非定常空気力の変化に着目した並列ケーブルのウェイク振動発現機構に関する研究

京都大学大学院工学研究科　学生員　○福島　温樹　京都大学大学院工学研究科　正会員　八木　知己
京都大学大学院工学研究科　学生員　下田　拓也　神鋼鋼線工業株式会社　正会員　榊　一平
京都大学大学院工学研究科　正会員　野口　恭平

１．概要

橋梁の並列ケーブルのように，複数の円柱が並列配置された構造に風が作用することで生じる現象としてウェイク振動があげられる．ウェイク振動は，下流側円柱が主流直角方向卓越に振動する Wake Galloping(以下 WG)および主流方向卓越の楕円軌道を描く振動をする Wake-induced Flutter(以下 WIF)に大別される．袁ら[1)]はウェイク振動を，非定常空気力係数揚力鉛直速度比例項の $H_1^* > 0$ が寄与する 1 自由度鉛直フラッターと連成項の P_4^*, H_5^*, H_6^* が寄与する 2 自由度連成フラッターに分類し，発現機構に基づいた 2 円柱の模型配置によるウェイク振動の分類図を提案した．しかし，未だ無次元風速とウェイク振動発現機構との関係についての検討は不十分である．本研究では，自由振動応答実験において WG が生じる無次元風速領域と WIF が生じる無次元風速領域がみられた模型配置について，下流側円柱の非定常空気力測定実験やフラッター解析を行うことにより，ウェイク振動の無次元風速変化に対する振動機構変化についての知見を得ることを目的としている．

２．自由振動応答実験

上流側円柱を固定し，下流側円柱をばね支持した並列 2 円柱(固有振動数 f = 1.32 Hz, 円柱直径 D = 50 mm)の自由振動応答実験を行った．このうち，$(X/D,Y/D) = (3.0,0.5)$ の模型配置における下流側円柱の振動応答は図-1 に示すように無次元風速 U/fD = 30 (風洞風速 U = 2 m/s)で WIF が生じたのに対し，U/fD = 182 (U = 12 m/s)で WG ならびに主流方向に非定常な振動が生じた．このように $(X/D,Y/D) = (3.0,0.5)$ の配置では無次元風速に応じ異なる性状の振動応答がみられた．

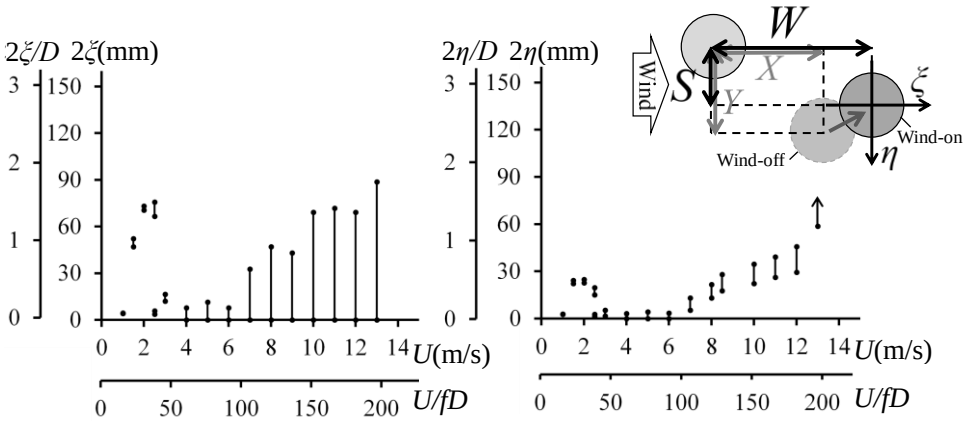

図-1　自由振動応答風速-振幅図 $(X/D,Y/D) = (3.0,0.5)$

３．非定常空気力測定実験

下流側円柱に作用する非定常揚力(*Lift*)及び非定常抗力(*Drag*)を鉛直･水平各 1 自由度強制加振実験で計測し，Scanlan & Tomko[2)]によって示された以下の式より非定常空気力係数 H_i^*, P_i^* $(i = 1, 4, 5, 6)$ を導出した．

$$Lift = \frac{1}{2}\rho DU^2\left(kH_1^*\frac{\dot{\eta}}{U} + k^2H_4^*\frac{\eta}{D/2} + kH_5^*\frac{\dot{\xi}}{U} + k^2H_6^*\frac{\xi}{D/2}\right) \quad Drag = \frac{1}{2}\rho DU^2\left(kP_1^*\frac{\dot{\eta}}{U} + k^2P_4^*\frac{\eta}{D/2} + kP_5^*\frac{\dot{\xi}}{U} + k^2P_6^*\frac{\xi}{D/2}\right) \tag{1}$$

今回対象とする風速域($6.8\times10^3 < Re < 4.1\times10^4$)では，$Re$ 数が異なっても U/fD が同じであれば同じ非定常空気力係数をとり，非定常空気力係数の変化は Re 数の変化によらないことを確認している．

$(X/D,Y/D) = (3.0,0.5)$ の自由振動応答実験で無次元風速変化に応じ異なる振動応答を示すことを振動機構の観点から考察するため，自由振動応答実験の静的変位位置付近の 36 配置について，加振振動数 f = 1.32 Hz, 加振倍振幅 $2A/D$ = 0.4 で鉛直･水平各 1 自由度強制加振実験を行い，非定常空気力係数を導出した．図-2 に非定常空気力係数 H_1^* と下流側円柱静的変位位置を示す．図-2 より，わずかに模型配置が異なると H_1^* の値が大きく異なることが示された．自由振動応答実験において無次元風速変化により異なる振動応答を示したのは，非定常空気力係数の値が模型配置により大きく変化する領域で生じた静的変位が要因の一つと考えられる．

キーワード　ウェイク振動，非定常空気力係数，フラッター解析
連絡先　〒615-8540　京都市西京区京都大学桂　京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻　ＴＥＬ075-383-3244

© Japan Society of Civil Engineers

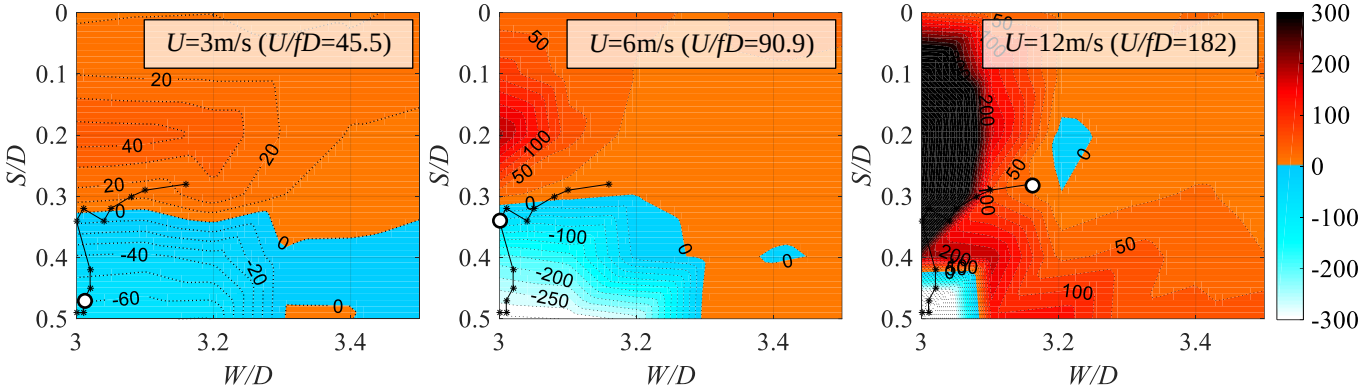

図-2　非定常空気力係数 H_1^* および(*X/D,Y/D*) = (3.0,0.5)配置の自由振動応答実験下流側円柱静的変位位置(O)

4．非定常空気力係数を用いたフラッター解析

強制加振実験より得られた非定常空気力係数を用い，2 自由度系運動方程式について複素固有値問題を解き，各風洞風速 *U* における対数減衰率，振動数，振幅比，変位の位相差を算出するフラッター解析を行うことで，*U/fD* に応じて生じる振動の発現機構の違いについて考察した．解析には自由振動応答実験の諸元を用い，構造減衰は 0 とした．

(*X/D,Y/D*) = (3.0,0.5) 配置の自由振動応答実験における *U* に対応する下流側円柱静的変位位置での非定常空気力係数を用いフラッター解析を行ったところ，低風洞風速域で水平卓越振動(WIF)の 2 自由度連成フラッター，高風洞風速域で $H_1^* > 0$ が寄与する鉛直卓越振動(WG)の 1 自由度鉛直フラッターが生じ，応答と解析結果が良く一致した．これより，模型配置のわずかな違いにより発現機構の異なる振動が生じることが明らかとなった．

(*W/D,S/D*) = (3.0,0.3) 配置でのフラッター解析結果(対数減衰率 δ および振幅比 η/ξ) を図-3 に示す．細実線･太実線がそれぞれ無風時水平･鉛直卓越モードである．無次元風速の変化に応じ H_1^* の値の正負が変わり，*U* の増加に応じ対数減衰率が負となる(振動が発現する)モードが変化することが明らかとなった．生じた振動がどの非定常空気力係数の寄与によるものかを特定するため，図-4 に一例を示すようにある 1 つの係数を 0 倍，3 倍してフラッター解析(感度分析)を行い，δ を比較することで，1 m/s < *U* < 3 m/s で発現した振動は H_1^* がおよそ 0 で，連成項の非定常空気力係数である H_5^*, H_6^*, P_4^* が寄与する水平卓越振動(WIF)の 2 自由度連成フラッター，3 m/s < *U* < 5 m/s および *U* > 8 m/s で発現した振動は $H_1^* > 0$ が寄与する鉛直卓越振動(WG)の 1 自由度鉛直フラッターであると判明した．これより，無次元風速の上昇に応じ発現機構の異なる振動が生じる配置の存在が示された．

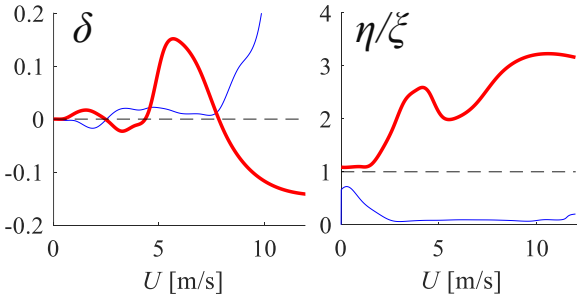

図-3　(*W/D,S/D*) = (3.0,0.3) フラッター解析結果

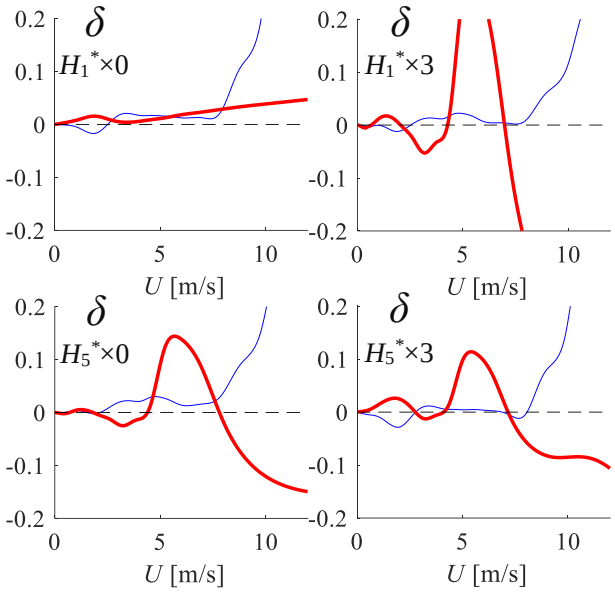

図-4　(*W/D,S/D*) = (3.0,0.3) 感度分析結果(δ)

5．結論

わずかな円柱模型配置の違いで非定常空気力係数の値が大きく変化し，異なる発現機構の振動が生じる模型配置の領域が存在することが示された．また，同じ円柱模型配置でも無次元風速の変化に伴い非定常空気力係数の値が変化し，発現する振動の機構が非定常空気力係数連成項寄与の 2 自由度連成フラッターから，非定常空気力係数 H_1^* 寄与の 1 自由度鉛直フラッターに変化する模型配置が存在することが判明した．

参考文献

1) 袁ら:平行ケーブルにおけるウェイク振動の分類とスパイラル突起による振動制御に関する研究,平成29年度日本風工学会年次研究発表会梗概集,pp.175-176,(2017)
2) Scanlan, Tomko : Airfoil and bridge deck flutter derivatives, Journal of the Engineering Mechanics Division Proceeding of the American Society of Civil Engineers, pp.1717-1737, (1971)

© Japan Society of Civil Engineers