

II-140

混合砂礫床での粗粒化過程と動的平衡状態

（株）日水コン 正 員 ○本橋 健
金沢大学工学部 正 員 辻本 哲郎

1. まえがき： 混合砂礫床における分級現象の最も典型的な例は粗粒化である。流砂量が全くない静的平衡状態に達する静的粗粒化（armoring）に対し、最近、河床が粗粒化していてもその上での流砂量が存在するような動的平衡状態に達する動的粗粒化の重要性が指摘されている。図-1は、動的粗粒化の進行を示す模式図である。

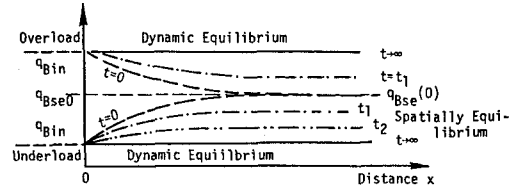


図-1 流砂量の時間的・場所的变化の模式図

る。給砂量が初期の河床粒度に固有の平衡流砂量と異なる場合、流砂量は最初は時間的にも場所的にも非平衡状態であるが、徐々に給砂量に近づいてゆき、結局場所的平衡流砂量が給砂量と等しいような動的平衡状態が達成される。このような過程は総流砂量だけでなく粒径別流砂量についても生じる。すなわち、平衡流砂量の粒度分布は給砂量のそれと全く同じものとなる。上述の過程は分級作用による河床表層の粒度構成の self-adjustment（自己調節機能）と言える。

2. 動的平衡状態の推定： 給砂量 q_{bin} と動的平衡状態における pavement の粒度分布 p_{se} との間には次式の関係が成り立つ。

$$q_{bin} = (A_3 d_i / A_2) \cdot p_{se} \cdot p_{se(i)} (p_{se(i)}) \cdot \lambda_i \quad \dots (1)$$

ここに、 λ_i ：粒径別の無次元平均 step length, 添字 e は平衡状態 (pavement) に対する値を示す。図-2は、この式による計算結果の一例であり、このことより動的平衡状態の存在が示唆された。すなわち、動的平衡河床の粒度分布は給砂量に依存し、粒径の範囲を除いては初期河床（あるいは substrate）の粒度分布には無関係である。しかし、動的平衡状態に達するまでの過程は底面せん断応力と substrate の粒度分布に大きく係っており、非平衡流砂則および河床での砂礫の交換現象に対するモデルを適用しなければ記述できない。

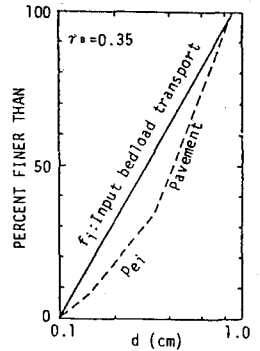


図-2 動的平衡河床

3. 動的粗粒化の非平衡過程： 辻本・本橋¹⁾によると、動的平衡状態に至るまでの非平衡過程は微小時間と河床の縦断方向の微小区間を考え、各区間で離脱する砂の個数 ΔM_{ik} 、停止する砂の個数 ΔQ_{ik} および給砂される個数 $\Delta \tilde{Q}_{ik}$ を pick-up rate と step length で評価することによって、次の基礎式で表わされる。

$$n_{ik}(t+\Delta t) = n_{ik}(t) - \Delta M_{ik}(t) + \Delta Q_{ik}(t) + \Delta \tilde{Q}_{ik}(t) + p_{se} \sum [\{ \Delta M_{jk}(t) - \Delta Q_{jk}(t) - \Delta \tilde{Q}_{jk}(t) \} (d_i/d_j)^2] \quad \dots (2)$$

ここに、 $n_{ik}(t)$ ：時刻 t に k 区間の河床表層に露出している混合砂の i クラスの砂の個数、 p_{se} ：初期河

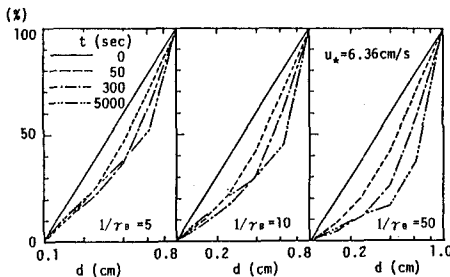


図-3 動的粗粒化過程の数値計算結果

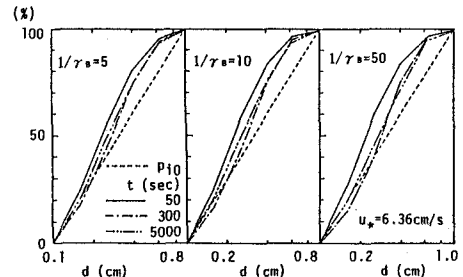


図-4 流砂量の粒度分布の時間的变化

床でiクラスの砂が占める体積割合、N：混合砂の粒径クラスの数である。上式の右辺第5項は、離脱や停止が繰り返された後に新しく露出する個数を表わす。式（2）によって河床表層の粒度分布の時間的・場所的变化が逐次計算できる。図-3は計算結果の一例であるが、 γ_B は初期の平衡流砂量に対する給砂量の割合を示すパラメータで、 $1/\gamma_B \rightarrow \infty$ のとき静的粗粒化に一致する。すなわち、静的、動的の区別なしに統一的に記述できるということが重要である。この図より、給砂量の割合が少ないほどpavementの粒度分布は粗くなることがわかる。また、図-4は粒径別非平衡流砂則を用いて計算された流砂量の粒度分布の時間的变化の一例で、pavement上の流砂量は初期河床の粒度分布に比べやや細くなっている。

4. 実測値との比較： 実河川では先述の給砂量に関するパラメータ γ_B を測定することは一般に困難であるから、pavementが形成されているとき、その河道区間の γ_B を次の方法で推定することとした。 γ_B は厳密には粒径別にそれぞれ異なる値を持ち、給砂量と初期河床の場所的平衡流砂量 q_{Bsi} の比として次式で表わされる。 $\gamma_{Bi} \equiv q_{Bsi}/q_{Bsei} = [(A_3/A_2) \cdot p_{0i} \cdot p_{s0i} \cdot \Lambda_i \cdot d_i] / [(A_3/A_2) \cdot p_{i0} \cdot p_{s00} \cdot \Lambda_i \cdot d_i] = [p_{0i} \cdot p_{s0i}] / [p_{i0} \cdot p_{s00}] \dots\dots(3)$

ここに、 A_2, A_3 ：砂の2次元、3次元形状係数、 p_s ：pick-up rate、 Λ ：平均step length、添字0は初期河床に対する値を表わす。式（3）による γ_{Bi} の値を用いて先の非平衡モデルで計算したpavementの粒度分布はParkerら²⁾による水路での実測値のそれと非常によく一致しており（図-5）、動的粗粒化過程について記述した本モデルの適用性が確かめられた。また、Parkerら³⁾はOak Creek など5つの河川について、pavementおよびsubstrateの粒度分布の実測値を得ているが、これらの河川の γ_B を次のようにして算定することができる。まず、初期河床の粒度分布としてsubstrateのデータを与え、 γ_B の値を変化させて非平衡計算を行ない、その結果として得られる最終平均粒径が実測されたpavementの平均粒径と等しくなるときの γ_B の値によってその河道区間への給砂量を表わしていると判断した。計算結果を図-6と表-1に示す。図-7は、Oak Creekについて表-1の γ_B を用いた非平衡計算によって予測されるpavementの粒度分布とそれに至る過程を再現したものである。

参考文献 1) Tsujimoto & Motohashi : Memoirs, Fac. of Tech., Kanazawa Univ., 21-2, 1988. 2) Parker, Dhamotharan & Stefan : Water Resources Res., 18-5, 1982. 3) Parker, Klingeman & Mclean : Proc. ASCE, HY108, 1982.

Stream	$1/\gamma_B$
Oak Creek	10.5
Elbow River	9.0
Snake River	3.7
Clearwater River	∞
Vedder River	49.5

表-1 5河川の γ_B の値

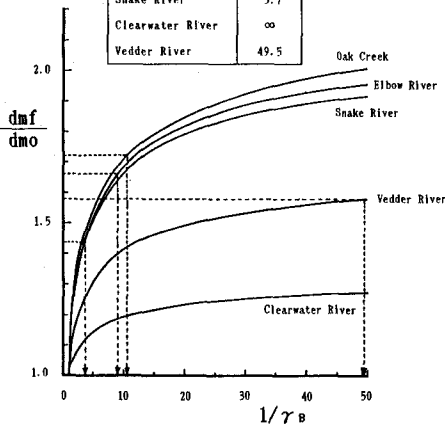


図-6 給砂量の違いによる最終平均粒径の変化

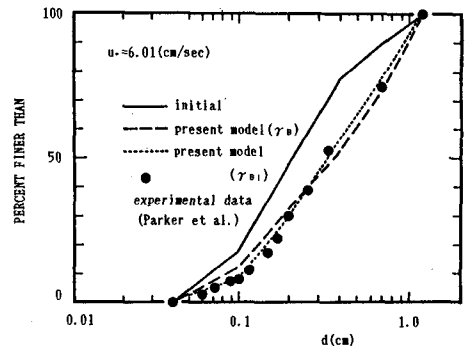


図-5 pavementの粒度分布

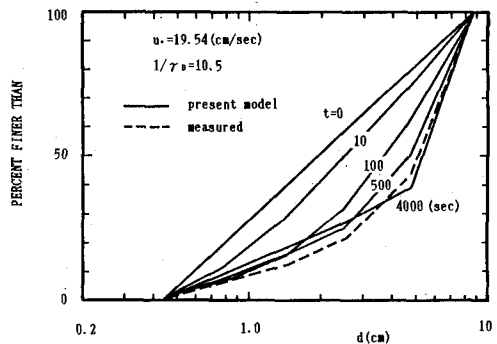


図-7 pavementに至る非平衡過程