

II-246

非定常開水路流下における河床変動について

京都大学工学部 正員 村上 正吾

京都大学工学部 正員 中川 博次

東海旅客鉄道 正員 長谷川昌明

1. はじめに

我々が対象とする実際の河川においては、種々の要因によって流量は絶えず変化し、河床形状、流砂量、水位は全体として相互作用系を形成しながら応答していく。特に洪水時における河床変動は直接、間接に河道、河川構造物の安全性に関係することから古くより水理学的な検討がなされてきた。こうした洪水時における河床の時間変化の記述において、特に明らかにすべき点は、従来の流砂の運動方程式(掃流砂量式で代用)においては無視されていた①砂粒運動と水理量の伝搬の時間スケールの違い、と②外力としての底面せん断応力の特性の評価と思われる。本研究では①については中川ら¹⁾の流砂の確率モデルにもとづいて、②については線形化された水流の運動方程式の解にもとづいて検討し、両者を用いて非定常流中の河床高の時間的、空間的的特性の基本的な特性の把握に努める。

2. 非平衡掃流砂モデルについて

個々の砂粒の運動の駆動力は水流であり、しかも非定常開水路流の場合、その水理量の擾乱の伝播速度が水流の速度と同一オーダーである。したがって、砂粒の運動特性と水理量の伝搬速度との差に注目した形で非定常開水路流れの下で出現する時間的、空間的に非平衡な掃流過程を考える必要がある。例えば流砂の原点 x_0 からの距離 x 、時刻 t における掃流砂量 $q_b(x, t)$ は、距離 x' 、時刻 t' に微小区間 dx' より、微小な時間間隔 dt' で飛び出した砂粒が、時刻 t に位置 x を単位時間当り単位幅当りに通過する個数を考えることで得られる。このように、掃流砂量 $q_b(x, t)$ 、deposit rate $p_d(x, t)$ 、河床高の時間変化率 $\partial z / \partial t$ は次のように表される。
 $q_b(x, t) = (A_3 d / A_2) \int_0^x \int_0^t p_s(x - \xi, t - \tau) \int_{\xi}^{\infty} f_{x\tau}(\xi, \tau) d\tau d\xi \dots (1)$
 $\partial z / \partial t = A_1 d \{p_d(x, t) - p_s(x, t)\} \dots (2)$
 $p_d(x, t) = \int_0^x \int_0^t p_s(x - \xi, t - \tau) f_{x\tau}(\xi, \tau) d\tau d\xi \dots (3)$
 ここで $f_{x\tau}(\xi, \tau)$ は砂粒のmoving period(移動時間)が τ で、step lengthが ξ である時の結合確率密度関数であり、step length $\{\xi\}$ と砂粒速度 $\{v_g\}$ が従う確率密度関数 $f_x(\xi)$ と $f_v(v_g)$ を用いて表すと $f_{x\tau}(\xi, \tau) = f_x(\xi) \xi / \tau^2 f_v(\xi / \tau) \dots (4)$ となる。平坦河床でのstep lengthは指数分布に、粒子速度は形状係数 r が3~5程度のガンマ分布に従う。このモデルにおいては、①水理量と砂粒の速度スケールの差はstep lengthと移動速度の確率特性の効果として、②底面せん断応力の時空間的変動の効果は主にpick-up rateによって表現される。

3. 底面せん断応力について

上流端における水深を $h(0, t) = h_0(1 + r_h \sin \omega t)$ (ただし、 $r_h h_0 \sin \omega t$: 水深 h の摂動分、 ω : 洪水の角周波数)の正弦波状水深変動を考える。この時線形化された水流の連続式と運動方程式に対して、岡本²⁾の方法を適用すると、底面せん断応力の時空間変化は $\tau_b(x, t) = \tau_0 \{1 + r_\tau \sin(\omega t - \kappa x + \phi_\tau)\} \dots (5)$ と表わされる。図-1は後述する水路実験において得られた底面せん断応力の振幅 r_τ と位相差 ϕ_τ の実験値と計算値との比較を示したもので、式(5)で分布形は与えられるもの期待される。なお、この解はbase flowの流速係数 ϕ_0 、Froude数 Fr_0 および洪水の無次元周期 $\omega_* = \omega h_0 / U_0$; $T = 2\pi / \omega = 2\pi / T$, T : 周期, h_0 , U_0 : 等流時の水深、平均流速であり、これらの関数となっている。図-2は $i_b = 1/100$, $h_0 = 165(\text{cm})$, $d = 1(\text{cm})$, $T = 120(\text{sec})$, $r_h = 0.5$ とした正弦波状の非定常流に対して計算された河床高の時間変化の一例である。破線が砂粒の移動速度分布を考慮したもので、実線が考慮せず一定値を与えた場合である。分布形を考慮した場合の方が最大洗掘深、水深に対する位相差とも大きいのが特徴である。

4. 実験について

実験は長さ12m、幅0.50mの勾配可変水路の中央部に5mにわたり移動床部を作り、上流と下流には移動床と

同じ砂を粗度付けした固定床を設置した。河床材料には粒径 $d=0.088\text{cm}$ ，比重 $\sigma/\rho=2.65$ の砂を用いた。初期河床は平坦し，等流(base flow)時には変形することのないよう限界掃流力よりやや小さくなるように流れを設定した。また，最大流量時においても河床波が形成されず，また浮遊限界を越えないようにピーク時の流れの条件を定めた3角形状ハイドログラフで行った。水底形状測定器と波高計で河床高と水位を計測した。底面せん断応力の実験においては水路全長を固定床とした。移動床実験の水理条件は路床勾配 $i_b=1/1000$ ， $h_0=3.2(\text{cm})$ ， $Fr_0=0.45$ ， $T=30, 60(\text{sec})$ とした。一方，固定床実験は $i_b=1/1000$ ， $1/500$ ， $h_0=3.5\sim 4.8(\text{cm})$ ， $Fr_0=0.56\sim 0.94$ ， $T=30, 60(\text{sec})$ とした。摩擦速度は非定常流の運動方程式に基づいて評価した。

給砂のない条件下で，固定床から移動床への接続部($x=0$)から十分に離れた位置 $x=350\text{cm}$ での水深と河床高の時間変化の例を図-3に示した。図より，河床は増水期に洗掘され，減水期においても $\partial Z/\partial t$ は正に転じないため十分に埋め戻しされない。最大洗掘深は水深のピークの後にくることが分かる。図中には提案した非平衡掃流砂モデルによって計算された河床高とその時間変化率も併示されており，河床高変化に関する実験値と計算値の対応は良好である。図-4は河床の時間的，空間的な変動を示したものである。計算にあたっては砂粒子運動を滑動過程とみなし，その平衡速度を平均値とした。移動速度の分布を考慮すると，固定床と移動床の接続部から十分に離れた領域への遷移領域における堆積部の存在が再現される。また，減水期における埋め戻しの傾向が顕著な領域はこうした領域であることが計算より認められた。

5. おわりに

本研究では，非定常開水路流中における河床変動の特性を粒子の運動時間（速度）を考慮した形の非平衡掃流砂モデルによって検討した。モデル中のパラメータの特性に実験的な検討がまだ十分でない点が残されており，今後の課題としたい。

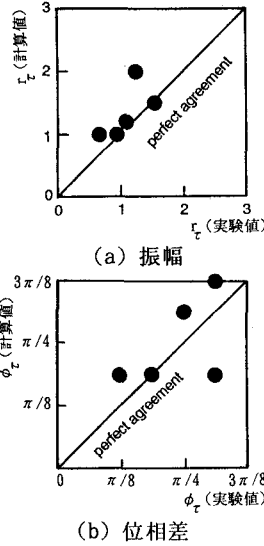


図-1 底面せん断応力

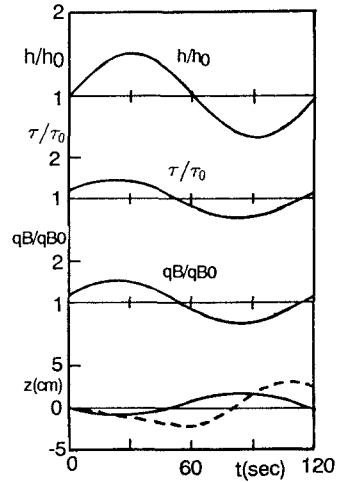


図-2 河床高変化の計算例

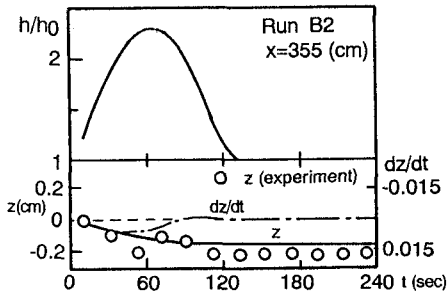


図-3 実験値と計算値の比較

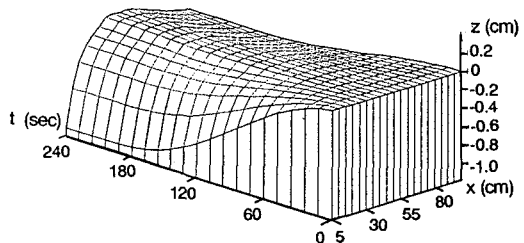


図-4 河床高の時空間変化

- 参考文献 1) 中川博次・辻本哲郎：掃流過程の確率モデルとその一般化，土論第291号，pp. 78-83，1979。
2) 岡本元治郎：河川における潮汐，地球物理 第4巻，1940。