

土砂直投工において生じる濁水塊挙動のモデル化について

大阪大学工学部 正員○玉井昌宏
 佐藤工業(株) 正員 神田東正
 大阪大学工学部 正員 村岡浩爾
 大阪大学工学部 正員 室田 明

1. まえがき 人工島埋立工事においては、濁りの発生による水域環境への影響が懸念されている。工事に伴う水質の変化を事前に予測し、予め有効な対策を講じておくことが重要となっている。土砂直投工において生じる濁りは潮流など周囲環境中の流動と土砂落下により誘起される流動とにより移流・拡散する。周囲流動による拡散予測の試みは数値シミュレーションにより既に行われているものの¹⁾、誘起流動を考慮した例はない。しかしながら、著者らの実験結果²⁾によれば誘起流動は投下直後の濁りの拡散を支配し、その流動の影響はきわめて広範囲にまで及ぶ。したがって、誘起流動の影響を除外して濁りの拡散を予測することは適切でないと考えられる。

本研究では誘起流動による濁りの拡散機構について検討しているが、ここでは運動量保存の概念を基礎として濁水塊の挙動モデルを構築し、実験結果との対応を図る。

2. 濁水塊挙動モデルの概要 土砂混入水塊が水平面あるいは傾斜面に衝突した後に形成される濁水塊は初期運動量と濁質混入による密度差を併せ持つ流動である。衝突直後には初期運動量や初期乱れが卓越する挙動を示すのに対して、移動距離の増大にともない、密度差に基づく重力が有効となる乱流サーマル的な挙動へと変化する。濁水塊内部の流動に関する情報が全くないことから、流体塊としての挙動をモデル化するのに有効な方法は、乱流サーマル理論と同様な運動量保存の方程式を用いることである。濁水塊に作用する外力は濁質混入による密度差による重力と底面せん断力であるが、それらは濁水塊内部の運動量と圧力を介して付加質量分の周囲流体の運動量を変化させると考える。底面せん断力が小さく無視できると仮定すると、運動量保存式は次式のようなになる。

$$\frac{d \{ \rho_a (1 + kv) u A \}}{dt} = B \quad (1)$$

ここに、 ρ_a は周囲水密度、 kv は付加質量係数、 u は濁水塊移動速度、 A は濁水塊面積、 B は濁質混入による重力である。濁水塊内の過剰密度を $\Delta \rho$ 、 θ を底面の傾斜勾配とすれば、重力 B は $B = \Delta \rho g A \cdot \sin \theta$ のように定義される。但し、 g は重力加速度である。濁質が沈降しないと仮定すれば、 B は保存される。

濁水塊内部の循環によって周囲水が連行されると予想される。循環強度は濁水塊移動速度 U と濁水塊高さ H あるいは長さ W の積に比例することが予想される。そこで、連行の概念を用いて濁水塊面積の変化を次式のようにおく。

$$\frac{dA}{dt} = \alpha UH \quad (2)$$

ここに、 α は連行係数である。 kv 、 α を一定とすれば従来の乱流サーマル理論の基礎方程式と同様になる。乱流サーマル理論は傾斜面上や初期速度を有する場合にも拡張できるが、同理論をそのまま流用することは難しい。それは乱流サーマル理論では相似仮説が大前提になっているからである。連行係数が一定であることや、相対密度差による重力が保存されるという仮定も、濁水塊の挙動を説明するには不適當である。

連行係数 α と付加質量係数 kv は、形状係数 $K (= H/W)$ の変化に影響されることが予想される。同一の移動速度と高さを持っていても斜面方向の長さが異なれば流体抵抗が変化し、付加質量係数さらに連行係数 α が変化する。Masahiro TAMAI, Harumasa KANDA, Kohji MURAOKA and Akira MUROTA

数も変化してしまうからである。そこで、Britter et al.の実験結果を用いて、 α 、 k_v と K の関係を次式のようにする。

$$\alpha = 2 K^2 \quad : \quad k_v = 2 K \quad (3)$$

これらの関数形はあくまで実験結果の平滑曲線であり、今のところ明確な物理的な意味はない。

著者らの実験結果によれば、形状係数 K は濁水塊の移動にともない変化する。濁質混入による密度差により底面に垂直な方向への圧縮によって K が変化するものと考え、いわゆるスランピング現象の研究成果を導入する。濁水塊のスランピングによる長さの変化を次式のように定義する。

$$\frac{dW_s}{dt} = C_1 \sqrt{\epsilon g H \cos \theta} \quad (4)$$

ここに、 H は濁水塊の高さ、 $\epsilon (= \Delta \rho / \rho_a)$ は相対密度差である。既往の実験結果によれば、定数は $C_1 = 1.15 \pm 0.05$ 程度の値であり、ここでは $C_1 = 1.15$ とした。

濁質混入量が保存されるとして、 $B = \text{const.}$ とする。(3) 式を (1)、(2) 式に代入することにより、 K 、 U 、 H に関する初期値問題となる。

3. 計算結果 図-1～3に傾斜面上での濁水塊の挙動に適用した例を示す。記号は著者らの行った実験結果である。実験は2次元水槽内において、投下土砂としての粗粒径砂($d_{50}=3.4\text{mm}$)と濁りの成分としての細粒径砂($d_{50}=0.18\text{mm}$)とを混合した土砂を投下して形成される濁水塊の挙動を可視観測により計測したものである。粗粒砂の投下量は 150cm^3 である。細粒砂投下量は黒塗記号のケースが 50cm^3 、白抜き記号が 10cm^3 である。

図-1は濁水塊高さの流下にとまう変化を示しているが、濁水塊高さは運動量の卓越する投下点近傍では急激に成長する。流下距離が増大して濁質混入による密度差が有効になると、高さの成長率は緩やかに減少する。濁質混入量の大きい、つまり密度差の大きいケースにおいては高さの成長はより抑制されていることがわかる。図-2は濁水塊長さの流下にとまう変化を示している。長さは概ね線形に増大し、さらに細粒砂混入量の違いにより影響も小さい。図-3は濁水塊先端の移動速度の流下方向変化を示している。細粒砂混入量が大きくなるほど移動速度の遅減は抑制される。濁質混入量が大きくなるほど、密度差により鉛直方向への成長が抑制され流体抵抗が軽減されるために、移動速度の減少が抑制されることになる。絶対値を一致させるまでには至っていないが、計算結果は実験値の傾向を良好に再現していると判断できる。

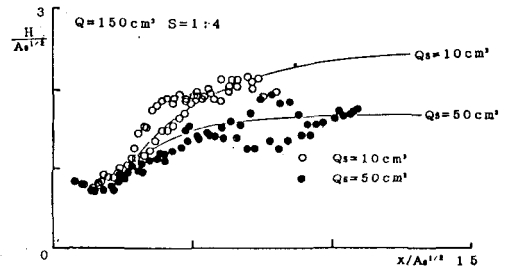


図-1 濁水塊高さの流下方向変化

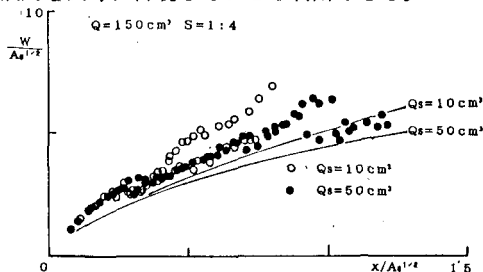


図-2 濁水塊長さの変化

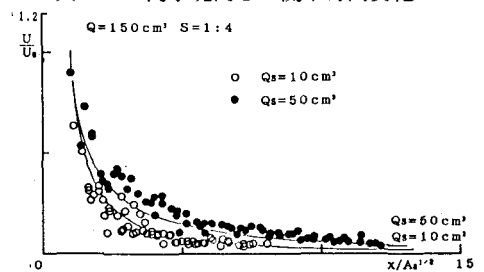


図-3 濁水塊の移動速度の変化

(参考文献) 1) 堀口・古土井・堀江：第32回海岸工学講演会論文集，1985。

2) 室田・玉井・町田・浅井：第34回水理講演会水工学論文集，1990。