



未来にかけてたものづくりの夢 本州四国連絡橋

本州四国連絡橋は、瀬戸内海国立公園の美しい景観に溶け込み、壮大で優美な姿を見せるとともに、本州と四国を結ぶ社会インフラとして欠かせない存在となっている。中でも兵庫県神戸市と淡路島間の明石海峡に架かる明石海峡大橋は、日本の橋梁技術の粋を集めた世界最大の吊橋として、多くの人々を惹きつけている。この橋はどのようにして誕生したのか。そして本州四国連絡橋の架橋技術は、現在どのように受け継がれているのか。世界に誇る長大橋を生み出した日本のものづくりを追う。



日本の橋梁技術を発展させた海を渡る橋

本州と四国を結ぶ構想は、1889（明治22）年に香川県議会議員が塩飽諸島を橋台とした連絡橋を提唱したことに始まる。そして1955（昭和30）年、修学旅行生を乗せた宇高連絡船「紫雲丸」が沈没して168人の生命が奪われるという悲惨な事故が発生。この事故が本州四国連絡橋の必要性を決定的なものとし、1959（昭和34）年に建設省が調査を開始した。1970（昭和45）年、本州四国連絡橋公団（現在の本州四国連絡高速道路

路株）が設立されると、1973（昭和48）年に3ルートの同時着工を決定した。その後石油危機による着工の一時凍結や、鉄道と道路の併用か道路単独利用とするかの検討などを経て、1975（昭和50）年の大三島橋着工に始まり、1976（昭和51）年に大鳴門橋、1988（昭和63）年に明石海峡大橋の着工などが進められていった。本州四国連絡橋の歴史的意義について、東京大学名誉教授の伊藤學氏は次のように解説する。

「日本の鋼橋は官営製鉄所の操業が軌道に乗った大正時代以降、すべて国産でつくられるようになりました。そして関東大震災の復興事業を契機として飛躍的な発展を遂げます。しかし日本には大きな川がなく、長いスパンの橋はつくられませんでした。こうした中、戦後日本の橋梁技術を発展させたエポックメイキングな出来事は、海を渡る橋でした。西海橋、若戸大橋、関門橋といずれもスパンや橋梁形式の点で、それまで経験しなかった未知の領域に入りました。さらに東京オリピックと大阪万博を契機にして、高速道路や東海道新幹線が、技術の飛躍的な発展を促しました。特に1970年代からは、大都市圏で大規模橋梁の建設が活発になり、これは古今未曾有の大プロジェクトであった本州四国連絡橋の建設に刺激されたところが大きかったと思います。こうして長大橋技術が培われ、ついに明石海峡大橋という世界最大の吊橋を架けるに至るまで、日本の橋梁技術は進化を遂げたのです」

本州四国連絡橋の概要



東京大学名誉教授 伊藤 學氏

1959年東京大学大学院博士課程修了(工学博士)。72年同大学教授(工学部土木工学科)を経て91年現職。国際構造工学会会長、日本橋梁建設協会会長など歴任。日本の耐風設計研究の第一人者として、長年橋梁構造の研究に携わる。明石海峡大橋など本四架橋計画への参画をはじめ、国内外の長大鋼橋を中心とした数多くのプロジェクトに関わり、その発展に大きく貢献。

“海を渡る橋”の歩み

西海橋 (完成 1955年 長さ 316m 最大支間長 216m)

長崎県の針尾瀬戸(日本三大潮流の一つ)に架けられ西彼杵半島と佐世保市を結ぶ



若戸大橋 (完成 1962年 長さ 627m 最大支間長 367m)

福岡県北九州市の洞海湾に架けられ戸畑区と若松区を結ぶ



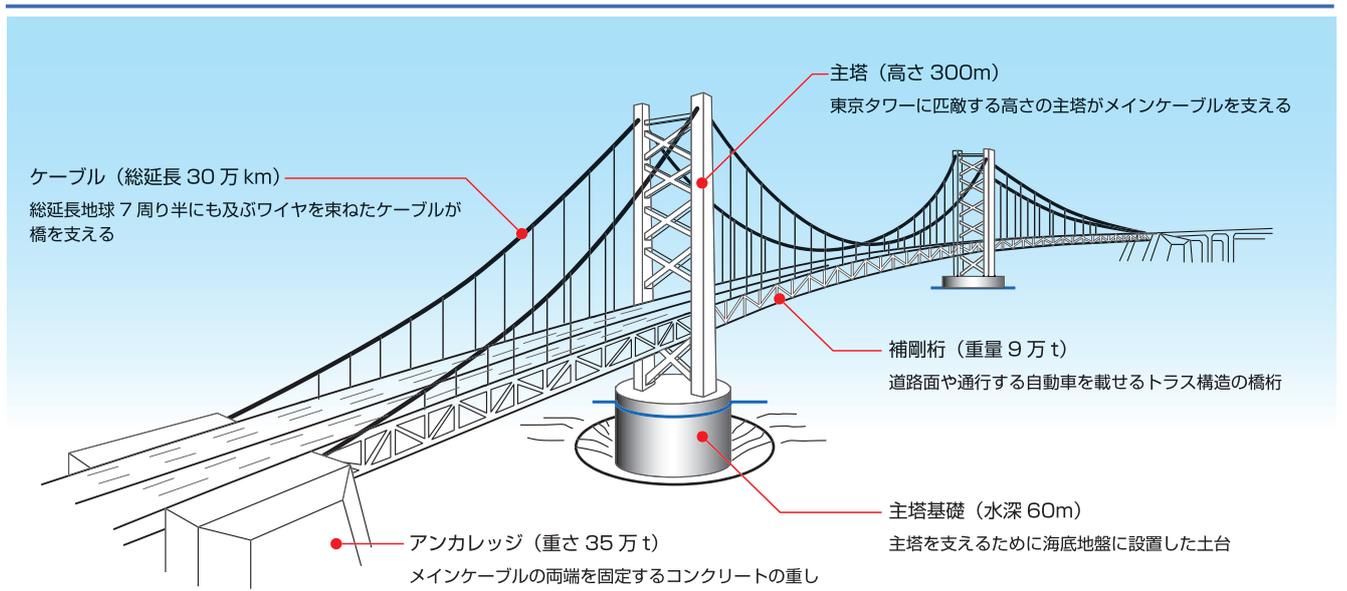
関門橋 (完成 1973年 長さ 1,068m 最大支間長 712m)

関門海峡に架けられ山口県下関市と福岡県北九州市門司区を結ぶ

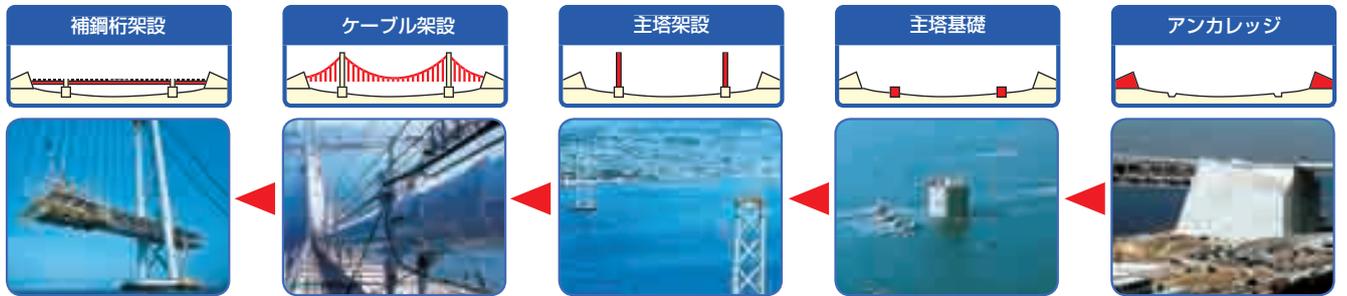


明石海峡大橋 (完成 1998年 長さ 3,911m 最大支間長 1,991m)

明石海峡に架けられ兵庫県神戸市と淡路島を結ぶ



明石海峡大橋ができるまで



歴史にその名を刻む世界最大の吊橋

大阪湾と瀬戸内海を結ぶ明石海峡は、幅が約4km、最大水深は約110m、潮流の速さは最大で毎秒4.5m(約9ノット)に達する。古くからの好漁場であるとともに、1日に1400隻以上の船舶が航行する海上交通の要衝でもある。明石海峡大橋は厳しい条件の中で、日本の橋梁技術の粋を集めて建設された。

自然との闘い

吊橋の大きさはケーブルを支える支間長で決まる。明石海峡大橋が建設されるまで、日本では1000m級が最長で、その約2倍になる中央支間長1991mの橋の桁を架設する大プロジェクトだった。支間長が長くなると風の影響を受けやすくなる。台風通過が多い明石海峡では、風への対策が重要だ。強風観測で最も強かった記録は、1965(昭和40)年に最大風速49.4m/sに達した。明石海峡大橋の設計では、100分の1の精巧な模型をつくり風洞試験を繰り返し、風速約80m/sまで耐え得る構造をつくり出した。

また明石海峡を1つの橋でまたぐためには、基礎を支えるしっかりした地盤が必要だ。そこで基礎を据えても安全か検証するため、すべての断層を調査し基礎の場所が決められ、太平洋プレートで発

生が想定される大地震にも耐え得る基礎構造が建設された。

基礎が完成すると、続いて主塔だ。明石海峡大橋の主塔の高さは297mに達する。これは東京スカイツリー(634m)、東京タワー(332.6m)、あべのハルカス(300m)に次ぐ高さの巨大構造物だ。その主塔を海上で建設するため、塔柱は30段のブロックごとにつくられ、現場で積み上げられて接合された。主塔の設置誤差は極力少なく抑えられ、また風による曲げ振動やねじれ振動に対応するため、主塔の断面形状を工夫し、振り子型の制振装置が設置された。



大型風洞模型による耐風安定性試験



ケーブルの架設

ワイヤを束ねたストランドを
290本架け渡し整形する

吊橋はケーブルが命

主塔の次はケーブル架設に入る。吊橋はメインケーブルが命と言われ、建設プロジェクトはクライマックスを迎える。明石海峡大橋のケーブルは片側1本ずつで計2本、1本につき290本のストランド(正六角形に束ねられたワイヤ)で構成されている。明石海峡大橋のため引張に強い高張力鋼が開発された。ここに新日鉄住金の世界最高水準の技術力が発揮されている。1985(昭和60)年に架けられた瀬戸大橋では、ワイヤの強さが1mm当たり160kgの1600メガパスカル(MPa)級だった。それから10年、絶え間ない技術開発を続けた結果、明石海峡大橋では200MPa強い1800MPa級へと進化を遂げた。これによって、片側2本必要だったケーブルが1本に減り、軽量化と架設作業の効率化が図られた。

軽量化が図られたとは言え、メインケーブルは直径約1.1m、総重量約5万500トンに達する。安全で効率的なケーブル架設を実現するため、ワイヤの開発には相当な時間と労力を費やした。当時新日鉄で開発を推進した日鉄住金テクノロジ(株)室蘭事業所長の樽井敏三氏は次のように語る。

「延性低下の防止と溶融垂鉛めつき時の強度低下の抑制が、1800MPa級鋼線を実現するためのポイントでした。最先端のアトムプロープを用いたナノレベルでの組織解析によって課題を解決するとともに、さまざまな評価試験を行い実

用化に耐えることを実証しました」

メインケーブルを架けるために先行してパイロットロープを架けるが、その架設でも新たな挑戦があった。ロープに浮きを付けて海を曳航する若戸大橋や関門橋の手法では、気象や海象の影響を大きく受け、航路も封鎖しなければならぬ。そこで明石海峡大橋では初めてヘリコプターでパイロットロープを架ける手法が取られ、順次太いワイヤロープに架け替えていき、キャットウォークという足場をつくり、航路を封鎖することなくケーブルを架設した。

またメインケーブルの防食では、新たに送気乾燥システムが開発された。本州四国連絡橋のうち、完成時期の早い大鳴門橋や瀬戸大橋などでは、ワイヤを束ねた表面に防錆剤を塗った後ラッピングし、さらにその表面を塗装する方法でさびを防いでいた。しかし湿度が高く、気温変化が大きい日本の気候に、より防食効果を高めるため、明石海峡大橋では、乾燥空気を送りケーブル内部の湿度を適切に管理する送気乾燥システムによって、腐食を防ぐことに成功している。

阪神・淡路大震災を耐え抜く

主塔にケーブルを架け渡した直後の1995(平成7)年1月17日、阪神・淡路大震災が発生した。震源地は明石海峡の直下だった。このとき2つの主塔基礎は最大で1m近く地盤ごとずれ、両端のアンカレッジ間の距離も1.1m広がったが、その後の調査で主塔ほか橋の施設



大ブロックの一括架設



阪神・淡路大震災後まもなくの神戸市と建設中の明石海峡大橋

橋自体に深刻な構造上の損傷は見当たらなかったが、街は至る所で建築物が倒壊しブルーシートで覆われた。

には健全性に影響を及ぼす損傷がないことがわかった。震度7という激震を発生させた地震にも明石海峡大橋は見事に耐え抜いたのだ。念には念を入れた地震対策の面でも、その技術が世界でトップクラスであることを証明した。工事は基礎が動いたことよって、主塔と主塔の間の距離が変わり桁の長さを変更する必要があったが、未製作の桁のパネルの長さを調整することで対応して、工事は大幅に遅れることなく進んだ。

大震災を乗り越え、補剛桁の大ブロック一括架設が始まった。明石海峡大橋は超長大橋であるため、桁が受ける荷重は既存のどの橋よりも大きい。そこで補剛桁には新日鉄住金の高張力鋼材が大量に採用された。新日鉄住金における高張力鋼材の技術変遷を見ると、天門橋

(熊本と天草をつなぐ天草五橋の一つ)で600MPa級鋼、港大橋(大阪港の天保山と咲洲を結ぶ)では700・800MPa級鋼が大量採用された。しかし現場での溶接にあたり高温での予熱が必要ななどの課題があったため、明石海峡大橋では低予熱型800MPa級鋼を開発した。これにより大きな荷重に耐える機能性とともに、軽量化と経済性の向上が図られた。

それでも大ブロックの重さは最大3800トンにも及んだ。これは海だから動かせる重さだ。大型クレーンで主構トラスや主横トラスを架設した後、道路面となる鋼床板を架設し、作業は直下を往来する船舶に細心の注意を払いながら行われた。そして1996(平成8)年9月、明石海峡大橋の橋桁が一つにつな

21世紀の橋づくりに脈々と息づく

長大橋技術

明石海峡大橋は現地工事の着手から10年の歳月を経て完成し、本州と四国

を結ぶ「神戸淡路鳴門自動車道」として1998(平成10)年4月に開通した。瀬戸内海国立公園の景観に溶け込む優美な姿を見せ、また機能面では、交通量が本州四国連絡橋の中で最も多く、2013(平成25)年9月には通行車両が1億5千万台を突破した。本州四国連絡橋開通が地域に与える効果について、本州四国連絡高速道路(株)長大橋技術センター総括・

防食グループリーダーの萩原勝也氏は次のように語る。

「天候の悪化などにより本州と四国間の移動が制約されることが減り、移動の確実性が向上するとともに、本四間の所要時間は約3分の1へ大幅に短縮され、物流や地域間交流、観光などを活性化させました。また海峡部の橋梁には水道、電気、通信施設など、各種インフラ施設も設置され、地域の重要な生活基盤としての機能も果たしています」

本州四国連絡橋で世界最高水準に到達した日本の橋梁技術の今後について、東京大学名誉教授の伊藤學氏は次のように展望する。

「日本は数十年前まで海外の技術の後追いが続きましたが、それらを改良し発展させる技術開発に優れていました。本州四国連絡橋は、当時の日本が持っていた技術だけでなく、多くの新しい技術を独自に開発し、それらを用いて建設されました。1988年、ロンドンでの引張構造国際会議の席上、吊橋先進国であるアメリカの長老技術者から『日本におけるケーブル架設の技術開発は素晴らしい』と評価されたときは、大変感慨深いものがあり



明石海峡大橋の完成式典

本州四国連絡高速道路(株)

ました。21世紀に入り国内では大規模橋梁ブームが一段落しました。海外プロジェクトを支援しているものの、技術継承の面では若干危惧を抱いています。しかし一方では、本州四国連絡橋で開発した技術が脈々と受け継がれています。例えば明石海峡大橋のケーブル送気乾燥システムは、瀬戸大橋やレインボーブリッジで追加的措置として講じられたほか、イギ

リスのハンバー橋でも採用されています。また低予熱型高張力鋼材をさらに発展させた高性能鋼が開発され、東京ゲートブリッジに使われています。橋は他の分野の構造物よりも長きにわたって、多くの人々に便宜を供与することができます。その使命を鉄がこれからも担ってくれるものと期待しています」

本州四国連絡高速道路は、日常生活はもちろん、業務や観光など、多様な目的で利用されている。また、海峡部の橋梁には水道、電力、通信施設も添架され、地域のライフラインを形成しており、貴重な社会インフラを200年以上の長期にわたり使用可能なものにするために、

また、これまで培ってきた橋梁技術を活用したグローバルな技術支援や、本州四国連絡高速道路を媒介とした「せとうち美術館ネットワーク」など、地域と連携した瀬戸内地域の活性化や観光振興などにも取り組んでいる。

供用開始の初期段階から「予防保全」を基本に計画的な維持管理に取り組んでいる。そしてこの取り組みをより一層体系的なものにするために、アセットマネジメントの考え方を導入し、構造物の長寿命化とライフサイクルコストの最小化に努めている。



ケーブル点検