

橋桁基本断面の渦励振に及ぼす乱流特性の影響

EFFECTS OF TURBULENCE CHARACTERISTICS ON VORTEX-INDUCED

OSCILLATION OF BRIDGE GIRDERS WITH BASIC SECTIONS

小林 紘士*・川谷 充郎**・金 熙 恵***・上 島 秀 作****

By Hiroshi KOBAYASHI, Mitsuo KAWATANI, Heeduck KIM and Hidesaku UEJIMA

This paper investigates the effects of turbulence characteristics (turbulence intensity and scale) on vortex-induced oscillation of bridge girders with basic sections. The basic sections of girders are selected taking account of various effects of turbulences on vortex-induced oscillation such as; the maximum amplitude of vortex-induced oscillation is 1) reduced, 2) enlarged in some cases or 3) not changed by the existence of wind velocity fluctuations, which are referred from the results of references. The vortex-induced responses of models are investigated not only in grid-generated turbulent flows but also in actively simulated turbulences with large turbulence scale through an active gust generator. The effects of turbulence properties on vortex-induced response are evaluated in terms of the ratio of the maximum amplitude in turbulence to that in smooth flow.

1. まえがき

橋梁構造物の長大化に伴い、その耐風安定性は重要性を増してきている。耐風安定性の照査は、風洞実験によるところが大きく、照査実験は主に一樣気流中で行われてきた。しかし、自然風の乱れを考慮した乱流中での模型の応答実験が各方面で行われるようになり、一樣流中と乱流中では応答に違いのあることが広く認識されるに至ってきている。構造物の合理的な耐風設計を行うためには、これらの乱れの影響を十分に把握する必要があると考えられる¹⁾。風による各種振動現象の中で渦励振に着目したとき、既往の研究において、一般的に、乱れにより振幅の低減する実験結果が示されている^{2)~6)}。しかし、断面によっては逆に振幅が増大するという報告もなされている^{7)~9)}。これらの報告は乱れを表現するパラメータの中で、特に乱れ強度に着目しているものである。もう1つのパラメータである乱れスケールの影響に関しては、これまでになされた報告例は少なく¹⁰⁾、未だ不明確な点の残されているのが現状である。

風洞内に乱流を発生させる方法としては、パッシブな方法¹¹⁾とアクティブな方法¹²⁾に大別することができる。従来は主にパッシブな方法で発生させた乱流中で応答実験が行われてきた。この中で格子乱流は比較的簡単に乱流を発生させることができるが、自然風のような大スケールの乱れを生成することは困難である。

* 工学博士 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒603 京都市北区等持院北町)

** 工学博士 大阪大学助教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘 2-1)

*** 大阪大学大学院 工学研究科後期課程土木工学専攻 (〒565 吹田市山田丘 2-1)

**** 大阪大学大学院 工学研究科前期課程土木工学専攻 (〒565 吹田市山田丘 2-1)

境界層乱流では大スケールの乱れを生成することができるが、境界層発達のための長い風路が必要である。筆者らは、数年前からアクティブな乱流発生の必要性を痛感し、平板列と翼列のランダム駆動により乱れ強度および乱れスケールの両方を任意に制御することができる乱流発生装置を開発した^{13), 14)}。

本研究では渦励振に及ぼす乱流特性の影響を検討するため、従来から行われてきたパッシブな生成法による乱流中における橋桁基本断面の応答実験結果を総括した。これらの実験結果を確認するため、報告例の多い断面および乱れにより振幅が増大する断面等に着目し、格子乱流中およびアクティブ制御乱流中において渦励振応答実験を行った。これら2種類の気流中での応答特性の相違点に関して比較検討を行い、橋桁基本断面の渦励振応答に及ぼす乱れのパワースペクトル形状、さらに乱れ強度および乱れスケールの影響について考察した。

2. 既往の研究成果

従来、構造基本断面を有する2次元模型の乱流中における応答実験は、格子乱流あるいは境界層乱流といったパッシブな生成法による乱流中で行われてきた。ここでは、それらの中でも特に橋桁の基本的断面を取り上げ、それらの渦励振に及ぼす乱流特性の影響に関する研究成果をまとめる。対象とする断面は、矩形断面および矩形断面の両端にフェアリングを取り付けた偏平6角形断面、さらに矩形断面に張り出し部を設けた箱桁断面である。矩形断面と偏平6角形断面では、辺長比(B/D)によって2つに分類した。

- ① 矩形断面
 - $\left\{ \begin{array}{ll} B/D < 2.8 & \cdots \cdots \cdots \text{TYPE-A} \\ B/D \geq 2.8 & \cdots \cdots \cdots \text{TYPE-B} \end{array} \right.$
- ② 箱桁断面 $\cdots \cdots \cdots \text{TYPE-C}$
- ③ 偏平6角形断面
 - $\left\{ \begin{array}{ll} B_0/D < 2.8 & \cdots \cdots \cdots \text{TYPE-AF} \\ B_0/D \geq 2.8 & \cdots \cdots \cdots \text{TYPE-BF} \end{array} \right.$

ここで、偏平6角形断面の B_0 は基本とした矩形断面の幅である。また、渦励振に及ぼす乱れの影響を次の最大振幅比を用いて評価する。

$$\text{最大振幅比 (Amplitude Ratio; } R_{MAX}) = \frac{\text{乱流中における渦励振最大振幅 (R. M. S.)}}{\text{一様流中における渦励振最大振幅 (R. M. S.)}}$$

Fig. 1は既往の研究成果^{2)~9)}を主流方向乱れ強度に着目して、最大振幅比により整理したものである。全体的な傾向として、乱れ強度の増加に伴って渦励振最大振幅の低減することが分かる。ここで、注目すべきことは、 $B_0/D < 2.8$ の偏平6角形断面TYPE-AF断面において、乱れの存在によって一様流の場合より振幅が増大していることである。また、 $B_0/D \geq 2.8$ の偏平6角形断面TYPE-BFの場合も、乱流中における振幅は一様流中より若干小さくなる程度である。偏平6角形断面のフェアリングは、本来、空力特性を改善するために取り付けられるものであるが、乱流中の渦励振に関しては、基本断面の形状によってはフェアリングが必ずしも有利に働かないことが分かる。

乱れスケールの影響については、武田ら¹⁰⁾が格子乱流と境界層乱流中におい

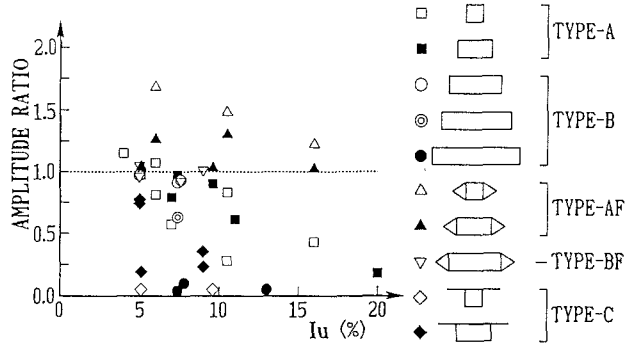


Fig.1 Turbulence effects on vortex-induced oscillation from references 2)~9)

て応答実験を行い、主流方向乱れスケール $L_{x,u}$ の増加に伴って渦励振振幅が大きくなる傾向を指摘した。しかし、 $L_{x,u}/B$ が1～3の範囲での調査であったため、自然風の有する大きい乱れスケールの範囲における渦励振応答特性の把握までは至っていない。

3. 風洞実験概要と2次元模型

実験に用いた風洞は、幅1.8m、高さ1.8mの断面を有するゲッティンゲン型風洞である。応答実験に用いる構造基本断面として、既往の研究成果を参考にして、渦励振の振幅が乱れの影響を受けて低減する断面、逆に一様流中よりも乱流中の方が振幅の増大する断面および乱れの影響を受けない断面を採用した。採用断面の構造諸元をTable 1に示す。A断面は乱れの影響をやや受ける断面（TYPE-A）、B断面は乱れの影響を強く受ける断面（TYPE-B）である。AF1断面は乱れにより振幅が増大する断面（TYPE-AF）、AF2、AF3断面はそのフェアリングを変形した断面である。また、乱れの影響を受けない断面（TYPE-BF）として採用したのがBF1断面であり、BF2断面はそのフェアリングを長くした断面である。C1～C3の箱桁断面は乱れの影響で振幅が大きく低減する断面として着目し（TYPE-C）、張り出し部の長さを変化させた。

各モデルの構造減衰はTable 1に示すようにかなり小さく設定しているが、これは乱流中においても渦励振そのものを発現しやすくするための配慮である。

渦励振振幅は約80秒間のサンプリングデータに基づくr.m.s.値で評価した。なお、すべてのモデルで、その渦励振領域においてはほとんど正弦的な振動であった。

4. 格子乱流における渦励振応答

4.1 格子乱流特性

模型設置点を格子からの噴流が及ばない下流側7.0mの位置とし、そこにおける格子乱流特性の調査を行った。気流の測定は熱線風速計を用いた。各格

Table 1 Sectional shape and dynamic characteristics of models

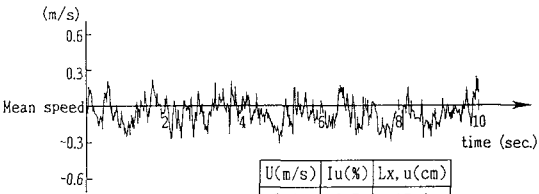
Model No.	Sectional shape	Weight (kg-f)	Frequency (Hz)	Logarithmic decrement
A		2.25	5.65	0.002
AF1		2.38	5.45	0.002
AF2		2.38	5.45	0.002
AF3		2.39	5.45	0.002
B		2.33	5.55	0.003
BF1		2.39	5.45	0.004
BF2		2.40	5.40	0.004
C1		2.36	3.00	0.003
C2		2.49	2.90	0.003
C3		2.55	2.85	0.003

Note: The length of model is 660mm.

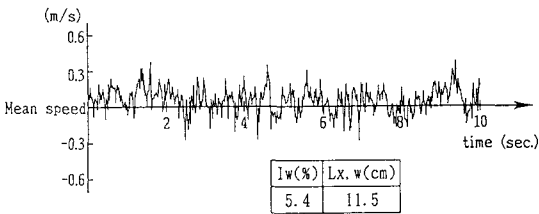
Table 2 Turbulence characteristics of grid-generated flows

Turbulence No.	[W, l] Unit: mm	I _u (%)	I _w (%)	L _{x,u} (cm)	L _{x,w} (cm)
G 6	[60, 30]	3.2 ~ 3.4	2.6 ~ 3.2	16 ~ 17	7 ~ 10
G 12	[120, 450]	4.9 ~ 5.8	4.6 ~ 5.6	16 ~ 28	10 ~ 17
G 24	[240, 780]	9.6 ~ 10.0	8.1 ~ 9.8	25 ~ 42	11 ~ 17

W: Width of grids, l: Interval of grids



(a) Horizontal component



(b) Vertical component

Fig.2 Time series of grid-generated turbulence

子から得られた気流の乱流特性値をTable 2に示す。表に示すように乱れ強度の異なる3種類の気流を得ることができた。乱れスケールについて、格子乱流では大きな値が得られないとされており、何れの格子を用いても $L_{x,u}$ 、 $L_{x,w}$ 共に50cm以下の値であった。また、風速の変化に伴い乱れスケールは変動した。Fig. 2に気流変動の時刻歴、Fig. 3に基準化パワースペクトルの一例を示す。両図からも格子乱流は変動の長周期成分が小さく、スケールの小さい乱流であることが確認できる。

4.2 渦励振応答

一様流および乱流中において鉛直一自由度系にばね支持した2次元剛体模型の渦励振応答を測定し、Fig. 4~6にそれらのV-A曲線を示す。また、乱れ強度の変化による最大振幅比の変化をFig. 7に示す。Fig. 4、Fig. 7より、辺長比

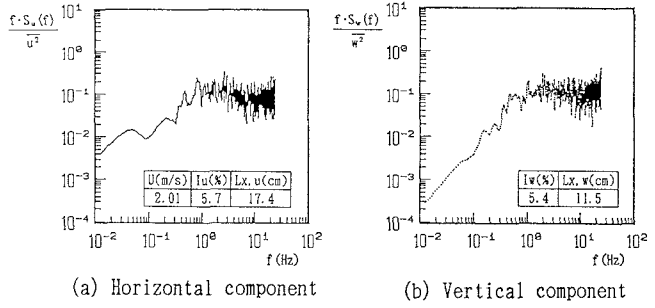


Fig. 3 Power spectra of grid-generated turbulence

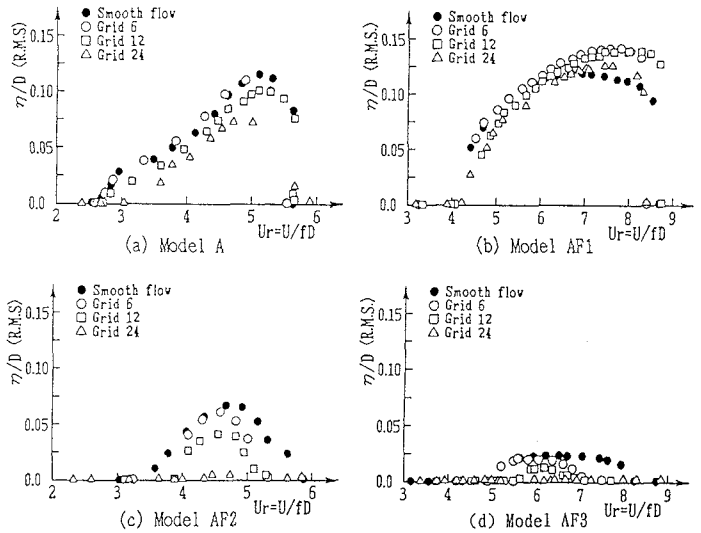


Fig. 4 Response amplitude (A-series models)

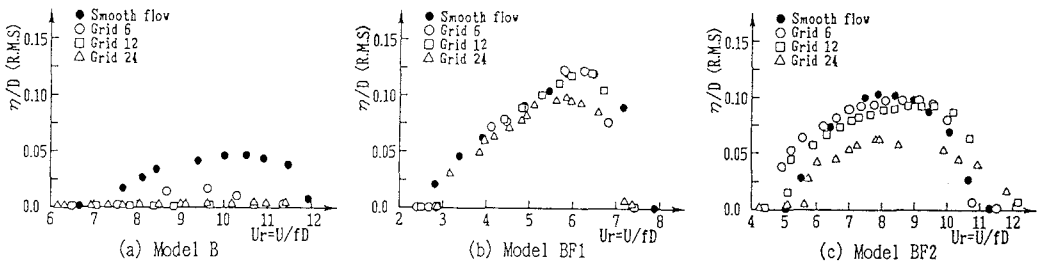


Fig. 5 Response amplitude (B-series models)

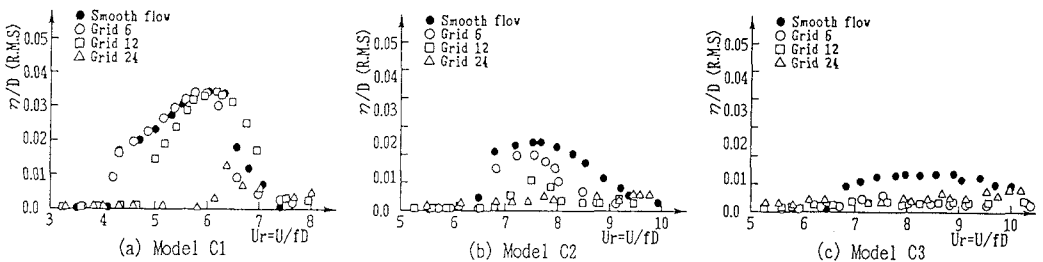


Fig. 6 Response amplitude (C-series models)

2 矩形断面を基本にした偏平六角形断面AF1は、武田ら⁷⁾・

⁸⁾ および鈴木ら⁹⁾ が乱れにより渦励振振幅の増大する結果を報告しているが、本実験結果においても同様の傾向であった。その他の偏平六角形断面 (AF2, AF3) においては乱れにより振幅は低減し、さらに一様流中においてもその振幅がフェアリングなしのA断面の振幅より小さくなることから、渦励振に対するフェアリングの効果が期待できる。

Fig. 5, Fig. 7に示すBF1およびBF2断面はフェアリングを取り付けることにより、基本としたB断面より2倍程度の振幅増加が生じた。また、乱れ強度の増加によりB断面の振幅は急激に減少したが、BF1, BF2 断面は乱流G24のみにて振幅の低下が生じた。以上のことから、B₀/Dおよびフェアリング形状の変化は渦励振に複雑に影響を及ぼし、乱流効果の評価は一律にはできないことが分かる。

Fig. 6, Fig. 7に示す箱桁断面タイプの渦励振に関しては、張り出し部が長くなるにつれて渦励振は高風速側に移りし振幅は減少している。これらの結果は武田ら⁷⁾・⁸⁾ および横山ら¹⁵⁾ の報告と同様の結果を示している。

5. アクティブ制御乱流中における渦励振応答

以上で述べた格子乱流での渦励振応答の結果は、乱れスケールの小さい気流における実験であるため、実際の自然風中における渦励振応答の評価には至っていない。したがって、自然風のような大きな乱れスケールを有する気流における調査が必要となる。ここでは自然風と良く似たスペクトル特性を有する乱流の生成が可能であるアクティブ乱流発生装置を用いて、前章で用いた各断面における渦励振応答を測定し、格子乱流での結果と比較検討する。

5.1 乱流発生装置

著者らは自然風に相似な乱流を風洞内に発生させるために、Fig. 8に示すような平板列および翼列を用いたアクティブな乱流発生装置を開発してきた¹³⁾・¹⁴⁾。Fig. 8において、風路最上流部に設置したのが平板列であり、これを回転変動させることで風路入り口の閉塞率を変化させ、主流方向の気流変動 (u 成分) を制御

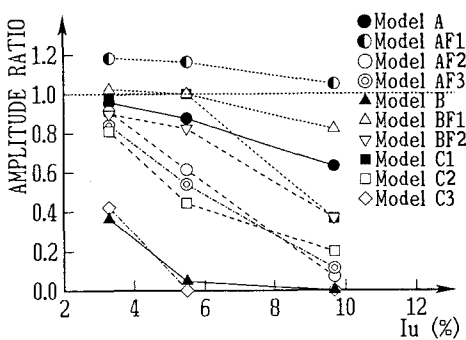


Fig. 7 Amplitude ratio
(in grid-generated turbulences)

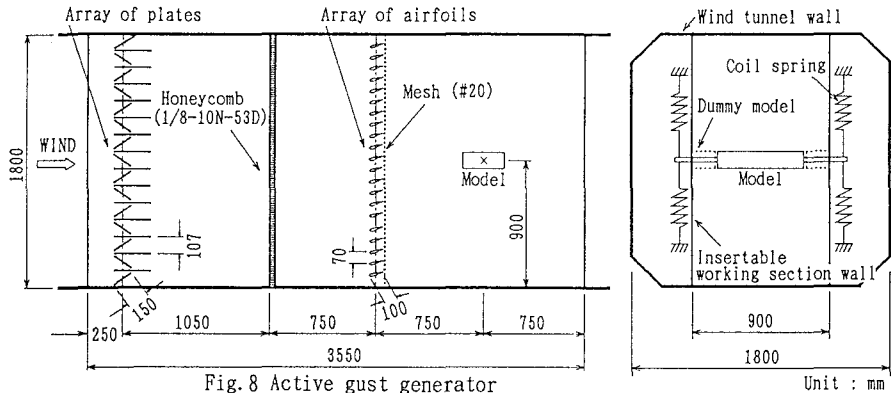


Fig. 8 Active gust generator

Unit : mm

する。また、平板列より1.8m下流側に設置した翼列を回転変動させ気流に傾斜角を与えることで鉛直方向の気流変動（w成分）を制御する。以上の平板列および翼列は、パーソナルコンピュータを用いてランダム制御されるACサーボモータにより駆動した。さらに、平板列の後流側のハニカムは、平板列から生じる余分な剥離渦を整流し、翼列の後流側のメッシュは最終的に余分な気流の高周波成分をカットし、かつ気流の断面内の一様性を確保する目的で設置したものである。シミュレートされた気流は、翼列から0.75m下流の風路断面中央でx型プローブを用いた熱線流速計により測定した。

5.2 アクティブ制御乱流特性

Fig. 9に乱流発生装置を用いてシミュレートした気流の時刻歴の一例を示す。Fig. 2に示した格子乱流のものとは異なり、長周期成分が卓越している。Fig. 10にアクティブ制御乱流の基準化パワースペクトルの一例を示す。図中には乱流シミュレーションの際に目標としたKármánの提案式によるパワースペクトル密度も併記した。10Hz以下の周波数域において、シミュレートされた気流のパワースペクトルはターゲットに比較的良く一致している。10Hz以上の高周波域ではターゲットより大きい値となっている。このような高周波域の乱れの、空力特性に及ぼす影響は未だよく分かっていないが、ここでは基準化パワースペクトルによる表現を用いており高周波域での実際のパワーはかなり小さい。

Table 3にシミュレートした総ての気流の乱流特性値を示す。このように本装置は、それぞれの乱流特性値を独立に幅広く制御でき、格子乱流に比べて1桁大きいスケールの乱流を得ることも可能である。ここで、乱れスケールを変化させる場合、乱れ強度を大きくすると振幅が

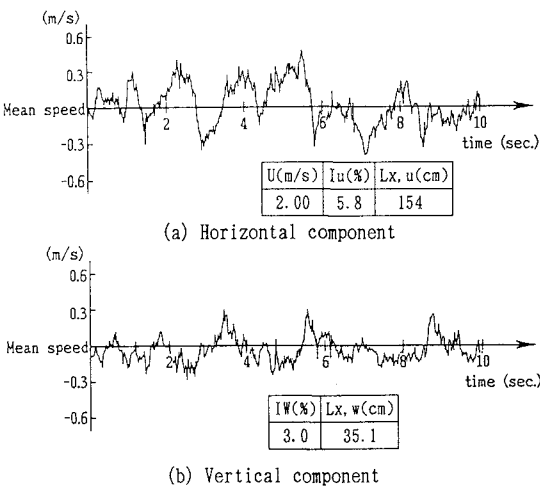


Fig.9 Time series of actively generated turbulence

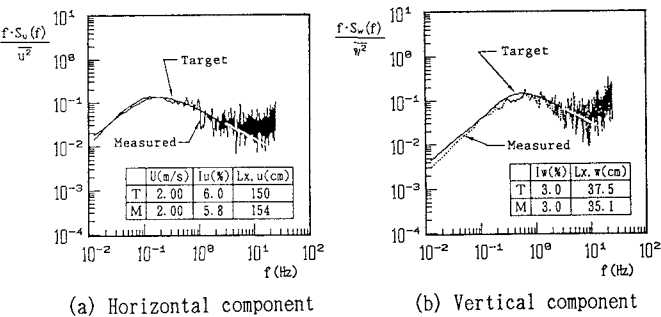


Fig.10 Power spectra of actively generated turbulence

Table 3 Turbulence characteristics of actively simulated flows

Turbulence No.	Change of	Target				Measured			
		I _u (%)	I _w (%)	L _{x, u} (cm)	L _{x, w} (cm)	I _u (%)	I _w (%)	L _{x, u} (cm)	L _{x, w} (cm)
Semi-smooth flow						< 1.5	< 1.5	3	2
TI-04S	I _u I _w	4	2	150	37.5	4.4	2.6	129	26.7
TI-06S*		6	3			5.8	3.3	154	35.1
TI-10S		10	5			9.8	5.4	150	37.6
TSu-05S	L _{x, u}	6	3	50	37.5	5.7	3.3	52	33.4
TSu-15S*				150		5.8	3.3	154	35.1
TSu-35S				350		6.2	3.4	319	35.8
TSw-12S	L _{x, w}	6	3	12.5	150	6.0	3.3	134	12.3
TSw-37S*				37.5		5.8	3.3	154	35.1
TSw-87S				87.5		6.1	3.6	140	76.3

* TI-06S, TSu-15S and TSw-37S are the same turbulences.
**The mean velocity is 2m/s

低減し、乱れスケールの効果を確認することが困難であると予想される。そこで、自然風の乱れ強度の範囲内 $I_u = 4\% \sim 25\%$ で¹⁶⁾ 比較的小さな値 $I_u = 6\%$ 、 $I_w = 3\%$ に設定した。

さらに、本装置の特性として平均風速が増加するにしたがって乱流特性値も増加する傾向がある。ここで用いた乱流特性値に関する変動幅は、 $L_{x,w}$ では20%であり、他の特性値では10%以下であった。また、生成された気流は模型軸方向にかなり高い相関を有し、その変動風速の空間相関係数は主流方向成分がほとんど1、鉛直方向成分が0.8以上であった。

Table 3に示す準一様流とは、平板列および翼列を水平に設定した状態で得られる気流であり、風路内に乱流発生装置を設置しない状態での一様流と区別した。

5.3 渦励振応答

前節での気流測定点に模型をばね支持し、準一様流中およびアクティブ制御乱流中において渦励振応答実験を行った。

5.3.1 乱れ強度の影響

Fig. 11~13は乱れ強度が変化した場合、各断面の応答のV-A曲線を示している。また、乱れ強度の変化による最大振幅比の変化をFig. 14に示す。このとき、乱れスケールは $L_{x,u} = 150$ cm、 $L_{x,w} = 37.5$ cmであった。

Fig. 11(b)は、前章の格子乱流中において、乱れにより振幅が増大した断面AF1のV-A曲

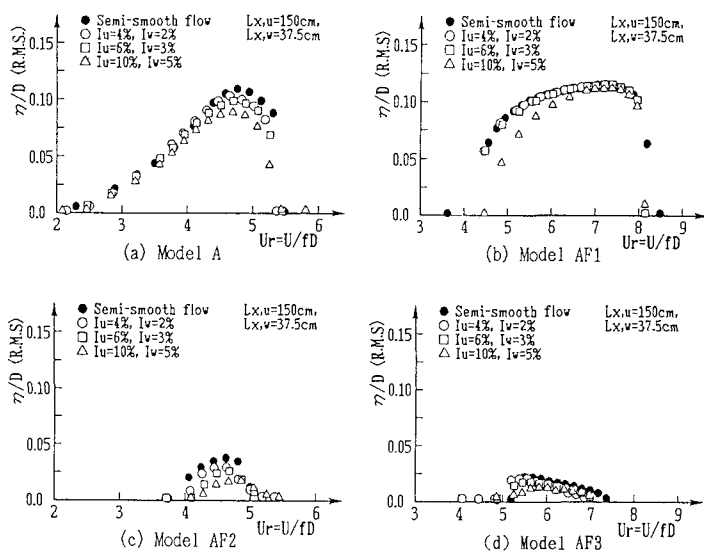


Fig. 11 Response amplitude (A-series models)

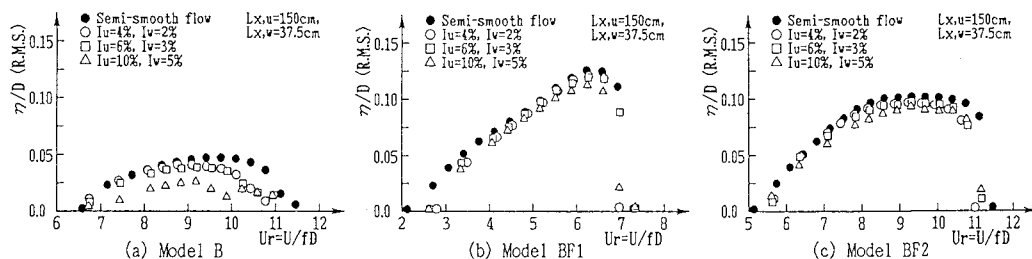


Fig. 12 Response amplitude (B-series models)

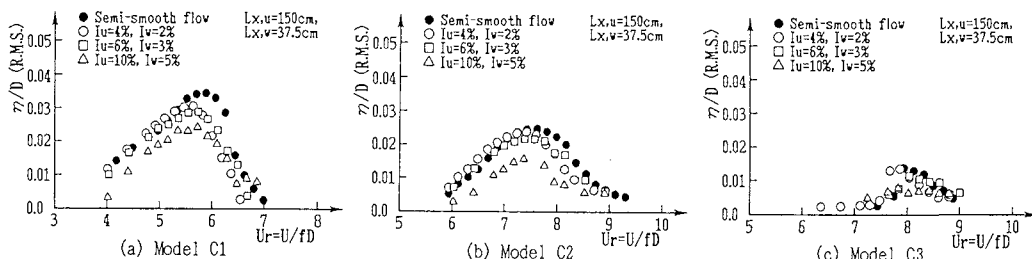


Fig. 13 Response amplitude (C-series models)

線を示しているが、格子乱流の結果と比べ振幅増加率の小さいことが分かる。これは、両者で用いた気流の乱れのスペクトル特性の違い起因するものと考えられる。Fig. 14(b), (c)より、 I_u が10%まで増加しても断面BF1, BF2の振幅はほとんど変化しないことが分かる。また、その他の断面においては格子乱流中での傾向と同様であったが、振幅比が格子乱流に比べ大きくなっている。

これらの結果は自然風と同様のスペクトル形状を有する気流を用いて得られたものである。自然風とはかなり異なるスペクトル形状の格子乱流中での結果をそのまま耐風設計に適用するのは一考を要する。

5.3.2 主流方向乱れスケールの影響

主流方向の乱れスケールを変化させたときの最大振幅比の変化をFig. 15に示す。このとき、乱れ強度は $I_u=6\%$ ($I_w=I_u/2$)、鉛直方向乱れスケール $L_{x,w}$ は37.5cmであった。Fig. 15より、ここで用いた総ての断面において主流方向スケールの変化による最大振幅比の変化はほとんど認められなかった。

5.3.3 鉛直方向乱れスケールの影響

鉛直方向の乱れスケールを変化させたときの最大振幅比の変化をFig. 16に示す。ここでも、他の特性値は乱れ強度 $I_u=6\%$ ($I_w=I_u/2$)、主流方向乱れスケール $L_{x,u}=150\text{cm}$ を保持した。Fig. 16(b)より、辺長比5のB断面は鉛直スケールの増加に伴って、振幅比の増大することが分かる¹⁴⁾。また、Fig. 16(c)より、C3断面の場合はスケールの増加と共に振幅が増大しているが、その振幅が小さいので ($\eta/D<0.02$)、スケールの効果に関する明確な判断が困難である。その他の断面については、鉛直スケールの変化による影響をほとんど受けないことが分かる。

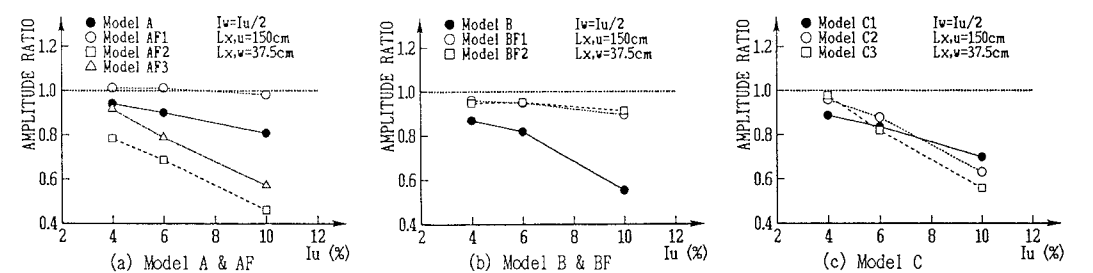


Fig. 14 Amplitude ratio vs. turbulence intensity

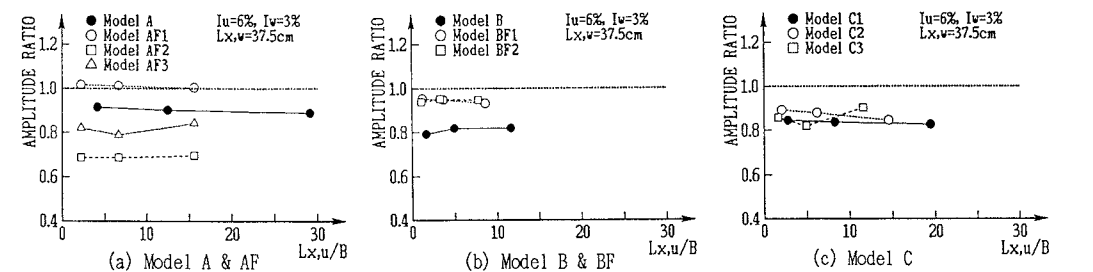


Fig. 15 Amplitude ratio vs. horizontal scale

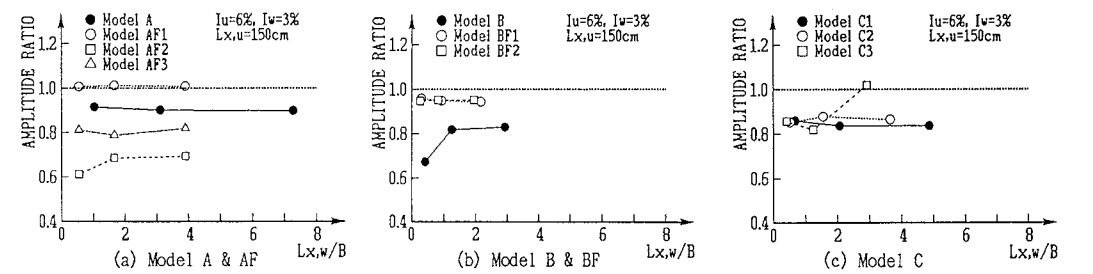


Fig. 16 Amplitude ratio vs. vertical scale

6. 結論

- 1) 乱流中における橋桁基本断面の渦励振現象に着目して、乱れの存在によって振幅が増大する断面、減少する断面および変化のない断面に着目して、10種類の断面を選定し、格子乱流およびアクティブ制御乱流中における乱れの影響を一樣流中での渦励振最大振幅と比較して評価した。
- 2) 格子乱流において、偏平6角形断面AF1は乱れの存在によって渦励振最大振幅が増大したが、フェアリングの形状を変化させたAF2、AF3断面は振幅が低下した。辺長比5のB断面は乱れの影響を強く受け乱れ強度の増加に伴い急激に振幅が低下した。その断面にフェアリングを取り付けたBF1、BF2断面の場合は、乱流中での振幅が一樣流中とほぼ同じで乱れの影響を受けないことが分かった。また、箱桁断面C1～C3断面は乱れによって振幅が低下し、張り出し部が長くなるほどこの傾向の著しいことが分かった。
- 3) アクティブ制御乱流中における渦励振応答実験より次のことが分かった。
 - a) 各断面における乱れ強度の変化による渦励振応答は、格子乱流での結果と同様な傾向であったが、乱れによって振幅が増大する断面AF1の最大振幅比は格子乱流での結果より小さく、また振幅の減少する断面の振幅比は格子乱流中より大きくなった。これは、両者で用いた気流の乱れのパワースペクトル形状の違いに起因するものと考えられる。
 - b) 主流方向の乱れスケールが最大振幅比に及ぼす影響はほとんど認められなかった。
 - c) 鉛直方向スケールの増加は辺長比5のB断面の振幅比を増加させたが、その他の断面にはほとんど影響を及ぼさなかった。

今回は、乱れの渦励振振幅に及ぼす影響に関して現象のみを報告した。渦励振発生メカニズムを考慮した乱れの影響に関する考察は今後の課題とする。

参 考 文 献

- 1) 横山功一・佐藤弘史・福田 誠：自然風を考慮した橋の耐風性調査報告書，土木研究所資料，第2260号，1985.10.
- 2) 西尾一郎・小林紘士：格子乱流中における辺長比の異なる角柱の渦励振に関する実験的研究，土木学会第42回年次学術講演会講演概要集，I-301，1987.9.
- 3) 岸上岩樹・小松定夫・小林紘士：格子乱流中の角柱に作用する圧力特性の解析，昭和61年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，I-39，1986.5.
- 4) 中神陽一・山本邦夫：タウトモデルを用いた一樣流中および乱流中での角柱の応答，土木学会第38回年次学術講演会講演概要集，I-285，1983.9.
- 5) 橋本光行・武田勝昭：渦励振に及ぼす気流の乱れ効果に関する一考察，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集，I-344，1986.11.
- 6) 本田明弘・白石成人・松本 勝：渦励振に及ぼす乱流効果についての実験的研究，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集，I-244，1982.10.
- 7) 武田勝昭・園部好洋：気流の乱れ強度と渦励振振幅，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集，I-278，1984.10.
- 8) 武田勝昭：構造基本断面の空力特性（その3），日本風工学会誌，第39号，pp.19-26，1989.4.
- 9) 鈴木利彦・樋上琇一：乱流特性と渦励振応答振幅の関係について，土木学会第40回年次学術講演会講演概要集，I-223，1985.9.

- 10) 武田勝昭・園部好洋：気流の乱れスケールと渦励振振幅，土木学会第40回年次学術講演会講演概要集，I-221，1985. 9.
- 11) 森 武雄：格子により自然風に相似な風洞流を作る試み，第5回構造物の耐風性に関するシンポジウム論文集，pp. 275-281，1978. 12.
- 12) Cermak, J. E., Bienkiewicz, B. and Peterka, J. A. : Active Modeling of Turbulence for Wind-Tunnel Studies of Bridge Models, Federal Highway Administration Report No. FHWA/RD-82/148, 1983. 2.
- 13) 小林紘士・川谷充郎・太田 圭・畑中章秀：スケールの大きい乱流中における2次元角柱の渦励振応答，構造工学論文集，Vol. 35A, pp. 811-816, 1989. 3.
- 14) 小林紘士・川谷充郎・金 熙恵・太田 圭・上島秀作：2次元角柱の渦励振応答に及ぼす乱流特性の影響，第11回風工学シンポジウム論文集，pp. 167-172, 1990. 12.
- 15) 横山功一・中神陽一・福富孝康：一樣流中および乱流中における箱桁断面の空力特性調査，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集，I-340，1986. 11.
- 16) 小松定夫・小林紘士・川谷充郎・亀井正博：大阪北港における自然風の諸特性について，第9回風工学シンポジウム論文集，pp. 13-18, 1986. 12.

(1991年 9 月30日受付)