

海底掘削機の開発

建設省土木研究所 ○ 本田宜史
原 誠

1. まえがき

海中の浚渫作業は近年増加傾向にあり、その水深も益々深い場所を作業する必要に迫られて来ている。水深 30 m 以内ではポンプ浚渫船が一般的であり、汚濁に対しても影響は比較的小さいが、水深 50～60 m に対してはグラブ浚渫以外に現状では変る工法がない。掘削作業の能率の面や、グラブによる海中汚濁の面でこれに代るべき新しい工法の出現が望まれている。

本調査はこうした見地から非常に水深の深い場所にある軟弱層を高い含泥率で、しかも海中を汚濁することなしに掘削が可能で新しい型の海底掘削機の開発を目的としたものである。

2. 調査概要

本調査は以下の順序により実施した。

- (1) 海底掘削機（試験用）の試作：高含泥率掘削を目的としてスクリーオーガ・サンドポンプ送泥式の被けん引式海底掘削機を関東技術事務所と共同で試作した。
- (2) 海底掘削機による掘削試験：掘削機の作動状況、掘削能力、操作方法などの実用の可能性を検討するとともに設計上必要な各部の消費電力、高濃度揚水の管路抵抗の値などを明らかにする目的で、海上試験を行った。
- (3) 大型海底掘削機試設計：試験結果を基にして、現場に適応した大型海底掘削機の試設計のための基本的機構を決定するとともに掘削機の走行形式について、3方式（けん引式、円筒車輪駆動式、スキッド走行式）について検討し適当な形式を選出する。

- (4) スキッド歩行機能を有する走行装置を製作しその適用性を実験的に確認する。

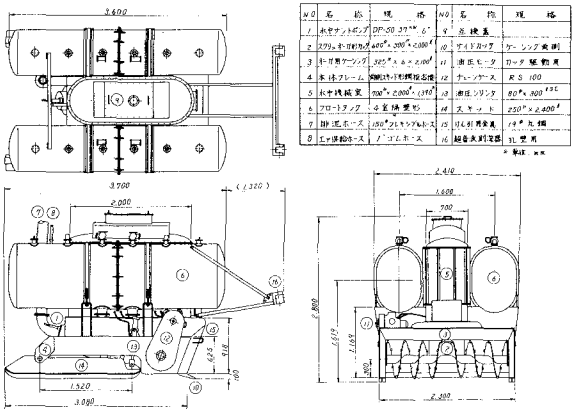
3. 海底掘削機の試作並びに試験

3.1 掘削機の概要

掘削試験に使用した海底掘削機は、以下の設計条件で製作したものである。

- (1) 掘削水深：60 m
- (2) 掘削地盤：N 値＝0～15
- (3) 海底汚濁：汚濁を生じないこと
- (4) 捨土：土運搬船による

海底掘削機の水中本体部の概略図を図－1に、概略仕様を表－1に示す。掘削機はスクリー型オーガカタで集土し、水中ポンプで揚泥する形式とした。水中ポンプは水中に独立させ動力線、排泥管で海上と結ぶ方式を採用した。走行は軟弱地盤を考慮し被けん引式とした。補機類の駆動部分も水中機械室を設けてその中に入れている。図中のフロートは機械の浮沈および保持、本体の姿勢制御、接地圧の調整に用いるもので、片側フロートがそれぞれ2室に分割されている。スキッドは本体を



図－1 海底掘削機水中本体

表－1 海底掘削機概略仕様

項 目		数 値
掘 削 速 度		0～3 m/min
有 効 掘 削 幅		2,300 mm
本 体 重 量		6,500 Kg
寸 法	全 長	3,700 mm
	幅	2,410 mm
	全 高	2,800 mm
揚泥用水中ポンプ出力		37 kw
油圧駆動用電動機出力		22 kw、6 P

軟弱層上に支持するもので、掘削方向を規定し油圧シリンダにより上下し前面カッタの食い込み深さを調節することができる。

実作業に際しては、状況により多少異なるが、掘削機本体の他にけん引用巻き取り巻き戻し装置、運転制御装置、電源設備、空気圧縮機、送泥ホース、電源および操作用多芯ケーブル、揚錨船（けん引用、復帰用）、土運船等が必要である。また水中本体部と水上部の連結は、排泥用フレキシブルホース、油圧駆動用電動機動力ケーブル、計器信号用および電磁バルブ等の操作用ケーブル、水中機械室およびフロートタンク用送気ホース、けん引用ワイヤロープ等である。

3.2 試験場所

三個所の海底掘削試験区域における土質条件、その他の調査結果を表一2に示す。A区域、B区域のN値＝10～15に対しC区域ではN値＝0で、採取した試料は自立しないヘドロであった。平均水深はいずれも10m以下の浅海であり、所定の60mにおける性能を確認するには至っていないが、水密性を除いた面では、結果の考察にはとくに支障があるものとは思われない。

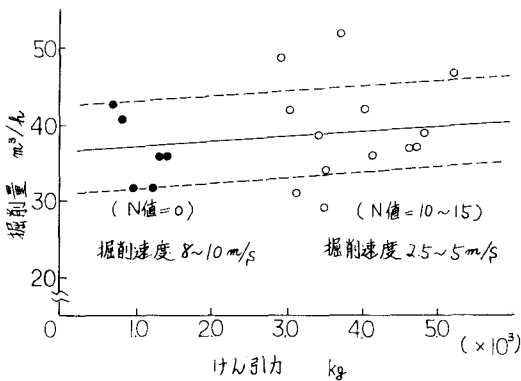
3.3 試験方法

試験は東京湾の千葉港内の三個所で実施し、その時の各試験機器の配置の大略は、図一2に示す通りである。

試験では、けん引速度とカッタ食い込み深さを変化させて行った。計測項目は、掘削能力、揚水量、含泥率、けん引力、けん引速度、ポンプ消費電力、オーガカッタ油圧、排泥管内圧力、海底土質条件等である。

3.4 試験結果

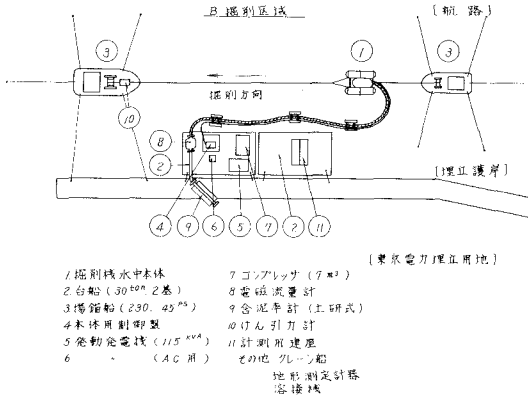
3.4.1 掘削能力



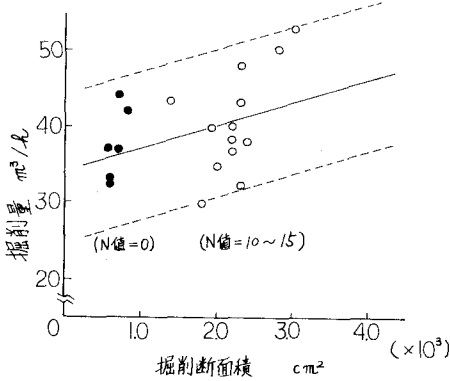
図一3 掘削量とけん引力

表一2 掘削区域別調査概要

項 目	A 区 域	B 区 域	C 区 域
調 査 場 所	千葉市川崎町	千葉市川崎町	千葉市生浜町
掘 削 幅 (m)	20	20	20
掘 削 距 離 (m)	50	50	50
送 泥 距 離 (m)	約90	約90	約90
平均水深 (m)	2.6～4.5	7.6～9.3	4.4～5.8
土 質 調 査	単位体積重量	1.327	1.232
	比 重	2.717	2.671
	圧縮強さ(匁)	0.160	0.144
	分 類	細 砂	シルト交り細砂
N 値	10～15	10	0



図一2 掘削試験配置図



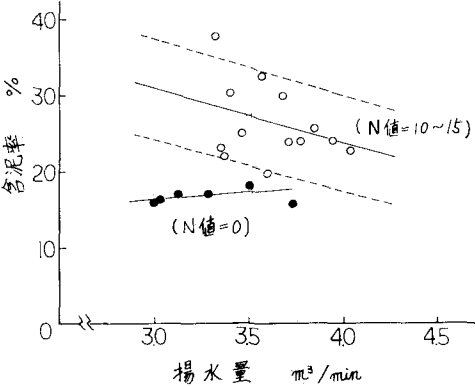
図一4 掘削量と掘削断面積

本機の場合、掘削能力は水中ポンプ、カッタ、けん引装置等の最大能力によって制約を受ける。各要素に与えた動力の範囲内で能力を上げるためには、操作方法が適当でなければならない。また、実用機の設計に際しては、本機で不足している動力系統があれば、それを増加させる必要がある。

海上試験の結果、N値＝0～15の間で掘削能力に大差がなく、操作方法によってバラッキがあるが平均で40 m^3/h の掘削能力を示した。37kW級のポンプ浚渫船の能力が10～15 m^3/h であるのに対してカッタ馬力を含めて考えても2～3倍程度の能力を有することになる。掘削能力とけん引力、掘削断面積との関係をそれぞれ図－3、4に示す。図より、けん引力の大きい程、掘削断面積の大きい程、掘削量は増大している。一方、掘削量とけん引速度（掘削速度）の相関は極めて低い値となった。これより、本器の場合には、早く掘削するより深く掘削する方が有利となる事が判明した。

3.4.2 含泥率

本機の掘削量は揚水量に含まれる土砂の量によって左右される。従って一定重量の揚水量中の土砂の占める重量比の多い程、能力が上がっていることになる。これを含泥率で表わして、揚水量との関係を図－5に示す。含泥率の増加に比して揚水量の減の割合は微少であり、含泥率の大小が本機の性能を直接的に決定していることになる。今回の試験では含泥率は掘削条件により10～25%の範囲で変動し、N値＝10～15では平均で26%、N値＝0では平均で17%の値を示した。N値＝0で低い値を示したのは、原地盤の単位体



図－5 含泥率と揚水量

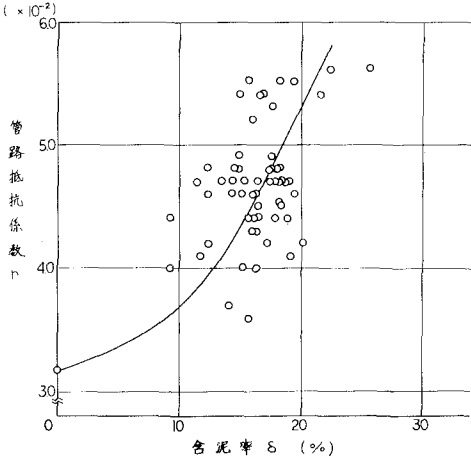
積重量rd自身が小さいこと、掘削深さが十分でなかったことによるものと想定される。ヘドロ層に対してはカッタは極めて低い負荷率であり、能力としてはまだ余裕があり、掘削深さを大きくとることが必要であった。また実用機の設計に際しては、カッタ能力とくにトルクを増大させることが必要と思われた。

3.4.3 排泥管抵抗係数

海底掘削機を大型化し実用化するに際し、馬力選定の基本的要因である高濃度泥水の管路抵抗を求めておくことが必要となってくる。そのため試験において、管内の圧力損失を求め、それを基にして排泥管抵抗係数を求めた。測定の結果を図－6に示す。

3.4.4 海中の汚濁

当初問題とした海水汚濁に関しては、ケーシング内でスクリーナカッタを回転させて、ポンプサクションする方法を採用した結果、掘削付近の汚濁は全く認められず良好な成績を示した。



図－6 含泥率と管抵抗係数

4. 大型海底掘削機試設計

4.1 海底掘削機の機構、能力

試設計にあたり大型海底掘削機の基本的機構は、試験用の掘削機と同じとした。一方、掘削能力は20 m^3 級グラブバケット浚渫船（能力480 m^3/h ）に匹敵するものとした。したがって排泥水の含泥率を25%として、掘削機は比重1.14 t/m^3 の泥水を1,920 m^3/h 排送する能力を持った浚渫ポンプを備える必要がある。これらを基本事項として3種類の走行形式について、試設計の検討を行った。

4.2 けん引式大型海

底掘削機

機体の移動は試作機と同様に、海面上の作業船に装備されたウインチを用いてけん引することにより行い、前後に掘削装置を設け着地したまま往復けん引させる形式をとって、効率の増加をはかった。図-7はその概略図を示したもので、2本のスキッドで本体を支え、本体の中央に浚渫ポンプを置き、前後の掘削装置より泥水を吸込する。

4.3 円筒型車輪駆動式大型海底掘削機

けん引式ではけん引を行う作業船やアンカーの点で広い作業海域を必要とし船舶の運航の障害となるので、海底で自走できる機能とした。図-8はその概略図を示したものである。走行は機体の両側に6対づつ計12対の円筒型の車輪を設け、各車輪に勝手反対のヒレを装備し、これを地盤に食い込ませながら油圧モーターで回転させて行う。

4.4 スキッド走行式大型海底掘削機

車輪駆動式では地盤が

非常に軟らかくせん断力が小さい場合に動輪のヒレで機体の支持地盤を掘りおこし、前進力を生じない状態になるおそれがあるので、機体に2組のスキッドを装備し、1組のスキッドで機体を支えている間にもう1組のスキッドを持ち上げて本体ごとスライドさせ、前進終了後、反対に後の1組のスキッドで機体を支え、前の1組を持ち上げて本体の元の位置までスライドさせ前進するものである。図-9はその概略図を示したもので、各スキッドは油圧シリンダの脚で機体を支えており、各スキッドは単独に脚の伸縮ができる。また内側のスキッドの支持台と本体は一体構造となっているが、外側のスキッドの支持台は油圧シリンダで本体とスライドできるようになっている。図-10に走行装置に自動歩行を行わせる油圧回路を示す。

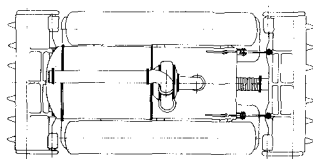
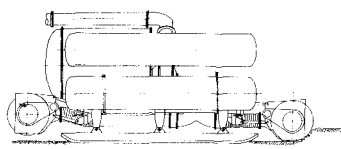
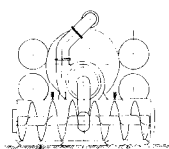


図-7 けん引式大型海底掘削機

主な仕様

掘削速度	2 ~ 3.5 m/min
掘削幅	5.3 m
掘削深さ	0.55 m
浚渫ポンプ	
揚水量	1,920 m ³ /h
駆動馬力	191 PS
総重量	52.1 t

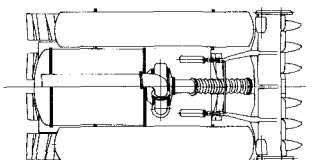
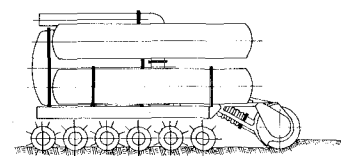
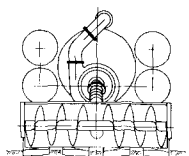


図-8 円筒型車輪駆動式大型海底掘削機

主な仕様

掘削速度	4 ~ 6 m/min
掘削幅	5.3 m
掘削深さ	0.3 m
浚渫ポンプ	
揚水量	1,920 m ³ /h
駆動馬力	174 PS
総重量	65.8 t

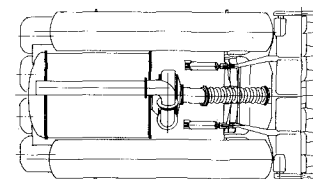
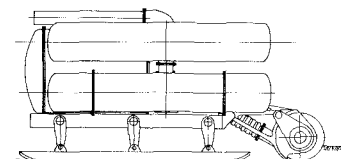
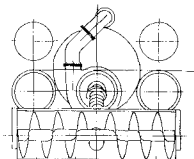


図-9 スキッド走行式大型海底掘削機

主な仕様

掘削速度	5 m/min
掘削幅	5.3 m
掘削深さ	0.3 m
浚渫ポンプ	
揚水量	1,920 m ³ /h
駆動馬力	174 PS
総重量	58.9 t

掘削装置はアースオーガ型スクリーコンベヤ方式とした。浮力タンクは左右の上側タンクに隔壁を設けて独立したタンクとし、機体の前後・左右の傾斜の調節を行う。機械室は圧力タンクとなっており、中で電動機が動力源となり浚渫ポンプ、オーガ用油圧ポンプ、走行装置用油圧ポンプを駆動する。海面上の指令船は制御盤、発電機、空気圧縮機を持ち掘削機とは電動機用の電力線、圧縮空気を送るパイプ、制御通信線で連絡され、その動力の供給と作動の指示を行う。

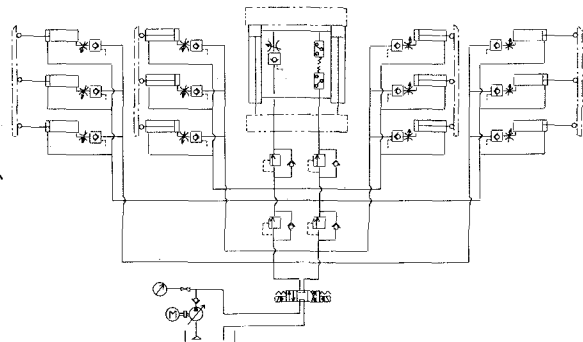


図-10 走行装置油圧回路図

5. スキッド式走行装置の走行試験

5.1 スキッド走行式の特長

現在、海底作業機械の走行方式としてはクローラ式がとられているがこれに対しスキッド走行式は次のような特長が考えられる。

- (1) スキッド式では掘削機本体下部全面を走行部分とすることができクローラ式などにくらべて広い接地面積を得ることが可能である。
- (2) クローラ式では地盤が軟弱になるにつれて車輛の沈下により走行抵抗が急激に大きくなるが、スキッド式に浮力による調整機構を加えれば微少とすることが可能である。
- (3) クローラ式では履帯の損傷が多いが、それをほとんど考慮する必要がない。
- (4) スキッド走行方式は理想的な状態では走行中スキッドと地盤との間に相対移動がないため海水を汚濁することがない。

5.2 試験用走行装置

試験用に製作した走行装置は、試設計を行った大型海底掘削機の走行部分を主に縮尺したものであり、オーガ、水中ポンプなどの作業装置は取り付けずブレードにて押土する機構としている。地盤支持力の変化に対し、スキッド接地圧を変化させるのには、左右のフロートに充気・充水して行う。また、陸上に置かれた油圧パワーユニットの給油量を変化させることにより、掘削速度を変化させることができるようになっている。走行装置の概略図を図-11に示す。

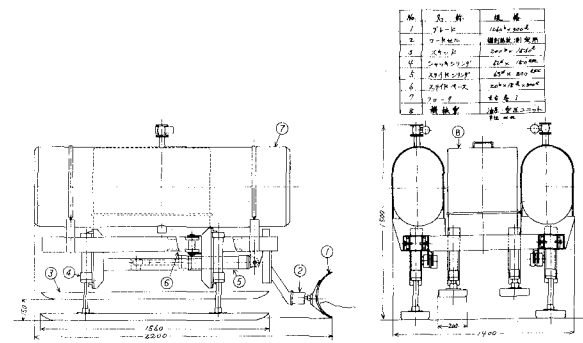


図-11 走行装置概略図

部	名	規格
1	主ポンプ	1200×1000
2	電動機	2000×1000
3	油圧シリンダ	2000×1000
4	油圧ポンプ	2000×1000
5	油圧シリンダ	2000×1000
6	油圧ポンプ	2000×1000
7	油圧シリンダ	2000×1000
8	油圧ポンプ	2000×1000

表-3 地盤条件

5.3 走行地盤

走行地盤は、長さ×巾×深さ(2.4m×3m×2m)の水槽に砂、ローム、ヘドロの3種類の土を50cmの厚さに、各々敷均して地盤とした。この地盤条件を表-3に示す。

5.4 試験項目および試験条件

試験で計測した項目は、スキッド接地圧、装置けん引力、掘削押土抵抗、装置走行速度、すべり率である。試験はこの内スキッド接地圧、掘削速度、走行地盤、地盤条件を変化させて行った。

5.5 試験結果

一般に掘削機が作業する力、すなわち、けん引力は一般に次の3種の制約を受けている。(1)動力が許容

項 目	砂地盤	ローム地盤	ヘドロ地盤
比 重	2.5	2.8	2.6
単 位 体 積 重 量	1.7	1.1	1.3
含 水 率 (%)	39	119	121
地盤支持力(コーン指数)	2.2	0.18	0.11

する最大けん引力、(2)接地面と地盤の摩擦力が許容する最大けん引力、(3)地盤の強度が許容する最大けん引力。掘削機の場合、機体を前方に押し出す油圧力は掘削抵抗力以上に設計されているので、(1)に関しては問題がない。従って(2)または(3)による最大けん引力と掘削抵抗力について検討を行えばよく、今回これを走行装置の試験の目的とした。この場合、最大けん引力に及ぼす要因としては、地盤支持力、けん引速度（掘削速度）、スキッド接地圧の3つが考えられる。接地圧と最大けん引力の関係を図-12に示す。地盤支持力の高い砂地盤の場合、接地圧すなわち総重量を増加することにより、けん引力は直線的に増加する傾向がある。一方、ローム地盤の場合、長い間水につかった状態のため表面がすでに液状化しているため、砂地盤の約 $\frac{1}{2}$ のけん引力になっており、接地圧の低い部分で、ほぼ直線に増加するが、一定のけん引力ですべりを生じそれ以上は一定の値になって増加はみられない。また、ヘドロ地盤は非常に軟弱なためけん引力は極めて低く、接地圧の変化によるけん引力の変化はみられなかった。次に、けん引速度の影響は最大けん引力に対しては、ほとんどないことが判明した。

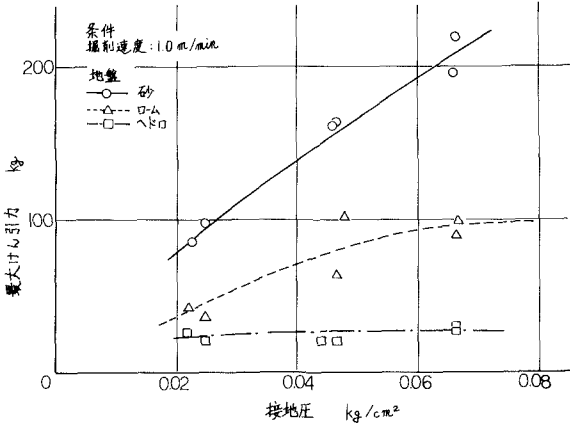


図-12 接地圧と最大けん引力

とにより、けん引力は直線的に増加する傾向がある。一方、ローム地盤の場合、長い間水につかった状態のため表面がすでに液状化しているため、砂地盤の約 $\frac{1}{2}$ のけん引力になっており、接地圧の低い部分で、ほぼ直線に増加するが、一定のけん引力ですべりを生じそれ以上は一定の値になって増加はみられない。また、ヘドロ地盤は非常に軟弱なためけん引力は極めて低く、接地圧の変化によるけん引力の変化はみられなかった。次に、けん引速度の影響は最大けん引力に対しては、ほとんどないことが判明した。

5.6 実機への適応性

表-4 実機への適応性

試験結果を基に実機の大きさにスケールアップする場合の適用性を検討してみる。前提条件としては、大型海底掘削機の掘削幅530cm、掘削深さ30cm、オーガ掘削断面当りの抵抗力を砂地盤で、0.83%、ヘドロ地盤で0.036%とする。適応性の検討の結果を表-4に示す。検討の結果から砂、ヘドロ地盤のどちらにおいてもスキッド走行式を実機に適用したとき、スキッドの大きさまたは掘削深さに余裕があることが判明した。

種別	番号	項目	砂地盤	ヘドロ地盤
走行装置	①	最大けん引力	220Kg	30Kg
	②	①の接地圧による補正值	450Kg	30Kg
	③	スキッド面積	6.240cm ²	6.240cm ²
	④=②/③	スキッド面積当り最大けん引力	0.072%	0.0048%
大型海底掘削機	⑤	所要掘削反力	13,200Kg	665Kg
	⑥=⑤/④	所要スキッド面積	18.3m ²	13.8m ²
	⑦	スキッドの大きさ	76mb×1.2mb×2本	5.7mb×0.88mb×2本
	⑧	試設計のスキッドの大きさ	7.8mb×1.2mb×2本	7.8mb×1.2mb×2本
	⑨	掘削可能深さ	31cm	41cm

6. まとめ

海底掘削機による掘削試験により、大型実用機設計に必要な資料を収集することができ、掘削位置の制御機構を付加すれば、要望に対応できる見通しがついた。さらにこれに続き、3種類の走行装置の走行方式に基づき試設計を行い検討した結果、20m²級グラブ浚渫船に匹敵する能力を持つ海底掘削機の概要が明らかになった。これはグラブ浚渫船と比べ非常に小型である。3種類の中では、スキッド走行式が適当と判断された。またこれに続き、走行装置の試験の結果、スキッド式走行の各種性能や問題点が明らかになり、自走式大型海底掘削機が、軟弱地で十分作業できることが判明した。しかしながらこの結果は、直線的な走行の限られた試験結果によるものであり、実用化に際しては、操向の機構を組み込むことが必要であり、また、海中作業の監視や管理などの、別の分野の技術の導入も必要である。また、本機構による掘削では、浚渫による水中汚濁は認められないが、土運搬船よりオーバーフローする濁水の問題に対しては解決されず、土運搬船内における濁水処理の研究も将来の課題として残された。