

# 流砂量変動に伴う円柱周辺の局所洗掘深の変動

## FLUCTUATION OF SCOUR DEPTH AROUND A BRIDGE PIER RESPONDING TO FLUCTUATING SEDIMENT DISCHARGE

辻本 哲郎\*

By Tetsuro TSUJIMOTO

Because of recent changes in river environments and the subsequent increase of disasters of hydraulic structures caused by local scour, it is important to make a physically reasonable model for local scour with sufficient applicability. An analytical model to describe scouring process at front foot of a bridge pier is derived based on reasonable estimations of the vortex intensity and the subsequent sediment motion. The model is so available that it is possible to analyze the responding properties of scouring to the fluctuation of sediment discharge as an important aspect of the changes of river environments. The fluctuation of sediment discharge caused by the migration of dunes is a typical example, and a coupling of the derived model with a model for dune migration makes it possible to predict the fluctuation of scour depth and the maximum scour depth as a design criterion.

*Keywords* : local scour, sand waves, dunes, sediment transport, bed load

### 1. 序 論

橋脚周辺の局所洗掘は洪水時の橋梁災害の最大の原因であるが、最近の洗掘災害の事例を調査すると<sup>1),2)</sup>、近年の河川環境、河道・河床特性の複雑な変化を反映し、さまざまな様相と複合した様式での被災例が多い。土砂水理学的観点からすると、これは橋脚周辺への上流からの給砂様態が多様であることによっていってよいだろう。すなわち、種々の河床形態、周辺の他の構造物のために橋脚周辺での流砂量特性が強い変動性状を有しているため、これらを考慮しないで予測されたものより深刻な洗掘が生じて被災に至ることが結構多いと判断される。こうした点に鑑みると、洗掘現象そのもののモデリングもさることながら、洗掘にかかわる諸様相を含めたモデリングについても検討を行うことが重要と考えられ、本研究ではその第一歩として最も単純な複合様式の取り扱いとその適用性を探ることにし、今後の研究の足掛りとしたい。

洗掘現象は橋脚周辺部から運び去られる土砂量とそこへ供給される土砂量の差によって進行するものであり、従来の研究では後者の有無により動的洗掘 (scour with

continuous sediment motion) と静的洗掘 (clear water scour) に分けて<sup>3)</sup>考えられていることが多い。橋脚周辺の洗掘の最も主要な要因は、橋脚前面底部に循環が集中して産み出される回転流れが円柱に沿って後方に流されて形成されるいわゆる馬蹄型渦と考えられる<sup>4)-6)</sup>。静的洗掘では洗掘孔の拡大によるこの渦の拡散のため、渦による掃流力が限界掃流力に達するまで洗掘が進むのに対し、動的洗掘では、渦によって運び出される土砂量と流入土砂量とが均衡するところで平衡洗掘深が得られる。通常、流入土砂量は定常的なものを考えるので、橋脚の影響がないところでの掃流力が限界掃流力となる条件で静的洗掘と動的洗掘の区分がされる。静的洗掘の最終洗掘深は「流れの強さ」が増すとともに増大するが、動的洗掘の平衡洗掘深は「流れの強さ」に対してそれほど敏感でなく、静的・動的洗掘の遷移条件近傍で洗掘が最も深刻となる<sup>4)</sup>ようである。しかしながら、極端な場合として上流からの給砂が何らかの理由 (構造物や河床形態などの存在など) で扞止されたうえ、流れの強さが本来動的洗掘に対する程度に大きい場合、相当深刻な洗掘が出現することは容易に推測される。また、従来からも指摘される河床波の進行に伴う洗掘深の変動による最大洗掘深の出現なども、単に河床波の波高を洗掘深に重ね合わせるだけでなく、流砂量の変動に伴う洗掘孔での流砂

\* 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科  
(〒920 金沢市小立野 2-40-20)

の不均衡の結果として理解されるべきであろう。同様に砂州の進行、「みお筋」の変化などによる極端な洗掘孔の急激な成長もこの種のものである。

上述のような観点から、流砂量変動を考慮して洗掘現象を取り扱えるモデリングが望まれる。にもかかわらず従来合理的な流砂モデルに基づく洗掘モデルのほとんどが単に静的洗掘過程の記述に限られてきた<sup>5),6)</sup>。そこで本研究では、単なる静的・動的洗掘過程のみならず、既述のような災害面との関連から多様な様相の洗掘現象も統一的に扱える洗掘モデルをまず組み立てる。もっとも、条件が簡単な場合でさえ現象が複雑であるため、洗掘現象の本質は失わない範囲でできるだけ単純なモデルとすることが肝要である。次に、災害に絡む種々の洗掘をとりまく様相は、既述のように流砂量変動で代表されると考え、これに対する洗掘深の変動を予測することを目的とした。現象とその機構の概略を把握するため、まず流砂量変動を微小変動とした線形解析を示してその本質の特徴を明らかにし、次に特に河床波の進行に伴う洗掘深の変動の評価を目的として線形解析の不備を数値計算で補うとともに、河床波の影響を考慮した設計洗掘深の考え方を示すこととする。

2. 洗掘基礎式<sup>注1)</sup>

橋脚周辺の局所洗掘機構の解析モデルを得るにあたって、中川・鈴木<sup>5)</sup>が最初に行った円柱前面の濃み面への着目は以下の理由で有効である。すなわち、橋脚周辺の局所洗掘の主原因である馬蹄型渦の雛型が円柱前面に形成される回転流であること、最終的な最大洗掘深が橋脚前面に生じること、洗掘孔形状がほぼ時間的に相似に保たれることから、前面の洗掘深の時間的変化によって洗掘過程がおおむね記述できることなどである。

Fig.1 は円柱周辺での代表的な洗掘形状で、図の  $L_1$

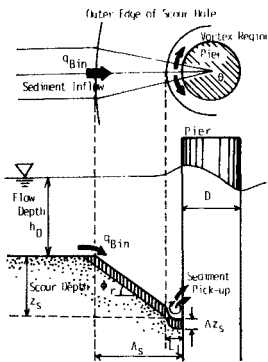


Fig.1 Typical scour hole around a pier.

注1) 洗掘基礎式の誘導についてはすでに第29回水理講演会にて発表済みである<sup>7)</sup>。

で代表される領域に渦が集中、砂を巻き上げ円柱に沿って運び去る。図の  $L_s$  で代表される洗掘孔スケールは、特に洗掘孔が発達すると図のように砂の静止摩擦角の影響を受けて決まる。動的洗掘時では、洗掘孔上流端の流砂量で洗掘孔への給砂量が決まる。Fig.1を参考に土砂の収支を考えると、まず渦によって砂が巻き上げられる領域での平均 pick-up rate  $p_{so}$  が知られれば、 $\Delta t$  時間当たりの系からの流出土砂の実質体積  $\Delta V_1$  は、

$$\Delta V_1 = L_1(L_1 + D) \cdot \frac{\theta}{2} \cdot p_{so} \cdot p_E \cdot \frac{A_3}{A_2} \cdot d \cdot \Delta t \dots\dots\dots (1)$$

と書ける。ここに、 $D$ ：橋脚径、 $d$ ：砂粒径、 $A_2, A_3$ ：砂の形状係数、 $\theta$ ：Fig.1に示す微小角、 $p_E$ ：渦によって巻き上げられた砂が系外へ運び去られる確率である。

一方、洗掘孔外縁の流砂量を  $q_B$  とすると、系への流入土砂量は  $\Delta t$  時間当たり、

$$\Delta V_2 = q_B \{L_s + (D/2)\} \theta \cdot \Delta t \dots\dots\dots (2)$$

となる。

洗掘孔形状の相似性を認めると、洗掘深が  $z_s$  から  $(z_s + \Delta z_s)$  に変化するときの系内土砂の体積変化量は、

$$\Delta V_3 = (1 - \rho_0) (A_s + D) A_s \cdot (\theta/2) \cdot \Delta z_s \dots\dots\dots (3)$$

と書ける。ここに  $\rho_0$ ：砂の空隙率である。  $\Delta V_3 = \Delta V_1 - \Delta V_2$  であることから結局次の洗掘基礎式が得られる。

$$\{\Psi_1(\zeta) - \Psi_2(\zeta)\} (d/D) \Delta t_* = \Psi_3(\zeta) \cdot \Delta \zeta \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

$$\Psi_1(\zeta) \equiv (A_3/2 A_2) p_{so} \lambda_1(\zeta) + 1 \cdot \lambda_1(\zeta) p_E(\zeta) \cdot \phi_p(\zeta) \dots\dots\dots (5)$$

$$\Psi_2(\zeta) \equiv (d/D) \cdot q_{B0} \bar{\gamma}_n(\zeta) \cdot \lambda_s(\zeta) + 1/2 \dots\dots\dots (6)$$

$$\Psi_3(\zeta) \equiv (1 - \rho_0) \{ \lambda_s(\zeta) + 1 \} \cdot \lambda_s(\zeta) / 2 \dots\dots\dots (7)$$

$p_{so} \equiv p_s \sqrt{d/(\sigma/\rho - 1)g}$ ,  $q_{B0} \equiv q_B / \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3}$ ,  $\lambda_1 \equiv L_1/D$ ,  $\lambda_s \equiv A_s/D$ ,  $\zeta \equiv z_s/D$ ,  $p_{so0}$ ： $z_s = 0$  のときの渦による pick-up rate,  $\phi_p(\zeta) \equiv p_{so}(\zeta)/p_{so0}$ ,  $q_{B0}$ ：非擾乱部での平衡流砂量,  $\bar{\gamma}_n(\zeta) \equiv q_n(\zeta)/q_{B0}$ ,  $\sigma/\rho$ ：砂の比重,  $g$ ：重力加速度である。

3. 円柱周辺の洗掘機構

(1) 渦域の pick-up rate

$z_s = 0$  のときの渦による掃流力の評価には Shen ら<sup>4)</sup>によって提案された循環保存則の適用が有効である。

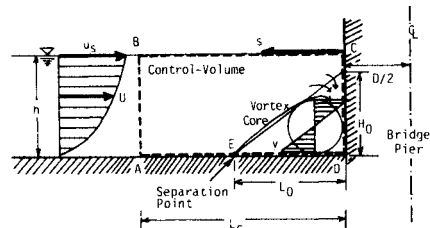


Fig.2 Control volume and vortex formation.

Shen ら<sup>4)</sup>の示唆に基づき円柱前方渦み面でのコントロールボリューム (Fig. 2 の ABCD) に沿う循環の円柱の存在による変化分が円柱前方底部に形成される渦の循環として再配分されると考え、円柱周辺の表面流速の場所的分布をポテンシャル流理論で与えることより、渦の半径を  $\omega D$  とするとき、渦の外縁流速  $v$  を次式のよう

$$v = u_{s0}/4 \pi \omega \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $u_{s0}$ : 非擾乱表面流速である。

$z_s=0$  の場合に相当する固定床の実験による馬蹄型渦のスケールや流速分布についての計測<sup>5), 8), 9)</sup>より、 $z_s=0$  のときの  $\omega$  の値 ( $\omega_0$ ) は約 0.2 であり<sup>22)</sup>、このとき式 (8) も実験値とよく対応している<sup>10)</sup>。渦域の掃流力  $\tau_0$  ( $=\rho u_{s0}^2$ ) は  $\phi_v = v/u_{s0}$  を 7.0 程度に選ぶと、吉川ら<sup>11)</sup>の実験値ともよく一致して、

$$\gamma_0 \equiv \tau_0/\tau_c = |\phi_s/(4 \pi \omega_0 \phi_0)|^2 \approx 1.5 \dots\dots\dots (9)$$

程度となる<sup>10)</sup>。ただし、 $\phi_s = u_{s0}/u_{*c}$ 、 $\tau_0: z_s=0$  のときの渦による掃流力、 $\tau_c = \rho u_{*c}^2$ : 非擾乱域での掃流力である。

洗掘の進行に伴う渦特性の変化はほとんど知られていないが、渦のもつ循環はほとんど変化しないと考えられ、むしろ渦のスケールが洗掘孔の拡大とともに増加すると考えられることから、Baker<sup>12)</sup>の仮定と同様に次式で  $\omega$  の変化を表わすこととする。

$$\omega(\xi) = \omega_0(1 + k_\omega \xi) \dots\dots\dots (10)$$

ただし  $k_\omega$ : 定数とする。渦のもつ循環が保存され、洗掘の進行に伴う  $\phi_0$  の変化を無視すると、

$$\phi_r(\xi) \equiv \tau_0(\xi)/\tau_{00} = (1 + k_\omega \xi)^{-2} \dots\dots\dots (11)$$

のように渦の掃流力の洗掘進行に伴う変化が知られる。静的洗掘過程の最終洗掘深が渦による掃流力が限界掃流力に等しくなった時点で得られること、通常の状態での静的・動的洗掘の遷移が生じるとき (非擾乱場での掃流力が限界掃流力に等しいとき) に最終洗掘深と動的平衡洗掘深がほぼ等しくなると考え、従来より経験的に知られるそれを橋脚径の 1.2~1.5 倍程度とする予測式を適用すると  $k_\omega = 1/7$  と予想される。

上述のように渦域の掃流力が評価されると、そこでの砂粒の pick-up rate は中川ら<sup>13)</sup>による推定式により、次のように推定される。

$$p_{s*0} = F_0 \gamma_0 \tau_{*c} \eta (1 - k_2/\gamma_0 \eta)^m \dots\dots\dots (12)$$

$$\phi_p(\xi) = \phi_r(\xi) \cdot [1 - k_2/|\gamma_0 \eta \phi_r(\xi)|]^m / (1 - k_2/\gamma_0 \eta)^m \dots\dots\dots (13)$$

ただし、 $F_0=0.03$ 、 $k_2=0.7$ 、 $m=3$  であり<sup>13)</sup>、 $\eta \equiv \tau_{*0}/\tau_{*c}$ 、 $\tau_{*c}$ : 無次元限界掃流力である。

なお、渦域で pick-up された砂粒が系外へ運び出される確率  $p_E(\xi)$  は、渦によって pick-up される砂の step length が平均値  $\lambda_0 \cdot d$  の指数分布に従うとし、step length が  $\lambda_1 \cdot D$  の  $\alpha$  倍 ( $\alpha=0.5$ ) 以上となる確率で与えられると考えると、

$$p_E(\xi) = \exp[-\alpha \lambda_1(\xi)/\lambda_0(D/d)] \dots\dots\dots (14)$$

となる。このときの step length は平坦河床のそれと比べてずっと大きく、 $\lambda_0$  は 500~1000 程度と推定された。

(2) 洗掘孔形状

円柱前面での洗掘孔形状は Fig. 3(b) に示すような静止摩擦角を呈す鉢状のものが特徴的であるが、洗掘過程の初期には Fig. 3(a) のような形状を呈す。

まず渦流によって砂粒が離脱させられる限界位置を示す Fig. 4 の  $\theta_c$  を求めることにより  $L_1$  を評価すると、

$$\lambda_1(\xi) \equiv L_1/D = \omega_0(1 + k_\omega \xi)(1 + \sin \theta_c) \dots\dots\dots (15)$$

$$\theta_c = \begin{cases} \pi/2 & (x(\xi) > 1) \\ \arcsin[\chi(\xi)] - \phi_r & (x(\xi) \leq 1) \end{cases} \dots\dots\dots (16)$$

$$\chi(\xi) \equiv (\gamma_0 \eta / k_3) \sin \phi_r \cdot \phi_r(\xi) \dots\dots\dots (17)$$

となる。ここで、 $\phi_r$ : 砂の水中静止摩擦角、 $k_2 \leq k_3 \leq 1$  である。

Fig. 3 の (a) の形状から (b) の形状へ遷移する (静止摩擦角を呈する斜面の出現) 限界の洗掘深  $\xi_1 D$  は、Fig. 3(b) にみられる洗掘孔内の傾斜変換点での砂粒の安定性の条件によって求められる、

$$\xi_1 \equiv z_{s1}/D = \omega_0/(1 - k_\omega \omega_0) \dots\dots\dots (18)$$

であり、また  $A_s$  は Fig. 3 を参考に次式で与えられる。

$$\lambda_s(\xi) \equiv \frac{A_s}{D} = \begin{cases} \omega(\xi) [1 + \sqrt{\xi^2 \omega(\xi)^2 - \xi}] / \omega(\xi) & (\xi \leq \xi_1) \\ |\cot \phi_r + (2 - \cot \phi_r) k_\omega \omega_0| \xi + (2 - \cot \phi_r) \omega_0 & (\xi > \xi_1) \end{cases} \dots\dots\dots (19)$$

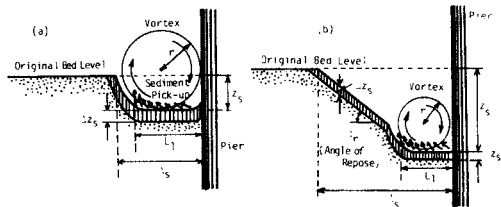


Fig. 3 Geometry of scour hole at front foot of a pier.

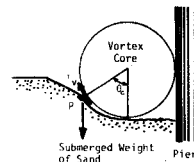


Fig. 4 Schematic figure.

注 2) 渦域のスケールを直接測定するのは困難で、主として Fig. 2 の  $H_0$ 、 $L_0$  の実測値<sup>5)</sup>より、 $\triangle CDE$  に内接する円の半径として求めている。渦み面において測定された底面逆流速<sup>9)</sup>の最大値を与える位置が渦中心とみなすとほぼ  $\omega_0=0.2$  との推定と合致しており、またその他の研究者の実測 (推定) 値<sup>8), 9)</sup>ともオーダー的にならない。

(3) 洗掘孔への流入流砂量

洗掘孔への流入流砂量は、洗掘孔が発達して洗掘孔上流端が橋脚から十分離れると、非擾乱場の流砂量で近似される ( $\bar{\gamma}_d(\xi)=1$ ) が、厳密には澱み面における掃流力の変化を考慮した非平衡流砂量式を適用するのが適切であると思われる。掃流力が円柱周辺のポテンシャル流速の平方に比例すると仮定すれば、澱み面における円柱壁面からの距離  $s \equiv \xi \cdot D$  の関数として、

$$\gamma_r(\xi) \equiv \tau(\xi)/\tau_0 = [1 - 1/(2\xi + 1)]^2 \dots\dots\dots(20)$$

が得られ、中川ら<sup>13)</sup>の pick-up rate 推定式より、pick-up rate の場所的分布は、

$$\gamma_d(\xi) \equiv \frac{p_{s*}(\xi)}{p_{s*0}} = \left[ \frac{1 - k_2/\gamma_r(\xi) \cdot \eta}{1 - k_2/\eta} \right]^m \cdot \gamma_r(\xi) \dots\dots\dots(21)$$

で表わされる。よってさらに中川らの非平衡流砂量式<sup>14)</sup>を用いて、

$$\bar{\gamma}_d(\xi) \equiv \frac{q_d(\lambda_s(\xi))}{q_{d*0}} = \int_0^\infty \gamma_p \left( \frac{\varepsilon \Lambda}{D} \right) \exp[-(\varepsilon - \varepsilon_0)d\varepsilon] \dots\dots\dots(22)$$

を得る<sup>注3)</sup>。ただし  $\varepsilon_0 \equiv \Lambda_s/\Lambda$ 、 $\varepsilon \equiv s/\Lambda$ 、 $\Lambda$ ：砂の平均 step length で、step length は指数分布に従うものとしている。

(4) 静的洗掘過程と動的平衡洗掘深

静的洗掘過程は式(4)で  $\Psi_s(\xi)=0$  の場合に相当する。式(4)の積分によって得られる静的洗掘時の洗掘深の時間的変化についての計算結果例は Fig.5 に示すようであり、 $(D/d)$ 、 $\eta$  がパラメーターとなっている。中川・鈴木の実験資料<sup>5)</sup>では  $\eta$  の値が必ずしも明確でないが、彼らの系統的な実験より、静的洗掘の上・下限に相当す

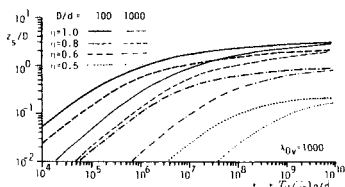


Fig.5 Calculated example for clear water scour process.

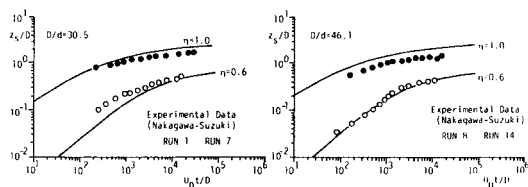


Fig.6 Experimental verification of the scour model (clear water scour).

注3) 非平衡流砂量式を用いると、流砂量が円柱に向かって減少しそのため堆積を産むこととなるが、現実には流線幅が広がることでこのような堆積は生じない。

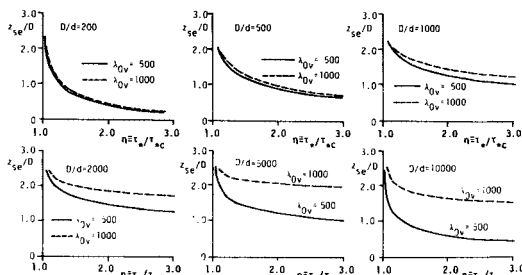


Fig.7 Equilibrium scour depth in case of scour with continuous sediment motion.

るであろう実験資料を選び計算曲線と比較したのが Fig.6 であり、 $\lambda_v=1000$  とした計算曲線と良好な一致がみられる。

一方、動的平衡洗掘深は、 $(\Delta \xi / \Delta t_*)=0$  であるから、 $\Psi_1(\xi_e) = \Psi_2(\xi_e) \dots\dots\dots(23)$

を満足する。計算によって得られた  $\xi_e - \eta$  関係は Fig.7 に示すとおりで、従来の経験的に提案された洗掘予測式によるものと同様、橋脚径の1~2倍程度となっている<sup>注4)</sup>。また、Carstens<sup>15)</sup>は動的洗掘に対し巨視的な解析モデルを与えているが、その結果は Fig.7 と洗掘深の値、流れ速度に対する傾向ともよく一致している。

4. 流砂量変動に対する洗掘深の変動応答に関する線形解析<sup>注5)</sup>

洗掘孔へ供給される流砂量の変動が小さく、それに伴う洗掘深の変動も十分小さい場合、線形解析によって現象の概容を記述できる。いま洗掘孔上流端での流砂量変動を、

$$q_{B*} = \bar{q}_{B*}(1 + r_B \sin \tilde{\omega}_* t_*) \dots\dots\dots(24)$$

それに伴う洗掘深の変動を、

$$\xi = \xi_e + \xi' \dots\dots\dots(25)$$

と書けるとする(無次元表示)。ただし、 $\bar{q}_{B*}$ ：洗掘孔上流端での無次元平均流砂量、 $r_B \bar{q}_{B*}$ ：流砂量変動の振幅、 $\tilde{\omega}_* \equiv \tilde{\omega} \sqrt{d/(\sigma/\rho-1)g}$ ：無次元化された流砂量変動の角周波数、 $t_* \equiv t \sqrt{(\sigma/\rho-1)g/d}$  である。 $r_B$ 、 $\xi'/\xi_e$  が十分小さいとき、式(4)は次のように近似される。

注4) 渦によって巻き上げられた砂の step length は粒径に比して極端に大きくむしろ渦のスケールを規定する橋脚径に支配されている可能性もある。よって平坦河床での値に比べずっと大きくて自然である。

注5) 第29回水理講演会論文集<sup>7)</sup>では、河床波の進行に伴う洗掘深の変動応答に関連させて本章の基本的な考え方を説明したが、河床波の進行に伴う流砂量変動は大きく線形解析にはなじまないため、ここでは一般的議論として線形解析を行った。すなわち、線形解析によって流砂量変動に伴う洗掘深の変動機構の概容を理解することを主目的とした。しかし、流砂量の大部分を河床波の進行が受け持っている状況でなければ本解析も実現象に対して有効である。

$$\begin{aligned} & \left[ \Psi_1(\zeta_e) \left\{ 1 + \frac{1}{\Psi_1(\zeta_e)} \frac{\partial \Psi_1}{\partial \zeta} \Big|_{\zeta_e} \cdot \zeta' \right\} \right. \\ & \quad \left. - \Psi_2(\zeta_e) \left\{ 1 + \frac{1}{\Psi_2(\zeta_e)} \frac{\partial \Psi_2}{\partial \zeta} \Big|_{\zeta_e} \cdot \zeta' \right\} \right] \left( \frac{d}{D} \right) \cdot \Delta t_* \\ & = \Psi_3(\zeta_e) \left\{ 1 + \frac{1}{\Psi_3(\zeta_e)} \frac{\partial \Psi_3}{\partial \zeta} \Big|_{\zeta_e} \cdot \zeta' \right\} \Delta \zeta \dots \dots \dots (26) \end{aligned}$$

ここで、 $(\partial \Psi_1 / \partial \zeta) / \Psi_1|_{\zeta_e}$ 、 $(\partial \Psi_2 / \partial \zeta) / \Psi_2|_{\zeta_e}$ 、 $(\partial \Psi_3 / \partial \zeta) / \Psi_3|_{\zeta_e}$  および  $\zeta'$  は十分小さくこれらの高次項を無視し、さらに式 (23) の関係を用いると、 $\zeta'$  について次の微分方程式を得る。

$$\frac{d\zeta'}{dt_*} = -\frac{2\bar{q}_{B*}}{1-\rho_0} \left( \frac{d}{D} \right)^2 \frac{\tau_B}{\lambda_s(\zeta_e)} \sin \tilde{\omega}_* t_* \dots \dots \dots (27)$$

ただし、

$$\tilde{\lambda}_s(\zeta_e) = \frac{\lambda_s(\zeta_e) \cdot \lambda_s(\zeta_e) + 1}{\lambda_s(\zeta_e) + 1/2} \dots \dots \dots (28)$$

である。式 (27) の解は、

$$\begin{aligned} \zeta'(t_*) & = \frac{2\bar{q}_{B*}}{1-\rho_0} \left( \frac{d}{D} \right)^2 \frac{\tau_B}{\tilde{\omega}_* \tilde{\lambda}_s(\zeta_e)} \sin \left( \tilde{\omega}_* t_* + \frac{\pi}{2} \right) \\ & \dots \dots \dots (29) \end{aligned}$$

であり、洗掘深の変動応答は流砂量変動に対し位相差  $(\pi/2)$  を有し、振幅は、 $\bar{q}_{B*}$ 、 $(d/D)$ 、 $\tau_B$ 、 $\tilde{\omega}_*$  および  $\zeta_e$  に依存していることがわかる。

### 5. 河床波の進行に伴う局所洗掘深の変動

流砂量変動をもたらす例として、河床波の進行によるものを扱う。通常、河床波の形成された移動床流路ではほとんどの流砂量が河床波の進行という様式で運搬されるため、河床波の進行そのものが流砂量変動を産み出す。従来より、動的洗掘時には洗掘深が平衡洗掘深のまわりで変動することが指摘されており<sup>1)</sup>、Shen ら<sup>4)</sup>は設計洗掘深として dune 波高の半分を平衡洗掘深に加えることを提案しているし、最近、鈴木ら<sup>16)</sup>は水路実験から、洗掘深の変動の標準偏差は dune-bed の河床高標準偏差の約 60% 程度であることを見出している。設計洗掘深や、橋脚の洗掘防護工を考えるうえで、河床波による洗掘深の変動を予測することは重要であるが、現象の機構に立脚した予測はこれまで行われておらず、本章では前章の考え方を拡張してこの種の問題への提言を行うための基礎的知見を得る。

いま簡単のため dunes を対象としその形状が Fig. 8 に示すように正弦波で近似されるものとする、洗掘孔上流端の点  $P_0$  (Fig. 8 参照) での河床高を dunes の谷のレベルから測った高さ  $z_E(t)$  で表わすと、

$$z_E(t) = \frac{H}{2} \left( 1 + \sin \frac{2\pi t}{T_D} \right) \dots \dots \dots (30)$$

となり、ここに  $H$  : 河床波の波高、 $T_D$  : 河床波の周期である。dunes の波速を  $c_d$  とすると、洗掘孔への流入

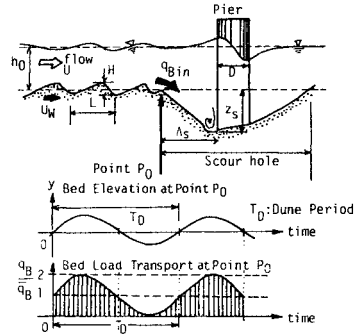


Fig. 8 Schematic figure of scour hole and dune migration.

流砂量は、

$$q_d(t) = c_d \cdot z_E(t) \dots \dots \dots (31)$$

で表わされる。それゆえ、

$$\bar{q}_B = \frac{c_d \cdot H}{2} ; \tau_B = 1 ; \tilde{\omega} = \frac{2\pi}{T_D} \dots \dots \dots (32)$$

として式 (24) の形で流砂量変動を記述し得る。河床波の周期は 1 つの dune の体積を平均流砂量で運ぶのに要する時間として求められるので、

$$T_{D*} = T_D \sqrt{d/(\sigma/\rho - 1)g} = \hat{s}(1-\rho_0)k_L^2 \theta_b (h/d)^2 / \bar{q}_{B*} \dots \dots \dots (33)$$

と推定される。ここに  $\hat{s}$  : 河床波の形状に関する係数(正弦波なら  $(\pi/2)$ 、三角形なら 0.5)、 $k_L \equiv L/h$ 、 $L$  : dune の波長、 $h$  : 水深、 $\theta_b \equiv H/L$  : dune の波形勾配である。

もし前章の線形解析結果をそのまま踏襲すると、式 (29) により洗掘深の変動振幅  $a_\zeta \cdot D$  は次式より知られる。

$$a_\zeta = \frac{\hat{s} k_L^2 \theta_b}{\pi \cdot \tilde{\lambda}_s(\zeta_e)} \cdot \left( \frac{h}{D} \right)^2 \dots \dots \dots (34)$$

dune-bed の河床高の振幅との比を  $r_{zy}$  とすると、

$$r_{zy} = [2 \hat{s} k_L / (\pi \cdot \tilde{\lambda}_s(\zeta_e))] \cdot (h/D) \dots \dots \dots (35)$$

となる。上式によると、 $(h/D) = 1.0$  程度に対し  $r_{zy} = 1$  程度となり、鈴木らの実験値<sup>16)</sup>と比較すると相当に過大評価となっている。これは線形近似に起因するものであり、特に河床波の進行にかかわる問題にとって重要な要素について検討することによりモデルの修正を図ることとする。

まず、先の線形解析においては式 (4) 中の  $\lambda_1$ 、 $\lambda_0$ 、 $\phi_D$ 、 $p_E$ 、 $\bar{\gamma}_B$  を  $\zeta_e$  に対する値を用いて一定として扱ったのに対し、ここでは刻々の  $\zeta$  に対して数値計算することとする。

次に、洗掘孔への給砂量を規定する洗掘孔上流端の位置が時間的に変動することを考慮し、洗掘孔上流端河床高の dune の谷からの高さについて式 (30) を次式のように修正した。

$$\bar{z}_s(t) = \frac{H}{2} \left[ 1 + \sin 2\pi \left\{ \frac{t}{T_D} + \frac{\Lambda_s(z_s(t)) - \Lambda_s(z_{se})}{L} \right\} \right] \quad \dots\dots\dots(36)$$

ただし  $z_{se} = \zeta_e \cdot D$  である。

さらに、洗掘孔上流端の位置の変動は、洗掘孔に対する河床波の相対速度  $\bar{c}_d(t)$  を次式のように変動させる。

$$\bar{c}_d(t) = c_d + \frac{d\Lambda_s}{dt} \Big|_{z_s} \quad \dots\dots\dots(37)$$

このとき、洗掘孔へ dunes の進行によって運び込まれる流砂量は  $\bar{z}_s(t)$  と  $\bar{c}_d(t)$  の積として与えられるから、式 (32) の代わりに次式が有効となる。

$$q_{B*}(t_*) = \bar{q}_{B*} [1 + \sin \{ \omega_* t_* - \phi_b(\zeta) - \Gamma_B(t_*) \}] \quad \dots\dots(38)$$

ここにおいて、 $\phi_b(\zeta)$ 、 $\Gamma_B(t_*)$  が付加項で、それぞれ、

$$\phi_b(\zeta) \equiv |\lambda_s(\zeta) - \lambda_s(\zeta_e)| \cdot (D/h) / k_L \quad \dots\dots\dots(39)$$

$$\Gamma_B(t_*) \equiv (T_{D*} / k_L) (D/h) \cdot (d\lambda_s / dt_*) \quad \dots\dots\dots(40)$$

である。

dunes の場合、 $k_L \approx 5.0$  であり、また波形勾配  $\theta_b$  については次式で表わされる Fredsøe<sup>17)</sup> の式が適当でありかつ利用しやすい。

$$\theta_b = 0.119 (1 - 1/\eta - 0.4 \tau_{*c} \eta)^2 \quad \dots\dots\dots(41)$$

これらを用いて、河床波の進行に伴う洗掘深の変動を式 (4) を用いて数値計算によって求めた例が Fig. 9 に示される。Fig. 9 には線形解析の結果を比較して示したが、この例でも洗掘深の変動振幅は線形解析の結果(式(35))よりはかなり小さくなっている。Fig. 9 は  $(D/d)=200$ 、 $(h/D)=1.0$ 、 $\eta=2.0$  の条件について計算したものである。Fig. 9 のような洗掘深の変動における最大洗掘深と最小洗掘深の差と河床波の波高との比を  $r_{zy}$  と定義する

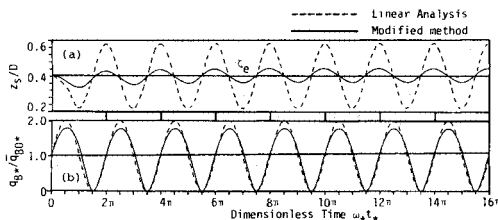


Fig. 9 Fluctuations of sediment discharge and scour depth.

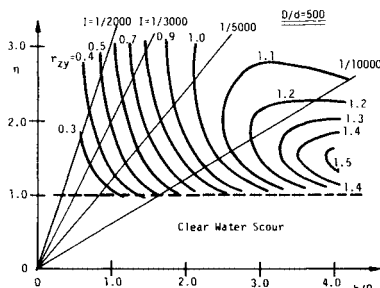


Fig. 10 Contours of  $r_{zy}$  in  $\eta \sim (h/D)$  plane.

と、数値計算により  $r_{zy}$  を  $\eta$ 、 $(h/D)$ 、 $(D/d)$  の関数として求めることができる。Fig. 10 は  $(D/d)=500$  の場合について  $r_{zy}$  の等値線を  $\eta \sim (h/D)$  面に描いたものである。ところで、 $\eta$  はエネルギー勾配  $I$  と  $(D/d)$  をパラメーターとして次のように  $(h/D)$  と関係づけられる<sup>(26)</sup>。

$$\eta = \frac{I}{\tau_{*c}(\sigma/\rho - 1)} \cdot \left(\frac{D}{d}\right) \cdot \left(\frac{h}{D}\right) \quad \dots\dots\dots(42)$$

すなわち与えられた  $I$  と  $(D/d)$  に対しては  $\eta$  は  $(h/D)$  に書き換えられ、よって  $r_{zy} \sim (h/D)$  関係が得られる。

Fig. 11 にはその計算例を示した。Fig. 10, 11 によると  $r_{zy}$  の評価は線形解析と鈴木らの水路実験による類推<sup>(6)</sup>との中間程度の傾向を示しており、 $D/d$  が小さいほど  $I$ 、 $h/D$  による変化が著しい結果となっている。 $D/d$ 、 $I$ 、 $h/D$  により  $r_{zy}$  は 0.5~2.0 程度に変化し、単に波高の何 % を平衡洗掘深に加えるべきかという問題ではないことに注意すべきである。

上記のような取り扱いで、局所洗掘に複合する河床波の進行が基本的にモデル化され、現象のいくつかの特性が明らかにされたが、定量評価となるとまだ不備は多い。しかしながら各サブシステムが十分精度を整えてくると、本論文の考え方が次のような形で実用に生かされてくるものと思われる。

ところで、鈴木らの実験<sup>(6)</sup>によると、洗掘深の変動はほぼ正規分布に従っており、このことより実用上の最大洗掘深は洗掘深の変動の標準偏差を  $\sigma_z$  とすると、

$$\bar{z}_{smax} = z_{se} + 3\sigma_z \quad \dots\dots\dots(43)$$

と書けるだろう。dune 河床を正弦波で近似したときの振幅は dune 河床の河床高標準偏差  $\sigma_y$  に比例しているはずだから、 $(\sigma_z/\sigma_y) = r_{zy}$  であり、それゆえ、

$$\bar{\zeta}_{smax} \equiv \frac{\bar{z}_{smax}}{D} = \zeta_e + 3 r_{zy} \left(\frac{h}{D}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_y}{h}\right) \quad \dots\dots\dots(44)$$

と書ける。 $\sigma_y$  は dunes の平均波高の半分程度であることが知られているから<sup>(18), 19)</sup>、最大洗掘深は次式によって

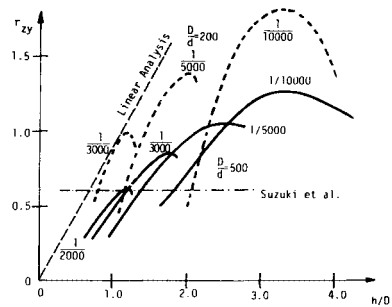


Fig. 11 Relation between  $r_{zy}$  and  $(h/D)$ .

注6)  $\eta$  は理論では有効掃流力 ( $\tau_e$ ) に相当するものを用いており、 $\eta$  として全掃流力 ( $\tau$ ) に対するものを用いると式 (42) の右辺に  $(\tau/\tau_e)$  を乗する必要がある。

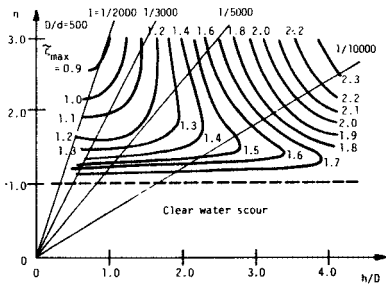


Fig. 12 Contours of  $\zeta_{\max}$  in  $\eta \sim (h/D)$  plane.

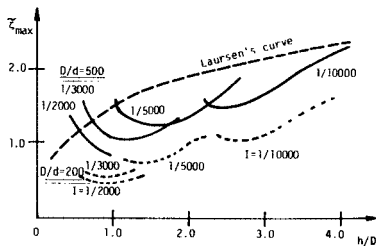


Fig. 13 Relation between maximum scour depth and  $(h/D)$ .

予測される。

$$\bar{\zeta}_{\max} = \zeta_e + \frac{3}{2} \cdot k_L \cdot r_{zy} \cdot \theta_D \cdot \left(\frac{h}{D}\right) \dots \dots \dots (45)$$

ただし上式中  $\zeta_e$  は式 (23) によって、 $\theta_D$  は式 (41) によって、 $r_{zy}$  は Fig. 10 で与えられる。Fig. 10 と同様に  $(D/d)$  をパラメーターとして  $\eta \sim (h/D)$  面に  $\bar{\zeta}_{\max}$  の等値線を描いたのが Fig. 12 で、さらに式 (42) の関係を用いて  $\bar{\zeta}_{\max} \sim (h/D)$  関係を調べたのが Fig. 13 である。

Fig. 13 に示されるように  $\bar{\zeta}_{\max} \sim (h/D)$  関係は  $(D/d)$ 、 $I$  をパラメーターとして変わるもののゆるやかな増加関数を呈し、Laursen の曲線<sup>20)</sup> はほぼその包絡線となっている。上記の結果を詳細に検証する実験資料は十分でない (実験条件が厳密でない) が、参考に示す Fig. 14<sup>5)</sup> との比較により、式 (45) ではば妥当な最大洗掘深の予測が可能と考える<sup>17)</sup>。

## 6. 結 論

本論文では、近年の河川環境の変貌に伴う河川構造物の洗掘災害の増加に鑑み、適用性の高い洗掘モデルを提示することにより、単に静的洗掘・動的洗掘のみならず洗掘現象に付随する種々の様相をも統一的に説明・予測することを目的としたものである。特に、河川・河道状況の変貌は構造物周辺へ運搬・供給される流砂量の変動

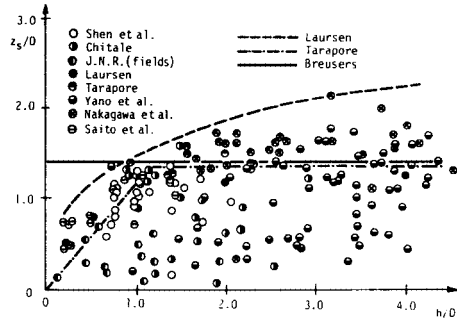


Fig. 14 Data of scour depth from flume experiments and field observations.

という形で抽象化されるであろうこと、局所洗掘の典型例としては円柱橋脚周辺のそれを対象とすることとした。さらに流砂量の変動については、具体的には dunes の進行によってもたらされるものを対象とし、それによって局所洗掘深がどのように変動・応答するかを見積ることを当面の課題とした。

まず、円柱橋脚周辺の洗掘では、洗掘の主要因が円柱前面底部で形成され側方に流される馬蹄型渦であること、洗掘過程において洗掘孔の幾何的相似性が満足されることなどから、いわゆる灘み面内での解析を行った。そこでの土砂収支を考慮して洗掘基礎式を立て、その支配要素である渦の掃流力とそれによる土砂の pick-up rate、洗掘孔への供給流砂量、洗掘孔や渦域のスケールをそれぞれ実験等による従来の知見を援用して評価した。このようにして得られた洗掘基礎式は適用性に優れ、静的洗掘過程の記述、動的平衡洗掘深の予測が可能であることを示した。

流砂量変動に対する洗掘深の変動応答も、本論文で誘導した洗掘基礎式によって十分記述される。まず、流砂量の微小変動を仮定し、線形解析によって流砂量変動に伴う洗掘深の変動応答の基本的特性、機構の概略の把握を行った。次に、dunes の進行をモデル化し、それに伴う洗掘深の変化を問題とするとときに考慮すべき洗掘孔上流端の河床高変動や、河床波の洗掘孔上流端に対する相対速度などを検討し、数値計算によって洗掘深の変動を予測した。さらに実用的観点から最大洗掘深を評価する方法を示し、従来の実験・実測資料とも矛盾のない予測であることがわかった。

本研究の主張は、河床波が生じている場合の最大局所洗掘深は、単に洗掘深に河床波高の何%かを加え合わせて推定されるものでなく、給砂量の変動により長時間過少給砂が継続することによる深刻な洗掘であると認識することである。

本論文では現象の複雑さに鑑み、定量評価そのものより複合作用がいかに定量評価に組み込まれるべきかに主

注 7) Fig. 13 によると  $I$  が大きいとき最大洗掘深が過少評価となるが、これは式 (42) による  $\eta$  から  $(h/D)$  への換算に起因する。Fig. 14 との比較においては脚注 6) を考慮しなければならない。

眼をにおいて、各部分の定量評価のためにはさらに実験等による知見の集積が必要である。問題にかかわる各部分を単純化したために現象にかかわる各スケールが異なるときに生じる不都合も少なくないと思われ、今後モデルの改良を行っていきたいと考える。また条件として、たとえば河床形態の種類による相違、流砂の運動様式の変化についても検討を行うべきであろう。

なお、本研究の遂行にあたり、一部昭和59年度文部省科学研究費・自然災害特別研究(1)「河川構造物の洗掘防護工に関する研究」(代表：中川博次京都大学教授)の補助を受けた。

#### 参 考 文 献

- 1) 中川博次編：橋梁の洗掘災害とその防止に関する研究，昭和58年度文部省科学研究費・自然災害特別研究(1)成果報告書，92 p.，1984.
- 2) 中川博次編：河川構造物の洗掘防護工に関する研究，昭和59年度文部省科学研究費・自然災害特別研究(1)成果報告書，121 p.，1985.
- 3) Shen, H.W. : Scour near piers, River Mechanics, Vol.2, edited by H.W. Shen, Chapter 23, Water Resources Publications, 1971.
- 4) Shen, H.W., Schneider V.R. and Karaki, S. : Local scour around bridge piers, Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, Vol.95, HY6, pp.1919~1940, 1969.
- 5) 中川博次・鈴木幸一：橋脚による局所洗掘深の予測に関する研究，京都大学防災研究所年報，第17号B，pp.725~751，1974.
- 6) 鈴木幸一：円柱橋脚周辺の局所洗掘に関する研究，土木学会論文報告集，第313号，pp.47~54，1981.
- 7) 辻本哲郎・水上敏昭：円柱橋脚前面での局所洗掘機構のモデル化，第29回水理講演会論文集，pp.591~596，1985.
- 8) 宇民 正：円柱橋脚前方における局所流の研究，土木学会論文報告集，第247号，pp.61~69，1976.
- 9) Qadar, A. : The vortex scour mechanism at bridge piers, Proc. Institution of Civil Engineers, No.71, Part 2, pp.739~757, 1981.
- 10) Tsujimoto, T. : Analytical description of scouring process due to vortex induced by a bridge pier-A theory of clear water scour, Memoirs, Faculty of Technology, Kanazawa University, Vol.17, No.2, pp.91~101, 1984.
- 11) 吉川秀夫・福岡捷二・岩間 汎・曾小川久貴：橋脚の洗掘ならびにその防止工に関する考察，土木学会論文報告集，第194号，pp.83~90，1971.
- 12) Baker, C.J. : Theoretical approach to prediction of local scour around bridge piers, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.18, No.1, pp.1~12, 1980.
- 13) 中川博次・辻本哲郎：水流による砂れきの移動機構に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第244号，pp.71~80，1975.
- 14) Nakagawa, H. and Tsujimoto, T. : Sand bed instability due to bed load motion, Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, Vol.106, HY12, pp.2029~2051, 1980.
- 15) Carstens, M.R. : Similarity laws for localized scour, Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, Vol.92, HY3, pp.13~36, 1966.
- 16) 鈴木幸一・道上正規・片岡幸三：橋脚周辺の局所洗掘に及ぼす河床波の影響，第27回水理講演会論文集，pp.659~664，1983.
- 17) Fredsøe, J. : The friction factor and height-length relation in flow over a dune-covered bed, Progressive Report 37, Institute of Hydrodynamics, Technical University of Denmark, 1975.
- 18) 芦田和男・田中祐一朗：砂漣に関する実験的研究(3)，京都大学防災研究所年報，第10号B，pp.121~132，1967.
- 19) 中川博次・辻本哲郎：河床波の統計モデルに関する研究，土木学会論文報告集，第291号，pp.79~87，1979.

(1985.9.4・受付)