

上路橋の橋脚部周辺の形態に関する土木史的研究*

Historical Study of Civil Engineering on Form of Elements around the Pier of Deck Bridges

木村 雄司**・窪田 陽一***

By Yuji KIMURA** and Yoichi KUBOTA***

Abstract: Form of elements around the pier of deck bridges is one of the dominant visual characteristics in bridge aesthetics. Some of historical stone arch bridges had various cut waters, balconies, holes that were made on the spandrel, orders or pilasters and so on. In this study, investigations have been conducted about the form of elements around the pier and the proportion between the pier thickness and maximum span of the bridge from Roman age to twentieth century. Some design standards in stone arch bridges were succeeded to the part of modern bridges, or some were arranged due to the difference of materials, structure and so on.

1 はじめに

近年、景観的に意味性を与えられる橋や都市内高架橋のように近景から眺められる橋脚等においては、周辺環境に与える影響や人間の心理的影響に配慮して、橋脚部周辺に対するデザインの質的向上が求められるようになってきたが、一般的には景観的配慮が十分とは言えない。上部工とそれを支える橋脚は構造的に不可分のものであるが、橋脚がややもすると補助的な印象を持たれるため、橋脚部周辺のデザイン規範は少ないように思われる。また、詳細設計における上部工と橋脚の設計の分業化等、細部まで上部工と橋脚のコーディネートを行う設計の体制が現状では十分とはいえないため、上部工と橋脚のつながりに対する配慮に欠けた橋を目にすることも少なくない。渡河橋の橋脚では、河川管理施設等構造令の影響もあり、場所性への配慮がないまま、小判形あるいは円形断面の橋脚が採用されている。

ここで、歴史的石造アーチ橋に目を転じてみると、橋脚周辺に水切りとよばれる橋脚保護工やバルコニー、支柱、橋脚上のスパンドレル部に開口部等があり、かつて橋脚部周辺の造形が景観上の大きな要素であったことに改めて驚かされる。現在では過去の橋がもっていた橋脚部周辺における形の原則・規範がほとんど忘れ去られているように思われる。使用材料あるいは設計思想の変化に応じた新しい原則・規範があることは言うまでもないが、歴史的遺産を回顧し、先人が様々な困難の末に導き出した解から学ぶという姿勢もまた必要であろう。

既往研究として、フランスの石造アーチ橋については、プラド (Marcel Prade) ¹⁾による水切り断面の分類及び非常に大まかな歴史的変遷のまとめ、馬場 ²⁾による水切り形態の分類及び開口部、橋上の家、橋脚上の見晴らし台

等の有無と時代別、地域別の頻度分布に関するまとめがある。鹿児島県の甲突川五石橋については、二宮、出水、馬場ら ³⁾、及び吉原、奥田、迹目ら ⁴⁾⁵⁾による水切りの形態的な特徴等に関するまとめがある。

橋脚に関わる寸法比に関しては、ローマ期の石造アーチ橋についてのオコーナーによる橋脚厚 W と最大径間長 S の比 W/S の写真測定 ⁶⁾、馬場、二宮らによる 30 の代表的な歴史的石造アーチ橋に関する W/S 、 S^2/W と橋の完成年 (時代) との関係を定性的に求めた研究 ⁷⁾がある。

橋脚の形態分類方法に関しては、土木学会がまとめた桁と橋脚のつながりに関する大まかな橋脚タイプ毎の分類 ⁸⁾、増田、小林らによる橋脚形態のバリエーションについての分類方法が提案されている。 ⁹⁾

しかし、土木史的観点から橋脚部周辺の構成要素の形態に関する変遷を体系的にまとめた研究はない。そこで、筆者らはこれまで土木史的観点から体系的に論じられることのなかった石造アーチ橋の橋脚部周辺の形態及び橋脚に関わる寸法比の歴史的変遷を追い、まとめた ¹⁰⁾。本稿ではこの研究をふまえ、さらにどのような規範があったかを明らかにし、近代以降の上路橋に形態の規範が継承されているかを検証するとともに、寸法比についても橋脚保護工やバルコニーの有無等との関係を探ることを目的とする。

2 上路橋の橋脚部周辺の構成要素に関する調査

(1) 調査の方法

本稿では石造アーチ橋を主としつつ、2 径間以上の、すなわち橋脚を有する上路橋を対象とした。石造アーチ橋や桁橋に代表されるように、上路橋は歴史上の長い期間に渡り橋の主流であり、橋脚部周辺の形態の変遷を議

*keywords: 橋脚、形態、石造アーチ橋

**正会員 工修 (株)ハオ技術コンサルタント事務所 (〒206-0025 東京都多摩市永山 1-5)

***正会員 工博 埼玉大学工学部 建設工学科 (〒338-0825 埼玉県浦和市下大久保 255)

論する上で時間的連続性が図れることと、下路橋や吊形式橋梁に比べ、橋脚部周辺の構成要素が橋全体に与える視覚的印象が相対的に大きいことがその理由である。

まず、フランスや英国、ドイツ、イタリア、スペイン、米国等の諸外国及び日本の文献により、石造アーチ橋を604橋、それらと比較するために産業革命以降の近・現代につくられた鋼、コンクリート等の上路橋を260橋、計864橋収集し、橋脚部周辺の形態及び橋脚に関わる寸法比について調査を行った。これらの橋の中には既に現存していない橋も多く、文献よりできるだけ写真や図面、銅版画、絵画などにより詳細に調査した。近代の上路橋については、石造アーチ橋の形態が継承されているかを判定する資料として収集を行う観点から、なるべく多くの形態バリエーションを収集することを重視した。表-1にそれらの国別の内訳を示す。

表-1 収集した橋の国別内訳

＜石造アーチ橋＞		＜近代以降の上路橋＞	
国名	橋梁数	国	橋梁数
フランス	293	フランス	69
英国	98	ドイツ	52
イタリア	47	日本	49
ドイツ	42	アメリカ	25
日本	32	イギリス	20
スペイン	23	イタリア	12
中国	11	スイス	8
米国	8	オーストリア	6
ブルガリア	6	オーストラリア	5
ポルトガル	6	スペイン	4
ベルギー	5	ベルギー	3
旧ユーゴスラビア	5	スウェーデン	2
イラン	4	デンマーク	2
スイス	4	ロシア(旧ソ連)	2
チュニジア	4	その他	9
トルコ	4		
その他	12		

石造アーチ橋において、フランスの橋が約半数を占めた理由としては、フランスが世界で最も歴史的橋梁に関する詳細なデータが体系的に整備されている国であり、何とんでも貴重なデータを図面や写真とともに豊富に掲載したプラドの著書¹¹⁾等の恩恵が大きかったことがあげられる。イギリスも同様に古い橋のデータはまとめられている^{12),13),14)}が、フランスのように数値データまで体系的にはまとめられていない。基本的に石造アーチ橋については、著名な橋を除き、文献中に形態や寸法比等が把握できる写真等の掲載が少ない傾向があるため、代表的な石造アーチ橋の多くは概ね収集していると考えられ、上路橋の橋脚部周辺の形態及び橋脚に関わる寸法比に関する大まかな傾向を調べるという目的は十分果たせると思われる。ただし、中国の石造アーチ橋は軟弱地盤対策としての薄肉橋脚とせん断壁の採用等、ヨーロッパとは異なる技術的系譜を有し¹⁵⁾、また、わが国の石造アーチ橋も古くは中国から範をとったという説があり¹⁶⁾、ヨーロッパからの影響については厳密な考証を必要とする。後述の時代区分も考慮し、石造アーチ橋については、中国およびわが国の橋を除いた“ヨーロッパとその影響下にあったほかの地域”の561橋を分析の対象とする。

本稿において橋脚部周辺形態の歴史的変遷を追うために用いた時代区分は、①ローマ期、②石造アーチ衰退

期、③中世、④ルネッサンス期、⑤17世紀、⑥18世紀、⑦19世紀、⑧20世紀の8区分である。基本的には既往文献の時代区分を参考にしたが、橋梁建設史的に重要な変化が起こった時期や調査対象の橋の架橋時代分布を勘案した。なお、ローマ期とはローマ帝国による道路と水道の建設が押し進められ、石造アーチ橋がつくられた紀元前2世紀～5世紀、石造アーチ衰退期とは西ローマ帝国の崩壊以来、道路と橋の荒廃が始まり、石造アーチ橋の建設がほとんど行われなかった6世紀～11世紀とする。ヨーロッパにおける中世の捉え方には様々な意見があり、広義では西ローマ帝国の崩壊(476年)から概ねビザンチン帝国の首都コンスタンティノープルの陥落(1453年)に至る時期を指すこともできるが、本稿では橋梁建設史的にみて、石造アーチ衰退期後にヨーロッパで再び壮大な石造アーチ橋が数多く建設されるようになった12世紀～14世紀のみを中世とし、それ以後の15世紀～16世紀をルネッサンス期とした。

寸法比をとるための数値データに関しては、基本的に文献中のデータや図面から収集した。数値データは橋のスケールやプロポーションを把握する上で重要であるにもかかわらず、文献ではこれらが明示されていないことが多い。そこで、橋脚厚や最大径間長等の実寸が記載されていない場合でも、橋の全長が記載されていれば、図面や写真から計測を行い、寸法比を算出した。したがって、図面や写真から測定した寸法比にはある程度の誤差が含まれる可能性はある。

(2) データベースの構築

本研究においては、できるだけ客観的な判断基準に基づいて、橋脚部周辺の形態を体系的に分類すること、また橋脚に関わる寸法比の変遷を探るための数値データをストックするため、石造アーチ橋及び近代以降の上路橋のそれぞれについて、橋脚部周辺の形態及び橋脚に関わる寸法比に関するデータベースを作成した。これだけの数にのぼる橋について、橋脚部周辺の形態や寸法比を調査し、それをまとめた成果は見あたらず、写真の著作権の問題等から公開には至っていないが、これらの情報をデータベース化しておくことは、今後、土木史情報の共有をめざすという観点からも重要であると思われる。

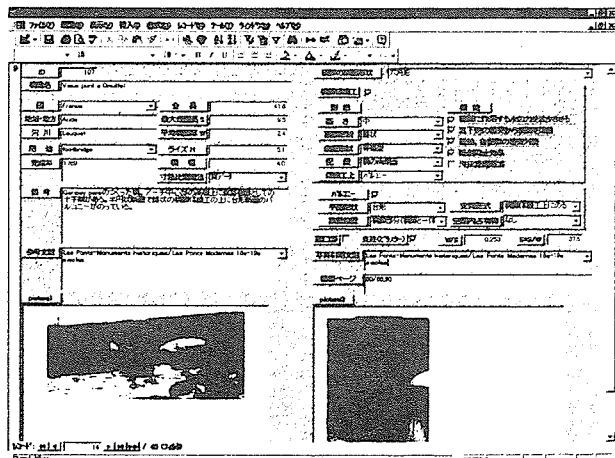


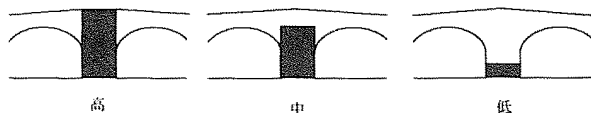
図-1 石造アーチ橋のデータベース

3 石造アーチ橋における橋脚部周辺の形態の類型化と形態規範の変遷

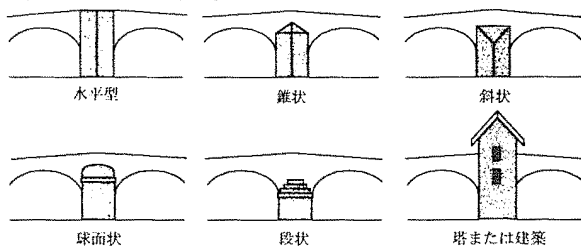
(1) 橋脚保護工（水切り）

対象となる 561 橋の石造アーチ橋のうち、87%にあたる 487 橋に橋脚保護工が見られ、橋脚保護工が石造アーチ橋の橋脚部周辺の主要な要素であることが裏づけられた。橋脚保護工の類型化の方法は、プラドや馬場らの分類方法を一部参考にし、①橋脚の水平断面形状、②橋脚保護工の高さ（橋脚保護工の高さは、洪水時の想定水位等から決められたと想定されるが、ここでは視覚的な高さに着目し、高欄あるいはアーチスプリングと水面・地面との相対的な位置関係としての高さとして定義する）、③頂部形状、④橋軸方向から見た場合の側面形状、⑤上下流の配置という 5 項目の組み合わせにより、説明できる。このうち、②、③、④の類型化の方法を図-2 に示す。

<橋脚保護工の高さ>



<橋脚保護工の頂部形状>



<橋脚保護工の側面形状>

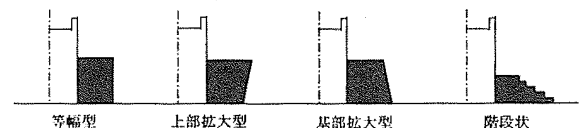


図-2 橋脚保護工の類型化の方法

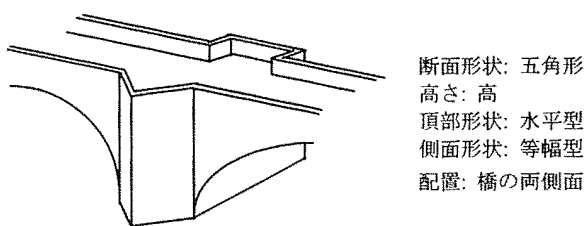


図-3 橋脚保護工形態の例

例えば、図-3 のような形態については、高さが高く、頂部が水平型のタイプで、三角形断面及び四角形断面の橋脚保護工がそれぞれ橋の上流、下流側の両側面に基部から上部に向かい等幅型に配置されているため、“五角形-高-水平型-等幅型-両側面”とよぶことにする。以後、これらの 5 項目を用いて橋脚保護工形態の類型化を行い、ローマ期から 20 世紀までの各時代において石造アーチ橋の橋脚保護工の形態にはどのようなバリエーションがあったのか、また、各時代を代表する形態の規範はどのようなものであったかを探った。なお、橋脚保護工が見られた 487 橋のうち写真等から配置等の判定ができないものがあるため、類型化の 5 項目がすべて判定で

きた 356 橋について、データ数の少ない石造アーチ衰退期及び 20 世紀を除く各時代におけるサンプル数に対する構成比の高いものから順に並べて表-2 に示した。

表-2 各時代における橋脚保護工の形態規範

時代区分	橋脚断面形状	高さ	頂部形状	配置	側面形状	構成比	橋数	サンプル数
ローマ期	五角形	中	水平型	片側側面	等幅型	15%	3	20
	五角形	中低	水平型	片側側面	等幅型	15%	3	
	五角形	低	錐状	片側側面	等幅型	10%	2	
中世	六角形	高	水平型	両側面	等幅型	15%	10	66
	五角形	高	水平型	両側面	等幅型	9%	6	
	六角形	高	錐状	両側面	等幅型	9%	6	
ルネッサンス期	六角形	高	水平型	両側面	等幅型	27%	18	66
	五角形	高	水平型	片側側面	等幅型	9%	6	
	六角形	中	斜状	両側面	等幅型	8%	5	
17世紀	六角形	中	錐状	両側面	等幅型	25%	13	52
	六角形	中	水平型	両側面	等幅型	13%	7	
	六角形	中	斜状	両側面	等幅型	6%	3	
18世紀	六角形	中	錐状	両側面	等幅型	19%	16	84
	小判形	中	錐状	両側面	等幅型	11%	9	
19世紀	小判形	中	球面状	両側面	等幅型	33%	18	54
	小判形	低	球面状	両側面	等幅型	19%	10	

側面形状が判定できた橋の 9 割以上が等幅型であり、また、表-2 の形態規範はいずれの時代においてもすべて等幅型であるため、以後、形態規範のタイプについては側面形状を省略して称することとする。

表-2 に見るようにローマ期においては、写真-1 のような、“片側側面”タイプが全体の 1/3 を占めている。また、ローマ期は橋脚保護工が片側側面に配置されている割合が他の時代に比べて相対的に高い。ローマ人はセメントの使用や河川での基礎工事に囲い堰（止水堰）を用いるなど高い基礎建設技術を有しており、洪水対策としてスパンドレルに開口部を設けていた橋も多かったため、橋脚保護工を下流側にも設ける必要性を感じていなかったのかもしれない。

中世からは、写真 2 や写真 3 のように“五角形あるいは六角形-高-水平型-両側面”タイプが規範の一つとなり、以後ルネッサンス期を経て 17 世紀までこの規範が引き継がれた。橋の両側面に突出した橋脚保護工の上部は、軍事上の防衛目的等からバルコニーが設置されており、銃眼がみられるものもあった。一方、写真 4 の“六角形-中-錐状-両側面”タイプも中世から規範形となり、ルネッサンス期に一時的に数を減じるが、17 世紀から再び規範となり、18 世紀まで規範とされた。このタイプは商業都市の財力によって貿易路の要衝に架けられたものや、教会によって建設された橋が多い。



写真 1 グロツ橋(BC27)
(文献 17)より転載)



写真 2 カリジエ橋(1358)
(文献 18)より転載)



写真 3 バグイ橋(1281)
(文献 1)より転載)



写真 4 フット橋(1208)
(文献 19)より転載)

中世につくられた橋の橋脚は非常にマッシブなものが多く、アーチ開口部が非常に狭くなっていた。橋脚保護工も側面に突出した過大なものが多いが、その理由としては以下のようなことが考えられる。石造アーチ衰退期を経て、ローマ期のセメントや杭基礎などを用いた高度な橋脚基礎建設技術が忘れ去られたため、中世の橋脚の多くは石を敷いて整地された河床の上に直接築かれており、橋脚の裏込め材もその多くが土で非常に脆弱であった。したがって、洪水や氷の衝突による橋脚の崩壊を防ぐためには、三角形断面の突出した橋脚保護工によって、なるべく上流の前方から流水を分けてアーチ開口部へ流してやり、流水によって橋の側面にかかる圧力をできるだけ減じる必要があった。また、中世になってからは橋脚断面が六角形、すなわち三角形断面の橋脚保護工を下流側にも配したものが主流となったが、ローマ期に主流であった断面が五角形の橋脚では下流側における四角形の部分で流れの急速な収束によって渦が生じ、河床の洗掘が起こりやすい。したがって、橋脚の転倒を防止するために下流側にも三角形の橋脚保護工を配置したのである。この下流側に突出した橋脚保護工は、洪水時に橋脚及びスパンデルにかかる流水の圧力によって橋脚が下流側に向かって転倒するのを防止する意図もあったと思われる。

ルネッサンス期は、中世から引き続く“六角形-高-水平型-等幅型-両側面”タイプ(写真5)が規範形であり、中世よりさらにその割合が高くなっている。イタリアのアルベルティ(Leon Battista Alberti)は1485年に出版した著書「建築論(De re aedificatoria)」の中で、望ましい橋脚基礎の断面は全体として縦に長い長方形とし、その前後にある先端部はやや尖った感じのする二等辺三角形とすべきであると述べおり、前記の規範形はアルベルティが示す形と一致していることがわかる。一方、ルネッサンス期には、新たに写真6のように“六角形-中-斜状-両側面”タイプの規範が現れた。この形態が出現した理由としては以下のようなことが考えられる。上流側が三角形断面の橋脚保護工の主な機能は、流水により橋の側面にかかる圧力を緩和するために流水を橋脚保護工で分けてアーチ開口部に導くことにあるが、アーチ開口部より上の部分に関してはその目的を果たさないため、三角形の頂部がカットされたのではないと思われる。



写真5 ボリ橋(16C)
(文献1)より転載



写真6 東フェイ橋(14-15C)
(文献13)より転載

17世紀に入ると、中世の規範でルネッサンス期にいったん減少した“六角形-中-錐状-両側面”タイプ(写真7)が再び主流となった。また、“六角形-高-水平型-両側面”タイプ(写真8)も中世の規範形を継承し、ルネッサンス期の規範である“六角形-中-斜状-両側面”タイプ(写

真9)も引き続き規範とされた。

18世紀も17世紀から引き続き、“六角形-中-錐状-両側面”タイプが規範であるが、写真10のように異なる材質の石によるパターン表現が行われるなど、前世紀からの進展もみられる。一方、この時代には写真11のような“小判形-中-錐状-両側面”タイプが新たに規範となった。保護工の断面形状は中世以来続いた三角形断面から半円断面の穏やかなものへと変質を始めた時期にあたる。なお、この他にこの時代には割合としては多くないが、写真12のように頂部形状が球面状のものが現れた。写真11のような錐状のものについては、六角形-錐状の形から小判形-球面状の形に移行する過渡期にあたるこの時期のみの規範であった。

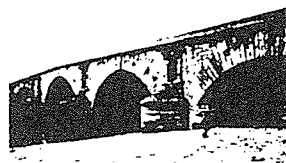


写真7 マリ橋(1635)
(文献19)より転載



写真8 71の古橋(1680)
(文献1)より転載

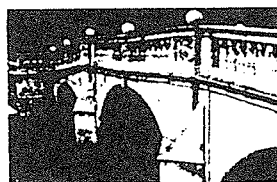


写真9 クア大学の橋(1640)
(文献19)より転載



写真10 デュルタル橋(1750)
(文献20)より転載



写真11 アンベル橋(1768)
(文献19)より転載



写真12 ベリ橋(1780)
(文献21)より転載

ここで、橋脚保護工の断面が三角形から半円状へと変化した理由については、次のようなことが考えられる。18世紀になると、内陸の運河網の発達により河川や運河を航行する船舶の数も増大したが、この時代に橋脚保護工の主な設置目的が流水を分ける(水を切る)ことに加えて、航行する船舶による橋脚への衝突対策という側面も大きくなった。橋脚間のアーチ開口部を通過する船舶にとって、三角形断面の突出した橋脚保護工は心理的圧迫感(恐怖感)になる。また、ルネッサンス期にアルベルティは前述した著書の中で、もし断面の橋脚保護工によって流速が極端に押さえられることがなければ、半円状の方がより線が美しいので好ましいと述べているように、半円状断面の橋脚保護工は橋を小さな視線入射角でみた際に柔和で美しい印象を与えることができる。このように船舶航行側からの要請と美的観点から半円状断面の橋脚保護工が採用されるようになっていったのではないと思われる。また、この当時切石の加工技術も全盛をきわめており、半円状の断面、あるいは球面状の頂部

形状に仕上げるために必要な技術的背景はあった。

19 世紀になると、18 世紀に現れた“小判形-中-球面状-両側面”タイプ（写真 13）が橋脚保護工形態の 1/3 を占める規範となった。さらに、この時代には写真 14 のように、橋脚保護工の高さが低くなったタイプも一つの規範となった。一方、17、18 世紀に最大の規範であった、橋脚断面が六角形、橋脚保護工の高さが中、頂部形状が錐状、側面形状が等幅型、橋の両側面に配置のタイプは、この時代にはほとんど姿を消した。

20 世紀に入ると限定された場所を除いて石造アーチ橋の建設はほとんど行われなくなった。前世紀の規範の 1 つであった、“小判形-低-球面状-両側面”タイプがその割合を増し、主流になった。

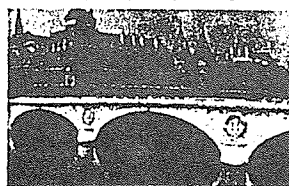


写真 13 シャンジュ橋(1860)

(文献 22)より転載)



写真 14 レーのロンドン橋(1831)

(文献 11)より転載)

以上のように、橋脚保護工の形態規範の変遷を追ってきたが、収集した橋全体の 9 割以上が等幅型であり、歴史的に橋脚保護工の側面形状の主流はほとんど等幅型であった。そこで、特殊な形態である階段状と基部拡大型の形の意味について考察する。

写真 15 の橋のような基部拡大型に関しては、18 世紀フランスのゴティ（Emiland Marie Gauthey）がデザインした橋（写真 16）で側面が下方に拡大した形状の橋脚保護工がいくつか採用されている事例が目立つ。橋梁設計に卓抜した知識を有していたゴティは、流れを最も乱さずに流水を分ける橋脚保護工の断面形状は、正三角形に外接する尖頭形であるとし、写真 16 の橋の橋脚断面には紡錘形に近い形を採用²³⁾しており、その橋脚上に基部拡大型の橋脚保護工を設け、橋の側面とすり合わせを行ったためであろう。



写真 15 デュエ橋(17C)

(文献 1)より転載)

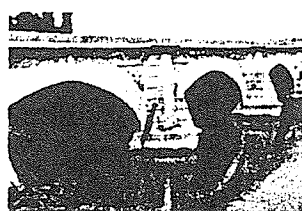


写真 16 ナヴィリ橋(1780)

(文献 23)より転載)

一方、階段状に関して、写真 17 の橋では、基礎からアーチスプリング位置まで一つの切石が一つの段を形成しながら徐々に断面を減少するという方法がとられている。アーチリブの下で橋脚が接続する位置にはこの段差を利用して支保工が設けられた形跡があり、橋脚保護工の部分もこの形状に合うように石が階段状に積まれたものと思われる。このように一段ごとに断面を減らす、即ち積む石を減らすことによって、材料の節約と地盤への負荷軽減を図るという意図もあったと思われる。

写真 18 の橋は、高水位の際にのみ必要となる高い位置の橋脚保護工については、材料節約の意図から階段状にセットバックしたものと思われる。また、この橋は建設途中に度重なる洪水により破壊され続け、完成まではほぼ 400 年を要したことからも推測できるように、長期間にわたって中断を繰り返しながら橋脚の建設が行われたため、結果的に橋脚保護工が階段状になった可能性もある。



写真 17 エリオ橋(BC12)

(文献 24)より転載)

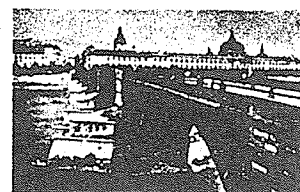


写真 18 ギロティエール橋(1570)

(文献 23)より転載)

(2)バルコニー

対象となる 561 橋のうち完成した時代が特定できた 502 橋の 24%にあたる 120 橋にバルコニーが見られ、歴史的な石造アーチ橋においてはバルコニーも橋脚部周辺の主要な要素であることがわかった。そこで、各時代におけるバルコニーのある橋の割合を表-3 に示す。

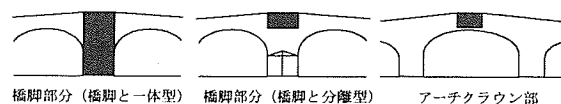
表-3 各時代におけるバルコニーのある橋の割合

時代区分	橋梁数	構成比	サンプル数
ローマ期	1	2.2%	45
石造アーチ衰退期	1	16.7%	6
中世	36	47.4%	76
ルネッサンス期	42	48.3%	87
17世紀	12	17.6%	68
18世紀	15	11.8%	127
19世紀	11	13.9%	79
20世紀	2	14.3%	14

表-3 で、17 世紀に入って急減する理由としては、橋脚保護工の高さが「中」の橋が多くなり、橋脚保護工の頂部空間をそのまま利用したタイプが減ったことや絶対主義国家による中央集権化の進展により、防衛施設としての役割が減じたこと等が考えられる。

バルコニーの形態は、①バルコニー直下の橋脚断面形状、②バルコニーの平面形状、③支持形式、④設置位置の 4 つで説明できる。このうち、③、④の類型について図-4 に示す。

<支持形式>



<設置位置>

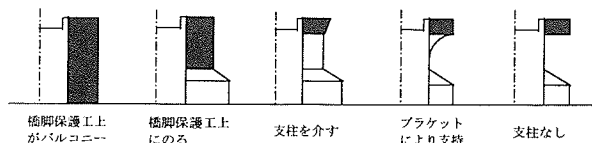


図-4 バルコニーの類型化の方法

各時代において石造アーチ橋のバルコニーの形態にはどのようなバリエーションがあり、各時代を代表するバルコニー形態の規範はどのようなものであったかを探った。バルコニーがみられた 120 橋のうち、ローマ期、

石造アーチ衰退期、20 世紀については収集できたデータがほとんどないため、中世から 19 世紀の橋の中で類型化のための 4 項目がすべて判定できた 115 橋について類型化を行い、各時代におけるサンプル数に対する構成比の高いものを順に並べて表-5 に示した。

表-5 各時代におけるバルコニーの形態規範

時代	バルコニー直下の片側橋脚断面	平面形状	支持形式	位置	構成比	サンプル数
中世	三角形	三角形	橋脚保護工上 がバルコニー	橋脚部分 (橋脚と一体)	58%	35
	三角形/四角形	三角形 /四角形	橋脚保護工上 がバルコニー	橋脚部分 (橋脚と一体)	11%	
	尖頭形/四角形	尖頭形 /四角形	橋脚保護工上 がバルコニー	橋脚部分 (橋脚と一体)	9%	
ルネッサンス期	三角形	三角形	橋脚保護工上 がバルコニー	橋脚部分 (橋脚と一体)	69%	42
	三角形	台形	橋脚保護工上に バルコニーがのる	橋脚部分 (橋脚と一体)	17%	
17世紀	三角形	三角形	橋脚保護工上 がバルコニー	橋脚部分 (橋脚と一体)	75%	12
18世紀	三角形	三角形	橋脚保護工上 がバルコニー	橋脚部分 (橋脚と一体)	47%	15
19世紀	三角形	三角形	橋脚保護工上 がバルコニー	橋脚部分 (橋脚と一体)	27%	11
	半円状	四角形	支柱を介す	橋脚部分 (橋脚と一体)	27%	

封建国家間による戦闘が頻発した中世には、橋脚保護工の上に写真 19 のようなバルコニーが多くつくられるようになり、基本的にこの形が以後 19 世紀までの規範となった。中世の橋は軍事上の理由等から概して幅が狭く、橋の両側からやってきた人馬が橋の上ですれ違う際には、どちらか一方が一時的にバルコニー内に退避した。

各時代における顕著な形態的变化を表す特殊な事例についても調査したところ、ほかの時代には見られない特徴的な形態があったことがわかった。例えば、中世には平面形状が四角形(写真 20)や尖頭形(写真 21)のバルコニーもそれぞれ 1 割あった。ルネッサンス期には三角形断面の橋脚保護工の上部がカットされたもの(写真 22)が 2 割近く存在した。17 世紀になると、少数ではあるが橋脚保護工の断面形状とバルコニーの平面形状が異なるもの(写真 23 や写真 24)が現れ、18 世紀には橋脚保護工と完全に分離されたバルコニー(写真 25)まで出現した。19 世紀には半円断面の橋脚保護工の上に支柱によって支持された四角形のバルコニー(写真 26)が 3 割を占めた。



写真 19 ラウル・ス・ロデ橋(1320)
(文献 1)より転載

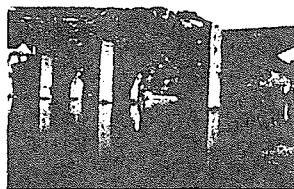


写真 20 エントレグ橋(13C)
(文献 1)より転載

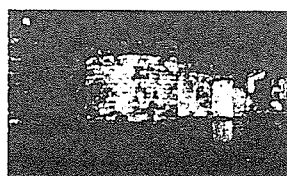


写真 21 サン・マルティアル橋(13C)
(文献 1)より転載



写真 22 エモント橋(1425)
(文献 13)より転載

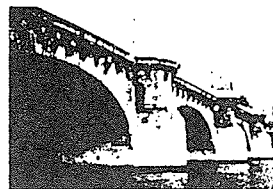


写真 23 ヌ橋(1603)
(文献 25)より転載



写真 24 オールド橋(1610)
(文献 13)より転載



写真 25 ヨノスのビエール橋(18C)
(文献 26)より転載



写真 26 ウォーター橋(1817)
(文献 23)より転載

(3)開口部

スパンドレルに開口部を設ける手法はローマ時代に確立されたが、当初は洪水対策、自重軽減による基礎への負荷軽減、材料節約等の目的で設けられた。表-6 のようにサンプル数の少ない石造アーチ衰退期を除けば、ローマ期と 20 世紀において開口部のある橋が比較的多い。

表-6 各時代における開口部のある橋の割合

時代区分	橋梁数	構成比	サンプル数
ローマ期	11	24.4%	45
石造アーチ衰退期	2	33.3%	6
中世	10	13.2%	76
ルネッサンス期	4	4.6%	87
17世紀	3	4.4%	68
18世紀	9	7.1%	127
19世紀	3	3.8%	79
20世紀	5	35.7%	14

ローマ期の開口部は基本的に写真 27 のように小アーチ形状のものが多く、写真 28 のように矩形の開口部もこの時代にはあったが、この形状では開口部の上のまぐさ石が梁として上からの荷重を支えなければならないため、開口部は横幅が狭く、かつ下方に位置することになる。したがって、その後このような矩形の開口部は姿を消す。一方、写真 27 のようにアーチ形状になっていれば、上方からの荷重をしっかりと支えることができるために開口部を大きくでき、かつ路面に近い位置に配することも可能であった。石造アーチ橋はその形状から、水位が上昇すると急激に河積閉塞率が大きくなる。洪水時に流出断面の閉塞が急激に起こるアーチ上方に近い場所に開口部があると、その分流出断面を増すことができるため、洪水を貫流させるという目的からは高い位置まで開口部があることは合理的であると思われる。このような開口部の形態は後世の規範となった。



写真 27 フィブリキア橋(BC62)
(文献 27)より転載



写真 28 フラ橋(ローマ期)
(文献 7)より転載

中世になると開口部のある橋の割合は減少するが、写

真 29 のように錐状の橋脚保護工の直上に開口部が配されていることが多い。錐状の橋脚保護工と開口部の組み合わせには、洪水時に橋脚保護工の頂部まで水が達した際に錐状の橋脚保護工によって流水を開口部へと導くという意図が見られる。この時代における橋の開口部形状の多くは、基本的にローマ期のものを継承していた。

ルネッサンス期に入ると、中世から現れた高欄部分まで達し、頂部形状が水平となった橋脚保護工が主流となったため、必然的に開口部はほとんどつくられなくなった。この時代につくられた橋においては、洪水対策がほとんど橋脚保護工によって行われていたことを示す。開口部形態も写真 30 の橋のように中世からほとんど変化が見られない。

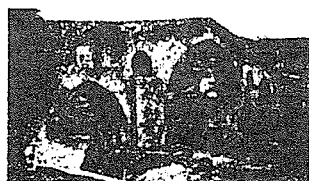


写真 29 オスのかガ橋(12C)

(文献 11)より転載)



写真 30 ゲイン橋(1470)

(文献 11)より転載)

17 世紀もルネッサンス期と同様に開口部のある橋はほとんど見られず、開口部のある橋においてもその形態はローマの規範にしたがっている。しかし、一方でこの時代には写真 31 のように装飾的な開口部をもつ橋も現れ、開口部が美的評価の対象であることが意識されてきたことがわかる。

18 世紀も開口部のある橋はほとんど見られないが、この時代に開口部が設けられた橋を概観すると、ほとんどが写真 32 のように開口部が円形や楕円形となっていた。時代が進むと写真 33 のように開口部に対して美的配慮がなされていたことがわかる。

19 世紀も開口部のある橋は少ないが、開口部のある橋をみると、前世紀同様に開口部の形状は円形である。写真 34 の橋はスパンデル中央に大きな開口部があり、その上方にも 2 つの小さな開口部がみられる。基本的に前世紀から変化はほとんどみられない。

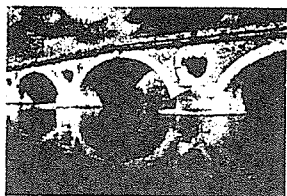


写真 31 トゥールズのヌ橋(1632)

(文献 1)より転載)

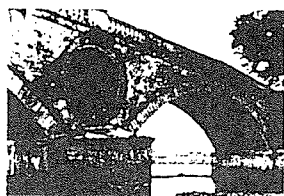


写真 32 アレイ橋(1774)

(文献 14)より転載)

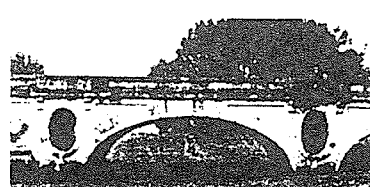


写真 33 エシャヴァンス橋(1790)

(文献 26)より転載)

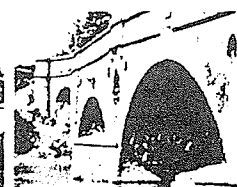


写真 34 バン・イ・ゴイル橋(1821)

(文献 14)より転載)

20 世紀になると、写真 35 や写真 36 のように、スパンデルにおいて 2 つの隣り合うアーチリブの上に小アーチがのるという形をした開口部が現れた。この開口部は橋脚よりも広い幅を有し、小アーチは上方からの荷重をアーチリブに伝達している。この時代には、それまでより橋脚がスレンダーになり、橋脚上のスパンデルに大きな開口部を設けにくくなっていたが、できるだけ多く石材を節約して建設コストを削減し、自重を減らすことによって地盤に対する負荷を軽減するために考えられた形態であろう。この形は橋脚上の小アーチと連続するアーチリブ形態の調和が図られており、水平方向のリズムと軽さが感じられる。



写真 35 アミエール橋(1911)

(文献 28)より転載)



写真 36 シャウ・イニ橋(1948)

(文献 26)より転載)

(4)支柱

ここではギリシア様式の独立円柱やピラスターなどのように、橋脚上の橋の側面に付加されて橋の剛性を増したり、橋脚保護工上のスパンデル部分で水平方向の視覚的な縁切りをしている柱などを総称して支柱と呼ぶこととする。表-7 にそれぞれの時代における支柱のある橋の割合を示す。

表-7 各時代における支柱のある橋の割合

時代区分	橋梁数	橋成比	サンプル数
ローマ期	6	13.3%	45
石造アーチ衰退期	0	0.0%	6
中世	0	0.0%	76
ルネッサンス期	11	12.6%	87
17世紀	5	7.4%	68
18世紀	23	18.1%	127
19世紀	23	29.1%	79
20世紀	3	21.4%	14

ローマ期に 1 割以上の橋に支柱が設けられていたが、中世に入って頂部がバルコニーとなった橋脚保護工が規範となったこと、橋から装飾性が排されたこともあり、姿を消す。ルネッサンス期から再び支柱が付加されるようになり、18 世紀以降再び増加した。

ローマ期は、写真 37 のように橋を補剛するために付加されるシンプルな角柱形のものほとんどである。

ルネッサンス期は、写真 38 のように斜状の橋脚保護工の上に頂部がバルコニーとなった支柱がのる形式が主流である。

17 世紀には、前記の写真 9 の橋のように装飾的な支柱が現れたが、主として美観的な意図で設置されたもので構造的な寄与はそれほどない。

18 世紀になると再び支柱をもつ橋の割合が多くなるが、ルネッサンス期や 17 世紀のものと大きな違いはない。写真 39 の橋の支柱は補剛材として機能すると同時にバルコニーを支持する柱としての機能も有している。半円

形の支柱はこの時代までほとんどなかった。

19世紀には鉄道橋も含め、1/4以上の橋に支柱が設けられていた。写真40に示すように、この時代には支柱が2本に分かれている形態が現れた。この形は20世紀の橋にも引き継がれた。

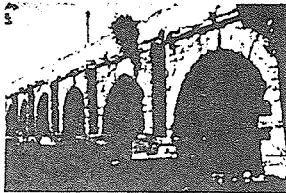


写真37 サラマンカのローマ期の橋
(文献6)より転載



写真38 ストップ・ハム橋(1423)
(文献19)より転載



写真39 リッチモンド橋(1777)
(文献29)より転載



写真40 ケルソー橋(1803)
(文献19)より転載

4 近代以降の上路橋に継承された規範

(1)石造アーチ橋の規範の継承と近代以降の変容

橋の建設材料が鋼やコンクリート等になった近代以降の橋にも石造アーチ橋の規範の一部が残っているのか、または規範のアレンジなど何らかの変容があったのかを確認するために、近代以降の上路橋に関しても橋脚部周辺の形態に関する類型化を行うこととした。

このように多様な構造形式や設計思想を有する近代以降における上路橋の橋脚部周辺の形態分類を行うことは非常に困難ではあるが、近代以降の上路橋に石造アーチ橋からの規範の継承があるのか、あるいは近代以降新たに発生した課題による規範の変容があるかを探るために、データベースをもとに石造アーチ橋の規範と客観的な比較を行った。

(2)石造アーチ橋の規範の継承と近代以降の変容

近代以降の橋において、石造アーチ橋の橋脚部周辺の形態規範が比較的忠実に継承されたと思われるものや部分的に導入されたもの、一方で近代以降に発生した新たな課題により何らかの変容を受けたものがみられた。以下にそれらを示す。

a)橋脚保護工

写真41の橋は、表面に石貼りを施した鉄筋コンクリート造であるが、三角形-低-錘状-両側面の規範を忠実に継承している。橋脚が石造アーチ橋の場合に比べて非常に薄いため、橋脚保護工は石造アーチ橋のそれよりかなり鋭利な印象を受ける。同様の規範を受け継ぐ写真43の橋は部材化されたコンクリートアーチであるが、橋脚保護工頂部の錘状の笠石は、石造アーチ橋のデザインをモチーフにしたものと思われる。

初期の桁橋の橋脚には、写真42のような表面に石貼りを施された六角形断面の橋脚がドイツ等でみられるが、

上部工と分離はしているものの、17世紀まで石造アーチ橋において橋脚保護工の主流であった三角形-水平型-両側面の形態に類似している。

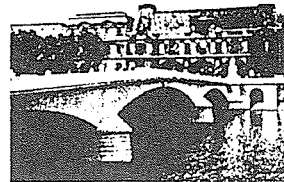


写真41 カルゼル橋(1939)
(文献28)より転載

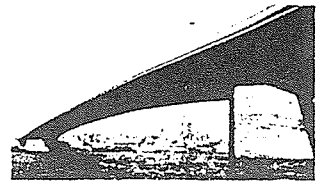


写真42 ケルンのライン川の橋(1948)
(文献18)より転載

写真44の鉄筋コンクリート橋は、石造アーチ橋において19世紀から規範となった橋脚断面が小判形で橋脚保護工の高さが中あるいは低、頂部形状が球面状の形が継承されている。橋脚保護工の頂部はコンクリートの可塑性を活かした柔らかな形態を有しており、橋脚保護工は径間長やアーチ形状が異なる中央径間と側径間が接続するのを橋脚部でうまく縁切りする役割も果たしている。

石造アーチ橋においてはそれほど多くはみられなかった階段状の橋脚保護工も、写真45のように一部の橋でこの形態を引き継いだものもある。

一方、写真46の桁橋は、上部橋脚断面が矩形であるが、橋脚下方に橋脚保護工が付加されているため、下部橋脚断面が六角形になっており、橋脚保護工が部分的に導入されていると言える。



写真43 農人橋(1926) (文献29)より転載



写真44 安綿橋(1928) (文献30)より転載



写真45 シュレスヌ橋(1951)
(文献20)より転載



写真46 タルスカヤ橋(1989)
(文献11)より転載

写真47から写真50の橋については、近代における橋脚保護工形状の変容が見られる。まず、写真47の鋳鉄橋の橋脚は刃のように鋭い紡錘形をしており、流水を切るという目的が明快な形で材料の特性を活かした橋脚保護工のアレンジが行われている。写真48や写真49の橋の橋脚保護工はモダンな橋に調和するように形の再構築がなされており、両者とも水面より下の部分まで橋脚保護工が達しておらず、航行する船舶や流下物の衝突対策に重点を置いた形態であると思われる。写真50の橋の橋脚

保護工は、変断面桁橋の支承部における沓隠しとしての機能も有しており、近代以降の橋において新たに生じた上部工と橋脚の分離という課題を解決するために橋脚保護工が利用されている例である。

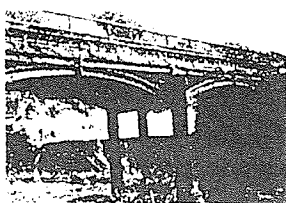


写真 47 羽洲橋(1885)
(文献 31)より転載

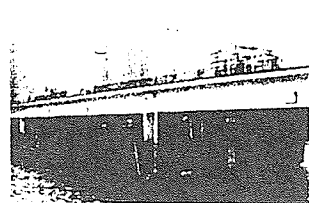


写真 48 ショリス・イル・ロイ橋 (1962)
(文献 11)より転載

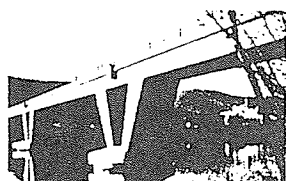


写真 49 ヴェルト高架橋(1955)
(文献 20)より転載

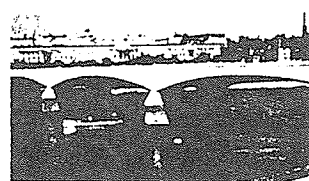


写真 50 ウォーター橋(1942)
(文献 14)より転載

b)バルコニー

初期のコンクリートアーチ橋や鋼アーチ橋は石造アーチ橋のデザインを引用していることが比較的多い。写真 51 のコンクリートブロックアーチ橋は、石が表面に貼られ石造アーチ橋のバルコニーを模している。写真 52、53 の橋のようなバルコニー形態も基本的には石造アーチ橋における平面形状や支持形式、設置位置などのデザイン思想は継承している。

一方、写真 54 の橋はバルコニーが橋脚位置にはあるが、橋脚保護工とは分離しており、石造アーチ橋ではほとんどみられないタイプである。現代においては、経済性の問題や地盤に対する負荷の増大等の問題から、橋脚基礎を過大にすることは望まれない。したがって、橋脚部にバルコニーを受けるための橋脚保護工あるいは支柱を設けることは非常に難しいため、支持するものがないまま上部工側面に突出したバルコニーをもつことが多い。



写真 51 ローフェンバーク橋(1911)
(文献 32)より転載

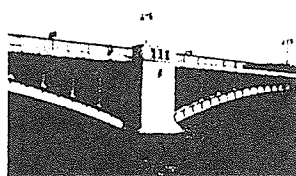


写真 52 蔵前橋(1927)
(筆者撮影)

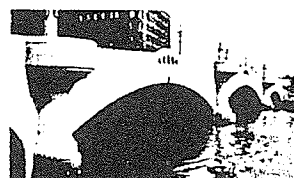


写真 53 田蓑橋(1929)
(文献 30)より転載

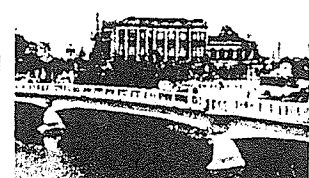


写真 54 西大橋 (1936)
(文献 33)より転載

写真 55 及び写真 56 は、いずれもバルコニーをうまく橋脚部におさめる方法が考慮された橋であるが、写真 55 の橋は鋼桁の外側にコンクリート橋脚を配することがで

きたため、橋脚とバルコニーの接続部が沓隠しも兼ねた形をとっている。写真 56 の形態的にアーチ橋のように見せた変断面桁橋は、円錐を縦に切断したような形のブラケットでバルコニーが支持されており、橋脚部の形状に合わせるように配慮されている。



写真 55 忠別橋
(文献 34)より転載



写真 56 21 世紀の森と広場の橋
(文献 35)より転載

c)開口部

近代以降の橋においては、部材化や橋脚の薄肉化など別の方法で材料節約を考えるため、開口部を設ける必然性はなくなったが、初期の充腹コンクリートアーチ橋には開口部をもつものも見られた。石造アーチ橋の開口部の規範との関連を述べれば、写真 57 の橋はローマ期から 17 世紀頃までの規範、写真 58 は 18 世紀及び 19 世紀に比較的多くなった円孔型、写真 59 は 20 世紀の橋で用いられるようになった型である。

一方、開口部を設ける意匠的な価値を意識し、それをモダンにアレンジした橋も見られる。例えば、写真 60 の橋などでは穴をあけるのではなく、橋脚上の垂直材をなくし、かつそのすぐ側の部材を R 処理することによってあたかも開口部があるように見せている。



写真 57 宮守アーチ橋 (1915)
(文献 36)より転載

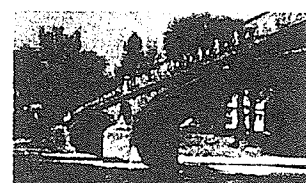


写真 58 カペル橋 (1911)
(文献 37)より転載



写真 59 ト初橋 (1922)
(文献 20)より転載

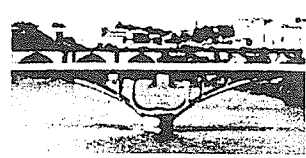


写真 60 せびア橋 (1962)
(文献 20)より転載

5 石造アーチ橋の橋脚に関わる寸法比の変遷

(1) 寸法比の変遷

ヨーロッパとその影響下にあったほかの地域におけるローマ期から 20 世紀までにつくられた石造アーチ橋のうち、最大径間長 S と橋脚厚 W の寸法データが得られた 245 橋について、これらの関係を図-5 に示す。これら間には正の相関が見られる。

ここではデータ数の少ない石造アーチ衰退期及び 20 世紀を除き、橋脚に関わる寸法比の変遷を追うこととす

る。橋脚に関わる寸法比としては、既往研究に倣い最大径間長 S と橋脚厚 W の比 W/S 、及び W/S を S で除しその逆数をとった S^2/W を採用した。

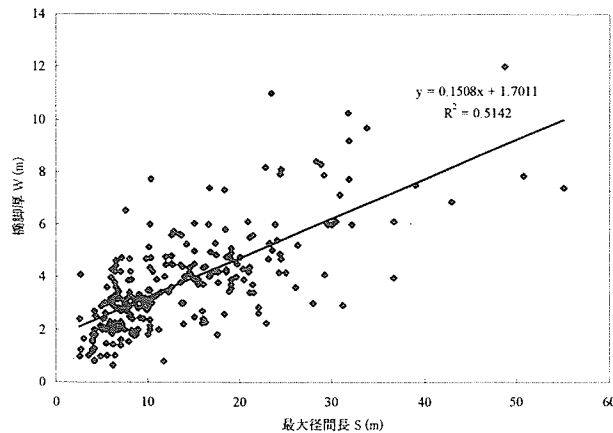


図-5 石造アーチ橋における S と W の関係

W/S は古くからライズ比とともにとり上げられていた指数であり、石造アーチ橋建設の際に橋脚によって河川の流出断面がどの程度小さくなるのかを判断するための指標であった。一方、 S^2/W は技術的困難さ（スパンの大きさ）を加味した指標であり、ライズスパン比 H/S に対するスパンゲンベルグ指数 S^2/H と同様の考えで、すでに馬場らが歴史的石造アーチ橋の構造論的分類を行うために用いている⁷⁾。

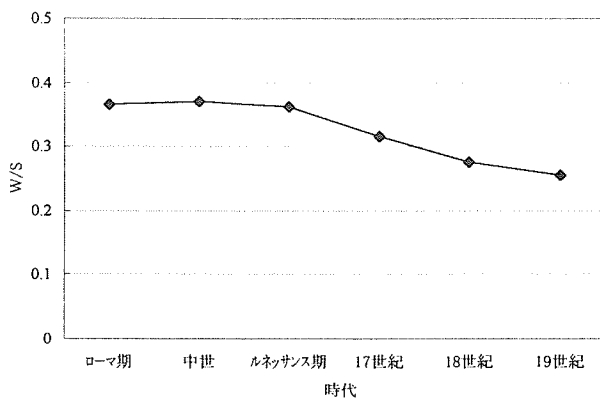


図-6 石造アーチ橋における W/S の変遷

図-6 より時代が進むにつれ W/S が小さくなっていったことがわかる。すなわち、時代とともに橋の径間長に比して橋脚厚が薄くなっていったことになる。ローマ期から中世にかけてわずかに W/S が増加するが、その理由としては以下のようなことが考えられる。前述したようにローマ帝国の崩壊以後、ローマ人が開発した橋脚基礎建設技術が完全に忘れ去られたため、中世の橋脚の多くは非常に脆弱であった。中世においては橋脚基礎を強固にすることよりもむしろいかに洪水による橋脚の倒壊を防ぐかという点に関心が持たれたため、非常にマッシブな橋脚が多く、径間長に比して過大な橋脚厚を有していたためであろう。

1832年に崩壊した Old London Bridge はその最も有名な例であり、厚い橋脚により流出断面が減少し、橋がダムのようにテムズ川の流れをせき止めていた。狭いアー

チ開口部を水が流れる際には縮流作用によって流速がより速くなり、その結果として生じる河床洗掘の危険に常にさらされ、また船が安全に橋の下を通過することすらままならない状況を招いていた。

厚い橋脚によって引き起こされる弊害を改善するために、歴史的に W/S を小さくする努力が重ねられた。ルネッサンス期にアルベルティは「建築論」の中で石造アーチ橋をつくる場合、守るべき基準として橋脚厚を径間長の $1/6 \sim 1/4$ にすべきであると提案している。18世紀にフランスのペロネ（Jean Rudolphe Perronet）は、「橋脚の厚さを減少せしめることについて」という論文の中で、橋脚厚を大きくすることは無駄であるだけでなく、橋脚厚が大きければ安全性が増すというのは誤りであり、厚い橋脚により流水断面を狭くしてしまうため橋の下で川の流れは速くなり、そのことにより多くの橋を崩壊させてきた洗掘の危険性が高まるという意見を述べている³⁹⁾。実際に彼がつくった橋の橋脚は、当時の一般的な基準からみればはるかに薄く、ヌイイ橋で $W/S=0.108$ 、コンコルド橋では $W/S=0.094$ を実現している。

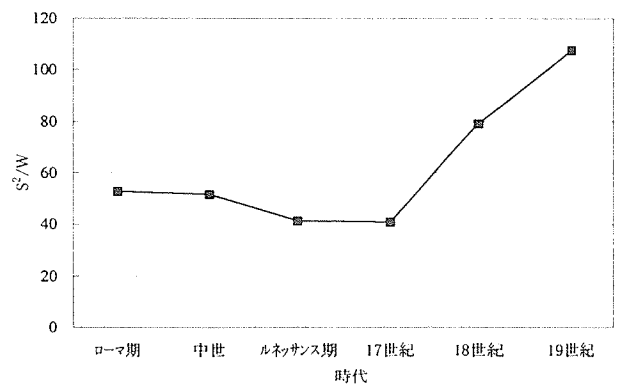


図-7 石造アーチ橋における S^2/W の変遷

一方、図-7 は図-6 とは異なった様相を呈している。ローマ期から17世紀までは S^2/W が徐々に減少しているが、18世紀から突如急激な増加傾向に転じている。このことは、ローマ期から17世紀まではアーチの連続化の進展はなく、むしろ厚い橋脚によって分節化された個別化アーチに近くなる傾向があったことが分かる。18世紀になって S^2/W が突然増加した理由としては以下のようなことがあげられる。

まず、18世紀には石橋の建設が全盛を極め、特にフランスにおいては、後述のような国家による教育環境整備がなされ、橋と道路建設に関する専門的な技術指導が行われるようになったこと、また前述したペロネという傑出した人物が現れたことにより石造アーチ橋建設は多大な発展を遂げた。

ペロネは土木学校において47年間指導を行い、優秀なエンジニアを輩出した。ペロネは橋梁建設を学問的に論拠づけるということを行っただけでなく、前述したように彼自身も卓抜した橋梁技術者であり、彼がつくったヌイイ橋及びコンコルド橋では、 S^2/W はそれぞれ337.9、332.9という当時としては驚異的な値を有していた。ペロ

ネは等スパンの橋であれば中間橋脚においては鉛直力だけをとり、水平方向の力は両端の橋台に受け持たせようということを発見し、アーチの連続化を図った。

次の理由としては、18 世紀中頃に起こった産業革命により、ワット（James Watt）が発明した蒸気機関が橋の建設に活用されたことである。蒸気機関の力は基礎掘削作業の際の排水や杭打ち機のハンマーの巻き上げ、杭打ち蒸気槌などの建設機械を駆動するために用いられ、強固な橋脚の建設に対して大きな貢献を果たした。その結果、径間長の大きな橋の建設も可能となり、 S^2/W を大幅に増加せしめることにつながったと考えられる。

(2) 橋脚部周辺の構成要素の有無と寸法比の関係

ここでは石造アーチ橋における橋脚部周辺の構成要素の有無によって、橋脚に関わる寸法比に差がみられるのかを探究した。石造アーチ橋は建設材料である石の特性が地域により異なることや橋の立地条件（河川の流速、河床材料、地質条件等）もそれぞれの橋で全く異なるため、径間長や橋脚厚の寸法値には大きなばらつきがあり、それらの合成変数である W/S や S^2/W の平均値をとった場合、それらの分散にはばらつきがあると思われる。以下の a)～c) においては、橋脚保護工やバルコニー等の形態要素の有無に対して、各時代ごとに W/S や S^2/W に関する平均値の差の検定を行った結果、いずれの形態要素においても、それらの有無による寸法比の平均値の間に有意差は見られなかった。統計的には意味のある差は認められなかったが、ここで分析に用いた橋の標本数等の影響もあると考えられ、また、橋脚保護工やバルコニー等の設置の有無によって橋のプロポーシオンが変化することはあり得ると考えるため、これらの関係を調べることは十分意義があると思われる。そこで、ここでは橋脚部周辺の構成要素の有無や構成要素の形態の違いによって各時代における寸法比の平均値に差が見られるか概略的な傾向を把握することとした。なお、形態要素の双方のサンプルが見られない時代や橋梁数がほとんどない時代のデータを考察の対象からは除いた。

a) 橋脚保護工の有無と寸法比の関係

表－8 に橋脚保護工の有無と W/S 、 S^2/W の関係を示す。橋脚保護工の有無と S^2/W の間には関係がみられ、橋脚保護工がある橋の方が無い橋に比べ S^2/W が大きいことがわかる。これは橋脚保護工を設けることにより、対洪水性能が向上し、比較的アーチの連続化を図ることができたためであると思われる。

表－8 橋脚保護工の有無と寸法比の関係

時代区分	橋脚保護工	S 平均	W/S 平均	S^2/W 平均	橋梁数
ローマ期	有	15.76	0.352	55.5	12
	無	11.52	0.395	47.5	6
17世紀	有	10.97	0.301	45.0	42
	無	9.74	0.240	41.5	4
18世紀	有	15.75	0.283	80.6	54
	無	11.20	0.222	74.2	7
19世紀	有	18.51	0.271	102.2	13
	無	20.85	0.205	62.7	4

b) バルコニーの有無と寸法比の関係

表－9 にバルコニーの有無と W/S 、 S^2/W の関係を示す。前述したようにローマ期、石造アーチ衰退期、20 世紀についてはバルコニーのある橋のデータがほとんどないため、中世から 19 世紀の橋について考察を行う。

表－9 より、バルコニーの有無と W/S 、 S^2/W の間には関係がみられ、バルコニーがある橋の方が無い橋に比べ W/S は大きく、その逆に S^2/W は小さくなる傾向にあることがわかる。バルコニーを設けるためには橋脚にバルコニーを支持するだけの橋脚厚が要求されるため、バルコニーがあることによって W が大きくなり、 W/S も大きくなるためであろう。同様にバルコニーのために W が大きくなるため S^2/W が小さくなり、バルコニーがない場合に比べて若干ではあるが構造的に個別化アーチの傾向を示すことがわかる。なお、歴史的に石造アーチ橋におけるバルコニーの形態規範の多くは、三角形断面の橋脚保護工の頂部がバルコニーになったものであったことは既に述べたが、このようなバルコニー形態により視覚的にも橋脚部で各アーチの分節化が行われていた。

表－9 バルコニーの有無と寸法比の関係

時代区分	バルコニー	S 平均	W/S 平均	S^2/W 平均	橋梁数
中世	有	13.87	0.394	50.6	29
	無	13.89	0.366	50.9	19
ルネサンス期	有	11.98	0.380	37.6	25
	無	11.26	0.352	42.2	26
17世紀	有	10.28	0.363	33.4	5
	無	10.94	0.287	46.0	41
18世紀	有	11.01	0.327	41.5	8
	無	15.87	0.269	85.7	53
19世紀	有	16.33	0.322	71.4	5
	無	20.20	0.228	116.5	12

c) 開口部の有無と寸法比の関係

表－10 に開口部のある橋と W/S 、 S^2/W の関係を示す。基本的に開口部のない橋に比して開口部のある橋の数が非常に少なく、データの偏りが大きいことは否めないが、それを踏まえた上で比較を行うこととする。開口部のある橋のデータが 1 橋しかない 19 世紀を除いて、ローマ期から 18 世紀までについては、開口部があることによって W/S が小さく、 S^2/W が大きくなる傾向がみられる。橋脚部においては水平推力が相殺するため主として橋脚には鉛直力のみがかかるが、開口部を設けることによって橋脚に作用する死荷重が減少し、地盤に対する負荷が軽減されるために、開口部がない場合に比べ径間長を大きくすることが出来たためではないかと思われる。事実、開口部がある方が最大径間長 S は大きくなる傾向にある。

表－10 開口部のある橋と寸法比の関係

時代区分	開口部	S 平均	W/S 平均	S^2/W 平均	橋梁数
ローマ期	有	18.35	0.310	60.6	4
	無	13.21	0.383	50.6	14
中世	有	23.09	0.244	99.5	4
	無	13.04	0.396	46.1	44
ルネサンス期	有	17.53	0.242	61.6	3
	無	11.03	0.378	38.2	49
17世紀	有	26.35	0.243	113.9	2
	無	10.16	0.298	41.5	44
18世紀	有	16.80	0.217	75.7	3
	無	15.15	0.279	80.1	58

6 おわりに

本研究では諸外国及び日本の文献により 864 橋の上路橋について調査を行い、橋脚部周辺の形態及び橋脚に関わる寸法比に関するデータベースを作成したが、これは橋脚部周辺の形態に関する土木史的考察を行う上で有用だと思われる。石造アーチ橋における橋脚部周辺の構成要素のうち、橋脚保護工、バルコニー等について、ヨーロッパとその影響下にあったほかの地域の橋について時代毎に形態規範の抽出を行い、ローマ期から 20 世紀に至るまでの規範の変遷を明らかにした。

また、多様な近代以降の上路橋について、石造アーチ橋の橋脚部周辺の形態規範との比較を行った結果、石造アーチ橋からの規範を継承している点が見られたが、一方で近代における新たな課題によって、形態規範のアレンジが見られることも示した。

さらに、石造アーチ橋の最大径間長と橋脚厚の関係を時代毎に探った結果、歴史的にみてこれらには相関があることがわかった。そして、橋脚に関わる寸法比として、 W/S 、 S^2/W (W :平均橋脚厚、 S :最大径間長)を採用し、これらの寸法比の変遷を探った結果、 W/S は時代とともに減少する傾向、 S^2/W は 17 世紀まで減少するが 18 世紀以降に急増する傾向がみられた。また、各々の時代において橋脚部周辺における構成要素の有無や橋脚部周辺の形態と寸法比の関係も示した。

石造アーチ橋の橋脚部周辺の形態規範を現代の橋の設計に活かすことは、使用材料や設計思想の違いなどにより限界があることはやむを得ないが、本研究の成果は、土木史的な関心に留まらず、現代の橋の設計において参考となりうる基礎的資料であると思われる。

今後の課題としては、本研究では類型化によって各時代を代表する形態の規範を探ることを主眼に置いたため、様式や装飾等との関連についても考察を拡大することができるよう、標本数としての橋の数を増やすこと、近代以降の上路橋に関しても橋脚部周辺の形態規範を明らかにし、近代の中での規範の変遷等を石造アーチ橋と同様に求めることであると思われる。

なお本稿は、筆者らの既発表論文である下記の参考文献 10 の調査データ、内容をふまえ、これを発展させた研究であることを付記する。

参考文献

- 1) Marcel Prade: Les Ponts-Monuments historiques, Errance, p.32, 1988
- 2) 馬場俊介: フランスの歴史的石造アーチ橋の形態と意匠, 土木史研究 No.11, pp.1-12, 1991.6
- 3) 二宮公紀, 出水さとみ, 馬場俊介: 甲突川の五大石橋とその構造論的評価, 土木史研究 No.11, pp.109-117, 1991.6
- 4) 吉原進, 奥田朗, 西原幸男, 鳥巢佳彦, 佐竹芳郎, 米倉敏雄, 辻目英正, 中島一誠, 阿久根芳徳: 鹿児島県甲突川五石橋の形態的、構造的特徴, 土木史研究 No.16, pp.201-214, 1996.6
- 5) 吉原進, 辻目英正, 奥田朗: 橋梁技術史上における甲突川五石橋の位置づけ, 土木史研究 No.17, pp.413-424, 1997.6
- 6) Colin O'Connor: Roman Bridges, Cambridge University Press, pp.164-166, 1993
- 7) 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 No.10, pp.41-52, 1990.6
- 8) 土木学会編: 美しい橋のデザインマニュアル [第 2 集], 1993
- 9) 増田剛士・山下真樹・小林一郎・戸塚誠司: 橋脚の形態分類について, 土木学会第 52 回年次学術講演会概要集 I (A), pp.700-701, 1997
- 10) 木村. 窪田: 石造アーチ橋の橋脚部周辺の形態に関する土木史的研究, 土木計画学研究・講演集 No.21(1), pp.109, 1998
- 11) Marcel Prade: Ponts & Viaducs Remarquables d'Europe, Errance, 1990
- 12) Geoffrey Phillips: Thames Crossings Bridges, Tunnels and Ferries, DAVID & CHARLES, 1981
- 13) J. M. Richards: The National Trust Book of Bridge, Jonathan Cape Ltd., 1984
- 14) Eric de Marc: Bridges of Britain, B.T.Batsford Ltd., 1975
- 15) 武部健一編訳: 中国名橋物語, 技報堂出版, 1987
- 16) 辻目英正, 長谷場良二, 奥田朗, 吉原進: 我が国の石造アーチ橋の発展と岩永三五郎、阿蘇鉄矢の事跡, 土木史研究 No.17, pp.425-436, 1997.6
- 17) Charlotte Jurecka: Brücken Historische Entwicklung-Faszination der Technik, Verlag Anton Schroll & Co, 1979
- 18) Fritz Leonhardt: Brücken Ästhetik und Gestaltung (Bridges Aesthetics and Design), Deutsche Verlags-Anstalt, 1982
- 19) Martin Hayden: The Book of Bridges, Marshall Cavendish Ltd., 1976
- 20) Bernard Marrey: Les Ponts Modernes 20e siècles, Picard, 1995
- 21) Geoffrey Phillips: Thames Crossings Bridges, Tunnels and Ferries, DAVID & CHARLES, 1981
- 22) 来島武・成瀬泰雄: 世界の橋, 森北出版社, 1968
- 23) Charles. S. Whitney: Bridges-their art, science & evolution, Greenwich House, 1983
- 24) Giorgio Morelli: IL TEVERE E I SUOI PONTI, Edizioni Kappa, 1980
- 25) 伊藤 學: 橋の造形, 丸善, 1995
- 26) Bernard Marrey: Les Ponts Modernes 18e-19e siècles, Picard, 1990
- 27) David J. Brown: Bridges three thousand years of defying nature, Mitchell Beazley, 1993
- 28) 来島武・成瀬泰雄: 世界の橋, 森北出版社, 1968
- 29) Graeme Outerbridge・David Outerbridge: Bridges, Harry N. Abrams, 1989
- 30) 伊東孝: 水の都、橋の都 -モダニズム東京・大阪の橋梁写真集-, 東京堂出版, 1994
- 31) (社) 日本橋梁建設協会: 日本の橋 -鉄の橋百年の歩み-, 朝倉書店, 1984
- 32) 景観デザイン研究会/橋梁部会: 橋のデザイン, 景観デザイン研究会/橋梁部会, 1995
- 33) 土木図書館編: 絵葉書に見る日本の橋, 拓殖書房, 1992
- 34) (社) セメント協会: Concrete Engineering News No.97 特集シックデザイン入門, 1993
- 35) (社) セメント協会: セメント・コンクリート No.570 特集コンクリートの美学, 1994
- 36) JR 東日本歴史的建造物調査委員会編: BRIDGES AND TUNNELS, 関東日本旅客鉄道施設電気部工事課, 1990
- 37) Christoph Hackelsberger: München und seine Isar-Brücken, Hugendubel, 1981
- 38) ヘルム・ハインリッヒ編著/宮本裕+小林英信共訳: 橋の文化史 桁からアーチへ, 鹿島出版会, 1991