



1. はじめに
2. 設計段階における景観への配慮
3. 瀬戸大橋建設における技術的課題
4. 工期短縮の工夫
5. 大水深基礎の建設と杉田所長の思い出
6. 道路鉄道併用橋の課題克服
7. まとめ

## 四国島民四百万人の悲願であった瀬戸大橋の建設 ～本州と四国を初めて陸続きに～

### 講演者



#### 加島 聡

元本州四国連絡橋公団  
理事



#### 大塚 岩男

元本州四国連絡橋公団  
企画開発部 首席審議役



#### 平野 茂

元本州四国連絡高速道路(株)  
安全技術部長



#### 金崎 智樹

元本州四国連絡高速道路(株)  
取締役常務執行役員

20世紀最大の国家プロジェクトと言われた瀬戸大橋は、構想から100年、調査開始から30年の歳月を経て、1988（昭和63）年4月10日に開通した。瀬戸大橋の建設に向けて日本の土木技術の総力が結集された。さらにこの完成により、フェリーに頼っていた本州四国間の人や物の往来は格段に改善され、瀬戸内のみならず西日本の経済活性化に大きく貢献することとなった。本稿では、瀬戸大橋のうち最大規模の南北備讃瀬戸大橋の建設を中心に技術的課題の克服等について紹介する。

写真提供：本州四国連絡高速道路（株）



写真1 瀬戸大橋の全景

### 1. はじめに

本州四国連絡橋は、瀬戸内海の東から神戸・鳴門、中央が児島・坂出、西側が尾道・今治の3ルートからなる。

このうち瀬戸大橋は、児島・坂出ルート、本州側の岡山県児島市（現倉敷市）から四国側の香川県坂出市までの道路延長約37km、鉄道延長約32kmの内、海峡部約10kmにかかる6つの長大橋を含む橋梁群の総称である。吊橋3橋、斜張橋2橋、トラス橋1橋で構成され、最も四国寄りの南備讃瀬戸大橋は、建設時点で世界最長の道路鉄道併用吊橋であった。（写真1）

#### (1) 構想段階

本州と四国を結ぶ橋の夢を初めて語ったのは、香川県議会議員の『大久保謙之丞』だといわれている。1889（明治22）年5月、讃岐鉄道の丸亀・多度津・琴平線の開通祝賀会で、次のような演説があった。

「塩飽諸島ヲ橋台トシテ架橋連絡セシメバ、常二風波ノ憂ナク、南来北行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。

塩飽諸島というのは、岡山県と香川県との備讃瀬戸付近にある島々で、これを橋台として架橋する、すなわち現在の瀬戸大橋を架ければ、海が荒れた日でも本州と四国の間を自由に行き来でき、国家の利益と国民の幸福にとって、これ以上のものはないといったのである。今から130年以上も前のことである。

大久保が瀬戸大橋の建設について技術的に可能かどうか吟味していたとは思えないが、この演説の6年前には、



写真2 大久保の銅像とブルックリン橋の絵馬

当時世界一の吊橋であったブルックリン橋がニューヨークで完成していた。その情報は、アメリカに興業に出かけた足芸軽業師の杉本一座がブルックリン橋の石版画を買い求めて帰り、大久保発言の2ヶ月前に無事帰国のお礼に金比羅宮に絵馬として奉納しているの、大久保議員がそれを見て、架橋構想を夢として記念式典で演説したのではないかとされている。（写真2）

#### (2) 調査段階

具体的に架橋構想が動き出したのは、戦後しばらくして、フェリーの沈没事故が相次いだことが大きなきっかけとなった。フェリー事故の中には、1955（昭和30）年5月11日の宇高連絡船『紫雲丸』の事故もあった。修学旅行生を含む168人が亡くなるという痛ましい事故であり、これらが本格的な架橋調査を開始する契機となった。まずは香川県、岡山県による独自の調査が行われた。さらに、建設省と国鉄が道路、鉄道をそれぞれ調査し



た後、国家プロジェクトとして国の総力を挙げて技術検討すべきとされ、土木学会に検討委員会が設けられ、技術的な可能性検討が行われた。

調査対象ルートは、3ルートあり、それぞれのルートの地元では、激しい架橋誘致合戦が繰り広げられた。

1967（昭和42）年7月、技術的課題はあるものの3ルートとも架橋可能との土木学会最終報告がなされた。

### (3) 本四公団設立と工事開始

1970（昭和45）年7月、本州四国連絡橋公団が設立され、調査は建設省・国鉄から公団に引き継がれた。1972（昭和47）年11月に「本州四国連絡橋調査報告書」がまとめられ、調査結果が建設大臣及び運輸大臣に提出された。その後、両大臣から工事に関する基本計画の指示があり、さらに工事实施計画の認可を受けて、本四連絡橋は3ルート同時に着工することとなった。

しかしながら、1973（昭和48）年11月25日に起工式と決められ、準備を進めていた矢先の11月20日、オイルショックに伴う総需要抑制策に基づき着工を延期するよう政府から指示がなされ、工事着手は延期された。

4年後の1977（昭和52）年11月4日、閣議決定された「第3次全国総合開発計画」において、当面早期に完成を図るルートとして児島・坂出ルートが正式に決定され、翌1978（昭和53）年10月10日に起工式が行われ、瀬戸大橋の工事が開始された。（写真3）

## 2. 設計段階における景観への配慮

瀬戸内海は、日本で最初に指定された国立公園である。また、瀬戸大橋の架橋地点周辺は、規制の厳しい国立公園第2種特別地域や名勝に指定された地区もある。このため、当初の設計から景観に配慮した構造変更や地形改変への影響を少なくするための計画変更が行われた。

代表的な事例として、櫃石島橋・岩黒島橋の橋梁形式変更と、鷺羽山地区の構造変更について紹介する。

櫃石島橋・岩黒島橋は、当初ゲルバートラス橋で計画されていたが、ルート全体の統一性、連続性を考慮して、軽快ですっきりした印象を与える斜張橋に橋梁形式が変更された。これは、当時、コンピュータを用いた斜張橋の解析・設計技術がめざましく発展しており、その技術の進歩も大きな要因であった。

また、鷺羽山地区は、当初オープンカットにより通過することとしていたが、地形や植生改変による景観変化が顕著になるため、技術的に再検討した結果、影響の少ないトンネル構造に変更された。鷺羽山トンネルは、上段が道路2本、下段が鉄道2本の4トンネルが近接して設けられた特殊形状のトンネルであり、さらに南側の抗口に下津井瀬戸大橋のトンネルアンカーが近接しているため、トンネル工事は技術的に非常に難易度の高いものであった。（図1）

## 3. 瀬戸大橋建設における技術的課題

南北備讃瀬戸大橋は、瀬戸大橋の6つの長大橋の中で最も四国側に位置し、国際航路を跨いで建設された2連の吊橋である。瀬戸大橋建設には様々な課題があったが、ここでは、①工期短縮のための工夫、②強潮流下における大水深基礎の建設、③道路鉄道併用橋の課題克服について、南北備讃瀬戸大橋を例に紹介する。（写真4）

具体的課題の説明の前に、吊橋の建設手順を説明すると、大きくはコンクリート打設が中心の下部工工事（基礎の構築）と工場製作した鋼部材を現地で組み立てる上部工工事（塔、ケーブル、桁の架設）に分けられる。

南北備讃瀬戸大橋の下部工工事では、7基の基礎のうち6基が海中に建設された。また、吊橋ではアンカレイジと呼ばれるケーブルをつなぎとめる巨大な基礎が必要となることも特色である。

上部工の架設では、まずアンカレイジの建設と並行して工場で作られた塔部材が架設される。この塔は、高さ200mにもなり、ケーブルを鉛直に支える役割を担う。



写真3 瀬戸大橋の起工式



図1 環境に配慮した構造変更



写真4 南北備讃瀬戸大橋

次に両側のアンカレイジをパイロットロープをつなぎ、このロープをもとにワイヤーを引き出し、キャットウォークと呼ばれる足場を掛け渡し、ケーブルを架設する。その後、ケーブルからハンガーロープを吊り下げ、補剛桁を架設して路面を構築する。（図2）

## 4. 工期短縮の工夫

最も長期間を要する南北備讃瀬戸大橋の工事を定められた瀬戸大橋全体の工期（9年半）に収めることが最初の課題であった。

### (1) 下部工工事での工期短縮

南北備讃瀬戸大橋の基礎建設では、コンクリート量が非常に大きいのが特徴である。特に南備讃瀬戸大橋の6Pと7Aの水中コンクリート量が大きく、瀬戸大橋の工期はこれらの基礎建設にコントロールされることとなり、1978（昭和53）年10月の着工後、最初にこれらの基礎工事に取掛かった。

表1 南北備讃瀬戸大橋の下部工諸元に示す通り、5P、6P、7Aは、非常に水深の深い位置に建設されることとな

	1A	2P	3P	4A	5P	6P	7A
位置	陸上	海中	海中	海中	海中	海中	海中
基礎設置面 (m)	+20	-10	-10	-10	-32	-50	-50
掘削量 (千m)	95	21	42	58	32	122	594
水中コンクリート (千m)	0	13	13	35	51	118	231
気中コンクリート (千m)	137	13	13	254	16	17	186

表1 南北備讃瀬戸大橋の下部工諸元

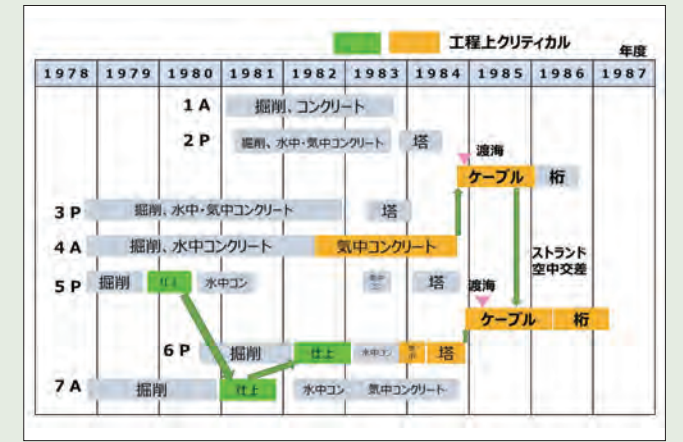


図2 南北備讃瀬戸大橋の建設工程

り、大水深かつ強潮流下において巨大な基礎を確実に構築することが、瀬戸大橋建設における最大の課題の一つであった。この課題を克服するために開発されたのが設置ケーソン工法である。この工法については「5-(1) 設置ケーソン工法」で詳細に説明する。（表1）

南北備讃瀬戸大橋の中央に位置するアンカレイジ基礎4Aは、ふたつの吊橋の共用アンカレイジであり、ケーブルストランドが空中で交差する。このため、まず北備讃瀬戸大橋のケーブルストランド架設を完了し、その後南備讃瀬戸大橋のケーブルストランドを架設することになる。そのため4Aの工事は先行する北備讃瀬戸大橋の工程に合わせて施工する必要があり、アンカレイジ基礎に埋め込まれる4基のケーブルアンカーフレームは、工期短縮を図るため、工場で作製し、大型クレーン船で一括架設し、コンクリートの打設を促進した。（写真5）

### (2) 上部工工事での工期短縮

上部工工事では、ケーブル架設のはじめの作業であるパイロットロープ渡海に合わせて、6P主塔も5P主塔と同時期に完成する必要があった。このため、塔架設につ



写真5 ケーブルアンカーフレームの一括架設（4A）



いては、5Pは従来工法であるクレーンによって架設を行ったが、6Pについては自立型クレーンによって架設を行い、クレーンの盛り替え作業を省略することにより工期短縮を図った。(写真6)

次に、点から線に移行するケーブル工事のパイロットロープ渡海では、国際航路における一般船舶の航行への影響がないよう、65m高の空間を常に確保できるブームの高いクレーン船を使用した。(写真7)

さらに、補剛桁架設においては、北備讃瀬戸大橋の工事に追いつくために、南備讃瀬戸大橋では塔近傍の補剛桁は工場で大ブックに組み立て、大型クレーン船により一括架設して工期短縮を図った。(写真8)

このように南北備讃瀬戸大橋の建設工事では、大型クレーン船が頻繁に活用され、工期短縮に貢献した。大型クレーン船は、斜張橋の櫃石島橋・岩黒島橋やトラス橋の与島橋の架設にも活用され、現場工期の短縮が図られた。また、これら大型クレーン船を活用した吊橋各部の架設経験が瀬戸大橋完成と同時に開始された明石海峡大橋の建設にも活用されることとなった。

## 5. 大水深基礎の建設と杉田所長の思い出

前述のように、南北備讃瀬戸大橋の建設において大きな課題の一つが、潮流が速く水深が深い海中に巨大な基礎を建設することであった。

瀬戸大橋の中で最大の塔基礎（南備讃瀬戸大橋の6P）と最大のアンカレイジ基礎（南備讃瀬戸大橋の7A）の諸元は、表1に示した通り巨大である。特に、7Aの基礎寸法は75m×59m×52.3mであり、水中コンクリート量が23万1千m<sup>3</sup>と膨大な上に、備讃瀬戸の潮流は最大5ノット（時速9.2km）を超え、また、周辺の海域は1日約700隻の船舶が輻輳し、漁船の操業も多い場所である。

長大橋の大型基礎を、水深が深く、潮流が速い上に航行船舶の多い海峡で、確実に施工する工法として、開発されたのが設置ケーソン工法である。

ここでは、瀬戸大橋の基礎を確実に施工するために開発された設置ケーソン工法の詳細と、その開発及び現地での施工の陣頭指揮をとった杉田秀夫所長について紹介する。

### (1) 設置ケーソン工法

瀬戸大橋の設置ケーソン工法は、固い岩盤を水中発破で砕き、グラブ船でズリを綺麗に除去した後、造船所で製作した鋼殻ケーソンを曳航して沈設し、その中にプレパックドコンクリートを打設して基礎を完成させるものである。(図3)



写真6 自立型クレーンによる塔架設の工期短縮



写真7 クレーン船を使用したパイロットロープ渡海



写真8 大型クレーン船による塔付き補剛桁一括架設

この工法の特徴は、工事をプレハブ化したところであり、瀬戸大橋は日本で初めて設置ケーソン工法を大規模に採用した工事である。瀬戸大橋において特筆すべきは、ケーソン内の水中コンクリートにプレパックドコンクリートを採用したことがあげられる。プレパックドコンクリートは、ケーソン内に8cmから15cmの大きな粗骨材を投入後、その隙間にモルタルを注入する工法である。(図4)

この設置ケーソン工法の開発に尽力したのが杉田秀夫所長である。

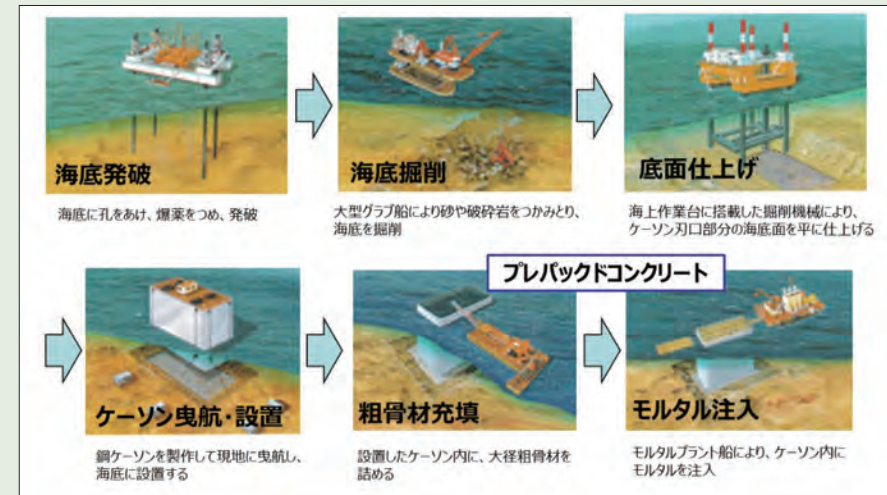


図3 瀬戸大橋での設置ケーソン工法の流れ

### (2) 坂出工事事務所での杉田所長の思い出

大規模な土木事業は、誰か一人の技術者によって完成されるものではなく、瀬戸大橋も例外ではない。本四公団、設計コンサルタント、ゼネコン、橋梁メーカー等、多くの技術者が協力して完成させたものである。

ただし、「瀬戸大橋を架けた男」として語り継がれることとなった一人の技術者がいた。NHKの「プロジェクトX」でも採りあげられ、テレビ映画にもなった男、それが杉田秀夫所長である。(写真9)

以下、瀬戸大橋の計画段階から下部工工事の終盤まで、坂出工事事務所長として「男が惚れる男」とか「志を貫いた真のリーダー」といわれた杉田所長とはどんな人間だったのか、設置ケーソン工法の開発に大きく貢献した杉田所長の「人となり」について紹介する。

杉田さんは、1931（昭和6）年千葉県印旛沼で生まれ、1950（昭和25）年に丸亀高校を卒業、1954（昭和29）年に東京大学土木工学科を卒業し、旧国鉄に入社した。1964（昭和39）年3月日本鉄道建設公団に移り、1970（昭和45）年7月の本州四国連絡橋公団設立と同時に公団に移ってこられた。本四公団では、設計第二部設計第4課



写真9 坂出工事事務所時代の杉田所長（大塚と）

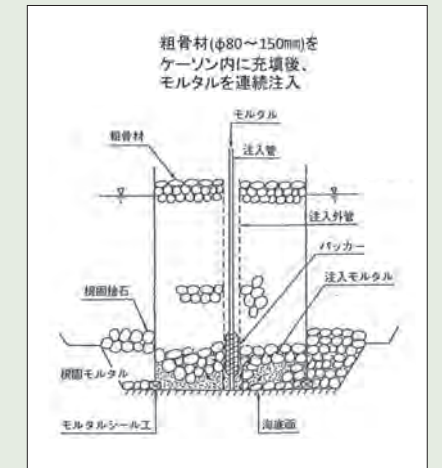


図4 プレパックドコンクリートの施工概念図

長として主に児島・坂出ルートの下部工工事の施工法となる設置ケーソン工法について調査研究し、1972（昭和47）年6月に児島調査事務所坂出支所長として坂出に赴任し、1973（昭和48）年7月に坂出工事事務所長になられ、瀬戸大橋の工事を陣頭指揮された。

杉田所長は、自ら50mの潜水を行い、海底の岩盤を確認されたが、潜水の体力作りのために毎朝丸亀から事務所まで、約10kmを自転車通勤された。部下たちに「後の世に笑われない仕事をしよう」と語っていた杉田さんは、自分自身も海中工事の研究や、水深50mの海底に潜るための鍛錬を黙々と続け、それを実践したのである。(写真10)

何としてでも自分が工事の先頭に立ち、世界に類を見ないこの橋の建設を必ずやり遂げようという強い信念が杉田さんを動かしていた。だからこそ、公団職員だけでなく、施工業者も一丸となり、また地元の漁業関係者なども納得して工事に協力していただけたのである。

以上、杉田さんを思い出しながら人柄について紹介したが、若い皆さんに何か少しでもお役に立てば望外の喜びである。

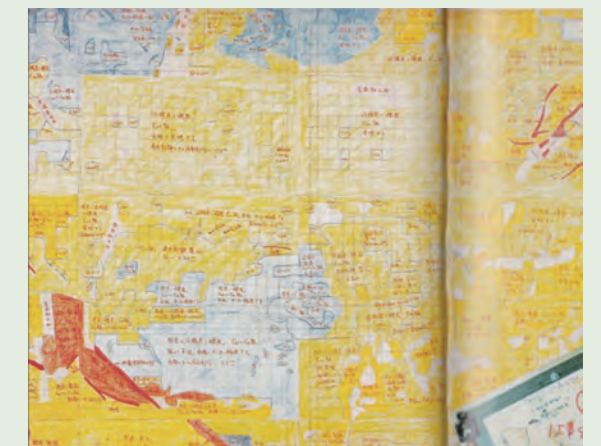


写真10 杉田所長の岩盤観察記録



## 6. 道路鉄道併用橋の課題克服

瀬戸大橋完成当時、路面電車は別として、本格的な高速鉄道を長大吊橋に通した例は世界中になかった。ここでは、桁橋などに比べて揺れやすく、たわみやすい構造である長大吊橋に、総重量1,000トンを超える列車を時速100km超のスピードで安全に通すための技術的課題とその克服について紹介する。

吊橋や斜張橋はたわみやすく振動しやすい特徴があるため、桁端部に生じる伸縮量や角折れが従来の鉄道橋に比べ格段に大きい。従って、これらの橋梁上を列車が高速かつ安全に通ることができる列車走行性の確保が必要であった。

また、金属材料に繰り返し力が加わると、その材料が持っている強度よりも低い力で破壊されてしまうのが金属疲労である。長大橋では橋桁を軽くするために、強度の高い材料を大量に使用する。また、瀬戸大橋では重い列車の走行によって、部材に大きな変動応力が生じ、その繰り返し回数も膨大である。このため、疲労に対して十分な配慮が必要であった。

### (1) 緩衝桁軌道伸縮装置の開発

設計段階では、道路鉄道併用橋に適した吊橋形式の検討が行われ、桁端部での角折れと伸縮問題に対処するため、吊橋主塔部分で橋桁を連続させる形式を採用した。

また、アンカレイジ部分には「緩衝桁軌道伸縮装置」を新たに開発し、設置することとした。

この装置は、アンカレイジと橋桁の間に渡り桁を配置して、角折れ量を分散するとともに、伸縮は角折れが生じない場所で処理する構造である。(写真11)

この装置の有効性を確認するため、各種模型試験の他、開業前の山陽新幹線において実車走行試験が実施された。



写真11 緩衝桁軌道伸縮装置

### (2) 金属疲労への対応

金属疲労問題に対しては、大型の疲労試験機を新たに製作して実物大供試体による多数の疲労試験を実施し、設計、製作、材料に関する独自の基準を新たに定めた。

問題となったのはボックス断面のかど溶接部に残る小さな空洞、いわゆる「ブローホール」という溶接欠陥で、疲労試験ではこれを起点として亀裂が発生する事例が多く確認された。(写真12)

このため、補剛桁製作時にはこのブローホールの寸法を許容値以下に抑えるように厳しく管理し、さらに溶接線を自動超音波探傷試験で検査を行い、完成後も溶接欠陥を追跡調査できるよう検査記録を保存した。

### (3) 列車走行試験

瀬戸大橋の供用に先立ち、列車走行試験を実施し、列車の走行性、橋本体の安全性、新たに開発した緩衝桁軌道伸縮装置の有効性を確認した。試験列車は、電気機関車を10両連結したもので、総重量は約千トンである。試験列車の走行により、吊橋補剛桁に生じたたわみや桁端の伸縮量は計算値とよく一致すること、また装置がスムーズに動くことが確認された。(写真13)

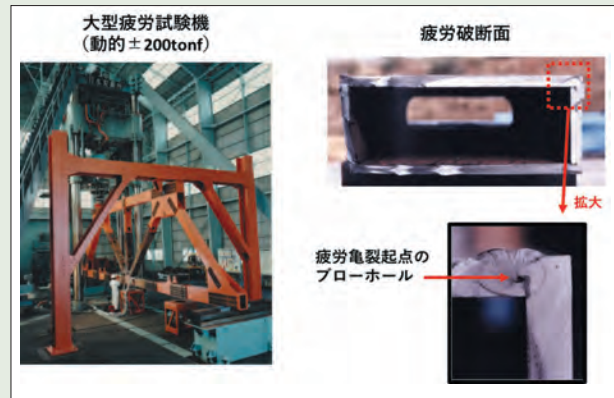


写真12 大型疲労試験の実施



写真13 列車走行試験時の吊橋のたわみ

## 7. まとめ

### (1) 開通から30年を超えての経済効果

1988(昭和63)年4月に瀬戸大橋が開通してから33年が経過した。(写真14)

この間、西日本の高速道路ネットワークが格段に整備され、また早島ICから坂出IC間の通行料金も開通当初の6,300円から現在の平日ETC利用の場合の2,310円あるいは休日ETC利用の場合の1,990円へと、概ね3分の1となった。これは、2014(平成26)年4月から本四3ルートも全国高速道路ネットワークの一部として全国共通の料金水準としていただいたおかげでもある。交通量も開通当初の一日当たり約1万台から約2万3千台へと大幅に増加し、本州と四国の交流拡大に大いに貢献できていると確信する。(図5)

### (2) 200年の利用に向けた維持管理

本州四国連絡高速道路(株)(本四公団の業務を継承し民営化した会社)では、重要な社会インフラである本州四国連絡橋を200年以上、さらに半永久的に使えるよう、予防保全の考え方を取り入れ、ライフサイクルコストを最小とする維持管理を行っていくこととしている。具体的には、海峡部の長大橋については5年に1度定期点検を行い、その結果に基づき、予防保全として早めの補修を実施することとしている。(写真15)

具体例として、塗装について紹介する。

長大橋の上部構造は主に鋼製である。鋼部材の機能を長期間維持するためにはサビの発生を抑えることが最も重要であり、本州四国連絡橋では、鋼部材をサビから守る塗装が最も基礎的な維持管理項目となる。

塗装は紫外線や水分によって劣化が進むため、定期的な塗り替えが必要である。本州四国連絡橋の塗装面積は3ルート全体で約400万m<sup>2</sup>(瀬戸大橋だけでも約200万m<sup>2</sup>)と膨大なため、塗装の塗り替えサイクルを長くするとともに一回の塗り替え費用を抑えることがライフサイクルコストを最小化するために必要となる。

このため、建設段階において長期間耐久性が期待できる多層構造の塗装系を開発した。更に、高い塗装品質が確保できる工場での塗装を基本として製作架設を行った。

上塗り塗装には、瀬戸大橋建設時において最も長期耐久性が期待できたポリウレタン樹脂塗料を採用したが、現在はさらに高い耐久性を有するフッ素樹脂塗料を上塗りに用いて塗り替えを行い、さらなる維持管理コストの削減に努めている。

現在供用から33年経過し、瀬戸大橋としては第1回目の全面塗り替えを実施中である。



写真14 開通式(1988(昭和63)年4月10日;与島PAにて)

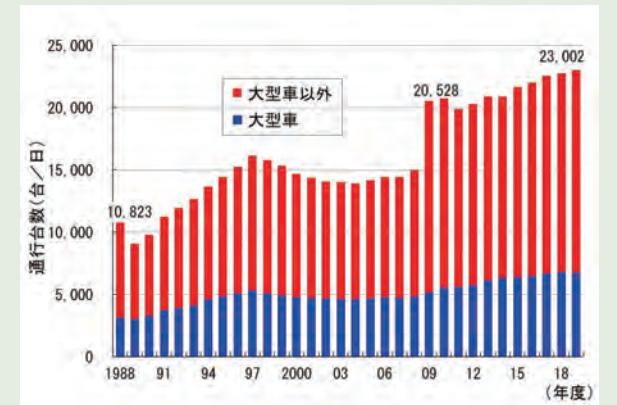


図5 瀬戸大橋の1日当たり通行台数の推移



写真15 瀬戸大橋の点検作業

今後はさらに技術開発を進め、効率的な点検、効果的な補修を行うことにより、瀬戸大橋を末永くご利用していただけるよう管理していくこととしている。

次の時代を担うこととなる若手技術者の皆さんには、点検や維持管理への新技術の開発やロボット技術・AI技術の適用など、新たな挑戦に挑戦してもらいたい。

### < 図表・写真の提供・出典 >

- 表1、写真1～15、図1、2、3、5 本州四国連絡高速道路(株)
- 図4 海中土木技術(杉田秀夫 山海堂)一部加工