

石造アーチ橋固有の技術の構造論的評価

名古屋大学 正会員 馬場 俊介
安田火災海上保険 岩本 雅伸

Structural Evaluation of Characteristic Technics in Stone Arch Bridges

By Shunsuke BABA and Masanobu IWAMOTO

概 要

石造アーチ橋の構築技術の中から、地域性や時代性にあふれた固有技術として、①コーベルアーチ、②鉄楔付きアーチリブ、③せん断壁、④籠手型アーチ、⑤オープンスパンドレルの5点を取り上げ、これらの技術の必然性について有限要素解析に基づく構造論的な評価を行なう。討議の対象とした橋は、①～⑤の技術が構造上の要件として典型的な形で活かされたことで有名な石造アーチ橋で、それぞれ、①プラブトス橋、②安済橋、③放生橋、④サンタ・トリニタ橋、⑤ポンティブリッド橋である。これらの結果を用いれば、経験の集積としての技術の妥当性を今日的観点から評価することが可能となる。

[中世～近世・橋梁]

1. 序 論

石造アーチ橋は、数ある歴史的土木遺産の中でも、①世界中に普遍的に分布し、かつ、相当数が現存していること、②地域による形態や技術力の差がきわめて大きく、様式史的取扱いが可能であること、③スケール感とバランス感の共存が他の土木構造物にない「感動」を見る者に与える景観性構造物であること、など特異な構造体である。さらに、欧米や中国それにわが国においても史料の整理が最も進み、文化財への指定や保存への努力が最も払われている土木構造物でもある。例えば、石造アーチ橋の歴史だけを取り扱ったハインリッヒ (B. Heinrich) の著書⁸⁾をはじめ、フランス^{1), 2), 22), 27), 28)}、イギリス³⁰⁾、アイルランド²⁵⁾、アメリカ^{19), 26)}、オーストラリア¹⁵⁾、中国^{4), 5), 16), 23), 33)}、日本^{1), 2), 10), 11)}など国別の著書・資料集や、レオンハルト (F. Leonhardt²⁰⁾)、メインストーン (R. Mainstone⁹⁾)、小山田³⁾、山本¹³⁾の著書のように一部に石造アーチ橋を紹介したものは多い。しかし、最も概史的なハインリッヒの著書にせよ、最初から網羅性を諦めてごく少数の名橋にまつわる挿話に終始しているし、最も網羅的なプラード (M. Prade) の労作^{27), 28)}は、単一の土木構造物を対象とした最も完全な資料集という意味では価値が高いものの、体系化とか評価にまでは踏み込んでいない。

著者らは、世界や日本の土木遺産データベースを構築していく中で、改めて土木構造物の体系化や評価を行なう場合のキーワードは何かということを自問してきた。例えば発電所、これは外壁の意匠面での独創性が分類・評価を左右する。それに対して、例えば運河、こちらは閘門や給水の方式など技術面での優劣が分類・評価を左右する。その中で、石造アーチは、「巨大な空間を小さな石を円形に並べただけで架け渡してしまう」という技術的な側面と、「橋を印象付けるアーチ形、水制、側面装飾、高欄などの多様さ」という意匠的な側面とが、一対一で共存する特異な建造物である。加えて、先述したように、石橋アーチ橋には網

羅的なデータもそろっていることから、体系化の試行対象としては最も適している。こうした前提に立って、著者らは、石橋アーチ橋を対象とした構造論的な評価⁷⁾と意匠的な評価⁸⁾とを試みてきた。本論文は、両者の中では構造論的な範疇に入る。前報の技術的評価が、アーチの全体形、特に「扁平な連続アーチ」の技術的困難さを強調するものであったのに対し、本報はアーチ環以外の部分の技術的な役割に焦点を当てるものである。具体的には、①プラプツ橋（カンボジア）におけるコーベルアーチ、②安済橋（中国）における鉄楔付きアーチリブ、③放生橋（中国）におけるせん断壁、④サンタ・トリニタ橋（イタリア）における籠手型アーチ、⑤ポンティブリッド橋（イギリス）におけるオープンスパンドレルという5つの特徴的なアーチ技術を選び、それらの存在意義を構造論的に検証することによって、当時の技術、ひいては、その技術に応用した橋の分類・評価に反映させることをめざす。

2. 石造アーチ橋の技術的変遷と5つの技術

石造アーチ橋を技術的な面から体系化するにあたり一つの指標となるのは、「扁平化の技術力」に相当するスパンゲンベルク指数（ S^2/H 、 S ：スパン、 H ：ライズ）である⁷⁾。この指数を用いて、著者らは、石造アーチ橋の発展史を図-1に示すような5つのグループ（プラス、特異点としての安済橋）に分けて取り扱うことの有意さを指摘した⁷⁾。これらのグループは①厚肉半円の「ローマ期」②画期的な薄肉扁平アーチである安済橋、③芸術的配慮を重点に置いた「ルネサ

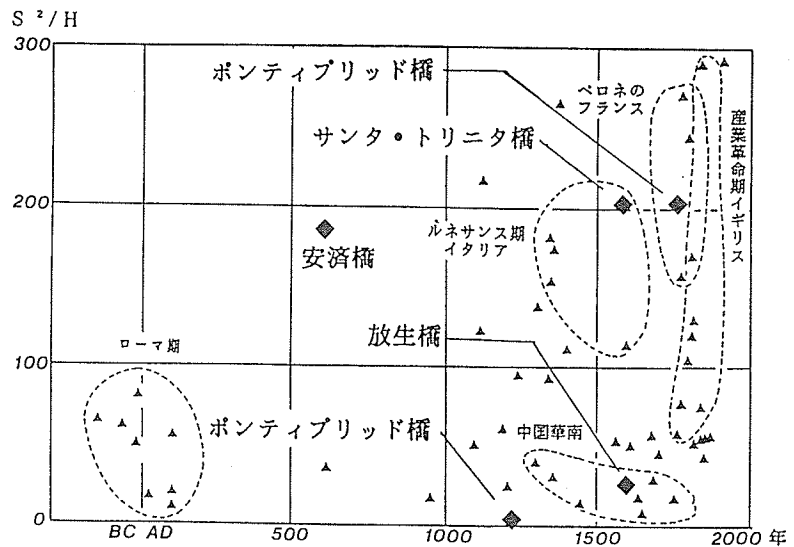


図-1 時代による S^2/H の変遷とグルーピング⁷⁾

ンス期イタリア」、④軟弱地盤用の超薄肉半円の「中国華南」、⑤技術的挑戦としての「ペロネのフランス」と⑥「産業革命期イギリス」である。そのうち、中国の2グループについては、②で「鉄楔付きアーチリブ」という技術、④で「せん断壁」という技術が使われていて、それが他では見られない特徴となっている。また、③のうち最も完成度が高いと言われるサンタ・トリニタ橋には「籠手型アーチ」が取り入れられているし、⑤の立役者であるペロネに扁平連続アーチを設計する勇気を与えたとされるポンティブリッド橋では、「オープンスパンドレル」が架橋成功の鍵となっている。このように、石造アーチ橋における技術的な飛躍や地域的な個性は、それを支えあるいは特徴付ける固有の技術が一对一に対応しているのである。

本論文は、これら固有の技術が構造上必然的・合理的なものであったかどうかを、定量的な指標を導入して検証しようとするものである。対象としては、既に述べた鉄楔付きアーチリブ、せん断壁、籠手型アーチ、オープンスパンドレルの4技術に加えて、アーチの原初的形式であるコーベルアーチの計5つの技術を選ぶ。

3. 構造論的評価法の概略

石造アーチ橋の技術的なレベルとしては、アーチ環の構築技術以外にも、架橋点の地形・地質、橋脚の有

無と洪水対策、石材の加工精度と積み方、施工管理技術などさまざまな要素が考えられるが、著者らは、当時の記録や詳細なデータの入手が困難という状況を考慮して、アーチ環だけを評価の対象とした⁷⁾。そこで提案された評価基準は、「アーチ環の迫石間にせん断すべりが生ずる確率」を表わす指標 IS (IS は $0 \sim 1$ の間の数値で、 1 に近いほどすべり破壊の危険性が高いことを示す) を用いたものであった。

指標 IS を求めるにあたり、対象構造物は12節点アイソパラメトリック平面要素(高精度2次元要素)を用いて有限要素メッシュに分割され、アーチ環の応力度(接触面の垂直応力 $\sigma_{(n)}$ とせん断応力 $\tau_{(n)}$) が計算される。そして、 $\tau_f = C + \sigma_{(n)} \tan \theta$ から算定される「面の摩擦抵抗力」と、 $\tau_{(n)}$ に相当する「面をすべらせようとする力」の比 ($\tau_{(n)} / \tau_f$) を、迫石の半径方向に沿った11等分点で計算する。各等分点のうち1ヶ所だけで「すべり破壊」と判定されても全体が破壊に至ることはないので、指標 IS としては断面内の平均値を用いる ($IS < 0$ または $IS > 1$ の場合は、 $IS = 1$ とする)⁷⁾。また、 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だが、安全側に考えてゼロとおく。 θ は石材の摩擦角である (33° とする)。技術評価には、各迫石間での IS 値のうち最大値を用いる。

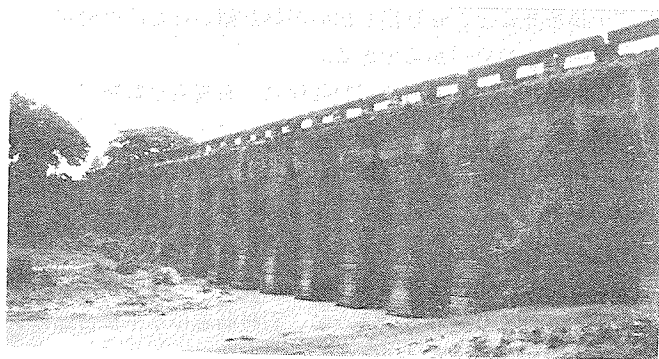
これらの解析には、微小変形・弾性の仮定が用いられている。現実の古いアーチ橋では、建造当初に半円形だったとは思えないほど変形した橋が壊れずに残っている場合もあり、微小変形の仮定が100%満足のいくものでないことは自認している。ただし、著者らの目的は既存の橋の技術レベルを判断することにあるのであって、橋の実施設計をしようというわけではない。それならば、アーチ環の迫石が最初にすべり始める時点をもって「技術的に失格」とみなしても差支えなからうと考え、線形解析を採用したのである⁷⁾。

指標 IS の値は、アーチ環の扁平さや基礎地盤の硬さ、連続橋の場合は橋脚の厚さによって大きく異なるパラメータである。前報では、「西洋近世の扁平連続アーチ橋が技術的に非常に高く評価される」などの結論を得るのに効力を発揮した。本論文でも、アーチ固有のいろいろな技術の評価するにあたり、 IS 値をそのまま踏襲して用いる。

4. プラプトス橋におけるコーベルアーチ

固有技術の数値的評価の最初の対象としては、アーチの最も原初的なスタイルであるコーベルアーチ(疑似アーチ、張出しアーチ)をとり上げる。コーベルアーチは真正アーチ誕生の前段階として、エジプトやギリシアなど環地中海地方で広く使われ、紀元前13世紀のミュケナイ(Mycenae)のアトレウス(Atreus)の宝庫で技術上の最高水準に到達する。この宝庫は、2次元アーチでなくて3次元ドームではあるが、直径14.6mという真正アーチでも千年以上も後になってようやく達成す

写真-1 プラプトス橋(737文化研究所提供)



る大スパンを、力学的により不安定なコーベルアーチで実現している。このような技術上の奇跡が可能となったのは、石材が比較的小さくてバランスが保たれ易く、高さが13.4mと鋭い尖頭形で推力が下方を向いている上、全体が地中に埋められていて天然のアーチを構成するなど、特殊要件が重なった結果であろう。それはさて置き、この宝庫は例外中の例外で、一般には(特に2次元アーチでは)、コーベルアーチの最大の欠点はスパンがせいぜい数mしかとれないということであり、それがために真性アーチに淘汰されていった。

コーベルアーチがスパンの点で真性アーチに劣るのは特に数値的裏付けはいらないと思うので、ここでは、

コーベルアーチの別の側面について考察を加える。すなわち、この後の5章～8章でとり上げる固有技術はいずれも地盤の柔らかさと関係していることから、本章ではコーベルアーチと軟質地盤との「相性」について検証を試みる。

(1) プラプトス橋の来歴

コーベルアーチが軟質地盤に対して「強いのか弱いのか」を数値的に検証するにあたり、実在のコーベルアーチ橋を解析の対象とする。ここでは、現存する同形橋の中で最大規模かつ保存状態も最良のものとして、コンボン・クデイ (Kompong Kdei) のプラプトス (Phra Phutthos) 橋を取り上げる。プラプトス橋は、12世紀末にアンコール (Angkor) 王朝ジャヤヴァルマン (Jayavarman) VII世によって建造された全長75m、橋脚数20以上の超弩級の大重量橋である。ところで、アンコール文明には真性アーチの橋も建築も一切存在しない。アンコール人がなぜ真性アーチを用いなかったかは定かではない。アンコール文化の源泉であるヒンズー・インドには独自の真性アーチ技術があるし、東の隣国であるベトナムには中国を通じてやはり真性アーチ技術が入っていたことを考えると不可思議としか言いようがない。今後の説明が待たれる。

(2) コーベルアーチの特徴¹⁴⁾

コーベルアーチは、石を少しずつせり出させていって天井なり橋なりを架けるという「誰もが思いつく技術」であって、そこには、真正アーチを生んだ「天才の発想」は必要としない。1個の石材や1本の木材を架け渡しただけの第一世代の梁の改良版にすぎない。その結果として、①長いスパンがとれず、②洪水時に水の抵抗が大きく流失する危険性が高く、③河川航行が妨げられ、④材料が多量に必要となる(重い)など欠点も多い。本節では、これら自明の欠陥以外に、「コーベルアーチは柔らかい地盤に弱いのか」という設問を投げかける。それは、崩壊したコーベルアーチ橋を見ると、せり出し部の石材が傾いたために滑落したケースが目立つからである。

数値計算に用いる石材の材料特性は、石灰石や花崗岩程度の硬質岩盤を想定して、弾性係数 $E_s = 5 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ 、ポワソン比 $\nu_s = 0.2$ 、単位体積重量 $w_s = 2.5 \text{ t/m}^3$ を用いる。

数値解析では、一次計算として、①10cm(橋脚高さの50分の1)の強制変位に対する全体の変形を求め、次いで、②一次計算での変形値を初期値とするようメッシュを再分割した上でIS値を求める、という二段階方式を採用する。また、10cmの強制変位が石材の内部変形で吸収されてしまわないように、石材同志の水平接合部にジョイント要素を挿入し、石材相互の自由なすべりを表現できるようにする。②の計算で用いた有限要素メッシュを図-2に示す(中央部の5連分のみ抽出、対称性からその2分の1を解析)。ジョイント部は、空隙に近いような挙動を示すため弾性係数 $E_j = 50 \text{ t/m}^2$ と極端に小さい値に設定する。

結果は、表-1に示す。沈下がない場合にはIS値(張出し部の水平石材相互のすべりが対象)はほぼゼロに近いのに対し、10cmという僅かな沈下に対してIS値は相当大きな

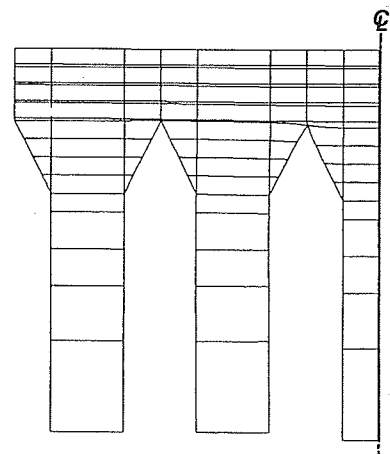


図-2 地盤沈下を起こした
プラプトス橋のメッシュ図

表-1 プラプトス橋の最大IS値

地盤の沈下量 δ (cm)	地盤沈下のない 場合のIS値	地盤沈下のある 場合のIS値
10	0.000	0.822

値を示す(0.822)。このことは、コーベルアーチが「橋脚の不同沈下による水平石材の傾斜に対してきわめて弱い」という欠陥を抱えていることを如実に示している。コーベルアーチは、真性アーチが発見された地域では真正アーチに取って替られていったが、それには、スパンの制約という原因以外に、不同沈下に対する弱さも一役買っていたらしいことが推察される。

5. 安済橋と鉄楔付きアーチリブ

2番目の固有技術としては、太樹鉄・楔鉄のように、鉄の楔で迫石同志を固結する技法を取り上げる。こうした技術は中国固有のもので、空石積みから出発したローマのアーチや、その継承者としてのヨーロッパのアーチには見られない。また、次章のせん断壁同様、中国のアーチ築造技術の多様さをアピールする技術でもある。わが国では、この技術が諫早眼鏡橋や秋月目鏡橋(推定¹²⁾)のように比較的扁平な石造アーチに使用されていて、九州の石造アーチが中国起源であることの証拠ともなっている¹³⁾。

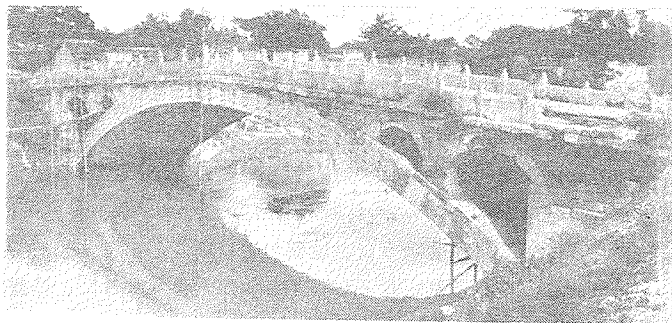
(1) 安済橋の来歴

中国で最も有名な橋は、世界最古の扁平アーチ橋としてつとに声名の高い安済橋である。この安済橋のアーチ環には全面的に鉄楔が使われていて、しかもそれが先駆的な形態(図-1参照)と驚異的な長命の原因の一端ともなっていることから、本節では安済橋を解析の対象に選ぶ。

安済橋についてはあまりにも多くの書物で言及されており、ここで敢えて蛇足を付け加えるつもりはない

が、基本的な要件だけは示しておく。安済橋は、中国北東部の石家荘(河北省)の東南50kmの趙県の郊外で洺河に架かる単径間のアーチ橋で、建造は610年前後、季春の作とされている。スパン37.0m、ライズ7.2mという超扁平アーチで、側面の大きな開口部のおかげでアーチ環がリブ化している(20世紀初頭の骨組アーチ的な構造)。

写真-2 安済橋³³⁾

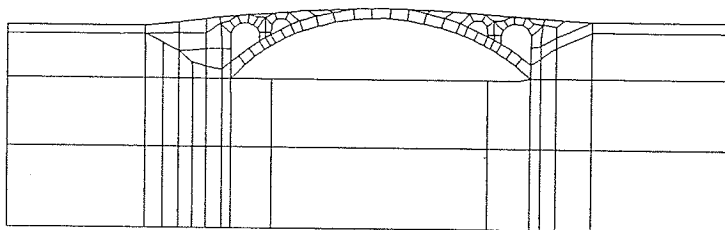


(2) 鉄楔付きアーチリブの効果

安済橋の最大の特徴はもちろんその扁平さにあるのだが、それを実現できた技術的なキーポイントは、各迫石間に2個ずつ挿入された腰鉄(鉄鉋鉤)と呼ばれる鉄楔の存在にある。すなわち、鉄楔は、迫石を相互に連結することにより、洪水時や地盤沈下に際してアーチ環を一本のリブとして一体的に挙動させる効果を有している。安済橋は、シルト系地盤の上に、杭などの基礎工なしで直接築かれていて⁴⁾地盤の影響を強く受けることが予想される。以下、鉄楔の有無によるせん断すべりの指標 I_S の変化を数値計算により求めることで、鉄楔の効果を数値的に評価する。

「鉄楔効果」の数値解析への導入方法としては、①新たに鉄楔型の要素を境界面に設定するという最も伝統的な方法以外に、②鉄楔の存在によるせん断抵抗の増加を I_S 値の算定に反映させる方法、③簡便法として、鉄楔の介在が一種の「鉄筋石」材料を生成していると考え、弾性係数 E_s を割増しする方法などが考えられる。ここでは、鉄楔のサイズ・材質などが不明なこと、鉄楔のせん断抵抗値が不明なことから、敢えて最も単純な③の仮定を用いる(鉄楔のある場合の弾性係数を、ない場合の20%増に設定する)。20%という割増率は、鉄楔と石材の弾性係数比4と断面積比0.05(推定)から概数として選んだ数値で、平均的にとらえれば石材が鉄楔の分だけ硬くなっているという状態を直感的に表現したものである。こうした方法は、 E_s

の割増率の選び方に問題が残り、しかも力学的にも正しくないなどウィークポイントも多い。それでも、鉄楔の存在が E_s を増加させる傾向にあることだけは確かなため、 IS の数値そのものの妥当性は別として、「鉄楔の効果の有無」程度なら十分に判定できると考える。



図－３ 安済橋のメッシュ図

表－２ 安済橋の最大 IS 値

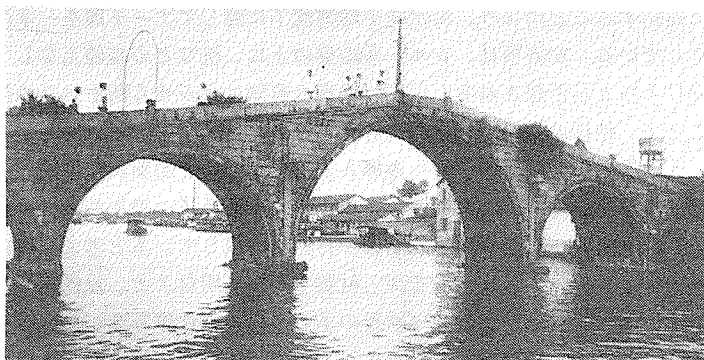
地盤の弾性係数 E_f (t/m^2)	鉄楔のある 場合の IS 値	鉄楔のない 場合の IS 値
5×10^4	0.333	0.318
0.9×10^4	<u>0.861</u>	0.879
0.5×10^4	<u>0.930</u>	0.963
0.4×10^4	<u>0.969</u>	0.973

使用する有限要素メッシュを図－３に示す。鉄楔の有無によって弾性係数を変える迫石部には、薄く陰影を付けて区別してある。安済橋は比較的柔らかい地盤上に築かれていることは知られているが、地盤の影響を定量的に調べることを目的に、地盤の硬さを軟質の岩盤（弾性係数： $E_f = 5 \times 10^4 t/m^2$ ）から礫混じり土（ $E_f = 0.4 \times 10^4 t/m^2$ ）まで変化させ、対応する IS の値を求める（ $\nu_f = 0.2$ ， $w_f = 2.0 t/m^3$ ）。

結果は、表－２に示すように、地盤の硬い場合には鉄楔の存在は不利となるが（ IS 値が大きくなる）、地盤が柔らかい場合には鉄楔の効果が現われてくる（波線部）。もっとも、 IS 値（せん断すべりが生ずる確率）の通減率は最大でも３％程度にすぎず、この程度では目立った改善とは言えない。ただ、先述したように弾性係数 E_s の割増しという仮定に立つ以上、これらの数値自体にはそれほど意味があるわけではないので、鉄楔の存在が軟質地盤に対して効果的という定性的な傾向が導かれただけでも結論としては十分かもしれない。

6. 放生橋とせん断壁

軟質地盤向けの代表的なアーチ築造技術は、華南（中国の南東部の長江デルタ地帯）グループを形成する超薄肉半円形の太鼓橋で頻繁に用いられているせん断壁（間壁）という技法である。この地方では、地盤の悪さを薄肉化（＝軽量化）で、運河通運の便を太鼓化（＝大クリアランス）で補うため、半円アーチの両端に垂直の１枚岩を挿入することによって、アーチ環の変形を押さえようとした。同じような低湿地でありながら、ヴェネツィアではせん断壁を使っていない。ただしその代償として、リアルト（Rialto）橋で見られるように、6000本にもものぼる密な群杭によって橋を支えなければならなかった。中国の場合は、軽量化のための薄

写真－３ 放生橋⁴⁾


肉構造と、それを可能にするためのせん断壁の導入によって、より経済的に解決しようとしたのである。

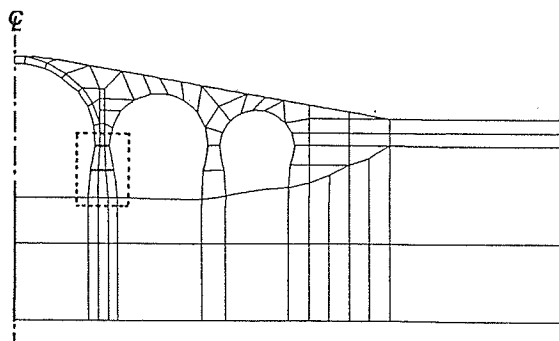
(1) 放生橋の来歴

長江デルタ地帯には、上海・蘇州という超薄肉アーチ橋の集中分布地域がある。上海では放生橋、七宝塘橋、蘇州では普濟橋、寛渡橋、呉門橋などの名橋が知られている¹⁴⁾。本節では、それらの中で放生橋(写真-3)を解析・評価の対象とする。放生橋は、全長70.8mの5孔の太鼓型アーチ橋(中央スパン14.7m)で、江南水郷地帯(上海郊外)でも最大級かつ典型的な超薄肉アーチ橋である。そしてその大きさにもかかわらず、橋脚部の幅は60cmにしかすぎない。初代の建造は16世紀末、僧・性潮によるものであるが、1814年に崩壊・再建され現在に至っている。

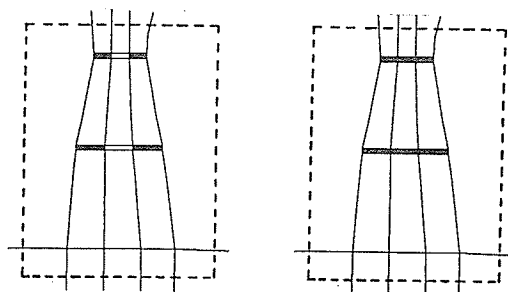
(2) せん断壁の効果

せん断壁は、写真-3(前ページ)でもはっきりと確認できるように、アーチ環の両脇を固定する垂直の壁である。長江デルタ地帯では、表層だけでなく下層土まで軟弱な地質のため、群杭を打つなどありきたりの基礎工事¹⁶⁾だけではとても対応しきれない。軟弱地盤の影響を少しでも減らすためには薄肉構造による軽量化が必須となるが、そうするとアーチ環に無理な力が働いて崩壊の原因になってしまう。それを回避するためには、「アーチ環を厚くせず、かつ動きを固定する」ことが求められる。せん断壁はこの難問を解決するユニークな発想であった²³⁾。

放生橋の有限要素メッシュを 図-4 (a) に示す。全体の要素数が多いためメッシュ分割が相当粗くなっているが、12節点の高精度要素を用いており、精度上の問題はあまりない(メッシュ数と応力誤差の関係は照合済み¹⁷⁾。ただし、地盤のメッシュは粗すぎるかもしれない)。また、放生橋は厳密には左右対称ではないが、本論文の目的がせん断壁の効果を求めることにあつたため、便宜的に対称性を仮定して2分の1の構造体の解析で済ませる。中央アーチの両側にはせん断壁に相当する形状の要素を設けているが、もちろんそのままではせん断壁の効果は数値解析に反映されない(弾性解析のため)。せん断壁の存在価値は、「壁がなければ中央アーチ環が水平移動するのを、垂直壁の抵抗によって



(a) 全体メッシュ図(右半分)



(b) せん断壁のある場合 (c) せん断壁のない場合

図-4 放生橋のメッシュ図

表-3 放生橋の最大 I S 値

地盤の弾性係数 E_r (t/m^2)	せん断壁のある 場合の I S 値	せん断壁のない 場合の I S 値
$5. \times 10^5$	0.543	0.308
0.5×10^5	<u>0.793</u>	0.829
0.3×10^5	<u>0.835</u>	0.913
0.05×10^5	<u>0.922</u>	1.000

止める」ことにある。そこで、せん断壁の周囲の石積み構造をより現実的にモデル化するため、ジョイント要素を（実橋の継ぎ目部に相当する部分に）挿入する。そして、図-4 (b) のように、せん断壁内のジョイント要素の材質を石材と同一にしたものを「せん断壁のある場合」、図-4 (c) のように、ジョイント要素の材質を石材の1/100に下げて ($E_j = 5 \times 10^4 \text{ t/m}^2$) せん断壁が分断されることを許容したものを「せん断壁のない場合」に相当すると考える。なお、図中の黒く塗った部分が、材質 1/100 ($E_j = E_s/100$) のジョイント要素（すべり面）である。

結果は表-3 に示す。地盤の堅さが岩盤に近い ($E_r = 5 \times 10^5 \text{ t/m}^2$) と せん断壁の存在は逆効果となるが、礫混り土程度に柔らかくなると効果が現われ、I S 値が10%程度低下する（波線部）。このことは、せん断壁が軟質地盤対策として有効な技術であることを数値的に裏付けている。

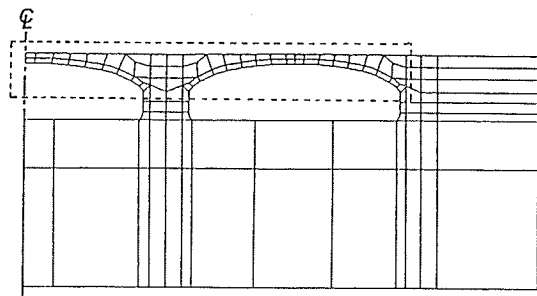
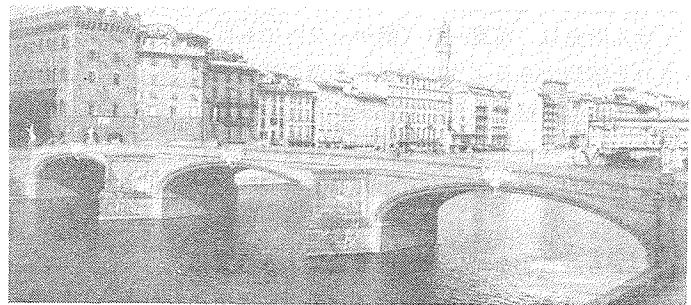
7. サンタ・トリニタ橋と籠手形アーチ

ルネサンス期を典型付けるアーチの技術は、籠手型アーチである。籠手型アーチ（半楕円アーチの変形）は、半径の異なる数個の欠円を組み合わせて作られたアーチで、多中心アーチとも呼ばれている。このアーチ形式が最初に適用された橋はフィレンツェのサンタ・トリニタ（Santa Trinita）橋であるが、従来の欠円アーチを排して敢えて新しい冒険に踏み切った動機は、橋全体としての調和の創出にあった⁸¹⁾。すなわち、橋梁史上初めて意匠デザインが構造設計に優先したのである。われわれが興味のある点は、この革命的なデザインが構造的にも優れたものであったか、構造上は無駄な飾りにすぎなかったかという点である。

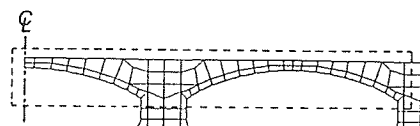
（1）サンタ・トリニタ橋の来歴

サンタ・トリニタ橋は、ルネサンスの中心地フィレンツェのアルノ（Arno）川に架かる3スパンの扁平籠手型アーチ橋であり、ルネサンス期イタリアを代表する石造アーチ橋として知られている^{81, 82, 84)}（写真-4）。中央スパンは32m、両側スパンは29mと若干中央部が長くなっているが、それぞれの6心円アーチを微妙に調整することで、3つのスパンが一体化した一つの構造物としての安定感と調和を生み出すことに成功している。また、半楕円アーチという形態からは、欠円アーチにはない優美さが醸し出されている⁸³⁾。この傑作アーチ橋の設計者は、芸術家と技術者双方の素養を持ったアンマナーティ（B. Ammannati）、完成は1569年のことであった。現在フィレンツェの第一級の観光名所であるヴェッキオ（Vecchio）橋がヨーロッパで初めて安済橋を超える扁平アーチ（ $H/S = 0.16$ ）として登場したのは1345年のことであり、その200年以上も後に下流に隣接

写真-4 サンタ・トリニタ橋⁸⁴⁾



(a) 籠手型アーチ



(b) 欠円アーチ

図-5 サンタ・トリニタ橋のメッシュ図

して造られることになったサンタ・トリニタ橋のデザインにあたって「ヴェッキオ橋を凌ぐ」ことが第一要件としてアンマナーティの頭に去来した⁹⁾。その結果生まれたものが、籠手型アーチであり、 $H/S=0.14$ というヴェッキオ橋を超える超扁平アーチであった。

(2) 籠手形アーチの評価

籠手型アーチの作り出す曲線は、両端（橋脚部）では垂直に近いが、中央部に近づくにつれて湾曲の度合が緩やかになっている。これにより、扁平欠円アーチの欠点である「アーチ環と橋脚との急角度での交差」を回避しつつ、スパンの割にライズの低い扁平アーチを構成することを可能にしている。すなわち、籠手型アーチは、単に形態上優美であるというだけでなく、橋脚部での力の流れが円滑化されることによって構造的にも優れた形式となっていることを示唆している。籠手型アーチの構造的な有利さを検証する目的で、サンタ・トリニタ橋（図-5 (a)）と、サンタ・トリニタ橋と同じライズ比をもった欠円アーチ橋（図-5 (b)）の2橋についてI S値を計算する。地盤については、岩盤に近い硬さ（ $E_f=5 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ ）から堅目の礫混り土（ $E_f=0.1 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ ）までを検討の対象とする。

結果は、表-4に示すように、想定した全範囲の地盤に対して、籠手型アーチのI S値の方が欠円アーチに比べて低い数値を示している（波線部）。籠手型アーチの方が欠円アーチよりも有利という結果は、力の流れのスムーズさという観点からは、籠手型アーチの構造特性として普遍的にとらえることもできるし、サンタ・トリニタ橋に限定して適用すれば、アンマナーティの選択が美観上のみならず構造的にも正しいものであったという評価に結び付けることができる。

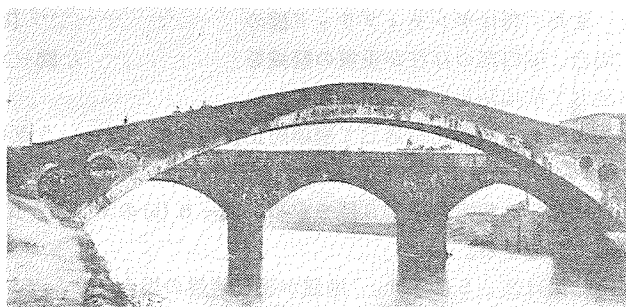
表-4 サンタ・トリニタ橋の最大I S値

地盤の弾性係数 E_f (t/m ²)	籠手型にした 場合のI S値	欠円にした 場合のI S値
$5. \times 10^6$	<u>0.478</u>	0.562
$1. \times 10^6$	<u>0.380</u>	0.546
0.5×10^6	<u>0.375</u>	0.548
0.1×10^6	<u>0.591</u>	1.000

8. ポンティブリッド橋とオープンスパンドレル

アーチ固有の技術の最後の例として、石造橋で広範に用いられているオープンスパンドレル（橋側面の開口部）の効果を検証する。一般的にオープンスパンドレルが採用される要件は、①軽量化（軟質地盤対策）、②通水機能（洪水対策）、③材料節約（資金対策）、④側面装飾（景観対策）の4点であるが、石造アーチ橋の構築技術に積極的に関与するのは①の軽量化である。ちなみに、②は巨大な橋脚（通水を妨げる）しか造れなかった中世～近世初期の連続アーチ橋にしばしば見られる自己防衛的な技術、③と④は19世紀末～20世紀初頭になってアーチの力学的機構が明確になるまでは実現できなかった鉄筋コンクリート構造向きの技術である（セメントが貴重品であった近代日本のアーチ橋では③の経済性が相当重視された）。

写真-5 ポンティブリッド橋³⁰⁾



(1) ポンティブリッド橋の来歴

ポンティブリッド (Pontypridd) 橋は、ウェールズ地方の同名の村を流れるタフ（

Taff) 川に架けられている単径間アーチ橋である。スパン42.4m、ライズ10.6mというサイズは、石造アーチ橋の天才ペロネ (R. Perronet) をして、一目置かせたほどの革命的な長大・扁平アーチであった (写真-5)。建造技師は地元の石工エドワーズ (W. Edwards) で、3度の失敗の後4度目の (3度目という説^{18, 21)} もある) 挑戦でようやく永久橋を作り上げるのに成功した (1756年) という大変な来歴を持っている。

エドワーズの架けた最初の橋は3スパン (2, 4スパンとの説も^{24, 30, 35)}) の連続アーチ橋で、1746年に完成した。ただ、優秀な石工であっても橋梁技師でないエドワーズは、堅固な橋脚の基礎を構築する術を知らなかったため¹⁸⁾、2年後の洪水であっけなく流されてしまう。エドワーズの次なる挑戦は、洪水の心配がいないという理由と、経済的な要求もあって橋脚のない1スパンの橋となった (その代り誰もが経験したことのない長スパンの橋に挑まねばならなくなった)。2代目の橋は、その形態だけでなく存在そのものについても不詳な点が多い。3代目の橋は、ソリッドアーチであったこと以外は現橋と同型であったらしい。この橋は1754年に完成し、その6週間後に要石の部分から崩壊したと伝えられている (同年11月7日)。

現在の橋 (4代目) は、先代の橋のスパンドレル部に、左右3ヶ所ずつ、直径9ft (2.7m) と6ftと4ftの円形の開口部を設けたデザインとなっている (当初は各4穴であったと指摘されている³¹⁾)。設計変更にあたっては、図面の比較研究²⁹⁾ からスミートン (J. Smeaton) の関与が論議されているが^{30, 31)}、否定的な意見も多い。開口部の存在は、ポンティブリッド橋の力線を理想的な懸垂線に近づける上で効果があったとも指摘されているが³⁰⁾、力学的な検証が行なわれたわけではない。

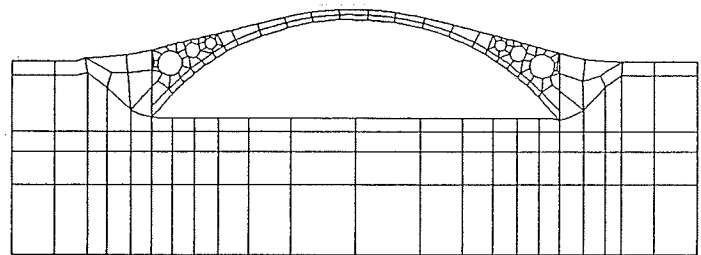
(2) オープンスパンドレルの効果

同型の2つの橋があって1つは開口部がなく破壊し、1つは開口部があって200年以上保っているとあれば、開口部の存在が成功の鍵であったことは間違いない。そこで、ポンティブリッド橋と、同橋の開口部を埋めてソリッドアーチ化した橋 (模擬的に3代目の橋を表す) の双方について、地盤部を含め図-6 (a), (b) のような有限要素メッシュ分割を行ない、IS値を計算する。地盤については、石材と同質の硬い岩盤 ($E_r = 5 \times 10^8 \text{ t/m}^2$) からやや軟質の岩盤 ($E_r = 0.125 \times 10^8 \text{ t/m}^2$) までを検討の対象とする。

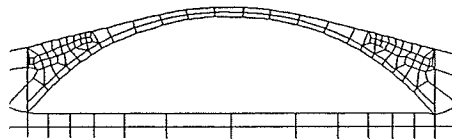
また、特にポンティブリッド橋の場合、開口部の存在が重量の軽減を通じて崩壊防止につながったのか、

力の流れの円滑化を通じて崩壊防止につながったという点も、非常に興味ある問題である。そこで、図-6 (b) のメッシュで開口部に相当する部分 (近似的) の単位体積重量をゼロに近い値 (0.1 t/m^3) にした仮想的な構造物を想定してIS値を求め、図-6 (b) のIS値と比較することによって、重量軽減効果だけを分離して評価する。

結果は表-5に示す。地盤が硬質岩盤の場合 ($E_r = 5 \times 10^8 \text{ t/m}^2$) には、開口部の有無によるIS値の相違は見られないが、岩質が軟化するにつれて開口部の効果が現われ (波線部)、開口部のある方が、すべり



(a) 開口部のある場合



(b) 開口部を埋めた場合 (アーチ部のみ抽出)

図-6 ポンティブリッド橋のメッシュ図

破壊の危険が3分の4程度に軽減される。また、開口部がなくても、重量が軽減されれば、開口部のある場合に近い効果が得られる。これらの結果は、ボンティブリッド橋において開口部の存在がいかに大切であったかを、そして、開口部の効果はもっぱら重量の軽減によるものであったことを示している。

表-5 ボンティブリッド橋の最大IS値

地盤の弾性係数 E_r (t/m^2)	開口部のある 場合のIS値	開口部のない 場合のIS値	開口部に相当 する重量軽減 が行なわれた 場合のIS値
$5. \times 10^6$	0.224	0.229	
0.5×10^6	<u>0.338</u>	0.423	
0.25×10^6	<u>0.621</u>	0.850	<u>0.670</u>
0.125×10^6	<u>0.916</u>	1.000	<u>0.991</u>

9. 結 論

石造アーチ橋の個別技術の中から5種類を取り上げて、著者らの提案してきた指標ISを用いて技術度の評価を行ない、以下の結論(1)～(5)を得た。

(1) アーチの原初的スタイルであるコーベルアーチは、下記(2)～(5)の技術とは逆に、軟質地盤に対して非常に弱い「欠陥」技術である。堅固な地盤の上に建てられたブラブス橋は、今も頑健さを誇示しているが、若干の地盤沈下があれば、急速に弱体化して水平石材が滑落するに至る可能性もある。そういう意味で、コーベルアーチから真正アーチへの移行は、史的事実であると同時に技術的必然であったと解釈できる。

(2) 鉄楔付きアーチリブは、無筋コンクリートを鉄筋コンクリート化するように、アーチ環を補強するという効果を通じて、軟質地盤上のアーチ橋の安全性向上に貢献している。特に安済橋の場合は、時代にはるかに先行した扁平アーチを実現し得た背景に鉄楔の存在があることを確認できた。

(3) せん断壁はアーチ環の変形の拘束を通じて、軟質地盤上のアーチ橋の安全性向上に貢献している。江南の薄肉アーチ橋群は、軟質地盤をクリアするための優れた構造であるが、それを実現するためにせん断壁は不可欠のものであることが数量的に裏付けられた。

(4) 籠手型アーチは、アーチ環と橋脚との滑らかな接合を通じて、扁平アーチ内部の力の流れをスムーズにすることに貢献している。特にサンタ・トリニタ橋の場合は、アンマナーティによる籠手型アーチの採用は、美観上の配慮と構造上の有利さを兼ね備えた見事な決断であった。

(5) オープンスパンドレルは重量の軽減を通じて、軟質地盤上のアーチ橋の安全性向上に貢献している。特に、ボンティブリッド橋の場合は、オープンスパンドレルの存在が、橋の崩壊か否かを分けるほどのクリティカルな条件であったという史実を検証できた。

これらの技術は、経験主義的に発達してきたものであるが、コーベルアーチについては技術として淘汰されていったことへの技術的根拠が得られ、後四者についてはそれらの存在意義が力学的に裏付けられた。これらの結論は、石造アーチ橋の技術史論的な評価を行なうに際して、一定の指針を与えるものである。

参 考 文 献

〈和書／翻訳本を含む〉

- 1) 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
- 2) 太田静六: 『眼鏡橋—日本と西洋の古橋』, 理工図書, 1980
- 3) 小山田了三: 『橋』, ものと人間の文化史66, 法政大学出版局, 1991
- 4) 武部健一, 編訳: 『中国名橋物語』, 技報堂出版, 1987
- 5) J. ニーダム (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

- 6) B.ハイリット(宮本裕・小林英信.訳):『橋の文化史—桁からアーチへ』, 鹿島出版会, 1991
- 7) 馬場俊介・二宮公紀ら:『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, 10, 1990
- 8) 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, 11, 1991
- 9) R.マイスト(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
- 10) 山口祐造:『九州の石橋をたずねて1~3』, 昭和堂,
- 11) 山口祐造・戸井田道三:『日本の石橋』, 平凡社カ-新書88, 平凡社, 1978
- 12) 山口祐造:『秋月目鏡橋物語』, 秋月郷土館, 1979
- 13) 山本 宏:『橋の歴史—紀元1300年ごろまで』, 森北出版, 1991

<洋書/中国語を含む>

- 14) S.Baba: "A Summary Report on a Civil Engineering Survey of the Angkor Monuments", Conservation of the Angkor Monuments, 6, Inst. of Asian Cultures, Sophia University, 1992
- 15) C.O'Connor: "Spanning Two Centuries—Historic Bridges of Australia", Univ.of Queensland Press, 1985
- 16) H.Fügl-Meyer: "Chinese Bridges", Kelly & Walsh, 1937
- 17) G.Grattasat: "Ponts de France", Presses Ponts et Chaussées, 1982
- 18) S.B.Hamilton: "Pontytyprydd—Notes on the Technical Significance of a Remarkable Bridge", Trans.Newcomen Society, 24, 1945
- 19) D.C.Jackson: "Great American Bridges and Dams", ASCE, 1988
- 20) F.Leonhardt: "Bridges—Aesthetics and Design", Deutsche Verlags Anstalt, 1980
- 21) B.H.Malkin: "The Scenery Antiquities and Biograph of South Wales", 1804
- 22) J.Mesqui: "Le Pont en France—Avant le Temps des Ingenieurs", Picard, 1986
- 23) H.F.Meyer: "Chinese Bridge", Kelly and Walsh, 1937
- 24) T.Morgan: "A Remarkable Bridge at Pontytypridd in Glamorganshire", Gentleman's Magazine, 1764
- 25) P.O'Keeffe, T.Simington: "Irish Stone Bridges—History and Heritage", Irish Academic Press
- 26) D.Plowden: "Bridges—The Spans of North America", ASCE, 1984
- 27) M.Prade: "Les Ponts—Monuments Historiques", Brissaud, 1988
- 28) M.Prade: "Ponts & Viaducs au XIX^e siecle—Techniques Nouvelles et Grandes Realisations Francaises", Brissaud, 1988
- 29) E.C.Ruddock: "William Edwards's bridge at Pontypridd", Industrial Archaeology, 11, 1974
- 30) T.Ruddock: "Arch Bridges and Their Builders 1735-1835", Cambridge University Press, 1979
- 31) T.M.Smith: "Account of the Pont-y-Ty-Pridd", Minutes of Proc.ICE, 5, 1846
- 32) D.B.Steinman, S.R.Watson: "Bridges and Their Builders", Dover Publication Inc, 1957
- 33) 唐寶澄: "中国古代橋梁", 文物出版社, 1957
- 34) C.S.Whitney: "Bridges—Their Art, Science and Evolution", Crown House, 1983
- 35) E.I.Williams: "Pont-y-ty-pridd—A Critical Examination of its History", Trans.Newcomen Soc., 24, 1945