

鉛直二次元衝突流れによる洗掘に及ぼす気泡混入の影響

REDUCTION EFFECT BY ENTRAINED AIR TO SCOUR FROM AN IMPINGING JET

赤司信義*・斎藤 隆**

By Nobuyoshi AKASHI and Takashi SAITOU

This paper presents the reduction effect by entrained air to scour from plunging jet on the basis of the experiments and the numerical analysis. The experiments of scour were carried out under a shallower tailwater depth than the penetration depth of airbubbles which is observed under a fully deep tailwater. The characteristics values of scour profile, such as the maximum scour depth and the height of the ridge and so on, were compared with those in the case of the submerged impinging jet. On the other hand, equilibrium maximum scour depth for the asymptotic steady state are calculated by making use of the numerical analysis model. The calculated results agree well with the experimental results. And the reduction effect by entrained air is shown by the equations arranged the calculated results.

Keywords: scour, air-entrained jet, impinging jet

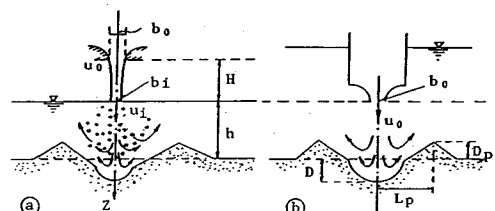
1. 緒 言

衝突流れによる洗掘現象は、堰や段落部等の水理構造物の安全性や河床の安定化を図るうえで重要な問題であるが、今日なお多くの不明な点を有している。これは局所洗掘が流速や掃流力に関する流れ特性と境界面形状としての洗掘形状および非平衡性や砂移動形式等に関する砂移動特性の時間的空間的な相互作用によるものであって、これらの特性を規定する水理的条件ともいべき要因が複雑に関連し合うことに起因している。一般的に、関連する要因としては、流速減勢に寄与する気泡混入の影響、衝撃力等に関連する砂礫混入の影響、ふるい効果としての河床構成材料の影響、非対称洗掘としての上流閉塞および流れの衝突角度の影響、下流水深の浮流砂拡散に及ぼす影響等が挙げられる。これらの要因をすべて含めた形で現象を論ずることは困難であり、現象をより単純化した形で個々の要因を消去法的に解明していくことが重要と考える。

さて、堰等からの自由越流水脈による洗掘を単純化する

れば、図—1(a) に示すような鉛直突入流れによる洗掘とみなせる。さらに、水中に巻き込まれる気泡の存在を無視すれば、図—1(a) の u_i , b_i を図—1(b) の u_o , b_o に対応させた鉛直もぐり噴流とみなすことができる。これまでの鉛直衝突流れによる洗掘に関する研究の多くは図—1(b) の状態を対象にしたものである^{8),10)}。気泡混入の影響を実験的に把握しようとした研究としては、図—1(b) の状態で半円形ノズルより気泡を混入させた Johnson の研究⁷⁾ が挙げられる。Johnson は Doddiah⁹⁾ の次元解析的手法による自由越流水脈による洗掘実験を基本にして最大洗掘深の気泡混入による洗掘の軽減効果を明らかにしているが、強制的な空気混入実験であるので実際の落下水脈による空気混入状態との対応は不明である。

本研究は、鉛直落下水脈の水面突入によって形成され



図—1 衝突流れによる洗掘

* 正会員 工修 西日本工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒800-03 福岡県京都郡苅田町新津)

** 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科 (〒755 山口県宇部市常磐台)

る空気混入流による洗掘過程を気泡混入のないもぐり噴流による洗掘過程と比較することによって気泡混入の洗掘特性に及ぼす影響、特に気泡混入による洗掘軽減機構を明らかにすることを目的としたもので、実験的観察に基づいて洗掘機構に関連する洗掘形状特性および砂移動特性の検討を行うとともに、気泡混入による洗掘軽減機構は気泡混入流の流速や底面せん断力等の流れ特性によって評価されると考え、この流れ特性をもぐり噴流による洗掘解析モデルに導入することで洗掘の進行過程や洗掘軽減量を数値的に解析し、実験値との比較検討を行ったものである。

2. 洗掘解析手法

著者らはこれまでに鉛直もぐり噴流による洗掘過程を初期、中期、後期に分け、各期の洗掘機構を次のように定義づけて数値解析モデルを見出ししてきた^{1)~3)}。初期洗掘では河床変動量が小さく、流れはほぼ水平砂面に沿って流下し、河床の変化はこの流れによる砂移動の場所的变化に起因する。中期洗掘では洗掘面に沿う流れのはく離が堆積部の形成に大きく寄与する。後期洗掘では堆積部の洗掘穴内に滑り落ちようとする土圧力と洗掘穴内での流向の急変に伴う流体力との不均衡に起因して堆積部が洗掘穴内に間欠的に崩落する。さらに、洗掘の進行は堆積部頂点を越える浮遊砂量によって決定される。

気泡混入を伴う衝突流れによる洗掘ともぐり噴流による洗掘との相違点は、実験的観察の結果、底面せん断力や流速減勢特性が異なるのみで内的要因としての上述の洗掘機構には本質的な差異はないと考える。本章では、洗掘解析に導入する流れのモデルや洗掘解析モデルの概略を解析に使用する主要な式とともに記しておく。

(1) 洗掘計算基礎式

河床変動の基礎式は非平衡状態での流砂式を導入して次式となる。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial \tau} = \frac{1}{1-\lambda} \frac{d}{b_i} \left(\frac{sgd}{u_i^2} \right)^{1.5} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \xi} = \frac{b_i}{\lambda_1 d} (\Phi_0 - \Phi) \dots\dots\dots (2)$$

$$\Phi_0 = \kappa \left(\frac{u_*^2}{sgd} \cdot \frac{1}{\sin \theta + \mu \cos \theta} \right)^{1.5} \cdot \left(1 - \frac{u_{*c}^2}{u_*^2} \frac{\sin \theta + \mu \cos \theta}{\mu} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\zeta = Z/b_i$ 、 $\xi = X/b_i$ 、 $\Phi = q_0/\sqrt{sgd^3}$ 、 $\tau = u_i^2/sgd \cdot u_i t/b_i$ 、 u_* は摩擦速度、 u_{*c} は限界摩擦速度、 λ は空隙率、 d は砂粒径、 u_i は水面突入流速、 b_i は水面突入幅、 s は砂の水中比重、 g は重力加速度、 λ_1 は砂粒子の平均移動距離係数、 κ は移動砂粒強度係数、 μ は砂粒間摩擦係数、 θ は河床勾配、 Φ_0 、 Φ はそれぞれ平衡状態および非平衡状態での無次元掃流砂量である。なお、

式(3)は河床勾配の影響を考慮している⁹⁾。 Φ は式(2)を $\xi=0$ で $\Phi=0$ の条件のもとに積分して求められる。

(2) 流れのモデル化

洗掘がある程度進行したときの洗掘穴内に進入する流れは、洗掘穴内に出現する渦によって噴流中心軸が動揺し、よどみ点が洗掘穴内砂面上を非周期的に移動するといった非常に不安定な流れである。洗掘の進行は対数時間的な現象であって、砂移動機構を一連の洗掘過程にわたって説明するためには、瞬間的な流れの変化をある一定時間内で平均化した形で、時間的空間的に評価せねばならない。ここでは、前論文¹⁾と同様に、流れ特性の時間的な変化は最大洗掘深の時間的な変化、すなわち噴流特性を規定する衝突距離(ノズルから最大洗掘深までの距離)の時間的な変化によって表わされると考え、洗掘面上の流れを実験的に安定した特性を示す水平粗面固定床上の流れで近似するものである。洗掘解析のために必要な流れ特性を以下に示す。

気泡混入流れ特性を規定する気泡混入率は、ノズル幅 $b_0=1, 2$ cm に対して、 $H/b_0=1\sim 30$ 、 $u_0 b_0/\nu=(0.7\sim 6)\times 10^4$ の実験範囲に対して次式と示された。

$$q_a/q = 8.2 \times 10^{-9} \cdot (F_J - 2 \times 10^6) \dots\dots\dots (4 \cdot a)$$

$$F_J = \left(\frac{u_0 b_0}{\nu} \right)^{1.4} \cdot \left(\frac{u_0}{\sqrt{gH}} \right)^{0.6} \cdot \left(\frac{H}{b_0} \right)^{0.9} \dots\dots\dots (4 \cdot b)$$

ここに、 q は水流量、 q_a は空気混入量、 H はノズルから水面までの落下高さ、 u_0 はノズルでの噴出速度、 b_0 はノズル幅、 ν は動粘性係数である。

水面突入点で一樣なボイド率 f_0 をもち、気泡の水流に対する相対速度を無視し、空気混入量 q_a と水流量 q の比が1に対して小さいとすれば、 $f_0 \approx q_a/q$ と表わされることおよびボイド率は近似的に相対密度差を与えるものであることを考慮すれば、水面突入流れを密度噴流として取り扱うことができ、流れ特性を規定する無次元数として密度フルード数 $F_d(F_d^2 = u_i^2/f_0 g b_i)$ を挙げることができる。気泡停滞深さや河床衝突前の流れ特性は密度噴流としての取り扱いにより、質量、運動量、輸送物質保存則に基づく解析結果でよく説明できたことより、衝突後の流れ特性値も衝突前の流れ特性値と同様に次式で定義し、

$$\delta_{0*} = (F_d^2)^{-2/3} \delta_0/b_i, \quad u_{m*} = (F_d^2)^{1/3} u_m/u_i \dots\dots\dots (5)$$

$b_0=1$ cm、 $H/b_0=2\sim 25$ 、 $d/b_0=0, 0.22, 0.40$ 、 $F_d^2=400\sim 1600$ 、 $h/b_0=15\sim 60$ 、 $u_0 b_0/\nu=(1.5\sim 3)\times 10^4$ の実験範囲に対して次のように示された。

$$\delta_{0*} = 0.1178 \cdot \{X_* + X_{*h}/2 + (X_* + X_{*h}/2)\} \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{u_{m*}}{u_{m*j}} = 0.95 + 0.05 \cdot \frac{X_*}{X_{*j}} \quad \text{for } X_* < X_{*j} \dots\dots\dots (7 \cdot a)$$

$$\frac{u_{m*}}{u_{m*j}} = \sqrt{\frac{1.5}{X_*/X_{*j} + 0.5}} \quad \text{for } X_* > X_{*j} \dots\dots\dots (7 \cdot b)$$

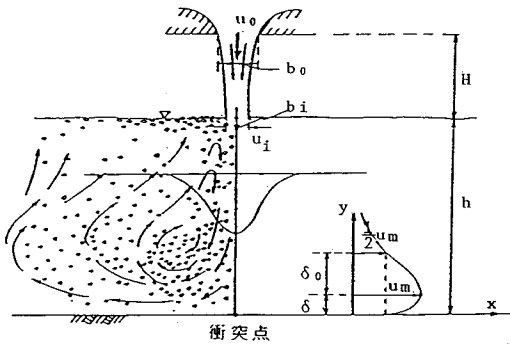


図-2 固定床での気泡混入衝突流れの概略

$$u_{m*j} = 2.1 \cdot (X_{*h} - 0.04)^{-1/2} - (X_{*h} - 0.04)^3 \dots (8)$$

$$X_{*j} = 0.175 - 0.08 \cdot d/b_i \text{ for } X_{*h} > 0.5$$

$$X_{*j} = (0.28 - 0.14 d/b_i) \cdot X_{*h} + 0.035 \text{ for } X_{*h} < 0.5 \dots (9)$$

ここに X_* は図-2 に示すように衝突点から水平下流方向の軸で $X_* = (F_d^2)^{-2/3} X/b_i$, X_{*h} は無次元水深で, $X_{*h} = (F_d^2)^{-2/3} \cdot h/b_i$ であり, 水深が十分深いときに形成される気泡停滞深さ X_e を用いて表わせば $X_{*h} = h/X_e$, X_{*j} は衝突点から最大流速が減少し始める位置までの衝突域長さであり, u_{m*j} は $X_* = X_{*j}$ での u_{m*} の値である. なお, 気泡混入率が非常に小さくなると気泡混入流はもぐり噴流に近い流れとなることから, $F_d^2 > 1500$ では衝突域長さ X_{*j} は一定値と考え, $F_d^2 = 1500$ として式 (9) から定められる値を用いる.

次に掃流砂量を決定し, 洗掘軽減に大きく関係する底面せん断力は, 上記特性値や気泡混入の影響を受けた底面圧力分布特性および壁面噴流の主流部乱れの影響を考慮した境界層速度分布則を境界層運動量方程式に導入して解析した結果⁵⁾, 境界層の発達に関する実験結果を十分に説明し得る値として定められたもので, その際の計算結果の一例が図-3 に示されている. 図中の C_x は抵抗係数で, $C_x = 2(u_*'/u_m)^2$ である. 洗掘解析における便宜さを図るため, 得られた結果をもとに, 図-4 のように近似し, 数式化したものが次式である.

$$C_x = 0.0995 \cdot \left(\frac{d}{b_i}\right)^{0.268} \cdot (F_d^2)^{-0.174} \text{ for } X_* < X_{*j} \dots (10 \cdot a)$$

$$C_x = C_1 X_*^2 \text{ for } X_* > 1.8 X_{*j} \dots (10 \cdot b)$$

$$C_1 = 0.00338 \left(\frac{d}{b_i}\right)^{0.118} \cdot (F_d^2)^{0.18} \cdot X_{*h}^{0.322}$$

$$C_2 = -5.066 \cdot (F_d^2)^{-0.24}$$

X_* が X_{*j} から $1.8 X_{*j}$ の範囲は式 (10・a) と式 (10・b) を対数紙上で直線的に接続する. 図-4 中の点線は計算結果で, 実線は上記の近似式を示したものである. 式 (7) ~ (10) の関係から, h, b_i, d, u_i が一定の場合, 気泡

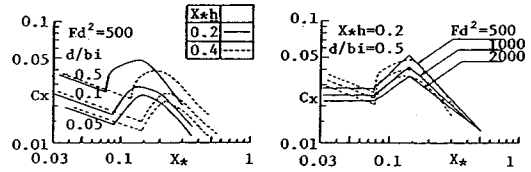


図-3 粗面固定床の壁面抵抗係数解析結果

図-4 壁面抵抗係数近似式との比較

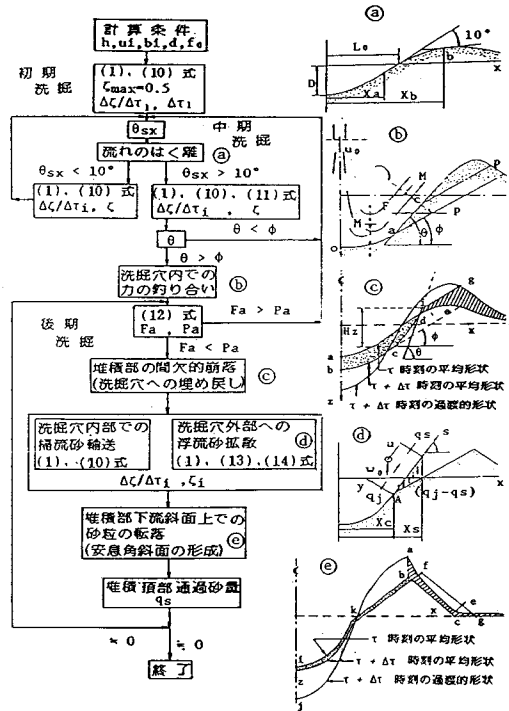


図-5 洗掘解析の手順

混入率 f_0 が大きくなると底面せん断力が小さくなることを示される.

(3) 洗掘解析手順

図-5 は洗掘機構のモデル化に基づく洗掘解析手順を示している. 計算の最初は式 (1), (10) より $\Delta\xi/\Delta\tau_1$ を求め, 最大洗掘深 $\xi_{max} = 0.5$ となる $\Delta\tau_1$ を求め洗掘計算の時間スケールを決定する. そのときの洗掘形状は $\Delta\xi/\Delta\tau_1$ に $\Delta\tau_1$ を乗ずることで求められる. 次に得られた洗掘形状に対して河床勾配 θ を求め最大斜面勾配との差 θ_{sx} が 10° 以上になるとき, 流れのはく離の影響を考慮する. このとき, 流砂量 Φ_0 を次式で与える.

$$\Phi_0 = \Phi_{0a} \cdot \frac{X_b - X}{X_b - X_a} \text{ for } X_a < X < X_b \dots (11 \cdot a)$$

$$\Phi_0 = 0 \text{ for } X > X_b \dots (11 \cdot b)$$

Φ_{0a} は洗掘穴内のはく離始点 X_a (図-5(a)) での掃流砂量である. こうした中期洗掘を繰り返していくと洗掘

穴内部に砂の水中安息角 ϕ より大きな勾配をもつ斜面が形成される。このとき、次式で洗掘穴での流向の急変に伴う流体力 F_a および洗掘穴内に滑り落ちようとする土圧力 P_a を求める。

$$F_a = M_1 \cdot (1 - \cos \theta) \dots \dots \dots (12 \cdot a)$$

$$M_1 = 2 \rho u_m^2 \delta_0 / (3 \cosh^{-1} \sqrt{2})$$

$$P_a = C_a s g (H_z^2 / 2) \dots \dots \dots (12 \cdot b)$$

ここに C_a はクーロンの主動土圧係数である。 $F_a < P_a$ になるとき、堆積部が洗掘穴へ崩落すると考えて、(c) 図に示す間欠的崩落モデルを適用する。実験の観察によれば間欠的崩落と洗掘穴からの吹き上げを繰り返す過程で、洗掘穴形状は二次曲線的形状になるが、解析上こうした形状を求めることは非常に困難であるので、埋戻しに伴う洗掘穴形状として実験で定められる形状を適用する。さて、このように間欠的崩落が始まると、洗掘穴からの砂粒子の流送はほとんど浮流砂拡散によることになる。このときの流送砂量は、気泡混入の影響を受けた流速逓減特性を導入した拡散方程式をもとに次式¹⁾で定められる。

$$\frac{q_s}{q_j} = \sum_{n=1}^{\infty} \exp(F_s - F_0) \cdot C'_n \cdot \frac{w_0 h' \cos \theta}{\epsilon} / \frac{k^2 h'^2}{\epsilon} \dots \dots \dots (13)$$

$$C'_n = 2(\alpha_n h')^2 / \left(\frac{k^2 h'}{\epsilon} + \frac{w_0 h' \cos \theta}{\epsilon} \right) \cdot \left[\exp\left(\frac{w_0 h' \cos \theta}{2 \epsilon}\right) \cdot \frac{w_0 h' \cos \theta}{\epsilon} \cdot H_n \right] / \frac{k^2 h'^2}{\epsilon}$$

$$H_n = \cos(\alpha_n h') + \frac{w_0 h' \cos \theta}{2 \epsilon} \cdot \frac{\sin \alpha_n h'}{\alpha_n h'}$$

$$2 \cot \alpha_n h' = \alpha_n h' / \frac{w_0 h' \cos \theta}{2 \epsilon} - \frac{w_0 h' \cos \theta}{2 \epsilon} / \alpha_n h'$$

$$\frac{k^2 h'^2}{\epsilon} = (\alpha_n h')^2 + \left(\frac{w_0 h' \cos \theta}{2 \epsilon} \right)^2$$

$$F_s = -\ln \left| \frac{u_m}{u_i} \frac{w_0}{u_i} \sin \theta \right| + \frac{3.0}{\alpha} \frac{k^2 h'}{u_i} \left(\frac{u_{mj}}{u_i} \right)^2 \cdot \left\{ - \left(\frac{u_i}{w_0 \sin \theta} \right)^3 \ln \frac{u_m}{u_i} + \left(\frac{u_i}{w_0 \sin \theta} \right)^2 \frac{u_i}{u_m} + \frac{1}{2} \frac{u_i}{w_0 \sin \theta} \left(\frac{u_i}{u_m} \right)^2 + \left(\frac{u_i}{w_0 \sin \theta} \right)^3 \ln \left| \frac{u_m}{u_i} \frac{w_0 \sin \theta}{u_i} \right| \right\}$$

ここに、 q_s は浮遊砂量、 q_j は吹き上げ点での流砂量である。 $\alpha = X_{*h} / X_{*j}$ であり、 F_0 は上式の F_s の u_m に吹き上げ流速 u_{mc} を代入した値である。 q_s / q_j は

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \xi} = \Phi_j \cdot \frac{\partial \Phi / \Phi_j}{\partial \xi} = \Phi_j \cdot \frac{\partial q_s / q_j}{\partial \xi} \dots \dots \dots (14)$$

であり、これらの関係を式(1)に代入すれば、浮流砂拡散に伴う $\Delta \tau$ 時間後の仮想的な洗掘形状が定められる。そして、この形状に対して力のつり合い、間欠的崩

落および堆積部下流斜面での砂粒の転落モデルを適用して、 τ_i 時刻の洗掘形状が決定される。以後この過程を繰り返すことになる。計算の終了は洗掘形状堆積部頂点を通過する砂量が $\Delta \tau$ 時間での仮想洗掘量の 0.1 % 以下になるときとする。

3. 気泡混入を伴う洗掘実験

(1) 実験装置とその方法

実験は図-6に示すように、2m×1m×0.2mの両面アクリル鋼枠製水槽中央に設けた2cm×20cmの二次元ノズルより噴出させた流れを水面に突入させて行った。ノズルから水面までの落下高 H は3~30cm、水深 h は15~50cm、ノズルでの噴出流速 u_0 は0.8~3m/s、河床均一砂粒径 d は、0.69、0.95、2.6mmの3種類を用いた。洗掘形状の読み取りはモータードライブカメラによって撮影した写真をもとに行った。実験時間は2~4時間とした。なお、水深と流速の条件によって洗掘の進行過程に自由水面の影響が現われるが、実験は自由水面の影響を受けず、洗掘穴下流に形成される堆積部形状が明瞭な三角形を呈する場合を対象として行った。実験手順はまず所定の流速、水深に調節したあと、水面突入点付近に水平板を差し込み、流れを遮断した状態で河床を水平に敷きならした。その後、この平板を瞬間的に引き抜くことで実験を開始した。

(2) 実験結果とその検討

水面突入流れによる洗掘形状の時間的変化の一例を示したものが図-7である。これまでに明らかにしたもぐ

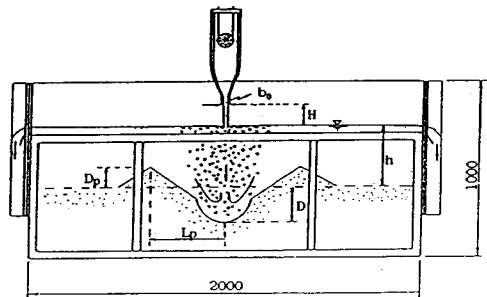


図-6 実験装置の概略 (単位: mm)

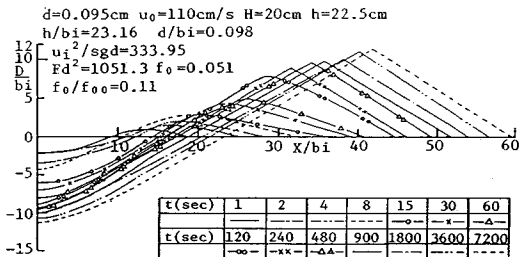


図-7 洗掘形状の時間的変化

り噴流による洗掘形状の時間的変化と非常によく類似して、Rouse⁸⁾が指摘したように堆積部頂点の軌跡は、衝突点を原点として直線的に推移していることがわかる。図中にはその軌跡を点線で示している。図-8は図-7の各時間ごとの最大洗掘深位置を原点として上向きにとったZ'軸とX軸で示される洗掘穴形状を示したものである。やはり、潜り噴流による洗掘でみられたと同様に後期洗掘過程での洗掘穴形状はほぼ同じ曲線形状で近似できることがわかる。図中の実線は洗掘時間が1, 2時間での形状に対して定められた近似曲線であり、点線は洗掘穴に続く堆積部の砂の水中安息角φをもつ斜面を示している。洗掘穴の曲線形状を単純に、 $Z'/b_i = b(X/b_i)^2$ で近似し、各実験で得られた洗掘穴形状係数bをプロットしたものが図-9である。図中の実線はもぐり噴流による洗掘穴形状係数として定められた、次式で示される、実験式⁴⁾である。ばらつきはあるもののほぼ次式で近似できることがわかる。

$$b = 0.42 \cdot (h/b_0)^{-0.78} \text{ for } h/b_0 > 3 \dots\dots\dots (15)$$

固定床での気泡混入衝突流れの実験で衝突域長さは式(9)と示されることから、洗掘穴形状は、単に水深 h/b_i のみでなく、 F_i^2 や d/b_i によっても影響を及ぼさ

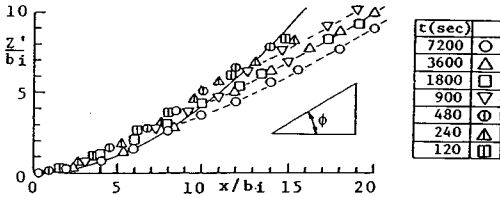


図-8 洗掘穴形状

れると考えるべきであるが、実験的にその差異を見出すことは困難であった。図-10, 11は洗掘継続時間2~4時間での洗掘形状に対して読み取られた堆積部頂点位置 L_p および堆積部高さ D_p を最大洗掘深Dに対して示したものである。もぐり噴流による洗掘実験および洗掘解析において、最終洗掘状態に対するそれらの関係は次式と定められた。

$$\frac{L_p}{b_0} = \left\{ 2.5 \cdot \tanh\left(\frac{h/b_0}{8}\right) + 2.5 \right\} \cdot \left(\frac{D_e}{b_0}\right)^{0.82} \dots\dots\dots (16)$$

$$\frac{D_p}{b_0} = \left\{ 0.8 \cdot \tanh\left(\frac{h/b_0}{7}\right) + 0.3 \right\} \cdot \left(\frac{D_e}{b_0}\right)^{0.9} \dots\dots\dots (17)$$

両図中の実線は $h/b_0=25$ での、上式の関係を示している。図-10をみると、気泡混入を伴う洗掘実験結果はもぐり噴流によるものよりも若干大きくなっている。これは洗掘穴斜面に働く流向の急変に伴う流体力が気泡混入のためもぐり噴流によるものより小さくなり、洗掘穴内に出現する変曲点の高さが低くなるために堆積部頂点位置が洗掘穴中心から遠くなるものと考えられる。図-11は図-10ほどにはもぐり噴流による結果とのずれは少なく最大洗掘深と堆積高との関係はほぼもぐり噴流によるもので近似できる。図-12, 13は最大洗掘深 D/b_i と洗掘無次元時間 τ の関係を示したものである。もぐり噴流による後期洗掘過程における最大洗掘深の時間的変化は、浮遊砂の輸送機構から、 $\log D/b_0 \propto \log \tau$ の関係が示されることおよび h/b_0 , d/b_0 が一定の条件のもとでは u_b^2/sgd が変化しても時間的変化率 $d(\log D/b_0)/d(\log \tau) = m_s$ には変化はなく、 D/b_0 は u_b^2/sgd に比例して変化することを見出している⁴⁾。前者については、図-12, 13から明瞭にその傾向を認めることがで

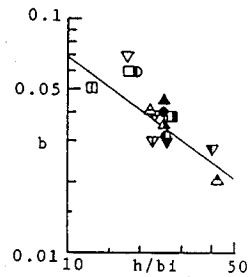


図-9 洗掘穴形状係数bと h/b_i との関係 (記号は表-1参照)

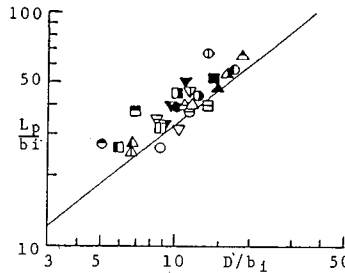


図-10 堆積部長さ最大洗掘深との関係 (記号は表-1参照)

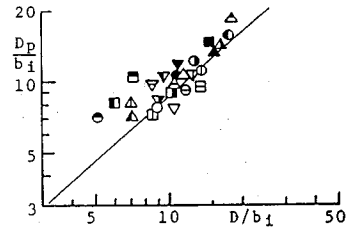


図-11 堆積部高さ最大洗掘深との関係 (記号は表-1参照)

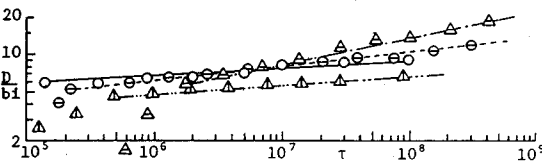


図-12 最大洗掘深の時間的変化 (記号は表-1参照)

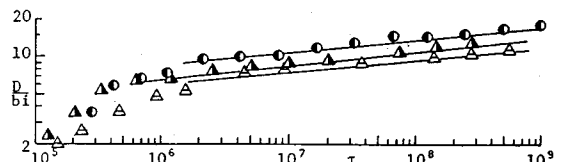
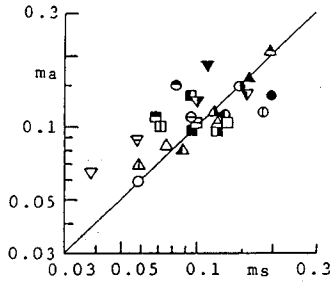


図-13 最大洗掘深の時間的変化 (記号は表-1参照)



図—14 最大洗掘深の時間的变化率の比較 (気泡混入衝突流れによる場合は m_a , もぐり衝突流れによる場合は m_s , 記号は表—1 参照)

きる。後者については、 $h/b_i = 23 \sim 26$, $d/b_i = 0.1$ の条件について示された図—13において、気泡混入条件がほぼ同じデータ ($u_i^2/sgd \approx 440$ (●), 204 (▲) ともに $F_a^2 \approx 4000$) の比較から、その傾向を認めることができる。また、同図中の $u_i^2/sgd \approx 334$ (△) のデータは、気泡混入効果が大きい (ため $F_a^2 = 1051$)、両データの間でなく、 $u_i^2/sgd \approx 204$ (▲) のデータよりさらに小さくなっていて、洗掘軽減に気泡混入が大きく影響することがわかる。

図—14 は最大洗掘深の時間的变化率 $m_a (=d(\log D/b_i)/d(\log \tau))$ を次式²⁾で示されたもぐり噴流による時間的变化率 m_s と比較したものである。

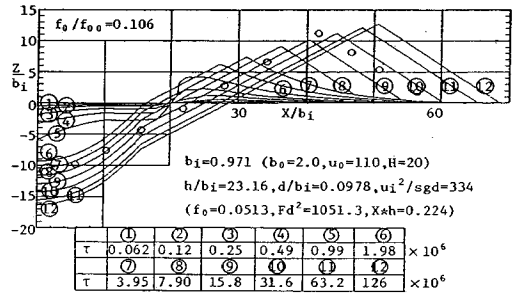
$$m_s = 0.004 \cdot (h/b_0)^{0.58} \cdot (d/b_0)^{-0.68} \dots \dots \dots (18)$$

気泡混入実験値 m_a は、ばらつきはあるもののほぼ上式と合致していることがわかる。

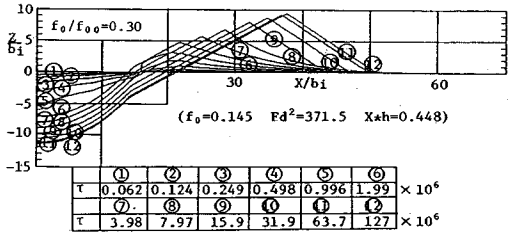
気泡混入洗掘実験結果から、洗掘形状特性 ($Z'-X$, D_p-D , L_p-D) および m_s をもぐり噴流によるものと比較を行ってきたが、それらの関係はもぐり噴流によるものとほぼ一致していることが判明した。このことから気泡混入を伴う衝突流れによる洗掘であってもその洗掘機構はもぐり噴流によるものと大差なく、前章に示した洗掘解析手法をそのまま気泡混入衝突流れによる洗掘解析に導入してさしつかえないことがわかる。

4. 数値解析結果

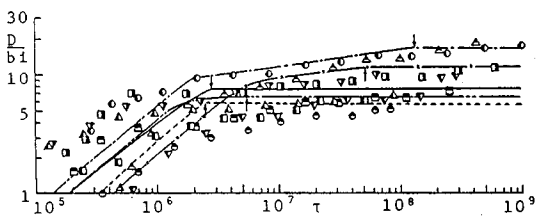
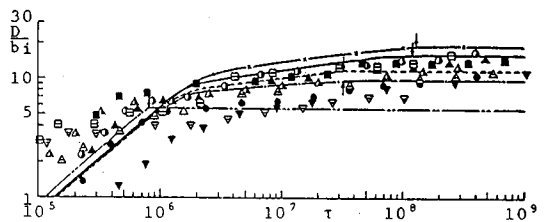
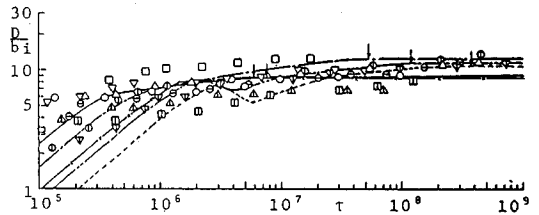
本章では、砂移動機構をもぐり噴流によるものと同様に取り扱い、洗掘軽減機構を気泡混入による流砂量の低下とみなして、洗掘の進行過程がどの程度説明されるのか、また気泡混入率によってどのように最終洗掘深が軽減されるのかを数値的に検討する。解析結果を示す前に解析に取り入れた諸定数を示しておく。砂の水中比重 s は 1.65, 空隙率 λ は 0.4, 水中安息角 ϕ は 31° , 砂粒の摩擦係数 μ は 1.0, 移動砂量強度を規定する係数 α は 8, 砂粒の平均移動距離を与える係数 λ_1 は 100 である。なお浮流砂拡散に関する渦動粘性係数 $\varepsilon/u_m \delta_0$ は、流れ



図—15 洗掘形状の計算結果と実験結果との比較



図—16 洗掘形状の気泡混入率による違い (計算結果)



図—17 最大洗掘深の時間的变化に関する計算結果と実験結果との比較 (記号は表—1 参照)

の代表幅 δ_{0*} の変化がもぐり衝突噴流の変化に近いことから、もぐり衝突噴流による洗掘の場合と同様に 0.04 とした。また、計算時間間隔 $\Delta \tau$ は、洗掘現象が対数時間的な現象であることから、 $\Delta \tau_i = 2 \Delta \tau_{i-1}$ とした。

(1) 洗掘形状

洗掘形状に関する計算結果を実験的に観察された形状

と比較したものが図-15である。図中の○記号は図-7に示す洗掘時間2時間 ($\tau=5.61 \times 10^8$)での形状を示している。若干洗掘穴形状に違いがみられるが、洗掘穴から堆積部上流斜面へと接続する変曲点の出現を力のつり合いモデルによつて的確にとらえていることが認められる。図-16は、 b_i , h/b_i , d/b_i , u_i^2/sgd の条件を図-15と同じにして気泡混入条件のみを変化させ、 $f_0/f_{00}=0.30$ として計算したときの洗掘形状を示したものである。 f_{00} は与えられた条件 u_i , b_i のもとで $h=X_0$ (気泡停滞深さでの流速は気泡上昇速度にほぼ等しく、河床はほとんど洗掘されなくなる) になる仮想的な f_0 の値であつて、 $X_{*n}=1$ として求められ、 $f_0/f_{00}=(h/b_i)^{1.5}/F_d^2=X_{*n}^2$ である。自由水脈の水面突入によつて任意に気泡混入率 f_0 を調節できるものではないがここでは単に f_0/f_{00} の洗掘形状に及ぼす影響をみたものである。図-15と図-16の比較より気泡混入率が多いほど、洗掘量が少なくなることがよくわかる。

(2) 最大洗掘深

図-17は種々の条件のもとで行われた実験結果を計算結果と比較したものである。計算結果は実験値とよく合致して、洗掘の進行を決定づける堆積部頂点を通過する浮遊砂量が、気泡混入の影響を受けた流れ特性を導入した浮遊砂輸送モデルで適切に評価されたものと考ええる。なお、図-17中の矢印は最終洗掘深に達したときの時刻を示したものである。

さて気泡混入衝突流れによる最大洗掘深は次元解析的に、

$$D/b_i = f_{unc}(h/b_i, d/b_i, u_i^2/sgd, f_0/f_{00}, \tau) \dots (19)$$

と示される。上式中のそれぞれのパラメーターを変化させて (h/b_i を10, 20, 40, d/b_i を0.05, 0.1, 0.2, u_i^2/sgd を100, 250, 500, f_0/f_{00} を0, 0.05, 0.15, 0.45)

計算した最終洗掘深 D_c/b_i の結果を示したものが図-18である。図-18の横軸は初期水平砂面上の衝突点での掃流力 u_i^2/sgd が限界掃流力 $u_{ic}^2/sgd=0.05$ を与える水面突入点での流速 u_{ic}^2/sgd で規準化している。 u_{ic} は式(7-a), (10-a)に $X=0$ を代入して求められる値

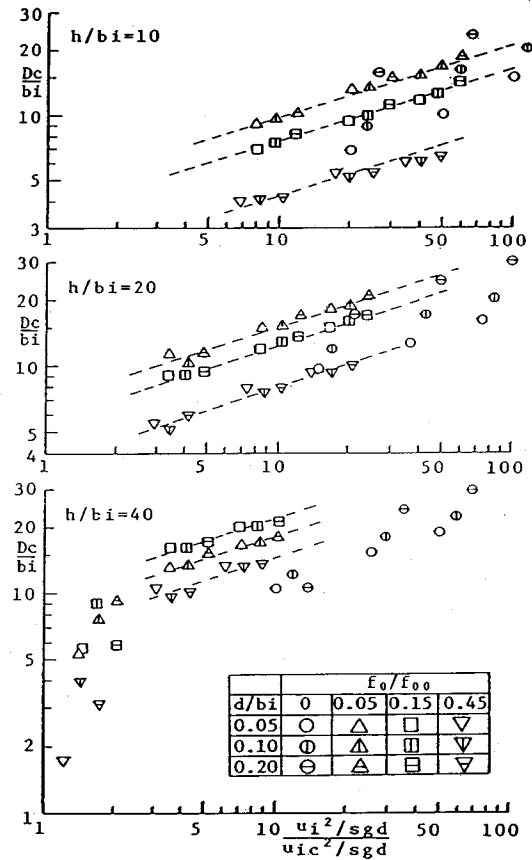


図-18 最終洗掘深の計算結果

表-1 実験条件一覧表

	d(cm)	u ₀ (cm/s)	H(cm)	h(cm)	h/b _i	d/b _i	u _i ² /sgd	Fd ²	f ₀	f ₀ /f ₀₀	図17の計算曲線
▽	0.260	94.0	20.5	10.5	12.37	0.306	116.59	1745.2	0.034	0.02	-----
○	0.260	177.0	10.0	20.0	12.75	0.166	121.14	334.0	0.099	0.14	-----
△	0.260	291.0	19.5	30.5	18.37	0.157	292.33	167.9	0.450	0.47	-----
□	0.069	78.0	10.0	18.0	18.49	0.071	230.20	4452.8	0.006	0.02	-----
⊕	0.069	175.0	10.0	30.0	19.21	0.044	450.15	339.7	0.097	0.25	-----
▲	0.260	84.0	10.0	21.0	20.41	0.253	63.40	2744.1	0.010	0.03	-----
△	0.260	175.0	21.0	29.0	22.20	0.199	170.75	350.6	0.160	0.30	-----x-----
▽	0.069	200.0	15.0	35.0	23.05	0.045	622.01	271.4	0.172	0.41	-----
⊖	0.260	301.0	7.0	43.0	23.07	0.139	248.14	225.3	0.253	0.49	-----
⊞	0.095	110.0	20.0	22.5	23.16	0.098	333.95	1051.3	0.051	0.11	-----
△	0.260	299.0	2.5	47.5	24.39	0.134	224.30	388.6	0.127	0.31	-----
○	0.260	98.0	20.5	21.5	24.48	0.296	118.42	1517.5	0.038	0.08	-----
●	0.069	165.0	13.5	35.5	24.93	0.048	481.17	370.3	0.104	0.34	-----
▲	0.069	99.0	15.0	25.0	25.00	0.069	351.35	1345.9	0.030	0.09	-----
■	0.095	80.0	22.0	18.0	25.03	0.132	322.36	3269.4	0.021	0.04	-----
▽	0.095	105.0	30.0	20.0	25.17	0.120	454.55	1440.6	0.062	0.09	-----x-----
⊕	0.069	77.0	13.0	22.0	25.32	0.079	281.51	4007.4	0.009	0.03	-----
△	0.095	77.0	13.0	22.0	25.32	0.109	204.47	4007.4	0.009	0.03	-----
⊞	0.095	97.0	21.0	22.0	25.50	0.110	329.19	1583.2	0.038	0.08	-----
○	0.260	176.0	3.0	47.0	25.63	0.142	87.66	524.6	0.039	0.25	-----
▽	0.069	77.0	22.0	18.0	25.89	0.099	439.61	3847.6	0.019	0.03	-----
▲	0.260	168.0	10.0	40.0	26.03	0.169	113.75	362.0	0.088	0.37	-----
○	0.260	111.0	3.5	46.5	29.01	0.162	45.62	1562.8	0.008	0.10	-----
▽	0.095	82.0	13.0	36.0	39.39	0.104	209.64	2845.4	0.013	0.09	-----x-----
○	0.260	83.0	11.0	39.0	39.63	0.264	67.67	2805.9	0.011	0.09	-----
△	0.069	79.0	13.0	36.0	40.58	0.078	284.31	3458.0	0.011	0.07	-----
⊞	0.260	75.0	21.0	29.0	41.82	0.375	111.28	4305.1	0.016	0.06	-----

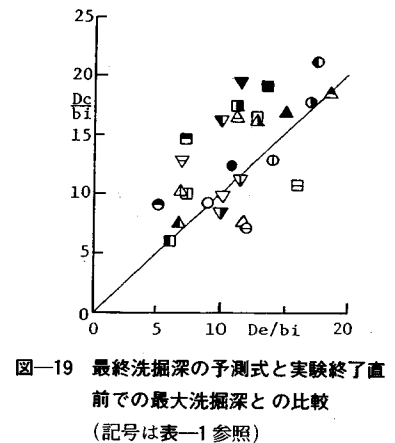


図-19 最終洗掘深の予測式と実験終了直前での最大洗掘深との比較 (記号は表-1 参照)

である。図中の点線は気泡混入時の計算結果についての平均的傾向を示したものである。また、同図中にはこれまでに得られた気泡を混入しないもぐり噴流による洗掘解析結果を合わせて示している。図-18の $h/b_i=40$ に対する結果についてみると、 $u_i/u_{ic}=1$ になるとき、 D_c/b_i が0になる傾向を示している。この傾向を考慮し、これらの図をまとめて最終洗掘深に関する計算結果を定式化したものが次式である。

$$\frac{D_c}{b_i} = 0.72 \cdot \left(\frac{h}{b_i}\right)^{0.79} \cdot \left(1 - \frac{f_0}{f_{00}}\right)^{1.2} \cdot \left(\frac{u_i^2}{u_{ic}^2} - 1\right)^{1/3} \dots\dots (20)$$

もぐり噴流による結果は、抵抗則が異なるため（水面突入流れにおいて $f_0=0$ であっても、水面に突入する自由水脈の界面変動の存在のためもぐり噴流において観察されるポテンシャルコアの形成を認めにくいこと等の理由による）、上式と異なった形で次式と示された。

$$\frac{D_c}{b_0} = 14 \cdot \left(\frac{d}{b_0}\right)^{0.86} \cdot \left(\frac{h}{b_0}\right)^n \cdot \left(\frac{u_0^2}{u_{ic}^2} - 1\right)^{1/3} \dots\dots\dots (21)$$

$$n = 0.09 \left(\frac{d}{b_0}\right)^{-0.52}$$

u_{oc} は文献1)の式(9)、(12)に $X=0$ を代入して求められる。次に、図-19は洗掘時間2~4時間で観察された最大洗掘深 D_e/b_i と式(20)との比較を示したものである。最終洗掘深に関する計算結果 D_c/b_i が実験終了直前での最大洗掘深 D_e/b_i より高くなっているデータが多くみられるが、実験的に最終洗掘深を特定することは困難であって、実験データが必ずしも最終洗掘深ではないことを考慮すれば、予測式との適合はほぼ妥当なものであると考えられる。

5. 結 語

本論文は鉛直衝突流れによる洗掘に及ぼす気泡混入の影響を論じたもので、気泡混入によって洗掘深は軽減されるものの、その時間的変化率や洗掘穴形状および最大洗掘深と堆積頂部位置や堆積高との関係に気泡混入の影響はあまりみられず、もぐり噴流による洗掘でのそれらの関係とほとんど同じであることが見出された。そして、洗掘深の時間的変化もしくは洗掘深の軽減量は気泡混入による洗掘軽減機構を流速や底面せん断力の低下による流砂量の変化とみなし、気泡混入率と関係づけられた流れ特性をもぐり噴流と同様な洗掘穴形成機構としての土圧力関係や洗掘量を決定づける浮遊砂機構等に導入することでほぼ説明できることが示された。

なお、本論文は洗掘軽減機構の説明を行うため、気泡混入流れ特性を実験範囲内で評価したものであるが、実際の落下水脈による気泡混入流と対応づけるためには、きわめて重要な役割をもつ空気混入機構に関する新たな研究とともに空気混入量や流れ特性の関係等より広範な実験条件のもとで、今後さらに明らかにしなければならない。

終わりに、本論文において重要な意味をもつ流れ特性に関する研究に対して、文部省科学研究費奨励研究(A)(課題番号61750525)の補助を受けたことを付記して謝意を表すものである。また、洗掘計算には西日本工業大学電子計算機FACOM M-360を使用したことを記すとともに計算結果の処理等に助言頂いた情報処理センターの方々に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 赤司信義・斎藤 隆：鉛直噴流による洗掘に関する研究，土木学会論文報告集，Vol.298，pp.53~62，1980。
- 2) 赤司信義・斎藤 隆：鉛直もぐり噴流による洗掘深の予測について，第28回水理講演会論文集，pp.191~196，1984。
- 3) Akashi, N. and Saitou, T. : Estimation of equilibrium scour depth from submerged impinged jet, 4th Congress-Asian and Pacific Division, IAHR, Vol.1, pp.167~181, 1984.
- 4) Akashi, N. and Saitou, T. : Influence of water surface on scour from vertical submerged jet, Journal of Hydraulics and Hydraulic Engineering, Vol.14, No.2, pp.55~69, 1986.
- 5) 赤司信義・斎藤 隆・石川 誠：気泡混入を伴う衝突壁面噴流の抵抗係数について，第31回水理講演会論文集，pp.611~616，1987。
- 6) Doddiah, D., Albertson, M.L. and Thomas, R. : Scour from jets, Proc. 5th-IAHR, pp.161~169, 1953.
- 7) Johanson, G. : The effect of entrained air on the scouring capacity of water jets, IAHR, partc, pp.218~226, 1967.
- 8) Rouse, H. : Criteria for Similarity Transportation of sediment, Proc. Hyd. Conf., Univ. of Iowa, Bull. 20., pp.33~49, 1940.
- 9) 椿東一郎・斎藤 隆：突堤による河床の洗掘について，山口大学工学部学報，Vol.13, No.1, pp.71~80, 1963.
- 10) Westrich, B. and Kobus, H. : Erosion of a uniform sand bed by continuous and pulsating jets, Proc. 15th-IAHR, Part A, pp.91~98, 1973.

(1987.4.20・受付)