

【委員会報告】

風洞実験相似則に関する調査研究

STUDY ON SIMILARITY OF WIND TUNNEL EXPERIMENTS

構造工学委員会風洞実験相似則検討小委員会
Subcommittee on Similarity of Wind Tunnel Experiments

1. ま え が き

本報告は、平成3年8月～平成5年8月の2ヶ年間にわたる、表記委員会（第1期）の活動成果の概要を述べるものである。

風の作用のもとで、一般に複雑形状を有する構造物に生じる空力諸現象を明らかにする手段として、風洞実験は最も信頼性のある方法と考えられている。強風下における実験構造物の挙動を風洞実験によって再現する場合、それに対応したレイノルズ数を満足するには高風速の超大型風洞を用いるか、高圧または超低温の特殊風洞が必要となる。しかしながら、多くの風洞実験はいわゆる低風速風洞（最大風速が50 m/s 程度の風洞）が用いられており、実験は実構造物より $10^2 \sim 10^3$ オーダの低いレイノルズ数域で行われている。このため、現象がレイノルズ数の影響を受けることが周知である円柱、曲線・曲面形状をもつ構造系の実験においては、流れの剝離点を人工的に固定したり、表面粗度を変えたりして、レイノルズ数の相似性に工夫・注意して検討が加えられてきた。一方、剝離点の固定されている角ばった断面はレイノルズ数の影響を受けないという前提で実験が行われてきたが、近年隅切り（脚注1参照）を有する吊橋主塔の実験で、レイノルズ数の違いにより振動応答特性が急変したという報告がなされ、実験レイノルズ数の違いが応答の差となって現れた可能性が指摘された。

これらの報告を機に、本州四国連絡橋公団耐風委員会相似則検討作業班が構成され、平成2年4月～平成3年3月の一年間にわたり、隅切り断面に重点を置いた調査・研究が行われた。その結果、隅切り断面は基本断面辺長比および隅切り寸法が特定の場合に、レイノルズ数の振動応答への影響が存在することが明らかにされた。同時に、ある隅切り断面を対象に行われた実験結果より、最大応答振幅が急変するレイノルズ数（ $Re = UD/\nu$ 、 U ：平均風速、 D ：断面見つけ幅、 ν ：流体の動粘性係数）がおよそ $6 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$ に存在することが明らかとなった。なお、このレイノルズ数をジャンプレイノルズ（脚注1）本報告書で用いる“隅切り断面”は、2次元矩形断面の4つの角部に正方形、もしくは矩形上の切り欠きを設けた断面形状を指す。

（脚注2）“ジャンプレイノルズ数”という用語については、さらに検討が必要であろう。

数（脚注2参照）と仮称した¹⁾。

本小委員会は以上のような問題指摘および一部明らかにされた特性を踏まえ、平成3年8月に発足した。当委員会では、上記のレイノルズ数効果に関する問題を、風洞実験法の根幹にかかわる問題としてとらえ、他の構造断面に対するレイノルズ数効果の有無、高レイノルズ数域での挙動推定方法、乱流中におけるレイノルズ数と応答との関係等、さらに幅広く調査・研究、検討することを目的としている。具体的には、第1期2年間の研究委員会活動を通じて、

- 1) どのような断面のどのような空力現象（静的空気力も含めて）にレイノルズ数効果が現れるのか
- 2) 実験でレイノルズ数をいくら以上にすれば、比較的精度よく実物構造物の挙動を評価できるのか
- 3) その他閉塞率などの風洞実験相似の信頼性等の問題点を中心に調査、検討がすすめられた。

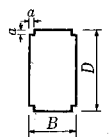
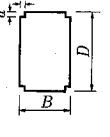
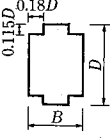
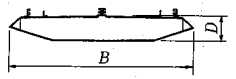
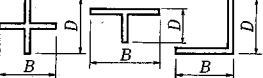
以上の活動目的のもとに、計10回の小委員会を開催し、レイノルズ数効果を中心に、風洞実験相似則に関する諸問題について、活発に調査・研究を行った。必要に応じて、委員あるいは委員以外の方々にも特別話題を提供していただき、上記課題に関連して最新かつ多岐にわたる情報を収集した。本小委員会の目的とした課題が、これらの活動を通じてすべて明らかにされた訳ではないものの、従来より研究の対象とされてきた構造基本断面（例えば逆梯形桁断面、六角形箱桁断面、アングル材、等）においても、レイノルズ数依存性が認められるなどの新しい知見も多数得られ、今後風洞実験を実施する際の留意点等を指摘することができた。構造断面別あるいは空力現象別のレイノルズ数効果を体系的に整理するには至っていないが、本研究で得られた成果より、実験条件の設定あるいは風洞実験結果の評価法の留意点と問題点を指摘することができたものと言え、今後の調査・研究の継続が期待される。

2. 空力特性に及ぼすレイノルズ数効果

各種断面の空力特性に及ぼすレイノルズ数効果に関し、既往の研究成果ならびに各機関で実施された風洞実験データが多数報告された。対象とした断面幾何学形状は隅切り断面（タンデム構造を含む）、矩形断面、H型断面、アングル材などの構造基本断面に加え、偏平六角

形断面やPC斜張橋桁、I型、二箱桁の橋梁桁断面等多岐に及んだ。測定内容は三分力、ストローハル数などの静的空力特性、振動応答特性であり、それぞれ風速もしくはは模型縮尺を変化させることにより、レイノルズ数の影響が検討された。またレイノルズ数効果に対する乱れの影響についても併せて検討が加えられた。個々の断面のレイノルズ数効果、一連の検討内容を表一および図一～七に示す。

表一 各種断面の空力特性に及ぼすレイノルズ数効果(その1)

断面形状	測定項目	実験レイノルズ数 (Re=UD/v)	レイノルズ数効果	補足説明	備考	参照図表	参考文献
隅切り断面 $B/D=0.565$ 正方形隅切り $a/D=1/18$ $D=48.5$ mm (小型) 485 mm (大型)  矩形断面 (外郭形状同一)	抗力	1.0×10^4 ~ 8.0×10^5	なし		大型模型、小型模型2基を使用(閉塞率5%以下)パネ支持系による振動応答測定実験実施		
隅切り断面 $B/D=0.62$ 正方形隅切り $a/D=1/18$ $(D=45.0$ mm) 	揚力	4.6×10^3 ~ 3.1×10^4	あり 揚力係数勾配 $dC_F/d\alpha$ が低レイノルズ数 (Re= 4.6×10^3) では正、Re $>7.7 \times 10^3$ で負、Re= 3.1×10^4 では再び0へ近づく。	本来ギャロッピングは $dC_F/d\alpha < 0$ を示す断面で発生し、かつその限界風速はレイノルズ数に依存しないと考えられていた。これに対し後述のパネ支持実験では $dC_F/d\alpha < 0$ を示す風速域 (すなわちレイノルズ数域) とギャロッピングの発現風速域がよく対応し、限界無次元風速はレイノルズ数に強く影響を受ける。	パネ支持系による振動応答測定実験実施		2)
隅切り断面 $B/D=0.66$ 長方形隅切り $(D=60.0$ mm) 	圧力分布 ストローハル数	5.0×10^3 ~ 5.0×10^4	あり 断面側面の平均圧力分布は Re= 1×10^4 付近を境に変化。これより低レイノルズ数側では側面で一律な圧力分布。高レイノルズ数側では下流側につれて圧力回復。ストローハル数は Re $<1 \times 10^4$ ではレイノルズ数と共に増加。Re $>1 \times 10^4$ ではほぼ一定。(St=0.23)	流れの可視化実験から低レイノルズ数 (Re= 5×10^3) では模型前縁部から剝離した流れが隅切り部に一旦衝突、再び側面角部から剝離。高レイノルズ数 (Re= 1×10^4) では前縁角部からの剝離せん断層は隅切り部に衝突せず、むしろ側面に接近し、後流幅も狭い。	明石海峡大橋主塔の支柱塔頂部断面 パネ支持系による振動応答測定実験実施 隅切りの深さや位置等、断面形状を変えた計測も実施		3)
偏平六角形断面 $B/D=7.37$ 高欄付き $D=73.1$ mm (1/60 模型) $D=14.6$ mm (1/300 模型) 	三分力 抗力、揚力、ピッチングモーメント	4.0×10^3 ~ 8.4×10^4 (1/60 模型) 5.0×10^3 ~ 1.0×10^4 (1/300 模型)	あり Re $<6.6 \times 10^4$ では風速依存性 (すなわちレイノルズ数依存性) あり揚力に対してレイノルズ数効果が顕著。抗力、ピッチングモーメントにも若干影響あり。1/300 模型の三分力特性と合わせ、Re $<3 \times 10^4$ では三分力特性は安定しない。	断面下面の流れが三分力特性に重要な役割を果たす。レイノルズ数依存性が現れたのは、この流れがレイノルズ数により変化したためと考えられる。検査車レールを断面下面に設置した同様の偏平六角形断面では、三分力特性にレイノルズ数の影響は現れていない。	1/60 および1/300 縮尺の2基の模型を使用。(閉塞率はいずれも5%以下)パネ支持系(1/60 模型)およびタウトストリップモデル(1/300 模型)による振動応答測定実験実施。		4)
アングル材 (L字, T字, 十字形断面)  $B/D=1$ $B/D=2$ $B/D=1$ (断面板厚はいずれも5 mm) $(D=50$ mm) $(D=30$ mm) $(D=50$ mm)	三分力 抗力、揚力、ピッチングモーメント ストローハル数	5.4×10^3 ~ 5.2×10^4 (L字, 十字形断面) 3.2×10^3 ~ 3.1×10^4 (T字形断面)	あり 上流側端部からの剝離流れが下流側端部へ再付着する迎え角付近では、三分力、ストローハル数にレイノルズ数依存性が現れる。Re= 1×10^4 付近を境に特性が変化する。		外形形状が等しい直角三角形、正三角形の計測も併せて実施。パネ支持系による振動応答測定実験実施		5)

表一 各種断面の空力特性に及ぼすレイノルズ数効果(その2)

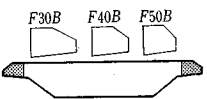
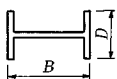
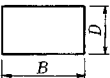
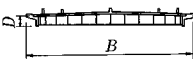
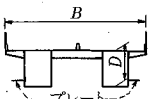
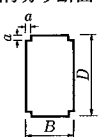
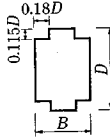
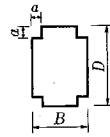
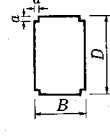
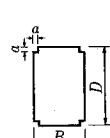
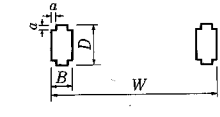
断面形状	測定項目	実験レイノルズ数 (Re=UD/ν)	レイノルズ数効果	補足説明	備考	参照図表	参考文献
PC斜張橋断面 	ストローハル数	1.0×10^3 $\sim 1.7 \times 10^4$	あり Re > 5×10^3 でストローハル数安定				9)~16)
H型断面 B/D=2.5, 7 (D=20 mm) 	ストローハル数	5.0×10^2 $\sim 1.2 \times 10^4$	あり B/D=2.5 では計測された全域でストローハル数一定せず。 B/D=7 では Re > 5×10^3 でストローハル数安定。	剥離せん断層の断面側面への非定常な再付着と関係あり。			17) 18)
矩形断面 B/D=1, 2, 4 (D=20 mm, 50 mm) 	ストローハル数	1.0×10^2 $\sim 7.0 \times 10^4$	一部あり B/D=1, 4 ではレイノルズ数依存性なし。B/D=2 では Re=4~ 6×10^2 でレイノルズ数が不連続。Re=3~ 15×10^3 で2つのストローハル数あり。	剥離せん断層の断面側面への非定常な再付着と関係あり 別途バネ支持系による応答測定実験結果より、B/D=2 断面の2つのストローハル数に対応する風速域でそれぞれ振動応答検出。	バネ支持系による振動応答測定実験実施		17) 18)
I桁 (two edge beam girder) B/D=16 高欄付き (D=25 mm) 	三分力抗力, 揚力, ビッグモンメント	5.7×10^3 $\sim 1.7 \times 10^4$	あり $\alpha=0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$ の揚力係数が特異的に変化。 Re=8 × 10 ³ 付近で揚力係数がピークを示す。	断面回りの流れが風速により変化したことによる。 固有振動数を3種類に変化させたバネ支持実験によれば、揚力係数がピークを示す風速域に渦励振発現風速域が一致する場合に、渦励振応答振幅が増加する。	バネ支持系による振動応答測定実験実施		
二箱桁 B/D=3.2 高欄・遮音壁付き (D=72.7 mm) 空力対策用プレートあり/なし 	三分力抗力, 揚力, ビッグモンメント	4.0×10^3 $\sim 5.0 \times 10^4$	あり $\alpha=6^\circ, 7^\circ, 8^\circ$ の揚力係数が Re=1.4 × 10 ⁴ 付近で他のレイノルズ数域と異なる値を示す。 空力対策用プレート付き断面では、揚力係数の変化は現れず。	プレートなしの断面で現れた揚力変化は、断面回りの流れが風速により変化したことによる。 固有振動数を3種類に変化させたバネ支持実験によれば、揚力係数が異なる値を示す風速域と渦励振発現風速域との大小により、渦励振応答のリミットサイクルが変化。揚力が増加する風速が渦励振発現風速より低い場合にはリミットサイクル存在せず。	バネ支持系による振動応答測定実験実施		
隅切り断面 B/D=0.565 正方形隅切り a/D=1/18 (D=48.5 mm (小型) 485 mm (大型))  矩形断面 (外郭形状同一)	振動応答 (鉛直たわみ)	1.0×10^4 $\sim 1.0 \times 10^6$ (渦励振発現レイノルズ数域)	あり 隅切り断面の渦励振最大応答振幅は、レイノルズ数と共に変化。 Re < 2×10^5 ではレイノルズ数の増加にともない最大振幅は徐々に低下。しかし、これ以上のレイノルズ数では応答振幅は増加の傾向を示す。 隅切りを埋めた矩形断面ではレイノルズ数の影響は小さい。	渦励振発現風速域としては最大のレイノルズ数まで計測が実施されている。ジャンプレイノルズ数がおおよそ Re = 5×10^3 から 1×10^4 の間に存在することと併せ、隅切り断面の渦励振の一般的な応答特性を示すものと考えられる。実構造物のレイノルズ数域に相当する Re = $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^8$ 程度のさらに高いレイノルズ数域の応答評価がますます重要となる。	大型模型, 小型模型2基を使用 (閉塞率5%以下) 抗力測定実験実施	図-1	

表-1 各種断面の空力特性に及ぼすレイノルズ数効果(その3)

断面形状	測定項目	実験レイノルズ数 (Re=UD/ν)	レイノルズ数効果	補足説明	備考	参照表	参考文献
隅切り断面 $B/D=0.66$ 長方形隅切り ($D=60.0$ mm) 	振動応答 (鉛直たわみ) 渦励振発現レイノルズ数域	4.0×10^3 $\sim 1.8 \times 10^4$	あり 渦励振最大応答振幅は $Re=6 \times 10^3$ を境に大きく変化。(ジャンプレイノルズ数の存在) これより低レイノルズ数域では振幅小さく、隅切りの制振効果大。上記のレイノルズ数を超えると急激に振幅値は増大し、それまでの5倍以上に達する。	前述の静的空力特性(圧力分布、ストローハル数)の計測結果とも併せ、このような渦励振応答の大きな変化は、断面前縁部からの剥離せん断層の挙動に深く関係する。ただし、静的空力特性は渦励振応答ほどの急激な特性変化は見られない。	明石海峡大橋主塔の支柱塔頂部断面 圧力分布、ストローハル数などの静的空力特性計測 隅切りの深さや位置等、断面形状を変えた計測も実施	図-2	3)
隅切り断面 $B/D=0.67$ 正方形隅切り ($a/D=2/18$) ($D=100.0$ mm) 	振動応答 (鉛直たわみ) 渦励振発現レイノルズ数域 一様流、乱流 ($I_u=11\%$)	3.0×10^3 $\sim 2.0 \times 10^4$	あり $Re=4 \times 10^3$ 付近を境に渦励振最大応答振幅が約1.5~2倍に急増した。後漸減。ただし一様流中の応答は $Re=1.3 \times 10^4$ 付近で再び増加する傾向あり。乱流中においても一様流中と同様のレイノルズ数効果あり。	文献1)で同一断面の一樣流中の渦励振応答が調査され、 $Re=5 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$ の間にジャンプレイノルズ数が存在することが既に確認されている。なお、対象断面はローリングの発生が顕著であり、鉛直たわみ渦励振の精度良い検出に新たな工夫が施されている。		図-3	1) 6)
隅切り断面 $B/D=0.62$ 長方形隅切り ($a/D=1/18$) ($D=45.0$ mm) 	振動応答 (鉛直たわみ) 渦励振発現レイノルズ数域 一様流、乱流 ($I_u=5\%$)	2.9×10^3 $\sim 1.1 \times 10^4$	あり $Re > 8 \times 10^3$ で渦励振最大応答振幅がレイノルズ数と共に増加。風速限定型ギャロッピング発生系の固有振動数に近づかず限界風速はほぼ一定。(無次元限界風速は固有振動数の増加と共に低下) 乱流中においても同様の特性。	ギャロッピングの発現は前述の揚力係数勾配 $dC_F/d\alpha$ が負値を示すレイノルズ数域に対応し、その無次元風速域はレイノルズ数の増加にともない低風速側へ移行し、やがて渦励振発現風速域と一体化する。一定の無次元風速から発現する従来のギャロッピングとは異なる応答特性を示す。実験に用いられた乱流場では、一様流と同様のレイノルズ数効果を変えるほどの乱流効果は現れていない。	揚力測定実験実施		7)
隅切り断面 $B/D=0.62$ 正方形隅切り ($a/D=1/18$) $D=50.0$ mm (小型) 485.0 mm (大型) 	振動応答 (鉛直たわみ) 渦励振発現レイノルズ数域 一様流、乱流 ($I_u=6\%$, 12% (小型), 15% (大型))	3×10^3 $\sim 5 \times 10^5$	あり 渦励振最大応答振幅はレイノルズ数と共に増加。風速限定型のギャロッピングの限界無次元風速は、レイノルズ数の増加にともない低風速側へ移行。	乱れの強さ (I_u) が6%程度の乱流中では応答振幅がやや低下。 $I_u > 10\%$ では、大型、小型両模型ともに振動は発生しない。	大型模型、小型模型2基を使用 (閉塞率5%以下)		
隅切り断面 (タンDEM構造) $B/D=0.5$, $W/D=4.0$ 正方形隅切り, $a/D=2/18$ ($D=70.0$ mm)  矩形断面 (外郭形状同一)	振動応答 (鉛直たわみ) 渦励振発現レイノルズ数域	2×10^3 $\sim 1.2 \times 10^4$	あり 渦励振最大応答振幅はレイノルズ数の影響を受け、 $Re=5 \sim 7 \times 10^3$ を境に急変。これより高レイノルズ数域では約2倍に増加。矩形断面ではレイノルズ数の影響なし。	渦励振はカルマン渦により励起されるタイプ。隅切り断面で、左記のレイノルズ数より高い領域では、矩形断面とほぼ同じ最大応答振幅値に達し、隅切りによる制振効果もほとんど現れない。		図-4	8)

表一 各種断面の空力特性に及ぼすレイノルズ数効果(その4)

断面形状	測定項目	実験レイノルズ数 (Re=UD/ν)	レイノルズ数効果	補足説明	備考	参照図表	参考文献
偏平六角形断面 B/D=8.06 地覆・高欄あり/なし { D=27.7 mm (小型) 110.9 mm (大型) } 	振動応答 鉛直たわみ/ねじれ	2×10^3 $\sim 6 \times 10^4$ [渦励振発現レイノルズ数域]	なし ただし、地覆・高欄を取り付けることによる応答の変動がレイノルズ数効果による変化より顕著であった可能性あり。	偏平六角形断面は地覆・高欄の設置による応答への影響が顕著であり、これら細部の模型化に注意が必要と判断される。	大型模型、小型模型2基を使用(閉塞率5%以下)		
偏平六角形断面 B/D=7.37 高欄付き { D=73.1 mm (1/60模型) D=14.6 mm (1/300模型) } 	振動応答 鉛直たわみ	1×10^3 $\sim 8.5 \times 10^3$ [渦励振発現レイノルズ数域]	あり 渦励振最大応答振幅は1/60模型(Re=4.2~8.5×10 ³)と1/300模型(Re=1×10 ³)との間に大きな差がある。(後者は前者の約5倍)	1/60模型はバネ支持された2次元剛体模型、1/300模型はトストリップ模型、両者の模型構造の違いはあるものの、低レイノルズ数ほど振幅が大きい傾向が認められる。なお、想定実橋の高欄を忠実に模型化し、1/60模型に設置した場合、渦励振が発生しなかったことから、高欄部の模型化が応答特性に大きく影響すると言え、特に小さい縮尺での模型化には細心の注意が必要と判断される。	1/60 および1/300縮尺の2基の模型を使用。(閉塞率はいずれも5%以下) 両模型を用いた三分力測定実施。	図-5	
偏平六角形断面 B/D=5.55 高欄付き (D=76.0 mm) 	振動応答 鉛直たわみ 一様流、乱流(Iu=6%)	4×10^3 $\sim 2.2 \times 10^4$ [渦励振発現レイノルズ数域]	あり Re>1.3×10 ⁴ で渦励振最大応答振幅は約20%増加。乱流中ではレイノルズ数による振幅変化の程度は小さくなる。	隅切り断面の急激な応答変化は認められないものの、偏平六角形断面でも、渦励振に対するレイノルズ数効果ありと判断。乱流中においてもレイノルズ数効果あり。		図-6	
矩形断面 B/D=1, 2, 4 (D=20 mm) 	振動応答 鉛直たわみ	2.0×10^3 $\sim 1.0 \times 10^4$ [渦励振発現レイノルズ数域]	一部あり B/D=1, 4ではレイノルズ数依存性なし。 B/D=2では2つのストローハル数に対応した渦励振応答発現。		ストローハル数測定実験実施		17) 18)
I桁 B/D=16 { two edge beam } 高欄付き girder (D=25.0 mm) 	振動応答 鉛直たわみ	5.0×10^2 $\sim 1.2 \times 10^3$ [渦励振発現レイノルズ数域]	あり 揚力係数がピークを示す風速域に渦励振発現風速域が一致する場合に、渦励振応答振幅が増加。	I桁断面、二箱桁断面は場合によっては三分力、振動応答両面がレイノルズ数の影響を受ける。レイノルズ数による断面回りの流れのパターンの変化は静的空力特性と動的空力特性の両面に現れる可能性があると言え、バネ支持実験より幅広い風速域での計測が可能な三分力計測により動的現象に対するレイノルズ数効果の有無を検討しておくことが望ましい。	三分力測定実験実施	図-7	
二箱桁 B/D=3.2 高欄・遮音壁付き (D=72.7 mm) 空力対策用プレートあり/なし 	振動応答 鉛直たわみ	1.0×10^3 $\sim 6.0 \times 10^4$ [渦励振発現レイノルズ数域]	あり プレートなしの断面では、揚力係数風速域が変化する風速域と渦励振発現風速域との大小により、渦励振応答のリミットサイクルが変化。揚力変化風速が渦励振発現風速より低い場合にはリミットサイクル存在せず。		三分力測定実験実施		

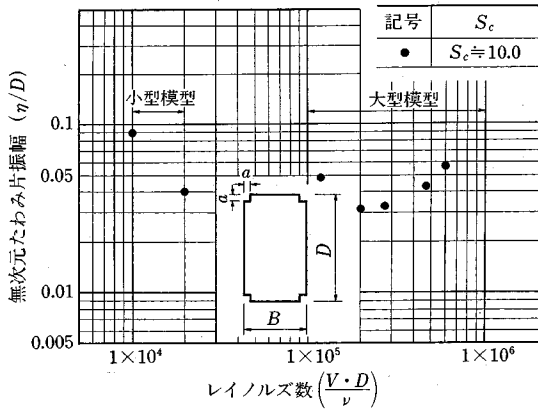


図-1 レイノルズ数による渦励振最大応答振幅の変化 (齊藤委員提供)
(隅切り断面, 断面辺長比 $B/D=0.565$, 正方形隅切り, 隅切り率 $a/D=1/18$)

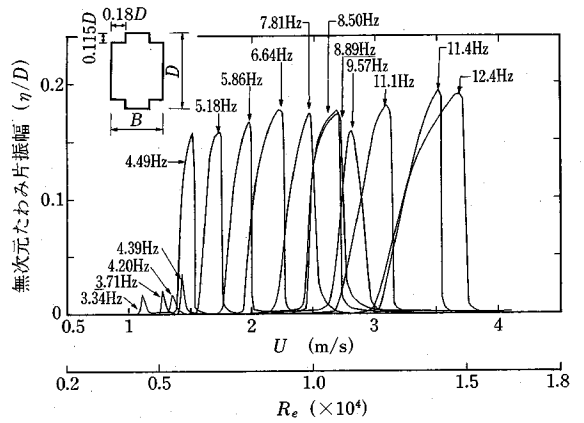


図-2 レイノルズ数による渦励振応答の変化 (文献3)より抜粋)
(隅切り断面, 断面辺長比 $B/D=0.66$, 長方形隅切り)

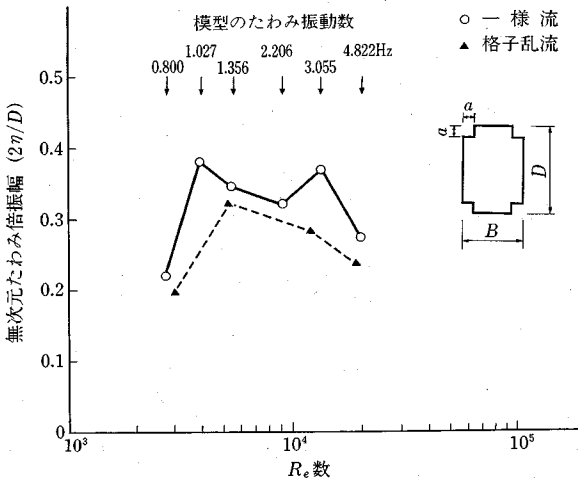


図-3 レイノルズ数による渦励振最大応答振幅の変化 (文献6)より抜粋)
(隅切り断面, 断面辺長比 $B/D=0.67$, 隅切り率 $a/D=2/18$)

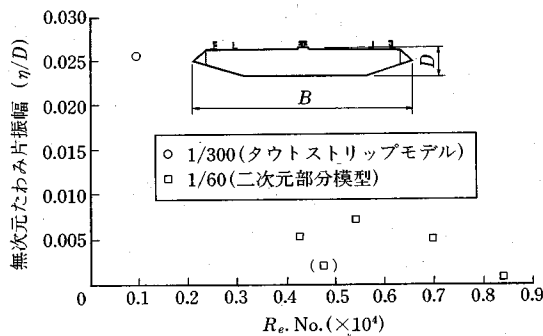


図-5 レイノルズ数による渦励振最大応答振幅の変化 (井上委員提供)
(偏平六角形断面, 断面辺長比 $B/D=7.37$, 高欄設置)

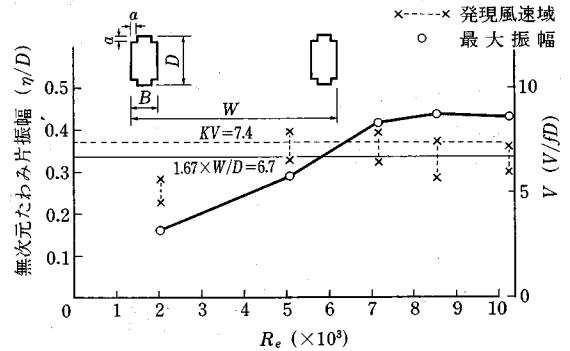


図-4 レイノルズ数による渦励振最大応答振幅, 発見風速の変化 (武内委員提供)
(隅切り断面 (タンデム構造), 断面辺長比 $B/D=0.5$, 隅切り率 $a/D=2/18$, 2柱外面間隔比 $W/D=4.0$)

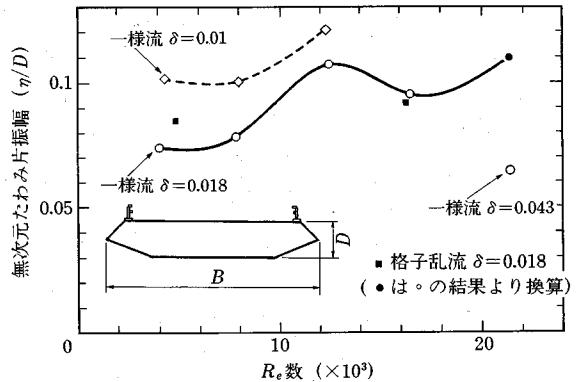


図-6 レイノルズ数による渦励振最大応答振幅の変化 (南條委員提供)
(偏平六角形断面, 断面辺長比 $B/D=5.55$, 高欄設置)

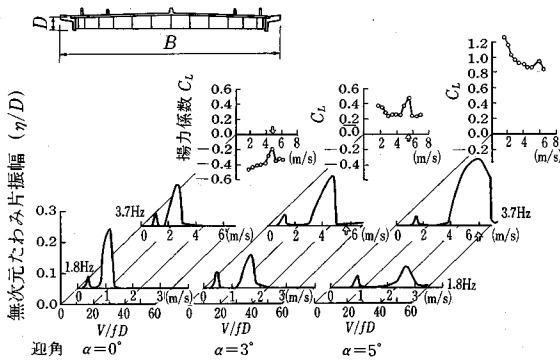


図-7 風速による渦励振応答の変化および揚力計数との対比 (樋上委員提供)
(1桁断面 (two edge beam girder), 断面辺長比 $B/D = 16$, 高欄設置)

3. その他の実験相似に関連する討議, 研究紹介

(1) 実験相似に関する討議

本節では, 本委員会で討議がなされたレイノルズ数効果以外の実験相似に関する項目を示す。

実機の応答と風洞実験との対比

空力特性に及ぼすレイノルズ数効果の有無にかかわらず, 実構造物の耐風応答と縮尺模型を用いた風洞実験で計測される空力応答との間の対応関係について, 2次元剛体模型と3次元全体模型, および実構造物相互の空力応答特性の対比の問題, 3次元構造物固有の空力問題, 3次元応答挙動 (マルチモードフラッター, 非定常空気力同定) などを中心に議論がなされた。

応答に影響を与える因子

風洞実験に際して, 模型の応答に影響を及ぼす因子について, 弾性模型外形材間の間隙 (スリット) の影響, 模型の表面粗度, 2次元剛体模型実験における端板効果, 風洞閉塞効果などが指摘された。このうち, 風洞閉塞効果については最近の研究成果が示されたほか, 風洞閉塞効果をおさえる特殊構造の風洞 (slotted wall), その他の研究例が紹介された。

(2) 実験相似に関する研究紹介

前章で述べられた空力特性に及ぼすレイノルズ数効果に関する一連の風洞実験結果ならびにそれらに対する討議のほか, 風洞実験相似に関する研究成果がいくつか紹介された。以下, 本節では (1) 立坑中の自由落下物体の空力特性, (2) 境界層乱流中の立方体の空力特性に及ぼす風洞閉塞効果, (3) 2次元矩形断面の空力応答特性に及ぼす風洞閉塞効果を順次述べる。

a) 立坑中の自由落下物体の空力特性^{19)~22)}

平成3年7月には北海道空知郡上砂川町に完成した落下方式無重力実験施設 ((株) 地下無重力実験センター)

は垂直落差約700mを有し, 無重力時間10秒を実現できる世界最大級の実験施設である。自由落下物体の空気制動システムの開発に際して, 一連の検討過程と解析, 実験結果が本委員会で紹介された。システムの流体力学的特性ならびに実験相似に関する成果の概略は以下のようである。

空気制動システムの開発に際し, 1) カプセル・制動槽間の隙間漏れ流量, 2) 制動槽壁面の影響, をはじめとする多くの問題点を解決するため, 段階的な実験・シミュレーションが実施され, 結果を実機に反映する場合の模型縮尺などスケールの影響が検討されている。

その結果, 小型モデルの実験から実機カプセルを使用しているの実証実験を通して, 本制動システムのようなカプセルの前後に圧力差を有し, さらにカプセルと制動槽の隙間が非常に狭い領域を高速で移動する物体の流体挙動に関して, 以下のことが明らかにされている。

- カプセルの前方と後方の圧力差が比較的大きい場合, カプセルに作用する抗力は, 大部分が圧力抵抗である。粘性抵抗は, ほとんど無視できる量と考えられる。
- カプセルの前方と後方の圧力差が比較的大きい場合, カプセルと制動槽との隙間漏れ流量係数は, カプセルの直胴部長さをカプセル直径と制動槽内径との差で除した値の1/4乗に反比例する。またカプセルの形状が相似形であるならば, モデルのスケール影響はほとんど受けない。

b) 境界層乱流中の立方体の空力特性に及ぼす風洞閉塞効果

文献23)では, 大きさの異なる複数の立方体模型を3種類の境界層乱流中に配置し, それぞれ模型背圧から, 境界層乱流中の立方体の空力特性に及ぼす風洞閉塞効果が検討されている。なお, 文献24)では境界層乱流中に2次元模型を設置した実験結果が述べられている。その内容の概略を以下に示す。

閉塞率の影響: 閉塞率 (風洞断面積 A_w に対する模型投影面積 A の比 A/A_w) と模型背圧計数 (模型高さ h における速度圧で無次元化) の関係を見ると, 閉塞率1%あたりで背圧係数が増加する傾向にあり, この程度の閉塞率であっても既に閉塞効果が発生している。また, 別途実施された一様乱流場における実験結果と比較すると, 境界層乱流中の閉塞効果はかなり小さい。

レイノルズ数の影響: 閉塞率の影響がレイノルズ数の影響に比べて顕著に現れるケースもあるが, 全体としてレイノルズ数の増加と共に背圧係数の絶対値は若干低下する傾向にある。

c) 2次元矩形断面の空力応答特性に及ぼす風洞閉塞効果

文献25)では, 空力振動現象に関する閉塞効果として, 2次元矩形柱に対する閉塞率の影響が調査されている。

その概略は以下のようである。

対象断面は、断面辺長比 $B/D=1, 2, 3, 4$ の4種類の2次元矩形断面であり、風洞測定部に仮設の天井と床を設け、閉塞率を変化させている。風洞閉塞効果は $B/D=3$ で最も顕著に現れる。閉塞率5%では渦励振、ギャロッピングが発生しているのに対して、閉塞率10%以上ではギャロッピングが発生しない。また、渦励振の振幅も閉塞率の増加にともなって著しく低下している。

このような閉塞率の影響は圧力分布にも現れる。閉塞率が小さい範囲では完全剝離型に近い分布形であるのに対して、大きな閉塞率の下では分布が再付着型に近づく。このような圧力分布の変化は現象面から見たギャロッピング発生の有無と良く対応するものであり、閉塞率の増加に伴って物体周辺流れが変形するために応答に顕著な変化が現れたものと推定される。

したがって、一般的には閉塞率が空力振動に与える影響はさほど大きくないが、再付着のように流れの微妙な変化が応答に大きな影響を及ぼす場合には閉塞率にも注意を払う必要があると言える。

4. まとめ、今後の課題

風洞実験相似則に関して、本小委員会（第1期）における一連の実験的研究の結果及び討議の結果を以下にまとめる。

＜得られた成果＞

角のある構造物でも、隅切り断面・六角断面など断面形状によっては、その空力応答特性がレイノルズ数の影響を受ける場合があることが明らかとなった。とくに、流れのパターンが風速（レイノルズ数）に敏感に影響を受けて変化する断面や、剝離流れの微妙の制御を施した断面においてレイノルズ数の影響が強く現れるようである。ジャンプレイノルズ数の存在の原因としては、流れの剝離、再付着がキーポイントとなるものと考えられ、再付着点が微妙に変化するような迎角では、まず、静的空気にレイノルズ数の影響が顕著に現れるように見受けられた。

空力特性の急変を示すレイノルズ数の境界値は、静的・動的特性とで必ずしも一致せず、むしろ異なる場合が多い。静的特性が変われば動的特性も変わるが、逆は必ずしも成立しない場合が存在した。静的特性と動的特性は必ずしも同じでないと考えられる。

剝離点の位置が明確かつ一定の断面で、流れの再付着が生じない（完全剝離型）か、あるいは再付着が生じても空力特性を支配する程の効果を与えない場合にはレイノルズ数の影響はあまり現れないと言える。しかしながら、隅切り断面及び偏平六角形断面等においては、レイノルズ数効果が存在する可能性が高いとすることができ、空力特性の精度良い評価を行うためには、可能な限り高い

レイノルズ数で実験することに努力すべきであろう。断面形状に応じた実験レイノルズ数下限値の具体的な数値は、更に詳細データの蓄積が必要であると考えられるが、現状では 1×10^4 以上のレイノルズ数が必要と言える。

＜今後解明すべき事項とその方策＞

(1) メカニズムの解明とデータの蓄積

レイノルズ数の影響を体系的に分類することは現段階では必ずしも容易ではないが、「どのような断面のときはレイノルズ数の影響に気をつけるべきか、限界レイノルズ数以下で実験を行ったとき、その結果をどのように処理して設計にフィードバックさせるか」に対する答、目安が必要とされる。今後、さらに種々の断面に対してレイノルズ数依存性について実験を行いデータの蓄積を引き続き行うことが必要である。同時に、前述のようにレイノルズ数効果に対する体系的な理解を深めるためには、空力諸現象の発生メカニズムの解明が重要かつ近道である。従来避けてきたレイノルズ数というパラメータを積極的にメカニズムに取り入れた検討が今後なされるべきであろう。

(2) 高レイノルズ数における挙動

今回報告・検討がなされたレイノルズ数の範囲は、実構造物のそれと比べれば、依然オーダーが小さいため、これらの結果から直ちに実構造物の挙動を推定することは困難である。このため、自然風中での実構造物の観測データ（圧力測定など）を収集し、実験結果と比較検討を行うことが重要であると考えられる。委員会の中で、現在我国で建設中の長大橋梁を対象とした実構造物の表面圧力計測の計画も一部紹介された。この計画では、橋梁の主塔表面に開けられた化粧ボルトの穴を圧力孔として利用し、実橋における高レイノルズ数での圧力分布を計測し、風洞実験結果と対比させることにより、いわゆるレイノルズ数効果の調査を行うとするものである。

また、世界の現存する風洞設備の中には、高レイノルズ数を発生できる大規模あるいは特殊風洞も数多く、それらを利用した高レイノルズ数域における構造物の空力特性の調査研究例もある。今後、これらの風洞の積極的な利用の可能性も含め、高レイノルズ数域の特性評価の有効な一方法とすることができる。

さらに、高レイノルズ数の挙動を推定するための他の方法として数値流動解析が挙げられ、この方面に関する討議も度々委員会でなされた。現在の計算機の性能を考えれば、実構造物の応答推定が可能になるまでには、まだ相当に時間がかかるように思われるが、風洞実験と数値解析の関わりについて、今後も検討を重ねることが重要であろう。

最後に、本委員会（第1期）の構成メンバーを記す（敬称略）。

委員長：松本 勝（京都大学），委員：井上浩男（三井造船株式会社），宇都宮英彦（徳島大学），大屋裕二（九州大学），岡島 厚（金沢大学），小川一志（川崎重工株式会社），川谷充郎（大阪大学），北川 信（本州四国連絡橋公団），北沢正彦（阪神高速道路公団），木村吉郎（東京大学），久保喜延（九州工業大学），小林紘士（立命館大学），斉藤通（三菱重工株式会社），佐藤弘史（建設省），白土博通（京都大学），武内隆文（住友重機械工業株式会社），南條正洋（日立造船株式会社），樋上琇一（石川島播磨重工業株式会社），藤澤伸光（NKK），藤野陽三（東京大学），宮田利雄（横浜国立大学），山田 均（横浜国立大学），吉村 健（九州産業大学），米田昌弘（川田工業株式会社），前委員：保田雅彦（本州四国連絡橋公団），横山功一（勸学館建設技術センター），特別参加：平野廣和氏（中央大学）

なお、平成5年8月より宇都宮英彦新委員長のもと、第2期委員会が継続して活動中であり、第1期委員会で主に検討されたレイノルズ数効果の問題も含め、活発な研究活動を行っている。第2期より、岡南博夫（大阪府立工業高等専門学校），長尾文明（徳島大学），細見雅生（駒井鉄工株式会社），溝田武人（福岡工業大学）の4委員が新たに参加している。

参 考 文 献

- 1) 本州四国連絡橋公団耐風委員会相似則検討作業班報告書，1991年。
- 2) 松本・白石・白土・桂・西崎：隅切り矩形断面のレイノルズ数効果に関する研究，構造工学論文集，Vol. 38A，pp. 851～856，1992年。
- 3) 岡島・上野・阿部：隅切り矩形断面柱の空力特性に及ぼすレイノルズ数の影響，日本風工学会誌，第49号，pp. 1～12，1991年。
- 4) 井上・萩生田・船本・内藤：長大吊橋偏平断面補剛桁の耐風安定性に関する実験的研究，三井造船技報第135号，1988年。
- 5) 岡島・上野・西・原田・矢野・埜：L字形，T字形，十字形断面部材の空力特性，第12回風工学シンポジウム論文集，pp. 149～154，1992年。
- 6) 小川・酒井・松田：川崎重工の構造物用風洞について，日本風工学会誌，第17号，pp. 41～50，1983年。
- 7) 西崎・松本・白石・白土・桂・辻本：隅切り矩形断面におけるレイノルズ数効果に及ぼす乱流の影響，平成4年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，I-68，1992年。
- 8) 武内・松本・白石：タンデム配列ブラッグ角柱に発現する渦励振に関する研究，第12回風工学シンポジウム論文集，pp. 375～380，1992年。
- 9) 野上・久保・加藤：PC斜張橋断面の端部形状による空力特性，第45回土木学会年次学術講演会概要集（第I部門），pp. 942～943，1990年。
- 10) Y. Kubo, C. Nogami and K. Kato: Response Characteristics of Cable-Stayed Bridge by Fairing Shapes to the Wind Action, Proc. of Innovation in Cable-Stayed Bridge, pp. 167～174, 1991.
- 11) 久保・本多・野上・加藤・田崎：PC斜張橋の閉断面桁および開断面桁の剝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年。
- 12) 本多・久保・田崎・周：剝離流相互干渉法によるフェアリング形状の選定，第47回土木学会年次学術講演会概要集（第I部門），pp. 676～677，1992年。
- 13) 久保・本多・田崎：剝離流干渉効果によるPC斜張橋開断面桁の対風性能改善法，第12回風工学シンポジウム論文集，pp. 399～404，1992年。
- 14) 小石・久保・田崎：再付着断面桁の前縁剝離干渉作用について，第46回土木学会年次学術講演会概要集（第I部門），pp. 808～809，1993年。
- 15) 久保・野上・落田：PC斜張橋断面の空力応答特性に与えるRe数の影響，日本風工学会誌，第47号，pp. 33～34，1991年。
- 16) 野上・久保・本多・落田：縮尺の異なる橋梁断面模型の対風特性，第46回土木学会年次学術講演会概要集（第I部門），pp. 548～549，1991年。
- 17) 周・久保・前田・落田：橋梁基本断面柱のRe数によるSt数と応答特性，第48回土木学会年次学術講演会概要集（第I部門），pp. 776～777，1993年。
- 18) 久保・周：Re数に対する矩形断面柱のSt数と応答特性，日本風工学会誌，第55号，pp. 143～144，1993年。
- 19) 小野・平野・佐野・池ノ内：無重力落下カプセル制動システムの研究開発，三井造船技報第146号，1992年。
- 20) 佐野・平野・池ノ内・小野：管路内を高速で移動する物体に作用する空気力，機械学会論文集B編，（投稿中）。
- 21) 大庭，他：末端閉鎖管路内におけるカプセルの停止挙動に関する研究，資源素材学会誌，Vol. 105，1989年。
- 22) 地下無重力環境実験センター検討技術分科会：制動技術に関するシミュレーション実験報告書，地下無重力実験センター技術調査報告書，1988年。
- 23) 野田・宇都宮・長尾・中西・神谷：乱流境界層を用いた風洞実験における閉塞効果，土木学会第47回年次講演会概要集，I-269，1992年。
- 24) 野田・宇都宮・長尾・河井：境界層乱流中の2次元模型の閉塞効果，日本風工学会誌，第55号，pp. 103～104，1992年。
- 25) K. Takeda et al.: Wind tunnel blockage effects on drag coefficient and wind-induced vibration, Proc. of the 8th international conference on wind engineering, 1991. (1994. 3. 9 受付)