

関西電力 正員 矢田 篤
 京都大学工学部 正員 中川 博次
 京都大学工学部 正員 辻本 哲郎

1. まえがき 移動床過程について系の構成要素である砂粒の挙動を表わすパラメータ (たとえば rest period と stop length) を評価できれば、これを組み合わせて平衡状態からずかすにすれば非平衡現象が説明できる。実際着者は砂粒の移動特性量を平衡平坦河床に対して評価し、それを用いて平坦河床からの非平衡状態の出現過程を説明できることを示した^{2,3)}。一方、河床波が形成された場では河床波長のスケールでの粗視化によって砂粒の移動特性量が河床波形状のそれに置き換えられるものと推定し、このレベルでの非平衡過程である河床波の成長過程および崩壊過程の説明を試み、実験的に検証した^{4,5)}。こうした研究成果にもとづき、河床形状と砂粒運動の関係を更に検討すること、砂粒運動の確率的特性に置き換えられるべき河床形状のスケールの分布性について考察することが必要であると考へ、本報では河床波の変形過程の説明・予測に重要な役割を果たすこれらについての考察結果を述べる。

2. 河床形状と砂粒運動との関係に関する基礎的考察 前報⁵⁾に示したように特別な状況 (たとえば“流量急減直後等”) でない限り、実験の結果、個々の波について次の関係式が概ね認められる。

$$j_B = \hat{S}(1 - \beta_0) U_w H \quad (j_B: \text{掃流砂量}, \hat{S}: \text{河床波の形状係数}, \beta_0: \text{砂の空隙率}, U_w, H: \text{河床波の波速と波高})$$

これは流砂が河床波の上流側斜面で洗掘され、同じ波の下流側に堆積するという具合に、形状に完全に規制されているからに他ならず“移動床過程”でこのような状況が出現することを次に示す特別な条件での実験によって確認した。河床波は流砂の局所的な非平衡の出現によって発生し、いわゆる平衡状態まで“発達するか”、この形成過程を原理的に模擬し、固定床粗面と移動床面を接続することによって強制的に非平衡状況を作り出す二次元洗掘実験を行なった。実験は中央粒径が

0.065 cm のほぼ均一砂を用い、自走式超音波測深器によって洗掘部河床縦断形状の時間的変化を記録した。この資料をもとに最大洗掘深 z_{smax} の時間的変化を示したのが図-1であり、 z_{smax} は初期においては時間に比例し、その後時間の平方根に比例する過程が認められる。すなわち、初期過程は平坦河床での個々の砂粒運動を stochastic model で定式化することによって説明できる。step length が平均値 λ ($=\lambda d$) の指数分布で pick-up rate $p_s(x)$ を一定とすると、 $y(x) = -p_s t A_1 d \cdot \exp(-x/\lambda) \dots\dots (*)$ が得られ、これより $z_{smax}/d = p_s A_1 t \dots\dots (**)$ を得る。一方、 z_{smax} が時間の平方根に比例することは、砂粒運動が形状に完全に規制されているため洗掘孔形状の時間的相似性が保たれているからに他ならず、

これより、 $z_{smax}/d = \sqrt{j_B t / S_0 d} \dots\dots (***)$ が得られる。

S_0 は洗掘孔の水平スケールを X_s 、形状を三角形とすると、 $S_0 = X_s / (2 z_{smax})$ である。図-2 に示されるように洗掘孔形状の相似性 (X_s と z_{smax} の比例関係) が成り立つ過程の存在が認められ、この図から、せん断応力によって若干の差はあるものの今回の実験結果では S_0 はほぼ 18.5 程度である。式 (**), (***) を等置することから洗掘状況が遷移する時刻、 $t_T = (A_2/A_1 A_2) \lambda / S_0 p_s$ が求められ、その時の洗掘深は $z_{sT}/d = (A_2/A_1 A_2) \lambda / S_0$ として

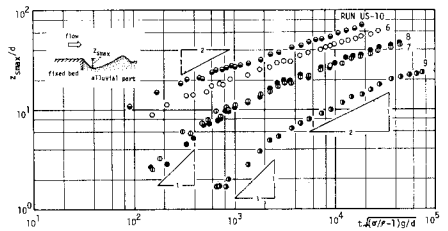


図-1 二次元洗掘実験における最大洗掘深の時間変化

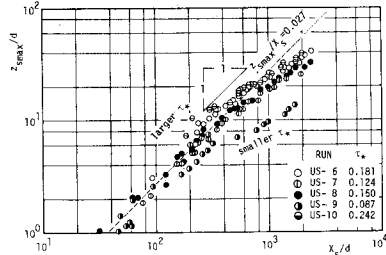


図-2 洗掘孔の水平、鉛直スケールの比

求められる。ここで $g_{80}/\sqrt{(0.9-1)}gd^3 = \rho_{5*} \lambda (A_3/A_2)$, $\rho_{5*} = \rho_5 \sqrt{d/(0.9-1)}g$ とした。ところで, $\lambda \approx 100$, $S_0 \approx 20$, $A_3/A_2 \approx 1$ より, $Z_{5p}/d \approx 5$ とし, これは図-1に示される実験結果と良く一致している。

以上のように河床の形状がその鉛直スケールで直径の5倍程度を越すと流砂は形状に強く規制されるようであり, 流砂運動のパラメータを河床形状のそれに置き換えることが可能である。

3. 河床波スケールの分布性状 移動床過程の多くは個々の波(砂)レベルの現象(素過程)がばらばらに起ることに起因しており, 河床波が形成される場合には, その波のスケールの分布性状を知っておくことが現象説明の大きな鍵であることはこれまでの研究^{4,5)}により明らかである。そこで, ここでは波長分布を, 河床縦断形状を零交叉定常 Gaussian 過程とみなし, 零交叉間隔分布の2重畳み込みであると仮定して, その特性を検討した。 γ_0 を単位長さ当たりの零交叉確率密度とし, $Z(x) = \text{sgn}[Y(x)]$ とすると, 零交叉間隔 $\{E\}$ の期待値および分散は Fourier 変換を用いて次式のように求められる。

$$E[E] = 1/\gamma_0, \quad \text{Var}[E] = (2/\gamma_0) \int_0^\infty \text{Re}z(\xi) d\xi \quad \text{-----} (*)$$

ここで $\text{Re}z(\xi)$ は $Z(x)$ の自己相関関数で, $Y(x)$ が相関係数 $\rho_f(\xi)$ の Gaussian 過程ならば⁶⁾ 次式で与えられることが知られている。

$$\text{Re}z(\xi) = (2/\pi) \arcsin \rho_f(\xi) \quad \text{-----} (**)$$

波長が零交叉間隔の2重畳み込みであるから, その変動係数 α_L は,

$$\alpha_L = \sqrt{2 \text{Var}[E] / (2E[E])} = \sqrt{2\gamma_0/\pi} \left\{ \int_0^\infty \arcsin \rho_f(\xi) d\xi \right\}^{1/2}$$

で求められる。ここで式(**)の積分が計算上の難問となるが, いま $\rho_f(\xi)$ に平均波長を緩和距離とした指数型を用いると積分が解析的に実行され, 結局, $\alpha_L = \sqrt{\ln 2/\pi} \approx 0.47$ となる。この値は前報⁵⁾の実験結果(図-3)と良く一致する。なお, 高次のモーメントの計算は理論展開上の仮定の弊害がでることで, 複雑な分布関数では現象解析(たとえば河床波の変形過程の説明・予測)への適用に不便であることから, ここでは変動係数が上に得られた値となる

gamma分布による波長分布を表示することを提起しておく。すなわち, 平均値⁷⁾規格化された波長 $(\xi = L/L)$ の確率密度関数は,

$$f_L(\xi) = \{r/\Gamma(r)\} (\gamma\xi)^{r-1} \exp(-\gamma\xi)$$

ここで r は shape parameter で $r = 1/\alpha_L^2 \approx 4.5$ である。図-4に示すように(図中実線は $r=6$, 破線は $r=4$ に対する gamma 分布), 波長分布は変動係数がこの程度の gamma 分布で良く表示し得る。

4. あとがき 本報で, 河床波の成長・崩壊過程を統計的手法を用いて説明・予測する場合の基本となる流砂と河床形状の関係および河床形状のスケールの分布性状が明らかにされ, 前報^{4,5)}と併せ, 河床波の変形過程が比較的体系的に説明できることが示された。今後, さらに河床波の統計的性質の詳しい検討および水理条件との関連についての考察など併せ, 研究を続ける予定である。

<参考文献> 1) 中川, 辻本: 土木学会論文報告集, 1975. 2) 中川, 辻本, 矢野: 昭和52年度関西支部年講, 1977. 3) 中川, 辻本, 原: 京大防災研年報, 1977. 4) 中川, 辻本: 第31回年講, 1976. 5) 中川, 辻本, 藤井: 第32回年講, 1977.

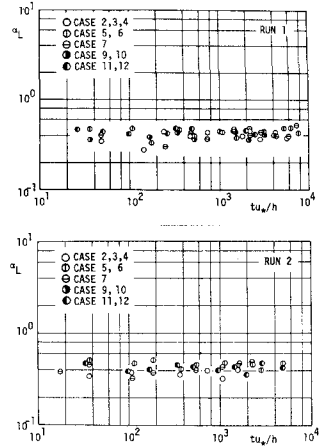


図-3 河床波長の変動係数 (河床波の成長過程)

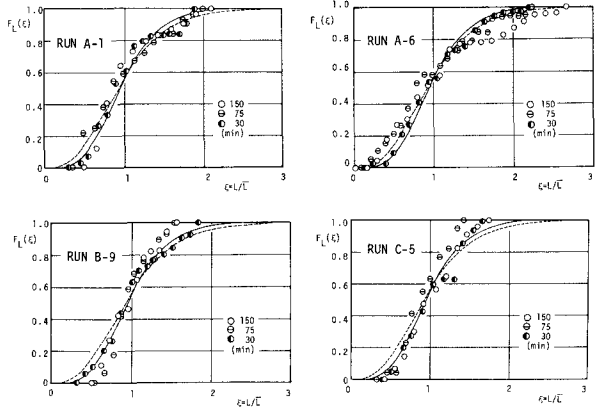


図-4 河床波の波長分布の列

河床形状のスケールの分布性状が明らかにされ, 前報^{4,5)}と併せ, 河床波の変形過程が比較的体系的に説明できることが示された。今後, さらに河床波の統計的性質の詳しい検討および水理条件との関連についての考察など併せ, 研究を続ける予定である。

<参考文献> 1) 中川, 辻本: 土木学会論文報告集, 1975. 2) 中川, 辻本, 矢野: 昭和52年度関西支部年講, 1977. 3) 中川, 辻本, 原: 京大防災研年報, 1977. 4) 中川, 辻本: 第31回年講, 1976. 5) 中川, 辻本, 藤井: 第32回年講, 1977.