

橋脚周辺の動的洗掘について

道上 正規*・鈴木 幸一*・片岡 幸三**

(1982年6月11日受理)

Local Scour with Continuous Sediment Motion around Bridge Piers

by

Masanori MICHIEU, Koichi SUZUKI and Kozo KATAOKA

(Received June 11, 1982)

The local scour depth around a bridge pier with continuous sediment motion varies with the movement of sand waves near the pier. The object of the present study is to investigate experimentally the effect of sand waves on the characteristics of the local scour with continuous sediment motion around a cylindrical bridge pier and to propose an equation to estimate the maximum scour depth.

1. ま え が き

橋脚周辺部における局所洗掘現象は、従来数多くの研究者の興味をひき、最大平衡洗掘深の予測に関して多くの提案式が示されている¹⁾。これらの洗掘深推定式は、各研究者が行なった実験あるいは集めた資料の範囲でとくに現象を支配する要素を選び出して決定されたものであるが、適用範囲が不明確なためお互いに相容れない推定式も存在する。Fig. 1²⁾は従来の推定式の一部と実測値を示したものであって、縦軸は最大平衡洗掘深 Z_S を橋脚径 D で無次元化したものであり、横軸は水深 h_0 を D で無次元化したものである。また、実測値は clear water scour (静的洗掘) のデータと scour with continuous sediment motion (動的洗掘) のデータの区別がわかるようにしてある。実測値は広範にばらついていて、推定式については Laursen 式にみられるように全実測値を包括して過大に洗掘深を見積るものや、Tarapore 式のように過小に見

積るものなどがある。これらの推定式はごく一部であって、これらの他に、小川³⁾や吉川ら⁴⁾のように Z_S/h_0 がフルード数 ($F_r = V_0/gh_0$, V_0 : 平均流速, g : 重力加速度 h_0 : 水深) の関数であるとするものや、砂粒径の要素に重点を置いた Carstens⁵⁾の推定式など数多くの提案式がある。このような最大平衡洗掘深の推定式がお互いに必ずしも一致しなかったり時には矛盾したりする原因は主に最大平衡洗掘深の認識の違いにあると考えられる。すなわち、主に、

- 1) 静的洗掘と動的洗掘との明確な区別
- 2) 静的洗掘の最大平衡洗掘深の定義
- 3) 動的洗掘深の時間的変動の影響

の3点が必ずしも十分考慮されていなかった資料に基づく解析がなされてきたためと考えられる。1)と2)に関連する静的洗掘深の時間変化特性に関しては、既に著者の一人⁶⁾も検討しているので、本報告では3)の動的洗掘深の

* 土木工学科 Department of Civil Engineering

** 津山市役所 Tsuyama Municipality

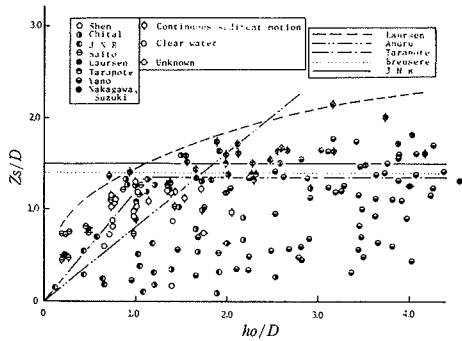


Fig. 1 Relationship between nondimensional scour depth Z_s/D and nondimensional flow depth h_o/D .

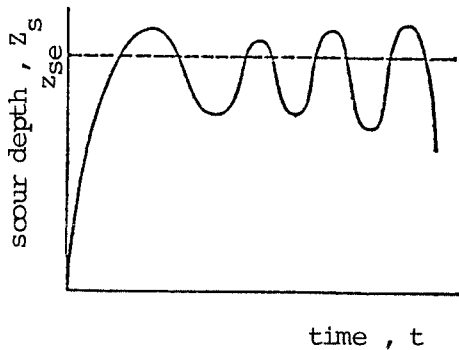


Fig. 2 Schematic figure of scour depth variation with time.

変動特性について考察する。動的洗掘深 Z_s の時間 (t) の変動状態を模式的に示したものが Fig. 2 である。動的洗掘状態では河床全体の砂が移動しているため、流れの状態によっては大きな波高の河床波が形成されその移動の影響を受けて洗掘深 Z_s も時間的に変化する。動的洗掘時における平衡洗掘深 Z_{se} は Z_s の時間的平均を示したものであって、 Z_s の最大値は Fig. 1 に示される平衡洗掘深より河床波の状態によってはかなり大きいことも考えられ、従来言われているように静的洗掘から動的洗掘への過渡期の洗掘深が最大で最も危険であるというは必ずしも正しくないかもしれない。橋脚周辺部の動的洗掘状態における洗掘深の変動については Shen ら⁷⁾ が定性的には検討しており、洗掘深は河床波の波高程度の幅で変動することを示している。また、最近 Jain⁸⁾ は、動的洗掘深に関する詳細な実験結果を報告しており、動的洗掘状態でも洗掘深は接近流速によって変化するというを示し、

従来の研究結果と異なる結論を述べている。しかし、Jain の実験データを検討すると従来の Z_s の平均値である平衡洗掘深ではなくて、時間的に変動している Z_s の最大値について論じたものであって Jain の主張は妥当でないと思われる。いづれにしても、動的洗掘深はどのような変動特性を有しており、また橋脚が最も危険な状態はどのような水理条件で生じるかを明らかにさせる意味でも、動的洗掘に関してはさらに検討する必要があると考える。

2. 動的洗掘特性に関する実験的考察

2.1 実験の概要

実験に用いた水路は、長さが 20 m で幅が 0.5 m の長方形断面水路であり、上流端にエレベーター式給砂装置がついている。この水路床全体に Fig. 3 に示すような粒径加積曲線を有する 50% 粒径 $d_{50} = 0.61$ mm のほぼ均一な砂を約 20 cm の厚さに均一に敷き、所定の給砂量、流量のもとに通水し、約 2 時間毎に河床縦断形状と水面形を測定し、河床勾配と水面勾配とが等しくなり流れが平均的には定常状態に達したことが確認できるまで通水を続ける。流れが定常状態に達した後、下流端から堰上げることによって河床を乱さないように通水を止め、河床の縦断形状を自動測深器で測定した後、水路のほぼ中央(下流端から 8 m 地点)に直径 $D = 5$ cm の円柱模型橋脚を設置する。再び通水して、洗掘深の時間的な変化、河床縦断形状の時間的な変化を測定する。実験条件は Table. 1 に示すとおり、単位幅流量 q および単位幅給砂量 q_s を適宜

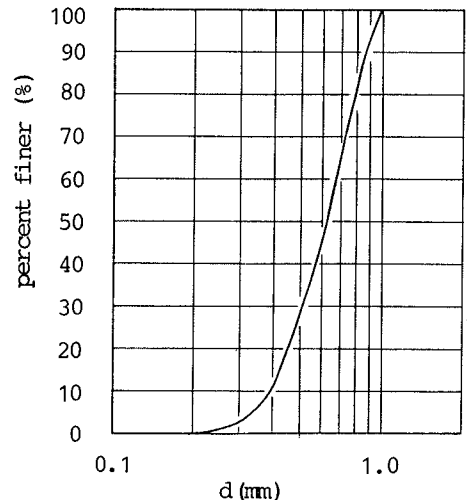


Fig. 3 Particle-size accumulation curve of used sand.

Table 1 Experimental conditions.

Run No.	B (cm)	q (cm ² /s)	q _s (cm ² /s)	h ₀ (cm)	u ₀ (cm/s)	i ₀ (x10 ⁻²)
1	50	400	0.222	8.72	45.9	0.286
2	50	400	0.167	9.89	40.4	0.187
3	50	400	0.111	9.58	42.0	0.221
4	50	285	0.0413	8.59	33.2	0.179
5	50	320	0.167	7.87	40.7	0.173
6	50	240	0.167	7.48	32.1	0.241

変えた Run 1 から Run 6 までの 6 ケースである。表中、 h_0 は平均水深、 u_0 は断面平均流速、 i_0 は河床勾配であってこれらは全て模型橋脚を設置する前の状態についてのものである。

2. 2 洗掘深の変動特性

Fig. 4 は洗掘深の時間的変化の一例を Run 6 について示したものであって、図中○印は橋脚上流端河床での洗掘深を、また●印は橋脚側面河床での洗掘深を示している。この図に示す動的洗掘の場合、静的洗掘時にみられるように橋脚周辺で場所的（○印と●印）に洗掘進行特性が異なるというようなことはない。また、ごく短時間のうちに動的平衡洗掘深 Z_{se} に達し、洗掘深は以後、こ

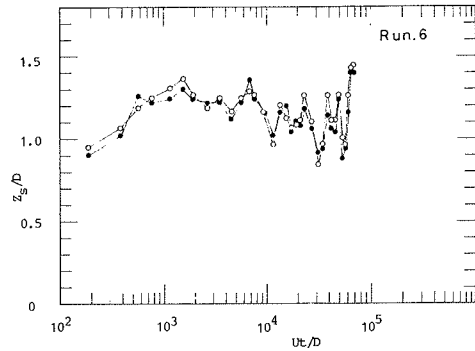


Fig. 4 Variation of scour depth with time.

の Z_{se} を中心に変動している。 Z_{se} に達した後の洗掘深の変動および橋脚上下流の各場所での河床高の時間変動のスペクトル図の一例を示したのが Fig. 5 (a), (b) である。図中、太い実線は橋脚上流端河床 ($x = 0.0$ m) の洗掘深の変動についてであり、 x は橋脚上流端からの流下方向距離である。(a) 図に示す橋脚の上流側 0.5 m および 1.0 m 地点の河床変動特性と洗掘深の変動特性を比較すると、まず、洗掘深の変動の大きさは、上流地点に比してかなり小さいことがわかる。また、 $x = -1.0$ m 地点でみられるような卓越周波数 ($\approx 0.12 \text{ min}^{-1}$) は洗掘深の変動で

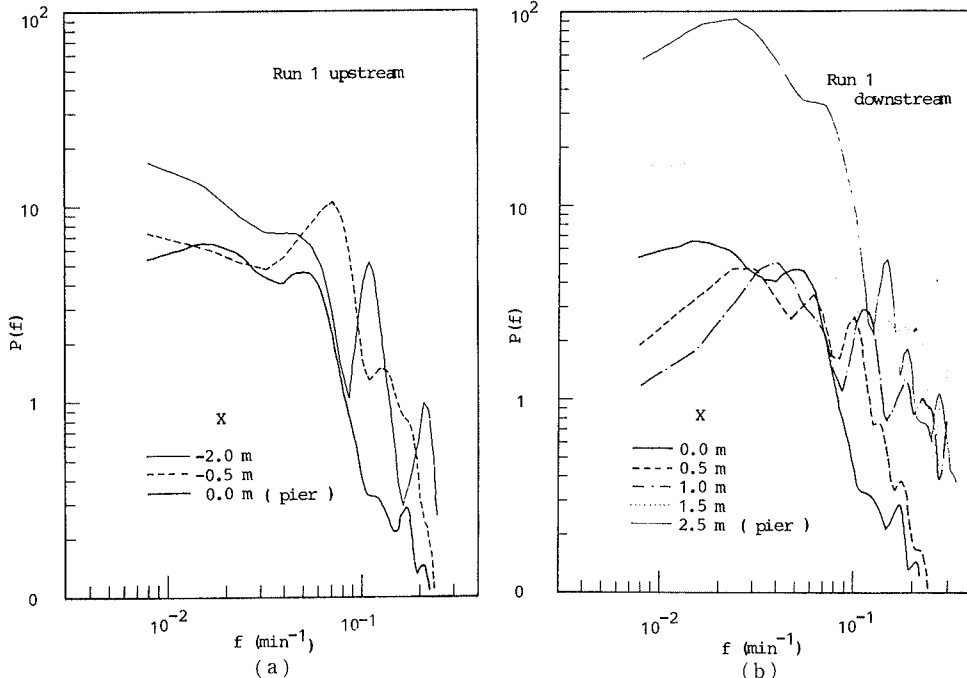


Fig. 5 Power spectral densities of bed level variations with time.

は認められなくなっているのがわかる。このことは、橋脚の影響のない場所の河床波の移動に伴う河床高の変動の比較的高波数成分は、そのまま洗掘深の変動と対応しているのではなく、かなり減衰した形で洗掘深の変動に表われているということになる。ただ、低波数成分は比較的变化していない。一方、橋脚の下流側についての(b)図をみると、後流の堆積域である $x=0.5$ mおよび 1.0 m地点の河床高の変動の大きさは、 $x=0.0$ m地点の洗掘深の変動の大きさとほとんど同じで、比較的小さいことが認められる。ただ、上流の一樣流場 ($x=-1.0$ m) 地点で認められた卓越周波数 ($\approx 0.12 \text{ m}^{-1}$) がやや認められる。堆積域の下流側地点である $x=1.5$ mおよび $x=2.5$ mでの変動は上流の一樣流場のものに比してもかなり大きくなっていることがわかる。

以上のことより、橋脚上流端の洗掘深の変動は、河床波の低波数すなわち波長の大きいものには影響されやすいが、高波数すなわち波長の小さいものにはほとんど影響を及ぼされないこと、橋脚の存在によって下流側河床の変動は、橋脚近くの堆積域を除いて、かなり大きくなることなどが明らかとなった。

Fig. 6は、橋脚上下流部での河床変動の標準偏差 σ_z の大きさを比較したものであり、橋脚上流端の洗掘深の変動の標準偏差 σ_s で無次元化して表わしている。また、Fig. 7は橋脚上流端の洗掘深の変動の分布特性を調べたものであるが、ほぼ正規分布をしていると考えられる。

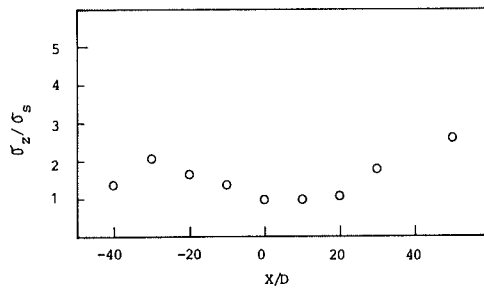


Fig. 6 Longitudinal distribution of standard deviation of bed level change with time.

2. 3 橋脚周辺の河床形状

Fig. 8は、Run1について水路中央河床の縦断形状を示したものであるが、河床高は平衡洗掘深 Z_{se} で無次元化してある。橋脚の上流側の洗掘孔斜面は、ほぼ砂の水中安息角の勾配であって、橋脚に河床波の峰が接近しても谷が接近してもほとんど変化しないといわゆる時間的に相似形を保っているといえよう。一方、橋脚の下流側の

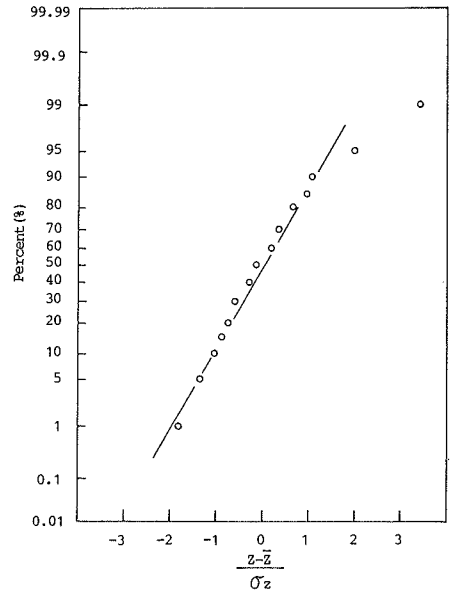


Fig. 7 Fitting of distribution of scour depth variation to the normal distribution.

洗掘孔から堆積域へかけての斜面も、その勾配は約 20° と上流側斜面勾配より小さいものの、時間的にほぼ相似であることが認められる。しかし、それより下流側の堆積域形状は、静的洗掘時とは異なって河床波の影響を受けるため、時間的に相似ではない。

橋脚周辺の河床形状の変化と洗掘深の変化とがどのように対応しているかを検討したものが、Fig. 9および Fig. 10である。すなわち、円柱橋脚上流端の洗掘深 Z_s の時間的変動を示す Fig. 9の番号を付した時刻における橋脚周辺の河床形状を示した例が Fig. 10(1)~(7)である。Fig. 9の No.1, 2および No.6のように洗掘深が比較的大きくなる時には、Fig. 10(1), (2)および(6)のように橋脚の直上流部には比較的高い河床波の峰があり、かつ橋脚上流斜め近傍に谷が存在している状態であることがわかる。また、観察によるとこの谷に沿って比較的強い流れが橋脚に衝突するように流れるのが認められた。つぎに、Fig. 9の No.4および No.7のように洗掘孔が若干埋戻され洗掘深が小さくなったときは、Fig. 10(4)および(7)にみられるように比較的大きな河床波の峰が橋脚を通過した後である。とくに、水路全幅にわたって形成された大きな河床波の峰が橋脚を通過するときには、橋脚の上流側から洗掘孔に大量の土砂が供給され洗掘深がとくに小さくなることが観察された。また、洗掘深が平衡洗掘深 Z_{se} 近

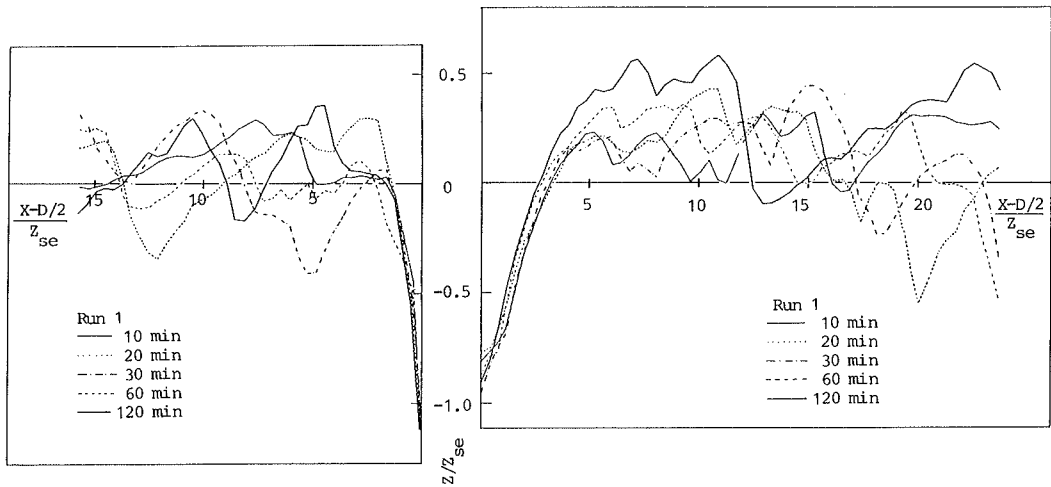


Fig. 8 Longitudinal bed profiles nondimensionalized by equilibrium scour depth up- and down-stream regions of a pier.

傍であり変動しないとき (Fig. 9 の No.3 および No. 5) には, Fig. 10(3)および(5)に示されているように橋脚周辺のごく近傍に大きな河床波は存在しなくて, 洗掘土砂量と上流側からの給砂量とがほぼ釣り合っていると見える。以上のように洗掘深は河床波の移動による影響を受けて変動する特性が定性的に明らかにされた。ただ, Fig. 10 にみられるように, 洗掘孔形状は時間的にほとんど変

化せずほぼ逆円錐形を保っている。また, 橋脚の上流側の河床波の平面形状は橋脚の存在によって著しく変形させられるようなことは認められない。一方, 橋脚下流側の河床形態は橋脚の影響を強く受ける。すなわち, 上流側で二次元的な河床波は橋脚によって二つに分けられて若干三次元性が増す一方, 上流側で著しく三次元的な河床波は橋脚通過後, 比較的固定している後流堆積域の影

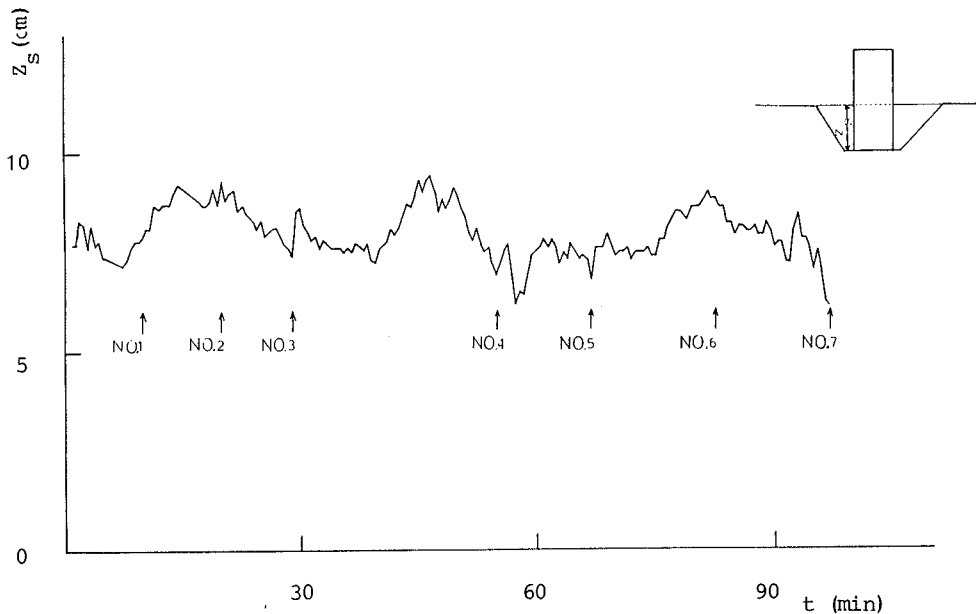


Fig. 9 Variation of scour depth with time.

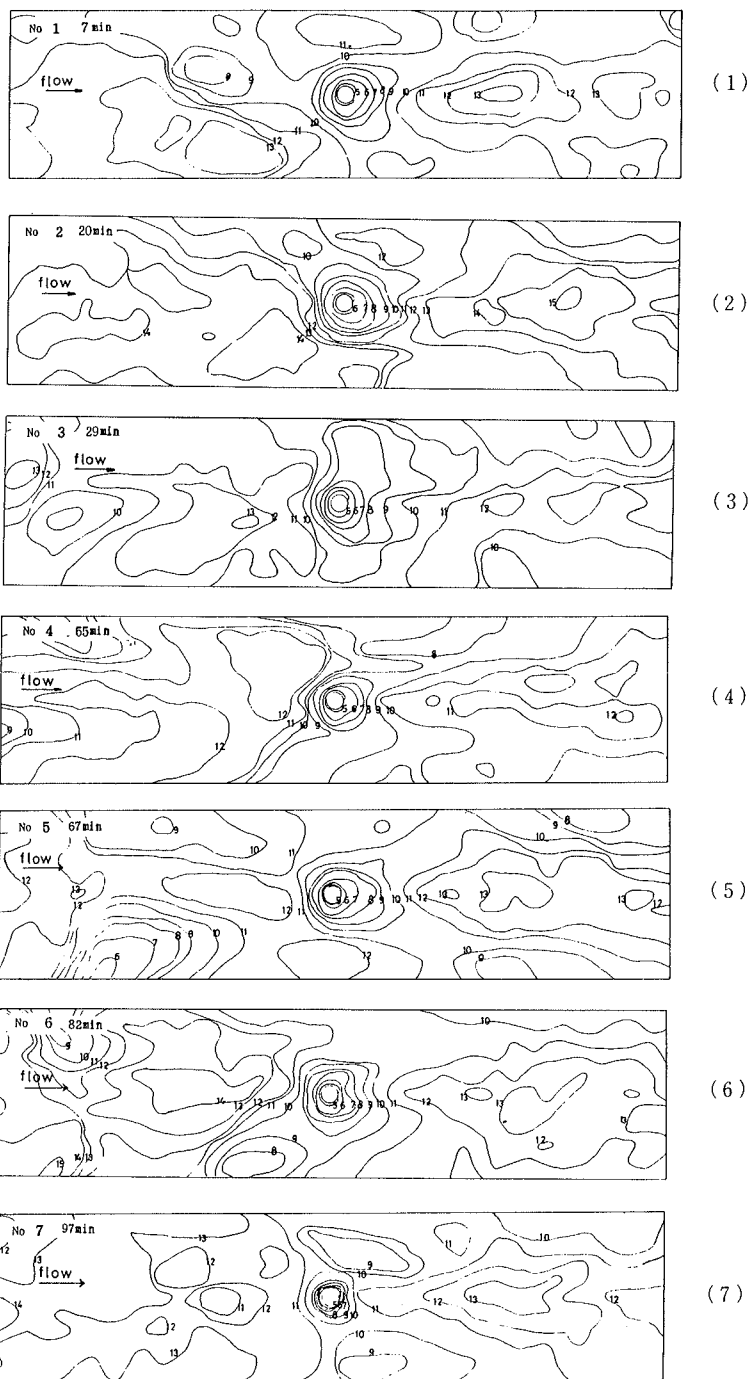


Fig. 10 Bed configurations around a bridge pier.

響を受けて形が整えられる傾向が認められる。

3. 最大洗掘深の評価

ここで述べる最大洗掘深 Z_{sm} は動的平衡洗掘深 Z_{se} に最大変動量を加えたものであるので、まず平衡洗掘深と洗掘深の変動特性を別々に論じた後に最大洗掘深の評価を行なう。

3.1 平衡洗掘深

Fig. 11 は洗掘深 Z_s と橋脚径 D の比 Z_s/D と土砂数 $N_s (=V_0/\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd})$, σ および ρ :それぞれ砂および水の密度, d :砂粒径)の関係を示したもので、Charbertらの実験結果をCarstens⁵⁾がまとめたものであるが、本実験でのデータも加えてある。図中の曲線はCarstersによる推定式、

$$\frac{Z_s}{D} = 0.546 \left(\frac{N_s^2 - 1.64}{N_s^2 - 5.02} \right)^{5/6} \dots\dots\dots (1)$$

であって、 $N_s > 2.24$ の条件下で成立する。 $N_s > 2.24$ の動的洗掘状態のデータをみると Z_s/D の値は同一の N_s の値に対してもかなりの幅で変化していることが認められる。この原因としては、河床波の影響によって変動する洗掘深をどのような河床状態のとき測定したかによるところが大きいと考えられる。しかし、本実験のデータをも含めて、平均的には Z_s/D は N_s によって系統的に変化せずほぼ一定の値をとるようであり、 $N_s > 2.24$ のデータのみをみると Z_s を平均した平衡洗掘深 Z_{se} は、

$$\frac{Z_{se}}{D} = 1.25 \dots\dots\dots (2)$$

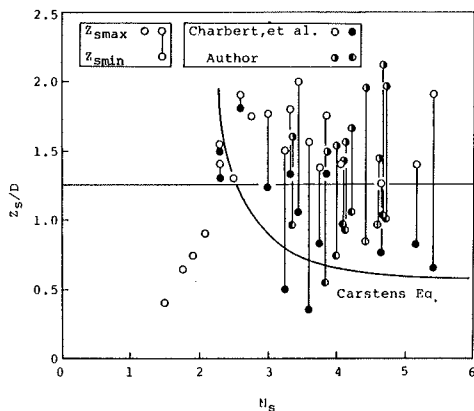


Fig. 11 Relationship between nondimensional scour depth Z_s/D and sediment number N_s .

と表わせるようである。また、Carstensの式は Z_s/D の最小値をほぼ示している。

3.2 河床波高

芦田・道上⁹⁾の河床形態領域区分法によれば、流れのフルード数 $F_r (=V_0/\sqrt{gh_0})$ が0.8以上であればupper flow regime, F_r が0.8より小さければlower flow regimeと呼ぶ河床形態となり、lower flow regimeの中でも砂粒レイノルズ数 $Re (=u_*d/\nu)$, u_* :摩擦速度, ν :水の動粘性係数)が10以下であれば砂漣, 10より大きければ砂堆河床となる。本実験の条件を用いてこれらの条件を検討すると、河床形態は砂堆である。砂堆の平均波高 H は、Yalin¹⁰⁾によれば、水深 h_0 , 河床砂の限界掃流力 τ_c および河床面せん断応力 τ_0 によって、

$$\frac{H}{h_0} = k \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_0} \right) \dots\dots\dots (3)$$

で表わされる。ここに、 k は定数で、Yalinは $k=1/6$ としたが、実験的には $1/6$ から $1/2$ までの範囲をとるといわれている¹¹⁾が本実験データでは $k=1/3$ であった。また、河床高変動の標準偏差 σ_z と平均波高 H との間には、

$$H \approx 2\sigma_z \dots\dots\dots (4)$$

の関係があることが芦田・奈良井¹²⁾によって示されている。

3.3 最大洗掘深

最大洗掘深 Z_{sm} は平衡洗掘深 Z_{se} に河床波の影響による最大変動量に加わったものと考えられる。先に述べたように橋脚上流端河床の洗掘深および橋脚の影響のない上流の河床高の時間的変動の分布はほぼ正規分布である。また、Fig. 6からもわかるように上流側の河床変動の大きさは洗掘深の変動にそのままではなくかなり減衰した形で表われており、上流側の一様流での河床変動の標準偏差 σ_z は洗掘深変動の標準偏差 σ_s よりかなり大きく、実験的には、

$$\sigma_s \approx 0.6\sigma_z \dots\dots\dots (5)$$

となっている。いま、洗掘深の変動が正規分布に従うとすると、洗掘深は平衡洗掘深 Z_{se} から $\pm 3\sigma_s$ の間に99.7%の確率で存在する。したがって、ここでは、最大洗掘深 Z_{sm} を99.7%の確率でそれを越えない洗掘深であると定義すると、

$$Z_{sm} = Z_{se} + 3\sigma_s \dots\dots\dots (6)$$

と表わせる。(6)式に(5), (4), (3)および(2)式を代入し、橋

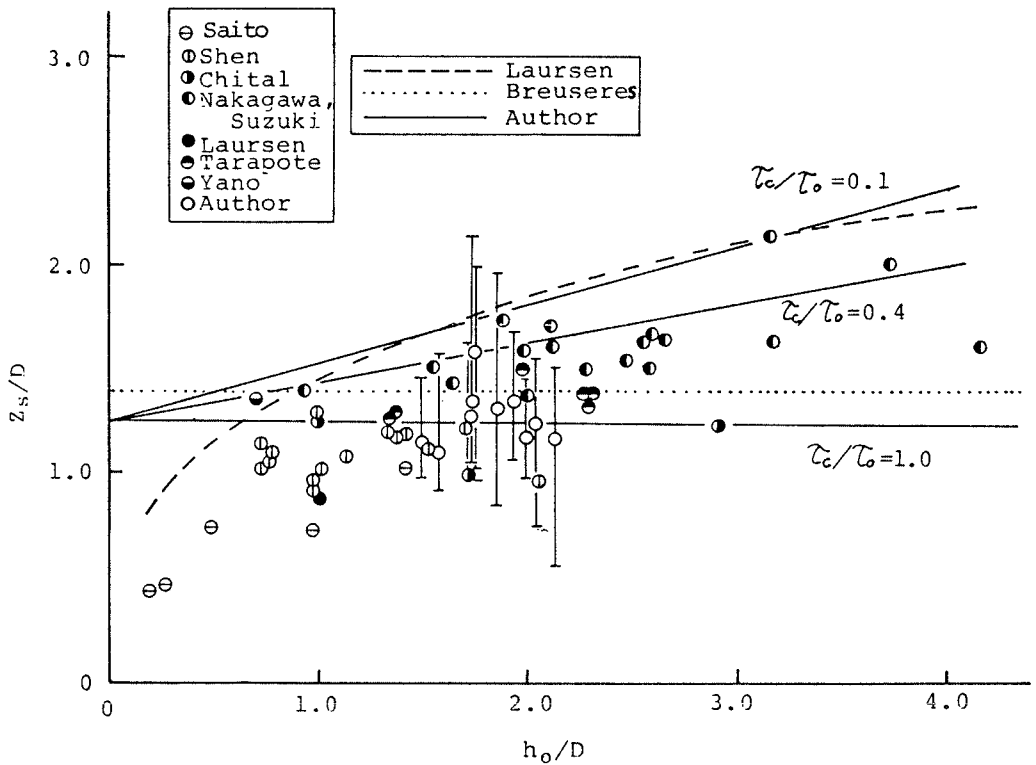


Fig. 12 Relationship between nondimensional scour depth Z_s/D and nondimensional flow depth h_o/D .

脚径 D で無次元化すると、

$$\frac{Z_{sm}}{D} = 1.25 + 0.3 \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_0} \right) \frac{h_0}{D} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。

Fig. 12 は、(7) 式の関係を実験データとともに示したものである。 $\tau_c/\tau_0 = 0.1$ の場合は全ての実測値を包絡するようであり、破線で示す Laursen の洗掘深推定式に近い。ただし、図中のデータは本実験の著者のデータを除いては平衡洗掘深に近いものが示されており必ずしも本研究で定義した最大洗掘深ではない。本実験では、 $\tau_c/\tau_0 = 0.17 \sim 0.36$ であるが、これらの最大洗掘深がわかっているデータを見ると、(7) 式によって最大洗掘深を推定する妥当性がある程度認められる。

4. あとがき

本研究は、円柱橋脚周辺における動的洗掘特性を実験的に明らかにしようとしたものであって、とくに河床波の移動特性と洗掘深の変動特性との関係について検討し

た。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 洗掘孔形状は静的洗掘時と同様、時間的に相似形を保っており逆円錐形となっているが、橋脚後流域の堆積形状は静的洗掘時と異なり河床波の影響で三次元的に乱れるため時間的相似性はない。
- 2) 洗掘深の変動の大きさは、橋脚の影響のない上流河床高の変動の大きさよりかなり小さく、標準偏差で比較すると $\sigma_s \approx 0.6 \sigma_z$ である。ここに、 σ_s および σ_z はそれぞれ洗掘深および河床高変動の標準偏差である。
- 3) 洗掘深は橋脚周辺を通過する河床波の影響をうけて、河床波の峰が接近したとき洗掘深は大きくなり、それが通過したとき小さくなる。河床波の大きさが不規則であり、河床波高の減衰した形で洗掘深が変動するがその分布は正規分布をしている。
- 4) 最大洗掘深 Z_{sm} を 99.7% の確率でそれを越えない洗掘深であると定義し、 Z_{sm} を推定する式、

$$\frac{Z_{sm}}{D} = 1.25 + 0.3 \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_0} \right) \frac{h_0}{D}$$

を提案した。ここに、 D は橋脚径、 τ_c は砂の移動限界掃流力、 τ_0 は一様流での掃流力、 h_0 は一様流の水深である。

参 考 文 献

- 1) Breusers, H. N. C., Nicollet, G., Shen, H. V. : Local Scour Around Cylindrical Pier, Journal of Hydraulic Research, Vol. 15, No. 3, 1977, pp.211—252.
- 2) 中川博次・鈴木幸一：橋脚による局所洗堀の予測に関する研究, 京大防災研究所年報, 第17号B, 1974, pp.725—751.
- 3) 小川芳昭：橋脚近くの河床変動について, 土木試験所報告, No.42, 1966.
- 4) 吉川秀夫・福岡捷二・岩間 汎・曾久川久貫：橋脚の洗堀ならびにその防止に関する考察, 土木学会論文報告集, 第194号, 1971, pp.83—90.
- 5) Carstens, M. R. : Similarity Laws for Localized scour, Proc. of ASCE, Vol. 92, HY3, 1966, pp.13—36.
- 6) 鈴木幸一：円柱橋脚周辺の静的洗堀に関する研究, 土木学会論文報告集, 第313号, 1981, pp.47—54.
- 7) Shen, H. W., Schneider, V. R., Karaki, S. : Local Scour around Bridge Piers, Proc. of ASCE, Vol. 95, HY6, 1969, pp.1914—1938.
- 8) Jain, S. C. Fischer, E. E. : Scour Around Bridge Piers at High Flow Velocities, Proc. of ASCE, HY11, 1980, pp.1827—1841.
- 9) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, 1972, pp.59—69.
- 10) Yalin, N. S. : Geometrical Properties of Sand Waves, Proc. of ASCE, Vol. 90, HY5, 1974, pp.105—116.
- 11) 土木学会・水理委員会・移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会：移動床流れにおける河床形態と粗度, 土木学会論文報告集, 第210号, 1973, pp.65—91.
- 12) 芦田和男・奈良井修二：河床形態の変動特性に関する研究 —その統計的構造について—, 京大防災研究所年報, 第12号B, 1969, pp.449—462.