

本四架橋における掘削実験について

本州四國連絡橋公団 古 関 新 也

はじめに

本州四國連絡橋工事に於いて重要な課題の一つとして海中基礎の掘削があげられる。瀬戸内海の主航路を跨ぐ長大橋の基礎には非常に大きい荷重がかかり、このため従来の一般土木構造物にくらべてはるかに堅い地盤までの海底掘削を行う必要があり、また瀬戸内の地質は褶曲が多く、節理・断層が非常に発達しているので掘削壁面の崩壊が起り易いなど、それぞれの地質・地盤に適応できる性能の掘削機と掘削工法の開発が望まれてきた。

また架橋地質は狭い海峡部を選人でいる関係から潮流も速く、水深も30～50mといふ処での施工も多く、目に見えない海底で正しい位置と深さの掘削を大量に行うためには種々むづかしい問題がでてくる。さらに最近公害問題が大きくクローズアップされ、海底掘削にともなう海水汚濁・水産資源の保護にも充分な考慮を払ひながら作業しなければならぬ。以下本四公団が46年度および47年度、神戸市高倉山でおこなった掘削実験のうちその二、三について述べることにする。

掘削実験の経緯

一般的にいうと海底基礎地盤の掘削手段として海工足場から下りて孔掘削機などによる円形孔の掘削と、クレーン船やポンプ船などの浮揚船による海底面の掘削が考えられ、後者の場合地盤が硬くなればあらかじめ砕岩機や水中発破で岩盤を破砕する必要がある。これら浮揚船は以前から航路浚渫など使用実績は多く最近までに大規模・高性能の機種が開発されている現状である。一方海底面での削孔機械として海外においては石油生産試掘用の比較的小口径の削孔機械や設備については開発もすすんでいるが大口徑の掘削機械となるとその機種や施工の例も少く、本四架橋の様に軟硬錯綜した海底地盤を口径3～4m程度削孔していくには新しい機種と施工法の開発が必要であり、当公団設立以前から建設省はじめとして調査、研究が進められていた。本四連絡橋公団が昭和45年に設立されてからも海底岩盤掘削用機械の基礎的調査や開発、試作、その性能確認のための諸実験工事が行はれてきたが高倉山下の実験もその一つであり、現在までの掘削実験の経過を次表に示した。

本四公団掘削実験一覧表					G: 花崗岩 Mo: モルタル Co: コングリート
掘削機名	規 格	45年度	46年度	47年度	
マキナマリ砕岩機	10-B-3		児島 風化G		
回転式掘削機	ビーズ LDM-50t 1.4m		児島 風化G		
"	ドリル L-2号 1.2m			高倉山 地盤・Mo	

回転式掘削機	土研式 2.5m~3.0m		高倉山 砂山・Mo	瑞宝 尾化・新鮮子
"	成ル L-105 3.65m 川重 KSD-4 3.65m 三菱 MRJ60 3.6m			高倉山 (3機種) Mo
重鎗掘削機	十字字刃 3.16m	高砂 Co	鳴門 和泉砂岩	高倉山 Mo
"	ドロツアハンマ 中 4.5m			高倉山 Mo
"	十字字刃 10m ドロツアハンマ	高砂 Co	鳴門 和泉砂岩	高倉山 Mo
高压式注水掘削	圧力 = $p \sim 200 \text{ kg/cm}^2$			高倉山 砂山・Co・Mo
水中発破			大 三 島 沖 海 面 面 面	

高倉山における陸上掘削実験

この実験は、昭和 46 ~ 47 年度にわたり本四公団がおこなった掘削実験で建設省ならびに公団所有の掘削機のほか国内で開発されたロータリー掘削機について実用試験を行い、各機種種の掘削性能を把握するとともに、組立・掘削・解体作業の歩掛りなどを調査、取りまとめることを目的として行なった。実験場所として神戸市須磨区多井畑黒ヶ谷（高倉山）を選んだが実験地付近を構成する地質は、粗粒の黒雲母花崗岩で一般に深部まで風化が進み、現地での二本のボーリング結果では、ほとんどコアを採取することか出ず、ボーリング孔内の地弾性波速度は最高 26 km/sec しか得られなかった。このため特別に軟岩を対象とした掘削実験を実施する以外は、 $\delta_{28} = 400 \text{ kg/cm}^2$ を目標としたコンクリートモルタルの擬似岩盤を打設することとした。

実験に使用した掘削機種として次の種類があげられるが、本文としては主として (1) および (2) のロータリー掘削機ならびに (4) の高压噴流水掘削装置についてその概要と実験結果を述べることとする。

- (1) 中 2.5 ~ 3.0 m ロータリー掘削機 (建設省土木研究所)
- (2) 中 3.6 m ロータリー掘削機 (石川島播磨重工・三菱重工・川崎重工)
- (3) 重鎗式掘削機 (本四公団)
- (4) 高压噴流水掘削装置 (本四公団)

中 2.5 ~ 3.0 m ロータリー掘削機

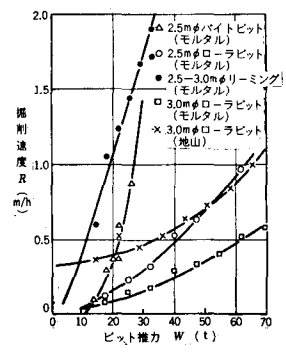
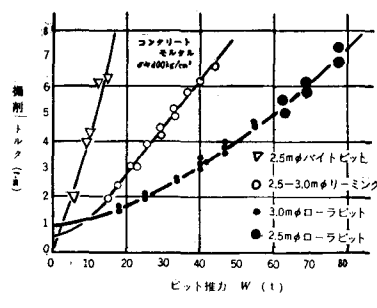
回転式の掘削機は、当初 RC ドリル (リバースサーキュレーションドリル) がわが国に導入されたが、硬岩はもちろん軟岩の地盤に対する掘削もできないものであり、掘削口径も 1.5 m 中どまりであった。岩盤掘削機として外国では石油井戸の削孔から発達した大口径ロータリー掘削機を用い鉱山の堅坑掘削とが核地下実験用の掘削の施工例が紹介されていたが、技術的なデータが乏しく、海中の基礎掘削に RC ドリルを適用することが考えられたが実用に供しうる段階ではなかった。そこで建設省土木研究所を中心として、本機による掘削に当って一番問題になるカッターについて研究が始められ岩盤に対する削孔性の把握を行なうとともに、高水深に適するよう駆動装置が水没するダウンゲー

ル型の掘削機が開発されることになった。この掘削機の口径は2.5mで3mまで掘削することができ、カッターはローラカッターとバイト型カッターに付け替えることができる。実験はこの2種類のカッターについておこなわれ、カッター推力と回転数を変化させて掘削速度、回転トルクなどを測定した。

実験結果として

- (1) 回転数8~10 RPMにおいて(バイト型カッター)の場合、地山で2.0~3m/hr、セメントモルタルで0.5~0.8m/hrであって、またローラカッターの場合、地山で1.0m/hr、セメントモルタルで2.2m/hrを得た。即ちローラカッターは比較的堅い岩盤に適しバイト型カッターは軟い地盤に高い掘削能率を示している。ビット推力と掘削速度の関係を図に示す。
- (2) ビットの摩耗状況はバイトビットの場合、地山2.0mの掘削で

約70%の欠損が認められたがローラビットの場合地山2.6m、セメントモルタル4mの掘削を行い、摩耗高さで最高5mm程度であった。



φ3.6m級ロータリ掘削機

工研式φ2.5mロータリ掘削機の開発について国内の四社においてφ3.6m級ロータリ掘削機が相

ついで製作されたが岩盤用大口径掘削機として目下最大口径級のものである。実験はこれらうち3機種について行ったが前述のφ400kg/cm²のセメントモルタルの擬似岩盤を約8mを掘り下げることにした。3機種ともビット駆動方式が相違しているがそれぞれ各機種のそれぞれの特徴をあらわしているともいえる。以下簡単にその構造を説明することとし、主たる諸元を表-1及び外観図を図-1に示す。

表-1 3.5m級大口径掘削機仕様一覧

項目	社名	石川島播磨重工業 株	川崎重工業 株	三菱重工業 株
型 式 名	L-10S	川重3.65φm	MDM500	
口 径	3.65φm	3.40~3.65φm (リーディング)	3.6φm	
ビ ャ ッ ト 型 式	ローラー(24個)	ローラー(33個)	ローラー(22個)	
駆 動 位 置	上 部	水中(max 50m)	上 部	
駆 動 方 式	ロータリーテーブル	平輪車クレー	ロータリー装置昇降	
機 械 配 置	分離型	分離型	一体型	
ドリルストリング支持方法	旋回ジブフレン200t	水中グリップ	油圧ジャッキ (ガイドマスト)	
ドリルストリング 重 (水深20m基準)	120t	65t	157t	
ス イ ー ル 許 容 荷 重	180t	(スラスト荷重max260t)	200t	
総 重 (原動機ユニット除く)	162t	116t	265t	
最 大 ト ル ク	36t-m	35t-m	40t-m	
回 転 速 度	0~18 r.p.m	0~10 r.p.m	0~16 r.p.m	
原 動 機 出 力	160ps×2台=320ps	電力480KW	115ps×4台=460ps	
ドリルパイプ口径	300φ×5m	250φ×5m	406φ×5m	
ず り 掘 り 方 式	ポンプサクション及びエアリフト	同 左	同 左	
全 装 備 重 量	(182t)	154t	276t	

- (1) L-10S型(ロータリーテーブル式)

この型式は機構的にいってR.Cドリルとほぼ同一でありドリルパイプをロータリーテーブルと呼ばれる駆動装置を介して

回転することによって掘削を行なう。ロータリテーブルを通過する部分のドリルパイプはケーラーと呼ばれる四角断面をもったパイプで、回転力が伝えられるとともに垂直方向には自由に動きうるので、掘削がすすむにつれてドリルパイプも下って行く構造のもので、掘削に必要な推力はビットおよびドリルカラーの重量で与えるようになっている。また掘削すりはエアリフトまたはサクシヨンポンプによりドリルパイプを通じて機外に排出される。

(2) MDM-300 (パワースイベル式)

この型式の残機も基本的にはR.Cドリル型式をとっているが、一番大きな違いはパワースイベルと呼ばれる装置をつけた点であり、ロータリーテーブル式のケーラーをなくしこのスイベル部分でドリルパイプに回転を伝えると共に油圧シリンダーでこのスイベル部分を上下してドリルストリングを昇降するようにしたものである。ロータリーテーブル式が推力に相当する重量を吊り上げるクレーンを常備しなければならないが、この方式ではそれを省略できる等の利点がある。

(3) 川重 3.6 t m (ダウンザホール式)

この型式は工研式 2.5 m 掘削機と構造的に同一である。岩を掘削するためにはカッターを大きい力で岩に押しつける必要があり、前項の2機種ではドリルカラーと呼ばれる重錘をドリルビット直上の部分に取り付けて作りだされていたが、この型式ではグリッパージャッキと呼ばれる油圧装置を本体の上・下段にグリッパシユを張り出し孔壁に押しつけてトルクの反力や推力用シリンダーの反力をとるようになっている。このため残機本体の重量の軽減と、ジャッキ操作による推進方向を制御できるように考慮されている。

実験結果について

(1) ビット荷重と掘削速度

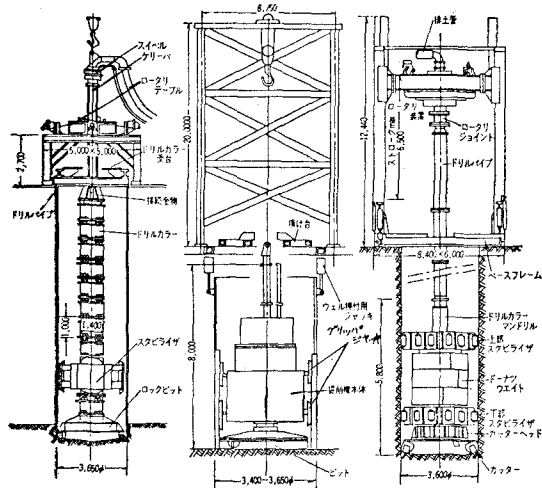
図-2は実験結果から得たビット荷重と掘削速度の関係を示した一例である。また本実験中得られた最大能力として $1.2 \frac{m}{h}$ 前後を記録することが出来た。ビット回転数を決める方法として Hughes 社方式では

$$N_{max} = \frac{266}{d} \cdot N$$

N: ビット回転数 (r.p.m.) d: ビット口径 (m)

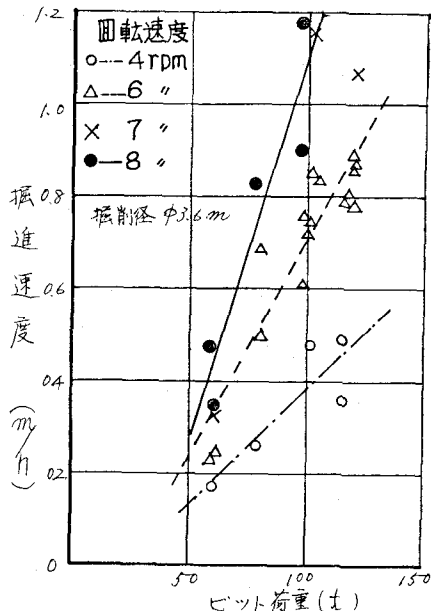
$$d = 3.6 \text{ m とすれば } N \approx 10 \text{ r.p.m. とする。}$$

本実験では3機種ともビット回転数は8 r.p.m. と 10 r.p.m.



(a)ロータリテーブル型 (b)ダウンザホール型 (c)パワースイベル型
図-1 3.6 mロータリ掘削機全体図

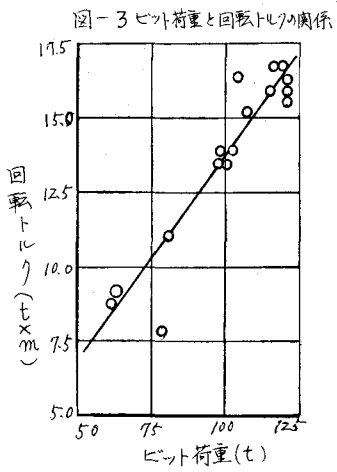
図-2 ビット荷重と掘削速度の関係



で掘進速度の差が殆んどみとめられなかったため $N_{max} = 8 \text{ t.p.m.}$ が上限と考えられるが、実用回転数は 6 t.p.m. 程度が妥当であると考えられた。またビット荷重については各機種とも最高荷重付近における掘進速度の伸び率の鈍化現象は認められさらに直線的に伸びる傾向を示しているが、通常の掘削においては孔曲りを防ぐためドリルスティングの $1/3$ 程度を吊って掘削する場合を想定すれば掘進速度は大巾に低下すると思はれるのでドリルスティングの重量の増加が予想される。

(2) ビット荷重と掘削トルク

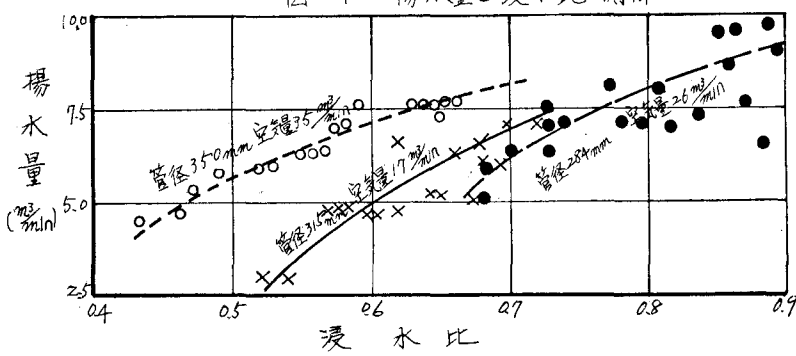
図-3も本実験で得たビット荷重に対する掘削トルクの関係を示した一例であるがこのなかには残骸の空転トルクも含まれており、空転トルクを差引いた値が掘削に要したトルクであり正確な掘削トルクは各機種とも大差はなかった。また各機種の最大掘削速度のとき所要トルクを残骸側の設計トルクと比較し、設計トルクに対する所要トルクの比率を求めると $55 \sim 65 \%$ となり、最大能力時において $35 \sim 45 \%$ と可成り余裕を残していた。



(3) 揚水量と浸水比

エヤリフトによる揚水量はドリルパイプの浸水比に大きく左右され、また使用空気量、ドリルパイプの内径にも関係するが実験で得られた結果を図-4に示した。掘削面に生ずる掘削屑の排除すなわちクリーニングは、揚水量の大小のほかに吸込み口の形状、取り付け位置によっても左右され、掘削速度やローラビットの摩耗に著しく影響をあたへるものであるが、上記掘進速度などの曲線から推定してみるとほぼ充分であり、ローラビットの摩耗も殆んど認められなかった。

図-4 揚水量と浸水比の関係



高压噴流水掘削装置実験

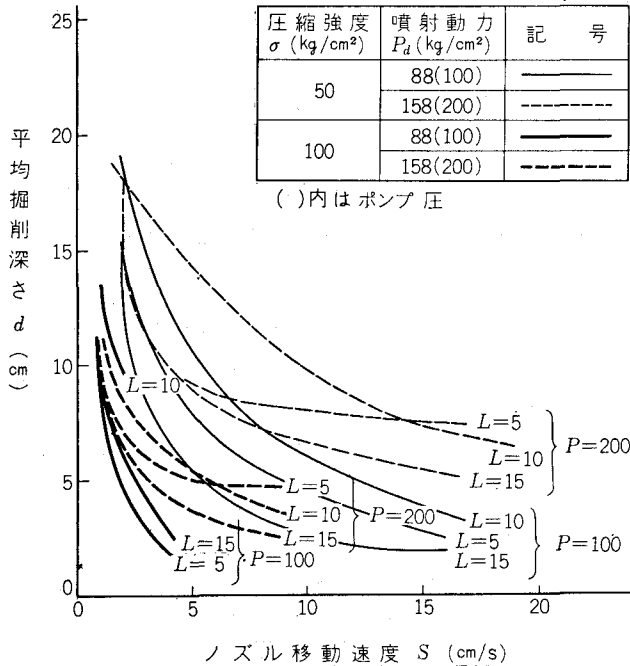
この実験は公団が試作した高压噴流水掘削装置の掘削能力の把握、面掘削への適応性、コンクリートレイタンスの除去と打込細目処理の確認うために行なったものである。

掘削対象地質としては圧縮強度 $50, 100, 200 \text{ kg/cm}^2$ のセメントモルタルの擬似岩盤と地山について行なった。

まず基礎的実験としてセメントモルタルについて一列の溝掘削を行い、噴射動圧 (P_d)、ノズル移動速度 (S)、ノズル噴射距離 (L)、による掘削幅 (b)、掘削深 (d)、掘削量 (V) の変化を調べることとし、噴射圧及び水量は 200 kg/cm^2 で 200 l/min 、 100 kg/cm^2 で $1,100 \text{ l/min}$ であり使用する

ノズルの口径は噴射圧力により異なり $P=100 \text{ kg/cm}^2$ の場合 $\phi=13.2 \text{ mm}$, $P=200 \text{ kg/cm}^2$ の場合 $\phi=6.0 \text{ mm}$ であった。

図-5 ノズル移動速度と掘削深さ(水平溝切り)の関係



P_d (kg/cm ²)	L (cm)	気中 A	記 号
30 (50)	10	W	x—x
88(100)	10	A	□
	10	W	●—●
	20	W	⊙
	30	W	▲
158(200)	10	W	○—○
	30	W	△

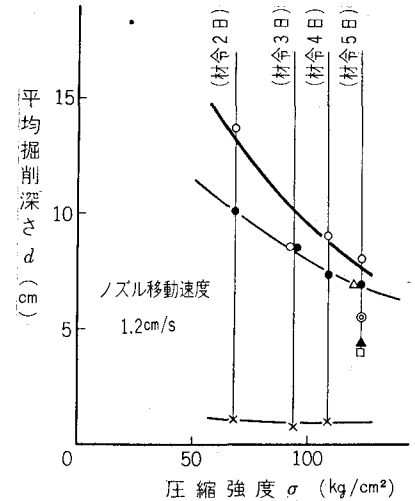


図-6 圧縮強度と平均掘削深さの関係

掘削深さ (d), モルタル強度 (G), ノズル移動速度および噴射距離 (L) の関係を示すと図-5 のとおりである。

噴射圧力が大きく、ノズル移動速度が遅くなると掘削深さは深くなる。また、移動速度が 2.5 cm/sec 以下になると噴射距離による差もなくなり、強度が又倍になると、掘削深さは $1/2$ となる結果が得られた。

また、強度と掘削深さの関係は、モルタルを強度ごとに同一条件 ($S=1.2 \text{ cm/sec}$) で掘削したとき圧縮強度と掘削深さの関係図-6 から同様の傾向がうかがえた。

ただ、噴射圧力 50 kg/cm^2 の場合、掘削深さの強度による差はないが、値は非常に小さい。

地山面掘削の場合のノズル移動速度、掘削量の関係を図-7 に示す。地山面掘削では $P=100 \text{ kg/cm}^2$, $L=3 \text{ cm}$, $S=15 \text{ cm/sec}$ で $V=44 \text{ m}^3/\text{h}$ と最高の能力を示した。

P_d (kg/cm ²)	L (cm)	記 号	注
30 (50)	50	x—x	1. P_d : 噴射動圧
88(100)	30	●—●	()はポンプ圧
	50	⊙—⊙	L: 噴射距離
158(200)	50	○—○	2. 地山
	100	△—△	σ 年 35 kg/cm ²

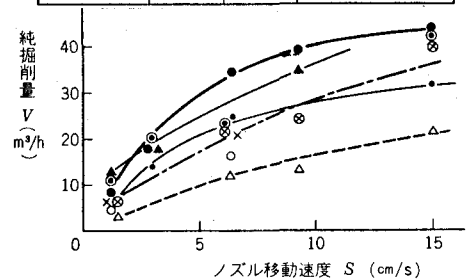


図-7 ノズル移動速度と掘削量との関係(地山面掘削)

以上,