

偏平箱桁断面に対する水平プレートの空力制振効果に関する実験的研究

Effects of Leading Edge Stabilizer on the Aerodynamic Stability of One-box Girder Sections of Cable-stayed Bridges

米田 昌弘

Masahiro YONEDA

川田工業株式会社技術開発本部技術研究室室長

宮地 真一

Shin-ichi MIYACHI

川田工業株式会社技術開発本部技術研究室係長

瀬戸内 秀規

Hideki SETOUCHI

川田工業株式会社技術開発本部技術研究室

枝元 勝哉

Katsuya EDAMOTO

川田工業株式会社技術開発本部技術研究室

This paper presents the effects of leading edge stabilizer on the aerodynamic stability of one-box girder sections. Two dimensional wind tunnel experiments were carried out on the cable-stayed bridge girder model both with and without leading edge stabilizer. It was ascertained from the test results that this aerodynamic device could be one of the useful countermeasures to improve both vortex excitation and torsional flutter for one-box girder sections of cable-stayed bridges.

Key words : leading edge stabilizer, vortex excitation, torsional flutter, cable-stayed bridge, wind tunnel experiment

1. まえがき

斜張橋は吊橋に次いで剛性の低い柔構造物であることから、耐風設計にあたっては慎重な検討を行う必要があり、道路橋耐風設計便覧¹⁾が提示された現在においても最大支間長が200 mを超えるような斜張橋では風洞実験を実施して耐風安定性を検討する場合が多い。

ところで、比較的偏平な箱桁断面を採用した斜張橋では、一様流中ではね支持模型風洞実験を実施した場合、一般には低風速域においてたわみとねじれの渦励振が、また、高風速域においてねじれフラッターの発現が予想される。これらの斜張橋主桁部の風による振動に対処する方法として、渦励振に限定すればTMDを設置して構造減衰を付加する対策も一部で採用されているものの²⁾、通常はフラップやフェアリングなどを設置して加振空気の低減を図る空力的対策が採用されている。しかしながら、フラップやフェアリングなどの空力的対策は比較的高価であることから、安価でかつ制振効果の高い、斜張橋主桁部に対する空力的対策の開発が実務技術者から強く望まれていた。

周知の如く、今までにも数多くの空力的対策が実橋で採用されているが、これらの中にあって、水平プレートは構造がきわめて簡単で、かつ、制振効果の高い空力的対策の一つに位置づけられるものである。しかしながら、

水平プレートは、従来、比較的ずんぐりした断面を有する箱桁橋や斜張橋主塔のギャロッピング対策として採用されており^{3),4)}、斜張橋で採用されることの多い比較的偏平な箱桁断面に対する空力安定化効果については十分な検討がなされていなかった。これに対し、著者ら⁵⁾は、最大支間長が250 mなる斜張橋(常吉連絡橋)の主桁についてばね支持実験を行い、地覆外側に段差部を有する基本設計断面が隅切り効果によってきわめて良好な耐風性を示した事例を報告している。隅切り効果はコーナー部からの2つのはく離流が相互に干渉することによって引き起こされるものである。それゆえ、プレートを適切な位置に設置することによってプレート先端とコーナー部からの2つのはく離流が相互に干渉すれば、同様の空力制振効果が期待できると考えられる。また、実際、久保ら⁶⁾は、幅 B と高さ H の比が $B/H=6$ なる比較的偏平な長方形断面の上・下面に垂直板を設置すれば、模型のコーナー部と垂直板より生じる2つのはく離流が相互に干渉し、渦励振やねじれフラッターの原因となるはく離渦の生成を抑制できる場合があるとの知見を提示している。さらに、酒井ら⁷⁾は、鉛直のエッジプレートと水平のチッププレートを組み合わせれば、2つのI桁から構成された桁断面を有する2主桁橋梁の耐風性が大幅に改善されたことを報告している。

それゆえ、ここに示した最近の研究成果を考慮すれば、

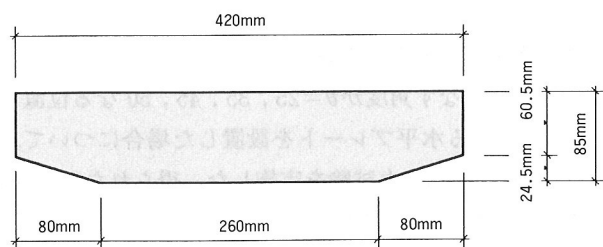


図1 基本断面

斜張橋で採用されることの多い比較的偏平な箱桁断面においても側面部に水平プレートを設置すれば、渦励振やねじれフラッターを十分に制振できる可能性があると考えられる。そこで、本研究ではプレート幅が異なる2種類の水平プレートを模型側面部の種々の位置に取り付けた場合について、静的3分力試験とばね支持模型実験を実施し、斜張橋で採用されることの多い比較的偏平な箱桁断面に対する水平プレートの空力制振効果を詳細に検討することとした。その結果、比較的偏平な箱桁断面に発現する渦励振やねじれフラッターに対しても、適切な位置に水平プレートを設置すれば十分に制振できるという、実務上きわめて有用な知見が得られたので、ここにその結果を報告する。なお、本論文の内容はすでに発表済みである⁸⁾。

2. 実験概要

風洞実験にあたっては、川田工業(株)所有の多目的風洞施設を利用した。この風洞施設は開放型と閉鎖型の2つの測定洞を備えた水平回流式ゲッチンゲン型であるが、本実験では幅2.0m×高さ2.5m×全長15.0mなる閉鎖型測定洞を使用するものとした。

本研究では、常吉連絡橋の主桁断面⁵⁾を参考にして製作した、図1に示すような地覆や高欄の無い実験模型(模型長 $l=1620$ mm)を基本断面として採用することとした。また、水平プレートは幅 b を $b=20$ mmとし、図2に示したように水平プレートの先端とコーナー部を結ぶ線が桁上面となす角度 θ を変化させることとした。ここに、常吉連絡橋と同じく1/33なる縮尺で模型が製作されるとすれば、 $b=20$ mmなる水平プレート模型は実橋換算で $b=660$ mmなる大きさに相当する。さらに、基本断面や水平プレート付き断面との対比を考え、図3に示すような上面傾斜角 θ_u が $\theta_u=35^\circ$ なるフェアリング付き断面についても実験対象とした。

実験にあたっては、まず、基本断面とフェアリング付き断面および桁上面との角度が $\theta=25^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ なる位置に水平プレートをそれぞれ設置した断面について静的3分力試験を実施し、静的空力特性に及ぼす水平プレートの影響を把握することとした。次に、静的3分力試験結果を踏まえ、一様流中でばね支持模型実験を実施

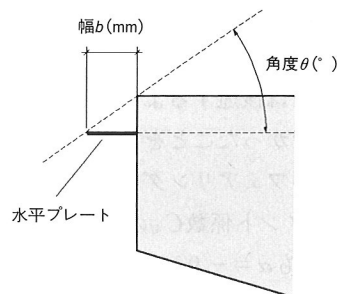


図2 水平プレートの設置状況

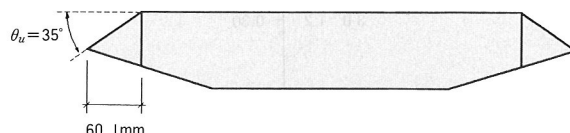


図3 フェアリング付き断面

表1 基本断面のばね支持実験条件

		ばね支持実験条件	想定される実橋諸元
重 量		22.72 kgf/model	15.27 tf/m/Br.
		0.0431 kgf・s ² ・m/model	31.55 tf・s ² ・m/m/Br.
振動数	たわみ	2.00 Hz	—
	ねじれ	5.22 Hz	

し、比較的偏平な箱桁基本断面に対する水平プレートの空力安定化効果を検討することとした。なお、ばね支持模型実験の実験条件は表1に示すとおりである。ここに、模型の重量と極慣性モーメントは、常吉連絡橋の構造諸元⁵⁾をもとに設定したものであるが、表1には参考までに縮尺を1/33と仮定した場合の実橋換算値も付記している。

3. 静的3分力試験

(1) 基本断面とフェアリング付き断面

風洞風速 V_m が $V_m=5$ m/sと $V_m=10$ m/sなる一様流状態で得られた基本断面の3分力曲線を図4に示す。図4より、一様流中における基本断面の3分力係数特性は、若干の差異はあるものの、風洞風速($V_m=5$ m/s, 10 m/s)の違いによらずほぼ同じ特性を示していることがわかる。すなわち、揚力係数 C_L は迎角 $\alpha=-6^\circ\sim+4^\circ$ なる範囲で、また、空力モーメント係数 C_M は迎角 $\alpha=-6^\circ\sim+2^\circ$ なる範囲でほぼ直線的に増加しているものの、その後は $\alpha=+6^\circ$ なる迎角まで徐々に減少する結果となっている。

なお、基本断面や次節に示す水平プレート付き断面との対比を考えて、図3に示したフェアリングを設置した断面についても一様流中で静的3分力試験を実施した。 $V_m=10$ m/sなる風洞風速で得られた3分力曲線を図5に

示す。ここに、 $\theta_u=35^\circ$ なるフェアリングは文献5)において有効性が認められたもので、また実際、本フェアリング付き断面では後述するように渦励振やねじれフラッターは発現しなかったことを付記しておく。図5から、制振効果の高いフェアリングを設置した場合、揚力係数 C_L と空力モーメント係数 C_M の特性は基本断面と大きく異なり、いずれも $\alpha=-9^\circ\sim+9^\circ$ なる迎角範囲でほぼ直

線的に増加する結果となっていることがわかる。

(2) 水平プレート付き断面

桁上面とのなす角度が $\theta=25^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ なる位置に $b=20\text{ mm}$ なる水平プレートを設置した場合について、一様流中で静的3分力試験を実施した。得られた3分力曲線をそれぞれ図6～図9に示す。

図6からわかるように、 $\theta=25^\circ$ なる場合の3分力曲線

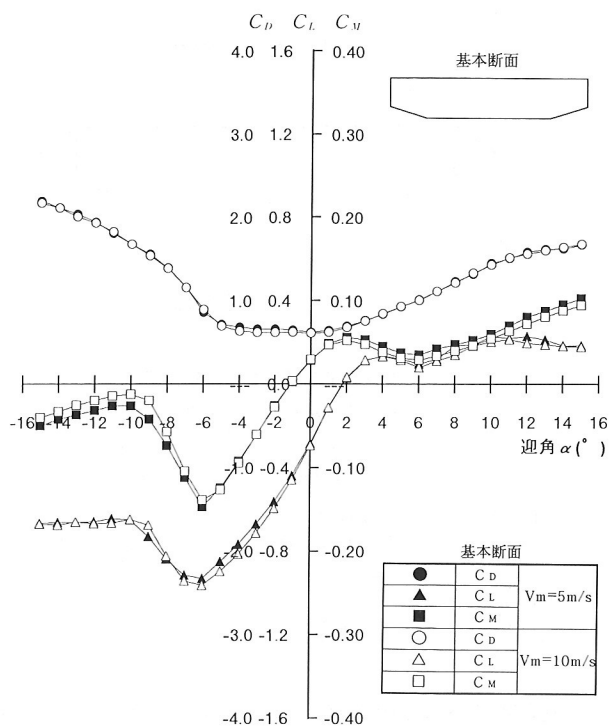


図4 基本断面の3分力曲線

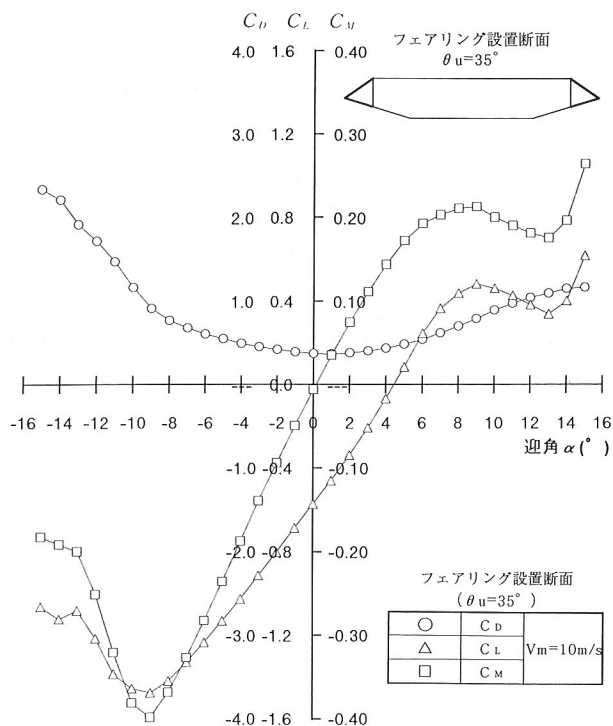


図5 フェアリング付き断面の3分力曲線

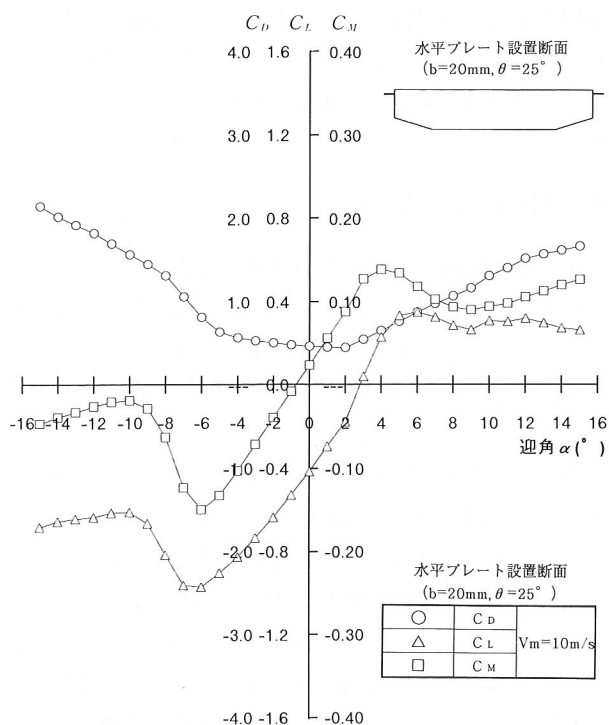


図6 水平プレート付き断面の3分力曲線
($b=20\text{ mm}, \theta=25^\circ$)

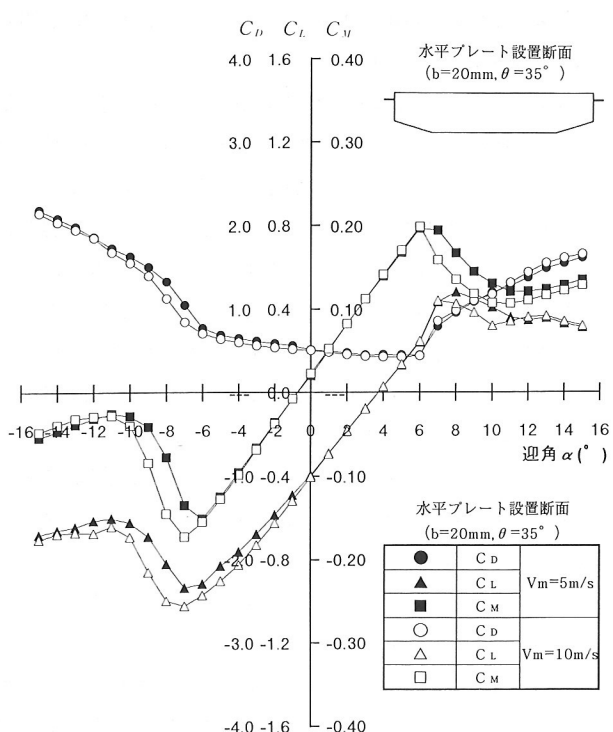


図7 水平プレート付き断面の3分力曲線
($b=20\text{ mm}, \theta=35^\circ$)

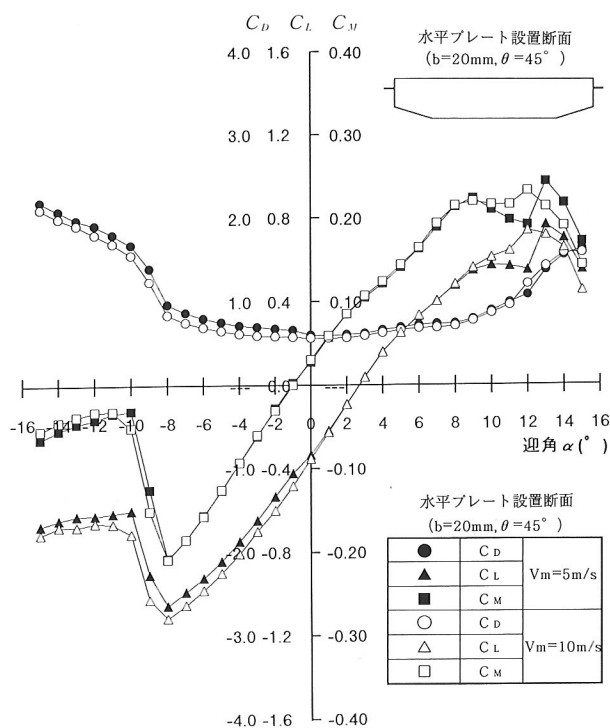


図8 水平プレート付き断面の3分力曲線
($b=20\text{mm}$, $\theta=45^\circ$)

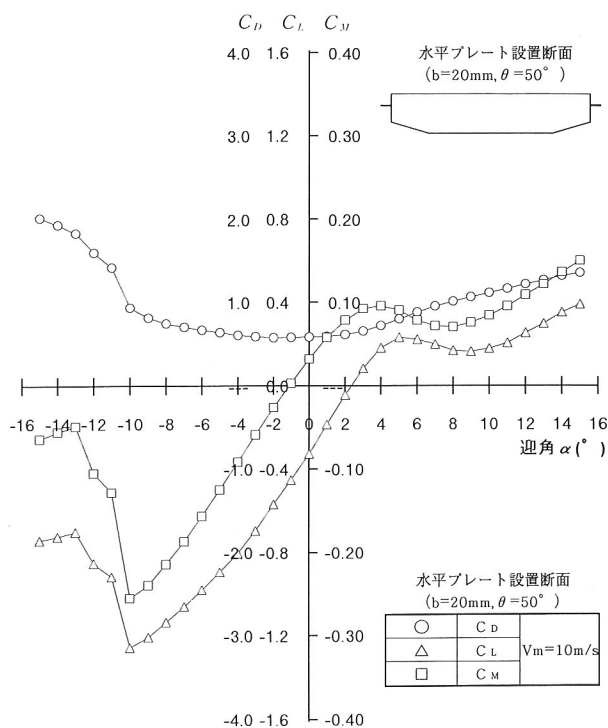


図9 水平プレート付き断面の3分力曲線
($b=20\text{mm}$, $\theta=50^\circ$)

は基本断面と類似しており、静的空気力には水平プレートを設置した影響がほとんど認められない結果となっている。これに対し、桁上面とのなす角度が $\theta=35^\circ$ と $\theta=45^\circ$ なる場合には、図7と図8からわかるように、揚力係数 C_L と空力モーメント係数 C_M の直線的に増加する迎角範囲が $\theta=25^\circ$ なる場合よりも増加し、フェアリングを設置した断面の静的空気力特性に近づく結果となっている。しかしながら、図9に示すように、桁上面とのなす角度を $\theta=50^\circ$ まで大きくした場合の静的空気力には、水平プレートを設置した影響がほとんど認められない結果となった。

4. ばね支持実験

(1) 基本断面とフェアリング付き断面

まず、基本断面について、一様流中でばね支持模型試験を実施した。迎角が $\alpha=+3^\circ$ および 0° なる場合のV-A曲線（風洞風速と応答振幅の関係図）をそれぞれ図10、図11に示す。

図10から、たわみとねじれの構造対数減衰率 δ をそれぞれ $\delta=0.02$ とした場合、 $\alpha=+3^\circ$ なる迎角で基本断面には $V_m=1.8\text{m/s}$ （橋幅を代表長とした無次元風速 V_r で $V_r=2.1$ ）なる風洞風速でたわみ渦励振が、また、 $V_m=9.5\text{m/s}$ （ $V_r=4.3$ ）なる風速域からねじれフラッターがそれぞれ発現していることがわかる。またねじれの構造対数減衰率 δ を $\delta=0.01$ と幾分小さく設定した場合には、 $V_m=2.8\text{m/s}$ （ $V_r=1.3$ ）なる風洞風速でねじれの渦励振も発現していることがわかる。これに対し、迎角が $\alpha=0^\circ$ なる場合には、図11からわかるように、渦励振は発現

せず、また、ねじれフラッターの発現風速も $V_m=16.5\text{m/s}$ （ $V_r=7.5$ ）と大幅に上昇する結果となっている。

一方、上面傾斜角 θ_u が $\theta_u=35^\circ$ なるフェアリングを設置した断面について、 $\alpha=+3^\circ$ なる一様流中で同様のばね支持模型試験を実施したところ、実験風速域内で渦励振やねじれフラッターは発現しない結果となった。

(2) 水平プレート付き断面

前章で示したように、本研究で対象とした断面では、 $b=20\text{mm}$ なる水平プレートを桁上面とのなす角度が $\theta=35^\circ\sim45^\circ$ となるように設置すれば、耐風性に優れたフェアリング付き断面と類似した静的空気力特性を有することとなる。そこで、 $b=20\text{mm}$ なる水平プレートを桁上面とのなす角度が $\theta=35^\circ$ および 45° となるように設置した断面について、一様流中でばね支持模型試験を実施した。迎角が $\alpha=+3^\circ$ および 0° なる場合のV-A曲線をそれぞれ図12、図13に示す。これらの図から、水平プレート付き断面（ $b=20\text{mm}$, $\theta=35^\circ$ および $\theta=45^\circ$ ）では、基本断面で認められた渦励振やねじれフラッターが発現しておらず、耐風安定性が向上する結果となっていることがわかる。

一方、水平プレートのねじれフラッターに対する空力安定化効果をより詳細に把握するため、ねじれ振動波形から基準片振幅を 1° とした場合の対数減衰率を算出し、水平プレート付き断面と基本断面の結果を対比することとした。迎角が $\alpha=+3^\circ$ と $\alpha=0^\circ$ なる場合のV- δ 曲線（風洞風速と対数減衰率の関係図）をそれぞれ図14、図15に示す。なお、これらの図において、対数減衰率が負と

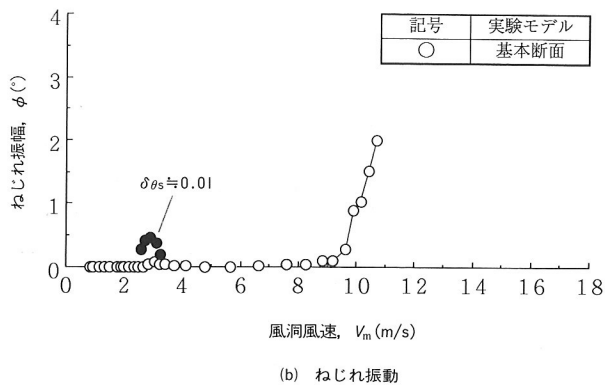
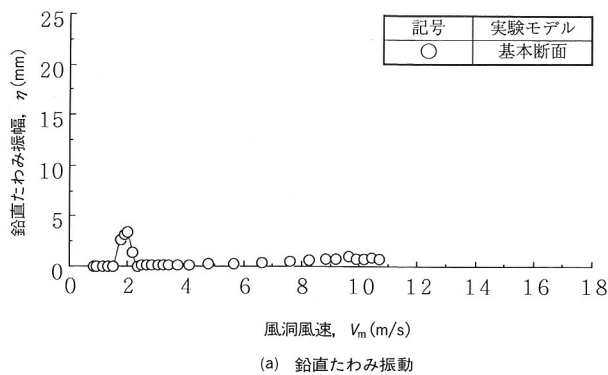


図10 基本断面のV-A曲線 ($\alpha = +3^\circ$, $\delta \approx 0.02$)

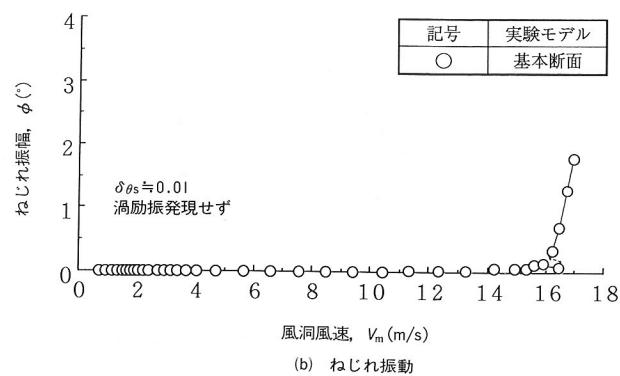
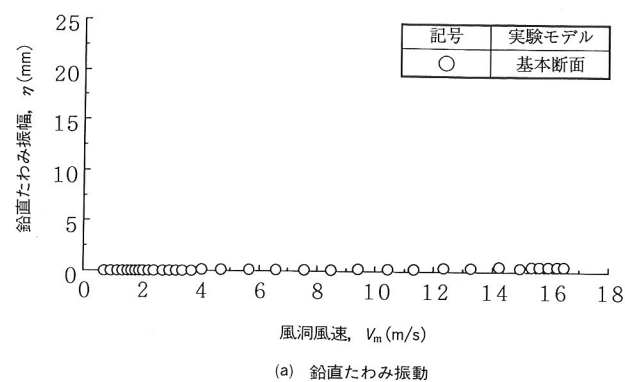


図11 基本断面のV-A曲線 ($\alpha = 0^\circ$, $\delta \approx 0.02$)

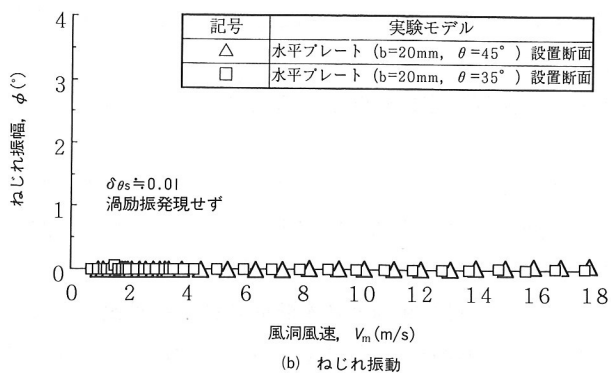
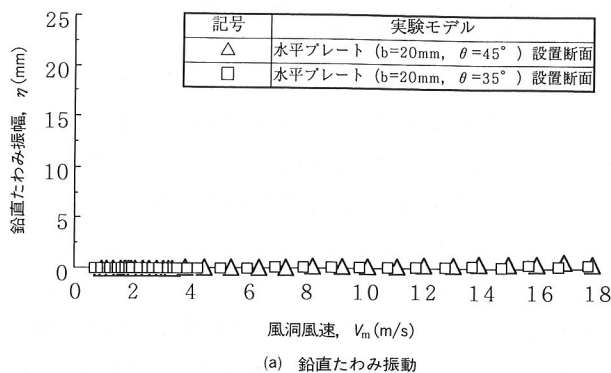


図12 水平プレート付き断面のV-A曲線
($b=20\text{mm}$, $\alpha = +3^\circ$, $\delta \approx 0.02$)

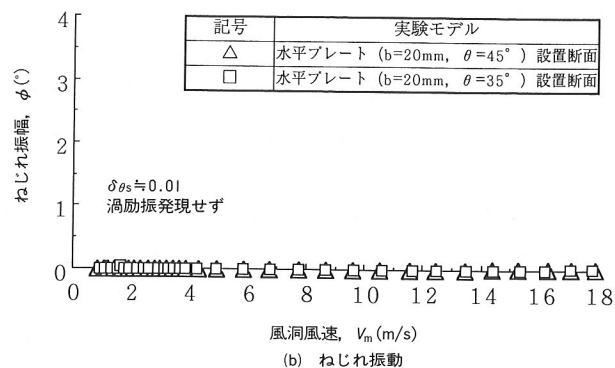
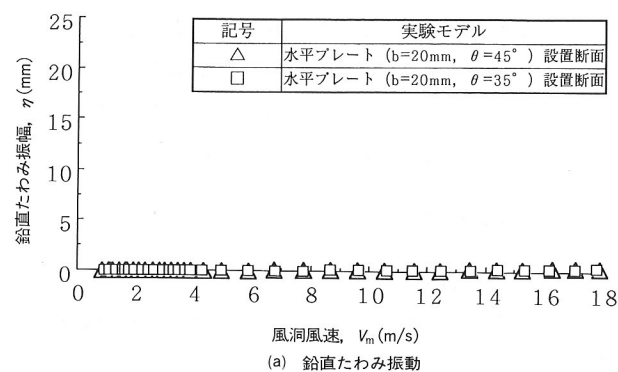


図13 水平プレート付き断面のV-A曲線
($b=20\text{mm}$, $\alpha = 0^\circ$, $\delta \approx 0.02$)

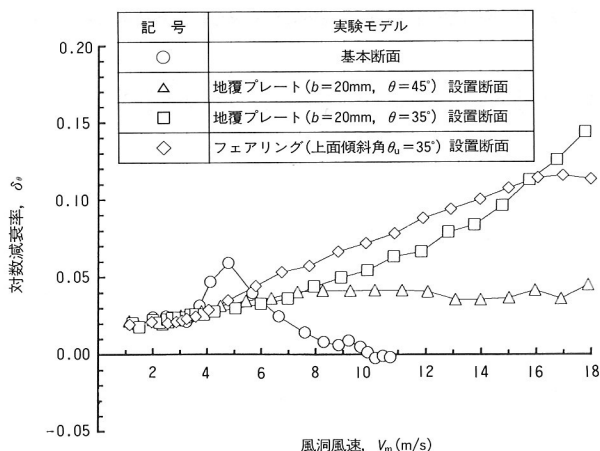


図14 V-δ曲線 ($\alpha = +3^\circ$)

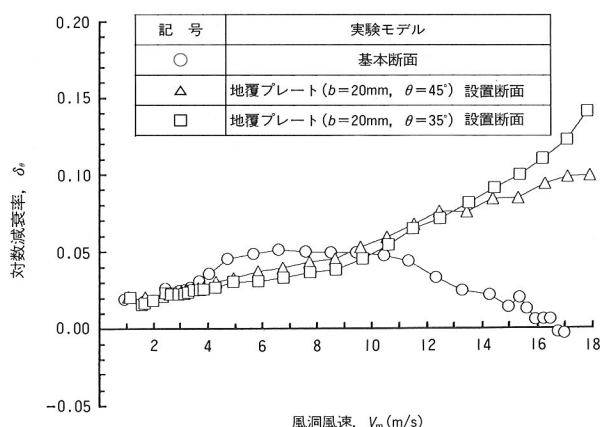


図15 V-δ曲線 ($\alpha = 0^\circ$)

なる風速域で片振幅が 1° 以上のねじれ振動が発現することになる。

図14からわかるように、迎角を $\alpha = +3^\circ$ に設定した場合、基本断面のねじれ対数減衰率 δ_{θ} は、 $V_m \approx 7 \text{ m/s}$ ($V_r \approx 3.2$)以上の風速域で無風時での構造対数減衰率である $\delta_{\theta 0} \approx 0.02$ を下回っているのに対し、 $\theta = 45^\circ$ となるように水平プレートを設置した場合には $V_m \approx 18 \text{ m/s}$ ($V_r \approx 8.2$)以下の実験風速域内で無風時の構造対数減衰率 $\delta_{\theta 0} \approx 0.02$ を常に上回る結果となっている。また、 $\theta = 35^\circ$ となるように水平プレートを設置した場合には、フェアリング付き断面と同程度のきわめて優れた空力制振効果を有していることもわかる。一方、迎角を $\alpha = 0^\circ$ に設定した場合の結果である図15から、 $\theta = 35^\circ$ と $\theta = 45^\circ$ なる場合の結果には大きな差異が認められず、両者の空力制振効果はいずれも非常に大きなものとなっている。

以上に示した一連のばね支持実験結果より、幅が $b = 20 \text{ mm}$ (1/33なる縮尺を用いて実橋換算すれば、660 mmに相当) 程度の水平プレートを桁上面とのなす角度が $\theta = 35^\circ \sim 45^\circ$ となるように設置すれば、前述した基本断面の渦励振やねじれフラッター特性が大幅に改善されることがわかった。すなわち、本研究で対象としたような比

較的偏平な箱桁断面に発現する渦励振やねじれフラッターに対しても、上述した水平プレートを適切な位置に設置することで十分に制振できる可能性が高いと言えよう。

5. あとがき

今回実施した一連の部分模型風洞実験により、斜張橋で採用されることの多い比較的偏平な箱桁断面に対する水平プレートの空力制振効果 (前縁はく離型渦励振や流れの位相遅れに起因したねじれフラッターに対する効果) が確認された。今後は、水平プレートを設置した断面の空力特性と、それに及ぼす地覆・高欄の影響などを詳細に把握すべく、引き続き風洞実験による検討を実施していく所存である。また、中小規模斜張橋で通常よく用いられている種々の主桁断面 (2箱桁断面や張り出しブラケットを有する断面など) に対する水平プレートの空力制振効果についても、同様の実験的研究が必要と考えている。本論文が、耐風検討に携わる実務技術者や風工学の研究者にとって示唆に富んだ有益な技術資料になることを心より願う次第である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，pp.1～22，1991年7月。
- 2) 高橋宏榮・大澤廣和・津村直宜・中村 宏・山口宏樹・N. Poovarodom：奥多摩大橋の制振対策，第3回振動制御コロキウム講演論文集，Part A，pp.55～62，1995年8月。
- 3) たとえば，斎藤 通・本田明弘：長大箱桁橋の耐風性及び制振対策法について，構造工学論文集，Vol.36A，pp.889～894，1990年3月。
- 4) 本田明弘・堤 満晴：浦上川歩道橋主塔の耐風安定性に関する実験的研究，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集，pp.706～707，1992年12月。
- 5) 芦原栄治・林田幸雄・井上稔・米田昌弘・宮地真一：常吉連絡橋 (仮称) の部分模型風洞試験 - 主桁部の耐風安定性に及ぼす隅切り効果について -，第13回風工学シンポジウム論文集，pp.401～406，1994年12月。
- 6) 久保喜延・小石 明・田崎賢二・中桐秀雄：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論文集，pp.353～358，1994年12月。
- 7) 酒井洋典・小川一志・下土居秀樹・斉藤敏雄：2主桁橋梁の空力特性改善策に関する実験的研究，第12回風工学シンポジウム論文集，pp.393～398，1992年12月。
- 8) 米田昌弘・宮地真一・瀬戸内秀規・枝元勝哉：偏平箱桁断面に対する水平プレートの空力制振効果に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.42A，pp.825～832，1996年3月。