

掘削システムによる海底岩平面掘削実験 (大口径ロータリー掘削機を使用した場合)

さくら い のり ろう
 桜 井 紀 朗*
 やま なか たか し**
 山 中 鷹 志

1. はじめに

本四連絡橋の3本のルートの中の一つ児島～坂出ルート（通称Dルート）は、岡山県倉敷市児島鷺羽山付近より香川県坂出市番の州埋立地に至る海峡部約10kmのルートである（図-1参照）。

このルートの海底地盤は、その大半において風化花コウ岩が海底面に露頭しているため、海中下部工施工法として「設置ケーソン工法」を予定している。この設置ケーソン工法とは、風化花コウ岩を支持力（最大基礎反力800 t/m²）および安定上十分必要な深さまで掘削し、この掘削面に鋼製ケーソン（海中コンクリートの型わくとしての役割をなす）を設置し、ケーソン内を静水状態にしたうえで、こ

の中に海中コンクリートを打設し剛体基礎を施工する工法である。しかし、ここで施工する海中基礎は図-2にも一例を示してあるが、一基あたりのコンクリート体積が海中部分で20万m³にもなるものがあり、岩盤の掘削量にしても備讃瀬戸大橋全体で約25万m³にもなり、海中構築物の施工規模としては前例のないことである。平面掘削の本題にはいる前に、ここで設置ケーソンにおける掘削対象の特性を整理してみると表-1のようである（備讃瀬戸大

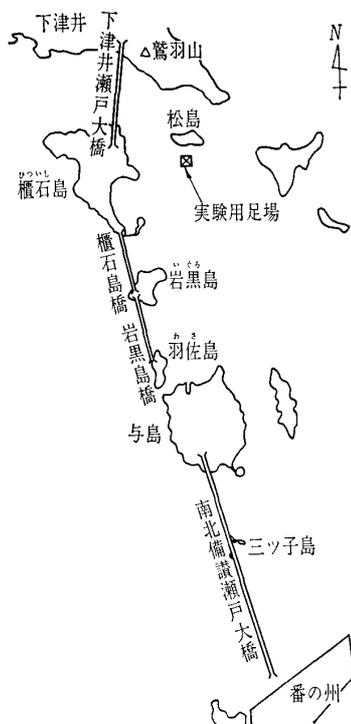


図-1 児島～坂出ルート

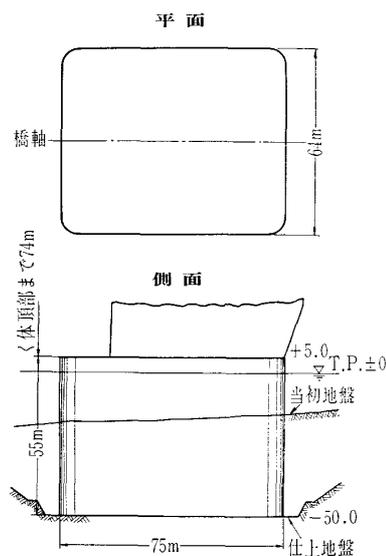


図-2 南備讃瀬戸大橋7A下部工一般図

表-1 備讃瀬戸大橋海底掘削施工条件

1. 掘削量	岩 250 千 m ³ , タイ積層 500 千 m ³	
2. 岩質	風化花コウ岩 (一部ホルンフェルス)	
3. 水深	0 ~ 50 m	
4. 潮流	最大 5 ノット	2.5 m/sec
5. 掘削層厚	5 ~ 10 m	タイ積層を入れると 35 m
6. 掘削位置精度	± 50 cm	ケーソン刃口据付
7. 仕上精度	± 10 cm	モルタル漏えい防止

* 本州四国連絡橋公団第二建設局建設第一課長
 ** 本州四国連絡橋公団第二建設局児島工事事務所技術課

橋に対し)。さらに、これらの掘削対象を施工上の問題からながめてみるとつぎのようである。

大水深、大潮流下において

1. どのような掘削機で掘削できるのか。
2. 掘削能率をあげるにはどこをプッシュすればよいか。
3. 掘削精度を確保するにはどうすればよいか。

このような問題について当公団では、いろいろな角度から調査・実験・検討を進めてきたが、ここでは掘削工法としては非常に珍しく、また構築物の基礎を目的とした海中掘削の特質を理解するうえで有効と考えられる、平面掘削実験の計画と実験結果について紹介するとともに、実験結果を中心に施工上の問題点を述べてみることにする。

2. 海底岩の掘削方法

海底を掘削する工事としては、一般的には航路シュンセツ・護岸工事が、また特殊なものとしては石油・天然ガス採掘ボーリングなどがある。これらの掘削を行なう機械を載せ、海上工事での足場としての手段に使用される物は、大別してつぎの3種類に分けられる。

- (1) 船足場
- (2) 固定足場
- (3) 移動足場

(1)の船足場は最も一般的に使用されている。弱点としては、船自身をワイヤおよびチェーンで固定しているため、深い水深と速い潮流および大きな潮位差のある海上においては、船自身の正確な位置決めと掘削機械を任意の位置に下ろし掘削することは困難である。また、波の影響を受けやすく、強風下では作業を中断して避難しなければならず、作業能率が一般に悪い。

(2)の固定足場は浅い海での掘削や海上ボーリング作業に使用されている。しかし、潮流下での設置方法および安定上の問題があるためか、大規模な施工例はあまりないようである。

また(3)の移動足場による掘削は、最も能率が良く海底掘削に適しているが、足場が高価なため、特殊工事かあるいはかなり大規模な工事にならないと施工システムのバランスがとりにくく、わが国では一部海上ボーリング工事、クイ打ち工事などに使用されているのが現状である。

一方、掘削機械としては種々の機械があるが、一般的なものをあげるとつぎのように分類される。

- (1) カッター式ポンプシュンセツ船
- (2) グラブ式シュンセツ船
- (3) ディッパー式シュンセツ船
- (4) 発破
- (5) 衝撃式
- (6) おもり式
- (7) ロータリー式

これらの機械のうち(1)～(3)は、掘削対象が土砂や軟岩で

あり、本ルートのように岩盤の一軸圧縮強度が場合によっては $1,000 \text{ kg/cm}^2$ もある場合には、主力機として用いることは困難であろう。また、(4)～(7)は岩掘削に適しているが、わが国では大量の海底岩掘削の施工実績があまりなく、ましてや施工精度の高い平面掘削の経験は皆無である。なお、ここで述べた平面掘削とは、構築物を据え付けるのに必要な広さと、平らな仕上げ面を確保するための開削をさしている。

今回の海底岩平面掘削を行なうにあたり、掘削機として取りあげたのは、(5)の衝撃式として空気圧を利用したマキナテリー砕岩機と、(7)のロータリー式としてヒューズ掘削機(掘削径 1.40 m)である。この両者を使用して海底岩盤の平面掘削の可能性および掘削能率や改良点を目的に実験を行なったが、ここではロータリー掘削機を使用した実験について述べることにした。

なお、(4)の海中発破の利用についても、Eルート(尾道～今治)の大三島沖にて穿孔・遠隔起爆による実験を、移動足場の一つである SEP(自己上昇式移動足場)を使用して実施済みであり、また(6)のおもり式については、Aルート(神戸～鳴門)の鳴門の固定足場を使用して実験を実施したことを申し添える。

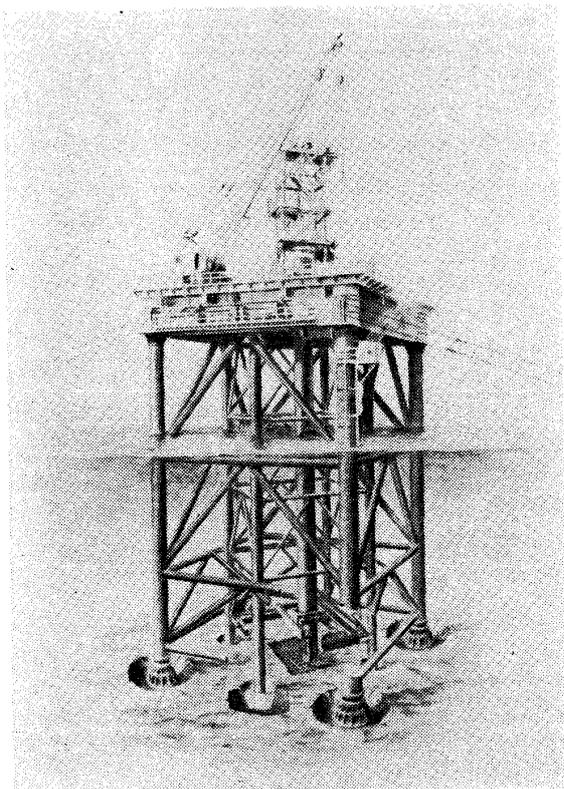
まず、平面掘削を行なう場合に問題となるのは、潮流下でのこれらの機械の防護方法と正確な位置決めである。このための足場としては、実際工事では移動足場を使用することが不可欠であるが、今回は児島松島沖水深 25 m の位置に設置した実験用海中鉄構(固定足場)を利用することとした。この海中鉄構は各種の施工調査用として、潮流5ノット、水深 25 m の位置に据付けられたものである。この実験に先立ち、海中鉄構を据付けるための海底岩ならし作業を行なった。この掘削はプリストマン型シュンセツ船にマキナテリー砕岩機をワイヤによりつり下げて海底を砕岩し、ズリは 4 m^3 のクラムシェルバケットとダイバーによるエアリフトで処理した。潮流の速いときは、ワイヤが流され正確な位置を掘削することが困難であり、潮待ちをせざるをえなかった。この潮待ちが全工程の 48% を占め、作業能率は非常に悪い。このため実験では、能率良く正確に海底が掘削できるようにという目的で、新たに掘削システムを考案・製作した。

3. 掘削システム

掘削システムとは、種々の掘削機械を載せ、これらを潮流、波浪および潮位差から防護し、海底の任意の位置に移動可能な、能率的かつ正確に掘削機を作動させるための掘削補助機構である。写真-1に掘削システムの透視図を示す。

3.1 掘削システムの機構

掘削システムは大別してつぎの四つの部分より構成されている。



写真一1 掘削システム透視図

- (1) 潮流圧から掘削機械、水中テレビカメラ、測深機などを防護し、これらを取付けるリフティングビームを昇降させるためのガイドパイプ
- (2) ガイドパイプを平面内の任意の位置（移動範囲 6 m × 4.5 m）および高さ方向に移動させるための上・下二段の走行装置
- (3) 掘削機械などを上下に移動させ、ズリの末端処理をするためのタワー……マキナン砕岩のとき
ヒューズ掘削機を載せるために空中トロリー上にあるヒューズ架台
- (4) 動力装置および操作機器

なお、システムの一般図を図-3に、構成ユニットの主な物の名称・目的・構成要素を表-2に示す。

3.2 掘削システムの機能

掘削システムのガイドパイプは掘削深度 10 m を仮定して、D.L. - 34 m の深度まで継ぎ足しが可能である。また、ガイドパイプの支持は、(1)水中支持、(2)空中支持、(3)ガイドパイプ上部引上げ支持の三通りあり、それぞれの支持状態および設計外力条件を図-4、表-3に示す。上記(1)は通常掘削状態、(2)は水中システムの点検補修作業および特殊掘削状態、(3)はガイドパイプ継ぎ足し作業時にそれぞれ適用した。なお、図-4においてガイドパイプと水中システムの支持は、(1)、(2)の場合、空中トロリーに取付けたガイドパイプ押込用シリンダーと、水中エレベーターロック装置によって、(3)の場合はエレベーター巻上げ用ウインチによりそれぞれ支持される。

このように掘削システムは、潮流下でも掘削機を上下二

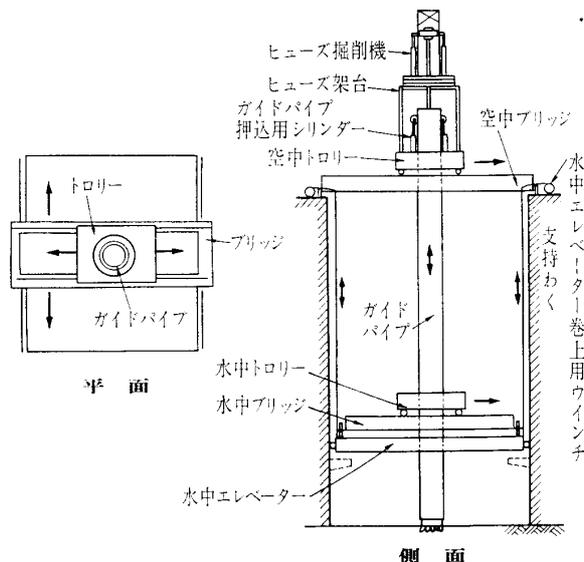


図-3 掘削システム機能一般図

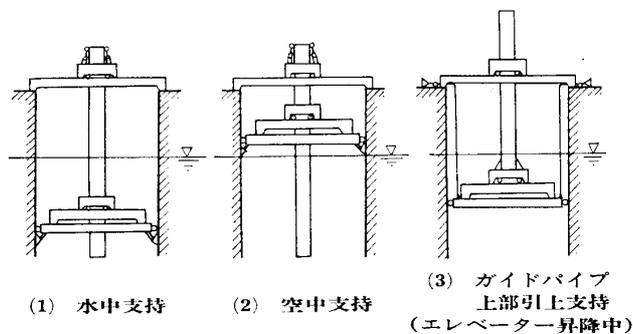


図-4 ガイドパイプ支持状態

段のトラベラーにより所定の位置に下ろすことが可能である。このトラベラー位置表示は、空中ブリッジ・トロリーの座標位置および空・水中部の偏差量をそれぞれの減速機の回転数をカウントし、デジタル表示で知らせ、偏差が 20 cm になると警報表示灯とブザーによってオペレーターに警報を、30 cm になると自動停止を行なう。

3.3 掘削管理装置

海底岩を掘削した後の掘削深度を測量するために、超音波測深装置 (D. P. I) を使用した。これをリフティングビームに取付け、ブリッジ・トロリーを移動させることにより X・Y 座標の深度 (Z) を cm 単位で知ることができ、平面掘削状況を正確・敏速にプリントアウトする。この D. P. I の仕様を表-4に示す。

また、掘削作業中の掘削機およびシステムの状態を測定・自動記録し、作業の管理および解析のために掘削管理装置を取付けた。記録は 6 チャンネルペン書きレコーダーにより行なった。表-5にこれらの構成を示す。

4. 大口径ロータリー掘削機による掘削

ヒューズ掘削機を使用して、大口径ロータリーボーリングによる平面掘削を昭和 46 年 7 月 9 日より 9 月 3 日まで

表-2 掘削システム構成ユニット

ユニット名称	主要目的	構成要素
支持わく	既設海中鉄構にそう入し、水中エレベーターのガイドおよびシステム全体の足場になる。	上部ビーム・下部脚柱、水中エレベーターガイドレール
水中エレベーターフレーム	水中ブリッジ・トロリーを載せ、支持わくのガイドに沿って昇降するフレーム	ボックスゲタ・プーリーブロック、ロック装置
空中・水中ブリッジフレーム	ガイドパイプの空・水中部の支持わくで移動距離4.5m、水中はエレベーターの、空中は支持わく上部のビニオンラックに載せる。	ボックスゲタ
空中・水中トロリーフレーム	ガイドパイプの空・水中部の支持わくで移動距離6.0m、ブリッジフレーム上のビニオンラックに載せる。	ボックスゲタ
ガイドパイプ	直径2.0mのパイプでリフティングビーム、エアリフトパイプおよびヒューズ掘削機スタビライザーのガイドになる。油圧シリンダーによりパイプは上下に2mストロークし、海底の凹凸およびパイプ継足し作業に対処する。	$I=38\text{ m}1\text{本}\cdot 2.5\text{ m}1\text{本}\cdot 3.75\text{ m}2\text{本}$ ・ボーリング用先端パイプ・エアリフトガイド・内部にレール
リフティングビーム	マキナテリ、グラブ、水中テレビ、D.P.I.などを先端に取付けガイドパイプ内を昇降する。	鋼製フレーム、つば付ローラ12個
ブリッジ・トロリー駆動装置	ブリッジ・トロリーを潮流に抗して走行させる装置	油圧モーター・ブレーキ・減速機・ビニオン・ラック
エレベーターウインチ	水中エレベーターフレームを4台のウインチで巻き上げる。	モーター・減速機・ドラム
エアリフト	300φのエアリフトパイプ	グースネック・ドリルパイプ
タワー	油圧ウインチ・電動ウインチを載せ、巻上げ操作、ズリ処理、タワースキッドなどの掘削本作業を行なう。	タワー本体・油圧ウインチ・電動ウインチ・ズリ処理装置・スキッドシリンダー・エアリフトシリンダー
水中テレビ	テレビケースを俯仰する。	テレビケース・クリヤサイト俯仰装置・制御盤
制御装置	トロリー・ブリッジ・エレベーターの位置表示	近接スイッチ・表示盤・カウンターメモリー・演算回路
電気装置	電気部品の動力装置	リミットスイッチ・モーター・操作盤・電気箱
油圧装置	油圧機器の駆動装置	パワーユニット・バルブスタンド・油圧シリンダー・チクサンジョイント

表-3 外力条件

ケース		潮流	波高	風速
a. 水中支持	作業中	5 kt	2 m	15 m/s
	休止中	5 "	2 "	60 "
b. 空中支持	作業中	3 "	2 "	15 "
	休止中	5 "	2 "	60 "
c. エレベーター昇降中 (ガイドパイプ上部引上状態)		2 "	0.5 "	15 " (上部は割増)

実施した。実験は掘削パターンを2通りのタイプに変え、第1層はボーリング穴を接する方式で約70cmを、第2層はラップボーリング方式で5mをそれぞれ掘削した。掘削実施工程を表-6に示す。

4.1 ヒューズ LDM 505 掘削機の概要

本機は米国のヒューズ・ツール社より輸入された通常のカッタービット・ドリルカラーを使用するロータリー式であり、排土はエアリフトによる逆循環で行なう。その形式は、

表-4 D.P.I.の仕様

超音波周波数	400 kHz
指向幅	3°
測深幅	1mごと3組並列
測深回数	30秒ごとに1回
測定距離	約10m

- (1) エンジン・ポンプなどの動力部分その他を載せる安定機構
 - (2) 上記に鉛直に立てた試すい(錐)やぐら(槽)
 - (3) ビット・掘削荷重用のドリルカラーなど回転部分の掘削具
- および今回のシステムの空中トロリー上に本体を載せるための、
- (4) ヒューズ用架台

より構成されている。なお、(3)の掘削具には、掘削具をガイドパイプ内および掘削孔内において、円滑に回転させ水

表-5 管理装置構成

測定項目	測定条件・範囲	測定器および性能
ガイドパイプ振動	0~0.6g	加速度計2台 0~2.0g (0.6gにて警報)
油圧ウインチ用ワイヤテンション	1~10 ton	ロードセル (圧縮型) 1~10 ton
油圧ウインチ・油圧クラブ電流	0~160A	分流器入力電圧 440V (70kWにて警報)
コンプレッサーエア流量	3~30 m ³ /min	フロート式流量計 3~30 m ³ /min
マキナン打撃回数	105回/min	マイクロホン 高圧レベル5段階
大口径掘削機回転数	0~20 rpm	近接スイッチ 0~20 rpm
大口径掘削機ビット荷重	0~170 kg/cm ²	油圧プレッシャー 200 kg/cm ²
大口径掘削機掘削速度	0~1.5 m/h	ポテンシオメーター 0~3.0 m/h

平方向に支持するスタビライザー(上部および下部), およびグースネックよりエアリフトされたズリと海水を一度ため、排土ホースに送るための排土タンクを含む。これらは本実験用として特注したものである。写真-2に(3)の掘削具のクレーン船によるつりこみ状態を示す。

また、掘削機本体の機能はつぎのようなものである。

(1) ベース機構が3段の可動フレームからなり、今回の掘削段取替えに使用した上部フレームは前後の調整および掘削具建込みのため、全体に1.8m後方へスライドする。

(2) 上部ストローク3m、能力40tの油圧シリンダー2基により、直接ビット荷重を調節する。

(3) トルクはスイベルと一体をなすパワースイベルにより駆動され、これはやぐらのガイドレールに装置されている。

(4) やぐらはベースと連結するマスト用シリンダーにより倒立でき、組立てたまま運搬できる。

これらの機能はすべて油圧で作動し、操作はやぐら後方の運転台で行ない、掘削状況によりスラスト荷重、ロータリー回転数を簡単に調整することができる。これらの機能を持つ本機はビット荷重約65t、回転数20rpm、回転最大トルク5,600kg-mまでの条件で掘削が可能であり、本実験に使用したカッターは、対象岩が風化花コウ岩であり、マキナン掘削の結果から、中硬岩用のMRカッターを使用した。過去に和泉砂岩を対象とした陸上予備実験において、ビット荷重38.5t、ロータリー回転数17.6rpmときの掘進速度は最大の値1.28m/hであったことを参考までに紹介しておく。

掘削に先だち、掘削機のエアリフトの効果を調査するため、エアリフト揚水試験を行ない、エア送気量と揚水量との関係を調べた。この結果を図-5に示す。この図に示すように、エア量20m³/分のときが最も効果的に揚水されたため、以後掘削はエア量20m³/分で行なうこととした。

表-6 ヒューズによる掘削実施工程表

	6月					7月					8月					9月						
	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30	5	10		
地盤コアボーリング	■																					
第1層掘削							■															
水中作業	■					■		■		■		■		■		■		■		■		
第2層掘削													■		■		■		■		■	
その他	■					■		■		■		■		■		■		■		■		

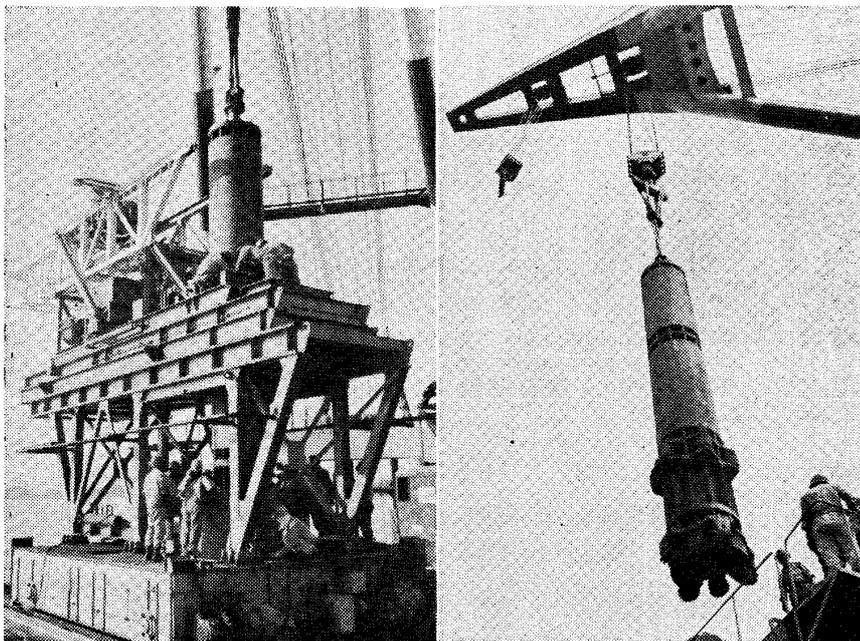


写真-2 掘削具のつりこみ

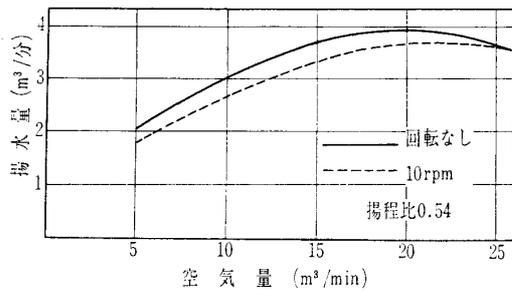


図-5 エアーリフト揚水試験結果

4.2 第1層 (D.L. -22.80~D.L. -23.50 m までの掘削深 70 cm) 近接掘削

マキナテリーによる掘削後、大口径掘削に先立ち、海底の代表的な2点においてコアボーリング (径 86 mm) を実施し、掘削岩盤の強度とヒューズ掘削能率との関係およびマキナテリー砕岩の影響などを調査した。 q_u はどの場所でも大差なく、最大 341 kg/cm²、最小 198 kg/cm²、平均 273 kg/cm² であり、砕岩による岩強度の低下は本ボーリング結果からは考えられなかった。

ヒューズ掘削機による平面掘削の第1段階として、まず本システムをフルに活用して確実に平面掘削ができると考えられる、図-6 に示すパターンにより実験を実施した。このパターンの掘削の前提は、

- 1) ガイドパイプ先端を、どのパターンにおいても海底に押しつける→ガイドパイプ押付用油圧シリンダーに

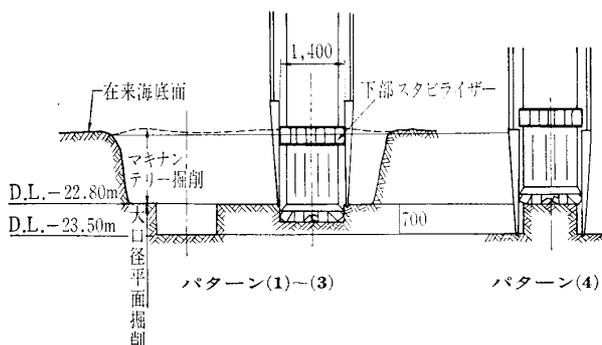
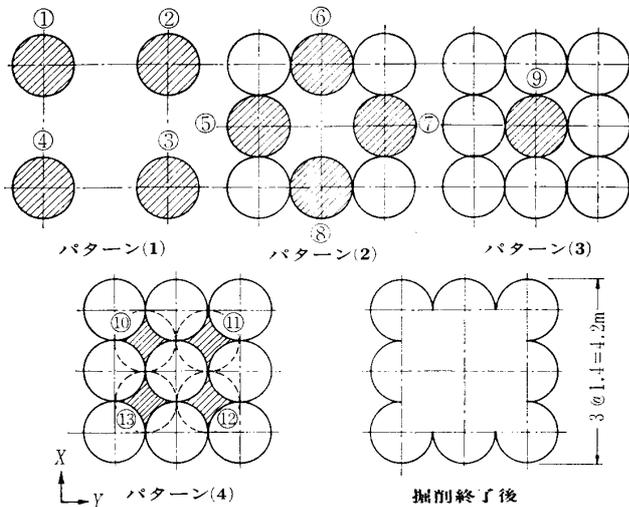


図-6 第1層 (近接掘削) 掘削パターン

ブースターを取り付け、常時海底に押しつける。

- 2) 下部スタビライザーを常にガイドパイプ内で保持する。

であり、ストローク 2m のガイドパイプ押付用シリンダーにぶら下がったガイドパイプの移動範囲が、D.L. -21.64 ~ 23.64 m であったため、パターン(4)でパイプを押し付けるには最終掘削深度を D.L. -23.50 m にせざるをえず、掘削深さを 70 cm とした。それぞれのパターンを分類すると、

- パターン(1)……単独孔掘削
- ” (2)……2 点が接する近接掘削
- ” (3)……4 点が接する近接掘削
- ” (4)……残部をパイプに抱きこんだ掘削

となり、4.2×4.2 m の平面掘削を行なうことになる。

掘削状況は順調で、それぞれのパターンにおける番号順に実施した。掘削深が浅いため、掘削能率はあまり参考にならないが、最小 0.65 m/h ($W=5.7t, N=10 \text{ rpm}$)、最大 3.42 m/h ($W=22.2t, N=15 \text{ rpm}$)、平均 2.3 m/h であった。ガイドパイプの平面位置コントロールも正確に行なわれたため、孔と孔の中心間隔のズレは ±5 cm 程度であった。

ついで第2層掘削のため、第1層掘削周辺部をダイバーにより拡幅掘削し、ガイドパイプ移動の支障にならないようにした。この作業はマキナテリー終了後も同様に実施している。

4.3 第2層 (D.L. -23.50 ~ D.L. -28.50 m までの掘削深 5 m) ラップ掘削

第1層目の掘削は、最も確実に施工できると思われる方法で実施したが、第2層目では平面掘削上の問題点抽出に重点を置き、掘削方式も趣向を変えてラップ掘削とし、掘削深度も本工事を考慮して 5 m を目標に実施した。掘削パターンを 図-7 に示す。これは第1層目と異なり、

- 1) ガイドパイプは海底に押しつけず、水中トローリーより約 7m の張り出し状態とする。
- 2) 下部スタビライザーは、掘削深度の大半においてガイドパイプより出る。
- 3) オーバーラップ掘削 (ラップ長 30 cm) を行なう。

とし、それぞれのパターンを分類すると、

- パターン(1)……単独孔掘削
- ” (2)……2 個所がラップするラップ掘削
- ” (3)……ビットの横方向の移動に対し、下部に支持装置のない掘削

となり、3.6×3.6 m の平面掘削を行なうことになる。①孔より④孔までの単独孔掘削においては、ビット荷重 (Wt) およびロータリー回転数 ($N \text{ rpm}$) の値を種々変化させ、掘進速度 ($R \text{ m/h}$) と W, N の関係を知ることと、本工事を想定して掘進速度向上をはかる目的で、荷重を順次大きくして実施した。このときの W, N と R の関係をグラフにすると 図-8 になる。これを $R = \alpha N^p \times W^q$ として記録値を処理したところ、 $R = 0.031 N^{1.1} \times W^{0.3}$ (相関係数

表-7 ヒューズ掘削稼働状況

作業種別	第1層		第2層	
	作業日数	全作業日に対する割合	作業日数	全作業日に対する割合
全日数	14日	100%	33日	100%
休日	2	14.3	4	12.1
掘削作業	7	50.0	19	57.6
水中撮影	2	14.3	—	—
撮影のための段取り(設備取付)	3	21.4	—	—
機械点検による待機	—	—	7	21.2
天候不良のための待機	—	—	1	3.0
ダイバーズ処理	—	—	2	6.1

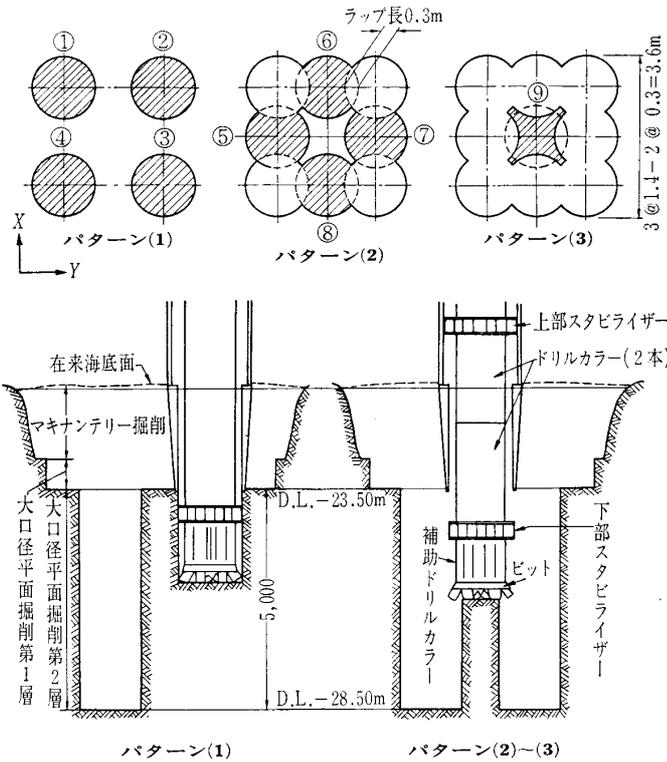


図-7 第2層(ラップ掘削)掘削パターン

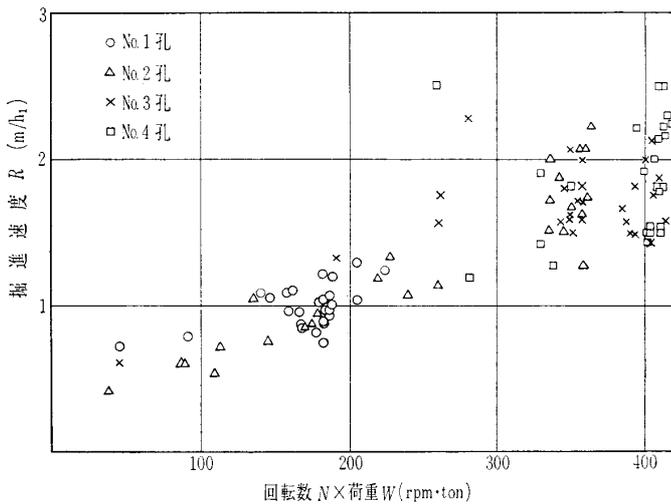


図-8 第2層 第①孔~第④孔掘進能率図

0.87) となった。これは荷重よりも回転数を大きくしたほうが掘進速度は大きいことを示している。

パターン(1)の掘削は順調に進んだが、パターン(2)の掘削は、予想されたことであるが、スタビライザーがガイドパイプからはずれて掘削孔の中にはいってゆくと、自由面が両側にあるため、掘削中の部分の岩盤が風化き裂に沿って肌ばなれを生じ、すでに掘った両側の孔に落ちる現象がみられ、このズリにビットがかみこんだ。この現象に対してつぎの処置を行なった。

- 1) ダイバーによる大割石のズリ処理と、ズリのたまった孔に掘削機をセットし、空運転によるエアリフトでズリを揚げる。
- 2) 下部スタビライザー位置を変更し、2本のドリルカ

ラーの間にそう入して、スタビライザーを再びガイドパイプ内で回転させる。

この処置後は異常なく、すべての掘削を終了した。

4.4 掘削結果

第1層、第2層の掘削状況をまとめると表-7になる。今回の実験においては、その成果を知るためにダイバーによるモザイク写真撮影などに日数を費やしたが、第1層掘削方法は、この点を略するとフルに稼働したことになる、ガイドパイプ押付用シリンダーのストロークを大きくし、下部スタビライザーをパイプ内に拘束すれば、10m程度の深度の近接掘削も能率よく掘れるものと思われる。

5. おわりに

今回の実験は、本工事の掘削規模に比べ比較的小規模のものであったが、このような掘削システムが水深の深い潮流の速い海中において、期待どおりに作動するかどうか、また大口径ボーリングマシンによる平面掘削が、実際に可能かどうかを調査した。実験の結果、ほぼ期待どおりの成果を知ることができ、このような掘削システムが実用になる明るい見通しを得ることができた。

海中工事は一般に多額の費用を伴うものであり、また、気象海象の変化などの外乱の影響も非常に大きい。したがって海中工事の作業計画をたてるに当たっては、工事中の目的、性格ならびに環境条件を十分認識し、適切な作業機械を選定し、機械的にこれを組合わせて用いることが重要なポイントとなる。今回の橋脚基礎面の掘削のように施工精度の高い構築物を大水深、強潮流下において、能率良く確実に施工するためには、掘削機を強固に支持し、移動できる装置と、陸上工事におけるやり方に相当するものが必要であるが、掘削システムはこの意味において非常に有効であると考えられる。

(原稿受理 1973.6.25)