

剥離干渉による実橋桁断面の耐風特性に及ぼす高欄の影響

Influence of Handrails to Aeroelastic Responses of Bridge Deck Section
by Separation Flow Mutual Interference Method

皆田龍一*, 久保喜延**, 加藤九州男***, 山口栄輝****, 岡 利文*****

Ryuichi MINATA, Yoshinobu KUBO, Kusuo KATO, Eiki YAMAGUCHI and Toshifumi OKA

*九州工業大学 工学部 大学院工学研究科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)

**九州工業大学 工学部 教授 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)

***九州工業大学 工学部 助手 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)

****九州工業大学 工学部 助教授 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)

*****島根県庁 (〒690 島根県松江市殿町1)

The fairing developed by separation flow mutual interference method is named as "blunt fairing" by authors. The blunt fairing can control separation flows from leading edge of bridge deck section by using two separation points. Although the blunt fairing is effective for improving aeroelastic performance, handrails at both ends of bridge deck have possibility to change the aeroelastic performance of bridge section. In this paper, influences of the handrails to the aeroelastic performance are investigated by wind tunnel tests. It is concluded that the shape of handrail is one of important factors to improve the aerodynamic performance.

Key Words: vortex-excited vibration, separation flow, handrail

1. まえがき

近年、我が国の橋梁技術の進歩は著しく、中でも斜張橋はその構造特性における有利性および景観の優美性を併せ持つことから、年々その架設数は増加している。これらの橋梁は、スパンも長大化しており、風による振動問題を内在している。橋梁主桁に発生する振動現象としては、渦励振、ギャロッピング、フラッター等が挙げられる。それらに対する制振対策を検討するために、模型による風洞実験を行って、最終的な制振対策を決定しているのが現状である^{1,2)}。

制振対策には、TMD等の構造的対策と、主桁端部の形状を変化させることにより対処する空力的対策とがある。構造的対策の場合、コストがかかることや維持管理上の問題があるため、空力的対策の必要性が増してきていると考えられる。

空力的対策の耐風制振法の1つとして、桁断面にフェ

アリングと呼ばれる付加物を付ける方法がある。これまでに著者らは、図-1に示すように桁端部に2個の剥離点を設けて、1次剥離点からの剥離流を2次剥離点で制御することにより、振動の原因となる有害な剥離渦の生成を抑制して、主桁の耐風制振を行うことを検討してきている^{1,2,3)}。このフェアリングを、プラントフェアリング(blunt fairing)と銘名している。そこで、本研究では、架設が計画されている鋼斜張橋の主桁断面を対象として、同様の剥離干渉の適用が可能か否かの検討を行った。その際、検討例が少ない高欄形状の耐風性能に与える影響に着目した。

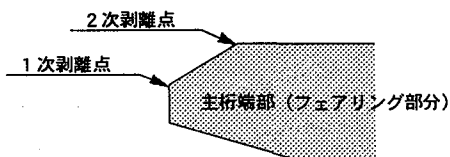


図-1 プラントフェアリングにおける剥離点の定義

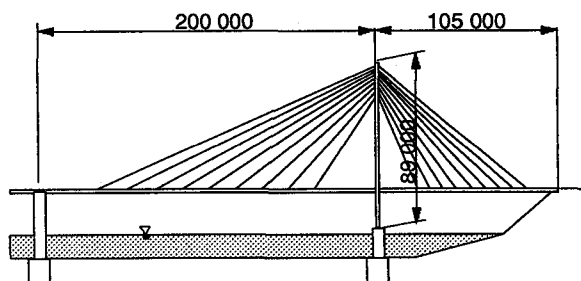


図-2 対象とした橋梁の概略図（単位 mm）

2. 実験概要

実験には、九州工業大学の中型空力弾性試験用風洞（測定断面 1070mm×1070mm）を用いた。図-3.1、-3.2に示すように、2次元剛体模型をたわみ1自由度、ねじれ1自由度で支持して、自由振動法により一様流中で風洞実験を行った。

実験模型には図-4に示す基本断面を使用し、フェアリング部分は図-5、高欄部分は図-6.1,6.2に示すものを使用した。これらは、全て対象とした橋梁主桁部分の1/36スケールのものである。フェアリングは、既往の研究により2個の剥離点を結ぶ直線と模型表面とのなす角 θ が 30° の場合に、最も良好な結果が得られていることから、上面傾斜角 θ_u は 30° に固定している。また、F33Aのみ下面傾斜角 θ_l を 30° としている。高欄は、幾何形状を詳細に模型化したもので、図-6に示すようにTYPE AとTYPE Cが車両防護欄（図中網線部、以下、

防護欄）の設計範囲内で、それぞれ最も高い位置と低い位置に防護欄を設置している。TYPE Bは、ほぼ中央に防護欄を設置しており、TYPE Pは標準的な高欄で、ボトムプレートが防護欄を兼ねたものとなっている。

また、本橋は左右非対称なため、実験は図-4に示すように、風向はⅠ側とⅡ側の2パターンで行っている。模型の諸元は表-1に、実験ケースは表-2に示す。

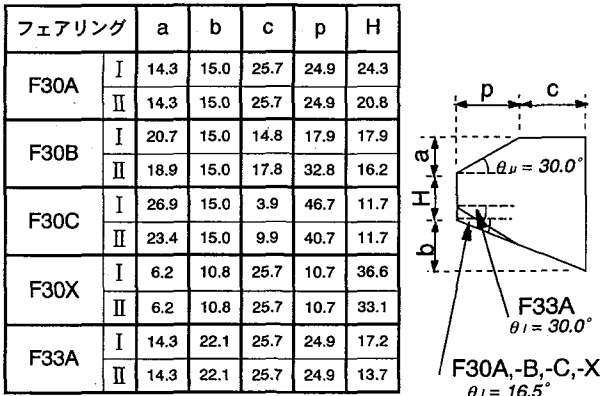


図-5 フェアリング部分詳細図（単位 mm）

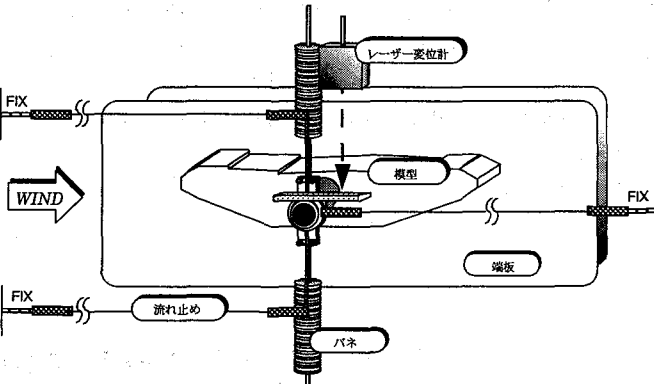


図-3.1 たわみ1自由度模型支持装置

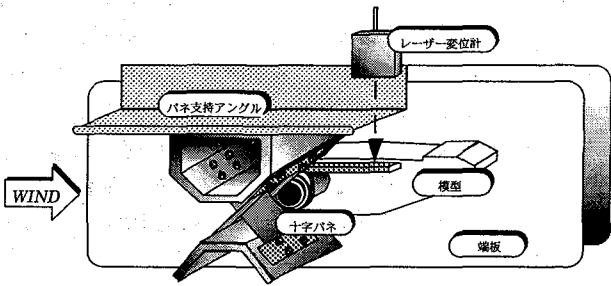


図-3.2 ねじれ1自由度模型支持装置

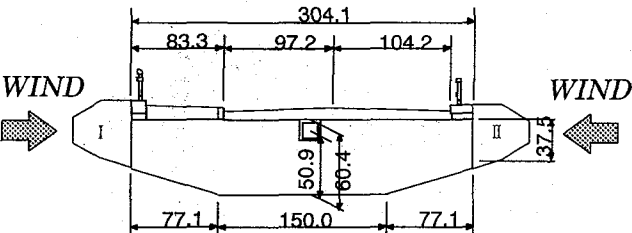


図-4 模型基本断面（単位 mm）

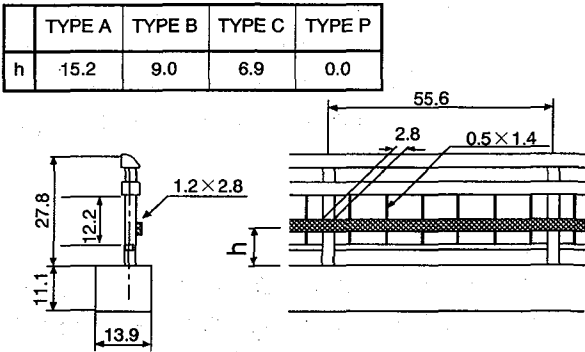


図-6.1 高欄歩道側(A)部分詳細図（単位 mm）

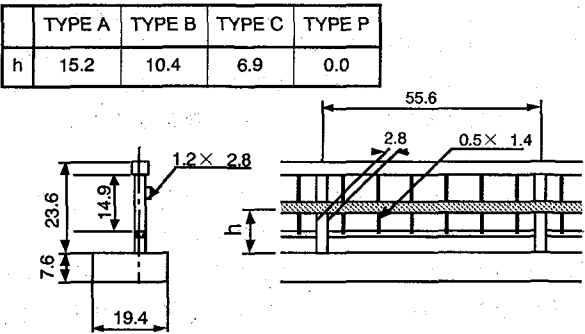


図-6.2 高欄車道側(B)部分詳細図（単位 mm）

表-1 模型の諸元

	たわみ振動実験	ねじれ振動実験
単位長さ当たり質量 (kg/m)	7.037	
単位長さ当たり極慣性モーメント (kgfm ² /m)		0.075
振動数 (Hz)	2.48	4.70
構造減衰率	0.003	0.010

表-2 実験ケース一覧

たわみ1自由度振動実験				ねじれ1自由度振動実験			
フェアリング	風向	高欄	迎角 α (deg.)	フェアリング	風向	高欄	迎角 α (deg.)
F30A	I	TYPE P	+6,+3,+0,-3,-6	F30A	I	TYPE P	+6,+4,+2,+0,-2,-4,-6
		無	+6,+3,+0,-3,-6			無	+0
F30B	I	TYPE P	+6,+3,+0,-3,-6	F30B	I	TYPE P	+6,+4,+2,+0,-2,-4,-6
		無	+6,+3,+0,-3,-6			無	+0
F30C	I	TYPE P	+6,+4,+3,+2,+0,-2,-3,-4,-6	F30C	I	TYPE P	+0
		無	+6,+4,+3,+2,+0,-2,-3,-4,-6			無	+0
	II	TYPE P	+6,+4,+2,+0,-2,-4,-6	F30C	II	TYPE P	+6,+4,+2,+0,-2,-4,-6
		無	+6,+4,+2,+0,-2,-4,-6			無	+0
F30X	I	TYPE P	+6,+3,+0,-3,-6	F30X	I	TYPE P	+0
		無	+6,+3,+0,-3,-6			無	+0
F33A	I	TYPE P	+6,+4,+2,+0,-2,-4,-6	F33A	I	TYPE P	+6,+4,+2,+0,-2,-4,-6
		TYPE A,B,C	+6,+3,+0,-3,-6			TYPE A,B,C	+6,+3,+0,-3,-6
	II	TYPE P	+6,+4,+2,+0,-2,-4,-6		II	TYPE P	+6,+4,+2,+0,-2,-4,-6
		TYPE A,B,C	+6,+3,+0,-3,-6			TYPE A,B,C	+6,+3,+0,-3,-6

3. 実験結果と考察

3.1 風向と高欄の有無による応答特性

本橋は、主桁断面が左右非対称であるため、風向により応答特性が異なる可能性がある。以下に、検討結果を示す。

高欄無しのたわみ振動実験結果の応答図を図-7に、高欄有り (TYPE P) の応答図を図-8に示す。図-7によれば、風向 I では、正の迎角で $Vr=5, 11$ 付近で渦励振が発生しており、風向 II と異なる応答特性を示しているが、負の迎角では同じ傾向を示している。図-8によれば、高欄を付けることにより、正の迎角で $Vr=5$ 付近の渦励振は発生しなくなったが、 $Vr=11$ 付近では、風向 II で励振している。また、負の迎角の渦励振は、振幅が小さくなった。

本橋の桁断面の非対称性は、主に桁上面の付加物 (高欄、地覆など) によるもので、桁下面はほぼ対称であ

る。正の迎角では、桁上面形状の変化 (高欄の有無、地覆配置) により、応答特性に大きな変化が見られていることから、渦励振を誘起する剥離渦が主に桁上面で発生しているものと考えられる。これは逆に、負の迎角において、渦励振の発生が主に桁下面形状に依存していることから、風向による応答特性に顕著な違いが現れていないとも考えられる。これにより、渦励振を誘起する剥離渦の生成が正の迎角の場合は桁上面で起こり、負の迎角の場合は桁下面で起こっていると推察できる。

以上により、本橋では、渦励振の最大振幅が風向により変わらない傾向にあるために、主に風向 I について検討を行い、最終断面で両風向の検討を行った。また、以上の結果より、本橋では両風向ともに高欄による影響が大きく、高欄を考慮に入れた検討が必要である。

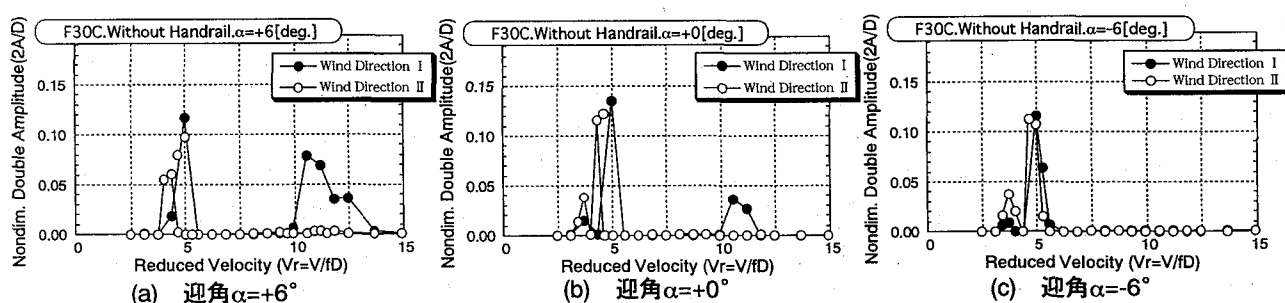


図-7 たわみ振動応答図 (フェアリング F30C. 高欄無し)

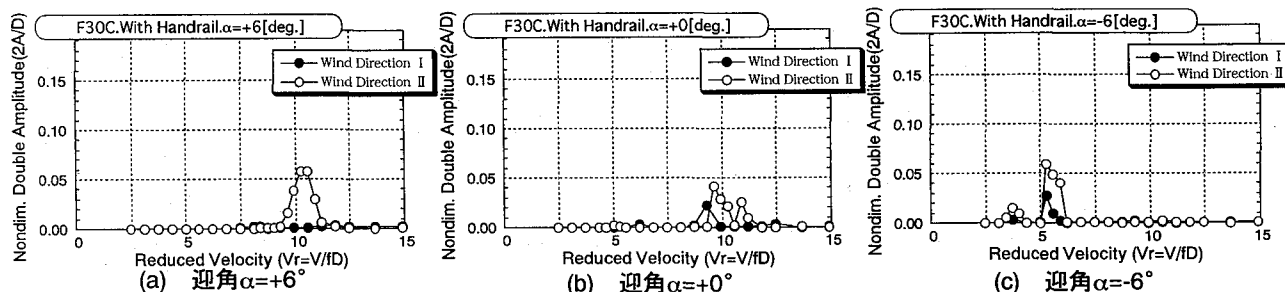


図-8 たわみ振動応答図 (フェアリング F30C. 高欄有り TYPE P)

3.2 フェアリング形状と高欄の有無による応答特性

フェアリング形状と高欄との関係を見るために、フェアリング形状を図-5のように変化させた検討を行った。

3.2.1 フェアリング上面形状

実験に使用したフェアリングのうち、F30A, B, Cはフェアリング長 $[p+c]$ (cf. 図-5) が同じで、先端厚 $[H]$ を変化させている。F30Xは、F30Aの先端をカットした形で、フェアリング長が短いものとなっている。これらのフェアリングの下面形状は、同一のものとなっている。

(1) たわみ1自由度振動実験

たわみ振動実験結果を図-9, -10に示す。実験の結果、迎角 $\alpha=+6^\circ$ では、F30A, B, Cの渦励振最大応答振幅が $Vr=4\sim5$ で発生しているのに対して、F30Xの最大振幅

は $Vr=13$ で発生している。迎角 $\alpha=+0^\circ, -6^\circ$ では、高風速での渦励振は消え、各フェアリングとも $Vr=4\sim5$ で最大振幅が発生している。また、高欄を付けることにより、各フェアリングとも振幅は小さくなっている。つまり、高欄により剥離渦が制御されているものと考えられる。

フェアリングの形状変化により、正の迎角では応答特性が変化しているのに対して、負の迎角では正の迎角ほど変化が現れていない。これにより、3.1でも述べたように、迎角によって渦励振を誘起する剥離渦の生成が異なっていると考えられる。また、フェアリングの形状変化による系統的な応答特性の変化は見られず、高欄による影響の方が大きいことが分かる。

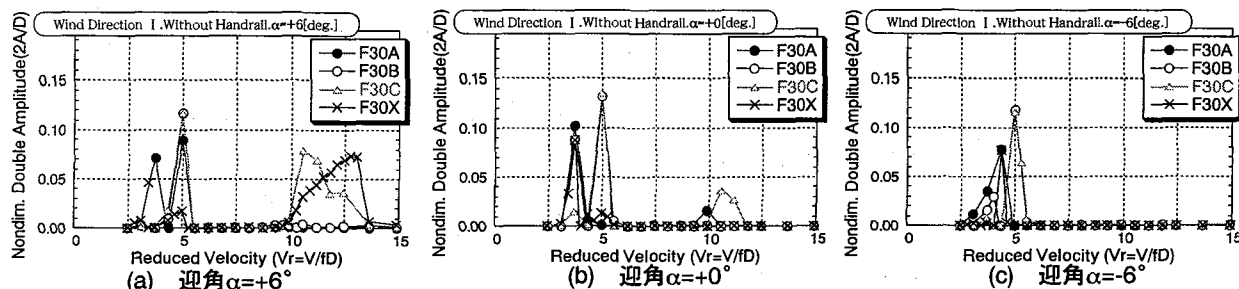


図-9 たわみ振動応答図 (風向 I. 高欄無し)

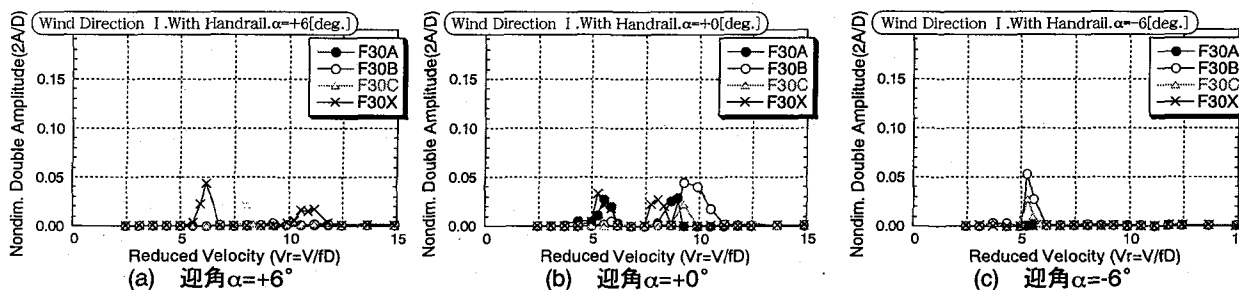


図-10 たわみ振動応答図 (風向 I. 高欄有り TYPE P)

(2) ねじれ1自由度振動実験

ねじれ振動実験結果を図-11に示す。実験の結果、迎角 $\alpha=+0^\circ$ では、 $Vr=4, 5.5$ 付近で渦励振が発生している。高欄を付けることにより、F30A, B, Cでは最大振幅が小さくなったのに対して、F30Xは渦励振発振風速が $Vr=4$ から $Vr=5$ に変化し、振幅が大きくなっている。

このことから、1次剥離点と高欄との距離が応答特性の変化に関与していると考えられる。また、低風速での渦励振の発生が、たわみ振動と同様に抑制されていることから、低風速では剥離渦が高欄と干渉しやすいことが

わかる。つまり、風速の上昇に対して、渦励振が数回発生する場合は、その渦励振毎に剥離状態が異なると言える。一方、ねじれ振動では、図-11 (c)に示すように、迎角により渦励振発振風速が変化しているのがわかる。発振風速は、迎角が負になるにつれて大きくなっているが、最大振幅は迎角により様々である。また、たわみ振動の場合とは異なり、各迎角とも高欄からの剥離渦の影響が小さくなるのではなく、高欄からの剥離渦と桁下面の剥離渦の双方が渦励振を誘起する要因となっているものと考えられる。

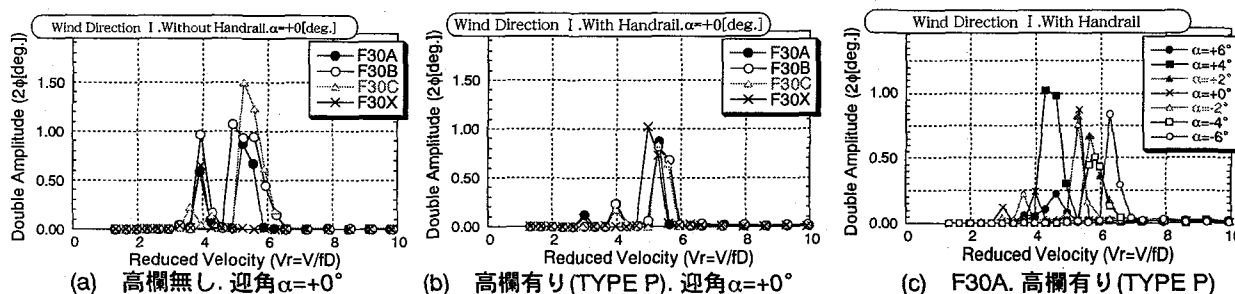


図-11 ねじれ振動応答図 (風向 I)

3.2.1 フェアリング下面形状

フェアリング上面形状変化では、ねじれ振動において渦励振の発生を抑制できなかったことから、F30Aの下面傾斜角を 30° にしたF33Aを用いて実験を行った。

(1) たわみ1自由度振動実験

たわみ振動実験結果を図-12に示す。実験の結果、F30Aと同様に、F33Aも負の迎角において、 $Vr=5$ 付近で渦励振が発生し、ほぼ同じ応答特性となった。また、最大振幅は風向Ⅰで約1.2倍となり、風向Ⅱではさらにその約1.2倍となった。

以上のことから、たわみ振動においては下面傾斜角の変化では、応答特性に影響が少なく、渦励振の発生は高欄に依存しているものと考えられる。このことから、フェアリングの形状選定においては、高欄の存在を考慮する必要があると言える。

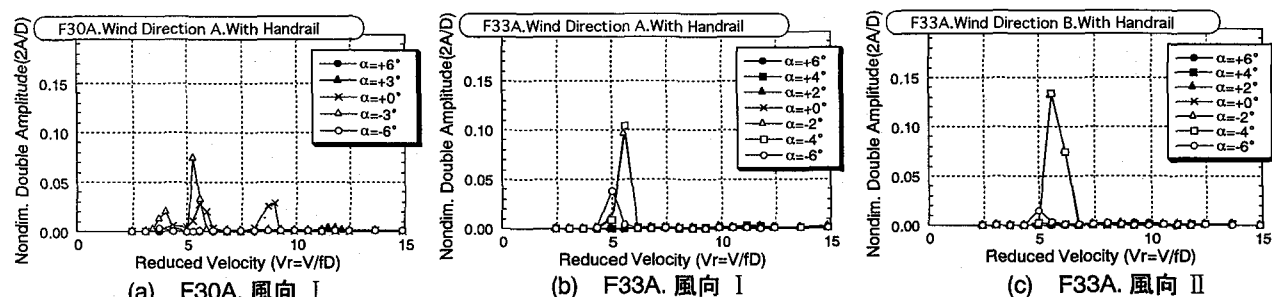


図-12 たわみ振動応答図（高欄有り TYPE P）

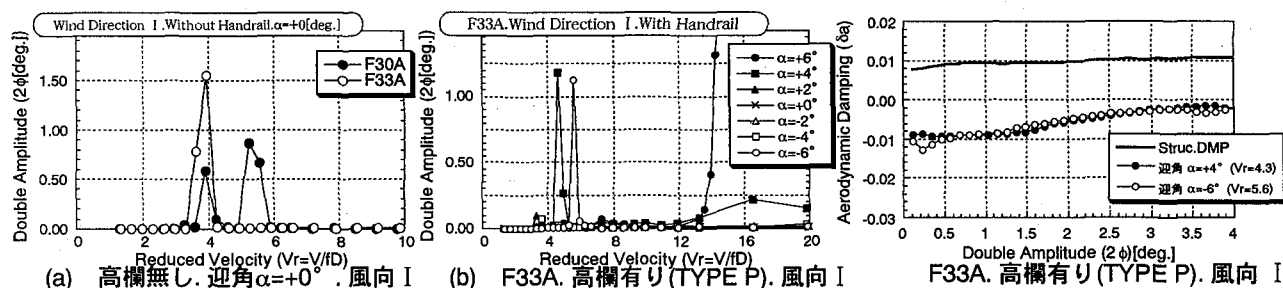


図-13 ねじれ振動応答図

図-14 空力減衰率

3.3 高欄形状による応答特性

以上の実験結果から、高欄の主桁応答特性に与える影響が極めて大きいことが判明した。そこで、高欄の防護柵の位置を規準で許されている範囲で変化させて、応答特性への影響を検討する実験を行った。フェアリングとしては、決定断面となったF33Aを使用している。

(1) たわみ1自由度振動実験

たわみ振動実験結果を図-15に示す。実験の結果、高欄のTYPE Bで迎角 $\alpha=-6^\circ$ の時に、渦励振の発生が抑制されている。迎角 $\alpha=+0^\circ$ では、防護柵の影響による渦励振の発生が見られる。

以上のことから、たわみ振動において、本橋における高欄の存在は、渦励振発生風速には関与せず、振幅量に影響を与えているものと考えられる。つまり、高欄により、フェアリングの2次剥離点からの剥離流が制御されていると言える。

(2) ねじれ1自由度振動実験

ねじれ振動実験結果を図-13に示す。実験の結果、高欄が無い状態では、下面傾斜角を変えることにより、 $Vr=4$ での渦励振は振幅が増大し、 $Vr=5$ での渦励振は消滅している（cf. 図-13 (a)）。図-13(b)によると、風向Ⅰでは、高欄を付けることにより、迎角 $\alpha=+6^\circ$ の時に $Vr=13$ 付近でフラッターが発生するものの、迎角 $\alpha=+4^\circ$ 、 -6° 以外の渦励振は抑制されている（cf. 図-11 (c)）。これらにより、下面傾斜角を変えることで、応答特性は明確に異なるものとなり、各迎角で高欄の影響を強く受ける場合と、フェアリングの影響を受ける場合に別れることが分かる。

以上の検討の結果と、図-14に示す空力減衰率から、F33Aで発生している渦励振の空力減衰率が $\delta a > -0.01$ であることから、フェアリング形状をF33Aに決定した。

(2) ねじれ1自由度振動実験

ねじれ振動実験結果を図-16に示す。迎角 $\alpha=+6^\circ$ では、TYPE Aでフラッターの発生が抑制され、防護柵の位置が低くなるにつれて、発振風速が低くなっている。迎角 $\alpha=+0^\circ$ では、振動は発生しなかった。また、迎角 $\alpha=-6^\circ$ では、防護柵の位置が低くなるにつれて、渦励振の最大振幅が小さくなっている。

防護柵の位置により、フラッターの発生および渦励振の振幅が変化していることから、高欄が桁表面の非定常圧力分布に大きな影響を与えているものと考えられる。

以上のことから、ねじれ振動においては、本橋における高欄の存在は、空力振動にかなりの影響を与えており、剥離干渉により制振効果を得ようとする場合には、高欄の形状をも考慮に入れなければならないと言える。

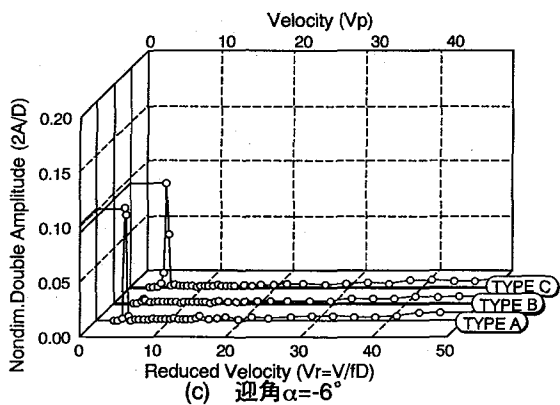
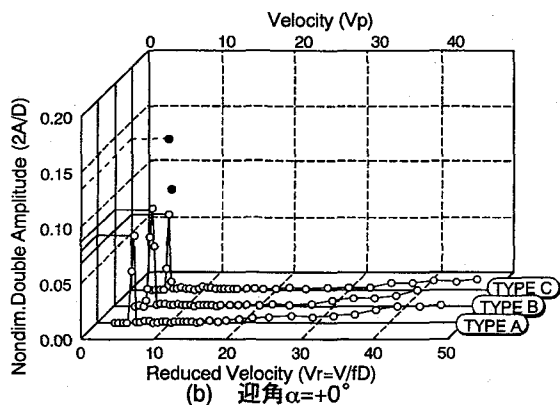
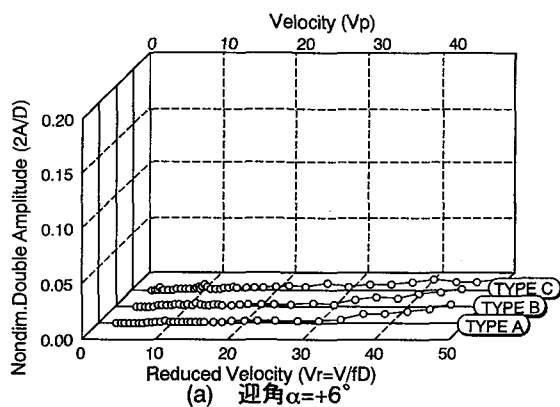


図-15 たわみ振動実験応答図

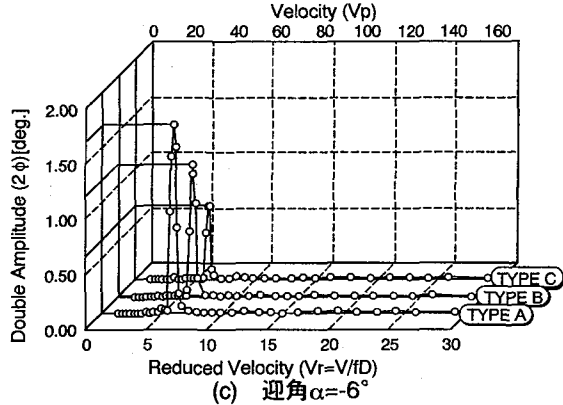
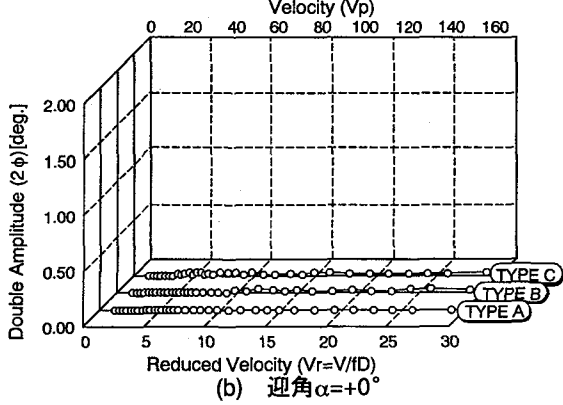
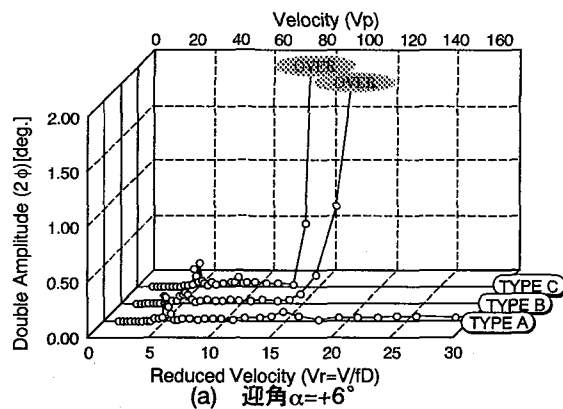


図-16 ねじれ振動実験応答図

4. まとめ

以上の実験結果をまとめると、以下のようになる。

(1) 桁表面上の左右非対称性による振動発生風速には変化は無く、振幅量に変化が現れる。従って、桁断面の応答振幅量は、桁端部および高欄等の付加物に大きく依存している。

(2) フェアリング上面形状変化による、系統的な応答特性の変化は見られなかったが、桁下面にも剥離干渉法を適用することで、制振効果を向上させることができる。

(3) 高欄は剥離干渉において、無視することのできない存在であり、高欄の形状も空力弾性振動の大きな要因となっている。また、車両防護柵の位置により応答が顕著に変わることは、特筆すべきことである。

以上のことから、実橋桁断面において剥離干渉法を適用する場合には、高欄を3次剥離点として考慮に入れる

必要があり、さらなる基礎実験を行って高欄の影響を検討する必要がある。特に、実橋桁断面の耐風性能の検討においては、桁端部からの剥離流と高欄との干渉作用に着目した検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 久保, 本多 他: PC斜張橋の閉断面桁および開断面桁の剥離流相互干渉法による耐風性能改善策に関する研究, 構造工学論文集, Vol.38A, PP.919-924, 1992
- 2) 久保, 小石 他: 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, PP.353-358, 1994
- 3) 皆田 他: 浜田マリン大橋の桁断面の耐風特性, 第51回土木学会全国大会講演概要集第I-A部門, 1996.9
(1996年9月6日受付)