

開水路中の透過性抵抗体を通過する Froude 数の異なる段波の数値解析法とその検証

広島大学 学生会員 ○小林 大祐

広島大学 正会員 内田 龍彦

1. 序論

地震によって発生した津波は河川を遡上し、内陸深くにおいて越水することで、海岸堤防を越えた津波による被害があまり大きくない地域でも、流体力や局所洗掘などの被害をもたらす。河川遡上津波の被害を軽減するために、適切な数値計算手法の確立が求められている。河川では、植生群などの透過性抵抗体が存在している。一般的に、沿岸域における防潮林などの透過性抵抗体は、津波のエネルギーを減衰させることが知られている(首藤, 1987)。しかし、河川を遡上する津波を考えると、沿岸域とは異なり河川堤防により縦断的に防護する必要がある。即ち、河川では、透過性抵抗体によって発生する流体力によって、津波のエネルギーが減衰されると同時に、その反射によって水位が上昇し河川堤防を越水する危険性もある。そのため、河川遡上津波の適切な数値計算法の確立のためには、透過性抵抗体による流体力を適切に再現することが重要となる。しかし、流体力評価における抗力係数には、これまで経験的な値が用いられてきたため、流れ場に依存しない流体力評価法の検討は不十分である。また、透過性抵抗体と段波について、段波の減衰に着目した実験的検討も多く行われている。しかし、植生密度や配置による減衰率の影響に焦点が当てられており、波や低 F の段波条件が多く、Froude 数(F)の違いによる減衰率への影響については不明な点が多い。本研究では、植生群を通過する段波の減衰について、不等流効果を考慮できる流体力評価法を用いた数値計算を行い、実験結果と比較することで流体力評価法の検証と F による減衰率への影響評価を行う。

2. 実験方法

図-1 に実験水路の平面図を示す。用いた直線水路は、幅 0.39(m)、長さ 16.1(m)、勾配 0 である。ゲート上流に設置したゲートを急開させることで、段波を下流へ伝播させる。段波の初期条件は、高 F 碎波($F=3.99$)をゲート上流・下流水深を 0.30(m)、0.02(m)、低 F 碎波($F=1.53$)を 0.285(m)、0.107(m)として設定した。また、直径 $d=0.01$ (m)の円柱群を、 $x=3\sim5$ (m)の範囲において千鳥状で配置した。円柱群の面積密度は、 $\lambda=\pi d^2(4\Delta x\Delta y)=0.072$ ($\Delta x=\Delta y=0.033$ (m): 植生間隔)である。本実験では、測定点において、サーボ式水位計を用いて波高の時間変化を測定した。また、測定点は、縦断方向に 6 点、横断方向にそれぞれ 3 点設置した。

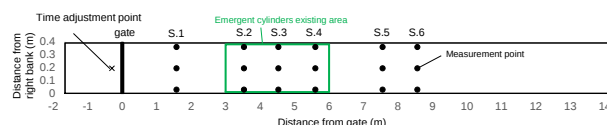


図-1 実験水路平面図

実験結果が横断方向に大きく変化しないことを確認し、結果には断面中央の測定点における実験結果を用いる。

3. 数値計算法

本研究で用いる平面二次元計算の基礎方程式を、式(1)-(4)に示す。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U h}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U h}{\partial t} + \frac{\partial U U h}{\partial x} = -g h \frac{\partial z_s}{\partial x} - \frac{N f_d}{\rho} - \frac{\rho n^2 |U| \cdot U}{h^{4/3}} \quad (2)$$

$$f_d = \frac{\rho |U| \cdot U}{2} C_D h d + \rho g h d L \frac{dh}{dx} \quad (3)$$

$$C_D / C_{D0} = 1 + \frac{\beta_{C_D}}{2} C_{D0} F^2 \quad (4)$$

ここで、 U : 水深平均流速、 h : 水深、 z_s : 水位、 g : 重力加速度、 N : 円柱群密度、 f_d : 流体力と圧力勾配による付加力、 τ_b : 底面剪断力、 n : マニングの粗度係数(=0.01)、 C_D : 抗力係数、 C_{D0} : 一樣流中の抗力係数、 F : Froude 数、 L : 円柱背後の剥離渦の代表長さ(=kd)である。流体力項には Uchida et al.による不等流中の評価法を適用する。式(4)の等流中の抗力係数 C_D は理論的に導出されており、第 2 項により円柱周りの水深変化による流体力の変化が考慮される。また、式(3)の第 2 項では、加速流中の円柱背面で発生する剥離領域が下流の圧力の影響を受けることで発生する縦断方向の圧力勾配による付加力を示す。流体力評価法(式(3))には、2 つの未知数(C_{D0} , k)は、定常加速流 ($Q=0.0185$ (m³/s); $h_t=0.079$ (m)) の縦断水面形を再現できるような、最適な C_{D0} と k の組み合わせとして、 $k=5$, $C_{D0}=1.3$ を用いることとする。また、3 次元計算も行っており、OpenFOAM における RANS 方程式を基礎方程式として、式(3)、(4)を考慮している。

4. 数値計算法の検証と F による減衰率の変化

図-2 に高・低 F の段波波高の時間変化の実験と計算結果を示す。ここに、 Δh : 波高、 h_t : 浅水流方程式の理論解波高、 t : 時間である。

抗力係数のみの計算結果では、植生群内(S.3)における波高を過大評価したが、圧力勾配を流体力評価

キーワード Froude 数, 碎波段波, 流体力, 抗力係数, 圧力の縦断勾配

連絡先 〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1

広島大学大学院先進理工系科学研究科 T E L 080-4339-5924

において考慮すると、波高を良好に再現する。一方で、圧力勾配を考慮した場合、植生群内における波速を過小評価した。円柱群通過後(S.6)では、抗力係数のみの計算結果では波速と到達時刻が実験に比べ早く、波高を過大評価した。また、式(4)の水面変化の項の影響は大きくないが、圧力勾配を考慮した計算結果では、円柱群通過後の波速と波高を良好に再現できている。図-3に最大波高の縦断分布と段波の到達時刻と縦断距離の関係を示す。このように、従来の抗力係数のみの計算結果では、円柱群内の減衰波高を過大評価するが、圧力勾配を考慮することで、減衰波高を良好に再現する。植生群内における流体力によって到達時刻が遅くなることを定性的に示したが、波速を過小評価する結果となった。一方、植生群通過後(S.6)の波速は実験結果と概ね一致した。また、S.6における到達時刻の遅れは、植生群内における波速の過小評価によるものである。

圧力勾配を考慮する計算結果が、実験結果を良好に再現する要因について、空間波形から考察する。図-4では、高Fの圧力勾配を考慮する場合としない場合について、ボアフロントの位置が一致する異なる時刻の瞬間波形を比較している。両計算結果における違いは、植生群内の波高と植生上流における反射波の位置に現れる。ボアフロントが同じ位置にある状態では、圧力勾配を考慮した結果の方が、反射波がより上流側に到達している。反射波の上流への伝播によって、植生群内を伝播する正の段波の波高が減少する。また、図-2のS.1における反射波の到達時刻は、圧力勾配を考慮したことで再現性が向上している。よって、抗力係数のみの結果では流体力が過小評価され反射波を適切に再現できず、圧力勾配を考慮することで反射波の到達時刻と正の段波波高の減少を適切に評価できる。

最後に、Fによる流体力による減衰率の影響を考察する。図-3より、波高や波速の減衰率はFが大きいほどより減衰する結果となった。また、図-2より低Fの砕波段波では、植生群通過後に、波状段波へと移行する結果となった。図-5に、低Fの砕波段波の空間波形の平面二次元計算と3次元計算結果を示す。3次元計算結果より、植生群内においてボアフロントの波形勾配が、伝播とともに流体力によって緩やかに変化していくことがわかる。植生通過後では、波状段波に移行しており、波形勾配はさらに緩やかになっている。このように、植生群内における流体力による波形勾配の減少によって、低Fの砕波段波は波状段波へ移行したと考えられる。

5. 結論

本研究では、開水路中の円柱群を通過する段波波高について、不等流中の非水没抵抗体の流体力評価式を考慮した数値計算を行い、再現性の検討を行った。従来の抗力係数を用いた計算では、波高を過大評価する結果となった。一方、抗力係数による流体力評価に加え、圧力勾配による付加力を考慮した計算結果では、流体力によって発生する反射波と下流へ伝播する段波のエネルギーフラックスを適切に再現す

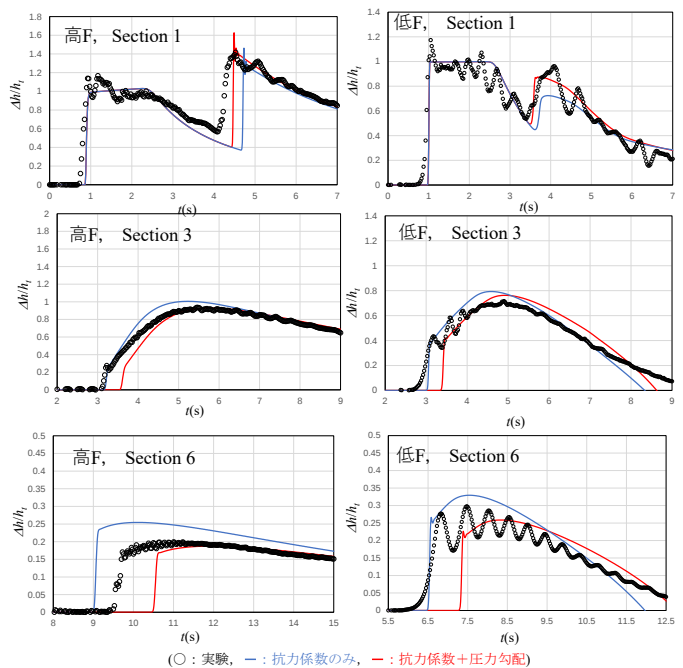


図-2 波高の時間変化の実験結果と計算結果の比較

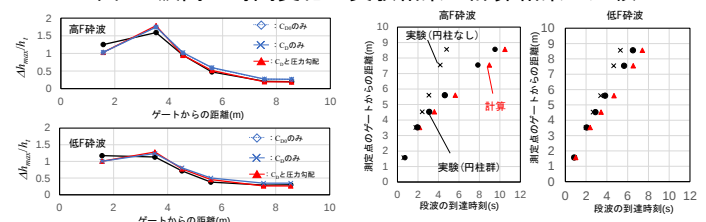


図-3 最大波高の縦断分布(左)と段波の到達時刻と縦断距離(右)

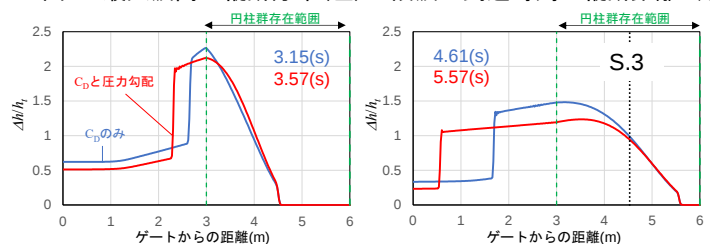


図-4 空間波形の平面二次元計算結果の比較

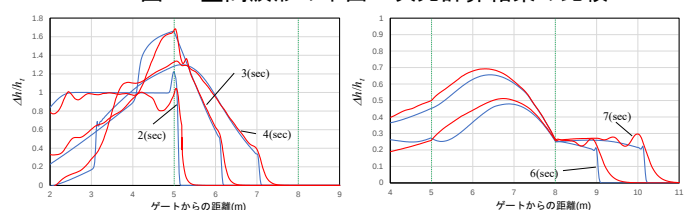


図-5 低Fの砕波段波の空間波形の平面二次元計算と3次元計算結果

るため、波高の時間変化や最大波高の縦断分布を良好に再現する結果となった。また、低Fの砕波段波は、流体力によって波形勾配が減少することで、波状段波へ移行することを示した。

参考文献

- ・首藤伸夫: 防潮林の津波に対する効果と限界, 海岸工学講演会論文集, 32巻, pp. 465-469, 1987.
- ・Uchida, T., Ato, T., Kobayashi, D., Maghrebi, M. F. and Kawahara, Y.: Hydrodynamic forces on emergent cylinders in non-uniform flow, Environmental Fluid Mechanics 22, pp. 1355-1379, 2022.