

水制上流に設置された低層構造物の洗掘抑制効果に関する研究

指導教員 富永晃宏 教授

富田和希

1. はじめに：日本では、各河川でダム建設や砂利採取が盛んに行われた。その結果、上流からの土砂供給量が減少し、河川構造物周辺に局所的な深掘れの傾向が顕在化し被害をもたらした。近年、河川構造物の水制が河川環境に多様性を与えるとして注目されており、多くの研究が行われた。しかし、洗掘防止に関する研究は数少なく、水制の長期的な運用を目指すためには洗掘抑制方法を検討する研究が必要である。そこで、本研究では水制前面に本水制より高さの低い障害物（導流工）を設置することを提案し、この障害物の設置間隔や高さの適切な設定方法を検討する。検討する方法として、移動床実験により洗掘抑制効果を、数値解析によりそのメカニズムを検討した。また、数値解析は固定床実験と比較することで精度を確かめた。

2. 実験の方法：実験水路は長さ 13m、幅 60cm の直線開水路を使用し、水路勾配は 1/500 とした。固定床実験の場合、底面は砂を散布し粗度を与えたものとし、移動床実験では平均粒径 $d_m=0.611\text{mm}$ の一様砂を厚さ 11cm で敷き詰め実験を行った。実験条件を表-1 に示す。摩擦速度が限界摩擦速度を超えており、通水中に砂の移動が見られたため動的洗掘とみなせる。水力条件等は一つで固定し導流工の設置条件のみを変更した。設置形式については図-1 に示す。

流速計測には 2 成分電磁流速計を使用し、水面形の計測にはポイントゲージを使用した。移動床実験では通水後の河床形状をレーザー距離計により計測した。

3. 河床変動と洗掘抑制効果：導流工を設置することによる河床変動特性を検討した。図-2 に水制単体の case0-t4 と case2-d10 の河床高コンター図を示す。全ケースにおいて、水制、導流工の前方から側方で深い洗掘が見られ、水制後方で堆積が発生している。case0-t4 では目視において、水制先端から洗掘孔が拡大していく。そして洗掘孔拡大とともに、水制前面で砂が上流側に移動する傾向が強くなり、馬蹄形渦が発生していることが考えられる。また、洗掘孔縁の斜面では水中安息角に到達し砂がずり落ちる現象が発生するため、洗掘孔内側へ砂が運ばれ、その後は洗掘孔内部の渦によって水制を迂回するように下流へ砂が運ばれている様子が確認できた。導流工を設置した case2-d10 を見ても同様に水制前面で洗掘が発生しているが明らかに洗掘孔が小さくなっている。また、水制背後の堆積は単体時より上流側で高く堆積している。

ここで、導流工を設置することでどの程度洗掘が抑制されたか、水制周辺 5cm のみを対象とした洗掘体積を概算した。洗掘体積の範囲模式図を図-3 に示す。また、各ケースの局所洗掘体積を V_c 、case0-t4 の局所洗掘体積を V_{c0} とし、case0-t4 に対する洗掘体積の割合 V_c/V_{c0} を図-4 に示す。まず、導流工高さが高い

表-1 実験条件

流量 Q [m ³ /s]	水深 h [cm]	断面平均流速 U_m [cm]	フルード数 Fr	レイノルズ数 Re	動粘性係数 ν [cm ² /s]	水路勾配 i
0.0151	6.0	42.44	0.553	28199	0.00903	1/500

摩擦速度 u_* [cm/s]	中央粒径 d_{50} [mm]	平均粒径 d_m [mm]	限界摩擦速度 u_{*c} [cm/s]	無次元掃流力 T_*	通水時間 [min]
3.13	0.586	0.611	1.80	0.099	60

ケース名	水制天頂高 t [cm]	導流工天頂高 Tt [cm]	設置間隔 d [cm]	流量 Q [m ³ /s]	水深 h [cm]	フルード数 Fr
case0-	t1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4		0.0151	6.0	0.553
case1-	d5, 10, 15		1			
case2-	d5, 10, 15		2			
case3-	d5, 10, 15		3			
case4-	d5, 10, 15		4			

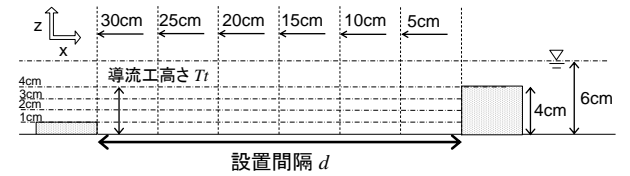


図-1 模型の設置模式図

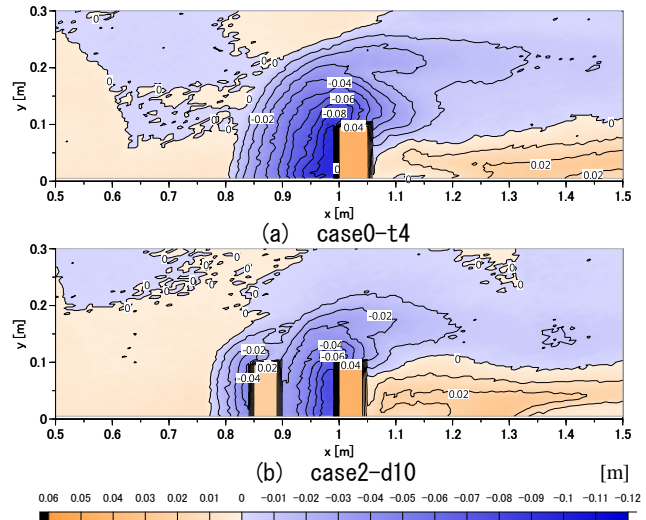


図-2 模型の設置模式図

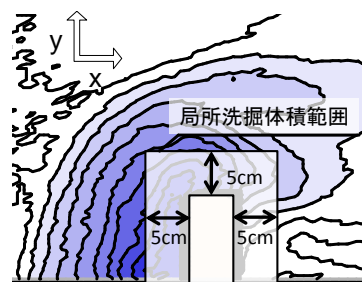


図-3 局所洗掘体積範囲

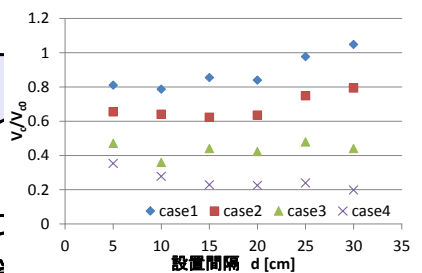


図-4 局所洗掘体積

ものほど洗掘が小さくなる傾向が見られた。ただし、実際には case3, case4 については水制周辺よりも導流工周辺の洗掘孔のほうが大きくなっているが本研究では水制自体の洗掘抑制効果に着目している。設置間隔による違いは case1 では d10, case2 では d15 まで洗掘体積が若干減少し、間隔が広くなるにつれて増加する傾向が得られた。case3, case4 についても一定間隔までは設置間隔が広くなると洗掘が減少する傾向が見られるが、d30 でも減少している。これは上流からの給砂による埋戻し現象が確認されている。ここで図-5 に case0 における水制背後の堆積を横断方向(y=0~0.1m)に積分した単位長さあたりの堆積縦断面図を示す。これより、模型高さが高くなるほど、その背後の堆積が増加することが分かり、特に模型高さ 3cm では 0.3m 付近で堆積量が上昇している。そして、図-6 に case0-t4, case2-d10, case3-d30 における局所洗掘体積の経時変化を示す。局所洗掘体積の経時変化を見ると case3-d30 では 5 分以降で洗掘体積が減少している。このことから、導流工が高く、設置間隔が広いと水制の洗掘孔への給砂量が上昇し、埋め戻されると考えられる。

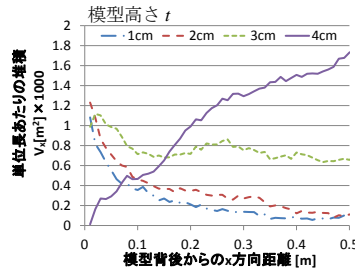


図-5 単位長さあたりの堆積縦断面図

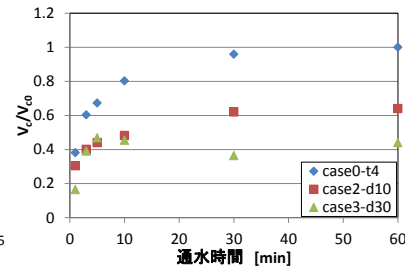


図-6 局所洗掘体積、経時変化

局所洗掘は前方、側方、後方といった各位置で原因となる局所流が異なる。そこで、洗掘体積をそれぞれの部分で分けることにより、各要因の増減を検査することができる。洗掘体積を前方 V_f 、側方 V_s 、後方 V_b とし、図-7 に局所洗掘体積に対する割合を示す。全体的に case4 は異なる傾向を示している。水制前方では設置間隔が狭いときに洗掘の割合が大きくなり、側方はあまり変化が見られない。そして、後方では設置間隔が広がるほど割合が大きくなる傾向が得られた。これらは設置間隔が広がるほど水制単体時の割合に近づいている。水制前方では下降流や馬蹄形渦、後方では後流はくり渦が原因として考えられている。そこで、数値解析によりその局所流の強弱を確認する。

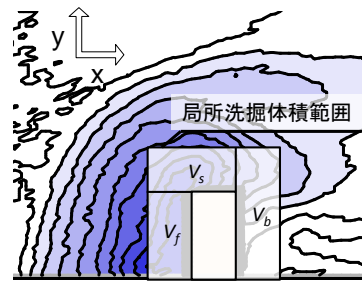
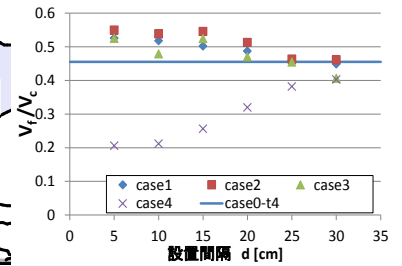
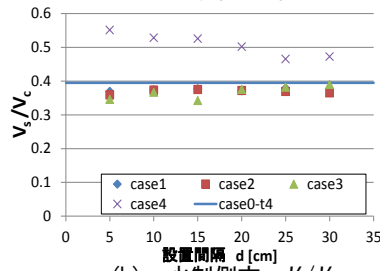


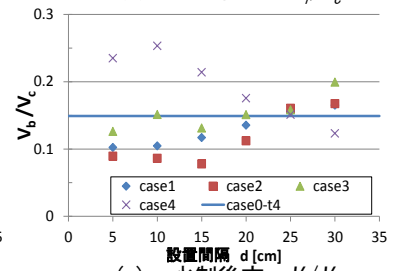
図-7 分割部分の模式図



(a) 水制前方 V_f/V_c



(b) 水制側方 V_s/V_c



(c) 水制後方 V_b/V_c

図-8 各位置における局所洗掘体積

4. 固定床実験と数値解析：局所流を確かめる前に、固定床実験と数値解析を比較し精度を検証する。

本研究では水制、導流工間の渦構造の再現が重要であることから乱流モデルに LES を適用した。LES における空間粗視化された連続式と運動方程式は次のようになる。

(連続式)

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (i=1,2,3) \quad (1) \quad \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_i} + \hat{u}_j \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} = F_i - \frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\tau_{ij} + 2\nu \hat{D}_{ij}) \quad \therefore D_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

(運動方程式)

ここに、上付ハットは空間平均操作を示す。 F_i は外力項、 p は圧力、 D_{ij} は歪速度テンソルである。本研究では標準 Smagorinsky モデルで計算したため、 τ_{ij} は次のようになる。

$$\tau_{ij} = -2\nu_{SGS} D_{ij}, \quad \nu_{SGS} = (C_s f_s \Delta)^2 D_{ij}, \quad \Delta = \sqrt[3]{\Delta_x \Delta_y \Delta_z} \quad (3)$$

Smagorinsky 定数 C_s は 0.18 とした。 f_s は van Driest の壁面減衰関数であり、以下のとおり定義される。

$$f_s = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{A^+}\right), \quad y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu}, \quad u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (4)$$

上述の基礎式を基に MAC 解法で瞬間流速分布を解いた。移流項スキームは 3 次精度風上差分、時間微分項には 2 次精度 Adams-Bashforth 法を用いた。壁面および自由水面境界には流速の 3 成分とも No-Slip 条件を与えた。

水面は、水平位置(x_1, x_2)について次式により計算する。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u_1 \frac{\partial h}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial h}{\partial x_2} - u_3 = \frac{\partial \tau_{h1}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{h2}}{\partial x_2} \quad (5)$$

右辺はサブグリッド項であるが本計算では無視している。式(5)により計算された水位に応じて水面での境界が時間的に変動し、水面の移動に合わせてメッシュが等間隔に再配置される。

ここで水制前面の底面近くでの再現性について検討するため、 $x=0.99\text{m}$ (水制前面 $x=1.00\text{m}$)、 $z=0.01\text{m}$ における流速分布を図-9 に示す。比較には導流工の影響が再現できているかを見るため、case0-t4 と case2-d10 を検討した。精度には問題があるが、堰上げ効果により流速 U が $y \leq 0.1\text{m}$ で減少していることや、水はねにより $y=0.1\text{m}$ 付近で流速 V が上昇、また、下降流が発生し、導流工を設置することで強くなっているといった現象は再現されているため、ケース間の比較検討に用いることはできる。

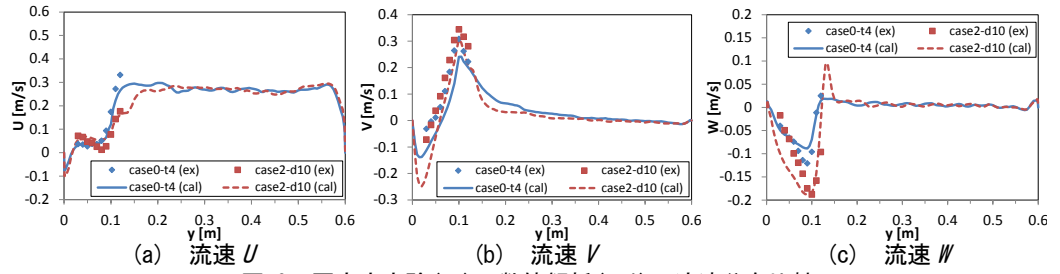


図-9 固定床実験(ex)，数値解析(cal) 流速分布比較

5. 数値実験：この数値解析によりケース間の洗掘特性の原因を検証する。初めに水制前面の洗掘要因として、馬蹄形渦や下降流が考えられるため、水制前面の最大下降流速を見る。各ケースの最大下降流速を W_{\min} 、case0-t4 のものを $W_{\min 0}$ とし、 $W_{\min} / W_{\min 0}$ を図-10 に示す。また、水制と導流工間の上面からの流量を図-11 に示す。これより、設置間隔が狭いケースほど下降流速が大きくなるが、水制への流入量は減少している。このことから、導流工を設置した場合、下降流速を加速させる原因として、導流工越流時の剥離など水制と導流工間で渦度が集中することが考えられる。

次に、水制前面の馬蹄形渦の評価に、ヘリシティ密度を用いた。これは乱流の秩序だったコヒーレント構造を記述するのに適した概念であり、速度ベクトルと渦度ベクトルの内積で以下のように定義される。

$$h = u \cdot \omega \quad (6)$$

ヘリシティが大きくなるほどエネルギーカスケードを引き起こす要因が減少することから、乱流構造の持続性と密接に関わるスカラー量である。図-12 に $z=0.01\text{m}$ におけるヘリシティ密度のコンター図を示す。比較するケースは case0-t4、case2-d5、case2-d10 とし、水制と導流工間の渦構造を検討する。case0-t4 では水制先端付近の上流側で正、下流側で負の値が増加している。正の値を示したとき、右ねじの法則に従う方向に回転しているとしているため、正の値が上昇する領域では馬蹄形渦が、負の値の領域では、それに伴う後流渦が持続されていると考えられる。case2-d5 では水制前面で壁面から水制先端にかけて値が上昇している。そして、水制先端での負の値は単体時と比べると範囲も値も小さい。case2-d10 では導流工背後の壁面近くから水制先端まで正の分布が広がっている。このことから、導流工越流による剥離渦が水制前面の馬蹄形渦と相互に作用していると考えられる。そのため、導流工の設置間隔が狭いものほど渦に起因する下降流が強くなり、水制前面の洗掘を促すと考えられる。

これまでの結果では導流工を設置したことで、特に設置間隔が狭い場合は洗掘要因が強くなる一方で、水制単体時と比較すると、洗掘が促進される結果のみが得られ、抑制はされない。そこで、河床変動に伴う流れ構造の変化を検討することで洗掘抑制要因が見えてくると考えられる。そこで、移動床実験によって得られた河床高を用いて、流れ構造の経時変化を検討した。

図-13 に case0-t4 と case2-d10 の $x=0.98\text{m}$ 、 $y=0.1\text{m}$ における鉛直方向流速 W の鉛直分布の経時変化を示す。流速が 0 となっている所は河床である。また、図-14 に図-11 と同様に算出した水制前面流入量を示す。case0-t4 は導流工がないため、 $z=0.01\text{m}$ の断面で計算した。

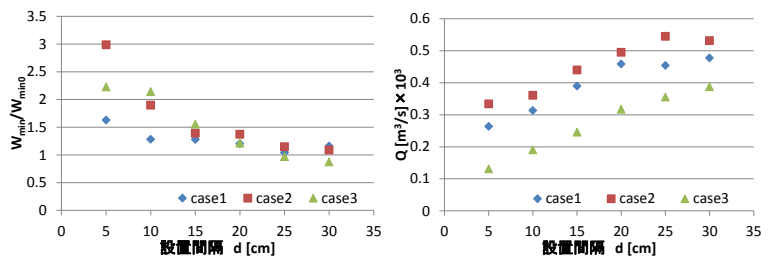


図-10 水制前面最大下降流速

図-11 水制前面流入量

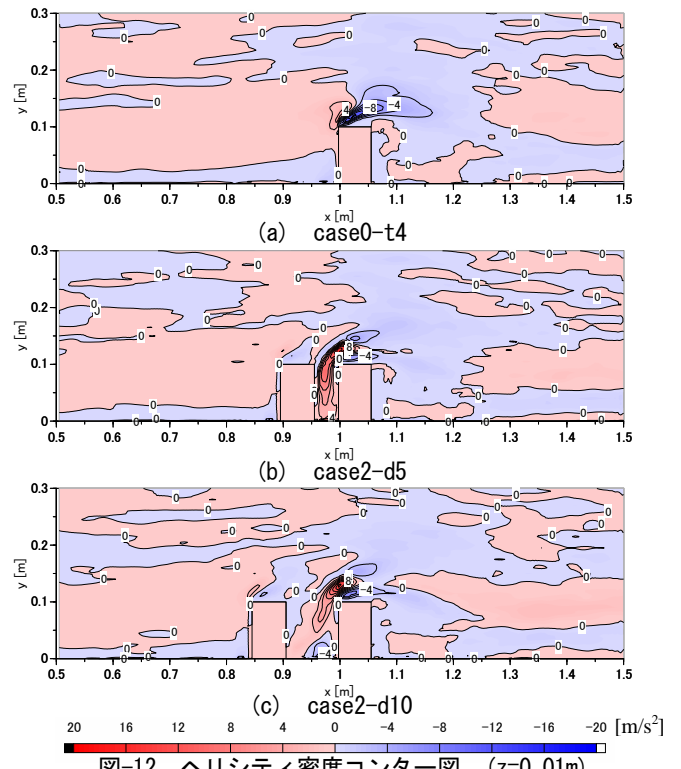


図-12 ヘリシティ密度コンター図 ($z=0.01\text{m}$)

case0-t4 では $z=0.02\text{m}$ と河床の中間に位置する点で下降流速のピークが発生しており、時間の経過とともにピークが低層に移動し、流速が上昇している。それに対し、case2-d10 ではピークが $z=0.02\text{m}$ と -0.01m 付近の 2 か所で見られるが、時間の経過によるピークの発生位置の変化はなく、流速は徐々に低下している。この原因として、水制前面流入量を見ると、case0-t4 は初期の状態より流入量が上昇しているが、

case2-d10 では若干減少しているがあまり変化がない。これより case2-d10 では導流工が存在することで河床変動による水制上流側の流況の変化が小さく、水制単体は河床変動により流入量が上昇するため洗掘が進行すると考えられる。

次に、水制背後の洗掘要因について検討する。水制背後は後流はくり渦が要因として考えられるため、水制周辺の圧力分布から剥離現象を検討する。水制前面の根元を始点とし、水制を回り込む長さを $\text{length}(\text{m})$ とし、 length の定義の模式図を図-15、横軸に length 、縦軸に圧力の図を図-16 に示す。圧力分布は $z=0.01\text{m}$ の断面とし、比較対象は case0-t4 と case2 とする。case0-t4 では水制先端付近の $\text{length}=0.1\text{m}$ 付近で圧力が急激に減少しているが、導流工を設置することで圧力のピークが水制先端から離れ、圧力勾配が小さくなっており、設置間隔が広がるにつれて case0-t4 に近づく。これより導流工を設置することで剥離点が水制前面に近づき、圧力勾配が減少することで剥離渦の影響が小さくなっていると考えられる。

次に水制背後における乱れエネルギーの供給と拡散について検討する。まずは、 $1.05\text{m} \leq x \leq 1.50\text{m}$ 、 $y=0.1\text{m}$ 、 $z=0.01\text{m}$ における流速 W について横軸に時間をとった時空間表示を図-17 に示す。時空間表示では斜めの縞パターンを示していることから、流体塊がほぼ様な速度で流下方向に移流していることが分かる。そのため、この範囲で乱れエネルギー分布を見ることで乱れエネルギーの供給と拡散を検討できる。乱れエネルギーは次式により定義する。

$$q^2/2 = (u'^2 + v'^2 + w'^2)/2 \quad (\because u'^2, v'^2, w'^2 \text{ は乱れ強度}) \quad (7)$$

図-18 に case0-t4 と case2 の乱れエネルギー分布を示す。これより、case0-t4 と比べ、より上流側でエネルギーが供給され、設置間隔が広いほど値が上昇しており、剥離渦が強くなっていることが推測できる。

6. おわりに：これまでの結果をふまえて、導流工の適切な設置についていくつか提案する。

- ① 導流工高さが高くなるほど洗掘抑制効果は大きくなるが、導流工自体の洗掘が大きくなるため、導流工の高さは水制に対し、0.5 倍程度が適切である。
- ② 導流工と水制の設置間隔は狭すぎると渦度が集中し、広すぎると導流工の効果が小さくなる。そこで渦度が集中しない程度に、または水制の洗掘孔と一体化しない程度に間隔をあけて設置することが適切である。

本研究では水理条件を一つのもので固定しているが、他研究より越流、非越流といった条件の違いではどちらも洗掘抑制効果が得られており、設置間隔の違いによる傾向も近い。そのため、実用化の際は本研究である程度の判断をすることができると考えられる。しかし、詳細な決定のためには、精度の高い流れ場の解析と河床変動解析を行う必要があると考えられる。

参考文献： 富田和希, 富永晃宏：導流工設置による水制工周辺の流れ構造と洗掘抑制効果, 水工学論文集, 第 57 巻, 2013.

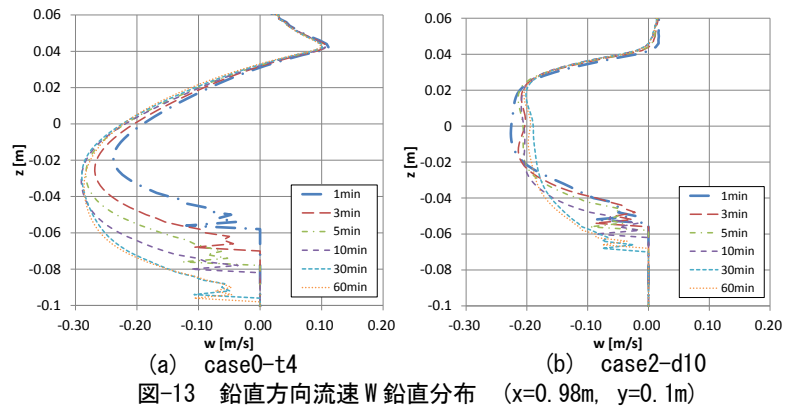


図-13 鉛直方向流速 W 鉛直分布 ($x=0.98\text{m}$, $y=0.1\text{m}$)

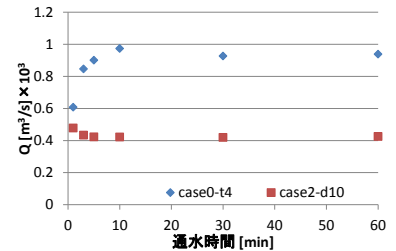


図-14 水制前面流入量

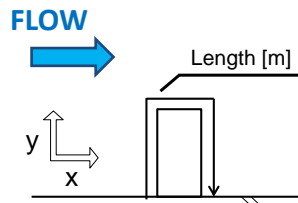


図-15 length 模式図

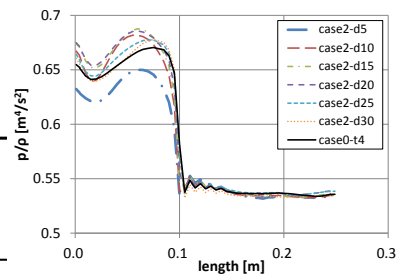


図-16 水制周辺圧力分布

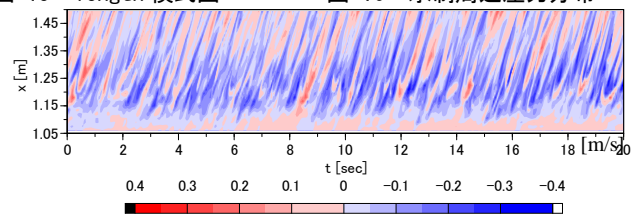


図-17 流速 V 時空間表示 ($y=0.1\text{m}$, $z=0.01\text{m}$)

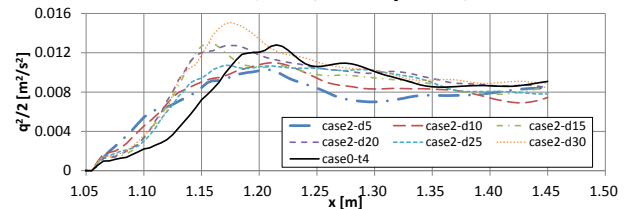


図-18 乱れエネルギー分布 ($y=0.1\text{m}$, $z=0.01\text{m}$)