31　砂防における砂礫の混合効果および破砕・摩耗作用の検討

筑波大学農林工学系　　○眞板　秀二
筑波大学水理実験センター　池田　宏
上武大学商学部　　伊勢屋ふじこ
筑波大学水理実験センター　小玉　芳敬

1．はじめに

近年，筑波大学水理実験センターの池田・伊勢屋・小玉は，これまでとは異なる視点から沖積河川における混合砂礫の流送および流送過程における砂礫の破砕・摩耗作用を検討している．ここで取り上げられた現象は，急勾配渓流でより顕著であり，これからの砂防技術を大きく変える可能性をもつと考える．本報告では，池田らによる研究成果を流砂量予測およびウオッシュロード生産という観点から紹介する．対比の意味で従来の砂防における混合砂礫および砂礫の破砕・摩耗作用についての取り扱いにも触れる．

2．混合砂礫の流送と流砂量予測

混合砂礫の流砂量予測は，一様粒径の流砂量式に修正エギアザロフ式[1]で与えられる粒径別移動限界掃流力を適用して行われることが多い．この方法では，移動限界状態の粒径別の掃流力の関係が砂礫の移動中も同じに保たれているとの仮定に立っている．この仮定の適否については芦田・高橋・水山らが既に検討している[2]．これによると，平均粒径より大きな粒子では，粒径が大きくなるほど実験値が計算値より大きくなり，その適合性が悪くなるとし(図1),修正エギアザロフ式を使った方法が適切でないことを指摘している．そして，混合砂礫では大きな礫は河床砂礫と容易に交換せず運動を継続する性質があるとの流砂実験の観察から停止限界掃流力に着目し，新たな混合砂礫の掃流砂量式を提案している．この式では，流砂の粒径毎の平衡の成立が前提条件となっており，この条件下では各粒径に対する停止限界掃流力は，粒径に無関係に等しいということが基本となっている．

ところで，流砂量予測では移動している状態での砂礫の運ばれ易さの評価が重要である．しかし，上述のようにこれまでの研究は，この評価を移動限界あるいは停止限界の掃流力から行っている．確かに一様粒径の粒子では，移動状態での運ばれ易さは，粒子の性質によって決まるのでこれら限界状態の掃流力からの評価は可能と言える．しかし，混合粒径ではこの運ばれ易さは粒子の性質のみによっては決まらず，周囲の粒子との相対的な関係によって変化するので，これら限界状態の掃流力から評価するのには無理がある．移動状態での砂礫の運ばれ易さの評価のためには，小粒子とともに大粒子までもが移動している状態でどのような現象が起こっているかを把握する必要がある．この点に着目したのが池田らの混合効果に関するつぎの研究と言える[3]．二粒径混合砂礫を使って，まず，礫の供給量を一定とし，砂の供給量を増加させる実験を行った．この実験から水流が流送しなければならない砂礫の合計量は増加するにもかかわらずそれら混合物を流送するのに必要なストリームパワーはかえって減少するというこれまでの認識とは逆の実験事実を示した(図2)．そしてこれは砂礫が混合することによって起こる減摩効果，突出効果，連行効果すなわち混合効果が働くためであると説明し

た．つぎに，砂と礫を合わせた量を一定とし，その混合比率のみを変化させる実験を行い，混合効果はある混合比率を境として急変することを示した(図3)．

以上のように，混合砂礫の移動状態での運ばれ易さは，一様粒径の限界状態の掃流力を基本として組み立てられた認識とは異なるものであった．したがってこの評価のためには，ここで明らかにされた混合効果の定量化が必要で，これをどのように掃流砂量予測に結びつけていくかが今後の砂防分野の課題となろう．

3．砂礫の破砕・摩耗とウオッシュロード生産

3.1 砂礫の破砕・摩耗

河床砂礫の縦断的粒径分布は，流水による砂礫の選択運搬作用と流送砂礫の破砕・摩耗作用によって説明される．しかし，これまでの回流水槽による摩耗実験の結果から後者の作用は無視し得るほど小さいとし，縦断的粒径分布は前者によって説明できるとするのが現在の河川工学，砂防工学の立場である．したがって砂礫の破砕・摩耗によるウオッシュロードの生産ということも全く考えていない．

これに対して小玉らは破砕・摩耗作用の重要性をつぎのように再評価している[4),5)]．沖積礫床河川の粒径別岩種構成比の縦断的変化の検討から，粒径減少に占める破砕・摩耗作用の割合は最小でも約4割，場合によっては6～7割におよぶことを示した．また，サルテーションに伴う礫同士の衝突速度を実際河川に相似させるための装置(ERC-ABRATION-MIXER,図4)を使った破砕・摩耗実験を行い，この実験から得られた礫径の減少率はこれまでの実験と異なり1～2オーダー以上大きいこと，日本の主要な扇状地河川の粒径の減少率とオーダー的に一致することを示し，実際河川での粒径減少を破砕・摩耗作用で説明できる可能性を指摘した．この沖積礫床河川で示された粒径減少に占める破砕・摩耗作用の役割は，急勾配渓流でさらに大きいと考えられるとともに，砂防分野では土砂収支に関連する破砕・摩耗によるウオッシュロード生産に特に注目する必要がある．

3.2 破砕・摩耗によるウオッシュロード生産

ウオッシュロードは河床変動に関与しないということで，砂防ではこれに対処してこなかった．かつて貢板らは大井川東河内流域の山腹土層の模式的物理組成を示し，固相中に占めるウオッシュロード成分は山腹土層で32%,崩壊地流送部で8%であること，また渓床堆積物で1%程度であることを報告し，ウオッシュロード成分を考慮した土砂収支の必要性を指摘した[6)]．この時点では破砕・摩耗によるウオッシュロード生産は考えていなかったが，この量がさらに追加されるなら砂防にとってウオッシュロード成分の考慮が必要不可欠になろう．では，流送土砂の中にウオッシュロード成分がどの程度含まれるであろうか．今，試みに大井川上流域の貯水池堆砂資料を使った土砂収支の検討結果[7)]を基に概略の値を検討してみる．まず問題は，貯水池の堆積土砂の中にウオッシュロード成分がどの程度含まれるかである．大井川水系では千頭貯水池で48%との報告があり，淀川水系の天ケ瀬貯水池では55%，また庄川水系の鳩ケ谷貯水池で40%との報告がある．この値は流域の地質条件の影響が大きいと考えらるが，仮に40%の値を使って検討してみると図5のような結果が得られる．ここでは吉良らの提案による捕捉率[8)]を使って貯水池流入地点での流出土砂量を推定しており[7)]，ダムから下流に流出するのはウオッシュロードと考えている．また，貯水池の堆積土砂の密度を1.5ton/m^{3}として体積を重量に変換している．これらの条件からダム区間への流入土砂量に占めるウオッシュロード成分の割合を

求めると45%ということになる．山腹土層の崩壊あるいは崩壊地の再崩壊による生産土砂に占めるウオッシュロード成分の割合は，前述の東河内流域の調査結果から考えると10～30%程度であり，山腹から生産される以上のウオッシュロードが貯水池区間に流入したことになる．この試算は流送砂礫の破砕・摩耗によるウオッシュロード生産を支持する結果と言える．

小玉は東河内沢の河床礫の頁岩を材料にERC-ABRASION-MIXERを15分間運転した際のウオッシュロード（0.25mm以下）の生産量を調べている(表1)[9]．この結果を，小玉が行ったように[9]つぎの仮定のもとで解釈すると，大井川本流合流点までの7kmを頁岩の河床礫が流送される間にその30～40%が破砕・摩耗によりウオッシュロードとなるということになる．仮定の①，ERC-ABRASION-MIXERの15分間の運転が数100mの礫の移動量に相当する．仮定の②，東河内沢の礫が大井川本流にたどりつくまで受ける破砕・摩耗は，ERC-ABRATION-MIXER実験を7kmの移動相当距離に達するまで連続して行うより，数100mの短い流送距離に相当する実験を繰り返し行うものにより近い．この仮定については今後さらに検討の必要はあろうが，流送砂礫の破砕・摩耗によってウオッシュロードが生産されることは間違いなく，しかもその量を無視できないことは先の試算の結果を考え併せれば確実であろう．

4．おわりに

これまで報告したように，砂礫の混合効果および破砕・摩耗作用についての認識は，これまでの砂防について再検討を迫るものと言える．特に破砕・摩耗作用によるウオッシュロードの生産は，端的に言えば流送の過程で砂礫が粉れてなくなるというもので，砂防対策を大きく変える可能性をもっている．

引用文献

1)芦田和男・道上正規(1971)：混合砂れきの流砂量と河床変動に関する研究，京大防災研年報14B　2)芦田和男・高橋保(1978)：山地河川の掃流砂量に関する研究，新砂防107　3)池田宏(1984)：二粒径混合砂礫の流送に関する水路実験，筑大水理実験ｾﾝﾀｰ報告第8号　4)小玉芳敬・池田宏・伊勢屋ふじこ(1989)：渡良瀬川における粒径別岩種構成比の縦断的変化，筑大水理実験ｾﾝﾀｰ報告第13号　5)小玉芳敬(1990)：ERS-ABRASION-MIXERによる渡良瀬川の河床礫の破砕・摩耗実験，筑大水理実験ｾﾝﾀｰ報告第14号　6)眞板秀二・内田煌二(1984)：山腹土層の粒径成分とその土量変化，砂防学会発表概要集　7)眞板秀二・大坪輝夫・海上道雄(1982)：大井川流域の土砂流出，文部省科研報告書　8)吉良八郎・石田陽博・畑武(1975)：貯水池の堆砂に関する基礎的諸問題，神戸大農研11(2)　9)小玉芳敬(1990)：礫の破砕・摩耗による細流物質の生成，文部省科研報告書

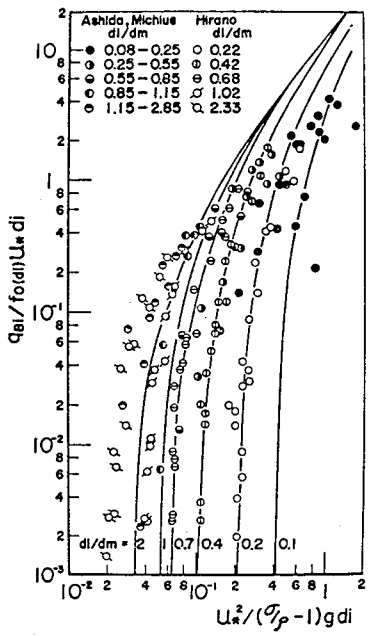

図1　芦田ら[2]による混合砂礫の掃流砂量の実験値と計算値との比較

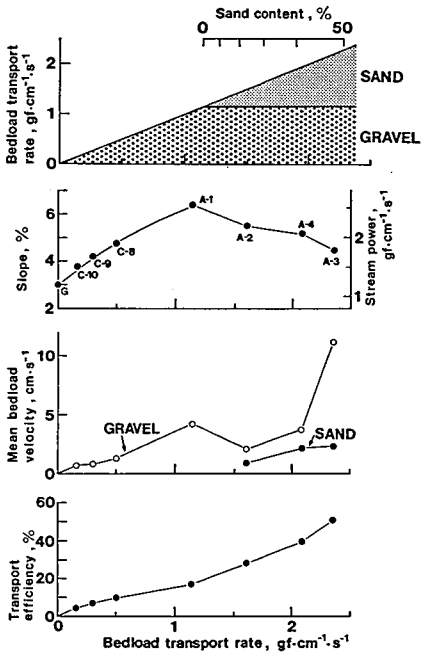

図2　池田[3]による礫の供給量は一定で，砂の供給量を増加させた実験

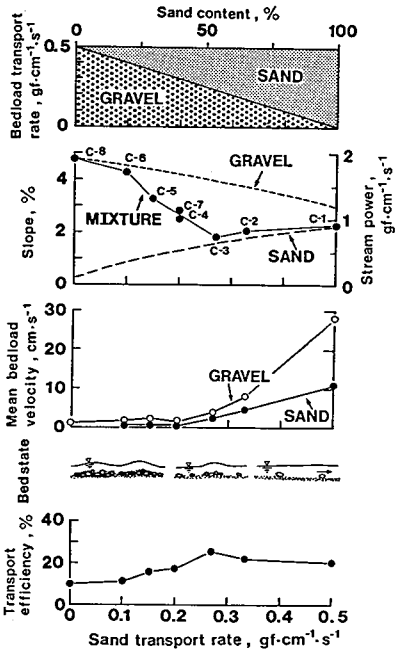

図3　池田[3]による砂と礫の合計の供給量は一定で，混合比率だけを変えた実験

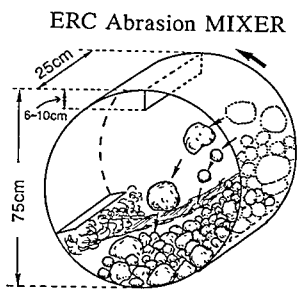

図4　小玉[5]による礫の破砕・摩耗装置

表1　ERC-ABRASION-MIXERの15分間の運転による渓床礫(頁岩)からのWASH-LOAD成分の生産量小玉の実験結果からの計算[9]

単一粒径実験			二粒径混合実験	
LL	MM	SS	LM	MS
2.42%	2.69%	5.35%	2.57%	2.72%

L:-6.0φ～-6.5φ　M:-4.5φ～5.0φ　S:-3.5φ～-4.0φ

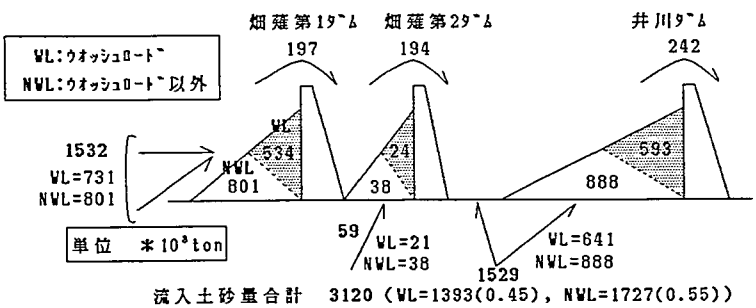

図5　流送土砂量中のWASH LOAD成分量の大井川上流域での試算例