

## 音響刺激による橋梁断面の剥離せん断層不安定性増幅に関する研究

松本 勝・伊藤 裕一・八木 知己・徳元 真一  
白 丙基・白土 博通・白石 成人

### ON THE ENHANCEMENT-PROPERTIES OF SHEAR LAYER INSTABILITY AROUND BRIDGE SECTION BY APPLIED SOUND

By Masaru MATSUMOTO, Yuichi ITO, Tomomi YAGI, Shinichi TOKUMOTO,  
Byung-gi BAEK, Hiromichi SHIRATO and Naruhito SHIRAISHI

#### Synopsis

The mechanism of vortex-induced oscillation of bluff section is closely related with the instability of separated shear around its body. The shear layer can be easily stimulated by self-movement of the body or external disturbance such as flow perturbation, applied sound with a specified frequency fluctuation and so on.

In this study, the investigation of vortex-induced oscillation for 2-D rectangular section was performed by the way of shear layer instability stimulation by applying sound. Furthermore, geometrical shape effect on the response characteristics of the vortex-induced oscillation of edge girder bridge section was also investigated on the basis of applied sound technique.

Additionally, the effect of turbulence on vortex-induced oscillation was fundamentally investigated by use of applied sound technique from the turbulent frequency effect point of view.

#### 1. ま え が き

近年、橋梁構造物の長大化、長径間化に伴って、風が構造物に及ぼす影響、特に風の作用による空力不安定現象についての議論が高まり、研究が急速に進歩している現状にある。しかし各種空力現象の発生機構、制振対策等については、いまだ不明な点も数多く残されている。その一方で橋梁構造物は、社会の要請に応えるため益々長大化、長径間化する傾向にあり、その耐風安定性が大きな問題となってきている。このように風の作用による橋梁構造物の各種空力振動現象の中で、渦励振はフラッタのように発散型の破壊的振動ではないが、比較的低風速で発生することから、構造物の使用性に問題をきたしたり、部材疲労を引き起こす可能性がある。従って耐風設計を行なう際には、最大応答振幅や発現風速についての、適切な把握が必要であると云える。従来の研究によると渦励振は、物体後流のカルマン渦放出周波数と物体の固有振動数が一致する付近で生じる、一種の強制振動であるカルマン渦型渦励振と、物体周りの剥離せん断層の不安定性が増幅されることによって、物体前縁から剥離した渦が、物体自身の振動によって生じる後縁二次渦と一体化するために生じる、いわゆる自己励起型渦励振（前縁剥離型渦励振）の2つに大別できることが知られている<sup>1)</sup>。

剥離せん断層の不安定性は、自己励起型渦励振のみならず、ギャロッピングやねじれフラッタの発生と

も密接な関係にあり、物体周りの条件やある種の外的攪乱によってその状態が容易に変化するという、極めて不安定な特性を示す。従って剥離せん断層の挙動を解明することで各種空力不安定現象の発生機構が明らかになると思われる。また剥離せん断層は、物体自身の振動の他 Pulsating Flow, Applied Sound といった外的刺激によっても容易にその不安定性が増幅され、ある特定の周波成分の渦生成を行なうことが知られている。

本研究では、矩形断面周りの剥離せん断層を Applied Sound (音響付加) を用いて刺激し、その不安定性を増幅させ、矩形断面の渦励振特性の解明を試みる。更に近年斜張橋などで多く用いられている Edge Girder 断面の、渦励振に対する断面形状効果を Applied Sound 実験によって調べ、同時にバネ支持自由振動実験も並行して行ない、断面形状選定時における Applied Sound 実験の有効性についても考察する。また Applied Sound の応用として、音響を乱流中のある特定の周波数成分刺激とみなし、バネ支持した矩形断面に付加することで、渦励振に対する乱流の周波数効果について考察を加える。

## 2. 剥離せん断層の不安定性と矩形断面の渦励振特性

### 2.1 概 説

矩形断面周りの流れの様子は、上流側の剥離点が隅角部に固定されているために、比較的レイノルズ数  $Re=UD/\nu$  ( $U$ : 平均流速,  $D$ : 代表長さ,  $\nu$ : 動粘性係数) の影響を受けにくいといわれているが、断面辺長比  $B/D$  ( $B$ : 幅員,  $D$ : 桁高) によって流れの様子は大きく変化する<sup>2)</sup>。 $B/D$  が 2 より小さいような断面は、前縁から剥離した流れはそのまま断面背後に流れ込み、時間平均的にも非定常的にも断面側面に再付着しない、いわゆる完全剥離型の断面である。また  $B/D=0.62$  においてこの断面背後への巻き込みが最も強くなることも知られている<sup>3)</sup>。これより断面辺長比が大きくなり  $B/D=2.8$  程度になると、剥離流れは瞬間的に断面に再付着するようになり、さらに  $B/D$  が 6 程度になると、流れは定常的に断面後部に再付着するようになる。断面に発生する渦励振の種類も、この断面辺長比すなわち剥離流の形状と大きな関係があり、 $2 \leq B/D < 6$  程度では剥離せん断層の不安定性と密接な関連のある自己励起型渦励振 (前縁剥離型渦励振) が生ずる。またこの自己励起型渦励振の開始無次元風速は、たわみ渦励振の場合、 $(1/n) 1.67 B/D$ , ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) であることも知られている<sup>1)</sup>。またこれ以外の断面辺長比では、物体後流のカルマン渦による一種の強制振動であるカルマン渦型渦励振が生じるとされている。

さて前述のように、自己励起型渦励振は剥離せん断層の不安定性と極めて深い関係にあるが、Michalke<sup>4)</sup> は、せん断層を特徴づけるパラメータである運動量厚さ  $\theta_0$  で定義される無次元周波数  $f\theta_0/U_0$  ( $f$ : せん断層内の速度変動周波数,  $U_0$ : 接近流速) がある範囲でのみ、剥離せん断層の不安定性増幅が可能であるとしている。また筆者ら<sup>5)</sup> は、Pulsating Flow によって剥離せん断層の不安定性を増幅し、自己励起型渦励振の発現する断面辺長比では、開始無次元周波数の 2 倍・4 倍で剥離せん断層の不安定性が増幅され、同時対称渦を放出するとしている。Parker, Welsh<sup>6)</sup> は applied sound によって種々の断面比の矩形断面周りの剥離せん断層を刺激し、その不安定性増幅特性を調べた。その中で断面後流の流速変動周波数特性により、矩形断面の断面辺長比を 4 種類に分類している。

そこで本研究では固定支持した矩形断面に音響を付加することで、断面周りの剥離せん断層を刺激し、その不安定性を増幅させて、間接的に矩形断面の渦励振応答特性の把握を試みた。従来の pulsating flow による実験では、模型の上下面を同相刺激していたが、音響を使用することで逆相刺激が可能となり、模型自身の振動による剥離せん断層刺激に対応した刺激となっている。

### 2.2 実験概要

本実験で対象とした断面は、Table 1 に示すような断面辺長比  $B/D=2, 3, 4, 5, 6, 8$  の二次元矩形

Table 1. Properties of rectangular section models

| B/D | B(cm) | D(cm) | St   | 1/St | 1.67B/D |
|-----|-------|-------|------|------|---------|
| 2   | 10    | 5     | 0.08 | 12.5 | 3.33    |
| 3   | 15    | 5     | 0.17 | 5.88 | 5.00    |
| 4   | 16    | 4     | 0.13 | 7.69 | 6.67    |
| 5   | 20    | 4     | 0.11 | 9.09 | 8.33    |
| 6   | 18    | 3     | 0.17 | 5.88 | 10.00   |
| 8   | 20    | 2.5   | 0.19 | 5.26 | 13.30   |

断面である。模型は木製で、模型表面には表面圧力を測定するための圧力孔が設置されており、気流の二次元性を確保するために、模型端部に端板が設けられている。また  $B/D=2, 3$  断面の実験で用いたスプリッタープレートは木製で、その大きさは長さ 910 mm, 幅 600 mm である。なおスプリッタープレートは模型の後流域に 8 mm の間隔で設置した。

使用した風洞は、京都大学工学部土木工学教室に設置された吹き出し式エッフェル型風洞（測定部高さ 1.0 m, 幅 0.7 m, 長さ 5.0 m）で側面境界層及び模型支持アームによる気流の攪乱を防止するために、測定部側面より 3.5 cm の位置に導流壁を設け、模型設置位置付近ではほぼ均一な

風速分布になること、主流方向乱れ強さが時間平均風速 4 m/sec 付近で 0.5% 以下になることが確認されている。風速は 0 ~ 15 m/sec の範囲で連続的に制御できる。なお平均流速の測定は、NPL 型ピトー管により総圧、静圧を検出し、その差圧をデジタルマノメータ (OKANO WORKS LTD, DP-20 A) で検出した。

音響は風洞の上下面にそれぞれ 7 個のスピーカー (FOSTEX FW 100) を設けて、周波数発振器 (NF ELECTRONIC INSTRUMENTS E-1011 A) によって調節した周波数を、パワーアンプ (TRIO L-07 M) によって増幅して発生させ、その周波数をユニバーサル・カウンタ (日置電気 K.K. 3601 型) により検出した。音響による刺激方法は、模型の上面と下面を交互に刺激するように、上面からの音響と下面からの音響が  $180^\circ$  の位相差をもつようにした。(以下逆相刺激と呼ぶ)

模型表面の圧力測定は、測定断面を迎角  $\alpha = 0^\circ$  で風洞内に固定支持して行なった。圧力測定点は模型上面の前縁と後縁とし、表面圧力は圧力孔より模型内のアルミ製導圧管を通じて模型端部に導き総圧とし、ビニール製の導圧管により差圧計に入力、差圧計の他方には静圧を入力した。そして両者の差圧をプレッシャーマイク (豊田工機 DD 101 K) を用いて電気信号として検出し、直流増幅器 (豊田工機 AA 2300), ローパスフィルタ (NF 回路設計ブロック K.K. E 3201) を介して、スペクトルアナライザ (三栄測器 Signal Processor 7T 16) により解析した。圧力変動のパワースペクトルは、風速 5 (m/s) のときのピトー管の総圧をキャリブレーションとして用いた。なお本実験では、音響周波数を  $f_s = 16$  Hz に固定して、風洞内風速を変化させることで無次元周波数  $fsD/U$  を変化させた。

### 2.3 実験結果及び考察

本研究では、各無次元周波数 (無次元風速) で得られた圧力変動パワースペクトル密度 (Fig. 1 参照) の周波数  $f = f_s$  (矢印) でのピーク値  $Sp(f_s)$  を読み取り、無次元周波数  $fsD/U$  もしくは無次元風速  $U/fsD$  に対する  $Sp(f_s)$  の変動を調べた。

#### (1) $B/D = 2$ 断面

断面辺長比  $B/D = 2$  の断面は前述のように完全剝離型の断面であるが、バネ支持自由振動実験では自己励起型 (前縁剝離型渦励振) が観察される。音響付加実験の結果を Fig. 2 に無次元風速  $U/fsD$  に対する  $Sp(f_s)$  の変化として示す。  $Sp(f_s)$  の最大値は、自己励起型渦励振の開始無次元風速  $U/fsD = 1.67 B/D$  でなくストロハ

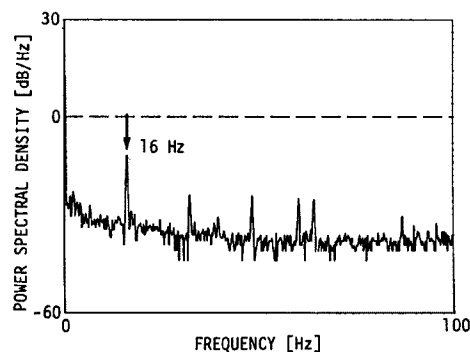


Fig. 1. Power spectral density of unsteady pressure. ( $B/D=5$  rectangular section,  $U/fsD=8.33$ )

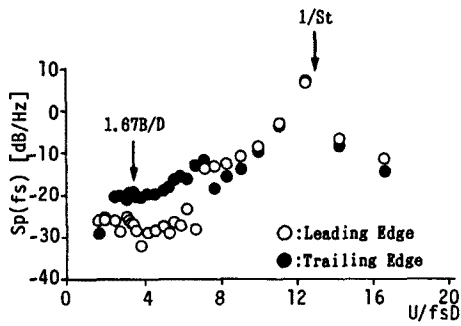


Fig. 2.  $Sp(fs)$  V.S. wind velocity diagram. ( $B/D=2$  rectangular section)

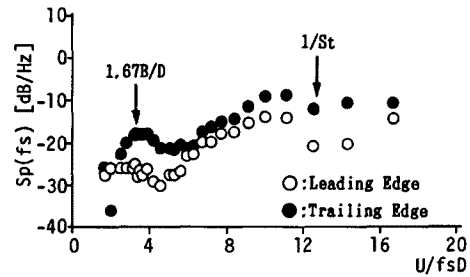


Fig. 3.  $Sp(fs)$  V.S. wind velocity diagram. ( $B/D=2$  rectangular section with splitter plate)

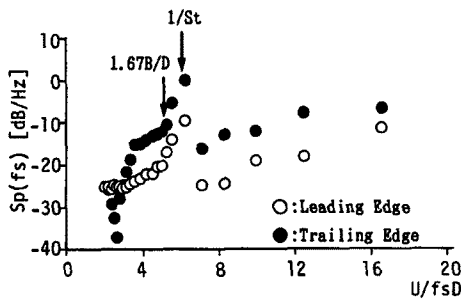


Fig. 4.  $Sp(fs)$  V.S. wind velocity diagram. ( $B/D=3$  rectangular section)

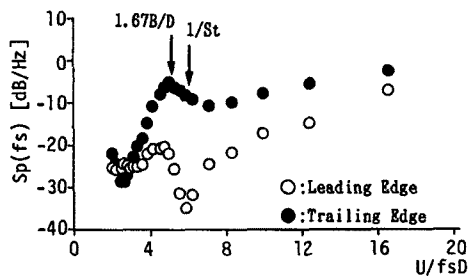


Fig. 5.  $Sp(fs)$  V.S. wind velocity diagram. ( $B/D=3$  rectangular section with splitter plate)

ル数の逆数 ( $1/St$ ) 付近にあることから、この断面周りの剥離せん断層はカルマン渦の影響を強く受けているものと思われる。そこでカルマン渦の影響を排除する目的で、断面の後流域にスプリッタープレート (長さ 910 mm, 幅 600 mm, 模型背面との間隔 8 mm) を挿入し同様の実験を試みた。その結果を Fig. 3 に示す。これより  $Sp(fs)$  は、後縁で  $U/fsD = 1.67 B/D$  付近に比較的緩やかなピークがみられるのみである。従ってこの辺長比の断面は外的刺激によって剥離せん断層の不安定性が増幅されにくいと考えられ、これは文献 7 における結果と一致している。しかしこの断面は、バネ支持自由振動実験では自己励起型渦励振が観察されることから、断面自身の振動による刺激では剥離せん断層の不安定性が増幅されていると考えられる。

#### (2) $B/D=3$ 断面

$B/D=3$  の断面は、前縁から剥離した流れが断面後部に瞬間的に再付着する断面である。この断面の実験結果は Fig. 4 に示す通り、 $B/D=2$  の断面と同様に  $Sp(fs)$  は  $1/St$  付近でピークがみられる。このことからスプリッタープレートを挿入した断面についても実験を行ない、その結果を Fig. 5 に示す。図よりスプリッタープレートを挿入すると、 $Sp(fs)$  のピークは  $U/fsD = 1.67 B/D$  付近になり、音響によって剥離せん断層が刺激されているものと考えられる。このことからこの断面は、音響による刺激によって剥離せん断層の不安定性は増幅されるものの、スプリッタープレートを挿入しない場合には、物体後流のカルマン渦による刺激の方が強いため、 $1/St$  付近で  $Sp(fs)$  のピークが生じたものと思われる。

#### (3) $B/D=4$ 断面

Fig. 6 に実験結果を示す。 $B/D=4$  の断面においては、 $1/St$  と  $1.67 B/D$  の中間付近に  $Sp(fs)$  のピークが確認できる。従ってこの断面においても、剥離せん断層は音響による刺激を受けながらも、カルマン渦の影響を多少受けているものと考えられる。

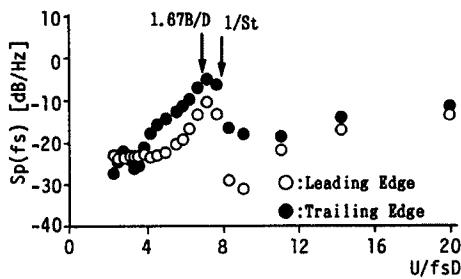


Fig. 6.  $Sp(fs)$  V.S. wind velocity diagram. ( $B/D=4$  rectangular section)

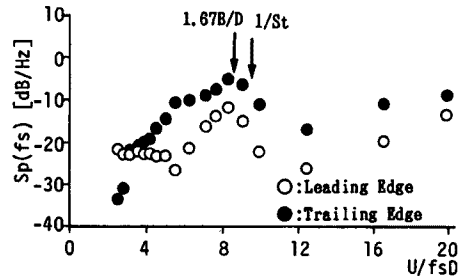


Fig. 7.  $Sp(fs)$  V.S. wind velocity diagram. ( $B/D=5$  rectangular section)

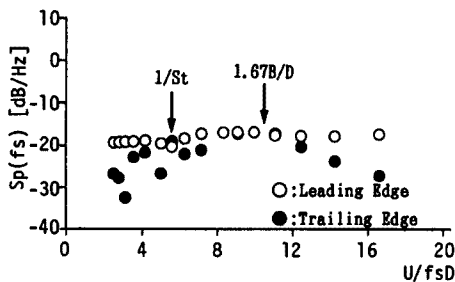


Fig. 8.  $Sp(fs)$  V.S. wind velocity diagram. ( $B/D=6$  rectangular section)

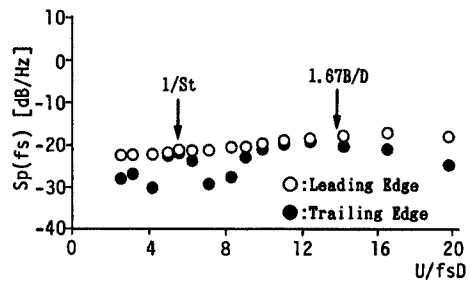


Fig. 9.  $Sp(fs)$  V.S. wind velocity diagram. ( $B/D=8$  rectangular section)

#### (4) $B/D=5$ 断面

$B/D=5$  の断面では Fig. 7 に示すように、 $Sp(fs)$  は無次元風速  $U/fsD=1.67B/D$  のところでピークを持つ。ここでは剥離せん断層がカルマン渦に干渉されることなしに、音響によって剥離せん断層の不安定性が増幅されているものと考えられる。

#### (5) $B/D=6, 8$ 断面

2.1でも述べたように、 $B/D>6$  の断面は剥離せん断層が断面後部に定常的に再付着し、断面後縁から放出されるカルマン渦による渦励振が発生するとされている。Fig. 8, Fig. 9 に示す実験結果から、これらの断面では後縁のみではあるが  $1/St$  付近に緩やかなピークがみられ、カルマン型渦励振に対応していると思われる。また同様に後縁において、 $Sp(fs)$  は無次元風速  $U/fsD=1.67B/D$  付近にも緩やかなピークがあり、音響による剥離せん断層刺激の影響も伺える。

### 2.4 まとめ

以下に矩形断面における音響刺激と剥離せん断層不安定性の関係についてまとめる。

断面辺長比  $B/D=2$  の断面は、剥離せん断層が外的刺激を受けにくい断面であり、スプリッタープレートを挿入した場合でも、無次元風速  $1.67B/D$  付近で同期現象がみられなかった。よってこの断面は断面自身の振動によってのみ、剥離せん断層が刺激されるものと考えられる。また  $B/D=3, 4$  の断面においても、音響によって剥離せん断層は刺激されるものの、同時にカルマン渦の影響も確認される断面である。これらの断面で自己励起型渦励振が観察されるのは、物体自身の振動によって、剥離せん断層が刺激されるだけでなく、カルマン渦が弱められるためであると考えられる。次に  $B/D=5$  の断面では、物体後流のカルマン渦の影響も観察されず、剥離せん断層は音響による刺激を受けやすいものと思われる。

$B/D=6, 8$  の断面は、音響によって剥離せん断層の不安定性も増幅されているが、その程度は他の断面と比べて極めて弱く、 $1/St$  付近でも緩やかな同期現象が観察される。

### 3. エッジガーダー断面の形状変化に対する渦励振応答特性への影響

#### 3.1 概 説

渦励振は、その応答幅が小さくないことや比較的低風速で発生することから、その発生が予想される場合には設計段階で耐風制振対策をとることが必要である。その制振対策は構造力学的対策と空力的対策に大別できる。前者の構造力学的対策は質量、剛性、減衰等の増加によって応答振幅を小さくしようとするものである。また後者の空力的対策とは、耐風安定性の良い断面形状に変化させたり、フェアリング、フラップ等のアタッチメントを付加することによって応答を安定化させようとするものである。前縁からの剥離を抑制するようなアタッチメントを付加することで、たわみ渦励振応答を安定化させる方法がしばしばとられる。また、Toeber, Eagleson<sup>8)</sup> や Greenway, Wood<sup>9)</sup> は、断面の後縁形状を変化させると、その振れ渦励振応答や渦放出に起因する音響のレベルが変化することを調べた。

本章では、近年斜張橋などで採用されているエッジガーダー断面及び、その断面に種々のアタッチメントを設置した断面について音響付加実験とバネ支持自由振動実験を行ない、断面形状選定時における音響付加実験の有効性について述べ、更に如何なる形状のアタッチメントが渦励振応答の安定化に寄与するのかを調べる。

#### 3.2 実験概要

本実験で用いたエッジガーダー断面は、Fig. 10 に示すような断面辺長比  $B/D=10$  の二次元剛体模型である。模型は木製で、模型表面には表面圧力を測定するための圧力孔が設置されており、更に気流の二次元性を確保するために、模型端部に端板が設けられている。使用したアタッチメントは6種類のフェアリングで、すべて木製である。フェアリングの形状を Fig. 11 に示す。なお、便宜上フェアリングについては、以下この図に記載されている番号を使用する。音響付加実験では、測定断面を風洞内に迎角  $\alpha=5^\circ$  で固定支持し、音響周波数  $f_s=31$  Hz の音響を使用して前述の実験と同様の手法を用いた。なお迎角を  $5^\circ$  としたのは、制振付加装置を取り付けない原断面で  $0^\circ$ 、 $-5^\circ$  より渦励振応答が大きくなることから、迎角  $5^\circ$  が  $0^\circ$ 、 $\pm 5^\circ$  のうち、最も空力的に不安定と判断したためである。またバネ支持自由振動実験では、模型の両端部に設けた端板に支持アームを取り付け、左右2本計4本のコイルスプリングで風洞内に迎角  $\alpha=5^\circ$  でたわみ1自由度支持した。変位は、コイルスプリング基部に挿入されたコの字型ピックアップ部のひずみゲージにより電氣的に検出し、ホイットストーンブリッジ（新興通信事業部）、ローパスフィルタ（前出）、動歪計（新興通信事業部 PSA-655）を通じてリニアコーダー（グラフテック K. K. WR 3101）に出力して計測した。自由振動実験における各断

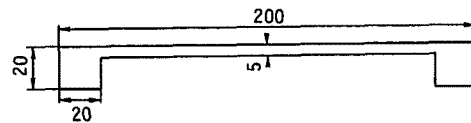


Fig. 10. Cross section of model.  
(unit in mm)

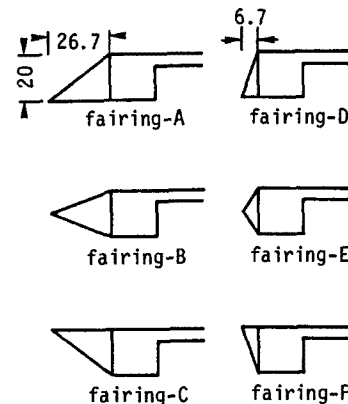


Fig. 11. Shape of fairings.  
(unit in mm)

Table 2. Test conditions of models (edge girder sections)

| Attachment | fo(Hz) | M(kgs <sup>2</sup> /mf) | $\delta$ (40mm) | $\delta$ (30mm) | $\delta$ (20mm) | $\delta$ (10mm) | $\delta$ (5mm) | $\delta$ (1mm) |
|------------|--------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
|            | 4.984  | 0.1308                  | 0.0442          | 0.0273          | 0.0223          | 0.0173          | 0.0140         | 0.0090         |
| Fairing A  | 4.676  | 0.1474                  | 0.0573          | 0.0470          | 0.0375          | 0.0259          | 0.0196         | 0.0109         |
| Fairing B  | 4.688  | 0.1482                  | 0.0526          | 0.0401          | 0.0331          | 0.0246          | 0.0191         | 0.0123         |
| Fairing C  | 4.670  | 0.1470                  | 0.0540          | 0.0417          | 0.0373          | 0.0252          | 0.0191         | 0.0104         |
| Fairing D  | 4.872  | 0.1399                  | 0.0497          | 0.0379          | 0.0325          | 0.0201          | 0.0138         | 0.0083         |
| Fairing E  | 4.870  | 0.1380                  | 0.0398          | 0.0291          | 0.0227          | 0.0153          | 0.0122         | 0.0076         |
| Fairing F  | 4.869  | 0.1371                  | 0.0453          | 0.0342          | 0.0265          | 0.0189          | 0.0147         | 0.0085         |

面の物理諸元を Table 2 に示す。

### 3.3 実験結果及び考察

#### (1) アタッチメントを設置しない断面

音響付加実験、バネ支持自由振動実験の結果を併せて Fig. 12 に示す。自由振動実験では2つの風速域で渦励振応答がみられるが、低風速側のものは開始無次元風速が  $0.83 B/D$ 、高風速側のものは開始無次元風速が  $1.67 B/D$  の自己励起型渦励振（前縁剥離型励振）である。これを音響付加実験の結果と対比すると、自由振動実験での渦励振開始風速と、音響付加実験で  $Sp(fs)$  がピークとなる風速がほぼ一致していることがわかる。前縁と比較して後縁での  $Sp(fs)$  の値の方が大きくなっているのは、前縁から剥離した渦が断面を流下する間に発達したためと考えられる。

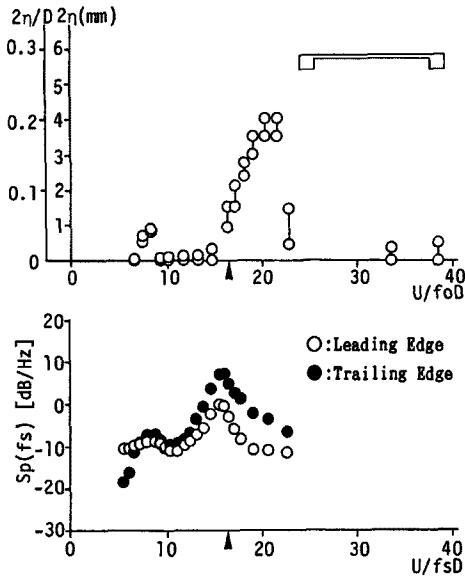


Fig. 12. Heaving response amplitude V. S. wind velocity diagram &  $Sp(fs)$  V. S. wind velocity diagram. (without any attachment)

#### (2) フェアリングを設置した断面

フェアリングを設置した断面の実験結果を Fig. 13 ~ Fig. 18 に示す。フェアリング A, B, C は比較的長いフェアリングであり、いずれの場合も音響付加実験と自由振動実験の結果はよい対応を示しており、フェアリング A, B のような前縁での剥離を抑えるようなフェアリングによって、渦励振応答が安定化していることがわかる。比較的短いフェアリングである D, E, F を設置した断面において、D, F に関しては両実験結果の対応は良いと考えられるが、フェアリング E では自由振動実験の最大応答振幅が比較的抑えられているにもかかわらず音響付加実験でのピークは非常に鋭くなっており、他の断面ほど良い対応を示していない。但し応答は明確な定常振幅として観測されていないが、振動を発生しようとする様子がかがえると共に、風速—応答振幅—減衰率曲線 ( $V-A-\delta$  曲線) から空力的にこの風速域が局所的な不安定化傾向にあることが確認された。以上の結果より、正の迎角をつけた断面では、断面前縁の上面での剥離を抑えるようなフェアリングが、渦励振応答の安定化に有効であることがわかる。

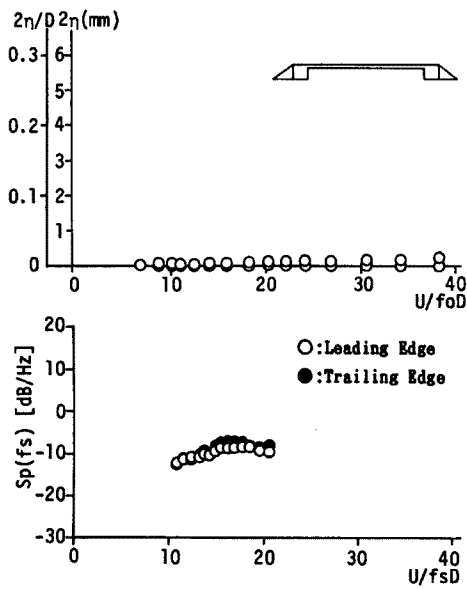


Fig. 13. Heaving response amplitude V. S. wind velocity diagram &  $Sp(fs)$  V. S. wind velocity diagram. (with fairing-A)

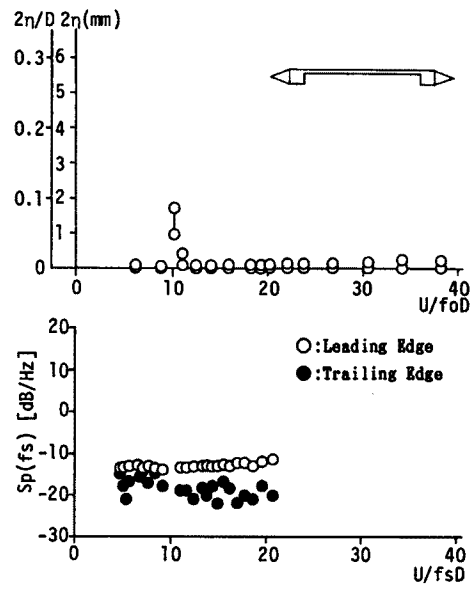


Fig. 14. Heaving response amplitude V. S. wind velocity diagram &  $Sp(fs)$  V. S. wind velocity diagram. (with fairing-B)

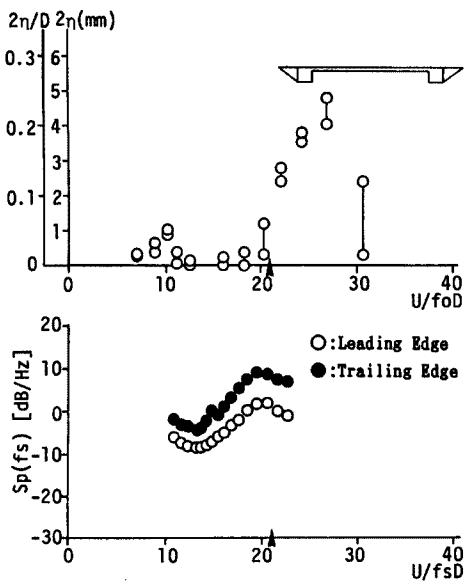


Fig. 15. Heaving response amplitude V. S. wind velocity diagram &  $Sp(fs)$  V. S. wind velocity diagram. (with fairing-C)

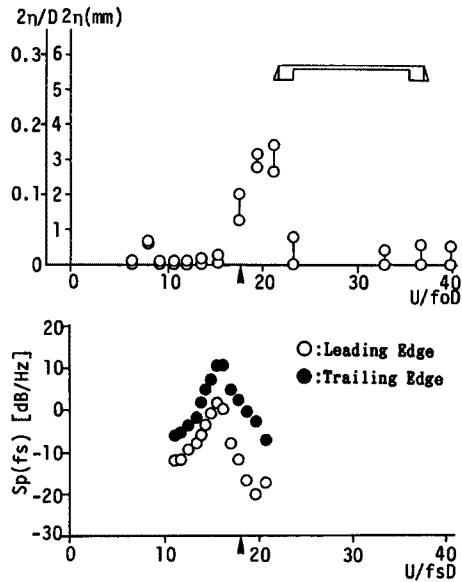


Fig. 16. Heaving response amplitude V. S. wind velocity diagram &  $Sp(fs)$  V. S. wind velocity diagram. (with fairing-D)

### 3.4 まとめ

以上の実験結果より、自由振動実験における渦励振開始無次元風速と、音響付加実験で  $Sp(fs)$  がピークとなる無次元風速はほぼ一致することが確認できた。また本研究のように正の迎角をつけた断面では、断面前縁の上面での剥離を抑制することによって、渦励振応答が安定化することもわかった。更に、自由



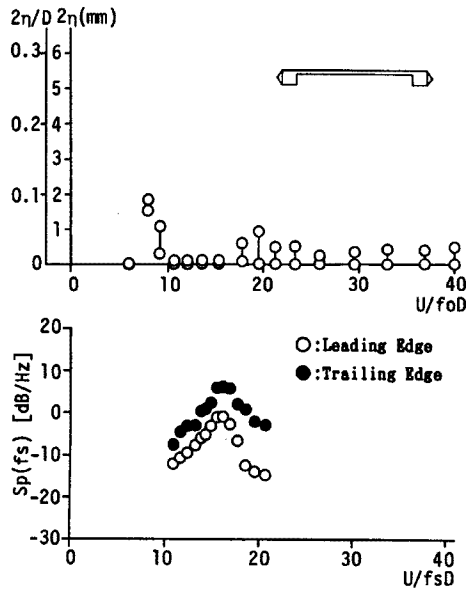


Fig. 17. Heaving response amplitude V. S. wind velocity diagram &  $Sp(fs)$  V. S. wind velocity diagram. (with fairing-E)

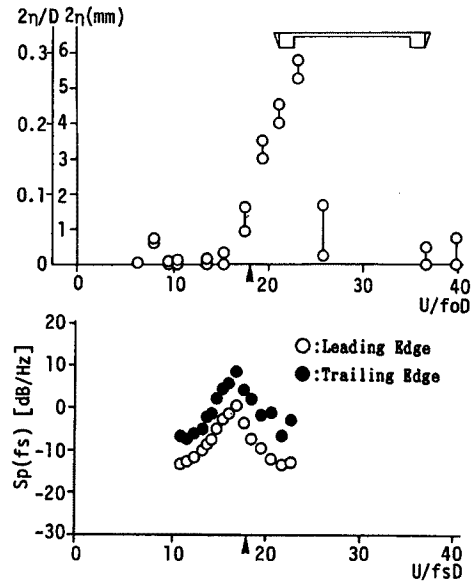


Fig. 18. Heaving response amplitude V. S. wind velocity diagram &  $Sp(fs)$  V. S. wind velocity diagram. (with fairing-F)

振動実験で渦励振応答が観察された断面は、音響付加実験でも  $Sp(fs)$  がピークをもつことから、音響付加実験は種々の断面形状のたわみ渦励振発生の可能性を調べる上で、極めて有効な手段であると考えられる。但し、一部に自由振動実験との対応が思わしくない断面も存在し、その詳細な検討については今後の研究に待たれる。

#### 4. 矩形断面の渦励振応答に対する乱流の周波数効果

##### 4.1 概 説

通常、風洞実験で使用されるのは一様流であるが、実際の橋梁構造物に作用する自然風は地表面等の影響を受けるため乱流となっており、時間的にも空間的にも乱れた流れである。一般には渦励振やギャロッピング応答は乱流中で安定化するとされているが、偏平六角形断面のように渦励振応答が乱流中で逆に不安定化する結果も報告されている<sup>10)11)12)</sup>。従って乱流中における各種空力現象の応答の変化を把握することは極めて重要である。従来の空力現象に対する乱流効果についての研究は、主として乱れの強さや乱れのスケールに着目した研究が多くなされてきた<sup>13)14)15)</sup>。これらより乱れの強さは、二次元角柱の時間平均流れや剥離バブル内の平均圧力分布などに大きな影響を及ぼすとしている。乱れのスケールは、スケール効果を物体の厚さと同程度の大スケールと、剥離せん断層厚さと同程度の小スケールに区別し、前者はカルマン渦に大きな影響を与え、後者は剥離せん断層の連行作用を強めるとしている。一方、乱流を様々な周波数成分を有する刺激と考え、乱流効果を乱流のもつ周波数効果としてとらえる研究も盛んに行なわれている。乱流のもつ特定周波数成分によって渦励振、ギャロッピング、振れフラッタ等の応答に変化がみられるとの報告もなされている<sup>7)16)17)</sup>。

本研究では、音響の周波数を乱流中のある特定周波数成分と類似な外的刺激ととらえ、バネ支持されている矩形断面に音響を付加しその応答変化を調べた。更に一様流中、乱流中での応答と比較して乱流の周

波数効果の把握を試みた。

#### 4.2 実験概要

本実験で用いた断面は自己励起型渦励振（前縁剝離型渦励振）の生じる  $B/D=5$  の矩形断面であり、音響付加方法及び応答振幅測定手法は前述の通りである。乱流は乱流格子（格子バーサイズ 1.5 cm, 格子メッシュサイズ  $6.0 \times 5.0$  cm）を用いて発生させ、乱れの強さは  $Iu=4.8\%$  である。また、風洞内風速 4 (m/s) のときの流速変動パワースペクトル密度を Fig. 19 に示す。乱流中の風速測定は、模型設置点付近でピトー管と平行に熱線プローブを設置し、熱線風速計（日本カノマック K.K. CTA(MODEL1017)）、電源指数可変型リアライザ(MODEL1013)、加減算器(MODEL1017)、電源ケースモニタ(MODEL1008)を使用し、ピトー管による風速値でキャリブレーションを入れ、風速設定を行なった。また乱流中の特定周波数成分として付加した音響は、模型の固有振動数  $f_0(=6.99\text{Hz})$  の 0.5, 0.9, 1.1, 1.5, 2.0, 4.0 倍の周波数の逆相刺激\*とした。なお、この際の音響は各周波数でアンプの出力を一定に保つようにそのレベルを決めた。模型の応答振幅測定は、模型の両端部に設けた端板に支持アームを取り付け、左右各 4 本計 8 本のコイルスプリング使用し、迎角  $\alpha=0^\circ$  のたわみ 1 自由度にバネ支持した。模型の物理諸元を Table 3 に示す。

\*）逆相刺激：風洞の天井と床部に設置されたスピーカーをそれぞれ逆相に作動させ風洞高さ中央部にマウントされた模型上下面に逆相音響刺激を与えることを指す。

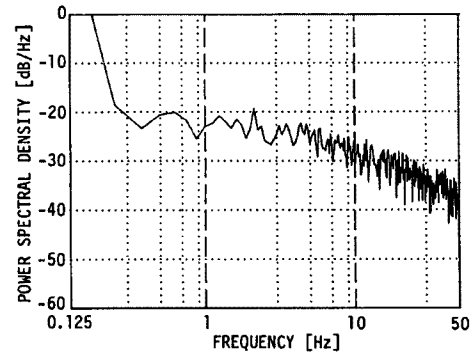


Fig. 19. Power spectral density of longitudinal wind component. ( $Iu=4.8\%$ ,  $U=4.0\text{m/s}$ )

Table 3. Test conditions of models ( $B/D=5$  rectangular section)

| Flow       | $f_s/f_0$ | $f_0(\text{Hz})$ | $f_s(\text{Hz})$ | $M(\text{kgs}^2/\text{m}^2)$ | $\delta(30\text{mm})$ | $\delta(20\text{mm})$ | $\delta(10\text{mm})$ | $\delta(5\text{mm})$ | $\delta(1\text{mm})$ |
|------------|-----------|------------------|------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| smooth     |           | 6.987            |                  | 0.1607                       | 0.0401                | 0.0240                | 0.0104                | 0.0076               | 0.0039               |
| turb.      |           | 6.986            |                  | 0.1640                       | 0.0409                | 0.0206                | 0.0105                | 0.0077               | 0.0039               |
| with sound | 0.5       | 6.986            | 3.493            | 0.1580                       | 0.0416                | 0.0240                | 0.0104                | 0.0076               | 0.0039               |
|            | 0.9       | 6.987            | 6.288            | 0.1607                       | 0.0401                | 0.0240                | 0.0104                | 0.0076               | 0.0039               |
|            | 1.1       | 6.987            | 7.680            | 0.1607                       | 0.0401                | 0.0240                | 0.0104                | 0.0076               | 0.0039               |
|            | 1.5       | 6.987            | 10.480           | 0.1580                       | 0.0416                | 0.0240                | 0.0104                | 0.0076               | 0.0039               |
|            | 2.0       | 6.986            | 13.973           | 0.1640                       | 0.0409                | 0.0206                | 0.0105                | 0.0077               | 0.0039               |
|            | 4.0       | 6.986            | 27.945           | 0.1580                       | 0.0416                | 0.0240                | 0.0104                | 0.0076               | 0.0039               |

#### 4.3 実験結果及び考察

##### (1) 一様流中における結果

断面辺長比  $B/D=5$  の矩形断面について、一様流中で音響を付加しない状態での自由振動実験を行なった。その風速—応答振幅図は Fig. 20 に示す通りであり、渦励振応答が 2 つみられる。これらは両者共、自己励起型渦励振（前縁剝離型渦励振）で、低風速側の渦励振応答は、開始無次元風速が  $U/foD=0.83 B/D$  で表されるもの（断面側面上に渦が 2 つある場合）であり、高風速側の渦励振応答は開始無次元風速が  $U/foD=1.67 B/D$  で表されるもの（断面側面上に渦が 1 つだけある場合）であると考えられる。

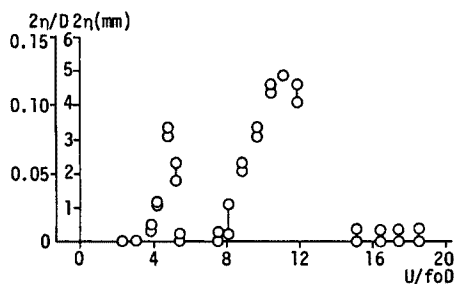


Fig. 20. Heaving response amplitude V. S. wind velocity diagram in smooth flow.

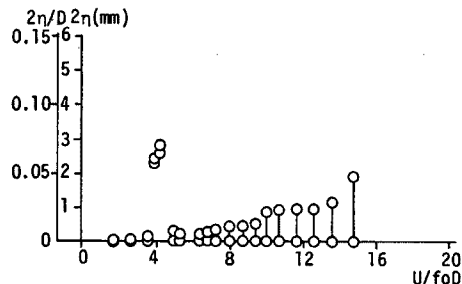


Fig. 21. Heaving response amplitude V. S. wind velocity diagram in turbulent flow.

(2) 格子乱流中における結果

同じ断面を用いて、4.8% 格子乱流中における自由振動実験を行ない、その結果を Fig. 21 に示す。これより乱流中で高風速側の渦励振応答は安定化しているのに対し、低風速側の応答は振幅が多少小さくなってはいるが、安定化しているとは云えない。

(3) 一様流中で音響を付加した場合

模型のたわみ振動固有振動数を  $f_0$ 、音響周波数を  $f_s$  とすると、模型に付加した音響周波数  $f_s$  は、 $f_s/f_0 = 0.5, 0.9, 1.1, 1.5, 2.0, 4.0$  である。これらの各々について自由振動実験を行ないその結果を Fig. 22 に示す。

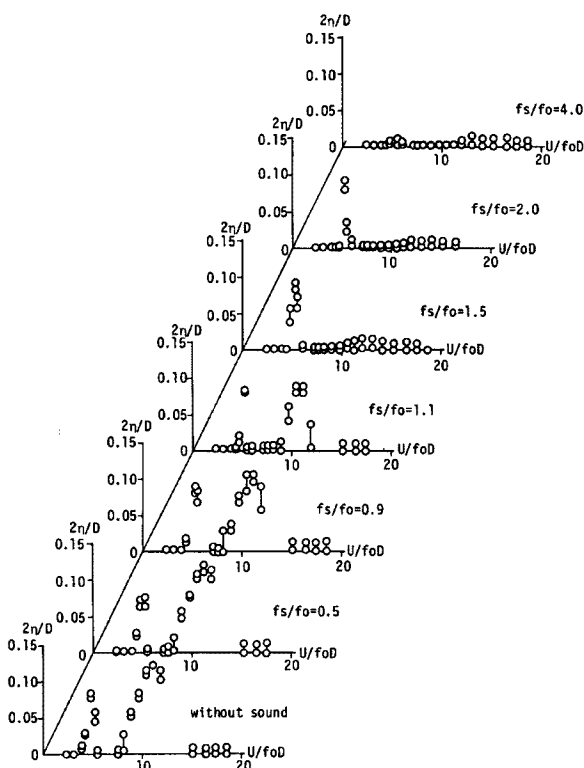


Fig. 22. Heaving response amplitude V. S. wind velocity diagrams with applied sound ( $f_0$ : natural frequency of model,  $f_s$ : frequency of applied sound)

(a)  $f_s = 0.5 f_0$  の音響を付加した場合

風速—応答振幅図の形状は、音響を付加しない場合と比較して変化はほとんどみられず、この音響周波数による乱流の周波数効果は認められない。

(b)  $f_s = 0.9 f_0$  の音響を付加した場合

音響を付加しない場合の実験結果に比べて、高風速側の渦励振の最大応答振幅が多少小さくなっている。しかし、低風速側の渦励振応答については、大きな変化はみられない。

(c)  $f_s = 1.1 f_0, 1.5 f_0, 2.0 f_0$  の音響を付加した場合

音響の周波数が大きくなるに伴って、高風速側の渦励振の応答振幅が減少し、安定化していくことがわかる。更に模型の固有振動数の1.5倍以上の音響周波数を付加することで、高風速側の渦励振応答は殆どおさまる。但し、低風速側の渦励振応答は、いずれの場合においても振幅の低減がみられず、音響による周波数効果の影響は認められない。

(d)  $f_s = 4.0 f_0$  の音響を付加した場合

低風速側、高風速側のいずれの渦励振応答もほぼ完全に安定化している。特に低風速側の渦励振応答は、固有振動数の4倍の音響周

波数によって安定化することから、この渦励振は乱流中のある周波数以上の高周波数成分によって安定化されると思われる。従って4.8%格子乱流中で、低風速側の渦励振応答が余り低減していないのは、この乱流において、比較的高周波数成分の割合が少なかったためと考えられる。

#### 4.4 まとめ

以上の結果より、 $B/D=5$ の矩形断面の自己励起型渦励振応答は、その開始風速が $U/foD=1.67 B/D$ である高風速側の渦励振については、模型の固有振動数より大きい周波数をもった音響によって次第に安定化し、固有振動数 $fo$ の1.5倍程度以上の音響周波数を付加するとほぼ安定化することがわかった。更に開始風速が $U/foD=0.83 B/D$ である低風速側の渦励振については、固有振動数の4倍程度の音響周波数で安定化している。故に、 $B/D=5$ の矩形断面では、乱流中の高周波数成分が渦励振応答の安定化に寄与することが明かとなった。また、4.8%格子乱流中における実験で、高風速側の渦励振が安定化するのに対して、低風速側の渦励振が安定化しないのは、Fig. 19より乱流中の高周波数成分のパワーが小さいためと考えられる。つまりこの4.8%格子乱流中には、低風速側の渦励振を安定化させるに必要な高周波数成分が余り含まれていなかったためと考えられる。

## 5. 結 び

矩形断面を風洞内に固定支持し、音響を付加することでその断面周りの剥離せん断層に刺激を与え、模型前縁と後縁の変動圧力パワースペクトル密度の変化により矩形断面の渦励振特性の把握を試みた。その結果、全ての断面辺長比の断面において、音響刺激により剥離せん断層の不安定性が増幅されていることが確認できたが、その程度は断面辺長比によって大きく異なった。断面辺長比 $B/D=2, 3$ の断面では、物体後流でのカルマン渦の影響が極めて強く、特に $B/D=2$ の断面は外的刺激によって剥離せん断層の不安定性は増幅されにくく、断面自身の振動によってのみ不安定性が増幅され、自己励起型の渦励振が発生するものと思われる。

種々のアタッチメントを設置した、断面辺長比 $B/D=10$ のエッジガーダー断面を風洞内に迎角 $5^\circ$ で固定支持し、同様の音響付加実験を行なった。これより、音響付加実験の結果とバネ支持自由振動実験の結果に比較的良好な対応がみられ、音響付加実験によって橋梁断面の渦励振特性の把握が可能であることが実証できた。更に音響付加実験より、前縁部に設置されたフェアリングが渦励振の安定化に寄与していることが確認され、更に前縁上部での剥離を抑えるようなフェアリングが、たわみ渦励振に対して効果的であることが明かとなった。

音響付加実験の応用として、音響周波数を乱流中のある特定周波数成分とみなし、バネ支持された断面辺長比 $B/D=5$ の矩形断面に音響を付加することで、乱流の渦励振応答に対する周波数効果を調べた。その結果、一樣流中で音響を付加した場合、その音響周波数が高くなるほど、2つの渦励振応答は両者共安定化した。更に高風速側の渦励振は固有振動数の1.5倍、低風速側の渦励振は固有振動数の4.0倍の音響周波数で応答がほぼ完全に消滅した。従って乱流中での渦励振応答の安定化は、模型自身の固有振動数より高い乱流中の周波数成分に起因するものと思われる。

### 参 考 文 献

- 1) 白石成人・松本 勝：渦励振の発生機構と応答評価，日本風工学会誌，第20号，1984，pp.103-127.
- 2) 岡島 厚：種々な断面辺長比の矩形柱周りの流れ，日本風工学会誌，第17号，1983，pp.1-19.
- 3) 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考察，航空学会誌，第16巻，

- 第 168 号, 1968, pp. 1-5.
- 4) Michalke, A: The instability of free shear layers, A survey on the state of art, Deutsche Luft-und Raumfahrt, 1970.
  - 5) 白石成人・松本 勝・白土博通・岸 明信・小林茂雄: 非定常気流中の Bluff Body の変動圧力特性と動的応答特性について, 京大防災研年報, 第 29 号 B-1, 1986, pp.177-195.
  - 6) Parker, R. and M.C. Welsh: Effects of sound on flow sepapation from blunt flat plates, Int. J. Heat & Fluid Flow, Vol.4, No.2, 1983, pp.113-128.
  - 7) 松本 勝・白石成人・白土博通・孫 亜偉・小林茂雄・真下義章・湯川雅之: 充腹構造断面の空力特性に及ぼす乱流効果, 京大防災研年報, 第 30 号 B-1, 1987, pp.247-258.
  - 8) Toebes, G.H. and P.S. Eagleson: Hydroelastic vibrations of flat plates related to trailing edge geometry, Journal of Basic Engineering, 1961, pp.671-678.
  - 9) Greenway, M.E. and C.J. Wood: The effect of a bevelled trailing edge on vortex shedding and vibration, Journal of Fluid Mechanics, Vol.61, part 2, 1973, pp.323-335.
  - 10) 武田勝昭・園部好洋: 気流の乱れ強度と渦励振応答振幅, 第 39 回土木学会年次学術講演会, 1984, pp.555-556.
  - 11) 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, 第 40 回土木学会年次学術講演会, 1985, pp.445-446.
  - 12) 松本 勝・白石成人・三澤 彰・村上琢哉・佐野祐一・高橋邦夫・金田士郎・川邊弘美: 高欄を設置した橋梁箱桁断面の乱流効果, 構造工学論文集, Vol.36 A, 1990, pp.873-878.
  - 13) 中村泰治・大屋裕二・渡辺公彦: 矩形断面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, 1984, pp.249-254.
  - 14) 中村泰治・小園茂平・渡辺公彦: 厚板前縁の剝離一再付着流れに及ぼす乱れの影響, 第 9 回風工学シンポジウム論文集, 1986, pp.109-114.
  - 15) 中村泰治・大屋裕二・渡辺公彦: 直方体の空力特性に及ぼす乱れの強さおよび乱れのスケールの影響, 第 7 回風工学シンポジウム論文集, 1982, pp.91-97.
  - 16) 松本 勝・白石成人・白土博通・真下義章・湯川雅之・平井滋登: 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, 1988, pp.115-120.
  - 17) 松本 勝・白石成人・湯川雅之・伊藤裕一: ねじれフラッターに対する乱れの周波数効果に関する考察, 土木学会論文集, 第 416 号/I-13, 1990, pp.235-224.