

水門下流の局所洗掘に関する研究

九州工業大学工学部 ○ 学生員 川村清一 Le Dinh Hong
同 上 正 員 秋山壽一郎 浦 勝

1. 諸言

水理構造物の付近では、局所流により局所洗掘が発生する。この現象は水理構造物の倒壊につながり、工学上極めて重要な問題である。一般に、局所洗掘現象は洗掘穴内での河床砂と流れ特性の複雑な相互作用によるばかりでなく、洗掘穴内の局所流の特性そのものの定量化が極めて困難であるため、非常に複雑な問題である。本研究では、エプロンを有する水門下流の局所洗掘を半理論的に取り扱う。

2. 理論解析

次元解析: 水門から流出する潜り壁面噴流による洗掘過程を系統的に評価するためには、まず、問題に関与している様々なパラメーターの役割を考慮することが必要である。問題の簡略化のため、本研究は以下の場合に限定する: 砂層は一様砂($\sigma = \text{一定}$); s は一定; 粘性の影響は無視; 下流水深は十分に深い。更に、従来の研究より洗掘穴長と最大洗掘深との間にある関係が存在することが予想されるので、これらの2つの変数のうち一つが余分と考えられ、次元解析より式(1)の関係が得られる。

$$\frac{z_0}{d_s} = f\left(\frac{U}{d_s}, \frac{U}{v_s}, \frac{L_p}{D}, \frac{D}{d_s}\right) \dots (1)$$

ここに、 z_0 = 最大洗掘穴深、 U = 水門での流速
 v = 動粘性係数、 t = 経過時間、 D = 水門開き、 ρ_s = 砂の密度、 ρ = 水の密度、 L_p = エプロン長、 s = 砂の水中比重($=\rho_s/\rho-1$)、 d_s = 粒形、 g = 重力加速度
 v_s = 砂粒子の速度($=sgd_s$)¹²。

洗掘形状の相似形: 一般に、洗掘穴は時間と共に変化し、洗掘過程は初期と発達段階に分けられるが、最大洗掘深 z_0 と洗掘穴長 L を代表長さとして用いると、洗掘の発達領域において洗掘形状が幾何学的相似性を有することが知られている。特に、発達領域では、無次元洗掘形状が経過時間と無関係にはば一定になるという実験的事実は重要である。相似形状の妥当性について、既存のデータを用いて検討を行なった結果が図-2である。最大洗掘深 z_0 及び洗掘穴長 L を鉛直、流下方向の代表長さとして用いると、実験条件が異なるにもかかわらず、一つの相似形状になることがわかる。洗掘穴の無次元洗掘形状は図中の簡単な2次式で近似的に表される。ここに、 X と Z は式(2)と(3)で定義される独立変数である。

$$X = \frac{x}{L} \dots (2) \quad , \quad Z = \frac{z}{z_0} \dots (3)$$

最大洗掘深の予測モデル: 1次元の砂の連続方程式は(4)式で与えられ、独立変数 X と Z を利用すると、式(5)のごとく変換される。

$$(1-p) \frac{\partial z}{\partial t} - \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \dots (4) \quad , \quad \frac{1}{(1-p)L} \frac{dz_0}{dt} = Z dX \dots (5)$$

ここに、 q_s = 流砂量、 p = 砂層の空けき率。

洗掘穴の形状は相似形状を有する(図-2)。これは、式(6)で定義されるパラメーター E が時間に対して不変であることを意味している。既存の実験データを用い、 E の他のパラメーターに対する依存性の検討を行なった結果が図-3である。式(1)からも明らかなように、パラメーター E に影響を与えている最も重要な物理量は D/d_s と U/v_s である。 E は U_{ma}/v_s が増加すると単調に減少する性質があり、式(7)の経験式が得られる。

$$E = \frac{L}{z_0} \dots (6) \quad , \quad E = 8.25 - 2.30 \ln(u_{ma}/v_s) \dots (7)$$

ここに、 u_{ma} = エプロン下流端部での最大速度。

無次元洗掘形状は時間に対して不変であるので、式(5)は $q_s(0) = 0$ (clear water scour)の境界条件のもとで $X=0$ から1.0まで積分することができる。ここに、 $K1$ は(9)式で定義され、無次元洗掘形状にのみ依存するパラメーターである。

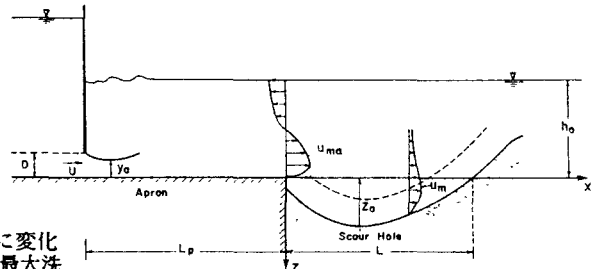


図-1 Definition Sketch

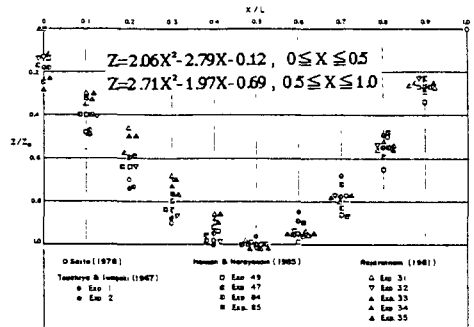


図-2 Similarity Profiles of Scour Hole

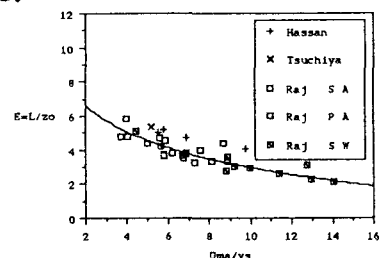


図-3 Relationship of E and U_{ma}/v_s

$$q_s(L) = K_1 E(1-p) z_0 \frac{dz_0}{dt} \quad \dots (8) \quad , \quad K_1 = \int_0^L Z dX \quad \dots (9)$$

K_1 の値は異なる実験条件のもとで得られた既存のデータに対して、0.639-0.597の範囲で、平均値は0.618であった。

洗掘の現象は本質的に非平衡状態である。非平衡流砂量 $q_s(x)$ は一般に、式(10)で与えられ、境界条件 $q_s(0)=0$ のもとで式(10)を積分すると式(11)のようになる。

$$n(x) \frac{dq_s(x)}{dx} = q_{s0}(x) - q_s(x) \quad \dots (10) \quad , \quad q_s(x) = \exp\left(-\frac{x}{n}\right) \int_0^x q_{s0} \frac{1}{n} \exp\left(\frac{x}{n}\right) dx \quad \dots (11)$$

ここに、 q_s =平衡状態での流砂量、 $n(x)$ =ステップ長、 $n(x)=jds$ 、 $j=100$ 。
式(8)と(11)を用い、(12)式の最大洗掘深と経過時間の関係が得られる。

$$K_1 E(1-p) z_0 \frac{dz_0}{dt} = \exp\left(-\frac{L}{n}\right) \int_0^L q_{s0} \frac{1}{n} \exp\left(\frac{x}{n}\right) dx \quad \dots (12)$$

無次元流砂量 Φ を式(13)として定義し、平衡状態での流砂量式として式(14)を用い、シールズパラメータ θ を式(15)により定義し、せん断応力と重力の組合わされた影響を考慮し、修正シールズパラメータ θ^* を導入する。

$$\Phi = \frac{q_s}{q_{s0}} \quad \dots (13) \quad , \quad \Phi = K\theta^m \left[1 - \frac{\theta_c}{\theta} \right] \quad \dots (14) \quad , \quad \theta = \frac{\tau_b}{\rho v_s^2} \quad \dots (15) \quad , \quad \theta^* = \theta - 0.1 \frac{dz}{dx} \quad \dots (16)$$

ここに、 θ_c =限界シールズ応力、 K と m は実験データより、キャリブレーションして得られる定数、 τ_b =局所底面せん断応力。

無次元時間 $t^* = t u_{ma}/ds$ と無次元最大洗掘深 $z_0^* = z_0/ds$ を導入すると、無次元最大洗掘深と無次元時間との関係は式(17)によって与えられる。

$$\frac{dz_0^*}{dt^*} = \frac{1}{K_1(1-p)j} \left(\frac{v_s}{u_{ma}} \right) \exp\left(-\frac{E z_0^*}{j}\right) \int_0^1 \Phi_0 \exp\left(-\frac{E z_0^* X}{j}\right) dX \quad \dots (17)$$

水理条件: 水門からの流出した水は潜り跳水となり、エブロン上では潜り壁面噴流として発達する。エブロン下流は、噴流は洗掘穴に流れ込み、砂層面に沿って発達する壁面噴流となる。本解析では、Hassan・Narayanan(1985)によって得られた関係式を水理条件として用いる。エブロン上では、最大流速 u_{ma} に関する関係式が式(18)で、境界層での流速が0の面から外層において平均流速が $u_{ma}/2$ である面までの距離 δ_1 に関する関係式が式(19)で与えられる。

$$\frac{u_{ma}}{u} = 3.83 \left(\frac{L_p}{D} \right)^{-0.5} \quad \dots (18) \quad , \quad \frac{\delta_1}{D} = 0.5 + 0.065 \left(\frac{L_p}{D} \right) \quad \dots (19)$$

洗掘穴内での流砂量の計算に関しては、洗掘穴が発達するときに生じるせん断応力を考慮しなければならない。ここでは、5つの固定洗掘穴の形状に対して、Hassan・Narayananが求めた洗掘穴内での最大速度の減衰率 u_{mh} を用いる。これは式(20)で与えられ、摩擦係数 C_b は式(21)のように表わされる。

$$\frac{u_{mh}}{u_{ma}} = \frac{1}{2} [1 + \exp\{-0.23(x/\delta_1)^{1.55}\}] \quad \dots (20) \quad , \quad C_b = 2 - \frac{\tau_b}{\rho u_{mh}^2} \quad \dots (21)$$

3. 洗掘過程のシミュレーション

得られた半理論的モデルを用い、Hassan・Narayananの実験データに対して洗掘過程のシミュレーションを試みる。初期段階において、洗掘穴の形状は相似形状に従わないが、この領域においては洗掘穴の発達に要する時間は発達領域の経過時間よりはるかに短いので、洗掘過程の初期すなわち、 $t=0$ から本モデルを近似的に適用する。Hassan・Narayananのデータと修正Hamming's predictor-corrector法を用いた計算結果の比較を図-4に示す。

4. 結言

洗掘形状の相似性及び、砂の連続方程式を基づき水門下流の局所洗掘に関する半理論モデルを求めた。本モデルと $K=3.0$ 、 $m=2.5$ 、及び $C_b=0.0109$ を用いて、複雑な洗掘過程をある程度の精度で、簡単に予測することができる。本方法は $4.0 \leq u_{ma}/v_s \leq 14.0$ 、 $2.7 \leq D/ds \leq 28.6$ 、 $8.0 \leq L_p/D \leq 95.8$ の範囲で使用できる。

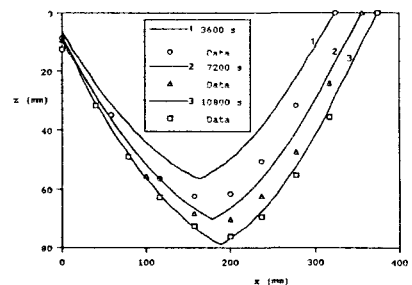


図-4 Generation of Scour Process of Hassan・Narayanan (Exp.49)