

直投粒子群の底面衝突後の流動特性とその解明に関する研究

九州工業大学 大学院 学生員○井手野 創 工学部 学生員 野中 雅之  
九州工業大学 工学部 正会員 秋山壽一郎

1.はじめに

海上空港などの人工島建設では施工効率上の理由で土砂直投工がしばしば用いられるが、この工法は大規模な水質汚濁を引き起こすことが問題である。本研究は、広範囲な汚濁の広がりをもたらす直投土砂の底面衝突後の流動特性について基礎的な知見を得たものである。

2.実験

本研究では直投濁水塊と濁水重力密度流の2種類の実験を行った。直投濁水塊は水面付近から粒子と水を混合した濁水を直投することによって発生させた。濁水重力密度流は水槽底面に固定した流入箱に濁水を閉じ込めた後、ゲートを瞬間的に解放することによって発生させた。密度差として塩水を用いた同様の実験も実施した。いずれの実験においても流動状況を CCD カメラで撮影し、コンピュータ制御が可能な VTR に収録された画像を解析することにより、落下速度  $V_z$  あるいは先端移動速度  $U_f$  および形状を算定した。同一条件下で 繰り返し実験を行い、信頼性の高いデータを 5 セット得た。また、総浮力の保存状況を調べる目的で、仕切ゲートを用いた実験を行い、底面衝突後の直投塩水塊および濁水塊、塩水および濁水重力密度流先端部の単位幅総浮力  $W_s$  を求めた。その際、同一条件下で繰り返し実験を行い、信頼性の高いデータを 3 セット得た。

実験は初期単位幅総浮力  $W_0(= \epsilon_0 g A_0)$  を  $4900 \sim 13720 \text{ cm}^3/\text{s}^2$  の範囲で、水深  $h$  を  $0.5\text{m}$  と  $0.9\text{m}$  に変化させ実施した。ここに、 $\epsilon_0 = (\rho_0 - \rho_a) / \rho_a$  ( $\rho_0$  = 塩水または濁水密度、 $\rho_a$  = 淡水密度) である。以下、図中の凡例 D と G はそれぞれ直投と重力密度流、S と P はそれぞれ塩水と中央粒径  $0.044\text{mm}$  のガラスビーズによる濁水、最初の数字 1 と 2 はそれぞれ水深  $h=0.5\text{m}$  と  $0.9\text{m}$  であることを示している。

3.実験結果

可視化実験より、直投濁水塊は乱流サーマル領域、重力密度流領域への遷移領域および重力密度流領域の3領域に区別されることがわかった。そこで、底面衝突後の直投濁水塊と重力密度流の流動状況を図-1のようにモデル化する。なお、図中の  $x_R$  は遷移領域から重力密度流領域への遷移点の位置である。

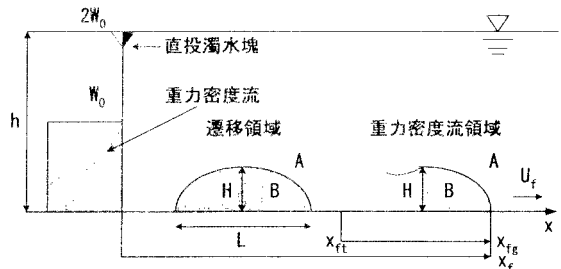


図-1 直投濁水塊と重力密度流の定義図

表-1 無次元特性量と  $x_{fg}/h$  との関係

$x_{fg}/h$	$0 < x_{fg}/h < 1.3$	$1.3 < x_{fg}/h < 6.3$
H	$H/A_t^{1/2} \approx 0.6$	
B	$B/(W_i/A_t) \approx 1.0$	$B/(W_i/A_t) = (x_{fg}/h)^{-1}$
$U_f$	$U_f/(W_i^2/A_t)^{1/4} \approx 0.7$	$U_f/(W_i^2/A_t)^{1/4} = 0.7(x_{fg}/h)^{-1/2}$

まず、乱流サーマル領域における底面衝突直前の落下特性量と重力密度流領域の始まりの点  $x_R$  における流動特性量の関係を調べた結果、直投濁水塊では  $W_0$  と無関係に単位幅体積比  $A_R/A_s \approx 2.0$ 、平均浮力比  $B_R/B_s \approx 0.4$ 、速度比  $U_R/V_z \approx 1.8$  を取ることがわかった。

次に、塩水および濁水重力密度流と重力密度流領域での濁水塊の各特性量(最大層厚 H、平均浮力 B、先端移動速度  $U_f$ )について調べたものが図-2、3 および 4 である。直投濁水塊の各特性量は遷移点での単位幅総浮力  $W_i$  や単位幅体積  $A_t$  で、流下距離  $x_{fg}$  は周囲水水深  $h$  で無次元化されている。ここで、 $x_{fg}$  は  $x_R$  から流下方

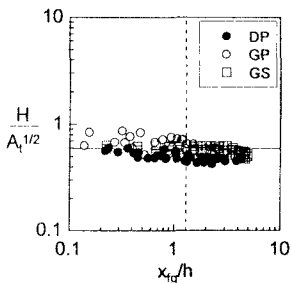


図-2  $H/A_i^{1/2}$  と  $x_{fg}/h$  との関係

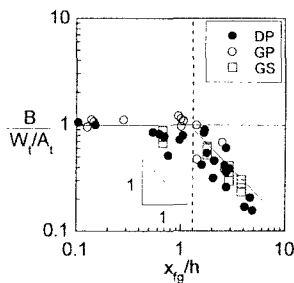


図-3  $B/(W_f/A_i)$  と  $x_{fg}/h$  との関係

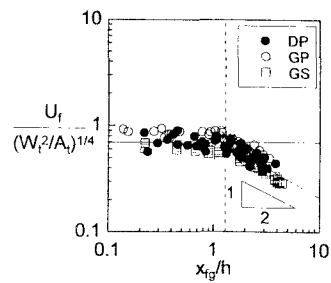


図-4  $U_f/(W_f^2/A_i)^{1/4}$  と  $x_{fg}/h$  との関係

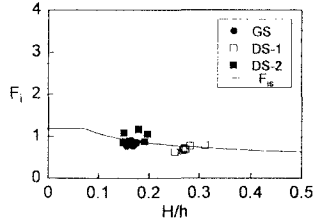


図-5 塩水重力密度流・直投塩水塊の  $F_i$  と  $H/h$  との関係

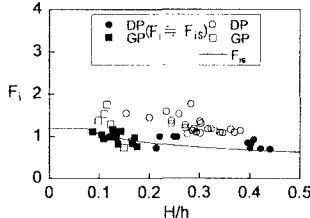


図-6 濁水重力密度流・直投濁水塊の  $F_i$  と  $H/h$  との関係

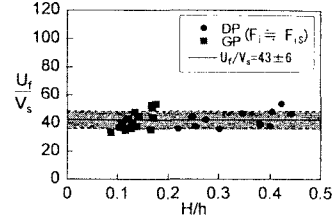


図-7  $U_f/V_s$  と  $H/h$  との関係

向へ測った距離である。

これらの図よりも、塩水と濁水の重力密度流の各特性量は同様な傾向を有するとともに、重力密度流領域における直投濁水塊もほぼ同様な関係に従っていることが確認できる。すなわち、 $H$  は無次元流下距離  $x_{fg}/h$  に対してはほぼ一定値を取り、 $B$  と  $U_f$  も  $x_{fg}/h \approx 1.3$  まではほぼ一定値を取るが、その後、 $B$  は  $x_{fg}/h$  の-1 乗で  $U_f$  は  $x_{fg}/h$  の-1/2 乗で減少する傾向が認められる。以上のことより、無次元特性量と無次元流下距離との関係は表-1 のようにまとめられる。また、そのような関係が成立することにより、濁水塊の内部 Froude 数  $F_i (=U_f/(BH)^{1/2})$  が  $x_{fg}/h \approx 1.3$  の上下流側で特性量が変化するにもかかわらず、 $F_i$  は流下方向に一定値( $\approx 0.9$ )を取る。このように重力密度流の  $B$  と  $U_f$  の特性が変化する要因としては、流入箱から反射したサージが重力密度流のフロントに追いつくことで特性量が変化することがまず考えられるが、直投濁水塊ではこのようなサージ現象は発生しないので、これが理由とは考えられない。考えられるもう一つの要因は、底面衝突後の濁水塊と重力密度流のいずれもその初期状態では乱れが十分強いが、フロントの前進に伴い総浮力がその後部に取り残されるため、流動特性が変化することが考えられる。ただし、その詳細については今のところ不明であり、今後の重要な検討課題である。

最後に、Huppert & Simpson<sup>1)</sup>によって経験的に得られた保存性の塩水重力密度流の内部 Froude 数  $F_{is}$  に関する関係式( $H/h \leq 0.075$  で  $F_{is} = 1.19$ 、 $H/h = 0.075 \sim 1.0$  で  $F_{is} = 0.5(H/h)^{-1/3}$ )に基づき、塩水重力密度流と直投塩水塊(図-5)、濁水重力密度流と直投濁水塊(図-6)の内部 Froude 数  $F_i$  との相対水深  $H/h$  との関係について調べた。図-5 より、塩水重力密度流と直投塩水塊の内部フルード数  $F_i$  は  $F_{is}$  とよく一致することがわかる。また図-6 より、濁水重力密度流と直投濁水塊の  $F_i$  は、Huppert & Simpson の関係に必ずしも従っていないことが確認できる。なお、図中の塗りつぶした記号は Huppert & Simpson の関係がほぼ成立しているデータである。そこで、これらのデータに関して濁水塊の先端移動速度  $U_f$  と粒子の沈降速度  $V_s$  の速度比  $U_f/V_s$  と相対水深  $H/h$  との関係について調べたものが図-7 である。これより、一つの目安として  $U_f/V_s = 43 \pm 6$  程度であれば、濁水であっても Huppert & Simpson の関係が成立すると考えられる。

#### 4. 結論

遷移領域と重力密度流領域における無次元特性量を明らかにした。また、重力密度流領域における直投濁水塊の内部 Froude 数は、 $U_f/V_s = 43 \pm 6$  程度であれば、Huppert & Simpson の関係にほぼ従うことを示した。

参考文献：(1) Huppert & Simpson, JFM. vol.99, 1980.