

## 開水路流れに設置された橋脚周辺の水理特性について (5)

今本 博健・大年 邦雄

### HYDRAULIC CHARACTERISTICS AROUND BRIDGE PIERS IN AN OPEN CHANNEL FLOW (5)

By *Hirotake* IMAMOTO and *Kunio* OHTOSHI

#### Synopsis

A pier that was made up of a small circular cylinder with a larger cylinder below it was used as the non-uniform pier model and the scouring process around it was analyzed by a mathematical simulation which was partly based on the information through experiments.

The main results obtained were;

1) The development of scour depth with time differs considerably based on the elevation of the lower cylinder. The differences appear remarkably when the diameter of lower (upper) cylinder becomes larger (smaller).

2) When the dimension of the lower cylinder is large and its top surface is just near the river bed, scour is reduced than that for a uniform pier with the same diameter of upper cylinder. But, any slight upward shift of the top surface can bring about a remarkable increase in scour depth.

#### 1. 緒 言

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、橋脚の代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<sup>1)</sup>。この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り、土砂水理学的観点よりその影響を把握することが必要である。

そもそも橋脚周辺の局所洗掘現象は、河川の水理特性と橋脚の特性を外部条件とする応答現象であり、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。したがって、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り、従来の研究では、現象を支配すると考えられる水量を抽出し、次元解析の手法を用いて実験値を整理してそれらの水配水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多い。しかしながら、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り、そのためには現象の本質を見失わない洗掘モデルを構成することが要求される。

本研究では、上述したような橋脚下部を大きくした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、その最も単純な例として、大円柱の上に小円柱のついた二段型の円柱橋脚における局所洗掘を取扱う。このような二段円柱型橋脚の幾何形状は、Fig. 1 に示すように、上段円柱径  $D_1$ 、高さ  $h_1$  および下段円柱径  $D_2$ 、高さ  $h_2$  (元河床からの高さ) によって規定されるが、ここでは段面が河床よりも上 ( $h_2 > 0$ ) にある場

合のみを対象とし、clear water scour での洗掘過程を検討する。まず実験によって、洗掘の進行に伴う洗掘孔形状および流況の変化を把握し、次にそれらの知見を基にして洗掘過程のモデルを構成する。その洗掘モデルを用いて洗掘過程をシミュレートし、主として橋脚の形状特性が及ぼす影響について考察する。

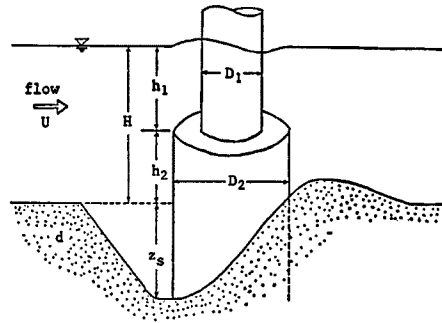


Fig. 1 Non-uniform pier model.

2. 洗掘過程

2.1 洗掘孔形状および流況

初期に平坦に敷きならした河床状態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るようになって円柱前方にはほぼ半円錐状の洗掘孔が形成される。なお、接近流のもつ掃流力が小さい場合、あるいは下段円柱が上段円柱に比し大きくかつ段高が小さい場合には、側方洗掘から前方洗掘へ移行するまでの時間遅れがかなり長く、場合によっては前方が洗掘されないままで洗掘が停止することもある。

一旦前方が洗掘域となると、Fig. 2 に示すように、洗掘孔はその斜面の勾配を一定（砂粒の水中安息角）に保ちつつ時間の経過とともに拡大していく。したがって、洗掘孔のスケールは各時点での最大洗掘深と砂粒の水中安息角とによって規定され、時間的に相似形状を維持している。このような洗掘孔の形状特性は一様円柱の場合と全く同様である。

最終的に洗掘深が最大となるのが円柱前方であることより、二段円柱中心を通る縦断面に着目し、洗掘の進行に伴う前方流況の変化を中立浮遊粒子をトレーサーとして可視化した。一例として下段円柱径  $D_2$  と段高  $h_2$  を一定に保ち ( $h_2/D_2=0.1$ )、上段円柱径  $D_1$  を変化させた場合の可視化結果を Fig. 3 に示す。上

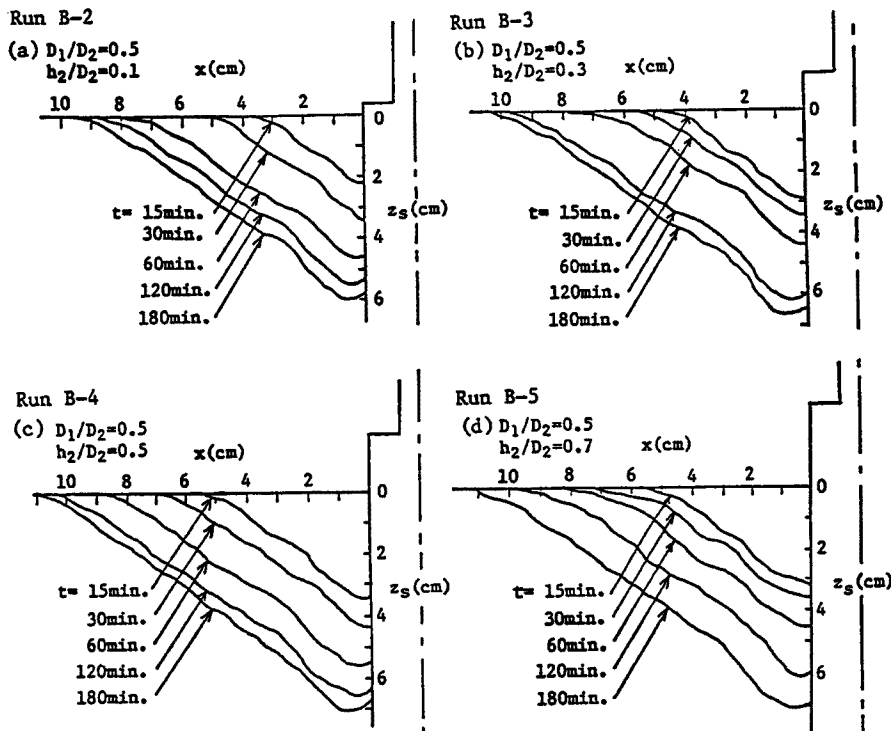


Fig. 2 Variation of the dimension of scour hole with time in the plane of symmetry.

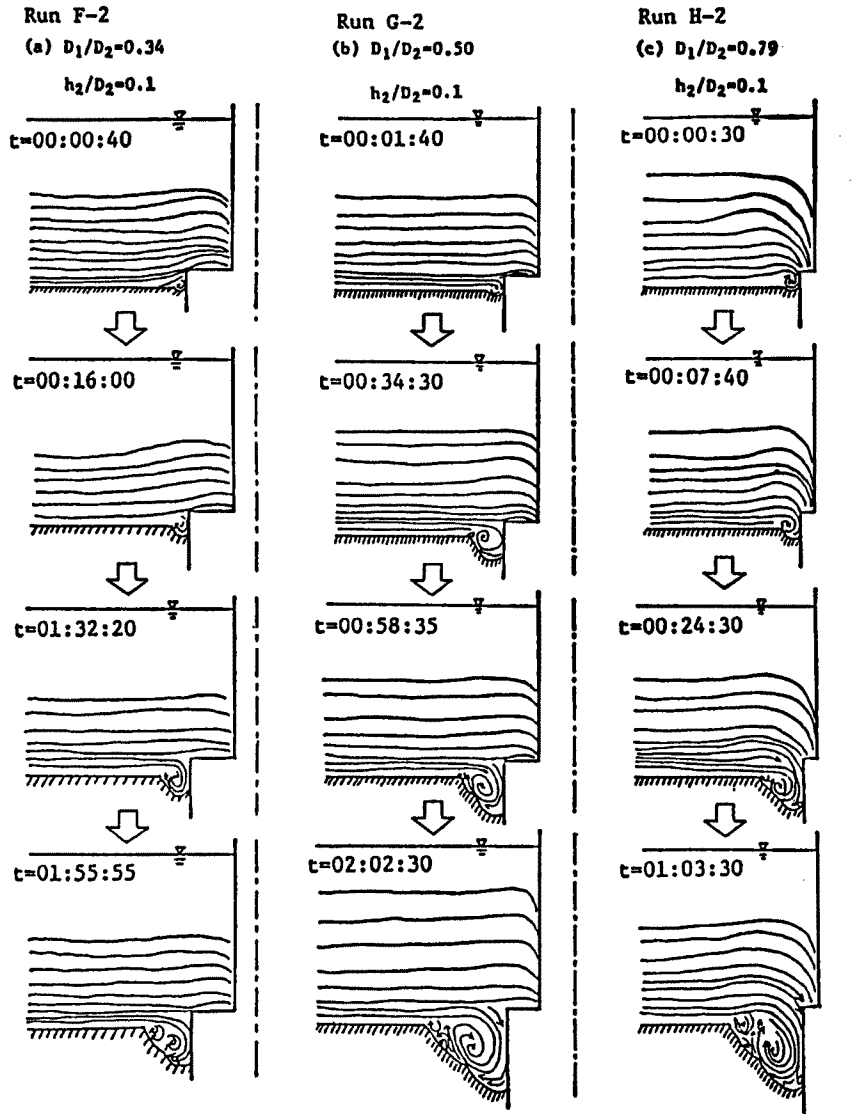


Fig. 3 Variation of flow pattern in the scour hole with time in the plane of symmetry.

段円柱前面には表面に沿う下降流が認められるが、上・下段円柱径比  $D_1/D_2$  の小さな場合には段面にその殆どがぶつかり路床面には直接作用していない。路床に直接作用するのは下段円柱底部に形成される馬蹄渦であって、これが洗掘を進行させる起動力となっている。この馬蹄渦は洗掘孔の拡大（洗掘の進行）とともに洗掘孔内に沈み込み、そのスケールを増大させていることがわかる。また、同図に示した面内での馬蹄渦の形状は円に近い楕円であって、円で近似することも可能なようである。

上述した二段円柱橋脚における洗掘過程を考慮して洗掘モデルを構成するためには、馬蹄渦のもつ掃流力を合理的に評価して洗掘孔からの流出砂量を見積る必要がある。その見積りが可能になると、洗掘孔形状の相似性に立脚することにより洗掘深の時間的増大速度（洗掘速度）が定式化される。

### 3. 洗掘モデルの構成

#### 3.1 洗掘孔における砂量のバランス

二段円柱中心を通る鉛直縦断面内の円柱前方の河床形状を、 $\theta$  を微小角として Fig. 4 のように模式化して表わす。すなわち、洗掘孔は逆円錐台状であり、洗掘孔底部の幅は  $k_1 D_2$  の一定（洗掘深によって変化しない）で、洗掘孔斜面の勾配は砂粒の水中安息角である。馬蹄渦によって実際に洗掘される領域は GCEF の洗掘孔底部であり、ABCG の斜面領域では洗掘深の増大に伴って砂粒が滑落し洗掘孔を拡大していく。

いま、 $\Delta t$  時間に洗掘深が  $\Delta z_s$  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わされる。

$$\frac{q_b}{1-\lambda} \cdot A_b \cdot \Delta t = (A_s + A_b) \cdot \Delta z_s \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $q_b$  は洗掘孔底部において単位時間・単位面積あたりに流出した砂粒の実質体積、 $\lambda$  は砂粒の空隙率、 $A_s$  および  $A_b$  はそれぞれ次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} A_s &= \frac{1}{2} \cdot \frac{z_s}{\tan \varphi} \left\{ \frac{z_s}{\tan \varphi} + (2k_1 + 1)D_2 \right\} \cdot \theta \\ A_b &= \frac{1}{2} k_1 (k_1 + 1) D_2^2 \cdot \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

#### 3.2 馬蹄渦のスケール

平坦河床上一様円柱では、円柱前方底部に形成される馬蹄渦は半径  $r_0 = k_0 D$  の円で近似できることが知られている。ここに、 $k_0$  は定数 ( $\approx 0.15$ )、 $D$  は一様円柱径である。二段円柱の場合、一般に上段円柱および下段円柱の底部に馬蹄渦が形成されるが、それらのスケールおよび河床洗掘への寄与は、上・下段円柱径および段面の河床からの高さに支配されるとともに洗掘の進行によっても変化する。ここでは、上述の渦スケールと河床洗掘への寄与について検討する。

(1) 下段円柱底部にはそれと同一径の一様円柱の場合と同スケールの渦が形成される。その半径は  $r_0 = k_0 D_2$  と近似できる。この渦は上段円柱の影響をさほど受けず、河床洗掘に対して支配的である。観察によると、この渦は洗掘の進行に伴って洗掘孔内に沈み込むとともにそのスケールが大きくなる。すなわち、洗掘孔の大きさを規定する洗掘深の増大とともに渦スケールが大きくなる。このことを  $r = r_0 + C_r \cdot z_s$  と表わす<sup>2)</sup>。ここに  $C_r$  は比例定数である。

下段円柱底部の渦が上段円柱の影響を受けないとみなされる最小の段高は、 $h_2 = 2r_0$  すなわち  $h_2/D_2 = 2k_0$  程度である。

##### (2) 段高が小さい場合

上段円柱径が下段円柱径に比してかなり小さいとき、上段円柱底部に形成される渦は段面上にあるから河床洗掘への寄与は無視できる。このとき、初期において支配的であるのは下段円柱側部における掃流力の局所的増大であって、洗掘は側部から開始され下段円柱周りに沿って前部へと洗掘域が拡大していく。前部が洗掘域となるまでにはかなりの遅れ時間 ( $=t_s$ ) がある。これについては後述する。前部が洗掘域となった

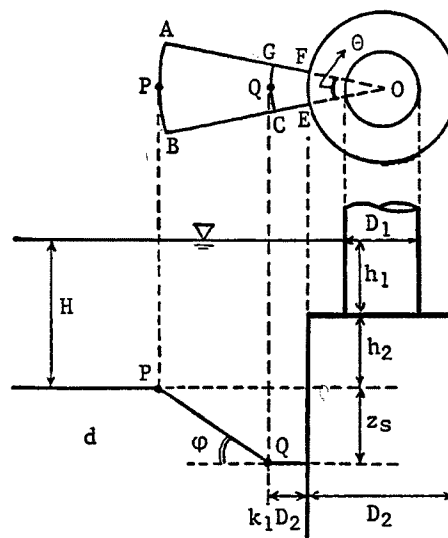


Fig. 4 Definition sketch of bed configuration in the plane of symmetry for partly developed scour hole.

後では、洗掘孔内へ流れが集中するようになってそこに形成される馬蹄渦が顕在化し、これがその後の洗掘過程に対して支配的となる。また、渦のスケールは洗掘深の増大とともに大きくなり、前述と同様に  $r=r_0+C_r z_s$  (ただし  $t>t_s$ ) と表わす。上段円柱底部の渦が段面上にある条件は  $(D_2-D_1)/2>k_0 D_1$  と近似される。

一方、上段円柱径が下段円柱径に近いとき、下段円柱前部が洗掘され始めるまでの時間遅れは短く（ここでは無視する）、下段円柱径  $D_2$  に支配されるスケールの馬蹄が現われて洗掘の進行とともにそのスケールを増していく。したがってこの場合にも  $r=r_0+C_r z_s$  と近似する。

以上の検討より、洗掘過程における馬蹄渦半径  $r$  については次のようにまとめられる。

$$\left. \begin{aligned} D_1/D_2 \geq 1/(1+2k_0) \text{ or } h_2/D_2 \geq 2k_0; r=k_0 D_2+C_r z_s \text{ for } t \geq 0 \\ D_1/D_2 < 1/(1+2k_0) \text{ and } h_2/D_2 < 2k_0; r=k_0 D_2+C_r z_s \text{ for } t \geq t_s \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

**3.3 馬蹄渦のもつ掃流力**

一様円柱の場合には、円柱の存在に起因する循環の減少は、ポテンシャル流れの仮定に基づくと  $1/2DU_H$  で与えられる<sup>3)</sup>。ここに  $U_H$  は接近流の表面流速である。

これからの類推より、ここで対象としている二段円柱が存在することにより生じる循環の減少  $\Delta\Gamma$  を次のようにおく。

$$\Delta\Gamma = \frac{1}{2} D_1 U_H \cdot K \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $K$  は二段円柱の形状効果を表す係数で次の性質をもつ。

$$K = \begin{cases} 1 & \dots\dots\dots \text{for } h_2/H=0 \\ D_2/D_1 & \dots\dots\dots \text{for } h_2/H=1 \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

このような係数  $K$  に対して、ここでは次式を仮定する。

$$K = 1 + (D_2/D_1 - 1)(h_2/H)^a \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $a$  は接近流の流速分布に関連しているとみなされる正の定数である。

二段円柱前方に形成される2つの馬蹄渦がもつ循環の和  $\Gamma$  は、式(4)の  $\Delta\Gamma$  と密接に関連しているものと考えられ、ここでは  $p$  を比例定数として  $\Gamma = p \cdot \Delta\Gamma$  とおく。3.2 で述べたように、段高が小さいとき、洗掘が進行して下段円柱がある程度露出すると洗掘孔内に流れが集中して下段円柱底部の馬蹄渦が顕在化する現象が見られることより、下段円柱底部の馬蹄渦がもつ循環  $\Gamma_2$  の  $\Gamma$  に対する割合  $R_2$  は、二段円柱の形状だけに規定されるのではなく洗掘深によっても変化すると考えることができる。このような特性を考慮して、次式を仮定する。

$$R_2 = \frac{\Gamma_2}{\Gamma} = \frac{\Gamma_2}{p \cdot \Delta\Gamma} = \frac{D_2(z_s + h_2) + D_1(H - h_2)}{D_2(H + z_s)} \dots\dots\dots (7)$$

一方、下段円柱底部の馬蹄渦がもつ循環  $\Gamma_2$  は、その渦外縁速度を  $V$  とすると

$$\Gamma_2 = 2\pi r V \dots\dots\dots (8)$$

と表わされるから、上式に式(3)、(4)、(6)、(7)を用いると  $V$  が次のように定式化される。

$$V = \frac{\alpha}{4\pi} \cdot E \cdot K \cdot R_2 \dots\dots\dots (9)$$

ここに、

$$E = \frac{D_1/D_2}{k_0 + C_r z_s/D_2}, \quad \alpha = p \cdot \frac{U_H}{U} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $\phi_s = V/u_*$  を導入すると、洗掘孔内の摩擦速度  $u_*$  および無次元掃流力  $\tau_*$  が接近流におけるそれぞれの値  $u_{*0}$  および  $\tau_{*0}$  を用いて、次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} u_* &= \frac{\alpha}{4\pi} \cdot \frac{\phi}{\phi_s} \cdot E \cdot K \cdot R_2 \cdot u_{*0} \\ \tau_* &= \left(\frac{\alpha}{4\pi}\right)^2 \cdot \left(\frac{\phi}{\phi_s}\right)^2 \cdot E^2 \cdot K^2 \cdot R_2^2 \cdot \tau_{*0} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(11)$$

ここに、 $\phi$  は接近流の流速係数であって、次式より与えられる<sup>4)</sup>。

$$\phi = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{H}{2d} \dots\dots\dots(12)$$

$d$  は砂粒径である。

**3.4 平衡状態**

ここでいう平衡状態とは、洗掘孔から流出する砂量が零となって洗掘深の時間的増大が停止する状態をいう。このような状態では、洗掘孔底部の砂粒子に作用する力は静的なバランスを保持していると考えられる。このことより、著者ら<sup>5)</sup> は平衡状態における馬蹄渦外縁速度  $V_s$  に対して次式を導いた。

$$V_s = \sqrt{\xi(\sigma/\rho - 1)gd} \dots\dots\dots(13)$$

ここに、

$$\xi = \frac{2A_3 \tan \varphi}{\epsilon A_2 (C_D + C_L \tan \varphi)}$$

$\sigma$ : 砂の密度,  $\rho$ : 水の密度,  $A_2$ : 球の面積係数,  $A_3$ : 球の体積係数,  $C_D$ : 球の抗力係数,  $C_L$ : 球の揚力係数,  $\epsilon$ : シャヘい係数,  $\varphi$ : 砂の摩擦角

式(9)と(13)を用いると、平衡状態における無次元掃流力  $\tau_{*c}$  および平衡洗掘深  $z_{sc}$  が評価される。

$$\tau_{*c} = \xi/\phi_s^2, \quad V_s = V|_{z_s = z_{sc}} \dots\dots\dots(14)$$

**3.5 洗掘孔からの流出砂量**

Yalin<sup>6)</sup> により提案された流砂量式を拡張して用いることにする。すなわち、

$$q_B = C_1 u_* d \left\{ j_* - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta j_*) \right\} \dots\dots\dots(15)$$

ここに、

$$j_* = \tau_* / \tau_{*c} - 1, \quad \beta = C_2 \sqrt{\tau_{*c}} \dots\dots\dots(16)$$

$C_1$  および  $C_2$  は定数である。式(15)の  $q_B$  を、 $q_s = q_B / k_1 D_2$  に用いると、式(1)の  $q_s$  が評価される。その際、 $u_*$  および  $\tau_*$  には式(11)を用い、 $\tau_{*c}$  には式(14)を用いる。

**3.6 二段円柱前部が洗掘されるまでの遅れ時間**

近似的に  $(D_2 - D_1)/2 < k_0 D_1$  かつ  $h_2 < 2k_0 D_2$  の場合には、二段円柱側部が洗掘され始めて前部が洗掘域となるまでにはかなりの遅れ時間がある。この遅れ時間  $t_s$  は、円柱前部の掃流力が小さく側部の掃流力が大きいため側部から掘れ始めた洗掘域が前部まで拡大されるのに要する時間と理解される。したがって、その時間を評価するためには、二段円柱側部における掃流力の局所増大を考慮する必要がある。

いま平坦固定床状態を考え、上段円柱と同一径 ( $= D_1$ ) をもつ一様円柱周辺の流れにポテンシャル流れを仮定すると、Fig. 5 に示したB線分上の平均速度  $\bar{u}_0$  が次のように求まる。

$$\bar{u}_0 = A_0 \cdot U \dots\dots\dots(17)$$

$$A_0 = 1 + \frac{(D_1/D_2)^2}{1 + 2k_1} \dots\dots\dots(18)$$

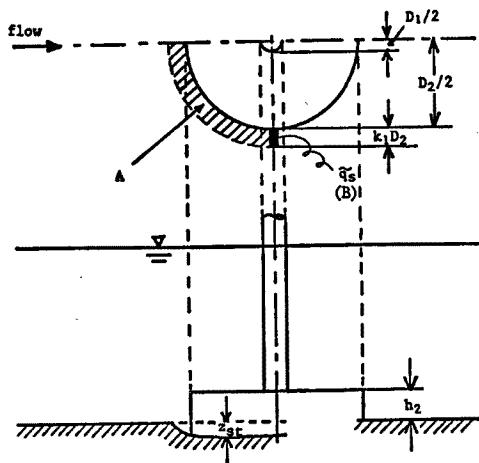


Fig. 5 Definition sketch.

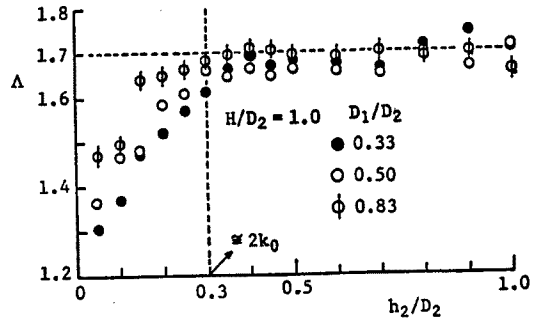


Fig. 6 Variation of side velocity with top elevation of lower cylinder.

二段円柱の場合に対して、B線分上の平均速度  $\bar{u}$  と接近流速との比  $A = \bar{u}/U$  を実験的に検討すると、それは上・下段円柱径比  $D_1/D_2$  および段高・下段円柱径比  $h_2/D_2$  によって変化し、Fig. 6 に示す変化性状を呈することがわかった。すなわち、 $0 \leq h_2/D_2 \leq 0.3$  においては  $h_2/D_2$  の増大とともに  $A$  はほぼ直線的に増大することがわかった。すなわち、 $0.3 < h_2/D_2$  に対しては  $A \approx 1.7$  の一定値となっている。 $h_2/D_2 = 0$  のときには  $A = A_0$  と近似でき、また  $h_2/D_2 = 0.3$  は  $h_2/D_2 = 2k_0$  と近似できることより、 $0 \leq h_2/D_2 < 2k_0$  に対する  $A$  は次のように表わされる。

$$A = \bar{u}/U = \frac{1.7 - A_0}{2k_0} \cdot h_2/D_2 + A_0 \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 $\phi_s = \bar{u}/\bar{u}_*$  とおくと、二段円柱側部の摩擦速度  $\bar{u}_*$  および無次元掃流力  $\bar{\tau}_*$  がそれぞれ次のように評価される。

$$\bar{u}_* = A \cdot (\phi/\phi_s) \cdot u_{*0}, \quad \bar{\tau}_* = A^2 \cdot (\phi/\phi_s)^2 \cdot \tau_{*0} \quad \dots\dots\dots (20)$$

Fig. 5 において、二段円柱前部が洗掘域となる直前でのA領域における平均洗掘深  $z_{st}$  が、 $z_{st} = 2k_0 D_2 - h_2$  と近似でき、また、A領域の面積が  $A = 1/4 k_1 (k_1 + 1) D_2^2$  と表わされることより、 $t=0$  から  $t=t_s$  までの砂量の収支を考えると遅れ時間  $t_s$  は次式で与えられる。

$$\bar{q}_s \cdot t_s / (1 - \lambda) = z_{st} \cdot A \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここに、 $\bar{q}_s$  は線分Bを通過する単位時間あたりの砂量であって、3.5と同様に次式で評価する。

$$\bar{q}_s = k_1 D_2 \cdot C_1 \bar{u}_* d \left\{ \bar{j}_* - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta \bar{j}_*) \right\} \quad \dots\dots\dots (22)$$

ここに、 $\bar{j}_* = \bar{\tau}_*/\tau_{*c} - 1$ 、 $\beta = C_2 \sqrt{\tau_{*c}}$  であってこれらは式(14)、(20)を用いると算定できる。

以上より、遅れ時間  $t_s$  が評価でき、次式で与えられる。

$$\frac{u_{*0} t_s}{D_2} = \frac{\pi(1 - \lambda)(1 + k_1)}{4C_1} \cdot \frac{D_2}{d} \cdot \frac{\phi_s}{\phi} \cdot \frac{2k_0 - h_2/D_2}{A \left\{ \bar{j}_* - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta \bar{j}_*) \right\}} \quad \dots\dots\dots (23)$$

### 3.7 洗掘速度

以上の諸式を用いると、洗掘深の時間的増大速度が定式化されるが、それは次式のように表わされる。(具体的な式形は省略する)

$$\frac{d(z_s/D_2)}{d(u_{*0} t/D_2)} = fn\left(\frac{D_1}{D_2}, \frac{h_2}{D_2}, \tau_{*0}, \frac{H}{D_2}, \frac{D_2}{d}, \frac{z_s}{D_2}\right) \quad \dots\dots\dots (24)$$

すなわち、ある時点における洗掘速度は、橋脚の形状特性量 ( $D_1/D_2$ ,  $h_2/D_2$ )、接近流の水利特性量 ( $\tau_{*0}$ ,  $H/D_2$ ,  $D_2/d$ ) およびその時点での洗掘深 ( $z_s/D_2$ ) によって規定されることを表わしている。

本研究では、( $t=0$  のとき  $z_s=0$ ) を初期条件とするが、式(24)はどのような初期条件に対しても適用可能である。というのは式(24)右辺が時間  $t$  に関するパラメータを含んでいないからである。

#### 4. シミュレーション結果

本シミュレーションにおいては、外部条件としてのパラメータ  $D_1/D_2$ ,  $h_2/D_2$ ,  $\tau_{*0}$ ,  $H/D_2$ ,  $D_2/d$  を既知量として与え、 $t=0$  のとき  $z_s=0$  を初期条件として洗掘過程をシミュレートする。なお、本洗掘モデルが含む各種の定数には次の値を用いた。

$$a=0.1, A_2=\pi/4, A_3=\pi/6, C_1=0.635, C_2=1.66, C_D=0.4, C_L=0.34, C_r=0.1, k_0=0.15, \\ k_1=0.25, \alpha=2.8, \epsilon=0.4, \lambda=0.4, \varphi=35^\circ, \phi_s=10.0$$

##### 4.1 洗掘深の時間的变化

下段円柱径  $D_2$  で基準化した洗掘深  $z_s/D_2$  の無次元洗掘時間  $T=u_{*0}t/D_2$  による時間的变化のシミュレーション結果を両対数紙上に表示すると Fig. 7~10 のようになる。以下では、式(24)右辺の支配パラメータが及ぼす影響を定性的に説明する。

まず始めに、 $\tau_{*0}$ ,  $H/D_2$  および  $D_2/d$  をそれぞれ一定に保ち、3種の上・下段円柱径比  $D_1/D_2$  について相対段高  $h_2/D_2$  をそれぞれ系統的に変化させた場合の Fig. 7 を見ると、 $D_1/D_2$  の小さいほど  $h_2/D_2$  の影響が顕著であることがわかる。すなわち、上・下段円柱径の近い  $D_1/D_2=0.8$  では  $h_2/D_2$  が変化しても各曲線のずれはわずかであり、段高の影響は微小である。しかし、下段円柱径が上段円柱径に比し大きくなると ( $D_1/D_2 \rightarrow$  小)、各  $h_2/D_2$  に対する曲線のずれは次第に大きくなり、 $h_2/D_2$  の相違による差が顕著に現われている。このような特性は実験結果 (後述される) を定性的に十分説明しており、二段円柱型橋脚の洗掘特性を取扱う場合には段高に対する考慮が極めて重要であることを示唆している。

次に、 $D_1/D_2$ ,  $H/D_2$  および  $D_2/d$  をそれぞれ一定に保ち、3種の  $h_2/D_2$  に対して接近流の無次元掃流力  $\tau_{*0}$  を系統的に変化させた場合の Fig. 8 を見ると、同一の  $h_2/D_2$  に対しては  $\tau_{*0}$  の大きいほど、また同一の  $\tau_{*0}$  に対しては  $h_2/D_2$  の大きいほど洗掘深は大きくなっていることがわかる。このような  $\tau_{*0}$  の影響は容易に予想されるものであるが、本洗掘モデルは合理的にそれを説明している。

また同様に、3種の  $h_2/D_2$  において相対水深  $H/D_2$  をそれぞれ系統的に変化させた場合のシミュレーション結果を示したものが Fig. 9 である。一樣円柱の場合には、他の支配水量が一定であれば水深の大きいほど洗掘深も大きくなることが従来の研究より明らかにされているが、同図では逆に水深の小さいほど、すなわち同一の  $h_2/D_2$  に対して  $H/D_2$  の小さいほど洗掘深が大きくなる傾向を示している。これは段高  $h_2$  が一定であれば水深  $H$  の小さいほど  $h_2/H$  は大きくなり、下段円柱の支配性が卓越するようになることを考えると説明されよう。

最後に、他のパラメータを一定に保ち、 $D_2/d$  を種々変化させた場合の Fig. 10 を見ると、 $D_2/d$  の大きいほど  $z_s/D_2$  が大きくなることを示している。この結果の解釈は複雑であるので、具体的に考えてみることにする。 $D_2/d$  が大きくなるなり方としては、1)  $D_2$  が一定で  $d$  が小さくなる、2)  $d$  が一定で  $D_2$  が大きくなる、3)  $D_2$  が大きくなり  $d$  が小さくなる、の3通りが考えられる。3) の場合は1)と2)の重合せとして解釈できるからここでは考えない。まず1)の場合、 $d$  のみが小さくなると水深・粒径比  $H/d$  が大きくなり、接近流の流速係数  $\phi=U/u_{*0}$  が増大する (式(12))。このことは  $\tau_{*0}$  が一定であれば馬蹄渦のもつ無次元掃流力  $\tau_*$  の増大をもたらす (式(11))、洗掘の助長を促す。したがって  $D_2$  が一定だから  $z_s/D_2$  は大きくなる。次に2)の場合、 $d$  が一定で  $D_2$  が大きくなるから  $H/D_2$  が一定の条件下では  $H$  が大きくなることを意味し、それは  $H/d$  の増大に通じる。したがって同様に  $\phi$  が大きく評価され  $\tau_{*0}$  が一定だから  $\tau_*$  が大きくなる。



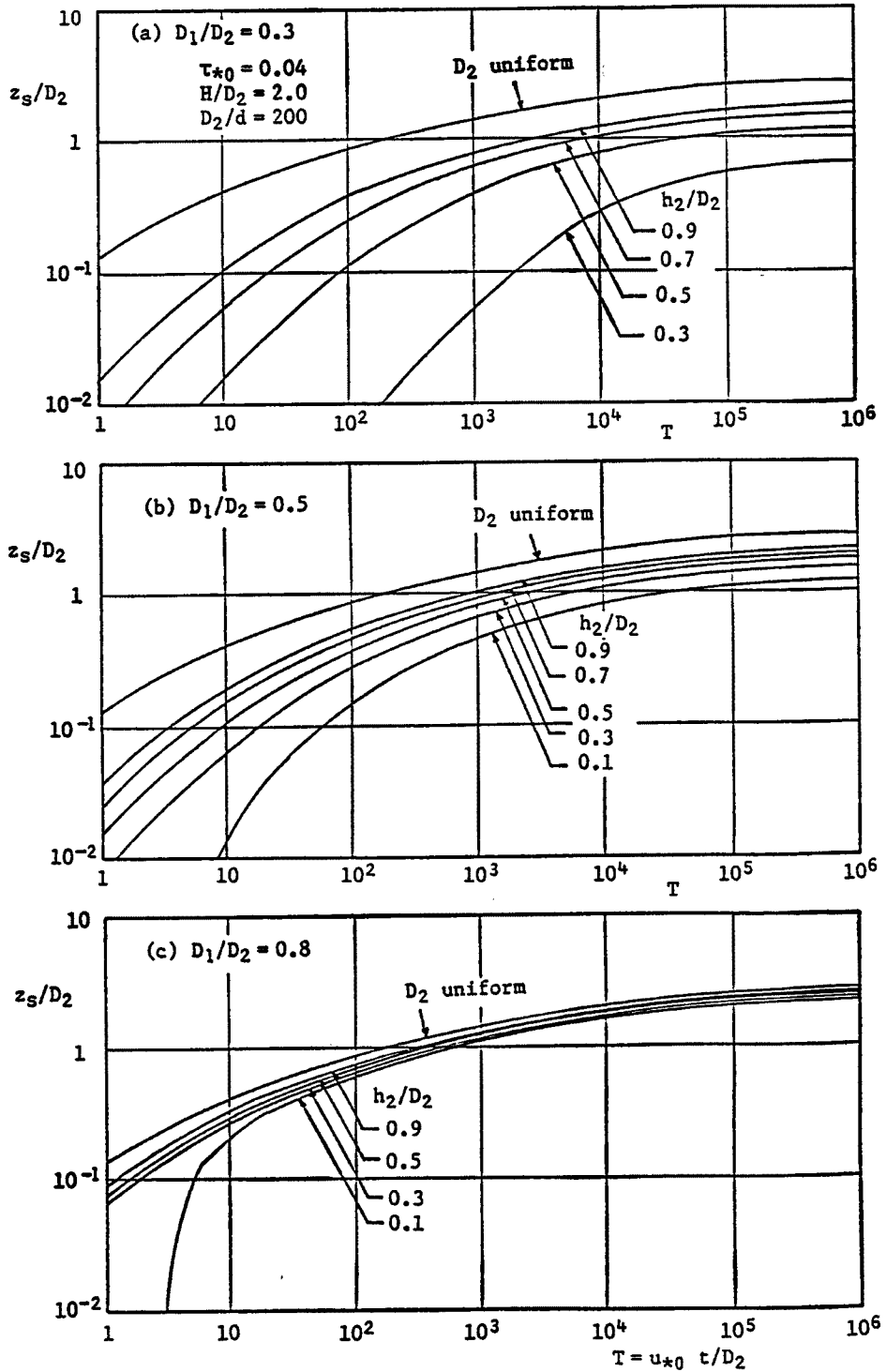


Fig. 7 Development of scour depth with time (effect of  $h_2/D_2$ ).

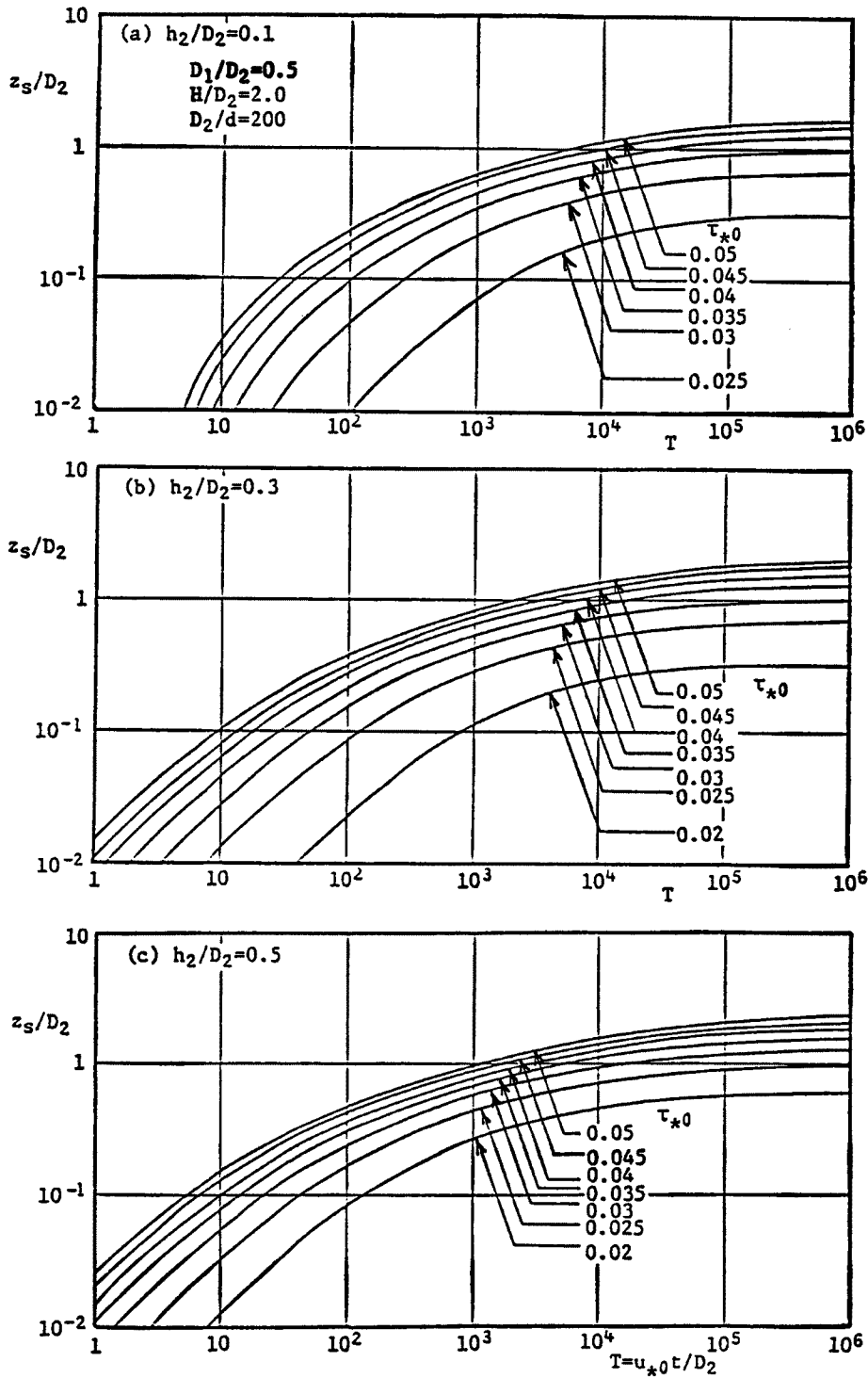


Fig. 8 Development of scour depth with time (effect of  $\tau_{*0}$ ).

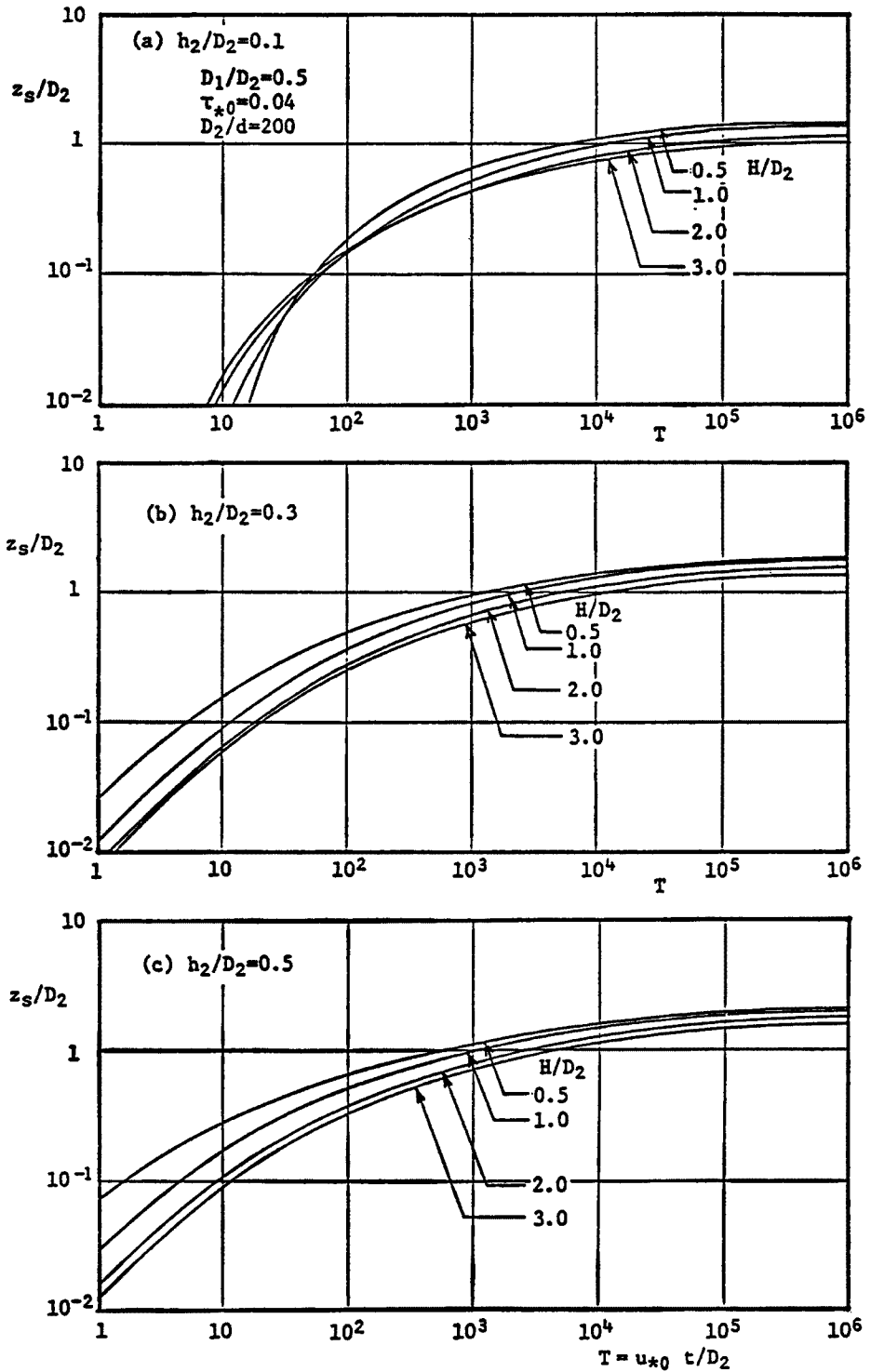


Fig. 9 Development of scour depth with time (effect of  $H/D_2$ ).

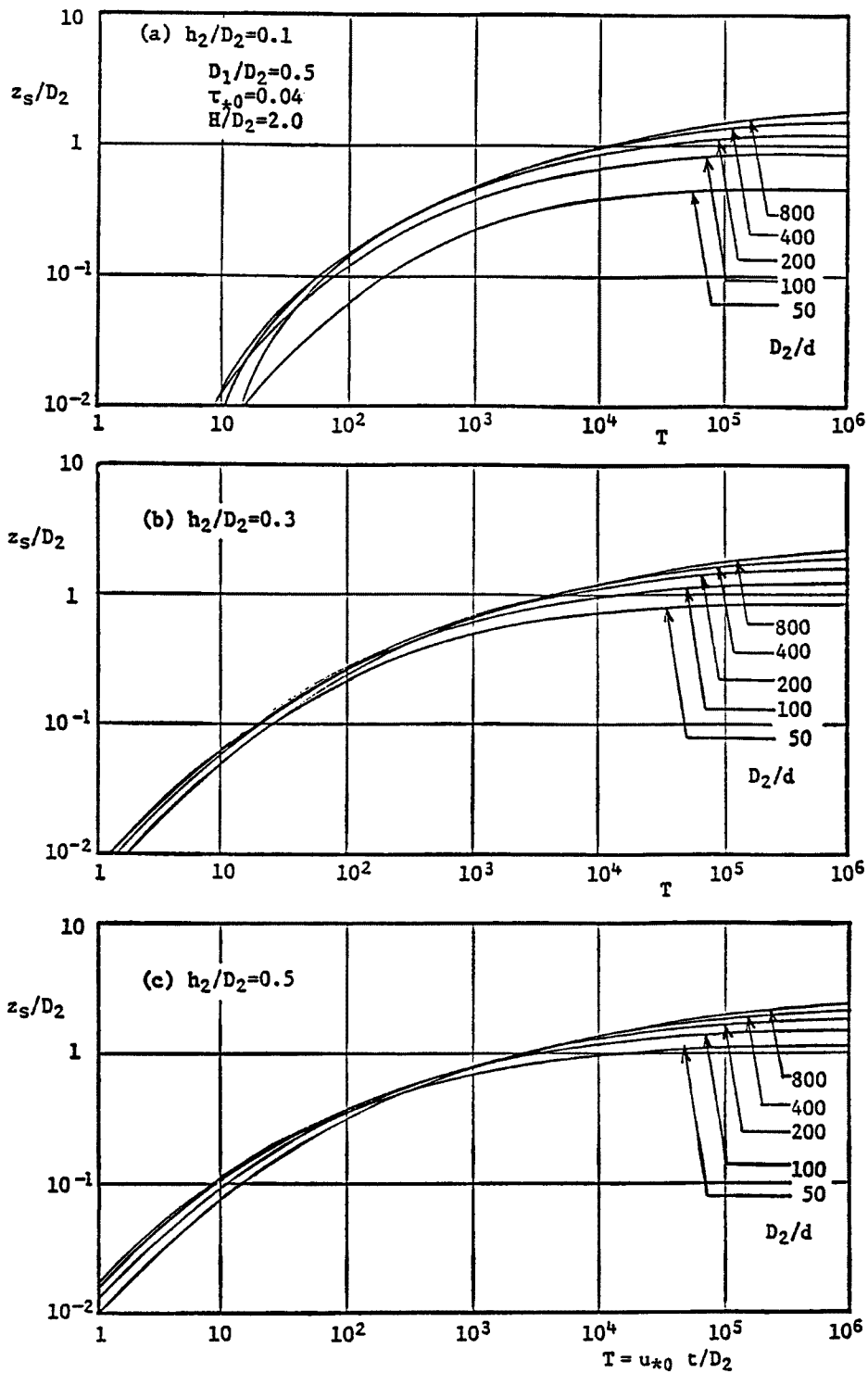


Fig. 10 Development of scour depth with time (effect of  $D_2/d$ ).

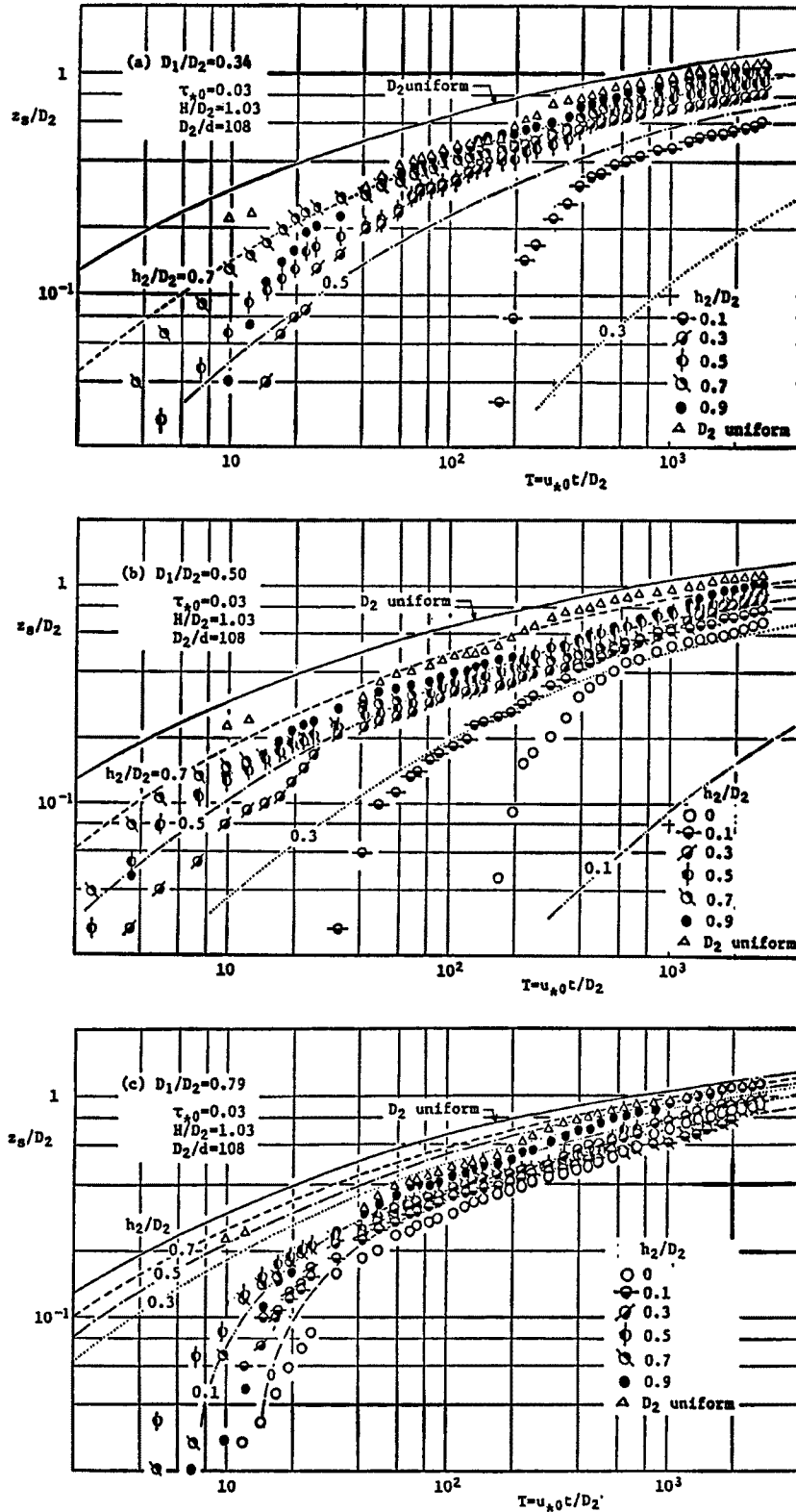


Fig. 11 Comparison between simulation and experimental data.

このことは洗掘孔からの流出砂量の増大を引起すが  $D_2$  も大きくなっているので  $z_s/D_2$  が大きくなるとは一概には言えない。諸量の値を具体的に計算して評価されるが本洗掘モデルでは  $z_s/D_2$  の増大する結果となる。ただし、 $D_2$  が大きくなると洗掘孔のスケールが大きくなるので、最終洗掘深に到達するまでの所要時間は長くなることが予測される。Fig. 10 において同一の  $t$  に対する洗掘深の時間的増大率は  $D_2/d$  が大きいほど大きくなっており、上述の予想を肯定する結果を示している。パラメータ  $D_2/d$  は洗掘の時間スケールに關与するものと考えられる。

支配水理量の定性的影響は本シミュレーション結果から以上のように説明されるが、本洗掘モデルの定量的妥当性を検証するために、実験結果との比較を次に行う。

Fig. 11 は実験結果と同一の水理条件に対するシミュレーション結果とを比較したものである。定量的に

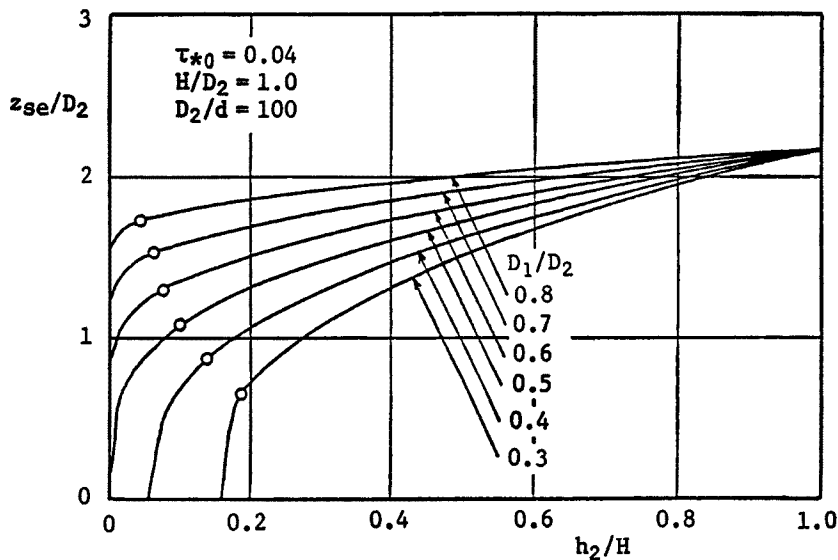


Fig. 12 Equilibrium scour depth (effect of  $D_1/D_2$ ).

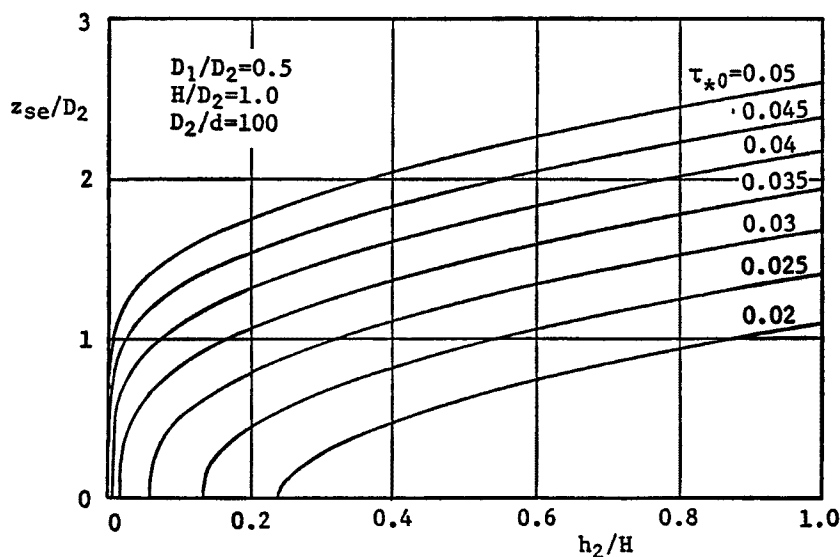


Fig. 13 Equilibrium scour depth (effect of  $\tau_{*0}$ ).

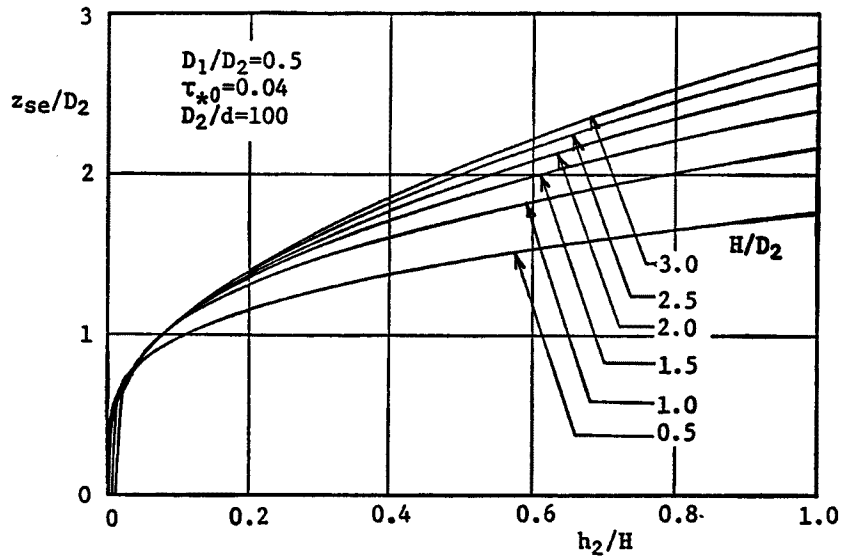


Fig. 14 Equilibrium scour depth (effect of  $H/D_2$ ).

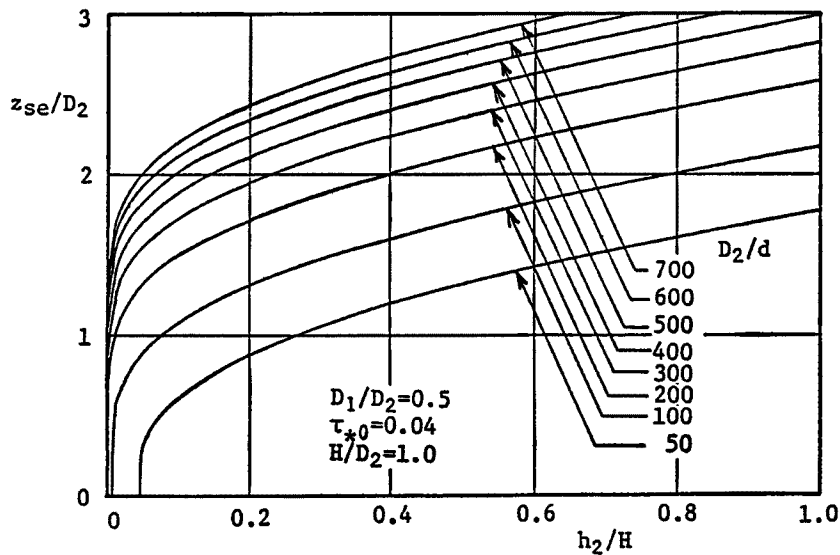


Fig. 15 Equilibrium scour depth (effect of  $D_2/d$ ).

は必ずしも両者は一致せず、とくに  $h_2/D_2$  の小さな場合および洗掘初期に対する適合度が悪いようである。したがって本シミュレーションは現段階では定性的な特性を説明するに止まっており、今後改良を加えていく必要がある。

#### 4.2 平衡洗掘深

式(14)より評価される平衡洗掘深  $z_{se}$  のシミュレーション結果を示すと Fig. 12~15 のようである。ここでは Fig. 12 のみに着目して二段円柱の形状特性が平衡洗掘深に及ぼす影響を検討する。

同図は、 $z_{se}/D_2$  と  $h_2/D_2$  の関係を種々の  $D_1/D_2$  に対して示したものである。なお、各曲線上に○で示さ

れた点は、各  $D_1/D_2$  に対する平衡洗掘深が上段円柱と同一の径をもつ一様円柱（上段一様円柱と呼ぶ）での平衡洗掘深に一致するときの段高 ( $h_2/H$ ) を表わしている。そこで、上段一様円柱における平衡洗掘深との比較という観点から図を見ると、 $h_2/H$  が小さく段面が河床に近いような場合には、いずれの  $D_1/D_2$  に対しても平衡洗掘深は上段一様円柱でのそれより小さい。しかし段面が上昇すると上段一様円柱での平衡洗掘深を上回るようになり、下段円柱の影響が顕著となることがわかる。すなわち、二段円柱型橋脚では、段面の位置により洗掘を抑制する効果と促進する効果との二面性があることがわかる。もちろん、そのような二面性の境界となる段面の位置は支配水量によって変化する。

## 5. 結 言

本研究は、上・下段で径の異なる二段円柱型の橋脚周辺の洗掘特性について検討したものであって、上・下段の円柱径および段高を系統的に変化させた実験を行うとともに、円柱前面に形成される馬蹄渦の発達過程に基づく洗掘モデルを提唱している。得られた成果を要約して結論とする。

- 1) 段高が高いほど洗掘開始時期は早くなる傾向があり、一定時間後の洗掘深も大きくなる傾向がある。また、上・下段の円柱径差が大きいほどこの傾向は顕著となる。
- 2) 円柱前面の馬蹄渦の循環値は洗掘が進行しても一定値に保たれるという仮定を用いて、洗掘過程を説明づけるモデルを導いたが、このモデルは実験結果と定性的に良く一致しており、洗掘深を推定するうえで極めて有効である。
- 3) 二段円柱型橋脚は、上・下段の円柱径比および段高の値により、上段円柱と同一径の一様円柱と較べて、洗掘を抑制する効果と促進する効果の二面性を持っている。

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国西達也君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) 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.
- 3) Shen, H. W., V. R. Schneider and S. Karaki: Local Scour around Bridge Piers, *Proc. ASCE*, Vol. 95, HY6, 1969, pp. 1919-1940.
- 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) 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(3), 京大防災研究所年報, 第28号 B-2, 1985, pp. 523-537.
- 6) Yalin, M. S.: An Expression for Bed-Load Transportation, *Proc. ASCE*, Vol. 89, HY3, 1963, pp. 221-250.