

開水路における円柱群のスロッシング現象の発生限界

(独)国立高専機構 岐阜工業高等専門学校専攻科 学生会員 ○山中貴之・澤田賢吾
同上 環境都市工学科 正会員 和田 清

1. はじめに

近年、河川の護岸や農業用水路の側壁部に、水生生物の幼生・稚魚の生息場や洪水時の避難場所としての機能を期待して、凹凸部や円柱群などの構造物を設置することが行われている。設計上必要な構造形式や配置パターン、面積密度などと水理特性(流速分布や乱れ強度など)の関係を明らかにするためには、その支配的なパラメータを水理実験により検討する必要がある。一方、予備実験により、水路幅全体にわたって円柱群を千鳥配置した場合、ある特定の円柱群の幾何形状および水理条件において水路幅方向に卓越する水面振動(スロッシング)が観察された。本研究では、定常流中に生じた非定常性波動(スロッシング現象)に着目して、単一直径の円柱群(一定の面積密度)において、そのスロッシングの振動波形の発生条件を、上下流の水深(h_1 , h_2), 流量 Q などの水理量との関係で明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

実験は可変勾配水路(長さ 10m, 幅 0.4m, 深さ 0.4m)を用いて、水路内に面積密度 $\lambda=11.4\%$ (有効幅 40cm×有効長さ 90cm)となるように塩ビパイプ(直径 $D=32\text{mm}$)の円柱群(9 列、計 50 本)を千鳥配置(円柱の横断中心間隔: 33mm、縦断中心間隔: 100mm)に設置して行った。その実験装置の概略図を図-1に示す。実験条件は流量 $Q=5.5\sim 20.0\text{L/s}$ 、水路下端の堰の高さ $\Delta H=0\sim 15\text{cm}$ の間で変化させ、勾配は $1/180$ で一定とした。また、実験は、1) 流量 Q を一定とし ΔH を変化させた場合、2) ΔH を一定として流量 Q を変化させた場合の 2 パターンについて実施した。実験中は、上下流の水面振動を抑制するために発泡ウレタン製のボード(厚さ 5cm、幅 40cm、長さ 300cm)を浮かべた。さらに、水面波形は容量式波高計(KENEK CH-303)を用いて計測し、円柱群の内部(1 段目: No.1 および 8 段目: No.2,3,4)および下流部に計 5 本設置した。また、8 段目(No.2,3,4)では、振動モードの腹・節が計測できるように、両側面と中央部に波高計センサーを設置し、振動波形はビデオ撮影などを併用した。なお、サンプリング周波数 50Hz、データ数 8192 個でパソコンに取り込み、それを用いて相互相関係数の算出やスペクトル解析を行った。

3. 結果および考察

3.1 スロッシング波形の卓越周波数

今回の実験で観測されたスロッシングは、振動モード $m=1$, $m=2$ である。そこで、それぞれのモードについて典型的な例を挙げて説明する。図-2 は $Q=5.48\text{L/s}$ 、 $\Delta H=7\text{cm}$ ($h_2/h_1=0.64$)、 11cm ($h_2/h_1=0.81$) における No.4 の波形をスペクトル解析した結果である。同図から、 $m=1$ のスロッシング現象が発生した場合は周波数 $f_1=1.20\text{Hz}$ 、 $m=2$ の場合は $f_2=1.71\text{Hz}$ が卓越していることがわかる。なお、今回の実験スケールではこの 2 つの卓越周波数が発生している。下流端の堰が低く($\Delta H=7\text{cm}$)、水位差(h_2-h_1)がある限界を越えると $m=2$ が卓越し、さらに ΔH が増加し、水位差が小さくなると、振動モードが $m=1$ の明瞭なスロッシング現象が確認できた。

実験で得られた卓越周波数をセイシュ理論の周波数と比較するために、分散関係式を用いて波速を補正し周波数を簡易的に算定した。これは、今回発生したスロッシングの水深波長比(h/L)が $0.113\sim 0.225$ の範囲であり、長波近似を適用したセイシュの式を用いることができないためである。その結果、 $m=2$ の場合 $f=1.89\text{Hz}$ ($T=0.53\text{s}$)となり、セイシュ理論よりも周期は長く算定される。なお、実際には水路中の円柱群によって、波動を阻害して周期はより長いものになると考えられる。

3.2 スロッシング波形の遷移過程

図-3 は流量 Q を一定 (5.48L/s)、下流端の堰の高さ ΔH を変化させた場合において、スペクトル解析による卓越周波数のパワースペクトルが全体に占める割合 ($S(f)_{\max}/\Sigma S(f)$)、2 ヶ所の波形の位相差から相互相関係数を求めて、 h_2/h_1 の比との関係で示したものである。ここでスペクトル解析では上流と下流の水深データ(No.1, 4)、相互相関係数

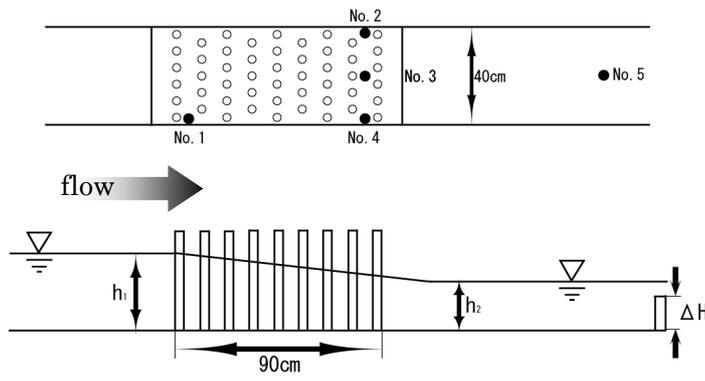


図-1 実験装置概略図

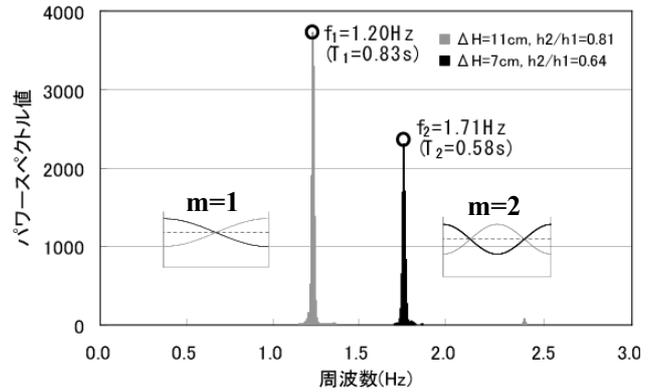


図-2 m=1,2における卓越周波数(No.4)

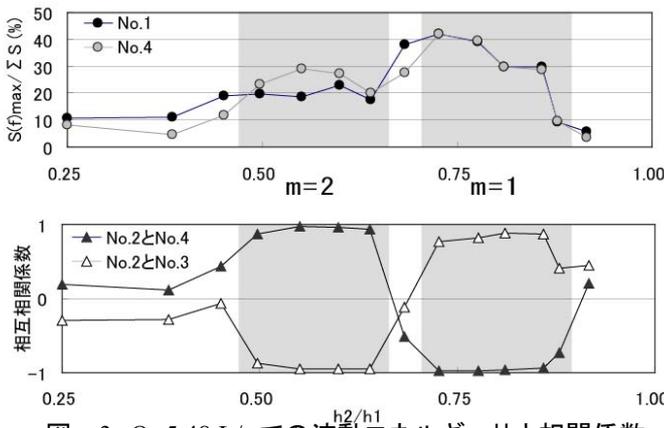


図-3 Q=5.48 L/s での波動エネルギー比と相関係数

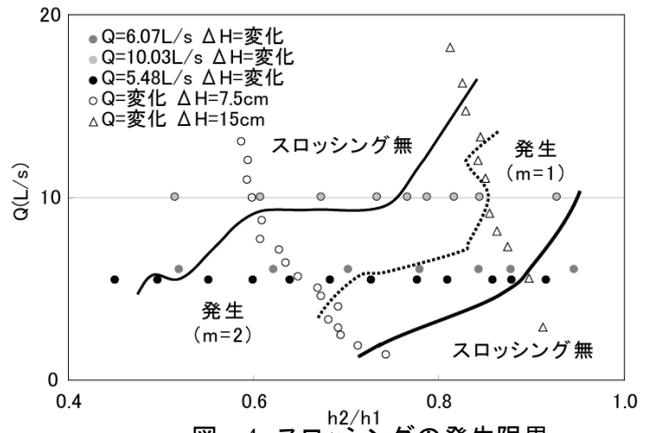


図-4 スロッシングの発生限界

では同一横断面内の側壁、中央部(No.2, 4 および No.3, 4)を採用している。図中のハッチング部分は振動モードが卓越する領域である。同図から、 $m=2$ では No.4 の波動エネルギー比の割合が No.1 よりも必ず大きくなり、下流につれて振動エネルギーが増幅していることがわかる。No.2 と No.4 の相関係数は 1、No.2 と No.3 では -1 に非常に近い値となった。これは No.2 と No.4 を水路の両側面に、No.3 は中央に位置しており、 $m=2$ の場合、No.2 と No.4 (振動の腹) は同位相となり No.3 (振動の節) は他の二つと逆位相となったものと考えられる。一方、 $m=1$ では波動エネルギー比が No.1 と No.4 でほぼ同程度の割合、No.2 と No.4 の相関係数は -1 に非常に近い値となり、No.2 と No.3 では 0.9 程度の値であった。これは、円柱群内での縦断方向の波動などが関連していると思われる。

3.3 スロッシングの発生限界

図-4 はスロッシング発生の有無、振動モード m を流量 Q と h_2/h_1 の関係で表したものである。なお、今回の実験においてスロッシング現象発生の判断基準は、スペクトル解析において前述の卓越周波数 ($f_1=1.20\text{Hz}$, $f_2=1.71\text{Hz}$) が確認できること、両側面(No.2 と No.4)の波形の相互相関係数の絶対値が 0.7 以上であることとした。同図より、流量 Q が大きくなるにつれて h_2/h_1 のスロッシング発生領域は小さいこと、流量が少なくなると落差が大きい状態 (h_2/h_1 の値が小さい) でもスロッシングが発生することがわかる。

4. おわりに

以上、今回設定した円柱群の配置パターンでは、スロッシング現象 ($m=1$ と $m=2$) が観測された。 $m=2$ のスロッシングが発生した場合、上流部の振動エネルギーが下流部では増幅し、相関係数は 1 に非常に近い値を示した。 $m=1$ では上下流部で振動エネルギーに差がなく、相関係数は -1 に非常に近い値を示した。スロッシングの発生限界は h_2/h_1 と流量 Q に大きく依存し、流量 Q が小さい場合にはスロッシング発生の領域がより拡大されることが明らかにされた。スロッシングの発生メカニズムについては、上下流の水位差 (h_1-h_2) によって円柱間の通過流速が変化し、円柱後方に形成される渦構造と深く関連している。今後、円柱後方に形成される渦の可視化、円柱群内の流速分布や乱れ場の計測、数値シミュレーションを検討している。