

## 瀬戸大橋の開通

## The Opening of the Seto Ohashi Bridge

やま ね  
山 根つとむ  
孟\*

4月10日、瀬戸大橋、本州と四国とを初めて道路と鉄道の陸路で結ぶ、本州四国連絡橋児島・坂出ルートが開通した（口絵写真参照）。

明治22年5月、四国新道の企画、推進に挺身した大久保謙之丞は、讃岐鉄道株式会社の丸亀一多度津一琴平線の開通祝賀会で、「塩飽諸島ヲ橋台トシテ架橋連絡セシメバ、常ニ風波ノ憂ナク、南来北向東奔西走瞬時ヲ費サズ、ソレ国利民福コレヨリ大ナルハナシ」と提唱された。以来99年を経た。

これに先だつ2か月前、ニューヨークのイースト川を渡り、明治16年5月開通をみた Brooklyn 橋、当時世界一であった中央支間長 486m の吊橋の絵馬（石版画）が、金刀比羅宮に奉納されている。この橋の基礎には、空気ケーソン工法が用いられている。馬車と鉄道、帆船と蒸気船の時代であった。

昭和15年4月、内務省神戸土木出張所長であった原口忠次郎は、鳴門海峡架橋構想を提案され、これに続く夢として、明石海峡大橋を描かれた。サンフランシスコ湾口には、昭和12年5月、中央支間長 1 280m の Golden Gate 橋がかけられている。南側主塔基礎の施工には、苦勞のあった橋でもある。同氏は、戦後神戸市長として本州四国連絡橋に情熱を注がれた。

本州四国連絡橋の本格的調査は、約 30 年前にさかのぼる。昭和37年1月から42年5月まで5年余にわたり、土木学会本州四国連絡橋技術調査委員会において、学際的かつ専門的な検討・審議が行われ、これに基づいて調査対象ルートの工期・工費が見積られ、経済的妥当性が検証された。昭和44年5月閣議決定された新全国総合開発計画では、「本州四国連絡橋として、神戸・鳴門間、児島・坂出間および尾道・今治間の建設をはかる」こととなった。

昭和45年7月1日、本州と四国にかかわる有料の道路および鉄道の建設および管理を総合的かつ効率的に行うことを目的として、本州四国連絡橋公団が発足した。昭和48年3ルート同時着工が、同年11月石油危機による総需要抑制策により延期、50年8月にいたって当面の建設方針が決定された。これに基づき、いわゆる地域開発橋として大三島橋（支間長 297m のアーチ橋）、大鳴門橋（中央支間長 876m の吊橋）、因島大橋（同 770m の吊橋）、後に伯方大島大

橋（同 560m の吊橋ほか）を順次着工、これら4橋はいずれも供用し、それぞれの効果をあげている。

当面早期完成をはかる道路鉄道併用橋としてのルートは、第三次全国総合開発計画（昭和52年11月）で、児島・坂出ルートと決定、環境影響評価の実施、旅客船問題等に関する対策の基本方針の確立などを経て、昭和53年10月10日着工の運びとなった。

海峡部は、道路鉄道併用の長径間吊橋3橋、斜張橋2橋などを主橋梁とする、世界的規模の長大橋梁群であり、台風、地震、水深、潮流などの自然条件はきびしく、そのルートは瀬戸内海国立公園を通過し、国際航路を含む船舶のふくそうする海域を横断する。

長年にわたる調査・研究、多くの難しい技術的課題の克服、さまざまな技術開発などが進められ、技術の粋を結集し、用地提供者、漁業関係者、海事関係者の理解と協力のもとに、総じて順調な事業の進展をみた。

ここに瀬戸大橋は、9年6か月の歳月、1兆1300億円の建設費、延900万人の工事従事者により、風光明媚な瀬戸内海の自然と調和し、20世紀の代表的な所産の一つとして誕生した。

この開通は、関門海峡の橋・トンネル、青函トンネルとあわせて、我が国の主要な四島を陸続きにするという、歴史的な意義を持つものと言えよう。

## 1. 本州四国連絡橋児島・坂出ルートの概要

児島・坂出ルートは、①本州側の岡山県都窪郡早島町で山陽自動車道と一般国道2号に連結する早島インターチェンジ(IC)から南下、水島IC、児島ICを経て鷲羽山に至り、海峡幅約1kmの下津井瀬戸を渡り、櫃石島、岩黒島、羽佐島、与島を経て、海峡幅約3.2kmの備讃瀬戸（与島より三ツ子島）を渡って四国側番の州に達し、坂出北ICを経て坂出市川津町で四国横断自動車道と一般国道11号に連結する坂出ICまでの延長37.3kmの瀬戸中央自動車道と、②倉敷市茶屋町で宇野線茶屋町駅から分岐して南下、植松駅、木見駅、上の町駅、児島駅を経、道路と共用して海峡部を渡り、香川県綾歌郡宇多津町の宇多津駅で予讃本線に接続する32.4kmの本四備讃線とからなる。海峡部を中心に、13.1kmが道路鉄道共用区間で、瀬戸大橋と呼ぶ。

\*本州四国連絡橋公団総裁

## 論 説

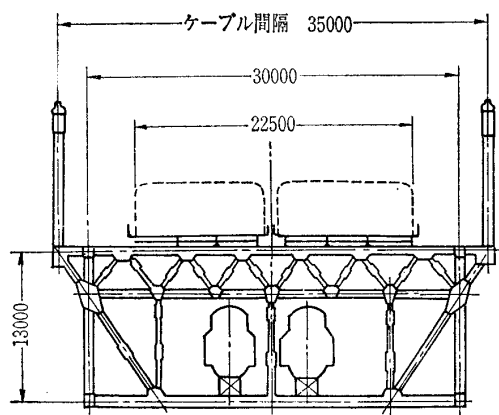


図-1 吊橋断面

構造規格は、道路については第一種第二級（設計速度100 km/h）の4車線、鉄道については在来線甲種規格（同120 km/h）の複線である。なお、海峡部の橋梁などについては、将来新幹線を併設できる構造としている。また陸上部は50 kg Nレールのスラブ軌道、海峡部は60 kgレールの鋼桁直結軌道の構造とし、直流1500ボルト方式の電車線としている。道路鉄道併用区間は、道路を上層、鉄道を下層とする二層構造である（図-1）。

海峡部9.4 kmは、鷺羽山をトンネルで出て、下津井瀬戸大橋（中央支間長940mの吊橋）、櫃石島高架橋、櫃石島橋（同420mの斜張橋）、岩黒島高架橋、岩黒島橋（同420mの斜張橋）、与島橋（同245mのトラス橋）、与島高架橋、北備讃瀬戸大橋（同990mの吊橋）、南備讃瀬戸大橋（同1100mの吊橋）により四国側に達し、番の州高架橋に連なる。

すでにふれたように、架橋海域は国際航路の備讃瀬戸はじめ、海上交通の要衝にあたっており、風、霧、波浪、潮流など船舶航行上の海象条件もきびしい。橋梁計画にあたっては、所要の航路幅、航路高（備讃瀬戸での桁下高は略最高高潮面から65m）を確保している。

鷺羽山トンネルは、延長それぞれ道路205m、鉄道230mの二段双設トンネル、いわゆる四つ目トンネルである（図-2）。これは、下津井瀬戸大橋の上層道路、下層鉄道の二層構造を、至近距離で受け入れることによるものであ

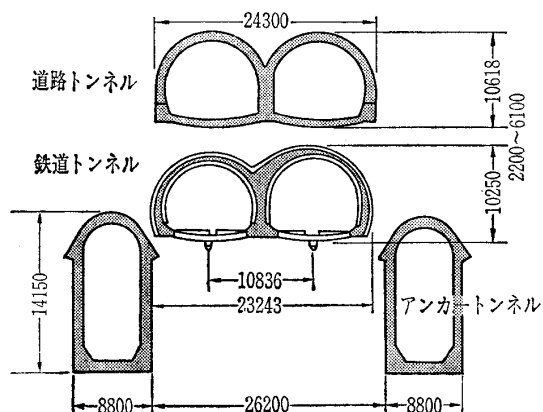


図-2 鷺羽山トンネル断面

るが、トンネルの施工は技術的に困難であるとの観点から、当初切土の計画であった。しかしこの地区は、瀬戸内海国立公園特別地区、名勝「鷺羽山」であるため、上記の計画としたものである。また、下津井瀬戸大橋の鷺羽山側アンカレイジは、直接地山に定着させるトンネルアンカーによることとし、地形改変を最小限にとどめる計画とした。

櫃石島橋、岩黒島橋についても、当初はゲルバートラスの計画であったが、瀬戸内海の自然景観との調和に配慮、斜張橋としている。

## 2. 技術的意義とその成果

瀬戸大橋は、きびしい環境条件での世界的規模の長大橋梁群で、道路鉄道併用橋としてはまさに世界一、長径間吊橋として、第5位となる南備讃瀬戸大橋、第11位となる北備讃瀬戸大橋、第13位となる下津井瀬戸大橋、斜張橋としても第3位となる櫃石島橋、岩黒島橋（併用橋としては第1位）が主橋梁を構成する。

この瀬戸大橋は、我が国の科学技術の進展を基盤に、長年にわたる調査・研究、大規模な実験、実地試験などが積み重ねられ、耐風設計、耐震設計はじめ未踏の分野に及ぶ設計基準、施工基準類の確立、関門橋、因島大橋、大鳴門橋などにおける経験、自然環境、社会環境を配慮した最適な計画ないし設計の策定、現地に即した施工法の選択、材料、細部設計、要素工程にわたるさまざまな技術開発、これまでの技術の改良など、総力が結集され、高い技術水準で、安全、確実かつ効率的な事業の遂行がはかられて、その完成をみたものである。

いわば、我が国の橋梁技術、土木技術が、この分野において到達し得た水準を如実に示すものであり、同時にまた世界的水準にあることを象徴する。

中央支間長500m以上の吊橋は、本年、世界に31橋を数えるが、このうち、この20年間での完成は13橋、我が国のそれは7橋である。そして他の6橋のうち2橋、すなわちザイールの President Mobutu-Sese-Seko 橋（モブツ元帥橋、中央支間長520m、昭和58年）、トルコの 2nd. Bosphorus 橋（第2ボスポラス橋、同1090m、本年完成予定）は、我が国の技術に負うものである。

本州四国連絡橋事業を通じて研究開発され、蓄積された数多くの技術は、我が国はもとより、世界の長大橋、海洋構造物の建設等に大きな意義を持つ。そして、広範な分野における技術開発に、さまざまなインパクトを与える。

昭和61年度に事業化された明石海峡大橋は、中央支間長1990m、側支間長960m、橋長3910mの吊橋で、現在世界一のイギリスの Humber 橋（ハンバー橋、中央支間長1410m、昭和56年）の規模を大きく上回る。しかも主塔基礎での水深は40～45m、最大潮流は7～8ノット、船舶の航行も多く、瀬戸大橋の場合に比し、施工環境は一段ときびしい。明石海峡大橋には、さらに新たな技術の開発が必

要であるが、瀬戸大橋の経験が活かされて成立つものと言えよう。

以下、技術的な成果のいくつかを例示しよう。

## 2.1 計画・設計・施工のよべき基準類の確立

上部構造設計基準，下部構造設計基準，耐風設計基準，耐震設計基準，鋼橋等製作基準，鋳鍛鋼品製作基準，鋼橋等塗装基準，橋面舗装基準，材料規格，吊橋主塔設計要領，緩衝桁軌道伸縮装置設計要領など50を越える。

以下，耐風設計と耐震設計についてふれる。

耐風設計は，構造部材の断面設計を主体とする静的設計と，暴風時の動的安定性の確保，風荷重算定のための空気力係数の検証などの風洞実験による動的設計からなる。これらの設計の基本とする基本風速は，再現期間を150年とし，海面上10mの10分間平均風速としている。児島・坂出ルートでは，43 m/sである。設計風速は，この基本風速に高度，応答特性，風の空間特性を考慮し，構造ごとに設定される。

耐震設計については，紀伊半島沖，土佐沖において，100年に1～2回発生が予想されるM8程度の地震を対象とし，地震時入力加速度は180 galとしている。設計は，地盤も含めた上・下部工の全体系モデルにより，加速度応答スペクトルを用いた応答解析を行い，得られた反力を下部工モデルに外力として与え，安定計算を行うものである。長大橋梁の下部工は巨大になり，それが負担する荷重より自重がはるかに大きく，耐震設計いかににより，その構造寸法が決まるだけに，下部工にとって耐震設計は，最大の問題であった。

## 2.2 自然環境に配慮した計画，設計，施工

鷲羽山をトンネルに，櫃石島橋，岩黒島橋を斜張橋とする計画についてはすでに述べたが，このほか塔・橋脚の形状については慎重に配慮された。

橋梁の色彩は，ライトグレー（N7.5）で，瀬戸内海の空・海・島になじみ，コンクリート構造との一体感を与えている。

なお，二段双設の鷲羽山トンネルは，土被り最大30m，二段のトンネルの上下純間隔2～6mで，下津井瀬戸大橋のアンカレイジのトンネルにも近接する，きわめて難しい施工であったが，トンネル相互間の安定にかかわる各種計測，予測，施工のシステムを開発し，所期どおり完成できた。

## 2.3 道路鉄道併用，長径間化に対応した材料，構造，製作面における開発

道路鉄道併用，長径間化に伴い，設計活荷重が大きいこと，二層構造に鉄道空間を確保すること，所要剛度が大きいことなどのため，死荷重は著しく増大する。死荷重軽減のため，道路の床版を鋼床版とし，特殊舗装を採用するほか，調質高張力鋼板を相当量用いた。

調質高張力鋼は，材料の特性から列車の繰返し荷重によ

る溶接部の疲労対策が不可欠である。このため，動的荷重振幅400 t<sub>f</sub>，世界最大級の大型疲労試験機を製作，実験を重ねて溶接欠陥の少ない溶接法を開発し，また製作された部材の非破壊検査手法を確立，疲労に対しても安全な構造部材の製作を可能にした。

また，支承等での大きな反力や移動量に対応するため，耐久性の高い大型鋳鋼品，鋳鋼と鋼板のハイブリッド構造のサドル，揺動確認試験を経たタワーリンクなどの設計製作技術の確立をはかった。

## 2.4 列車の走行安定性の確保

長径間吊橋は，たわみやすい構造であり，列車の走行によって補剛桁端部に大きな伸縮，角折れを生じ，列車の走行安全性と乗り心地に問題を生ずる。これに対処して，補剛桁構造に連続形式を採用して，その発生箇所を少なくし側径間長を短くして，折れ角の値をできるだけ小さくした。また，伸縮，角折れを吸収するため，緩衝桁軌道伸縮装置を開発し，アンカレイジ部に生ずる伸縮，折れ角を最大±75 cm，10%まで可能にした。

なお，列車の走行による吊橋の変形，振動についても問題はなく，道路面を走行する自動車への支障もないことが確認されている。

また，番の州高架橋は，支持層が深く高橋脚であり，高架橋の振動特性によっては，地震時における列車の脱線が憂慮された。このため，列車の振動周期に対し，構造物の振動周期をシフトさせたスパン割りを採用し，シミュレーション解析により，走行安全性を検証した。

## 2.5 設置ケーソン工法の選定と要素工程における技術開発

きびしい施工環境における現場施工は，現場作業量を軽減し，工期をできる限り短縮し，安全かつ確実な工法を選択することが肝要である。これには，単純化，省力化ないし自動化，大量化ないし大型化，高速化した施工法が決め手になる。

瀬戸大橋の海中基礎11基には，設置ケーソン工法が開発，選択された。

本ルートの海底地質は，基盤が花崗岩で，表層5～15mは風化しており，場所によっては20～30mの堆積層がある。橋梁の基礎は，この堆積層，風化岩盤を除去して，堅固な岩盤に支持されなければならない。この支持面は海面下10～50mであり，周辺海域の最大潮流は5ノットを越える。また，基礎平面寸法の最大は，長さ75m，幅59m（南備讃瀬戸大橋の四国側アンカレイジ）である。

設置ケーソン工法は，①大型の自己昇降型の海上作業足場（必要に応じ避難可能）に，ボーリング機械を数台据えて海底を削孔する，②爆薬を装填して発破し，岩盤を破碎する，③破碎した風化岩を大型グラブ船でつかみあげ，運搬捨土する，④露出した岩盤の表面を，ロータリー式の岩盤掘削機<sup>たいら</sup>で平に仕上げる，⑤工場で製作した鋼製ケーソン

## 論 説

を曳航し、所定の位置に据えつける、⑥大径の骨材を投入する、⑦海水で満たされている空隙を、モルタルで置き換える、という工法である。

以上の要素工程には、つぎのような技術開発などが行われ、すぐれた成果をおさめた。

- ① 大水深下で、周辺への影響（魚、船舶、近接する石油精製プラントなど）を最小限にし、確実に発破を行うことのできる耐水性爆薬、起爆システム（超音波、電磁誘導、秒差段発有線起爆法）など
- ② 20 m<sup>3</sup> 級（土砂用）と 10 m<sup>3</sup> 級（岩盤用）のバケットを使い分ける、大型グラブ船による掘削
- ③ ロータリー式大口径（2.5 m）掘削機による底面仕上げ
- ④ 最大長さ75 m、幅59 m、高さ55 m、質量約 16 000 t の鋼製ケーソンを、所定位置に精度よく据えつける位置決め沈設システム—ケーソン側に 130 t 容量のウインチ 8 台を装備、3 000 t フローティング・クレーン船が介添し、ケーソンの平面位置、吃水、傾斜を連続自動測定して、その測定値をケーソン作業管理室内のテレビ画面上に表示し、ウインチの操作、クレーンの操作を有機的に行って沈設する。
- ⑤ 高品質のモルタルを連続して急速、大量に供給（240 m<sup>3</sup>/h）し得る大型プラント船

### 2.6 長径間吊橋などの上部工架設工法における技術開発

- ① フリーハング工法によるパイロットロープの新しい渡海工法—クレーン船でロープに張力をかけ、空中を渡海させる方法で、航行船舶への支障を最小限にとどめている。
- ② 道路鉄道併用、長径間化に伴い、ケーブル長が長く太径化することに対応したプレハブ・ストランド（PS）工法—127 本の素線の端部をソケット付けしたストランドを、工場で製作して現場に搬入し、ホーリング・システムで引き出し、これを集成してケーブルに仕上げる。
- ③ 下津井瀬戸大橋の鷺羽山へのトンネル式アンカレイジに対応して定着ストランド数を少なくすることのできるエア・スピニング（AS）工法—素線のまま架設し、現場でストランドする工法で、ここでは44のストランドそれぞれが 552 本の素線で構成されている。
- ④ 塔、補剛桁、アンカーフレームなどの大ブロック架設工法—実績の最大は 2 隻のフローティング・クレーン船による長さ185 m、質量 6 100 t の架設
- ⑤ 補剛桁架設における逐次剛結工法

### 2.7 その他

以上のほか、工事中および完成後における航行船舶の安全対策、早島 IC における軟弱地盤処理、番の州高架橋におけるリバース工法による杭径 3 m、最大杭長73 mの場所

打ち杭基礎の施工、鋼床版の変形に追従でき、耐疲労性、耐流動性のすぐれた鋼床版舗装、防錆力、耐久性の高い長期防錆型塗料と塗装、橋梁の動態観測、アクセシビリティの高い点検補修作業車の設置などを含めた維持管理システムなどがあげられる。

## 3. 経済社会的意義など

児島・坂出ルートは、今世紀中の完成をめざしている神戸・鳴門ルート、尾道・今治ルートとともに、高規格幹線道路網の一環として、第四次全国総合開発計画（昭和62年6月）の目標とする多極分散型国土の形成、その達成のための交流ネットワーク構想の推進に大きな役割を果たす。

児島・坂出ルート、瀬戸大橋の開通は、海上交通への依存度の高い瀬戸内海地域の交通体系を、画期的に改善するものである。すなわち、風、霧、波浪などの気象条件に大きく左右されてきた本州四国間の交通は、「いつでも、きまった時間で」の交通が可能となり、また乗り換え、積み換えの不便さがなくなり、交通所要時間が大幅に短縮される。例えば、倉敷・坂出間の乗用車による所要時間は、フェリー利用で約2時間を要するが、走行速度の上昇、乗り換え、待ち時間の解消などにより、約40分と3分の1に短縮される。また、岡山・坂出間の鉄道旅客の所要時間は、宇高連絡船利用の約2時間40分が、約40分と4分の1に短縮される。

これにより、中国・四国地域は、瀬戸内海によって隔てられているという地理的条件を克服し、関連する交通施設の整備とあいまって、両地域が一体となった産業発展の基盤が整うこととなり、産業の活性化を通じて生産所得の増加が促されよう。すなわち、①野菜、果物、花卉、魚介類など農水産物の流通条件の改善、市場圏の拡大、②地域の特性に応じた工業の展開、産業構造の多様化、③消費需要の増大、関係地域相互間の交流の活発化による商業、サービス機能の向上など、産業の振興が期待される。

一日行動圏が拡大し、一衣帯水の両岸諸都市相互間、地域間の機能的分担、有機的連携が強まり、生活圏の拡大と生活の利便性向上に寄与する。これにより、地域の産業発展とあいまって、人口の定着を促進し、安定した活力ある地域社会の形成がはかられよう。

また、知名度が高い瀬戸内海国立公園に、そのすぐれた自然に融合し、技術の粋を集めた瀬戸大橋が誕生したことは、新たな景観資源として、観光レクリエーション需要を生むことになろう。関連地域は、資源に恵まれながら、必ずしも有効に生かされてこなかった。これからは、関連公共施設、海洋リゾート基地、その他諸施設の整備とあいまって、関連地域の魅力は飛躍的に高まることになろう。そして、日本海—瀬戸内海—太平洋はじめ、広域的かつ多様なルートが展開されよう。瀬戸大橋は、その枢要部を占める。

ここで、本州四国連絡道路、瀬戸中央自動車道は、有料道路制度によって、はじめて今日完成をみたものであることを強調しておきたい。その建設に要する資金は、借入金が大部分で、総合金利を6.149%とするよう、出資金が国および関係地方公共団体から2:1の割合で投入されている。借入金は、政府引受債、政府保証債、政府保証借入金、縁故債（地方公共団体あつせん）および民間借入金によって調達され、多様な民間資金によっている。この建設に要した費用、これからの維持管理費、調達資金にかかわる利息等の費用は、利用者が負担することになる。その料金は、道路整備特別措置法、本州四国連絡道路の料金制度についての道路審議会の答申などに基づき、①料金収入によって一定期間内に上記の費用を償う償還主義、②便益の範囲内で料金を設定するという便益主義、③国土開発上の役割、計画の一体性、機能の代替性、利用者負担の公平などから3ルート of 料金プール制、④全路線画一対距離料金制（陸上部と接続する高架橋等を含めた海峡部とに区分、車種ごと）によって設定されている。

## おわりに

児島・坂出ルート、瀬戸大橋（瀬戸中央自動車道および本四備讃線）の開通とともに、その管理が始まる。

安全で快適に利用いただけるよう万全を期し、瀬戸内海の自然に調和した貴重な資産、きびしい環境にある長大橋梁群を21世紀、22世紀へと保全し、その機能の維持向上に最善をつくさなければならない。

また、明石海峡大橋、来島大橋、3ルートの完成に向け、これまでの経験のうえに、全力を傾注し、21世紀へのかけ橋を立派に仕上げ、次の世代に引き継いでいかなければならない。

本ルートの完成は、いわば21世紀へ向けての新たな出発を意味する。

長年にわたり、ご指導いただいた皆様方に心から厚く御礼申しあげ、これまでも増したご支援をお願いする次第です。

（原稿受理 1988.3.1）