

2 主桁断面を有する低コスト型斜張橋の耐風性検討

Aerodynamic Investigation on Cable-stayed Bridge with 2-edge Girder

村上 琢哉 基盤技術研究所 都市工学研究部 主任研究員
武田 勝昭 基盤技術研究所 都市工学研究部 主幹
高尾 道明 橋梁建設部 開発技術室 統括スタッフ
由井 陸粋 基盤技術研究所 都市工学研究部

Takuya Murakami
Katsuaki Takeda
Michiaki Takao
Rokusui Yui

本研究では、張出しを設けない 2 主 I 桁、端 2 箱桁を有する斜張橋を対象に、維持管理上の通路あるいは公共添架物を耐風安定化部材として活用する低コスト型耐風安定化対策を提案し、風洞実験によりその効果を実証した。また、全体剛性増加によるフラッター発現風速の向上を狙った構造力学的対策についても検討した。さらに、フラッター性能に着目した場合の本橋の適用支間長について検討を加え、今回提案した耐風安定化対策の効果を定量的に示した。

This paper investigates aerodynamic countermeasures for cable-stayed bridges with 2-edge girder section. Wind tunnel tests were conducted in order to confirm the performance of the new countermeasure by using the essential attachments. Some structural countermeasures by increasing bridge rigidity were also investigated. In this study, adding a horizontal member at the top of the tower is most effective for increasing the flutter onset velocity. In conclusion, these aerodynamic countermeasures can be economical countermeasures.

1. はじめに

橋梁の低コスト化の要請から、斜張橋に 2 主桁（エッジガーダー）を採用する構造形式が国内で注目されている。

2 主桁形式の斜張橋は、海外では既に多くの実績があるものの、断面形状から決定される空力特性が悪いこと、断面のねじれ剛性も低いことから、台風常襲国の我が国では主として 1 箱桁断面が採用されてきた。しかし、国内でも最近活発に耐風性の検討が実施されており¹⁾³⁾、耐風性に優れた桁断面が幾つか提案されている。既往の耐風対策は桁断面形状の変更による空力的対策が主流であり、代表的なものとして、Alex-Fraser 橋における桁の張出しとエッジプレートの設置⁴⁾、Long's Creek 橋におけるフェアリングの設置⁵⁾、Quincy 橋におけるパップルプレートの設置⁶⁾などが挙げられる。しかし、経済性をより追及するためには、橋梁建設あるいは供用上不可欠となる部材を耐風安定化部材として有効に活用する対策が望まれる。一方、構造力学的対策についても、ねじれ剛性の高い主塔の採用、南浦大橋に採用された側径間に中間橋脚の設置⁷⁾など橋梁の全体剛性を高める対策が実施されているが、耐風性の効果は必ずしも明確ではない。構造力学的対策に対して耐風性向上効果を把握することは、耐風安定性の確保が懸念される場合の構造形式の選定に有効であると考えられる。

本研究では、まず、床版の張出しを設けない 2 主 I 桁、端 2 箱桁を有する低コスト型斜張橋を対象とし、維持管理上の通路あるいは公共添架物を活用した低コスト型耐風安

定化対策を提案し、その効果を検討した。また、全体剛性増加によるフラッター発現風速の向上を狙った構造力学的対策の検討を実施した。最後に、フラッター発現風速に着目した場合に、床版張出しを設けない 2 主桁斜張橋の適用支間長について検討した。

2. 対象橋梁の概要

対象とした橋梁は Fig.1 に示すような中央径間 400m、側径間 180m（側径間比 0.45）を有する 3 径間連続斜張橋である。主塔は H 型形状、ケーブルは 2 面吊りとし、主塔と桁の接続はフローティング形式としている。橋桁は、経済性を考慮して床版張出しのない 2 主 I 桁断面（断面 A）、端 2 箱桁断面（断面 B）とした。端 2 箱桁は、長支間用の橋桁断面として主桁に箱桁を用いた断面である。橋桁断面はともに、中央防護柵に耐風性、経済性を考慮した充実型防護柵を設け、横桁高さは 1.5m、横桁間隔 3m、縦桁高さ 0.5m、縦桁間隔 4.4m と標準とした。

3. 空力的対策の検討

3.1 風洞実験概要

当社所有の測定断面 2m(幅)×3m(高さ)の回流式風洞を使用し、たわみとねじれの 2 自由度系ばね支持試験を実施した。模型の縮尺は 1/50、模型長は 1.59m とした。対象断面 (Fig.1 (c), (d)) において、(c) の 2 主 I 桁断面については、縦桁高さの影響を検討するために、1.5m 高さの断面も実施した。断面は、高さ 1.5m を A1、0.5m 高さ(標準)

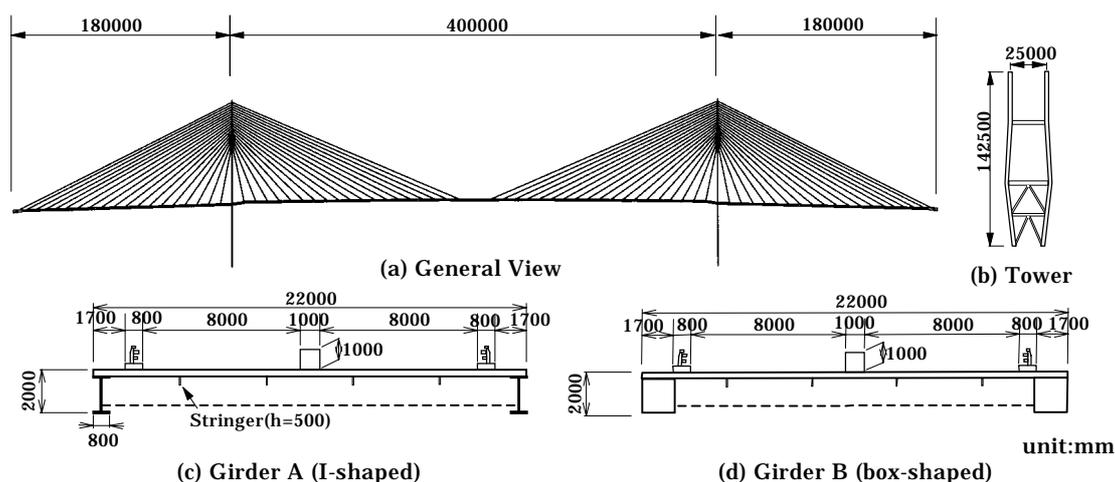


Fig.1 Cable-stayed bridge for investigation

の断面を **A2** と呼ぶこととする。ばね支持条件を **Table 1** に示す。同条件は、中央径間 **400m** クラスの斜張橋を想定して定めた。試験ケースは、各断面とも一様流中の迎角 0° 、 $\pm 3^\circ$ を実施した。提案した耐風安定化対策を **Fig.2** に示す。これは、矩形部材で模擬した供用上不可欠となる添架部材により擬似隅切りを形成する方法である。**2 主 I 桁** では主桁内側に、**端 2 箱桁** では桁の上下面に設置するが、添架材の設置パラメーターである I 桁からの突出高 **Pa**、箱桁端部からの距離 **XU**、**XL** を適宜変化させた。

Table 1 Properties of bridge section model

Property	Prototype (assumed)	Model (scale 1:50)
Width	22.0m	0.44m
Depth	2.0m	0.04m
Mass	25.23t/m	16.05kg/model
Inertia	1548t·m ² /m	0.394kgm ² /model
Damping(δ)	-	0.020
Bending freq.	0.27Hz	2.10Hz
Torsional freq.	0.54Hz	4.20Hz

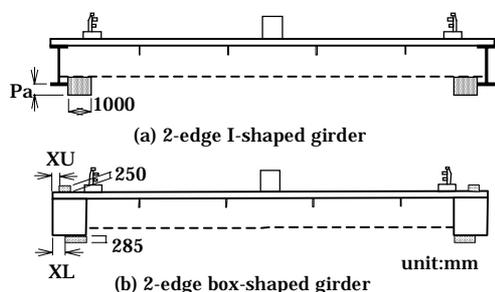


Fig.2 Concept of new countermeasure

3.2 試験結果

各試験ケースごとにフラッター発現風速、渦励振最大振幅を測定した。渦励振振幅は加速度に変換して表現し、ねじれ渦励振振幅については桁端部の加速度で表現した。なお、本試験で生じたフラッターはすべてねじれ卓越のねじ

れフラッターである。耐風性の判断基準については、道路橋耐風設計便覧⁹⁾に準じることとした。すなわち、渦励振については一応の目安とされている **100gal** とした。渦励振加速度が **100gal** に達する振幅は、たわみ実橋振幅約 **35cm** ($\eta/B = 0.016$)、ねじれ振幅約 0.45° である。フラッター照査風速については、架設地点に依存するものの、仮に架設地点を対象規模の斜張橋の実績が多い沿岸部、主桁高度 **60m**、基本風速 **35m/s** とした場合の照査風速 **60m/s** を一応の目安として今後論じることとした。

3.2.1 2 主 I 桁の空力的対策

試験結果を添架部材突出高 **Pa** とフラッター発現風速、渦励振加速度の関係でまとめて **Fig.3** に示す。図中、突出高 **w/o** は添架物を設置していない基本断面を示している。

(1) 縦桁高の違いによる影響

縦桁高の違い(断面 **A1** と断面 **A2**)を比較すると、縦桁が高い断面 **A1** の方が断面 **A2** よりもフラッター発現風速が **10m/s** 以上高く、渦励振加速度もたわみ、ねじれともに小さくなっていることがわかる。これは、縦桁が高い場合には、縦桁がバップルプレートの役割を果たし、上流側主桁下面において剥がれた流れが主桁内側に巻き込んで渦が形成されるのを抑制しているためと考えられる。

ねじれ渦励振の最大加速度については、縦桁の高さに関わらず **100gal** を越えているため、何らかの対策が必要となる。一方、フラッターについては、どちらも迎角 -3° で最小となり、断面 **A1** が約 **65m/s**、断面 **A2** が約 **45m/s** となる。縦桁の低い **A2** については対策が必要となると判断される。

(2) 擬似隅切り対策の効果

断面 **A1** では、迎角 $+3^\circ$ で添架物の突出高が大きくなるにつれてフラッター発現風速、渦励振ともに悪化しており、突出高 **80cm** ではフラッター発現風速は約 **50m/s**、ねじれ渦励振最大加速度は約 **120gal** に達することがわかる。一方、迎角 -3° においては、突出高 **20cm** と **80cm** の場合に

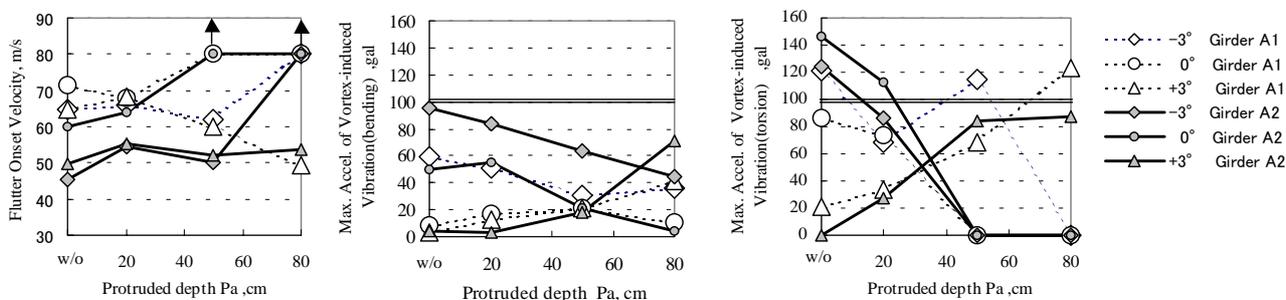
渦励振低減効果が見られ、迎角 0° では突出高 **50cm, 80cm** でフラッター発現風速、ねじれ渦励振に顕著な改善が見られる。以上より、断面 **A1** においては **Pa=20cm** が最も耐風安定性に優れており、フラッター発現風速については概ね **65m/s** と添架物を設置しない場合とほぼ同等であること、渦励振最大加速度は基本断面の約 **60%** である約 **70gal** にまで低減されていることがわかる。

断面 **A2** については、迎角 $0^\circ, -3^\circ$ において、添架物突出高を **50cm, 80cm** にすれば **100gal** 以上のねじれ渦励振は消滅し、たわみ渦励振も低減していることがわかる。一方、フラッターは突出高 **80cm** の場合に最も効果があり、発現風速は **80m/s** 以上となっている。しかしながら、迎角 $+3^\circ$ では、フラッター発現風速は添架物突出高によらず約 **55m/s** にとどまっており、設置による効果は見られない。渦励振については突出高の増加とともに最大加速度は大きくなる傾向を示しているが、突出高 **80cm** でも約 **80gal** 程度であり、一応の目安である **100gal** を下回っている。これらの現象は、迎角 0° では擬似隅切りによって上流側主桁下面の渦形成を抑制できているが、迎角 $+3^\circ$ では擬似隅切りにより逆に大きな剥離渦が形成されたためと推察される。以上より、断面 **A2** では突出高 **80cm** の場合が最も耐風安定性に優れており、渦励振最大加速度は基本断面の約 **60%** の約 **80gal** に低減される。ただし、フラッター発現風速が迎角 $+3^\circ$ において約 **55m/s** にとどまっているため、今回の判断基準では他の対策との併用が必要とされる。

以上の結果より、**2 主 I 桁** 内側に矩形部材を突出させることによって擬似隅切りを形成する対策は、適切な突出高をとれば、フラッター発現風速を対策前と同等かそれ以上にし、渦励振を低減する効果を有するため、渦励振対策の一つとして有効であると言える。ただし、縦桁高さによって適切な突出高が異なることに留意する必要がある。

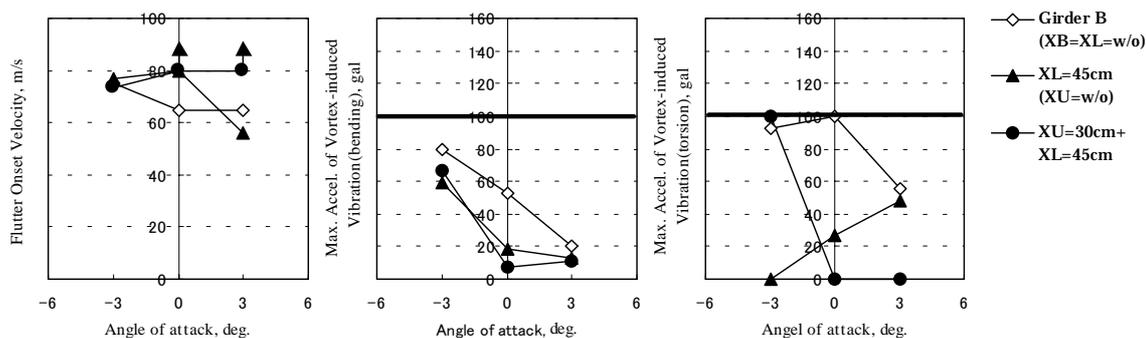
3.2.2 端 2 箱桁の空力的対策

代表的なケースとして、桁下のみに隅切り (**XL=45cm, XU=w/o**) を設けたケース、桁上下に隅切り (**XU=30cm, XL=45cm**) を設けたケースのばね支持試験結果を基本断面と比較して **Fig.4 (a)~(c)** に示す。これより、対策を講じない基本断面 (図中◇) のフラッター発現風速は約 **65m/s** であり、**2 主 I 桁** 断面よりも約 **50%** 高い。また、渦励振加速度についても **100gal** 近く生じているものの **2 主 I 桁** よりも小さいことがわかる。したがって、基本断面では、端 2 箱桁断面の方が **2 主 I 桁** 断面よりも高い空力特性を有していることがわかる。桁下のみの隅切りを有した場合 (図中▲) では、渦励振加速度は低減されているものの、迎角 $+3^\circ$ のフラッター発現風速は低下する。一方、桁上下に適切な隅切り断面を講じたケース (図中●) では、フラッター発現風速の最も低い迎角 -3° でも **74m/s** となり、基本断面 (**64m/s**) より約 **15%** 高くなっていることがわかる。また、渦励振については、たわみ渦励振、ねじれ渦励振ともに最大加速度は迎角 -3° において基本断面と同程度の振動が生じており、ねじれ渦励振では **100gal** 近くに達している



(a) Flutter (b) Vertical vortex-induced vibration (c) Torsional vortex-induced vibration

Fig.3 Investigation on new countermeasure (2-edge I-shaped girder)



(a) Flutter (b) Vertical vortex-induced vibration (c) Torsional vortex-induced vibration

Fig.4 Investigation on new countermeasure (2-edge box-shaped girder)

ものの、基本となる迎角 0° では渦励振はほとんど見られていない。以上より、今回検討した端箱桁断面に隅切りを形成する耐風安定化対策は、適切な隅切りサイズを設けることにより、フラッター発現風速を向上させることができる。径間長の増大とともに、フラッター発現風速は低下することから、本対策は大規模斜張橋を考えた場合には有効な対策になると考えられる。

4. 構造力学的対策の検討

4.1 解析概要

全体剛性を増加させる構造力学的対策は、フラッター発現風速の増加を狙ったものであるため、橋梁全体系の固有値解析と二次元フラッター解析によって評価することとした。主要な構造諸元を **Table 2** に示す。解析モデルの作成においては、曲げねじれ剛性を合わせるために星埜ら⁹⁾と同様のモデル化を行っている。解析ケースは、側径間中間橋脚の追加設置検討、主塔塔頂水平材の追加、主塔塔頂をケーブルで接続する方式（以下、タワーケーブル方式）を実施した。各対策の概念図を **Fig.5** に示す。塔頂水平材の剛性は主塔上側の中間水平材と同一とし、タワーケーブル方式の断面積については、主ケーブルの断面積と同等の **0.013m²** としたケース（**Area 1**）を基本とした。二次元フラッター解析に入力する橋桁の空気力には、前章で検討した断面 **A1** の非定常空気力係数（迎角 0° ）を用いた。

Table 2 Properties of analytical model

Girder	Outline	Shape	2-edge I-shaped girder
		Width	22m
Girder	Mass	Mass	23t/m
		Moment of inertia	2400t·m ²
	Stiffness	Area	1.05m ²
		Vertical	0.8m ⁴
Tower	Stiffness	Horizontal	160m ⁴
		Bending - Torsional	85m ⁶
		Out - Plane	11~20m ⁴
	Horizontal member	In - Plane	6~8m ⁴
		Torsional	15~21m ⁴
		Out - Plane	6m ⁴ (U) , 11m ⁴ (L) *1)
Tower	Horizontal member	In - Plane	5m ⁴ (U) , 7m ⁴ (L)
		Torsional	8m ⁴ (U) , 15m ⁴ (L)

(Remarks) *1) U : Upper member L : Lower member

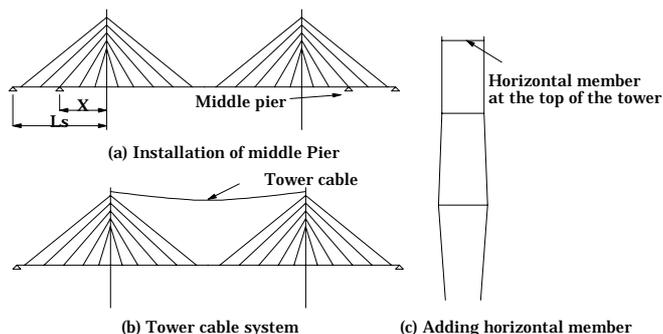


Fig.5 Concept of structural countermeasures

4.2 解析結果

解析結果を **Table 3** に示す。これより、中間橋脚の設置は側径間中央部に設置した場合にねじれ振動数を最も増加させることができるが、フラッター発現風速の増加は **3m/s** 程度であり、大幅なフラッター発現風速の向上にはつながることがわかる。これは、剛性増加によりねじれ振動数が大きくなっているものの、たわみ振動数の増加率がねじれ振動数よりも大きく、振動数比が小さくなっているためと判断される。タワーケーブル方式も同様な傾向で、フラッター発現風速の増加は **2m/s** 程度である。一方、主塔の塔頂水平材の追加は、構造系のねじれ剛性を **13%** 増加させることが可能で、フラッター発現風速も **16%** 増加していることから効果的な対策であることがわかる。塔頂水平材の追加による影響を箱桁の場合と比較すると、ねじれ振動数、フラッター発現風速ともに箱桁より増加率が大きい。

以上より、今回検討した対策の中では、塔頂水平材の追加が最も効果的である。本対策はねじれ振動数のみを効率的に増加させるため、フラッター発現風速の上昇には効果があるものの、ねじれ渦励振加速度の増大が懸念される。しかしながら、今回の振動数、発現風速の増加率（それぞれ **13%**、**16%**）を、断面 **A2** に添架物突出高 **80cm** を付加した桁断面に適用した場合には、懸念される迎角 **+3°** のフラッター発現風速は **55m/s** から **65m/s** 程度まで上昇し、ねじれ渦励振最大加速度は約 **80gal** から約 **95gal** にとどまり、一応の基準となる **100gal** を下回る。以上より、本対策は、桁断面との組み合わせによっては有用な構造的対策になり得ると判断できる。

Table 3 Effectiveness of structural countermeasures

Girder	Analytical condition	Frequency (Hz)			Flutter onset velocity	The rate of increase			
		Vertical sym. 1st	Torsional sym. 1st	Ratio		Torsional sym. 1st	Ratio of frequency	Flutter	
2-edge I-shaped	Nothing (basic)	0.2711 Hz	0.4605 Hz	1.70	63 m/s	1.00	1.00	1.00	
	Additional pier	X= Ls/4	0.4041 Hz	0.5246 Hz	1.30	66 m/s	1.14	0.76	1.05
		X= Ls/2	0.4014 Hz	0.5317 Hz	1.32	66 m/s	1.15	0.78	1.05
		X= 3Ls/4	0.3303 Hz	0.4895 Hz	1.48	64 m/s	1.06	0.87	1.02
	Adding horizontal member	0.2711 Hz	0.5207 Hz	1.92	73 m/s	1.13	1.13	1.16	
	Tower cable system	Area 1	0.3230 Hz	0.4934 Hz	1.53	65 m/s	1.07	0.90	1.03
Area 10 ¹⁾		0.4825 Hz	0.5226 Hz	1.08	52 m/s	1.13	0.64	0.83	

(Remarks) 1) Area 10 shows that the sectional area of tower cable is ten times as large as that of inclined cables

5. 適用支間長に関する検討

張出しのない2主I桁、端2箱桁を採用する場合に、どれくらいの支間長まで適用できるか、さらに今回提案した対策を実施することによりどの程度効果があるかを検討した。まず中央径間200~600m(側径間比0.45)について試設計ならびに固有値解析を実施し、各径間におけるたわみ、ねじれの最低次振動数を算出した後に、本検討における基本断面(Girder A2, B)および改良断面の非定常空気係数を用いて二次元フラッター解析を実施した。改良断面は2主I桁断面A2にPa=80cmとした断面と、端2箱桁断面BにXU=30cm, XL=45cmとした断面である。検討結果をFig.6に示す。解析ケースは迎角0°, ±3°としたが、同図にはその中の最低風速を示した。これより、2主I桁については、無対策では中央径間300mを超えると耐風性に問題が生じること、低コストの耐風対策として、I主桁の内側に擬似隅切りによる断面改良とH型主塔の塔頂に水平材を追加する対策を講じれば、中央径間400m程度まで適用できることがわかった。また、端2箱桁の場合には、桁断面の改良により、支間長600m以上にも充分適用できることがわかる。

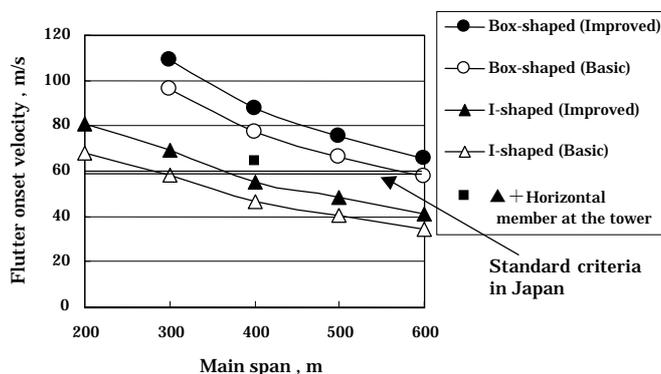


Fig.6 Relation between main span and flutter onset velocity

6. おわりに

本研究では、張出しのない2主桁断面を有する斜張橋の耐風安定化対策について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 2主I桁断面の内側から管理路、公共添架物を想定した矩形部材を突出させて擬似隅切り効果を狙った耐風安定化対策については、適当な突出高を設けた場合には、同等以上のフラッター発現風速を確保しつつ渦励振振幅を低減する効果を有する。ただし、桁断面形状によって、最適な突出高が異なることに注意を要する。
- (2) 今回実施した端2箱桁断面は、フラッター特性、渦励振とともに2主I桁断面よりも優れた空力特性を示している。端箱桁断面の桁下に隅切りを設けた場合には正の迎角でフ

ラッター発現風速が低下するが、桁上、桁下に適切なサイズの隅切りを設けた場合には、フラッター発現風速は約15%向上した。本対策は、端箱桁断面を有する斜張橋の長径間化を実現できる有効な対策になり得ると判断される。

- (3) 構造力学的対策として、中間橋脚の設置、塔頂水平材の追加、タワーケーブル方式について検討した。今回検討した中では、塔頂水平材を追加する方法が最も効果があり、フラッター発現風速を16%上昇できる。橋梁のねじれ剛性のみを上昇させる方法が効果が大きいことがわかった。
- (4) フラッター特性に着目すると、張出しを設けない2主I桁断面では中央径間300mを超えると対策が必要となることがわかった。今回提案した低コスト耐風安定化対策を施せば、中央径間400m程度まで適用可能となる。一方、端2箱桁断面では中央径間600m程度で対策が必要となるが、今回提案した空力的対策により600m以上の規模にも適用できる。

参考文献

- 1) 横山功一ほか。“二主桁合成床版を有する斜張橋に関する総合的検討”。土木学会構造工学論文集, Vol.38A, pp.1153-1160, 1992.
- 2) 松本勝ほか。“長大斜張橋端2主桁基本断面の基本特性”。第15回風工学シンポジウム論文集, pp.395-400, 1998.12.
- 3) 岡本有造ほか。“剥離干渉法にもとづく斜張橋用2主桁断面の耐風安定化策について”。土木学会第54回年次学術講演会, I-B359, pp.714-715, 1999.9.
- 4) Irwin, P. A. “Wind Tunnel Tests of Long Span Bridge”. Final Rep. 12th Congress IABSE, pp.689-696, 1984.
- 5) Wardlaw, R. L. “Some Approaches for Improving the Aerodynamic Stability of Bridge Road Decks”. Proc. of Wind Effects on Buildings and Structures. (Tokyo), 1971.
- 6) 山田均ほか。“主流の乱れと桁断面形状をパラメータとした斜張橋全橋模型応答特性—合成構造斜張橋の耐風安定性に関する風洞実験—”。日本風工学会第30号, pp.41-55, 昭和61年12月.
- 7) 林 元培ほか。“中国の長大合成桁斜張橋の設計と施工”。橋梁と基礎, pp.25-34, 1996.6.
- 8) 日本道路協会。“道路橋耐風設計基準”。平成3年7月.
- 9) 星埜正明。“2主桁合成構造斜張橋のクリープ解析とねじり振動解析”。土木学会論文集, No.543/I-36, pp.236-246, 1996.7.

<問い合わせ先>

基盤技術研究所 都市工学研究部

Tel. 044 (322) 6337 村上 琢哉

E-mail address : tmurakam@lab.keihin.nkk.co.jp