

先人たちの 技術

に学ぶ

File No. 1

アーチ構造の盛衰

工学分野では、さまざまな技術が発明され、実用化されましたが、技術の進歩とともに古い技術は^{すた}廃れ、より新しい技術へと進化しました。土木や建築の分野でも、明治時代では^{れんが}煉瓦や石積みによる鉄道構造物が主流でしたが、現在では鉄骨や鉄筋コンクリート構造へと変化し、^{れんが}煉瓦や石材は使われなくなりました。しかし、木造建築のように、鉄道以前から使われ続けている伝統的な材料もあります。

ここでは、木材と同様に土木・建築の構造として古い歴史を誇るアーチ構造を取り上げ、その技術が鉄道分野でどのように継承されたのかを振り返ってみたいと思います。

■ 日本はアーチの後進国

アーチ構造の歴史は、紀元前4000年前のメソポタミア文明にさかのぼることができると言われ、その起原には諸説がありますが、一説にはコーベルアーチと呼ばれる^{せん}尖頭形の擬似アーチ構造（厳密には一種の片持梁^{ばり}）から進化したと推察されています。洪水の後で自然石が偶然にアーチ型に組み合わせられていたことから発想を得たとする



①中世の水道橋に用いられたアーチ構造（ポルトガル・アモレイラ水道橋／15～17世紀）

②沖縄に伝わったアーチ構造（那覇市・識名園の石橋／18世紀）



説もありますが、いずれにしても古代から知られていた古典的な構造のひとつでした¹⁾。

アーチはやがてヨーロッパへもたらされ、古代ローマ帝国の水道橋、中世の教会建築や道路橋として発達しました（①）。アーチ橋は中国にも存在するため、シルクロードを経て中国へ伝えられたとも言われますが、最近の研究では相互に何らかの影響があった可能性はあるものの、それぞれ独自に発展したとする説が有力となっています²⁾。中国には、^{ほうたいききょう}宝帯橋（蘇州・806年／1232年再建）、^{ろこうききょう}廬溝橋（北京・1192年）などのアーチ橋が現存し、さらに唐代には朝鮮半島にも伝わりました。

しかし、少なくとも近世以前の日本にアーチ構造が存在した痕跡は琉球王朝として独立していた頃の沖縄県以外には無く（②）、日本にアーチ構造がもたらされるのは、1634年に明からの渡来僧^{もくすにょじきょう}・黙子如定（1597～1657）が現在の長崎市に架けた眼鏡橋（国重文）を待たなければなりませんでした。日本でも^{ほねばし}笏橋（カンチレバー橋の一種）を用いた猿橋（山梨県：7世紀頃）、「アーチ形」をした錦帯橋（山口

県：1673年）や神社の太鼓橋のようなユニークな架橋技術は存在していましたが、部材の^{せり}迫持つ力のみで維持される純粋なアーチ構造はなぜか発想されませんでした。

長崎にもたらされたアーチ橋の技術は、江戸時代には徐々に各地へと広まり、通潤橋（熊本県：1854年）などが完成しますが、その施工方法は一部の石工集団による「秘伝」として伝えられたため、一般的な技術として広がることはありませんでした。

■ 鉄道とアーチ構造

日本でアーチ構造が本格的に普及するきっかけとなったのは、鉄道の登場でした。鉄道の盛土の下をくぐる水路（暗渠）や道路のために^{れんが}煉瓦や石造による小規模なアーチ橋が建設されました（③）。また、1893（明治26）年に完成した碓氷峠の鉄道建設では、急勾配区間における軌道の^{きよ}ふく進を防止するために有道床を採用することとし、一般的な開床式の鉄製橋梁^{りょう}ではなく、^{れんが}煉瓦アーチ橋を用いました。その最大の構造物が、1893（明治26）年に完成した最大径間18.3m（のちに内巻補強



③明治時代初期の煉瓦造のアーチ橋（東海道本線 島本～高槻・奥田端橋梁／1876）



⑤煉瓦造のアーチ式高架橋（東海道本線有楽町～新橋・内山下町橋高架橋／1910）

をしたため、現在は最大径間16.5m)の碓氷第三橋梁(群馬県・国重文)でした(④)。また、1910(明治43)年に完成した東京駅へと至る新永間市街線高架橋では、ベルリンの市街線をモデルとして赤煉瓦の連続アーチによる高架橋が外堀沿いに建設されました(⑤)。しかし、高架鉄道に必要な路線は限られ、小規模な橋梁にはIビームやコンクリート単版桁などの簡易な構造の桁橋が普及したため、煉瓦アーチ橋の建設はやや衰退しました。

明治時代末になると、煉瓦や石積みで代わってコンクリート材料が普及し、鉄筋または無筋コンクリートを用いたアーチ橋が登場しました。山陰本線の島田川暗渠は、わが国で最初の鉄道用の鉄筋コンクリート構造物として1907(明治40)年に完成しました。しかし、鉄筋コンクリート構造が本来得意とするのは、アーチではなく、はり、柱、床で構成されるラーメン構造で、土木・建築分野を問わず、鉄筋コンクリートラーメン構造が普及することとなりました。フレームで構成されるラーメン構造は、その内部にアーチよりも広い



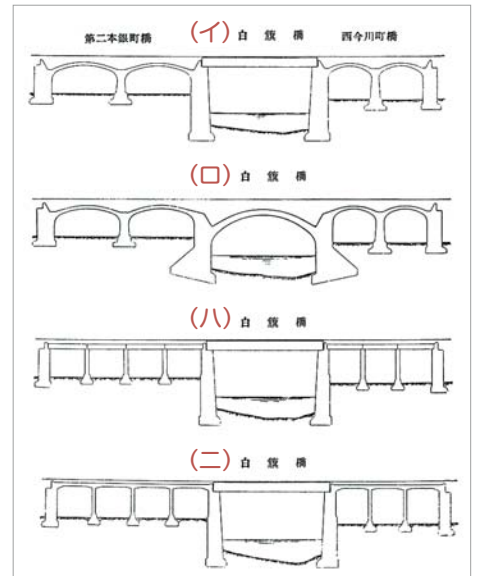
④煉瓦造最大のアーチ橋(旧信越本線横川～熊ノ平・碓氷第三橋梁／1893)

空間を確保することができ、より軽量で少ない材料を用いて、頑丈な構造を実現することが可能となりました。

■ 阿部美樹志のこだわり

アーチ構造からラーメン構造へと進化する時代に活躍した技術者のひとりが、阿部美樹志(1883～1965：『RRR』1997年6月号参照)という人物でした。阿部は、鉄道院技師として1919(大正8)年に完成した東京万世橋間高架橋の設計・施工に従事しますが、この高架線では鉄筋コンクリート構造が全面的に導入され、鉄筋コンクリートアーチによる高架橋を基本として、一部で単純桁式、ラーメン式の高架橋を用いました。

当時の阿部は、アメリカ留学から帰国したばかりで、最新の鉄筋コンクリート技術を用いてこれらの高架橋の設計にあたりました。しかし、鉄筋コンクリートによるラーメン構造はまだ実績が無かったため、すでに実績がある煉瓦アーチ式高架橋をベースとして、



⑥白旗橋付近の比較検討案³⁾

構造のみを鉄筋コンクリートに置き換えました。

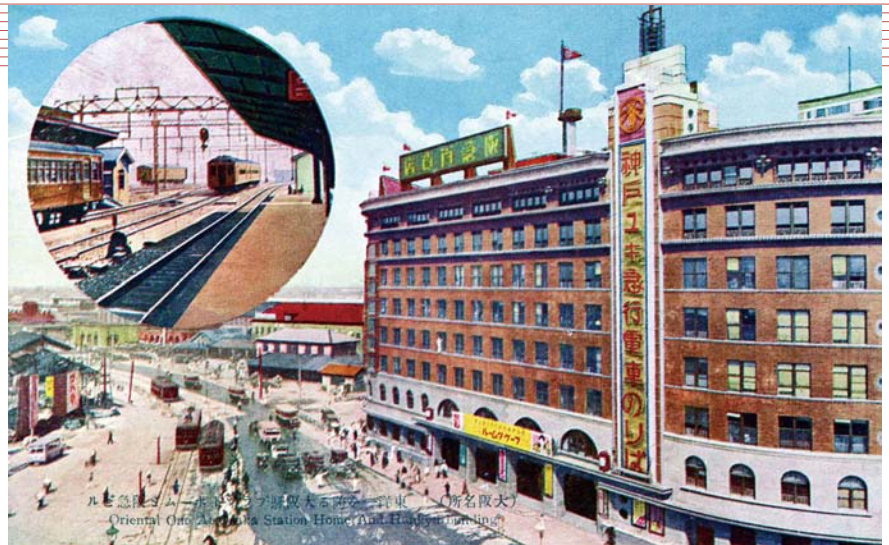
また、東京～神田間の白旗橋の近傍では、側径間を含めて⑥に示すような4案((イ案)アーチ+桁、(ロ案)連続アーチ、(ハ案)単純桁、(二案)ラーメン+桁)が比較検討されましたが、設計計算は複雑となるもののフレームにより堅固な構造を実現できるとして(二案)が採用されました。こうして、最初の鉄道用鉄筋コンクリートラーメン構造による高架橋として、白旗橋を挟んで第二本銀町高架橋と西今川橋高架橋が1919(大正8)年に完成しましたが、この検討案は鉄道高架橋が桁やアーチ構造からラーメン構造へと進化する過程を表した図となっています。



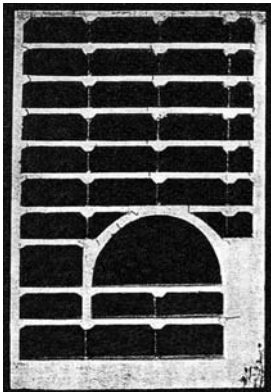
⑦鉄筋コンクリートアーチによる名島川橋梁 (西日本鉄道貝塚線貝塚～名島 / 1924)



⑨アーチを用いた阪急ビルディングのコンコース



⑧阪急ビルディングの外観 (阿部美樹志設計 / 1929)



⑩石膏と鋼棒を用いた阪急ビルディングの模型試験⁴⁾



⑪タイドアーチによる松住町架道橋 (総武本線御茶ノ水～秋葉原 / 1932)



⑫バランストアーチによる第一白川橋梁 (南阿蘇鉄道立野～長陽 / 1927)

東京万世橋間高架橋ののちはラーメン高架橋が主流となり、阿部も数多くのラーメン高架橋を設計しましたが、その一方でアーチ構造にもこだわり続け、1924(大正13)年に完成した博多湾鉄道汽船(現在の西日本鉄道貝塚線)の名島川橋梁や(⑦)、1936(昭和11)年に完成した阪神急行電鉄神戸市内高架線(現在の阪急電鉄神戸線)で鉄筋コンクリートアーチ橋を用いました。また、1929(昭和4)年に大阪の梅田に完成した阪急ビルディング(阪急百貨店)の設計では、1階と2階にコンコースの空間を兼ねたアーチ構造を採用し、模型実験でその効果を確認するなどして

より耐震性の高い構造物を実現しました(⑧～⑩)。

■ 戦時体制のもとでの復活

アーチ構造は、圧縮力のみで構造を維持するため、煉瓦や石材、コンクリートに適した構造でしたが、鋼構造によるアーチ橋も建設されるようになり、上路または下路による鋼アーチ鉄道橋が登場しました。下路タイプの鋼アーチ橋としては、1932(昭和7)年に完成した御茶ノ水両国間の松住町架道橋(支間72m:ブレーストリブタイドアーチ)や隅田川橋梁(中央支間96m:ランガー)があり、上路タイプでは1927(昭和2)年に完成した高森線(現在の南阿蘇鉄道)の第一白川橋梁(中央支間91m:スパンドレルブ

レーストバランストアーチ)、1941(昭和16)年に完成した只見線の第一只見川橋梁(中央支間112m:スパンドレルブレーストバランストアーチ)などが登場し、コンクリートアーチ橋よりも大支間を実現していました(⑪⑫)。しかし、下路タイプは重心が高くなり、部材が車窓の景観を乱すという難点があり、上路タイプは線路の位置が必然的に高くなるため適用条件が制約され、どちらも全国規模で用いるには至りませんでした。

アーチ構造に注目が集まったきっかけは、戦時体制のもとで鉄材料の統制が始まり、鉄鋼の価格が高騰したためとされ、鋼橋に代わってコンクリートアーチ橋が建設されるようになりました(⑬)。しかし、アーチ構造でも、



⑬鉄筋コンクリートアーチによる宮守川橋梁
(釜石線宮守～柏木平／1940)



⑭扁平なアーチ橋として完成した
碓氷川橋梁(旧信越本線横川～熊
ノ平／1963)

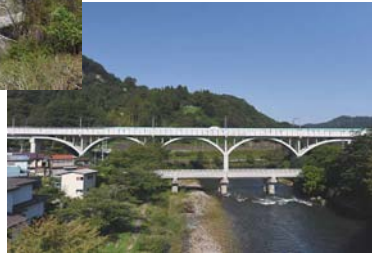


⑮方杖橋として完成した廻戸川橋
梁(北上線ゆだ錦秋湖～ほと
ゆだ／1960)



⑯逆ランガーアーチによる
大沢橋梁(三陸鉄道
北リアス線白井海岸～
堀内／1974)

⑰連続アーチを用いた第3馬淵
川橋梁(東北新幹線二戸～八
戸／2002)



⑱アーチ構造を用いた越谷橋梁
(武蔵野線南越谷～越谷レイクタウン／2003)

大規模な橋梁は鉄筋を必要としたため、同一径間の橋梁を鋼橋で設計した場合とコンクリート橋で設計した場合の鋼材使用量が比較されました。

■アーチ構造のリバイバル

戦後の鉄道橋梁でも、アーチ橋はしばしば用いられました。1963(昭和38)年に、信越本線横川～軽井沢間に架けられた碓氷川橋梁は、支間70.0mに対してライズ(拱矢:アーチの天端とスプリングラインの垂直高さ)が9.0mという扁平な鉄筋コンクリートアーチ橋として完成しました(⑭)。また、アーチ構造とラーメン構造の利点を融合させたラーメンアーチ構造(方杖橋)を用い、1960(昭和35)年に完成した北上線の廻戸川橋梁や(⑮)、1963(昭和38)年に完成した上越線の第八利根川橋梁などが登場しました。鋼アーチ橋でも、1964(昭

和39)年に完成した東海道新幹線の馬込架道橋などでローゼ橋が使用されるなど、新しい技術も導入されましたが、特殊な条件下での適用に限られました。

1974(昭和49)年に完成した三陸鉄道の大沢橋梁では、海岸線沿いのリアス式海岸の景観と、塩害防止の観点から支間86mの逆ランガーアーチが採用され(⑯)、さらに1979(昭和54)年には上越新幹線の赤谷川橋梁が支間126mの逆ランガーアーチ橋として完成しました。近年では、景観に優れた構造としてアーチが選択され、2002(平成14)年に開業した東北新幹線二戸～八戸間の第3馬淵川橋梁(⑰)や、翌年開業した武蔵野線南越谷～越谷レイクタウン間の越谷橋梁(⑱)などにアーチ橋が用いられました。

近年では、既存のラーメン高架橋の補強方法としてアーチ型鋼材を用いた施工法も開発されるなど(『RRR』2012

年10月号参照)、構造物の保守管理にもアーチの技術が用いられています。はるかメソポタミア文明の時代に起原を持つアーチ構造が、人類の歴史とともに途絶えることなく今日まで継承されていることは、この構造が他の構造形式には無い固有の特性を備えていることを示しており、これからもその特長を活かした構造物の実現が期待されます。

(小野田滋／情報管理部 担当部長)

文献

- 1) ベルト・ハインリッヒ編著、宮本裕＋小林英信共訳：橋の文化史一桁からアーチへ、鹿島出版会、1991
- 2) 武部健一：アーチは東漸したか、日本土木史研究発表会論文集、No.9、1989
- 3) 鉄道省東京改良事務所編：市街高架線東京万世橋間建設紀要、鉄道省東京改良事務所、1920
- 4) 阿部美樹志：阪急ビルの構造計算に就て、建築と社会、Vol.15、No.2、1932