

近・現代の中国における石アーチ橋とその係累 *

Arch Stone Bridges and their Relatives in Modern China

韓 直林**・馬場 俊介***

By Zhi-Lin HAN and Shunsuke BABA

Abstract: Steel bridges and reinforced concrete bridges, introduced from Europe and America, have got wide spread use in modern China. However, arch stone bridges are still being constructed due to their cheap cost of material. Much technical progress has been made during the past several decades. In 1972 and 1990, the world record on the length of span was changed twice. Moreover the relative of arch stone bridge, two-way curved arch bridge with new structure system, was invented in 1960's. This study aims at clarifying the developmental history of arch stone bridges and two-way curved arch bridges in modern China.

1. はじめに

隋の開皇・大業年間（594～605 年）に建設された趙州橋（安濟橋）をはじめ、中国の石アーチ橋が優れた技術水準にあったことはよく知られている。趙州橋のスパン 37.02m という数値は、古代ローマのサン＝マルタン橋の 35.64m と比べて、時代が 600 年も後ということでそれほどのアドバンスはないが、扁平（ライズ比 0.2）な開腹アーチという点では、古代ローマにその類例を見ないばかりか、ルネサンス時代のイタリアでようやくライズ比 0.2 が実現されるまで（フィレンツェのヴェッキオ橋、1345 年）の 700 年間、到達不可能な構造であった。こうした技術的アドバンスがあったにもかかわらず、その後のヨーロッパでは、1833 年のグロウヴナー橋（61m）、1905 年のフリーデンス橋（90m）と順調にスパンが伸び、ライズ比も 0.1～0.3 が常識となっていた（19 世紀）のに比べ、中国では趙州（Zhaozhou）橋のスパンが 1,300 年間塗り替えられないまま、鉄とコンクリートの時代を迎えるに至った。

皮肉なことに、20 世紀初頭に技術的なピークを迎えたヨーロッパの石アーチ橋は、ほぼ同時に出現した鉄筋コンクリート・アーチによってあっという間にその地位を奪われ、10 年と経たないうちに過去の実在として忘れ去られてしまった。一方、近代の中国では、欧米伝来の鉄やコンクリートに加え、材料費の安価な

石アーチ橋が忘れ去られることなく受け継がれた。そして、世界が石アーチ橋の存在を完全に忘れた 1959 年になって、突如、スパン 60m の黄虎港橋（湖南省石門県）が造られる。以後、中国国内では大スパンの石アーチ橋が相次いで架けられ、1972 年にスパン 116 m の九溪溝（Jiuxigou）橋（四川省豊都県）、1990 年にスパン 120m の鳥巢河（Niaochahe）橋（湖南省鳳凰県）が完成し、世界記録を次々と塗り替えていった。石アーチ橋への回帰は、単に長大スパンへの挑戦にとどまらず、「双曲」アーチという新しい構造形式をすら登場させた。

これに比べて、江戸時代に独自の石アーチ文明を築きあげた九州各県では、大正期に至るまで約 1,100 橋¹⁾の石橋が架けられたものの、鉄筋コンクリート桁が安価な永久橋の架設手段として定着化する大正末期以降、九州から（そして日本全土から）急速に姿を消してしまう。

中国古代の石アーチ橋に関しては、世界中の著作で広く取り上げられている。中国の近代や現代の石アーチ橋についても、陸徳慶らの『中国石橋』²⁾をはじめ、中国公路交通史編集委員会の『中国公路史・第一冊』³⁾、公路交通編集委員会の『當代中国的公路交通』⁴⁾の他、各省の公路史・交通誌にも部分的な記述が結構見られる。また、唐褒澄の『中国石拱橋研究』⁵⁾のように、石アーチ橋の設計理論・施工などの側面からの研究もある。しかし、近代から現代に至るその変遷、石

* keywords: 石アーチ橋、双曲アーチ橋、中国

** 正会員 工博 (株)ナイスコーポレーション (〒541 大阪市中央区本町 3-2-6)

*** 正会員 工博 岡山大学教授 (〒700 岡山市津島中 2-1-1)

アーチ橋の復興の状況、「双曲」アーチ橋への発展などについて歴史的な観点から研究された例はない。本研究は、中国近代の石アーチ橋の変遷、現代における石アーチ橋の復権と「双曲」アーチ橋への発展の系譜を、各種文献の記述をもとに再構成しようとするものである。

古代、近代、現代という用語について、ここで予め統一を図っておきたい。歴史学的には、1840 年のアヘン戦争から 1949 年に中華人民共和国が誕生するまでの約 1 世紀を「中国近代」、それ以降を「中国現代」と呼ぶ。しかし、道路橋の技術史を論じる本論文では、「近代」の境界線を半世紀以上後ろにずらし、民国元年（1913）に置くことにした。確かに、アヘン戦争によって中国が半植民地状態になった後に、鉄の橋が造られたことはあった。しかし、それらは租界地に限られていたし、中国のその他の地域では石の橋が旧来と同じ形で造り続けられていた。その状況が徐々に変わり始め、外国の技術で大河に巨大な橋が架けられるようになるのは 20 世紀に入ってから、自動車が少しずつ普及するようになってからのことであった。ちなみに、中国最初の自動車は、清代の光緒 27 年（1901）、ハンガリー人 Leinz によって上海に輸入された。近代の境界線とした 1913 年における輸入量は年間 276 台⁶⁾、周鳳九の『湖南公路橋梁概況』⁷⁾（1934 年）に、

「湖南公路肇始於民国初年之修築軍路」

湖南省の自動車道路は民国元年（1913）の軍事用道路の建設から始まった。

と書かれているように、それはまさに、自動車を前提とした道路造りが始まった年であった。

なお、本論文における引用文は、原文、和訳の順で示す。本文中、引用の主旨に関係のない部分は省略し（……で省略のあることを示す）、和訳からも省いた。また、和訳には（）内に補足説明を加えた部分もある。

2. 近代の中国における石アーチ橋の低迷

(1) 鋼・RC 道路橋の導入とその影響

1840 年のアヘン戦争でイギリスに負けてから、中国は半封建・半植民時代に入った。その後 1845 年から、イギリスをはじめ日本も含まれる列強諸国は、上海・天津などに租界地を広げていった。そして、それら租界地には外国人の手で鋼道路橋が架けられた。岑德彰の『上海租界略史』⁸⁾（1932 年）には、蘇州河に架けられた鋼橋・外白渡（Waibaidu）橋（1906 年）

の建設経緯について、つぎのように記されている。

「美租界自興英租界合併、成立公共租界後（清同治二年）、中隔蘇州河、往來不便、最初僅恃渡船、每值陰雨、即感困難。有威而司者、組織威而司洋行、跨河建橋、名之曰威而司橋。……公司又欲建造鉄橋、不意橋柱忽傾、橋亦隨之。又若干年後、工部局於公司橋傍、……建一橋、……今之大橋、則清光緒三十二年所改建者也」

英米の租界が合体して、清の同治 2 年（1863）に公共租界ができた時、内部は蘇州河で隔てられ、往來に不便を来した。最初は渡し船が使われたが、雨が降ると難儀だった。Wills という人が Wills 銀行を設立し、川を跨ぐ橋を計画し、Wills 橋と名付けた。1871 年 Wills 銀行は鉄の橋の建設を始めたが、不意に橋脚が傾斜して橋も壊れた。数年後、工部局は旧橋の脇に一つの橋（舟橋）を造った。今の橋（鋼橋）は清の光緒 32 年（1906）にそれを架け替えたものである。

当時の中国には黄河のような大河に永久橋を架ける技術がなく、外国の技術を導入して鉄橋が架けられた。朱壽明の『光緒朝東華錄』⁹⁾（1909 年）には、黄河橋（1909 年）の建設の由来が、つぎのように紹介されている。

「蘭州城北濱臨黄河。……凡西北大路往來者、……皆須從此經過。每年春間、……搭浮橋一座。以鉄繩繫船二十四隻、面鋪木板、以便車馬往來。入冬經冰凌冲激、則浮橋輒斷。又設渡船以濟之。……臘月河冰堅凝、船不能渡、改於冰上行走。土人稱為冰橋。至開春凍解冰消、復估造浮橋如初。……逐年繁費、已屬不支、且冰橋將結將開之時、往往半途失陷。每歲溺斃人口牲畜不少。……故大學士臣左宗棠前往甘督時、已切憂之、會議建造鉄橋」

蘭州城は北側で黄河と接する。西北の道を往來する人は、ほとんどここを通過する。毎年春に舟橋を建設し、鉄索で 24 の舟をつなぎ、上に木板を敷き、車輛と馬を通す。冬になると、氷の衝撃で舟橋が壊れるので、渡し船が使われた。冬至の後は、川に硬く氷が張り舟が通れなくなるので、氷の上を歩いた。当地の人は冰橋と呼ぶ。春になって再び氷が解けると舟橋が造られた。毎年にかかる多額の費用は支出が困難で、かつ、氷橋は溶けようとする時しばしば途中で陥没し、毎年多くの人と家畜が溺れる。そのために学士である左宗棠が甘肅に赴任した時、深く憂慮して、鉄の橋を建設することを提案した。

これらの鉄橋は外国人の設計であった。「中国近代」の境界線とも言うべき 1913 年の以前から、徐々にではあるが、欧米の近代橋梁技術が導入され始めた状況がうかがえる。中国の伝統的な石橋では到底かなわなかった黄河を渡る橋が、鉄の橋によって実現したことは、欧米の技術の優位性を強く印象付けただけでなく、その後の石アーチ橋の発展に足枷をはめることになった（中国の石アーチ橋は、19 世紀後半のヨーロッパのように、鉄の橋の対抗馬として高い競争力を持つには至らなかった）。中国の石アーチ橋は、19 世紀末になっても千年以上前の趙州橋のレベルを回復できていなかったのも、スパンが短く、例えば、天津市のように水上交通が発達した都市では、スパンをより長くとれる鋼アーチ橋や、可動式の鋼橋などに取って代わられた。その状況は、楊豹壺らの『天津市之活動橋』¹⁰⁾

(1934 年)に、

「運河流經天津、直達海口、水上之交通之頻繁、遂使市內橋梁之建築、莫不採用活動式、以便依時啓閉、以利船隻」

運河は天津から海に入る。水上の交通が頻繁だったので、市内の橋には殆ど可動式が採用された。時間によって開閉すれば、舟が航行できるからである。

と書かれている。中国では当時、橋梁用の鋼材が生産できなかったもので、鉄道橋と同様、外国からの輸入に頼らざるをえなかった。『天津市之活動橋』には、新金鋼(Xinjingang)橋(1922 年)の部材がアメリカから輸入されたものであることが、つぎのように記されている。

「新金鋼橋……全橋之設計及材料由美国 Strauss Bascule Bridge Co. 承包」

新金鋼橋の設計・製作は、アメリカの Strauss Bascule Bridge Co. が請け負った。

外国から鋼橋部材を輸入する場合、凌鴻勳の『橋梁』

¹¹⁾ (1933 年)に書かれているような問題点があった。

「吾国鋼鉄出産不多、鉄廠亦少、較大之鉄橋、均来自外洋。因航運困難、而国内起重設備復甚缺乏、故每段之長度及重量、均有相當之限度。設計既不經濟、建築亦困難。在臨海各省、交通便利之地猶可、若至内地、則運輸尤苦。故鉄橋之使用、確是一重大問題」

わが国は鋼鉄の生産量が少なく、鉄工場も少ないため、長大橋の鋼材はすべて輸入された。運輸の困難さと、国内の起重設備が欠乏していたため、部材の長さや重量は大きな制約を受けた。こうした(短い部材を使った)設計は経済的ではなく、建設も困難となる。沿海部の省のように交通の便利な場所ならよいが、内陸部では、輸送が非常に難しい。それが、鋼橋の使用に際しての最大の問題点だった。

鉄道橋の場合、既設の軌道を利用して鋼材を現場近くまで輸送できるという利点があった。これが道路橋になると、輸送が困難な地域では輸送コストが嵩み、鋼橋の建設費も膨らんだ。前記の黄河橋に例をとれば、国内の運送に一部(鉄道のない場所で)馬車や人力を用いたためのコストと、鋼部材やセメントなどの建設資材と施工機械をドイツから輸送したことにコストを合わせると、14.9 万両銀がかかったと言われるが、それは橋の建設費 16.5 万両銀とほぼ同じ金額に達した¹²⁾。

時代が下ると、鉄筋コンクリート(以後 RC と略記)橋も導入された。黄炎らの『上海定海路橋』¹³⁾ (1928 年)は、都市の橋について、RC 橋の利点を記している。

「在本地可用以建橋之材料、不外(一)木材、(二)磚石、(三)鋼鉄、(四)水泥四種。木橋易腐、非永久之建築、又以之造百尺長之津梁、亦非易事。石此处不合用、工價甚昂。鉄橋則造價較貴、且常須油漆修理、故材料之中、惟水泥建築、其質既永固、不須修理、造價復較廉、興工亦較易、實為最合用之品」

本地(上海)で利用できる橋梁資材は(1)木、(2)石・煉瓦、(3)鋼、(4)セメントの 4 種類である。木橋は腐り易くて永久構造物とはならない。また、木で 100 尺(33m)の橋を造ることは、容易ではない。石は建設費が非常に高くつくため適当ではない。鋼橋は建設費も高く、かつ、常にペンキを塗る必要がある。各材料の中で、セメントの構造物は、その品質が永久で、補修理の必要もなく、建設費が安くて、施工も容易なため、一番適切な材料である。

都市部では、鋼橋だけでなく石アーチ橋の建設費用も RC 橋より高く付いたらしい。韓伯林の『滬河橋梁工程』¹⁴⁾ (1934)では、さらに、つぎのような指摘もある。

「在生産落後之中国、事事依靠外人、而唯混凝土工事、所用国産材料較多、維持修理費在各種橋梁中亦最省」

工業(の発達)が遅れた中国では、どんなことでも外国に依頼するが、コンクリートだけは、使える国産材料が多く、維持・修理費用が各種橋梁の中で最少である。

このように、中国では、石アーチ橋の技術(大スパン化)が十分に発達しない段階で鋼橋が導入され、その優位性が(黄河への史上初の架橋によって)強く認識された結果、(同時期のヨーロッパと違って)石アーチの技術に磨きをかける方向へは進まなかった。また、鋼橋の最大の欠点だった「高い輸送費」の問題も、RC 橋の導入により一気に解消され、RC 橋より高コスト(石材の産地以外では)の石アーチ橋の出番はますますなくなった。

(2) 低迷する伝統的な石アーチ橋

鋼と RC の導入によって、中国古来の石アーチ橋は大きな制約を受けることになった。しかし、鉄道路線が近くになく(鋼材の輸送が困難)、セメント産地からも遠く離れ、逆に石材が豊富に採れる湖南、陝西、雲南、四川などの省では、石アーチ橋にも可能性が残されていた。例えば、前述の『湖南公路橋梁概況』には、湖南省の道路橋について、つぎのような記述がある。

「湖南地勢、平原山嶺錯雜。建築材料、如磚石、木材、石灰等、產量頗多、故橋梁建築、以上項材料為主要。鉄料水泥購自滬漢、價值較昂、工程較重要或因其他原因需要者方用之」

湖南省は平原と山脈が交錯する地勢だ。建設資材として石材・煉瓦・木材・石灰などの産出が多く、橋の建設にもそれらが使われた。鋼鉄、セメントは上海・武漢から購入するため価額が高く、重要な部分や別の理由で必要な所にだけ用いられる。

鋼鉄やセメントが入手しにくい地方では、鋼橋や RC 橋のコストが石アーチ橋より高くなることから、地元の材料である石や煉瓦が使われた。ちなみに、1912～32 年にかけて、湖南省では石・煉瓦橋が橋の総延長の 80% を占め、鋼橋や RC 橋は各 5% に過ぎなかった¹⁵⁾。写真-1 は、この時期に造られた湖南省の白竹

(Baizhu) 橋 (1929 年) である。

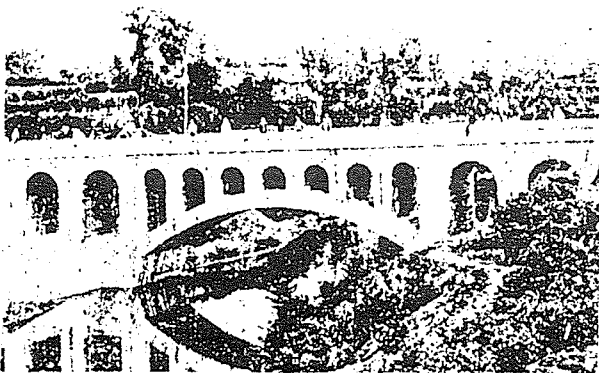


写真-1 白竹橋 (文献 7)より転載)

表-1 湖南省の道路橋建設費 (1912~38 年) *

橋名	構造形式	長さ (m)	幅 (m)	建設費 (元)	元/m ²
永豊橋	RCアーチ	70.7	7.3	42000	81.4
瀉江橋	RC桁	138.5	7.2	73650	73.9
望麓橋	RC桁	47.6	6.2	22100	74.9
泗汾橋	RC桁	88.0	6.2	41320	75.7
巖家河橋	RC桁	89.6	6.2	41290	74.3
老龍潭橋	石アーチ	56.4	6.6	24000	64.5
白竹橋	石アーチ	45.7	6.2	18773	66.3
丹龍橋	煉瓦アーチ	47.5	6.7	16370	51.4
能灘橋	吊橋	80.0	4.5	69000	191.7

* : 資料 6), 36)より著者作成。

表-1 には、湖南省で 1912~38 年に建設された主な道路橋の建設費が示されている。表-1 によれば、湖南省のように鋼・セメントの供給地から遠く離れ、かつ、現場付近で石材が確保できる地域では、石アーチ橋の建設費は RC 橋よりも低かったことが知られる。

一方、四川省の道路橋については、孫輔世が『四川橋梁の三種』¹⁵⁾ (1934 年) の中で、つぎのように記述しているように、四川省でも、石アーチは道路橋の主なスタイルであった。

「四川橋梁、大都與其他各地相同、如拱式的與板梁式的石橋以及各種の木橋」

四川省の橋は他の地域とだいたい同じで、石アーチ橋、石桁橋、および、各種の木造橋からなる。

外国の利権絡みで建設が進められた鉄道と違い、中国近代の道路 (そして道路橋) は、軍事的な目的から造られた場合が多い。この場合、経済的な利益が見込めないで、外国からの投資はなく、建設資金が不足気味であった。茅以昇の『三十年来中国之橋梁工程』¹⁶⁾ (1946 年) によれば、つぎのような表現が見られる。

「中国公路事業……以經費支絀、組織規模、遠非鉄道可比。……尤以橋梁建築、更較草率」

中国の道路事業は経費不足のため、組織の規模が鉄道と比較できないほど小さく、特に橋はお粗末だ。

建設資金が不足していたため、例え鋼やセメントの供給が容易な地域であっても、鋼橋や RC 橋の数は少数で、数の多い中小の橋梁では、石アーチが幅をきかしていた。彭禹謨の『閩省橋梁工程見聞雜録』¹⁷⁾ (1929 年) には、福建省の状況を、つぎのように紹介している。

「小跨度橋梁、採用乱石拱弧」

小スパンの橋には乱積の石アーチを採用する。

旧来の橋を自動車が通れるように改良するにあたって、古代の石橋の橋脚上に RC 橋に架けることも行われた。これに関しては、彭禹謨の『閩南橋梁工程雜記』¹⁸⁾ (1928 年) に、つぎのように記されている。

「福建省漳州城外、有……一名新橋、然其建築年代、已遠在數百年以上、其樣式為石桁橋。……民國十年、……將石桁拆去、改建鋼筋混凝土連續桁橋、……因經費關係、下部結構、未能根本改革」

福建省漳州城外には、新橋という橋がある。数百年以上前にできた石桁橋だ。民国 10 年 (1921)、石桁を取り外し、RC 連続桁橋に架け替えた。経費不足のため、橋下部の構造を根本的に変えることはできなかった。

表-2 には、在来の石アーチ橋を自動車の通る道路橋に改造した事例を示す。

表-2 石アーチ橋の道路橋への改造

橋名	建設場所	建設年代	スパン (m)	参考文献
靈虹橋	山東省	1471 年架替	2.5~3.2	39)
沙坪橋	貴州省	明代	11~12	38)
萬年橋	山東省	1691~96 年架替	5	39)
高陂橋	福建省	1775 年架替	20	40)
通濟橋	浙江省	1809 年架替	11~12	38)
萬福橋	湖南省	1834 年架替	13.4	37)
水東橋	福建省	1840 年架替	20	40)
多安橋	湖南省	1866 年架替	10	37)

それでも、大スパンの橋は鋼と RC に限られていた。1941 年に湖北省で建設された大漆溝 (Daqigo) 橋は、スパン 33m と中国近代で最大の石アーチ橋となったが、それでも 1300 年前に造られた趙州橋の記録を超えることはできなかった。

ところで、石アーチ橋に用いられる石材の加工法は、近代も古代も同じであった。大型の石アーチ橋では、上部に加工された切石が使われ、特に都市のモニュメンタルな橋に対しては、美観を考慮して精巧に加工された直方体の切石が用いられた。こうした切石は、大

型橋の橋脚や、背の高い橋脚にも使われた。一方、小規模な橋では、非整形の石を乱積にすることが普通で、高さ 1.5m 以下の橋脚でも、隅石以外は乱積とされることが多かった（ヨーロッパでもこうした状況に変わりはないが、18 世紀以降、橋の大きさや格に関係なく加工の精度は向上し、モニュメンタルなものは華麗な装飾で覆うことで差別化が図られていた）。

近代中国では、遅まきながら道路橋の設計理論も導入された。中華民国 25 年（1936）、全国經濟委員会公路処によって編集された中国初の全国的な基準である道路橋設計指針『公路橋梁涵洞工程設計暫行準則』¹⁹⁾がそれで、そこでは、鋼・RC だけでなく、石材や煉瓦の許容応力度も掲載されていた。ここにきて、ようやく、経験に頼っていた石アーチ橋の設計が、全国一律に力学に基づいて行われるようになった（江蘇省などの道路橋設計指針では、1930 年の段階で、石材の許容応力が決められていた²⁰⁾）。

3. 現代の中国における石アーチ橋の復権

長く続いた戦争が終結し、1949 年 10 月 1 日に中華人民共和国が誕生すると、経済の再建が始まった。しかし、建設の対象となる国土はあまりにも広大で、一方、近代化の指標としての鉄鋼など基幹産業はあまりに未発達であった（1952 年の鋼鉄生産量はわずか 135 万 ton であった²¹⁾）。道路橋に用いられる構造用鋼材の使用は強く制限された。1950 年代の中ごろには、交通部が「地元の材料を使って、伝統的な石アーチ橋を建設する」よう全国に呼びかけた。これが、中国で石アーチ橋が復興するきっかけを与えることになった。

(1) 大スパン化への流れ

交通部が呼びかけた結果、確かに全国各地で石アーチ橋が建設されるようになった。しかし、その技術水準は古代に遠く及ばず、しかも、ブームと言えるほど量産されたわけでもないの、これをもって石アーチ橋の復興とはまだ言えない。

現代中国における石アーチ橋の復権は、1959 年、湖南省石門県でスパン 60m の黄虎港（Huanghugang）橋（写真-2 参照）が架けられてことに始まる（趙州橋のスパン 37m を初めて超えることができた）。

黄虎港橋の建設に関して、湖南省交通庁がまとめた『黄虎港大跨径石拱橋的修建情况』²³⁾（1960 年）によれば、石アーチを選択した理由を、「材料の現地

調達」の決まりに則ったものとして、つぎのように記している。

「該橋设计方案、系根据就地取材的原则、採用石拱橋」

この橋の設計案は、現地で取れる材料を使うという原則に従って、石アーチ橋案を採用した。

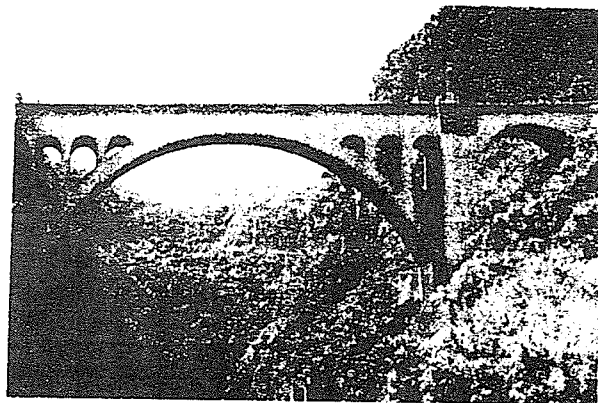


写真-2 黄虎港橋（文献 22）より転載）

石アーチ橋にすることはすんなり決まったが、60m という大スパンに決着するまでには紆余曲折があった。

「黄虎港橋跨越深溪峡谷、兩岸有峭壁懸崖高聳 200 餘米、山巒峻拔、素稱天險。勘測石清公路時、曾試圖另選路線、避開這一困難工程、但其他比較線均增長路線里程、對大量磁產的運輸經濟不利、因而決定選用現行路線。路線確定以後、如何跨越這一天險、就成為設計上一個關鍵問題」

黄虎港橋は、深い峡谷を跨ぐ。兩岸には高さ 200m 余の断崖絶壁が連なり、山は高く聳え、まさに天険の地であった。石清道路を測量した際、困難な工事を避けようと種々の路線が検討された。しかし、いずれも距離が長く、磁産物の輸送を行おうとすると経済的に合わず、結局、今の路線を選んだ。路線が決まった後、この天険をどう越えるかが、設計上の難となった。

大スパンの石アーチ橋の建設が必須となったが、その経験は当時の中国にはまだなかった。中小スパンの石アーチ橋にすることもできたが、高い橋脚が必要で、経済的に容易ではない。設計者たちは各案を比較した後、スパン 60m の石アーチ橋を架けることを決め、1300 年前の記録に挑戦することになった。

「最初設計為 3 孔 16 米的等截面圆弧拱、需建築高達 40 餘米的橋墩兩座。雖然該橋橋位適於修建單孔大跨径石拱橋、但由於大跨径石拱橋的設計与施工都沒有經驗、存在不少顧慮。後來經過……對改變設計方案的鼓勵和支持以後、決定改為主孔跨径 60 米、邊孔跨径 16 米、總長 103 米、橋高 52 米的大跨径石拱橋」

最初の設計は、スパン 16m の 3 径間の等断面圆弧アーチで、そのためには、高さ 40m の橋脚 2 基を築く必要があった。同じ位置に単径間の大スパン・アーチを架けることも考えられたが、大スパンの石アーチ橋の設計・施工の経験がなかったことから、多くの難関が予想された。その後、政府から設計案の修正に激励と支持があり、主スパン 60m、全長 103m、高さ 52m の大アーチを架けることに決めた。

黄虎港橋で大スパン・アーチの経験を蓄積したことが、2 年後の 1961 年、スパン 100m を超える長虹（Changhong）橋（スパン 112.5m、雲南省）の建設

を可能にした。以後、中国各地でスパン 100mを超える石アーチ橋が相次いで架けられる。1972 年に四川省豊都県で建設されたスパン 116mの九溪溝橋は、石アーチ橋の世界記録を塗り替えた。現時点での最大スパンは、1990 年に建設されたの鳥巢河橋（スパン 120 m、湖南省鳳凰県）である。表-3 には、現代中国のスパン 100mを超える石アーチ橋を示す。

表-3 スパン 100mを超える石アーチ橋

橋名	建設年代	建設場所(省・自治区)	スパン(m)	径間数	参考文献
長虹橋	1961	雲南	112	1	5)
紅渡橋	1966	広西	100	3	5)
紅旗橋	1968	四川	111	3	5)
沱江橋	1968	四川	110	1	42)
愚公橋	1969	河南	102	1	5)
潞河橋	1971	河南	105	1	5)
九溪溝橋	1972	四川	116	1	5, 41)
丹河大橋	1983	山西	105	1	41)
鳥巢河橋	1990	湖南	120	1	41)

中国で大スパン・アーチが独自の発達を見せていたこの時期、中小スパンの石アーチ橋の建設も一種のブームとなった。張先進が書いた『浙江建築石拱橋的經驗總結』²⁴⁾（1964 年）には、浙江省の状況が、つぎのように紹介されている。

「1958 年……以後、克服了修建大跨径石拱橋和軟地基建拱の重重困難、建成了白沙橋。……是我省石拱橋建築全面發展時期」

1958 年以後、大スパンの石アーチ橋を築く問題と、軟弱地盤上に石アーチ橋を築く問題が克服され、白沙橋が架けられた。この時代、わが省では、石アーチ橋の建設が全面的に発展した。

浙江省で 1958～63 年の間に 487 橋の道路橋が建設された。平均 4 日に 1 橋というハイペースであった。

石アーチ橋の建設ブームは、湖南・浙江などの省から全国に広まった。1979 年の段階で、スパン 20m 以上の石アーチ橋が 5,000 橋以上建設され、1949～79 年の間に造られた全道路橋（スパン 20m 以上）の総数の 32%を占めた²⁵⁾。

(2) 大スパン化を生み出した技術

石アーチ橋の復権に寄与した要因には、①施工技術の改良（「三分砌築法」）、②中国に多い脆弱な地盤への対応（上部構造の軽量化、基礎構造の工夫）、③建設費の削減（石材加工の簡素化、石材の節約）の三点が挙げられる。以下、順に見ていくことにしよう。

第一の施工技術について、中国では従来、石アーチ橋の上部構造の架設には、支保工が用いられることが一般的であった。しかし、架設中、石の自重のすべて

を支えることになる支保工は、石積部位が橋脚近くからクラウン部へと進むに従い、図-1 に示すような変形を示す。このとき、施工の初期段階で、石積が橋脚近傍で行われているときは、支保工が沈下してスプリング上部に亀裂が発生する可能性がある。一方、施工末期で、石積がクラウン近くまで達しているときは、支保工が反対側に変形し、それまでに完成していたアーチ部分に上向きの力がかかるため、亀裂が発生する可能性がある。これらの破壊パターンが、大スパン・アーチ橋の建設を困難にしてきた最大の原因であった。黄虎港橋の建設にあたった技術者は、施工中のこうした挙動を未然に防止するため、「分階段、分段、分環」を基本とする「三分砌築法」を編み出した。「三分砌築法」は、その後の大スパン・アーチの建設に大きな影響を与えてゆく。

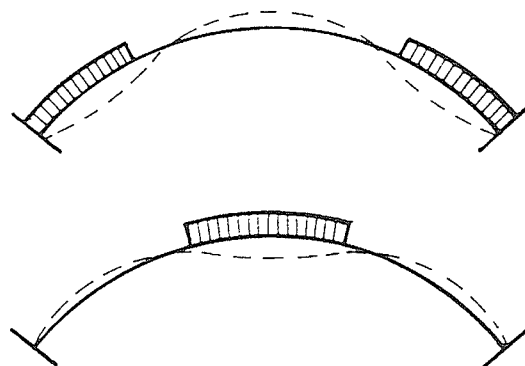


図-1 支保工の変形図

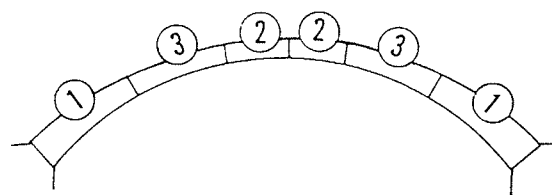


図-2 「分階段、分段」の施工法（3「階段」、6「段」の事例）

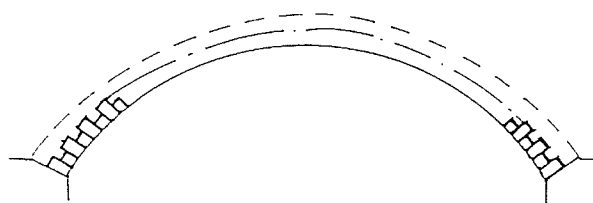


図-3 「分環」の施工法（2「環」の事例）

「三分砌築法」の中で、「分階段、分段」というの

は、図-2に示すように、アーチ全体を複数のブロック（段）に分け、支保工の変形ができる限り小さくなるよう、ブロックごとの施工ステップ（階段）を調整しつつ作業を進めるというものである（図-2の例では、最初にスプリング部、次にクラウン部、最後にその中間という順番で、左右対称に石を載せる）。

一方、「分環」というのは、図-3に示すように、アーチ・リングをいくつかの層（環）に分け、一番下の層から施工し、順次、下から上へと層を重ねていく方法である。大スパン化するにつれ、アーチ・リングが厚くなり過ぎ、それを受ける支保工に過大な力がかからないようにするための工夫である。「三分砌築法」について、『黄虎港大跨径石拱橋の修建情況』は、つぎのように記している。

「“三分砌築法”的優點、在於拱圈的全部砌築過程中分階段、分環、分段合理地安排砌築的位置、從而減輕拱架荷載、改善各環在砌築過程中的受力情況、避免拱架的不規則變形、簡化施工設備和減輕操作困難、盡量利用各環合攏後的間歇時間、合理安排勞動力、加速施工進度等。根據砌築過程中各項觀察資料、以及通車後的情況來看、可以認為這種方法是成功的、是大跨徑拱橋的一種合理的施工方法」

“三分砌築法”の優れた点は、アーチリングを構築する際、階段・段・環に分けて合理的に築くことにある。支保工が受ける荷重を減らし、各環への力のかかり具合を改善し、不必要な変形を避け、施工器材や作業内容を簡素化し、作業工程の無駄を排して労働力を合理的に配分し、施工速度を上げる等の効果がある。施工時の観測や開通後の状況から見て、この方法は成功であり、大スパンの石アーチ橋の合理的な施工方法とみなし得る。

第二の技術的な課題であるが、本来、アーチの強力な推力を支える基礎としては、硬質土や岩などの堅い地盤が望ましい。ところが中国の内陸部には、粘土質の地盤が多い。この軟弱な地盤に対応するための試みの一つが、石リブ・アーチの採用であった。1960年、陝西省で建設されたスパン 65m の陽平関（Yangping）橋は、中国最初のリブ・アーチ橋となったが²⁴、ここでは、リブ間の繋がりにRC部材が使われ、上部構造の重量を約半分に減らすことに成功した²⁵。1971年に河南省新県で架けられたスパン 105m の滸湾（Huwan）橋では、リブ断面をU状の箱形にすることで、中実の矩形断面より石材を30%減らした²⁶。リブ・アーチの剛性を上げる目的で、図-4に示すような山、山形のヴォールト状のアーチも考案されている。

軟弱な地盤の上に石アーチ橋を構築しようとする、地盤のトータルな支持力不足と、局所的な不同沈下の問題が解決されなくてはならない。この点について、先の『浙江建築石拱橋的經驗總結』には、つぎのよう

な記述が見られる。

「在軟土地基的處理方面、初步摸索到採用砂樁、砂墊層加固的方法、以及上部構造採用三鉸拱調整不均勻沉降、是解決軟地基建拱的有效措施」

軟弱地盤対策としては、砂杭や砂層で補強する方法を採用する。上部構造には3ヒンジ・アーチを採用し、局所的な不同沈下を調整する。これらは軟弱地盤上にアーチ橋を建設する有効な対策である。

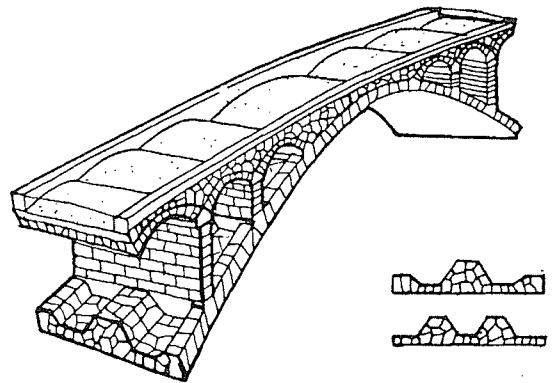


図-4 ヴォールト状の石アーチの断面（文献5）より転載）

浙江省余姚県工業交通局がまとめた『在粘土地基上怎樣修建石拱橋』²⁶（1960年）には、つぎのような対策も書かれている。

「擴大基礎、減少基底的壓應力。……拉長修建時間。……基礎均使用大石料」

基礎（の面積）を増やし、地盤に発生する圧縮応力を減らす。建設時間を長くし、基礎に大きい石を用いる。

さらに、建設期間を長目にとることで、施工中に基礎自身の自重で地盤の圧密沈下が進行し、竣工後の大きな沈下や不同沈下を避けることができる。粘土質の地盤が多い中国にとって、軟弱地盤上に石アーチ橋を建設するノウハウの確立は、石アーチ橋の普及を図る上で重要なポイントであった。

石アーチ橋が普及する上で残された第三の課題は、建設費（材料費）の削減である。従来の石アーチ造りでは、石材を精密に整形することが要求されていたので、そのぶん加工費も高く付いていた。そこで、石材加工のレベルを場所に合わせて差造化できるようにし、加工費が低廉化できるようにした。前出の『浙江建築石拱橋的經驗總結』には、つぎのような記述がある。

「……由這些石頭製成的粗料石、塊石、片石或天然卵石等、只要砌縫填塞密實、使其受力均勻、均可作為石拱橋的建築材料、打破了以往單純非細料石不可的思想束縛」

粗加工の石、野面石、石片、天然の卵形石などは、石と石の間の間隙をしっかり埋め、均等に力がかかりさえすれば、いずれも石アーチの材料になり得る。従来の「精製された切石でなければな

らぬ」という常識は打破された。

使用可能な石材の種類が増加したため、採掘・加工が容易になり、作業期間は短縮され、材料費も節約となった。

材料費の削減は、石材の総量を減らすことで、構造形式の改良（前述のリブ・アーチ化）によっても達成された。『浙江建築石拱橋的經驗總結』には、下記のように、偏平な円弧弓形アーチの利点が指摘されている。

「我省於 1953 年起採用坦圓拱、拱梁高度相應降低。隨後拱軸線型由圓弧發展到懸鏈線、由等截面發展到變截面、這一改革、不僅拱圈受力情況良好、而且用料省、外型美觀」

わが省では、1953 年から偏平な円弧弓形アーチが採用され、その結果、アーチは低く偏平になった。その後、アーチの軸形は円弧から懸垂線に、アーチ断面は等断面から変断面に進化したのが、それによってアーチ内の力の伝達が良くなり、材料も節約となり、外観は美しくなった。

以上、一つの技術ではなく、多面的な技術が集積することで初めて、大スパンのアーチ橋を、軟弱な地盤上に、安全かつ安価に架けられる技術が確立した。これにより、石アーチ橋という過去の技術が、現代の技術として蘇えることができた。

4. 石アーチ橋の係累としての「双曲」アーチ橋

1960 年代初頭の中国では、近代（～1949 年）に架けられた木橋がつぎつぎと寿命を迎え、永久橋への架替えが必要となった。この時期に、前章で述べたように、石アーチ橋の復権が進むのだが、石アーチ橋には別の問題もあった。それは、石材の加工や支保工の架設に要する労働力が大きく、建設期間も長くなるという点であった。当時、鋼材、鉄筋、セメントなどの建設資材は依然として不足していたので、鋼橋や RC 橋は造れない。そこで、資材が節約できるという石（煉瓦）アーチのメリットと、施工が容易という RC 橋の特性とを組み合わせた新しい構造体として、「双曲」アーチ橋が考案された。本章では、「双曲」アーチ橋の出現の経緯とその構造特性について見てゆこう。なお、「双曲」という名称は、双曲線をイメージしがちな面もあるが、原典である中国語での表現を尊重してそのまま使用することにした。以後、本文中では「」を外して用いる。

(1) RC リブ双曲煉瓦アーチ橋の出現とその後の展開

最初の双曲アーチ橋は、江蘇省無錫県で建設された。同県は有名な水郷地帯であり、多くの橋が架けられている。1964 年の調査によれば、県全体では 3,505 橋の道路橋があり、その 85% は木橋であった。当時、木橋は老化して危険な状態にあり、架替の必要性が指摘されていた。しかし、建設資金は乏しかったようで、同県交通庁が出した『為革命造橋為農民造橋—無錫県交通局集体創造成功双曲拱橋』²⁷⁾（1966 年）には、つぎのような記述が見られる。

「無錫全県原有的農橋年久失修、当地群眾迫切要求修好。……1963 年無錫県委……對農橋建設提出了「少花錢、多造橋、大力支援農業生產」的指示」

無錫全県では農村部の橋が長い間修理されなかったことから、人民が修理を強く求めた。1963 年無錫県政府は、農村の橋の建設に対し「金を少なく使い、橋を多く造り、大力に農業生産を支援する」と指示を出した。

「少花錢、多造橋」の指示に対し、同県の橋梁技術者は、現地調達可能な材料でアーチ橋を架けることにした。同文献には、つぎのような記述もある。

「在這種新形勢下、……無錫県交通局……從實際出發、……為解決橋型構造、他們就到群眾中去請教、得到了三點啓示：(1) 拱橋在無錫県有悠久的歷史、建橋技術已為群眾掌握、(2) 無錫盛產磚石、設計可往石拱橋方面去探索、(3) 廣大農村有一批副業泥水工人、都有修建拱橋的經驗……」

新しい情勢下で、無錫県交通局は橋の構造形式について、人民から三つの啓発を得た。①アーチ橋は無錫県で悠久の歴史をもち、人民は橋の建設技術を掌握している。②無錫県では煉瓦・石を盛んに産することから、石アーチ橋を考えるべきである。③農村には副業で左官のできる者がいて、彼らはアーチ橋を建設した経験がある。

しかし、従来の方式で石アーチ橋を架けようとすると、建設期間が長くなり、短期間で全部の木橋を架け替えることはできない。架設に支保工を用いる場合には、大量の木材が必要となり建設費もかさむ。そこで、より速く、より安く架橋する方法が種々検討された。そしてそこに、県下で 1962 年から数橋が架けられてきた RC 橋の経験が活かされることになった。前出の文献には、その間の経緯がつぎのように記されている。

「他們到……群眾中去征求意见。開始不少人認為在鋼筋混凝土肋上平砌磚板方法、施工有困難、……容易坍塌。泥瓦工出身的蔡錫金同志建議說：「墳坑的頂是在二牆之間砌小拱圈的、我們可以把平磚板改成磚拱」他這一建議得到大家的支持、於是決定將這一民間傳統工藝運用到橋上砌橫向拱……就這樣、双曲拱橋的設計就定型了……從而、成功地試建了第一座双曲拱人行橋、省交通庁作了靜載試驗、証明負荷情況很好。接着……他們……陸續建造了淨跨 10～55 米的單孔双曲拱橋二十餘座」

彼らは人民に意見を求めた。多くの人が、「RC リブの上に平行に煉瓦を並べる」方法は、施工が困難で崩れ易いと指摘した。左官出身の蔡錫金同志は、「墓の頂部では、2 つの壁の間に小アーチが架けられている。リブ・アーチに平行に煉瓦を並べるのでは

なく、リブとリブの間にも煉瓦でアーチを架けたらどうか」と建議した。彼の建議は皆の支持を得た。そして、この民衆の伝統技法を橋に適用し、横断方向にもアーチを導入することを決定した。かように双曲アーチ橋の設計は決定した。第1号の双曲アーチ歩道橋が成功裏に建設された。交通庁では荷重載荷試験を行い、結果が良かったため、引き続いてスパン 10～55mの単径間の双曲アーチ橋が20橋あまり架けられた。

こうしてできた双曲アーチは、同文献に下記のように記述されているように、RCリブ・アーチの上にRC柱を立て、その上に路面を載せるのが普通の構造であるのに対し、複数のリブ相互を煉瓦アーチでつなぎ、その上に路面を載せるという複合構造の（材料も）橋であった。

「1964年、無錫県交通局……集体創造成功了新型的双曲拱人行桥。……是一種……上部構造由钢筋混凝土拱肋和支承在钢筋混凝土拱肋上的双曲磚拱組成的橋梁」

1964年、無錫県交通局により新型の歩道用の双曲アーチ橋が創作され成功した。それは、RCリブ・アーチと、リブに支えられた煉瓦アーチから構成された橋である。

ここでは、このタイプの橋を、RCリブ双曲煉瓦アーチ橋と呼ぶことにする。図-5に模式図を示す。また、写真-3は、第一号の双曲アーチ橋となった東拱(Donggong)橋(1964年)の全景である。

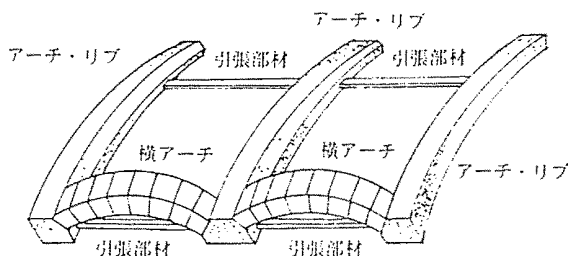


図-5 双曲アーチ橋の模式図

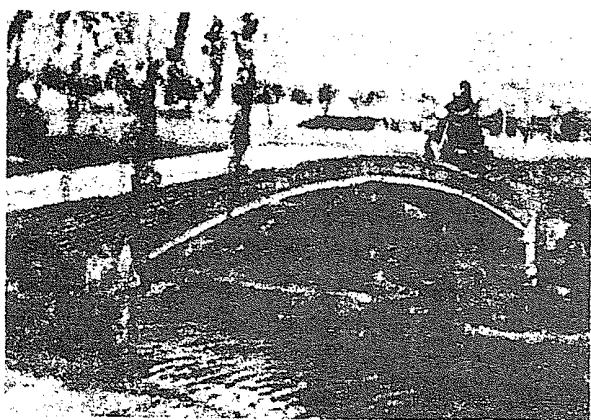


写真-3 東拱橋（文献22）より転載）

RCリブ双曲煉瓦アーチ橋は、翌1965年、江蘇省の南京、蘇州などの地域で道路橋にも適用された。唐永泉の『輕台薄拱鋼筋混凝土肋双曲磚拱公路橋』²⁸⁾(1966年)には、つぎのような記述がある。

「江蘇省交通庁蘇州……修建了一座全長17.98米、淨跨10

米、淨寬6米的輕台薄拱鋼筋混凝土肋双曲磚拱公路橋。該橋建成後、為了驗證鋼筋混凝土肋双曲磚拱構造在公路上使用的承載能力、探索正確的設計計算方法、由交通部西安公路科學研究所、省交通庁等交通部門進行靜載試驗」

江蘇省の交通庁は、蘇州に、延長17.98m、スパン10m、幅6mの薄肉輕量橋脚をもつRCリブ双曲煉瓦アーチ道路橋を建設した。この橋が建設された後、同構造を道路橋に適用する際の載荷力の算定や、正確な設計計算法を策定するため、交通部西安道路科學研究所や江蘇省交通庁などの交通部門では、載荷試験を実施した。

また、同じ1966年には、西安公路研究所が双曲アーチ橋の長所を汲み取った形で、スパン5mの微小曲げ板・偏平アーチ・リブの「微彎板坦肋アーチ」を考案した²⁹⁾。

双曲アーチ橋の中国全土への普及に伴い、その形態も多様化していった。潘利平らの『双曲拱橋在發展中』³⁰⁾(1973年)には、双曲アーチ橋の変化について、

「由於双曲拱橋的大量被採用、為了適應各地区水文地質、施工条件、材料供應……等具体特点、使双曲拱橋的構造形式也向多樣發展。主拱圈断面形式分為多肋多波、少肋少波、兩肋單波……等。……主拱圈分為有筋有肋、無筋無肋、石肋等型式」

双曲アーチ橋が大量に使われたことで、各地の水文地質、施工条件、材料供給などに適応して、構造形式も多様化した。主アーチの数は多リブ、少リブ、2リブなど、主アーチの構造は、RCリブ、無筋コンクリート・ヴォールト、石リブなどに分かれる。

と書かれている。つまり、RC構造と煉瓦アーチが合体してできたオリジナルの双曲アーチ橋は、①すべてがRCでできたRC双曲アーチ、②リブのない波状のヴォールト（無筋コンクリート）、③石と煉瓦、あるいは、石だけでできた双曲アーチ、など様々な変形を生んだのである。

すべてが石だけで造られた石双曲アーチ（石リブ双曲石アーチ）橋の第1号は、四川省の巫山県に架けられた官渡(Guandu)橋(1970年、スパン50m)である³¹⁾。その後1973年には、同省奉節県でスパン60mの紅旗(Hongqi)橋(1973年)が造られ、湖南省でも1981の時点で35橋の同タイプの橋が建設されていた。奉節県では、石双曲アーチ橋は普通の石アーチ橋より40～60%の石材が節約でき、上部構造の自重も減ったことが記録されている³²⁾。

つぎに、双曲アーチ橋の大スパン化についてであるが、1964年に最初の日曲アーチが生まれてから、スパンは急速に大きくなっていった。1966年、常州市はスパン30mのRCリブ双曲煉瓦アーチ橋の架設に成功した。同市の市政工程處の嚴松寿によって書かれた『常州建成淨跨30米鋼筋混凝土肋双曲磚拱公路橋』³³⁾(1966年)には、つぎのように記述されている。

「我處……以双曲拱農橋推廣於大跨度公路橋。在今年上

半年建造了一座全長 48.6 米、淨跨 30 米、拱寬 8 米……的鋼筋混凝土肋双曲磚拱公路橋」

わが部門は、双曲アーチを農村橋から大スパンの道路橋へ進化させた。今年の前半には全長 48.6m、スパン 30m、幅 8m の R C リブ双曲煉瓦アーチ道路橋を建設した。

中国各地での双曲アーチの大スパン化はさらに進み、わずか 3 年後の 1969 年には、河南省でスパン 150m の前河大（Qianheda）橋が完成するに至る。この 150m というスパンは、（双曲アーチとしては）今だに中国で（世界でも）最長である。また、1972 年に湖南省で建設された長沙湘江（Changsha-Xiangjiang）大橋は、橋長が 1,532m もあり、双曲アーチ橋の最大橋長の記録を保持している。長沙湘江大橋は、その規模のわりに、工期はわずか 1 年と非常に短い。『双曲拱橋在發展中』（1973 年）にも、つぎのように賞賛されている。

「長沙湘江大橋為總長 1532 米的雙曲拱橋、主橋寬 20 米、這樣大的橋梁僅用一年時間就建成通車」

長沙湘江大橋は橋長 1532m の双曲アーチ橋で、幅は 20m。このように巨大な橋がわずか 1 年という期間で通行できるようになった。

双曲アーチ橋の建設期間の短さは、木造橋を緊急に架け替えなくてはならなかった地方にとって最大の魅力であった。これについては、さらに、木橋の架替時に、古い橋脚を利用できる場合には、経費削減のため残せるものは残し、上部構造だけを交換する方法も採用された。廣西壮族自治区交通局工程公司によってまとめられた『旧橋改建為双曲拱橋』³²⁾（1975 年）では、桂林市解放橋の架替時の情況が、つぎのように紹介されている。

「桂林市解放橋原為一座五孔 34.3 米等跨徑的半永久式橋、於 1941 年建成。木橋面用四片上承式鋼木聯合桁橋支承。……1971 年進行改建前觀察上構主桁、橋面木料多已腐朽、急待修建。……為此、……對旧橋進行調查、分析比較、最後確定利用旧橋的墩台、採用預製安裝修建双曲拱橋的方案。這個方案避免了水下工程、節約大量資材、而且縮短了施工期限」

桂林市にある解放橋は、スパン 34.3m の 5 連の半永久橋で、1941 年に建設された。木床版を 4 つの上路の木鉄混合トラスで支える構造。1971 年、架替に先立って橋を調査したところ、木部の多くが腐朽し、緊急修理が必要と判断された。そのため、旧橋の調査を進め、各案を比較検討し、最終的に、旧橋の橋脚を利用し、その上に双曲アーチ橋を載せるという案に落ち着いた。この案だと水中作業を避けることができ、資材が大幅に節約でき、工期も短縮される。

次節でも触れるように、双曲アーチ橋は施工が簡単で、その期間も短く、資材の節約にもなり、建設コストも低くて済むといった利点があったことから、木橋の架替だけでなく、新橋の建設にも広く採用された。1964～79 年の 15 年間で、中国各地に建設されたスパン 20m 以上の双曲アーチ橋の総数は 4,000 橋余で、中

国の全道路橋（同時期、同規模）の総数の 25% を占めるに至った。その割合は石アーチ橋の 32% に次いで多い²⁵⁾（両方合わせれば過半数を超える）。

また、双曲アーチ橋は、その優れた利点から、幹線道路だけでなく、農村部の小規模な橋でも使われた。交通部公路局の『公路双曲拱橋的成長与展望』³³⁾（1975 年）には、つぎのような記述がある。

「僅江蘇省的蘇州、楊州、塩城、南通四個地区就修建了八千七百多座、長達十六萬一千里」

江蘇省の蘇州、楊州、塩城、南通の 4 地域では、8,700 橋余が建設され、総延長は 161,000m に達した。

同じ江蘇省の無錫県では、1964～73 年の間に農村道路に 3,977 橋の双曲アーチ橋を建設し、いち早く木橋の架替を完了した。

(2) 双曲アーチ橋の特性

写真-4 には、多リブの双曲アーチ橋の例として、北京市の盧溝新橋（1971 年）を示す。また、図-6 には、矩形、L 型、I 型、U 型など様々なバラエティをもつリブの断面形状を示す。

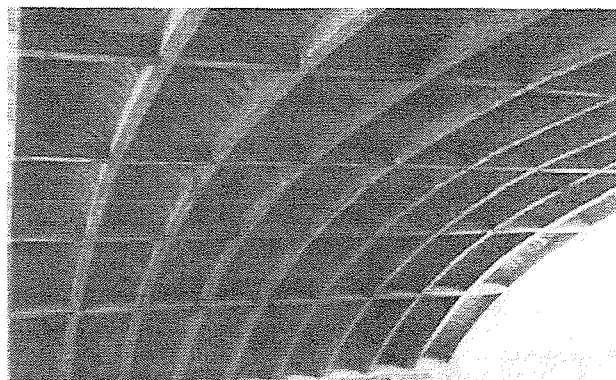


写真-4 盧溝新橋（山田健太郎氏提供、1990 年撮影）

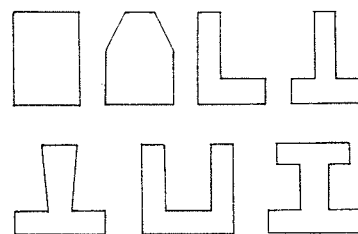


図-6 双曲アーチ橋のリブ断面図

双曲アーチ橋は、橋軸方向のリブ・アーチ（R C、石）の上に、断面方向の小アーチ（煉瓦、石、コンクリート）が載るという構造であり、施工もその順に行われる。従って、リブ・アーチを施工するとき支保工

が必要となるが、自重が少ないので小規模なものでよく、断面方向の小アーチを施工するときにはリブ・アーチが足場の代わりになるという有利な側面を持っている。この点を中心に、双曲アーチ橋の特性をまとめると、つぎようになる。

① R C 構造はリブ・アーチの部分に限られ、その他の部分は煉瓦、石、無筋のコンクリートで造られているので、鉄筋の使用量を大幅に節約できる。さらに、双曲部を施工するにあたって、リブ・アーチがその足場となることから、支保工の木材を節約できる。例えば、前述の長沙湘江大橋では、同じ湘江に建設された湘潭 (Xiangtan) 大橋 (R C アーチ) より、鋼材で 68%、木材で 40% の節約となった³²⁾。

② 長大アーチの迫石の加工には優れた技巧が必要となるが、R C リブの製作にはそれほどの技術は不要であるし、製作施設、必要な人手なども少なく済む。施工に要する期日も短い。

③ 農村部の橋のように低コスト至上の構造物にまで十分適用が可能であるだけでなく、姿が美しい。

④ 自重が小さいため、各種の地盤に対して広い適応性を持っている。

しかし、双曲アーチ橋にも弱点はある。それは、その開口部の断面が捩り強度や安定性に欠けるためで、交通部第二公路勘察設計院の『關於双曲拱橋設計的幾点体会』³⁴⁾ (1975 年) には、つぎのように指摘されている。

「双曲拱橋在断面形式上、打破矩形截面的框框、這是一大躍進。目前双曲拱橋採用的波形開口截面形式、因其抗弯……不如工形或箱形截面、抗扭和穩定性能不如閉口截面、故在選擇跨径時也存在適用範圍的問題」

双曲アーチ橋は、アーチ橋でそれまで使われてきた長方形断面という慣行を打破した。大きな躍進である。しかし、双曲アーチの波状断面は、曲げ抵抗では I 型や箱型断面に劣り、捩り強度と安定性に対しては閉口断面に及ばない。結果的に、スパンの選択には適用範囲が存在する。

同じ年に、貴州省交通局が書いた『烏江渡公路大橋設計体会』³⁵⁾ (1975 年) によれば、

「最近我們統計分析了国内一些双曲拱橋……得到的初步看法是：在条件允許有架施工的情況下、双曲拱橋適應於各種跨径……」

最近、国内のいくつかの双曲アーチ橋を調査し得られた結論は、(リブの施工時に) 支保工を用いる場合には、双曲アーチはどんなスパンにも適応できる。

とあるものの、大スパンの双曲アーチ橋では支保工を用いない (ケーブル施工) のが普通なので、施工中のリブの剛性や安定性が大きな問題となる。このような

場合、スパンが長くなればなるほど、断面の問題が重要になる。潘利平らの『双曲拱橋在發展中』(1973 年) には、

「由於大跨径双曲拱橋一般多採用無支架施工、拱肋柔性大、施工安全甚為突出、同時隨着跨径的增大、鋼材用量顯著增加、工藝複雜、造價亦相應增加」

大スパンの双曲アーチ橋は、一般的に支保工を使わずに架設されるため、リブの低剛性が、施工の安全上大きな問題となる。そのためスパンが増大すると、鋼材の使用量が顕著に増え、施工が複雑化し、建設コストも相対的に増加する。

とした上で、双曲アーチ橋のスパンは 80m 以下とすることを推奨している。

双曲アーチ橋は、1980 年代に入ってから中国の鋼鉄生産量が増えると、道路橋でも、鋼橋や R C 橋が多くなり、幹線道路に双曲アーチ橋が架けられる機会は減少していった。しかし、農村部の道路では、まだその使命を終えていない。

5. おわりに

本論文では、技術資料に準拠して、近代から現代に至る中国の石アーチ橋の発達史を再構築した。その結果得られた結論を以下に示す。

(1) 中国近代には、外国から鋼橋の技術が導入され、20 世紀に入ってから R C の技術も加わった。しかし、外国の利権絡みで建設が進んだ鉄道と違い、道路橋では、伝統的な石アーチ橋は実用的な橋梁形式として後年まで生き残った。特に、鋼・セメントの供給地から遠く離れ、かつ、現場付近で石材が確保できる地域で、石アーチ橋は依然として大きなウエイトを占めていた。建設資金が不足していたため、たとい鋼やセメントの供給が容易な地域であっても、鋼橋や R C 橋の数は少数で、数の多い中小の橋梁では、石アーチ橋が幅をきかしていた。しかし、位置付けはあくまで添え物でしかなく、大スパンの橋は鋼と R C に限定され、当時の石アーチ橋の最大スパンはわずか 33m でしかなかった。

(2) 1960 年代初頭の中国では、近代 (～1949 年) に架けられた木橋がつぎつぎと寿命を迎え、永久橋への架替えが必要とされていた。ただし、鋼鉄 (鋼橋)、鉄筋 (R C 橋) などの建設資材が極度に不足していたため、政府は石アーチ橋の建設を強く指導した。結果として起こったのが、中国現代における石アーチ橋の復権であった。石アーチ橋の復活にはこのような「外圧」が働いたが、それを実現可能にした背景には、

①施工技術の改良（「三分砌築法」の導入）、②中国に多い脆弱な地盤への対応（上部構造の軽量化、基礎構造の工夫）、③建設費の削減（石材加工の簡素化、石材の節約）といった技術面での進歩があった。

(3) 中国現代における石アーチ橋のもう一つの特徴として挙げられるのが、双曲アーチ橋という中国独自の複合構造をもつアーチの創出であった。双曲アーチ橋は、石材の加工や支保工の架設に要する労働力が大きく、建設期間も長くなるという普通の石アーチ橋の欠陥を補うべく「巷間」で生み出された橋梁形式で、並列するRCリブ・アーチ（石造のケースも）の上に、煉瓦ヴォールト（石や無筋コンクリートのケースも）を架けるという二段構造を持っていた。そして、導入の経緯が物語るように、①材料や人件費の節約、②工期の短縮がその最大のメリットであった。

最後に、本研究の方法論について、一言申し添えたい。本来、現代の事項を扱おうとすれば、生存している当事者から直接聞くことが最もオーソドックスな方法である。しかし、現代の中国でそのような種類の情報が公開されることはまずなく、本研究のように僅かに存在する技術資料に依らざるを得ないという事情があり、本論文のような構成に落ち着いた。

参考文献

- 山口祐造：『石橋は生きている』，葦書房，1992年
- 陸徳慶ら：『中国石橋』，人民交通出版社，1992年
- 中国公路交通史編集委員会：『中国公路史・第一冊』，人民交通出版社，1990年
- 公路交通編集委員会：『當代中国的公路交通』，當代中国出版社，1991年
- 唐寰澄ら：『中国石拱橋研究』，人民交通出版社，1993年
- 中国公路交通史編集委員会：『中国公路運輸史・第一冊』，人民交通出版社，1990年
- 周鳳九：「湖南公路橋梁概況」，工程，vol.9(4)，p.419-427，1934年
- 岑德彰：『上海租界略史』，1932年，文海出版社復刻，p.94
- 朱壽明：『光緒朝東華錄』，1909，中華書局出版，1984年復刻，p.5846-5847
- 楊豹靈ら：「天津市之活動橋」，工程，vol.9(4)，p.429-437，1934年
- 凌鴻勳：『橋梁』，商務印書館，1933年，p.81-82
- 創建蘭州黄河鉄橋碑記（石碑現存），1906年
- 黄炎ら：「上海定海路橋」，工程，vol.3(3)，p.175-186，1928年
- 韓伯林：「師河橋梁工程」，工程週刊，vol.3(31)，p.482-486，1934年
- 孫輔世：「四川橋梁的三種」，工程週刊，vol.3(33)，p.520-521，1934年
- 茅以昇：「三十年来中国之橋梁工程」，1946年，茅以昇科技文選（1995年版），中国鉄道出版社，p.61-76
- 彭禹謨：「閩省橋梁工程見聞雜録」，工程，vol.4(2)，p.319，1929年
- 彭禹謨：「閩南橋梁工程雜記」，工程，vol.4(1)，p.119-120，1928年
- 全国經濟委員会公路処：『公路橋梁涵洞工程設計暫行準則』，1936年
- 江蘇省公路局：『江蘇省公路局工程標準・建築規程合編』，1930年
- 国家統計局工業交通物資統計司：『中国工業經濟統計資料』，中国統計出版社，1985年，p.170
- 交通部公路局：「中華人民共和国公路橋梁画冊」，人民交通出版社，1978年
- 湖南省交通厅：「黄虎港大跨径石拱橋的修建情况」，公路，1960年3期，p.14-15
- 張先進：「浙江建築石拱橋的經驗總結」，公路，1963年2期，p.4-6,13
- 戴競：「中国公路橋梁技術的新發展」，公路，1989年10期，p.19-23
- 浙江省余姚県工業交通局：「在粘土地上怎樣修建石拱橋」，公路，1960年3期，p.21-23
- 無錫県交通局：「為革命造橋為農民造橋—無錫県交通局集体創造成功双曲拱橋」，公路，1966年2期，p.11-12
- 唐永泉：「輕台薄拱鋼筋混凝土肋双曲磚拱公路橋」，公路，1966年1期，p.21-23
- 微彎板坦肋拱橋編写組：『微彎板坦肋拱橋』，人民交通出版社，1980年
- 潘利平ら：「双曲拱橋在發展中」，公路設計資料，1973年1期，p.1-8
- 嚴松寿：「常州建成淨跨30米鋼筋混凝土肋双曲磚拱公路橋」，公路，1966年9期，p.36
- 廣西壮族自治区交通局工程公司：「旧橋改建為双曲拱橋」，公路双曲拱橋設計施工經驗選編，1975年，p.87-91
- 交通部公路局：「公路双曲拱橋的成長与展望」，公路双曲拱橋設計施工經驗選編，1975年，p.1-3
- 交通部第二公路勘察設計院：『關於双曲拱橋設計的幾点体会』，公路双曲拱橋設計施工經驗選編，1975年，p.34-39
- 貴州省交通局：「烏江渡公路大橋設計体会」，公路双曲拱橋設計施工經驗選編，1975年，p.39-55
- 湖南公路交通史編集委員会：『湖南公路史・第一冊』，人民交通出版社，1988年
- 茅以昇ら：『橋梁史話』，上海科学技術出版社，1979年
- 山東公路史誌編審委員会：『山東公路史・第一冊』，人民交通出版社，1989年
- 茅以昇ら：『中国古橋技術史』，北京出版社，1986年
- 李国豪ら：『中国橋梁』，同濟大学出版社，1993年
- 王展意：『橋林漫話』，人民交通出版社，1994年
- 範立礎ら：『橋梁工程』，人民交通出版社，1996年