

斜張橋用 2 主桁断面の対風特性

Aeroelastic Responses of 2-Edge Girder for Cable-Stayed Bridges

貞島健介*, 久保喜延**, 古賀貴***, 岡本有造*, 山口栄輝****, 加藤九州男*****

Kensuke SADASHIMA, Yosinobu KUBO, Takasi KOGA, Yuzou OKAMOTO,

Eiki YAMAGUTI and Kusuo KATO

* 九州工業大学 大学院 工学研究科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

** 九州工業大学 工学部建設社会工学科 教授 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

*** 住友重機械工業株式会社 鉄構機器事業本部 (〒799-1393 愛媛県東予市今在家 1501)

**** 九州工業大学 工学部建設社会工学科 助教授 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

***** 九州工業大学 工学部建設社会工学科 助手 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

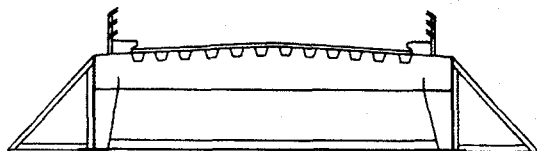
In the situation that reduction of construction cost for infrastructure has been required, cable stayed bridges, which increases its span length, is also required to reduce the fabricating and construction cost. A 2-edge girder section has been recognized as one of cost reduction methods. The aim of the present paper is to investigate aeroelastic performances for the proposed bridge section with various arrangements of 2 main girders. It was concluded that aeroelastic instability was improved by placing main girder inner part under the bridge floor. The relationship between the arrangement of main girder and onset wind velocity of aeroelastic vibrations was also obtained to assess the aeroelastic stability.

Key Words: cable stayed bridges, 2-edge girder, aeroelastic vibrations

1. まえがき

近年、我が国の架橋技術の進歩は著しく、中でも斜張橋は飛躍的な発展を続け、日本はもとより世界的にも盛んに建設されており、その規模も長大化の一途をたどっている。昨年完成した多々羅大橋は、中央支間長を 890m まで延ばし、世界最長の斜張橋となった。これにより斜張橋も、従来吊り橋の領域といわれていたスパンを実現できるようになりつつある。しかし、このような橋梁の長大化に伴い、現在問題になっているのが経済性である。そこで、経済性を考慮した桁形状の具体案として、2つの I 桁を有する 2 主桁断面が注目されている。この 2 主桁断面は、軽量構造化によりコスト削減が期待できる桁形状ではあるが、従来の斜張橋の桁断面に比べてねじれ剛性が小さく、風の条件が厳しい日本において

耐風性で問題が生じる可能性が大きい。そのため、最近ではこの 2 主桁断面の耐風安定性に関する研究が数多く行われている^{1)~4)}。海外では既に斜張橋の桁断面として採用されたケースも多く、海外での採用例(図-1)をみると、耐風性の改善を図るためにフェアリング等の耐風安定化策が施されている。しかしこれでは、2 主桁断面の経済的特長を損なっている恐れがある。2 主桁断面を将来の長大斜張橋の桁断面として適用するには、その経済性を確保しつつ耐風安定性についての検討が重要となってくる。そこで、本研究では経済性を確保するために、構造部材のみの位置を変化させて応答実験および静的 3 分力実験を行い、2 主桁断面の基本的な対風特性について検討した。



(a) Long's Creek 橋



(b) Knie 橋

図-1 2 主桁橋の海外での採用例

2. 実験概要

実験には、九州工業大学の中型空力弾性試験用風洞（測定断面 1070mm×1070mm）を使用し、たわみとねじれの2自由度系での応答実験および静的3分力実験を一樣流中において行った。実験模型は、図-2に示すように $B/D=10$ の2主桁断面である。既往の斜張橋⁵⁾を参考にし、幅員 20m、桁高 2m の4車線を想定して縮尺を 1/66 とした。I 桁は床版端部からの距離を C として、 $C=15\sim60\text{mm}$ の範囲において 7.5mm 刻みで移動させることができ、壁高欄として高さ 12mm のアルミアングルを設置した（図-3）。実験パラメータは床版端部からの距離 C を桁高 D で無次元化した C/D を用いて、 $C/D=0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0$ としている。2自由度系での応答実験における模型の設置状況を図-4に、また模型の諸元を表-1に示す。

表-1 模型の諸元

	たわみ振動	ねじれ振動
単位長さあたり重量 (kgf/m)	5.03	
単位長さあたり極慣性 モーメント(kgf・m ² /m)		0.066
振動数(Hz)	2.17	4.19
対数構造減衰率	0.0048	0.0013

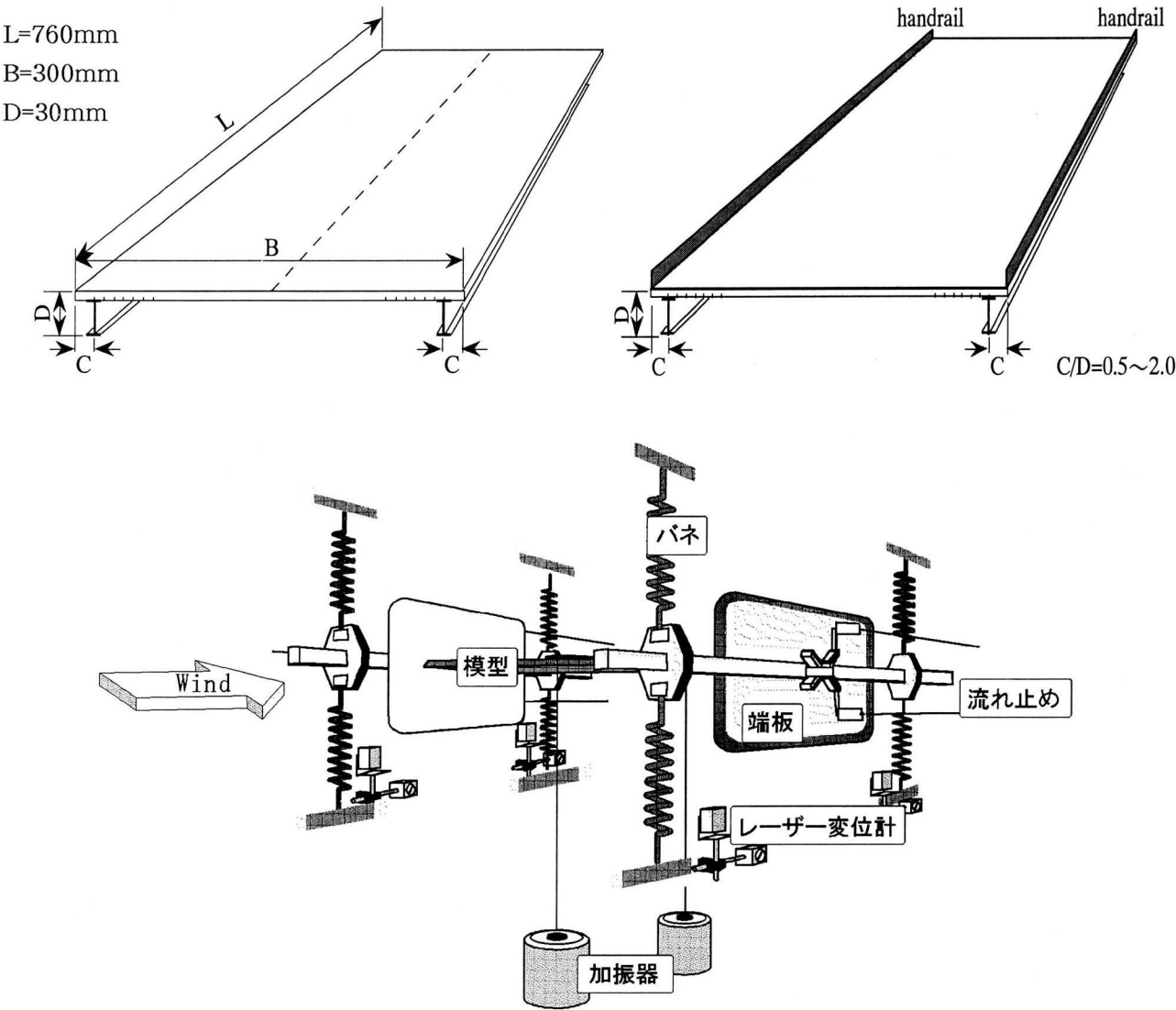


図4 模型の設置状況

3. 実験結果と考察

3-1 2自由度応答実験

図-5, -6, -9, -10 に応答図を示す。グラフの横軸は桁高 D で無次元化した換算風速 V_r 、縦軸はたわみ無次元倍振幅 $2A/D$ およびねじれ倍振幅 2ϕ [deg.]を示している。グラフ上の黒字のプロットは加振時応答を示している。この加振時応答とは、単に風を吹かせただけの状態では応答は現れないが、模型を強制的に加振した場合、図に示す振幅で定常振動となる応答のことである。実験は全て迎角 $\alpha=0^\circ$ で行った。

3-1-1 主桁位置の違いによる対風特性

(1) たわみ振動

全てのケースにおいて、渦励振が2回発生している。どちらの渦励振の場合も C/D が大きくなるにつれて、渦励振の発振風速は低くなり、その最大振幅は減少している。渦励振の最大振幅に着目してみると、低風速側の渦励振で、 C/D の変化による差はそれほど大きくないが、高風速側の渦励振ではその差が顕著に現れている。 $C/D=0.5 \rightarrow 2.0$ になるにつれて、その最大振幅は無次元倍振幅で $2A/D=0.26 \rightarrow 0.07$ と $1/4$ 程度にまで減少している(図-5)。このことは、主桁を内側に設置することにより、発振風速が低下し剥離渦の巻き込みが小さくなっているためと考えられる。

(2) ねじれ振動

$C/D=0.5 \sim 1.25$ では、フラッターの発生が見られるが、その発振風速は C/D が大きくなるにつれて、 $V_r=27 \rightarrow 45 \rightarrow 73 \rightarrow 88$ と飛躍的に上昇している。 $C/D=1.25$ において、 $V_r=20$ 付近から、最大振幅がねじれ倍振幅で $2\phi=4.2$ [deg.]程度の加振時応答を含む渦励振が発生している(図-6(a))。 $C/D=1.5 \sim 2.0$ では、 $C/D=1.25$ と同様に $V_r=20$ 付近で加振時応答を含む渦励振が発生しているが、その最大振幅は C/D が大きくなるにつれて、 $2\phi=3.4 \rightarrow 2.3 \rightarrow 1.0$ [deg.]と減少している。また、 $C/D=0.5 \sim 1.25$ の全てのケースで発生したフラッターが、 $C/D=1.5 \sim 2.0$ では発生していない(図-6(b))。

(3) 主桁位置と発振風速の関係

C/D と発振風速の関係を図-7, -8 に示す。ここで図-7の縦軸は、たわみ振動の高風速側における渦励振の発振風速 V_{rH} 、図-8の縦軸はフラッター発振風速 V_{rF} 、横軸は共に C/D (張り出し比)を示している。図-7を見れば、たわみ振動の渦励振において、その発振風速は C/D に対してほぼ線形的に減少している。また図-8からも、フラッター発振風速が、 C/D に対してほぼ線形的に増加しているのがわかる。このことより、主桁位置の違いによる空力弾性振動の発振風速を、パラメータ C/D により推定することができると考えられる。

以上のことから、基本断面において主桁が内側へ移動することで、たわみ振動の渦励振は最大振幅が減少し発振風速は低風速側へと移動している。ねじれ振動は主

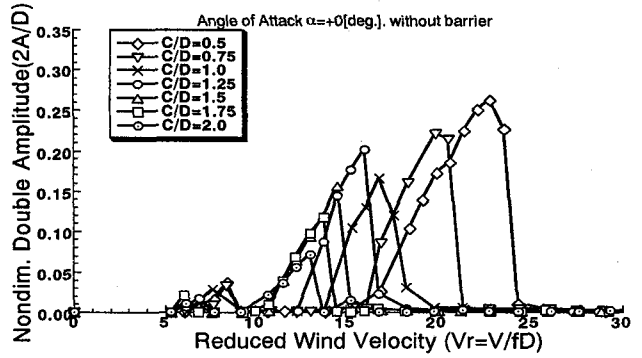
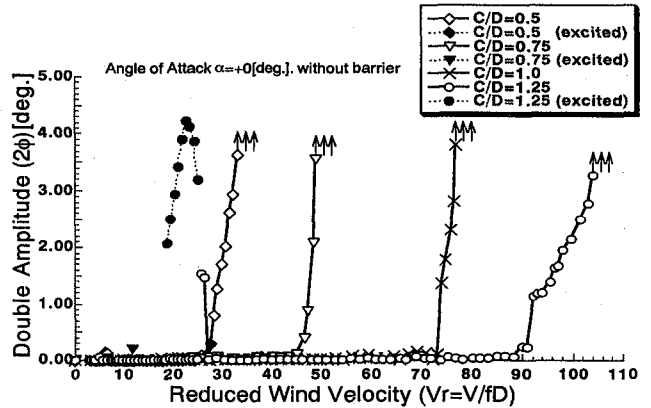
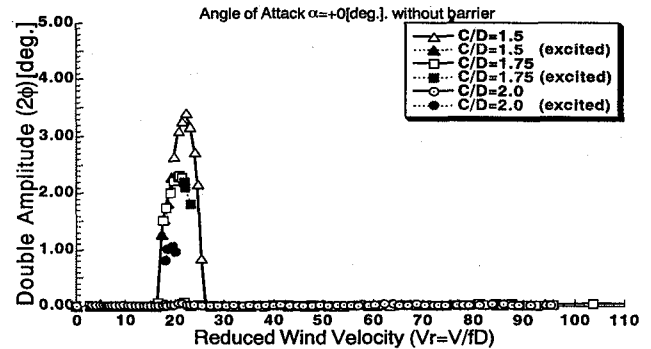


図-5 基本断面におけるたわみ振動応答図



(a) $C/D=0.5 \sim 1.25$



(b) $C/D=1.5 \sim 2.0$

図-6 基本断面におけるねじれ振動応答図

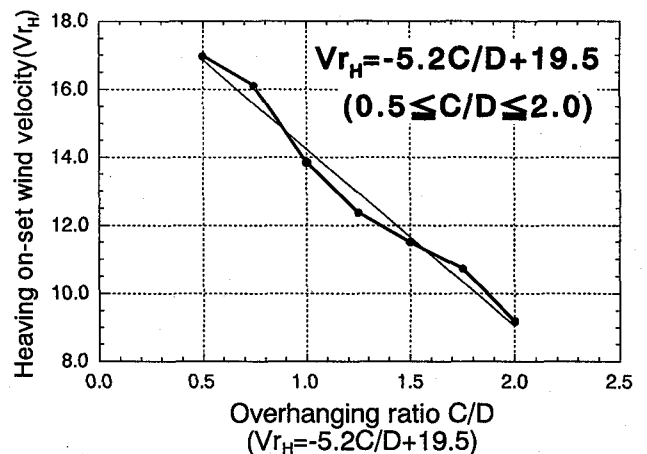


図-7 たわみ振動における渦励振発振風速比較図

桁位置の違いによる影響を大きく受け、主桁が内側へ移動することで、フラッター発振風速が飛躍的に上昇しており、対風特性の変化が顕著に現れる結果となった。

3-1-2 壁高欄がある場合の対風特性

(1) たわみ振動

$C/D=0.5$ 及び $C/D=1.25\sim 2.0$ において渦励振の発生が見られた。 $C/D=0.5$ では、最大振幅が無次元倍振幅で $2A/D=0.20$ と比較的振幅の大きな渦励振が発生しており、渦励振域も広い。 $C/D=1.25\sim 2.0$ では、どのケースも渦励振が $V_r=7$ 付近で発生しており、最大振幅も $2A/D=0.08\sim 0.13$ 程度とそれほど大きくない (図-9(a))。 $C/D=0.75, 1.0$ は、他のケースと較べると特異なケースとなり、渦励振は発生せず対風特性は良好であるといえる (図-9(b))。

(2) ねじれ振動

全てのケースにおいて渦励振とフラッターが発生している (図-10)。 $C/D=0.5\rightarrow 1.5$ にすると、渦励振の振幅は徐々に大きくなっており、 $C/D=1.75$ と 2.0 では最大振幅が減少しているものの、ねじれ倍振幅は $2\phi=3.0[\text{deg.}]$ 以上となっており、小さいとはいえない。また、フラッター発振風速は $C/D=0.5\rightarrow 2.0$ にすると $V_r=20\rightarrow 29$ と上昇してはいるが、基本断面の場合と較べると対風特性は非常に悪いといえる。

以上のことから、壁高欄を設置するとたわみ振動は $C/D=0.75$ と 1.0 において、渦励振が発生せず特異なケースとなったが、その他のケースは主桁位置の違いによる影響をあまり受けていない。ねじれ振動は渦励振の最大振幅及びフラッターの発振風速に多少の差こそあるが、主桁位置の違いによらず対風特性は非常に悪い。

3-1-3 対風特性改善のための対策

以上の実験結果から、基本断面においては主桁を内側に設置するほど、渦励振の最大振幅は小さくなり、フラッター発振風速は飛躍的に上昇し、 $C/D=2.0$ では良好な対風特性を有することが判明した。しかし、壁高欄を設置すると対風特性は悪化し、主桁を内側に設置してもその特性は改善されなかった。そこで、剥離干渉法を適用して壁高欄の設置位置を変化させて対風特性の改善を試みた。

(1) 実験方法

既往の研究により、床版端部と壁高欄上端部を結ぶ線と床版上面とのなす角度 θ を $\theta=30^\circ$ にすると、床版端部からの剥離流が壁高欄上端で抑制され、剥離渦の生成を抑制できることが報告されている^{6), 7)}。図-11、図-12に示すように、 $\theta=30^\circ$ となる位置 (床版端部から内側 21mm 離れた所) に壁高欄を設置して、 $C/D=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ の4ケースのみについて2自由度応答実験を行った。その結果をねじれ振動のみについて図-13に示す。

(2) 実験結果 (ねじれ振動のみ)

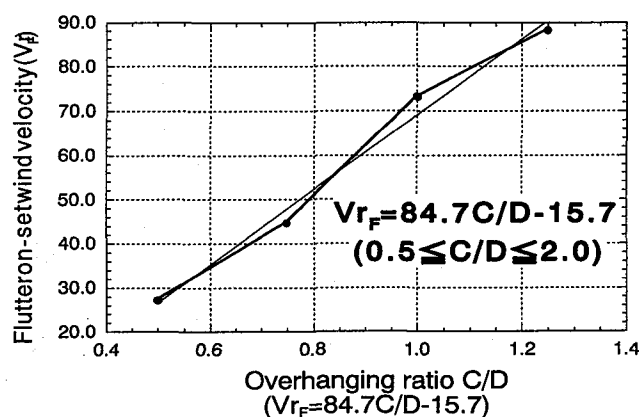
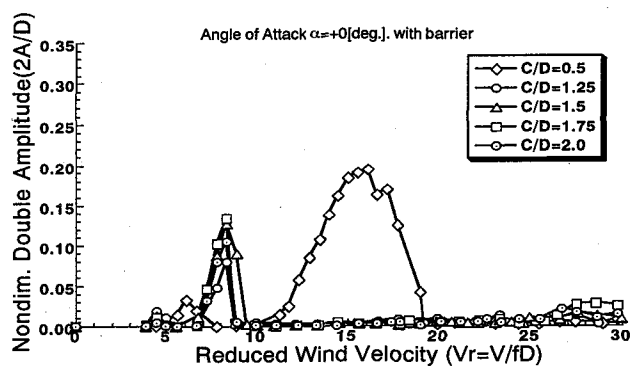
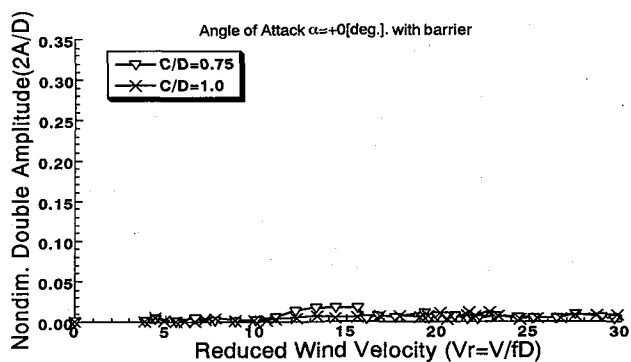


図-8 フラッター発振風速比較図



(a) $C/D=0.5$ 及び $1.25\sim 2.0$



(b) $C/D=0.75$ 及び 1.0

図-9 壁高欄を設置した場合のたわみ振動応答図

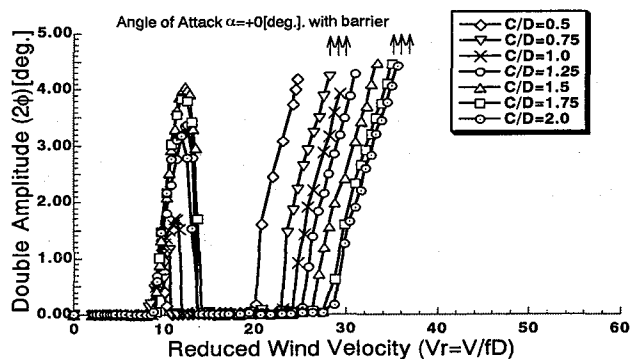


図-10 壁高欄を設置した場合のねじれ振動応答図

$C/D=0.5, 1.0$ では渦励振が $Vr=6$ 付近から、フラッターは $Vr=15, 12$ 付近と非常に低い風速から発生している。 $C/D=1.5$ は、フラッターこそ発生していないが、非常に大きな振幅の渦励振が3風速域で発生しており、対風特性は最も悪くなっている。しかし、 $C/D=2.0$ では一変して、渦励振・フラッターの発生は見られず、また基本断面の場合（図-6）に確認できた加振時応答もなく、良好な対風特性を示している（図-13）。

以上のことから、剥離干渉法を考慮して壁高欄の設置位置を決めたが、 $C/D=0.5\sim 1.5$ ではその効果は得られず、壁高欄を床版端部に設置したときよりも悪い特性を示した。しかし、 $C/D=2.0$ では渦励振およびフラッターを抑制することができ、対風特性が改善され、期待した剥離干渉効果を得られたものと考えられる。

3-2 静的3分力測定

測定迎角を $-10^\circ \sim +10^\circ$ の範囲で 2° 刻みで変化させ、 $C/D=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ の4ケースについての静的3分力を測定した。実験結果を図-14, -15, -16 に示す。グラフの横軸は迎角 α [deg.] で、縦軸は空気力係数 C_D , C_L , C_M を示している。

3-2-1 基本断面の場合の3分力特性

(1) 抗力特性（図-14(a)）

C/D が大きくなるにつれて、測定した迎角の範囲内での抗力係数は減少している。また、迎角 $\alpha=0^\circ$ の場合を見てみると、 C/D に対して抗力係数はほぼ線形的に減少し、 $C/D=2.0$ では $C/D=0.5$ と比較すると、約20%の抗力の減少が見られ、主桁を内側に設置することで、風荷重（抗力）がかなり低減されている。

(2) 揚力特性（図-14(b)）

迎角 $\alpha=0^\circ$ では C/D によらず、揚力係数はほぼ同じ値となっているが、迎角が大きくなるにつれて、 C/D による揚力係数の差は大きくなっている。 $C/D=2.0$ は全般的に、他の C/D よりも小さい負の揚力係数となっており、耐風設計上好ましい。特に負の揚力が発生することは、構造剛性の増加に結びつく可能性がある。

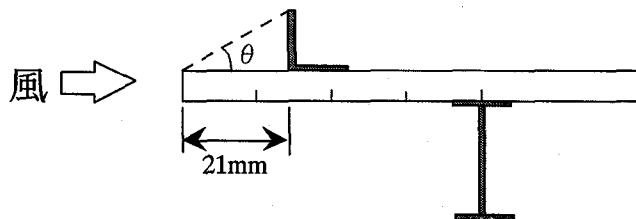


図-11 壁高欄の設置位置 ($\theta=30^\circ$)

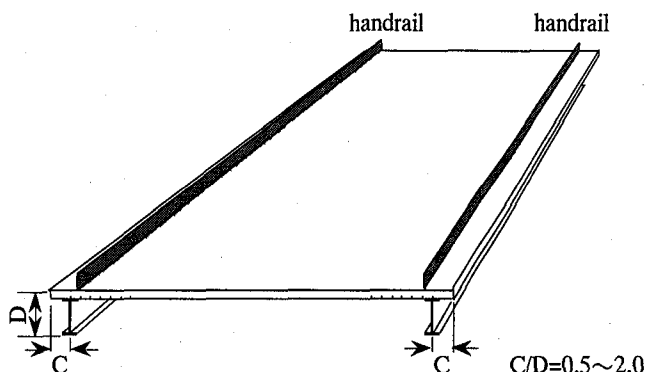


図-12 $\theta=30^\circ$ となるように壁高欄を設置した場合

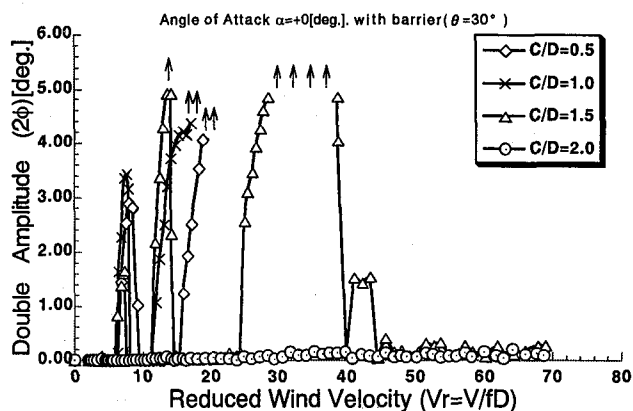


図-13 $\theta=30^\circ$ となるように壁高欄を設置した場合のねじれ振動応答図

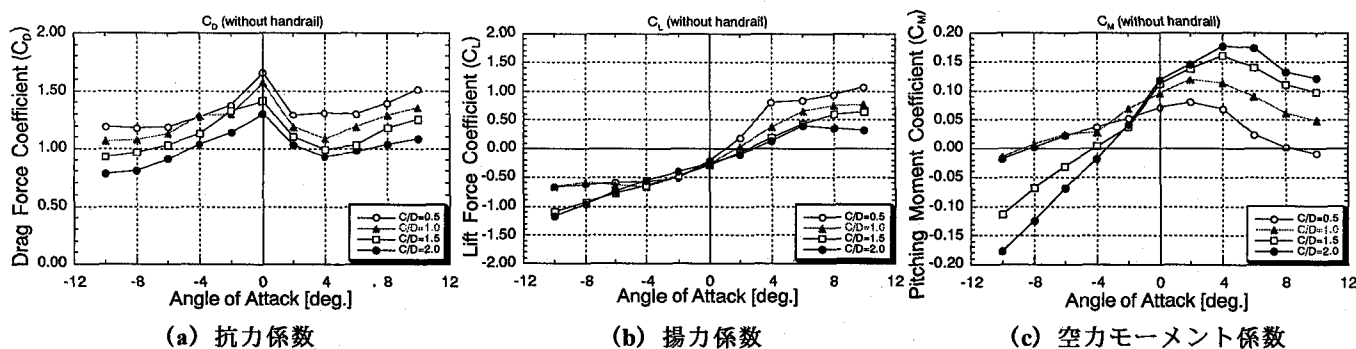


図-14 基本断面における静的3分力係数

(3) 空力モーメント特性 (図-14(c))

C/D が大きくなるにつれて、迎角 $\alpha=0^\circ$ では空力モーメント係数勾配 $dC_M/d\alpha$ が大きくなっており $dC_M/d\alpha$ が正から負へ転じる迎角は高迎角側へと移動している。つまり、主桁の内側への移動により、フラッターに対して安定な断面になると考えられる。実際に、応答実験の結果を見てみると、 $C/D=1.5, 2.0$ においてはフラッターは発生していない。しかし、 $C/D=1.5, 2.0$ における迎角 $\alpha=4^\circ$ 以上で $dC_M/d\alpha$ に負勾配が見られ、この迎角域ではフラッター発生の可能性があると考えられる。

3-2-2 壁高欄を設置した場合の3分力特性

ここでは、壁高欄を床版端部及び床版の内側 ($\theta=30^\circ$) に設置した場合の空力モーメント特性のみにについて示す。

(1) 床版端部に設置した場合 (図-15)

$\alpha=0^\circ$ において $C/D=0.5$ は $dC_M/d\alpha$ が負勾配であり、 $C/D=1.0\sim 2.0$ は $dC_M/d\alpha$ が正勾配から負勾配になっている。つまり、 $\alpha=0^\circ$ 付近ではフラッターが発生する可能性が大きいといえる。実際、応答実験の結果を見ると、全てのケースでフラッターは発生しており、基本断面の場合と比較すると、明らかにフラッター安定性が低下しているのがわかる。

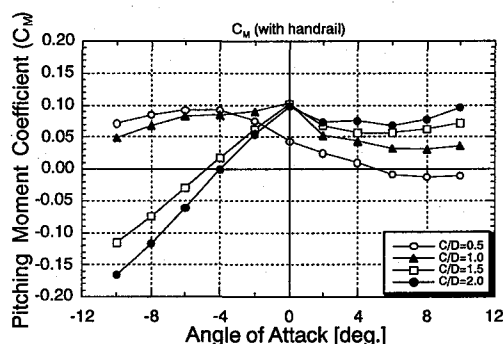


図-15 床版端部に壁高欄を設置した場合の空力モーメント係数

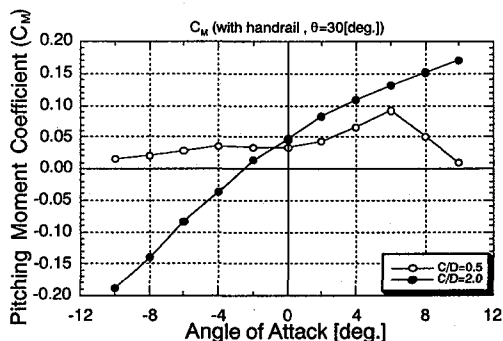


図-16 $\theta=30^\circ$ となるように壁高欄を設置した場合の空力モーメント係数

(2) 床版内側に設置した場合 (図-16)

$C/D=2.0$ は、測定迎角の範囲では $dC_M/d\alpha$ は常に正勾配であり、明らかにフラッター安定性は向上すると考えられる。応答実験の結果を見ても、最良な対風特性を示しており、期待した剥離干渉効果が得られているものと考えられる。

4. あとがき

以上の斜張橋用2主桁断面の対風特性に関する実験結果をまとめると、以下のようになる。

(1) 基本断面では、 C/D が大きくなるほど、たわみ振動は渦励振最大振幅が減少し、ねじれ振動はフラッター発振風速が飛躍的に上昇する。つまり、主桁を内側に設置するほど対風特性は向上する。

(2) 壁高欄を桁端部に設置することにより対風特性は低下するが、壁高欄の設置位置に剥離干渉法を適用することで、対風特性を向上させることができる。

(3) 主桁を内側に設置するほど、耐風設計の際に用いる風荷重が低減される。本実験では、2割近い低減が見られた。

以上のことから、構造部材 (I 桁、高欄) の位置変化だけで、十分な耐風安定性を確保できると考えられる。しかし、剥離干渉法を適用した壁高欄の位置 ($\theta=30^\circ$) は、実橋にすると、床版端部から 1.4m 内側となり大きすぎると考えられ、実橋の主桁断面として適用可能かどうかさらなる検討が必要であり、また2主桁断面が非常に敏感な空力特性を有するため、迎角の影響についても検討する必要がある。

参考文献

- 1) 松本勝, 石崎浩 他: 斜張橋2箱桁断面の空力特性, 第14回風工学シンポジウム, PP.569-574, 1996
- 2) 松本勝, 大東義志 他: 長大斜張橋端2主桁基本断面の空力特性, 第15回風工学シンポジウム, PP.395-400, 1998
- 3) 松本勝, 大東義志 他: 長大斜張橋端2主桁断面の空力振動発生メカニズム, 日本風工学会誌, No79PP.81-82, 1999
- 4) 久保喜延, 古賀貴 他: 斜張橋用2主桁断面の空力特性について, 日本風工学会誌, No79PP.65-66, 1999
- 5) 橋梁と基礎 海外文献研究グループ; 資料〈内外の斜著橋〉, 橋梁と基礎, PP.125-136, 1985.8
- 6) 久保喜延, 小石明 他: 橋梁断面における空力干渉作用のメカニズムについて, 第13回風工学シンポジウム, PP.353-358, 1994
- 7) 久保喜延, 本多健二 他: PC斜張橋の開断面桁および開断面桁の剥離流相互干渉法による耐風性能改善策に関する研究, 構造工学論文集, Vol.38A, PP.919-924, 1992

(1999年9月17日受付)