並列円柱のウェーク・ギャロッピングと非定常圧力

構営技術コンサルタント(株) 正会員 〇八木 悟 高知工科大学 フェロー会員 藤澤 伸光

.まえがき ウェーク・ギャロッピングの励振メカニズムには、未だに不明な点が少なくない.著者らは、これま で自由振動実験¹⁾,定常圧力測定実験²⁾を行ってきたが、今回、下流側円柱周りの非定常圧力分布を測定したので、 その概要を報告する.

2. 実験方法 円柱は市販のアルミ製パイプ:外径(D) 32mm を2本使用して,風向に対して垂直かつ平行に配置した.円柱中心間隔は2D~4Dとしたが,紙面の制約から,ここでは2D,3Dのケースを中心に述べる.上流側円柱は固定とし,下流側円柱を上下に強制加振(Y)させて定常振動状態における下流側円柱の表面圧力分布を動的に測定した.加振振幅はY<D,一部の実験ではY<1.25Dとした.圧力孔位置は,上流端を θ =0°とし,32点:11.25°ピッチで設けた.実験気流は一様流,風速3~12m/sの6ケース:レイノルズ数~2.6×10⁴である.加振振動数は一定とし,事前に実施した自由振動実験¹⁾時の固有振動数にほぼ一致させた.

3. 自由振動応答と空力減衰 図1に自由振動実験¹⁾の結果を示す. 図から明らかなように,間隔 2D では3 個の安

定な応答が観測され,振幅は風速によらずほぼ一定であった.一方,間隔3Dの応答は風速とともに漸増するソフト型である.図2に,測定した圧力係数から空力減衰(Ci)を求め,自由振動実験¹⁾時の構造減衰(C)との差を取った減衰係数(C-Ci)の例を示す.縦軸は,円柱径で無次元化した加振振幅(Y/D)である.図1中の縦線は,図2の実験風速に対応する風速を示す.間隔2Dの場合,この風速では,Y/D=0.5,および1.0付近の2個の応答が存在する.

図2によれば、間隔2Dの場合、Y/D=0.5程度で減衰係 数が負から正に変化しており、図1の自由振動応答とよ く整合していると言える.他の風速での実験結果によれ ば、減衰係数の符合が変化する振幅は、風速の増加とと もに若干増加する傾向があるものの風速による変化はさ



ほど大きくなく,この点でも自由振動実験結果との整合性は良好と認められる.一方,大振幅における減衰係数は 振幅の増加とともに若干減少する傾向を示してはいるものの,実験範囲では負減衰の発生は認められなかった.従って,実験の過誤などがない限り,振幅 Y/D=1.0 付近の応答は空力負減衰では説明できないことになる.しかしな がら,一方で,物体変位と独立な外力による強制加振的な特徴は認められず,自由振動応答を観測する限り,この 振動は自励的な特徴を強く持つものであった.従って,一般的な空力負減衰に起因する自励振動ではなく,全く別 の形の,たとえば非線型復元力による自励振動のようなメカニズムを考える必要があるようにも思われるが,詳細 は今後の課題である.

間隔 3D の場合も,Y/D=0.6 程度の振幅の応答に関しては,減衰係数の測定結果とよく整合している.他の風速での実験から,間隔 3D の場合,風速の増加とともに減衰係数の符号が変化する振幅も増加するという結果が得られており,両実験結果は,この点でもよく整合しているものと認められた.なお,実験験範囲内では減衰係数が正値に至る点まで測定できなかったが,図2の結果は,Y/D=1.3 程度の大振幅で安定なリミット・サイクルが発生する可

キーワード ウェーク・ギャロッピング,並列円柱,非定常圧力
連絡先 〒782-8502 高知工科大学 社会システム工学科 TEL0887-57-2417

能性を示しているようにも見える.仮にそうであれば、間隔 3D でも2個の安定なリミット・サイクルが発生し、か つ Y/D=1.3 を越えるような大振幅の振動となる可能性があるので,耐風設計上,注意が必要と思われる.

4. 空力減衰の発生メカニズム 間隔 2D, 3D の Y/D=0.5~0.7 程度の応答は空力負減衰に起因する典型的な自励振 動であり、その振幅は揚力の振幅非線形性に支配されていると言える。そこで、振幅変化に伴う揚力変化について

2

0 -1 表 の

-2

-3

Ŷ

考察する.一例として、図3に、間隔 2D、風速 10.7m/sのY/D=0.27(負減衰時)とY/D=0.55(正 減衰時)での振動1周期における揚力変化を示す. 図3の実線は無次元変位、丸は測定揚力である。

Y/D=0.27 について見ると、中立位置から円柱が 上昇するに伴い, 負の揚力が発生する. 円柱変位 の増加とともに揚力も減少するが、円柱変位が最

大となっても揚力の減少は続き、円柱が中立位置に戻り始めた後、揚力が負のピ ークに達する.後半の半周期も同様である.定常圧力分布の測定結果²から,こ の振幅の場合、下流側円柱は上流側円柱の後流内部にあり、両円柱の間に気流が 流れ込む、いわゆるギャップ・フローへのスイッチングは生じていないと推定さ れる.したがって、この振幅での揚力変化は上昇した円柱の上側、すなわち剥離 剪断層に近い部分の圧力上昇のためと考えられよう. 図からも明らかなように, 揚力変化は変位に対して遅れており、これが負減衰の原因となることは周知の通



(秒

図4

3D の揚力の例 りである.この現象は流れの遅れとして理解されるものであり、この点からも、Y/D=0.5~0.7程度の応答は一般的 な自励振動であると結論されよう.次に、空力減衰が正となる振幅 Y/D=0.55 の場合の揚力変化を見てみる.変位が 0の時の圧力が0でないことからも、Y/D=0.27と同様な遅れが生じていることは明らかである.しかしながら、こ の振幅での揚力の最大の特徴は、中立位置から円柱が上昇する時(および下降する時)に鋭いピーク状の揚力が発 生することにある。このピークのために、基本波の位相は全体として進みとなり、空力減衰が正に変化したと言え る. 定常圧力分布の測定結果²⁾から,このピーク揚力の発生はギャップ・フローへのスイッチングと密接な関係に あることが明らかとなっている.スイッチングの発生は風速よりも、むしろ両円柱の相対的な位置関係に支配され ると考えるのが自然であろう.これが、間隔2Dにおける応答振幅が風速によらずほぼ一定である原因ではないかと 考えられる。円柱位置を準定常的に変化させた場合には、両円柱が特定の位置関係にあれば変位が増加している場 合,および減少している場合ともギャップ・フローに起因する揚力ピークが生じた.図3から分かるように、振動 状態では変位(の絶対値)が増加している場合にしか揚力ピークは生じない.このことが揚力の位相進みの原因と なっていることは自明であるが、片側でしかピークが発生しない理由は、今回の研究からは明らかでない.

間隔 3D の場合,自由振動の振幅は風速とともに増加し,2D とは異なった挙動を示す.3D の場合の非定常圧力(揚 力)の特徴も、定性的には 2D の場合と大差はない.しかしながら、間隔 3D では、最大変位から中立位置に戻る場 合にも、スイッチングに起因するピークではないかと思われる揚力変化が僅かに認められるケースがあった。図4 はそのような変化を示した例で、変位が正から0に戻る過程で、揚力に若干のピーク状の変化が認められる.この 揚力変化は、遅れ、すなわち不安定化の原因となる.従って、間隔 3D では、安定化効果を持つ要素と不安定効果を 持つ要素の微妙なバランスの結果として振幅が定まり、このことが振幅の風速依存性と関係しているのではないか と想像されるが、資料不足であり詳細は今後の課題である.

6. まとめ ○間隔 2D, 3D の Y/D=0.5~0.7 程度の応答は典型的な自励振動である.振幅を支配する正減衰への変化 は流れのスイッチングと密接な関係がある.○間隔 2D の大振幅の振動は、空力減衰では説明困難である.

参考文献

1) 八木悟,藤澤伸光他:「ウェーク・ギャロッピングの応答特性に及ぼすケーブル間隔の影響」,土木学会四国支部,2002

2) 八木悟,藤澤伸光:「並列円柱の定常圧力分布と円柱周りの流れ」,土木学会四国支部,2004