

土砂供給の停止による河床低下と 砂礫河岸拡幅の進行過程

DEGRADATION AND WIDENING PROCESS OF GRAVEL RIVER UNDER
THE CONDITION OF NO SEDIMENT SUPPLY AT UPSTREAM END

後藤孝臣¹・北村忠紀²・辻本哲郎³

Takaomi GOTO, Tadanori KITAMURA and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 工修 名古屋大学工学研究科博士課程後期課程学生 地圏環境工学専攻
中部電力(株)電力技術研究所(〒459-8522 名古屋市緑区大高町字北関山20番地の1)

²正会員 博(工学) 名古屋大学助手 地圏環境工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 工博 名古屋大学教授 地圏環境工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Channel forming process under the condition of no sediment discharge was investigated with both flum experiments and numerical simulations. In addition to the degradation of bed -elevation, natural channel can change its width relatively within short time, in the process. The experimental results revealed that the relatively short time for channel widening firstly occurs, and then the bed-slope gradually adjusts to the static equilibrium condition with no significant change of the channel width. The numerical model to simulate the channel forming process, which is constituted by the depth-averaged 2-D flow model with the non-orthogonal boundary fitted grid system and the bed -deformation model taking into account the collapse of the bed -material on side banks, can reproduce the process observed in the experiment.

Key Words : bank erosion, sediment transport, movable-bed model test, 2D-numerical solution

1. はじめに

河川におけるダムや堰堤の構築は、上流部の河床上昇、下流部の河床低下を引き起こすことが指摘されている。これは一般にはダムや堰堤によって土砂輸送が遮断されることによるものであり、これによる下流域の河床低下やアーミングについての研究などは、古くから行われている。一般に、河床低下と同時に断面形状は変化し、最終的には土砂供給状態に応じた安定形状になる。安定河道断面形状の形成過程を対象とした研究(主に実験を対象としたもの)には、平野¹⁾、村本・藤田²⁾、藤田³⁾、福岡・山坂⁴⁾らが挙げられ、主に側岸侵食による流路拡幅のメカニズムが調べられている。土砂供給停止に伴う河床低下と河道断面形状の変化は、相互に作用していると考えられるが、これまでの研究ではそれらの相互関係については、明確に検討されていないようである。

一方、辻本・北村⁵⁾は、土砂供給が停止した河道での植生域の増加と滞筋の明確化に関する相互作用を、水路実験を通じて検討している。彼らによれば、植生域の存在による流れの集中化が滞筋の明確化に対する鍵となっている。すなわち、側岸の植生域付近の遅い流れは、側

岸侵食を抑制するが、植生域以外に集中した流れは河床低下を促進し、これにより滞筋の明確化が進行する。

さて、植生のように流れを強制的に変化させるような物体が存在しない河道において、土砂供給停止により河床低下と同時に側岸侵食による流路拡幅が生ずる場合、河道は勾配と流路幅のどちらを変化させて新たな安定状態へと移行するであろうか。河床勾配の減少は掃流力を低下させるし、流路幅の増大は単位幅流量の減少を通じて掃流力を低下させる。つまり河道はどちらの変化によっても安定状態となり得る。

本研究では、これらのことを鑑み、河床低下と流路拡幅が同時に生ずる時の河道の変化状態を考察するため、側岸侵食が可能な2次元水路を用い移動床実験を実施した。さらに、こうした過程の特性を再現することが可能な数値解析モデルを構築し、条件を変えた数値実験による検討を行った。

2. 移動床実験

(1) 実験概要

実験に用いた水路は長さ7m、幅0.5m、側壁高さ0.7mで、水路床は水平となっている。この水路に上流端に初期河

床断面と同等の形状をした粗度付き木製固定床を取り付け、境界条件を同断面形の固定床として取り扱った。一方、下流端において側岸侵食を伴った場合、流路拡幅した場合でもほぼ等流水深を維持し、その影響が上流に及ぼさないように、矩形の木製粗度付き固定床の断面を取り付けた。このような条件のもと、河床勾配が1/70、側岸の横断勾配が1/2で高水敷と低水敷の差が5cmとなるように河床を整形した。この水路(低水路側)に一定流量を通水し、適宜河床の横断、縦断を計測することにより、河床低下と流路拡幅の状態を観察した。一方これらの実験に対し、流路拡幅を伴わない場合の河床低下の状況を比較検討するため、高水敷部分に対し仕切り板を設定し、幅0.25mの矩形水路で、河床低下の実験を行った。なお、今回河床低下と流路拡幅の状態を調べるため、すべての条件で上流側からの給砂は行っていない。河床材料は、一様砂の実験ケースとしてケイ砂(平均粒径1.4mm)を、混合粒径の場合として、同じくケイ砂で平均粒径2.9mm、平均粒径1.4mm、平均粒径0.9mmをそれぞれ、1:1:2の比率で混合させた。初期河床の状態を図-1に、実験条件を表-1に示す。なお、実験中の水位観測により、河床勾配や流路幅が変化しても、わずかな変動は存在するものの流下方向にはほぼ等流に近い状態であったことを確認している。

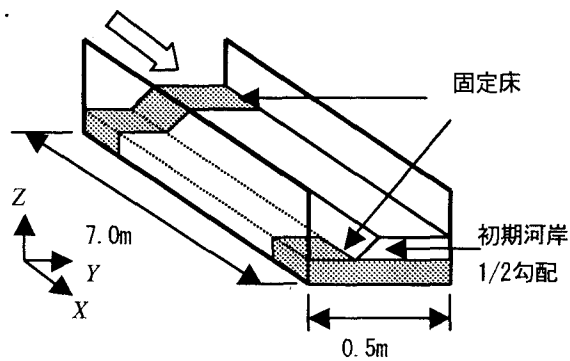


図-1 水路概要図

表-1 実験ケース

Case No	流量 (l/sec)	水路幅 (m)	河床材料
Case-1	4.0	0.5	一様砂
Case-2	4.0	0.5	混合砂
Case-3	4.0	0.25	一様砂
Case-4	4.0	0.25	混合砂

(2) 実験結果

図-2は、Case-2における河床高さの横断方向分布の時系列変化を示す。村本・藤田²⁾、福岡・山坂⁴⁾の実験と比較するとかなり側岸の侵食速度が速い。これは、初期河床勾配が1/70と急勾配であるためと考えられる。また、側岸からの給砂によって、低水敷の河床が上昇する点は彼らの実験結果とは同じであるが、実験を開始した15分ぐらいから低水敷の河床は上昇せず、低下する傾向が見られた。河床低下と流路拡幅は同時に起こるものの、今

回の実験では、まず河道の拡幅が起こり、ほぼ安定した河幅を呈した後(ここではおよそ15分程度)、河幅と河川勾配が均衡した状態で河床低下していく。さらに河床低下に伴い、側岸に急勾配が生じ、間欠的にその崩壊、それに伴う流路拡幅が観察された。平野¹⁾、福岡⁴⁾の実験によれば、河道は下流域から広がるという結果が得られている。今回の実験では、図-2から示されるように、流下方向毎に横断形状の顕著な差は見られなかった。これらの特徴は、河床材料の違いによってほとんど差がないが、一様砂を用いたケースの方が流路拡幅の進行が早い傾向にあった。

図-3は流路の左岸(高水敷側)、右岸(低水敷側)の河床高さの縦断方向分布の時系列変化を示す。ここではCase-1で示した。左岸(高水敷側)では、計測開始から側岸の侵食とともに順次河床は低下していくが、右岸(低水敷側)では、法面からの給砂により一度河床が上昇し、その後河床低下に転じることが判る。また、間欠的な側岸の崩壊の結果、水際線は必ずしも直線とはならず、河床縦断図に切れ目が存在する。2時間を越えると、右岸、左岸の区別なく、ほぼ平坦河床になると共に、両岸とも同時に河床低下していく傾向が見られた。最終的には8時間程度で静的平衡状態に落ち着いた。

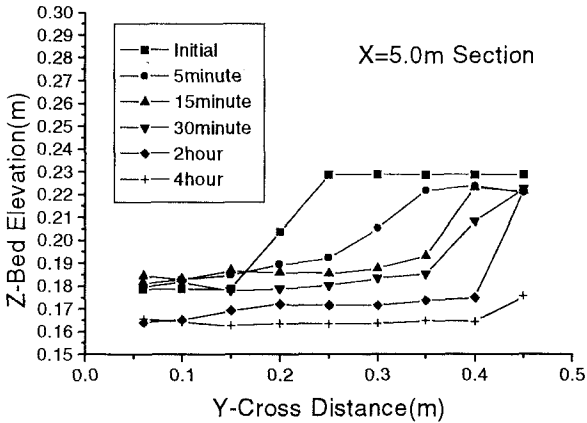
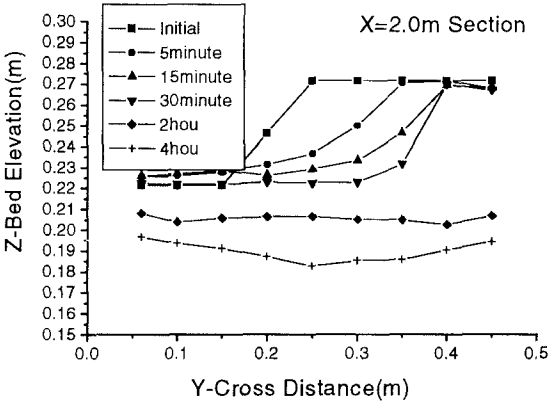


図-2 流路横断面形状の時間変化(Case-1)

図-4は、流路拡幅過程を許さないCase-3における河床低下の様子を示す。Case-1, Case-2の結果と比較すると、側岸侵食がないため流路への絶対的な給砂量が少なく、計測開始15分後にはすでに初期河床より低下している。また流路拡幅の制約から、河床低下量は著しく早い。

これらの結果から、本実験の条件では側岸の侵食を許しながら河床低下が生ずる場合、河床勾配よりも河幅の拡幅という形によって河床のせん断力を低下させながら、安定状態に至ることが判る。これは、平野¹⁾、福岡・山坂²⁾らの実験と同様に、まず側岸侵食とともに河道の拡幅とそれに伴う一時的な河床上昇が確認されたが、植生域を伴う場合の河床低下(辻本・北村³⁾)とは著しく異なる結果となった。本実験の結果は、限られた条件内で実施されているが、河床と河岸が同じ材料で形成され、かつ流れを強制的に変化させる物体が無い場合には、河川は河幅の変化によって安定状態に向かう可能性が大きいことを示すものである。

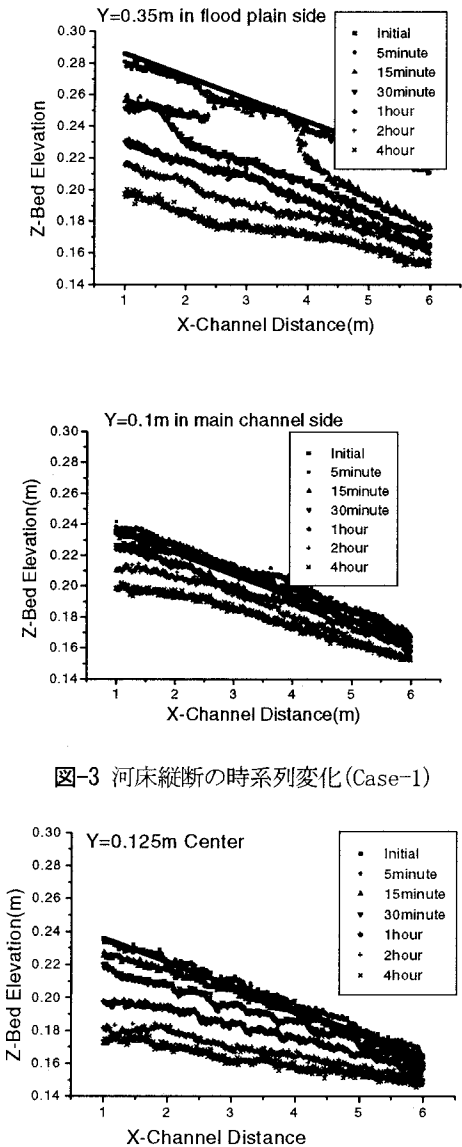


図-3 河床縦断の時系列変化 (Case-1)

図-4 河川幅が制約された河床縦断の時系列変化 (Case. 3)

3. 移動境界を伴う平面2次元河床変動解析

(1) 解析の概要

流路拡幅を伴う流れの計算を実施する際、側岸侵食により解析領域が拡大していくことが解析上問題となる。この問題を取り扱うため、地形に関する情報を詳細に分割した平面固定格子に与えておくとともに、流れを解く格子は、水際の位置に応じて決定された解析領域で境界適合格子に展開する方法を採用した。水際の位置の決定には、平面固定格子上の地形情報が用いられる。このような境界適合格子を採用したとき、見かけの応力項を導入しなければならないが、流れについては定常解を求めているため、今回この応力項は考慮していない。

(2) 流れの基礎式

流れの方程式は、水深平均化された平面2次元流れのモデルを用いる。基礎式は、一般形保存式をベクトル表示すれば以下のようになる。

$$\text{div}(\phi \vec{q}) - \Theta \text{grad} \phi = S_\phi \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 $\vec{q} \equiv h\vec{u}$ ($\vec{u}$:流速ベクトル, h :水深)である。

(1)式において ϕ , Θ , S_ϕ をそれぞれ次の様に現すと、それぞれ、連続式, u , v の運動方程式が得られる。

・連続式

$$\phi = u \quad ; \quad \Theta = 0 \quad ; \quad S_\phi = 0$$

・ u -方程式 (x 方向流れ成分)

$$\phi = u \quad ; \quad \Theta = 0$$

$$S_\phi = -gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} - C_f U \sqrt{U^2 + V^2} + \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right]$$

・ v -方程式 (y 方向流れ成分)

$$\phi = v \quad ; \quad \Theta = 0$$

$$S_\phi = -gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} - C_f V \sqrt{U^2 + V^2} + \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) \right]$$

ここで、 u : x 方向成分流速, v : y 方向成分流速, h : 水深, g : 重力加速度, ζ : 基準面からの水面高さ, C_f : 路床の摩擦抵抗係数であり、乱流応力 τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{yy} はBoussinesq近似により表現する、このとき、本研究では、渦動粘性係数 ν_t は、摩擦速度を u_* として、

$$\nu_t = \alpha u_* h \quad \text{----- (2)}$$

とした。ここで、 α は経験定数であるが、本研究では $\alpha = 0.1$ とした。なお、一般的に乱流応力項は数値解析上、拡散項として取り扱われることが多いが、collocate格子による計算では、拡散項を見かけ上ゼロとなるよう工夫し、その代わり乱流応力項は生成項として取り扱うことで、補間の繰り返しに伴う数値振動を抑制できる⁴⁾こ

とから、本研究でもこの手法を採用する。

(3) 流れの解析手法

基礎式は、コントロールボリュームで積分した後、水深と流速成分をすべてセル中心に配置するcollocate格子を用いて有限体積法により離散化する。セル界面での物理量は基本的には隣接するセル中心の値から線形補間によって求める。ただし、移流項の離散化にあたっては、風上側のセル中心の勾配を用いて求めるものとした⁷⁾。

水深と流速成分を解くアリゴリズムはSIMPLE法⁹⁾によった。一般に、水深と流速成分を同位置に配置し解析を行うと数値振動が懸念される。ここでは、数値振動を抑制するために、セル界面での流速成分の補間の際に、Rhie and Chow⁹⁾の方法を用いることにした。

地形情報を与えた平面固定格子は変化しないが、流れの収束解を求める際に水位の変動によって水際的位置と解析領域の格子が変化する。本研究では、収束計算のステップ毎にこうした水際の変化に応じて計算領域と格子を配置しなおして、計算を進めた。なお、水際的位置は水深がある限界値以下となる位置として求めた。

境界条件は、まず、上流端では流量を与える。下流端では、与えられた断面に対する等流水深を、幅広水路を仮定して抵抗則として対数則を用いて評価して与える。また側岸では対数則を仮定する。

(4) 河床変動解析手法

流砂の解析は、流砂の非平衡性は無視し、芦田・道上式¹⁰⁾を用いる。ただし、実験と同様に上流端からの給砂は無いものとした。また、河床が傾くことによって流砂の運動方向が流れの方向から変化する効果については、中川・村上・辻本の式¹¹⁾を用いた。

側岸侵食のモデルは、隣接する格子点の傾斜角が安息角以上かどうか判別し、安息角以上であるなら安息角に等しい傾斜角をもつ滑り面に沿って崩壊が生ずるとし、質量保存を考慮して河床の高さの再配置を行うこととする^{13) 14)}。

ところで、この解析モデルでは、流れを解く格子と地形の情報を保存する格子を分けて取り扱っている。そのため、流れの格子を使って、流砂の連続式から、流れの格子のコントロールボリュームでの平均河床変動量と河床高を求める。さらにそれをもとに固定地形格子での河床高を得る。逆に流れの計算の際には、流れの格子のコントロールボリューム内にある固定座標格子の河床高から平均量を求めて流れの格子での河床高とする。

(5) モデルの適用性

図-5は、実験CASE-1に対して行われた再現計算結果のうち、通水後2時間が経過した時点での流れの状況を示したものである。流路上流端及び中央部付近では、側壁一杯まで水面が到達していないが、流路下流端付近では

水際が側壁近傍まで達している。

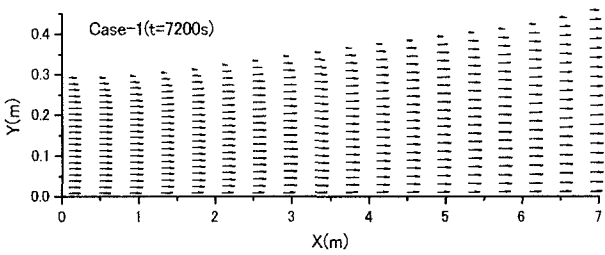


図-5 流速ベクトルの計算結果例 (Case-1, t=7200s)

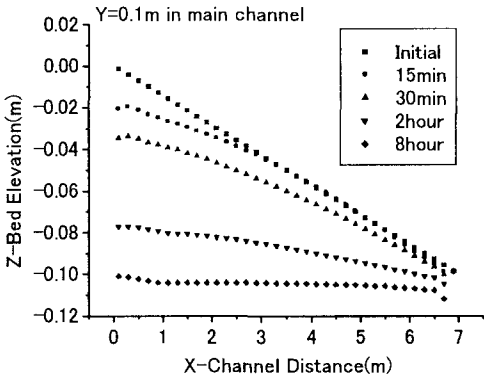
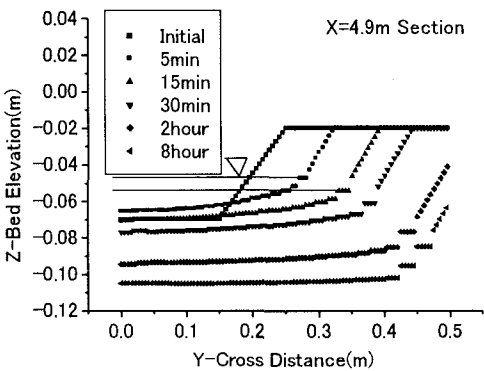


図-6 河床縦横断面形の時系列変化(拡幅可能水路)

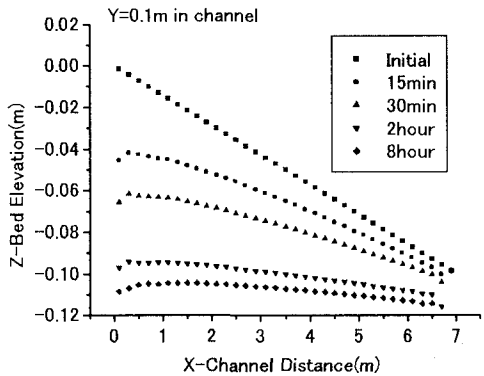


図-7 河床縦断の時系列変化(拡幅制約水路)

図-6は、Case-1に対する流路横断面形状の計算結果の時系列変化を示したものであり、その傾向は実験とよく一致している。すなわち、まず流路の拡幅と低水敷への堆砂が始まり、限界の水路幅まで流路の拡幅が進行した後、河床低下が進行する。この流路の拡幅は、下流端が固定床として境界条件を与えているため、下流側より広がる傾向にある。また、上流側では給砂無しの場合で計算しているため、上流側付近では、やや上に凸な形状を保ちながら河床低下していくという傾向が伺えた。

図-7は、河道拡幅に制限のある実験Case-3の再現計算結果を示したものである。図-6、図-7を比較すると、図-7では、実験と同様、河道拡幅に制限(0.25m)があるため、流路拡幅を許す場合に比べて単位幅流量の増大から掃流力が大きくなり、河床低下が顕著になる。

以上の結果から、本解析モデルは実験水路で観察された現象の再現が可能であると考えられる。

(6) 数値実験と考察

ここでは、数値解析モデルを用いて、条件を変化させた計算を試みる。基本的な条件は、実験Case-1と同様とする。まず、Case-5として、幅1.0mの水路を設定し、今回の実験では不可能であった、なんら側壁の拘束のない状況での流路拡幅と河床低下状況について調べる。ついで、Case-6、7として、初期河床勾配を変化させた計算を行い、現象の進行状況の相違を考察する。数値計算条件を表-2に示す。

図-8は、流路上流端から1.9m下流地点での流路横断面形状の時間変化を示したものである。図中、河床高さは高水敷の表面高さを基準としたものとなっている。いずれのケースにおいても、約8時間後には、ほぼ静的平衡状態に達し、その時の水面下の流路形状は各ケースともほぼ同様なものとなっている。

図-9は、流路の特性を代表する量として、1)流路上流端と下流端の水位差から求められる平均的な水面勾配、2)水路上中流域付近での水面幅、の2つの量に着目し、その時間変化を示したものである。図より、初期河床勾配の大きいCase-5、6では、はじめに流路の拡幅と水面勾配のわずかな上昇が生じ、その後、比較的短い時間スケールで流路幅がいったんほぼ平衡状態に近い状況になってから、比較的長い時間をかけて顕著な河床低下が生じることがわかる。最終的には、勾配が約1/200でほぼ安定した状態となる。興味深い点は、Case-5、6では初期河床勾配が異なるにも関わらず、はじめに拡幅する流路幅がほぼ等しくなり、その後、ほぼ同じ流路幅を保ちながら同様の勾配に落ち着く点である。

Case-7は、初期河床勾配が他のケースの安定勾配に近い。Case-5、6と比較すると、計算初期で河床低下の進行過程が遅いものの、2時間を越えた付近からは、他の条件と類似の傾向を示す。3ケースは、初期状態が異なるにも関わらず、流路幅の適合というプロセスをへながら、

最終的には、水面下ではほぼ同様の横断面形状となる。

この数値実験の範囲で見える限り、最終的に得られる安定形状には、初期状態の影響は少ないばかりか、最終

表-2 計算条件

解析ケース	総流路幅	低水路幅	初期水路勾配
Case-5	1.00m	0.15m	1/70
Case-6	1.00m	0.15m	1/50
Case-7	1.00m	0.15m	1/100

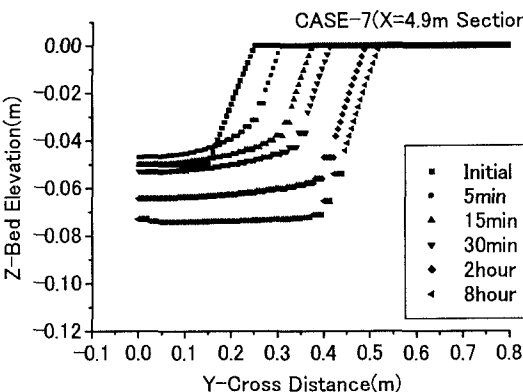
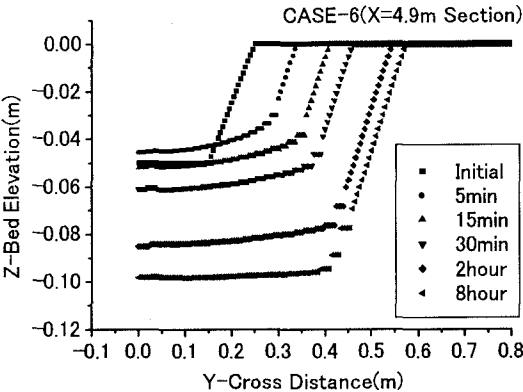
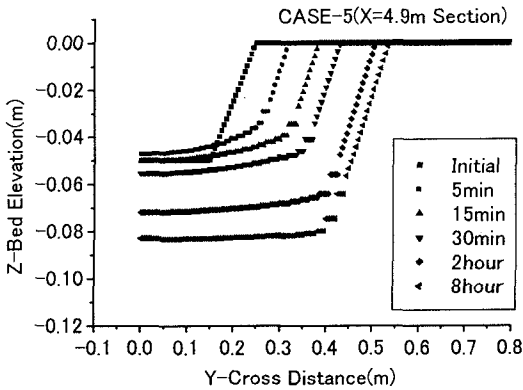


図-8 流路横断面形状の時間変化

状態に落ち着くまでのプロセスにも類似性が認められる。そして、そのプロセスの鍵は流路幅の適合であるといえる。流路幅は、あたかもあらかじめ土砂供給量に応じた最終的な平衡状態を知るかのように、流路の変化過程において決定される。

デルによる検討を行った。その結果、土砂供給の停止による河道の変化では、比較的短い時間スケールでの河道幅の適合とそれに続く長い時間スケールでの河床低下が生じることが確認された。今後、より多くの条件を変えた検討により、こうした特性の一般性を検討していくとともに、流路変化過程の初期にほぼ決定されてしまう流路幅の決定メカニズムを明らかにしたい。

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，第210号，1973.2，pp.13-20.
2) 村本嘉雄，藤田裕一郎：河床横断形状の形成過程，土木学会第29回年次学術講演概要集，II-224，1974，pp.282-284.
3) 藤田裕一郎：直線流路の側岸侵食機構，京大防災研究所年報，第22号，B-2,1979.4,pp.537-552.
4) 福岡捷二，山坂昌成：なめらかな横断形状をも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，第351号，II-2，1984.11，pp.87-96.
5) 辻本哲郎，北村忠紀：河床低下に及ぼす植生繁茂の影響，水工学論文集，第40巻，pp.199-204，1996.2
6) Joel H.Ferziger, and Milovan Peric: Computational methods for fluid dynamics, Springer-Verlag 1996.
7) Dey, A. K., Kitamura, T. and Tsujimoto, T.: 2-D simulation of overland flow around gully headcut, *submitted to Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE,(投稿中).
8) スハス・V・パタンカー（水谷幸夫，香月正司訳）：コンピュータによる熱移動と流れの数値解析，森北出版198p.，1985.
9) Rhie,C.M.,and Chow,W.L:Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation,AIAA J.21,1525-1532.
10) 芦田和男，道上正規：混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究，京都大学防災研究所年報，第14号 B2,pp.259-273,1971.
11) Nakagawa,H. T.Tsujimoto and S.Murakami : Non-equilibrium bed load along side bank, Proc.3rd Int. Sym. River Sedimentation, Jackson, Mississippi, USA, pp.1029-1065,1986.
12) 長田信寿，細田尚，村本嘉雄，Md.Munsur Rahman：河岸侵食過程における流砂の非平衡性を考慮した流路変動の数値解析，水工学論文集，第41巻，1997.2，pp.889-894.
13) 関根正人：側岸侵食機構を考慮した河川の流路変動に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 533/ II -34, pp. 51-59, 1996.2.
14) 長田信寿，細田尚，村本嘉雄，Md.Munsur Rahman：移動一般座標系による側岸侵食を伴う河道変動の数値解析，水工学論文集，第40巻，1996.2，pp.927-932.

(1999.9.30受付)

4. あとがき

本研究では、河床低下と流路拡幅が同時に進行する時の河道の変化過程について、移動床実験、数値計算モ

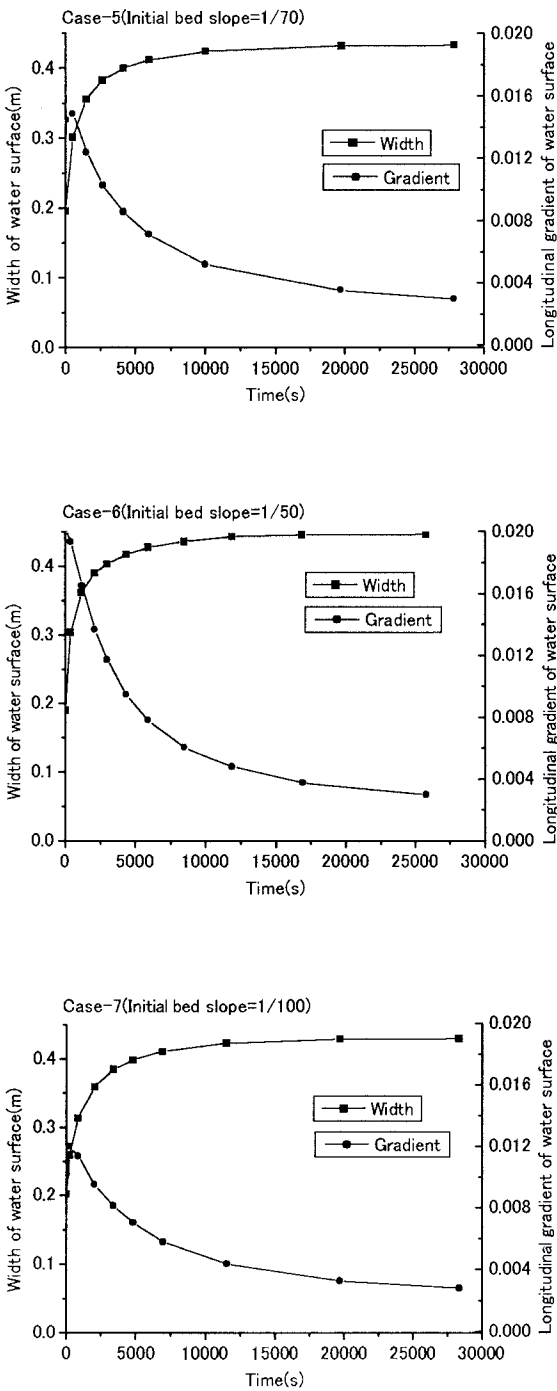


図-9 水面勾配と水面幅の時間変化