

### ③通潤橋の配置とアーチ構造

通潤橋の配置は、【図5-1-6】に示すように橋の設置角度をみるとほぼ轟川に直角をなしており、最短の距離を選んでいることがわかる。これは川底から3.64mの岩盤（Aso-1）に輪石の根石（支承部）を据え付け（【写真5-1-11】参照）、スパンが18.2m（10間）ならば石橋の建設が可能と考えた石工の宇一と丈八の判断から妥当と思える。なお、この付近の岩盤状況も輪石建設は問題ないと思えるが、橋面の通水石管の配置や橋の高さにも大きく影響するので、岩盤の強度確認が必要である。また、スパンが当初の10間から1.5倍以上の28.18m（15間3尺）に変更された背景には、「通潤橋仕法書」によれば、通水管（吹上樋）の試行した結果、つまり材料とし



写真5-1-11 現況の通潤橋のアーチ基部

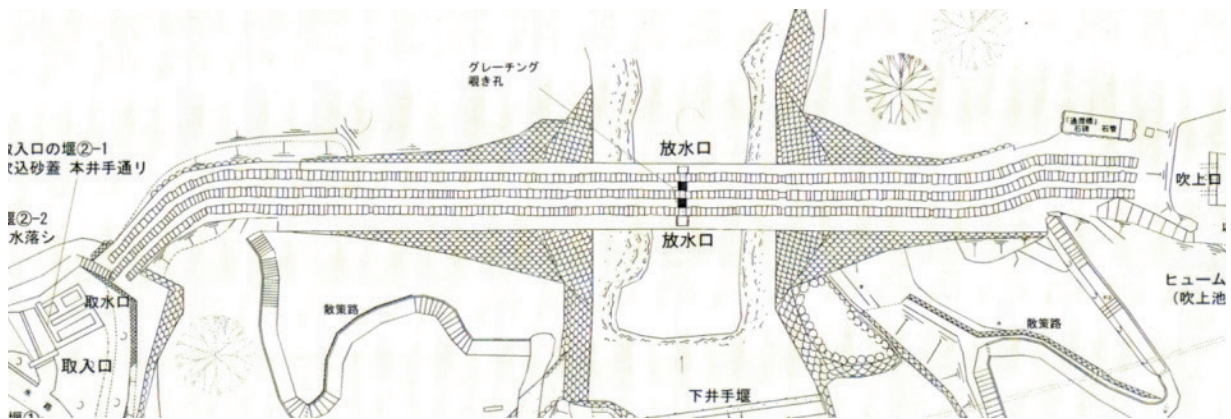


図5-1-6 通潤橋の平面図

て板材と石材を用いた通水実験の結果と大きな関係があると思われる（佐藤常雄etc.・1997）。連通管の原理を採用し、最終的には通水管に石管を用いても、水の取入口と吹上口の高低差をできるだけ小さくしないと通水が難しいとの判断である。そのためには、できるだけスパンを大きくして石造アーチの橋面を高くし、かつ熊本城の石垣を参考にして高石垣を補強する鞘石垣を構築すれば可能であるとの判断があったと思われる。また、輪石の根石部の岩盤の硬さもスパンの長大化要因になったと思われる。

【図5-1-7】は「通潤橋仕法書」（佐藤常雄etc.・1997）にある輪石の形状と寸法図である。これによると、スパンは28.18mで半円形状になっており、橋面までの高さはアーチ支承部の岩盤基部から20.45mとなっている。また、岩盤基部の高さは河川から3.64mとなっている。現況では、【写真5-1-11】と【図5-1-8】に示すように、スパンは鞘石垣とアーチ輪石部分の交点部分からの水平距離で計測し、【表5-1-1】に示すスパンは上流側の寸法である。当初設計ではほぼ半円であるが、現況はアーチ支承部が隠れているので半円でない。しかし、設計通りのアーチ形状だとするとアーチ支承部には水平力は働かず、全て鉛直力となりこれを岩盤で支持している。石造アーチ橋の強度特性は支承部の支持条件が影響するので、通潤橋が架設された河床部はAso-1の岩盤であり、後述する圧縮試験結果【表5-1-4】からも十分な圧縮強度を有していることがわかる。また、上載荷重に対してアーチスパンの1/4点や3/4点付近は大きな曲げモーメントが発生するが、これは中詰材と壁石によりしっかり拘束されており、輪石が安定した構造的になっていることがわかる。特に、鞘石垣はアーチ支承部を保護すると同時に壁石も拘束して

いる。なお、輪石は石の板目が圧縮を受ける方向に据えられ、【写真5-1-12】に示すように角の部分は面取りをした石材を用いており、強度維持の工夫がされている。

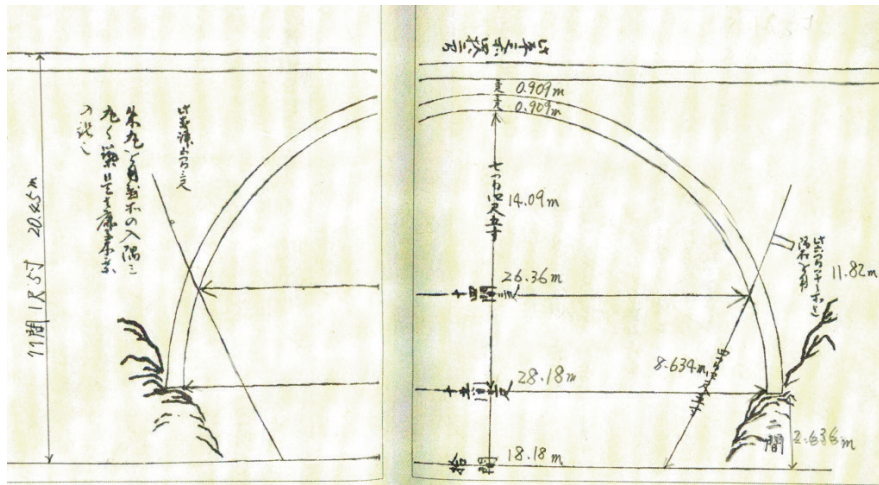


図5-1-7 通潤橋の正面図（設計図）（佐藤常雄etc.・1997）

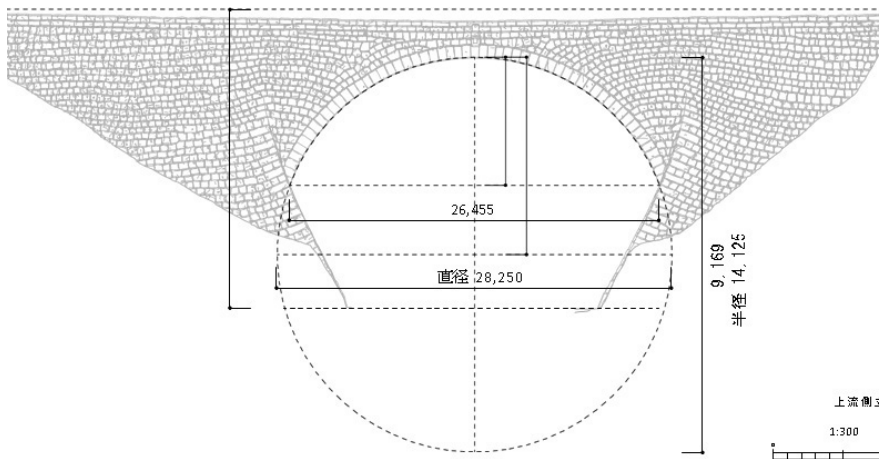


図5-1-8 通潤橋の現況の形状寸法（上流側）



写真5-1-12 通潤橋の輪石を見上げた状況

### (3) 通潤橋の高石垣と鞘石垣の構造特性および釣石の配置

#### ① 鞘石垣の構造特性

「通潤橋仕法書」(佐藤常雄etc.・1997)の「石垣の事」では、岩盤基部から橋面までの高さは、手摺石も含めて22.73m(12間半)と記されているが、【図5-1-7】では20.45mとなっている。【図5-1-9】では19.54mで、手摺石の高さ91cmが含まれていないと思われる。いずれにしても通常の石橋では考えられない垂直の高い壁石となっている。このような高壁石を垂直に維持するには、土圧対策として勾配を付ける必要があるが、「通潤橋仕法書」では熊本城の矢倉台石垣を参考にして鞘石垣を築いたと記されている。この鞘石垣の勾配が重要な点である。

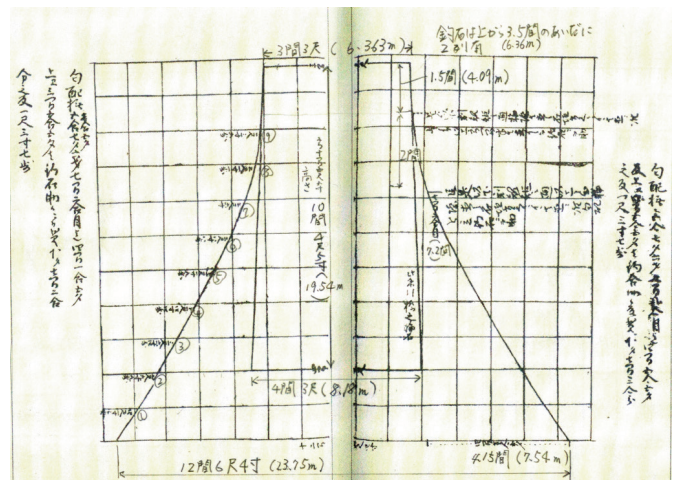


図5-1-9 通潤橋の鞘石垣とアーチ設計図  
(佐藤常雄etc.・1997)

北垣は、「石垣秘伝之書」(学習研究社・1994)を参考にして通潤橋の鞘石垣の石垣勾配を計算している(北垣聰一郎・2011)。また、福田は、北垣が計算した結果と通潤橋の右岸側の鞘石垣を計測してその勾配を比較している(福田光治・2014)。

【図5-1-10】は、福田が「通潤橋仕法書」の中の【図5-1-7】と【図5-1-9】および熊本城の二様石垣および北垣の結果を比較して示したものである。図より福田は、熊本城の二様の石垣勾配と通潤橋の鞘石垣の勾配は非常によく対応しており、石垣秘伝勾配とは差があると思われる。鞘石垣の勾配は秘伝書によらず、熊本城の勾配に合わせて構築したとの見方は正しいと思われる。

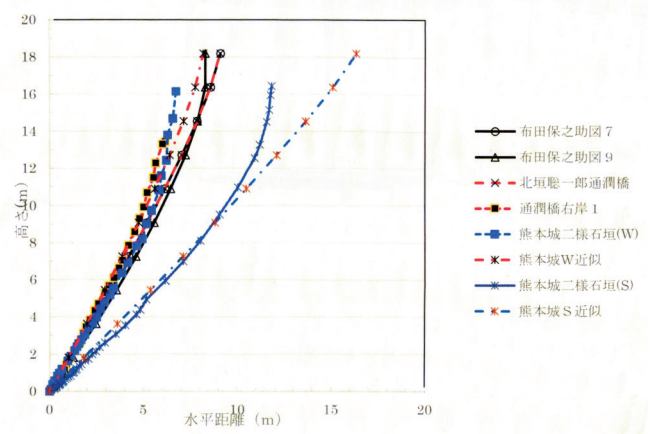


図5-1-10 鞘石垣の勾配と熊本城の石垣勾配  
(福田光治・2014)

次に、鞘石垣の石積みについてみると、石垣勾配のみの検討では不十分であり、石垣の築き方には十分注意を払っている。築石の板目(凝灰岩の堆積方向)合わせの検査やわずかなひび割れがある石は使用せず、石材の形状は直方体とし、鞘石垣の下部に用いる石ほど太く長くし、切込み接ぎで積んでいる。石垣に用いる石材は、長さ3尺、断面が1尺5寸の断面では、奥の断面を2分ほど大きくした断面を用い、壁石の膨らみを抑える役目もしていると考えられる。さらに、石垣の高さ方向にも4段に分け、石材の大きさを変化させながら築く工夫をし、かつ慎重に実施している。つまり、石垣の下から2.13m(1.2間)までは75cmの角石を、次の5.09m(2.8間)は54cm(1尺8寸)角で長さが90cmの石材を、次の5.45m(3間)は51cm(1尺7寸)角で長さが75cm(2尺5寸)の石材、次の6.82m(3.75間)は45cm(1尺5寸)角で長さが60cm(2尺)の石材を使用するよう規定している。また、石垣が交差する角の隅石積みは4か所あり、長さ1.5m(5尺)の石材を交互に【図5-1-11】のように組んでおり、さらに裏込め石にも丸石は使用せず、すべて直方体の角石を使用しているため、橋の内部も壁石と同様な状態で積むよう指示されており、2重に石積みしている。特に、施工の際には石の片方を踏むと片方が跳ね上

がる積み方や石の角と角とがぶつかって欠けることが無いよう細心の注意を払わせている。これは、鞘石垣の勾配が下部ほど緩やかになっており、かつ大きな石材を用いていることから、上部重量を内部の石積みで受け、下になるほど巨石により大きな圧力に耐える力を大きくする工法であり、壁石の孕みも抑えることができることになる。また、地震時においても、石垣の勾配による抑えと壁石のみならず裏込めの石材でも地震動を吸収できる見事な工夫がなされている。

裏込め石を含む鞘石垣の構造内部の確認は通常はできないが、2018年5月の大雨で右岸の手摺石と壁石の一部の93石が崩落してしまう事例が発生した（山尾敏孝・2020）。この復旧工事で天端近くの石垣ではあるが、崩落土や浮き石を除去して壁石内部の裏築の状況を調べることができた。その結果、熊本城の石垣内部や他の眼鏡橋の壁石の内部とも相違する構造であることが判明した。【写真5-1-13】には通水石管下の様子を示しているが、大小の直方体の門石の石材を用いて組み合わせた構造となっていることがわかる。水路橋であるため、壁石に変形を生じて通水石管の変形が生じないように念を入れて積んだとの記述が「通潤橋仕法書」にあり、その通りの構造であった。高壁石の内部は大体このような構造であると推定できる。

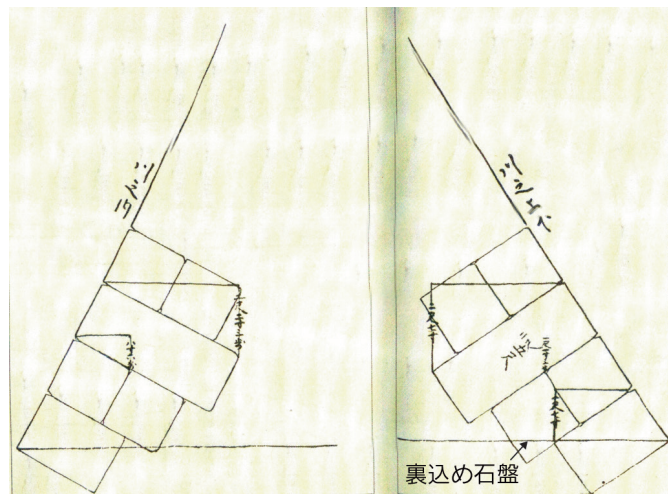


図5-1-11 鞘石垣の隅石積（佐藤常雄etc.・1997）

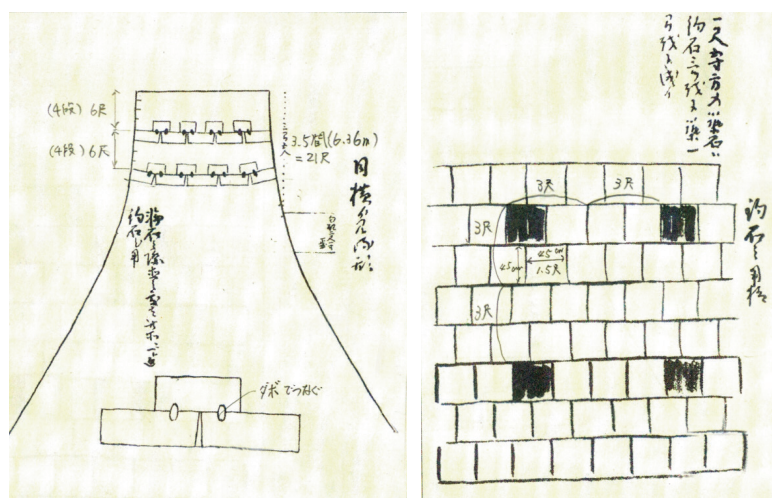


写真5-1-13 通水石管と裏築部の状況

## ②釣石の配置

通潤橋の高壁石を守る勾配を持った鞘石垣は、7.3間（13.27m）までで、それから上は垂直な壁石となることから壁石の補強が必要と考え、【図5-1-12】に示すような釣石を築いて壁石を補強したとされている。

釣石の構造は、【図5-1-12】(a)の挿入図から判断すると、石の孔にダボとよばれる鉄を差し込み、上下の石をつないでいると考えられる。使用した石材は、図および橋全幅が3間3尺から推測する



(a) 釣石の形状

(b) 釣石の配置

図5-1-12 釣石の形状と配置（佐藤常雄etc.・1997）

と、1尺5寸（45.3cm）の断面の角材が5本あるから、1部材の長さは4尺程度と推定される。重ねる石は4本であり、それより短い3尺程度と思われる。これにより上流側の壁石垣と下流側の壁石を動かさないよう固定している。また、釣石の配置は【図5-1-12】（b）に示すような、1尺5寸（45.3cm）の壁石では、釣石を3つおきの間隔で築き、ちょうど1間の間隔を左右上下にとって設置したとされている。

現在の通潤橋の石組みから数えると、橋面から6尺（約1.8m、手摺り石3尺を除く）あたりに配置されていると推定されるが確認が必要と思われる。また、壁石に使用した釣石は14箇所（上流側と下流側をつなぐことで1箇所と計算）との記述（矢部町通潤地区土地改良区・2004、矢部町・矢部町教育委員会・2004）もあるが、その根拠が不明である。壁石に用いる石は、石の縁角を突き合わせて積むと重さが加わって割れるため縁を落としてすき間を開けている。壁石に使用する石は、2尺5寸（75cm）以上の角石の場合は4寸（12cm）のすき間を、2尺（60cm）以下の角石ならば2寸5分（7.5cm）のすき間を開けたようである。



図5-1-13 通潤橋の壁石の孕み出しの状況（上流側）

平成28年（2016）の熊本地震の発生後、文化庁の保存修理事業で被害状況の調査が実施された。目視の調査では壁石垣の孕み出しの程度が数値化できなかつたため、3次元計測調査により壁石の孕み出しや壁石面の亀裂の程度を詳細に把握している。地震3年前の計測データと地震後の計測データを比較した結果の一例を【図5-1-13】に示した（山尾敏孝・2020）。輪石や壁石下部には損傷被害が見られず、地震以前より外側に変形していた壁石上部に被害が集中していることがわかる。左岸側2箇所と右岸側の1箇所に孕み出しが見られ、左岸側で最大10cmから15cm程度であった。通潤橋の壁石の釣石の配置について、上記の推定位置が正しいか確認はできていないが、壁石上部の地震被害状況からみると、鞘石垣の勾配による抑えと裏込めの石材の使用及び釣石が効果的に働き、輪石の安定性が発揮され、石垣の強靱さが地震動に十分耐えることができるものであったことが証明されたと考えられる。

#### （4）通潤橋の通水石管の設計と漆喰（接合材）の特徴

##### ①通水石管の設計

通水管の開発は試行錯誤により多くの時間と労力を費やしたと「通潤橋仕法書」（佐藤常雄etc.・1997）に書かれている。最終的に石材の通水管（石樋）を使用し（【図5-1-14】参照）、独自の手法で作った漆喰による目地詰め（接着剤）を開発することにより成功したものと考えられる。当初の予定は、美里町にあるスパン最大の石橋である霊台橋が架設されたことに加え、同町にある雄亀滝橋のように橋面部分を開水路形式に近い形で通水することを考えたと思われる。しかし、それを実現するには、川面から30m近い高壁石が要求されたが、当時の石工の技術では建設不可能であった。

通水管の平面位置は、【図5-1-6】からもわかるように通潤橋の橋面位置では橋と平行であるが、取水口と吹上口は地形に合わせて曲がらざるを得ない状況であった。通水管が曲がる部分は高低差もあるので大きな水圧が作用することから、通水管の材料選定は大きな問題であったと思われる。橋面から取水

口までの垂直高さは7.64mで、吹上口までの高さは6.54mで、1.12mの差がある。この高低差と曲がることに対応できる通水管の材料として、まず板材の通水管で試行したが失敗し、その後試行錯誤を重ねて「こぶれがし」での現場実験により石樋【写真5-1-14】と決定した。

石樋は、表面を平らにして敷石で基礎を作り設置したとされていたが、これまで確認に至っていなかった。【写真5-1-14】は、2018年5月の大雨で右岸の手摺石と壁石の一部93石が崩落した際の復旧工事で、崩落部分に近接する通水石管（最低1列）を一度解体して施工することになった(山尾敏孝・2020)。これにより、通水石管の下に敷石が敷かれて高さ調整をして通水石管の安定を保っている構造などが初めて確認できた。

石樋は内径寸法を30.3cm角とし、水圧の強弱により石樋の厚さを変化させ、外径は60cm～90cmである。石は柂目方向に接ぎ、【図5-1-14】に示す黒い部分（漆喰の孔）に漆喰を入れ接合した。黒い孔の寸法は3.64cm～3.94cm角である。石樋同士を組み合わせるときは、水路の穴位置、漆喰孔が食い違わないよう、かつ四隅がぐらつかないように据え付けたようである。四隅がぐらつく場合はわら束を敷いて調節したとあり、輪石の設置でも同様な工法が用いられている。石樋が曲がる場合は1節ごとに石の大きさの割合を変化させている。また、各通水管の途中4か所には土砂を排出するため木管を設置したとあり、それ以外の機能は記述されていない。地震の時の緩衝材効果があるのかは不明である。

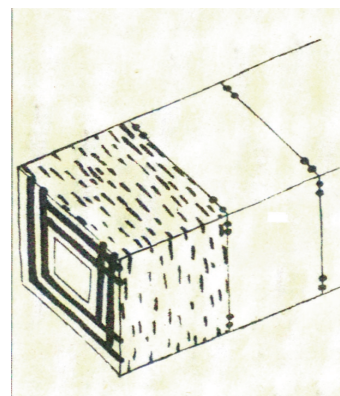


図5-1-14 石樋の接ぎ目  
(佐藤常雄etc.・1997)



写真5-1-14 通水石管と敷石の状況

## ②通水石管の漆喰（接合材）の特徴

通水石管の接合材である漆喰（「通潤橋仕法書」（佐藤常雄etc.・1997））は、不純物の少ない良質の粘土を乾燥させ、つき砕き、フルイを通して微粒の土を5合、焼いてから50日経過した石灰を2升、緑川と千滝川合流地点近くの砂州で採取した砂1升8合、1合の塩の配合で、一緒に臼に入れてよく攪拌し、2日ばかり煮た松葉汁を少しずつ加えながら搗きあわせ、二昼夜ばかり寝かせる。これをさらに搗いて日にさらして乾燥させ、さらに揉み砕いて粉状にしたら「漆喰」となる。また、この漆喰の詰め方も手順が決められていたようである。なお、石管には漆喰を詰める孔が二重に彫られており、通常は内側だけで良いが、地震などで水漏れが発生したら外側の孔にも漆喰を詰めたようである。

通水管の本数は、水田への送水が必要な時期に破損箇所を修復するとなるとその間送水が止まるので、その対策として3本設置したとある。現在、通水石管は土に埋まった状態であるが、完成当時はむき出しの状態だったようである。これは、石管のひび割れ状況の把握、石管からの漏水点検や漆喰の交換など通水管の維持管理の面からは石管がむき出しの方が良かったと思われる。しかしながら、通水管の曲がった部分がむき出しの状態では、地震動を受けた時に石管の目地が外れる危険性があり、実際に被災したのかもしれない。現在は3列とも土に埋めた状態ではあるが、熊本地震に対して土に埋めたままでも漆喰の抜けやズレなどの破損により漏水が発生した。今後も通水管の維持管理は非常に重要である。

### ③「通潤橋仕法書」の意義

布田保之助が残したと伝わる「通潤橋仕法書」は、過去の石橋ではなかなか拝見できない設計・工事施工書である。特に、準備過程から施工まで含めて基本工法と留意点がまとめられている点は大変貴重な史料である。また、「通潤橋仕法書」を裏付ける資料として「南手新井手記録」（白石・渡邊家文書）が出てきたことも幸いしたと思われる。書かれている内容にも検討過程で大変苦勞していることが随所に出てきており、変更を余儀なくされている部分の記述が少ないため決定根拠が不明な点もあるようである。

「通潤橋仕法書」の石工の技術である、輪石の架設や高石垣を支える石積み工法、鞘石垣の勾配実現や裏築石垣の工法は、現在の石積み工法として大いに活用できる技術であり、今後残す必要があると思われる。これらの技術なくしては通潤橋が現在まで崩れることもなく維持されえなかったであろう。また、連通管の原理を用い、石材の通水管を考案した漆喰で接着した水路を開発した技術は通潤橋の特徴の一つである。通潤橋で用いられた素晴らしい技術が他の石橋で使用され、後世で活用された事例が見当たらないのは、これを活用する人材がいなかったのか、これらを適用するような事業がなかったのかは今後調べる必要がある。連通管の原理でかつ石管で水路を通すような誰もがなしえない未知の難問に挑戦した意気込みこそ我々が学ぶべきことである。通潤橋の輪石の架設と壁石垣および鞘石垣の構築や通水石管は、今後とも後世に引き継ぐ貴重な土木遺産であり、今後の維持管理手法をしっかりと検討して維持することが最も重要である。