

河道内樹木群による混合砂礫河床の変動と 表層土砂の粒度変化に関する研究

VARIATION OF BED ELEVATION AND GRAIN SIZE DISTRIBUTION BY THE MULTIPLE ROWS OF CYLINDERS IN AN OPEN CHANNEL

高岡広樹¹・橋本晴行²・池松伸也³・下大迫博志¹

Hiroki TAKAOKA, Haruyuki HASHIMOTO, Shinya IKEMATSU and Hiroshi SHIMOOSAKO

¹ 八千代エンジニアリング株式会社九州支店(〒810-0062 福岡市中央区荒戸 2-1-5)

² 九州大学大学院工学研究院(〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

³ 九州大学大学院工学府(〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

Key Words: bed variation, grain size distribution, riparian trees

1. はじめに

河道内の樹木群は、洪水時には流れを減速し魚の避難場所になるとともに、土砂堆積を引き起こし、流れや河道地形に変化を与えている。現地では、樹木群は、有限なスケールで局所的に存在している場合がほとんどである。そのような観点から、水路内に局所的に樹木群を設置し、その周辺の河床変動を調べる研究が行われてきた^{1), 2)}。

著者らは、河床材料として一様砂礫を用いた移動床水路側岸部に、局所的に樹木群を配置し、樹木群周辺の河床変動を調べる実験を行ってきた³⁾。その結果、樹木群を設置した側では、樹木群上流端付近で堆砂が生じ、下流端付近で洗掘が生じた。また、樹木群を設置していない側では、樹木群の対岸側で著しい洗掘が生じることが分かった。また、河床変動計算により、実験結果の検証を行い、樹木群による流れの阻害影響によって対岸側に流れが集中するため、著しい洗掘が生じることが明らかになった⁴⁾。

しかしながら、実河川では、河床材料は混合砂からなり、樹木群による混合砂の河床変動と土砂の分級については未解明な部分が多く残っている。

本研究は、樹木群による混合砂礫河床の変動と粒度変化について調べたものである。まず、河床材料として広範な粒度分布を持つ混合砂礫を用い、直線水路において樹木群模型を局所的に設置した場合について実験を行う。次いで、河床表層土砂の粒度変

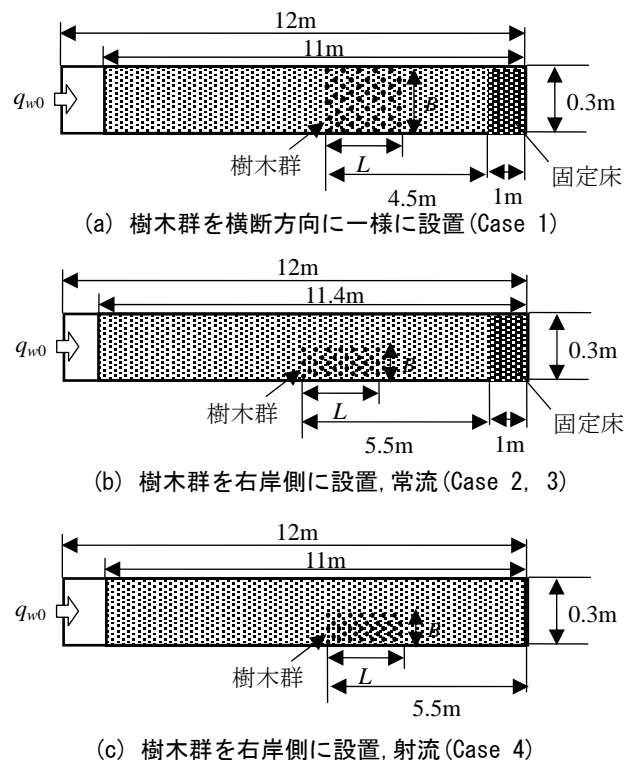


図-1 水路平面図

化を考慮した河床変動計算を行う。最後に、計算結果と実験結果との比較、検証を行い、樹木群周辺の河床変動と河床表層土砂の粒度変化について考察する。

2. 河床変動と粒度変化に関する水路実験

樹木群による河床変動と粒度変化を調べるため、直線水路を用いて、基礎的な実験を行った。

2.1 実験方法

実験に用いた水路は、全長 12m、幅 0.3m の両側アクリルライト製可変勾配水路である(図-1)。実験は樹木群の配置を変え、2種類行った。1つは、樹木群を水路横断方向に一様に、縦断方向に局所的に設置した場合であり(Case 1)、もう1つは縦断・横断方向ともに局所的に設置した場合である(Case 2, 3, 4)。

Case 1 では水路下流端から 1m を固定床、その上流側 10m の区間を移動床とし、下流端から 5.5m 上流に長さ L 、水路全幅に樹木群を設置した(図-1(a))。水路勾配は 1/54 とし、流れは射流である。Case 2, 3 では、水路勾配 1/101 とし、常流条件で通水し、下流端から 1m を固定床、それから上流方向に 10.4m の区間を移動床とし、下流端から 6.5m 上流の位置から右岸側に沿って長さ L 、幅 B の樹木群を設置した(図-1(b))。射流条件(水路勾配 1/54)の Case 4 では、下流端から 11m を移動床とし、下流端から 5.5m 上流の位置から Case 2, 3 と同様に樹木群を設置した(図-1(c))。

樹木群模型は直径 $D=2.0\text{mm}$ のステンレス丸棒を、中心間隔 S_t で千鳥状に配置した。用いた樹木群模型の特性を表-1 に示す。ここに、 λ は樹木群密度(河床単位面積に占める樹木の断面積)、 a は密生度(流体単位体積当たりの樹木の遮蔽面積)である。

河床材料としては、Case 1, 3, 4 では平均粒径 0.60, 0.84, 1.5, 2.0, 3.3, 5.9mm の均一砂を体積比 2 : 2 : 1 : 1 : 1 : 1 で混ぜあわせた砂礫を用いた。Case 2 では、同様の均一砂を同一体積比で混ぜあわせた砂礫を用いた。河床砂の敷厚は、約 10cm とした。また、無給砂の状態、樹木群上流端で平衡流砂量となり、河床侵食の影響を受けないよう、樹木群上流端から上流 6m 程度まで砂礫を敷き詰めた。

上流端からの供給水量は、全ての粒径が移動する流量を設定し、単位幅流量 $q_{w0} \doteq 200(\text{cm}^2/\text{s})$ とした。流砂形態は掃流砂である。河床高は、通水停止後にポイントゲージを用いて測定した。また Case 1 および Case 3, 4 については、下流端において流砂を採取するとともに、通水停止後、表層土砂のサンプリングを行い、粒度試験を行った。採取する土砂層の厚さは最大粒径程度の約 5mm とし、粒径 5mm 以上の砂礫が含まれる場合、それを含めて採取した。実験条件を表-2 に示す。

表-1 樹木群模型の種類及びその特性

樹木群type	A	B
樹木群長さ L (cm)	100	100
樹木群幅 B (cm)	30	7.5
樹木直径 D (mm)	2.0	2.0
樹木間隔 S_t (cm)	3.3	2.0
樹木群密度 λ ($\times 10^{-3}$)	5.77	15.7
密生度 a (1/cm)	0.367	0.1

表-2 実験条件

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
樹木群type	A	B	B	B
砂の平均粒径 d_m (mm)	2.20	2.70	2.16	2.20
$\sqrt{d_{84}/d_{16}}$	2.77	2.73	2.82	2.77
砂の比重 σ/ρ	2.64	2.64	2.64	2.64
水路勾配 I	1/54	1/101	1/101	1/54
水路幅 (m)	0.3	0.3	0.3	0.3
供給流量 q_{w0} (cm^2/sec)	199	200	204	204
通水時間	10分	10分	10分	5分

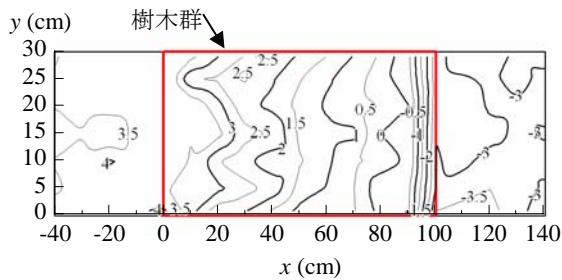
2.2 実験結果

(a) 河床変動

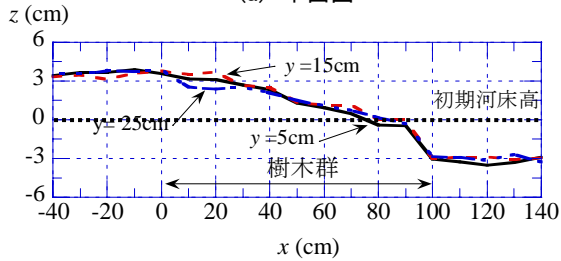
図-3~6 は、各ケースにおける通水停止後の河床高の平面図と縦断図をそれぞれ示したものである。ここに座標軸は、樹木群上流端を原点とし、初期河床に沿って下流斜面方向に x 軸を、右岸から左岸に y 軸を取った。河床高 z は初期河床面から垂直上向きに測定した。

樹木群を水路横断方向に一様に設置した Case 1 (図-2)では、樹木群内部から上流部にかけて横断方向に一様に著しい堆砂が生じ、堆砂高のピークは樹木群上流端付近であることが分かる。また、樹木群下流端から下流では、洗掘が発生している。これは、樹木群上流端付近では、樹木群によるせき上げの影響により流れの掃流力が減少するため、堆砂が発生すると考えられる。また、樹木群との衝突や閉塞による砂粒の停止はあまり見られなかった。一方、樹木群下流端より下流では、せき上げの影響が無くなり、掃流力が回復するため、洗掘が発生すると考えられる。

樹木群を Case 1 と同一区間内、右岸側に設置した Case 2(図-3)、Case 3(図-4)、Case 4(図-5)では、大略的に見ると、樹木群より上流側または入り口付近で堆砂が生じており、特に、緩勾配の図-4, 5 では樹木群中央部においても若干の堆砂が生じている。一

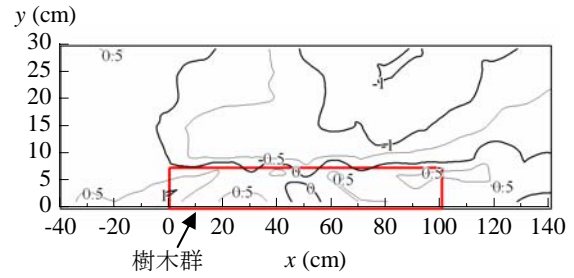


(a) 平面図

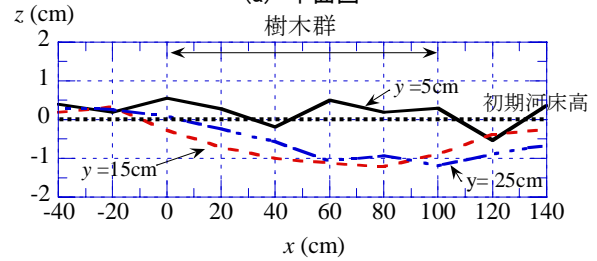


(b) 縦断面図

図-2 通水停止後の河床高 (Case 1)

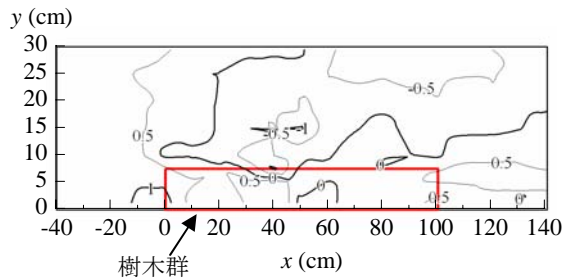


(a) 平面図

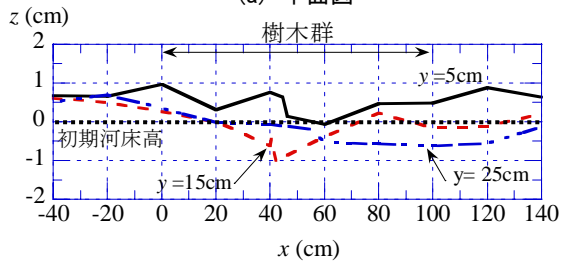


(b) 縦断面図

図-3 通水停止後の河床高 (Case 2)

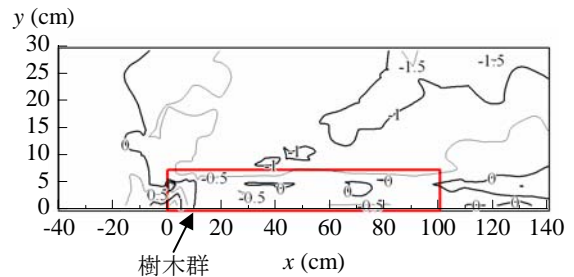


(a) 平面図

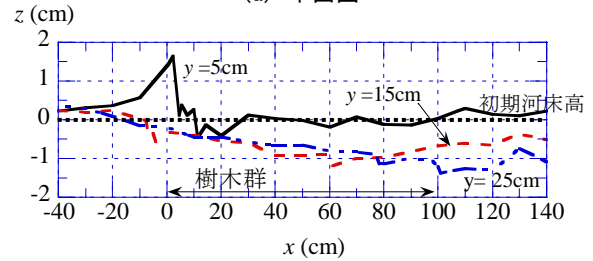


(b) 縦断面図

図-4 通水停止後の河床高 (Case 3)



(a) 平面図



(b) 縦断面図

図-5 通水停止後の河床高 (Case 4)

方、樹木群を設置していない左岸側でも $x=0\text{cm}$ 付近において若干の堆砂が見られる。また、右岸側の樹木群によって右岸側から左岸側に向かう流れが生じ、左岸側に流れが集中し、流速が大きくなり、掃流力が大きくなるため、樹木群から左岸下流側に向かって水路を斜交するように洗掘が起こっている。

(b) 粒度変化

図-6, 7に、Case 1とCase 4における通水後の河床表層土砂のサンプリング範囲と各範囲における粒度分布をそれぞれ示す。図中には、比較のため、下流端において採取した流砂および実験前のオリジナル河床の粒度分布も示している。サンプリング範囲は、微地形の形成や表層土砂の粒度変化に対応して

決定した。

Case 1(図-7)では、樹木群入口から内部にかけて著しく粗粒化しており、樹木群上流で細粒化していることが分かる。

また、Case 4(図-8)では、樹木群内部では粗粒化し、樹木群上流側や左岸側では反対に細粒化していることが分かる。特に、樹木群入口付近の領域5では粗粒化が顕著であった。これは、樹木群によって掃流力が減少したため、粒径の大きい粒子は樹木群内に堆砂するが、粒径の小さい粒子は堆砂せず流下したものと考えられる。

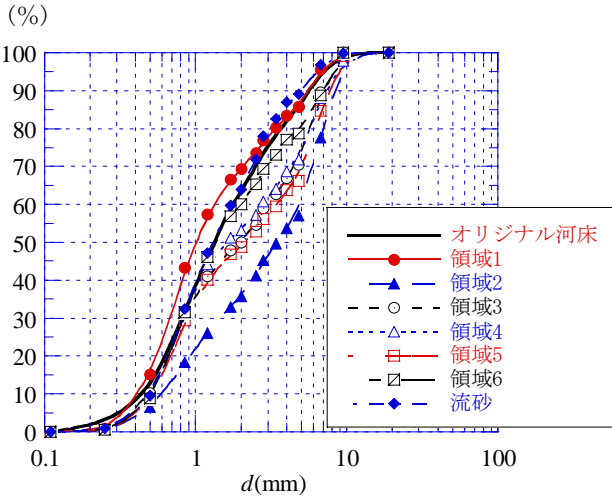
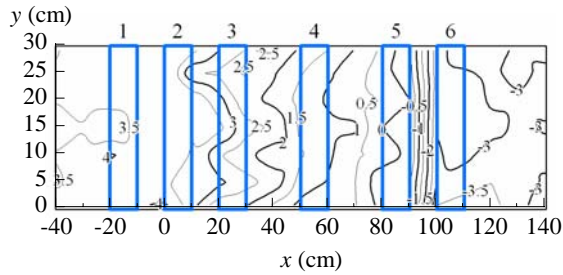


図-6 河床表層土砂のサンプリング範囲と粒度分布 (Case 1)

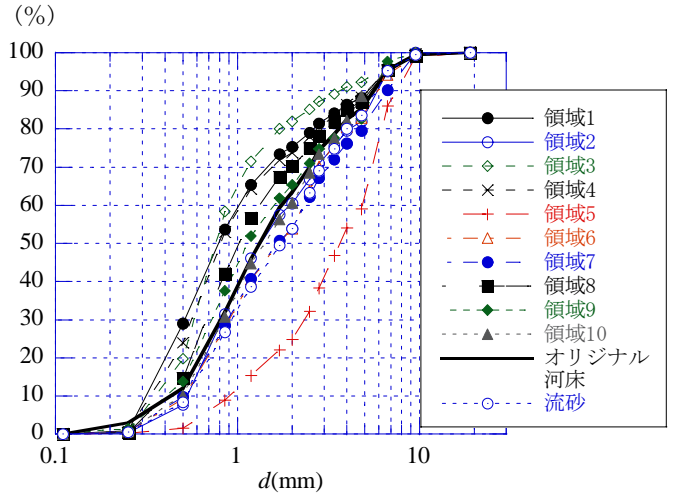
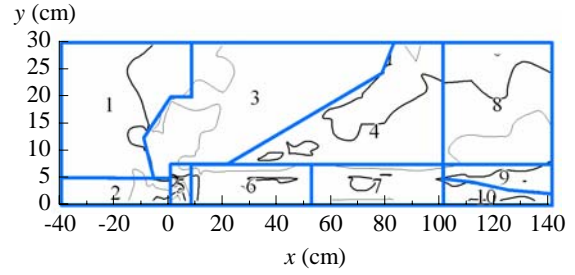


図-7 河床表層土砂のサンプリング範囲と粒度分布 (Case 4)

3. 粒度変化を考慮した1次元河床変動計算

樹木群を水路横断方向に一様に設置した Case 1 を対象に、粒度変化を考慮した1次元河床変動計算を行い、実験結果と比較した。

3.1 基礎式

用いた基礎式は、運動方程式、全相の連続式、河床の連続式と粒度分布の連続式である。運動方程式、全相、河床の連続式は以下の通りである。

(運動方程式)

$$\frac{\partial q_t}{\partial t} + \frac{\partial v q_t}{\partial x} = (1-\lambda)gh \left(\sin \theta - \frac{\partial(h+z)}{\partial x} \cos \theta \right) - (1-\lambda) \frac{v^2}{\phi^2} - \frac{1}{2} v^2 C_D a h \quad (1)$$

(全相の連続式)

$$(1-\lambda) \frac{\partial(h+z)}{\partial t} + \frac{\partial q_t}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

(河床の連続式)

$$(1-\lambda) \frac{\partial C_a z}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

ここに、 q_t : 単位幅当全流量、 h : 水深、 z : 河床高、 θ : 水路勾配、 v : 流れの x 方向流速、 C_a : 最密充填濃度、 ϕ : 流速係数、 C_D : 樹木群の抗力係数、 q_s : 流砂量、 λ : 樹木群密度、 a : 樹木群の密生度である。初期河床に沿って流れ方向に x 軸を、 x 軸から垂直向上向きに z 軸を設定した。また、樹木群外部では $\lambda=0$ 、 $C_D=0$ 、 $a=0$ とした式を用いる。

ここで、式(1)~(3)の他に、粒度分布の連続式が必要である。3.2節で粒度分布の連続式について述べる。

3.2 混合砂礫の粒度変化モデル

平野^{5), 6)}は、流砂は河床表面のごく薄い層にのみ起因し、この層から飛び出した砂粒が流砂となって移動した後、再びこの層に落ち着くという具合に、このうすい層と流砂との間で砂粒を交換しながら河床と粒度分布の変動が進行するものと考え、この薄い層を交換層と定義した。この交換層内において、土砂の連続式を立てることで粒度分布の連続式が求められている。

ここで、河床を交換層の直上直下のどちらで定義するかで粒度分布の基礎式が以下のように若干異なる。本研究では、両式を用いてそれぞれ計算し、その差異についても調べた。

(粒度分布の連続式)

・交換層の直下を河床とした場合

$$(1-\lambda) \frac{\partial(a^* C_a P_j + C_a P_j z)}{\partial t} + \frac{\partial q_{sj}}{\partial x} = 0 \quad (4a)$$

・交換層の直上を河床とした場合

$$(1-\lambda) \frac{\partial(a^* C_a P_j)}{\partial t} + (1-\lambda) C_a P_j \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_{sj}}{\partial x} = 0 \quad (4b)$$

ここに、 P_j : 交換層内において d_j 粒子が占める割合、 a^* : 交換層の厚さである。また、 q_{sj} : d_j 粒子の流砂量であり、次式の掃流砂量式⁷⁾を用いる。

(流砂量式)

$$\frac{q_{sj}}{\sqrt{sgd_j^3}} = P_j \cdot 4.7\tau_{*j}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*cj}}{\tau_{*j}}\right) \frac{1}{\alpha - I_f} \quad (5)$$

ここに、 τ_{*j} : d_j 粒子の無次元掃流力、 τ_{*cj} : d_j 粒子の無次元限界掃流力である。また、全流砂量 q_s は

$$q_s = \sum_{j=1}^N q_{sj} \quad (6)$$

と表される。

3.3 計算条件

基礎式の差分化には、MacCormack 法を用いた。計算対象範囲は、樹木群上流端の 1m 上流から水路下流端までである。

初期条件は、ドライベッドとした。

境界条件は、上流端で一定流量、平衡流砂量を与え、水深 h は等流水深とした。また、下流端では、河床高を一定とした。計算条件を表-3 に示す。

3.4 計算結果と考察

図-8 は、河床高 z と水位 $H(=h+z)$ の計算結果と実験結果を比較したものである。河床高と水位の実験値は、水路左岸からビデオカメラで流れの様子を撮影し、測定した。ここに時間 t は、流れの先端が樹木群上流端に到達した時間を $t=0(\text{sec})$ とした。計算結果は、粒度分布の連続式として式(4a)または式(4b)を用いた結果をそれぞれ示している。河床高、水位ともに計算結果と実験結果は概ね一致していることが分かる。また、粒度分布の連続式の違いによる河床高、水位の差異はほとんど見られない。

図-9 に、通水停止後の河床表層土砂の平均粒径 d_m の実験結果と計算結果を示す。ここで、平均粒径 d_m は初期河床の平均粒径 d_{m0} との比で示している。実験値が計算値に比較して過大となっており、計算値は、ほとんど変化していないが、樹木群内部で粗粒化の傾向が見られる。粒度分布の連続式として式(4a)を用いた場合、その傾向がやや大きい。計算で粒度変化がほとんど起こっていないのは、初期粒度構成の偏りが小さいためであると考えられ、今後、粒度分布の連続式についてさらに検討が必要である。

4. 2次元河床変動計算

Case 4 を対象とし、粒度変化を考慮した 2次元河床変動計算を行う。

4.1 基礎式

用いた基礎式は、 x 、 y 方向の運動方程式、全相、固相の連続式、粒度分布の連続式である。以下にそれぞれを示す。

表-3 1次元河床変動計算の計算条件

時間格子間隔 Δt (sec)	0.05
空間格子間隔 Δx (cm)	10
水路勾配 θ	1/54
流速係数 ϕ	8
交換層内の土砂濃度 C_a	0.6
交換層の厚さ a_* (cm)	2
樹木群の抗力係数 C_D	1
樹木群密度 λ	0.00577
樹木群密生度 a (1/cm)	0.0367
計算時間 T (sec)	600

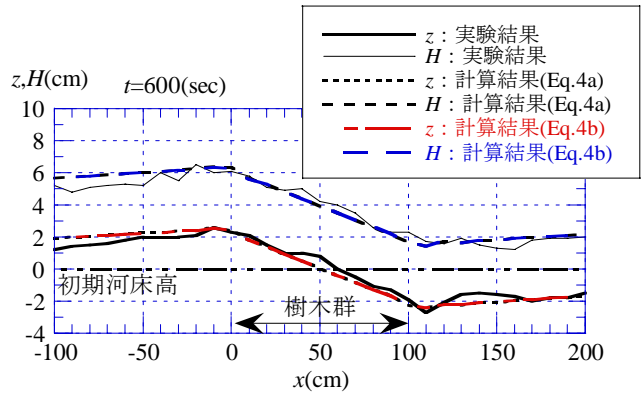


図-8 河床高 z と水位 H の実験値と計算値との比較

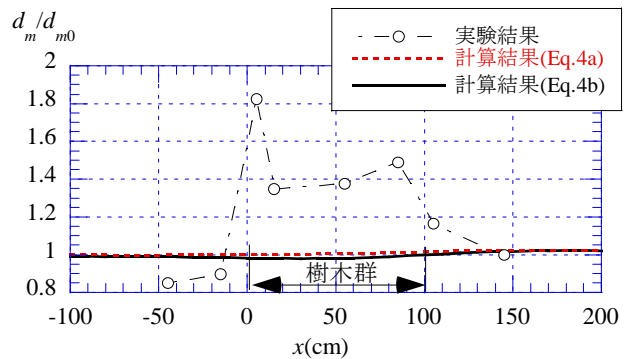


図-9 平均粒径の実験値と計算値との比較

(x 方向の運動方程式)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(UM)}{\partial x} + \frac{\partial(VM)}{\partial y} = -gh(1-\lambda) \frac{\partial(h+z)}{\partial x} - (1-\lambda) \frac{U\sqrt{U^2+V^2}}{\phi^2} - \frac{1}{2} U\sqrt{U^2+V^2} C_{Dh} \quad (7)$$

(y 方向の運動方程式)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(UN)}{\partial x} + \frac{\partial(VN)}{\partial y} = -gh(1-\lambda) \frac{\partial(h+z)}{\partial y} - (1-\lambda) \frac{V\sqrt{U^2+V^2}}{\phi^2} - \frac{1}{2} V\sqrt{U^2+V^2} C_{Dh} \quad (8)$$

(全相の連続式)

$$(1-\lambda) \frac{\partial(h+z)}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

(固相の連続式)

$$(1-\lambda)C_a \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial C_T M}{\partial x} + \frac{\partial C_T N}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

(粒度分布の連続式)

$$(1-\lambda) \frac{\partial (a_* C_a P_j + C_a P_{jz})}{\partial t} + \frac{\partial C_{Tj} M}{\partial x} + \frac{\partial C_{Tj} N}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

ここに、 $M(=Uh(1-\lambda))$: x 方向の単位幅当流量、 $N(=Vh(1-\lambda))$: y 方向の単位幅当流量、 U : x 方向の断面平均流速、 V : y 方向の断面平均流速である。また、 C_T : 流砂濃度、 C_{Tj} : d_j 粒子の流砂濃度であり、

$$C_T = \frac{q_s}{\sqrt{M^2 + N^2}} \quad (12) \quad C_{Tj} = \frac{q_{sj}}{\sqrt{M^2 + N^2}} \quad (13)$$

と表され、 q_s 、 q_{sj} は式(5)、(6)より求められる。

4.2 計算条件

差分はスタッガードスキームを用いて行った。

境界条件として、上流端で一定流量、流砂量を与え、水深 h は等流水深とした。また、下流端では、河床高一定とした。計算条件を表-4 に示す。

4.3 計算結果と考察

図-10 に河床高の計算結果の平面図を示す。樹木群内部で堆砂が発生し、対岸で洗掘が発生している。計算値は実験値(図-6)と比べ、堆砂のピークは小さくなっている。

領域 1, 3, 5, 6, 8(図-7 参照)について、粒度分布の計算結果を図-11 に示す。樹木群入口で粗粒化していることが分かる。しかしながら、実験結果は計算結果より粗粒化していることが分かる。他の領域については、大きな粒度変化は起こっていない。

5. おわりに

本研究では、河床材料として広範な粒度分布を持つ混合砂礫を用い、樹木群を局所的に設置した場合の水路実験を行った。その結果、本研究の実験条件下では、樹木群により樹木群の上流側および樹木群内で堆砂が起こり、樹木群がない対岸下流部や樹林群の出口付近では洗掘が生じた。

また、樹木群が存在する区間の河床表層では、樹木群によって掃流力が減少するため、粒径の大きい粒子は樹木群内に堆砂し、初期の粒度構成に比べ粗粒化することが分かった。

粒度変化を考慮した河床変動計算を行い、計算結果と実験結果との比較、検証を行った。その結果、1次元河床変動計算では、水位、河床高の計算値は、実験値とよく一致しているが、計算値の粒度変化は実験値のそれと比べ過小となった。2次元河床変動計算でも、粒度分布の計算値は実験値よりも変動が

表-4 2次元河床変動計算の計算条件

時間格子間隔 Δt (sec)	0.001
空間格子間隔 Δx (cm)	10
空間格子間隔 Δy (cm)	2.5
水路勾配 θ	1/54
流速係数 ϕ	8
交換層内の土砂濃度 C_a	0.6
交換層の厚さ a_* (cm)	2
樹木群の抗力係数 C_D	1
樹木群密度 λ	0.00577
樹木群密生度 a (1/cm)	0.0367
計算時間 T (sec)	300

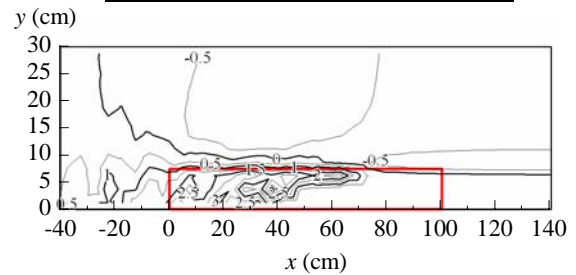


図-10 河床高の計算結果 (Case 4)

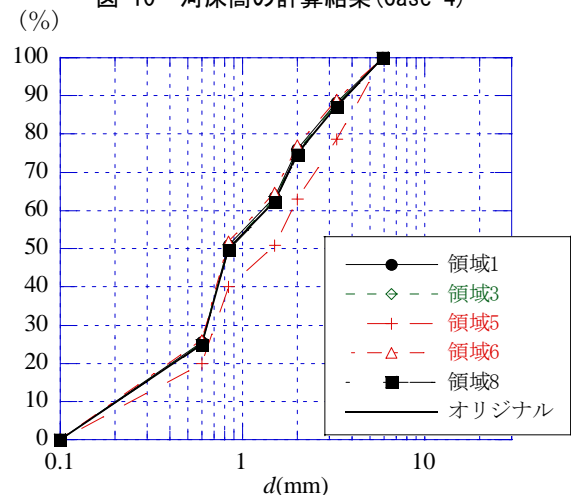


図-11 粒度分布の計算結果 (Case 4)

小さい。これは、粒度構成の偏りが小さいためと考えられ、今後、粒度分布の連続式についてさらに検討が必要である。

参考文献

- 1) 辻本・北村・中川：側岸部植生群落周辺の掃流過程と分級，土木学会論文集，No. 503，II-29，1994.
- 2) 辻本・北村：植生周辺での洪水時の浮遊砂堆積と植生域の拡大過程，水工学論文集，第40巻，1996.
- 3) 橋本・池松・山村・椎木：移動床水路において樹木群が局所的に存在する場合の河床変動，九州大学工学集報，第75巻，第1号，2002.
- 4) 橋本・朴：移動床水路側岸部に樹木群が局所的に存在する場合の河床変動計算，流体力の評価とその応用に関する研究論文集，第2巻，2003.
- 5) 平野：Armorngを伴う河床低下について，土木学会論文集，第195号，1971.
- 6) 平野：混合砂礫河床の変動と平衡河床に関する研究，土木学会論文集，第207号，1972.
- 7) 橋本・平野：掃流状集合流動の抵抗則と流砂量，土木学会論文集，No.545，II-36，1996. (2008. 5. 16 受付)