

© 1992 ISIJ

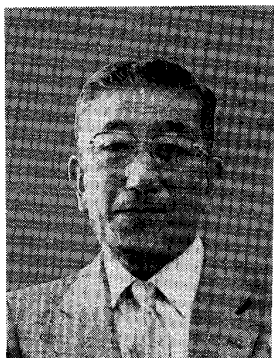
特別講演

## 長大橋への挑戦

田 島 二 郎\*

## Challenge the Long Span Bridges

Jiro TAJIMA



## 1. とび石、風倒木から石のアーチへ

川の浅瀬をじゃぶじゃぶと渡ることからとび石伝いに、風倒木の上を恐る恐る伝って小川を越えることから、桁橋へと、人類はより安全な、水にも流されない恒久的な道を求めた。西岸間に、あるいは土台となる石の間に板状の石を渡すことも覚えたが、長大な石はなかなか得難く、また運搬も容易ではなかった。因幡の白兔の説話に見られる舟橋も考えられた。藤づるを伝っての渡河も古くからあったかと思うが、その安全性、耐久性は十分ではない。

それらはそれなりにしだいに形を成してはいったが、原始の橋は自然の中にうずもれて、そのままの姿を今日に残してはいない。

天然の岩にできたアーチ(写真1)は、大きく空間をまたいだ姿で人々にあるヒントを与えたのではなかろうか。人工的なアーチの起源は古い。ピラミッドの入口にも、図1のような両側から石をせり出させた持送りアーチ



写真1 天然のアーチ(城ヶ島にて)

チが使われている。しかし、持送りアーチでまたげる空間(スパン)はせいぜい数mであった。しかしこの技術も、ドーム状の墓ではB. C. 14世紀には十数mの空間を作り出していたものがある。

持送りアーチが進歩して、くさび形の石を放射状に積み重ねたアーチに発展する。B. C. 9~7世紀にはオリエントではこのアーチ構造が駆使されていたと考えられている。この技術を完成させたのがローマ人である。

ローマの市内にも、B. C. 109年のMilvio橋が完全な姿で残っている。写真2は、プッチーニの歌劇トスカの舞台ともなった美しいSt. Angelo橋、A. D. 134, Hadrianus帝により建設されたものという。ローマはその広大な領土支配のために85000kmの道路を建設し、その間各地に石造アーチを残している。スペインのSegovia水道橋は、延長828m、2層のアーチで、2世紀初めの建設。その高い技術水準を今日に伝えている。

ローマのアーチは半円形をなし、水流に耐えるための橋脚の基礎は特に入念に造られ、水中コンクリートの前身の技術も使われた。橋脚を丈夫にするため、スパンの1/3程度の幅となり、逆に流れを阻害する率は大きいものとはなった。

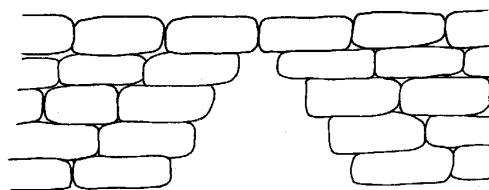


図1 持送りアーチ

平成3年10月 本会講演大会における浅田賞受賞記念特別講演 平成3年10月24日受付 (Received Oct. 24, 1991)

\* 田嶋橋梁構造研究所ブリッジアドバイザー 工博 (Bridge Adviser, Bridge and Structural Research Office, Toshin Irifune Bldg. 3-1-5 Irifune-cho Chuo-ku, Tokyo 104)

Key words : bridge ; technological history.

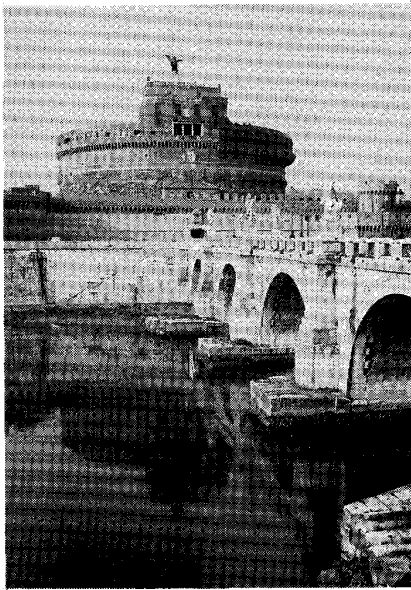


写真2 ローマの St. Angelo 橋

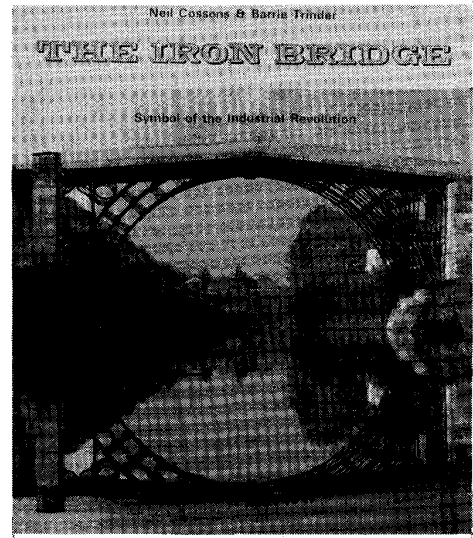


写真4 イギリスの Iron Bridge



写真3 中国の趙州橋

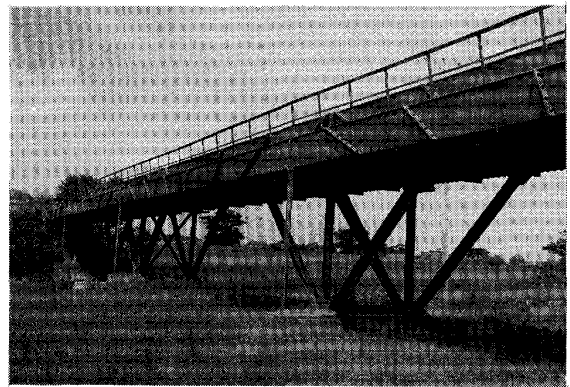


写真5 イギリスの Longdon 運河橋 (1796 年)

ローマ滅亡, A. D. 5~11 世紀の暗黒時代を経て, 12 世紀に至り軍隊の力でなく, 宗教集団の活動により橋も整備されていくことになる。

中国においてもすばらしい石造アーチの技術が流れていた。616 年建造の石家荘の趙州橋は今日残る中国最古のものといわれ, スパン 37.4 m, 欠円, アーチの上にアーチの空隙を設けて水流に配慮している (写真 3)。幅方向には鉄棒を通して石を締め付けるなどの高度な技術が既に応用されていた。

ルネッサンスの時代を迎え, ローマのアーチはさらに欠円アーチ, バスケットハンドル型のアーチと偏平となり, 橋脚の幅も狭くなってきた。アーチの石が互いにおし合って結果として基礎に水平力が生じるという認識もあり, 基礎への斜杭の採用なども見られた。1502 年, DAVINCI はスパン 240 m のバスケットハンドル型のアーチの提案を残している。

## 2. 産業革命——鉄の時代

1760 年代にイギリスより始まった産業革命は鉄の生産を増し, 橋の材料として鑄鉄が使われることになる。製鉄業の中心地 Coalbrookdale に, 1779 年世界初の鑄鉄アーチ橋が架けられた (供用開始は 1781 年 1 月 1 日)。スパン 100 ft (30.48 m) の橋である (写真 4)。

以後 1 世紀ほどにわたって次々と鑄鉄の橋が架けられ, アーチのみでなく桁橋もでき (写真 5), アーチも近代的な構造をとるようになる (写真 6)。材料力学も, 1705 年 Bernoulli の定理, 1776 年 Coulomb による重心, 中立軸の概念, 1807 年の Young 係数の概念などと進展を示している。

産業革命は陸路あるいは水運の発達をうながしたが, 18 世紀に入ってから蒸気機関の発明, 19 世紀に入ってからそれによる蒸気機関車が実用化され, 1825 年, Stockton~Darlington, Liverpool~Manchester に初の商業鉄道の営業が開始された。生産力の増大と共に物資の流通は



写真 6 イギリスのMythe橋(1836年, スパン170ft (51.8 m))

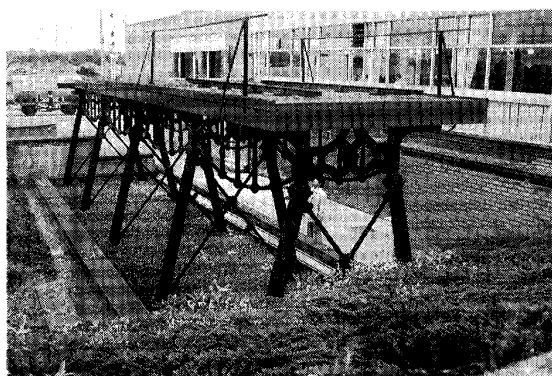


写真 7 York 鉄道博物館の Gaunless 鉄道橋 (1824 年)

盛んになり、鉄道の需要は急激にふくらんだ。当時駅馬車の速さは速くて 15 km/h であったが、開始当初の鉄道の速さは 25 km/h、10 年後にはドイツで 60 km/h に達し、1893 年にはアメリカで 186.9 km/h の速さを記録した。

鉄道路線の進展と共に鉄道橋の建設も数々進められた。しかし、道路橋での経験は、重い機関車、貨車の重量、レールの上を鉄の車輪で高速に走行する振動と衝撃に対してしばしば無力であり、苦い経験を重ねることになる。

写真 7 は York の鉄道博物館に展示されている初の鉄道橋で、鑄鉄の脚、鍛鉄の桁から成っている。

1830 年、Stockton から Tees 川を越えて Middlesbrough への鉄道延伸のために、初の鉄道吊橋が Samuel Brown により架けられた。石造のタワー、トラス桁を吊った構造のスパン 85.77 m の橋である。しかし、この吊橋は開業前の試運転で撓みが甚しく、タワーにも変状を来たした。そのため長い連結器を用いて荷重を分散させるような苦肉の策などによって運行を図ったという。この橋は 11 年後に鑄鉄の橋に替えられた。

1855 年、アメリカ Niagara 峡谷を渡るスパン 250 m

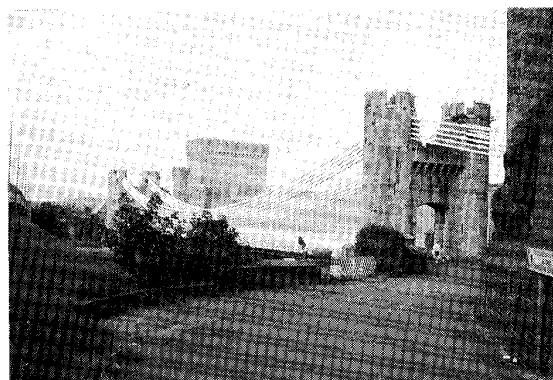


写真 8 イギリス Conwy の吊橋と鉄道桁橋

の鉄道、道路併用吊橋が Roebling により建設された。ワイヤーケーブルを用い、木と鉄の補剛トラスで、上層に鉄道、下層が道路となっている。鉄道吊橋として剛性を高めるため、タワーの頂と両岸から桁に斜め控え索が上下に張られていた。この橋は 42 年の間実用に供され、以後の鉄道吊橋への関心を高めるものとなった。

1825 年、イギリスの Menai 海峡に海を渡る吊橋が建設された。スパン 177 m である。その翌年 Conwy にスパン 122 m の吊橋が竣工する(写真 8)。いずれも初代イギリス土木学会長となった Thomas Telford による。彼は新しい鉄という材料に出逢って、次々に長大橋梁にいどんだのである(写真 5, 6 も彼の建設である)。

写真 8 の吊橋の向こう側に壁が見える。それは 1848 年、蒸気機関車の祖といわれる George Stephenson の子 Robert によって架けられた箱形断面の中を列車が通る桁橋で、長さ 400 ft (121.92 m) である。1850 年に建設されたスパン 460 ft (140.21 m) の Britannia 橋のプロトタイプとなる橋である。

### 3. 明治維新——近代橋架技術の導入

1868 年 9 月に慶応 4 年から明治元年となり、文明開化の波は橋架界にも及んだ。慶応 4 年初の鉄橋(桁橋)が長崎に、翌年横浜にトラス橋が外国人の手により、居留地の入口に架けられた。いずれも鍛鉄製である。欧米では鑄鉄から鍛鉄の時代に移りつつあったのである。

1878 年、東京に弾正橋が建設された。スパン約 15 m、上弦材は鑄鉄、他は鍛鉄を用い、工部省赤羽製作所で製造した。日本人の設計・製作になる鉄橋の第 1 号である。この橋は現在深川の富岡八幡宮の横手に移設され、国の重要文化財の指定を受け、良く保存されている(写真 9)。トラス格点のピン頭には菊の御紋章が付けられ、初の鉄橋に対する当時の人々の思い入れが感じられる(写真 10)。

海外では、この橋の 1 年前、ポルトガルに Eiffel の手になる Maria Pia 鉄道橋が竣工している(写真 11)。

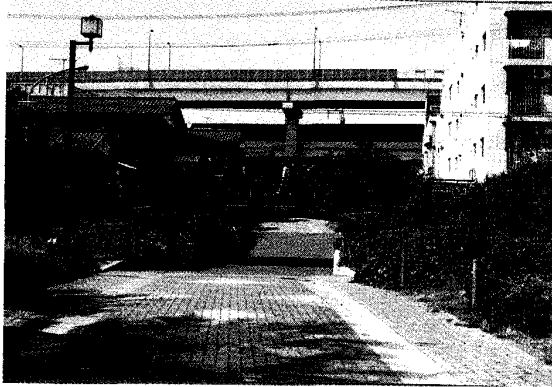


写真 9 東京深川の八幡橋 (1878 年)

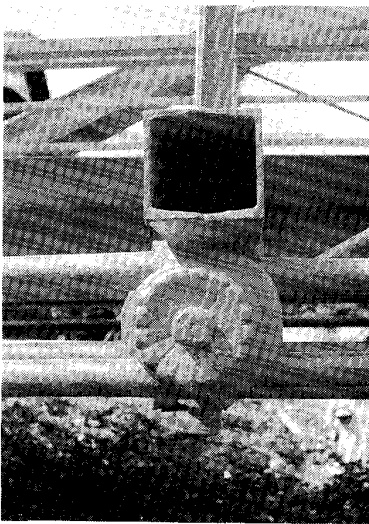


写真 10 八幡橋格点の菊の御紋章

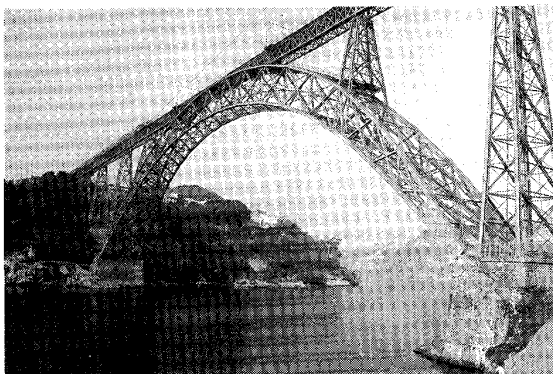


写真 11 ポルトガルの Maria Pia 鉄道橋(1877 年)

スパン 160 m の鉄道橋である。当時世界最大スパンの橋はアメリカの吊橋（道路橋）の 307.4 m であった。

1883 年、New York に East River をまたいでスパン 486 m の吊橋 Brooklyn 橋が Roeblin 父子の努力により竣工した。ゴシック風の巨大な石造タワーは街のシンボリック構造物であった。直径 16 インチ (40.64 cm) の主ケーブル 4 本は直径約 4.5 mm の垂鉛めっきピアノ線を

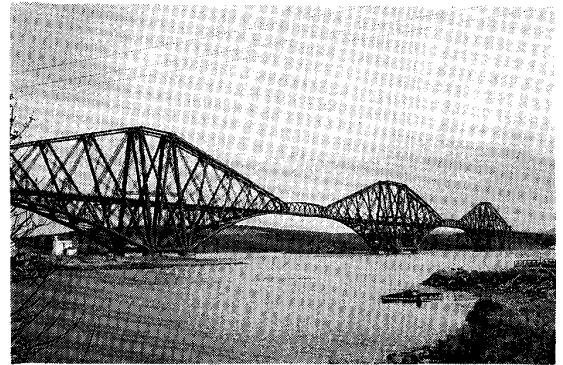


写真 12 イギリスの Forth 鉄道橋 (1890 年)

空中で張り渡して束ねられ、それは鋼線でラッピングされている。このケーブルシステムは今日の吊橋にもなお受けつがれている。

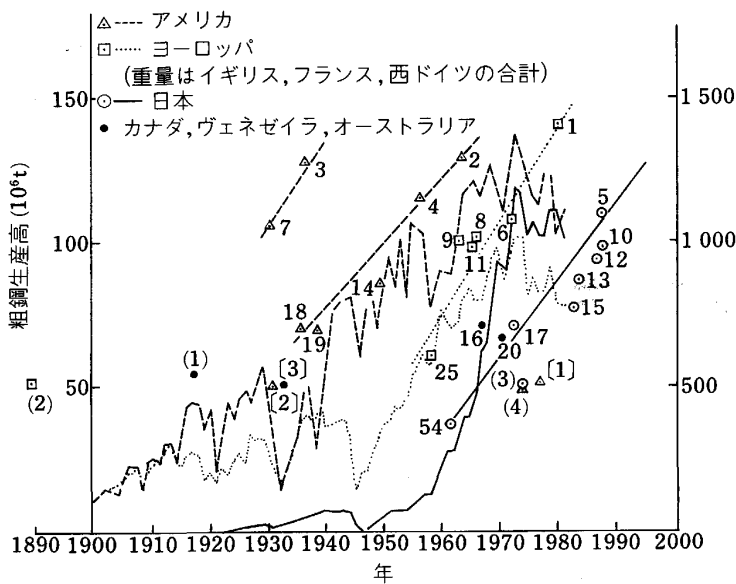
1890 年、イギリス・スコットランドの Forth 湾にスパン 521 m のカンチレバートラス鉄道橋が建設された (写真 12)。圧縮部材には巨大な円形断面をもち、シーメンス・マルチン鋼が使用された。この橋はそれまでスパン世界第一を吊橋が占めていたものを、その後の 27 年にわたっての世界一の長スパン橋であり、同様な形式の道路鉄道併用橋であるカナダの Quebec 橋 (スパン 548.6 m) が次の 12 年間世界一であった。

この頃、日本では鉄道建設が盛んに進められ、ドイツ、イギリス、アメリカの設計、材料により多くの鉄道橋が建設された。径間 200 ft (60.96 m), 300 ft (91.44 m) のトラス鉄道橋で、今日でもなお供用されているものを見ることができる。

#### 4. 現代の長スパン吊橋時代へ

鉄鋼の生産量は国家の力のひとつの指標ともいえる。B. C. 30 世紀来のプロトヒッタイト族の鉄に関する技術を温存し、B. C. 17 世紀来 550 年にわたって鉄と軽戦車によって中東に君臨したヒッタイト帝国など、武力という点ではあるが、鉄が国家を支えたといえる。図 2 はヨーロッパ (英・仏・西独の合計)、アメリカ、日本の粗鋼生産量と橋のスパン長との図である。鉄の生産量に比例するようにスパンも長大化している。国家の経済力の伸びがその関係に表れているものと言えよう。ただし、前述のトラス橋 2 橋、アメリカの吊橋 2 橋が大きくはざれている。

1909 年、Brooklyn 橋に並んで Manhattan 橋が完成する (写真 13)。スパン 448 m。構造解析において荷重によるケーブルと補剛桁の大きな撓みを考慮する撓度理論が用いられ、従来の剛なタワーでなく撓みやすい細味のタワーにより中央径間・側径間のケーブル張力の不均衡に対応するフレキシブルタワー方式が採用されている。これらは現在の吊橋の基本となったものである。



吊橋

- 1: Humber 2: Verazano Narrows 3: Golden Gate 4: Mackinac Straits 5: 南備讃瀬戸
- 6: Bosphorus 7: George Washington
- 8: De-Vinte-e- Cinco-de-Abril 9: Forth Road
- 10: 北備讃瀬戸 11: Severn 12: 下津井瀬戸
- 13: 大鳴門 14: Tacoma Narrows 15: 因島
- 16: Angostura 17: 関門 18: San Fransisco Oakland Bay
- 19: Bronx White Stone
- 20: Pierre la Porte 25: Tancaville 54: 若戸

トラス

- (1) Quebec (2) Forth (3) 大阪・港
- (4) Commodore John J. Sarry

アーチ

- (1) New River Gorge (2) Bayonne
- (3) Sydney Harbour

図 2 粗鋼生産高と橋のスパン長



写真 13 ニューヨークの Manhattan 橋 (1909 年)

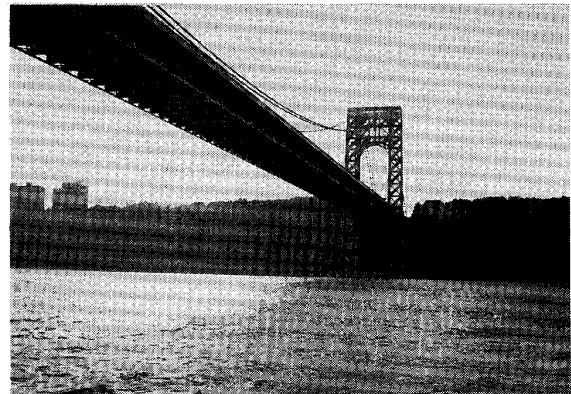


写真 14 ニューヨークの George Washington 橋 (1931 年, 1960 年)

Brooklyn 橋が建設中の頃, Hudson 川を渡る橋の必要性が既に言われていた. George Washington 橋である. 鉄道も通すことから, 当初は 2000 ft (609.6 m) のカンチレバートラス案からアーチ, アーチ・吊橋の混合システム, 吊橋案などいろいろの提案がなされた. 紆余曲折のあと, 1927 年に現地工事に着手. AMMAN の設計になる 1067 m の吊橋である. 現在見るこの橋 (写真 14) はトラス補剛桁を持つ 2 層の橋であるが, 1931 年竣工の時は上層のみであり, トラスが追加され下層まで供用されるようになったのは 1960 年のことである. この橋によって吊橋のスパンは一挙に 1.9 倍に伸びたことは, 工学的には偉大な飛躍といえることができる.

San Francisco 金門湾に架かる Golden Gate 橋は 1937 年竣工, 1280 m の橋である. この橋が提案された 1917 年当時はそのスパンのあまりにも長大であることに危惧をいさぐ声も強かったが, 東海岸における George Washington 橋の実現によりその危惧は全く払拭された.

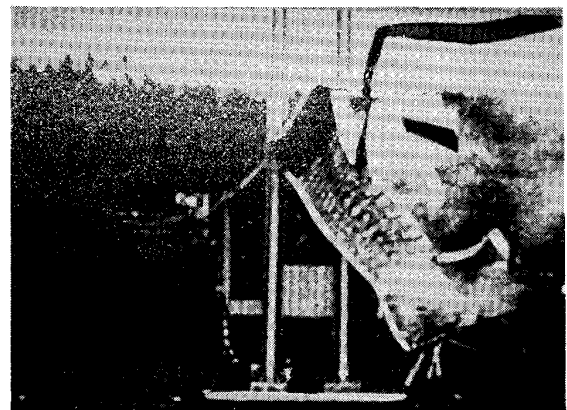


写真 15 アメリカ Tacoma 橋の落橋

撓度理論による経済設計のため, 補剛桁はスレンダーになり, 7~800 m の橋も I 形桁で建設されるようになった. これに対し 1940 年, 当時世界第 3 位のスパン 853 m をもつ Tacoma 橋が, 竣工後 3 か月にして風によ

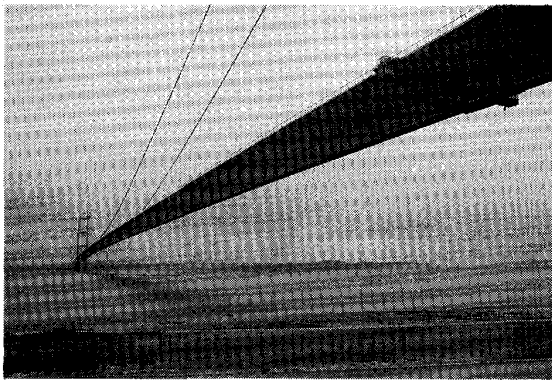


写真 16 イギリス Humber 橋 (1981 年)

る振動で落橋した (写真 15) 事故は、吊橋の風による動的な影響について大きな反省を与えた。

その結果、再びトラス補剛桁による剛性の大きい橋とする傾向が見え、1964 年竣工の New York の Verazano Narrows 橋 1 298 m はトラス補剛桁を持つ 2 層橋となっている。

日本で初めて 300 m を超えた若戸橋 (1962 年, 367 m)、世界ランキングに顔を出すようになった関門橋 (1973 年, 712 m) もトラス補剛桁を採用している。

一方イギリスでは、流線形の補剛桁の採用によって風による動的影響に対処する新しい設計が試みられ、1966 年, 988 m、当時世界第 6 位の Severn 橋が竣工した。この形式の流れは、現在 1 000 m を超える 10 橋のうち、1981 年、供用中では現在世界第一位のイギリスの Humber 橋 (写真 16) のほか第 1 および第 2 Bosphorus 橋の 2 橋があり、現在工事にかかっているデンマークの Great Belt 橋 1 624 m も同様である。

## 5. 本州四国連絡橋へ

昭和 30 年代から実現に向けての歩みを進めた本州四国連絡橋は、延長 4 km の明石海峡大橋をはじめとして 11 橋の長大吊橋が計画された。このうち神戸・鳴門、児島・坂出の 2 ルートは鉄道も通す計画であったが、昭和 26 年に発表された記事では鳴門海峡にはスパン 500 ~ 600 m のカンチレバートラスかバランスドタイプアーチが考えられ、明石海峡は鉄道はトンネルとなっていた。

撓みやすく、揺れやすい吊橋に、重量の大きい列車が高速で走行できるためには、走行する列車が吊橋に与える影響、吊橋の挙動が列車の走行に与える影響の二つを解明しなければならない。すなわち前者では橋の振動、変位、部材の疲労などであり、後者では大きな撓み、撓み角、振動および桁端での伸縮などである。

吊橋は長大スパンになるほど自重の主ケーブルへの負担は大になる。スパン 770 m の因島大橋では、主ケ

ブルの応力の中で自動車荷重の占める割合は 16% であるが、1 990 m の明石海峡大橋ではわずか 8% にすぎない。そのため、調質高張力構造用鋼材の採用、ケーブルではより強い素線が望まれた。ケーブル材料としては、計画の当初は安定して製作できる  $1\,600\text{ N/mm}^2$  級の垂鉛めっき鋼線とし、列車が通ることによる主ケーブルの曲げによる 2 次応力の影響について、当時工事中の熊本県の吊橋での現場実橋試験も実施した上で、従来の破断に対する安全率を 3.0 から 2.5 に低減させた。現在工事中の明石海峡大橋では、 $1\,800\text{ N/mm}^2$  級のワイヤーを安全率 2.2 として設計するまでに至った。

吊橋以外の長大トラス橋も含めて、構造用鋼は 80 キロ級鋼までを考えた。そのため、溶接性、座屈、疲労、現場ボルト継手など各種の調査、実験を進めた。

構造用鋼材は、1974 年竣工の大阪港大橋 (スパン 510 m はこの形式では世界第 3 位) 以来開発実用化が進んでいた調質 80 キロ級鋼まで含んで HBS (本州四国連絡橋公団規格) を制定した。

橋の自重を軽減するために高強度の鋼材を使用した場合、鉄道を通すこと、吊橋では補剛トラスの重量は主ケーブルによって吊り上げているため、載荷される列車、自動車による応力の変動が部材応力に占める割合が大きいこと、また高張力鋼は疲労き裂感度が高いことなどから、疲労に対する慎重な検討を行った。1975 年より実施した大型疲労試験機による各種の実験は、これに対し貴重な成果をあげた。

その結果として、従来の小型試験片による疲労試験結果に基づく設計方法を全面的に改訂した。すなわち、橋梁に用いられる各種の継手に対し、き裂伝播寿命を基として SN 線図を定め、応力変動範囲に対する許容応力を設定した。この場合、通常の施工では避けられない部分溶込み溶接継手 (グループ溶接、すみ肉溶接) のルート部の欠陥の影響を明らかにした。それに従って、施工の面では、溶接部分の表面を完全に清掃すること、ルート間隙の許容値は 0.5 mm とすることなどきびしい施工管理を仕様することとした。また、その欠陥を検査するため、自動超音波探傷システムを開発した。前面すみ肉溶接に対してはなめらかな趾端部形状が得られるなど、ピード形状の優れた溶接棒の開発をうながし、溶接士の技術にも特段の配慮がなされた。

吊橋の大きな撓みに起因する桁端部での軌道の角折れが列車走行に及ぼす影響については、1966 年の鉄道建設公団の報告書において一応の目安を得たが、以来、理論的検討、実験が精力的に続けられた。1970、71 年の北海道狩勝実験線における実車実験、さらに開業をひかえた山陽新幹線倉敷での新幹線線路にて、それまでに鋭意開発を進めた動程 1.5 m の軌道伸縮装置も含めて走行試験を実施し、時速 180 km/h までの実験に成功した。新幹線の速さは、路線選定上最小半径 1 300 m の曲

線が入っていること、列車走行に伴う吊橋の振動を安全な範囲におさえることの原因から 160 km/h を想定していた。なお、在来線の走行速度については、実用されている列車速度には何ら制限を設けていない。

児島・坂出ルート(瀬戸大橋)では、1988年1月29日、試運転旅客列車が 120 km/h で無事通過して以来4年間、順調な運行を続けている。

### 6. 20世紀から21世紀への橋

今世紀最後を飾る明石海峡大橋の基礎工事は着々と形をなし、高さ 283 m のタワーの製作が工場では進んでいる。補剛トラスには 80 キロ鋼も多用され、構造はこれまでの吊橋の延長線上にあるトラス構造である。それまでの吊橋では、大鳴門橋で 70 キロ鋼まで、その他の吊橋では 60 キロ鋼までであった。風による部材の応力と疲労の影響との兼ね合いで吊橋には 80 キロ鋼は使わず、それは部材応力の中で自重の占める割合の大きいトラス橋のみであった。

このような超長大橋となると、風が補剛トラスにもタワーにも大きな影響を与える。そのため建設省土木研究所に新設された大型風洞によって、長さ 40 m (1/100) の模型による耐風実験が実施されている(写真 17)。

吊橋のスパンの限界は、現用の材料の強さを基にすると 4~5 km と計算できる。しかし、それだけ長い橋になると、橋の固有振動数は甚しく低くなり、風の動的効果に対する考慮が支配的となってくる。

21 世紀の橋として、具体的な設計検討に入っている橋に、イタリアの南端 Sicily 島に渡る Messina 海峡の橋がある。水際線間 3 km、道路と鉄道を通すこの計画は相当以前から検討が続けられ、1971 年の国際コンペ以来、橋梁のほか掘削トンネル、水中トンネルの案も提案されていた。そのうち海峡を橋梁でひとまたぎする案を示すと、1971 年一席となった案は写真 18 で、荷重を

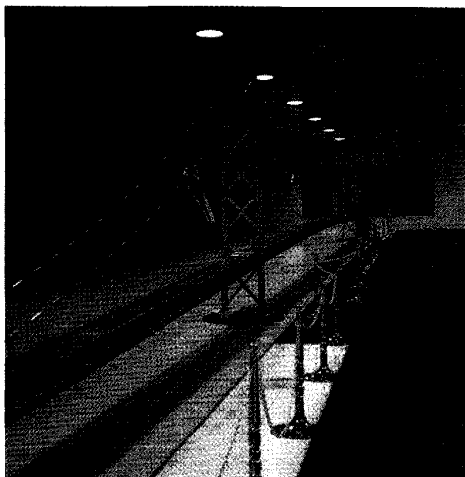


写真 17 建設省土木研究所での明石海峡大橋の風洞実験(1991年3月)

吊る主ケーブルのほか、下側にも 2 本の耐風ケーブルを用いたものである。写真 19 は 1986 年の、写真 20 は 1990 年の Messina 海峡公団の案である。三角トラス断面から箱桁格子構造となり、大きなフェアリングを両縁に設けることにより風に対処しようとしている。今後の精密な検証結果が待たれるものである。海峡の中にタワーを建ててスパンを縮める案は、潮流速最大 4 m/s、地震の影響もあり活断層もある水深 150 m の基礎の構築を考えると、ひととび 3 300 m の案を採用することとなった。

ローマのアーチから 2 000 年、人々は幾多の苦い経験を繰り返して、それを乗り越え、創意を發揮して橋の建設に挑み、今日の姿に至っている。それぞれの点で橋の歴史の中で挙げなければならないものの数は多く、短時間

Figure 13. The Messina pretensioned hanging bridge.

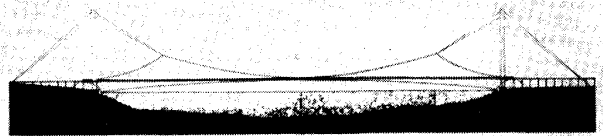


Figure 14. The Messina bridge cross-section.

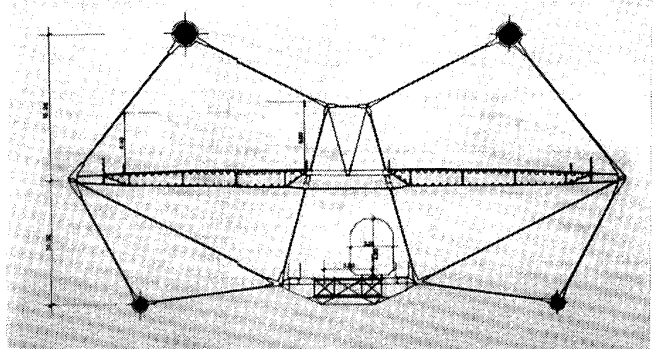


写真 18 Messina 海峡大橋 1971 年案

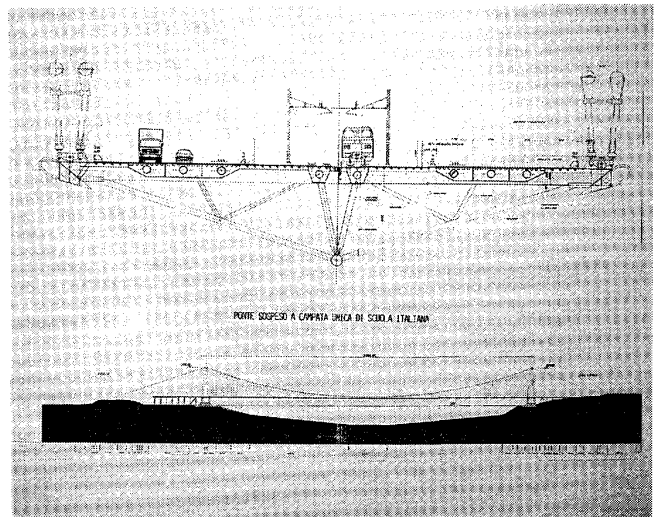


写真 19 Messina 海峡大橋 1986 年案

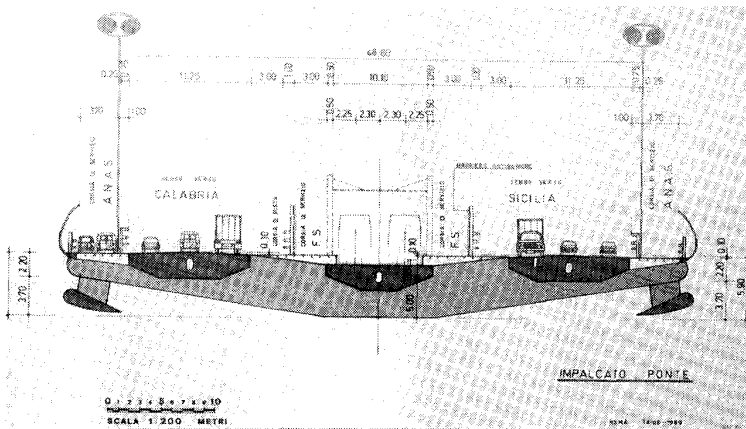


写真 20 Messina 海峡大橋 1990 年案

の話の中で、短い拙文の中で意を尽くすことはむずかしい

現在日本においても来世紀に期待する長大橋として、東京湾に、伊勢湾に、紀淡海峡また豊予海峡など取り沙汰されている。新しい工学的工夫と新しい材料の採用など、超長大橋への期待は大きい。

#### 参 考 文 献

- 1) アーチバルド・ブラック著、山崎慶一訳：橋の世界—進化と科学— (1943)[那珂書店]
- 2) ベルト・ハインリッヒ著、宮本・小林訳：橋の文化史—桁からアーチへ— (1991) [鹿島出版会]
- 3) 山本 宏：橋の歴史—紀元 1300 年ごろまで— (1991) [森北出版]
- 4) アレクサンダー・マクリン、江見俊彦：鉄と鋼, 77 (1991), N196
- 5) 田島二郎：第 13 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1971), p. 73
- 6) 田島二郎：第 120・121 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1987), p. 51
- 7) 田島二郎：国際交通安全学会 IATSS Review, 14(1988) 1, p. 25