研究報告

充腹構造断面の渦励振限界風速と応答特性について

On the critical reduced velocity and the response characteristics of vortex-induced oscillations of bluff structural sections

白石 成人*

Naruhito SHIRAI SHI

松本 勝**

Masaru MATSUMOTO

SUMMARY

This paper presents an investigation on vortex-induced deflectional oscillations of various bluff structural sections. With aid of a number of formerly reported works, it is noted that the onset critical reduced velocity $V_{cr,0}$ of vortex-induced oscillations is characterized by slenderness ratio $\bar{B}/\bar{D}$ where $\bar{B}$ and $\bar{D}$ signify projection of chord length to mean flow and that of height to the plane normal to mean flow. Experimental results indicate that critical reduced velocity of vortex-induced oscillations can be classified into four types. In the onset reduced critical velocity and slenderness ratio diagram, the two of four types show that $V_{cr,0}$ increases linearly with slenderness ratio $\bar{B}/\bar{D}$, to which a majority of road bridge deck sections belongs, while other types show that the onset reduced velocity $V_{cr,0}$ tends to be controlled by the Strouhal number. It should be however noted that the equivalent lift force coefficient C_L or the maximum amplitude of vortex-induced responses relates dispersedly with geometrical shape of cross sections.

1. まえがき

最近注目されている構造物の空力振動の一つに、比較的低風速において生じる渦励振がある。この振動は、構造断面が流体力学的に比較的Bluffな形状をしている場合に、度々見られ、背の高い鋼管煙突、照明塔、長い構造部材、ケーブル構造、吊橋・斜張橋等の箱桁、架設途中の吊橋の独立主塔などの構造系に振動が発現したとの報告もなされている。渦励振自体は、連成フラッタ、剥離流フラッタ、ギャロッピングのような発散型の破壊的な空力振動ではないにしても、構造物の使用性あるいは建設の施工性、部材等の局部破壊等の面で障害をきたすこともあり、予め、その構造系の振動発現風速や最大応答振幅等の空力振動特性の評価あるいは防振・制振対策が要求されている。

我国においても、現在建設あるいは計画中の名港大橋（仮称、中央径間405m）、大和川橋梁（仮称、中央径間355m）等があるが世界的にも多くの長径間斜張橋が計画建設されつつある。これらの多くには、力学的にあるいは構造形態上の美観の面から偏平箱桁断面が採用されているが、その断面の最終的な幾何学的形状選定は、渦励振特性によって決められるといっても過言ではないであろう。一般に、構造物の耐風性照査は、模型による風洞実験により行なわれており、渦励振に対し、より有利な耐風安定性の優れた構造断面形状あるいは防振・制振付加装置が試行錯誤的に検討されている。しかしながら、渦励振の発生原因には未だ不明な点が多く残されている。二次元実

* 京都大学工学部教授 Member of JAWE, Prof., Dept. of Civil Eng'ng, Kyoto Univ.

** 京都大学工学部助教授 Member of JAWE, Associate Prof., Dep. of Civil Eng'ng, Kyoto Univ.

験結果の実橋（三次元構造系）への適用，気流に含まれる乱れの渦励振制振効果，防振・制振付加装置の効果，断面幾何学形状の応答特性への形状評価方法等の問題も山積されており，自然風中に置かれた構造物の渦励振応答挙動をより適確にかつより合理的に評価するためにはこれらの諸問題の解明は不可欠であり，現在の多くの研究もこの点を解明しようとするものであると考えられる。

ところで，これまでに，矩形断面等の基本的な形状や，橋梁偏平箱桁断面の渦励振特性について数多くの報告がなされているが，これらのデータをベースにして，充腹断面の渦励振特性の概略的な総合的検討および，データの今後の構造物耐風性検討への活用は，耐風工学的に意義のあることと考えられる。

以上のことを勘案し，ここでは充腹断面の渦励振鉛直たわみ振動発現風速について，従来より報告されているデータをもとに検討を加えると共に，断面形状と渦励振応答特性との関連性について述べるものである。なお，ここで対象としているのは全て一様気流中における二次元的な応答特性である。

2. 渦励振限界風速の評価

従来より，渦励振の生じる原因として，充腹断面背後に生じる周期的な渦（カルマン渦的）の放出振動数（ f_s ）が，構造物の固有振動数（ f_0 ）と一致する前後の風速域において，カルマン渦が断面の振動に同期して，渦励振が生じるものと考えられてきた。近年，小林¹⁾，中村²⁾等により，この発生原因の他に，断面の振動に伴って断面の前縁部より生じる剥離渦が原因となって生じる場合のあることが指摘されており，小林はこれを剥離渦励振，中村は低風速励振と呼び，従来より知られているいわゆるカルマン渦励振と区別している。一方，このタイプの渦励振の特徴としては水槽実験による流れの可視化，あるいは圧力分布測定

により，渦励振定常振動時には，断面の振動に伴って断面前縁部および後縁部より生じる渦（前縁剥離渦および後縁二次渦）の一体化による安定な渦放出が挙げられ，この結果，断面側面の非定常圧力分布ならびに振動応答の位相特性が振動を助長するようになると考えられる。このような渦の相互作用が渦励振発現の原因の一つになっており，鉛直たわみおよび捩れそれぞれの渦励振開始無次元風速が異なるという一面を有する。³⁾

Fig.1 充腹断面の渦励振開始無次元風速 V_{ero} と偏平比 B/D の関係

(Onset reduced velocities V_{ero} of vortex-induced deflectional oscillations of bluff sections v.s. slenderness ratio B/D)

Fig.1は，従来より報告されている充腹断面の渦励振特性結果（自由振動法による風速・応答振幅図あるいは強制振動法による非定常揚力測定結

Table 1. Fig.1に対応する断面形状, 設定迎角と引用文献
(Shapes of cross sections, angles of attack and reference numbers
corresponding to Fig.1)

NO	断面	迎角	引用文献	NO	断面	迎角	引用文献	NO	断面	迎角	引用文献	NO	断面	迎角	引用文献
1		0°	8	29		7°	14	57		0°	14	85		0°	7 E0020
2		0°	8	30		0°	15	58		0°	17	86		3°	7 Shue- hiro
3		0°	8	31		4°	1	59		0°	25	87		3°	7 D5015
4		0°	8	32		5°	14	60		0°	25	88		4°	7 E0010
5		0°	8	33		7°	11	61		2°	7	89		3°	7 E0010
6		4°	9	34		7°	11	62		0°	25	90		4°	7 A7510
7		0°	9	35		5°	16	63		0°	15	91		4°	7 B7515
8		0°	3	36		7°	11	64		5°	18	92		4°	7 E0010
9		10°	10	37		0°	17	65		0°	19	93		3°	7 E0010
10		7°	11	38		7°	18	66		7°	11	94		0°	7 E0015
11		0°	10	39		7°	11	67		7°	11	95		3°	7 B5010
12		10°	12	40		4°	1	68		0°	9	96		3°	7 A5010
13		10°	12	41		0°	19	69		5°	12	97		0°	7 D5020
14		-4°	9	42		6°	7	70		0°	12	98		0°	7 A5020
15		10°	12	43		5°	15	71		0°	17	99		3°	7 Shue- hiro
16		-5°	12	44		3°	14	72		0°	17	100		0°	7 E0020
17		10°	12	45		7°	11	73		0°	17	101		0°	7 E0020
18		7°	11	46		7°	11	74		0°	21	102		0°	7 B5020
19		10°	12	47		0°	19	75		0°	26	103		3°	7 A5015
20		5°	12	48		5°	20	76		0°	17	104		-4°	7 B7510
21		7°	11	49		5°	21	77		-4°	7 E0020	105		4°	7 B7510
22		7°	11	50		7°	21	78		3°	7 A7515	106		0°	7 Shue- hiro
23		0°	10	51		5°	18	79		4°	7 B5020	107		4°	7 E0010
24		7°	11	52		0°	22	80		3°	7 A7515	108		4°	7 A7510
25		0°	7	53		7°	23	81		0°	7 A7520	109		0°	7 E0015
26		7°	11	54		5.2°	24	82		3°	7 A5015	110		0°	7 A7515
27		4°	13	55		4°	19	83		-3°	7 E0015	111		0°	7 A7515
28		5°	12	56		7°	18	84		0°	7 A5020	112		0°	7 E0010

果)から, 渦励振開始無次元風速 $V_{cro}(U/\bar{D}f_0)$,
 U ; 一様流速, f_0 ; 鉛直たわみ固有振動数, $\bar{D}$;
断面有効高さ)と充腹構造断面偏平比($\bar{B}/\bar{D}$, $\bar{B}$;
断面有効幅員)の関係をプロットしたものである。
図中の各番号に対応する断面形状, 設定迎角およ
び引用文献(なお詳細な形状については各文献を
参考にされたい)を Table 1 に示す。

断面の有効高さ $\bar{D}$ および有効幅員 $\bar{B}$ は, Fig.
2 に示されるように, それぞれ主流直角面および
主流方向への断面投影長(但し $\bar{B}$ については同一
側面に関して)であり, 有効高さ $\bar{D}$ については,
既に中村によって渦励振特性を評価する上で重要
なパラメータであることが指摘されている。⁴⁾

Fig.1 に示される結果は大きく次の4種類の

Fig.2 断面の有効幅員 $\bar{B}$ および有効高さ $\bar{D}$
(Effective chord length $\bar{B}$ and effective
height $\bar{D}$ of bluff sections)

グループに分類できる。その1つは $\bar{B}/\bar{D}$ が1.0
以下の比較的Bluffな断面の結果であり, その

V_{cr0} はほぼ図中の式に示される $1/\bar{S}t$ ($\bar{S}t$; ストロハル数, $\bar{S}t = \bar{D}f_0/U$) に従って $\bar{B}/\bar{D}$ の増加に伴ない急激に V_{cr0} の増加するグループであり, 他の2つのグループは, 原点を通り, $\bar{B}/\bar{D}$ の増加と共にほぼ直線的に V_{cr0} が増加するものであり, 最後の一つは, $\bar{B}/\bar{D}$ によらず V_{cr0} がほぼ一定値 (4~5) を示すグループである。ところで Fig.1 中の実線で示される直線:

$$V_{cr0} = 1.67 (\bar{B}/\bar{D}) \quad (1)$$

$$V_{cr0} = 0.83 (\bar{B}/\bar{D}) \quad (2)$$

は, 断面の振動に伴なって前縁より剥離した渦 (前縁剥離渦) が, 断面側面上に沿って流下し, 振動1周期後あるいは2周期後に断面後縁部に達し後縁二次渦と一体化する条件式を示すものである。但し, 前縁剥離渦の側面に沿う平均流下速度 U^* は, 非定常圧力測定 of 位相特性および水槽実験による流れの可視化によって, 設定流速 U の約60%と測定された。Fig.1に示されるように, 大部分の結果は, 式(1)あるいは(2)と比較的よく一致する。

すなわち, $\bar{B}/\bar{D}$ が2~7となる充実断面の多くは, 前縁剥離渦が後縁二次渦の助けを借りることによって生じる渦励振 (ここでは便宜上, 前縁剥離渦型と称す) と考えられ, 迎角を有する充実断面についても, その迎角に応じた $\bar{B}/\bar{D}$ を用いることにより, それらの V_{cr0} は $\bar{B}/\bar{D}$ に対し, 比較的ばらつきの少ない統一的な特性を示していると云えよう。一方, $\bar{B}/\bar{D}$ によらず V_{cr0} が4~5を示すグループについては, データは少ないものの, 比較的前縁剥離渦の生じにくい形状をした偏平断面に生じており, 従来よりいわれているストロハル数0.2~0.25に対応して生じており, 水槽実験等によれば断面後縁部における渦放出が渦励振発現の主要因となっているものと考えられる (ここではこのタイプの渦励振を付着型と称す)。

ところで, 耐風構造の面からは, 渦励振開始風速より, むしろ渦励振最大応答振幅の生じる風速

の評価がより重要であろう。Fig.3は, いくつかの充実断面について, 渦励振最大応答振幅の生じる無次元風速 V_{cr1} と開始無次元風速 V_{cr0} との

Fig.3 限界風速比 V_{cr1}/V_{cr0} と偏平比 $\bar{B}/\bar{D}$ の関係
(Critical reduced velocity ratios V_{cr1}/V_{cr0} v.s slenderness ratios $\bar{B}/\bar{D}$)

比 (V_{cr1}/V_{cr0}) を $\bar{B}/\bar{D}$ 別にプロットしたものであるが, ばらつきは見られるもののその値は1.5程度と考えられる。従って, この結果を式(1), (2)に適用することにより, 前縁剥離型の渦励振の場合, 最大応答振幅を示す無次元風速は近似的にそれぞれ次式:

$$V_{cr1} = 2.51 (\bar{B}/\bar{D}) \quad (3)$$

$$V_{cr1} = 1.25 (\bar{B}/\bar{D}) \quad (4)$$

のように表わせる。Fig.1中に示されるように, 式(3), (4) (図中点線) は, 小林によって提案されている最大応答振幅を与える限界風速評価式¹⁾ (図中一点鎖線):

$$V_{cr1} = 2.4 (B/D) + 0.5 \quad (5)$$

$$V_{cr2} = 1.2 (B/D) + 0.5 \quad (6)$$

とはほぼ一致する。なお Fig.3 中の各プロット点の番号に対応する断面形状, $\bar{B}/\bar{D}$, 質量減衰パラメータ ($m\delta/\rho\bar{D}^2$, m ; 単位長さ当りの質量, δ ; 構造減衰, ρ ; 空気密度), 引用文献を一括して Table 2 に示す。一方, Fig.1 中の破線はそれぞれ Merrison 委員会による評価式⁵⁾

$$V_{cr1} = 6.5 \quad \text{for } B/D \leq 5.75 \quad (7)$$

Table2 Fig. 2 に対応する断面形状, 迎角, 偏
平比, 質量減衰

(Shapes of cross sections, angles of
attack, slenderness ratios mass-damping
parameters and reference No's
corresponding to Fig. 3)

NO	断面	迎角 度	B/D	$m\delta/\rho D^2$	参考文献	NO	断面	迎角 度	B/D	$m\delta/\rho D^2$	参考文献
1		0	2	1.96	27	22		0	3.96	11.41	10
2		0	2	1.10	28	23		0	4	20	32
3		0	2	3	29	24		0	4	6	29
4		0	2	5	30	25		0	4	2.60	33
5		0	2	8	30	26		0	4	7.84	34
6		0	2	1.85	31	27		7	4.73	11.87	11
7		0	2	2.51	31	28		7	4.73	10.94	11
8		0	2	1.44	1	29		7	4.68	6.49	14
9		0	3	4.22	27	30		0	5	6.61	19
10		7	2.92	5.62	11	31		7	4.85	16.85	11
11		7	3.10	4.07	11	32		7	4.39	6.57	11
12		0	3	3	32	33		-3	4.68	7.86	14
13		0	3	9.24	1	34		5	5.39	6.35	20
14		0	3	3.32	1	35		7	5.33	7.94	35
15		7	3.35	6.57	11	36		7	5.91	13.60	18
16		7	3.35	6.30	11	37		7	5.74	10.74	23
17		7	4.04	8.48	11	38		7	5.72	14.53	35
18		7	4.30	12.36	11	39		0	6.52	15.02	14
19		7	4.30	9.06	11	40		0	8.26	13.07	26
20		0	4	4	32	41		0	9.70	31.24	10
21		7	4.04	9.94	11	42		0	9.9	25.11	26

$$V_{cr1} = 2.0 (B^*/D - 2.5) \text{ for } B^*/D > 5.75 \quad (8)$$

および近く英国の BS 5400 に採用される予定の
評価式⁶⁾:

$$V_{cr1} = 6.5 \quad \text{for } B^*/D > 5.0 \quad (9)$$

Fig.4 有効幅員 B^* の定義および無次元限界風
速と文献もの偏平比 B^*/D の関係

(Effective chord length B^* and critical
reduced velocities v.s. slenderness
ratios B^*/D reported in Ref. 6)

$$V_{cr1} = 1.1(B^*/D) + 1.0 \text{ for } 5.0 \leq B^*/D < 10 \quad (10)$$

$$V_{cr1} = 12 \quad \text{for } B^*/D \geq 10 \quad (11)$$

を示す。なお上式中の B^* は断面の有効幅員を示
しており, Fig.4 中の上図のように定義されてい
る。(一般に $\bar{B} \geq B^*$) 図に示されるように式(9),
(10), (11)は, 式(3), (4)あるいは(5), (6)に比べかなり
異っているが, その原因としては, 断面の偏平比
($\bar{B}/D$ と B^*/D) の定義の違いが考えられ, 文献
6 における式(9)および(10)は, 前述の式(3)および式
(4)に対応しているものと思われる。(Fig.4⁶⁾参
照)

Fig.5 は, 断面の幾何学形状に応じた渦励振応

図一5 断面の 何学的形状に応じた渦励振幅の 変化

Fig. 5 Responsive characteristics of vortex-
induced deflectional oscillation for
various shapes of cross sections

答振幅の変化を示す。図に示されるように、 $\bar{B}/\bar{D}$ がほぼ等しい場合には、渦励振開始無次元風速 V_{cr0} は断面形状変化に依らずにほぼ同一の値を示すのに対し、最大応答振幅を示す無次元風速 V_{cr1} は断面形状により差が認められる。このことから、渦励振開始無次元風速 V_{cr0} は、断面形状に依らずに断面の偏平比 $\bar{B}/\bar{D}$ をパラメータとしてかなりばらつきのない形で評価できるのに対し、最大応答振幅を示す無次元風速 V_{cr1} に関しては $\bar{B}/\bar{D}$ 以外に今後断面形状特性を示す他のパラメータの導入が検討されなければならないものと云える。

3. 渦励振応答振幅の評価

『渦励振によってどの程度の最大応答振幅が生じるのか』という課題は、構造物の耐風性を予め検討する上で極めて重要である。斜張橋等の場合、予備設計あるいは概略設計の段階で、過去に既に採用されている断面形状や、既に報告されているいくつかの桁断面の空力特性についての情報が検討され、基本断面形状が決定され、更に、次の段階として多くの場合、この断面についての空力特性が風洞実験によって検証され、もし余り好ましくない性状を示す場合には、基本断面形状の変更であるとか、あるいはフラップ、デフレクタ等の防振付加装置の設置が検討されている。従って基本断面形状として予めできるだけ耐風安定性の優れた断面が選定されていることが好ましいわけであるが、そのためには予備設計や概略設計の段階での机上の検討としての渦励振特性の評価式が工学的には有用であり、このようなことから予備設計の段階での渦励振最大応答振幅に関する Merrison 委員会による評価式⁵⁾：

$$\eta_0 = \frac{\rho D U_{cr1}^2}{60 m \delta f_0^2} \quad (12)$$

又は

$$(\eta_0/D) = \frac{1}{60} \left(\frac{\rho D^2}{m \delta} \right) \cdot V_{cr1}^2 \quad (13)$$

但し V_{cr1} は式(7)、(8)による。

η_0 ：渦励振鉛直たわみ最大応答振幅

が利用されている場合もしばしば見受けられる。

しかしながら前述のように、前縁剥離渦型の渦励振では、断面の振動に伴って前縁部および後縁部に生じる剥離渦が大きな役割りを果していると考えられることから強制振動よりむしろ自励型の振動に属し、また、断面回りの剥離渦の挙動を含めた、流れのパターンと振動応答間は連成・非線型振動系を構成すると考えられており、各種の充腹構造断面の幾何学形状を加味した形での渦励振最大応答振幅の評価は極めて難しい問題といえる。このため問題を簡単にし簡単な形で応答振幅を評価するために、渦励振を便宜上強制振動として取り扱い、このときの交番空気力係数を用いて渦励振応答特性が議論される場合が多い。いま鉛直たわみ 1 自由度振動系に作用する交番揚力 $L(t)$ を次式

$$L(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 \bar{B} C_L e^{j\omega t} \quad (14)$$

但し C_L ：交番揚力係数、 ω ；近似的に系の固有円振動数 ($\div 2\pi f_0$)

のように表わし、更に共振状態として、外力と応答振幅間の位相を $\pi/2$ とすれば、最大応答振幅 η_0 、そのときの無次元風速 V_{cr1} および質量減衰パラメータ ($m\delta/\rho\bar{D}^2$) を用いることによって交番揚力係数 C_L は次のように表わせる。

$$C_L = 8\pi \left(\frac{m\delta}{\rho\bar{D}^2} \right) \cdot \left(\frac{1}{V_{cr1}^2} \right) \left(\frac{\bar{D}}{B} \right) \left(\frac{\eta_0}{D} \right) \quad (15)$$

充腹断面について従来より報告されているデータをもとにして式(15)より得られた交番揚力係数 C_L を $\bar{B}/\bar{D}$ 別にまとめたものを Fig.6 に示す。なお図中の●印は、成田によって報告されている強制振動法による変動揚力係数 $C_{LI}^{(7)}$ を示すものである。Fig.6 中の各プロットに付された番号に対応する断面形状、設定迎角、断面偏平比 $\bar{B}/\bar{D}$ 、質量減衰パラメータ $m\delta/\rho\bar{D}^2$ 、引用文献を一括して Table 3 に示す。Fig.6 に示されるように、全

Fig. 6 式(15)による交番揚力係数 C_L 或いは変動揚力係数 C_{LI} と偏平比 $\bar{B}/\bar{D}$ の関係
(Fluctuating lift force coefficients C_L derived from eq. (15) or C_{LI} v.s. slenderness ratios $\bar{B}/\bar{D}$)

体的な傾向としては、断面が偏平すなわち $\bar{B}/\bar{D}$ が大きくなるに従って C_L は減少している。このことから、比較的偏平度の大きな断面の渦励振防振付加装置（例えば末広大橋に取り付けられたフラップ）の設置は、 C_L の面から云えば僅かに小さくするだけであるが、偏平度 $\bar{B}/\bar{D}$ が大きいために最大応答振幅の生じる無次元風速 V_{cr1} は大きく（式(3), (4)参照）なり、この自乗がトータル揚力として寄与するために、その耐風構造上の防振効果が大きいものと判断される。一方、No. 46, 47（□, 迎角 0° ）のように比較的 Bluff な形状を有し、もともと C_L が大きい場合には、防振効果を期待するためには、かなり大きく C_L を減ずる対策を講じなければならず、この場合には末広大橋タイプのフラップのみでは防振しきれないものと

思われる。また、Fig. 6 には同一断面の結果（矩型断面、 $\bar{B}/\bar{D}=2, 3, 4$, 迎角 0° ）が示されているが、質量減衰パラメータ $m\delta/\rho\bar{D}^2$ 等実験条件の違いによって大きく C_L の値が異っている。

（一般的な傾向としては $m\delta/\rho\bar{D}^2$ の増加に伴って C_L も増加）これらの特性は、 $m\delta/\rho\bar{D}^2$ の差による応答感度の差、減衰の振幅依存性の差および本来は自励型の非線型振動を強制線型振動として評価していること等に起因しているものと考えられる。このようなことから、現時点では構造断面の幾何学形状を明確に反映させた形での C_L の評価は極めて難しい問題であり、今後の研究に期待される所が大きい。なお Fig. 6 中の破線は Merrison 委員会の提案式(12), (13)を式(15)に対比させ、さらに B^*/D を $\bar{B}/\bar{D}$ に等しいものとして得られる交番揚力係数：

$$C_L = \frac{8\pi}{60} \left(\frac{\bar{D}}{\bar{B}} \right) \quad (16)$$

を示すものであり、一方実線は文献 6 に紹介されている交番揚力係数：

$$C_L = \frac{5.8}{V_{cr1}^2} \quad (17)$$

を同じく $\bar{B}^*/\bar{D}$ を $\bar{B}/\bar{D}$ に等しいものとして示すものである。

4. むすび

以上得られた成果を要約すれば次のようである。

- I) 充腹構造断面の偏平比 $\bar{B}/\bar{D}$ ($\bar{B}$: 同一側面の主流方向への投影幅員長, $\bar{D}$: 桁高の主流直角面への投影高さ) を用いることによって、各種の充腹構造断面の渦励振開始無次元風速 V_{cr0} ($U_{cr0}/\bar{D}f_0$) が比較的ばらつきの少ない形で整理される。
- II) 充腹構造断面の渦励振開始無次元風速 V_{cr0} と $\bar{B}/\bar{D}$ の関係から大きく 4 つのグループに分けられる。これらのうち、特に橋梁の桁に用い

Table 3 Fig. 6 に対応する断面形状, 設定迎角, 偏平比, 質量減衰パラメータと引用文献

(Shapes of cross sections, angles of attack, slenderness ratios, mass-damping parameters and reference No's corresponding to Fig. 6)

NO	断面形状	迎角 度	B/D	$m\delta/\rho D^2$	引用文献	NO	断面形状	迎角 度	B/D	$m\delta/\rho D^2$	引用文献	NO	断面形状	迎角 度	B/D	$m\delta/\rho D^2$	引用文献	NO	断面形状	迎角 度	B/D	$m\delta/\rho D^2$	引用文献	
1		0	2	10	32	29		0	3	4.48	27-3-10	58		7	4.30	9.06	77	81		4	--	--	7	A5020
2		0	2	10.65	36	30		0	3	3.32	1	59		5	4.12	6.78	14	82		3	--	--	7	A7515
3		0	2	2.57	31	31		0	3	4.35	27-3-30	60		7	4.04	8.48	21	83		3	--	--	7	A5015
4		0	2	4.42	36	11		0	3	3	32	61		0	4	4	32	84		0	--	--	7	A7520
5		0	2	8	30	31		7	3.35	6.57	11	62		0	4	2.60	33	85		0	--	--	7	B5020
6		0	2	2.57	36	34		0	3	2.54	1	63		7	4.73	11.87	11	86		0	--	--	7	B5020
7		0	2	2.31	36	35		0	3	5.66	27-3-40	64		7	4.45	14.85	11	87		3	--	--	7	D5015
8		0	2	2.31	28	36		0	3	6.17	27-3-56.3	65		7	4.94	13.40	35	88		4	--	--	7	E0010
9		0	2	5	30	37		0	3	4.22	27-3-50	66		7	4.73	10.94	11	89		4	--	--	7	A7510
10		0	2	3	29	38		0	3	5.11	27-3-45	67		-3	4.68	7.86	14	90		4	--	--	7	E0010
11		0	2	1.95	36	39		7	3.10	6.54	11	68		0	5	6.61	19	91		4	--	--	7	A7510
12		0	2	1.85	31	40		7	3.35	6.30	11	69		7	4.85	11.15	11	92		4	--	--	7	E0010
13		0	2	2.20	3	41		7	3.10	4.07	11	70		7	4.48	5.01	37	93		4	--	--	7	D5010
14		0	2	1.44	1	43		0	3	5.52	27-3-50	71		3	4.68	6.49	14	94		3	--	--	7	E0010
15		0	2	1.54	31	44		0	4	40	32	72		7	5.33	7.94	35	95		0	--	--	7	A7515
16		0	2	1.96	27	45		0	4	20	32	73		7	5.72	14.53	35	96		0	--	--	7	E0015
17		0	2	2.31	30	46		0	4	7.84	34	74		7	5.74	10.74	23	97		0	--	--	7	E0015
18		0	2	2.44	27-2-45	47		0	3.96	11.41	30	75		7	5.91	13.60	19	98		-3	--	--	7	E0010
19		0	2	1.11	28	48		0	4	8.49	27-4-20	76		5	5.39	6.35	20	99		4	--	--	7	D5010
20		0	2	1.26	27-2-10	49		0	4	8.49	27-4-30	77		5	5.81	10.97	10	100		0	--	--	7	A5015
21		0	2	2.29	27-2-40	50		7	4.03	12.06	11	78		0	6.52	15.02	14	101		3	--	--	7	B5010
22		0	2	1.93	27-2-20	51		0	4	8.12	27-4-0	79		5	7.04	23.19	18	102		3	--	--	7	A5010
23		0	2	2.05	27-2-30	52		7	4.30	12.36	11	80		4	--	--	7	E0020						
24		0	3	30	32	53		0	4	7.64	27-4-10													
25		0	3	15	32	54		0	4	6	29													
26		7	2.92	5.62	11	55		7	3.68	5.04	14													
27		0	3	9.24	1	56		7	4.04	9.94	11													
28		0	3	4.34	27-3-20	57		7	4.39	6.57	35													

られる多くの構造断面は, V_{cr0} が B/D と共にほぼ線型的に増加するグループに属する。

III) 鉛直たわみ振動について, 渦励振最大応答振幅を示す無次元風速 V_{cr1} については, 断面形状や質量減衰パラメータ $m\delta/\rho D^2$ 等によってばらつきは見られるものの, おおよそ渦励振開始無次元風速 V_{cr0} の 1.5 倍と考えられる。

IV) 渦励振を線型強制振動として扱えたときの交番揚力係数 C_L は, 断面が偏平になるに従って減少する傾向が認められる。このことと上記の II) III) の特性を考慮することにより, B/D が大きい場合には, わずかの C_L の減少が渦励振に対し大きく貢献するものと判断される。

V) 充腹断面の交番揚力係数 C_L は同一の B/D に対しても, 断面の幾何学的形状や質量減衰パ

ラメータによって相当異った値を示し, 渦励振最大応答振幅の適確な評価は今後の研究に待たれる。

最後に, 本研究の風洞実験の遂行に際し, 御協力を得た京都大学工学部白土博通氏を始め, 京都大学工学部土木工学教室橋梁工学研究室関係諸氏に対し感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 小林敏士: 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) 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11月
- 4) 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
- 5) Inquiry into the Basis of Design and method of Eredion of Steel Box Girder Bridges, Rep. Com., App.1, part 1, 1973
- 6) Bridge Aerodynamics, Institution of Civil Engineers, Westminster, London, May, 1981
- 7) 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
- 8) 中村泰治, 深町信尊, 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
- 9) 大阪市土木局: 川崎橋工事報告書, 昭和54年3月
- 10) 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
- 11) 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10月
- 12) 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
- 13) 渡辺義方, 日種俊哉, 石田貢, 木本栄一, 南条正洋: 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
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 調査中間報告はん訳グループ: 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
- 18) 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
- 19) 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
- 20) 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
- 21) 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
- 22) 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
- 23) 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
- 24) Melbourne, W.H.: Cross-Wind Response of Strudures to Wind Action, Proc. of the 4th Int'l Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, 1975
- 25) 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
- 36) 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
- 27) 白石成人，松本 勝，白土博通：充腹桁橋梁
の渦励振動特性に及ぼす幾何学的断面形状の影
響について，土木学会第35回年次学術講演会
概要集，昭和55年10月
- 28) 溝田武人，中村泰治：矩型断面柱の非定常揚
力と後流の速度変動について，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
12月
- 29) 鷺津久一郎，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
- 30) 山田均，宮田利雄，宮崎正男：乱流中の渦励
振に関する一考察，土木学会第34回年次学術
講演会概要集，昭和54年10月
- 31) 斎藤恒範：箱型構造断面の空気力学特性に関
する基礎的研究，京都大学大学院工学研究科修
士論文，昭和52年2月
- 32) 山田均，宮田利雄，伊藤学：たわみ振動する
角柱の周辺圧力分布に関する一考察，第6回風
工学シンポジウム論文集，1980年11月
- 33) 中村泰治，渡辺公彦，藤本聰：矩型断面柱の
低風速励振とわず励振について，土木学会第35
回年次学術講演会概要集，昭和55年9月
- 34) 小林紘士，永江啓一：箱型断面橋梁の限定振
動に関する風洞実験，昭和50年度土木学会関
西支部年次学術講演会概要集，昭和50年4月
- 35) 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55年度研究成果報告書，昭
和56年3月
- 36) 中村泰治，溝田武人：ある箱型構造物の空力
弾性的特性について，構造物の耐風性に関する
第2回シンポジウム論文集，1972年12月
- 37) 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：斜張橋の耐風性に関する実
験的研究，昭和49年度報告書，昭和50年3月