

これからの長大橋プロジェクト

Next Scenario for Long Span Bridges

川田工業(株)技術研究本部編

KAWADA INDUSTRIES, INC. Engineering Research Division

日本では明石海峡大橋の完成後、経済情勢の悪化と相まって公共事業への風当たりが強まり、第11次道路整備5ヶ年計画に示された海峡横断プロジェクトが実施される見通しは今のところ全く立っていない。しかしながら、目を世界に向ければ、数多くの長大橋プロジェクトがあり、多くの橋梁技術者が絶え間ない研究を続けていることがわかる。ここでは、イタリアのメッシナ海峡架橋を中心にそれらのいくつかを紹介する。

キーワード：海峡横断プロジェクト、長大橋、メッシナ海峡架橋

1. はじめに

20世紀の終末にあたって、吊橋においては“明石”，“グレートベルト”，斜張橋においては“多々羅”，“ノルマンディ”といったプロジェクトが完結し、長大橋にとっての華々しい舞台も終焉を迎えた。橋梁技術者にとっては、「さあ次の公演を」と行きたいところであるが、世界的にみても社会情勢が思うに任せない状態である。しかしながら、次のシナリオがないわけではない。

ここでは、ようやく着工の目途がついたかに見える超長大橋梁“メッシナ海峡横断橋”にスポットライトをあてて、その長かった道のりを振り返ってみたい。さらに、世界各国のその他の長大橋プロジェクトの数々も紹介する。日本においても、本四架橋という壮大なプロジェクトで培われてきたエンジニアリングをここで絶やすことなく、今後も継承していくためにこれらの情報が参考になれば幸甚である。

もちろん、将来のプロジェクトの全てを網羅したわけではなく、しかも取り上げたものも施工中のものから、実施に向けて準備中、計画・構想段階などとレベルがまちまちであることをお断りしておく。これらの情報の多くは主にRichard Scott氏の「In The Wake of Tacoma」¹⁾を参考にさせていただいたことを明記しておく。

2. メッシナ海峡架橋プロジェクト

超長大吊橋としてすでに設計も終わり、その着工が目前に迫ったと考えられているのが、イタリアのメッシナ海峡架橋プロジェクトである。架橋地点は海底が深く、潮流の激しい海峡部で、長靴の形をしたイタリア半島の爪先とシシリー島を距てるこの場所は、過去永い年月に

わたって人々に、架橋の夢を描かせ続けて来た地点であった。

シングルスパンで跳ばす吊橋としては、これまでの知識や経験を超えた新しい技術が必要とされたが、それ以前の問題として過ぐる10年間、建設資金の調達や政治的な調整という難問が存在していた。

メッシナ架橋は古い昔から、多くの著名な技術者達に夢を与えてきたが、最新の架橋案は構造的にまさに画期的なものとなっており、またそのスパンは過去のいかなる長大橋をも遙かにしのぐ巨大なものである。

古い神話や伝説の世界では、この海峡を襲う激しい嵐や秒速5mに達する潮流や大渦巻きは、スキュラ（嵐）やカリュプティス（渦）という怖ろしい怪物にも擬せられて、海峡がいかに危険かということ伝えてきた。だが実はそれよりもっと怖ろしいことは、この地域が地震帯上に位置していることであって、1908年の大地震では、なんと10万人もの死者が出たと伝えられている。

海峡部の水深200m、その海底からさらに300mも掘らねば支持層に到達しないという地盤条件。また漏斗の口のように絞られた海峡に轟めき集まる船舶航行量の多さ

これらの諸条件が組み合わされることにより、メッシナ海峡架橋プロジェクトは技術者にとって、これまでには先例のない最大の難工事への挑戦であった。

古くは紀元前251年のバレルモの戦い（第一次ポエニ戦争）において、ローマの執政官セル・メルテスがこの海峡に架橋したとの言い伝えがある。その後1701年にシシリー駐在のスペイン総督が、浮き橋の建設を試みたが、嵐に見舞われて忽ちにして破壊されたという。

1850年代に入ると、再びメッシナ海峡架橋の話に、人々の関心が寄せられることになった。1867年イギリス

の「エンジニアリング」誌は、ジョン・ローブリングによるナイアガラ架橋の成功を報ずるとともに、吊橋による海峡架橋の可能性につき示唆した。1870年代に入ると、幼稚なものながら架橋案としてのスケッチが、鉄道用のトンネル案とともに出版されるまでになった。もっともこの時代、メッシナ海峡連絡はいまだ夢物語りの域を出るものではなく、当時すでに施工が始まっていたローブリングのブルックリン吊橋ですら、世の著名な技術者達の多くがその完成を疑がわし気に見守っているという時代であった。

1899年からは、メッシナ海峡にもフェリーが定期的に通航した。具体的な架橋への動きは1950年頃までに、イタリア鉄鋼協会（Italian Steel Institute）が道路・鉄道併用橋としての架橋計画を、スタインマン（David Steinman）に委嘱したことから始まった。

たっぷり時間をかけた後に、スタインマンはそれまでに先例のない、1 524 mスパンのダブルデッキトラスによる巨大な吊橋を提案した。実現を見るには至らなかったが、この設計は興味深いものであった。サイドスパンの732 mという規模ですら、当時の橋梁としては世界で第4位にランクされるものであり、3径間吊橋としての全長 2 987 mは、後年彼が架けて世界1となるマキノ吊橋よりも731 mも長いものであった。巨大な主塔の脚も、サンフランシスコオークランド湾橋の基礎よりもさらに深い、水深122 mにも達するものであった。工費6千万USドルと試算されたこの設計では、鋼材7万トン、コンクリート38万 m³強、ケーブル用ワイヤー4万2千トンを要することになっていたが、ケーブルだけをみてもそれはマキノ吊橋の4倍にも相当した。

鉄道と風、それに地震という3つの条件から、スタインマンはこの吊橋には大きな剛性が必要と考えた。彼の持論の構高対スパン比1：40に従うとすると、高さ38 mの補剛トラスが必要となるが、彼はその代わりに主ケーブルをもってスパン中央部のトラス上弦材に代替するという、彼がフロリアナポリス吊橋（スパン340 m、1926年、ブラジル：図1）で行った方式をこの場合にも採用した。その結果は鋼重を大きく軽減するだけでなく、メインスパンの4分の1点における構高を50 mという高いものにすることが可能となり、ひいては風や活荷重による振れや曲げモーメントが最大になる箇所において、最



図1 フロリアナポリス吊橋²⁾

大の剛性をもつ構造とすることが可能になった。スタインマンはこの考えをサイドスパンにも採用しているが、これは1926年のヘルシオ吊橋などでは見られなかったものである。

構高15 mの補剛トラスは上・下両面にラテラルブレースが組まれているが、その下弦の方には軌道2車線が設置された。自動車はトラス上面を走らされるが、当初は27.5 mあるトラス幅の3分の1だけを使用し、それもトラス上弦材から大きく離して路面と主構の間には大きな空間が設けられた。この手法は後のマキノ吊橋でも採用されるが、メッシナの方がより顕著である。

スタインマンはタワーステーをも採用した。これはタコマ吊橋落橋の事故の後に、アンマン（Othmar Ammann）との間で激しい論争となったものである。スタインマン自身はステーとトラスの組み合わせを、「調和と均衡という一際美しい芸術的な雰囲気をかもし出す」（1953）と考えていたが、今日的な感覚からすればいささが重苦しいものではある。

さらに付言するならば、メッシナ海峡案に示された主塔、アンカレイジ、主径間対側径間スパン比などは、いずれも後により洗練された形でマキノ吊橋において実現されている。

スタインマンによるメッシナ海峡架橋案が提出された頃は、生憎とイタリアは第2次大戦敗戦による戦後の復興期であり、まだとてもこのような架橋プロジェクトに資金を投入できるような状態ではなかった。それでもスタインマンはその後5年間、このプロジェクトの実現に心を砕くのであるが、結局は諦めざるを得なかった。

その後1959年に至って、突如として上路に6車線、下路に4車線（うち2車線を軍隊専用）という設計で、総額2億USドルという架橋案が打ち上げられたが、これは直ぐに立ち消えてしまった。

より具体的な動きが、1967年になって始まった。この年イタリア政府はスヴァードラップ・アンド・パーセル社（Sverdrup & Parcel）に、前記スタインマン案の見直しも含めて、海峡架橋に関する設計と施工の技術的検討を委嘱した。またイタリアの企業グループはフランスの有名な海底探検家クストー（Jacques Yves Cousteau）と契約し、海峡部海底の詳細な地盤撮影も行った。

こうした一連の調査検討が進められた結果、総工費は8億USドルにも達すると推定されるに至り、1955年以来イタリア政府と有力企業17社の協同参加で作られていた、メッシナ架橋推進機構（Gruppo Ponte di Messina Spa：GPM）の動きにもはずみがついた。そうした中からスヴァードラップ・アンド・パーセル社は、同じGPMのメンバーであるUSスチールと共に、新しい設計を提案した。それはスタインマンの設計を検討した結果として

出されたもので、スパンはより長い1 676 mとされていた。

当時のムードとしては、1968年までに政府が工事施工を決定すると考えられるまでになっており、1969年の春には全ての設計も完了をみる予定であった。だが不幸なことに肝心の資金調達の見込みが立たず、その結果設計の承認は遅れに遅れて、ついにこの時の話も立ち消えとなってしまった。1969年7月、イタリア政府の道路および鉄道当局は、今一度新たな挑戦を試みることを宣言し、メッシナ海峡連絡プロジェクト設計の国際コンペを、広く世界にアナウンスした。その反響は予想以上に大きく、同年12月までに世界中から、道路鉄道併用による海峡横断プロジェクト案が、オーソドックスなものからまことに奇抜なものまで多数寄せられた。その数は総計144件、そのうち吊橋によるものが約40件を占めていた。

海峡の地理的条件と、しかも地震帯に位置していることからして、一般には橋梁型式が好ましいと考えられたが、最終選考をへて1970年12月入賞作品として発表されたものは6件であり、その内訳は吊橋案3件、斜張案1件、浮体トンネル案1件・・・などとなっていた。

その中の一つ、スヴァードラップ・アンド・パーセル社とモリソン・クヌードセン社が組んで応募したもの（Gruppo Ponte：図2）は、主径間1 600 mの両側に側径間770 mを有する3径間吊橋で、トラスで補剛され、上路に自動車道路4車線、下路に鉄道用軌道2車線を走らせた。高さ245 mの2本の主塔は、水深125 mの海中に人工的に築島し、その上に建てられることになる。6億7千万USドルと見積もられた工事費は、これまでに例を見ない巨額なものであった。入賞作品の中では築島を考えた案がもう一つあり（Caltabiano：図3）、そちらの方では主径間1 300 m、側径間650 mという3径間吊橋の基礎となっていた。

北米のイー・ライオネル・パブロ（E.Lionel Pavlo）がイタリアと組んだ入賞作では、1 360 m2連の吊橋が、巨大なA型フレームの塔を介してあい接する構造となっている（Calini B：図4）。この塔も深い海峡中央部に築かれる海中基礎を必要としており、主ケーブルはこの2連の中央径間と、その両サイドに位置する465 mの2つの側径間を含めて、全体に連続した一本のものとなっている。両側径間との間に位置する塔は従来型のもので、デラウェアメモリアルに似た形状をもっている。また補剛トラスはリンデンタールのタイプで、上路に自動車道8車線、下路に鉄道軌道2車線、将来の拡張に備えて自動車用6車線分の空間が確保されている。総工費7億8千万USドルと見積もられた。

この同じ北米とイタリアのコンソーシアムは、いま一つの非常に意欲的な、906 + 1 842 + 906 mという吊橋案をも提案しており、この場合も主塔の高さは285 mとな

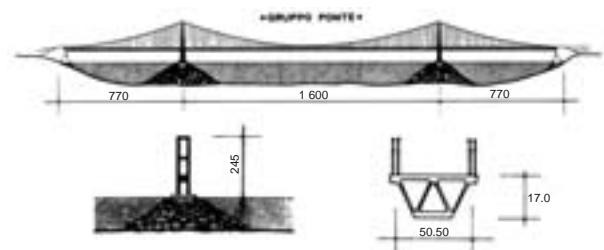


図2 スヴァードラップ・アンド・パーセル社とモリソン・クヌードセン社の案³⁾

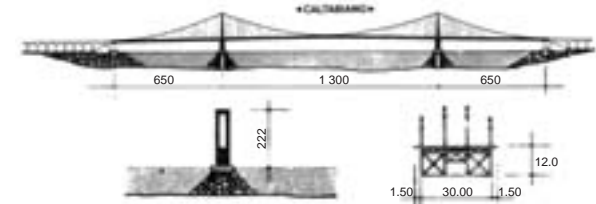


図3 Caltabiano の案³⁾

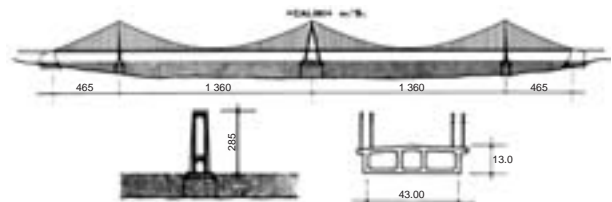


図4 Calini のB案³⁾

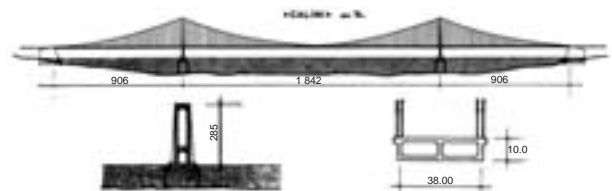


図5 Calini のA案³⁾

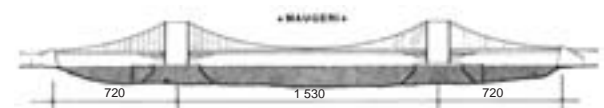


図6 Maugeri の案³⁾

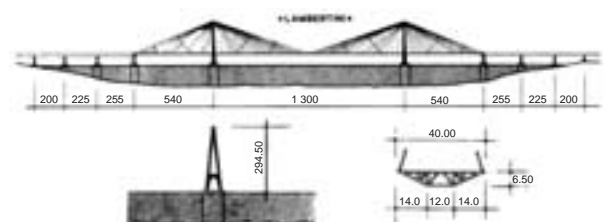


図7 Lambertini の案³⁾

っていた (Calini A : 図5)。

興味深い結果の一つは、メッシナ海峡横断コンペに応募した吊橋では、主塔のほとんどがポータル・ブレイシングを採用していることで、同じように地震国でありながら、日本の長大吊橋の主塔にはダイヤゴナル・ブレイシングが多く採用されたのと対照的であった。

応募作品の中には、奇想天外なものも幾つかみられた。たとえば 1 530 m の主径間を跳ばす吊橋案の一つは、主塔に相当する部分の幅が 150 m もあり (橋軸方向に)、さらに補剛桁に対してはそれぞれにカンチレバー支持とされた (Maugeri : 図6)。

斜張橋案も幾つかあり、そのうちの一つはレオンハルト (Fritz Leonhardt) とイタリアのランベルチーニグループ (Gruppo Lambertini) のコンソーシアムによるもので、従来の斜張橋のスパンを一挙に3倍にも伸ばして、1 300 m に達していた (Lambertini : 図7)。

コンペに応募した技術者達を最も悩ませたのは、これまでに先例のない深い海中基礎であり、このことは入賞した何れの作品においても例外ではなかった。その中でただ一案だけはこの問題をクリアしていたが、それはローマ大学のムスメチ教授 (Prof. Sergio Musmeci) の設計で、彼は斜張橋と吊橋を巧みに組み合わせてハイブリッド構造 (Cable-tension hybrid) とすることにより、3 000 m スパンを一気に跳ばそうとした (Musmeci : 図8)。

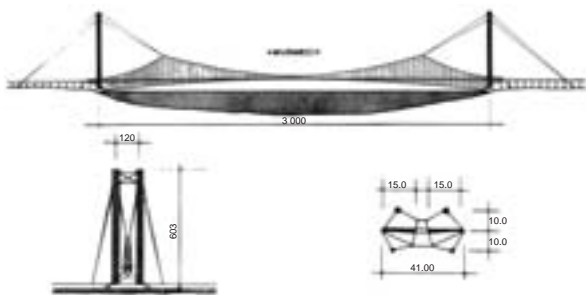


図8 Musmeci の案³⁾

ムスメチ案では陸上に建造された高さ 603 m の主塔から、主径間中央部に張り出された斜めケーブルにより、吊橋の構造として本来あるべき位置での塔が省略されている。すなわち主塔からスパン中央へ向かって水平に 500 m、高さ 297 m の点 (本来吊橋の塔の頂点たるべきところ) から、斜めケーブルは吊橋の主ケーブルへと変わっているのである。

風に対する剛性の不足を補うために、いわゆるウィンドケーブルが両岸から張られ、メインケーブルと組み合わせられた。その結果上路橋には幅 40 m の車道を有し、下路に鉄道軌道 2 車線を有する、桁とトラスの複合体の耐風安定性が確保されるとした。ムスメチのこのデザインは、1921年にシュトラウス (Joseph Strauss) がゴールデ

ンゲート橋のプロトタイプとして発表した、あの幻の吊橋・カンチレバー複合構造を思い起こさせるものである。技術的な不安定さへの懸念さえなければ、ムスメチのこのクモの巣状にケーブルが張り渡たされたシステムは、メッシナ海峡に架かる最も壮観な構造物となったに違いない。イタリアの有名な建築家ネルヴィ (Pier Luigi Nervi) も、3 000 m をワンスパンで跳ばすという提案をしている (Nervi : 図9)。

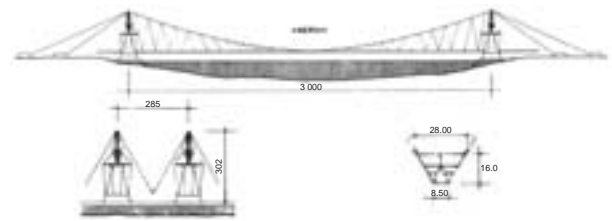


図9 Nervi の案³⁾

以上に見てきたようなこの時の入賞作品は、いずれも工期 5 ヶ年、1977 年までに竣工させることが要求されており、1971 年にイタリア政府が架橋管理公団 (Public-private agency to manage the project) 設立法案を制定したことによって、架橋実現への期待は一気に高まった。しかしながらついに 1971 ~ 75 年の国内開発 5 ヶ年計画には組み入れられず、また公団の設立そのものも 1981 年まで実現されなかった。結局入賞作品 6 案を発表しておきながらもその最終案の決定は行われず、丁度初期の頃のマキノ橋やハンバー橋の場合同様に、架橋への期待はやがて不満にとって代えられた。この時期はついに、工事開始に必要な資金調達のための機関すらも組織されなかったのである。

1970 年代に行われた調査や研究の成果としては海峡を 1 径間あるいは 2 径間の吊橋で跳ばそうというものの他に、海峡の底深さ 210 m のところに海底トンネルを掘る案 (Girola : 図10) などがあつた。また 1973 年には新た

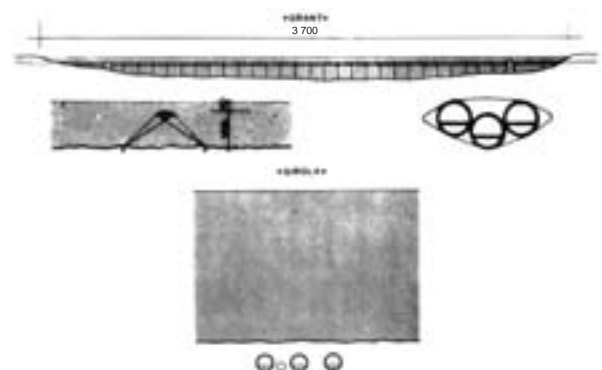


図10 トンネル案³⁾

(上 : 沈埋 (浮体) トンネル, 下 : 海底トンネル)

に1 750 mスパンの2径間連続吊橋案が提案されたが、この案では側径間がイタリア側で1 000 m、シシリー側で850 mあり、両方ともに吊られてはいなかった。

この1973年の連続吊橋案では、両側の高さ230 mの主塔は陸上に設置されるが、中央のA型主塔は海中で、2千万 m³の土砂をシシリー島のエトナ火山から運んで造成される、人工島の上に築かれることになっていた。この他1978年にはメッシナ架橋推進機構GPMから、地震時の水の抵抗を減ずる目的で、開口部の多いトラス組みの水中橋脚も提案された。このGPMは3 000 mの海峡を何とかワンズパンで架けようという、いま一つの提案もっており、こちらのほうはムスメチ教授や1970年代中頃のダニエリの設計を踏まえたものである。ダニエリの3 000 mシングルスパン案は、主ケーブルから放射線状に斜めケーブルを張るというケーブルシステムを組み合わせたものであったが、問題は海峡の中に巨大な水中基礎を必要とすることであった。

ウィリアム・ブラウン (Dr. William Brown) に率いられたフリーマンフォックス社 (Freeman Fox & Partners) は、1976年以来シングルスパンによる架橋実現に向かって基礎的な研究に取り組んでおり、研究が進むにつれてこれまでの先人達の努力が霞んで見えるくらいの素晴らしい成果を挙げるに至った。

彼等は先ずメッシナ海峡は、3 300 mの吊橋によってシングルスパンで一気に跳ばすことが可能であるとした。そのためには2本ずつペアにした合計4本の、直径1 mの主ケーブルが、兩岸の陸上部に建造された高さ380 mのコンクリート主塔間に張り渡されることになる。ケーブル応力のほとんど50%が、このケーブルの自重を支えるだけに使用された。吊橋の規模は僅か3年ばかり以前にフリーマンフォックス社が架けた、世界一の吊橋ハンバー橋よりもさらに2倍以上も大きなもので、吊り構造とはならぬ側径間は、シシリー島側で1 000 m、イタリア本土側で800 mの高架橋とされていた。

吊り構造部については風の専門家 (aerodynamicist) ウォルシュ (D. E. Walshe) の協力を得て、ブラウンは実にユニークな構造を考え出した。それは橋軸方向に平行な開口部を有する「孔空きデッキ」(perforated plate) で、車道6車線を有しているが、それが主ケーブルから吊られた50 m幅の横梁の上に置かれているという構造になっている。路床部と開口部の割合 (開口率) はほぼイコールで、その結果アップリフトは極めて小さなものとなり、吊り構造それ自体の捩れ剛性は小さいのだが、大きな主ケーブル間隔がそれを補って余りある。さらに斜ハンガーやクロスハンガーが全体の剛性に寄与することになる。

鉄道用の軌道2車線は下路側に設置され、それは上路中央車線部の柱から吊り下げられる構造になっているが、

横梁端部とテンションケーブルでプレーシングされた。

構造は全体的にフラッターの発現を抑え、剛性を高めるように配慮されて、ムスメチやダニエリの案で懸念されたような構造的な不安定さは排除されている。このアイデアは正に革命的と言えるもので、後に独立した箱桁を並列させる「スプリットボックス」(Split box) へと発展をみるものである。

この時フリーマンフォックス社が見積った総工事費10億USドル (\$ 1billion), 工事期間5~6年というのは、深い海底での基礎工事を不要としたことによるもので、この時併せて検討の対象となった橋梁3案とトンネル1案の中では、最も経済的で実現の可能性が高いものと考えられた。耐震、耐風および将来のメンテナンス性能にも優れ、また1980年の僅か数ヶ月間にきびすを接する如くに発生した、スウェーデンのチョールン (Tjörn) 橋やフロリダのサンシャインスカイウェイ (Sunshine Skyway) 橋のような、船舶衝突による事故の心配なども全く不要になるものであった。

シングルスパンで海峡を一気に跳ばそうという案の他に、2スパンで渡る案についても検討された。その場合梯形箱桁を採用して、橋床の中央に鉄道用軌道2車線、その両側にそれぞれ車道3車線を設けると橋床の幅は36 mとなった。フリーマンフォックス社はこれに彼等のアイデア「孔空きデッキ」案を適用することによって車線と並行に開口部を設け、主ケーブル間隔を40 mに拡げることによって、この程度のスパンの吊橋においても大きく耐風性能が向上することを明らかにした。

その他にも、この時代メッシナ海峡架橋についてはいろいろアイデアが寄せられた。たとえば1979年、カステルビアンコ (F. Bianchi di Castelbianco) は1970年のムスメチ案をひとひねりした次のような構造を考えた。それは高さ450 m、幅200 m (塔頂で) というトラス組みの主塔から、斜めハンガーとステークケーブルを縦横に張り出したケーブルシステムにより、スパン3 000 mを跳ばそうというものであった。最もユニークなことはスパン中央部の1 600 mは普通の吊橋になっているが、その両側の塔側の700 m余りのところから橋床は左右二股に分かれ、その間隔は次第に広げられて塔の近くでは300 mとなっていた。

ドイツのヘルツォーク (Max Herzog) も、優雅な3 500 mスパンの吊橋を提案した。彼の設計では僅か3.5 mという薄い箱桁の橋床上に、車道6車線、軌道2車線 (中央に) を設け、それを高さ405 mの主塔から張り渡された主ケーブルと斜めハンガーで支えた。ヘルツォークはその後1983年に至って、死荷重の軽減をはかって橋床のアルミ化をも検討した。

ランベルティニとレオンハルトのコンビは、斜張橋で

1 750 mを跳ばすという大胆な案を提案してきたが、この場合も深い海中基礎が不利な問題点として残されていた。

以上のような1978年末頃までのメッシナ架橋推進機構（GPM）の活動の成果について、イタリア政府は一定の評価をしながらもついに結論を出すことはなかった。それでもこの中ではフリーマンフォックス社のシングルスパン吊橋案が最も評価が高く、更なる検討が要請された。しかしながら1981年3月までの間にインフレーションの進行と設計変更により、工事費の方は20億USドルへと倍増した。それでも連続吊橋案の31.4億USドルや、海底トンネル案の38億ドルと比較して遙かに経済的であった。

その後3ヶ月を過ぎて、イタリア政府はようやくにして1971年の架橋管理公団設立法案を実施することになり、「メッシナ海峡公社」(Societa Stretto di Messina : SdM) が、国、鉄道公団、道路公団、カラブリア政庁、シシリー政庁からの資金の拠出により設立された。しかしながら1985年の12月に至るまで、この公社SdMに対しては技術検討を進めるための権限が与えられず、またその権限が与えられた時点では沈埋トンネルと海底トンネル両案について再度検討することが要求されて、事態は一步後退した感すらあった。

1986年6月、メッシナ海峡公社は何れの案でも実施は可能であるが、シングルスパン吊橋案が技術的に最も明快で、施工の安全性、経済性、工期といった点でも、かつまた完成後の維持管理費の低廉さでも勝れていると結論した。この時までには吊橋案としてはスパン3 320 m、橋床幅員60 m、道路鉄道併用橋といった基本的な構想が固まっていた。高さ400 mの塔、直径1.6 mの主ケーブル、上部工の使用鋼材63万トン、いずれもこれまでに例を見ない大きなもので、施工費31億USドルと見積られていた。

工法の最終決定は同年の夏とされ、その後に詳細設計と施工への準備作業に入る予定とされたが、この詳細設計費用だけでも1.5億USドルが必要とされた。そして1989年工事着工、工期に10年を要すると考えられていた。ところがこの時期になって、レオンハルト教授が突如としてスパン2 000 mという大胆な斜張橋案を持ち出し、吊橋よりも60%のコストダウンが可能になると主張した。彼は更に、3 300 mという巨大な吊橋の風洞試験の信頼性に対して疑義をとえ、海峡を吹く激しい風でケーブルの施工性にも問題があるとクレームをつけた。だがレオンハルトの意見は、要らん余計なおせっかいだとされて、まともに取り上げられることもないままに立ち消えていった。

メッシナ海峡を橋で渡るかトンネルを掘るかについての決定は、1988年4月に政府とメッシナ海峡公社（SdM）から委託を受けた機関により、最終的に架橋案とする結

論が出された。この結果をうけて、架橋推進機構は直ちにシングルスパンおよび2スパンの両方による予備的な吊橋の設計に着手した。

2スパン案では1 800 mスパン2連が海峡の中央で高さ200 m、使用鋼材5万トンのA型タワーによってあい接することになるが、このタワーのためには水深153 mの海中に27万 m³の人工島を築かねばならない。450 mと500 mの両サイドスパンは部分的に吊られた構造となっており、これらの全体を直径85 cmのメインケーブル4本が支える。主ケーブル碇着用のアンカーには、全体として25万 m³のコンクリートが必要とされた。

シングルスパン案ではこの時はスパン3 360 mとされていた高さ390 mで、使用鋼材7万トン（片側）という巨大な主塔と、これまた先例をみない直径130 cmの主ケーブルと、その碇着のための40万 m³ものコンクリートが使用される巨大な2つのアンカーブロックを必要とした。

1990年5月、メッシナ海峡公社（SdM）は上記2案を政府に提出し、その年末にシングルスパン案が最終的に選ばれて、1992年末までに更に技術的につめた予備設計を完成させるようにとの指示が出された。

ウィリアム・ブラウンはこの時点ではフリーマンフォックス社を離れ、ブラウンビーチ社（Brown Beech & Associates）の代表となっていたが、引き続き彼がその後の作業のリーダーとなった。この時の設計思想は橋に作用する力風力や地震力を含めてをその根元において最小とすることであり、かつ必要な剛性を備えながらもあたうる限り軽い吊構造を開発しようということであった。

これまでの箱桁タイプの補剛桁では、スパンが3 300 mもある吊橋ではハンパー橋の何倍も大きな断面が必要とされることになる。そこでブラウンはフラッター抵抗を向上させるための手段として、従来のような補剛桁の剛度を上げる代わりに、先ずハンガーの形状を変えることを試みた。たとえば中央スパンで塔から4分の1点までのハンガーに鉛直なものと同斜めなものを組み合わせたりした。

この時、思い掛けぬ展開（ブレイクスルー）が起こった。かつてブラウンが第二ボスボラス橋の仕事に従事していた頃、補剛桁を分割したツインボックス案を考えたことがあった。その時は採用に至らなかったのであるが、彼はいま一度この古いアイデアを持ち出して、ミラノ工科大学のディアナ教授に風洞試験を依頼した。結果は彼の期待を裏切らぬ良好なものであった。

直ちに中央に鉄道軌道2車線を走らせるための箱桁、その両横にそれぞれクルマ3車線のための箱桁、合計3本の箱桁を有する橋床案が浮上した。さらにトリノのピニ

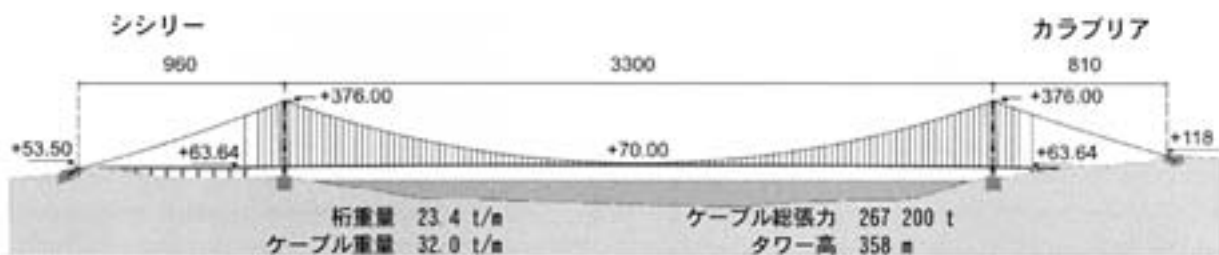


図11 最終設計案^{4),5)}

フリナ風洞 (Turin's Pinin Farina wind tunnel) で、30分の1模型による風洞試験が行われ、その結果これら3本の箱桁の形状、桁間にとられるべき空間の大きさ、またこの箱桁同士をつないで一体とする横桁配置の間隔などが、より適切なものとして決められた。

イタリア国内は勿論のこと、世界中の公的機関、学会、民間の技術者達にも広く呼びかけて協力が求められた。200年間の供用を保證せよという要求に応えるには、リヒタースケール7.1の地震 1908年の地震より大きなものに耐える必要があった。架橋予定地のあたりには実に100以上もの断層があり、海峡直下にも明らかに一つの活断層が走っていたし、カラブリア側の側径間にもそれらが4つも存在していることが知られていた。

1992年の12月になって、メッシナ海峡公社 (SdM) は最終設計案と称するものを発表した (図11)。スパンはこれまでより少し短い3 300 mとなっていたが、それでも当時世界最長の道路鉄道併用吊橋である日本の南備讃瀬戸大橋よりも3倍も長く、また世界最大の明石海峡大橋と比較しても1.5倍も大きなスパンとなっていた。設計で直ぐ気をつくことは、両側のサイドスパンが塔から180 mに限られて吊られていることで、シシリー島側ではその後の800 mは高架橋とされ、しかも大きくカーブして橋軸から外れている。主ケーブルはシシリー島では塔から960 m離れてアンカーされ、カラブリア側では810 m離れた小高い丘の上でアンカーされていた。この丘にはトンネルが掘られ道路も鉄道もそこを貫通することになっている。

4本ある主ケーブルはそれぞれの径が1.24 mもあり、これまでに施工されたどの吊橋よりも多い144 352本の素線で構成されて全長5.3 kmにも達する。この主ケーブルは2本ずつがペアになって張り渡されるが、その総重量166 600トンは吊構造部の重量の2倍以上にもなるもので、明石海峡大橋のケーブルの実に3倍以上も重くなる。ここには超長大スパンの吊橋におけるケーブル重量の増加が、吊り構造部とは全く異なって、指数関数的に増えるものであることがはっきりと示されている。

素線504本で構成されているストランドを88本束ねた主ケーブルは、全て空中架線法により製作されることになっている。このストランドの径はグレートベルトイ-

スト橋で採用されたものと同じである。またペアにされる2本の主ケーブルは、風の抗力を抑えるためにその間僅か50 cmで配置されるが、このことはケーブルラッピング用の機械として、従来型を改良してよりコンパクトなものにするという、新たな問題を提起した。

この他にも記録的な事例は多い。その一つは高さ376 mの主塔であり、その一基の重量で54 100トンという規模も、これまでに例を見ないものであった。この巨大な塔の柱は空力的理由から卵形の断面とされており、それが塔の基部で78 m、塔頂部で52 mの間隔となるよう傾斜させて建て上げられている。塔の横梁は橋床より上に3本、下に1本という構成である。この巨大な塔は柱1本を22段階に分割して積み重ねており、その1段はさらに3つのブロックに分割されて、その1ヶずつがクレーンで一気に吊り込まれることになる。

規模の大きさは勿論のことだが、技術的革新の最大のもは桁高2.25 mの箱桁3本を並列させた3胴船 (Trimaran) 型の橋床構造であろう (図12)。それが海上70 mの高さで海峡を横断するのである。

橋床の構成は両側方に幅12.75 mの箱桁がきて、それぞれ自動車道3車線を走らせ、中央の幅8 mの箱桁上は鉄道用の軌道2車線が走る。これら箱桁同志の間には8.25 mの空隙が設けられ、その全体が中央で4.5 mの桁高を有する鋼製の横梁によって連結された。この横梁は橋軸方向に30 m間隔で設けられる。橋床には風が抜けるようグレーチングによる維持点検用の歩道 (grid service lane) が設けられており、橋床面積は全体で24ヘクタールにも達することになった。

このように広大な橋床面を有する吊構造ではあったが、そこで使用される鋼材の重量70 500トンは、明石海峡大橋と比較して15%以上も軽いものとなる。こうした吊構造部の重量的軽減が、この橋の主ケーブル断面を明石海峡大橋と比べて、ごく僅かに大きなものとするだけで済まされているのである。実際には活荷重がはるかに大きいうえに、ケーブルのサグ比 (サグ/スパン) を11分の1と浅くされてケーブル張力のより大きくなる形状が採用されていることを考えれば、これは素晴らしい成果と言えた (もっともメッシナ海峡案で吊られる3 660 mは、明石海峡大橋の3 911 mより短いものである)。

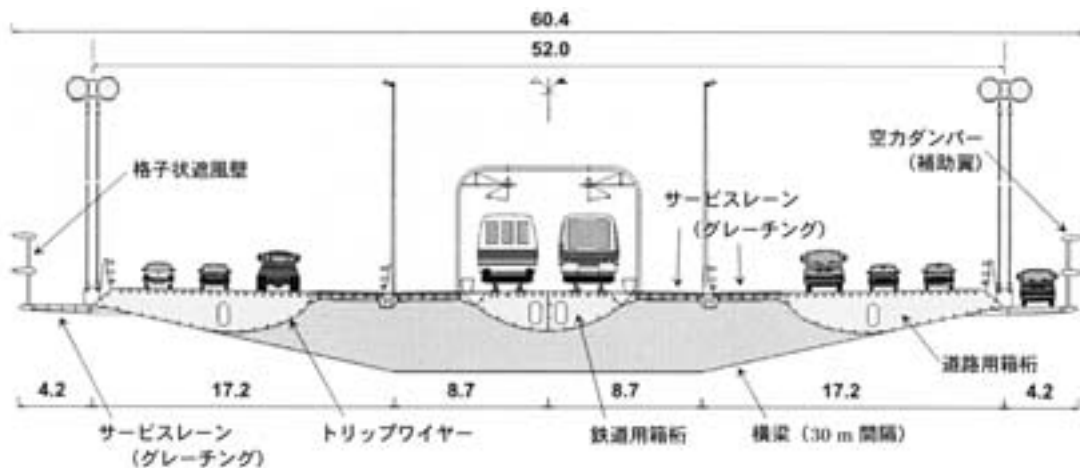


図12 最終案橋床構造^{4),5)}

より合理的な構造を求めて、吊材（ハンガー）についても各種検討が行われた。剛性を高める手段としての斜めハンガーやケーブルステーについても検討されたが、箱桁の断面形状を適切なものとするにより、そのような吊材システムでの細工が不要となることが明らかにされた。箱桁の下面を曲面にしたのもそうした試みの一つで、しかも製作上そう難しいものでないことは、既に第二ボスボラス橋のアプローチ、450 mの高架橋において実証済みであった。その結果外側に配置される2つの箱桁の断面は、風の流れをスムーズなものとする「涙の雫」型（teardrop-shaped）とされている。

強風時に走るクルマの安全対策として遮風壁（windscreen）の設置が求められたが、それにより多少抗力（drag）の増加が懸念された。そこでミラノ工科大学のダイアナ教授（Professor Giorgio Diana）にその研究と対策が委嘱され、1991年その成果として、薄板構造の補助翼を持ったような遮風壁が開発された。その効果は橋床上に吹き付ける風の速度を3分の2に減じたうえに、フラッター発現風速を80 m/sまで高める効果があった。ちなみに設計上のフラッター限界風速は60 m/sであり、その時のメインスパン中央における水平変位量は10 mで、これは明石海峡大橋の3分の1に過ぎない。また27.8 m/sの風に対しては僅かに2 mしか変位せず、このような剛性の大きさは主ケーブルの重さと剛性の大きさにも原因するものであった。ちなみに主ケーブルの重量はメートル当たり56トンにもなり、さらにそこに大きな活荷重が載るのである。

エキスパンションジョイントで吸収されるべき伸縮量の大きさと、橋上を走行する全長400 mの列車荷重は、いずれも技術的に大きなチャレンジであった。両側のクルマ用の箱桁は、いずれも主塔部でヒンジが設けられたが、中央の鉄道を走らせる方は変形を抑える目的から塔部を貫通して切れ目のない3径間連続桁とされた。結果的に3 660 mという記録的な橋長に対して、両サイドス

パン端部で3.4 m（最大で）の伸縮量が吸収される構造となった。主塔部における水平変位抑制装置（ウィンドシュー）があるだけで、桁はグレートベルトイースト吊橋やホーガクステン（Höga Kusten）吊橋と同じように、巨大な遊動円木の如くに全長にわたって一体として吊られた構造になっている。

これらの箱桁と主塔断面の内部には除湿装置が設置されて、内面塗装を不要としている。主塔のそれぞれの脚柱は、地下60 mまで掘って造られた直径55 m、厚さ20 mという巨大な釣鐘状の基礎の上に置かれることになる。シシリー島側の塔の位置は軟弱地盤で、基礎工のコンクリートボリューム86 000 m³の10倍にも相当するグラウトを注入して、地盤改良が行われる必要がある。アンカーブロックには一基当たり328 000 m³のコンクリートと、大量のバラストが使用されることになる。これだけ大きなアンカーブロックであるが、実際に地上に見えるのはカラブリア側ではケーブル支承部を覆う上屋のみ、シシリー島側ではアンカーブロック上方の僅か4分の1に過ぎない。

1994年の時点で、総工事費は20億USドルと見積られた。内訳は塔と箱桁がコストの半分を占め、ケーブルと吊材が3分の1。その他に取付部の道路や鉄道の高架橋、トンネル等で、11億USドルが必要とされた。

この巨額な建設資金が明らかにされたところで、1993年からくすぶり続けていた汚職事件がエスカレートして政治的大混乱となり、とても架橋工事を推進するどころではなくなった。メッシナ海峡公社が希望していた1994年末の工事着工、2000年の供用開始という線が怪しくなったところで、さらに追い討ちをかけるように技術論争までが発生した。それは外側の箱桁の最も内側のレーンに重い鉄道を走らせるという案に対して、これまで採用されてきた箱桁に比べて据れ剛性が低すぎはしないかという疑問であった。幸いこの問題は、鉄道の走る方向をそれぞれに逆向きにする（クルマと対向に）ということ

で軽減することがわかって解決をみた。

1994年7月、まだ不安定な要素が残されてはいたが、まず鉄道関係当局が設計を承認した。こうした間も空力的（Aerodynamic）な研究が継続されていて、竣工後1年間にわたるハンバー吊橋の挙動などは詳細に計測されて、数値モデル作りが大きく寄与した。また部分模型や1/250分の1の全径間模型などによる風洞試験が、デンマーク海事研究所（Danish Maritime Institute）にある最新の境界層風洞を使って行われた。全径間模型によるものは別にロンドンのオンタリオ境界層風洞試験室（Ontario's Boundary Layer Wind Tunnel at London）でも行われており、こうした一連の研究の成果もあって、ついに1995年11月、メッシナ海峡公社の道路関係当局も設計を承認するに至った。

しかしながら、今度は45億USドルと見積られた巨額な工事費が、実施への大きな障害として立ちのぼることになった。噂では、工事は早急に着工をみるか、さもなくば永久にお蔵入りになるとされた。それでも1998年10月、イタリア政府は再度の実設計の許可を与え、また1998年の中頃に成立をみた法案によって、民間資金調達の道もひらかれることになった。

だが、海峡を運航するフェリーが赤字で経営されているという実状の中で、新たな架橋工事が果たして引き合うものかどうかの懸念はつきまとっており、官民一体となった形で資金調達の道が拓かれねばならなかった。メッシナ海峡公社（SdM）は政府が建設資金の40%を負担することを公表し、それを受けて1998年も押し迫って、日本の代表的企業である三菱重工が、プロジェクトに興味を持っていることを表明していると報ぜられた。

ごく最近になっても、このプロジェクトに関しては論争の種が尽きなかった。2000年に入ると早々に、いまやパーソンズグループ（Parsons Transportation Group）の傘下に入っている北米のスタインマンコンサルタント（Steinman, Boynton, Gronquist & Birdsall）が、メッシナ海峡横断橋の設計に最終決定を与えるための、評価検討業務を請負ったが、このことに対してT. Y.リン社（T. Y. Lin International）とか北欧のコーウイ社（COWI Engineers and Planners A/S）からクレームがついた。彼等は競争で負けたにもかかわらず（ちなみにCOWI社は2番札であった）、法的に争って結局業務は6ヶ月間にわたり停滞した。結果は提訴が退けられ、スタインマン側の勝訴であった。

2001年5月になって、総工事費47億USドルの2分の1を引き受けるという民間セクターの出現が報じられるに至り、ついにこのメッシナ架橋プロジェクトも、最終的な工事着工命令が出されるのも間近と感じられるまでになった。正式に着工命令が出された後、詳細設計に2.5年、

工事に6.5年を要すると考えられているが、これは明石海峡大橋よりも期間的にかなり短いものである。工期短縮の最大の理由は、海中基礎工事が省かれたことによるものであった。

メッシナ海峡横断橋は、箱桁を吊橋の補剛桁に採用するものとしては、第3世代ということになる。この新しいタイプの補剛形式による世界最初の施工例は、2007年に完成を予定されているホンコンの青龍（Ting Lung）橋であろう。別にスパン2250mの東京湾口吊橋を計画している日本の技術者達も、このアイデアに興味を示している。

メッシナ海峡横断橋は、これまでの既知の技術を駆使するだけでは、明らかに吊橋としてのスパンの限界に近づきつつある。これまで長大スパンを経済的に架け渡そうと、多くの技術者達が開発と研究に腐心してきたが、彼等の結論は常にそのために新しいケーブルシステムと新素材の開発が必要だというものであった。

19世紀の初頭に誕生をみて以来、近代吊橋は技術者達の想像力豊かな知的冒険の中で、これ程までに発展を遂げてきたのであるが、考えてみればその原点は常に新しいケーブルシステムと、新しい素材の開発にあったと言えるのである。



写真1 メッシナ海峡横断橋完成予想図⁵⁾

3. その他のプロジェクト

(1) ヨーロッパ

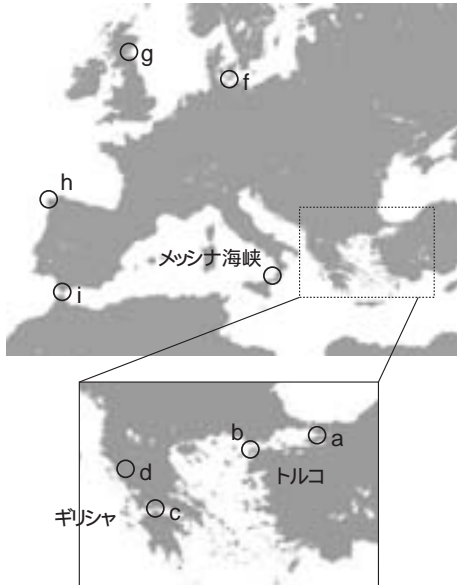


図13 ヨーロッパにおける長大橋プロジェクト

a) Izmit湾横断橋¹⁾

トルコのMarmara海奥のイズミット湾を横断する560 + 1 688 + 560 mの吊橋。タワーは鋼製で高さ263 m。建設資金調達の見途はついたものの、1999年の大震災およびその後の経済状態からプロジェクトは停止状態。

b) Dardenelles海峡橋¹⁾

トルコMarmara海入口のダーダネルス海峡を横断するスパン1 440 mの吊橋。補剛桁は2箱分離桁（涙の雫型断面）。計画止まり。

c) Rion-Antirion橋⁶⁾

ギリシャのコリンス湾3 kmを横断する全長2 252 m (286 + 3@560 + 286 m) の5径間連続斜張橋。タワーはコンクリート製の4本脚で高さ220 m。水深65 mの海底に直径90 mのケーソン基礎。現在下部工およびアプローチの施工中で2004年完成予定。

d) Metsovitikos橋⁷⁾

ギリシャのピンドス山中のスパン565 mの吊橋。主ケーブルは山腹に直接アンカーされ、ハンガーと共に面外に傾斜している。補剛桁は中央に3.1 mのギャップを設けたツイン箱桁。設計は英国のOve Arup & Partners。現在施工中で2004年完成予定。

e) スイスのジュネーブ湖にかける橋¹⁾

斜めハンガーを有するスパン950 mのモノケーブル吊橋。支間中央付近では、主ケーブルが桁の下に垂れ下がっている。計画段階。

f) Fehmarn Belt Link⁸⁾

ドイツとデンマーク間のフェマルン海峡(海上部22 km)

を渡り、ウルスンリンク (Øresund Link : デンマーク~スウェーデン) を経由してスカンディナビアとヨーロッパ大陸が陸続きになる。トンネル案もあるが、1 752 mの吊橋または720 mの斜張橋等の数案がある。ドイツおよびデンマーク両政府で検討中だが、環境問題、交通需要、フェリー対策など問題も多い。

g) Forth湾口横断橋¹⁾

スコットランドのフォース湾において、カンチレバートラスで有名なフォース鉄道橋、吊橋のフォース道路橋に続く第3の横断橋。1 200 ~ 1 400 m程度の吊橋、900 mクラスの斜張橋、斜張吊橋、等々の各種形式の提案がある。一時廃案になったが最近再検討の兆しもある。

h) Rias Altas Link⁹⁾

大西洋に望むスペイン北西部ガリシア地方のリアス式海岸部で計画されている3つの海峡を渡る連絡橋。コルーニャ (Coruña) 橋は724 + 2 016 + 724 mの吊橋。アレス (Ares) 橋は804 + 2 198 + 804 mの吊橋。他に吊材がアーチ中心から放射状に傾いた全長500 mのタイドアーチのフェロール (Ferrol) 橋もある。

i) Gibraltar架橋¹⁾

スペインとモロッコを結び、ヨーロッパとアフリカの両大陸を繋ぐという壮大な構想。20年以上に渡って、支間長5 000 mにもおよぶ超長大橋を含む各種橋梁型式やトンネル案が検討された。経済性の観点からトンネル案にほぼ絞られたものの、この検討過程でなされた超長大橋に関する多くの研究は今後必ず役に立つものと思われる。

(2) アメリカ

a) New Tacoma Narrows橋¹⁰⁾

風による落橋で有名な米国北西部ワシントン州のタコマ海峡において、交通容量増大を目的に現橋に平行に架けられる366 + 853 + 427 mの吊橋。タワーはコンクリート製。補剛桁は鋼床版トラス桁。工事元請JVはバクテ

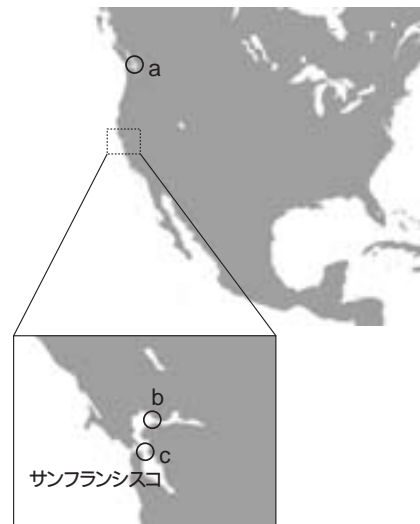


図14 アメリカにおける長大橋プロジェクト



写真2
新タコマナローズ橋
(左側が新橋)⁹⁾

ル・キーウィット (Bechtel-Kiewit) だが、ケーブルおよび補剛桁は新日鐵・川田が担当。2002年着工，2007年完成予定。

b) New Carquinez橋¹¹⁾

米国サンフランシスコ湾北東部のカルキネス海峡を渡る147 + 728 + 181 mの吊橋。既存のカンチレバートラス並列橋のうち，1927年完成の旧橋の架替え。2000年に着工し2003年秋完成予定。

c) East Bay橋¹²⁾

1936年に開通し1989年のロマプリータ地震で一部が崩落した，サンフランシスコ・オークランドベイ橋のオークランド側 (East Bay) の架替え。スパン385 mの単柱式2径間自碇式吊橋。補剛桁は分離箱桁。地震に対して数々の工夫がなされている。2002年着工，2007年完成予定。

d) New Chacao Channel Bridge¹³⁾

南米チリの首都サンチャゴの南約1 000 kmにあるチロエ (Chiloé) 島と本土間のチャカオ (Chacao) 海峡2.3 kmを結ぶ計画。主橋梁としては，A型タワーを間に挟んだスパン1 055 mと1 100 mの連続吊橋案がある。2002年着工予定。

(3) アジア

a) ベーリング海横断¹⁾

T.Y.LINが提唱した，シベリア～アラスカ間88 kmを結ぶ“国際平和橋”構想。



図15 アジアにおける長大橋プロジェクト

b) 間宮海峡横断¹⁾

サハリン北端～ロシア本土間の7 kmを結ぶ構想。

c) 宗谷海峡架橋¹⁾

北海道～サハリン間の42 kmを1 500 + 3 000 + 1 500 mクラスの吊橋を多数連続して結ぶ構想。

d) 日本の海峡横断プロジェクト

津軽海峡，東京湾口，伊勢湾口，紀淡海峡，豊予海峡，第2関門，島原・天草・長島連絡道などがあり，一部で耐風安定性や架設工法の検討がなされているものの，着工の見通しは立っていない。

e) フィリピン，Panay～Guimaras島¹⁾

COWI社によるスパン1 100 mのモノデュオ型吊橋案。

f) インドネシア¹⁾

ジャワ島～スマトラ島 (Sunda海峡)

海峡部27 kmにスパン3 300 mの吊橋。

バリ島～ジャワ島

Brownの2 100 m分離箱桁吊橋案やFlint & Neill社他の

2 300 mディッシンガー型斜張吊橋案がある。その他，ジャワ島～マドラ島間を結ぶ構想もある。

g) 中国

山東 (Shandong) ～遼東 (Liaodun) 間の渤海 (Bohai) 湾横断¹⁴⁾

旅順と蓬萊を結ぶ西ルートでは，由島列島をはさみ北側水路は42 kmのトンネル案，南側水路65 kmは海中の島々を利用した橋梁案が有望。いまだ構想段階。

杭州湾 (Hangzhou Bay)¹⁴⁾

全長36 kmのルートのうち，橋梁がほとんどを占める。北側航路では，90 + 150 + 448 + 150 + 90 mの2面吊り斜張橋。タワーはA型で高さ164 m。南側航路も同様な形式で，スパン割は100 + 100 + 228 m。タワー高は162 m。これらの主橋梁の間およびアプローチは最大スパン80 mの連続ラーメン橋で構成される。建設費107億人民元。

青龍大橋 (Tsing Lung Br.)¹⁾

香港の新界地区 (New Territories) から大嶼山 (Lantau)



図16 中国における長大橋プロジェクト

島を結ぶスパン1 418 mの吊橋。現在設計中で2007年完成予定。

昂船洲橋 (Stonecutters Br.)⁵⁾

香港地区, 青衣 (Tsing Yi) 島 ~ 九龍 (Kowloon) リンクの一部。スパン1 018 mの斜張橋。設計は国際コンペで行われた。2008年完成予定。

伶仃洋大橋 (Lingdingyang crossing)⁴⁾

香港の西の珠江 (Pearl River) 河口を渡るルート全長42 kmの横断橋。主橋梁としては, 東航路に900 mクラスの斜張橋, 中央に1 400 mの吊橋, 西航路に300 mクラスの斜張橋。種々の要因で計画止まり。

大嶼山 (Lantau) - 澳門 (Macau) - 珠海 (Zhuhai)¹⁴⁾

香港地区, ランタオから珠江河口対岸のマカオと珠海へ分岐して結ぶ案 (27 km), またはランタオからマカオを直接結ぶ案 (38 km) がある。予算は150億人民元。

海南 (Hainan) 島 ~ 中国本土 (広東省雷州半島) の琼州海峡 (Qiongzhou Haixia)⁴⁾

多くのルートが検討されたが, 西ルート30 ~ 36 kmに決定。橋梁案, トンネル案, 橋梁トンネル結合案 (大半がトンネル) がある。橋梁案は, 主航路には1 600 mの吊橋, 副航路に800 mの斜張橋, これらを連絡する250 mや125 mの多径間連続ラーメン橋。橋梁トンネル結合案では, 大半がトンネルで一部に125 ~ 250 mの連絡橋がある。概念設計は完了したが, 工事は15 ~ 20年先。

4. おわりに

以上, 世界各国を見渡せば長大橋プロジェクトがまだまだあることがわかる。その一部は既に進行中であったり, 実施に向けて準備中であったりするのだが, 大半は計画または構想段階で, 現在も多くの技術者達が色々な難題に取り組んでいる。

その主なテーマは何といっても風と地震であろう。耐風安定性の確保としては, ケーブル間隔を広げ「涙の雫」型をした箱桁を分離して配置するブラウンの方式が第3世代の長大橋桁構造として定着しそうな感がある。また, 環太平洋および東地中海沿岸といった強地震帯にプロジェクトが集中していることには興味深いものがあるが, それだけ地震対策の課題が多いことが予想される。

技術者はいつの時代も困難があればある程, より挑戦意欲をかき立てられるものであり, 我々にとってまだまだ勉強する課題が絶えないということは, 一面喜ぶべきことでもある。

最後に, 著書の一部を翻訳し引用することを快くご承諾いただいたRichard Scott氏, 米国土木学会 (ASCE) および中国の最新情報をご提供いただいた劉健新教授 (長安大学) に改めて御礼申し上げたい。

参考文献

- 1) Scott, Richard : In The Wake of Tacoma, ASCE PRESS, 2001.
- 2) The ENCYCLOPEDIA AMERICANA, AMERICANA CORPORATION, 1962.
- 3) 平井敦 翻訳監修 : メッシーナ海峡の横断連絡 (L'INGEGNERE), 本州四国連絡橋公団, 1972.11.
- 4) Diana, G., Falco, M., Cheli, F., Cigada, A. : Experience gained in the MESSINA Bridge Aeroelastic Project, Long-Span Bridges and Aerodynamics, Springer, 1999.
- 5) メッシーナ海峡公社のホームページ “ <http://www.strettodimessina.it/> ” より
- 6) Gefyra社のホームページ “ <http://www.gefyr.gr/> ” より
- 7) Bridge Design & Engineering, Issue No.20, 3rd Quarter, 2000.
- 8) Yearsley, Alan : Danish-German missing link, The Øresund Fixed Link, Route One Publishing Ltd., 2000.
- 9) Hernández, S. : The Rias Atlas link. A challenging crossing, Proc. of the 4th symposium on Strait Crossing, Bergen, 2001.9.
- 10) BridgeProsのホームページ “ <http://bridgepros.com/> ” より
- 11) Bridge Design & Engineering, Issue No.28, 3rd Quarter, 2002.
- 12) カリフォルニア州交通局のホームページ “ <http://www.dot.ca.gov/dist4/eastspans/> ” より
- 13) Forsberg, T., Petersen, A. : The challenge of constructing a bridge over the Chacao channel, Proc. of the 4th symposium on Strait Crossing, Bergen, 2001.9.
- 14) 劉健新教授 (長安大学) から提供していただいた情報による
- 15) 伊藤學 : 香港Stonecutters橋の国際設計コンペ, 橋梁と基礎, 2001.9.