

アーチ橋のお話し

0. 始めに

日本は、森林資源の多い国ですので、実用的な橋を架ける材料に木材以外を使う発想は、あまり無かったと思います。単純な石の桁橋を作るとしても、梁の長さとして一間（1.8m）をそのまま渡せるほど寸法の長い石材は、簡単には手に入らないからです。中国文化の影響を受けた寺院や大名の庭園には、石の桁橋が見られます（図1）。或る程度の支間を持たせた切り石組みのアーチ橋は、中国をはじめ、欧州では古くから建設されていました。日本での石造アーチ橋は、中国からの伝来技術で建設されたので、現代以前、沖縄と九州に主に見られる程度でした。アーチ橋のお話は、まず天然石材を使うアーチから始め、次いで、鋼材やコンクリートを使った現代のアーチ橋の解説に進むことにします。



図1 行者橋：京都白川に架かる石の桁橋、建設年不明、（撮影：宮下力）

1. 石組みで空間を作る工夫から

人が生活をする場としての住まいは、通常、柱と梁を組み合わせ、屋根つきの空間を構成します。柱は、石材を積み上げることで構成できますが、石材を梁に使うにはそれなりの長さの長い材料と、それを支える技術が必要です。柱が邪魔にならないような広い空間を持たせる屋根の構成は難しく、さらに、広い平面構造を持たせて二階建てにする構造はありません。古代の宗教設備としての神殿遺跡は、ギリシャのパルテノン神殿に見るように、背の高い石柱がかなり残っています。しかし、梁は、部分的に残っていても、天井部分は殆んど抜け落ちています。欧米風の古い建築物で、外見がレンガや石材で構成されていても、二階三階、さらには屋根を構成するときは梁や床に木材を使います。レンガの壁には、梁を受けるホゾを設ける、などの細部構造があります。レンガ造りでは、3階以上高い建物は多くありません。広い平面的な床組を構成するには、木材の梁を使います。この構造は、火事になると、外側だけが残って、中が焼け落ちてしまいます。差し渡しの広い空間を切り石やレンガなどで渡すには、アーチ(arch)またはドーム(dome)に組むことが経験的に応用されてきました。組み方と建設方法を工夫しないと簡単に崩壊します。アーチ橋は、その上を通路として利用することが目的です。建築物に使われる構造は、ヴォールト(vault)と言います。その下に空間を構成することに目的がありますので、こちらは、装飾様式のデザインが特徴です。アーチ状の梁は、横抑えの力（水平反力）、つまり、踏ん張りがあることで力学的に安定します。アーチの立ち上がりの部分を起拱部(springing)と言い、この部分が横にズレると簡単に崩壊してしまいます。古い石造アーチの形状に半円形が多く見られるのは、まず頑丈な基礎を作って柱を立ち上げ、それを支えとして上にアーチ部分を連続させるように構成するからです（図2）。木造のアーチ橋の錦帯橋は、橋脚が立派であることに注目します（図3）。近代的なアーチ橋は、平らな円弧に構成するようになりましたが、水平反力を計算に入れて設計します（図4）。



図2 ガール水道橋, 14BC, 典型的な半円弧の石造アーチ (撮影: 倉西 茂)



図3 岩国の錦帯橋 1673、木造アーチ (倉西 茂)



図4 アレキサンダー三世橋, パリ, 1890, 鋳鋼アーチ, ライズの低さに注目 (倉西 茂)

2. 圧縮だけで持たせる形

アーチ（漢語では**拱**を使います。訓はこまねく）の力学を扱う書物は多く見られます。少し毛色の違った説明をしましょう。図5は、北斎の描いた「桶屋」です。桶は、薄い板材を丸く並べ、竹で編んだ「たが」で締めて円形を構成します。底板を付ける前のリング状態の組み立には簡単な杵を使います。材料の板断面は台形です。大工が内側を丸く仕上げています。隣り合う板の平らな接触面の延長は円弧の中心を通ります。板材の接触を正確にしないと水が漏れますし、形が決まらず、微妙な釣り合いが崩れると壊れてしまいます。桶本体の板の接触面が剪断変形、つまり**ずれ**がないように、小さなクサビ状の釘を補助的に使います。板の接触を圧縮応力状態にする外力を「たが」が加えています。同じような構造を、割り箸を使って小断面の筒を工作で作ることに挑戦してみれば、この力学構成の難しさが分るはずです。アーチ橋を作るときも型に相当する杵を最初に使い、専門用語では**セントル** (center) と言います。アーチ橋は、この桶の構造形式を部分的に応用した形になっています。桶の「たが」に相当する力を与えるのは、アーチリングの外周り、全体の重量です。石造のアーチ構成は、自重が大きいので、完成すれば、人の通行程度の変動する荷重（活荷重）で不利な応力状態になることはありません。石のアーチ橋を横から見ると、リング状の切り石部材（**輪石**）の断面が見えますが、桶の板と同じように、奥行き方向に長い石材です。長さは橋幅よりも狭いので、幅方向の組立てにも注意が必要です。アーチ橋を下面から見ないと、これを確認できません。普通の人はそのままで注意することはありません。



図5 葛飾北斎 富嶽三十六景 尾州不二見、通称「桶屋」

3. ソリを持たせた城の石垣

もう一つ、アーチ原理の石構造を示しましょう。熊本城の石垣は裾が開いた弧を描いています。この形は、石のアーチ橋半分を縦にした構造と見ることができます。城壁の石積み面は平らが普通ですが、壁面の途中が土圧の横押しで膨らんで破壊しないようにする注意と、敵兵が上れないように垂直に構成することも工夫した構造です。築城の場所は、地盤が軟らかであったことも理由であったのでしょう。エジプトのピラミッドでは、巨大石積み構造であっても、設計された幾何学的壁面からの石のセリ出しを抑える工夫が見られるものがあります。この構造も、専門家は、隅角部の石の組み上げ方に注目します。



図6 熊本城の武者返しの城壁（撮影：加藤雅史）

4. 曲げ剛性を持たせるアーチのリブ

砂利や砂のような粒の集まりは、砂時計で見るように流体のような動きができます。しかし、粒間の摩擦が効いて、細かい個所で目詰まりを起こすことがあります。これは、部分的に粒間でアーチ作用が起きるためです。空間を渡す橋桁は、全体で曲げ変形に抵抗できる構造でないと実用になりません。切り石でアーチを構成するとき、主アーチ曲線を構成する輪石の連なりは、曲げ剛性が無いバラバラの素材です。曲げ剛性のある連続桁材を使うとき、**アーチリブ** (arch rib) と言います。切り石造りのアーチ本体（輪石）が曲げにも抵抗できる梁として機能させるためには、長さに対して、寸法の揃った厚みの石材をズレないように円弧状に並べます。これが石造アーチ橋の特徴です。隣り合う切り石間に圧縮力が作用し、その合力が接触断面内、材料力学的に正確に言えば、断面の**核**内を通るようにします。

近代的なアーチ橋は、鋼、またはコンクリートの部材を使い、曲げ剛性を持たせてアーチリブ本体を構成しますので、リブ断面に曲げによる引張応力度が出ることも許す設計をします。アーチ橋をマクロに見れば、この全体が曲げに抵抗する梁です。曲げは偶力ですので、梁全体の厚みが大きければ梁内部で働く圧縮・引張の対の力が小さくなり、変形も抑えることができます。アーチ橋とは、曲げの作用を起こす圧縮力分をアーチリブで持たせる構造を指します。アーチリブを円弧状に構成したときの中央高さ（**拱矢**、**ライズ**: rise）が換算した梁の厚みを構成し、マクロに見た全体高さで曲げに抵抗する構造になります。橋の長さ（スパン）とライズとの比は、切り石組みの半円弧アーチでは2:1です。かなりの厚みですので、結果的に頑丈で長持ちします。石橋は全体の重量が大きいので、人の重量程度で破壊することはありません。等分布荷重を支えるだけならば、ライズが低くても崩壊しないような、やや扁平なアーチリブ構造も可能です。しかし、図4に見るアーチは約20:1の比です。移動する車両荷重の位置によっては、軸力がアーチリブの厚みを外れる応力状態が起こりますので、切り石でアーチを構成することは不可能です。そこで、近代的なアーチ橋は、アーチリブそのものにも曲げ剛性の大きな部材を持たせた設計をします。鋼橋では、アーチリブをトラスで組み上げて、マクロにはリブとして計算しますが、この構造を**ブレースドリブアーチ** (braced rib) と言います。西海橋がその典型です。(図7)。これと区別するため、図4の単体のアーチ部材を、**ソリッドリブアーチ** (solid rib) と断ることがあります。



図7 西海橋、1955(Wikipedia より)

5. 変形を考える近代的なアーチ橋

石造の構造物は、いったん完成すれば、地震や洪水のような自然災害を受けなければ、1000年単位の耐久性があります。その理由は、石材が殆んど劣化も変形もしないからです。変形は、主に二つの要因で起こります。一つは荷重を受けることでの弾性変形、もう一つが温度の影響です。自然石を使用するアーチ橋は、温度による変形を考える必要がありませんし、自重も大きいので、人馬の通行程度の移動荷重で大きな応力が出ることもありません。近代的なアーチ橋は、材料として鋼か人工石材のコンクリートを使います。道路通行や列車の通行などの大きな移動荷重による弾性変形と、夏冬の気温の変化での長さ変化を考えた設計が必要です。変形の影響が最も大きく現れるのは起拱部です。石造アーチは、この部分が大地と一体になった**固定アーチ**です、構造力学では3次の外的不静定構造（力の釣合条件だけで解析できない構造）です。西海橋（図7）は典型的な鋼の上路形式の固定アーチ橋です。この形式を選んだ理由は、海の上に仮の足場を建設できないので、両岸からカンチレバー状にアーチリブを伸ばす構造にしたことと、支点部の応力が過大なるのを軽減するために斜めのケーブルで仮に支える架設工法を採用したからです。鋼アーチ橋は、アーチリブの起拱部をヒンジ構造にした**2ヒンジアーチ**形式が主に採用されます。ヒンジには、漢字で**鉸**を当て、**二鉸アーチ**と使うことがあります。これは構造力学的には1次の外的不静定構造です。固定アーチに比べると、応力分布の計算に不確定な要素が少なくなります。長大な鋼アーチ橋としては、オーストラリア、シドニーのハーバー橋が観光スポットとして有名です。支点は下弦側のトラス起点だけです。この形式は、後で説明する下路アーチです。カンチレバー方式で架設するとき、トラスの上弦材の端を仮に陸側へケーブルで引く必要がありますので、起拱部のトラス高さを大きくした構造デザインです。



図8 Sydney Harbour Bridge, 1932（倉西茂撮影）

一方、鉄筋コンクリートのアーチ橋は、石造アーチの建設と同じように、原則としてセントルを作ってアーチリブのコンクリートを打ちます。アーチリブは、橋幅と同じ程度の幅広の寸法に構成しますので、起拱部を機械的なヒンジ構造にすることが難しく、固定アーチ橋として建設されるのが普通です。アーチ下側に足場を作成できない架設現場では、骨格を鋼アーチリブで架設しておいて、この鋼アーチを足場とし、これをコンクリートで巻き立て、いわば肉付けする形式でコンクリートリブを完成させます。これを**メラン式**アーチ(J. Melan)と言います。愛知県瀬戸市の庄内川に架かる鹿乗橋は、元は明治43年(1910)に架設された上路の鋼アーチ橋でしたが、昭和26年(1951)、補強のためコンクリートで全面を巻き立てましたので、外見がコンクリートアーチ橋に変身しました。当時としては珍しい補強方法でしたが、今後、既設のアーチ橋の耐荷力を増す一つの方法として提案できる工法です。

6. 曲げ部材とアーチ部材の組み合わせ

アーチ橋は、原理的には、アーチリブが水平な通路を下から支える構造（上路）が基本です。近代的な鋼アーチ構造は、水平な通路とアーチリブとの上下の位置関係に自由な選択ができます。橋を横から見て、通路を下に吊り下げ、全体がかまぼこ状に見える形が**下路橋**です。見かけで言うと中路橋もありますが、通路を吊り下げる構造になりますので、解析上は下路橋で扱います。コンクリートアーチ構造に採用することは殆んどありません。鋼橋では曲弦トラス橋をアーチ橋と間違え易いのですが、アーチ橋ではパネル間に斜めの部材（斜材）が無いこと、曲弦トラス橋では斜材を使うこと、で区別ができます。曲弦トラス橋の上弦材の連なりは、アーチリブと似た力学的性質がありますが、斜材を除いてしまうと全体は不安定構造になってしまいます。橋桁全体として曲げ剛性を持たせるアーチ橋としての構造形式が、大別して三つ、その中に小分類があります。

(1) アーチリブに曲げ剛性を持たせる場合

床桁部分は、一定の間隔（パネル間）で横桁を吊り材で吊り下げた構造になりますので、横桁間は短支間の桁橋です。アーチリブの支持方式として、さらに二種類の選択があります。

(2-1) アーチリブを大地で支える **2ヒンジアーチ**、または(2-2) **固定アーチ**)

(2-3) アーチ端部を細い引張材で弓の弦のように繋ぐ方式 (**タイドアーチ** : tied arch)

(2) 水平桁部に曲げ剛性を持たせる場合

床部分は、一続きの桁橋として構成しますが、それをアーチで補強した形式です。アーチ部分は曲げ剛性を持たない柱材で多角形の形状になります。この形式を発案した Langer の名前を付けて、**ランガー橋**と言います。

(3) アーチリブ・水平桁部、共に曲げ剛性を持たせる場合

この形式は、力学的には、タイドアーチとランガーアーチの間になるものです。日本では**ローゼ橋**(Lohse)と言います。アーチ橋を横から見ると、アーチリブと水平桁部が、共に厚みを持っていることが特徴です。アーチリブと曲げ剛性を持った桁との合成構造ですので、高次の不静定構造です。垂直材は上下の桁材を繋いで、荷重分配作用をします。垂直材も剛な断面に構成すると、橋全体を**ラメン構造** (**フィーレンデール構造**)として計算することになりますが、計算が面倒になる割には、経済的な断面設計になりません。

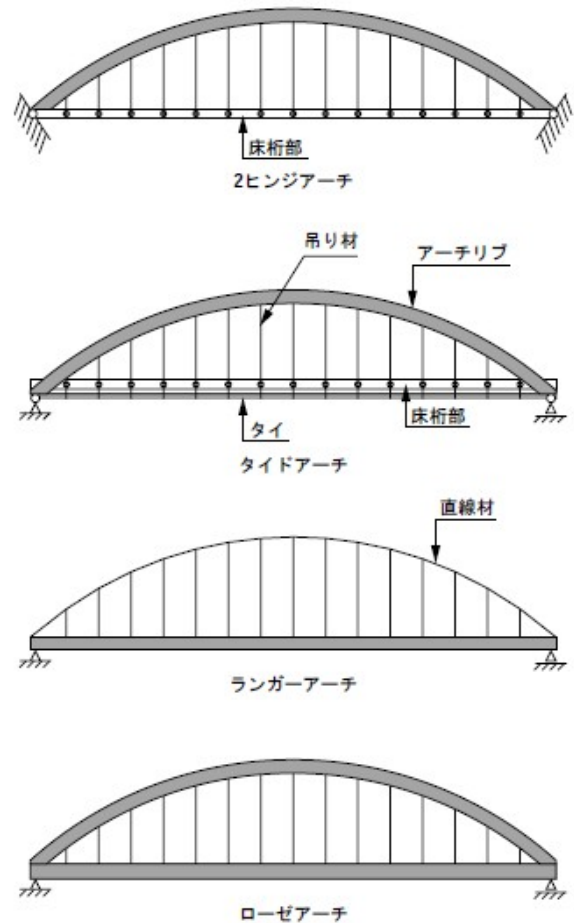


図8 下路アーチの構造形式の分類

構造力学的に言うと、2ヒンジアーチ(2-1)と固定アーチ(2-2)は外的不静定構造であり、それ以外は、単独に取り出しても形の崩れない外的静定構造物です。そのため、中小支間の鋼アーチ橋は、アーチ全体を別の場所で組み立てておいて、全体を架設位置まで押し出す方法や、大型クレーンで吊って架設する一括架設の工法が採られることがあります。鋼橋では、吊り材部分をケーブルで網目状に組むデザインがあり、日本では**ニールセン形式**(Nielsen)と言います。また、トラス状に斜材を使う場合もあり、トラスとアーチとの合いの子のデザインもあります。斜材を使うと、アーチリブに作用する軸力の水平成分が支間方向で変化しますので、**トラスドアーチ**(trussed arch)と言う場合があります。

7. 上路橋の特別な構造形式

上路形式のアーチ橋は、水平な通路部分を下からアーチリブで支えます。これを斜めの直線材にしたものが**方杖橋**です(図9)。頬杖(ほおづえ)が原義の和製漢語です。支えを垂直に使う構造が**ラーメン橋**(Rahmen)です。上路部分を含めて全体を連続させる種々のデザインがあります。優美なデザインとして有名なコンクリートアーチはスイスにあるザルギナトーベル橋(1930)があります(図10)。



図9 方杖橋



図10 ロベール・マイヤール(Robert Maillart, 1872-1940)のデザイン (Frickr from YAHOO!, 20060806)

石造やコンクリートアーチ橋は上路形式が普通ですが、垂直材の個所(腹部)をすべて埋めた形式を**充腹アーチ**と言います。隙間を空ける形式が開腹アーチですが、用語が少し不吉ですので、カタカナ用語の**オープンスパンドレルアーチ**(open spandrel arch)と使います。

鋼のアーチ橋は下路形式が普通ですが、上路形式を採用することも少なくありません。この中、構造計算原理として、ランガー形式とローゼ形式で設計したものを、**逆ランガーアーチ**、**逆ローゼアーチ**と言います(図11)。不思議な言い方ですが、図8のアーチ形状の構成と対比させると、アーチリブと水平通路とが上下逆になっていることから言い始めて、専門用語になりました。この形式は、外的な不静定構造です。逆ランガー形式は、ドイツ語ではStabbogen (**スタブボーゲン**)と言います。なお、逆タイドアーチはありません。

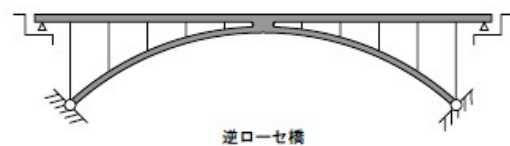
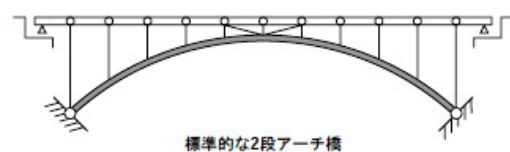


図11 上路形式のランガーとローゼ

8. アーチ系橋梁の動的な挙動

アーチ橋の特徴は、橋全体の外形に円弧を含むことで、長さに対して高さ方向にデザイン上のアクセントがつけます。近代的なアーチ橋を設計するとき、支間が大きくなると、橋幅の寸法に比べて全体高さが相対的に高くなりますので、横方向への変形・転倒に対する安定・振動、などが新しい研究課題になってきました。橋軸方向から見た構造では、左右のアーチリブの起拱部間隔を広げ、アーチリブを含む面をA字形にするデザインも見られるようになりました。西海橋（図 7）は、道路幅員が狭い上路形式ですので、アーチリブの構成面を僅かに傾けています。シドニーのハーバー橋は、幅員が広く、また路面を吊り下げる下路形式ですので、左右トラス面は垂直です。アーチ橋の横方向への変形と応力とは、設計計算上、大きな影響が無いのですが、実際の鋼アーチ橋では横振動や捩れ振動挙動が測定されることがあります。単弦アーチ橋はデザイン的に好まれますが、捩れ剛性を確保する注意を払います。

東名高速道路の皆瀬川橋（図 3）は、1969年に完成した上路ローゼ桁です。この振動の現場測定をしていて驚いたことは、全く車両通行が無いにも関わらず、支間中央の路面上で、橋軸直角方向の水平振動（周期約 1 秒）が常時観測されたことです。振動モードは、1 波形の対称 1 次です。この起振は、谷風です。鋼のアーチ橋は、吊橋に比べれば剛性が大きいので、簡易吊橋で見えるような横振れ制御用の耐風索を必要としませんが、横方向の振動が大きく出ていることは予想外でした。



図 12 東名高速道路皆瀬川橋

鋼アーチ橋の上下方向の振動に関しては、上路形式と下路形式とでは幾らか性質が違います。上路形式のアーチ橋は、アーチの頂点で水平な桁を支えた方杖橋の性格がありますので、その個所が振動モードの節になるような、左右非対称の波形に相当する振動モードが卓越周期の振動として測定されます。しかしながら、図 8 に示すような下路形式のアーチでは、複数の卓越振動が測定されることが多く、理論的に数値計算しても複数の振動モードが得られます。この現実を構造力学的に合理的に説明したいと長い間考えていたのですが、よく分かりませんでした。図 8 の構造系を眺めていて気が付くことは、トラス構造とは違って斜材がない部材の組み立てになっていることです。トラスとしての構造系と仮定すると、これは全体として不安定であって、隣り合う格点間のパネルで剪断変形が起こります。水平な床桁部分は、吊り材で支えられた横桁上で支持された連続桁の性格を持ちます。この部分の振動は、波動のような性質を示すことがトラス橋の振動測定で測定されています。それは、橋の支間方向に波動が往復するような現象であって、その速度は約 200m/sec です。固有振動を、振動数ではなく、振動周期で整理すると、支間を一往復する周期は、橋の全長 L (m)/100 秒がよく合います。この波動が横桁間の縦桁支間（パネル）で折り返すときに最短振動周期になります。鋼のランガーアーチでは、この振動周期の整数倍が観察され、最長の振動周期は、最短振動周期のパネル数倍になっていることが確認できます。

8. アーチ系橋梁の再現設計

近代的なアーチ系の橋梁では、その幾何学的な形状を上下さかさまにすると、吊橋の幾何学的形状と同じになります。構造力学で扱う数学モデルは、式の上では、吊橋もアーチ橋も全く同じ微分方程式を扱います。吊橋ではケーブル力の水平成分を引張力として扱うのに対して、アーチ橋ではアーチリブに作用する圧縮力の水平成分を扱い、便宜的に力の符号は圧縮力を正とします。中小支間のアーチ系の橋梁では、吊橋に比べれば、相対的に剛性の大きな桁材を使いますので、吊橋計算で仮定するような非線形の構造解析をするまでもありません。既設のアーチ橋の耐荷力を調査するときは、実際の部材寸法を使った解析計算の結果と、現地での簡単な振動測定の結果とを突き合わせて判定します。具体的な教材用の計算書は、インターネットで閲覧できるようにしました。