

巻頭言

再び流れが変わった長径間吊橋

New Trend of the Long Span Suspension Bridge

川田工業(株) 取締役社長
President川田 忠 樹
Tadaki KAWADA

1. 橋梁技術史上に特筆されるべき1988年

1988年という年は、私たちのように橋の仕事にたずさわっているものにとっては、まことに充実した、栄光に満ちた年であった。

その第一の理由は何といっても本四架橋、瀬戸大橋ルート¹の完成であらう。

これは日本ではじめて、ワンスパンで1 000mを超えた南備讃瀬戸大橋をはじめ、北備讃瀬戸大橋、下津井瀬戸大橋といった巨大な吊橋と、櫃石島橋、岩黒島橋という、日本一の斜張橋二橋を含んだ、延長10kmを超す一大橋梁コンプレックスであった(図-1 参照)。

しかも、これまで世界にもその例をみない、在来線二車線のほかに将来構想としては新幹線二車線をも予定した、道路鉄道併用橋という立派なものである(図-2 参照)。

祖谷の蔓橋や 蜘蛛の巣のごとく
風も吹かんのに ゆらゆらと

明治のころまではこの粉ひき唄にあるような、蜘蛛の巣のように揺れやすい粗末な吊橋しか架けることを知ら

ず、また終戦のときまで橋脚無しでは200mをとばすことのできなかつた日本の橋梁技術が、ついにこれだけのものを造るまでに至ったのである。しかも調査計画の段階から設計、製作、架橋と、すべてを日本人だけの力でやっていた。

世界的にみても現在これだけの規模で、これだけの水準の橋を、これほどまでに集中して施工しているところはない。

次いで第二の理由として挙げるべきものは、この本四架橋が培った日本の技術を、国際的なひのき舞台で存分

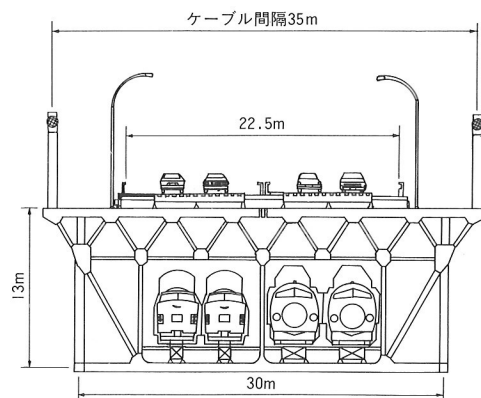


図-2 本四瀬戸大橋断面

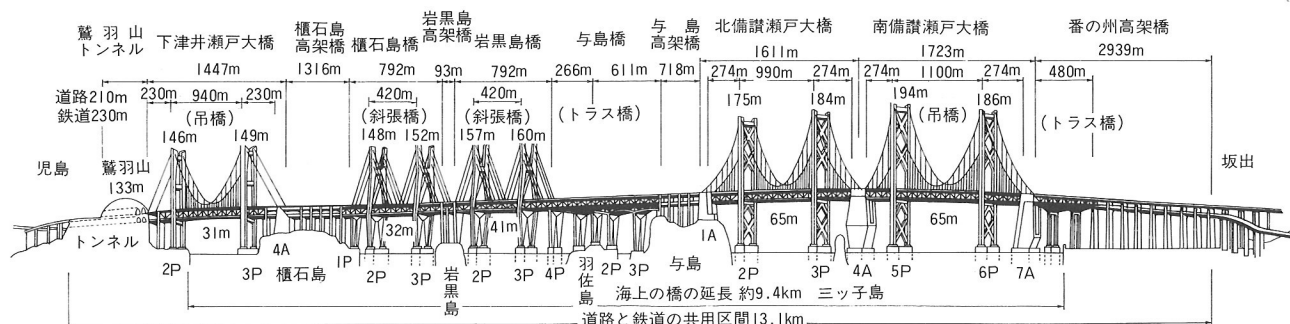


図-1 本州四国連絡橋 児島・坂出ルート「瀬戸大橋」

提供：財団法人海洋架橋調査会

に發揮してみせた、第二ボスポラス橋(正式にはFatih Sultan Mehmet Bridge)の竣工である。

中央径間1 090m, 上下各4車線合計8車線, その車道の両側にそれぞれ2.8mの歩道を有するという立派な吊橋が, 同じく1988年の6月, アジアとヨーロッパを結ぶ架け橋として見事に完成をみた。

以上に述べた本四の瀬戸大橋と第二ボスポラス橋, この二つだけをもってしても1988年という年が, 橋梁技術史上に特筆されるべきものであることは間違いない。ところが実はこの第二ボスポラス橋には, セバーン橋のアンチテーゼといったもう一つの大きな意味があつて, この橋の竣工を契機に, セバーン橋以来の世界の吊橋の流れが再び大きく変わったという事実がある。そしてこれこそ, 1988年を特筆すべきものであるとする第三の理由なのである。

2. セバーン橋にみる技術革新とその泣きどころ

1966年にイギリスで竣工をみたセバーン橋については, いまさらここで蛇足を付け加えるまでもなさそうだが, やはり順序として一言触れておくことにする。

セバーン橋が架けられるまで, 世界の吊橋の主流は北アメリカであつた。そこではタコマ橋の事故に懲りて, 吊橋は重厚な補剛トラスと重いコンクリート床版を採用した, 非常に頑丈なものとなつていた。

こうした北米流の吊橋を真っ向から否定し, ご存知のように吊橋から補剛トラスを不要とし, 再び軽量化の方向へと向かわしめたのがセバーン橋であつた。

図-3に掲げた一般図に示されるように, 補剛トラスで風を吹き抜けさせるかわりに, 流線形の箱桁を採用し風の流れもスムーズにして抵抗を減らした。そして鉛直ハンガーを斜めにしてトラス状に組んだ。これはロープのヒステリシスを利用して振動時のエネルギー減衰を高め

るとともに, 構造系としての剛性をも向上させようという新工夫であつた¹⁾。

それはまことに素晴らしいアイデアであり, その優れた経済性とあいまって以後世界の吊橋を一変させた。すなわちアメリカ流の大きな補剛トラスはごく特殊な場合を除いて姿を消し, 軽い流線形箱桁で補剛された, いわゆるセバーンタイプの吊橋が一世を風靡したのである。

だがこの素晴らしい技術革新であつたはずのセバーン橋にも, やがて大きな問題が内在されていることが明らかになった。それはまず斜めハンガーの破損という形で報告されたが, ことはそんななまやさしいものではなく, 吊橋全体にわたる, 構造的および材料的な疲労としての全貌が明らかになったのである²⁾。

セバーン橋の急速な疲労の原因を斜めハンガーにありとしたホンベルク博士らの指摘と, それに対する設計者フリーマン・フォックス社側からの反論。こうした論争はいずれも大変興味深く, またそれなりに示唆に富んだものであつたが, ただどうもそこにはもっと本質的な問題, すなわち吊橋における自重, 質量といったものの役割が忘れられているのではないかというのが, 当時の筆者の考えであつた³⁾。

恩師の平井敦東大名誉教授にご相談してみたところ, 先生も全く同じご意見だということがわかり, そこであらためて二人の考えを「質量付加式吊橋の提案——セバーン橋の問題とその対策」⁴⁾という論文にまとめ, 英訳したうえでホンベルク博士や, フリーマン・フォックス社のブラウン博士に送り届けた。

3. ドクター・ブラウン

平井先生との連名で用意した論文を送り届けておいたうえで, 1984年6月, 日本を発ちフリーマン・フォックス社のブラウン博士, そしてそのライバルとみなされる西

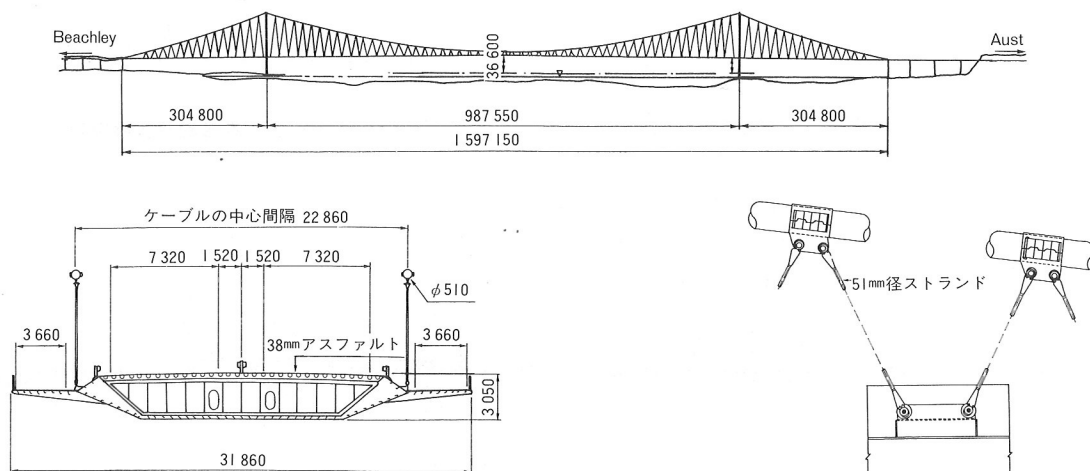


図-3 セバーン橋の補剛桁と斜めハンガー

独のホンベルク博士らと意見を交わした折の様子については、帰国の後「橋梁と基礎」誌上に報告したとおりである⁵⁾。

ギルバート・ロバーツ卿の高弟として、セバーンや第一ボスポラス橋の設計に参画したブラウン博士は、当時はごく近い将来に、フリーマン・フォックス社の最高責任者(シニア・パートナー)になるであろうと評判の高い実力者であった。当然第二ボスポラス橋の受注活動でも中心的な存在で、精力的に活躍されている最中であつたと考えられる。

それだけに博士は、セバーン橋に関する技術的な批判に対しては、ライバルたちの政治的な中傷だとして一歩も退かぬかまえてあつた。私たちの「セバーン橋は少し軽く造りすぎたのではないか——吊橋の自重、質量の果たす役割を忘れたのが原因ではないか」という意見に対しても一切耳を貸さず、そんなことは無いと言い切って、もはやそれ以上私たちには言葉をはさませず、一人でしゃべりまくっていた。

こうなると、もうとても私たちの語学力では太刀打ちできるものではない。あとから平井先生と二人で、それだけ事はフリーマン・フォックス社にとって重大で、私たち二人に対しても、ブラウン博士は身構えていたのだろうと話し合ったものである。

このようなわけで、ブラウン博士と意見を交換するといった状態にはほど遠いものであつたが、それでも博士の言い分だけはしっかりと聞かされてきた。それは、

- (1) セバーン橋に対する批判は、ライバルたちの政治的な中傷にすぎぬ。
- (2) ハンガーの損傷は構造上の欠陥ではなく、むしろディテールの問題。斜めハンガーが本質的に悪いというわけではない。
- (3) 橋の疲労が進んでいるというが、それは現実の走行車輛が、設計時の推定を大きく上回ったことによるものだ。むしろ橋の管理者が、交通規制を行い制限すべきものであつた。

といったようなものであつた。

ところが現実のセバーン橋の方は、ブラウン博士のいうほど楽観的なものではなかった。文献5)に掲げた筆者たちの報告にもあるとおり、すでにこの時点でも満身創痍の感があり、その後、塔中に新たに別の塔を造るようなことを含めて、当初の橋の建設費の2倍半も要する大改修工事が行われている⁶⁾。

そのあげくに、やはりもう一橋セバーン川を渡る橋が必要だということになって、イギリスでコンサルタントの競争入札が行われることになったが、その参加資格者のリストの中からは、フリーマン・フォックス社の名前が削られていた⁷⁾。

このようなイギリス本国内における動きの中で、まずブラウン博士がフリーマン・フォックス社を辞めたという噂が伝えられてきた。

お気の毒に、博士はセバーン橋の責任をとらされたのかな——などと考えていたら、今度はそのブラウン博士が、個人的にトルコ政府に傭われて、第二ボスポラス橋の技術的な責任者として着任したというニュースが入ってきた。全くこれには、筆者たちもすっかり驚いたものである。

4. 第二ボスポラス橋にみる思想的な転換

もっとも考えてみれば、これはトルコ政府にとっても、ブラウン博士にとっても、まことに都合のいい話であつた。そして私たちとしては、セバーン橋でいろいろな事実を学んだに相違ないブラウン博士が、今度はその知識をいかにこの新しい吊橋に反映させるかということと、興味津々ということになった。

ご存知のように第一と第二ボスポラス橋は、同じ海峡に近接して架けられた、ほぼ同じスパンの吊橋である。補剛桁を流線形箱桁とし、サイドスパンを吊らないところまでそっくりである。

しかしながら第一ボスポラス橋が、設計思想的にはそっくりそのままセバーン橋のコピーであつたのに対して、新しくできた第二ボスポラス橋の方は、少なくとも二つの大きな点において、設計思想上の転換が行われていた。

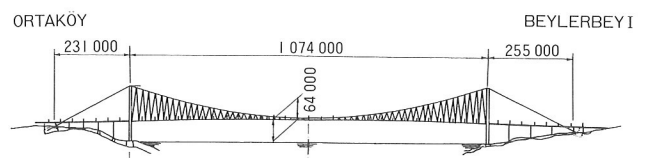


図-4 第一ボスポラス橋

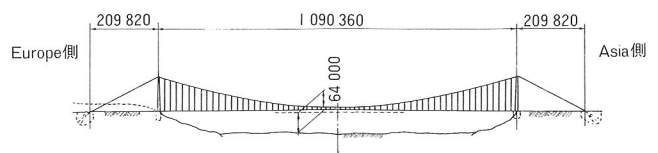


図-5 第二ボスポラス橋

では実際にどのような思想転換が行われたのか、それを検証するために先ず両橋の一般図、図-4、5を比較していただきたい。

一見して気が付くことは、第二ボスポラス橋においてあの特徴的な斜めハンガーが消滅して、普通の鉛直ハンガーに改められていることである。実はこの斜めハンガ

表-1 セバーン型主要吊橋の諸元

() : 箱桁本体鋼重

		南海大橋	セバーン橋	第一ボスボラス橋	第二ボスボラス橋	ハンバー橋	大島大橋
死荷重 (t/m/Br)	ケーブル+ハンガー	0.820	2.76	3.70	6.89	4.96	2.56
	吊構造	(2.86) 3.19	(7.09) 7.45	(8.02) 8.51	(12.81) 13.03	(7.66)	(8.8) 11.25
	舗装	0.994	2.10	2.33	2.69	1.67	3.43
	合計	5.0	12.31	14.54	22.61	14.29	17.24
車線数		道路2車線+ 両側歩道	道路4車線+ 両側歩道	道路6車線+ 両側歩道	道路8車線+ 両側歩道	道路4車線+ 両側歩道	道路4車線+ 両側歩道
径間割(m)		131+404+131 =666	305+988+305 =1598	(231)+1074+(255)	(210)+1090+(210)	280+1410+530 =2220	(140)+560+(140)
ケーブル間隔(m)		11.0	22.9	28.0	33.8	22.0	22.5
補剛桁全幅(m)		12.0	31.9	33.4	39.4	28.5	29.5
桁高(m)		1.65	3.1	3.0	3.0	4.5	2.2

一こそは、流線形箱桁断面とともに、フリーマン・フォックス社が世に問うた二大技術革新の一つであり、ブラウン博士が筆者や平井先生の前で、こちらの口を封じてまでも弁護してやまなかったものである。それが、なんとも見事なまでに姿を消してしまっている。

次に外見的にはわからないが、いま一つ大きく変わっているものに死荷重がある。これはまず表-1の「主要吊橋の諸元」で比較していただきたい。

死荷重は橋軸方向単位長さあたり(t/m/Br)として示されているが、第一と第二ボスボラス橋では、全体で14.54tから22.61tへ、箱桁本体の鋼重だけでも8.02tから12.81tへと、大きく増えている。

もっともこれだけでは、6車線から8車線へという幅員の差もあるだけに、一概に比較できぬのではないかという疑問もある。そこで箱桁本体の鋼重を単位面積あたりで計算して、その結果をまとめたら図-6のようなものとなった。

ざらんのように南海大橋から始まって、セバーン橋、ハンバー橋と、同じような流線形箱桁で補剛された吊橋の鋼重は、いずれもほぼスパン長に比例したものとなっている。第一ボスボラス橋も、少し軽いようには見うけられるが、同じような傾向の中にあるものということができよう。

ところがその中で、日本の大島大橋と第二ボスボラス橋だけは明らかに特異値で、この傾向から大きくかけ離れたものとなっている。

実は大島大橋と第二ボスボラス橋は、いずれもセバーン橋の問題が世間に知れわたり、いろいろとその対策が議論されている最中に施工されたものであった。すなわちこの二橋は、いわばセバーン橋のアンチテーゼであり、セバーン橋で明らかとなった失敗を、何とかして克服しようという配慮の上に施工されたものである。

その結果としてこの二つの吊橋において、セバーン橋以来の傾向であった軽量化路線は否定された。代わって吊構造部の鋼材を増やすことによって、質量付加の方向

箱桁鋼重/(ケーブル間隔×橋長)

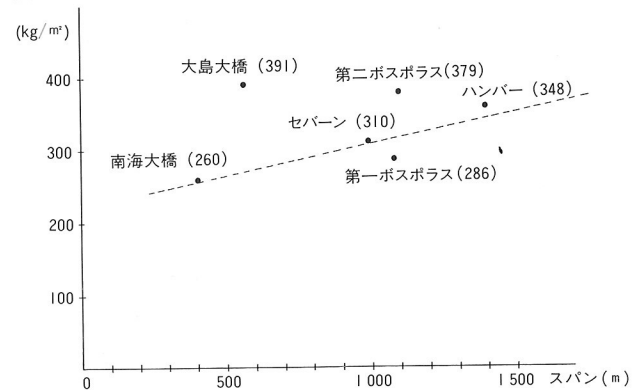


図-6 流線形箱桁補剛吊橋の鋼重

へと大きく思想転換が行われたのである。

5. ハンガーの鉛直と斜めの差と質量

以上にみてきたように、セバーン橋以来の軽い流線形箱桁と斜めハンガーの組み合わせという傾向を、第二ボスボラス橋や大島大橋は大きく変えてしまった。形こそは変わらぬが補剛桁はより重いものにされ、斜めハンガーは鉛直ハンガーへと改められた。

こうした最近の傾向が妥当なものであったかどうかを調べる意味で、手許にあるデータで斜めハンガーと質量の差を、鉛直方向だけではあるが計算してみた結果が図-7である。

図中の説明で D_1 荷重とあるのは、第一ボスボラス橋のケーブルを含めた全死荷重(570kg/m^2)であり、それに対して第二ボスボラス橋の方を、 D_2 ($670\text{kg/m}^2 = 1.18D_1$)とした。計算はケーブル間隔を第二ボスボラス橋に統一して行なった。使用プログラムは汎用プログラム NAS-TRANである。

結果は要約すると、次のようなことになる。

- (1) 斜めハンガーを鉛直ハンガーに変更することによって、死荷重が同一の吊橋ではその剛性が確実に低下する(たわみも曲げモーメントも大きくなる)。

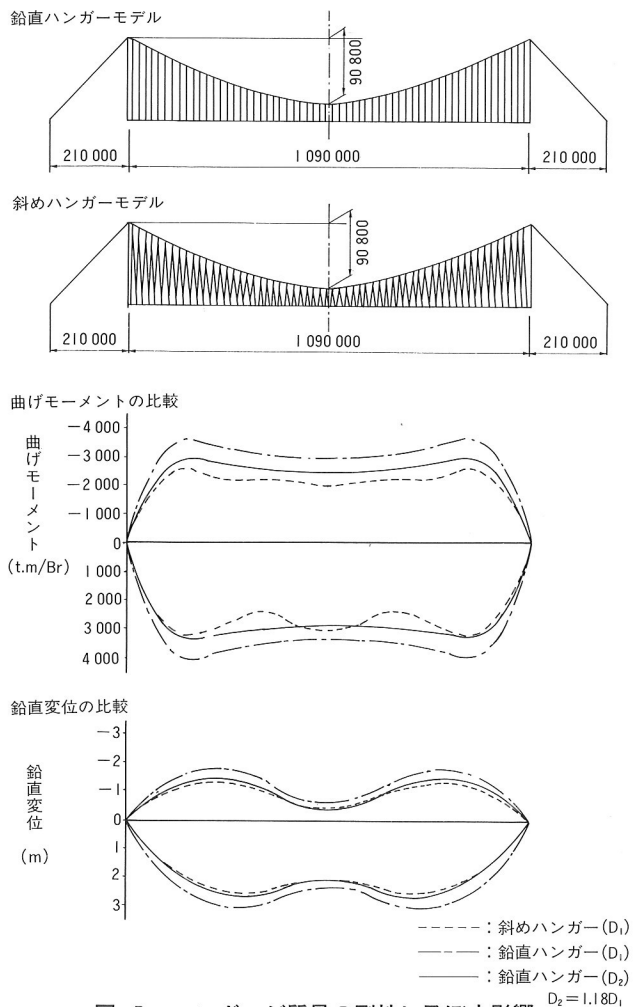


図-7 ハンガーが質量の剛性に及ぼす影響

(2) 死荷重を第一ボスボラス橋 D_1 から、第二ボスボラス橋 $D_2 (=1.18D_1)$ まで増加させることによって、ハンガーを斜めから鉛直へ変更したことによる剛性の低下は、ほぼ回復される。すなわち、たわみや正の曲げモーメントに関してはほぼ完全に回復されており、また負の曲げモーメントに関しても、低下した分の半分以上が回復されている。

図-7はまさにこのことを裏書きするものであり、こうしてみると第二ボスボラス橋においては、ハンガー形状の変更によって低下した吊橋の剛性は、補剛桁の鋼重を増すことによって補われたと考えられるのである。

実はこのことは、既に筆者が平井先生とともに、当時のブラウン博士やトルコ政府の技術者たちにアドバイスしておいたことである。その折に準備し、手渡した小論の中で、筆者たちは次のように提言していた。

「セバーン型の流線形箱桁断面を採用した時点で、吊橋の自重の持つ意味に注目しなかったことは残念なことであった。そしてこのような軽い吊橋を安定させようとして斜めハンガーを採用したことは、より一層事態を悪化させてしまったようである。

実際には、自重さえ増してやれば、斜めハンガーなどは不要であったと思われる。むしろ、流線形箱桁プラス質量付加という組み合わせが、吊橋としては構造的にも経済的にも、最も有利なものとなるべきであったと、現在筆者たちは考えている。」⁴⁾

6. セバーン橋以来の流れが変わった

1984年6月18日、平井先生とともにロンドンのフリーマン・フォックス社のオフィスを訪ねた折には、私たちの意見には耳を貸そうとはしなかったブラウン博士が、結果的には斜めハンガーを鉛直ハンガーに改め、吊構造部の死荷重を増すという、まさに筆者たちが提案したとおりの設計変更を行ったうえで、第二ボスボラス橋を完成させた。

ここに、セバーン橋以来の世界の吊橋の流れは、それを世に出した中心的な技術者の一人である、ブラウン博士自身の手によって大きく変えられたのである。

筆者たちは今もって、値段の高い鋼材で死荷重を増やすよりも、安価な別の材料、たとえばコンクリートなどで増やすほうが有利だと考えているが、いずれにしてもこの第二ボスボラス橋でなされたことは、設計思想上は吊橋における質量付加方式への転換以外の何ものでもなかった。

1988年に入って、わが国では賑々しく祝われた本四瀬戸大橋竣工の興奮もようやくおさまったころ、今度は海に向こうから、第二ボスボラス橋竣工のニュースが伝えられてきた。そして6月30日付のニュー・シビル・エンジニア誌は、カバーストーリーとしてこの吊橋をとりあげた。そこにはブラウン博士が、写真とともに次のように紹介されていた⁸⁾。

「この架橋工事の施主はトルコの道路局であり、施主より委嘱されて現場の総指揮をとったのが、技師ビル・ブラウン博士であった。博士の指揮下に入って、コンサルタントのフリーマン・フォックス社と、そのトルコ側のパートナー、ボテック社が現場の監督にあたった。

ブラウン博士は、もともとフリーマン・フォックス社の役員であったが、第二ボスボラス橋の計画を樹てた段階で体調を崩して、ついに同吊橋の設計が完了するまで職場に復帰がかなわなかった。

その後あらためてフリーマン・フォックス社内で、第二ボスボラス橋の現場監督にという話が持ち上がったが、彼はそれを断ってフリーマン・フォックス社を辞め、かわりに直接トルコ側の施主に働かれて現場の総指揮を委嘱された。ブラウン博士に寄せられたトルコ側の信頼が、それほどまでに高かったということであろう。

第二ボスボラス橋の設計は、かくしてブラウン博士

の手によって修正が加えられることになったが、それでもまだ全体的にみれば、フリーマン・フォックス社の設計思想が色濃く残されている……。」

ブラウン博士が体調を崩した、病気になったというくだりで、筆者はかつてのティ橋を架けたトーマス・ブーシヤ、タコマ橋のレオン・モイセイフのことを思い浮かべていた。この二人の技術者は、自分が架けた橋が壊れるという不運にあってから、いずれも一年あまりしか生きながらえることはなかった⁹⁾。

してみると、強気の発言を繰り返していたあのブラウン博士も、内心ではやはり病を得るほどにまで苦しんでいたということなのであろうか。

それにしてもフリーマン・フォックス社で、現場の責任者になれと言われたら断って、あらためてトルコ政府に傭われたというんまづが面白い。うがった見方をすれば、次期社長と目されていた実力者が、地方の現場に出ろといわれてプライドが許さず、辞表を叩きつけたようなものである。

といって、これまでの実質的なプロジェクトの推進者なので、施主のトルコ政府の方で救いの手をさしのべたというところであらうか。

ブラウン博士の方も、フリーマン・フォックス社を離れることによって、はじめて軌道修正が可能になるところもあった。それは斜めハンガーの廃止と質量付加方式への転換であって、セバーン橋を世に出したフリーマン・フォックス社の内にあるのは、メンツにかけても筆者たちの意見に従うとは言えなかったに相違ない。

かくして第二ボスポラス橋は、同じようにフリーマン・フォックス社の設計でありながら、ブラウン博士の手によって二つの大きな点において重要な修正が加えられて、第一ボスポラス橋とは設計思想上に大きな距たりを持つものとなった。ここに世界の吊橋の流れはあらためて大きくその方向を転換したのである。

斜めハンガーと軽量化への訣別——それはセバーン橋以来主流となった設計思想への反省であった。吊橋における質量の意味があらためて問い直され、今後は必要な剛性を必要な死荷重によって与える、すなわち質量付加方式へと吊橋の流れが変わる、そのまさにターニングポイントに第二ボスポラス橋は位置することになった。

ちなみに質量付加式吊橋に関するこれまでの研究や成果については、当社の技報も含めていろいろな機会に発表してきたので、あらためてここで繰り返すことはしない¹⁰⁾。

ただこの間に、アメリカ合衆国をはじめとする幾つかの国で特許が与えられたことと¹¹⁾、当社中央研究室の米田昌弘主任研究員が、質量付加を含んだ研究の成果で、東京大学から学位を授与されていることを付記しておく

たい¹²⁾。

参考文献

- 1) Sir Gilbert Roberts: The Severn Bridge—A New Principle of Design, International Symposium on Suspension Bridge, Lisbon, 1966.
- 2) Flint and Neil Partnership: M₄ Severn Crossing, Structural Feasibility Study (Interim Report), 1982, 10.
- 3) 拙著: 橋梁技術者の忘れ物——セバーン橋の問題とその対策, 橋梁, 1984, 2.
拙著: セバーン吊橋の栄光と悲劇—質量付加方式の提案, 橋梁と基礎, 1984, 4.
- 4) A. Hirai and T. Kawada: Proposal for Suspension Bridge with Additional Mass—A Solution for the Severn Bridge Problem, Kawada Technical Report, Vol. 4, 1985.
日本語の題は本文にあるとおり。
- 5) 平井・川田: 世界の吊橋で今何が起っているか——セバーン, ボスポラス, ゴールデンゲート, 橋梁と基礎, 1984, 10.
- 6) Strengthening Severn Bridge, New Civil Engineer, 3 January 1985.
- 7) Top firms knocked out of Severn Bridge job, New Civil Engineer, 6 August 1987.
- 8) Bosphorus double take, New Civil Engineer, 30 June 1988.
- 9) 拙著: だれがタコマを墜としたか, 建設図書, 1975.
拙著: ボーモンの卵——ティ橋落橋事件の真相ほか 2 編, 建設図書, 1987.
- 10) 拙編著: 現代の吊橋, 理工図書, 1987.
本書の参考文献には、一応質量付加に関してこれまでに発表された論文や研究の成果が網羅されている。
- 11) United States Patent: STREAMLINED BOX GIRDER TYPE SUSPENSION BRIDGE, Patent Number; 4,665,578.
Date of Patent; May 19, 1987.
- 12) 米田昌弘: 吊形式橋梁の固有振動特性と風による振動に及ぼす構造的要因の影響に関する研究 (学位請求論文), 昭和62年11月。