

II - 193

開水路Water Conveyorに関する研究（第二報）

（株）大林組 正 員 市川 雅之
山梨大学工学部 正 員 荻原 能男
山梨大学大学院 学生員 〇田内 誠一

1. はじめに

近年、排水機場および水力発電所等の水利施設に多様な種類・形状の塵芥が排出され、その量は年々増加の一途をたどっている。これら水利施設に排出された塵芥は除塵機で掻き上げられ、各施設に設置された焼却炉までBelt Conveyor等で輸送され、焼却処分されているのが現状である。しかし、Belt Conveyorでは除塵機で掻き上げた塵芥が水を含んでいるために、Belt Conveyorに塵芥が付着し、塵芥がスムーズに輸送されないという問題が顕在化してきた。この問題を解消するために、Belt Conveyorのかわりに開水路水流を用いて塵芥を輸送する装置を飯田祥雄氏が提案した。この装置をWater Conveyorと呼ぶ。この装置は水流によって塵芥を輸送するために、塵芥をスムーズに輸送することができ、また消費電力が少なく機能的・経済的な利点を持っている。類似した研究では福島¹⁾による単一な雪魂の移動限界式の提案等が紹介されているが塵芥輸送についての研究は十分に行われていない。そこで本研究では、このWater Conveyorにおける塵芥輸送機構を理論的に検討し、塵芥の移動限界式および水流による塵芥の解析モデルを提案する。さらに、模擬塵芥としてPVA²⁾（Poly Vinyl Alcohol Sponge）を採用し、理論式の妥当性を検討する。

2. 理論的検討

2.1 塵芥の移動限界

流量がある値よりも少ないと、水が塵芥の間隙を通って漏れ、塵芥を押し流すのに必要な流量が得られないことから塵芥は移動しない。このように与えられた塵芥を流下させるために必要な流量、すなわちある水利条件のもとで塵芥の移動限界を知ることが重要となってくる。そこで、塵芥の大きさが水路幅と同じくらいの極めて大きい物体が水路中に存在するときの流れを適切にモデル化し、塵芥の静止と移動の機構を理論的に検討する。

(1) 塵芥のモデル化

理論に用いた仮定は次に示すとおりであり、塵芥が水路底を滑って移動し、上流側の水深が塵芥によってせき上げられる場合を滑動状態、塵芥が浮いて移動し、上流と下流の水深がほぼ等しい場合を浮遊状態と呼ぶことにする。

①塵芥を高さ h_r 、長さ L_r 、幅 B_r の直方体とする。②塵芥内の空隙は均一に分布しているものとする。③塵芥の幅 B_r は水路の幅 b とほとんど等しいとする。ここでは、浮遊状態においては塵芥は必ず移動することから、滑動状態の場合だけを考える。

(2) 塵芥に働く力の釣合方程式

(1)の仮定に基づいて、図-1のように塵芥に作用する力から斜面方向に働く力の釣合方程式を導くと次式のように表される。

$$F_D + \Delta P + D_w + W_r \sin \theta - D = 0 \quad \cdots (1)$$

ここで、 D は水中の塵芥の摩擦係数 μ_0 を用いて次のように表される。
 $D = \mu_0 [W_r \cos \theta - F_r] \quad \cdots (2)$

式(1)に各諸量を代入して、塵芥の移動条件を求めると次式となる。

$$C_D \rho_w u_0^2 h_1 B_r + \rho_r g (1 - \lambda) h_r B_r L_r \sin \theta \\ \geq \mu_0 (1 - \lambda) [\rho_r h_r \cos \theta - \rho_w h] g B_r L_r \\ - \frac{1}{2} \rho_w g B_r (1 + \lambda) (h_1^2 - h_2^2) - \rho_w g B_r h L_r \lambda \sin \theta \quad \cdots (3)$$

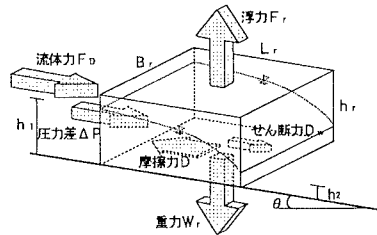


図-1 塵芥に作用する力の釣合

ここで、 ρ_r は塵芥の密度、 ρ_w は水の密度、 λ は塵芥の空隙率、 g は重力加速度、 C_D は抗力係数、 u_0 は塵芥上流の流速を表す。また、 h は浮力の作用する平均水深であり、上・下流の水深 h_1 、 h_2 を用いて近似すると $h \approx (h_1 + h_2) / 2$ と表せる。さらに u_0 は連続の式から $u_0 = Q / B h_1$ と表される。ここで、 Q は流量、 B は水路幅である。

2.2 移動座標系からみた塵芥の流動

ここでは移動座標系という概念を導入し、塵芥の運動を理論的に検討する。

(1) 固定座標と移動座標の定義

固定座標系においては塵芥は速度 c で移動し、水深 h も断面平均流速 u も時間 t と距離 x の関数である。いわゆる非定常流れである。ところが、塵芥とともに速度 c で移動する座標系 y では塵芥は静止し、水深 h も断面平均流速 v も時間では変化しない。この y 座標を移動座標系と呼ぶ。

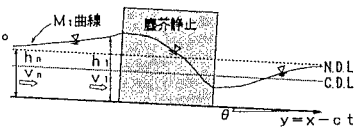


図-2 移動座標系の連続条件

(2) 塵芥の移動速度と流量の関係

移動座標系の限界水深は固定座標系の限界水深より小さい。そのため塵芥の上流の水面形はほとんどの場合M₁型水面形である。すなわち図-2に示すように上流側で水深が等流水深に近づく堰上げ背水曲線(back water curve)である。上流の等流部分と塵芥の上流に連続の条件を当てはめると次式のようになる。

$$v_n h_n = v_1 h_1 = q \quad \cdots (4)$$

一方、固定座標系でみると上流の等流部分では

$$q_0 = u_n h_n = (v_n + c) h_n \quad \cdots (5)$$

が成立立つ。したがって、式(4)、(5)より、塵芥の移動速度 c と流量 q_0 の関係が次のように求められる。

$$c = \left(1 - \frac{q}{q_0}\right) \frac{q_0}{h_n} \quad \cdots (6)$$

また、 q_0 / h_n は等流流速 u_n であるから、上式は次のようにも書ける。

$$\frac{c}{u_n} = 1 - \frac{q}{q_0} \quad \dots\dots\dots (7)$$

この c/u_n を『塵芥速度比』と呼ぶことにする。また、 q は塵芥からの漏水流量であり、 q/q_0 は漏水率である。

3. 実験概要

本実験では水路の幅0.11m、高さ0.12m、総延長8.50mの変勾配直線水路を使用。材質は塩化ビニル製で粗度係数は実験から0.0092である。実験には実際の塵芥に近い単位重量と空隙率をもつ PVAスポンジを用いる。（表-1に供試体の諸元を示す。）なお実験方法は以下のものとする。

①表-1に示される供試体を水路上流端から2.2mの地点に投入した後、供試体の移動形態（静止、浮遊）を判定。流量は0.050～0.350 (ℓ/s) および5.00～8.50 (ℓ/s) の間で数種変化させた。また水路勾配は1/100、1/300、1/500、1/1000を採用した。

②流量5.00～8.50 (ℓ/s) の間では水路上流端から5.00～8.50mの間で模擬塵芥の移動速度を測定した。

4. 実験的検討

(1) 移動限界の理論と実験値との比較

図-3は、供試体Aの移動限界を示したものである。図中の実線は式(3)と連続の式から求めた移動限界流量の理論値であり、塵芥下流側の水深 h_2 の項は上流側の水深 h_1 の項に比べて十分に小さくなるのでこれを無視した。また、流量が小さい場合には塵芥移動前の上流水深 h_1 は供試体の変化にはよるものの、水路勾配の変化にはよらず、ほぼ一定値をとるので h_1 の項には実験値の平均値を代入した。実線の理論値が供試体が移動している状態の○印と移動しなかった状態の×印の中間にあれば理論値は実験値と一致していると判断する。このような観点からみると、水路床勾配が1/300以下の場合には理論値は○印と×印の中間のところに位置し、実験値との対応はよい。一方、水路床勾配がこれより大きくなると、実験値に比べ理論値がやや小さくなっている。この理由として、一つにはWater Conveyor水路に模擬塵芥を投入すると、水面形が大きく変形し、その割合は水路床勾配が大きくなるほど大きくなるためであると考えられる。また、水路床勾配が設定値からはずれるなどの影響が現れているためであると考えられる。このことを考慮すると、模擬塵芥の移動限界に対して理論式は実験値の概略を説明できる。以上のように、ここで、提案した移動限界式は密度で表される塵芥の質、水路床勾配底面の状態などをパラメータとして流量の関数としてあらわすことができた。このような解析によって、これらのパラメータを適切に評価することができれば、広い範囲の条件に対し、理論により、塵芥の移動限界を見積もることが可能になる。

(2) 塵芥速度比 c/u_n と流量の関係

図-4は供試体Aの塵芥速度比と流量の関係を示したものである。このグラフから、次のようなことが判る。水路の流量が増えると c/u_n は増大する。すなわち、塵芥からの漏水流量 q と水路の流量 Q との比 q/Q （漏水率）の値が減少する。 $c/u_n = 1.0$ 付近で、模擬塵芥の流れの状態は遷移状態となり、さらに c/u_n が増加すると浮遊して移動するなどの影響が現れるためであると考えられる。このことを考慮すると、模擬塵芥の移動限界に対して理論式は実験値の概略を説明できる。以上のように、ここで、提案した移動限界式は密度で表される塵芥の質、水路床勾配底面の状態などをパラメータとして流量の関数としてあらわすことができた。このような解析によって、これらのパラメータを適切に評価することができれば、広い範囲の条件に対し、理論により、塵芥の移動限界を見積もることが可能になる。

5. おわりに

本研究は、直線のWater Conveyorにおける塵芥の移動限界および水流による塵芥輸送について理論的・実験的研究を行った。塵芥の移動限界については、模擬塵芥を用いた実験を行い、理論の妥当性が検証された。このことにより、Water Conveyorにおける必要流量の算定、または塵芥投入量の調節も容易に行うことが可能になる。次に、移動座標系において定常の連続条件から塵芥輸送の解析モデルを導いた。このモデルの妥当性を検討するために模擬塵芥による流下実験を行い、限られた適用条件ではあるが、モデルの妥当性が示された。

【参考文献】

- 1) 福島祐介・早川典生・村上正人: 流雪溝における雪塊の移動条件、土木学会論文集No. 497/II-28, pp. 51～59, 1994. 8.
- 2) 岡村康一・福島祐介・早川典生・村上正人: 流雪溝の雪輸送能力に関する水理学的検討、水工学論文集、第36巻、pp. 287～292, 1992.
- 3) 荻原能男・坂本康・宮沢直季: 水流による塵芥輸送の解析モデル、水工学論文集、第37巻、pp. 525～530, 1995. 4.
- 4) 市川雅之・荻原能男・宮沢直季: 開水路Water Conveyorに関する研究、土木学会第49回年次学術講演会、II-200, pp. 400～401, 1994. 9.

表-1 模擬塵芥の諸元

供試体 種類	物理的諸元				単位重量と空隙率		空隙率 (%)
	高さ h (cm)	幅 B (cm)	長さ L (cm)	乾燥質量 (g)	飽和質量 (g)	静止質量 (g)	
A	4.0	10.5	9.0	0.123	0.851	0.67	72.8
B	4.0	10.5	18.0	0.125	0.825	0.66	70.1
C	4.0	10.5	36.0	0.121	0.820	0.61	69.9
D	8.0	10.5	9.0	0.119	0.849	0.59	73.1
E	8.0	10.5	18.0	0.131	0.803	0.52	67.5
落葉	—	—	—	0.033	0.980	—	83.4

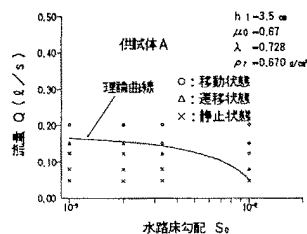


図-3 模擬塵芥の移動限界

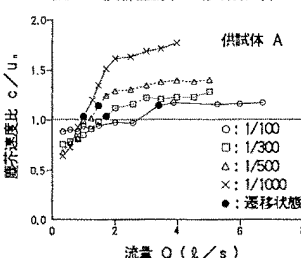


図-4 塵芥速度比と流量の関係

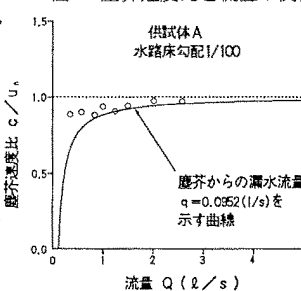


図-5 漏水流量一定曲線

次に、移動座標系において定常の連続条件から塵芥輸送の解析モデルを導いた。このモデルの妥当性を検討するために模擬塵芥による流下実験を行い、限られた適用条件ではあるが、モデルの妥当性が示された。