

勾配急変部を含む直線流路の側岸侵食と河床変動に関する研究

Study on bank erosion and riverbed evolution in straight channel with sudden gradient changes

北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 高橋 圭吾 (Keigo Takahashi)
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 長谷川和義 (Kazuyoshi Hasegawa)
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 中西 哲 (Satoru Nakanishi)

1. はじめに

河川は現在の形に至るまでに様々な変化を遂げてきた。その変化が何に起因しどのようなものであったかを知ることは河川を総合的に維持管理する中で重要な問題である。そこで本研究では、河道形態を変化させる要因の一つである側岸侵食が顕著となる状況を想定し、さらに河床勾配が急激に変化する部分が存在する場合の側岸侵食および河床縦断面形の変化に関する問題を取り上げることとした。

側岸侵食は河道形態を変化させる大きな要因の一つであるため、これまで数多くの研究が行われてきた。平野¹⁾は土粒子に作用する力学的機構から1次元解析を行い、安定横断形状について検討した。また、長谷川²⁾は非平衡性を考慮した横断方向流砂量式を導いているほか、侵食過程の定式化を行った。福岡・山坂³⁾は側岸部と河床部を区分し、その境界に作用するせん断力を詳細に検討することにより直線流路の拡幅現象に関する議論を行っている。このように側岸侵食に関する研究は多々あるのだが、側岸侵食による河床縦断面形状の変化について述べられた研究はまだ少ない。

後藤・北村・辻本⁴⁾は上下流端の境界条件が劇的に変化する状況を想定し、その際の側岸侵食と縦断面形変化の相互作用に関して検討を行っている。しかし、このモデルでは河床低下に起因する側岸侵食のみを扱っているため、拡幅を伴う河床縦断面形変化全般に対し扱うことはできない。流路の拡幅が河床縦断面形に与える影響を解明するにはより一般性の高いモデルの開発が必要である。以上のことを鑑み、著者ら⁵⁾はこれまでに以下のような研究を行い、また良好な結果を得ている。

側岸侵食を低水路部のせん断力で評価できるモデルを開発し、そのモデルから得られる2次元河床変動式を芦田⁶⁾と同様に線形拡散方程式に帰着させた。また室内実験を行い、その実験結果を拡散方程式の解析を用いて表現できるか検証した。さらにそれらを比較することにより理論の整合性を検討した。

本研究ではこれまでのことを踏まえた上で、側岸侵食を伴う状況下で直線流路に勾配急変部を設け、勾配の変化によって側岸侵食が河床縦断面形に与える影響がどのように変化するかについて議論を行う。

2. 理論式

ここでは、側岸侵食による拡幅を伴う1次元河床変動の解析を容易にするために線形拡散方程式に帰着させる形で導く。今回はこれに用いた式と結果のみを示すため、

詳細については文献⁵⁾を参照されたい。

河床縦断面形および河床横断面形の概略図をそれぞれ図-1, 図-2に示す。実験をすることを考え、横断面形は片側のみ侵食が発生する断面と定義する。侵食により水際がBからB'へ移動する、すなわち側岸が実線から破線へと進行し、影の付いた部分の土砂が崩落して河床に堆積するというモデルである。また、縦断方向座標軸の上流側からの距離をx, 横断方向座標軸の片側断面の右岸からの距離をyとし、 z_b は基準面からの河床高、 H_m は側岸天端高を表す。

次の2次元の流砂連続式から1次元の流砂連続式を導き、拡散方程式に帰着させる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) = r \quad (1)$$

ここで、 λ は河床材料の空隙率、 q_{bx} , q_{by} はそれぞれx, y方向の単位幅流砂量である。rは側岸からの給砂量強度を表し、図-2中における影の付いた部分の単位長さあたりの堆積であり、以下のように表すことができる。

$$r = \frac{H}{B} \frac{\partial B}{\partial t} \frac{1-\lambda_H}{1-\lambda} \quad (2)$$

ここで、 λ_H は側岸を構成する材料の空隙率である。また長谷川²⁾によると側岸の時間変化と流砂量との関係は以下の式で表される。

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{-q_{by}(B_l)}{(1-\lambda)(h+H)} \quad (3)$$

この(1), (2), (3)式とMeyer-Peter Muller式を用いて、さらに簡略化のために近似を行うと以下のような拡散方程式が導かれる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = K_1 \frac{\partial^2 z_b}{\partial x^2} - K_2 \frac{\partial z_b}{\partial x} \quad (4)$$

$$K_1 = \frac{42\sqrt{g}}{5(1-\lambda)_s} \left(\frac{nQ}{B} \right)^{9/10} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \quad (5)$$

$$K_2 = \frac{8h}{(1-\lambda)B} \tan \beta_k \sqrt{\frac{gd\tau_{*c}}{s\mu_s\mu_k}} \left(1 - \frac{3}{2} \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \quad (6)$$

式(4)の K_1 および K_2 を定数として扱うことにより、 z_b のxに対する一階微分項を含んだ線形拡散方程式となる。

この拡散方程式を、上下流端の境界条件をそれぞれ $z_U(t)$, $z_D(t)$ とし、初期条件を $\varphi(x)$ としてストークスの方

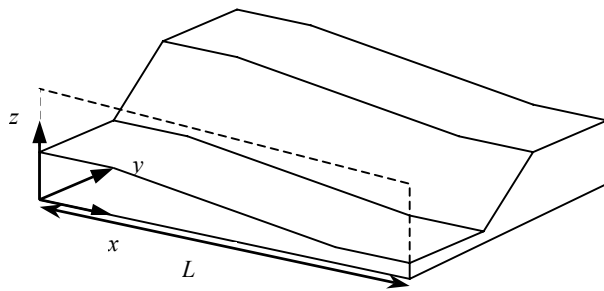


図-1 座標軸の定義

法で解くと以下ようになる。

$$z_b(x, t) = \exp\left\{\frac{K_2}{2K_1}\left(x - \frac{K_2 t}{2}\right)\right\} \times \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \lambda_n x \left[K_1 \lambda_n \int_0^t e^{-\lambda_n^2 K_1 (t-\tau)} \{z'_U(\tau) - (-1)^n z'_D(\tau)\} d\tau + e^{-\lambda_n^2 K_1 t} \int_0^L \phi(\xi) \sin \lambda_n \xi d\xi \right] \quad (7)$$

ここで λ_n は固有値を表し、 $z'_U(t)$ 、 $z'_D(t)$ および $\phi(x)$ もそれぞれ次の通りである。

$$\lambda_n = \frac{n\pi}{L} \quad (8)$$

$$z'_U(t) = z_U(t) \exp\left\{\frac{K_2}{2K_1} \frac{K_2 t}{2}\right\} \quad (9)$$

$$z'_D(t) = z_D(t) \exp\left\{\frac{K_2}{2K_1} \left(\frac{K_2 t}{2} - L\right)\right\} \quad (10)$$

$$\phi(x) = \exp\left\{-\frac{K_2}{2K_1} x\right\} \varphi(x) \quad (11)$$

以上の式を実験値と比較・検証することで現象の機構を把握する。

3. 移動床実験

(1) 実験概要

実験に用いた水路は水路長 15m、幅 0.8m、側壁高さ 0.2m の可変勾配水路である。この水路の上流端から下流に 1m の位置から下流端から 3m 上流までの区間、実長 $L=11\text{m}$ に砂を敷き詰めた。実験に用いた土砂はほぼ均一の平均粒径 0.6mm である珪砂 4 号を使用した。今回の実験では図-1, 2 に示されるような片側のみが侵食する水路を作成した。上流端において給砂は行わず、下流端は堰を設けて常に等流が保たれる条件とした。

計測にはレーザー変位計を用い、縦断方向に上流側 2m および下流側 2m の区間は 50cm 毎に、その間の区間 6m は 25cm 毎に河床横断面を計測した。計測時間は通水開始から 1 分、5 分、15 分、30 分、1 時間の各時間に計測を行った。なお計測中は通水を停止した。その他の実験条件を表-1 に示す。Case1, Case2 では流量を変化させて掃流力の差による河床縦断形状の変化の違いを検証す

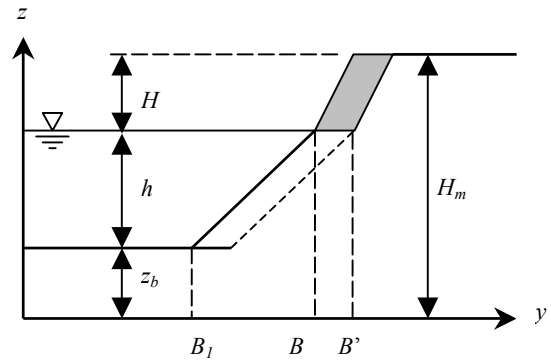


図-2 横断形の定義

表-1 実験の水理量

	流量 (ℓ/sec)	低水路幅 (cm)	側岸 天端高 (cm)	側岸勾配	K_1
Case1	1.17	15	7	45°	0.004
Case2	2.86			45°	0.01
Case3	2.85			30°	0.01

るために、また Case2, Case3 では側岸勾配を変化させて土砂供給量の違いによる影響を検証するために実験を行った。本研究では勾配急変部の影響を調べるために、河床勾配を変化させた。砂を敷き詰めた実長 11m の上流側 3m および下流側 3m の勾配を 1/1000 とし、中間部を 1/200 とした。

(2) 実験結果

図-3 に各 Case における河床高の時間変化を示す。ここで河床高は低水路部河床高の横断方向平均をとったものである。また図中の z_0 は勾配 1/1000 を表し、図全体として基準線からとった河床高 z_b から z_0 を引いたもので表した。傾向としては、Case1 の一部を除き全体として堆積となっている。流量が小さい Case1 では他の二つに比べると明らかに堆積する量が抑えられている。また上流から 2.5m 付近でわずかな侵食が、8m 付近で大幅な侵食が見られた。Case2 および Case3 の 15 分後、30 分後の 8m 付近にも同様に大幅な侵食が見て取れる。また Case2 と Case3 を比較すると、側岸勾配が急峻な Case2 の堆積の方が少々大きい。全体的にはほぼ似た結果となっている。

側岸侵食を伴わない場合の河床変動は、上流側の勾配急変部付近では河床低下、下流側のそれでは河床上昇となり、安定的にほぼ直線に近い河床縦断形となる。しかし今回の実験では、下流側では堆積しているが上流側においても堆積する結果となった。

著者ら⁵⁾によると、側岸からの土砂供給は低水路の縦断形状に影響を及ぼすことが分かっている。これによると、側岸勾配が小さいと土砂輸送にかかる時間が短く済むため河床材料の輸送が円滑に進み、侵食速度は速くな

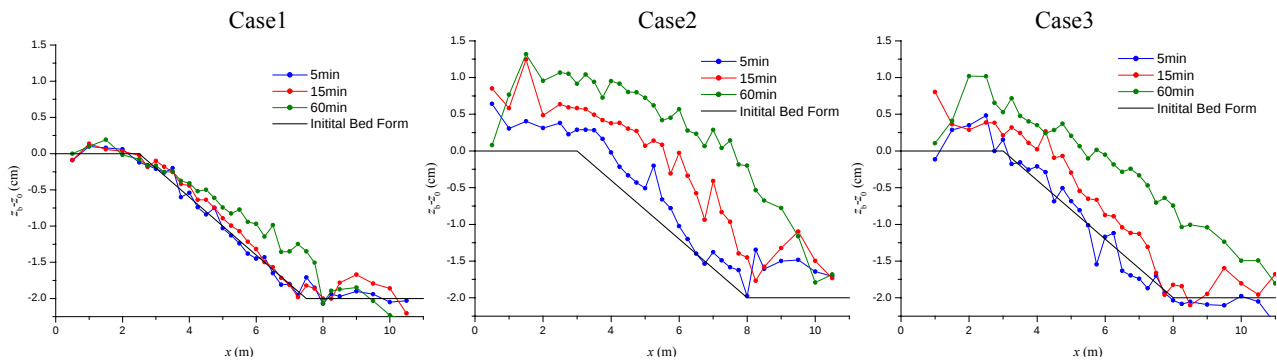


図 - 3 河床縦断形の時間変化

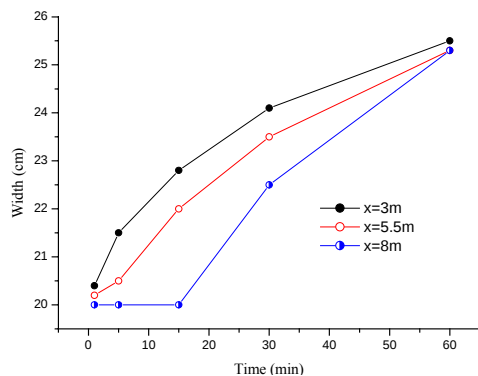


図 - 4 Case2 における川幅の時間変化

る．また，図 - 4 に侵食の様子が最も明確に現れた Case2 における側岸侵食の時間変化を示す．初期の掃流力が最も大きいと考えられる 3m 地点では，通水直後の侵食速度が最も大きく，時間が経過し河床が上昇するに連れて侵食速度は徐々に小さくなっていく．逆に初期の掃流力が最も小さいと考えられる 8m 地点では，通水開始から 15 分後までは全く侵食されず，15 分以降から急激に侵食が進む．この 2 つの地点の間である 5.5m 地点では，側岸はほぼ一定に侵食されている．3 つの地点はそれぞれ拡幅の過程は異なるが，通水開始から 1 時間後にはほぼ同じ川幅となることがわかる．

4. 比較・考察

ここでは実験結果から得られた値を理論式に当てはめて，実測値との比較を行った．拡散項における係数 K_2 は式(6)より側岸侵食に起因する係数である．そのため今回の実験のような側岸侵食が顕著となる条件では K_2 の検討が必要となる．そこで K_1 を固定し K_2 を変化させることによって，河床縦断形の時間変化を理論的に表現できるかどうか検証した．

図 - 5 は各 Case 毎に実験値から求めた K_1 (表 - 1) を固定し，理論曲線が実験値に合うように K_2 を与えたグラフである．拡散方程式を解く際の境界条件は上下流端ともに初期河床高の一定値を与え，初期条件としては通水前の河床縦断形状を与えた．どの Case においても上流から 3m 程の勾配が急になる位置から下流では理論曲線と

実験値は概ね合っていると見えるであろう．Case2, Case3 において上流端から約 3m までの区間で大きな違いが現れたが，これは側岸から供給される土砂の量が過剰に多かったため，河床材料の輸送による河床低下を大幅に上回ったためと考えられる．また河床縦断形の下流方向への移動速度について，Case2 に比べ Case3 の方が遅い結果となっているが，これは Case3 の方の土砂供給量が小さいためと考えられる．しかしいずれにしても，移動速度は非常に速いことが見て取れる．そのため通水開始から 1 時間もしないうちに，上流から 3m 程の位置から下流側の勾配が若干上に凸かもしくはほぼ一定となっている．

側岸侵食がない状況つまり， K_2 が 0 の条件と各 Case の通水開始から 1 時間後の理論値を比較したものを図 - 6 に示す．一般的な知見としてレキ床河川の勾配急変部では，上流側では侵食によって河床が低下し，下流側では堆積によって河床が上昇することが分かっている． $K_2=0$ の場合はこの現象を再現しているが，実験では異なる結果を示した．過度の土砂供給は河道形状を下流へと伝播させる働きをする．このことは急勾配部での土砂堆積が顕著となることを表している．堆積した土砂がこのまま安定するかもしれないが初期形状へと戻る挙動を示すのかどうか今回の実験では分からなかった．このことは今後の課題である．また， $K_2=0$ の上下流に着目すると河床形状の振動が見られる．これは上下流端境界条件による締め付けによる効果と上下流の流路長が短いことに起因する計算上の特性である．この振動が上流部にて発達することによって図 - 5 の理論値に見られる河床の上昇を引き起こすものと考えられる．実際の河川では本研究のように上下流を固定することはない．しかしながら理論値の河床上昇と実験の堆積状況との間に整合性があり，興味深い結果となった．

5. おわりに

本研究は側岸侵食が発生する条件下においての勾配急変部を含んだ河床縦断形状の変化について検討を行った．今回の研究を通して得られた知見を以下に示す．

- ・ 上流側の勾配急変部付近では河床は低下もしくはわずかな上昇となると予測したが，実際には全体的に大きな河床上昇という結果を示した．

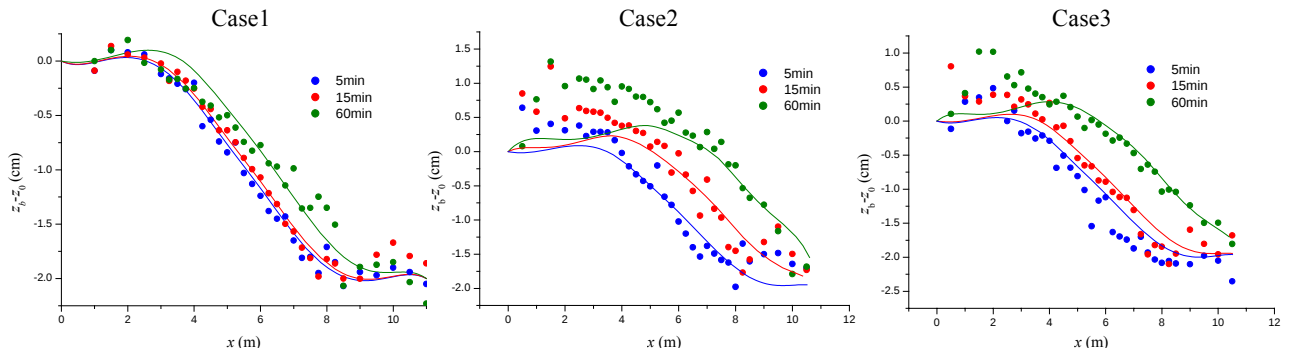


図 - 5 河床縦断形状の理論値と実験値の比較

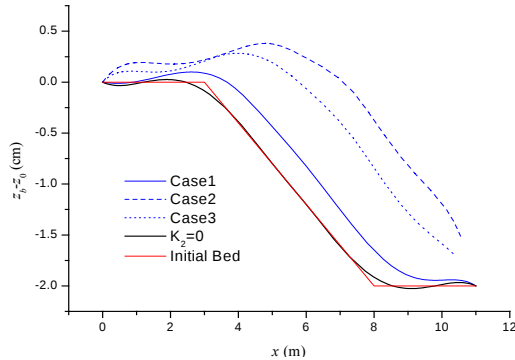


図 - 6 側岸侵食を伴う場合とない場合の河床縦断形状

- Case2, Case3 において、側岸からの給砂が過剰に影響したため、上流側で理論値との誤差が大きく現れた。
- 河床縦断形状の下流方向への移動速度は非常に速い。また通水を始めてから十分に時間が経過すると、上流側の勾配急変部から下流側の勾配がほぼ一様になる。

今後の課題としては、実測値と理論値の誤差の再検討、水理条件を変化させたさらなる実験などが挙げられる。それらをもとにし、さらに一般的な現象を把握できればと考えている。

参考文献

- 1) 平野宗夫：拡幅を伴う流路変動について，土木学会論文報告集，No.210号，pp.13-20，1973.12.
- 2) 長谷川和義：非平衡性を考慮した側岸侵食量式に関する研究，土木学会論文報告集，No.316号，pp.37-50，1981.12.
- 3) 福岡捷二・山坂昌成：なめらかな横断面形状を持つ直線流路のせん断力分布と拡幅過程の解析，土木学会論文集，No.351号，pp.87-96，1984.11.
- 4) 後藤孝臣・北村忠紀・辻本哲朗：上・下流境界条件の変化による直線砂礫流路の側岸侵食を伴う河床低下に関する研究，土木学会論文集，No.684号，pp.35-46，2001.8
- 5) 中西哲・長谷川和義・高橋圭吾：拡幅を伴う直線流路の河床変動1次元解析、水工学論文集、第49版、2005現在印刷中。
- 6) 芦田和男：河床変動に関する研究，京大防災研究所年報，第12号B，pp.437-447，1969.