
| 復元建造物 | 7棟 | 天守閣瓦落下、壁ひび、塀崩壊など |
| 石垣 | 崩落6箇所 | 膨らみ・緩み多数 |

平成28年4月16日 1時25分「本震 M7.3」

※前震での被害を含む

| 種類 | 被害数量 | 内容 |
|-----------|---------------|--|
| 重要文化財建造物 | 13棟 | 倒壊2棟、一部倒壊3棟。他は屋根・壁破損など |
| 復元建造物 | 20棟 | 倒壊5棟。他は下部石垣崩壊、屋根・壁破損など |
| 石垣 | 崩落・膨らみ・緩み517面 | 約23,600㎡ (全体の299%) (うち崩落50箇所、229面) (うち崩落約8,200㎡ (全体の10.3%)) |
| 地盤 | 陥没・地割れ70箇所 | 約12,345㎡ |
| 利便施設・管理施設 | 26棟 | 屋根・壁破損など |

熊本城全体の石垣：973面、約79,000㎡
特別史跡熊本城跡の土地面積：約512,000㎡



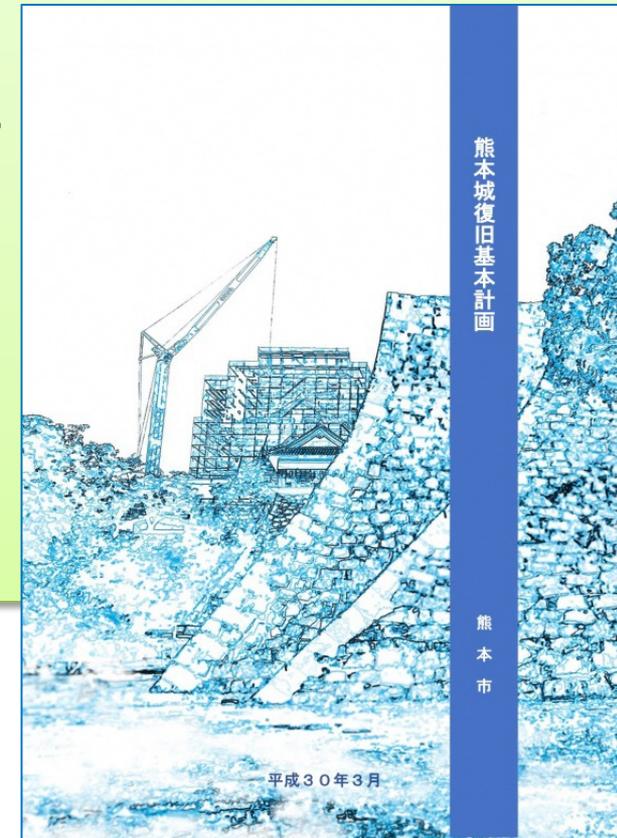
⑬ 二の丸御門

「熊本城復旧基本計画」

H30.3.28策定

- 1 被災した石垣・建造物等の保全
- 2 復興のシンボル「天守閣」の早期復旧
- 3 石垣・建造物等の文化財的価値保全と計画的復旧
- 4 復旧過程の段階的公開と活用
- 5 最新技術も活用した安全対策の検討
- 6 100年先を見据えた復元への礎づくり
- 7 復旧基本計画の推進

詳細は熊本市ホームページ参照



被災石垣復旧の原則

石垣は原則として 「地震直前の状態」に復旧する

- 石垣の解体範囲は必要最小限とする
- 石垣等の復旧は伝統工法を基本とする
- 安全確保と文化財価値の保全を両立する
- 適切な文化財調査と成果の検討を行う



被災建造物復旧の原則



建造物は、原則として「地震直前の状態」に復旧することを基本とするが、耐震・耐風対策などの防災機能等についての検討を行う。

特に耐震対策について、総合的な調査・研究を早急に行う。

三次元レーザー測量等の活用



オルソ立面写真

天守台石垣の復旧

明治10年焼失 → 火薬庫 → 昭和35年再建(鉄筋コンクリート造)

地震被害: 大天守最上階の瓦崩落、小天守最上階の瓦破損、
大天守最上階柱鉄骨の損傷、穴蔵石垣の崩落、
小天守外側石垣の一部崩落・崩壊、
床・階段・壁の一部損傷 など



天守閣、天守台石垣被害状況

- ・昭和35年外観復元の天守閣はダメージ小
- ・天守台との間に8～27cmの隙間発生
- ・大天守台にダメージ小
- ・明治10年天守炎上時の焼損があり、地震を受けて剥離、破断が進行
- ・小天守台に一部崩落や孕みだし、緩み

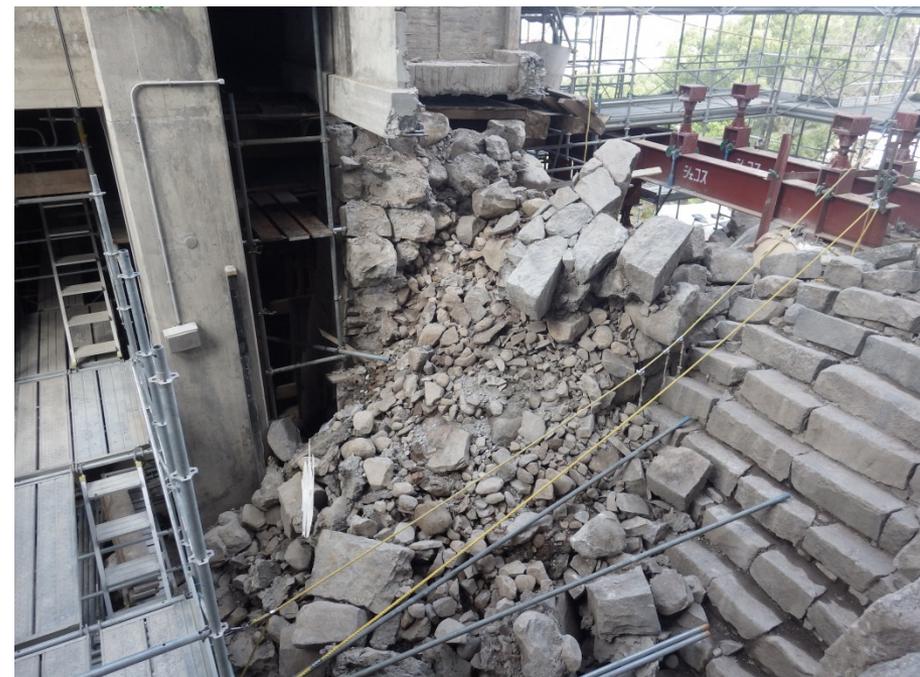
★穴蔵での被害が甚大



大天守南面石垣 石垣にはほぼ被害なし



小天守入口付近は再建時修理箇所が被害大



小天守穴蔵内崩落状況 南から

天守閣復旧工事

・天守閣の復旧はRC造の建物と崩落、変形した石垣の修理が主な作業。
天守閣建物は一部を解体修復し、補強工事を行う。
平成28年4月より本格的に工事を開始し、10月より大天守最上階再建作業が開始された。

平成29年3月



平成30年4月



平成30年10月



天守閣復旧工事

- ・大天守の石垣解体範囲を決めるにあたり、大天守台石垣上面の発掘調査を行った。
- ・崩落石材回収作業を行った。



大天守石垣上面調査成果



焼土2次堆積
明治22年積直し裏込

東面検出状況 北から



焼土2次堆積
明治22年積直し裏込

トレンチ5土層断面 北から

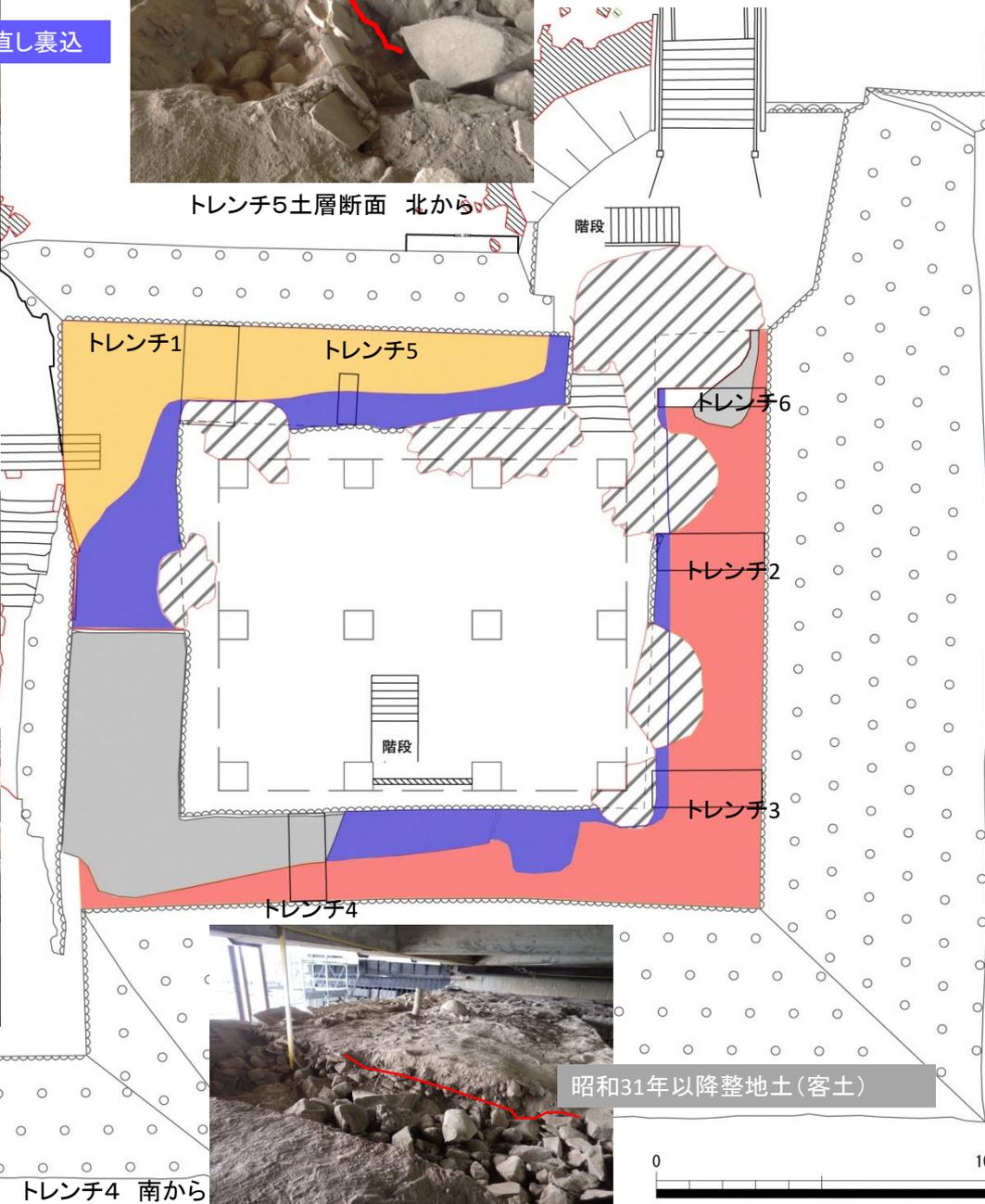


不明壺の破片

トレンチ1土層断面 南から



昭和31年閉塞箇所裏込 西から



昭和31年以降積直し

トレンチ6 西から



焼損瓦

明治10年焼土堆積

トレンチ2 東から



トレンチ3 北から

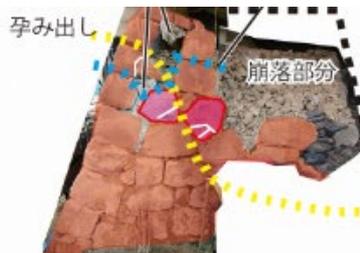
- 旧 ↑
- ↓ 新
- 明治10年焼土堆積
- 焼土2次堆積
- 明治22年積直し裏込
- 昭和31年以降積直し



昭和31年以降整地土(客土)

トレンチ4 南から

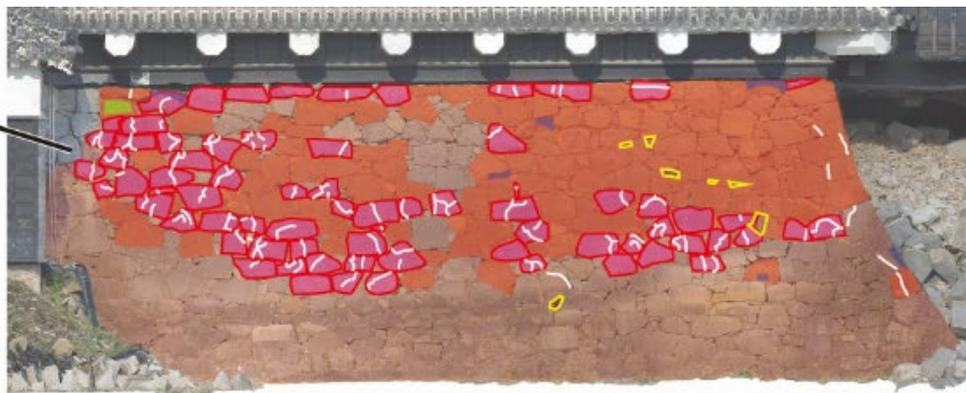
※斜線部は平成28年崩落箇所



石垣 (H615)



天守入口隅角部



石垣 (H522)

凡例

| | |
|----------------------|-------------------|
| : 焼損範囲 | : 石材変位 (飛び出し) |
| : 強く火を受け、破断・ヒビが生じた石材 | : 石材変位 (内側への落ち込み) |
| : 焼損した石材 | : 欠損 (割れ) |
| : 破断 | : 間詰め石の抜け落ち |
| : 変形部分 | : 後世の改修ライン |

石垣履歴・被災状況図



石垣 (H615)

解体ライン(案)



天守入口隅角部



石垣 (H522)

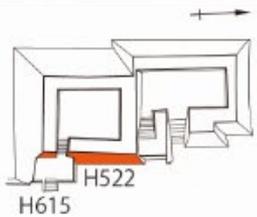
修復・取り替えが必要な焼損石材

H615 石垣解体理由

- 崩落部分に接した著しい変形 (孕み出し) の修復のため。
- 天守再建工事の際に埋め込まれたコンクリートの除去のため。

H522 石垣解体理由

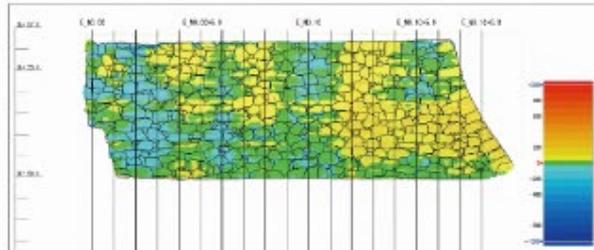
- H617 の変形修復のため、隅角石 4 石の解体が必要。
- 隅角石解体に必要な範囲と、その影響が及ぶ焼損の激しい築石の修復のため。
- 焼損した天端石の修復のため。



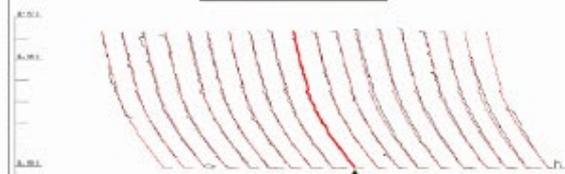
石垣解体範囲案図

大天守東面石垣 (H522・H615)

修復履歴、被災状況図

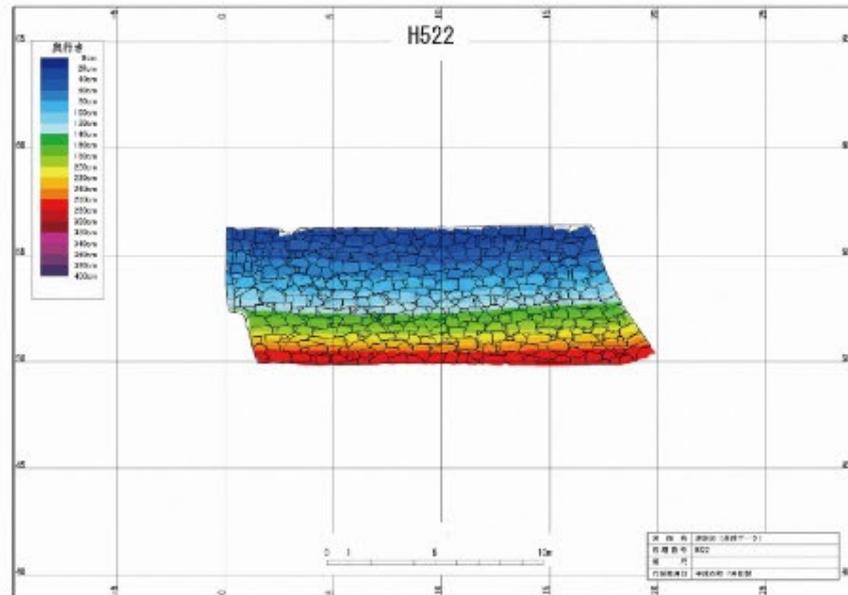


H522 段彩图

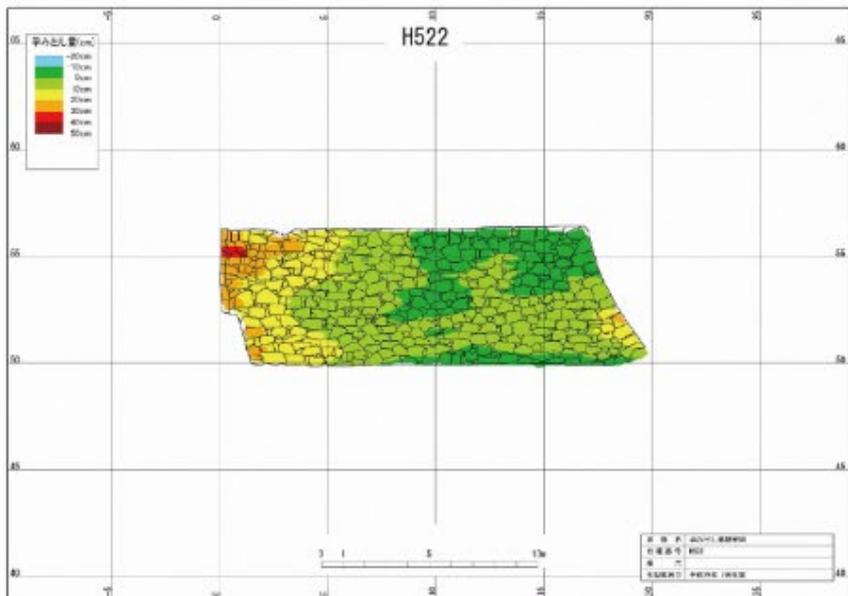


基准勾配

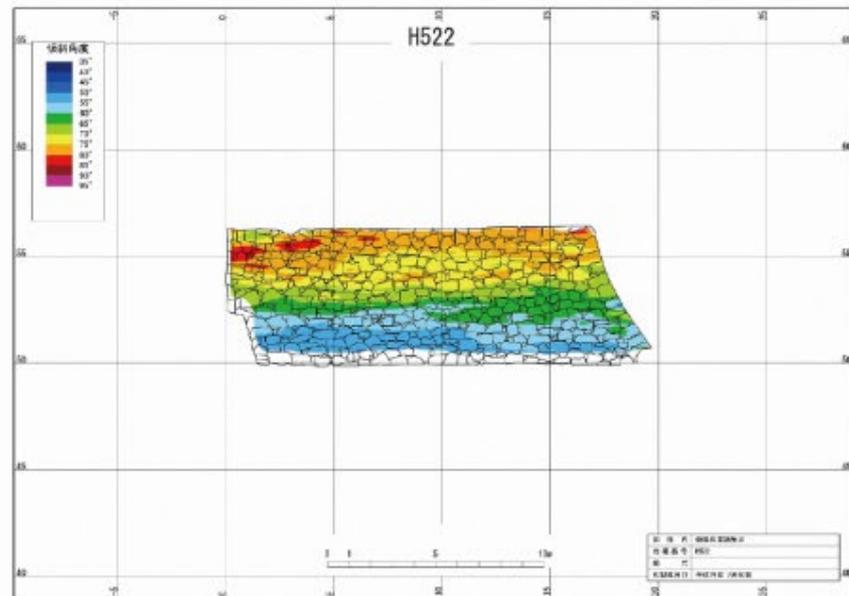
H522 垂直断面图



H522 段彩图 (点群)



H522 孕み出し量結果图



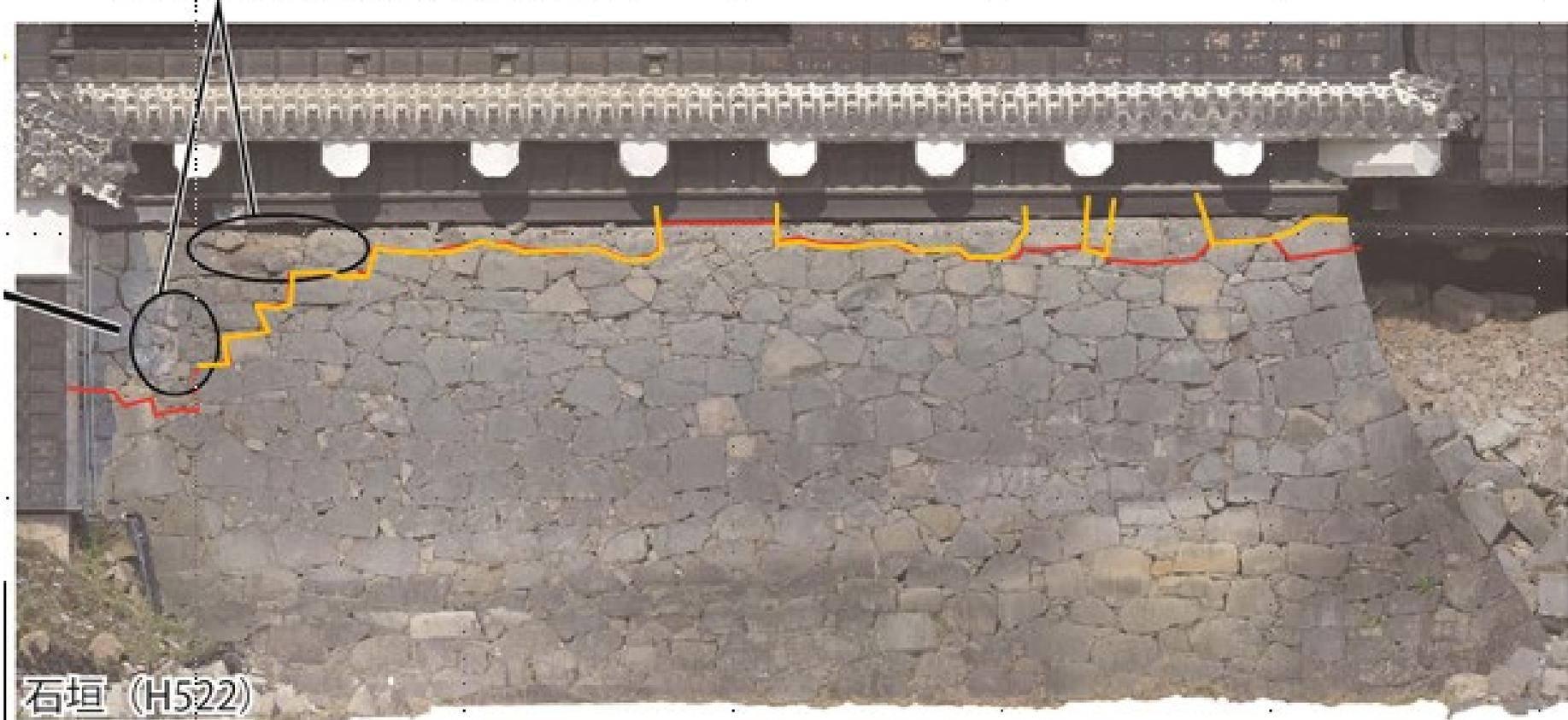
H522 傾斜角度結果图

段彩图

大天守解体作業

・石垣を測量し、段彩図を作成、修復履歴、被災状況を整理して、現地検討後、委員会の承認を得て解体範囲を決定した。

修復・取り替えが必要な焼損石材



解体範囲図(解体後)

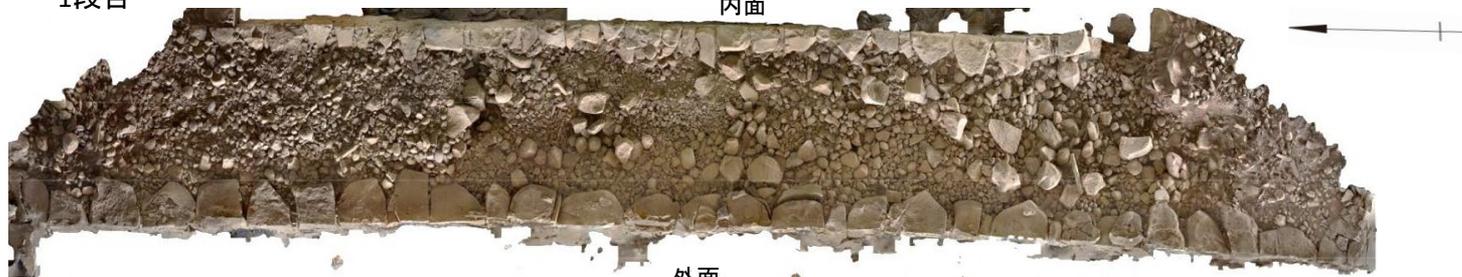
大天守石垣解体作業

頭上は大天守の梁
チェーンブロックを使用して石材を移動し、カニクレーンで足場に降ろす



西面 (H515・H616-1)

1段目



大天守台の内面と外面で、築石の大きさに明瞭な違いが見られる。外面の江戸期の石垣に比べて内面の近代以降に積み直された範囲の築石は小振りになっている。

4段目



大天守台内面の昭和31年と明治22年崩落後の積み直し範囲は、使用している築石の石材が小さく、下段ほど間知石状の石材が増える傾向がある。



1段目解体前

上面に昭和31年の積み直し時に築石として使用しなかった石材を並べている。積み直し時の境界部分に入れた可能性が考えられる。



4段目解体後

石垣背面でも大きな石材を検出した。一部は近代以降の積み直し時に境界となる部分に入れた石材と考えられる。江戸期の裏込めにも栗石として人頭大以上の大きな石材を入れている。

H618-1石材対照状況図



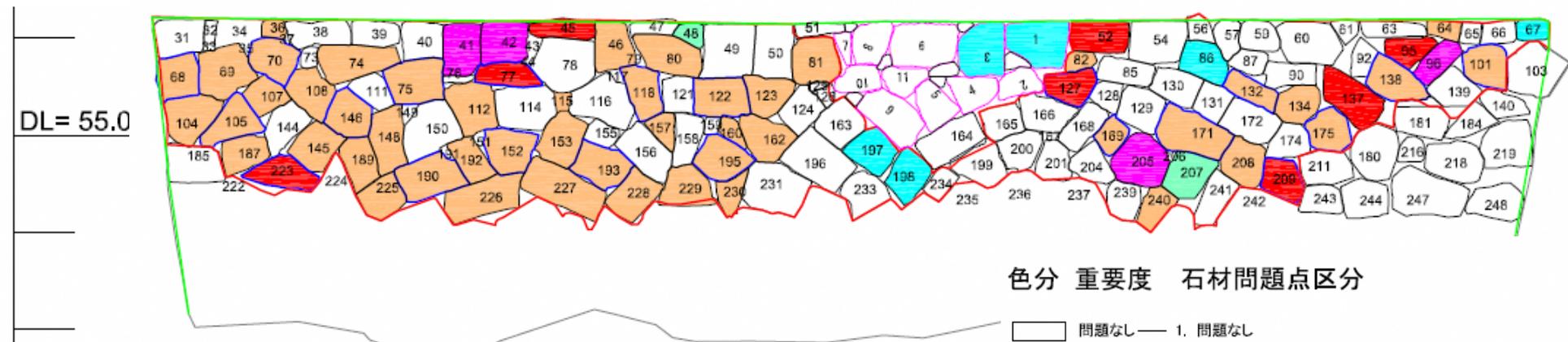
昭和35年工事写真にて石材対照



崩落状況での番付資料



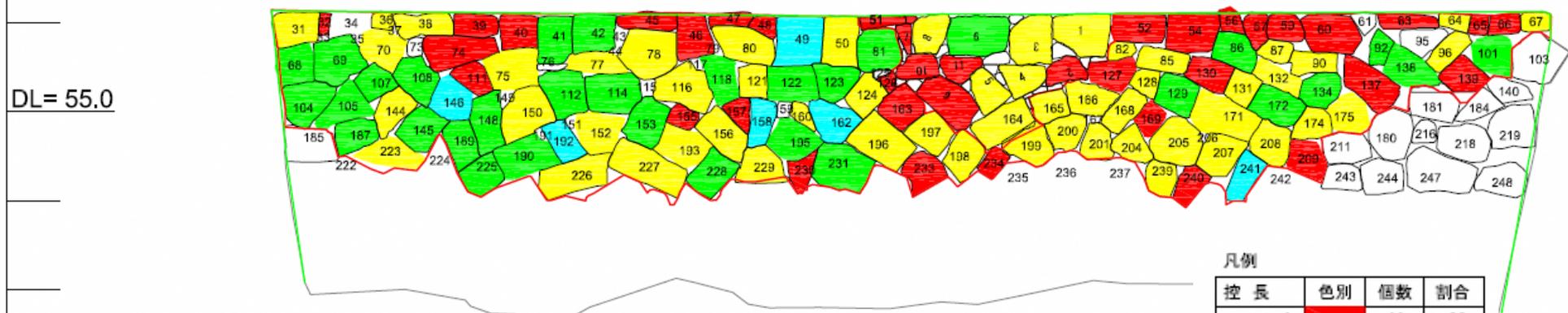
H618-1石材問題点分布図・石材控長分布図



石材問題点分布図(石材調査票より作成)

色分 重要度 石材問題点区分

- | | | | |
|--|-----------------------|-----------------|------|
| | 問題なし | 1. 問題なし | |
| | 大 | 2. 石材が破断している | 8(個) |
| | | 3. 石材に亀裂が入っている | |
| | | 4. 石材が剥離・剥落している | |
| | | 5. 石材の風化等による劣化 | |
| | | 6. 石材の控え 極端に短い | |
| | 7. 石材の控え 左右どちらかに寄っている | | |
| | 8. 石材の背面 石尻が極端に短い | | |



石材控長分布図(石材調査票より作成)

凡例

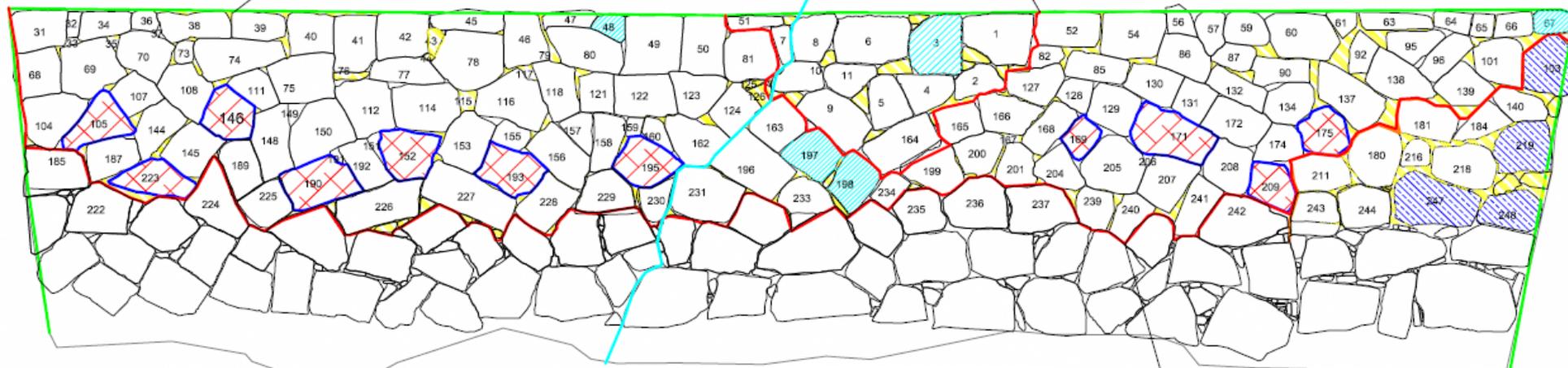
| 控長 | 色別 | 個数 | 割合 |
|--------|----|-----|-----|
| 30cm以上 | | 38 | 29 |
| 45cm以上 | | 55 | 42 |
| 60cm以上 | | 32 | 24 |
| 75cm以上 | | 6 | 5 |
| 90cm以上 | | 0 | |
| 合計 | | 131 | 100 |

H618-1石材取り扱い図・石垣復旧フロー

復旧ライン(検討中)

崩落ライン

明治22年積直しライン



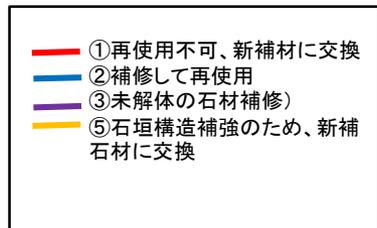
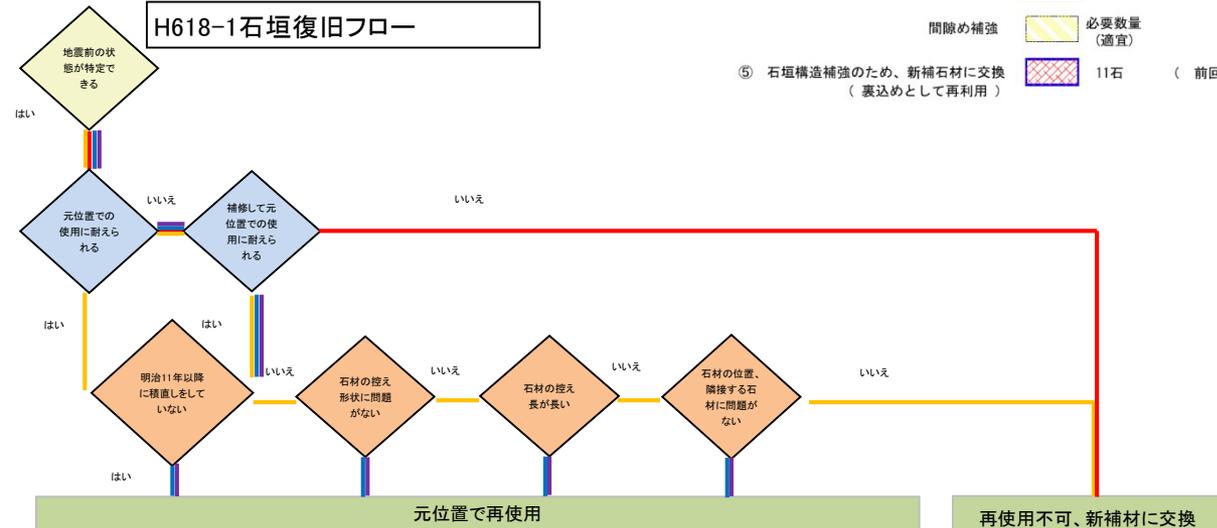
昭和31年修復ライン

解体ライン

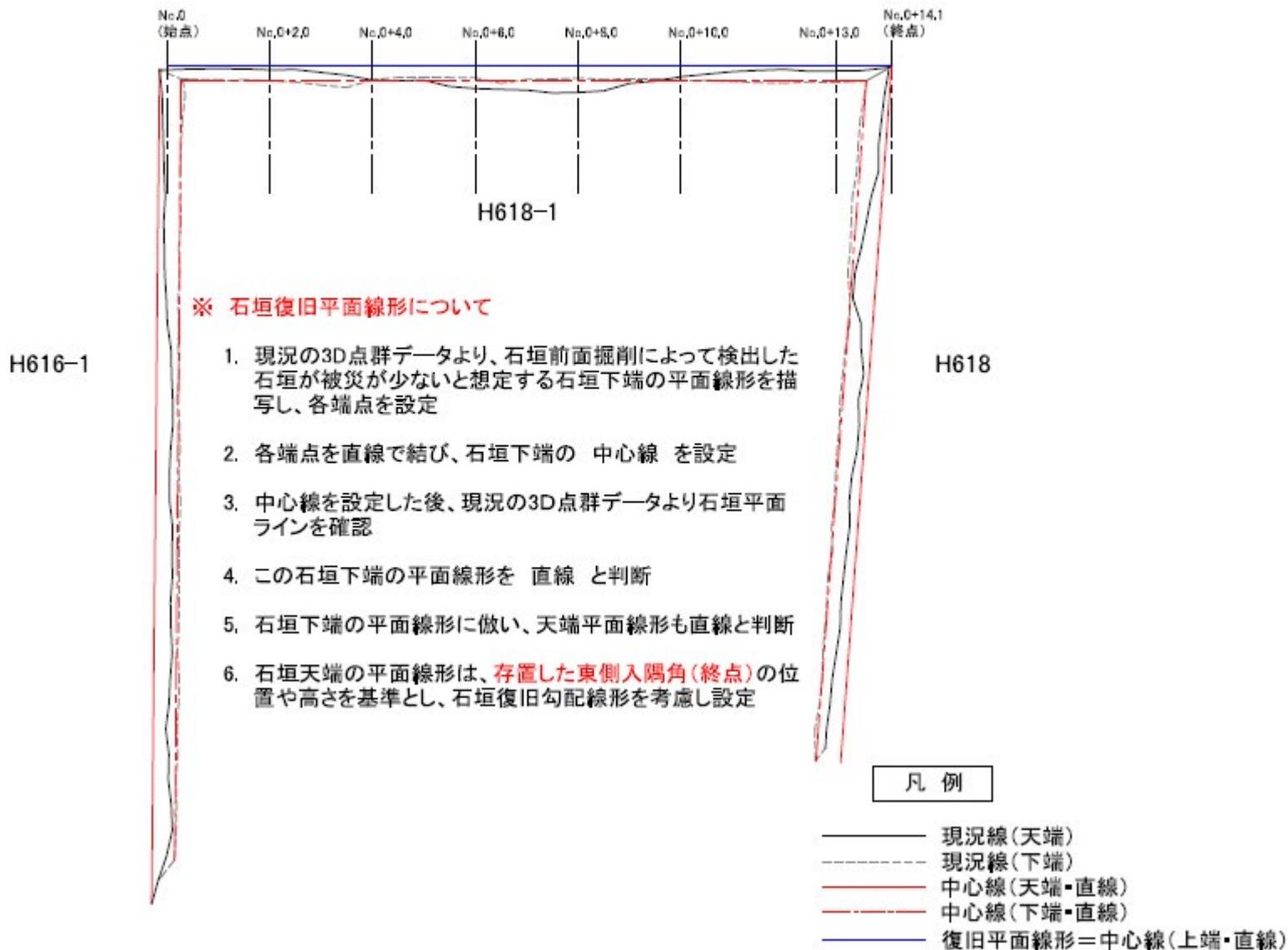
凡例

- | | | |
|------------------------------------|--|--------------|
| ① 再使用不可、新補石材に交換 (裏込めとして再利用) | | 0石 (前回 1石) |
| ② 石材補修して再利用 | | 5石 (前回 5石) |
| ③ 非解体の石材補修 | | 4石 (前回 4石) |
| ④ 新補石材 (追加築石) | | 0石 (前回 0石) |
| 間隙め補強 | | 必要数量 (適宜) |
| ⑤ 石垣構造補強のため、新補石材に交換 (裏込めとして再利用) | | 11石 (前回 21石) |

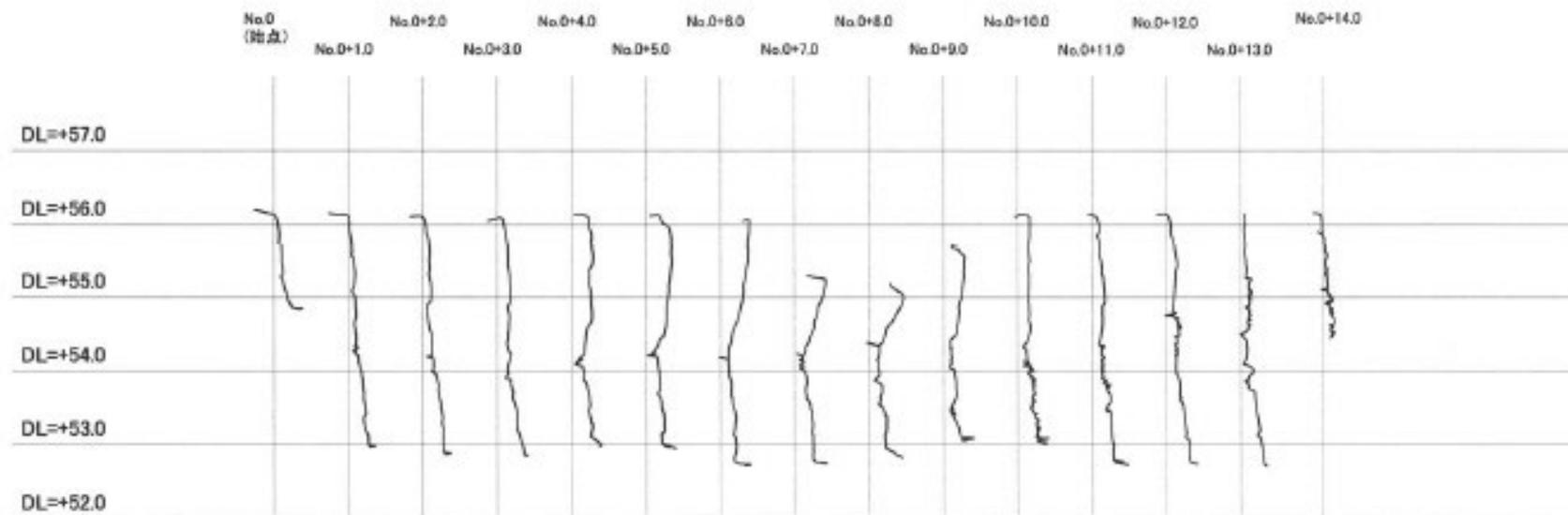
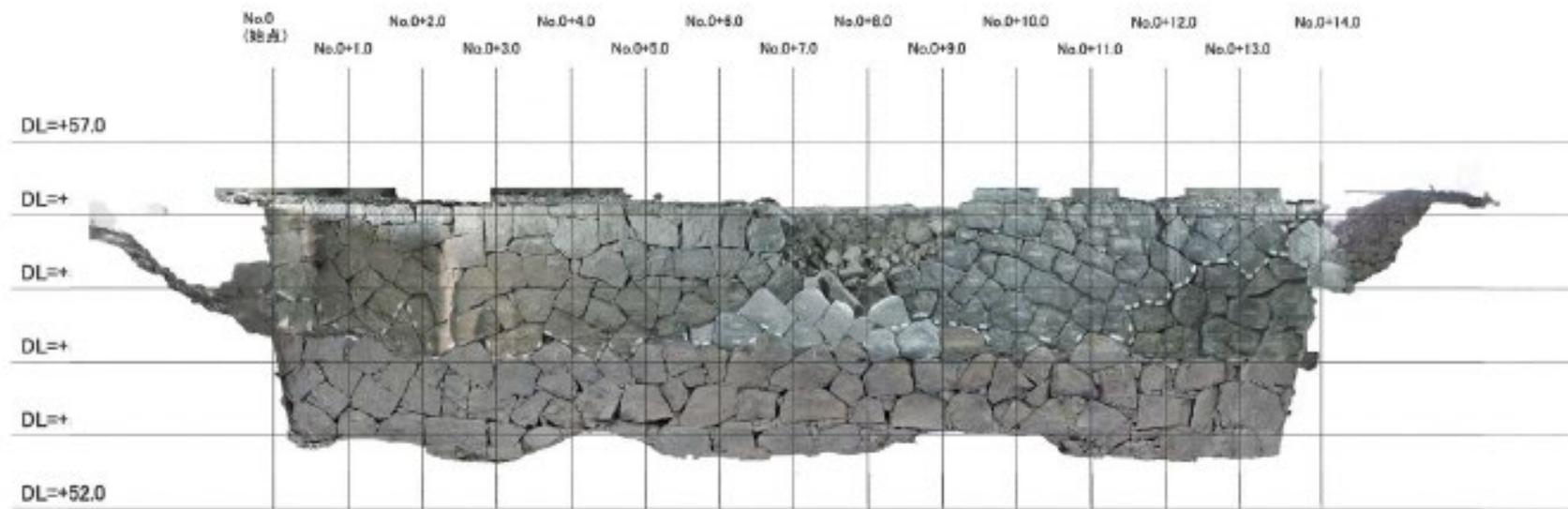
H618-1石垣復旧フロー



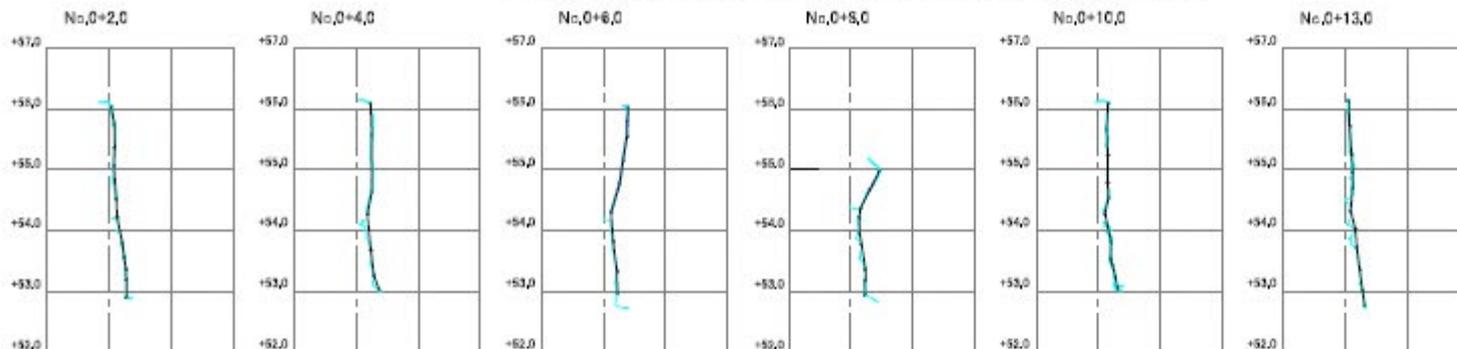
平面図H618-1



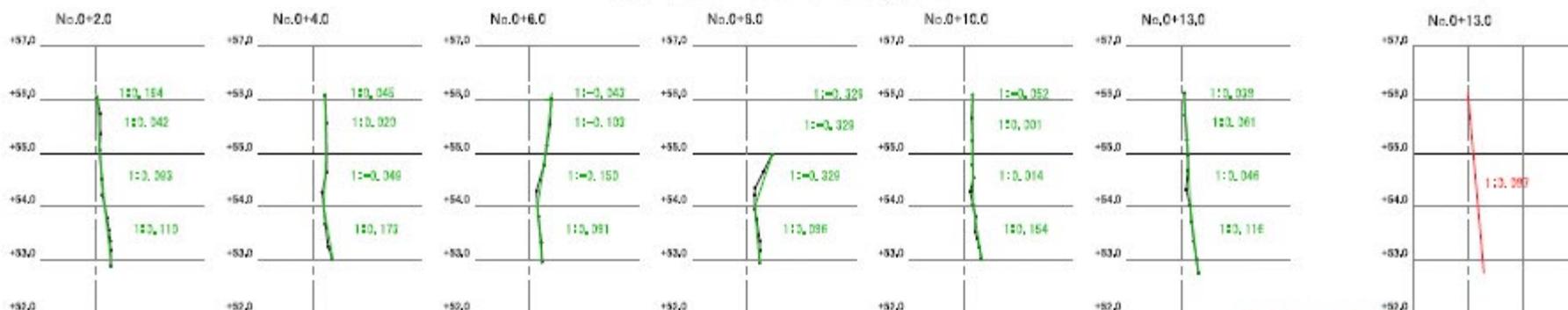
H618-1 断面图



H618-1現況測量による平滑化断面図（現況石垣表面ライン）



H618-1現況測量による平均勾配断面図



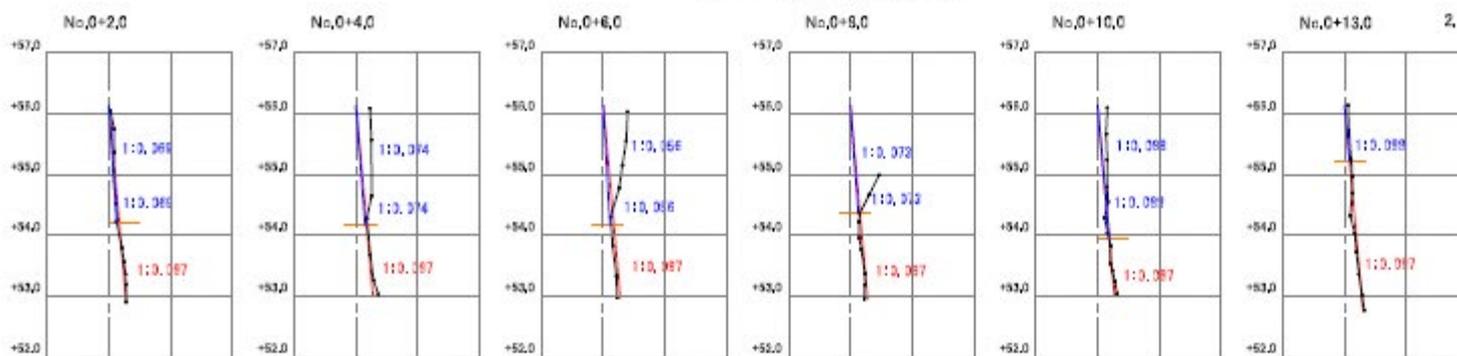
基準勾配



※ 基準勾配の設定

1. 全体形状の変状が小さい箇所
(石垣断面図例によって検出した箇所)を参考とした。
2. 石垣基準勾配は95° (1:0.097) が妥当と判断した。

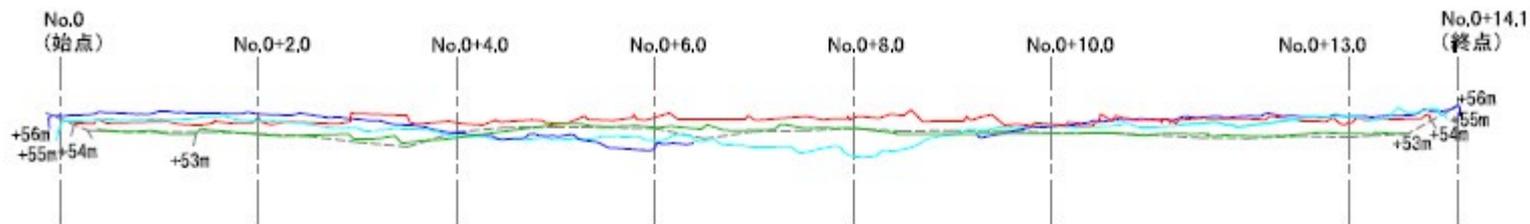
H618-1復旧案 断面図



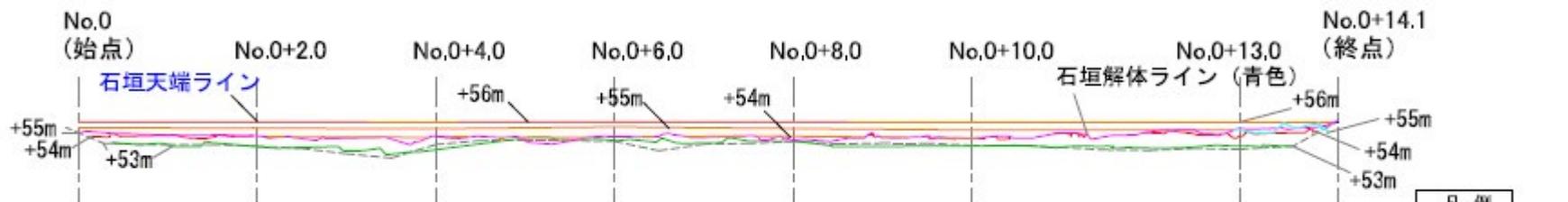
凡例

- 現況線
- 平滑化断面線
- 平均勾配断面線
- 基準勾配線
- 復旧勾配線
- 復旧境界

H618-1 現況測量による等高線図



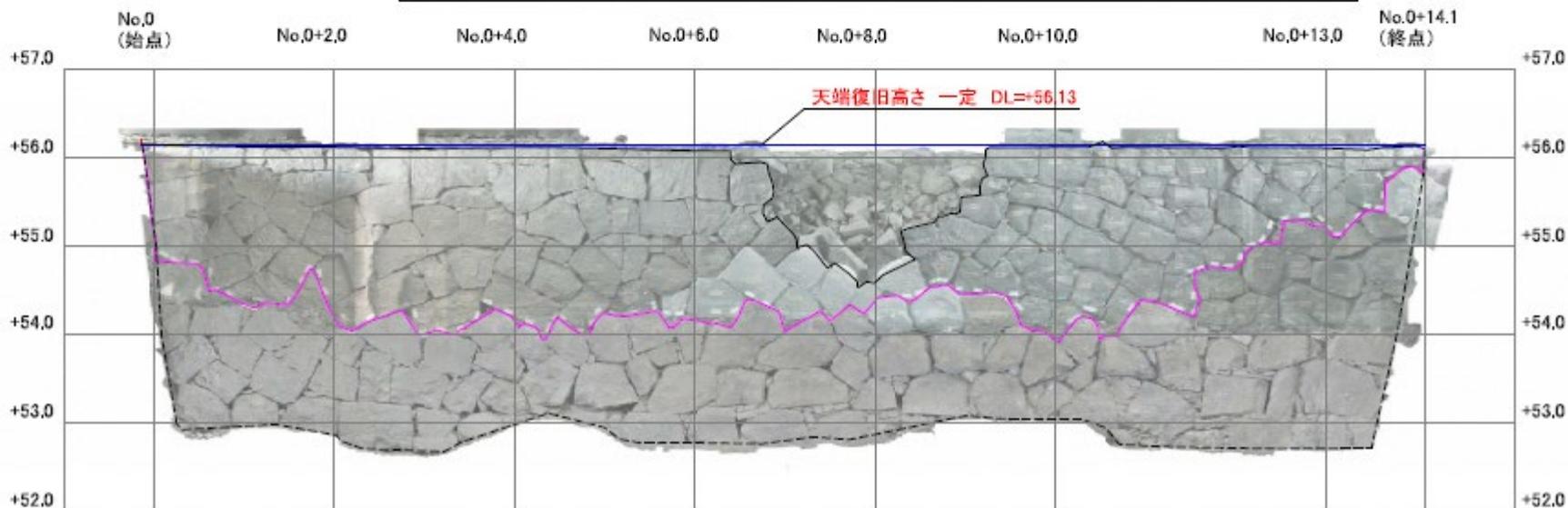
H618-1 復旧案 等高線図



H618-1復旧案 立面図

※ 石垣天端復旧高さ

1. 終点側の存置石垣の高さ DL=+56.13m を基準とし、基準高さを設定
2. 基準高さと現況の比較より、石垣天端復旧高さを一定の『DL=+56.13m』と設定



4. 復旧への課題

○地震前の崩落石材の元位置

○地震前の石垣形状(天端高さ、平面形状、勾配等)

役に立ったもの

・石垣台帳

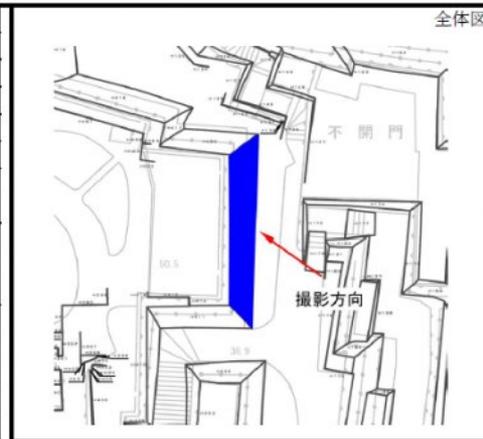
石垣面1つ1つに番付

基本情報をまとめる

(写真、面積、高さ、積み方など)

石垣台帳

| | | | | |
|------|-------|------------|----------------|----|
| 石垣番号 | H415 | | | |
| 地区名 | 本丸ゾーン | | | |
| 石垣部位 | 橋台 | | | |
| 構造規模 | 地盤 | 土 | | |
| | 地形 | 盛土部(一部切土部) | | |
| | 構成 | 2面 | | |
| | 石垣延長 | 天端 | 39.32 | m |
| | | 下端 | 50.84 | // |
| | 石垣高さ | 左 | 12.60 | // |
| | | 中央 | 12.84 | // |
| | | 右 | 13.60 | // |
| | 勾配 | 隅、左部 | | 度 |
| | | 左 | | // |
| 中央 | | | // | |
| 右 | | | // | |
| 面積 | 隅、右部 | 63 | // | |
| | | 566.65 | m ² | |

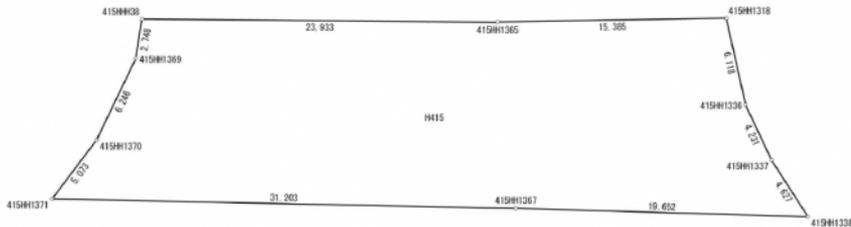


| | | |
|-------|------|-------|
| 積み方 | 隅部 | 算木積使用 |
| | 平部 | 布積・乱積 |
| 加工度 | 隅部 | |
| | 平部 | |
| 平面形状 | | |
| 反りの有無 | | |
| 石材 | 形状 | 割石 |
| | 面加工 | 打込ハギ |
| | 石質 | 安山岩 |
| 間詰め石 | 一部欠落 | |
| 裏込石 | 不明 | |
| 矢穴 | 有 | |
| 刻印の有無 | 無 | |
| 風化度 | | |
| 変形度 | | |
| 危険度 | | |



本丸ゾーン 面積計算 H415

S=1/250



求積表

| 地番 | H415 | Xn | Yn | Yn-1-Yn | Xn - (Yn-1-Yn) |
|-----------|------|--------|--------|---------|-----------------------|
| 415H41508 | | 49.971 | 10.000 | 24.347 | 1216.643937 |
| 415H41505 | | 49.769 | 33.932 | 39.315 | 1956.668235 |
| 415H41518 | | 50.021 | 49.315 | 16.670 | 834.016770 |
| 415H41536 | | 44.050 | 50.602 | 3.044 | 134.068200 |
| 415H41537 | | 40.201 | 52.359 | 4.192 | 166.522992 |
| 415H41538 | | 36.266 | 54.794 | -17.308 | -424.065228 |
| 415H41587 | | 36.848 | 35.151 | -50.839 | -1873.315472 |
| 415H41571 | | 37.499 | 3.955 | -28.198 | -1057.396802 |
| 415H41570 | | 41.591 | 6.953 | 5.630 | 234.157330 |
| 415H41569 | | 47.255 | 9.595 | 3.047 | 143.695985 |
| | | 合計 | | | 1133.305447 |
| | | 合計面積 | | | 566.6527235 |
| | | 地積 | | | 566.65 m ² |

| | | | | | | | |
|-----|-------|----|-----|-----|-----|-----|----|
| 履歴等 | 改修の有無 | 時期 | 江戸期 | 明治期 | 昭和期 | 平成期 | 備考 |
| | | 範囲 | | | | | |
| | | 起因 | | | | | |

特記事項
中央ハツキ抑え
勾配は、天端と下端より計算

調査日 2013年3月21日

足りなかったもの

・石垣の詳細な写真

現在ではデジタルカメラで撮影したデータから3次元データ作成できる。

白河市小峰城では地震で崩れた石垣の勾配をこのデータから復元している。

石垣の対照作業にも有効。正面に近い写真があれば正解率が上がる。



おわりに～自然災害への備え～

- ・3Dレーザー測量
3次元のデータが、復旧に有効。
 - ・ドローン撮影
- ※上記は機材準備が必要。

すぐにでも始めることができるのは

- ・デジタルカメラ撮影

※石垣に支障物(草や苔、樹木など)がない状態での写真
地震後に測量を発注する場合にも、除草作業にかなりの費用、期間が必要になっている。

また、季節によっても見え方が変わるので注意