

5. 高濃度軟泥圧送船“TOTRA”

東亜建設工業(株)：石田 敏明・*泉 信也
原 英幸

1. はじめに

我国における浚渫埋立工事は、高度経済成長を背景に、大型の船舶が入港できる航路や港湾を開削するとともに、浚渫土砂により大規模な臨海工業用地を急速に造成できる方法として、大型ポンプ式浚渫船を利用して各地で盛んに行われてきたが、現在の浚渫工事は、既存の航路・港湾の水深維持や、産業活動や生活排水により汚染され水底に堆積した軟泥（汚泥、ヘドロ）の除去等に主目的を変えつつある。

この種の工事の特質として、工事現場周辺地域の都市化や宅地化にともない浚渫土砂の埋立処分地が十分に確保できないことや、工事対象となる汚泥等の土砂の性質から、浚渫埋立の過程で発生する濁りや余水が厳しく規制されることなどがあげられる。このような現状から、水底に堆積している土砂を攪乱せずにそのままの状態浚渫でき、余分な水を加えずに高濃度で管路輸送が可能な“環境に優しい”施工システムの需要が急増し、浚渫業界各社はこれに対応する技術の開発を進めている。

東亜建設工業(株)では、軟泥の高濃度浚渫技術、高濃度管路輸送技術の研究開発にいち早く着手し、水中に気中雰囲気を作り出すことにより高濃度の軟泥を濁りを発生させずに浚渫できる「気密式バケツトホイール浚渫システム＝^{アイリス}IRIS 工法」、ならびに圧送助勢装置で高濃度の軟泥を輸送管路に送り出した後、管路に圧縮空気を供給することにより圧力損失を低減させて長距離の管路輸送を可能とする「混気圧送システム＝^{トトラ}TOTRA 工法」を実用化した。

本稿では、混気圧送システムの採用によって、高濃度な軟泥の大量かつ長距離の圧送を可能とした高濃度軟泥圧送船 TOTRA の概要を紹介する。



写真-1 高濃度軟泥圧送船 TOTRA-1

2. TOTRA 工法の概要

「TOTRA」とは、「Toa High Density Sludge Transport System」の略で、「高濃度の浚渫軟泥を管路輸送する混気圧送システム」の意味が込められた名称である。

当社は平成3年に、大型の混気圧送システムを搭載した2隻の高濃度軟泥圧送船 TOTRA-1^{トトラワン}、および TOTRA-2^{トトラフツ} を建造した。両船の公称排送能力は 600m³/h、標準排送距離は 1,000m である。

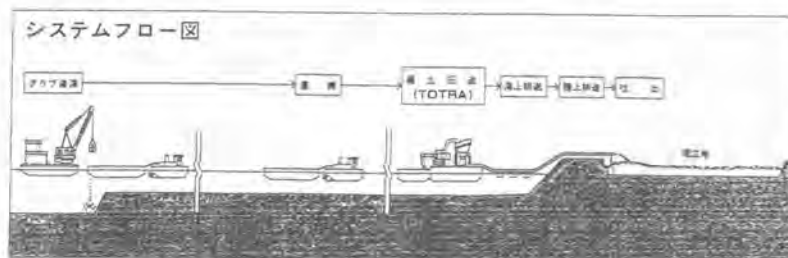


図-1 高濃度軟泥圧送船 TOTRA の標準的施工フロー

2.1 混気圧送システムの原理

高濃度軟泥圧送船 TOTRA の標準的な施工フローを 図-1 に示す。図の通り、圧送船 TOTRA による施工では、グラブ浚渫船で浚渫され、土運船で運搬された土砂を、本船上に搭載したバックホウにより揚土し、混気圧送システムにより埋立地まで管路輸送する。

混気圧送システムは 図-2 のような機器から構成され、以下に記す処理によって高濃度の軟泥を管路輸送可能な状態とする。

バックホウで投入された土砂は、メッシュ・スクリーンや2軸式粘土剪断機を組込んだホッパー装置によって細断するとともに、振動篩分機によって土砂中に含まれる障害物（石や丸太、漁網等）を除去する。振動篩分機の下部に設置したリザーバタンクでは攪拌翼によって土砂を流動化させ、圧送助勢装置（特殊型遠心式渦巻ポンプ）による土砂の吸入、送出を容易にする。

圧送助勢装置から排送管路に送り出された土砂は、圧縮空気を注入することによって管内の見掛の比重や摩擦抵抗が極めて低減された状態で輸送されるため、低い圧力エネルギーで高濃度かつ長距離の管路輸送が可能となる。

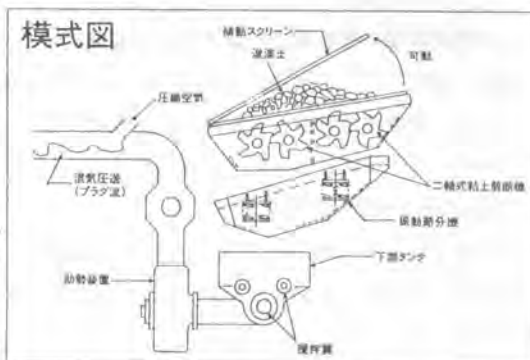


図-2 混気圧送システムの模式図

2.2 混気圧送のメカニズム

混気圧送システムにおいて、圧送助勢装置で送り出された土砂に対して圧縮空気を注入することにより実現される混気圧送では、管内にプラグ流と呼ばれる流れが発生し、波のような形状の軟泥の塊（プラグ）が、圧縮空気の膨張力によって埋立地の方向へ押し動かされる。

当社では、混気圧送による管路輸送技術の開発、実用化に当り、プラグ流の管内流動様式の可視化実験を実施し、さらにこの実験結果に基づく理論的研究を現在も継続中であるが、これらから明らかとなったプラグ流の流動メカニズムを図-3に示す。

図の通り、圧縮空気層の膨張作用を推進力とするプラグの内部では複雑な混合渦が発生し、プラグ前面では先行の土砂滞留層の取り込みの流れが、またプラグ後方では管壁面との摩擦による土砂の脱落の流れがそれぞれ発生する。脱落した土砂は滞留層として減速してゆき、次に来るプラグに再び取り込まれる。以上のプラグ内における取込みと脱落の収支バランスにより、プラグは管内において発生と成長、消滅を繰り返しながらも、全体としては確実に埋立地まで輸送される。



図-3 混気圧送（プラグ流）のメカニズム

3. TOTRA 工法の開発経緯

当社では、昭和61年より軟泥の高濃度浚渫技術および高濃度管路輸送技術の研究開発に着手し、気密式バケットホイール浚渫・混気圧送システム（IRIS 工法）と混気圧送システム（TOTRA 工法）の開発、実用化を並行して推進してきた。

以下に TOTRA 工法と高濃度軟泥圧送船 TOTRA の開発経緯を記す。

3.1 ニューマチックポンプ式混気圧送システム

高濃度浚渫・管路輸送に関する研究開発によって最初に実用化した工法は、気密式バケットホイールによる高濃度浚渫技術と、圧縮空気駆動するニューマチックポンプによる混気圧送技術を組合わせた IRIS 工法である（図-4）。

当社では、表-1 に示す通り、この高濃度浚渫・混気圧送システムによって土量約 70万 m^3 の施工を行うとともに、ニューマチックポンプによる混気圧送システムを独立させた TOTRA 工法を実用化し、約 12万 m^3 の施工を行っている。

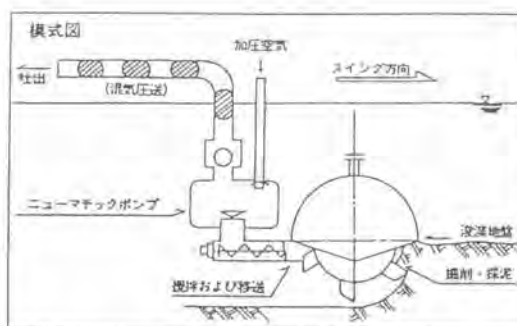


図-4 高濃度浚渫・混気圧送システム
（ニューマチックポンプ方式）

3.2 圧送助勢装置式混気圧送システム

ニューマチックポンプによる混気圧送システムに対し、排送可能な土質範囲の拡大と、障害物への対応を容易にするために、当社では新たに圧送助勢装置（高濃度の吸排泥が可能な特殊型渦巻ポンプ）と

表-1 高濃度混気圧送工法の施工実績（高濃度浚渫工法も含む）

システム	高濃度浚渫・混気圧送システム“IRIS”		高濃度混気圧送システム“TOTRA”		工費合計 (m^3)
	年度	施工実績 (m^3)	年度	施工実績 (m^3)	
設備種別	気密式バケットホイール ニューマチックポンプ	気密式バケットホイール 圧送助勢装置+圧縮空気	(ダンプ浚渫船)	(ダンプ浚渫船)	
圧送機種			ニューマチックポンプ	圧送助勢装置+圧縮空気	
昭和62年	秋田県船川地区 300,100				300,100
昭和63年	熊本市新港地区 5,000 川崎市浮島地区 46,200		千葉県四街道地区 9,200 宮城県志津川地区 26,800 岡山県安島地区 87,800		175,000
平成1年	川崎市浮島地区 349,900			宮城県志津川地区(可搬式) 94,800	444,700
平成2年				山口県平生地区(可搬式) 12,400	12,400
平成3年				熊本市新港地区(TOTRA-1) 162,900 北海道留萌地区(TOTRA-2) 17,800 福岡市香椎地区(TOTRA-1) 293,400	473,900
平成4年		滋賀県琵琶湖地区 6,700		熊本市新港地区(TOTRA-1) 134,800 福岡市香椎地区(TOTRA-1) 563,500 東京都羽田地区(TOTRA-2) 800,400	1,505,400
平成5年		茨城県羅ヶ浦地区 85,000		福岡市香椎地区(TOTRA-1) 340,800 東京都羽田地区(TOTRA-2) 180,000 福岡市東区地区(TOTRA-1) 89,700	722,200
土費合計(m^3)	701,200	91,700	133,800	2,710,300	3,627,000

圧縮空気の組合わせによる混気圧送システムを開発し、公称能力 100~200 m^3/h の可搬式圧送装置を実用化した。

この混気圧送システムによって、平成1~2年に2件の工事を行っている。

3.3 混気圧送システムの大型化

当社では、圧送助勢装置と圧縮空気を組合わせた混気圧送システム（TOTRA 工法）の研究開発を更に進め、平成2年に、大規模な浚渫埋立工事にも対応可能な大型圧送装置を実用化した（図-5）。

この圧送装置は1基当りの処理能力が 200~300 m^3/h であり、平成2年12月に熊本新港において性能実証実験を実施した。

さらに、この大型圧送装置を複数搭載する圧送船 TOTRA の建造に先立ち、複数の圧送助勢装置吐出管を集合させ、管径 $\phi 610\sim\phi 760\text{mm}$ の排送管で混気圧送を可能とする複数管集合技術の実験研究にも成功し、これらについて工業所有権を取得している。

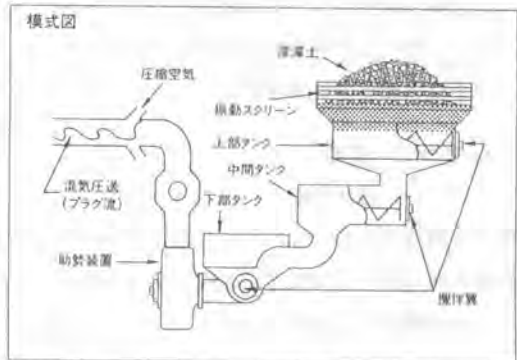


図-5 混気圧送システムの模式図
(圧送船 TOTRA-1,2 建造当初の方式)

3.4 高濃度圧送船 TOTRA の建造

平成3年、当社はそれまでの高濃度混気圧送技術に関する研究開発の成果を集大成させた2隻の大型高濃度軟泥圧送船 TOTRA-1、TOTRA-2 を建造した。

以来、両船は九州、北海道、東京の各地区で工事を重ね、平成5年7月現在までに約280万 m^3 の施工実績をあげている（表-1）。

3.5 高濃度圧送船 TOTRA の改造

図-5 に示した混気圧送システムは、上部、中間、下部の3段階に設置し、それぞれに攪拌翼を装備したリザーバタンクによって土砂の流動化を図り、圧送助勢装置による吸排泥を容易にしたものであったが、各地での施工を重ねるにしたがって、土質適応性の拡大、特に含水比 30~40% の硬質粘土塊を含む土砂の処理能力が必要となった。

このため、高濃度軟泥圧送船 TOTRA-1 では平成4年11月に、図-2 に示したような2軸式粘土剪断機や振動篩分機を新たに装備した。

また、TOTRA-2 では平成5年5月に振動篩分機を装備し、障害物対応力を向上させている。

上記改造後の TOTRA-1、TOTRA-2 両船の主要仕様を表-2 に示す。

表-2 圧送船 TOTRA-1, TOTRA-2 の主要仕様

船名	高濃度軟泥圧送船	
	TOTRA-1	TOTRA-2
公称能力	圧送土量	600m ³ /h
	排送距離	1,000m
船体寸法	長さ	46.0m
	幅	25.0m
	深さ	4.5m
	喫水	2.0m
揚土機	エンジン出力	550ps
	バケット容積	3.8m ³
機数	台数	2台
	形式	2軸式粘土剪断機
異物対応機	容積・能力	(15kW+22kW)*2
	数量	2組
一 次	形式	振動篩分機
	容積・能力	2.4m ³ *3.0m, 30kW
二 次	数量	2台
	形式	リザーバタンク(攪拌翼)
攪拌機	容積・能力	16m ³ , 22kW*3
	数量	3基
一 次	形式	圧送助勢装置
	容積・能力	370kW
二 次	形式	空気圧縮機
	容積・能力	195ps, 16.5m ³ /min
排送管	径	φ610~780mm
	数量	1台, 2台
主 機	容積・馬力	1,000kVA, 500kVA
	数量	1台, 2台
補 機	容積・馬力	30kVA, 150kVA
	数量	各1台
竣工年月		平成3年6月
		平成3年7月

4. 高濃度圧送船 TOTRA-1 の圧送設備

図-6 に、平成4年11月に改造を実施した高濃度軟泥圧送船 TOTRA-1 の圧送設備を示す。写真-2 は、TOTRA-1 のバックホウによる揚土状況である。

以下に各機器の概要を記す。

4.1 ホッパー装置

ホッパー装置は傾動スクリーンと2軸式粘土剪断機から構成される。このうち2軸式粘土剪断機は、低含水比(30~40%程度)の硬質粘土を細断するために自社開発した装置である。

この粘土剪断機は、対向する複数の刃が内方向に回転して、高能率で粘土、材木等を細断し、次工程の振動篩分機へ落とし込む。また、石、鉄材等が刃に噛み込まれ駆動モーターの電流値が過負荷となった場合、モーターが瞬時に逆方向に回転し、異物を自動的に排除する。

対向する刃の回転数は、50%近い差を設け、粘土を効率的に剪断するように設計している。

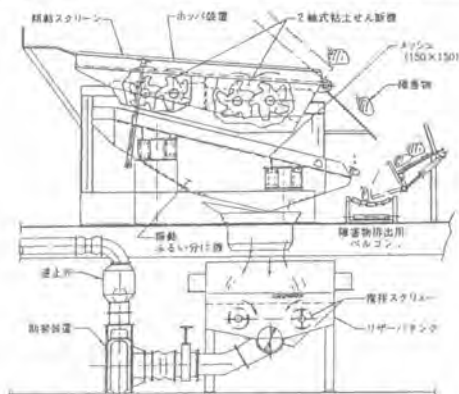


図-6 高濃度圧送船 TOTRA-1 の圧送設備



写真-2 バックホウによる揚土状況

4.2 振動篩分機

TOTRA-1 に装備した振動篩分機は、鉱山の碎石等を篩い分ける大型の装置であり、浚渫土砂に含まれ圧送設備の障害となる異物（圧送助勢装置の通過粒径以上の石等）の篩い分けが可能である。篩い分けられた異物は、振動篩分機の前面に設置した障害物排出用ベルトコンベヤにより速やかに除去される。

4.3 リザーバタンク

リザーバタンクでは、振動篩分機を通過した浚渫土砂を一時的に溜めるとともに、タンク内に装備した3軸の攪拌翼によって土砂を攪拌、流動化させる。

硬質粘土は特に、十分な流動化を施すことが圧送能率の向上に不可欠である。

4.4 圧送助勢装置

圧送助勢装置は、高濃度軟泥専用で設計した大型の遠心式渦巻ポンプであり、各部の材質、構造に工夫を加えている。高濃度軟泥で特に問題となる軸受グランド部には細心の注意を払った構造としている。

5. 高濃度圧送船 TOTRA の施工能力

5.1 対象土砂

高濃度軟泥圧送船 TOTRA は、次の土質条件の軟泥を標準土質として設計、建造している。

- ・含水比： 70%以上
- ・粒度分布： 粘土分（ $5\mu\text{m}$ 以下） 30%
シルト分（ $5\sim 75\mu\text{m}$ ） 50%
細砂分（ $75\sim 420\mu\text{m}$ ） 20%

なお、現在までの施工実績等から、作業能力の確保できる土質は 図-7 の三角座標に示す通りである。

5.2 作業能力

高濃度軟泥圧送船 TOTRA の作業能力（ q_0 ）は、通常、図-8 の標準性能特性表によって推定される。

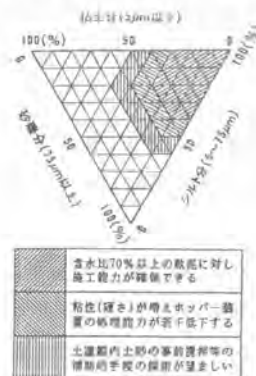


図-7 高濃度圧送船 TOTRA の土質適応性

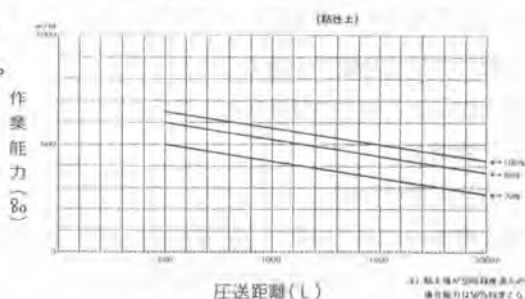


図-8 高濃度圧送船 TOTRA の標準性能特性

6. むすび

高濃度の浚渫土砂を大量かつ長距離排送可能な TOTRA 工法は、現在までに数々の技術的な開発、改良を重ねてきたが、今後解決すべき課題も残されている。例えば、砂や礫を多く含む土砂への対応、あるいは 2,000m 以上の長距離輸送、含水比 50% 以下の超高濃度輸送等である。

2隻の高濃度軟泥圧送船 TOTRA-1、TOTRA-2 を中心とする当社の TOTRA 工法が、全国各地の港湾、湖沼等の水辺の環境改善に寄与できることを祈ってやまない。