

# 瀬戸大橋架橋の技術的意義

吉田 巖

## 1. まえがき

岡山・香川両県民だけでなく、四国の人々、いや、日本中の人たちが待ち望んでいた瀬戸大橋がいよいよ来年の4月に開通する。

この橋は、本州と四国を結ぶ3つのルートのうち、児島・坂出ルートと呼ばれており、連絡ルートとしては最初に完成する。

海峽10kmを渡る橋を地元の人々は“瀬戸大橋”と呼んでいるが、この橋の誕生は、橋梁技術の面から見ても画期的な出来事である。

その由来をわかりやすく解説するとともに、次につづく長大橋建設に与えるインパクトについても触れてみたい。

## 2. 世界の吊橋技術の歴史

大きな川を越えて、あるいは海を渡って橋を架けたいと思うのは、人類共通の望みであった。

橋脚の数を少なくして、大きく一べんに渡る橋の技術として吊橋が誕生したのはいつ頃であろうか。

ケーブルを張り渡して、橋げたを吊るす構造の橋の歴史は古いが、鉄鋼材料が大量生産され始めた18世紀以降、各地で建設されるようになった。最初はケーブルの代わりにチェーンが用いられてお

り、イギリス、ドイツ、フランスなどヨーロッパ各地に建設された。

この型式のものでは1826年イギリスで架けられたスパン175mの **Menai Straits** 橋がある。以下スパンという言葉がしばしば出てくるが、日本語で支間とも訳され、橋脚と橋脚の間、橋げたを支える間の距離を言い、橋の規模をあらわす。

吊橋の技術はアメリカに渡り、19世紀半ばからいくつもの名橋が出現する。1855年に道路・鉄道併用橋で、スパン250mのナイアガラ吊橋が建設されている。この頃から、今も使われているワイヤケーブルが、チェーンに代って登場し、年とともにスパンを拡大する原動力となった。

この吊橋を完成させた **J. Roebling** は、吊橋には、剛性ととともに、自重もその安定性に寄与するという自説——これは、現在の吊橋理論のベースになっている——にしたがって、数々の名橋を建設した。1883年にスパン488mの **Brooklyn** 橋が完成し、その後のアメリカの吊橋黄金時代の端緒となった。しかもこの橋は、誕生して100年を過ぎて使われており、橋の寿命を問われたときの模範解答になっている。

1903年に同じニューヨークに支間488mの **Williamsburg** 橋、1933年には支間1067mの **George Washington** 橋が建設され、ついに1000mの舞台を越えた。

1937年には、有名な **Golden Gate** 橋が建設され支間も1280mに達して、ヨーロッパやアジアの

よしだ いわお 本州四国連絡橋公団 理事

〒105 港区虎ノ門5-1-5

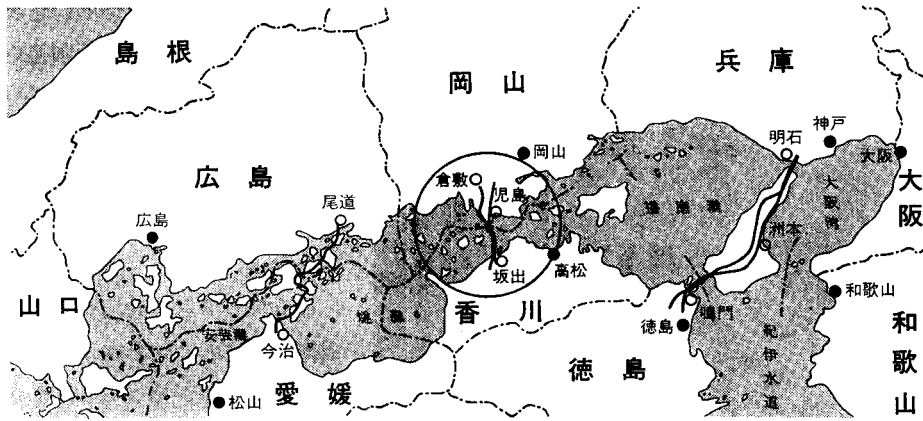


図 1 本四連絡ルート図

吊橋技術に大きく水をあけた。

1940年に建設された Tacoma Narrows 橋はけた高の低い、ガーダー形式のものであったが、建設後、いくらか経たないうちに比較的低い風による振動で落橋した。風に対する配慮が必要なことを技術者に教えた。ちょうど、世界大戦に世界をあげて突入したため、吊橋の建設も中休みになり、世界の研究機関を中心に耐風設計の勉強が進められた。

ようやく大戦も終り、吊橋技術の世界も新しい時代を迎えることになる。

まず、アメリカを中心に技術は進み、1957年に支間1158mの Mackinac 橋が、1964年には Ver-razano Narrows 橋が建設され、その支間は1298mと、ついに戦前の記録を破ることになる。

一方ヨーロッパの吊橋技術はアメリカに遅れをとっていたが、1960年フランスに Tancarville 橋(支間608m)が建設されるのをはじめてとしてイギリスの Force Road 橋(支間1006m)が1964年に、Severn 橋(支間988m)が1966年に建設されている。

そしてついに1981年、Humber 橋(支間1410m)の誕生で、世界一の記録はアメリカからイギリスに移った。

このような吊橋技術の発展の中で、アメリカの技術を中心にポルトガルの 4月25日橋(支間1013

m)が1966年に、イギリスの技術でトルコのボスボラス橋(支間1074m)が1973年に建設されて、先進国の技術輸出が盛んになっている。

### 3. 日本の吊橋技術の歴史

日本の吊橋は祖谷のかずら橋に始まる。本格的な吊橋は1920年代に入ってからであり、関東大震災の後の復興事業で隅田川に架けられた清洲橋はケーブルにチェーンを用いており、古い形の吊橋として、今もユニークな姿をわれわれに見せてくれる。その頃、徳島県の吉野川に架けられた三好橋(支間140m)は、戦前のわが国の吊橋として最長のものであった。

日本の吊橋技術は、その程度で戦争になった、支間で1280mになる Golden Gate 橋を生み出したアメリカの技術とは大きな隔りがあったと言える。戦後になって、本格的な建設事業が始まるとともに、海峡を渡る長大橋が計画され、西海橋、若戸大橋とつづくことになるが、この若戸大橋が本格的な吊橋の第1号であり、日本の吊橋技術はここからスタートすることになる。

若戸大橋(支間367m)は1962年に完成、ついで関門橋(支間712m)が1973年に完成した。2つの吊橋ともに日本の技術だけでまとめられたが、若戸は外国を真似て手さぐりの感じであり、関門になってはじめて、吊橋の画が書けたという実感で

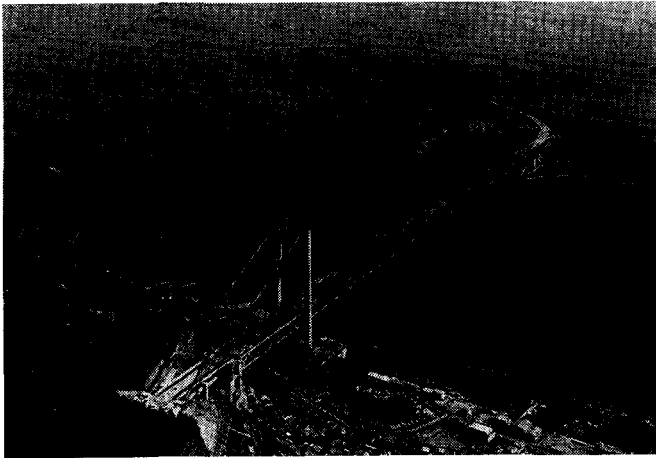


写真 1 瀬戸大橋の現況

あった。

本州四国連絡橋公団が設立されて、長大橋建設の時代に入ったが、それが1970年であって、関門橋の技術が、そっくり公団に引継がれた。

#### 4. 瀬戸大橋の誕生

四国と本州を結ぶ計画が国にとりあげられて調査が始まったのは国有鉄道が1955年、建設省が1959年であった。

技術的な調査は両者共同で行なうことになり、土木学会に本州四国連絡橋技術調査委員会が設けられ、学界、官界あげて調査にとりくむことになったのは1962年である。

吊橋の建設技術は、若戸大橋から関門橋と道路橋の建設の中で育てられてきたので、吊橋の技術的研究は建設省土木研究所を中心に進められることになった。

一方、吊橋に鉄道を通すことは、初めてに近い試みであり、国有鉄道の研究陣がこれを担当することになる。

一方、調査の過程でルートは図1に示す3ルートにしぼられたが、現地調査は、神戸および尾道のルートを建設省が、岡山の瀬戸大橋のルートは日本国有鉄道（後になって鉄道建設公団が担当）がそれぞれ分担して進めることとなった。

調査は進展し、具体的に建設を担当する事業体として、本州四国連絡橋公団が発足したのは昭和45年(1970年)である。

3ルートの着工に向けて準備が進められたが、昭和48年11月、総需要抑制策の導入という政府方針の変更により着工延期となる。

昭和50年8月、政府から当面の建設方針が打出され、いわゆる1ルート3橋方式による建設が始まることになる。

すなわち、瀬戸大橋とも呼ばれている児島一坂出ルートを早期に完成をはかるルートとして位置づけ、地域開発橋として、大三島橋、因島大橋、大鳴門橋をとりあげるものであった。

瀬戸大橋は、岡山県倉敷市鷺羽山から香川県坂出市秀の州埋立地まで海上10kmを渡る長大橋で、

ひつ石島、岩黒島、与島などの島々をよぎり、3つの吊橋、2つの斜張橋、1つの長大トラス橋と高架橋の連続から成り立っている。

特に吊橋は下津井瀬戸大橋（支間940m）、北備讃瀬戸大橋（支間990m）南備讃瀬戸大橋（支間1100m）の3橋ともその支間は1000m前後で、日本の吊橋技術が、完全に世界的なレベルになったと言ってよい。

支間だけで言えば、最長の南備讃瀬戸大橋が、世界第5位ではないかということになるが、道路鉄道併用橋としては世界最長であり、吊橋のケーブルの太さは世界最大。それにも増して、長大橋が連続する瀬戸大橋は海上10kmをつなぐものとして、総額1兆3000億円の投資規模に達し、過去における世界の長大橋プロジェクトの中に例を見ない。

この大プロジェクトを支えるために数々の技術開発が行なわれ、具体化されたが、以下その内容を説明したい。

#### 5. 新しい技術の開発

## 5.1 耐風設計

日本は台風の常襲地帯にあり、タコマ橋のような風による橋落事故を聞くと、風に対して安定な吊橋を設計することが、長大吊橋を建設する上で第1の課題となった。

吊橋のけたが風によってどのような挙動をするのかというテーマを解決するには風洞実験が不可欠である。2次元風洞としては東京大学はじめ、いくつかの研究機関にあったが、航空機開発用のものが多く、吊橋の挙動を調べるために、建設省土木研究所に専用の風洞が建設され、研究は本格化していった。

一方、風洞での風が整流であることから、自然風のような乱れた風での挙動が議論になり、昭和48年には、そのための実験施設が千葉県館山市の平砂浦に建設され、風洞実験との対比が行なわれたりした。

昭和51年(1976年)には一連の研究調査結果をもとに耐風建設基準がとりまとめられ、瀬戸大橋もこの基準によっている。

## 5.2 耐震設計

日本は世界でも有数の地震国であり、長大吊橋を耐震的に設計することは日本固有のものとして新しいテーマとなった。まず、瀬戸内周辺の過去の地震を調べることから始まったが、比較的地震活動がおだやかな地域であることがわかる。しかし紀州沖、土佐沖を震源とする地震の影響を受ける可能性が高く、それを含めて検討されることとなった。

吊橋は高い塔と、ケーブルに支えられるけたから成立つ長周期構造物である。超高層建設の耐震性と共通性があり、今まであまり問題とされていなかった地震の長周期成分の評価を中心に検討が進められいった。

吊橋の全橋模型を用いての振動実験、地盤のバネ特性の評価、各種解析モデルを用いての計算など一連の調査研究をもとに耐震設計基準が、昭和42年(1967年)に制定された。その後10年間の研

究成果を反映して見直しが行なわれ、1977年の基準で瀬戸大橋は設計されている。

長大吊橋を支える海中橋脚は、岩盤に支えられているとはいえ巨大なものであり、耐震設計によって寸法が決まる。それだけに安全性の面からだけでなく、工費にも大きな影響を与えるので、その合理性も追及されることとなる。

## 5.3 海中橋脚の建設

海や川を一度に渡りたいという人類の希望に近い橋の形式として吊橋が誕生した。すでに説明した、海外の吊橋や日本の吊橋はいずれも岸に近い処に橋脚を建設して、海上での建設工事を避けている。

アメリカサンフランシスコの Golden Gate 橋や Oakland Bay 橋は、海中に橋脚を建設した数少ない事例であるが、いずれも苦勞している。

瀬戸大橋では、途中の島々を上手に利用しているとはいえ、備讃瀬戸は国際航路で水深も大きく、潮流も速い上に、瀬戸の幅は3.5kmあり、どうしても、海中橋脚の建設が必要になった。

橋脚のうち3基は水深20m以上の箇所の建設になり、そのうちの1つは水深35mで、基礎の底面は海面下50mまでおろす必要があった。

このような条件下での基礎の施工法として、設置ケーソン工法を考え出した。

風化した海底岩盤を効率よく掘削し、良好な岩盤を得るには、発破を用いて破碎し作業船を用いたグラブ掘削がよく、短期日の大量掘削を成功させた。

大型の自己昇降式移動足場 (Self Elevating Platform) は海底石油掘削に開発されたが、土木工事として、国内生産され実用化された。

国産 S.E.P. のうち2台が備讃の海域で活動したが、この足場の上に数台の穿孔機を据えて、同時作業を行なうことができ、穿孔発破の効率をいちじるしくあげることができた。

掘削に用いたグラブ船はグラブバケットの重量が85tあって、世界最大のものである。

ケーソンを据える岩盤面の平滑化には回転式の岩盤掘削機が活躍した。トンネルの岩盤掘削機を整形に使うが、大鳴門橋、大島大橋などでの掘削経験を生かすことができた。

平坦に削られた岩盤の上に造船所で製作された鋼製ケーソンを据える。最大のもは長さ75m 幅59m 高さ55m 重量20,000t で3000t吊りクレーン船の助けをかり、注水作業との連携で、50cmの許容誤差範囲内での据付けに成功した。巨大な機材を駆使し、精密な電子機器を動員しての総合運営の勝利といえる。

海中コンクリートの施工法としてはトレミー工法とプレパックドコンクリート工法がある。

前者は古くからあるが大量施工に色々困難を伴う。プレパックドコンクリートは、骨材の投入とモルタルの注入からなり、モルタル合材の施工数量が、コンクリートの1/2になることから、効率の良い工法といえる。しかし、アメリカのマキノ橋で例があるとはいえ、日本では初めてのことであり、注入モルタルの性状の確認、注入設備の整備などの問題を解決するため、昭和40年代の当初から数多くの実験がくりかえされた。

海中での注入実験のほか、モルタル船を開発した。写真2はモルタルプラント船で、公団の持ち船であり、建造費35億、時間当たり240m<sup>3</sup>のモルタルの注入が可能になる。

このMP船を使っても、連続注入作業時間は、最大の区画に対して88時間に達した。

#### 5.4 ケーブルの架設

本四連絡橋調査が始まった頃の日本では1962年に完成した若戸大橋を含めてロープケーブルが用いられていた。

500m以上の支間をもつ吊橋では平行線ケーブルが採用されているが、その当時日本では経験がなかった。

わが国における平行線ケーブルの開発は関門橋

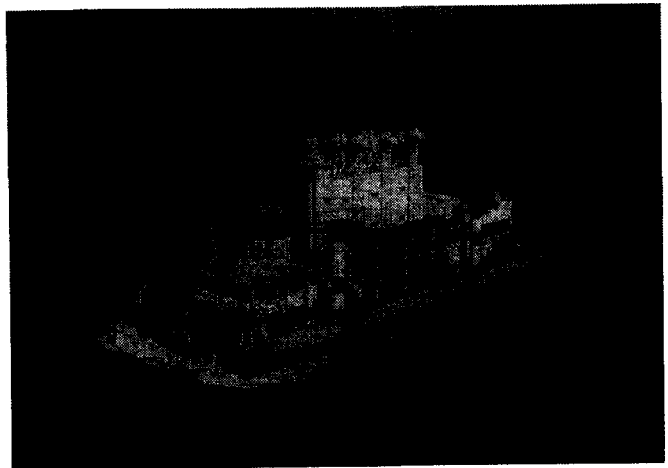


写真2 モルタルプラント船

に向けて具体化されていった。平行線ケーブル用のピアノ線の試作、土木研究所構内でのエアスピニング工法の実験、そして、プレファブストランド工法の技術導入が行なわれた。その結果、平戸大橋はエアスピニングで、関門橋はプレファブ工法で架設され、ケーブル架設についての目途がついた。

瀬戸大橋の3つの吊橋のうち下津井瀬戸大橋はエアスピニングで、南と北の備讃瀬戸大橋はプレファブスピニング工法で架設されている。

いずれも、戦後建設された、アメリカやイギリスの吊橋現場での施工速度より速く、もはや日本のケーブル架設は世界一流のものになったと断言してよい。

#### 5.5 けたの架設

外国の施工事例を見ると、ほとんどが海上のバージからけたを吊り上げて架設している。しかし日本では海上交通がきわめてはげしく、また気象条件などから、直下吊りと言われる工法の採用はむずかしい。そのため橋の上を使って、塔に近い方から材料を輸送し、部材をつないでゆく逐次剛結法が開発された。全部材を吊り下げ、ケーブルの形が決まってからけたを剛結する外国の工法に比べ、応力の調整など、高度の技術力を要求される。日本ならではの架設工法と言えよう。

## 5.6 鉄道橋としての問題

吊橋を列車が走行するとき、2つの問題がある。1つは長大吊橋の温度による伸縮や列車重量のたわみによるけた端における伸縮を、レール面でどのように吸収するかという問題、もう1つは、けたのたわみによって、けた端に起こる角折れを吸収する問題である。

これに対して、緩衝桁と軌道伸縮装置が考案され、実車を用いての走行実験によって、確認、改良され、自信のもてるものまでになった。

また、けた材料の疲労の問題がある。けたの材料には調質高張力鋼(HT70およびHT80)が用いられることになったが、疲労試験のデータが少なかった。

そこで、動的荷重振幅400tの世界最大の大型疲労試験機を製作し、主要な継手について、実験を繰返し、実設計に反映させた。

とくに溶接管理の重要性が指摘され、精度の高い自動超音波探傷検査が、工場での生産管理に導入されている。

## 6. 明石海峡大橋へつづくもの

3つのルートのうち、東にある神戸—鳴門ルートには大鳴門橋と明石海峡大橋が計画され、前者はすでに2年前に開通している。

明石海峡大橋は、海上距離4kmを渡って、本土と淡路島を結ぶ。土木学会の技術委員会当時まとめられた計画では、支間1515m, 871m, 669mの3つの吊橋の連続で計画され、海中橋脚を8基建設する必要があった。

その後、本四公団を中心に見直しが行なわれ、ルートを西側に移すとともに支間1780mの吊橋で一度に渡る計画となった。しかし、この場合でも4基の海中橋脚を必要とした。

明石海峡大橋は永い間、将来新幹線鉄道を載せる容量をもつ、道路・鉄道併用橋として計画されてきたが、社会情勢の変化から、道路単独橋としての見直しが行なわれ、昭和61年度から建設に入

ることとなった。

道路単独橋の計画では、支間1990mと2000mに10m短い吊橋で海峡をひとまたぎすることになっている。

これこそ世界最大の吊橋であり、この計画をまとめることができたのも、瀬戸大橋での経験からくる自信といってよい。

海中橋脚は水深45m、潮流8ノットのところに建設されるが、瀬戸大橋の橋脚施工法、設置ケーソン工法が、再び登場することになる。

戦後、若戸大橋にスタートした日本の吊橋技術は、明石大橋の建設によって、名実ともに世界一流のものになる。

## 7. ま と め

現在、第2ボスボラス橋(支間1090m)がトルコで建設中であるが、日本の吊橋技術が世界に認められ、国際競争入札に勝つことができたプロジェクトである。

イタリアの本土とシシリー島の間のメシナ海峡に吊橋(支間3300m)の計画があり、地中海の入口のジブラルタル海峡にも、水深350m、海上距離30kmの夢のような橋梁計画がある。

橋梁技術者にとっては、近く完成する瀬戸大橋の経験が、明石から世界へ通ずる道と思えてならない。

