

開水路流れに設置された橋脚周辺の水理特性について (4)

今 本 博 健・大 年 邦 雄

HYDRAULIC CHARACTERISTICS AROUND BRIDGE PIERS IN AN OPEN CHANNEL FLOW (4)

By *Hirotake* IMAMOTO and *Kunio* OHTOSHI

Synopsis

In order to anticipate various aspects of local scouring phenomena around a bridge pier, a dynamic and flexible model will be necessary which reflects the essence of the phenomena. Such a model was constructed considering tractive force due to horseshoe vortex, geometrical similarity of scour hole and mass balance of sediments in the scour hole. The model explained the feature of scouring process which has been observed in flume experiments under steady flow conditions, such as development of scour depth with time under the condition of clear water scour, oscillation of scour depth associated with migrating dunes, relation between the amplitude of the oscillation and the expected dune height and so on.

The response of scour depth during a flood in a river was simulated using present scour model, and a suggestion for design criteria was discussed on the basis of the information obtained by the model.

1. 緒 言

橋脚周辺の局所洗掘現象は、橋脚が設置されている河川の水理水文特性と橋脚の特性を外部条件とする応答現象とみなされる (Fig. 1 参照)。しかも、橋脚周辺の局所流、それによって起こされる砂粒の動き、砂粒が移動することによる洗掘孔形状の変化、洗掘孔形状に対応する局所流構造の変化というように、応答現象の内部構造が非定常であるため、局所洗掘現象をその内部機構に基づいて定式化することは極めて困難である。したがって、従来の研究では、現象を支配すると考えられる水理量を抽出し、次元解析の手法を用いて実験値を整理してそれらの支配水理量の影響を定量的に明らかにしようとするアプローチをとっているものが殆どである。すなわち、現象のメカニズムにまで立ち入った検討を行っているものは少ない。

次元解析に基づいて実験資料を整理し洗掘深の予測式を導こうとするアプローチでは、その予測式をスケールの異なる実河川にそのまま外挿できるかどうかという問題が常に伴う。したがって、広範な水理条件下での現象予測に対処するためには、洗掘現象のメカニズムに立脚したアプローチが必須である。しかしなが

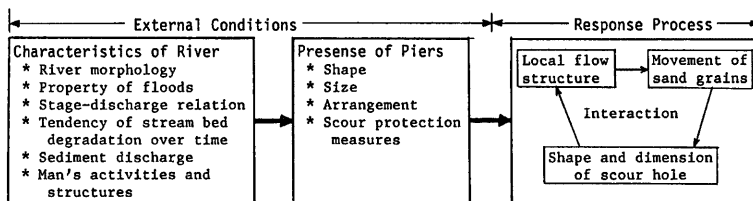


Fig. 1 Local scouring phenomena around bridge piers.

ら、前述したように橋脚周辺の洗掘現象は非常に複雑であるから、現象を厳密に反映するようなモデル化は困難であり現象の本質を見失わない範囲でできるだけ単純化することが要求される。

本研究では、流れの円柱中心を通る縦断面（円柱前方）に着目し、馬蹄渦に関する若干の仮定と実験的に認められる洗掘孔形状の相似性に基づいて洗掘現象を記述するモデル化を行い、従来の知見を洗掘の内部構造から説明するとともに洗掘の支配水理量が時間的に変化する非定常場での洗掘特性を検討しようとするものである。これらの検討に基づいて設計上考慮すべき洗掘深の評価に関して工学的に合理的な知見を与えようとするものである。

2. 洗掘モデル

従来より指摘されているように、橋脚周辺の局所洗掘を支配する流れの主要因は橋脚底部に形成される馬蹄渦であり、主としてこの馬蹄渦がもつ掃流力によって砂粒が移動され洗掘孔が形成される。洗掘孔の幾何形状は砂粒の水中安息角に規定されており、洗掘深に基づいて基準化した形状は相似であることが知られている¹⁾。したがって、洗掘深によって形状を代表させることができる。

接近流に河床波（たとえば砂堆）が存在し洗掘孔へ砂粒が流入するような場合には、洗掘孔の埋戻しと洗掘とが繰返され洗掘深が平均値のまわりに変動する。このような洗掘形態は *scour with continuous sediment motion* と呼ばれ、平均値（平衡洗掘深と呼ばれている）の評価よりもむしろ変動の最大値を評価することが局所洗掘という問題の性質上重要となる。

本章では、橋脚周辺の局所洗掘現象に関する種々の知見を合理的に説明するモデル化を行う。モデル化に際しては **Fig. 2** に示すプロセスに従い、現象の本質を見失わない範囲で簡略化を行っている。すなわち、洗掘孔の幾何形状が相似であることに着目して洗掘孔形状をモデル化し、洗掘孔内における砂量のバランスを定式化する。その際、洗掘孔周辺には与えられた水理量に対して生起することが見込まれる砂堆が存在するものとし、簡単のためその形状を二次元的に取扱う。この砂堆の移動に伴って洗掘孔への流入砂量と洗掘孔外縁位置が変動することを考慮する。また、洗掘孔より流出する砂量は洗掘の主要因である馬蹄渦の掃流力を考慮して評価する。以上の取扱いにより洗掘深の時間的変化速度（洗掘速度）を定式化する。

2.1 洗掘孔における砂量のバランス

円柱中心を含む鉛直縦断面の円柱前方の河床形状を **Fig. 3** のように模式化して表す。接近流には波高 H 、波長 L の砂堆が存在し、波速 c で移動している状況を扱う。砂堆が一波長分移動するのに要する時間を T 、と表すと $c = L/T$ である。接近流の平均河床高から洗掘孔底部までを洗掘深 z_s とし、角度 θ を微小として砂堆の移動に伴う洗掘孔での砂量のバランスについて考える。

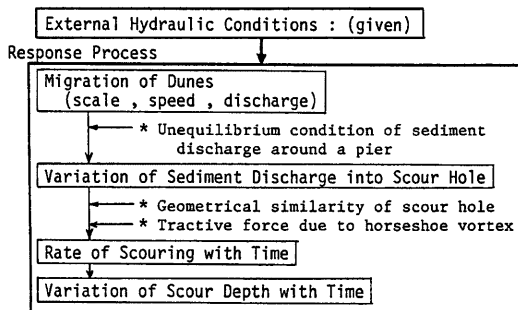


Fig. 2 Framework of present model.

いま、時刻 $t=0$ のときに砂堆が RSU であり、 $t=t(<T_s)$ のときに R'S'U' に移動したとする。PS'U'U に相当する部分が t 時間における洗掘孔への流入砂量であり、幅 b_{in} より洗掘孔へ流入した砂粒は洗掘孔斜面 ABCG (斜面角 φ) を滑落して洗掘孔底部 GCEF に達する。洗掘孔底部では馬蹄渦の作用により単位時間・単位面積あたりに q_b の砂量が洗掘孔外へ流出している。時刻 t における洗掘孔斜面長 PQ および単位時間・単位幅あたりの流入砂量 q_{in} は次のように表される。

$$\overline{PQ} = \{z_s + H(0.5 - t/T_s)\} / \sin \varphi \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$q_{in} = (1 - \lambda_0) LH(1 - t/T_s) / T_s \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに λ_0 は砂粒の空隙率である。

微小時間 Δt の間に洗掘深が Δz_s 増大したとすると、洗掘孔における砂量のバランスは次のように表される。

$$\left(-\frac{q_{in}}{1 - \lambda_0} \cdot b_{in} + \frac{q_b}{1 - \lambda_0} \cdot A_b \right) \Delta t = (A_s + A_b) \Delta z_s \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} b_{in} &= (\overline{PQ} \cos \varphi + k_1 D + D/2) \cdot \theta \\ A_s &= \frac{1}{2} \cdot \frac{z_s + H(0.5 - t/T_s)}{\tan \varphi} \left\{ \frac{z_s + H(0.5 - t/T_s)}{\tan \varphi} + (2k_1 + 1)D \right\} \cdot \theta \\ A_b &= \frac{1}{2} k_1 (k_1 + 1) D^2 \cdot \theta \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

k_1 は実験定数で $k_1 = 0.25^{1)}$ 、 D は円柱径である。

2.2 洗掘孔内の掃流力と洗掘孔からの流出砂量

洗掘孔内の掃流力は主として馬蹄渦に依るものであり、これを厳密に評価することはきわめて困難である。したがって、ここでは前報²⁾と全く同様な取扱いを行い、洗掘孔底部の摩擦速度 u_* 、無次元掃流力 τ_* 、洗掘孔からの流出砂量 q_b を次の手順に従って評価する。

1) 洗掘初期における馬蹄渦を半径 $r_0 (= k_0 D)$ の円で近似し、渦外縁速度を V_0 とすると、循環は $\Gamma_0 = 2\pi r_0 V_0$ と表される。この Γ_0 は円柱の存在に起因する循環の減少 $\Delta \Gamma = (D/2) U_m$ 、ここに U_m は接近流の表面流速、と密接に関連し Γ_0 が $\Delta \Gamma$ に比例すると考えると $\Gamma_0 = \alpha (D/2) U$ を得る。ここに、 α は比例定数、 U は接近流の平均流速である。

2) 洗掘過程においては洗掘深の増大に伴って馬蹄渦の大きさが増大するとして、 $r = r_0 + C_r z_s$ とおき³⁾、渦外縁速度を V とすると循環は $\Gamma = 2\pi r V$ となる。

3) 馬蹄渦の循環が洗掘深に依らず保存されるとして、 $\Gamma = \Gamma_0$ とおく。

以上の取扱いにより次式が得られる。

$$V = \frac{\alpha}{4\pi} \cdot \frac{U}{k_0 + C_r z_s / D} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで $\phi_0 = V/u_*$ とおくと

$$u_* = \frac{\alpha}{4\pi} \cdot \frac{\phi}{\phi_0} \cdot \frac{u_{*0}}{k_0 + C_r z_s / D} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\tau_* = \left(\frac{\alpha}{4\pi} \right)^2 \cdot \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^2 \cdot \frac{\tau_{*0}}{(k_0 + C_r z_s / D)^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 u_{*0} および τ_{*0} は接近流の摩擦速度および無次元掃流力、 ϕ は流速係数 ($= U/u_{*0}$) である。 ϕ は次式を用いる⁴⁾。

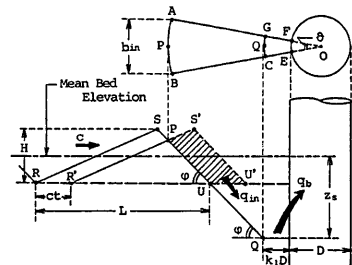


Fig. 3 Definition sketch of bed configuration in the vertical plane of symmetry ahead of a circular pier.

$$\left. \begin{aligned} \phi &= 6.0 + 5.75 \log_{10} \left(\frac{h}{2d} \right) & \text{for } \tau_{*0} \leq \tau_{*c0} \\ \phi &= 2.4(h/d)^{1/6} \tau_{*0}^{-1/3} & \text{for } \tau_{*0} > \tau_{*c0} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 h は水深、 d は砂粒径、 τ_{*c0} は接近流の限界無次元掃流力である。

式(6)、(7)を用いると前報²⁾と同様に、 q_b が次のように表される。

$$q_b = \frac{1}{k_1 D} \cdot c_1 u_* d \left\{ j_* - \frac{1}{a} \ln(1 + a j_*) \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} j_* &= \tau_* / \tau_{*c}, \quad a = c_2 \sqrt{\tau_{*c}}, \quad \tau_{*c} = \xi / \phi^2 \\ \xi &= \frac{2A_3 \tan \phi}{\varepsilon A_2 (C_D + C_L \tan \phi)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

clear water scour に対しては、いわゆる平衡洗掘深が定義され、式(7)の τ_* が τ_{*c} に等しいとおくことにより、次式で表される。

$$\frac{z_{se}}{D} = \frac{1}{C_r} \left\{ \frac{\alpha \phi}{4\pi} \sqrt{\tau_{*0}/\xi} - k_0 \right\} \dots\dots\dots (11)$$

2.3 洗掘孔への流入砂量

円柱周辺の流砂は非平衡の状態にあり、非平衡性を考慮して洗掘孔への流入砂量を評価する必要がある。いま Fig. 4 において、円柱中心より上流向きに x 座標をとり、 $x=0$ における流砂量を Q_0 と表して次式を仮定する³⁾。

$$\frac{\partial Q}{\partial x_*} = \frac{D}{S} (Q_0 - Q) \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 $x_* = x/D$ 、 $S = Ad$ (step length) である。上式を $x_* = 0.5$ で $Q = 0$ として解き、洗掘孔外縁 $x_* = x_{*r} \equiv (z_s/D)/\tan \phi + k_1 + 0.5$ における流砂量 Q_r を求めると

$$Q_r = Q_0 \left[1 - \exp \left\{ -\frac{D}{Ad} (x_{*r} - 0.5) \right\} \right] \dots\dots\dots (13)$$

上式を考慮して前述の式(2)を次のように修正する。

$$q_{in} = (1 - \lambda_0) L H (1 - t/T_s) \cdot \left[1 - \exp \left\{ -\frac{D}{Ad} (x_{*r} - 0.5) \right\} \right] \dots\dots\dots (14)$$

2.4 砂堆の形状と移動速度

本報では、接近流の河床形態を砂堆に限定している。砂堆には種々のスケールのものが混在し、波高 H および波長 L はそれぞれ平均値 $\bar{H}$ および $\bar{L}$ のまわりに分布している。これらの分布にはガンマ分布、レーレー分布あるいは正規分布などが良く適合するようであるが⁶⁾、ここでは、 $\eta = H/\bar{H}$ 、 $\lambda = L/\bar{L}$ として η および λ にレーレー分布を仮定する。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} f_H(\eta) &= \frac{\pi \eta}{2} \exp \left(-\frac{\pi}{4} \eta^2 \right) \\ f_L(\lambda) &= \frac{\pi \lambda}{2} \exp \left(-\frac{\pi}{4} \lambda^2 \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

砂堆のスケールにかかわらず一つの砂堆ごとの平均流砂量は全体の平均流砂量に等しいとすると、個々の砂堆の一波長移動するのに要する時間 T_s は $T_s = \bar{T}_s \cdot \lambda \eta$ と表される。なお、波高や波長の分布に比べると波形勾配 H/L の分布はかなり一様であることが知られているので⁶⁾、 $H/L = \bar{H}/\bar{L}$ 、すなわち $\eta = \lambda$ として取扱う。

波高および波長の分布性状についてみると、その確率密度および累加確率 P は Fig. 5 のようになる。ここで、 $m = (\eta - 1)/\sigma = (\lambda - 1)/\sigma$ 、 σ は分布の標準偏差を表す、とおいて波高および波長のスケールを m を指標

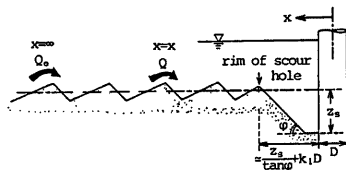


Fig. 4 Definition sketch.

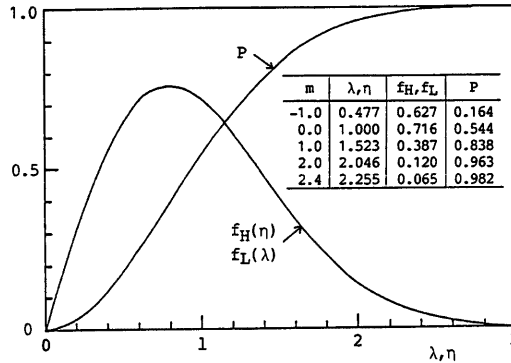


Fig. 5 Distribution of dune scales.

として表すことにすると Fig. 5 に併示した数値が得られ、最大の砂堆スケールは $m=2.4$ (累加確率98.2 %) 程度である。

次に、平均波高 $\bar{H}$ および平均波長 $\bar{L}$ についてみると、次式が良い近似を与える⁷⁾。

$$\bar{H} = m_1(1 - \tau_{*c0}/\tau_{*0})h, \quad \bar{L} = m_2h \quad (16)$$

ここに、 m_1 および m_2 は定数である。

$\bar{T}_s$ は砂堆一個の体積を平均流砂量 Q_0 で運ぶのに要する時間と解釈できるから、

$$\bar{T}_s = \frac{1}{2}(1 - \lambda_0)\bar{L}\bar{H}/Q_0 \quad (17)$$

平均流砂量には芦田・道上式⁸⁾を用いることとする。すなわち、

$$Q_0 = 17\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd^3} \cdot \tau_{*c}^{3/2}(1 - \tau_{*c0}/\tau_{*0})(1 - \sqrt{\tau_{*c0}/\tau_{*0}}) \quad (18)$$

ここに、

$$\tau_{*c} = \frac{u_{*c}^2}{(\sigma/\rho - 1)gd}, \quad \frac{U}{u_{*c}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{h}{d(1 + 2\tau_{*c0})} \quad (19)$$

式(16)、(18)、(19)を式(17)に用いると $\bar{T}_s$ が評価される。

2.5 洗掘速度

前節までの諸式を用いると洗掘速度が水理量の関数として表される。式形が複雑となるので省略するが、それは次のように表現される。

$$\frac{\Delta(z_s/D)}{\Delta(u_{*c0}t/D)} = F_n\left(\tau_{*c0}, \frac{h}{d}, \frac{D}{d}, \frac{z_s}{D}, \frac{t}{\bar{T}_s}\right) \quad (20)$$

上式は、ある時刻における洗掘速度が接近流の水理諸量とその時点における洗掘深および洗掘孔に最も近い砂堆の洗掘孔外縁に対する位置関係によって規定されることを表現している。また、砂堆に関する諸量を省略すると clear water scour での洗掘速度を与える。

後章では式(20)を用いて種々の洗掘現象をシミュレートするが、その際 τ_{*c0} 、 h/d 、 D/d 、初期洗掘深ならびに近接砂堆の初期位置は既知量として与える。また、式(20)に含まれる種々の定数には次の値を用いている²⁾。

$$\begin{aligned} A_2 &= \pi/4, \quad A_3 = \pi/6, \quad c_1 = 0.635, \quad c_2 = 1.66, \quad C_D = 0.4, \quad C_L = 0.34, \quad C_r = 0.1, \quad k_0 = 0.15, \\ k_1 &= 0.25, \quad m_1 = 0.25, \quad m_2 = 5.0, \quad \alpha = 2.8, \quad \varepsilon = 0.4, \quad \lambda_0 = 0.4, \quad A = 100.0, \quad \tau_{*c0} = 0.04, \\ \varphi &= 35^\circ, \quad \phi_0 = 10.0 \end{aligned}$$

なお対象とする砂堆にはその平均スケール ($m=0$) のものを考慮し、3.4節において砂堆のスケールが分布していることの影響を検討する。

3. 定常場に対するシミュレーション結果

本章では、接近流の水利量が時間的に変化しない定常場での洗掘現象をシミュレートし、従来の知見を合理的に説明するとともに本モデルの妥当性を検証する。

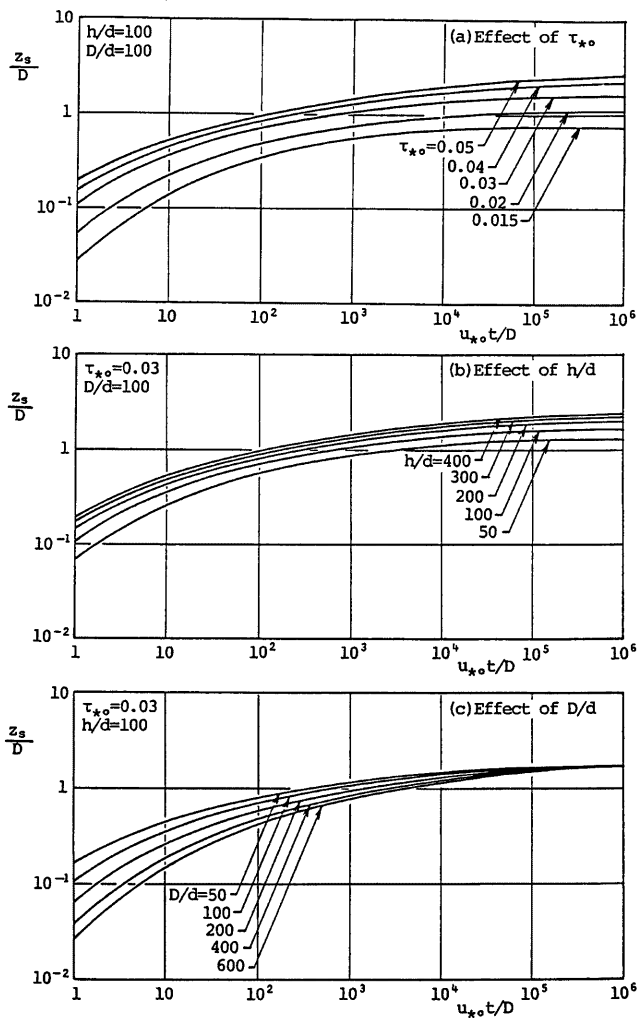


Fig. 6 Development of scour depth with time under clear water scour.

3.1 clear water scour における洗掘深の時間的変化

洗掘孔への土砂供給のない clear water scour では、洗掘の初期段階で洗掘が急激に進み、それ以後の進行は緩慢で長時間を要して平衡状態へ漸近することが知られている。それを洗掘深 z_s と洗掘時間 t の関係でみると、 $z_s \sim t^a$ と表し初期に $a \cong 1$ であって中期に $a=1/2$ 、その後時間の経過とともに $a \rightarrow 0$ であることを指摘した中川ら¹⁾の研究、 z_s を t の指数あるいは対数関数で表した研究などがある⁹⁾。

本モデルを用いて、初期平坦河床状態からの洗掘深の時間的変化をシミュレートすると Fig. 6 のように

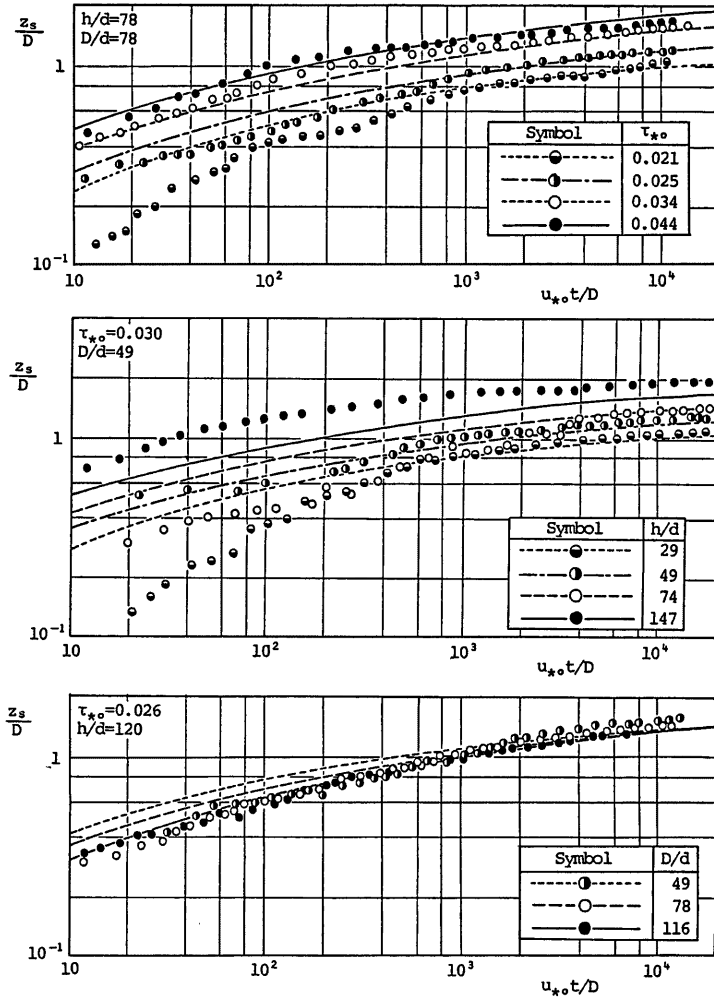


Fig. 7 Development of scour depth with time under clear water scour. Comparison between simulation and experimental data.

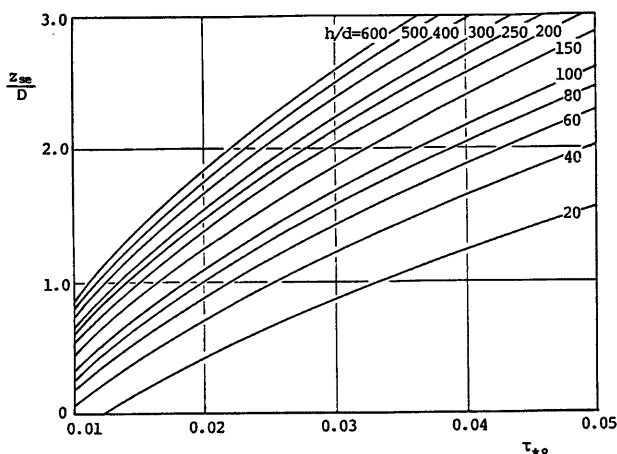


Fig. 8 Equilibrium scour depth under clear water scour.

ある。円柱径 D で基準化した洗掘深 z_s/D の無次元洗掘時間 u_{*0}/D による時間的変化を両対数紙上に表すと、その曲線は水量に依らず同様の性状を呈している。すなわち、種々の τ_{*0} および h/d における曲線群は縦軸方向に平行移動すると一本の曲線にまとまるようであり、種々の D/d における曲線群は横軸方向に平行移動すると同様に一本の曲線にまとまるようである。なお、いずれの曲線をもて洗掘深の時間に対する増大は中川らの指摘するものより緩やかなものとなっている。これらのシミュレーション結果を実測値と比較すると Fig. 7 のようであって、洗掘初期における実験値との適合度は十分とは言えないが、シミュレーションの適合度は概ね良好のようである。しかし、本モデルの妥当性を検証するためにはさらに広範な水理条件下における実験が必要である。

次に、式(11)で与えられる平衡洗掘深 z_{se} を示すと Fig. 8 のようになる。式(11)からも知られるように、平衡洗掘深を z_{se}/D として評価すると、それは τ_{*0} と h/d によって規定され D/d には無関係である。また、Raudkivi ら¹⁰⁾ が示した $(z_{se}/D)_{max}=2.3$ は Fig. 8 を見る限り概ね妥当のようであるが、それ以上に大きな平衡洗掘深も生じうることを本モデルは示唆している。

3.2 砂堆の移動に伴う洗掘深の変動

橋脚地点を砂堆が移動すると、その移動に応じて洗掘孔への供給砂量が時間的に変動し、その結果として洗掘深が変動する。このような変動特性に注目した研究には Shen ら¹¹⁾、鈴木ら¹²⁾の実験的研究、洗掘孔への流入砂量を時間の $\sin$ 関数で与え洗掘深の変動を模擬した辻本らの研究¹³⁾などがあるが、変動特性と水量との関係をシミュレートするまでには至っていない。

本節では式(20)を用いて上述の変動をシミュレートするが、その際既知量として与えた水量のもとで砂堆は十分発達している状態を初期状態とする。また、その時の初期洗掘深は任意に与えられるものとするが、ここでは $(z_s/D)_{t=0}=0.2$ としている。このような条件下でのシミュレーション結果を z_s/D と t/T_s の関係として表すと Fig. 9 のようになる。同図は、クレストの通過時に洗掘孔が急激に埋戻され次第に洗掘されて次のクレストの通過で再び埋戻されるという洗掘深の変動機構を良く説明するとともに、その変動振幅には h/d と D/d が顕著な影響を及ぼすことを示している。 τ_{*0} の影響は $\tau_{*0}/\tau_{*c0} \geq 3 \sim 4$ に対しては軽微なようである。そこで $\tau_{*0}/\tau_{*c0}=5.0$ とし、洗掘深の変動振幅 z_{sf} と砂堆波高 H との比 z_{sf}/H を $(D/d, h/d)$ 平面上の等値線として求めると Fig. 10 のようである。Shen ら¹¹⁾は実験的に $z_{sf}/H=1.0$ を示唆している

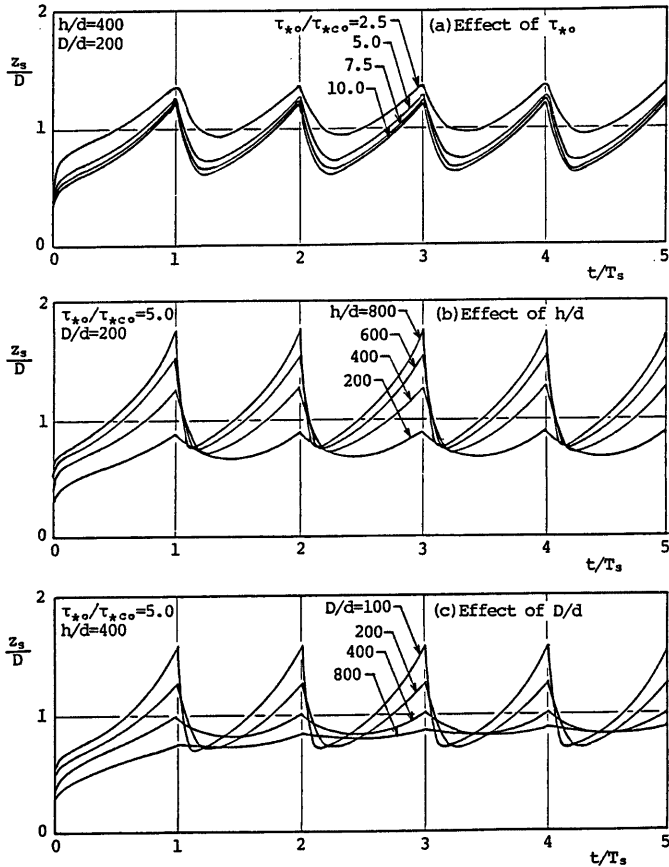


Fig. 9 Variation of scour depth due to migrating dunes.

が、本シミュレーションで対象とした範囲では $0.6 \leq z_{sf}/H \leq 1.5$ であって、Shen らの指摘をある程度裏付けているが h/d の大きいほどあるいは D/d の小さいほど z_{sf}/H は大きくなる傾向にある。

3.3 従来の予測式との比較

前述したように、橋脚の局所洗掘は古くからの研究課題であって数多くの予測式が提案されているが、scour with continuous sediment motion を対象としているものをまとめると Table 1 のようになる。本研究では洗掘の支配パラメータとして τ_{*0} , h/d , D/d を用いているので、本シミュレーションと従来の予測式との比較を容易にするために Comparison Format として示したように変形している。その比較を示すと Fig. 11 のようである。

従来の予測式は各研究者の実験値等に基づいて提案されたものであって、対象とした水理条件等の相違により予測式相互には定量的にかなりの差があるとともに定性的にも一致していないものが見受けられる。しかし、多くの予測式に共通に認められる傾向として、1) τ_{*0} の影響が軽微であって τ_{*0} が変化しても洗掘

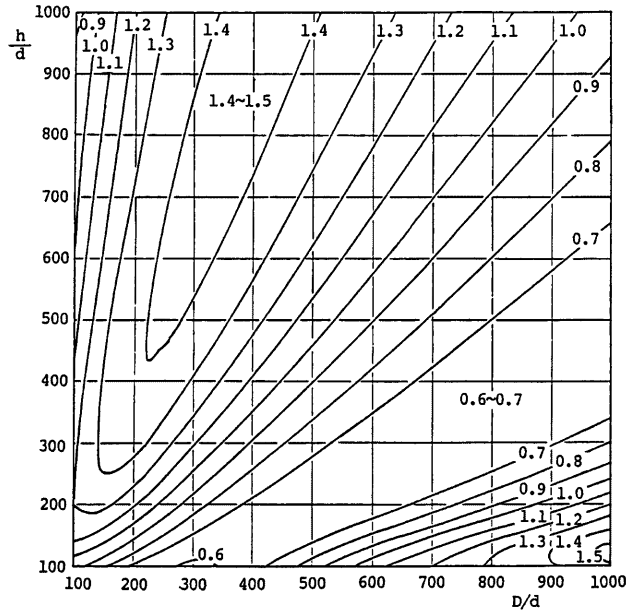


Fig. 10 Contour line of z_{sf}/H on the $(D/d, h/d)$ plane at $\tau_{*0}/\tau_{*c0}=5.0$ (z_{sf} ; amplitude of the variation of scour depth, H ; dune height).

Table 1 Summary of predicting formulas of scour depth
(scour with continuous sediment motion).

	Investigator	Original Formula	Comparison Format
1	Laursen (1958)	$\frac{z_s}{D} = 1.11(h/D)^{1/2}$	$\frac{z_s}{D} = 1.11\left(\frac{h/d}{D/d}\right)^{1/2}$
2	Breusers (1965)	$z_s = 1.4D$	$\frac{z_s}{D} = 1.4$
3	Arunachalam (1965)	$\frac{z_s + h}{h} = 1.95(h/D)^{-1/6}$	$\frac{z_s}{D} = 1.95\left(\frac{h/d}{D/d}\right)^{5/6} - \frac{h/d}{D/d}$
4	Carstens (1966)	$\frac{z_s}{D} = 0.546\left(\frac{N_s^2 - 1.25}{N_s^2 - 5.02}\right)^{5/6}$	$\frac{z_s}{D} = 0.546\left(\frac{\phi^2\tau_{*0} - 1.25}{\phi^2\tau_{*0} - 5.02}\right)^{5/6}$
5	Blench (1969)	$\frac{z_s + h}{h} = 1.8(D/h)^{1/4}$	$\frac{z_s}{D} = 1.8\left(\frac{h/d}{D/d}\right)^{3/4} - \frac{h/d}{D/d}$
6	Nakagawa et al. (1974)	$\frac{z_s}{D} = 3.4 - 0.9\log_{10}(D/d)$	$\frac{z_s}{D} = 3.4 - 0.9\log_{10}(D/d)$
7	Breusers et al. (1977)	$\frac{z_s}{D} = 1.5\tanh(h/D)$	$\frac{z_s}{D} = 1.5\tanh\left(\frac{h/d}{D/d}\right)$

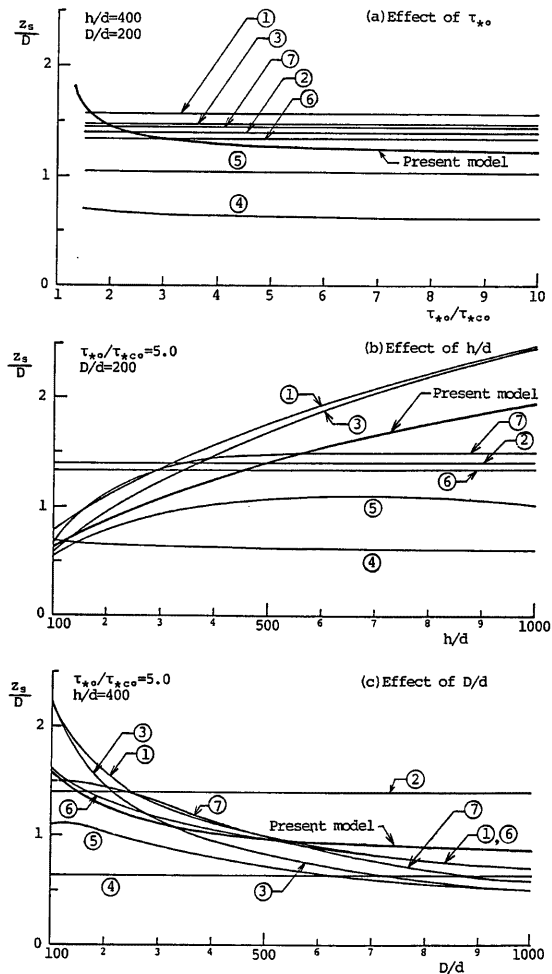


Fig. 11 Comparison between simulation and predicting formulas.

深はさほど変化せずば一定であること、2) h/d の大きいほど洗掘深も大きくなるようであること、3) D/d の増大とともに z_s/D は減少すること、などが挙げられる。また定量的にみると、ここで対象とした水理量範囲においては $0.5 \leq z_s/D \leq 2.0$ である。

本シミュレーション結果をみると、上述した定性的傾向を十分に説明しているとともに定量的にも妥当のようであり、全体的にみて Breusers ら⁹⁾ の予測式⑦に良好に一致しているようである。

3.4 砂堆スケールの影響

前節までのシミュレーションでは、接近流の砂堆としてその水理条件に対応する平均スケールのものを対

象としていたが、本節では砂堆のスケールが分布していることの影響が洗掘特性にどのように波及するかについて検討する。そこで、 $\tau_{*0}/\tau_{*c0}=5.0$, $h/d=400$, $D/d=200$ の条件において、砂堆のスケールを代表する指標 $m=-1.0, 0, 1.0, 2.0$ に対する洗掘深の変動を Fig. 9 と同様にシミュレートすると Fig. 12 のようである。平均スケールよりも小さな砂堆 ($m=-1.0$) では洗掘深の変動振幅は小さい。一方、平均スケールよりも大きな砂堆の場合には、クレスト部が洗掘孔へ流入する際の砂量が多いため急激な埋戻しが起きる。しかし、一波長移動するのにより多くの時間を要するためトラフ部が通過するまでに洗掘が進行して洗掘深は

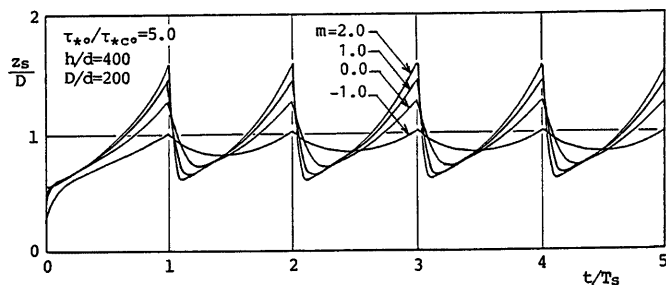


Fig. 12 Variation of scour depth due to migrating dunes.

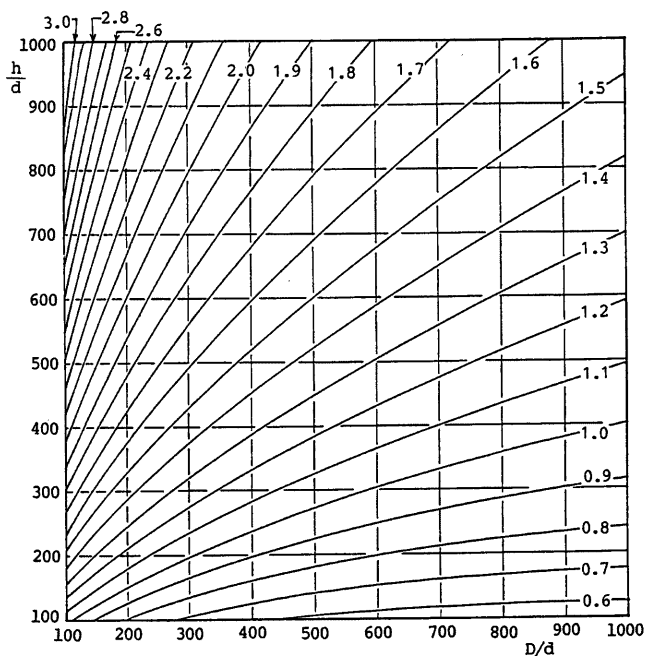


Fig. 13 Contour line of z_{smax}/D on the $(D/d, h/d)$ plane at $\tau_{*0}/\tau_{*c0}=5.0$.

小スケールのものに比し大きくなり、したがって洗掘深の変動振幅が大きくなっている。

ここに示した図は、同一スケールの砂堆がつながって移動するとした際の洗掘深の変動を種々のスケールに対してみたものであるが、実際には同一スケールの砂堆が連続することは稀であろうから、実現象では個々の砂堆のつながりを考慮する必要がある。しかし、洗掘深の変動とりわけ最大洗掘深に着目する場合には、このようなつながりよりも与えられた水量に対して生起することが予想される種々のスケールの砂堆のうち最大とみなされるものに対して洗掘深の変動を考慮すれば工学上は十分であろう。このような観点より、予想される最大スケールの砂堆は $m \cong 2.4$ （確率98.2%）であるので、 $m=2.4$ としたときの最大洗掘深 z_{smax}/D を $(D/d, h/d)$ 平面上の等値線として求め Fig. 13 に示した。前述したように $\tau_{*0}/\tau_{*c0} \cong 3 \sim 4$ の領域では τ_{*0} が洗掘深に及ぼす影響は軽微であるので、同図は $\tau_{*0}/\tau_{*c0}=5.0$ におけるものではあるが広範な砂堆領域に属する水理条件下での最大洗掘深を評価しているとみなされる。

4. 非定常場に対するシミュレーション結果

前章では洗掘現象を支配する水量が定常で長時間続くことを前提とした条件下での洗掘特性をシミュレートし、従来の知見を説明することができた。しかし、実河川で洗掘が問題となる洪水時を考えると、洗掘現象を支配する水量は時間的に変化しており、その変化に対応して洗掘現象が進行している。したがって、このような非定常場での洗掘特性を検討することは重要であり、設計上有用な情報を与えるものと考えられる。

本章では洪水の増水期を想定し、支配水量の変化に対する洗掘深の応答について検討する。

4.1 設定条件

シミュレーションに際して問題となるのは、想定する洪水のハイドログラフをどのように設定すればよいかという問題と、水量の変化に対する流砂量の変化をどのように扱えばよいかという問題であるが、ここでは次の仮定を設定することとした。

- 1) 水面勾配は水量の変化に依らず一定とする。
- 2) 水量の変化と流砂量の変化には遅れがなく、水量の変化に即座に対応した流砂量となる。

仮定1)により、 τ_{*0} と h/d とは一次の比例関係にある。実際には水面勾配は一定でなく、主として橋脚下流での水位の増減に応じて変化するものと考えられるが、下流水位の変化は対象とする河川の特性に依存するのでここでは一定として扱った。なお、水面勾配の変化が既知であれば、その変化に対応する τ_{*0} と h/d を与えるようにしておけばよい。仮定2)により、第2章で求めた洗掘速度を与える式(20)において τ_{*0} と h/d を時々刻々における値に設定すれば非定常場に対しても適用可能となる。

以上より、 D/d を一定として Fig. 14 に示したような非定常場を設定する。すなわち、base flow の状態から増水開始となる時点を $t=0$ とし、peak flow の状態に達する時点を $t=t_p$ とし、その間 τ_{*0} は τ_{*0b} から τ_{*0p} まで時間とともに直線的に増大するものとする。したがって h/d も同様に $(h/d)_b$ から $(h/d)_p$ まで時間とともに直線的に増大する。 $t > t_p$ においては peak flow の状態が継続するとして扱う。 τ_{*0b} は τ_{*0c} より小さな値に設定し、洗掘形態が clear water scour から scour with continuous sediment motion へと遷移するものとする。なお、洗掘時間 t は $T = \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd} \cdot t/D$ と無次元化する。したがって、 $t_p = 1 \sim 5$ 時間、 $d = 1.0 \text{ mm}$ 、 $D = 1.0 \text{ m}$ とすれば peak flow に到達するまでの無次元時間は $T_p \cong 460 \sim 2300$ 程度である。

洪水の履歴の影響は、本シミュレーションでは初期洗掘深の設定に集約されている。

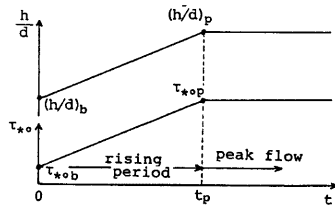


Fig. 14 Conditions of simulation.

4.2 水理量の変化に対する洗掘深の応答

本節では非定常場における洗掘深の応答を, peak flow に達するまでの無次元時間 T_p , ピーク水理量および初期洗掘深をそれぞれ種々変化させた場合についてシミュレートする。

Fig. 15 は, ピーク水理量と初期洗掘深をそれぞれ一定に保ち T_p のみを種々変化させた場合のシミュレ

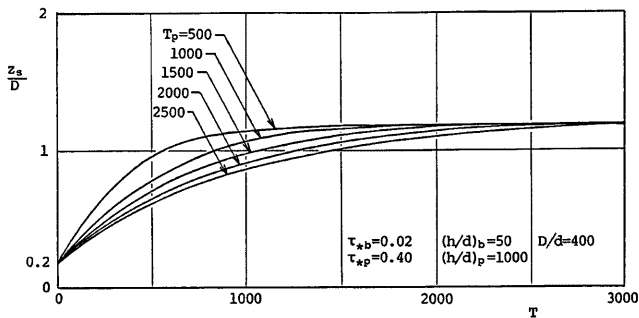


Fig. 15 Influence of the time T_p of rising period on the development of scour depth.

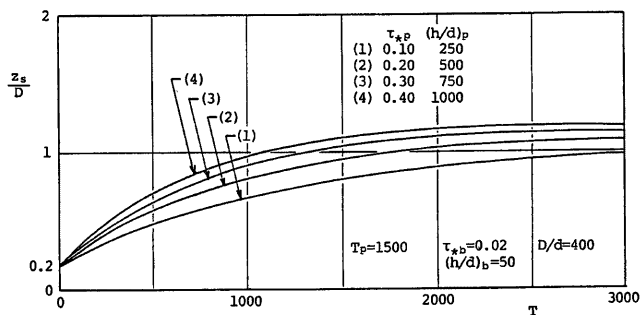


Fig. 16 Influence of peak flow conditions on the development of scour depth.

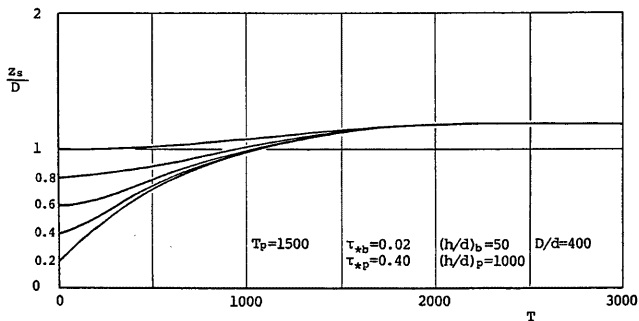


Fig. 17 Influence of initial scour depth on the development of scour depth.

ーション結果を示している。洗掘現象は水理量の急激な変化 (T_p : 小) に敏感に反応し, 緩慢な変化 (T_p : 大) に対する反応は鈍いことがわかつるとともに, 各曲線について $T=T_p$ での洗掘深を比較すると T_p の大きいほど大きな洗掘深を呈することがわかる。したがって, ピーク水理量が同一ならばピークに達するまでの時間の長い洪水ほど洗掘は進行する。次に, T_p と初期洗掘深を一定に保ちピーク水理量のみを種々変化させた場合の結果を Fig. 16 に示す。当然ながらピーク水理量が軽微なほど洗掘深は小さくなっている。最後に, T_p とピーク水理量を一定に保ち初期洗掘深のみを変化させた場合の結果を Fig. 17 に示す。同図より, 初期洗掘深の相違による影響はピーク時にはほぼ消失していることがわかる。すなわち, 初期洗掘深が過去の洪水履歴を意味すると考えられることより, 洪水履歴の影響は橋脚の局所洗掘には顕著に波及しないとみなすことができる。

以上に示したシミュレーション結果を工学的観点より考察すると, ピーク水理量下における最大洗掘深を適切に評価しておけば, 流れの非定常性の影響は安全側であることが示唆される。しかし, ここでのシミュレーションには流れの非定常性に関しての仮定を含んでいるので, 詳細な評価は各河川の水理・水文特性に基づいて行う必要がある。

5. 考 察

新たに橋脚を設計する場合あるいは現在の橋脚を補強するような場合には, 荷重を支える強度を別にすると, まず第一にどの程度の洗掘が見込まれるかを評価することが重要な問題となる。その際, 過去の実績あるいは当該河川での水理・水文特性を考慮し, 何らかの信頼しうる予測式を用いて最大洗掘深を求めるのも一法である。しかし, このような評価法により求められる洗掘深はかなり大きい。例えば, 最大洗掘深 (従来の知見より移動限界の条件下で生じる平衡洗掘深とする。Fig. 18 参照) が $(z_s/D)_{max}=2.5$ とすると, $D=2\text{ m}$ で $z_{s,max}=5\text{ m}$, $D=3\text{ m}$ では $z_{s,max}=7.5\text{ m}$ となる。このような評価法は橋脚の洗掘に対する安全性という面からみると十分ではあるが, 合理的であるとは考えにくい。すなわち, 上述の評価法では最大洗掘深を与える水理条件が長時間 (平衡状態に達するまで) 続くことを前提としているが, 現実問題としてはそのようなことは極めて稀であろう。実河川の洪水を考えると, 継続時間は有限であり, しかも洗掘現象の支配水理量が時間的に変化している。

本研究では, 洪水の増水期を想定して洗掘深の応答を検討した。その結果をみると, ピーク水理量が長時間継続する場合における洗掘特性を評価することが工学的に合理的であることを示唆しているように考えられる。この点に関してさらに検討してみる。

いま, ピーク水理量が移動限界状態に対応している洗掘場を想定し, その水理量が長時間継続する場合の洗掘深の時間変化に着目する。このとき, 本洗掘モデルを用いて, 洗掘深が平衡洗掘深の η 倍 ($z_s=\eta \cdot z_{se}$) に到達するまでの洗掘時間 $T_{*c}=\eta \cdot t_{*c0}/D$ を種々の $\eta(=0.3\sim 0.9)$ に対して求めると Fig. 19 が得られる。ただし初期洗掘深は 0 としている。ここで $\eta=0.9$ に着目すると, 同図より Table 2 が得られる。表における N は, 一回の出水で移動限界の状態が 5 時間継続すると仮定した場合に $z_s=0.9 z_{se}$ に達するまでの出水の回数を表す。同表より次の事項が指摘できる。

- 1) 設計上考慮すべき洗掘深を移動限界に対応する条件下での平衡洗掘深とするか, それともピーク水理量下における最大洗掘深とするかは当該河川の出水特性に依存する。
- 2) 移動限界状態を越える出水がある程度の頻度で期

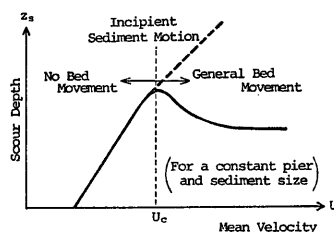


Fig. 18 Variation of scour depth with mean velocity of an undisturbed approach flow.

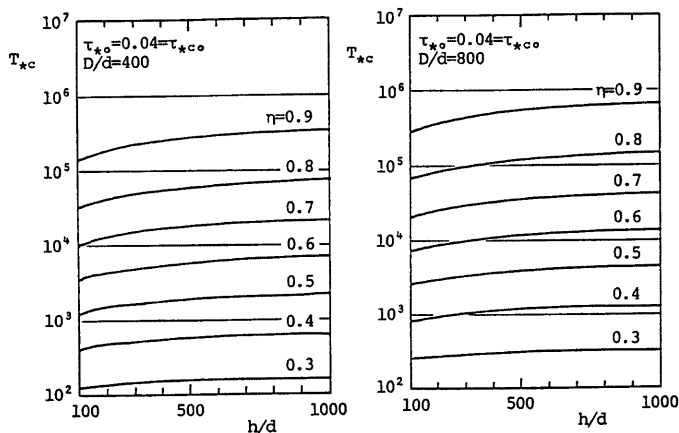


Fig. 19 Scouring time T_{*c} necessary for scour depth to reach η times the equilibrium depth.

Table 2 Scouring time T_{*c} for $\eta=0.9$.

D/d	d (cm)	D (cm)	u_{*c0} (cm/s)	T_{*c}	t (hour)	N
400	0.1	40	2.54	$10^5 \sim 5 \times 10^5$	437 ~ 2187	87 ~ 437
	0.2	80	3.60		617 ~ 3086	123 ~ 617
	0.3	120	4.40		758 ~ 3789	152 ~ 748
800	0.1	80	2.54	$4 \times 10^5 \sim 8 \times 10^5$	3500 ~ 7000	700 ~ 1400
	0.2	160	3.60		4938 ~ 9877	988 ~ 1975
	0.3	240	4.40		6060 ~ 12121	1212 ~ 2424

待できる河川では、移動限界以下の出水が連続して生起していてもその途中で一回でも移動限界を越える出水があれば、短時間で洗掘あるいは埋戻しが進行しそれまでの出水履歴は消失するから、ピーク水量下における洗掘深の変動を考慮した最大洗掘深（本研究の Fig. 13）に着目するのが工学的に合理的であるといえる。

なお、橋脚上流部にアーマコートが形成されていたり砂州が固定されている場合などのように、橋脚周辺の砂粒に対しては移動限界以上であっても洗掘孔への土砂供給が見込まれないような場合には相当大きな洗掘深となることが予想され（Fig. 18 の破線）、clear water scour としての取扱いをすることが重要となる。

6. 結 言

橋脚周辺の局所洗掘問題は古くて新しい研究課題であって従来より数多くの研究がなされてきている。それらの研究により、洗掘現象に対する理解が一層深まりつつある。本研究では、円柱橋脚を対象として局所洗掘機構をモデル化し、従来の知見を説明するとともに洗掘特性に及ぼす水量の影響を定量的に評価した。また、洪水の増水期を想定した非定常場での洗掘特性をシミュレートし、設計上考慮すべき洗掘深の取扱いについて考察を加えた。これらの検討により緒言で述べた本研究の目的をある程度達成することができたが、

本研究での洗掘モデルには種々の仮定や近似が含まれており、今後検討してゆく必要がある。また、混合粒径での洗掘問題および洗掘防御工に関する検討も実施する必要がある。

最後に、本研究の遂行に際し助言をいただいた京都大学防災研究所助教授澤井健二先生に感謝するとともに、本研究に対して文部省科学研究費奨励研究（A）の補助を受けたことを記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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，京大防災研年報，第17号B，1974，pp. 725-751.
- 2) 今本博健・大年邦雄：開水路流れに設置された橋脚周辺の水利特性について(3)，京大防災研年報，第28号B-2，1985，pp. 523-537.
- 3) Baker, C. J.: Theoretical Approach to Prediction of Local Scour around Bridge Piers, Jour. of Hydr. Res., Vol. 18, No. 1, 1980, pp. 1-12.
- 4) 岸 力・黒木幹男：移動床流れにおける河床形状と流体抵抗，北大工学部研究報告，No. 67, 1973.
- 5) 赤司信義・斉藤 隆：鉛直噴流による洗掘に関する研究，土木学会論文集，第298号，1980，pp. 53-62.
- 6) 吉川秀夫編著：流砂の水理学，丸善，1985，第5章.
- 7) Yalin, M. S.: Geometrical Properties of Sand Waves, Proc. ASCE, Vol. 90, HY5, 1964, pp. 105-119.
- 8) 芦田和男・道上正規：移動床流れにおける抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文集，第206号，1972，pp. 59-69.
- 9) Breusers, H. N. C., G. Nicollet and H. W. Shen: Local Scour around Cylindrical Piers, Jour. of Hydr. Res., Vol. 15, No. 3, 1977, pp. 211-252.
- 10) Raudkivi, A. J. and R. Ettema: Clear-Water Scour at Cylindrical Piers, Proc. ASCE, Vol. 109, HY3, 1983, pp. 338-350.
- 11) Shen, H. W., V. R. Schneider and S. Karaki: Local Scour around Bridge Pier, Proc. ASCE, Vol. 95, HY6, 1969, pp. 1919-1940.
- 12) 鈴木幸一・道上正規・片岡幸三：橋脚周辺の洗掘深に及ぼす河床波の影響，第27回水理講演会論文集，1983，pp. 659-664.
- 13) 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，1985，pp. 591-596.