

鹿児島県甲突川五石橋の形態的、構造的特徴

Configurational and Structural Features of Five Major Stone Masonry Bridges
over the Kotsuki River in Kagoshima

吉原 進* YOSHIHARA, Susumu
鹿児島大学工学部

奥田 朗 OKUDA, Akira
先端建設技術センター
(前鹿児島県土木部長)

西原幸男 NISHIHARA, Yukio
鹿児島県土木部河川課

鳥巢佳彦 TORISU, Yoshihiko
鹿児島県土木部都市計画課

佐竹芳郎 SATAKE, Yoshiro
建設省福岡工事事務所
(前鹿児島市助役)

米倉敏雄 YONEKURA, Toshio
鹿児島市橋りょう建設課

逸目英正 NIGEME, Eisei
ほつま土木計画(株)
(元(株)協和コンサルタンツ)

中島一誠 NAKASHIMA, Issei
(株)建設技術コンサルタンツ

阿久根芳徳 AKUNE, Yoshinori
大福コンサルタント(株)

本報告は、鹿児島市内を貫流する甲突川に、約150年前岩永三五郎らによって架設された玉江橋、新上橋、西田橋、高麗橋および武之橋などの大型連続アーチ石橋に対して行われた調査結果を取りまとめ、これら甲突五石橋の特徴を述べるものである。

玉江橋と高麗橋は、流失した新上橋、武之橋とともに、すでに解体調査が実施されたが、西田橋は鹿児島県の有形文化財(建造物)に指定されているので、測量調査や地中探査など非解体調査のみが実施された。これまでに解体調査の終了した四橋の調査結果や西田橋の事前調査の結果は、報告書として公表されている。それらを取りまとめ考察を加えたものは、本研究発表会で別に詳しく報告される。

Keywords : 多スパンアーチ石橋、岩永三五郎、甲突川五石橋、技術史

1 概 説

鹿児島市内を貫流する甲突川(流域面積106km²)には、約150年前に架設された4スパンと5スパンの連続アーチ石橋が5橋あり、甲突川五石橋と呼んでいた。甲突川はしばしば氾濫したので、肥後(熊本)より招聘された岩永三五郎によって、河川改修が行われ、かつ市街部に五石橋などのアーチ石橋が架設された¹⁾。天保9年の洪水の様子²⁾、甲突川の改修の状況³⁾を伝える資料を示す。

ア) 岩永三五郎は鹿児島県の治水事業、架橋事業に業績を残すだけでなく、干拓、埋立、新田開発、水道、道路、波止場など土木事業万般に足跡を残している。

イ) 海老原清熙手記顛末記に「天保九年閏四月拾七日(十六日夕方ヨリ雨)朝

*正会員 鹿児島市郡元1-21-40、鹿児島県西田橋解体復元調査委員会委員長および鹿児島市石橋調査技術委員会座長(委員会の詳細は本文末尾に記載)

ノ比、シノヲ束ネ降ル時分ヨリ、少々晴候。然処、甲突川水、満水ニ相成リ、拙者、土手当分ニ参リ、少々低キ所ハ水越様ニ成立チ、(略)土手ノ打切、床ノ下、四五寸計、水参リ、壺杯惣テアゲ、其外諸所打切り、加治屋町方ヨリ、下樋口辺惣テ水上リ、云々。」

ウ) 鹿児島県維新前土木史¹⁾に「(略)天保13年頃新上橋より下流の河川改修及河底浚渫の爲一定尺度の縄を以て河幅を測りたるに(略)改修延長二十四町河幅百五十尺乃至二百四十尺堤防の高さ十尺右岸は五寸乃至一尺低し、(略)」

創建(1845年~1849年)以後、集中豪雨、台風、地震⁴⁾、戦争⁵⁾など幾多の災禍を受け、自動車時代になって荷重も変化したが、甲突川五石橋は長い間市民、県民に便宜を提供し、地域の記憶となっていた。

エ) 鹿児島付近を震源とするM=6以上の地震は14回、M=7以上は4回ある。中でも明治44年6月喜界島近海のM=8.2と大正3年1月桜島のM=7.1の地震が著名である。桜島の地震は直下型で、鹿児島で震度6であった。

オ) 太平洋戦争の末期に、数次にわたる大空襲を受け、旧市街地の93%が被害を受けたとの報告がある。

1993年8月6日、集中豪雨による洪水流が、流木や自動車などの大型流下物と共に市街地に押し寄せ、広範囲(424ha)を水没させ、1万2千戸弱の家屋に被害を与えた(これを8.6水害と称す)。その際、五橋の内2橋が流失した。明治以降の大洪水の概要を表-1にまとめた。この8.6水害については総合的調査が行われ、すでに報告されている^{2)、3)}。

表-1 鹿児島市の大洪水の概要

洪水発生 年月日	降雨の状況		主な被害状況 (新聞報道)
	日雨量	既往値	
明治31.7.5	206.6	10位	西田町・薬師馬場・薬師馬場・高麗町浸水
明治40.7.6	200.9	11位	市内の大部分の家屋浸水 薬師・薬師町床上浸水
大正6.6.16	305.7	1位	甲突川氾濫 溺流全市に溺る 西田町、薬師町、薬師町、草牟田町浸水、山之口通り浸水 1時間に1坪1石の雨 市内氾濫(参考 1坪1石=55ミリ)
大正8.6.15	216.9	7位	草牟田町、新錦院浸水水深5尺 薬師町床上浸水 氾濫救護に軍隊200人出動
昭和3.6.21	255.0	4位	空前の豪雨 1時間56mmの豪雨、西田橋被害 甲突川増水4尺、浸水家屋763戸
昭和11.7.23	233.8	6位	甲突川稀有の大氾濫、浸水家屋1万戸 床上浸水300戸
昭和23.6.25	210.4	8位	豪雨鹿児島を襲う 西田町、塩屋町、天保山町浸水
昭和24.6.28	238.3	5位	塩屋町付近が氾濫 市内中央部を除き一面泥水の街と化す
昭和27.6.8	206.8	9位	甲突川の増水にともなう浸水 市内約1千戸が床下浸水
昭和44.7.5	76.0		甲突川氾濫
平成1.7.28	257.5	3位	甲突川氾濫
平成5.8.6	259.0	2位	甲突川氾濫 市内424ha、11,586戸浸水 武之橋、新上橋流失 柳山町役場で時間雨量99.5ミリ、 日雨量384ミリ

上流域における日雨量384ミリ、時間雨量99.5ミリの豪雨が、流域の脆弱なシラス地盤を崩壊させた。流域の土地利用が変化していたことと複合して起こった災害である。甲突川流域の市街地の経年変化と土地利用の変遷を図-1、図-2に取りまとめた。

甲突川五石橋の設計図、施工図などの基礎データは、現在まだ発見されていない。創建時に近い姿を伝えるため、これまでに判明している一番古い時期の写真、撮影時期を明示して建造順に写真-1から写真-5に示す。

昭和10年頃
市街地5.8%

昭和20年頃
市街地6.8%

昭和40年頃
市街地14.2%

昭和55年頃
市街地21.2%

昭和60年頃
市街地24.4%

平成2年頃
市街地27.2%

図-1 甲突川市街地の経年変化

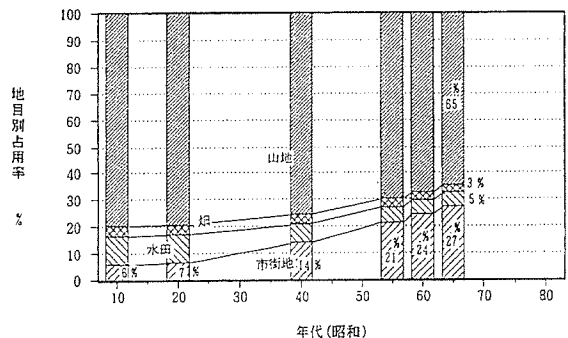


図-2 甲突川流域の土地利用形態の変遷

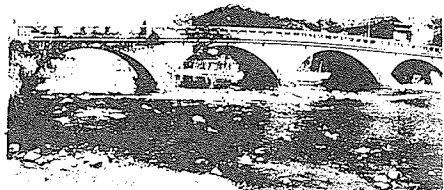


写真-1 新上橋 創建1845年 撮影1950年頃
太田静六：眼鏡橋ー日本と西洋の古橋

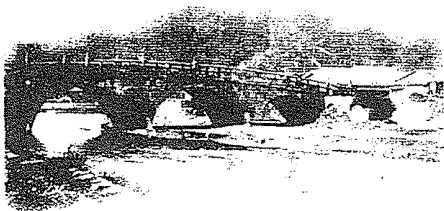


写真-2 西田橋 創建1846年 撮影1880年頃
土木図書館編：絵はがきに見る日本の橋

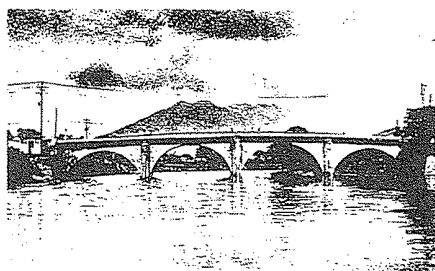


写真-3 高麗橋 創建1847年 撮影1925年頃
木下武之助：世界橋梁写真集

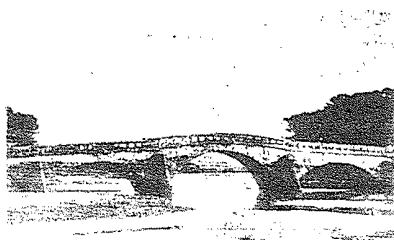


写真-4 武之橋 創建1848年 撮影1880年頃
鹿児島市：鹿児島市戦災復興誌



写真-5 玉江橋 創建1849年 撮影1965年頃
太田静六：九州のかたち眼鏡橋・西洋建築

河川激甚災害対策特別緊急事業による河川改修のため、流失を免れた3橋は移設されることになった。玉江橋と高麗橋は、被災した新上橋、武之橋とともに、1994年から順次解体され、調査が実施された。西田橋は鹿児島県の有形文化財（建造物）に指定⁴⁾されているので、解体、移設、復元のための基礎資料を得る目的で、測量調査や地中探査など非解体調査が実施された。この事前調査結果に基づいて1995年5月に現状変更許可申請が提出され、半年の審議の後、1995年12月に許可された。1996年2月から解体に着手され、詳しく調査されることになった。

これまでに解体調査の終了した玉江橋、高麗橋および大部分が流失した新上橋、武之橋の調査結果や、西田橋の事前調査の結果は、報告書⁵⁾、⁶⁾、⁷⁾としてすでに公表されている。それらを取りまとめ、考察を加えて、今回それぞれ別に詳しく報告される。

甲突川五石橋はどれも岩永三五郎の指揮の下で、同じ河川の比較的近接した地域に、自然環境、社会環境に適するように、力学的、構造的適合性を考慮して相次いで架設されたものであるから、当然基本的な形態、構造は類似している。しかし解体調査によって、細部では異なった部分があることも判明した。以下に甲突川五石橋の形態的、構造的な特徴を、日本や中国のアーチ石橋とも比較しながら述べる。

2 解体調査から受けた一般的状況

解体直前の甲突川五石橋の一般図を一括して図-3に示す。また主要寸法を表-2に取りまとめた。

西田橋を除く4橋の解体調査の状況を述べる。

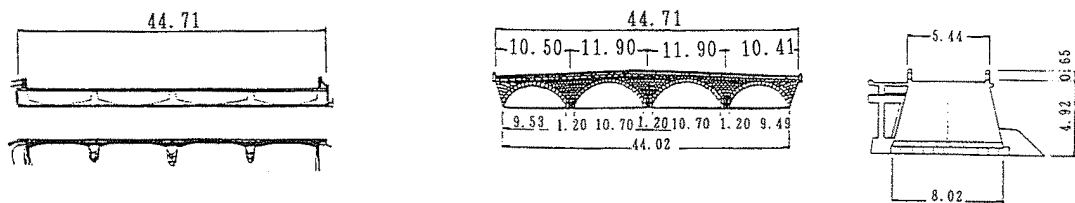
1) 構造、つくりが簡単

- a) 橋脚や橋台の基礎石の下部には、梯子胴木のみが敷かれていて、縦杭は打たれていない。胴木は丹念な作りのものもあるが、雑な作りのものもある。
- b) 基礎地盤には置き換えが行われた形跡はない。
- c) 壁石の孕み出し対策はなく、空積みで、目地とじもない。部分的に20cm程度の孕み出しがあった。
- d) アーチ石は空積みで、だばによる結合はない。

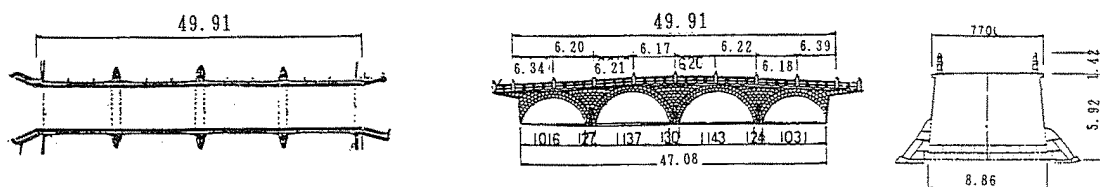
2) 合理的で確実な施工

- a) 現場近くで簡単に入手出来る熔結凝灰岩が使われている。『維新前土木史』に「土木工事用石材として縣下至る所豊富なるは灰石なり火成岩にして比重軽く頗る軟質にして應張力乏しく摩擦し易き缺

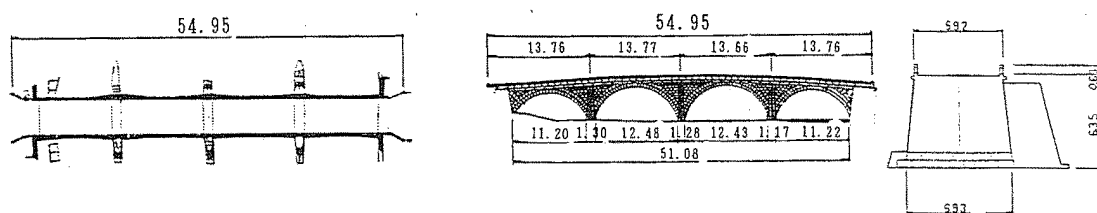
新上橋全体一般図



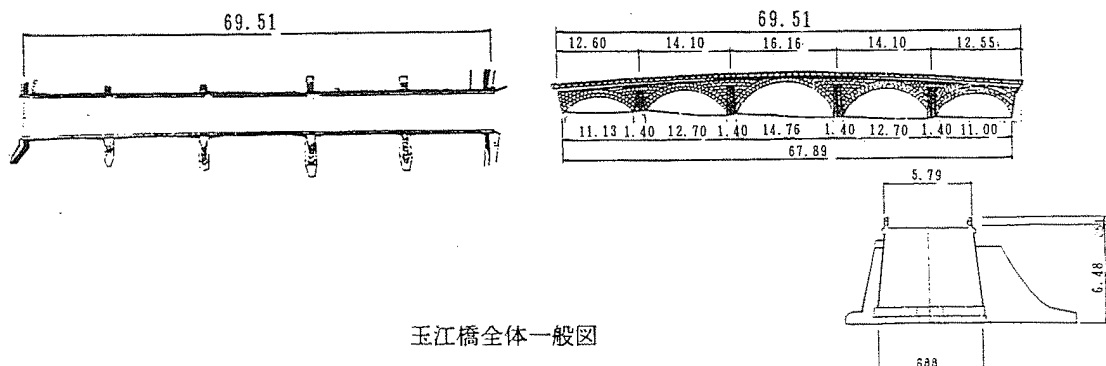
西田橋全体一般図



高麗橋全体一般図



武之橋全体一般図



玉江橋全体一般図

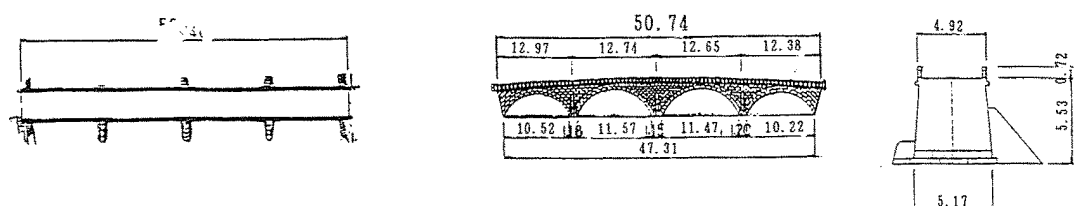


図-3 解体直前の甲突五石橋一般図

表-2 解体直前の甲突川五石橋の主要諸元

		玉江橋 (1849)		新上橋 (1845)		西田橋 (1846)		高麗橋 (1847)		武之橋 (1848)	
		上流側	下流側	上流側	下流側	上流側	下流側	上流側	下流側	上流側	下流側
河口からの距離 km		5.37		3.30		2.83		2.00		1.33	
基礎石下部の標高 m		4.97	4.95	2.80	2.74	1.96	1.94	1.24	1.22	0.44	0.40
護岸面標高 m		9.09	8.97	6.64	6.62	6.55	6.58	6.16	6.19	4.63	4.78
路面長 L m		50.74	50.74	44.71	45.03	49.91	49.92	54.95	54.23	69.51	69.07
路面高 H m		5.47	5.49	4.76	4.77	5.92	5.88	6.16	6.15	6.30	6.34
橋	起拱点高さ m	0.21	0.27	0.05	0.05	0.07	0.00	0.18	0.16	0.14	0.15
	橋台幅 D m	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
台	橋台下標高 H m	3.61	3.48	3.45	3.45	4.45	4.48	4.56	4.60	3.80	3.93
	起拱点標高 m	5.51	5.48	3.19	3.17	2.42	2.42	1.25	1.23	0.83	0.85
第1スパン	スパン長 l m	10.32	10.19	9.53	9.87	10.16	10.20	11.20	11.26	11.13	11.10
	スパン比 e	3.01	3.05	2.78	2.78	3.65	3.68	4.33	4.31	2.91	2.93
スパン	分切り α	3.43	3.34	3.43	3.55	2.78	2.77	2.59	2.61	3.82	3.79
	7-1/2半径 r m	0.49	0.47	0.49	0.52	0.32	0.31	0.25	0.26	0.57	0.56
中心角 θ	平均7-1/2厚 t m	5.93	5.78	5.47	5.77	5.36	5.37	5.79	5.83	6.78	6.72
	121-01-33	123-37-24	121-02-27	117-34-27	142-47-22	143-15-08	150-50-49	149-44-32	110-25-20	111-19-24	
橋	起拱点高さ m	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
	橋脚幅 D m	0.10	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.26	0.99	0.97
脚	基礎下標高 H m	1.18	1.22	1.20	1.20	1.27	1.17	1.30	1.18	1.40	1.40
	起拱点標高 m	4.63	4.64	4.11	4.07	5.11	5.08	5.30	5.27	3.94	3.96
第2スパン	スパン長 l m	5.40	5.36	3.14	3.12	2.35	2.42	1.34	1.33	1.68	1.67
	スパン比 e	11.57	11.62	10.70	10.71	11.37	11.42	12.48	12.66	12.70	12.80
スパン	分切り α	3.81	3.86	3.40	3.41	4.55	4.52	5.18	5.20	3.39	3.13
	7-1/2半径 r m	3.04	3.01	3.15	3.14	2.50	2.53	2.41	2.43	3.75	4.09
中心角 θ	平均7-1/2厚 t m	0.40	0.39	0.42	0.42	0.22	0.23	0.18	0.19	0.56	0.61
	133-28-23	134-23-45	129-44-46	129-57-14	154-41-18	153-27-35	158-47-17	157-36-37	112-23-01	104-14-46	
橋	起拱点高さ m	6.30	6.30	5.91	5.91	5.83	5.87	6.35	6.45	7.64	8.11
	平均7-1/2厚 t m	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
脚	基礎下標高 H m	0.00	0.00	0.11	0.09	0.06	0.03	0.24	0.24	0.57	0.54
	起拱点標高 m	1.15	1.19	1.20	1.20	1.30	1.28	1.28	1.11	1.40	1.40
第3スパン	スパン長 l m	4.90	4.94	4.31	4.31	5.40	5.43	5.62	5.68	5.34	5.27
	スパン比 e	5.30	5.21	3.25	3.21	2.41	2.45	1.31	1.31	1.26	1.24
スパン	分切り α	11.47	11.52	10.70	10.70	11.43	11.49	12.43	12.65	14.76	14.83
	7-1/2半径 r m	3.74	3.83	3.38	3.38	4.51	4.49	5.14	5.18	5.03	4.96
中心角 θ	平均7-1/2厚 t m	3.07	3.01	3.17	3.17	2.53	2.56	2.42	2.44	2.93	2.99
	132-26-21	134-23-05	129-08-05	129-08-05	153-06-54	152-02-15	158-22-02	157-15-58	137-06-32	135-07-00	
橋	起拱点高さ m	6.27	6.25	5.92	5.92	5.88	5.92	6.33	6.45	7.93	8.02
	平均7-1/2厚 t m	0.15	0.16	0.06	0.02	0.16	0.08	0.30	0.33	0.13	0.11
脚	基礎下標高 H m	1.20	1.15	1.20	1.20	1.24	1.25	1.17	1.09	1.40	1.40
	起拱点標高 m	4.44	4.50	4.01	4.03	4.97	5.02	5.21	5.16	5.72	5.72
第4スパン	スパン長 l m	5.45	5.37	3.20	3.14	2.51	2.50	1.37	1.40	0.82	0.81
	スパン比 e	10.22	10.29	9.49	9.52	10.31	10.26	11.22	11.25	12.70	12.62
スパン	分切り α	2.93	2.98	2.80	2.82	3.56	3.60	4.41	4.36	3.82	3.88
	7-1/2半径 r m	3.49	3.45	3.39	3.38	2.90	2.85	2.54	2.58	3.32	3.25
中心角 θ	平均7-1/2厚 t m	0.51	0.50	0.48	0.48	0.35	0.34	0.24	0.25	0.47	0.45
	119-19-02	120-19-06	122-10-43	122-34-35	138-30-52	140-14-16	152-40-59	151-07-07	124-07-13	126-20-56	
橋	起拱点高さ m	5.92	5.93	5.42	5.43	5.51	5.46	5.77	5.81	7.19	7.07
	平均7-1/2厚 t m	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
又	基礎下標高 H m	0.25	0.27	0.05	0.06	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
	起拱点標高 m	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.40	1.40
台	起拱点標高 m	3.41	3.40	3.39	3.45	4.45	4.43	4.68	4.68	4.91	4.93
	起拱点標高 m	5.55	5.48	3.19	3.18	2.41	2.44	1.07	1.07	0.69	0.70
第5スパン	スパン長 l m									11.00	11.10
	スパン比 e									3.04	3.03
スパン	分切り α									3.62	3.66
	7-1/2半径 r m									0.53	0.54
中心角 θ	平均7-1/2厚 t m									6.50	6.60
	115-43-21									114-31-43	
橋	起拱点高さ m									0.60	0.60
	橋台幅 D m									0.12	0.14
台	橋台下標高 H m									1.20	1.20
	起拱点標高 m									4.28	3.69
路面偏平率 F/L		0.025		0.022		0.020		0.016		0.012	
路面半径 R m		220		260		249		280		327	
上幅/下幅 B ₁ /B ₂		0.95		0.68		0.94		0.85		0.84	
橋高幅員比: H/B ₂		1.06		0.59		0.72		0.89		0.92	
自重/基礎全面積 kgf/m ²		35.7		30.0		35.4		35.6		37	

ここに、スパン番号は左岸から。起拱点高さは最低位置を0とする。

スパンライズ比 $e = l/f$ (拱矢比), 分切り $\alpha = (r-f)/r$, $r = (l^2 + 4f^2)/8f$, $\theta = 2\arctan(1/2)/(r-f)$

点は免れざるも採取加工容易にして製磚の患少き為め古來盛んに諸種の工事に使用せり縣下に拱橋多きは一に此灰石の大量に出が為ならん（略）」とある。

この石材は上部加久藤火砕流堆積物（約30万年前）および吉野火砕流堆積物（約50万年前）の熔結部分であり、軽くてコンクリートなみの強度を持つが、異方性が強いとされている⁸⁾。現在もなお市内に採石場がある。石材の調達地を表-3に示す。

表-3 使用石材と運搬距離

橋	石材産地	運搬距離
新上橋	小野石	2～4 km
西田橋	小野石：アーチ、壁	3～5 km
	河頭石：高欄	3～4 km
高麗橋	小野石	3～5 km
玉江橋	小野石	3～5 km
武之橋	たんたど石	7 km
	花棚石 混合	4～6 km
	小野石	1～3 km

b) 凝灰岩の加工性は良いが、部位によって表面仕上げを使い分けている。全般的な石材加工状況を表-4にまとめた。

表-4 石材表面仕上げ一覧

		新上橋	西田橋	高麗橋	玉江橋	武之橋
アーチ石	側面	F	B	F	F	F
	腹面	F	C	F	F	F
	合端	G	—	G	G	G
基礎石	側面	E	E	E	E	E
	腹面	G	—	E	E	E
	合端	G	—	E	E	E
壁石	側面	F	B	E	F	F
	腹面	E	—	G	E	E
	合端	H	—	H	H	H
反力石塊	石垣	G	—	H	H	*
	中詰	G	—	H	H	H
護床敷石	基礎周り	E	D	G	*	G
	基礎周り	*	E	*	*	*
	橋梁下部	G	G	G	*	G
	橋梁外側	H	H	H	H	H
水切り石	水面上	E	A	E	E	F
	水面下	E	E	E	E	E
高欄	親柱、小	F	B	*	F	F
橋面敷石	表面	E	D	E	E	E
	合端	E	—	E	E	E
	裏面	H	—	H	H	H

A：小叩き B：びしゃん C：上ノミ切り D：中ノミ切り
E：荒ノミ切り F：ヨキ仕上げ G：瘤おとし H：野面 —：未調査
*：該当なし

c) アーチ石の合端間には、砂利混じり土が入っていた。これは調節用に意図的に入れられたのか、自然に混入したのか、判定しにくい。

d) 路面敷石合端の施工は丹念である。中詰めは粒子の細かい土も含むが、壁石に漏水痕や汚れはない。

3) 構造の細部については橋毎に特長がある

a) 財政事情が違っていても、経験を積み毎に要領が良くなったとも、藩内の政治的事情で完成を急

いだとも考えられるが、理由はわからない。天保改革によって薩摩藩の藩財政立て直しに成功し、これによって膨大な工費が賄われた。工費は新上橋が2415両、西田橋が7127両3歩2朱余、高麗橋が2800両、武之橋が2400両、玉江橋が1560両と記録されている⁹⁾。

b) 現場毎の技術、技能集団が、個別の棟梁に率いられていたと考えられる。岩永三五郎に直属した鹿児島関係の名前を各種資料から数えれば山田龍助、小牧幸三などの石工棟梁が十数名、石工や仕明夫（作業員）が合わせて2～300名程度となる。案外現代にも通ずる請負システムのなかで競ったので、橋毎の独自性となったのかも知れない。

4) 破損状況について

a) 欠損、クラックが多い。どの時期に、如何なる理由で発生したか判定するのは難しい。

b) 風化の程度は激しい。熔結凝灰岩自身の風化の速度は年0.2mm程度で、一般石材よりやや風化しやすいと報告されている⁸⁾。石や煉瓦を積み上げた城壁（中国の長城、故宮城壁、南京城壁など）でさえ、長い年月の間に風化等によって崩壊している。アーチ石橋のような組石ものは例外で有り得ない。

しかし凝灰岩は間隙や吸水性が大きく、中詰め土もあるので、植物が根付き、成長する。

壁石などに根付いた植物は見た目に軟らかい感じを与えるので一般に歓迎される。しかし根は成長するので長い目で考えるとよくない。その意味で、中国江南の朱家角放生橋を視察した際、灌木が数本生えているのが気になった。管理者がこれを刈り取ろうとしたところ、地元の人は強く反対したと、案内の文化館館長から聞いた。理由はその木が「石溜（ざくろ）」の木で、根が石組を抱え込むように意図的に植えたものであるからとのこと。石組の中で根を張る樹木を切りたい管理者と、美観やざくろの特性から刈り取りを阻止したい利用者の間に美しいアーチ石橋の安全を求めている。難しい問題である。

c) 度々車両が衝突した形跡がある。見通しが悪く、幅員が小さく、車両通行規制が長い間なかったために、接触事故が起こり易かったようである。

5) 建設後何回も補修、改修されている

- 護床を敷石からコンクリート版に改造（玉江橋）。
- 路面縦断曲線を緩やかに改造（玉江橋以外の4橋）。
- 水切り石には積み増しされたり、縮小されたり、流失後に積み直された形跡がある（高麗橋、玉江橋）。
- 高欄の修復には鉄筋コンクリートや竹筋コンクリートが使われていた（玉江橋、高麗橋）。
- 修復にはコンクリートやモルタルを使いすぎる。

3 甲突川五石橋の形態的特徴

3. 1 機能面や形態面の特徴

1) 甲突川五石橋は単一の緩曲面路面で近似できる。

諫早眼鏡橋は二弧形路面である。中国、ヨーロッパでは、多スパンの大アーチ橋に直線路面が使われていることが多い。

写真-4によると、武之橋は創建当初は中央部1スパン分だけが、両側と異なり、小さな半径の急な路面であったことがわかる。鹿児島市史¹⁰⁾によると高麗橋の縦断曲線の改造工事は工費1195円で明治42年7月17日に、西田橋の同工事は工費1995円で明治43年8月8日に完工とある。しかし武之橋の路面改造の経緯は明確になっていない。新上橋にも路面改造の痕跡はあるが、やはりまだ明らかでない。これらは交通体系の変化によるものであるから、いずれもほぼ同時期に改造されたものと推察される。

2) 甲突川五石橋は路面が低く、橋下空間は小さい。河床係数が大きく、流出土砂の大きい甲突川では、河口部以外小舟の運行にしか適さない。舟運の点からはそれほど大きな橋下空間を必要としなかった。

3) 壁石は扇形に積まれ、二重アーチに見せるよう工夫されている。玉江橋の一部に見られる布積みの壁石は、創建後の補修によるものである。

4) アーチ石と壁石は、いずれも目地に漆喰などの詰めものを使わない空積みである。

5) 耳石を路面両側に壁石面より突き出しているのは日本では珍しい。突出量はわずかであるが、その意匠上の効果は大きい。日本のあちこちにアーチ石橋は相当多数残っているが、耳石が壁石から突き出ている例はほとんどない。しかし中国には、多数のアーチ石橋の耳石が壁石面より突き出ている、しかもその端部に紋とか連続模様を彫り出している場合が多い。

6) ユニークな形の水切り石が、石橋の側面形に強い印象を与える。

3. 2 スパン構成について

甲突川は、改修によって架橋地点の川幅45~72m、河床から護岸までの高さ3mと設定された。台風常襲地で集中豪雨も多い流域を流下する暴れ川であった。甲突川五石橋のどの架橋地点にも岩盤はなく、南九州特有の沖積シラスである。甲突川に架かるアーチ石橋は他にもある。三五郎による河頭太鼓橋(1848年)は単径間であるが、その地点には岩盤が露出している。

薩摩藩城下の表玄関としての位置付けや日常の便からして、三五郎には路面曲線が出来るだけ緩やかな単曲線の橋を造ることが求められたであろう。いわゆる眼鏡橋では、各アーチに沿った二弧形の路面曲線もあれば、二つのアーチを覆う一つの路面曲線もある。どちらも橋の端部で勾配が急になるので、階段を設けることが多い。都市内物流が活発化していたであろう当時としては、こ

の様な急勾配の路面の橋を幹線道路上の橋梁として望まなかったに違いない。緩やかな単曲線の方が機能性はよいのに、なぜか武之橋だけは変則的な路面構成であった。なお、明治末になって路面を一層緩やかにしたケースが多い。

さらに産業活動の活発化のためにも壊れることのない永久橋が要請されたはずである。それまでの日本の橋は、材料調達面、技術的な面、戦略的な面から木橋が多く、洪水や火災によって流失や消失する上、腐食もあるので、修復や再建が不可欠であった。出水にも流失しない頑丈な橋、掛け換えの必要のない耐久性のある橋とすることが、近代化を目指していた当時の鹿児島には重い課題であったに違いない。

特に鹿児島では当時すでに軍制改革や大砲の研究に着手していて、それまでに重量物の移動の必要性もあったであろうし、産業活動を育成するためにも、交通の便を促進する必要が高くなっていった。これは、狭い地域内の主要街道の延長上に相次いで5つも架橋されたことから明らかである。

1) 半円の単スパンまたは2スパンにすると、アーチが高くなりすぎて、構造的にも、機能的にも問題が大きくなる。例えば、熊本の霊台橋や通潤橋は深い谷の岩盤の上に架けられているので、この点では機能的にも構造的にも無理はない。

沖積平野では一般に河川の堤防が低いので、アーチが大きいと極端な太鼓橋になるか、急勾配の路面となり、階段を併設しなければならず、機能性が悪くなる。中国の江南地方では舟運を妨げないように、大きなアーチに急勾配の直線路面を設けて、橋下空間を大きくしている。取付け道路の勾配も急で、長い階段が付いている。だから現在の自転車やリアカー等の利用者にとって、使い勝手は極めて悪い。北方では玉帯橋など庭園内の特殊な橋以外に、急勾配の路面を見ていない。橋の機能性を優先するか、犠牲にして橋下空間を優先するかは、南船北馬といわれた往時の交通体系から決定されたものである。

半円アーチが有利なのは、基礎に働く水平推力が小さく、施工が簡単なこと、河川通水断面の閉塞率が小さいことなどであるが、沖積平野の半円アーチは、基礎の鉛直支持力が不足したり、横安定性が悪く転倒し易くなるなどの欠点をもつ。通潤橋、霊台橋などは山間部の岩盤上にあるので、鉛直支持力に心配はない。横安定性を増すために、多段式の鞘石垣や城壁式の斜め石垣を設けることで転倒抵抗力を高めている。中国江南地方の半円大アーチでは、支持力不足を縦杭で補っている。

鹿児島にはどちらの意味からも本案は適さない。

機能性からは、階段のない、緩やかな単曲線が望ましい。単スパンは論外として、2スパンでも路面が急になりすぎる。図-4にスパン割りから決まる路面曲線と河川閉塞率の関係を示す。

2) 橋面を低くするためには、偏平アーチか小さなアーチによる多スパンとする必要がある。

アーチが偏平になるほど、橋脚、橋台へ作用する

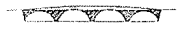
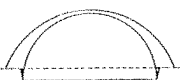
形式	矢高	傾斜	IV1.5067%	IV1.5067%
1 スパン (路面形状は平直橋と同じ)		3.4%		3%
2 スパン (路面形状は平直橋と同じ)		2.9%	(諫早眼鏡橋、拱矢比=3)	1.5%
		3.2%		

図-4 路面曲線と断面閉塞率

水平推力が大きくなって、施工も難しくなる。厚いアーチ石、強度の大きい石材、石の結合など高度な加工や技術力がなければ、偏平なアーチを採用することはできない。偏平になるほど河川の通水断面を大きく閉塞するので、洪水の影響を受け易くなる。

諸資料^{11)・12)・13)}から、日本のアーチ石橋の中の最も偏平なものを表-5に示す。

表-5 日本の偏平なアーチ石橋

スパン\時期	江戸期末	明治以降
10m以上	佐野屋橋 対馬厳原町	市万田橋 大分朝地町
スパン/ライズ	10.5m/2.1m=5	16.5m/2.4m=6.9
10m未満	東眼鏡橋 八代市	石用(イサ)橋 大分緒方町
スパン/ライズ	5.4m/0.6m=9.0	3.0m/0.3m=10

中国では隋時代にアーチスパン37.02m、ライズ7.23m (スパンライズ比=5.2、拱矢比という)の趙州橋が沖積平野に建設されている。この偏平なアーチは28本のリブ式アーチで構成されているので、アーチ石の結合に格別の配慮がある。趙州橋のある石家庄市には他にも類似のアーチ石橋が何橋もある。しかしこの種の橋には永年(1300年以上)の間に悲惨なほど障害が起こっている。

3)そこで甲突川五石橋は、多スパン化によって機能性をよくしたものと思われる。しかしそれがために、沖積地盤上に多数の基礎を建設する必要が起り、洪水安全性が低下する。洪水安全性を増すために、護床敷石、水切り石、台形断面、高水対策など、考えられるあらゆる対策を講じた。

多スパン化は基礎地盤の鉛直支持力の点からは有利になる。小さなアーチを連続させて、路面を低くした例として、中国蘇州市に宝帯橋がある。これは曳き舟橋としての特殊な目的にかなうように造

られたものである。この橋は湖水に架かるので、洪水の心配はない。

4)洪水対策

単スパンでは上に述べた問題があるので、多スパンとして低路面を実現した。これは路面曲率とアーチの偏平度について構造的なぎりぎりの妥協である。しかしその結果、次の理由で耐洪水能力が極度に低下することになった。中間基礎が増えると、橋脚の洗掘の機会が増える。アーチ石橋は高水位になるにつれて断面閉塞率が急に大きくなり、横からの大きな動圧力を受ける。流下物の捕捉率が高くなる。太い橋脚が流線を乱す。縮流のため流速を増加させる。アーチ空間を通り抜ける際下向き流を生じさせる。

a)橋によって程度は異なるが、洪水流をともに受ける大きな壁石を持つので、橋の横抵抗を増やすため断面を台形にした。大きな壁石に作用する洪水からの圧力に抵抗するためである。壁石の面積を減らすことも大きな効果があるが、中国に相当早い時期からみられる空腹式壁石のような施工例は日本にはなかった。なお、鹿児島県知覧町の矢櫃橋(1852年)は空腹式とも考えられる。空腹式壁石の本来の目的は河川の通水断面の閉塞を緩和し、地盤の鉛直支持力不足を補うものである。矢櫃橋は岩盤に基礎を持つので、単にスパン割りの都合で計画されたものであるかも知れない。しかし断定はできない。

b)軟弱な沖積地盤上に、多数の基礎を持つことになるので、洗掘を防ぐために河床に大規模な護床敷石を敷き並べた。

c)橋によって形や大きさは異なるが、水切り石を上流側だけでなく下流側にも付設した。洪水流による大きな動水圧を和らげるために用いられるようである。日本のアーチ石橋には長崎眼鏡橋や諫早眼鏡橋のように、小判型で上から下までまっすぐな筒状のものがあるが、甲突川五石橋に見るような下側の大きい三角形のものほとんど例がない。洪水が問題になる中国のアーチ石橋には、上から下までまっすぐな三角形の水切り石が付設されている。大抵の場合上流側だけでなく、下流側にも同じ大きさの水切り石がある。

d)流出抑制対策として甲突川上流に植林を勧めた。

海老原清熙手記頼木書によると「甲突川橋も架し終わり、小野村、原良、永吉村、伊敷村、犬迫村等より出る小川の水、堤防皆修繕し、(略)右の山野の川に沿たる所は開墾を禁じ、竹木を植て修繕の用に供す可しと令したるは、川の開墾は雨毎に土砂を洗い出し、川床高くなり、水害となる事なれば、後年に至り是を禁す可しと、岩永が言いし事にて、其村々々堅く禁じたるに、御維新の際より(略)」とある。

e)高水対策として石橋群の上手で右岸堤防を低くして故意に氾濫させて、水位が高くなるのを防いだ。

1頁注釈ウ)参照。また鹿児島藩小史料によると「川渡へ凡沖ノ村ヨリ武

ノ橋迄ノ間、年分、土砂ヲ揚ゲルコトニ定メ、川下サヘ渡フレバ、流水ニ連テ川上ノ土地モ日夜下リ、(略)亦川向西田ノ方ハ堤ヲ築カズ大洪水ニハ已レト吞下リ、(略)故に西田町ハ大洪水ニハ舟ヲ通シ、運用スルハ初ヨリノ考ヘナリ。」とある。ただ、上流で氾濫させたのは石橋を守るためより、当時「川は氾濫するもの」であって、市街地を守る常套手段であっただけかも知れない。

高橋脚は路面を高くするので採用できない。

日本にはリブ式アーチリングは本格的に使われていなかった。洪水流に対して一体面アーチとどちらが有利かは簡単に結論を出せない。

アーチ石の抜け出し防止対策として、通潤橋のような石垣はないし、諫早眼鏡橋のような結合もしていない。

なお、諫早眼鏡橋では地震対策があったようであるが、甲突川五石橋には、地盤の液状化対策や石の結合への配慮はなく、表立った地震対策はない。アーチ石や壁石をだばなどで結合するのは、洪水対策であり、地震対策であり、かつ基礎の移動に備えるためである。原因によって石のずれ方に種々のパターンがあるので、ある種の方向に結合があるからといって、万全と考えることは出来ない。また結合するのが最良とも言えない。柔らかい石では効果が期待できないし、堅い石でも応力集中のために、だば穴が亀裂の原因になるからである。趙州橋も修復前はだば穴から亀裂が発生して、実に悲惨な様相であった。

熊本県の西木倉橋では石製のだば、諫早眼鏡橋では鉄製のだばが使われていた。鹿児島県維新前土木史¹⁾に寛永年間(1640年頃)に架設と記載されている鹿児島市吉野の実方太鼓橋は8.6水害で流失したが、回収されたアーチ石には、だば用と思われる鋭い加工跡が確認できたが、だばは回収できなかった。

3. 3 甲突川五石橋の形態と美

甲突川五石橋は美しい。三五郎らが美観をどこまで意識したかわからないが、種々の配慮のあとがあるのは事実である。甲突川五石橋の美的要素は多い。主としてその形態が持つ美的要素を挙げる。

1) 虚と実

アーチ石橋は桁橋に比べて空間を大きく閉塞するので、うっとおしさと、暗さを連想させがちであるが、甲突川五石橋は必ずしもそのようなマイナスイメージを与えない。視線方向が低く、水面に写る虚の空間が強調されることがある。実際の虚空間と一体視されると、実空間の閉塞性を補ってあまりある開放感をもたらしてくれる。また、アーチの頭(クラウン)の上に厚い壁石がないのが、空間の阻害感を減少させている。この開放感は美的要素の一つである。中国のアーチ石橋の高欄は板(欄板)になっていることが多

い。この板に彫刻などを施して装飾性を高めているが、空間の閉塞性の点では、日本のアーチ石橋の高欄に劣るようである。

2) 陽と陰

橋は平面的であるが、アーチ石橋は高欄や大きな壁石など垂直要素も多く持つ。陽に輝く路面と高欄の影との明暗の対比が面白い。壁石の横へ突き出ている耳石は、わずかなものであるが側面形に強い印象を与えるし、大きな壁石に付設された水切り石のユニークな形も独特の立体感を与える。これらは太陽光によって陽と陰を演出する主役で、甲突川五石橋を特徴付けている。印象深い美的要素である。

3) 曲線

アーチは曲線に見えるが、小さな直線からなる台形の石を組み合わせで円弧とするものである。中国江南地方の楓橋などのアーチ石橋は、アーチに合わせて、薄くて長い石を曲面加工して組み合わせているものが多い。日本にも超小型アーチにはこの種アーチ石を用いている2~3の例がある。

機能性だけで言えば直線路面が優れている。しかし甲突川五石橋は曲面路面としている。意図的ではないかも知れないが、アーチ曲線と曲線路線の曲率が視点位置を変えることによって、微妙に異なって、直線路面橋にない躍動感を感じさせる。曲線は視点位置によって曲率が見掛け上変わるが、一本の直線はどこから見ても直線のままである。路面が単直線のアーチ石橋は、アーチの曲線と路面の直線の組み合わせになり、見た目の座りが悪く、安定感がないと感ずる。この場合単直線路面ではアーチクラウンの上が極端に薄くなって不安感を与えがちであるが、力学的な安定性がないわけではない。しかし見た目に安定感が無く、違和感さえ感じる。

曲線は斜め横からみると視線方向によって、曲率が増える面白さを持っているし、正面からみると曲線を直接的には感じさせないが、高欄の消え行く先が奥行きを実感させる。曲線路面では両側の曲線の消失点が視点位置を変えるにつれて空中高い位置から低下してくる様子が感じられる。

これは機能性からくる美である。

4) 空間のリズム

空間のリズム感は、空間を区切る曲線、直線の繰り返しからくるもので、あたかも音のリズム感と同じような安定感や心地よい感じを与えるのである。

甲突川五石橋は繰り返す橋脚や大アーチと小アーチの組み合わせが緩慢に変化するぼんやりとしたリズムを与える。一方高欄の柱や、規則的なあるいは不規則的な壁石の目地などは小気味のいいリズム感を与える。長崎眼鏡橋のように漆喰とじされた布積みの壁石は特にクリ

アーでインパクトのあるリズム感、悪くいえば強すぎるリズム感を与える。

5) 対称性

甲突川五石橋はほぼ完全な対称形である。対称性を見る者に落ち着きや安心感を与える。それだけに古典的で、正統的で、常識的な美である。力学的合理性を追求して得られる、シンプルで、しなやかな美である。非対称な造形は珍しさ、柔らかさを感じさせるが、力学性から外れ安定感がない。このため積極的にはあまり作られていない。この意味で先に紹介した鹿児島市の知覧町にある矢橋橋は貴重である。

他に、頑丈な巨大さ、ごつごつした手作り感、凝灰岩独特の柔らかな色合いと肌触りなど、甲突川五石橋の持つ美的要素は多い。

4 甲突川五石橋の構造的特徴

アーチ石橋は小さな石を組み合わせて、互いに押し付け合う力で安定するものであるから、基礎にはアーチからの水平力、鉛直力が働き、これを受け止める強固な地盤がなければ、基礎が移動して石組が安定できない。ところが甲突川五石橋の架橋地点の地盤は、沖積地盤で大きな水平推力に耐えられないし、鉛直支持力も不足するので、基礎を固定するのが難しい。その上軟弱な沖積シラスで侵食され易い不安定な河床である。しかも川幅が広く、護岸から河床までが浅い、氾濫し易い川である。鹿児島市街地はアーチ石橋の建設にとって、理想的な条件を備えていない。このような場所に大重量に耐え、利用しやすく、耐久性ある橋をいかに実現したか。

河川が堆積性であることはアーチの建設にとって致命傷ではないが、河床が上昇すると洪水の水位が高くなりがちなので、望ましいことではない。

基礎の移動はないにこしたことはない。玉江橋は10cm程の急激な沈下を経験して、石組に緩みや亀裂を発生させたが、全体の崩壊には至っていない。また個別要素による数値シミュレーションでも、基礎を数十センチ移動させても、アーチは崩壊しない結果が得られている。アーチ石橋のような集合構造物は、ある限界値を越えると突如崩壊にいたる性質を持つが、限界を越えるまでは意外な強靱さを持つことも事実である。ただその限界値を求めるのが難しい。

4. 1 基礎

アーチを支える岩盤があるときは、岩の上に直接アーチ起拱石を据えられるが、甲突川五石橋では一体化した梯子胴木の上に二重の基礎石を敷き、その上に最下段アーチ石の角度に合わせた袴石を置いて、

基礎としている。この梯子胴木は石の位置決めなど水中での施工性と、石のずれ止めのために使われたものと考えられる。基礎石に働く地盤反力を均等にする効果も期待できる。しかし胴木を受ける縦杭はなく、締め固めが不十分であったのか、胴木直上の基礎石で割裂しているものがあつた。梯子胴木を用いるのは、城壁や護岸の下部などに古くから使われていた普通の工法である。

なお、梯子胴木の下には縦杭はなかったが、護床敷石下流部末端には短い縦杭があつた。沖積層の上に架けられたアーチ石橋の中で、甲突川五石橋より古い長崎平戸幸橋¹⁴⁾は胴木の下に縦方向の木杭を使っていた。同時期に建設された諫早眼鏡橋¹⁵⁾には長くないにしても基礎の下には縦木杭が打たれていて、しかも地盤は粘性土に置換されていたと報告されている。通瀬橋は岩の上に直接アーチ石を乗せていた。中国では相当早い時期から杭が使われていた。

地盤の置き換えが確認できないことから、基礎に作用する荷重を地盤に広く分散させる意図はなかったものと思われる。

両側のアーチから中間基礎に作用する水平推力は均衡することを知っていたのか、橋脚に特別の水平推力対策を施していない。だから梯子胴木にそのための工夫はない。杭は鉛直支持力を増加させるだけでなく、水平抵抗力も増加させる効果を持っている。

鉛直支持力に対しても、多スパン化で基礎が分散したこともあって、特別の工夫はしていない。甲突川五石橋の基礎石に働く平均鉛直反力は40ton/m²程度と推定され、一方サウンディング調査から地盤の極限支持力もほぼ40ton/m²と推定できる。後述の護床敷石が支持力を増加させる効果があることに気付いていたので、この程度でも安全性に確信があつたのかも知れない。中国趙州橋の調査から、31~44ton/m²の鉛直反力に対して極限支持力は34ton/m²と推定されている¹⁶⁾。

地盤の支持力を算定することは極めて難しいことである。両者とも経験と感で対処したのであろうが、結果的に経済設計に徹したかたちになっている。

4. 2 反力石塊群

岩盤のない沖積地盤上に、やや偏平なアーチを建設するためには、橋の両側に水平推力に抵抗できる強固な地盤が必要である。三五郎は人工岩盤とでも言うべき反力石塊群を考え出した。兩岸に大きい石塊を積み重ねて、それぞれ約300tonにもなる巨大な塊として埋設した。このような例が中国にあるとは聞かないが、日本では幸橋に護岸用に造られていた旧石垣を使っていた形跡があるし、諫早眼

鏡橋では類似の構造が出土している。

甲突川五石橋では明瞭な意図の下に反力石塊が計画され、施工されている。これはアーチ構造に適さない沖積平野の河川にアーチ橋建造を可能にした、三五郎らの特筆すべき工夫であると言える。

4. 3 護床敷石

洗掘され易い不安定な河床の、橋脚の基礎の間に、橋脚の長さ分だけでなく、上流部、下流部にも長く延長して、護床敷石が付設してあった。基礎の周辺部は特に念入りで、石の形も整い、二重に敷いている。下流部の規模がやや大きく、下流部末端は横木で受け、細い縦杭もあった。基礎の周辺に比べれば、上下流部は少し雑になっている。大きいものは 500 kg にも達する石で、1500m²程度の河床を覆っている。橋に使った石の総数の半数以上に及んでいる。

新上橋には、敷石の下にも簡単な胴木を使って、敷石の沈下を防いでいた。沈下で河床に凹凸が出来ると、護床敷石が流失し易くなるからである。

玉江橋は護床敷石が撤去されて、コンクリート床版に置き換えられていたが、河床に散財していた石から、他の橋と同程度の敷石があったと推測できる。

この様に護床敷石に拘ったのは、軟らかい河床の洗掘を避けるためである。これは甲突川五石橋の洪水対策の要点である。同時にまた基礎周辺の重い敷石は、基礎の支持力を大きくするのに貢献している。

錦帯橋(1637年)の河床には、上流側、下流側各60間の石張りがあったとされている。平野部にある諫早眼鏡橋に護床敷石があったとの記録はない。これは橋脚基礎の下に縦杭を打つことで、河床の洗掘に抵抗できると考えたものであろう。中国の類似条件の石橋に護床敷石がないのも同様な理由であらう。

橋長の長いアーチ石橋の橋脚基礎の間の、しかも普段は目に出来ない川底にあって、地味であるので、この敷石の重要性に気付きにくい。

洪水流は水面で最高速度であり、浮遊流下物も水面を移動するのに、なぜ河床を保護する護床敷石が必要であるか理解しにくい。三五郎らは財政当局をどの様に納得させたのか。アーチをくぐり抜けた洪水流は加速されて激しい下向きの速度を持ち、浮遊物も高速流に巻き込まれて河床を洗うことがあることを観察から知っていて、説得したのであろう。これは三五郎らの苦心の結晶で、まさに慧眼としかいえないようがない。

流木等を巻き込んだ高速水流が護床敷石を洗い出し、これがアーチ基礎の洗掘に至ったことと、敷石の洗い出しによる支持力欠如が重なって、基礎が不

等沈下してアーチ石が緩んだ。そこに流体力や流下物が橋の高い部分に横から作用して、新上橋や武之橋を流失させることになったものと推測される。

4. 4 アーチ石、壁石

常時力の作用するアーチ石にも、凝灰岩が使われている。軟らかく加工し易い割に強度が大きいことを経験的に知っていたのであろう。

その厚みは平均するとほぼ60cm、スパンとの比は0.05程度である。アーチ石側面の寸法は縦、横ほぼ同じで、背面側の長い台形であり、その奥行き長さは1m程度である。

中国江南のアーチ石橋は特に長くて、薄いアーチ石が使われている。厚さスパン比で0.015のものがある。ただしこの様に薄いアーチ石の場合は、アーチの曲率に合わせてアーチ石そのものが曲面加工されている。

アーチ背面は野面であるが、人目にふれる面は丁寧な仕上げである。

合端には土砂が入っているが、漆喰などを使わない空積みで、だばなどによる結合もない。

またアーチ石の上の二重アーチに見える石は、外側に1列だけ並べられていて、控えが短くアーチ作用を受けない。アーチ石と同一面であることから、アーチ保護石としての機能もない。ただ側面に出るこの2つの石の間の目地は、擦り合わせたような曲面状の仕上げになっている。意匠的要素として使われているが、このような例は他にない。中国でよく見かけるアーチ保護石は、アーチ石より外側へわずかに出ている。薄い石であるが、壁石の孕みを拘束する機能もあるし、意匠効果も大きい。

甲突川五石橋の特徴は、壁石が扇積みであることと二重リング石にあるとの説がある。扇積みの例は内外にほとんど例がない。

壁石は控えの短い石が空積みのままで、孕み出し防止策はない。そのためか一部でわずかに孕み出しが見られた。諫早眼鏡橋の壁石は鈎石で互いに引き付けていたが、防止策のなかった平戸幸橋は相当大規模に孕み出していた。長崎眼鏡橋は漆喰による目地とじがある。

扇積み壁石の力学的意義は理解しにくい。壁石の孕みを防ぐ上での効果を期待したのであろうか。それとも単なる意匠的配慮であらうか。

甲突川五石橋はどれも壁石が全面的に積み上げられた充腹式である。アーチ石橋は河川の通水断面を閉塞するので、壁石に大きな力が働く。この点が水

位の高い洪水に対して、特に流下物の多い河川では、アーチ石橋の弱点となる。

ヨーロッパや中国の古いアーチ石橋では、この洪水流の影響を避けるため、壁石を大きくくり抜いていることが多い（空腹式）。日本には空腹式の例はない。鹿児島県鹿野町の矢橋橋は唯一の例外で、変則的な空腹式ともいえる。なお空腹式を使う目的は洪水の疎通を改善するだけでなく、橋の自重を小さくして支持地盤の負担を減らす目的もある。

路面を高くできる時は、大分県の耶馬溪橋（大正12年）のように高い橋脚の上にアーチを組み上げる場合もある。この形式は中国、ヨーロッパに多い。

図-5 に、充腹式壁石、空腹式壁石、高橋脚の場合の、水位の高さと断面閉塞率の関係を示す。これによると壁石に穴のない充腹式のアーチ石橋は、水位が高くなると急に閉塞率が増える。この種の壁石は水位の高い洪水流、特に流速の大きい流水を妨げるので、動水圧合力の作用点が高くなる。

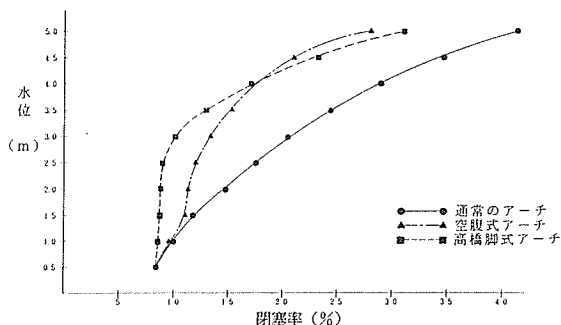


図-5 河川水位とアーチ石橋の閉塞率

4. 5 中詰め

壁石と路面とアーチ石の間に詰め込まれた土石で、アーチ石の跳ね上がりを防ぎ、路面の活荷重をアーチ石に分散して伝えるのが本来の目的である。昔は大きな活荷重がなかったので、荷重の分散の意図はなかったかも知れないが、甲突川五石橋は産業活動を活発にさせようとした頃に造られたためか、中詰め施工にも配慮の痕を見ることが出来る。

大きい凝灰岩とか、加工残材を積み上げ、間詰め土を詰め込んだようである。漆喰などは確認されない。諫早眼鏡橋では漆喰が突き固められていた。

載荷実験によると20トンの静止荷重によるアーチ石の歪みは、最大でも 100×10^{-6} に満たず、縁応力も 5 kg/cm^2 以下と推察される。中国の盧溝橋に400トン以上の重

量車両を通行させたとの記録がある¹⁷⁾。

中詰め荷重分散効果が大きいことを示している。

アーチクラウンには、直接敷石を載せている。この状況は外観からもわかるが、縦断曲線を改める際にも確認できたに違いない。しかしバスなどの重荷重をそのまま走行させていた。

アーチ石橋は理屈では説明出来ない強靱さを持つものだと感じ入る。中国の趙州橋の近くにある永濟橋では、アーチ石が完全にすれていてのに、トラックを走行させているのを目撃した。これを合理的に説明することはほとんど不可能である。

4. 6 水切り石

一般に水切り石は上流側にあるだけでなく、下流側にも付設されている。ただ下流側のものは上流側のものより小さいことが多い。水切り石は創建後何度も手が入れている。

高麗橋の大きい水切りは建造後積み増している可能性が大きい。水切り石裏の壁石の仕上げの違いからの推測である。また上流部の長い基礎石にはぞ穴があるのに、解体直前には利用されていなかった。創建時は西田橋のような低い末広りの三角形水切り石であった可能性もある。

壁石のぞ穴に水切り石を差し込んで、強度を確保している。しかし写真調査から、玉江橋の水切り石は一部流失した。その後再建されたようである。

当時流体力学を体系的に理解していたとは考えられないが、橋脚周辺の水流を乱さように、むしろ乱れを改善しようと考えて、水切り石を採用したとみるのが妥当であろう。

中国で観察したアーチ石橋の水切り石は全て上下同形の筒状の三角形であった。写真集¹⁸⁾には上部の大きい逆三角形や舟型水切り石の例が示されている。これは構造的には不安定であるが、流速の大きい表面近くにおいて、動圧力や流線の乱れを低減させようとするものである。ただこの形はアーチ石橋を浮き上がらせる方向に力が働くことに注意する必要がある。

しかしこの説は、上下流部で水切り石の大きさが異なるものがあるので、現代の流体力学からは一部は否定される。水位が高くなるときこそ、壁石が水流を妨げる割合が増えるので、上に挙げた効果が求められるのに、低くて、小さい水切り石では役に立たないからである。

中国の水切り石は、背の高い上下同形の筒状の三角形が上下流に付設されていることが多い。

また転倒防止とも考えられるが、下流側が小さくしては意味がない。

さらに、衝突防止と考えられる。盧溝橋は、上流が三角、下流が背の低い矩形の水切り石を持っていた。しかも上流側の三角水切り石の

先端を鉄で補強していた。これは明らかに氷などの衝突避けである。

これまでの水切り石の役割についての評価になかったことであるが、「水切り石は橋脚先端部の洗掘防止」をも意図して使われたと考えることが出来る。この意味では、高麗橋、諫早眼鏡橋のような上下同形より、小さくても末広りの三角型の方が効果的である。

小さくても末広りの三角型水切り石が洗掘防止に効果があるのは、近代的な橋脚の洗掘事故を防ぐための実験結果を参照すれば、容易に理解できる。図-6にそのメカニズムを示す¹⁹⁾。

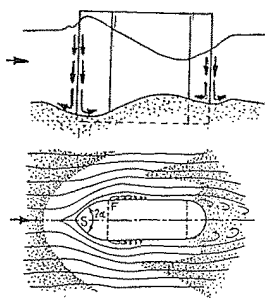


図-6 橋脚周囲の流水状況

これによると橋脚表面に沿う鉛直下向き流が洗掘の原動力である。この図から、橋脚の洗掘防止のためには、橋脚周辺特に前面部の河床の強化または橋脚の根入れ深さの増大が必要であるとわかる。小さくても末広りの水切り石が付いていると、下向き流を分散させ、その流速を小さくする。そのため基礎石の根入れがなくても洗掘の心配は少なくなる。

三五郎の永安橋の故事は有名である。福岡川の河口に3スパンアーチ橋を完成させた直後のこと、鹿児島県新土史¹⁾は「(略)本橋の成るや時人洪水に対する安泰を危ぶみしか幾何ならずして洪水に会し濁水滔々渦流を成す、有可甚しく之を憂ひ抱腕橋(史料9では抱眞橋とある)頭に到り之を監視せり、(略)水底より三五郎露れ出て有可に報して曰く橋脚の基礎を檢せしに毫も異状なきを確めたり是にて大に安堵したりと、有可も亦安心して三五郎の熱誠を賞し永久に安泰なる可しとて橋名を永安橋と改めらるるに到れり、(略)」と記している。橋脚の様子を確かめ、同時に橋脚表面の水流を観察したと捉えることが出来る。

橋脚周辺の水流に関連して起こる動圧力を巨視的現象、橋脚表面に起こる現象を微視的挙動とすれば、流体力学が微視的挙動を解明し、体系付けたのはそれほど昔のことではない。しかし三五郎が身を賭した入念な観察と深い洞察から、この点を見抜いてい

たと考えることはできる。

この意味では上下同形の筒状水切り石では、いくらサイズを大きくしても効果はない。

これが三五郎の用いた、小さくても末広りの水切り石に対する新しい評価である。しかし当時、甲突川の堤防の高さを3mに設定して、今のように高い洪水流を想定していないから、この評価は的外れの可能性もある。

4. 7 末広がり断面

水位が高くなる洪水時には、壁石が大きいのでアーチ石橋には大きな水平力が働く。その意味では橋の横断面を末広りにして横抵抗を増大する効果は大きい。特に現在のように洪水が路面を越えるほど高くなる状況下では、必要不可欠である。しかし当時の洪水位は低いので、これもまた意匠的效果を試すためだけであったかも知れない。

5 結 語

洪水の際には、橋は流失するものであると諦めざるをえなかった当時、使いやすくて、威厳があって、しかも相当程度に重たい荷物が通せて、かつ耐久性のある永代橋を、地盤や地形などの条件の悪い場所に求められた岩永三五郎らが、どの様にしてその困難を克服したのか。解体調査によってある程度まで解明できた。この過程でアーチ石橋の理屈では説明しにくい強靱さにふれることも出来た。

解体移設によって、この貴重なアーチ石橋の補修・補強の機会が得られたのは幸いなことである。なぜなら石橋といえど永久不滅でなく、緩慢な障害を永年に渡って受け続ける上、時に急激な破壊力を受けるので、適切なメンテナンスを怠れば見るも無惨な姿に朽ち果てる例が少なくないからである。

今後、三五郎らの苦心の結晶であるオリジナリティを損なわないように、安全に利用できるように、次の解体補修を可能とするように、そして確実に次世代に引き渡せるように移設、復元することに、最大限の努力を傾注しなければならない。

鹿児島市を設置主体として、西田橋を除く4橋の解体調査を任務とする石橋調査技術委員会が組織されたが、復元事業の開始に当たり石橋復元技術委員

会に改められた。鹿児島県を設置主体として、西田橋解体復元調査委員会が組織され、解体調査の開始に当たり委員会が拡充された。

以下に記す各位は両委員会委員を兼ねているが、西田橋解体復元調査委員会の方の委員は下線で示す。なお、吉原進が両委員会の責任者を努めている。

今回の報告に関連する解体、調査には、次に記す第一次委員が関与した。

彦坂熙（九州大学工学部）、山尾敏孝（熊本大学工学部）、棚橋由彦（長崎大学工学部）、横田修一郎（島根大学総合理工学部、前鹿児島大学理学部）、谷口信行（谷口工業）、福村秀徳（福村石材工業）、前迫実（前迫石材）、稲田博（鹿児島県道路公社）、奥田朗（元鹿児島県土木部長）、佐竹芳郎（元鹿児島市助役）。

改組の後、行政委員の交代の他、次の各位が新しく参画している。

木村勉（奈良国立文化財研究所）、加藤允彦（奈良国立文化財研究所）、土田充義（鹿児島大学工学部）、馬場俊介（岡山大学環境理工学部）、川村純二（元鹿児島市文化財審議会）、三木靖（鹿児島短期大学）、横田穰二（鹿児島県土木部長）、稲寺隆（鹿児島市助役）

本報告は第一次委員の了解を得て行うものである。

参考文献

1) 鹿児島県土木課：鹿児島県維新前土木史、昭和9年初版（昭和60年鹿児島県建設技術センター）

2) 鹿児島大学調査研究会：1993年鹿児島豪雨災害の総合的調査研究、平成6年

3) 疋田誠、平野宗夫：1993年鹿児島豪雨災害浸水図、鹿児島地図センター

4) 野村孝文：西田橋（鹿児島県文化財報告書第2集）、昭和28年

5) 鹿児島市橋りょう建設課：平成6年度玉江橋他2橋現況調査測量業務委託報告書

6) 鹿児島市橋りょう建設課：高麗橋解体設計業務報告書

7) 鹿児島県：石橋解体復元計画調査業務委託（西田橋）、平成7年

8) 鹿児島県土木部、土木学会：建設資材としての凝灰岩の特性についての基礎調査報告書、平成7年

9) 宮之原源之丞：御産物御仕登金銀銭御蔵納高萬控、嘉永2年間4月

10) 鹿児島市役所：鹿児島市史、大正5年3月

11) 山口祐造：石橋は生きている、葦書房、平成4年

12) 大分の石橋を研究する会：おおいたの石橋—総合資料、平成3年

13) 熊本県教育庁文化課：石橋アーチ橋資料一覧、昭和47年7月

14) (財)文化財建造物保存技術協会：重要文化財幸橋保存修理工事報告書

15) 諫早市教育委員会：重要文化財眼鏡橋移築修理工事報告書

16) 胡達和、夏樹林：安済橋橋台基礎考察報告、中国科学技術史学会、1983年

17) 羅英、唐寶澄：中国石拱橋研究、人民交通出版社、1993年6月

18) 陸徳慶：中国石橋、人民交通出版社、1992年7月

19) 石原藤次郎、本間仁編：応用水理学（中Ⅱ）、丸善

