連続水制のアスペクト比が流況および抵抗特性に及ぼす影響

Effect ofAspect Ratio on Flow Patterns and Resistance Characteristics around Emergent Groynes

北海道大学工学院　○学生会員　斉藤　翔吾(Shogo Saito)
北海道大学工学研究院准教授　正会員　木村　一郎 (Ichiro Kimura)
北海道大学工学研究院教授　フェロー会員　清水 康行(Yasuyuki Shimizu)

1. はじめに

水制工は流速を減少させ，水はねにより流れの方向を変え，河岸を守る効果があ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なく，水制の導入による抵抗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、水制工が流れに対して粗度として働くため、短期的には水位を増加させるが，中・長期的には水制による洗掘で澪筋の河床が低下するため，これが水位を低下させる効果も期待できる．この二つの相反する効果が水制周辺の水位変化を決定づけると考えられるが，どちらの効果が卓越し，結果的に水位がどのように変化するかという点は未解明の課題である．これまでに，水制に関する研究は数多く行われてきている．連続水制に限っても，例えば，水制のアスペクト比（水制間隔/水制横方向の長さ）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等がある．しかし，水制の粗度としての効果に限って考えた場合については，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について，十分な解明がなされているとはいい難い．例えば，川幅に対する水制長の比が大きくなると抵抗が大きくなるのは自明であるが，水制長が一定の場合，アスペクト比や，水流に対する水制角度，越流型水制の場合は水没率などが流れの抵抗に及ぼす影響については、未解明な点が多く残されている．

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する．水制間隔を変化させアスペクト比と流れに対する抵抗の関係の解明を試みる。既往の研究データ[1)2)]（実験結果及び 2 次元数値シミュレーションによる結果）と 3 次元数値シミュレーションによる検討を行い，詳細な流況を数値的に表した．また渦や水面振動の考察を進める．移動床の中・長期的な洗掘での河床低下による水位の変化は考察できないが，より単純な条件で考察するため水制間隔の変化による流動機構を知るための条件であると考える．

2. 水理模型実験及び数値解析の概要

（1）　水理模型実験の概要

既往の実験概要[1)2)]として図-1に示すスチール土台アクリル側壁の長さ10m，幅0.2m，勾配0.002の循環式直線水路を使用した．非越流不透過水制のモデルとしては厚さ2cm長さ5cmの発泡ポリスチレンフォーム板を用いた．これを，水路左岸に沿って，水路長全体にわたり等間隔で設置することにより連続水制を模擬した．このため，設置した水制個数はケースによって異なり，アスペクト比が大きい場合，水制個数は少なくなる．また，水路長が比較的短いため，下流端に堰を設置し，水路全体の水深分布を確認しながら堰き上げ水位を調節することで，水路中央付近に主流方向の水深変化が極めて小さい疑似等流場を形成した．

表-1　実験における条件

experiment	case	E0	E2	E5	E10	E20
slope	i	0.002				
discharge	Q(l/s)	2				
aspect ratio	d/l		2	5	10	20
interval	cm		10	25	50	100

図-1　実験装置

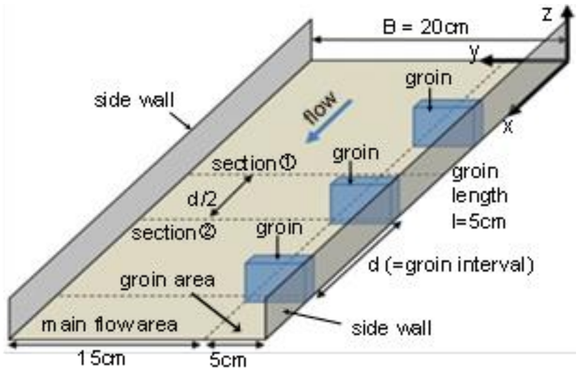
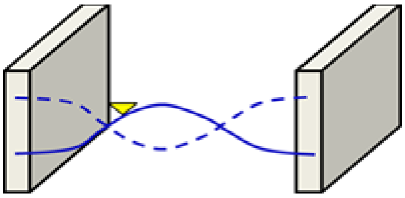
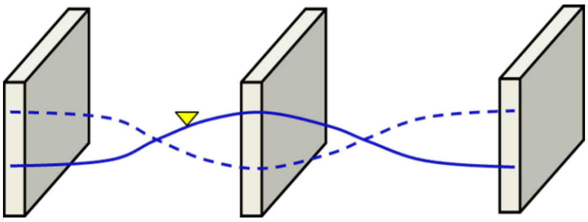


図-2　水路のスケール及び記号の説明



(a) **1span** 条件



(b) **2span** 条件

図-3 水面振動と周期境界条件の関係

この疑似等流場では，重力項と抵抗項がバランスしていると考えられ，無限長の連続水制場とほぼ等価とみなせる．このため，計測ではこの水路中央付近の疑似等流区間を対象に実施した．

図-2の記号について示す．座標系は，**図-2**に示したように水路左岸側上流端を原点として流下方向をx軸，横断方向をy軸，河床からの鉛直方向にz軸とする．実験条件は表-1に示す通りであり，水制の有無とアスペクト比(=d/1)を変化させた5通りの条件で実施している．

実験における計測項目としては，水制間中央点（y=2.5cm)における水位測定，図-2の測線①，②における流速測定，および表面流速のアルミ粉末による可視化とそのビデオ，写真撮影を実施した．

（2）数値解析の概要

a)数値解析モデル

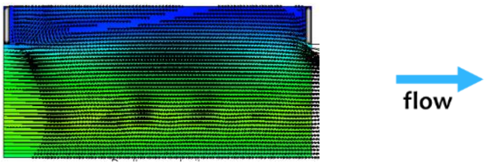
具体的なソルバーとしては，河川数値解析共通プラットホーム iRIC の NaysCube（3 次元）を用いて実施した．フリーソフトとして国内外で使用されている乱流モデルには二次非線形 $k-\varepsilon$ モデル,底面抵抗評価にはマニング式，移流項の空間スキームには QUICK を用いる．

b）計算手順

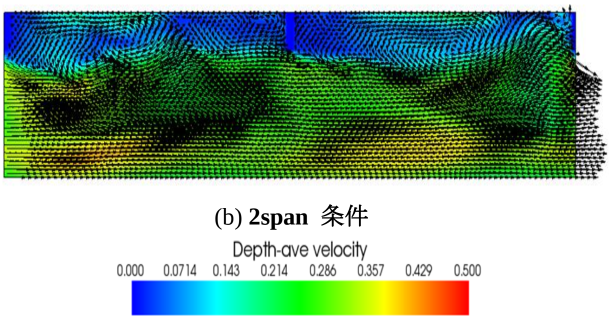
水路底面のマニングの粗度は水制を設置していないケースの実験結果から求める．数値シミュレーションは実験と同じ条件（**表-1** の E0 以外の 4 ケース）で行う．ただし，水路長全体を計算領域に組み入れるのではなく，既往の研究 [1)2)]と同様に計算効率を考えて上下流端に周期境界条件を課すことを考える．周期境界条件は無限に長い水路の等流区間を想定しているが，本計算では水理実験の水路中央付近の疑似等流場を等流に置き換えて計算を実施する．

また，周期境界条件を課した計算では流量を陽に与えることができないため，計算流量を実験流量に適合させるため，計算領域全体の水深を計算途中に一様に自動調整して流量を実験流量に一致させるアルゴリズムを用いている．計算格子は計算領域全体で5㎜×5㎜の正方形格子とした．計算領域は水制区間が1区間分の場合と2区間分の長さのそれぞれ行った．ところで，水制周辺ではせん断不安定等の影響により周期的な水面振動が生じることが知られている．このような水面振動が支配的な流れ場に周期境界条件を用いる場合は注意を要する．すなわち，周期境界条件は上下流端の水深を同期させるため，互い違いの振動モードは周期境界条件による拘束のため，再現できない．そこで，水制区間を2つとると**図-3(b)**のように隣り合う水制先端で異なる水位をとることができるため，互い違いの振動を再現可能と考えられる．これらの点を考慮して，本数値解析では水制区間を一区間だけ考慮した周期境界条件（以下，「1 span条件」と呼ぶ）と，二区間を考慮したもの（以下，「2 span条件」と呼ぶ）との二種類を採用し，計算結果を比較した．**図-4**はE10のケースを対象とした数値解析で，1 span条件と 2 span条件を比較したものである．このとき平均流速コンターは鉛直方向に8分割したうちの底面から5つ目，流速ベクトルは6つ目の位置で表した平面流況である．

1span条件では 2 span条件に比べて非定常性が弱まり，大規模渦の規模が小さくなる．さらに，数値解析結果より，1 span条件では流れの横断方向の揺動も小さいことが確認された．また，2spanモデルの結果では，左右の水制区間の大規模渦の位相がほぼ半波長ずれている．これより，**図 3 -(b)** に示すような水面振動，すなわち，水制間の中央付近に 1 個の節を有する主流方向の振動（以下，これを 1 次モード水面振動と呼ぶ）の存在と，これに伴った大規模渦の発生・進行が示唆される．

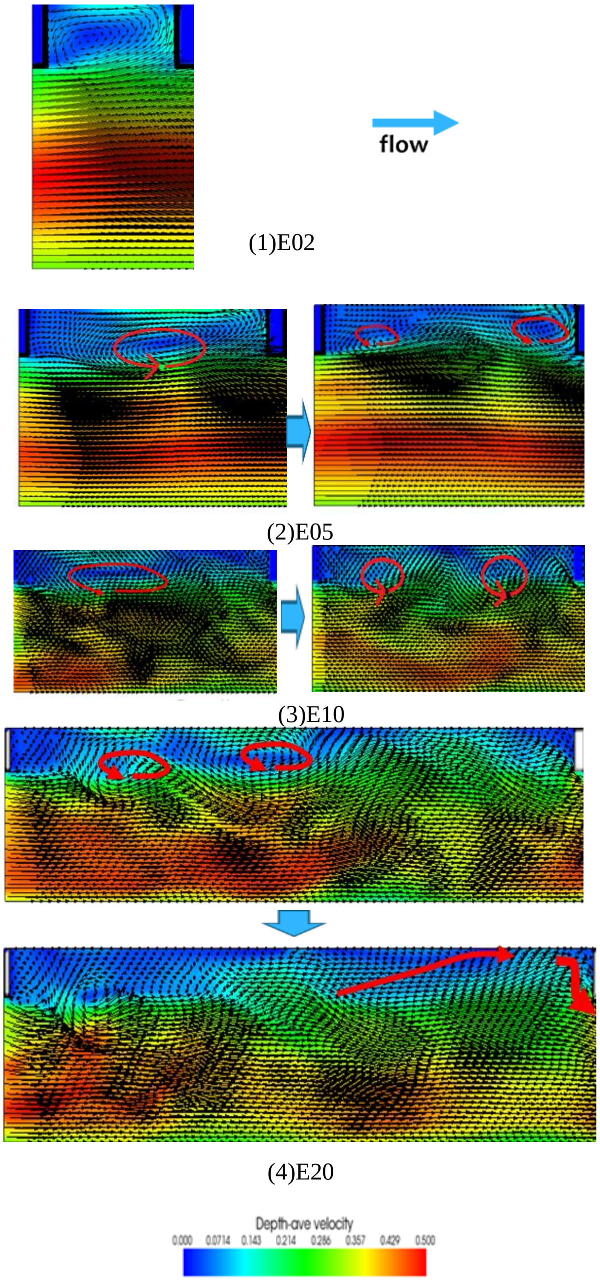


(a) **1span** 条件



(b) **2span** 条件

図-4　1span 条件と 2span 条件による瞬間平面流況
（水深平均流速コンターと流速ベクトル）

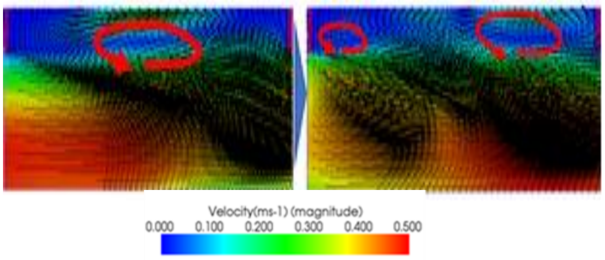


図−6 数値解析結果における平面流況（3次元，コンター凡例とベクトルスケールは各ケース共通）

3.平面流況に関する考察

2span 条件のアスペクト比の異なる 4 ケース流速ベクトルと平均水深流速コンターの瞬間映像図を**図−6** に示す．このとき平均流速コンターは鉛直方向に底面から 8 分割したうちの 5 つ目，流速ベクトルは 6 つ目の位置で表した平面流況である．

2span 条件での数値解析析結果として，E02 のケースは既往の実験結果とは異なり定常な渦が観測された。非定常な渦が明確に現れなかったのは，全ケースで長さ 5mm の正方形格子で一定としているため，水制間隔の絶対値 E02 では界面における相対的な計算格子の解像度が低いためと考えられる。他のケースは，既往の実験



図−7 数値解析結果における平面流況（2次元，2span 条件，E10）

結果と同じように大規模渦を観測することができた．また，アスペクト比 5 以上のケースでは，渦の位相が異なる 2 つのパターンを表している．図中の赤い矢印は定常な渦を表しているわけではなく，進行する大規模渦を表している．**図-6** のアスペクト比 5 以上のケースは,大規模渦が 1 つの場合と 2 つの場合を示している．E05 のケースでは**図-6(2)**のように渦の進行とともに渦が 1 つから 2 つに変化し，渦が下流側で水制に衝突し壊されすぐに 1 つの状態に戻る．

一方,アスペクト比が大きい E20 のケースでは,長時間大規模渦の数が 2 つとなっていることが観測された．また E20 のケースでは，主流が左岸に再付着していることも実験同様観測された．

以上より,大規模渦の再現性は，定性的に良好ということができる．

図-7 は，既往の 2 次元解析結果の一例[1)2)]であり，流速ベクトルと流速絶対値コンターを示している．2 次元（既往の結果）と 3 次元の解析結果を定性的に比較すると，アスペクト比が大きい条件で大規模渦が複数発生・振興することなど共通するところが多いが，相違点としては，3 次元計算の方がより流れが複雑で，規模の小さい渦の発生が見られる点などは 2 次元計算とは異なる結果となった．この理由に関しては今後さらなる検討を必要とする．

4. 抵抗とアスペクト比の関係

図－8 は，水理実験[1)2)]，及び数値解析（3 次元の 1span 条件と 2span 条件，2 次元の 2span 条件[1) 2)]）における水制区間全域における平均水深（m）とアスペクト比のグラフである．縦軸が水深（m），横軸がアスペクト比である．またこのグラフはアスペクト比，4 つのケースでの平均水深を直線で結んだものである．

2span 条件の解析結果から,実験結果と同じように抵抗がピークとなるアスペクト比が存在することがわかる．

実験結果では,アスペクト比 5 付近でピークとなり,数値解析では 2 次元，3 次元の結果は，それよりも少し大きな地点で最大となっている．これらのことからアスペクト比は 5〜10 付近で水深が最大となることがわかる．また 3 次元と 2 次元の 2span 条件を比較すると,3 次元の解析結果はより水深が実験結果に近い値をとること，2 次元計算では抵抗を過少評価することなどがわかる．

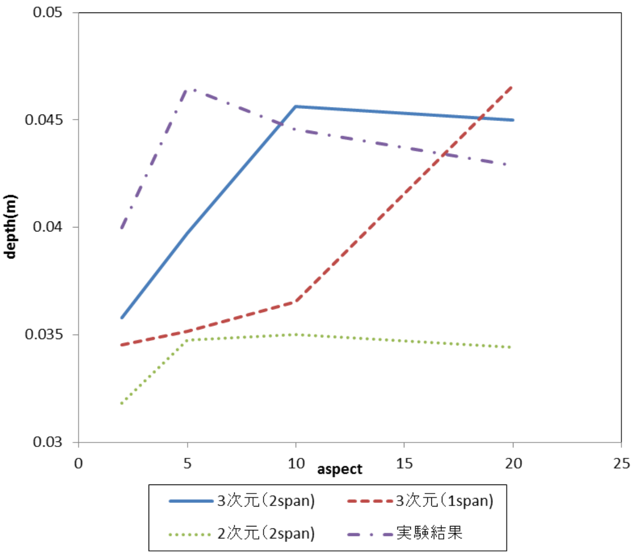


図-８実験および数値解析（１スパン条件，２スパン条件）における抵抗とアスペクト比の関係

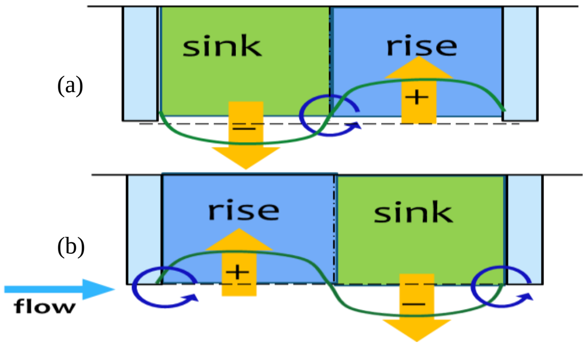
一方，1span 条件では，ピークの存在は再現されず，アスペクト比の増大とともに抵抗が単調増加するという実験とは全く異なる結果となったこのことから水面振動が拘束された状態では１次モードは起きにくく１次モードと抵抗のピークは密接に関係していると考えられる．

なお実験結果と解析結果（2span 条件）の抵抗のピークの位置がややずれているが，このことに関しては，さらなる検討を必要とする．

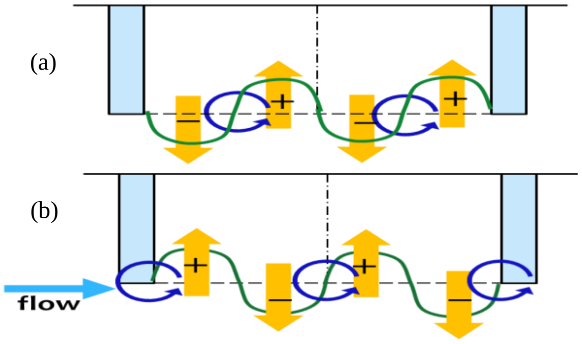
5．非定常大規模渦の個数と水面振動の関係

まず，界面を進行する渦数が１個の場合について考える．水面振動の１次モードは水制域中央付近に節を１個有する振動であることから，水制域の上流側半面と下流側半面の水の出入りに着目する．図-9の (a) の状態，つまり，界面の中央に大規模渦が存在する場合，渦の回転方向と，それに伴う流れの出入りを考慮すると，水制域上流側半面で流出，下流側半面で流入となり，これに応じて，上流側半面の水位が上昇，下流側半面で下降する．渦が進行していき，図-9 (b) の状態となり，この場合の渦による水制域内への水の出入りは，(a) の場合と全く逆となり，これにより，上流側半面の水位が上昇，下流側半面で下降となる．この図-9の (a) と (b) の状態は渦の進行とともに交互に起きるため，１次モードの水面振動が大きくなる．

次に界面を進行する大規模渦数が２個の場合について考える．これは，今回の条件ではアスペクト比が10以上の場合に相当する．まず，図-10 (a) のような位置に２つの渦が存在する場合，水制域の上下流側半面の水の出入りは渦の励起する流速分布によって流入と流出が打ち消し合い，それぞれゼロとなる．渦が進行していくと，図-10 (b) の状態となるが，この場合も，上下流側半面の水の出入りはやはり打ち消し合い，ゼロのままである．つまり，渦の進行に伴ういかなる位相を考えても，半面ごとの水の出入りは常にゼロであり，１次モードの水面振動は生じにくいことになる．



図－9 渦が１個の時の水面振動



図－10 渦が２個の時の水面振動

したがってアスペクト比5～10付近で抵抗が最大となっているのは大規模渦２個の時間が短いことと関係していると考えられる．

6. まとめ

本研究は，非越流連続水制場のアスペクト比が抵抗特性および流況に及ぼす影響を３次元数値シミュレーションと実験結果の比較を通じて考察したものである．以下に結論を示す．

１. 連続水制場での流況は，大規模渦 1 次モードの水面振動に影響する. またアスペクト比 5～10 では水制区間内で大規模渦が１個から２個へ，２個から１個へ移り変わる．

2. 水深-アスペクト比のグラフから，アスペクト比が 5～10 付近で抵抗がピークとなる．また 3 次元計算では抵抗増加に伴う水位上昇を適切に評価できるが，2 次元計算は過少評価となることが示された．

3. 流れの抵抗には大規模渦の個数と１次モードの水面振動の相互関係が大きく影響することが指摘された．

参考文献

1) 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. 1-48，2014

2) 木村一郎，米森一貴，清水康行：連続水制のアスペクト比が流れの抵抗に及ぼす影響，応用力学論文集，印刷中，2014