

ロンドンのミレニアムブリッジの振動問題と関わって

藤野 陽三*

1. はじめに

少し前のことになるが、2000年6月10日にエリザベス女王を迎えてロンドンのミレニアムブリッジ(写真-1)の開通式が行われたが、その際、想像すらしていなかったことが起きた。待ちかねた数百人の歩行者が通過した際、大きな横揺れ振動が生じたのである。その翌日もやはり歩行者が大勢押しかけると振動し、管理者は歩行者の安全を考え、結局、橋は閉鎖した。振動のために橋が閉鎖されるという例はこれまでにきわめてまれで、世界中の橋梁関係者だけでなく、イギリスはもとよりヨーロッパほかの一般社会でも大きな話題となった。日本のテレビでも報道されたので、おぼえている方もおられるかもしれない。筆者は、15年前に同様の原因で生じる橋の横揺れ振動を扱った論文を国際誌に出していたこともあって、アドバイザーと呼ばれ、向こうのエンジニアとこの問題について議論する機会をもった。

2. ミレニアムブリッジ

ロンドンでは、21世紀、すなわちミレニアムを記念して3つのプロジェクトが計画された。ミレニアムドーム、大観覧車と、ミレニアムブリッジである(写真-1)。最後のプロジェクトになるミレニアムブリッジについてはデザインコンペが行われ、イギリスが生んだ世界的建築家ノーマン・フォスターの提案が選ばれた。構造設計を担当したのは、著名なコンサルタントであるアラップ社である。

この橋は、テムズ河にかかっており、北にはセントポール寺院、南には発電所を改造して造られたテート美術館が位置している。形式としては吊橋であり、センターパンが144m、サイドスパンを合わせると全長333m(144+81+108)もあり、歩行者専用の橋梁としてはかなり長いといえる。サグが2.3mときわめて小さいケーブル構造を採用している。2本のケーブルの間を渡した骨組の上にアルミ製の床版を載せ、端部付近の床版はガラスで下が透け



写真-1 ミレニアムブリッジ (ロンドン、テムズ河)

てみえる。川の中にある2本の塔は人間の形をモチーフとした形状となっている。この橋の特徴は何といっても、その扁平さにある。エレガントではあるが、華奢であり、構造的に言えば柔い橋ということになる。その総工費は30億円程度とのことであり、平方メートルあたり250万円を超えており、きわめて贅沢な橋でもある。

6月の半ばであったと記憶しているが、夜、仕事しているとオフィスに電話が入った。アラップ社の技術開発部長からのもので、「ミレニアムブリッジで歩行者による横揺れ振動が発生し、閉鎖となった。今後の対策を考えねばならない。既往の文献を探したところ、あなたによる論文がこの問題に関する唯一の論文であった。相談に乗って欲しいのでロンドンに来ることはできないか?」というものであった。私はテレビをほとんど見ないので、この橋が揺れて閉鎖になったというニュースを見ていなかったこともあり、突然の電話に驚いた次第であった。

他の用事もあり、7月はじめにロンドンに行き、アラップ社を訪問し向こうのエンジニアと議論するとともに、閉鎖された同橋を見る機会をもった(写真-2)。



写真-2 閉鎖されたミレニアムブリッジ (2000年7月)



* Yozo FUJINO

東京大学 工学系研究科
社会基盤学専攻 Ph.D.

3. T 橋の振動

1980 年台の後半、ある知り合いのエンジニアから、関係した新設の歩道橋で歩行者による振動が問題になっているという相談を受けた。歩道橋の歩行者による振動というのは知られたことであつたし、ダンパーを設置した例があることも論文を読んだことがあつた。昔、フランスの橋梁で軍隊が行進して通過した際、鉛直振動が大きくなって、橋が壊れたという有名な話があるように、軍隊の行進のように歩調があつてると人の歩行力といっても馬鹿にできないのである。当然、この橋の振動も歩行者による鉛直振動だと思つたところ、驚いたことに、桁が横揺れ振動するという。信じられないところもあり、実際にその振動を体験して、水平振動が生じることを納得した。しかし、何故このような振動が生じるのかまでは、現地に行って体験しただけでは分からなかつた。

どのような振動かをまずは計測してみようとコンサルタント・製作者の方々や研究室のメンバーと桁の振動、ケーブルの振動を測定し、そのデータから分析を試み、併せて文献も調べた。歩行者による歩道橋の振動はやはり、渋谷の歩道橋のように問題となる例もいくつかあつたが、いずれも鉛直振動を扱つたものばかりであつた。いろいろ調べているうちに、スイス連邦工大のパーフマン教授の書かれた振動の本に、ゴルフ場の橋梁（鋼アーチ）で人がジョギングして渡ると横揺れするという例があり、横揺れ振動が過去にあつたことを知つた。

人間が歩くと、その歩調はおよそ 1 秒あたり 2 歩、すなわち 2 Hz の力が鉛直方向に働く（図 - 1）。歩道橋の鉛直振動の固有振動数がこの 2 Hz 付近にあると共振することがある。このことはかなり前から知られており、立体横断構造物設計基準にも、2 Hz 付近は避けなさいとの規定がある。人間は二足歩行をするわけで、歩くたびに重心が歩行方向に対して直角に幾分動く。この振動数は 2 Hz の半分の約 1 Hz となる（図 - 2）。理論的には橋梁の横方向の固有振動数が 1 Hz 付近にあると共振する可能性がある。確かに、この橋の水平横方向の固有振動数は 1 Hz に近く、実際の歩行者による振動も 1 Hz が卓越していたが、ただ、横方向の動き

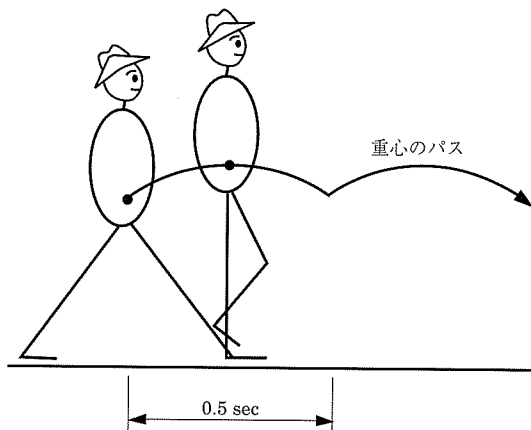


図 - 1 人の歩行（鉛直方向）

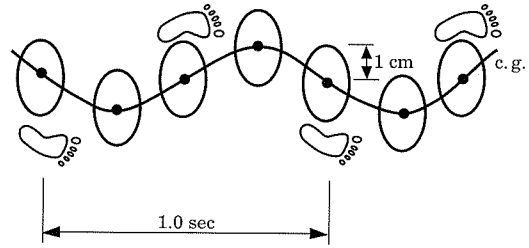


図 - 2 上から見た人の歩行（水平方向）

による人間の水平慣性力は鉛直方向力に比べ圧倒的に小さく、このような小さい力でなぜ、重い桁を有意な振幅（3 - 4 cm 程度）で振動させることができるのか？が解けない謎であつた。

競艇場には貴賓席があり、そこからは橋を上から一望に見渡すことができると聞き、振動の状態を貴賓席から見ることにした。桁の上にたずんでいたり、橋の上に群集と一緒に歩いているときには振動がなぜ起きるかが理解できなかったが、桁の上から歩行者による振動を見るとその原因は一目瞭然であつた（写真 - 3）。俯瞰的にものを見ると、これはこういうことだと思つた。すなわち、桁が横揺れしているときは、多くの歩行者が歩行のリズムを桁の水平横振動に合わせる、同期させていたのである。同期させるほうが歩くのが楽であり、一人ひとりの歩行力が弱くともそれぞれが同じ位相となれば、小さな力も線形的に重なり合い大きな力となって共振させていたのである。

これをビデオに撮影し解析することとしたが、当時は画像処理などの技術も進展しておらず、どうしてよいものか考えあぐんでいた。そのとき見つけ出したのは、東京大学生産技術研究所の交通研究室にあつた、ビデオの上から高速道路の自動車をトレースするシステムであつた。トレー



写真 - 3 群集の通過の中で横揺れする橋

スといってもマニュアルでやるもので、ビデオ画面を一コマずつ出して、注目した人間の位置（首の位置）にカーソルをまわし一人ひとりの歩行パスを追いかけるのである。このようにして歩行者の橋の上での軌跡をもとめた例が図-3である。これを見ると人間というのはまっすぐに歩かないものだということが良くわかる。これにハイパスフィルターをかけると、桁の横方向の振幅が小さいときと大きいときで人間の歩く横方向振幅が大きくなること、また振幅が大きくなるとより多くの人が歩調を横方向振動に合わせることを定量的に把握することができた（図-4）。さらに桁には最大2000人ぐらいが同時に載るが、そのうち、歩調があっている2割程度の人が、同期したとすると、その力は、桁を横方向に3cmないし4cm程度に揺らすことを理論的にも説明することができた。

非常に面白い結果が得られたものの、国内での研究成果の発表は橋のオーナーへの配慮からはばかれた。国外な

VIDEO MONITOR SCREEN

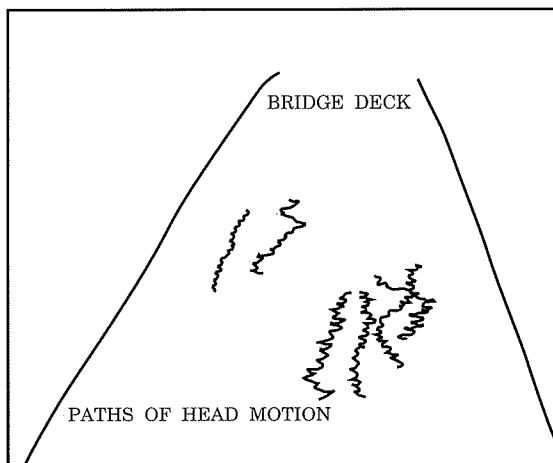


図-3 ビデオ画面からトレースした人の歩行軌跡

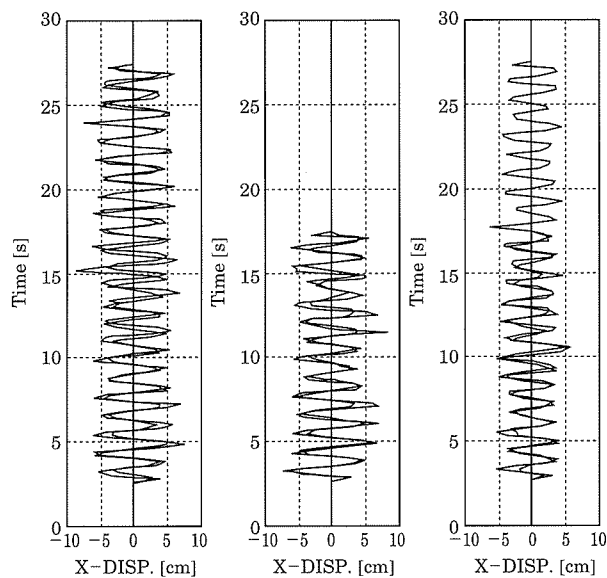


図-4 同期している人の水平方向の動き

らばよいとオーナーに認めていただいて英語で論文を書くこととした。その論文が1993年にイギリスの国際誌に掲載されたり。振動に関係してからすでに5年が経過していた。

この振動を外国での講演で話すと、誰もが非常に興味を示してくれる。条件さえ整えば、このような振動がほかの橋でも起こるわけであるが、著名な橋で起こるとは思ってもみなかった。

4. ソルフェリーノ橋

ミレニアムブリッジが完成する1年近く前の1999年の夏、パリのセヌ川に、構造建築家ミムラム氏が設計するソルフェリーノ橋が完成した（写真-4）。鋼アーチ橋の歩行橋である。ミムラム氏が、東大の篠原修教授の招きでその年の12月日本に来た際、私にぜひ会いたいとの伝言を受け取り、なぜ私に？と思ったが、お会いする機会を持った。この橋もミレニアムブリッジと同じようにデザインコンペを経て採用されたものであり、費用も多にかかり鳴り物入りの橋であったと聞く。場所はルーブル美術館の前で、開

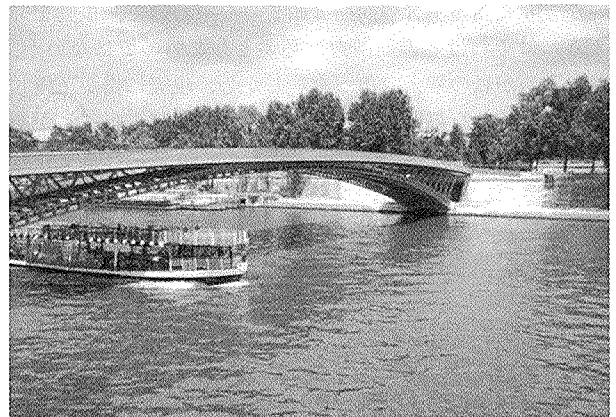


写真-4 ソルフェリーノブリッジ（パリ、セヌ河）



写真-5 ミムラム氏（右）と橋にとりつけられたダンパーの上で

通当時多くの人が渡ったが、そのときミレニアムブリッジと同じように大きな横揺れ振動が生じ、閉鎖されたのであった。私に会うのは、振動をいかに止めるかを聞いたかったためである。ダンパーによる制振法の考え方を説明し、ミムラム氏はその方向で検討し、アーチ橋の頂部の床の下にTMDを設定し、無事この振動をとめることができた。2004年にパリで第一回歩道橋会議が行われ、この場でミムラム氏からお礼を言われたことを今でもうれしく覚えている(写真-5)。

5. 再びミレニアムブリッジについて

さて、7月にアラップ社に行った際、当然、振動をいかに止めるかという議論になった。なにしろ、振動の原因の相手は人間であり、いかようにも変化する。速くも歩くし、遅く歩く場合もあり、振動数も変わってくる。たくさんの人が歩いたときにどの程度の人が橋桁の動きに同期するかも、そのときの力のオーダーも正確にはわかっていない。地震や風のように外力をある程度推定できる荷重とは違い、問題は非常に複雑である。ただし、橋桁の振動が発生しないかぎり人間の歩行の同期は始まらないわけで、振動を抑えるにはそれほどの制御力は必要としないのではないかと、というのが私の考えであった。しかし、現実に橋が閉鎖しており、それを再開したときに再び振動が起こることがあっては沽券にかかわるという意識が向こう側にあることも理解できた。すなわち、考えうる振動はすべて抑えられる振動制御方式をとりいれるということである。

彼らと議論を行って、二つほど強く印象に残ったことがある。

ミレニアムブリッジという橋が閉鎖され、世界中にこのニュースが流れ、担当者たちはさぞかし意気消沈しているのではないかなと思って、お目にかかってみると、そんなことは決してない。むしろ、この問題の解決のために全精力を注ぐという強い意志、元気さを感じたことである。向こうのシステムでは、エンジニアが設計したものを上司の人がチェックしそれをパスすれば、担当のエンジニアには直接には責任が及ばないということが、明確になっているようであった。責任はあくまでも上の人が関係するのであって、若い人や担当者のところにはいかないことがそうさせているのかもしれない。

もうひとつ驚いたことは、議論の場では、技術部長とか主任技師に混じって若いエンジニアが議論に参加するなかで、自分の考えをはっきりと上司の前でも言うことであった。上司の考えに反対の意見も躊躇なく言う姿は印象的であった。

振動制御の方法について、いろいろ議論したが、選択は二つに限定される。ダンパーとかTMDとかパッシブな制御方式であり。もう一つは、アクティブな制御方式である。私は、後者のほうが好ましいと考えていた。その理由は、1)人間の歩行によってこの振動が起こるのであるが、先にも述べたように人間は適応するので、歩行の振動数は桁の振動とともに変わるところに特徴があり、TMDのような同調系のダンパーでは振動数がずれたときにその効果が低減す

る。2)21世紀の幕開けを記念して作られたミレニアムブリッジらしくハイテク技術を駆使したダンパーを設置し、それが歩行者、とくに子供たちからからも見えるようにすることは、とくに、科学技術の成果をビジュアルにすることにも有効である。

日本に戻り、アクティブ制御方式の実績があるIHI橋梁設計の宇野さんや研究所の小池さんに相談した。関心をもっていただき、簡単な試算、試設計もしていただきその結果をもって、ロンドンに再び行きアラップ社と議論を行った。アクティブ制御方式に対するアラップ社の関心も高かったが、安心感のあるパッシブ方式を優先して考えたいというのが、向こう側の反応であった。その後、ミレニアムブリッジにおいては多数の歩行者が通過するときに桁に作用する力を把握するためにアラップ社は、エキストラで雇った人を橋の上を歩かせて力を求め、人間が同期すると、かなり大きな、負の減衰力となって働くことが判明した。また、測定された振動から、単に横たわみ水平振動だけでなく上下振動も励起されることが分かった。これを踏まえ、水平振動にはダンパー、鉛直振動にはTMDを設置することとなった(写真-6)。水平振動用のダンパーは床パネルの下の骨組のせん断変形を利用したもので、小振幅から減衰力が出るようにするために、遊びの非常に少ないアメリカ製のダンパーを用いている(写真-6)。なお、ダンパーは、床パネルの下だけでなく、桁端部においては、地上と桁との間にも入れてある。

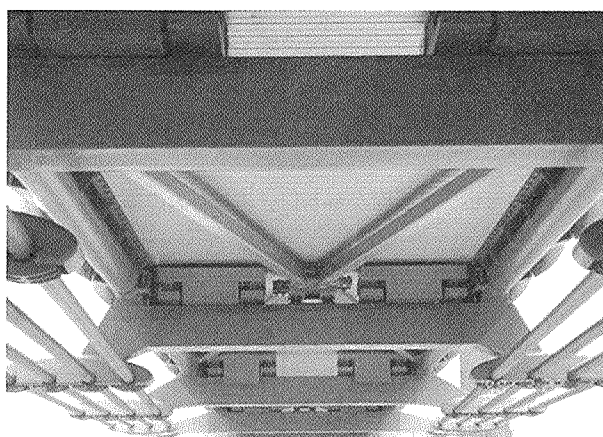


写真-6 ミレニアムブリッジのダンパー(桁の下に見える箱のようなものが鉛直振動制御のためのTMD、桁の下の斜めの棒の先にあるのが、桁の水平振動時のせん断変形を利用した粘性ダンパー)

鉛直振動を止めるためのTMDは床パネルの下に設定されたが、きわめて限られたスペースに入る扁平なダンパーとなっている。これらの制御装置が有効であることを確認し、2002年12月すなわち一年半後に再開通した。

この振動問題のひとつの論点は、設計する時点で、あらかじめ振動が予測できたか否かであった。前述のように、バーフマン教授の本にも横振動について若干触れられ、また、私の論文では、具体的な事例のなかでこのような振動が起こることとそのメカニズムが記述されており、情報と

しては公開されていた。しかし、橋梁設計において一般的に知られている事実ではない、ということで振動制御等に有した費用（調査、工事など、約8億円）は保険から支払われたと聞いている。いずれにせよ、この橋の建設費30億円に対し、振動制御のための調査、装置の購入等に本体の建設費の4分の1を使ったことになる。

ミレニアムブリッジの振動問題が生じてから、人間の歩行に及ぼす橋桁の横方向振動の影響、そのモデル化における研究がきわめて盛んになった。いまでも、このテーマを扱った論文が数多く国際誌に発表されている。

6. その後

日本が得意とするアクティブ制御方式はミレニアムブリッジでは採用されなかったが、2年ほど経って、またもやアラップ社から電話があり、ヒースロー空港の拡張工事に伴い、新たに建設される管制塔（写真-7）の風による振動問題の相談をもちかけられた。管制塔は振動すると、管制官の仕事ができなくなる。それは空港の閉鎖を意味することになり、何が何でも振動を抑える必要が出てくる。それまでに風洞実験で風による振動を抑える手段を講じたが、許容レベルまで下げることができず、TMDなどのパッシブな装置でも難しいということで、ミレニアムブリッジで検討されたアクティブ制御の方策を打診してきた。IHIの方々の努力の末、小型アクティブ振動制御装置を開発し



写真-7 ヒースロー空港の新管制塔

（写真-8）、それが海を渡って2006年に設置された。順調にそれが今、作動している。



写真-8 アクティブ制御装置

7. あとがき

私がたまたま、友人から知る機会を得た、ある小さな振動が遠い向こうでも同じように起こったため、いろいろな展開につながった。もし、あの日、英語で論文を書かなかったならば、きっと何も起こらなかったであろう。国際誌に投稿したのは日本語で論文を書くことができなかったためであり、何が幸いするかわからない。残念なことは、人の歩行と床振動との同期を基礎的なところから調べた研究については日本語の論文しか書かなかったことである。ミレニアムブリッジの振動事件のあと、ネイチャーにもこの種の論文が発表されているが、われわれのほうはずっと前にやっていたにもかかわらず、世界の目にはとまっていない。

プレストレスコンクリート技術にしろ橋梁技術にしろ、次の世代に大きな発展を望むには世界に展開することなのかと思う。下手な鉄砲…という言葉があるが、世界に打って出て、また情報を世界に向けて発信して…そうすることが何かに繋がるという思いをもち続けたい。

参考文献

- 1) Fujino, Y. 他 : Synchronization of Human Walking Observed during Lateral Vibration of a Congested Pedestrian Bridge, International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 22, pp.741-758, 1993

【2007年10月30日受付】