

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*

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

木村 雄司**・窪田 陽一***

by Yuji KIMURA**・Yoichi KUBOTA***

1. はじめに

近年、橋梁景観に対する意識の高まりとともに、周辺環境に与える景観の影響や人間の心理的影響などを考慮して、橋脚部周辺に対する美的配慮が求められるようになってきた。しかし、現状では上部工に比して橋脚部周辺に対するデザインの適用範囲は決して広いとはいえない。ここで、歴史的な石造アーチ橋の橋脚部周辺を概観してみると、非常に重厚感のある橋脚や水切りと呼ばれる橋脚保護工、バルコニー、橋脚上のスパンドレルに設けられた開口部などが視覚的な主対象となっており、かつて橋脚部周辺の造形が橋の景観に大きなインパクトを与えていたことがわかる。また、アーチという形態上の特徴もあるが、橋脚厚とスパンの寸法の関係についても、石造アーチ橋は視覚的に美しい比率を有していると思われる。このことから、歴史的な石造アーチ橋の橋脚部周辺の形態や寸法比に着目し、技術の進歩と密接に関連したこれらの変遷を追うことは、土木史的な関心からだけでなく、今後の橋梁設計にとっても非常に重要であると考えられる。

既存研究では、馬場ら¹⁾、プラド²⁾、山下ら³⁾がフランスの石造アーチ橋に関して水切り形態の分類を行っているが、詳細にその変遷を追った研究はない。また、橋脚に関わる寸法比について、馬場らが⁴⁾ 代表的な 30 の石造アーチ橋の橋脚厚と径間長に関するデータをとっているが、時代との関係など詳しい記述はない。

そこで本研究では、橋脚部周辺の形態が歴史的

にどのような変遷を経てきたのか、また橋脚に関わる寸法比に関して、各時代の橋がどの程度の値を有し、橋脚部周辺の形態とどのような関係にあったのかを探ることとした。

2. 橋脚部周辺の構成要素の調査

前述のように、石造アーチ橋の橋脚部周辺には様々な構成要素があるが、本稿ではその中でも現代の橋にはあまり見られない橋脚保護工、バルコニーに着目して、フランス、英国、ドイツ、イタリア、スペイン、米国等の外国及び日本の文献により、604 橋を収集し調査を行った。そして、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構築した。なお、産業革命以降につくられた鋼、コンクリート上路橋も橋脚形態のバリエーションを考慮して 260 橋収集し、石造アーチ橋との比較を行い、継承されている点があるかを確認するため、同様のデータベースを作成した。過去、これだけの数にのぼる石造アーチ橋の橋脚部周辺の形態や寸法比を調査した研究成果はみられず、これらをデータベース化しておくことは、土木史情報を広く共有できるという意味からも有用であると思われる。

3. 形態の類型化と形態規範の変遷

(1) 類型化の方法

調査した石造アーチ橋の 86%に橋脚保護工がみられ、橋脚部周辺の主要な要素であることが裏付けられた。橋脚保護工の形態的特徴は、プラドや馬場らの分類方法を一部参考にすると、橋脚の水平断面形状及び橋脚保護工の高さ（高欄と水面・地面の間の相対的な位置関係としての高さ）、頂部形状、橋軸方向から見た側面形状、上下流の配置の組合せにより説明でき、これらをもとに類

*keyword:土木史、石造アーチ橋、橋脚

**正員 工修 株式会社都市設計

(〒112-0012 東京都文京区大塚 3-5-4

TEL:03-5976-0881 FAX:03-5976-0883)

***正員 工博 埼玉大学工学部建設工学科教授

(〒338-0825 埼玉県浦和市下大久保 255

TEL:048-858-3551 FAX:048-858-7374)

型化を行った。例えば、図-1 のような橋脚保護工の形態については、橋脚断面が五角形、橋脚保護工の高さが高、頂部形状が水平型、側面形状が等幅型、橋の上下流両側面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。ここでは、上下流両側の橋脚保護工の形態が識別でき、かつ橋の完成した時代が特定できた 377 橋について、類型化を行った。

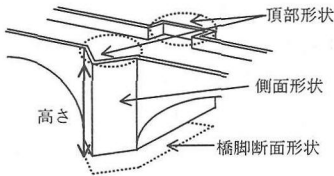


図-1：橋脚保護工形態の例

同様に、調査した石造アーチ橋の 25%にあたる橋にバルコニーがみられ、バルコニーも重要な要素であることがわかった。バルコニーの形態は、バルコニー下の橋脚保護工断面形状及びバルコニーの平面形状、支持形式、設置位置で説明でき、これらをもとに類型化できる。ここでは、橋の完成した時代が特定できた 119 橋について、類型化を行った。

(2)橋脚保護工形態の変遷

類型化された形態のうち、各時代の橋のサンプル数に対する構成比の高い形態をそれぞれの時代を代表するものとして、規範とみなした。表-1 は橋脚保護工の形態規範の変遷を示すものである。

表-1：各時代における橋脚保護工の形態規範

時代	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	低	水平型	片側側面	等幅型	15%	3	
	五角形	低	鐘状	片側側面	等幅型	10%	2	
中世	六角形	高	水平型	両側側面	等幅型	15%	10	67
	六角形	高	水平型	両側側面	等幅型	9%	6	
	六角形	中	鐘状	両側側面	等幅型	9%	6	
ルネッサンス期	六角形	高	水平型	片側側面	等幅型	27%	18	66
	六角形	高	水平型	片側側面	等幅型	9%	6	
	六角形	中	斜状	両側側面	等幅型	8%	5	
17世紀	六角形	高	鐘状	両側側面	等幅型	25%	13	53
	六角形	中	水平型	両側側面	等幅型	13%	7	
	六角形	中	斜状	両側側面	等幅型	6%	3	
18世紀	六角形	中	鐘状	両側側面	等幅型	18%	16	86
	小判形	中	鐘状	両側側面	等幅型	10%	9	
	小判形	中	球面状	両側側面	等幅型	6%	5	
19世紀	小判形	中	球面状	両側側面	等幅型	29%	18	63
	小判形	低	球面状	両側側面	等幅型	16%	10	
20世紀	小判形	低	球面状	両側側面	等幅型	33%	6	18

①ローマ期には五角形-中あるいは低-水平型-片側側面（上流側のみ）のタイプが多かった。（写真-1）②中世～ルネッサンス期～17 世紀にかけては、六角形-高-水平型-両側面のタイプが主流となる。（写真-2）③ルネッサンス期～17 世紀に

かけて六角形-中-斜状-両側面のタイプが現れた。

（写真-3）④17～18 世紀には六角形-中-鍾状-両側面のタイプが主となる。（写真-4）⑤18～19 世紀には小判形-中-鍾状-両側面（写真-5）や小判形-中-球面状-両側面のタイプが現れ（写真-6）、⑥19～20 世紀には、小判形-低-球面状-両側面のタイプが多くなった。（写真-7）

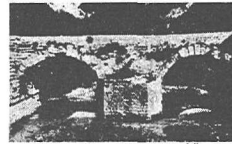


写真-1: グロツ橋 (BC27) 14

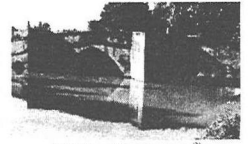


写真-2: ハヴィ橋 (1281) 21

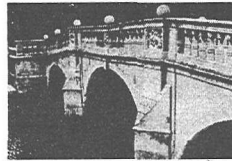


写真-3: クレア大学の橋 (1640) 9



写真-4: マリー橋 (1635) 9



写真-5: アンペル橋 (1788) 18



写真-6: ヘンリー橋 (1780) 11



写真-7: レニーのロンドン橋 (1831) 18

前述の①～④においてみられる三角形の突出した橋脚保護工形態は、上流からの流水を前頭部で分けてアーチ開口部へ流し、橋の側面にかかる流水圧を減じたり、氷の衝突による橋脚の崩壊を防ぐための形である。ローマ期には五角形の橋脚断面が主流であったが、この形では下流側の四角形の部分で流れの急速な収束によって渦が生じ、河床の洗掘が大きくなるため、その後は下流側にも三角形の橋脚保護工が配されるようになった。②は高い橋脚保護工の上部がバルコニーとなっているが、これは軍事上の理由からである。③や④のように橋脚保護工の高さが「中」となった背景としては、高水時に前頭部で分けた流水をアーチ開口部に導くという本来の目的からいえば、要石のレベルより上の部分の橋脚保護工は、不要であるため低くなったのであろう。⑤や⑥のように小判

形の橋脚断面へと変化していったのは、次の理由が考えられる。三角形の橋脚保護工の場合、流れの向きと橋脚保護工の向きが一致しないと、河床の洗掘が大きくなるが、半円形の橋脚保護工は流れ向きの変化に対応できる。また、アルベルティが「建築論」で言及しているように、美的観点から柔和な印象をもつ半円形が採用されたのではない。さらに、この時代になると、橋脚保護工には船舶の衝突対策という役割も生じ、橋脚間を通過する際に心理的恐怖感の少ない半円形が採用されるようになっていったとも考えられる。

(3) バルコニー形態の変遷

石造アーチ橋にバルコニーが設置されるようになったのは、橋の下への敵の侵入を防ぐという軍事上の理由からで、戦争が絶えなかった中世には半数以上の橋に設置されていた。石造アーチ橋のバルコニーの形態について調査したところ、以下のようなことがわかった。



写真-8: バレバストウのムーラン橋 (15C) ²³⁾



写真-9: エントレヤグ橋 (13C) ²⁴⁾



写真-10: サン・マルティアル橋 (13C) ²⁵⁾



写真-11: エアumont橋 (1425) ¹¹⁾

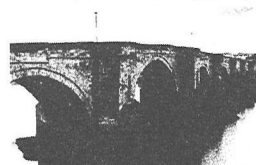


写真-12: オールド・ブリッジ (1610) ¹²⁾



写真-13: ボン・ヌフ (1603) ²¹⁾



写真-14: ヨンヌのヒュール橋 (18C) ¹⁸⁾

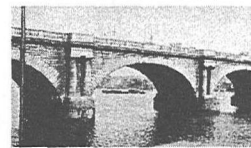


写真-15: ウォータールー橋 (1817) ¹⁵⁾

基本的には、写真-8 のように三角形の橋脚保護工の上が三角形のバルコニーとなった形が中世以後 19 世紀まで主流であった。ただ、いくつかの時代では、他の時代にみられない特徴的な形が現れたこともわかった。例えば、中世には前述の形の他に、平面形状が四角形 (写真-9) や尖頭形

のもの (写真-10) も 1 割ずつあった。ルネッサンス期には三角形の橋脚保護工の上部がカットされ、平面形状が台形のバルコニー形 (写真-11) が 2 割近くみられた。また、17 世紀には数としては少ないが、橋脚保護工の断面形状と異なる平面形状を有するバルコニーが橋脚保護工の上にある形 (写真-12,13) が、18 世紀には橋脚保護工とバルコニーが完全に分離した形 (写真-14) が現れた。19 世紀には半円状の橋脚保護工上に支柱により支持された四角形のバルコニー (写真-15) が現れ、バルコニー形態の約 3 割を占めた。

4. 石造アーチ橋の橋脚に関わる寸法比の変遷

石造アーチ橋はどのようなプロポーションを有し、時代とともにどのような変化をしてきたのかを把握するため、橋脚厚 (橋軸方向の橋脚幅) W と最大径間長 S の関係に着目し、寸法比として W/S と S^2/W の変遷を探った。 W/S は橋脚により河川の流出断面がどの程度小さくなるかを判断するために古くから用いられていた指標であり、径間長の大小に関わらず橋脚の寸法が橋全体に占める割合を議論できる。一方、 S^2/W は石造アーチ橋の連続化の技術的困難さを加味した指標であり、橋のスケールを考慮できる ⁴⁾。石造アーチ橋の場合、寸法データがわからないものが多く、データ収集が非常に難しいが、調査した橋のうち上述の寸法比が測定できた 288 橋についてこれらの関係を調べた。なお、各時代につくられた石造アーチ橋の総数を知ることにはできないが、寸法データ、平面図あるいは寸法比が測定できる写真を可能な限り収集し、寸法比の関係を議論することにした。

図-2 に W/S の変遷を、図-3 に S^2/W 及び S の変遷を示す。まず、 W/S は時代とともに減少する傾向がみられた。図-3 では 17 世紀まで S が減少する傾向を示しているため、 W がそれ以上の割合で減少していったことがわかる。厚い橋脚は河川の流出断面を減少させ、狭いアーチ開口部を水が通過する際には、縮流作用により流れが速くなり、その結果として河床洗掘によって橋脚が転倒の危険にさらされたり、船の航行に障害をもたらした。このような弊害を改善するため、歴史

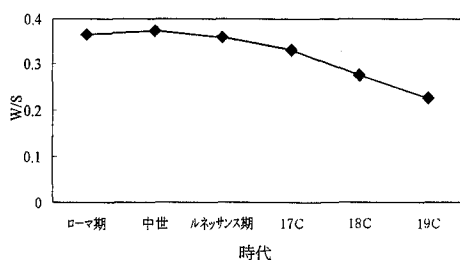


図-2: W/S の変遷

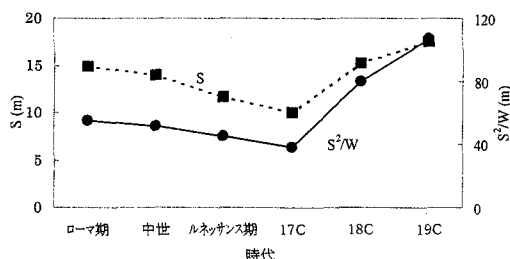


図-3: S^2/W 及び S の変遷

的に W/S を小さくする努力が重ねられた。

ローマ期から 17 世紀までは S 及び S^2/W が減少している。これはローマ帝国の滅亡以後、幹線街道に架かる橋や水道橋といった大規模な橋から、地方の村落や小都市間を結ぶ比較的小規模の小さな橋が多く建設されるようになったためと考えられる。また、ローマ期から 17 世紀まではアーチの連続化の進展はほとんどなく、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うかがえる。一方、18 世紀以降、径間長及び S^2/W は急激に増加する。ルネッサンス期に数学や物理学といった自然科学が進展した結果として、特に 18 世紀のフランスにおいて、土木技師団 (Corps des Ingénieurs des Ponts et Chaussées) や土木学校 (Ecole des Ponts et Chaussées) といった橋の建設に関する専門的な行政組織や学校が創設され、橋の建設において材料実験や理論に基づく計算が導入されるようになったためである。特に土木学校の校長であり、自身も卓抜したエンジニアであったジャン・ルドルフ・ペロネ (Jean Rudolphe Perronet) の存在が大きい。橋脚厚の減少に関する論文を出すなど薄い橋脚の橋をつくったり、等径間の橋では中間橋脚で鉛直力だけをとり、水平力は両端の橋台

に受けもたせることを発見し、アーチの連続化を図った。実際、彼がつくったコンコルド橋 (Pont de la Concorde) は $W/S=0.094$ 、 $S^2/W=332.9$ という当時では驚異的な値を有していた。また、産業革命以後、蒸気機関の活用により基礎掘削や排水能力が飛躍的に進歩し、強固な橋脚基礎の建設が可能になったことも理由の一つであろう。

さらに石造アーチ橋の橋脚保護工やバルコニーの有無、あるいはそれらの形態と寸法比の関係を時代ごとに探った結果、それらの有無や形態の違いにより寸法比に概して差がみられた。

5. おわりに

本研究では石造アーチ橋の橋脚部周辺の形態や寸法比に関する規範を時代ごとに抽出し、それらの変遷について明らかにすることができた。現代の橋では橋脚がほとんど目立たないが、石造アーチ橋のように橋脚部周辺に橋軸直角方向の動きを与えることにより、下部工形態に多様性が増すと思われる。そのためには、解決すべき問題も多いが、十分に検討の余地があると思われる。

<参考文献 (主なもの)>

- 1)馬場: 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
- 2)Marcel Prade: Les Ponts-Monuments historiques, Errance, 1968
- 3)山下、小林: フランスにおける石造アーチ橋の歴史の変遷と橋梁美, 土木史研究 No.18, pp.41-56, 1998.5
- 4)馬場、二宮、小川: 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
- 5)木村雄司: 上流橋の橋脚部周辺の形態に関する土木史的研究, 平成 9 年度埼玉大学修士論文, 1998.2
- 6)ハット・ハインリッヒ編著/宮本裕+小林英信共訳: 橋の文化史, 鹿島出版会, 1991
- 7)H・シュタプ 著/藤本一郎訳: 建設技術史, 鹿島出版会, 1976
- 8)Charles. S. Whitney: Bridges-their art, science & evolution, Greenwich House, 1983
- 9)Martin Hayden: The Book of Bridges, Marshall Cavendish Ltd., 1976
- 10)Colin O'Connor: Roman Bridges, Cambridge University Press, 1993
- 11)Geoffrey Phillips: Thames Crossings Bridges, Tunnels and Ferries, DAVID & CHARLES, 1981
- 12)J. M. Richards: The National Trust Book of Bridge, Jonathan Cape Ltd., 1984
- 13)Eric de Mare: Bridges of Britain, B.T.Batsford Ltd., 1975
- 14)Charlotte Jurecka: Brücken Historische Entwicklung-Faszination der Technik, Verlag Anton Schroll & Co, 1979
- 15)Paul Bonatz-Fritz Leonhardt: Brücken Die Blauen Bücher, 1960
- 16)Fritz Leonhardt: Brücken Ästhetik und Gestaltung (Bridges Aesthetics and Design), Deutsche Verlags-Anstalt, 1982
- 17)Marcel Prade: Ponts & Viaducs Remarquables d'Europe, Errance, 1990
- 18)Bernard Marrey: Les Ponts Modernes 18e-19e siècles, Picard, 1990
- 19)Bernard Marrey: Les Ponts Modernes 20e siècles, Picard, 1995
- 20)Giorgio Morelli: IL TEVERE E I SUOI PONTI, Edizioni Kappa, 1980
- 21)伊藤肇: 橋の造形, 森北出版社, 1991