

風が育てた長大橋

世界一の長大橋「明石海峡大橋」を作り上げ、わが国の橋梁技術は世界のトップレベルに躍り出た。そこでは、長大橋に大きく立ちふさがる風の脅威を克服するための最新技術が発揮された。風と技術者の戦いに加えて、最近数多く架けられるようになった斜張橋や橋に対する低コスト化の動きも追ってみた。



世界一のスパン(1,991m)を誇る明石海峡大橋

長大橋に適した吊橋の技術的課題

橋の規模を技術的に比較する場合、橋長ではなく、個々の橋の支承(橋桁の支持点)間の距離である「支間長:スパン」が用いられる。スパンの長い長大橋に適している橋梁形式が吊橋である。

橋にはさまざまな形式があるが、橋の自重や通行車両の荷重を、橋桁のたわみ抵抗で支える桁橋や圧縮力(押しつぶそうとする力)で支えるアーチ橋では、スパンが伸びるに従って橋桁に働く力が急激に大きくなり、架設可能なスパンに限度がある。一方、吊橋はハンガーロープを介してケーブルが橋桁を吊っている構造である。つまり、ケーブルが橋桁の自重をすべて肩代わりして支えてくれるので、長いスパンにも対応することができる形式である。

その反面、吊橋は極めてたわみやすく、風の影響を受けやすい構造特性を持つ。18世紀後半、産業革命によって製鉄技術

が発達して、ケーブルに鉄を使用した近代吊橋が誕生した。しかし、その当時は「架橋の数だけ落橋がある」といわれたほど、吊橋はさまざまな事故に見舞われた。特に多く発生したのが、風による落橋である。

風による試練〜タコマ・ナローズ橋の落橋事故

タコマ・ナローズ橋はアメリカ合衆国・ワシントン州のタコマ市に架けられた、当時世界第3位のスパン853mを誇る吊橋で、53 m/sの風速(10分間平均の風速)に耐えるように設計されていた。しかし、1940年11月7日、風速19 m/sの風により竣工後わずか4か月にして、あっけなく崩壊してしまったのである。

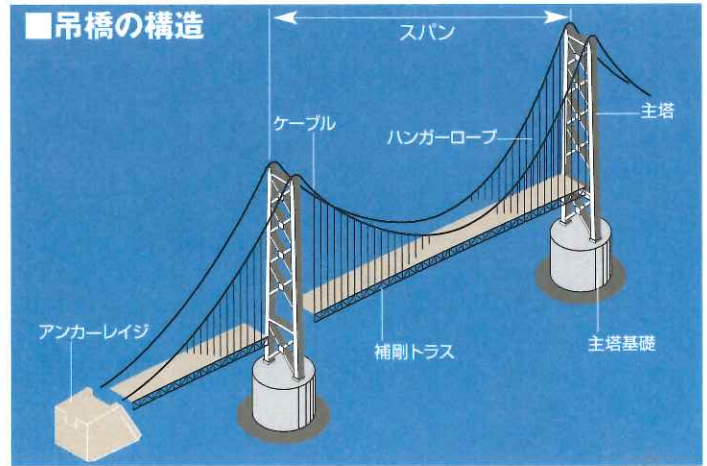
事故の原因は風による振動(動的作用)であった。まず、橋桁の背後に発生する風の渦に起因する振動(渦励振)が起きて、橋桁が上下に揺れだした。そのうちに、風の動的作用により橋桁のねじれ運動が加速していく発散振動(フラッターとも呼ば

れる減衰しない自励振動)が発生したのである。これに加えて、経済性を追求する余り、剛性の不足した極めて薄い橋桁を採用したことも災いした。

それまで橋桁に働く風圧(静的荷重)にのみ配慮してきた橋梁技術者は、タコマ・ナローズ橋の落下事故以来、風の動的作用にも着目せざるを得なくなり、橋桁の剛性も確保するようになった。事故後に建設されたほとんどの吊橋はトラス型の橋桁(補剛桁)を採用している。トラスは細長い部材を三角形に組み合わせた構造で、風が吹き抜けやすく、しかも剛性を高めるのに都合のよい形であった。

世界一のスパンを持つ明石海峡大橋の完成

アメリカ合衆国・ニューヨークのシンボルともなっているブルックリン橋(1883年完成・スパン486 m)は、世界で初めて鋼鉄製のワイヤーをケーブルに採用した近代吊橋の記念碑的存在といわれる。一方、わが国の近代吊橋は1962年に完成



した若戸大橋(スパン367 m)である。ブルックリン橋の完成から遅れること約80年、その当時のわが国の橋梁技術は、欧米から大きく遅れていた。しかし、その後、わが国の橋梁技術者たちは、関門橋(1973年完成・スパン712 m)など、数多くの吊橋を手がけ、スパンを伸ばす技術力を磨いていったのである。

そして、四半世紀をかけて本州と四国を結ぶ巨大プロジェクトである本州四国連絡橋計画も動き出していた。ついに1998年、本州四国連絡橋の一つである明石海峡大橋が、世界最長のスパン1,991 mを持つ吊橋として、神戸市と淡路島間の明石海峡に架けられた。この明石海峡大橋の完成により、わが国の橋梁技術は、80年の遅れをわずか30年で追い抜き、世界トップレベルに達したのである。もちろん、そこまでの道程は決して平坦なものではなかった。

本州四国連絡橋の調査が始まったのは、若戸大橋が完成する3年前、1959年である。当時の技術力を考えれば、明石海峡大橋のルート調査を行った本州四国連絡橋技術調査委員会が「設計施工の諸条件が、世界の長大橋において類似した実施例のない極めて厳しいものであり、実施に当たっては、多くの技術的問題の解決と、そのための十分な調査が必要である」といった厳しい評価を報告したのもうなずける。

明石海峡大橋の架設地点は、地形的に強い風が吹く場所である。さらに、台風の考慮も必須である。多くの技術的問題の中でも、長大橋にとって避けることが出来ない風対策、それも耐風安定性(発散振動に対する安定性)が、克服すべき

最重要課題であった。

風の影響に対する徹底した調査・検証

風はその地域・地形によって、その特性が異なる。そして、「長大橋は風速ばかりでなく、水平面に対して風が吹く角度(水平か、それとも吹き上げか、吹き下げか)によっても、振動を起こす風速が大きく変化するなど、非常に敏感な特性を有しています。このため、自然風の特性について徹底的に調査しました」(本州四国連絡橋公団・長大橋技術センター技術調整課長・平野茂氏)。特に明石大橋のような過去に例のない長大橋の場合、現地の風の特性を知ることなくして、橋の設計は出来ない。そこで1964年、架橋地点の近くの海岸に高さ80 mの気象観測塔を建て、20年にわたる風の観測を行った。

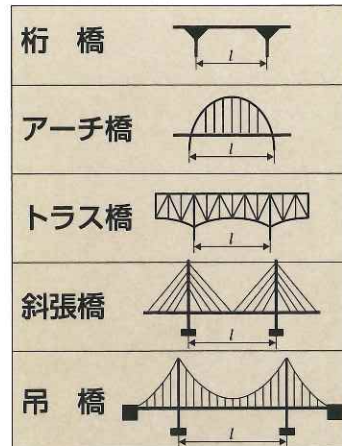
その膨大な風速観測記録を統計処理し、発散振動がこの風速以下で発現してはならないとする照査風速を10分間平均風速で78 m/sとした。つまり、78 m/sの風速でも大きな揺れが生じない橋を設計したのである。この風速は150年に

1回程度吹く風を推定し、これに安全性を考えた余裕を見込んで設定されたもので、世界の長大橋に対して設定されている照査風速の中でも最も高い風速レベルである。

橋に及ぼす風の作用を調べるため、タコマ・ナロウズ橋の落橋以来実施されている、橋桁のみを抽出した断面模型を使ったさまざまな風洞試験が行われた。「しかし、これだけ長い橋になると、強風時のたわみが大きく、それも3次元的な変形をするので、橋が実際にどのように挙動するかは、橋桁の部分模型による風洞試験の結果だけでは誰にも確信が持てませんでした。そこで、全橋模型による風洞実験を行って耐風安定性を調べました」(平野氏)。

全橋模型試験の精度を確保するためには、縮尺100分の1の模型が必要となる。模型の長さは40 mになるため、本州四国公団は1991年、茨城県つくば市の旧建設省土木研究所構内に世界最大規模の大型風洞施設を作って試験を行った。その結果、風速の増加とともに橋桁は風下にたわみながら、さらに風に対し頭下

中央支間長と橋の形式

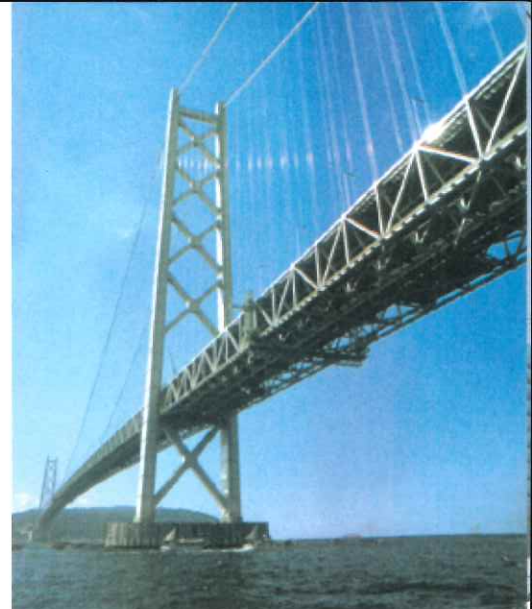


1991年に幅41 m、長さ30 m、高さ4 mの大型風洞施設が旧建設省・土木研究所敷地内に建設され、明石海峡大橋の全橋模型による風洞実験が行われた。

■世界長大吊橋の順位

順	橋梁名	中央支間長 (m)	国 名	完成年
1	明石海峡大橋	1,991	日 本	1998
2	グレートベルト・イースト橋	1,624	デンマーク	1998
3	ハンバー橋	1,410	イギリス	1981
4	江陰長江大橋	1,385	中 国	1999
5	ツインマ橋	1,377	中 国	1997
6	ベラザノナローズ橋	1,298	ア メ リ カ	1964
7	ゴールデンゲート橋	1,280	ア メ リ カ	1937
8	ベガクステン橋	1,210	スウェーデン	1997
9	マキノ橋	1,158	ア メ リ カ	1957
10	南備讃瀬戸大橋	1,100	日 本	1988

■吊橋支間長(スパン)の変遷



明石海峡大橋のスパンは世界最長の1,991m、主塔の高さも102階建てのビルに匹敵する約296mあって、風に対する徹底した対策がとられた。

で、橋完成後も塔柱が風で振動します」(平野氏)といった状況も予想された。

そこで、主塔架設の進捗と共に変化する固有振動数に対応できる、振り子タイプのセミアクティブダンパーを架設クレーンに設置し、さらに、完成後の振動にも有効な質量同調型ダンパー(TMD)を主塔1基あたり20基設置して対応するなど、過去に例がない試みが行われた。

万全を期しても予想外の事は起こる。それは桁を吊っている直径85mmのハンガーロープの揺れであった。ハンガーロープは1ヶ所に2本並べて取り付け構造で、大きな揺れは生じないと考えられていたロープ間隔で配置した。しかし、「橋桁を架設した後に台風が襲来して判ったことですが、予想外の大きな揺れが風下側のロープに生じました。そこで急遽、振動原因の究明を行い、その結果、風上のロープによって生じた風の後流が風下のロープに干渉して、大きな励振力を発生させていることが判明したのです」(平野氏)。

げ状態でねじれ、照査風速ではねじれ角は約5°に達した。この状態では安定していたが、さらに風速を上げると発散振動が発生した。これに加えて、どの程度の風速で発散振動が発生するか、電子計算機を使ってシミュレーションする解析手法(フラッター解析法)を新たに開発し、これらの現象を再確認した。このようにして、明石海峡大橋は風速80 m/sまで発散振動が起きず、十分な耐風安定性を有していることを検証したのである。

■風対策に投入された最新技術

耐風安定性を主として支配する要因は、橋桁の断面形状とその剛性である。明石海峡大橋の補剛桁では、トラス形式を採用してねじれ剛性を高めている。この他にも、風の影響を軽減する多くの工夫が施されている。道路面の床版には、

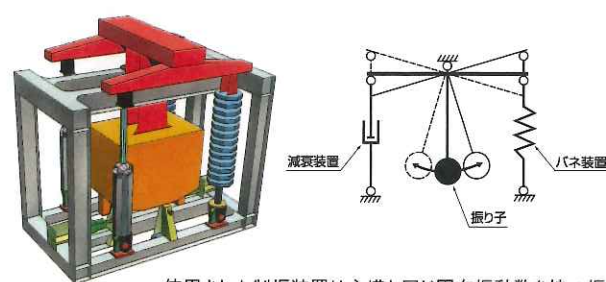
路肩と中央分離帯にグレーチング(鋼製のこ)を敷設して、補剛桁に吹き込む風を路面上に逃がしているのも一例である。その効果をさらに高めるため、中央分離帯の直下に鉛直スタビライザー(風の流れを路面上に積極的に誘導する衝立板)も設置されている。

明石海峡大橋の主塔は、高さが約300 mで東京タワーに匹敵する構造物である。それだけに風に対する万全の備えが必要となった。塔柱には風による振動を生じにくい十字断面を採用し、風速67 m/sの風圧に対して十分耐えられるように設計されている。しかし、「特に主塔架設中は単独で立っているため揺れやすく、低速の風でも渦励振によって振動するので、主塔上で働く作業員は船酔い現象を起こして作業が危険になります。また、明石海峡大橋の主塔は従来にも増して高いの



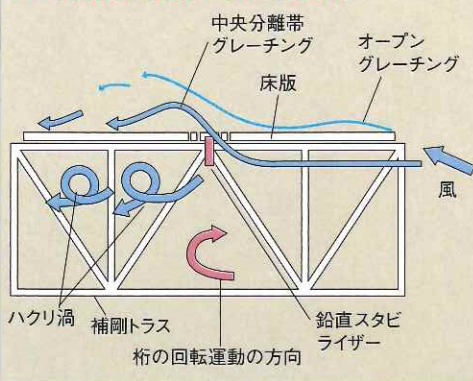
主塔内には20基の制振装置が設置された。

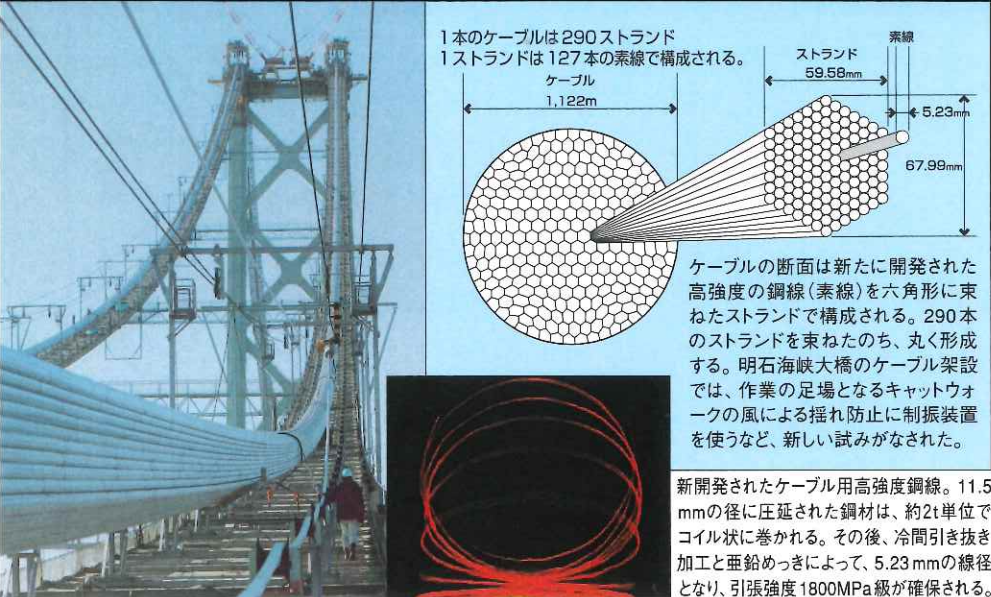
■質量同調制振装置 (TMD = Tuned Mass Damper)



使用された制振装置は主塔と同じ固有振動数を持つ振り子とダンパーから成り、主塔に揺れが発生すると同時に制振装置が働いて、揺れを抑制することができる。

■明石海峡大橋の安定化対策





その対策として、ハンガーロープに直径10mmのロープを螺旋状に巻き付けて風の流れを制御する空力対策技術を開発し、現地に適用した。

軽量化につながった 新開発の高強度鋼材

長大橋を作るには、強風時に危険な振動が発生しないこと、経済性を高めるために橋桁を軽くするという、相反する要求が求められる。

補剛桁のトラス部材には強風時に発生する横方向のたわみにより、大きな力が発生する。一般的な鋼材(引張強度400MPa)でこれに耐えようとする、補剛桁が重くなる。そこで、本州四国連絡橋用に開発された高い強度の鋼材(引張強度780MPa)を用いて、軽量化が図られた。明石海峡大橋の補剛トラスの鋼量は45,000tで、そのうちの約7,000tにこの高強度鋼材が使用された。

経済化に寄与したという点では、新たに開発されたケーブルの存在も大きい。関門橋以来、わが国の吊橋のケーブルは、直径5mm、引張強度1600MPa級の鋼線を束ねて使用してきた。しかし、この鋼線

を使用することを前提に設計すると、片側2本ずつ、計4本ケーブルが必要となる。「片側2本でも作る技術はあります。しかし、片側2本となると、その分の場所を確保しなくてはならないし、ケーブルの端部を定着する巨大なコンクリートブロックのアンカーレイジも大きくなります。さまざまな面で手間とコストがかかりますから、それは避けたいということでした」(新日本製鐵株式会社・鉄構海洋グループ建設・技術部)。そこで、1800MPa級の高強度鋼線が開発され、片側1本のケーブルが実現したのである。

逆風の中にある長大橋計画

本州四国連絡橋の完成で、長大橋計画も一息ついた感がある。しかし、わが国の長大橋計画が終わったわけではない。1998年に閣議決定された「21世紀の国土のグランドデザイン」では、新しい国土軸構想が示され、各地域の多様な機能の交流・連携を総体として捉えた地域連携軸の促進も提唱された。そして、新交通軸の海峡横断道路として、紀淡海峡に架かる紀淡海峡連絡道路をはじめとする6海

峡横断道路の構想が検討されている。長大橋を想定すると、どのプロジェクトも明石海峡大橋を越える規模の橋梁となる。

しかし、一方では採算性と共に低コストが求められ、従来の技術で設計施工した場合に比べ、30～50%という大幅な事業コスト削減が目標に掲げられている。こうした厳しい状況にあっても、世界最先端の橋梁技術を駆使して、低コスト実現のための長大橋技術開発が進められている。「箱桁の中央部に開口部を設け、そこにグレーチングを設置し、その上も走行させる桁構造もそのひとつです」(独立行政法人・土木研究所)。

グレーチングは明石海峡大橋にも採用されているが、この新技術はそれとは発想が違う。グレーチング部を道路に利用しようというものである。つまり、追い越し車線では、通常の舗装されたコンクリートや鋼製床版上ではなく、オーブングレーチング上に自動車を直接走らせようというものである。

これにより、グレーチング部の面積が増えるため、橋の耐風安定性が格段に向上するとともに、さらに桁幅の拡幅を回避できるので、桁重量も減らすことが可能となる。この場合、グレーチング上での高速走行性やグレーチングの耐久性の向上が必要であり、このための研究が現在、鋭意進められている。

注目を浴びる斜張橋の台頭

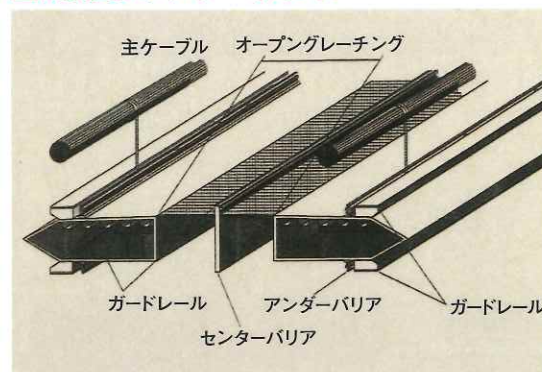
長大橋として、吊橋のライバルとなりつつある斜張橋についても述べておかねばならないだろう。斜張橋は、橋桁と塔の間に直接斜めのケーブルを多数配置し、これにより橋桁自重の大半を塔で支持する

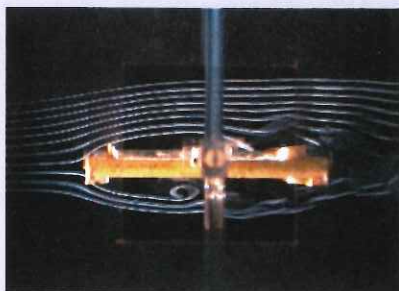
コラム

トラス桁と箱桁

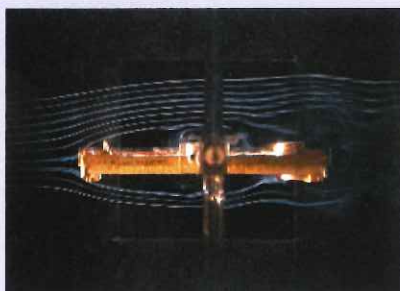
吊橋の補剛桁には、トラス桁と箱桁の2種類の形式がある。トラス桁は単材を三角形に組み合わせることで、耐荷力を増す構造になっている。さらに、風に強いという利点があり、ねじれ振動にも強い力学特性を持っている。一方、箱桁は流線型をしており、内側は中空で閉じた空間になっている。箱桁では、風が橋桁の周りで乱れずスムーズに流れるため、トラスに比較して風による荷重が少なく、発散振動も出にくい。橋桁を軽くできるため、トラスよりも経済的に架設できる。

開発中のグレーチング

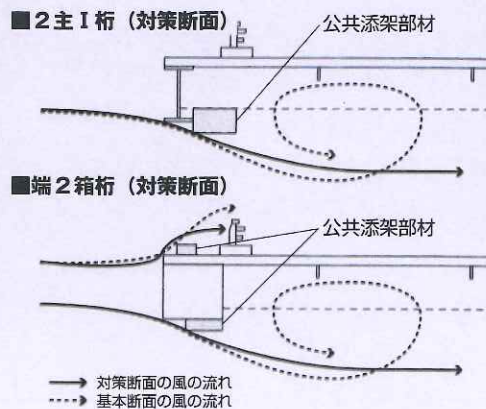




■2箱桁断面



■2箱桁の対策断面



■斜長橋



多々羅大橋は1999年に完成した。広島県尾道市と愛媛県今治市を結ぶ西瀬戸自動車道(瀬戸内しまなみ海道)の中にある、広島県生口島と愛媛県大三島を結ぶ全長1,480m、スパン890mの世界最長の斜張橋である。



横浜ベイブリッジは首都高速湾岸線として大黒埠頭と本牧埠頭を結ぶ全長860m、スパン460mの斜張橋である。1989年に完成し、美しい斜張橋として、人気が高い。

形式の橋梁である。その美しい姿に人気が集まり、近年、国内でも数多くの斜張橋が見られるようになった。

斜張橋は吊橋以上に複雑な構造解析が要求される。しかし、コンピューターの発達と共に解析技術も発展し、ここ30年程で急速に普及してきた。わが国の斜張橋技術も世界レベルにあり、本州四国連絡橋の一つである多々羅大橋(1999年完成)は、斜張橋の中で世界最長スパンとなる890mを誇っている。

斜張橋は同程度のスパンの吊橋と比較して、斜めに張ったケーブルの効果によりねじれ振動数が高くなり、結果として発散振動の発現風速が高くなる傾向がある。さらに、吊橋に必要なアンカーレイジが基本的に不要である等の利点を持つ。つまり、スパン1000m以下の斜張橋は耐風安定性や経済性で吊橋に勝る可能性を有しているのである。

反面、斜張橋ではスパンの長大化に伴って橋桁に発生する圧縮力が急増し、必要な橋桁断面が急増する。そうすると、橋

桁が重くなり、経済性の面で吊橋のほうが有利となる。これらのことを踏まえると、斜張橋で可能なスパンは「せいぜい1,300m級程度まで」といわれている。

■斜張橋の可能性と低コスト化の研究

斜張橋はどこまでスパンを伸ばせるか、それが橋梁関係者にとって大きな関心事ではあることにはまちがいない。その研究も進められ、「斜張橋のケーブルを橋の両端に設置したアンカーレイジに結びつけるアースアンカー式構造にすれば、十分に吊橋に対抗できる」という声もある。

また、ケーブルに使用する引張強度2000MPa級の鋼線の開発も斜張橋や吊橋のスパンを飛躍的に伸ばすことにつながるかと期待されている。世界中が注目する2000MPa級だが、実はすでに明石海峡大橋の工事で使用されたことは、余り知られていない。「架設用のワイヤーロープに使いました。ただ、品質の均一性に信頼がなかったり、1800MPa級鋼線よりもろかったりする面もあって、あくまで短期間での使用ということで使いました」(新日本製鐵株式会社・鉄構海洋グループ建設・技術部)。

一方、低コストな斜張橋の研究も盛んである。たとえば、橋桁に低コストの2主桁(床版の下に左右両端に配置した2つの桁)を用いた斜張橋のアイデアも発表されている。しかし、単なる2主桁は耐風性能に問題があり、わが国のような台風常襲国の斜張橋向きではないとされてきたが、この常識が覆されつつある。「ポイントは公共添加部材を風対策として、積極的に利用したことです」(NKKエンジニアリング事業部)。

公共添加部材とは、電力や通信などのライフラインやメンテナンス用の箱状の通

路となる部分で、従来の設計では橋桁の内部に隠されている。それを橋桁の下に少し突出させたのである。橋桁と公共添加部材を一つの矩形としてみると、角を切り落としたような形となる。これにより、風の流れがスムーズになり、有害な風の渦を防ごうというアイデアである。

■長大橋の将来について

将来の長大橋について、茨城大学工学部の横山功教授はこう予測する。「昨今の財政事情で今までのようにどんどん実現するというわけにはいかないでしょうが、長大橋に対する需要は変わらないと思います。現に、スパン3,300mのイタリアのメッシナ海峡連絡橋など、海外では多くの長大橋計画が進められています。今後、技術が進歩すれば、さらにスパンは伸びるでしょうし、吊橋や斜張橋だけでなく、浮力を利用した橋桁をアンカーおよびアンカーケーブルで海底面に固定する浮体橋なども長大橋の候補となるでしょう。どんな形式であれ、安全性と耐久性に関する機能が高い長大橋が必要されることはまちがいないありません」。

古来より、橋梁技術者は橋の長さを伸ばすことに心血を注いできた。その技術力が国を大きく伸ばす財産となってきた。明石海峡大橋や多々羅大橋で築いた世界レベルの技術力をさらに磨き、それを後世に伝承していくためにも、経済面や環境・景観面にも対応する長大橋の夢が途切れないことを願わずにはいられない。

■取材協力・写真提供／本州四国連絡橋公団(長大橋技術センター) 新日本製鐵株式会社 NKK 茨城大学工学部 独立行政法人・土木研究所

■参考文献／「架橋組曲 明石海峡大橋」(財団法人海洋架橋調査会)『本州四国連絡橋耐風設計基準(2001)・同解説』(本州四国連絡橋公団)「斜張橋の支間長大化計画における構造特性の影響に関する研究」(遠藤武夫)「橋 なぜなのおもしろ読本」(山海社)