論文

各種矩形断面柱を対象とした剥離干渉法による空力弾性振動の 制振メカニズム

Suppression mechanism of aerodynamic vibration due to Separation Interference Method for various rectangular prisms

林田宏二^{*1}

久保喜延^{*2}

大窪一正^{*3}

池田隼人^{*4}

Koji HAYASHIDA, Yoshinobu KUBO, Kazumasa OKUBO, Hayato IKEDA

SUMMARY

The authors developed one method and tried to make clear its suppression mechanism. By using a plate that is placed to normal to the surface of the body at an optimum position, the separation flow from the leading edge is forced to touch the tip of the plate. The method was named by one of authors, as Separation Interference Method (SIM). The detail of this method and the suppression mechanism on the aerodynamic vibrations are described in the present paper. As a result, it is shown that circulatory flow between 1st separation point and 2nd separation point is very important for SIM. In the present paper, it is concluded that the mechanism of SIM possesses the same effect on both the square prism and the rectangular prism with re-attachment of separation flow. Furthermore, it is made clear that SIM is also effective in turbulent flow as well as in smooth flow.

Key Words: Separation Interference Method, rectangular prism, separated flow, circulatory flow

1. まえがき

久保らは、構造部材や機能部材を用いて耐風安定性を向上させることに主眼を置き、風による振動の原因である剥離流を制御する空力的対策手法として、剥離干渉法 (SIM : Separation Interference Method) を提案している¹⁾²⁾。この手法は、構造物断面に2つの剥離点 (以後、1次剥離点および2次剥離点) を設けて、1次剥離点から発生した剥離流を2次剥離点を用いて制御することによって耐風安定性を向上させる制振手法である。過去の研究によって剥離干渉法の有効性については確認されているが、耐風安定性の向上に寄与する詳細なメカニズム (剥離干渉法が機能した場合の流れの変化

や構造物に作用する外力の変化など) や剥離干渉法によって得られる具体的な効果については明確にされていなかった。そこで著者らは完全剥離型断面柱である正方形断面柱を対象として、静止時における各種風洞実験を行うことによって、剥離点間に生じる循環流が大きな役割を果たしていること、剥離干渉法を適用することで迎角の影響を受けにくい流れ場を形成していることなどを明らかにした³⁾。

本研究では、強制加振実験による渦励振およびギャロッピングの各振動現象に対する剥離干渉法の効果、実用化を考える上で必要な諸検討 (風向変化や気流の乱れへの対応)、さらに再付着断面柱に剥離干渉法を適

*1 鹿島技術研究所 都市防災・風環境グループ 主任研究員

Senior Research Engineer, Disaster Prevention and Wind Engineering Group, Kajima Technical Research Institute

*2 九州工業大学 建設社会工学科 教授

Professor, Department of Civil Engineering, Kyushu Institute of Technology

*3 鹿島技術研究所 都市防災・風環境グループ 研究員

Research Engineer, Disaster Prevention and Wind Engineering Group, Kajima Technical Research Institute

*4 九州工業大学大学院 建設社会工学専攻 (研究当時)

Graduate Student, Kyushu Institute of Technology (At the time of the research)

(原稿受理年月日: 2007年4月2日, 採用決定: 2007年8月20日)

用した場合の制振メカニズムについて検討した結果について述べる。

2. 完全剥離型断面柱に関する検討

2. 1 実験概要

検討対象とした断面柱は、Fig.1 に示すように $B/D=1.0$ (幅 B , 高さ D , $B=D=50\text{mm}$) の正方形断面柱を基本断面柱とし、側面に設置した鉛直板によって 2 次剥離点を設ける。既往の研究結果²⁾より、剥離干渉法を有効に機能させるために必要な鉛直板の高さが $h \geq 0.17D$ であることから、本研究では $h=0.2D$ の高さの鉛直板を用い、鉛直板の設置位置によって剥離干渉角 θ を 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° に変化させた。本章で実施した各種実験の諸元を Table 1 に示す。

2. 2 剥離干渉法による耐風安定性への影響

参考文献 3) で実施した応答実験を基に、さらに高風速域まで検証した迎角 $\alpha=0\text{deg}$. における 1DOF たわみ応答図を Fig.2 に示す。基本断面(Basic)では換算風速 $V_r (=V/f_h D) = 7.4$, $\theta=15^\circ$ では $V_r=20.8$ 以降においてギャロッピングが発生しているのに対し、 $\theta=20^\circ \sim 40^\circ$ では高風速域 ($V_r=40$ まで確認) までギャロッピングは抑制され、高い耐風安定性を示している。また、参考文献 3) において、静的空気力特性を用いた Den Hartog の判別式⁵⁾によって $\theta=20^\circ \sim 30^\circ$ の範囲が耐風安定性に対して有効に機能する剥離干渉角であることを示している。ここで有効な剥離干渉角において、迎角 $\alpha \leq 10\text{deg}$. の範囲で Den Hartog の判別式によって判定した結果を Fig.3 に示す。これより、基本断面 (Basic) では大半の迎角において負値となっているのに対して、有効な剥離干渉角では一部の迎角を除いて正値となっている。とくに $\theta=30^\circ$ では $0\text{deg.} \leq \alpha \leq 7\text{deg.}$ までの範

Fig.1 Definition of Parameter ($B/D=1.0$)

Fig.2 Response of square prism (Heaving)

Fig.3 Discriminant of Den Hartog

Table 1 Specification of wind tunnel tests ($B/D=1$)

実験種類	応答実験	三分力測定	表面圧力測定	表面圧力測定
断面	B/D=1 (B=D=50mm)			
実験気流	一様流 ($Iu \leq 0.01$) 乱流 ($Iu=0.081 \sim 0.085$)	一様流 ($Iu \leq 0.01$)		
実験風速 V (Re 数($=VD/\nu$)) ν : 空気の動粘性係数	0~14.8m/s (0~49333)	5~9 m/s (16500~30000)	2~9m/s (6666~30000)	
対数構造減衰率 δ	0.002			
固有振動数 f_h	7.40Hz			
スクルトン数 Sc	18			
迎角 α	0deg.	-13deg.~+13deg.	-10deg.~+10deg.	
サンプリング周波数, データ数	1000Hz, 60000 個	400Hz, 32768 個		15Hz, 1500 組
剥離干渉角 θ	15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°			
模型状況	自由振動	静止	静止, たわみ 1DOF 強制振動 (加振条件: 振動数 $f_{w0}=7.4\text{Hz}$, 振幅 $2A_0/D=0.1$)	

囲で連続して正值となっており、この範囲ではギャロッピングは発生しないことが示唆されている。このことから剥離干渉法はある程度の迎角の変化がある場合においてもギャロッピングに対して有効に機能する手法であると言える。

一方、鉛直板を設置した場合には $Vr=4\sim 10$ 付近において限定振動が発生する。この振動については僅かな減衰付加によって大幅に抑制することが可能であることを確認しているが³⁾、ここで振動現象をより詳細に把握するために、Fig.4 に示すように模型の後流に長さ $10D$ のスプリッター板を挿入した場合の応答実験を行った。 $\theta=20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ での 1DOF たわみ応答図を Fig.5 に示す。これよりスプリッター板を挿入した場合、 $\theta=20^\circ$ および 30° では限定振動は発生しておらず、この限定振動が後流域のカルマン渦によって励起されるカルマン型渦励振と判断される。また $\theta=40^\circ$ についてはスプリッター板を挿入しても $Vr=7.9\sim 9.7$ の範囲において振動が発生している。スプリッター板がない場合には $\theta=40^\circ$ においては $Vr=5.3\sim 7.6$ と $7.6\sim 10.2$ で 2 つの山となる振動が発生しているが、スプリッター板の有無での応答の比較から、1 つ目の限定振動はカルマン型渦励振であり、2 つ目の限定振動は、1 つ目の限定振動とは異なる発生機構によって発生していると考えられる。

Fig.4 Installation image of splitter plate

Fig.5 Response of square prism (with splitter plate)

2. 3 強制加振状態での剥離干渉法のメカニズム

本節では、応答特性を踏まえて強制加振状態での圧力測定および PIV 実験を実施し、渦励振およびギャロッピングに対する剥離干渉法の作用および効果について検討する。以下に示す結果は、下向き速度および相対迎角が最大となるゼロクロス点 (位相 $\phi=180^\circ$ 、加振振幅 $2A_0/D=0.1$) における位相平均値 (圧力測定では約 600 個、PIV 実験では 1500 組のデータより算出) を用いて考察する。

a) 渦励振

有効な剥離干渉角である $\theta=20^\circ, 30^\circ$ と大きな限定振動が発生している 40° について、振動の発生域 (Fig.6 参照) における圧力分布を Fig.7 に示す。図中の○が平均圧力係数 $\bar{C}_p$ 、●が上下面の測定点での平均圧力係数の差より得られた圧力係数 $\bar{C}_{p_s}$ を示している。

断面の側面に作用する力に着目すると、下向き最大速度の状態であるので、 $\theta=20^\circ$ および 30° では、鉛直板の風上側では減衰力 (上向き)、風下側で励振力 (下向き) が働いている。一方、 $\theta=40^\circ$ では鉛直板の風上側を含めて側面全体において励振力が働いており、鉛直板の風下側にはより大きな励振力が働いている。これらの結果から、主に鉛直板の風下側において作用する励振力によって振動が発生していることが分かる。

次に、同条件下の PIV 実験による実験風速に対する風速の比 (以下、平均風速比) および渦度の分布を Fig.8 に示す。これより、断面の後流域において全てのケースでカルマン渦が発生している。また、渦度の大きな部分は剥離せん断層の位置とみなすと、 $20^\circ\rightarrow 30^\circ\rightarrow 40^\circ$ の順で下面側における剥離せん断層の断面背面への巻き込みが顕著となっており、鉛直板の風下側での風速が増加している。これより、断面後流に発生するカルマン渦によって剥離せん断層が断面の背面に沿って巻き込むような流れを形成し、鉛直板の風下側の流速が

Fig.6 Response of square prism (Vortex oscillation)

($\theta = 20^\circ$, $V_t = 5.4$)

($\theta = 30^\circ$, $V_t = 6.5$)

($\theta = 40^\circ$, $V_t = 8.7$)

Fig.7 Distribution of mean pressure coefficient (Vortex oscillation region, phase $\phi = 180^\circ$, $2A_0/D = 0.1$)

($\theta = 20^\circ$, $V_t = 5.4$)

($\theta = 20^\circ$, $V_t = 5.4$)

($\theta = 30^\circ$, $V_t = 6.5$)

($\theta = 30^\circ$, $V_t = 6.5$)

($\theta = 40^\circ$, $V_t = 8.7$)

($\theta = 40^\circ$, $V_t = 8.7$)

Fig.8 Results of PIV tests (phase $\phi = 180^\circ$, $2A_0/D = 0.1$) left : mean wind velocity, right : vorticity,

Fig.9 Velocity vector on upside (Vortex oscillation, phase $\phi=180^\circ$, $2A_0/D=0.1$)

増加することによって大きな負圧が発生し、励振力が働いていると考えられる。

また、Fig.9 に示すように $\theta=20^\circ$ および 30° の上面の鉛直板風上側において循環流が発生している。圧力分布の結果と併せて考えると、渦励振発生時においても鉛直板の風上側では循環流によって負圧が発生することで減衰に寄与する働きをしているが、カルマン渦によって鉛直板の風下側に作用する励振力がそれを上回ることでも励振が発生していると考えられる。

一方、 $\theta=40^\circ$ では上下面において循環流が発生せず、減衰力となる大きな負圧が発生しないことで鉛直板の風上側において励振力が発生している。このことからスプリッター板を挿入してカルマン渦の影響を取り除いた状態において発生した $\theta=40^\circ$ の振動は、剥離干渉法が有効に機能しない、つまり剥離点間に循環流が形成されないことによって生じていると考えられる。

b) ギャロッピング

前述したとおり、 $\theta=20^\circ \sim 40^\circ$ では高風速域におけるギャロッピングの発生が抑制されている。基本断面とギャロッピングが抑制されている $\theta=30^\circ, 40^\circ$ について換算風速 $Vt=24$ での圧力分布を Fig.10 に示す。これより、側面に作用する $\bar{C}_{p_s}$ (図中●) については、基本断面では側面全体には励振力（下向き）が働いているのに対して、 $\theta=30^\circ$ および 40° では、鉛直板の風上側では減衰力（上向き）が働き、風下側には振動に寄与

するような力が発生していない。つまり 1 周期の中で鉛直板の風下側には振動に寄与する力は働いておらず、静止状態に近い圧力分布を示していることになる。さらに鉛直板の風上側の上下面の圧力 $\bar{C}_p$ (図中○) に着目すると、 $\theta=30^\circ$ では上面側に大きな負圧が働くことによって減衰力が発生しているが、 $\theta=40^\circ$ では下面側の負圧が回復することで減衰力が発生しており、鉛直板の風上側で生じている現象が両者で異なっている。

次に、PIV 実験による平均風速比および渦度の分布を Fig.11 に示す。渦度が大きくなる部分を剥離せん断層の位置とみなすと、基本断面では下面側の剥離せん断層が側面に近づいて上下面で非対称となっているのに対し、 $\theta=30^\circ$ および 40° では剥離せん断層の位置は上下面でほぼ対称な配置となっている。また後流域で発生するよどみ点 (図中×印) も $Y/D=0$ 上に発生している。圧力分布の結果と併せて考えると、2 次剥離点より下流側の流れ場は風軸に対して上下対称に近くなっていることを示している。

また Fig.11 の平均風速比分布より、側面部での風速比に着目して、下面側に対する上面側での風速比の最大値の比についてまとめたものを Fig.12 に示す。これより、基本断面では上面に対して下面での流速増加が大きくなっているのに対して、 $\theta=30^\circ$ を含む有効な剥離干渉角では上面側の風速が増加している。さらに鉛直板の風上側の流れ場に注目すると、Fig.13 に示すよ

Fig.10 Distribution of mean pressure coefficient (Galloping region, $Vt=24$, phase $\phi=180^\circ$, $2A_0/D=0.1$)

Fig.11 Results of PIV tests($Ur=24$, phase $\phi=180^\circ$, $2A_0/D=0.1$) left : mean wind velocity , right : vorticity,

Fig.12 Wind velocity ratio($V_r=24$, phase $\phi=180^\circ$, $2A_0/D=0.1$)

Fig.13 Velocity vector ($V_r=24$, phase $\phi=180^\circ$, $2A_0/D=0.1$)

うに上面側においては $\theta=30^\circ$ および 40° のどちらのケースでも循環流が発生しているのに対して、下面側においては $\theta=30^\circ$ では循環流が発生しているが、 $\theta=40^\circ$ では上方へ向かう流れが発生しておらず、明確な循環流が確認できない。つまり $\theta=40^\circ$ における下面側の負圧の回復は、循環流の働きが弱まる（なくなる）ことによって生じているものと考えられる。

以上のことから、有効な剥離干渉角において発生する渦励振はカルマン型渦励振であり、振動発生時においても鉛直板の風上側では減衰力が働いていることが明らかになった。また、ギャロッピングに対しては、強制的に振動させた状態においても、循環流による剥離流の増速効果によって剥離干渉後の流れが振動の影響を受けず、迎角 $\alpha=0^\circ$ の静止状態に近い流れ場が形成される。これによって2次剥離点より下流側の断面には振動に寄与する力が発生しない上に、さらに循環流発生位置で発生した負圧によって減衰力が働くことでギャロッピングに対する抑制効果を発揮していることが明らかとなった。さらに高風速域においては、振動時の相対迎角が小さくなることで静止時の $\alpha=0^\circ$ に近い気流の状態となるために、剥離干渉法の有効性は確保され続けると考えられる。

2. 4 乱流中における剥離干渉法の効果

剥離干渉法の実用化を考える場合、自然風への対応、つまり乱流中での効果の検証は重要な検討事項である。そこで、乱流中における応答実験によって検討を実施した。検討に用いる乱流は乱流格子による等方性乱流である。乱流格子の諸元および乱流の特性を Table2 に示す。

Table2 Specification of turbulence flow

バーサイズ: b	100mm
メッシュサイズ: m	470mm
m/b	4.7
格子一模型距離: X	2000mm
主流方向乱れ強さ: I_u	8.1~8.5%
主流方向乱れスケール: S	54~61mm

Fig.14 Response of square prism (in turbulent flow)

Fig.15 Response of square prism (in turbulent flow)

基本断面と剥離干渉法が有効に機能している $\theta = 30^\circ$ の断面について、一様流中および乱流中（主流方向の乱れ強さ 8.1～8.5%，乱れのスケール 54～61mm）との応答特性を比較したものを Fig.14 に示す。これより、両断面とも気流の違いによって若干の差はあるが、ほぼ同じ応答特性を示す。高風速域でのギャロッピングについては、気流の乱れに関係なく抑制されており、剥離干渉法が乱流中においても有効に機能している。また低風速域で生じる渦励振についても、ほぼ同じ応答振幅となっている。この最大応答振幅発生時の空力減衰率 δ_A (Fig.15 参照) より、乱流中においても一様流中と同様に減衰付加によって大幅に応答振幅を抑制することが可能である。

以上のことから、完全剥離型断面柱に対して剥離干渉法は気流の乱れに関係なく、その効果を発揮する手法であるということが明らかとなった。

2. 5 風向変化に対する剥離干渉法の効果

本研究では、鉛直板を風上側に設置することを基本として検討を進めているが、実用化にあたっては背面側から風が吹く（風上と風下が逆となる）場合に対する効果について明らかにする必要がある。Fig.16(a)に示すように片側の剥離干渉角 θ_1 が $20^\circ \sim 25^\circ$ であれば他方の剥離干渉角 θ_2 は $23.9^\circ \sim 27.4^\circ$ となり、どちらの剥離干渉角も有効な剥離干渉角の範囲内となり、どちらからの風に対しても剥離干渉法は有効に機能することになる。 $\theta = 30^\circ$ の場合については、Fig.16(b)に示すように風上、風下の両側に 2 枚設置することになる。風上下の両側に 2 枚設置することになる。そこで $\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ$ として鉛直板を 2 枚設置した場合の応答実験（迎角 $\alpha = 0^\circ$ ）によって剥離干渉法の有効性の確認を行った。鉛直板両側設置と風上側のみの片側設置の応答特性を比較したものを Fig.17 に示す。これより、両側設置においても片側設置の場合と同様、ギャロッピングは発生しない。また低風速域の渦励振についてもほぼ同じ応答特性を示している。Fig.18 に PIV 実験による $\theta = 30^\circ$ の片側設置での上下面の平均風速比と流線を示す（換算風速 $V_r = 24$ ，位相 $\phi = 180^\circ$ ，加振振幅 $2A/D = 0.1$ での位相平均値）。これより、鉛直板の背面における平均風速は非常に小さくなっている。また鉛直板から発生した剥離せん断層は風下側の鉛直板高さより上の位置を流下していることから、風下側に鉛直板が挿入された場合でも干渉するような流れ場となっていないために、下流側の鉛直板は応答特性に悪影響

を与えていないと考えられる。

以上のことから、完全剥離型断面柱に対して、有効な剥離干渉角においては風向が変化する場合においても有効に機能させることが可能であることが示された。

Fig.16 Arrangement of the vertical plates for wind shift

Fig.17 Response of square prism (Addition of vertical plate)

Fig.18 Distributions of average wind velocity ratio and streamline(phase $\phi = 180^\circ$, $2A_0/D = 0.1$)

2. 6 完全剥離型断面柱での剥離干渉法の効果

以上の検討から明らかになった完全剥離型断面柱である正方形断面柱に剥離干渉法を適用した場合のメカニズムに関する知見は以下のとおりである。

- ・ 有効な剥離干渉角において、低風速域で発生する限定振動はカルマン型渦励振であり、カルマン渦によって鉛直板の風下側に発生する励振力が鉛直板の風上側の減衰力を上回ることによって発生している。
- ・ 剥離干渉法を有効に適用した場合、剥離点間（1次剥離点と2次剥離点の間）に発生する循環流の働きによって剥離流が加速されることで、迎角の影響を受けない流れ場を形成し、剥離干渉後の断面には振動に寄与する力が働かない。さらに剥離点間における循環流によって発生する負圧が、減衰力として作用することでギャロッピングの発生を抑制する効果を発揮する。
- ・ 迎角の変化および風向の変化に対しても剥離干渉法を有効に機能させることが可能である。
- ・ 剥離干渉法は、乱流中においても一様流中と同様の効果を発揮し、気流の乱れの影響を受けにくい特性を示す。

3. 再付着型断面柱に関する検討

これまで、完全剥離型断面柱である正方形断面柱に対して剥離干渉法のメカニズムについて明らかにしてきたが、流れが再付着するような断面柱に対しても同様のメカニズムが機能しているのかどうかは不明である。そこで、本章では再付着型断面柱であり、既往の研究¹⁾からねじれフラッターの発現が示唆される $B/D=8$ 矩形断面柱を基本断面として、鉛直板タイプの剥離干渉法を適用した場合の空力特性の変化と制振メカニズムの把握を試みる。

3. 1 実験概要

参考文献 10)において、 $B/D=8$ 矩形断面柱においても剥離干渉角 θ を $20^\circ \sim 30^\circ$ と設定することでフラッター発振風速が高風速化し、耐風安定性が向上することが確認されている。Fig.19 に示す $B/D=8$ 矩形断面柱（幅 $B=400\text{mm}$ 、高さ $D=50\text{mm}$ ）を基本断面とし、正方形断面柱での検討と同様の鉛直板（高さ $h=10\text{mm}$ 、 $h/D=0.2$ ）を用いた。本章で実施した各種実験の諸元を Table 3 に示す。

Fig.19 Test model ($B/D=8$)

3. 2 静止時の空気力特性

表面圧力測定で得られた静止時の圧力を断面周りに積分して、次式より抗力係数 C_D を求めた。迎角別の C_D を Fig.20 に示す。

$$C_D = \frac{d}{\frac{1}{2} \rho V^2 D} \quad (1)$$

d : 単位長さ辺りの抗力, ρ : 空気密度

これより、鉛直板を設置することによって抗力係数 C_D は基本断面に比べて低下しており、迎角 $\alpha=0\text{deg.}$ では基本断面の $C_D=1.20$ に比べて、 $\theta=25^\circ$ で $C_D=0.97$ と約 20% 低下している。これは Fig.21 に示すように剥離点間において正方形断面同様、循環流が発生しており、この循環流によって発生する負圧による効果である。

次に、有効な剥離干渉角の例として $\theta=30^\circ$ について、迎角 $\alpha=+2\text{deg.}$ における側面上の平均圧力係数 $\bar{C}_p$ および変動圧力係数 $\tilde{C}_p$ を基本断面と比較したものを

Table 3 Specification of wind tunnel tests ($B/D=8$)

実験種類	表面圧力測定	PIV 実験
断面	$B/D=8$ ($B=400\text{mm}$, $D=50\text{mm}$)	
実験気流	一様流 ($Iu \leq 0.01$)	
実験風速 $V(Re \text{ 数}(=VD/\nu))$	静止時: 9m/s (30000)	
ν : 空気の動粘性係数	強制加振時: $0 \sim 16\text{m/s}$ ($0 \sim 53000$)	
迎角 α	$-2\text{deg.} \sim +2\text{deg.}$	
サンプリング周波数, データ数	400Hz, 32768 個	15Hz, 1500 組
剥離干渉角 θ	$15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$	
模型状況	静止, ねじれ 1DOF 強制振動 (加振条件: 振動数 $f_0=4.6\text{Hz}$, 振幅 $u_0=2\text{deg.}$)	

Fig.22 に示す。 $\bar{C}_p$ については上下面圧力差 $\bar{C}_{p*}$ の分布についても併記する。これより、 $\theta=30^\circ$ の場合には側面の負圧が回復する点が上流側に移行しており、断面前縁端から生じた剥離流の再付着点が上流側に移行している。なお、このことは変動圧力係数 $\tilde{C}_p$ のピーク発生位置が上流側に移行していることから確認できる。また、再付着点より下流側においては、上下面ではほぼ同じ圧力分布となっており、迎角 $\alpha=0^\circ$ における圧力分布とよく似た傾向を示す。一方、鉛直板の風上側においては上面側で大きな負圧が生じている。これらの傾向は他の有効な剥離干渉角でも同様である。

以上のことから、剥離干渉法が有効に機能する剥離干渉角 θ においては、剥離流の再付着点が上流側に移行し、再付着後の圧力場（流れ場）は迎角の影響をあまり受けておらず、上下面対称となる効果を示している。

Fig.20 Drag force coefficient

Fig.21 Velocity vector and mean pressure coefficient ($\theta=30^\circ$)

3. 3 強制振動時の空気力特性

ねじれ 1DOF 強制加振実験より、基本断面と $\theta=30^\circ$ について、位相 $\phi=0^\circ$ （ねじれ速度頭上げ最大となるゼロクロス点）での圧力係数 C_p の分布を比較したものを Fig.23 に示す。これより静止時同様、鉛直板を設置

することによって再付着が促進されている。さらに鉛直板の風下側の圧力分布が上下面でほぼ等しくなっている。ねじれ速度同相成分の圧力はねじれの空力減衰に寄与することから、鉛直板の風上側でのみ減衰に寄与する力が働いていることを示している。

3. 4 非定常空気力特性

強制加振時の空力モーメント M から次式に示す非定常空気力係数¹¹⁾を算出した。

$$M = \frac{1}{2} \rho (2b)^2 V^2 \left\{ k A_2^* \frac{b \dot{\phi}}{V} + k^2 A_3^* \phi \right\} \quad (2)$$

b : 半弦長 ($b=B/2$), k : 換算振動数 ($k=b\omega/V$)

ω : 加振円振動数, ϕ : ねじれ変位

($\dot{}$) : 時間微分, A_i^* ($i=2-3$) : 非定常空気力係数

非定常空気力係数のうち、ねじれの空力減衰項である A_2^* の結果を Fig.24 に示す。 A_2^* は、 $\theta=40^\circ$ は基本断面とほぼ同じ無次元風速 $Vr(Vr=f/B)=4.0$ 付近で、 $\theta=15^\circ$ は $Vr=7.0$ 付近でそれぞれ負から正に転じており、ねじれフラッターの発現が示唆される。その他の断面は測定した無次元風速域においては常に $A_2^* < 0$ であるが、 $\theta=20^\circ$ は $Vr \geq 5.0$ の風速域において下に凸で値が増加する傾向を示している。

以上の結果から $\theta=25^\circ \sim 30^\circ$ が、より有効な剥離干渉角といえる。なお、有効な剥離干渉角における各非定常空気力係数は平板での値に近づいており、とくに $\theta=25^\circ, 30^\circ$ においては平板に近い空力特性を示す。

Fig.24 Aerodynamic derivative A_2^*

3. 5 周辺の流れ場の変化

基本断面と $\theta=30^\circ$ について、Fig.23 と同条件における平均風速比分布および流線を Fig.25 に示す。これより、基本断面では上面側に比べて下面側での増速領域が卓越し、大きな剥離を生じているのに対し、 $\theta=30^\circ$ では下面側での剥離が小さくなり、増速領域は上下面において対称となるような分布傾向を示す。さらに再付着点より下流側の流れも断面に対して流線はほぼ平行で、風速分布も上下面对称に近くなっている。つまり剥離干渉法によって周辺流れ場は、振動状態においても静止状態と近い分布となる効果を発揮している。

3. 6 再付着断面柱での剥離干渉法の効果

以上の検討から明らかになった、再付着断面柱である $B/D=8$ 断面柱に剥離干渉法を適用した場合のメカニズムに関する知見は以下のとおりである。

- ・ 剥離点間に生じる循環流の働きによって抗力が減少する。
- ・ 剥離流の再付着が促進され、迎角がある場合においても、再付着点より下流側での圧力分布が上下面でほぼ対称となり、迎角の影響を受けにくい特性を示す。
- ・ 強制加振時の圧力分布より、剥離干渉法が有効に機能している場合には剥離干渉点より下流の断面に作用する力は上下面でほぼ対称となっており、鉛直板の風上側にのみ制振力が作用している。
- ・ 有効な剥離干渉角における非定常空気力は平板空気力に近い特性を示す。
- ・ 強制加振時の周辺流れ場より、剥離干渉法が有効に機能している場合には剥離干渉後の流れは静止時に近い流れ場となっている。

4. 結論および今後の課題

既往の研究結果および今回実施した完全剥離断面柱 ($B/D=1$) および再付着断面柱 ($B/D=8$) を対象とした検討において明らかになった剥離干渉法が有効に機能した場合の効果とそのメカニズムは以下の通りである。

- ・ 剥離点間 (1 次剥離点と 2 次剥離点の間) に発生する循環流の働きによって、剥離せん断層を引き寄せ、加速させる効果によって 2 次剥離点より下流側の剥離流を制御している。
- ・ 剥離点間の循環流によって発生する負圧によって抗力を減少させる効果を発揮する。
- ・ 2 次剥離点より下流側の流れ場および空気力は、

構造軸に対して上下面对称となり、迎角の影響を受けにくい特性を示す。

- ・ 2 次剥離点より下流側の断面には振動に寄与する力が働かず、剥離点間において循環流の働きによって発生した負圧によって減衰力を発揮している。
- ・ 強制振動状態においても、有効な剥離干渉角では 2 次剥離点より下流の流れは静止時に近い流れ場となっている。

以上は、両断面柱で共通の知見であり、剥離干渉法は断面の種類に関係なく、同じメカニズムで機能しているということが明らかとなった。

さらに、完全剥離断面柱の検討において、剥離干渉法が迎角の変化および風向の変化に対しても有効に機能すること、乱流中においても一樣流中と同様の効果を示し気流の乱れの影響を受けないことを、また再付着断面の検討において、有効な剥離干渉角では流れの再付着を促進させる効果があり、平板に近い非定常空気力特性を示すことが明らかとなった。

今後は、本研究で得られた制振メカニズムを踏まえて、他のパラメータを変化させた場合の制振メカニズムおよび制振効果の変化や実構造物断面に剥離干渉法を適用した場合の定量的な制振効果の評価などについて明らかにしていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 久保喜延・本多健二・野上千秋・加藤九州男・田崎賢治：「PC 斜張橋の閉断面桁および開断面桁の剥離流相互干渉法による耐風性能改善対策に関する研究」, pp. 430-463, 構造工学論文集, (1992)
- 2) 久保喜延・小石明・田崎賢治・中桐秀雄：「橋梁断面における空力干渉作用のメカニズムについて」, pp. 353-358, 第 13 回風工学シンポジウム, (1994)
- 3) 林田宏二・久保喜延・池田隼人・野田辰徳：「剥離干渉法による空力振動制振メカニズムに関する研究」, pp.429-434, 第 19 回風工学シンポジウム, (2006)
- 4) 日本鋼構造協会：「構造物の耐風工学」, 2 章, pp. 104-106, (1997)
- 5) Den Hartog, J.P. : "Mechanical Vibrations", MacGraw-Hill, (1956)
- 6) 岡内功・伊藤学・富田利雄：「耐風構造」, pp. 110-111, (1977)
- 7) 土木学会構造工学委員会：「風洞実験相似則検討小委員会活動成果報告書」, 2 章, pp.8-154, (1994)
- 8) 西村宏昭・谷池義人：「二次元静止正方形角柱の変動空気力特性」, pp. 255-260, 第 16 風工学シンポジウム, (2000)
- 9) 溝田武人：「角柱まわりの時間平均流れに関する実験的研究」, pp. 39-47, 土木学会論文報告集第 312 号, (1981)
- 10) 池田隼人・久保喜延・木村吉郎・林田宏二：「PIV による矩形柱の剥離干渉効果に関する研究」, 日本流体力学会年会, AM06-02-011, (2006)
- 11) Scanlan, R.H., Beliveau, J.G., Budlong, K.S. : "Indicial Aerodynamic Functions for Bridge Decks", Jour. Eng. Mech. Division, Proc. ASCE., pp. 657-672, Vol.100, EM4, (1974)