特集

本四架橋に向けた耐風技術の変遷（個人的な係わり）

Primal Progress of Wind Resistant Design for Honshu-Shikoku Bridges

成田信之*

Nobuyuki NARITA

1. はじめに

編集担当の平野先生より、培われた技術の変遷と本四での集大成をおこなうようにとの執筆依頼が“断るな”との注釈付きで頂いた。それほど大きな課題について執筆する自信もないし、また、怪しいことを書きそうで心配である。そこで、個人的な係わりに限らせていただきたいと思います。いずれにしても、資料の再調査もせず、個人の記憶に沿って筆を進めるため、特に数値に関しては誤りが多いのではないかと不安であるが、文脈をご理解頂くことでお赦しを頂きたい。また文末には、これからの橋梁の維持管理についての考えを述べたいと思う。

2. 最初のかかわり

筆者が長支間の道路吊橋を知ったのは、昭和35年に北九州市の洞海湾に架けられた若戸大橋(89+367+89m、平成2年に4車線に拡幅)の風洞実験を通じてである。当時、昭和15年11月に竣工から僅か4ヶ月後に強風で落橋したタコマ橋をニュース映画で観て、戦後に論文を書かれ、いわゆる換算曲げ剛性・捩れ剛性の考えを提案された恩師の平井 敦先生は若戸大橋の耐風設計を引き受けられ、後に中央大学に移られた岡内 功先生の直接指導の下で同期生2名とともに、卒業研究として風洞実験を手伝った。

実験に使用した風洞は航空学科所属のものを借用した。円形吹出し口(1.5 m)の開放型の回流式風洞で、冬の冷気のなか部分模型を吊るした測定部の上部に置かれた吊線式天秤で三分力を測定し、また、バネ支持

模型を使ってフラッタ試験を行った。また、アルバイターとしてY社に赴き、島田静雄先生が行われた本橋の架設計算の手伝いをした。

長大橋梁の風洞実験の実施例はわが国でも少なく、参考文献としては Prof. F.B.Farquharson が旧タコマ橋の落橋原因の追究と新橋の計画のために実施した部分・全橋の風洞実験結果を取りまとめた4分冊からなる報告書が唯一のものであった。

卒業後建設省土木研究所に勤務したが、その頃になると本州四国連絡橋の架橋計画も実現に向けた調査研究が具体的に動き始め、その業務の一環として再び若戸大橋に関係することとなった。本橋については竣工時の動的構造特性すなわち固有振動数と減衰特性を実測した。それまで吊橋など柔形式橋梁の動特性は、山間地の中小橋について人力加振によって得られた微小振動から得られたものが大部分であった。若戸大橋の場合は、交通開放直前の機会を捉えて自衛隊のトラック群による静的載荷試験と2対の不均衡重錘を鉛直面内に回転させる方式の起振機による動的載荷試験が行なわれた。その結果から、本橋の補剛トラスが大変大きな捩れ剛性をもっていることを知らされた。

若戸大橋のほかにも国内の中小支間の吊橋や斜張橋について、特別に製作した起振機を用いて振動特性を計測して歩いた。その結果、振動減衰特性は橋梁それぞれの架設条件に大きく影響されて一定のものでなく、また気温の変動の影響も受けるものであることが分かった。そこで、耐風設計基準には安全性を考慮して小さ目の値を採用した。

* 鋼管杭協会 専務理事
Administrative Director, JASPP

若戸大橋の風洞実験と実橋実測で長大吊橋の勉強をさせられたが、そのあいだの時期すなわち大学院時代には、列車走行時の吊橋応答測定実験にも参加した。秋田県能代の近傍に架設された鉄道吊橋を木材搬出用のトロッコ列車が通過するときの振動を計測するもので若き日の伊藤 學先生などと過ごした。秋田の方言が聴き取れないために列車の通過時刻が判らず、計測準備に困ったことを記憶している。

その後、本四架橋の計画調査にも参加させて頂いた。当時、関係自治体による本四架橋計画の誘致活動は盛んで、神戸・鳴門ルート、宇野・坂出ルートそれに尾道・今治ルートの各ルートは個別に調査活動を行っていた。昭和34年の夏に香川県の依頼を受け、後に武蔵工大に移られた西脇威夫先生を中心に、橋梁研究室のメンバーは県庁の一室に缶詰めになり、40日ほどをかけて宇野・坂出ルートの計画設計をおこなった。設計の実経験の全くない筆者は指示されるままに懸命に手動計算機を回した。時間的な制約もあり構造形式別に代表的支間の橋梁を2、3概略設計し、あとは内挿して材料・寸法を推定する方法を採った。このことは筆者にとって貴重な経験となった。本四連絡橋の事業が完成した現在、機会があれば実橋の数値と比較してみたいと西脇先生とも語り合っているが、未だ実現していないのは残念である。

3. 土木研究所でのかわり

建設省に就職する際、現場で仕事をしたいと業務の希望を提出したが、配属先は土木研究所であった。そして入所1,2年の間は応力凍結法を用いた光弾性実験によるダムの応力解析や道路橋の耐震設計の手伝いなどをして過ごした。その後本四連絡橋の建設計画は大きく動き出し、所属の構造研究室は長大吊橋の耐風と耐震の問題に専念することとなった。台風と地震に耐える中央支間1,000 mの吊橋の建設を可能とせよというのが最初の命題であったように記憶している。どうやら若戸大橋の耐風設計などを齎っていたのが配属の理由だったのかも知れない。

初期の段階では、耐風問題の実験は大学への委託研究で済まし、専ら文献調査を進めた。当時、アメリカでの吊橋を中心とした長大橋梁建設の時代は既に頂点を過ぎており、新規なものはフランス・イギリス・デンマークなどヨーロッパに見られた。設計風速とガスト応答の研究に先進的な業績をあげられていたのを知り、厚かましくも学位論文のコピーの送付を依頼した Prof.

A. G. Davenport, セバーン鉄道橋に取り付けた自然風の鉛直迎角観測機器についての議論をした Mr. C. Scruton などを思い出す。特に Mr. C. Scruton にはその後の留学に際して大変世話になった。

さて、建設省と日本国有鉄道からの委託を受けて土木学会に昭和37年1月に「本州四国連絡橋技術調査委員会」が発足し、昭和38年1月にはその下部組織として「耐風設計小委員会」が設置されて本格的技術検討が開始された。小委員会には土木・建築・気象・航空・電気等の分野から専門家を迎え、昭和40年5月には第1次報告書を取りまとめ、付属資料として「耐風設計指針(1964)および解説」を上梓した。こうして本州四国連絡橋の耐風設計に関してよるべき基準を示すと共に、解説書も作成してその時点での諸研究の結果を総括して指針の内容の基礎的な考え方を明らかにした。耐風設計基準は研究の進展に合わせて順次改訂され、実橋の設計に生かされた。とはいえ、当初は強風の観測記録も満足なものがなく、兵庫県垂水に建設された気象観測塔(塔高80 m)に台風が接近するたびに観測小屋に泊り込み、強風の吹き荒ぶ中で矢羽根式風向計(パイペーン)や超音波風速計を用いて風速の鉛直分布、風の鉛直迎え角、ガストなどの測定をおこなった。その成果は初期の設計風速や鉛直迎え角の基準化の基礎資料を提供した。設計風速については海上部での観測値がないため、気象官署と観測船の風速比を気象官署のそれに乗じて決めるといった方法を探ったりもした。こうして3つのルートの設計の基本とする風速は異なった値を採ることとした。

因みに、道路橋示方書に規定されている設計風荷重は島嶼も含めて一定値を採用しているが、本来、設計風荷重は風速の再現期待値、構造物の耐用年数、非超過確率、構造物の規模・構造特性等々数多くの因子を考慮して決定されねばならず、それらの基本となるものは架設地点における風速の再現期待値である。そこで、全国の163気象官署の観測資料を基に再現期間20,50,100年の10分間平均風速と瞬間風速の再現期待値を算定した。その結果、地域によりその差が大きいことが分かった。特に最近では地球環境の変化の影響のためか、従来の統計値が単純に適用し得ない現状になっているようにも思われるので是非とも再検討して、全国を一律に規定することの可否を見直す必要があると思っている。

その後、実験施設を持ち自前で実験を行わねばならないと言うことで、航空関係の研究者に教えを乞いな

から風洞施設を建設した。橋梁試験に専用すると言うことで「橋梁試験用風洞」と名付けた。プロトタイプの主構間隔を 30m と想定し、その 1/100 縮尺の模型を採用することとし、アスペクト比を 6 程度として、閉塞率、静圧勾配などの影響を考慮のうえ、最終的に測定部は 1.8 x 3.0 m で 30 cm の角切りのある縦長の断面とした。当初この風洞には一様風のみ特性を持たせ、将来的には脈動風も吹かせうる機能を持たせた設計としたが、筑波研究学園都市への移転計画が浮上する至り実現はしなかった。また、後に述べる英国での全橋試験に刺激されて、縮流胴を可傾式として吹き上げ・吹き降ろしの気流を吹かして、模型を傾ける必要のない状態で全橋模型実験の可能な吹き口 32 m の超大型風洞の計画も提案したが予算上の制約から実現しなかった。

架橋計画の調査研究は急速に進展したが、いきなり超長大橋梁が実現したわけではない。若戸大橋がわが国初の本格的道路吊橋として竣工してから本四連絡橋計画最後の明石海峡大橋に至るまでの 35 年間には、多くの吊橋あるいは斜張橋が架設され、いわゆる柔形式橋梁の耐風設計に関与して経験を積むことができたことは幸運であった。しかもその支間長は年とともに漸次伸張し、一橋ごとに設計の成果を実橋で確認しながらステップ・バイ・ステップで調査研究を進めることができたのは大きな自信ともなった。

上にも触れた Mr. C. Scruton はアメリカ型のトラス補剛吊橋に替わる箱桁補剛吊橋を案出し、セバーン橋に適用した立役者として Sir. Gilbert Roberts 卿とともに注目をされていた。氏は既に昭和 21 年頃から航空機の格納庫を利用してセバーン橋の全橋模型実験（この模型のプロトタイプはトラス補剛橋で最終的にはフォース道路橋に採用された）を実施した。ちょうどその頃、留学の話があり、多くの研究者がアメリカを選んだのに、筆者は英国を選び、科学技術庁の長期在外研究員選抜試験を受け、英国物理研究所に留学する機会を得た。Mr. C. Scruton は筆者の身元引受人を承諾してくれた。研究所滞在中はガスト応答の解析を試みたり、氏より指示のあった 3 自由度の部分模型実験（気流方向の自由度も持たせる）の実験装置を設計したりした。また、実橋梁の試験としてオーストラリアの代表的斜張橋である Lower Yarra 橋の風洞試験を行ない、Mr. D.E. Walshe と連名の報告書を取りまとめたりもした。研究所では建築物(New York の World Trade Center の近接建物の空力干渉)、煙突(デンマークとは異なり strake

を巻き付けることによる防振)さらには森林を越える気流など幅広い研究もなされていた。

当時はロンドンに居住する人も少なく、グローブナー通りにあった日本大使館の領事部に入り込み、関係者から楽しい話を聞かせていただいたり、旅券に旅行先を追記して頂いたりすることができた。そんな中、日本から企業・団体の方が研究所見学に訪れ、そのたびに通訳の役割を持たされた。確かに当時のイギリスは、航空機はアメリカに、また、船舶は日本に遅れをとる状態ではあったが、帰り際に多くの方が、“イギリスからは得るものはない”と言われたのは大変残念であった。

滞在中の来訪者に橋梁関係では小西一郎先生、坂田弘氏などが居られた。先生は Scruton の顔を見るなり、“昨年訪問してのち、どのような論文を出したか”と極めて単刀直入な質問をなされ、同席していた筆者は驚かされた。また、坂田氏は部分模型を使って非定常空気を測定する手法を編み出された直後で、ご自身の論文を披歴し解説して議論をされ、正に道場破りといった雰囲気を感じ出されていたのは懐かしい思い出である。

昭和 42 年に帰国した後は、国内の吊橋や斜張橋など長大柔形式橋梁の耐風設計に追われる毎日を過ごした。それらの中には、関門道路吊橋、名港西大橋、横浜港ベイブリッジ、平戸大橋などが含まれる。

当時の耐風設計の基本的な考えは Theodorsen の平板空気を基本としてこれを吊橋補剛トラス・桁に転用しようとするものであった。しかし、有限の厚みを持つトラスあるいは桁に Kutta の条件などが成り立つはずがない。

そこで、流線型断面の補剛けたを提案したが、気流の剥離点が測定風速ごとに変化し、3 分力係数が確定できない悩みが生じた。解析的に推定した剥離点にトリップワイヤを取り付けて強制的に剥離点を固定するなどの工夫をしたが、自信がなかった。そこで、乱流研究の第一人者であられた谷 一郎先生を訪れご意見を頂いたが、静止している場合でもよく解らないのに運動中の模型では推定の方法がない、と宣告されてしまった。最近、曲面を持った補剛断面を持つ橋梁（例えばメッシナ海峡計画案）が提案されているのをしばしば見受けるが、この種の問題は解決されているのか不安である。

仕方なくブラッフな断面を基本とし、運動方程式の外力項には実測の空気力値を取り込もうと考えるのが

人情である。先の坂田氏の方法もこの考えに沿ったものであろう。すでに航空機分野では風路内で模型を加振して非定常空気を測定しようとする幾つかの手法が提案されていたが、作用空気に比して圧倒的に大きい模型の慣性力を如何にして除去し、空気力の測定精度を上げるかが問題であった。坂田氏は慣性力を電気回路で除去する方法を採用した。筆者は玩具の“弥次郎兵衛”からヒントを得て、機械的に慣性力を除去する方法を用いた。この方法は当初はヒービングを対象としたが、後にはピッチングにも拡張した。吊形式橋梁の桁形式補剛構にも発生する例が見られるようになった風琴振動の対策立案のためにも、微小空気を正確に測れる計測装置は有力な武器となり、また、完成系のみならず、架設系の耐風性もストリップ理論より検討することが可能になった。

話は反れるが昭和40年代にわが国では橋梁の建設が活発に行われたが、当時は競争設計が盛んな時代であり、できるだけ鋼重を減らすことに注力され、十分な剛性を持たない橋梁が生み出された。その結果、比較的低風速領域で橋梁部材(例えば下路ランガー橋の腹材など)の振動問題が発生し、時には部材の疲労破断などの事故も発生した。いわゆる風琴振動である。その対策として部材の剛性の増加、断面形状の改善、さらには振動減衰性の付加などの手段が用いられたが、その際にも非定常空気力測定装置は大きな威力を発揮した。

4. 大型風洞と全体模型実験

周知のように、長大吊形式橋梁の耐風性は吊構造部の部分模型を用いたいわゆる部分模型試験で確認するのが一般的な手法であり、すでに紹介したように全体模型を用いた本格的な風洞実験は Prof. F.B. Farquharson によるタコマ橋についてのものと、Dr. R.A. Frazer と Mr. C. Scruton が昭和21年から6年間に亘り格納庫で行った実験のみであった。吹き上げあるいは吹き下げ風の効果を知るために、前者では縮流胴の終端部に翼列を配置することにより、また、後者では風洞風は水平にしか吹送しないので風に対する迎え角は模型全体を傾けて付け、そのために発生する重力の水平成分の影響はばねによって打ち消す方法をとった。本四架橋事業が進捗して対象橋梁が漸次長大化し、明石海峡大橋の建設が視野に入る頃には完成系のみならず、架設系の耐風性を確認する必要に迫られた。そこで、すでに述べたように研究室では当時の計画中央支

間1500mを念頭に縮尺1/100模型用に吹き口寸法32m幅の超大型風洞を建設しようと計画した。しかも新風洞では縮流胴と拡散胴を可動として、風洞風に傾斜風を発生できるように工夫をした。しかし、諸般の事情から実現せず、幻の計画に終わった。

その後明石海峡大橋の中央支間は一挙に1990mに拡大されたが、それに伴い実施した実験では、部分模型と全体模型の結果の乖離が生じた。その原因のひとつには全体模型の縮尺比が小さくなるために幾何学的ならびに力学的な相似に難点があったことによる。そこで、当時部分模型の最小縮尺比である1/100と同程度の規模の全体模型を収容できる測定部を持つ風洞の建設を計画し、事業主体の本四連絡橋公団と協議の上、建設省土木研究所の構内に測定部断面41x4mを持つ大型風洞施設を建設した。筆者は建設計画立案の段階で建設場所を土研構内に決定した時点で建設省を退官したので、本風洞建設の具体化、それを用いての成果、さらには、橋梁耐風設計の象徴的存在であった本施設のその後の消長については、ここでは触れないこととする。

5. あとがきに代えて

建設省土木研究所の勤務を終える少し前にニューヨークのマンハッタン周辺の橋梁群、とくに吊橋の見学の機会を持った。特別にお願いをして橋台内を見せて頂いた。理由は橋台には主ケーブルを通じて雨水が浸入し易く、橋台内は常に湿度が高い状態に置かれるため、どのような防錆方法を採用しているかを見たかったのである。その結果は予想通りの傷み方であった。一部を除いて大部分の長大吊橋は第二次大戦までに架設されたアメリカでは、ケーブル・ハンガーの腐食が問題になっており、その張り替えが新聞記事になっていた。こうした諸外国での経験はわが国でも注視しており、キメの細かい方法で対策が施されているのは周知の通りである。

一方、中小橋梁に目を向けると、最近では内外を問わずの疲労と腐食による破壊が大きな問題になっている。橋梁は他の公共施設とともに重要な社会的な資産であって、消耗品と考えるべきではあるまい。橋梁を消耗品と考えれば、次代に伝えていく資産とはならない。社会的な資産が積み重ねられる結果として、豊かに富んだ社会が形成され、初めて、美しい国作り、が出来るのである。橋梁は社会的な資産だが、同時に、私たちの時代の“しるし”でもある。こうして私たち

が生きてきた時代のしるしを大切に維持保全すること
なしに次々と抹殺せざるを得ない状況に迫りやっ
てい
る現状を、私は許しがたいと思っている。自然の四季
のうつろいに映える橋梁の素晴らしさを落ち着いて楽
しめる時代を取り戻したいと考えるのは贅沢すぎるも
のなのだろうか。

文末になったが、これまでご指導戴いた多くの先生、
および、ともに仕事に励んだ同僚・友人・後輩の方々
に心より感謝の意を表して筆を擱く。

平成 19 年 8 月 15 日 終戦記念日に記す