

アーチ橋のお話し

2017年6月

0. まえがき

日本は、森林資源の多い国です。実用的な橋を架ける材料に木材以外を使う発想は、あまり無かったようです。単純な石の桁橋を架けるとしても、梁の長さとして一間(1.8m)をそのまま渡せるほどの寸法の石材は、簡単には手に入らないからです。沖縄県は、小さな島の集合です。台風の襲来が多いこともあって、建造物に使える良質の木材を調達することに不便がありました。日本で最初の石造アーチ橋は、長虹堤(1451)と呼ぶ海中道路に中国風にデザインされた7橋であると言われています。或る程度の支間を持たせた切り石積みのアーチ橋は、中国をはじめ、欧州では古くから建設されていました。長崎の眼鏡橋(1634)は中国の技術者を招いて建設したものです。諫早の眼鏡橋(1839)は、さらに200年後の架設です。明治維新後、欧米都市に普通に見られたアーチ形式の橋を真似て、アーチ橋が東京でも建設されるようになりました。

この文書は、数学的な説明を省いて、一般の人を対象としてアーチ系構造物の解説をまとめました。まず、天然石材を使うアーチ橋から始め、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。実は、和語には、英語の arch に当てる言葉がありません。漢語には拱があります。音が同じ虹を愛称として使った命名もあります。ところが、虹の英語は rainbow ですが、それをカタカナ語として使ったレインボウブリッジは、第一義的な連想がアーチ橋です。東京港にある吊橋に、一般公募の愛称として命名したのは、一種の悲喜劇になりました。この文書「アーチ橋のお話し」は、一般に人にも専門用語の意味を正しく理解してもらうことも目的の一つとしてまとめました。

目 次

0. まえがき	
1. 沖縄に始まった石の橋	
1.1 石材の利点と欠点	
1.2 浮世絵に描かれた石橋	
1.3 沖縄の石の桁橋	
1.4 沖縄の石のアーチ橋	
2. アーチ橋に使われる材料	
2.1 円弧アーチの原理	
2.2 石材には水成岩を主に使う	
2.3 標準化が必要であった連続アーチ	
3. 石造アーチの架設方法	
3.1 最初に足場を作る	
3.2 アーチリングの端抑えが重要である	
3.3 曲げ剛性を増加させる腹部	
3.4 扁平なアーチ橋の建設は難しい	
3.5 ソリを持たせた城の石垣	
3.6 手作業で経験できるアーチの模型実験	
4. 煉瓦、コンクリート、そして鋼材の利用へ	
4.1 煉瓦造アーチ橋の一時代	
4.2 鉄筋コンクリート時代の象徴的な聖橋	
4.3 鋼アーチ橋の登場	
5. 個性のあるアーチ橋	
5.1 錦帯橋	
5.2 西海橋とシドニーハーバー橋	
5.3 上路橋の特別な構造形式	
6. 下路形式の鋼アーチ橋の工夫	
6.1 下路トラス橋の設計から発展した	
6.2 上路橋の特別な構造形式	

用語索引

索引の参照番号は、章・節 です

2ヒンジアーチ	6.1	拱手	2.1	ドイツ橋	3.2
アーチライズ	3.3	拱矢	3.3	トラストアーチ	6.1
アーチリブ	3.3	熊本城	3.5	長崎の眼鏡橋	0
アーチリング	3.1	玄武岩	2.2	ニールセン	6.1
アルベール・カーン	3.1	コーンビーフ	3.6	パルテノン神殿	1.1
アレキサンダー三世橋	4.3	固定アーチ	6.1	ピラミッド	1.1
橋本勘五郎	4.2	ザルギナトーベル橋	5.3	聖橋	4.2
諫早の眼鏡橋	0	西海橋	5.2	フィーレンデール	6.1
ヴォールト	3.2	シドニーハーバー橋	5.2	ブレースドリブ	5.2
碓氷第三橋梁	3.4	斜材	6.1	不静定	6.2
円弧アーチ	2.1	充腹アーチ	3.3	ポルトランドセメン	2.3
オープンアーチ	4.2	将棋の駒	3.6	ポン・デュ・ガール	2.3
オープンスパンドレル	4.2	上路橋	5.3	方杖橋	5.3
応力調整	3.2	スタブボーゲン	6.2	方生橋	1.3
桶屋	2.1	スタリ・モスト	3.1	御影石	2.2
大谷石	2.2	水成岩	2.2	武者返し	3.5
ガール水道橋	2.3	水平反力	3.2	眼鏡橋	3.1
下路橋	6.1	水路橋	2.3	明治維新	4.2
火成岩	2.2	セントル	3.1	モスタル橋	3.1
花崗岩	2.2	静定	6.2	横浜開港	4.1
外的に安定	6.2	石灰岩	2.2	擁壁	3.5
葛飾北斎	2.1	節理	2.2	ラーメン橋	5.3
関東大震災。	4.1	ソリッドリブアーチ	5.2	ランガー橋	6.1
要石	3.2	反り橋	5.1	レインボウブリッジ	0
起拱部	3.2	大理石	2.2	煉瓦	4.1
逆ランガーアーチ、	6.2	タイドアーチ	6.1	ローゼ橋	6.1
逆ローゼアーチ	6.2	たが	2.1	ローマンセメント	2.3
凝灰岩	2.2	太鼓橋	5.1	ロベール・マイヤール	5.3
錦帯橋	5.1	長虹堤	1.2	輪石	3.1
拱	2.1	天女橋	1.4		

参照できるリンク情報

(* 1) PDF 版; 橋の情報と資料、中日本建設コンサルタント株式会社、技術情報
WEB サイトは、

<http://www.nakanihon.co.jp/gijyutsu/Shimada/shimadatop.html>

1. 沖縄に始まった石の橋

1.1 石材の利点と欠点

天然の石材を積み上げた建造物の代表は、ピラミッドです。これが何千年も残っているのは、材料としての石材の利点である耐久性があるためです。一方、欠点は、三つあります。第一は、重量が大きいことです。産地が限られていますので、そこからの輸送が大きな問題でした。欠点の二つ目は、石工(いしく)の技術集団でないと石材の加工ができないことです。第三は、表面の彫刻を別として、木材のような加工に向かないことです。これは、材料力学的に言えば、脆い(もろい)性質があるためです。石材を梁に使うには、それなりの長い材料と、それを支える技法が必要です。柱が邪魔にならないような、二階建て以上で、広い空間を持たせる床構造や、屋根の構成は難しいのです。古代の宗教設備としてのギリシャのパルテノン神殿は、高い石柱はかなり残っていますが、屋根の梁は石造ではなく木造であったため、天井部分は殆んど抜け落ちています。

1.2 浮世絵に描かれた石橋

江戸時代末期に出版された瓦版や浮世絵は、現代のグラビア誌の性格があって、当時の社会風俗を記録しています。名所を紹介したカラー版の錦絵は、橋そのもの、または背景に橋を描き込んであるものが多くあって、橋梁工学的にも参考にできるものがあります。しかし、風景画は、浮世絵師が現地に行かないで、何かの資料を元に、印象・連想・想像を交えて描いた作品も少なくありません。それらを鑑賞する庶民の方も「そんなものか」と割り切っていたようです。図1は、琉球に行ったことのない北斎(1760-1849)が、資料を元に描いた琉球八景のうち、長虹堤(1451)にあったアーチ橋の図柄です。中国風のデザインであることが分かります。



図1 北斎の描いた琉球八景の内1点

1.3 沖縄の石の桁橋

石橋と言えば、単純に長さの長い石材を並べるだけの桁橋です。支間は、一間(1.8m)程度です。高欄も地覆も設けないことが多いので、物騒な通路です。図2の方生橋は、架橋が15世紀末です。現存しています。高欄と親柱があることに注目して下さい。下の図3の石造アーチも高欄・親柱のある石造アーチであって、どちらも丁寧な石材加工で架橋されています。このことが、これらの橋を文化財として保存することの理由の一つです。一方、図1の石造アーチは、画像から見る限り、地覆すらありません。建設の歴史は最も古いのですが、長虹堤そのものが市街地化されてきたこともあって、現存していません。



図2 沖縄県円覚寺方生橋(1498)

1.4 沖縄の石のアーチ橋

現存する日本最古の石のアーチ橋は、上と同じく、沖縄県那覇市円覚寺の天女橋です。図2の方は、寺の本堂に向かう主要通路になっていますが、図3は弁財天堂へ渡る橋です。中国の石工の指導で架設されましたので、路面のデザインが中国風です。橋の中央は平らですが、取り付け部は斜路です。加えて橋の入り口が階段になっています。これは、牛車などの利用が無かったからでした。



図3 沖縄県円覚寺天女橋(1502)

2. アーチ橋に使われる材料

2.1 円弧アーチの原理

英語の arch をカタカナ語にしたアーチの用語は、漢語では拱(コウ)を使います。訓はこまねくです。中国古式礼法で言う「拱手」は、手を胸の前で組むのですが、この組み方をアーチの形状を表す用語にしたようです。日本では、そもそもアーチ形式の構造を知らなかったため、和語では弓形と使うこともあります。カタカナ語のアーチと言う方が一般的です。英語でも弓が bow ですので、トラスの形状を表す用語に bowstring truss (弓弦トラス)があります。ここでは、アーチ橋の原理の説明を、少し毛色の違った例図を使って説明しましょう。

図4は、北斎の描いた「桶屋」です。桶は、上部をやや膨らみを持たせた円筒状なるように、薄い台形断面の板材を並べ、竹で編んだ「たが」で締めつけて円形に構成します。底板を付ける前のリング状態の組み立ては、全体を立てた状態にし、簡単な枠を使います。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、また、微妙な釣り合いが崩れると、ばらばらに倒れてしまいます。板材の接触面がずれないように、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して締め付ける外力を「たが」が加えています。この状態であると、図4のように円筒を横にしても形が崩れません。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。この上半分が半円アーチ橋の原理と同じ力学状態になっています。

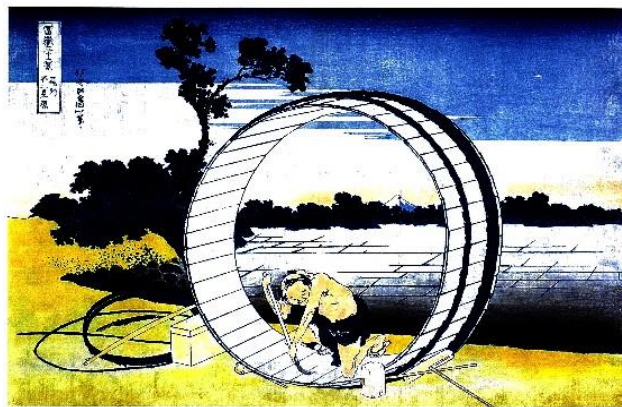


図4 葛飾北斎 富嶽三十六景
尾州不二見、通称「桶屋」

2.2 石材には水成岩を主に使う

図4の木材の板に代えて、石材を使うのが石のアーチ橋です。天然の石材は、火成岩と水成岩とがあります。石材を構造材料として大量に、また標準化した寸法で切り出して使うには、水成岩系が適しています。水成岩は層状に堆積して生成したものですので、平らな面を持った板材のように切り出し易い性質があります。沖縄県は石灰岩系の石材が使われています。大理石は、火山性の熱で石灰岩が変質したものですので、産地に限られます。九州では凝灰岩が多く産されますが、これは火山の噴出物が堆積したものです。栃木県の大谷石(おおやいし)は凝灰岩です。産地が東京に近いので、よく知られた石材です。火成岩系の代表は、玄武岩と花崗岩(御影石)です。火成岩系の石材は、マグマが塊状に固化したものです。そのときに規則的な割れ目(節理)ができるものがあります。石工は、節理を利用して石材として切りだします。こちらは、大量の材料を揃った寸法で供給できない性質があります。石垣などは、地盤から不揃いな石の塊を隙間なく積み上げるため、接触面の加工に、石工の技(わざ)が必要です。門構えの上部やアーチ橋は、下面に空間を持たせるように曲面を構成させますので、石積みは特殊な、また経験を必要とする工事になります。

2.3 標準化が必要であった連続アーチ

図5は、フランス南部に、今も残るポン・デュ・ガール(Pont du Gard)です。アーチ橋と言えば、必ず紹介される水路橋(aqueduct)です。世界文化遺産に登録されていますので、一般に広く知られるようになりました。紀元前19年完成です。典型的な半円弧アーチ構造ですが、全体の巨大さと幾何学的な正確さが見事です。1000人の作業で僅か5年で完成したことも驚きです。大量の標準化された石灰岩の石材を調達しなければならなかったのですが、同時に、架設工事に大量の木材を足場や支保工に使ったはずですが、設計から架設までが標準化されていたと想像されます。水路は、水漏れしないように、ローマンセメントを使ったモルタルを構造接着材として使用していました。これは現代のポルトランドセメントよりも強度があり、耐久性の高い材料です。しかし、これらの工事用材料は火を使って製造しますので、合わせて多くの木材資源を失う自然破壊に繋がったはずですが。



図5 ガール水道橋,19BC,
典型的な半円弧の石造アーチ(撮影:倉西 茂)

3. 石造アーチの架設方法

3.1 最初に足場を作る

図6に見るような半円形の石造アーチ橋を建設するときには、原理的に図4の木桶の、上半分の木材部分を切り石で組み上げます。この部分をアーチリング(輪石)と言い、隣合う石材の接触面の形状を正確に加工する精度が要求されます。図6の2連の半円形は、川の水位が少し上がって、水面に写る半円と合わせて全円の景観が見られます。その形から眼鏡橋と名づけられました。このアーチリングの半円形が景観的にもアクセントを添えています。この建設では、アーチ下面に半円筒形の曲面を構成するように足場を作ります。これを、専門用語ではセントル(center)と言います。この支保工の上面に沿わせて、左右の基礎部分からアーチリングを積み上げます。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、幅方向の組み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。

図7は、ボスニア・ヘルツェゴビナの通称モスタル橋です。正式にはスタリ・モスト(古い橋の意)と言います。まだカラー写真が普及していない時代、アルベール・カーン(1860-1940)の撮影です。このアーチ橋は川面からの高さもあり、支間も広いのですが、どのようにセントルを組みんだかの記録が全く残っていません。再建時には、鋼の仮橋にセントルを載せた写真が残されています。この橋の再建では、橋を2回架け渡した工事でした。

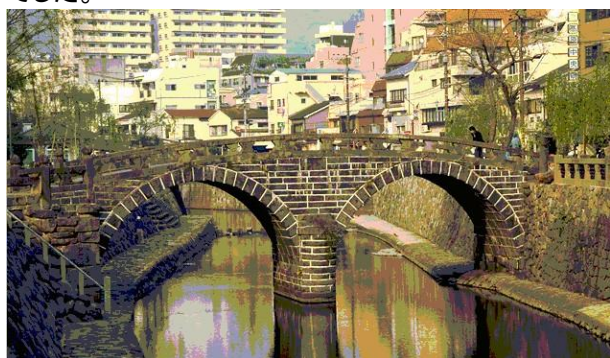


図6 長崎の眼鏡橋(1634)
ウィキペディア

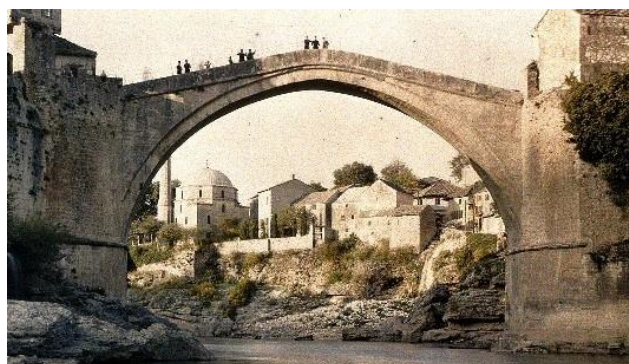


図7 モスタル橋(創架 1566)、内戦 1993 で破壊、
再建 2004 撮影 1912、アルベール・カーン美術館

3.2 アーチリングの端抑えが重要である

アーチ橋は、その上の通路を支えることが目的です。建築物に使われるアーチ構造は、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。アーチリングは、桁の機能を持たせますが、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、この部分が横に開くと簡単に崩壊してしまいます。これは、アーチリングを梁として働かせるとき、下面に引張り応力が出て、亀裂が進行するためです。そのため、軸圧縮力を加えるため、アーチリングの両端を押さえます。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。起拱部からセントルの円形曲面に沿ってアーチリング用の石材を積み上げていきます。傾斜のある部分は石の自重が効いて軸力が働き、正しい接触を確認できます。支間の中央まで来ると、セントルの面がほぼ水平になるため、軸力が効かなくなります。そこで最後の石材として要石(かなめいし)を中央に落とし込んでアーチリングを完成させます。このとき、両端から伸びてきた石材の間隔を押し広げて、軸力が発生するような作業をします。これを応力調整と言います。図8は、第一次世界大戦のとき、ドイツ人の捕虜が徳島県に収容されていたときに架けた石のアーチ橋です。橋長 6m、径間 3m、地覆なしで幅員 2.1m です。捕虜としての身分ですので、特別な工具は使えなかったはずですが、アーチリングの石材の寸法は不揃いですが、台形の左右の、面の角度は、円形アーチに組み上がるように、幾何学的に正確に削られています。ただし、腹部や路面の石材は、図6と比較すれば、相当に不揃いです。



図8 ドイツ橋(1919)
高欄はありません

3.3 曲げ剛性を増加させる腹部

橋は、開いた空間を渡す、長さを持った構造物です。その力学的な性質は、曲げに抵抗できる桁です。曲げ変形を抑えるため、桁長と桁高さとの比は、普通10:1以下にします。アーチ橋の場合はやや特殊であって、アーチリングの支間と、曲線のふくらみの高さ(アーチライズ; rise, 拱矢)との比が当たります。自然石でアーチリングを構成するとき、石材の繋ぎは引張り強度がありませんので、柱を積み上げるときと同じように、接触面に圧縮応力だけが作用するようにします。矩形断面の柱では、中央の縦横 1/3 の狭い範囲に圧縮の合力が作用するようにしないと、断面に引張り応力場ができます。石造アーチが崩壊するときは、アーチリングの下面に曲げによる引張り応力場ができて、石材が部分的に崩落し、それが連鎖的に進行するときです。これを防ぐには、全体の重量を増加させるように、通路とアーチリングの間にも石材を詰め、アーチリング断面全体に追加の圧縮力が作用するようにします。この構造が**充腹アーチ**です。充腹部分は、アーチリングの曲げ剛性も増加させる意義があります。**アーチリブ**(arch rib)とは、曲げと圧縮力に抵抗できる曲がり桁を採用した構造です。

3.4 扁平なアーチ橋の建設は難しい

ここまでの説明に使った石造アーチの写真は、すべて半円形のアーチリングを主構造としています。アーチリングは支点で横抑え(水平反力)が必要ですが、半円形のアーチリング構造は、その力が大きくなりません。しかし、欠点は、通路の位置が、高くなることです。谷を渡る構造には向いています。都市の水環境に架けるには、水運のために橋下の空間を残す分だけ通路を高めなければなりません。扁平なアーチ構造を採用するのは、路面高を橋の所で高くしないようにするためです。この構造は、起拱部でアーチリブが斜めになり、大きな水平反力が生じますので、頑丈な橋脚または基礎構造が必要です。何径間も連続してアーチ橋を建設するとき、半円形のアーチ構造であっても、途中の橋脚の高さを高くすると、通路を移動する大きな活荷重で、橋脚の左右の水平反力の大きさが変わり、その差で、予期しないアーチリングの変形を起こすことがあります。後の第 4.1 節で紹介する碓氷第三橋梁(図 11)がその一例でした。一方、図5のガール水道橋は、移動荷重を殆ど無視できますので、連続アーチであっても、独立した径間単位でアーチリングを建設できたと推定されます。

3.5 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る独特の形を持っていて、**武者返し**と呼ばれています。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。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。石積みの城壁は、現代の土木構造物の機能として見れば、土留めの**擁壁**(ようへき)です。建設当時の石工集団が、これを、アーチ系の構造と意識していたとは考えられませんし、現代でもそうと指摘する人はいないと思います。なお、コンクリートで建設する水力発電用アーチダムは、戦後の一時期ブームになりました。設計の力学的考え方は現代的です。



図9 熊本城の武者返しの城壁(ウィキペディア)
熊本地震(2016)による被災前の写真

3.6 手作業で経験できるアーチの模型実験

専門教育の場で、切り石積みアーチ橋の建設過程を、模型を使って経験させる一つのアイデアが幾つも知られています。図 10 は、木片を使ってアーチリングを構築させた実験の写真です。ライズの低い方の模型は横抑えを使っていることに注目して下さい。材料に、コーンビーフの缶詰を使うデモンストレーションは学園祭などでよく利用されます。この缶詰の形は台形ですし、適度な重さがあることが重要です。ただし、材料調達が、いささか高くつきます。将棋の駒を使うことも試してみましたが、材料素片が小さく、表面も滑らかですので、実験材料には向きませんでした。



図10 木片で組み上げたアーチの模型、秋田大学
環境構造工学講座-(インタネットより探図)

4. 煉瓦、コンクリート、そして鋼材の利用へ

4.1 煉瓦造アーチ橋の一時代

天然石材は、寸法が不揃いですので、工業材料として規格化された煉瓦製品の方が扱い易くなります。日本では、横浜開港(1859)から関東大震災(1923)を経験するまでの期間、欧米風の煉瓦造りの建築物が多く建てられました。しかし、煉瓦積みは、耐震性に問題が多いので、震災以後は鉄筋コンクリート造が積極的に研究される時代に移りました。煉瓦は、標準化された人工石材として、欧米ではごく普通に小規模の構造物の建設に利用されています。煉瓦建築物は、二階・三階、さらには屋根を構成するときは、梁や床に木材や鉄骨を補強材として使います。壁は、窓や出入り口のような開口部も必要です。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もあります。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。しかし、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。

図 11 は、信越本線の鉄道橋、碓氷第3橋梁です。1893 年完成し、1963 年まで使用されていました。完全な半円形アーチであることに注目して下さい。活荷重は重量のある列車ですので、鉄道橋としての経験が浅かった時代の構造物であったため、完成後、すぐに補強工事が行われました。その痕跡は、橋脚のデザインが、上部のアーチの形状とマッチしていないことです。一方、煉瓦造りのアーチ鉄道橋は、東京駅周辺から有楽町、万世橋などに高架橋として相当数が残っています。それらは、1912 年頃に建設され、やや扁平な円弧アーチです。関東大震災にも耐えました。

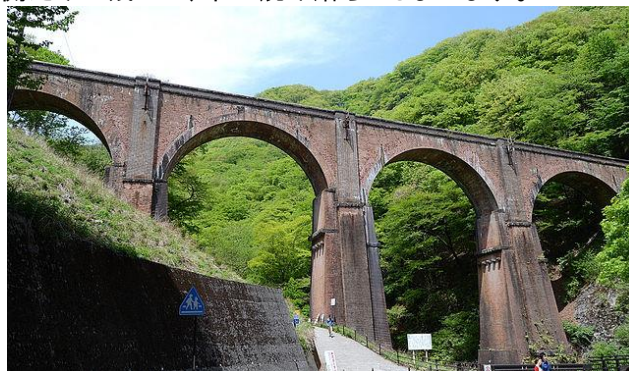


図 11 碓氷第3橋梁(1893);、ウィキペディアより

4.2 鉄筋コンクリート時代の象徴的な聖橋

明治維新(1967)の後、薩長土肥主導の新政府は、欧米文化を性急に学び、それを取り込むことをしました。その一つが、欧米風の都市景観を構成するアーチ系の橋梁の建設でした。日本では、江戸時代末期まで、九州地区だけにしか建設されませんでした。それは、当時の薩摩藩や肥後藩が、アーチ橋の建設技術が九州以外に広がることを、厳しく抑えていたからでした。明治政府は、当時高名であった肥後の石工、橋本勘五郎(1822-1897)を東京に招いて、神田万世橋をはじめ、幾つかの石造アーチ橋を国産技術で架けさせました。しかし、経験技術でアーチ橋を架設することは、もはや時代遅れになっていて、力学を応用する設計が主流になりました。関東大震災が大きな契機となって、材料も自然石材から、鉄筋コンクリートの採用へと代わってきたのです。図12の聖橋は、古典的な半円アーチですが、主構造は、アーチリングから、鉄筋コンクリートのアーチリブの採用になっています。特に、腹部が窓を持つことが近代化の特徴です。この構造を、オープンスパンドレルと言い、このアーチの形式を、充腹アーチに対して、オープンアーチと言うようになりました。



図 12 御茶ノ水の聖橋(ひじり)、1927

4.3 鋼アーチ橋の登場

18世紀半ばからイギリスに始まった産業革命は、当時の新素材であった鉄鋼材料を安価に、また大量に供給できる時代へと変わりました。アーチ橋も、石材系と共に、鉄鋼材料を利用する設計が多くなりました。その特徴は、石材系のアーチ橋では不可能な大支間が架けられること、そして桁橋と見間違うほど低いライズでアーチリブを製作できることです。図 13 は、都市の道路橋ですので、アーチ橋として常識である上路形式です。鉄道橋では、アーチリブをトラスで組む場合が多く、ブレースドリブアーチと言います。



図 13 アレキサンダー三世橋、パリ、1890、
鋼アーチ、ライズの低さに注目(撮影 倉西 茂)

5. 個性のあるアーチ橋

5.1 錦帯橋

山口県岩国の錦帯橋は、日本独自の技術で建設された木造の長大アーチ橋として世界的に知られています。創架は 1673 年、同名で中国杭州の西湖にある橋からヒントを得たとされています。杭州の錦帯橋は石造アーチです。日本の木橋は、殆どが人道橋であって、牛車などの通行を考えない反りの大きな桁橋構造です。通称 **太鼓橋**と呼ばれる大きな弧を描く象徴的な橋も知られていて、階段が付いています。しかし、それらは、力学的にアーチ橋とは言えない構造です。岩国の錦帯橋は、ライズの低いアーチリブ本体だけの構造の反り橋です。ただし、起拱部は階段になっています。中央径間 35.1m、幅員 5m、ライズ 4.7m です。アーチの水平反力を支える頑丈な橋脚にも注目します。錦帯橋は、何度も洪水で流される被害を受けていることと、木橋としての平均的な寿命が20年程度ですので、架け替えが何代にも渡って繰り返されてきました。しかし、基本的な木造アーチとしての構造を継承しています。

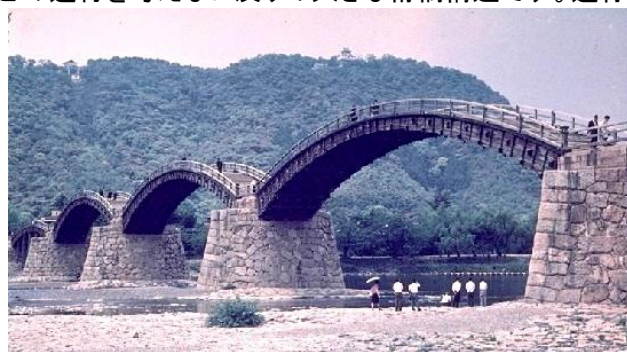


図14 岩国の錦帯橋 1673、(撮影 倉西 茂)

5.2 西海橋とシドニーハーバー橋

アーチ系の長大橋の基本的な骨組みは、鋼のトラスで構成します。通路は、トラスの格間(パネル)に小支間の桁橋を架けます。つまり、長大橋のトラス部分は「橋を載せる橋」です。マクロに観察した主構造のアーチリングは、トラスで組み上げますので、**ブレースドリブ**(braced rib)と言います。図15 の**西海橋**は、標準的な上路のアーチ橋です。図16 のシドニーハーバー橋は、鉄道と道路とを通す二階建ての連続トラス構造を吊り下げ、そのトラスが個別に鉄道用と道路用の桁橋支える複合構造です。一方、桁構造でアーチリングを構成するときは、**ソリッドリブアーチ**(solid rib)と断ることがあります。こちらは、長大支間のアーチ橋には向きません。



図15 西海橋、1955(Wikipedia より)



図16 Sydney Harbour Bridge, 1932 (倉西茂撮影)

5.3 上路橋の特別な構造形式

構造材料にコンクリートを使うアーチ橋は、長大橋にはいささか苦しい構造ですので、景観美を強調する設計に应用されることが多く見られます。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 17)。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の例として、**ロベール・マイヤール**(Robert Maillart, 1872-1940)のデザインによる**ザルギナトーベル橋**(1930)があります(図 18)。



図17 方杖橋



図18 ザルギナトーベル橋(1930)
(Frickr from YAHOO!, 20060806)

6. 下路形式の鋼アーチ橋の工夫

6.1 下路トラス橋の設計から発展した

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3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**。
外的に1次の**不静定構造**です(章末の注を参照して下さい)。

(2-2) **固定アーチ**。3次の外的不静定構造です。

(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)。内部的に1次の不静定構造です。

(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、その複数の格点を吊材で吊ることで、アーチで桁橋を補強した形式です。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、**ランガー一橋**と言います。

(3) 上下の弦材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中間になるものです。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。曲げ剛性を持ったアーチリブと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**ラーメン構造**(**フィーレンデル構造**)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。

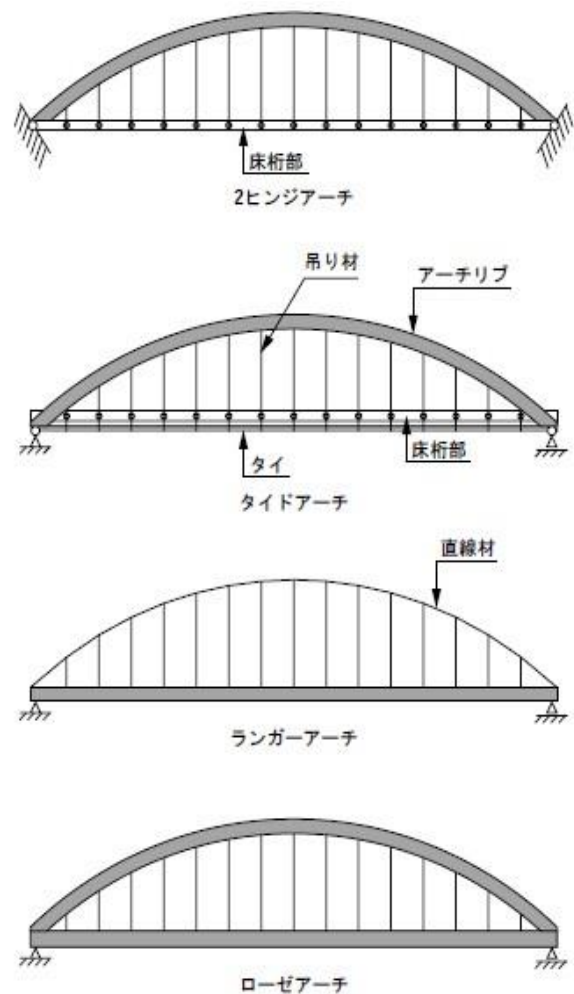


図 19 下路アーチの構造形式の分類

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、**トラストアーチ**(trussed arch)と言う場合があります。

6.2 上路橋の特別な構造形式

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が**充腹アーチ**です。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。

鋼のアーチ橋はトラス構造から発展しましたので、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 20)。不思議な言い方ですが、図 19 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の位置関係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。しかし、筆者は、上路・下路の用語を使うようにしています。この上路形式の構造設計で重要なことは、アーチリブの頂点で、通路とが相対的に横ズレがおきないようにすることです。図 20 では、一対の斜材が描いてありますが、これがズレをとめる部材です。アーチリブ本体は、1 次の不静定構造です。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。

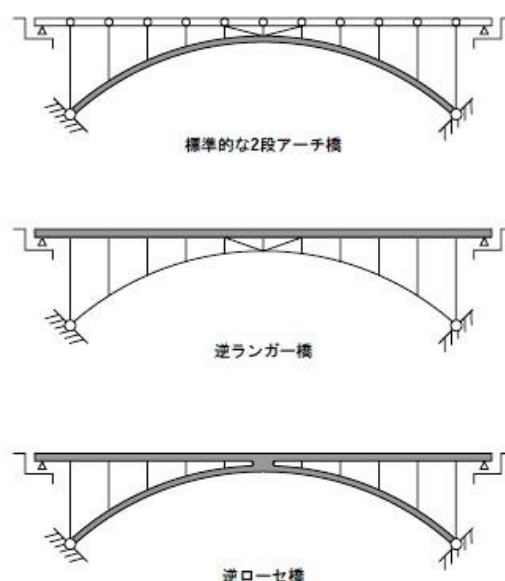


図 20 上路形式のランガーとローゼ

【注】 静定とは構造力学の用語です。骨組み構造の部材力が、釣合条件だけで計算できるときを**静定**、材料の変形などの弾性条件を考えないと計算できないとき**不静定**と言います。構造物は、支点を介して大地で支えます。このとき支点反力を含め、釣合条件だけで部材力がすべて計算できるとき、**外的に安定**で静定な構造であると言います。