

歴史的石造アーチ橋の構造論的分類への試み

名古屋大学 正 会 員 馬場 俊介
川内職業訓練短期大学 正 会 員 二宮 公紀
三菱重工 正 会 員 小川 元秀

A Study on the Structural Classification of Historical Stone Arch Bridges

By Shunsuke BABA, Kohki NINOMIYA and Motohide OGAWA

概 要

世界の著名な石造アーチ橋の歴史を、形態と強度という技術的な観点から概説する。1節では、石造アーチに対する土木史としての取組みの重要さと本論文の特徴について触れる。2節では、アーチ橋の概略史を述べる。3節では、アーチ橋の形態的な分類を56橋の歴史的な橋を用いて行う。4・5節が本論文の主要部で、アーチ橋の強度的な分類を、多数のシュミレート・アーチ橋と16橋の歴史的名橋を用いて行う。そして、形態と強度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. 序

橋梁は形態的に多様で、その多様さは、地理、環境、民族、技術などさまざまな要因に起因する。地域と時代による橋梁の変遷を体系化して分類することは、過去に造られた橋梁の再評価に留まらず、現在と将来における橋梁の地位向上にとっても必要なことである。土木に携わる者が、自らの創造物に史的必然性と技術美を発見し賞揚することは、社会一般の橋梁に対する認識に変化を促す。すなわち、地域や時代のモニュメントとしての橋梁の存在が社会的通念として定着し、そうした橋梁にはデザイン主体の設計がなされて人気を博し、それがよい意味での循環となって土木全体の地位向上にも役立つ。ここで大切なことは、土木工学がデザイン面に対してもタッチできるだけの背景を作りあげておくことである。歴史的な研究は過去の分類にのみあるのではない。過去の優れた作品の中に、見る者の琴線に触れるような感動的要因、地域と民族に根ざした伝統的要因を抽出し、そうしたエッセンスを将来のデザイン創造に活用できるようにしてこそ、土木工学の重要な構成分野として自立してゆけるのである。

さて、本論文の方向性としては、著者らの上記の主張に基づき、土木史学から土木意匠学へと連続してつながるような流れを構築することにある。そして、その第1ステップとして、橋梁型式を石造アーチ橋に限定し、さらに、技術史的な見方、すなわち、構造論としての立場に絞って分類を試みる。構造論の中には、形態的なもの（外的）と強度的なもの（内的）の双方が含まれる。

アーチ橋の史的研究に関しては、従来橋梁史の一環としてとり上げられることが大半で、それも鋼・コンクリート時代への前座として簡単に記されるに留まっている。ローマのアーチ橋、中世中国の先駆的アーチ橋、近世ヨーロッパの薄肉アーチ橋については、個別に研究が進められていて多くの記述が見られるが、アーチの変遷についての系統立った記述は少なく、わずかに「中国の科学と文明」²⁴⁾の中でニーダムが平坦

率などを用いた比較を行っているのが目立つ程度である。著者らは、石造アーチ橋の力学的分類を目標として1989年に第1報¹⁴⁾を出した。そこでは、分類法、分類対象とも不十分であったため、本論文では、以下の3点を含め抜本的に見直しを図る。

- ① 形態的分類に関して、新たに2つの指標を導入し、56橋の歴史的アーチ橋を分類する。
- ② 強度的分類に関して、新たに2つの指標を導入し、16橋の歴史的に著名なアーチ橋を分類するとともに、シミュレート・アーチ橋を用いての数値解析により、形態と強度との相関にまで言及する。
- ③ 数値解析(②で使用)面で、弾性地盤の導入(地盤部の要素分割)、平面アイソパラメトリック要素の精度向上(4節点から12節点への変更)など、強度評価の信頼性を上げるための改善を行う。

2. 石造アーチ橋の歴史 — 概説

本論に入る前に、石造アーチ橋の歴史を簡単にまとめておこう。人類史上初めてアーチが使用されたのは、紀元前3千年紀初期のメソポタミアで、その起源は持送り積みの尖頭(逆V)疑似アーチとされる。当時は大型構造にはむしろ持送り積みが使われ、真正アーチ(ヴォールト)は専ら墓室や下水など地下構造物の一部に用いられていたにすぎない(その多くはレンガ製で、施工の簡便さから多用された)^{8, 21, 32)}。ヴォールト構造は、完成部分に持たせかけて簡易に施工するという独自の傾斜積みであることが多く(西アジア式)、後世のローマ式とは一線を画している。こうした状態は、メソポタミアとほぼ同時期から模擬アーチの経験を持つエジプトでも大差ない。

古代世界でアーチを真に生かしたのがローマであることは、よく知られている。小アジア起源とされる隣国エトルリアから学んだアーチ技術は、前1・2世紀になって大径間の橋梁を架けられるまでに成熟する。ローマの繁栄の象徴となった道路と水道のいずれにもアーチ橋が多用され、公共土木構造物の普遍的スタイルとしてのアーチ構造が確立する。形態から見るとその多くは半円アーチであり、迫り厚はスパンの10～20分の1と大きく、それが外観としての重量感・威圧感の演出にもつながっている。石材(多くは石灰岩⁴¹⁾)は空積みのことが多いが、それは石材加工技術の高さ(中世ヨーロッパの石造橋と対比して)に支えられたものである。特に後者は、ローマのアーチ橋が、洪水で流されたり戦争で破壊されたりした以外は中世を通じて現在まで残っているものが多い、という事実を説明している。すなわち、重量構造のため施工中に基礎が十分に締め固められ、アーチの自然崩壊につながる基礎の剛体移動を未然に防いできた。

アーチ橋はローマ帝国の衰亡とともに建造されなくなる。より鈍重な形となったアーチ橋がヨーロッパで再出現するのは、巡礼の道や大聖堂建設に代表されるように宗教熱が高まりを見せ(慈善建造物としてのチャペル橋¹⁰⁾)、かつ、封建制の枠内ながら経済活動が活況を示し始めた11～12世紀のことである。その間、アーチ橋はイスラムと中国で独自の発展を続けていた。イスラムのアーチ橋は、当初こそローマからの直輸入で、建造にあたったのもローマ人なら形態も全くローマ的であった³⁰⁾。しかし、それ以後の発展は重要で、持送り積みの伝統を生かした尖頭アーチを発展させ、その変形である馬蹄アーチなど華麗な変形パターンを編み出しただけでなく、橋梁に渡河以外の目的(ダム、アメニティの場)を付与するなど大きな足跡を残した³⁰⁾。特に前者は、シシリー島、イベリア半島というヨーロッパとアラブとの接点を通じて中世ゴシック美術にはかりしれない影響を与えた。

一方、中国では後漢後期(2～3世紀)から埤(瓦)を用いたヴォールト構造が造られるようになる^{7, 24, 38)}。そこには、折線ヴォールト⁸⁾など独自の発想のものも見られるところから、メソポタミアからの直接的な影響は考えにくい。中国のアーチ橋技術は早くも7世紀初めに頂点に達し、安濟橋(趙州橋)を創建する。安濟橋は、技術上多くの独創性を有し^{38, 52)}、形態的にもローマの量塊感とは対照的に、軽快で水平的なイメージを史上初めて実現させた。その形態は、渡河する川の水量、地盤の軟弱さなどの外因が生み出した必然と言えなくはないが、同じような前提条件が後世の中国華南の運河地帯では、全く別の形態(薄肉太

鼓橋)を生み出すに至る。この多様性が中国の魅力である。

ヨーロッパ近世では、3段階に分かれてアーチの発達が見られる。第1段階はルネサンス期の14世紀イタリアで起こり、各都市国家では覇を競うように市内の大河に大胆な扁平アーチ橋が架けられる。第2段階は絶対王政期の17世紀フランスで起こり、偽楕円アーチや朝顔型断面が一般化^{21, 41)}、その流れは18世紀末のペロネらによる扁平化への技術的挑戦となって結実する。第3段階は世界初の産業革命を目前に国内交通網の急速な整備を迫られた18世紀末のイギリスで起こり、アーチ後進国から一気に、レニーに代表されるように建築的要素を持った独自の形式(ペロネとは一線を画す)を発展させるに至る⁴⁷⁾。ただ、アーチの絶頂期は短く、産業革命の結果得られるようになった豊富な鉄を使っての「石から鉄への変換」が急速に進む。その間、建築的(装飾的)傾向に対するテルフォードの拒否反応⁴⁷⁾などもあり、橋梁が一個の作品から単なる技術上の成果品と位置付けられるようになり、現在に至っている。

3. アーチ橋の形態的な分類

アーチ橋の形態分類に用いた56橋を、表-1に示す。橋梁に関するデータは、教会建築などと比較して極度に不足していて時代と地域に偏りがあるが、なるべく代表的なアーチ橋を集めた。形態を表すパラメータには、スパン S 、ライズ(迫高) H 、迫石厚 V 、橋脚幅 W (連続橋のみ)などがある。ここでは、アーチの技術的なレベルを表す指標として、つぎの4つの指数を用いる。

- ① 見かけの平坦さ : H/S (ライズ比, 平坦率²⁴⁾の1/2)
- ② 扁平化の技術力 : S^2/H (スパンゲンベルク指数²⁴⁾)
- ③ 薄肉化の技術力 : $0.1 S^2/V$ (1/10で除すのは②, ④とオーダーを統一するため)
- ④ 連続化*の技術力 : S^2/W (*個別化アーチからつり合いアーチへの移行を示す)

このうち、 H/S はアーチのおおまかな分類に用い、「技術力」は ② S^2/H と ④ S^2/W の2つの指数で表現する。まず②について、アーチの扁平さは H/S だけでも表せるが、技術的困難さ(スパンが大きいほど高い技術レベルが必要)までは表せない。そこで、 H/S を S で除して逆数をとることでスパンの影響を加味したスパンゲンベルク指数を採用する。③は、表-1から読み取れるように、②と類似の傾向を示すため省略する。④は、②と同様な考えで、橋脚幅の対スパン比(W/S)にスパンの影響を加味した指数である。この数値が小さい(橋脚幅が大きい)と、形態的には連続アーチでも構造的には個別化アーチに近くなる(中世のアーチ橋に多く見られる)。

図-1 には、(a) S^2/H の時代による推移と、(b) S^2/H と S^2/W の関係とを示す。図-1(a)からは、ニーダムが示唆²⁴⁾した「アーチの進化=扁平化」という図式がより鮮明に追認できただけでなく、既存のアーチ橋が地域と時代によって大きく3つの特徴的なグループ(下記の①~③)に分れることが見てとれる。また、図-1(b)からは、高 S^2/H ・低 S^2/W 、低 S^2/H ・高 S^2/W という2つの新しいグループ(下記の④と⑤)の存在が認められる。

- ① ローマ期 : 半円形(もしくは半円に近い)
- ② ルネサンス期イタリア : 扁平化への最初の試み
- ③ ペロネのフランス : 扁平化と連続化の頂点
- ④ 産業革命期イギリス : フランスの後追いだが独自性あり(連続化への意欲薄い)
- ⑤ 中国華南 : 半円形だが連続化(薄肉化も)が極限に進行

これ以外には、ローマ期以降中世期を含めて技術的には大きな進展がなかったこと、7世紀初頭の中国の中国の安濟橋(d)が特異なものであること、共に運河地帯に造られ形状も似ている中国華南とヴェネツィアの2橋(i, j)が、技術的にはかなり異なっている(相互に何らかの技術的交流があったとは考えにくい)こ

表-1 形態的分類に用いた歴史的石造アーチ橋

名 称	図 1	型式	完成年	国	架橋地点	最大支間 $S(m)$	ライズ比 H/S	指数 ¹⁾ S^2/H	指数 ²⁾ $0.1S^2/V$	指数 ³⁾ S^2/W
アラゴス橋 **	1	半円	前1~2世紀	イタリア	ローマ北方, ナルニ	32.3	0.50	65		
ファブリウス橋	2	欠円	前62年頃	イタリア	ローマ市	24.9	0.41	61	36	69
ガル橋	(a)	半円	前19年頃	フランス	ニーム近郊	24.5	0.50	49	44	117
サン・マルティノ橋	3	欠円	前1世紀	イタリア	サン・マルティノ	31.4	0.39	81	98	
ティベリウス橋	4	半円	20年頃	イタリア	リミニ	8.5	0.50	17	9	21
ヒゴヴィアの水道橋	(b)	半円	100年頃	スペイン	ヒゴヴィア市	4.9	0.50	10	4	19
クラダの水道橋	5	半円	100年頃	スペイン	クラダ郊外	約10	0.50	20	11	45
アルカンタラ橋	(c)	半円	103年頃	スペイン	アルカンタラ	28.1	0.50	56	48	108
安濟橋	(d)	欠円	605年頃	中国	趙県	37.4	0.20	184	113	
橋楼殿	6	欠円	615年頃	中国	福慶寺	10.7	0.31	35		
カ・イ・チュワルの橋	7	半円	9-10世紀	イラン	サルディスタン近郊	約15	0.88	17	24	20
王妃の橋	8	半円	11世紀	スペイン	ヘンテ・ラ・レタ	約25	0.50	50	42	119
永通橋	9	欠円	1130年	中国	趙県	25.9	0.12	216		
カ・ベ・ゼ橋	(e)	欠円	1185年	フランス	アグニオン市	32.7	0.27	122	74	78
蘆溝橋	10	欠円	1192年	中国	北京近郊	21.6	0.35	61		
古ロンドン橋 **	11	尖欠円	1209年	イギリス	ロンドン市	10.4	0.42	25	11	14
ネティール橋 *	12	欠円	1245年	フランス	リヨン	33.2	0.35	95		
寛渡橋 *	13	半円	1300年	中国	蘇州市	約20	0.50	40	133	
サン・エズリ橋	14	欠円	1305年	フランス	サレー近郊	34.0	0.25	136		
ヒレ橋	15	半円	1339年	フランス	サレー	45.5	0.50	91	169	
ヴェンツェ橋	16	欠円	1345年	イタリア	フィレンツェ市	28.8	0.16	180	85	131
ゴバル橋	17	欠円	1351年	イタリア	ボヴィー市	30.5	0.20	153		
ヴァラントレ橋	(f)	尖欠円	1355年	フランス	カール市	16.5	0.53	31	35	44
スクリジェロ橋	18	欠円	1356年	イタリア	ヴェロナ市	48.7	0.28	173		198
グイスコンティ橋 **	19	欠円	1375年	イタリア	トレヴィゾ	74.1	0.28	265		
カステルヌ橋 *	20	欠円	1404年	フランス	シストロン	28.0	0.25	112		
宝帯橋	21	半円	1446年	中国	蘇州市	7.0	0.50	14		81
モスタルの橋	22	尖欠円	1567年	ユーゴ	モスタル市	27.3	0.52	53		
サタ・トリニタ橋	(g)	半楕円	1569年	イタリア	フィレンツェ市	29.3	0.14	204	110	113
リアト橋	(h)	欠円	1592年	イタリア	ヴェネチア市	26.5	0.22	119	126	
放生橋	(i)	半円	16世紀末	中国	上海近郊	14.7	0.50	29	33	191
アヲ橋	23	半楕円	1607年	フランス	パリ市	19.6	0.39	50	25	85
長崎眼鏡橋	24	欠円	1634年	日本	長崎市	8.3	0.46	18	13	46
ハーシュー橋	25	尖楕円	1650年頃	イラン	イズファハーン市	3.2	0.40	8		7
東新橋	26	欠円	1673年	日本	長崎市	15.5	0.27	57	46	
トレ・アルキ(37-チ)橋	(j)	欠円	1688年	イタリア	ヴェネチア市	10.7	0.36	29	40	71
幸橋	27	欠円	1702年	日本	平戸市	15.1	0.33	46	34	
玉帯橋	(k)	尖長円	18世紀中	中国	北京市	約10	0.59	17	30	
ボンティリッガ橋	(l)	欠円	1756年	イギリス	カーディフ近郊	42.7	0.21	203	340	
ゴールドストリーム橋	28	欠円	1767年	イギリス		18.5	0.32	58	45	80
ブラックフライース橋 **	29	半楕円	1769年	イギリス	ロンドン市	30.5	0.40	76	64	145
メイの橋 **	30	欠円	1772年	フランス	パリ	39.0	0.25(0.10)	157(379)	94	394
サントゥ・マダガス橋 **	31	欠円	1774年	フランス	サンリ	23.4	0.09	270	56	196
コンコルド橋	(m)	欠円	1791年	フランス	パリ市	31.2	0.13	243	85	333
ラヴォールの橋	32	半楕円	1791年	フランス	トゥール近郊	48.0	0.46	104	89	
エニオン橋	33	欠円	1805年	イギリス	アバディン市	39.6	0.23	170	142	
エスク橋	34	欠円	1808年	イギリス	ミュンヘン市	13.7	0.12	119		88
秋月目鏡橋	35	欠円	1810年	日本	甘木市	14.9	0.29	51	50	
クーサール橋 **	(n)	半楕円	1817年	イギリス	ロンドン市	36.8	0.29	128	92	222
グロズナー橋	36	欠円	1833年	イギリス	チェスター市	61.0	0.21	290	200	
旧ウエルズ橋	37	半楕円	1835年	イギリス	リムリック市	18.5	0.25(0.12)	75(153)	65	130
練早眼鏡橋	(o)	欠円	1839年	日本	練早市	17.9	0.32	55	46	122
霊台橋	(p)	半円	1847年	日本	砥用町	28.3	0.50	56	88	
武之橋	38	欠円	1848年	日本	鹿児島市	15.5	0.36	43	43	97
通潤橋	39	半円	1854年	日本	矢部町	28.2	0.50	56		
アドル橋	40	欠円	1903年	ルクセンブルク	ルクセンブルク市	84.7	0.29	292	565	

備考: 1) S : 橋脚間隔 (H: 迫高), 2) V: 迫石厚, 3) W: 橋脚幅

** 現存しないもの, *

現存するかどうか不明のもの, ()内 朝顔断面の最外縁での迫高

と、などが読みとれる。また、時代により W/S が大きくなる（「連続化」）傾向にあるが、有効流水面積の拡大を通じて対洪水性能や可航性能の向上につながるなどの技術的必然性を持っている。図中には、九州の石橋についても8橋を示すが、顕著な特徴はない。

4. アーチ橋の強度的な分類 — シミュレート・アーチ橋

アーチ橋の扁平さ H/S の違いによる構造強度について論じるため、スパンを固定し (20m)、ライズ、

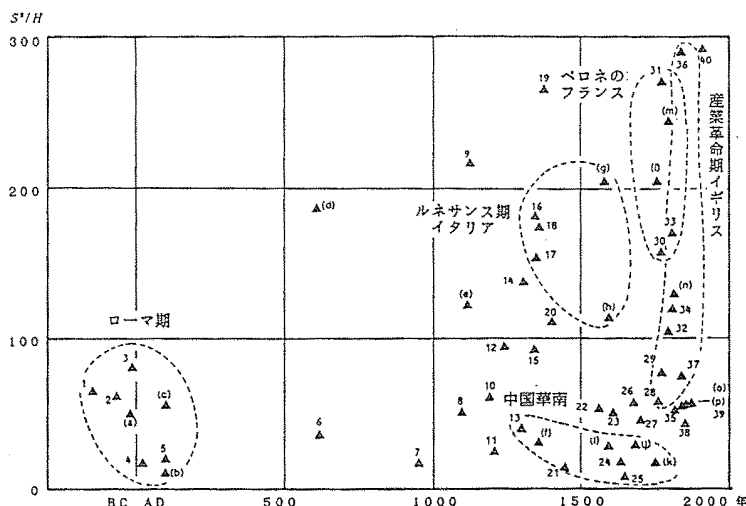
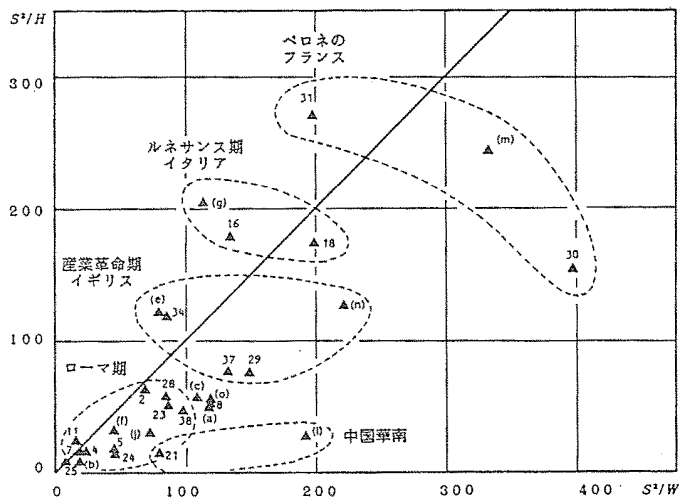
(a) 時代による S^2/H (扁平化の技術力) の変遷(b) S^2/H と S^2/W (連続化の技術力) の関係

図-1 現実のアーチ橋 (56橋) の形態的な分類

迫石厚、裏込の有無、地盤支持状態などを変えた仮想的なアーチを想定し、有限要素法により構造体としての安全度を評価する。なお、解析にあたっては微小変形、弾性、連続体を仮定した。

(1) シミュレート・アーチ

図-2に、シミュレート計算の対象となるアーチの基本形を示す。(a)が迫石のみのアーチ、(b)が裏込のあるアーチである。現実のアーチとの対応という観点に立つと、図(a)は連続アーチ (or つり合いアーチ)、図(b)は単一アーチ (or 個別化アーチ) に比定できる (5節参照)。ライズ H は、 $H/S=0.1\sim0.5$ (半円) まで 0.1刻みの5段階となるように選ぶ。迫石厚 V は、標準厚 (1 m) と半厚 (50 cm; 薄肉軽量アーチを想定) の2種類とする。地盤については、堅い地盤 (弾性係数 $E=\infty$; 岩盤上) と柔らかい地盤 ($E=2000\text{t/m}^2$, ポワソン比 $\nu=0.2$, 単位体積重量 $w=2.5\text{t/m}^3$; 土基礎よりずっと硬い) の2種類を想定する。

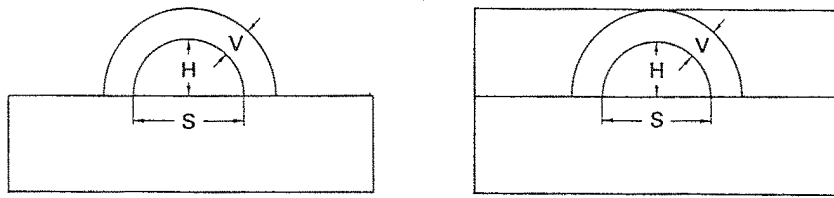
迫石は、現実の橋が石灰石製もしくは大理石製であることを考慮して、 $E=5\times 10^8\text{t/m}^2$, $\nu=0.2$, $w=2.75\text{t/m}^3$ を用いる^{13, 42)}。これは、ほぼ花崗岩のデータに等しい。裏込部分は、堅目の乾燥した礫混り土 ($E=4000\text{t/m}^2$, $\nu=0.2$, $w=2.0\text{t/m}^3$) と考える。最後に、荷重条件としては、自重だけによる場合と、アーチ頂部に10 tの鉛直集中荷重を載荷する場合の2通りを対象とする。

(2) 安定度の評価

石造アーチ橋の構造的安定度の評価には、つぎの2つの指標を用いる。

- ① 迫石内の圧縮力の伝達のばらつき : IV
- ② 迫石間でのせん断すべりの危険性 : IS

①の指標 IV は、アーチを構成する迫石になるべく均等な圧縮力が働くことがアーチにとって理想である



(a) 迫石のみのアーチ（連続橋に相当） (b) 裏込のあるアーチ（単一橋に相当）

図-2 シミュレート計算の対象となるアーチの基本形

という前提に立って設定した。 IV は小さいほどよい。 IV の定義をつぎに示す。

$$IV = \text{mean} [(\text{迫石 } i \text{ の最大応力}) - (\text{迫石 } i \text{ の最小応力})] / (\text{迫石 } i \text{ の平均応力})$$

式中の応力は、迫石間の円周方向の圧縮もしくは引張応力で、迫石接触面に沿っての最大値、最小値、平均値を使用する。また、 $\text{mean}[i]$ は、全アーチ迫石について平均値をとることを意味している。

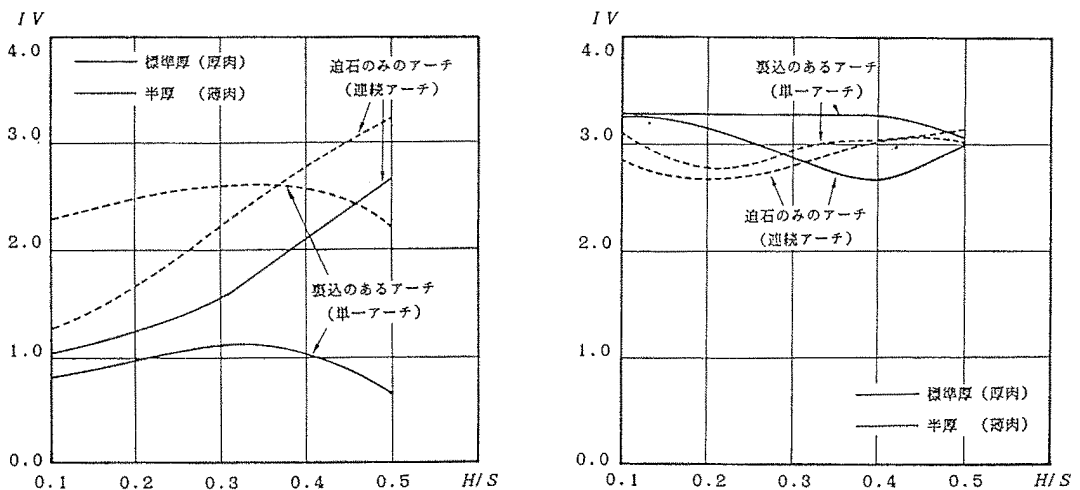
②の指標 IS は、アーチが崩壊する直接原因の一つは迫石間でのすべりによるという事実から出発している。 IS の定義をつぎに示す（各迫石間で定義される）。 IS は小さいほどよい。

$$IS = \max [\sum_j \{ (\text{迫石 } i \text{ の } j \text{ 部分のすべり確率}) \}]$$

式中のすべり確率とは、迫石間でせん断すべりが生ずる確率で、迫石相互の接触面のせん断応力 $\tau_{(n)}$ と、 $\tau_r = C + \sigma_{(n)} \tan \theta$ で定義される摩擦応力 τ_r との比 $\tau_{(n)} / \tau_r$ により与えられる。ここに、 $\sigma_{(n)}$ 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、最も危険側の推定となるように $C=0$ とし、 θ は荒削りの石材同志のすべりという観点から $\theta=33^\circ$ （大理石）を用いる。

(3) シミュレート計算から得られる知見

シミュレート計算の結果は、ライズ比 H/S の影響、迫石厚 V の影響、地盤の硬軟の影響、裏込の有無、上載荷重の影響を知るため、つぎのような図に整理して示す。



(a) 堅い地盤，迫石／標準厚（厚肉）

(b) 柔らかい地盤，迫石／半厚（薄肉）

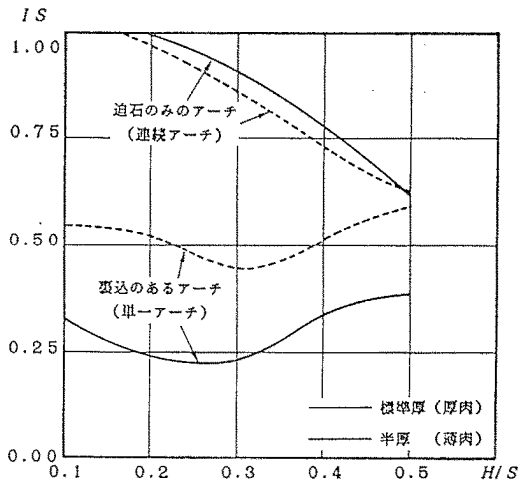
図-3 $H/S - IV$ （ライズ比と迫石内の圧縮力伝達のばらつき）の関係

図-3(a),(b): $H/S - IV$ の関係, 図-4(a),(b),(c),(d): $H/S - IS$ の関係

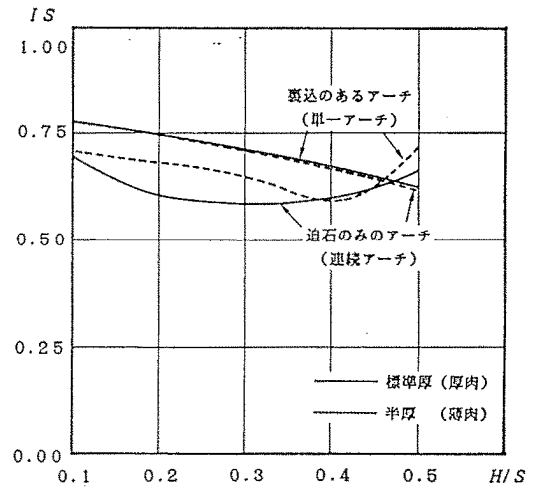
なお、(a)と(b)は迫石厚の影響(厚肉と薄肉)を、(c)と(d)は上載荷重の影響(自重のみと10トン載荷)を表している。また、(a)と(c)は堅い地盤、(b)と(d)は柔らかい地盤に相当する。いずれの場合も、迫石のみの場合(連続)と裏込のある場合(単一)の双方が併示されている。これらの図の傾向をまとめると、つぎのような知見が得られる(敢えて、「連続」とか「単一」という言葉で統一する)。

① 地盤が堅い場合

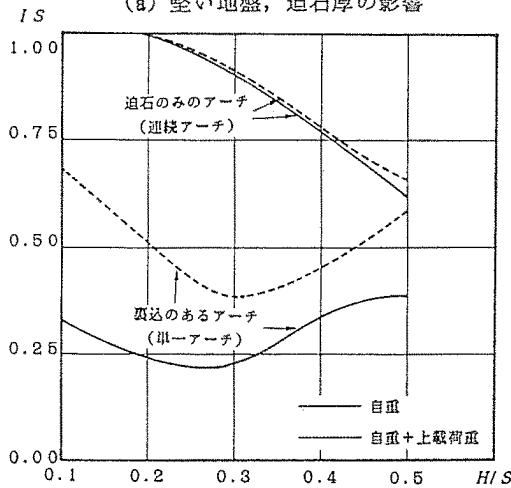
- * 連続アーチ、単一アーチとでは、単一アーチの方が明らかに有利。
- * 単一アーチにするなら、ライズ比は0.2~0.3とするのが有利。また、薄肉よりは厚肉の方が有利となる(応力の伝達が薄肉ほど不均等となるため)。
- * 敢えて、連続アーチにするなら、半円が最も有利。また、薄肉でも厚肉でも同じ(応力の伝達効率に差がないため)。



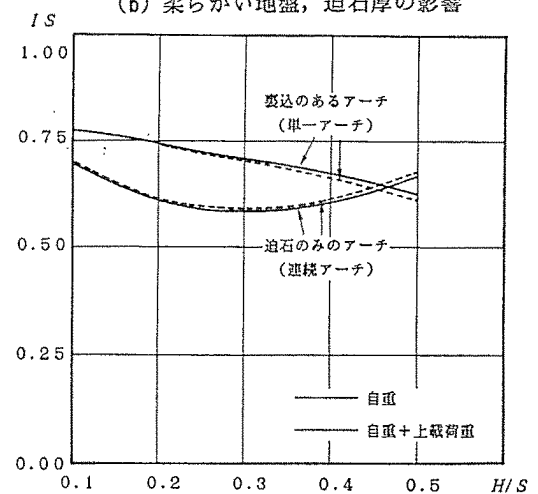
(a) 堅い地盤, 迫石厚の影響



(b) 柔らかい地盤, 迫石厚の影響



(c) 堅い地盤, 上載荷重の影響



(d) 柔らかい地盤, 上載荷重の影響

図-4 $H/S - IS$ (迫石間でのせん断すべりの危険性) の関係

② 地盤が柔らかい場合

- * 連続アーチ、単一アーチの間で差がなくなる。また、ライズ比による差異も少ない。
- * 単一アーチは、地盤が堅い場合に比べて不利になる。従って、地盤に適した形態を採用すれば、必ずしも杭などで剛基礎化する（①の状態にする）必要はない（シルト系地盤に直接築かれた安済橋³⁶⁾がその代表例）。

この結果は、アーチの技術レベルを単に扁平さなど見かけの形態だけによって判断するのは間違いで、同じ扁平アーチでも単一橋であるか連続橋であるかによって大きな差が生ずることを示している（扁平な連続アーチを架けるといことが技術的にいかに困難であり、19世紀末のペロネの努力がいかに技術的挑戦に等しかったかを物語る）。また、地盤条件も形状決定の一つの要因になり得たことも示唆している。

5. アーチ橋の強度的な分類 — 歴史的アーチ橋

歴史的アーチ橋の個々の評価、そして、4節におけるシミュレート・アーチ橋を用いた分析結果との関連性を求める目的で、16橋の著名な石造アーチ橋について数値解析を行い、2つの強度指標 IV 、 IS を求める。今回対象としたアーチ橋は、表-1中、(a)~(p)の記号が付されたもので、対応する要素メッシュを図-5に示す（アーチ軸線に沿った指標 IS の値を黒丸で示す；大きな黒丸が $IS=0.5$ 以上のすべり危険性を、小さな黒丸が $IS=0.1\sim0.5$ のすべり危険性を表す）。連続橋の場合（11橋）は1スパン分のみの解析で済みますが（境界部＝連続条件）、太鼓型アーチ2橋については全長にわたって解析する。また、欄干部分は構造上影響がないため削除するが、橋上構造物（リアルト橋）については重量換算して上載荷重として扱う。境界条件は固定（地盤の $E=\infty$ ）とする。

図-6(a)は、迫石内の応力伝達効率に関する指標 IV と、アーチのライズ比 H/S との関係を示す。現実の16橋（a~p）は、いずれも応力伝達効率がよく、特に単一アーチにその傾向が強い。また、図中に示されているシミュレート計算の $H/S-IV$ 曲線（図-3(a)の実線と同一）との相関は薄い。現実の石造橋ではスパンドレル部が厚いことが普通で、これが応力伝達効率をよくする原因となっているのであろう。

図-6(b)は、すべり破壊の指標 IS とライズ比 H/S との関係を示す。現実の16橋は、

- ① ローマ式の裸石材だけの半円アーチ連続橋（a, b, c）
- ② 橋脚幅が厚く個別アーチが並んだだけの中世の連続橋（e, f, o）
- ③ 橋脚幅が薄くつり合いアーチ化している近世の連続橋（g, m, n）
- ④ 単一橋（扁平な d, h, l と半円形の k, p）と、主径間が他に比べて十分大きい連続橋（i, j）

という4グループに分れる。全体として、連続化しているほど IS は高く、単一橋は一様に IS が低いという傾向がある。図中に示されているシミュレート計算の $H/S-IS$ 曲線（図-4(a)の実線と同一）は、この傾向とよく一致している。

これらの図をもとに個々の橋について評価した結果を、以下に示す。

- ① ローマの橋（a, b, c）：ローマの橋の多くは半円アーチで、これは堅い地盤では半円が最も適しているという結果と一致している。ローマが半円形を広く採用したのは、施工性の良さ、ワンパターン化による技術の普遍化、エトルリア以来の伝統などによるものだが、半円の有利さに対して何らかの経験的知識を有していたのかもしれない。このグループは、図-6(b)の右上方に孤立するように位置している。 IS の値は全体に大きく、しかも空積みのため、その数値は実質である（モルタル等が使用されていれば実質の IS は低下）。これらの橋の IS がシミュレート曲線を超えている理由は、連続アーチといっても1スパンを取り出せば縦に長い垂直指向のアーチとなっているためと思われる。
- ② 安済橋（d）：安済橋の場合は、流量の大きい狭い川という外因と未体験の連続アーチへの躊躇とい

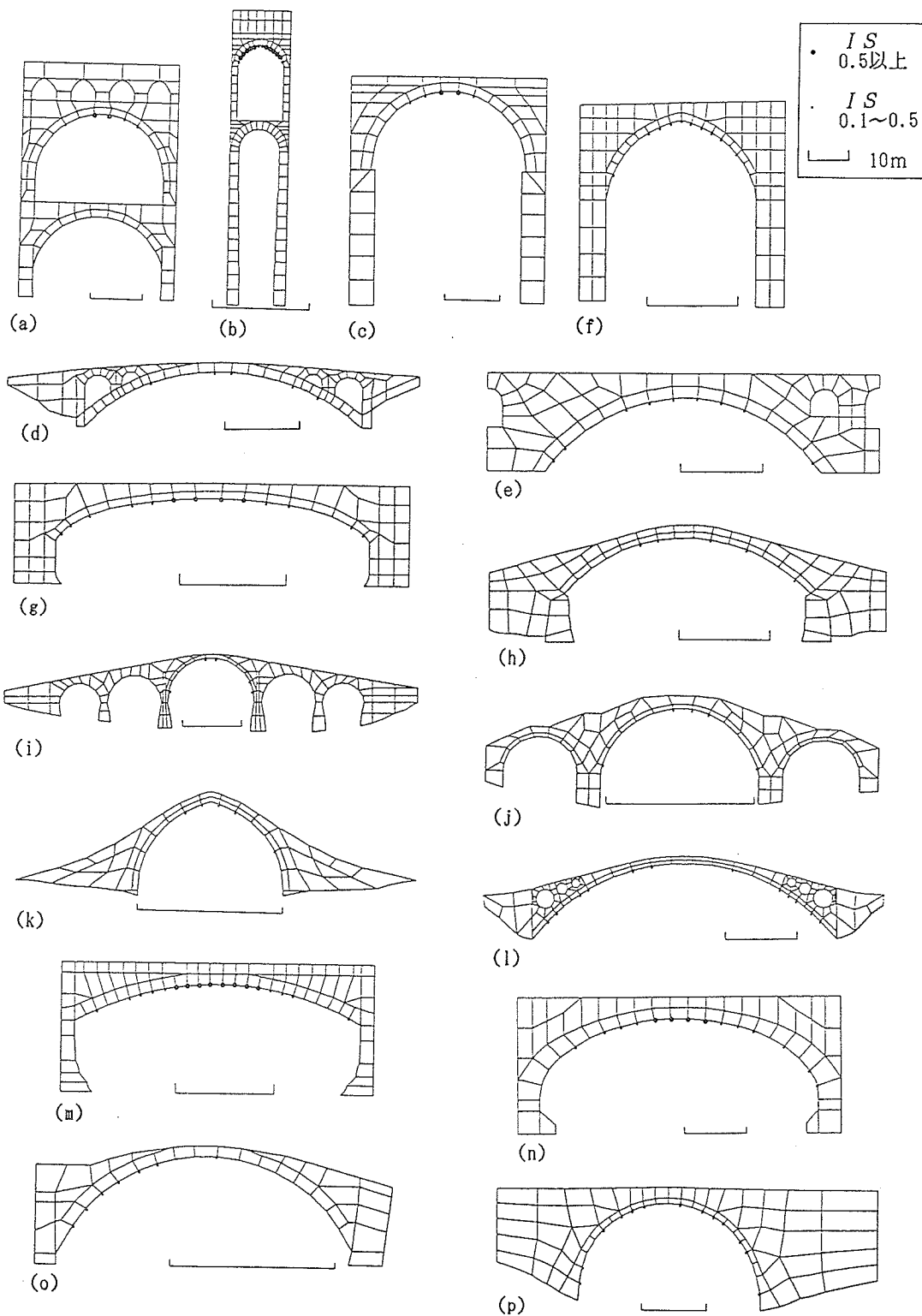
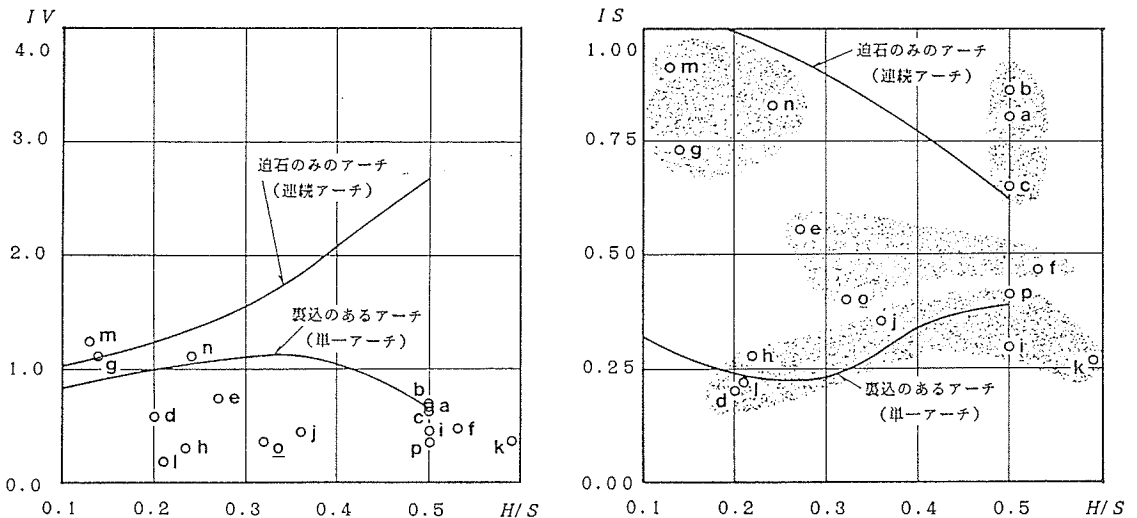


図-5 歴史的アーチ橋（16橋）の要素メッシュ（迫石部の IS 付き）

う内因が単スパン化への背景となり、平原部における通行量の多い幹線道という点が平坦化への直接原因となって、扁平で長スパンの橋の誕生に結びつくと解釈できる。安済橋は、16橋中最も IS の低い橋であり、かつ、シミュレート曲線をも下回っている。これは、オープンスパンドレルを導入して軽量化を進めるなどの工夫が効を奏したものであろう。また、単一橋の場合の最適ライズ比0.2~0.3を採用しているのも、それ以前の技術の集積から何らかの経験を得ていたのかもしれない。ただし、実際の IS 値は、安済橋がシルト系の地盤の上に杭などの基礎工なしで直接築かれているため、少なくとも0.5を超えていることが予想される（図-4(b)参照）。軟弱な地盤上に敢えて扁平な大アーチを架けるといふ冒険は、地盤を強化した他のアーチ橋が基礎の剛体移動によってかえって落橋しているのを見るとき³⁰⁾、その先見の明に対して高く評価されるべきであろう。

- ③ 中世の橋 (e, f) : 中世の橋は、教会主導で地元や巡礼の便のため建造されたため大きな川を渡る場合も多く、多スパンの連続アーチ橋が一般的な形態である。ただ、連続といっても橋脚は幅広く、単一アーチを並べたに等しいような例も多い。これは、ローマの技術が失われた時代にあって、最も安全な構造型式を採用せざるをえなかったことを示している（力学的に見れば、単一アーチの方が安全）。中世のアーチは、技術だけでなく形態的にもローマから独立していて、半円以外に欠円や尖頭がしばしば採用されヴァライティに富んでいる。これには、ロマネスクからゴシックにかけて急速に普及していった教会の尖頭ヴォールトが影響を与えたものと推定される。
- ④ ルネサンスの橋 (g, h) : ルネサンスは、建築家にドーム建築を媒体として意識革命を引き起こしたが、アーチ橋の設計者にも扁平で水平なイメージの追及という気運を生んだ。それまでにない技術の追及は、設計者個人を評価することにも通じ、ガッディ、アンマンナティ、ダ・ポンテなど著名な橋梁建築家を輩出させた²¹⁾。サンタ・トリニタ橋は（ヴェッキオ橋もだが）、扁平で連続性の高い（開口部の大きい）近代的アーチ橋の先駆である。これは図-6(b)からも明らかである。形態的にも半円より欠円という欠円より優美な形を取り入れるなど、ルネサンスを代表する名橋といえる。
- ⑤ 運河地帯の薄肉橋 (i, j) : 蘇州、上海など運河地帯で多く見られる薄肉半円アーチ橋は、運河航行のため半円形をとったのが最大の理由である。特異な薄肉構造となっているのは、軟弱地盤上の剛基礎という組合せの結果であろう。地理的に遠く離れ、交流もほとんどない両者に、類似した構造型式



(a) IV (ライズ比と迫石内の圧縮力伝達のばらつき) (b) IS (迫石間でのせん断すべりの危険性)

図-6 歴史的アーチ橋(16橋)の力学的な分類

が見られるのは、環境の果す役割がいかに大きいかを語っていて面白い。この2橋は変高連続橋となっている。図-6(b)で、両者が連続ありながら下側の曲線(単一橋)に属するのは、主スパンが側スパンに比べてかなり大きく、側スパン部が裏込と同様の効果を果たしているからであろう。

- ⑥ ポンティブリッド橋(1)：ポンティブリッド橋は、経験の積み重ねが完成させた傑作であり、あのペロネが扁平・薄肉化への挑戦にあたって、安全性への保障と考えた橋でもある。 $V/S=1/91$ (薄肉度)という数値は異常にまで小さい。ライズ比は安済橋と類似していて単一橋での最適値に近い。また、 IV の値が16橋中最も低いことも特筆すべきである。一般に薄肉ほど IV が大きくなるのに(図-3(a)参照)、ポンティブリッド橋で最低値が実現できたのは、円形のオープンスパンドレルの賜物である(円形孔のなかった2,3代目は完成直前と建設直後に崩壊)。いずれにせよ、技術的には最高レベルにあり(設計者エドワーズ)、完成に至るまでの4度の挫折という逸話^{21), 47)}や、形態のユニークさを含め、もっと評価されてよいアーチ橋の一つである。
- ⑦ コンコルド橋(n)：近世都市内の連続アーチ橋は、時代とともに扁平化が推進される。それは河川航行のための広いスパンの希求と、都市内の馬車交通を円滑化するための平坦な道路~橋という構図の一致した結果であり、時代の要請でもあった。その中で、ペロネとその弟子達は、近代的都市にマッチした橋は扁平で薄く橋脚が小さくて開放感のある連続アーチ橋であると位置付け、年を追って扁平化への挑戦を続けた。ペロネの代表作コンコルド橋は、それ以前のサントゥ・マグザンス橋などに比べて扁平化では劣ってはいるが、アーチを生かした全体のバランスという点では、ペロネ畢生の作に相応しい名橋である。 IS は16橋中最大で、もし空積みでできていたら破壊点にあり、迫石同志が固定されていて初めて可能となった数値といえよう。まさに、力学的挑戦と形態的優美さとを限界まで追及した指標的存在であり、橋梁技術史上の最高傑作の一つである。
- ⑧ ウォータールー橋(n)：コンコルド橋の出現以降というわりには扁平化、連続化とも劣る。フランスの模倣から始まった近代イギリスのアーチ橋は、当時を代表する橋梁技師レーニーのペロネ批判から、より「つり合い」のとれた形態として、中央部が平らになった半楕円と垂直性の高い橋脚部を組み合わせた様式へと移行する⁴⁷⁾。ただ、橋脚部の建築的なデザインの可否は別にして、ペロネ方式のつり合いアーチの否定から出発したにしては、半楕円アーチの IV は期待されたほど改善されていない。

6. まとめ

現実の56橋の形態上の分類、シミュレート・アーチ橋による地盤(軟弱地盤対策)、裏込(連続化)、迫石厚(薄肉化)などの影響分析、名橋と言われる16橋の力学的な評価を通じて、アーチ橋の構造論的分類と評価を試みてきた。結論を簡単にまとめると、

- ① アーチ橋の系譜は形態的に見た場合、扁平化(S^2/H)と連続化(S^2/W)によって分類が可能で、そこからはアーチ扁平化の傾向と、5つの特徴的な地域・時代グループの存在が読み取れた。
- ② シミュレート計算により、扁平アーチでも単一橋であるか連続橋であるかによって技術上は大きな差があること、地盤条件も形状決定の一つの要因になり得たことが示された。
- ③ 現実のアーチ橋の数値解析を通じて、力学的な分類・評価にはすべりの危険性の指数 IS が適していること、そして、 IS はアーチの「連続化」に大きく左右されることが知られた。
- ④ 歴史的に著名な16のアーチ橋について、①~③をもとにして独自の視点での評価を行った。

のようになる。個々の詳しい分析や結論については、ページの都合上、各節を参照していただきたい。

これまでに示した分類や評価は、数値解析の限界もあって一面的であり、また対象としたアーチ橋も限られている。また、時代による変遷とその必然性がよく説明されているとは言えない。それには完成物としての個々の橋だけでなく、底流として流れる技術そのものの系譜にまで立ち至って検証する必要がある。ま

た、日本の石造アーチ橋は、世界の中では圧倒されてしまって目立たないが、それだけを取り出して系統化するだけの価値は十分にある。

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」となり得る数少ないテーマの一つであるのに、郷土史的な範疇を脱していない。今後は、橋梁の構造美について史的な考察を蓄積し体系化してゆくことが、是非とも必要なことだと思われる。

参考文献

- 1) 今井 宏：古代のローマ水道，原書房，1987
- 2) 太田静六編：九州のかたち眼鏡橋・西洋建築，西日本新聞社，1979
- 3) 太田静六：眼鏡橋—日本と西洋の古橋，理工図書，1980
- 4) 熊本大学環地中海遺跡調査団：地中海建築—調査と研究・I～III，日本学術振興会，1979
- 5) 来島 武・成瀬泰雄編：世界の橋，森北出版，1964
- 6) 小谷 明・粟津則雄：スペイン巡礼の旅，新潮社，1985
- 7) 武部健一：アーチは東漸したか，第9回日本土木史研究発表会論文集，pp.217-226，1989
- 8) 田中 淡：中国建築史の研究，弘文堂，1989
- 9) 丹下敏明：スペイン建築史・建築各国史1，相模選書，1979
- 10) 出口保夫：ロンドン・ブリッジ—聖なる橋の2000年，朝日イニングニュース社，1984
- 11) 砥用町：砥用町の石橋，1977
- 12) 中村作太郎：橋梁の歴史の変遷とその発達動向，関岳会，1979
- 13) 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
- 14) 二宮公紀・馬場俊介ら：歴史的石造アーチ橋の安全性評価に関する考察，第9回日本土木史研究発表会論文集，pp.209-216，1989
- 15) 藤原 武：ローマの道の物語，原書房，1985
- 16) 藤原 武：ローマの道—遍歴と散策，筑摩書房，1988
- 17) 山本 宏：橋梁美学，森北出版，1942
- 18) 山本 宏：アーチ橋—その発生と伝播，土木学会誌，1985
- 19) T.ジョー他（平田 寛監修）：図説 世界文化地理大百科／古代のローマ，朝倉書店，1985
- 20) H.シュタウ（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
- 21) C.シンカ他編（平田 寛・他訳編）：技術の歴史・2,4,6,8，筑摩書房，1979
- 22) A.アッハツ（神谷武夫訳）：イスラムの建築文化，原書房，1987
- 23) A.アッハツ（鈴木博之訳）：図集 世界の建築・上，下，鹿島出版会，1979
- 24) J.ニーム（東畑精一・藪内 清監修）：中国の科学と文明・10／土木工学，思索社，1979
- 25) F.ムンガット（杉本俊多訳）：西洋建築様式史・上，鹿島出版会，1983
- 26) G.ヒール（佐々木英也訳）：世界の建築・ローマ，美術出版社，1966
- 27) R.ベネー（武藤 章訳）：近代建築の歴史・上，鹿島出版会，1974
- 28) R.ベネー（佐野敬彦・林 寛治訳）：図説 都市の世界史・1～3，相模書房，1983
- 29) A.キド（田中 淡訳）：中国の建築と都市，鹿島出版会，1980
- 30) A.U.ホフ（石井 昭訳）：ベルシア建築，SD選書169，鹿島出版会，1981
- 31) R.マク（飯田喜四郎訳）：ゴシック建築の構造，鹿島出版会，1983
- 32) R.メインストン（山本学治・三上祐三訳）：構造とその形態—アーチから超高層まで，彰国社，1984
- 33) リッパ社・講談社インクナショナル編：世界の遺跡と名建築・10／技術の成果，講談社，1983
- 34) 中国建築工業出版社編（尾島俊雄監訳）：中国建築・名所案内，彰国社，1983
- 35) 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
- 36) 潘 洪宣（武部健一編訳）：中国名橋物語，技報堂出版，1987
- 37) D.Beckett: Bridges—Great Buildings of the World, Paul Hamlyn, 1969
- 38) H.Fugl-Meyer: Chinese Bridges, Kelly & Walsh, 1937
- 39) Y.Goepfert: Pont du Gard, Edition Aio
- 40) G.Grattesat: Ponts de France, Presses Ponts et Chaussées, 1982
- 41) H.J.Hopkins: A Span of Bridges—An Illustrated History, Praeger, 1970
- 42) R.D.Lama, V.S.Vutukuri: Handbook on Mechanical Properties of Rocks Vol II, Trans Tech Publ., 1978
- 43) F.Leonhardt: Bridges—Aesthetics and Design, Deutsche Verlags Anstalt, 1980
- 44) Ministère des Travaux Publics: Elargissement du Pont de la Concorde, 1930
- 45) G.Outerbridge, D.E.Outerbridge: Bridges, Harry N.Abrams, 1989
- 46) A.U.Pope: Persian Architecture, Thames and Hudson, 1965
- 47) T.Ruddock: Arch Bridges and Their Builders 1735-1835, Cambridge University Press, 1979
- 48) C.-L.Salch (ed.): L'Atlas des Villes et Villages Fortifiés en France (Moyen Age), Edition Publitotal Strasbourg, 1978
- 49) Structural Restoration of the «3 Archi» Bridge in Venice, Fondedile S.p.A., 1981
- 50) C.S.Whitney: Bridges Their Art—Science & Evolution, CROWN Publishers INC, 1983
- 51) H.Wittfoht: Building Bridges—History, Technology, Construction, Beton-Verlag, 1984
- 52) 茅 以升編：中國古橋技術史，北京出版社，1986