

# プリンストン大学留学報告

## 目 次

1. 田中 洋：「スカンラン先生に学ぶ」

My experience at Princeton—The days with Prof. Scanlan—

日本風工学会誌

第26号 昭和60年12月

2. 田中 洋：「プリンストン滞在記」

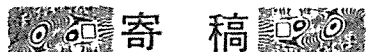
道 路

昭和61年3月号

3. D.R. Huston, H.R. Bosch, and H. Tanaka :

“ The Effects of Large-scale Upstream Gusting on the  
Aeroelastic Behavior of Section Models ”

( The 18th U.S—Japan Joint Panel on Wind and  
Seismic Effects ; May 1986 )



## スカンラン先生に学ぶ

### My experience at Princeton—The days with Prof. Scanlan—

田 中 洋<sup>\*1)</sup>  
Hiroshi TANAKA

昨年8月下旬より今年6月下旬に至る約10カ月間、米国プリンストン大学(写真1)の大学院にて風工学を中心に勉強する機会を得た。アドバイザーはスカンラン教授(写真2)だった。先生は親日家であり、訪日も3回に及び、橋梁を中心とした空力弾性学の研究で日本でも著名である。不思議なことに、先生の下で風工学を学んだ大学院生としては、私が邦人としては初めてのようなので、体験記をここに報告したい。

間の橋梁技術者1名を米国のIRF(国際道路連盟:ワシントン)の留学制度を通じ、研究に適する大学に派遣する募集があった。選考は、英語の

#### 1. 留学の経緯

昭和58年11月、日本橋梁建設協会より、民



写真1 プリンストン大学土木工学科

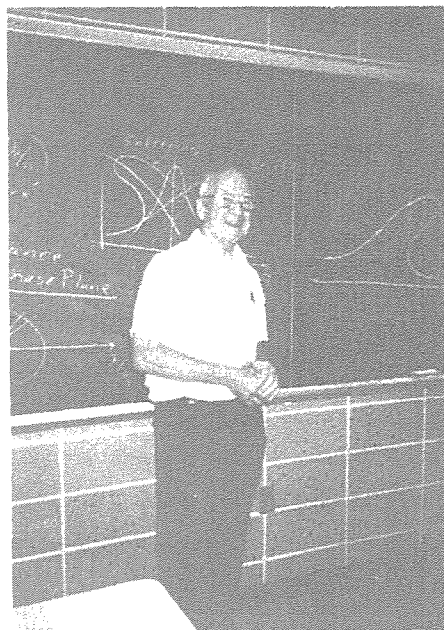


写真2 スカンラン先生

\*1) 日立造船(株) 鉄構設計部橋設計主事  
Assistant Section Manager, Bridge Design Section, Steel Structure Design Dept.,  
HITACHI ZOSEN CORP., Member of JAWE, JSCE

(本稿受理:昭和60年10月6日)

試験(TOEFL)と留学希望理由とそのバックグラウンドに依った。社命により応募したが幸い希望が叶った。本留学制度は、1949年に始まり、米国で道路施設を勉強するのが目的で世界98カ国の技術者等が参加している。日本からは1954年より、建設省及び公団等から毎年約1名留学していたが、3年前より民間からも1名選ばれるようになった。

私は入社以来、橋梁設計を担当し因島大橋などの長大橋を経験したこと、大学及び当社研究所における長大橋の風洞実験に従事し、風工学に興味を持っていることから、米国で長大橋の風工学の研究がさかんな大学をIRFに希望した。IRFの斡旋によってスカンラン先生に受け入れられた。私が大学院生であった時、先生が来日され、2時間ほどの講義を受けたこともあったので、IRFから通知が届いた時は、非常に感激を覚えた。プリンストン大学に入学願書及び入寮手続書を郵送し渡米した。

## 2. カリキュラムについて

プリンストン大学の大学院コースは、大別すれば、構造系、交通系、水資源系に分類される。各々充実した陣容を誇っているようだが、風工学は、構造系に属している。ここでは、スカンラン先生のアドバイスに従い風工学の勉強のために受講した科目について述べる。

### ① Structural Dynamics (スカンラン教授)

力学の復習から始まり、1自由度系の自由振動と、任意の動的荷重に対する強制振動の解析。多自由度系のマトリックス定式化と固有値解析。多自由度系の空力弾性問題(渦励振、ギャロッピング、ダイバージェンス、フラッター、パフエッティング)と地震応答解析についてを平易に解説された。先生自筆の講義ノートと練習問題のゼロックスが配布された。練習問題は、2週間後に先生の部屋の前の黒板に解答が掲示された。主に学部高

学年向けだが、院生も単位となる。

### ② Advanced Theory of Vibrations (スカンラン教授)

1自由度系。グリーン関数。ラプラス変換。ラグランジュの運動式。ハミルトンの原理。多自由度系のマトリックス法と固有値解析。連続体の動的応答。連続体に対する変分法の応用。ダンピング理論。不規則振動論。以上広範囲に及ぶ内容を週2回100分の講義24回で要領よく解説された。先生の講義ノートは活字化すれば教科書として発刊されるようにまとめられていた。

### ③ Aeroelasticity (ベンディクセン教授)

航空工学科における講義。静的空力弾性論として、翼のダイバージェンス論と2次元構造物の空力オベレータ。動的空力弾性論として、ハミルトンの原理及びラグランジュの運動方程式、翼の曲げ振りフラッターの近似解及び厳密解、パネルフラッター。非定常空気力学として、subsonic, transsonic, supersonic flowにおける翼の振動を数式を中心に講義した。私のように航空工学科の学生でない者には、難解であったが、わからない箇所を教授の部屋に質問に行くと1時間ぐらい黒板を使って教えて下さった。難解な式もほとんど暗記している優秀な先生だった。

### ④ Design of Large-Scale Structure (ビルリントン教授)

高層ビルや長大橋・シェル構造の設計論。特に橋の美観を重視され、経済性と美観は相対のものであり、相反することがないことを強調された。コンクリート橋及び鋼橋の歴史的考察。シェル構造の演習及び橋の設計演習と実戦も重視していた。ビルリントン教授の娘さんは、交換留学生(AFS)の資格で筑波近郊に高校生として来日している。教授は本州四国連絡橋プロジェクトに大きな関心を寄せられていた。

### ⑤ Loading Formulation in Structural Dynamics (スカンラン教授)

構造動力学の基本原理の復習。構造物の地震風、波に対する応答。フラッター、渦励振等を流体と構造物の相互干渉問題と捉え、先生の非定常空気力係数 ( $H_i^*$ ,  $A_i^*$ ) を用いて説明された。

以上風工学を動力学の幅広いバックグラウンドの上で講義が進められ、応用力を養うのに適していた。

### 3. スカンラン先生について

スカンラン先生は、日本でもよく知られているが、詳しい経歴は案外知られていないので先生のプロフィール<sup>1)</sup>をここに紹介したい。先生は、1914年にシカゴに生まれ、シカゴ大学で1936年に学士号を1939年に修士号を取得されている。1936年から1940年まで、ニューヨークのロングアイランドにある航空局で働き、航空機構造及び空力弾性部の主任技術者として頭角を現わした。1941年、MITの博士課程に進み1943年Ph.D.を取得した。1年間、連邦航空局の動的荷重部の主任技術者を経て、ニューヨーク、トロイのRensselaer Polytechnic Instituteの教授となった。1951年から1957年までNRC-NACAヨーロッパ研究員として、フランスに滞在した。その時、パリ大学(ソルボンヌ)からも博士号を授与されている。帰国後、ヒューストンのSchlumberger 株式会社で働き、1960年にCase 工科大学の機械科の主任教授となった。1966年、プリンストン大学の客員教授となり、1967年には土木工学科の終身

教授となった。以来、風工学の分野では、特に橋梁の空力弾性学の分野で広く知られるに至った。

先生のこの分野での業績は以下である。

- (1) 橋梁の耐風安定性の研究に、非定常空気力係数 ( $H_i^*$ ,  $A_i^*$ ) を導入し、橋梁の部分模型による風洞実験から、これらの係数を決定する米国流の方法を確立したこと。
- (2) 部分模型実験に対し、新しいタイプの乱流発生装置(写真3)を用いて長い波長のガストを発生させ実験する創始者の一人であること。
- (3) 橋梁のフラッター機構を明らかにし、タコマ橋の落橋原因をつきとめたこと。

以上の功績等に対し、1968年に、ASCEよりState-of-the-Art in C.E.が、1976年に、AISCよりNational Higgins Lectureshipが授与されている。

米国ばかりでなく、カナダ、日本、西独、フランスの企業及び政府機関のコンサルタント業務も手広く行っておられる。

また、弟子E. Simiuとの共著、Wind Effects on Structures (Wiley, 1978)は、近く改訂版が出版されるが、風工学の本格的な教科書として評価が高い。

先生は、今年の6月プリンストン大学を70才で退官されたが、ボルチモアのジョージ・ホプキンス大学で引き続き教鞭を執られている。5月

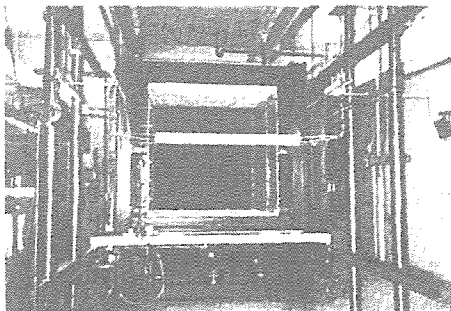


写真3 可変翼を用いた乱流発生装置

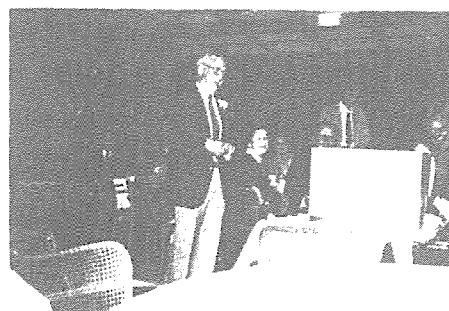


写真4 退官記念プレゼントのパソコンを喜ぶ先生

17日に退官パーティ(写真4)が催されたが、世界各国の有名教授、例えば、パークレイのW. Clough 教授などから祝電が寄せられていた。とりわけ印象的だったのは、先生のライバルであるカナダのA.G. Davenport 教授からの詩の電報文が、先生の業績を読んだ後、「ボブ(先生の愛称)の研究意欲は常にnegative damping(衰えることがない)！」と締めくくられていたことだった。

先生の学問に対する厳しさと学生に対する思いやりによって、大学職員一同から深い尊敬を受け、多くの教え子らに囲まれていた先生は誠に幸福そうだった。

#### 4. 風工学の研究体制について

プリンストン大学では、風工学の研究しているのはスカンラン先生だけであつたので、チームを組織的な研究体制を作っているわけではなかった。日本の大学でよく見られる講座制はなく、教授と助教授は各々独立した研究を行っている。ただし、Ph. Dを取得しようとする院生がスカンラン先生についており風洞実験を中心とする実験的研究を行っていた。院生はドライバー・ヒューストン君で、大学院の5年生であつた。プリンストン大学の土木工学科には、風洞装置がなく、連邦道路局(FHWA)のターナーフェアバンク道路研究所(写真5)にある風洞装置を借用していた。研究所はワシントンD.C.の郊外のバージニア州

Mc Leanにある。私は、9月より1月末までの秋学期には、前述した講義を修得したが、2月より5月末までは、当地へ転居しドライバー君と同居し研究に参加した。彼の研究目的は乱流発生装置を用いて、大きな波長の乱れを発生させ、二次元の橋梁断面模型に対し、スケールの異った乱れがどのように空力安定性に影響を及ぼすかを探ろうとするものだった。従来の乱流格子では、乱れのスケールが模型長に比較し小さく、自然風の乱れのスケールと実橋梁との関係と対応しないとされていた。勿論、自然風との相似律については未だ議論の余地を残しており容易な問題ではないが、とにかく一步でも前進させようとの試みであつた。模型は、主にDeer Isle-Sedgwick 橋(メイン州)を用いた。なぜなら、この橋はスタインマンの設計したものだが、H型断面をしており渦励振でよく揺れるので有名であり、FHWAは、6個のギル風速計と15個の加速計をこの橋に設置し現地観測を行っているからである。電算によるデータ通信システムによって、FHWAに振動記録が送られていた。風洞実験と現地観測記録とを比較すれば、新しい知見が得られるだろう。彼と議論しながら実験やデータ解析をするのは、実験装置のトラブル等に悩まされたこともあったが楽しいものだった(写真6)。IBM等の米国製マイコンを使ってデータ解析やプロッター図を作成したのであるが使用した印象では、日本製マイコン

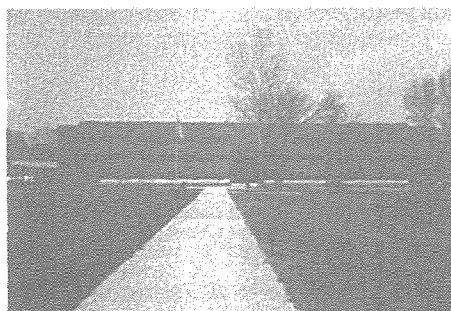


写真5 ターナーフェアバンク道路研究所(FHWA)  
Turner-Fairbank Highway Research Center



写真6 ドライバー君(左)とマイコンを用いての実験結果の解析作業

の方が優れているのではないかと感じられた。研究の方針等は、彼の自主性と一人前の研究者として尊重している理由からスカンラン先生は、彼に任せ切りのようだった。しかし、実験結果等は郵送し先生の批評を必ず仰いだ。今秋には、Ph. D 論文が完成するので楽しみにしている。彼の研究は、FHWAの委託でもあるのでFHWAのレポートとしても発刊されるはずである。彼の話では、スカンラン先生は、ジョージ・ワシントン大学へ移っても、FHWAの風洞を使って研究を続けたとのことだった。そのため先生は彼を共同研究者として必要としているのだが、大学で彼の適当なポストがなく苦心しているようだった。また、FHWAは毎年研究の契約更新があるので、メリーランド大学等も虎視眈々と風洞実験に進出しようとしており、先生がFHWAと以前と同じ関係を保つかは不明だった。この面の競争は、米国は非常に厳しいようだ。

## 5. あとがき

夏休みの末、米国で初めてお会いした時、先生は研究室で秋学期の講義ノートの改訂をなされていた。プリンストン最後の講義となるのにである。私は先生の完璧主義を見せつけられた。挨拶を済ませた後、研究室で日本からもってきた本などを整頓していると、早速自宅へ夕食に誘って下さった。ほんとうに温かい先生だった。また、授業の後、教室に残って、例えば私の渦励振のアイデアなどの可否を質問すると決して否定はされなかった。そして、実験方法など先生の考え方を述べ、アイデアを発展させるように常に導いて下さった。ドライバー君も言っていたが、先生の人徳によって、学びに来た全ての人が幸福感を覚え研究できる。私のような浅学な者には、先生の偉大な人格に触れたことが留学の最も大きな成果と言えるかもしれない。

## 参考文献

- 1) Editors ; Ahmed M. Abdel-Ghaffar etc.  
: Robert H. Scanlan From Aeroelasticity  
to Wind Engineering, Dept. of Civil  
Engineering, Princeton University,  
May 17, 1985

# プリンストン滞在記

田 中 洋

## はじめに

IRF（国際道路連盟）の留学制度を通じ、1984年8月より1985年6月にわたる約10カ月間、プリンストン大学（写真-1）の大学院にて風による構造物の応答をテーマとする風工学を勉強する機会を得た。長大橋の設計時、耐風設計は非常に重要であるため風工学の研究が盛んな大学を希望したところ、IRFの斡旋により同大学のスカンラン教授に受け入れられた。大学生活を中心と



写真-1 プリンストン大学

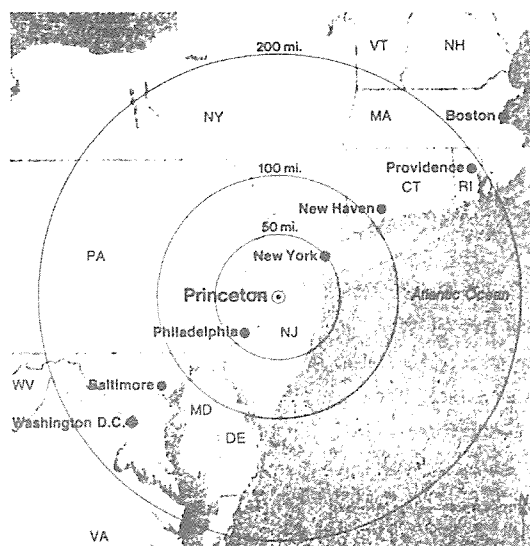


図-1 プリンストン位置図

する体験記をここに報告したい。

## 1. プリンストン大学とその環境

プリンストンは人口約2万5,000人、ニューヨークとフィラデルフィアのほぼ中間に位置し、電車（アームトラック）でマジソンスクエアガーデン地下のペンステーションから約1時間である（図-1）。マンハッタンへの通勤に便利な高級住宅地を控え、大学を中心とする学園都市である。近年、郊外のルート1号線沿いに、美しい景観とプリンストン大学の研究ポテンシャルを評価し、民間のハイテク産業が研究所を多数建設している。そのため地価は約10%近い上昇を続けている。

プリンストン大学は、プリンストンの町の中央に位置しているが、1746年に創立され文科、理科、建築、工学、応用科学、公共、国際事情ほか学部約60を擁し、総学生数約5,900名（学部4,500名、大学院1,400名）で少数精鋭主義である（ちなみにハーバート大学は大学院1万名）。大学とは独立した機関ではあるが、晩年、アインシュタイン博士が統一場理論の研究をプリンストン高等研究所で行っていたこともあり、物理学や数学が著名である。

また、政治および経済の分野でもハーバート大学と並ぶ影響力を持つと言われており、レーガン政権下のシュルツ国務長官や、大統領に続くNo.2の権力を誇るFRB（連邦準備制度理事会）のボルカー議長らを輩出してい

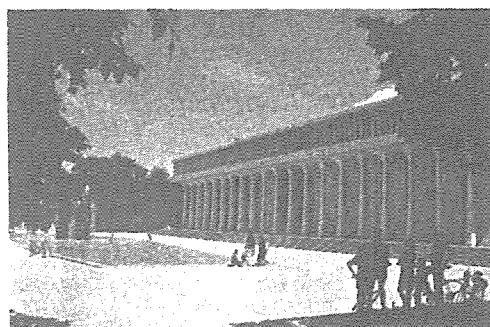


写真-2 日系ミノル・ヤマザキの設計による  
ウッドローウィルソンスクール

る。そのため、大蔵省、通産省および日本銀行からの留学生も多かった。プリンストン大学の広大なキャンパス(8.1 km<sup>2</sup>)は、ゴシック風の寮、ギリシャ神殿風建物、ピカソの“婦人の頭像”に近接する美術館、音楽教室、図書館、教会等々、すぐれた建築家による新旧の建物が豊かな緑の中に点在し、全米でも有数の美しさを誇っている(写真-2)。

## 2. 寮生活

寮生活は、OGC (Old Graduate College) で過ごした(写真-3)。OGC は、森と大学所有のゴルフ場に囲まれた各部屋が2つの個室とリビングルーム、シャワールーム付きの広い寮だった。ルームメイトは、韓国銀行次長の尹鷹淳<sup>ユン・ドクソン</sup>氏(43)で、9年前、東京の日本銀行で研修された親日家であった。氏は韓国経済の発展と世界経済の相互関係を1年間研究された。韓国人留学生は邦人より多かったが、わが国の経済力および高度技術力を称賛し韓国のよき手本と考えていた。寮生約500人のうち約半数が外国人であり、大食堂のテーブルを囲み各国の友人と食事を取りながら会話するのは楽しい一時だった。

邦人との交際では、大蔵、通産省および国鉄等の将来を嘱望される若人と夜を明かして日本の将来等を議論できたのは貴重だった。大学には、“インターナショナルセンター”というボランティア組織があり、留学生の世話をしてくれるホストファミリーや英会話の先生を紹介してくれた。また「日本プリンストン会」という邦人の教官および学生が中心となった同好会があり、日本の映画上演等の文化活動を行っている。週に一度夕食会が開かれるが、この時ばかりは全員日本語を話すことが義務づけられており、最近の日本語熱の高まりにも助けられ、多数の外国人も参加しその活動は好評を博している。

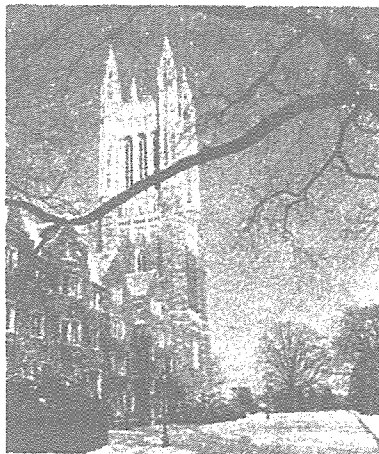


写真-3 Old Graduate College (寮)



写真-4 スカンラン教授と筆者

## 3. 土木工学科とカリキュラム

プリンストン大学に土木工学科があったのかと意外に思われる読者も多いと思われるが、MIT やパークレーほど派手さはないが優秀なスタッフがそろった学科である。学部は1学年約30名、院生は総数で約40名と規模は小さい。大学院コースは、大別すれば構造系、交通系、水資源系に分類されており、私はスカンラン教授の下で風工学を学んだので構造系に属した(写真-4)。修士課程は2年であり、論文と10単位必要である。1年に春学期と秋学期が開講されるから、1学期2〜3科目取ればよい。私の場合滞在が1年なので、スカンラン教授の推薦する科目を出来るだけ多く受講した。秋学期に次の4科目の単位を修得した。

- ① Structural Dynamics (スカンラン教授)……学部生を主として対象とする基礎的な構造振動論
- ② Advanced Theory of Vibrations (スカンラン教授)……不規則振動論を含む高等振動論。
- ③ Design of Large-Scale Structure (ビルングトン教授)……高層ビルや長大橋、シェル構造の設計論。構造物の美観と経済性、橋の歴史的考察および橋の設計実習。
- ④ Aeroelasticity (ベンディクセン教授)……航空工学の科目で航空機のフラッター解析を中心とする弾力弾性論。

これら4科目は、どの科目も充実しており、宿題および演習が多く厳しかったが着実に実力がつくように配慮されていた。

スカンラン教授の講義は、例えば確率過程を教えるのに最初は例のコインの裏表の現れる場合を考える確率の基礎概念から出発し、いつのまにか学会のトピックスで言及する解明な内容だった。講義ノートは活字化すれば教科書として出版できるほど整っていたし、練習問題もよく考えられたものだった。

ビルングトン教授は、ほとんど毎時間多数の美しい



ライドを駆使した楽しく内容のある授業を提供してくれた。

ベンディクセン教授は、スウェーデン人だったが聴講している学生もアメリカ人3名のほかは、イギリス人、中国人それに私と国際色豊かだった。私だけが土木工学科の学生でハンディがあったが、オリンピックでも出場しているような雰囲気だったので特にながらった。中国の学生は人民服を着ていたし、教科書が高いと言ってわれわれと異なるものを使用していた。ところがよく見ると、中国で発刊された同じ教科書の海賊版で2ドルという話だった。現代中国では、多数の留学生を米国に送り込みこのような手段で西側の最新情報を吸収しており、日本も油断できない状況だと感じた。宿題の演習は難解だったので、しばしば教授の部屋を訪れたが、わからない箇所は黒板を使用して1時間以上も説明してくれた。教授のドアはいつも半開きになっており、学生が質問に行きやすくなっていた。

以上のように学生が学問しやすい環境作りがなされており、世界各地から学びにくる理由も理解できた。

#### 4. 研究体制について

プリンストン大学では、日本の大学でよく見られる講座制はなく、教授と助教授はおのおの独立して研究を行っている。Ph. D を取得しようとする学生とその担任教授（または助教授）は、研究テーマを設定し2～3年のプロジェクトを組む方法が主流のようだ。教授はコンサルタントとして官庁および民間とパイプをもっており、大学の給与以上の報酬を受け取る場合も少なくはない。そのためよい研究をし、コンサルタントとして認められるように努力している。従って学生指導に熱が入り、学生もPh. D を取得すれば高いサラリーで就職できるので必死に研究している。特に、外国人で米国に永住を希望している学生のがんばりは素晴らしい。26、27歳でPh. D が取れ、若くして研究者として自立できる。それに対してわが国では、大学に残っている助手クラスでさえ30代でやっと博士号を取得する場合が多く、創造的な仕事をする上で改善が必要である。また、日本の国公立大学の教官は、法的制約のためコンサルタント業務もままならず所得水準も高いとはいえない。米国と競い合うほど成長したわが国の高度産業社会をさらに伸長するためには、この面での自由化が必要ではないかと強く感じられた。

#### 5. FHWA での風洞実験プロジェクト

前期の期末試験は、中間試験で要領がわかってはいたものの4科目とあって厳しかったが、途中日本道路協会

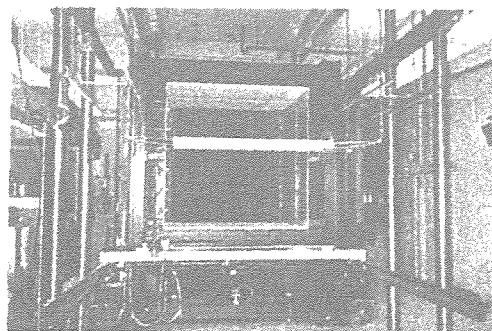


写真-5 乱流発生装置を用いた橋梁の風洞実験

の要請により、ワシントン D.C. で開催された Transportation Research Board (TRB) の第64回年次総会に出席した。米国の交通・運輸に関する活発な調査研究の発表を聞くことができた。詳しい内容については、本誌60年6月号<sup>2)</sup>に紹介したとおりである。

さて、春学期(2月～6月)は、スカンラン教授のアドバイスに従い、ワシントン D.C. 郊外にある連邦道路局(FHWA) 所有の風洞装置を用いた橋梁の耐風安定性の研究プロジェクトに参加した。このプロジェクトは、FHWA がスカンラン教授に委託したもので、院生のドライバー・ヒューストン君が Ph. D 取得のために実験および解析を担当していた。

研究の目的は、最新鋭の乱流発生装置によって、スケールの異なった乱れを発生させ、二次元の橋梁断面模型の空力安定性にいかなる影響を及ぼすかという主としてスケール効果を研究するものだった(写真-5)。そのため当地へ転居し彼と共同生活を送り研究に参加したので英会話のよい訓練になった上、米国の実験方法を知ることができ貴重な体験だった。プリンストンの寮は、そのまま確保していたので、スカンラン教授の講義を聞いた後実験の討議を行うためしばしばワシントンとプリンストンを往復した。

#### 6. 長大橋を訪ねて

プリンストンからニューヨークは近いので、時々ブルックリン橋やマンハッタン橋、ジョージワシントン橋等の長大吊橋を見学した(写真-6)。これらの橋はかなり老朽化しており技術的には過去の遺産となっているが、おのおの古典として深い味わいがあった。冬休みには妻と長女(当時6歳)が2週間遊びにやって来たので、西海岸に飛び金門橋やオークランドベイブリッジを見学した。金門橋を見れば興奮で涙が出るだろうとひそかに期待していたが、プロポーショナルは美しいと思ったが、あの鮮やかな朱色のペンキは色あせており、本四国連絡橋の真新しい吊橋を見慣れている私にとって落胆の思いであ

った。

風洞実験プロジェクトに参加し春休みも取らなかった  
ので、4月下旬より2週間休暇をもらいヨーロッパ（イ  
ギリス、フランス、ドイツ）を旅行し有名な橋梁を訪れ  
た。

イギリスでは、ロンドンから1人でレンタカーを運転  
し3日間で、世界一長径間を誇るハンバー橋をはじめ、  
セバーン橋、クリフトン橋、アイアン橋等を見学した(図  
-2)。セバーン橋は剛度不足でよく揺れていたが、ハン  
バー橋は1981年7月に開通したばかりで真新しく、セ

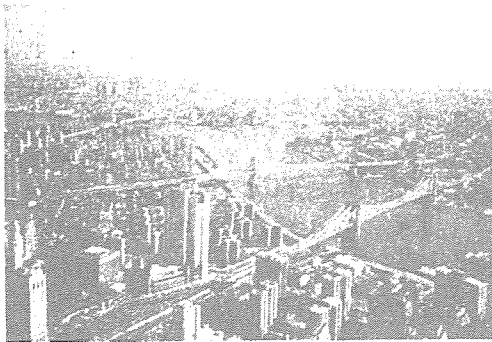


写真-6 ニューヨークの吊橋群

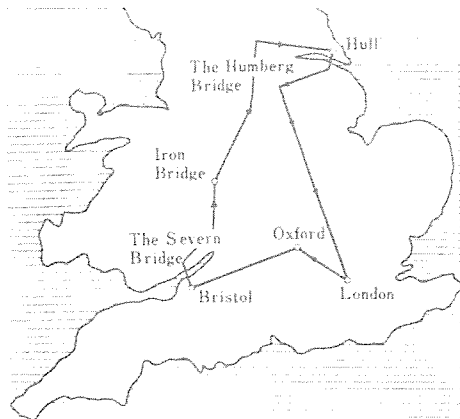


図-2 イギリス長大橋見学ルート

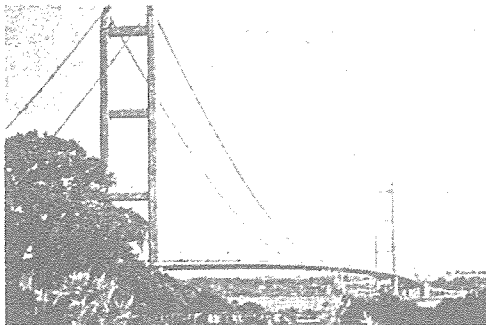


写真-7 ハンバー橋

バーン橋の欠点を克服しているように思えた。この橋を  
見た時私は最も感激した(写真-7)。アイアン橋は世界  
初の铸铁橋だが、よく保存されておりスタイルも洗練さ  
れていたのには驚いた。

フランス（パリ）へ飛び、セヌ川の橋を見た後、西  
独ジュセルドルフへ汽車で到着した。ここは斜張橋のメ  
ッカである。当社の駐在員に案内してもらい実際に歩い  
て渡って橋梁を観察したが、ドイツが最も維持管理がよか  
った。

その後、この旅行の主目的であるシュツガルト駅前  
のローゼンスタインパークにある吊橋の歩道橋(写真-  
8)を見に行った。有名なレオンハルト氏の設計した橋だ  
が、大阪市が現在建設中の世界初のモノケーブル自碇式  
吊橋である北港連絡橋(仮称)の参考となっていたから  
である(写真-9)。当社は、上部工建設工事共同企業体  
のとりまとめ企業であり、私は設計に携わっているの  
で、どうしても見ておきたかったわけである。形は似て  
いる箇所もあるが、力学的には全く別物であることがわ  
かりわれわれの仕事のオリジナリティがはっきりし、う  
れしかった。やはり実物を見ておくべきだとその重要性  
を痛感した。

そのほかには、帰国直前、1985年6月17日～19日  
に開催された第3回世界橋梁会議(IBC)に出席するた  
めピッツバーグを訪れた。当地は、鋼橋のメッカであり、  
オハイオ川をボートツアーしたが、まさに鋼橋の実物博  
物館のようだった。

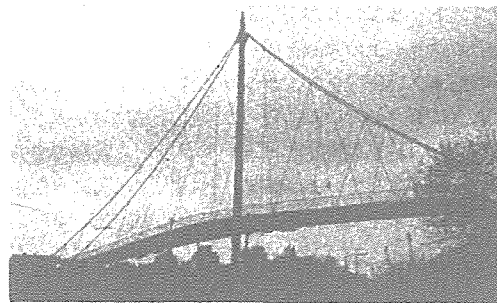


写真-8 ローゼンスタインパークの吊橋歩道橋

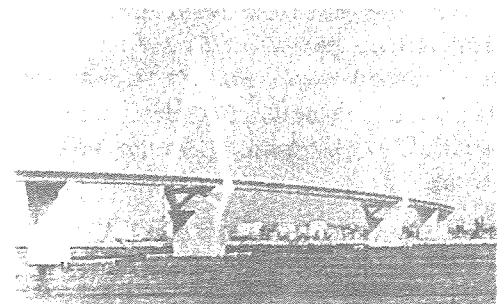


写真-9 北港連絡橋(仮称)の完成予想図

## おわりに

わずか 10 カ月余りの期間であったが、密度の高い生活を送れた。それは短い期間の制約が可能にしたものかもしれない。得られた成果としては、プリンストン大学で真のアカデミズムに触れられたこともあるが、多くの外国人の知己を得て国際感覚を養うことができ物の見方が広がったことだろう。また、欧米の多くの長大橋を自分の目で確かめたことは、橋を設計する上で今後大いに役立つと思う。

余談になるが、すべての旅行中最も僥倖だったのは、セバーン橋に行く途中、オックスフォード大学に 2 時間程立ち寄った時、ウォートン校で浩宮様をお見かけしたことだった（写真-10）。あまりにも伸び伸びされておられたので、声をお掛けするのを遠慮してしまった。友人と横をお通りになった浩宮様は、私の存在には気づかれなかったことだろう。リラックスした服装で全く自由に



写真-10 オックスフォード大学ウォートン校の浩宮様



写真-11 オックスフォード大学・マクダーレン校

行動なさっており私自身も目を凝って静観してしまいました。帰国された浩宮様がわが国の警備体制について少し不満を述べられたようだがもっともだと思われる。

また、マクダーレン校（写真-11）を見れば、プリンストン大学（写真-1）の建物は全くオックスフォード大学の模倣とわかる。数学者であり哲学者だったイギリスのラッセル卿がプリンストン大学で講演された時、「まねは猿でも出来る」と皮肉られたと伝えられるのはおもしろい。

最後に、筆者の独断と偏見をお赦し願うとともに、日本道路協会、日本橋梁建設協会をはじめ留学に対し多大のご助力を賜った皆様に深甚なる御礼を申し上げます。

### 参考文献

- 1) 田中 洋：スカンラン先生に学ぶ，日本風工学会誌 第 26 号（1985 年 12 月）
- 2) 遠藤 玲，田中 洋：第 64 回 TRB 年次総会報告，道路（1985 年 6 月号）日本道路協会

（日立造船株式会社陸機国内本部）  
鉄構設計部橋梁設計主事

THE EFFECTS OF LARGE-SCALE UPSTREAM GUSTING  
ON THE AEROELASTIC BEHAVIOR OF SECTION MODELS

BY

D. R. Huston<sup>1</sup>, H. R. Bosch<sup>2</sup>, and H. Tanaka<sup>3</sup>

ABSTRACT

This paper will describe the results of a recent wind tunnel study which examined the effect of large-scale upstream gusting upon the aeroelastic behavior of bridge deck section models. The large-scale upstream gusts were created with a flapping-airfoil gust generator. The results of the section model studies demonstrate that the method of active gust generation can produce large-scale upstream gusts which are capable of inducing measurable changes in the flutter stability and buffeting response of bridge deck section models. The changes which were induced in the aeroelastic behavior of the section models by upstream gusting will be presented along with an interpretation of these preliminary results.

KEYWORDS: Aeroelasticity; Large-scale; Section model; Turbulence

1. INTRODUCTION

The interaction of a flexible structure and a moving fluid, such as a large suspended-span bridge subjected to wind loading, is an inherently complex problem. The complexities arise because the fluid and structural motions are coupled by the continuity of displacements and tractions at the fluid-structure interface. The presence of turbulence in the flow introduces an additional complication to the interaction problem. An understanding of fluid-structure interaction problems usually requires the introduction of mildly restrictive theoretical assumptions which are then used to formulate parsimonious semi-empirical models with easily measured parameters.

The flexibility and exposure to the wind of the deck structure on a long suspended-span bridge enables an analysis of the wind loading to be conducted by considering only the action of the wind loading upon the flexible bridge deck. If, in addition, "strip-theory" aerodynamics is valid for the bridge deck structure, then it is possible to examine the effects of wind loading on the full bridge structure by studying the dynamics of a conceptual two-dimensional slice of the bridge deck, i.e. a section model. Section models are extremely useful in the theoretical modeling of the aeroelastic behavior of elongated structures. The simplicity of section models also facilitates their use in wind tunnel simulations.

The equations of motion for a two-degree-of-freedom section model take the form:

$$M(\ddot{h} + 2\zeta_h \omega_h \dot{h} + \omega_h^2 h) = -L(t) \quad [1]$$

$$I(\ddot{\alpha} + 2\zeta_\alpha \omega_\alpha \dot{\alpha} + \omega_\alpha^2 \alpha) = M(t) \quad [2]$$

where

$h(t)$  = the vertical displacement of the section model

$\alpha(t)$  = the torsional displacement of the section model

$L(t)$  = the lift

$M(t)$  = the aerodynamic moment

The generalized aerodynamic forces are theoretically calculated by integrating the instantaneous local surface pressures which act on the deck section as the section undergoes a virtual vertical or torsional displacement. The fluctuating aerodynamic pressures and the associated generalized forces depend upon the upstream flow conditions, the deck section geometry, the motion history of the deck section and local topographical considerations. Since the theoretical calculation of the local aerodynamic pressures requires an integration

<sup>1</sup> Dept. of Civil Engin., The Johns Hopkins University, Baltimore, MD 21218

<sup>2</sup> Federal Highway Administration, HNR-10, 6300 Georgetown PK., McLean, VA 20212

<sup>3</sup> Hitachi-Zosen Corp., 3-40, Sakurajima 1-chome, Konohana-ku, Osaka 554, Japan

of the partial differential equations of the unsteady fluid motion around the bluff body, it is usually necessary to invoke additional simplifying assumptions so that the fluid forces can be faithfully modeled. A primary simplifying assumption is to model the fluctuating aerodynamic forces by conceptually separating the aerodynamic forces into two components, one which depends on the motion of the deck section the other being a buffeting force which depends on the upstream gusting, i.e.:

$$L(t) = L_m(t) + L_b(t) \quad [3]$$

$$M(t) = M_m(t) + M_b(t) \quad [4]$$

where the subscripts m and b correspond to the motion-dependent and the buffeting aerodynamic forces, respectively.

Stability of dynamical systems, such as bridge decks subjected to wind loading, about positions of equilibrium can be assessed from the linearized motion-dependent forces acting on the system in the neighborhood of the equilibrium position, ref. (1). The motion-dependent aerodynamic forces are usually expressed in terms of the flutter derivative coefficients as follows, refs. (2) and (3):

$$L_m(s) = \rho U^2 B \left[ K H_1^*(K) \frac{\dot{h}}{B} + K H_2^*(K) \alpha' + K^2 H_3^*(K) \alpha + K^2 H_4^*(K) \frac{h}{B} \right] \quad [5]$$

$$M_m(s) = \rho U^2 B^2 \left[ K A_1^*(K) \frac{\dot{h}}{B} + K A_2^*(K) \alpha' + K^2 A_3^*(K) \alpha + K^2 A_4^*(K) \frac{h}{B} \right] \quad [6]$$

where s and K are the reduced time and frequency, respectively.

The aeroelastic stability of a bridge deck depends upon whether the combined action of motion-dependent aerodynamic and structural forces will cause a net increase or decrease in the total energy of the system. If the system acts to input energy from the airstream, then the deck motion will become excessively large and eventually result in damage to the structure. Otherwise, the aeroelastic deck-

section system will dissipate the energy contained in incipient motions, thereby forming a stable system. The calculations which assess the aeroelastic stability of the deck sections and the corresponding prototype bridge structures are usually iterative procedures that search for the lowest mean velocity corresponding to a neutrally stable system.

Experiments conducted with bluff bodies indicate that aeroelastic instabilities are usually of the single-degree-of-freedom type which are associated with a negative effective aerodynamic damping. The effective torsional and vertical aerodynamic damping are represented in terms of the  $A_2^*(K)$  and the  $H_1^*(K)$  flutter derivative coefficients, respectively. Positive trends in either of these flutter coefficients are indicative of destabilizing tendencies. Therefore, a measurement of the  $A_2^*(K)$  and the  $H_1^*(K)$  flutter derivatives will usually give a very good indication of the tendencies towards bluff-body flutter.

If it is assumed that the motion-dependent aerodynamic forces are indeed independent of the upstream wind gusts, then the stability of the aeroelastic system about a position of equilibrium will be independent of the presence of upstream turbulence and the flutter derivatives will not change under smooth and turbulent flow conditions. However, if the aeroelastic stability is affected by upstream gusting, then the flutter derivatives will be noticeably different under different flow conditions.

Flutter derivatives are usually measured with initial conditions experiments that extract the effective aeroelastic damping from the response that ensues from giving the section model either an initial torsional or vertical displacement.

The buffeting effect of upstream turbulence is to produce generalized aerodynamic forces that are presumably independent of the deck section motion. The turbulent wake downstream of the bluff body, i.e. the signature turbulence, will also produce a buffeting effect, regardless of the presence of upstream turbulence. The combination of upstream turbulence with signature turbulence will presumably produce larger buffeting forces than those which form in smooth flow which are solely attributed to the signature turbulence.

Wind tunnel simulations of the prototype turbulent flow conditions are usually hampered by problems of scale. The wind gusts encountered at the bridge site are, in general, several times larger than the width of a typical bridge deck, ref. (4). The gusts which can be simulated in a wind tunnel by passive methods such as grids, strakes, wooden blocks,

etc. are usually somewhat smaller than the typical bridge deck section model, ref. (5). Two alternative solutions are available for the gust scale simulation problem. One alternative is to use significantly smaller section models, ref. (6). The use of small section models will alleviate the gust scaling problem but will exacerbate Reynolds number scaling problems and problems associated with faithfully reproducing the geometry of the prototype deck sections. The other alternative solution to the gust scaling problem is to use active gust generation techniques such as flapping airfoils or air-jet injectors.

This paper will present some of the results of a wind tunnel investigation of turbulent-wind bridge aeroelasticity. The section models were tested under smooth and gusting flow conditions. The gusting flow conditions were passively created, in one set of tests, by a grid and actively induced, in another set of tests, by a flapping-airfoil gust generator. The flapping-airfoil gust generator is capable of producing gusts that are several times larger than the width of a deck section.

The following sections will discuss, in succession, the experimental procedures and apparatus, the results of some of the experiments and a preliminary interpretation of the experimental results.

## 2. EXPERIMENTAL APPARATUS AND PROCEDURES

The innovative apparatus in this project were the flapping airfoil gust generators. The gust generators are positioned upstream of the deck section and create two-dimensionally coherent gusts by flapping an array of airfoils in unison. Two gust generators were used in this manner. One generator, referred to as the in-phase gust generator, flapped all of the airfoils in one direction, thereby controlling vertical gusts. The other generator, referred to as the out-of-phase gust generator flapped two airfoil arrays in opposite directions, thereby tending to choke off the flow and controlling the horizontal gust action.

The use of flapping-airfoil type gust generators for wind engineering purposes was originally proposed by Scanlan, ref. (7). The development of the gust generator technology was conducted at the Colorado State University Fluid Dynamics and Diffusion Laboratories, ref. (8). The result of these studies was the fabrication and installation of flapping-airfoil gust generators in the Federal Highway Administration's G. S. Vincent Wind Tunnel, McLean, VA. Details of some of the flow patterns that can be produced with the active gust generators can be found in ref. (9). A schematic diagram of the flapping-airfoil gust generator mechanism is shown in fig. 1.

The experiments that are reported in this paper represent the first use of the flapping-airfoil gust generators, described above, to the testing of bridge deck section models. Therefore, the experiments were designed so that the influence of the gust generators could be easily detected and evaluated. This design entailed performing standard state-of-the-art testing procedures on section models in both smooth and gusting flow patterns.

Two types of smooth flow patterns were employed in this study. One type was formed when the gust generators were removed from the wind tunnel. The resulting undisturbed airstream was quite smooth with a turbulence intensity of less than 1%. This approximately laminar flow will be referred to as the "Laminar" flow. The other type of smooth flow was produced, while the gust generators were installed in the wind tunnel. This flow was created by passing the air through the generators with the airfoils held in a neutral stationary position. The resulting flow was reasonably smooth flow with an intensity of approximately 3%. The flow produced by holding the gust generator airfoils in a neutral position, will be referred to as the "Neutral" flow.

Large-scale gusting flow patterns were induced by flapping the airfoils on the in-phase gust generator with a large-amplitude, 2.0 Hz. cutoff, low-pass filtered white noise random driving signal. This driving signal was selected so that the gust generators would produce one of the more violently turbulent flow patterns that the gust generators were capable of synthesizing. The gusting flow, which formed downstream of the generators and upstream of the section models, with this driving signal, was not intended to simulate any specific prototype field condition, but rather it was simply a large-scale high intensity flow pattern. Since the flow was produced by driving the in-phase gust generator with a 2.0 Hz. low-pass filtered white noise random signal, hereinafter it will be referred to as the "Low-Pass" flow. The intensity of the turbulence contained in the "Low-Pass" flow was measured at 20%. The length of the resulting gusts was quite large and could be extended, in theory, to infinity.

An additional type of turbulent flow was created by placing a 4x4 wood lath grid across the mouth of the wind tunnel. The wooden grid induced turbulence intensities that ranged from 10% to 20%. The flow pattern produced by the wooden grid will be referred to as the "Grid Turbulent" flow. The scale of the "Grid" turbulence and the spanwise coherence was somewhat smaller than that of the "Low-Pass" flow.

Three different section models were tested under these four flow regimes. The deck section models were geometrically faithful slices of the Deer Isle-Sedgewick, Maine, bridge, a proposed fairing-modified version of the Deer Isle bridge and the Golden Gate Bridge, San Francisco, Calif., figs. 2.a-c. The unmodified Deer Isle bridge is of the plate girder or H-type. The proposed fairing-modified version of the Deer Isle bridge forms a rather streamlined deck section. The Golden Gate deck section is of the open-truss type.

The standard section model tests consisted of: 1.) measuring the motion-dependent aerodynamic forces, i.e. the flutter derivatives, by initial condition experiments, 2.) recording the stationary response of the section model to stationary wind conditions. Both sets of experiments were performed with the deck section models mounted on flexible springs. This elastic support structure was constructed to permit motion in the vertical direction and in a torsional direction about a spanwise-running axis. The support structure was designed to restrain or enable the vertical and the torsional degrees of freedom separately, if desired. Therefore, the section model could be configured as either a single-degree-of-freedom system or as a two-degree-of-freedom system.

All of the flutter derivatives were measured with the section model configured to act as a single degree of freedom system. The flutter derivatives that could be measured with an S.D.O.F. setup were measured were the  $A_1^*(K)$ ,  $A_2^*(K)$ ,  $H_1^*(K)$  and the  $H_2^*(K)$  flutter derivatives, i.e. the auto-excited flutter derivatives. The stationary time histories were recorded with the deck sections mounted in three different configurations, one which permitted single degree of freedom vertical motion, one which permitted single degree of freedom torsional motion and one which permitted two degree of freedom combined vertical and torsional motion.

### 3. EXPERIMENTAL RESULTS

#### 3.1 Flow Measurements

The ability of the gust generators to produce controllable gusts is demonstrated by figs. 3-5. Figs. 3.a and 3.b are strip chart recordings of the flow that resulted from holding the airfoils in a stationary neutral position, i.e. the "Neutral" flow, at a mean velocity of 7 ft./sec, with an intensity of about 3%. An observation of these traces indicates that the "average" gust size is of the order of 1 ft. or less. Figs. 4.a, 4.b and 4.c are traces of the actuator motion and the gust velocities that result from flapping the in-phase airfoils with a 2.0 Hz. low-pass filtered, large-amplitude, white noise signal. The intensity of the resulting turbulence was 20%. An observation of figs. 4.b and 4.c

indicates that the "average" gust size which results from using these flow patterns is at least 7 ft, which is several times larger than the 1ft.-2ft. range of typical section model widths. Spectra of the actuator motion, vertical gust velocity, and the horizontal gust velocities which correspond to the "Low-Pass" flow are shown in fig. 5.

#### 3.2 Flutter Derivative Measurements

The  $A_1^*(K)$ ,  $A_2^*(K)$ ,  $H_1^*(K)$ , and  $H_2^*(K)$  flutter derivatives were extracted from the three section models under smooth and gusting flow patterns. fairing-modified Deer Isle deck section and the Golden Gate deck section were all measured under smooth and gusting flow conditions. Both versions of the Deer Isle deck section were tested under the "Laminar," "Neutral," "Grid Turbulent," and "Low-Pass" flows. The Golden Gate deck section was tested only under the "Neutral" and the "Low-Pass" flows.

The flutter derivatives which were measured by initial condition experiments are shown in figs. 6-8. Figs. 6.a-6.d contain the flutter derivatives that were extracted from the unmodified Deer Isle deck section. Figs. 7.a-7.d are the flutter derivatives which were extracted from the fairing-modified version of the Deer Isle deck section. Figs. 8.a-8.d are the flutter derivatives which were extracted from the Golden Gate deck section.

All of the flutter derivatives that are shown in figs. 6-8 were calculated from estimates of the effective aeroelastic damping and natural frequency. These estimates were performed with a digital version of the logarithmic decrement procedure that used all of the local maxima and minima in the free vibration response of the deck section to calculate the desired system parameters, ref. (10).

Since the logarithmic decrement procedure is strictly applicable to the case where a linear system is oscillating as the result of nonzero initial conditions without any applied external forces, such as buffeting forces, it was decided to verify some of the measured flutter derivatives with an independent procedure. One alternative method of estimating damping ratios and natural frequencies of elastically supported section models, is to measure the width of the peak that occurs in the spectrum of the displacement that results from buffeting the section with a broadbanded stationary random excitation. A modified version of this procedure which used a least-squares spectral curve fitting procedure, ref. (10), coupled with the use of a Maximum Entropy spectral estimator, ref. (11), was used to remeasure the  $A_1^*(K)$  flutter derivative under smooth and gusting flow conditions. The results of this independent flutter derivative extraction

procedure to the stationary response of the Golden Gate deck section are shown in fig. 9.

Since it is impractical to measure the reference zero-velocity viscous damping ratio by the spectral width procedure, the vertical positioning of the horizontal axis in fig. 9 is uncertain. If the mean of viscous damping ratios where were measured with transient initial condition experiments was employed, then the horizontal-axis takes the position of the solid line in fig. 9. However, since the  $A_2^*(K)$  flutter derivative should approach zero as the reduced velocity approaches zero the horizontal axis in fig. 9 should be shifted to reflect this physical constraint. The dashed horizontal axis which appears in fig. 9 reflects this ad hoc axis shift, which is based on physical reasoning.

### 3.3 Stationary Buffeting Response

The motions which resulted from allowing the elastically-supported section models to oscillate freely in the presence of buffeting forces due to upstream and signature turbulence were digitized and recorded on magnetic tape. Figs. 10-12 contain plots of the dimensionless root mean square displacement versus the reduced velocity for four different motion conditions. The torsional displacement is expressed in terms of radians, the vertical motion is rendered nondimensional by dividing the motion by the deck width. The wind velocity is reduced by the free vibration natural frequency of the particular degree of freedom under consideration and by the deck width.

The use of three different end support conditions required the observation of four different types of motion. The four displacement-types were: 1.) vertical single-degree-of-freedom motion, 2.) torsional single-degree-of-freedom motion, 3.) the vertical component of a two-degree-of-freedom motion, and 4.) the torsional component of two-degree-of-freedom motion. Figs. 10.a.-c. contain the RMS vs reduced velocity plots for the unmodified Deer Isle deck section under four flow conditions. Fig. 11.a.-d. contain the rms displacement vs. reduced velocity plots for the fairing-modified Deer Isle deck section. Figs. 12.a.-12.d. contain the RMS displacement vs. reduced velocity plots for the Golden Gate deck section.

### 4. INTERPRETATIONS AND CONCLUSIONS

The measurements of the flow conditions downstream of the gust generators indicated that the flapping airfoils are indeed capable of producing controllable large-scale gusts. If the airfoils are held in a neutral stationary position the resulting turbulence flow field is probably smooth enough to be used

as a nongusting reference flow condition. The ability of the gust generators to simulate prototype field conditions has not been entirely verified, although these studies indicate that it should at least be possible for those prototype conditions where the turbulence intensity exceeds 10%.

The flutter derivative measurements indicated that the presence of upstream turbulence will produce noticeable changes in the flutter derivatives. The  $A_2^*(K)$  flutter derivative for the unmodified Deer Isle deck section displayed a moderate change under smooth and gusting flow conditions. The  $A_2^*(K)$  derivative for the "Laminar" flow was unmeasurable in the reduced velocity range of 2-4 because of strong vortex-shedding action. The results indicate that the presence of the upstream turbulence in the "Low-Pass" flow have indicated causes a slight positive trend in the  $A_2^*(K)$  derivative, which indicates a destabilizing tendency due to the upstream gusting. The fairing-modification to the Deer Isle deck section produced radically different flutter derivatives from those of the unmodified Deer Isle deck section. Nevertheless, the presence of upstream gusting in both the "Grid Turbulent" and the "Low-Pass" flow causes an increased positive (destabilizing) trend in the  $A_2^*(K)$  derivative. Likewise the  $A_2^*(K)$  derivative for the Golden Gate Deck section also showed this same destabilizing trend in the  $A_2^*(K)$  derivative for the smooth and gusting flows.

Since the tendency of upstream gusting to produce an increased aeroelastic torsional instability is somewhat contrary to the conventional wisdom that turbulence is a stabilizing factor in bluff-body aerodynamics, the  $A_2^*(K)$  flutter derivative for the Golden Gate deck section was also measured by the alternative least-squares spectral width procedure. The remeasured  $A_2^*(K)$  derivative shows the same destabilizing tendencies due to upstream gusting as that of the transient response measurements. Therefore, in addition to verifying the result that upstream gusting can indeed exert a destabilizing influence upon the torsional dynamic motion of bridge deck section models, the two methods of system identification were verified.

The RMS displacement vs. reduced velocity curves exhibited a behavior that was consistent with the results of the flutter derivative experiments. The unmodified Deer Isle deck section showed an increased RMS response due to the upstream gusting except for certain isolated peaks which may be attributed to the vortex-shedding action in the smoother "Laminar" and "Neutral" flows. The changes in the flutter stability of the flutter stability of the unmodified Deer Isle deck section were not extremely dramatic. The fairing-modified Deer Isle deck section showed a considerable



increase in the vertical motion due to the presence of upstream turbulence. Since the addition of fairings produced a deck section that was quite stable, no changes were observable in the aeroelastic stability of the fairing-modified Deer Isle deck section. The Golden Gate section also exhibited an increased vertical response to upstream gusting. The presence of turbulence in the "Low-Pass" flow caused to section to become unstable at a lower velocity than that which was encountered in the smoother "Neutral" flow. This destabilizing trend was verified by the flutter derivative measurements. The instability which appeared in the Golden Gate motion was a torsional flutter-type instability, in spite of rather larger vertical buffeting motions.

Some of the overall conclusions that can be drawn from this study are that the use of flapping-airfoil type gust generators is a viable method of producing controllable large-scale gusting flow patterns. The future research capabilities of this apparatus are virtually unlimited. The measured changes in the aeroelastic behavior of the section models, at present forms a rather small data base. However, the preliminary conclusions that can be drawn from these results are that large-scale upstream gusting may, in some circumstances, be destabilizing and the gusting will possibly suppress vortex-shedding action.

#### ACKNOWLEDGMENTS

This research was conducted at the U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Turner-Fairbank Highway Research Center's wind tunnel facilities in McLean, VA. During the course of this study the first author received financial assistance from the National Highway Institute and the third author received financial support from the International Road Federation.

#### REFERENCES

- (1) Meirovitch, L., Methods of Analytical Dynamics, McGraw-Hill, 1970.
- (2) Scanlan, R. H. and Tomko, J. T., "Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivatives" ASCE, Jnl. Eng. Mech. Div., pp. 1717-1737, Dec. 1971.
- (3) Beliveau, J. G. Suspension Bridge Aeroelasticity Nonlinear Least Squares Techniques for System Identification, doctoral dissertation, Dept. of Civil Engineering, Princeton University, Sept. 1973.
- (4) Counihan, J. "Adiabatic Atmospheric Boundary Layers: A Review and Analysis of Data from the Period 1880-1972" Atmos. Environ., 9(1975), 871-905.

- (5) Jancauskas, E. D. and Melbourne, W. H., "The Aerodynamic Admittance of Two-Dimensional Rectangular Section Cylinders in Turbulent Flow," Proc. Fifth U.S. National Conference on Wind Engineering, Lubbock, Texas, 1985.
- (6) Lin, W. H., Forced and Self-Excited Responses of a Bluff Structure in a Turbulent Wind, Ph.D. dissertation, Princeton University, 1977.
- (7) Bienkiewicz, B., Cermak, J. E., Peterka, J., and Scanlan, R. H., "Active Modeling of Large-Scale turbulence," J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 13(1983), 465-476.
- (8) Cermak, J. C., Bienkiewicz, B. and Peterka, J., Active Modeling of Turbulence for Wind Tunnel Studies of Bridge Models, Final Report FHWA/RD-82/148.
- (9) Huston, D. R., and Bosch, H., "Active Modeling of Turbulence for Section Model Studies," Presented at the 16th U.S.-Japan Joint Panel on Wind and Seismic Effects, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, May 1984.
- (10) Huston, D. R., The Effects of Upstream Gusting Upon the Aeroelastic Behavior of Long Suspended-Span Bridges, doctoral dissertation, Princeton University, Department of Civil Engineering, May 1986.
- (11) Robinson, E. A., Multichannel Time Series Analysis With Digital Computer Programs, Holden-Day, San Francisco, 2nd Ed., 1978.

- A = Horizontal Gust Control
- B = Vertical Gust Control
- C = Linkage
- D = Hydraulic Actuators
- E = Bridge Model

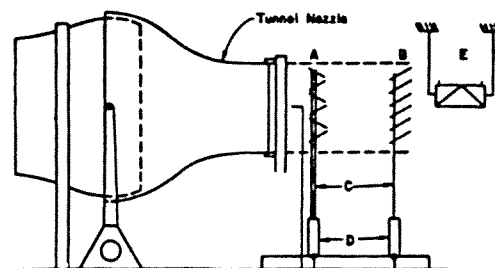


Fig. 1. Line drawing of the flapping-airfoil gust generators positioned downstream of the wind tunnel exhaust nozzle and upstream of the section model.

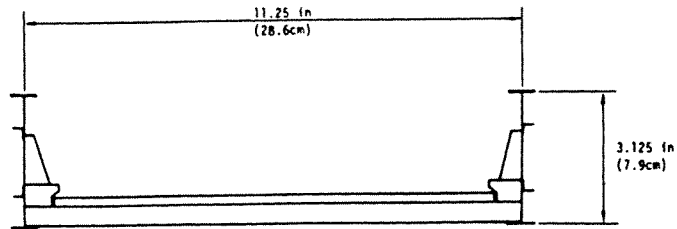


Fig. 2.a. Unmodified Deer Isle-Sedgewick, Maine, bridge deck section.



Fig. 2.b. Fairing-modified version of the Deer Isle deck section.

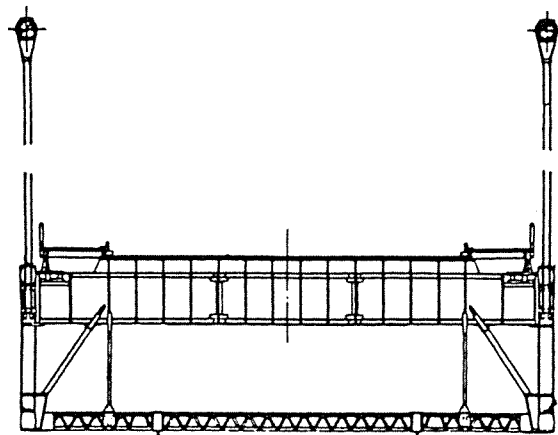
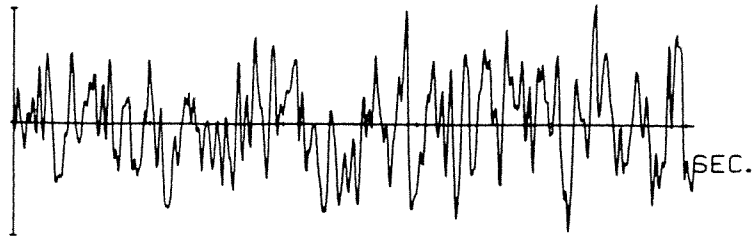
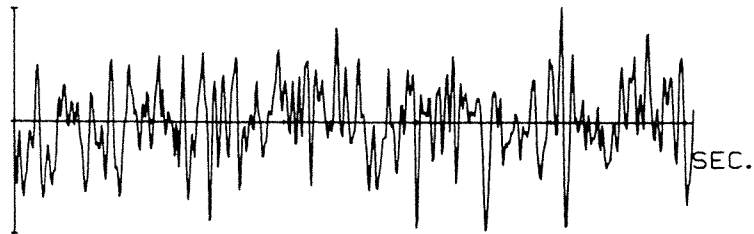


Fig. 2.c. Golden Gate deck section.

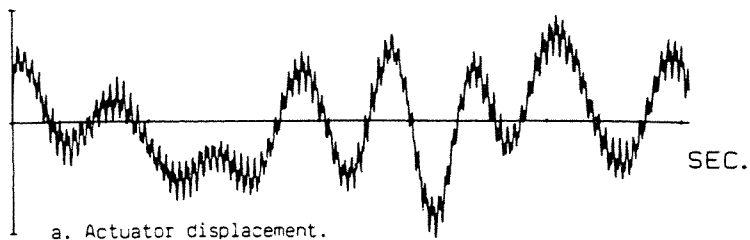


a. Horizontal gusting.

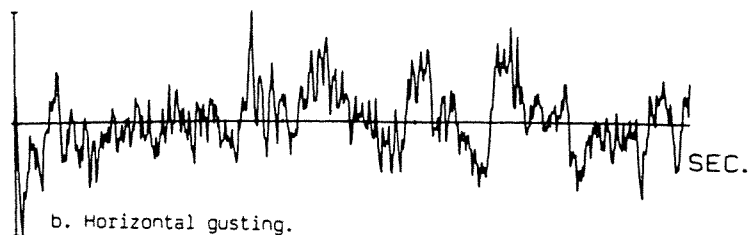


b. Vertical gusting.

Fig. 3. Typical simultaneous gust velocity time histories for the "Neutral" flow at a nominal mean velocity of 7 ft./sec.



a. Actuator displacement.



b. Horizontal gusting.

Fig. 4. Typical simultaneous gust velocity time histories for the "Low-Pass" flow at a nominal mean velocity of 7 ft./sec.

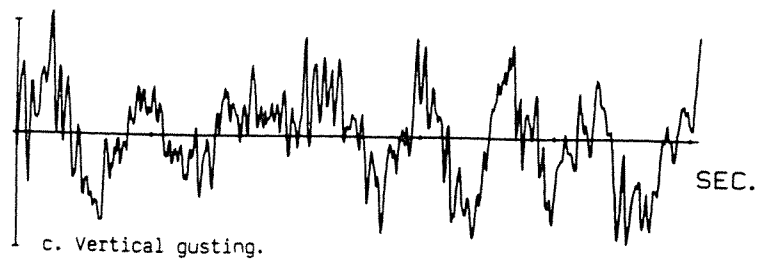


Fig. 4. (cont.) Typical simultaneous gust velocity time histories for the "Low-Pass" flow at a nominal mean velocity of 7 ft./sec.

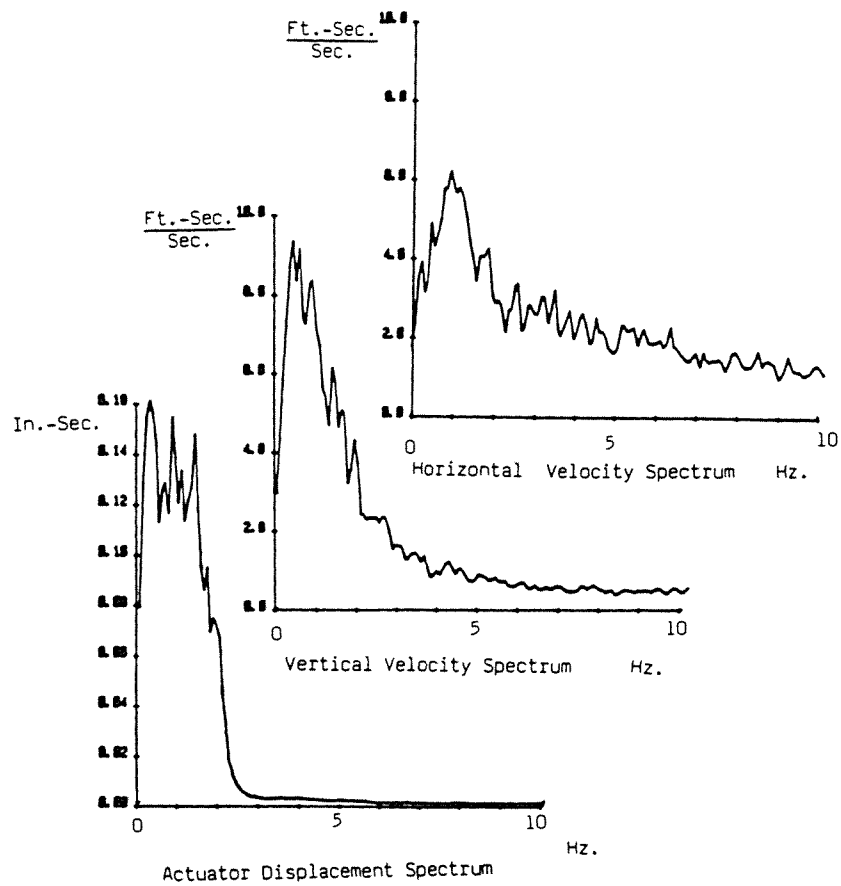
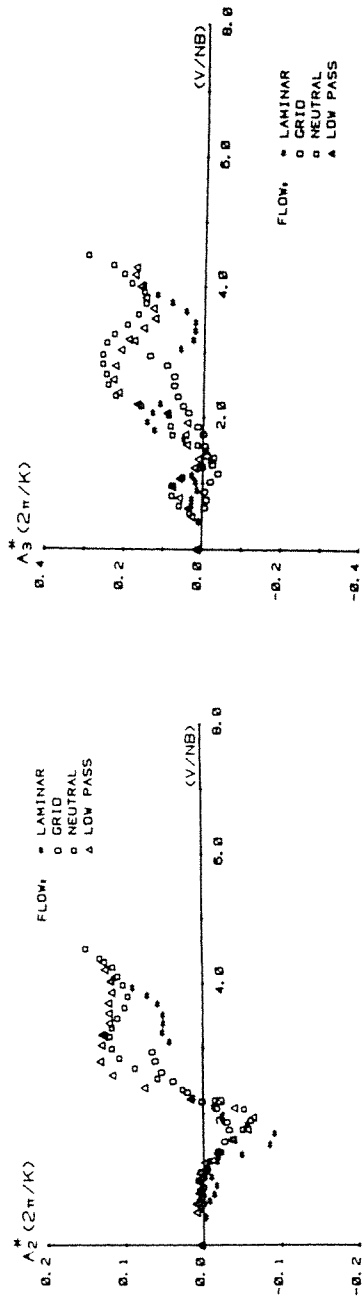
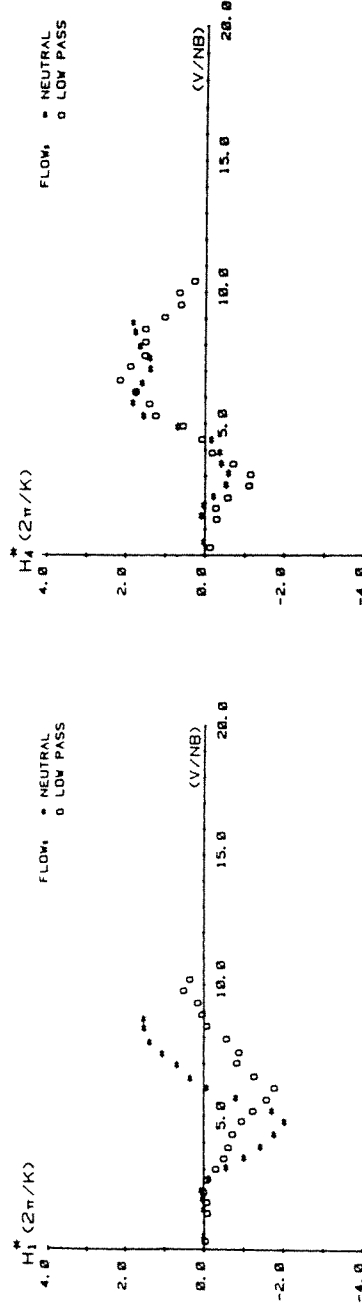


Fig. 5. Actuator and gust velocity spectra corresponding to the "Low-Pass" flow.



a.  $A_2^*$  vs. reduced velocity.

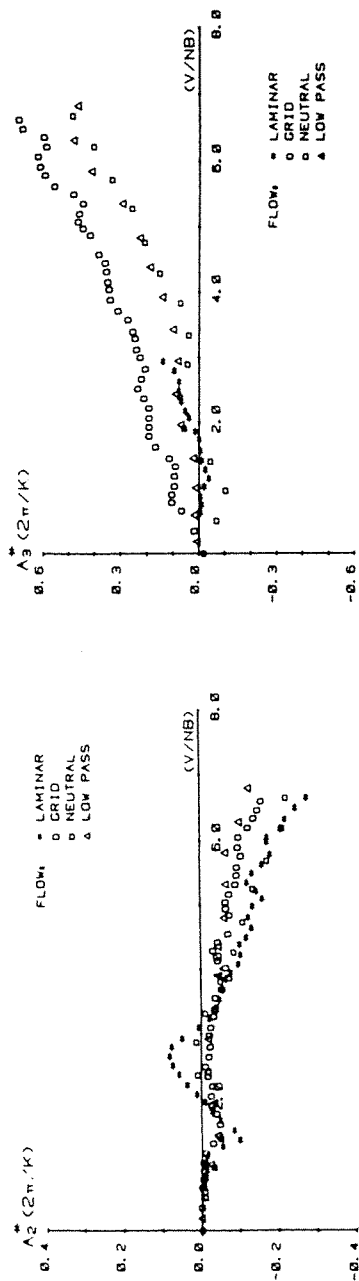
b.  $A_3^*$  vs. reduced velocity.



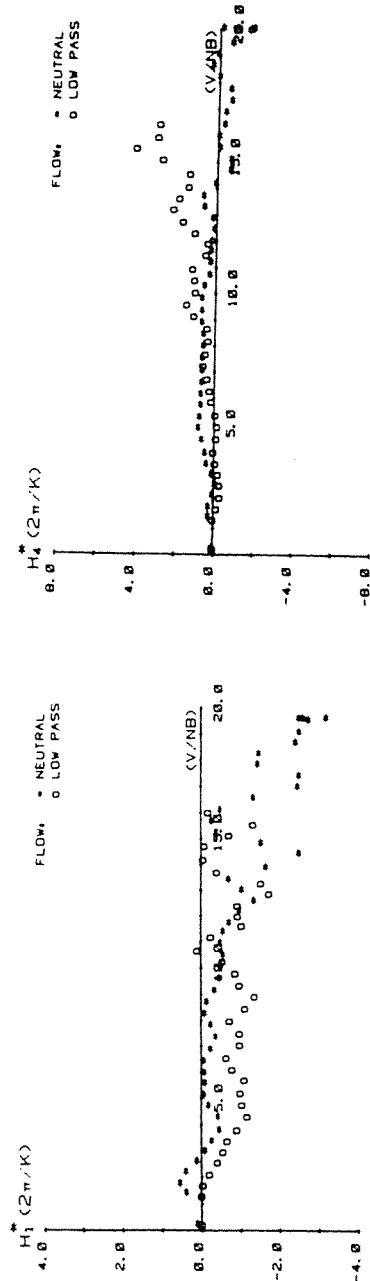
c.  $H_1^*$  vs. reduced velocity.

d.  $H_4^*$  vs. reduced velocity.

Fig. 6. Unmodified Deer Isle bridge: flutter derivatives, extracted from initial condition experiments.



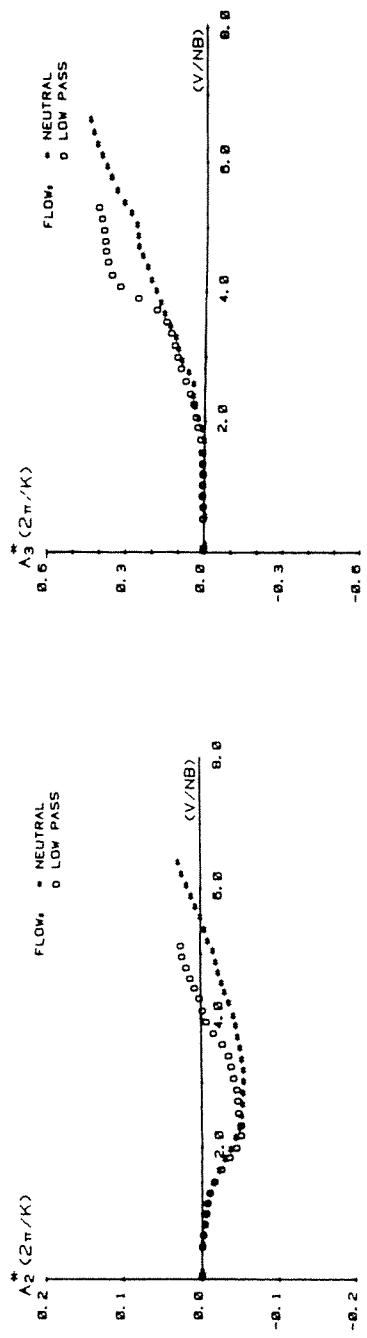
b.  $A_3^*$  vs. reduced velocity.



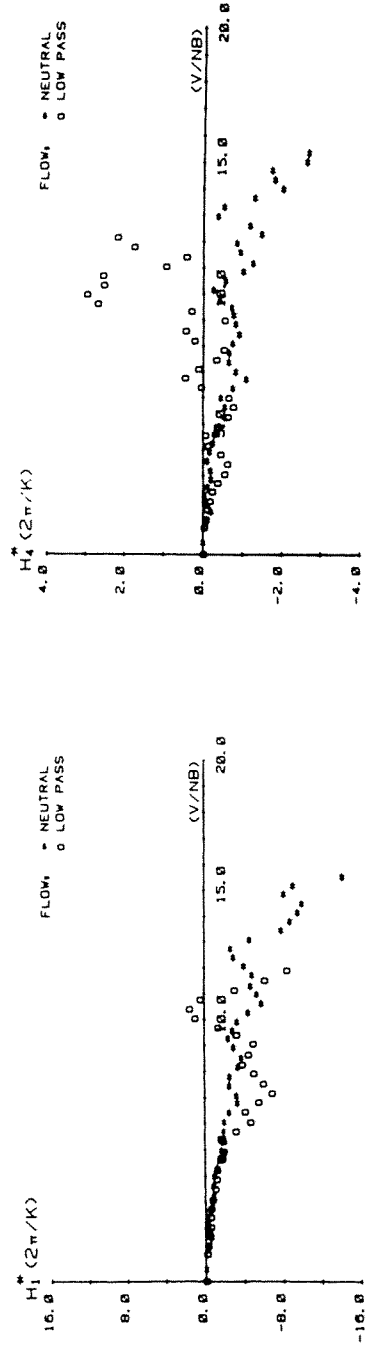
d.  $H_4^*$  vs. reduced velocity.

c.  $H_1^*$  vs. reduced velocity.

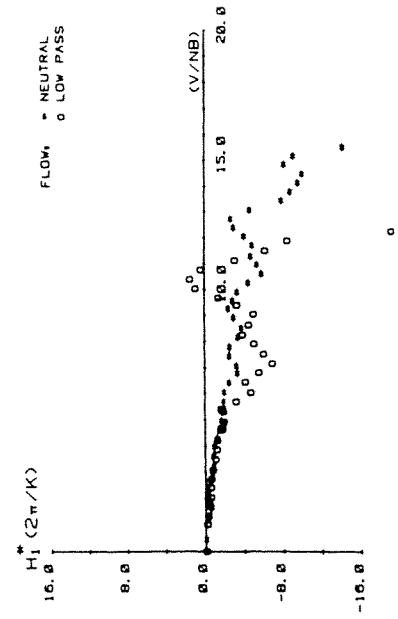
Fig. 7. Fairing-modified version of the Deer Isle bridge: flutter derivatives, extracted from initial condition experiments.



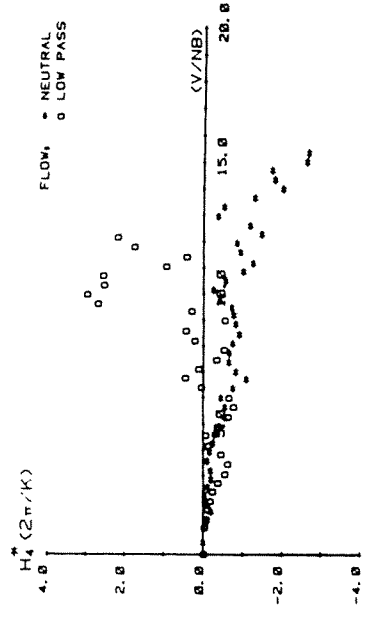
a.  $A_2^*$  vs. reduced velocity.



b.  $A_3^*$  vs. reduced velocity.



c.  $H_1^*$  vs. reduced velocity.



d.  $H_4^*$  vs. reduced velocity.

Fig. 8. Golden Gate deck section: flutter derivatives extracted from initial condition experiments.

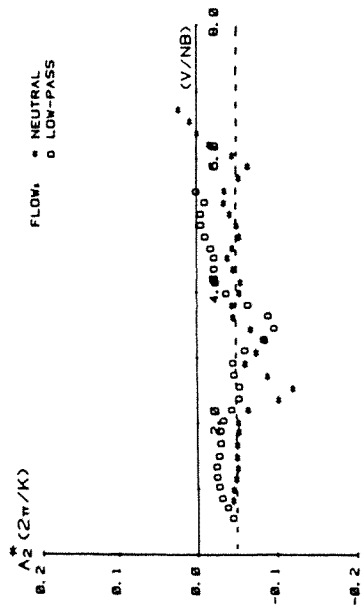


Fig. 9 Golden Gate Bridge deck section flutter derivative, extracted by the stationary time history method, (---) indicates ad hoc shift in the vertical axis.

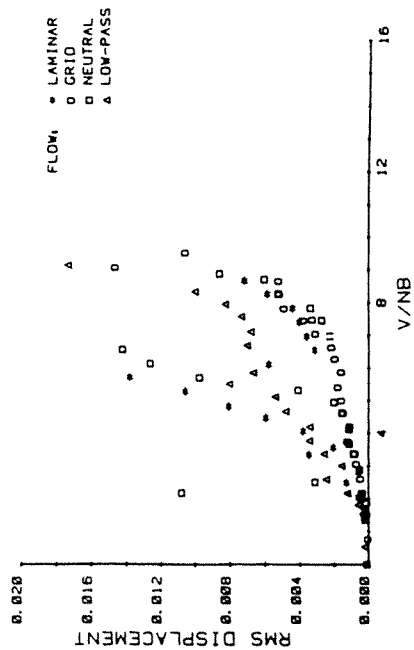


Fig. 10.b. Unmodified Deer Isle deck section, RMS vertical disp. vs. reduced velocity, torsion and vertical D.O.F. enabled.

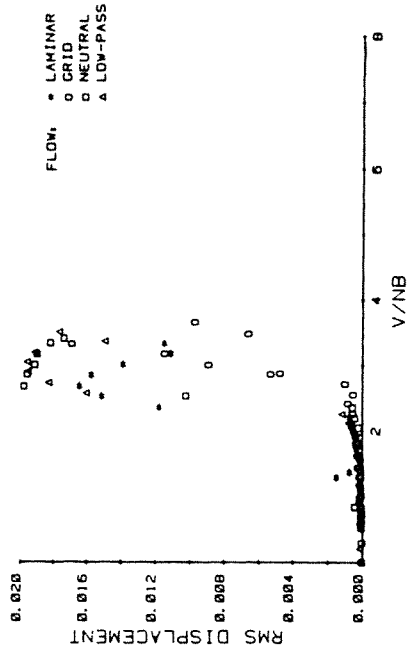


Fig. 10.a. Unmodified Deer Isle deck section, RMS torsional disp. vs. reduced velocity, torsion and vertical D.O.F. enabled.

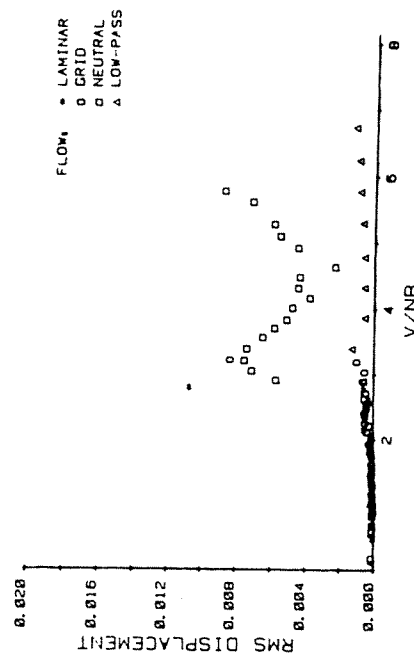


Fig. 10.c. Unmodified Deer Isle deck section, RMS torsional disp. vs. reduced velocity, torsion D.O.F. enabled.



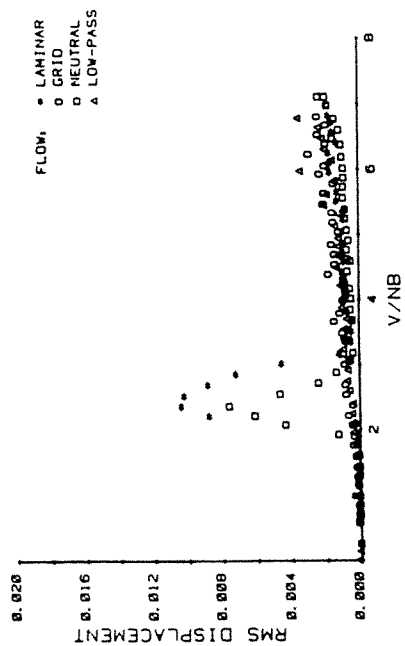


Fig. 11.a. Fairing modified Deer Isle deck section, RMS torsional disp. vs. reduced velocity, torsion and vertical D.O.F. enabled.

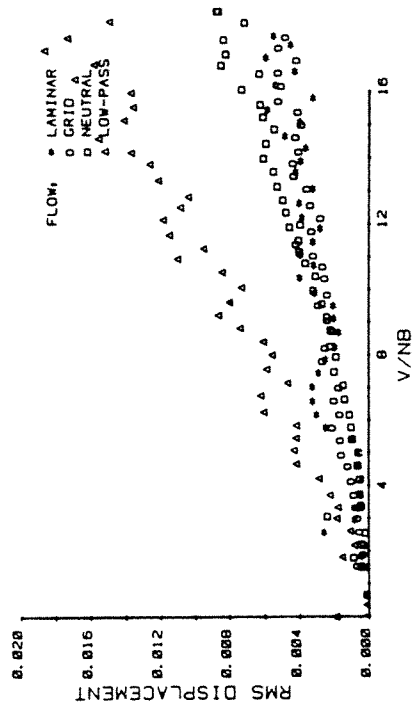


Fig. 11.b. Fairing modified Deer Isle deck section, RMS vertical disp. vs. reduced velocity, torsion and vertical D.O.F. enabled.

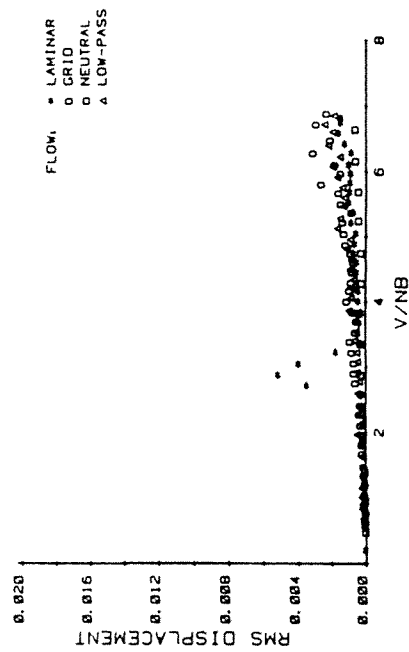


Fig. 11.c. Fairing modified Deer Isle deck section, RMS torsional disp. vs. reduced velocity, torsion D.O.F. enabled.

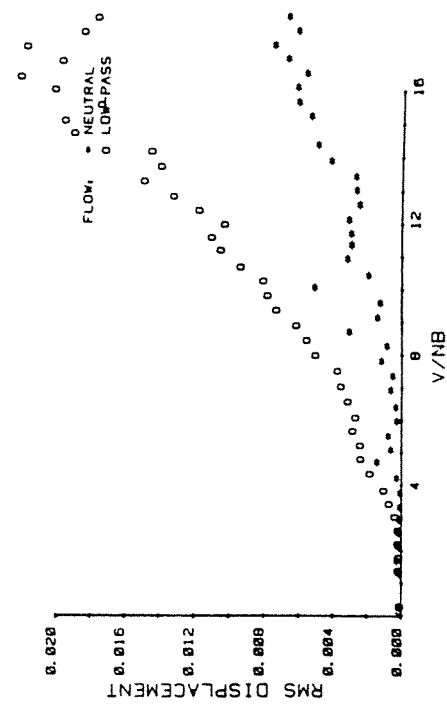


Fig. 11.d. Fairing modified Deer Isle deck section, RMS vertical disp. vs. reduced velocity, vertical D.O.F. enabled.

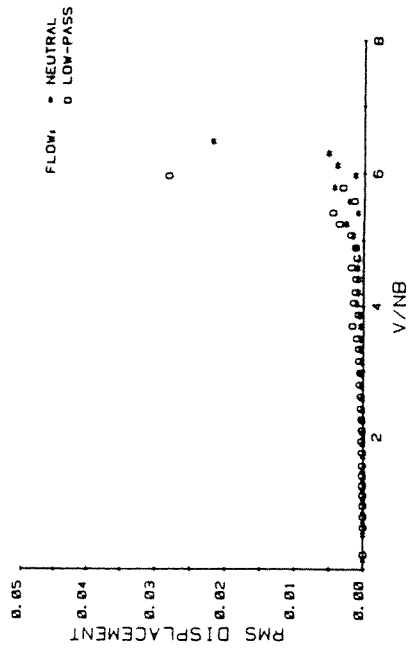


Fig. 12.b. Golden Gate deck section, RMS torsional disp. vs. reduced velocity, torsion and vertical D.O.F. enabled.

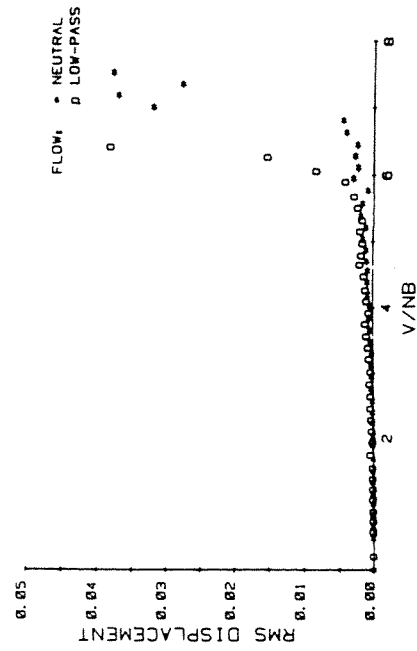


Fig. 12.d. Golden Gate deck section, RMS torsional disp. vs. reduced velocity, torsion D.O.F. enabled.

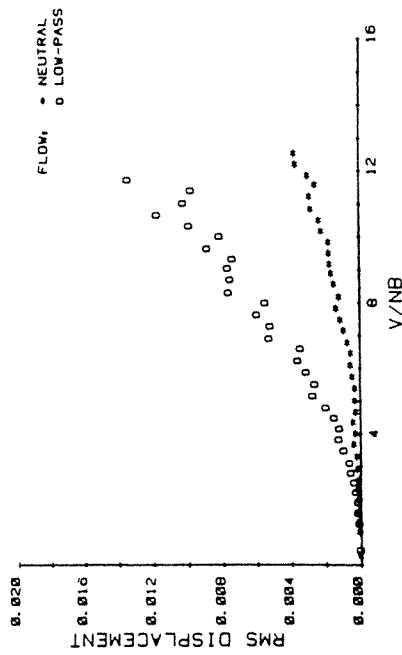


Fig. 12.a. Golden Gate deck section, RMS vertical disp. vs. reduced velocity, torsion and vertical D.O.F. enabled.

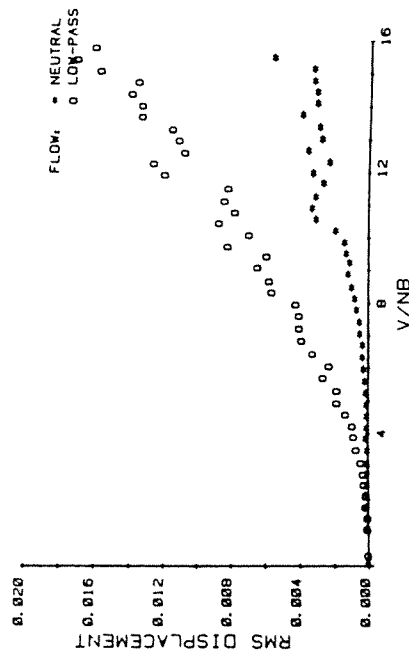


Fig. 12.c. Golden Gate deck section, RMS vertical disp. vs. reduced velocity, vertical D.O.F. enabled.