

ジェット エゼクター式高深度しゅんせつ船の開発

東

寿*

1. ま え が き

ジェット エゼクター式高深度しゅんせつ船は、6年の才月と十数億円の資金を費して開発され、つぎの3つの特色を持っている。

① エゼクター ポンプの使用により、いままでサクシオン式ポンプ船でできなかった 50~100 m からの揚土が可能であることが立証された。

② 高圧水ジェットの使用により、岩盤を除くすべての地層を掘削しうることが明らかになった。特にN値の高い砂礫食詰め層がかえって掘削しやすいことが有利となろう。

③ ジェットを円形に配置することにより、シルト粘土、砂礫層の掘進後の孔跡が円形に維持されることがわかった。多くの新しい施工法に利用することができよう。

筆者は、この企画の始めから、試作、改造、実験工事と一応開発の完成までを一貫して関係したので、このしゅんせつ船の開発が今後の海底資源の開発ないし新しい土木施工法に利用されることを確信して、この機会にその概要を報告することとした。

(1) 本しゅんせつ船開発の経緯

① 昭和 34 年運輸省機材課および運輸技術研究所により、水道用ろ過砂採取に実績のあるエゼクター ポンプを改良すれば、高深度しゅんせつは可能であるとの提案があった。

② 昭和 34 年 12 月より同 35 年 2 月にかけて、神戸市は高深度しゅんせつ試験工事（日本浚渫（株）へ委託）を施工し、-33 m より揚砂することに成功した。

③ 昭和 35 年 5 月、運輸省港湾局（高木、三宅）、運研（長谷川、小岩）、三建（東、松田）、神戸市（宗

宮）、日本浚渫（株）（斉藤）は、おおむねつぎのような方針による高深度船の開発を決定した。

a) 神戸港の海底の粘土層を貫通し洪積層の -50 m（小型船）および -100 m（大型船）から揚砂しうるジェット エゼクター船を開発する。揚砂単価は 300 円/m³ を目標とする。

b) さしあたり試験船として大型船を公共事業費で、小型船を民間資金にて建造する。

c) ジェット エゼクター船の技術的開発については、これを石川島重工業（株）に依頼する。

④ 運輸省港湾局は、昭和 36 年度公共事業費 2 億 5000 万円をもって飛竜号を建造し、運研、三建、神戸市、石川島は数次にわたる試験工事、改造工事を実施しその実績は第一亜細亜号の設計資料となっている。

⑤ 運研、二建材検は、飛竜号の試験工事および改造に協力するとともに、公共事業費によるエゼクターの効率化、ジェットによる軟岩掘削等の研究を継続実施している。

⑥ 昭和 36 年 2 月石川島播磨重工業（株）、三井物産（株）、日本浚渫（株）により亜細亜浚渫（株）が設立され、小型船 3 隻を建造して神戸市事業に従事し、三次にわたる改造を行ない、その結論として第一亜細亜号（大型船）を建造した。

⑦ 第一亜細亜号は、小型船 3 隻とともに神戸市、大阪市、大阪府などの試験工事に従事し、-50 m までの高度しゅんせつに成功している。その間、ジェット エゼクター船を使用する砂柱基礎工法、海底陥落工法、軟泥上の表土安定処理工法などの新工法を開発したが、それぞれ一応の成果をえたので、昭和 43 年 10 月亜細亜浚渫（株）を解散し、作業船、特許権などのいっさいを石川島播磨重工業（株）に移すこととした。

2. 開発された高深度しゅんせつ船の概要

(1) 主な特徴

* 正会員 工博 石川島播磨重工業（株）、日本テトラポッド（株）顧問

① 従来できなかった高深度しゅんせつを可能ならしめる。

② 海底の粘土層を貫通してその下にある良質の砂礫を揚土することができる。

③ 固結した砂礫の食詰め層を容易にしゅんせつすることができる。

④ 海底粘土層をせん孔し、径 1.6~3 m の砂柱を必要な深度まで（たとえば -50 m）設定して複合土基礎とし、軟弱地盤の改良を確実に施工することができる。

⑤ 高深度の海底基礎に使用して、新たな工法を可能ならしめる。

⑥ 海底深く所在する砂鉄、鉍石、砂利、砂などの資源を開発することができる。

⑦ 高深度の海底地層を容易に調査することができる。

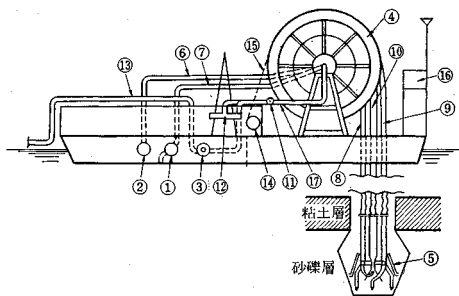
(2) 第一亜細亜号装置の概要

第一亜細亜号の装置を記すれば、表-1、図-1 のようである。

表-1 第一亜細亜号主要要目

しゅんせつ深度(水面下)	最大	70 m	
揚砂能力(直降しゅんせつ)		220 m ³ /h	
揚砂能力(横噴射時)		240 m ³ /h	
年間揚土量		720 000 m ³	
船体寸法(長・幅・深)		47.4 m×14.5 m×3.5 m	
エゼクターポンプ		1 200 m ³ /h×160 m	1 台
ジェットポンプ		1 100 m ³ /h×180 m	1 台
エゼクターおよびジェット用原動機		2 500 PS×540 rpm	1 台
排送ポンプ		2 200 m ³ /h×90 m	1 台
同上用原動機		2 000 PS×500 rpm	1 台
主発電機		AC 125 kVA×225 V	2 台
同上用原動機		150 PS×900 rpm	2 台
しゅんせつ用ゴム管給水管		300 mm φ	一 式
しゅんせつ用揚砂管		445 mm φ	一 式
しゅんせつ器(エゼクターポンプおよびジェット)			一 式
排送管		陸上管 500 m 海上管 1 500 m	

図-1 しゅんせつ装置説明図



a) ジェットおよびエゼクターへ給水する圧力水は図-1 において強力な同用ポンプ①および②より圧力それぞれ 18 kg/cm²、16 kg/cm² にて給水管⑥、⑦を経てゴムホース巻きとりリール④の軸に入りゴムホース⑧、

⑨に連結され、ゴムホースによりしゅんせつ器⑤に送られ、ジェット噴流による掘削およびエゼクターによる揚砂を行なう。

b) しゅんせつ器⑤より揚砂される土砂は、揚砂ゴムホース⑩をとおり、リール④を経て、同軸部よりケーシングトップ上パイプ⑪に導かれ、舷外排送シュート⑫、あるいは切換バルブにて排送ポンプ⑬により排送管⑭を経て遠方に排送される。

c) ゴムホース巻きとりリール④の回転は機関室上段のウインチ⑮により鋼索⑯を介して自在に行なうことができる。

d) 給水制御、しゅんせつ器上げおろしはすべて船橋操縦室⑰より遠隔制御によって行なわれる。

e) 揚砂管⑩にアイトープによる含泥率測定器⑱を設け、船橋操縦室⑰の含泥率計に伝達する。操縦者は含泥率計を見ながら最も効率のよい状態を維持しながら運転する。

(3) 揚砂のメカニズム

エゼクター式高深度しゅんせつ機構のしゅんせつ器は、揚砂装置、直降掘削装置および土砂崩壊助成装置の3つの組合せにより成立している。

a) 揚砂装置(エゼクターポンプ)

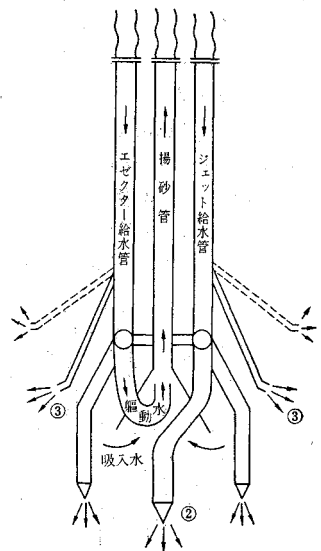
吸入口の先端に近い所にとり付けられているため、吸入揚程がほとんどなく、したがって高深度しゅんせつが可能となる。エゼクターポンプの駆動水は、圧力 16 kg/cm²、噴射水量約 1 000 m³/h で、これによって吸引される水量は約 1 200 m³/h、合計約 2 200 m³/h の土砂水が吐出されて、その含砂率 10% と仮定すると約 220 m³/h の土砂が揚砂される。

b) 直降掘削装置(下向ジェット)

しゅんせつ器を掘進せしめる機構で吸入筒の外周に 9 本および中心部に 3 本の垂直ノズルを配置し、そのジェット噴流によって地底を掘削し、かくはんして土砂を吸入水中に浮遊せしめるとともに、しゅんせつ器を直降させてゆく。

c) 土砂崩壊助成装置(横向ジェット)

図-2 ジェットエゼクター式しゅんせつ器



適当深度において掘進を止め、横向ジェットに切替え噴射し、側壁の土砂の崩壊を助成する装置である。横ジェットは約 2.3 m の腕を持ち、水圧装置により展開して、ノズル刃口は中心より 3 m の距離に届く。そこで噴射を行なうと、そのジェット噴流の方向が側壁の崩壊面と交わる点まで穴の径を大きくすることができる（第一亜細亜号では穴の直径はほぼ 10 m）。

かくして崩壊した土砂は 3 本の中心ジェット噴流によりかくはんされ浮遊し、エゼクター ポンプに供給され揚砂される。

(4) 粘土層を貫通してその下の砂礫層から揚砂する工法

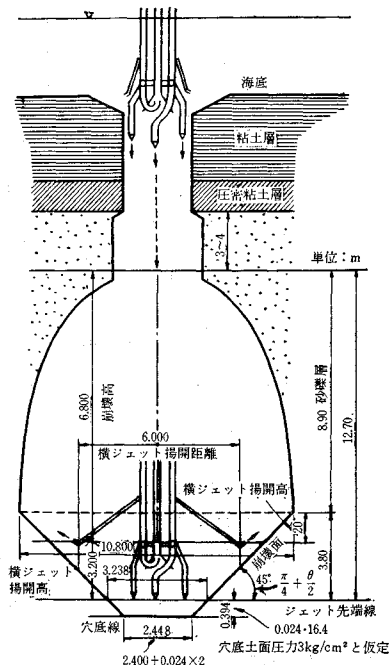
a) 粘土層直降掘進工程

下向ジェット、およびエゼクターを作動させつつしゅんせつ器を降下すれば、粘土質層においてはしゅんせつ器が通過する程度の孔（面積積 8 m^2 ）が貫通されてゆく。掘進速度（ 0.45 m/min ）は速く、不用土量のあがりも少ない。

b) 砂礫層直降掘進工程

砂礫層に達すると掘進速度は落ちるが、孔の周囲の土砂崩壊が多くなり（掘進速度 0.225 m/min では直降掘削土量 $8 \text{ m}^3/\text{m}$ の 50% 程度）、孔の径も多少大きくなる。砂礫層に入ってから 17~19 m の層厚の深度で直降掘進を止め、横噴射に切替える。神戸港のような地質では、地山のゆるみの高さが 13~15 m と考えられるから粘土層の下に 4 m 程度の砂礫層を残すこととなり、粘

図-3 粘土層下の砂礫層から揚砂する工法説明図



土層の崩壊、海底の陥没を防ぐことができる。

なお、この途中において短時間の横噴射を行なって大崩壊によるしゅんせつ器の埋設を避ける。

c) 横噴射工程

横向ジェットの腕を開いて噴射すると、穴底からの崩壊面と横向ジェットの噴流の方向とが交わる点まで穴の径を大きくすることができる（直径 10 m）。

この側圧による土砂崩壊ともなって穴の上部の不要の土砂がゆるみ、直径 10 m、高さ 13~15 m の半円錐体の形となるまで崩壊を続け、中心部下向ジェットの噴流によりかくはんされ、浮遊しエゼクター ポンプにより揚砂される。直降掘進およびそれともなり周囲の崩壊の土量を含めて、この標準深さ 1 穴の全土量は 700 m^3 である。

d) 高深度しゅんせつ工程

高深度にわたって砂礫層が存在する場合は前述の直降掘進工程、横噴射工程を層厚 13~15 m ごとに繰返す。

砂礫層の厚さが上部の余裕 4 m を除いて 45 m である場合の最大可能の揚砂量は、1 穴につき 3660 m^3 である。

3. ジェット エゼクター式しゅんせつ船の揚砂理論

(1) 序 説

エゼクターにより高深度から揚水しうることは理論的にも予想されたことであるが、この吸入水に大量の土砂が含まれていれば、深層内の土砂を大量に掘削し、かく乱し、水中に浮遊せしめてエゼクター ポンプに供給することができれば、エゼクター式高深度しゅんせつは成立する。第一亜細亜号の場合は、ジェットによって深層内の土砂を掘削しようとした。このジェット装置は、ゴムの給水管に吊下げられていて、自重により真下の方向にその掘削の範囲を拡大しうるが、横の方向には移動することができない。したがって、ある地層に上からある直径の孔が掘り進められたときに、その周囲の土砂がどのように崩壊し、どのような穴をつくり、その土量はどれほどであるか、どのように操作すればその崩壊を最大にしうるかということが、エゼクター式高深度しゅんせつの揚砂理論の基礎となるものである。

本章では、エゼクター ポンプの機能の理論を概述し、ついでジェットによる直降掘進のメカニズムを明らかにし、その孔により生ずる土砂崩壊の理論をとりまとめた。これによって、揚砂効率は 1 穴の揚砂可能量および揚砂時間によって支配されることを明らかにし、揚砂機構の各部の機能的バランスまたは適切な操作方法を求め

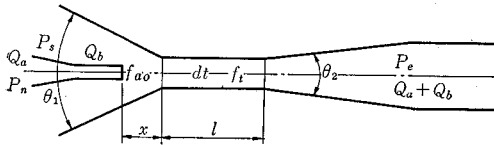
るための基礎理論とすることとした。

(2) エゼクター ポンプの理論

a) エゼクター ポンプがポンピング機能を生じる原理は、エゼクター ポンプののど部において、ノズルより噴射された噴流が吸入水に衝突混合して、吸入水を高速低圧に変化せしめる水の運動理論によるものである。したがって、エゼクター ポンプのノズルにより噴射される水の圧力、ノズル口径、ノズルの近づき距離、のど部の口径、長さ、ポンプの吐出揚程の諸元はエゼクター ポンプの性能に関係する諸要素となっている。

これらの理論的説明および実験報告は、日本機械学会論文集 20 巻 89 号 (昭和 29 年発行) 「水噴射ポンプに関する研究」に詳述されているが、ここでは簡単にエゼクター ポンプの性能に大きな影響を与える点を列記するにとどめる。

図-4 エゼクター ポンプのポンピング機能の原理作用図



- Q_a : 駆動水量
- Q_b : 吸入水量
- P_n : 駆動水圧力
- P_s : 吸入部の圧力
- P_e : ディフューザー出口圧力
- f_{a0} : 駆動水ノズル面積
- d_u : 駆動水ノズル口径
- d_t : のど径
- f_1 : のど断面積
- x : ノズル近づき距離
- l : のど長さ
- θ_1 : のど案内角度
- θ_2 : のど出口角度

b) 駆動水量 (Q_a)、駆動水圧力 (P_n) の影響

① 流動比

$$\text{流動比 } (\mu) = \frac{\text{吸入水量 (重量)}}{\text{駆動水量 (重量)}} = \frac{Q_b}{Q_a} \dots\dots(1)$$

駆動水量に対し吸入水量が多いことがポンプ性能としては望ましい。すなわち、 μ の値の大きいほどポンプ効率は高くなる。

② 圧力比

$$\text{圧力比 } (\sigma) = \frac{\text{吐出圧力} - \text{吸入水圧力}}{\text{駆動水圧力} - \text{吐出圧力}} = \frac{P_e - P_s}{P_n - P_e} \dots\dots(2)$$

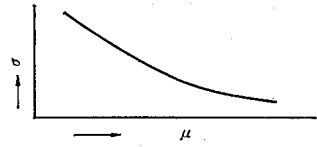
駆動水圧力ができるだけ低くて所要の吐出圧力をえることが、ポンプ性能としては望ましい。すなわち、 σ の値が大きいほどポンプ効率は高くなる。

③ ポンプ効率

$$\text{ポンプ効率 } (\eta) = \sigma \cdot \mu \dots\dots(3)$$

水の運動量から μ と σ との間には 図-5 に示すような関係がある。すなわち、 σ が大であると μ は小さく、 σ が小であると μ は大となる。つまり、駆動水圧力を高くすれば吸入水量は多くなる。このような関係からエゼクター ポンプの効率は割合に低く、25~30% が限度

図-5 水の運動量における μ と σ との関係



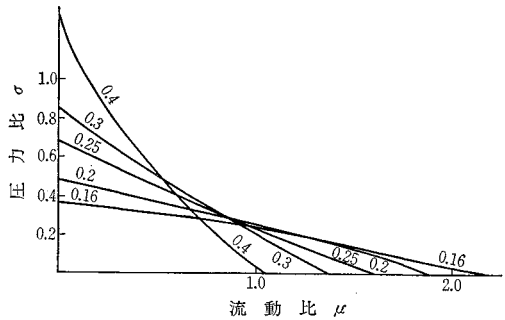
のようである。

c) 駆動水ノズル口径、のど径の影響

① のど面積比

$$\text{のど面積比 } \left(\frac{1}{\epsilon_a}\right) = \frac{\text{ノズル断面積}}{\text{のど断面積}}$$

図-6 $1/\epsilon_a$ をパラメーターとする σ - μ 曲線



$1/\epsilon_a$ をパラメーターとする σ - μ 曲線からつぎのことがいえる。

$1/\epsilon_a$ が大きい場合は、吸入水量を多くすることはできないが、駆動水圧力は低くともよい。また駆動水圧力を高くしても、吸水水量はそれほど増さない。

$1/\epsilon_a$ が小さい場合は、駆動水圧力を低くすると吸入しなくなる。また駆動水圧力を高くすると、吸入水量は非常に増加する。 σ のわずかな変化によって吸入水量に大きな変化を生じる。

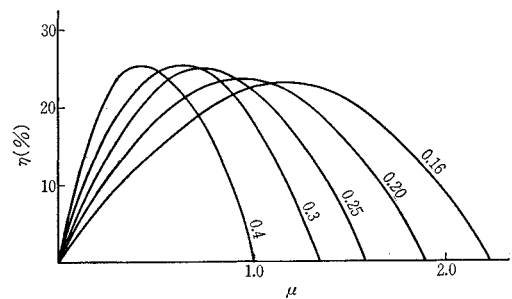
つぎに、 $1/\epsilon_a$ をパラメーターとする η - μ 曲線を図示すると、これからつぎのことが明らかとなる (図-7)。

$1/\epsilon_a$ が小さくなると最高効率率は少しずつ低下するが、 μ は大となる。また同一効率率においても $1/\epsilon_a$ が小さいほど μ は大となる。

d) エゼクター ポンプ要目決定方法

第一垂細垂号を例にとると

図-7 $1/\epsilon_a$ をパラメーターとする η - μ 曲線



① 条 件

揚砂管内含砂率： 11.37% (250 m³/2 200 m³)
 エゼクター給水量： 1 150 m³/h
 揚砂水量： 2 200 m³/h
 吸水土砂水： 1 050 m³/h
 揚土量： 250 m³/h
 吸入部含砂率： 23.8%
 管径・給水管 300 mm
 揚砂管： 445 mm

② 揚程計算

エゼクター給水管内損失揚程： 12.5 m
 揚砂管内損失揚程(必要揚程)： 26.0 m

③ 要目算出

1) エゼクター給水ポンプ吐出圧力：

$$\text{流量比} (\mu) = \frac{250 \times 1.8 + 800 + 1.025}{1 150 \times 1.025} = 1.079$$

前掲図より $\mu = 1.079$ における最適の $1/\varepsilon_a = 0.18$

また、 $\mu = 1.079$, $1/\varepsilon_a = 0.18$ における

$$\sigma = 0.218 \quad \eta = \sigma \mu = 23.5\%$$

$$\sigma = 0.218 = \frac{26.0 - (-0.5)}{P_n - 26.0} \quad \therefore P_n = 147.5 \text{ m}$$

駆動水給水ポンプ吐出圧 = $P_n + 12.5 = 160 \text{ m}$

2) エゼクター寸法決定：

駆動ノズル前圧力： $P_n = 147.5$

出口流速： $V = C \sqrt{\sin 2g} = 51.1 \text{ m/sec}$

駆動水量： $Q_b = 1 150 \text{ m}^3/\text{h} = 0.320 \text{ m}^3/\text{sec}$

ノズル面積： $f_{a0} = \frac{Q_b}{V} = 6 260 \text{ mm}^2$

ノズル口径： $d_u = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 89.4 \approx 90 \text{ mm } \phi$

のど面積比： $1/\varepsilon_a = 0.180$

のど径： $dt = d_u / \sqrt{1/\varepsilon_a} = 212 \text{ mm } \phi$

駆動水ノズル近づき距離： $x = 350 \text{ mm} (x/dt = 1.65)$

のど部長さ： $l = 900 \text{ mm} (l/dt = 4.25)$

末広部長さ： $L = 1 400 \text{ mm} (\theta_1 = 9^\circ \sim 32^\circ)$

案内内部角度： $\theta_2 \leq 80^\circ$

(3) ジェットによる直降掘進の理論

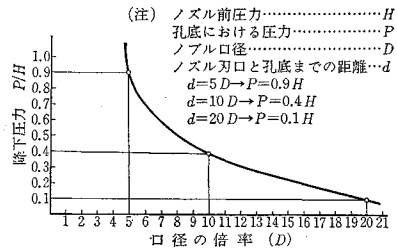
a) 直降掘進のためのジェットは、数本の円形に配置されたサイドノズルと 1~3 本のセンターノズルから構成されている。しゅんせつ器が直降してゆくためにはこれらのおおののジェット噴流により一定時間に掘削された平面の円が閉まっていることを必要とし、その直降のスピードは、おおののジェット的一定時間に掘削した深さのうち最小のものに制限されている。したがって、ジェットによる直降掘進の効率は、適正に配置されたサイドノズル、センターノズルの噴流により一定時間に掘削される平面積とその深さによって求められ、ジェット直降掘進の理論は、どのような水圧、水量をもつジェットをどのように配置するかを求めるにある。

b) 数次の改造の経験により、ジェットノズルの配置について、揚砂能力に影響を与えた諸要素を抽出し、繰返し法により一応次のようにこれを特質づけてみた。

① 各ノズル刃口の水量 Q は、ノズル刃口の径 $2r$ に関係するものとし、掘進する穴底の面積は、 $2r \times 2 = 4r$ の径をもつ円とした。

② 各ノズル刃口の水圧 H は、ポンプ先圧力より管内ロスを減じて定め、掘進穴底のジェット噴流の水圧 P (kg/cm²) は、ある地層において P kg/cm² 以下では掘進することができない限界水圧を示すものとする、図-8 によって P/H から各ノズル刃口と穴底までの距離 d を求めることができる。

図-8 水中噴射の降下圧力曲線



③ 径 $2r$ の各ノズル口から、水量 H , 水圧 H のジェット噴流が出て、 d の距離で水圧 P kg/cm² で径 $4r$ の穴を掘ったときに起る崩れの層厚を $d + 1/3 d$, 崩壊面の水平線に対する角を $\pi/4 + 55/2 = 40^\circ$ と仮定する。つまり、穴底の円の周囲から 50° の崩壊面で $d + 1/3 d$ の層厚の掘削が生じ、その平面における円をそのノズルの一定時間における掘削円と名づける。

c) 以上の仮定によって、つぎのような順序によってジェットの直降能力が計画される。

① 地層の固さは、ジェット噴流により掘進しうる限界水圧 P によって示される。

② 地層ごとに P が仮定されると、ある水量および水圧をもつジェットの適正な配置が繰返し法によって決定される。

③ つぎに P によって示される地層別に、一定時間に掘削する平面積、直降速度および土量が計算される。実証値から一定時間を絶対値によって表わせば、ジェットによる直降能力が計画される。

(4) 深層内の孔により生ずる土砂崩壊の理論

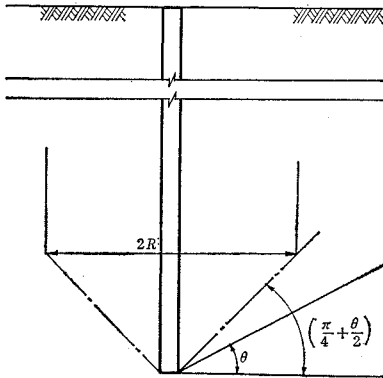
a) ジェット噴流によって深層に上部からある直径の穴が掘り進められてゆくと、その直降につれてまず側圧による孔の周囲の土砂の崩壊が起り、ついで鉛直圧によって上部土砂の崩壊を起し、直降を止めれば一定の形の崩壊面に囲まれた穴を形づくる。したがって、ある地層において一定の深さで揚砂しうる土量は一定であって、その崩壊する時間を短縮することに揚砂効率の問題がある。その理論は、穴の最大径はいくらであるか、その場合、上部土砂はどのような形で何メートルの高さまで崩壊するかを求めることにある。なお、崩壊面の一般理論

は、トンネル工学において、深層内の掘削にともない支保工または覆工に自重的作用をおよぼす地山の範囲として考えられているものに等しいとした。

b) 孔の側圧による崩壊面

ジェット噴流により前節に述べた平面積の孔が真つぐ下方に掘進されてゆくと、その周囲の側圧により土砂の崩壊を生じ、その崩壊面は Coulomb の理論により土砂の安息角を θ とすると、水平線に $(\pi/4 + \theta/2)$ の角度をもったものである (図-9)。

図-9 直降掘進の説明(1)



この崩壊面はある一定の幅 (R) に至ると、周囲の土圧の arch-action によって側面と内部摩擦角とが平衡し、崩壊面は垂直となる。ジェットの直降掘進にともなう崩壊はこの R より小なる範囲の崩れでその (崩壊土量/ジェットの掘進土量) (%) は直降速度が速くなると小さくなることの実証されている。

ジェットによる直降掘進を停止し、横ジェットの噴流によって最大の R を求めようとする場合は、図-10 のように、崩壊面とジェット噴流線の交わる点まで側圧の arch-action による平衡は起らないと考える。

したがって、作図作業によってこのしゅんせつ器による穴の最大径 $2R$ を求めることができる。

この推論の意味するところは、横ジェットの噴流はノズル口より離れることによって水圧を減じて崩壊しつ

図-10 直降掘進の説明(2)

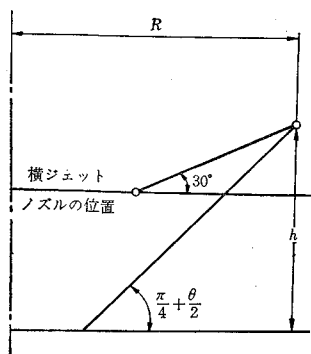


表-2 $P=3 \text{ kg/cm}^2$ の場合

区分	$R(\text{m})$	$h(\text{m})$
第一大神丸	3.450	2.750
第二大神丸	4.250	3.300
第三大神丸	3.550	2.750
第一亜細亜号	5.400	3.800

つある土砂の崩壊を促進する働きをなし、その噴流の方向が崩壊面と交わる点まで穴の径を大きくするものであることを示している。

c) 穴の鉛直圧による崩壊面

側圧による崩壊面の到達範囲 R が決まると $2R$ の円の範囲の上部の崩壊を生ずるが、その理論はトンネル工学における Willmann の理論によって $H=(100h)/p$ を高さとし、径 $2R$ の直径の円を底面とする半だ円錐体がゆるみを生じ崩壊しようとする範囲を示すものである。

ここに h : 地山の弛緩の原因となってトンネル頂部の沈下量で、この場合は 表-2 に示した各船ごとの h に相当する。

p : 弛緩せる地山膨張率 (%) で土質により異なるが、神戸港のような固い土質では一時的な膨張率として 25~30 の値をとることとする。したがって、各船について H を求めると 表-3 のとおりとなる。

表-3 各船別の H 値

区分	第一大神丸	第二大神丸	第三大神丸	第一亜細亜号
$P=25$	11.00 m	13.20 m	11.00 m	15.20 m
$P=30$	9.17 m	11.00 m	9.17 m	12.70 m

しかし、この場合の一時的膨張率は、1日1穴として1日の間のゆるみを考えざるをえないので、この計算の H より小さいことが想像される。過去の実証値によると、穴の最大量を出している層厚がすべて 9~13 m であるので、一応現在の段階ではこの計算による H から h を引いたものを崩壊面の高さとして仮定し、今後の実証値により修正することとしたい。

(5) 揚砂により生ずる穴の形-1 穴の揚砂可能量

前節において、深層に上方からある直径の孔が掘り進められてゆくと、その直降につれて孔の周囲の土砂の崩壊を生じ、さらに鉛直圧によって上部土砂の崩壊を起し、直降をやめると一定の形の崩壊面に囲まれた穴を形成することを理論的に解明した。

この推論によって、ある地層が与えられると

① 直降による掘削土量から実証値による関連曲線を使って直降にともなう崩壊土量を推計しうる。同時に直降による孔の径が計算される。

② しゅんせつ器の直降掘削平面積、地層の崩壊面が与えられると、深層内に生ずる穴の最大径が求められ、同時にその場合の上部土砂の崩壊高の限界、およびそのときに生ずる穴の形を予想することができる。

③ つまり、ある地層が与えられると1ヶ所の掘削により揚砂しうる最大土量と、横ジェット噴射による崩壊土量、すなわちその箇所の最大揚砂可能量が予想されるので、直降掘削、直降にともなう土砂崩壊および横ジェ

ットの噴射による土砂崩壊助成のそれぞれの時間を最小限にする操作方法をとれば、揚砂効率を最大ならしめることができよう。標準砂礫層について最大を求めてみると 図-3 に示すとおりである。

(6) ま と め

以上、ジェット エゼクター式高深度しゅんせつ船の揚砂理論を実証的資料から組立ててみたが、この間に明らかとなったことは、本しゅんせつ器は直降掘進だけの能力を有し、横ジェットは周囲の土砂崩壊を助成するだけであって、揚砂効率は深層における土質力学的土砂崩壊の理論を駆使した操作の方法いかんによるということである。その操作上の基本的注意事項を列記してみると、つぎのようなものである。

① 本しゅんせつ器の直降能力は、つぎの相反した2つの操作的機能を兼ねていることを絶対的要件としている。

1) 掘削すべき地層にできるだけ近づいていること。
2) 常に自重で垂直に吊下がっていること。しゅんせつ器の機械的能力は曲げないで、できるだけ速いスピードで下げるようになっているが、直降にともなう孔の周囲の土砂崩壊量との関連で直降速度を加減する操作がとられるだけである。

② 横噴射ノズルは、機械的には地層を掘削する能力を有していない。孔の周囲の崩壊が進んでいるときにその崩壊を促進せしめ、側圧による崩壊面をおのおのジェット噴流の方向まで延ばすだけのものである。したがって、側圧による崩壊が起りつつあるときに使用されるべきで、崩壊が起りつつあるときに使用されるべきで、崩壊がやんで崩壊面が安定したときに横噴射を行なっても役に立たない。

③ 深層内の孔の径が制限されるために、1穴の揚土量は掘削深度に支配される。

④ 神戸港の地層は一番硬い層でも $P=4 \text{ kg/cm}^2$ で掘進しうることが実証されている。

硬い層を速く突破するためには、絶対に曲げないで短時間ごとにしゅんせつ器を近づける——硬ければ硬いほど小さきみに絶対曲げないように下げてゆくことが必要である。

⑤ つぎのような深度が曲がりやすい深度であることが実証されている。

- 1) 圧密粘度層に入るとき。
- 2) 粘度層から砂を含む層に入るとき。
- 3) しゅんせつ器の鉄部分の長さだけ海底下に入ったとき。
- 4) 横ジェットを噴いて孔を大きくし、つぎに下向き掘進に切替えたとき。

⑥ しゅんせつが曲らなければ、つぎのいずれかの現象が単独に、またはあわせて起ってくる。

- 1) しゅんせつ器をあげるとき異常荷重がかかる。
- 2) 直降掘削しても揚砂量に変化がない。
- 3) 粘土色が全然なくなり真白となる。
- 4) 砂が揚らずに礫だけ間けつ的にあがる。
- 5) ワイヤーがゆるんでいる。
- 6) しゅんせつ器を穴底に近づけても、長時間細砂ばかりあがる。
- 7) エゼクターが詰まっていなのに吐水量が半減以下となる。

⑦ しゅんせつ器が曲がったのを直すには、前述の曲がりやすいと思われている深度まであげて、除々に下降せしめる以外に措置はない。

しかし、現在は船に傾斜計を設備して曲がることを防ぐこととしている。

4. む す び

以上ジェット エゼクター式高深度しゅんせつ船について、その開発の経緯、しゅんせつ船の要目およびその揚砂理論について報告したが、本しゅんせつ船の有する特殊な性能によって、いままでできなかったことが可能となり、今後の海底資源開発および土木施工法に多くの革新的方法を提供しうるものと思われる。

その二、三を列記するとつぎのとおりである。

① コンクリート用砂港湾工事用特殊砂の供給源として、沿岸海底洪積層の砂を揚砂する。

これはすでに大阪湾等において具体的に試験しているので、計画として誤ることはない。建設省としても砂利等対策協議会において検討済みである。

② 大陸棚資源開発の具体的方法の一つとして、資源調査会による報告書にも記載されている。海底における砂鉄、すずなどの開発およびその調査に適している。

③ 砂柱基礎工法として、20~50 m の厚さの粘土層に2~3 m 径の砂柱を5~6 m 間隔に設定して、複合土地盤の基礎とする。これはすでに新居浜港、気仙沼港、石巻港等の防波堤、岸壁の基礎としてすでに経験済みである。厚い粘土層上に構造物を設定し、また埋立を行なう場合の地盤改良として画期的なものとなろう。

④ 海底深層基礎工法として、食詰め層をせん孔して鋼管パイルの建て込みが研究されている。このほか、巨大ケーソンの掘削沈下の方法としても考えられよう。

⑤ 高深度しゅんせつとしては、通常の高深度しゅんせつと海底陥落工法とがある。いわゆる硬土盤も岩盤でない限り可能であって、特に砂礫食詰め層の掘削に有利である。

(1968. 5. 29・受付)