

超長大橋プロジェクトの技術の周辺

Recent Advanced Technology for Super Long Span Bridges

横浜国立大学教授

Professor, Yokohama National University

宮田 利雄

Toshio MIYATA



1. はじめに

去る6月、コペンハーゲンで開かれたIABSEの第15回大会に出席した。今回のテーマには、経済、環境、エネルギーを考慮した構造工学をモットーに、将来の意思決定にプロとしての影響力を行使しようとするのであれば何をなすべきか、というような主旨が強調されていた。次の世紀に向けて構造工学の意気込みをさらに、との狙いがあったからであろう。

中でも、阪神・淡路大震災の後ということから、特別企画に構造工学と自然災害の軽減をテーマとするセッションが設けられていた。通常の他のテーマに比べて参加者の印象がどうであったか定かでないが、招待講演者の一人の片山恒雄東大教授（当時）と会場からコメントを求められたカナダのA.G.ダヴェンポート教授との短いやりとりは面白いものであった。片山教授がこの大震災の教訓として、One man's error is another man's dataと結論し、大きな被害をもたらした多くの過誤から多くを学ぶことができる、と個々の事例に基づく理解を積み重ねていく各論の重要性を強調していた。これに対して、ダヴェンポート教授は、個々の分野に応じた技術的観点から早期に規準化することが重要である、とするいわば総合化を第一と主張し、両者の主張はなかなかかみ合わなかった。

ふだん、ご両者が同じ場に出会うことが滅多にないだけに、その見解のすれ違いが余計に印象に残った。この際、自然災害による経済損失、保険金支払いが巨大化しているとの報告が併せ行われ、工学分野もさることながら、科学、政府機関、NGO、メディアなどを介した低減のための協力態勢づくりが急がれている、との意見が述べられた。確かに、自然の脅威の前に、狭義の技術的な規準化に限定されることなく、広い観点に立ち、しかも

個々の事情の丁寧な分析を厭わない本質的な議論が今こそ求められているのであろう。

さて、構造工学の最近の大会ではおなじみのテーマとなっている超長大橋に関するセッションでは、W.C.ブラウン博士¹⁾による、メッシーナ海峡プロジェクトに至る彼の長大吊橋設計の考え方の流れを聞くことができた。短いものながら、楽しい一刻を持つことができた。トラス桁のフォース道路吊橋、扁平一箱桁のセバーン吊橋から、メッシーナ橋の最終案になっているスロットを間に挿入したマルチ箱桁という解答を得るに至るまでの話があり、これは耐風性はもちろんのこと、材料、コストの点でも優れていると主張していた。その高名さは、吊橋設計に長い間いろいろな提案をしてきたからこそであるが、相変わらず技術的課題の一つ一つに強い関心を持って理解をし、自分の見解を主張するその態度には大いに感概を覚えさせられる。メッシーナ橋の建設は今なお冬眠状態にあるとのことだが、プロジェクトが具体的に動き出さなくても、技術的な詰めは最先端のものを整えておく、ということができているようだ。

大会の開催地デンマークでは、現在、グレートベルト吊橋が工事中だが、テクニカルツアーによる案内の際には、ケーブルスピニングを開始する直前とかで、その日のかなり強い風の中で工事の人も見え、ただキャットウォークで繋がれたコンクリートの主塔が天空にそびえ立つのが目に残った。予定は少々遅れ気味のようなが、補剛桁架設を始める前に、耐風性試験のための全橋風洞実験がこれからDMI (Danish Maritime Inst.) の大型風洞を使って行われるとのこと、また目新しい方法が何か提案されることになるかもしれない。というのも、同じ大会で、DMIに出向中のオタワ大学の田中 宏教授²⁾によって、スウェーデンで工事中のフーガクーステン橋(中央径間1 210 m長、箱桁)の架設系に対する全橋風洞試験



写真1 グレートベルト・イースト橋の建設状況

が報告された。その結果によると、在来の対称な桁の張り出しよりも逆対称に張り出す方がより耐風性に優れることが見い出され、提案されたからである。この例に限らず、個々の技術的課題が、決して多いとはいえない関係者間の適切で迅速な判断のもとに取捨選択され、事態が進められていくのを見聞きすると、考えさせられるものが多い。

2. 超長大スパン3 500 m吊橋の提案

ここで、わが国の超長大橋プロジェクト³⁾に関連する技術的課題をいくつか概観してみよう。

周知のとおり、第二国土軸をつなぐ超長大橋梁が明石海峡大橋のスパン長を超えて建設されるべきものと、今までにも多くの提案が発表されている。まずはプロジェクトの立ち上がりがなくはとばかり、短期的に見て実現可能なスパン長は2 500 m程度であるといわれてきた。明石で実現できた2 000 mを若干上回るスパン長であれば、これまでの蓄積の延長線上で対応できるはず、という考え方であった。そこでは、明石で採用されたトラス補剛桁に準じた案が示されていたが、いつの頃からか中

央に大きな開口部を持つ並列二箱桁案がたたき台にあげられるようになっていく。メッシーナ、ジブラルタル海峡橋プロジェクトに提案されていたものが、大いに注目されたためであろうか。いずれにしても、今後の大型橋梁プロジェクトでは、在来の建設費に比べて一段と経済性に優れたものとなることが必須の条件とされている。

このような前提条件に対して、中央径間2 500 m程度というスパン長では、プロジェクトが計画されている代表的な湾口地点での主塔基礎はいずれもかなりの深海域に計画、建設されることになり、必ずしも総建設費用の低減化には結び付かないのではないだろうか。また、すでに述べたように、当初案ではトラス補剛桁が考えられていたが、実際に想定される往復四車線の床版で、しかもより低い固有振動数になるわけであるから、明石の六車線の経験のみに頼るわけにはいかず、新たに種々の試験検討が必要になる。これは、必ずしも短時間で事が処理できるわけでもなく、仮に耐フラッター性に優れたトラス補剛桁が見い出されてもその重量の格段の低減、すなわち経済性に優れることが期待できるわけでもない。

このように考えるとき、総建設費用の低減化を目指すという観点から、これまではむしろ中長期的に検討が行われるべきものとされてきたさらなる超長大スパン長についても、これに適した検討が少なからず精力的に行われてきているので、それらの成果に基づき並行して検討し、総合的な比較が行われて然るべきである。とりあえず想定できるスパン長として、2 500 mを超える3 000 mから5 000 mの範囲が考えられるが、具体的な計画地点をイメージすると、現実味のある目標として3 500 m程度の中央径間長が穏当なところであろうか。このような超長大スパン長で十分な耐フラッター性を満足させるのは、明石などについてこれまでに行われてきた経験、諸検討から、きわめて難しいことは分かっている。しかし、メッシーナ海峡橋のスパン長3 300 mが実現可能といわれ

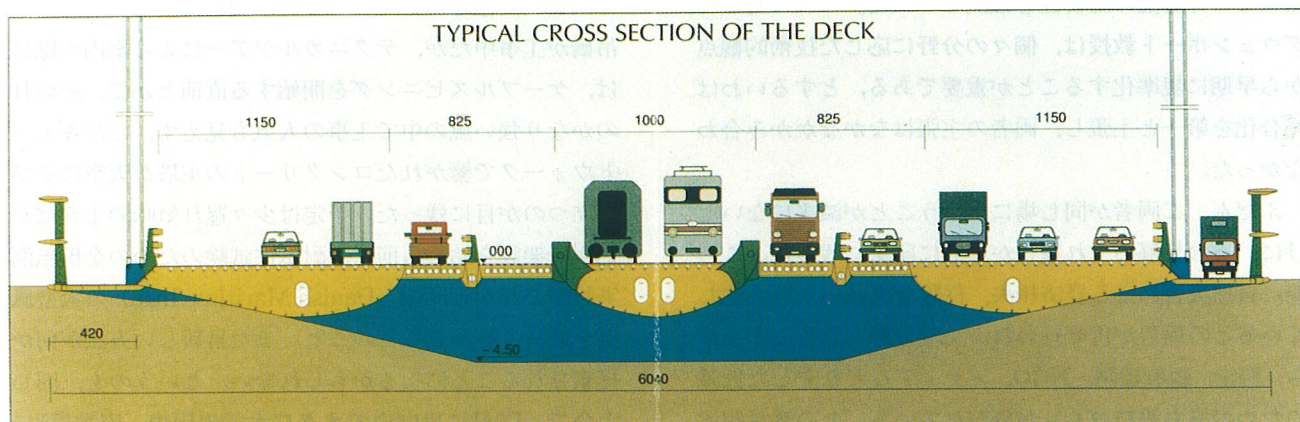


図1 メッシーナ橋の補剛桁断面案

ているのであるから、挑戦してみる価値は十分にある。

3. 超長大スパン吊橋の耐震性

阪神・淡路大震災による大きな被害を被って以来、土木構造物に対する耐震設計基準についても見直し作業が急であり、周知のとおり、道路橋示方書耐震設計編も改訂されることとなった。その骨子は、在来の耐震設計で使われていた地震動（レベル1）に対して全く損傷しないようにし、これに加えて震源断層近くで発生する低頻度強震動（レベル2）を新たに設定して、これに対しては崩壊しないようにすることを基本とするものである（日経コンストラクション'96/6/14）。

このような検討に合わせて調査活動が実施されている超長大橋に対しても、その耐震設計のための入力地震動にレベル1、およびレベル2の2段階を設定するとの提案になっている³⁾。レベル1地震動については、「交通機能を阻害するような損傷を防止することを目標に、許容応力度などで照査すること」とされている。他方、レベル2地震動に対しては、「機能復旧可能な損傷は許容するが、崩壊は防止することを目標に、部材の塑性化を考慮した許容変位などで照査する」としている。

要するに、性能表示型設計法に沿った提示をしたわけである。いずれにしても、この段階ではあまりに抽象的すぎ、吊橋系としてももう少し具体的に、どういうことなのかを見通せるように、あるいはどういう手法で、どこに着目して解析するのか、などを明確にしておくことが、今後、求められることになるだろう。想定した地震に本当に耐えられるかを確認する客観的な基準がなければ、個々の構造物について想定した機能保全の妥当性を確かめられないし、また他の荷重との安全性についての相对比较、超長大吊橋では最も厳しい問題になる耐フラッター性能との対比もできないからである。この点は、どの分野の耐震基準の見直しの議論の中でも焦点になっているところである（朝日'96/5/17夕刊）。

吊橋という構造系が具体的にになっているのであるから、特定の地点について設定された強震動に対してどのような挙動をするか、すなわちどこから損傷し、あるいは塑性域に入り、結局、このように変形、振動して、とりあえずは崩壊せずに終わった、というようなストーリーを想定し、これを明示しておく必要がある。陥りがちなのは、例えば、地盤と下部構造のみを対象にして上部構造は単なる質量の塊として載せておくとか、ある段階までは構造全体系は健全で、突然、固定支承が壊れて境界条件が変わってしまった、というような系を対象にするとか、あまり合理的とはいえない検討のみで済ませるのは避けなければならない。

ケーブル工事終了直前であの阪神・淡路大震災の強震

動の洗礼を受けた明石海峡大橋⁴⁾では、そのときの構造系が大きく振動し、結局、主塔、アンカーレッジにわずかの永久変位が残り、工事用機器、その他にも少々の被害を被っている。これらの挙動、被害の記録、観測はきわめて貴重なもので、その追跡分析は上述のような被害想定にも有用な情報を提供してくれるはずである。このようにして吊橋系の強震動への応答性、さらには被害想定 of 客観的評価基準の方向が確定できれば、スパン長、構造細目、地盤条件の相違、あるいは三径間か単径間か、などの選択肢の中から、より適切な構造形式の選定ができるようになるはずである。

4. 超長大スパン吊橋の耐フラッター性

長大橋にとって厳しい外力作用である強風の影響についてはよく理解されている。ある大きさを持つ弾性体が風に晒されて運動を始めると、作用する空気力は小さくても系がたわみやすくなるほどに不安定な自励振動が誘起されるのは本質的なことなのである。タコマ吊橋の崩落のときのようなねじれフラッターでは、プレートガーダー補剛桁の先端からできた空気の剥離渦が後方へ流下するとき、運動する桁のウェブ上下部に生じる時々刻々の圧力分布に複雑な影響を及ぼす。その時々刻々の合力をとるとねじれモーメントが形成されており、ねじれ振動を引き起こすこととなった。この振動が発生した風速は比較的低く、したがって、風による振動問題を支配する物理量である換算風速 U/fB も大きくない。この換算風速には、系の振動の一周期 ($1/f$) と剥離渦が桁幅 B を流下する時間 (B/U) との比という意味があり、これが小さい領域では剥離渦の流下が運動する桁部と干渉し合う時間が長い、ということを示している。

ところで、明石海峡大橋にトラス補剛桁が採用されるについては、事前に耐風性の観点から実に多くの比較検討が行われた。最終的にトラス桁とハイブリッド箱桁、すなわち総重量を一定に保ちながら全体系の剛性増を期待して高低二つの箱桁を橋軸方向に適宜配置するもの、の二案が、重量的にもほぼ等価で所要の耐フラッター性を満たすものとして提示された⁵⁾。結局、六車線のトラス桁が採用されたのだが、通過船舶が頻繁な国際航路上で吊り上げ架設をしないで済むことを最優先したためであった。このトラス桁の原案について部分模型による風洞試験に着手した頃には、上述のねじれフラッターはクリアできたものの実風速50~60m/sあたりでねじれと鉛直たわみの連成したフラッターが観測され、関係者の注目を集めた。トラス桁でも平板翼のような連成フラッターが起こるものか、という素朴な疑問であった。固有振動数は相対的に低下しているが、耐フラッター性を確保しなければならない風速域はスパン長に関係なくほぼ同じ

レベルが要求されるので、当然、対象とされる換算風速域は大きくなる。したがって、振動の固有周期に比べて剥離渦の流下時間は短くなって、構成される圧力分布は相対的にフラットに、平均的には平板翼のそれに近づき、連成フラッターが生じてもおかしくないという理解は後になってからのことであった。

乱暴な言い方をすれば、道路橋に走行車線がある限り空気力の作用が及び、構造的にたわみ性が増せばこのような不安定振動が必ず引き起こされ、一層の耐風安定化を目指した前述のスロット箱桁でもこれは避けられず、発生する風速が無大無限大ということもあり得ない。超長大吊橋では、構成構造要素すべてに係わる風の効果を考慮した耐フラッター性の検討が不可欠になる。

5. フラッターのモードコントロール法

以上のような「明石」までの過去の経験から、在来的な補剛桁形状を持つ長大吊橋の耐風性について、一般的に次のような結論が導きだされている^{5),6)}。すなわち、

a) 扁平箱桁；ふつう、扁平な一箱桁断面は最小板厚の条件から断面諸元が決定される。こうして与えられた断面ではフラッターの発生風速はかなり低く、所要の性能を満足させられない。単純に板厚を厚くして剛性を増し、固有振動数を高くすることによって満足させようとすると、総重量がトラス桁のそれを超え、結局、箱桁の軽量であるとの優位性はなくなる。

b) トラス桁；主構造はおおむね風荷重で決定されることになり補剛桁全体の総重量は概して重く、これを軽減するのは容易でない。耐風性の観点からは、主部材、床版、公共添架物、グレーチングなどの配置、またそれぞれの相対位置、ならびに車線数などで決まる。寸法諸元の影響が大きく、フィジブルな解の選択は必ずしも容易ではない。明石海峡大橋では、原案にいわゆる鉛直スタビライザーを設置して耐フラッター性を満足させているが、これは事後の主トラス内の添架物などの変更は

厳しくなることを意味している。

さて、明石海峡大橋の耐風安定性は、最終的に、約40m長さの全橋模型を用いた大型風洞試験を実施して検証が行われた^{6),7)}。上述したとおり、床版下方に鉛直スタビライザーを設置するが、中央径間のみで十分であると結論されている。他方、この試験に際し原案ではフラッターの発生が観測されたが、これに関連していくつかの貴重な知見が得られている。要約すると、

- ① 風荷重で大きく横たわみするとともに中央部で頭下げのねじれ変位が重なった状態でフラッターが起き、その振動モード形は鉛直たわみ、ねじれ、さらに横たわみの各変位成分から成る、連成した3次元的なもので、時々刻々相似した形状をとらない複素モード形を成している。
- ② 振動する桁などの構造体に作用する空気力(非定常空気力と呼ぶ)を実験的に測定し、構造解析モデルに適用すると、複雑なフラッターの挙動をある程度まで説明することができる^{7),8)}。従来、連成フラッターでは、ねじれと鉛直たわみが重なる振動という理解から、その一般的な検証法の部分模型試験でもそれらの2変位自由度のみを与えるとしてきた。伝統的に、翼断面のそれにならうものであった。ところが、ねじれ、鉛直たわみ振動にともなう抗力、あるいは横たわみ振動にともなう揚力、空力モーメントの効果が有為になる、という新発見があった。この主な原因はトラス補剛桁の抗力が大きかったからと考えられる。
- ③ フラッター発生時の複素振動モード形を用いて、運動に伴う非定常空気力のなす仕事の橋軸方向分布を求めると、中央径間の中央部約1/3の領域で加振力として、残る両端の側径間に至る領域全体には減衰力として働いていることが分かる。このような加振力、減衰力分布の総和がある風速以上で加振力側に転じると、フラッターが発生することになる⁸⁾。
- ④ この仕事量の総和を減衰力側に保つよう、フラッター時の振動モード形を適当な方法により変化させられると、その限界風速の増大を図ることができる、すなわち振動モード形の制御による耐風安定性の向上を期待できることになる。モードコントロール法と命名できるこの方法は、補剛桁の改良、構造系の剛性増に続く第三の耐風安定性向上対策法として位置付けられる^{8),9)}。

6. 超長大化とフラッター

すでにキーワードのいくつかを述べたように、今後の超長大吊橋を実現させる際に必須な耐風安定性の向上化には、考慮すべき重要な事実関係が見い出せる。これまでも少なくない耐風性向上策が提案されているが、そ

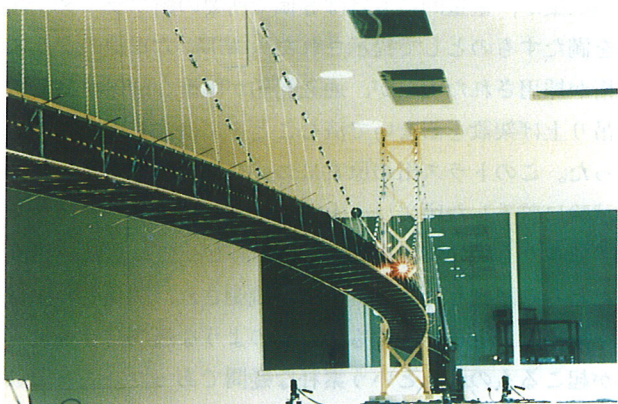


写真2 明石海峡大橋の全橋模型風洞実験
(写真提供：本州四国連絡橋公団)

の基本的なものには、

a) ケーブルシステムによる高剛度化；在来のフラッター解析法の一つであるゼルベルグ法（限界風速を特定するには無理があるものの、関係する構造諸元の効果はある程度反映するため、それなりの指標として使われてきた）によると、ねじれ固有振動数の増、またこれと鉛直たわみのそれとの比の増が限界風速の向上につながるとなっている。これから、補剛桁の板厚増などによる剛性増、あるいはいろいろなケーブルシステムの援用による構造系全体の剛性増により、ねじれの固有振動数を増大させ、限界風速を高くしようとするものである。しかし、前者の単純な剛性増の方法は重量増につながるもので、後者の方法が比較的多数検討されてきた。もっとも、ケーブルネット系を新たに本来の主ケーブル、ハンガーに付与するとき、耐フラッター性向上という点でのそれら付加系の構造的役割と効果、解析モデル、接合節点の詳細などに検討の余地が残されている。

b) 桁断面形状の改良；耐フラッター性の向上を図るには、より一層耐風安定性に優れた補剛桁形状を探せばよい。しかし、前述したように、扁平箱桁、グレーチングのあるトラス桁などを基本に実に数多くの検討例があるものの、超長大化する場合に所要の耐風性を満たすのはそれほど簡単ではない。メッシーナ海峡橋の最終案やジブラルタル海峡橋への提案例に見られる、各走行車線ごとの床版を大きなスロットを介して剛な横梁でつなぐ構成案が考え出されてきたのには理由がある。従来の経験からすると、中途半端な空間、例えばトラス桁のグレーチング幅を少々広げる程度ではさほどの効果は生まれない。桁幅全体が広がるのを覚悟して、相当幅の空隙を設けて各床版部に働く空気力相互に位相差を発生させるなどの方法を採用したものといえる。メッシーナ橋では中央の空間に鉄道桁が入るので、それなりの合理性があるが、この桁幅が広がる、したがって主塔幅、ならびにその基礎構造が広がる場所にこの案の難点が残っている。

c) 制御装置の搭載；最近、構造物の振動問題の解決法の一つとして、減衰装置を搭載して振動を抑制、制御する方法が盛んになっている。橋梁関係では、工事中の風による振動制御に多くの実績があり、高層ビルなどには、強風はもとより地震に対する使用性保持のために多くの実績がある。いわゆるアクティブ制御法によるフラッター振動の抑制についても、シミュレーション解析結果から原理的には効果的であるとの結論は得られている¹⁰⁾。しかし、この種の問題の検討は緒についたばかりであり、根本的にはその信頼性、特に永久構造物の耐力に係わる問題への適応性について、多くの論議がなお必要である。

いずれにしても、超長大吊橋の実現に向けてそれぞれ

の提案をしていくについて、耐フラッター性の検証が避けられないが、そこでは合理性のある検証法が示されなければならない。このためには、「明石」の検討に関連して開発されてきた、いわゆる3次元フラッター解析法⁸⁾の適用が薦められる。これは、空気力-構造系の関係に実測値を一部とり入れてモデル化し、解析するのに現状では最も実際に即し、標準的なツールとして適当なものであるといえる。超長大化に対応した種々の提案、ケーブルネット系、スロットつき箱桁などの検討を行うについても、補剛桁への抗力は小さくなる。しかし主ケーブル、ハンガー、あるいは付加ケーブルへの抗力が相対的に大きくなる、などの要因のフラッター発生への影響を逐一検証しておく必要がある。

7. ケーブル強度と限界状態

現在の鉄鋼より強度や寿命が二倍以上の「超鉄鋼材料」の開発に官民が共同で乗り出すと報道されている（日経'96/6/20朝刊）。ケーブル線材についても現在の強度の二倍、500 kgf/mm²を目指すとのことだが、そうなると超長大吊橋の構造系にも大きな影響を及ぼすことになる。さらに、「吊橋などに応用すれば橋脚間隔を広げられるから、東京湾を横断する長大橋の建設も可能になるという」とある。現在の強度でも、架設時の問題は残るにしても、「明石」の2 000 mを超えて、ここで提案している3 500 mクラスになっても構造設計は十分にできる、といわれる。そこで、ケーブル強度が二倍になれば、現状方式でも架設系には効用が発揮されるだろうし、一方、在来の長大吊橋にはないほどにサグ比を小さくし、その構造特性を大胆に変更させるという考え方もできるだろう。この方式では主塔高さを低くでき、超長大吊橋には一層好都合であり、コンクリート主塔の可能性も一段と高くなっていく。

ところで、超長大吊橋プロジェクトの調査、検討に際し、「明石」の経験に基づいたとして、ケーブル強度に対する安全率を2.2から1.8へ低減させることが検討されている。そこでは、死荷重に活荷重を合わせ考慮し、限界状態設計法の考え方に基づいた要因の整理分析を行ったので、合理的な設定であるとされている。しかし、この安全率の低減は限界状態の一つであるフラッターにまで影響が及んでくる。すなわち、構造系の他の条件を変えないでケーブルの許容応力度のみを上げると、ケーブル断面が縮小し、したがってその質量、また質量慣性モーメントが相対的に小さくなる。その結果、フラッターの限界風速を低下させるように働くのである。厳密には、構造系全体の動的特性にかかわり、採用された補剛桁形状、すなわちその非定常空気力特性によっても異なることなので、前述の3次元フラッター解析を実施してその

影響の程度を検証する必要がある。「明石」の場合に、その主ケーブルの破断強度を 180kgf/mm^2 に変更した際、耐風性の検証作業に一時大きな混乱を招いたことがある。このときは、鉛直スタビライザーを設置するなどの対策が見い出されたので事なきを得ることができた。結局、このときも死荷重と活荷重に対する限界状態を想定した、という理由から、その重要性が喚起されながらも、耐風安定性は単なる照査の一項目に位置付けられたに過ぎない。いわゆる限界状態の中には、場合によっては、活荷重よりも強風応答、あるいは地震応答の方が厳しくなることが考えられ、また不安定問題では強度よりも剛性の方が重要になるので、そのときはこちらの側から構造諸元の一部が決められても格別おかしくはない。

前述のとおり、超長大吊橋の耐震設計についても、レベル2の設定を厳しく問わなければならないといわれるこの時点で、経済性追及とともに、性能表示型設計法を広く掲げようとしている。このようなとき、超長大吊橋の構造設計法の基本的な考え方について、在来の伝統的な考え方に固執することなく、一般的な限界状態設計法を広く採用する方向に進むのに合わせて、いわゆる限界状態についてはこれを厳しく問い直し、超長大吊橋固有の設定が肝要になるであろう。

8. あとがき

議論を限って、超長大吊橋プロジェクトの実現化に向けた技術的課題のみの検討を進めるとしても、今もなお、その総合的なアプローチが繰り返されるのではないだろうか。それには時間がかかるとの反論がいつも出てくるが、少数精鋭のプロ技術集団により事を精力的に進めれば難しいことではない。一般的な意味でのプロジェクト化の難しさの方が厳しいと予想される中で、しっかりした提示を行うためにも必要なことである。

この社会から認知を得ることの手強さは簡単には片付けられないだろうが、良い性能で経済的なものを、もちろん環境との共生 (ISO 14000の要求) にも十分配慮した、お買い得ですよ、と提示し続けることは常に励行すべきである。イタリアのメッシーナ海峡橋は経済的事情によりなお休命中とのことだが、それにつけても、海峡上に長大橋を架けようと彼等のいう熱情に動かされて事が始められてからの長い期間を考えると、だからこそのいいものが提示できることになったとはいえないだろうか。彼等が、今でも臆することなく、いろいろな検討を丁寧に続けているのには感心させられる。

都計審で常連の計画の専門家が、今後のビッグプロジェクトは難しい、との発言に続けて、「土木の世界には、技術の継続を確実にするために技術者を温存するシステムがあった。非常に巧妙に技術者と技術的な蓄積を維持

し、国民のニーズに関係なく、技術者の論理で動いてきた面もある。21世紀になっても、税金を使って技術者と技術的な蓄積を維持していくことができるかどうか。欧米では、不要になった技術は冷酷に捨て去ってきたのだと思う」とある (日経コンストラクション'96/3/22)。さて、この一方的な説にどう答えていけばいいのか、今のところあまり気のきいた反論は聞かれない。とにかく、いいものはいいのだと売り込めるよう、当面、いいものを丁寧に考えていくことになるのだろうか。

参考文献

- 1) Brown, W.C.: Development of the Deck for the 3,300m Span Messina Crossing, *Congress Rept., 15th IABSE (Copenhagen)*, pp.1019~1030, June, 1996.
- 2) Tanaka, H., Damsgaard, A., et.al.: Aerodynamic Stability of a Suspension Bridge with Partially Constructed Bridge Deck, pp.113~118, ditto.
- 3) 建設省土木研究所: 海峡横断道路プロジェクト技術調査委員会報告書, 平成8年3月.
- 4) 本州四国連絡橋公団: 兵庫県南部地震の明石海峡大橋への影響調査報告書, 平成7年8月.
- 5) 大橋・宮田・岡内・白石・成田: 明石海峡大橋の耐フラッター性に関する予備的検討, 第10回風工学シンポジウム論文集, 1988年12月.
- 6) 宮田・保田: 明石海峡大橋の耐風性に関する大型風洞試験, 構造工学論文集, Vol.39A, 1993年4月.
- 7) 勝地・宮田・北川・佐藤・樋上: 明石海峡大橋大型風洞試験での連成フラッター特性に関する考察, 第13回風工学シンポジウム論文集, 1994年12月.
- 8) 宮田・山田・風間: フラッターモード形に着目した長大吊橋の耐風安定性向上に関する研究, 土木学会論文集, No.525/I-33, 1995年10月.
- 9) Miyata, T. and Yamada, H.: New Ideas for Detailed Investigation on Aerodynamic Behaviors of Long Span Suspension Bridges, *Congress Rept., 15th IABSE (Copenhagen)*, pp.81~86, June, 1996.
- 10) Miyata, T., Yamada, H. and Dung, N.N.: Proposed Measures for Flutter Control in Long Span Bridges, pp.781~786, ditto.