

鉛直もぐり噴流による洗掘深の予測について

Study on the Estimation of Scour Depth from Submerged Impinged Jet

西日本工業大学 正員 ○赤 司 信 義
山口大学工学部 正員 斎 藤 隆

1. はじめに

鉛直もぐり噴流による洗掘は洗掘の進行に伴って流れや砂移動形態が変化する複雑な流れであって Rouse 以来数多くの研究がなされているものの、そのほとんどは次元解析的手法によるものである。著者らはこれまでに洗掘穴内の流況と砂移動の観察結果より洗掘機構を初期、中期、後期の三期に分け各期の機構をモデル化して検討してきた。最終洗掘状態へと続く後期洗掘機構は砂堆部分の洗掘穴への間欠の崩落および洗掘穴からの浮流砂拡散によって特徴づけることができ、洗掘は浮流形式で堆積部頂点（砂堆頂）を越えてでいていく砂量によって進行することを明らかにしてきた。最終洗掘状態は洗掘穴内で砂移動があっても砂堆頂を越える砂量がなくなることによって定義されるが、この状態を数値的に求めようとする場合砂堆頂形成過程がかなり実験的傾向と一致せねばならない。これまでの解析モデルは洗掘機構の大略を把握するという観点から砂堆頂下流斜面が安息角勾配を形成することなどの形状特性を考慮せずに取り扱ってきた。

本研究は最終洗掘状態に関する上述の考えのもとに、これまでの解析モデルに洗掘形状特性を導入して洗掘過程を解析し、最終洗掘深を求めようとするものである。又、後期洗掘の解析に用いた基礎式をもとに洗掘深の時間的変化率を考察し、最大洗掘深の時間的変化の予測式を示そうとするものである。

2. 洗掘解析モデル

ここで取り扱う洗掘解析モデルの内、初期・中期の洗掘モデルや後期において洗掘量を規定する浮流砂拡散はこれまでに取り扱ったものと同じであるから、これらについては解析に用いた主要な式と共にモデルの概略を示しておく。

(1) 河床変動基礎式および流れのモデル

洗掘領域各断面の流砂量および洗掘深の時間的変

化は非平衡状態での砂移動による河床変動の式で評価する。平衡状態および非平衡状態での無次元掃流砂量をそれぞれ Φ_0 、 Φ とし砂粒子の平均移動距離を L とするとき砂粒の連続条件は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \xi} = \frac{B_0}{L} \cdot (\Phi_0 - \Phi), \quad \xi = \frac{x}{B_0} \dots \dots \dots (1)$$

Φ は上式を $\xi = 0$ で $\Phi = 0$ の条件で積分して求められる。平衡状態での流砂関数 Φ_0 は次式を用いる。

$$\Phi_0 = k \left(\frac{u_*^2}{sgd} \cdot \frac{1}{\sin \theta + \mu \cos \theta} \right)^m \cdot \left(1 - \frac{u_* c^2}{u_*^2} \right) \dots \dots \dots (2)$$

河床変動の基礎式は

$$\zeta = z/B_0, \quad \tau = (u_0^2 / sgd)^{m-0.5} \cdot u_0 t / B_0$$

とおくと次式で与えられる。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial \tau} = \frac{1}{1-\lambda} \frac{d}{B_0} \left(\frac{sgd}{u_0^2} \right)^m \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \dots \dots \dots (3)$$

衝突噴流の特性は噴出孔から砂面までの衝突距離によって異なることから洗掘面に沿う流れを最大洗掘深の位置にある水平砂面に沿う流れで近似する。このようにモデル化することによって洗掘の進行に伴う流れの変化が最大洗掘深の時間的変化によって表わされる。

(2) 初期・中期洗掘計算法

初期洗掘における河床変動量は小さいので、流れは水平砂面に沿う流れとみなせ、衝突噴流特性を式(3)に代入して、場所的な洗掘深の時間的変動量が定まる。 $\zeta_{\max} = 0.5$ となる洗掘形状をもつ $\Delta \tau$ を求め $\Delta \zeta / \Delta \tau$ に乗することで洗掘深の場所的変化量が定まる。

中期洗掘では τ 時刻の形状に対して洗掘穴内での最大傾斜角及び最大傾斜角より 10° 緩い点を求め、その区間で砂のまき上げを考慮して移動し始める砂量 Φ_0 が最大傾斜点での値から直線的に 0 になるとして $\Delta \tau$ 後の河床変動量を求める。最大傾斜点まで

は初期洗掘と同様な方法で求める。最大傾斜角が砂の水中安息角をこえるとき、流体力と土圧力とのつり合いから不安定斜面の間欠的崩落のないことをたしかめる。

(3) 後期洗掘計算法

洗掘穴斜面勾配が安息角勾配より急な不安定斜面が現われ、この不安定斜面に働く土圧力が流れの変向による流体力よりも大きいとき、この不安定部分は洗掘穴へ崩落する。その後こうした間欠的崩落と洗掘穴からの浮流砂拡散とを繰り返しながら後期洗掘は進行する。計算モデルを示す前に、まず実験的に定められる洗掘平均形状特性をこれまでの実験結果からみていく。

a) 後期洗掘形状特性

図1は後期洗掘形状の概略を示したもので、図2には、噴流中心より片側の洗掘平均形状の時間的変化を示した。後期洗掘形状は間欠的崩落のため図1に示すような変曲点をもつことで中期形状の区別できる。砂堆部は砂堆頂上下流にはば砂の水中安息角

に等しい斜面を形成している。これは洗掘穴からのふき上げ流れによって拡散された砂粒子が砂堆頂付近に沈降し、砂堆頂上下流の斜面上を転落していくことによる。洗掘穴形状は洗掘穴内に生ずる渦によって二次曲線的な形状を示し、変曲点の位置は x 方向にほとんど変化していない。

時間的に変化する洗掘形状に対して、噴流中心線上の最大洗掘深位置を原点にとり、上向きに Z 軸をとって、各時間の洗掘穴形状を示したものが図3である。同図より、一定の噴流条件のもとでは洗掘穴形状は一曲線で十分近似されることが分かる。

洗掘形状を代表長さ D で無次元化するとき、後期洗掘形状が一曲線で近似されるとすれば洗掘の進行に伴って、噴流中心から変曲点までの距離と最大洗掘深位置から変曲点までの高さが共に時間的に大きくなることになる。洗掘穴への流入運動量が增大すれば変曲点の高さは大きくなるが、実際には減少すると考えるべきである。このとき変曲点の位置は洗掘穴中心部へ移動すると考えられるが洗掘深の変化が小さいことから実験的には見出しにくい。

さて、このようにして一曲線で近似されたものを

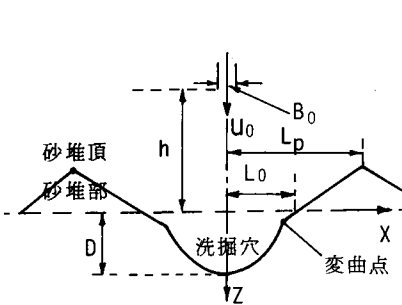


図1 洗掘形状概略図

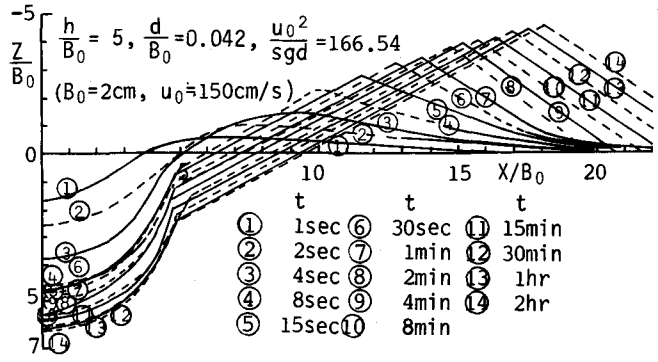


図2 洗掘形状 (実験結果)

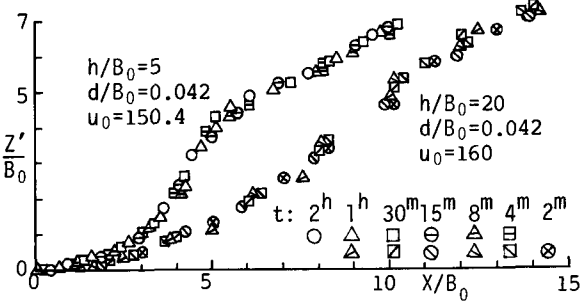


図3 洗掘穴形状

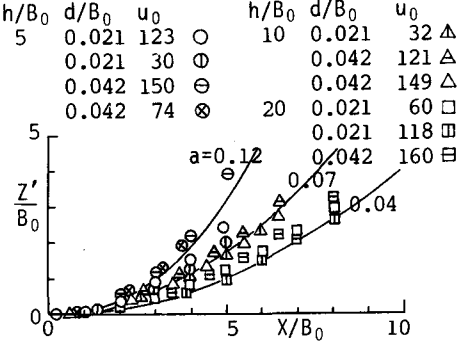


図4 洗掘穴形状

まとめたものが図4である。衝突距離が短いと洗掘穴に進入する噴流幅が狭いため洗掘穴の曲率は大きくなっている。洗掘穴での砂粒子は激しい乱れを伴う渦によって、又噴流の動揺によって誘起される著るしい圧力変動によって移動することを考えれば一概に言及はできないが、ここでは、衝突距離によってのみ洗掘穴形状は変化すると考えて、次式で形状を近似する。

$$\frac{Z'}{B_0} = a \left(\frac{x}{B_0} \right)^2, \quad a = 0.42 \left(\frac{h}{B_0} \right)^{-0.78} \dots\dots\dots (4)$$

図4中の実線は上式を記入したものである。

(b) 間欠的崩落モデル

$\tau + \Delta\tau$ 時刻での不安定斜面をもつ過渡的な洗掘形状に対し、洗掘穴斜面での力の均衡が保たれた安定的な形状を上述の洗掘形状特性を導入し、力のつり合い式と砂量の連続条件をもとにして次のように求める。

図5に示すように過渡的な形状について洗掘穴形状を式(4)で仮定し、流体力Fと土圧力Pとが等しくなる点Cを定める。斜面deに働く流体力は、 $F = M \cdot (1 - \cos \theta)$ にて求め、運動量Mは自由噴流の速度分布を積分して定める。de面に働く土圧力Pは、de面を壁体と考え、砂の摩擦角を ϕ 、仮想すべり面をaf、壁体の傾き角を θ 、壁体と砂との摩擦角を ϕ とし、又砂堆部上面の傾斜角を洗掘形状特性より ϕ とおいてクーロンの土圧力の水平成分として定める。 $\tau + \Delta\tau$ 時刻の平均洗掘形状は最大洗掘深の位置を逐次近似的に変えながら力のつり合い点eを定め、洗掘量(a-b-c)と崩落砂量(c-d-e-f-g)とを一致させることによって求めることができる。

(c) 浮流砂拡散モデル

洗掘穴からのふき上げ流れによる拡散モデルの概略を図6に示す。ふき上げ点は同図中のA点であり $\tau + \Delta\tau$ 時刻の洗掘深の時間的変化率が0になる点である。洗掘穴からの掃流砂量はこの点を原点として、図6中に示すS軸にそってふき上げられるとするもので、濃度の時間的変化、流れ方向の濃度勾配変化、y方向の速度成分、渦動粘性係数の場所的変化を無視すると次の拡散方程式が導かれる。

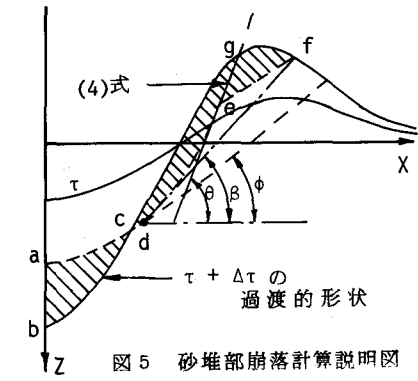


図5 砂堆部崩落計算説明図

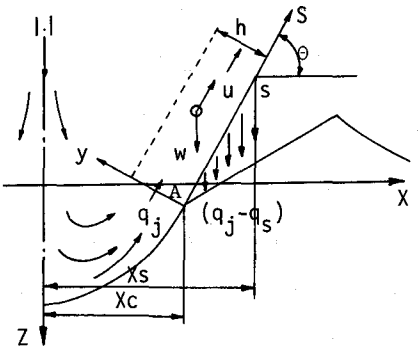


図6 浮流砂拡散モデル説明図

$$\frac{\partial}{\partial s} \{ C \cdot (u - w_0 \sin \theta) \} = \epsilon \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + w_0 \cos \theta \frac{\partial c}{\partial y} \dots\dots\dots (5)$$

ふき上げ地点の流送砂量を q_j 、断面Sを通過する砂量を q_s として、 q_s/q_j は、これまでに、上記拡散方程式から求められる濃度分布を用いて次のように示された。

$$\begin{aligned} \frac{q_s}{q_j} &= \sum_{n=1}^{\infty} \exp(F_n - F_j) \cdot \\ &C_n' \frac{w_0 h' \cos \theta}{\epsilon} \left/ \frac{k^2 h'^2}{\epsilon} \right. \\ F_n &= \ln \left| \frac{u}{u_0} - \frac{w_0 \sin \theta}{u_0} \right| - \frac{1.6}{a} \frac{k^2 h'}{u_0} \left(\frac{u_j}{u_0} \right)^2 \\ &\cdot \left\{ - \left(\frac{u_0}{w_0 \sin \theta} \right)^3 \ln \frac{u}{u_0} + \left(\frac{u_0}{w_0 \sin \theta} \right)^2 \frac{u_0}{u} \right. \\ &+ \frac{1}{2} \frac{u_0}{w_0 \sin \theta} \left(\frac{u_0}{u} \right)^2 \\ &\left. + \left(\frac{u_0}{w_0 \sin \theta} \right)^3 \ln \left| \frac{u}{u_0} - \frac{w_0 \sin \theta}{u_0} \right| \right\} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

C_n' や k は ϵ 、 h' 、 θ および w_0 によって規定され

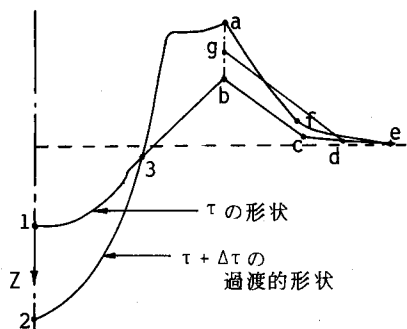


図 7 砂堆部計算説明図

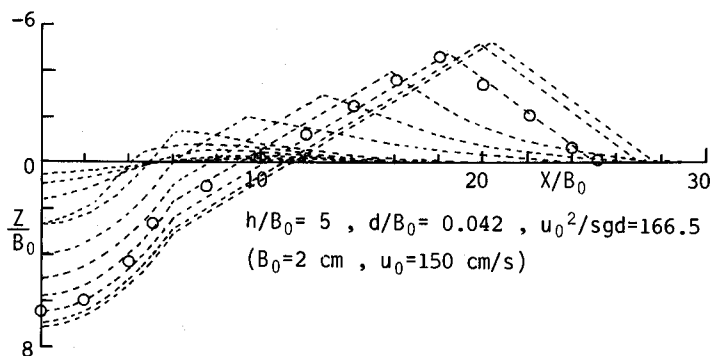


図 8 洗掘形状 (計算結果)

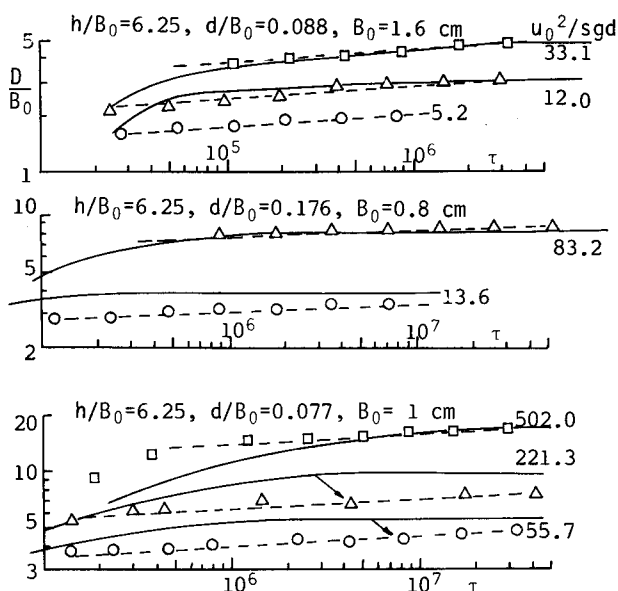


図 9-a 最大洗掘深の時間的变化

る。 F_j は F_s の式中の u にふき上げ流速 u_e を代入した値である。

上式によって得られる q_s/q_j の関係をもとにして無次元流砂量の場所的变化が次式で求められ、こ

$$\frac{\partial \phi}{\partial \xi} = \phi_j \frac{\partial \phi/\phi_j}{\partial \xi} \dots \dots \dots (7)$$

の式を河床変動の基礎式に導入することでふき上げ点下流側の河床変動量を求めることができる。このようにして求められる $\tau + \Delta \tau$ 時刻の過渡的な形状は図 7 (概略図) にみるように砂堆頂下流面勾配が安息角勾配より急になる。砂堆頂を越えて通過した砂量は砂堆頂直下流に沈降し、砂堆頂下流面は前述

したように安息角斜面となることを考慮して、図に示すように通過砂量 (a b c d e f a) が安息角斜面堆積量 (g b e d g) に一致するよう砂堆頂下流面を修正する。この時刻の平均形状はこの過渡的形状に対して間欠的崩落モデルを用いて求める。

3. 洗掘計算結果

洗掘計算に使用した諸数値を示しておく。砂の水中比重 S を 1.65、空隙率 λ を 0.4、水中安息角を 31° 、砂粒の摩擦係数を 1.0、移動砂量強度を規定する係数 k を 8.0、砂粒の平均移動距離を与える λ_1 を 100 とした。

洗掘形状：図 8 に計算結果を示した。同図中には実験時間 2 時間での洗掘形状を $\circ$ 印で示している。洗掘穴形状に実験形状を導入し、砂堆頂下流斜面に安息角斜面を形成させたが、変曲点の位置および砂堆頂の位置の時間的推移状況は非常によく実験の傾向と一致している。

最大洗掘深の時間的变化：計算結果を図 9 に示した。図中

点線は実験描点の平均線である。実験値と計算値はよく一致していて力のつり合い条件および砂堆頂を通過する砂量を適切に評価することができたと考える。

最終洗掘深：最終洗掘状態は砂堆頂を越える砂量がない状態であるが、ここでは砂堆頂を通過する砂量（図7のg b c d部分）が過渡的な洗掘量（図7の1 2 3部分）の0.1%を下回るときをもって最終洗掘状態の判定を行なった。図10には $h/B_0 = 6.25$ のときの最終洗掘深を示した。同図中の記号は実験時間1～2時間のときの最大洗掘深を示している。これらの値はほぼ最終洗掘深に近い値となっている。最終洗掘状態は非常に緩い時間的変化で漸近的に出現するため実験的な観察はかなり困難であるが、一応の予測は可能となった。

4 後期洗掘における最大洗掘深の時間的変化
後期洗掘深は砂堆頂を越える砂量に規定されることと $\Delta \tau$ 時間での洗掘深の変化量は場所的に大きな変化はないことを考慮すれば洗掘深の時間的変化率は次式で表わされる。

$$\frac{\Delta \zeta_0}{\Delta \tau} = \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{sgd}{u_0^2} \right)^{15} \frac{d}{B_0} \Phi_j \frac{\Phi_p}{\Phi_j} / \xi_p \dots\dots\dots(8)$$

Φ_p は砂堆頂を通過する無次元浮流砂量、 Φ_j はふき上げ点の無次元掃流砂量で、 $\xi_p = L_p / B_0$ 、 $\Delta \zeta_0 = \Delta D / B_0$ である。 ξ_p は ζ_p に比例しほぼ、 $\xi_p = (2 \sim 5) \cdot \zeta$ で表わされる。近似的に Φ_j は Φ_p に等しいから

$$\Phi_j \propto \left\{ \frac{u_0^2}{sgd} \cdot \left(\frac{u^*}{u_m} \right)^2 \cdot \left(\frac{u_m}{u_0} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots(9)$$

と表わされる。 u^*/u_m は砂粒径 d/B_0 に関係する。衝突噴流の最大流速の変化は、これまでに次式で示された。

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{u_j}{u_0} \cdot \frac{u_m}{u_j} \cdot \frac{u_j}{u_0} = \sqrt{7.2 / \left(\frac{h}{B_0} + 3.2 \right)} \dots\dots\dots(10)$$

u_m/u_j は洗掘穴付近では1であり、砂堆部付近で

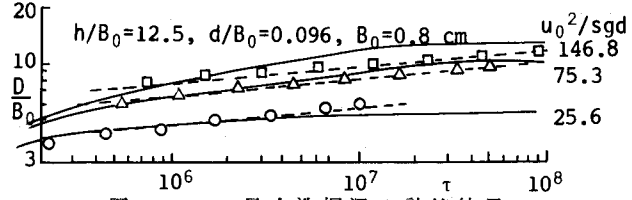


図9-b 最大洗掘深の計算結果

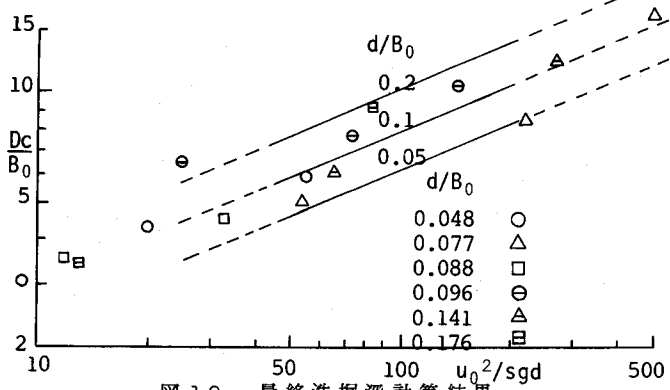


図10 最終洗掘深計算結果

は次式として示された。 α はほぼ1である。

$$\frac{u_m}{u_j} = \sqrt{0.9 / \left(\frac{\alpha^s}{h} + 0.4 \right)} \dots\dots\dots(11)$$

砂堆頂までの流送距離 s は ξ_p に比例する。 h/B_0 が ζ_0 と同程度であれば砂堆頂付近の u_m/u_0 は $u_m/u_0 \propto (h/B_0 + \zeta_0)^{-1/2}$ となるから、 Φ_j は $(h/B_0 + \zeta_0)^{-1.5}$ にほぼ比例する。 Φ_p/Φ_j は $\exp(F_p - F_j)$ に比例し、 F_p 、 F_j は(5)式の中括弧の第2、3項より大略的に

$$F_p, F_j \propto \left(\frac{h}{B_0} + \zeta_0 \right)^{1/2} + \left(\frac{h}{B_0} + \zeta_0 \right)$$

と考えられる。 ζ_0 の変化が少ないとき $\Phi_j \cdot \Phi_p / \Phi_j$ は ζ_0^n に比例させた形で近似できる。このとき、 $d\zeta/d\tau \propto \zeta^n$ となるから、次式の形で、

$$\zeta = a \cdot \tau^b \dots\dots\dots(13)$$

最大洗掘深の時間的変化をとらえることができよう。係数 a 、 b は u_0^2/sgd 、 d/B_0 、 h/B_0 によって表わされる関数となろう。

後期洗掘深の時間的変化は図9より(13)式で表わされることが分かる。同図より認められるように、 h/B_0 、 d/B_0 が同じ場合、 u_0^2/sgd が変化しても、変化率は変わらない。 h/B_0 、 d/B_0 が変わることによって洗掘深の変化率が変わっている。変化率 b を各実験値より読み取って描点したものが図11

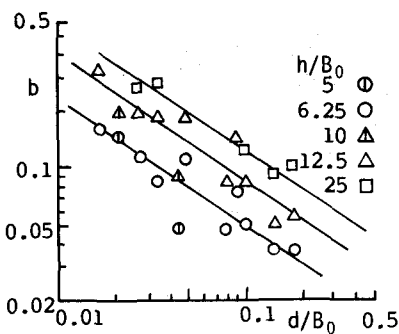


図 11 係数 b

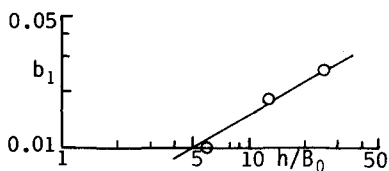


図 12 係数 b_1

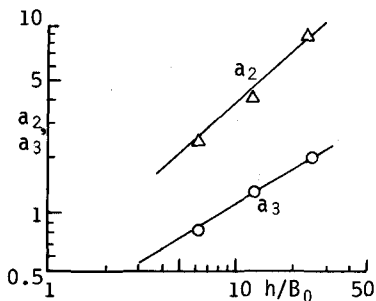


図 15 係数 a_2, a_3

である。これらをまとめると次式が得られる。

$$b = b_1 \cdot \left(\frac{d}{B_0}\right)^{-0.68}, \quad b_1 = 0.004 \left(\frac{h}{B_0}\right)^{1.58} \dots\dots\dots (14)$$

又、 a の値を読みとって描点したものが図 13 であり実験式として示すため、図 13 から、図 14、15 を示した。これらの図より a は次式として表わされる。

$$a = a_1 \left(\frac{u_0^2}{sgd}\right)^{0.5}, \quad a_1 = a_2 \left(\frac{d}{B_0}\right)^{a_3}$$

$$a_2 = 0.5 \left(\frac{h}{B_0}\right)^{0.9}, \quad a_3 = 0.29 \left(\frac{h}{B_0}\right)^{0.6}$$

..... (15)

5. おわりに

洗掘過程解析モデルに砂堆頂上下流部の斜面勾配は安息角勾配を呈することおよび洗掘穴形状は二次曲線形状を呈することの二点の洗掘形状特性を導入して、洗掘過程を解析した。得られた計算結果はかなり実験

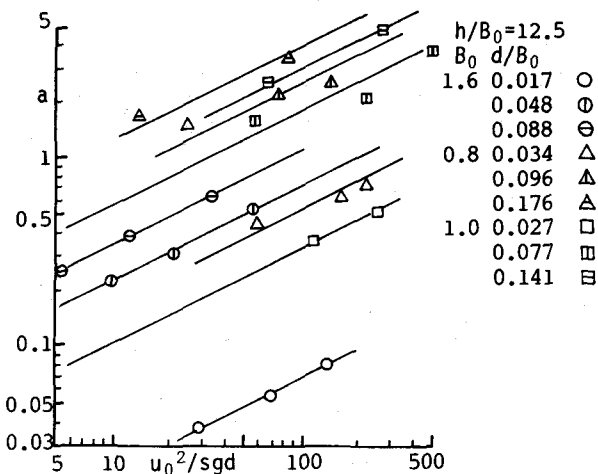


図 13 係数 a

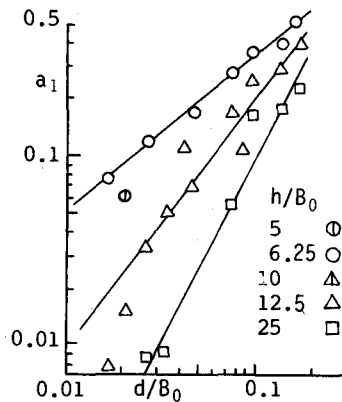


図 14 係数 a_1

結果と一致し、最終洗掘深の予測が可能となった。

又、後期洗掘における最大洗掘深の予測のため実験式として、表示された。

参考文献

- 1) Rouse, H.: Criteria for similarity on the transportation of sediment, Proc. Hyd. Conf., Univ. of Iowa Bull. 20, 1940.
- 2) 栗津清蔵：射出水による洗掘について、土木学会論文集、第 38 号、1956。
- 3) 斎藤 隆・赤司 信義・亀田 芳満：衝突および再接触噴流による壁面噴流、山口大学工学部研究報告、28 巻、1 号、1977。
- 4) 赤司 信義・斎藤 隆：鉛直噴流による洗掘に関する研究、土木学会論文集、298 号、1980