

都市部に架かる狭幅員箱桁橋梁のギャロッピング評価

Investigation on galloping of box girder section with smaller width in urban area

御嶽 譲*, 木村真二**, 山本 泰幹***, 山田 均****, 村上 琢哉*****
Yuzuru Mitake, Shinji Kimura, Yasumiki Yamamoto, Hitoshi Yamada, Takuya Murakami

- * 工修, 首都高速道路(株), 保全・交通部 (〒100-8930 東京都千代田区霞が関 1 丁目)
 ** 首都高速道路(株), 東京建設局 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6 丁目)
 *** 工修, 首都高速道路(株), 神奈川管理局 (〒221-0044 横浜市神奈川区東神奈川 1 丁目)
 **** 工博, 横浜国立大学教授, 大学院環境情報研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79 番地)
 ***** 工修, JFE 技研(株)主任研究員, 土木・建築研究部 (〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町 1 丁目)

The viaduct over Shinonome Channel, which is in the Harumi line of Metropolitan Expressway, is a three span continuous bridge with 132m of center span and is located 9m above of the existing bridge. At the provisional opening stage of the viaduct, only side ramp bridges are going to be constructed in advance of the main line. Each ramp bridge has one box girder section, whose height is approximately as same as the width. Spring supported wind tunnel tests were conducted mainly in turbulent flow. The turbulent flow was simulated so as to match well over the range of bending frequency of target turbulent power spectrum. It is found that the existing bridge makes the galloping performance worse and that the turbulent flow gives better galloping performance. In conclusion, galloping occurred over the design wind speed and vortex-induced oscillations were not observed in the turbulent flow.

Key Words: Box girder, Wind resistant design, Galloping, Turbulent flow

キーワード: 箱桁, 耐風設計, ギャロッピング, 乱流

1. まえがき

箱桁断面を有する鋼橋では風によるギャロッピングが問題となる。道路橋耐風設計便覧¹⁾(以下, 耐風便覧)では, ギャロッピングに対しては乱流により応答が安定化することが明らかなることから, 乱れ強さ $I_u=15\%$ 未満, 桁幅 B と桁高 D の比である B/D が5未満の充腹断面橋桁を有する断面のみ照査することとしている。発現風速推定式はバネ支持試験結果をベースに定められ, ほぼ水平の風が吹く場合には無次元風速で8を発現風速推定値としている。この推定式は B/D が2以上に対して定められていると推測されることから, B/D が2を下回るような橋桁断面の場合には別途検討が必要と判断される。また都市部においては高架橋建設時に空間的な制約が多く, 既存構造が空力的に影響を及ぼすことが懸念される。

首都高速晴海線の東雲運河渡河部は都道放射第34号線と二層構造の高架橋である。街路橋(木遣り橋)の上部約9mに位置する3径間連続鋼床版箱桁橋(中央径間132m)であり, 中間橋脚部は主桁との剛結, 端部には支承が設けられた構造である。架設地点は臨界副都心の運河渡河部であるが, 運河中央部には旧防波堤の緑地帯が

あり, 周辺には中高層建築物が散在する。桁断面は, 図一1の様に4車線の本線とその両側に併行する2つのサイドランプからなるが, 当面の整備ではサイドランプ(ONランプ, OFFランプ)のみが設置される。各ランプは桁高4.5mに対して桁幅は約6mと狭く, さらに高さ約1mのコンクリート高欄が設置されることから, 空力的には桁幅と桁高がほぼ同程度の箱桁断面が並列配置される。さらに, 街路橋の存在も空力的に無視できないと考えられることから, 風洞試験により耐風安定性を検討した。特に, 実橋で想定される気流を格子乱流により部分的に相似させてバネ支持試験を行い, 耐風性評価に反映させている所に特徴を有する。このような事例は国内には例がなく, 今後の都市部高架橋の耐風性を検討する場合の一助になると判断できることから, 本橋の対風応答特性と耐風性評価法を報告する。

2. 風洞試験方法

試験はJFE技研(株)所有の幅2m, 高さ3mを有する構造物風洞試験装置で実施した。本橋は直線橋であり大部分が同一桁高構造であったことから, 風洞試験方法は中

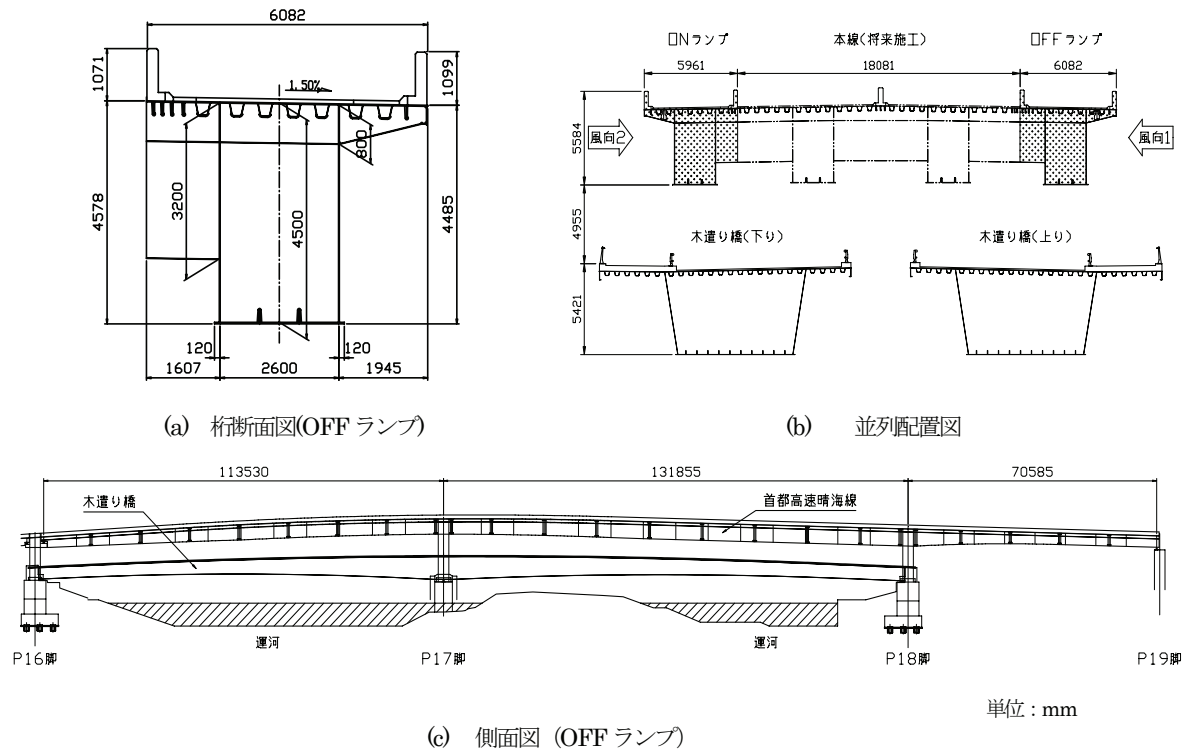


図-1 首都高速青海線東雲運河渡河部

中央径間中央部を取り出した2次元模型による鉛直たわみ1自由度系のパネ支持試験とした。橋梁の試験条件を表-1に示す。これは中央径間中央部の最低次モードを抽出したものであり、対数減衰率は、耐風便覧¹⁾の桁橋の最小値の $\delta=0.04$ とした。模型のたわみ振動数は4.9～5.0Hzに設定したため、風速倍率は8.7程度である。対象は主に等価質量の小さいOFFランプとし、風向は橋軸直角方向の両側とも考慮した。OFFランプが上流側の風向(図-1(b)中、風向1)ではONランプは設置せず、ONランプが上流側の風向(風向2)ではONランプを風洞の上流側に固定して試験を実施した。並列配置の実験では一部ONランプとOFFランプに高低差がある所があったため、高低差による応答の違いについても検討した。街路橋の存在については、実験結果により振動応答に影響が認められたことから、影響試験実施後は街路橋を常に固定のダミー模型として設置した。また、迎角設定時には図-1(b)の将来施工の本線中央部を回転中心とし、OFFランプだけでなく、ONランプ、街路橋も傾けて実験を実施した。

気流は、一様流と格子乱流の2種類とした。格子乱流の生成方法についてはIrwin²⁾の考え方にしたが、パネ支持試験の固有振動数以上の振動数領域における乱流スペクトル形状を実橋の気流条件と相似させる方法を採用した。これは、剥離せん断層に影響を及ぼすと言われている変動風速パワースペクトルの慣性小領域の一致が目的であり、矩形断面柱では乱れ強さの一致よりも小スケール渦領域でのスペクトル強度を相似させた方

表-1 パネ支持試験条件

項目	OFFランプ		ONランプ	
	実橋値	要求値	実橋値	要求値
縮尺	—	1/40	—	1/40
質量	8.08 t/m	8.03 kg/模型	11.80 t/m	11.73 kg/模型
たわみ振動数	1.08 Hz	—	1.06 Hz	—
たわみ構造減衰	—	0.04	—	0.04

(備考) 模型長:1.59m

が背圧係数の一致が良いことも確認されており³⁾、有効性は認められている。乱流の乱流スペクトル $S_u(f)$ は、耐風便覧¹⁾記載の以下の式を用いた。

$$\frac{f \cdot S_u}{U_z^2} = \frac{4n_u \cdot I_u^2}{(1 + 70.8n_u^2)^{5/6}} \quad (1)$$

ここに、 $n_u = \frac{L_x^u f}{U_z}$, U_z : 平均風速,

L_x^u : 乱れのスケール, I_u : 乱れ強さ

架橋地点の粗度区分は、運河渡河部にあるものの中央に大きな緑地帯があること、中高層建築物が散在されていることから、耐風便覧¹⁾の粗度区分Ⅲと定め、その標準値である乱れ強さ23%、乱れスケール90mを与えた。また、照査風速38m/sであることから代表風速を40m/sとした。一方、風洞試験時の乱れスケールは測定結果から風洞風速10～15cmであるため、実橋相当で4～6mとなる。両者のスペクトルを実橋スケールで比較して図-2に示す。これより、風洞試験時の乱れ強さが10%で

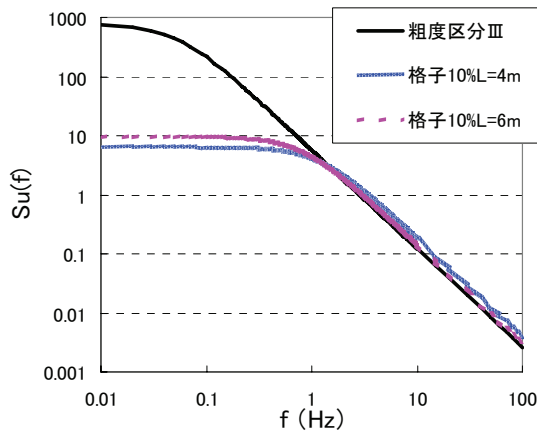


図-2 変動風速のパワースペクトル

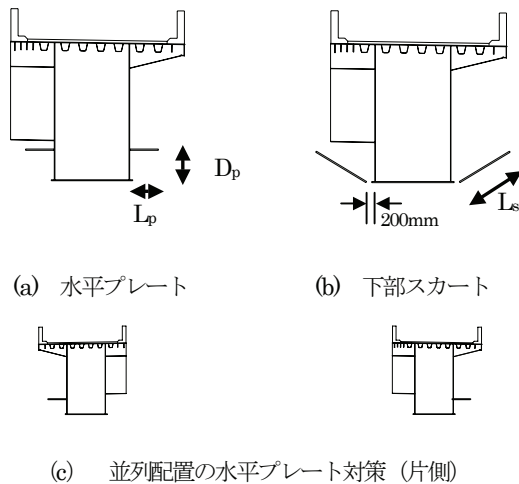


図-3 検討した耐風安定化対策

あれば、鉛直たわみ振動数 1Hz 以上で粗度区分Ⅲと良好に一致していることがわかる。以上の結果から、今回の乱流試験は乱れ強さ 10%で実施することとした。

風洞試験では、対策を施さない基本断面の検討の他に、既往の耐風安定化対策⁴⁾⁷⁾による効果を検討した。耐風安定化対策は図-3に示すとおり、水平プレート、下部スカートを実施した。水平プレートは下フランジからの取付位置 D_p 、取付長さ L_p を変化したケース、並列配置時には風上側のみ水平プレートを考慮するケース（同図(c)：以下、片側設置）も検討した。プレート板厚は、門崎高架橋⁶⁾を参考に模型で 1mm、実橋 40mm を想定した。下部スカートは、既往の事例にしたがい、下フランジを水平として 30° 傾けて下部スカートの長さを $L_s=2000\text{mm}$ とし、スカートと下フランジに 200mm の隙間を設けたが、隙間を設けない場合も比較した。

応答変位は変動が大きいケースもあったことから、平均振幅と変動幅あるいは最大振幅で表現した。同一風速における応答変位の計測時間は 3 ～ 5 分である。明確な定義ではないが、応答変動状況を逐次見ながら変動幅を測定するのに十分な時間をとった。

3. 試験結果

試験の結果、全てのケースにおいて渦励振は発現しなかったが、たわみの発散振動であるギャロッピングと並列配置時に高風速域で風速限定型の振動が生じた。ここでは、ギャロッピング、並列配置時の応答を中心に述べる。照査風速は 38m/s である。

3.1 OFF ランプが上流側の風向の場合（風向 1）

(1) 基本断面の応答

一様流における OFF ランプ基本断面（無対策断面）の試験結果を図-4に示す。同図のプロットは変動振幅の平均値、線は変動幅を示している。これより、迎角によらず実橋風速 40m/s 付近から振幅が大きくなり、ギャロッピングが発現していることがわかる。風速 40m/s は無次元風速 (U/B) に換算すると約 5.8 であり、耐風便覧の推定式の値である 8 を下回っている。したがって、 B/D が 2 を下回る断面に現行便覧の推定式を適用する場合には危険側の評価を与える場合があるため注意が必要であると判断される。また、街路橋の影響と乱流効果の試験結果として、迎角 0° の風速-振幅図を比較して図-5に示す。これより、一様流中では街路橋の影響により発散振動の発現風速は低下していることがわかる。街路橋の舗装面と本橋下フランジとの距離は約 5m であり、本橋桁高と同程度であるが、街路橋の存在が空力特性に影響を及ぼしており、桁下面の流れがギャロッピング応答

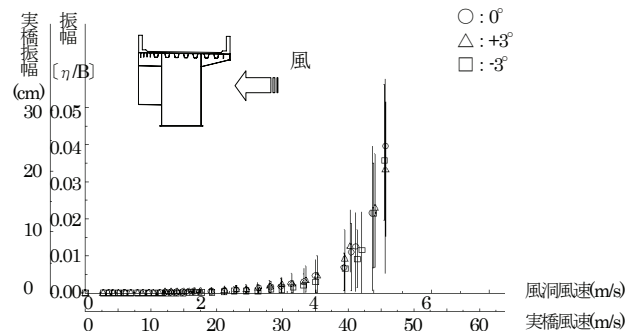


図-4 OFF ランプの応答（風向 1：一様流）

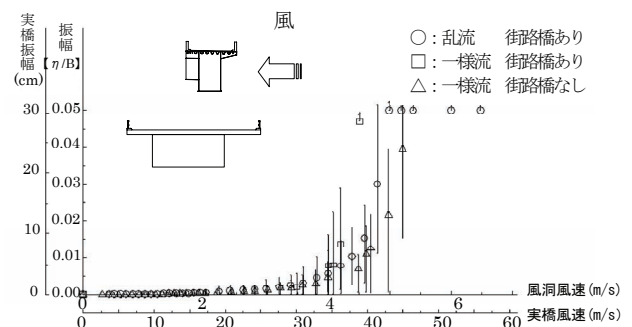


図-5 街路橋の影響と乱流効果（風向 1：迎角 0° ）

に支配的であると推察される。別途、高欄形状の変更がギャロッピング応答に大きな変化がないことも明らかとなっているが、これも桁下面の流れが支配的であることを示唆している。また、一樣流中の場合には実橋風速 38m/s で幅員の 5%以上と大きな振幅となるが、格子乱流中では照査風速内では最大振幅は桁幅の 2%以下まで低減されており、乱流により応答が安定化されていることがわかる。

(2) 耐風安定化対策の効果

$D_p=1000\text{mm}$ とした場合の一樣流中における水平プレートの検討結果を、迎角 0° 、 $\pm 3^\circ$ における照査風速 38m/s 以下の最大振幅の形でまとめて図-6 に示す。迎角 -3° については代表ケースのみ実施した。これより、街路橋のない場合には水平プレートの効果は $L_p=1000\text{mm}$ では見られないこと、街路橋がある場合には水平プレートの設置により応答を大きくする場合があり、プレート長さを 2000mm まで伸ばしても迎角 0° 、 $+3^\circ$ では大きな制振効果は見られないことがわかる。一方、格子乱流中で実施した水平プレートの応答比較を図-7 に示す。これらは街路橋を考慮した実験結果であるが、これより迎角 $-3^\circ \sim +3^\circ$ の最大応答は水平プレートの長さが $L_p=1000\text{mm}$ で桁幅の 2%程度まで低減されていることがわかる。基本断面と比較すると迎角 -3° の制振効果が大きく、迎角 $+3^\circ$ では応答は同程度である。また、風上側だけに水平プレートを設置する対策は、迎角 0° で基本断面よりも応答は大きくなる結果となった。両側に水平プレートを設置した方が、全ての迎角における最大振幅が同程度か小さくなっている。

また、一樣流中における下部スカートの検討結果を図-8 に示す。これより、下部スカートとウェブに隙間がある場合にはギャロッピング応答は基本断面（図-1）とあまり変わらず、下部スカートの効果が見られない。一方、隙間を塞いだ場合には最大振幅が桁幅の 1%程度の限定的な振動に収まっており、制振効果が見られている。過去の事例では同程度の隙間を設けて制振効果が得られている⁹⁾が、 B/D は 4 程度、箱桁の下フランジ長は 8m、桁高 4.6m であり両者の比は 1.7 である。一方、本橋では下フランジ長 2.6m、桁高が 4.5m であり、両者の比が 0.58 と矩形断面に見なすと物体背後への巻き込みが最も強い辺長比近傍である。このような断面では、箱桁前縁部の隅部の流れを擬似的に流線形状にするだけでは不十分であり、下部スカートでも隙間を塞ぐあるいは水平プレートのようにウェブに沿った風の流れを遮断しないと桁下の再付着を促進させてギャロッピング応答を抑制することは難しいと考えられる。

3.2 OFF ランプが下流側の風向の場合（風向 2）

(1) 基本断面の応答

迎角 0° の並列状態の風速-応答図を、一樣流中と乱

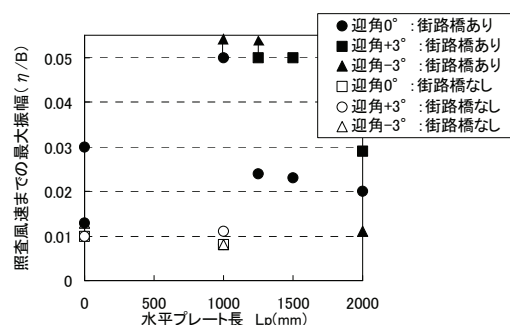
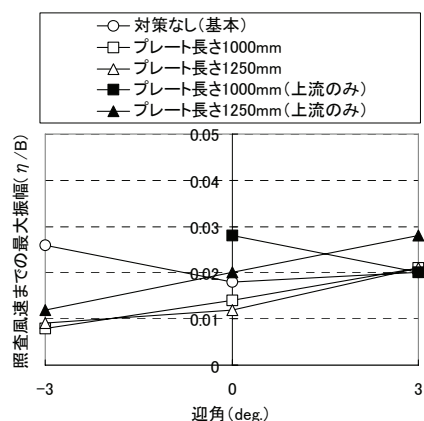


図-6 水平プレートの効果（一樣流）



（備考） 全て街路橋ありの実験である。

図-7 水平プレートの応答比較（格子乱流）

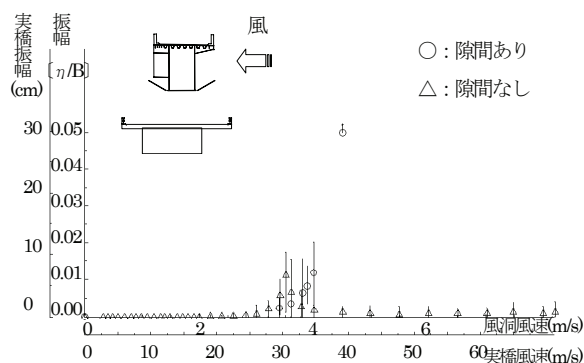


図-8 下部スカートの効果（一樣流：迎角 0° ）

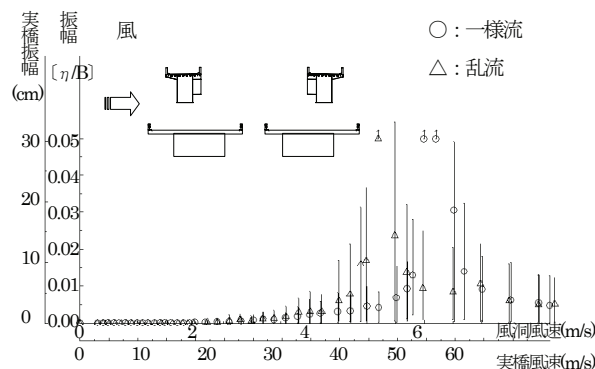


図-9 風下側橋桁の応答（風向 2：迎角 0° ）

流中を比較して図-9に示す。これより、照査風速 38m/s までは振幅が大きくないが、風速 55~60m/s 近傍の領域で振幅が桁幅の 5%を超える風速限定型の発散振動が生じており、その風速近傍における応答の変動も大きいことがわかる。この風速域の無次元風速 (U/B) の逆数は 0.12~0.13 であり、武内ら⁹⁾が計測した正方角柱単独のストローハル数とほぼ等しい。したがって、この振動現象は、風上の橋桁断面からの渦放出によって生じていると判断される。格子乱流中では、一様流と比較すると、風速限定型の発散振動の風速域が 45m/s 近傍と低くなっていること、幅員の 5%を超える大きな応答が発生する領域が狭くなっていることがわかる。

(2) 高低差の影響

高風速域における応答に対して、並列配置の上下に高低差が生じた場合の下流側の応答を格子乱流中で比較した結果を図-10に示す。高低差は桁高の 0.46 倍である。図-9と比較すると、実橋風速 45m/s 近傍で生じている風速限定型の発散振動が高低差を変えても生じているものの、応答特性の違いは大きくないことがわかる。また、迎角の違いにより発生風速域は変化するものの、全てのケースにおいて発現風速が照査風速以上であることがわかる。

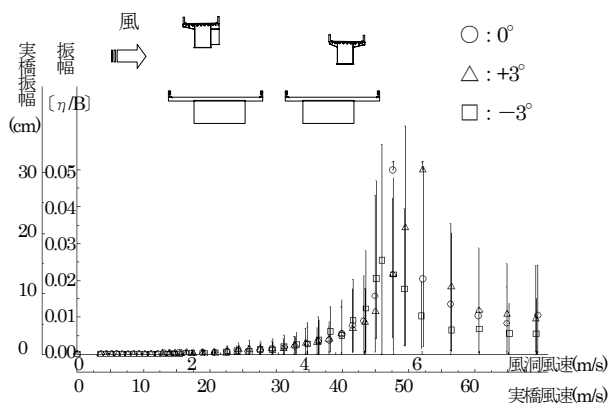
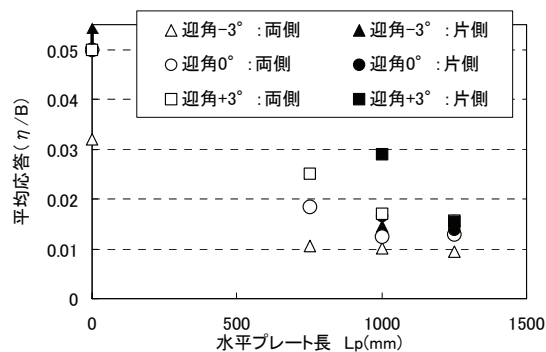


図-10 高低差の影響 (風向 2: 迎角 0° (乱流))



(備考) $D_p=1000\text{mm}$

図-11 並列配置時の水平プレートの効果 (迎角 0° : 乱流)

(3) 耐風安定化対策の効果

風速限定型の発散振動を抑制させるために、水平プレートの効果を検討した。水平プレートは上流側、下流側の橋梁ともに設置する方法、片側設置による方法 (図-3) とした。各対策と風速限定型発散振動の平均応答との関係を図-11に示す。これより、水平プレートは効果があり、取付長 750mm でも応答は半減することがわかる。水平プレート長を長くすると応答は小さくなるが、片側設置の場合には両側に設置するよりも制振効果が悪くなる傾向があることがわかる。

4. 本橋の耐風性評価

耐風安定性を満足する条件は、「照査風速 38m/s 以下において構造系が降伏応力に達する振幅以下であること」と定め、その振幅をギャロッピングの許容振幅とした。照査風速以下においては許容振幅までを許容することになるが、風速頻度が極めて少なく疲労への影響は小さい。許容振幅は、立体骨組み解析の断面力を用いた部材断面設計時の発生応力から応力の余裕分を求めて、それを振幅に換算し、さらにバネ支持試験評価に用いる振動モードの補正係数⁹⁾を考慮して決定した。その結果、実橋振幅換算で約 16.4cm、幅員の 2.69%となった。評価の対象とする実験結果は格子乱流中の迎角 -3°、0°、+3°の結果とし、最大振幅値で比較して耐風安定性を判断することとした。格子乱流中の結果で評価した理由は、粗度区分Ⅲでは一様流に近い風は生じないと考えられること、ギャロッピングは発生メカニズムが明確であり、乱流中では橋桁前縁からの剥離せん断層の橋桁側面への再付着が促進されるため応答が安定化することが知られている¹⁰⁾ことによる。今回生成した格子乱流は、剥離せん断層に影響を及ぼすと言われている変動風速のパワースpekトルの慣性小領域を概ね一致させていることから、乱流中の実橋応答を評価できると判断している。ただし、低い振動数領域を一致させることができないため、それを補完するために迎角をつけた試験結果も評価には取り込むこととした。

OFF ランプが上流側の風向 (図-1の風向 1) について、OFF ランプ基本断面、水平プレート付断面における平均振幅と最大振幅をまとめて図-12に示す。これより、対策を施さない場合には迎角 -3°において最大振幅が許容振幅近くに達するものの、耐風安定性を満足することがわかる。また、迎角 -3°については水平プレートの制振効果が大きく、 $L_p=1000\text{mm}$ で平均応答、最大応答がともに半分程度に低減される。一方、並列配置時の迎角 0°、±3°の応答を図-13に示す。これより、並列配置時には照査風速以上で風速限定型の発散振動は生じるものの、照査風速以下では最大でも桁幅の 1.7%であり、耐風安定性を満足することがわかる。以上の結果

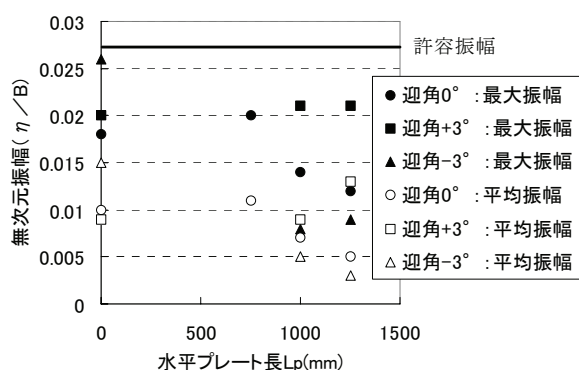


図-12 格子乱流中の各種断面の応答比較（風向1）

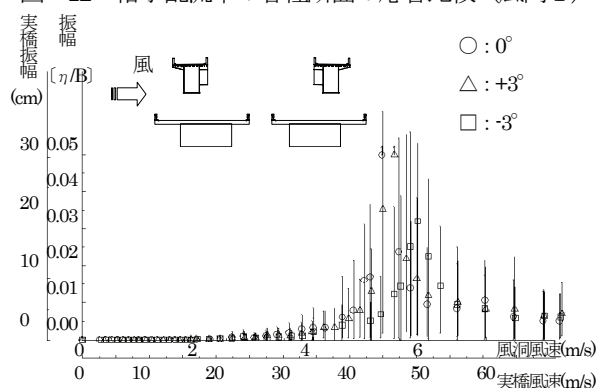


図-13 並列配置時の基本断面応答（風向2：乱流）

より、対策を施さない基本断面でも与えられた耐風安定性を満足する結果が得られたため、本橋に対しては耐風安定化対策を講じないこととした。

5. まとめ

過去に例を見ない桁幅 B と桁高 D がほぼ等しい $B/D \approx 1$ の箱桁断面の並列配置に対して、バネ支持試験を行った。その応答特性は以下の通りである。

- (1) 街路橋の存在により桁下空間が桁高と同程度に閉塞された場合には、ギャロッピング発現風速は低下する。桁下の流れがギャロッピング応答に支配的であると考えられる。渦励振は発現しない。
- (2) 今回実施した橋梁断面では、道路橋耐風設計便覧のギャロッピング発現風速推定式よりも小さい風速で大きな応答が生じた。
- (3) 一様流中に比べて乱流中の方がギャロッピング応答は小さい。
- (4) 街路橋がある場合には一様流中では水平プレートの効果は小さく、逆効果となる場合もある。また、下部スカートでは隙間を塞がないと制振効果が得られない。一方、乱流中ではプレート長さ 1000mm で制振効果が見られ、迎角 -3° で効果が最大であ

った。

- (5) 並列配置で下流側となる場合には、風速限定型の発散振動が高風速域で生じた。この振動現象は、風上の橋桁断面からの渦放出によるものと考えられる。乱流中では、風速域は低風速側に移行する。また、答特性は大きく変わらない。

本橋の耐風性評価は、鉛直たわみ振動の固有振動数以上の乱流スペクトルを相似させた格子乱流中の風洞実験結果で評価することとした。それより低い周波数成分の影響は、迎角をつけた実験結果を考慮することにより取り込んだ。また、耐風安定性を満足する条件を、風洞試験で計測された照査風速以下の最大振幅が、構造系が降伏応力に達する振幅以下であることとした。その結果、本橋は耐風安定化対策を施さなくても耐風安定性を満足すると評価された。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，平成3年7月。
- 2) P. A. Irwin: The role of wind tunnel modeling in the prediction of wind effects on bridges, *Bridge Aerodynamics*, Larsen & Esdahl(eds), pp.99-117, 1998.
- 3) 山田均，勝地弘，佐々木栄一，高岡泰弘：乱れスケール比と乱れ強度に着目した風洞乱流シミュレーション，土木学会第62回年次学術講演会，I-175，pp.349-350，平成19年9月。
- 4) 松尾善章，藤田武彦，岩村栄樹，今金真一，本田明弘，斉藤通，杉山貞人：伊王島大橋（仮称）の耐風安定化検討について，土木学会第60回年次学術講演会，I-294，pp.584-585，平成17年9月。
- 5) 石岡英男，丸山忠明，芦原栄治，長井義則：なみはや大橋の完成報告一尻無川新橋有料道路一，大阪市建設局業務論文報告集，Vol.3，No.Pt1，pp.19-30，1996。
- 6) 宮下力，大橋治一，樋上琇一，藤沢伸光，宇野裕恵：門崎高架橋の耐風安定性，橋梁と基礎，Vol.18，No.2，pp.35-42，1984.2。
- 7) 山崎和夫，葛西俊二，半野久光：有明西運河橋の耐風安定性に関する検討，橋梁と基礎，pp.37-41，1997.6。
- 8) 武内隆文，松本勝，白石成人：タンデム配列ブラッ角柱に発現する渦励振に関する研究，第12回風工学シンポジウム，pp.375-380，1992。
- 9) 山田均，田中宏：部分模型実験の質量相似則とそれに基づく応答予測，土木学会論文集，第380号／I-7，pp.341-348，1987年4月。
- 10) 中村泰治，友成義正：層流および乱流における矩形断面柱のギャロッピング，構造物の耐風性に関する第4回シンポジウム論文集，pp.175-180，1976。

(2007年9月18日受付)