特集

橋梁技術発展への風工学の寄与：その略史 Contribution of Wind Engineering to Bridge Design

伊藤 學*
Manabu ITO

1. タコマ橋以前

強風が絡んだ構造物の最初の著名な事故は1879年、スコットランドの Tay 橋の崩壊である。前世紀においても J. Smeaton による設計風圧の提案はあったが、多くの実験に基づく風荷重の評価はこの事故以後のことで、少し後の Eiffel の風洞実験、風力研究所設立を含め、構造物に関連した風工学の黎明はこの頃と言えよう。

一方、19世紀初頭に誕生した近代吊橋も風による損傷例は多く、英国の Brighton Chain Pier 橋 (1836) など後々の Tacoma 橋崩落に似たスケッチが残っている。しかし、1855年、J. Roebling のナイアガラ鉄道・道路併用吊橋が剛性の大きなトラスおよび桁下からのステイクケーブルの採用によって長期供用に成功してからは、この種の問題はしばらく表に出なかった。

1883年、この Roebling 父子による Brooklyn 橋の完成は以後70年余に及ぶ米国の長大吊橋黄金時代の幕開けとなった。更に、20世紀に入り導入された撓度理論の実用化は活況に拍車をかけた。1937年以後はトラスに代わり軽快な、しかし空力特性の劣るプレートガーダーを補剛桁にもつ吊橋が出現、風による振動も小手先の対策でかわされ、研究者達の重大な関心を引き起こすには至らなかった。そして1940年、遂に当時世界第3位のスパン(853m)を誇った Tacoma Narrows 橋の崩落という大事故が発生した。その詳細をここで再録する必要はあるまい。直後に行われた調査の報告書においてもこの事故は ignorance の結果とされた。

2. 1940年から1960年

旧 Tacoma 橋の崩落は Fr. Bleich, D.B. Steinman など多くの著名な研究者、技術者の Bridge Aerodynamics という風工学における新たな分野への取組みを促した。完成時からこの橋の挙動の観測、研究を行っていた地元ワシントン大学の F.B. Farquharson は大型全橋模型風洞実験を含む精力的な研究を行うとともに、再建設案の検討に加わった。日本でも、平井 敦がこの事故から僅か2年後、大戦の最中に一連の理論的研究の最初の論文を公にした。

米国での一連の研究成果はその後の長大吊橋の設計や耐風性に問題のある既存橋の改修に役立てられた。たとえば、Bronx Whitestone 橋 (1939) ではセンタータイを設置、後年更にプレートガーダーにトラスを付加した。また、1951年強風で激しい振動を起こした Golden Gate 橋には下横構が追加された。

1950年 Tacoma Narrows 橋は再建され、その後1957年に完成した Mackinac 橋では、Steinman がフラッター限界風速無限大と豪語するに至った。わが国においても、初の本格的吊橋若戸橋の設計に際し、平井、岡内らにより風洞模型実験が行われた。これらの基本思想は風抜きが多い構造(トラス桁、グレーティング床、床と桁の隙間)、ねじれ剛性の確保、そして必要に応じセンタータイ、ダンパーなどの採用であった。

3. 1960年代の動き

1960年代は風工学が、とくに橋梁との関係において注目されるべき時期であった。まず、この頃西欧に移

* 名誉会員；東京大学・埼玉大学 名誉教授
Emeritus Professor, University of Tokyo & Saitama University

った長大吊橋建設の波は、英国において画期的な構造を生んだ。G. Roberts と W. Brown が 1950 年代に着想した流線形箱桁の Severn 橋 (1966) への採用である。この橋は斜吊材の採用と相俟って、格段の経済設計とスマートな外観をもたらし、橋梁界に大きな衝撃を与えた。しかしその後僅か十数年にして大幅な補修、補強を余儀なくされ、斜吊材は程なく見捨てられたが、流線形箱桁のアイデアはその後、斜張橋を含む長大吊形式橋梁の主流となった。

耐風構造に関する最初の国際シンポジウムが英国で開かれたのは 1963 年である。以後 4 年ごとに開催されることとなり、その後名も風工学国際会議と変わり、やがて国際学会の設立につながった。一方、1966 年にはリスボンで吊橋に関する国際シンポジウムが開催され、この中では耐風設計が重要なトピックであった。A.G. Davenport が、自然風の乱れによる構造物の不規則振動の研究から、ガスト応答を設計規準に取り入れる基礎を導いたのも 1960 年代であった。各国の各種構造物の耐風設計規準が整備されたのもこの頃である。橋梁に関しては、1967 年に公にされた本州四国連絡橋耐風設計指針 (土木学会) は、この種のものとしては世界初であり、その後研究の進展、技術の進歩に伴って改訂を重ねたが、後年長大橋時代を迎えた中韓両国にも大きな影響を与えた。

技術の進歩は新たな問題も生む。溶接構造の普及と材料の高強度化に伴って平滑かつスレンダーな部材が増えると、渦励振による疲労が無視できなくなった。1967 年以降、日本のいくつかの下路アーチ橋の吊材などでこれが問題となり、補強や螺旋ワイヤ付加が施された。渦励振は Forth 道路橋 (1964) の架設中の独立塔でも問題となり、塔頂からケーブルでコンクリートブロックを吊るすという対策が必要となった。

4. 1970 年代以降

1970 年代以降、斜張橋は形態多様化と長スパン化の両面でブームと言える状況となった。吊構造なるがゆえに耐風性が設計支配要因の一つとなるが、空力的付加物による対策が目立った。加えて、1986 年の名港西大橋を契機にステイカブルの雨/風振動が大きな話題となった。マルチステイシステムと PE 被覆の普及が生んだ現象である。各種ダンパーの開発や PE 管表面の工夫がわが国を中心に行われた。

吊形式橋梁の長大スパンへの挑戦は絶えることなく続けられ、その際耐風性は重要な鍵となる。現在世界

最長スパンの吊橋、明石海峡大橋の設計に当たっても多くの候補断面の風洞試験が行われた。この橋では架設上の制約もあってトラス構造が採用されたが、計画中のメシナ海峡吊橋では、3つの分離流線形箱桁を並列に結んだユニークな補剛桁で 3300m という超長大スパンを克服しようとしている。現在建設中の Stonecutters 橋 (主径間 1017m の斜張橋) や日本の将来の海峡横断吊橋計画は 2 箱桁形式であるが、分離箱桁のアイデアは前述の Brown がかねて主張していた。

橋梁の耐風性検討に風洞試験は必須のツールとして、性能、数ともに伸展を遂げた。部分模型、タウトストリップ模型、全橋模型はそれぞれ得失を勘案して使い分けられてきた。本四公団がつくばに設置した世界最大の風洞が撤去されるのは残念であるが、これら風洞の果たしてきた役割は大きい。他方、風工学における数値流体解析手法の発達も近年目覚しく、時間、費用の両面で風洞実験に近付きつつあると言われるが、自然風の中での複雑な形状の構造物の挙動を知るには、まだ当分風洞実験は欠かせまい。

橋の耐風設計プロセス自体は確立したかにみえる。フラッター解析も長大吊橋などでは変形を考慮した 3 次元立体解析も可能である。信頼性、精度は著しく向上した。他方、予備設計段階などでは各種の経験式、簡易式が提案され、データベースなどの情報も利用できよう。しかし、外乱、構造ともに複雑な橋梁の耐風設計では、いずれをとっても盲信は禁物で、工学的判断は欠かせない。構造物の空力特性からして、僅かな違いが微妙に結果を左右する。

以上述べたように、橋梁技術における風工学の役割は大きく、とくに風の作用が安全性を支配するフレキシブルな長スパン吊形式橋梁の発展は、風工学の寄与なくしてはありえなかったと言ってよい。