

箱桁橋の耐風安定化対策に関する研究

木場 和義¹⁾ 幽谷 栄二郎²⁾ 細見 雅生³⁾

箱桁形式の橋梁は、近年の建設コスト縮減の要請および景観的配慮から長支間化が進んでいくことが予想される。しかし、支間長の大きな箱桁橋では、風による影響を受けやすく風による振動現象が大きな問題となってくる。そこで、長支間箱桁橋の風による振動発生メカニズム検討と、種々な空力制振デバイスによる効果の比較および制振デバイスの選定方法の提案を目的として、風洞実験による検討を行っている。

ここでは、これら各種空力制振デバイスを単独で設置した場合の風洞実験の結果を比較し、その制御効果について検討した結果を報告する。

これまでのところ、従来から実績のある水平プレート、下部スカートおよび端部鉛直プレートでギャロッピングを制御する効果が得られることが確認できた。また下部スカートでは、橋体との間に隙間を空けると制振効果が期待できなくなることでもわかった。

キーワード：箱桁橋、耐風安定性、風洞実験、耐風対策、ギャロッピング、渦励振

まえがき

箱桁形式の桁橋は、近年の建設コスト縮減の要請および景観的配慮から、構造の合理化と共に長支間化が進んでいくことが予想される。箱桁のような断面形状は、気流の剥離の影響が大きく、風の作用により種々な周期の変動圧力が橋梁表面で発生している。箱桁形状の橋梁では、長支間化によって構造が比較的柔なものになると、固有振動数が低くなり（長周期化）風による振動現象、とくにギャロッピングとたわみモードの渦励振が大きな問題となってくる。

ギャロッピングは、その発生が直ちに構造の損傷を引き起こす可能性がある発散型の現象であり、構造物の供用期間中に発生しないようにする慎重な対応が要求される。ギャロッピングを引き起こす空気力は大きいので、構造物の減衰を大きくする方法による制振は困難である。その対策に

は風の流れを制御して振動現象の発生を抑える、空気力学的方法が採用される。

渦励振は、発生する風速範囲と振幅共に限定された現象であり、構造の損傷を直ちに引き起こす可能性は小さい。そのため、疲労や使用性より求められる許容振幅内に振動を抑えることが対策の目的となる。これに対しては、空気力学的方法のほかに構造力学的に減衰力を付加する方法も有効であり、TMD(Tuned Mass Damper)が設置される例も多い。

表-1に、これまでに施工された箱桁橋における耐風対策の実施例を示す。これによると、ギャロッピングに対する対策として、水平プレートが設置された例が多い。これらの空力的耐風対策(空力制振デバイス)の効果を設計時に精度よく推定することは難しく、デバイスを選定し効果を検討するため風洞実験が実施されている。

我々は、長支間箱桁橋を対象として、風による振動、とくにギャロッピングを制御する空力制振

1) 技術研究室係長 2) 技術研究室 3) 技術研究室室長

表-1 箱桁橋における耐風対策実施例^{1) 2) 3) 4)}

橋 名	最大支間長	振動現象	制振対策
門崎高架橋	190.4m	渦励振 ギャロッピング	ダブルフラップ 下部スカート
撫養橋	160m	渦励振 ギャロッピング	プレート管理路併用
泊大橋	170m	渦励振 ギャロッピング	(ダブルフラップ) プレート
海田大橋	250m	渦励振 ギャロッピング	(ダブルフラップ) プレート
有明西運河橋	230m	渦励振 ギャロッピング	下部スカート
関西国際空港 連絡橋	109m	渦励振 ギャロッピング	TMD(フラップ) プレート
琵琶湖大橋	140m	渦励振 ギャロッピング	フラップ(旧橋のみ) プレート
なみはや大橋	250m	渦励振 ギャロッピング	TMD(フラップ) プレート
東京湾横断道 路	240m	渦励振 (ギャロッピング)	TMD (プレート)

※制振対策欄の()内は、有効性を確認しているが設置しなかったものを示している。

デバイス案を各種検討し、振動の発生とデバイス選定方法および具体的な設計方法を提案することを目的として、風洞実験による検討を行っている。

耐風安定性に影響を与えるものとして、①箱桁ウェブの傾きや床版張り出し幅など断面形状の影響、②歩道、地覆、高欄、遮音壁など橋面構造の影響、③添架物、検査路など側面細部形状の影響、④気流の乱れの効果、⑤桁高が変化する3次元性の効果など種々有ることが既往の実験などによりわかっている。しかし、与えられた機能を満足する橋梁を設計する場合、上記の影響因子のみを考慮して安定な箱桁橋を設計することは困難である。そのため、上述のような制振対策によって安定化をはかることが重要視されている。ここでは、各種制振対策案の基本的な制振効果について風洞実験で検討した結果を報告する。

1. 検討対象橋梁

検討対象とした橋梁は、中央支間長 150m の 3 径間連続変断面箱桁橋³⁾である。変断面箱桁橋の現在の国内最大支間長は、なみはや大橋および海田大橋の 250m であるが、これらの規模の橋梁に対しても本実験結果が基本的データとして使用できると考えている。また支間長は、固有振動数とモード質量に影響するが、実験結果を補正換算することにより 300m 規模の長支間橋梁にも適用することが可能である。

想定橋梁の概要図を図-1に、構造諸元を表-2に示す。

表-2 対象橋梁の構造諸元

橋梁形式	3 径間連続鋼床版箱桁橋
最大支間長	150m
幅 員	12m
桁 高	4.1m(中央径間 1/4 断面) 4.0m(支間中央)～6.0m(中間支点上)変断面

2. 検討の内容と方法

(1) 検討内容

各種耐風対策案の、風による振動に対する制御効果を検証することを目的とすることから、2次元剛体模型を用いたバネ支持応答実験によって、風による振動の応答特性を比較する。

空力制振デバイス案には、これまでに実績のある水平プレートや下部スカートの他に、制御効果があり、橋梁本体にかかる負担が少なく、景観的

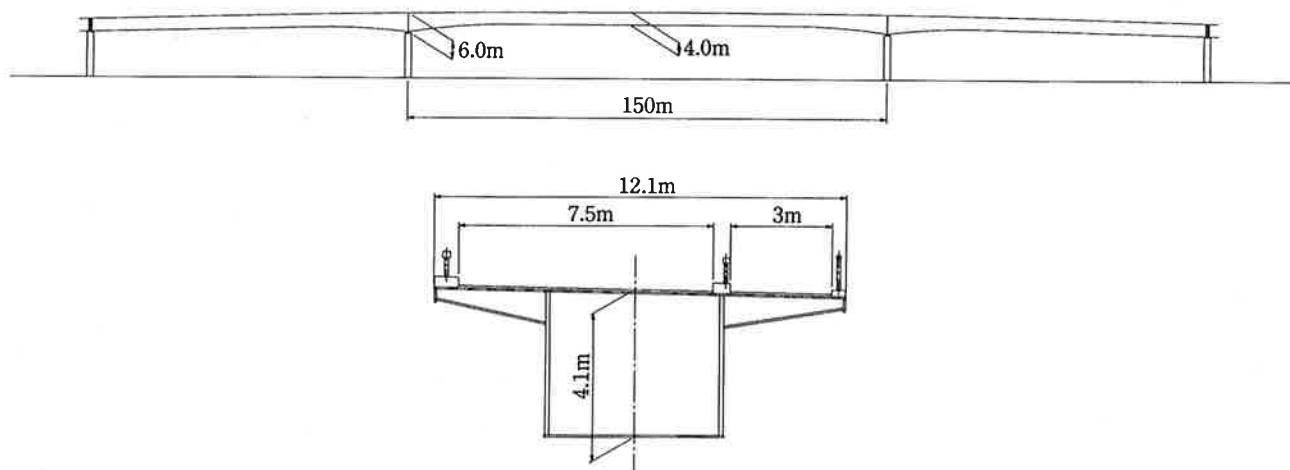


図-1 想定橋梁の概要図

にも違和感のない形状とすることを目標として、全部で19種類の形状を提案して効果を検討する。

(2) 実験方法

風洞は、当社保有の風洞を2次元実験用風洞(測定部断面：幅1.5m×高さ2.0m)にして使用する。

箱桁橋梁では、ねじれ振動数が高く、ねじれ振動は発生しにくいことがわかっている。ここでは、着目する振動をたわみ振動に限定し、2次元剛体模型をバネで風洞断面内にたわみ1自由度に支持する。応答特性の比較は、風による振動が発生しやすい条件すなわち、一様流、車道側風上、迎角+5度に設定して行う(写真-1)。

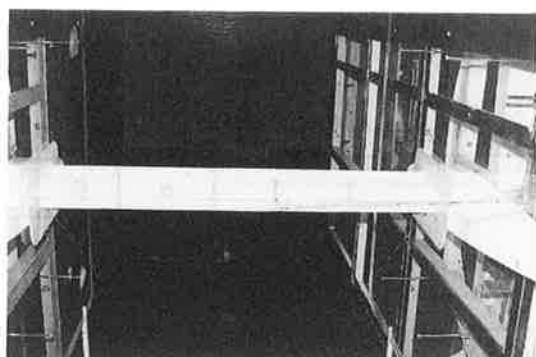


写真-1 風洞実験実施状況

3. 使用模型

(1) 模型化の方針

対象橋梁は変断面であるが、2次元剛体模型には、中央径間 $l/4$ 点の断面を採用する。風洞測定部の閉塞率=5%以下の条件から、縮尺を1/60とする。実際の橋梁断面を想定して、端部の地覆、高欄などディテールをできる限り細部まで忠実に模型化して、想定した断面形状に幾何学的に相似させる方針で模型を製作する。

(2) 模型の諸元

模型の諸元は、想定した橋梁と空力振動現象が共通となるように、表-3に示す相似パラメータを使用して、諸元に対する縮尺比を設定している。ここで、寸法の縮尺(n)=60、振動数倍率($S=f_m/f_p$)=8.6としている。

また、桁橋の構造減衰は、対数減衰率で $\delta=0.04 \sim 0.08$ に設定することが道路橋耐風設計便覧⁶⁾に示されているが、長支間化やゴム支承の使用、連結部の溶接継手の採用などによって小さくなる傾

表-3 模型の縮尺比と諸元

相似パラメータ	諸元	単位	縮尺比	実橋(想定値)	模型所要値
	寸法	m	1/n		1/60
慣性パラメータ	単位長さ質量	$\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$	$1/n^2$	9963	2.768
	単位長さ極慣性モーメント	$\text{kg} \cdot \text{s}^2$	$1/n^4$		—
弾性パラメータ	たわみ振動数	1/s	S	0.540	4.64
	ねじれ振動数	1/s	S	3.47	—
	風速	m/s	S/n		1/7
構造減衰	対数減衰率	—	1	0.02	0.02

※ここでは、 $n=60$, $S=8.6$ と設定している。

向にあると考えられる。また、振動現象を明確にするためには構造減衰を小さめに設定して応答振動が大きく出るようにした方が安全側の検討条件になる。したがって、構造減衰は対数減衰率で $\delta=0.02$ とする。

4. 実験結果

耐風対策として、19種の形状と寸法の空力制振デバイス案を提案し応答特性の比較を行った。提案したそれぞれのデバイス案は、断面周りの気流を制御して風による振動の発生を抑えることを目的としたものである。検討した断面形状と、それぞれの制振効果を表-4に示す。

空力デバイスの効果について比較検討を行う。各種空力デバイスのうち代表的なものについて、下フランジ付近の流れの制御を目標とした実験と、橋面付近の流れの制御を目標とした実験の結果について説明する。

(1) 基本断面の応答特性

図-2に、制振デバイスをセットしていない、基本断面の気流迎角による応答の変化を示す。気流

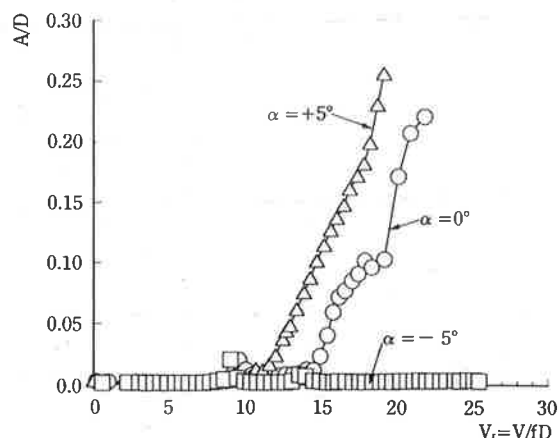
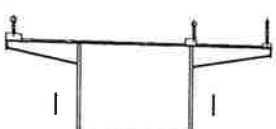
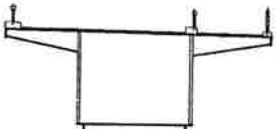
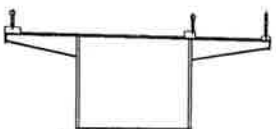
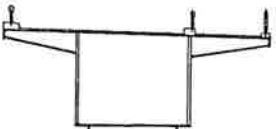
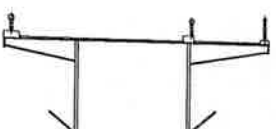
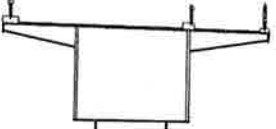
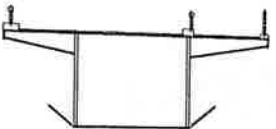
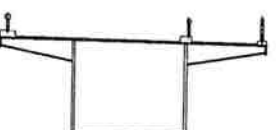
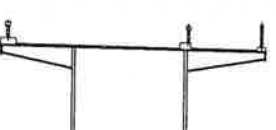
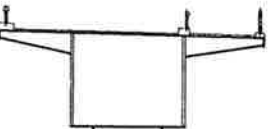
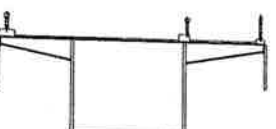
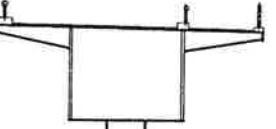
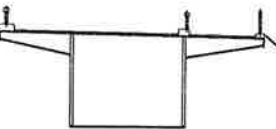
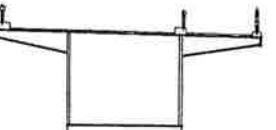
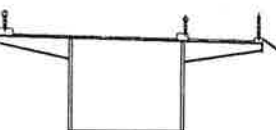
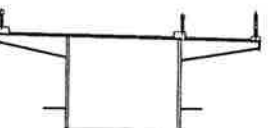
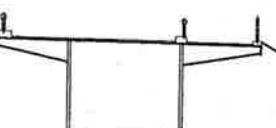


図-2 基本断面の応答特性

表-4 検討した断面形状と制振効果

※ α : 迎角 G : ギャロッピングに対する効果 V : 渦励振に対する効果
○ : 発生を抑制 △ : 許容振幅内 × : 発生が問題となる

断 面 形 状	制 振 効 果			断 面 形 状	制 振 効 果		
	α	G	V		α	G	V
	0°	×	△		+5°	×	○
	+5°	×	—				
	-5°	○	○				
	α	G	V		α	G	V
	+5°	×	—		+5°	×	○
	α	G	V		α	G	V
	+5°	×	—		+5°	×	○
	α	G	V		α	G	V
	+5°	×	○		+5°	○	△
	α	G	V		α	G	V
	+5°	×	○		+5°	×	○
	α	G	V		α	G	V
	+5°	×	○		+5°	○	△
	α	G	V		α	G	V
	+5°	△	○		+5°	×	○
	α	G	V		α	G	V
	+5°	×	—		+5°	×	△
	α	G	V		α	G	V
	+5°	○	△		+5°	△	△
	α	G	V		α	G	V
	+5°	×	—		+5°	×	△

の向きは、車道側が風上である。想定橋梁における実橋換算風速は、無次元化風速(V_r)を 2.2 倍した値に相当する。

気流が水平に作用する場合($\alpha=0^\circ$)、無次元化風速($V_r=9 \sim 10$)付近で小振幅の渦励振が発生し、 $V_r=14$ 付近から応答振幅が大きくなりギャロッピングへと移行している。気流が桁に対して吹き上げの角度で作用すると($\alpha=+5^\circ$)、応答が大きくなる風速が $V_r=11$ 付近まで下がっている。逆に、桁に対して吹き降ろしの角度で作用すると($\alpha=-5^\circ$)、小振幅の渦励振は $\alpha=0^\circ$ の場合と同じ風速で発生するが、ギャロッピングは発生していない。

以上から、制振デバイス案についての検討では、ギャロッピングに対する制御効果に着目する意味

から、迎角の条件を $\alpha=+5^\circ$ に限定して実験を行った。

(2) 下フランジ側の制御

図-3に、桁の下フランジ側での気流の制御を目標とした空力制振デバイスをセットした実験結果を示す。ここに示した 4 つの例では、基本断面で $V_r=14$ 付近から発生したギャロッピングに対して制振効果が見られる。それぞれを比較すると、高風速域のギャロッピングに対して制振効果が大きいものでは $V_r=7$ 付近で渦励振が発生しているが、高風速域での制振効果が比較的悪いものでは低風速域の渦励振はほとんど発生していない。

これは、高風速域で下フランジの上流側端部から剥離する気流を制御して下フランジに再付着させてギャロッピングを抑える効果が得られたが、低風速域で下フランジに沿って流れる渦を作り、限定振動を発生させているものと推察される。

(3) 橋面側の制御

図-4に、橋面側での気流の制御を目標とした空力制振デバイスについての実験結果を示す。

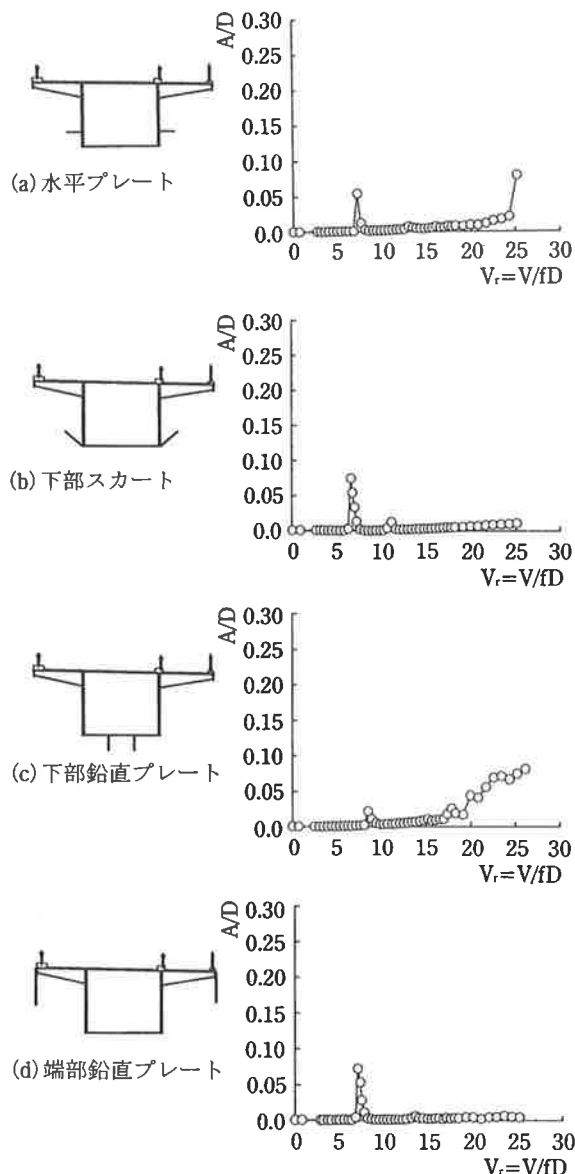


図-3 下フランジ側制御デバイスの効果

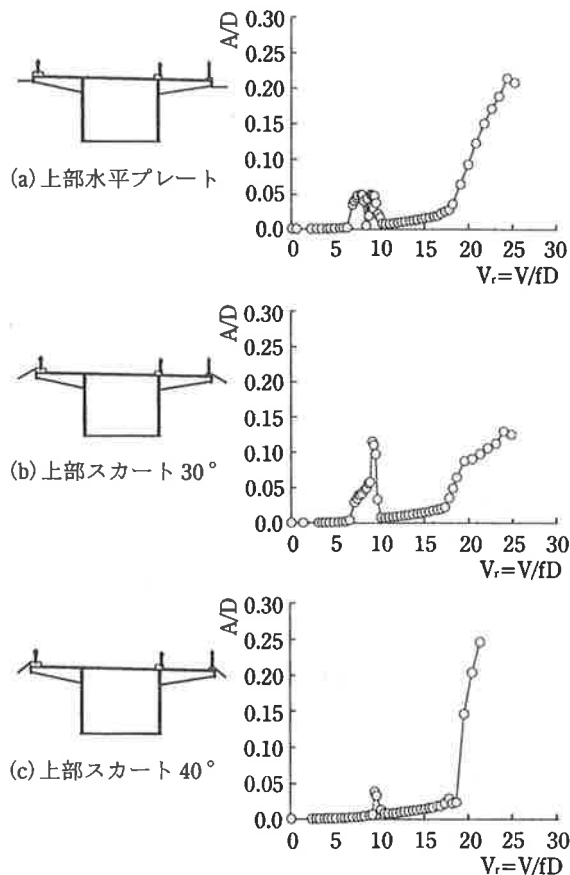


図-4 橋面側制御デバイスの効果

傾きが 40° の上部スカートで、ギャロッピングの発振風速を $V_r=18$ 程度まで引き上げられ、有効な制振効果を示している。他の 2 例でも、ギャロッピングの発振風速を引き上げる効果は有るが、低風速域の渦励振が比較的大きい結果となった。

ここには、比較的制振効果のあったものを示しているが、下フランジ側の制御に比べると制振効果が劣っている。これは、正の迎角(吹き上げ)では下フランジ側の空気力の寄与が大きく、橋面側の制御では制振効果が小さいためと考えられる。

(4) 下部スカートの特性

図-3に示したように、下部スカートはギャロッピングに対して十分な制振効果を有していることが確認でき、制振デバイスとして有力な案である。しかし、その形状から雨水やゴミが溜まる懸念されるため、実際に設置される場合には橋体との間に隙間を設けることが考えられる。そこで、実橋寸法で 200 mm 程度の隙間を設けた実験を実施し、隙間の有無に着目した比較を行った。

実験結果を図-5に示す。図で明らかなように、隙間を設けた場合には、ギャロッピングの発振風速が基本断面の場合に比べて高風速側に移動するものの、制振効果はほとんど見られない。

これは、隙間を通る気流による影響と考えられる。とくに高風速域では、隙間からの気流吹出しの影響が大きいと考えられ、これによって下部スカートの外側を流れる気流の剥離が促進されてギャロッピングが発生していると推察される。実際に橋梁で適用する場合には、隙間の影響に対する配慮が必要である。

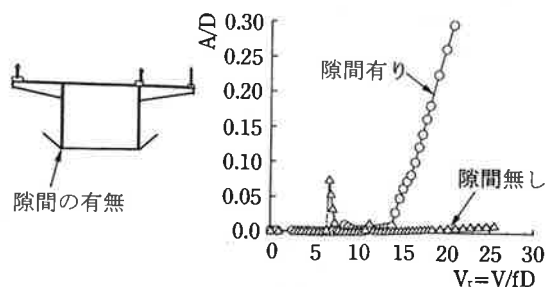


図-5 下部スカートにおける隙間の影響

あとがき

長支間箱桁橋梁の耐風安定性、特にギャロッピングの制振を目的とした空力制振デバイスについ

て実験による検討を行った。今回は、有効なデバイスの抽出を目的として、多数の制振デバイス案について制振効果に着目した応答実験結果の比較を行った。提案した制振デバイスの中の数例については、ギャロッピングに対する制振効果を確認することができた。しかし、制御のメカニズムには不明な点が多く、実際の橋梁に合理的に適用するための設計手法の整理には検討課題が多い。

今後は、デバイスの組み合わせの効果も含めて、形状や寸法に関する条件を詳細に設定するとともに、可視化実験などによる制御メカニズムの検討を進めていく予定である。

本研究の風洞実験実施では、立命館大学学生松下真也君に協力して頂きました。また、立命館大学小林紘士教授からは終始懇切なご助言、ご指導を頂きました。ここに記して、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鋼橋技術研究会：耐風制振設計研究部会報告書，1998.8.
- 2) 建設コンサルタンツ協会近畿支部：限界状態設計法による試設計と耐風・耐震技術の事例調査，1995.7.
- 3) 建設コンサルタンツ協会近畿支部：鋼橋の合理化設計および耐風・耐震設計に関する調査研究，1998.7.
- 4) 飯田裕・吉田好孝・佐賀弘一：東京湾横断道路・多径間連続鋼床版箱桁橋上部工の設計・施工（上），橋梁と基礎，1995.3.
- 5) 川谷充郎・高橋知久・飯塚隆雄・丸山武士・伊藤匠・武伸明・西村宣男：箱桁橋梁断面における耐風安定性と制振対策，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，I-B43，2000.9.
- 6) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，1991.7.