

小スケール乱流相似による矩形断面周り流れの相似に関する研究

Study on effects of small-scale turbulence on flow patterns around rectangular cylinder

勝地 弘*, 山田 均**

Hiroshi Katsuchi and Hitoshi Yamada

*博(工), 横浜国立大学教授, 大学院工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

**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 79-7)

Flow patterns around a bluff body are governed by small-scale turbulence and simulation of large-scale turbulence in a wind tunnel is often difficult. An idea of partial simulation of turbulence that simulates the normalized PSD in a high-frequency part was recently suggested. In this study, the idea of the partial simulation of turbulence was experimentally investigated. Base pressure coefficient and Karman vortex intensity of rectangular cylinders with various slenderness ratios were compared for pairs of turbulences partially simulated. The result showed that the base pressure coefficient at and larger than the critical slenderness ratio fairly agrees among the partially-simulated turbulence pairs. However, Karman vortex intensity was not simulated in the partially-simulated turbulence pairs.

Key Words: Small-scale turbulence, partial simulation, base pressure, wind-tunnel test

キーワード: 小スケール乱流, 部分乱流相似, 風洞試験

1. はじめに

Bluff な断面の空力振動特性は、断面周りの剥離流れの状況に支配される。その剥離流れの状況は、接近流の乱れに大きく左右されるため、風洞試験によって空力振動特性の調査を行う際には、乱流特性を適切に相似する必要がある。しかしながら、Bluff な断面の空力振動特性への乱流の影響は十分には理解されていない。また、風洞試験において、自然風の乱流特性を完全に相似することは事実上不可能である。このようなことから、風洞試験においては、乱流特性のうち、乱れ強さを選択的に相似することが一般的に行われている。

構造物への乱れの影響には、小スケールと大スケールの2種類のものがあると言われている¹⁾。ここで、小スケールとは、乱れスケールが剥離せん断層と同程度のスケールで、構造物代表長さの1/10程度のもを指し、大スケールとは、構造物代表長さと同程度の乱れスケールを指す。このうち、小スケール乱れ成分は、Bluff な断面周りの剥離せん断層の連行作用を強める効果を持ち、背圧や臨界辺長比に影響を及ぼす。一方、大スケール乱れ成分は、矩

形柱に対して、カルマン渦放出周波数でのスパン方向コヒーレンスを低下させ、カルマン渦を弱める効果を持つ。

風洞試験においては、乱流の大スケール成分の相似は一般には難しく、また、大スケール成分のパワーは自然風のそれよりも小さくなる場合がほとんどであることから、大スケール成分が非相似でも実務的には安全側の評価となる。それゆえ、構造物の空力振動を風洞試験によって調査する際には、乱流成分のうち小スケール成分(パワースペクトル密度の高周波数成分)を相似することが1つの方法となり得る。実際、Irwin は橋桁の渦励振を風洞試験によって評価する際に、小スケール領域の乱流強度を相似した気流を用いることが可能であるとの研究成果を示すとともに^{2), 3)}、実橋での渦励振観測結果で検証を試みた事例もある⁴⁾。

本研究では、風洞試験により、この乱流の小スケール成分相似法あるいは部分乱流相似法(Partial simulation)の適用性を検討する。具体的には、小スケール乱れ成分を相似させた乱流と相似させない乱流中において、種々の断面辺長比を持つ矩形断面柱を用い、風洞試験によって背圧特性、後流特性

を調査することで、矩形断面周りの流れ特性に及ぼす小スケール乱れの効果を比較検討する。

2. 部分乱流相似法（小スケール乱流相似法）

乱流の相似においては、乱流のパワースペクトル密度を全周波数領域において完全に相似することが必要となるが、実際は風洞設備の大きさなどの制約により、風洞内に再現される乱流の乱れスケールは、自然風のそれよりもかなり小さなものとなる。それゆえ、風洞内に大スケールの乱流を再現することは非常に困難となる。

小スケール乱れ成分は、Bluff な断面周りの流れに影響を及ぼすことから、その空力振動特性を左右する。一方、大スケール乱れ成分は、平均風速変動を生じさせ、カルマン渦放出周波数での流れ直角方向のコヒーレンスを低減する。したがって、風洞試験における大スケール乱れ成分の非相似（ほとんどの場合は、低パワー）は、実務的には安全側の評価となる。これらのことから、風洞試験において乱流成分のうち小スケール乱れ成分を相似して、構造物の空力振動を評価することが 1 つの合理的な手法となり得る。

ここで、式(1)に示すようなカルマン型のパワースペクトル密度を仮定し、小スケール乱れ成分（高周波数成分）の相似を考えると、相似に必要な要件が式(2)のように与えられる。これによれば、風洞試験における構造物のスケールに対する乱れスケールの比 $(L_u^x/D)_m$ が実橋よりも 1 桁小さい場合には、相似要件として風洞試験における乱れ強さが実橋のそれのおおよそ半分となることが分かる（図-1 参照）。このような相似要件（部分乱流相似）は、Irwin によって提案され^{2), 3)}、実橋の渦励振観測結果に対して適用性が検証されている⁴⁾。

$$\frac{fS_u}{\sigma_u^2} = \frac{4 \frac{fL_u^x}{U}}{\left(1 + 70.8 \left(\frac{fL_u^x}{U}\right)^2\right)^{5/6}} \quad (1)$$

$$\frac{(I_u)_m}{(I_u)_p} = \left(\frac{(L_u^x/D)_m}{(L_u^x/D)_p}\right)^{1/3} \quad (2)$$

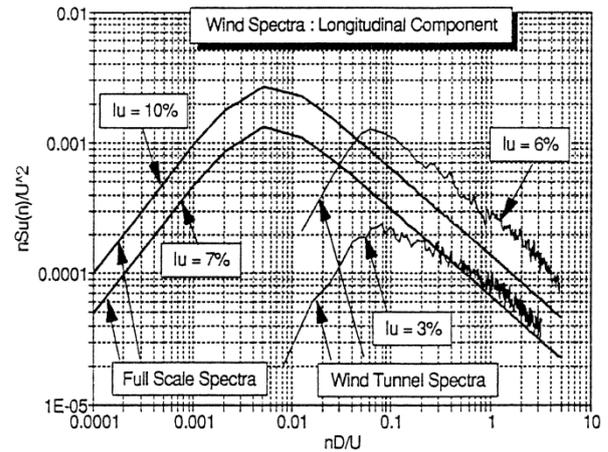


図-1 乱流の小スケール乱れ成分の相似概念²⁾

この部分乱流相似の相似要件を検証するために、本研究においては、種々の乱れ強さ、乱れスケールを持つ乱流を生成し、その中から小スケール乱れ成分が相似されている乱流、相似されない乱流を選び出し、矩形断面柱周りの流れ特性の調査を行った。ここで、空力振動を直接の計測対象とせず背圧特性を比較することとしたのは、Bluff な断面周りの流れ特性が背圧によって端的に代表されることから、空力振動特性よりも直接的かつ敏感な指標となり得ると考えたためである。さらに、カルマン渦強度の観点から検討を行うために、矩形断面柱の後流特性も比較することとした。

3. 背圧特性による検討

3. 1 小スケール乱れ成分相似の乱流

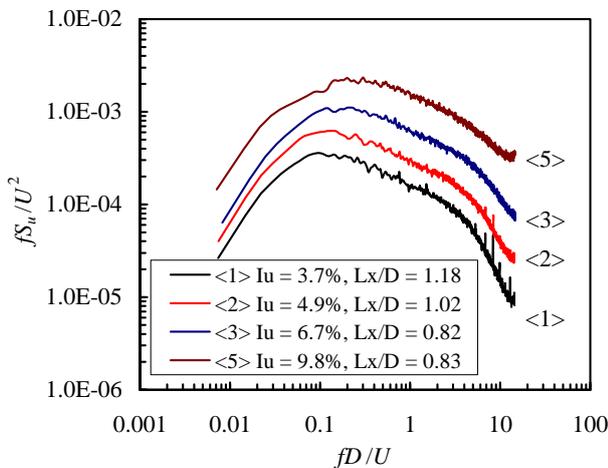
風洞試験は、横浜国立大学所有の開放型風洞を用いて実施した。測定部の寸法は、幅 1.3m、高さ 1.8m である。乱流は、異なる大きさの格子と、格子と模型までの距離を変えることで、種々の乱れ強さ、乱れスケールを持つ乱流を生成した。さらに、異なる高さ $(D = 3, 6, 9 \text{ cm})$ の矩形断面模型を用いることで、より広い乱れスケール比が実現できるようにした。表-1 に試験に用いた乱流の特性を、また図-2 にそれぞれのパワースペクトル密度を示す。乱流特性は、熱線風速計を用いて、サンプリング周波数 2,000Hz、サンプリング時間 300 秒で計測を行った。

図-2 (a)は、このうち異なる乱れ強さにおいて検討を行う場合の組み合わせ、図-2 (b)は、小スケール乱れ成分が一致した乱流において検討を行う場合の組み合わせである。

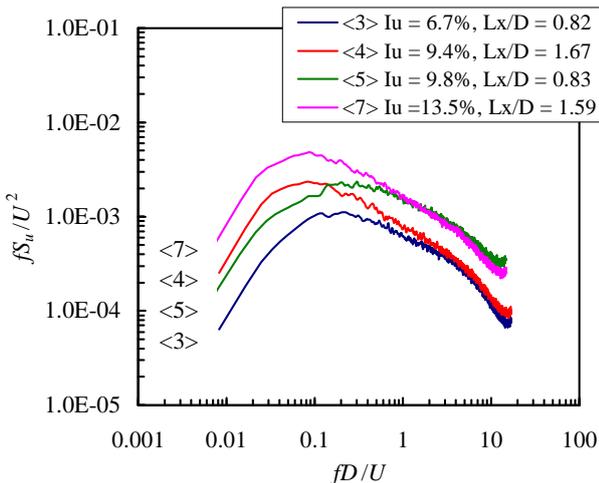
表-1 用いた乱流の特性

乱れ強さ I_u (%)	乱れスケール L_x (cm)	乱れスケール比 (L_x/D)		
		$D = 3\text{cm}$	$D = 6\text{cm}$	$D = 9\text{cm}$
3.7	10.6	3.53	1.77	1.18 <1>
4.9	9.2	3.07	1.53	1.02 <2>
6.7	7.4	2.47	1.23	0.82 <3>
9.4	15.0	5.0	2.50	1.67 <4>
9.8	7.5	2.50	1.25	0.83 <5>
10.8	16.6	5.53	2.77	1.84 <6>
13.5	14.3	4.77	2.38	1.59 <7>
一様流	—	—	—	—

注) < >は、図-2における番号を示す。



(a) 異なる乱れ強さの組み合わせ



(b) 小スケール乱れ成分相似の組み合わせ

図-2 乱流のパワースペクトル密度

3. 2 背圧計測

背圧計測は、種々の断面辺長比($B/D = 0.26 - 0.98$)を持つ矩形断面柱に対して実施した(図-3参照). 断面辺長比 B/D の変更は、断面幅 B を変更することで行った(図-4参照). 本研究においては、背圧は矩形断面柱模型(長さ 1.25m)の中央点において計測した. また、計測においては、図-5に示すように断面に対して十分に大きな端板を取り付けて、流れの2次元性を確保した. 背圧は、サンプリング周波数 100Hz で 300 秒間計測した. 計測時のレイノルズ数は、断面高さ $D = 9\text{cm}$ に対して、約 3.7×10^4 である. また、3 種類の異なる断面高さ模型での値を比較するためには、風洞閉塞率の違いによる影響を補正する必要があるが、断面辺長比ごとの 3 種類の異なる断面高さでの背圧測定値をもとに参考文献5)に従って補正係数を求めた. 以下に示す背圧計測値は、すべて補正係数を乗じた補正後の値を示している.

背圧係数 C_{pb} は以下のように算出した.

$$C_{pb} = \frac{P_b - P_\infty}{P_{Total} - P_\infty} \quad (3)$$

ここで、 P_b 、 P_∞ 、 P_{total} はそれぞれ背圧、静圧、全圧を示す.



図-3 風洞内の格子設置状況

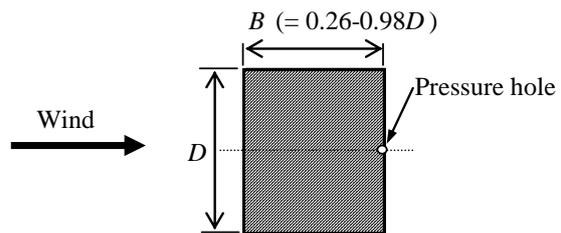


図-4 矩形断面の定義と背圧計測点



図-5 端板の設置状況

3.3 背圧係数の比較

ここでは断面高さ $D = 9\text{cm}$ の模型での検討結果を代表として示す。なお、 $D = 3, 6\text{cm}$ の模型での結果も概ね同様の傾向を示した。

図-6は、一様流中での背圧係数 C_{pb} について、既往の研究成果^{(6), (7)}と本研究での結果を比較したものである。本研究での計測結果は、既往のものとおおむね一致していることが分かる。また、背圧係数が最大値を取る臨界辺長比も既往の研究とほぼ同じ0.6程度を示している。

図-7は、異なる乱れ強さを持ち、乱れスケール比が比較的近い4つの乱流中での背圧係数 C_{pb} を一様流中でのものと合わせて示したものである。これより、臨界辺長比より小さな断面辺長比においては、背圧係数は乱れによってわずかなではあるが低下する傾向にあるが、臨界辺長比より大きな断面辺長比においては、乱れ強さが大きくなるほど背圧係数が大きく（負の絶対値が小さく）なることが分かる。これは、乱れ強さが大きくなるにしたがって、小スケール乱れ成分と矩形断面周りの剥離せん断層の干渉が促進されて、剥離せん断層を矩形柱側面に引き寄せ、伴流幅を減少させることで、背圧の回復(上昇)が行われた結果と考えられる。さらに、乱れ強さが大きくなるにしたがって、臨界辺長比の値がわずかなではあるが小さくなることも分かる。これは乱れ強さの増大による剥離せん断層の巻き込みが強くなることで、断面辺長比が見かけ上、小さくなることによるものであると考えられる。

図-8は、小スケール乱れ成分を相似した乱流中での背圧係数の計測結果を示したものである。図-2(b)に示したように乱流<3>と<4>、<5>と<7>がパワースペクトル密度の小スケール乱れ成分を相似した組み合わせである。また、この2つペアは式(2)の相似要件を満たしている。

これより、臨界辺長比以下の断面辺長では、どの乱流においても背圧係数はほぼ同じであるが、臨界辺長比よりも大きな断面辺長比においては、小スケール乱れ成分を相似した乱流間での背圧係数の一致が見られる。このことは、小スケール乱れ成分を相似した流れにおいては、矩形断面周りの流れが相似されていることを裏付けていると言え、部分乱流相似法が適用可能であることを示している。しかしながら、図-6～8に示す背圧係数の計測は、断面辺長比 B/D が 0.26～0.98 の範囲であり、現実の橋桁断面での断面辺長比は 3 よりも大きな場合がほとんどであるので、さらに大きな断面辺長比における検討が必要である。

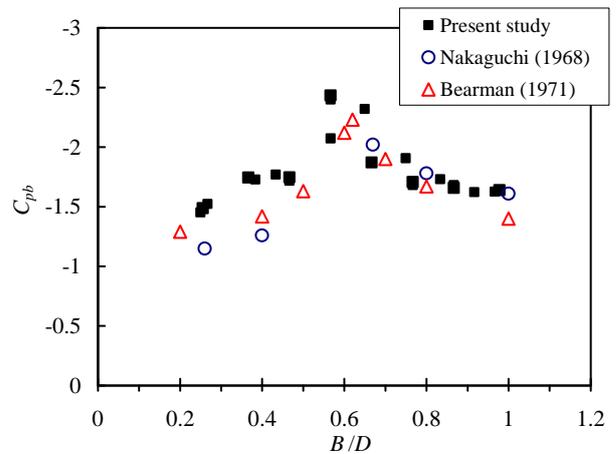


図-6 一様流中での背圧係数 C_{pb}

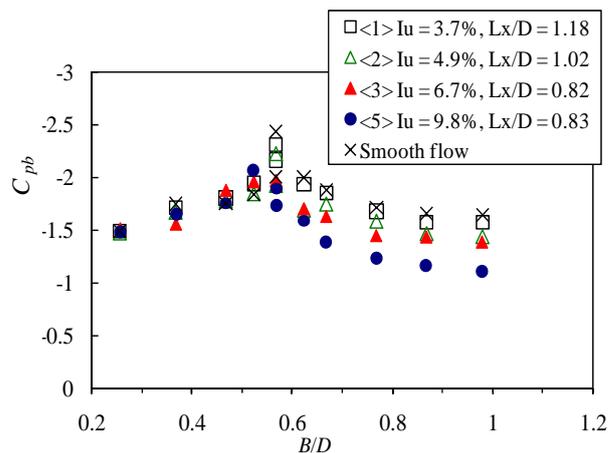
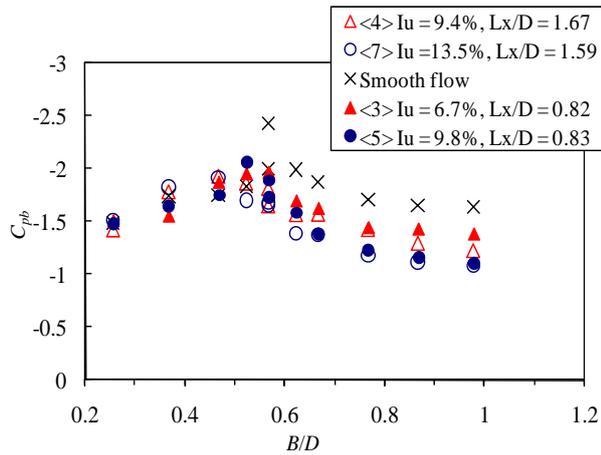


図-7 異なる乱れ強さでの背圧係数 C_{pb}



図－8 小スケール乱れ成分相似乱流での背圧係数 C_{pb}

4. 後流特性による検討

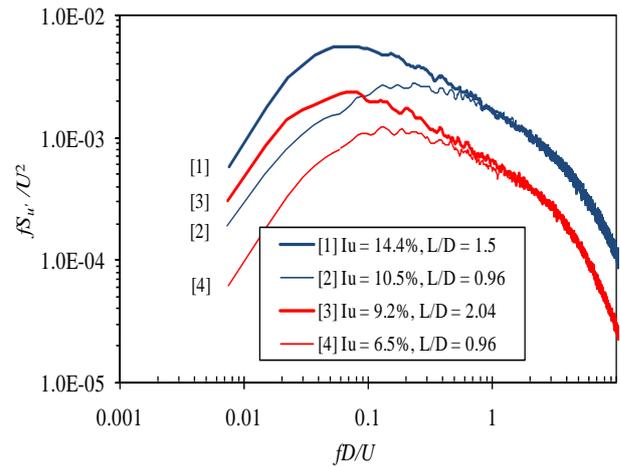
4. 1 小スケール乱れ成分相似の乱流

小スケール乱れ成分の相似による部分乱流相似法について、背圧特性に加えてカルマン渦強度の観点からも検討を行った。これは、Bluff な断面の空力振動特性は、断面周りの流れ状況のみならず、カルマン渦強度によっても影響を受けることから、検討を行ったものである。カルマン渦強度の検討は、断面後流の流れ特性を計測することで実施した。

本研究においては、図－9に示すように後流域の変動風速を熱線風速計で計測した。熱線風速計は、断面背面の中心から $2D$ 後方、 $1D$ 上方に設置し、計測は乱流生成の時と同じサンプリング周波数 $2,000\text{Hz}$ 、サンプリング時間 300 秒で行った。ここで使用した乱流は、3章の背圧特性による検討で用いた乱流とは別に生成したものであり、そのパワースペクトル密度を図－10に示す。ここで、小スケール乱れ成分を相似した乱流の組み合わせは、図中の[1]と[2]、および[3]と[4]である。



図－9 後流の変動風速計測



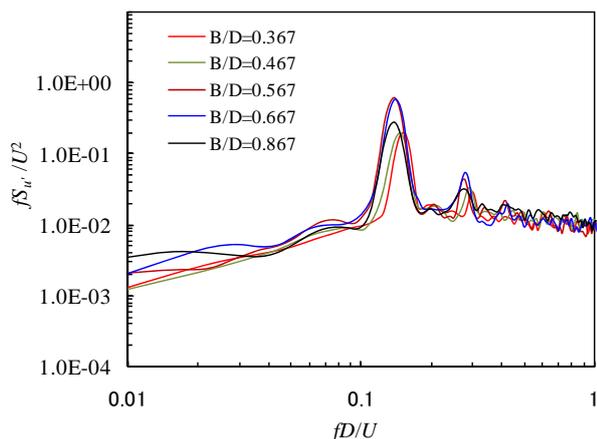
図－10 後流特性計測に用いた乱流のパワースペクトル密度

4. 2 カルマン渦強度の計測

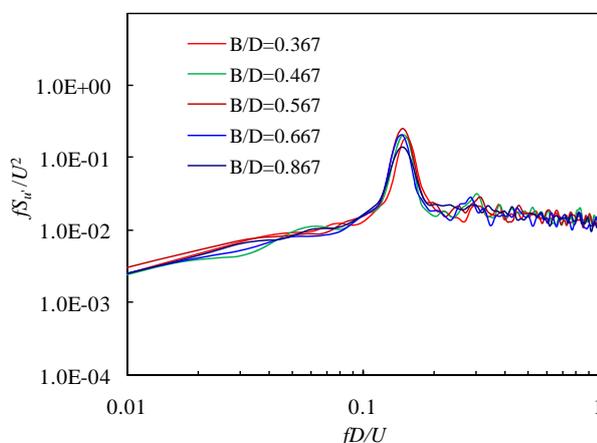
矩形断面柱の後流の風速変動パワースペクトル密度を異なる断面辺長比で計測した結果を図－11に示す。なお、図－11の(a)は一樣流中での計測結果、(b)は図－10に示す乱流[1]での計測結果を示している。ストローハル数成分でのパワースペクトル密度が、カルマン渦強度に対応すると考え、異なる乱れ特性を持つ乱流、断面辺長比における計測結果を比較検討した。結果を図－12に示す。

異なる断面辺長比に対するストローハル数成分でのパワースペクトル密度は、図－7、8に示す背圧係数の変化特性とよく似ている。また、臨界辺長比で最大値を示すことも分かる。さらに、背圧係数の場合と同じように、臨界辺長比以下の断面辺長比ではどのケースもほぼ同じ値を示すが、臨界辺長比よりも大きな断面辺長比においては、乱れ強さが大きくなるにしたがいストローハル数成分でのパワースペクトル密度は小さくなる。ただし、背圧係数の場合と違って、小スケール乱れ成分を相似した乱流間で、そのパワースペクトル密度が一致する傾向は見られなかった。

以上のことから、後流域でのカルマン渦強度は、小スケール乱れ成分を相似した部分乱流相似よりも乱れ強さ相似によるほうが、再現されていると判断される。実橋の橋桁（断面辺長比 $B/D > 3$ ）を考えると、渦励振は断面後縁から放出されたカルマン渦に加えて前縁からの剥離流れによって影響される。したがって、実橋の橋桁の渦励振に対して、本研究での小スケール乱れ成分相似（部分乱流相似）法が適用できないとは言い切れず、さらに検討が必要と思われる。



(a) 一様流



(b) 乱流[1] ($I_u = 14.4\%$)

図-1-1 後流風速変動のパワースペクトル密度

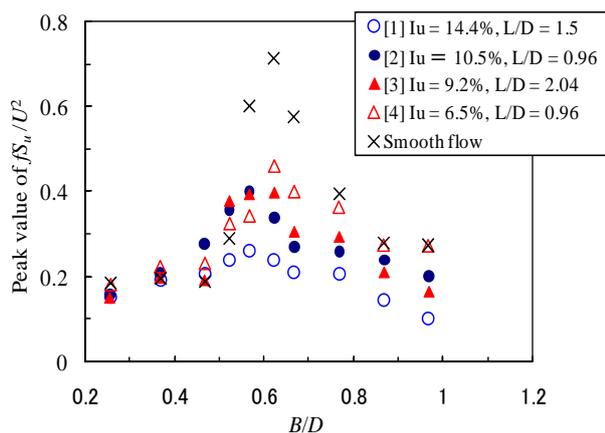


図-1-2 カルマン渦放出振動数における後流風速変動のパワースペクトル密度の比較

5. まとめ

乱流の小スケール乱れ成分相似（部分乱流相似）に関して、風洞試験によって検討を行った。

種々の断面辺長比($B/D = 0.26 - 0.98$)を持つ矩形断面柱の背圧特性を比較した結果、臨界辺長比より大きな断面辺長比においては、小スケール乱れ成分を相似した乱流間で背圧係数値が一致する傾向を確認した。このことは、矩形断面柱周りの流れ状況が、小スケール乱れ成分を相似した乱流中で再現され得ることを示している。

後流中のカルマン渦強度について、同様の比較検討を実施した結果、小スケール乱れ成分を相似した乱流中よりも、乱れ強さを相似した乱流中でのほうが、カルマン渦強度は再現されることが確認された。しかしながら、このことは乱流の小スケール乱れ成分相似が橋桁のような断面の渦励振に対して適用できないことを示すものではないと考えられ、さらなる検討が必要である。

参考文献

- 1) 中村泰治, 大屋裕二, 渡辺公彦: 矩形断面柱空力特性に及ぼす乱れの影響, 第8回風工学シンポジウム論文集, pp.249-254, 1984.
- 2) Irwin, P. A., The role of wind tunnel modeling in the prediction of wind effects on bridges, Proc. of the Int. Symp.: Advances in Bridge Aerodynamics, Balkema, pp.99-117, 1998.
- 3) Irwin, P. A., Bluff body aerodynamics in wind engineering, Proc. of BBAA V, Ottawa, Canada, pp.51-57, 2004.
- 4) Macdonald, J. H. G., Irwin, P. A. and Fletcher, M. S., Vortex-induced vibrations of the Second Severn Crossing cable-stayed bridge – full scale and wind tunnel measurements, Proc. of the ICE: Structures and Buildings, SB152(2), 2002.
- 5) Nakamura, Y. and Ohya, Y., The effects of turbulence on the mean flow past two-dimensional rectangular cylinders, J. Fluid Mechanics, 149, pp.255-273, 1984.
- 6) 中口博, 橋本貴久裕, 武藤真理: 矩形断面の柱の抗力に関する一実験, 航空学会誌, 第16巻, 第168号, pp.1-5, 1968.
- 7) Bearman, P. W. and Trueman, D. M., An investigation of the flow around rectangular cylinders, Aeronautical Quarterly, 23, pp.229-237, 1972.

(2009年9月24日受付)