

## 充腹構造断面の渦励振応答特性に関する研究

ON VORTEX-INDUCED OSCILLATIONS OF BLUFF CROSS  
SECTIONS USED FOR BRIDGE STRUCTURES

白石 成人\*・松本 勝\*\*

By Naruhito SHIRAISHI and Masaru MATSUMOTO

## 1. ま え が き

近年、わが国においても中径間橋梁形式として、斜張橋が計画あるいは建設されるケースが多くなっており、その桁断面には、力学的あるいは美観上の特徴を生かすという点で、偏平な箱型形状が採用される場合が多い。しかしこのような偏平な箱型断面は、流体力学的には Bluff な断面に属し、そのため渦励振の発現する可能性を有しており、これらの橋梁の安全性、機能性を保持するために、渦励振に対する十分な検討が望まれている。

渦励振に対する防振、制振対策に関しては従来より、空力的な対策や振動特性からの対策が講じられている。後者の対策としては、構造減衰の増加や、剛性増加に伴う固有振動数の増大化等であり、一方前者の空力的な対策としては、桁の基本断面形状として比較的耐風安定性の良好な断面の選定であるとか、あるいは Lille Belt 橋、Long's Creek 橋、St. Nazaire 橋、末広大橋、かもめ大橋、石狩河口橋、川崎橋等の例にみられるような種々の耐風安定性向上のためのアタッチメント（フラップ、デフレクター、ウインドノーズ、カバープレート、スプリッタープレート等）の設置等が行われてきた。

ところで、偏平箱桁断面の渦励振については、その発現風速や最大応答振幅の評価方法、許容振幅の規定、架橋地点の自然風の局所的特性の評価（たとえば、風の傾斜角、卓越風向、風速ランク別生起頻度特性、乱れ特性等）、渦励振に及ぼす乱れの効果の評価、二次元剛体模型ばね支持風洞実験結果による実橋の空力挙動の評価、より効果的な防振対策の確立、等に多くの未解決の問題点が残されており、より安全かつ合理的な橋梁の耐風設計を行うためにはこれらの諸問題の解決が望まれる。とりわけ、渦励振の発生原因は、これらの諸問題と密接に

関連していることから、その解明は必要不可欠なことである。

渦励振発生原因については、従来より、断面背後に生じる周期的な渦（カルマン渦）に起因した周期変動空力によるものと考えられてきたが、最近、小林<sup>1)</sup>や中村<sup>2)</sup>は、従来のカルマン渦によるもの以外に、断面の振動に伴って断面前縁部より生じる剝離渦に起因するケースがあることを指摘している。一方、Toebe & Eagleson<sup>3)</sup>や Greenway & Wood<sup>4)</sup>は肉厚平板の渦励振特性やそれに起因する音響レベルが、断面の後縁形状に大きく影響されることを報告している。これらのことから、渦励振の発生原因は単一なものではなく、構造断面の形状によって異なったものとなり、その成因別に応じてそれぞれの渦励振特性が変化し、したがってこれらの防振、制振対策は異なったものになると判断される。

以上の点を考慮して本研究では、渦励振の応答特性および断面回りの流れのパターンの面から、発生原因別に分類し、それぞれの特徴を明らかにするとともに、現在までに報告されている渦励振についてのデータをもあわせて参考にして、偏平箱桁断面、充実断面の渦励振の開始限界風速に評価を加え<sup>注1)</sup>、構造物の渦励振に対する耐風性検討の一助としようとするものである。

注 1) 風速・振動振幅図 ( $V-A$  曲線) あるいは風速・振動振幅・減衰図 ( $V-A-d$  曲線) より求められる渦励振の開始する無次元限界風速は厳密には、構造減衰によって変化するものと考えられるが、渦励振が比較的狭いある限定された風速域で生じること、一般に渦励振応答が問題となる振動系の構造減衰は小さく（たとえば対数減衰率で 0.01~0.03 程度）、この範囲では限界風速に与える構造減衰の影響は小さいと考えられること、また最大応答振幅や、それを生じる風速値に比べ、限界風速への構造減衰の影響は小さいと考えられること等から、ここでは、渦励振の開始する限界風速を近似的に評価するという観点より、主として、構造断面形状と渦励振の開始する限界風速との関連性について注目した。

\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

\*\* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学教室

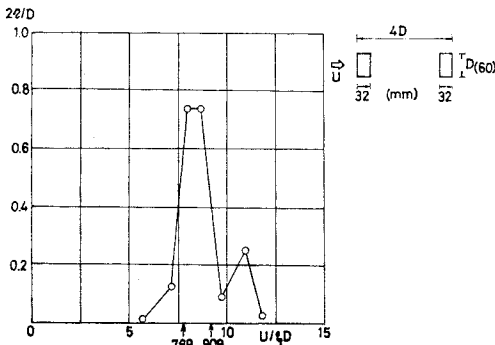
## 2. 渦励振の分類と特性

断面回りの流れのパターン、渦励振発現風速とストロハル数より決まる共振風速との関連性、鉛直たわみとねじれの渦励振開始無次元風速の関係より、渦励振を便宜上、完全剥離型、前縁剥離渦型、付着型および混合型とよび4種類に分類する。以下にそれぞれのタイプの渦励振の特徴について、1~2の実験結果を例に示しながら説明を加える。

### (1) 完全剥離型

断面の弦長 ( $B$ ) が桁高 ( $D$ ) に比べて小さな、いわゆる非常に Bluff (流体力学的には、非流線型肉厚形状をしたという意味あいであるがここでは Bluff という表現を用いることとする) な断面に生じる渦励振であり、断面の振動に伴って断面前縁より剥離流が生じ、断面の後縁部に近い後流域において一つの渦が生成され、この渦が交互に後流へと放出され、その放出振動数 (断面の振動数)  $f_0$  が、静止断面のストロハル数  $S_t$  成分の渦 (カルマン渦) 放出振動数  $f_s$  と同期することによって生じる渦励振である。したがって、渦励振開始無次元風速 (以下、渦励振限界風速と称す)  $V_{cr} (V_{cr} = U_{cr} / f_0 D, U$ : 風速,  $f_0$ : 断面固有振動数,  $D$ : 断面桁高) はストロハル数  $S_t (S_t = f_s \cdot D / U, f_s$ : 静止断面回りの周期渦放出振動数) の逆数と密接な関連性を有する。このようなきわめて Bluff な断面の渦励振応答特性は、中村<sup>5)</sup>、石崎<sup>6)</sup>、亀井<sup>7)</sup> の報告にみられるように、ストロハル数  $S_t$  より決まる共振風速より低風速域において渦励振が

$m$	$0.2950 \text{ [Kg sec}^{-2} \text{ m}^{-2}]$
$f_{\eta}$	$2.635 \text{ [sec}^{-1}]$
$\delta_{\eta}$	$0.00993 \text{ (} 2\eta = 15\text{mm)}$
$f_{\phi} / f_{\eta}$	$1.931$
$D$	$60 \text{ [mm]}$
$\alpha$	$0^\circ$

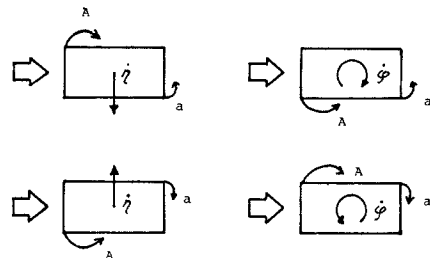


図一1 2本直列角柱のたわみ渦励振応答図 (完全剥離型)

発現し、共振風速を含んでかなり広範囲の風速域にわたって応答が継続され、断面背後の周期渦が断面の振動数に同期する風速域が広いという特徴を有する。このタイプに属すると考えられる鉛直たわみ応答の例として、一体として振動する2本角柱の場合の結果を 図一1 に示す。なお図中矢印で示される値はそれぞれ単柱および2本直列角柱のストロハル数 0.13 および 0.11 の逆数の無次元共振風速値である。

### (2) 前縁剥離渦型

断面の振動に伴って、断面前縁部より剥離渦が交互に発生 (以降、この剥離渦を前縁剥離渦と称す) し、比較的後縁に近い側面上で発達した後、側面に沿って流下し、断面後縁部近傍の後流において、振動に伴って生じる主流直角方向の相対流れに起因して断面後縁部に発生する二次的な渦 (以降、後縁二次渦と称す) と一体化することによって、周期的に安定な渦放出を行い、これが鉛直たわみ ( $\eta$ ) あるいはねじれ ( $\phi$ ) の渦励振発現の大きな要因となっているタイプである。ところでこれらの渦は、鉛直たわみ振動とねじれ振動の場合では、図一2 に示されるように、前縁剥離渦と後縁二次渦の生じるタイミングに差がみられ、このことに対応して、鉛直たわみおよびねじれの渦励振発現無次元風速  $V_{cr\eta}, V_{cr\phi}$  に差が生じる。すなわち、前縁剥離渦が後縁二次渦と一体化するためには、鉛直たわみ振動の場合には、前縁剥離渦が振動1周期 ( $T_0$ ) あるいはその整数倍の時間  $nT_0$  ( $n=2, 3, 4, \dots$ ) を要して後縁に到達 (その半周期前に生じた後縁二次渦と一体化) すればよく、またねじれ振動の場合には、前縁剥離渦が振動半周期 ( $0.5 T_0$ ) あるいはその奇数倍 ( $1.5 T_0, 2.5 T_0, \dots$ ) の時間を要して到達 (同じく半周期前に生じた後縁二次渦と一体化) すればよい。いま、前縁剥離渦の断面側面に沿う平均流下速度比 (平均流下速度/接近流速) が、風速、振動モードによらず一定とし、前縁剥離渦が振動1周期  $T_0$  を要してちょうど後縁部に達するときの無次元風速を基本無次元風速  $V_{cr}$  とすれば、鉛直たわみ振動は  $V_{cr}$  のほかに  $1/2 V_{cr}, 1/3 V_{cr}, \dots$  において、またねじれ振動は 2



図一2 前縁剥離渦型の流れの模式図 (前縁剥離渦Aと後縁二次渦a)

$V_{cr}$ ,  $2/3 V_{cr}$ ,  $2/5 V_{cr}$ , ... において渦励振の発現する可能性を有しているものと判断される。

このタイプに属する渦励振応答特性の例を、図-3 (断面比  $B/D=2$  の矩形断面, 迎角  $0^\circ$ ), および図-4 (プレートガーダー断面, 迎角  $0^\circ$ ) に示す. なお図中に併示された渦励振限界風速  $V_{cr}$  は, 鉛直たわみ振動の発現および流れのパターン等より概略定められたものである. 一方, 図-5 は, 断面比  $B/D=2$  の矩形断面の, 鉛直たわみあるいはねじれの渦励振発現定常振動状態 (図-3 参照) における断面側面上の非定常圧力の負圧のピーク (前縁剝離渦によって発生) と断面最大変位 (鉛直たわみは最上位置, ねじれは最大頭上げ位置) との間の位相差を示すものであるが, この図より知られるように, 前縁剝離渦が断面後縁部に達するのに, 鉛直たわみ渦励振の場合に 1 周期 ( $360^\circ$  位相), ねじれ渦励振の場合に 0.5 周期 ( $180^\circ$  位相) および 1.5 周期 ( $540^\circ$  位相) 要している. 鉛直たわみあるいはねじれの渦励振定常振動発現時における断面側面での, 断面の振動と同期した変動圧力の圧力係数 ( $\bar{c}_p$ ) は, 傾向的には, 側面弦

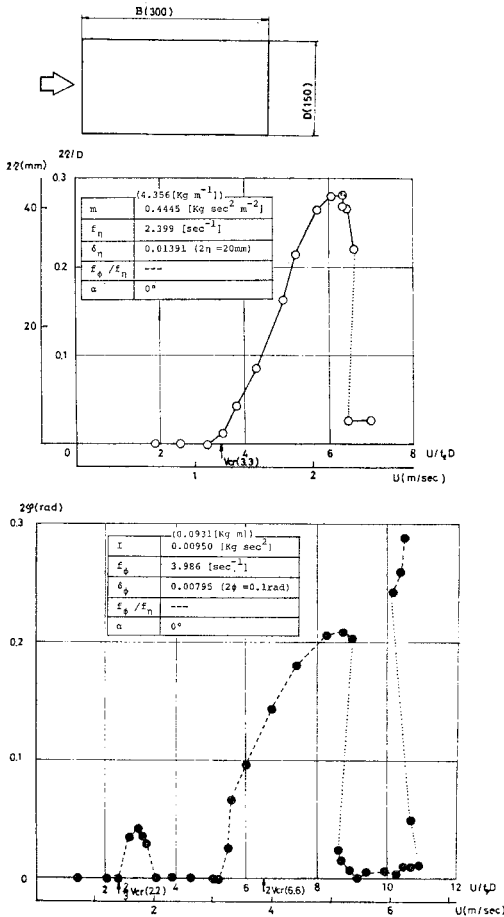


図-3 矩形断面 ( $B/D=2$ ) 渦励振応答図 (前縁剝離渦型)

長中央点よりやや下流側において大きくなり (たとえば断面比 1:2 の矩形断面の鉛直たわみ渦励振時の変動圧力係数  $\bar{c}_p$  は後に示す 図-19 の下図ようになる), このような特性は, 断面後縁部における安定な渦放出と何

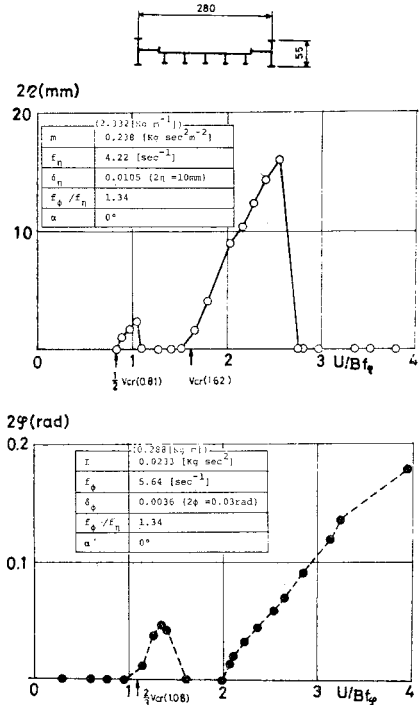


図-4 プレートガーダー断面 ( $B/D=5.09$ ) 渦励振応答図 (前縁剝離渦型)

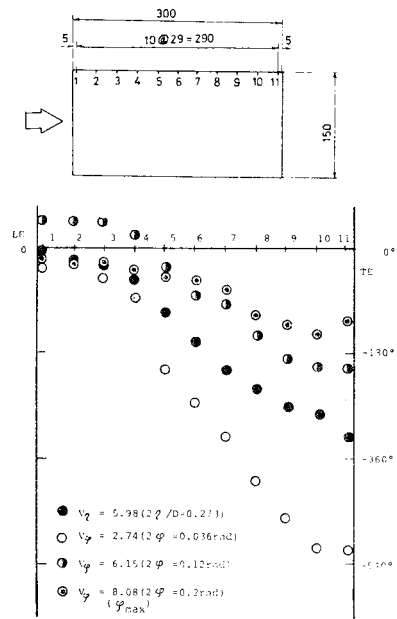
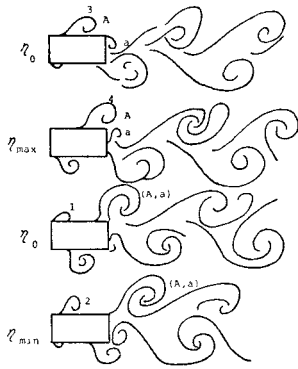
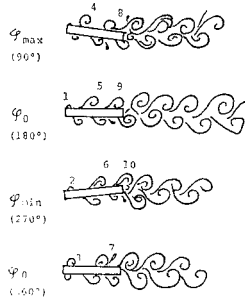


図-5 偏平逆梯形断面渦励振応答図 (前縁剝離渦型)



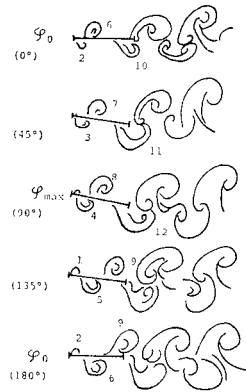
Rectangular section ( $B/D=2$ )  
vertical motion  
 $V_r=4.15$  ( $2\eta/D=0.3$ )  
 $Re \approx 1000$   $\alpha = 0^\circ$

図-6 矩形断面 ( $B/D=2$ ) 鉛直たわみ渦励振発現流速域における流れのパターン (安定な渦放出, 前縁剥離渦型)



Rectangular section ( $B/D=8.256$ )  
torsional motion  
 $V_r=5.5$  ( $2\phi=0.15\text{rad}$ )  
 $Re \approx 1000$   $\alpha = 0^\circ$

図-7 矩形断面 ( $B/D=8.256$ ) ねじれ渦励振発現流速域における流れのパターン (安定な渦放出, 前縁剥離渦型)

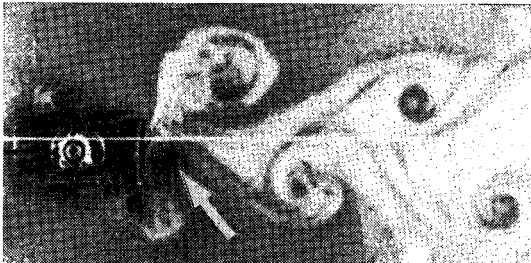


H section ( $B/D=10$ )  
torsional motion  
 $V_r=12.5$  ( $2\phi=0.29\text{rad}$ )  
 $Re \approx 1000$   $\alpha = 0^\circ$

図-8 H 型断面 ( $B/D=10$ ) ねじれ渦励振開始流速域における流れのパターン (前縁剥離渦型)

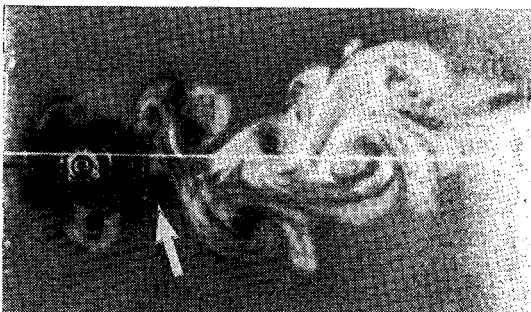
らかの関連性があるものと考えられる。なお、このような断面側面上での変動圧力係数の分布特性と、圧力・変

位間の位相特性より、渦励振発現時では、振動1サイクル当たりの仕事は正となり、空気力としては負減衰力となり励振力として作用すると判断される。また水槽実験によって得られた、渦励振発現時の流速域における比較的安定した流れのパターンの例として、図-6 (断面比  $B/D=2$  の矩形断面, 迎角  $0^\circ$ ,  $V_{cr}$  鉛直たわみ渦励振発現域, 前縁剥離渦が発生後1周期要して後縁二次渦と一体化), 図-7 (断面比  $B/D=8.256$  の矩形断面, 迎角  $0^\circ$ ,  $2/5 V_{cr}$  ねじれ渦励振発現域, 前縁剥離渦が発生後2.5周期要して後縁二次渦と一体化) および 図-8 (断面比  $B/D=10$  の扁平H型断面, 迎角  $0^\circ$ ,  $2/3 V_{cr}$  ねじれ渦励振開始域, 前縁剥離渦が発生後1.5周期要して後縁二次渦とまさに一体化する直前の状態) に示す。またこれらの流れの様子の写真をそれぞれ 写真-1 (矩形



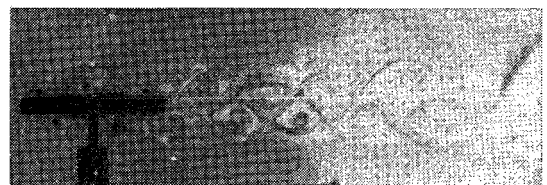
Rectangular section ( $B/D=2$ )  
vertical motion ( $\eta_{min}$ )  
 $V_r=4.15$  ( $2\eta/D=0.3$ )  
 $Re \approx 1000$   $\alpha = 0^\circ$

写真-1 矩形断面 ( $B/D=2$ ) の流れの様子 (矢印は後縁二次渦, 渦励振発現流速域, 図-6 に対応)



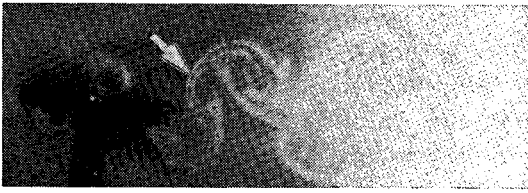
Rectangular section ( $B/D=2$ )  
vertical motion ( $\eta_{min}$ )  
 $V_r=3.02$  ( $2\eta/D=0.3$ )  
 $Re \approx 1000$   $\alpha = 0^\circ$

写真-2 矩形断面 ( $B/D=2$ ) の流れの様子 (矢印は後縁二次渦, 渦励振発現流速以下の低流速域)



Rectangular section ( $B/D=8.256$ )  
torsional motion ( $\phi_{max}$  &  $\phi_0$ )  
 $V_r=5.5$  ( $2\phi=0.15\text{rad}$ )  
 $Re \approx 1000$   $\alpha = 0^\circ$

写真-3 矩形断面 ( $B/D=8.256$ ) の流れの様子 (矢印は後縁二次渦, 渦励振発現流速域, 図-7 に対応)

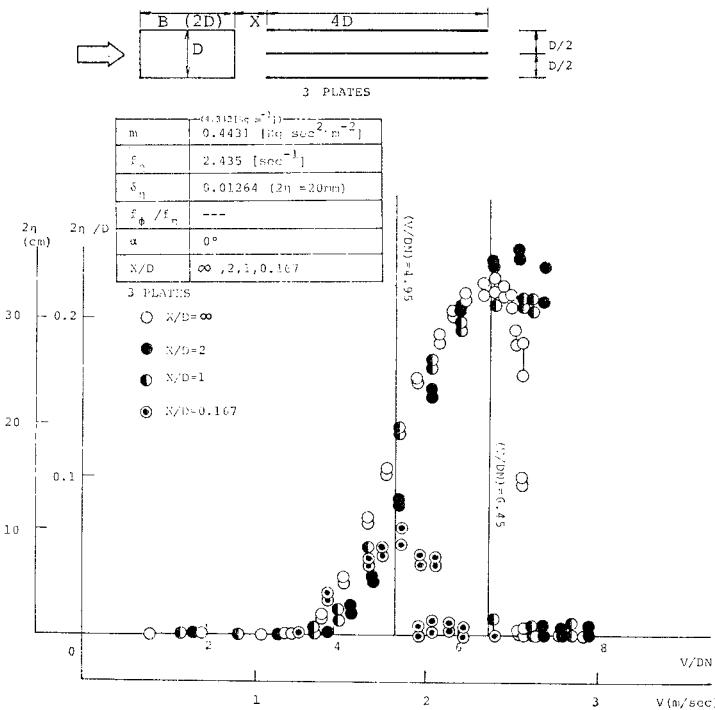


H section ( $B/D=10$ )  
 torsional motion ( $\phi_{max}$ )  
 $V_r=12.5$  ( $2\phi=0.29$  rad)  
 $R_e=1000$   $\alpha=0^\circ$

写真—4 偏平 H 型断面 ( $B/D=10$ ) の流れの様子 (矢印は後縁二次渦, 渦励振発生流速, 図—8 に対応)

断面  $B/D=2$ , 安定渦放出), 写真—2 (矩型断面  $B/D=2$ , 不安定渦放出), 写真—3 (矩型断面  $B/D=8.256$ , 安定渦放出), 写真—4 (偏平 H 型断面  $B/D=10$ , ほぼ安定な渦放出) に示す。

以上述べたように, この前縁剝離渦型は, 前縁剝離渦がきわめて重要な役割を果たしているが, 安定な渦放出に後縁二次渦もあわせて重要な役割を果たしており, 構造断面の前縁形状とともに後縁形状やその近傍での流れの制御も渦励振応答特性に影響を与えるものと考えられる。これらのことは, 図—9 に示されるように, 矩型断面 (断面比  $B/D=2$ ) の後流に 3 枚の後流板 (後流の周期渦を壊すとともに 後流を変化させるための平板であり, 主流方向長さは  $4D$ ) を設置し, その位置を変化させることによって渦励振応答振幅が変化することや, 図

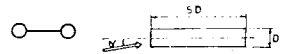
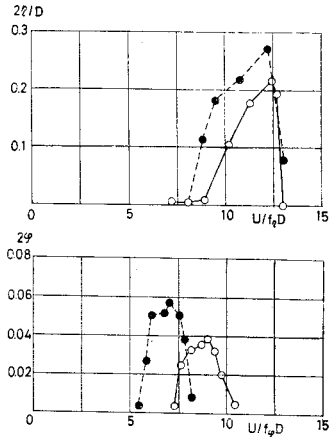


図—9 矩型断面 ( $B/D=2$ ) の鉛直たわみ渦励振応答に及ぼす後流板の影響 (前縁剝離渦型)

—10 に示されるような迎角  $7^\circ$  の偏平矩型断面 (断面比  $B/D=5$ ) の後縁形状を半円に変化させることによりその応答特性に変化がみられることから確認できる。

(3) 付着型

断面の振動にもかかわらず, 断面前縁部からは剝離渦はほとんど発生せず, 代わって断面後縁部から後縁二次渦および後縁からの剝離渦 (以降後縁剝離渦と称す) が発生し, これらの放出振動数が, 静止断面のストロハル



$m$	$(1.267 [kg \cdot m^{-1}])$ $0.3436 [kg \cdot sec^2 \cdot m^{-2}]$
$f_{\eta}$	$2.551 [sec^{-1}]$
$\delta_{\eta}$	$0.01368$ ( $2\eta = 5mm$ )
$f_{\phi} / f_{\eta}$	---
$\alpha$	$7^\circ$

$I$	$(0.05166 [kg \cdot m])$ $0.005271 [kg \cdot sec^2 \cdot m^{-2}]$
$f_{\phi}$	$6.077 [sec^{-1}]$
$\delta_{\phi}$	$0.01151$ ( $2\phi = 0.05rad$ )
$f_{\phi} / f_{\eta}$	---
$\alpha$	$7^\circ$



$m$	$(3.92018 [kg \cdot m^{-1}])$ $0.4010 [kg \cdot sec^2 \cdot m^{-2}]$
$f_{\eta}$	$2.551 [sec^{-1}]$
$\delta_{\eta}$	$0.00737$ ( $2\eta = 5mm$ )
$f_{\phi} / f_{\eta}$	$2.25$
$\alpha$	$7^\circ$

$I$	$(0.05887 [kg \cdot m])$ $0.005966 [kg \cdot sec^2 \cdot m^{-2}]$
$f_{\phi}$	$5.748 [sec^{-1}]$
$\delta_{\phi}$	$0.00532$ ( $2\phi = 0.05rad$ )
$f_{\phi} / f_{\eta}$	$2.25$
$\alpha$	$7^\circ$

図—10 矩型断面 ( $B/D=5$ ) の断面後縁形状の渦励振応答への影響 (前縁剝離渦型)

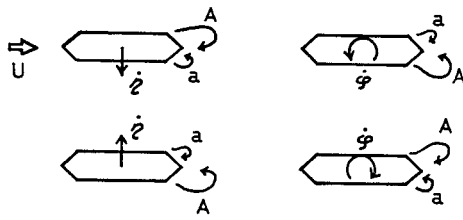


図-11 付着型の流れの模式図（後縁剝離渦Aと後縁二次渦 a）

数  $S_t$  より決まる渦放出振動数  $f_s$  あるいはその  $1/n$  ( $n$ : 整数) と同期することによって安定した渦放出が行われ、これが渦励振誘起の大きな原因となるタイプである。この付着型の流れのパターンは、図-11 に示されるように、断面後縁部に生じる後縁二次渦と後縁剝離渦それぞれの発現するタイミングは、鉛直たわみおよびねじれ振動に対してともに同様になり、そのために鉛直たわみおよびねじれの渦励振発現無次元風速  $V_{cr}$  はほぼ等しく、ともに静止断面のストロハル数  $S_t$  より決まる無次元共振風速  $V_s$  とほぼ等しくなる。

従来より、Klöppel<sup>8)</sup>、Clement<sup>9)</sup> らによって報告されているように、扁平度 ( $B/D$ ) の大きな充腹断面のスト

ロハル数  $S_t$  は 0.2 前後の値を示し、その渦励振限界風速  $V_{cr}$  は約 5 程度の値を示す。また、前述のように、ストロハル数成分に従うカルマン渦発生振動数  $f_s$  が、後縁二次渦、後縁剝離渦の放出振動数の整数倍となる場合にも安定な渦放出が起こり得、これに対応して、無次元基本限界風速  $V_{cr}$  ( $V_{cr}=1/S_t$ ) の整数倍の風速値  $2V_{cr}$ ,  $3V_{cr}$ ,  $4V_{cr}$ , ... においても渦励振応答出現の可能性を有している。なお、このタイプでは、断面後縁近傍での流れが渦励振に大きく影響を与えており、断面後縁形状が、渦励振の応答特性にきわめて重要な要素となっている。

上記の応答特性の例として、図-12 に扁平六角断面（断面比  $B/D=9.9$ 、迎角  $0^\circ$ ）の鉛直たわみおよびねじれの渦励振応答図を、また 図-13 に渦励振応答発現風速域と同断面後流における変動風速の卓越振動数との関係を示す。これらの結果に示されるように、鉛直たわみおよびねじれ振動ともに、ほぼ同一の無次元風速値 ( $V_{cr}=4.5$ ) より応答が発現しており、この値は、静止断面のストロハル数  $S_t$  (0.22) より決まる無次元共振風速  $V_s$  とほぼ一致している。一方、同断面の鉛直たわみおよびねじれの渦励振発現流速域における定常加振状態での流れのパターンを 図-14 に示す。またその写真を 写真-5, 6 に示す。さらに、断面の後縁形状が渦励振応答特性に及ぼす影響の例として、扁平六角断面（断面比  $B/D=5$ 、迎角  $7^\circ$ ）の後縁を半円形に変化させたときの渦励振応答特性の比較を 図-15 に示す。なお六角断面の渦励振は、そのストロハル数  $S_t$  が 0.226 であることより、鉛直たわみおよびねじれともに  $2V_{cr}$  から始まる

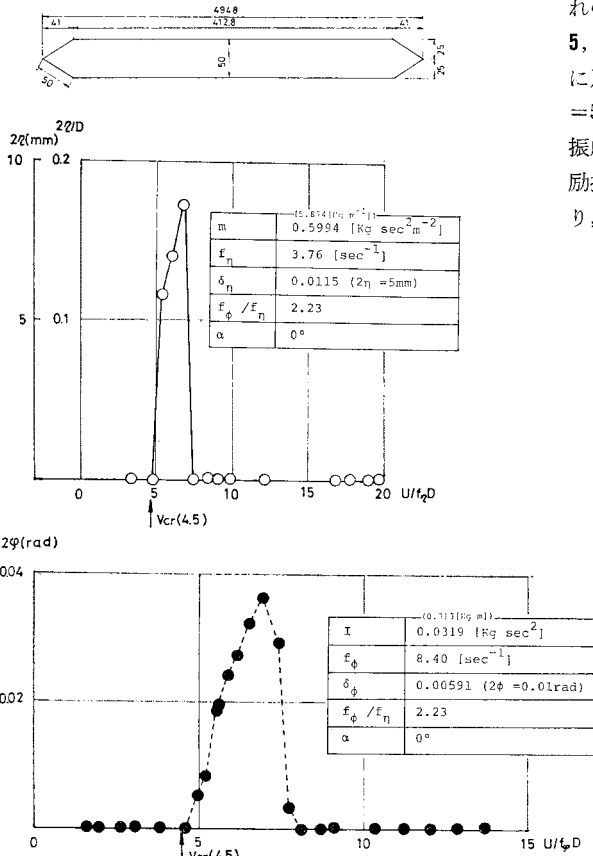


図-12 扁平六角断面 ( $B/D=9.896$ ) の渦励振応答図 (付着型)

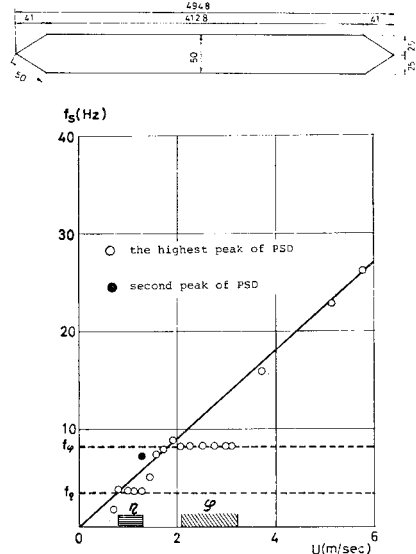


図-13 扁平六角断面 ( $B/D=.896$ ) の後流変動風速の卓越振動数と振動応答出現との関係 (付着型)

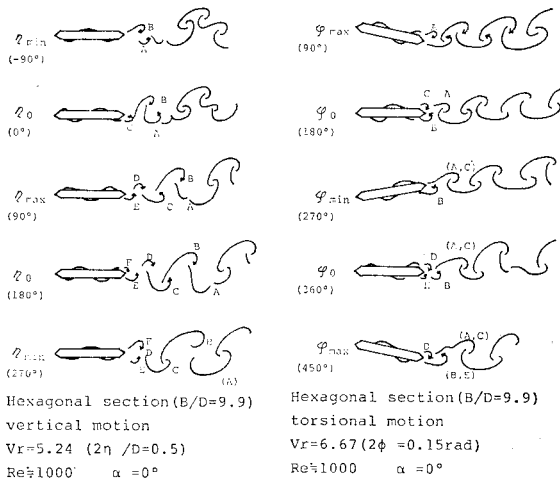


図-14 偏平六角断面 ( $B/D=9.896$ ) の渦励振発現流速域における流れのパターン (付着型)

振動であり、一方後者の断面については、ストロハル数  $S_f$  が 0.281 であることより、鉛直たわみおよびねじれともに  $V_{cr}$  から始まる振動と判断される。

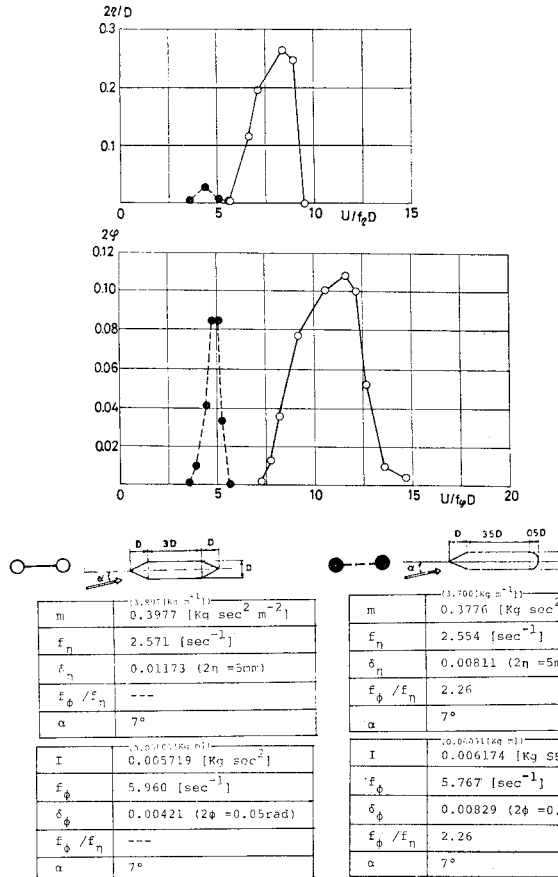
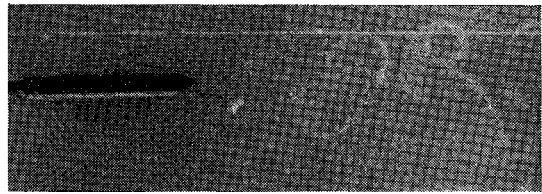
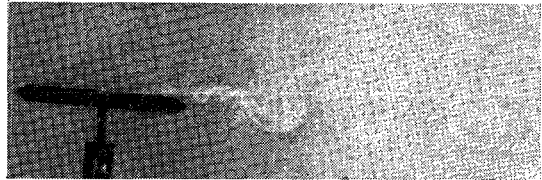


図-15 六角断面 ( $B/D=5$ ) の断面後縁形状の渦励振応答への影響 (付着型)



Hexagonal section ( $B/D=9.9$ )  
vertical motion ( $\gamma_{max}$ )  
 $V_r=5.24$  ( $2\eta/D=0.5$ )  
 $Re=1000$   $\alpha=0^\circ$

写真-5 偏平六角断面 ( $B/D=9.9$ ) の流れの様子 (渦励振発現流速域, 図-14 に対応)

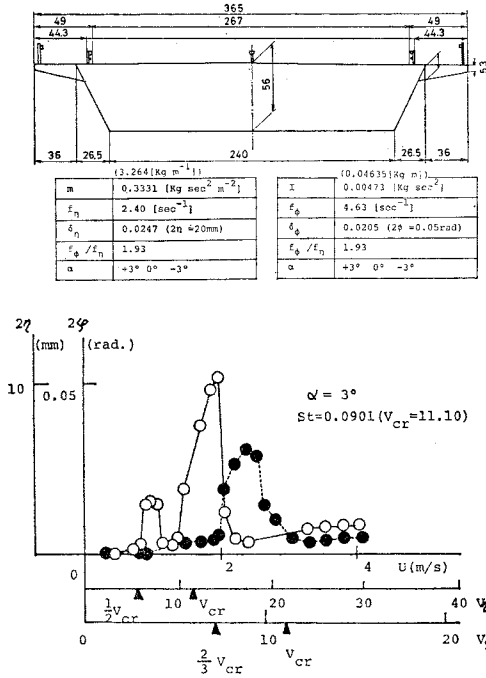


Hexagonal section ( $B/D=9.9$ )  
torsional motion ( $\phi_{max}$ )  
 $V_r=6.67$  ( $2\phi=0.15rad$ )  
 $Re=1000$   $\alpha=0^\circ$

写真-6 偏平六角断面 ( $B/D=9.9$ ) の流れの様子 (渦励振発現流速域, 図-14 に対応)

(4) 混在型

このタイプは、前縁剝離渦型と付着型の両特性が混在したものであり、渦励振応答特性としては、鉛直たわみの渦励振限界風速  $V_{cr}$  (前縁剝離渦がちょうど振動1周期を要して後縁に達するときの無次元風速) がストロハル数  $S_f$  より決まる無次元共振風速とほぼ一致し、またねじれの渦励振が、この渦励振限界風速  $V_{cr}$  (付着型) および  $2/3 V_{cr}$  (剝離型) 等の風速域において発現もしくは発現の可能性を有する。このタイプの応答例として、図-16 に、比較的 Bluff な形状の逆梯形断面 (迎角  $+3^\circ, 0^\circ, -3^\circ$ ) の場合の鉛直たわみおよびねじれの渦励振応答図を示す。迎角  $3^\circ$  では、鉛直たわみは  $1/2 V_{cr}$ ,  $V_{cr}$  より、またねじれは  $2/3 V_{cr}$  より渦励振が発現していることから、この渦励振は前縁剝離渦型に属すると判断されるのに対し、迎角  $-3^\circ$  では、鉛直たわみ、ねじれともにほぼ同一の無次元共振風速より応答が発現することから、付着型に属するものと判断される。一方、迎角  $0^\circ$  では、ちょうど迎角  $3^\circ$  および  $-3^\circ$  における応答特性両者の混在した特性を有しており、ねじれは、渦励振限界風速  $V_{cr}$  および  $2/3 V_{cr}$  の2種類の風速域において渦励振の発現が認められる。



図一六 逆梯形断面 ( $B/D=6.52$ ) の渦励振応答図 (迎角  $3^\circ$ : 前縁剝離渦型, 迎角  $0^\circ$ : 混在型, 迎角  $-3^\circ$ : 付着型)

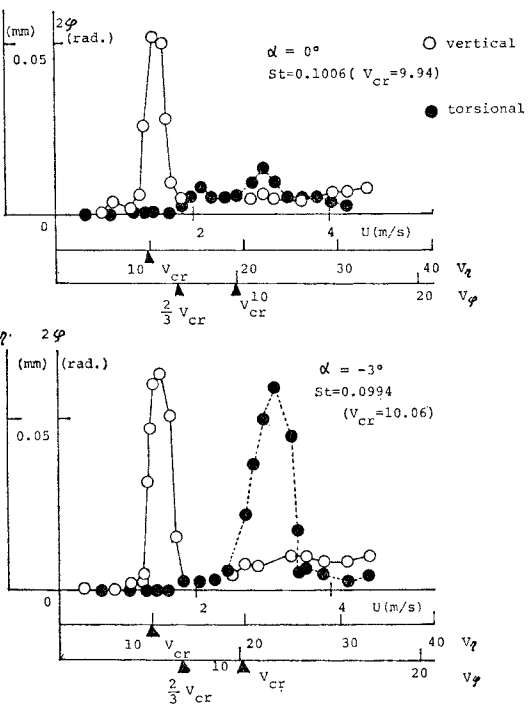
### 3. 渦励振発現無次元風速

従来より、非流線型の充腹断面の渦励振は、断面後流に生じるカルマン渦的な周期渦の放出振動数が、構造物の固有振動数と一致する、いわゆる強制振動的な共振現象、あるいはその共振風速近傍においてある風速幅をもって、渦放出振動数が断面の固有振動数と同期するロックイン現象として考えられてきた。これらの振動の生じる渦励振限界風速  $V_{cr}$  は、次式のように、静止断面のストロハル数  $S_t$  と関係づけられる。

$$V_{cr} = \frac{U_{cr}}{Df_0} = \frac{1}{S_t} \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $U_{cr}$ : 限界風速、 $D$ : 断面桁高、 $f_0$ : 断面固有振動数

ところが、近年、小林<sup>1)</sup>や中村<sup>2)</sup>は、充腹断面に生じる低風速域での空力限定振動——これらを、小林は剝離渦励振、中村は低風速励振とよんでいる——は、静止断面のストロハル数や、カルマン渦とは無関係であり、振動に伴って断面の前縁より生じる剝離渦に起因するものであり、従来より一般的に考えられてきたカルマン渦に

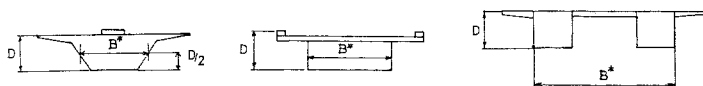


起因する振動現象とは区別されるべきものであることの指摘がなされている。小林は、断面比の異なるいくつかの矩形断面の非定常圧力測定および仕事量から、渦励振の鉛直たわみ応答最大値を示す無次元限界風速として次式のような実験式を提案している<sup>1)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} \tilde{V}_{cr} &= 4.8 \left( \frac{B}{D} \right) + 0.5 \\ \text{または} \\ \tilde{V}_{cr} &= 2.4 \left( \frac{B}{D} \right) + 0.5 \dots\dots\dots(2) \\ \text{または} \\ \tilde{V}_{cr} &= 1.2 \left( \frac{B}{D} \right) + 0.5 \end{aligned} \right\}$$

一方、英国のマリソン委員会によって、橋梁箱桁断面の無次元限界風速  $\tilde{V}_{cr}$  として、図一七に示される等価幅員 ( $B^*$ ) および桁高 ( $D$ ) を用いて、次式の評価式が提案されている<sup>10)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} \tilde{V}_{cr} &= \frac{U_{cr}}{ND} = 6.5 \text{ for } \frac{B^*}{D} < 5.75 \\ \tilde{V}_{cr} &= \frac{U_{cr}}{ND} = 2.0 \left( \frac{B^*}{D} - 2.5 \right) \text{ for } \frac{B^*}{D} > 5.75 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$



図一七 各種充腹断面の有効幅員  $B^*$ <sup>10)</sup>

ただし、 $N$ : 構造物の固有振動数  
ところで、前縁剝離渦型の渦励振限界風速は、前述のように前縁剝離渦と後縁二次渦が、後縁近傍の後流におい



一体化する条件で与えられるものと考えられることから、以下のようにしてこの渦励振限界風速  $V_{cr}$  が、断面比と関係づけられる。

いま無次元風速を、前縁剝離渦の側面に沿う平均流下速度を用いて次のように変形する。

$$V_{cr} = \frac{U_{cr}}{\bar{D} f_0} = \left( \frac{U^*}{\bar{B} f_0} \right) \cdot \left( \frac{U}{U^*} \right) \left( \frac{\bar{B}}{\bar{D}} \right) \dots\dots (4)$$

ただし、

$V_{cr}$ : 渦励振限界風速 (無次元)

$U_{cr}$ : 渦励振発現風速 (接近流速) [m/sec]

$f_0$ : 構造物の固有振動数 [1/sec]

$U^*$ : 前縁剝離渦の側面に沿う平均流下速度 [m/sec]

$\bar{D}$ : 前縁剝離点、後縁剝離点間の流れ直交距離 (有効桁高) [m]

$\bar{B}$ : 前縁剝離点から最下流側後縁端までの主流方向距離 (有効幅員) [m]

なお、断面の有効幅員  $\bar{B}$ 、有効桁高  $\bar{D}$  の例を図-18に示す。

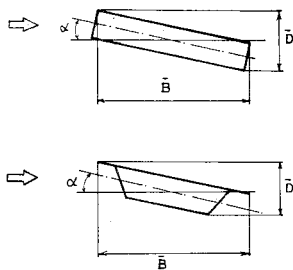


図-18 充腹断面の有効幅員  $\bar{B}$  および有効桁高  $\bar{D}$

ところで、前縁剝離渦がちょうど振動1周期  $T_0$  後に後縁に達する場合には、

$$\bar{B} = U^* \cdot T_0 = \frac{U^*}{f_0} \dots\dots (5)$$

が成立することから、このとき式 (4) は

$$V_{cr} = \left( \frac{U}{U^*} \right) \cdot \left( \frac{\bar{B}}{\bar{D}} \right) \dots\dots (6)$$

のように表わせる。すなわち、前縁剝離渦型の鉛直たわみ渦励振の限界風速  $V_{cr}$  は、前縁剝離渦の平均流下速度比 ( $U^*/U$ ) と断面の偏平度を示す有効幅員・有効桁高比 ( $\bar{B}/\bar{D}$ ) (本研究ではこの比を仮に Bluffness ratio とよぶ) によって関係づけられることになる。

この前縁剝離渦の流下速度比 ( $U^*/U$ ) は、前述の矩型断面 (断面比  $B/D=2$ , 迎角  $0^\circ$ ) の非定常圧力測定結果 (図-5 参照) より、次のようにして推定される。すなわち、非定常圧力の負圧のピークが前縁剝離渦の位置に対応することから、振動変位と負圧のピークとの間の位相差より、前縁剝離渦の流下速度が概略求められる。

図-19 は、鉛直たわみ渦励振発現時の定常振動状態に

おける非定常圧力の位相特性を大きく3つの領域に分けたものであり、これらの3領域を、I, II, III とし、それぞれの特徴を次のように考える。

(I); 前縁剝離渦の生成・成長の領域であり、前縁に近いことから、この領域での流下速度はほぼ接近流速に等しい ( $U_1^* \approx U$ )。

(II); 成長、発達した前縁剝離渦が徐々に衰退しながら比較的ゆっくり流下する ( $U_2^* < U$ )。

(III); 断面後縁近傍の縁縁二次渦等の影響を受けて、前縁剝離渦が再び成長しながら、流下速度を上げて上げる ( $U_3^* > U_2^*$ )。

このように考えるとき、前縁剝離渦の平均流下速度  $U^*$  は式 (5) より

$$U^* = \frac{\bar{B}}{T_0} \dots\dots (7)$$

であり、前縁剝離渦が  $U_1^* (= U)$  で後縁に達する時間を  $T_1$  (図-19 参照) とすれば

$$U \approx U_1^* = \frac{\bar{B}}{T_1} \dots\dots (8)$$

が近似的に成立する。図-19 より、矩型断面 (断面比  $\bar{B}/\bar{D}=2$ ) 鉛直たわみ渦励振発現時における、前縁剝離渦の平均流下速度比 ( $U^*/U$ ) を近似的に ( $T_1/T_0$ ) として求めれば、無次元風速 4.95 および 5.98 では約 0.60, 0.55 となりおおよそ 0.6 程度の値をとるものと考えられる。

以上のことから、前縁剝離渦型の鉛直たわみの渦励振

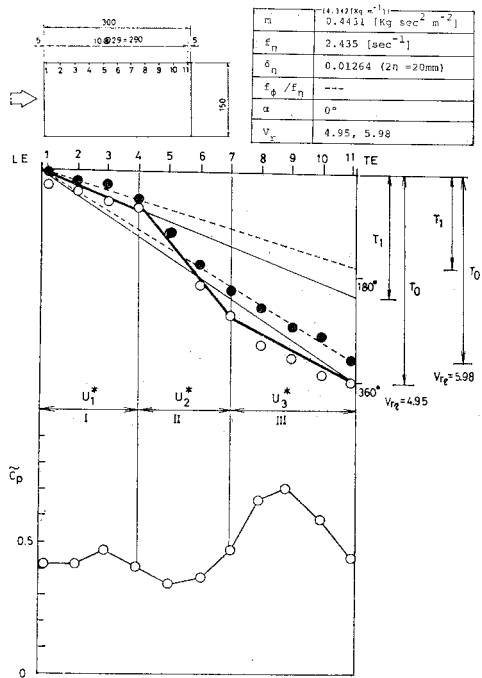


図-19 前縁剝離渦の側面上の流下速度の算定

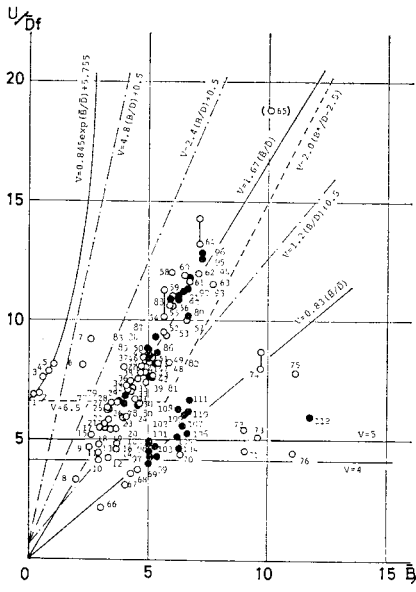


図-20 各種充腹構造断面の鉛直たわみ渦励振発現無次元風速（渦励振限界風速）と断面 Bluffness ratio ( $\bar{B}/\bar{D}$ ) との関係

限界風速  $V_{cr}$  は近似的に次式で表わせる。

$$V_{cr} \approx 1.67 \left( \frac{\bar{B}}{\bar{D}} \right) \dots\dots\dots (9)$$

ところで、図-20 は、現在までに各研究者らによって報告されている、充腹断面の鉛直たわみ渦励振の応答特性あるいは、非定常空気力に関するデータをもとにして、鉛直たわみ振動（ただし、直列角柱の場合は完全剝離型に属すると考えられねじれの結果も含めた）の渦励振限界風速  $V_{cr}$  と Bluffness ratio ( $\bar{B}/\bar{D}$ ) の関係をプロットしたものである。なお、応答特性 ( $V-A$  図) より求められた結果 (No. 1~No. 76) は○印によって、また、成田<sup>11)</sup>によって求められた非定常空気力係数 ( $CLI$ ) より、負減衰力を与える限界として求めた結果 (No. 77~No. 112) は●印によって区別されている。これらの渦励振限界風速  $V_{cr}$  の定義を模式図、図-21 に示す。図-20 中の番号 (No. 1~No. 112) に対応する構造断面形状概略図、迎角条件、研究者、引用文献を一括して表-1 に示す。ただし、No. 65 は、流れのパターン (図-8、写真-4) より、絶縁剝離渦がちょうど振動1周期で後縁に達する流速に換算された結果を示す。

一方、図-22 は、従来より報告されている充腹断面のストロハル数  $S_t$  ( $S_t = f_0 D/U$ ) をもとに式 (4) に示した有効桁高  $\bar{D}$  によって修正されたストロハル数  $\bar{S}_t$  ( $\bar{S}_t = f_0 \bar{D}/U$ ) の逆数で定義される無次元共振風速  $V_r$  ( $V_r = U_{cr}/f_0 \bar{D} = 1/\bar{S}_t$ ) と、Bluffness ratio ( $\bar{B}/\bar{D}$ ) の関係をプロットしたものである。図中の番号 (No. 1~No. 73) に対応する断面形状、迎角条件、研究者、引用

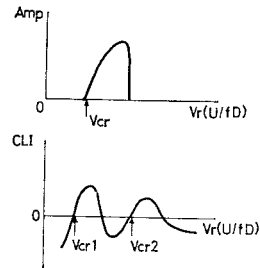


図-21 渦励振発現無次元風速（渦励振限界風速）の定義

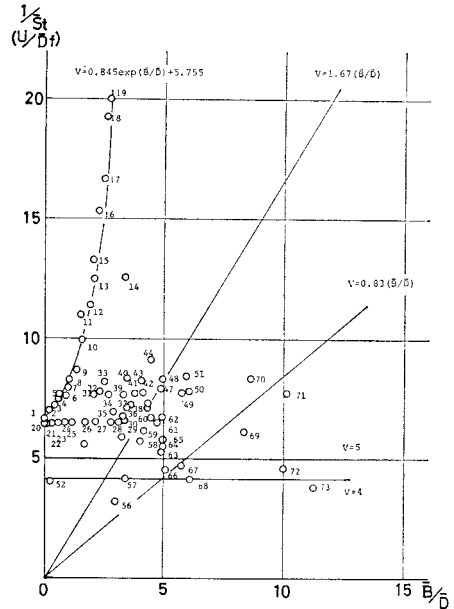


図-22 各種充腹構造断面の共振無次元風速 ( $1/\bar{S}_t$ ) と断面 Bluffness ratio ( $\bar{B}/\bar{D}$ ) との関係

文献を一括して表-2 に示す。

以上の結果をもとに、鉛直たわみの渦励振限界風速およびストロハル数特性より、いくつかのタイプに分類すれば次のようになる。

i) タイプ 1; Bluffness ratio  $\bar{B}/\bar{D}$  が 1.0 以下の非常に Bluff な断面のグループであり、渦励振限界風速  $V_{cr}$  は、ストロハル数  $\bar{S}_t$  の逆数と一致し、近似的に次式で表わせる。

$$V_{cr} \approx 0.845 \exp(\bar{B}/\bar{D}) + 5.755 \text{ for } (\bar{B}/\bar{D}) \leq 1.0 \dots\dots\dots (10)$$

なお、このタイプは、完全剝離型に属する。

ii) タイプ 2; 鉛直たわみ渦励振限界風速  $V_{cr}$  は、Bluffness ratio ( $\bar{B}/\bar{D}$ ) とほぼ直線関係にあり、近似的に次式で表わせる。

$$V_{cr} = 1.67 (\bar{B}/\bar{D}) \dots\dots\dots (11)$$

なお、このタイプには、多くの橋梁偏箱桁断面が含ま

表一1 図一20 中の各番号に対応する断面概略形状、迎角条件、引用文献

No.	Cross section	Angle of Attack	Author or Bridge Name	Ref. No.	No.	Cross section	Angle of Attack	Author or Bridge Name	Ref. No.
1		0°	Nakamura	5	29		7°	Shiraishi	18
2		0°	Nakamura	5	30		0°	Azi Rv. Br.	19
3		0°	Nakamura	5	31		4°	Kobayashi	1
4		0°	Nakamura	5	32		5°	Shiraishi	18
5		0°	Nakamura	5	33		7°	Shiraishi	15
6		4°	Kawasaki	12	34		7°	Shiraishi	15
7		0°	Kawasaki	12	35		5°	Yamaguchi	20
8		0°	Shiraishi	13	36		7°	Shiraishi	15
9		10°	Tozaki Br.	14	37		0°	Long's Creek Br.	21
10		7°	Shiraishi	15	38		7°	Ohshima Br.	22
11		0°	Tozaki Br.	14	39		7°	Shiraishi	15
12		10°	Konishi	16	40		4°	Kobayashi	1
13		10°	Konishi	16	41		0°	Tacoma Br.	23
14		-4°	Kawasaki	12	42		6°	Shin-suigo Br.	11
15		10°	Konishi	16	43		5°	Azi Rv. Br.	19
16		-5°	Konishi	16	44		3°	Shiraishi	18
17		10°	Konishi	16	45		7°	Shiraishi	15
18		7°	Shiraishi	15	46		7°	Shiraishi	15
19		10°	Konishi	16	47		0°	Shiraishi	23
20		5°	Konishi	16	48		5°	Yamato Rv. Br.	24
21		7°	Shiraishi	15	49		5°	Ohshima Br.	25
22		7°	Shiraishi	15	50		7°	Shiraishi	25
23		0°	Tozaki Br.	14	51		5°	Ohshima Br. (temporary)	22
24		7°	Shiraishi	15	52		0°	Ishikari Rv. Br.	26
25		0°	Onomichi Br.	11	53		7°	Azi Rv. Br.	27
26		7°	Shiraishi	15	54		5.2°	West Gate Br.	28
27		4°	Nanko Foot Br.	17	55		4°	Shiraishi	23
28		5°	Konishi	16	56		7°	Ohshima Br.	22

No.	Cross section	Angle of Attack	Author or Bridge Name	Ref. No.	No.	Cross section	Angle of Attack	Author or Bridge Name	Ref. No.
57		0°	Shiraishi	18	85		0°	Narita E0020	11
58		0°	Initial Severn Br.	21	86		3°	Suehiro Br.	11
59		0°	(tors.)	29	87		3°	Narita D5015	11
60		0°	(tors.)	29	88		4°	Narita E0010	11
61		2°	Shin-suigo Br.	11	89		3°	Narita E0010	11
62		0°	(tors.)	29	90		4°	Narita A7510	11
63		0°	Azi Rv. Br.	19	91		4°	Narita B7510	11
64		5°	Ohshima Br.	22	92		4°	Narita E0010	11
65		0°	Shiraishi	23	93		3°	Narita E0010	11
66		7°	Shiraishi	15	94		0°	Narita E0015	11
67		7°	Shiraishi	15	95		3°	Narita B5010	11
68		0°	Kawasaki Br.	12	96		3°	Narita A5010	11
69		5°	Konishi	16	97		0°	Narita D5020	11
70		0°	Konishi	16	98		0°	Narita A5020	11
71		0°	Yarra Br.	21	99		3°	Suehiro Br.	11
72		0°	Erakin Br.	21	100		0°	Narita E0020	11
73		0°	Wye Br.	21	101		0°	Narita E0020	11
74		0°	Ohshima Br.	25	102		0°	Narita B5020	11
75		0°	Shiraishi	30	103		3°	Narita A3015	11
76		0°	Bosporus Br.	21	104		-4°	Narita B7510	11
77		-4°	Narita E0020	11	105		4°	Narita B7510	11
78		3°	A7515	11	106		0°	Suehiro Br.	11
79		4°	B5020	11	107		4°	Narita E0010	11
80		3°	Narita A7515	11	108		4°	Narita A7510	11
81		0°	Narita A7520	11	109		0°	Narita E0015	11
82		3°	A5015	11	110		0°	Narita A7515	11
83		-3°	Narita E0015	11	111		0°	Narita A5015	11
84		0°	A5020	11	112		0°	Narita E0010	11

(2)

(1)

表-2 図-22 中の各番号に対応する断面概略形状、迎角条件、引用文献

No.	Cross section	Angle of Attack	Author	Ref. No.	Cross section	Angle of Attack	Author	Ref. No.
1		90°	Klöppel	8		90°	Nakamura	32
2		0°	Nakamura	5		80°	Nakamura	32
3		0°	Nakamura	5		70°	Nakamura	32
4		0°	Nakamura	5		60°	Nakamura	32
5		0°	Nakamura	5		50°	Nakamura	32
6		0°	Nakamura	5		40°	Nakamura	32
7		0°	Nakamura	5		30°	Nakamura	32
8		0°	Washizu	31		25°	Nakamura	32
9		0°	Washizu	31		20°	Nakamura	32
10		0°	Washizu	31		0°	Washizu	31
11		0°	Merrison Committee	21		0°	Klöppel	8
12		0°	Washizu	31		7°	Shiraishi	15
13		0°	Washizu	31		7°	Shiraishi	15
14		0°	Klöppel	8		7°	Shiraishi	15
15		0°	Washizu	31		7°	Shiraishi	15
16		0°	Washizu	31		0°	Washizu	31
17		0°	Washizu	31		0°	Washizu	31
18		0°	Washizu	31		0°	Washizu	31
19		0°	Washizu	31		0°	Washizu	31

No.	Cross section	Angle of Attack	Author	Ref. No.	Cross section	Angle of Attack	Author	Ref. No.
35		0°	Washizu	31		0°	Klöppel	8
36		0°	Washizu	31		7°	Shiraishi	15
37		0°	Klöppel	8		0°	Fage & Jøhansen	33
38		0°	Washizu	31		7°	Shiraishi	15
39		0°	Klöppel	8		7°	Shiraishi	15
40		0°	Klöppel	8		5°	Yamaguchi	20
41		0°	Washizu	8		0°	Hanshin Exp. Way Auth.	19
42		0°	Washizu	8		7°	Shiraishi	15
43		0°	Washizu	8		0°	Shiraishi	15
44		0°	Klöppel	8		0°	Klöppel	8
45		7°	Shiraishi	15		0°	Klöppel	8
46		7°	Shiraishi	15		0°	Konishi	16
47		7°	Shiraishi	15		0°	Konishi	16
48		7°	Shiraishi	15		--	Bearman	9
49		0°	Klöppel	8		0°	Shiraishi	30
50		0°	Yamaguchi	20		0°	Klöppel	8
51		0°	Klöppel	8		0°	Narita	11
52		0°	Camichel	33		0°	Shiraishi	30
53		25°	Nakamura	32		0°	Shiraishi	30
54		0°	Klöppel	8		0°	Shiraishi	30

(2)

(1)

れ、前縁剝離渦型に属する。

iii) タイプ 3; 本質的には、タイプ 2 と同じであり、渦励振限界風速  $V_{cr}$  はタイプ 2 の 1/2 となる。

$$V_{cr} = 0.83(\bar{B}/\bar{D}) \dots\dots\dots(12)$$

なお、このタイプは、前縁剝離渦がちょうど振動 2 周期を要して後縁に達する場合であり、前縁剝離渦型に属する。

iv) タイプ 4; Bluffness ratio  $\bar{B}/\bar{D}$  によらず、渦励振限界風速  $V_{cr}$  はほぼ一定の値、約 4~5 を示す。すなわち

$$V_{cr} \approx 4 \sim 5 \dots\dots\dots(13)$$

このタイプは付着型に属する。

以上の近似式、式 (10)~(13) について、式 (10) は 図-22 のストロハル数  $\bar{S}_i$  の逆数の近似式であり、式 (11) は、前述のように前縁剝離渦の平均流下速度比  $U^*/U$  をおおよそ 0.6 とした場合の近似式 (式 (9)) であり、式 (12) は式 (11) の風速値の 1/2 として近似された式であり、さらに式 (13) はストロハル数  $\bar{S}_i$  を 0.20~0.25 とした場合の近似式である。

また、図-20 には、比較のために、式 (3) で示されたメリソン委員会の提案式 (ただし、有効幅員  $B^*$  を  $\bar{B}$  として評価) を破線によって、一方小林によって提案されている鉛直たわみ最大応答値を示す無次元風速評価式 (式 (2)) を一点鎖線によって示されている。なお、前縁剝離渦型のねじれの渦励振現無次元風速は、近似的に次式によって評価できるものと考えられる。

$$\left. \begin{aligned} V_{cr}^* &= 1.11(\bar{B}/\bar{D}) : \left( \frac{2}{3} V_{cr} \text{ に対応} \right) \\ V_{cr}^* &= 0.67(\bar{B}/\bar{D}) : \left( \frac{2}{5} V_{cr} \text{ に対応} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots(14)$$

#### 4. 結論および今後の課題

本研究を通じて得られた結論および今後の課題を示せば次のようである。

(1) 充腹構造断面の渦励振は、その応答特性、流れのパターンより大きく、完全剝離型、前縁剝離渦型、付着型および混合型に分類できる。

(2) これらの各タイプのうち、完全剝離型、付着型の渦励振現風速は、静止断面のストロハル数と関連づけられるのに対し、前縁剝離渦型については明確な関連性は認められない。

(3) 前縁剝離渦型では、鉛直たわみとねじれの渦励振現無次元風速が異なる。

(4) 渦励振の限界風速の評価において、特に迎角を有する場合、有効幅員  $\bar{B}$  および有効桁高  $\bar{D}$  を用いることによって、比較的ばらつきの少ない形で、各タイプに分類することができる。

(5) 完全剝離型では、前縁からの剝離流が、前縁剝離渦型では、前縁剝離渦と後縁二次渦 (の一体化) が、また、付着型では後縁二次渦と後縁剝離渦が、渦励振現の重要な要素となっている。

(6) 前縁剝離渦型では、断面の前縁形状 (ただし後縁形状によっても応答が変化するが) が、付着型では、断面の後縁形状が、渦励振応答特性に大きな影響を与える。

(7) 前縁剝離渦の側面に沿う平均流下速度は、接近流速のおおよそ 60% 程度と考えられる。

(8) 橋梁の偏平箱桁断面の多くは、前縁剝離渦型に属し、その渦励振現無次元風速は、ほぼ断面の Bluffness ratio ( $\bar{B}/\bar{D}$ ) に比例する。

今後の課題としては、渦励振の各タイプ別の、断面の幾何学的形状を考慮した最大応答振幅の評価方法や、乱れの影響に対する評価、あるいはより効果的な防振・制振のための空力的な対策の検討、等が挙げられる。

最後に本研究遂行に際し、風洞実験に多大のご助力を得た、大阪府立工業専門学校助教授 岡南博夫氏、建設省 小前繁氏、香川県 高口秀和氏、石川島播磨重工業株式会社 小島治久氏、日本電信電話公社 斎藤恒範氏、住友重機械工業株式会社 武内隆文氏、京都市 佐伯英和氏、鹿島建設 乙藤寛治氏、京都大学工学部 白土博通氏、真下英人氏、佐川信之氏の諸氏に対し謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 小林紘士：風による長大橋の限定振動に関する研究，大阪大学博士学位論文，昭和 53 年 11 月。
- 2) 中村泰治・渡辺公彦：H 型断面柱の低風速励振について，土木学会第 34 回年次学術講演会概要集，昭和 54 年 10 月。
- 3) Toebes, G.H. and P.S. Eagleson : Hydroelastic vibrations of flat plates related to trailing edge geometry, Trans. ASME, D 83, 1963.
- 4) Greenway, M.E. and C.J. Wood : The effect of a bevelled trailing edge on vortex shedding and vibration, J. Fluid Mech., Vol. 61, part 2, 1973.
- 5) 中村泰治・深町信導・上村平八郎：矩型断面柱のうず励振，土木学会第 33 回年次学術講演会概要集，昭和 53 年。
- 6) 石崎澄雄・谷池義人・近藤宏二：風による角柱の振動不安定性に対する稜の寸法比の影響について，京都大学防災研究所年報，第 23 号 B-1, 昭和 55 年 4 月。
- 7) 亀井 勇・丸田栄藏・望月 強：四角柱の振動性状と後流の風速変動について，構造物の耐風性に関する第 4 回シンポジウム論文集，1976 年 12 月。
- 8) Klöppel, K. and F. Thiele : Modellversuche im Windkanal zur Bemessung von Brücken gegen die Gefahr winderregter Schwingungen, Der Stahlbau, Heft 12, Dez., 1967.
- 9) Clements, R.R. : An inviscid model of two dimensional vortex shedding, J. Fluid Mech., Vol. 57, part 2, 1973.
- 10) Inquiry into the Basis of Design and method of Erection of Steel Box Girder Bridges, Rep. Com., App. 1, part I, 1973.

- 11) 成田信之：充腹断面桁を有する斜張橋の耐風設計に関する基礎的研究，東京大学博士学位論文，昭和53年2月。
- 12) 大阪市土木局：川崎橋工事報告書，昭和54年3月。
- 13) 白石成人・松本 勝：充実構造断面の渦励振特性に関する基礎的考察，第6回風工学シンポジウム論文集，1980年。
- 14) 本州四国連絡橋公団，石川島播磨重工業株式会社：門崎高架橋上部工（4径間）の風洞試験結果中間報告，昭和55年11月。
- 15) 白石成人・松本 勝・真下英人：幾何学的形状からみた充腹桁断面の渦励振特性について，土木学会第36回年次学術講演会概要集，1981年。
- 16) 小西一郎・白石成人・大門孝一・井上浩男：箱型構造断面に対するFlow Visualizationと風洞実験，構造物の耐風性に関する第3回シンポジウム論文集，1974年。
- 17) 渡辺義方・日種俊哉・石田 貢・木本栄一・南條正洋：南港歩行者専用道路（3径間連続斜張橋）の設計，橋梁と基礎，81-1，1981年。
- 18) 白石成人・松本 勝・武内隆文：橋梁箱桁断面の耐風安定性，住友重機械技報，Vol. 29, No. 85, 1981年。
- 19) 阪神高速道路公団，三菱重工業株式会社：安治川橋梁予備風洞実験報告書，昭和49年3月。
- 20) 山口富夫・福沢 清・池上保彦・田中博喜：長大けた橋の限定振動に関する実験的研究，三菱重工技報，Vol. 7, No. 7, 1970年12月。
- 21) 調査中間報告ほん訳グループ：鋼箱ゲタ橋の設計と架設の調査委員会（Merrison委員会）の調査中間報告書付録A（暫定設計評価基準）（4），橋梁と基礎，73-11。
- 22) 京都大学工学部土木工学教室 橋梁工学研究室，本州四国連絡橋公団：吊橋の耐風安定性に関する調査研究，昭和53年度研究成果報告書，昭和54年3月。
- 23) 白石成人・松本 勝・小島治久・小林修二：H型断面のフラッター特性に関する実験的研究，構造物の耐風性に関する第4回シンポジウム論文集，1976年。
- 24) 京都大学工学部土木工学教室 橋梁工学研究室，阪神高速道路公団：斜張橋の耐風安定性に関する調査研究（その2），昭和53年度研究成果報告書，昭和54年3月。
- 25) 本州四国連絡橋公団，石川島播磨重工業株式会社：大島大橋の耐風安定性について，昭和54年2月。
- 26) 建設省土木研究所構造研究室：石狩川河口橋の耐風性に関する調査報告書，土研資料-648，昭和46年3月。
- 27) 京都大学工学部土木工学教室橋梁工学研究室，阪神高速道路公団：斜張橋の耐風安定性に関する研究（その3），昭和54年度研究成果報告書，昭和55年3月。
- 28) Melbourne, W.H. : Cross-Wind Response of Structures to Wind Action, Proc. of the 4th Int'l. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, 1975.
- 29) 白石成人・松本 勝・佐川信之：吊橋主塔の渦励振特性に対する基礎的研究，土木学会第36回年次学術講演会概要集，昭和56年。
- 30) 白石成人・松本 勝・岡南博夫・高口秀和：橋梁断面の渦励振動特性についての一考察，昭和52年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集，昭和52年4月。
- 31) 鷲津久一郎・大屋昭男・大築志夫・藤井邦雄：箱型模型の空力弾性特性に関する風洞実験，構造物の耐風性に関する第4回シンポジウム論文集，1976年。
- 32) 中村泰治：傾斜平板および関連断面柱のうず励振について，九州大学応用力学研究所所報，第43号，昭和50年8月。
- 33) Farquharson, F.B. : Aerodynamic Stability of Suspension Bridges, Part III, The Investigation of Models of the Original Tacoma Narrows Bridge under the Action of Wind, June, 1952.

(1981.6.29・受付)