

アクティブ制御による自然風シミュレーション技術の 橋梁風洞実験への適用に関する研究

Natural Wind Active Simulation Technique for Shapening Wind-Tunnel Research on Bridges

藤本信弘* 斎藤 通** 本田明弘*** 平井滋登****

Nobuhiro FUJIMOTO, Toru SAITO, Akihiro HONDA and Shigeto HIRAI

*第二実験課課長 三菱重工業(株)長崎研究所 (〒851-03 長崎市深堀町5丁目717番1号)

**工博 流体・伝熱研究室主務 三菱重工業(株)長崎研究所 (〒851-03 長崎市深堀町5丁目717番1号)

***流体・伝熱研究室主任 三菱重工業(株)長崎研究所 (〒851-03 長崎市深堀町5丁目717番1号)

****流体・伝熱研究室 三菱重工業(株)長崎研究所 (〒851-03 長崎市深堀町5丁目717番1号)

Engineering of large bridges in recent years has come to actively assess the effects of turbulence of natural wind seeking realistic and rational bridge aerodynamic design. The conventional turbulent flow generating method employed in wind tunnel testing, however, has a limit regarding the scale of turbulence it can generate and, besides, is unable to freely control the spatial distribution characteristics. Systematically analyzing the parameters of turbulence for their individual effects has therefore been difficult.

This paper reviews a natural wind active simulation technique devised this time, which employs a combination of blade rows and dampers to generate turbulent flows in wind tunnel testing on models representing full-length bridges, and the results of its trial application to the wind tunnel testing. The technique successfully clarified the effects of parameters of turbulence on the bridge aerodynamic stability, offering good prospect of its practical application to bridge aerodynamic design.

Key Words : natural wind, active simulation, wind tunnel test, bridge

1. まえがき

最近の長大橋では、自然風の乱れの影響を積極的に考慮し、より現実に即した合理的な耐風設計が行われるようになってきた。しかしながら、従来の風洞における乱流発生手法(格子またはスパイヤー・ラフネスブロック)では、風路内に固定された物体から生ずる渦による乱流が主であった。これらの手法では、乱れのスケールに限界がある上、空間分布特性を自由にコントロールできないため、乱れの諸量別に系統的にその影響を調べることに困難であった。

筆者等は、風洞の流路の一部に翼列を設置し、各翼を同方向にピッチングさせて、主流直角方向の変動風を発生させるとともに、流路の残りの部分には平板列を設置し、隣り合った平板を逆方向にピッチングさせて、流路の断面積を変化させる(ダンパー)ことにより、主流方向の風速変動を発生させる装置(以下、翼列・ダンパー方式¹⁾と呼ぶ)を開発した。本研究では、全橋模型試験用の乱流として、これらをアクティブに制御することに

より、発生する乱れをコントロールする技術を開発するとともに、橋梁風洞実験への適用を試み、乱れの各諸量の橋梁の耐風安定性に与える影響を調査した。

2. 乱流発生方法

2.1 乱流発生装置

風洞は三菱重工業(株)長崎研究所に設置の大型汎用風洞を使用した。本風洞は吹出式風洞で、しかも吹出口が回転式となっており、風路断面は幅10m×高さ3m×長さ10m又は幅3m×高さ10m×長さ10mの2通りで使用出来るようになっている。

全橋模型試験用の乱流発生装置(翼列・ダンパー方式)を図-1に示す。本装置は、風洞の吹出口の下部2/3(測定部)に翼列を設け、その上部1/3(ダンパー部)には平板列を設けている。翼列には、弦長250mm、長さ10mのNACA0012翼を8列使用し、各列の翼を同方向にピッチングさせて、主流直角方向の変動風を発生させる。

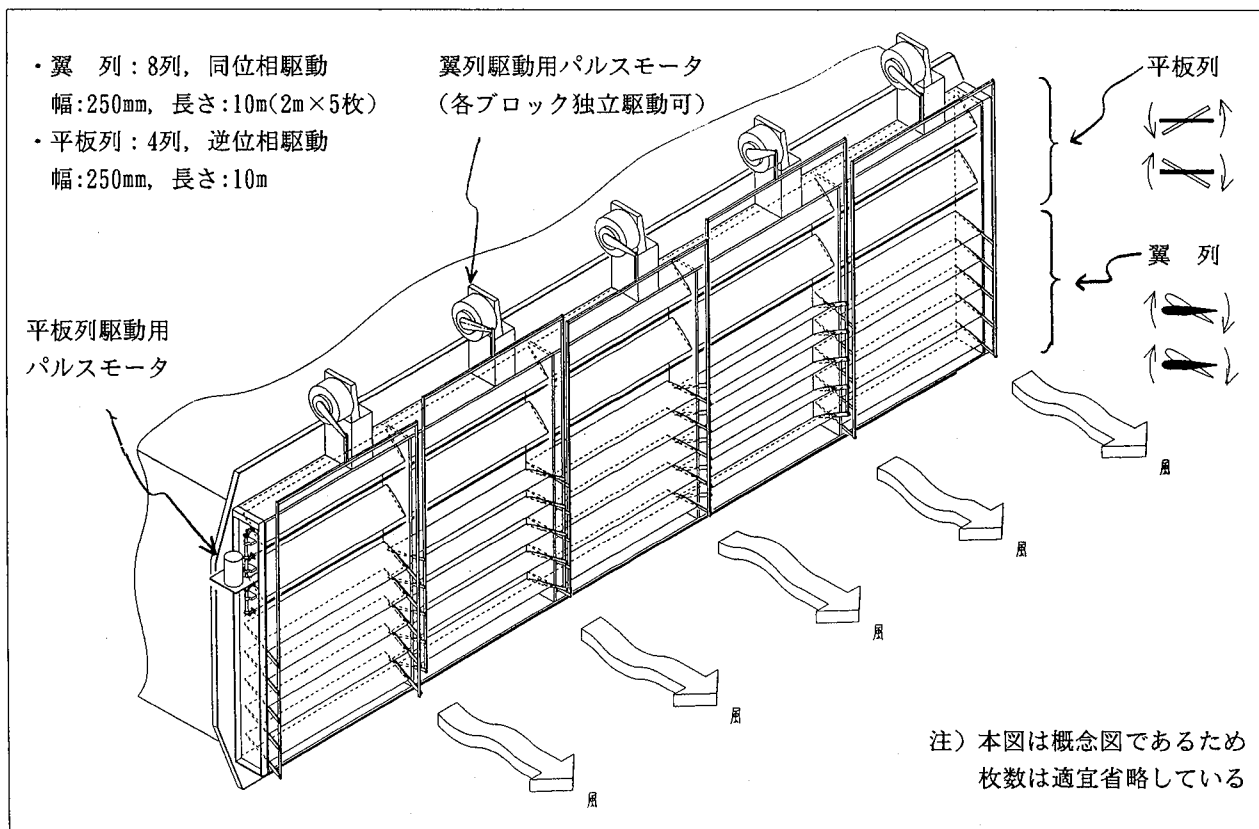


図-1 乱流発生装置(翼列・ダンパー方式)の概念図

また、ダンパー部には、幅250 mm、長さ10mの平板を4列使用し、隣り合った列の平板を逆方向にピッチング運動をさせ、流路の断面積を変化させることにより、主流方向の風速変動を発生させる。なお、翼列及び平板列はいずれもパルスモータにて駆動される。

本研究では、従来長さ方向に一体となって駆動されていた翼列を、長さ2mで5分割し、各ブロック(2m x 8列)ごとに独立して駆動出来るように改造することにより、空間的に異なる変動風を再現出来るようにした(以下、分割翼方式と呼ぶ)。

本方式での分割翼の駆動は、目標とする自然風のパワースペクトルから、各翼列間の空間相関(コヒーレンス関数)を考慮し、多次元自己回帰式²⁾を用いて、各翼列毎の駆動波形を作成して行った。

なお、本研究で目標としたパワースペクトルは、主流方向の風速変動成分(以下、 u 成分と呼ぶ)は日野の提案式³⁾を採用し、主流直角方向の風速変動成分(以下 w 成分と呼ぶ)はPanofsky & McCormicの提案式³⁾を採用した。また、コヒーレンス関数 $R(f) = \exp(-k \cdot f \cdot r / U)$ では、デケイファクター: $k=7$ を目標とした。

2.2 乱流の特性

本研究では、従来、翼列・ダンパー方式によるアクティブ制御では困難であった空間相関のコントロールを、

分割翼方式により改善することに主眼を置いて風洞実験を実施した。発生した乱流は、乱流発生装置の下流2 m位置において熱線風速計で計測し、AR法⁴⁾によりスペクトル解析を行い、パワースペクトル及び各点間の空間相関(コヒーレンス関数)を求めた。

試験結果は、空間相関に注目して下記により無次元化表示で示した。

①パワースペクトル

横軸: 無次元周波数 $f \cdot L / U$

縦軸: 無次元スペクトル $S(f) \cdot U / \sigma^2 / L$

②コヒーレンス

横軸: 無次元周波数 $f \cdot r / U$

縦軸: ルートコヒーレンス $R(f)$

記号 f : 周波数, U : 平均風速, I : 乱れ強さ

σ^2 : 変動風速の分散値, r : 2点間距離

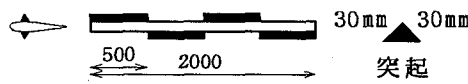
$S(f)$: パワースペクトル

L : スケール長 $[= U \cdot S(f=0) / 2\sigma^2]$

図-3及び図-4に従来の翼列・ダンパー方式(連続剛翼方式)の乱れ特性例を示し、図-5に分割翼方式の乱れ特性例を示す。 u 成分も w 成分のいずれもパワースペクトルの形状は、目標とした自然風のパワースペクトルの形状に比較的良好一致している。一方空間相関は、従来の一様相関であった連続剛翼、又は連続剛翼に不連

続な突起（図－2 参照）を取り付けた場合に比べ、w成分については分割された翼間での相関度は、自然風の値に近くなっている。しかし、当然のことながら、同じ翼内でのw成分の相関度は高すぎる傾向にある。なお、u成分については空間的な相関度が自然風の値よりも高すぎる傾向にある。

上記分割翼の不具合を改善するために、連続剛翼の場合と同様に翼上に不連続な突起を取り付け、翼内での相関度を改善することを試みた。突起物は長さ0.5mの30mm×30mmのL型鋼を、0.5mピッチで山型状に翼上面と下面に交互に取り付けた（図－2 参照）。



図－2 突起物の概要

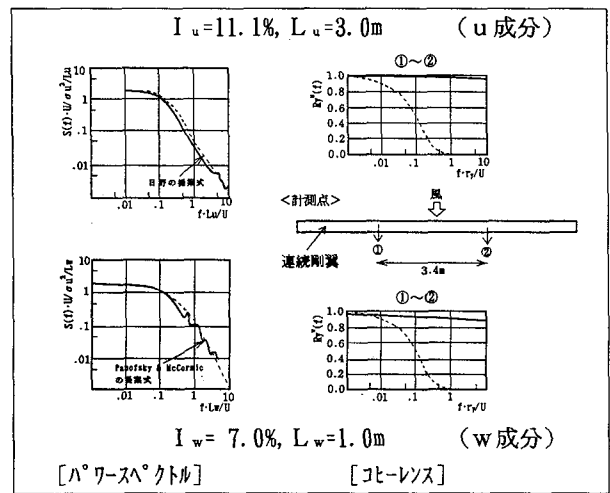
本方式での乱れ特性例を図－6 示す。分割翼方式同様

u成分とw成分の乱れのパワースペクトル形状は、実風の提案式によく一致する。また、突起を断続して分割翼上のスパン方向に設置することにより、同じ翼内のu成分及びw成分の相関度が、また他の翼との間でのu成分の相関度が改善され、より自然風の乱流特性に近づく傾向にある。

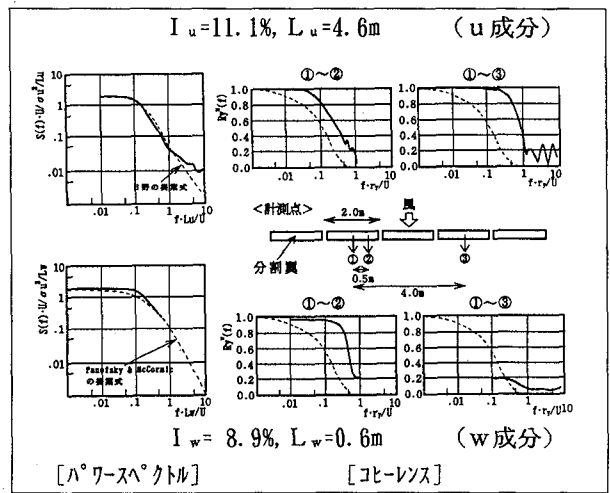
3. 橋梁風洞実験への適用

翼列・ダンパー方式において、分割翼を採用することにより、乱れの各諸量がある程度独立にコントロールすることが可能となった。特に従来の格子等では得られなかった大きな乱れスケールと、自然風に近い空間分布特性が得られることにより、乱れ特性を定量的に考慮した耐風検討が可能になる。

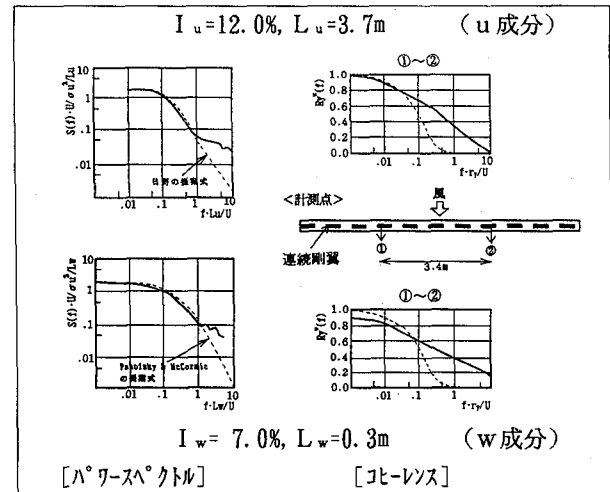
ここでは、翼列・ダンパー方式を橋梁実験へ適用し、乱れの各諸量の橋梁の耐風安定性に与える影響を調べた幾つかの例について報告する。なお、表－1に風洞実験に用いられた気流の乱れ特性を示した。



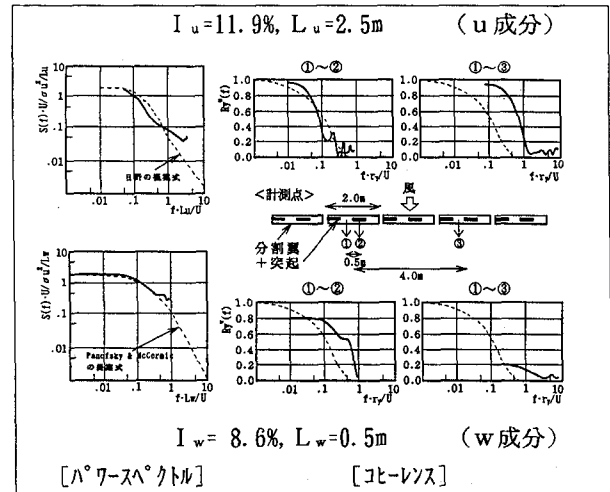
図－3 連続剛翼方式の乱れ特性例(U=5.2m/s)



図－5 分割翼方式の乱れ特性例(U=5.2m/s)

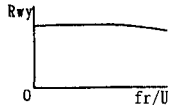
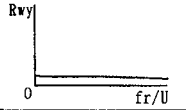
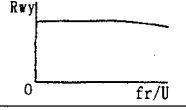
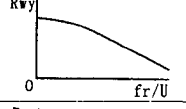
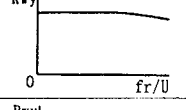
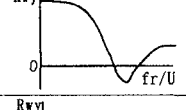
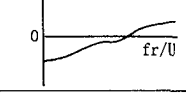


図－4 連続剛翼＋突起方式の乱れ特性例(U=5.2m/s)



図－6 分割翼＋突起方式の乱れ特性例(U=5.2m/s)

表-1 橋梁風洞実験に用いられた気流の乱れ特性 (*乱れスケールは実橋換算値)

対 象 橋 梁		縮尺	乱 流 の 種 類		乱れ強さ		乱れスケール*		空間相関(コレリシ)
					u成分	w成分	u成分	w成分	w成分
構造系			TYPE	発生方法	I_u	I_w	L_u	L_w	R_{wy}
完 成 系	トラス桁	1/100	I-A	翼列・ダンパー (連続剛翼)	11%	7%	300m	100m	
	斜張橋		II	格 子	15%	10%	8m	4m	
	箱桁橋	1/60	I-B	翼列・ダンパー (連続剛翼)	8%	5%	480m	30m	
			I-C	翼列・ダンパー (連続剛翼 + 突起)	12%	7%	220m	13m	
架 設 系	偏平箱桁	1/120	I-D	翼列・ダンパー (連続剛翼)	13%	7%	470m	50m	
			I-E	翼列・ダンパー (分割翼)	13%	7%	470m	50m	
	斜張橋		III	スハイヤ + ラフネスブロック	14%	7%	130m	20m	

3.1 乱れ強さとスケールの効果

(1) バフエッティング振動

完成系の斜張橋(ダブルデッキトラス桁)⁵⁾に発生するバフエッティング振動を対象に、全径間模型を用いて、乱れ強さは小さいが、乱れスケールの大きな翼列・ダンパー方式の乱流(TYPE I-A)と、乱れの強さは大きい、乱れスケールの小さな格子乱流(TYPE II)中での、鉛直たわみ対称1次振動の応答特性を調べて比較した。

その結果を図-7に示す。図-7から分かるように、バフエッティング振動振幅は、乱れ強さの大きな格子乱流(TYPE II)の方が小さく、乱れ強さの小さな翼列・ダンパー方式乱流(TYPE I-A)の方が約5倍と大きくなっている。これは、乱流I-Aの場合、乱れ強さの差に比べて乱れスケールの大きさの違いとそれにとまう空間相関特性の差の方が大きいことによるものと考えられる。即ち、乱れのスケールが大きい場合乱れの低周波成分の影響により、固有振動数成分以下の低周波の応答変位が大きくなったためと考えられる。

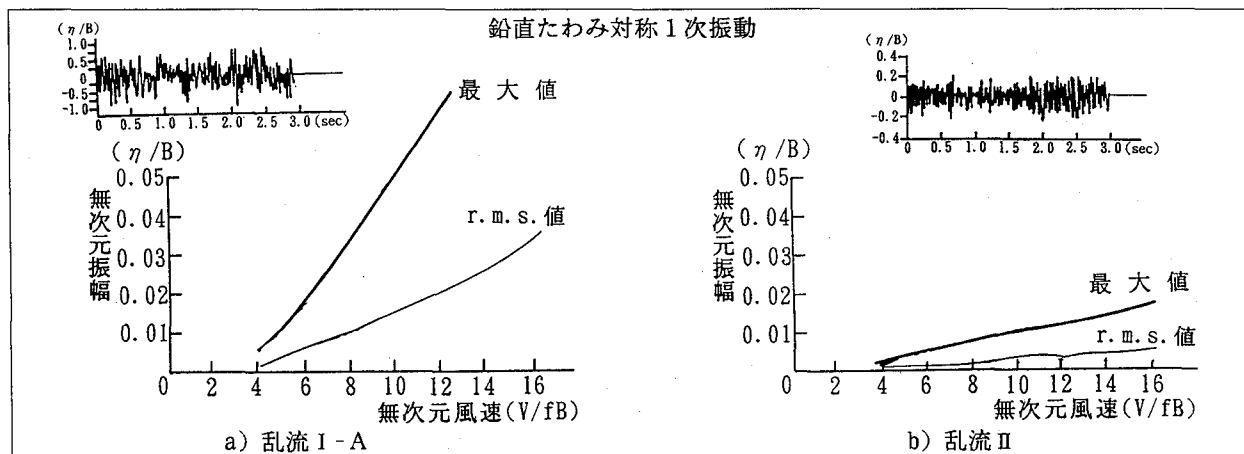


図-7 バフエッティング振動応答に与える乱れ強さとスケールによる影響

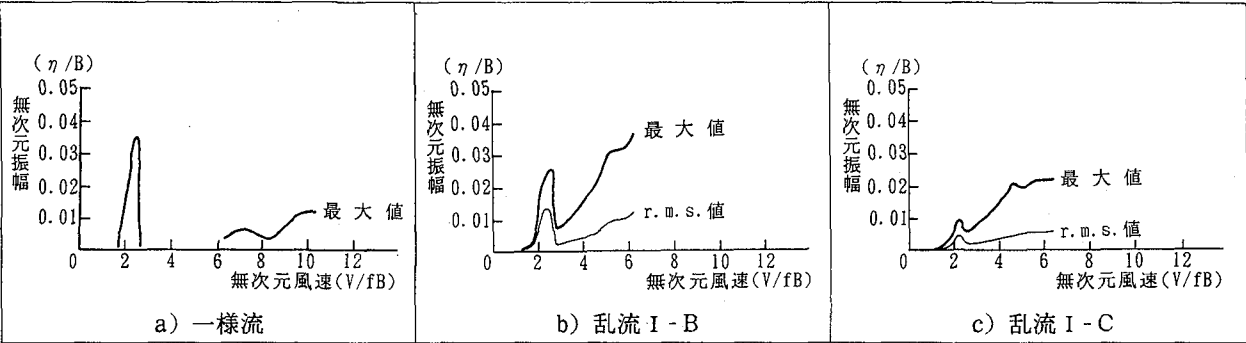


図-8 渦励振振動応答に与える乱れ強さとスケールによる影響

(2) 渦励振振動

完成系の桁橋（箱桁）⁶⁾に発生する渦励振振動を対象に、全径間模型を用いて一様流と翼列・ダンパー方式による乱れ強さとスケールの異なる2種類の乱流(TYPE I-B, TYPE I-C)中で行われた風洞試験結果を図-8に示す。

図-8から分かるように、乱れ強さとスケールによって渦励振振動の応答振幅が変わる。一般に箱桁橋の場合には、乱れ強さが小さく成る程、またスケールが大きくなる程一様流の特性に近くなるものと考えられる。

図-9は、過去に行われた幾つかの上記に示すような箱桁橋の試験結果⁷⁾を基に、箱桁橋の渦励振振動に与える乱れ強さとスケールの影響をまとめたものである。

図中の斜線の領域では振動は殆ど発生しない。一方、乱れ強さが約3%以下、 B/L_w (B : 桁幅) が約0.1以下では、乱れの影響はほとんどなくなり、一様流の応答特性と変わらないものと考えられる。

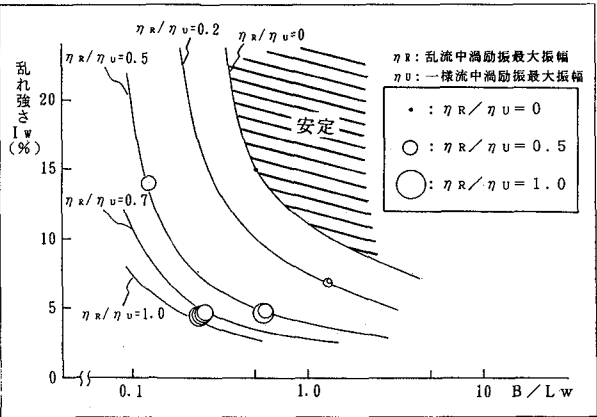


図-9 箱桁橋の渦励振振動に与える乱れの影響

3.2 空間相関の効果

(1) バフエッティング振動

架設系の斜張橋（偏平箱桁）⁸⁾に発生するバフエッティング振動を対象に全体模型を用いて、乱れ強さはほぼ同じで乱れ (w 成分) の空間相関分布特性が異なる3種

類の乱流 (乱れ I-D, I-E, III) 中で応答特性を調べ比較した。

図-10に3種類の乱れの空間相関分布特性を示す。対象架設系としては、主塔から中央径間側と側径間側に桁をバランスさせながら張り出す架設工法で、表-2に示すような主塔を中央に両側の径間の桁が、同相と逆相で振動する2種類の振動モードを対象とした。

風洞試験によるバフエッティング振動の応答振幅を図-11に示す。

図-11から分かるように、1次モードと2次モードとでは、乱れの空間分布の影響度が全く異なっている。

即ち、1次モードは主塔左右逆位相の鉛直たわみ振動であるために、一様相関に近い空間分布の乱れでは応答振幅は小さいが、乱れ I-E (分割翼) や乱れ III (境界層乱流) のように、自然風と同様な空間分布を持った乱れの方が、大きな応答振幅になるものと考えられる。

一方、2次モードはその反対で主塔左右同位相の鉛直たわみ振動であるために、一様相関の乱れの場合にに応答振幅は大きく、乱れ I-E (分割翼) や乱れ III (境界層

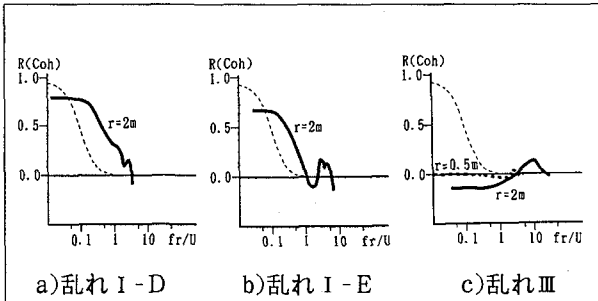


図-10 乱れの空間相関分布 (w 成分)

表-2 振動モード形態

次数	振動モード	振動数	備考
1次		0.095 Hz	左右逆位相
2次		0.417 Hz	左右同位相

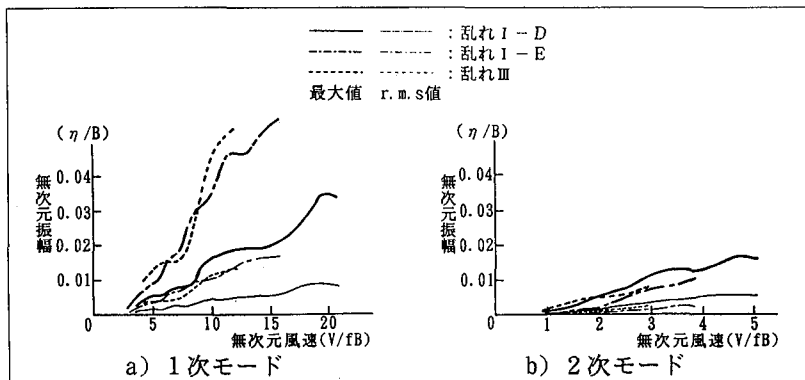


図-11 バフティング振動応答の乱れの空間分布による影響

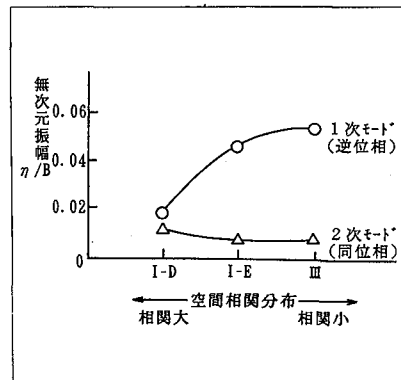


図-12 空間相関による応答変化

乱流)のように、一様でない空間分布を持った乱れの方が、応答振幅が小さくなるものと考えられる。

以上に示すように、バフティング応答振動は、振動モードの形状により応答振幅が最も大きくなる空間分布形状があると考えられ、必ずしも空間分布特性において相関が少ないからといって、応答振幅が小さくなることは限らないことが分かった(図-12参照)。

4. あとがき

本研究では、橋梁全体模型風洞実験用の乱流として、翼列・ダンパー方式を用いてアクティブ制御で自然風をシミュレーションする技術の開発を試みた。

その結果、大きなスケールの乱流を発生することが可能となり、縮尺が1/100以下の大型の全体模型試験が可能となった。又、空間相関をコントロールできるようにすることにより、架設地点により異なる様々な風環境を風洞内に再現することが可能となるとともに、現地の風特性をある幅をもって評価することが比較的容易になった。

次に、上記の乱流発生技術をいくつかの実際の橋梁に適用して、乱れ強さや乱れのスケールの空間相関特性のそれぞれが振動応答に与える影響を調べた結果、これら諸量の変化に伴い、応答特性が大きく変わる場合もあることが明らかになるとともに、今後のより現実に即した定量的かつ過不足のない合理的な耐風設計へ適用できる目処が得られた。

今後は、乱流発生技術としては、より任意な空間相関特性を発生させるために、翼列・ダンパー方式の連続翼のフレキシブル化、又、大規模な3次元乱流の発生のために、スパイヤー・ラフネスブロックのアクティブコントロール化が必要と考えられる。

又、橋梁風洞実験においては、様々な橋種・空力振動現象を対象に適用し、より数多くのデータを求めることにより、乱れが橋梁の空力応答に与える系統的な特性を明らかにしていく予定である。

5. 謝辞

本研究を進めるにあたり、貴重なご意見をいただきました、京都大学工学部土木工学教室の白石成人教授ならびに松本勝助教授に謝意を表します。

また、阪神高速道路公団殿ならびに日本道路公団殿には、委託試験で実施した試験結果の一部を使わせていただきましたことに謝意を表します。

参考文献

- 1) 斎藤通, 藤本信弘, 本田明弘, 「翼列・ダンパーを用いた変動風発生法の研究」, 土木学会第45回年次学術講演会, 1990
- 2) 岩谷祥美, 「任意のパワースペクトルとクロススペクトルを持つ多次元の風速変動のシミュレーション」, 日本風工学研究会誌, 第11号, 1982
- 3) 岡内功, 伊藤學, 宮田利雄, 「耐風構造」, 丸善株式会社, 1977
- 4) 赤池弘次, 中川東一郎, 「ダイナミックシステムの統計的解析と制御」, サイエンス社, 1983
- 5) T. Saito, N. Shiraishi, H. Ishizaki: On Aerodynamic Stability of Double-Decked/Trussed Girder for Cable-Stayed "Higashi-Koube Bridge", Journal of Wind Engineering, No. 37, October 1988
- 6) 檜垣忠良, 吉原光美, 平木茂, 「海田大橋(上部工)の設計, 施工」, 橋梁, 1989年12月
- 7) 斎藤通, 本田明弘, 「長大橋桁橋の耐風性及び制振対策法について」, 構造工学論文集, Vol. 36A, 1990年3月
- 8) T. Kazama, Y. Momiyama, Y. Suzuki, A. Honda, S. Hirai: Aerodynamic Stability of Nagoya Port Bridges, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 49(1993)543-552, Elsevier

(1994年9月14日受付)