

直列2矩形柱の空力不安定振動

Aeroelastic instability of two rectangular cylinders in a tandem arrangement

岡島 厚* 阿部 彰人** 木綿 隆弘**

By Atsushi OKAJIMA, Akihito ABE and Takahiro KIWATA

Aeroelastic behavior and fluid-characteristics of two tandem cylinders with a rectangular cross section have been experimentally investigated in a wind tunnel. We have carried out two kinds of free oscillation tests: A downstream/upstream one is free transversally to oscillate, elastically suspended with two pairs of coil springs, and the other cylinder is set to be rigidly fixed. The two rectangular cylinders with a different ratio of side length-to-height from 1 to 6, are separated by a gap-to-diameter ratio from 1 to 5 along a common center-line in a direction of flow. So, each aeroelastic instability of an upstream and a downstream cylinders is separately examined, and then the effects of Reynolds number, the gap-distance and the side ratio on it are clarified.

1. 緒言

矩形柱周りの流れや空力静特性、さらに空力弾性的不安定性による動的振動挙動はその断面形状によって大きく相違する。そして、鉄塔、橋梁など複数個の部材で構成される場合には、周辺構成部材周りの流れによる相互の干渉も加わって、流れは一層複雑となる。また、その空力特性に寄与するパラメータも多く、未だ不明なことが多い⁽¹⁾⁽²⁾。前報⁽³⁾では、2矩形柱を直列配置で固定した時の表面上静圧分布、抗力係数、後流のストローハル数などを測定し、断面辺長比や隙間間隔比によって空力静特性が大きな影響を受けることを報告した。

本報では、前報の空力静特性についての結果を基礎にして、流れに直列配置された2矩形柱の空力的不安定振動の応答特性を調べる。本実験では、直列2矩形柱の空力弾性的不安定性に対するそれぞれの矩形柱の寄与する効果を明らかにするため、2矩形柱のうち、どちらか一方を弾性支持し、他方を固定する。そして断面辺長比 B/H (B は矩形柱の側面長さ、 H は前面高さ) $=1\sim6$ の同一形状の2矩形柱について、その隙間間隔 S を $(1\sim5)H$ の範囲で変え、それぞれの直列2矩形柱の空力弾性的不安定性を風洞実験により明らかにする。

2. 実験装置と実験方法

実験には、測定断面 $0.3\text{m}\times 1.2\text{m}$ のエッフェル型風洞装置を使用した。供試模型は風洞測定部内に流れに直列に2個の同一形状模型を配置し、そのうち1個の模型は固定し、もう一方の模型は両端を風洞測定部外側

* 工博 金沢大学教授 工学部機械システム工学科 (〒920 金沢市小立野2-40-20)

** 金沢大学大学院

で2対のコイルバネで弾性支持し、自由振動法による実験を行った。風洞測定部における一様流れの非一様性は1%以下、乱れ強さ(RMS値)は0.2%以下である。供試模型の前面辺長さ H は50mm(あるいは40, 30, 15mm)とし、流れ方向側面辺長さ B は断面辺長比 $B/H=1(H=40\text{mm})$, $2(40\text{mm})$, $3(50\text{mm})$, $6(30\text{mm})$ となるように変え、それぞれ2個の同一断面形状の供試模型を製作した。なお、空力不安定性による振動応答特性に与えるレイノルズ数の影響を調べるために、矩形柱の静特性が Re 数の影響を比較的受け易い $B/H=3$ の矩形柱については、模型前面の辺長さ $H=15, 30, 50\text{mm}$ の大きさの異なる供試振動模型を準備した。供試模型は軽量化のためスチレンボード材製とし、模型の前・後縁が直角となるように充分留意して製作した。模型配置は図1に示すごとく、測定部中央に上流側模型は固定し、下流側模型を弾性支持した場合と、上流側模型を弾性支持し、下流側を固定した場合

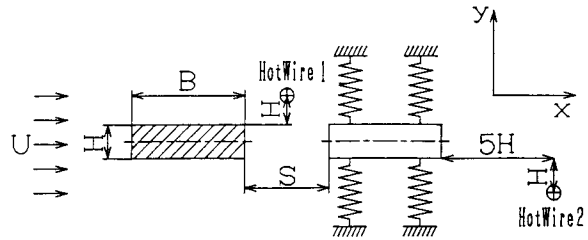


図1 振動実験模型配置概略図
(上流側模型固定 下流側模型弾性支持の場合)

表1 供試模型の振動系特性

断面辺長比	B/H	1	2	3			6
前面辺長さ	H (mm)	40	40	15	30	50	30
固有振動数	f_{NB} (Hz)	5.66	5.71	5.76	5.37	5.18	5.37
	f_{NT} (Hz)	6.84	7.13	12.70	11.43	8.98	8.20
周波数比	α	1.21	1.25	2.20	2.13	1.73	1.53
バネ定数	k (N/m)	578	580	457	796	772	618
等価質量	m (kg)	0.457	0.450	0.349	0.699	0.729	0.543
対数減衰率 $\times 10^{-2}$	δ_B	3.40	3.85	2.65	3.24	3.87	6.50
スクルートン数	Sc	5.51	3.07	7.58	5.55	2.08	3.71

の2種類について、それぞれ2矩形柱の隙間間隔比 S/H を1~5の範囲で変え、振動矩形柱の並進応答振幅 η (模型前面辺長さ H に対する応答変位のRMS値の%)およびねじれ振動の角度振幅 θ (°)を調べた。後流渦の周波数 f_w はそれぞれの模型後流に挿入した熱線流速計プローブによって検出し、A/D変換しフロッピーディスクに収録した後、大型電算機(FACOM M-760/10)により周波数解析し、後流渦のストローハル数 $St=f_w H/U$ (U は一様流速)を求めた。レイノルズ数(Re 数)は $Re=UH/\nu$ (ν は空気の動粘性係数)である。表1には、使用した各供試模型の振動系特性の値をまとめて示す。表中、振動模型系の並進モードの固有振動数を f_{NB} とし、ねじりモードの固有振動数を f_{NT} とする。また、 δ_B は並進モードの対数減衰率、 m は供試振動模型の等価質量、そして $Sc=(2m\delta_B/\rho H B l)$, l は供試振動模型のスパン長さ(296mm), ρ は空気の密度)はスクルートン数を表す。ただし、本報告の直列2矩形柱の振動については、主として並進振動モードの挙動に注目したので、ねじりモードの振動については省略する。なお、2次元模型の振動実験においては振動模型の端部の影響は無視できない。本実験では、2つの模型を近接して配置することによって模型端板は出来るだけ小さくするが、端板と風洞壁の間を狭くすることによって端部の影響を軽減するようにした。また、模型の測定部における閉塞率は1.25~4.2%で比較的小さいので、測定結果に対する閉塞効果の補正は施していない。

3. 実験結果および考察

3.1 単独矩形柱(Re 数の影響)

実験および測定法の妥当性と直列2矩形柱の振動応答特性と比較する基礎資料を得るために、まず単独矩形柱についての自由振動実験を行った。一般に、矩形柱周りの流れや空力特性は Re 数の影響を強く受ける。特に、 $B/H=3$ 矩形柱では $Re \approx 10^3$ 付近で、 St 数の変化を伴い流れパターンが著しく変化する⁽⁴⁾。そこで、 $B/H=3$ の単独矩形柱を一例にして、空力不安定性による応答特性に与える Re 数の影響を示す。図2, 3に、

それぞれ $H=15, 50\text{mm}$ の単独模型の自由振動実験による結果を示す。図(a)には無次元風速 $\bar{U} = U / (f_N B H)$ あるいは Re 数に対する応答変位振幅 η (%)、角度振幅 θ (°) を、図(b)に後流 St 数をそれぞれ示す。なお、図には、各実験での無次元共振風速 $\bar{U}_r$ を矢印で示してある。図2の $H=15\text{mm}$ の矩形柱の場合の Re 数範囲は、 $Re=(0.4\sim 7)\times 10^3$ で、比較的低い Re 数領域で St 数の値が複雑に変化する遷移 Re 数領域 $Re=(1\sim 5)\times 10^3$ を含んでいる。一方、図3の $H=50\text{mm}$ の矩形柱の場合、発振領域の現れる Re 数領域は $Re>5\times 10^3$ の比較的高い Re 数領域である。まず図2(a)の応答振幅では、 $\bar{U}=6$ 付近に渦励振が認められ、 $\bar{U}=45$ 付近から比較的大振幅の並進振動が発生し、 $\bar{U}\geq 55$ でねじれ振動が生ずる。 $\bar{U}=45$ 付近からの並進振動では、図2(b)のように後流の卓越 St 数は静止の場合の St 数 0.16 に等しく、 $B/H=1, 2$ などの矩形柱で特有なギャロッピング振動と考えられる。そして、図3の場合には、各モードの共振風速付近で渦励振、ねじれ振動が生じ、高風速域でねじれフラッターが生じており、高い Re 数領域における山田の実験結果⁽⁵⁾ と一致している。そして図2(b)、3(b) に振動模型後流の St 数を示すが、両者の結果はかなり様相を異にしている。すなわち、図2(b)では、 $Re=(1\sim 5)\times 10^3$ の発振領域以外の振動振幅の小さい風速域における St 数の値は、静止矩形柱の St 数の実験結果⁽⁴⁾ とほぼ一致し、特に、 $Re=(1\sim 2)\times 10^3$ の Re 数領域で、 $St\approx 0.06$ の低い St 数成分が認められ、前縁剥離流れが混在している。一方、図3(b)の場合、模型の振動にLocking-inしている領域以外の St 数値は

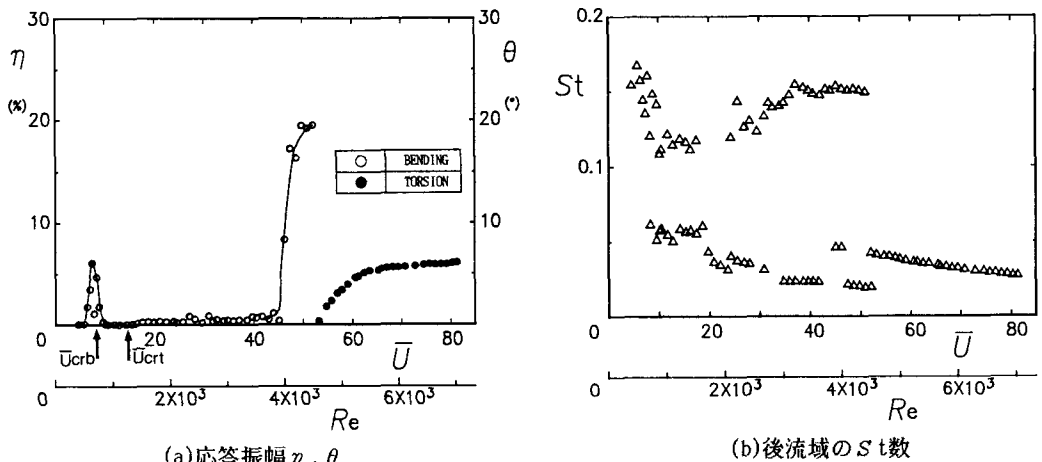


図2 単独矩形柱の振動応答特性 ($B/H=3, H=15\text{mm}$)

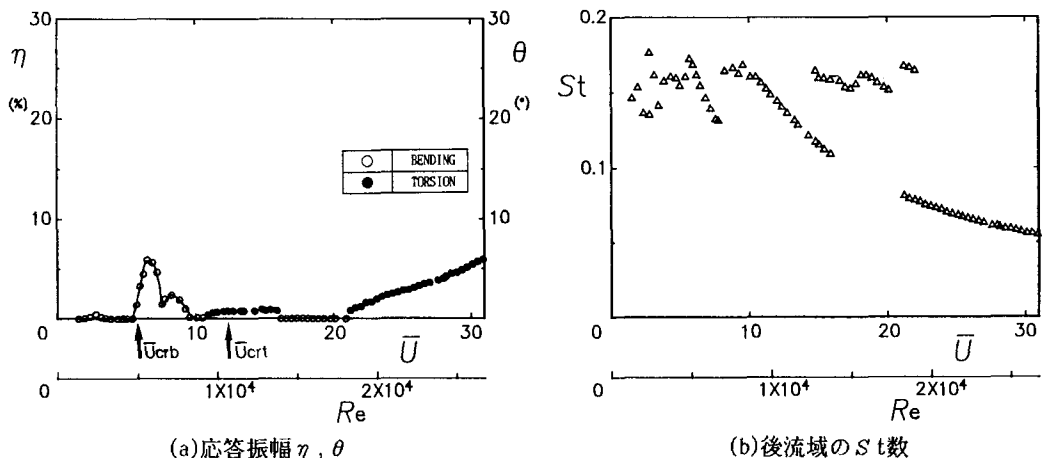


図3 単独矩形柱の振動応答特性 ($B/H=3, H=50\text{mm}$)

0.16で一定である。従って、 $B/H=3$ などのように St 数値が Re 数によって複雑に変化する矩形柱の場合の振動実験においては、振動時の Re 数には注意を要する。

3.2 上流側弾性支持、下流側固定の直列2矩形柱の場合

断面辺長比 $B/H=1$ の直列2矩形柱で、下流側模型を固定し、上流側模型を弾性支持した場合の応答特性を図4に示す。図の η の曲線はいずれも風速を約60種類変化させて得られたもので、隙間間隔を $S/H=1.1\sim 4$ の範囲で変えた時の応答並進振幅 η を単独矩形柱の場合と比較して示すが、いずれも単独柱の場合（図中、 $-\bullet-$ で示す。）とはほぼ類似した挙動を呈し、共振風速付近から振幅 η は急増し、ギャロッピング振動が生じている。次に、 $B/H=2$ 矩形柱の振幅 η を図5に示すが、 S/H を変えても本実験の隙間範囲では、いずれも $\bar{U}=5$ 付近で低風速発振が生じ、単独柱の応答振幅 η の傾向と大きな差異はないが、 S/H に対する静止の直列2矩形柱後流の卓越 St 数値の変化⁽³⁾ から推測される共振風速 $\bar{U}_{cr}$ の変化に伴い、ギャロッピング振動の η は平行移動した曲線を示している。図6の $B/H=3$ 矩形柱の場合は、共振風速付近で渦励振が認められ、 $S/H=3\sim 5$ の η は、図に示すように一旦振動しなくなり、2つのピークを持つ特異な応答特性を呈している。図7の $B/H=6$ の場合も共振風速付近で渦励振が認められる。 $S/H=2$ の η は単独柱の場合の1.2%より大きいが、いずれも η は3%以下で、その振動振幅は小さい。

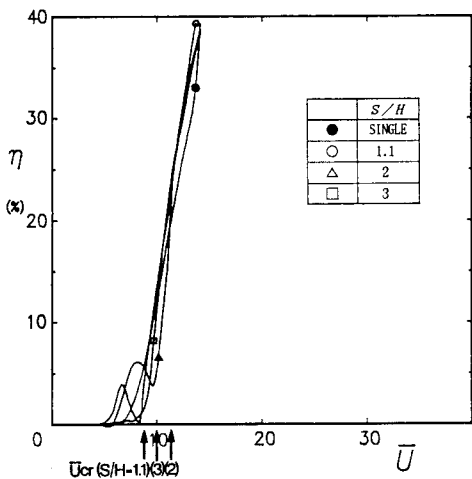


図4 直列2矩形柱の振動応答特性
($B/H=1$, $H=40\text{mm}$, 上流側模型弾性支持)

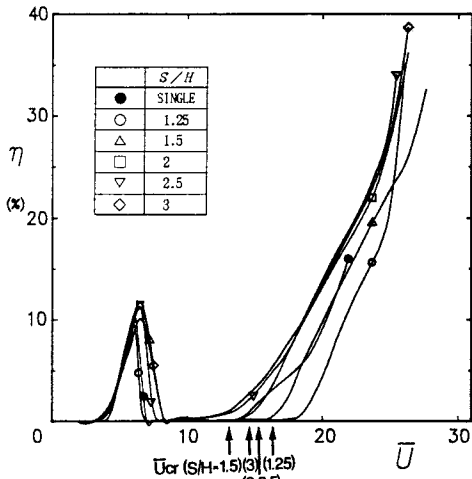


図5 直列2矩形柱の振動応答特性
($B/H=2$, $H=40\text{mm}$, 上流側模型弾性支持)

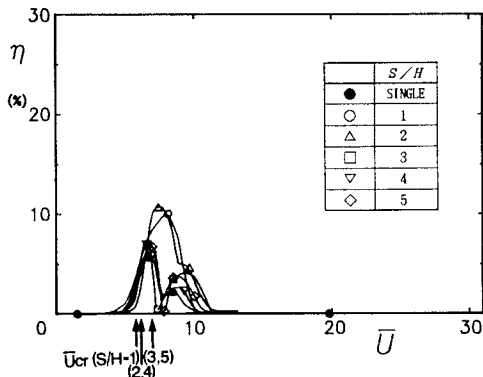


図6 直列2矩形柱の振動応答特性
($B/H=3$, $H=50\text{mm}$, 上流側模型弾性支持)

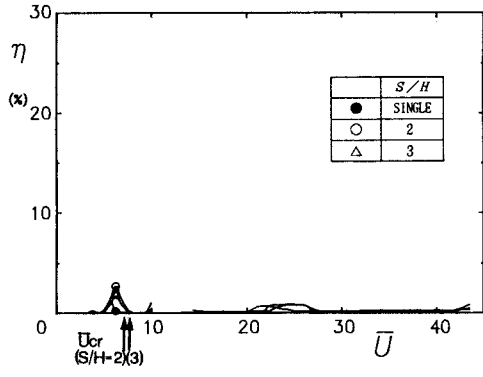


図7 直列2矩形柱の振動応答特性
($B/H=6$, $H=30\text{mm}$, 上流側模型弾性支持)

3.3 上流側固定、下流側弾性支持の直列2矩形柱の場合

次に、上流側模型を固定して下流側模型を弾性支持した場合の $B/H=1\sim3$ の直列2矩形柱の並進応答振幅 η を図8～10に示す。図8の $B/H=1$ の場合、下流側模型の応答特性には、ギャロッピング振動は見られず、 $B/H=2$ の場合も、図9のように単独柱に現れる $\bar{U}=5$ 付近の低風速発振も認め難くなるが、図8、9ともに共振風速付近に大振幅の渦励振が生ずる。しかも、それぞれの振幅 η は隙間間隔 S/H に依存してかなり相違し、 $B/H=1$, $S/H=2$ の場合、 $\eta \approx 25\%$ に、 $B/H=2$, $S/H=2.5$ の場合、 $\eta \approx 30\%$ に達する。なお、 $B/H=2$ の静止2矩形柱の $S/H=1.25$ の場合、後流速度のスペクトル分布は広い帯域におよぶ⁽³⁾ が、 $\bar{U}=18\sim23$ の高風速域で $\eta \approx 20\%$ の振動が生ずる。次に、図10に $B/H=3$ 矩形柱の場合を示す。なお、この矩形柱の静止時の後流速度のスペクトル密度分布には、2種類の卓越する S t数成分が認められるので⁽³⁾、図には、2種類の共振風速を示した。図から、それぞれの共振風速付近で発振し、低風速側の応答振幅は鋭いピーク形状を呈し、高風速側の η の曲線はなだらかな形状を呈しており、また、振動矩形柱の後流 S t数は、ともに矩形柱の振動と同期している。そこで、隙間間隔 $S/H=4$ で、無次元風速 $\bar{U}=10.1, 22.7$ で、ほぼ等しい振動振幅 ($\eta \approx 5\%$) で振動している時の振動模型下流域 ($x=4H$) で測定した速度分布 (定常分 $\bar{u}/U$ 、変動分 u'/U) を

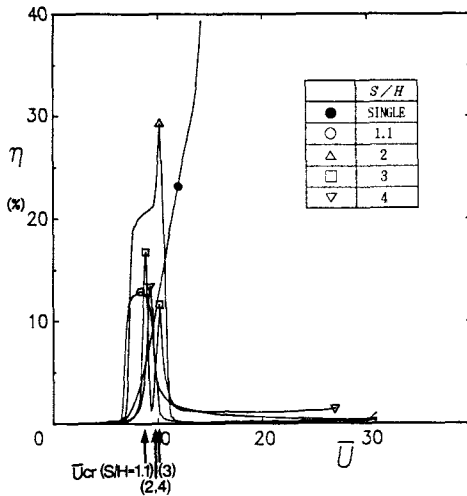


図8 直列2矩形柱の振動応答特性
($B/H=1$, $H=40\text{mm}$, 下流側模型弾性支持)

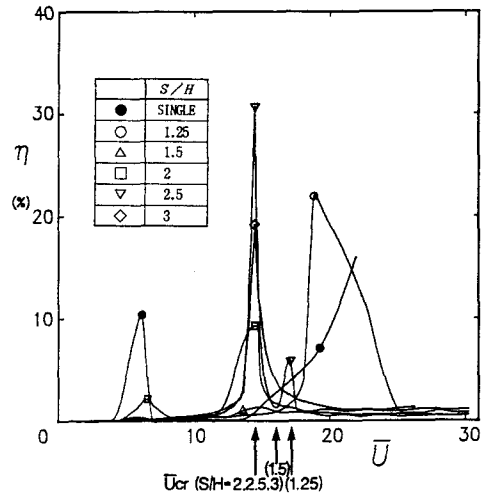


図9 直列2矩形柱の振動応答特性
($B/H=2$, $H=40\text{mm}$, 下流側模型弾性支持)

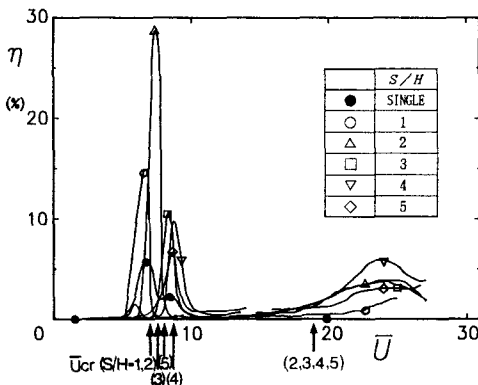


図10 直列2矩形柱の振動応答特性
($B/H=3$, $H=50\text{mm}$, 下流側模型弾性支持)

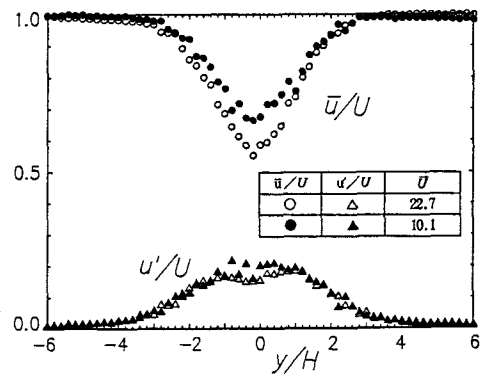


図11 模型下流域 ($x=4H$) の速度分布

図11に示す。図中、 $-\bullet-(-\blacktriangle-)$ で示す低風速域の振動時($\bar{U}=10.1$)の $\bar{u}/U$ の速度欠損は小さく、 u'/U のピークは $y/H=0$ 軸上に1つある。一方、 $-\circ-(-\triangle-)$ で示す高風速域における振動時($\bar{U}=22.7$)では、 $\bar{u}/U$ の後流幅は広く、谷も深くなり、 u'/U の分布形状は2つのピークを呈するようになる。静止の直列2矩形柱の後流速度変動には $St=0.12, 0.05$ の2種類の卓越 St 数成分が認められるが、この場合、模型が振動することによって、それぞれの成分が容易に分離されて、流れの相違がより顕著に現われている。

次に、図12には、 $B/H=6$ 矩形柱の場合を示すが、単独柱の場合には、渦励振による振幅 η は1.3%程度で比較的小さいが、直列配置にすると $S/H=2\sim3$ では $\eta=5\sim8\%$ に達し、より大きい振幅で振動するようになる。

4. 結論

前報の静特性を基礎として、流れに直列に配置された2矩形柱の空力弾性的不安定による応答特性を明らかにした。本実験では、直列2矩形柱のうちどちらか一方を弾性支持し、矩形柱の断面辺長比 $B/H=1\sim6$ の範囲で、隙間間隔を $S/H=1\sim5$ の範囲で変えて、それぞれの2矩形柱の空力不安定性を風洞実験により明らかにした。主な結論は次の通りである。

(1) 単独柱の場合： $B/H=3$ 矩形柱の St 数が複雑に変化し、その周辺流れの変容する Re 数領域 $Re=(1\sim5)\times 10^3$ における振動応答特性は、 Re 数の影響を強く受け、ギャロッピング振動の発生など、 $Re>5\times 10^3$ の高い Re 数領域における特性とは相違した応答特性を示す。

(2) 上流側弾性支持、下流側固定の直列2矩形柱の場合：上流側弾性支持の矩形柱の振動挙動は単独柱の挙動に類似し、 $B/H=1$, 2矩形柱はギャロッピング振動が発生し、 $B/H=3, 6$ では弱い渦励振が生ずるが、いずれも隙間間隔に依存して変化する。

(3) 上流側固定、下流側弾性支持の直列2矩形柱の場合：下流側を弾性支持した場合には、 $B/H=1\sim6$ いずれの矩形柱も、本実験での隙間間隔の範囲では、ギャロッピング振動は発生せず、共振風速付近で渦励振のみ生ずる。渦励振は S/H に依存して、単独柱の場合より大振幅の応答を示す場合もある。また、静止の場合の後流渦の卓越ストローハル数が2種類ある $B/H=3$ 矩形柱では、それぞれの共振風速付近で Locking-in 現象を伴って、渦励振が生ずる。

最後に、本振動実験装置および計測システムを製作し、実験を行った当時、本学大学院生 斎藤正美君(現富士重工(株))並びに学部生 岩坪竜二君に感謝の意を表す。

参考文献

- (1) N.Shiraishi, M.Matsumoto, and H.Shirato, "On Aerodynamic instabilities of tandem structure", J. Wind Eng. & Ind. Aerody., Vol.23 (1986), pp.437~447.
- (2) 白石・松本・白土・佐川, "直列柱状構造物の空力特性に関する基礎的研究", 7回風工学シンポ論文集, (1982), pp.265~272.
- (3) 岡島・木綿, "直列配置の2矩形柱の空力静特性", 構造工学論文集, Vol.36A (1990-3)
- (4) 岡島, "種々な断面辺長比の矩形柱周りの流れ", 風工学会誌, No.17 (1983-9), pp.1~20.
- (5) 山田, "構造基本断面の空力特性", 風工学会誌, No.38 (1989-1), pp.98.

(1989年10月2日受付)

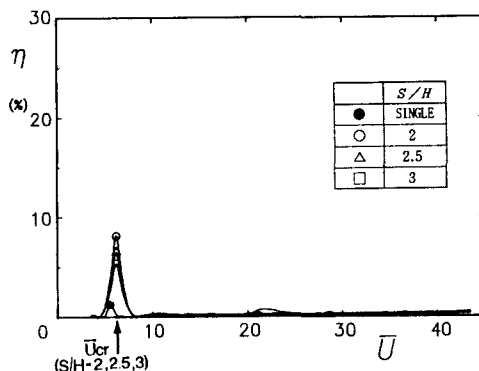


図12. 直列2矩形柱の振動応答特性
($B/H=6$, $H=30\text{mm}$, 下流側模型弾性支持)