

石造アーチ型水路橋の損傷調査及び補修設計

株式会社有明測量開発社 技術部 近藤 悦郎

石造アーチ型水路橋「雄亀滝橋」は、熊本県美里町の農業用水の供給に200年もの期間、寄与し続けている重要な施設であり、歴史ある石橋が周囲の自然と調和し独特の趣ある景観を創り出している。また、江戸時代の石工の技術や行政の歴史を示す貴重な遺産であることから、県の重要文化財に指定され、今日まで大切に守られてきた。しかし輪石の断面欠損の進行や水路からの漏水発生、さらにアーチ変形が懸念されたため、構造健全性も視野に入れた対策工の検討が求められた。ここでは雄亀滝橋の損傷・変状調査から構造健全性の照査並びに補修工法の設計と検証について報告する。

キーワード：石橋復元，文化財保護，歴史的施設保全，農業水利施設

1. はじめに

「雄亀滝橋」は熊本県上益城郡美里町に存在する熊本県指定文化財に登録された写真-1の石橋であり、石工の岩永三五郎により文化14年（1817年）に架橋され、国指定文化財である霊台橋、通潤橋を、建設する上での技術的な手本となったとされている。

橋梁諸元としては径間15.5m、橋面幅3.63m、拱矢5.9mであり、架橋後200年以上が経過しているが、現在も農地(113ha)へ農業用水($q=0.433\text{m}^3/\text{s}$)を供給する役目を担い続けている県内の架橋年代がわかっている現役の水路橋の中では最古のものである。

しかし、200年の年月を経て写真-2のような損傷・変形が見受けられ、過去にも管理者である美里町土地改良区によって応急的に軽微な補修が繰り返し行われてきた経緯もあり、平成27年に熊本県の土地改良事業として本格的な調査設計を行い、施設の保全を図ることとなった。

本論文では、石橋損傷調査と3Dレーザー観測を用いた点群データによる構造健全性の照査、また、設計における景観を考慮した補修工法とその要求性能検証、及び施工実績について述べるものである。

2. 損傷調査

(1) 調査手法

石橋点検要領を参考として輪石のひび割れ、断面欠損、アーチの変形等を近接目視により調査した。

石橋の変形観測及び図化については、近接目視スケッチによる損傷図作成に加えて、断面欠損及びアーチ形状の正確な計測、今後の維持管理を踏まえた

データ化が必要と考えられたため、3Dレーザー観測機器を用いて点群解析及び処理を行うことにより、石橋断面を点群データ化した。

(2) 近接目視結果

図-1に示すように、輪石全体にひび割れや断面欠損が確認され、特に貫通ひび割れが2箇所以上で断面欠損率が50%以上となる重大な損傷が下部に集中しており、構造安定性の観点から修復を必要とした。また貫通ひび割れが橋軸方向に連続しており、漏水痕も見られた。



写真-1 全景（下流より）



写真-2 輪石の損傷（右岸）

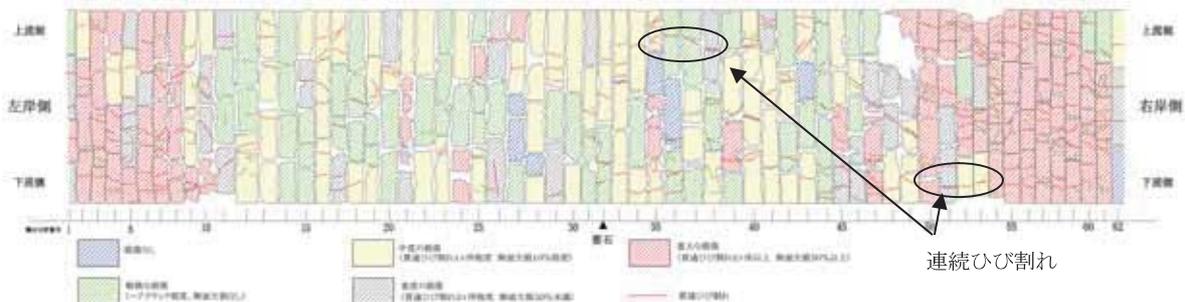


図-1 輪石損傷図

3. 構造健全性の照査

輪石のアーチ形状保持は石橋の安定には重要な要素となる。しかし、輪石の変状が、断面欠損のみかアーチの変形に起因するものかは目視調査のみでは判定し辛い。そこで点群解析データより橋軸方向に30cm間隔で13断面、橋軸直角方向に各輪石毎に62断面を作成しアーチ形状の検証を行った。

図-2は、点群データから作成した橋軸方向の断面に、R=5.9mの半円を配置したものであるが、すべての断面でほぼ半円と合致することが確認された。

特に、目視では部分的には突出しているように見えた箇所についても、点群データでは前後の断面を含めて、ほぼ同円上に位置しており、輪石アーチ形状は維持しているものと判断した。

4. 原因の推定と対応策

輪石アーチ下部の断面欠損の原因として、現在では、石橋上流に砂防ダムが設置され、土石流の直撃から保護されているが、砂防ダム設置以前は、上流からの土石流が直撃しており、落差による過流や土石の跳ね上げが発生し、輪石アーチ下部のみ損傷を進展させたものと推定された。

輪石の漏水痕は、水路内部を調査した結果、写真-3のように水接部の摩耗が進展し水路壁を貫通しており、貫通穴より水路下面の輪石部へしみ出していると推定された。

以上より、輪石の損傷については急速な進展は想定されないものの、断面欠損は、部材断面積が減少することで作用軸力に対する部材耐力の相対的な低下の危険性があり、ひび割れは、石材の圧壊や変形、水路漏水からの水分が内部に入り凍結膨張し石材が細分化することによって輪石が抜け落ち、構造的に不安定に陥る危険性がある。したがって輪石の断面修復を主体とした補修対策をの必要性が生じた。

5. 補修設計

(1) 設計の基本方針

設計及び施工においては美里町により、学識経験者や地元の有識者により構成された「雄亀滝橋調査保存委員会」が設立されており、保全・整備に係る基本方針は以下を遵守することとなった。

- ・ 構造物としての安定を図る整備
- ・ 重要文化財として景観を配慮した整備
- ・ 用水路としての機能を保全
- ・ 重要文化財としての価値を保全

(2) 断面補修工法の検討

輪石のアーチ形状は維持しており輪石積み替え等の抜本的な改築の必要はないため、ひび割れ補修と断面欠損補修を主体とした工法を検討した。断面欠損補修は表-1に示すように補修厚によりその工法が選定される。しかし輪石表面の凹凸が不規則であるため、NO.2~4の型枠を要する工法は型枠設置のため既存の輪石をはつり取る等が必要となり施工困難が想定された。そこで補修厚5cmまでは「左官工法」を

採用し、景観・文化財価値を考慮し樹脂モルタルに石粉を混ぜた擬石材による仕上げとした。ただし、修復厚が5cmを超える箇所は樹脂モルタルの厚塗と断面修復+石版とする施工方法を比較して、コスト面で有利となった図-3の示す石版補修工法とした。

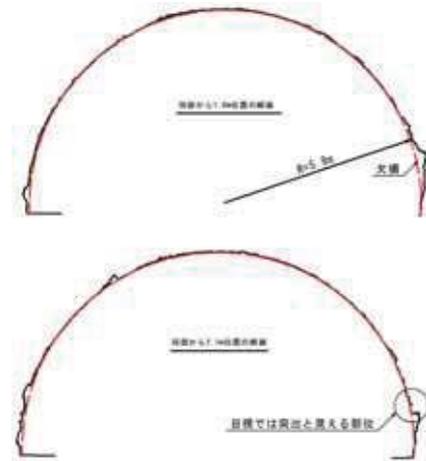


図-2 点群データによる橋軸方向の断面図(抜粋)



写真-3 水路内部の摩耗・貫通穴

表-1 補修厚の目安²⁾

No	工 法	補修厚の目安	型枠
1	左官工法	0～5cm程度	不要
2	打継工法（モルタル）	5～15cm程度	必要
3	打継工法（コンクリート）	15cm以上	必要
3	プレバッドコンクリート工法	5cm以上	必要

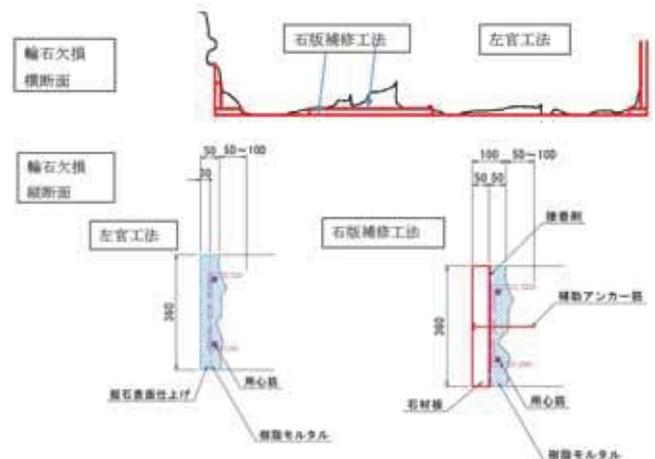


図-3 補修工法図

(3) 石版の強度と接着力確認試験

石版補修工法の採用には、耐久性の観点から石版の強度確認が必要であり、使用石版の強度が現地石材以上であることを圧縮・割裂試験により確認した。また、石版の接着力、母石材の引張強度を求めるため、**図-4**の供試体を複数作成し**写真-4**の引抜き試験を実施し工法の耐久力を確認した。

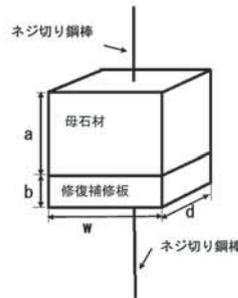


図-4 供試体



写真-4 引抜き試験

(4) 試験結果

圧縮試験結果より石版に使用する石材の一軸圧縮強度は $q_u=63\text{N/mm}^2$ となり、**写真-5**のシュミットロックハンマーにより計測した現地石材の $q_u=36\text{N/mm}^2$ より大きい。引抜き試験では18~20kNで石版に亀裂が入り破損する結果となったが、接着面の剥離等は発生しなかった。石版接着材の接着力は 1N/mm^2 であり供試体寸法で換算すると62.5kNとなる。石版に作用する引張力は自重0.06kN程度であることから石版補修工法は十分な接着力を有すると言える。



写真-5 石材のシュミットロックハンマー計測

(5) ひび割れ補修工法

輪石のひび割れはコンクリート補修と同様に**図-5**の低圧注入工法とした。目地や貫通ひび割れが同方向に連続しており、輪石の縦割れの危険性がある箇所には、**図-6**のように輪石側面からステンレスアンカーを貫通させて、縦割れ防止の補強を行った。

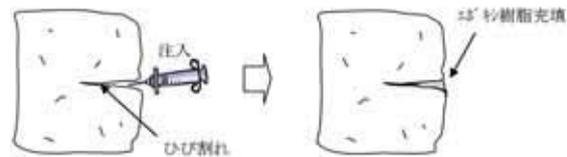


図-5 ひび割れ充填工法

(6) 水路補修工法

水路の補修工法は、石橋保全の観点から漏水を確実に止水できる工法を選定した。補修はコンクリート壁面の欠損・ひび割れを補修後**図-7**のように強化プラスチックの接着シートにより被覆する「シートライニング工法」³⁾とした。なお、本工法の有利な点は以下であった。

- ・水路形状に柔軟に追従して硬化し固着する
- ・施工が容易であり、事後補修にも対応可能
- ・水理性、耐摩耗性に優れている

また、橋面からの雨水浸透による輪石部への漏水を防止するために、橋面の土砂部分に遮水シートを設置し水路側に向かって勾配をつけて浸透雨水を水路内に導き排水できる工法とした。

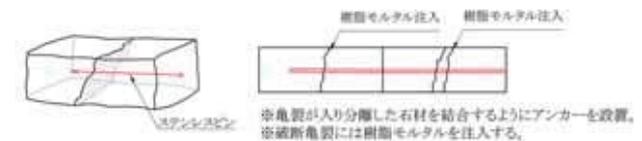


図-6 アンカー挿入補強

(7) 周辺石垣の欠損修復

石垣の損傷は点群データによる断面図から左岸下部の孕み、その他部分的な欠落が判明している。

孕みは地山の滑動によるものであり、ロックボルトなどの比較的短い棒状補強材を地山に多数挿入することにより、地山と補強材との相互作用によって切土法面全体の安定性を高める**図-8**の地山補強土工を採用した。景観対策として、補強材挿入の頭部を擬石モルタル材を用いて処理を行った。

欠損補修は石橋部と同様に、小規模な補修は擬石樹脂モルタル材を用いた補修とし、欠損が大きい箇所や抜け落ちについては石材を用いた。

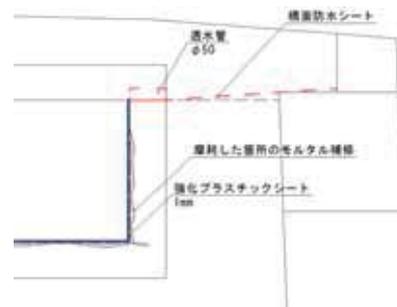


図-7 水路補修工法

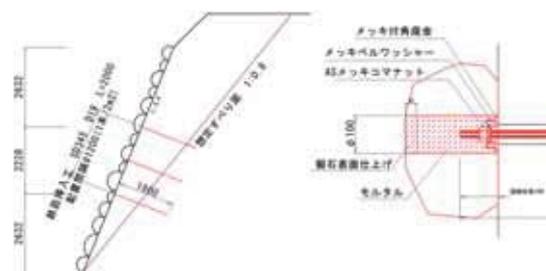


図-8 石垣補修工法

6. 熊本地震後の観測

調査及び設計を平成27年に実施していたが、平成28年4月に発生した熊本地震により新たな損傷の発生が懸念された。地震により損傷が増加し石橋の構造的安定が損なわれている場合は工法の再検討が必要となるため、再度、目視確認を行い、さらに3Dレーザー観測により点群データでの確認を行った。

地震前後の3Dレーザー観測断面を重ねた図-9のように、表面に付着した雑草等により20mm程度ズレがあるもののアーチ形状は変形していないことが確認できた。また新たな欠損も見受けられなかった。

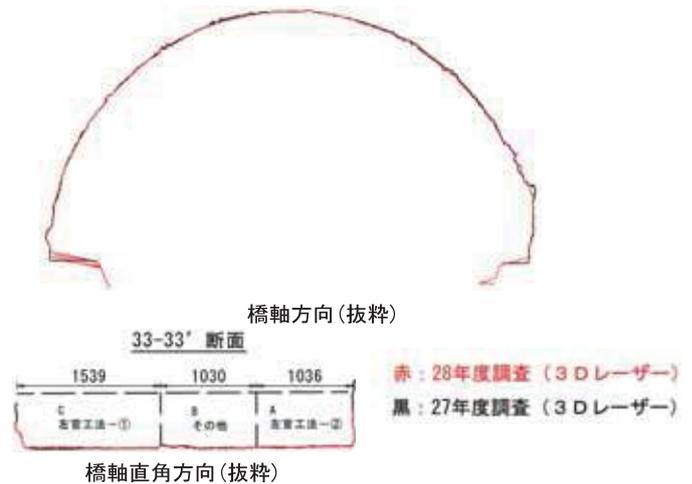


図-9 地震後の観測結果

7. 工事実施における変更点

平成28年10月～平成29年3月に輪石の修復、壁石・石垣の修復、水路補修工事が実施された。

(1) ひび割れ充填工における変更

当初は、写真-5のように目地隙間にシーリングを施しシリンダーによりボンド材を注入する低圧注入工法としたが、ボンド材の粘性が低いものを使用したため、近接目視では判らなかった石材内部の微細なひび割れより流出してボンド材の数量が増加した。

そこで粘性が高いボンド材に変更し、足踏みポンプにより調整圧入することで、ひび割れ内にボンド材が残留し易い対策を施した。



写真-5 ひび割れ充填

(2) 自然に近い景観へ

工事実施の際にも景観面や文化的価値の観点より「雄亀滝橋調査保存委員会」により写真-6の施工中及び施工直後の現地観察を行い意見を頂いている。

その中で欠損の修復は、輪石下部の重大な損傷のある箇所のみ留めて、軽微な損傷である上部は自然に近い景観とするため端部の部分欠損は修復しないよう変更された。



写真-6 下部補修の施工直後 (H28撮影)

8. おわりに

調査では、従来通りの目視調査だけでなく3Dレーザー観測を活用したことで、予期せぬ災害が発生した場合でも、データで形状を確認することができた。

設計では、経験的手法を用いて行われてきた石材補修を実証実験により妥当性を確認することができ、施工後は写真-7、8のように景観を保ったまま構造的に強固な施設とすることができた。

過去の石工の技術による歴史的施設を、現在のICT技術によりデータとして保存・管理整備することで、さらに後世へ文化的価値のある施設を残し、地域資源として活用していくことができる。

(2019. 9. 13提出)

参考文献

- 1) 石橋の設計ガイドラインと維持管理ガイドライン：九州構造・橋梁工学研究会（KABSE）
- 2) コンクリート構造物補修・補強施工マニュアル：財団法人道路保全技術センター
- 3) 農業水利施設の補修・補強に関するマニュアル（案）：一般社団法人 農業土木技術協会



写真-7 輪石右岸の補修後 (H29撮影)



写真-8 工事完了後の輪石部 (H29撮影)