

円柱橋脚周辺の静的洗掘に関する研究

STUDY ON THE CLEAR WATER SCOUR AROUND
A CYLINDRICAL BRIDGE PIER

鈴木 幸一*

By Koichi SUZUKI

1. まえがき

橋脚周辺の局所洗掘現象は、流れと河床面形状との相互作用による複雑な現象であるが、その内部機構を説明しようとする、ある境界面形状に対応する局所流とその局所流に対応する砂の移動特性および非平衡状態の流砂量等の問題が明らかにされなければならないが、現在のところこれらの問題は現象が定常な場合にも不明な点が多く、まして非定常な流れと河床面の相互作用を微視的にとらえることは非常に困難である。このため、橋脚周辺の局所洗掘に関する従来の多くの研究は、おもに水理模型実験結果を次元解析する方法に頼っている。しかし、実験事実に基づいて、ごく巨視的に洗掘孔における流砂の連続式を考慮したモデルによって解析するという研究も数多く、そのおもなものを挙げると表-1のようである。

局所洗掘現象は上にも述べたように、流れ、砂の動きおよび洗掘孔形状の相互作用であり、それぞれに関するとらえ方が研究者によって異なっている。すなわち、洗掘を生ぜしめる流れに関しては、橋脚側面での縮流に注目したもの(Laursen¹⁾、齊藤²⁾、Gradowczyk³⁾、単に上流側の一様流速を代表させるもの(Carstens⁴⁾、橋脚周辺底部に起こる馬蹄型渦に注目するもの(Shen⁵⁾、Tanaka⁶⁾、吉川⁷⁾あるいは洗掘孔内での流れの拡散を考慮するもの(Tarapore⁸⁾)などがある。また、洗掘孔形

状に関しては、実験的事実に基づいて逆円錐形を仮定しているものがほとんどであり、砂の動きに関しては、各種の従来の平衡状態での流砂量式を修正して用いている。これらのモデルにおいては、流砂の洗掘孔内への、また洗掘孔からの出入がバランスするところでの洗掘深を求めることに主眼が置かれているため、洗掘深の時間的変化をおもに扱ったものは少なく、また clear water scour (以後、静的洗掘とよぶ)と scour with continuous sediment motion (以後、動的洗掘とよぶ)の洗掘特性の相違を明確にして解析したものも少ない。すなわち、上述の従来の多くのモデル解析では、洗掘領域全体を1つの流砂量式の適用範囲としているため、橋脚による流れの変化、渦の発生などを考慮した合理的な流砂量式を与える、などの洗掘の内部機構に基づく解析がなされていないという欠陥がある。

本研究では、橋脚周辺部における静的洗掘の諸特性を実験的に明らかにするとともに、実験事実に基づいて、非平衡な流砂量など洗掘の内部機構を考慮したモデルによる解析によって、洗掘深の場所的、時間的変化特性を明らかにしようとするものである。

ここで、特に、一様流場では砂の移動はなく橋脚周辺部でのみ砂の移動がある静的洗掘のみを扱ったのは、流勢の強い動的洗掘では上流からの洗掘孔への流入土砂量が大きくなるため、最大洗掘深は静的洗掘状態で発生することと、内部機構の解明に関しての複雑性を避けるためである。

表-1 橋脚周辺の局所洗掘に関するモデル解析

Investigator	Model for flow	Scour hole shape	Model for Sediment movement
Laursen	Constriction	reverse-cone	Critical tractive force
Saito	Constriction	(front) reverse-cone (back) trigonal-pyramid	Kalinske-Brown formula
Carstens	$u_{0i} / \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd}$	reverse-cone	Experimental formula
Shen	Horse shoe Vortex	reverse-cone	
Tarapore	Velocity diffusion at the scour hole	reverse-cone	Du Boy's formula

* 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科

2. 静的洗掘に関する実験^{注1)}

(1) 実験装置と実験方法

実験水路は長さ 14 m, 幅 98 cm, 深さ 30 cm の木製であって, その中央部が一部透明アクリル樹脂でできており, この部分のみ水路底より下 15 cm の深さの箱部が設けてあり, ここに円柱橋脚模型を設置し砂が敷けるようにしてある. 使用した円柱は塩化ビニール製であり, この円柱の上流端面, 斜め上流側面および側面の3か所にポイントゲージが取り付けられており, その3か所での洗掘深が測定できるようになっている. 実験条件^{注2)}は表-2に示すとおりであって, 用いた円柱の直径は, 8.9 cm および 14.0 cm の2種類で, 一様流の平均流速 v_o は 20.80, 26.05 および 37.04 cm/s の3通り変化させた. また, 円柱周辺河床砂は図-1に示すような粒径加積曲線をもつ, 中央粒径が 0.083 cm および 0.193 cm の2種類である.

実験の方法は, まず水路中央部底箱に円柱を設置し, その底箱に砂を上下流部の水路床と同じ高さまで敷き, 円柱周辺の移動床部を押え板で保護した状態で通水し, 流れが定常になってからこの押え板を流れを乱さないようにゆっくり取り除いた後, 洗掘深の時間的変化を測定する. 洗掘測定は円柱の3か所に付置したポイントゲ-

表-2 実験条件

Run	D (cm)	d_{50} (cm)	h_o (cm)	v_o (cm/s)
1	14.0	0.193	13.62	26.05
2	14.0	0.193	9.58	37.04
3	8.9	0.193	17.06	20.80
4	8.9	0.193	13.62	26.05
5	8.9	0.193	9.85	37.04
6	8.9	0.083	17.06	20.80
7	8.9	0.083	13.62	26.05

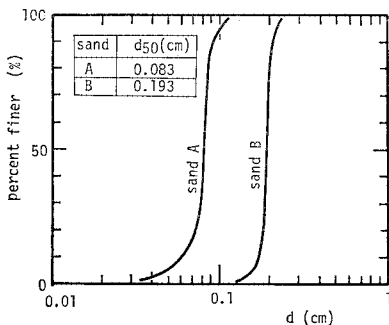


図-1 実験砂の粒径加積曲線

注 1) 一部既報⁹⁾

注 2) ここでは, 既報の実験 25 ケースの中で以下の解析の検証のために洗掘深の場所的・時間的変化を詳細に測定した7ケースについてのみ示す.

ジによって, 円柱橋脚周辺の最大洗掘深について行うが測定時間間隔は通水後5分までは30秒, 20分後までは1分間隔, 以後は5分間隔, 10分間隔と適宜洗掘進行状態によって変化させ, 通水後4時間経過まで測定するのを原則とした. また, 洗掘孔形状は, 測定したい時間に水路下流端の水位調節用板を引き上げ水位を十分大きくして通水を停止した後徐々に排水し, 各場所の標高をポイントゲージで測定し, 白系によって等高線を描いた後, 写真によって記録した.

(2) 洗掘形状

図-2は Run 6 についての円柱周辺部における局所的な河床形態を示したものであって, 通水後 10 分, 30 分, 1 時間, 8 時間および 13 時間 30 分のものである. 洗掘のごく初期を除いては, 円柱上流側半分での洗掘孔はほぼ逆円錐形となっている. 洗掘孔内で実際に砂が流れによって洗掘されている領域は円柱にごく近い一部河床のみで, 洗掘孔内のその他の部分は砂の水中静止摩擦角(約 45°)の傾きをもつ斜面を形成しているだけで, 洗掘されている領域の河床が低下すると斜面の傾きを砂の摩擦角に保つように砂が斜面から滑落しているに過ぎないことが, 実験観察より認められた. 洗掘初期には, 円柱上流端に比して, 円柱の斜め上流面河床から側面河床へかけての洗掘深がより大きくなっているが, やがてそれらの洗掘深はほとんど等しくなり, 洗掘孔底部での洗掘深は円柱周に沿ってほとんど変わらない状態で洗掘が進行する. さらに洗掘が進むと, 最大洗掘深の位置は円柱の上流端に移ってゆき, 洗掘孔形状は円柱の中心を

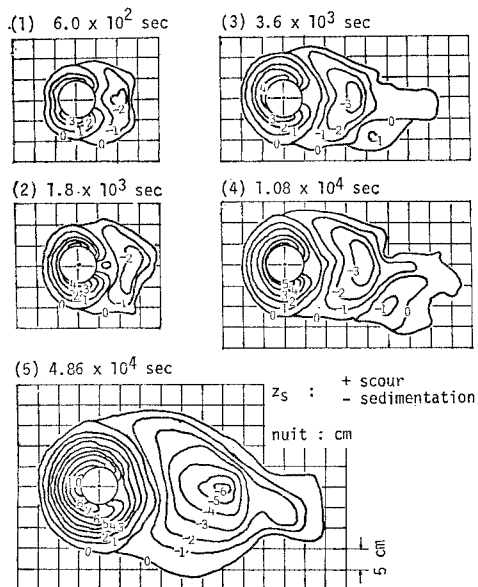


図-2 洗掘孔形状の時間的変化

頂点とするような逆円錐形から形が若干変化するとともに、逆円錐形の頂点が円柱の上流端へ移ったような形になっている。水理条件が静的洗掘の条件であるため、洗掘された土砂は遠くへ流されることなく、橋脚の後流部へ堆積している。橋脚側面から下流側では、側面から円柱の直径程度下流領域は洗掘領域となっており、それより下流側の後流域は洗掘された砂の堆積域となっている。

(3) 最大洗掘深の時間的变化

図-3 は Run 6 について、円柱上流端面(図中 A 点: $\theta=0$)、斜め上流面(B 点: $\theta=45^\circ$)および側面(C 点: $\theta=90^\circ$)における洗掘孔底部の洗掘深の時間的变化を示したものである。洗掘初期には、円柱の側面(C 点)から斜め上流面(B 点)にかけて洗掘が比較的速く進行し、円柱上流端(A 点)での洗掘進行は比較的緩慢である。しかし、ある程度洗掘が進行すると、B, C 点付近の洗掘進行が緩慢になるにもかかわらず、A 点では同じような速度で洗掘が進行するため、本例では、通水後約 1 時間で、A, B および C 点での洗掘がほとんど一致し、それ以降では、最大洗掘深は A 点に移っている。観察によれば、これらの現象は次のような理由から生じている。すなわち、円柱側面では洗掘が進行してゆき河床が低下すると水深が大きくなり流速の減少に伴って掃流力が小さくなることと、円柱側面 C 点から円柱径程度下流側以降が洗掘砂の堆積域となっているため、C 点からこの堆積域にかけての区間が逆勾配となっているが、洗掘進行とともにこの逆勾配が大きくなり、側面での砂が動きにくくなる。一方、水平軸をもつ渦流のみによって洗掘が進行している円柱上流端 A 点では、洗掘が進行しても渦流の強さはほとんど変わらず砂を巻き上げ続けるためである。しかし、最終的には、この側面が生じた逆勾配の領域が洗掘進行とともに次第に A 点近くに移行

してゆき、A 点での洗掘進行も緩慢になっていく。

以上、ここに示した洗掘特性は、円柱周辺の静的洗掘進行過程の基本的特徴であって、水理量によっては少なからず異なっているものもある。それらの詳細は 4. の図-8 (a) から (g) までに示されている。

3. モデルによる解析

円柱橋脚周辺の局所洗掘(静的洗掘の場合)の前節で示された場所的・時間的变化特性を理論的に解析することが本節の目的であるが、橋脚周辺の局所洗掘現象は 3 次元流によって惹起される現象であり、この流れ特性自体にもまだ不明な点も多く、それに応答する局所河床形状を純粋に理論解析することは現段階では困難である。そこで、ここでは前節あるいは従来の研究で明らかにされている実験事実に基づくいくつかの仮定のもとにモデル解析を試みる。

(1) 基礎式

図-4 は円柱橋脚周辺の局所洗掘孔を模式的に示したものであって、 r_i は円柱の半径、 r_o は渦流等によって実際に洗掘されている領域外縁までの円柱中心からの距離、 r_o は橋脚中心から洗掘孔外縁までの距離である。 $(r_o - r_i)$ の領域(以下、掃流領域とよぶ)の砂が局所流によって移動しこの掃流領域の河床が低下すると、 $(r_o - r_i)$ の領域(洗掘孔斜面)の砂が斜面勾配を砂の水中静止摩擦角 ϕ に保つように洗掘孔底部の掃流領域へ滑落することによって洗掘が進行していく。いま、元河床面から鉛直下向きに洗掘深 z_s をとり、橋脚中心からの半径方向の距離を r 、橋脚中心軸右回りの一様流向からの偏角を θ として、図-4 の斜線で示す掃流領域での土砂の連続式を考える。

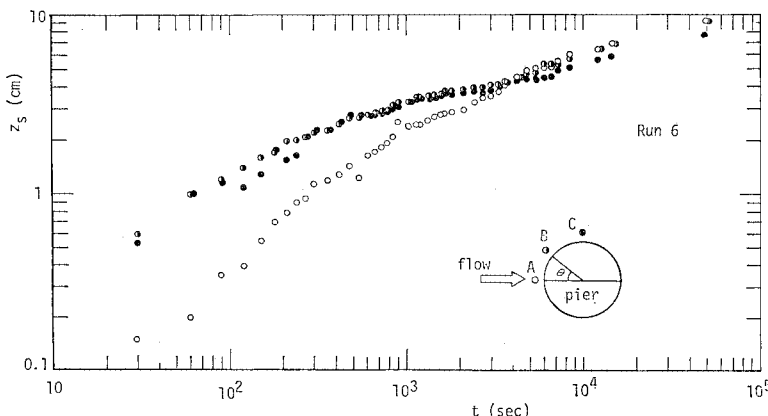


図-3 円柱上流端(点 A)、斜め上流側(点 B)および円柱側面(点 C)における洗掘深の時間的变化

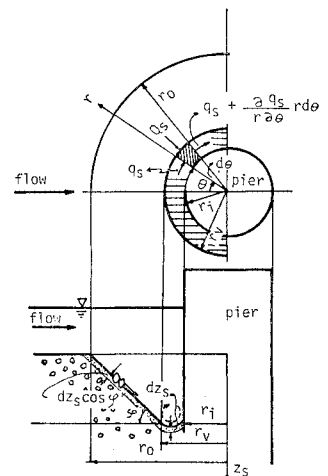


図-4 洗掘孔の模式記号図

掃流域の河床が dt 時間に dz_s だけ低下したときには、洗掘孔斜面の傾きが φ で保たれるためには斜面河床も dz_s だけ低下し、その低下量に対応する砂が掃流領域に滑落している。その滑落した砂の単位時間当たりの量を Q_s 、 λ を砂の空隙率とすると、図-4 において幾何学的関係より、

$$Q_s dt = \frac{1-\lambda}{\cos \varphi} (r_o^2 - r_v^2) \frac{d\theta}{2} (dz_s \cos \varphi) \dots (1)$$

である。また、 q_s を掃流領域での円周に沿う方向の単位幅流砂量とすると、図-4 の斜線部における dt 時間の流砂の連続の関係は、

$$\frac{1}{1-\lambda} \left\{ \int_{r_i}^{r_v} \left(q_s + \frac{\partial q_s}{r \partial \theta} r d\theta - q_s \right) dr - Q_s \right\} dt = (r_v^2 - r_i^2) \frac{d\theta}{2} dz_s$$

で表されるから、この式に式 (1) を代入し、 q_s の $r_i < r < r_v$ での平均を \bar{q}_s とすると (以後 $-$ は $r_i < r < r_v$ での平均を示す)、

$$\frac{1}{2} (r_o^2 - r_i^2) \frac{\partial z_s}{\partial t} - \frac{1}{1-\lambda} (r_v - r_i) \frac{\partial \bar{q}_s}{\partial \theta} = 0 \dots (2)$$

で示される河床変動に関する基礎式が得られる。局所的な河床変動が生じていないときの馬蹄型渦流の半径方向の規模は水理量によらずほぼ円柱径 D のみによって決まり、 $k_1 D/2$ (k_1 : 定数 ≈ 0.5) で示されるが¹⁰⁾、馬蹄型渦流の存在領域と洗掘領域 ($r_v - r_i$) にほぼ対応すると考えられるから、 $r_v \approx (1+k_1)D/2$ と仮定することができよう。また、実験によって観察されるように渦流の規模が洗掘進行後もほぼ不変であると仮定すると、式 (2) の r_i 、 r_v および r_o は、次式 (3) で示される。

$$\left. \begin{aligned} r_i &= D/2 \\ r_v &= (1+k_1)D/2 \\ r_o &= r_v + (z_s/\tan \varphi) = (1+k_1)D/2 + z_s/\tan \varphi \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

r_i 、 r_v は時間 t あるいは場所 $\bar{r}\theta$ ($\bar{r} = (r_o + r_i)/2$) によって変化しないが、 r_o は z_s の関数であるから t および $\bar{r}\theta$ の関数である。

次に、式 (2) の洗掘領域における r 方向に平均した単位幅流砂量 \bar{q}_s についてであるが、局所洗掘状態においては、場所的 ($\bar{r}\theta$) にも掃流力が異なることと、平衡一様流状態のように無限に上流からの土砂供給がないため、 \bar{q}_s は非平衡状態の流砂量であって、その場所の水理条件だけでは決まらず上流の条件によって決定される。非平衡状態の流砂量に関する考察が、Tsuchiya¹¹⁾ や齊藤¹²⁾ に

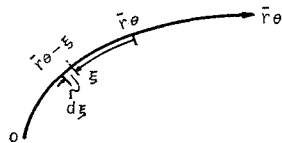


図-5 記号図

る水平噴流による局所洗掘現象の解明の際に初めてなされたが、同様な考え方をここに適用すると、式 (2) における $(1/\bar{r})\partial \bar{q}_s/\partial \theta$ は、図-5 に示す記号を用いて、

$$\frac{\partial \bar{q}_s}{\bar{r} \partial \theta} = A d \left\{ p_s(\bar{r}\theta) - \int_0^{\bar{r}\theta} p_s(\bar{r}\theta - \xi) f(\xi) d\xi \right\} \dots (4)$$

で示される。ここに、 $p_s(\bar{r}\theta)$ および $p_s(\bar{r}\theta - \xi)$ はそれぞれ、移動床が始まる原点からの流下方向距離 $\bar{r}\theta$ および $\bar{r}\theta - \xi$ 地点における単位時間当たりの河床砂の移動確率、 $f(\xi)$ は砂の跳躍距離の確率密度関数であって、実験によると L を砂の平均跳躍距離として、 $f(\xi) = (1/L)\exp(-\xi/L)$ で示される¹³⁾。 d は砂粒径、 A は砂の形状に特有な定数である。また、 L は Einstein¹⁴⁾ によると $L = \lambda_1 d$ ($\lambda_1 \approx 100$) であって砂粒径のみによって決まる。

いま、 $\bar{r}\theta$ 地点の掃流力に対応する平衡状態の流砂量を $\bar{q}_{so}(\bar{r}\theta)$ とすると、 $\bar{q}_{so}(\bar{r}\theta) = p_s(\bar{r}\theta) \cdot A \cdot d \cdot L$ と表わされるから、これらの関係と式 (3) および式 (4) を式 (2) に代入して、整理無次元化を行うと次式 (5) が得られる。

$$\frac{\partial z_s^*}{\partial t^*} = \frac{K^*}{G^*(z_s^*)} \left\{ \bar{q}_{so}^*(\bar{r}^*\theta, t^*) - \int_0^{\bar{r}^*\theta} \bar{q}_{so}^*(\bar{r}^*\theta - \xi^*, t^*) \frac{1}{L^*} \exp\left(-\frac{\xi^*}{L^*}\right) d\xi^* \right\} \dots (5)$$

ただし、

$$\begin{aligned} K^* &= \frac{(2+k_1)k_1}{4L^*(1-\lambda)} \\ G^*(z_s^*) &= \frac{k_1}{2} \left(1 + \frac{k_1}{2}\right) + (1+k_1) \frac{z_s^*}{\tan \varphi} + \left(\frac{z_s^*}{\tan \varphi}\right)^2 \\ z_s^* &= \frac{z_s}{D}, \quad t^* = \frac{v_o t}{D}, \quad L^* = \lambda_1 \frac{d}{D}, \quad \bar{q}_{so}^* = \frac{\bar{q}_{so}}{v_o D} \\ \bar{r}^* &= \frac{\bar{r}}{D}, \quad \xi^* = \frac{\xi}{D} \end{aligned}$$

である。式 (5) は局所洗掘深 z_s の場所 ($\bar{r}\theta$) 的、時間 (t) 的变化を示す方程式であって、各地点における掃流力に対応する平衡状態の流砂量 \bar{q}_{so} が時間的に求まれば、計算によって z_s の場所的・時間的变化を決定することができる。

(2) 平衡状態の流砂量

式 (5) における平衡状態の流砂量 \bar{q}_{so} を求めるに際し、他の仮定の精度との整合性から考えるといたずらに複雑な流砂量式を用いてもあまり意味がないので、ここでは従来提案されている式の中で比較的形の単純な Meyer-Peter & Müller 型の流砂量式、

$$\frac{\bar{q}_{so}}{\sqrt{sgd^3}} = C(\bar{\tau}_* - \bar{\tau}_{*c})^m \dots (6)$$

を修正して用いることにする。ここに、 $\bar{\tau}_* = \bar{u}_*^2/sgd$ 、

$\bar{\tau}_{*c} = \bar{u}_{*c}^2 / sg d$, \bar{u}_{*c} および \bar{u}_{*c} (一は掃流領域の半径方向平均を示す) はそれぞれ摩擦速度および砂の限界摩擦速度, $s = \sigma / \rho - 1$, σ および ρ はそれぞれ砂および水の密度, g は重力加速度である。

さて, 式 (6) を用いて \bar{q}_{so} を計算するためには摩擦速度 \bar{u}_{*c} の大きさを知らなければならない。洗掘孔底部(掃流領域)での \bar{u}_{*c} は円柱周に沿っても時間的にも変化するためにその大きさを正確に求めることは困難であるが, 上に述べた実験的事

実を踏まえたいくつかの仮定のもとに \bar{u}_{*c} の評価を試みる。洗掘が進行する以前の掃流領域に作用する河床面せん断力 $\bar{\tau}$ を 図-6 にみられるように, 渦流による円柱の半径方向のせん断力 $\bar{\tau}_r$ と円周方向の流れによる円周に沿う方向のせん断力 $\bar{\tau}_\theta$ とに分けて考える。いま, 仮に洗掘前の $\bar{\tau}_\theta$ における円周方向の流速 \bar{v}_θ (水深方向にも平均した流速) が $r \approx D/2$ の点でのポテンシャル流で近似され,

$$\bar{v}_\theta \approx 2 v_o \sin \theta \quad (v_o: \text{一様流の平均流速})$$

で示されるとし, 洗掘進行後洗掘深が z_s になったときには,

$$\bar{v}_\theta \approx 2 v_o \sin \theta \frac{h_o}{h_o + z_s} \quad (h_o: \text{一様流の水深})$$

で示されるものとする。 φ_o をそこでの流速係数とすると, τ_θ は,

$$\bar{\tau}_\theta (\equiv \rho u_{*c} \bar{v}_\theta) = \rho \varphi_o^{-2} \bar{v}_\theta^2 \approx 4 \rho \varphi_o^{-2} \sin^2 \theta \left(\frac{h_o}{h_o + z_s} \right)^2 v_o^2 \quad \dots \dots \dots (7)$$

となる。

一方, 洗掘前(固定床)の $\bar{\tau}_r$ については, $\bar{\tau}_r$ も $\bar{\tau}_\theta$ と同様にほぼ ρv_o^2 に比例する¹⁰⁾ことがわかっているから, その比例定数を φ_r^{-2} とすると,

$$\bar{\tau}_r \approx \rho \varphi_r^{-2} v_o^2 \quad \dots \dots \dots (8)$$

と表わせるが, 前にも述べたように, 渦流の規模および強さが洗掘進行後も, 場所的にもほぼ変わらないことが実験的に観察されていることから, $\bar{\tau}_r$ は $\bar{\tau}_\theta$ と違って巨視的には場所的にも時間的にも変わらないと仮定できよう。吉川ら⁷⁾によると, 一様流での河床面せん断力 τ_o と橋脚上流端部における渦流による河床でのせん断力 τ_r との比は実験的には $\bar{\tau}_r / \tau_o \approx 1.5$ ということが示されている。したがって, いまこの結果を用いるとすると, 式 (8) から $\rho \varphi_r^{-2} v_o^2 / \rho u_{*o}^2 \approx 1.5$ (u_{*o} : 一様流部の摩擦速度) であるから,

$$\varphi_r \approx 0.82 \varphi_o, \quad \varphi_o \equiv v_o / u_{*o} \quad \dots \dots \dots (9)$$

となるが, φ_o については, 静的洗掘では一様流での河

床は平坦であるので, $\varphi_o = 6.0 + 5.75 \log(h_o/d)$ で与える。また, 固定床での実測¹⁰⁾によると, 円柱側面 ($\theta = \pi/2$) の円柱近傍河床では $\bar{\tau} / \tau_o \approx 4$ であるから, 式 (7) ~ (9) および $\bar{\tau} = \sqrt{\bar{\tau}_r^2 + \bar{\tau}_\theta^2}$ の関係を用いると,

$$\varphi_o \approx 1.04 \varphi_o \quad \dots \dots \dots (10)$$

となる。式 (9) と (10) の関係が洗掘進行後も成り立つものと仮定すると, 洗掘深が z_s のときの摩擦速度 \bar{u}_{*c} は, $\rho \bar{u}_{*c}^2 = \sqrt{\bar{\tau}_r^2 + \bar{\tau}_\theta^2}$ であるから, 式 (7) ~ (9) を用いて,

$$\bar{u}_{*c} = \left\{ 2.2 + 13.7 \sin^4 \theta \left(\frac{h_o}{h_o + z_s} \right)^4 \right\}^{1/4} \frac{v_o}{\varphi_o} \quad \dots \dots \dots (11)$$

となる。すなわち, 洗掘領域で $\bar{\tau}_\theta$ での平均的摩擦速度は, 一様流での平均流速 v_o , 水深 h_o および流速係数 φ_o とその場所での局所洗掘深 z_s および θ の関数で表わされる。河床面せん断力 $\bar{\tau} (\equiv \rho \bar{u}_{*c}^2)$ の方向と円周に沿う方向とのなす角を α_1 とすると, $\tan \alpha_1 = \bar{\tau}_r / \bar{\tau}_\theta$ であるから, $\bar{\tau}$ によって動かされた砂の初期の移動方向は必ずしも円周に沿う方向ではないが, 砂が河床から浮き上がる渦流に巻き込まれるようにして円周に沿う掃流領域を移動していく。したがって, 半径方向に動かされた砂も掃流領域系全体からみると円周方向に $\bar{\tau}$ によって動かされていると考えてもよいであろう。

次に式 (6) における無次元限界掃流力であるが, 洗掘孔底部の掃流領域内でも円周に沿う方向に洗掘深が異なるため, 河床が傾きを有しており砂の移動のしやすさが異なり τ_{*c} も場所的に変化していると考えられる。図-7 のように, 傾き α の河床上での砂の移動限界状態では, C_D, C_L をそれぞれ抗力係数および揚力係数とし, k_1, k_2 および k_3 を砂粒子の形状に関する係数, $(u_b)_{cr}$ を河床における限界流速とすると,

$$\frac{(u_b)_{cr}^2}{sgd} = \frac{2 k_3 (\tan \varphi \cos \alpha - \sin \alpha)}{C_D k_1 + C_L k_2 \tan \varphi} \quad \dots \dots \dots (12)$$

である¹⁵⁾から, 水平河床での無次元掃流力 $\tau_{*c}(o)$ と河床勾配が α でのそれ $\tau_{*c}(\alpha)$ の関係は,

$$\frac{\tau_{*c}(\alpha)}{\tau_{*c}(o)} = \cos \alpha \frac{\sin \alpha}{\tan \varphi} \quad \dots \dots \dots (13)$$

となる。したがって, 式 (6) における $\bar{\tau}_{*c}$ としては式 (13) で表わされる $\tau_{*c}(\alpha)$ を用いなければならない。

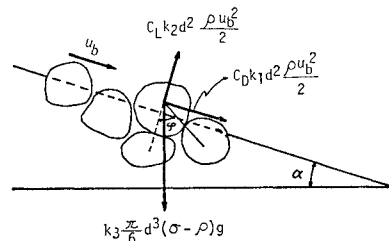


図-7 斜面上の砂粒に作用する力

4. 解析結果と実験結果との比較

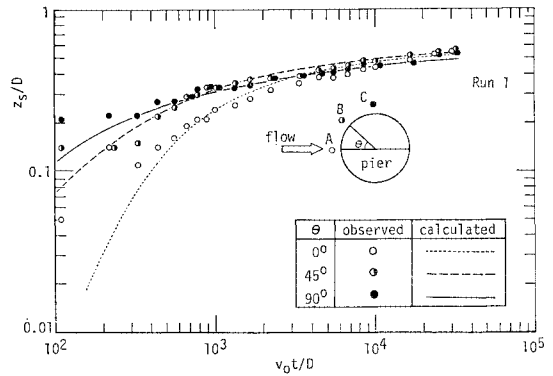
(1) 数値計算

式(11)を式(6)に代入することによって、洗掘深が z_s のときの掃流領域における任意断面($r\theta$)での掃流力に対応する平衡流砂量 \bar{q}_{s0} を計算し、これを基礎式(5)に代入したのち、差分して数値計算によって z_s の場所的・時間的変化を求める。計算域は円柱上流端($\theta=0$)から掃流領域に沿って円柱側面($\theta=\pi/2$)までで、この区間を11区間に分割して $\Delta r\theta$ を与え、計算時間間隔 Δt は $t=10$ 秒までは2秒、 $t=10\sim 500$ 秒では4秒、500秒以降は25秒とした。初期条件としては、 $t=0$ で $z_s=0$ とし、 $\tau_{*c}(\alpha)$ を与えるために必要な河床勾配は、前後の断面の河床高との関係で与えられるが、円柱側面(第12断面)での河床勾配は、実験のところで述べたように、円柱側面から円柱径 D 程度下流側までは洗掘域であつてなだらかに河床が上がっていると、その勾配 α_{12} は $\alpha_{12}=-\tan^{-1}(z_s(12)/D)$ (逆勾配)で与えた。ただし、 $z_s(12)$ は円柱側面における洗掘深である。 $\tau_{*c}(\alpha)$ としては一般には、0.03~0.06であるが、洗掘孔内では結果的にこれは大き過ぎ0.015とかなり小さくとした。また、流砂量式(6)の係数 C および m については、 $C=20$ 、 $m=1$ として計算した。これらの値は、全実験ケースについて洗掘進行が実測と計算とで比較的良好に一致するように試行錯誤的に求めたものであり、 $\tau_{*c}(\alpha)$ 、 C および m の上記の値で与えられる流砂量は掃流力が限界掃流力に近いところで、従来の流砂量式で与えられるものよりかなり大きい、掃流力が大きいときは逆となっている。洗掘孔内では、流れの変動が比較的大きいため、砂が移動しやすい状態にあるため $\tau_{*c}(\alpha)$ が小さくなっていると考えられよう。

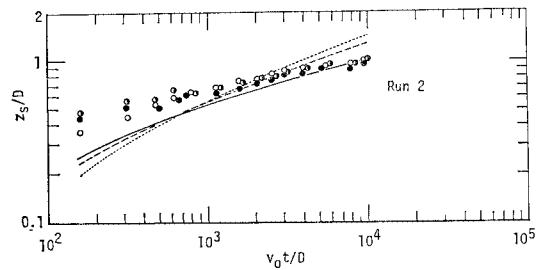
(2) 計算結果と実測との比較

図—8(a)~(g)は、 z_s/D と $v_0 t/D$ との関係を表わしたものであつて、図中丸印が実測値で、曲線が計算結果を示している。(a)図中に示しているように、○印と点線が円柱上流端部($\theta=0$, A点)、●印と破線が斜め上流側($\theta=45^\circ$, B点)、●印と実線は円柱側面($\theta=90^\circ$, C点)での洗掘進行状態を示している。各Runの実験条件は表—2に示されている。Run 1についてみると、洗掘初期ではC点が最も洗掘が進んでおりA点は遅れていて、B点はその間にあるが、 $v_0 t/D \approx 7 \times 10^2$ 程度でA点とB点での洗掘深が一致し、 $v_0 t/D \approx 4 \times 10^3$ 程度でA、B、C点でほとんど等しくなり以後わずかであるが、C点での洗掘深がA点、B点に比して小さくな

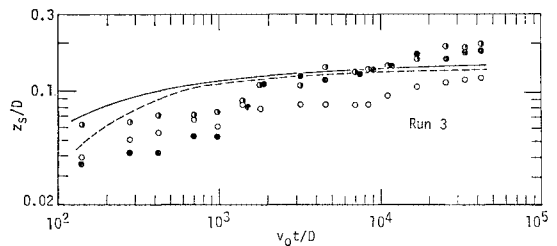
ている。これらの特性は、実測と計算とで非常によく一致している。Run 1と同じ径の円柱($D=14$ cm)と同じ砂($d_{50}=0.193$ cm)で流速を大きくした場合のRun 2では、A、BおよびC点とも洗掘初期から大きく洗掘されており、しかも各点間での差は小さい。これらの傾向は実測と計算とでほぼ一致はしているが、全体的な傾



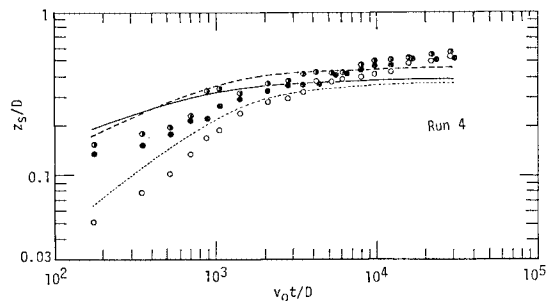
(a) $D=14.0$ cm, $d_{50}=0.193$ cm, $v_0=26.05$ cm/s



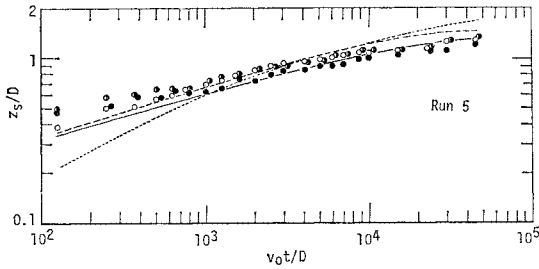
(b) $D=14.0$ cm, $d_{50}=0.193$ cm, $v_0=37.04$ cm/s



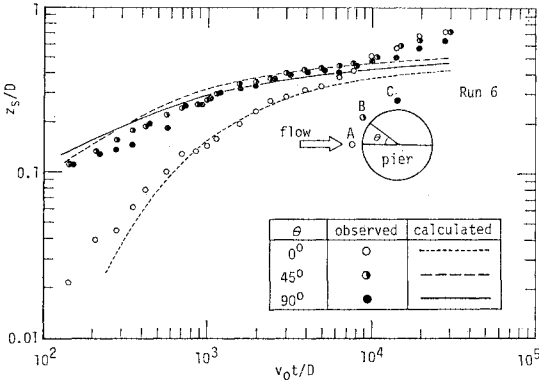
(c) $D=8.9$ cm, $d_{50}=0.193$ cm, $v_0=20.80$ cm/s



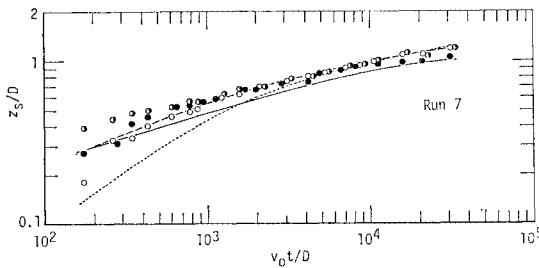
(d) $D=8.9$ cm, $d_{50}=0.193$ cm, $v_0=26.05$ cm/s



(e) $D=8.9\text{ cm}$, $d_{30}=0.193\text{ cm}$, $v_0=37.04\text{ cm/s}$



(f) $D=8.9\text{ cm}$, $d_{30}=0.083\text{ cm}$, $v_0=20.80\text{ cm/s}$



(g) $D=8.9\text{ cm}$, $d_{30}=0.083\text{ cm}$, $v_0=26.05\text{ cm/s}$

図-8 A, B および C 点における洗掘深の時間的変化

向としては、実測の方の洗掘深が洗掘初期に大きくなっており、あまりよくシミュレートされていない。Run 3 から Run 7 までは円柱径が 8.9 cm であって、まず Run 3 は砂粒径が 0.193 cm と大きく、流速が小さい場合で、洗掘はほとんど生じない。計算では A 点では洗掘深が 0 であって (c) 図中 ○印に対応する曲線がないが、実測も最終的に $z_s/D \approx 0.1$ と小さいけれども洗掘は生じている。B 点、C 点については比較的計算と実測は一致している。Run 4 および Run 5 は Run 3 の条件で流速のみを大きくしたものであり、A, B, C 各点での洗掘進行特性は実測と計算とでほぼ一致している。また、Run 6 と Run 7 は砂粒径が 0.083 cm と小さい場合について検討したものである。Run 6 では、 $v_0 t/D \approx 10^4$ 程度まで実測と計算による洗掘進行特性は非常によく一致しているが、それ以降実測の洗掘深がかなり大

きくなっている。Run 7 では洗掘のごく初期を除いて、計算曲線は実測データをほぼ説明していることがわかる。

以上、細かくみると実測結果と計算結果とは十分一致しないところはあるものの、全体的には、種々の水理条件に対しても両者はほぼ一致しており、モデル解析の大筋の妥当性は示されているものと考えられる。

5. あとがき

本研究は、円柱橋脚周辺部における静的洗掘の場所的・時間的変化特性について、詳細な実験を行うとともに理論的な検討を加えたが、得られたおもな結果は以下のとおりである。

(1) 洗掘孔内で実際に砂が流れによって掃流されている領域は円柱にごく近い一部河床で、他の部分はその掃流領域の河床低下に伴って形成される砂の水中静止摩擦角をその勾配とする斜面である。

(2) 局所洗掘を起こす流れは、橋脚周辺底部に発生する馬蹄型渦流と橋脚側面近くで卓越する縮流であるため、洗掘初期には、縮流と渦流の両方が存在する円柱斜め前面から側面にかけての洗掘が円柱上流端より大きい。洗掘深が大きくなり通水断面が大きくなると、縮流流速が小さくなり、円周に沿ってほとんど強さが変わらない渦流のみによって洗掘が進行するようになるため、上流側からの流入砂の少ない円柱上流端部の洗掘深が相対的に大きくなっていく。

(3) 洗掘孔内における非平衡状態の流砂量をも考慮した流砂の連続式 (5) を導き、いくつかの仮定のもとに、洗掘孔掃流領域での摩擦速度を与え数値計算により式 (5) を解くことによって、洗掘深の場所的・時間的変化を解析的に求めることを可能にした。

(4) 解析結果と実測値を比較した結果、微視的には両者は一致しないところはあるものの大筋において理論による洗掘深の場所的・時間的変化特性は実測のものと同じであり、本モデル解析の妥当性が示された。

本研究を行うにあたり、懇切なご指導をいただいた京都大学工学部 中川博次教授および鳥取大学工学部 道上正規教授に深く感謝の意を表わす。

参考文献

- 1) Laursen, E.M.: An Analysis of Relief Bridge Scour, Proc. of ASCE, Vol. 89, HY 3, pp. 93~118, 1963.
- 2) 斉藤 隆・浦 勝・柴田幸信: 円柱周辺の洗掘について、山口大学工学部研究報告, 第 20 巻, 第 1 号, pp. 83~90, 1969.
- 3) Gradowczyk, M.H., O.J. Maggiolo and H.C. Folguera: Localized Scour in Erodible-Bed Channels,

- Jour. of Hydraulic Research, Vol. 6, No. 4, pp. 289~326, 1968.
- 4) Carstens, M.R. : Similarity Laws for Localized Scour, Proc. of ASCE, Vol. 92, HY 3, pp. 13~36, 1966.
 - 5) Shen, H.W., V.R. Schneider and S. Karaki : Local Scour around Bridge Piers, Proc. of ASCE, Vol. 95, HY 6, pp. 1914~1938, 1969.
 - 6) Tanaka, S. and M. Yano : Local Scour around a Circular Cylinder, Proc. of 12th Congress of IAHR, Vol. 3, pp. 193~201, 1967.
 - 7) 吉川秀夫・福岡捷二・岩間 汎・曾小川久貴 : 橋脚の洗掘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, pp. 83~90, 1971.
 - 8) Tarapore, Z.S. : A Theoretical and Experimental Determination of the Erosion Pattern Caused by Obstruction in an Alluvial Channel with Particular Reference to Vertical Circular Cylindrical Piers, Ph. D. Thesis, University of Minnesota, 1962.
 - 9) 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, pp. 725~751, 1974.
 - 10) 鈴木幸一 : 橋脚周辺部における流れと掃流力に関する研究, 土木学会論文報告集, 第272号, pp. 65~78, 1978.
 - 11) Tsuchiya, Y. : On the Mechanism of the Local Scour from Flows Downstream of an Outlet, Proc. 12th Congress of IAHR, Vol. 3, 1967.
 - 12) 齊藤 隆 : 水平噴流による洗掘に関する研究, 土木学会論文報告集, 第282号, pp. 53~63, 1979.
 - 13) 矢野勝正・土屋義人・道上正規 : 砂礫の流送機構の確率過程としての特性について, 京都大学防災研究所年報, 第11号B, pp. 61~73, 1968.
 - 14) Einstein, H.A. : The Bed Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows, U.S. Dept. Arg. Tech., Bull. 1026, 1950.
 - 15) Graf, W.H. : Hydraulics of Sediment Transport, McGraw-Hill, p. 85, 1971.

(1980.7.30・受付)