

## 鉛直管内における投入土砂の水理解析

茨城大学 学生会員 齊川 義則  
 茨城県土木部 加藤 知恵  
 茨城大学 正会員 三村 信男

## 1. 目的

土砂を扱う埋立、浚渫、浅場造成事業では、工事による周囲への影響を極力小さくすることが要求されており、その方法として、より効果的・効率的に汚濁防止膜を展開する方法や汚濁発生源での負荷を低減する方策等が検討されている(五明, 2001)。汚濁発生源での負荷を低減する方策として、汚濁防止膜が使用できない錨泊地内において、環境への影響をできるだけ抑え、狭い作業占有域から計画地点に確実に土砂を投入する方法として二重管式投入工法がある。しかし、その循環機構や諸条件下での最適な管の構造などの不明な点が存在する。そこで、本研究では、二重式鉛直管の考察の基礎にするために、単式鉛直管を用いて投入土砂の挙動と水理特性の把握を目的に、数値モデルによるシミュレーションと水理実験による検証を行った。

## 2. 鉛直管内の土砂落下モデル

五明(2000)にならって鉛直管内の運動方程式を導いた。鉛直管内を円柱形状の土砂塊が落下する場合を考える。土砂投入によって管内水位が低下し、その結果土砂塊の上下に圧力差が生じる。この土砂塊にかかる圧力差により、土砂塊と鉛直管の壁面との間を上方に水が抜ける。土砂塊はこの水流による摩擦と、圧力差、自重のバランスによって管内を脈動しながら落下する。この現象に対して土砂塊上面、下面の水圧がそれぞれ管内水位、管外部水位による静水圧に等しく、土砂塊、間隙水には相対速度の二乗に比例する摩擦抵抗が働くものとし、以下の運動方程式を導いた。

(土砂塊の運動方程式)

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\rho_s}{\rho_s(1+C_m)} g - \frac{A}{V} \frac{\rho_w}{\rho_s(1+C_m)} g(h_1 - h_2 + H) - \frac{fs}{2V} \frac{\rho_w}{\rho_s(1+C_m)} (w-v)|w-v| \quad (1)$$

(水流の運動方程式)

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{A_1 - A}{V_1 - V} g(h_1 - h_2 + H) - \frac{fs}{2(V_1 - V)} (v-w)|v-w| - \frac{fs_1}{2(V_1 - V)} v|v| \quad (2)$$

(鉛直管内の水の連続式)

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{A}{A_1} w + \frac{A_1 - A}{A_1} v \quad (3)$$

ここに、 $w$ :土砂塊落下速度、 $v$ :間隙水速度、 $\rho_s$ :土砂塊の密度、 $\rho_w$ :水の密度、 $s$ :土砂塊の側面積、 $s_1$ :土砂塊厚さ相当部分の鉛直管側面積、 $A$ :土砂塊底面積、 $A_1$ :鉛直管断面積、 $V$ :土砂塊体積、 $V_1$ :間隙体積、 $d$ 、 $d_1$ :土砂塊、鉛直管の内径、 $h_1$ :鉛直管内水位、 $h_2$ :鉛直管外水位、 $f$ :摩擦係数、 $C_m$ :付加質量係数である。

## 3. 単式鉛直管実験

実験では高さ100cmの亚克力水槽を用意し、直径50mm、厚さ2.5mm、高さ90cmの亚克力製の鉛直管を水中部分の長さが65cmになるように固定した。圧力計を、水面下35cm、60cmの2ヶ所に設置し、土砂塊落下時の圧力変化、2つの圧力計の圧力差を測定した。デジタルカメラによって鉛直管内の水面変動と土砂塊の位置を追跡した。土砂塊の初期高さを25cmと0cmの2種類とし、表1に示された条件で合計14ケースの実験を行った。

表1 実験条件

| d(cm) | h(cm) | A/A1 | 密度(g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------|-------|------|------------------------|
| 4.81  | 90    | 0.93 | 2                      |
|       |       |      | 1.53                   |
|       |       |      | 1.2                    |
| 4.6   | 90    | 0.85 | 1.53                   |
|       |       |      | 4.3                    |
| 3.85  | 90    | 0.59 | 2                      |
|       |       |      | 1.53                   |
|       |       |      | 1.2                    |

キーワード 単式鉛直管、土砂塊、落下モデル、水理実験

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4丁目12番地1号 茨城大学都市システム工学専攻 TEL 0294-38-5268

### 4. 実験とモデル解析の比較

図1は実験と計算結果の比較である。土砂塊の落下速度について、閉塞率が高くなるほど落下速度が遅くなる

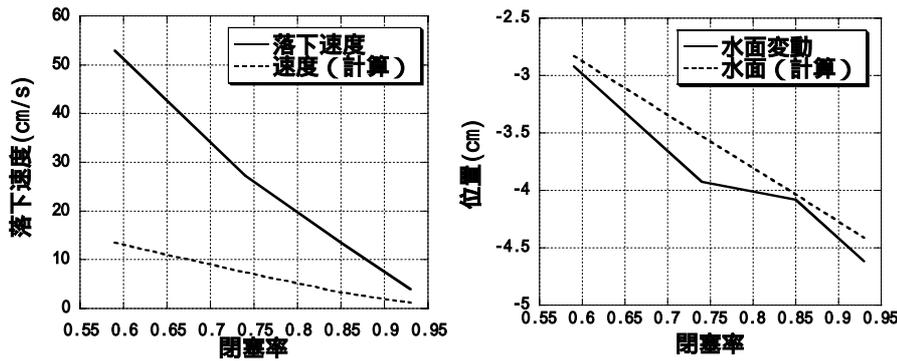


図1 落下速度と平均水位（土砂塊の密度  $1.53 \text{ g/cm}^3$ ）

ることが分かる。また閉塞率が高い場合には実験を計算が良く再現している。閉塞率が大きくなった領域で計算結果が小さく出るのは、圧力差と摩擦のモデル化に問題があることを示している。

土砂塊が管内内部に存在すると管内の平均水面が低下するが、この水面低下量は、土砂塊を含めた鉛直管内の全重量と鉛直管外側の水

位（静水圧）が釣り合うと考えた推定値とほぼ等しい。

### 5. 結論 投入土砂塊の水理特性

図2,3に土砂塊と管内水位の経時的な変化を示す。各期間における土砂塊の運動のメカニズムは以下のように理解できる。図2の期間Aでは、土砂塊は初速度  $w_0$  で水面に衝突し、その後  $w=0$  となるまで鉛直管内を落下する（図3A）。鉛直管の水面も土砂塊と同時に低下する。このとき土砂塊の持っていた運動エネルギーは、衝突時のエネルギー散逸によって失われるとともに鉛直管の水柱の位置エネルギーに変わり、鉛直管内の水面はこの分だけ低下する。図2の期間Bにおいては、図3Bのように土砂塊の上下面にそれぞれ圧力  $p_1, p_2$  が作用する。水中では圧力  $p_2$  が（圧力  $p_1$  + 重力）より大きくなるので、土砂塊はこの圧力差を復元力にして鉛直管内を上昇する。鉛直管の下端での圧力を  $p_0$  とすると、 $p_0$  は鉛直管内の水の重量と土砂塊重量より大きくなるので、この圧力差（=位置エネルギー）を復元力にして、水柱（水面）も上昇する。図2の期間C、すなわち図3Cのように水面及び土砂塊が上昇した状態では、圧力  $p_2$  が（圧力  $p_1$  + 重力）より小さくなり、また下端圧力  $p_0$  が鉛直管内の水 + 土砂塊の重量より小さくなるので、土砂塊も水柱（水面）も降下する。このように、土砂塊上下の水圧および鉛直管下端の水圧と水面及び土砂塊の上下運動が連成することによって、鉛直管内の振動運動が継続する。その中で、土砂塊は重力の作用によって、平均的には一定の速度で落下する。土砂塊と水柱の運動をエネルギー的に考えると、土砂塊が初期に有する位置エネルギーが、水柱（水面）と土砂塊の運動および位置エネルギー、エネルギー散逸に転化されて振動が維持されると考えられる。

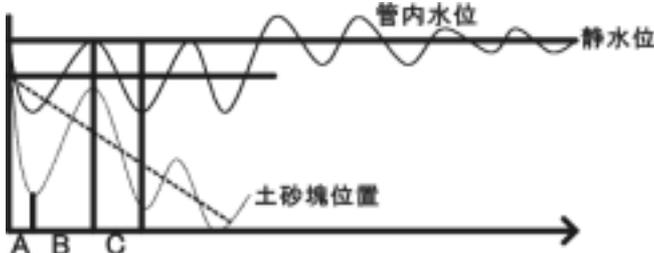


図2 土砂塊と管内水位の経時変化

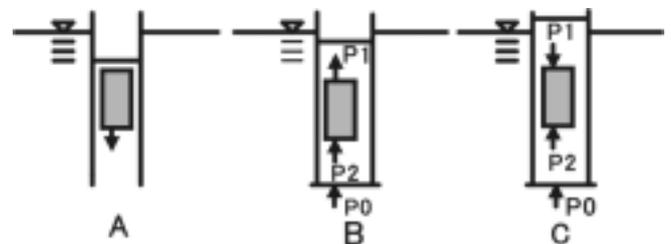


図3 土砂塊と水面の状況

### 参考文献

- ・加藤知恵(2002):鉛直管内における投入土砂の水理解析-系統的な実験とモデル化-,茨城大学卒業論文,80p.
- ・五明美智男(2000):二重式鉛直管を用いた土砂投入時における管内水循環機構について,海岸工学論文集,第47巻,pp.981-985.
- ・五明美智男(2001):衝撃現象を考慮した覆砂工法の体系化に関する研究,水理環境研究室論文集 別冊 第1集,東亜建設工業株式会社 技術研究所,162p.
- ・齊川義則(2001):鉛直管内における投入土砂の水理解析,茨城大学卒業論文,72p.