

フランスの石造アーチ橋を対象とした 古構造デジタル標本作成方法の検討 -ガール橋を事例として-

本田 泰寛 山本蘭音

第一工科大学工学部環境エンジニアリング学科 (〒899-4332 鹿児島県霧島市国分中央1-10-2)

A Study on Digital Specimen Creation Methods for Historic Structures : A Case Study of the Pont du Gard

Yasuhiro HONDA and Ran YAMAMOTO

Department of civil engineering, Daiichi institute of Technology

(1-10-2Kokubuchuo, Kirishima City, Kagoshima, 899-4332) E-mail: y-honda@daiichi-koudai.ac.jp

Abstract : Bridges that have been superseded through technological progress are conceptualized as "historic structures," drawing an analogy from paleontology. This study examines methods for creating digital specimens — three-dimensional models — of stone arch bridges in France. A stepwise modeling approach at levels of detail (LOD) 100 to 300, referencing the LOD framework established by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, is proposed and organized. The potential for application in multi-bridge comparison and structural understanding is also demonstrated.

Key Words : France, masonry arch bridge, dormant structures, digital specimens

1. はじめに

(1) 背景と目的

筆者らはこれまでに、すでに絶滅した生物を研究対象とする古生物学に倣い、技術発展の過程で淘汰されていった橋梁構造を対象に、その独創性の由来の解明と記録・保存を目的とする古構造学の手法確立に向けた研究に取り組んできた¹⁾。古構造に関する情報を体系的に整理・記録しておくことは、時代の変化によって再び注目される可能性のある構造技術の知識を未来へ継承するうえで意義があると考ええる。こうした背景のもと、本稿では主としてフランスの石造アーチ橋であるガール橋を対象に3次元モデルによるデジタル標本の作成手法を検討した。

現在、古構造を3次元モデルによって仮想的に複製した「デジタル標本」の作製手法を検討するための事例研究に取り組んでいる。構造物の特徴を表現した3次元モデルは、図面や写真資料などから得られる情報を補完する新たな形の資料になると考える。

2. 研究の対象

本研究では、フランスに建設された石造アーチ橋を対象としている。本稿ではその中からローマ時代に建設されたガール橋を事例として取り上げ、手法の検討を行う。

フランスでは古代ローマ時代から2,000年以上の年月をかけて、地理的要因、地域特性などを要因として多様な石造アーチ橋が建設されている(次頁表-1)。これらの橋梁には、半円アーチ、尖頭アーチ、扁平アーチといった異なるアーチ形式が含まれており、各時代におけるアーチ形状の選択傾向を概観できる。さらに、塔や門といった付属施設の有無など、時代や地域によって多様である。また、資料などが豊富に残されているため、インターネット上や資料館において文献や図面、写真資料が比較的入手しやすい。これにより、3次元モデル作成に必要な情報を一定程度確保できるため、事例として適していると考えた。

表-1 フランスにおける石造アーチ橋の時代区分と特徴

年 代	時 代	アーチ縦断	アーチ構造	特 徴	事 例
前 1 世紀	ローマ	半円アーチ	リング	凱旋門	ガール橋、フラヴィアン橋
5～16 世紀	中 世	半円アーチ 尖頭アーチ	リング	塔、住居など	ヴァラントレ橋、ソミエール橋 リュール・アン・ヴァル橋、
16～17 世紀	ルネサンス	半円アーチ 欠円アーチ	リング	装飾、テラス 都市空間	ポン・ヌフ、アンリ 4 世橋、グラン・ボン
17～18 世紀	近 世	半円アーチ 扁平アーチ	リング (一部にリブ)	平野部渡河	ヴェルネイ橋
18～19 世紀	近 代	半円アーチ 扁平アーチ	リング	北部:水平な橋面 南部:大スパン、装飾	ヌイ橋、ラヴォール橋
19 世紀以降	産業革命期	半円アーチ 欠円アーチ	リング	鉄道橋、運河橋	モルレ高架橋

3. 図面及び写真資料の特徴の整理

石造アーチ橋に関する既存資料として入手可能なものとしては、平面図、立面図、断面図などの図面資料や、現地で撮影された写真資料が一般的である。これらの資料からは、橋梁全体の寸法条件や形状、スパン数、橋長、幅員といった基本的な情報を把握することができる。特に寸法情報は数値として明示されている場合が多く、橋梁の規模を定量的に理解するうえで有効である。また、立面図からはアーチの側面形状や橋全体の外観を把握することができるし、断面図があればアーチ構造や内部構成など、外観からは読み取りにくい構造的特徴を理解することが可能となる。さらに、写真資料を併用することで、図面には記載されていない細部の形状や質感、周辺環境との関係について補足的な情報を得ることができる。このように、図面および写真資料からは、石造アーチ橋の基本的な形態や構造を把握することができる。

一方、これらの資料のみでは、橋梁の全体的な構造を直感的に理解することは難しい場合もある。例えば図面は平面図、立面図、断面図といった複数の図に分かれて提示されることが多く、橋梁全体の立体構成を把握するためには、これらの情報を頭の中で統合する必要がある。また、特に複数の橋梁を比較する場合には、アーチ間隔や橋脚高さ、スパン構成などの違いを把握するために、複数の図面を行き来しながら確認する必要がある。写真資料についても、形状や質感などの把握には極めて有効であるが、代表的な視点場から撮影されたものが多く、得られる情報も限られてくる。

上記を踏まえると、石造アーチ橋の構造をより分かりやすく整理するためには、平面・立面・断面といった情報を統合的に把握できる手法が必要である

と考えられる。3次元モデルを用いることで、橋梁全体の形状や構成要素の配置関係を一目で把握することが可能となり、複数橋梁の比較や構造理解を容易にすることができる。また、3次元モデルは専門的な図面読解能力を必要とせず、教育や構造分析を目的とした資料としても有効なのではないかと考える。そのため、本研究では3次元CADを用いたモデル作成により、石造アーチ橋の構造を立体的に整理し、比較・理解を行うこととした。

4. 3次元モデル作成の考え方

(1) 詳細度概念の援用

本研究では、モデル化の考え方を整理する指標として、国土交通省が定めるLOD (Level of Detail) の考え方を参考にした²⁾。LODはモデルの利用目的に応じて表現レベルを段階的に整理する概念であり、表-2(次頁)に示すように100から500の5段階に分けられる。本研究においてモデル作成方針を検討するうえで有効な枠組みであると考えられる。

標本としては実物と同様の500とすることが理想的ではあるが、石造アーチ橋の場合すべての石材を正確に作成することは極めて困難であることから、構造形式が判別可能で、なおかつ外形形状および主構造が再現される詳細度300を基準とし、石造アーチ橋をいくつかの要素に分割してモデルを作成することとした。

(2) 石造アーチ橋の構成要素

本研究では、フランスの石造アーチ橋梁史に関する基礎資料となっている文献3)、4)にもとづいて、表-3(次頁)に示すような構成要素に分割することとした。まずは上部工、下部工、付属物の3要素に分け、上部工はさらに高欄、壁石、アーチに分けて

表-2 詳細度の定義

詳細度	共通定義	構造物(橋梁)のモデル化
100	対象を記号や線、単純な形状でその位置を示したモデル	【橋梁の配置がわかる程度】 ・矩形形状もしくは線状
200	対象の構造形式が分かる程度のモデル。	【橋梁の構造形式がわかる程度】 ・一般的なスパン比等で主桁形状を定める ・モデル化対象は主構造程度
300	附帯工等の細部構造、接続部構造を除き、対象の外形状を正確に表現したモデル。	【主構造をモデル化】 ・主構造とは、鋼橋なら床版、主桁、横桁、横構、対傾構
400	詳細度 300 に加えて、附帯工、接続構造などの細部構造および配筋も含めて、正確にモデル化する。	【接続部構造や配筋までモデル化】 ・リブや吊り金具、添接板の形状と配置
500	対象の現実の形状を正確に表現したモデル	—

表-3 分割した要素

上部工	高欄 壁石 (開口部)	アーチ	
		縦断形状	横断形状
		半円 欠円 尖頭 籠手	リング(拱環) リブ(拱肋)
下部工	橋脚 水切り		
付属物	門、塔、テラス、建物など		

いる。アーチについては、輪石によって構成されるアーチそのものを主構造としてとらえた上で、縦断方向の形状と横断方向の形状のふたつに分類した。縦断形状は、半円アーチおよび円弧の一部を用いた欠円アーチ、2つの円弧によって形成され、クラウン部が鋭角の尖頭アーチ、複数の円弧が連続することで形成される籠手アーチに分けた。横断方向は、アーチリブを有するものとそうではないものの2通りに分ける。下部工には本来基礎工も含まれるが、今回の研究では十分な情報を得ることができなかったため除外することとした。側面図等に表示された河床から上の部分を橋脚として作成した。

5. モデル作成の手順

本章では、ガール橋を例にとって、詳細度ごとのモデル作成の手順について述べる。

(1) ガール橋について

ガール橋（写真-1）はフランスが古代ローマ帝国

の支配下にあった1世紀ごろに完成したとされる石造アーチ橋で、水源となるユゼスから50kmほど離れたニームへと水を運ぶために建設された水路がガルドン川を越える地点に建設された水路橋である。

水面から最上部までの高さは約48m、橋長は275mに達する大規模な橋梁である。三層構造のうち最下層の第1層は6径間で、その直上に位置する第2層は11径間である。このうち、重複する部分のスパン割は等しく、中央の流路部のスパンは24.4m、その他は19.2mとなっている。水路部となる第3層はスパン4.8mのアーチ31径間からなっている。



写真-1 ガール橋

(2) 詳細度ごとの段階的なモデル作成

詳細度100のモデルは橋梁のおおよその大きさを反映したもので、形状は矩形のような単純なものでよいとされている。今回は、橋長と高さを反映し、かつ実物のおおよその形状を反映するように、表-4に示すような台形とした。当然ではあるが、周辺地形など比較対象がないため、モデルのみでは構造物のスケール感を把握することはできない。

詳細度200のモデルは橋梁の外形が認識できることが重要である。今回は、スパンドレル、アーチ形状、橋脚の形状までを表現した。図からは、三層構

表-4 詳細度ごとのモデル

詳細度	写真	モデル
100		
200		
300		

造であること、一層目及び二層目と異なり、三層目は小アーチが連続していることが確認できる。

主構造をモデル化する詳細度 300 では、アーチリングおよび橋脚を個別の要素として作成した。また、4章2節で述べたように、石造アーチ橋を構成する主要な要素である高欄及び水切りについてもそれぞれ別途作成した。

(3) 構成要素の視覚化

上述したように、詳細度 300 のモデル作成にあたっては、石造アーチ橋を一体の構造物として作成するのではなく、橋脚、水切り、アーチ、スパンドレル、高欄といった構成要素を個別に作成し、それらを組み合わせる手法を採用した。各構成要素はレイヤー分けを行い、色分けによって視覚的に識別できるようにした。

この方法を用いることで、アーチリングなどの部材が明確に認識できるようになり、石造アーチ橋が複数の部材によって成立している構造であることが視覚的に把握できるようになる。さらに、特定の構成要素のみを表示することで、橋脚とアーチの関係など、構造の骨格となるような部分を抽出し、それぞれの位置関係などを確認することが可能となった。

6. おわりに

本稿では、技術発展の過程で淘汰された橋梁構造を「古構造」と位置づけ、フランスの石造アーチ橋であるガール橋を事例として、3次元モデルによるデジタル標本の作成手法を検討・整理した。具体的には、国土交通省の LOD 概念を援用した詳細度 100～300 の段階的なモデル作成方針を示すとともに、石造アーチ橋の構成要素をレイヤー分けして視覚化する手法の有効性を確認した。

今後は他の石造アーチ橋への適用を通じて事例研究を蓄積し、古構造デジタル標本の作製手法の確立と活用方法についての検討を継続する予定である。

謝辞 本研究は科学研究費(課題番号25K03813)の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献 1) 本田ほか:スガントイブ吊橋の由来に関する古構造学的分析及び評価, 土木史研究論文集 vol.28, pp.1-12, 2009. 2) 社会基盤情報標準化委員会特別委員会:『土木分野におけるモデル詳細度(案)』, H29. 3) Marcel Prade: Les ponts monuments historiques, Edition Brissaud, 1988. 4) Jean Mesqui: Le pont avant le temps des ingénieurs, Grands Manuels Picard, 1986