

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—

Two-Dimensional Wind Tunnel Experiments of TSUNEYOSHI Bridge

—On Aerodynamic Stability of Main Girder by its Corners Cut—

米田 昌弘

Masahiro YONEDA

川田工業㈱技術本部研究室室長

宮地 真一

Shin-ichi MIYACHI

川田工業㈱技術本部研究室係長

枝元 勝哉

Katsuya EDAMOTO

川田工業㈱技術本部研究室

望月 秀之

Hideyuki MOCHIZUKI

川田工業㈱技術本部研究室

The cable-stayed bridge is the most flexible structure next to the suspension bridge. Therefore, in the wind-resistant design of this type of bridge, it is significant to check the aerodynamic stability.

The TSUNEYOSHI Bridge is a two-span continuous girder cable-stayed bridge with a main span length 250m. Wind tunnel experiments have been carried out to investigate aerodynamic characteristics of its girder. It was ascertained that original cross section of main girder with corners cut have drastic effects of improving aerodynamic stability compared to the same bridge models without corners cut.

Key words : wind tunnel experiment, cable-stayed bridge, aerodynamic stability

1. まえがき

近年における斜張橋の発展には目覚ましいものがあり、わが国においてもその使用実績は急速な伸びを示している。その反面、斜張橋は吊橋に次いで比較的剛性の低い柔構造物であることから、耐風設計に際し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200 mを超えるようなスパンの比較的長い斜張橋では、個々の橋梁ごとに風洞試験を実施して耐風安定性を検証する場合が多い。

ところで、比較的偏平な箱桁断面形式の斜張橋では、地覆や高欄を有する実橋の主桁部をモデル化し、一様流中ではね支持模型試験を実施した場合、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などを設置して構造減衰を付加する対策も一部実施されているものの²⁾、一般にはフラップやフェアリングなどの各種スタビライザーを設置することによって加振空気の低減を図る空力的対策が採用されている。

このような状況のもと、著者らも現在計画中の最大支間長が250 mなる常吉連絡橋(仮称)を対象として、道路橋耐風設計便覧による検討に基づき耐風性が好ましくな

いと判定された基本設計断面の空力的対策を検討すべく、部分模型風洞試験を実施した。ところが、予想に反し、本橋の基本設計断面は風洞試験によってきわめて良好な耐風性を示すという結果が得られた。対象橋梁の基本設計断面は地覆外側に段差部を有しており、上述の結果は主塔断面で従来より報告されている“隅切りによる空力安定化”と同様の効果に起因するものと推察される。比較的偏平な箱桁断面の渦励振やねじれフラッターに対する隅切り効果は今までに確認されておらず、本風洞試験結果は今後の中小規模斜張橋の耐風設計にあたりきわめて有用な知見を提示していると思われることから、ここにその結果を報告する。なお、本論文の内容の一部はすでに発表済みである³⁾。

2. 対象とした斜張橋とその構造諸元

常吉連絡橋(仮称)は、図1に示すように最大支間長が250 m、有効幅員が11.75 mの2面吊り鋼斜張橋であり、完成すれば1基のみの塔を有する斜張橋としては国内で最大規模のものとなる。

本橋の桁部は海上に位置することから強風に曝される可能性が高く、設計段階において道路橋耐風設計便覧を適用して概略の耐風安定性を検討している。その結果、許容振幅は若干下回るものの、低風速域において比較的大きなたわみとねじれの渦励振が、また、ねじれフラッ

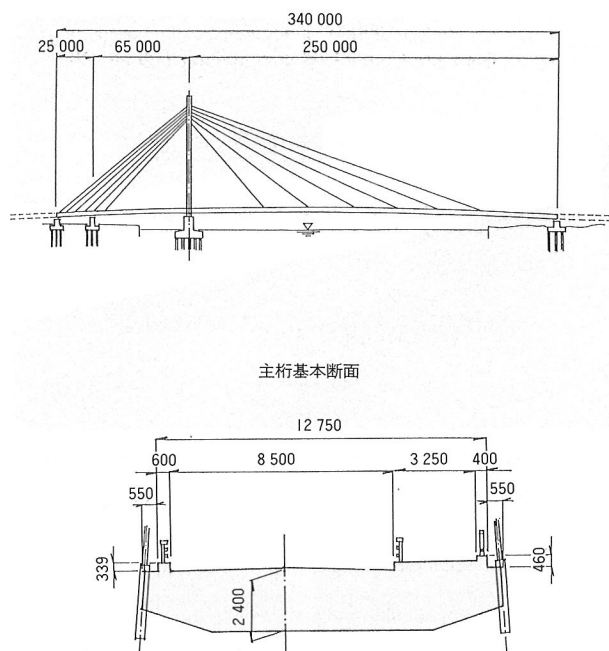


図1 常吉連絡橋(仮称)一般図

ターの発現風速は照査風速である68.1m/sを下回ると推定され、本橋の耐風性に関しては風洞試験によるさらに詳細な検討が必要と判断された。

3. 試験概要

風洞試験にあたっては、川田工業㈱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グ型であるが、本実験では幅2.0m×高2.5m×全長15.0mなる閉鎖型測定洞を使用するものとした。

風洞試験では、中央径間中央部の断面形状をモデル化した縮尺1/33の2次元剛体部分模型(模型長=1620mm)を用いて、一連のばね支持模型風洞試験を実施することとした。なお、ばね支持模型試験にあたっては模型を2自由度系で支持し、模型の回転中心を実橋断面の重心とせん断中心の1/2点に設定している。ばね支持模型試験で対象とした実験モデル(断面形状)を表1に示す。ここに、MODEL-Aは基本設計断面であり、歩道部側と車道部側にはそれぞれ段差部を有する。参考までに、MODEL-Aのばね支持試験条件を表2に示す。MODEL-BとMODEL-Cは、後述するようにMODEL-Aが良好な耐風性を示したことから追加採用した実験モデルであり、MODEL-Bが地覆外側のケーブル定着桁を取り外して段差部を無くした断面に、MODEL-Cが地覆外側の段差部を補助材でカバーして段差部を無くした断面にそれぞれ対応するものである。さらに、MODEL-Dは耐風性に優れたフェアリング形状を選定すべく採用した実験モデル

表1 実験モデルの断面形状

MODEL	断面形状	備考
A	基本断面 	主径間中央部の主桁断面形状
B	定着部無し断面 	地覆外側のケーブル定着部を取り外し、隅切りを無くした断面
C	隅切り無し断面 	地覆外側の段差を補助材でカバーすることで隅切りを無くした断面
D	フェアリング設置断面 	3タイプのフェアリング形状を想定 Type-1: $\theta_1=40^\circ$ Type-2: $\theta_1=35^\circ$ Type-3: $\theta_1=30^\circ$

表2 MODEL-Aのばね支持試験条件

	実橋諸元	模型所要値	ばね支持試験の諸元
縮尺	—	1/33	1/33
重量	15.29 tf/m	22.745 kgf/model	22.731 kgf/model
極慣性モーメント	31.41 $t \cdot s^2 \cdot m / Br.$	0.04291 $kgf \cdot s^2 \cdot m / model$	0.04277 $kgf \cdot s^2 \cdot m / model$
振動数	たわみ	0.367Hz	—
	ねじれ	1.616Hz	—
構造対数減衰率	—	0.02	0.02

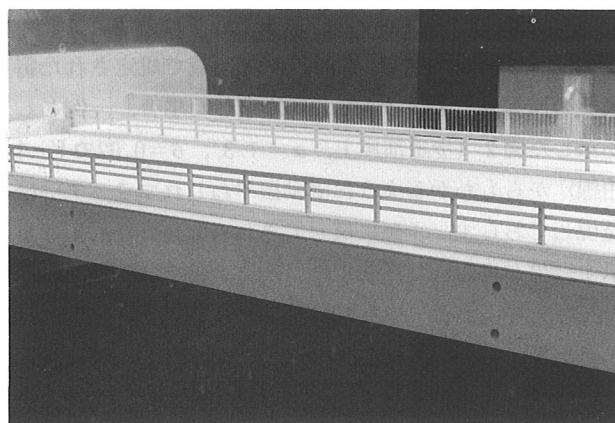


写真1 基本断面模型(MODEL-A)の設置状況

ルであり、本試験では上面傾斜角を変化させた3タイプのフェアリング(Type-1~Type-3)を対象としている。

なお、以上のばね支持模型風洞試験に加え、一部のケースについては静的3分力試験も実施することとした。

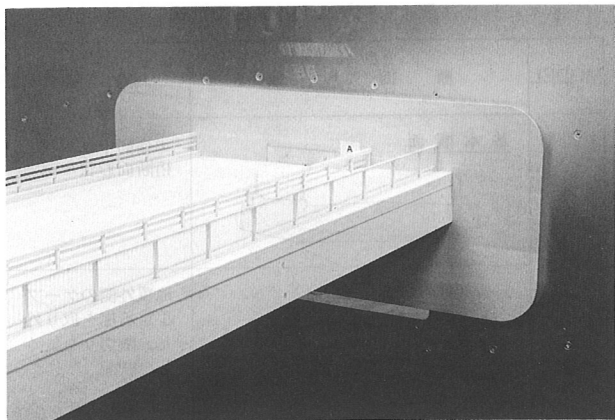


写真2 隅切り無し断面模型(MODEL-C)の設置状況

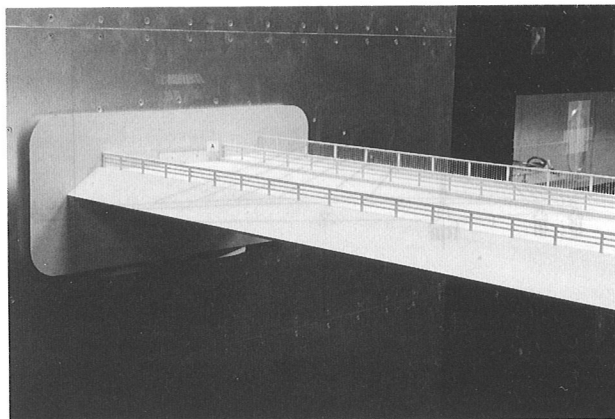


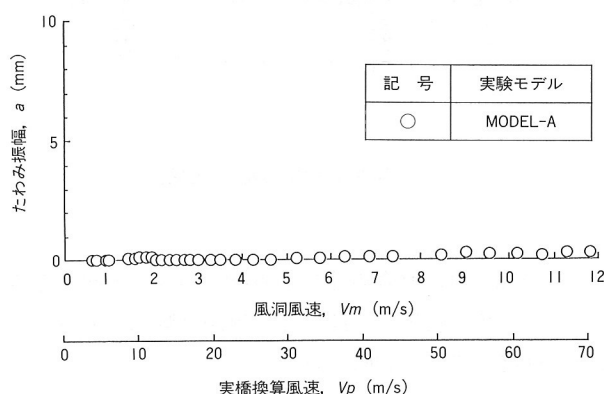
写真3 Type-2なるフェアリングを採用した模型(MODEL-D)の設置状況

参考までに、基本断面模型、隅切り無し断面模型およびフェアリング(Type-2)の設置状況を写真1～3にそれぞれ示す。

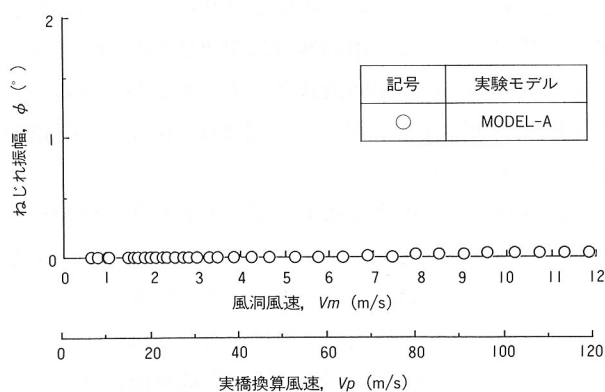
4. 実験結果と考察

(1) ばね支持模型試験

図1からわかるように、本橋は橋面の片側にマウントアップされた歩道部を有することから、主桁の基本設計断面は左右非対称となっている。また、地覆とケーブル定着桁によって車道側と歩道側にはそれぞれ段差部(歩車道部における段差幅の合計値と橋幅の比は約1/12.6)が形成されており、初期の検討段階ではこの段差部が耐風性に悪影響を及ぼすものと考えられた。そこで、まずMODEL-A(基本設計断面)の耐風性を把握することを目的として、車道部風上と歩道部風上のそれぞれにつき、迎角 α が $\alpha = +3^\circ, 0^\circ, -3^\circ$ なるもとで一樣流状態ではね支持模型実験を実施した。その結果、設計基本断面については車道部風上と歩道部風上のいずれの場合においても、構造対数減衰率 δ を耐風設計便覧で規定された斜張橋の所要値である $\delta = 0.02$ に設定した場合、一例として示した図2(歩道部風上、 $\alpha = +3^\circ, \delta = 0.02$ のV-A曲線)からもわかるように渦励振やねじれフラッターは発現しておらず、予想に反してきわめて良好な耐風性を示す結果が得られた。ここに、風洞試験での Re 数は、代表長として桁高 D (模型では $D = 0.0756$ m)を採用した場合、 $Re = 4.0 \times 10^3 \sim 7.8 \times 10^4$ である。そこで、MODEL-B(地覆外側のケーブル定着桁を取り外して段差部を無くした断面)とMODEL-C(地覆外側の段差部を補助材でカバーして段差部を無くした断面)について、 $\alpha = +3^\circ, \delta = 0.02$ なるもとで一樣流状態のばね支持模型試験を実施することとした。得られたV-A曲線を図3に示す。図3より、段差部を無くしたMODEL-BやMODEL-Cでは、きわめて大きなたわみとねじれの渦励振が、また、ねじれフラッターも照査風速である68.1 m/sと同程



(a) 鉛直たわみ振動

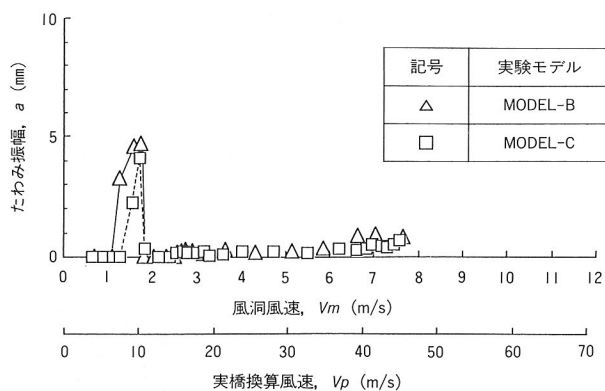


(b) ねじれ振動

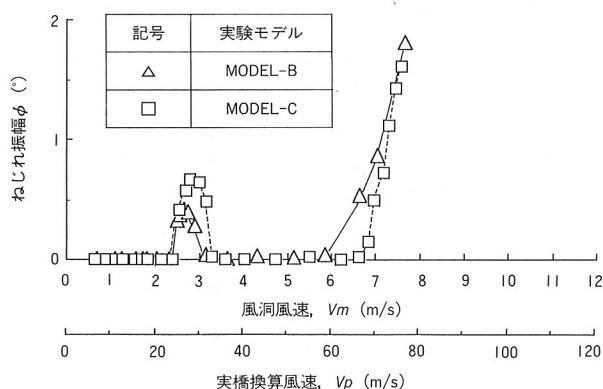
図2 MODEL-AのV-A曲線
(歩道部風上、 $\alpha = +3^\circ, \delta = 0.02$)

度の風速で発現していることが明確に理解できよう。よって、本橋の主桁基本断面がきわめて良好な耐風性を示したのは、地覆外側の段差部による“隅切り効果”によるものと推察された。

明石海峡大橋や東神戸大橋の主塔では、渦励振やギャロッピング対策としてすでに隅切り断面を採用しているが、隅切りによる耐風対策はメカニズムがきわめて複雑でその効果も Re 数の大きさに依存することが知られて



(a) 鉛直たわみ振動



(b) ねじれ振動

図3 MODEL-BとMODEL-CのV-A曲線
(歩道部風上, $\alpha = +3^\circ$, $\delta = 0.02$)

いる^{4)~7)}。したがって、本橋の設計基本断面に対して風洞試験で確認された隅切りによる耐風性改善効果を実橋においても同様に期待できることを証明するためには、 Re 数を変化させた膨大なケースの実験を実施しなければならない。また、本橋では耐風性に優れたフェアリングを設置することによって主桁部の景觀に配慮することが当初からの設計思想となっていたこと、さらに、上面傾斜角 θ_1 が $\theta_1 = 35^\circ$ なるフェアリング(Type-2)を設置した場合、 $\alpha = -3^\circ \sim +5^\circ$ の範囲において非常に良好な耐風性を示すことが風洞実験で確認されたこともあり、隅切りによる空力安定化効果が認められた基本設計断面をそのまま採用するかどうかは現在のところ微妙な状況下にある。しかしながら、前縁はく離型に分類される主桁断面の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隅切りによる空力安定化効果は従来報告されておらず、ここに示したばね支持模型試験結果は、今後の中小規模斜張橋の設計にあたり、示唆に富んだきわめて有用な実務設計上の知見を与えていると考えられる。そこで、次節に示すように、静的3分力試験も併せて実施し、静的空力特性の面から主桁段差部の隅切り効果について検討することとした。

(2) 静的3分力試験

風洞風速が $V = 5 \text{ m/s}$, 10 m/s , 15 m/s なる一様流中で試験で得られた、MODEL-Aなる基本設計断面(歩道部風上)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設計断面の3分力特性は、若干の差異はあるものの、風速($V = 5 \text{ m/s} \sim 15 \text{ m/s}$)の違いによらずほぼ同じ傾向を示していることがわかる。すなわち、揚力係数 C_L と空力モーメント係数 C_M は迎角 $\alpha = -4^\circ$ 以上で増加する傾向を示し、とりわけ $\alpha = -4^\circ \sim +4^\circ$ なる範囲ではほぼ直線的に増加していることが読み取れよう。また、Type-2なるフェアリングを設置した断面の3分力曲線と比較した図5からわかるように、基本設計断面(MODEL-A)は $\alpha = -4^\circ \sim +15^\circ$ なる迎角範囲においてType-2なるフェアリングを設置した断面とほぼ一致する3分力特性を示していることも理解できる。ここに、Type-2なるフェアリングを設置した断面は、前述したように $\alpha = -3^\circ \sim +5^\circ$ なる迎角範囲で非常に良好な耐風性を示すことがばね支持模型試験で確認されている。

これに対し、図6は風洞風速が $V = 5 \text{ m/s}$, 10 m/s , 15 m/s なる一様流で実施したMODEL-C(地覆外側の段差部を補助材でカバーして段差部を無くした断面)の歩道部風上における3分力曲線であるが、この場合には

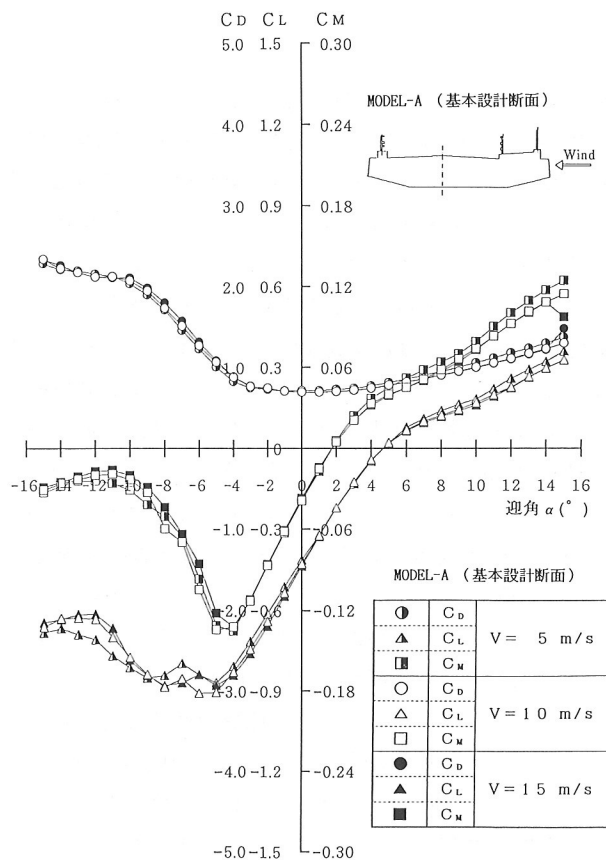


図4 MODEL-Aの3分力曲線(歩道部風上)

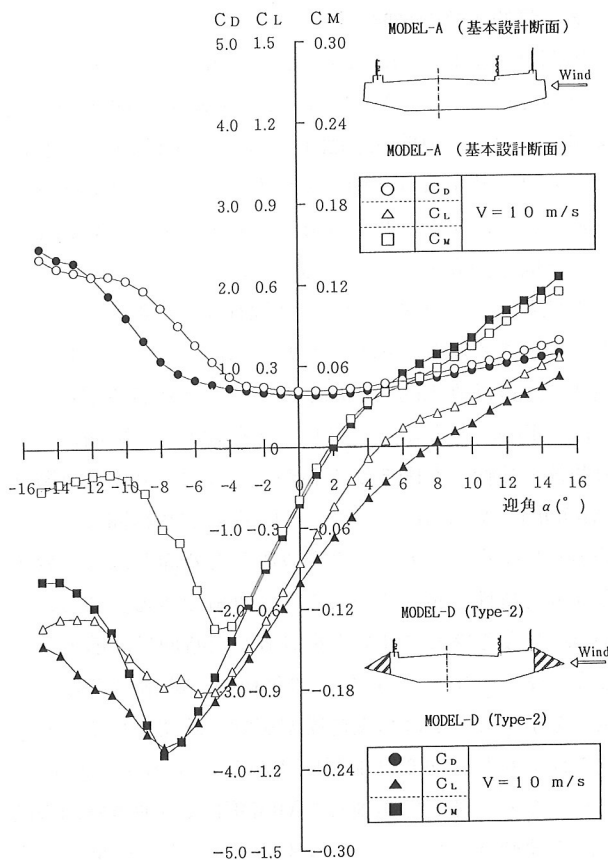


図5 MODEL-AとMODEL-D(Type-2)の3分力曲線

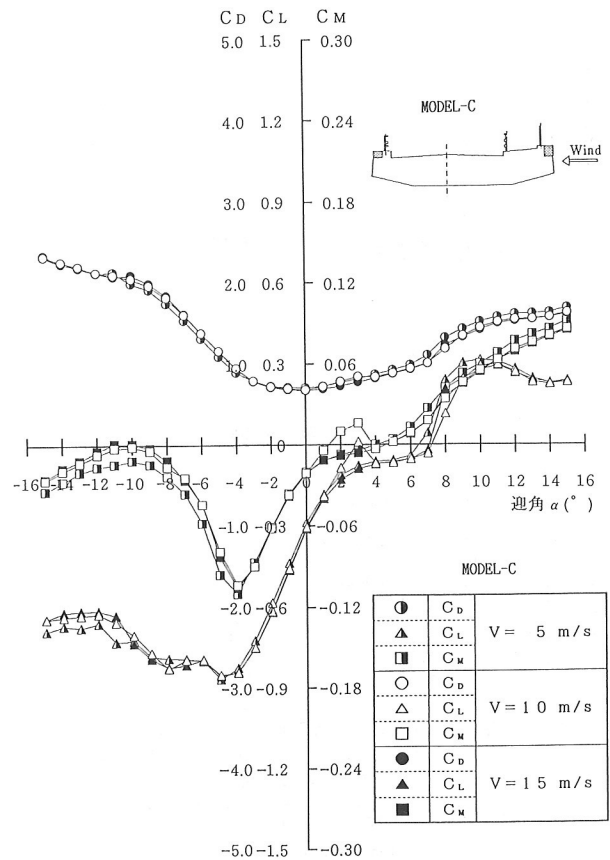


図6 MODEL-Cの3分力曲線(歩道部風上)

$\alpha = +3^\circ \sim +6^\circ$ なる範囲で揚力係数 C_L と空力モーメント係数 C_M の迎角 α に対する勾配が基本設計断面の測定値と比較して明らかに相違する結果が得られている。すなわち、MODEL-Cなる段差部無し断面では、風速によって特性の差異が若干認められるものの、 $\alpha = +3^\circ \sim +6^\circ$ なる範囲での揚力係数勾配 $\Delta C_L / \Delta \alpha$ と空力モーメント係数勾配 $\Delta C_M / \Delta \alpha$ は負ないしはほぼゼロなる結果を与えていることがわかる。したがって、基本設計断面の段差部は静的空気力特性からも、準定常理論の仮定のもと動的耐風性に少なからず影響を及ぼしているものと推察された。なお、文献4)では、断面比(幅/高さ)が $B/D = 1.46$ なる矩形断面に $a/D = 2/18 \sim 3/18$ の隅切りを施した場合、隅切りのない矩形断面に比べ、抗力係数 C_D が約半分に低減したとの報告がなされているが、本主桁断面に対する実験では隅切り部の有無に係わらず $C_D \approx 0.68 \sim 0.70$ となっており、抗力係数の低減は認められていない。これは本橋の橋幅 B と桁高 D の比が $B/D \approx 9$ であることから、隅切りの有無に係わらず橋面上において流れの再付着が生じていることに起因するものであろう。それゆえ、前節のばね支持模型試験結果も加味すれば、隅切りによる空力安定化効果は、流れの再付着が生じる比較的偏平な断面に対しても有効である可能性が高いと

考えられる。

5. まとめ

本論文は、現在計画中の最大支間長が250 mなる常吉連絡橋(仮称)を対象とした、部分模型風洞試験結果について報告したものである。得られた主要な結果を以下にまとめる。

- ① 本橋の基本設計断面(MODEL-A)は、地覆外側に段差部(歩車道部における段差幅の合計値と橋幅の比は約1/12.6)を有するものであるが、構造対数減衰率 δ が $\delta = 0.02$ で迎角 α が $\alpha = +3^\circ, 0^\circ, -3^\circ$ なるもとで一樣流状態のばね支持模型試験を実施したところ、渦励振やねじれフラッターは発現せず、予想に反してきわめて良好な耐風性を示す試験結果が得られた。一方、地覆外側のケーブル定着桁を取り外して段差部を無くした断面(MODEL-B)や地覆外側の段差部を補助材でカバーして段差部を無くした断面(MODEL-C)では、迎角 α が $\alpha = +3^\circ$ と $\alpha = 0^\circ$ なるもとできわめて大きなたわみとねじれの渦励振が、また、ねじれフラッターも照査風速である68.1 m/sと同程度の風速で発現する結果となった。よって、本橋の基本設計断面(MODEL-A)がきわめて良好な耐風性を示したのは、

地覆外側の段差部による“隅切り効果”によるものと推察された。

② 歩道部風上の段差部無し断面 (MODEL-C) について、風洞風速が $V = 5 \text{ m/s}$, 10 m/s , 15 m/s なる一様流中で静的 3 分力試験を実施したところ、風速によって特性の差異が若干認められるものの、 $\alpha = +3^\circ \sim +6^\circ$ なる範囲での揚力係数勾配 $\Delta C_L / \Delta \alpha$ と空力モーメント係数勾配 $\Delta C_M / \Delta \alpha$ は負ないしはほぼゼロなる結果となった。これに対し、歩道部を風上とした基本設計断面 (MODEL-A) では、風洞風速 ($V = 5 \text{ m/s} \sim 15 \text{ m/s}$) の違いによらず、揚力係数 C_L と空力モーメント係数 C_M は迎角 $\alpha = -4^\circ$ 以上で増加する傾向を示し、とりわけ $\alpha = -4^\circ \sim +4^\circ$ なる範囲ではほぼ直線的に増加していた。また、基本設計断面は、 $\alpha = -4^\circ \sim +15^\circ$ なる迎角範囲において、上面傾斜角が 35° の Type-2 なるフェアリングを設置した断面とほぼ一致する 3 分力特性を示していた。したがって、基本設計断面の段差部は、静的空気力特性からも準定常理論の仮定のもと耐風安定性に少なからず影響を及ぼしているものと推察された。

③ 断面比 (幅/高さ) が $B/D = 1.46$ なる矩形断面に $a/D = 2/18 \sim 3/18$ の隅切りを施した場合、隅切りのない矩形断面に比べて抗力係数 C_D が約半分に低減したとの報告がなされているが、本主桁断面に対する実験では隅切り部の有無に係わらず $C_D \approx 0.68 \sim 0.70$ となっており、抗力係数の低減は認められなかった。それゆえ、ばね支持模型風洞試験結果も加味すれば、隅切りによる空力安定化効果は、流れの再付着が生じる比較的偏平な断面に対しても有効である可能性が高いと考えられる。

主塔のような矩形断面に対する従来の風洞試験から、隅切りによる空力安定化効果には最適な隅切り寸法が存在し、また Re 数によっても特性が変化することが知られている。それゆえ、今後は、隅切りの幅や高さならびに Re 数をパラメータとした詳細な実験を実施し、主桁断面に対する隅切り効果を検討していく所存である。このように解明されるべき課題は残されてはいるものの、本風洞試験で確認された主桁断面に対する隅切りによる空力安定化効果 (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) は従来報告されておらず、今後の中小規模斜張橋の耐風設計にあたりきわめて有用な知見を与えるものであろう。本論文が、斜張橋の設計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。

最後に、本業務を実施するにあたり、大阪市建設局橋梁課の皆様より貴重な御指導と御支援を賜りました。紙

面を借りて、厚くお礼を申し上げます。

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) Huffmann, G., Freeman, R. A. and C.W. Brown: Dao Khanong Cable Stayed Bridge-Tuned Mass Dampers in Deck and Pylon-, *International Conference on Cable-stayed Bridges*, Bangkok, pp. 1485～1493, November, 1987.
- 3) 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，第13回風工学シンポジウム論文集，pp. 401～406，1994年。
- 4) 白石成人・松本 勝・白土博通・石崎 浩・長田 信・松井俊彦：隅切りによる矩形断面の空力安定化対策，第9回風工学シンポジウム論文集，pp. 193～198，1986年12月。
- 5) 水元義久・石崎 浩・吉田 聡：東神戸大橋主塔の耐風安定性，阪神高速道路公団技報，第6号，pp. 62～70，1986年。
- 6) 武内隆文・北原俊男：超長大橋主塔の渦励振の発現と空力制振法に関する基礎的研究，第9回風工学シンポジウム論文集，pp. 199～204，1986年12月。
- 7) 岡島 厚・上野久儀・阿部彰人：隅切り矩形断面柱の空力特性に及ぼすレイノルズ数の影響，日本風工学会誌，第49号，pp. 1～13，1991年11月。