

歴史的石造アーチ橋の安全性評価に関する考察

名古屋大学 正会員 二宮 公紀
名古屋大学 正会員 馬場 俊介
(株)リクルート 正会員 福田 光修

A Study on the Safety Assessment of Historical Stone Arch Bridges

By Kohki NINOMIYA, Shunsuke BABA and Mitsunobu FUKUTA

概 要

世界の著名な石造アーチ橋の歴史を、形状と強度という技術的な観点から概説する。1章では、石造アーチに対する土木史としての取組みの重要性について、美術的観点から触れる。2章では、アーチの平坦率を用いてアーチ形状の変遷について分類を行なう。3章では、アーチ橋の崩壊に対する安全性を有限要素法を用いて解析し、解析結果を示す。4章では、結論として、平坦率と安全率を組合せた石造アーチ橋の分類へのアプローチについて述べる。
[古代～近世・橋梁]

1. はしがき

建築構造物は、国家として都市としての権勢や富、宗教心の高さを誇るための象徴として計画されることが多く、希有な崇高さから審美的な繊細さまで多様な価値観の対象となってきた。それに対し、土木構造物は、存在そのものの持つ公共性という宿命のため機能性と経済性が優先された結果、日常的で類型化されたものであるという認識が定着している。もちろん日常的といっても無価値なわけではなく、特に、時代を経るにつれて歴史的遺構としての存在意義は大きくなる。ただし、それらが普遍的な感動を引き起こすかという、残念ながら否としか言いようがない。

本質的に重要でありながら地味な脇役にまわることの多い土木構造物であるが、美学的評価の可能な数少ない例外の一つに橋がある。石造アーチは本来、機能の美と危機の美とを内包する構造である。すなわち、安定と不安定のはざまにあって、支えるもののない石が空間に弧を描くという奇跡をぎりぎりの簡潔さで実現しているのがアーチである。石造アーチ橋は、アーチそのものの有するこの美意識を保ちつつ、谷を跨ぐという実用性を付与させたものとして認識できる。荒削りの石材をモルタルなしで積み上げたアーチが空間高くせり上がり、遙かな高みを越えて対岸に達するのを見るとき、我々は緊迫感溢れる均衡美に圧倒され、あるいは、力強い量感に言いようのない感動を覚えるのである。ゴシックの尖頭アーチが垂直で崇高な空間の創造をめざしているとすれば、古代から中世に至るアーチ橋は強引に分断された水平な空間の美を演出していると言えよう。

石造アーチ橋は芸術と技術の双方から評価されるべきであり、土木工学に携わる者がその義務と権利を有する。本稿はその一端として、筆者らの未熟さであってもっばら技術的な側面からの取組みをめざすものである。すなわち、著名な石造アーチ橋の崩壊に対する安全性を個々の例について数量的に評価し、同時に、ゴシックのアーチに求められた特性と橋としてのアーチの持つ特性の相違についても言及する。

2. アーチの形状と機能

アーチの進歩を計る尺度には大きさ（スパン）と形状がある。本稿ではアーチの機能と美とをより端的に表現する形状に焦点をあて、橋としての安全性を定量的に評価する。

(1) 平坦率の推移

アーチの形状、すなわち、半円アーチであるか直線に近い扁平アーチであるかは、平坦率（アーチ高／半スパン長）を用いて分類することができる。もちろん、半円アーチ（平坦率＝1）だからといって技術的に低位にあるとは一概に言えないが、半円から扁平へと移行してゆくのは歴史的な流れであり、平坦率の減少はアーチ建造技術の進歩を表していると考えられる。図－1は、横軸に年代を縦軸に平坦率をとったもので、ローマ期の半円アーチが時代の経過とともに扁平化してゆく状態を示す（参考文献：12）。

人類の歴史を通じて石造アーチを發展させ、あるいは利用したのはローマ人において他はない。アーチ構造はメソポタミアから小アジア、エジプトにかけての一帯で発祥したとされる技術だが、ローマには北方の先進都市国家群エトルリアを通じて伝わった。それまでは特殊な建築様式でしかなかったアーチだが、既成技術の量産化に秀でたローマ人の手を経ると構造形式の主流として開花し、国勢の拡大とともに地中海世界一円に普及した。当初アーチの半径はどれもあった迫石の大きさは、半径の1/10程度にまで縮小し（前1世紀）、それに伴いスパンも数mから25m程度にまで伸びる。「単独の石材では不可能な距離を一気に跨ぐ」というアーチ本来の特性が最大限に生かされたわけである。ローマの帝国としての基盤は道路であり、都市としての基盤は水道であったが、そのいずれにも大量の橋（高架橋を含む）が必要で、多用される橋にアーチ構造を採用することは、石材量を軽減し、障壁を造らず、市民へのアピール効果を高めるという点から最適の選択であった。今日旧ローマ支配地で多年の風雪に耐えた石造橋が散見され、それらが一般の人の橋梁構造物に対する（ひいては土木への）興味をかきたてるのも、大量普及の成果と言えよう。唯一の欠点は、半円アーチという統一型式を（ごく少数の例外を除いては）金科玉条のものとしたことくらいであろうか。

ローマ以降、アーチ橋は停滞期を迎える。ローマの地理的後継者であるヨーロッパの初期キリスト教社会では宗教的動機が優先し、精神的後継者であったイスラム専制君主社会では世俗的動機が優先し、いずれも交通体系など社会基盤の整備には手がまわらない。畢竟アーチ橋の建設技術も稚拙化し、特に橋脚基礎工事の質が低下したため安全を確保するため橋脚自体を大きくせざるを得なくなった（ローマ期は橋脚幅とスパンの比が1:4~1:5、それ以後は1:1に近い）。そのため、洪水に対して弱体化し、アヴィニョンの橋のように何度も架け替えられたものもある。この時代の唯一の成果は、両地域で同時発生的に使用が始まった尖頭アーチ構造で、教会建築では宗教的美意識と結びついてその後の建築様式に大きな影響を与えた。

アーチ橋の設計・架設技術がローマを凌駕するのは、商工業活動が活発化して都市内外の円滑な通行が日常的に必要となったルネッサンス期以降のことである。通行の便から見ればアーチ橋の高さはできる限り低いことが望ましく、洪水 平田 率

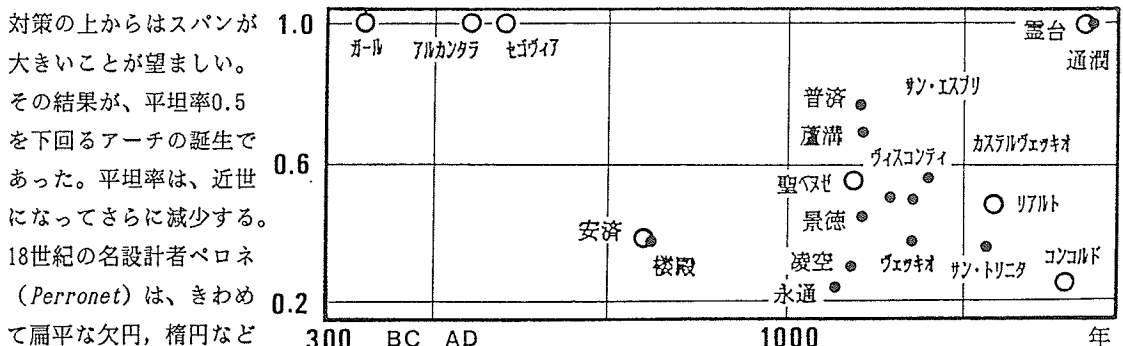


図-1 アーチ橋の偏平化（参考文献12より）

代表作コンコルド (Concorde) 橋は、アーチ迫石以外の部分に補強のため鉄筋コンクリートを使用しているとはいえ、平坦率0.26という革新的な橋であった。

ローマに端を発する西洋式アーチ橋の動向と全く異なるのが東洋の石造アーチ橋である。それは、7世紀初頭の中国で時代を遙かに先取りする扁平なアーチ橋が建造された反面、19世紀の九州では(イギリスで既に鉄製アーチ橋が誕生しているというのに)依然半円アーチ橋が架けられていたことに象徴される。まず、中国の安濟 (An-chi) 橋はヨーロッパに700年以上先行して0.38という平坦率を実現したが、それは李春という天才的設計者の存在、中国の石造技術の高さ、平坦な地形(低いアーチ高)と水運の必要性(広いスパン)という背景が揃って初めて可能となったものである。ただし、ローマのように技術的・地域的均一性がなかった中国では、せっかくの李春の技法も他の地域に伝播するところとならず、12~14世紀にかけての短い時期に平坦率0.2~0.8のさまざまなアーチ橋が造られている。一方九州では、それまで石造アーチの技術を有しなかったことから先祖返りのような半円アーチが出現するが、わが国だけの橋梁発達史の範疇で見る限り、先進的な存在として評価されるべきであろう。

(2) アーチの安全性

教会建築のように高い柱の上にアーチを架ける場合には、破壊の最大の原因はアーチ推力が柱の有効断面内に留まらないこと(力学的不安定)に由来し、柱の不等沈下、強風による局所的な引張力の発生などがそれに次ぐ。それに対して、アーチ橋はきわめてマッシュヴで、かつ水平に広がっており、架設中の一時期を除いては「力学的不安定」によって破壊することはあり得ない。アーチ橋の破壊原因は、橋脚の不等沈下、橋脚下の地盤の洗掘、洪水によるアーチ上部の流出、戦争による意図的な破壊の4つに求められる。

アーチの構造物としての破壊は、上に述べたさまざまなケースを想定できるが、破壊に至る力学的なメカニズムという点から整理すると、次の4つの崩壊機構を考えることができる。

- | | |
|------------------|------------------------|
| ① 力学的不安定 | ② 引張力の発生による石材間のかい離 |
| ③ 圧縮力の増大による石材の圧潰 | ④ せん断力の増加によるアーチ迫石相互の滑り |

アーチ橋の場合には、①や②はほとんど問題とならない。橋脚の不等沈下は④の崩壊の引き金となるかもしれないが、洗掘・洪水・戦争はアーチ本来の強度とは別次元での破壊で、①~④のいずれとも無関係である。

本稿ではアーチ橋の安全性の評価を、③と④の破壊機構に対して数量的に行う。③は、自重及び上載荷重による石材の圧潰であり、石橋では現実的ではないが、現代のコンクリート・アーチ橋の圧縮破壊に対する安全率と対比させる意味で評価の対象とした。その場合、圧縮破壊は「アーチ各部での自重による最大相当応力 $\bar{\sigma}$ が石材の圧縮破壊強度 σ_c を越える場合($\bar{\sigma} > \sigma_c$)に生ずる」とし、圧縮破壊強度と最大相当応力の比($\sigma_c / \bar{\sigma}$)を安全率としてデータ整理する。

アーチ迫石相互のせん断滑りを破壊の原因とする④の場合、「相接するアーチ迫石の接触面に発生するせん断力 $\tau_{(n)}$ が、 $\tau_f = C + \sigma_{(n)} \tan \theta$ で定義される摩擦力 τ_f を越える場合($\tau_{(n)} > \tau_f$)に滑りが生じ、最終的にはアーチが崩壊に至る」とみなす。摩擦力とせん断力の比($\tau_f / \tau_{(n)}$)を安全率としてデータを整理する。ここで、 $\sigma_{(n)}$ は接触面に働く垂直応力、 C は迫石相互の継ぎ目に充填材として使用されているモルタルのせん断強度、 θ は石材の摩擦角である。なお本稿では、 C は中世の石膏モルタルを想定して $C = 5.833 \times 10^5 (\text{kg/m}^2)$ とし、 θ は荒削りの石材を想定して $\theta = 33^\circ$ (大理石)、 34° (安山岩)、 35° (砂岩)とする。

3. 数値解析による安全性の評価

歴史的に著名な石造アーチ橋について、数値解析によりその安全性を評価する。アーチ橋の崩壊機構としては、2章(2)で規定した③と④の機構を対象とする。また、荷重・支持条件は、次のように設定する。

荷重 : 自重のみ、及び、自重＋上載荷重（スパン中央に集中鉛直荷重）

支持 : 両端固定、及び、一端固定・他端弾性支持（鉛直・水平バネ）

アーチの強度は両端がいかに強固に支持されているかによって決まり、一般に扁平なものほどその影響を受け易いと言われる。ここで、「一端固定・他端弾性支持」という支持条件を設定したのは、不等沈下などによってアーチの固定度が低下する場合の「抵抗度」を評価するためである。

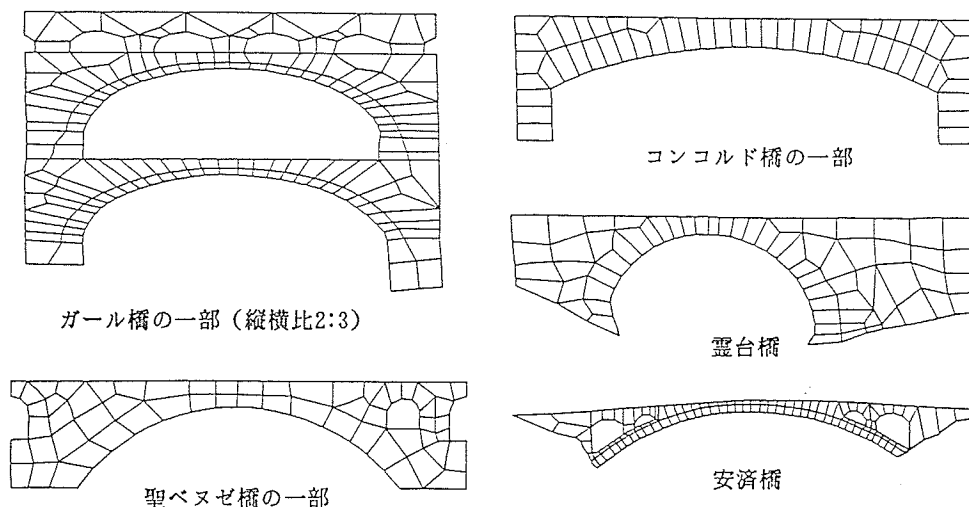
（１）解析の手法

数値解析によって石造アーチの力学的挙動をその崩壊に至るまで追跡しようとするれば、アーチ迫石相互の位置関係をも可変にするような大変形解析が必要となろう。ただし、本稿では、第一近似としてアーチ全体を連続体とみなして弾性・微小変形解析を行うに留める。その際得られるものは、アーチ全体の崩壊に対する安全性ではなく、アーチを構成する迫石の部分破壊（圧潰 or 滑り）に対する安全性となっている。

数値解析は平面応力状態を仮定し、４節点・８自由度のアイソパラメトリック平面要素を用いる。個々のアーチ橋は、予め正確な平面図がある場合には平面図に基き、それ以外の場合はできる限り正面から撮られた写真に基いて要素分割を行う。特に、せん断滑り破壊④の計算にあたっては、アーチ迫石相互の接触面方向のせん断力を正確に算出するため、実際の迫石の配置と同じように分割する。なお、解析対象となる橋が連続アーチのときは、最大スパンの部分だけを抜き出して計算の対象とする（側方水平拘束を仮定、妥当性は代表的な連続アーチ橋について検証済み）。

（２）解析の対象とするアーチ橋

圧縮破壊③の計算の対象として８橋を選ぶ。そのうちローマ期の橋としては、単層の道路アーチ橋であるアルcantアラ（Alcantara）橋、２層の水路アーチ橋であるセゴヴィア（Segovia）水道橋、３層の水路アーチ橋であるガール（Gard）橋の３橋をとり上げる。さらに中世～近世に至るアーチの進化を代表する一連の橋として、中世期のアヴィニョンの聖ベヌゼ（St-Benezet）橋、ルネッサンス期を代表するヴェネツィアのリアルト（Rialto）橋、近世扁平橋の代表作であるパリのコンコルド橋の３橋をとり上げる。残りの２橋には、西洋に対峙するものとして、中国の安済橋と九州の霊台橋とを選ぶ。一方、せん断滑り破壊④の計算の対象としては、要素分割に手間がかかるため５橋に絞ることとし、上記８橋からガール橋、聖ベヌゼ橋、コ



図－２ 解析対象アーチ橋の要素分割

表－１ 数値計算に用いた歴史的な石造アーチ橋の諸元

橋の名称	着工年 完成年	橋の所在地 建造地点	橋の型式 用途	橋の建造者 摘要	橋の全長 最大スパン L	橋の全高 7-チ高 S	材質 平坦率 α
1) ガール橋	前19年	フランス ニーム近郊 ガール渓谷	3層連続アーチ 水道橋	不明 9世紀頃まで使用 1747年に修復	全(上)275m 長(中)242m (下)142m L=20.0m	全高 48.7m うち中,下層 は各20.1m S=10.0m	砂岩 モルタルなし $\alpha=1.0$
2) セヴィリア水路橋 (悪魔の橋)	100年 頃	スペイン セヴィリア市 町入口の谷	2層連続アーチ 水道橋	不明 1072年に一部破壊 1454年に修復	全長 800m うち2層部 274m L=4.89m	全高 30.0m S=2.44m	花崗岩 モルタルなし $\alpha=1.0$
3) アルカンテラ橋	98～ 103年	スペイン アルカンテラ市 タホ川	1層連続アーチ 道路橋	カウス・リウス・ラチエル 建造 1543年に改修	全長 194m L=28.1m	全高 57.0m S=14.0m	花崗岩 モルタルなし $\alpha=1.0$
4) 聖ベヌエ橋	1345～ 1348年	フランス アヴィニオン市 ローヌ川	1層連続アーチ 道路橋	1185年初代架橋 (羊飼ベヌエ?) 流出と修復	全長 140m L=32.7m	全高 11.6m S=8.8m	花崗岩 $\alpha=0.54$
5) リアルト橋	1588～ 1591年	イタリア ヴェネチア市 大運河	1層単一アーチ 道路橋	1181年舟橋 13世紀木橋 アントニオ・ダ・ポネ設計	全長 約45m L=28.9m	全高 約8m S=6.96m	大理石 $\alpha=0.48$
6) コンコルド橋	1787年	フランス パリ市, セーヌ川	1層連続アーチ 道路橋	ジャン・ロドルフ・ペロ設計	全長 153m L=31.2m	全高 11.2m S=4.0m	大理石 $\alpha=0.256$
7) 安濟橋	610年	中国 趙県, 滌河	1層単一アーチ 道路橋	李春設計	全長 54m L=37.4m	全高 8.5m S=7.23m	砂岩 $\alpha=0.38$
8) 霊台橋	1845～ 1847年	日本 熊本県 緑川	1層単一アーチ 道路橋	篠原善兵衛 建造 大工・伴七, 万助 設計	全長 89.9m L=28.3m	全高 16.4m S=14.2m	安山岩 $\alpha=1.0$

表－２ 荷重と支持条件の設定

計算の対象	崩壊機構	事例数	荷重	支持
歴史的な石造アーチ橋	圧潰	8	自重	両端固定
	せん断滑り	5	自重	両端固定, 一端固定・他端弾性支持
シミュレート・アーチ	圧潰	5	自重＋上載荷重	両端固定, 一端固定・他端弾性支持
	せん断滑り	5	自重＋上載荷重	両端固定, 一端固定・他端弾性支持

表－３ アーチ石材の力学的性質

岩質	比重	圧縮強度 (kg/m^2)	弾性係数 (kg/m^2)	ポソン比	岩質	比重	圧縮強度 (kg/m^2)	弾性係数 (kg/m^2)	ポソン比
砂 岩	2.36	1.323×10^7	1.905×10^9	0.212	大理石	2.66	1.628×10^7	5.625×10^9	0.284
安山岩	2.67	1.452×10^7	3.210×10^9	0.145	花崗岩	2.75	1.836×10^7	9.690×10^9	0.210

ンコルド橋、安濟橋、霊台橋を選択した。

これら8橋についての簡単な歴史的事項および代表的な諸元を、表-1にまとめて示す。要素分割図は、せん断滑り破壊を対象とする5橋について、図-2に示す。また、荷重と支持条件の選び方を表-2に、アーチ石材の力学的性質を表-3に示す。また、弾性支持の場合のバネ係数は、 $5 \times 10^4 \text{ kg/m}$ （砂岩層に相当）とする。計算結果を図-3に示す。横軸には図-1と同じく年代をとり、縦軸には圧潰あるいはせん断滑りに対する安全率をとる（▲は安全率1以下であることを示す）。

（3）個別の評価

図-3から見る限り、平坦率の低下と安全率の低下との間には対応関係が乏しいが、時代の経過とともに安全率が増加する傾向は存在する。比較対照するデータが僅か5～8と少ないので一般論として言うことはできないが、経験主義的に造られた古代のアーチ橋に比べて、ペロネのように合理的な設計を経ての近代アーチ橋の安全率が、圧潰・せん断滑りの双方に対して均等な強度を有するのは当然の帰結であろう。

ガール橋をはじめとするローマ期の半円アーチ橋は、圧潰に対しては十分高い安全率を示す。それに対して、計算例はガール橋しかないが、せん断滑りに対しては極端に弱く、初期滑りに対する安全率は1を下回る。もちろん、初期滑りを起こしても変形後につり合っていれば全体的な崩壊にはつながらないが、アーチ橋としての基本的な安全性には欠ける構造と言えよう。このような結果が得られた理由は、ガール橋がモルタルなど接着剤を使わない空積み構造で造られているからで、試みにモルタルが使用されている仮定すると、安全率は両端固定の場合30以上、最も条件の厳しい弾性支持の場合でも5とトップクラスの強度となる。

扁平橋を代表する安濟橋とコンコルド橋は、固定されている（両端固定）か不等沈下を許容する（弾性支持）かで、安全率が大きく異なる。安濟橋は不等沈下に対して極めて弱く、圧潰に対する安全率=3、せん断滑りに至っては1以下という結果を与えている。その理由は、コンコルド橋の橋脚の面積が小さくて弾性支持の影響が少ないこと（連続アーチのメリット）、安濟橋の地盤との接触部が長大でその分弾性支持の影響が大きくなることが考えられる。型式が異なるが霊台橋についても弾性支持の場合類似の結果が得られており、これも支持部が長大となる単一アーチ特有の原因によるものと解される。

（4）平坦率と安全率の系統的な評価

これまでの考察により、平坦率は時代とともに減少する傾向があり、それを「アーチの進化」と受け止めることもできること、そして、数値計算による安全率の評価によれば、安全率と平坦率（時代）の間には有意な相関の見られないことが示された。ただし、それらは具体例としての5～8橋、それも寸法・材質とも大幅に異なる橋についての比較に過ぎない。以下、アーチの平坦率と安全性の関係をもう少し系統的に誘導することを目的として、平坦率と圧縮破壊③、平坦率とせん断滑り破壊④の関係を、パラメトリックな数値計算を通じて求める。

計算に用いるアーチは、アーチの荷重支持機構に関係のない部分を排したアーチ軸線のみとし、スパン一定（20m）、材質一定（安山岩、継ぎ目にモルタル使用）で、平坦率のみ異なるとする。平坦率は、0.27, 0.41, 0.52, 0.58, 0.78, 0.92, 1.00（開角で表すと60°, 90°, 110°, 120°, 150°, 170°, 180°）の7種類とする。荷重と支持条件は表-2に併記する（弾性支持のバネ係数は $5 \times 10^4 \text{ kg/m}$ ）。計算結果を図-4に示す。横軸には平坦率を、縦軸には圧潰あるいはせん断滑りに対する安全率をとる（▲は安全率1以下であることを示す）。

図-4から判別される顕著な特徴を列記すると、次のようになる。

- ① アーチはせん断滑りに対して弱く、圧潰の1/6倍程度の安全率となる。
- ② アーチの固定度が低いと（弾性支持）、安全率が1/20以下に低下する。
- ③ 平坦率0.5程度のアーチが構造上最も安定している（半円アーチの安全率最低）。

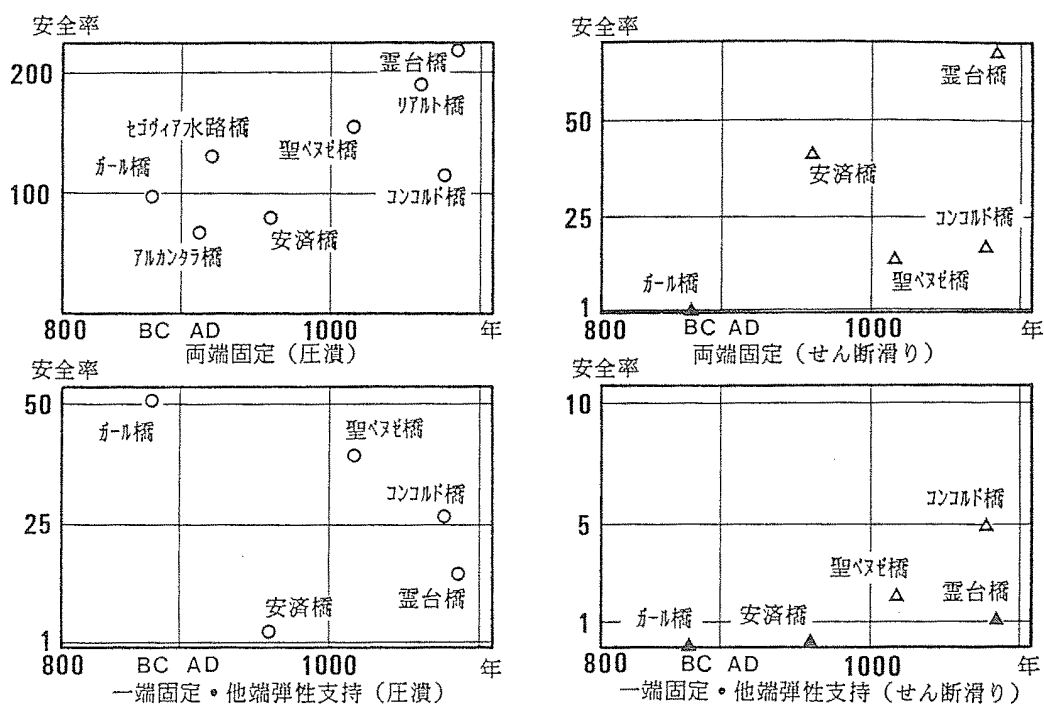


図-3 歴史的な石造りアーチ橋の安全率 (▲は安全率<1)

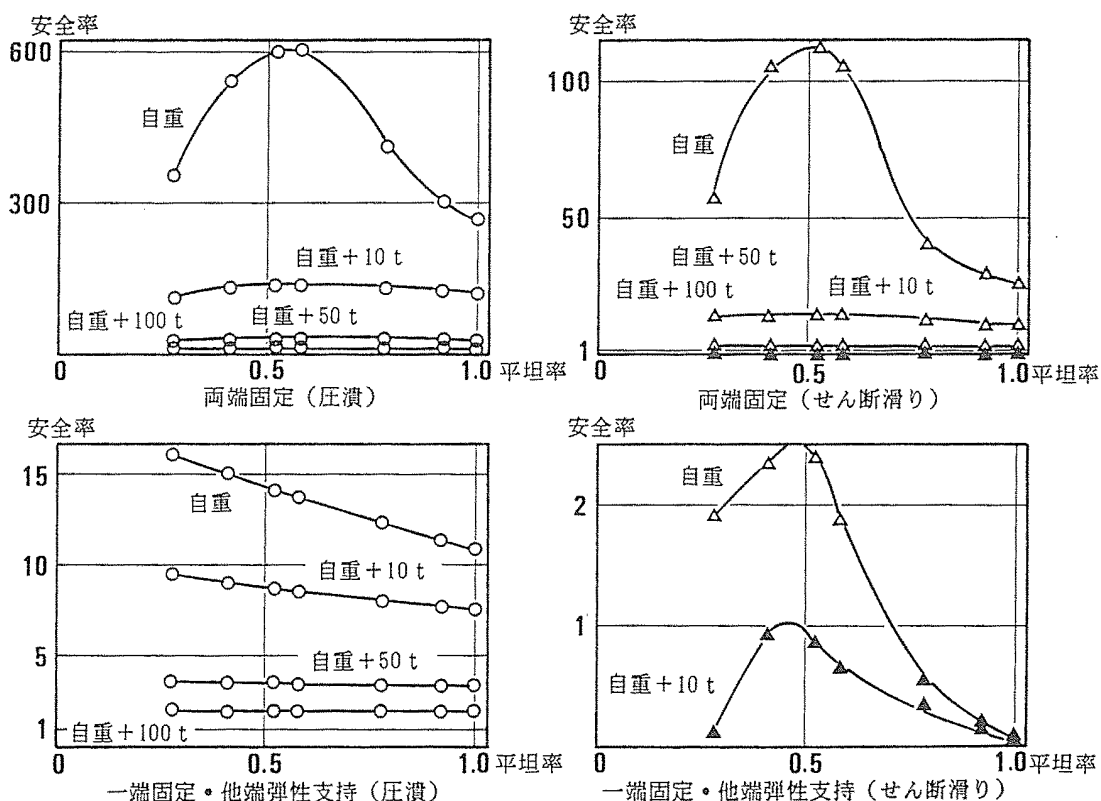


図-4 シミュレート・アーチの安全率 (▲は安全率<1)

このうち、①のせん断滑りと圧潰との差、及び、②の弾性支持の影響に対しては、定量的な評価を与えたという点が新しい視点である。特に、弾性支持の影響に対しては、砂岩層という「固定に近いような」地盤ですら完全固定に比べて極端に安全率が低下する、という結果を与えており示唆に富んでいる。

一方、筆者らにとって意外だったのは、半円アーチが構造上最も不利という③の結果である。前節の計算でもローマ期の3橋の安全率が高い方に属するとの結果が得られており、数値計算を待つまでもなく初期のアーチがすべて半円だったことから半円アーチの優位性は明らかなように見える。この設問に対しては次のように答えればよいであろう。すなわち、ローマ期の石造アーチはマッシヴである分必要以上に安全であり、規格を統一したシミュレート計算と同一の尺度では比較できないこと、そして、ローマ期に主流を占めた連続アーチの場合、水平推力が大きくなる扁平アーチは構造上・施工上不利であったこと、などが背景として考えられる。逆の見方をすれば、設計・施工技术が向上してゆくにつれて、力学的に見てより優れた扁平アーチに移行して行ったのは当然の帰結であったとも言えよう。

4. 結 論

本稿の主たる目的は、石造アーチ橋の経年分類のための基礎データ作りであり、機能と美のうち、機能面を定量的に評価しようとするものであった。内容的には、実在する歴史的な名橋の安全性評価と、数値シミュレーションによる単一スパンのアーチ橋の強度特性評価とに二分される。結果として、現実の石造アーチ橋の頑丈さが確認され、アーチ破壊における迫石相互のせん断滑りの重要性が定量的に確認された。また、アーチの安全性に最大の影響を持つと言われる両端の固定度についても、弾性支持に対する模擬計算により影響の大きさを知ることができた。

石造アーチ橋は、建築・美術史の中では「最も技術的なもの」として最右翼に位置付けられている。一方、土木史の分野では、「最も美術的なもの」としてアクセス可能な数少ないテーマであるのに、郷土史的な範疇を脱していない。芸術的評価は、例えそれが土木構造物であろうとも建築にまかせるとするのは望ましい姿勢ではない。土木史が経済・社会史から技術史までを包括する広いものであるならば、石造アーチ橋に代表される橋梁の構造美について史的な考察を累積し、体系化してゆくことは是非とも必要なことである。

参 考 文 献

- 1) 太田静六：眼鏡橋—日本と西洋の古橋，理工図書，1980
- 2) 来島 武・成瀬泰雄編：世界の橋，森北出版，1964
- 3) 丹下敏明：スペイン建築史・建築各国史I，相模選書，1979
- 4) 砥用町：砥用町の石橋，1977
- 5) 中国建築史編集委員会編（田中 淡訳）：中国建築の歴史，平凡社，1975
- 6) 中村作太郎：橋梁の歴史の変遷とその発達動向，蘭岳会，1979
- 7) 西村 昭・藤井 学：最新土木工学シリーズ・8／最新土木材料，森北出版，1975
- 8) 山本 宏：橋梁美学，森北出版，1942
- 9) 山本 宏：アーチ橋—その発生と伝播，土木学会誌，1985
- 10) H.シュタウブ（藤本一郎訳）：建設技術史・工学的建造技術への発達，鹿島出版会，1976
- 11) A.スファツ（鈴木博之訳）：図集 世界の建築・上，鹿島出版会，1979
- 12) J.ニダム（田中 淡・佐藤武敏・吉岡義信・中村圭爾・森田 明訳）：中国の科学と文明，思索社，1979
- 13) F.バウムガルト（杉木俊多訳）：西洋建築様式史・上，鹿島出版会，1983
- 14) G.ビカル（佐々木英也訳）：世界の建築・ローマ，美術出版社，1966
- 15) R.ベネーネ（武藤 章訳）：近代建築の歴史・上，鹿島出版会，1974
- 16) R.ベネーネ（佐野敬彦，林 寛治訳）：図説 都市の世界史・1～4，相模書房，1983
- 17) A.ボイド（田中 淡訳）：中国の建築と都市，鹿島出版会，1980
- 18) R.マウ（飯田喜四郎訳）：ゴシック建築の構造，鹿島出版会，1983
- 19) リザー社・講談社インターナショナル編：世界の遺跡と名建築・10／技術の成果，講談社，1983
- 20) F. Leonhardt：Bridges Aesthetics and Design，Deutsche Verlags Anstalt，1980
- 21) R. J. Mainstone：Developments in Structural Form，M. I. T. Press，1975
- 22) Ministère des Travaux Publics：Élargissement du Pont de la Concorde，1930
- 23) C. S. Whitney：Bridges Their Art—Science & Evolution，CROWN Publishers INC，1983
- 24) 茅 以升編：中國古橋技術史，北京出版社