

混合砂礫床の侵食過程に関する研究

高橋 保・中川 一・里深好文・奥村裕史*・安本大地**

* 電源開発(株)

** 京都大学大学院工学研究科

要旨

本研究においては、山地河川からのより高精度な土砂流出予測を行うことを目的として、混合砂礫床の侵食過程に関する水路実験および数値シミュレーションを行っている。まず、混合砂礫床における非平衡な流砂・河床変動過程を解析するために、新たな侵食・堆積速度式を提案し、水路実験の結果との比較を通じて、その妥当性を検証している。ついで、この侵食・堆積速度式を用いて、一次元的な河床侵食過程に関する数値シミュレーションモデルを構築し、水路実験に適用している。さらに、このモデルを2次元場に拡張して、混合砂礫床の水みち侵食に関する解析を行い、河床砂の粒度分布が河床侵食に及ぼす影響について検討している。

キーワード：河床侵食，混合砂礫床，侵食・堆積速度，水みち侵食

1. はじめに

近年、ダム堆砂や砂防構造物による流出土砂抑止の影響により、河道の土砂環境に大きな変化が現れていることを反映して、土砂災害に対する安全性を確保しつつ、水系一貫の土砂移動を考慮した総合的な土砂対策を行うことが要求されるようになってきている。すなわち、危険な土砂流出は確実に抑止し、安全・無害な土砂は積極的に流下させることが必要とされているのである。このような土砂管理を実現するためには、様々な領域における土砂の移動機構に関して調査研究を進め、量的・質的な予測精度の向上を図ることが重要であると考えられるが、特に、下流域への主たる土砂供給源となっている山地流域からの土砂流出を予測することは、河川流域全体にわたる土砂環境の保全を行う上で重要な課題であるといえよう。しかし、流量や勾配や河床材料の特性といった流砂に影響を及ぼす要因が山地河川では時間的・空間的に大きく変動することもあって、土砂の移動形態さえも大きく変化するため、流砂量の質的・量的な予測が難しい状況にある。

山地流域の特色として河床材料が幅広い粒度分布をもつことが挙げられるが、これも流砂・河床変動の予測を難しくしている要因の一つとなっている。そこで、本研究では比較的幅広い粒度分布をもつ河床材料を用いて、混合砂礫床の侵食過程に関する水路実験を行うとともに、このような場に適用可能な流砂・河床変動モデルを提案し、水路実験との比較を通じてその妥当性を検証している。また、このモデルを2次元的な場に適用して、混合砂礫床における水みち侵食過程に関する数値シミュレーションを行っている。

2. 混合砂礫床の侵食過程に関する水路実験

2. 1 実験方法と実験条件

混合砂礫床の流砂現象と河床変動に関して基礎的なデータを収集するために水路実験を行った。実験は大きく分けて次の2種類行われている。ひとつは混合砂礫床の侵食・堆積速度に関する実験であり、もうひとつは、混合砂礫床の一次元的な河床変動に関する実験である。

まず、混合砂礫床の侵食・堆積速度に関する実験について説明する。本研究では次章で述べるように、混

合砂礫床の流砂・河床変動を計算するために各粒径階ごとの侵食・堆積速度を用いている。モデルを検証するためのデータを収集し、かつ、混合砂礫床の流砂現象に関するさまざまな情報を得るために、矩形断面水路に短い移動床部を設け、水路勾配や給砂条件および河床材料の粒度分布を種々変化させて、河床位や河床表面の粒度分布の変化を時間的に追跡した。

実験に用いた水路は、京都大学防災研究所宇治川水理実験所にある長さ6m、幅20cmの鋼製矩形断面水路である。水路側面は透明アクリル製であり、側方から河床や流砂の状況が確認できる。実験水路には高水槽、低水槽ならびにポンプが設置されており、ポンプの流量はインバーター制御により調節できる。流量は水路下流端において一定時間の流出量採取することにより計測している。実験装置の側面図をFig.1に示す。

Fig.2に示すように、移動床部の縦断方向の長さは49cmとし、幅は20cmである。移動床部の上・下流には長さ1mの固定床部が設けられ、その表面には平均粒径0.39cm、粒度分布の標準偏差が2.19の混合砂が粗度として貼り付けられている。移動床部における初期の堆積厚さは7.5cmで、固定床の表面と同じ高さになるようスクレーパを用いて表面の成型を行っている。流下方向に諸条件が変化することを考えると、移動床部はできるだけ短いほうが望ましいが、データ計測のためには少なくともこれくらいの長さが必要であった。給砂は水路上流の固定床部において手作業で行われている。

実験水路上には流下方向および横断方向に移動可能な計測台車が設置されており、その台車にはレーザー式河床位計とサーボ式水位計が搭載されている。センサーからのアナログ信号はアンプによって増幅され、AD変換ボードを通じてパソコンに入力される。河床表面の状況を記録するために、55mmの接写レンズを取り付けたカメラを用いて、河床表面から20cmの距離を保ちながら撮影している。河床表層の採取によるサンプリングも試みたが、採取に伴う河床の損傷がその後の実験に無視できないほど大きな影響を及ぼすことや、一定の厚さで材料を採取することの困難さなどもあって、表層の粒度分布の計測は撮影された写真をもとに行われている。水路下流端において目の細かい金網により流出土砂をすべて採取し、流出土砂量を計測している。

通水時間はトータルで30分としているが、途中、河床位の計測および河床表面の撮影のために5分毎に通水を停止した。水位は通水停止直前に水路中央線に沿って計測されている。下流端で採取された土砂は、乾燥後ふるい分けられ、粒度分布ならびに各粒径ごとの流砂量が求められている。

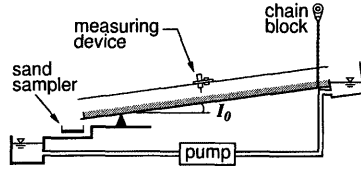


Fig.1 Experimental flume

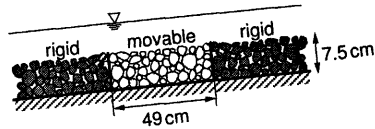


Fig.2 Arrangement of movable bed and rigid bed

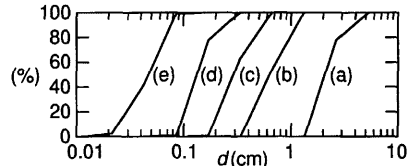


Fig.3 Grain size distribution of original materials

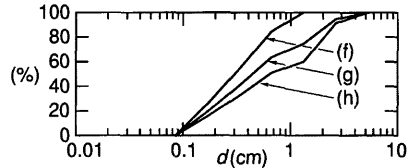


Fig.4 Grain size distribution of mixture employed in experiments

実験に用いた河床材料は5種類の砂礫を適当に混合することによって3種類作成されている。5種類の砂礫の粒度分布をFig.3に示すとともに、3種類の混合物の粒度分布をFig.4に示している。図中の(a)~(e)および(f)~(h)は混合前の砂礫ならびに混合物の種類をそれぞれ示しており、Table 1にはふるい分けによって得られた各材料の平均粒径 d_m と粒度分布の標準偏差 $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ とが示されている。 d_{84} , d_{16} はそれぞれ粒径加積曲線における通過率84%の粒径と通過率16%の粒径である。

河床表面の写真から河床表層の粒度分布を求める手順は以下の通りである。河床表面の写真は2倍に拡大した後、約40cm²の領域において上記5種の砂礫そ

Table 1 Mean diameter and standard deviation of bed materials

	d_m (cm)	$\sqrt{d_{84}/d_{16}}$
(a)	1.455	1.453
(b)	0.689	1.593
(c)	0.326	1.575
(d)	0.156	1.505
(e)	0.048	1.620
(f)	0.390	2.194
(g)	0.864	3.358
(h)	1.148	3.503

れぞれの個数をカウントし、このデータと各砂礫の粒度分布 (Fig. 3) をもとに河床表層の粒度分布を得ている。ところで、一般に粒度分布は各粒径の重量 (体積) 存在率で表されるため、本実験のように表面に存在する粒子の個数分布が得られた場合には、なんらかの方法で変換する必要がある。いま、粒径 d_k の粒子の河床表面における個数百分率を $h(d_k)$ 、重量百分率を $f(d_k)$ とすると、

$$h(d_k) = A_v \frac{f(d_k)}{d_k^3} \quad (1)$$

と表すことができる。ここに、 A_v は右辺の合計を 100% にするための係数である。このような方法で河

床表層の粒度分布を求めると、河床材料をふるい分けることによって得られる粒度分布に比べ、粗いものの存在率が高くなる傾向が見られた。この理由としては次の2点が考えられる、まず、水山 (1977) によって指摘されているように、振動などにより細粒分が下方の空隙に埋没することにより、実際に表層が元の材料よりも粗くなっていることである。混合砂礫床においてこのような鉛直方向の粒子の交換が生じることば芦田・江頭ら (1989) によっても報告されている。もうひとつの理由としては「表層」をどのように考えているかということが挙げられよう。今回行ったような方法では、粗い粒子のあるところの「表層」は厚く、細かい粒子の部分では薄いと考えていることになる。これに対して土屋 (1963) が提唱しているように、一定の厚さの表層を考え、その中では砂礫が深さ方向に一樣に分布しているものと仮定すると、

$$h(d_k) = A_s \frac{f(d_k)}{d_k^3} \quad (2)$$

と表される。ここに、 A_s は A_v と同様に右辺の合計を 100% にするための係数である。この方法によれば細粒分の存在率が前述の方法に比べ大きくなり、ふるい分けによる分布形により近づく結果となった。しかし、流砂との相互作用を考えるとときにはやはり河

Table 2 Experimental conditions

Run No.	Q (cm ³ /sec)	Q^{bin} (cm ³ /sec)	I_0	bed material	sediment supply	
S-1	1620	0.000	0.0250	(f)	(d)	
S-2		0.201				
S-3		0.388				
S-4		0.000		(g)		
S-5		0.000				
S-6		0.201				
S-7		0.388		(h)		
S-8		0.000				
S-9		0.201				
S-10		0.388	0.0167	(f)		
S-11		0.000				
S-12		0.201				
S-13		0.388				
S-14		0.000		(g)		
S-15		0.201	0.0250		(c)	
S-16		0.388	(c)			
S-17		0.000				
S-18		0.210	(d)			
S-19		0.405				
S-20		0.201				
S-21		0.388	(e)			
S-22		0.000				
S-23		0.201				
S-24		0.388	0.0167		(c)	
S-25		0.204	(d)			
S-26		0.405				
S-27		0.000				
S-28		0.210				
S-29		0.405				

Table 3 Experimental conditions

Run No.	Q (cm ³ /sec)	Q_{bin} (cm ³ /sec)	I_0	bed material	sediment supply
L-1	1620	0.000	0.0250	(c)	(d)
L-2		0.201		(f)	
L-3		0.000			
L-4		0.201			
L-5		0.000		(g)	
L-6		0.201		(h)	
L-7		0.000			
L-8		0.201			

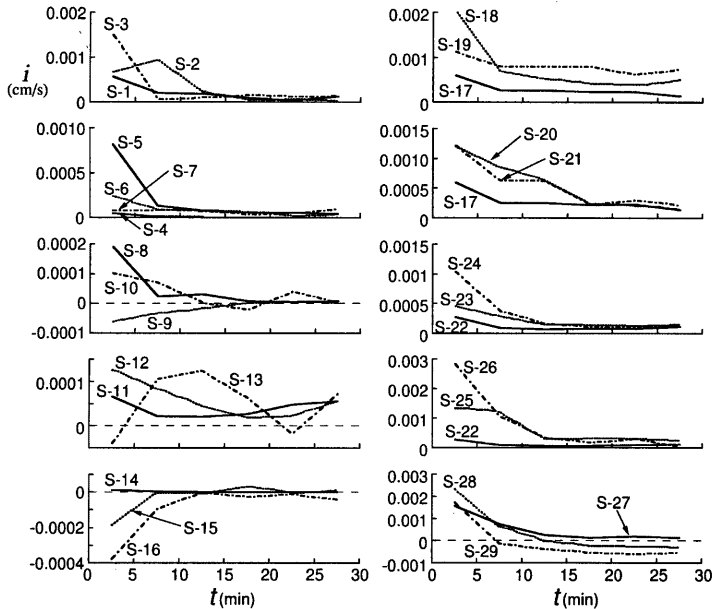


Fig. 5 Temporal variation of erosion velocity obtained from experiments

床表面に存在する砂礫層を表層と考えざるを得ないこと、深さ方向の砂礫の分布が一樣と考えることが難しいことなどから、本研究ではあえて式(1)の方法を用いることとした。河床材料の粒度分布の範囲が広がるほど、このような「表層」の取り扱いに関する問題が大きくなると考えられ、今後検討すべき課題であると言えよう。

実験条件をTable 2に示している。ここに、 Q は給水量、 Q_{bin} は給砂量、 I_0 は水路勾配である。表中の(c)~(g)は河床材料ならびに供給土砂に用いられた砂礫材料の種類 (Fig. 3, 4およびTable 1参照) を示している。

つづいて、混合砂礫床の一次元的な河床変動に関する実験について説明する。実験条件をTable 3に示している。実験にはすでにFig. 1に示されている水路を用い、水路幅は20cmとしている。移動床部の流下

方法の長さは530cmとし、上流端に40cm、下流端には30cmの固定床部を設けた。固定床部の粗度の材料としては前述の実験と同じものを使用している。移動床部の初期堆積厚さは7.5cmであり、初期河床勾配は水路勾配 I_0 と等しくなっている。平坦な初期河床を作成した後、一定の給水・給砂条件の元で、河床位ならびに河床表層の粒度分布の時間的変動を追跡した。

通水時間は100分とし、通水開始後40分までは10分毎に、その後は20分毎に通水を停止して、河床位計測ならびに河床表面の写真撮影を行った。河床位は横断方向に3cm間隔、流下方向に1cm間隔で計測され、河床表面の写真撮影は上流端から10cm, 180cm, 350cm, 520cmの計4地点において行われている。流出土砂は通水停止直前の約1分間のものを採取し、乾燥した後ふるい分けを行った。

2. 2 侵食・堆積速度に関する実験結果の考察

短い移動床を用いた混合砂礫床の侵食・堆積速度に関する水路実験の結果の一部を示し、考察してみよう。Fig. 5には河床変動量から求められたS-1～S-29の各ケースにおける侵食・堆積速度の時間的変化が示されている。これを見ると、給砂開始直後のデータにはかなりのバラツキがあるものの、いずれのケースにおいても時間の経過に伴い侵食・堆積のない状態に収束していることが分かる。実験を通じて給砂・給水条件は変化させていないことから、これは給砂条件に応じて河床表層の状態が変化したことによると考えられる。

Fig. 5のS-13をみると、実験開始当初堆積傾向を示し、その後侵食傾向に変わり、やがて侵食も堆積もしない状態になっていることが分かる。このような堆積から侵食に遷移する過程は次のように説明されよう。人為的に作成された初期河床の表面には、大きな礫の周辺などに多くの凹部があり、小さな粒子がここの中に一旦落ち込むと再び流れ出すことは困難である。実験中の観察からも、上流から給砂された小さな砂礫が河床の大きな粒子の隙間にトラップされることが確認されている。実験開始直後の河床には数多くの凹部が存在するため、凹部以外の領域では侵食傾向であったとしても、全体としては堆積傾向となっていたのであろう。時間の経過に伴い凹部は埋められるため、トラップされる量が減少し、侵食傾向が現れたと考えられる。Fig. 6にはS-13のケースにおいて流出土量と給砂量との差から求められた、粒径別侵食速度の時間的変化を示している。これを見ると、給砂材料の主たる成分である $d=0.12\text{cm}$ の傾向だけが他の材料のものとは異なり、給砂材料がトラップされていることが分かる。

初期河床に凸凹があり小さな砂礫のトラップが生じることはS-13のケースに特有の現象ではなく、程度の違いはあるもののいずれのケースにおいても確認されている。流れと流砂のアンバランスにより生じる堆積現象とこの「トラップ」とは区別する必要があると思われる。なぜならば、凹部に落ち込んだ砂礫のほとんどは河床表面付近には存在せず、より下方に移動してしまうので、流砂とのインタラクションは存続しなくなってしまうからである。流れの中で自然に形成された河床において、このような現象が支配的であるかどうかは今後の検討を要するところであるが、「トラップ」が現実におこっているとする、河床の空隙率を一定と考えることができなくなるなど、これまでの移動床の考え方そのものを大きく変更する必要が生じるであろう。

つぎに、粒径別の侵食・堆積速度について見てみよう。Fig. 7には前述のトラップの影響が比較的小さいと思われたケースのうちで、明瞭な侵食傾向を示し

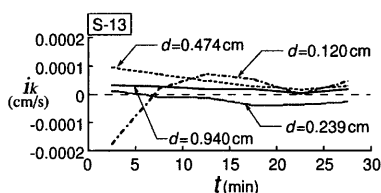


Fig. 6 Temporal variation of erosion velocity for each grain sizes in S-13

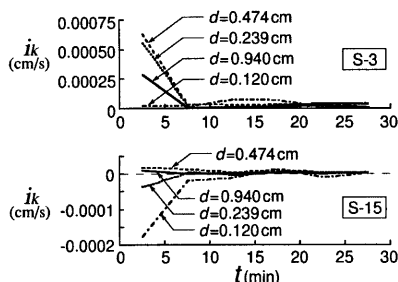


Fig. 7 Temporal variation of erosion velocity for each grain sizes in S-3 and S-15

たS-3のケースと、堆積傾向が見られたS-15のケースについて粒径別侵食・堆積速度が示されている。これら以外のものも含めて粒径別の侵食・堆積速度を調べた結果、侵食が卓越するような場ではほとんどの粒径階において侵食傾向を示し、堆積が卓越する場ではわずかな例外を除いてほとんどの粒径階において堆積傾向を示すことが明らかになった。当然、いずれのケースにおいても侵食も堆積もしないような粒径階は存在するが、「トラップ」されるものを除けば、侵食される粒径階と堆積する粒径階が同時に存在することはほとんどなかったといえる。

2. 3 混合砂礫床における一次元的な河床変動に関する実験結果

Fig. 8には流下方向の長さが530cmの移動床水路における河床変動量に関する実験値が示されている。河床位としては各段面において横断方向に平均化された値を用い、初期河床位を基準として各時刻の河床変動量 ΔZ を求めている。これを見ると、Fig. 3の(a)に示された粗い粒子を含んでいる混合材料(g)や材料(h)を河床材料として用いたケース(L-5～L-8)では、粗い粒子を含まないケース(L-1～L-4)に比べて一般的に河床変動量が小さいことが分かる。L-5～L-8のケースにおける局所的な侵食・堆積は河床材料中の粗い粒子の影響であると考えられる。

比較的一様な粒径をもつ材料(c)を用いたL-1とL-2においては、下流端を回転の中心としたいわゆるロ

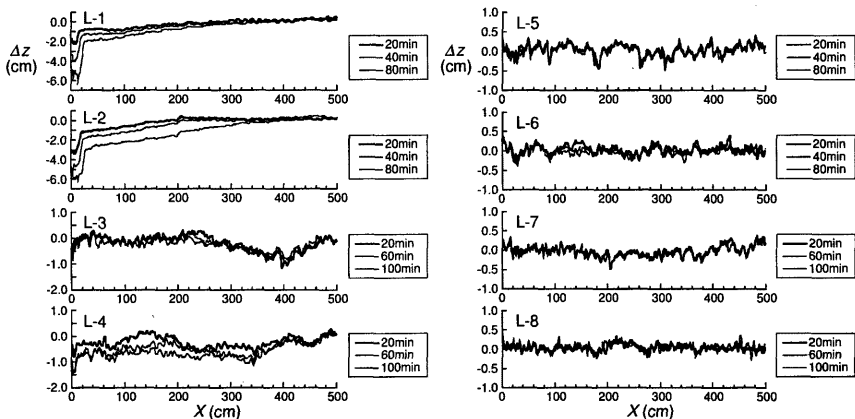


Fig. 8 River bed variation measured in the experiments

一時的な河床変動が生じているのに対し、幅広い粒度分布をもつ材料(g), (h)を用いたケースではパラレルな河床変動が生じている。L-3とL-4では粗い粒子(a)は含まないもの、材料(c)よりは粒度分布の範囲が広い材料(f)を河床材料として用いているため、中間的な河床変動が生じているようである。

Fig. 9に給砂を行ったケースにおいて4地点で計測された河床表面の粒度分布を示している。図中のxは各計測地点の上流端からの距離を示している。これらを見ると、L-2を除くケースでは、時間の経過に伴い水路上流側から徐々に、河床表面上における細粒成分の割合が増加していることが分かる。ここで言う細粒成分とは給砂に用いられている材料(d) (Fig. 3参照)のことを指している。上流から流れてくる流砂の粒径に対して河床表面が粗いと、いわゆる遮蔽効果によって細粒成分が堆積しやすくなるためであると考えられるが、前述のようなトラップにより河床の割合深い部分に捕捉された粒子についても一部カウントされている可能性がある。現時点でこれらを明確に区別することはできなかった。

混合材料(f), (g), (h)を河床材料に用いた場合、いくつかの例外を除けば河床表面が時間経過に伴い粗粒化していることが分かる。細粒成分を給砂した場合に一部、細粒成分が増加しつつも粗粒化しているような2極化的な挙動を示す場合も見られるが、全般的には上流から粗粒化が進行していることが確認された。

Fig. 8のL-1～L-4を見ると、河床材料として粒度分布が比較的一様である材料(c)や材料(f)を用いた場合には、給砂を行った場合の方が河床侵食量が大きくなることが分かる。これは、給砂材料が河床材料に比べて小さいことに原因があると思われる。細粒成分が上

流から供給される時、河床材料のほとんどが掃流されているような条件下であると、細粒成分が河床砂と容易に混合することにより、河床の見かけの平均粒径が小さくなっていると考えられる。すなわち、細粒成分の混入により、より粗い粒子の安定が損なわれ、結果的に侵食量が増大したのであろう。Fig. 9のL-2を見ると、たしかに河床表面が次第に細粒化していることが分かる。これは一般的な混合砂礫床の侵食過程における河床の粗粒化の傾向と明らかに異なっており、本実験における給砂条件と侵食量との関係が一般的な傾向に反することも理解できよう。ただし、通水停止に伴い、流砂として存在していた細粒成分が河床上に停止するため、流れの存在下で実際の河床表面が細粒化していたのかどうかは不明である。また、河床材料と流砂の粒径が等しい場合や、河床材料の一部のものしか移動しないような状況下では、このような現象は起こらないため、現実の河川において頻繁に発生することではないのかもしれない。しかし、細粒成分の供給により河床の侵食がより顕著になることは興味深い事実であり、これに関して今後より一層の検討を行う必要があろう。

3. 混合砂礫床における侵食・堆積速度に関する考察

3. 1 混合砂礫床の流砂・河床変動に関する従来の研究

本研究では比較的幅広い粒度分布をもつ混合砂礫床において掃流砂を対象とした解析を行っている。ここで、混合砂礫床の掃流砂に関して行われてきた研究のうち代表的なものを選び簡単に紹介してみる。

混合砂の掃流砂量式を導くには、一様粒径の流砂量式をもとにして、これを一部修正することが多い。例えば、砂礫の粒度分布の特性に応じて掃流力に補正を加える方法や、限界掃流力に補正を加える方法

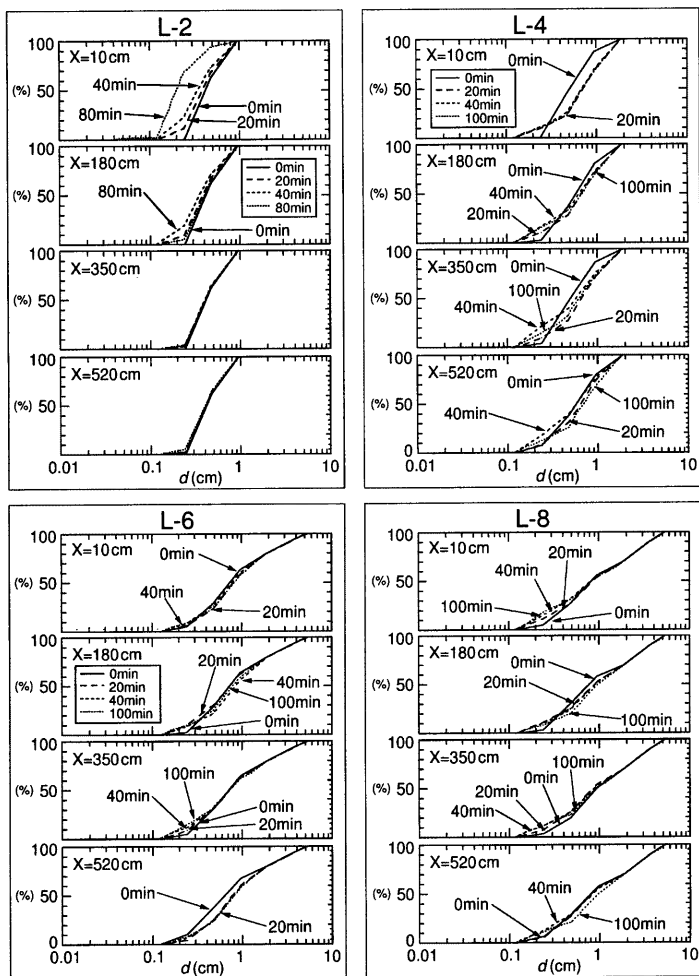


Fig. 9 Grain size distribution of bed surface measured in the experiments

がある。前者の代表例としては、遮蔽係数を導入した Einstein (1950) の研究が挙げられる。後者に関しては、粒子の存在高さの違いに基づいて粒径別の移動限界掃流力を求めた Egiazaroff (1965) の研究や、これに一部修正を加えた 芦田・道上 (1972) の研究などがある。これに対し、水山 (1977) はすべての粒子が移動しているような状態では、各粒径の停止限界掃流力が等しくなっている必要があると考え、実験的にこれを確認している。また、鈴木ら (1994) は掃流力と限界掃流力どちらにも補正が必要であるとの立場から、2 粒径の混合砂礫に関する流砂量式を提案している。これらの式は基本的に平衡場の掃流砂量に

関する式であるため、非平衡な場に対して適用するためには、通常、流下方向の流砂量の増減をもとに河床変動量を求める方法が採られている。

非平衡な場の流砂現象に関する研究としては、中川・辻本ら (1977) によるものが挙げられよう。これは均一砂に関して得られた pick-up rate をもとに、Egiazaroff の粒径別限界掃流力を用いて粒径別の pick-up rate を評価する方法である。step length を用いれば deposit rate が求められるため、pick-up rate との差によって河床変動が計算される。

さらに、非平衡な場での河床変動を解析する方法としては、石礫型土石流を対象とした高橋・中川 (

1991)のモデルが挙げられる。このモデルにおいては、各地点の平衡濃度と実際の濃度との差が侵食・堆積に結びつくと考えられており、侵食・堆積速度を用いることにより河床変動が計算されている。

3. 2 混合砂礫床の流砂モデルに関する問題点

これまで混合砂礫床を対象としてなされてきた研究のうちほとんどは、比較的粒径分布の範囲が狭いものを対象としていて、最大径が最小径の1000倍以上となるような山地河川において適用不可能な場合が多い。また、山地河川では河床の状態が空間的に大きな変動をみせるため、流砂と掃流力との間の非平衡性ということ以外に、河床表層の状況と流砂との非平衡性が問題となることが考えられる。すなわち、掃流砂とはいえ、なかばウォッシュロードのように河床とほとんど交換せずに流下するものも考えられよう。これまでの流砂・河床変動モデルではこのような事象は考慮されていないため、河床表層の粒子の存在率がその粒径階の流砂量に対して支配的な要因となっている。したがって、芦田・江頭ら(1989)によって既に指摘されているように、これらのモデルにより上流域からの土砂供給の減少に伴うアーモアコートの形成過程を説明しようとする、その進行速度は過小評価されることが多い。この問題を解決するため、芦田・江頭ら(1989)は砂礫層内の粒子の垂直移動の概念を導入しているが、前述のように河床との交換がほとんどないような細粒分の存在を認め、河道の全域から細粒分が選択的にピックアップされ流下していると考ええるならば、急激な粗粒化の進行も説明できよう。

また、これまでのモデルでは異なる粒径階間のインタラクションはほとんど考慮されていない。たとえば、各粒径階ごとに平衡流砂量を求める方法では、限界掃流力の算定において他のサイズとの関連は考慮されてはいないものの、流れと流砂のバランスを考える際には単一サイズの粒子として取り扱っているために、粒径に応じて河床面に作用する掃流力が異なっている場合もある。これは粒子の存在高さの差によって作用する掃流力が異なるというのではなく、同一の面(理論河床面)に作用する掃流力が様々な値をとることとあって、合理的とはいえない。Bagnold(1957)の「河床面に作用する全せん断力は、掃流層内で粒子同士が衝突することによって受け持たれるせん断力と、粒子間の流体によって受け持たれるせん断力との和である。」との仮説に基づけば、ある粒径階の流砂量が増加した場合、粒子間の衝突によるせん断力が増加し、流体が受け持つせん断力は減少する。流体のせん断力の大小に応じて、さらなる粒子の移動が生じるか否かが決定されることを考えると、特定の粒径階の流砂量の増加は他の粒径

階の流砂量にも影響を及ぼすに違いないことが推察される。

さらに、実際の流域からの土砂流出予測を行うためには、モデルの予測精度もさることながら、計算においてあまり煩雑な手順を必要としないことも重要である。大きな流域を対象とする場合、計算機の容量や計算時間の制約から、計算点の間隔は最小でも川幅程度に抑える必要があるため、細かい計算格子の配置を要求するようなモデルは使用できないと考えられる。

3. 3 混合砂礫床における侵食・堆積速度式

本研究では、前述のような混合砂礫床の流砂・河床変動モデルの問題点を解決し、より汎用性の高いモデルを構築することを目的として、侵食・堆積速度式を用いた流砂・河床変動モデルを提案しようとしている。ここでは、2章に示した水路実験の結果をふまえながら、混合砂礫床の侵食・堆積速度式に関して考察してみよう。

いま、流れと河床の条件に応じて平衡状態が存在するとし、その土砂濃度が C_∞ であるとする。実際の土砂濃度 C が C_∞ より小さければ、流体の受け持つせん断力は平衡状態のときより大きいため、流体は河床砂を取り込もうとする。すなわち、侵食傾向になると考えられる。これに対し、土砂濃度 C が C_∞ より大きければ、流砂として存在している砂礫の一部が河床上に堆積しようとするはずである。また、 C と C_∞ の差が大きいくほど、侵食・堆積の傾向は増大すると考えられることから、侵食・堆積速度 i と $(C_\infty - C)$ の間に以下の関係が仮定できる。

$$i \propto (C_\infty - C) \quad (3)$$

$(C_\infty - C)$ は全体的な流体の侵食能力を表していると考えられるが、混合砂礫床においては粒子径の違いにより各粒子の流れへの取り込まれ易さが異なると思われる。そこで、侵食速度に粒径の効果が反映されるように、ある粒径階 k の侵食速度 i_k に対して次のような仮定を行った。

$$i_k \propto (u_* - u_{*ck}) \quad (4)$$

ここに、 u_* は摩擦速度、 u_{*ck} は粒径階 k の限界摩擦速度である。Bagnoldの考えに従うならば、 u_* は間隙流体の受け持つせん断力を代表するものであるから、粒子濃度に応じて変化させる必要があるが、ここでは式(3)によって既に全体の侵食・堆積傾向が評価されていることや、粒子衝突によるせん断力は掃流砂が卓越するような場では小さいことなどから、 u_* に対して手を加えていない。また、侵食が起るような場で u_* が u_{*ck} よりも小さいような場合や、堆積が起こ

るような場で u_* が u_{*ck} よりも大きい場合には、その粒径階の粒子に関しては侵食なり堆積なりが生じないものとする。

以上のような考察から、粒径階 k の侵食・堆積速度 i_k は侵食を正とすると次式のように表される。

($C_\infty - C > 0$, 侵食傾向のとき)

$$i_k = \begin{cases} f_{bk} \delta_e \frac{C_\infty - C}{C_*} |u_* - u_{*ck}| & (u_* > u_{*ck}) \\ 0 & (u_* \leq u_{*ck}) \end{cases} \quad (5)$$

($C_\infty - C \leq 0$, 堆積傾向のとき)

$$i_k = \begin{cases} f_{bk} \delta_d \frac{C_\infty - C}{C_*} |u_* - u_{*ck}| & (u_* < u_{*ck}) \\ 0 & (u_* \geq u_{*ck}) \end{cases} \quad (6)$$

$$i = \sum_k i_k \quad (7)$$

ここに、 δ_e, δ_d はそれぞれ侵食係数、堆積係数であり、 f_{bk}, f_{dk} はそれぞれ河床表層と掃流砂中の粒径階 k の存在率である。 C_* は堆積土砂の容積土砂濃度であるが、混合砂礫のこの値について計測を行った結果、粒度分布を変化させても有為な差は見られず、ほぼ0.6であることが分かった。そこで、本研究ではこれ以後、 C_* は常に0.6とする。

平衡土砂濃度 C_∞ に関しては、混合砂礫床における平衡流砂量の研究を参考にして、以下のような方法で算定する。まず、河床構成材料が粒径階 k のみであると考えたときの平衡土砂濃度 $C_{\infty k}$ は、一様砂に関する平衡流砂量式などから求められる単位幅流砂量 q_{buk} と単位幅流量 q を用いて次のように表される。

$$C_{\infty k} = \frac{q_{buk}}{q} \quad (8)$$

C_∞ は $C_{\infty k}$ と河床表層における粒径階 k の存在率 f_{bk} とを用いて次のように表されよう。

$$C_\infty = \sum_k f_{bk} C_{\infty k} \quad (9)$$

土砂輸送濃度 C は全流砂量を流量で割ることによって求められる。

$$C = \frac{1}{q} \sum_k q_{bk} \quad (10)$$

ここに、 q_{bk} は混合砂礫床上の掃流砂のうちの粒径階 k の流砂量（単位幅）である。

3. 4 侵食・堆積速度式と実験値との比較

前節で提案したモデルの妥当性を検証するために、2. 2に示した水路実験の結果との比較を行う。実験値としては実験開始から5分の間の侵食・堆積速度を用いることとし、河床表層の粒度分布としては実験開始直前に計測されたデータを用いている。河床砂礫の頂部を結ぶ線から平均粒径の20%下がった位置に河床面があると考え、水位との差から水深 h を求めた。

摩擦速度 u_* はこの水深と初期河床勾配 I_0 とを用いて計算している。

$C_{\infty k}, C_\infty$ の計算に必要な q_{buk} の計算には、次の芦田・道上(1972)の式を用いている。

$$q_{buk} = 17 \sqrt{sg d_k^3 \tau_{*uk}^{3/2}} \left(1 - \frac{\tau_{*cu k}}{\tau_{*uk}} \right) \left(1 - \frac{u_{*cu k}}{u_*} \right) \quad (11)$$

ここに、 $\tau_{*cu k}$ と $u_{*cu k}$ はそれぞれ粒径階 k に対応する無次元限界掃流力と限界摩擦速度であり、一様砂に関する移動限界の式を適用する。ここでは岩垣(1956)の式を用いてこれらを求めている。

τ_{*uk} は粒径階 k の無次元掃流力であり、粒径 d_k を用いて、

$$\tau_{*uk} = \frac{u_*^2}{sg d_k} \quad (12)$$

と表される。ここに、 g は重力加速度、 $s = (\sigma/\rho - 1)$ であり、 σ は砂の単位体積重量、 ρ は水の単位体積重量である。

混合砂礫床における粒径階 k の限界摩擦速度である u_{*ck} は、Egiazaroff(1965)の式を用いて、

$$\frac{u_{*ck}^2}{u_{*cm}^2} = \left(\frac{\log 19}{\log 19 \frac{d_k}{d_m}} \right)^2 \frac{d_k}{d_m} \quad (13)$$

と表される。ここに、 d_m は河床砂の平均粒径、 u_{*cm} は d_m に対応する限界摩擦速度である。なお、前章で述べたような河床の粒度分布に対する流砂の粒度分布の影響を考慮するために、河床表層の厚さ d_m の部分と流砂とが混在していると考え、 u_{*ck} の計算時に限って、次のように河床表層の粒度分布の修正を行った。

$$f'_{bk} = A_f \left(\frac{h C}{d_m C_*} f_{bk} + f_{dk} \right) \quad (14)$$

ここで、 A_f は f'_{bk} の総和を1とするための係数である。修正された f'_{bk} をもとに河床の平均粒径 d_m を求め、式(13)を用いて u_{*ck} を計算している。

以上のような方法で侵食・堆積速度を求めたところ、実測値との適合は必ずしもよくなかった。これは、実験結果の考察のところで述べたように、河床への細砂のトラップの影響によると考えられる。そこで、次のような方法でトラップの影響に関する修正を行った。まず、移動床部の面積を A_0 とし、細粒分をトラップする部分の面積を A_t とする。トラップする部分の深さを h_t 、体積を V_t とすると、 $V_t = A_t h_t$ となる。いま、 h_t が一定値であるとするならば、流砂がトラップされる確率 p を用いて、 A_t の時間的な減少率は次のように表される。

$$\frac{dA_t}{dt} = -\frac{p}{h_t} Q_b \quad (15)$$

ここに、 Q_b は流砂量であり、ここでは給砂量と等しいとしている。確率 p に関しては、次のように仮定した。

$$p = \frac{A_t}{A_0} \quad (16)$$

トラップする部分以外の面積($A_0 - A_t$)の領域では、式(5)～式(7)によって求められる侵食・堆積速度 i で河床変動していると考え、これが観測時間 T の中では変化しないものとする、観測される見かけの侵食・堆積速度 i' は、

$$i' = i - \frac{1}{A_0 T} \int_0^T A_t dt \quad (17)$$

となる。

以上のような手順で計算された侵食・堆積速度と実験値とを比較した結果がFig. 10に示されている。この時、侵食係数 δ_e は0.6、堆積係数 δ_d は0.05、 A_t の初期値は $0.5A_0$ 、 h_t は 0.01cm としている。 T (=5分)の間にトラップされる土砂の体積は全給砂量の4～8%程度の値となっていた。堆積速度に関してはデータ数も少なく、十分な検討を行えないが、侵食速度に関しては比較的広い範囲で理論値が計算値と一致していることが分かる。Fig. 11にはトラップの影響が比較的小さいと思われるケースにおける粒径別の侵食・堆積速度に関する実験値と計算値とが示されている。これを見ると、両者はかなりよく一致しているといえよう。今後、トラップの影響をより合理的にモデルに組み込むことができるようになれば、さらにモデルの適用性が向上すると考えられる。

4. 混合砂礫床における一次元河床変動解析

4. 1 混合砂礫床の一次元河床変動モデル

ここでは、3章において提案された侵食・堆積速度式を用いて、混合砂礫床における一次元河床変動モデルを構築し、水路実験への適用を通じて妥当性の検討を行う。

一次元的な場を考え、流下方向に x 軸を取ると、流れの連続式および運動方程式はそれぞれ次のように表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\tau}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (19)$$

ここに、 h は断面平均水深、 B は川幅(水路幅)、 Q は流量、 u は断面平均流速、 p は圧力、 τ は河床せん断力、 ϵ は渦動粘性係数である。河床せん断力は摩擦速度 u_* を用いると、

$$\frac{\tau}{\rho h} = \frac{u_*^2}{h} \quad (20)$$

と表され、渦動粘性係数 ϵ はカルマン定数 κ を用いて、

$$\epsilon = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (21)$$

としている。

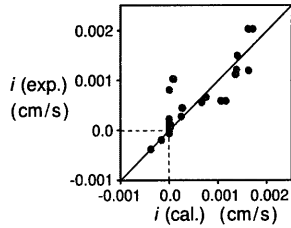


Fig. 10 Comparison of erosion velocity between prediction and observed data

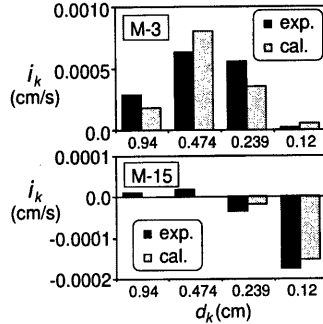


Fig. 11 Comparison of erosion velocity for each grain sizes between prediction and observed data

摩擦速度 u_* は河床の粒度分布の影響を考慮できるように、対数則を用いて以下のように与えている。

$$u_* = \frac{u}{6.0 + 5.75 \log(h/k_s)} \quad (22)$$

ここに、 k_s は相当粗度であり、河床表層の d_{90} を用いている。

圧力に関して静水圧近似を行うと、式(19)の右辺第1項は、

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -g \frac{\partial(h+z)}{\partial x} \quad (23)$$

と表される。ここに、 z は河床位である。

前章で示した侵食・堆積速度式(式(5)～(7))から得られる侵食・堆積速度 i を用いると、河床の連続式は以下のように表される。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i = 0 \quad (24)$$

流砂全体の連続式は、

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial CuhB}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial t} C_* = 0 \quad (25)$$

と表され、粒径階 k に関する流砂の連続式は、

$$\frac{\partial C_k h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial C_k u h B}{\partial x} - C_* i_k = 0 \quad (26)$$

となる。ここに、 C_k は粒径階 k の土砂濃度であり、これらを用いて流砂の粒度分布は以下のように表される。

$$f_{0k} = \frac{C_k}{C} \quad (27)$$

河床表層の粒度分布は、
($\partial z / \partial t < 0$ の時)

$$\frac{\partial f_{bk}}{\partial t} + \frac{i_k}{\delta_s} + \frac{\partial z}{\partial t} \frac{f_{bk0}}{\delta_s} = 0 \quad (28)$$

($\partial z / \partial t \geq 0$ の時)

$$\frac{\partial f_{bk}}{\partial t} + \frac{i_k}{\delta_s} + \frac{\partial z}{\partial t} \frac{f_{bk}}{\delta_s} = 0 \quad (29)$$

と表される。ここに、 f_{bk0} は河床表層より下にも存在する河床材料における粒径階 k の存在率であり、 δ_s は表層の厚さである。

4. 2 河床変動モデルの水路実験への適用

前節において提案したモデルの検証のために、2章に示した水路実験(L-1～L-8)への適用を試みる。前述の支配方程式をFig.12に示す変数の配置に従って差分化した。移流項に関しては風上差分を、それ以外については中央差分を用いている。上流端の境界条件としては流量と給砂量およびその粒度分布を与え、下流端の境界には、以下のような条件を設定した。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (30)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (31)$$

Δx は10cm、 Δt は0.05秒とし、侵食係数 δ_e は0.6、堆積係数 δ_d は0.05としている。トラップの影響は考慮せず、表層の厚さ δ_s は0.1cmとしている。

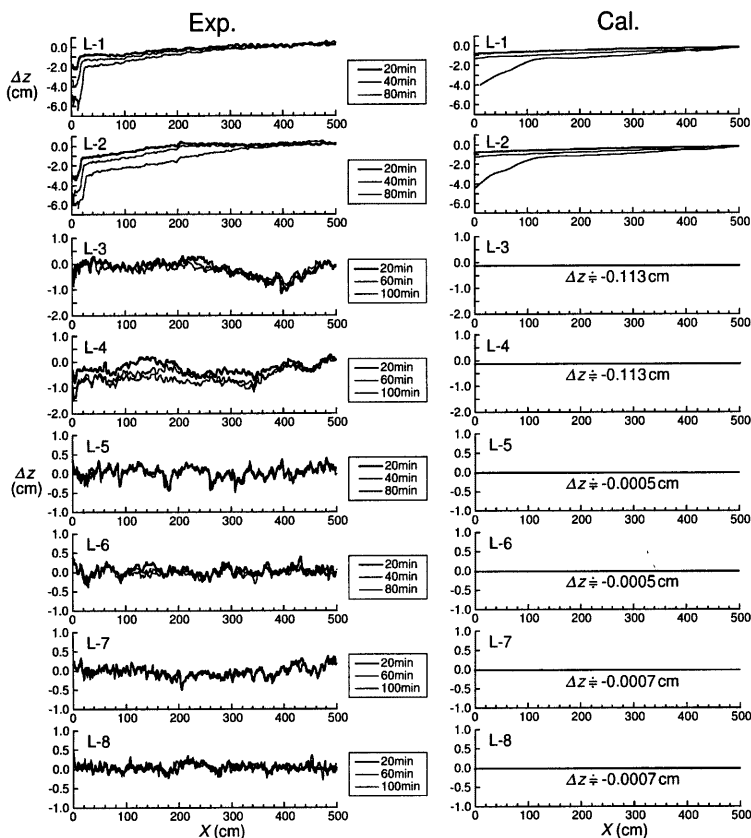


Fig. 12 Longitudinal bed profile calculated by the present model

Fig. 12には実験ケースL-1~L-8における平均河床位の縦断分布に関する計算値が実験値とともに示されている。Fig. 13には $x=10\text{cm}$ と $x=530\text{cm}$ における各ケースの河床表層の粒度分布が示されている。これらを見ると、本シミュレーションモデルによって混合砂礫床の河床変動過程が良好に再現されていることが分かる。ケースL-1~L-4においては水路上流端付近の局所洗掘は計算できないものの、平均的な河床侵食量についてはほぼ実験値と同じ程度になっているといえよう。ケースL-5~L-8については、侵食量が小さいために実験値との対応はあまりはっきりとしない。河床表層の粒度分布に関してみると、ケースL-2, L-4については比較的良好に実験値を再現できていることが分かる。ことに、L-4においては中間的

なサイズの材料が減少し、2極化的な粒度分布に変化することが計算にも現れている。ケースL-5~L-8については粒径の変化量が小さくはっきりとしないため、更なる検討が必要であらう。

5. 混合砂礫床の水みち侵食に関する数値シミュレーション

5. 1 混合砂礫床の二次元河床変動モデル

砂防ダムや河道狭窄部の上流域においては幅広い粒度分布をもつ土砂が広範囲に堆積していることが多く見られる。このような土砂が侵食される際には、水みちを形成することが多いため、一次元的な解析では十分とはいえない。そこで、前章に示した河床

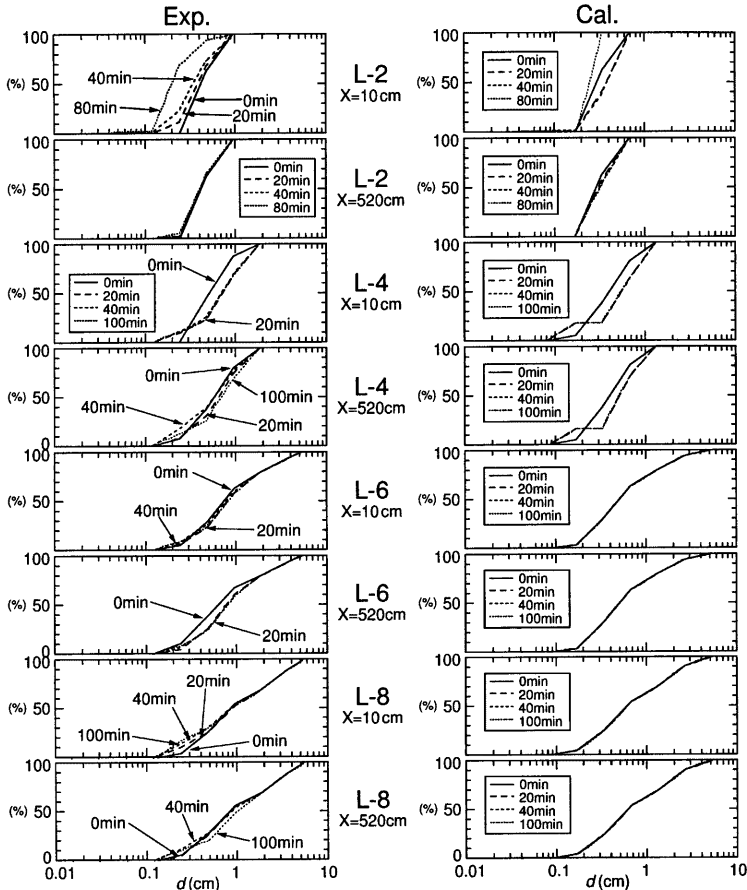


Fig. 13 Grain size distribution of bed surface predicted by the present model

変動モデルを2次元に拡張し、このような場への適用を図る。

流れの計算に関しては、著者ら（1996）の一樣砂礫を対象とした河床変動モデルと同じ方法を用いている。二次元的な場を考え、流下方向に x 軸、横断方向に y 軸を取ると、流れの連続式および x, y 方向の運動方程式はそれぞれ次のように表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad (32)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho h} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (33)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (34)$$

ここに、 v は y 方向の断面平均流速、 τ_x, τ_y はそれぞれ x, y 方向の河床せん断力であり、以下のように表される。

$$\frac{\tau_x}{\rho h} = \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \frac{u_*^2}{h} \quad (35)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho h} = \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \frac{u_*^2}{h} \quad (36)$$

摩擦速度 u_* は、

$$u_* = \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{6.0 + 5.75 \log(h/k_s)} \quad (37)$$

と表され、これを用いて、主流方向の平衡土砂濃度 C_∞ が求められる。 C_∞ と土砂濃度 C から各地点の侵食・堆積速度が計算される。

粒径階 k に関する流砂の連続式は、

$$\frac{\partial C_k h}{\partial t} + \frac{\partial C_k h u'}{\partial x} + \frac{\partial C_k h v'}{\partial y} - C_{*k} i_k = 0 \quad (38)$$

と表される。ここに、 u', v' はそれぞれ x, y 方向の土砂濃度の輸送速度である。主流と流砂の向きが同じであれば、 u', v' は u, v と等しいが、掃流砂を考える場合、河床の横断勾配や2次流の影響によって主流と直交する方向の流砂量が生じるため、なんらかの方法で u', v' を与える必要がある。いま、Fig. 14に示すように主流方向に s 軸、これと直交する方向に n 軸をとり、 s 軸が x 軸となす角を β_1 とすると、

$$\beta_1 = \arctan \frac{v}{u} \quad (39)$$

と表される。2次流の影響が小さいとすると、 n 軸方向の流砂量 q_{bn} は長谷川（1983）の式を用いて次のように表される。

$$q_{bn} = -q_{bs} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_{*s} \mu_{*k} \tau_{*s}}} \frac{\partial z}{\partial n} \quad (40)$$

ここに、 q_{bs} は s 軸方向の流砂量である。いま、上式の根号の値に場所的な変化が小さいと考え、この値を一定値 K とすると、流砂の向きが s 軸となす角 β_2 は、

$$\beta_2 = \arctan \left(-K \frac{\partial z}{\partial n} \right) \quad (41)$$

となる。横断方向に流砂が存在しても、流砂量の総量に変化がないと考えれば、 u', v' はそれぞれ以下のように表される。

$$u' = \sqrt{u^2 + v^2} \cos(\beta_1 + \beta_2) \quad (42)$$

$$v' = \sqrt{u^2 + v^2} \sin(\beta_1 + \beta_2) \quad (43)$$

以上の支配方程式をスタッガードスキームを用いて差分化し、シミュレーションモデルを構築する。

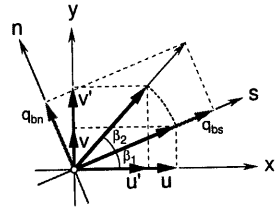


Fig. 14 Schematic of velocity modification due to the transverse sediment transportation

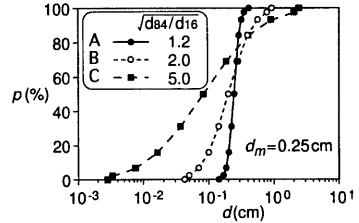


Fig. 15 Grain size distribution of mixture employed in numerical simulations

5. 2 水みち侵食過程に関する数値シミュレーション

上述のシミュレーションモデルを用いて、長さ5m、幅60cmの移動床流路における水みち侵食過程に関する数値計算を行う。

初期河床の中央部には幅14cm、深さ2cmの水みちを設定している。供給流量は $800 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、初期河床勾配は1/20であり、給砂は与えていない。河床砂の粒度分布の条件を変化させて4ケースの計算を行った。各材料の粒度分布がFig. 15に示されている。材料の平均粒径はすべて等しく、粒度分布形だけが異なっている。Case AにはFig. 15のAの材料を用い、Case B, Case Cにはそれぞれ材料B, Cを採用している。

ところで、山地河川においては粒子径の分布範囲が広く、水深規模あるいはそれ以上の粒子までが存在することもあるため、現地観測によって得られた粒度分布を用いて計算を行おうとすると、大きな粒

子の取り扱いが問題となる。計算メッシュよりも大きいような粒子まで計算領域全体に対して均一にその存在率を与える方法もあれば、大きな粒子に限っては個別に存在を評価する方法も考えられるからである。そこで、大きい粒子の与え方が流路変動に与える影響について調べてみることにした。Case Dにおいては材料Cの最大粒径階を除いた粒度分布を用い、代わりに計算メッシュのうちランダムに抽出した125点について、最大粒径階のみで構成されていると考えた。すなわち、河床全体の粒度分布としてはCase Cと同じであるが、大きな粒子の存在が均一ではないと考えていることになる。

すべてのケースにおいて Δx は5cm、 Δy は2cm、時間ステップは0.02秒である。Fig. 16は各ケースの $t=60$ 分における $x=250$ cmの断面の河床横断形状を示して

いる。これらを見ると、まず粒度分布の幅が広いCase B, Cの侵食量が大きいことが分かる。平均粒径を同じにして粒度分布の幅を広げると、細粒分が存在率が大きくなるため、このような結果になったと考えられる。いずれのケースにおいても $t=60$ 分の時点ではほとんど流砂は存在しなくなっており、アーモアコートが形成されている。水みちの横断方向への変動は

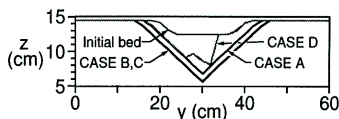


Fig.16 Cross sectional shapes obtained by the numerical simulations

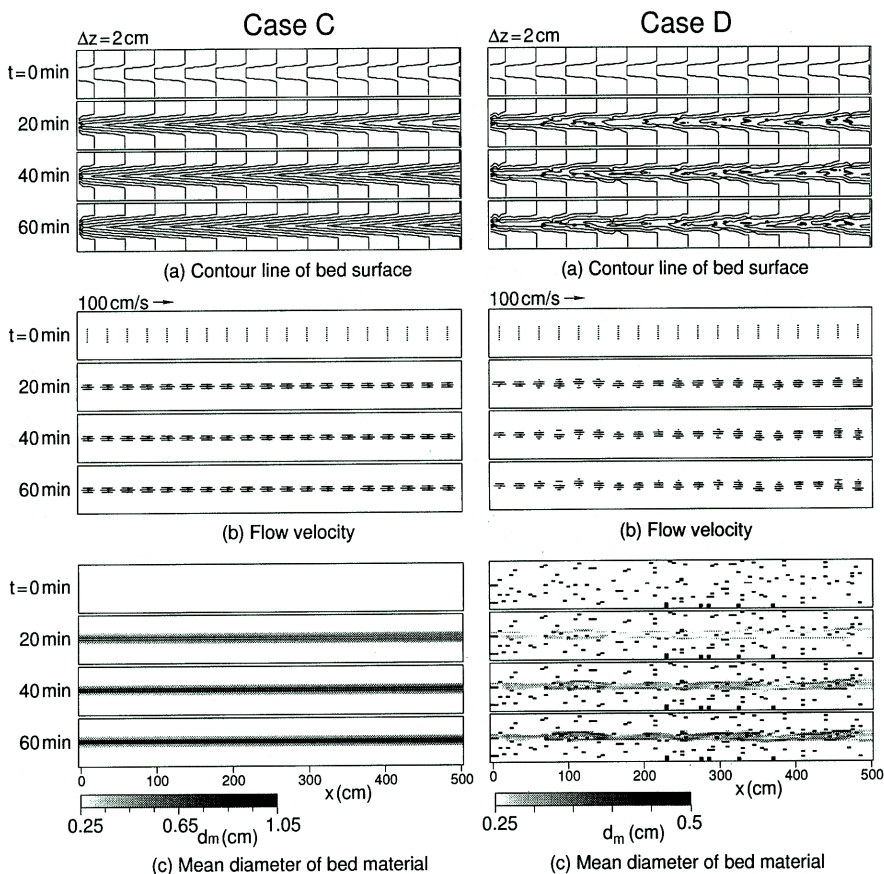


Fig. 17 Contour lines, flow velocity and mean diameter of bed surface in Case C, D calculated by the two-dimensional model

Case Dを除いてほとんど見られないが、これは、上流からの給砂が無く縦侵食が進むような場においては水みちの横断方向への変動が起こりにくくなる、という芦田ら(1988)による実験結果と適合する。Case Dの河床が凸凹しているのは、大粒子の存在するメッシュで侵食が起っていないためである。

Fig. 17はCase C, Dにおける河床コンター図と流速分布図および河床表層の平均粒径の図である。同じ河床材料であっても大きい粒子の評価法を変えると、予測される河床侵食量に大きな差が生じることが分かる。本計算において最大粒径階の粒径は約2cmであり、計算メッシュの横断方向のサイズと同程度となっているが、このような状況は決して特殊なものではない。流路の形状を表現するには、計算メッシュの大きさは流路幅の1/10程度以下にする必要があり、これ以上計算格子の間隔を拡大することはできないため、水みち幅の1/10以上のサイズをもつ粒子が存在する場合には、メッシュサイズと粒子が同程度あるいは粒子の方が大きいようなこともあり得るわけである。したがって、山地河川を対象とした流路変動を考える場合には、大きい粒子の存在をどのように扱うかという問題を避けることはできないと思われる。計算を行う上でメッシュサイズよりも粒子サイズが大きくとも別段問題はないが、本計算で明らかになったように流路の変動過程や河床侵食量に差が生まれることは注意すべきで有ると思われる。今後、現地への本モデルの適用を通じて、この点について一層の検討を行う予定である。

6. おわりに

本研究においては、混合砂礫床の侵食過程に関して水路実験ならびに数値シミュレーションによる解析を行った。ここに、本研究によって得られた成果を要約する。

- 1) 掃流砂を対象とした混合砂礫床の侵食・堆積速度式を新たに提案した。侵食・堆積速度は平衡土砂輸送濃度と流砂濃度との差、および摩擦速度と各粒子の移動限界摩擦速度との差によって求められる。
- 2) 侵食・堆積速度式の妥当性の検討のため、水路実験の結果との比較を行った。その結果、河床の窪みに流砂の一部が落ち込む現象(トラップ)を考慮すれば、計算される侵食・堆積速度は実験結果とある程度一致することが判明した。また、粒径階ごとの侵食・堆積速度も実験値を再現できることが分かった。

3) 一次元的な混合砂礫床の侵食過程に関して、水路実験ならびに上述の侵食・堆積速度式を組み込んだ数値解析モデルによる計算を行ったところ、河床変動量が大きいケースに関しては、両者の結果が比較的良好に一致することが分かった。

4) 侵食・堆積速度式を2次元河床変動モデルに組み込み、混合砂礫床の水みち侵食に関する計算を行ったところ、河床材料の平均粒径が同じであっても、粒度分布の範囲が広がると河床侵食量が増加することが分かった。

5) 河床変動計算において、河床材料のうちの大きい粒子の存在率を全領域に均等に与える方法に比べ、大きい粒子の存在場所を特定する方法では、河床侵食量が小さくなることが明らかになった。

今後、堆積が生じるような条件における水路実験や実河川への適用などを通じて、より一層モデルの改良を図る予定である。

謝辞

本研究は平成9～10年度文部省科学研究費補助金・奨励研究A「山地流域からの降雨・土砂の流出に関する研究」(課題番号09780419, 代表: 里深好文)の補助を受けている。ここに記して感謝いたします。また、水路実験や数値計算の遂行に際し、京都大学防災研究所技官吉田義則氏に御協力いただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 芦田和男・江頭進治・樺屋啓之・里深好文・高村裕平(1988): 砂防ダム堆砂域の侵食と流路の形成機構, 京都大学防災研究所年報, 第31号 B-2, pp.507-523.
- 芦田和男・江頭進治・高村裕平(1989): 移動床のアーミング機構に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第32号 B-2, pp.517-526.
- 芦田和男・道上正規(1972): 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 206号, pp.59-69.
- 岩垣雄一(1956): 限界掃流力に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第41号, pp.1-21.
- 鈴木幸一・栗原崇・山本裕規(1994): 二粒径混合砂礫による流砂量に及ぼす砂礫の混合効果の検討, 工学論文集, 第38巻, pp.627-632.
- 高橋保・里深好文・奥村裕史(1996): 山地河川の流路変動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第

- 高橋保・中川一 (1991) : 豪雨時に発生する石礫型土石流の予測, 新砂防44-3, pp.12-19.
- 土屋義人 (1963) : 混合砂礫の限界掃流力に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第6号, pp.228-253.
- 中川博次・辻本哲郎・原稔明 (1977) : 混合砂礫の粗粒化過程について, 京都大学防災研究所年報, 第20号 B-2, pp.259-273.
- 長谷川和義 (1983) : 沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究, 北海道大学学位論文.
- 水山高久 (1977) : 山地河川の掃流砂に関する研究, 京都大学学位論文.
- Bagnold, R. A. (1957) : The flow of cohesionless grains in fluids, Philosophical Trans. Royal Soci. of London, Vol. 249.
- Egiazaroff, I. V. (1965) : Calculation of nonuniform sediment concentration, Proc. ASCE, HY4, pp.225-247.
- Einstein, H. A. (1950) : The bed-load function for sediment transportation in open channel flows, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Bulletin, No. 1026, pp.1-71.

Study on the Erosion Process in Mountainous River

Tamotsu TAKAHASHI, Hajime NAKAGAWA, Yoshifumi SATOFUKA,
Hirofumi OKUMURA* and Daichi YASUMOTO**

* Electric Power Develop Company

** Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

In this study, sediment transportation and erosion process in a mountainous river, where the bed material is composed of a wide range of grain size, are investigated by experiments and numerical simulation. We introduce a new erosion velocity formula for non-uniform sand bed into the simulation model. The erosion velocity of each grain size can be predicted by the critical friction velocity and the balance between equilibrium sediment concentration and real concentration. We build one-dimensional and two-dimensional simulation model and apply to experiments. The model can calculate the bed degradation process on the non-uniform sand bed.

Keywords: erosion process; mixture bed; sediment transportation; erosion velocity