

往復流による橋脚周辺の局所洗掘に関する研究

今本 博健・大年 邦雄・国西 達也

LOCAL SCOUR AROUND BRIDGE PIERS IN AN OSCILLATORY FLOW

By *Hirotake* IMAMOTO, *Kunio* OHTOSHI and *Tatsuya* KUNISHI

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 oscillatory flow conditions, such as scouring and deposition of scour hole associated with the change of flow direction. The model was considered useful for rough estimation of maximum scour depth at least.

1. 緒 言

本研究は、流速が時間に対して正弦波状に変化する往復流での局所洗掘を、一様円柱橋脚について検討したものであり、対象とした洗掘形態は、clear water scourである。まず実験によって、洗掘の進行に伴う洗掘孔形状の変化を把握するとともに、洗掘孔への埋め戻し砂の量的評価を行なっている。次に、それらの知見を基にして局所洗掘モデルを作成し、広範囲の水理条件下における洗掘深の時間的変動をシミュレートした。最後に、計算結果と実験結果を比較することにより、本洗掘モデルの有効性についても検討した。

2. 洗掘過程

2.1 実験装置および方法

実験には、長さ10 m、幅1 m、深さ30 cmの水槽を用いた。水槽中央部の長さ1.8 m区間を深くし、そこに海底材料を敷きつめて橋脚模型を設置した。

往復流は、流量をパソコンで制御することにより得られる構造となっており、 $-20 \sim +20$ l/sの範囲で任意の流量波形が与えられるが、本実験では、正弦波状の流量変化を与えている。

実験の水理条件をTable 1に示す。主として、円柱径および往復流の周期を系統的に変化させた実験を行なっている。海底材料には、比較的小さな流速に対しても洗掘が生じやすいように、密度 $\sigma = 1.7$ のスラジライトを用いている。

Table 1. Hydraulic conditions for experiments

Run No.	$U_{max}T/D$	H/D	D/d	$\tau \cdot 0_{max}$	D	Q_{max}	H	U_{max}	d	T	T_w
A-1	4045	1.12	93.7	0.0243	8.90	20.0	10.0	20.0	0.10	1800	15.6
A-2	2022	1.12	93.7	0.0243	8.90	20.0	10.0	20.0	0.10	900	16.5
A-3	674	1.12	93.7	0.0243	8.90	20.0	10.0	20.0	0.10	300	16.7
A-4	225	1.12	93.7	0.0243	8.90	20.0	10.0	20.0	0.10	100	16.6
B-1	6000	1.67	63.2	0.0243	6.00	20.0	10.0	20.0	0.10	1800	12.5
B-2	3000	1.67	63.2	0.0243	6.00	20.0	10.0	20.0	0.10	900	11.0
B-3	1000	1.67	63.2	0.0243	6.00	20.0	10.0	20.0	0.10	300	13.2
B-4	333	1.67	63.2	0.0243	6.00	20.0	10.0	20.0	0.10	100	13.9
C-1	7500	2.08	50.5	0.0243	4.80	20.0	10.0	20.0	0.10	1800	8.2
C-2	1250	2.08	50.5	0.0243	4.80	20.0	10.0	20.0	0.10	300	11.5
D-1	3188	2.45	50.5	0.0167	4.80	20.0	11.8	17.0	0.10	900	8.3
D-2	3188	2.08	50.5	0.0176	4.80	17.0	10.0	17.0	0.10	900	8.2
D-3	3188	1.67	50.5	0.0189	4.80	13.6	8.0	17.0	0.10	900	8.4

* パラメータ * D ; 円柱径 (cm), Q ; 流量 (l/sec), H ; 水深 (cm), U_{max} ; 流速 (cm/sec), d ; 砂粒径 (cm), T ; 周期 (sec), T_w ; 水温 ($^{\circ}\text{C}$), $\tau \cdot$; 無次元掃流力

2.2 洗掘特性

2.2.1 洗掘孔形状

Fig. 1 は、半周期ごとに計測した海底形状の等高線の一例を示したものである。いま、便宜的に、橋脚を境界として向かって左側を A 領域、右側を B 領域と呼ぶことにする。実験では、平坦な路床状態を初期条件とし、流向は常に B 領域から A 領域に向かう方向としている。

通水初期には、B 領域側に円錐台状の洗掘孔が生じ、一方向流れによる洗掘と同様な形状となっている。転流して 1 周期経過すると、洗掘と堆積とが円柱を挟んで逆転したため、A 側に洗掘孔が生じ、その左にあった堆積部分は円柱に近づく方向に押し流され、堆積高は少し小さくなっている。また B 側では、洗掘孔が埋め戻されているとともに、その右側に大きく高い堆積部分が生じている。

時間の経過とともに A, B それぞれの領域は洗掘と堆積を繰り返しながら洗掘孔を拡大しており、堆積部分の面積も大きくなっている。

上述した海底形状の 1 周期内における時間的変化をさらに詳しく知るため、円柱中心を通る縦断面での海底形状に着目して、1 周期めおよび 7 周期めの計測結果を示すと Fig. 2 のようである。同図は、移動限界流速を考慮し、1 周期内を $\phi_1 \sim \phi_6$ の位相時に区分した場合の、相隣る 2 位相時における形状を示したものであって、実線が一つ前の位相時での形状を表わしている。

最初の 1 周期めでは、転流するまでは一方向流れによる洗掘と同様な形状変化であって、上流側に洗掘孔、下流側に二等辺三角形の堆積部分が形成されている。なお、堆積部分の形状変化は、背後に砂粒が堆積することによって

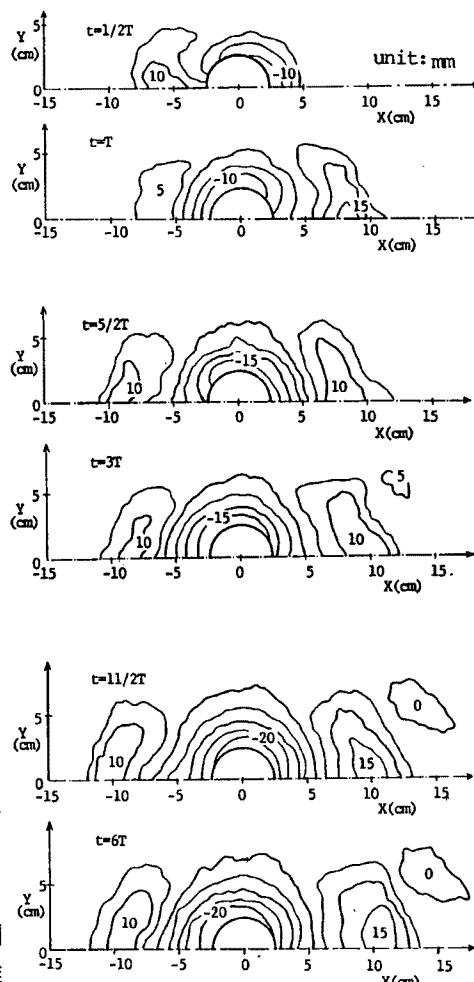


Fig. 1. Contour line of bed elevation.

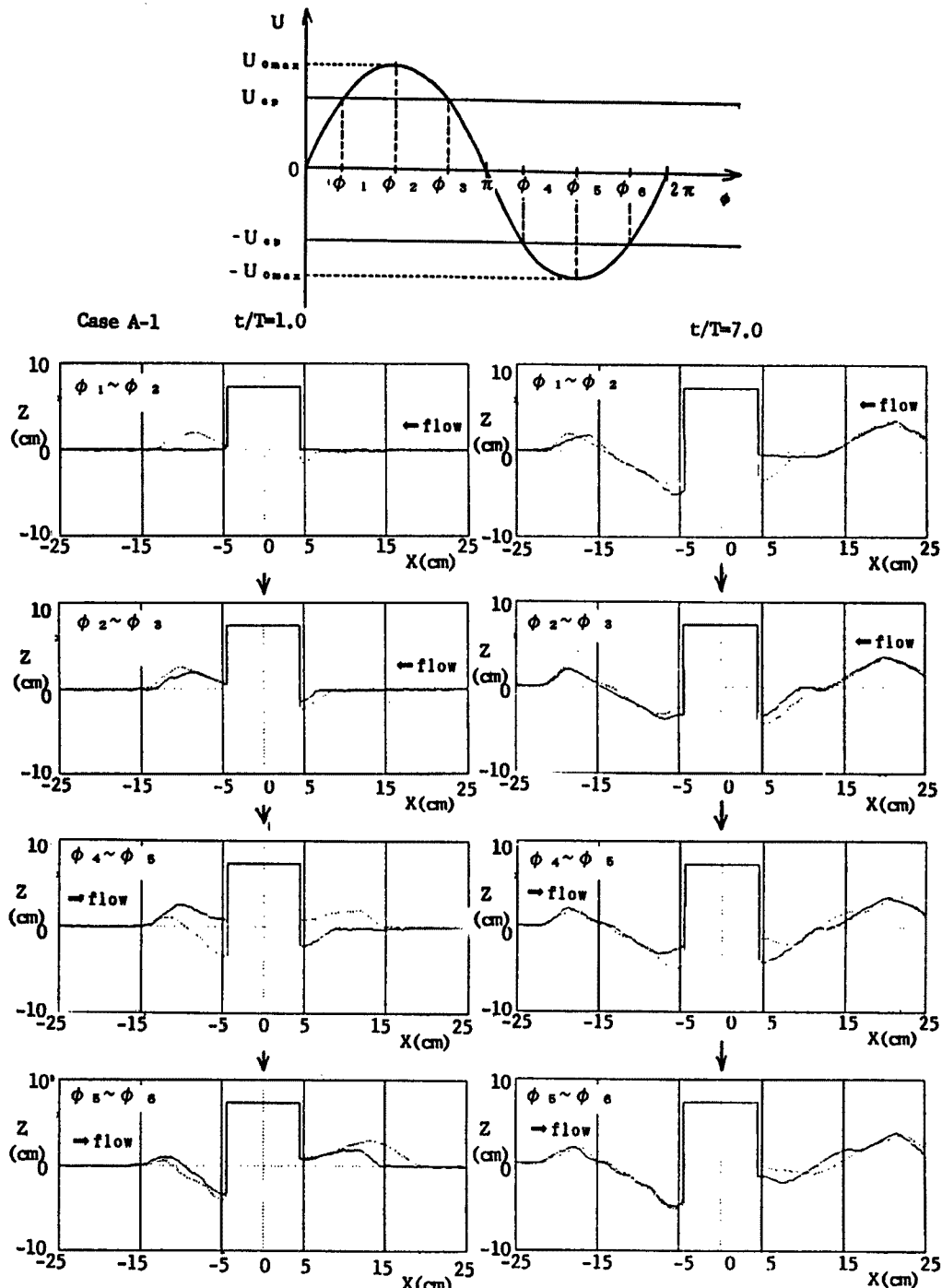


Fig. 2. Variation of bed elevation with time in the plane of symmetry.

いる。転流すると、この堆積部分から多量の土砂が流送されて反対側の洗掘孔を埋め戻している。

双方の洗掘孔が拡大した7周期目では、円柱近傍はそれまでの堆積現象により、洗掘孔は平坦に近い状態まで埋め戻されており（右側）、その状態から急激に洗掘されて、洗掘孔には水中安息角に限定される斜面と平坦部分とが現われるようになっている。洗掘される側から堆積される側への土砂の移動は、洗掘孔内にはほぼ平坦に堆積するものと洗掘孔外側の三角形形状堆積領域に供給されるものことから成っているが、

量的には前者の方がかなり多いようである。

以上に示した海底形状の変化特性をまとめると次のようになる。

- 1) 往復流では、一方向流とは異なり、円柱を取り囲むように洗掘孔が形成され、その外側に三角形の堆積部分が存在する。
- 2) 洗掘孔斜面の勾配は、ほぼ砂粒の水中安息角に規定されている。
- 3) 洗掘孔から流送される砂は反対側の洗掘孔をほぼ平坦に埋め戻し、そこが洗掘される時には、水中安息角に規定される斜面と平坦部分とが現われる。
- 4) 洗掘孔が埋め戻される時、その外側の堆積部分にも砂は堆積し、斜面背後に堆積することによって、その高さを増す。

2.2.2 洗掘深の時間的变化

往復流洗掘においても、一方向流による洗掘と同様、洗掘の主要因が馬蹄渦であるため、最大洗掘深の生じる箇所は橋脚前面近傍である。ここでは、最大洗掘深の時間的变化に関する実験結果を示し、周期および円柱径がそれに及ぼす影響について検討する。

Fig. 3 は、周期のみを系統的に変化させた実験により得られた洗掘深の時間的变化を示したものである。横軸には t/T (時間/周期) を、縦軸には Z/D (海底高/円柱径) をとっている。洗掘深は流向の変化に対応して周期的に変動しているが、いずれにおいても周期の大きいものほど同じ位相時における洗掘深は大きくなる傾向が見られる。また、 Z/D を用いた場合、円柱径の大きいものほど Z/D の変動幅は小さくなっていることがわかる。

この変動幅の経過周期数による変化を示すと Fig. 4 のようである。これを見ると、どのケースも2周期目までは増加し、その後徐々に減少して、3周期目以降では、ほぼ一定値 (= 0.2) に落ち着いているようである。すなわち、洗掘初期においては、洗掘深は不規則に変動するが転流を繰り返すうちに安定した変動をするようになると考えられる。

3. 予測手法

本章では、先に著者らが提案した一方向流れに対する局所洗掘モデル¹⁾を往復流に拡張し、往復流における局所洗掘のシミュレーションを行なう。

3.1 洗掘孔からの流出砂量

先のモデル¹⁾と同様に、洗掘孔内の単位面積、単位時間あたりの流砂量 q_s を次式で評価する。

$$q_s = (1/k_1 D) \cdot c_1 u_* d \{j_* - (1/a) \ln(1 + a j_*)\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $j_* = \tau_* / \tau_{*c} - 1$ 、 $a = c_2 \sqrt{\tau_{*c}}$ 、 u_* および τ_* は洗掘孔内の摩擦速度および無次元掃流力、 c_1 および c_2 はそれぞれ定数である。移動限界無次元掃流力 τ_{*c} については、次式を用いる。

$$\tau_{*c} = \xi / \Phi_r^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\xi = 2A_3 \tan \Phi / \{\varepsilon A_2 (C_D + C_L \tan \Phi)\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

u_* および τ_* は、接近流におけるそれぞれの値 u_{*0} および τ_{*0} を用いて次のように表わされる。

$$u_* = (a/4\pi) \cdot (\Phi_u / \Phi_r) \cdot u_{*0} / (k_0 + C_r + Z_s/D) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\tau_* = (a/4\pi)^2 \cdot (\Phi_u / \Phi_r)^2 \cdot \tau_{*0} / (k_0 + C_r + Z_s/D)^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 A_2 は球の面積係数、 A_3 は球の体積係数、 C_D は球の抗力係数、 C_L は球の揚力係数、 C_r は比例係数、 ε は遮蔽係数、 Φ は砂の摩擦角、 Φ_u は接近流の流速係数、 Φ_r は局所流速係数である。接近流の流速係数 Φ_u は、次式により与える²⁾。

$$\Phi_u = 6.0 + 5.75 \log_{10}(H/2d) \quad \dots\dots\dots (6)$$

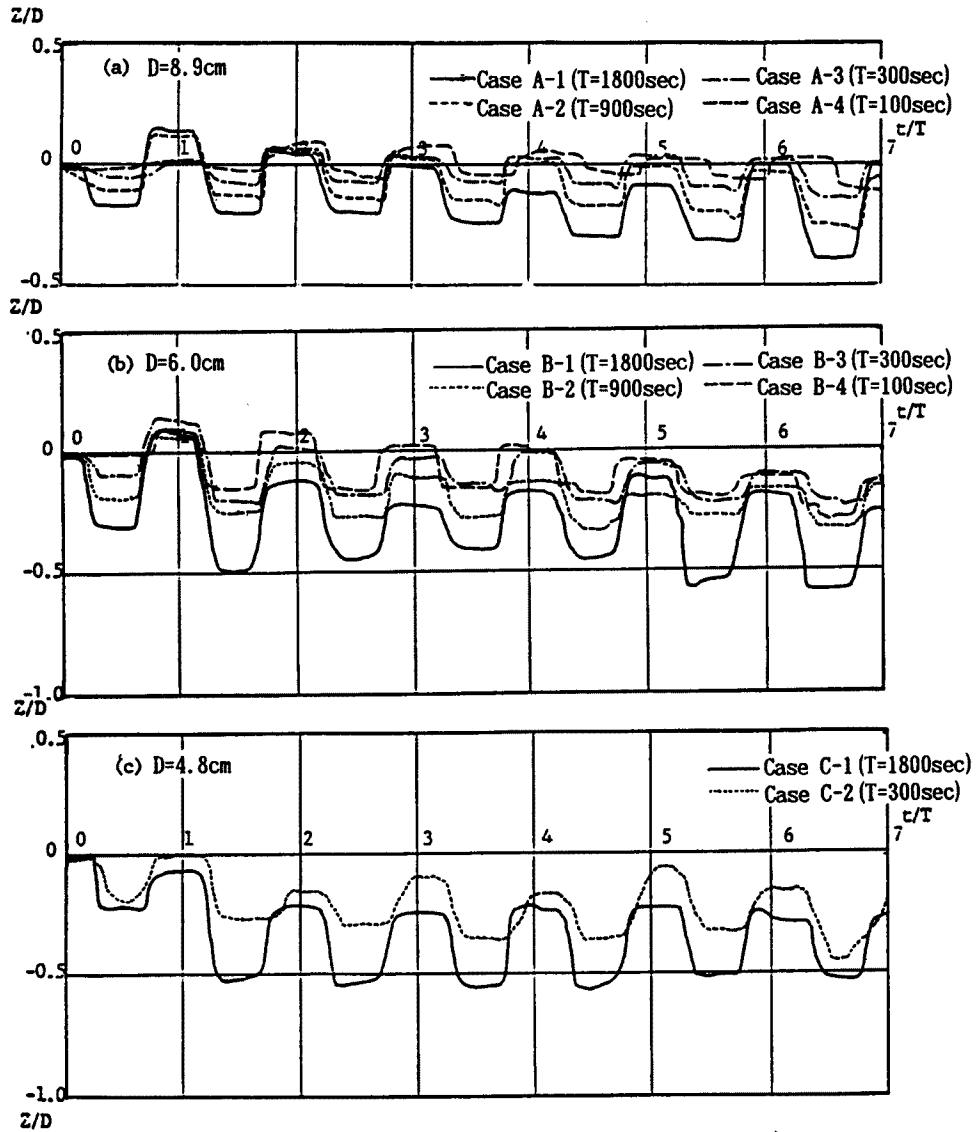


Fig. 3. Variation of scour depth with time (Experiment).

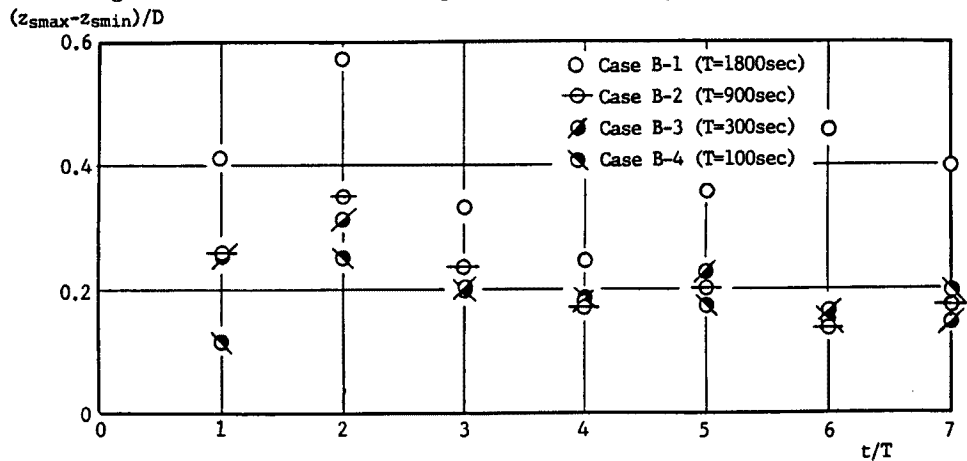


Fig. 4. Amplitude of the variation of scour depth.

3.2 砂量バランス

ここでは、2.2.1で述べた海底形状の変化を簡略化して取り扱うことによって砂量のバランス式を求める。また、洗掘孔からの流出砂量と反対側領域への堆積砂量の評価を行なう。

3.2.1 洗掘過程および堆積過程

(1) 第1洗掘過程および第1堆積過程

これは、Fig. 5に模式的に示している洗掘過程および堆積過程で、初めの1周期めにおける状態である。すなわち、洗掘孔は砂粒の水中安息角に規定される斜面DEと k_1D の幅をもつ平坦部分CDとからなり、CD部分は馬蹄渦の掃流力によって単位時間・単位面積あたり q_s の砂量を取り払われ、 $C'D'$ まで路床は低下する。また同時に、DE部分の砂は斜面を滑落して $D'E'$ へと拡大する。

いま、微小時間 Δt の間には洗掘深が ΔZ_s 増加したとすると、 λ を空隙率として、砂量バランス式が次のように表わされる。

$$\{q_s / (1 - \lambda)\} \cdot k_1 D \Delta t = (k_1 D + Z_s / \tan \phi) \Delta Z_s \quad (7)$$

一方、洗掘孔から取り払われた砂は、円柱を挟んで反対側の領域へと運ばれ、仰角がともに ϕ で表わされる二等辺三角形形状の堆積領域GHFの下流斜面へ $GG'H'H$ のように堆積する。いま、三角形GHFおよび三角形 $G'H'F$ の高さをそれぞれ h_{1d} および h_{2d} とすると、新堆積高 h_{2d} は次のように表わされる。

$$h_{2d} = \sqrt{q_s / (1 - \lambda) \cdot k_1 D \cdot \tan \phi \cdot \Delta t + h_{1d}^2} \quad (8)$$

(2) 第2洗掘過程および第2堆積過程

Fig. 6に示すように、2周期目以降の掘れ始めの状態である。すなわち、1周期前の堆積作用によ

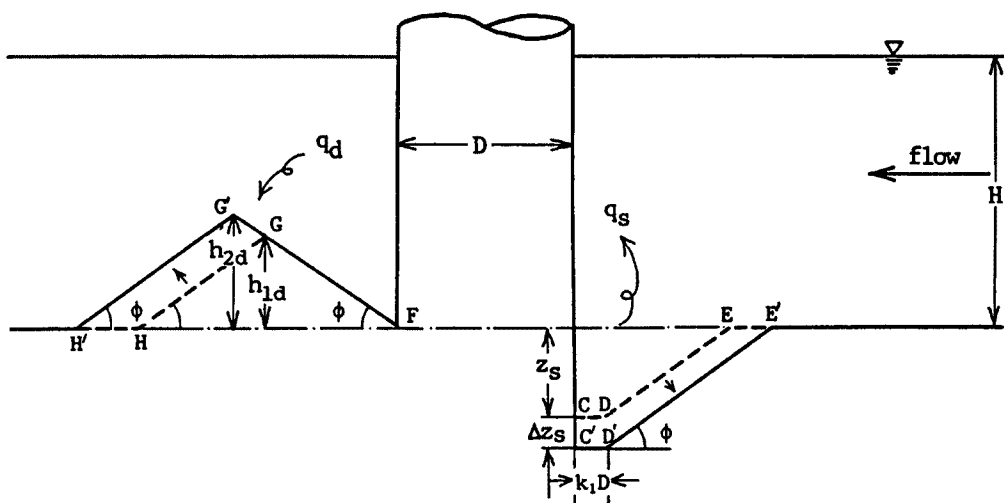


Fig. 5. Schematic diagram (First process).

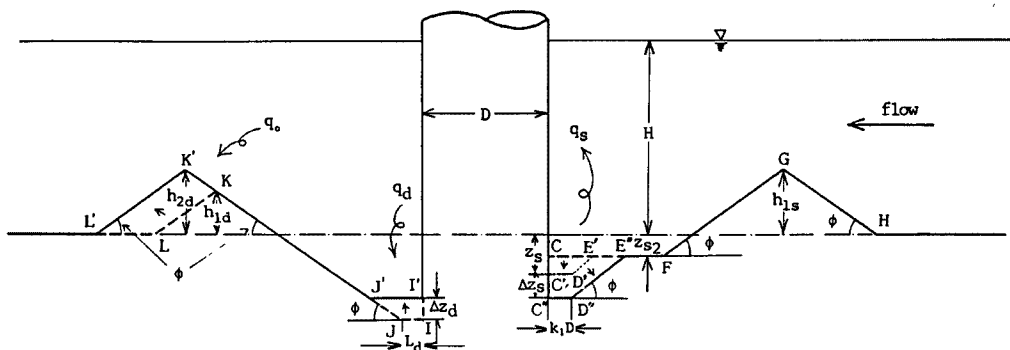
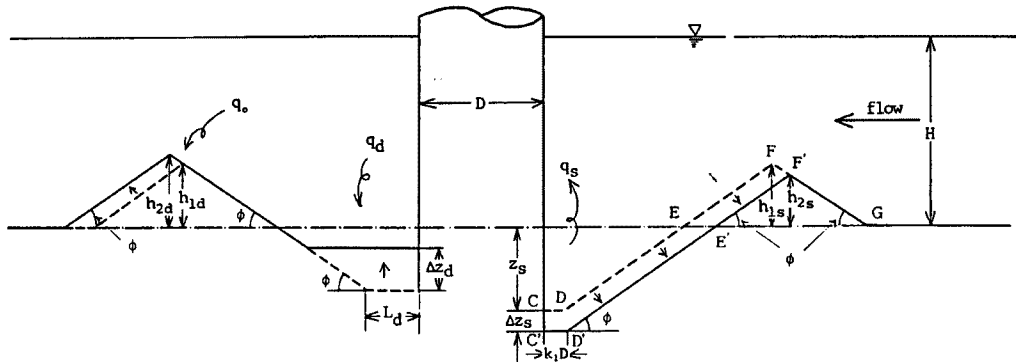
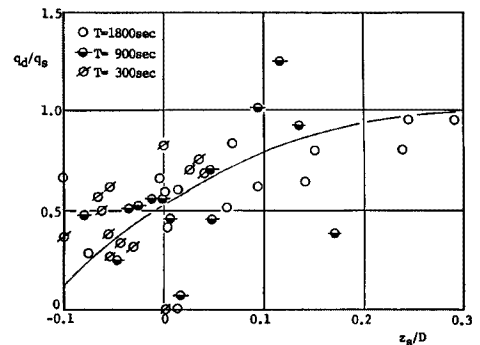


Fig. 6. Schematic diagram (Second process).



て平坦に埋め戻され、 Z_{ss} の洗掘深を持つ洗掘孔 CF は、洗掘状態に転じることにより、 ϕ に規定される斜面 $D'E'$ と平坦部分 $C'D'$ とからなる領域を形成する。そして洗掘の進行に伴い、 $C'D'$ は $C''D''$ へと下がり、 $D'E'$ 斜面も $D''E''$ へと変わる。したがって、洗掘孔斜面が堆積部分の内側斜面にまだ一致していない時のバランス式は、以下の式で表わされる。



堆積する側についてみると、洗掘孔から流送された砂は大きく分けて2ヶ所に堆積する。すなわち、円柱近傍のIJ部分と、その左側に存在する三角形状堆積部分の背後で考える。IJ部分では、前述したように、砂粒が平坦に堆積。小時間 Δt の間に ΔZ_d の深さだけ砂が堆積し、堆積砂量が

$$\{q_s / (1 - \lambda)\} \cdot k_1 D \cdot \Delta t = (k_1 D + Z_s / \tan \Phi - Z_{s2} / \tan \Phi) \cdot \Delta Z_s \dots \dots \dots (9)$$

堆積する側についてみると、洗掘孔から流送された砂は大きく分けて2ヶ所に堆積する。すなわち、円柱近傍のIJ部分と、その左側に存在する三角形状堆積部分の背後で考える。IJ部分では、前述したように、砂粒が平坦に堆積。小時間 Δt の間に ΔZ_d の深さだけ砂が堆積し、堆積砂量が

$$\{q_d / (1 - \lambda)\} \cdot k_1 D \cdot \Delta t = L_d \cdot \Delta Z_d \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 L_d は平坦部分 IJ の長さであり、 ΔZ_d だけ堆積が生じたときの平坦部分の長さ ($I'J'$) を L'_d とすると、次のように表わされる。

$$L'_d = L_d + \Delta Z_d / \tan \Phi \dots\dots\dots (11)$$

次に、KL 部分については、微小時間 Δt の間に KL から $K'L'$ に変化し、堆積砂量が q_0 とすると、新堆積高 h_{2d} が h_{1d} を用いて次のように表わされる。

$$h_{yd} = \sqrt{q_0 / (1 - \lambda)} \cdot k_p D \cdot \tan \Phi \cdot \Delta t + h_{ld}^2 \dots \dots \dots (12)$$

(3) 第3洗掘過程

これは Fig. 7 に示すように、洗掘孔斜面が堆積部分の内側斜面に一致しているときの過程をさす。すなわち、CD 部分が低下するにつれて、砂は DE 斜面と EF 斜面を一様に滑落してそれぞれ $D'E'$ および $E'F'$ となる。三角形 EFG の堆積高を h 、とすると砂量のバランス式は次のように表わされる。

$$\{q_s/(1-\lambda)\} \cdot k_1 D \cdot \Delta t = (k_1 D + Z_s / \tan \Phi + h_{1s} / \tan \Phi) \cdot \Delta Z_s \dots\dots\dots (13)$$

また、 $E'F'G$ 部分の新堆積高 h_{2s} は、以下のように表わされる。

$$h_{2s} = h_{1s} - 0.5 \Delta Z_s \dots\dots\dots (14)$$

堆積される側については、(2)で示したものと同様であるので省略する。

3.2.2 洗掘砂量および堆積砂量

次に、洗掘領域から流送された砂量のうち、どれほど反対側の洗掘孔へ堆積するかを見積もる必要がある。

すなわち、前出の q_d および q_o を量的に評価しなければならない。ここでは、堆積状態にある洗掘孔への流入砂量 q_d が、洗掘状態にある洗掘孔の流出砂量 q_s (単位時間単位面積あたり) とそのときの洗掘深 Z_s に支配されると仮定して、実験によってそれぞれの量を調べた。その結果を Fig. 8 に示している。これより、洗掘孔内への堆積流砂量 (q_d) およびその後方の堆積部分への流砂量 (q_o) を次のように近似した。

$$q_d/q_s = \begin{cases} 1.375 + 0.526 \ln(Z_s/D + 0.2) & \text{for } Z_s/D \leq 0.3 \\ 1.0 & \text{for } Z_s/D > 0.3 \end{cases} \quad (15)$$

$$q_o/q_s = 1 - q_d/q_s \quad (16)$$

3.3 洗掘速度および堆積速度

3.2 で示した砂量のバランス式から、それぞれの洗掘増加量および堆積増加量の変化速度が、次のように無次元様示される。ただし、第1堆積過程においては、円柱近傍は堆積されず、二等辺三角形の外側に堆積されるとしているため、堆積速度は0とする。

(1) 第1洗掘過程

$$\frac{\Delta Z_s/D}{\Delta t/T} = R \cdot J_* / P_1 \cdot (D/d)^{-1} \cdot U_{max} T / D \cdot \sin(2\pi t/T) \quad (17)$$

ここに、 $R = ac_1 \{4\pi(1-\lambda)\phi_r\}^{-1}$

$$J_* = j_* - (1/a) \ln(1 + aj_*)$$

$$P_1 = \{k_1 + (Z_s/D) / \tan \phi\} \cdot (k_o + C_r Z_s/D)$$

(2) 第2洗掘過程

$$\frac{\Delta Z_s/D}{\Delta t/T} = R \cdot J_* / P_2 \cdot (D/d)^{-1} \cdot U_{max} T / D \cdot \sin(2\pi t/T) \quad (18)$$

ここに、 $P_2 = \{k_1 + (Z_s/D - Z_{s2}/D) / \tan \phi\} \cdot (k_o + C_r Z_s/D)$

(3) 第3洗掘過程

$$\frac{\Delta Z_s/D}{\Delta t/T} = R \cdot J_* / P_3 \cdot (D/d)^{-1} \cdot U_{max} T / D \cdot \sin(2\pi t/T) \quad (19)$$

ここに、 $P_3 = \{k_1 + (Z_s/D - h_{1s}/D) / \tan \phi\} \cdot (k_o + C_r Z_s/D)$

(4) 第2堆積過程

$$\frac{\Delta Z_d/D}{\Delta t/T} = R \cdot J_* \cdot K \cdot L \cdot (D/d)^{-1} \cdot U_{max} T / D \cdot \sin(2\pi t/T) \quad (20)$$

ここに、 $K = f(Z_s/D) / (k_o + C_r Z_s/D)$, $L = L_d/D$

また、 $f(Z_s/D)$ には、(15)式右辺を用いる。

以上に示した式 (17) ~ (20) を用いれば、無次元微小時間 ($\Delta t/T$) 後の洗掘増加量 ($\Delta Z_s/D$) および、堆積増加量 ($\Delta Z_d/D$) が計算され、洗掘深の時間的变化が求められる。すなわち、平坦な状態から計算を始め、洗掘される側には式 (17) を用い、半周期後に流れが反転すると反対側が洗掘領域となるため、そちらには第3洗掘過程の式 (19) を用いて洗掘増加量を計算する。同時に、そのときの洗掘深および孔内からの流砂量と式 (20) とから、堆積増加量を求める。2周期目に入ると、円柱を挟んで両側の領域とも、洗掘孔とその外側の三角形の堆積部分が生じた状態となるので、式 (18) および式 (19) を用いて洗掘深を計算する。それと同時に、そのとき求められた洗掘増加量および流砂量を用いて、反対側

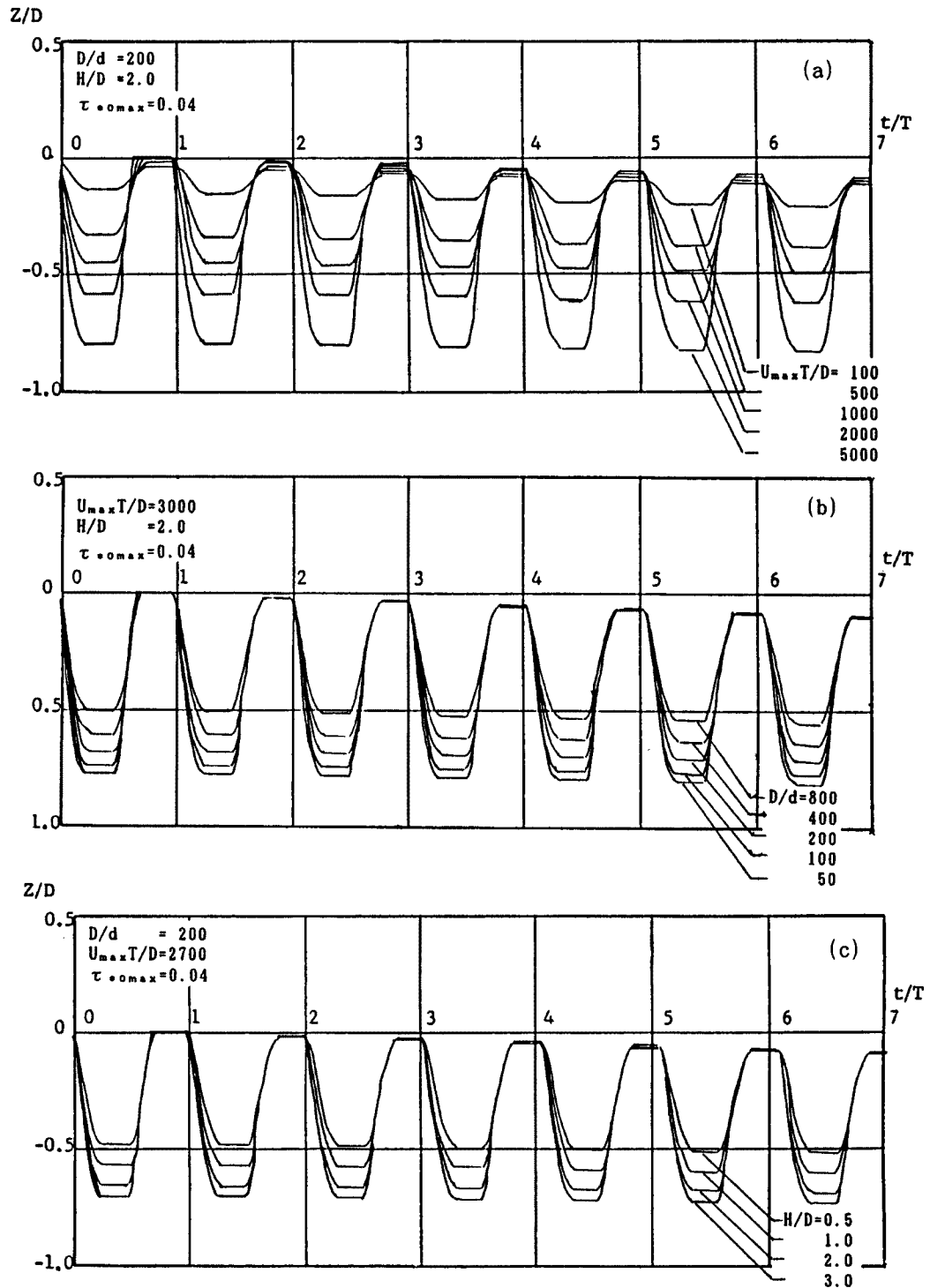


Fig.9. Variation of scour depth with time (Simulation).

の堆積領域の堆積増加量を計算する。以後同様に、洗掘領域には (18) および (19) 式，堆積領域には (20) 式を使うことにより、時々刻々の洗掘深の変化が求められる。

上述した洗掘モデルでは、洗掘・堆積速度を規定するパラメータは、接近流の最大無次元掃流力 τ_{*o} 、

水深・円柱径比 H/D , 円柱径・粒径比 D/d , 無次元周期 $U_{max}T/D$ およびその時点の洗掘深 Z_s/D である。

3.4 計算結果

3.4.1 洗掘深の時間的变化

$t=0$ のとき $Z_s=0$ を初期条件とし, 無次元洗掘深 Z_s/D と経過周期数 t/T の関係を計算すると Fig. 9 のようである。いずれの図においても, 1 周期内で洗掘・堆積を繰り返し, 実験結果に示した定性的特性を説明している。

まず (a) を見ると, $U_{max}T/D$ の大きい場合ほど 1 周期内の無次元最大洗掘深および無次元洗掘深の変動量ともに大きいことがわかる。無次元洗掘深の最小値に着目すると, $U_{max}T/D$ の大きいものほど小さくなっているようであるが, その差は微小である。

次に (b) を見ると, D/d の小さいものほど無次元洗掘深は大きくなっていることがわかる。この傾向は, 3.3 に示した洗掘速度の式形からも推測される。

最後に (c) を見ると, H/D の大きいほど無次元洗掘深は大きくなっている。この結果は, 水深の影響は無視できないことを示唆している。しかしながら, 水深がある程度以上であると, その影響はあまり顕著でないことが一般に知られており, 計算ではその特性が十分に説明されていないようである。

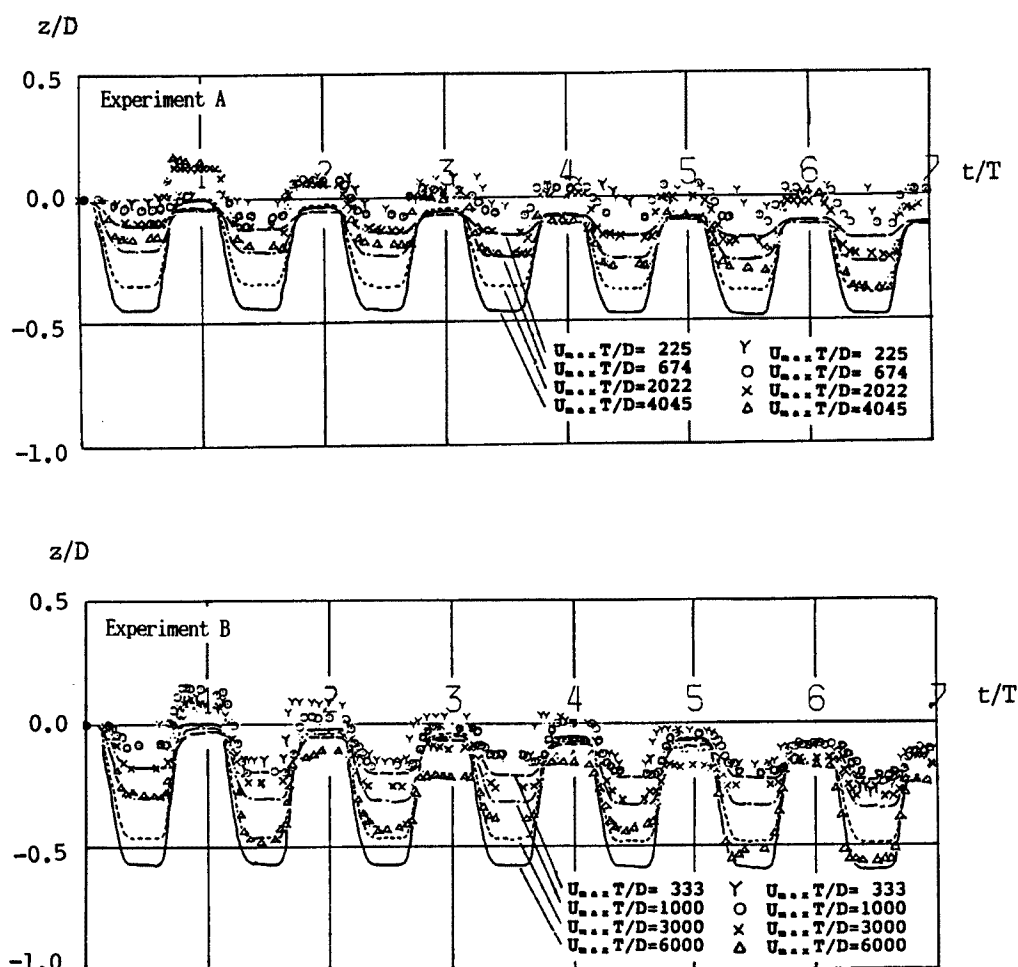


Fig. 10. Comparison between the results of simulation and experiment.

3.4.2 実験結果との比較

Fig. 10 は、同一の水理条件に対する実験結果と計算結果と比較したものである。全体的に、計算のほうが洗掘深を過大評価しているようである。とくに洗掘初期における差異が大きく表われている。すなわち、実験では、初めの1周期内には前面が十分に洗掘されていないため2周期目で大きく変化するのに対し、計算では、初めからかなり大きな値となっている。また、堆積状態にあるとき、実験では、それぞれのケースで洗掘深にある程度差があるのに対し、計算ではどれもほぼ同じ値を示している。しかしながら、洗掘深がある程度大きくなると、計算結果と実験結果との適合度は比較的良好になってきている。

以上に示した比較より、本洗掘モデルは十分とは言えないが、最大洗掘深を推定する手段としては有用であると考えられる。

4. 結 言

本研究は、円柱橋脚を対象として、往復流における局所洗掘特性について検討したものである。まず実験によって洗掘孔形状の変化特性を把握し、次に洗掘深を予測するモデルを作成している。そのモデルを用いた計算結果は、実験結果に示された往復流洗掘の定性的傾向を比較的良好に説明しているが、洗掘初期における適合度は十分とは言えなかった。しかし、洗掘深がある程度大きくなると、計算結果と実験結果との適合度は比較的良好であって、本洗掘モデルは、洗掘深を推定する際には有効であると言える。

参 考 文 献

- 1) 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（4），京都大学防災研究所年報，第29号 B-2，pp.487-503，1986.
- 2) 岸力・黒木幹男：移動床流れにおける河床形状と流体抵抗，北海道大学工学部研究報告，No.67，1973.