

図5-1-17 石材の最大圧縮応力度と重量の関係

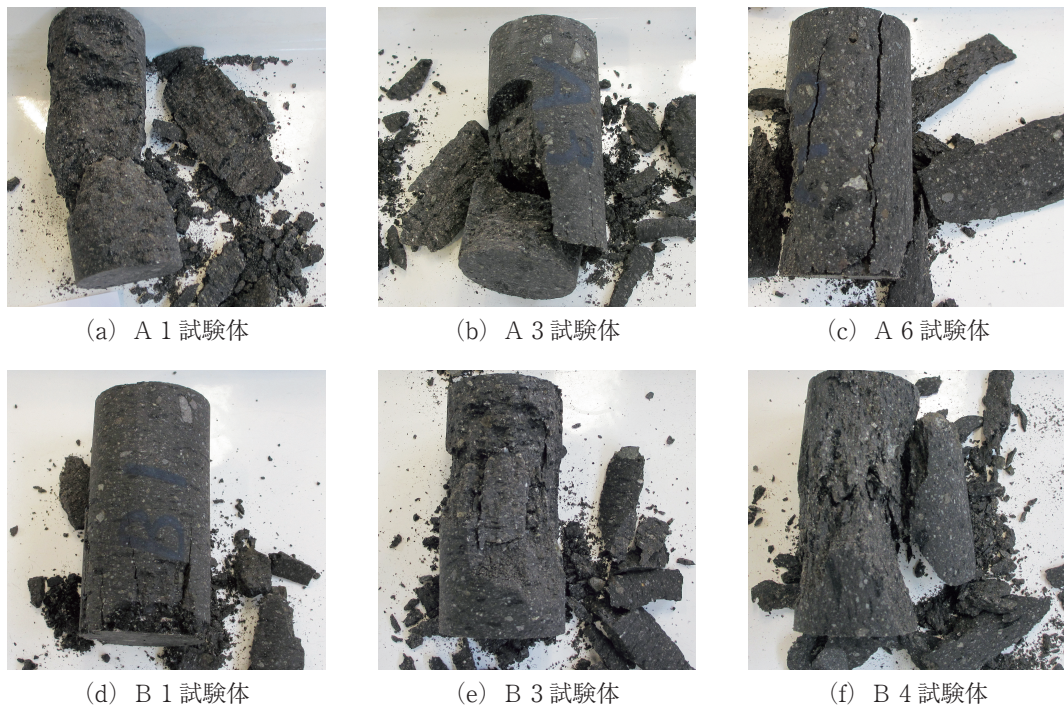


写真5-1-15 試料Aと試料Bの載荷後の様子

【写真5-1-15】は、圧縮載荷試験後の試料Aと試料Bの各3試験体の様子について、最大強度に達して破壊した後の様子を示したものである。試験体は最大荷重に達するとすぐに割れ、それに伴って急激に荷重が低下した傾向はいずれの試験体も同様であった。載荷後の試験体の割れ方をみると、圧縮強度が小さくなった堆積方向の試験体は、内部に存在する異質岩片の影響により、圧縮力を受けた場合、内部が均等な力を受けていないことが考えられ、試験体の高さ方向の途中で破壊している（A3試験体やB1試験体）。一方、圧縮強度が大きくなった堆積層方向の試験体では、層方向に均一になっているためか破壊後は試験体の上から下まで割れが通っていた（A6試験体やB4試験体）。

3. おわりに

通潤橋に用いられた技術について考察して得られた結果をまとめると以下のようである。しかしながら、調査解明が不十分な点も多々あることから、今後もさらに調査の継続が望ましい。

- 1) 国重要文化財に指定された石橋の中で石造アーチ水路橋は通潤橋と早鐘眼鏡橋の2橋であるが構造形式と水路形式は全く異なる。通潤橋は、空積み構造で日本最長のスパンの霊台橋と同程度の規模を有する石橋である。堅固な岩盤（Aso-1）に適した半円状のアーチ構造である。
- 2) 江戸末期から大正までの値評価が高い9の石造アーチ水路橋と比較した結果、いずれも水路橋は石材で造られた開水路で、スパンも小さい。通潤橋のような石材の管水路で石管同士を接着する漆喰を独自に開発して使用している事例はない。
- 3) 九州内に存在する道路橋石造アーチ橋のスパンライズ比は、スパンに関わらずほぼ $f/L=0.5$ と $f/L=0.2$ の範囲に存在しており、どちらかという $f/L=0.5$ に近い石造アーチ橋が多い。
- 4) スパンライズ比が小さい石造アーチ橋ほどアーチの輪石に圧縮力が大きくなり、より現在のアーチ橋梁に近くなる。アーチライズ比が大きい石造アーチ石橋（半円に近い橋）は、曲げモーメントが増えてくるので、輪石に軸力を確実に伝達し、アーチ機構を構築するには、上部の壁石や中詰材が非常に重要となる。
- 5) 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。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。
- 6) 輪石は石の板目が圧縮を受ける方向に据えられ、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。通潤橋の架設位置である五老ヶ滝川付近の河床部と既設通水管の石材の最大圧縮応力度の平均値は 79.7 (N/mm^2) と 68.7 (N/mm^2) で、非常に高い圧縮強度を有する石材である。
- 7) 通潤橋の鞘石垣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、熊本城の勾配に合わせて構築したと考えられる。鞘石垣の下部ほど勾配が緩やかでかつ大きな石材を用いているので、上部の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が強くなる工法となっており、壁石の孕みも抑えることを可能にした。
- 8) 壁石内部の裏築の状況は、大雨で壁石上部が崩壊する被災により、熊本城の石垣内部の丸い栗石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。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地震動を吸収できる工夫であることが確認できた。
- 9) 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熊本地震前後の壁石の変位状況の測量結果から証明された。なお、釣石の配置が設計図通りかどうかの確認は今後必要である。
- 10) 通潤橋は道路橋でなく水路橋のため、天端部に水路を通すために石垣の高さが非常に高い。そこで、中詰めに比較的大きな角石材を用いて通水石管や路面の沈下を抑え、壁石が土圧で外側に膨らまない工夫がされている。高石垣の途中に釣石設置や鞘石垣の設置も効果的だったと思われる。なお、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。
- 11) 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 $60\text{cm}\sim 90\text{cm}$ である。石は柂目方向に接ぎ、黒い部分（漆喰の孔）に漆喰をいれ接合した。また、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ている。

- 12) 漆喰は、不純物の少ない良質の粘土、石灰、砂、塩の配合し、煮た松葉汁を少しずつ加えて作る。漏水対策として石管に二重に漆喰を詰めている。
- 13) 通水石管、輪石及び壁石等の修復材選定の基礎資料として使用するため、主材料である阿蘇溶結凝灰岩の8種類の石材強度試験を実施した。その結果、得られた最大圧縮応力度の最小値は13.8(N/mm²)で、最大値は126.5(N/mm²)となり、大きなバラツキがあった。圧縮応力度の平均値は、福良の採石場(Aso-3)で石山の上層部から採取した石材が最も小さく、同じ石山でも下層部は倍以上あり、今後の石材採取に注意が必要と思われる。貫原採石場(Aso-1)や「こぶれがしの実験場跡」(Aso-1)の石材の最大圧縮応力度は40~50(N/mm²)であり比較的小さかった。また、貫原露頭(Aso-1)の平均値は100(N/mm²)程度あり、今回の実験供試体で最も大きな強度であった。
- 14) 石材の最大圧縮応力度と重量の関係および石材の最大圧縮応力度とヤング率の関係について、石材の最大圧縮応力度と石材重量およびヤング率と多少の相関関係があるが、ヤング率の方が堆積方向(V)と堆積層方向(H)によっても大きなバラツキがあり、最大圧縮応力度も通常と逆な結果となった。しかし、概して最大圧縮応力度が大きい石材は、重量があり、高い剛性(ヤング率)を持つ石材である。
- 15) 今後の通潤橋の通水石管の保存修理工事に活用する石材候補として、御船町大字上野で採取した石材で、吸水率試験と圧縮強度試験を実施し、オリジナル採取地と思われる五老ヶ滝川一帯の河床付近で採取したものは含水率試験のみ実施した。圧縮強度の平均値は、御船町石材では、堆積方向で66.9(N/mm²)と71.3(N/mm²)、堆積層方向で70.9(N/mm²)と74.3(N/mm²)となり、既往の試験結果と同様であった。また、含水率は、御船町石材の堆積方向は4.35(%)と4.39(%)であり、堆積層方向は4.54(%)と4.43(%)となったことより、両方の試料とも堆積方向よりも堆積層方向の含水率が大きくなった。しかし、その差は小さく、両者ともほぼ同程度の含水率であることが分かった。一方、今までも石橋の石材として用いられてきた河床付近の吸水率の平均値は多少小さく、3.92(%)であった。
- 16) 既往の試験で得られた石材の圧縮強度の平均値と重量について比較すると、御船町の石材試験体の乾燥重量は平均値で446(g)程度であることから、既往の試験結果の中で同程度の乾燥重量を有する石材強度と比較すると10%程度小さくなっており、含水率の差が影響したと考えられる。
- 17) 御船町で採取した試験体は最大荷重に達するとすぐに割れ、それに伴って急激に荷重が低下した。載荷後の試験体の割れ方をみると、圧縮強度が小さくなった堆積方向の試験体は内部に存在する異質岩片の影響により、圧縮力を受けた場合、内部が均等な力を受けていないことが考えられ、試験体の高さ方向の途中で破壊している。一方、圧縮強度が大きくなった堆積層方向の試験体では、層方向に均一になっているためか破壊後は試験体の上から下まで割れが通っていた。
- 18) 通潤橋で用いられた石工の技術である、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。これらの技術なくして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と思われる。
- 通潤橋の石材の通水管と漆喰は通潤橋の大きな特徴であり、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についても、ここで述べた技術を保存し、使用する石材特性を考慮して検討し、維持することが最も重要である。

(参考文献)

- ・馬場俊介, 二宮公紀, 小川元秀: 歴史的石造アーチ橋の構造論的分類への試み, 土木史研究, 第10号, 1980.
- ・各種水路橋: <https://www.kinnsei-izen.com>

- ・五味傑，橋本直樹，秋葉芳之，関文夫：バランスド扁平アーチ構造の構造特性とその挙動に関する研究，平成25年度日本大学理工学部学術講演会論文集，2014.
- ・山尾敏孝：道路橋石橋の構造特性と現状，道路橋の定期点検に関する講習会，国土交通省九州地方整備局主催，2021.
- ・佐藤常雄，徳永光俊，江藤彰彦編集：通潤橋仕法書（肥後）布田保之助，日本農書全集，第65巻，開発と保全二，農山漁村文化協会，pp.307-383，1997.
- ・北垣聡一郎：アーチ石橋、通潤橋の鞘岩垣について，『勝部明生先生喜寿記念論文集』勝部明生喜寿記念論文集刊行会，2011.
- ・桑原文夫：熊本城の石垣勾配，日本工業大学研究報告14，1984.
- ・学習研究社：「熊本城」歴史群像，名城シリーズ②，1994.
- ・福田光治：熊本の水遺産と地下水保全，地盤遺産シンポジウム，2014.
- ・福田光治：石垣秘伝書と通潤橋の鞘石垣勾配，2014.
- ・山尾敏孝：国指定重要文化財通潤橋の復旧について，土木学会誌，Vol.105，No.12，December，2020.
- ・矢部町通潤地区土地改良区：通潤橋架橋150周年記念誌，ホープ印刷，2004.
- ・矢部町・矢部町教育委員会：通潤橋シンポジウム報告書，通潤橋150周年記念事業，2004.
- ・白石・渡邊家文書：南手新井手記録
- ・山尾敏孝：通潤橋調査報告書，平成25年度山都町委託事業，2014.
- ・山尾敏孝：重要文化財通潤橋 新規通水管石材 吸水率試験等，委託業務実施報告書，2020.
- ・日本工業（JIS）規格【石材】JIS a 05003, 1995.