

ON THE BEHAVIOUR OF SUSPENSION BRIDGES UNDER WIND ACTION

平井 敦・岡内 功・宮田利雄

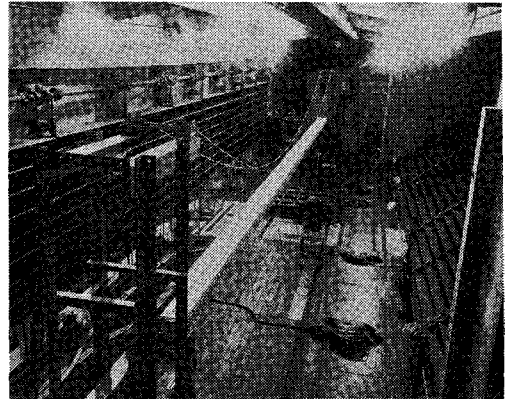
Tacoma 橋の落橋事故を契機とし、吊橋の耐風性の問題に関して新たな観点から研究が重ねられ、多くの成果があげられていることは周知のとおりである。しかし、これら諸研究の結論が必ずしも軌を一にしたものとはいがたく、課せられる設計条件の変化や新形式の吊橋の提案などもからんで、今後とも耐風設計の合理性や経済性を向上させるために研究の進展が要望されていることも強調されなければならない。この点に関して筆者らは、従来の研究の大勢が吊橋の風による自励振動現象に着目しているのに対し、その視野をより広げて強風下における吊橋の挙動を全般的に把握することが必要であると考え。また、吊橋の耐風性を検討するのにいまなお最良の方法として考えられている風洞実験に関しては、強風により吊橋に生ずる現象に対してその構造と風の作用の三次元的要因が強く反映することから、精度さえ確保されれば全橋模型による風洞実験によるのが最も望ましいと考えるものである。

以上のような見地から、筆者らは、ここ数年来各種形式の吊橋全橋模型に対し風洞実験を試みてきたが、その結果、(1) 横たわみ現象、(2) 横座屈現象、(3) 自励振動現象、の3つが吊橋の耐風性を支配する現象としてあげられることを見出した。もともと横たわみ現象については、Moisseiff の理論が、横座屈現象については筆者の一人である平井の理論が、また自励振動現象については Bleich の理論がそれぞれ基礎的理論として提示されている。したがって、これらの理論によって実験結果を数値的に検討し、あわせて吊橋構造部の断面形状や剛性、振動特性などの諸因子が上記3現象におよぼす影響を考察したが、本論文は以上の実験および考察結果について大要を述べたものである。

1. 風洞実験の方法

実験用風洞としては、東大土木工学科所属の、1.9 m × 16 m 扁平吹出口を有する風洞を主として利用した。この風洞は吊橋など長尺構造物の試験用として新設されたものであり、吹送可能最大風速は約 17 m/sec、風向の調節可能範囲は水平から ±10° にわたる。そのほかに、

写真-1 東大吊橋全橋模型用風洞内部



石川島播磨重工業技術研究所に所属する風洞(吹出口 1.2 m × 8 m)も併用している。

上記風洞の測定部に、吹出口全長をスパンとする単径間形式の吊橋全橋模型を設置し、その模型が風を受けて示す挙動、すなわち、補剛桁の変形あるいは振動状態などを風速と対応して観測した。実験された模型は、平板あるいはH型のように単純な断面の補剛桁をもつ模型や、形状、剛性とも実橋にできる限り忠実に相似させた模型など多種類にわたる。さらに、これらの模型に対しては、剛性や迎角などについて変化を加えた多くの実験をくり返した。なお、実験結果の検討に用いた空気力係数値などは別途製作した部分模型に対する風洞実験により求めたことを付記しておく。

2. 吊橋の耐風性を支配する現象

各実験ケースで得られた資料から風を受けた時の吊橋の挙動を総括するとつぎのようになる。

(1) 低風速域では、主として微小で不規則な曲げ振動をともないつつ、わずかながら横方向にたわむ。

(2) 風速を上昇させると、不規則振動の振幅と横たわみ量が次第に増加するが、さらに風速が高くなると終局的にはつぎの3つの状態のいずれかに到達して吊橋の破壊現象もたらされる。

- a) 横たわみが過大となる。
- b) 急激に大きな鉛直曲げとねじれの変形が連成して生ずる。すなわち、横座屈現象が発生する。
- c) 自励的振動が生じ、その振動が発達して振幅が著しく大きくなる。

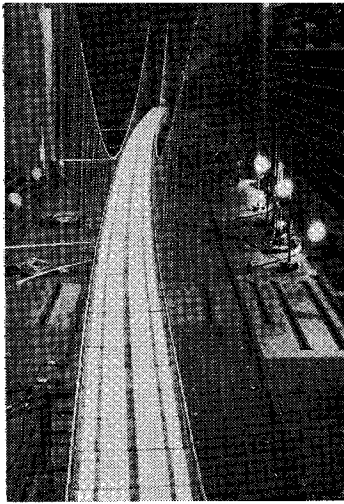
このような実験結果から、吊橋の耐風性は横たわみ、横座屈および自励振動の3現象に対する抵抗力によって決定されることを認めるに至ったが、どの現象が支配的であるかは、吊橋の剛性および振動特性、吊橋構造部の断面形状さらには迎角などによることが判明した。

3. 横たわみ現象

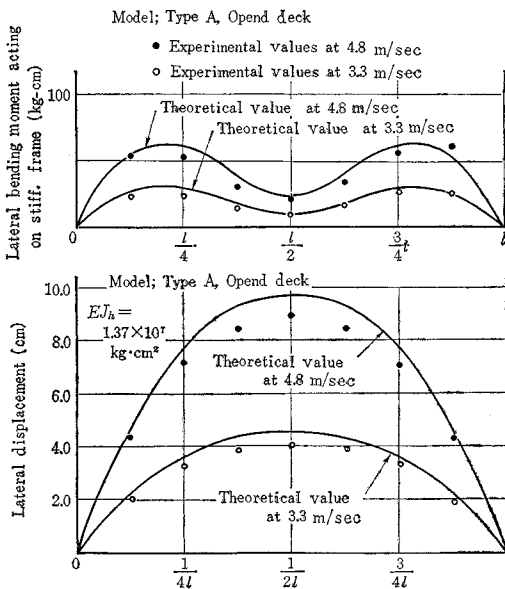
風速の増加とともに吊構造部が横方向にたわんでいく現象は、他の2現象が耐風性を支配した場合を含めてすべての場合にみられた現象である。しかし、横たわみが著しく大きくなって、これ以上風速を増加すると模型が破損する恐れがあり実験を打ち切ったケースの特徴は、一般的にいえば、横方向曲げ剛性が小さく、しかも橋床が開床構造の場合であった。

横たわみ現象に関して、吊橋の場合、他の形式の橋梁にくらべて異なるところは、ケーブルと補剛桁の横変位差だけ吊材が傾斜し、その水平分力によって補剛桁とケ

写真—2 横たわみ現象



図—1 横たわみ現象に関する実験結果の一例



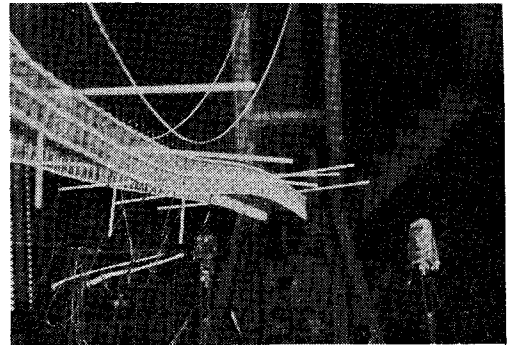
ーブルの間に荷重の伝達が行なわれることである。その結果、補剛桁に作用する横方向曲げモーメント、あるいは横たわみ量はスパンの中央付近で特に軽減される。これらの値のスパン方向の分布の実測例を図—1に示すが、吊構造部だけで風荷重を負担するとした時に想定される値にくらべて実験値はこれを大幅に下回り、ケーブルへの風荷重の移行が明確に認められている。

このような吊橋の風荷重による横たわみ現象については、L.S. Moisseiff が理論的解析の基礎を築いたことがよく知られているが、その弾性分配理論に対する Ellis の解法に基づく計算値を図—1に実線で示した。図—1における実験値と計算値の一致はおおむね良好と認められるが、こうした傾向は他のすべての実験においてもほとんど同様に認められており、Moisseiff の弾性分配理論が一応信頼するに足る結果を与えると考えられた。

4. 横座屈現象

ある風速に至ってはりの横座屈とほとんど同様の現象、すなわち、鉛直曲げとねじれ変形が急激に連成して生じ吊構造部が破壊の危険に頻する現象がいくつかの模型において観察された。その模型は大体において補剛桁のねじれ剛性にくらべ横方向曲げ剛性が大きく、また自励振動が起りにくい断面の場合であったといえることができる。

写真—3 吊橋の横座屈現象



吊橋の風圧による横座屈現象については、筆者の一人平井が、Tacoma 橋の事故直後の1942年に始めて発現の可能性を指摘したが、その際横座屈を生ずる限界風速を与える式を導いている。この式による計算値と実測値を比較して表—1のような結果を得た。

表—1によれば計算値がおおむね実測値に近い値を示すと認められるが、全般的には後者が多少大きい傾向が

表—1 横座屈限界風速の計算値と実測値の比較

模 型	A 型 トラス閉床	A 型 トラス開床	A' 型 トラス閉床	A' 型 トラス開床
限界風速 (m/s)	計算値 6.7	7.7	6.4	7.4
	実験値 7.1~7.3	9.2~9.4	6.7	8.0

あり、また、上記以外の一部の模型では、計算値よりかなり風速を上昇させても横座屈のみられないケースがあった。この最大の理由としては、平井の式ではケーブルへの風荷重の移行の影響を考慮していない点があげられ、この点で平井の式を再検討する余地が認められた。

5. 自励振動現象

模型の断面形や固有振動性状あるいは迎角に関連してかなり多数のケースにおいて、吊橋を崩壊に導くような大振動の自励的に発生することが認められた。こうしたケースは、閉床でしかもねじれ剛性の小さい場合、または充腹桁や充実率の大きいトラスなど補剛桁前縁で流れを阻止する面を大きく持つ断面の場合に多かった。

このような自励振動にはつぎのような特性が認められた。

- (1) 平板または充実率の小さいトラスを補剛桁とする模型が水平に近い風を受ける生ずるとき自励振動は、曲げとねじれの連成振動であって、振動数は曲げとねじれの固有振動数の中間の値を示す。
- (2) 充腹桁または充実率の大きいトラスを補剛桁とする場合、および平板または充実率の小さいトラスを補剛桁とする場合でも迎角が水平から離れたときにみられる自励振動はねじれのみの一自由度振動に近く、その振動数はねじれの固有振動数に近い値を示す。

これらの振動は、筆者らが若戸大橋の耐風性を検討するために実施した風洞実験の報告で指摘したように、翼の曲げねじれフラッターおよび失速フラッターの現象と酷似した性質を示す。それぞれの振動を発生した風速およびその際の振動数を、翼の曲げねじれフラッター理論を吊橋に応用した Bleich の理論にしたがって計算すると表-2 に示すような結果となった。

この結果から、前記の(1)の場合には計算値と実験値が比較的良好に一致し、(2)の場合にはかなりの差異が認められる。しかも、吊橋の自励振動に関して実用上問題と

表-2 自励振動の発振風速と振動数に関する計算値と実験値の比較

模 型	迎 角	発 振 風 速 (m/s)		振 動 数 (c/s)	
		計算値	実験値	計算値	実験値
平 板	-8°	7.6	5.3~5.6	2.02	2.25
	0°		7.5~7.7		2.06
	8°		4.7~5.0		2.45
充 実 率 の 小 さい ト ラ ス	-8°	4.3	4.0	1.40	1.50
	0°		5.6~5.8		1.32
	8°		3.7		1.45
H 型	0°	6.6	2.9	1.86	2.60
充 実 の 大 き い ト ラ ス	0°	8.6	5.7	1.69	2.11

なるところは、充実率の小さいトラス補剛桁が水平に近い風を受ける場合を除いて、発振風速が Bleich の理論による計算値よりかなり低下することである。したがって、補剛桁の断面選定にあたってはこの点を慎重に考慮しなければならないが、橋床にグレーティングを配置するなどして開床部を設けると上記自励振動の発生または発達をある程度抑制しうることが実験的に確かめられた。しかし、その効果は吊橋構造部の断面形状により微妙な差異があるので、風洞実験によって十分に調査しておくことが肝要であると認められた。

以上によって吊橋の耐風設計に際しては前記3現象に対して十分なる検討が必要と考えられ、さらに、できれば各現象に対する抵抗力を均衡のとれた形で保持させるよう配慮することが望ましく思われる旨結論された。

終りに、本研究にあたっては、日本国有鉄道、日本鉄道建設公団、建設省土木研究所の関係者各位、東大および中大橋梁研究室に所属された諸氏その他多数の方々のご協力を戴いたことを記し、厚く感謝の意を表する次第である。

〔 平井：正会員 工博 東京大学教授 工学部
 岡内：正会員 中央大学助教授 理工学部
 宮田：正会員 東京大学助手 工学部 〕

工 事 報 告 天 草 五 橋

調 査 編 ■ 1 章 調査経過の概要 / 2 章 主たる調査の内容 / 3 章 事業費償還計画
 設 計 編 ■ 1 章 下部工の設計 / 2 章 1号橋上部工の設計 / 3 章 2号橋上部工の設計 / 4 号 3号橋上部工の設計 / 5 章 4号橋上部工の設計 / 6 章 5号橋上部工の設計 / 7 章 座屈計算その他 / 8 章 特殊設計審議委員会および審美委員会
 施 工 編 ■ 1 章 1号橋下部工事 / 2 章 2号橋下部工事 / 3 章 3号橋下部工事 / 4 章 4号橋下部工事 / 5 章 1号橋上部工事 / 6 章 2号橋上部工事 / 7 章 3号橋上部工事 / 8 章 4号橋上部工事 / 9 章 5号橋上部工事 / 10 章 振動試験およびPC橋各種試験 / 11 章 工事用電力および照明設備事項 / 12 章 特記示様書および現場説明事項
 体 裁 ■ B 5 判 830 ページ、豪華箱入、8ポ2段組
 定 価 ■ 9800 円 (〒 200 円)
 申 込 先 ■ 土木学会