

# 土砂直投工における濁りの初期拡散過程に関する研究

玉井昌宏<sup>1</sup>・村岡浩爾<sup>2</sup>・室田明<sup>3</sup>・町田博紀<sup>4</sup>

<sup>1</sup>工博 大阪大学助手 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

<sup>2</sup>工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (同 上)

<sup>3</sup>工博 大阪産業大学学長 (〒574 大東市中垣内3-1-1)

<sup>4</sup>工修 (株)奥村組 (〒545 大阪市阿倍野区松崎町2-2-2)

海域での大規模埋立工事において一般的に採用される底開バージによる土砂直投工において生じる濁りの拡散, 特に投下土砂が水中を鉛直落下する際に誘起する流動場に起因する濁りの拡散過程について水理実験および理論解析により検討する. 土砂直投工をモデル化した実験を実施して, 誘起流動により形成される濁水塊の挙動の概要を示すとともに, 実験結果を基礎とした濁水塊挙動に関する解析モデルを開発する.

*Key Words* : turbidity, diffusion, soil, reclamation, hopper barge with bottom doors, man-made island

## 1. 概説

商工業, 港湾, 住宅, レクリエーションなど多目的の空間を創出するための大規模な人工島建設工事が各地で行われている. 用途の増大にともない定められた領域に詰め込むのではなく, ゆとりであるとか質を求める時代であるから, 埋立地の規模増大もその趨勢である.

敷砂や埋立土の投入工事に際しては, 経済性を重視して底開バージによる土砂直投工が採用されるのが一般的である. 何千 $\text{m}^3$ にもおよぶ土砂を水面付近から瞬時に投入することから, 急速施工の要求は満足される. しかし, 土砂の拡散が予想以上に広範囲に及んで計画した堆積断面形状が得られなかったり, 大規模な濁りが発生するなどの施工上の問題が生じる. ことに, 濁りの拡散問題は, 数年にも及ぶ工事期間中定常的に発生すること, 埋立土砂量を考慮すればその総量も膨大になることから, 周囲環境に及ぼす影響は甚大であると推察される. 濁りの海中生物群に与える影響の可能性は様々であり, 例えば, 濁質がプランクトンや魚介類のえらに付着して, 呼吸あるいは摂餌に影響したり, 海藻類の光合成を低下させたり, 海底に堆積して底生生物の生存を脅かしたりすることなども考えられる<sup>1)</sup>.

濁りの発生が避け難い現状にあることから, 工事にとまなう水質の変化を事前に予測し, 有効な軽減対策を講じておくことが重要な課題となっている. 濁りの拡散機構は対象とする時間スケールや空間スケールに

よって異なる. 数秒から数分の時間スケールあるいは数百メートル程度の空間スケール内では, 投下土砂の落下運動により誘起される流動が支配的となり, それ以上の時間・空間スケールでは潮流などの周囲環境中の流動が支配的になると考えられる. 周囲環境中の流動による濁りの拡散予測手法はいくつか提案されているものの<sup>2),3)</sup>, それらはあくまで全体現象の一端を予測できるに過ぎない. また, 拡散防止幕周辺での濁りの挙動に関する数値計算<sup>4)</sup>も実施されているが, 対象とするスケールの流動場の特性によりその効果も大きく変化することが予想される. 誘起流動場による濁りの拡散に関する知見は, 試験工事の実測<sup>5)</sup>のレベルに留まっており, それらの調査結果を一般的に利用することは難しい.

誘起流動が濁りの挙動を支配する小スケールでの拡散機構を明確にすることは, 大スケールの拡散予測の初期条件を用意するだけでなく, 土砂の投下方法の改善なども含めて積極的な濁りの軽減対策の基礎資料を提供するものであると考えられる.

そこで本論では土砂落下現象により誘起される流れ場による濁りの拡散過程に言及する. 底開バージによる土砂直投工をモデル化した二次元水理実験を行い, 水平固定床上での濁りの挙動について検討する. 誘起流動により形成される濁水塊の挙動の概要を示すとともに, 濁質の混入が密度差として貢献することを勘案して, 密度流に関する知見に基づいて濁水塊拡散モデルの開発を試みる.

## 2. 実験の概要

### (1) 現象のモデル化

古土井<sup>5)</sup>は関西国際空港建設に関する調査段階において3000m<sup>3</sup>積みの底開バージによる土砂投下試験を行い、濁りの拡散機構や拡散防止幕の有効性について貴重な実測データを提供している。その結果によれば土砂投下直後に底面を這う強い流動が形成され、この流動により濁りが数分間に数百mの範囲にまで輸送されることが確認されている。この強大な誘起流動の成因は土砂粒子群の落下挙動にある。投下土砂の大半は底面衝突直後に投下点近傍に沈降、堆積することから、比較的沈降速度の小さい粒子のみが誘起流動と共に濁りとなって拡散することになる。つまり、投下土砂の大半は濁りの拡散機構にとっては、誘起流動場の形成としてのみ寄与することになると考えられる。現実の投下土砂は連続的な粒度分布を有し、粒子は粒径に応じて連続的に沈降することから、濁りの成分を粒径範囲として明確に定義することはできない。しかし、一般に濁りとして問題になる粒子は沈降速度の小さい粒径74 $\mu$ m以下のシルトや粘土分である。一方、図-1は現実の投下土砂の粒径加積曲線の一例<sup>5)</sup>である。case1,2は海砂、つまり海底からの深濼残土であり、case3,4は山砂である。粒度分布は若干ばらついているもののその平均粒径は概ね1mm程度のオーダーであることがわかる。平均的にみれば濁質成分の粒径と投下土砂の粒径との比率は10~100程度になると判断される。また、投下土砂の粒度分布から全投下量に占める濁りの総量の比率は海砂では1%程度、山砂では10%程度とされている。但し、土砂の海底面衝突時に巻き上げが生じることも考えられることから、実際に発生する濁りの総量は特定できない。

本研究では誘起流動の形成を目的とした底面衝突時に沈降堆積する粗粒径砂と投下点付近では堆積しないような沈降速度の小さな細粒径砂を混合した2粒径砂を投下することにより実現現象のモデル化を試みた。特に粗粒砂量と細粒砂量の比率の変化による濁りの拡散の変化について検討した。

投下土砂の挙動は投下に要する時間に応じて変化することが予想される。浮力を有する流体を連続的に放出した場合にはブルーム流動が形成されるのに対して、瞬間的に放出した場合にはサーマルが形成されるのと同様である。ここでは、投下土砂が底面に至るまでに要する時間に比べて、投下に要する時間が短い場合、つまり瞬間的な投入を考えるものとする。

また、実際の土砂投入工事に用いられる底開式バージの諸元について調べると<sup>6)</sup>、船長は50~100mにも及ぶ。現状での投下水深が高々20m程度であること考

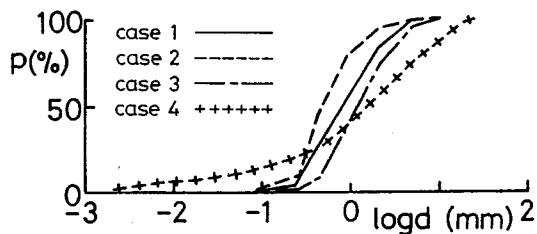


図-1 投下土砂の粒度分布<sup>5)</sup>

表-1 投下土砂の諸元

$d_{50}$ (mm)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$U_d$ (cm/s)	$Re_d$
3.38	2.65	26.5	895
0.15	2.65	2.02	3

え合わせると、船長方向に一樣な2次元現象であることが想像される。本研究では船長方向と垂直な面内2次元現象として実現現象をモデル化した。

### (2) 実験の内容

土砂投下から濁りの発生に至る一連の過程は土砂・水の混相流体塊の海底面の衝突や土砂の沈降堆積など複雑な現象が含まれている。従って、濁りの拡散挙動を投下条件と直接結び付けて論じることは難しい。混相流体塊の海底面衝突後に形成される水平方向の流動に対して何らかの初期条件を設定することが必要である。複雑な海底面上での衝突現象に直接言及することを避けるために、本研究では海底面衝突前後において誘起流動の諸特性が変化せず、運動方向だけが鉛直から水平方向へと変換されるものと仮定する。

従って、乱れの発生によるエネルギーの損失など衝突現象による影響は全て無視する。このような仮定により、底面の影響のない状態で自由落下する土砂・水混相流体塊の挙動特性を基礎として、底面衝突後の濁りの挙動について考察することが可能になる。

本研究では濁りの拡散を対象とした実験に先立ち、固体粒子群の鉛直落下挙動特性の把握を目的とした予備実験を実施した。その方法は参考文献7)と同一である。その結果を底面上での濁りの拡散挙動に関する実験の初期条件としてデータ整理の基礎として用いた。

既述の理由により表-1に示した2種類の土砂の混合砂を投下することにより実現現象をモデル化した。実験は長さ600cm、高さ50cm、奥行15cmの亚克力製二次水路を用いた。予めよく混合された土砂を幅5cm、高さ10cm、奥行15cmの亚克力製投下箱に一樣な高さになるように詰めた後、箱の底部を開くこと

表-2 実験条件

CASE	D(cm)	$q_L(\text{cm}^2)$	$q_S(\text{cm}^2)$	$A_0(\text{cm}^2)$	$U_0(\text{cm/s})$	$\epsilon_0$	$F_{d0}$
M10	10.0	10.0	0.33	136	47.0	0.0040	2.6
			~3.3	~145	~49.6	~0.0395	~8.2
M20	20.0	10.0	0.33	252	41.8	0.0044	2.7
			~3.3	~260	~42.3	~0.0215	~8.5
M30	30.0	10.0	0.33	384	38.8	0.0014	2.8
			~3.3	~400	~39.9	~0.0142	~8.8
L10	10.0	20.0	0.33	166	50.0	0.0033	2.1
			~6.7	~174	~55.0	~0.0637	~9.2
L20	20.0	20.0	0.33	284	54.5	0.0019	2.6
			~6.7	~298	~59.6	~0.0378	~11
L30	30.0	20.0	0.33	424	48.5	0.0013	2.5
			~6.7	~441	~51.2	~0.0255	~11

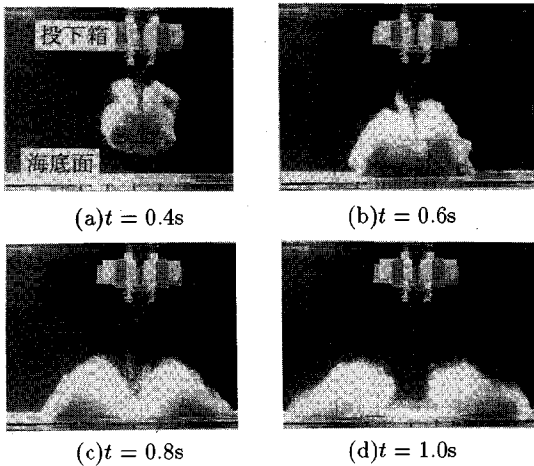


図-2 濁水塊の形成過程

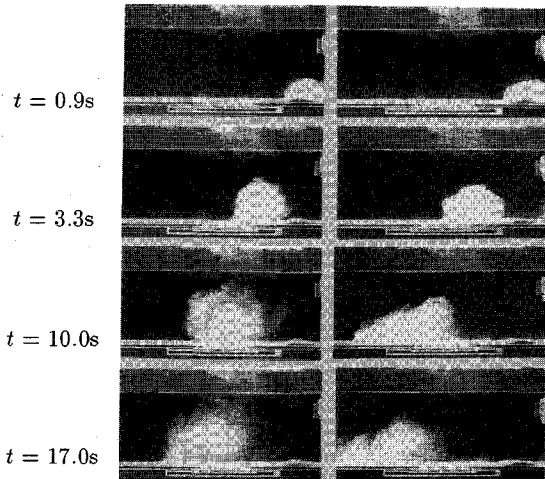
により投下した。投下箱上端部は水表面下にあり、土砂は完全に湿潤状態にある。

実験条件を表-2に示す。実験のパラメーターは、 $D$ ：投下水深（投下箱底部から衝突面までの鉛直高さ）、 $q_L$ ：粗粒砂の単位奥行き当りの投下量、 $q_S$ ：細粒砂の単位奥行き当りの投下量の3つである。なお、 $q_S$ については各実験ケースに対して表で示した範囲内で6~7種類の実験条件を設けた。CASE L10, L20, L30においては、 $q_S = 0.33, 0.67, 1.0, 1.3, 1.7, 3.3, 6.7\text{cm}^2$ の7種類の実験条件がある。また、CASE M10, M20, M30のケースでは $q_S = 6.7\text{cm}^2$ 以外の6種類の条件を設定している。表中の $A_0$ 、 $U_0$ 、 $\epsilon_0$ 、 $F_{d0}$ の範囲は $q_S$ の範囲に対応するものである。なお、 $q_S$ の増加により $F_{d0}$ 以外の諸量はいずれも増加傾向を示す。 $U_0$ と $A_0$ は予備実験に

より得られた土砂粒子群の落下速度と面積であり、これらを濁水塊の挙動の初期条件として用いている。予備実験では高さ130cm、幅90cm、奥行き15cmの2次元水槽内において、既述の投下箱から混合砂を投下する。土砂粒子群の拡散領域（粒子群の外形）が鉛直方向と水平方向に長短軸を有する楕円形であると仮定して、楕円形中心の落下速度、楕円形の面積と鉛直方向落下距離 $z$ との関係を可視観測により求める。 $U_0$ と $A_0$ は投下水深 $D$ だけ落下した時点、つまり $z = D$ での落下速度と面積である。なお、 $U_0$ 、 $A_0$ は同一条件下でも多少変動するので、3回の繰り返し実験の平均値となっている。 $\epsilon_0 (= \rho_a q_S / \rho_a A_0)$ は細粒砂投下量 $q_S$ と $A_0$ から算出した相対密度差である。また、濁水塊の挙動が底面衝突時の濁水塊の落下速度と濁質混入による密度差により支配されることを勘案して、密度フルード数 $F_{d0} (= U_0 / \sqrt{\epsilon_0 g \sqrt{A_0}})$ を実験条件の目安とした。なお、その物理的な意味合いについては4. 濁水塊挙動の理論的考察において記述する。表中の全ケースに対して水平面上での投下実験を行った。濁水塊の挙動はビデオカメラと35mm 1眼レフカメラを用いて収録し、解析した。

### 3. 濁水塊の挙動特性

図-2は混合砂の投下から濁りの初期拡散に到る一連の過程を示している。投下された土砂は粗粒砂、細粒砂が一体となって落下する。粒子個々の落下挙動は土砂粒子群全体規模の流動に支配されており、後端部から周囲水を連行しながら成長していることが判る。こうした挙動は筆者ら<sup>7)</sup>が示したいわゆる乱流サーマル的



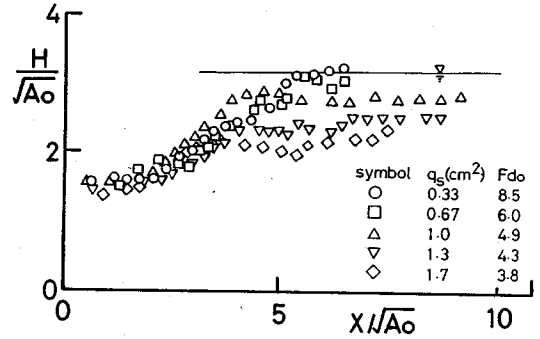
(a)  $q_s = 0.67 \text{ cm}^2$  (b)  $q_s = 3.33 \text{ cm}^2$   
 図-3 濁水塊の典型的挙動

な挙動であると判断される。底面衝突後は粗粒砂が急速に沈降堆積するのに対して、細粒砂はほとんど堆積せず、誘起された流動場とともに濁水塊となって底面上を移動し始める。

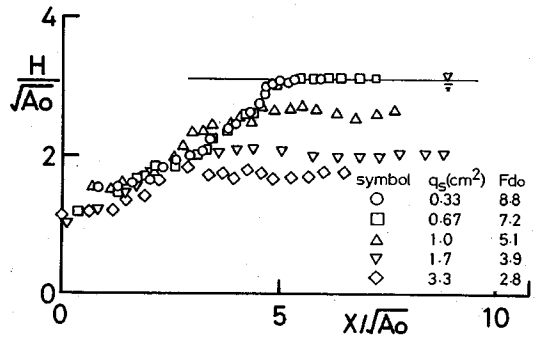
図-3は実験ケース L20, つまり投下高さ  $D = 20 \text{ cm}$ ,  $q_L = 20 \text{ cm}^2$ での濁水塊の挙動の様相を示している。(a)と(b)はそれぞれ  $q_s = 0.67$ と  $3.33 \text{ cm}^2$ のケースである。現象は投下点直下について左右対称であるので、投下点から左側半分の現象のみを示している。衝突直後の濁水塊は水平方向に引き延ばされた形状を示しているが、これは固定境界面への衝突現象により内在する渦構造が変形したことや粗粒子の急激な沈降により鉛直方向への成長が抑制されたことによると推察される。投下後3.3秒 ( $t = 3.3 \text{ s}$ )のまでは両ケースにおいて濁水塊の形状や移動速度に大きな差異はない。

濁質混入量の小さい(a)においては、濁水塊の高さは一様に増大し、濁水塊の上端部は水表面にまで到達する。 $t = 10.0 \text{ s}$ では濁水塊内部には時計廻りの循環が存在しており、後端部底面付近から周囲水を活発に連行していることがわかる。こうした挙動は傾斜面上での乱流サーマルの挙動に類似している。つまり、密度差の駆動力が無い場合でも運動量が十分大きく乱流状態が保持されておれば、乱流サーマルに類似した挙動になると推察される。その後移動速度は急激に減少し、濁質が沈降し始める。周囲水との密度差が減少することにより濁水塊は鉛直方向に急速に成長して最終的には水表面にまで濁りが到達している。

一方、濁質混入量の大きな(b)においては鉛直方向へはあまり成長せず、 $t = 3.3 \text{ s}$ 以降では濁水塊の高さ



(a) CASE M20



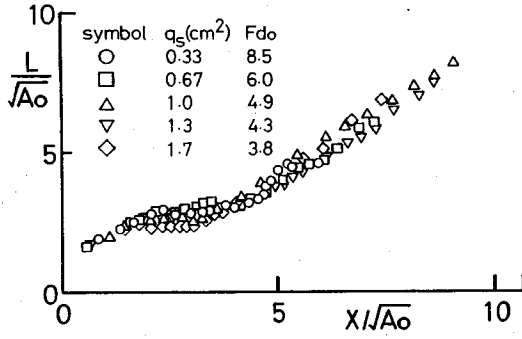
(b) CASE M30

図-4 濁水塊の高さ  $H$  の変化

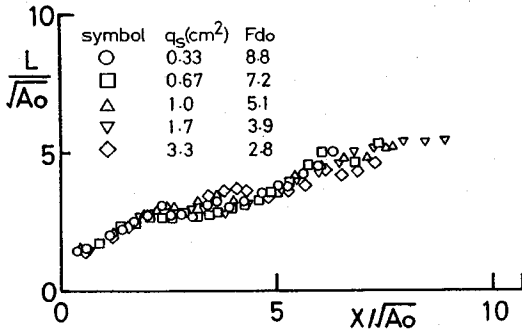
は概ね一定になっている。 $t = 10.0 \text{ s}$ では楔形の形状となっているが、後方部には(a)と同様な循環が存在し、周囲水を連行している。 $t = 10.0, 17.0 \text{ s}$ における両ケースの濁水塊の先端位置を比較すれば、(b)のケースでは移動速度の逡減が小さいことがわかる。細粒砂量の多いケースでは濁水塊の鉛直方向への成長が抑制されるために移動速度は逆に低減せずに遠方まで移動することになる。

図-4は濁水塊高さの移動にともなう変化を示す。(a),(b)の実験ケースはそれぞれM20とM30である。また、細粒砂の投下量は  $q_s = 0.33 \sim 3.3 \text{ cm}^2$ の範囲で変化させている。縦軸と横軸はそれぞれ高さ  $H$ と投下点直下からの距離  $x$ であり、両軸は濁水塊初期面積の平方根  $\sqrt{A_0}$ により無次元化した。図中の実線は水表面の位置を示している。

いずれのケースにおいても濁水塊高さは  $x/\sqrt{A_0} < 2$ の投下点直下近傍ではあまり強い増加傾向を示さない。 $2 < x/\sqrt{A_0} < 5$ の領域内で線形に増大した後に、概ね一定高さとなる。その線形増加領域の増加率は  $dH/dx = 0.5$ 程度であり、細粒砂混入量には無関係である。細粒砂量の少ないケースでは、濁水塊上端部は水表面にま



(a) CASE M20



(b) CASE M30

図-5 濁水塊の幅  $L$  の変化

で到達している。また、細粒砂量が多いほど、初期の線形増大の傾向からより早く逸脱し一定の高さへと移行する傾向がある。

図-5に濁水塊の底面に沿う水平方向の拡がり幅  $L$  (以後、濁水塊の長さという。)の移動に伴う変化を示す。図-4と同様に、(a),(b)の実験ケースはそれぞれ  $M20$  と  $M30$  である。長さは一樣に増大する傾向を示しているが、 $2 < x/\sqrt{A_0} < 3 \sim 4$  付近で増加勾配が小さくなっている。この領域は図-4において高さが線形に増大する領域に相当する。高さが一定になる  $x/\sqrt{A_0} > 5$  の領域では、長さは概ね線形に増大する。濁水塊長さは濁質混入量によって顕著に変化しないようだ。濁水塊形状の変化は周囲水の連行による成長と、特に活発な連行がない場合にはスランピング現象などの密度差により生じる流れや濁質の沈降等の影響が複雑に絡み合っているものと考えられる。

図-6に各実験ケースにおける濁水塊の線形増大部分の高さの増加率  $dH/dx$  と長さの増加率  $dL/dx$  を示している。横軸は投下水深  $D$  であり、粗粒砂投下量の平方根  $q_L^{1/2}$  で無次元化した。各増加率は各実験ケースの高さの線形増大領域における実験値の最適直線の勾配

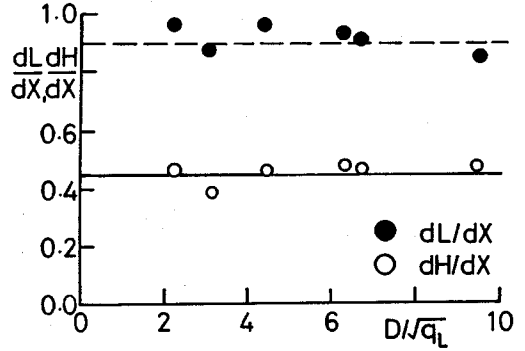


図-6 濁水塊の長さ と 高さの増加率

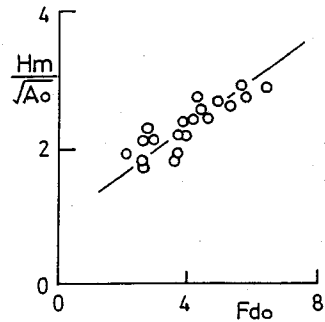
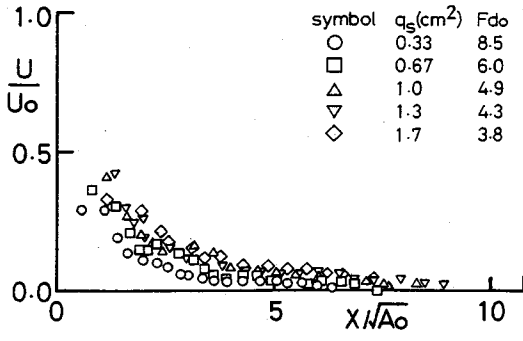


図-7 濁水塊最大高さ と  $F_{d0}$  の関係

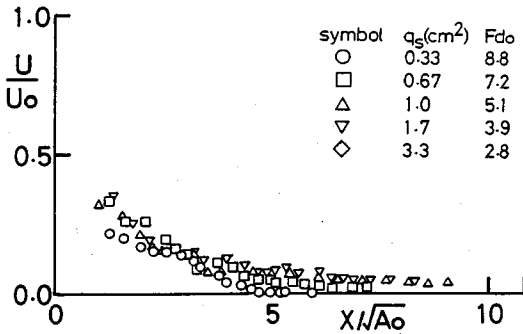
として与えた。この領域では粗粒砂投下量や投下水深に無関係に概ね一定となり、それぞれ図中に実線と破線で示しているように、高さは 0.45 程度、長さは 0.9 程度の増加率を持つことがわかる。この長さの増加率は鉛直方向に自由落下する乱流サーマルの水平方向の拡がり率に概ね等しく、高さはその半分となっている。高さの線形に増大する領域では細砂の混入量や濁水塊の初期速度に関わらず概ね相似な形状を保っていることがわかる。

図-7は濁水塊の最高到達高さ  $H_m$  と密度フルード数  $F_{d0}$  との関係を示している。ここでは、濁水塊上端部が水表面にまで到達したケースについては除外した。  $H_m$  と  $F_{d0}$  は強い正の相関関係を示している。  $F_{d0}$  が小さいほど密度差により鉛直方向の流体運動が抑制されることが予想される。

図-8に濁水塊先端の移動速度の変化を示す。(a),(b)の実験ケースは図-4、図-5と同様である。縦軸・横軸は移動速度  $U$  と投下点直下からの距離  $x$  であり、両軸は  $U_0$  および  $\sqrt{A_0}$  により無次元化した。  $F_{d0}$  が大きいほど急速に移動速度が小さくなっているが、これは濁水塊の高さが大きくなるほど、より大きな抵抗を受けるためであると考えられる。



(a) CASE M20



(b) CASE M30

図-8 濁水塊先端の移動速度

#### 4. 濁水塊挙動の理論的考察

##### (1) 基礎方程式

理論的取扱に際して用いた仮定を列挙すると、

- 1) 濁水塊形状は半楕円形である。
- 2) 濁水塊内部の細粒子混入濃度は均質である。
- 3) 濁水塊の質量変化は濁水塊の全体的なパラメータにより支配される。
- 4) 濁水塊は十分乱流状態にあり、底面の境界摩擦力は無視できる。

の以上4点である。濁水塊の移動に伴い圧力を介して周囲流体にも運動が生じることから、付加質量分を含めた運動量の保存が要求される。プーシネ近似を用いると濁水塊の全運動量の時間変化は次式のように定義される。

$$\frac{d\{\rho_a(1+k_v)UA\}}{dt} = (\rho_t - \rho_a)gA \sin \theta \quad (1)$$

ここに、 $\rho_a$ と $\rho_t$ はそれぞれ周囲水と濁水塊内部の密度である。 $k_v$ は付加質量係数である。 $U$ 、 $A$ は図-9に示すように、半楕円形と仮定した濁水塊における中心の海底面に沿う方向の移動速度と面積である。 $\theta$ は海底面の勾配であり、本実験では水平面上での濁水塊挙動を

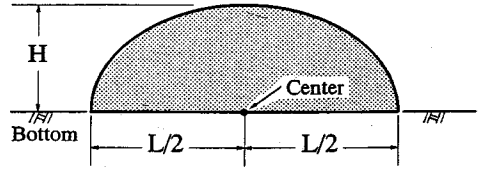


図-9 解析モデルにおける濁水塊の概要

対象としているので $\theta = 0$ となる。微分変数を時間 $t$ から投下点直下からの距離 $x$ に変換すると、 $U = dx/dt$ より次式が得られる。

$$U \frac{d\{(1+k_v)UA\}}{dx} = \epsilon g A \sin \theta \quad (2)$$

ここに、 $(\epsilon = (\rho_t - \rho_a)/\rho_a)$ は濁水塊の相対密度差である。

連行仮定を用いて周囲流体の連行量が濁水塊速度と周長とに比例すると仮定すると、質量保存方程式は次式のように定義される。

$$\frac{dA}{dt} = \alpha S A^{1/2} U \quad (3)$$

ここに、 $S = \{(\pi/2)^{1/2}(4K^2 + 1)^{1/2}\}/K^{1/2}$ は濁水塊周長/ $A^{1/2}$ である。 $K$ は高さとの比率であり、 $\alpha$ は連行係数である。式(2)と同様に微分変数を変換すると次式が得られる。

$$\frac{dA}{dx} = \alpha S A^{1/2} \quad (4)$$

濁水塊が相似形を保って成長する、つまり相似仮説が成立する場合には $\alpha$ や $k_v$ は一定値となり、理論は乱流サーマル理論に帰着する。しかし、前節で示したように濁水塊形状は海底面を移動しながら変化し、その程度も細粒砂混入量など濁水塊挙動に関する初期条件によって異なる。加えて流体塊の形状は流体抵抗さらには連行現象に直接影響すると予想されることから、 $\alpha$ あるいは $k_v$ と $K$ との関連についての検討が必要である。Beghin et al.<sup>8)</sup>は傾斜面上を下る2次元浮力サーマルに関する実験を行っている。斜面の傾斜角度に応じてサーマル形状が変化し、それに伴い連行係数や付加質量係数が変化することが示されている。図-10は実験結果に基づいて算出した連行係数 $\alpha$ と形状係数 $K$ との関係を示している。 $K$ の増大にともない連行係数も指数関数的に増大する傾向を有するようである。 $K$ の増大は流体抵抗の増大を引き起こし、さらに連行の増大を大きくすることを示していると考えられる。そこで、 $K \rightarrow 0$ の場合には $\alpha \rightarrow 0$ となることを仮定して、ここでは今回の実験データを用いて次式の関係を用いる。

$$\alpha = 1.6K^2 \quad (5)$$

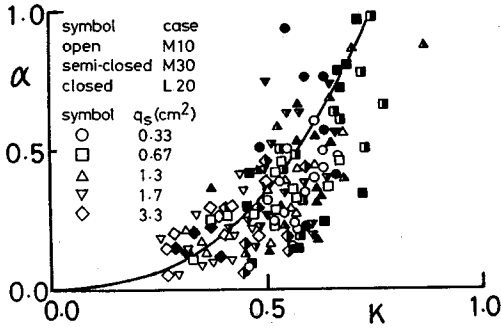


図-10 連行係数と形状係数の関係

一方、付加質量係数については楕円断面を有する無限長の円筒に対する次式の関係式を採用した。

$$k_v = 2K \quad (6)$$

$\alpha$ 、 $k_v$ と $K$ との関係は定義されたが、 $K$ の変化を規定する必要がある。濁水塊形状の変化の要因は連行による面積の増大と gravity current のスランピング現象と同様なメカニズム、つまり濁質混入による濁水塊内外の圧力差による変形とにあると考えられる。濁水塊長さの変化により、濁水塊の前後端部には相対速度 $\tilde{v}(=dL/dt)$ が存在する。連行による長さの変化と $K$ による長さの変化が独立であり、それらの効果が線形に重ね合わせられると仮定すれば、相対速度は次式のように表示される。

$$\tilde{v} = \tilde{v}_E + \tilde{v}_K = \left(\frac{dL}{dt}\right)_E + \left(\frac{dL}{dt}\right)_K \quad (7)$$

添字 $E$ と $K$ はそれぞれ連行によるものとスランピングによるものであることを示している。ここでは上式の右辺第2項をスランピング現象に関連付けて定式化することを試みる。gravity currentの先端部の前進速度については次式のような関係式が得られている<sup>9)</sup>。

$$\frac{v}{\sqrt{\epsilon gh}} = C_1 \quad (8)$$

ここに、 $v$ : フロント前進速度、 $\epsilon$ : 相対密度差、 $h$ : フロントの層厚、 $C_1$ : 定数である。そこで $K$ の変化に伴う水平方向の長さの変化が次式の関係を持つものと仮定した。

$$\left(\frac{dL}{dt}\right)_K \frac{1}{\sqrt{\epsilon g H \cos \theta}} = C_1 \quad (9)$$

添字 $K$ は形状変化によるものであることを示している。一方、 $L$ は濁水塊面積 $A$ と形状比 $K$ を用いて次式のように表せる。

$$L = \left(\frac{4A}{\pi K}\right)^{1/2} \quad (10)$$

$L$ の時間変化は次式で示すように連行による面積変化によるものと $K$ の変化によるものにわけられるものと

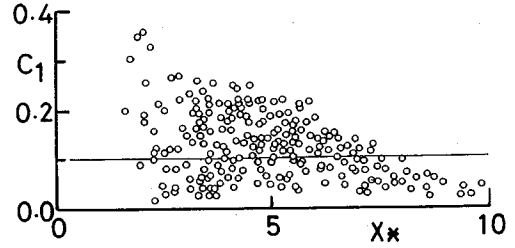


図-11  $C_1$ の変化

考える。

$$\frac{dL}{dt} = \left(\frac{1}{\pi}\right)^{1/2} (K^{-1/2} A^{-1/2} \frac{dA}{dt} - A^{1/2} K^{-3/2} \frac{dK}{dt}) \quad (11)$$

右辺第2項が $K$ の変化による長さの変化である。式(9)の釣合関係は周囲水の連行による面積変化とは無関係であると仮定して、右辺第1項を省略して次式を得た。

$$\left(\frac{dL}{dt}\right)_K = -\left(\frac{1}{\pi}\right)^{1/2} A^{1/2} K^{-3/2} \frac{dK}{dt} \quad (12)$$

式(8)を代入すると次式を得る。

$$\frac{dK}{dt} = -C_1 \left(\frac{\pi K^7}{A}\right)^{1/4} (2\epsilon g \cos \theta)^{1/2} \quad (13)$$

Huppert et al.<sup>9)</sup>により、 $C_1$ についての詳細な検討がなされている。gravity currentに関する実験結果は、層厚 $h$ と水深 $D$ の比率 $h/D$ が十分小さい場合には $C_1 = 1.3$ と一定値となり、 $h/D$ の増大により減少することを示している。しかしながら、ここで扱っている濁水塊は濁水塊高さや水深の比率が変化するとともに、その流動構造も gravity currentのそれとはかなり異なっているものと推察される。従って、従来の gravity currentに関する実験結果をそのまま利用することは難しい。ここでは簡単のために、 $C_1$ は $h/D$ によらず一定値をとるものとし、式(13)を用いて実験値から $C_1$ を逆算することを試みた。但し、濁質の沈降による浮力の欠損は無視して負の総浮力を一定として求めている。図-11に示すように $C_1$ はかなりばらばらしているが、ここではその平均的な値として $C_1 = 0.1$ を採用した。

細粒砂混入による負の浮力は濁質の沈降により減少する。濁水塊内の細粒砂が一様に分布しており、単一粒子の自由沈降速度で沈降していると仮定すると浮力の欠損は次式で与えられる。

$$\frac{d\epsilon A}{dt} = \epsilon L W_P \cos \theta \quad (14)$$

ここで、 $W_P$ は細粒砂の自由沈降速度である。

## (2) 基礎方程式の無次元化

濁水塊の移動速度 $U$ 、濁水塊面積 $A$ 、流下方向距離 $x$ 、細粒砂の自由沈降速度 $W_P$ について、次式のように

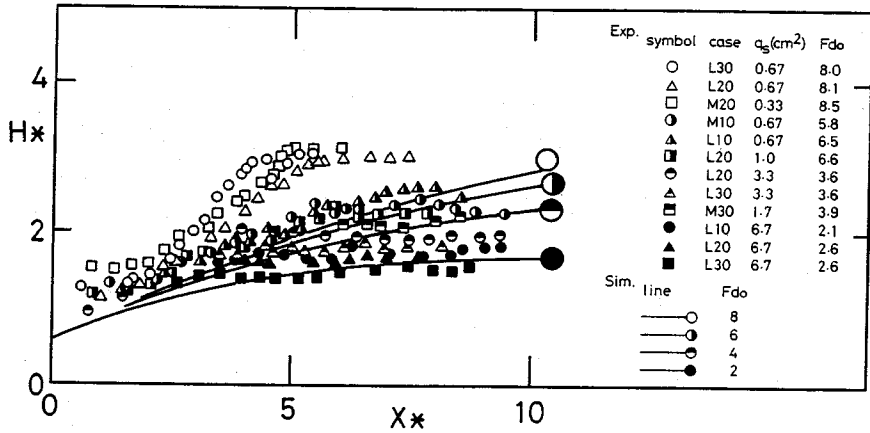


図-13 濁水塊高さに関する理論解と実験値の比較

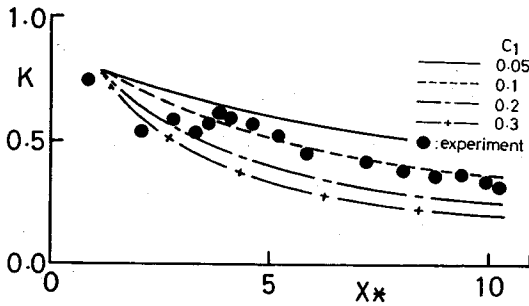


図-12 濁水塊形状係数の変化 CASE M10,  $q_s = 3.3 \text{ cm}^2$

無次元化する。また、無次元変数である濁水塊の相対密度差 $\epsilon$ と形状係数 $K$ についても同様に規格化する。

$$\begin{aligned} U_* &= U/U_0 ; & A_* &= A/A_0 ; \\ x_* &= x/\sqrt{A_0} ; & W_{P*} &= W_P/U_0 ; \\ K_* &= K/K_0 ; & \epsilon_* &= \epsilon/\epsilon_0 \end{aligned} \quad (15)$$

ここに、 $U_0$ ：濁水塊初期移動速度、 $A_0$ ：初期面積、 $\epsilon_0$ ：初期相対密度差、 $K_0$ ：初期形状係数である。式(15)を用いて基礎方程式を規格化すると、次式が得られる。

$$U_* \frac{d(1+k_v)U_* A_*}{dx_*} = \frac{1}{F_{d0}^2} \epsilon_* A_* \sin \theta \quad (16)$$

$$\frac{dA_*}{dx_*} = \alpha S A_*^{1/2} \quad (17)$$

$$\frac{dK_*}{dx_*} = -\frac{1}{F_{d0}} C_1 (\pi K_0^3 K_*^7)^{1/4} (2 \cos \theta)^{1/2} \quad (18)$$

$$U_* \frac{d\epsilon_* A_*}{dx_*} = (2\pi)^{1/2} K_*^{1/2} K_0^{1/2} \epsilon_* A_*^{1/2} W_{P*} \cos \theta \quad (19)$$

ここに、 $F_{d0}(=U_0/\sqrt{\epsilon_0 g \sqrt{A_0}})$ は濁水塊の初期運動量と密度効果の比率を示すパラメーターである。無次元化された方程式から判断できるとおり、現象を支配するパラメーターは $F_{d0}$ と $W_{P*}$ 、斜面傾斜角 $\theta$ さらに初期

形状 $K_0$ の4つである。但し、本研究では水平面上での濁水塊挙動についてのみ検討していることから、 $\theta = 0$ としている。式(16)(17)(18)(19)を差分化し、さらに式(4)(5)と連立することにより、 $U_*$ 、 $A_*$ 、 $\epsilon_*$ 、 $K_*$ について収束解を求めた。

### (3) 数値解の特徴

ここでは初めに $C_1$ の設定の妥当性について検証する。図-12は濁水塊の移動にともなう $K$ の変化を示している。図中のシンボルは実験結果の一例であり、実験条件はM10、 $q_s = 3.3 \text{ cm}^2$ である。 $C_1$ については0.05～0.3の範囲で変化させている。 $C_1$ の増大により粒子混入による密度効果によるスランピングが顕著となり、 $K$ の減少率は大きくなる。 $K$ の実験値は $x_* < 3$ では衝突の影響により、多少複雑な変動となっているが、この領域を除けば $C_1 = 0.1$ と設定した場合の解析解が実測値を良好に再現していると判断できる。

濁水塊高さに関する理論解と実験結果との対比を図-13に示す。実験値については全実験ケースより $F_{d0} = 2, 4, 6, 8$ 付近の実験条件のものをそれぞれ3ケースずつ選択して示している。 $F_{d0} = 8$ の条件を除けば、実験値と理論解の一致は比較的良好である。 $F_{d0} = 8$ 付近の全ケースにおいて濁水塊の上端が水表面にまで達していたことを勘案すると、両者の不一致は水表面の影響であると考えられる。つまり、密度フルード数が大きい場合には濁水塊内への周囲水の強い連行が保持されるために、水表面の影響を受けて急速に鉛直方向へ成長したものと考えられる。図-14は濁水塊移動速度に関する理論値と実験値との比較である。本章で設定された実験条件の範囲では、移動速度にそれほど大きな差異は生じない。しかしながら、理論値と実験値の一致は比較的良好であろう判断される。



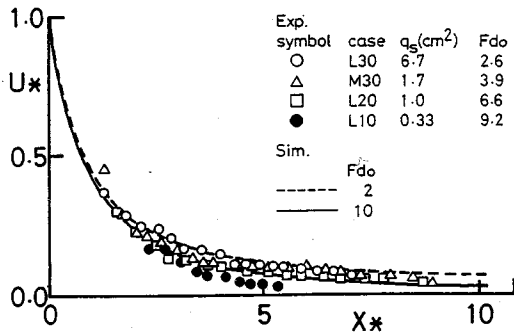


図-14 濁水塊移動速度に関する理論解と実験値の比較

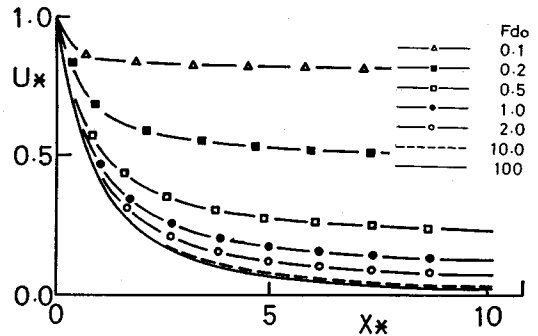


図-16 濁水塊速度  $U_*$  に対する  $F_{d0}$  の影響

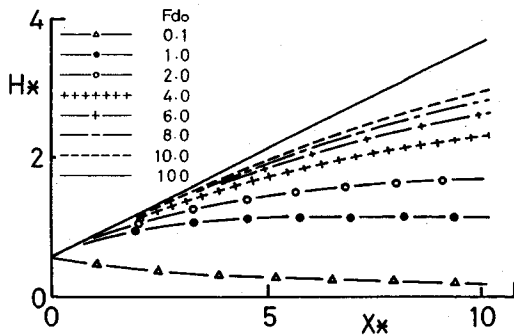


図-15 濁水塊高さ  $H_*$  に対する  $F_{d0}$  の影響

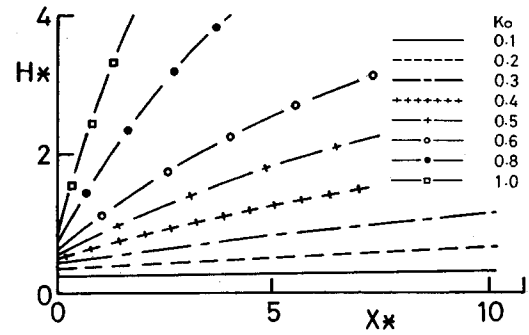


図-17 濁水塊高さ  $H_*$  に対する  $K_0$  の影響

次に初期密度フルード数  $F_{d0}$  と初期形状係数  $K_0$  に対する数値解の影響について示す。細粒砂の自由沈降速度  $W_{P*}$  については現実の濁りの沈降速度を考慮すればその影響は比較的小さいために、ここでは省略する。図-15、図-16 は初期の形状係数を  $K_0 = 0.5$ 、粒子の無次元自由沈降速度を  $W_{P*} = 0.01$  と設定したときの、濁水塊高さや濁水塊移動速度に対する初期密度フルード数  $F_{d0}$  の影響を示している。底面が水平であり、土砂の投下が瞬間的であれば底面衝突直後の濁水塊の形状比は  $K_0 = 0.5 \sim 0.7$  程度として差し支えない。また、投下土砂の平均的な粒径が数 mm のオーダーであり、単位奥行き当たりの投下量が数 m<sup>2</sup> 以上の規模の現実的な土砂の投下に限定すれば既述のとおり  $W_{P*}$  の影響は小さいことから判断して、これらの図は一般的に利用することができると考えられる。図-15より  $F_{d0}$  が十分大きい場合には濁水塊の高さは線形に増大するが、 $F_{d0}$  の増大により鉛直方向の成長は抑制されるようになる。

土砂投下時間が長くて土砂の瞬間的投下が仮定できない場合には、濁水塊の初期形状について  $K_0 = 0.5$  と仮定することが難しくなる。図-17、図-18 は濁水塊高さや移動速度に対する  $K_0$  の影響について示している。初期形状により濁水塊の挙動特性がかなり変化するこ

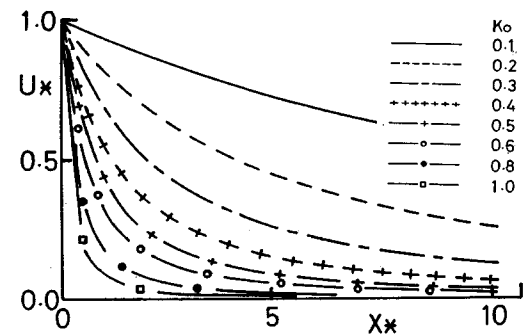


図-18 濁水塊移動速度  $U_*$  に対する  $K_0$  の影響

とがわかる。従って、瞬間投入を仮定できない場合については濁水塊の初期形状比を決定する方法が必要となる。この問題については今後検討されなければならない課題である。

## 5. 結論

本研究では大規模埋立工事に伴う海域の濁りが問題となっていることに鑑み、底開バージによる土砂直投工により生じる濁りの初期拡散過程について水理実験

により検討した。さらに、その結果を基礎とした濁水塊移動に関する解析モデルを提案した。得られた結果をまとめると以下のようである。

(1) 濁りの初期拡散は、土砂粒子群が鉛直に自由落下する際に誘起する流体運動により支配されているものと考えられる。

(2) 濁りの成分の増大は、濁水塊の鉛直方向への成長を抑制する。その結果、流体抵抗が小さくなるために移動速度の遅減が抑制され、濁りの水平方向の拡散範囲は大きくなる。従って、濁質混入量の大きな土砂に対しては海底から展張されたような自立式の濁りの拡散防止膜の使用が有効になると考えられる。一方、濁質成分が少ない場合には濁りの初期拡散の平面的な範囲は抑制される。

(3) 濁水塊の形状について、初期運動量の卓越する領域では高さの増加率は  $dH/dx = 0.45$ 、長さの増加率は  $dL/dx = 0.90$  程度である。濁水塊の最大到達高さは濁水塊の初期密度フルード数  $F_{d0}$  により規定されると考えられる。

(4) 運動量保存を基礎とした濁水塊挙動に関する解析モデルを考案した。実験結果より流体塊形状と連行係数の関係については、 $\alpha = 1.6K^2$  なる関数関係を得た。本解析モデルを用いることにより、投下土砂量、濁質としての細粒砂量、これらの平均粒径さらに投下水深を用いることにより、濁りの初期拡散過程について予測することができる。

(5) 本モデルを用いる上での問題点は、瞬間的な投入を仮定できないケースでの濁水塊の初期形状の決定方法、濁質成分つまり濁りの総量の決定方法などである。

#### 参考文献

- 1) 地球環境工学ハンドブック編集委員会編：地球環境工学ハンドブック、第17章海洋汚染問題、1991。
- 2) 堀口孝男、古土井光昭、堀江毅：海上工事による濁りの分布特性と数値シミュレーション、第32回海岸工学講演会論文集、pp.268-272、1985。
- 3) 堀江毅：MAC法による直投土砂の初期拡散に関する数値解析、運輸省港湾技術研究報告、No.471、1983。
- 4) 小田一紀、重松孝昌、濱崎佳尚、山瀬晴義：汚濁拡散防止膜の効果に関する研究、第37回海岸工学論文集、pp.843-847、1990。
- 5) 古土井光昭：港湾工事における濁りの挙動に関する研究、大阪大学学位論文、1989。
- 6) 武藤碩夫、吉井総介、石井勉：大規模底開バージによる土砂投下の研究、三菱重工技報、Vol.11, No.1, pp.92-104、1974。
- 7) 室田明、中辻啓二、玉井昌宏、町田博紀：海域での土砂投下における密度流現象、第35回海岸工学講演会論文集、pp.777-781、1988。
- 8) Beghin, P., Hopfinger, E.J. and Britter, R.E. : Gravitational convection from instantaneous sources on inclined boundaries, *J. Fluid Mech.*, Vol.107, pp.407-422, 1981.
- 9) Huppert, H.E. and Simpson, J.E. : The slumping of gravity currents, *J. Fluid Mech.*, Vol.99, pp.785-799, 1980.

(1994. 5. 27 受付)

## STUDY ON INITIAL STAGE OF DIFFUSION PROCESS OF TURBIDITY IN DIRECT DUMPING OF SOIL

Masahiro TAMAI, Kohji MURAOKA, Akira MUROTA and Hiroki MACHIDA

An initial stage of diffusion of turbidity in direct dumping of soil using hopper barges with bottom doors was studied both through laboratory experiments and theoretical consideration. The two-dimensional experiments were carried out to observe turbidity clouds as a mechanism of the initial diffusion process by a flow field generated by a swarm of soil particles falling vertically in water. A semi-empirical model based on results of the experiments was developed and applied to the experiment.