

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特性

VORTEX-INDUCED OSCILLATION OF
TWO DIMENSIONAL RECTANGULAR CYLINDERS IN LARGE SCALE TURBULENCE

小林 紘士*・川谷 充郎**・太田 圭***・畑中 章秀****

By Hiroshi KOBAYASHI, Mitsuo KAWATANI, Kei OTA and Akihide HATANAKA

This paper investigates the aerodynamic response, in particular the vortex-induced oscillation, of two dimensional rectangular cylinders with aspect ratios of 2.5 and 5 in the turbulent flow with a large scale. The turbulent flow is generated by active airfoils and plates. The scale of turbulent flow through the active gust generator is approximately one order larger than the scale of turbulence through a passive grid. The effect of the scale of turbulence on vortex-induced oscillation is investigated.

1. まえがき

構造物の耐風安定性の照査は、いまなお風洞実験に依るところが大きい。通常、風洞内の空気の流れは乱れの無い様な流れとし、耐風安定性の照査実験は一樣流中で行われる場合が多い。しかし、ここ数年自然風の乱流構造が明らかにされ、また風洞内に乱流を発生させる種々の技術が開発されてくるに伴い、乱流中における模型の応答実験が行われるようになってきている。この結果、一樣流中と乱流中では模型の応答に違いのあることが確認されている。構造物の風による動的応答を評価する上で乱れの影響を十分に把握することが重要である。乱れを表すパラメータのうち、乱れ強度については渦励振に及ぼす振幅低減効果^{1), 2)}や高風速の応答に影響を及ぼすという報告がなされている。しかし、乱れスケールの影響という点については、これまでになされた報告はその変動範囲が小さく^{2), 3)}、未だ不明確な点が残されている。これは、実際の自然風にみられるような大きな乱れスケールを有する乱流を風洞内に再現することが困難なためであると思われる。

風洞内に乱流を生成する方法には、大きく分けて2種類の方法がある。1つは、格子や粗度ブロック・スパイヤーを用いたパッシブな方法である^{4), 5)}。この方法は、比較的簡単に乱流を生成することが可能であるという利点がある。しかしその反面、格子による乱流では、自然風にみられるような大きな乱れスケールを有する乱流を再現することが困難である。また粗度ブロックやスパイヤーを用いた境界層乱流は、境界層

* 工博 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)

** 工博 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 工学研究科土木工学専攻前期課程 (〒565 吹田市山田丘 2-1)

**** 立命館大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒603 京都市北区等持院北町)

を発達させるのに十分に長い測定風路が必要であるという欠点を持つ。もう1つの方法は、翼列などのアクティブな乱流発生装置を用いる方法である^{6), 7)}。この方法は、短風路風洞において大きな乱れスケールを有する乱流の再現が可能であるとされている。

そこで本研究においては、第1にアクティブな乱流発生装置を用いて風洞内に乱流を発生させる。第2にその乱流中において辺長比1:2.5 と1:5 の2次元角柱の渦励振振幅を測定し、渦励振に及ぼす乱れの影響を調査する。

2. 乱流シミュレーション実験

2.1 実験装置

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。その風路内に隔壁を用いて、新たに図-1に示すように幅0.9m、高さ1.8m、長さ3.1mの測定風路を設けた。この風路の上流端に翼列を設置し、下流端に平板列を設置した。これらの翼列を図-2に示すように、上流側翼列を総て同位相に回転変動させることにより、気流に傾斜角を与えて鉛直方向成分(w成分)の乱れを制御した。また、後流側平板列を回転変動させ、風路の閉塞率を変化させて主流方向成分(u成分)の乱れを制御した。翼列および平板列はACサーボモータにより駆動し、パーソナルコンピュータによりランダム制御した。シミュレートされた乱流の気流特性は、翼列から1.5m下流の風路断面中央でx型プロブにより測定した。

2.2 乱流シミュレーション方法

乱流シミュレーションは、自然風のパワースペクトル形状を式(1)、(2)に示すKármánの式で近似されるものとし、平均風速、乱れ強度および乱れスケールを与えてパワースペクトル形状を定め、測定された気流のパワースペクトル形状がこれと適合することを目指した。

$$S_u(f) = 4 I_u^2 \bar{U} L_{x,u} \frac{1}{\left[1 + 70.8 \left(\frac{f L_{x,u}}{\bar{U}} \right)^2\right]^{5/6}} \quad (1)$$

$$S_w(f) = 4 I_w^2 \bar{U} L_{x,w} \frac{1 + 755.2 \left(\frac{f L_{x,w}}{\bar{U}} \right)^2}{\left[1 + 283.2 \left(\frac{f L_{x,w}}{\bar{U}} \right)^2\right]^{11/6}} \quad (2)$$

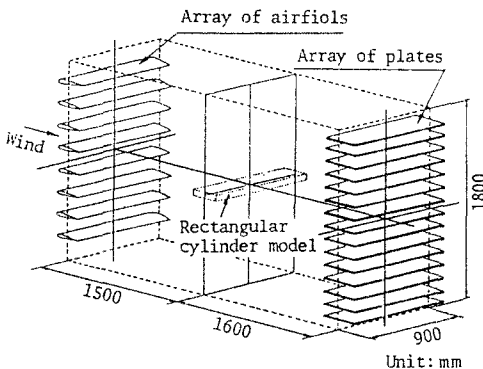


図-1 測定風路

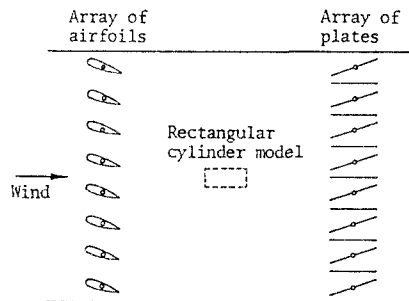


図-2 翼列および平板列

ここで、 $S_u(f)$ ：主流方向気流変動のパワースペクトル密度関数、

$S_w(f)$ ：鉛直方向気流変動のパワースペクトル密度関数、

f ：周波数 (Hz)、

$\bar{U}$ ：主流方向平均風速 (m/s)、

$L_{x,u}$ ：u成分乱れスケール (m)、

$L_{x,w}$ ：w成分乱れスケール (m)、

I_u ：u成分乱れ強度、

I_w ：w成分乱れ強度。

目標とするパワースペクトル (Kármánの式) から逆フーリエ変換を利用して時系列データを作成し、更にそれを翼列および平板列の制御電圧に換算した。まず、この制御電圧により翼列および平板列を駆動させ、その結果得られた気流のパワースペクトルと目標パワースペクトルとを比較する。次にこの比を利用して制御電圧に補正を施し、新たな制御データを与える。これを繰り返すことにより最終的に目標とするパワースペクトル形状に適合する乱流をシミュレートする。

2.3 乱流シミュレーション結果

測定された気流のパワースペクトルの一例を、図-3に示す。目標としたKármánの式によるパワースペクトルも併記した。本システムにより得られた乱れの主流方向成分、鉛直方向成分共に低周波数領域においては、目標パワースペクトル (Kármánの式) と比較的良好に適合しており、スペクトルピークもほぼ一致した。

しかし、高周波数領域において測定されたパワースペクトルが目標パワースペクトルより大きくなっているが、これは、上流側翼列からの剥離流によるものと考えられる。また、図-3の表に示される乱流特性の測定値は目標値と約20%の差異があるが、翼列・平板列の制御電圧の補正を3回以上繰り返しても、目標値への収束性はこれ以上改善されなかった²⁾。

本シミュレーションによって得られた乱流特性の測定値を表-1に掲げる。得られた乱流の乱れスケールは、u成分のみ制御した場合には $L_{x,u}=35\sim 259\text{cm}$ (模型の縮尺を1/50と仮定し、実風に換算すると、17.5~130m)、w成分制御の場合は $L_{x,w}=19\sim 69\text{cm}$ (同じく、9.5~35m) であった。

図-1および2に示すように、測定胴の下流に設置した平板列により主流方向の気流変動を制御したとき、風洞内圧が変化する。そこで、測定部の総圧を風洞外の大气静圧を基準として測定した。総圧の基準化パワースペ

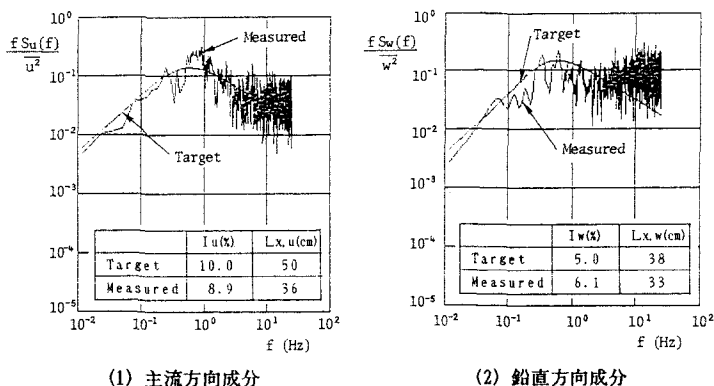


図-3 気流変動の基準化パワースペクトル

表-1 乱流特性

Turbulence	Changing of	I_u (%)	I_w (%)	$L_{x,u}$ (cm)	$L_{x,w}$ (cm)
A	Lx, u	10.9	6.4	35.3	37.5
B		10.1	6.1	87.9	21.2
C		10.1	5.9	121.8	42.9
D		10.9	5.3	225.3	40.9
E		12.3	5.6	259.1	47.4
1	Lx, w	3.1	4.4	8.2	19.3
2		3.9	5.1	16.9	47.6
3		3.9	5.1	18.8	68.5
a	Lx, u	5.9	3.4	34.6	32.2
b		7.0	3.9	122.7	32.6
c		6.4	3.5	185.2	36.3
d		7.5	3.9	194.7	34.7
e		6.7	3.3	268.9	32.5
f	Iu & Iw	5.7	3.5	88.0	22.5
g		8.6	4.6	117.2	33.4
h	Iu & Iw	6.0	3.6	119.5	26.2
i		9.4	4.6	209.7	36.2

クトルを風速の水平成分の基準化パワースペクトルと共に図-4に示す。図から分かるように、測定部の総圧は風速変動に比べて相対的に高周波数成分のパワーが大きくなっており、下流側の平板列による制御の影響が現れているものと考えられる。

3. 角柱の渦励振応答

3.1 実験装置

図-1 および 2 に示すように、翼列の下流 1.5m の測定風路断面中央に、2 次元角柱を設置した。隔壁近傍の境界層を考慮し、角柱の両端に長さ 12 cm のダミー角柱を設けた。この角柱を図-5 に示すように、長辺が気流と平行となるように 1 自由度系にばね支持し、シミュレートされた乱流中において、気流直角方向の並進振動の渦励振に着目した応答実験を行った。

本研究では、角柱の辺長比（高さ D：幅 B）が 1:2.5 と 1:5 の 2 種類の角柱を用いて、辺長比の違いによる乱れの影響について調査を行った。辺長比 1:2.5 の角柱は前縁から剥離した流れの再付着しない断面として選ばれ、辺長比 1:5 の角柱は再付着型断面として選ばれた。使用した角柱の構造諸元を表-2 に掲げる。

3.2 実験結果

前節で得られた乱流中において応答実験を行い、渦励振の振幅（rms 値）を測定した。気流の乱れによる振幅の低減効果を次式で評価した。

$$\text{振幅低減比: } R\eta = \frac{\eta_{\text{tur}}}{\eta_{\text{smooth}}} \quad (3)$$

ここで、 η_{tur} 、 η_{smooth} はそれぞれ乱流中および一様流中での渦励振振幅（rms 値）を示す。

(1) 主流方向成分の乱れスケールの渦励振に及ぼす影響

主流方向の乱れスケール $L_{x,u}$ の変化による渦励振振幅の変化を図-6 に示す。この場合、乱れを表す他のパラメータの目標値はそれぞれ乱れ強度 $I_u=10.0\%$ 、 $I_w=5.0\%$ 、乱れスケール $L_{x,w}=37.5\text{cm}$ に固定した。図-6 (1) より、辺長比 1:2.5 の角柱では、 $L_{x,u}$ が変化しても $R\eta$ は、0.8 近傍でほとんど変化していないことが分かる。また、図-6 (2) に示すように辺長比が 1:5 の場合では、目標乱れ強度 $I_u=10.0\%$ 、 $I_w=5.0\%$ のとき、渦励振振幅が極端に減少してしまうため、 $I_u=6.0\%$ 、 $I_w=3.0\%$ のときの応答についても調べた。辺長比 1:5 の角柱に対しても $L_{x,u}$ の $R\eta$ に及ぼす影響はほとんど無いことが分かる。

(2) 鉛直方向成分の乱れスケールの渦励振に及ぼす影響

鉛直方向成分の乱れスケール $L_{x,w}$ の変化による渦励振振幅の変化を図-7 に示す。この場合、乱れを表

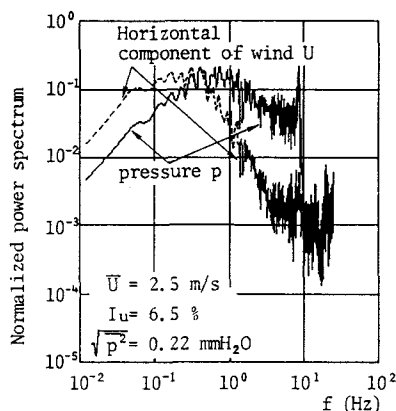


図-4 測定部の総圧変動の基準化パワースペクトル

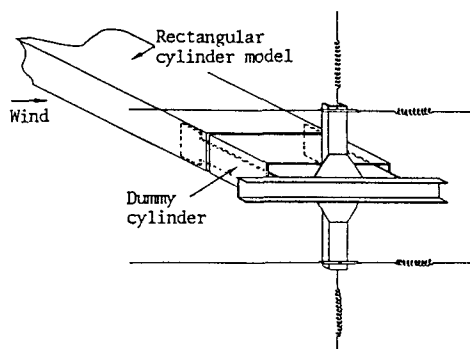
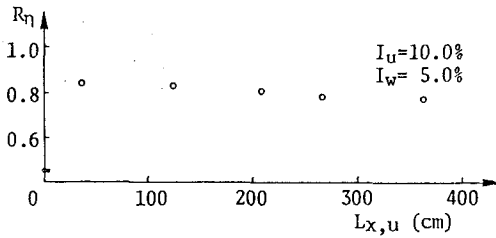


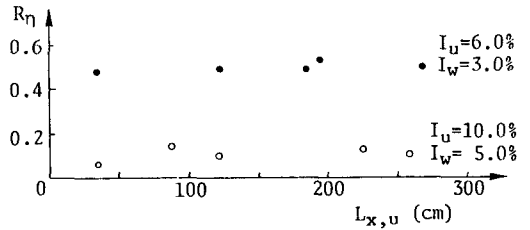
図-5 角柱支持系

表-2 角柱模型の構造諸元

Aspect ratio	1:2.5	1:5
Height (D)×Width (B)×Length (L) (cm)	6×15×66	6×30×66
Weight (kg)	2.52	3.84
Natural frequency (Hz)	5.00	2.92
Logarithmic decrement ($\eta=B/200$)	0.005	0.005

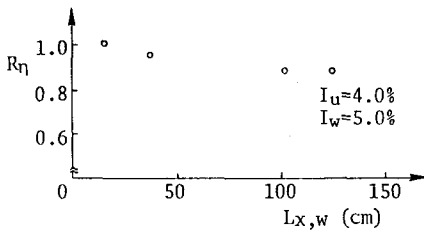


(1) 辺長比 1:2.5

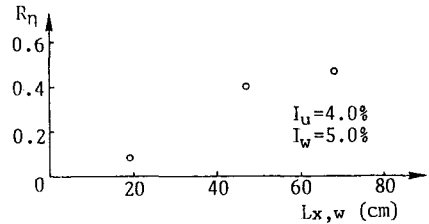


(2) 辺長比 1:5

図-6 主流方向成分の乱れスケールによる振幅低減効果



(1) 辺長比 1:2.5



(2) 辺長比 1:5

図-7 鉛直方向成分の乱れスケールによる振幅低減効果

その他のパラメータの目標値は、それぞれ乱れ強度 $I_u = 4.0\%$ 、 $I_w = 5.0\%$ に固定した。

$L_{x,u}$ は $L_{x,w}$ と共に変化しているが、前項の結果により、 $L_{x,u}$ の渦励振振幅に及ぼす影響はほとんど無いものと判断した。図-7

(1) より、辺長比 1:2.5 の角柱に対しては、 R_η に及ぼす $L_{x,w}$ の影響がほとんど見られなかった。しかし、図-7 (2) より、辺長比 1:5 の角柱に対しては、 $L_{x,w}$ の減少に伴い

R_η の減少することが分かる。このように鉛直方向成分の乱れスケール $L_{x,w}$ の渦励振振幅に及ぼす影響が、角柱の辺長比によって異なる要因として、それぞれの角柱の渦励振振幅の違い（比 1:2.5 では $\eta_{\max}/D = 0.07$ 、比 1:5 で $\eta_{\max}/D = 0.05$ ）、カルマン渦共振の含まれない振動（比 1:2.5）と含まれる振動（比 1:5）との違い、前縁剥離渦の挙動の差などが考えられ、結論を得るには、さらに多くのデータを要する。なお、辺長比 1:2 と 1:4 の角柱を比較し、辺長比の大きい角柱の方が乱れの影響を受け易いことは、松本・白石・白土 他⁹⁾ も明らかにしている。

(3) 乱れ強度の渦励振に及ぼす影響

辺長比 1:5 の角柱について、乱れ強度の変化による渦励振振幅の変化を図-8 に示す。この場合、乱れ強度は $I_w = 0.5 \times I_u$ となるようにした。乱れスケールの目標値は $L_{x,w} = 37.5 \text{ cm}$ に固定し、 $L_{x,u}$ の目標値が 100 cm と 200 cm の場合について実験を行った。この図より、辺長比 1:5 の場合は、乱れ強度の増加に伴い R_η は大幅に減少することがわかる。辺長比 1:2.5 の角柱の場合は、格子乱流を用いて乱れ強度の渦励振振幅に及ぼす影響をすでに調べた²⁾。それによると、やはり乱れ強度の増加に伴い R_η は減少するものの、辺長比 1:5 の角柱ほど大幅な振幅低減は起こっていない。

また、図-8 においても $L_{x,u}$ が渦励振振幅に及ぼす影響の認められないことが確認できる。

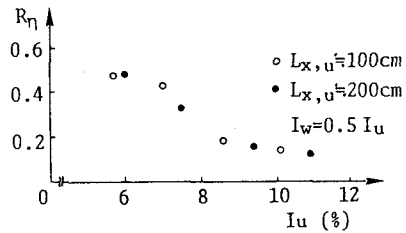


図-8 乱れ強度による振幅低減効果 (辺長比 1:5)

4. 結 論

ゲッティンゲン型風洞において、翼列および平板列を用いて乱流シミュレーションを行い、得られた乱流中で2次元角柱の渦励振振幅に着目した応答実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 翼列および平板列をランダム制御することにより、格子乱流に比べ1桁大きい乱れスケールを有する乱流をシミュレートすることが出来た。また、得られた乱流のパワースペクトルは、高周波数領域を除いて目標としたKármánの式によるパワースペクトルと良く適合した。
- 2) 主流方向成分の乱れスケール $L_{x,u}$ は、辺長比1:2.5および1:5のどちらの2次元角柱の渦励振振幅に対しても、影響をほとんど及ぼさない。
- 3) 鉛直方向成分の乱れスケール $L_{x,w}$ は、辺長比1:2.5の角柱の渦励振に対しては、ほとんど影響を及ぼさないが、辺長比1:5の角柱に対しては、 $L_{x,w}$ の減少に伴い振幅低減効果がある。
- 4) 辺長比1:5の角柱については、乱れ強度の増加に伴い渦励振振幅が低減する。その低減効果は辺長比1:2.5の場合よりも大である。

なお、図-3に示すように、気流の高周波数領域におけるパワースペクトルが目標値よりも大きくなることの、角柱の応答に及ぼす影響については、今後検討を要するものとする。

謝辞 本研究の一部には、昭和62～63年度の文部省科学研究費補助金（一般研究B，課題番号62460151）の交付を受けた。記して謝意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) 武田勝昭・園部好洋：気流の乱れ強度と渦励振応答振幅，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集，I-278，1984.10.
- 2) 中出 収・小林紘士・川谷充郎：角柱の渦励振に及ぼす乱れの影響，土木学会第42回年次学術講演会講演概要集，I-300，1987.9.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 本村超多郎・久保善延・木谷博文・加藤九州男：自然風のシミュレーションと強風特性について，土木学会第43回年次学術講演会講演概要集，I-357，1988.10.
- 6) 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.
- 7) 渡辺洋八郎・斉藤 通・坂田 弘・本田明弘・稲室隆二：橋梁の耐風安定性（その1）－実験解析編－，三菱重工技報，Vol.24, No.4, pp.316-325, 1987.7.
- 8) 小林紘士・川谷充郎・中出収・野村浩史・太田圭・畑中章秀：2次元風洞におけるスケールの大きい乱流の発生，第10回風工学シンポジウム論文集，pp.163-168，1988.12.
- 9) 松本 勝・白石成人・白土博通・真下義章・湯川雅之・平井滋人：各種空力振動現象に及ぼす乱れの影響，第10回風工学シンポジウム論文集，pp.115-120，1988.12.

（1988年10月12日受付）