

開水路流れに設置された橋脚周辺の水理特性について(3)

今本博健・大年邦雄

HYDRAULIC CHARACTERISTICS AROUND PIER IN AN OPEN CHANNEL FLOW (3)

By *Hirotake* IMAMOTO and *Kunio* OHTOSHI

Synopsis

Bridge piers are sometimes damaged by local scour. Although the problem of local scour around bridge piers has been studied extensively, it has been difficult to estimate local scour quantitatively. Many of the experimental investigations that have been conducted have dealt with scour around a uniform pier, but there have been few investigations of scour around a non-uniform pier. Non-uniform circular cylinders sometimes are used as piers. The scour process around a non-uniform pier, however, is not yet clearly understood.

In this investigation, a simple model of scour process around a uniform circular pier was constructed and the development of scour depth with time based on this model was compared with experimental data. A pier that was made up of a small circular cylinder with a larger circular cylinder below it was used as the non-uniform pier model and the scouring process around it was investigated experimentally.

1. はじめに

近年、わが国の多くの河川は河床低下の傾向にあり、長年月を経た橋梁の基礎が相対的に浮かび上がったために、洪水時の洗掘によって橋梁が倒壊・流出するなどの災害が引き起こっている。このため、橋脚のまわりにブロックを敷き詰めたり、モルタル等で固めるといった補強工事を実施している例なども報告されている¹⁾。このような橋脚による局所洗掘に関する研究は、古くから主として実験的に行われてきており数多くの知見が得られているが、現象の三次元性および非定常性により、未だ不明な点が残されているのが現状である。

本研究では橋脚による局所洗掘を取扱うが、現象を単純化するために、洗掘孔への土砂供給のない clear water scour を対象としている。まず、洗掘過程を理解するために一様円柱橋脚における洗掘機構をモデル化し、著者らが従来より実施してきた実験値と比較している。次に、上述したような橋脚下部を固めて補強する工法は橋脚自身の構造強度を増大するという目的は達成するものの、橋脚下部を大きくしたことがかえって局所洗掘を促進させることにつながる可能性があることを重視して、そのような形式の橋脚を幅の途中で変化する非一様橋脚としてとらえ、非一様橋脚の最も単純な例として二段円柱型橋脚の洗掘特性を実験的に検討した。

2. 一様円柱橋脚の洗掘特性

2.1 洗掘機構モデル

初期平坦河床より通水を開始すると掃流力の大きな円柱側方より洗掘され始め、続いて前方も洗掘されて円柱前方にはほぼ半円状の洗掘孔が形成される。洗掘された砂粒は後方へと運ばれて堆積し、時間の経過と

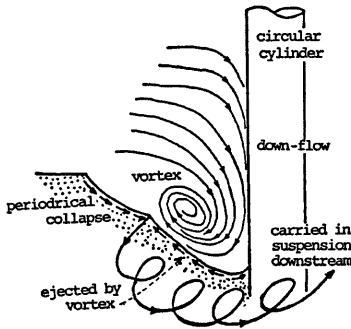


Fig. 1 Shape of scour hole and movement of sand grains in the plane of symmetry for partly developed scour hole

ともに洗掘深の増大および洗掘域の拡大が進行する。流れの円柱中心を通る縦断面内の洗掘孔形状および砂粒の動きを、洗掘進行過程について模式的に描くと Fig. 1 のようである。すなわち、円柱前方の下降流および馬蹄渦により、円柱近傍の砂粒子は矢印の向き（上流向き）に移動し、大部分の砂粒子は洗掘孔斜面途中から洗掘孔外へ流送されている。また、洗掘孔上流側斜面の砂粒子は洗掘深の増大に伴って断続的に滑落し、斜面の勾配を一定（水中安息角）に保っている。洗掘初期の段階ではこのような水中安息角の存在はなく、洗掘深がある程度増大した後に安息角が出現するようである。

したがって、洗掘過程のモデル化に際しては、洗掘の初期段階（第1洗掘過程）、安息角の出現する段階（第2洗掘過程）および洗掘孔内の砂粒の動きが鈍く洗掘深の時間的増大速度が極めて小さくなる段階（第3洗掘過程）のそれぞれに対する取扱が必要である。

本節では、上述した実験時の観察に基づいて簡単化した洗掘孔形状と洗掘の主要因である馬蹄渦に関する仮定より、洗掘深の時間的変化を定式化する。

(1) 洗掘孔形状と連続式

(a) 第1洗掘過程

流れの円柱中心を通る縦断面内の洗掘孔形状を Fig. 2 のように模式化する。すなわち、洗掘孔斜面の勾配は ϕ で一定であるが、洗掘孔底部の幅は洗掘深 z_s が第2洗掘過程への移行洗掘深 z_{s1} に達するまで z_s の増大とともに k_0D から k_1D まで変化する。ここに D は円柱径、 k_0 および k_1 は実験定数である。実際に洗掘されるのは BC 部分である。図において、 Δt 時間に洗掘深が Δz_s 増大したとする。 q_s を BC 部分において単位時間・単位面積あたりに流出した砂粒の実質体積、 λ を砂粒の空隙率とすると、砂粒の連続式は次のように表わされる。

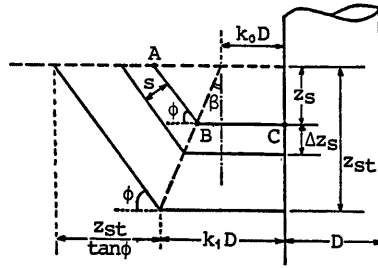


Fig. 2 Shape of scour hole in the plane of symmetry (1st scour process)

$$\frac{q_s}{1-\lambda} \cdot \overline{BC} \cdot \Delta t = \overline{AB} \cdot s + \overline{BC} \cdot \Delta z_s \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

$$s = \left(\frac{1}{\tan \phi} + \tan \beta \right) \Delta z_s \cdot \sin \phi, \tan \beta = \frac{(k_1 - k_0)D}{z_{s1}} \dots\dots\dots(2)$$

であるから、式(1)は次のように書わされる。

$$\frac{\Delta z_s}{\Delta t} = \frac{q_s}{1-\lambda} \cdot \frac{(k_1 - k_0)Z_s/Z_{s1} + k_0}{Z_s/\tan \phi + 2(k_1 - k_0)Z_s/Z_{s1} + k_0} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $Z_s = z_s/D$, $Z_{s1} = z_{s1}/D$ である

(b) 第2洗掘過程

洗掘孔の形状を Fig. 3 のように模式化する。すなわち、洗掘深が z_s が移行洗掘深 z_{s1} 以上になると洗掘孔底部の幅は k_1D の一定で、斜面の勾配は ϕ および砂粒の水中安息角 $\varphi (< \phi)$ で規定される。後述するように $z_{s1}/D \equiv Z_{s1}$ は比較的小さいため、ここでは洗掘孔斜面を PQ で近似し、PQ と水平面とのなす角を

γ とする。実際に洗掘される領域は $\triangle GCEF = A_{scour}$ であり、 $\triangle ABCG = A_{silt}$ の領域では洗掘深の増大に伴って砂粒が滑落する。 dt 時間に洗掘深が dz_s 増大したとすると、Fig. 3 において

$$\left. \begin{aligned} \tan \gamma &= z_s \tan \varphi \cdot \tan \phi / \{z_s \tan \phi + z_{st}(\tan \varphi - \tan \phi)\}, s = dz_s \cdot \cos \gamma \\ A_{scour} &= \frac{1}{2} k_1 (k_1 + 1) D^2 \cdot d\theta \\ A_{silt} &= \frac{1}{2 \cos^2 \gamma} \cdot \frac{z_s}{\tan \gamma} \left\{ \frac{z_s}{\tan \gamma} + (2k_1 + 1) D \right\} \cdot d\theta \end{aligned} \right\} \dots(4)$$

であるから、式(5)の連続式は式(6)のように書表わされる。

$$\frac{q_s}{1-\lambda} \cdot A_{scour} \cdot dt = A_{silt} \cdot s + A_{scour} \cdot dz_s, \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{dz_s}{dt} = \frac{q_s}{1-\lambda} \cdot \frac{k_1(k_1+1)\sin\gamma}{Z_s^2/\tan\gamma + (2k_1+1)Z_s + k_1(k_1+1)\sin\gamma} \dots\dots\dots(6)$$

(2) 洗掘孔内の掃流力

平坦固定床流れでの馬路渦を半径 r_0 の円で近似し、渦外縁速度を V_{r0} と表わすと、渦による循環 Γ_0 は次式で表わされる。

$$\Gamma_0 = 2\pi r_0 V_{r0} \dots\dots\dots(7)$$

この Γ_0 は、ポテンシャル流れの仮定より得られる円柱橋脚の存在に起因する循環の減少²⁾ $\Delta\Gamma$ すなわち、

$$\Delta\Gamma = (D/2) U_H \dots\dots\dots(8)$$

ここに U_H は接近流の表面流速を表わす、と密接な関係があると考えられ、ここでは ε を比例定数として次式を仮定する。

$$\Gamma_0 = \varepsilon \Delta\Gamma \dots\dots\dots(9)$$

式(8), (9)より次式が得られる。

$$\Gamma_0 = \alpha (D/2) U \dots\dots\dots(10)$$

ここに、 $\alpha = \varepsilon \cdot U_H / U$, U は平均流速である。

洗掘過程においては、洗掘深の増大とともに渦半径 r は増大すると考えられ、

$$r = r_0 + C_r z_s, r_0 = k_0 D \dots\dots\dots(11)$$

と仮定する³⁾。ここに C_r は実験定数である。このとき、渦外縁速度を V_r とすると循環 Γ は

$$\Gamma = 2\pi r V_r \dots\dots\dots(12)$$

と表わされ、循環が保存されるとして $\Gamma = \Gamma_0$ とおくと、式(10)~(12)より次式を得る。

$$V_r = \frac{\alpha}{4\pi} \cdot \frac{U}{k_0 + C_r Z_s} \dots\dots\dots(13)$$

ここで、 $\phi_{r*} = V_r / u_*$ とおくと洗掘孔内の摩擦速度 u_* および無次元掃流力 τ_* はそれぞれ式(14)および(15)のように表わされる。

$$u_* = \frac{\alpha}{4\pi} \cdot \frac{U}{\phi_{r*}} \cdot \frac{1}{k_0 + C_r Z_s} \dots\dots\dots(14)$$

$$\tau_* = \left(\frac{\alpha}{4\pi} \cdot \frac{N_s}{\phi_{r*}} \cdot \frac{1}{k_0 + C_r Z_s} \right)^2 \dots\dots\dots(15)$$

ここに、 $N_s = U / \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd}$, σ : 砂粒密度, ρ : 流体密度, d : 砂粒径である。

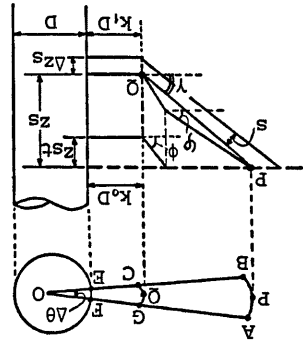


Fig. 3 Shape of scour hole in the plane of symmetry (2nd scour process)

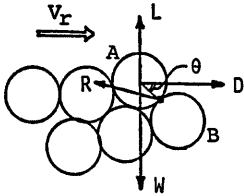


Fig. 4 Schematic illustration of forces acting on the particles at the bed of scour hole

(3) 第3洗掘過程

洗掘孔が十分発達し、洗掘深の時間的増大速度が極めて小さい状態である。このとき、洗掘孔底部の砂粒子に作用する力について考える。Fig. 4 に示した砂粒子 A には、 V_r による揚力 L と抗力 D 、水中重量 W および砂粒子 B からの反力 R が作用する。 L および D は粒子の重心を通るものとし、粒子 A の重心と粒子 A、B の接点 P とを結ぶ線が水平面となす角を θ とおく。

接点 P に関するモーメントが釣合することより次式が成立する。

$$(d/2) \cos \theta \cdot L + (d/2) \sin \theta \cdot D - (d/2) \cos \theta \cdot W = 0 \tag{16}$$

上式に、

$$L = \frac{1}{2} \rho C_L V_r^2 A_2 d^2, \quad D = \frac{1}{2} \rho C_D V_r^2 A_2 d^2, \quad W = (\sigma - \rho) g A_3 d^3 \tag{17}$$

を代入し式(16)を考慮すると、平衡洗掘深 z_{st} 、および限界無次元掃流力 τ_{*c} が次のように表わされる。

$$\frac{z_{st}}{D} = \frac{\alpha}{4\pi C_r} \sqrt{\frac{A_2}{2A_3} (C_L + C_D \tan \theta)} \cdot N_s - \frac{k_0}{C_r} \tag{18}$$

$$\tau_{*c} = \frac{2A_3}{A_2} \cdot \frac{1}{C_L + C_D \tan \theta} \cdot \frac{1}{\phi_{r*}} \tag{19}$$

ここに、 C_L は揚力係数、 C_D は抗力係数、 A_2 および A_3 は砂粒子の形状係数 (球を仮定すると $A_2 = \pi/4$, $A_3 = \pi/6$) である。

(4) 洗掘速度

第1および第2洗掘過程に対してそれぞれ式(3)および式(6)により洗掘速度が求められるが、式中の q_s を与える必要がある。洗掘孔内の流砂量は非平衡性を考慮して評価するのが望ましいが、ここでは平衡状態に対して与えられた Yalin⁹⁾ の流砂量式を拡張して用い、補正係数 p を導入する。すなわち、 q_B を単位時間・単位幅あたりの流砂量とすると、

$$q_B = 0.635 u_* d \left\{ j_* - \frac{1}{a} \ln(1 + a j_*) \right\} \cdot p \tag{20}$$

ここに、 $j_* = \tau_* / \tau_{*c} - 1$, $a = 1.66 \tau_{*c}^2$ (21)

第1洗掘過程に対しては $q_s = q_B / (k_0 D + z_s \tan \beta)$ として(3), (4), (5), (19), (20), (21)を用いると洗掘速度が式(22)のように定式化される。第2洗掘過程に対しては $q_s = q_B / (k_1 D)$ として式(6), (4), (5), (19), (20), (21)を用いると洗掘速度が式(23)のように定式化される。

第1洗掘過程: $\frac{dZ_s}{dT} = m_1 \cdot \frac{1}{D/d} \cdot V_1 \cdot J_* \tag{22}$

第2洗掘過程: $\frac{dZ_s}{dT} = m_2 \cdot \frac{1}{D/d} \cdot V_2 \cdot J_* \tag{23}$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} Z_s &= z_s / D, \quad T = Ut / D, \quad Z_{st} = z_{st} / D \\ m_1 &= \frac{\alpha}{4\pi} \cdot \frac{0.635}{1-\lambda} \cdot \frac{p}{\phi_{r*}} \cdot Z_{st}, \quad m_2 = m_1 / Z_{st} \\ V_1 &= \frac{(k_1 - k_0) Z_s / Z_{st} + k_0}{Z_s / \tan \phi + 2(k_1 - k_0) Z_s / Z_{st} + k_0} \cdot \frac{1}{(k_0 + C_r Z_s) \{ (k_1 - k_0) Z_s + k_0 Z_{st} \}} \\ V_2 &= \frac{(k_1 + 1) \sin \gamma}{Z_s^2 / \tan \gamma + (2k_1 + 1) Z_s + k_1 (k_1 + 1) \sin \gamma} \cdot \frac{1}{k_0 + C_r Z_s} \\ J_* &= j_* - \frac{1}{a} \ln(1 + a j_*), \quad a = \frac{1.66}{\phi_{r*}} \sqrt{\frac{2A_3}{A_2}} \cdot \frac{1}{C_L + C_D \tan \theta} \end{aligned} \right\} \tag{24}$$

$$j_* = \left(\frac{\alpha}{4\pi} \right)^2 \cdot \frac{A_2}{2A_3} (C_L + C_D \tan \theta) N_s^2 \left(\frac{1}{k_0 + C_s Z_s} \right)^2 - 1$$

$$\left. \begin{aligned} \tan \gamma &= \frac{\tan \phi \cdot \tan \phi \cdot Z_s}{Z_s \tan \phi + (\tan \phi - \tan \phi) Z_{st}}, \quad \sin \gamma = \frac{\tan \gamma}{\sqrt{1 + \tan^2 \gamma}} \end{aligned} \right\}$$

2.2 計算結果および実験値との比較

(1) 計算定数

洗掘孔への土砂供給のない clear water scour を対象とした前節の洗掘機構モデルを用いて洗掘深の時

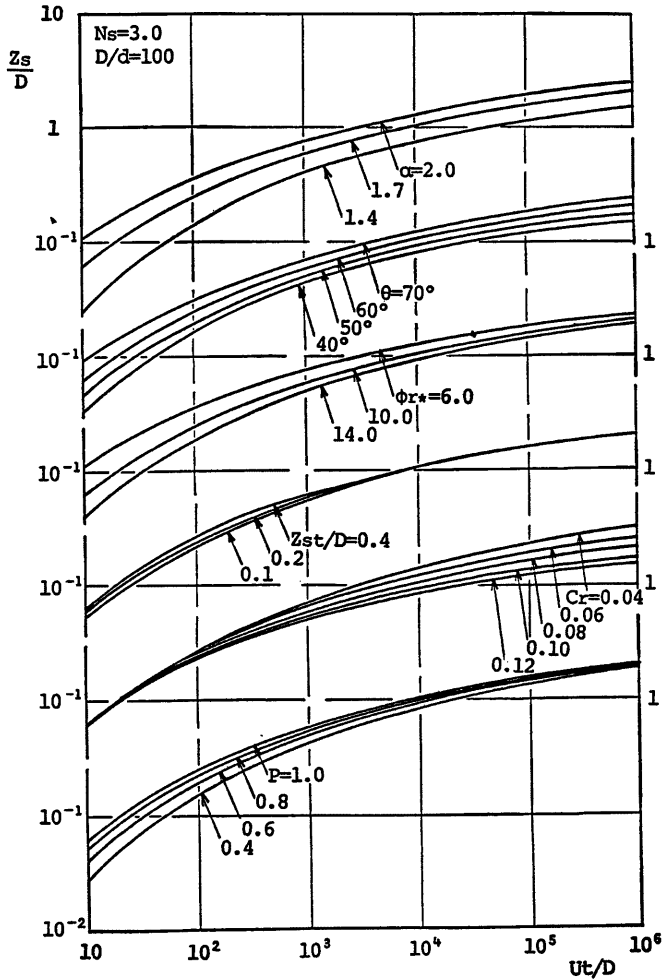


Fig. 5 Effects of various parameters on the relation of z_s/D to Ut/D

間変化を計算する際の各種定数には次の値を用いた。

まず、平坦固定床における馬蹄渦半径を表わす k_0 については宇民⁵⁾ の研究を参考にして $k_0=0.15$ とし洗掘孔底部の幅を表わす k_1 については鈴木⁶⁾ の研究を参考にして $k_1=0.25$ とおいた。また、抗力係数には球の抵抗係数を用いることとし $C_D=0.4$ 、揚力係数 C_L については Chepil⁷⁾ の研究によると $C_L/C_D=0.85$ であることより、 $C_L=0.34$ とした。砂粒の空隙率は、 $d=0.1\sim 1.0$ mm に対してはほぼ0.4であることより、 $\lambda=0.4$ とおいた。洗掘孔斜面の勾配である ψ および ϕ 、また第1洗掘過程から第2洗掘過程への遷移洗掘深 z_{st} については、著者らが従来より実施してきた実験に基づいて $\psi=35^\circ$ 、 $\phi=50^\circ$ 、 $z_{st}/D=0.3$ とした。

その他の定数については不明の点が多いが、極ね妥当な値として $\alpha=1.7$ 、 $\theta=60^\circ$ 、 $C_r=0.08$ 、 $p=1.0$ を基準量とし、 $\alpha=1.4\sim 2.0$ 、 $\theta=40^\circ\sim 70^\circ$ 、 $C_r=0.04\sim 0.12$ 、 $p=0.4\sim 1.0$ の範囲に対してそれらの影響を調べた。Fig. 5 にその計算結果を示している。同図は洗掘深 z_s/D と時間 Ut/D の関係に及ぼすそれらのパラメータの影響を調べたものである。洗掘深の増大に伴う馬蹄渦半径の増大を表わす式(11)の C_r については、洗掘後期にその影響が顕著となり、 C_r の大きい程同一時刻における洗掘深は小さくなる。また式(20)の補正係数 p は、洗掘初期にその影響が比較的顕著であるが、洗掘後期に対しては p の差違による洗掘深の差は小さく、補正係数 p の影響はそれほど大きくないとみなされる。一方、 α 、 θ 、 ϕ_{r*} は全洗掘過程に対して影響を及ぼすが、調べた範囲内では α 、 θ の影響が大きく、 ϕ_{r*} の影響は比較的小さいようである。また遷移洗掘深 z_{st}/D についても補足的に調べたが、同図に示されるようにこのパラメータ はそれほど重要ではないことがわかる。ちなみに ψ および ϕ は、 $\psi=30^\circ\sim 45^\circ$ および $\phi=40^\circ\sim 60^\circ$ の変化範囲ではその計算結果に及ぼす影響は極めて微少であった。

以上の検討に基づき、計算定数として次の値を用いることとした。

$$\left. \begin{aligned} k_0=0.15, k_1=0.25, \alpha=1.7, C_L=0.34, C_D=0.4, \lambda=0.4 \\ \psi=35^\circ, \phi=50^\circ, \theta=60^\circ, \phi_{r*}=1.0, C_r=0.08, p=1.0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(25)$$

(2) 洗掘深の時間変化に及ぼす水量の影響

本洗掘モデルにおいては、洗掘深 z_s/D と時間 Ut/D の関係に影響する水量は、sediment number N_s と円柱・砂粒径比 D/d である。前項に示した計算定数を用いてこれら水量の影響を調べ Fig. 6, Fig. 7 に示した。 D/d が一定であれば、 N_s の大きい程、また N_s が一定であれば D/d の小さい程、同一の Ut/D に対する z_s/D が大きくなる傾向を示すとともに従来の実験結果と定量的にもほぼ一致している。

次に、式(20)より計算される平衡洗掘深 z_{se} を用い、洗掘深が z_{se} の η 倍に達するのに要する時間 Ut/D

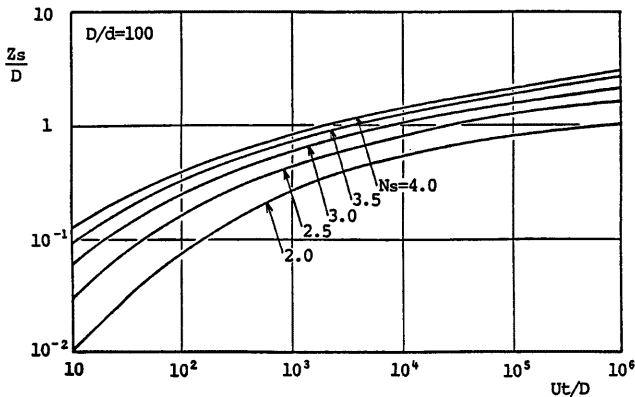


Fig. 6 Effect of N_s on the relation of z_s/D to Ut/D

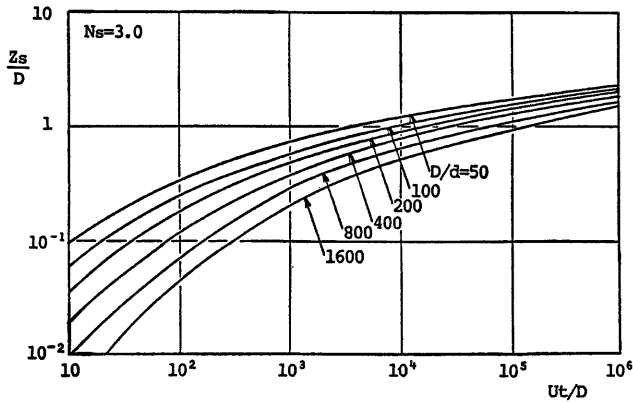


Fig. 7 Effect of D/d on the relation of z_s/D to Ut/D

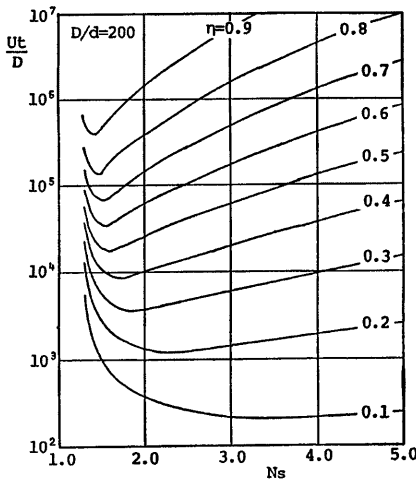


Fig. 8 Variation of dimensionless time Ut/D for transitional scour depth with N_s

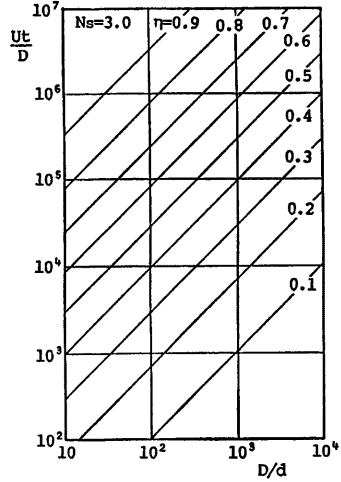


Fig. 9 Variation of dimensionless time Ut/D for transitional scour depth with D/d

と水理量との関係を η をパラメータとして計算し ($\eta=0.1\sim 0.9$), Fig. 8 および Fig. 9 に示した。これによると, D/d が一定のとき所定の洗掘深 $Z_s = \eta \cdot Z_{s0}$ に達するまでの無次元時間 Ut/D は, $N_s > 2.0$ において N_s の増大とともに増大する傾向にあり, η が大きい程その増大傾向が顕著となっている。一方, D/d の効果についてみると, いずれの η に対する無次元時間も D/d に比例して増大している。

(3) 実験値との比較

著者らが先に示した洗掘深の時間変化に関する実験結果⁸⁾と本モデルによる計算値とを比較すると Fig. 10

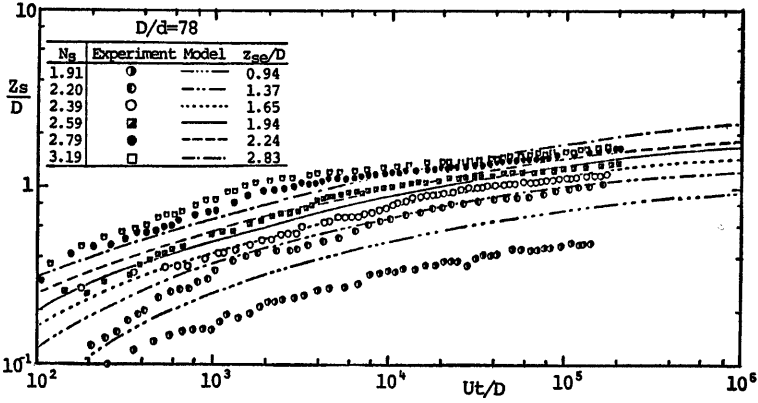


Fig. 10 Comparison of scour process model with experimental data (effect of N_s)

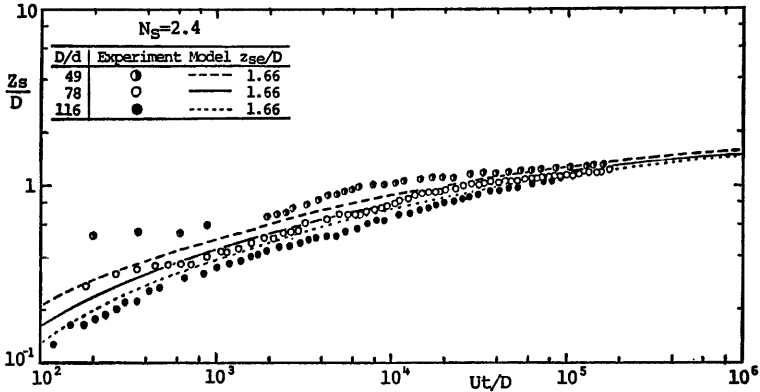


Fig. 11 Comparison of scour process model with experimental data (effect of D/d)

および Fig. 11 のようである。計算値は実験値の傾向を比較的良好に表現しているが、 N_s の小さな場合に対する適合性が悪い。また、 N_s の大きい場合および D/d の小さい場合に実験値は平衡状態へ漸近する傾向が比較的早期より認められるが、計算値で実験値よりも大きな洗掘速度を示している。

一方、式(8)で与えられる平衡洗掘深と実験値⁹⁾とを比較すると Fig. 12 のようである。計算値は実験値の上限包絡線の傾向を示し過大評価となっている。また、 N_s の大きい場合に対する実験値との差違が顕著であり、今後改良を加えてゆく必要がある。また、本モデルでは、接近流の水深 H と円柱径との比 H/D の影響については考慮していないが、Fig. 12 にみられるように、同一の N_s , D/d に対しては H/D の大きいほど平衡洗掘深 z_{se}/D が大きくなる傾向を実験値は示しており (図において実験値に付した数値は H/D を表わしている)、今後この点についても考慮する必要がある。

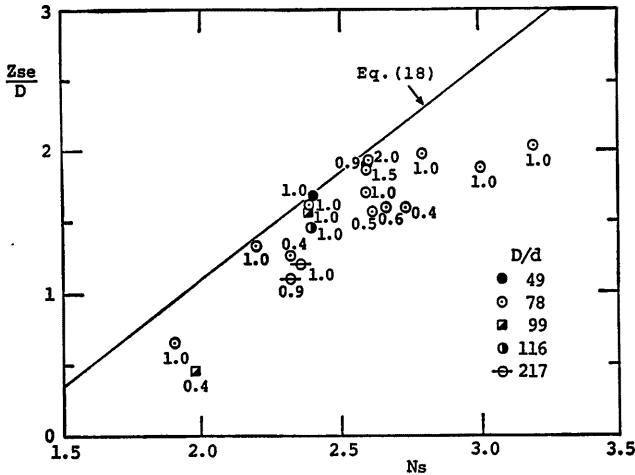


Fig. 12 Comparison of calculated equilibrium scour depth with experimental data

3. 二段円柱型橋脚の洗掘特性

3.1 実験装置および方法

定常で一樣な水流に設置された二段円柱型橋脚の洗掘深 z_s を支配する要素としては、流速 U 、水深 H 、砂粒径 d (一様砂とする)、上段円柱径 D_1 、下段円柱径 D_2 および段差 Δz が挙げられる (Fig. 13 参照)。次元的考察より次式が得られる。

$$\frac{z_s}{D_2} = F\left(N_s, \frac{H}{D_2}, \frac{D_2}{d}, \frac{D_1}{D_2}, \frac{\Delta z}{D_2}\right) \dots \dots (26)$$

ここに、 $N_s = U/\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd}$ である。本章では、上

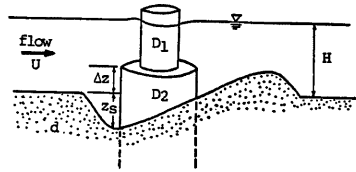


Fig. 13 Definition sketch

式右辺の各パラメータが洗掘深に及ぼす効果を洗掘孔への土砂供給のない clear water scour の状況下で検討することとし、Table 1 に示す条件下で洗掘実験を実施した。

用いた水路は、幅50 cm、高さ20 cm、長さ15 m の長方形断面水路で、中央部の1.5 m 区間を水路底より20 cm 深くしてその中に橋脚モデルを設置し、水路底と同一高さまで砂粒を密に敷き詰めた。使用した円柱は塩化ビニール製で、外径2.2~8.9 cm の7種のを適宜組合せて二段円柱橋脚モデルとした。また、使用した砂粒は中央粒径が0.15, 0.53, 0.77 mm の3種で、それぞれほぼ均一である。

洗掘実験では、所定の通水時間後の最大洗掘深および河床形状等を計測したが、それには超音波河床計およびポイントゲージを使用した。また、平坦固定床水路においては、中立浮遊粒子をトレーサーとして円柱中心を含む縦断面内の流況を可視化し⁹⁾、それを基に二段円柱前方に形成される下降流および渦の定性的検討を行った。

Table 1 Hydraulic conditions in the the scour experiments

Run	D_1/D_2	N_s	H/D_2	D_2/d	U (cm/s)	H (cm)	d (cm)	D_2 (cm)
A-1	0.50	1.95	1.12	140	18.09	8.50	0.053	7.60
A-2	0.50	2.56	1.12	140	23.68	8.48	0.053	〃
A-3	0.50	3.14	1.12	140	29.08	8.48	0.053	〃
B-1	0.50	2.58	0.70	140	23.85	5.33	0.053	〃
B-2	0.50	2.56	1.12	140	23.68	8.48	0.053	〃
B-3	0.50	2.60	1.50	140	24.07	11.42	0.053	〃
C-2	0.50	3.89	1.10	140	36.00	8.37	0.053	〃
C-3	0.50	3.91	1.09	500	19.33	8.31	0.015	〃
D-1	0.29	2.55	1.11	140	23.61	8.46	0.053	〃
D-2	0.50	2.56	1.12	140	23.68	8.48	0.053	〃
D-3	0.79	2.56	1.12	140	23.67	8.50	0.053	〃
E-1	0.50	2.60	1.10	100	29.01	8.36	0.077	〃
1	0.50	2.21	1.52	100	24.64	11.57	0.077	〃
2	0.50	2.21	0.70	100	24.62	5.33	0.077	〃
3	0.50	2.30	1.07	100	25.66	8.12	0.077	〃
4	0.50	4.90	1.55	500	24.20	11.78	0.015	〃
5	0.50	4.67	0.75	500	23.06	5.69	0.015	〃
6	0.50	4.97	1.12	500	24.54	8.49	0.015	〃
7	0.50	2.63	1.09	140	24.34	8.25	0.053	〃

Run	D_2/D_1	N_s	H/D_1	D_1/d	U (cm/s)	H (cm)	d (cm)	D_1 (cm)
F-1	1.23	2.60	3.00	34	28.82	7.80	0.077	2.60
F-6	3.42							

3.2 実験結果および検討

橋脚周辺の局所洗掘は、前述したように橋脚前面に沿う下降流および馬蹄渦に大きく支配される。下降流の強さ、換言すれば馬蹄渦による循環は主として橋脚径および接近流速によって規定される。水深は支配的ではなく、したがって洗掘に及ぼす影響も軽微である。

ここで対象とする二段円柱型橋脚の洗掘現象に対しても上述した下降流および馬蹄渦が支配的な影響を及ぼすと考えられる。Photo. 1 は、円柱中心を含む縦断面内流況の一例である。 D_1/D_2 , d_2/D_2 , U および H/D_2 を系統的に変化させた条件下で同様な撮影を行ったが、ここでは $D_1/D_2=0.5$ について d_2/D_2 の変化

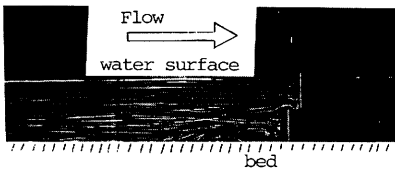


Photo. 1 An example of flow pattern in the vertical plane of symmetry ahead of the pier for the initial flat bed condition

に対する流況の変化を示す。Fig. 14 は、種々の d_2/D_2 における流況を上段および下段の二様円柱でのものと比較したものである ($D_1=2.0$ cm, $D_2=4.0$ cm, $H=6.0$ cm, $U=4.5$ cm/s)。円柱前面には表面に沿う下降流が認められるが、 $d_2/D_2=0.125$ の場合には段面にぶつかり路床面に達していない。一方、 d_2/D_2 が大きくなると下段円柱の表面に沿う下降流が路床面にぶつかりるとともに前面に形成される渦も大きくなる。このような流況変化によって二段円柱橋脚の洗掘特性は大きく支配されると考えられるが、現段階では下降流および渦の強さを定量的

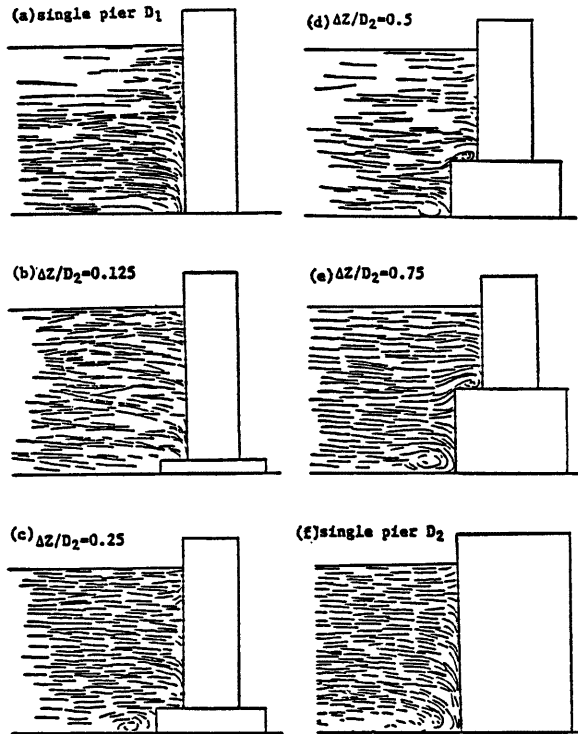


Fig. 14 Flow patterns in the vertical plane of symmetry ahead of the pier for the initial flat bed condition

に評価できておらず、今後の課題としたい。

(1) 洗掘過程

二段円柱型橋脚においても一様円柱橋脚と同様、橋脚側方から洗掘され始め次第に前方へと洗掘域が拡大してゆき、最終的には橋脚前面に最大洗掘深が生じる。洗掘孔の形状も一様円柱橋脚の場合と全く同様に逆円錐形であり、洗掘孔斜面の勾配も砂粒の水中安息角で規定されている。

Fig. 15 は、種々の段面位置における橋脚前面での洗掘深の時間的変化の計測例を示したものであって、段面の位置による洗掘過程の相違を要約すると次のようである。1) $\Delta z/D_2 > 0$ (段面が河床面上に露出) の場合における洗掘過程は、前述した一様円柱の場合と同様であるが、洗掘深は上段一様円柱のものより大きく下段一様円柱のものよりは小さい。2) $\Delta z/D_2 = 0$ (段面が河床面に一致) の場合には、橋脚の後部から若干洗掘され始め、時間の経過とともに洗掘領域が前方へと移動する。下段円柱が露出するに至って急激に洗掘深が増大し、最終的には上段一様円柱の場合よりも大きな洗掘深を呈することもある。3) $\Delta z/D_2 < 0$ (段面が河床面より下) の場合、洗掘深は段面で一旦頭打ちの状態となるが洗掘孔内の渦により洗掘孔は拡大してゆく。下段円柱が露出すると上段一様円柱の場合よりも大きな洗掘速度で洗掘深が増大することもある。なお、段面が十分深い場合には上段一様円柱橋脚となる。

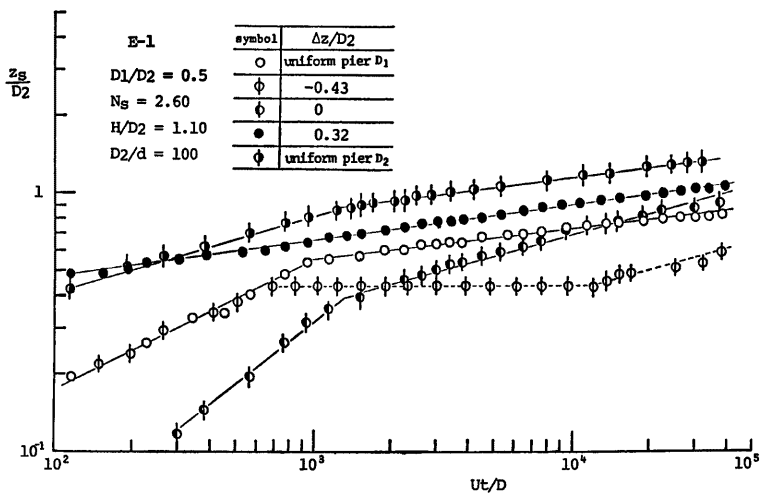


Fig. 15 Development of scour depth with time for a non-uniform pier

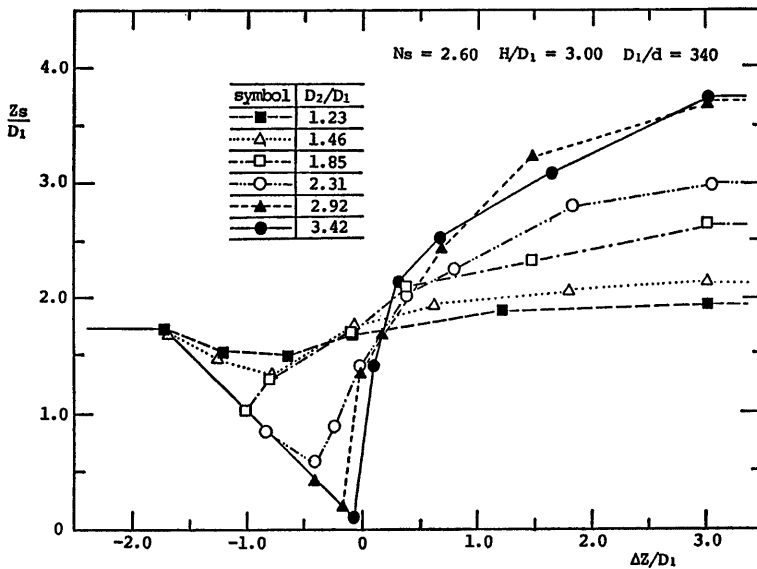


Fig. 16 Effect of D_2/D_1 on the relation of z_s/D_1 to $\Delta z/D_1$

このように、二段円柱橋脚においては段面と河床面との相対位置関係によって洗掘深の時間的増大性状は大きく異なり、洗掘に及ぼす上段円柱および下段円柱の支配度が変化することがわかる。

(2) 洗掘深に及ぼす水量の影響

上述したように、二段円柱橋脚では段面位置に応じて上段および下段円柱の支配度が変化するため、洗掘時間の評価には不明の点が多い。したがって、ここでは洗掘時間 t を一定とした場合における水量の影響を式(2)に基づいて検討することとした。

(a) 円柱径比の影響：Fig. 16 は、上段円柱径 D_1 を一定に保ち下段円柱径 D_2 を変化させた場合の一定の洗掘時間（60分）における洗掘深と段高との関係を z_s/D_2 と $\Delta z/D_2$ の関係として表わしたものである。

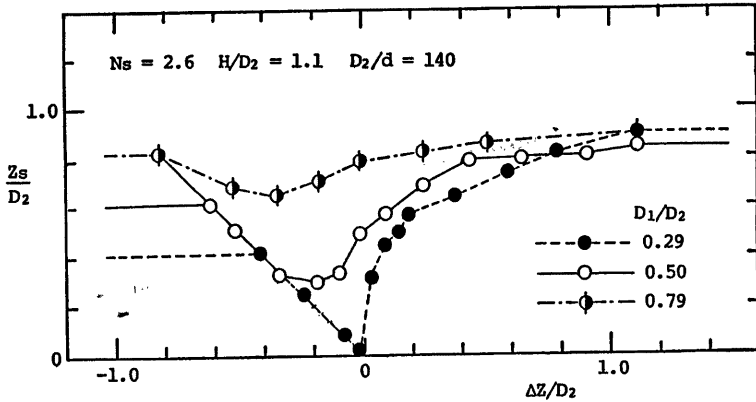


Fig. 17 Effect of D_1/D_2 on the relation of z_s/D_2 to $\Delta z/D_2$

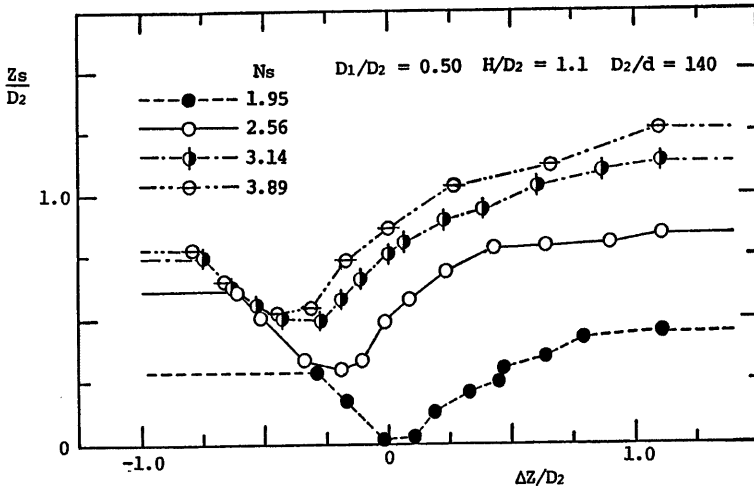


Fig. 18 Effect of N_s on the relation of z_s/D_2 to $\Delta z/D_2$

$D_2/D_1=1.23$ のものをみると上段と下段の円柱径が近いので、種々の $\Delta z/D_1$ に対する洗掘深の変化は小さく、 $\Delta z/D_1=-0.7$ 付近で若干洗掘深が小さくなっているにすぎない。一方、下段円柱径の大きな $D_2/D_1=3.42$ のものをみると段高によって洗掘深は大きく異なり、段面が河床より下 ($\Delta z/D_1 < 0$) であると洗掘深は段面で頭打ちの状態であって、上段円柱による洗掘を著しく低減している。これは上段円柱前方の下降流および渦による洗掘力が段面で消費され、河床砂にはさほど影響を及ぼさないためと考えられる。しかし段面が河床面より若干上にあるだけで、上段円柱と同一径の一樣円柱での洗掘深よりかなり大きな洗掘深を呈している。

また、下段円柱径 D_2 を一定に保ち上段円柱径 D_1 を変化させた場合に対する同様の計測結果 (通水時間 30 分) を z_s/D_2 と $\Delta z/D_2$ の関係として表わしたものが Fig. 17 であって、この場合にも全く同様の洗掘特性が認められる。

(b) N_s の影響: Fig. 18 に示すように N_s の増大とともに上段一樣円柱での洗掘深と等しくなる $\Delta z/D_2$ は減少する。 $N_s=3.89$ のものをみると $\Delta z/D_2 \geq -0.15$ において上段一樣円柱の場合より大きな洗掘深とな

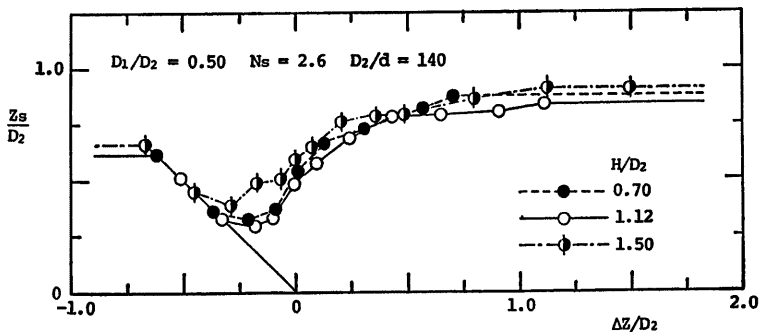


Fig. 19 Effect of H/D_2 on the relation of z_s/D_2 to $\Delta z/D_2$

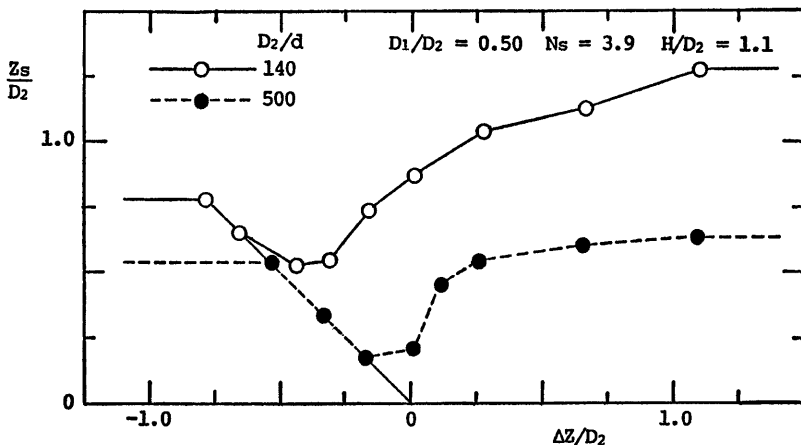


Fig. 20 Effect of D_2/d on the relation of z_s/D_2 to $\Delta z/D_2$

っている。すなわち、段面が河床面より下であっても下段の大円柱が洗掘を促進する効果を波及することもあり得ることを示唆している。

(c) H/D_2 の影響：Fig. 19 に示すように、本実験条件下においては H/D_2 の相違による有意な差は認められない。

(d) D_2/d の影響： N_s および H/D_2 が一定の条件下においては、Fig. 20 に示すように、いずれの d_2/D_2 に対しても D_2/d が小すなわち粒径 d が大きいほど洗掘深は大きい。

4. おわりに

本研究では、洗掘孔への土砂供給のない clear water scour を対象として、一様円柱橋脚における洗掘機構をモデル化し、実験値を概ね良好に表現する計算結果を得たが、平衡洗掘深に関する実験値との適合性が十分ではなかった。また、モデル中の各種定数についても実験的に決定しなければならないものが多く、さらにそれらの物理的意味付けも不十分であって、これらの点を今後検討してゆく必要がある。

また、非一様橋脚の例として二段円柱型橋脚による局所洗掘特性について実験的に検討し、主として上段・下段の円柱径比および段面と河床との相対位置に依る洗掘深の変化特性を調べたが、現段階では実験結果の定性的記述にとどまっており、今後、洗掘防御の問題を考慮しながらさらに検討してゆく予定である。

最後に、本研究の遂行に際し実験ならびにデータ整理に協力された江幡光博氏（現富山県）および大野真義氏（現岐阜県）に対して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 昭和58年度文部省科学研究費・自然災害特別研究(1)（代表：中川博次）「橋梁の洗掘災害とその防止に関する研究」成果報告書，1984。
- 2) Shen, H. W., V. R. Schneider and S. Karaki: Local Scour around Bridge Piers, Proc. ASCE, Vol. 95, HY 6, 1969, pp.1919-1940.
- 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) Yalin, M. S.: An Expression for Bed-Load Transportation, Proc. ASCE, Vol. 89, HY3, 1963, pp. 221-250.
- 5) 宇民 正：橋脚周辺の流れの機構と洗掘防止法に関する研究，京都大学学位論文，1975。
- 6) 鈴木幸一：橋脚周辺の局所河床変動に関する研究，京都大学学位論文，1977。
- 7) Chepil, W. S.: The Use of Evenly Spaced Hemispheres to Evaluate Aerodynamic Forces on a Soil Surface, Trans. AGU, Vol. 39, No. 3, 1958, pp. 397-404.
- 8) 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理特性について(1)，京大防災年研報，第26号 B-2, 1983, pp. 489-501.
- 9) 今本博健・大年邦雄：2段円柱橋脚周辺の水理特性に関する研究，第29回水理講演会論文集，1985, pp. 585-590.