

20 世紀型チェーン吊橋の実態とその形式選定に関する考察*

Consideration to the Design Concept of the Chain Suspension Bridge for the 20th Century

町田英治**・樋口輝久***・馬場俊介****

By Eiji MACHIDA, Teruhisa HIGUCHI and Shunsuke BABA

概 要

20 世紀の初頭から中頃にかけて、欧米(特にドイツ・アメリカ)・日本において吊橋の主索部にチェーンを用いたチェーン吊橋(鎖式吊橋)が建設された。しかし、チェーン吊橋は 1820~60 年代にイギリスで発達したものであり、すでに時代にそぐわないものであった。そこで、本論文では、なぜ 20 世紀に入ってからチェーン吊橋が採用されたのかそのなどを解くために、当時の文献を元に、使用された鋼材の種類やその強度、自定式構造の設計法など 20 世紀に架けられたチェーン吊橋がどのような特徴を有していたのかを分析し、ヒンデンプルク橋、三姉妹橋、清洲橋の設計経緯について考察を行った。そして、特殊鋼の開発に伴う新しい構造形式の創出や自定式構造に対するアイバーやフラットバーの架設時の利点からチェーン構造が採用されたと結論づけた。

1. 序論

吊橋を歴史的な視点から眺めてみると、荷重を支えて垂曲線(Catenary)をなす主索の構造によって大きく二つの形式に分類することができる。一つは鉄や鋼を材料とするアイバー(先端に孔を有する細い鋼板あるいは鋼棒)等をピンで連結した構造のチェーン吊橋(鎖式吊橋)、もう一つは鋼製のワイヤーから構成されるケーブルを用いた吊橋である。現在の吊橋においてはワイヤー・ケーブルが用いられており、1998 年架橋の世界最大スパン 1991m を誇る明石海峡大橋では、合計 36830 本のワイヤーから直径 1122mm の主ケーブルが作られている。一方、チェーン吊橋は 1820~60 年代に、特にイギリスにおいて建設された構造形式であり、ワイヤーの開発以降は、その存在意義を薄めていった。イギリスでは 20 世紀に入ってから新たなチェーン吊橋の建設は行われていないにもかかわらず、ドイツ・アメリカ・日本等で 16 橋のチェーン吊橋が架けられたことが現段階で判明しており(表-1)、19 世紀とは逆の現象が生じている。そこで、なぜ当時すでに時代にそぐわないものとされていたチェーン構造が採用されたのかという疑問が生じてくる。

この 20 世紀に建設されたチェーン吊橋(以降、本論文においては、20 世紀型チェーン吊橋と称す)の中で、関東大震災後の帝都復興事業において復興局が 1928(昭和 3)年に建設した清洲橋のデザインについては、1915

年にドイツのケルン市において、ライン川に建設されたヒンデンプルク橋の設計コンペ上位案を参照したものであることが明らかになっている¹⁾。しかし、この 20 世紀型チェーン吊橋のルーツとも言えるヒンデンプルク橋になぜチェーン構造が採用されたのかについては論じられていない。

そこで本論文では、20 世紀型チェーン吊橋を対象とし、当時の日本及び諸外国において出版された図書、工学系雑誌に掲載された設計工事報告や論文、並びに諸外国の

表-1 20 世紀型チェーン吊橋一覧(著者作成)

橋 名	場 所	架橋年
Elizabeth	Hungary・Budapest	1903
Lordville-Equinunk	USA・New York	1904
Schonausteg	Switzerland・Berne	1906
Grunwaldzki	Poland・Wroclaw	1910
Dresden	USA・Dresden	1914
Hindenburg	Germany・Köln	1915
Andy Warhol(SeventhStreet)	USA・Pittsburgh	1926
Admiral Scheer	Germany・Berlin	1927
Forst	Germany	1927
Rachel Carson(NinthStreet)	USA・Pittsburgh	1927
清洲橋	日本・東京	1928
RobertoClemente(SixthStreet)	USA・Pittsburgh	1928
Krefeld-Uerdingen	Germany・Krefeld	1936
Rio Tamasalupa	Guatemala・Asuncion Mita	1937
Neuperlach	Germany・Munich	1992
Nassau	Germany・Nassou	2005

*Keywords: 橋梁史、チェーン吊橋、鋼材

** 倉敷市役所
(〒710-8565 倉敷市西中新田 640)

*** 正会員 博士(学術) 岡山大学大学院助教(環境学研究所)
(〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

**** 正会員 工学博士 岡山大学大学院教授(同上)

Web サイトの記述を整理分析することにより、その実態及び形式選定の理由を明らかにしようと試みる。

2 章では、19 世紀に建設されたものも含めチェーンを構成する部材形状を示すとともに、20 世紀型チェーン吊橋に用いられた鋼材の種類やその強度、自定式構造の設計法等について分析を行い、どのような特徴を持ち合わせていたのかを明らかにする。

3 章では、ヒンデンプルク橋、1926～28 年にアメリカのピッツバーグで架橋された三姉妹橋、そして、清洲橋について架橋以前の状況や計画着手から竣工までの経緯を述べ、2 章で明らかにした特徴を踏まえた上で、①用いられた鋼材、②自定式構造の観点から形式選定の方針について考察を行う。なお、論文の構成上必要な箇所以外では、旧字体や旧仮名遣いは新字体及び現代仮名遣いに改めた。

2. 20 世紀型チェーン吊橋の実態

(1) チェーン部の構成

19 世紀に建設されたチェーン吊橋の主索部材で最も一般的なものは铸铁製のアイバーである。アイバー同士の連結方法としては、図-1 に示すように 2 本のアイバーの頭部の孔をリンク部品の孔に重ね、ボルトで連結する。そのためチェーン同士の連結部にはアイバーの円形の頭部が二つ見えることになる。そして、吊材(ハンガー)を 2 本のアイバーの間に挟むようにして設置する。このタイプのチェーンを有する代表的な吊橋としてトーマス・テelford が手がけた 1826 年完成のメナイ橋(Menai Straits Bridge)や、同じくテelford が同年に建設したコンウェイ吊橋(Conway Suspension Bridge、写真-1)がある。なお、メナイ橋のアイバー・チェーンは、1939 年の大改修によって鋼製チェーンに取り替えられた²⁾。コンウェイ吊橋も 1904 年に大改修が行われ、アンカレイジの補強及びケーブルの追加が行われたが、建設当初のチェーンが使用されている。

特殊なアイバー構造としては、ドイツの Pegnitz 川に 1824 年に建設された Kettensteg 橋(スパン 27.9m)がある。写真-2 に示すようにバーの先端が円形ではなく、T 字型になっており、フックの部分にリンク(輪)を引っ掛ける

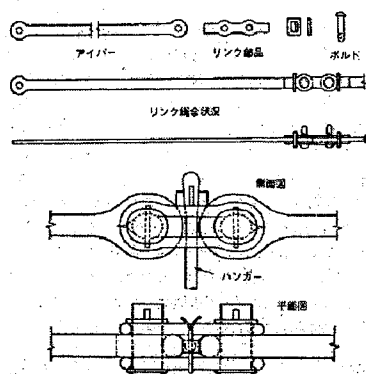


図-1 アイバー・チェーンの連結方法

(出典：川田忠樹、『近代吊橋の歴史』、建設図書、p. 30, 2002)

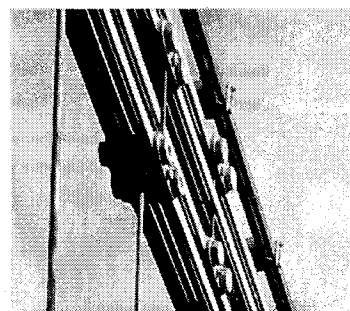


写真-1 コンウェイ橋のチェーン部

(出典：http://lambcutlet.org/gallery/Cymru/Looking_out_on_Conwy_Suspension_Bridge?full=1)

ことによってバーを連結している。上下 2 本のチェーンが用いられ、チェーンには交互にハンガーが定着されている。

20 世紀型チェーン吊橋でも主索の構成部材で最も多く用いられていたのはアイバーである。しかし、19 世紀に架けられたものとの違いは、鉄ではなく鋼製のため、1 本のアイバーは棒状ではなく板のように 3～5cm と非常に薄く、数本のアイバーを交互に重ねて頭部をピンで連結することによってチェーンを構成した。そのため、チェーンの連結部には円形の頭部が一つしか見えない。このタイプの橋としては、アメリカのピッツバーグにおいて 1926 年から 28 年にかけて建設されたスパン 131～4m の 6、7、9 番道路橋(Sixth、Seventh、Ninth Street Bridge)がある。これらの 3 つの橋はお互い距離も近く、構造も同じであるため三姉妹橋(Three Sisters Bridge)と呼ばれている。

材料が鋼製となり、製作が幾分容易になったとはいえ、アイバーを展延や鍛造によって製作するには製造者の高い技術が要求される。そこで、1903 年にドナウ川に架けられたエリザベス橋(Elizabeth Bridge、写真-3)に用いら

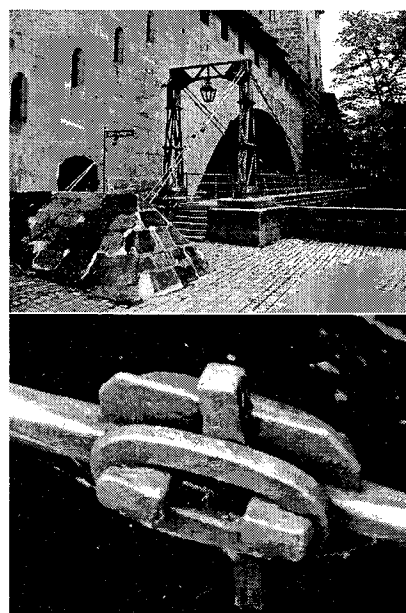


写真-2 Kettensteg 橋及びチェーン部

(出典：<http://www.bridgemeister.com>)

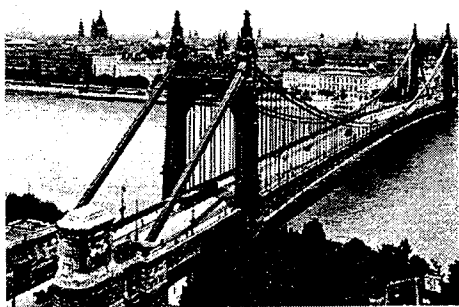


写真-3 エリザベス橋

(出典：ディルク・ビューラー，
『BRÜCKENBAU』，鹿島出版会，p.134，2003)

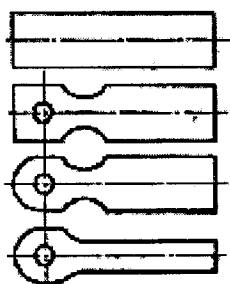


図-2 エリザベス橋のアイバー製造過程

(出典：三浦七郎，『鋼橋 下巻』，常盤書房，p. 182, 1936)

れたアイバーは、アメリカ製のアイバーと外観は変わらないように見えるが、頭の部分は展延や鍛造に頼らず、頭と同一の幅を持つ鋼板から切り出すことによって製作された(図-2)。しかし、この製造方法では工費が嵩み、また鋼を切って円形の頭部を造るため無駄な材料が出ることになり³⁾、エリザベス橋のアイバーがこの製造法で作られたのは例外的と言えよう。

なお、アイバーの頭部を展延によって製作するのが不可能な場合には、平らな鋼板を縦に重ねてピンで連結したフラットバーをアイバー・チェーンの代用とする方法がとられたが、その際は「釦の両端にはピン釦を當て、補強する」³⁾ 必要があった。ヒンデンブルク橋と清洲橋がこの構造を用いている。図-3 にヒンデンブルク橋のフラットバーの連結部とピン釦を示す。

長径間の橋においてはチェーンの断面積が大きくなり
ピンの長さが過大となるため、チェーンを二本並べるか、
上下に重ねる。後者のうち、格間長(チェーン連結部の間

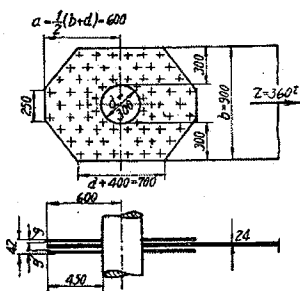


図-3 ヒンデンブルク橋の連結部

(出典：三浦七郎，『鋼橋 下巻』，常盤書房，p. 182, 1936)

の長さ)がそれほど短くない場合には、吊材を上チェーンと下のチェーンに交互に連結する必要があった³⁾。その他に、アイバーあるいはフラットバーの製造時の注意点として、美観的にチェーンの幅は支間の $1/200$ 以下が望ましいとされており、エリザベス橋においては、約 1m の間隔を保つように二つのチェーンを上下に重ね、チェーンの幅を支間の $1/580$ に制限するよう配慮がなされていた⁴⁾。

(2) 鋼材

20 世紀型チェーン吊橋の大きな特徴の一つとして、チェーンに様々な構造用鋼材が用いられていることが挙げられる。18 世紀から 20 世紀までの間における鉄鋼材料の変遷は目覚しく、橋梁の構造形態の決定にも影響を与えたと考えられる。橋梁全般に用いられた鋼材について述べると、そのほとんどが軟鋼及び中鋼であり、それは日本に限らず諸外国においても同様であった。特に軟鋼は 1890 年から最も用いられ 20 世紀前半においても最盛を極めていた⁵⁾。軟鋼及び中鋼は炭素を主成分としていたため、炭素鋼 (Carbon steel) または普通鋼 (Ordinary steel) と呼ばれていた。強度の高い鋼を必要とするときは高炭素鋼が用いられた。その他にもマンガン、クロム、ニッケル、バナジウム、珪素、タングステン、モリブデン、チタニウムなどを添加した合金鋼 (Alloy steel) 又は特殊鋼 (Special steel) が開発され、使用された⁵⁾。これらの炭素鋼及び合金鋼の相互の関わりについて述べると、強度の高い鋼材を必要とするときには、合金鋼か高炭素鋼が用いられ、1910 年頃からは価格の低廉な高炭素鋼が用いられていたが、炭素は含有量が多くなるほど靱性は低下する。そのため高炭素鋼は非常に脆弱であり、代わりに強度が高く、可鍛性が錬鉄と遜色ないニッケル鋼が全盛を極めた⁶⁾。しかし、第一次世界大戦 (1914~1918) 以後、ニッケルの値段が高くなったため、シリコン鋼が取って代わった。

橋梁用鋼材の中でもチェーン部の材料においては、基本的には炭素鋼で造り、大きな強度を必要とする時には合金鋼や高炭素鋼が用いられた⁷⁾。各橋の鋼材について見ていくと、エリザベス橋にはシーメンス・マルチン鋼が、ヒンデンプルク橋には0.8%~1.1%のニッケルとクロムからなるクロム・ニッケル鋼が使用されている⁷⁾。清洲橋の主索にはマンガン鋼であるデュコール鋼(Ducol steel)が用いられた。鋼の強度を増加させるには合金鋼のようにマンガンやニッケル、シリコンなどの特殊元素を添加するほかに外熱処理法による方法もあった。American Bridge Company は第一次世界大戦の間に引張強度 56kg/mm²、降伏点 35kg/mm²の低強度熱処理鋼(Low strength heat-treated steel)を開発し、三姉妹橋に用いた⁸⁾。

ヒンデンプルク橋に使用されたクロム・ニッケル鋼について触れておくと、1889年にイギリスにおいて鋼のニッケル添加量を増やしたニッケル鋼が開発され、その後、アメリカなどで実弾射撃による強度実験の結果、ニッケル

ル鋼の強さが証明され、世界の列強国は装甲板に競って使用し、さらに鋼の改良を続けた⁹⁾。一方で19世紀末頃からクロムの研究が盛んに行われるようになり、1912年に当時ドイツ最大の軍需企業であるクルップ社においてクロムの含有量を増やすことによって耐蝕性を増したクロム・ニッケル鋼が開発された。また、清洲橋に用いられたデュコール鋼はイギリスで開発されたものであるが、その経緯を述べると、第一次世界大戦後、列強国はその余勢をかって軍備拡充競争に狂奔していたが、各国とも深刻な経済不況で軍備の支出に悩んでいた¹⁰⁾。そこで、1921年にアメリカ大統領が軍縮を提案し、主力艦の保有量の英、米、日、仏、伊の比を5、5、3、1.75、1.75に制約することで合意に達した(ワシントン軍縮会議)。しかし、イギリスでは造艦制限に対処するために海軍とDavid Corville社が協力してデュコール鋼の開発を行った¹¹⁾。これらの軍事目的で開発された鋼材が使用されたことも以前のチェーン吊橋とは異なった特徴と言える。

(3) 自定式吊橋

16橋の20世紀型チェーン吊橋の内、11橋が自定式吊橋となっている。特にドイツではNeuperlach橋は道路に架かっているため、河川に架かる橋は全て自定式構造が用いられていることになる。自定式吊橋の特徴は、主塔の基部の支持条件がヒンジとなっていることとケーブル端部をアンカブロックではなく補剛桁に定着していることである¹²⁾。吊橋は通常ケーブルを定着する大きなアンカーが両端にあるが、自定式吊橋はアンカーを持っていないため、橋の重さはケーブルを通じて全て主塔にかかる。そのため橋脚の支承がヒンジとなっている。ヒンジは通常、中小吊橋に適用されるもので、主塔のスレンダー化が可能となり、支承下の下部工内のアンカー構造は簡単となるが、塔の建設時の安全性や維持管理の面からは固定の方が有利とされている¹³⁾。また、ケーブル端部を補剛桁に定着しているため、ケーブル張力の水平分力を補剛桁の圧縮力としてとらせることが可能となる。以下、20世紀前半における技術者達の自定式吊橋に対する認識を明らかにする。

a) 自定式吊橋の特徴

世界で最初の自定式吊橋は1899年にドイツのElbe-Trave運河に架けられたMühlenthor橋(スパン42m)である¹⁴⁾。しかし、自定式と同様の構造を持つ吊橋としては、オーストリアの技師Josef Langerが1870年に架けたWrsowic橋があるが、この橋はケーブルを主径間の中央においても補剛桁に定着しており、本格的な自定式吊橋とは若干異なるものであった¹⁴⁾。その後、ドイツでは1915年にヒンデンブルク橋が、1929年には自定式吊橋では当時世界最大径間を持つCologne-Mülheim橋(スパン315m)が建設された。アメリカではピッツバーグの三姉妹橋が初の自定式吊橋で、1933年にはLittle Niangua河にスパン68mの橋が建設されている。

このように19世紀から20世紀前半には多くの自定式

吊橋が建設されているが、通常の吊橋とどちらが経済的かについては、「無碇着吊橋(註：自定式吊橋)と碇着吊橋といずれが経済かは色々の問題即ち橋の高さ、碇着部の工費、活荷重、ケーブルの種類、架設の状態等に依って異なり一概には云へないが、直又は些少の反りのある補剛桁では800呎以下は無碇着の方が経済」¹⁴⁾とあるように各条件によって異なるが、一般的にスパン約240m以下では自定式吊橋の方が経済的だと認識されていた。

また、当時は自定式吊橋を採用した新たな橋梁形式も考えられており、プラハのGregor GKrevoschein教授は1910年にセントローレンス川を渡る橋の設計において、自定式吊橋とアーチ橋を共用した案を提出している(図-4)。彼は他にも同様の設計案を小さいものはスパン72m、大きなものはGolden Gate橋(全長2825m、ケーブル吊橋)でスパン1219mにも及ぶ橋まで提案している¹⁵⁾。これらの設計案は実現されることは無かったが、自定式吊橋に注目が寄せられていたことは確かである。



図-4 自定式吊橋とアーチ共用案

(出典：Howard Mullins, 「無碇着吊橋に就て」, 土木建築雑誌, シビル社, Vol. 15, p. 37, 1936)

自定式吊橋の利点として、以下の4点が挙げられる¹⁶⁾。

- ①外部定着が無く、橋梁全体を一体として、任意のトラス桁や突桁が用いられるような如何なる場所にも適用することができる。適当な基礎までの距離が遠い場合には外部定着を無くすることは非常に重要であり、自定式吊橋が推奨される。
- ②経済的にも美観的にも吊橋が最も望ましいとされる場合、水平張力に抵抗する基礎土質の条件が悪い場合にアンカブロックを必要としない自定式吊橋が適している。
- ③可航河川や運河においてクリアランスを広く取るため高い位置に橋を建設する際、通常の吊橋では周囲の土地が都市部のように平坦である場合、定着部を側径間の端からかなり遠くへ設置しなければならない。そのため、チェーンもしくはケーブルを余分に伸ばさなくてはならないが、自定式吊橋はこのような心配が無く(図-5)、通常の吊橋に比べて経済的となる。
- ④吊橋の定着部に用いる材料の一部分をある程度まで建築的趣味によって配置することができ、固有の自然美を強調する上部構造が可能となる。

以上のように自定式吊橋は架橋地点の基礎土質が信頼できない場合や、航行上の理由から桁下のクリアランスを広く取る必要がある時に有効であったと言える。

自定式吊橋の欠点としては、前述したように沈下に対して弱いことその他、以下の2点が挙げられる¹⁷⁾。

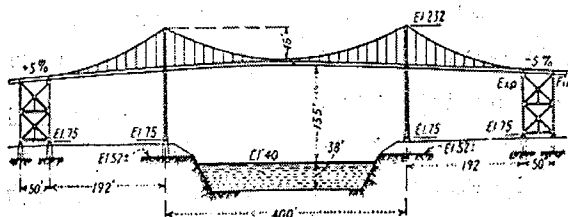


図-5 自定式吊橋の一設計例

(出典：Howard Mullins, 「無碇着吊橋に就て」,
土木建築雑誌, シビル社, Vol. 15, p. 37, 1936)

①自定式吊橋では補剛桁を足場上に架設しなければならないが、水深、可航面積ともに大きな河川湖水では足場の架設費用が高くなる。しかし、アイバーやフラットバーからなるチェーン構造を用いる場合は例外であり、その場合は側径間をまず足場上に架設した後、中央径間を両端から突桁として架設していき、中央で閉合することができる。この方法を用いる際には仮の抗压斜材をチェーンと補剛桁の間に格間ごとに入れ、上部横構も必要となる。また、桁の全死荷重の圧力を充分に出す大きさのあるジャッキを閉合点に設置しなければならない。

②最初に補剛桁を架設するため足場を長時間洪水の危険にさらす恐れがある。

b) チェーンを用いた場合とワイヤーを用いた場合の違い

主索の部材として Mühleuthor 橋では鋳結したものを使用していた¹⁸⁾。ヒンデンブルク橋や清洲橋にはフラットバーが、三姉妹橋にはアイバーが用いられた。ワイヤー・ケーブルの構造としては、唯一、Little Niangua River 橋に撚ケーブルが使用されている。自定式吊橋をチェーンで架橋する場合とワイヤーを用いて架橋する場合の違いを述べると、チェーン構造とする場合にはワイヤー構造よりも約 1/3 の実応力が作用し、弾性係数は 1/4 倍となる。そのためチェーンを用いればより剛度のある構造となり、補剛桁のモーメントにおいて経済的となる。しかし、チェーン自体の大きな重量に伴う水平張力の増大によって経済性は失われてしまう¹⁸⁾。

ワイヤー・ケーブルの場合はケーブルの端が温度変化によって移動するため、通常の吊橋よりも現場計算や架橋時における調整が困難となり、弛みや径間の変化を生じることになる。実際にワイヤー構造とした Cologne-Mülheim 橋や Little Niangua River 橋ではケーブルの調整に苦労したようで、「最初の場合は鞍にケーブルがおかれた時に中央径間の中央にて計算の位置上約 20 寸にある事がわかったので、吊材の結合のために補剛桁をジャッキで上げねばならなかった」¹⁸⁾。しかし、チェーン構造の場合は温度変化に伴う弛みが生じないため、「特に無碇着吊橋に適していると云へる」¹⁸⁾。前述した欠点①からも、当時の技術者の間には自定式吊橋を架橋するにはワイヤーよりもチェーンの方が適しているという認識があったと考えられる。

3. 20 世紀型チェーン吊橋の形式選定

(1) ヒンデンブルク橋

ドイツでは世界で一番多い 6 橋の 20 世紀型チェーン吊橋が建設されている。代表的な 20 世紀型チェーン吊橋としては、ヒンデンブルク橋(スパン 184m、写真-4)が挙げられる。この橋は建設当時、世界で最も美しい吊橋とされ、その後、諸外国において建設された一連のチェーン吊橋のモデルになったと言われているが¹⁹⁾、第二次世界大戦中に爆撃によって破壊された。現在のヒンデンブルク橋は、1948 年に架けられたカンチレバー橋である。

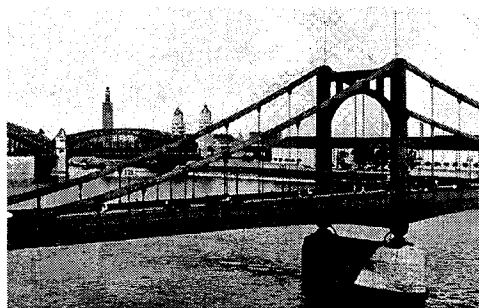


写真-4 ヒンデンブルク橋

(出典：http://www.anicursor.com/colpicoldd.html)

a) 架橋までの経緯

以前は中央部が開閉可能な橋(橋長 400m)が 1822 年に架けられ、船が横切るときに料金を徴収し、船を通していた(写真-5)²⁰⁾。しかし、開閉の度に橋上の交通が妨げられ、このままでは市の発展にも影響を及ぼしかねないということで橋の架け替えが計画された。計画においては、①現在の橋は 2 車線であったが、幅員を 8.5m に広げ、4 車線にすることが軍部によって要求され、②2 つの橋脚の間は船の航行の障害とならないように間隔を広くすることや③ケルン大聖堂などによって構成される都市の美しい景観に調和するようなデザインとすることが求められた²¹⁾。これらの要求や問題を解決するために市は German bridge building companies と共同で橋のデザインに関するコンペを 1898、1910、12 年の 3 回に亘って開催した。コンペの結果、上位には、①補剛桁にトラスを用いる吊橋案、②補剛桁に単純桁を用いる吊橋案、③アーチ案の 3 つの案が残った。既に 1911 年に完成していたホーエンツォレルン橋(アーチ橋)と対称の形になるという理由から吊橋とすることが決定されて、③アーチ案は落



写真-5 以前のヒンデンブルク橋

(出典：http://www.anicursor.com/colpicoldd.html)

選した²²⁾。その後、比較的容易に設計が行えるという理由から、②補剛桁に単純桁を用いる吊橋案が採用された。

b) 形式選定

ヒンデンブルク橋が主索部にワイヤー・ケーブルではなく、フラットバーを用いた理由に関して、自定式吊橋と使用された鋼材の二つの観点から考察する。

ヒンデンブルク橋は、2.(3)でも述べたように自定式吊橋で、ライン川の地盤固定が信頼できるものではなかったため自定式吊橋が採用された²³⁾。他にも前述したように、②2つの橋脚の間は船の航行の障害とならないように間隔を広くすることが求められていたことから、2.(3)a)で述べた「架橋地点の基礎土質が信頼できない場合や、航行上の理由から桁下のクリアランスを広く取る必要がある時に有効である」といった利点を有する自定式構造が適していたと考えられる。自定式吊橋にはワイヤーよりもチェーンの方が望ましいという認識が当時の技術者達の間にはあったが(2.(3)b)参照)、アイバーの製作が困難だったため、代用としてフラットバーを主索部材として用いたと結論付けることができる。

2.(2)で述べたように、ヒンデンブルク橋にはドイツ国産のクロム・ニッケル鋼が用いられている。また、ヒンデンブルク橋の建設に携わった技術者がハンガリーのブダペシュトに派遣され、チェーン吊橋の構造を学んでいる²³⁾。エリザベス橋がアイバーを用いたチェーン構造となったのは橋のすべてをハンガリー産の材料で建設しようと考えたからである²⁴⁾。したがって、エリザベス橋の形式選定を参考し、自国産の鋼材を用いるという理由からヒンデンブルク橋にチェーン構造が採用されたとも推測される。

(2) 三姉妹橋

アメリカでは5橋の20世紀型チェーン吊橋が架けられており、「1925年迄は米國の吊橋は短徑間の場合に限り例外としてチェーンを用いて」²⁵⁾いた。これは耐久性や19世紀末のアメリカにおいて、チェーン構造はワイヤー構造よりも高い剛性を有していた²⁶⁾との認識があったためと考えられる。アイバーはイギリスで発明され、発達したものであるが、20世紀において、その製作技術が最も優れていたのはアメリカであり、当時わが国で出版された書籍でも、「前者(註:アイバー)は米國が其の生國とも言ふべきで一般橋梁工事の抗張材に廣く使用され、従て其の製造技術は殆んど完成の域に達してゐる」²⁷⁾と記されている。また、「熱處理鋼より、高強度アイバーを製出するようになってからは、チェーンはケーブルの一大敵國となつた。〔中略〕夫で米國に於ける吊橋は次の時代に於てはアイバーチェーンが益々全盛を極むることゝなるだろう。針金(ワイヤー)製造業者は從來の深刻なる失敗にも拘はらず未だ完全に撃退されず、最近は熱處理アイバーと再び競争場裡に立たんと第二段の方法を講じつゝある」²⁸⁾と記されているように当時のアメリカではワイヤー・ケーブルよりもチェーンを主索に用いるとい

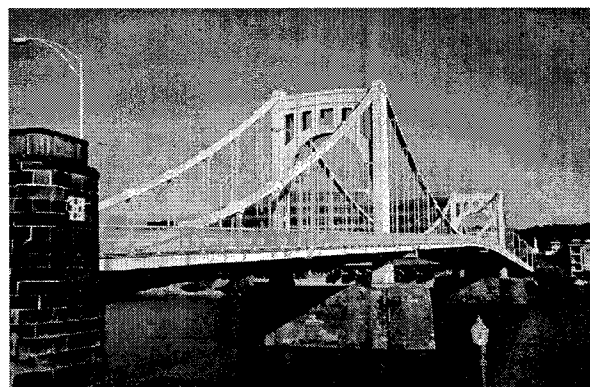


写真-6 三姉妹橋 (撮影:馬場俊介)

う機運も強まっていた。

アメリカにおける代表的な20世紀型チェーン吊橋は三姉妹橋である(写真-6)。設計者は技術者のT.J.Wilkerson及びVernon R.Covell、デザイナーのA.D.Nutter、建築家のStanley L.Roushの4人で、6番道路橋にはRoberto Clemente、7番道路橋にはAndy Warhol、9番道路橋にはRachel Carsonという別名が付けられている。

a) 架橋までの経緯

チェーン吊橋が架けられる以前、6番道路橋はアーチ・トラスに始まり、鉄製のワイヤー・ケーブル吊橋を経てプラットトラスが、7番道路橋にはアイバー・チェーンを用いた2径間の吊橋が、9番道路橋にはアーチ橋が架けられていた²⁸⁾。1900年頃、陸軍省(War Department)は州、国の産業の発展のためには水運の確保が重要と考え、これらの橋のクリアランスが船舶の航行には不十分であるとして、橋の架け替えをアレゲーニー郡に対して要求した。そこで、技術者達の間でいくつかの設計案が考えられるようになった。設計案として半円形に反った形の太鼓橋や、昇開橋(船舶が通行する時に、橋桁をジャッキなどで上昇させて通過に障害がないようにする可動橋)が計画されたが、それぞれ陸軍省の求めるクリアランスの確保が十分でなく、且つ郡が橋上の交通のため橋の勾配を3%にしたかったことやコストの問題などから採用には至らなかった²⁹⁾。

その後、1923年に6、9番道路橋を連続トラス、7番道路橋をカンチレバーにする案が計画され、陸軍省からもようやく了承を得た。当時、ピッツバーグでは25000ドル以上のコストが掛かる橋の建設に対しては、1911年に創設された芸術委員会(Metropolitan Art Commission)の承認が必要であり、技術者達は計画案を委員会に提出した。芸術委員会はこれらの案を美的ではないとして却下し、より魅力的なデザインを考えるよう技術者達に求めた。その後、技術者達はデザインを再考し、トラス、アーチ、吊橋など様々なデザインを改めて芸術委員会に提出した。その結果、最も美観的に優れるとして吊橋が望ましいとされた。美観的な面以外にも当時アメリカでは1907、16年と相次いで生じたケベック橋の崩壊に関して多くの議論がなされており³⁰⁾、トラス橋に対する疑念な

どが生じていたことも連続トラス案が採用されなかったことの一因と捉えることができる。

b) 形式選定

前述したように、三姉妹橋の設計案として太鼓橋や昇開橋が計画されていた頃、ドイツで自定式吊橋(=ヒンデンプルク橋)が竣工したことがアメリカで報告され、また、George A.Hool と W.S.Kinne の両技術者が彼らの著書において「Movable and Long-Span Steel Bridges」として言及している³⁰⁾。他にもカンチレバー橋及び吊橋の構造に関する有名な技術者の一人がヒンデンプルク橋の強度について紹介するなど³⁰⁾、自定式吊橋の設計詳細はアメリカにおいても直ちに紹介された。

芸術委員会は吊橋が望ましいとしていたが、以前6番道路橋にワイヤー・ケーブル吊橋が架かっていた頃にアンカレージが滑動するなど²⁶⁾、地盤条件の悪さが吊橋を建設する際の問題となっていた。しかし、2.(3)a)で述べたように自定式吊橋は基礎土質の条件が悪い時に有効であり、且つクリアランスの確保も可能なため、三姉妹橋建設に対する様々な条件を満たす構造であった。そのため、自定式吊橋の採用が決定され、ヒンデンプルク橋ではアイバーの製作が困難だったため、その代役としてフラットバーを主索部に用いていたが、前述したように、当時アメリカは世界的にみてもアイバーの製作技術に秀でていたため、アイバー・チェーン構造を採用したと考えられる。

(3) 清洲橋

清洲橋(写真-7)は日本で最初に自定式構造を取り入れた吊橋であるが、その理由として、『帝都復興事業誌』に「吊橋は、ケーブルの水平反力を、巨大なる礎材に錠碇せしめるのが普通であるが、かくの如きは、橋臺地を使用する事多く、且つ此の構造は一連のケーブルの終端が、兩岸に碇着し、地震動その他に関して好ましからざる影響があるから本橋に於いては、ケーブル水平反力を補剛鉄桁に依ってとらしめ、水平反力に関しては、橋自身が全く基礎に獨立せる自碇式吊橋の構造とした。此構造は獨逸ケルンのライン川吊橋に同じである。」³¹⁾と記されている。つまり、清洲橋架橋地点の地質条件が良好でなか

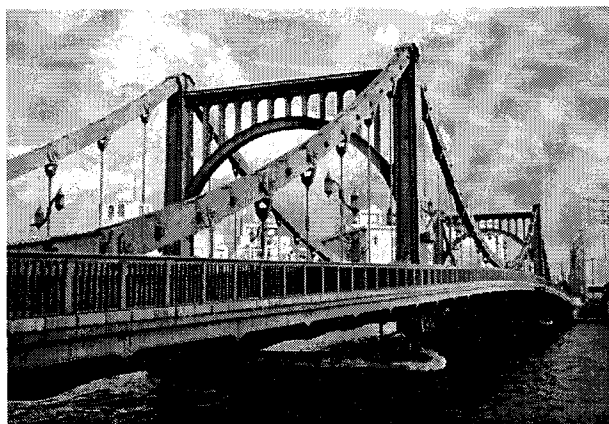


写真-7 清洲橋 (撮影：馬場俊介)

ったためケルンのライン川吊橋(ヒンデンプルク橋)を参考にして自定式構造を採用したことがわかる。自定式が採用された結果、自定式吊橋の建設においては架橋上の立場からワイヤーよりもチェーンの方が望ましいとされており、且つアイバーの製作が困難だったことからヒンデンプルク橋と同様にフラットバーを代用とし、アイバーは側径間の最後の連結に限定して使用した³²⁾チェーン構造となったと結論づけることができる。欧米で建設されていた特殊鋼を用いたチェーン吊橋の技術を学習し、且つ独自性を与えるためにデュコール鋼を採用したものと考えられる。

4. 結論

本研究では主に20世紀の前半に欧米、日本において建設された20世紀型チェーン吊橋に焦点を当てた。

19世紀における鑄鉄製のアイバーと20世紀型に用いられている鋼製のアイバーとは、その材料だけでなく定着方法等も異なっており、20世紀型チェーン吊橋は厳密にはチェーンとは呼べない全く新しい形式の橋と捉えることができる。また、ヒンデンプルク橋は第二次世界大戦の最中に破壊されたため、清洲橋は主索部にフラットバーを用いた世界で唯一現存する橋という新たな歴史的価値も明らかになった。

形式選定においては、20世紀型チェーン吊橋の架橋地点は概して地盤状態が乏しく、且つ船の航行のため桁下のクリアランスを広く取ることが要求されていた。そのため、ケーブル(チェーン)端部を地盤に固定する必要がないために、地盤状態が悪い場合にも建設可能で、且つクリアランスを広く取ることができるという長所を持つ自定式吊橋が採用された。自定式吊橋の建設においては架設上の立場からワイヤーよりもチェーンの方が望ましいとされており、アイバー又はフラットバーを用いた形式が採用された。

清洲橋は2000(平成12)年に永代橋とともに、第1回の「土木学会選奨土木遺産」に選定され、三姉妹橋のうち6番道路橋は竣工年の1928年に「American Institute of Steel Construction's 1928 award」で、「The Most Beautiful Steel bridge」として表彰されている³³⁾。これらの橋以外についても、その歴史的意義・重要性が認識されるとともに、現存するチェーン吊橋については、保存の動きが推進されることを期待したい。

謝辞

資料の収集に労を厭わずご協力して下さった京都大学付属図書館及び岡山県立図書館の方々に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 中井祐,「帝都復興事業における隅田川六大橋の設計方針と永代橋・清洲橋の設計経緯」,土木史研究(論文集), Vol. 23, pp. 13-21, 2004

- 2) 川田忠樹,『近代吊橋の歴史』, 建設図書, p. 42, 2002
- 3) 三浦七郎,『鋼橋 下巻』, 常盤書房, p. 184, 1936
- 4) 前掲 3), p. 185
- 5) 三浦七郎,『鋼橋 上巻』, 常盤書房, p. 43, 1932
- 6) 前掲 5), p. 44
- 7) 前掲 3), p. 175
- 8) 前掲 3), p. 176
- 9) <http://www.kitchen-bath.jp/public/40nenshi/2.1sutenresum-onogatari.pdf>
- 10) <http://www1.cts.ne.jp/~fleet7/Museum/Hsteel.html>
- 11) 堀川一男,『海軍製鋼技術物語』, アグネ技術センター, p. 184, 2000
- 12) 佐伯彰一,『図解橋梁用語事典』, 山海堂, p. 2, 1986
- 13) 『橋梁工学ハンドブック』編集委員会,『橋梁工学ハンドブック』, p. 263, 2004
- 14) Howard Mullins,「無碇着吊橋に就て」, 土木建築雑誌, シビル社, Vol. 19, p. 170, 1936
- 15) 前掲 14), p. 172
- 16) 前掲 14), pp. 170-171
- 17) 前掲 14), p. 171
- 18) 前掲 14), p. 173
- 19) F.Schleicher,「Die neue Straßenbrücke über den Rhein bei Köln-Deutz」, DER BAUINGENIEUR, Volume24, p. 17, 1949
- 20) <http://www.z-m.com/bruckeng.htm#top>
- 21) Fritz Eiselen,「Vom Wettbewerb um eine zweite feste Straßenbrücke über den Rhein bei Köln-Deutz」, DEUTSCHE BAUZEITUNG, p. 561, 1911
- 22) 前掲 21), p. 562
- 23) <http://www.st.nagasaki-u.ac.jp/ken/matsuda/bridge-culture-tech/7-chap.html>
- 24) ディルク・ビューラー,『BRÜCKEN BAU 博物館で学ぶ橋の文化と技術』, 鹿島出版会, p. 133, 2003. 6
- 25) 前掲 3), p. 178
- 26) HISTORIC AMERICAN ENGINEERING RECORD,『THREE SISTERS BRIDGES』(No.PA-490), p. 9, 1998
- 27) 前掲 3), p. 179
- 28) 前掲 26), p. 7
- 29) 前掲 26), p. 22
- 30) 前掲 26), p. 25
- 31) 内務省復興事務局,『帝都復興事業誌 土木編 上巻』, p. 344, 1931-1932
- 32) Richard Scott(著), 勝地弘 et al(訳),『タコマ橋の航跡—吊橋と風の闘い—』, 三恵社, p. 406, 2005
- 33) 前掲 26), p. 38