

第5章 論考

第1節 通潤橋の技術評価

山尾 敏孝

1. はじめに

通潤橋は、石造アーチ橋と水路橋の機能の両方を持つ土木構造物であり、石造アーチ橋の支間長（スパン）は、空積み石橋として最長スパンを有する霊台橋につぐものである。【写真5-1-1】(a)は正面からみた通潤橋全体の様子であり、【写真5-1-1】(b)は橋上面の様子で3列の通水石管が見える。特に、通潤橋は平成28年（2016）の熊本地震で大きな地震動を受けて通水石管と壁石上部や手摺石に被害を受けたが、輪石や壁石はほとんど影響なかったことが判明した。ここでは、「通潤橋に用いられた技術評価」をするために、以下の点からその特徴について考察するが、熊本地震の影響とその後の調査で判明したことについても考察した。

- (1) 通潤橋と国重要文化財に指定された他の石橋や石造アーチ水路橋との構造比較
- (2) 九州内石橋のスパンライズ比データと通潤橋の構造特性
- (3) 通潤橋の高石垣と鞘石垣の構造特性及び釣石の配置
- (4) 通潤橋の通水石管の設計と漆喰（接合材）の特徴
- (5) 通潤橋の使用石材の材料特性



(a) 正面からみた通潤橋の全景



(b) 橋上面の通水石管の様子

写真5-1-1 通潤橋

2. 通潤橋に用いられた技術と評価

(1) 通潤橋と国重要文化財に指定された他の石橋や石造アーチ水路橋との構造比較

①国重要文化財に指定された他の石橋との比較

通潤橋と国重要文化財に指定された10石橋の諸元や特徴をまとめて【表5-1-1】に示しているが、この中で水路橋は通潤橋と早鐘眼鏡橋の2橋のみである。早鐘眼鏡橋【写真5-1-2】は、三池藩が延宝2年（1674）に早鐘池の用水を通すために、大牟田にかけた石造アーチ型水路橋で、この様式ではわが国で一番古いものである。橋の上には【写真5-1-2】(b)に示すような三方が板石で作られた深さ33cm、幅45cmの用水路を設置し、早鐘池のある東の方から村々のある西の田へこの水路を通して水は流れる仕組みとなっている。農業生産向上のため、中国から伝えられた新しい技術を導入した先人の知恵と工夫が見られる石造アーチ水路橋である。橋長11.2m、スパン9.95m、幅員3.15m、ライズ3.08mで、使用石材は凝灰岩である。通潤橋に比べると架設年代が古く、日本での石橋架設は長崎で始まった初期の頃であり、スパンも長崎眼鏡橋より長く、かつ水路橋として用いたことも画期的なことだったと思われる。



(a) 正面の様子



(b) 上部の用水路と石蓋

写真5-1-2 早鐘眼鏡橋

橋の技術力を示す指標としてスパンがある。【表5-1-1】の石橋のスパンは、天女橋の3.3mから時代が進むにつれて大きくなり、空積み構造で日本最長スパン28.24mを有するのが霊台橋である。通潤橋は少し短い26.49mとなっているが、これは後述するように鞆石垣があるため本来のアーチ支承部が隠されて見えない状態である。架設した石工も同じことから同程度の規模を有するようである。また、石橋の構造形態の指標としてスパンライズ比（ライズ（ f ）／スパン（ L ））やスパンベルグ指数（ L^2/f ）がある（馬場俊介etc.・1980）。スパンベルグ指数はスパンが大きい場合高度な技術レベルが必要なことを示す数値である。【表5-1-1】のライズのデータが不明な天女橋と日本橋を除いた残りの9橋のスパンライズ比 f/L の値は0.31～0.71であり、スパンベルグ指数 L^2/f の値は7～77となった。これはあくまでも本表に示した9橋の中での比較である。通潤橋のスパンライズ比は0.35であり、 L^2/f の値も一番大きな分類に入る。実際は霊台橋とほぼ同じような半円状の構造形態であり、スパンも大きくかつ堅固な岩盤に適したアーチ形状であることがわかる。なお、世界でみると中国の安濟橋は支間長37.4mでスパンライズ比が0.2であることからスパンベルグ指数は184となる。また、イタリアのサンタ・トリニタ橋は支間長29.3mでスパンライズ比が0.14しかなく、スパンベルグ指数は204となっている（馬場俊介etc.・1980）。

②他の石造アーチ水路橋との比較

【表5-1-2】は「各種水路橋」（参考文献2点目に記載）のデータを基に一部修正したもので、江戸末期から大正までの石造アーチ水路橋で価値評価が高い9橋を取り上げて示した。【写真5-1-3～写真5-1-10】には8水路橋の石造アーチの様子や水路の様子を示しているが、江戸時代から石橋に水路を設けて農業等の配水に利用していることがわかる。石造アーチ橋のスパンは3.5m～15.3mとなっており、それ程大きなスパンを持つ石橋ではなく、いずれの水路も開水路である。開水路も石材で造るため漏水対策等は必要であるが、通潤橋の通水石管のような大きな落差圧力に対する考慮の必要はない。また、2径間の石造アーチ橋や大正になると6径間で橋長が長い石造アーチ橋が建設されているが、石造アーチ自体のスパンは小さい。

通潤橋は連通管（逆サイフォン）の原理を石材の管水路で適用した事例であり、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ことから、他に類を見ない水路形式で、貴重な石造アーチ水路橋であることがわかった。なお、通潤橋と同じ逆サイフォンを利用した石造アーチ水路橋として、明治24年（1891）に建設された御坂サイフォン橋（三木市）がある。淡河川疎水の一部をなし、山から谷を渡って川を越え、向かいの山へと水を運ぶ石造アーチ橋で、竣工当時としては画期的な事業であった。しかしながら、逆サイフォンで使用されたのは石材の通水管でなく鋼製の管である。なお、志染川に架かる眼鏡橋は全長52.4m、1径間長25.5mの2連である。なお、国営東播用水事業によってコンクリートアー

手橋が石橋の傍に建設されたため、石造アーチ橋は現在使用されていない。

表5-1-1 通潤橋と他の指定文化財の石橋のまとめ

名称	天女橋	長崎眼鏡橋	小石川後楽園 円月橋	早鐘眼鏡橋	幸橋	虹潤橋	諫早眼鏡橋	西田橋	霊台橋	通潤橋	日本橋
所在地	那覇市	長崎市	東京都文京区	大牟田市	平戸市	臼杵市・豊後 大野市	諫早市	鹿児島市	美里町	山都町	東京都中 央区
建立(年)	1502	1634	1669~1673	1674	1702	1824	1839	1846	1847	1854	1911
指 定	1972年5月	1960年2月	1952年3月	1970年6月	1978年1月	1999年12月	1958年11月	1953年9月	1967年6月	1960年2月	1999年5月
種 別	道路橋	道路橋	道路橋	水路橋	道路橋	道路橋	道路橋	道路橋	道路橋	水路橋	道路橋
橋長(m)	9.4	22.35	11.06	11.2	19.26	31	50	49.48	88.8	79.64	49
幅員(m)	2.98	4.68	2.32	3.15	5.12	6.1	5.5	7.64	5.45	6.65	28
総高(m)	3.74	5.23	4.6	10.1	7.46	不明	8.2	5.58	16.03	21.43	不明
スパン (L,m)	3.3	8.07	4.69	9.95	15.64	25.1	18.2	10.13(1) 11.49(2) 11.52(3) 10.18(4)	28.24	26.46	21
ライズ(f,m)	不明	3.49	3.03	3.08	5.84	11.2	6.1	3.71(1) 4.58(2) 4.53(3) 3.60(4)	13.98	9.15	不明
f/L	不明	0.43	0.71	0.31	0.37	0.45	0.34	0.37(1) 0.40(2) 0.39(3) 0.35(4)	0.5	0.35	不明
L ² /f	不明	19	7	32	42	56	54	28.29.29.29	57	77	不明
構造(アー チ、壁石、 裏築)	石造半円 単アーチで リブアーチ 形式、水平 布積の壁 石、高欄	石造二重 アーチで楔 形石を半円 形状、大小 角閃安山岩 切石を長手 に水平積の 壁石、高欄。 上下流面に 水切	石造欠円単 アーチ、台形 断面の迫石、 切り石布積の 壁石、高欄。 裏築は壁石と 兼用、隙間に 砂塗喰	石造単アー チ橋	石造欠円単 アーチで迫石 は台形断面 切石、切石で 水平布積の 壁石、高欄。 裏築は野面 石詰め	石造単アーチ 橋、高欄	石造二重アーチ、 アーチリング石上 下を大納鉄で緊 結、壁石も同様で 水平積、高欄。裏 築は下より約3分 の1までは切石 を、上部は土砂及 び切石割くずが混 合。特殊円形傾斜 立、空目地積みの 水切	大小2種の石造欠円 アーチからなる4連 アーチ、高欄、橋詰 階段、左右護岸。裏 築は上部部に粘性の 低い土砂と砂利。3 箇所の橋脚部の上 下流、6箇所に設け る	石造アー チでアーチ 部鱗状乱積、切り込 みはぎ。	石造アーチ でアーチ部 鱗状乱積、切り込み はぎ。裏築は 野面石詰め	石造二連 アーチ橋、 高欄
橋 面	石畳	すべて角閃 安山岩による 石張りでの円 弧状	両端より段石 6級を据え、 アーチ中央部 は敷石を円弧 状でアーチ全 幅に渡り切石		側面橋円状 に切石布敷。 両脇に耳石を スバンドレル 面より外方へ 出して据え。		頂上付近は石面 張石、両側に階段 あり。特殊円形傾 斜立	両脇に耳石を壁石よ り突き出して据え、内 側に布石を斜め敷き		通水石管露 出。石管脇 は赤土叩き の上に被覆 土が載る。	
石 質	石灰岩(橋) 砂岩(高欄)		安山岩		玄武岩(橋) 砂岩(取付)	溶結凝灰岩		溶結凝灰岩		溶結凝灰岩	

表5-1-2 石造アーチの水路橋の一覧

名称	所在地	付帯情報	形式(S:スパン)	建造年	出典	価値判断に係る事項
広瀬井路水路 橋 (藤ヶ谷水路 橋)	大分/宇佐 市	(拝田新洞) 広瀬井路/藤 ヶ谷川	石造アーチ橋 長 11.0m, S6.7m	慶応 2 (1866)	WEB(石橋) /WEB	広瀬井路は、文久元(1861)に南一郎平の手で最終的に明治3(1871)に通水成功/南一郎平は日田の豪商・広瀬久兵衛(井路の呼称の由来)からの資金援助(7000両)と島原藩の支援、明治期には県令・松方正義の支援と私財を投じて完成/水路橋は迫石が自然石を粗く削ったもので、壁石も野面積みに近い。保存状態は良い。水路部C化
第三区明治大 分水路橋	大分/大分市	明治大分水路	石造アーチ橋(凝灰岩) 2連 長 32.25m, 幅 4.7m, S7.47m	明治 39 (1906)	WEB(石橋)	幕末からの懸案であった水路が明治30年に着工。幹線32km、支線41kmという大規模な水路が完成したのは明治39年。
明正井路一 号幹線一 号橋	大分/竹田市	明正井路	石造アーチ橋(凝灰岩) 6連 長 78m, S(10.7m)	大正 8 (1919)	WEB(石橋)	橋の長さ共に日本一を誇る石橋水路橋で、現在も水路には水を湛えています。高千穂へと通じる県道にかかる日本最大規模の6連石造アーチ橋
大坪橋	熊本/山鹿 市	<寺島井手/ 吉田川>	石造アーチ橋(凝灰岩) 2連 長 31.0m, S8.9m, 幅 2.0m	慶応元 (1865)頃	WEB(石橋) /市教委	石工:種山組/2径間石造アーチの水路橋は珍しい昭和58解体→山鹿市立博物館前に移設保存
雄亀滝橋	熊本/(下益 城)美里町	柏川井手/緑 川 県重文	石造アーチ橋(凝灰岩) 長 15.5m, S11.8m, 幅 3.6m	文化 15 (1818)	WEB(石橋)	石工:岩永三五郎/岩永三五郎の初期の記念碑的な作品/通潤橋に先行する大型水路用石造アーチ/橋の上は水路に石蓋/上流右岸側に1/4円筒状の突起。保存状態は良好/水路はC化
享保水路太 鼓橋	宮崎/えび の市	(大河平) 享保水路/有 島川 国登録	石造アーチ橋 長 34m, 幅 9.6m	明治 3 (1870)	WEB(石橋)	1850頃に架設され、明治3に大修理が加えられたと書いてある場合も多いが、ここでは明治3の「大修理」が石造アーチ化された時期と判断する一対象外
東方大丸太 鼓橋	宮崎/小林 市	(東方)猿/宮 溝/浜の瀬川 県有形	石造アーチ橋 長 27m, S15.3m	弘化 4 (1847)	市教委 /WEB(石 橋)	県下に2橋ある近世の水路用アーチで、猿/宮溝の水を浜の瀬川を越えて引水するため、薩摩加治木の豪商・森山新蔵が私財を投じて建設したもの/江戸後期ではあるが、現存する県内最古の石造アーチ橋。保存状態は良好
市野々橋	鹿児島/霧 島市	一般道・用水 路 /市野々川	石造アーチ橋(凝灰岩) 長 15.5m, S5.5m	安政年間 (1854-59)	WEB(石橋)	壁石:布積/アーチ・リブが2重 保存状態はよい。アーチ部と路面がC補強(北面はオリジナル)
平熊の石洗越	鹿児島/霧 島市	竹山川/松永 用水路 市有形	石造アーチ橋(防災、 凝灰岩)、石段差工 長 13.3m, S3.5m, 幅 7.5m, 高 2.1m	安永 6 (1777)以 前	WEB(石橋) /WEB(みさ き道人)/本 田泰寛	松永用水に直接流れ込んでいた竹山川が、大雨の時には溢れて用水路を決壊させるので、竹山川専用の石橋を設けて用水路を跨いだ→災害防御用の石造アーチ橋は現在判明している限り全国でこの1橋のみ/石造アーチ橋の直後に階段状の段差工があり、非常に美しく美しい/由来を刻んだ「石洗越の碑」(同年)が脇に建つ。保存状態は良好



写真5-1-3 藤ヶ谷水路橋



写真5-1-4 第三区明治大分水路橋



写真5-1-5 明正井路一号幹線一号橋



写真5-1-6 大坪橋



写真5-1-7 雄亀滝橋



写真5-1-8 享保水路太鼓橋



写真5-1-9 東方大丸太鼓橋



写真5-1-10 平熊の石洗越

なお、ここに使用した写真の一部は「日本の石橋を守る会」のデータを使用した。

(2) 九州内の石橋のスパンライズ比と通潤橋の構造特性

石造アーチ橋のスパンライズ比（ライズ（ f ）／スパン（ L ））の値はアーチ構造の特性に影響する。輪石部材に発生する軸力（主として圧縮力 N ）やアーチ支承部に作用する反力である鉛直力（ V ）と水平反力（ H ）に大きく影響する。

【図5-1-1】は、石造アーチ橋のスパンライズ比が小さい時と大きい時の輪石モデルに、アーチクラウン部において鉛直方向に集中荷重を作用させた時の様子を示したものである。スパンライズ比（ f/L ）が小さい【図5-1-1】（a）の場合、アーチ効果により石材内部に生じる圧縮の軸力 N は大きくなり、輪石全体の鉛直方向の変形も抑えられ、部材の曲げモーメントは小さくなる。この時のアーチ支承部の水平反力 H が大きくなる。一方、スパンライズ比（ f/L ）が大きく、円弧に近づく【図5-1-1】（b）の場合、荷重により図の赤字で示すような部材の曲げによる変形が生じて、石材内部に生じる圧縮の軸力 N は場所により変化する。この時の部材軸力はほぼアーチ支承部の鉛直反力に相当し、水平反力 H が非常に小さくなる。

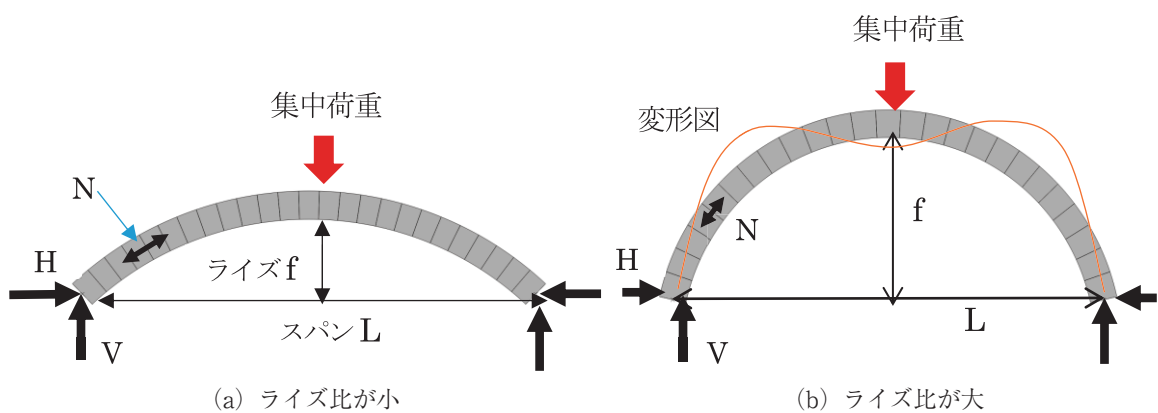


図5-1-1 石造アーチ橋のスパンライズ比と軸力や反力との関係

①扁平アーチとスパンライズ比の関係

扁平アーチを対象に、スパンライズ比を変化させた時の平面骨組解析の結果を用いてスパンライズ比がアーチ部材の軸力や曲げモーメントに及ぼす影響について考察したものである（五味傑etc.・2014）。

平面骨組解析では、両端固定のアーチモデルを用い、アーチスパンを28mと一定にし、ライズを変化させた $f/L=1/2\sim 1/14$ の7つのモデルで比較している。【図5-1-2】は $f/L=1/8$ の解析モデルである。

【図5-1-3】と【図5-1-4】は、アーチ部材のスプリング（アーチ支承部）、1/4点、クラウン（頂部）部の断面力である軸力と曲げモーメントとスパンライズ比（ f/L ）の関係をそれぞれ示したものである。

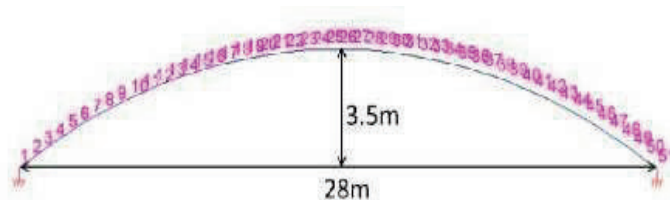


図5-1-2 解析モデル（ $f/L=1/8$ ）

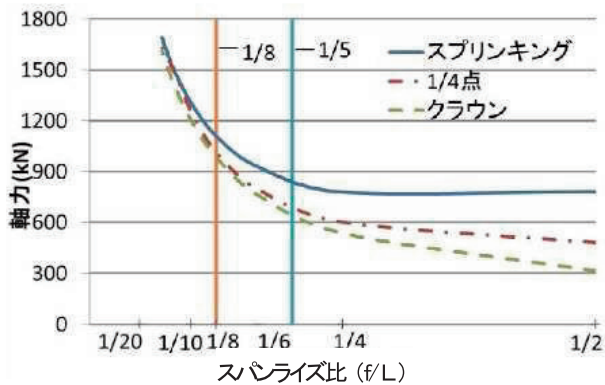


図5-1-3 軸力とスパンライズ比の関係

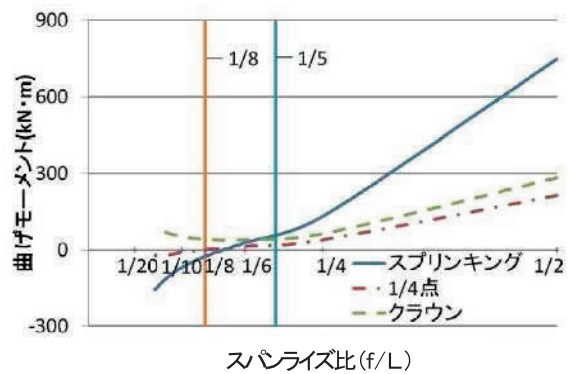


図5-1-4 曲げモーメントとスパンライズ比の関係

【図5-1-3】より、軸力に関しては f/L が $1/8$ 以下になると急激に増加し、これにより大きな水平力が発生することがわかる。【図5-1-4】の曲げモーメントは、 f/L が $1/5 \sim 1/8$ において0に近づいており、軸力が卓越していることがわかる。以上より、スパンライズ比が $1/5$ (0.2) より小さくなるとアーチに発生する軸力は急激に増加する。石造アーチ橋の場合も同様なアーチ機構を有していることから、石橋の輪石に作用する軸圧縮力もスパンライズ比に影響を受けていることがわかる。

②九州における石造アーチ橋のライズ比について

九州内の道路橋石橋（石造アーチ橋）について、既存の定期点検調書及び図面資料からスパン及びライズの寸法が確認された全687橋の内100橋について整理した結果（山尾敏孝・2021）を【図5-1-5】に示している。なお、道路橋石造アーチ橋とは、スパン2 m以上で道路橋として使用されている石造アーチ橋のことである。図中にスパンライズ比の $f/L=1/2$ (0.5) と $f/L=1/5$ (0.2) の値を示す線を記入している。

図より、整理した道路橋石造アーチ橋のスパンライズ比 f/L は、スパンに関わらずほぼ $f/L=1/2$ と $f/L=1/5$ の範囲に存在しており、どちらかという $f/L=1/2$ に近い石造アーチ橋が多いことがわかる。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、現在架設されている鋼やコンクリートのアーチ橋梁により近くなる。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荷重を輪石に伝え、アーチ支承部は鉛直力を十分支持できることが重要となる。なお、通潤橋のスパンは26.46m、ライズが9.15mより、このデータを【図5-1-5】にプロットすると赤丸の位置となる。

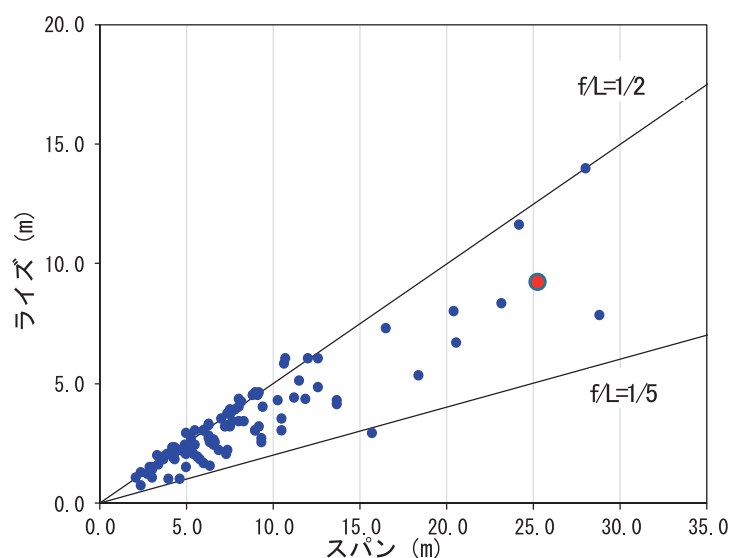


図5-1-5 九州内の石造アーチ橋のスパンとライズの関係