

II-155

非定常流れによるれきの掃流量

金沢大学工学部 正員 辻本 哲郎

1. まえがき

流砂現象に及ぼす流れの非一様性や非定常性の効果については必ずしも十分には知られていない。最近 Suszka & Graf は、均一粒径のれき床実験水路で非定常流れのもとで 流砂量の時間的変化を精度良く測定し、さらに非定常効果の指標を呈示し、それと非定常流れのパラメータとの関係を 実験データの回帰にもとづいて提案している(1987)。本報ではその特性を流れと流砂機構の面から説明しようとしたものである。

2. E.P.F.L.での実験とSuszka-Graf(1987)の実験式

LHYDREP-E.P.F.L.において長さ16.8m、幅60cmの水路に中央粒径12.2、23.5mmのほぼ均一なれきを平坦に敷いたところへ、ほぼ三角形波形のハイドログラフをもつ非定常流れを導き、水路下流端に設けられた自動重量測定機能のある採砂箱にて流砂量の時間的変化が測定された。水路勾配は0.005-0.025, "洪水"の継続時間は 33-270秒, "base-flow"はほぼ限界掃流力に, "peak"はほぼその1.5-2.0倍の掃流力に対応させてある。現象を支配する要素はbase-flowの水深(h_0)とその付加分(Δh), base-flowの摩擦速度(u_{*0}), 水路勾配(S_0), 洪水継続時間(ΔT), れきの粒径(d) であり、実験は顕著なbed-formsが形成されるまでに終了した。図-1の実線は水路下流端での水深と実測された流砂量の時間的変化の典型例で、破線は定常等流を仮定して計算された流砂量の時間的変化である。これより知られる特徴は (1) 実測された流砂量は定常等流を仮定して計算されたのより増幅されている。(2) $u_{*0} \Delta T / h_0$ が小さいほど増幅率大きい傾向にある。(3) $S_0 d / h_0$ が小さいとき流砂量のpeakは水深のそれに先行するの(負の遅れ)が認められる。Suszkaらはさらに式(1)で定義される ϵ (図-2参照) を非定常効果指標とし、実験データの整理より、式(2) (若干変形してある) の回帰曲線(図-3)を提案している。これは先述の(1), (2)を表している。式(2)によると、 Δh の効果は相殺され、少なくともE.P.F.L.の実験では $\Delta h / h_0$ の効果は出現していない。

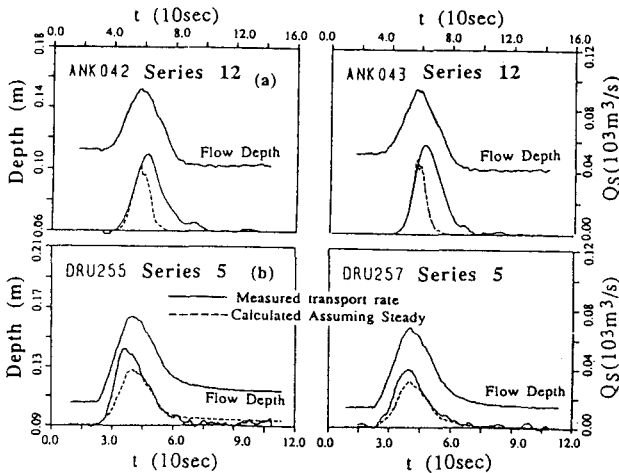


図-1

$$\epsilon = (V_S - V_{S0}) / V_{S0} \quad (1)$$

$$V_{S0} = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta T} q S u(t) dt \quad V_S = \int_{t_0 + \phi/\omega}^{t_0 + \phi/\omega + \Delta T} q S m(t) dt$$

$$\epsilon = 115 \sqrt{\Delta h / (u_{*0} \Delta T)} \sqrt{d S_0 / \Delta h} - 0.3 \quad (2)$$

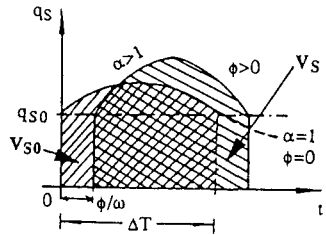


図-2

3. 非定常効果に関する考察

ここでは簡単のため線形近似で論を進める。水深の h_0 まわりの摂動 h' の流砂量に及ぼす働きは式(3)で表される。 β , p_1 , p_2 については後述する。水深の摂動を式(4)のように正弦波で表すと、結局流砂量変動は式(5)のように書け、定常等流の流砂量式をそのまま適用した場合に比べ増幅され 位相差を有することが説明される。

$$q_s = q_{s0} \{ 1 + \beta [(h'/h_0) + p_1 (\partial h' / \partial x) + (p_2 / u_{*0}) (\partial h' / \partial t)] \} \quad (3)$$

$$h' / h_0 = \eta_0 \sin(\omega t - \kappa x) \quad (4)$$

$$q_S(x,t)=q_{S0}[1+\beta\eta_0\sin(\omega t-kx)] \quad \alpha_I=\sqrt{1+\lambda_0^2}; \quad \phi_I=\arctan\lambda_0 \quad \lambda_0=(p_1\kappa-p_2\omega/u^*_{*0})h_0 \quad (5)$$

さて β は式(6)で定義され、従って定常等流での流砂量式に依存する。また非定常流れをSaint-Venant方程式で表現し、しかも線形近似をすすめると、底面せん断応力に及ぼす水深の振動の効果は式(7)で表され、ここに U_0 、 Fr_0 は非擾乱流れのFroude数、断面平均流速、 $\gamma=\alpha_U+1$ は擾乱の伝播速度と断面平均流速の比である(等流時の抵抗則に依存する)。この結果は掃流力の時間的変化が増幅され、水深に対して位相差を持つことを示している。

$$\beta=(dq_S/dh)(h_0/q_{S0}) \quad (6)$$

$$\tau_b=\tau_{b0}[1+(h'/h_0)+p_{01}(\partial h'/\partial x)+(p_{02}/u^*_{*0})(\partial h'/\partial t)] \quad (7)$$

$$p_{01}=-(\alpha_U Fr_0^2+1)/S_0 \\ p_{02}=-\alpha_U Fr_0^2(u^*_{*0}/U_0)/S_0$$

さらに、とくにれきの輸送が“慣性力”の影響を受けるであろうことを、次のように考慮した。1個のれき粒子に作用する慣性力と抗力の比 ψ を考えると、“れきの流送に効果的な掃流力”は、線形近似の枠内では、式(7)にさらに式(8)で表現される ψ が加えあわされた形となる。この“れきの流送に効果的な掃流力”を通常の掃流力に置き換えることから、本論で重要なパラメータである p_1 、 p_2 が決定され、流砂量の位相差の正接 λ_0 は式(9)となる。 λ_0 とFroude数の関係は図-3に概略的に示されるが、E.P.F.L.の実験のようにFroude数がほぼ一定の場合パラメータ $S_0 d/h_0$ が小さいほど負の位相差が出現しやすいことが説明される。

$$\psi=\psi_1-\psi_2=-\Xi_0(C/\sqrt{g})(\alpha_U/A_b)(d/h_0)(1/u^*_{*0})(\partial h'/\partial t) \quad \Xi_0=[2A_3/(C_D A_2)][(\sigma/\rho+C_M)-C_M] \quad (8)$$

$$\lambda_0=[h_0\omega/(\gamma u^*_{*0})]\{\alpha_U^2 Fr_0^2-[1-(\alpha_U \Xi_0/A_b)(C/\sqrt{g})(S_0 d/h_0)\gamma]\}/(S_0 C \sqrt{g}) \quad (9)$$

一方、Suszka-Grafが定義した非定常効果指標 ϵ は、本線形解析では容易に計算され、式(10)のようになる。 ϵ を構成する2つの成分 γ_1 、 γ_2 はそれぞれ、 β と $\eta_0(=\Delta h/h_0)$ 、 λ_0 に支配されている。前者はE.P.F.L.のデータについて容易に計算され、図-4に示すようにE.P.F.L.のデータでは $\Delta h/h_0$ の影響が顕著でないという事実と対応している。もう1つの成分 γ_2 はまさにパラメータ $u^*_{*0}\Delta T/h_0$ と $S_0 d/h_0$ に支配される位相差と強く関連する成分である。流砂量の位相差のデータと線形理論結果を比較したが、実現現象の非線形性と位相差の読み取り誤差により定量的な議論には達していない。しかしながら式(10)中の Ψ とパラメータ $S_0 d/h_0$ の相関は良好でこれに適切な実験式(11)を与えることで γ_2 を、従って非定常効果指標 ϵ を予測することができる(図-5)。

$$\epsilon=\gamma_1\gamma_2 \quad (10)$$

$$\gamma_1=(2\beta\eta_0/\pi)/[1+(2\beta\eta_0/\pi)]$$

$$\gamma_2=\alpha_I-1=\sqrt{1+\lambda_0^2}-1=\sqrt{1+\Psi^2[h_0/(u^*_{*0}\Delta T)]^2}-1$$

$$|\Psi|=2000\sqrt{S_0 d/(h_0 d)} \quad (11)$$

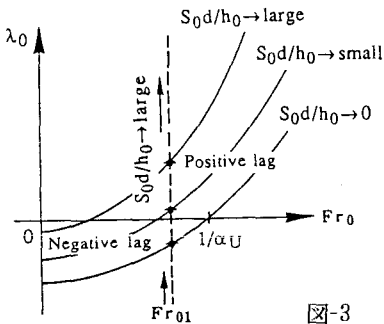


図-3

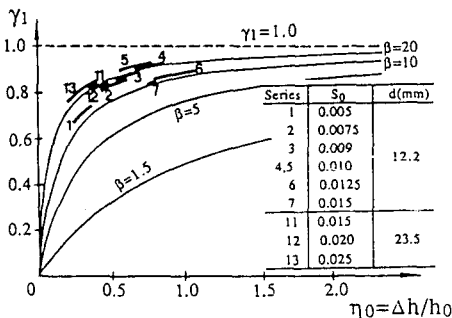


図-4

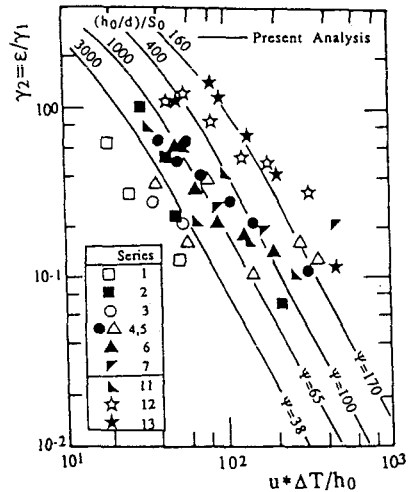


図-5