

水制群周辺の水面振動に関する実験とシミュレーション

Experiments and Computations on Water Surface Oscillations around Spur Dikes

北海道大学工学部 環境社会工学科国土政策学コース ○学生員 浅川優弥 (Yuya Asakawa)
 北海道大学 工学研究院環境フィールド部門 准教授 正会員 木村一郎 (Ichiro Kimura)
 北海道大学 工学研究院環境フィールド部門 教授 フェロー 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)

1. 研究背景

水制工は水流の流速を減少させ、水跳ねにより流れの方向を変え、河岸や堤防を浸食作用から守ることや、水深を増加させ、川船航路を確保することが知られている。しかし、水制は水流にとって障害物であることに変わりはなく、水制の導入による抵抗の増加と水位の上昇を考慮することが重要である。移動床で考えた場合には水制工が流れに対して粗度として働くため、短期的には水位は増加するが、一方、中・長期的には水制による洗掘で滞筋の河床が低下するため、水位が低下することも考えられる。この二つの相反する効果が水制周辺の水位を決定付けると考えられるが、どちらの効果が卓越し、結果的にどのように水位が変化するかということについては未解明の課題となっている。これまでも水制に関する研究は数多く行われており、連続水制に限っても、水制のアスペクト比(水制間隔/水制長)や水制角度を変化させた場合の河床変動や流れ構造を検討したものや、質量・運動量交換率を検討したものがある。しかし、水制の粗度としての効果に限った場合についてはどのような水理パラメータが流れの抵抗を決定付けるか、十分な解明がされているとは言い難い。本研究では水制の粗度としての効果に着目し、固定床・非越流不透過連続水制に限定し、水制のアスペクト比、及び水流のフルード数が水制の抵抗としての性質に与える影響の解明を試みる。手法としては数値解析を用い、既往実験等における詳細な流況を数値的に再現する。また、水制抵抗に深く関わると考えられる水制域内の水面振動と渦について考察を行う。

2. 研究概要

水制周辺抵抗特性を解明するため、水面振動とフルード数の関係についての検討とフルード数ごとの水制のアスペクト比と水制抵抗の関係についての検討の二つを行う。どちらの検討についても平面の数値解析を中心に行い、流況の比較、及び流域の水面振動と渦の観察を行った。また、既往研究の水理模型実験と数値解析のデータを合わせて検討に用いることで幅広い条件での考察を実施した。

3. 数値解析

3.1 計算条件

数値解析モデルとして、河川数値解析共通プラットフォーム iRIC のソルバー Nays2DH (二次元) を用いて、大きく分けて 2 種類の数値解析を行った。

水路底面のマニングの粗度係数は水制とアスペクト比の関係を検討した既往研究において、水制を設置しないケースの実験結果から得られたもの($n=0.0235$)をすべてのケ

ースに用いた。計算格子は計算領域全体で $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ の正方形格子とした。連続水制の計算を行う際には水路長全体を計算格子に入れるのではなく、計算効率を考慮して上下流端に周期境界条件を課した。ところで、水制周辺ではせん断不安定の影響等により周期的な水面振動が起こることが知られている。このような水面振動が支配的な場の水制 1 区間分の水路において周期境界条件を取ると、上下流端の水深を同期させることから水面振動が再現されないことがある。この問題は水制 2 区間分の両端で周期境界条件を取ることによって軽減されると思われる。そこで、本数値解析及び既往研究では水制 1 区間分に周期境界条件を課した「1span 条件」と水制 2 区間分に同様にした「2span 条件」の両方を採用し、結果を比較した。

3.2 水面振動とフルード数の関係についての数値解析

水面振動とフルード数の関係については単一ワンドを持つ直線水路模型における検討が行われている。¹⁾ (図-1)

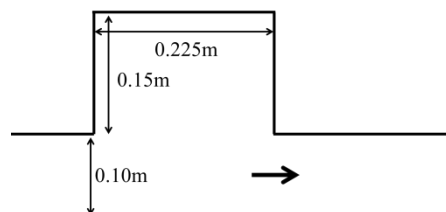


図-1 対象とした水路

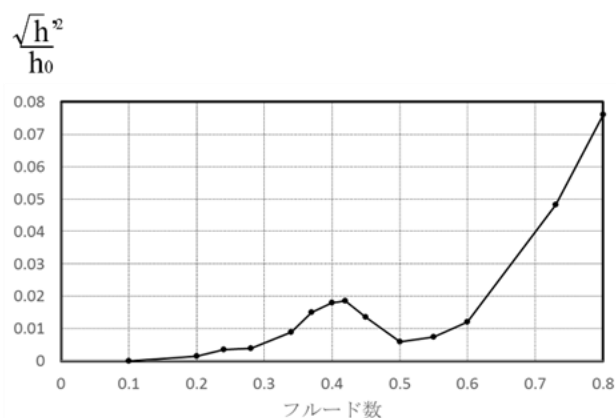


図-2 水面振動とフルード数の関係

このとき、閉鎖水域内で起こる非定常渦の影響により、フルード数を変えたときの水面振動の振幅は $Fr=0.33$ 付近に極大値をとり、 $Fr=0.5$ 付近に極小値を持つということが分かっている。(図-2)

水制間は半閉鎖性水域となるため、前述の単一ワンドにおける現象と同様のものが見られる可能性が高い。そこで、既往研究と同様な閉鎖水域を持つ水路、同じ大きさの閉鎖水域を連続して持ち、両端に周期境界条件を課した水路 (1span, 2span) の3種類 (図-3) を想定し、フルード数を変化させたときの水面振動を平面二次元モデルで計算した。閉鎖水域の大きさは開口部長さ 22.5cm、奥行き 15.0cm とし、主流幅は 10.0cm である。流量は $0.00023\text{m}^3/\text{s}$ とした。閉鎖水域前後の長さは既往研究を再現した水路では開口部長の4倍を付加し、隣り合う閉鎖水域での影響が少なくなるようにした。水制を模した 1span, 2span の水路では隣り合う閉鎖水域の間隔は後ほど述べる水制のアスペクト比と抵抗の関係に関する検討に倣い、2cm とした。既往研究で行われた実験では下流端水深を変化させることで主流のフルード数を変化させ、このとき図の閉鎖水域の左端から 0.215m、上端から 0.075m の点で水面振動を計測している。今回想定した3つの水路でも同様な下流端水深を与え、同様な点で水面振動を計測した。河床勾配は実験に倣い、すべて $1/500$ とした。

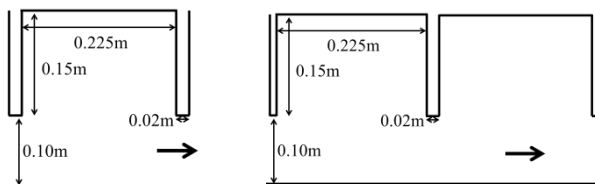


図-3 1span 条件 (左) 2span 条件 (右)

3種類の水路における水面振動に関する計算結果と既往研究における実験結果を図-4に示す。はじめに既往研究の実験結果と対応する数値計算結果を見ると、水面振動の振幅は比較的良好に一致し、実験で見られるような $Fr=0.5$ 付近における谷と、 $Fr=0.4$ 弱における山も再現されている。このため、この条件における水面振動の再現性は良好であるということが出来る。

次に水制を模した 1span, 2span の水路における結果を見ると、1span ではフルード数の増加に従い、単調に増加しており、2span では単一ワンドを持つ先ほどの2つの結果と同様なフルード数において山と谷を見ることが出来る。既往研究より水面振動は 2span 条件においてのみ良好に再現されるということが示唆されており、今回の数値解析でも 2span 条件のみで閉鎖水域におけるフルード数と水面振動の相関関係が良好に再現されるという結果になった。2span 条件の再現性の高い理由については後述する。また、単一ワンドの結果に比べて 1span, 2span の水面振動が全体的に大きい理由として、1span, 2span 条件においては閉鎖水域同士の距離が近いため、互いの水面振動が影響を与えやすいということが考えられる。

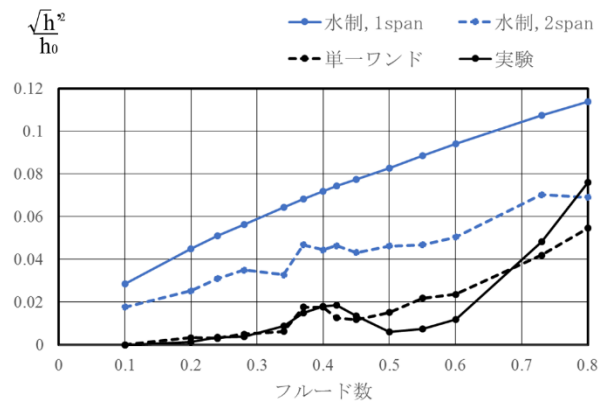


図-4 水面振動とフルード数の関係

いずれのフルード数においても閉鎖水域界面内で周期的な渦が発生している様子が観測された。2span 水路の $Fr=0.24$ と $Fr=0.80$ における水深平均流速ベクトルと流速分布を図-5に示す。 $Fr=0.24$ では二つの渦が同時に界面内に発生する様子が見られる場合があったのに対して $Fr=0.80$ では常に一つの渦が界面に存在する時間が長く、また、渦の規模も大きいことがわかる。全体的に 2span 条件ではフルード数の小さな条件では複数の小さな渦が見られ、フルード数の大きな条件では単一の大きな渦が見られる傾向があった。また、フルード数の大きい方が、概して渦自体も鮮明なものになることがわかる。

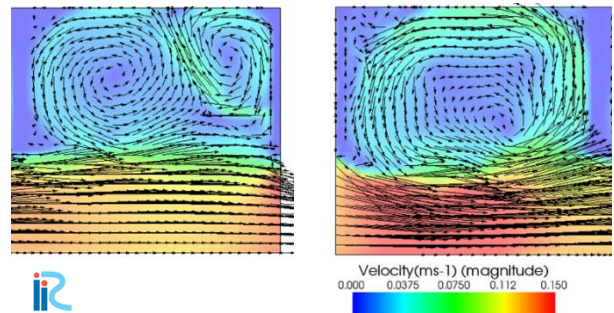


図-5 $Fr=0.24$ (左) $Fr=0.80$ (右) 2span 条件

3.3 アスペクト比と水制抵抗の関係についての数値解析

水制のアスペクト比 (水制間隔/水制長, l/d) と水制抵抗の関係については直線水路に水制を模した障害物を設置することによる水理模型実験及び、その2次元、3次元の数値解析が行われている。^{2) 3)} 水制のアスペクト比がある値をとるとき、水制の抵抗が最大となることが分かっている。この現象についてフルード数を変えて二次元数値計算を行うことでフルード数の影響を検討した。主流幅は 20cm とし、設置する水制は横断方向長さ 5cm、厚さ 2cm とした。流量は $0.002\text{m}^3/\text{s}$ である。水制間隔を変化させ、アスペクト比 2, 5, 10, 20 の4パターンを実施した。これらの条件は既往研究に倣った。本解析ではフルード数を変化させるため、既往研究における勾配 $1/500$ に加えて、 $1/1000, 1/250, 1/125$ の計算を行った。この時の各条件のフルード数はアスペクト比によって若干異なるが、そのおよそのフルード数を表-1に示し、水路形状を図-6に示した。

水制抵抗が増加すると水深は上がるため、水深を用いて抵抗を比較していく。

表-1 勾配とフルード数の変化

勾配	1/1000	1/500	1/250	1/125
Fr	0.3 前後	0.4 前後	0.5 前後	0.7 前後

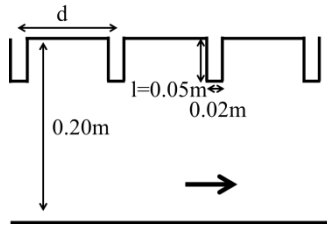


図-6 水路形状

はじめに既往研究の結果を示す。水深とアスペクト比の関係について、水理模型実験と同条件の二次元、三次元の数値解析の結果を比較したものを図-7 に示す。このときのフルード数は0.4 前後である。それぞれの1span 条件と2span 条件を比較すると、2span 条件においては実験結果のように抵抗がピークとなるアスペクト比が存在する一方、1span 条件においてはアスペクト比が大きくなると抵抗は単調増加しており、実現象と異なる結果となっている。

次に先ほどの結果を受けて2span 条件に絞って異なるフルード数における二次元の数値解析を行い、結果を比較した。(図-8) これは水面全体の平均水深を計算し、アスペクト比2 のときを基準に無次元化したものである。フルード数0.3 前後、0.7 前後の計算においてはこれまで同様、抵抗が最大となるアスペクト比が見られた。一方でフルード数0.5 前後のときにはピークが見られず、変化の様子がそのほかの条件と異なっていることが分かる。ピークの見られるフルード数である $Fr=0.7$ 前後について各アスペクト比における水面の流況を図-9 に示す。アスペクト比2 においては定常な循環流のみが見られ、アスペクト比5,10 においては界面に単一の非定常な渦が見られ、アスペクト比20 においては複数の渦が界面を進行する様子が見られた。この傾向はピークの存在する他のフルード数の実験でも同様に見られ、水理模型実験でも同様の現象を確認することができた。

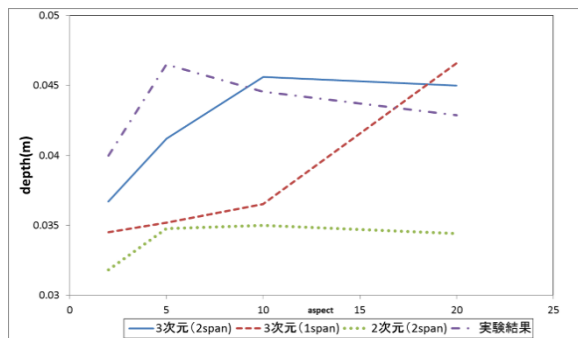


図-7 アスペクト比と抵抗の関係

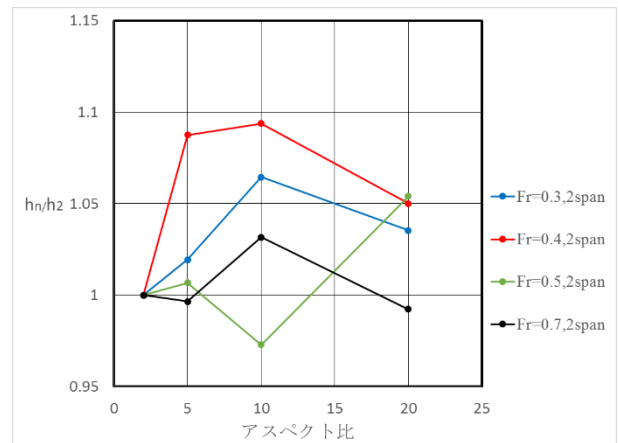


図-8 アスペクト比と水面振動の関係

フルード数0.5 前後においてピークの見られなかった理由を先ほどのフルード数と水面振動の関係に戻って考えてみる。図-4 から分かるように、フルード数0.5 前後は水面振動が発生しづらい条件である。既往研究では水面振動が抵抗の増加につながると考察されているが、水面振動が発生しづらい条件のもとでは、水制の抵抗特性に及ぼす水面振動の影響が弱まり、他の要因が卓越している可能性が示唆される。

抵抗のピークの大きさが各フルード数で異なって見えることや、抵抗の最大となるアスペクト比がフルード数ごとに異なる理由などについては更なる検討を必要とする。

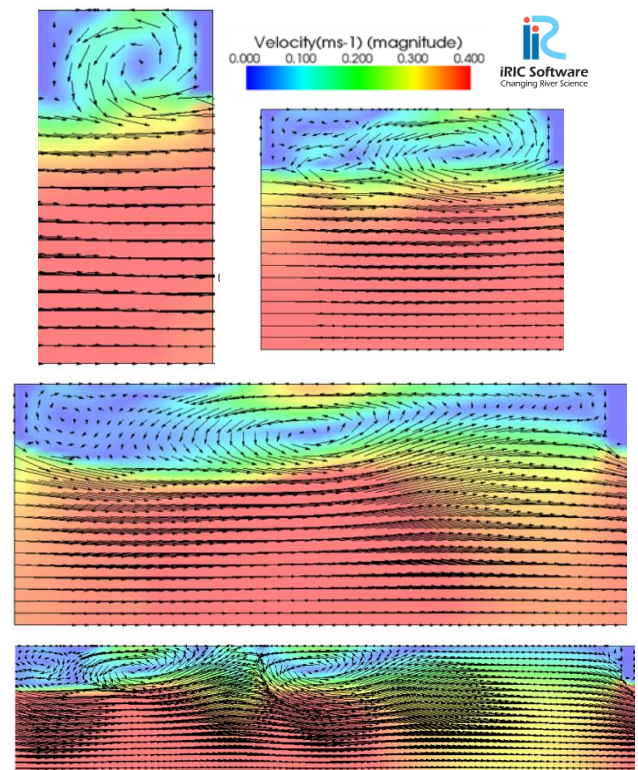


図-9 水深平均流速ベクトル及び流速分布
アスペクト比2 (左上) ,アスペクト比5 (右上)
アスペクト比10 (中央) アスペクト比20 (下)

4.1 次モードの水面振動に関する考察

これまでの解析の中で、周期境界条件を用いる際には 1span 条件と 2span 条件の 2 種類を用意し、比較を行ってきた。この二つの条件では、異なる水面振動が再現される。図-10 のように 2span 条件で再現される、水制 1 区間の中に節をひとつ持つ水面振動を 1 次モードと呼び、1span 条件で再現される水制 1 区間の中に節を二つ持つ水面振動を二次モードと呼ぶ。二つの数値解析ではどちらも 1span 条件では実現象に見られるような水面振動や抵抗のピークは再現されなかったことから、抵抗に関わるのは 1 次モードの水面振動ということが示唆される。既往研究では発生している水面振動の周期などからも 1 次モードの水面振動の卓越を観測している。

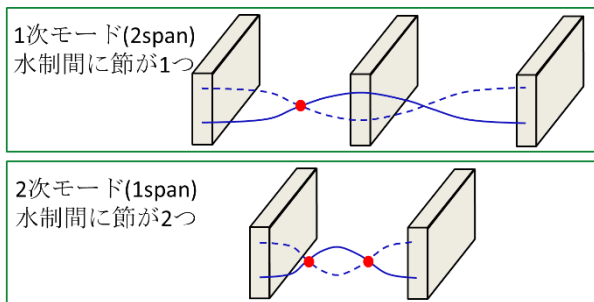


図-10 1 次モード, 2 次モードの水面振動

5. 水域内で見られる非定常大規模渦の考察

実験と解析の双方から、閉鎖水域内では非定常な大規模渦が観測されているが、この渦の水面振動への影響について考察する。4 節で述べたようにこのような閉鎖水域においては 1 次モードの水面振動が卓越するということが示唆されている。この振動は水制域中心付近に節をひとつ持つことから、水制域上流側、下流側の水の流入に注目する。図-11 の左図のように、界面をひとつの渦が進行する場合、渦の影響により、上流側、下流側のどちらかは水の流入する状態、一方は流出する状態となる。このとき、上流側と下流側の間で水面の高さに差が生じ、水面振動が発生する。次に図-11 の中央の図のように二つの渦が進行する場合、渦の大きさが等しいと仮定すると、上流側と下流側それぞれにおける水の流出は 0 となり、その差も 0 となる。すなわち、渦による水面振動はほとんど発生しないといえる。また、これ以上の渦が発生している場合を考えると、渦が奇数であるときは水面振動が発生し、偶数であるとき水面振動は発生しづらいということが考えられる。

3-2 節の結果を水面の様子から考察する。フルード数 0.6 ～1.0 においては 1 つの渦が進行する様子が見られるが、これは水制域上流側と下流側に水の流出入差を生み、最も水面振動を活発にする。グラフのフルード数 0.5 付近を見ると水面振動は弱まっており、この付近で渦がちょうど二つ進行していることが予想できる。次にフルード数 0.3 ～0.4 を見ると、再び水面振動は強くなっている。これは渦が 3 つ発生しており、流出入差が再び生まれていると思われる。大規模渦の空間的間隔はフルード数に依存し、フルード数が

小さくなると渦同士の間隔が狭くなり、ひとつの閉鎖水域にいくつも渦が発生できるようになるためこのようなことが起こると考えられる。

次に 3-3 節の結果を考察する。水面の様子を観察からアスペクト比 5, 10 でひとつの渦が存在し、アスペクト比 20 では複数の渦が進行するということが分かっている。このことからアスペクト比 5, 10 においては渦がちょうど一つ存在していたが、アスペクト比が大きくなり、水制間隔が広がったことで複数の渦が水制域に入り込むスペースが生まれ、結果的に一次モードの振動が弱められ抵抗が低下する。このため、アスペクト比 20 では水深が下がったと考えられる。

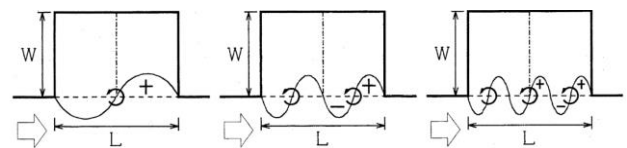


図-11 非定常渦と水面振動の関係

6. 結論

本研究では水制の抵抗としての性質にアスペクト比とフルード数が与える影響を異なる条件における数値解析と実験を通して検討した。また、閉鎖水域で発生する水面振動と非定常な渦について、1span 条件と 2span 条件の比較や流況の観察を通して考察を行った。これらのことから得られた結論を示す。

- 1) 水面振動、水制抵抗には 1 次モードの水面振動が影響する。
- 2) 水制域における水面振動は非定常な渦の影響によりフルード数 0.35 付近に極大値、フルード数 0.5 付近に極小値を持つ。
- 3) 水制抵抗はアスペクト比 5 ～10 において最大をとる。ただし、水面振動の小さくなるフルード数 ($Fr=0.5$) においてはピークは見られなかった。

参考文献

- 1) 木村一郎・細田尚・村本嘉雄・安永良：開水路流れにおける死水域内の流体振動に及ぼす水理パラメータの効果, 水工学論文集, 第 39 巻, pp. 779-784, 1995
- 2) 米森一貴：非越流連続水制のアスペクト比が流況及び抵抗特性に及ぼす影響, 修士論文, pp. 1-48, 2013
- 3) 斉藤翔吾：連続水制の抵抗則に関する二次元及び三次元モデルの適用性, 卒業論文, pp. 1-31, 2014
- 4) iRIC : <http://i-ric.org/ja/>