

特別講演 I

長大スパン橋梁へいたる歴史的展望

名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻
山田健太郎

1. はじめに

橋は、地理的な2点をつなぐのみならず、その技術は、テクノロジー・トランスファーによって世界をつなぐ。さらには、技術の伝承によって世代をつなぐとも言える。ある時代の橋は、その時代を背負っている。橋に用いる材料が入手可能かどうか、また橋梁技術があり技術者がいるかどうか、橋梁架設をうながす要求と、それを支える経済力があるかどうか、など、その時代特有の背景が橋にはある。最近の長大橋の建設では、材料の進歩、計算機の利用、汎用構造解析プログラムの開発や大型構造物試験装置による検証など、関連する技術とそれを支える時代背景があったことがそれを可能にしたと思われる。

橋のスパンを長くすることが夢であった時代、いくつかの大きな発明や発見、あるいはチャレンジがあった。筆者は、最近の長大橋に至る重要な要素は、大雑把に言って、鉄(鑄鉄、鍛鉄、鋼)の適用、ワイヤーケーブルの発明と吊橋への適用、それに溶接技術の開発と進歩であったと考えている。そこで、18世紀後半に始まった英国の鑄鉄橋の Iron Bridge から、現代の鋼を用いた長大橋建設まで、それらの技術が生かされた歴史を著名な橋梁を対象にたどってみたい。

2. 橋の形式と歴史

橋の原型は、手近な倒木を利用した桁橋であり、石をうまく積んだアーチであり、蔦やかずらなどを利用した吊橋であったと言われる。原始橋梁は、まさにそのような形であったのであろう。現在でも、原始橋梁は、日本庭園の景観を形づくる飛び石、木橋、土橋、あるいは石橋から想像することができる。

木の橋の欠点は、耐久性が小さいことである。伊勢神宮の宇治橋のように、20年ごとの式年遷宮に合わせて架け替えられるのは別格として、数十年毎に架け替えられるのが普通である。耐久性を上げるため、屋根をつける(カバードブリッジ)、木口に屋根をつけ水が入らないようにする、などの工夫をしている。木の橋は、火災に弱いことも欠点であり、有名なスイスのルツェルンのカペル橋は、1994年火災で焼失した。ちなみにこの橋は、1333年に最初の橋が架けられて、火災で焼失するまで12回ほど架け替えられている。平均すれば50年に1回であり、この程度が木のカバードブリッジの耐久性なのであろう。

石材の引張強度は小さく、割れが生じやすい。そのため、石を桁橋に使った例は少なく、京都の行者橋等は珍しい例であろう。したがって、石橋と言えば、その強い圧縮強度を利用するアーチ橋が主流である。耐久性が高いことから、現在でもかなり多くの石造アーチ橋が残されている。しかしながら、石の高い圧縮強度を利用して、アーチ橋を架けていったが、そのスパンはせいぜい30m程度で、605~617年頃に架設された趙州橋(中国、河北省趙県)のスパン37m程度が限界であろう。長大スパンの橋梁を建設するためには、新たな材料開発が不可欠であり、それは人工的に作られるものを待たなければならなかった。

3. Iron Bridge が架けられた鑄鉄橋の時代

鉄の生産は、3000年ほど前にヒッタイト帝国から始まったと言われる。その後、長い年月を経て14~15世紀に、木炭高炉(溶鉱炉)による鉄の大量生産がライン河畔で始まった。この時期には、大量の木炭を消費することから近隣の森林資源を荒廃させるような弊害も生んでいる。1709年には、英国の Abraham Darby

により、木炭とコークスの混合、その後同名の息子によって 1735 年頃にはコークスを使う高炉製鉄技術が開発され、鉄の大量生産が可能になった。セバーン川の上流、Coalbrookdale (Iron Bridge) がその地であり、英国の産業革命の礎となった。当時、この地では大量生産された鑄鉄を使ったいろいろの製品が製作され、活況を呈していた。窓枠、ポット、ストーブ、テラス、バルコニー、柱、彫像、など、あらゆるものにその製品を応用していった。その延長上として、鑄鉄で橋を架けることが提案され、実現されたものが Iron Bridge とも言える。その意味では、世界最初の鉄橋は、鑄鉄製品の優秀性をデモンストレーションするための構造物であったとも言える。石の代わりに鑄鉄を使うと言った発想であったので、スパン 30 m 程度で、橋台、アプローチは石造りとなっている。

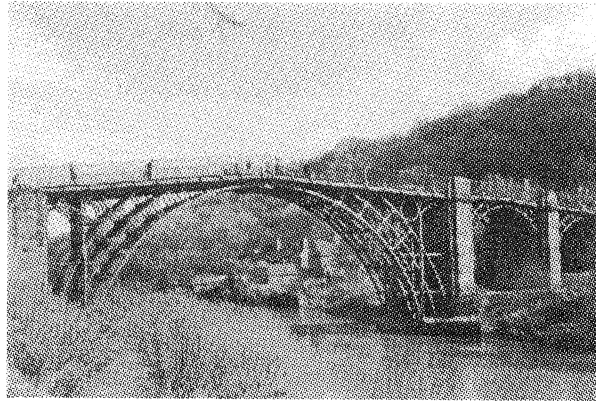


写真1 世界最初の鋼鉄橋 Iron Bridge

この橋は、Thomas F. Pritchard の設計で、Abraham Darby III が生涯借金に苦しめられることになりながら完成させたものである。継手などは木の継手の形式を踏襲している。ちなみに、この橋梁の建設には、民間の資金を活用し、通行料金を徴収することで建設費を償還する形であった。今で言うなら、BOT、あるいは PFI である。橋のたもとには、料金徴収所があるが、橋守りの宿舎でもあったのであろう。現在は小さな博物館になっており、当時の通行料が表示されている。ちなみに、1971 年にチャールズ皇太子が最後の通行人として通行料金を払い、その後は無料となっている。

この橋も 200 年ほどの間に、かなりの補修・補強が行われている。橋台には 1791 年頃に早くも亀裂が発生し、1801 年には橋台を橋脚に作り直し、木橋でつないでいる。1802 年には、それを鑄鉄アーチに替えた。この小スパンのアーチはその後 4 度修復されている。交通量が増えるにしたがって、この橋の安全性が疑問視され、1920 年代には、コンクリート橋に架け替える案が出た。しかし、1934 年になって歴史的建造物 (Ancient Monument) の指定を受け、保存されることになった。1969 年には、橋台が 48cm も押んできたことがわかり、アーチ部材にき裂も見つかった。そこで、1972-73 年に川底にコンクリートの控えをつくることでそれ以上の変形を押さえる工事が行われた。1つの橋が歴史を作るためには、不断の維持・管理、補修・補強が必要ながよく解る。

この橋は、1986 年に周辺の産業革命の遺構とともに世界遺産に登録された。

4. 運河橋、Menai 吊橋、Clifton 吊橋が架けられた時代

産業革命以降の橋梁史に、Thomas Telford の名前を忘れるわけにはいかない。古い石造りの教会の修復から始まった彼のキャリアは、石より圧倒的に強度が高い新しい鑄鉄を使うことで一挙に花が開いた。当時の物資の輸送には、船が一番効率が良かった。産業革命で必要になった大量の物資を輸送するため、内陸部に運河を建設することになり、Telford に活躍の場が与えられた。鉄道の建設以前の話である。Telford は、入手できる最良の材料を使って運河の建設を行っていったが、そのうち渓谷をわたる運河橋に鑄鉄を用いた。これが、1805 年の Pontcysyllte 橋 (発音は、Pont-ker-sullteh) である。渓谷のはるか高い位置に運河が

あり、そこを船がわたっていくのは、当時としては大変な驚きであったろう。英国には、Narrow Boatに乗ってのんびりと運河めぐりをする優雅な休暇の過ごし方もある。修復された部分も有り、時代背景が異なるものの、200年近い歳月を持ちこたえる構造物をつくるという思想は学びたいものである。

鑄鉄を使いこなしTelfordは、さらに道路建設や拡幅の工事を政府から任される。その過程で、スパン約98mのConway吊橋、スパン約174mのMenai海峡にMenai吊橋を建設した。これらはいずれも1784年コートによって発明された攪拌式精錬法（パドル法）によって生産されるようになった錬鉄製のアイバーチェインを使ったものである。最新の材料を取り

り入れて当時としては画期的な吊橋を架けていったのである。なお、錬鉄は、炉から取り出した鉄塊を、含有する不純物を鎚打除去し、脱炭(0.5-1.2%程度)したものである。彼は、1820年には英国土木学会(Institute of Civil Engineers)の初代会長に選ばれており、名実ともに土木技術者としてあがめられている。

鑄鉄橋は、その後鉄道橋を中心に数多くつくられていったが、1879年のTay橋の落橋事故で鑄鉄の持つ欠陥(巣)や引張力に弱いという欠点が再認識され、それ以降は使われなくなった。

英国のIsambard Kingdam Brunelも特筆すべき技術者である。彼の業績を見ると、蒸気機関を改良し汽車をつくったGeorge StevensonとBritannia橋を架設したRobert Stevensonと同様に、親子で各種の土木事業に取り組んだ。たとえば、Brunelは、父親の開発したシールドトンネル工法でテムズ川にトンネルを掘る工場の現場技術者として活躍した。その後、英国の繁栄の象徴ともなった鉄道建設に携わり、ロンドンから西のBristolに至るGreat Western Railway (GWR)鉄道の建設に貢献した。Brunelの橋として有名なのは、Royal Albert橋であり、パイプ断面をアーチ状に2連配置した眼鏡のような構造の橋である。また、Bristolの町外れ、エイボン川溪谷上に74mの高さに架けられたClifton吊橋は、24歳前後の彼の設計によるものである。競争設計で出された若い彼の設計は、功なり名をとげた判定委員のTelfordに拒否されたが、2度目の設計は委員会の採用するところになり、その設計に基づいて建設が始まった。この建設は、Bristolで起きた暴動や財政上の問題で、途中2度ほど中断した。用意された錬鉄製の吊材は売却され、皮肉にもBrunelの手になるRoyal Albert橋に使われた。また、テムズ川にかかるHungerford吊橋(スパン450mの人道橋)も1845年にBrunelによって架けられたが、その後同じ場所に鉄道橋を架けることになり、1862年に撤去された。その吊材が、今度はBrunelの設計になるClifton吊橋に使われている。リサイクルの最たるものである。その肝心のClifton吊橋は、Brunelの死後、1864年になってやっと完成した。

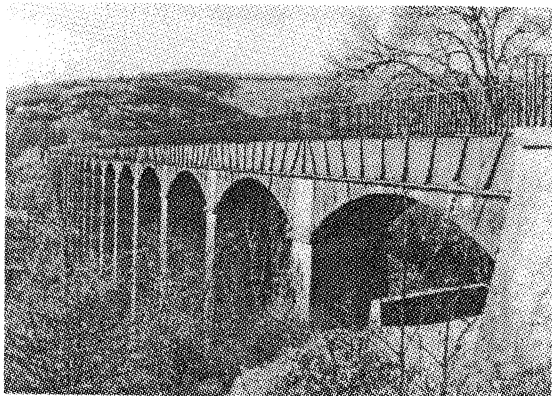


写真2 鑄鉄の運河橋

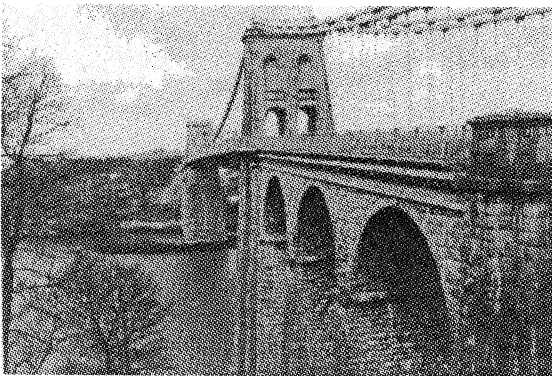


写真3 TelfordのMenai吊橋

Telford の Menai 吊橋が完成した 1826 年は、日本はまだ江戸時代で、鎖国中の日本近海に外国船が出没し騒がしくなってきた頃であり、また、Brunel 設計の Clifton 吊橋が完成した 1864 年頃は、まさに幕末で、黒船来航から 10 年、日本が大変革を始めようとしていた時期であった。

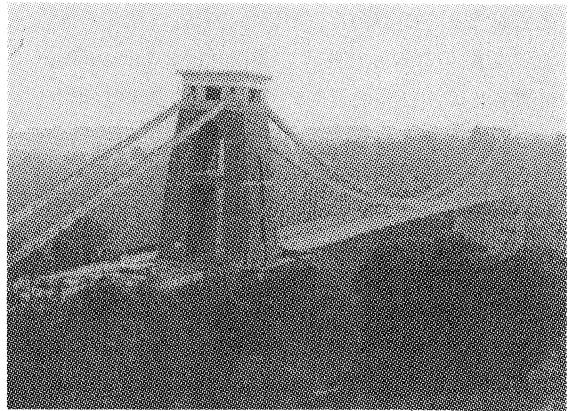


写真4 Brunel 設計の Clifton 吊橋

5. 鋼橋の時代と巨大橋、長大スパン橋梁の建設

1851-56 年頃、ウィリアム・ケリー、ヘンリー・ベッセマーによる転炉(ベッセマー転炉 1860 年特許)による鋼の大量生産可能になり、その鋼を使った巨大橋梁が建設されるようになった。

19 世紀中頃から盛んになった英国の鉄道建設は、数多くの橋梁を必要とした。有名なものに、カンチレバートラスのデモンストレーションの写真に収まった渡辺嘉一で有名な Forth 鉄道橋がある。スパンが 500m を越すような巨大な構造物は、吊り構造が可能になった事から、今後架けられることはないが、やはり 110 年を超える長い年月列車を支えていたことがその強度を物語る。その少し前に、鑄鉄に避けられない「巣」に起因した Tay 橋の落橋事故があったことから、巨大橋の信頼を回復するための安全性を余分にとったのかもかもしれない。

長大スパンの橋の建設を可能にした技術は、鋼の大量生産とともに、ワイヤーケーブルの開発が上げられる。それまでの吊橋や斜張橋の多くは、たとえば Royal Albert 橋のように、錬鉄のアイバーを用いてつくられていた。

ワイヤーロープの開発と吊橋への適用にかんしては、John and Washington Roebling 父子の名前が特筆される。鉱山でよく使われる麻のロープが磨耗して良く切れて事故につながることを知った John Roebling は、細い針金を編んでワイヤーロープをつくる特許をとり、色々なところに応用した。その販路を拡大する活動として、吊橋の建設も請け負った。その吊橋が、鉄道と人馬を通したナイアガラ吊橋であった。その後、ニューヨーク市の Brooklyn に吊橋を架設することを計画し、建設を始めた。基礎工事にニューマチックケーソン(潜函工法)を用いることを考え、息子の Washington をドイツに勉強に行かせたことなど、彼の長大吊橋にかける執念が見える。彼は、不幸にも建設のための測量中に事故にあり、そのけががもとで死亡してしまっただが、その意志を受け継いだ Washington によって、Brooklyn 吊橋が完成した。彼自身も、不可解な事故や病気が発生する潜函工事を自ら監督して基礎を完成させたが、不可解な病気(今では潜函病として知られる)にかかり、半身不随になってしまった。彼は、近くのビルの窓から架橋現場を望遠鏡で見ながら、妻の Emiry に指示を与えて架設を指示した。親子 2 代にわたる犠牲を強いた Brooklyn 吊橋は、1883 年に完成している。

その頃のわが国は、明治初期の近代化に邁進している時期で、1878 年(明治 11 年)に国産最初の鉄橋である弾正橋(現在の八幡橋、重文)や、1883 年に神子畑橋(鑄鉄橋、重文)が架設されている。欧米の橋梁建設に比べれば、約 100 年遅れていたと言わざるを得ない。

6. 溶接技術について

長大橋の建設を可能にした技術のもう一つの柱は、溶接技術の開発であろう。木の継手を踏襲した Iron

Bridgeは別として、それまで継手はリベットが主体であった。1907年にスウェーデンのO. Kjellbergが被覆金属棒によるアーク溶接を開発し、その後の溶接接合の基礎を築いた。本格的に溶接が使われたのは造船分野で、1920年頃にはわが国で全溶接船がつくられている。構造がシンプルになり、溶接により水密性が確保できることが大きな要因であった。橋梁に溶接が適用されるようになったのもこの時期と思われる。しかしながら、初期の溶接構造物では、主に①当時の鋼材、特に低温時の特性が良くなかった、②溶接残留応力、拘束応力にたいする理解がなかった、③溶接欠陥などの評価ができなかった、などの理由で、低温ぜい性破壊事故を生じたものもある。たとえば、ベルギーの運河にかかる標準設計されたフィーレンディール橋や、第2次世界大戦中に急造された戦時標準船Liberty Shipのぜい性破壊がそれである。その後、原因追究が進み、鋼材の改良や評価方法が確立されて、この種の事故はほとんど起きていない。

戦後のわが国における橋梁の溶接施工は、1950年頃から、まず工場の溶接設備の設置から始まった。1955～7年頃までに橋梁メーカーのほとんどが、X線検査装置やサブマージアーク溶接装置(当時はユニオンメルトと呼ばれた)をもつようになり、リベット接合から開放された。溶接構造になったことで、リベット接合に比べて、構造がシンプルになり、軽量化も図れた。特に、閉断面リブを持つ鋼床版などは、溶接を抜きにしては作れない構造である。軽量の鋼床版は、都市内高架橋や吊橋、斜張橋に使われ、スパンの長大化に貢献した。

現場での接合に用いられたリベットは、1960年頃から高力ボルト摩擦接合に移行していった。リベットうち作業の繁雑さ、騒音、コストなどがその理由であった。最近では、ほとんどの鋼橋の現場接合が高力ボルト摩擦接合になった。欧米に比べ、現場溶接は、わが国では余り使われていない。例外は、鋼床版のデッキの突合せ溶接、あるいはUリブの突合せ溶接であった。デッキは下向き溶接が可能で、溶接すれば舗装に影響を与えないこと、舗装厚を減らせること、などのため、鋼床版では現場溶接が多用されたものと思われる。本州四国連絡橋の鋼床版の現場溶接では、記録可能な超音波自動探傷法(AUT)が開発され、溶接施工技術とその品質管理に多大な進歩があった。

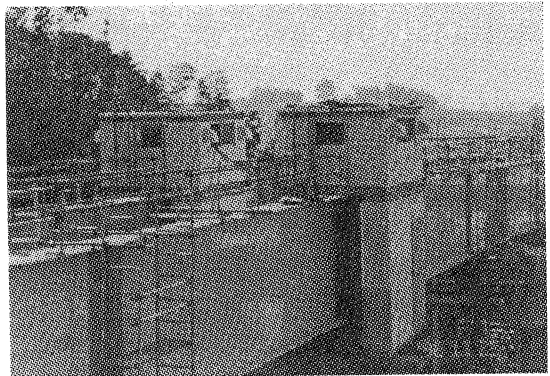


写真5 少数主桁橋の溶接建屋

一般の鋼橋では、現場継手は高力ボルト摩擦接合が大多数であり、ドイツあたりが現場継手を主に溶接で行っていることからその違いが際だっている。発注者側の現場溶接接合に対する若干の不信感と、施工者側の工程管理、施工管理から考えて無理に現場溶接にしなくてもいいのでは、といった消極的な対応が、なかなか現場接合が使われない理由とも言われている。景観上、あるいは維持・管理上からも現場溶接継手は優れており、今後の検討課題ではなかろうか。その中で、第2東名、名神高速道路の建設では、これまでより主桁間隔を広げ主桁本数を減らした少数主桁橋が中心となっている。主桁間隔を広げたことによる床版への負担は、PC床版を用いることによって解決している。主桁本数が減ったこととスパンが増大したことにより、主桁の板厚が増大し、フランジでは50mmを越す板厚の添接を現場で突合せ溶接することになった。移動式の溶接建屋を設けるなどの工夫をしており、一般橋梁の主桁等の現場溶接への道を開いたものと思われる。

7. まとめ

鋼は、重量の割に強度が高く、比較的安価で大量に入手できる材料である。FRPなどの新素材が出てきて、新たなチャレンジが始まるかもしれないが、まだまだ鋼の特徴である高強度、高品質な面を十分使い切っていない。その一つは、鋼橋の設計、製作が、多分に過去の形式、製作方法を踏襲する形を取っていることにある。高架橋が連続するような高速道路網のように、ある形式の橋が繰り返し使われる場合は別として、地形や周りの環境が異なる場所に、同じような橋梁が設計されることに奇異を感じるのは私だけではない。鋼、あるいはケーブルの持つ高強度を利用した軽快な美しい橋梁が、たとえば、コンクリートとの合成、複合と言った観点から出てくるのを期待している。

新たなチャレンジは、失敗を伴うことがある。解析や実験により、設計段階で問題になる点はある程度の予測が可能になってきている。鋼をより高度に使った橋のデザインコンペ等も可能であろう。もちろんその橋にたいする建設後のフォローアップは必要であるが、今後の示方書の方向である「性能照査型設計」や、PFIによる橋梁の架設が可能になったとき、新たなチャレンジが生まれるのかもしれない。

筆者は、橋梁の研究室でありながら、溶接継手の疲労実験から研究生生活に入り、疲労耐久性の評価や補修・補強技術と言った研究を通じて、橋を見る機会を持った。おもに、昭和初期から高度経済成長期に架設された橋梁であり、架設後数10年を経たものが多い。そんな橋であっても、それが架けられた時代背景を背負っていることが多く、それを抜きにして既設橋の耐久性を論じることはできないことを経験から学んだ。鋼橋の歴史と言っても、Iron Bridge から数えても220年程度である。機会をつくっては色々な橋を見てきたが、なかなかトータルな歴史を分析するまでには至っていない。本論では、不興を買うのを承知でかなり独断と偏見で大雑把に鋼橋の歴史を概覧した。

謝辞

筆者は、数年前からJH日本道路公団の委員会などを通じて、横浜国立大学の池田尚治先生から、機会あるごとにコンクリート構造、PC構造を始め、新技術の開発やそれにいたる発想など、示唆に富むご指導を得た。さらに鋼橋に関する技術的な発展に関して、このような考察を書くきっかけを作っていただき、大変感謝している。この論文が何かの参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本橋梁建設協会編：日本の橋—多彩な鋼橋の百余年史、朝倉書店、1994年
- 2) 成瀬輝男編：鉄(かね)の橋百選—近代日本のランドマーク、東京堂出版、1994年
- 3) 成瀬輝男：溶接橋梁—鋼材接合法の進歩と発展、土木学会誌 Vol. 82, 1997年7月
- 4) Catherine Clark : Ironbridge Gorge, Batsford, 1993
- 5) Douglas B. Hague : Conway Suspension Bridge, The National Trust
- 6) Rhoda M. Pearce : Thomas Telford, Shire Publications Ltd.
- 7) Ron Quenby : Thomas Telford's Aqueducts on the Shropshire Union Canal、
- 8) Living Bridges-The Inhabited Bridge: Past, Present and Future, 「リビングブリッジ/居住橋—ひと住まい、集う都市の橋」1999