

# 鋼斜張橋箱桁断面の空力特性

小川 路加<sup>1)</sup> 木場 和義<sup>2)</sup>

斜張橋は長大橋だけではなく、中規模橋梁や歩道橋にも数多く採用されている橋梁形式である。斜張橋はフレキシブルな構造形式であるため、支間長が短い場合を除いて、その耐風安定性が問題になることが多い。

本研究では、中央径間が280mの中規模の鋼斜張橋を想定し、その断面として片側に歩道部をもつ偏平な逆台形鋼床版箱桁の耐風安定性照査の一部としてその空力特性を風洞試験により検討した。風洞試験は、主桁の2次元部分模型を使用したバネ支持試験と静的三分力試験を実施した。さらに、たわみの渦励振に着目してレイノルズ数の影響について若干の検討を行った。本文は、この風洞試験の内容について報告するものである。

キーワード：斜張橋，鋼床版箱桁，逆台形断面，風洞試験，レイノルズ数効果

## まえがき

斜張橋は主桁・塔・ケーブルで構成され、塔の形やケーブル配置を様々に変化させることにより、極めて設計自由度の高い橋梁形式である。また、その形状は近代的感覚にマッチし、独特の機能美を表現できることから、近年、景観に優れた斜張橋が数多く架けられている。

斜張橋は主桁・塔・ケーブル全体で構造システムを構成しており、また、力の分担に効率のよい軸力部材を使用しているため、構造全体としての剛性が同程度の桁橋と比較すると、相対的にその振動数は小さくなる。そして、このようなフレキシブルな構造物は、空気力学的には静的にも動的にも風の影響を非常に受けやすい。したがって、斜張橋ではその支間長が短い場合を除いて、基本設計の段階でその耐風安定性の検討が行われるのが一般的である<sup>1)</sup>。

ところで、橋梁断面は一般的に、その要求機能を満たすうえから翼断面のような流線型をもつことはなく、風の流れに対して角張ったところや凹凸をもつ、いわゆる鈍い物体(bluff body)で、そ

の断面周りの空気の流れは剥離を伴う非常に複雑な様相を呈している。近年、コンピュータ技術の飛躍的な発達を背景にして、CFD（数値流体解析）により橋梁断面の空力特性を検討する試みが数多くなされている<sup>2)</sup>。耐風工学において、数値解析的にアプローチすることは、耐風設計の合理化や風洞実験作業の省力化を図るうえで極めて有益である。しかし、解析手法の適用限界やコンピュータの能力上の制約などのために、橋梁断面の空力特性に関する諸問題を詳細に解析することはまだまだ困難であり、一般的には風洞実験により行うのが現状である。すなわち、2次元部分模型を使用したバネ支持試験や静的三分力試験などによりその基本的空力特性を検討し、必要に応じて3次元全橋模型による風洞実験を行っている。

そこで本研究では、大型河川を渡河する中央径間280mの鋼斜張橋を想定して、その主桁断面として中規模斜張橋によく採用される逆台形鋼床版箱桁断面をとりあげ、実験例の少ない片側に歩道部をもつ箱桁断面の空力特性を風洞試験により検討した。また、フェアリングを用いた制振対策を検討してその効果を調べた。さらに、たわみの渦励振に着目してレイノルズ数（以下、「Re数」と記

1) 技術部技術課 2) 技術部技術課係長

す)の影響を調べた。

### 1. 構造の概要

本研究で対象とした鋼斜張橋は、都市部を流れる大型河川を渡河する中央径間280mの鋼斜張橋である。断面形状は総幅25.1mで桁高3.0mの偏平な逆台形箱桁断面であり、片側だけに歩道部を有するものである。また、主塔形状が一本独立柱であることを想定して、断面中央部には中央分離帯を持つ形状とした。図-1に主桁断面形状を、表-1に構造諸元を示す。なお、単位長さ当たりの極慣性モーメント、たわみ振動数およびねじれ振動数は、道路橋耐風設計便覧<sup>3)</sup>(以下、「便覧」と記す)の推定値により決定した。

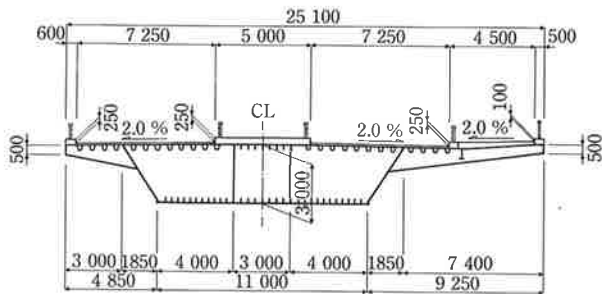


図-1 対象斜張橋断面図

表-1 対象斜張橋構造諸元

橋梁形式	鋼斜張橋	
塔形式	一本独立柱	
中央径間長	280m	
単位長さ重量	186326N/m	
単位長さ極慣性モーメント	1078045N・s <sup>2</sup> /m	
設計基準風速	45.6m/sec	
振動数	たわみ	0.355Hz
	ねじれ	1.064Hz

### 2. 風洞実験

#### (1) 風洞および模型

本研究に使用した風洞は、当社大阪工場構内に設置された風洞試験設備である<sup>4)</sup>。風洞の性能を表-2に示す。

模型は縮尺1/50で製作した長さ1.200mの2次元剛体部分模型であり、模型の回転中心は重心とせん断中心との1/2点とした。

表-2 風洞性能

風洞形式	エッフェル型
測定部寸法	幅1.5m×高さ2.0m×長さ16m
風速範囲	0.5～25.0m/s
風速偏差	1.0%以内
乱れ強度	0.5%以内
静圧勾配	0.9%/m

#### (2) バネ支持模型試験

対象斜張橋断面の空力特性を検討するためにバネ支持模型試験を実施した。

試験は、模型をたわみ振動とねじれ振動の2自由度で支持し、任意の風速下での弾性挙動を調査した。なお、実橋と模型との間では幾何学的形状の他に、慣性、減衰および風速に関する無次元パラメータを相似させた。迎角 $\alpha$ については、 $\alpha = 0^\circ, \pm 3^\circ$ で試験を実施した。表-3にバネ支持模型試験の試験条件を示す。

表-3 2次元バネ支持試験の試験条件

諸元	単位	縮尺比	実橋	模型
長さ	m	$1/n = 1/50$	—	1.200
単位長さ重量	N/m	$1/n^2 = 1/50^2$	186326	74.5
単位長さ極慣性モーメント	N・s <sup>2</sup> /m	$1/n^4 = 1/50^4$	1078045	0.172
たわみ振動数	1/sec	$S = 6.58$	0.355	2.336
ねじれ振動数	1/sec	$S = 6.58$	1.064	7.001
対数減衰率	—	1	0.020	0.020

#### (3) 静的三分力試験

対象斜張橋断面の静的空気力係数を求めるため静的三分力試験を実施した。任意の迎角 $\alpha$ に設定した模型に風を作用させ、模型両端部に取り付けた2台のロードセルにより静的空気力を検出した。静的三分力係数は次式により求めた。

$$\text{抗力係数: } C_D = \frac{P_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A_n} \quad \text{式(1)}$$

$$\text{揚力係数: } C_L = \frac{P_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 B} \quad \text{式(2)}$$

$$\text{モーメント係数: } C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V^2 B^2} \quad \text{式(3)}$$

ここに、 $P_D$ : 風軸方向の力(N)

$P_L$ : 風軸直角方向の力(N)

- M : 橋軸まわりのモーメント(N・m)
- $\rho$  : 空気密度(kg/m<sup>3</sup>)
- V : 風速(m/sec)
- A<sub>n</sub> : 有効鉛直投影面積(m<sup>2</sup>)
- B : 断面の総幅(m)

(4) Re 数の影響

Re数は式(4)で表される無次元パラメータで、空気の慣性力( $\rho V^2 D^2$ )と粘性力( $\mu VD$ )との比として定義される<sup>5)</sup>。

$$Re = \rho VD / \mu = VD / \nu \quad \text{式(4)}$$

ここに、V : 風速(m/sec)

- D : 桁高(m)
- $\rho$  : 空気密度(kg/m<sup>3</sup>)
- $\mu$  : 空気の粘性係数(Pa・sec)
- $\nu$  : 空気の動粘性係数(m<sup>2</sup>/sec)

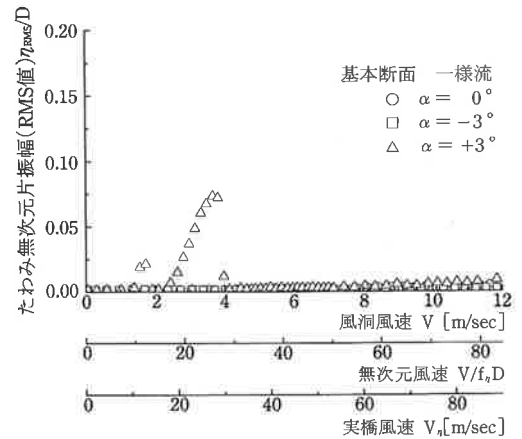
一般に橋梁断面における空力振動の照査を目的とした風洞実験においては、Re数の影響は小さいものとして実験が行われる。すなわち、円柱などの丸みのある断面ではRe数により剥離点が移動するため、その空力特性にRe数の影響が顕著に現れるが、橋梁断面のように角のある断面では剥離点が固定され、Re数による影響は小さいとされてきた。しかし、剥離点が固定されるような断面においても、Re数による影響を受ける断面のあることが最近の研究によりわかってきている<sup>6)</sup>。特に、空力振動に対して、フェアリングやフラップなどの付加物による空気力学的制振を行う場合、その剥離せん断層の空力特性はRe数に対して敏感であることから、Re数の影響を考慮して風洞実験の結果を評価する必要があると考える。

そこで、本研究で対象としている斜張橋断面について、たわみ渦励振に対するRe数の影響を調べた。まず、バネ定数の異なる数種類のコイルバネにより縮尺1/50模型の固有振動数を変化させ、それぞれのたわみ渦励振応答を調査する。さらに、縮尺1/100の模型を用意し、同様の手法で異なるRe数の条件でのたわみ渦励振応答を調査する。そして、Re数を比較的広い範囲にわたって変化させて、たわみ渦励振に対するRe数の影響を調査した。

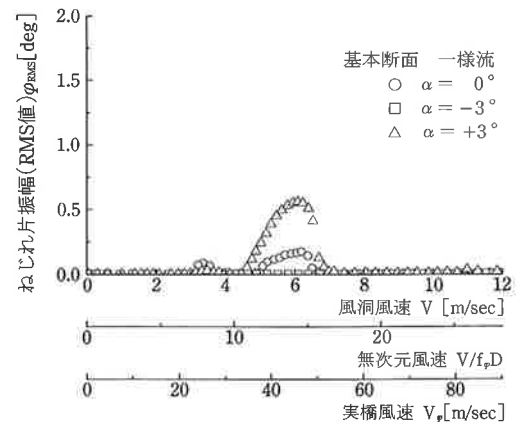
3. 実験結果

(1) バネ支持模型試験

歩道部を上流側とした場合の、基本断面の一樣



(a) たわみ応答



(b) ねじれ応答

図-2 基本断面の空力特性(歩道部上流側)

流中におけるバネ支持試験結果を図-2に示す。図-2においてはηはたわみ振動で、φはねじれ振動である。

たわみ振動に関して、迎角α=0° およびα=-3° では設計基準風速45.6m/secを大幅に超えた風速域まで、渦励振やねじれフラッターなどの空力弾性振動は発生しなかった。しかしながら、α=+3° のときには、実橋風速V<sub>n</sub>=12m/secおよび19m/sec付近で渦励振が発生した。表-4に便覧による渦励振発現風速の推定値を示すが、その推定値と実験値はよく一致している。一方、渦励振応

表-4 便覧による推定値との比較

	便覧推定値			実橋換算(α=+3°)	
	発現風速 [m/sec]	最大振幅	許容振幅	発現風速 [m/sec]	最大振幅
たわみ渦励振	17.8	7.9 cm	11.2 cm	18.5	31.0 cm
ねじれ渦励振	35.6	0.13°	0.14°	35.1	0.79°

注) 実橋の振幅は、渦励振応答を調和振動と仮定して、実験で得られたRMS値を√2倍した値に換算している。

答振幅については、便覧によると発現振幅は許容値を下回る推定値であるが、実験では許容値の約3倍もの応答振幅が確認された。スパンが大きく片側に歩道部を持つ断面では、便覧による振幅の推定値を適用できないと考える。

ねじれ振動に関しては $\alpha = -3^\circ$ では問題となる振動は発生していないが、 $\alpha = 0^\circ$ および $\alpha = +3^\circ$ においてはともに許容振幅を上回るねじれ渦励振が発生した。

車道部を上流側にした場合の、基本断面の一樣流中におけるバネ支持試験結果を図-3に示す。歩道部が上流側のときと同様に、 $\alpha = +3^\circ$ でたわみおよびねじれともに、ほぼ同じ風速域にて許容値を超える渦励振が発生したが、応答振幅に関してたわみ渦励振は約15%、ねじれ渦励振は約30%低減している。以下では、歩道部を上流側とした場合の実験結果についてのみ記す。

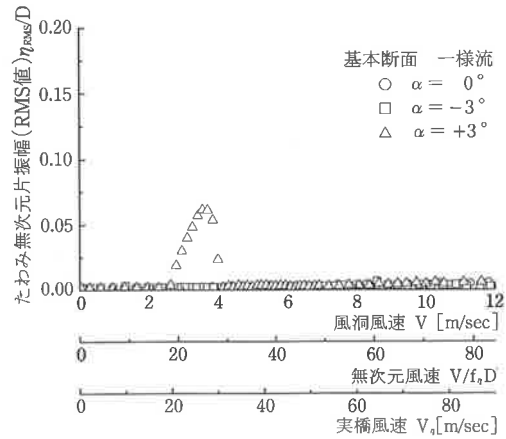
基本断面のたわみ渦励振応答に対する減衰の影響を示したものが図-4である。図-4では、振幅を減衰 $\delta$ の関数で表現できるとしたときの近似関数と、たわみ渦励振の許容振幅も合わせて示している。近似関数を式(5)に示す。

$$\text{Log}_{10}(\eta_{\text{RMS}}/D) = -0.43\text{Log}_{10}(\delta) - 1.88 \quad \text{式(5)}$$

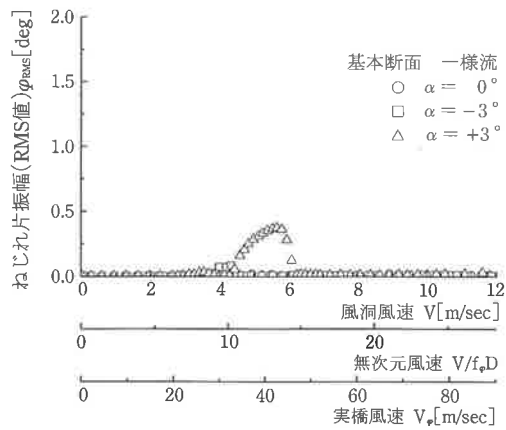
式(5)の関数はTMDの設計時によく使用されており、今回の実験でも実験結果と近似関数はよく適合している。たわみ渦励振の振幅を許容値以下にするためには、構造減衰を $\delta \approx 0.09$ 以上にする必要があると、例えば、TMDによる構造力学的制振対策を計画する場合、付加減衰が $\delta \approx 0.07$ となるようなTMDを設計すればよいことになる。

制振対策として図-5に示すような鋼床版端部に設置した3種類のフェアリングを検討し、その耐風安定性の効果を調べた。その結果を図-6および図-7に示す。F1断面では耐風設計上問題となるような空力振動は発生していない。フェアリングを設置することにより、上流側鋼床版端部からの流れの剥離が抑えられて渦励振が抑制されたものと考えられる。本文では図を省略したが、F2断面の実験結果もF1断面と同様に、問題となる空力振動は発生しなかった。F3断面では基本断面と同様に、実橋風速20~30m/sec付近で許容振幅を大幅に上回る渦励振が認められた。

渦励振の発生が確認された基本断面と、フェアリングによる制振効果の認められたF1断面を対象



(a) たわみ応答



(b) ねじれ応答

図-3 基本断面の空力特性(車道部上流側)

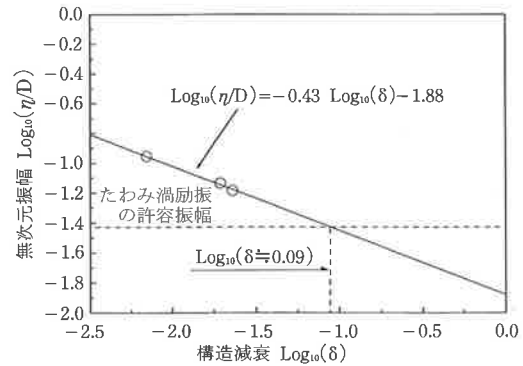


図-4 たわみ渦励振に対する減衰の影響

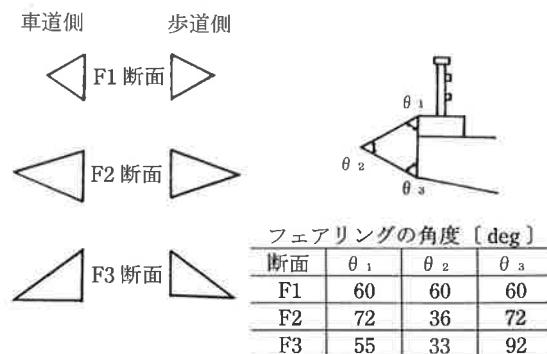
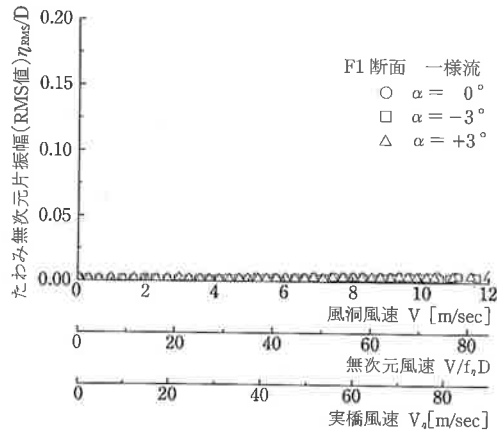
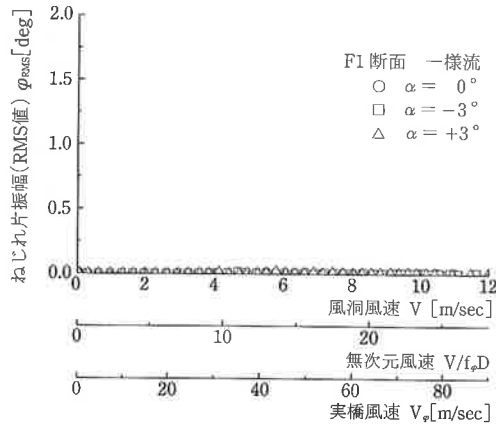


図-5 フェアリング形状

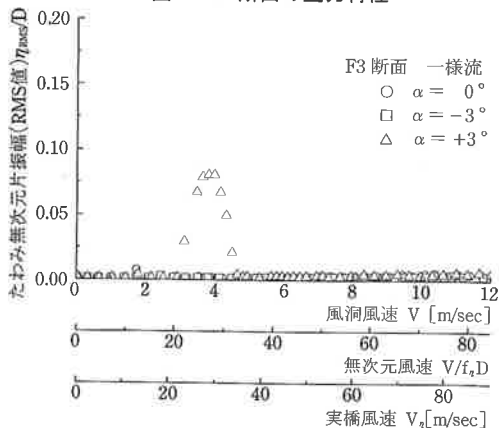


(a) たわみ応答

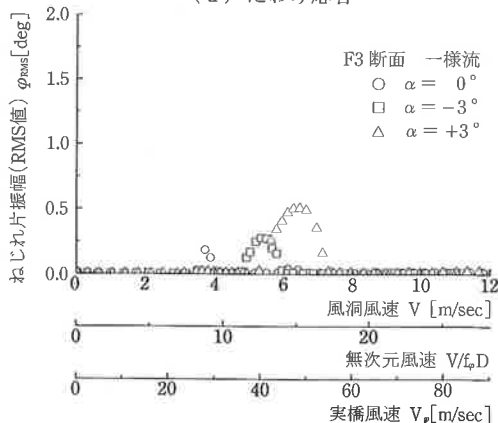


(b) ねじれ応答

図-6 F1断面の空力特性

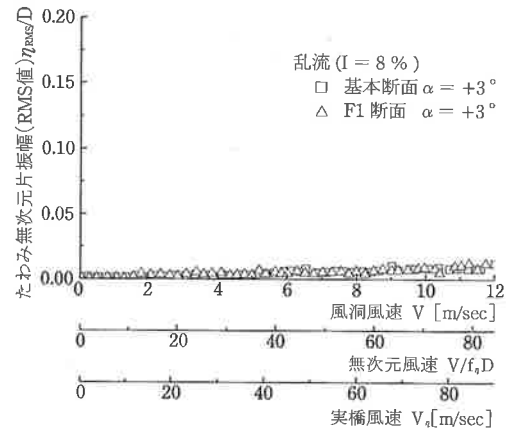


(a) たわみ応答

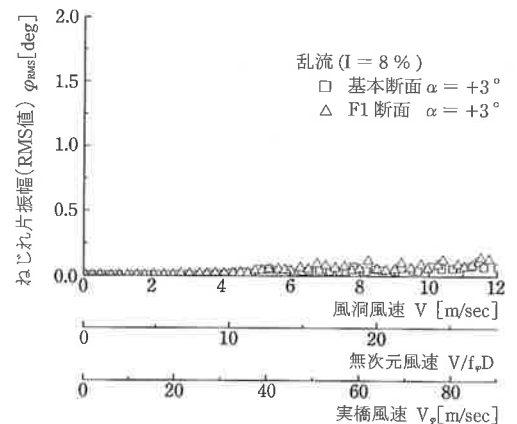


(b) ねじれ応答

図-7 F3断面の空力特性



(a) たわみ応答



(b) ねじれ応答

図-8 乱流中での応答

として、乱流中での空力特性を調査した。なお、乱流は格子を用いた乱流（乱れ強度 $I=8\%$ ）を使用した。その結果を図-8に示す。基本断面は一樣流中で渦励振が発生したが、乱流中では発生していない。図-8では、迎角 $\alpha=+3^\circ$ の試験結果のみを示しているが、 $\alpha=0^\circ$  および $-3^\circ$ の試験結果も同様に渦励振は発生しなかった。

## (2) 静的三分力試験

基本断面およびF1断面の静的三分力試験の結果を図-9および図-10に示す。実験は風洞風速 $5\text{m/sec}$ と $10\text{m/sec}$ の2種類の異なる風速で実施した。

図-9より基本断面の静的三分力特性は、風速の違いによらずほぼ同じ傾向を示している。揚力係数 $C_L$ は迎角 $\alpha=-13^\circ$ から $+6^\circ$ までの範囲では増加しており、 $\alpha=+6^\circ$ から $+15^\circ$ の範囲において若干減少している。空力モーメント係数 $C_M$ は $\alpha=-13^\circ$ から $+4^\circ$ までの範囲では増加し、それ以後はほぼ一定値である。

図-10よりF1断面の静的三分力特性は、抗力係数に風速の違いによる影響が若干見られるものの、

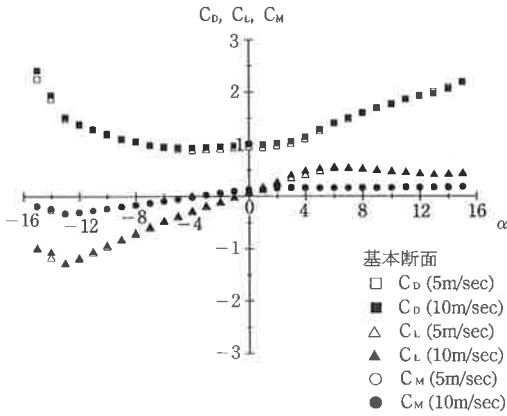


図-9 基本断面の三分力特性

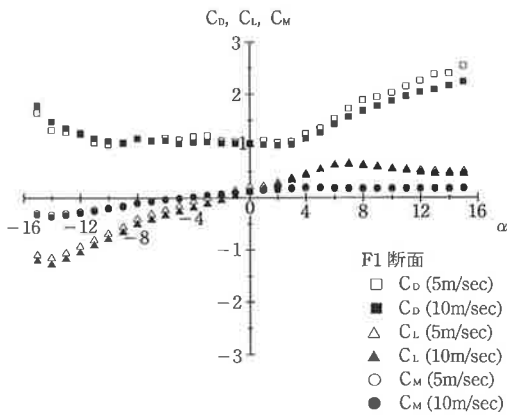


図-10 F1断面の三分力特性

基本断面とほぼ一致している。基本断面、F1断面ともに迎角  $\alpha = -3^\circ$  から  $+3^\circ$  までの範囲では、 $\alpha$  に対する揚力係数  $C_L$  の傾き  $dC_L/d\alpha$  は正值であることから、ギャロッピングは発生しないことがわかる。同様にして、迎角  $\alpha$  に対するモーメント係数  $C_M$  の傾き  $dC_M/d\alpha$  も正值であり、ねじれフラッターは発生しないことがわかる。この静的三分力特性とバネ支持試験の結果は一致している。

(3) たわみ渦励振に対する Re 数の影響

基本断面のたわみ渦励振に対する Re 数の影響をまとめたものが図-11である。実験は迎角  $\alpha = +3^\circ$  で行った。なお、表-5に示すように、実験ケースの中には、模型支持条件の制約から減衰を  $\delta = 0.02$  にあわせることができなかったケースがあった。一般に渦励振応答は減衰  $\delta$  と質量  $m$  を乗じたスクルートン数  $S_c = 2m\delta / \rho BD$  に依存している<sup>7)</sup>。そこで、Re数の影響による渦励振応答の差を見るためには、スクルートン数の差による影響を除去する必要がある、実験より得られた振幅と

表-5 基本断面のたわみ渦励振に対するRe数の影響

CASE	最大振幅発生 Re 数	模型縮尺	最大振幅発生無次元風速	対数減衰率	無次元振幅
1	$0.32 \times 10^4$	1/100	18.5	0.020	0.026
2	$0.82 \times 10^4$	1/100	20.6	0.020	0.060
3	$0.99 \times 10^4$	1/100	20.1	0.039	0.067
4	$0.94 \times 10^4$	1/50	21.1	0.020	0.057
5	$1.19 \times 10^4$	1/50	20.5	0.020	0.062
6	$1.60 \times 10^4$	1/50	18.8	0.042	0.065

減衰の関係(式(5))を用いて、スクルートン数の影響を除去して応答振幅を評価している。

表-5よりわかるように、多少のばらつきは見られるもののたわみ渦励振が最大振幅となる無次元風速はRe数の変化による影響はほとんどみられない。また、図-11より、たわみ渦励振による最大振幅は  $Re = 0.5 \times 10^4$  付近を境に大きく変化しているのが確認できる。すなわち、たわみ無次元片振幅の最大値は、 $Re \geq 0.5 \times 10^4$  の領域では0.06程度であるのに対して、 $Re < 0.5 \times 10^4$  では0.03程度と半分程度になる。

同様にして、F1断面のたわみ渦励振に対する Re 数の影響をまとめたものが図-12である。図-12より  $Re = 0.5 \times 10^4$  付近でたわみ振動が発生しているのが確認できる。先に実施したF1断面の耐風安定性照査では、問題となるような振動は発生して

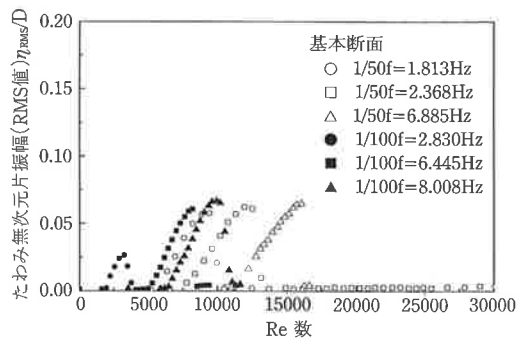


図-11 基本断面におけるRe数の影響

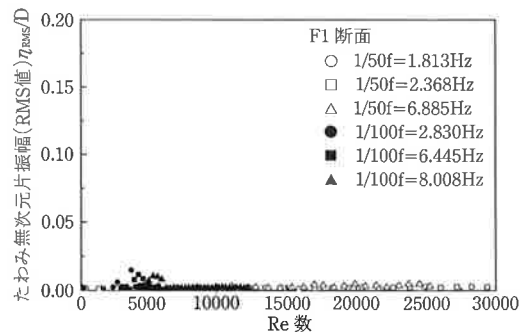


図-12 F1断面におけるRe数の影響

いない。したがって、基本断面と同様にF1断面においても、たわみ渦励振応答はRe数の影響を受けたものと考えられる。

既往の研究によると、橋梁断面における空力応答特性のRe数による影響は、あるRe数（ジャンプレイノルズ数）を境界として大きく特性が変化する場合のあることが報告されている<sup>9)</sup>。例えば、岡島らは、隅切り断面柱の空力特性が $Re \approx 0.8 \times 10^4$ を境に急変することを風洞実験と流れの可視化実験により明らかにしている<sup>8)</sup>。また、久保らは、PC斜張橋閉断面の後流ストローハル数を測定して、 $Re < 0.5 \times 10^4$ 領域でRe数に対する影響があるという結果を得ている<sup>9)</sup>。今回の実験でも $Re = 0.5 \times 10^4$ 付近を境に空力特性が変化している。このことから、今回の断面形状についても、既応の実験結果と同様の傾向を示しているといえる。しかし、様々な断面におけるジャンプレイノルズ数と応答振幅に与える影響を調べるためには、今後さらなる実験の蓄積が必要と考える。

#### 4. まとめ

本研究では、中央径間280mの鋼斜張橋を想定して、主桁の2次元部分模型を用いた風洞試験により、その主桁断面の空力特性について検討した。実験の結果と考察をまとめると以下ようになる。

- ・基本断面では設計基準風速以下の風速域で許容値を大幅に超える渦励振が発生した。一方、ねじれフラッターなどの発散振動は発生しなかった。
- ・適当なフェアリングを設置することにより、基本断面で発生した渦励振を抑えることができた。
- ・基本断面およびF1断面について、たわみ渦励振に対するレイノルズ数の影響のあることがわかった。

#### あとがき

今回、扁平な逆台形鋼床版箱桁断面を対象としてその空力特性の検討を行った。合わせて、対象断面におけるRe数の影響についての若干の検討も行った。その結果、Re数によりたわみ渦励振の応答振幅が影響を受けることがわかった。しかし、今回の試験では、異なるRe数の条件での応答変化

を確認したにとどまっております。橋梁断面に対するRe数の影響を議論するにはまだまだ不十分である。今後、様々な断面において、後流測定によりストローハル数を調査したり、断面周りの剥離の様相を可視化により調査することなど体系的に検討する必要があると考えられる。

最後になりましたが、本研究における風洞実験に際してご協力頂いた関係者各位に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会：鋼斜張橋—技術とその変遷—, 1990.9.
- 2) 例えば、枝元勝哉・丸岡 晃・米田昌弘：扁平箱桁断面の静的空力特性に対する2次元および3次元数値流体解析とその適用性評価, 土木学会論文集, No. 619/I-47, pp.47-58, 1999.4.
- 3) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧, 1991.7.
- 4) 細見雅生・木場和義：風洞実験設備の紹介, 駒井技報, Vol.9, pp.97-102, 1990.3.
- 5) 岡内 功・伊藤 学・宮田利雄：耐風構造, 丸善, 1977.5.
- 6) 土木学会構造工学委員会：風洞実験相似則検討小委員会活動成果報告書, 1994.10.
- 7) 日本鋼構造協会：構造物の耐風工学, 東京電機大学出版局, 1997.11.
- 8) 岡島 厚・上野久儀・阿部彰人：隅切り矩形断面柱の空力特性におよぼすレイノルズ数の影響, 日本風工学会誌, 第49号, pp.1-13, 1991.11.
- 9) 久保喜延・野上千秋・周 建芹・加藤九州男：橋梁断面および構造基本断面におけるRe数の影響について, 第13回風工学シンポジウム論文集, pp.119-124, 1994.11.