

# 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)

今 本 博 健・大 年 邦 雄

## HYDRAULIC CHARACTERISTICS AROUND PIER IN AN OPEN CHANNEL FLOW (1)

By *Hirotake* IMAMOTO and *Kunio* OHTOSHI

### Synopsis

Hydraulic characteristics around various types of flow obstructions is a problem of continuing interest. Many investigators have published results on the various aspects of this problem in the past, particularly on the local scour around bridge piers.

The present study is concerned with local scour around single cylindrical pier or plural cylindrical piers arranged in various types under the condition of clear water scour. In the case of single cylindrical pier, the variation of scour depth with time is investigated experimentally to obtain a formula. On the other hand, in the case of plural cylindrical piers, the effect of arrangement of piers on the scour characteristics is investigated mainly.

### 1. はじめに

河道内に橋脚が設置されると、その形状、大きさ、配置に応じて橋脚周辺の水理特性は設置前とは大いに異なったものとなる。すなわち、橋脚、流れおよび河床特性の相互作用によって局所的な河床変動（洗掘・堆積）を生じるとともに、橋脚後流の影響が相当下流まで波及するなど、設置前とは著しく異なる水理特性を呈すため、橋脚周辺の水理特性を把握することは河川工学において重要な課題となる。また、橋脚による局所洗掘現象は、橋脚自体の安全性に係わる極めて重要な現象であることは言うまでもない。

本研究は、橋脚周辺の水理特性を検討する第一段階として、単円柱橋脚および多円柱橋脚周辺の洗掘特性を実験的に取扱ったものであって、単円柱橋脚を対象とする場合には、静的洗掘における洗掘深の経時変化特性について検討し、全洗掘時間に対する経時変化特性に重点を置いている。一方、多円柱橋脚を対象とする場合には、それらの配列方式に依る洗掘特性の差違を比較検討し、配列方式の効果に重点を置いている。

### 2. 従来の研究

#### 2.1 単円柱橋脚周辺の洗掘

洗掘過程、とりわけ静的洗掘 (clear water scour) においては、洗掘の進行は遅く、室内実験においてさえ平衡状態の存在を確認するのは困難である。たとえば Anderson<sup>1)</sup> は、“洗掘過程に平衡状態は存在するのか”という問題を提起しているが、これに対し Rouse<sup>2)</sup> は、洗掘は常に増大する現象であって、終局あるいは平衡状態というものには実際にはないとの見解を示し、Breusers<sup>3)</sup> も Rouse の見解を支持している。一方、Laursen<sup>4)</sup> は、洗掘には限界があり、この限界値に漸近するとの見解を示している。

洗掘孔形状に関しては、適切な無次元パラメータに基づくと洗掘時間に依存せず相似であることが実験的に確かめられているが、洗掘深の経時変化特性については不明の点が多い。

一般に、静的洗掘における円柱橋脚前面の最大洗掘深の経時変化は、均一な河床材料の場合、Fig. 1 の模式図に示すようになって、洗掘過程を次のように分割して取扱う研究が多い。すなわち、

- (1) 円柱前面の下降流による急激な初期洗掘過程
- (2) 洗掘深の発達過程
- (3) 洗掘深の増大速度が非常に小さくなる平衡状態への移行過程
- (4) 平衡状態 (その存在は明らかでない)

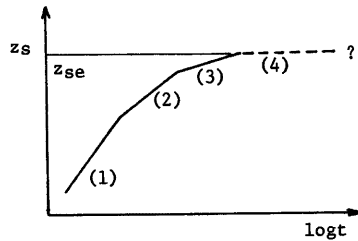


Fig. 1 Schematic illustration of the variation of scour depth with time.

したがって、分割された各領域ごとに洗掘深の経時変化を定式化しようとする取扱いが多く、たとえば、中川・鈴木<sup>5)</sup>は、円柱前面における洗掘深について考え、

よどみ面での洗掘を、(A) 渦の自由な洗掘過程、(B) 砂が静止摩擦角を保持するために、渦が実際に洗掘を行っている領域への砂粒の斜面滑落を考えなければならない過程、(C) よどみ面系から自由に外へ出られなくなって、洗掘深の時間変化が(B) 過程よりも鈍化する過程、に分割されることを実験的に確め、(A) 過程に対して  $z_s \sim t$ 、(B) 過程に対して  $z_s \sim \sqrt{t}$ 、となる洗掘モデルを示している。さらに、洗掘深の増大速度が小さくなる時の洗掘深を工学的にはほぼ最終洗掘深とみなせるものとして、これを遷移洗掘深  $z_s$  と名付け、 $z_s$  に関する検討を加えている。

以上のような取扱いは、洗掘現象を理解する上では非常に有意義であるが、明確な分割基準に問題が残る。

これに対し、洗掘過程を分割せず、全洗掘時間領域を対象として洗掘深の経時変化を定式化しようとする研究は、主として実験的に進められ、噴流による洗掘現象を対象とした Rouse<sup>2)</sup>、Thomas<sup>6)</sup> および Blaisdell<sup>7)</sup> などの研究、水制による洗掘を対象とした Ahmad<sup>6)</sup> および Gill<sup>9)</sup> などの研究、橋脚による洗掘を対象とした Carstens<sup>10)</sup> および Torsethaugen<sup>11)</sup> などの研究が挙げられる。これらの研究成果を大別すると、洗掘深の経時変化式は次のように分類される。

$$z_s = a \log t + b \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{z_s}{z_{se}} = 1 - b \exp(-at) \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{z_s}{z_{se}} = \exp\left\{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^{-\alpha}\right\} \dots\dots\dots (3)$$

式(1)は Rouse が最初に提案したものであって、洗掘は増大し、平衡状態は存在しないとするもの、式(2)、(3)は洗掘には限界があり、その限界値 (平衡洗掘深  $z_{se}$ ) に指数関数的に漸近するとしたものである。しかし、これらの式に含まれる各種パラメータ ( $a, b, \alpha, t_0$ ) の特性に関しては明らかにされていない。

**2.2 多円柱橋脚周辺の洗掘**

複数本の橋脚により橋梁を支持する場合、あるいは新旧両橋梁を並列させるような場合には、橋脚の配置と洗掘特性との関係を把握しておくことが重要である。

石原<sup>12), 13)</sup>は、橋脚の配置に関して、橋脚間の間隔と橋脚幅の影響、あるいは橋脚を並列させた場合の軸線の配置について実験的に検討し、以下のような知見を示している。

(1) 2本の円柱橋脚を流下方向に配列する場合には、円柱中心間の距離を円柱直径の2倍程度とするのが良い。これは、この間隔に2本の円柱を配置すると、上流側円柱で洗掘されてその下流へ堆積しようとする砂粒が、下流側円柱前面の影響を受けて後方へ流送され、両円柱間の河床が最も安定した状態を保つからである。

(2) また、両橋脚の軸線を流下方向に一致させることが困難な場合でも、軸線が流下方向と5°以上の角度をなさないようにすべきである。

Dietz<sup>11)</sup> は、2本の円柱橋脚の中心間隔を円柱直径の3倍以上にすると、円柱軸線と流水とのなす角度が最大洗掘深に及ぼす影響は認められないという実験結果を示している。しかしながら多円柱橋脚の洗掘特性と配列方式および間隔との関係には水理条件が顕著に影響すると考えられる。事実、上述した Dietz 実験結果と後述する本実験結果とは全く一致しておらず、橋脚の特性と洗掘との関連を検討する場合には、定性的傾向の把握に対しても水理条件に関する考慮が不可欠であることを示している。

### 3. 単円柱橋脚周辺の洗掘特性

#### 3.1 実験装置および方法

実験に用いた水路は、長さ 16m、幅 100cm、深さ 30cm の長方形断面を有する循環式水路であるが、中央部の長さ 2m 区間を除く上下流部は角パイプおよびベニヤ板等を用いて路床が水路床よりも 12cm 高くなるようにした。したがって、2m 区間は箱の状態となり、この部分に円柱橋脚模型を設置し、砂粒を水路床上 12cm の高さまで均一に敷き詰めることによって橋脚周辺河床を局所的に移動床としている。以上の概要を示すと Fig. 2 のようである。

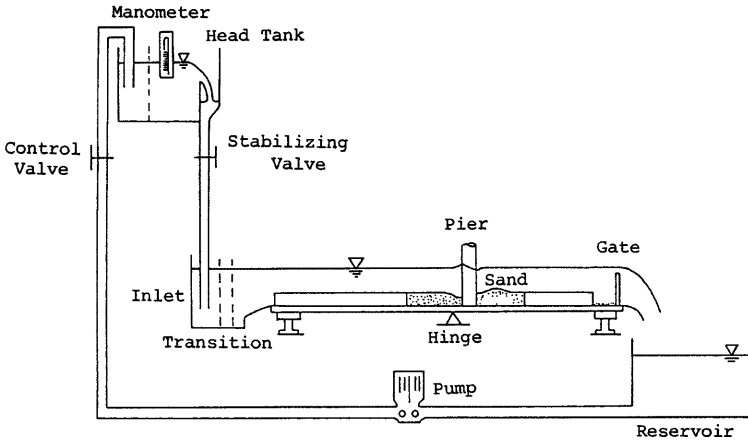


Fig. 2 Experimental flume.

使用した円柱は、塩化ビニール製で、その外径は  $D=3.80, 6.00, 7.63, 8.93$  および  $11.50$  cm の 5 種である。また、河床材料としては、中央粒径  $d_{50}=0.053, 0.077$  cm の 2 種を用いたが、ほとんどの実験は  $d_{50}=0.077$  cm の砂粒で行われている。

実験に際しては、水路下流端のせき板を所定の高さに設定し、洗掘の生じない範囲の流量で通水したのち、所定の流量にすばやく合わせ、円柱周辺で洗掘の始まった時刻を  $t=0$  とした。その後、洗掘・堆積の進行状況を目視観察するとともに円柱前面の最大洗掘深の経時変化を超音波式河床計を用いて計測した。

実験条件の選定に際しては、Breusers et al.<sup>11)</sup> が示した次元解析結果を参考にして、次式に基づいた。

$$z_s(t)/D = f(N_s, H/D, D/d, Ut/D) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $z_s(t)$  は洗掘時間  $t$  における洗掘深、 $N_s = U/\sqrt{sgd}$  は Carstens<sup>10)</sup> によって定義された無次元量で sediment number (土砂数) と呼ばれる。 $H$  および  $U$  は、それぞれ接近流の水深および平均流速、 $d$  は砂粒径 (一様砂)、 $D$  は円柱径である。すなわち、式 (4) に含まれるパラメータ  $N_s, H/D, D/d$  に着目して、これらを系統的に変化させることとし、Table 1 に示す水理条件下で実験を行った。なお、これらの実験は全

Table 1 Experimental conditions.

Run No.	$N_s$	$H/D$	$D/d$	$D$ (cm)	$H$ (cm)	$U$ (cm/s)	$d$ (cm)	$T_w$ (°C)
1	1.91	1.05	78	6.00	6.32	21.30	0.077	10.9
2	2.20	1.00	78	6.00	6.00	24.55	0.077	14.2
3	2.39	1.00	78	6.00	6.00	26.70	0.077	11.8
4	2.59	1.00	78	6.00	6.02	28.95	0.077	13.8
5	2.79	1.00	78	6.00	6.01	31.18	0.077	12.4
6	3.00	1.00	78	6.00	6.00	33.47	0.077	14.5
7	3.19	1.00	78	6.00	6.02	35.60	0.077	12.5
8	2.62	0.50	78	6.00	2.98	29.19	0.077	13.6
9	2.60	1.50	78	6.00	9.01	28.98	0.077	13.7
10	2.60	2.00	78	6.00	11.97	29.06	0.077	13.8
11	2.40	1.00	49	3.80	3.81	26.72	0.077	13.9
12	2.39	1.00	99	7.63	7.65	26.71	0.077	14.4
13	2.40	1.00	116	8.93	8.92	26.80	0.077	14.3
14	2.60	0.91	49	3.80	3.46	28.99	0.077	17.1
15	2.32	0.40	78	6.00	2.37	25.91	0.077	16.3
16	2.73	0.44	78	6.00	2.64	30.42	0.077	17.0
17	2.66	0.56	78	6.00	3.38	29.67	0.077	16.7
18	1.98	0.36	99	7.63	2.78	22.09	0.077	14.2
19	2.32	0.92	217	11.50	10.54	21.49	0.053	17.9
20	2.36	1.02	217	11.50	11.68	21.88	0.053	12.8

て静的洗掘を対象としている。

### 3.2 洗掘深の経時変化特性

円柱前面に生じる最大洗掘深の時間的変化の計測例を示すと Fig. 3~5 のようである。これらの図は、それぞれ  $N_s$ ,  $H/D$ ,  $D/d$  の効果に着目したものであって、実験時の目視観察および各図に示した洗掘深の増大過程より、前述した 1) 急激な初期洗掘過程、2) 洗掘深の発達過程、3) 平衡状態への移行過程、が推察されるが、4) 平衡状態の存在は通水時間内では明確でない。

なお、中川・鈴木<sup>5)</sup> が示した同様な計測結果を比較のために示すと Fig. 6 のようであって、 $z_s \sim t$ ,  $z_s \sim \sqrt{t}$  となる領域の存在が示されているが、本実験結果に関する限りそのような傾向は明確ではなく、洗掘深の増大はもっと緩やかなものとなっている。このことより、洗掘過程をたとえば上述した 1)~4) のように分割する取扱いは、洗掘機構を理解する上では非常に有効であるといえるが、明確な分割基準に問題が残る、妥当であるとはいえないと考えられる。

したがって、本研究においては、全洗掘時間を対象とした取扱いをすることとした。このような取扱いを

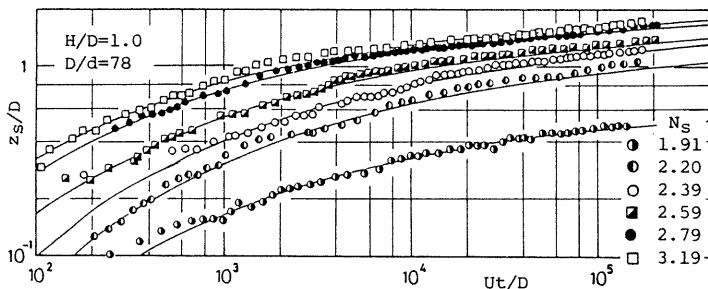


Fig. 3 Variation of dimensionless scour depth  $z_s/D$  with dimensionless time  $Ut/D$  (effect of  $N_s$ ).

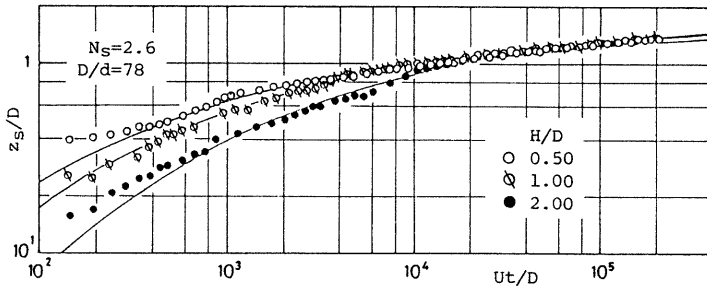


Fig. 4 Variation of dimensionless scour depth  $z_s/D$  with dimensionless time  $Ut/D$  (effect of  $H/D$ ).

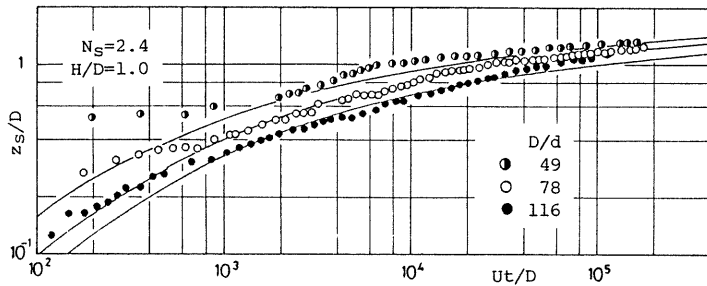


Fig. 5 Variation of dimensionless scour depth  $z_s/D$  with dimensionless time  $Ut/D$  (effect of  $D/d$ ).

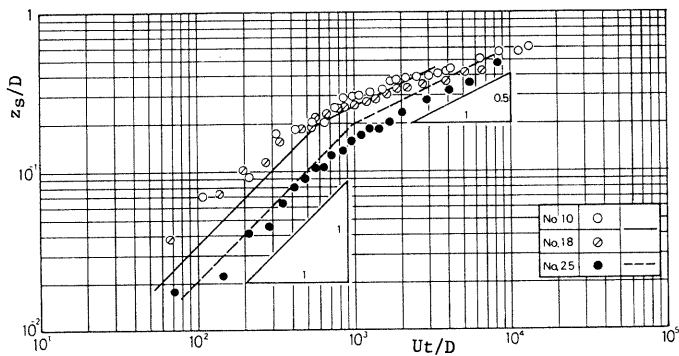


Fig. 6 Variation of dimensionless scour depth  $z_s/D$  with dimensionless time  $Ut/D$  (after Nakagawa, Suzuki<sup>5)</sup>).

したものとしては、前述の式(1)～(3)があるが、本実験結果を用いてこれらの適合性を検討した結果、式(3)の優れていることがわかったので、ここでは式(3)について検討することとする。ここで、

$$z_s^* = z_s/D, \quad z_{se}^* = z_{se}/D, \quad t^* = Ut/D, \quad t_0^* = Ut_0/D \dots\dots\dots (5)$$

とおくと、式(3)は次のようになる。

$$z_{se}^* = z_{se} \cdot \exp \left\{ -\left( t^* / t_0^* \right)^{-\alpha} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 $z_{se}$  は平衡洗掘深、 $t_0$  は  $z_s/z_{se}=1/e=0.362$  となる時の時間、 $\alpha$  は定数である。上式は Torsethaugen<sup>(11)</sup> がポリスチレン粒子を河床材料として行った実験より得たものであって、 $\alpha=0.5$  とされているが、砂粒子を用いた本実験結果では、 $\alpha=0.3$  とおくと良好な適合性を示すことがわかった。Fig. 3~5 に示された曲線は  $\alpha=0.3$  としたものである。そこで、式(6)を計測値に適用して評価される  $z_{se}^*$  と  $t_0^*$  が、パラメータ  $N_s$ 、 $H/D$ 、 $D/d$  とどのような関係にあるかを検討した。

Fig. 7 は推定された  $z_{se}^*$  と  $N_s$  との関係を実験ケースについて示したものである。なお、図中の数値は  $H/D$  の値を示している。 $H/D \cong 1.0$ 、 $D/d=78$  のものに見られるように、 $z_{se}^*$  は  $N_s$  の増大とともにほぼ直線的に増大することがわかる(図中の実線)。その直線関係には  $H/D$  および  $D/d$  が関与し、Fig. 8 および Fig. 9 に示すように、 $N_s$ 、 $H/D$  および  $D/d$  のうち他の2つが一定のとき  $H/D$  の大きいほどまた  $D/d$

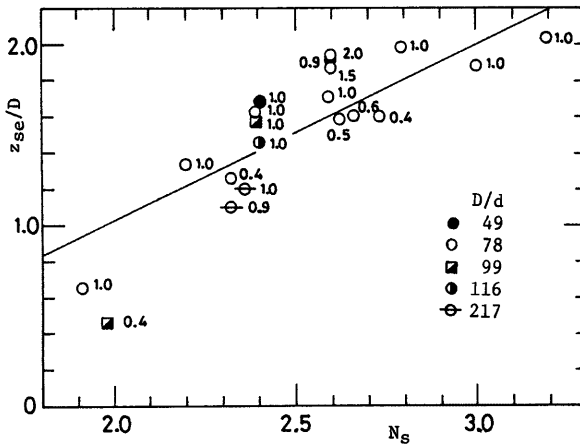


Fig. 7 Relation between dimensionless equilibrium scour depth  $z_{se}/D$  and sediment number  $N_s$ .

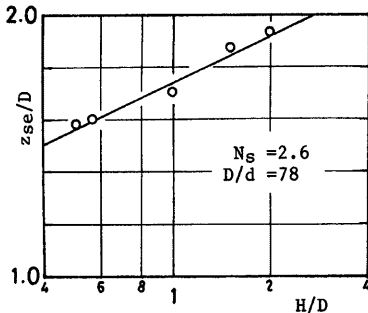


Fig. 8 Relation between dimensionless equilibrium scour depth  $z_{se}/D$  and parameter  $H/D$ .

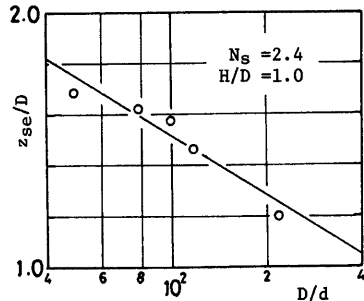


Fig. 9 Relation between dimensionless equilibrium scour depth  $z_{se}/D$  and parameter  $D/d$ .

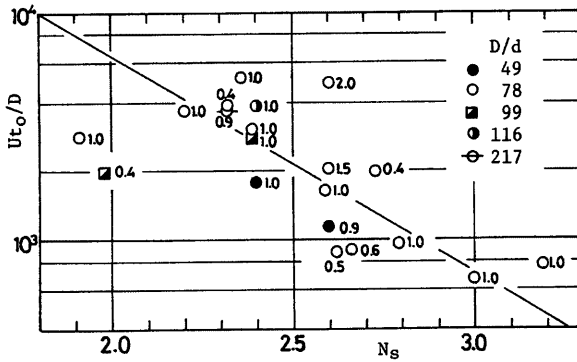


Fig. 10 Relation between dimensionless scour time  $Ut_o/D$  and sediment number  $N_s$ .

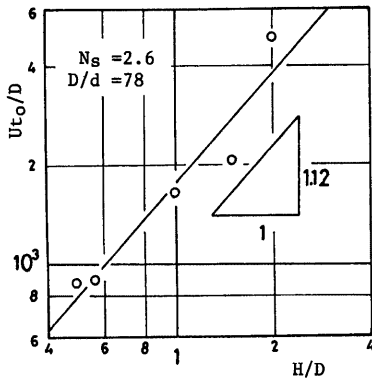


Fig. 11 Relation between dimensionless scour time  $Ut_o/D$  and parameter  $H/D$ .

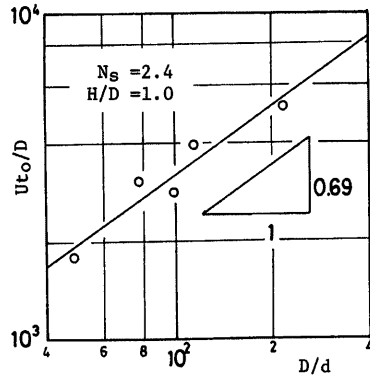


Fig. 12 Relation between dimensionless scour time  $Ut_o/D$  and parameter  $D/d$ .

の小さいほど  $z_{se}^*$  は大きくなっている。これらより、本実験の範囲内では、

$$z_{se}^* = a_1 N_s + b_1 \dots\dots\dots (7)$$

と表わされ、 $a_1 (>0)$ ,  $b_1$  が  $H/D$  および  $D/d$  の関数であることがわかるが、実験ケースが少ないためその特性を定量的に検討することはできない。

一方、 $t_o^*$  について上と同様の検討を行った結果がFig. 10~12 に示されており、これらの図より次式の関係が推察される。

$$t_o^* = \exp(a_2 N_s + b_2) \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $a_2 (<0)$ ,  $b_2$  は  $H/D$  および  $D/d$  の関数として表わされる。

今後実験資料を増やし、式(7)および式(8)の関係を定量的に検討する必要があるが、それらを用いると式(6)によって  $z_s^*$  の経時変化が定量的に評価されることになる。

#### 4. 多円柱橋脚周辺の洗掘特性

##### 4.1 実験装置および方法

実験水路は3.1で示したものを、河床材料は  $d=0.077$  cm, 円柱径は  $D=3.80$  cm のものを用いた。

多円柱橋脚の配列方法は、Fig. 13 に示すように、A: 流れ方向に配列 (縦断配列), B: 流れと直角方向に配列 (横断配列), C: 斜め方向に配列 (斜配列), D: 縦横断に配列 (格子配列) の4種の方式とした。各配列方式に対して、円柱間の間隔を系統的に変化させることとし、Cについては円柱中心を結ぶ線と流水方向のなす角  $\theta$  も変化させた。

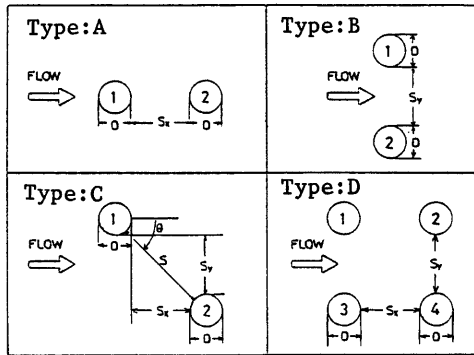


Fig. 13 Arrangement of cylindrical piers.

各実験は全て河床波の形成されない静的洗掘の状態を対象とし、Table 2 に示す水理条件下で行った。静的洗掘では実験的に平衡とみなしうる状態に到達するまでに長時間を要すが、本実験での水理条件であれば (I) の場合、 $t=70$  分程度、(II) の場合  $t=90$  分程度で洗掘の進行はかろうやくとすることを考慮して、通水時間は  $T=70$  分あるいは  $T=90$  分とし、洗掘・堆積形状および洗掘深の経時変化を検討することとした。

Table 2 Experimental conditions.

$q=100$ cm <sup>3</sup> /s·cm $D=3.80$ cm $d=0.077$ cm	I	$H=3.55$ cm $U=28.25$ cm/s	Type: A Type: B Type: C	$S_x/D=0\sim 64$ $S_y/D=0\sim 6$ $S/D=2, 3, 4$ $\theta=0\sim 90^\circ$
	II	$H=4.11$ cm $U=24.33$ cm/s	single Type: A Type: B Type: C Type: D	$S_x/D=2$ $S_y/D=0.5, 2$ $S_x/D=S_y/D=2$ $S_x/D=S_y/D=2$

##### 4.2 洗掘過程

各配列方式について、洗掘初期段階における砂粒の特徴的な動きを観察するとともに橋脚前面での洗掘深の経時変化を計測し、各配列に対する洗掘過程を比較検討すると次のようである。

縦断配列では、上流側円柱の周囲から掘れ始め下流側円柱の周囲が掘れ始めるまでに時間的遅れのあるのが認められた。これは、下流側円柱における馬蹄渦および掃流力が上流円柱でのものより小さくなっているためと考えられる。なお、上流側円柱周囲の洗掘進行状況は単円柱のそれとほぼ同様であった。



横断配列の場合には、配列間隔が短いときは両円柱外側側面の砂粒が最初に洗掘され始め洗掘深も内側に比べて大きい、配列間隔が長くなるとともに両円柱における洗掘は単円柱のそれに似かよってくる。

斜配列の場合には、 $\theta$  がある値以上になると下流側円柱周辺の洗掘が上流側円柱のそれに比べてはるかに顕著となる。これは、上流側円柱にぶつかり流向を変えた流れが下流側円柱前面に及び馬蹄渦を強くしているためと考えられる。なお、上流側円柱で洗掘された砂粒は、下流側円柱の洗掘孔へ入り込んでまたちに浮遊して後方へ堆積していく様子が観察された。

格子配列の場合には、縦断配列および横断配列における特徴を合わせ持つ状況が観察され、格子配列固有の特徴は認められなかった。

以上の定性的記述を円柱前面の洗掘深の経時変化によって定量的に検討すると次のようである。

本実験で対象とした各配列に対しては、上流側の円柱橋脚における洗掘状況は単円柱のそれと大差なく、斜配列および格子配列における前円柱と単円柱での洗掘深の時間的変化を比較した Fig. 14 に見られるように、それらの経時変化はほぼ同一であって顕著な差はない。

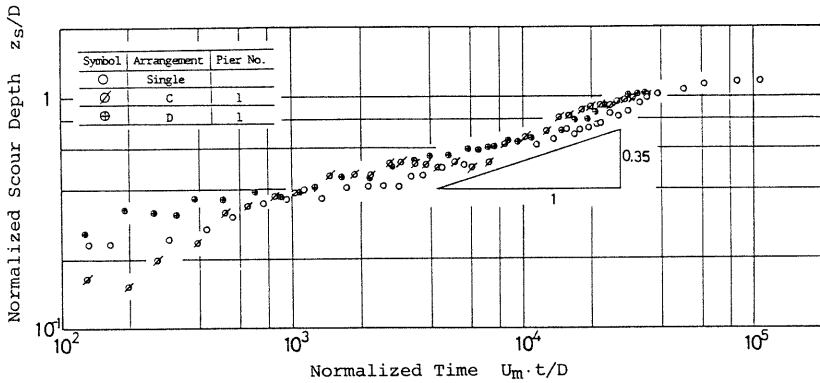


Fig. 14 Variation of dimensionless scour depth  $z_s/D$  with dimensionless time  $U_t/D$ .

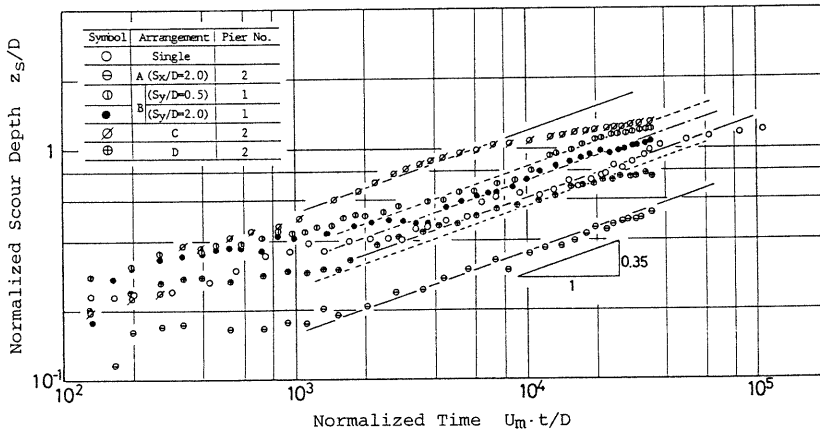


Fig. 15 Variation of dimensionless scour depth  $z_s/D$  with dimensionless time  $U_t/D$ .

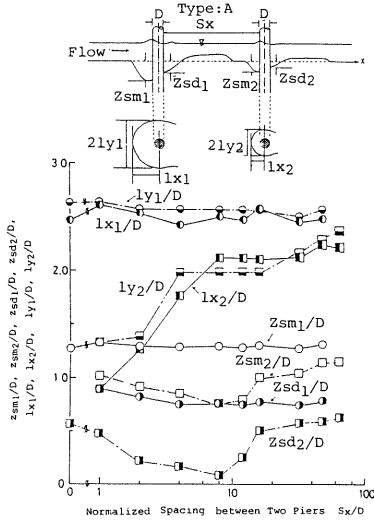


Fig. 16 Relation between bed configuration and dimensionless spacing  $S_x/D$  (Type: A).

一方、後円柱での洗掘特性は Fig. 15 に示すように配列に応じてかなり異なる。すなわち、縦断配列における後円柱での洗掘深は常に前円柱および単円柱のそれより小さく、この配列の場合には最も上流側の橋脚における洗掘深を評価しておくのが合理的であるといえる。

横断配列の場合には、 $S_y/D=0.5, 2.0$  の二種に対して示しているが  $S_y/D=0.5$  の方が常に大きな洗掘深を示し、前述の特徴を裏付けている。

斜配列の場合、 $S_x/D=S_y/D=2.0$  のとき後円柱の洗掘深は前円柱および単円柱のそれよりもかなり大きく、流水方向に対する十分な検討が必要であることを示唆している。

最後に、格子配列 ( $S_x/D=S_y/D=2.0$ ) では、後円柱の洗掘深は前円柱のそれより小さいが、縦断配列の後円柱よりも大きな洗掘深を示している。

以上のように、各配列に対する橋脚前面での洗掘深の経時変化には配列方法に対応した差違はあるが、いずれの場合にも  $Ut/D > 10^3$  において洗掘深が時間の 0.35 乗に比例して増大する共通の傾向がみられ、洗掘深そのものには差があるもののその経時変化特性には、先に検

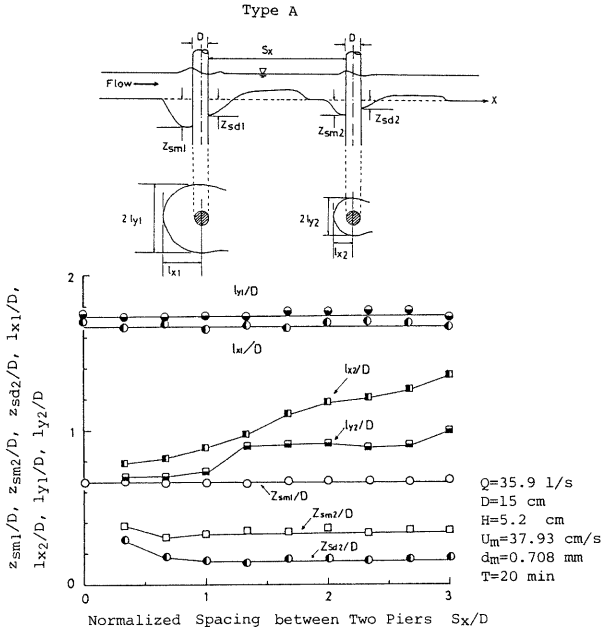


Fig. 17 Relation between bed configuration and dimensionless spacing  $S_x/D$  (after Ishihara<sup>12)</sup>).

討したような普遍性のあることが追認される。

ここで対象とした各配列方式における洗掘過程の概略は以上のようなものであるが、一定時間通水後の洗掘形状について検討すると次のようである。

### 4.3 洗掘形状

縦断配列と横断配列について、最大洗掘深および河床形状と配列間隔との関係を検討すると以下のようである。

縦断配列における両円柱の洗掘孔幾何特性量と配列間隔との関係を示すと Fig. 16 のようである。各記号の定義は図中に示している通りである。前円柱における洗掘幅  $l_{x1}$ ,  $l_{y1}$  および最大洗掘深  $z_{sm1}$  は、配列間隔  $S_x/D$  に無関係にほぼ一定であって縦断間隔の影響をほとんど受けないのに対して、前円柱後面の洗掘深  $z_{s1}$  は、 $S_x/D \geq 1$  のとき後円柱前面の洗掘作用を受けるので若干大きいが、 $S_x/D$  の増大とともに次第に後円柱による洗掘の影響が軽減されて前円柱のみの影響を受けるようになり、 $S_x/D \geq 4$  ではほぼ一定となっている。一方、後円柱における洗掘深  $z_{sm2}$ ,  $z_{s2}$  は配列間隔に応じて顕著な変化を示す。すなわち、 $S_x/D < 10$  では  $S_x/D$  の増大とともにそれぞれ減少し、 $S_x/D > 10$  では増加して両者とも前円柱のものに漸近する傾向を示している。これは、 $S_x/D$  の増大とともに前円柱の堆積の影響が次第に顕著となって  $z_{sm2}$  は漸減するが、ある程度以上の  $S_x/D$  の値 (本実験では  $S_x \approx 10$ ) に対しては、堆積よりも後円柱の洗掘作用の方が卓越するようになり、 $z_{sm2}$  は前円柱のそれに漸近する傾向を示すようになるということである。また、後円柱での洗掘幅  $l_{x2}$ ,  $l_{y2}$  は、 $S_x/D$  の増大とともにそれぞれ増大し、 $z_{sm2}$  と同様、前円柱での  $l_{x1}$ ,  $l_{y1}$  に漸近する傾向を示しているもの  $S_x/D=64$  に至っても  $z_{sm2}$ ,  $l_{x2}$  および  $l_{y2}$  は前円柱のものには一致しておらず、前円柱の影響は相当下流にまで及んでいることが推察される。

Fig. 17 は、同じく縦断配列 (ただし  $S_x/D \leq 3$ ) を対象とした石原<sup>(12), (13)</sup>の実験結果を整理し直したものであるが、定性的には本実験結果と同様な傾向を示しているものの定量的にはかなり異なったものとなっている。

次に、横断配列について配列間隔の影響を検討したものが Fig. 18 である。なお、両円柱における幾何形状はほぼ同一であったので右岸側円柱での値を採用した。図において、 $l_x$ ,  $l_y$  および  $z_{sm}$  は、配列間隔が非常に短い範囲 ( $S_y/D < 0.5$ ) では  $S_y/D$  の増大にともない急激に減少するが、 $0.5 \leq S_y/D \leq 1.5$  の範囲では漸減傾向となり、 $S_y/D > 1.5$  においてはほぼ一定値となっている。また、 $l_{xc}$  および  $z_{smc}$  は、 $S_y/D < 4$  の範囲では  $S_y/D$  の増大とともに急激な減少傾向を示し、 $S_y/D \geq 4$  で  $z_{smc} = 0$  となる。すなわち、両円柱の洗掘孔が  $S_y/D \geq 4$  では独立した形状を示すようになる。

以上に示した円柱間隔の効果は、本実験条件に対して成り立つものであって、水理条件が異なれば当然間隔効果も定量的に異なったものとなることが予想される。

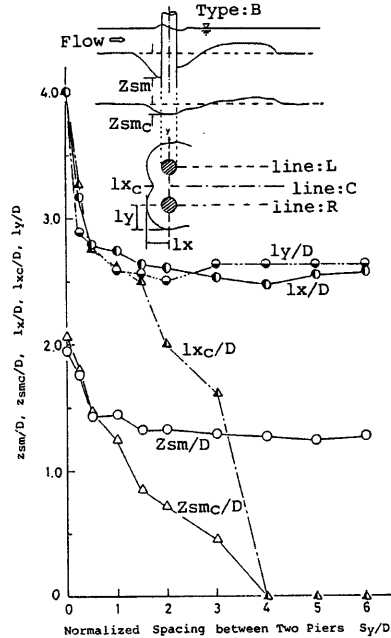


Fig. 18 Relation between bed configuration and dimensionless spacing  $S_y/D$  (Type: B).

斜配列に関して配列角度  $\theta$  と最大洗掘深との関係を検討したものが Fig. 19 である。いずれの配列間隔 ( $S/D=2, 3, 4$ ) においても  $\theta$  がある程度以上の値 ( $30\sim 40^\circ$ ) になると後円柱での最大洗掘深  $z_{sm2}$  は前円柱のそれ ( $z_{sm1}$ ) を上回っていることが注目される。これは、前円柱にぶつかり流向を変えた流れが後円柱前面に衝突し、後円柱前面における洗掘を促進したためであって、そこでの馬蹄渦は前円柱でのものより強くなっていることが示唆される。この結果より、多円柱橋脚では間隔とともに流向が重要な要素となることがわかる。

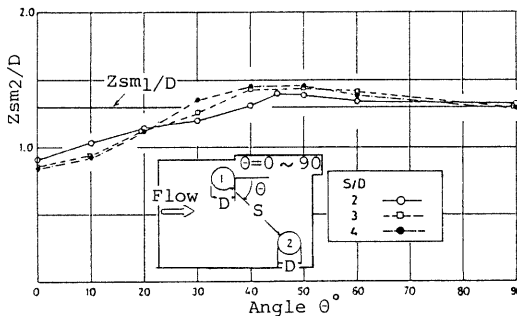


Fig. 19 Relation between dimensionless scour depth  $z_{sm}/D$  and angle  $\theta$  (Type: C).

## 5. おわりに

本研究では、河床波の形成されない静的洗掘状態を対象として、単円柱橋脚における洗掘深の経時変化特性を実験によって把握し、普遍的な経時変化式を求めることを一つの目的としたが、各種パラメータの影響を実験的に決めなければならず実験資料の不足から十分な検討がなされていないことが残された問題である。また、多円柱橋脚を数種の配列に配置した場合の洗掘特性についても実験的検討を加え、各配列方式における間隔等の影響がある程度明らかにされたが、洗掘現象と流況特性との関連に関しては検討されておらず今後の課題としたい。

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竹尾和彦氏（現矢作建設）に対して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Anderson, A. G.: discussion of "Sediment Transportation Mechanics; Erosion of Sediment", by the Task Force on Preparation of Sedimentation Manual, Proc. ASCE, Vol. 89, No. HY6, 1963, pp. 277-281.
- 2) Rouse, H.: Engineering Hydraulics; Sediment Transportation, John Wiley and Sons, 1965.
- 3) Breusers, H. N. C.: Time Scale of Two Dimensional Local Scour, Proc. 12th Congress of IAHR, Vol. 3, 1967.
- 4) Laursen, E. M.: Observation on the Nature of Scour, Proc. 5th Hydr. Conf., Bulletin 34, University of Iowa, 1952, pp. 180~181.
- 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, 1974, pp. 725-751.
- 6) Thomas, Z.: An Interesting Hydraulic Effect at Local Scour, Proc. 12th Congress of IAHR, Vol. 3, 1967, pp. 125-134.

- 7) Blaisdell, F. W., C. L. Anderson and G. G. Hebaus: Ultimate Dimensions of Local Scour, Proc. ASCE, Vol. 107, No. HY3, 1981, pp. 327-337.
- 8) Ahmad, M.: Experiments on Design and Behavior of Spur Dikes, Proc. Minnesota International Hydr. Convention, 1953.
- 9) Gill, M. A.: Erosion of Sand Beds around Spur Dikes, Proc. ASCE, Vol. 98, No. HY9, 1972, pp. 1587-1602.
- 10) Carstens, M. R.: Similarity Laws for Localized Scour, Proc. ASCE, Vol. 92, No. HY3, 1966, pp. 13-36.
- 11) Breusers, H. N. C., G. Nicollet and H. W. Shen: Local Scour around Cylindrical Piers, Jour. Hydr. Res., Vol. 15, No. 3, 1977, pp. 211-252.
- 12) 石原藤次郎：橋脚による河床洗掘に関する実験的研究，土木学会誌，第24巻，第1号，1938，pp. 23-55.
- 13) 石原藤次郎：橋脚による河床洗掘に関する実験的研究（第2編），土木学会誌，第28巻，第9号，1942，pp. 787-821.