

1. まえがき 橋脚周辺の局所洗掘は洪水時の橋梁災害の最も大きい原因で、とくに最近では河床の動態との関連で洗掘を論じるべき状況にあると思われる。本報では主として河床波の進行による洗掘孔への流入土砂量の変動により、洗掘深がどの程度変動するものかを検討する。換言すれば、こうした現象をはじめとする諸様相の絡んだ洗掘過程をも十分に説明・予測することのできる洗掘モデルが求められていると言える。

2. 洗掘モデルの概要 著者らは円柱橋脚周辺の洗掘過程について、洗掘孔形状が時間的に相似に保たれること、洗掘の本質が前面で形成され下流へ発達する鳥蹄型渦であること等から、前面に注目して、土砂のバランスを定式化した洗掘モデルを提案した¹⁾。それによる洗掘基礎式は次のようである(図-1参照)。

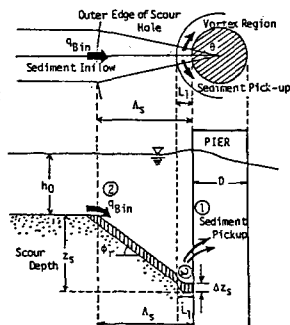


図-1 説明図

$$\begin{aligned} \{\Psi_1(S) - \Psi_2(S)\} (d/D) \Delta t_* &= \Psi_3(S) \Delta S \quad \dots\dots\dots (1) \\ \text{但し, } \Psi_1(S) &\equiv (A_s/A_e) \{ \lambda_1(S) + 1 \} \cdot \lambda_1(S) \cdot p_{svo} \cdot \psi(S) \cdot p_e(S) \quad \dots\dots\dots (2) \\ \Psi_2(S) &\equiv (d/D) \cdot \bar{q}_{B*0} \cdot \gamma_B(S) \{ \lambda_2(S) + 1/2 \} \quad \dots\dots\dots (3) \\ \Psi_3(S) &\equiv (1 - \beta_0) \{ \lambda_3(S) + 1 \} \cdot \lambda_3(S) / 2 \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S &\equiv z_s/d \\ \lambda_1 &\equiv L_1/D \\ \lambda_2 &\equiv A_s/D \\ d &: \text{砂粒径} \end{aligned}$$

$p_{svo} \equiv p_s \sqrt{d/(0.7p-1)}$, $\Delta t_* \equiv t \sqrt{(0.7p-1)g/d}$, $p_{svo} : z_s = 0$ のときの渦域での pick-up rate, $\psi(S)$: 洗掘の進行に伴う p_s の変化, p_e : pick-up された砂が渦域の外へ

運び去られる確率, β_0 : 砂の空隙率, $\gamma_B(S)$: 円柱前方での流砂の非平衡度合, その他の記号は図-1に準拠する。前論文¹⁾において上述のモデルに含まれる諸量: $\lambda_2(S)$, $\lambda_1(S)$, $\psi(S)$, $p_e(S)$, $p_{svo}(t)$ ($\gamma \equiv \tau_{*0}/\tau_{*c}$, τ_{*0} : 非擾乱部での無次元掃流力, τ_{*c} : 無次元限界掃流力) が評価されている。また、これよりいかなる動的洗掘過程における平衡洗掘深(z_{se})を非擾乱部の掃流力の関数として得ている。但し、 D/d がパラメータとなっている(図-2)。

3. 流砂量の変動に対する洗掘深変動応答に関する線形解析

微小変動する流砂量に対し、洗掘深が微小変動に答えるならば

次のように線形解析によって現象を容易かつ簡単な形で記述することができる。いま、 $\bar{q}_{B*0}$ が $\bar{q}_{B*0} (1 + \gamma_B \sin \omega_* t_*) \dots\dots\dots (5)$ と変動し、これに反応して洗掘深が $S_e + S'$ と変動するものとする。 S'/S_e が充分に小さいとき、式(1)は次のように近似される(但し、 ω_* : 無次元化した流砂量変動の角周波数)。

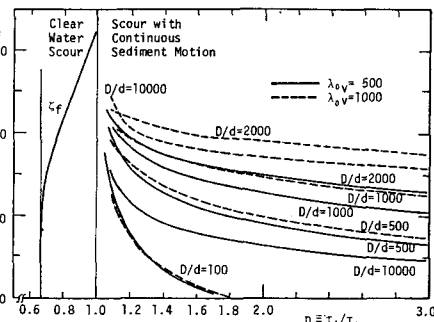


図-2 平衡洗掘深

$$\left[\Psi_1(S_e) \left\{ 1 + \frac{1}{\Psi_1(S_e)} \frac{\partial \Psi_1}{\partial S} \bigg|_{S_e} \cdot S' \right\} - \Psi_2(S_e) \left\{ 1 + \frac{1}{\Psi_2(S_e)} \frac{\partial \Psi_2}{\partial S} \bigg|_{S_e} \cdot S' \right\} \right] \frac{d}{D} \Delta t_* = \Psi_3(S_e) \left\{ 1 + \frac{1}{\Psi_3(S_e)} \frac{\partial \Psi_3}{\partial S} \bigg|_{S_e} \cdot S' \right\} \Delta S \quad \dots\dots\dots (6)$$

上式中、 $\sim$ 部が充分小さいことかこれを無視し、また $\Psi_1(S_e) - \Psi_2(S_e) = 0$ ("平衡"の定義)であることを用いると、式(3)、(4)を代入して次式のように S' についての微分方程式が得られ、容易にその解(S')を知ることができる。

$$\frac{dS'}{dt_*} = - \frac{2\bar{q}_{B*0}}{1-\beta_0} \left(\frac{d}{D} \right)^2 \frac{\gamma_B}{\lambda_3(S_e)} \cdot \sin \omega_* t_* \quad \dots\dots\dots (7) \quad \text{但し, } \tilde{\lambda}_3(S_e) \equiv \frac{\lambda_3(S_e) \{ \lambda_2(S_e) + 1 \}}{\lambda_3(S_e) + 1/2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$S' = \frac{2\bar{q}_{B*0}}{1-\beta_0} \left(\frac{d}{D} \right)^2 \frac{1}{\tilde{\lambda}_3(S_e)} \cdot \frac{\gamma_B}{\omega_*} \cdot \sin(\omega_* t_* + \frac{\pi}{2}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

以上のように、微小変動流砂量に対しては洗掘深は $\pi/2$ だけ位相がずれて応答、その変動幅は $\bar{q}_{B*0}$, (D/d) , γ_B , ω_* 及び S_e によって決まる $\tilde{\lambda}_3$ に支配されていることがわかる。

*) scour with continuous sediment motion,

) 辻本・水上: 第29回水講演文集, 1985.

4. 河床波の進行に伴う洗掘深の変動 動的洗掘過程では洗掘深が平衡洗掘深まわりで変動し、これが河床波の進行に伴ったものであるとの指摘はすでにある。^{2),3)} しかしいずれも河床波高が何らかのフィルターがかかっている場合としか考へられ、土砂の収支にもとづいて適確には検討されてはいない。図-3に概念的に示すように河床波の進行により、洗掘孔上流端の流砂量が変動することが最も重要なポイントで、河床波の進行によってすべての流砂量が違ってくる状況(浮砂砂がない)では、洗掘孔上流端(P₀の位置)での流砂量はその位置での河床高と河床波の波速の積で与えられる。すなわち、河床波を正弦波で表わすと、点P₀の河床高の時間的変動は、 $y = (H/2) \sin(2\pi t/T_D) \dots\dots (10)$ (H :河床波の波高, T_D :河床波の周期)と書け、流砂量変動式(5)の形を書くと、 $\gamma_B = 1$, $\omega_* = 2\pi/T_D$ となる。河床波の周期を、河床波1個の体積を平均流砂量で運ぶのに要する時間とこゝで求めると、 $T_D = \zeta(1-\gamma_B) L \cdot H / \bar{q}_{B0} \dots\dots (11)$ (ζ :河床波の形状係数で約0.5)となり、 $T_D = \zeta(1-\gamma_B) R_L^2 \theta (R/d)^2 / \bar{q}_{B0} \dots\dots (12)$ ($R_L \equiv L/r$, $\theta \equiv H/L$, L :波長, R :水深)である。すなわちその振幅は式(9)にこれを代入して次のように定められる。

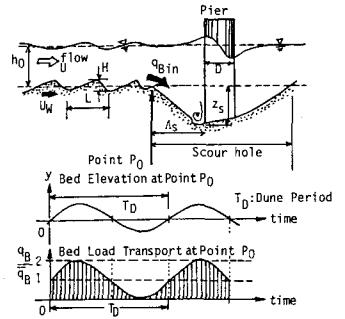


図-3 概念図

$a_s = \{ R_L^2 \theta / 2\pi \hat{\gamma}_s(\zeta e) \} (h/D)^2 \dots\dots (13)$ つまり、無次元洗掘深の変動幅は R_L , θ , ζe , (R/D) に支配される。dunes であれば、 $R_L \sim 5$ 程度であり、 θ は、例として Fredsøe⁴⁾ によると η の関数として与えられる。洗掘深の変動の標準偏差 σ_s を $a_s D$ 程度と看し、一方上流の橋脚の影響を受けまいとこゝでの河床高の変動の標準偏差 σ_y を $H/2$ 程度とすると、 $\sigma_x/\sigma_y = \{ R_L / \pi \hat{\gamma}_s(\zeta e) \} \cdot (h/D) \dots\dots (14)$ となる。

上記のように流砂量変動とそれに伴う洗掘深の変動を微小と考えると解析も容易で支配要素の効果も明らにされるが、計算された結果は必ずしも微小変動とは言えない。そこで、式(1)に戻って数値計算を行うことを覚悟して上記モデルの改良を行った。第1の改良点は、洗掘深の変動により集砂長である洗掘孔上流端の位置が変動すること、これを考慮すると洗掘孔上流端での砂面高は、 $z_E(t) = (H/2) [1 + \sin 2\pi \{ \frac{t}{T_D} + \frac{\lambda_s(z_E(t)) - \lambda_s(z_{se})}{L} \}] \dots\dots (15)$ と修正される。また、集砂長の位置の変動により河床波の集砂長に対する相対速度が、 $C_W(t) = U_W + \frac{d\lambda_s}{dt} \Big|_{z_E} \dots\dots (16)$ (但し U_W :河床波の波速)となり、洗掘孔へ供給される流砂量は式(15)と(16)の積に比例する。すなわち、

$q_{B*} = \bar{q}_{B0} [1 + \sin\{\omega_* t - \phi_B(s)\} + \gamma_B(t_*)] \dots\dots (17)$, $\phi_B = (D/h) \{ \lambda_s(s) - \lambda_s(\zeta e) \} / R_L \dots\dots (18)$, $\gamma_B = (T_D/R_L) (D/h) \cdot \frac{d\lambda_s}{dt_*} \dots\dots (19)$ となる。~~~~部が流入流砂量の変動に対して修正された箇所である。図-4(b)には流砂量変動について線型解析時のものと修正後の比較の一例が示されている。これを式(3)の q_{B0} に置き換えてやり、さらに式(1)中のすべての s を $\zeta e + s'$ に置き換えて(線型解析では単に ζe に置き換えた)、 Δt_* 間の Δs を逐次計算して洗掘深の変動を数値計算した。その結果の一例が

図-4 河床波の進行に伴う洗掘孔への流入流砂量と洗掘深の変動

図-4(a)に示される。この例では線型解析に比べ洗掘深の変動幅が著しく小さくなっている(一般に線型解析の γ が相対安全側の解を与える)。図-5に $D/d = 500$ の場合について η をパラメータとして $s_{max} \equiv \zeta e + a_s$ と (R/d) の関係、線型解析の結果とも比較して示した。

5. あとがき 今後実験資料をなく収集して本研究の適用性の検討を行うとともに、洗掘災害に直結した様々な洗掘に付帯する現象・様相に着目した研究を、本研究で展開したフレームワークに基づいて進めていきたい。

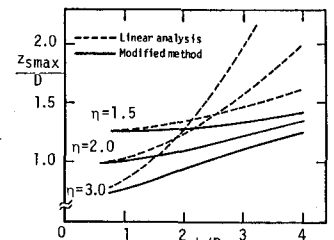


図-5 最大洗掘深

2) Shen, et al.: Proc. ASCE, vol. 96, HY6, 1969. 3) 鈴木道土: 第27回水講, 1983. 4) Fredsøe: Progressive Report, 37, Tech. Univ. of Denmark, 1975.