

第II部門 非定常開水路流下における流砂過程に関する研究

京都大学工学部 正 員 中川 博次 京都大学工学部 正 員 村上 正吾
東海旅客鉄道 ○正 員 長谷川 昌明

1. まえがき 現在、一樣流れ場での掃流砂、浮遊砂の研究はかなり進んだ。しかし、実際の河川のように流量が絶えず変化することにより水面が変動し、また河床も変形する非一樣流中の流砂を扱った研究の数は多くはない。本研究では、実河川における洪水を対象とした非定常流下における掃流砂の挙動に注目し、河床変動を実験と線形モデル及び非平衡流砂モデルを用いて把握しようとするものである。

2. 底面せん断応力について 確率モデルにより掃流砂を記述する場合、流れの底面せん断応力 τ の時間変化を知る必要がある。そこで、まず本研究では全長12(m)、幅50(cm)の鋼製可変勾配直線水路を用いて流れ実験を行った。パーソナルコンピュータで制御された電磁流量バルブにより流量の制御を行い、hot-film流速計と波高計による同時計測を行った。ハイドログラフは実際の洪水を模擬した三角波、及び解析の容易なsin波とした。実験は水路勾配: $i_b=1/1000, 1/500$, 周期: $\Delta t=30, 60(s)$, base flowの水深: $h_0=3.5\sim 4.8(cm)$, Froude数: $Fr_0=0.56\sim 0.9$, 摩擦速度: $u_{*0}=1.65\sim 2.78(cm/s)$ の範囲で行った。ここで、下付き添え字0は等流時の値を示す。さらに、非定常流下での河床変動を把握するため、流れ実験と同様の水路を用いて移動床実験を行った。実験には、粒径: $d=0.088(cm)$, 比重: $\sigma/\rho=2.65$ の砂を用いた。実験条件は、平坦にならした河床が等流時に変形することのないよう、 $i_b=1/1000, h_0=3.2(cm)$, $Fr_0=0.45, u_{*0}=1.77(cm/s)$ とし、 $\Delta t=30, 60(s)$ の2種類で行った。計測位置は固定床と移動床の接続部及び移動床の十分下流部の2点で行った。

摩擦速度 u_* は客観的に評価するため、非定常流の運動方程式から評価した。得られた u_* は、流速分布に壁法則を適用して得られた値と良好に一致した。ここで、この底面せん断応力の時空間変化を記述すべく、線形解析の適用を試みる。線形化された洪水流の基礎式に、上流端における正弦波状水深変動 $h(0, t)=h_0(1+r_h \sin \omega t) \cdots (1)$ を与えると、底面せん断応力 $\tau(x, t)$ の時空間分布はその振幅 r_τ 、水深に対する位相差 ϕ_τ を用いて、 $\tau=\tau_0\{1+r_\tau \sin(\omega t-\kappa x+\phi_\tau)\} \cdots (2)$ と書かれる。ここで、振幅、位相差は、base flowの特性(流速係数 $\phi_0=U_0/u_{*0}$; U_0 は等流時の平均流速, Froude数 Fr_0) および、洪水の時間特性(無次元角周波数 $\omega h_0/U_0$ の関数として計算される。各実験条件のもとで計算された r_τ, ϕ_τ と実験値から読み取れる結果とを比較したものが図-1 (a), (b)である。図より、振幅、位相差ともに実験値との対応はか

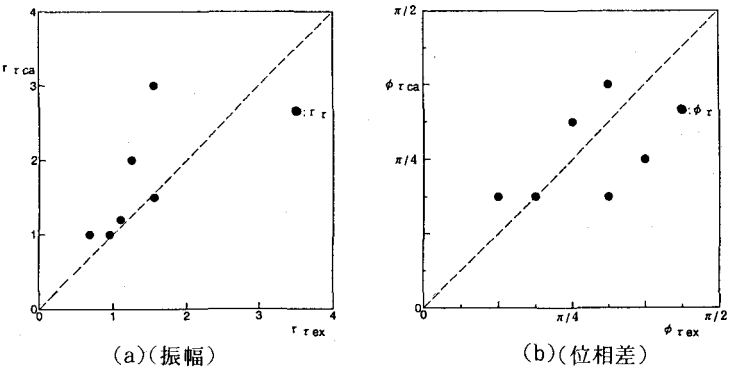


図-1 実験値と線形計算との比較

3. 掃流砂モデルについて 洪水時の掃流過程は、一般に時間および空間的な非平衡状況を呈することより、砂粒の移動速度分布を考慮した非平衡掃流モデルで表現される。すなわち、掃流砂量 $q_B(x, t)$, deposit rate $p_d(x, t)$, 河床高 z の時間変化率 $\partial z(x, t)/\partial t$ は次式のように表される。

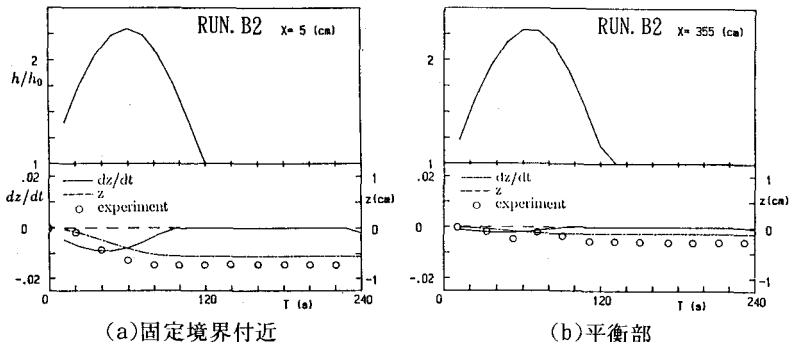
$$q_B(x, t) = \frac{A_3 d}{A_2} \int_{x_0}^x \int_{t_0}^t p_s(x-\xi, t-\tau) \int_{\xi}^{\infty} f_{XT}(\zeta, \tau) d\zeta d\tau d\xi \quad (3)$$

Hiroji Nakagawa, Shogo Murakami, Masaaki Hasegawa

$$p_d(x, t) = \int_{x_0}^x \int_{t_0}^t p_s(x - \xi, t - \tau) f_{XT}(\xi, \tau) d\tau d\xi \quad (4)$$

$$\frac{\partial z(x, t)}{\partial t} = A_1 d \{ p_d(x, t) - p_s(x, t) \} \quad (5)$$

ここで、 $f_{XT}(\xi, \tau)$ はある時刻 τ における step length が ξ である結合確率密度関数である。平坦河床での step length は指数分布に従うことが知られている。図-2(a), (b) は、上式で表される非平衡流砂モデルを用いて、実験条件のもとで図中の水深変化に対する河床変動を計算したものである。底面せん断応力は、与えられた水深の変化に対して先の線形解析による結果を用いた。



(a)固定境界付近

(b)平衡部

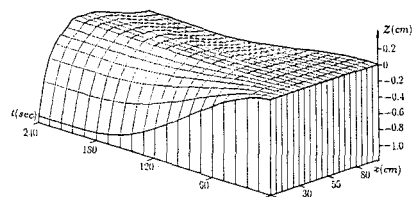
図より、水深のピークより早く河床高の時間変化率のピークがきて、水深のピークの後に河床高が最低になる。そして上流からの給砂が存在する $x=355(\text{cm})$ の地点では、洪水後、河床がやや埋め戻される。また、実験値との対応は計算値がやや小さくなっているが、これは平均 step length (100d と一定値として与えた) 及び砂粒速度 v_g の確率特性 (形状係数が 5 のガンマ分布、平均値は滑動の平衡速度で与えた) の与え方によるものである。このモデルでは、非平衡部における掃流砂による河床変形が忠実に表現される。非平衡部及び全体の河床変形を計算したものが図-3(a), (b) である。(a)より緩和距離が約 50(cm) ($\approx 600d$) であること、(b)より、河床の最深部が時間をおって下流方向へ進んでいくことがわかる。

図-4は、粒子速度を一定として、洪水流の伝搬速度 c と粒子速度との差による効果のみを考えて、次式で $\partial z / \partial t$ を評価し計算される河床高 z と、非平衡流砂モデルで計算されるものとの比較である。

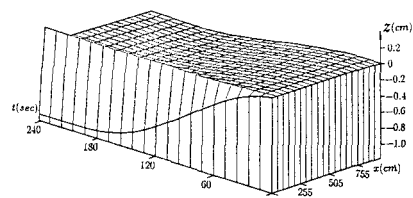
$$\frac{\partial z}{\partial t} = A_1 d \left\{ p_s(x, t) - \int_{-\infty}^x p_s \left(x, t - \frac{\xi}{c} + \frac{\xi}{v_g} \right) f_X(\xi) d\xi \right\}$$

図より、 v_g の分布を考慮した結果と比べて、最大洗掘深はやや小さ目で、洗掘、堆積の時間的変化が小さいのが特徴である。また、非平衡流砂モデルは砂粒子の移動速度分布を考慮しているため、この計算例のように非定常性が極端に大きな場合、砂粒子の速度の効果が大きく現れ、洗掘深がピークになる時間が大きく違ってくる。

4. おわりに 本研究では、非定常開水路流中における掃流砂による河床変動の時空間特性を明らかにした。しかし、実験値との対応から、定量的にはまだ不十分な面があり、砂粒子の移動特性を十分に取り込んだモデル化が今後必要である。



(a)固定境界付近



(b)概観図

図-3 河床高の時空間変化

(6)

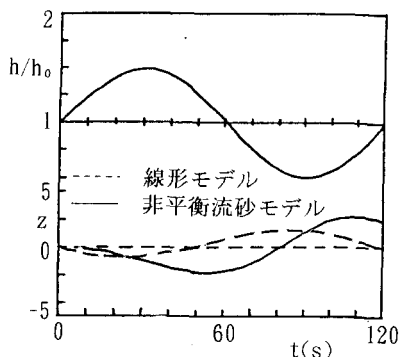


図-4 河床高 z の比較