

## 【巻頭言】

## 長大吊橋の建設に思う

## Construction of Long Span Suspension Bridge

川田建設(株) 取締役社長 村上 永一  
President Eiichi MURAKAMI



西海橋工事が完成に近づいた頃、東大名誉教授であった田中豊先生が「アーチは西海橋で十分研究されたから、若戸橋は将来に備えて吊橋で行こう。」と言われ、平行鋼線ケーブル架け渡しについていろいろと話をされた。かくして当初はアーチで調査を進めていた若戸橋は、日本で最初の本格的吊橋として建設されることになった。その後、西ドイツから斜張橋と称する新形式橋の提案があったが、スウェーデンでスパン182mのStrömsund橋が架設されたばかりの時代であって、軽く検討したのち辞退したと言ひ一幕もあった。

同じ頃、原口神戸市長も西海橋の現場に來られ、自分は明石海峡の架橋を提案するつもりだと言われた。当時スパン216mのアーチ橋が工事中であり、スパン367mの若戸橋の調査が始ったばかりの時期で、私には夢のような話にしか思われなかった。

原口市長はサンフランシスコ湾口を扼する Golden Gate 橋 (スパン1280m) の設計、架設の技術を修得し、水深50mの箇所<sup>やく</sup>に橋脚基礎を設置すれば道路橋としての明石海峡架橋は可能であると力説された。原口市長は市予算をもってこの架橋調査を単独に始められ、昭和34年から始まった建設省の調査までの先駆け役をかって出てパトタッチされた功績は大きい。

昭和36年に土木学会に設置された本州四国連絡橋技術委員会での調査の重点は、明石海峡架橋の技術的可能性をふまえての技術的検討であったと言って過言でない。そして昭和42年に答申が出された。それは明石海峡架橋以外の本州四国連絡橋のすべての橋について、技術的可能性を明らかにしたが、皮肉にも明石海峡架橋については、なお多くの問題を残す結果となった。引続き明石海峡架橋調査は行われてはいるが、その技術的困難さの故をもって工事開始の日程表は決まっていない。一方、イギリスでは昨年 Humber 橋が完成し、このスパン長1,410mで世界の記録を更新した。そしてイギリスが第2次大戦後計画した3大吊橋はすべて完成したと宣言した。

明石海峡架橋は Humber 橋よりはるかに困難さが高い。上部工では中央スパン2,000m級(現計画1,780m)の長大吊橋、下部工では水深50m・最大流速6m/secの条件下で20~25mの根入れをするなど、設計施工面

で前人未踏の領域に切込むなど、不確定要素が山積している。これに似た架橋はイタリア本土とシシリー島との間のメッナ海峡架橋である。この海面幅は3.0kmで明石海峡に較べてやや狭いが、海岸より急深で直ちに水深100mに達し、最深部は120m以上とされている。ここでは海中トンネルを含む種々の案が提案されているが、スパン3,300mで海峡を一跨ぎする単径間吊橋と海峡中央に1個の橋脚を設けてスパン1,750mの2径間連続吊橋で渡る案などが有力とされている。しかし着工の日程は未定である。

明石海峡架橋調査が始まった時点においてスパン600mを越す長大橋は6橋あったが、そのすべては吊橋でアメリカだけにしかなかった。長大吊橋の設計と架設はアメリカが独力で開発し、育てあげたお家芸であって国外不出の特技と言われていた。

だが現在では、スパン600m以上の吊橋は19橋になって、アメリカ以外で建設されたものは10橋にまでなった。イギリスの技術によるものが4橋、アメリカの技術によるもの3橋、日本の技術、フランスの技術、デンマーク(西ドイツも加わる)の技術によるものが1橋ずつとなっていて、アメリカの独占形態は崩れたと言ってよい。

今、長大吊橋で技術的、歴史的に意義あるものを3橋選ぶとすると、私は1931年に上路を完成し、1960年に下路を追加した George Washington 橋と、1936年に完成した San Francisco-Oakland Bay 橋、そして1966年に完成した Severn 橋をあげたい。

## George Washington 橋

この橋は、アメリカが独力で開発した長大吊橋の技術を集大成したと言ってよく、上路8車線・下路6車線を収容する2層構造を有する巨大吊橋で、Ambassador 橋のスパン564mを一気に1,000mの大台を越えて1,067mまで伸ばしたアメリカ型吊橋の代表作と言ってよく、Golden Gate 橋(1,280m)、Verrazano Narrows 橋(1,298m)もこの橋の延長線にあると言えよう。

## San Francisco-Oakland Bay 橋

大きな障害を渡るために、深い水深での橋脚またはア

ンカレージを築造することにより、長大橋建設の可能性、経済性を高めた最初の傑作である。本橋は中間でエルバブナ島を通してサンフランシスコ湾を横切る全長 6.8 km の橋梁で、その西側水路は 3.0 km あって、ここに中央スパン 1,250 m の 1 個の 3 径間吊橋で渡る案と、中央に巨大な共用アンカレージを設けその左右に中央スパン 704 m の 3 径間吊橋を配する案とが比較された結果、後者の案で実施された。

この共用アンカレージは水路の最も深い水深 3.2 m の箇所<sup>かつもく</sup>に位置し、縦 6.0 m × 横 2.8 m の蜂巢状ドレッジ・ケーソンを水面化 6.8 m の支持層まで、浮力をコントロールできるドームド・ケーソン方式で沈下させるという刮目すべき大工事を実施している。

1957年に完成した Mackinac 橋はマキノ海峡の海峡幅約 6.0 km、最深部 8.9 m で主塔は水深 42.7 m その基礎は水面下 6.3 m まで円形二重壁オープン・ケーソンで下げ、中央スパン 1,158 m の 3 径間吊橋を中央に配して渡っている。上下工費の割合は、上部工 26.8% 下部工 73.2% であって、このことは下部工工事の成否が架橋の可能性を支配していることを示している。

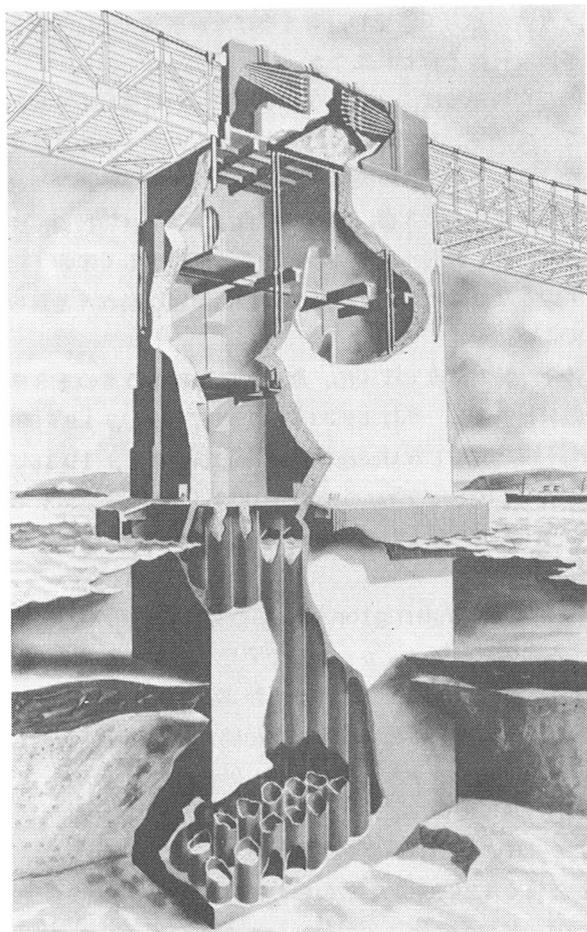


図-1 San Francisco-Oakland Bay 橋の下部工

また、アメリカ東海岸のナラガンセット湾に架けられた Newport 橋は主塔橋脚、アンカレージともに海中にあって、うち主塔橋脚は湾の最深部で水深 4.3 m の箇所におき H 鋼を水杭打機で 326 本を打込み、杭頭を水面下 4.7 m で切揃えて基礎としている。さらにアンカレージも水深 2.1 m のところに設置し、約 3.0 km の海面を中央スパン 488 m と小スパンの 3 径間吊橋で渡り経済性を高めている。吊橋を含む主要部分の工費は、上部 5.2%、下部 4.8% とバランスがとれていて吊橋のスパン割の正しさを示している。ここで水深 4.7 m で鋼杭の頭を切り揃えるため、ウェスティングハウス社が海洋開発のために開発した深海潜水装置を使い、作業員は一週間その水深の気圧で生活して能率的な水中切断を行った。最近めざましく進歩しつづけている海洋開発の諸技術の利用は橋梁基礎の可能性の範囲を拡げ、長大吊橋建設計画によい影響を与えようとしている。

#### Severn 橋

100年の経験をもとにアメリカのお家芸と自ら信じていた長大吊橋技術は、第2次大戦前に Golden Gate 橋でスパン 1,280 m の領域に達していた。その間、唯一の挫折が 1940年の Tacoma Narrows 橋の強風による落橋事故であったが、これも補剛トラスの振り剛性を重視し、橋床と上弦材との間に、また橋床自身の中に吹抜けを配するなどの対応を実施して新 Tacoma 橋を、続いて Mackinac 橋を、さらに 1964年には Verrazano Narrows 橋を完成し、アメリカの優位は不動であると信じていた。

その2年後、イギリスのセバン河口に架設された Severn 吊橋は従来と全く異質の補剛桁、すなわち飛行機の翼を思わせる薄い流線形の扁平箱形断面の補剛桁をもち、さらに橋全体の剛性を増し振動の構造減衰を高めるため、吊材を交互に斜めに配置したワーレン型を思わせる吊材を採用している。その鋼重は 18,500 t と驚く程少ない。

これは2年前に完成した Forth Road 橋の設計の経験と、国立物理研究所の Scruton 教授が行った 2次元風洞模型実験の結果をふまえて Freeman & Fox 社の Gilbert Robert 卿の提案がそのまま実現されたもので、日本の技術界の土壌では到底考えられないことである。

Severn 橋が出来た時、アメリカではその2年前に完成した Verrazano Narrows 橋の鋼重は 132,000 t と頗る重く、イギリスの設計が大胆になりすぎているのか、アメリカでは技術的評価が十分になされていないのか、と疑問が投げかけられ技術誌上で討論が続いた。

設計者の弁明を聞けば尤もなところもある。— Verrazano 橋に用いた I ビーム・コンクリート床版はニュー

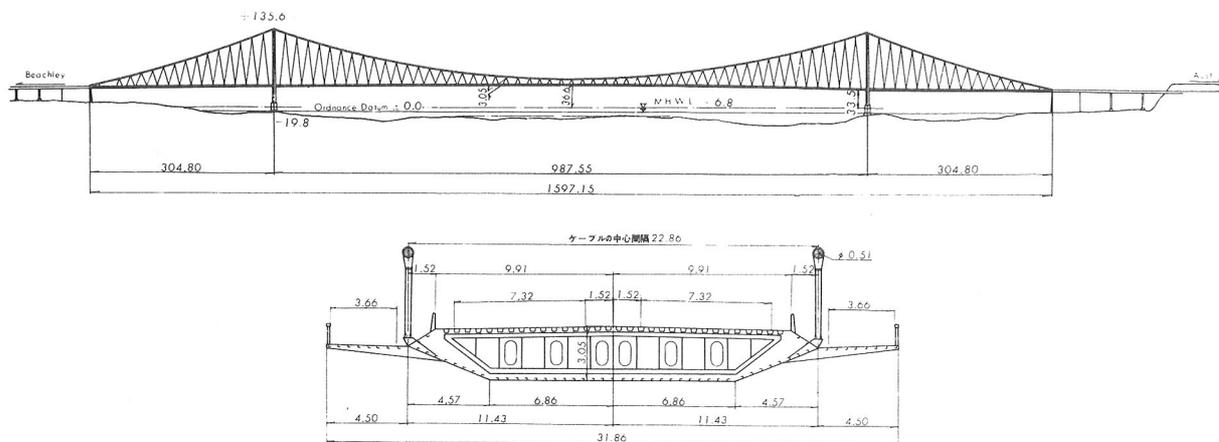


図-2 Severn橋

ヨーク市の重交通の実績からみて最も信頼性があり、補修なくして30年を使った経験はあるが、Severn流の鋼床版舗装ではアメリカは苦い失敗の経験しかない。上層6車線・下層6車線を収容するので横桁は当然重いものになる。セバーン型の箱桁では12車線の車道を収容する設計は不可能である。車道の単位面積当りの鋼重は前者の0.81 t/m<sup>2</sup>に対し、後者は1.44 t/m<sup>2</sup>でスパンの差を考えればそれ程鋼重は重いとは言えない。アメリカの労務費はイギリスの3倍であるにも拘らず、Verrazano橋の単位当り工費はSevern橋の1.43倍にすぎない一と。

Severn橋は中位の風速で限定振動を起す傾向がある。この振動は吊橋を破壊に至らせる危険はないとされているが、振幅が大きくなると自動車の走行が不安定となりしばしば交通規制がなされると聞く。また斜め吊材には交番応力が生じ、そのヒステリシス効果により振動を減衰させるとしているが、それだけ吊材は疲労する。最近の技術誌によると、Severn橋は交通量の増加とトラック自体の重量化のため、その吊材の疲労は予想以上にひどく、すでに49本の吊材が取替えられているが、近く全面的に吊材取替が行われようとして報じている。

Severn橋の偉大さは、箱形断面も形を整えれば吊橋の補剛桁として使えることを提案し実行したことにある。イギリスは斜め吊材や薄い鋼床版舗装を自慢し、さらに極端な軽量化を宣伝しすぎたと言えよう。デンマークのLittle Belt橋では6車線を収容する扁平箱形断面であるが、不安定振動を防止するための曲面板のフェアリングを高欄の外側につけ、垂直の吊材として良好な結果を得ている。イギリスは昨年完成させたHumber橋でも斜め吊材を依然として使用していて、Severn橋での教訓が生かされていない。理解に苦しむところである。重ねて強調するが扁平箱形断面のSevern橋での提案・採用は吊橋技術に新しい分野を開いた。さらに長大斜張橋

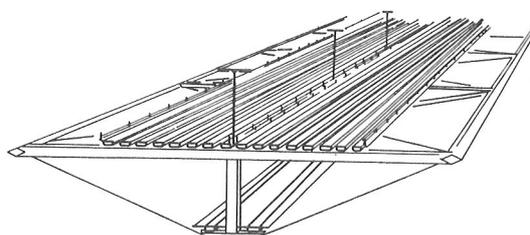


図-3 フリーマンフォクス社(英国)のDr Brownの提出による超長大支間吊橋の吊構造模型

の設計にも良い影響を与えた。その功績は高く評価してあげたい。

原口市長が明石海峡架橋を提案し、独力で調査を始めてから27年の歳月が過ぎた。その間、アメリカ型吊橋はGolden Gate橋からVerrazano Narrows橋へとスパン長18mを伸ばしたにすぎないが、Severn型吊橋はHumber橋の開通で432mも伸ばした。アメリカ型吊橋は経済限界に近づいたのであろうか。Severn型吊橋の優位が確立したと言ってよいのか。イギリスのBrown博士は、Humber橋はSevern流の扁平箱型断面の補剛桁の限界だとも言って、超長大スパン吊橋用に上幅が広く、風の吹き抜けのよい三角トラスの補剛桁を考案し、メシナ海峡のスパン3,300mの道路鉄道併用吊橋に提案している。一方、明石海峡架橋でスパン2,000m級の併用橋をアメリカ型の補剛トラスで設計可能としている。スパンの限界は採用される吊橋構造部の死荷重に見合った主ケーブルによって決まると考える。

吊橋の主ケーブルを従来の経験の延長線上で考えれば、平行鋼線ケーブルは素線数4~5万本、直径で120cm以内に納めたい。そして、このケーブルを片側に2本おくのが好ましい。研究すれば3本までは許されるかもしれない。それは主に吊材の配置と、アンカレッジの礎着

方法に起因すると言ってよい。道路6車線と複線鉄道を通すトラス型吊橋の試算によれば、スパン長1,880mの主ケーブルは $\phi 5mm$ の鋼線38,735本を集成した $\phi 111cm$ のケーブルを片側に2本必要とする。一方、吊構造部の重量はスパン長1,600mで32.36t/m、1,880mで37.06t/mとすこぶる重く、誰しもこの軽量化は強く要望しよう。

最近聞くところによると、明石海峡架橋では鉄道は載せず道路単独橋でいくとも聞く。かくなれば活荷重は減少し、補剛桁の選択の範囲も広がるので吊構造部のより軽量化が可能となろう。そして片側にケーブル2本を配する範囲でスパン2,000m級の3径間吊橋が可能となろう。このことは明石海峡においてケーブル・ベンド・ピアを設ければ、アンカレッジは陸上におくことが出来て、下部工事での負担を軽減することになろう。耐風安定性がある、軽量の補剛桁の追求は明石海峡架橋での経済性に直結するばかりでなく、ここでの建設の可能性をも左右すると言ってよい。

道路橋であれば従来のアメリカ型の補剛トラスばかりでなく、扁平箱形断面での検討が可能となろう。さらに両側に2本ずつ並ぶ巨大なケーブルとの協力によって、補剛桁の撓みや振動を抑制し得る構造系とする試みもなされよう。タワースティやSevern橋の斜め吊材などもこの試みの例であるが、今までは効果的な成功をおさめたものはないと言ってよい。またイタリアのMusmeci教授がメッシナ海峡で提案した張力構造とも言うべき吊橋もこの範疇に入ろう。バランスのとれた張力構造は一種のプレテンション構造となるので応力変動が少ない構造となろう。この構造では種々の荷重に対しFull Pre-tensionであることが要請されるから、大きな死活荷重を支える長大スパンの構造物では大きな張力導入が必要であって、その施工には困難な問題が多々あるが、その設計施工は研究する価値あるものと考えられる。

明石海峡で中央スパン2,000m級の3径間吊橋が架設され得るならば、ケーブルを礎着するアンカレッジは陸上部となし得るので、水深50m、潮流の最大流速6mに及ぶきびしい条件のもとでの2基の主塔の築造の可否は、この計画の死命を制することになろう。深い海での基礎の設置は設計ではなくて施工によって、その成否が決まると言ってよい。日本での工事は官指導型で行われていて、工事会社に新しいアイデアや新工法を提案させ、その責任において施工させる方式はとられていない。またこのような特殊工事の施工に実力ある業者も育っていない。

調査の現状についての情報に乏しいが、明石海峡架橋の下部工は在来工法の延長線上で施工の可能性を見出すよう心から切望するものである。然らざる場合、民間の経験と創意を工事運営に如何に反映させるか、工事責任の所在との関連において検討することも必要となろう。それは世界的に公開されたものでなければ、その主旨は活かされないであろう。

重ねて強調したい。明石海峡架橋での下部工は従来工法の延長線上で組立てられた工法で、施工の可能性を見出すよう切望してやまない。

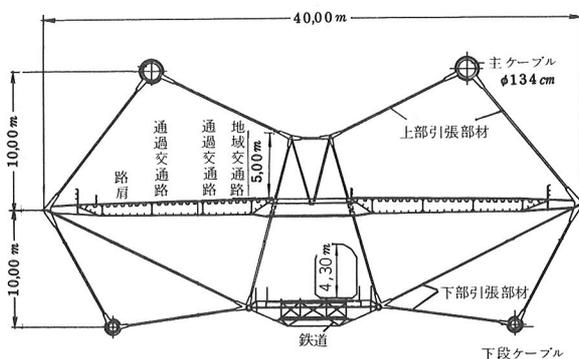


図-4 Musmeci 提案の張力構造吊橋の吊構造部断面