

I-1 アーチの力学的美観について

(株)北日本ソイル研究所 正員 中村作太郎

1. まえがき^{1) ~ 3)}

土木構造物の中で、石造アーチの築造は人類の文化史の源となっており、古代人達がこの建造に
いかに心血を注いだかが想像出来、人間味豊かなロマンを懐しく想い出せるのである。

紀元前3000年の昔、すでにバビロンのチグリス河およびユーフラト河に尖頭石造アーチが沢山架
けられたといわれている。またフランスのニームに架けられたガールの水道橋は、構造上奇巧に富
んだ二重アーチの珍しい橋で、歴史的に有名である。

これらのアーチは、それぞれ独特の力学的美観を示しており、古代人達といえども、いかに優れ
た美感覚を有していたかが判断出来るのである。ローマのテベレ河に架けられた石造アーチには、
ロトー、セステウス、ファブリチオ等があり、いずれも発祥地特有の景観力学的美観を誇っている。

また中世、文芸復興時代のアーチには、フランスのアビニヨンの橋、スペインのサンマルチン、
アルカンタラ等の橋、イタリアのベツキヨ、リアルト、聖トリニタ等の橋があり、古代の石造アー
チとしての美のほか、装飾美が追加されている。

中国の古代、中世の石造アーチには、景観力学的美の高揚される橋が多く、江蘇省の呉県にある
楓橋、北京郊外の万寿山昆明湖の辺りに架けられた駝背橋、四川省万県にある万州橋等は、ヨーロ
ツパのものとは一種異なつた東洋的素朴さと中国味豊かな環境調和美を有している。

また中国では、最近新しく開発された鉄筋コンクリートランガーの昌吉河橋や逆ローゼ系の鉄筋
コンクリートアーチの湘江大橋等が注目の的となっており、フランスのカステルモロン橋やアメリ
カのインテルシテイ橋のスマートな鉄筋コンクリートアーチ美とは対照的である。

我国における石造アーチは、九州と沖縄の合計600橋と本州、北海道、四国の合計約30橋とみられ
、その中で北海道、東北には数橋あるに過ぎない。しかも北海道、東北の石造アーチは、架設時期
がかなり遅く、大正の末期から昭和の初めのものが大部分である。北海道に架けられた石造アーチ
としては、札幌の植物園にある幽庭橋が唯一のもので、明治20年代の木橋が改築されたのである。

また、石造アーチの延長としてスパンを延ばした両端固定の鉄筋コンクリートアーチの築造は、
きわめて少なく、我国においては数橋程度である。その中で、珍しくも昭和6年(1931)に建造され
た大泉橋は、山形県鶴岡市の内川にその景観美豊かな勇姿を映し出している。

近代に入り、外的不静定アーチは不等沈下に弱いという理由で、タイドアーチ、ランガー桁、ロ
ーゼ桁、フイーレンデル桁等に発達し、それらの大部分は鋼橋として世界各国に架設されるよう
になつた。著者は、最近ローゼ桁、逆ローゼ桁につき、光弾性実験により力学的美観評価を行なつ
たので、それについても掲載する。

2. 古代石造アーチの美観^{3) ~ 5)}

古代の石造アーチは、周知のとおり紀元前数千年以前より架けられ、原始民族の古代文化史の貴
重な形見として、いまなお残っているものが多い。この安定性のある力学的美観は、圧縮力のみに
よつてバランスがとられ、更にその国々の環境にマッチした独特のロマンを内に秘めている。ロー
マを初めとするヨーロツパの石造アーチは、スマートな華麗さに映えて実に美しいが、東南アジア
や日本の石造アーチは、素朴な天然美に満ちている。これに対し、同じ東洋でも大国の中国となる
、その形、景観とも中国一流の伝統ある芸術美観を誇示している。我国に架けられた石造アーチは
、ポルトガルやオランダよりの直接の技術輸入ではなく、中国におけるアーチ技術の影響、中近東
のアーチ技術の影響をも受けていると思うが、装飾的美観はあまり見られないようである。

3. 中世以後の鉄筋コンクリートアーチの美観 1)～3), 5)

古代石造アーチの延長として、スパンの増大を目的とする鉄筋コンクリートアーチは、支承部の基礎構造の不等沈下の影響等が懸念されて、堅い地盤にしか用いられなかつたのは当然のことである。1900年にフランス人のHennebiqueがフランスのVienn河上に、径間50m3連の固定アーチのCha-ttelleraulf橋を架設したが、その直後1904年にドイツのClisar河に径間72.25m2連の3ヒンジ開側アーチのGrünwald橋が架設され、鉄筋コンクリートアーチでは最長となつた。しかし、その4年後の1908年に径間79mの陸橋のGmündertober橋がスイスに架けられ、その記録は1910年にニュージーランドのAucklandに架けられた径間97.54mの3ヒンジ開側アーチGrafton橋によつて破られた。しかしその翌年の1911年には、イタリアのTibre河上に架けられた径間100mのRome橋によつてその記録は更新された。その後12年間に渡り世界最長支間記録が保持された。その後1923年に至り、アメリカのMississippi河上に径間121.92mの開側固定アーチのMinneapolis橋が架けられ、最長径間の世界記録はアメリカに移つたが、同じ年にフランスのSeine河に支間131.8mの下路式固定アーチであるSt-Pierre-du-Vaurray橋が架設され、最長径間の起録は再び欧州に移つた。その5年後の1928年にはフランスのCrusilles付近に支間139.8mのCaille橋、1930年には支間186.4mのPlougatel橋が架設された。また1940年に至り、スペインに支間210mのEsla橋が架設され、更に1943年にはスウェーデンに支間264mという驚異の記録のSandö橋が架設された。

これらの鉄筋コンクリートアーチ橋の美観は、スパンの増大につれ、周辺の地形環境に左右されるから、景観力学的評価が中心になつて来ると思われる。径間が増大すればするほど、普通型のアーチでなく、逆ランガー、逆ローゼ系の連続形式になるものと考えられる。その最もよい例として、中国において最近架けられたヤルツアンボ江の崗嘎大橋、四川省の岷江大橋等であろう。また、我国において架けられた逆ローゼ系の鉄筋コンクリートアーチ橋には、富山県の想出橋(1967)があり、その景観美の素晴らしいのには感心させられる。海外における逆ランガー、逆ローゼ系の鉄筋コンクリートアーチ橋には、オーストラリア、シドニーのグレイデスビル橋(1964)、スイスのバルチール橋(1925)、ポルトガルのアラビダ橋(1963)等あり、いずれもその景観力学的美観に魅了させられる。

4. 近世以後の鋼アーチの長大化とその美観 1)～3)

近世以後における鋼アーチ橋のスパン増大傾向は、人類の夢を達成する上からも当然のことであるが、古代石造アーチの継続、延長として、鉄筋コンクリートアーチより鋼アーチへと変遷しつつあるのは、きわめて貴重なことである。また、その美観についても構造材料の違いにより、歴史を尊重したロマンチックなものから、科学技術を主流とした構造美観のものへと変つて来つつある。近代における鋼アーチ橋の架設状況は、近代吊橋、斜張橋よりは古く、ゲルバートラス橋よりは新しいようである。現在架設されている鋼アーチ橋の最大スパンは518mで、その橋はアメリカのチャールストンに1976年に架けられたGorge橋である。深い谷間に架けられた山岳地帯の逆補剛アーチで、静寂な中に飾り気のない天然美を感じさせられる。世界における鋼アーチ橋の長大スパンの順位5位までの平均スパン長は、現在444mであり、斜張橋よりも上回っている。その力学的美観も、古代や中世のアーチとは異なり、景観力学的立体美を主流として評価されるようになりつつある。

アメリカには、チャールストンのゴージ橋のほか、パイオン、ビルヘンオウフ、メルシイー、ナイヤガラ、ヘルゲート、レンボー、サガモア、フオートピッツ等の諸橋があり、それぞれ独特の現代的技術美観を誇示している。また、オーストラリアのシドニー・ハーバー橋の景観力学的美の秀でていることは定評どおりであり、西ドイツのフエーマンズント、モノレール、リンデン

ベーク、デュイスブルグ・ラインハウゼン等の諸橋は、ドイツ特有の技術的力線美を示している。

そのほか、力学的美観上定評のある海外の鋼アーチ橋には、オランダのウエスト橋、スウェーデンのアスケロフヨルト橋、パナマのアメリカス橋、フランスのヌイー橋、イギリスのマーシイ河橋、ハンガリーのマーガレット橋、デンマークのメン橋、ポルトガルのドン・ルイス橋、イランのアフワーズ橋、フィンランドのロパニエミのランガー桁橋、ブラジルのコレゴ・ダス・アルマス谷の道路橋、カナダのポートマン橋等があり、またアルミニウム合金橋として著名なものに、構造上優美なアルビダのアーチ橋がある。

我国において架設された、構造美観上優れた鋼アーチ橋には、西海橋、熊ヶ根橋、海尻橋、尾鈴橋、大矢野橋、内大臣橋、榎木沢橋、新三田大橋、戸崎橋、三井橋、前思橋、松島橋、安治川橋、千歳橋、住吉橋、大三島橋、天草5号橋、藻川水管橋、楠木沢水路橋、和田橋等がある。しかし、その中で、特に優秀な美的作品はきわめて少ない。今後は、景観力学的美の優れた長大スパンの鋼アーチ橋の出現を心から期待するものである。

5. 古代から現代に至るまでの力学的美観上優れたアーチ橋（写真図）1）～ 5）

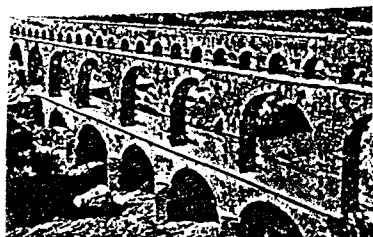


Fig. 1 フランスのニームに架けたガールの水道橋(古代)

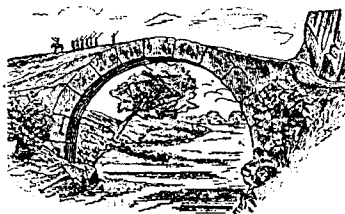


Fig. 2 中国の石積みによる古代アーチ橋



Fig. 3 中国の北京郊外万寿山の大理石アーチ橋

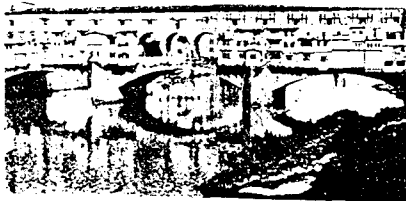


Fig. 4 イタリアのフィレンツェにあるベツキヨ橋(1345)

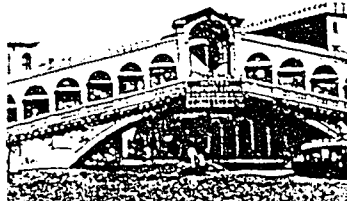


Fig. 5 イタリアのリアルト橋(1591)



Fig. 6 我国、長崎の眼鏡橋(1634,1649)

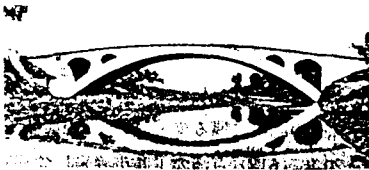


Fig. 7 中国に架けられた中世アーチの湘州橋



Fig. 8 ポルトガルの鉄筋コンクリートアーチのアラビダ橋(1963)

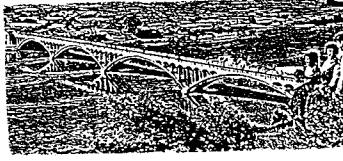


Fig. 9 オーストラリア、シドニーの鉄筋コンクリートアーチのグレイデスビル橋(1964)

Fig. 1～Fig. 11およびFig. 18は、古代から現代に至るまでの世界各国に架けられた石造、コンクリート、鉄筋コンクリートのアーチ橋である。その美観は、構造材料により素朴でロマンチックなものより、科学技術的なものへと移つて来つつあるが、今後とも人類の夢とロマンは貴重な存在である。



Fig. 10 我国，富山県の想影橋 (1967, R.C)



チベット「世界の屋根」の橋
Fig. 11 中国，ヤルツアンボ江の崗嘎大橋 (1970, R.C)



Fig. 12 アメリカ，チャールストンのNew River Gorge橋 (1977, 鋼アーチ)

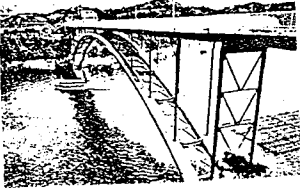


Fig. 13 我国，天草の松島橋 (1966, パイプアーチ)

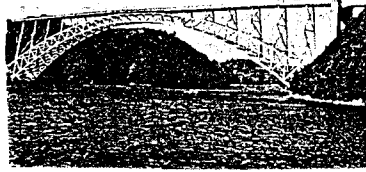


Fig. 14 我国，長崎県の西海橋 (1955, 鋼固定アーチ)

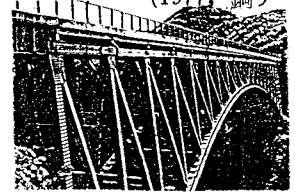


Fig. 15 我国，作並温泉付近の熊ヶ根橋 (1953)

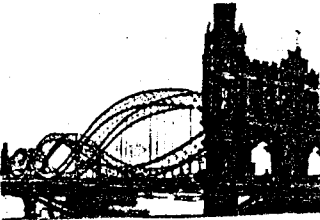


Fig. 16 西ドイツ，ハンブルグのエルベ橋 (鋼二重アーチ, 1870)

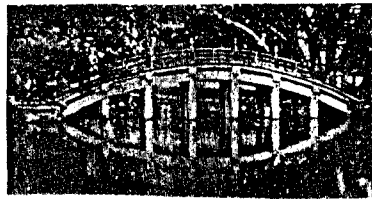


Fig. 17 我国の代表的太鼓橋 (木造、石造、近世)



Fig. 18 我国，山形県鶴岡市の大泉橋 (1931, R.C)

Fig. 12 はアメリカ，チャールストンに1977年に架けられた世界最大のアーチスパンを有するNew River Gorge 橋であり、逆補剛鋼アーチである。また、Fig. 13～Fig. 16 は我国および西ドイツの鋼アーチ橋中で、力学的美観上優れたものをピックアップしてみた。Fig. 17 は我国に多い美観用の太鼓橋で、公園，神社境内等に架けられる。Fig. 18 は我国の東北地方に1931年に築造された両端固定の鉄筋コンクリートアーチ橋で、きわめて珍しいケースと思つている。この橋の前身は三径間の石造りアーチと記録されているから、科学技術の発達により、現在の鉄筋コンクリートアーチへ前進したものといえる。

6. 光弾性実験によるアーチの力学的美観評価 6)～8)

アーチの力学的美観評価に光弾性実験を利用することは、きわめて効果的であると考えられる。元来、アーチ構造物は非常に安定性がよく、力学のバランスがとれているから、光弾性実験によれば、光速の速さで応力分布を捕えることが出来、大変都合がよい。また、等応力線図を画く前の段階の等色線縞写真を読む練習をすれば、アーチの応力分布の様相を速断し、目で見て美観評価することも可能である。古代から発達したアーチ構造物の美観評価に、理工学の先端を行く光弾性実験を用いることは、大変有意義であり、人類の夢とロマンを追求する今後の研究に期待するものである。

著者は、先に基本的ローゼ桁と逆ローゼ桁につき、光弾性実験解析を行なつたので、その成果を利用して、応力分布のバランスと力学の経済性の両面より、その美観評価を試みたからここに発表する。

Fig. 19 は基本的ローゼ桁の光弾性実験モデルの寸法図であり、Fig. 20 はその等色線縞写真である。また、Fig. 21 は三径間連続桁式逆ローゼ桁の光弾性実験モデルの寸法図であり、Fig. 22 はその等色線縞写真である。

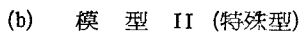
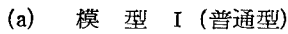


Fig. 19 基本的ローゼ柎の光弾性模型I, IIの一般寸法図 (模型I: 普通型, 模型II: 特殊型)

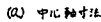


Fig. 21 三径間連続桁式逆ローゼ橋の
光弾性模型I, II, IIIの一般寸
法図

基本的ローゼ桁においては、Fig. 19, 20より、
 模型II (特殊型) の優れていることを確認出来たし、
 、連続桁式逆ローゼにおいては、Fig. 21, 22より、
 模型Iの優れていることを確認出来た。

なお、基本的ローゼ桁，連続桁式逆ローゼとも、応力のバランスと力学的経済性の優れたものが、

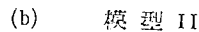
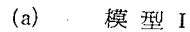


Fig. 20 基本的ローゼ析模型 (模型I, II)
の光弾性等色線縞写真



Fig. 22 三径間連続桁式逆ローゼ橋 模型(I, II, III)の光弾性等色線縞写真

その力学的美観の面においても、秀でていることと思われる。このことは、Fig. 20, 22の光弾性等色線縞写真をつぶさに観察することにより、直に判断出来るのである。

美観の面からみても、基本的ローゼ、逆ローゼとも、上弦材よりも下弦材の断面の大きい方が力学安定性に優れ、視覚神経を満足させてくれる。基本的ローゼ桁の場合は、模型IIのタイプを力学的美の極致と考え、著者はランガー系キャンバー式ローゼ桁と名づけた。また、最近逆ローゼ系の補剛アーチが盛んに架けられるようになって来たのは、景観力学的美の重要さに注目するようになって来たためと思う。今後ますますアーチの美観研究に、光弾性実験およびその解析を応用されることを待望するものである。

7. あとがき ^{3), 8), 9)}

アーチの構造美には、古代アーチに見られるような圧縮応力場のメーソンリーアーチの美と近代的な曲げモーメント場のアーチに見られるような美とに分けることが出来よう。古代アーチの美は、人類の生活文化史と繋がり、人間味豊かなロマンテックな美観として、昔から高く評価されており、近代的アーチの美は、新しい科学技術美として発達しつつあり、特に力学的美観としての今後の研究に期待するものである。なお、著者の試みたような光弾性実験によるアーチの美観研究は、夢とロマンを科学的に追求するものとして、ますます進展せしめたいものである。

また、最近海外や我国において、逆ローゼ系の補剛アーチが盛んに架けられるようになりつつあるのは、スパンの増大につれて、景観力学的配慮が行なわれるようになって来たからであろう。特に、中国においては、鉄筋コンクリートアーチ橋の新しいタイプが次々に架設され、注目を集めている。アメリカのチャールストントンの山間道路に架けられたゴージ橋は、世界最大スパンの鋼アーチとして、緑多い山間の環境に良く調和している。

8. 謝 辞

本研究論文を取りまとめるに当り、下記参考文献に負うところきわめて大きく、各文献の著者に対し、心から謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 中村作太郎： 橋梁の歴史的変遷とその発達動向， 室蘭工業大学退官記念誌， 蘭岳会， 1 (1979)。
- 2) 中村作太郎： 橋梁の力学的美観論， 専修大学北海道短期大学紀要， 第14号， 20 (1981)。
- 3) 中村作太郎： 歴史的に見たアーチの美観論， 土木学会第43回年次学術講演会， 講演概要集I-225， 504 (1988)。
- 4) 太田静六： 眼鏡橋—日本と西洋の古橋—， 理工図書， 1 (1980)。
- 5) 茅以昇： 中国の古い橋と新しい橋—趙州橋から南京長江大橋まで—， 外文出版社， 1 (北京， 1976)。
- 6) 中村作太郎， 番匠勲， 志村政雄： ローゼ桁橋の応力分布に関する光弾性模型実験について， 室蘭工業大学研究報告， 第3巻第4号， 101 (1961)。
- 7) 中村作太郎， 志村政雄： 3径間連続桁式逆ローゼ橋の最適弦材分配率に関する基礎的研究 (第2報)， 室蘭工業大学研究報告， 第8巻第1号， 147 (1973)。
- 8) 中村作太郎： アーチの光弾性美観論， 日本光弾性学会第10回研究発表講演会， 講演論文集， No. 10， 27 (1988)。
- 9) 中村作太郎： 橋梁美観に関する力学的評価と心理力学的考察， 土木学会北海道支部昭和56年度研究発表会， 論文報告集 第38号， 97 (1982)。