

第3章

熊本地震後の修理

第1節 工事概要

第1項 被災状況

1-1. 工事着手前の被災状況

平成28年（2016）熊本地震は熊本県熊本地方を震源地とした一連の地震活動である。同一地域において前震（4月14日21時26分）から本震（4月16日01時25分）までのわずか28時間の間で震度7を2度記録したのは、観測史上初めてのことであった。通潤橋の近傍にある観測所（山都町下馬尾^{げばお}）では震度6弱を1度（本震時）、震度5強を1度（前震時）、震度5弱を2度（4月15日0時03分、同日1時53分）記録した。

通潤橋は熊本地震により随所で破損が確認された。通水石管は目地漆喰の破損により橋上部やアーチ下部から大量に漏水しており、取入口と吹上口の目地には亀裂が生じていた。壁石上部に乗る手摺石は孕み出し、壁石と通水管の間の被覆土に地割れが生じていた。

目視の調査では石垣孕み出しの程度が数値化できないため、次項の三次元計測調査により詳細を確認した。

1-2. 工事着手後に明らかとなった被災・破損状況

工事着手後は被覆土の下に敷設されている赤土叩きや通水管の破損状況が詳らかとなった。

赤土叩きは平坦部にのみ敷設されているが、そのうち壁石ぞいに橋軸方向の地割れ・陥没が生じていた。陥没が顕著な2箇所にてレンチを入れたところ、壁石と裏築石の間に空隙があることが判明した。これは熊本地震で壁石が孕み出さなかった部分でも同様の状況であったことから、空隙は熊本地震前から発生しており、今回の地震により赤土叩きの破損につながったものと判断した。

ホ-19に残る木管（松材）はヤマトシロアリによる蟻害を受けていることが判明した。蟻害は木管の両側面の白太部分に見られ、表面皮1枚を残して全面に深さ8cm程度の範囲で広がっていた。蟻害の進行状況から熊本地震以前から被害を受けたものと判断した。通潤橋には合計で3個の木管が残るが、残りの2個は蟻害を受けていなかった。

石管は橋軸方向に亀裂が生じているものがあった。亀裂のある箇所から漏水が確認されなかったため、軽微な破損として取り扱った。



写真3-1-1. アーチ下端からの漏水



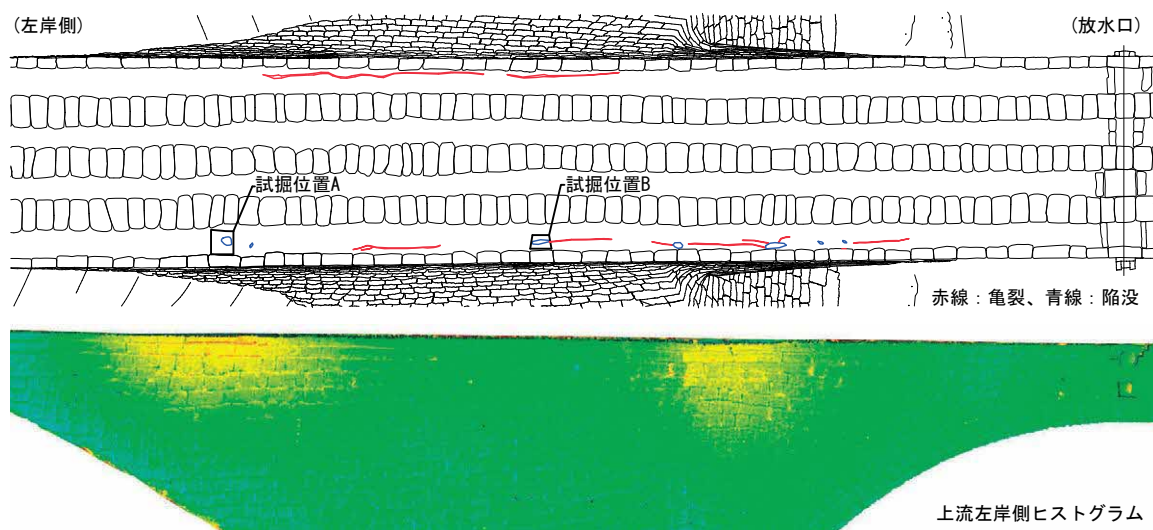
写真3-1-2. 手摺石の孕み出し



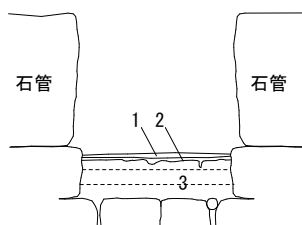
写真3-1-3. 被覆土の地割れ



写真3-1-4. 木管の蟻害



前回の修理の状態



「平成15年通潤橋補修工事報告書」p115参照

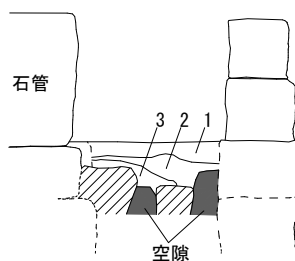
番号凡例：前回の修理

1. 紫色に変色した赤土：破損なし
2. 漆喰叩き：少し攪乱。二代目叩きか
3. 赤土層：三回くらいに盛土？

番号凡例：今回の修理

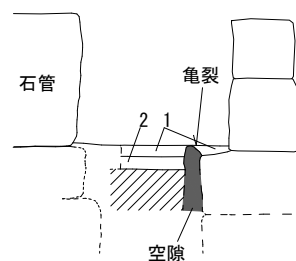
1. 叩き層(赤土)：過去修理工事の叩きか
2. 整地層
3. 叩き層(赤土)：当初の叩きか

今回の修理の状態(試掘位置A)



試掘A写真

今回の修理の状態(試掘位置B)



試掘B写真

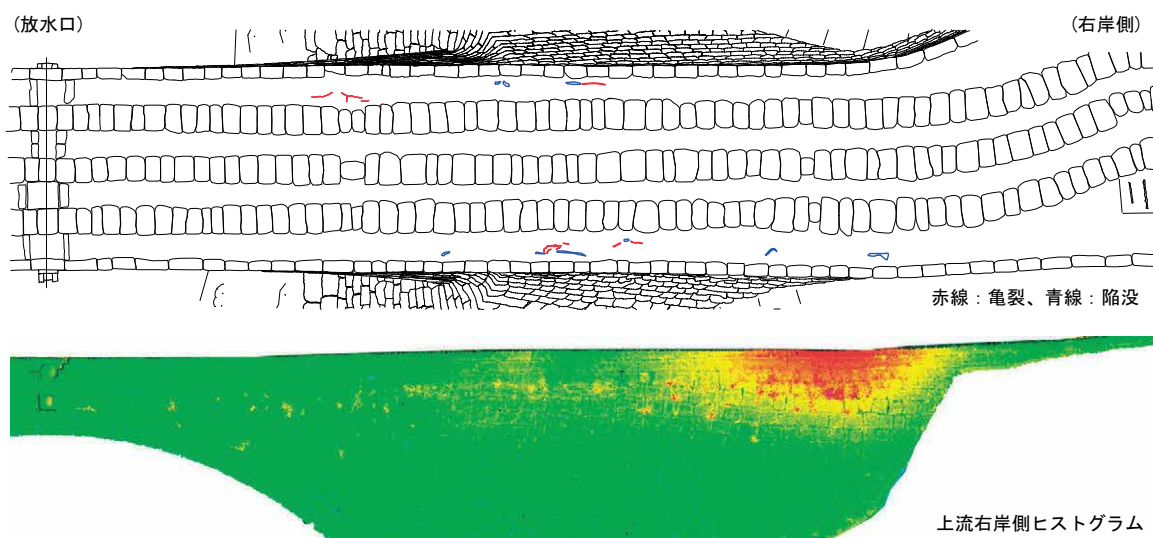


図3-1-1. 叩き層のひび割れと陥没範囲

第2項 工事着手前調査（三次元計測）

2-1. 概要

三次元計測では熊本地震以前の既存データと熊本地震後を比較し、亀裂の程度や石垣及び橋上の変位を数値化することを目的とした。

2-2. 現地計測

1. 三次元レーザ計測

三次元レーザスキャナはレーザが計測対象物とセンサーの間をレーザパルスが往復する時間を計測することで距離を取得し、レーザビームを発射した方向を計測することで三次元座標を取得するものである。計測は橋の周囲12箇所で行った（写真3-1-5に記載）。機材はTOPCON社のGLS-2000を使用した。

2. UAV撮影

三次元形状を取得するため、UAVを用いた撮影をした。対象を多視点からとらえて撮影し、デジタル画像からステレオマッチングされたデータより対象物の表面形状を取得した。撮影は橋周囲から隣り合う画像が60%以上ラップするようにした。機材はDJI社のPhantom3を使用した。

3. ギガピクセル画像撮影システムを用いた撮影

自動で動く雲台（自動撮影雲台）に望遠レンズを装着し、より高精細な石垣の撮影をした。自動撮影雲台とは2軸のモーターを搭載し、設定した撮影範囲を画角によって自動分割・撮影するものである。範囲を設定して自動で撮影するため、望遠レンズを用いた撮影でも画像の取りこぼしがなく、詳細な画像を得ることができた。また撮影したそれぞれの画像は合成して、超高解像度の1枚画像を作成した。今回は対象の亀裂やひび割れを確認できるように、石橋壁面では1mm/pixel以下となるよう500mmの望遠レンズを用い、対象までの距離70～85mで園路及び畦道から撮影した。

2-3. データ解析

三次元モデルは各場所から計測した点群データを合成した上で石橋全体を表現した。多視点画像解析（SFM解析）やギガピクセル画像を点群データと重ね合わせ、TIN（不整三角網モデル）からオルソ画像（正射画像）まで変換できるようにした。

解析をしたデータは三次元座標を持っているため、断面形状や石垣の亀裂を随時確認しながら検討した。この事業では孕み出し図と損傷図を作成した。

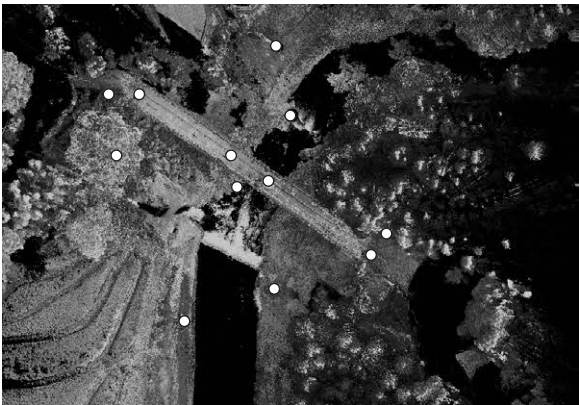


写真3-1-5. 三次元スキャナを設置した位置（12箇所）



写真3-1-6. 三次元合成完了データ

機種名	TOPCON GLS-2000
機種イメージ	
測定範囲	1～350m(選択モードによる)
カラー情報	内装カメラによりRGBデータ取得
備考	中距離型スキャナ。 1カット約10分。



左：三次元スキャナ機材

右：自動雲台機材

機種名	DJI Phantom3 professional
機器イメージ	
重量	1280g
大きさ	350mm
カメラ	解像度4000×3000pixel

UAV機材

2-4. 孕み段彩図の作成

段彩図は今回計測した三次元データと平成22年(2010)に計測したものを比較し、その差分を段階的な色で表現した。範囲は上流立面、下流立面、天端平面とした。

上流立面は左岸2箇所と右岸の1ヶ所に孕み出しが見られた。特に右岸側は顕著で、10cmから15cm程孕み出していた。

下流立面は左岸側の上部に孕み出しが見られた。右岸側は樹木が支障となりデータが得られていない。

天端平面は上流側立面で孕み出しの見られた部分を中心に沈下傾向があるが、熊本地震直後の応急対策によりブルーシートを設置した状況で計測しているため、正確な判定には至っていない。

2-5. 損傷図の作成

損傷図は主にギガピクセル画像及びUAV、手撮りによる高解像度の画像を用いて図化をした。平成25年(2013)に撮影した損傷図及び写真と比較した結果、亀裂の変化は確認されていない。

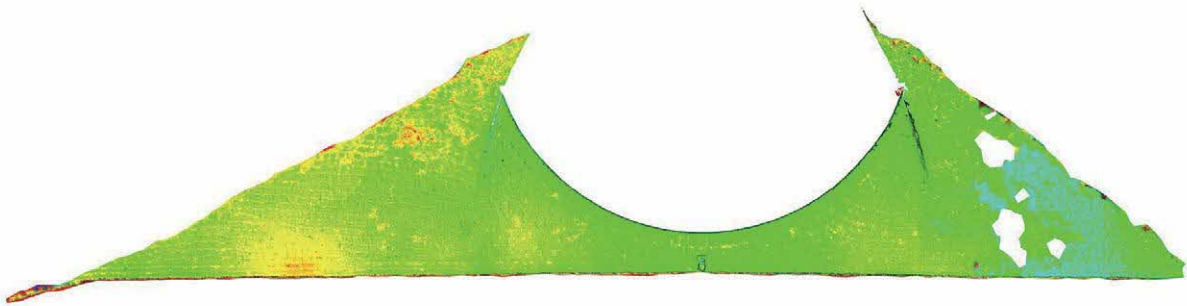


図3-1-2. 下流立面段彩図

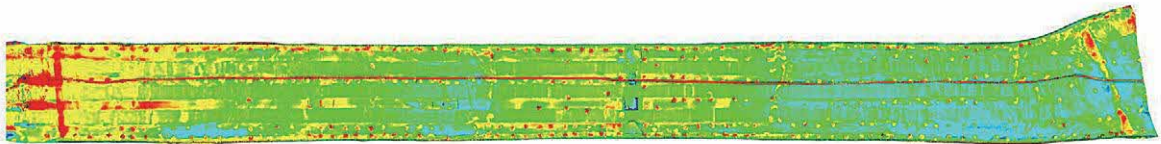


図3-1-3. 天端平面段彩図

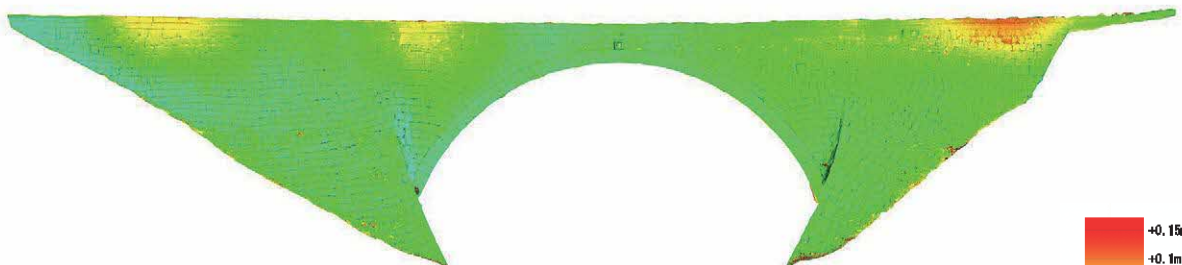
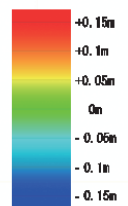


図3-1-4. 上流立面段彩図



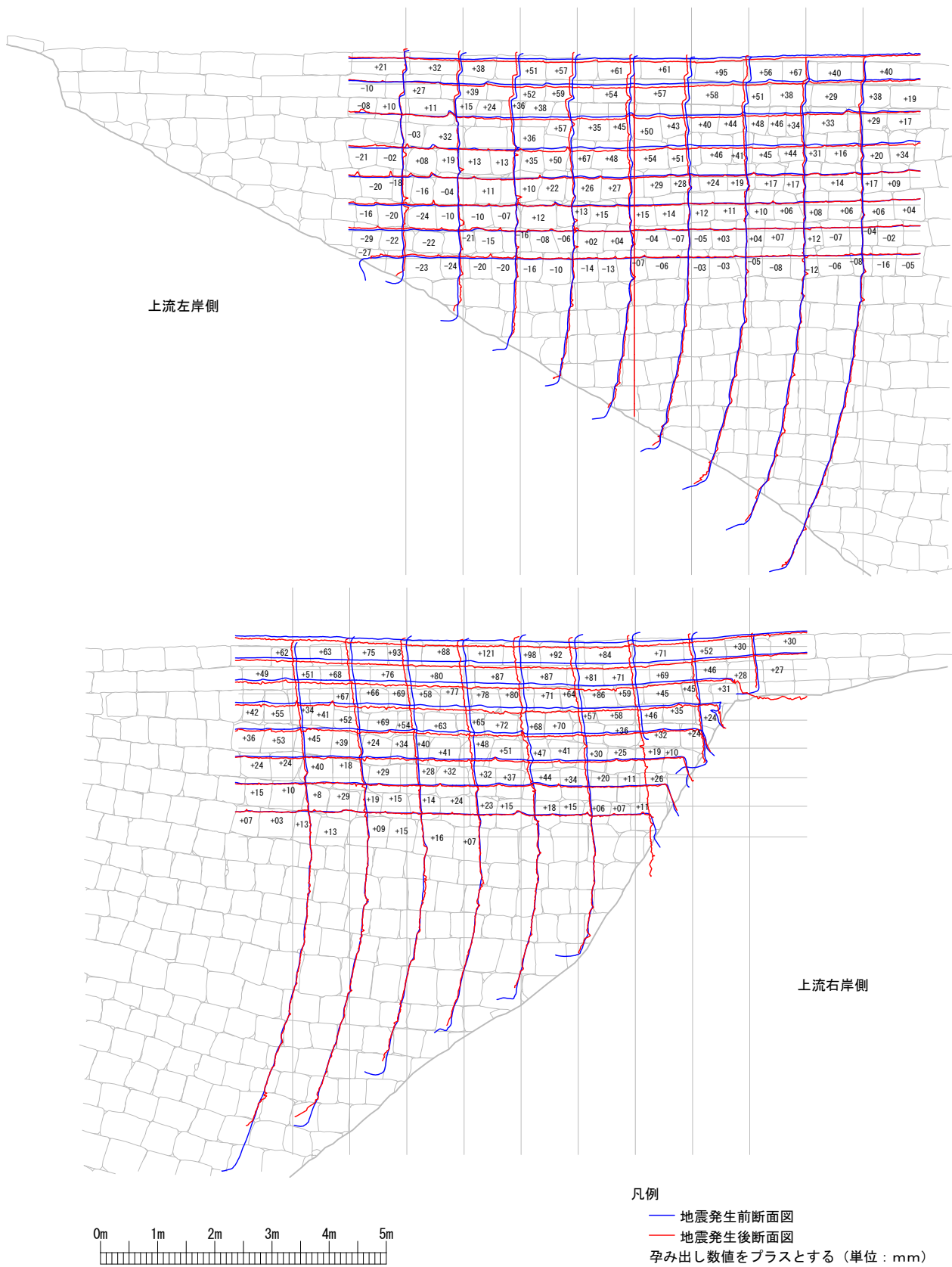


図3-1-5. 壁石孕み出し数値

第3項 修理方針の概要と実施工程

3-1. 修理方針の概要

修理方針は委員会等による検討を経て以下の通りに決定した。

1. 石垣の積み直し

今回の計測で特に孕み出しが顕著な上流兩岸の端部は以前から経年変化による孕みが確認されていた。平成22年と平成25年に三次元計測を行い比較をしたところ、孕み出しの進行は認められていないため、『重要文化財通潤橋保存活用計画』（平成27年3月）において「緊急に影響を及ぼすものではない」と位置付けている。熊本地震後の修理では上記の方針に倣い、かつ文化財修理の原則として最小限の範囲とすることを前提とした。

石垣の積み直し範囲は地震後で最大10～15cm程度のずれが確認された上流兩岸の手摺石2段を対象に据え直すこととした。

2. 通水石管の破損

通水石管は亀裂からの漏水はなく、構造的な問題もみられないため、今回は修理をせず、今後のために現状を記録した。

3. 壁石表面の亀裂

壁石表面の亀裂は地震以前から変位がなく、構造的な問題も認められていないため、修理は行わず経過観察に留めた。

4. 目地漆喰の詰め替え

目地漆喰は通水試験をした上で漏水箇所を特定し、漆喰の詰め直しを行うことにした。本工事では夏から冬にかけて長期間に亘り大量に漆喰を作る必要があったため、「通潤橋仕法書」や冬季の通潤地区土地改良区による維持管理実績を参考としながら漆喰試験をすることにした。

5. 赤土叩きの亀裂及び陥没箇所

赤土叩きの亀裂及び陥没箇所は目地漆喰を板状に整形したものを敷き並べ、その上に新たな赤土叩きを被せることとした。

6. 木管

木管の蟻害への対応は東京文化財研究所生物科学研究室長に現地指導を仰いだ。蟻害の進行が著しく補修できる状況ではなかったため、在来に倣い取り替えることとした。

3-2. 実施工程

工事は平成29年4月に着手した。はじめに索道を設置し、直接足場を架設した。被覆土の掘削後は手摺石の据え直しを行った。通水試験により漏水箇所を確認し、通水石管の目地漆喰を詰め替えた。この作業は漏水がなくなるまで繰り返し実施した。詰替完了後は木管の取り替え、赤土叩きの補修を経て、被覆土を埋戻した。取入口の目地詰め替えをして工事を完了した。

表3-1-1. 熊本地震後の実施工程表

区分		H28年度						H29年度												H30年度	
		10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月
委託	3次元計測調査	3次元計測																	修理後の計測		
別工事	ヒューム管取付		ヒューム管、搬入路																		
本工事	仮設工事							設置													
	直接足場							設置				撤去									
	土工									平場掘削						坂場掘削					
	被覆土掘削																				
	被覆土埋戻し																		赤土敷	埋戻し	
	石工事										据直し										
	手摺石据え直し																				
	目地削孔											目地削孔									
	左官工事											漆喰製作・詰替									
	通水試験											通水試験									
雑工事	取入口目地補修																				補修
	木管取替																			取替	

第2節 仮設工事

第1項 索道

索道は工事の運搬手段として取入口から吹上り口までの範囲に設置した。索道路線、起点・終点アンカー、支柱位置を検討し、計画図を作成した。施工手順は以下の通りである。

1. 機材搬入

機材は小型車両にて現場内に搬入した。過積載防止のため、積み込み時に重量確認を行い、運搬中に荷崩れを起こさないように確実に固定した。全ての作業は有資格者が行い、玉掛ワイヤーも毎月点検して使用基準に適合したものをを用いた。

2. 終点アンカーの設置

主索取り付けの立木を当木等で保護し、立木の強度表（林業教育研究会編「林業実践大学-伐出作業」）を参考に、他の立木からの控索で補強をして十分な強度を確保した。

3. 終点支柱作設

支柱部材を地組した後、立木を控索で補強し台棒とした。横行索、チルホールで立ち上げを行い、立木からの控索で確実に固定した。

4. ウインチ設置

ウインチは索道路線が視認でき、作業員の作業通路と交差しない位置に配置した。

5. 起点アンカーの設置

主索取り付けの立木を当木等で保護し、立木の強度表を参考に、他の立木からの控索で補強を行い十分な強度を確保した。

6. 起点支柱作設

鋼製支柱部材の地組を行い、立木に滑車を取り付け作業索にて建込み控索で固定を行った。必ず4方向以上で固定した。

7. 横行索配置

初めにナイロンロープを往復させ、ワイヤーロープと入れ替えた。ナイロンロープは終点側より人力で引き回した。

8. 主索配置

横行索で主索を曳き渡す際は、索道路線下への第三者立入りの有無を確認して作業した。主索緊張時はスイッチの破損等でワイヤーロープと接触しないよう、ワイヤーロープの内角での作業と立ち入りを禁止した。

9. 巻上索設置

ワイヤーロープの片末端を機械に固定し、起点アンカーから終点アンカーまで引き回した。作業中は索下の立ち入りの有無を確認し、合図に従って作業した。

10. 試運転

試験体の重量を確認し、十分な強度のある玉掛ワイヤーを使用した。なお荷重試験は「クレーン等各構造規格」を遵守し実施した。

11. 引き渡し、場内清掃

ウインチオペレーター資格の有無を確認し、作業場の留意点や運転操作、点検等の方法を指導してから運転操作を指導した。残材はすべて現場より搬出した上で退場した。

12. 完了

起点・終点アンカー、各支柱位置等での番線、ワイヤーロープ等の残材の有無を確認した。

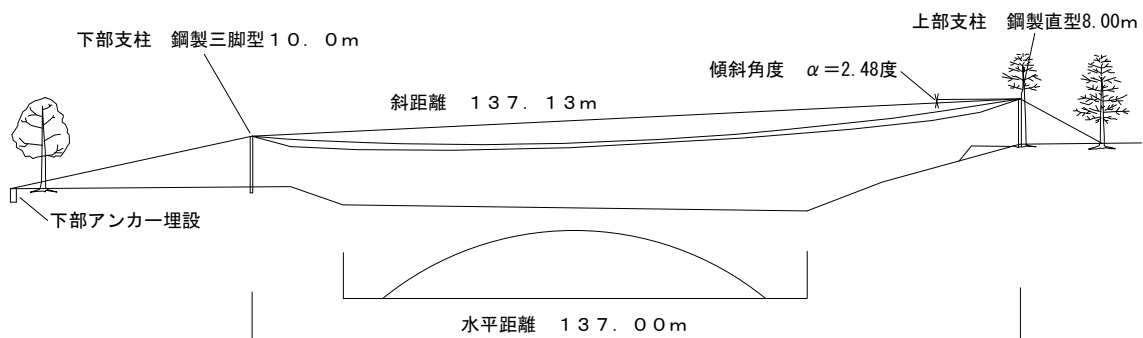


図3-2-1. 索道図

表3-2-1. 索道使用機材

品名	規格	性能	数量	備考
ウインチ	S Y H - 1 7 E R	最大値引力 1.7ton	1 台	
ウインチ	H - 1 3 0 0 D W S	最大値引力 1.3ton	1 台	
キャレージ	A - 1	常用荷重 2.0ton	1 機	
ローディング ブロック	B - 3 0 7 (4 枚重鍵付き)	常用荷重 3.0ton	1 個	
ガイドブロック (スナッチブロック)	E - 1 0	常用荷重 3.5ton	3 個	
ガイドブロック (スナッチブロック)	E - 0 8	常用荷重 2.0ton	18個	
アンカーサドル	A S - 2 0 1 0 C	常用荷重 20.0ton	1 個	
ヒールブロック	D 1 5 0 × 3 車	常用荷重 3.0ton	2 個	
万能バイス	A V - 2 8	常用荷重 9.0ton	1 個	
鋼製直型支柱	N T T - I 10.0m	許容圧縮荷重 273.99kN	1 基	起点支柱
鋼製三脚支柱	N T T - I 10.0m	許容圧縮荷重 310.40kN	1 基	終点支柱
ワイヤーロープ	C / L 6×7 A種 24.0mm	破断力 343.00kN	200m	主索
ワイヤーロープ	O / O 6×19 A種 10.0mm	破断力 54.00kN	450m	横行索
ワイヤーロープ	O / O 6×19 A種 10.0mm	破断力 54.00kN	330m	巻上索
ワイヤーロープ	O / O 6×24 A種 10.0mm	破断力 49.30kN	40m	支柱控索
ワイヤクリップ	J I S 規格 F-24.0mm		20個	主索固定用
ワイヤクリップ	J I S 規格 F-10.0～24.0mm		1 式	
シャックル	J I S 規格 22.0～38.0mm		1 式	
木材	末口×長さ (m) 0.24×2.00		5 本	アンカー根加材、 ウインチ盤台等

第2項 吹上ロステージ

吹上ロステージは索道運搬とトラック運搬の中継地点とするため、枠組足場で架設した。今回の工事では掘削土砂の運搬や材料の搬入・搬出に利用した。

足場の脚部は敷板の所定の位置にジャッキベースを釘止めし、鳥居型建枠を組み上げた。1枠毎に筋違いを入れ、上下に単管を通しクランプで固定した。単管の継手は重ね継ぎとし、重ねは1m以上、クランプ3個以上で固定した。建枠上部は12cm角の杉材を渡し、その上に足場板を載せて釘止めした。足場板の上はトラックの乗り入れができるよう、鉄板敷とした。ステージの開口部は落下防止のため、単管組で手摺を2段設けた。

各仮設の主材はJIS規格品とし、下記を標準とした。【単管】STK500外径48.6mm、肉厚2.5mm、長さ1.0~5.5m。【同付属品】ベースプレート、ジョイント、クランプ等（STK500用）。【足場板】厚さ2.5cm以上、長さ3.6m以上の杉板。【枠組足場】鳥居枠、W914mm×H1,700mm。【同付属品】ジャッキベース、プレス。【鉄線・釘】#10なまし鉄線、洋釘。【バタ角】厚12cm角の杉1等材。

第3項 直接足場

直接足場は手摺石据え直しのため、上流右岸側と左岸側に単管本足場で架設した。

足場の脚部は敷板の所定の位置にジャッキベースを釘止めし、根がらみを設けた。建地の間隔は桁行方向を1.8m、梁間方向を0.9mとした。足場が崩壊しないよう、梁間方向は高さに段を付けながら頭繋ぎを設け、トラスになるよう組み上げた。作業員が出入りする箇所（足場最上段）は足場板を敷き並べ、鉄線で緊結し、落下防止用に巾木と手摺を2段設けた。また橋上にはステージ及び昇降階段を設け、直接足場に乗り入れできるようにした。足場外部は養生ネットを張った。

各仮設の主材はJIS規格品とし、下記を標準とした。【単管】STK500外径48.6mm、肉厚2.5mm、長さ1.0~5.5m。【同付属品】ベースプレート、ジョイント、クランプ等（STK500用）。【足場板】厚さ2.5cm以上、長さ3.6m以上の杉板。【養生シート】JIS1級仮設工業認定品。【鉄線・釘】#10なまし鉄線、洋釘。【桟木】杉1等材（胴縁、とり止め桟等）

手摺石の据え直しが終わり次第、順次解体した。



写真3-2-1. 吹上ロステージ設置



写真3-2-2. 吹上ロステージ設置完了



写真3-2-3. 直接足場架設



写真3-2-4. 直接足場架設完了

第3節 土工事

第1項 被覆土掘削

被覆土は通水石管及び目地漆喰の破損状況を確認するため掘削した。当初、平坦部のみを掘削したが、通水試験で両側の台地に連なる斜面部にも漏水が確認されたため、範囲を以下の図3-3-1の通りに拡大した。

掘削は通水石管底面のレベルまで掘り、人力を中心とした一部小型機械併用による作業とした。掘削後は石管表面に付着している土砂を丁寧に除去した。橋上の掘削土は土砂バケットを用いて索道で搬出した。吹上口ステージから仮置場までは2tダンプトラックで搬出した。掘削土の仮置場は現場事務所付近にある駐車場を利用し、集積した土砂にシートをかぶせた。手摺石の据え直し及び通水石管の目地詰め替えがすべて完了した後、仮置き場に存置した被覆土を現場内まで搬入した。

第2項 赤土叩き

赤土叩きとは橋の平坦部において被覆土と裏築の境に敷設された不透水層のことで、人力タコを用いて粘性度の強い赤土を10cm程の厚さで叩き締めたものである。仕上げ高さは通水石管の下端と合い、橋軸方向へ勾配をつけながら放水口の横に設置される水抜穴から排水する仕組みとなっている。なお被覆土と区分するため「叩き」と称したが、一般的な土間叩き（三和土）のように石灰や苦汁は入れずに、粘性度の強い土のみで叩き締めるものである。

本工事では赤土叩きの損傷箇所を中心として、既設叩きの上から目地漆喰を板状に整形したものを敷き並べ、さらに新たな赤土叩きを被せた。また仕上げの高さは、目地漆喰を詰めるため、通水石管の最下層の横目地孔の下に設定した。赤土は山都町内産の材料を使用した。土の搬入は索道を用いた。

第3項 被覆土埋め戻し

被覆土は目地漆喰の詰め替え及び通水試験による確認がすべて完了した段階で埋め戻した。仮置き場からダンプトラックを使用して吹上口ステージまで運搬し、そこからモッコを用いて索道で現場内に搬入した。被覆土は人力による敷き均しと転圧により石管の上面の高さまで均等になるように埋め戻した。



写真3-3-1. 被覆土掘削



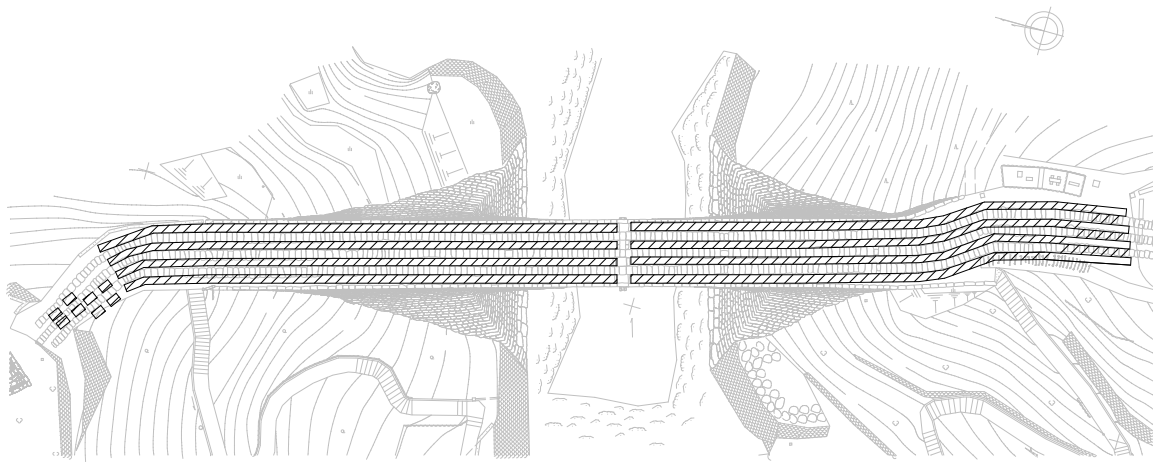
写真3-3-2. 被覆土運搬



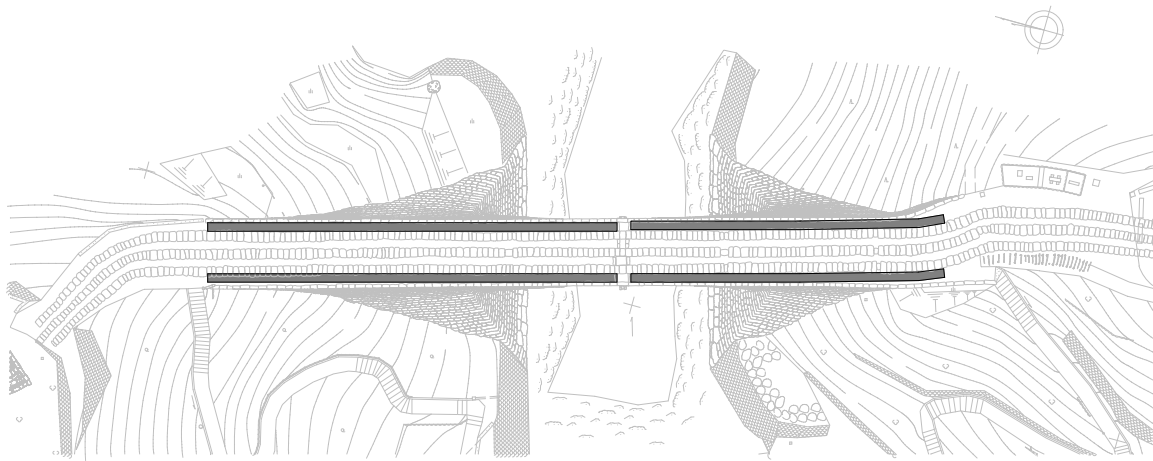
写真3-3-3. 被覆土掘削完了



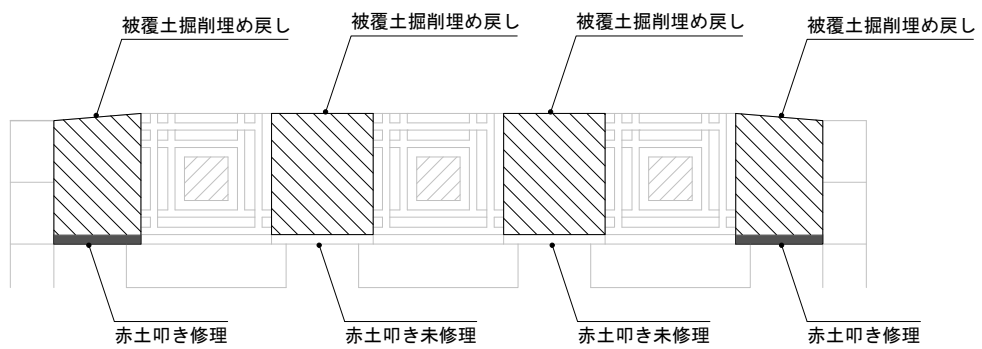
写真3-3-4. 赤土叩き



被覆土掘削及び埋め戻し範囲



赤土叩き修理範囲



断面略図

図3-3-1. 被覆土掘削埋め戻し及び赤土叩き範囲図

第4節 石工事

第1項 手摺石据え直し

被覆土の掘削が完了すると、手摺石の状況が詳らかとなった。加工は石尻のみ割肌でそれ以外はノミ仕上げであった。手摺石の背面は一般的な城郭石垣と異なり控えがなく、ほぼ立法体の石材が積まれている状況であった。

手摺石は現状の据え付け状況を十分に確認し、取り外し易い石材から順次解体を進めた。石材は索道を利用してチェーンブロック等の補助工具で一石ずつ丁寧に取り外し、橋上に仮置きした。

取り外し後、現状に馴染むよう復旧位置の目安として既設石垣の両端に水糸を当て、橋軸方向の石の通りを確認して施工した。

復旧の際は取り外しと同じく索道を使用して慎重に据え直した。据え直し完了後は再度三次元計測を行い、孕み出しの是正確認をした。その結果、右岸側で最大5cm強程度の是正をすることが出来た。

熊本地震後の工事では三次元計測で特に孕み出しの大きかった上流右岸側23個、上流左岸側14個の計37個の手摺石を据え直した。



写真3-4-1. 手摺石背面側



写真3-4-2. 手摺石の孕み出し確認



写真3-4-3. 手摺石取り外し



写真3-4-4. 手摺石の仮置



写真3-4-5. 手摺石取り外し完了



写真3-4-6. 手摺石据え直し

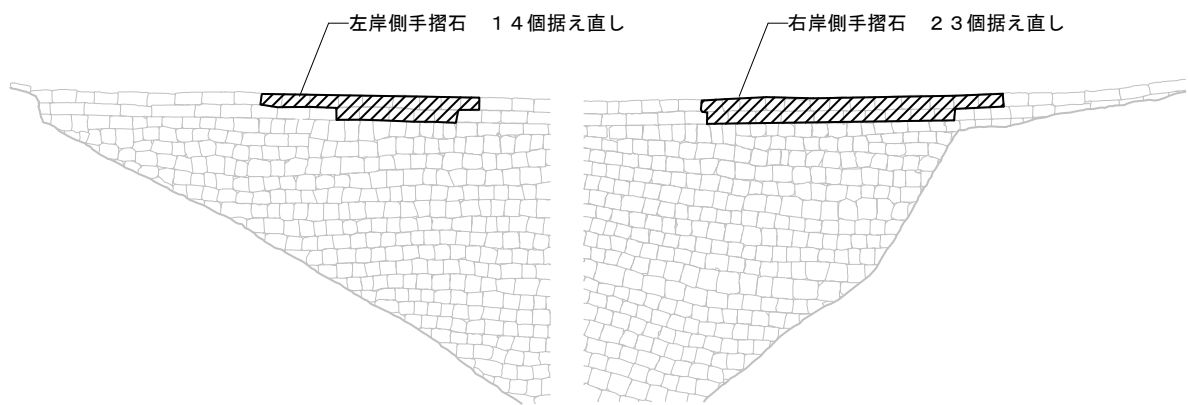


図3-4-1. 手摺石据え直し範囲図

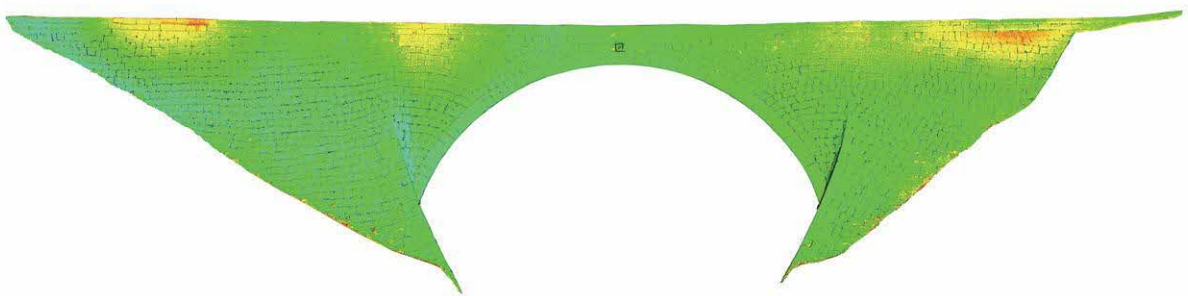


図3-4-2. 修理後段彩図1（地震前との比較）

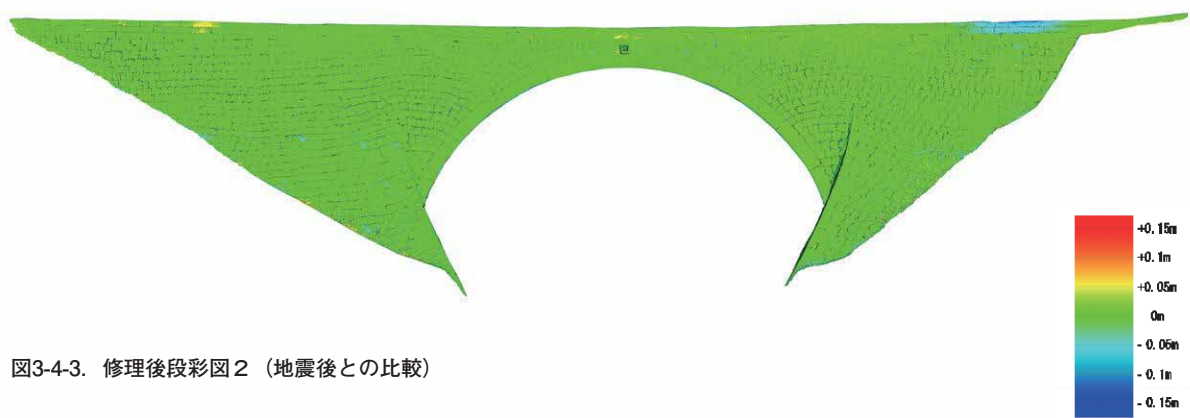


図3-4-3. 修理後段彩図2（地震後との比較）

第5節 左官工事

第1項 通水試験

通水試験は通水石管の漏水状況を調査し、補修箇所の特定をするために行った。工事中は通水石管内の水を堰き止めていたが、試験の際は取入口から水を流し、吹上水槽に満杯に溜まった状態で漏水を確認した。漏水の確認は1列ずつ行い、通水石管の両側面、上端を3名、アーチ下端からの確認を1名、図面等の書き込みを1名の合計5名程度で作業した。試験は詰め替え作業が終わるたびに実施し、漏水がなくなるまで繰り返した。合計10回の通水試験をした。

第2項 目地漆喰除去

漏水が確認された通水石管の既設目地漆喰は、石管を損傷しないよう注意しながら除去した。除去は空気圧縮機（エアーコンプレッサー）を用いてオーガードリルで削孔した。目地孔に残った漆喰屑等はエアーを用いて清掃した。清掃後は目地孔に雨水等が流入しないよう、シートで覆い養生した。

第3項 目地漆喰試験

3-1. 目地漆喰試験の概要

目地漆喰は赤土5合、石灰20合、砂18合、塩1合、松葉汁を配合したもので、これを杵と臼を使って一定時間搗く。搗き終わった材料は一旦2日2晩寝かせて、使用直前に搗き戻して完成する。以上の工法は「通潤橋仕法書」に記されており、現在もこれに則り製作しているが、松葉汁の分量や搗き時間に関しては記されていない。これは気温や湿度の影響により硬化具合が変化するため、松葉汁の量や搗き時間で適宜調整したものと考えられる。

以上より、目地漆喰試験では松葉汁の量と搗き時間を変えた場合に、どのような変化が見られるのかを確認した。試験は夏季の8月中旬頃に実施し、目地漆喰製作時と搗き戻し時の2回に分けて行った。試験結果は以下の通りである。

3-2. 目地漆喰製作時の配合試験

松葉汁の量は通潤橋を日常的に管理されている通潤地区土地改良区が経験により使用している1,400ml（冬季の適量とされている）を基準とし、それより少ない1,100ml、それより多い1,800mlの3種類に分けた。さらにそれぞれの搗き時間を5分、10分、15分と分け、合計で9種類の試験体を製作した。

搗き終わった材料は団子状に成型し、各試験体の状況を確認した。また各試験体はそれぞれ3日程寝かせ

た後、搗き機で30回砕いた時の崩れ具合を目視及び粒径で確認した。

1. 漆喰を搗いた後、団子状に成型した状況

松葉汁の量は1,100mlでは粘り気がなく、1,800mlになると水気過多となり、どちらもまとまりが悪い傾向であった。その結果、従来使用している1,400mlが最適であると確認された。搗き時間は短いほど粘り気がなく、長いほど粘り気が出る傾向であった。万が一松葉汁を入れすぎた場合は、これらで調整が可能である。

2. 漆喰を寝かせた後、搗き機で30回砕いた状況

松葉汁の量は少ないほど固くなり、多いほど柔らかい傾向であった。また搗き時間は短いほど柔らかく、長いほど固い傾向であった。搗き戻しの際に崩した漆喰が玉になることを避けるため、松葉汁の量は多めに、搗き時間は短くした方がよいと考える。

以上をふまえ、目地漆喰製作時は松葉汁の量を1,400ml、搗き時間を5～10分を目途に製作することにした。

3-3. 搗き戻し時の配合試験

搗き戻す際は3-2の試験で最適と判断された、松葉汁の量が1,400mlで10分搗いた材料を素材とし、3日間寝かせた材料を搗き機で崩して搗き戻した。

松葉汁の量は夏季の漆喰の乾燥状態から6分につき100mlずつ混入するように基準を設定し、それより少ない66ml、それより多い150ml、また最初に一気に400ml入れる場合の4種類に分けた。

搗き戻しが完了した後は目地孔の代用として竹筒にそれぞれの試験体を詰め込んだ。その3日後、竹筒を割って硬度と撥水性の確認をした。なお硬度は目視での確認を行い、撥水性はスポイトで水を垂らした際の浸みこみ具合を確認した。

結果、搗き時間が短いものは品質が劣る傾向にあり、少量ずつの松葉汁を搗き時間に合わせて順次混入する方法が最適であった。最初に400ml入れた場合は斑が出た。

以上から工事時は施工性を考慮して、搗き戻し時は松葉汁を6分毎に150mlずつ入れ、20分程度搗く方法がよいと考えた。



写真3-5-1. 通水石管の小口（平成12～13修理時の古材）



写真3-5-5. 目地漆喰試験



写真3-5-2. 通水試験（石管から水が流れている）



写真3-5-6. 松葉を煮る



写真3-5-3. 通水試験（石管から水が染み出している）



写真3-5-7. 漆喰を目地に入れる



写真3-5-4. 目地漆喰除去



写真3-5-8. 漆喰を詰め込む

■目地漆喰製作時の配合試験（目地漆喰を搗いた後、団子状に成型した状況）

	搗き時間5分	搗き時間10分	搗き時間15分
材料1 松葉汁 1100 ml	 ✕ 水気がなく、まとまらない。 粘り気はほぼない。	 ✕ 水気がなく、まとまらない。 ただし、粘り気は1-1よりある。	 ✕ 水気がなく、まとまらない。 ただし、粘り気は1-1よりある。
材料2 松葉汁 1400 ml	 ● 水気が程よく、まとまる。 粘り気はある。	 ● 水気が程よく、まとまる。 ただし、粘り気は2-1よりある。	 ● 水気が程よく、まとまる。 ただし、粘り気は2-1よりある。
材料3 松葉汁 1800 ml	 ✕ 水気があり、まとまらない。 粘り気はない。	 ✕ 水気があり、まとまらない。 粘り気はない。	 ▲ 水気はあるが、まとまる。 粘り気は少しある。

■目地漆喰製作時の配合試験（目地漆喰を寝かせた後、搗き機で30回砕いた状況）

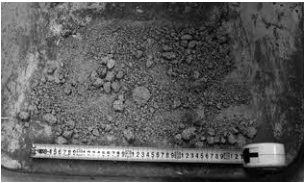
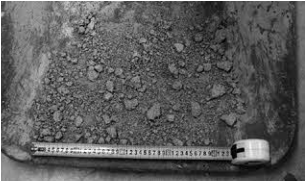
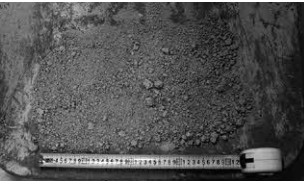
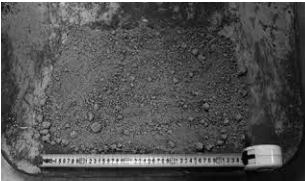
	搗き時間5分	搗き時間10分	搗き時間15分
材料1 松葉汁 1100 ml	 ● 粒径：平均22mm程度	 ▲ 粒径：平均24mm程度	 ✕ 粒径：平均35mm程度
材料2 松葉汁 1400 ml	 ● 粒径：平均22mm程度	 ▲ 粒径：平均30mm程度	 ✕ 粒径：平均36mm程度
材料3 松葉汁 1800 ml	 ● 粒径：平均15mm程度	 ● 粒径：平均19mm程度	 ✕ 粒径：平均37mm程度

図3-5-1. 目地漆喰製作時の配合試験

■ 搗き戻し時の配合試験

	搗き時間 6分	搗き時間12分	搗き時間18分	搗き時間24分	搗き時間30分
材料 4 松葉汁 66ml ずつ	 (松葉汁総量 66 ml) 硬度 ☐ 撥水性 ☐	 (松葉汁総量 132 ml) 硬度 ☐ 撥水性 ☐	 (松葉汁総量 198 ml) 硬度 ☐ 撥水性 ☐	 (松葉汁総量 264 ml) 硬度 ☐ 撥水性 ☒	 (松葉汁総量 330 ml) 硬度 ☒ 撥水性 ☒
材料 5 松葉汁 100ml ずつ	 (松葉汁総量 100 ml) 硬度 ☐ 撥水性 ☐	 (松葉汁総量 200 ml) 硬度 ☐ 撥水性 ☐	 (松葉汁総量 300 ml) 硬度 ☒ 撥水性 ☒	 (松葉汁総量 400 ml) 硬度 ☒ 撥水性 ☒	 (松葉汁総量 500 ml) 硬度 ☒ 撥水性 ☒
材料 6 松葉汁 150ml ずつ	 (松葉汁総量 150 ml) 硬度 ☐ 撥水性 ☐	 (松葉汁総量 300 ml) 硬度 ☒ 撥水性 ☐	 (松葉汁総量 450 ml) 硬度 ☒ 撥水性 ☒	 (松葉汁総量 600 ml) 硬度 ☒ 撥水性 ☒	 (松葉汁総量 750 ml) 硬度 ☒ 撥水性 ☒
材料 7 最初に 400ml	 (松葉汁総量 400 ml) 硬度 ☐ 撥水性 ☐	 (松葉汁総量 400 ml) 硬度 ☐ 撥水性 ☒	 (松葉汁総量 400 ml) 硬度 ☒ 撥水性 ☒	 (松葉汁総量 400 ml) 硬度 ☒ 撥水性 ☒	 (松葉汁総量 400 ml) 硬度 ☐ 撥水性 ☒

図3-5-2. 搗き戻し時の配合試験



写真3-5-9. 試験体目地漆喰詰め込み



写真3-5-10. 撥水性試験

第4項 目地漆喰製作

第3項の目地漆喰試験の結果をふまえ、材料の製作は以下の仕様とした。なお下記の配合量については「通潤橋仕法書」に記されている分量を基準とした。

1. 材料及び調合

①赤土・・・5合(0.9L)

山都町相藤寺地内の土手で採取したもの。材料は粘土質のもので、よく日に当てて乾かし、石臼に入れて搗き潰して粉末にしたものを使用した。

②砂・・・・1升8合(3.25L)

山都町津留地内の河原で採取したもの。材料は5mm目篩を通り、2.5mm目篩にかかる硬質な土気のない川砂利を使用した。

③石灰・・・・2升(3.6L)

工業用消石灰 J I S 規格品を使用した。

④塩・・・・1合(0.18L)

粗塩を使用した。

⑤松葉汁・・・適量

山都町内の原野で採取した松の枝葉(鉋で小さく切ったもの) 3.75kgと水18Lを釜に入れて煮沸し、半分に減じた煮汁を使用した。

2. 製作方法

製作方法は上記の材料と配合を標準として、赤土、砂、石灰、塩を攪拌したものを石臼に入れて、松葉汁1,400mlを入れながら搗き混ぜた。これを数日間寝かせた後に再度石臼に入れて碎き戻し、松葉汁を少量ずつ加えて適度な硬さとなったものを使用した。搗き戻し時の松葉汁は搗き時間6分につき150ml目安とし、詰め替えの時期により適宜調整した。

第5項 通水石管目地漆喰詰め込み

5-1. 詰め込み方法

目地漆喰は通水石管の合端にそれぞれ半円形の目地孔を欠き込み、石管を連結して円形となった目地孔に外側から詰める。目地は水を逃がさないように内・外の二重目地となっている。

作成した目地漆喰は、卵半分ほどの量を一握りにし棒状にまとめた後、孔に入れ、中に気泡が生じないように突き固め棒で70回以上均等な力で叩き、目地孔の奥まで詰める。漆喰の硬化養生期間は1週間から2週間程度とし、その間雨水が漆喰にかからぬようシートで養生をした。

5-2. 詰め込み基準と範囲

・詰め込みの基準

漆喰詰替は、通水試験により目地より漏水が確認さ

れたものを対象とした。

・詰め込みの範囲

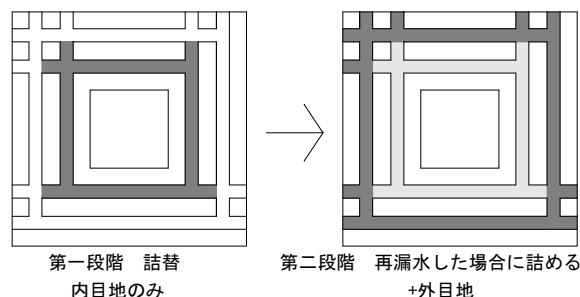
第一段階で内目地の漆喰詰めにより止水することとし、僅かに漏水が生じたものは第二段階において外目地まで詰める方針とした。複数回漏水が生じる箇所は、特に念入りに内目地のみを詰め替えた。

内目地のみで漏水が止まった箇所は外目地を詰めていないため、空の目地孔に雨等が溜まらないよう、縦目地孔上端を漆喰で蓋をすることにした。漏水がなくなるまで通水試験と目地漆喰詰め替え繰り返した結果、詰め替えた箇所は計148箇所となった。

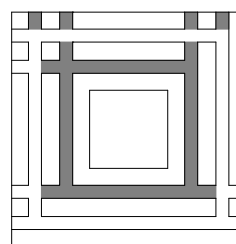
第6項 取入口目地詰め替え

目地切れを起こしている取入口の壁面漆喰を補修した。目地の材料は前回修理工事に倣い、粘土：セメント＝2：1の割合で配合したもの(赤土セメント)を使用した。

当初の詰め込み方法



最終的な詰め込み方法



内目地+縦目地上部に蓋

図3-5-3. 目地漆喰詰め込み方法

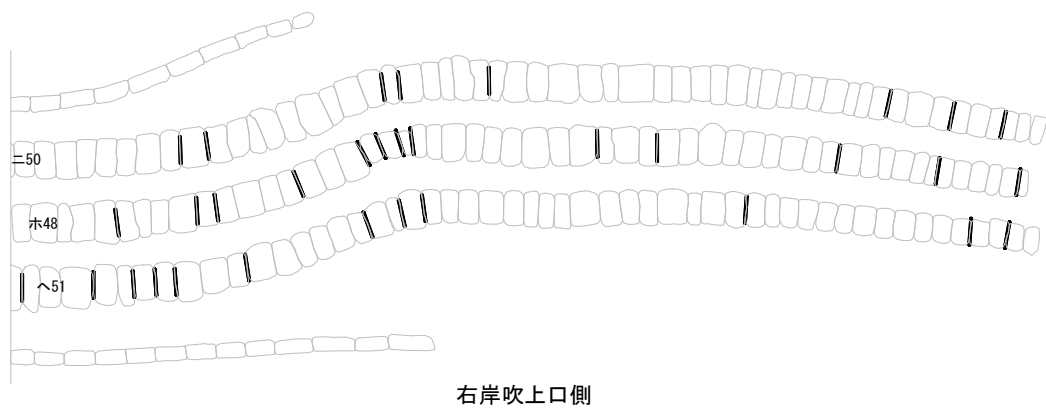
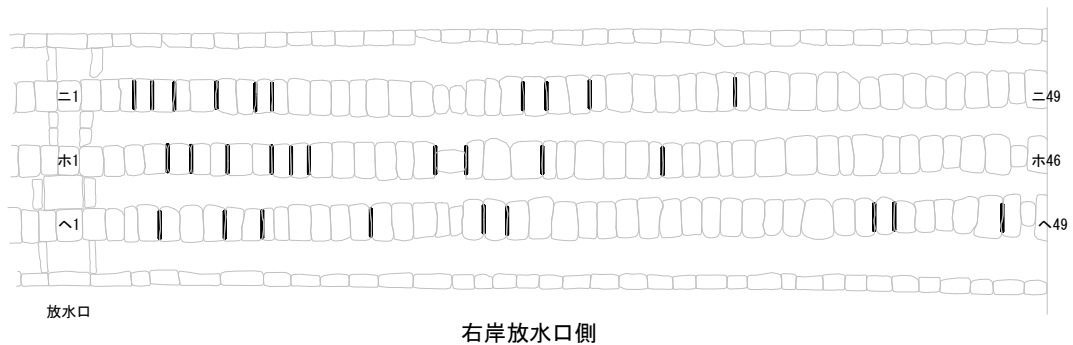
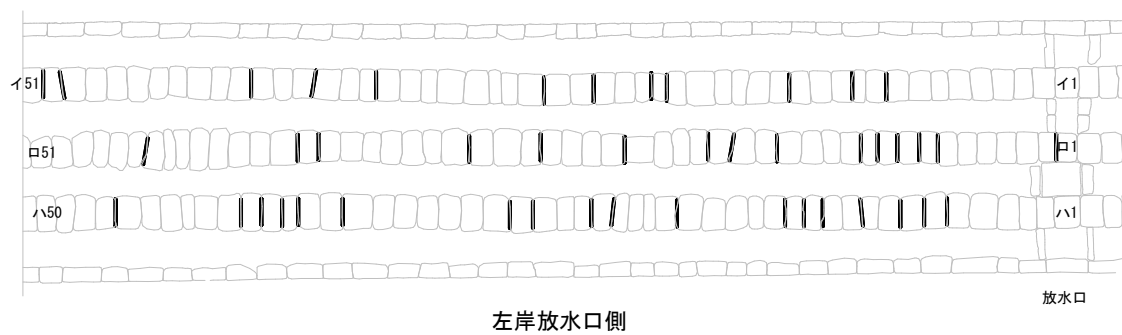
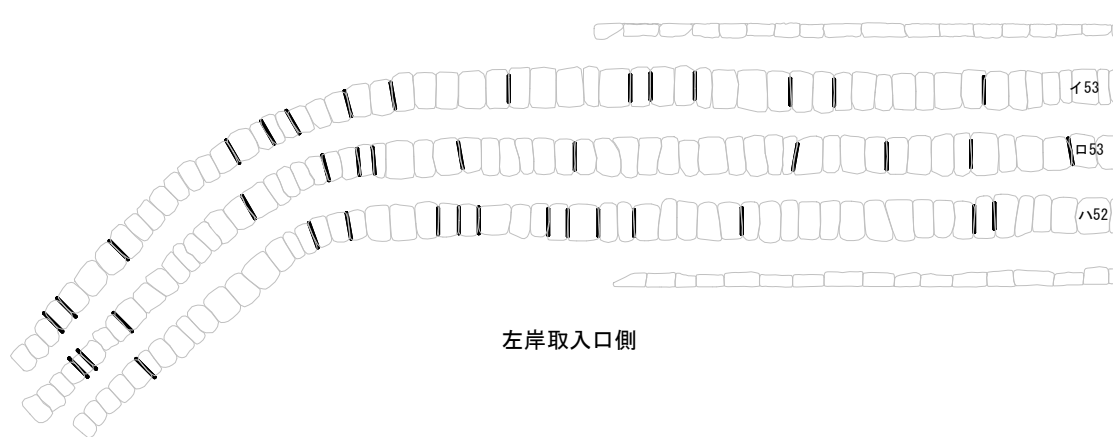


図3-5-4. 目地漆喰詰め込み範囲図（合計148箇所）

第6節 雑工事

第1項 木管取り替え

通潤橋の通水管は、石管列の中に一部木管が使用されている。木管は通水管内に除去できなかった土砂等が発生した場合、取り外し可能なメンテナンス用の部材として設置されている。当初は12個あったと推測されているが、多くは重要文化財指定以前に石管へ取り替えられ、3個のみ現存する。

蟻害を確認したホ-19の木管は工程上すぐに取り替えられなかったため、蟻害部分の木材を削り落す措置を講じた。乾燥した表面を削ったところ、内部に大量のシロアリが生息していた（写真3-6-1）。既に通水部にまで蟻害が達しており、大量の水分を含み染みだしていた。

通水試験の最中は、水圧により損壊しないよう削ぎ取り部を仮補強した。補強は欠損部を赤土セメントで埋め、上面及び側面を木材の板で押さえて番線で止めた。さらに木管の側面に木材を当て、脇の石管へつっぱりように固定した。

木管は在来に倣い取り替えた。旧木管は霧島産のアカマツが用いられていたが、補足材は熊本木材株式会社が所有する径3尺程、長さ6.5m、伐採後3年経過している鹿児島産クロマツの大径木を使用した。木管と石管の継ぎ目は赤土（粘性の強い土）とセメントを配合して、漏水しないよう接着した。取替材を含む木管3個には木管表面に防蟻処理剤（キシラモン3W）を塗布した。また木管の下部の土、周囲の被覆土には土壌用のキシラモンMCを噴霧した。

今後は蟻害を早期に発見するため、残存する木管3個の周囲にバイト剤（エコミューア-シロアリハンター）を設置（補助対象外）し、定期的なモニタリングを実施することにした。



写真3-6-1. 木管の蟻害



写真3-6-2. 木管の補足材

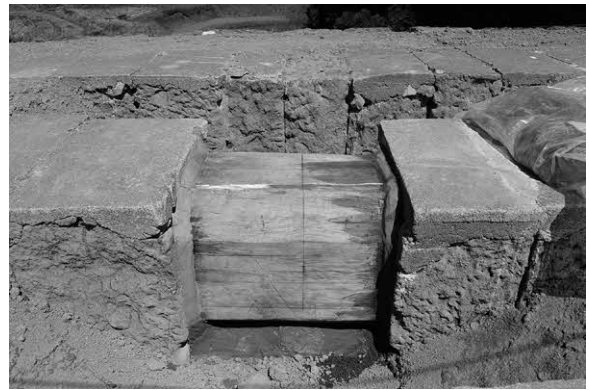


写真3-6-3. 木管取付完了

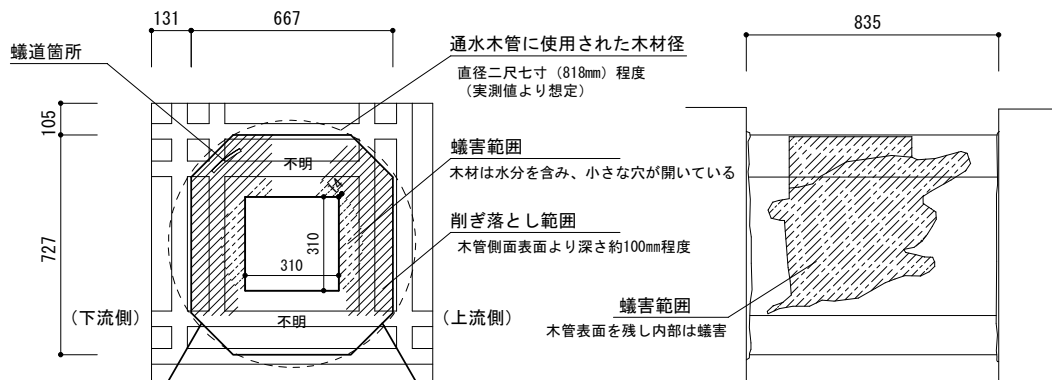


図3-6-1. 木管断面図

第 4 章

大雨災害後の修理

第1節 工事概要

第1項 被災状況

1-1. 工事着手前に明らかとなった被災状況

熊本地震災害復旧工事は平成29年4月から開始し、平成30年6月に竣工を予定していた。竣工目前に迫った平成30年5月7日、5月としては山都町観測史上最大の大雨（時間雨量39mm）により、上流右岸側の壁石と手摺石の93石が崩落した。石材は崩落箇所を起点に半円状に転がり、一部は直下の五老ヶ滝川内にも落下したが、通水石管は橋上に残り、その側面が露出した状況となった。また、崩落した被覆土周辺では吹上り側斜面からの流水が確認された。被災直後、橋の端部に水切りの土のうを設置した。

1-2. 崩落防止処置

崩落後は以下の手順で部材の保護及び被害の拡大防止の措置を行った。

1. 河川の崩落石材の回収

石材の流出を防ぐため、河川に転落した石材の引き上げを第一に実施した。

2. モルタル被覆養生

崩落箇所に再び雨水が浸入しないようモルタルを吹付けて養生した。下地には不織布と金網をピン止めし、その上から厚さ5～8cm程度のモルタルを吹き付けた。

3. 石垣の崩落防止支保工

被害箇所の隣接部と左岸側の経年変化による孕み出しが予想される2箇所に支保工を設置した。支保工は両側の手摺石を挟むように単管で組んだ。

4. 崩落石材の回収

石材はすべて仮番付を打ち、位置を計測した上で回収に当たった。引き上げ時には新たに横行索を追加して、既設索道を利用した。吹上りステージから場外の仮置場迄はダンプトラックで運搬した。

1-3. 工事着手後に明らかとなった被災状況

落下した壁石には一部に欠損や亀裂による表面剥離が確認された。また、工事着手後には被覆モルタルの撤去、崩土除去を進め、裏築の検出により内部の被災状況が判明した。裏築は崩落の影響か定かではないが、通水石管から1～3層下の石材に縦割れ等の破損が生じていた。併せて裏築の間に被覆土が落下し混入している状況も確認された。



写真4-1-1. 崩落部橋上面



写真4-1-2. 崩落部全景



写真4-1-3. 崩落部近景



写真4-1-4. 崩落部直下



写真4-1-5. モルタル被覆養生及び支保工設置



写真4-1-7. 崩落石材の回収



写真4-1-6. 支保工と土のうの設置



写真4-1-8. 崩落石材の測量

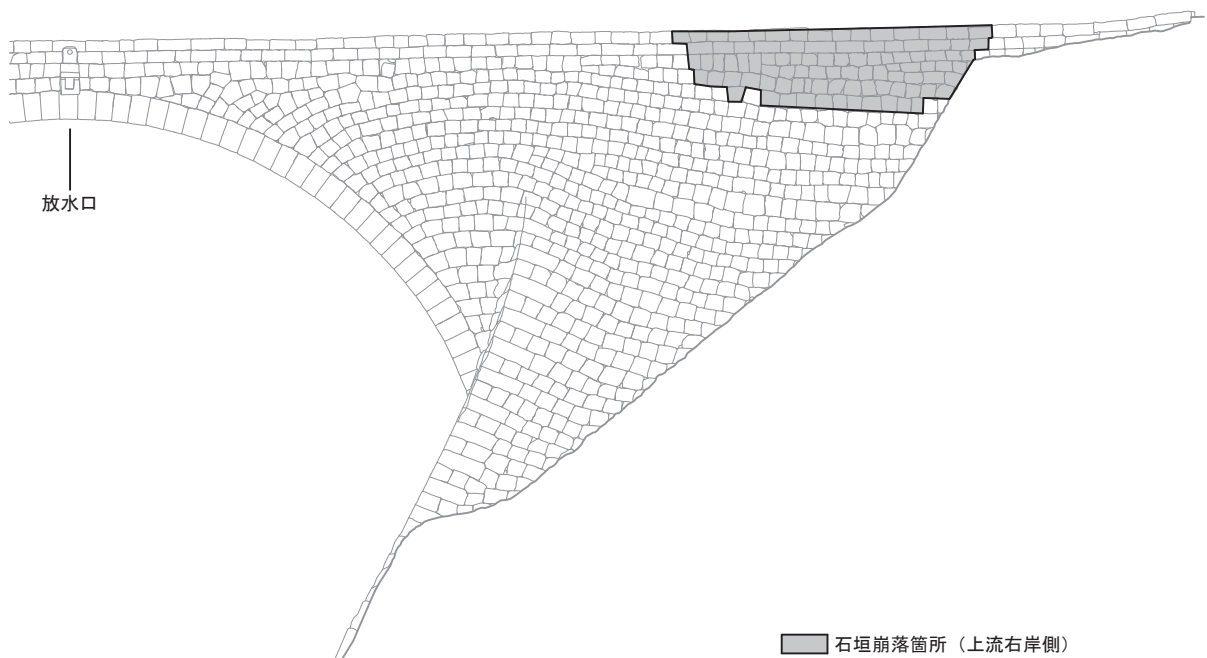


図4-1-1. 石垣崩落箇所

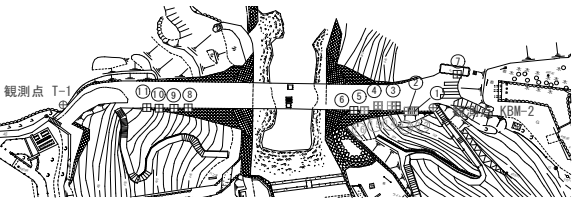
第2項 工事着手前、工事中調査（三次元測量等）

2－1．崩落に伴う変位計測、定点計測

崩落後の橋の変位や石垣の孕み出しを確認するため、三次元計測を実施した。使用した機材は第3章と同様である。崩落の前後で比較をしたところ、周囲1石に変位が確認されたが、全体的な孕み出しは確認されなかった（図4－1－3）。

また、降雨等による崩落箇所の周囲や上流左岸側石垣の経年的な孕み出しの進行の有無を監視する目的で、右図の通り橋上手摺石上部に定点を設置し、梅雨時期を中心に定期的な観測を行った。平成30年（2018）5月14日から7月20日まで計8回観測を実施した結果、数mm程度のズレが確認されたが、計測誤差の範囲内と考えられ、孕み出しの進行は認められなかった。

表4-1-1. 定点観測



座標比較表（任意座標）				観測日 平成30年7月20日	
観測点	今 回 観 測 値			基準座標との差 (m)	基準との 標高差
	X値	Y値	H値		
①					
②					
③					
④					
⑤					
⑥	-4.433	64.023	7.907	0.000	0.001
⑦					
⑧	-36.052	91.76	7.991	0.000	-0.003
⑨	-38.619	94.218	8.106	0.000	-0.005
⑩	-41.471	96.738	8.142	0.000	-0.003
⑪	-43.882	98.733	8.204	0.000	-0.007
⑫	6.773	53.993	8.251	0.001	-0.001
⑬	5.847	54.932	8.235	0.003	0.001
⑭	1.794	56.699	7.997	0.002	0.003
⑮	-0.821	58.978	7.982	0.004	0.001
⑯	-2.351	62.203	8.003	0.006	0.002

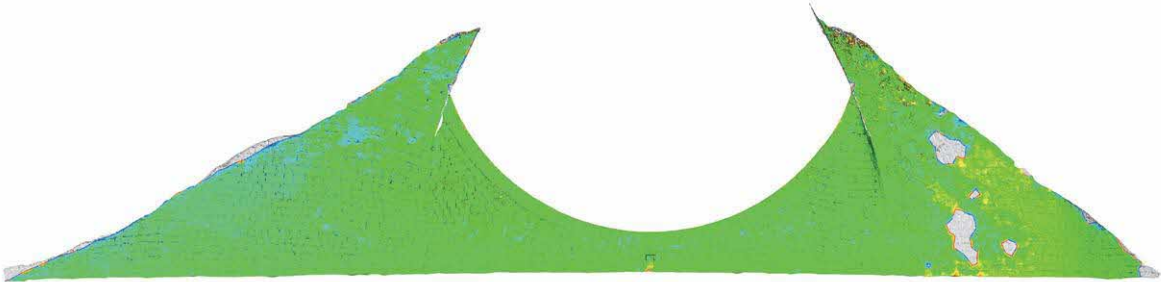


図4-1-2. 下流立面段彩図



図4-1-3. 天端平面段彩図

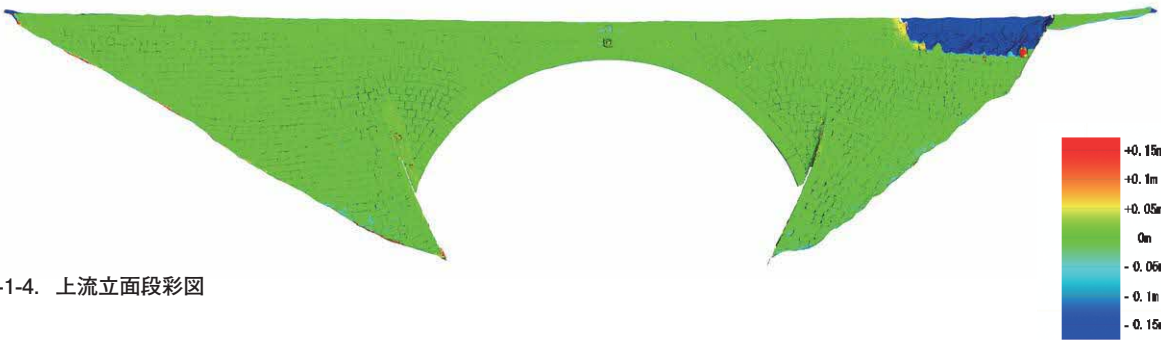


図4-1-4. 上流立面段彩図

2-2. 崩落した石材の測量、原位置の特定

1. 過去の計測データとの比較

回収した石材は仮置場に搬入し、一石毎に並べて計測した。石の寸法や形状のほか、加工痕、苔の生え具合等を崩落以前の計測データと比較し、9割程度の原位置を推定した。

2. 三次元シミュレーション

残り1割の位置の特定と、既に推定した9割の石材の検証を目的として、三次元上で石積みシミュレーションを行った。壁石の控えは50～70cm以下のものが多く、胴付により支える形であった。尻銅石等で勾配を変えて積み直すことが困難であるため、シミュレーション上で上下左右の断面や勾配の形状を確認しながら、石材を当てはめる作業を繰り返し行った。これにより、石垣93石のうち92石の原位置を特定できた。不明の石材は工事着工後に落石地点付近の土中の探索を行ったが、発見には至っていない。

またこれらの作業により、欠損した石材を確認することができた。なお、石材調査データは第5章参考資料に掲載している。

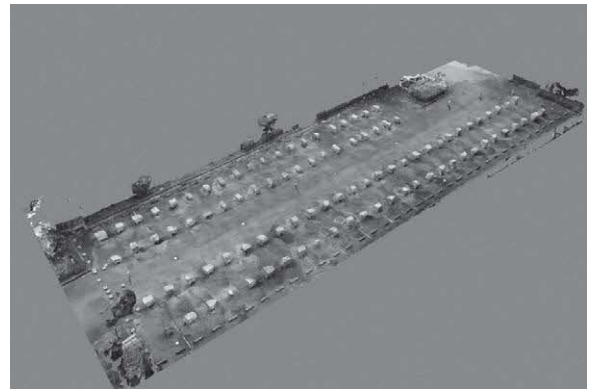


写真4-1-9. 崩落石材の3次元計測

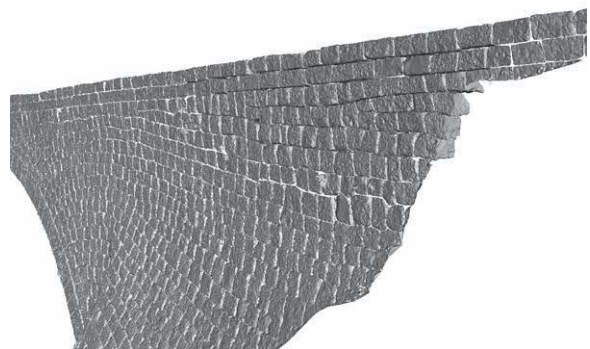


写真4-1-10. 原位置のシミュレーション

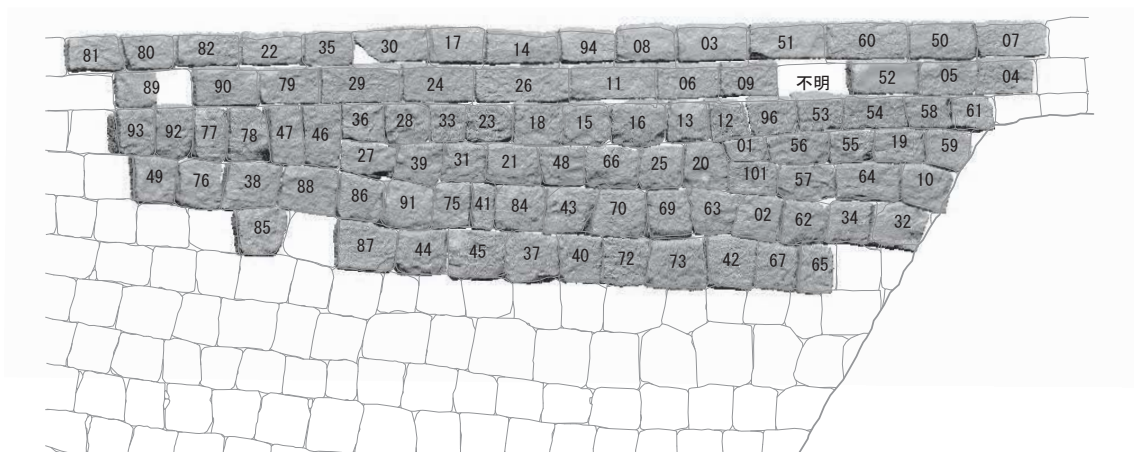


図4-1-5. 崩落石材の原位置

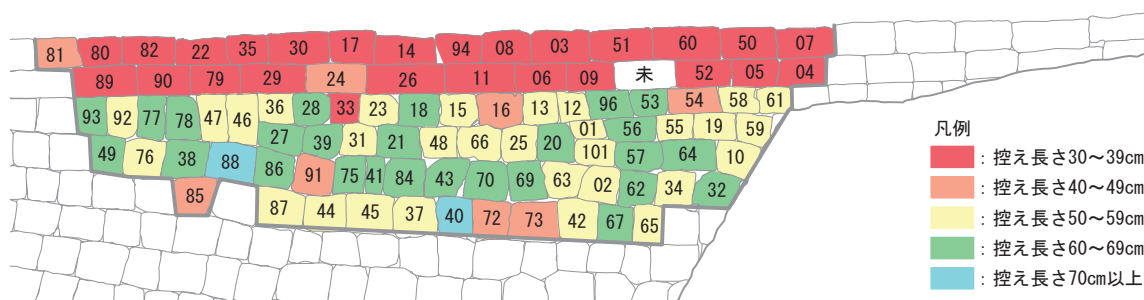


図4-1-6. 壁石・手摺石の控え寸法の分類

2-3. 石垣復旧前後及び工事中の測量

今回の工事では石垣の本格的な積み直しを行う初めての事例となるため、復旧前後と工事中の各段階において写真撮影と三次元レーザ測量を行い、オルソ図と図面の2種を作成した。

まず始めに、石材回収前には石材の落下位置から崩落の状況を類推するため、平面オルソ図を用いて記録した。次に、工事中は解体の各段階で確認された裏築の仕様や特徴を記録するため、写真と三次元レーザを用いて随時測量を行った。裏築の内部仕様については、第4節石工事の解体調査の項に記載した。各種図版は巻末に掲載している。測量により得られた石材の位置情報は、復旧の際にも利用している。

工事後は段彩図や断面図により、復旧前後の比較を行った。

第3項 崩落要因の検討

当日に記録した最大時間雨量は39mmであったが、熊本地震以降の約2年間でこれ以上の雨量を記録した日は5回あり、歴史的に稀な豪雨とはいえない。このうち1回は平成28年6月21日に1時間に126mmの雨量を記録した豪雨もあったが、石垣の変位や崩落は生じていない。これらから、当時の橋上の状況や石材の

転落位置から崩落に至った経緯や要因を考察した。

1. 被覆土の状況

橋上の平坦部は被覆土の埋め戻し直後であった。吹上口側の斜面部は埋め戻し途中の段階で、この周辺の雨水が崩落部に流れた痕跡が確認された。橋上の被覆土は、在来に倣い手摺石に負担がかかる機械での転圧は行わず少雨により少しずつ土が圧縮されていくのを待っており、通常よりも雨水を吸水しやすい状態であった。ここに一時的な強雨が発生したことで被覆土が急激に水を含み、石垣に圧力が掛かった可能性が高いと想定される。

2. 崩落パターンの考察

崩落した石材の落下場所と石垣の原位置との関係性を調査した結果、石垣の上部がより遠くに落下していることが分かった。このことから、石垣の上部から全体的に崩落したことが想定される。このため、崩落の起点は手摺石（被覆土）であると判断した。

3. 検討結果

以上から、埋め戻し直後の被覆土に吹上口周辺から流れた雨水が崩落部分に溜まり、被覆土や手摺石に負荷が加わり石垣が崩落したものと考えられる。



写真4-1-11. 平面オルソ



写真4-1-12. 写真測量の状況



写真4-1-13. 3次元レーザ測量の状況

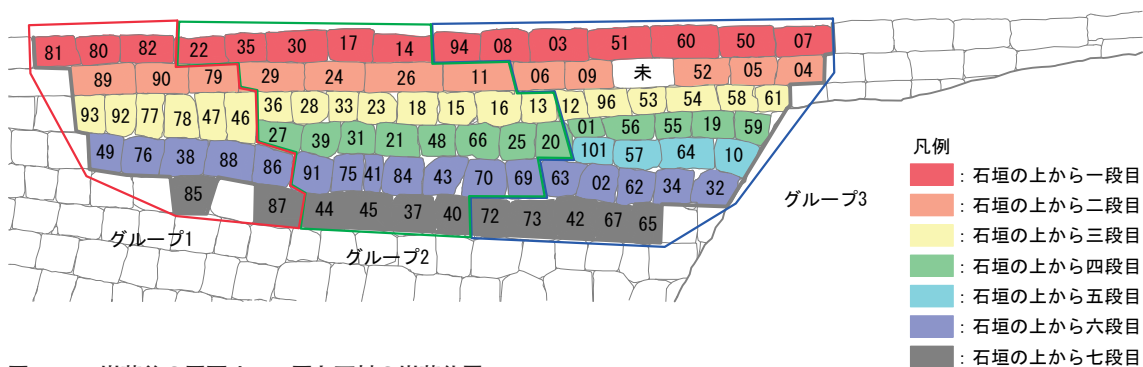
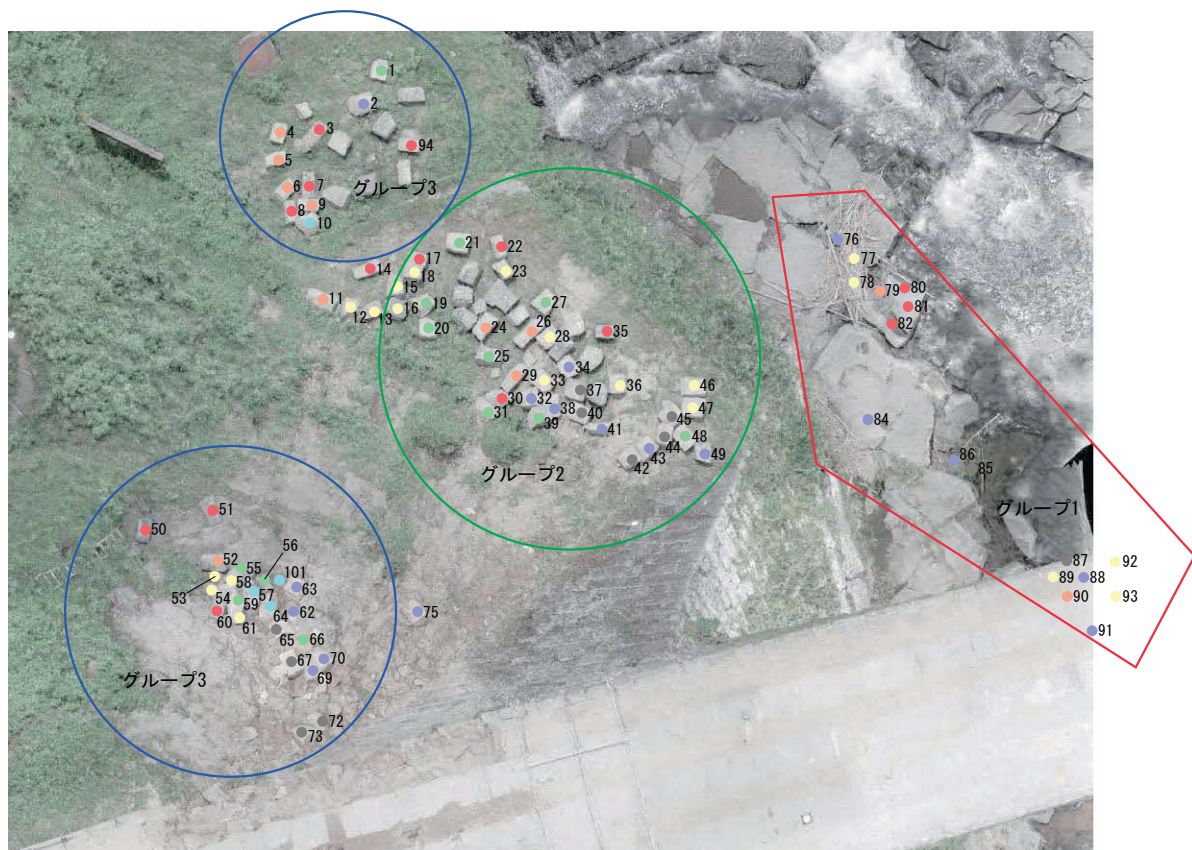


図4-1-7. 崩落後の平面オルソ図と石材の崩落位置

第4項 修理方針の概要と実施工程

4-1. 修理方針の概要

今回は初めての壁石の修理であり、石橋の内部構造も明らかとなったため、修理方針の策定に至るまでに様々な検討過程があった。本項では修理工法や範囲等の検討概要を記す。

1. 石垣復旧工法

石垣の復旧にあたり、①崩落しなかった通水石管や裏築に崩落防止処置（崩落面の石管・裏築を鉄骨で押えて仮補強する）を施した上で壁石を復旧する工法と、②石管とその下部の裏築まで解体し、十分な施工スペースを確保した上で壁石垣を復旧する工法の2種の検討を行った。当初は①の方法での復旧を検討したが、工事着手後に裏築の検出作業を行った結果、崩落部の裏築石に変位や破損が確認されたことや施工の安全性をより考慮して②の工法を採用した。

2. 石垣復旧範囲

石垣の復旧範囲は縦横断面図を用いて検討した。縦横断面図は縦横1mピッチの断面図を作成し、「通潤橋仕法書」に記載されている法面勾配を基準とした理想的な断面と地震前後、崩落前後の断面を比較した。復旧範囲は崩落部分の周囲1石を対象とした最小修理範囲、補強石垣が付加された明治初期時点まで孕み出しを修正する基本修理範囲、石垣の孕み出しをすべて修正す

る（すべての断面を通潤橋仕法書の法面勾配に合わせる）根本修理範囲の3つの範囲について検討した。

最小修理範囲では熊本地震前後の孕み出しの修正に留まり、根本修理範囲では右岸側の石垣を大きく解体しなければならない結果となることから、通水石管1列を取り外し復旧する工法を採用することも踏まえて、基本修理範囲とすることにした。

3. 構造補強

今回の修理範囲は経年的な孕み出しが顕著であった箇所であり、今後の変位や崩落を防止するため、構造計算をして補強を施すことにした。詳細は後述するが、「重要文化財（建造物）耐震診断・耐震補強の手引」に則り耐震補強ではなく「経過的補強」という位置づけとした。補強方法は前例を参考に、①重要文化財「幸橋」（長崎県平戸市）で実施された壁石同士をダボ鉄で緊結し、ダボ鉄から延ばした鉄筋棒を裏築に固定する工法と、②裏築に化学繊維であるジオテキスタイルを敷き込み、壁石と金具で緊結する工法の2種を検討した。ジオテキスタイルを用いる工法は、城郭石垣で採用されている補強策を参考とした。

以上の2案を検討した結果、裏築間に鉄筋棒を入れることは困難であるため、割石積み裏築構造を大きく変えずに施工できる②ジオテキスタイルでの補強を採用することとした。

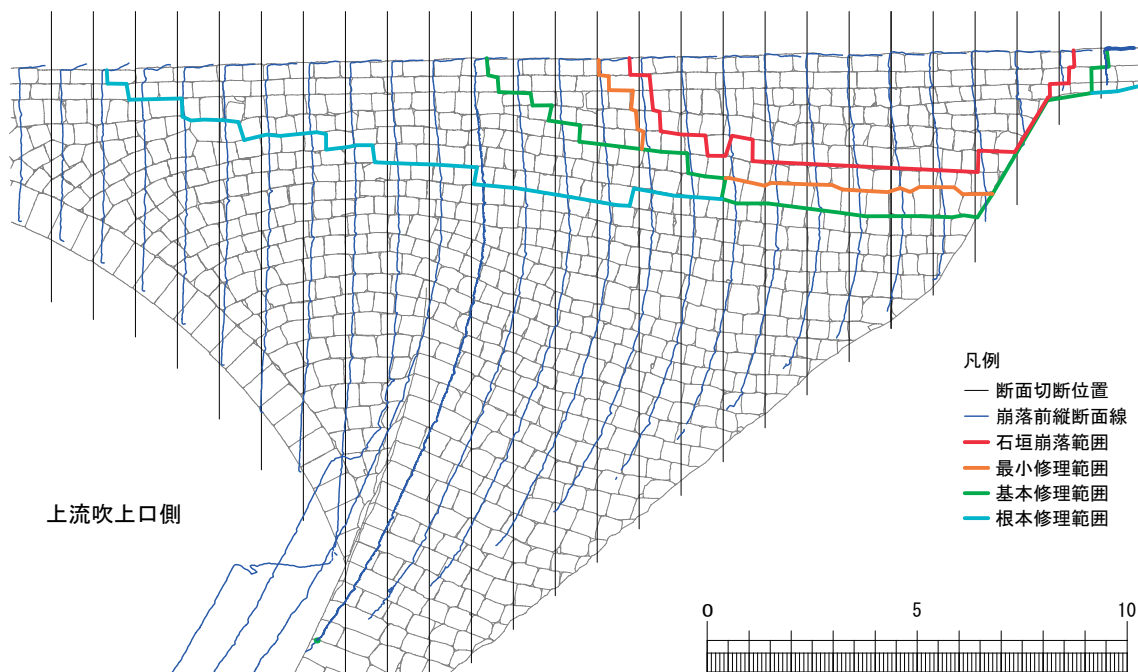


図4-1-8. 石垣修理範囲

4. 目地漆喰の詰め替え

目地漆喰は取り外した通水石管の復旧箇所と通水試験により、漏水が確認された箇所を詰め替えることにした。

5. 排水計画

通潤橋の石垣には熊本地震以前から経年的な孕み出しが確認されており、裏築解体中に調査をした結果、雨水の影響で流出した被覆土や赤土が裏築に混入していたことが判明した。これらは堆積した土が壁石に圧力をかけ、孕み出しの要因になっているものと判断した。今回の工事では被覆土が裏築に混入しないよう、赤土に石灰を混ぜて施工することとした（赤土叩きの撥水性及び硬化性を高めるため）。また、雨水処理方法としては吹上方向から雨水が流水ないように雨量計算を行い、盛土等による水勾配での調整、勾配端部での排水溝の設置をすることにした。

以上の修理方針に基づき、施工を進めた。詳細な施工方法は第4章2節以降に記載している。

4-2. 実施工程

平成30年（2018）5月7日の石垣崩落後は熊本地震災害復旧事業を延長し、崩落した石材の回収及び崩落面のモルタル被覆養生等の崩落防止処置を早急に行った。その後、石材の原位置の特定を進め、併せて修理方針や工法を委員会等で協議した。

平成31年（2019）2月1日の交付決定を経て、同年3月に大雨災害後の修理工事に着手した。索道・吹上口ステージの仮設物は継続して使用した。工事では始めに崩落部の養生のための被覆モルタルの撤去と裏築の検出作業を行い、仕様及び破損状況を調査した。調査完了後は通水石管、敷石、裏築、手摺石及び壁石の順に解体を進めた。復旧では壁石の仮組を行い、孕み出しの修正程度を確認した。仮組後、壁石と裏築の本積みを一段毎に繰り返し、敷石、通水石管の順で復旧した。石管の復旧後、通水石管の目地漆喰を詰め替え、漏水がなくなった段階で赤土叩き、被覆土を埋め戻した。最後に、排水対策工事を行い、仮設物の解体、吹上口の目地補修を終えて工事を完了した。

表4-1-2. 実施工程表

区分		期間	H30年度												R1年度												R2年度	
		6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月			
委託	3次元計測調査	3次元計測																										
	解体調査														裏築調査		解体調査											
本工事	仮設工事	索道	※熊本地震後に設置した索道を引継ぎ																								撤去	
		直接足場													架設									撤去				
	土工	被覆土掘削														掘削												
		被覆土埋戻し																						埋戻し				
	石工事	裏築等据え直し														解体				復旧								
		石垣据え直し														解体	仮組			復旧								
	左官工事	目地詰め替え																						詰め替え				
		通水試験																						通水試験				
		吹上り目地補修																							補修			
	雑工事	排水処理																							排水			