

浸透流の砂面擾乱の不安定性に及ぼす影響について

EFFECT OF INDUCED SEEPAGE FLOW ON PERMEABLE SAND BED INSTABILITY

村上正吾¹・辻本哲郎²

Shogo MURAKAMI, Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 工博 国立環境研究所 アジア自然共生研究グループ (〒305-8506茨城県つくば市小野川16-2)

²正会員 工博 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603愛知県名古屋市千種区不老町)

We analyzed the effect of permeability of fluvial bed on the sand bed instability. The pressure gradient accompanied by the initial formation of sand waves inevitably produces the seepage flow through the fluvial bed. The induced seepage flow has significant effect on flow and sediment transport process. Bed load transport process is indirectly affected by the change of flow resistance, and is directly affected by seepage flow itself. Particularly, dislodgement of sand particles is severely influenced by the suction and injection. Hence, the induced seepage flow prompts or reduces the non-equilibrium bed load transport process and sand bed instability according to the permeability of bed materials particles and surface flow conditions. We applied stochastic sediment transport model in consideration of seepage effect, and revealed its effect on permeable sand bed instability by comparing sand bed instability without permeability with that with permeability.

Key Words : permeable fluvial bed, seepage flow, sand waves, sand bed instability, stochastic non-equilibrium sediment transport model

1. まえがき

水理構造物周辺や河床波が存在する流れ場では、流下方向に圧力勾配が生じ、それに伴い浸透流（流下方向成分と河床面を通過する流出入流速成分）が誘起され、結局、『河床面変形→誘起浸透流の形成→砂粒運動への影響→非平衡流砂過程への影響→河床面変形』という系が形成されることになる。この系については、古くから興味を持たれ、Harrisonら¹⁾が、dunes bed上の表面流の圧力勾配と河床形状の位相差によって誘起される河床面を通過する流出入流速（吹き出しと吸い込み）が流砂量に影響を及ぼしduneの波形勾配を変化させると定性的な指摘を初めて行った後、1970年代前半には、流出入流速の砂粒の限界掃流力への影響がMartin²⁾、Oldemzielら³⁾、Wattersら⁴⁾により検討された。Willetsら⁵⁾は吹き出し場での流砂量分布についての検討を行ったが、力学モデルの構築には至らなかった。近年では、Chengら⁶⁾、Francalanciら⁷⁾により、再び、浸透流、特に流出入流速による砂粒運動への影響の水理学的検討に基づく力学モデル構築への試みが続けられている。また、Chiewら⁸⁾は、一定強度に調節されたような流出入流速場を持つ移動床で河床波の実験を行い、この区間に流入進行する平衡河床波の波形勾配と波高が吸い込みで減少、吹き出しで増加し、再び平衡に至ることを実験的に示している。一方、

河床波の不安定性については、Kennedy⁹⁾が線型不安定解析の手法を持ち込んで以来、この手法に沿って行われた研究のほとんどが境界面の条件としては不透水性を仮定したもので、透水性河床の影響を検討した例は数少ない。Chu & Gelhar¹⁰⁾は、透水性正弦波状河床上の表面流と河床層内の浸透流のポテンシャルを誘導し、Kennedyの不安定解析のフレームワークに適用したが、結果的にはKennedyの理論で未知数となっていた流砂の遅れ距離を河床波と水面の位相差で置き換えたもので、解析結果はKennedyのものとは大差なく、透水性境界面の効果を抽出したとは言い難い。これは流砂の遅れ距離について合理的な評価に至っていない事と、前述したように、河床波面を通過する流出入流速が流砂過程に果たす役割を的確に評価する流砂の力学モデルの研究の進展が十分でなかった事にもよるものである。

本研究では、砂面の不安定解析において不可欠な流砂の非平衡性を十分に表現できる掃流砂のstochastic modelを用いた中川・辻本^{11,12)}による砂面不安定解析の枠組みを採用する。また、その構成要素であるpick-up rateとstep length、および流れ（特に抵抗則）に及ぼす流出入流速の影響については著者ら¹³⁾の結果を用いる。解析的な枠組みを統一し、適用される流砂モデルの力学的構成の同一性を保つことで、誘起浸透流が砂面不安定に及ぼす影響の検討が、初めて可能な状況に至ると考えられる。

2. 線形不安定解析の枠組み

掃流砂による線形不安定解析の枠組みは、次のように要約できる。移動床砂面の形状を次式のような正弦波の微小擾乱 $\eta(x, t)$ とする。

$$\eta(x, t) = -h_0 + a(t) \cdot \sin \{ \kappa(x - U_b t) \} \quad (1)$$

ここで、 x ：流下方向軸、 t ：時間、 h_0 ：非擾乱水深、 a ：砂面擾乱の振幅、 $\kappa = 2\pi/L$ ：角波数、 L ：波長、 U_b ：擾乱の伝播速度である。下付添字0は、非擾乱の値を示す。線形近似の仮定の下では、微小擾乱上の流れと流砂の特性量は全て振幅・位相差の異なる同じ波数と波速をもつ正弦波で表現される。例えば、掃流砂量 q_{B0} は次のように表示される。

$$q_B(x, t) = q_{B0} [1 + r_B a \cdot \sin \{ \kappa(x - U_b t) - \phi_B \}] \quad (2)$$

ここで、 $r_B a q_{B0}$ 、 ϕ_B ：掃流砂量の摂動の振幅と位相差である。同様に、河床擾乱の発達・減衰を示す時間変化率は、次のように表示される。

$$\partial \eta / \partial t = r_{yt} a \cdot \sin \{ \kappa(x - U_b t) - \phi_{yt} \} \quad (3)$$

式(2)と(3)は、次の掃流砂の連続式で関係付けられる。

$$\partial \eta / \partial t = -1 / (1 - \rho_0) \cdot \partial q_B / \partial x \quad (4)$$

ここで、 ρ_0 ：砂の間隙率である。式(2)、(3)、(4)より、擾乱の時間変化率 $\partial \eta / \partial t$ の摂動の振幅と位相差 r_{yt} 、 ϕ_{yt} として次式が得られる。

$$r_{yt} = \kappa r_B q_{B0} / (1 - \rho_0) ; \quad \phi_{yt} = (\pi/2) + \phi_B \quad (5)$$

式(1)の時間微分と式(4)を等置すると次式が得られる。

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial a}{\partial t} = r_{yt} \cos \phi_{yt} = -\frac{\kappa q_{B0}}{1 - \rho_0} r_B \sin \phi_B \quad (6a)$$

$$\kappa U_b = r_{yt} \sin \phi_{yt} = \frac{\kappa q_{B0}}{1 - \rho_0} r_B \cos \phi_B \quad (6b)$$

上式は砂面の擾乱の振幅増幅率と伝播速度・方向は位相差 ϕ_{yt} 、 ϕ_B を調べれば良いことを示しており、線形解析の枠組みでは、 ϕ_{yt} は次のような位相差の線形和として表現されることが知られている¹²⁾。

$$\phi_{yt} = \phi_\tau + \phi_{p\tau} + \phi_{Bp} + \phi_{yB} = \phi_B + \phi_{yB} \quad (7)$$

ここで、 ϕ_τ ：擾乱と底面せん断応力との位相差、 $\phi_{p\tau}$ ：底面せん断応力とpick-up rateとの位相差、 ϕ_{Bp} ：掃流砂量とpick-up rateとの位相差、 ϕ_{yB} ：擾乱の時間変化率 $\partial \eta / \partial t$ との位相差 $(=\pi/2)$ である。本研究では第1項 ϕ_τ を透水性路床上の流れモデルより、第2項 $\phi_{p\tau}$ 、第3項 ϕ_{Bp} を透水性路床での流砂モデルより評価し、河床構成砂礫の透水性が擾乱振幅増幅率に関わる各位相差に及ぼす影響を検討する。

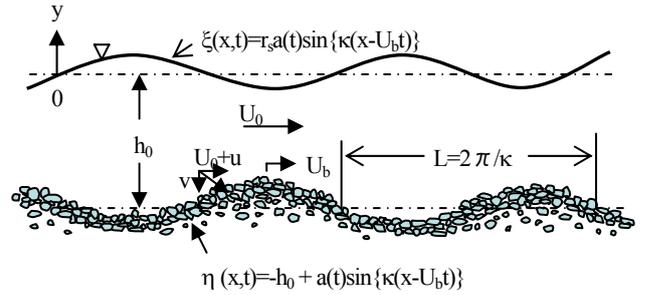


図-1 透水性河床波上の流れの定義図

3. 透水性正弦波状砂面上の流れ

河床が透水性の高い砂礫より構成される波高の小さい正弦波状砂面を仮定する時、水面波 $\xi(x, t)$ は次のように書ける。

$$\xi(x, t) = r_s(t) a(t) \cdot \sin \{ \kappa(x - U_b t) - \phi_s \} \quad (8)$$

ここで、 $r_s a$ ：水面波の振幅、 ϕ_s ：砂面擾乱に対する水面波の位相差である。

正弦波状擾乱河床上の表面流と層内浸透流の流れはChu & Gelher¹⁰⁾によってポテンシャル流理論を用いて扱われ、一様部流速を U_0 とすると、表面流と浸透流の摂動流速に対する速度ポテンシャル ϕ_1 、 ϕ_2 は、

$$\phi_1(x, y, t) = \frac{\cosh \kappa y + Fr_0^2 \kappa h_0 \sinh \kappa y}{Fr_0^2 \kappa h_0 \cosh \kappa h_0 - \sinh \kappa h_0} U_0 a \cos \delta \quad (9)$$

$$\phi_2(x, y, t) = \exp \{ \kappa(y + h_0) \} U_0 a \sin \delta \times \sin \{ \kappa(x - U_b t) - \delta \} \quad (10)$$

で与えられる。ここで、 δ は河床形状に対する水面波の位相差であり、透水性構成材の水利特性を長さの2乗の次元を持つ透水係数 $K^{14)}$ によって表現すると、

$$\tan \delta = (U_0 \kappa K / \nu) \cdot F^* \equiv Re_s \cdot F^* \quad (11a)$$

$$F^* = (Fr_0^2 \kappa h_0 \tanh \kappa h_0 - 1) / (Fr_0^2 \kappa h_0 - \tanh \kappa h_0) \quad (11b)$$

と書ける。 Re_s が河床砂礫の透水性が流れに及ぼす影響を表す項であり、表面流の水量を用いると、次のように表示できる。

$$Re_s = U_0 \kappa K = Fr_0 d_* (\sqrt{K} / d)^2 \sqrt{h_0 / (\sigma / \rho - 1) d \kappa h_0} \quad (12)$$

ここで、 Fr_0 ：非擾乱流のFroude数 $(=U_0 / (gh_0)^{1/2})$ 、 d_* ：無次元粒径 $(=\{(\sigma / \rho) g d^3\}^{1/2} / \nu)$ 、 d ：路床砂粒径、 $K^{1/2} / d$ ：無次元透水係数、 σ 、 ρ ：砂礫と水の密度、 ν ：渦動粘性係数である。式(11)は、位相差 δ は、Froude数、河床の透水性、流水抵抗、lower regimeとupper regimeの流れ区分にも依存していることを示している。

河床面 $(y=h)$ における表面流の流下方向、水深方向成

段分である $U(x, t)$ と $v(x, t)$ は、河床擾乱と関連付けて次のように表示することができる。

$$U(x, t) = U_0 [1 + r_u a \cdot \sin\{\kappa(x - U_b t) - \phi_u\}] \quad (13)$$

$$v(x, t) = r_v U_0 a \cdot \sin\{\kappa(x - U_b t) - \phi_v\} \quad (14)$$

ここで、 $r_u a U_0$, $r_v a U_0$: 河床面($y=h$)での流下、水深方向速度の摂動分の振幅、 ϕ_u , ϕ_v : 砂面擾乱に対する U および v の位相差である。上式と速度ポテンシャル ϕ_1 , ϕ_2 より決まる河床面浸透流の成分とを比較することより、 $U(x, t)$ と $v(x, t)$ の摂動の振幅および位相差は、それぞれ次のように与えられる。

$$r_u \sin \phi_u = \kappa F^* \sin \delta \cos \delta ; r_u \cos \phi_u = \kappa F^* \cos^2 \delta \quad (15)$$

$$r_v \sin \phi_v = \kappa \sin^2 \delta ; r_v \cos \phi_v = \kappa \sin \delta \cos \delta \quad (16)$$

水面波の振幅と位相差は、表面流のポテンシャルに対する水表面での圧力条件と、式(8)とを比較することで与えられる。すなわち、砂面擾乱の振幅と水面波振幅 $r_s a$ の比は、砂面の不安定性を示す指標で次のように書ける¹¹⁾。

$$r_s = |s^*| ; s^* = \frac{Fr_0^2 \kappa h_0}{Fr_0^2 \kappa h_0 - \tanh \kappa h_0} \cdot \frac{\cos \delta}{\cosh \kappa h_0} \quad (17a)$$

$$\tan \phi_s = \tan \delta \quad (17b)$$

で、 $s^* > 0$ のとき $\phi_s = \delta \div 0$ 、 $s^* < 0$ のとき、 $\phi_s = \delta \div \pi$ となる。

4. 砂面擾乱の不安定性に関わる位相差の評価

(1) 流出入流速の砂面擾乱の不安定性解析に果たす意義

高い透水性を有する河床の場合に誘起される浸透流、特にその水深方向成分である流出入流速が砂粒の運動に及ぼす影響は、直接的には水深方向の抗力成分の誘起に伴う限界掃流力の変化、間接的には抵抗則の変化を通じての底面せん断応力の変化として現れる。従って透水性砂面の不安定性解析における流砂モデルには、この二つの効果が組み入れられている必要がある。著者ら¹³⁾の検討によると、流出入流速の影響は、砂粒の初期移動への影響が大きく、step lengthへの影響は限界掃流力付近の低掃流力の場合に有意である。従って、dunesが形成される水理条件下では、移動特性量であるstep lengthへの影響を無視し、初期移動の特性量であるpick-up rate p_s の変化に着目すれば良いことになる。

流出入流速の存在する場での水流による無次元pick-up rate p_{s^*} 推定式は、次のように与えられる¹³⁾。

$$p_{s^*} = F_0 \frac{\Omega}{\Psi} \tau_{*n} \left(1 - k_2 \frac{\Psi}{\Omega} \cdot \frac{\tau_{*cn}}{\tau_{*n}} \right)^3 \quad (18)$$

ここで、 $p_{s^*} = p_s / [d / \{(\sigma' \rho - 1)g\}]^{0.5}$, F_0 , k_2 : 実験定数, τ_* :

無次元掃流力($=u_*^2 / \{(\sigma' \rho - 1)gd\}$), u_* : 摩擦速度), τ_{*c} : 無次元限界掃流力, Ω : 流出入流速による底面せん断応力の変化指標, Ψ : 限界掃流力の変化指標である。下付添え字nは、流出入流速が無い場合の値を示す。

式(18)は、不浸透路床の場合、pick-up rate p_s は τ_c に対して一意的に決まる($\phi_{pr}=0$)のに対し、透水性路床では、抵抗則の変化を考慮した分布 $\tau (= \Omega \cdot \tau_n)$ だけでは、 p_s は決まらず、流出入流速に起因する限界掃流力の変化分の位相差($\phi_{pr} \neq 0$)が存在すること示している。

このことを考慮し、直接・間接的效果を含めて実質的にpick-up rateを規定する有効掃流力を $\tau_{*e} = \Gamma_e \cdot \tau_{*n}$, $\Gamma_e = \Omega / \Psi$ と定義すると、式(18)は

$$p_{s^*} = F_0 (\Gamma_e \tau_{*n}) \left\{ 1 - \frac{k_2 \cdot \tau_{*cn}}{(\Gamma_e \tau_{*n})} \right\}^3 = F_0 \tau_{*e} \left(1 - \frac{k_2 \cdot \tau_{*cn}}{\tau_{*e}} \right)^3 \quad (19)$$

と書けることになる。こうした表示を行うと、pick-up rate p_s は τ_e のみによって決まり、形式上、中川・辻本の不安定解析の枠組みが、そのまま適用できることになる。このとき、 τ_e の位相差 ϕ_{pe} は $\phi_r + \phi_p$ で与えられる。結局、不透水性河床の場合と異なり、底面せん断応力の位相差に加えて v_0 によってもたらされるpick-up rateの位相差が砂面擾乱の時間変化率の位相差 ϕ_{ti} に加算される形で、透水性の影響が砂面不安定に現れることになる。

(2) 微小な流出入流速の有効掃流力へ影響

ここでは、微小な流出入流速が存在する場での有効掃流力に関わる指標 $\Gamma_e (= \Omega / \Psi)$ の検討を行う。まず、流出入流速の存在による抵抗則(底面せん断応力)の変化率 $\Omega (= \tau / \tau_n = (ff_n)^{1/3})$ は、無次元流出入流速 $v_0^+ (= v_0 / u_*)$ に対して次のように表される¹³⁾。

$$\frac{v_0^+}{4} \cdot \left\{ \frac{8}{f_n} + \frac{1 + \ln^2 \Omega}{\kappa_0^2} \right\} + \frac{1}{\kappa_0} \cdot \frac{\ln \Omega}{\sqrt{\Omega}} = \sqrt{\frac{8}{f_n}} \cdot \left(\frac{1}{\Omega} - \sqrt{\Omega} - \frac{v_0^+}{2\kappa_0} \ln \Omega \right) \quad (20)$$

ここで、 κ_0 : Karman定数, f , f_n : 流出入流速が有る場合と無い場合の抵抗係数である。ただし、上式の誘導においては流出入流速が有る場合と無い場合のいずれの流れも、単位幅流量およびエネルギー勾配が同一の等流状態であることが仮定されている。式(20)に基づき Ω を評価するためには繰り返し計算が必要である。そのため、ここでは、砂面の微小擾乱に対して誘起される流出入流速 v_0 が摩擦速度に対して十分に小さい場合を仮定して、式(20)を $v_0^+ = 0$, $\Omega = 1$ の周りでTaylor展開し、その第1項のみを残した線形近似式を用いることとした。

$$\Omega = 1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{1/\kappa_0^2 + \phi_0^2}{1/\kappa_0 + 3\phi_0/2} \cdot v_0^+ \equiv 1 - \varepsilon \cdot v_0^+ \quad (21)$$

ここで、 ϕ_0 : 流速係数($= U_0 / u_*$)である。

一方、流出入流速による水深方向の抵抗力出現による限界掃流力の変化指標 $\Psi (= \tau_c / \tau_n)$ は次式で与えられる¹³⁾。

$$\Psi = (1 + k_L \mu_f) / \{1 + (k_L + \varphi) \mu_f\} (A_* / A_{*n})^2 \quad (22a)$$

$$\varphi = (\varepsilon_0' C_D' / \varepsilon_0 C_D) \cdot (v_0^+ / v_0^+ / A_*^2) \quad (22b)$$

ここで、 $A_* = U_d / u_*$ 、 U_d ：砂粒に作用する代表流速、 k_L ：抗力・揚力比、 μ_f ：静止摩擦係数、 ε_0' 、 ε_0 ：流出入流速及び表面流に対する遮蔽係数、 C_D' 、 C_D ：流出入流速及び表面流に対する抗力係数である。先ず、 φ の評価に当たっては、 $\varepsilon_0' = \varepsilon_0$ 、 $C_D' = C_D$ 、 $(v_0 / U_d)^2 \ll 1$ 、を仮定し、 $\varphi = 0$ とした。一方、 Ψ については表面流の流速分布を粗面対数二乗則¹³⁾で与え、砂粒への局所代表流速を $y=d$ で定義し、 $A_* = (1 + v_0^+ / 4) \cdot A_{*n}$ とすることで、 $v_0^+ = 0$ 付近での Ψ を次のように近似した。

$$\Psi = 1 - (1/2) \cdot v_0^+ \quad (23)$$

以上の Ω 、 Ψ の検討結果を用いると、 $v_0^+ \ll 1$ の場合の有効掃流力に関わる指標 Γ_e は次のように表示できる。

$$\Gamma_e = \Omega / \Psi = 1 - (\varepsilon - 1/2) v_0^+ \quad (24)$$

図-2には、流出入流速による砂粒運動への影響指標 Γ の v_0^+ に対する変化を示しており、 $v_0^+ = 0$ 近傍で式(24)が成立していることが分かる。

(3) 透水性路床上の底面せん断応力の評価

Γ_e が式(24)で与えられる時、 τ_e の評価に当たっては透水擾乱路床 $\tau(x)$ の評価が必要となる。本研究では、中川・辻本の不安定解析の枠組みを採用することで、砂面擾乱がどのように河床面の透水性の影響を受けているかを明らかにすることを目的としていることより、底面せん断応力を評価する流れのモデルとしては、ポテンシャル流理論で評価される局所流速に空間的加速効果を考慮する方法を用いた¹¹⁾。この時、底面せん断応力 $\tau(x)$ は次のように局所流速 U と水深変化 $\partial h / \partial x$ と関係づけられる。

$$\tau(x) = \beta \rho U^2 \{1 - (\gamma / Fr_0^2) (\partial h / \partial x)\} \quad (25)$$

β 、 γ ：経験定数である。式(13)を上式に代入し、

$$\tau(x, t) = \tau_0 [1 + r_\tau a \cdot \sin\{\kappa(x - U_b t) - \phi_{p\tau}\}] \quad (26)$$

と比較すると、 $\tau(x)$ の振幅 r_τ と位相差 ϕ_τ は次のように評価され、 $\delta = 0$ の場合には不透水性河床での中川・辻本の結果に一致する^{11,12)}。ただし、 $\tau_0 = \beta \rho U_0^2$ である。

$$r_\tau \sin \phi_\tau = \kappa F^* \sin \delta \cos \delta + \gamma \kappa (s^* - 1) / Fr_0^2 \quad (27a)$$

$$r_\tau \cos \phi_\tau = \kappa F^* \cos^2 \delta - \gamma \kappa s^* \sin \phi_s / Fr_0^2 \quad (27b)$$

ϕ_τ の決定は、式(24)に式(26)を代入し、線形化の後、

$$p_s(x, t) = p_{s0} [1 + r_p a \cdot \sin\{\kappa(x - U_b t) - \phi_p\}] \quad (28)$$

と比較することで、最終的にpick-up rate p_s の摂動分の振幅 r_p とその位相差 ϕ_p が次式のようにまとめられる。

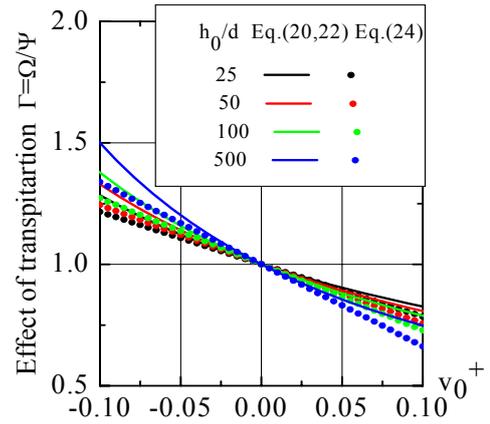


図-2 流出入流速の有効掃流力指標への影響

$$r_p \sin \phi_p = \frac{1 - 3\omega^2 + 2\omega^3}{(1 - \omega)^3} \cdot (r_\tau \sin \phi_\tau - \varepsilon \phi_0 r_\tau \sin \phi_\tau) \quad (29a)$$

$$r_p \cos \phi_p = \frac{1 - 3\omega^2 + 2\omega^3}{(1 - \omega)^3} \cdot (r_\tau \cos \phi_\tau - \varepsilon \phi_0 \cos \phi_\tau) \quad (29b)$$

ここで、 $\omega = k_2 \tau_{cn} / \tau_n$ である。

不安定性の指標である ϕ_{pr} の評価のためには、さらに流砂モデルから有効掃流力と流砂量の遅れが必要とされる。平均step length Λ は流出入流速によって大きく変化しないことが知られており、不透水砂面における非平衡掃流砂モデルの検討結果を用いると、 q_B と p_s との位相差 ϕ_{Bp} （遅れ距離 $\kappa \delta_{Bp}$ ）は次のように与えられる^{11,12)}。

$$\tan(\kappa \delta_{Bp}) = \kappa \Lambda = \kappa h_0 \cdot (\Lambda / d) \cdot (d / h_0) \quad (29)$$

以上の検討により、透水性砂面の不安定性を指標である ϕ_{pr} を構成する全ての位相差 ϕ_τ 、 ϕ_{pr} 、 ϕ_p 、 ϕ_{Bp} 、 ϕ_{Bp} が物理量、砂粒特性に対して求められたことになる。

4. 透水性の高い路床での不安定解析の計算結果

通常の不安定解析では、結果を $Fr_0 \sim \kappa h_0$ 平面上に表示することより、計算の便宜上、ここでは、通水結果としての表面流の水利特性量であるFroude数 Fr_0 、および砂粒Reynolds数 $Re_* (= u \cdot d / \nu)$ を所与条件とし、相対水深 h_0/d を対数則型の抵抗則 $\ln(11.0 h_0/d) / \kappa_0 = (Fr_0 d_* / Re_*) \cdot (h_0/d)^{1/2}$ を仮定することで評価した。計算に当たっては、 $Re_* = 40$ 、 $\Lambda/d = 100$ とした。路床砂礫径は、 $d = 0.02, 0.05, 0.15$ (cm)と変化させた。また、無次元透水係数 $k_{*} = K^{1/2}/d = \alpha \cdot k_m$ と表示でき、 $\alpha = 0.5 \sim 2$ 、 $k_m = 0.028$ であることが実験的に知られており¹⁵⁾、計算では平均値として $\alpha = 1$ とした。この水利条件範囲での最大誘起流出入流速は、 $d = 0.02$ cmでは擾乱流速 U_0 の0.1%、 $d = 0.15$ cmでは3%程度であった。

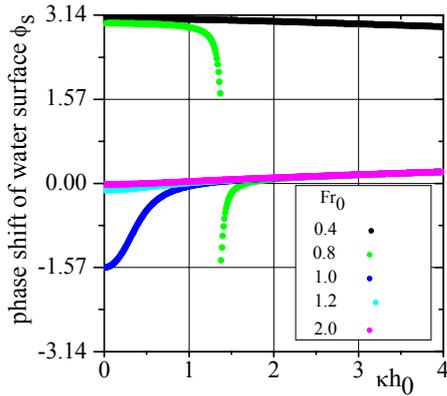


図-3 河床形状に対する水面形の位相差 ϕ_s

図-3は、Froude数 Fr_0 をパラメータに、無次元波数 kh_0 に対して河床擾乱に対する水面の位相差 ϕ_s を示したものである。lower regimeにおいては不透水性河床での位相差 $\phi_s=\pi$ よりやや小さい傾向を示すのに対し、upper regimeでは、不透水性河床での位相差 $\phi_s=0$ が、低波数でやや位相が遅れるのに対し、高波数側で $\phi_s>0$ となる。

図-4は、不透水性河床の場合の底面せん断応力の位相差 ϕ_τ を示したもので、中川・辻本の結果^{11,12})と同じであり、この時には、底面せん断応力とpick-up rateとの位相差 $\phi_{\phi\tau}$ は零となっている。図-5は、流出入流速による有効掃流力 τ_e の河床面形状に対する位相差 $\phi_{\tau e}$ を示しており、図-4と図-5の差が、 v_0 によってもたらされるpick-up rateの位相差分を示している。図-6は、河床高の時間変化率 ϕ_{yt} を Fr_0 をパラメータに、 kh_0 に対して示してあり、 ϕ_{yt} の象限に応じて砂面擾乱の安定性と伝播方向が判断できる。

図-7は、 $Fr_0 \sim kh_0$ 平面上で、砂面擾乱の安定・不安定領域を示したものである。砂礫径の大小による透水性の効果を見るため、これまでの実験結果¹⁶⁾を0.0088～0.025(cm), 0.035～0.055(cm), 0.1～0.23(cm)の3つの粒径範囲に分け、透水性が無い場合($k_s=0$)および砂礫径を $d=0.02, 0.05, 0.15$ (cm)で代表させた透水性砂面でのモデル計算結果と比較した。灰色の領域が不安定領域である。 $k_s=0$ と $d=0.02$ (cm)の場合は、低波数側のantiduneで領域判定に差異が有るが、ほぼ同様の不安定領域を示している。antiduneでの安定化については、この領域で相対水深がかなり小さくなることの各位相差に及ぼす影響を検討する必要があると考えられる。透水性が大きくなる $d=0.15$ (cm)の場合、低波数側($kh_0=2$ 以下)で、 $Fr_0=0.5 \sim 0.8$ の範囲で、dunesが安定化する傾向が認められた。この近傍に $d=0.2$ (cm)程度の粗砂での実験結果はあるものの、計算の検証には至っていない。透水性の影響伝播方向については、粒径、透水性に関わらず、dunesはすべて下流方向にantidunesのほとんどは上流方向に伝播するという従来の解析と同じ結果がモデル計算では得られている。

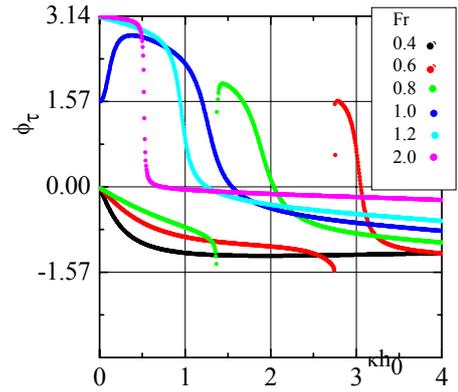


図-4 河床形状に対する底面せん断応力の位相差 ϕ_τ
(不透水性河床: $\phi_p=0$)

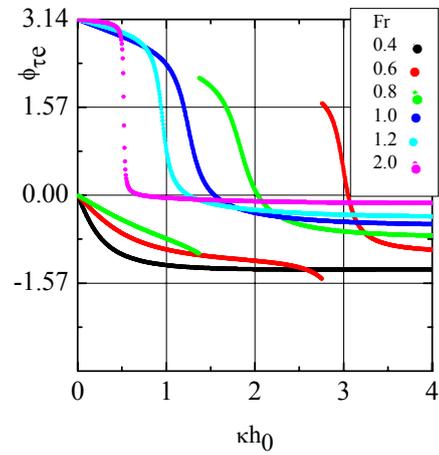


図-5 河床形状に対する有効底面せん断応力の位相差 $\phi_{\tau e}$
(透水性河床: pick-up rate の位相差 $\phi_{\tau e}=\phi_\tau+\phi_p$)

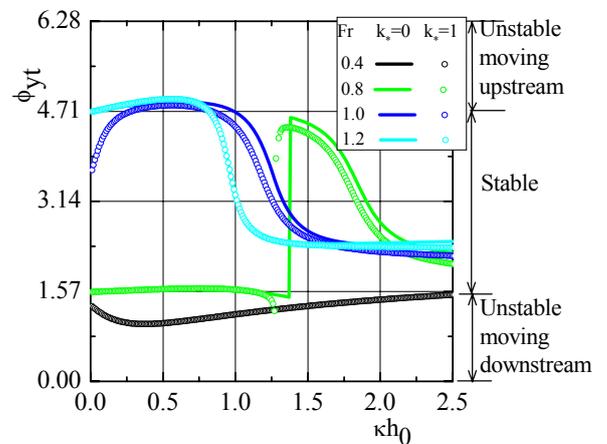


図-6 河床形状に対する河床高時間変化率の位相差 ϕ_{yt}
(河床透水性の効果: pick-up rate の位相差 $\phi_p \neq 0$)

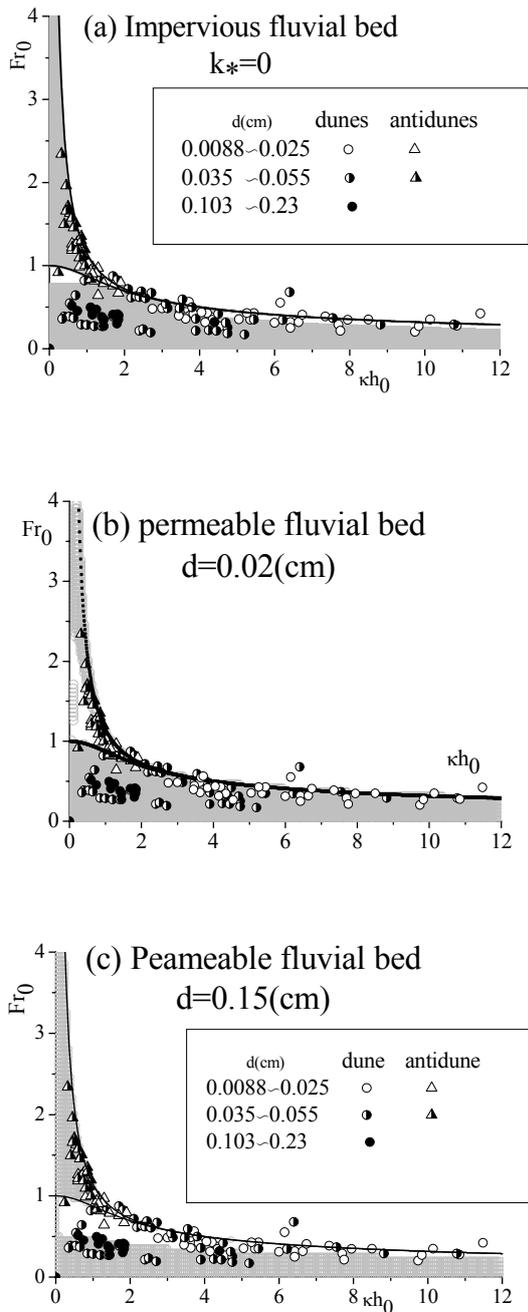


図-7 透水性砂面の不安定解析の計算結果
(路床構成砂礫径の変化の影響)

6. あとがき

本研究では、中川・辻本の砂面不安定解析の枠組みに流出入流速の影響を考慮した流砂モデルを組み込んだ透水性河床擾乱の不安定解析の基本的なモデルを提示し、河床波の存在に伴う流れの圧力勾配によって誘起される流出入流速の不安定解析における役割について検討した。提案したモデルを用いた計算結果は、路床構成砂礫の透水性により不透水性路床の場合と比較して不安定領域が

変化することを示していたが、粒径、路床透水性の変化に伴う不安定領域の変化の妥当性を検証するためには、今後さらに実験データの収集が必要であると考えられた。

参考文献

- 1) Harrison, S. S. and Clayton, L.: Effect of ground water seepage of fluvial processes, Geol. Soc. Amer. Bull., No.811, PP.1217-1225, 1968.
- 2) Martin, C. S.: Effect of a porous sand bed on incipient motion, Water Resour. Res., Vol.6, No.4, pp.1162-1174, 1970.
- 3) Oldenziel, D. M. and Blink, W. E.: Influence of suction and blowing on entrainment of sand bed, J. Hydraul. Div., Proc. ASCE, Vol. 100, HY7, pp. 935-948, 1974.
- 4) Watters, G. Z. and Rao, M. V.: Hydrodynamic effects of seepage on bed particles, J. Hydraul. Div., Proc. ASCE, Vol. 97, HY3, pp.421-439, 1971.
- 5) Willetts, B. B. and Dorossos, M. E.: Local erosion caused by rapid forced infiltration, J. Hydraul. Div., Proc. ASCE, Vol. 101, HY12, pp.1477-1488, 1975.
- 6) Cheng, N. S. and Chiew, Y. M.: Incipient sediment motion with seepage, Journal of Hydraulic Research, 37(5), 665-681, 1999.
- 7) S. Francalanci, G. Parker and L. Solari: Bedload transport in the case of seepage flow, Proc. of the international conference on fluvial hydraulics, River Flow 2006, Vol.2, pp.1569-1576, 2006.
- 8) Chiew, Y. M. and Lu, Y.: Seepage effect on dune geometry, Civil Engineering Research, Nanyang Technological University, No.17, pp.116-118, 2004.
- 9) Kennedy: The mechanics of dunes and antidunes in erodible bed channel, J. Fluid Mech., 16, pp.521-544, 1963.
- 10) Chu, Y. and L. W. Gelher: Turbulent pipe flow with granular permeable boundaries, Report, Ralph Parsons Laboratory, M. I. T., No.148, 1972.
- 11) Nakagawa & Tsujimoto: Sand bed instability due to bed load motion, J. Hydraul. Div., ASCE, 106-HY12, pp.2029-2051, 1980.
- 12) 中川博次・辻本哲郎: 移動床砂面の不安定要因としての遅れ距離・位相差, 土木学会論文報告集, 第305号, pp.139-142, 1981.
- 13) 村上正吾・辻本哲郎・中川博次: 掃流過程における河床面を通しての流出入流速の影響, 土木学会論文集, 第423号/II-14, pp.53-62, 1990.
- 14) Ward, J. C.: Turbulent flows in porous media, Jour. Hydraul. Engrg., ASCE, Vol.90, HY5, pp.1-12, 1964.
- 15) 中川博次: 明石海峡大橋主塔基礎の洗掘防止工法に関する研究: 財団法人防災研究協会 検討報告書, 1987.
- 16) Yalin, M., S.: Mechanics of sediment transport, Ch.7, Sand waves, pp.216, 2nd Edition, 1977.

(2006. 9. 30受付)