

# 超長大橋の技術課題

建設省土木研究所構造研究室長 佐藤弘史

## 1. まえがき

現在、新しい国土軸あるいは多様な地域連携軸の形成に向け、東京湾口道路、伊勢湾口道路、紀淡連絡道路など、全国各地で海峡部を横断する道路プロジェクトが構想されている。これらのプロジェクトでは、明石海峡大橋を越える規模の超長大橋の建設が含まれる可能性がある。このため、このような大規模構造物の技術的可能性を調査し、今後の技術調査方針をとりまとめることを目的として、平成3年に海峡横断道路プロジェクト技術調査委員会が設立された。同委員会では、平成5年の報告書<sup>1)</sup>において、既往の実績を2～3割程度上回る範囲の大規模構造物は、技術的には不可能でないが、より経済的・合理的に計画するためには、相当な技術開発を行う必要がある、として技術開発の目標を提案している。このうち、超長大橋に関わる目標を表1に示す。中期的目標としてあげられた技術的課題のうち、特に優先度の高いものについては、平成6年より同委員会を中心として、課題を早期に解決するため新技術の開発・検討が進められている。

表1に示されているように、超長大橋の技術課題は多岐にわたるが、ここでは、耐風設計に焦点をあて記述していく。これは、超長大橋の技術課題の中で、中央径間が長くなるに従いその安全性の確保が困難となるのが耐風性であるからである。

以下では、まず中央径間と耐風性との関連について述べ、次に明石海峡大橋までの耐風設計技術の発展を概観し、現在研究されている超長大橋の耐風性向上技術を記述し、最後に今後の課題を述べる。

表1 技術的課題に対する調査・研究・開発目標<sup>1)</sup>

項目	中期的目標	長期的目標
超長大吊橋の耐風設計	より耐風性に優れた桁断面やケーブルシステムの開発	新形式吊橋の開発
超長大吊橋上部構造の設計・施工	工費の低減、工期の短縮を目指した施工法の開発	ケーブル材料に関して、従来の強度(180kgf/mm <sup>2</sup> )を越える高強度鋼線や新材料の開発
長大多径間吊橋の設計・施工		長大多径間吊橋の合理的設計・施工法の開発
大深度(大水深、軟弱地盤)基礎の設計・施工	既往基礎形式の拡張による ・大水深直接基礎 ・深い軟弱地盤内に設置可能な大深度剛体基礎 の設計・施工法の開発	大水深海域に適用可能な新形式基礎の設計・施工法の開発
超長大吊橋の耐震設計	近距離大規模地震における設計用入力地震動の設定方法の開発 基礎の動的安定照査法の開発 減衰性向上のための制震技術の開発	新形式吊橋の耐震設計法の開発

## 2. 長大橋の中央径間と耐風性

本項では、中央径間の大きな長大橋あるいは超長大橋において、耐風性の確保が極めて重要な課題であることを、単純な近似的理論ならびに推定式により示す。

### (1) 中央径間と固有振動数

中央径間が大きくなるに従い橋の固有振動数が低下することは、梁あるいは弦の固有振動数の公式から容易に

推定されるが、ここではBleichの理論<sup>2)</sup>に基づき、吊橋の固有振動数に及ぼす中央径間の影響を試算する。試算に当たっては、3径間吊橋を想定し、各径間の比率を1:2:1、サグ比を1/10とし、中央径間を1000m、1500m、2000m、2500m、3000mと変えていく。補剛桁断面はどの中央径間の吊橋でも同じものとし、桁幅35m、桁高5m、板厚0.02mの1箱桁とし、さらに舗装など剛性に寄与しない質量を8t/mと仮定する。ケーブルは2本とし、ケーブル間隔は35mとした。

計算より求まる、質量、鉛直たわみ対称1次固有振動数、ねじれ対称1次固有振動数を表2に示す。表より、中央径間の増加に伴い固有振動数が低下していくことがわかる。

表2 吊橋の中央径間と振動数およびフラッター風速の試算例

中央径間 (m)	1000	1500	2000	2500	3000
ケーブル以外の質量 (t/m)	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5
ケーブル質量 (t/m)	3.0	4.9	7.2	9.8	13.0
総質量 (t/m)	23.6	25.5	27.7	30.4	33.6
鉛直たわみ対称1次固有振動数 (Hz)	0.091	0.070	0.060	0.053	0.049
ねじれ対称1次固有振動数 (Hz)	0.470	0.306	0.223	0.173	0.140
フラッター風速 (m/s)	142	97	75	61	52

## (2) 風による振動の種類

橋梁には、風により次の3種類の動的な空気力が作用する。

- a. 接近流に含まれる乱れによる空気力
- b. 橋梁自身の振動により付加される空気力
- c. 橋梁から放出される渦による空気力

これらの空気力の作用により、橋梁は振動することがある。風による橋梁の振動は、どの空気力が主たる原因となって発生したかにより、次のように分類されることが多い。

- a. パッフェティング：接近流に含まれる乱れによる空気力が主たる原因となって発生する振動

このうち、自然風の乱れによるものは、とくにガスト応答と呼ばれる。不規則な振動波形を示し、振幅あるいは振動変位の標準偏差は、概ね風速の2乗に比例して増加する。通常設計風荷重に含めてその影響は考慮される。

- b. 自励振動：橋梁自身の振動により付加される空気力が主たる原因となって発生する振動

自励振動のうち、振動モードがねじれモードのものはねじれフラッター、ねじれと鉛直たわみとが連成しているものは連成フラッター、鉛直たわみモードのものはギャロッピングと呼ばれる。風速がある限界値以上になると、発現する振動である。風速の増加に対する振幅の増加の割合が急激であり、この意味で発散的な振動である。振動波形は概ね正弦波に近い。発現すると構造物に致命的な影響を及ぼすため、設計ではこの発現風速が照査風速より高いことを確認する必要がある。

- c. 渦励振：橋梁から放出される渦による空気力が主たる原因となって発生する振動

自励振動の限界風速に比べると低い風速で、しかも限られた風速範囲でのみ発現する。振動波形は正弦波に近く、振幅もある値以上には大きくならない限定的な振動である。通常、使用性、疲労などの観点から渦励振の影響は照査される。

## (3) 中央径間とフラッター風速

以上述べたように、長大橋は風により様々な振動が発生しうるが、これらの振動のうち橋に致命的な損傷を与える、という点で最も重要な現象はフラッターである。このため、以下ではフラッターに着目し、(1)の結果に基づき、Selbergの式より各吊橋のフラッター風速を推定する。Selbergの式は、次の通りであり、平板空気力特性を有する鉛直たわみ・ねじれ2自由度の構造物のフラッター風速 $U_f$ を近似的に推定するも

のである。

$$Uf = 3.71 f \theta (1 - (f h / f \theta)^2)^{0.5} (m l)^{0.25} (\rho B)^{-0.5}$$

ここに、 $f \theta$  : ねじれ固有振動数、 $f h$  : 鉛直たわみ固有振動数、 $m$  : 単位長さあたり質量、 $l$  : 単位長さあたり極慣性モーメント、 $\rho$  : 空気密度、 $B$  : 桁幅

計算結果を表2に併せて示す。

なお、(1)で考えている矩形断面では、実際のフラッター風速は平板空気力に基づいて推定されるフラッター風速より低くなるものと考えられる<sup>3)</sup>。したがって、Selberg式より推定されるフラッター風速は、質量・剛性を変化させずに断面形状を改良したときに得られる1箱桁断面の最良のフラッター風速と考えることができる。一方、耐風設計ではフラッター風速を照査風速と呼ばれる風速より高くすることが必要である。この照査風速は、架橋地点の風の特性等に基づき設定されるが、明石海峡大橋の場合、照査風速は78m/sであり、他の長大橋においてもこれに近い値をとることが多い。以上のことより、中央径間が2000m級あるいはそれ以上となる超長大橋においては、フラッターなどに対する耐風性の確保が重要であり、流線型箱桁のように平板空気力に近い特性を有する箱桁を採用するという考えでは、耐風性の確保は必ずしも容易でないことが想像されよう。

### 3. 長大橋の耐風設計技術の発展

#### (1) 発展の契機

橋梁の耐風設計法の発展に大きな影響を与えたものとして、Tay橋の事故<sup>4)</sup>、ならびにTacoma Narrows橋の事故<sup>4)</sup>が挙げられる。Tay橋はスコットランドのTay川を跨ぐ鉄道橋であり、全長約3000m、85径間のラティストラス橋であった。1879年12月に、暴風により、13径間の主構が列車とともに水中に落ち、75名の人命が失われた。この事故をきっかけとして、風圧に関する研究が実施され、橋梁の設計にも反映されるようになった。

Tacoma Narrows橋は、米国Tacoma市近くのPuget Sound上に架けられた、プレートガーダーを補剛桁とする、支間853mの吊橋であった。1940年の開通直後より、風により上下に振動しており、同年11月7日に風速約19m/sの風により激しいねじれ振動が生じ、約300mの橋床部が落下した。本橋は、風速53m/sまでの風圧に対しては安全であるように設計されていたが、風による振動に対してはほとんど注意が払われていなかった。この事故を契機として、吊橋の風による振動に対する研究が進められるようになった。

耐風設計法の発展に第三の転機をもたらせたものは、1960年頃のA. G. Davenportの研究であるといわれている<sup>5)</sup>。この研究は、自然風の風速変動によって構造物にもたらされる不規則振動を、自然風の変動特性ならびに構造物の振動特性を考慮して、統計的手法により推定するものである。本研究を契機として、設計に用いる風荷重は、静的な風圧のみならず、この不規則振動の影響も考慮して設定されるようになった。

#### (2) 吊橋の耐風性向上技術

Tacoma Narrows橋の落橋以降、吊橋の設計において耐風性への配慮が行われるようになったが、ここでは、代表的な例としてNew Tacoma橋とSevern橋の設計について述べる<sup>6)</sup>。

落橋したTacoma Narrows橋に代わり建設されたNew Tacoma橋では、耐風性を向上させるため以下のような工夫が施されている。

- a. 補剛桁をプレートガーダーからトラスに変更したこと。
- b. 橋床にグレーチングを設け、開床構造としたこと。
- c. 下横構を設け、吊り構造部のねじれ剛性を高めたこと。

New Tacoma橋以降、Mackinac橋などトラス補剛桁を用いて吊橋の耐風性を確保することが多かったが、これと全く異なる考え方で耐風性を確保した例がSevern橋である。本橋では、流線型箱桁を補剛桁として採用しており、風荷重が小さく、またねじれ剛性が高いためフラッター限界風速が高いという特長を有している。

### (3) わが国の耐風設計

#### a. 設計基準

わが国において、本格的な長大橋の耐風設計が実施されたのは、若戸大橋が最初であるといわれている。その後、本州四国連絡橋プロジェクトを実現させるため、それまでの耐風設計に関する技術を世界で初めて体系化させ、「本州四国連絡橋耐風設計指針(1964)」を作成した。わが国のほとんどの長大橋の耐風設計は、本指針ならびにこれを改訂した「本州四国連絡橋耐風設計基準(1976)」(以下、「本四基準」と略す)を準用して実施されており、その考え方は次のとおりである。まず、架橋地点周辺の風の観測データに基づき設計の基本となる風速を定め、次に風洞実験等により橋梁の風による変形及び振動を推定し、その変形性状あるいは振動性状が安全なものかどうかを評価し、必要な場合には設計を変更する。

#### b. ガスト応答に対する設計

風の主流方向のガスト応答(橋桁の場合には水平たわみ振動)に関しては、同じ方向の定常的な空気力と併せて、設計風荷重として評価し、他の荷重と同様に静的設計において考慮される。ガスト応答の推定は、Daventryの提案した方法<sup>7)</sup>に従っている。風速ならびにそれに起因する空気力が時間的・空間的に変動するため、運動方程式をそのまま解くのではなく、パワースペクトル密度関数などにより、周波数領域で風速ならびに空気力の特性を記述し、空力アドミッタンス(風速変動のパワースペクトル密度関数と変動空気力のそれとを関係付けるもの)、メカニカルアドミッタンス(変動空気力のパワースペクトル密度関数と振動変位のそれとを関係付けるもの)を用いて応答を推定する。

#### c. 自励振動・渦励振に対する設計

自励振動・渦励振に対しては、乱れのほとんど無い一様気流中のバネ支持模型試験により、その特性が推定され、耐風性が評価されてきた。

バネ支持模型試験とは、橋桁の一部分を模型化し、これをバネにより鉛直たわみ・ねじれ2自由度で支持し、風を流し、風による振動振幅、減衰性状などを計測する試験である。振動の評価にあたっては、気流の変動特性に応じた風速範囲、迎え角範囲を予め設定しておき、この範囲内で構造物に有害な振動が発生しないことを確認するというものである。

振動が発現する場合には、橋桁の断面形状を僅かに変更することにより耐風性を向上させる、という対策が講じられることが多かった。これらの内、耐風性の向上を目的に小型の部材を取り付けることは、空力的対策と呼ばれ、その代表的なものにフラップ(端抑流板)<sup>8)</sup>および鉛直スタビライザー<sup>9)</sup>が挙げられる。フラップは充腹断面箱桁の渦励振を抑制するために用いられ、また、鉛直スタビライザーはトラス補剛桁のフラッター発現風速を高めるために用いられた。

### (4) 明石海峡大橋の耐風設計<sup>10)</sup>

明石海峡大橋は、それまでの長大吊橋の中央径間長を大幅に上回る超長大橋である。このため、明石海峡大橋の耐風設計に当たっては、橋梁の対風応答特性に及ぼす自然風の乱れの影響をより忠実に反映させた「明石海峡大橋耐風設計要領」を作成し、これに従い様々な桁形式に対し実験・解析に基づく耐風性の検討が精力的に進められた。

その結果、経済性、耐風安定性の観点から、トラス補剛桁案と2種箱桁案とが選定された。このうち後者は、主塔付近に桁高の高い箱桁を配置してねじれ剛性を確保し、径間中央に桁高の低い箱桁を配置して空力特性を向

上させる、という考えの構造である。この2案に対し、経済性、耐風性、応力余裕度、架設、維持管理等を総合的に勘案し、トラス補剛桁案が最終的に選定された。

さらに、トラス補剛桁案については、耐風安定性を向上させるため、中央分離帯の下に鉛直スタビライザーと称する部材を取り付けることとした。

#### (5) 明石海峡大橋の全橋弾性模型風洞試験<sup>11)</sup>

トラス補剛桁案のフラッターに対する安全性の検討はバネ支持模型試験により検討されてきたが、既往の例を見ない明石海峡大橋の規模を考慮すると、その耐風性を精度よく検証するため、全橋弾性模型を用いた風洞試験を実施することが必要と考えられた。

##### a. 大型風洞と模型

明石海峡大橋のトラス補剛桁形状を精度よく再現させるためには、模型の縮尺を少なくとも1/100にする必要があると考えられた。このためには幅がおよそ40mの風洞が必要となるが、当時そのような風洞はなかったため、本州四国連絡橋公団と建設省土木研究所との共同研究の一環として大型風洞施設が1991年に土木研究所構内に建設された。この大型風洞施設は、測定部の大きさが幅41m、高さ4m、長さ30mであり、土木構造物用の風洞としては世界最大規模の施設である。

模型縮尺は1/100とし、形状、質量分布および剛性が実橋と相似になるように設計された。特に補剛桁は、剛性棒を用いず、剛体ブロックとバネにより剛性を相似させることとした。また、ケーブルについては、質量、抗力および延び剛性を相似させることとしたが、ケーブルが桁と接近する中央径間中央付近では、ケーブルが桁の空力特性に及ぼす影響を考慮し、ケーブル自身の抗力よりむしろ形状を相似させることとした。

##### b. 試験より得られた知見

試験では、静的変形、フラッターおよびガスト応答が観測された。静的変形およびガスト応答は設計において想定していた値以内であり、また、フラッター風速は照査風速より高かったため、耐風設計の妥当性を確認することができた。さらに、本風洞試験により、それまでの長大吊橋では経験することのなかった、2000m級の超長大橋のフラッター特性、ガスト応答特性を把握することができた。新たに得られた知見は以下の通りである。

中央径間1000m程度の吊橋では桁のねじれ変形は無視し得るほど小さいが、明石海峡大橋の全橋模型風洞試験では、主として抗力に起因する、桁の大きな静的ねじれ変形が観測された。このねじれ変形の大きさは橋軸方向に変化しており、気流が水平としても相対的な迎え角を橋梁に与えることとなる。フラッター特性は迎え角によって変化するため、超長大橋のフラッターではこのような静的ねじれ変形の影響を考慮する必要がある。

明石海峡大橋の全橋模型試験では、連成フラッターが観測された。見かけの回転中心は、中央径間中央では上流側に、1/4点では下流側に、また側径間中央では上流側に位置していた。フラッター時の振動モードはねじれモードは対称1次の固有振動モードと同様であったが、鉛直たわみモードは、どの固有振動モードとも一致しない複雑な形状を示していた。したがって、超長大橋のフラッター特性をバネ支持模型試験から直接的に推定することは困難であるといえる。

従来、長大橋のフラッターを検討する場合には、振動モードとして鉛直たわみモードおよびねじれモードそれぞれの最低次の振動モードを考慮し、それぞれの振動に起因する揚力および空力モーメントを考慮すれば十分と考えられてきた。しかしながら、明石海峡大橋の全橋模型風洞試験および比較のための解析によれば、超長大橋のフラッター特性を精度よく推定するためにはこれらに加え、水平たわみの振動モード、それぞれの振動の高次のモードも考慮する必要があること、さらに空気力としてもこれらの振動に起因する抗力、揚力、空力モーメントを考慮する必要があることが明らかとなった。

ガスト応答は、定常的な抗力と併せて設計風荷重として設計で扱われており、長大橋橋桁の諸元を決定する要因の1つである。ガスト応答の推定に当たっては、自然風の風速の時間的および空間的な変動特性を考慮する必

要があるが、この内の2点間の風速の相関特性について、従来は2点の距離がいくら離れていても周波数が0に近づくと相関係数は1に近づくと、というモデルを用いていた。しかしながら、明石海峡大橋の風洞試験および比較のための解析によれば、超長大橋のように最低次の固有振動数が極めて低い構造物に対しては、このモデルではガスト応答を過大に評価することが明らかになった。自然風など実際の境界層乱流では、2点の距離が離れるに従い周波数が0に近づいても相関係数は1より小さくなる<sup>12)</sup>ため、超長大橋のガスト応答を精度よく推定するためには、風速の空間的変動特性を忠実に考慮したモデルを用いる必要があることが明らかとなった。

#### 4. 耐風性に優れた超長大橋の研究

本項では、明石海峡大橋の中央径間を2～3割程度超える規模の超長大橋を対象として、その耐風性を経済的に確保させるために実施した研究成果を記述する。

現在までに、箱桁を補剛桁とする超長大吊橋を対象とした研究が進められている。箱桁断面は、抗力が小さく維持管理が容易である等の長所があるが、2で述べたように、これをSevern橋のように流線型断面として用いるだけでは、対象とする超長大橋で所要のフラッター特性を経済的に確保することは困難である。このため、ケーブルシステムの工夫など構造特性を向上させるアプローチと、桁断面の改良など空力特性を向上させるアプローチとにより、耐風性の向上を検討した。

##### (1) ケーブルシステムによる耐風性の向上<sup>13) 14)</sup>

本アプローチは、ケーブルの張り方を工夫し、構造系全体のねじれ剛性、等価極慣性モーメントを高め、フラッター限界風速を向上させようとするものである。ケーブルシステムのうち、主ケーブルを1本とするモノケーブル、橋軸直角方向の鉛直面内で2本のハンガーを交差させるクロスハンガーが、ねじれモードの固有振動数の向上および等価極慣性モーメントの向上に効果があることが明らかとなった。また、1箱桁断面の超長大橋(スパン割：1250m+2500m+1250m)について、フラッター解析によりクロスハンガーの効果を試算した結果によれば、クロスハンガーのない通常の吊橋の場合フラッター風速が61m/sであるのに対し、ケーブルのクロスハンガーを設置すると72m/sに、また鋼材のクロスハンガーを設置すると81m/sにそれぞれフラッター風速が上昇することが明らかとなった。

##### (2) 桁断面の改良による耐風性の向上

本アプローチは、桁断面を改良し、平板空気力特性よりフラッター風速の高い空気力特性を有する断面形状を得ようとするものである。

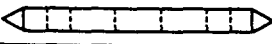
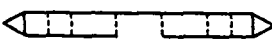
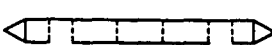
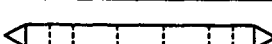
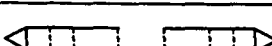
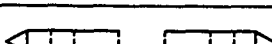
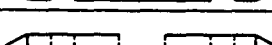
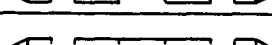
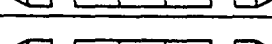
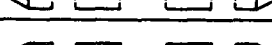

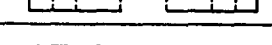
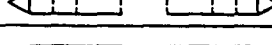
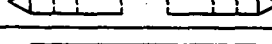
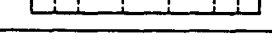
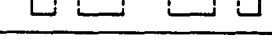
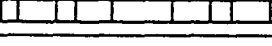






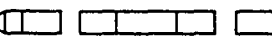
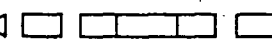

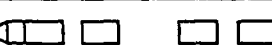
###### a. 開口部を有する箱桁のフラッター特性<sup>13)</sup>

超長大吊橋の箱桁を想定し、箱桁に開口部を設けることによる耐風安定性への影響を一樣気流中のパネ支持模型風洞試験により検討した。超長大橋として中央径間3000m級の吊橋を想定し、桁幅Bと桁高dの比が12および17の2種類の扁平六角形箱桁を設定した。模型A(B/d=12)、模型B(B/d=17)ともに、桁の一部分を脱着できるようになっており各所に開口部(桁の上下面に風が抜ける穴)を設けられる。

試験ケースおよび結果を表3に示す。模型Aの結果を見ると、フラッター風速を上昇させるためには、フェアリングを設置させた基本断面に対し、上下面とも風が抜けるような開口部を桁の中央に設けることが有効であることがわかる。開口部を桁の端部に位置させた場合、あるいは桁の中央部と端部に位置させた場合には、フラッター風速は低下してしまう。下面だけあるいは上面だけ開口させてもフラッター特性にほとんど影響を与えない。また、フェアリングの無いケースでは、開口部の設置によりフラッター風速が低下しているため、適切なフェアリングを設置させることが重要であることがわかる。

模型Bの結果も同様である。すなわち、桁中央に開口部を設けることによりフラッター風速は上昇し、開口の比率を大きくすればするほどフラッター風速は高まる。開口部の位置としては、桁の中央にまとめる方が有効と

表3 開口部を有する箱桁のフラッター特性

ケース	模型	断面形状	開口率	迎角	フェアリング	フラッター発現風速
1	A		0%	0°	有	39 m/s
2	A		0%	0°	有	38 m/s
3	A		0%	0°	有	37 m/s
4	A		0%	0°	有	37 m/s
5	A		17%	0°	有	51 m/s
6	A		17%	0°	有	37 m/s
7	A		17%	0°	有	47 m/s
8	A		17%	0°	有	25 m/s
9	A		17%	0°	有	21 m/s
10	A		33%	0°	有	19 m/s
11	A		17%	0°	無	18 m/s
12	A		17%	-3°	有	53 m/s
13	A		17%	+3°	有	53 m/s
14	A		0%	0°	無	27 m/s
15	A		17%	0°	無	16 m/s
16	B		0%	0°	有	39 m/s
17	B		12%	0°	有	38 m/s
18	B		18%	0°	有	54 m/s
19	B		30%	0°	有	51 m/s
20	B		42%	0°	有	80 m/s
21	B		24%	0°	有	62 m/s
22	B		36%	0°	有	57 m/s
23	B		12%	0°	有	46 m/s
24	B		42%	0°	有	64 m/s
25	B		66%	0°	有	74 m/s
26	B		30%	0°	有	68 m/s
27	B		36%	0°	有	69 m/s

注：フラッター発現風速は実橋換算値

なる。

#### b. 平板空気力からの考察

開口部の影響を解析的に検討するため、次のような仮定で開口部を有する偏平箱桁の非定常空気力を算出し、フラッター風速を推定した。すなわち、開口部で区切られた桁の各部分を独立した平板と考え、それらが相対的な位置を変えず、剛体的に揺れるものとする。それぞれの平板間での空力的な干渉は無いものとして、各平板中央の鉛直振動、回転振動に応じたTheodorsen関数に基づく空気力<sup>15)</sup>が作用するものとする。

この空気力より、2自由度の振動系を想定し、U-g法<sup>16)</sup>でフラッター限界風速を計算した。計算結果を実験結果の1部と合わせて図1に示す。桁中央に1ヶ所開口部を設けた場合には、開口率が大きいほどフラッター限界風速が高くなる傾向は実験結果と整合するが、フラッター限界風速の値そのものは、実験結果より計算結果が高い値を示した。定量的な差異は、本計算が空力的な干渉を無視していることが影響しているものと考えられる。

#### c. 耐風対策部材の設置<sup>17)</sup>

耐風安定性向上のためには、桁中央の開口幅は広いほど良いが、主塔や基礎工の建設費を考えると、開口幅は狭い方が好ましい。そこで、ある程度制約された開口幅の条件下で空力特性をさらに改善するために、開口部を有する箱桁断面に耐風対策部材を設置し、パネ支持模型風洞試験によりその効果を調査した。この試験で使用した模型および耐風対策部材を図2に示す。

試験結果を図3に示す。計測されたフラッター発現風速は、Selberg式で計算された値で除し、無次元化したものである。結果からセンターバリア及びガイドペーンはフラッター特性を改善することがわかる。

しかしながら、迎角-3度の実験ケースでは、センターバリア及びガイドペーンを設置してもフラッター発現風速が他の迎角と比べて低い。この理由として、桁断面が上下で異なる形状となっているため、迎角が正の場合耐風性が良好でも負の場合に良好とはいえないと考えられた。そこで、桁の形状を上下で対称形にすれば正負どちらの迎角に対しても同様の効果があるのではないかと考え、桁の下面に上面の自動車防護柵と同一形状のアンダーバリアを上面と対称となるような同位置に設置した。その結果迎角-3度でのフラッター発現風速は、大幅に上昇した(図4)。

#### d. フラッター解析

開口部を有する2箱桁のフラッター特性を精度よく推定するため、3次元フラッター解析を実施した。解析に当たっては、水平たわみ振動、鉛直たわみ振動およびねじれ振動に起因する抗力、揚力、空力モーメントの非定常空気力係数を計測し、解析に使用した。解析を行った超長大橋の想定支間長は1250m+2500m+1250mである。フラッター発現風速は84m/sであり、良好な耐風性を示した。

### 5. 今後の課題

超長大橋の技術課題のうち、耐風設計の分野における技術の発展、研究の状況について記述した。耐風設計以外の分野についても、技術開発は着実に進められており、今後はこれらの技術を総合させ、それぞれの架橋地点における自然条件・社会条件に適合した、より合理的かつ経済的な超長大橋を検討していくことが重要であると考えられる。また、技術は日進月歩であるため、より優れた要素技術の開発・採用にも引き続き努力し、経済性の向上を図っていく必要がある。

なお、超長大橋の耐風設計に関しては、今後は以下の課題について検討を進めていく必要があると考えられる。

#### (1) 全橋弾性模型風洞試験による確認

現在までに実施してきたフラッター特性に関する検討は、フラッター解析に基づくものである。この解析手法は明石海峡大橋の全橋模型試験により精度が改善されてきたが、今回対象の超長大橋は明石海峡大橋より中央径



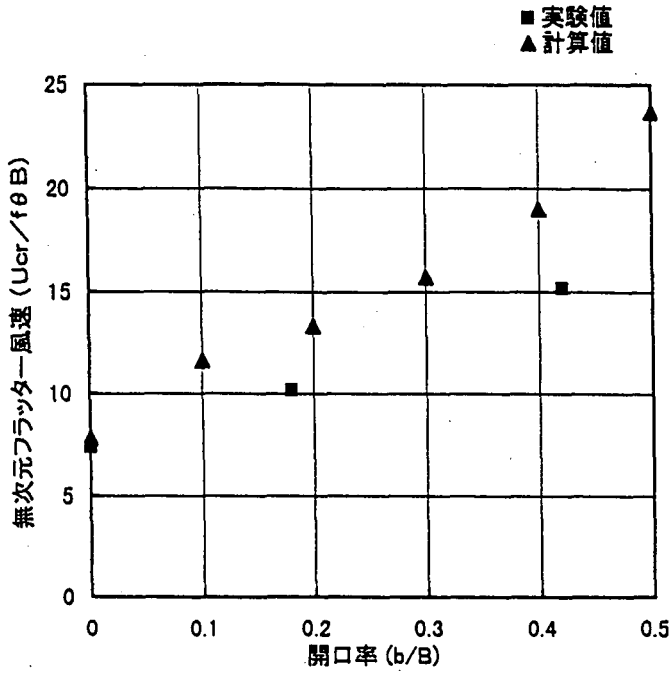


図1 フラッター風速と開口率

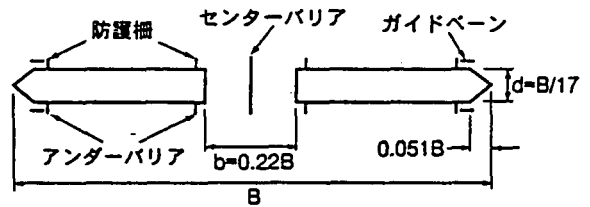


図2 開口部を有する箱桁  
および耐風対策部材

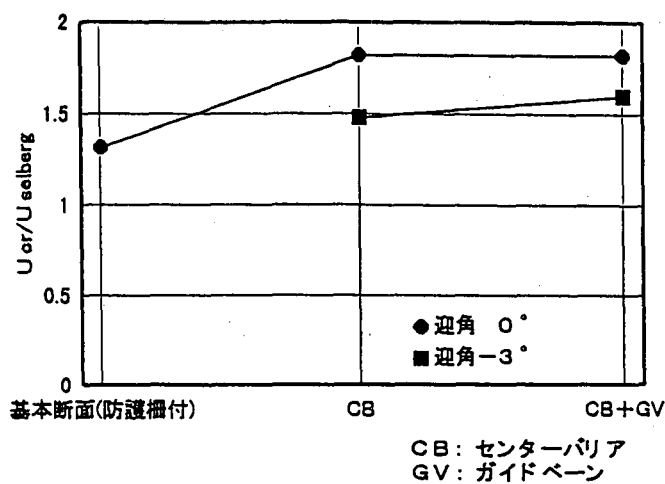


図3 センターバリアおよび  
ガイドベーンの効果

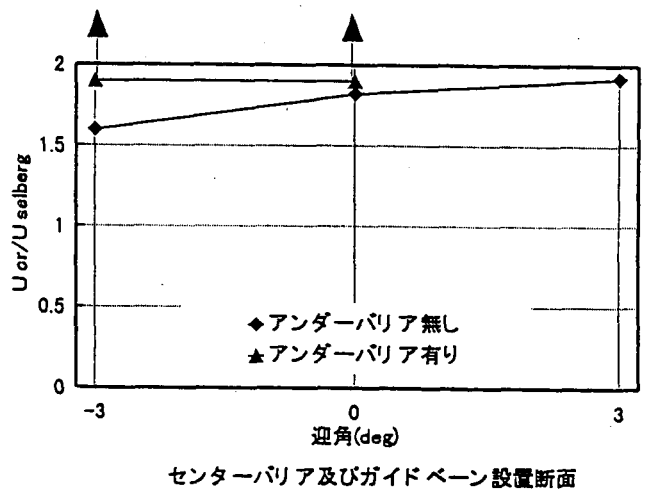


図4 アンダーバリアの効果

間が大きく、また、補剛桁も明石海峡大橋のトラス桁とは異なる。このため、全橋弾性模型風洞試験を実施し、本解析法の適用性について確認しておくことが必要と考えられる。

## (2) フラッター以外の現象に対する安全性の確認

現在までの検討は、橋に致命的な損傷を与えるおそれのあるフラッターを対象としており、フラッターに対する安全性を確保することに主眼がおかれていた。今後はさらに、渦励振、ガスト応答といった振動現象に対しても、安全性・使用性の確保・向上を図っていく必要がある。

## 参考文献

- 1) 建設省土木研究所：海峡横断道路プロジェクト技術調査委員会報告書、土木研究所資料第3205号（1993）
- 2) Bleich, F., McCullough, C.B. et al.: The Mathematical Theory of Vibration in Suspension Bridges, Department of Commerce, Bureau of Public Road, Washington (1950)
- 3) Kloppel, K. et al.: Teilmodellversuche zur Beurteilung des Aerodynamischen Verhaltens von Brucken, Der Stahlbau (1964)
- 4) 福田武雄：橋梁事故物語、土木学会誌、Vol. 50、No. 7（1965）
- 5) 岡内功、伊藤學、宮田利雄：耐風構造、丸善株式会社（1977）
- 6) 平井敦：鋼橋Ⅲ、株式会社技報堂（1967）
- 7) Davenport, A.G.: Buffeting of a suspension bridge by storm winds, Proc. ASCE, Vol. 88, ST3 (1962)
- 8) 成田信之：充腹断面橋桁を有する斜張橋の耐風設計に関する基礎的研究、東京大学学位論文（1978）
- 9) 植田利夫：長大橋の耐風制振に関する研究、大阪大学学位論文（1989）
- 10) Miyata, T., Sato, H., and Kitagawa, M.: Design considerations for superstructures of the Akashi Kaikyo Bridge, Proceedings of International Seminar on Utilization of Large Boundary Layer Wind Tunnel (1993)
- 11) 佐藤弘史、北川信他：明石海峡大橋の全橋模型風洞試験、日本風工学会誌、第68号（1996）
- 12) ESDU: Characteristics of atmospheric turbulence near the ground, Part 3 variations in space and time for strong winds (neutral atmosphere) (1975)
- 13) 佐藤弘史、鳥海隆一他：超長大橋の耐風安定性確保に関する基礎的検討、第13回風工学シンポジウム論文集、（1994）
- 14) 大谷康史、北川信他：長大吊橋のフラッター限界風速に対するクロスハンガーの改善効果に関する検討、土木学会第50回年次学術講演会（1995）
- 15) Fung, Y. C.: An Introduction to the Theory of Aeroelasticity, John Wiley & Sons (1955)
- 16) 鷲津久一郎：空力弾性学、共立出版株式会社（1957）
- 17) 佐藤弘史、荻原勝也他：開口部付き箱桁を有する超長大橋の耐風性に関する検討、第14回風工学シンポジウム論文集、（1996）