

浚渫土砂の空気圧送工法における管内抵抗係数

浦 勝*・秋山壽一郎**・別府道郎***・阿部 聖***

1. 緒 言

空気圧送工法は、浚渫された土砂を埋立地へパイプライン系を通じて輸送する方法の一つであり、土砂搬送の起動力として圧縮空気を用いるものである。従来、浚渫・土砂搬送工法は、パイプラインを用いた水搬工法であるポンプ浚渫が多く用いられてきたが、輸送土砂に多量の水を含むため膨潤率が大きく埋立地の容量が大きくなること、大規模な余水処理施設が必要であることなど、課題を解決しなければならなかった。従って、グラブ浚渫・リクレーマ船・フローティングコンベアを組み合わせた高濃度浚渫工法が、開発されて来た。ところで、土砂搬送法としてパイプラインを用いることの利点は、土砂の連続的・長距離輸送にある。この利点を生かし、余水処理の負担を軽減する方法として最近利用されるようになったものが大型圧送船による空気圧送工法である。空気圧送工法の特徴は次のようなものである。

- (1) 浚渫土砂の連続的、大量かつ長距離輸送が可能である。
- (2) 低含水比の状態での土砂圧送を行うため、余水処理設備が簡易で済む。また埋立地の表面乾燥が早く、表面処理の早期着工が可能となる。
- (3) 超軟泥土から砂質土まで、圧送が可能である。

しかし、浚渫土砂の空気圧送工法に関しては十分な現地データに乏しく、未知の点が多い。本研究は、大型圧送船を用いた現地(K港)実験を行い、得られた資料をもとに、土の含水比と圧送能力に関する検討を行ったものである。

2. 空気圧送工法

2.1 空気圧送工法の概略

空気圧送工法の概略を図-1に示す。グラブ浚渫船により浚渫された土砂は、土運船により空気圧送船の船舷まで運ばれてくる。空気圧送船(三井造船(1991))は幅30m、長さ50m、深さ2.5m(吃水1.5m)の箱型非

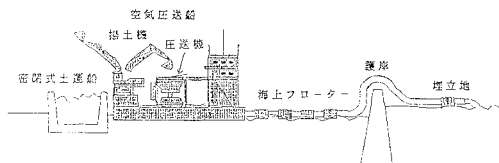


図-1 空気圧送工法の概略

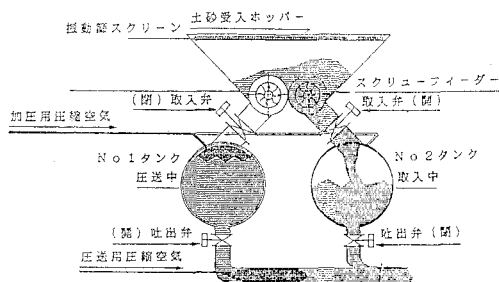


図-2 土砂取入及び圧送機構

自航船であり、左舷側に、バケット容量4.4m³のバックホー2台を搭載し、土運船からの揚土作業が行われる。圧送機入口は図-2に示すように、振動スクリーン(メッシュ200mm)を有する土砂受入ホッパーとなっており、障害物が除去されると共に、高粘性土でも良好に投入される。

土砂取入は図-2に示すようにスクリュウフィーダーにより行われる。圧送タンク(有効容量14.2m³)は2台を1組とし、土砂の取入と圧送を交互に繰り返すことにより、連続的に作業を行う。図-2ではNo.2タンクが取入状態、No.1タンクが圧送状態にある。圧送状態はタンク内の高位レベル検知により取入弁が閉塞された時に開始される。加圧用圧縮空気が圧入されタンク内の圧力が上昇し、同時にタンク下端の吐出弁が開き、土砂が圧送管に入る。この時圧送管には圧送用圧縮空気がノズルから注入され、土砂が圧送される。No.1タンク内の下位レベルが検知されると吐出弁が閉じ圧送状態は終わる。次に加圧用圧縮空気が遮断された後、タンク内が大気圧に開放され取入弁が開き再び取入状態に入る。2台のタンクの圧送管はタンク出口より7mでY管により1本の排砂管となっており、土砂は2台のタンクよ

* 正会員 工博 九州工業大学教授 工学部設計生産工学科

** 正会員 Ph.D. 九州工業大学助教授 工学部設計生産工学科

*** 正会員 三井不動産建設株式会社九州支店工事部

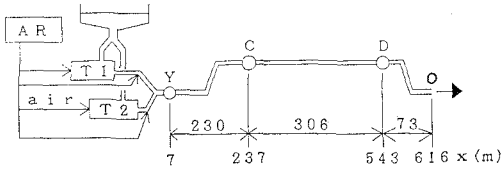


図-3 圧送管系圧力測定点

り交互に圧送されてくる。圧送装置は3組あり、それらは個別に運転され、3系統のパイプラインにより埋立地の敷均しを均一に施工することができる。圧送装置の運転は圧送船の第2甲板に設けられた制御室内の操作卓より自動又は遠隔手動により行われる。

2.2 現地実験条件

現地実験はK港において1990年12月に9日間にわたって行われた。排砂管の内径は340mm、管長は3系統それぞれ324, 442, 616mである。最長の第3系統の概略を図-3に示す。排砂管は6.0mのものを接続した。Y～C間230mは海上部があるため0.9mのゴムスリーブが23個、15°のベンド管が3個挿入されている。C～D間306mは陸上直線部であり、D～O間73mは吐出部で15°と45°ベンド管それぞれ

1個とゴムスリーブ3個が用いられている。第1, 第2系統は、C～D間の距離がそれぞれ10mと148mであるが、使用されているゴムスリーブ、ベンド管の数は第3系統と同じである。

浚渫された土砂の土性は13個の試料の平均値で示すと、真比重2.67, 自然含水比61.1%, 液性限界53.4%, 塑性限界31.7%, 細粒分59.8%, 粘土分21.8%であった。

実験項目は大きく2つに分けられる。

第1は、圧送船全体の土砂圧送能力と土砂含水比との関係を調べるものであり、第2は、土砂輸送時の管内圧力測定に基づき、圧送土砂の挙動を推定すると共に、圧送能力に及ぼす含水比の関係を検討するものである。

第2の実験では図-3に示した第3系統の6箇所、すなわち空気溜タンク（AR）、圧送タンク No. 1 及び No. 2（T1）、（T2）の出口、及び圧送管入口からの距離7m（Y点）、237m（C点）、543m（D点）に圧力計をとりつけ、10秒間隔で15分間圧力測定を行った。さらに、 $X=260\sim 290$ m間の土砂の通過音を測定して管内土砂移送速度 U_{so} を求めた。

3. 実験結果

3.1 土砂圧送能力と含水比の関係

表-1に圧送船全体としての圧送能力調査結果を示す。同表の圧送時間とはバックホウが土砂を積み込み始めてから圧送を終了するまでの時間である。圧送回数は1つのタンク内の土砂を圧送した回数を表す。加水量は圧送時の含水比を変える目的で、毎回の圧送時に1タンク当たり注入された水の体積である。圧送前含水比 Wb (%) はタンクへ投入される前の揚土試料9個の平均値である。揚土流量 Q_s (m^3/h) は1時間当たりのタンクへ投入された揚土体積であり、含水比は Wb をもつ。圧送後含水比 W (%) は各圧送管より排出された土砂試料9個の平均値である。圧送流量 Q_m (m^3/h) は1時間当たり圧送管を通して圧送された揚土量と加水量の総体積である。

図-4(a)に圧送流量 Q_m と圧送後の含水比 W との関係を示す。同図より W の増加と共に Q_m が増大し $W=95\%$ 程度で $Q_m=730$ (m^3/h) の最大圧送能力を持つといえる。一方、図-4(b)には圧送前の含水比

表-1 空気圧送法能力実験結果

日	圧送時間 (分)	加水量 (m^3 /タンク)	圧送回数(回)			揚土流量 Q_s (m^3/h)	含水比(%)		圧送流量 Q_m (m^3/h)
			1系統	2系統	3系統		圧送前 Wb	圧送後 W	
10	60	4	14	13	○ 16	432.0	71.4	86.6	610.6
11	55	4	15	13	○ 15	474.5	64.9	73.4	666.1
12	61	3.5	15	13	○ 12	425.9	64.7	99.2	558.7
	50		12	14	13	453.6	69.2	116.7	664.6
13	37	2.5	14	15	13	480.0	63.7	111.0	627.8
	44		13	12	10	535.9	67.1	105.8	677.7
	47		11	12	○ 14	519.6	67.4	95.4	670.7
14	45	2	12	13	12	613.3	67.7	82.4	700.5
	51		13	14	○ 14	590.6	64.5	81.7	684.9
	42		12	11	13	637.1	68.8	93.1	730.3
	38		12	10	10	625.3	65.8	85.5	717.5
15	36	2	9	8	○ 10	551.7	62.4	78.8	639.0
16	54	2	14	12	○ 14	532.2	66.5	84.0	631.1
	48		12	14	12	586.3	66.6	94.4	674.5
	60		16	18	17	636.0	64.1	93.2	724.2
	38		10	10	10	587.4	64.9	86.7	672.6
17	41	2	10	11	11	564.9	59.0	86.9	665.0
	44		12	13	12	619.1	62.8	86.3	716.5
	41		14	10	○ 11	643.9	70.0	90.0	727.3
	49		15	14	11	601.2	62.7	95.9	695.5
18	48	2	14	12	13	588.8	66.6	84.9	692.3
	46		10	12	14	598.7	60.3	78.0	666.8
	51		15	12	○ 17	635.3	67.4	95.1	725.1
合計平均	52	1158	14	13	12	535.4	63.8	90.6	639.0
			308	299	306	561.2	67.0	90.7	674.9

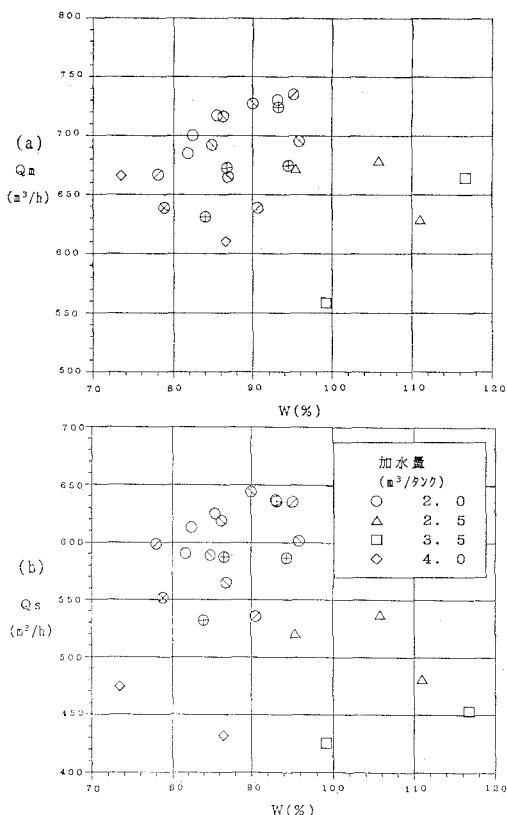


図-4 (a) 圧送流量 (b) 揚土流量と含水比の関係

$Wb=67\pm 4$ (%) を持つ土砂の揚土流量 Q_s と圧送後の含水比 W との関係を加水量をパラメータとして示した。同図より加水量が多く 2.5 (m³/タンク) 以上では Q_s が 530 (m³/h) 以下となって揚土流量が少なくなり、本実験に用いた土性をもつ土砂に関する限り加水量を増加することは不利になる事が判る。また、加水量が 2.0 (m³/タンク) の場合は $W=93\%$ のときに Q_s の最大値が存在するように思われる。

3.2 圧送管内の圧力変化

ここでは 2.2 節において述べた第 2 の実験結果を述べる。この実験は表-1 に○印をつけた圧送中の 15 分間に、図-3 に示した 6 点 (AR, T1, T2, Y, C, D 点) において圧力測定を行ったものである。

a) 管内圧力変化

図-5 に土砂圧送時の管内圧力変化の時系列の 1 例を示す。同図より次のようなことが判る。空気溜 tanks の圧力 PR (Δ) は 4 ± 1 (kgf/cm²) に制御されている。圧送タンク T1 が圧送開始状態になると出口圧力 PT1 ($\diamond$) が時間 $T=0$ より上昇し始め、これと同時に Y 点の圧力 PY (細実線) がほぼ PT1 と同じ値で上昇する。 $T=20$ s において C 点 ($X=237$ m) の圧力 PC (点線) が上昇し始めることから土砂混相流の先端が、この

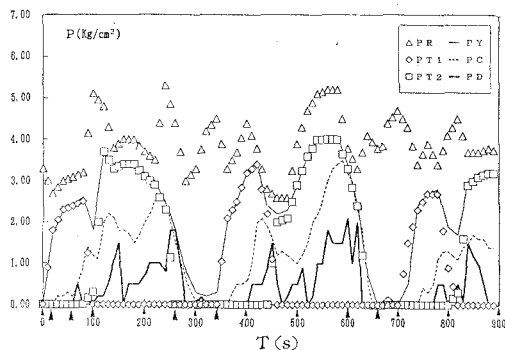


図-5 土砂圧送時の管内圧力変化の時系列 (12/17)

時刻に C 点に達した事がわかり、これ以後土砂通過と共に PC は上昇していく。さらに、 $T=60$ s では D 点 ($X=543$ m) の圧力 PD (太実線) が上昇し始め、混相流の先端が D 点に達したことが判る。 $T=100$ s で PT1 ($\diamond$) が減圧し、タンク T1 内の加水量を含めた土砂容量 14.2 m³ が排出完了したことになる。これと同時に、タンク T2 の圧力 PT2 ($\square$) が上昇し、T2 内の土砂が圧送管内に排出され、これに応じて PY (細実線) も上昇する。PC, PD もラグタイムを持ちながら変化する。T2 タンクの土砂が排出し終わる $T=260$ s ころから全体の圧力が下がり、2 個のタンクの土砂を圧送する 1 サイクルの輸送が終わる。図-5 の例では第 2 サイクルは $T=340$ s に始まり 660 s で終わっている。この例では各サイクルの始めと終わりが明瞭なのは圧送能力の方が土砂補給の能力を上廻っているためである。

b) 管内の圧送空気速度の評価

圧送管内の混相流体の密度と流速を見積るためには、管内に流入した空気の状態を知る必要がある。本実験では空気流量の測定が行えなかったため、次のような方法で圧送管に注入した空気量を算定した。すなわち、空気は空気溜 tanks の圧力 PR と Y 点の圧力 PY の圧力差によって空気注入ノズル孔 (径 $d=65.9$ mm) から噴出するものとし、その流速を Zeuner の式 (例えば椿 (1973)) により求める。

圧力 p_r 、密度 ρ_r に圧縮された大きなタンク内の空気が断面積 a の小さな孔から圧力 p 、密度 ρ の場所へ噴出するときの流速 u は次式で与えられる。

$$u = \sqrt{\frac{2}{n-1} C_T \left[1 - \left(\frac{p}{p_r} \right)^{(n-1)/n} \right]^{1/2}} \quad \cdots (1)$$

ここに n は定圧比熱と定積比熱の比で、乾いた空気は $n=1.40$ である。 $C_T = \sqrt{n R T_r}$ は絶対温度 T_r における音速であり、 $R=287$ m²/s² K は気体定数、温度を 20°C と仮定すると $C_T=343.1$ m/s となり、 u は m·s 単位で表せば次式となる。

$$u = 767.2 \left[1 - \left(\frac{p}{p_r} \right)^{0.2857} \right]^{1/2} \quad \cdots (2)$$

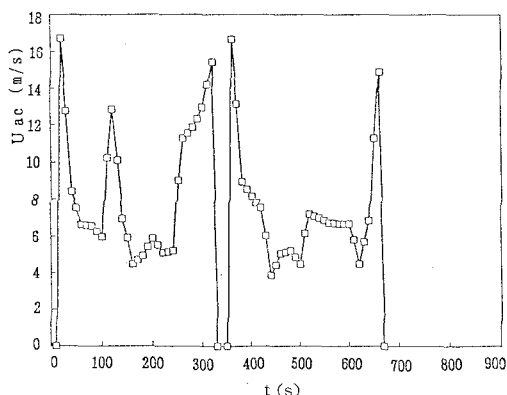


図-6 圧送管内空気速度変化時系列 (12/17)

式(2)の u は径 d のノズルから噴出する空気速度であるから、管径 $D (=339.8 \text{ mm})$ のY点における空気速度 U_{ay} は

$$U_{ay} = u \left(\frac{d}{D} \right)^2 = 28.85 \left[1 - \left(\frac{p}{p_T} \right)^{0.2857} \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。実験では p がゲージ圧で計算されているため、大気圧を P_0 として $p_T = PR + P_0$ などとした。Y点における時刻 t の空気速度を式(3)によって求めた結果の1例を図-6に示す。但し、同図はC点の値を求めるため

$$U_{ac}(t) = U_{ay}(t - \Delta t_1) \quad \dots\dots\dots (4)$$

を表示した。但し、 Δt_1 はY～C間の移動時間である。

c) 混相流体の管内流速

混相流体の管内流速を求めることは難しい。圧送管内の土砂通過音 ($x=260 \sim 290 \text{ m}$ 間の平均速度) により求めた流速を U_{so} とし 図-7 に△印で示した。図-7の横軸は圧送後の含水比 W である。同図にはC～D間の混相流の先端移動速度 U_t を□印で示した。また、前節で求めたY点の空気速度 U_{ay} の平均値を◆印とし、その標準偏差も合わせて示した。図-7に示した結果より、いずれの方法で求めた流速も W との間には依存関係がなく $U_{so}=7.90 \pm 1.70 \text{ m/s}$, $U_t=7.86 \pm 2.55 \text{ m/s}$, $U_{ay}=7.83 \pm 1.15 \text{ m/s}$ であった。これらの値がほぼ一致

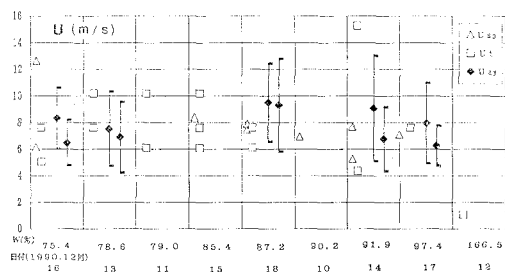


図-7 管内混相流体の流速と含水比との関係

することから、管内混相流体の流速として式(3)によって求めた空気速度を用いることにする。

d) 混相流体の単位体積重量

混相流体の平均単位体積重量 ω_m は次式により求めた。

$$\omega_m = (W_s + W_w + W_a) / (V_s + V_w + V_a) \quad \dots\dots (5)$$

ここに W は重量, V は体積を表し、添字 s, w, a はそれぞれ土砂, 水, 空気を表す。いま、圧送1サイクルの時間を T_c として、この間、土砂と水は一緒に運ばれたと仮定し、C点における時刻 t の混相流体の値 $\omega_{mc}(t)$ は次式によって評価する。

$$\omega_{mc}(t) = \frac{(W_s + W_w) / T_c + \rho_{ac}(t) g U_{ac}(t) A_p}{(V_s + V_w) / T_c + U_{ac}(t) A_p} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\rho_{ac}(t) = (PC(t) + P_0) / R \cdot T_T \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $U_{ac}(t)$ は式(4)とし、 $\rho_{ac}(t)$ は空気密度、 g は重力加速度、 $A_p = (\pi D^2 / 4)$ は圧送管断面積。

式(6)を用いて計算した $\omega_{mc}(t)$ の値は $0.1 \sim 0.3 \text{ (tf/m}^3\text{)}$ であった。

e) 管内抵抗係数

測点C, D間は直線区間であるので、この間の摩擦抵抗係数を次式により計算した。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{U_{ac}^2}{2g} + \frac{PC}{\omega_{mc}} + Z_c \right)_t \\ &= \left(\frac{U_{ac}^2}{2g} + \frac{PD}{\omega_{md}} + Z_D \right)_{t+\tau} + \left(f \frac{l}{D} \frac{U_{ac}^2}{2g} \right)_{t+\tau} \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

但し τ はCD間の距離 l の移送時間で、 $U_{ac}(t+\tau) = U_{ac}(t)$ とした。式(8)に式(3), (6), (7)を代入して求めた f の値は 図-5に対応する場合 図-8のようになる。 f の1サイクルごとの平均値を f_m として、含水比 W に対して示したものが 図-9である。同図より f_m は W の増加と共に減少し、 $W=87\%$ で最少の抵抗係数となり、 $W=100\%$ 近くで一定値に近づいていくと判断される。

f) 圧送管系の輸送能力評価

次に圧送管全体の平均抵抗係数 f_T を次式により定義し

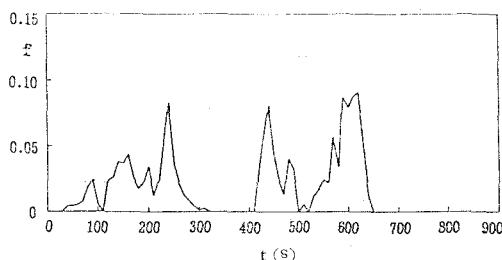


図-8 土砂圧送時の直線部管内抵抗係数変化の時系列

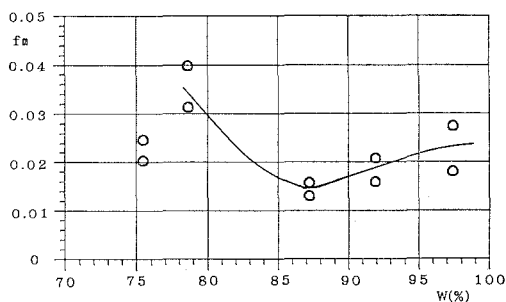


図-9 平均抵抗係数と含水比との関係

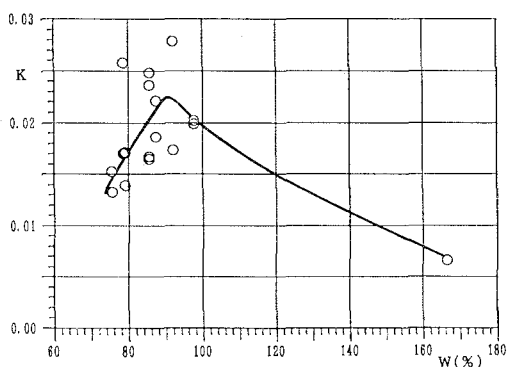


図-10 管系の輸送能と含水比との関係

図-10 に示す. 図-10 より $W=93\%$ 近傍で最大の輸送能を示すことがわかる.

4. 結 言

以上, 大型空気圧送船による浚渫土砂の現地圧送実験を行い, 次の結果を得た.

(1) 3系統のパイプラインによる全圧送土砂量の1時間当たりの値を求め, 本実験に用いた土性の土砂については含水比 93% 程度の低含水比で最大能力が得られること.

(2) 圧送船及び圧送管内の圧力変化の測定結果から, 土砂移動の挙動がわかり, 管内混相流速度が Zeuner 式による空気速度とほぼ同じ値になること.

(3) 直線区間の抵抗係数は含水比 87% 近傍で最低値をとること.

(4) 圧力測定から得られた輸送能は含水比 93% 近傍で最大値をとり, (1) の結果とも一致すること.

以上のことより, 93% 程度の低含水比で土砂輸送が可能な空気圧送法の発展性が期待できる. 今後, 他の性質をもつ土砂に関してもより詳細な実験と検討を行いたいと考えている.

最後に研究に協力いただいた, 木下久司, 鬼東幸樹の両氏に謝意を表する.

参 考 文 献

- 椿東一郎 (1973): 水理学 I, 森北出版, 208 p.
 三井造船 K K・三井不動産建設 K K (1991): 600 m³/h 土砂空気圧送船 [MATS-600], 作業船, 第 196 号, pp. 3-8.

$$Q_m = \frac{\pi}{4} D^2 \sqrt{\frac{1}{f_T}} \sqrt{2gPY/\omega_m} \dots\dots\dots (9)$$

輸送能 $K = \sqrt{\frac{1}{f_T}}$ を求めた. K と含水比との関係を