

甲突川の五大石橋とその構造論的評価

川内職業訓練短期大学校 正会員 二宮 公紀
アース・リサーチ設計㈱ 出水さとみ
名古屋大学 正会員 馬場 俊介

Five Stone Arch Bridges built at the Kohtuki River and its Structural Classification

By Kohki NINOMIYA, Satomi DEMIZU and Shunsuke BABA

概要

江戸時代後期に造られた鹿児島市の甲突川に架かる5つの石造アーチ橋（玉江橋、新上橋、西田橋、高麗橋、武之橋）の歴史とそれらの構造論的な特性を概説する。まず2節では、五大石橋の架設時の時代背景と九州の石造アーチ橋との関連について触れる。3節では、五大石橋各々の特徴や諸元について述べる。4節では、石造アーチ橋の建造の技術力を調べるために行った強度計算について述べる。そして五大石橋と世界の歴史的名橋との技術的な関連について考察を加える。

[近世・橋梁]

1. はじめに

鹿児島市のほぼ中央を東へ曲流しながら錦江湾へ注ぐ甲突川は、鹿児島市民の憩の場としても親しまれている。この甲突川にかかる5つの石造アーチ橋は五大石橋と呼ばれ、江戸時代後期の弘化から嘉永年間にかけて4～5年という短い期間に、肥後(熊本)の石工であった岩永三五郎とその弟子たちによってつぎつぎに架けられたものである。これらを架設年順にあげると、新上橋(弘化2年:1845)、西田橋(弘化3年:1846)、高麗橋(弘化4年:1847)、武之橋(嘉永元年:1848)、玉江橋(嘉永2年:1849)の順となっている。

日本に現存する石造アーチ橋の多くは、そのほとんどが九州・沖縄に集中している。明治以前に造られた石造アーチ橋に限定して数えると熊本、鹿児島、長崎、沖縄の4県に多い⁸⁾。中でも熊本が群を抜いて多い。これは岩永三五郎を代表とする技術力の高い石工が、数多く輩出したことにも一因がある。鹿児島の甲突川に架かる五大石橋も薩摩藩が肥後の岩永三五郎を招いて造らせたものであるが、これらは4連または5連の連続石造アーチ橋という、日本では他には見ることのない壮大なものであり、鹿児島の石造アーチ橋を特徴付けている。

石造アーチ橋の伝播経路の1つに、長崎から熊本を経て鹿児島へという経路があげられる。橋長23m、スパン8.3mの長崎眼鏡橋が架設されたのが寛永2年(1634)であるから、五大石橋は年代的に200年以上遅いわけであるが、それだけに規模が大きく、美しく、しかも技術レベルが高いと言われている。日本を代表する石橋群として欠くことのできないものといえる。甲突川の五大石橋は、日本の石造アーチ橋の構架技術の集大成といっても過言ではない。

甲突川はしばしばその流路を変える暴れ川で、川床は護岸の不備や砂の堆積によって上昇し、一旦大量の雨が降ると水害を及ぼすことが常であった。そのため薩摩藩は、川幅の統一・護岸の整備・土砂の浚渫を目的とした改修工事を数度行った。五大石橋の架設も、改修工事の一環として計画されたものである。改修工事の他に甲突川五大石橋を造ることは、家老・調所笑左衛門広郷によって財政改革に成功し、資金が潤沢に

あった(200万両)とはいえ、薩摩藩にとって一大事業であった。

著者らは、参考文献5), 11)で歴史的石造アーチ橋の形態的分類、強度的分類について報告している。本研究の目的は、甲突川の五大石橋架設の歴史的な背景と現状を調べるとともに、その形状による強度的分類を行うことにある。さらに世界の石造アーチ橋と対比することによって構造的技術レベルの位置付けを行う。

2. 九州の石橋と岩永三五郎

世界的に見ると石造アーチ橋は紀元前から造られているが、わが国の石造アーチ橋の歴史は江戸時代以降と遅い上に、分布範囲も大半が九州・沖縄と狭い地域に限定されている。太田は、こうした地理的な限定の理由を、九州の地理・風土と本州との技術交流の断続性などに求めているが³⁾、著者らはもう少し別の視点から、大きく2つに分けて再整理を試みた。

第1は、石造アーチ技術の自発的誕生の不可能性である。わが国は本質的に「木の文化」圏に属し、スパン数メートルといった身の回りの生活レベルでの空間架設は、木材を使えば簡単に達成することができた。木材が非常に高価で、泥をこねたレンガを組み合わせる以外に道のなかったメソポタミア(アーチ発祥の地)とは雲泥の差である。こうした環境では、長い木材を組み合わせて造る疑似的なアーチや刳橋は生れても、あるいは、石材で城壁を見事に築く技術は軍事上の要請から芽生えても、石の断片でアーチを構成して空間を渡すという発想は生れなかった。従って、そうしたものの存在を噂で伝え聞いただけでは、構造上・施工上の秘密まで解明することは不可能で、中国・朝鮮からの渡来の石工が直接技術指導を行った九州・沖縄にしてみても、石造橋の文化が花開くことができたのである。同じ九州の中でも、最初にアーチ技術が伝わった長崎から、本論で取り上げている薩摩にまで、技術が伝播するのに200年以上も要していることから、封建制という閉鎖的社会にあって遠く本州への技術伝播は遅々としたものとならざるを得なかった。

第2は、石造アーチ技術の存在を知った上で、実際に導入しようとする場合の種々の関門についてである。関門としては、①資金、②材料、③技術者、④政治的要因などが考えられる。まず①の資金についてだが、木橋の場合腐食のため平均寿命が20年に満たないし、洪水で流される可能性も大きいことから、もし石橋の技術さえあれば問題なく石造化されそうである。その関門となったのが建設費で、石材の加工・運搬費を含めた架設費用の高額さがネックとなった。九州でも、経済力のある長崎のような商港、篤農家の寄付による熊本の山間部、雄藩のお膝元の鹿児島以外では、逼迫した藩財政からの拠出には困難が伴った。つぎに、②の材料だが、石材の入手が容易かどうかという点は関門とはならないまでも、大きな制約条件となることは、石を産しないトゥールーズ地方(フランス)でレンガが100%石の代りをしていることから明らかである。わが国の場合は、石材産地が偏在しているとは言えないものの、藩内で簡単に求めるのも困難なことが多く、道路を筆頭に石材の輸送条件が悪いことも相まって、たかだか橋の架設のため遠隔地から石材を運ぶことには抵抗があった。③の技術者は、最大の関門の1つである。石造アーチ橋の築造には、ノーハウを知った技術者集団の存在が不可欠であることは上で述べたが、江戸時代においては、その技術者が簡単には行来できなかったのである。宝暦治水における薩摩武士団の大量移動などは、治水という最緊急事態に対する幕府という特例措置で、藩間での交流に制約があって、かつ、九州から遠距離にある本州(それも関西以东)には、単なる橋を架けるために技術者集団を招聘しにくかったと思われる。最後に、④の政治的要因であるが、これは石造構造という仰々しい形態に対する幕府への遠慮と、戦略的に見て川や堀に永久橋(非可燃橋)を架けることへの抵抗の2点が推察される。例えば、佐賀に石橋がほとんどなく、石橋の多い熊本でも城下を流れる川には1つも架けられていない点など、なんらかの政治的配慮を伺わせる。熊本のように九州の中心にあって、たくさんの優秀な石工(岩永三五郎、橋本文八など)をかかえるというように、石造アーチ橋架設のための条件を満たしている藩でも、城下では架けられていないのである。当時の為政者は、石橋のように頑丈な橋は、攻められたときの不利さを考え、戦略的に導入を見送ったものと思われる。

ここで九州各県の石橋について簡単に述べてみよう。江戸初期に造られた長崎市の中島川の石橋群は、わ

が国の石造アーチ橋の発祥とされている(当初は唐僧如定、高一覧など中国人により架けられた)。長崎では、数多く造られたわけではないが、ここで造られた石造アーチ橋が他の石橋に与えた影響は多大なものがある。熊本県は石造アーチ橋の宝庫である。石橋は全般的にみると平野部より山間部に多く分布している。上益城郡矢部町には、単一アーチ石橋としてわが国最大の橋長を誇る通潤橋をはじめ15橋近くが現存している。鹿児島県の石造アーチ橋は、明治維新の少し前頃から急に架け始められている。九州7県の中でも一番遅いことになる。結果的に岩永三五郎という名石工を肥後から得ることができ、九州一の大名であった薩摩藩自らが先頭に立って架橋したので、他県の追随を許さない長大な連続アーチ橋が構築されることになった。また、沖縄からの石造アーチ橋の技術の影響を指摘した記述もある⁷⁾。

岩永三五郎は肥後の石工だが、薩摩藩に招かれて甲突川の五大石橋を架けたことで、熊本よりは鹿児島で有名になった。前述したように熊本では、江戸時代を通じて市街を流れる主な河川には1つの石橋も架けられていない。一方、鹿児島では藩の方針で市街地に石橋を造ることになった。家老・調所によって、三五郎が肥後から招かれたのが天保11年(1840)頃で、当時48歳であったという。調所は火の車であった薩摩藩の財政を密輸と事実上の借金踏倒しによって建て直していた。これによって潤った財政を、甲突川の河川改修に投じたのである。その大事業の主任技術者として招聘されたのが三五郎であった。事業のなかの重要な項目の1つは石橋の架設であり、これは三五郎しかできないことであった。肥後では腕を奮う機会のなかった三五郎であるが薩摩では鹿児島、川内、指宿と水を得た魚のように縦横無尽に動き回り、およそ10年の間に36橋余りの石橋を架けている。故郷の熊本より鹿児島の石橋の方が規模が大きく、数量(熊本の約3倍)も多い。また歴史的価値のある名作も揃っている。特に甲突川の五大石橋は、市街地に立地しているのに加えて、何れも4連または5連アーチ橋という、わが国では最初が多連式アーチ橋であった。

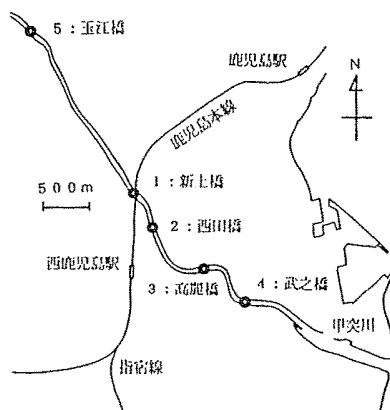


図-1 五大石橋の位置関係

3. 五大石橋の特長と成り立ち

(1) 五大石橋の地理的な関係

江戸時代には、川は敵が攻めてきたときの防衛のための重要な要衝として位置付けられていた。もし、ここに堅固な橋が架かっていると、敵の侵入を妨げられない。木で作られた橋のように、燃やすなどして壊しやすく作っておいた方が守るのに好都合である。薩摩の鶴丸城のような平城では、特に川の重要性は増すと思われる。

では、なぜ薩摩藩では堅固な橋を城下町内に架けたのであろうか。太田⁸⁾は、五大石橋架設の位置関係を戦略的な意味を指摘している(図-1, 表-1)。甲突川は城下の外堀

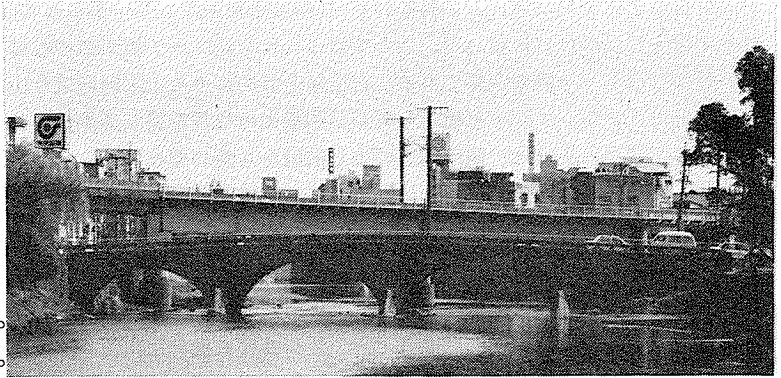
表-1 甲突川の五大石橋(名称は上流から順に示す)

名称	玉江橋	新上橋	西田橋	高麗橋	武之橋
橋長(m)	51.0	46.8	49.6	55.0	71.0
幅員(m)	4.70	5.00	6.30	5.45	5.54
輪石厚(m)	0.58	0.54	0.55	0.57	0.59
アーチ数	4	4	4	4	5
スパン(中央)	11.5	10.8	11.7	12.6	15.5
岸側	10.2	9.5	10.1	11.2	13.3
両端					10.9
アーチ高(中央)	4.3	4.2	4.2	5.5	5.5
岸側	3.5	3.8	3.8	4.6	4.6
両端					2.7
中央のスパン	0.37	0.39	0.36	0.44	0.35
ライズ比					
7-7頂部幅(m)	4.9	6.0	7.2	6.2	6.6
7-7底部幅(m)	4.9	7.7	8.4	7.2	7.1
現在の路面	コンクリート舗装	コンクリート舗装	アスファルト舗装	アスファルト舗装	コンクリート舗装
石材	熔結凝灰岩	熔結凝灰岩	熔結凝灰岩	熔結凝灰岩	熔結凝灰岩
架設年代	嘉永2年(1849)	弘化2年(1845)	弘化3年(1846)	弘化4年(1847)	嘉永元年(1848)
道路名称	玉江橋線	新上橋線	鹿児島市来線	高麗本通線	武之橋線
所在地	新照院町	西千石町	加治屋町	新屋敷町	下伊敷町
混雑度	0.70	1.11	2.11	2.97	----

混雑度：道路のもつ交通容量に対する実際の交通量の比(S.58年度)²⁾

と認識したうえで、『五大石橋は甲突川の互いに見えない位置に架橋されているため、万一、敵がそのうちの1つ、あるいは2つの橋を渡って押しよせてきても、味方は他の橋を敵に気づかれることなしに渡って、敵の背後または横腹を衝くことができることになる』と述べている。

さらに以下の点も考えられる。薩摩藩では川を防衛上の要衝地として重要視しなかったこと、幕府の権威の低下を感じていたこと、九州の有力な藩として攻撃されることはないという自負などが複合して、堂々と町中に石橋を造ったのではなかろうか。



写真－1 新上橋の全景(撮影：二宮, 1991. 3. 17)

(2) 新上橋(シカハシ)

岩永三五郎が、甲突川に架けた最初の橋である(写真－1)。また、4連のアーチとしたのも最初の経験であった。この橋は、五橋のうちでは上流から2番目にあり、川幅の狭い場所を選んで架設されている。三五郎が熊本にいたとき造った石橋は、単一アーチ橋か2連のアーチ橋なので、新上橋の架設技術には種々の工夫が施された。橋長50m弱の2スパンの石造アーチ橋を平地に架設するのは、スパンライズ比を0.4程度(三五郎が実際に造った五大石橋の代表値)とすると、1スパン20m程度になって技術的に非常に困難になるし、路面の勾配も急になる(3スパンも同様)。したがって、少なくとも4連のアーチ橋を設計しなければならなかった。三五郎は5連のアーチも考えたかもしれないが、狭い川幅の川中に4個の橋脚を造らなければならなかったことから、洪水による倒壊の可能性が高まることを危惧して、4連を採用したのであろう。この橋は隣の西田橋に最も近い場所にある。ゆえに架設に対する環境が似通っており、甲突川の五大石橋のメインである西田橋架設のためのリハーサルを兼ねて造ったのであろう。

川幅の狭い地点であるので、この辺りは流速が早くなっている。急流対策として三五郎は3つの工夫を取入れている。第1は、橋壁を垂直にせず傾けた構造としている点である。アーチの頂部と底部における橋の幅に1.7mの差を設けて橋壁を傾斜させ、安定感を増した構造とした。第2は、橋脚に水切りを設けた点である。低くて小型の水切りであるが、水の勢いを左右に分け、水圧を減らす構造となっている。第3は、橋脚の周りの洗掘を防ぐために川底に石を敷き詰めた点である。

五大石橋の中で新上橋だけがアーチ輪石を一重としている。高欄は質素で、あまりお金をかけていない。石積形式にも特徴はない。使用石材は、河頭石^{こうがしやま}と呼ばれる熔結凝灰岩である。右岸から1連目のアーチ要石(留石)に、「弘化二年乙巳九月十二日留入」の刻文がある。

最後に現状についても紹介する(各橋共通)。新上橋は車道専用となっている。歩行者は下流側に併設された人道橋を通ることになる。この人道橋のために下流からの景観は台無しになっている。上流側には水道管がコンクリートを用いて敷設されている。以前はバスなどの大型車も通っていたが、現在は規制されている。終日の通行量は非常に多く、高欄の柱が車の衝突で欠けてしまったりして傷んでいる。橋体への負荷なども心配される。

(3) 西田橋

三五郎が甲突川で2番目に造った4連の橋である(写真－2)。五大石橋の中で最も幅員の広い橋で、上流

から3番目に位置している。鹿児島城下の表玄関に位置しているこの橋は、参勤交代の通路でもあったし、賓客などの通路でもあった。このため特に念入りに造られている。高欄には、当時中納言以上の位でなければ使用が許されなかった22本の青銅の擬宝珠がつけられている。これらは第二次世界大戦のとき供出で失われ、陶器の擬宝珠で格好をつけたことがあった。現在は青銅で復元されている。

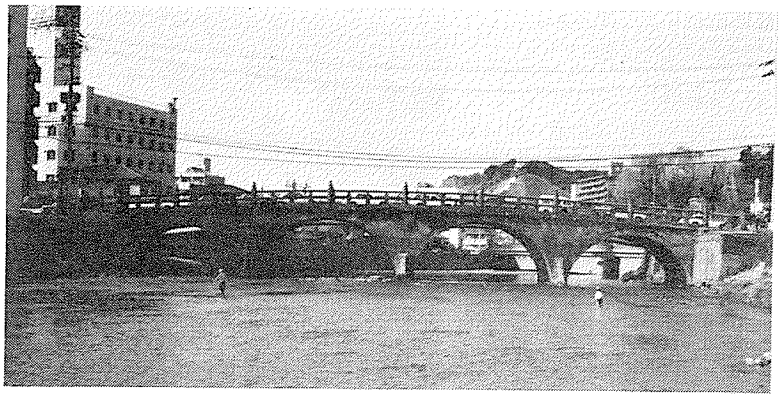


写真-2 西田橋の全景(撮影：二宮, 1991. 3. 17)

アーチ輪石を二重にして架設が行われている。三五郎はこれを西田橋から使いはじめて、以後の甲突川五大石橋に採用している。二重アーチ輪石の採用によって、堅固さを感じさせ、石橋の雄大さ引き立たせることに成功している。アーチを支えているのは内側の輪石だけであり、外側の輪石は内側の輪石に力をバランスよく配分する役目を担っている。外側の輪石は一般に、緩衝リング(補助リング)と呼ばれ、中国から到来した技術(605年頃造られた安濟橋で既に用いられている)の可能性が高い⁷⁾。

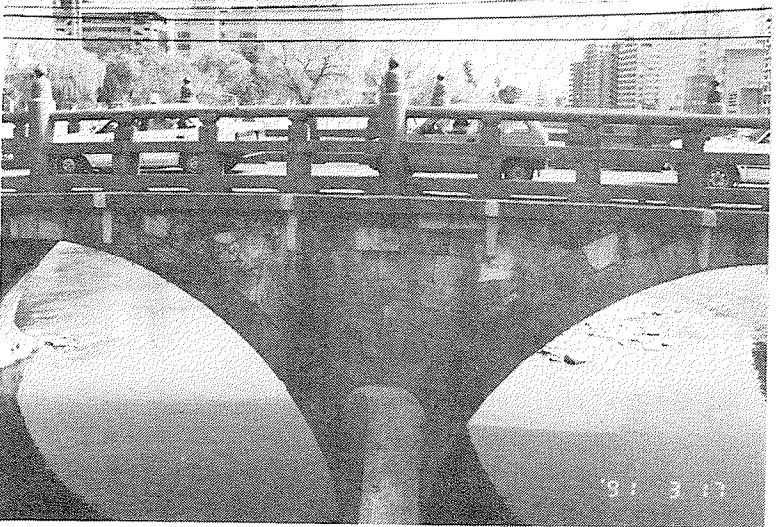


写真-3 西田橋の扇型の石積形式(撮影：二宮, 1991. 3. 17)

橋壁の傾斜は、新上橋より垂直に近くアーチの頂部と底部で1.2mの差である。石積形式についても工夫が施されていて、扇形に並べて配置されており(写真-3)、扇形の石積形式は鹿児島の石橋の大きな特徴の1つになっている。石の表面も『斧切り』と呼ばれる手間暇のかかる加工が施され滑らかに仕上げられており、ふんだんに費用を掛けたことが偲ばれる。

新上橋と西田橋は、約500mの間隔である。先に述べたように新上橋で予行演習を行っているのだから、構造上の基本的な問題については解決がついていたと思われる。水切りについても上に向けて反りを持つようになっているが、大きさも新上橋とあまり変わらない。水切りがあまりにも大きいとデザイン的に見栄えがよくないので、小さい水切りでも大丈夫か新上橋で確かめてみたのかもしれない。新上橋のスパンを1m弱拡張して、細かな点に神経を行き届かせたのが西田橋と言えそうだ。こうして生れた橋は五大石橋を代表する雄大で美しいものになった。この橋は、昭和28年9月に鹿児島県重要文化財の指定を受けている。左岸から1連目のアーチに「弘化三年丙午九月十一日留入」の刻文がある。

最後に現状だが、西田橋の場合、バスの通行は許可されていて十分に耐えている。ただ、市街地の主要幹線道路に架設されているため車の通行量は多く、至る所にコンクリートによる補修の跡がみられ、みっともない状態を呈している。その上、すぐ上流に人道橋が造られ、橋をゆっくり眺められる反面、遠くからの景

観は損われてしまった。

(4) 高麗橋

三五郎が3番目に造った4連の石橋である(写真-4)。甲突川の湾曲部に位置し、下流から2番目にあり、五橋中2番目に長い橋となっている。上流の西田橋とは約700mの間隔がある。アーチ高と橋長の比が五橋のなかで一番大きく足高な橋である。その割に、アーチの頂部と底部の橋幅の差は1.0mと小さく、より垂直に近い壁面を持つ。そのためであろうか、洪水による

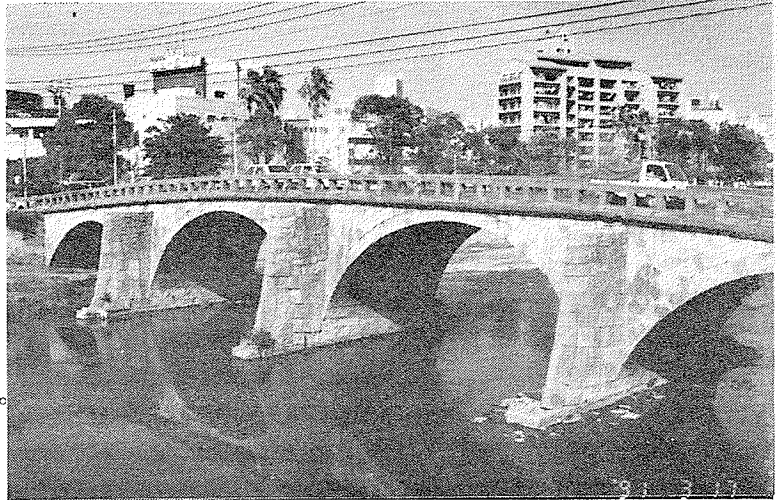


写真-4 高麗橋の水切り(撮影：二宮, 1991. 3. 17)

倒壊を防ぐための水切りは非常に大きく、橋脚の壁の大部分が水切りで隠れてしまう。上流側の水切りは基礎から橋面近くまで垂直に近い勾配でそびえ立ち、上方では反りを感じさせる。水切りの両側面は、流線型に仕上げられている。新上橋や西田橋とは洪水対策の考え方を根本的に変えているようにみえる。

石積形式は扇形で、西田橋のスタイルを踏襲している。高麗橋では地元の石工たち(山田竜助, 原田孫之進, 田中源次郎など)が成長して施工に当たらしい。三五郎が設計したことは確かであるが、施工に当たっては総監督として、ときおり地元の石工に指示を与えるだけだったかもしれない。左岸から1連目のアーチに「弘化四年丁未十月二十六日留入」の刻文がある。

現状であるが、車との衝突などによって高欄はほとんど倒壊喪失してしまい、コンクリートによって再現されている。また迫石には、はみ出しが見られるなど風化現象も甚だしい。現在は大型を除く車専用の橋となっている。車輛通行量は非常に多い。上流側に人道橋が造られている。このため、景観の面からは西田橋と同様な状態と言える。

(5) 武之橋(タケノハシ)

最も下流に位置するこの橋は4番目に造られ、五大石橋の中で最も長い橋である(写真-5)。造られたときは、甲突川の河口部近くにあったらしいが、現在は埋立などによって河口より1700mの地点になっている。明治以前の日本の石橋で唯一五連のアーチ橋であり、日本一の橋長を誇った。前述した新上橋、西田橋、高麗橋は4連アーチであるので、5連アーチとするために施工上の新たな工夫をいくつか凝らしている。中央のスパン

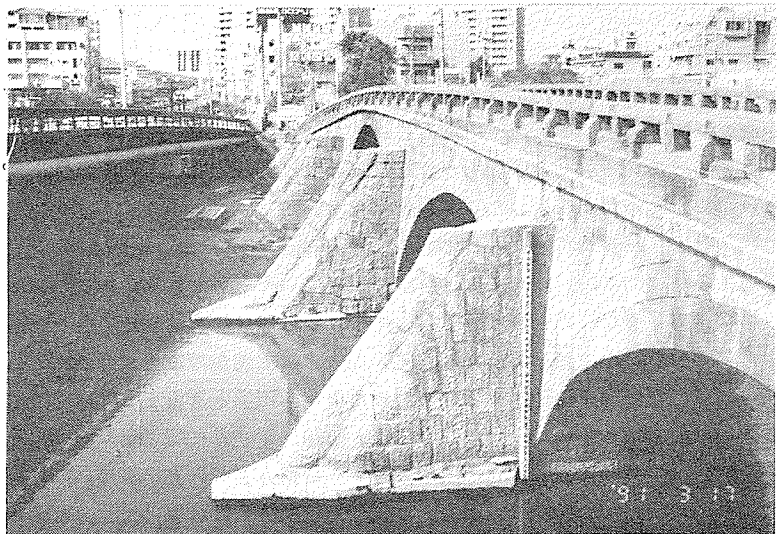


写真-5 武之橋の水切り(撮影：二宮, 1991. 3. 17)

を最大にし、両岸に近づくにつれてだんだん小さくすることにより、洪水による倒壊の危険性を避けたのもその1つであろう。第2の特徴は、水切りにも工夫を凝らしていることである。橋が受ける全体の水圧は橋長に比例して増大することから、水切りを大きくて丈夫なものとしている。また、その大きさから推定すると、水切りには橋を補強する効果も持たされていたと思われる。第3は橋脚の幅が他の4橋より広く取っており、その幅のままで橋面近くまで立ち上り、橋壁の大部分を覆っていることである。アーチの上下幅による橋壁の差は0.5mと少ない。上流の高麗橋とは、約500mの間隔をもっている。この橋から見る桜島の眺望は美しい。

壁石は西田橋と同様に扇形の石積みを採用しており、仕上げは比較的にきれいである。石材は、この橋だけ磯山の熔結凝灰岩を使用しているため、岩相(岩石の模様)が異なっていて、熔結度が他の橋の石材より高くなっている。中央アーチに「嘉永元年申三月十八日 北掛口留入 同卅日其次留入 四月三日南掛口留入 同四日其次留入 同十〇〇日中央之留入 石工尽力其功不日成矣」と2行にわたる刻文がある。

現状だが、両端のアーチの岸に近い部分は、アーチが円弧を描かずにいびつになっているのが観察される。老朽化により歪んだのか、架設中にいびつになったのか調べようがないが、もし前者なら早急に補修のための手を打たねばならないと思われる。また、左岸の橋脚は堆積した砂に埋って、景観が損われている。橋長が71mと高麗橋よりも16mも長いので、他の五大石橋と比較しても非常な雄大さを訴えてくる。現在は人道専用として利用されている。

(6) 玉江橋

五大石橋のうちで甲突川の最上流に位置するこの橋は、最後に架けられた(写真-6)。上流ではあるが、橋長は3番目に長い。これまでの4橋は木橋の架け替えであったが、この橋は新たに架けられている。城下町郊外に架設されたこともあり、幅員は最も狭くなっている。全体の湾曲は最も緩やかで美しい弧を描いている。アーチの上下幅の差はなく、橋壁は直立している。最上流のため基礎石に大型石材が用いられ、河床には広い面積にわたって石が敷きつめられている。一番近い新上橋からでも約1.7kmも上流にある。ほとんど需要のなかった場所に頑丈な橋造ったのは、戦略的意味合いが含まれていたからであろう。

上流側の水切りは中型の大きさである。下流側の水切りは丸型で小さく、そのうちの1つは破壊されてなくなっている。石積形式は、鹿児島特有なものとなった扇形と下流側中央部分の長崎型の水平積みとが混ざり合っている。またアーチ輪石も二重の部分と水平積みの部分の一重の部分の2種類がある。右岸から2番目のアーチに「嘉永二年酉三月二十八日留入」の刻文がある。

近年発見された亀裂は一重の水平石積みの部分で、老朽化が進んでいることが伺われる。さらにもう1ヵ所別のところに亀裂らしきものが発生しているようで、詳しい調査が必要である。五大石橋すべてに保存のための何等かの手当が必要であるが、特に玉江橋の場合は切実である。現在の利用状況は、朝夕交代の一方通行の車道専用で、交通量も多い。下流側に人道橋が造られている。

4. 有限要素法による強度解析

五大石橋は、4連または5連のアーチから成っているが、左右対称の形であるため半分だけ取りだして解析を行った。有限要素法を用いた解析の方法などは参考文献5)と同じである。解

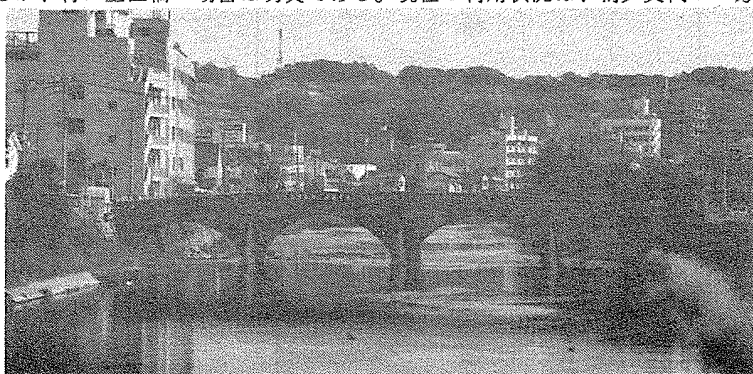


写真-6 玉江橋の全景(撮影:二宮,1991.3.17)

析に用いた5つの橋のメッシュ図を図-2に示す。高欄部分は、構造上強度計算に影響がないため削除してある。熔結凝灰岩を材料としているため、弾性係数は $3 \times 10^5 (t/m^2)$ 、単位体積重量は $2.2 (t/m^3)$ 、ポアソン比は0.25とした。安全度の評価として

(a) 迫石間でのせん断すべりの危険性

$$I S = \max[\Sigma_i \{(\text{迫石 } i \text{ の } j \text{ 部分のすべり確率})\}]$$

(b) 迫石内の圧縮力の伝達のばらつき

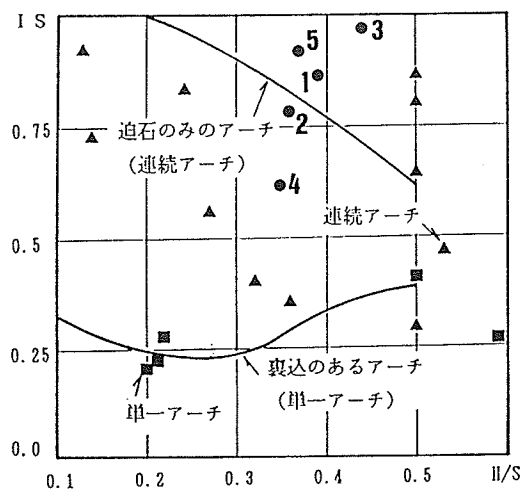
$$I V = \text{mean}[(\text{迫石 } i \text{ の最大応力}) - (\text{迫石 } i \text{ の最小応力})] / (\text{迫石 } i \text{ の平均応力})$$

の2つの指標を参考文献5)と同様に用いている。

ISは1に近いほど危険で、0に近いほど安全性を示す指数である。しかし逆に見れば1に近いほど釣り合いアーチ化されており、0に近いほど過大で無駄が多いともいえる。IVは0に近いほど応力の連続効率が良く、0を離れるに従い応力の流れが良くないことを示す指数である。従って、0に近い方がよいことになる。

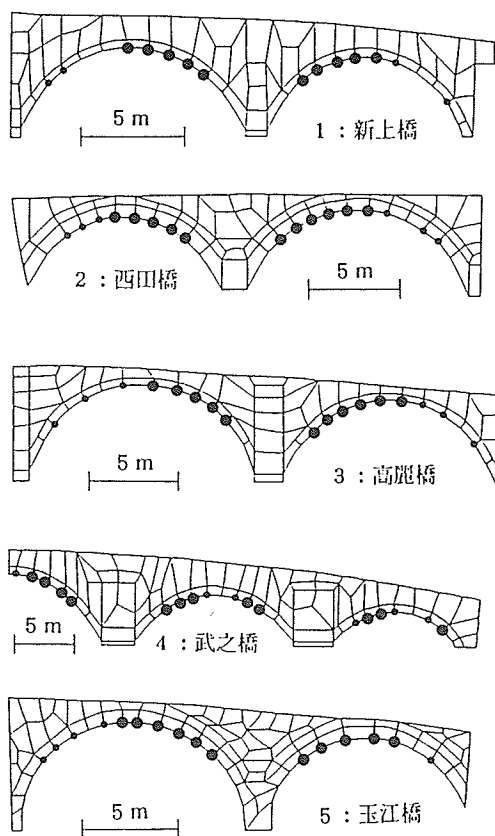
これらの結果を図-3、図-4に示す。図-3の横軸に使用しているH/Sはスパンライズ比である。また、図-2のメッシュ図の中にISの0.5以上のすべり危険性を大きな黒丸、0.1~0.5のすべり危険性を小さな黒丸で示す。

図-3では、ISのみの評価で釣り合いアーチ化された連続アーチ橋なのか、単一アーチに近い連続アーチなのかの評価を行う。それによれば、連続アーチの



1 : 新上橋 2 : 西田橋 3 : 高麗橋 4 : 武之橋 5 : 玉江橋

図-3 ISによる力学的な分布



● $0.1 \leq I S < 0.5$ ● $I S \geq 0.5$

図-2 五大石橋のメッシュ図とすべりの危険性

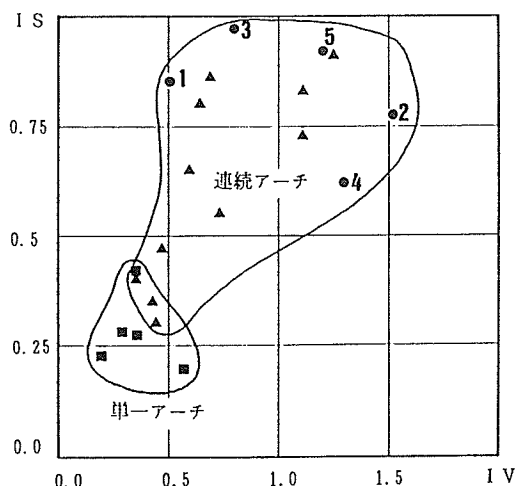


図-4 IVとISによる力学的な分布

シミュレート曲線より下部に位置する橋は2：西田橋と4：武之橋で、中でも4：武之橋は0.75以下の値を示し、単一アーチ橋に近い構造をしていることを伺わせる。武之橋は橋脚の幅とスパンとの比が一番大きい(他の橋のおよそ2倍)ことから単一アーチ橋の傾向を示していると思われる。一方逆に、ISが最も大きいのは高麗橋で、ほとんど1に近い値となっている。これは、高麗橋が左右のバランスをうまくとって造られた骨組に近い薄肉アーチであることを示している。構架の技術に高いものを持っていたことを伺わせる結果として捉えるべきであろう。

図-4は、横軸にIV、縦軸にISをとったものである。この指標で連続アーチ橋と単一アーチ橋の区別はより明確となる。4連または5連のアーチ橋である甲突川の五大石橋は連続アーチ橋のグループ、それもISの最大領域に分布しており、現存している世界の著名な橋と技術的に遜色のないことを伺い知ることができる。

5. まとめ

甲突川の五大石橋の現状と構造論的評価を試みてきた。以下に結論を簡単に述べる。

- ① 構造論的评价ということで、まず、せん断すべりの危険性(IS)を用いて評価すると、五大石橋は釣り合いアーチ化が進んでおり、技術的レベルが高かったと推察される。これは石材の加工のしやすさにも起因する石の組み合わせの良さも影響しているのであろう。
- ② ISと応力の伝達のばらつき(IV)を軸に取って構造論的评价を行うと、連続アーチと単一アーチの特徴が顕著となり、アーチ橋の強度評価を行うための有効な指標となると思われるが、ここでも五大石橋は釣り合いアーチ化が進んでおり、技術的レベルが高かったという結果が得られる。
- ③ 五大石橋とも保存環境としては良好とはいえない。車両の通行が頻繁でいつ壊滅的ダメージを受けるか予断を許さないと思われる。高欄部は車の衝突などで破壊が著しい。玉江橋は橋壁に亀裂が2ヵ所生じている。それなのに、保存のための処置は取られていない。武之橋は人道橋であるが、10mも離れていない所を市内電車が走り、その振動の影響がかなりあるのではないと思われる。
- ④ 都市景観的に検討を要する橋が多い。代表的な橋は新上橋で、下流側に併設して人道橋が造られているためその景観は損われ、歴史的価値が半減している。

今回の計算では橋の形状の違いによる強度の違いを、著者らの提唱する実証論的手法を用いて推察している。ただし、橋体の傾斜、水切りの影響は無視されている。これらの影響を取り入れれば、五大石橋の技術をより的確に評価することができよう。

今後は、五大石橋の保全方法について、技術面・方法論の両面から検討してゆくことが課題となろう。

参考文献

- 1) 増留貴朗：『五大石橋を考える』，南日本新聞開発センター，346p.，1987
- 2) 吉丸泰生ら編：甲突川と五大石橋，(社)鹿児島青年会議所地域文化産業委員会，29p.，1985
- 3) 太田静六：『眼鏡橋 - 日本と西洋の古橋 -』，理工図書株式会社，1980
- 4) 村野守治：岩永三郎と甲突五石橋，県文化財保護審議会，17p.，1986
- 5) 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，vol.10，pp.41-52，1990
- 6) 鹿児島県教育委員会：甲突川の五大石橋，22p.，1969
- 7) 山口祐造：『九州の石橋をたずねて(前編・中編・後編)』，昭和堂，362p.，368p.，251p.，1975,1976,1976
- 8) 太田静六：『九州のかたち眼鏡橋・西洋建築』，西日本新聞社，348p.，1979
- 9) 鹿児島県土木課：『鹿児島県維新前土木史』，260p.，1934
- 10) 鹿児島県教育委員会：西田橋，13p.，1972
- 11) 二宮公紀・馬場俊介・福田光修：歴史的石造アーチ橋の安全性評価に関する考察，第9回日本土木史研究発表会論文集，pp.209-216，1989