

橋脚周辺の洗掘深に及ぼす河床波の影響

Influence of Sand Waves on the Local Scour Depth around a Bridge Pier

鳥取大学工学部 正員 鈴木 幸一
鳥取大学工学部 正員 道上 正規
津山市 正員 片岡 幸三

1. まえがき

橋脚から離れた一様流場での河床砂の移動のある、いわゆる橋脚周辺の動的洗掘(scour with cotinuous sediment motion)は、砂の移動が橋脚周辺に限られる静的洗掘(clear water scour)と異なって河床波の影響を受ける。すなわち、河床波の移動に伴って局所洗掘深は時間的に変化する。図-1にみられるように、静的洗掘では洗掘の進行は比較的遅く最終的な静的平衡状態は必ずしも明確ではないため工学的には洗掘深の時間的な変化特性を明らかにすることが重要であるが、動的洗掘においては平衡洗掘

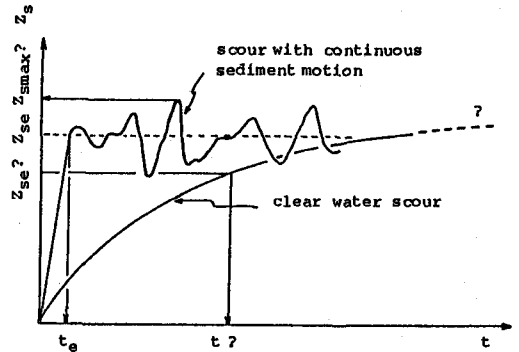


図-1 洗掘深の時間変化特性

深にはごく短時間に到達するため洗掘深の時間変化はあまり問題とならず、むしろ動的平衡洗掘深 Z_{se} に到達した後の洗掘深 Z_s の変動の大きさが問題となり最大洗掘深 Z_{max} が Z_{se} よりどの程度大きくなりうるかを検討することが必要となってくる。従来、平衡状態の洗掘深の推定に関して数多くの式が提案されていて、^{1), 2)} これらの推定式による結果が必ずしも一致しなかったり時には推定式の特性が矛盾する場合もあった原因は主に平衡洗掘深の認識の違いにあるものと考えられる。すなわち、1) 平衡洗掘深の確認が困難な静的洗掘深の時間変化特性 2) 動的洗掘深の平衡洗掘深からの変動特性 の2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)については著者ら³⁾もモデル解析によってその基本特性をある程度明らかにしたので、本研究では 2) に関して洗掘特性が河床波(砂堆)の移動によってどのように影響を受けるかを実験的に明らかにするとともに、最大洗掘深 Z_{max} を推定する方法についても検討する。動的洗掘における洗掘深の変動については Shen⁴⁾ が定性的には検討しており河床波高程度の幅で変動するとしている。また、最近では Jain⁵⁾ が動的洗掘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従来言われてきた結果と異なる結果を得ている。

2. 実験の概要

実験に用いた水路は長さが20mで幅が50cmの長方形断面水路であって、上流端にエレベーター式給砂装置がついている。この水路全体に図-2に示すような粒径加積曲線を有する50%粒径 d_{50} が0.6mmのほぼ均一粒径の砂を約20cmの厚さに均一に敷き、所定の給砂量、流量のもとに通水し、河床勾配と水面勾配とが等しい平衡河床を形成する。河床が平均的には平衡となったのを確認してから下流端を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測定した後、水路のほぼ中央(下流端から8m地点)に直径Dが5cmの円柱模型橋脚を設置する。再び通水して洗掘深、洗掘孔形状および河床縦断形状の時間的な変化を自動測深器によって測定する。実験条件は表-1に示すとおりであって、単位幅流量 q および単位幅給砂量 q_s を適宜変えたRun1からRun6までの6ケースについて実験

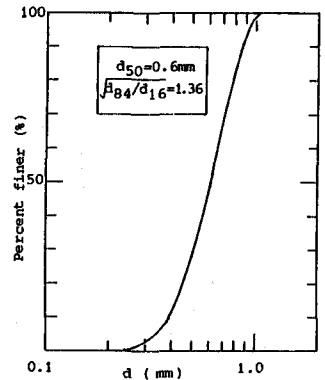


図-2 実験砂の粒径加積曲線

を行なったが、Run1 については実験の再現性をみるために同一条件で4回行なった。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様流状態についての値である。

3. 洗掘深の変動特性

図-3は洗掘深の時間的変化の一例をRun6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、●印は橋脚側面河床での洗掘深を示している。図からわかるように、静的洗掘時にみられるような橋脚周辺で場所的(○印と●印)に洗掘進行が異なるというような特性はない。ごく短時間に動的平行洗掘深 Z_{se} に達し、以後洗掘深はこの Z_{se} を中心にして変動している。 Z_{se} に達した後の洗掘深の変動および橋脚の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図-4である。図中、太い実線は橋脚上流端($x=0m$)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0.5mおよび2.0m地点の河床変動特性と洗掘深($x=0m$)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、 $x=-2.0m$ 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ことを示している。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図(b)をみると、後流の堆積域である $x=0.5m$ および $1.0m$ 地点の河床高変動の大きさは洗掘深($x=0m$)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。また、堆積域の下流側

表-1 実験条件

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

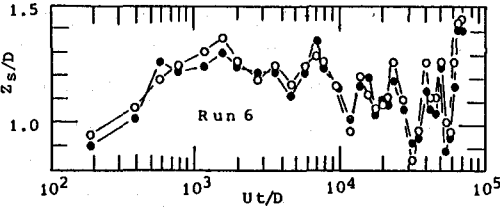


図-3 洗掘深の時間変化の例

図-4は河床高変動のスペクトル密度図。図(a)は橋脚の上流側(Upstream)のスペクトル密度 $P(f)$ (y軸, 対数スケール 0.1から100) 対周波数 f (x軸, 対数スケール 10^{-2} から 10^{-1} min^{-1})。太い実線は $x=0m$ (pier) の洗掘深の変動、点線は $x=-0.5m$ 、破線は $x=-2.0m$ の河床高変動を示す。図(b)は橋脚の下流側(Downstream)のスペクトル密度 $P(f)$ (y軸, 対数スケール 0.1から100) 対周波数 f (x軸, 対数スケール 10^{-2} から 10^{-1} min^{-1})。太い実線は $x=0m$ (pier) の洗掘深の変動、点線は $x=0.5m$ 、破線は $x=1.0m$ 、点線は $x=1.5m$ 、破線は $x=2.5m$ の河床高変動を示す。

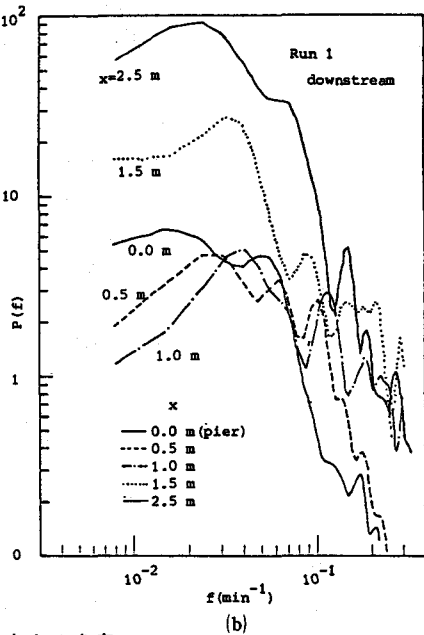
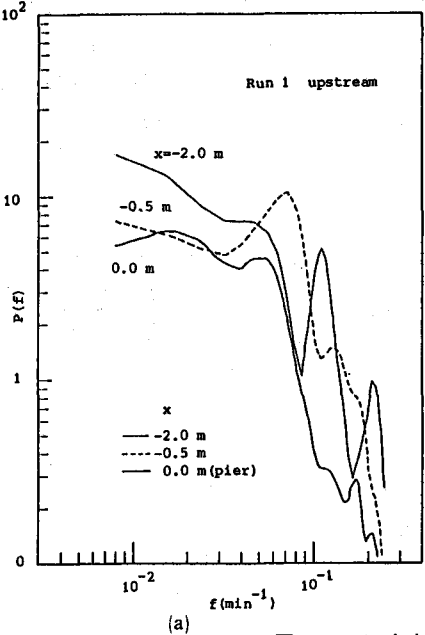


図-4 河床高変動のスペクトル密度

地点である $x=1.5m$ および $2.5m$ での変動は逆に、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。これらの各地点での河床高変動の大きさを標準偏差 σ_z で比較したのが図-5である。洗掘深 ($x=0m$) の変動の標準偏差 σ_s で無次元化しているが、橋脚の影響がほとんどない $x/D=-20, -30, -40$ のデータをみると σ_z/σ_s の値は2近くであり、後流堆積域より下流側では σ_z/σ_s が3近くまでなっている。また、図-6は橋脚上流端の洗掘深変動の分布特性を調べたものであるが、変動量はほぼ正規分布をしていると考えられる。

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るが、高波数すなわち波長の小さいものには影響を及ぼされないこと、変動の標準偏差は一樣流場のほぼ半分程度と小さく河床波の変動は減衰した形で現われることおよび変動量は正規分布に近いことなどが明らかである。

4. 橋脚周辺の河床形状と洗掘深

図-7はRun1について水路中央河床の縦断形状を平衡洗掘深 Z_{se} で無次元化して示したものである。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でいわゆる時間的に相似形を保っている。一方、橋脚の下流側の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の形状は静的洗掘時とは異なって、河床波の影響を強く受けるため時間的相似性は成立しない。

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図-8および図-9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図-8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図-9(1)~(7)である。図-8のNo.1, 2およびNo.6のように洗掘深が比

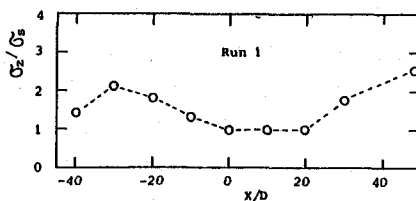


図-5 σ_z/σ_s の場所的变化の例

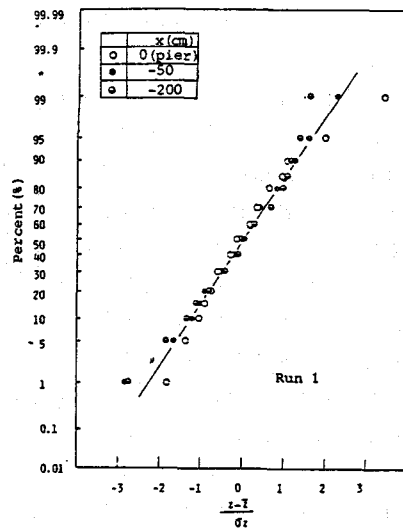


図-6 洗掘深変動の正規分布特性

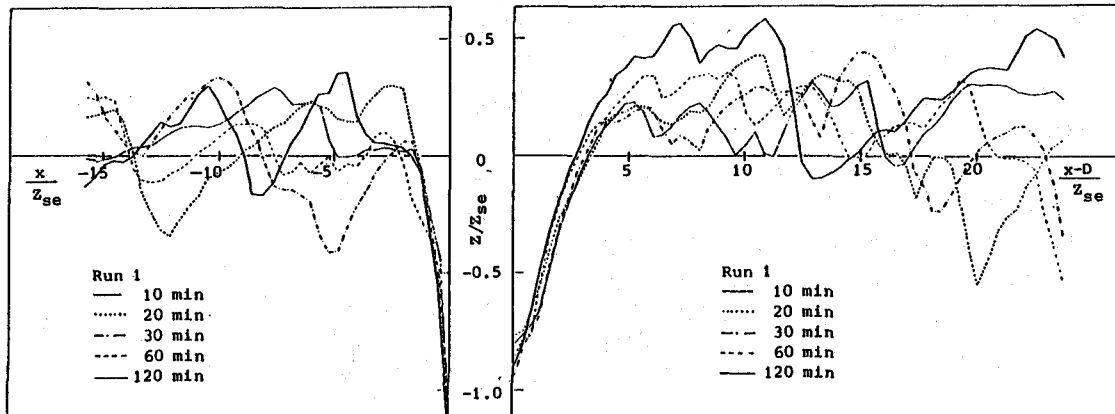


図-7 橋脚上下流の河床縦断形状

較的大きくなる時には、図-9 (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しかも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。観測によるとこの谷に沿って比較強い流れが橋脚に衝突するように存在することが認められた。つぎに図-8のNo.4およびNo.7のように洗掘孔が若干埋め戻されて洗掘深が小さくなったときは、図-9 (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} 近傍であり変動しない図-8のNo.3およびNo.5のような場合には、図-9 (3)および(5)に示されているように橋脚のごく近傍には大きな河床波は存在していなくて、洗掘土砂量と上流からの給砂量がほぼ釣り合っているといえよう。以上のことから、洗掘深が河床波の移動によって変動している様子が定性的には明らかとなったが、図-9にみられるように洗掘孔形状は時間的には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、橋脚下流部の河床形態は橋脚の影響を強くうける。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部を通過後比較的固定している後流堆積域の影響を受けて形が整えられる傾向が認められる。

なお、図-8および図-9はRun 1 について示した例で、図-9の河床高

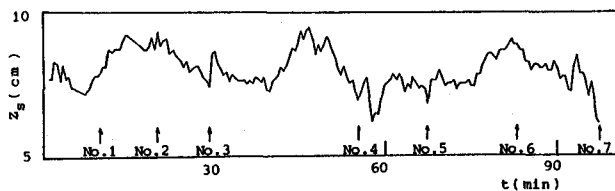


図-8 洗掘深の時間変化

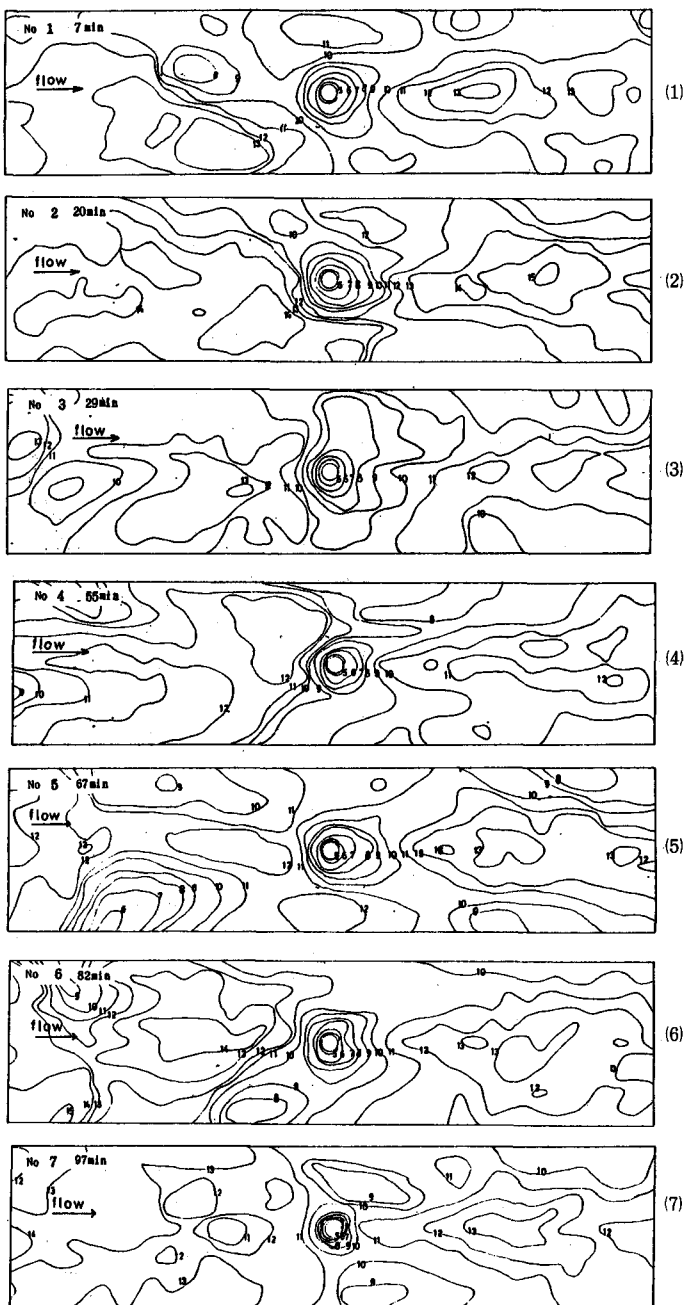


図-9 橋脚周辺の河床形状

はcmで示され11cmが元河床高である。

5. 最大洗掘深の推定法

最大洗掘深 Z_{sm} は動的平衡洗掘深 Z_{se} に河床波の影響による洗掘深の変動量で最大のものを加えたものである。ここでは、まず Z_{se} について従来提案されている推定式に基づいて考察し、洗掘深の最大変動量については、河床波高との関係を明らかにする。

平衡洗掘深 Z_{se}

図-10は洗掘深 Z_s と橋脚径の比 Z_s/D と土砂数 $N_s(U_o/\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd}, \sigma$:砂の密度, ρ :水の密度)の関係を示したもので、実験データには Charbert らの結果を Carstens⁹⁾がまとめたものも合わせて示している。

Z_s/D は同一の N_s に対してもかなりの幅で変化しているが、これ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で測定したかによるものである。しかし、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、 Z_s を平均した平衡洗掘深 Z_{se} は

$$Z_{se}/D = 1.25 \text{ ----- (1)}$$

と表わせるようである。なお、Breusers¹⁰⁾や Tarapore¹¹⁾も動的洗掘では Z_{se}/D は N_s によって変化せず、それぞれ $Z_{se}/D = 1.40$ および 1.35 であるとしている。

洗掘深の変動量

図-11は上流側の一樣流での河床高変動の標準偏差 σ_z と洗掘深変動の標準偏差 σ_s との関係を示したものであるが、上流側の河床高変動の大きさは洗掘深の変動の大きさにそのままではなくかなり減衰した形で表われており、ほぼ

$$\sigma_s \approx 0.6 \sigma_z \text{ ----- (2)}$$

となっている。

また、 σ_z と河床波の平均波高 Δ との関係を示すと、図-12のようであって、芦田・奈良井¹²⁾が実験的に示した

$$\Delta \approx 2 \sigma_z \text{ ----- (3)}$$

の関係はほぼ妥当であることがわかる。したがって、(2)式および(3)式から、洗掘深変動の標準偏差は河床波の平均波高の 0.3倍 程度であることになる。

河床波の平均波高は Yalin¹³⁾によれば、水深 h_o 、河床砂の限界掃流力 τ_c および河床面せん断応力 τ_o によって

$$\frac{\Delta}{h_o} = k \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_o} \right) \text{ ----- (4)}$$

で推定でき、 $k = 1/6$ であるとしているが、実験的には k は $1/6$ から $1/2$ までの範囲をとるといわれている。図-13に Δ/h_o と τ_c/τ_o の関係を示しているが、本実験では $k = 1/3$ 程度であることがわかる。

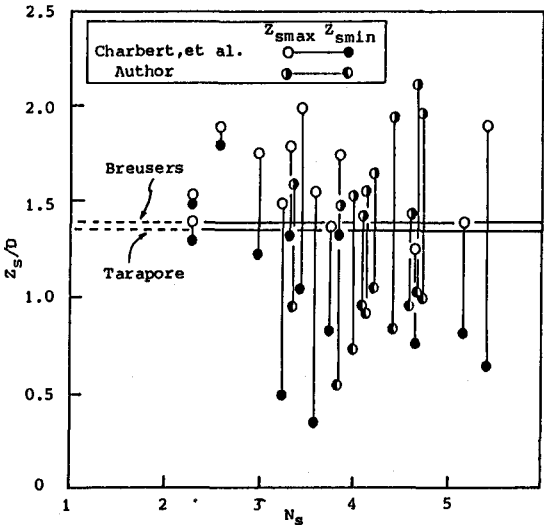


図-10 平衡洗掘深の推定

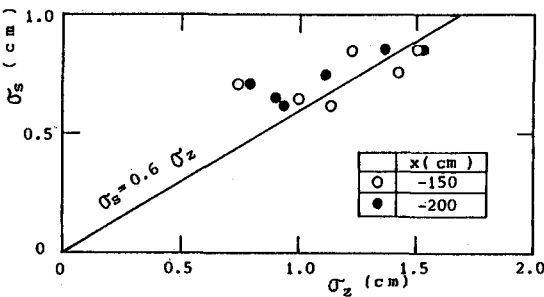


図-11 σ_s と σ_z との関係

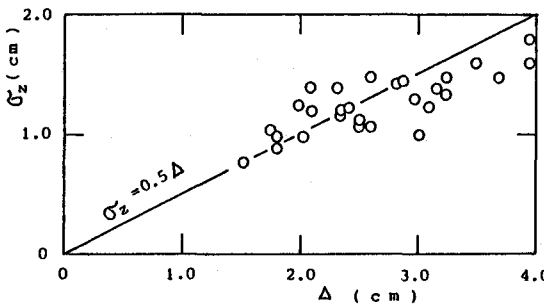


図-12 σ_z と Δ との関係

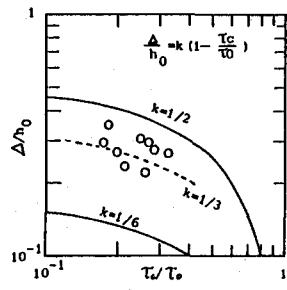


図-13 Δ/h_o と τ_c/τ_o の関係

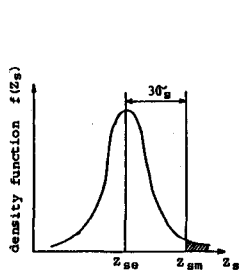


図-14 Z_{sm} の定義

最大洗掘深 Z_{sm}

洗掘深の変動が図-6に示したように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(図-14)。したがって、ここでは最大洗掘深 Z_{sm} を 99.9% の確率でそれを越えない洗掘深であると定義すると

$$Z_{sm} = Z_{se} + 3\sigma_s \quad \text{----- (5)}$$

と表わせる。(5)式に(1)、(2)、(3)および(4)式を代入し橋脚径 D で無次元化すると

$$\frac{Z_{sm}}{D} = 1.25 + 0.3 \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_0}\right) \cdot \frac{h_0}{D} \quad \text{----- (6)}$$

となる。

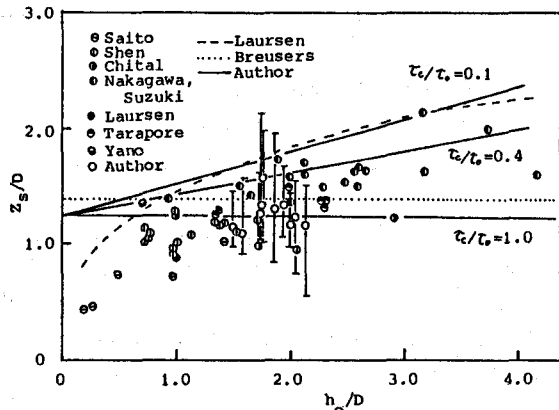


図-15 最大洗掘深の推定

図-15は(6)式の実験条件が明らかである動的洗掘の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であるので本研究で定義した最大洗掘深はこれらのデータよりやや大きい。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みると、(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。

6. 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受け、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。河床波高の減衰した形で洗掘深が変動するが、河床波の大きさが不規則であるために、洗掘深の変動も不規則でその分布はほぼ正規分布をしている。
- 4) 最大洗掘深 Z_{sm} を 99.9% の確率でそれを越えない洗掘深であると定義し、 Z_{sm} を推定する式を(6)式のように提案した。

参 考 文 献

- 1) Shen, H.W., Schneider, V.R., Karaki, S. : Local Scour around Bridge Piers, Proc. ASCE, Vol. 95, HY6, 1969.
- 2) Breusers, H.N.C., Nicollet, G., Shen, H.W. : Local scour around cylindrical pier, Jour. Hydraulic Research, Vol. 15, No. 3, 1977.
- 3) 鈴木幸一 : 円柱橋脚周辺の静的洗掘に関する研究, 土木学会論文報告集, 第313号, 1981.
- 4) Jain, S.C., Fischer, E.E. : Scour around bridge piers at high flow velocities, Proc. ASCE, HY11, 1980.
- 5) Carstens, M.R. : Similarity laws for localized scour, Proc. ASCE, Vol. 92, HY3, 1966.
- 6) Breusers, H.N.C. : Scour around drilling platforms, Bulletin, Hydraulic Research 1964 and 1965, IAHR, Vol. 9, 1966.
- 7) Tarapore, Z.S. : A theoretical and experimental determination of the erosion pattern, Ph.D Thesis, Univ. of Minnesota, 1962.
- 8) 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.
- 9) Yalin, N.S. : Geometrical properties of sand waves, Proc. ASCE, Vol. 90, HY5, 1974.