

タンデム配列角柱の空力応答特性と断面に作用する非定常圧力に関する基礎的研究

CHARACTERISTICS OF AERODYNAMIC RESPONSE AND PRESSURE DISTRIBUTION
OF RECTANGULAR CYLINDERS IN TANDEM ARRANGEMENT

武内隆文*

松本 勝**

白石成人***

Takafumi TAKEUCHI Masaru MATSUMOTO Naruhito SHIRAISHI

Two bluff bodies closely placed in tandem in flow, are known to show a mutual aerodynamic interference.

In this study, a fundamental consideration on aerodynamic response characteristics of tandem bluff rectangular cylinders through wind tunnel using 2-D models ($B/D=0.5, 1$ and 2) is presented. Aerodynamic responses characteristic of the tandem cylinders were investigated, focusing particularly on vortex-induced oscillation, galloping and flutter. In addition, the mechanism of the aerodynamic instability was studied by analyzing the result of the unsteady pressure distribution measurement of the body. It was clarified that the response of tandem cylinders with $B/D=0.5$ and 1 , differ from that with $B/D=2$. It can be considered to be a useful indication for the estimation of aerodynamic responses of tandem structures.

1. まえがき

流れの中に置かれた充実断面の動的応答挙動は、その断面形状によって大きく変化する¹⁾。橋梁主塔等の塔柱断面には断面辺長比の小さい、いわゆる bluff な矩型断面が採用されることが多い。これら bluff な断面が2体流れ方向に上・下流に並んで、タンデムに配列された場合、タンデム角柱は、単独柱とは異なり、角柱周りの流れの相互干渉も加わって、2体が複雑な空力干渉を示すこと^{2), 3), 4)}が知られている。

しかしながら、タンデム配列角柱特有の空力振動現象については、特に発生メカニズムの面で、これから解明すべき課題も多いと考えられる。

本研究では、流れ方向にタンデム配列された角柱に特有と考えられる空力不安定振動の発現の可能性に焦点をあて、タンデム配列角柱の耐風性に関して検討・考察を加える。主たる実験は各柱を独立に弾性支持した二次元V-A（風速-応答）実験と、強制加振状態での断面に作用する非定常空気力計測実験とであり、上・下流柱は同一形状、同一振動条件を有している。これらを通して、タンデム配列角柱の空力不安定振動の応答を予測する際に、有効な情報を与えると考えられる現象に関して実験的な解明を行うものである。

2. タンデム配列角柱特有の空力応答特性

2. 1 実験概要

タンデム配列柱の耐風性に大きな影響を及ぼすパラメータとして、断面辺長比(B/D)と角柱間隔比(W/D)と

* 工修 住友重機械工業 技術本部平塚研究所 (〒254 平塚市夕陽ヶ丘63-30)

** 工博 京都大学助教授 工学部土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

*** 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

が考えられる。(図1参照)

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エッフェル型風洞(測定部:高さ1.0m, 幅0.7m, 長さ5.0m)であり、実験に供した模型は、 $B/D=0.5$ ($B=0.025m$, $D=0.05m$), 1.0 ($B=0.05m$, $D=0.05m$), 2.0 ($B=0.1m$, $D=0.05m$)の3種類の二次元模型である。

模型は2体を独立に支持し、それぞれ曲げ・捩れ振動の2自由度支持とした。2体の模型は、質量、振動数、初期減衰がほぼ同じになるようにセットした。

2. 2 渦励振振動について

タンデム構造物の空力不安定振動現象の中でも、本研究では主として渦励振に着目した考察を加えるため、単独柱において発現する渦励振について簡単に記す。

渦励振については、現在までも様々な研究報告がなされており、発生メカニズムも含めてその応答特性は、かなり明確になってきたと考えられる。ここでは、角柱に対する現在の考え方を整理するが、これらの考え方は、白石・松本¹⁾、小林⁵⁾、中村・渡辺⁶⁾等の研究により解明されてきたものと考えられる。図2に、その発生メカニズムの考え方の概念図を示すが、渦励振は発生機構により2つのタイプに分けられる。一つは、従来より知られている断面背後に発生する後流交番渦に起因した渦励振であり、その限界風速はStrouhal数の逆数として表される。これをカルマン渦型渦励振¹⁾ (KVと略す)と呼ぶ。もう一つのタイプは、前縁から剝離した渦と、後縁に発生する二次渦との一体化が重要な役割を果たす、Motion-induced Excitation type の渦励振で、この渦励振のonset velocityは、 $V_r = 1.67 \cdot B/D$ で表される¹⁾。これを自己励起型渦励振¹⁾ (MIEと略す)と呼ぶ。

2. 3 得られた成果

2.3.1 間隔比 W/D に起因すると考えられる渦励振の発現について

① 断面比 $B/D=1$ 角柱の応答特性を図3に示す。同図及び図4、5、7中、同相とは上下流柱の振動位相差がほぼ 0° の場合、逆相と

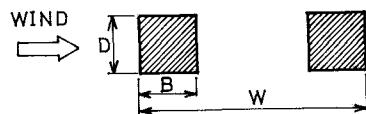


図1. 断面寸法表示法

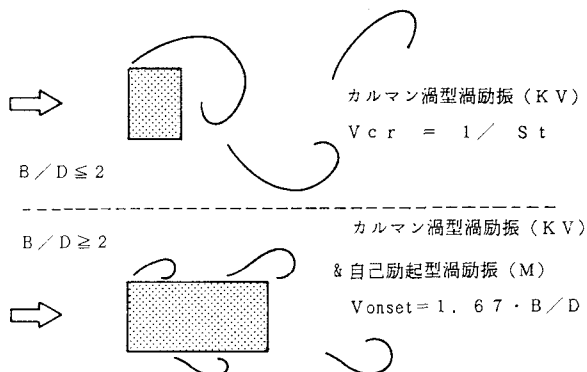


図2. 渦励振発生メカニズム

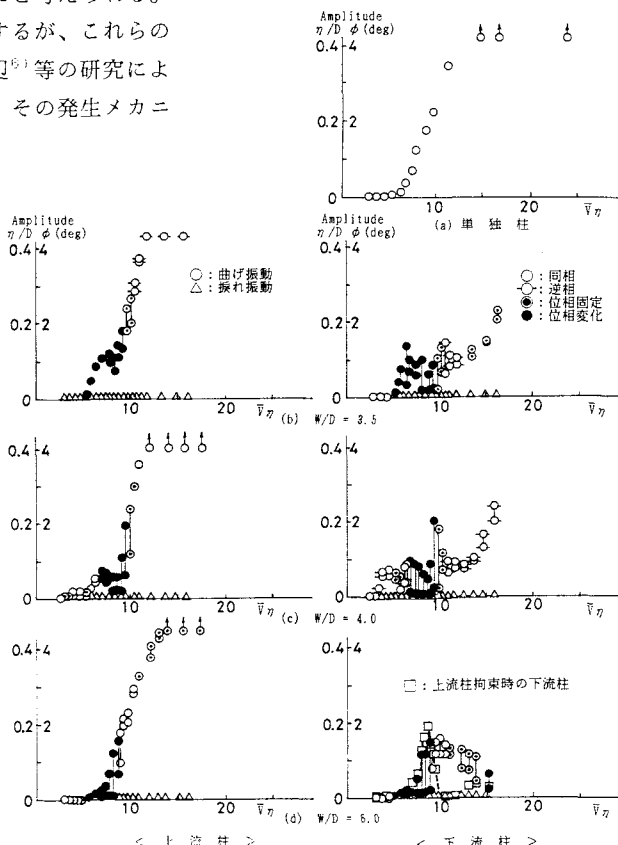


図3. タンデム角柱の W/D による応答変化 ($B/D=1$)

は位相差がほぼ 180° の場合、位相固定とは位相差が $0^\circ, 180^\circ$ 以外の位相差で固定の場合、位相変化とは位相差が時間とともに変化している場合をそれぞれ示す。図3中、(b)は $W/D=3.5$ 、(c)は $W/D=4.0$ 、(d)は $W/D=6.0$ の応答結果をそれぞれ示している。

$B/D = 1$ の断面は、単独柱では、(a)に示す通り、渦励振と「 γ ロケット」が混在した形で、換算風速 $V_r=7$ 付近から応答が現れる。図3(b)に示される通り、 $W/D=3.5$ のタンデム柱では、特に下流柱において顕著であるが、 $V_r=5$ 付近から発現するピークと、 $V_r=8\sim 10$ にピークを持つ2つの応答が現れる。図3(c)においては、更に低風速で逆相の応答 ($V_r=1.67 \cdot B/D \cdot 2/3$ における応答と考えられる) が現れるが、(b)と同様に $V_r=5$ 付近からのピークと、 $V_r=8\sim 10$ のピークとが現れる。ここにおける $V_r=5$ 付近からの発現は、 $V_r \text{ onset} = 1.67 \cdot W/D = 6.6$ で表される、2柱を一体と見なした W/D に起因した自己励起型渦励振と考えられ、 $V_r=8\sim 10$ でピークを示す応答は、後流中のStrouhal数計測結果 ($St = 0.121$) から、単独柱のカルマン渦型渦励振であると考えられる。なお、 $V_r=5$ 付近からの応答が自己励起型渦励振か、Strouhal数成分による応答かについての検討は、今後更に詳しく実施して行く予定である。図3(d)においては、下流柱に於て1つのなだらかなピークのみが発現が認められるが、図中破線で示した上流柱拘束の場合の下流柱では、その応答発現風速領域が極めて狭くなっており、 $V_r=8\sim 10$ におけるピークとなっている。このことより、両柱バネ支持状態の1つのなだらかなピークは、2つの応答よりなっている、つまり $V_r=8\sim 10$ でピークを示す単独柱としてのカルマン渦型渦励振と、 $V_r \text{ onset} = 1.67 \cdot W/D = 10$ で表される、 W/D に起因した自己励起型渦励振との2つの応答とから成っていると考えられる。

以上より、 $B/D=1$ 断面では、 $W/D=3.5\sim 6.0$ において、2柱を一体と見なした、 W/D に起因した自己励起型渦励振と考えられる振動の発現が認められた。

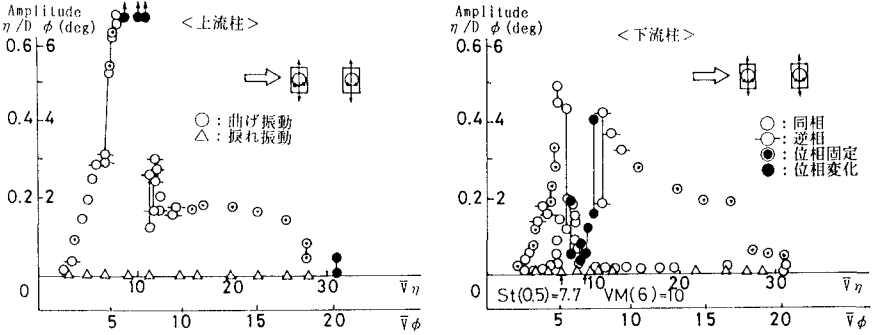


図4. タンデム角柱 V-A 応答 ($B/D = 0.5, W/D = 6$)

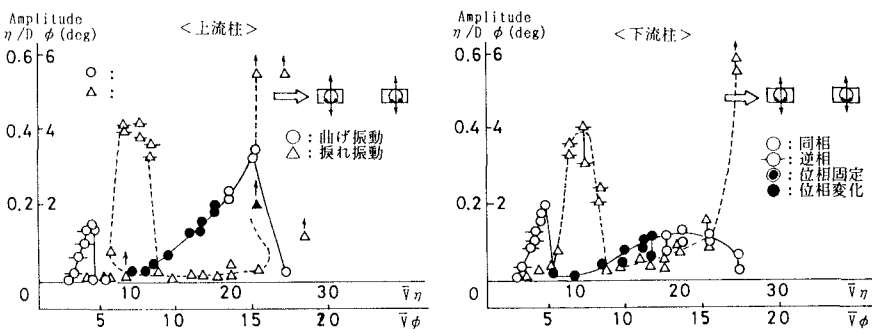


図5. タンデム角柱 V-A 応答 ($B/D = 2, W/D = 6$)

② 図4には、 $B/D=0.5$ 角柱の $W/D=6$ における応答を示すが、この場合2つの $\bar{V}$ - W/D が非常にクリアに現れており、 W/D に起因した自己励起型渦励振と考えられる振動の存在が認められた。(図4中の記号 $St(0.5)$ は、 $V_{cr} = 1/St$ (単柱)を、そして $VM(6)$ は、 $V_{r\ onset} = 1.67 \times (W/D) = 10$ を示す)

③ 図5には、 $B/D=2.0$ 角柱の $W/D=6$ における応答を示す。この角柱断面では、他の W/D においても、角柱間隔比 W/D に起因した自己励起型渦励振と考えられる振動の存在は認められなかった。

④ 以上を整理したのが、図6である。図中、 $KV(B/D)$ は単独柱(断面比 B/D)としてのカルマン渦型の、 $M(B/D)$ は単独柱(断面比 B/D)としての自己励起型の、そして、 $M(W/D)$ は2柱を見かけ一体とした(間隔比 W/D)形状による自己励起型の渦励振をそれぞれ表わしている。完全剥離型断面である $B/D=0.5, 1.0$ では、網掛けした領域において2柱を一体と見なした、 W/D に起因した自己励起型渦励振と考えられる振動の発現が認められたが、 $B/D=2$ 断面では、その発現は認められなかった。

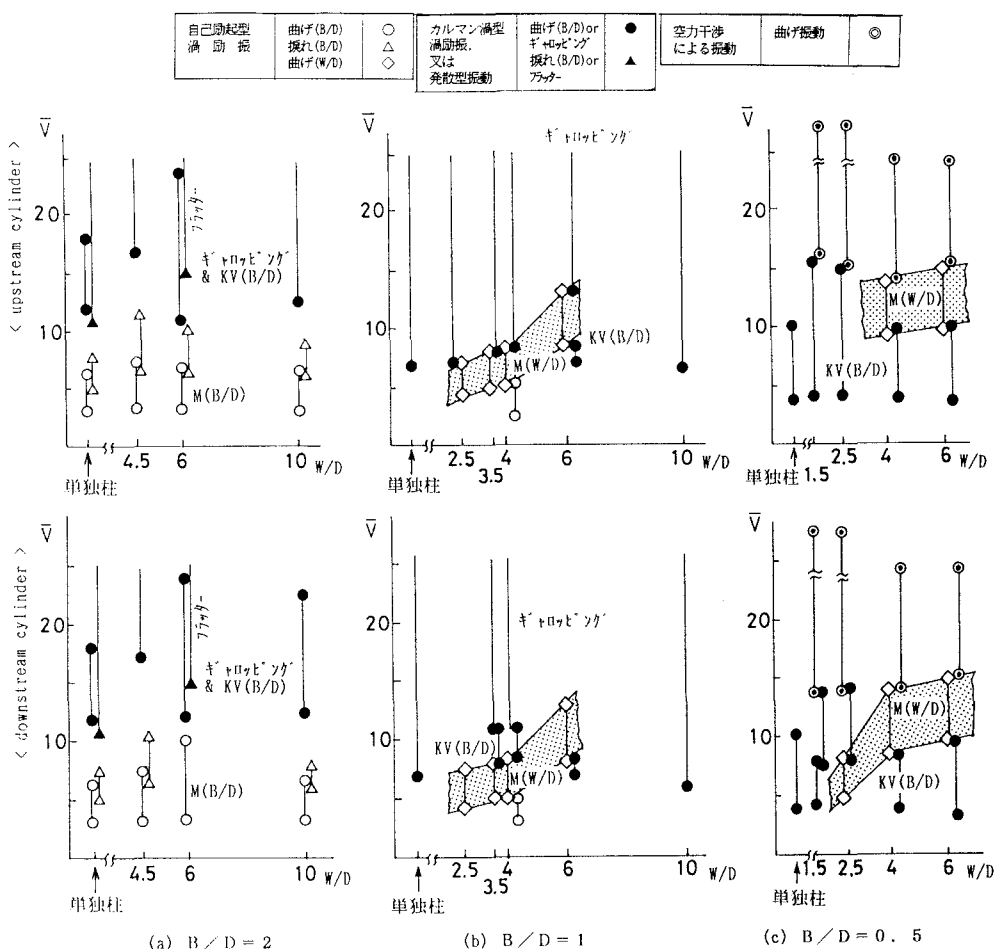


図6. $B/D-W/D$ -応答発現風速領域 ($\delta\eta=0.07, \delta\phi=0.05$)

2.3.2 タンデム配列状態の下流柱における大振幅振動について

① 振動モード(支持自由度の違い)による応答変化について記す。図7は、 $B/D=2$ 断面の $W/D=6$ における応

答特性を示し、図7(a)は、振れ1自由度支持し片柱を拘束した場合、図7(b)は、曲げ1自由度支持し片柱を拘束した場合、そして図7(c)は、両柱を独立に曲げ・振れ2自由度支持した場合のV-A結果を示す。

② ここで着目するのは、図7(b)の曲げ1自由度支持し、上流柱を拘束した場合の下流柱の応答である。文献3)でも報告されているように、単独柱と比べて極めて異なる特性を示している。すなわち、自己励起型の渦励振は抑制されており、 $V_r=12.5$ において H_1^* を持つカルマン渦型渦励振的な限定振動が極めて大きな振幅で現れる。ここに見られる2つの限定振動は、角柱間隔比 W/D により大きく変化することも分かった。

③ 図7(b)の下流柱の $V_r=12.5$ 付近に H_1^*

- η をもつ限定型の曲げ振動は、V-A図及び図8に示す非定常空気力係数 ϕ 計算式： $H_1^* = (\rho/\pi \rho b^2) \cdot (\delta \phi - \delta)$

但し $2b = B$ (弦長)より判断すると、カルマン渦型の渦励振、または Resonance Buffetingかと考えられる。一方、応答値が、単独柱の2.5倍と極めて大きくなること、及び、下流柱の後にスプリッター・プレート挿入した場合にも図9に示すように応答がほとんど小さくならないことから、いわゆる後流に放出されるカルマン渦による、単なる渦励振ではないと考えられる。ここでは、上・下流柱の間隙への流れの回り込み (Switching)が重要な役割を果たしているものと考えた。これについては、次の3.において更に検討を加える。

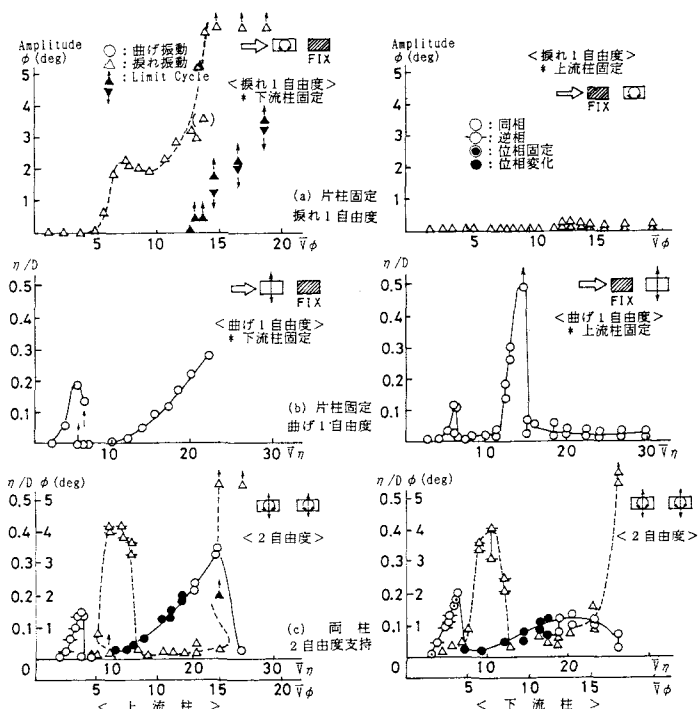


図7. 支持自由度の違いによる応答変化 ($B/D=2$, $W/D=6$)

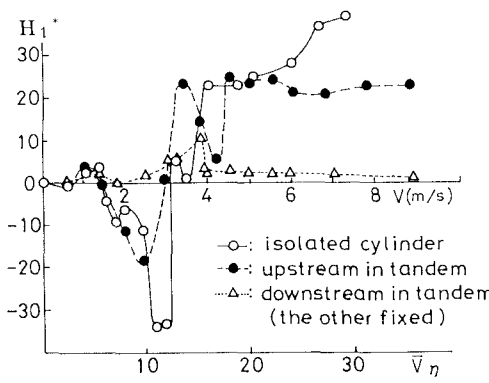


図8. 非定常空気力係数 H_1^* ($\eta/D=0.02$, $B/D=2$, $W/D=6$)

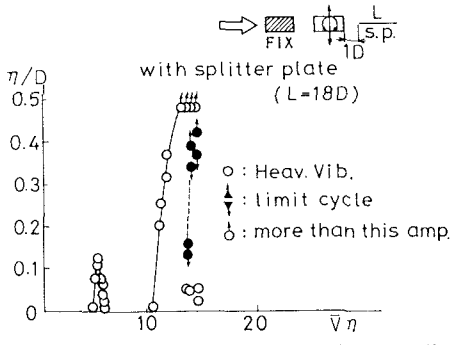


図9. 後流にスプリッター・プレートを挿入状態での下流柱応答 ($B/D=2$, $W/D=6$)

3. 断面に作用する非定常圧力計測

3. 1 実験概要

使用した風洞及び実験に供した模型は、前節 2. の V-A 計測実験と同様であるが、非定常圧力計測は、 $B/D=2$ 断面を対象に行った。模型表面には図 10 に示すごとく、上下各側面には、それぞれ 16 個、前後面には、それぞれ 4 個の圧力測定用の圧力ホイル(孔)が設けてある。模型は強制加振機により、曲げ振れの 2 自由度加振が可能であり、上下流柱の振動を同期させて加振することも、また、同期させた状態で位相差を変えることも可能である。但し、加振振動数は、2.7Hz で固定である。ここでは、2. の V-A 実験において得られた、単独柱及びバタナム柱の空力不安定振動の発現状態を参考にして、風速・振幅・並びに 2 柱間の位相差を設定した。圧力測定は、模型表面に埋め込んだ圧力孔で取り出した圧力をアルミ管で端板まで導き、ビニールチューブとスキャナ(スキャニバルブ社製)を介してプレッシャー・マイクに導き、風洞内の静圧との差を取り出した。取り出した圧力は、平均圧力係数 C_p 、変動圧力係数 C_{p_a} 、物体振動変位に対する圧力変動の位相差 β < 曲げ変位最大から上面で負圧が最大になるまでの位相の遅れを負とした > として整理し、更に圧力変動の速度比例成分(変動圧力の虚部) $C_{p_l} \leq C_{p_a} \cdot \sin \beta$ > を算出して、加振・減衰力の評価をした。尚、チューブ等の計測システムによる圧力変動測定の位相遅れの補正は、風洞下流端に設置したパルセータを利用して、各圧力孔毎に行った。

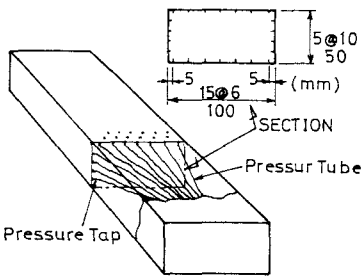


図 10. 非定常圧力実験用模型

3. 2 実験結果

3.2.1 単独柱における作用非定常圧力

$B/D=2$ 断面単独柱の曲げ 1 自由度 V-A 応答図を、図 11 に示す。現在までの研究で報告されている⁷⁾通り、 $V_r=5.5$ で自己励起型渦励振の発現があった後、 $V_r=12.5$ 付近からカルマン渦型渦励振が発現し、そのまま γ プロット⁷⁾へと連続する形で応答が現われている。この応答に対して、図中●印で示す各風速・振幅において加振を行なった状態で非定常空気力計測を行なった。

図 12 に得られた C_{p_l} を示す。これは、断面への作用力を表わしている。 $V_r=4, 10$ では断面側面に作用する力を積分した値は負を示し減衰力となり、 $V_r=5.5$ 及び $V_r=20$ では正值を示し加振力となり、V-A 図と対応した結果となっている。 $V_r=5.5$ の自己励起型渦励振発現風速域では、断面の下流側半分、特に後縁付近で加振力が作用していることが分かり、後縁二次渦との一体化が強い励振力と関係があることが伺える。 γ プロット⁷⁾発生領域の $V_r=20$ では C_{p_l} の値が前縁から後縁に向かって、なだらかに下がる形で、ほぼ断面全面に渡って励振力が作用している。これは内部循環流の発生に対応するものと考えられる。

断面変位に対する圧力変動の位相差 β を図 13 に示すが、 $V_r=4, 5.5$ では前縁から後縁に向かって大きく位相差が変化しており、 $V_r=4$ では約 360° 、 $V_r=5.5$ では約 300° の値を示す。つまり、振動約 1 周期の間に前縁から後縁に、前縁で剝離した渦が側面に沿って流下^{1), 7)}していくことが分かる。 $V_r=10, 20$ においては様相が異なり、位相の大きな変化は認められない。すなわち、自己励起型渦励振は、その発現風速付近において、側面上で圧力の、変位に対する位相差が大きな変化を示すことを特徴としており、これに起因した振動

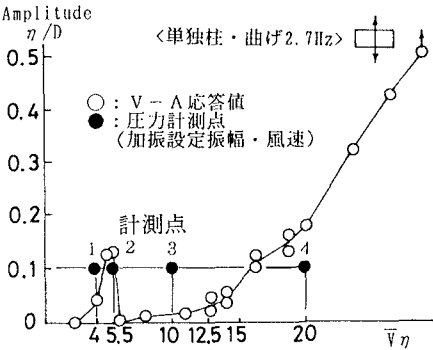


図 11. 曲げ 1 自由度 V-A 結果と圧力計測点
<単独柱, $B/D=2$ >

現象であることが、ここでも確認された。

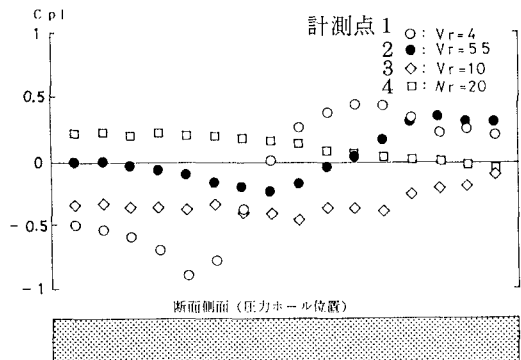


図12. 断面側面圧力変動の速度比例成分 Cpl
＜単独柱, $B/D=2$ ＞

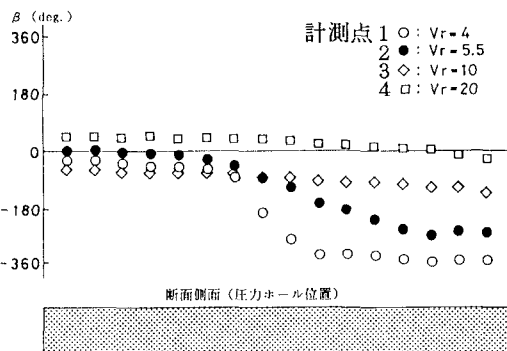


図13. 断面側面に作用する圧力の位相差
＜単独柱, $B/D=2$ ＞

3.2.2 タンデム角柱における作用非定常圧力

＜上流柱固定の場合の下流柱における大振幅振動について＞

図14は、2.3.2で記したタンデム配列状態で上流柱を固定した場合の下流柱における応答結果を示す。

図11と同じく、図中の●印で示す各風速・振幅において、加振を行って非定常空気力測定を行った。

図15に Cpl を示す、計測点1、2、5 ($Vr=4, 10, 20$) においては、断面側面に作用する力を積分すると負値を示し減衰力となり、計測点3、4 ($Vr=12, 12.5$) においては正値を示し加振力となっている。

注目すべきは、図16に示す位相差であり、計測点1では側面全体にわたり $\beta=0^\circ$ で、計測点2では同じく $\beta=0^\circ \sim 50^\circ$ である。ところが応答の発現している領域の計測点3、4においては、 β は、少なくとも前半分の位相差は 180° である。つまり、単独柱の場合とは逆相で

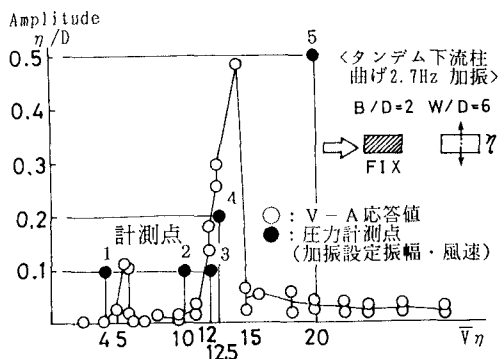


図14. 曲げ1自由度V-A結果と圧力計測点
＜タンデム下流柱（上流柱固定）, $B/D=2, W/D=6$ ＞

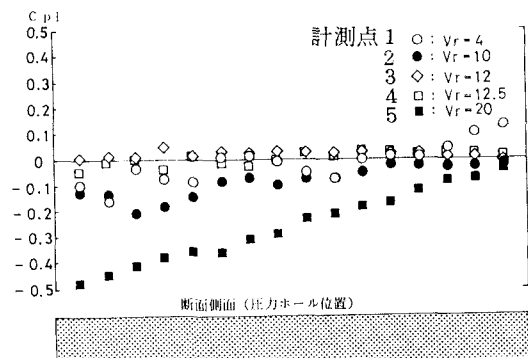


図15. 断面側面圧力変動の速度比例成分 Cpl
＜タンデム下流柱（上流柱固定）, $B/D=2, W/D=6$ ＞

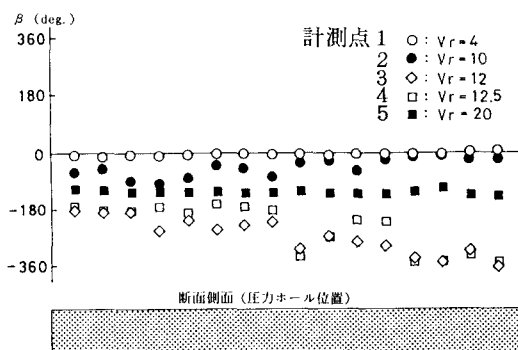


図16. 断面側面に作用する圧力の位相差
＜タンデム下流柱（上流柱固定）, $B/D=2, W/D=6$ ＞

渦が側面を流下しており、最上位にある時に下面を、最下位にあるとき上面を、渦が流下しているものと考えられ、これは流れの switching (gap flow) ⁸⁾ が発生していることを示すものと考えられた。図17 (写真) に $Vr=12.5$ (最大ピーク振幅付近で、 $\eta/D=0.40$) における水素気泡法による可視化実験の結果を示すが、可視化においても switching (gap flow) の存在が確認された。この流れのパターンは、タンデム配列柱特有の現象であり、種々の形で応答に現われてくるものと考えられる。今後、更に研究を進めていく予定である。

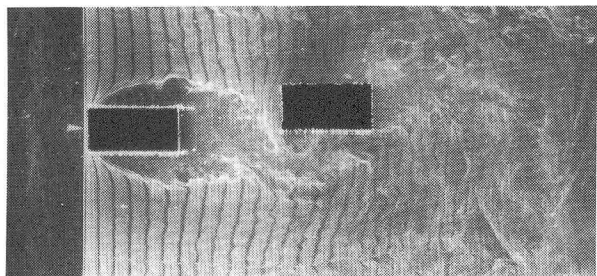


図17. 可視化実験結果 (タンデム配列・上流柱固定
 $B/D=2$, $W/D=6$ $\eta/D=0.4$)

4. 結論及び今後の課題

- (1) タンデム配列角柱特有の空力振動として、 W/D (タンデム配列2本柱を一体化した形状) に起因した自己励起型の渦励振の発現の可能性が認められた。この振動は、 $B/D=0.5, 1.0$ の完全剥離型の断面においては発現するが、 $B/D=2$ の断面では発現しない。
このことは、タンデム配列の bluff な断面の耐風性を予測する際の有効な情報であると考えられる。
- (2) タンデム配列 $B/D=2$ 断面では上流柱固定の場合に下流柱がかなり大きな応答を示したが、この振動は流れの switching (gap flow) に起因する振動と、非定常圧力計測及び可視化実験結果から理解された。
- (3) W/D に起因する渦励振が存在する可能性を指摘したが、後流中の Strouhal 数成分の渦励振放出の検討等を含めて、これがどういうメカニズムによるものかを解明することは今後の課題と考える。

最後に、本研究の実験の実施において協力頂いた、京都大学工学部・白土博通助手、同大学院生 桂一詞君、西崎孝之君、国際コース留学生 M. Martinoff 君をはじめ、橋梁研究室の諸氏に謝意を表す。

<参考文献>

- 1) 白石・松本、”充腹構造断面の渦励振応答特性に関する研究”、土木学会論文報告集 第322号、1982
- 2) T. Takeuchi : Effects of Geometrical Shape on Vortex-Induced Oscillations of Bridge Tower, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 33 (1990) 359-368
- 3) 岡島・阿部・木綿、”直列2矩形柱の空力不安定振動”、構造工学論文集 Vol. 36A (1990年3月)
- 4) N. Shiraishi, M. Matsumoto, H. Shirato : On Aerodynamic Instabilities of Tandem Structures, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 23 (1986) 437-447
- 5) 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
- 6) 中村・渡辺、”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、昭和54年10月
- 7) 山田・宮田・伊藤、”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) 185-192
- 8) M. M. Zdravkovich & D. L. Pridden : Interference between Two Circular Cylinders ; Series of Unexpected Discontinuities, Journal of Industrial Aerodynamics, Vol. 2, 1977, 255-270

(1991年 9月30日受付)