

海底砂地盤の掘削とその応用

CUTTING OF SANDY SEA FLOOR AND ITS APPLICATION

島 昭 治 郎*

By Shojiro HATA

1. 緒 言

近年海中構造物の施工，パイプラインや海底ケーブルの埋設など海底地盤を掘削することが多くなってきている。施工目的および海底地質の相違によりその掘削工法も種々のものがあるが，著者は最近日中間海底ケーブルの埋設にかかわる機会があったので，その経緯について述べてみたいと思う。海底砂質地盤の掘削に関する基礎的研究から始まって，模型実験・実物実験を経て新しいケーブル埋設機を開発し，それを用いて現在世界最長の 770 km の埋設に成功した経過をここにとりまとめて報告するものである。

前報¹⁾において砂質土を掘削する場合，その刃にかかる掘削抵抗を土圧論を用いて求めるのは適当でないことを述べた。著者は以前に掘削抵抗を推定するための現場試験方法について報告した²⁾が，この方法は砂質土に対して有用性の高いことが今回の海底砂質地盤の掘削において明らかとなった。

本論文の前半においては，前の報告³⁾と一部重複するところ（図—10, 11, 14）もあるが，砂質土に関する基礎的な掘削問題をとりあげ，さらに今回の研究で明らかとなった水底砂質土の掘削特性について詳述するとともに，海底砂地盤の調査法についても言及した。

後半においては，これらの研究成果をふまえて，どのような考え方で新しいケーブル埋設機の開発にあたったか，またどのような段階を経て実用機に到達したかについて詳しく述べるとともに，最後に実際に施工を行った結果について，作業中の実測データに基づいて報告している。

2. 砂質土の掘削抵抗

(1) 比掘削抵抗測定方法とその物理的意味

砂質土の掘削抵抗を推定するためには，これと密接な関係をもつ値を現場で簡単に求めることが必要となる。この値（比掘削抵抗）はもちろん測定方法によって異なってくるものであるが，ここでは，以下に示すような方法を用いることとした。

図—1 に示すように，幅 B の鋼板を地盤をゆるめないうちに地表面に直角に深さ t だけ押しこみ，鋼板の上端を引張って固定支点 A のまわりにできるだけゆっくり（鋼板の回転角速度で $1^\circ \sim 2^\circ/\text{sec}$ 程度）掘り返したとき最大力 P を測って，次式で計算される値 R_s をその土の比掘削抵抗とするものである。

$$R_s = \frac{Pl}{Bt^3} \dots\dots\dots (1)$$

この値は後述するように掘削抵抗に正比例するから，この値がわかればその土の掘削抵抗が推定できる。

式 (1) を変形すると，

$$R_s t = \frac{Pl}{Bt^2}$$

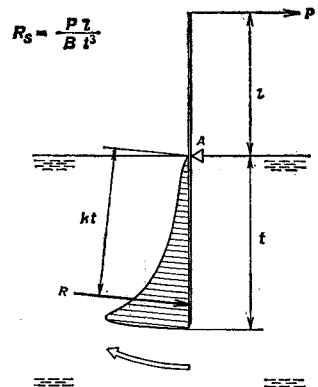
図のように，抵抗 R の A 点からの距離を kt ($0 < k < 1$) とすれば， A 点のまわりのモーメントのつり合いから，

$$Pl = Rkt$$

が得られ，これを前式に代入すると，

$$R_s t = \frac{kR}{Bt}$$

となる。右辺は版面



図—1 比掘削抵抗 R_s の測定方法

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

にかかる平均抵抗に k を乗じたものであるから、平均抵抗が深さに比例して増大するとしたときの比例係数が R_s すなわち比掘削抵抗ということになる。

なお、比掘削抵抗値は板幅 B が小さくなるほど大きくなるから、試験法として $B=50\text{ mm}$ を用いることとする。

(2) 比掘削抵抗の性質³⁾

一様につめた砂の場合比掘削抵抗 R_s はその測定深度 t に無関係に一定となる。その一例を図-2 に、用いた砂の粒度曲線を図-3 に示す。なお、図-3 中にはあとで使用するものも一緒に記入してある。このように均質な砂質土のときは測定する深さは1種類でよく、測定誤差の小さいもの、たとえば鋼板の重量の影響が鋼板をたおしたときに現われない程度の深さで行えばよい。以後とくに断りのない場合は $t=10\text{ cm}$ における値を示すものとする。

次に、一様につめた種々の粒子の気乾状態および水浸状態における比掘削抵抗の値を図-4~7 に、用いた試料の粒度曲線を図-8 に示す。

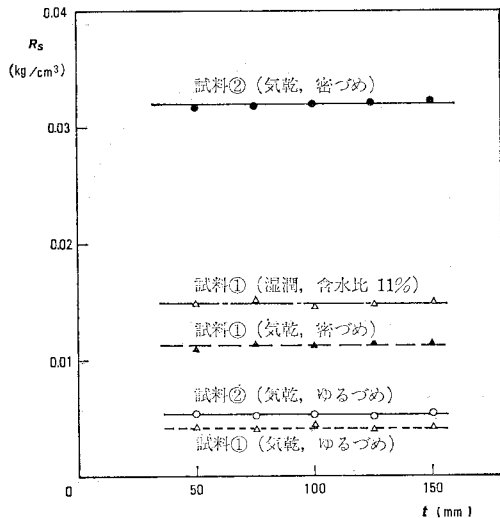


図-2 比掘削抵抗 R_s と測定深さ t (図中の試料番号は 図-3 のもの)

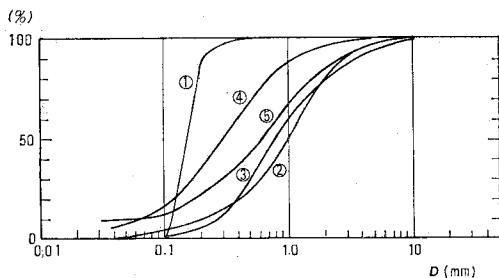


図-3 試料の粒度曲線

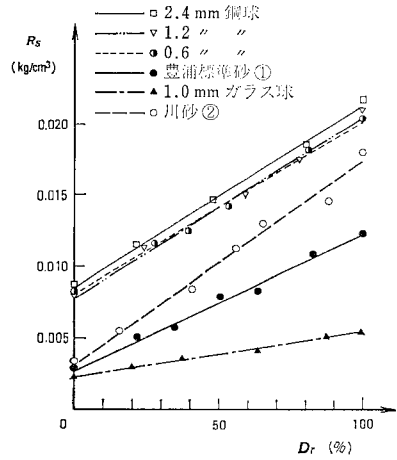


図-4 粒径のそろった試料の比掘削抵抗 R_s と相対密度 D_r の関係 (気乾状態)

図-4 には粒径のそろった砂および比較のため鋼球とガラス球のものを示している。図のように粒径のそろったものでは、比掘削抵抗 R_s は相対密度 D_r の増加に伴って直線的に増大していることがわかる。

比掘削抵抗を支配するものは、粒子の真比重、粒子間の摩擦あるいはかみ合いおよび粒子の移動に対する拘束性の3つと考えられる。まず、真比重については、粒子間の摩擦があまり違わないと考えられる鋼球とガラス球に関する値をみるとわかるように、 R_s はほぼ真比重に比例していることは明らかである。

次に、真比重がほぼ等しいものとして図中の下方の3つすなわち粒径の大きい粒形の角ばった川砂、粒径の小さい豊浦標準砂およびガラス球の直線が示すように、この順に粒子間摩擦が小さくなるため、比掘削抵抗 R_s もこの順に小さくなっている。

拘束性は相対密度であらわされると考えられ、 R_s は D_r に比例して大きくなっている。

次に、鋼球の分を除いて他の3種類すなわち川砂、豊浦標準砂、ガラス球を水浸状態にして比掘削抵抗 R_s を

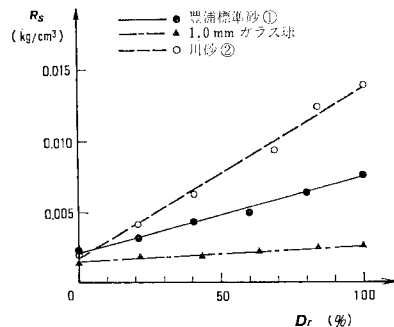


図-5 粒径のそろった試料の比掘削抵抗 R_s と相対密度 D_r の関係 (水浸状態)

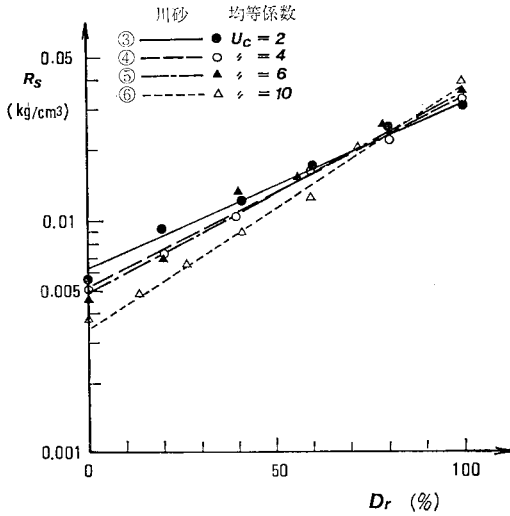


図-6 粒径のそろっていない試料の比掘削抵抗 R_s と相対密度 D_r の関係 (気乾状態)

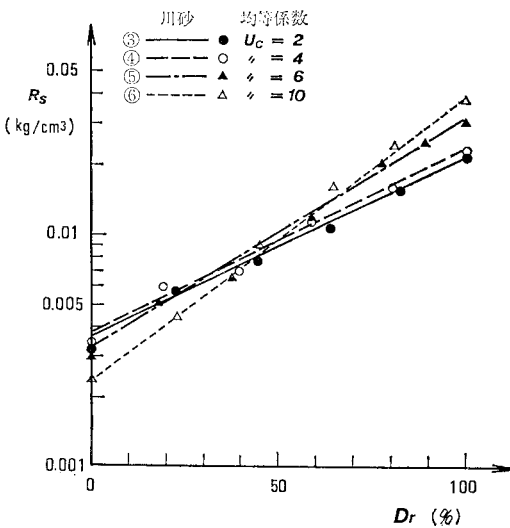


図-7 粒径のそろっていない試料の比掘削抵抗 R_s と相対密度 D_r の関係 (水浸状態)

測定したところ、図-5 のようになり、やはり相対密度 D_r と直線関係にあるが、絶対値そのものは粒子の水中重量に比例して気乾状態のものよりも低下している。

図-6 および 図-7 は粒径のあまりそろっていない試料に対する気乾および水浸状態のものである。用いた試料は、図-8 の ③~⑥ で、平均粒径をほぼ 1.0 mm に一定して均等係数 U_c の、値を 2, 4, 6, 10 の 4 種に調整したものである。

これらの図からわかることは、 $\log R_s$ と D_r とが直線関係にあること、均等係数 U_c の値が大きくなるほどその直線の勾配が大きくなること、気乾と水浸とを比較するとばらつきはあるがやはり真比重と水中重量との差

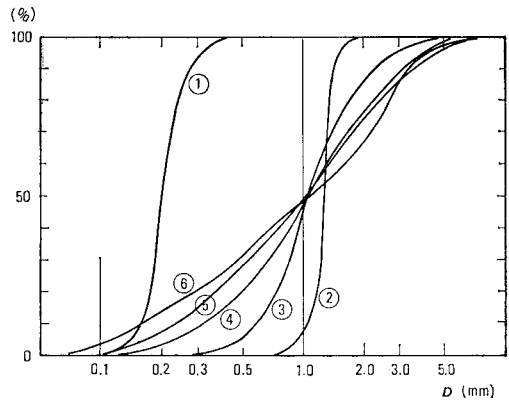


図-8 試料の粒度曲線 (① 豊浦標準砂, ②~⑥ 川砂)

がほぼ比例の形であらわれていることである。

このようにして、砂質土の比掘削抵抗 R_s は、粒子の重量、粒子形状、均等係数および相対密度の関数で表わされるが、その関数形はまだデータが少なく明らかにはなっていない。今後さらに多くのデータを解析してこの関数形を求めることができれば、海底地盤のように直接比掘削抵抗を測定することが不可能な場合でも、その地盤の不攪乱試料を採取することさえできれば、その粒度分布、粒子形状、比重および相対密度を知ることによってその地盤の比掘削抵抗を間接的に求めることができるわけで、今後の海底砂質土の不攪乱試料採取技術の発展が期待される。これが困難であれば、他の方面からのアプローチ、たとえば、中性子水分計によって海底砂地盤中の水量を求め、この値から飽和砂の間隙比を求めることが考えられる。

(3) 平刃による砂質土の掘削抵抗

図-9 で記号の説明をしておく。刃のすくい面が地表面の法線となす角 α をすくい角、刃の裏側すなわちげ面が地表面となす角 θ をげ角とよぶ。刃幅を B 、掘削深さを t とするとき、刃面にかかる掘削抵抗は、刃面の法線に対して角 δ (刃面と土との間の摩擦角) だけ傾いて図のように作用する。この抵抗の水平分力を H_α 、垂直分力を V_α (いずれも図の矢印の方向を正とする)

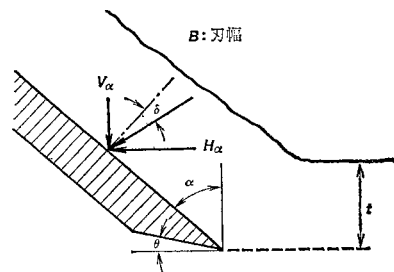


図-9 平刃による掘削

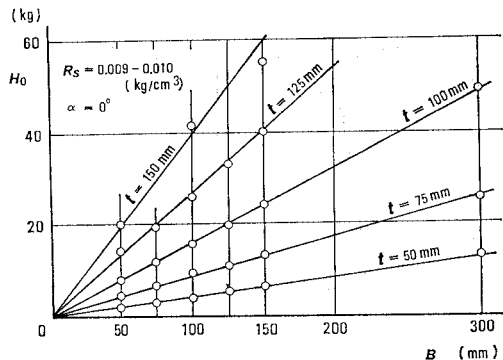


図-10 掘削抵抗 H_0 と刃幅 B の関係

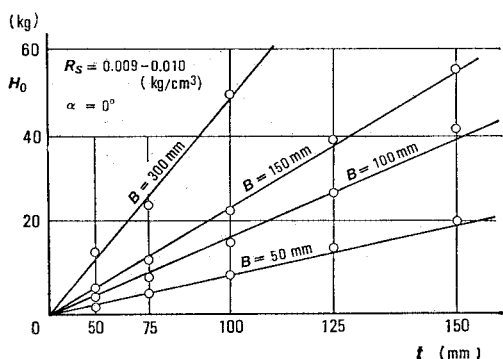


図-11 掘削抵抗 H_0 と掘削深さ t の関係

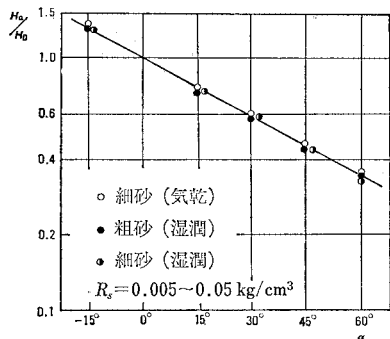


図-12 掘削抵抗とすくい角の関係

とする。ここで添字 α はすくい角が α のときの値を示すもので、 $\alpha = 0^\circ$ のときはそれぞれ H_0 、 V_0 となる。

さて、刃幅 B 、掘削深さ t およびすくい角 α を種々に変えて、砂質土に対して数多くの実験を行った結果、図-10、11 および 図-12 のようになり、これらをまとめると次式で表わされる。

$$H_\alpha = K_s B t^2 10^{-0.45\alpha} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 α はラジアンで表わすものとする。もし α を度で表わすときは、10 の指数は -0.008α となる。また、 K_s は比例係数であるが、これと比掘削抵抗 R_s とを比較してみると 図-13 のように正比例の関係にある

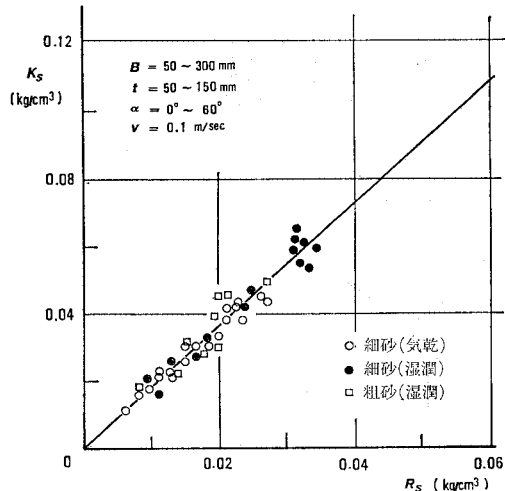


図-13 式 (2) における比例係数 K_s と比掘削抵抗 R_s の関係

ことがわかる。この図と式 (2) とから結局、

$$\left. \begin{aligned} H_\alpha &= 1.8 R_s B t^2 10^{-0.45\alpha} \\ V_\alpha &= H_\alpha \tan(\alpha - \delta) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

が得られる。ここで、 V_α は幾何学的に算出される。

(4) 水底砂質土の掘削抵抗

砂質土が気乾状態か、湿潤状態であっても不飽和のときは、図-14 のように掘削抵抗は掘削速度にほとんど影響されず、ほぼ一定の値を保つ。図においては、掘削速度の変化範囲はあまり大きくはないが、同程度の掘削速度範囲であっても、水浸状態の砂質土を掘削すると掘削速度の影響を大きく受けて、掘削抵抗がほぼ直線的に増大する現象がみられた⁴⁾。この理由として次のようなことが考えられる。

掘削刃の進行に伴ってその前方に土のせん断破壊が生じるが、ダイレイタンスーにより体積が膨張し間隙水圧が下がろうとする。もし掘削速度が非常に小さいとき

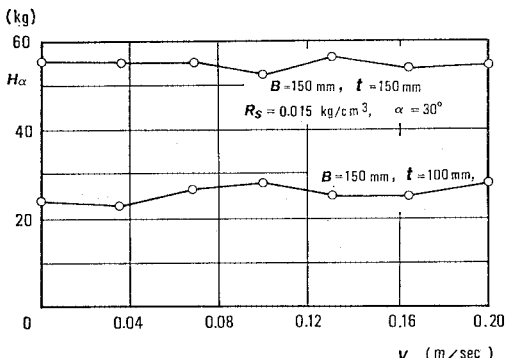


図-14 掘削抵抗 H_α と掘削速度 v の関係 (気乾あるいは不飽和砂)

は、砂の透水係数が大きいと周りの水がただちに進入してきて間隙水圧はもとの状態に戻る。しかし掘削速度が大きくなると、いくら透水係数が大きいといってもせいぜい 10^{-1} cm/sec 程度であるから、膨張した空間への水の補給がまにあわなくなり、間隙水圧は下がったままで有効応力が増すためにせん断抵抗が増え、結局掘削抵抗が増大することになる。

以上の考え方が正しければ水底砂質土の掘削抵抗は、その土の透水係数が小さいほどまた掘削速度が大きいほど増大するはずである。これを確かめるために次のような野外実験を行った。

地面に幅 3 m、長さ 30 m、深さ 0.8 m のピットを掘り、その中に砂と水を入れて水深 0.2 m、砂層の厚さを 0.4 m にならした。用いた砂試料の粒度曲線は 図-3 の ③、④、⑤ で、その透水係数はそれぞれ 1.2×10^{-1} cm/sec、 1.1×10^{-2} cm/sec、 5.0×10^{-3} cm/sec であった。

刃は両側にそりを有する鋼製棒に固定してジープで引張ったが、そりは沈下を防ぐため十分な面積を有するものとした。実測結果の一例を 図-15 に示す。図-15 の測定点をまとめて無次元表示すると 図-16 のようになり、掘削抵抗は結局 $(a + bv/k)$ に比例することとなり、上述の考え方が誤りではないことを示している。

ダイレイタンシーでいくらか負の間隙水圧が発生しても真空以上にはなりえないから掘削抵抗が速度とともにどこまでも増大してゆくものかどうかという疑問が残るが、速度が小さいうちはほとんど無視できる程度の流体抵抗が存在し、これは速度の自乗に比例するから、図-17 のようにダイレイタンシーによる抵抗増加分 ① は頭打ちになっても流体抵抗 ② は速度が大きくなると急増するため、その合計としての抵抗 ①+② は、ほぼ直線的に増大するものと考えられる。ここで流体抵抗としては、刃が水中を動くときの水の抵抗を考えている。

3. 海底ケーブル埋設機の開発

(1) ケーブル埋設機開発の必要性

昭和 48 年に日中間海底通信ケーブルが長崎—上海間に敷設されることが決定し、その建設および保守に国際電信電話(株) (以下 KDD とよぶ) が従事することとなった。

そのルートは 図-18、断面図は 図-19 に示されるように、全長約 850 km のうちの大部分は東シナ海の大陸棚上に位置しており、数箇所での予備調査の結果では

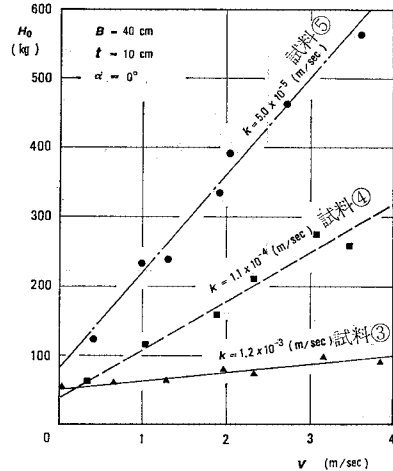


図-15 掘削抵抗と速度の関係(水浸状態)
(図中の試料番号は 図-3 のもの)

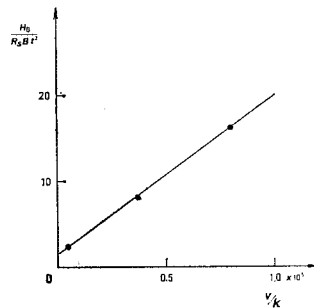


図-16 掘削抵抗と掘削速度および透水係数との関係

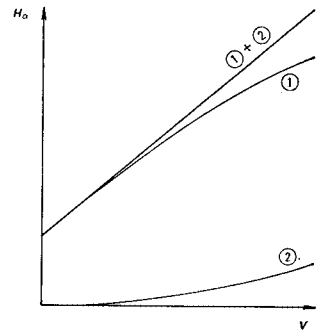


図-17 全掘削抵抗(①+②)が掘削抵抗①と流体抵抗②との和になることの説明図

図-19 に記入してあるように、ほとんどが薄い泥層をかぶった細砂あるいはシルト質の比較的軟らかい地盤である。

周知のように同海域は有数の底びき網漁場であり、1 t 以上もある重いトロールボードをつけて海底をひきずりまわるため、ケーブルを単に海底に沈めただけではケーブル破損あるいは切断事故が頻発することは明らかである。そこで海底面下に埋設することが考えられ、種々検討の結果 0.7 m の深さに埋めることを目標として、その埋設工法を開発することとなった。

現用ケーブル埋設機には、ジェット水によるものと鋤状の刃で掘削するものの 2 種があるが、前者はジェット水流の反力のため機体が安定しないきらいがある。後者の例としてアメリカ—スペイン間の大西洋横断ケーブル TAT-6 に使用されたものを 図-20 に示す⁹⁾。

通信ケーブルは同軸で無外装の場合、直径約 40~60 mm であるが、信号を増幅するためリピーターとよばれる中継器が数 km ないし 10 数 km ごとにケーブルの間

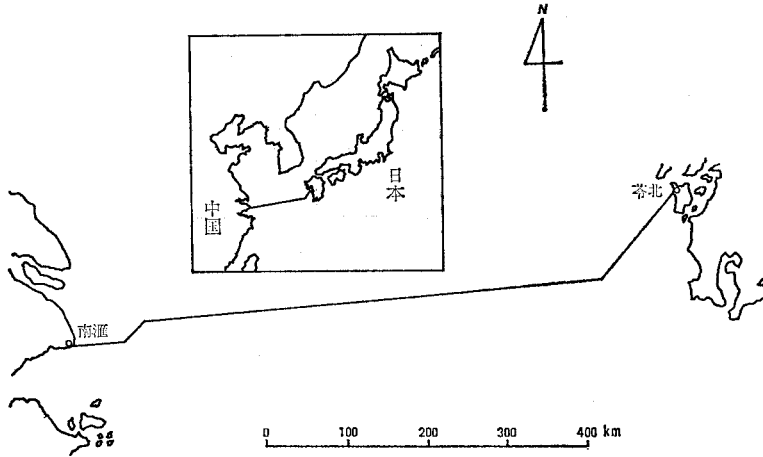


図-18 日中海底通信ケーブル敷設ルート

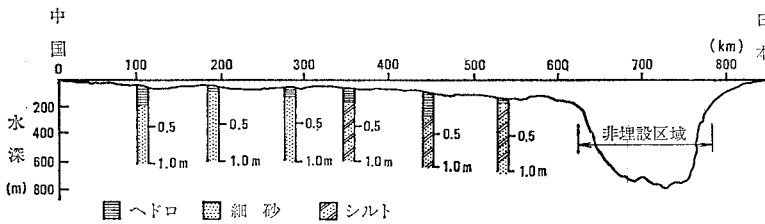


図-19 日中海底ケーブル敷設ルート縦断面

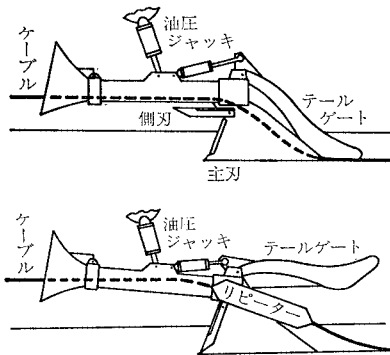


図-20 アメリカ-スペイン大西洋横断ルート TAT-6 に使用されたケーブル埋設機の主要部分 (Duncan⁵⁾ による)

に入ってくる。中継器の直径は 230 mm くらい、長さは約 2 m あり、これを同じ深さに埋めるのに工夫がされている。

ケーブルのみが通っているときは、上の図のように主刃のみで溝を掘ってゆくが、リピーターが入ってきてテールゲートを押し上げると、油圧ジャッキによって側刃がおりてきて溝幅をひろげるようになっている。このように非常にうまく作られているが、自重が 20 t 近くあり、掘削抵抗も 30 t に達するほか、油圧装置や水中テレビなど複雑な機構を備えている。ところが、KDD が保有しているケーブル敷設船 KDD 丸は 4500 t ぐらい

の中型で、クレーン容量 10 t 程度、最大けん引力も 25 t ぐらいで、とても上述のような大型の埋設機を使用することはできない。そこでもっと軽量で掘削抵抗も少なく、しかも単純で操作の簡単な埋設機を開発する必要が生じてきた。

(2) 多段刃方式について

埋設機のけん引抵抗に関係してくるのは、主として式 (3) で表わされる掘削抵抗水平分力 H_a であるが、これは、 $Bt^2 10^{-0.45\alpha}$ に比例するから、抵抗を小さくするにはこの各項を小さくすればよい。しかし、 t は与えられているし、幅 B も深さ t の溝を掘るためには自らある範囲をこえて小さくすることはできない。すくい角 α は大きくすることが可能であるが、これだけでは到底まかないきれない。

い。

そこで、均質な砂質土の場合には比掘削抵抗 R_s の値が深さに無関係に一定であるという事を利用して、与えられた深さ t を数段階にわけて掘削する、いわゆる多段刃方式を考えてみることにする。

a) 多段刃の刃数 n

いま仮に、比掘削抵抗 R_s およびすくい角 α を一定とすれば、幅 B 深さ t の溝を掘るとき抵抗は次のようになる。

$$H_1 = KBt^2, (K=1.8 R_s 10^{-0.45\alpha})$$

ここで、 H_1 は 1 枚の刃で掘るとき抵抗を表わす。次に n 枚の刃でそのおのおのが t/n ずつ掘ってゆく場合を考え、最もせまい n 番目の刃幅を B とし、その前段の刃幅が等差級数的に増えてゆくものとする。そして、先行刃は後続刃に対してまったく負担をかけない、すなわち、先行刃の前面に盛上がった土がその刃をのり越えて後続刃の前に落ちることがなく、また先行刃の掘った溝が後続刃が進んでくるまでは崩れないことが保障されるならば、全抵抗 H_n は

$$H_n = K(t/n)^2 \left\{ nB + \frac{n(n-1)}{2} a \right\}$$

となる。ここに、 a は連続した前後の刃幅の差である。

H_n と H_1 を比較すると

$$\frac{H_n}{H_1} = \frac{1}{n} + \frac{n-1}{2n} \frac{a}{B}$$

となる。仮に $a=2(t/n)$ とおけば上式は、

$$\frac{H_n}{H_1} = \frac{1}{n} + \frac{n-1}{n^2} \frac{t}{B}$$

となり、与えられた設計条件 ($t=0.7\text{m}$, $B=0.3\text{m}$) を用いてこの式を計算し図示すると 図-21 のようになり、 $n=6$ のときに抵抗が 1/2 に減少することがわかる。

図で n をもっと大きくすれば抵抗はさらに小さくなる

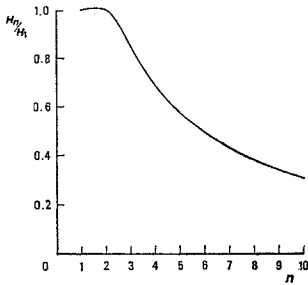


図-21 多段刃の刃の枚数 n と掘削抵抗

が、あまり段数を大きくすると埋設機の全長および自重が大きくなって好ましくない。また、図の計算根拠となっているところの、先行刃が後続刃にまったく負担をかけないという仮定が実際に満足されているかどうかは明らかでないから、

段数 n の決定は最終的には実験によることとした。

b) すくい角 α と横すくい角 β

先行刃の前にたまった土が後続刃の前に落ちてこないようにするためには、刃に後退角をつけて掘り上げた土砂をできるだけ速やかに側方に排除する必要がある。この後退角を横すくい角 β とよぶこととし、これが掘削抵抗にどう影響するかを調べるため 図-22 に示すような形状の刃を用いて掘削実験を行った。刃の寸法としては、 $t=100, 150, 200, 300\text{mm}$ の 4 種、 $B=100, 150, 200, 300\text{mm}$ の 4 種、 $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ の 5 種 $\beta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ の 4 種の組合せを用いた。

実験の結果を 図-23 に示す。図中の破線は式 (3) を

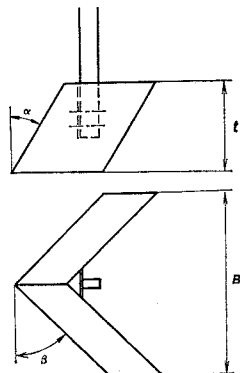


図-22 すくい角 α 、横すくい角 β の影響をみるために用いた刃の形状

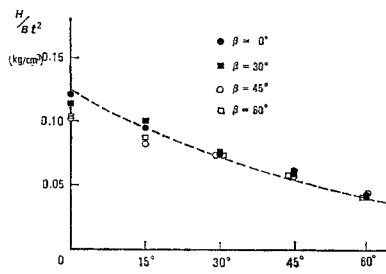


図-23 掘削抵抗に及ぼす α, β の影響

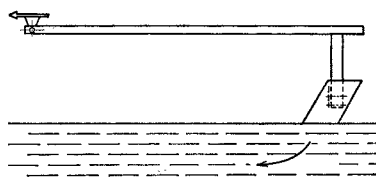


図-24 刃先の軌跡を求めるための装置概要

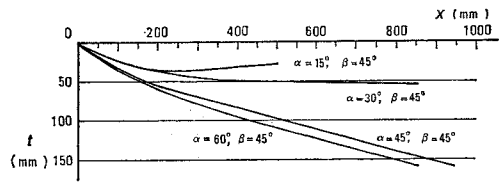


図-25 刃先の軌跡とすくい角 α の関係

表わしている。実験の方法は 2.(4) で述べた野外ピットで行ったものと同様であるが、掘削速度はできるだけ小さく 0.1 m/sec 以下に押えた。抵抗値は水中のため大きな変動はなく、ある一定距離掘削するとほぼ一定値となるので、図-23 にはこの一定になった値をプロットした。

図-23 からわかることは、掘削方向へ投影した刃幅 B が一定であれば掘削抵抗は横すくい角 β にはほとんど影響されないこと、および水中掘削においても式 (3) の関係が成立することである。

すくい角 α は大きいほど抵抗が小さいが、これをあまり大きくするとにげ角 θ が小さくなりすぎて、刃の裏側が地面にあたることとなり、深く掘り下げることが困難になると同時に、刃と刃の距離もせまくなって土砂がつまりやすくなる。刃先の入る軌跡をみるために 図-24 のように一端ヒンジの長いアームの先に刃をとりつけ、一定の荷重のもとで刃先の進行方向をみたところ、図-25 のようになり、 $\alpha=60^\circ$ くらいが適当との結果がえられた。

横すくい角 β については、抵抗にも刃先の進入方向にもあまり関係しないが、刃前面の土砂を速やかに側方へ流すためにはある程度以上大きくなくてはならない。しかし、これをあまり大きくすると、一定刃幅 B を保持するための刃の実際長が大きくなりすぎ、また刃と刃のすき間もせまくなるため好ましくない。ここでは中間をとって $\beta=45^\circ$ とすることにした。

e) 刃と刃の間隔 d

多段刃における刃と刃の間隔は重要で、大きすぎると先行刃の掘った溝が後続刃がくるまでに崩れて多段刃の特長を發揮することができず、逆に小さすぎると土砂がたまって流れが悪くなりよく掘れないことになる。

そこで 図-26 のような二段刃で間隔 d を変えたときの全抵抗がどうなるかを調べてみた。図において α と β はともに 45° 、先行刃の高さ t は 100 mm 一定とし、刃幅のみ 150, 200, 300 mm の 3 種を用い、後続刃としては $t=200\text{mm}$, B

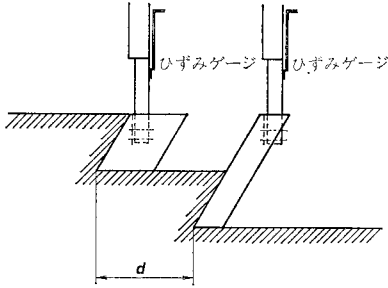


図-26 2枚刃で刃間距離 d の影響をみるための実験方法

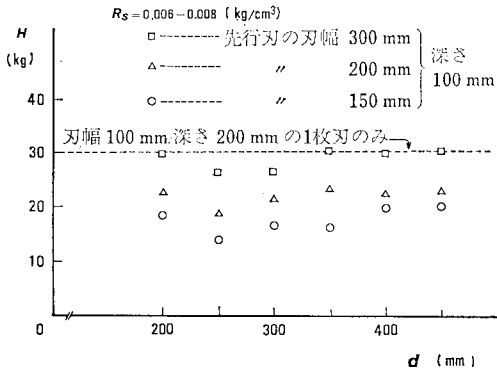


図-27 全掘削抵抗 H と2枚刃刃間距離 d

=100 mm の1種のみを用いた。抵抗の測定には刃の取付部に貼付したひずみ計と、これらの全体をのせた台車のけん引抵抗とから算出した。

図-27 に実測の結果を示す。各プロットはそれぞれ2枚の抵抗の和であり、破線で示したものは先行刃を除去し、後続刃1枚のみで掘ったときの抵抗である。図からわかるように、1枚のみの場合抵抗が最も大きく、多段刃の考え方の正しいことを示している。また先行刃の刃幅はせまい方がよい結果を与えているが、これも余掘りの少ない方がよいことを示している。刃間隔 d としては 250~300 mm すなわち各刃の担当掘削深さの 2.5~3.0、場合によっては 3.5 倍くらいが最適である。

d) 掘削速度の影響

水浸状態の砂質土を1枚刃で掘削するとき、掘削速度を大きくすると、図-28 のように掘削抵抗が速度に比例して増大するのは前述のとおりである。またこれらの測定点が速度零の線で収れんする点は、図中の矢印で示したように式(3)で計算した値とほぼ一致する。

海底ケーブル埋設速度は 2~4 ノットであるから、秒速にすると 1~2 m となり、式(3)で計算した値の数倍から 10 倍くらいになる。これはきわめて不都合なことで、苦心の掘削抵抗軽減策がこれだけですべて無駄になってしまう。ところが、幸いなことに 図-29 に示すような多段刃を用いて掘削を行うと、図-28 の破線の

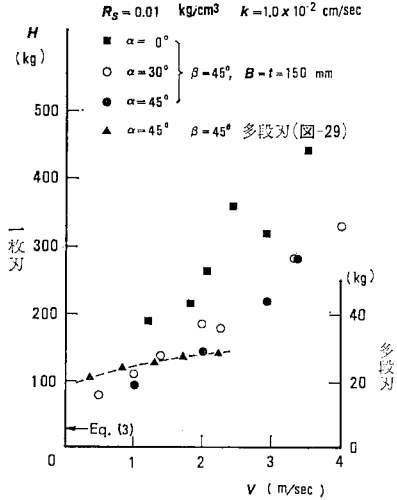


図-28 水底砂質土の掘削抵抗 H と掘削速度 v

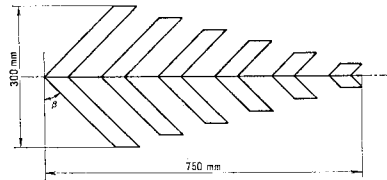


図-29 多段刃模型

ように速度が 2 m/sec になっても掘削抵抗は 1.4 倍にしかならないことが確認された。

この理由として考えられるのは、多段刃は1枚刃と異なり1枚ごとの掘削深さが小さいため、せん断破壊面と自由水との距離が短くなり、負の間隙水圧発生箇所への水の供給経路が短くそれだけ速やかに負圧が消滅し、掘削抵抗に及ぼす掘削速度の影響がそれだけ小さくなるからであろう。

4. 模型実験と相似律

前節の推論を確かめるためと実機の掘削性能を推定するため、図-30 のような形の模型を用い種々の条件のもとで、最大掘削深さ h と最大掘削抵抗 H を測定した。図のものは2つの部分からなっていて、前方の五角形のはうしろの本体が掘削中に左右にたおれないように支えている安定翼である。後半分は埋設機本体で形状寸法は 図-29 のものと同じである。横すくい角 β は 45° 一定、すくい角 α は 30°, 45° および 60° の3種類、

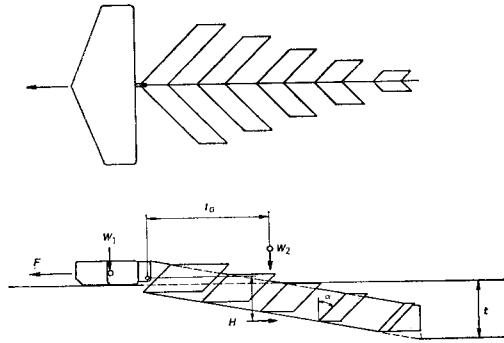


図-30 多段刃型埋設機にかかる外力

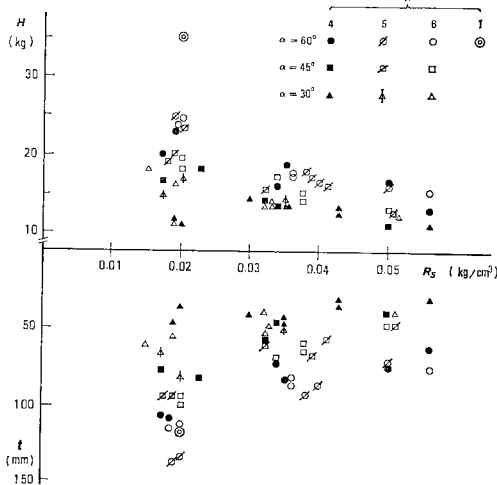


図-31 多段刃模型による実験結果

刃の段数 n は 4, 5, 6 の 3 種類とし、刃間距離 d はいずれも 135 mm 一定とした。

実験結果を 図-31 に示す。図中 ⊙ は参考のために 1 枚刃で $\alpha=60^\circ$ で多段刃のものとはほぼ等しい深さに固定して掘削したときの抵抗を示したもので、6 段刃の場合の約 1.5 倍になっている。前節 図-21 によれば理論的には約 2 倍になるはずのところであるが、図-31 の実測値（6 段刃）の方には安定翼の摩擦抵抗が含まれているのに対して、1 段刃のものはそれが無いので、このような結果になったものと考えられる。

この図をみると、 $\alpha=60^\circ$ のものがやはり最もよく掘れると同時に、掘削抵抗もあまり大きくないことがわかる。刃の段数 n については、比掘削抵抗 R_s の小さいときは 5 枚刃の方がよく入っているが、 R_s にある程度敏感であるのが気になる。実際にケーブルを埋設するルート of 日本側の海岸で実測した R_s は 0.04 kg/cm^2 となっているが、全ルートにわたって測定することは不可能で、採取した海底砂質土をできるだけ密に締固めた試料を用いた R_s の測定から判断すれば、 R_s の値として 0.04 kg/cm^2 をとってあまり大きな誤りはないと思われ

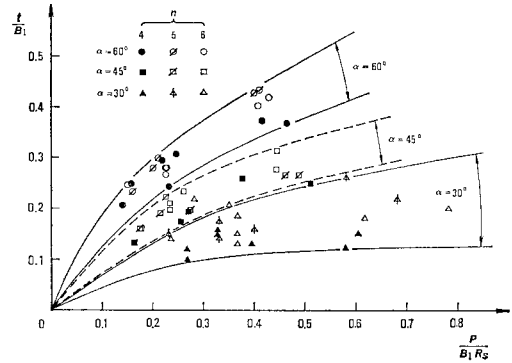


図-32 多段刃の掘削実験結果の無次元表示

るが、もしもっと固い部分があったときのことを考えて比掘削抵抗 R_s に比較的鈍感な $n=6$ の方がよいと思われる。

これまでの模型実験は α と n を決めるために行ったもので、模型の重量はほぼ 10 kg 前後の一定のものを用いた。次に実機 の 特性をつかむために模型の重量を変えて実験を行った。この結果を無次元表示したものを 図-32 に示す。縦軸に最大掘削深さ t と第 1 段目の刃幅 B_1 との比を、横軸に接地圧を $B_1 R_s$ で割った値をとっている。 α や n によるばらつきはあるが、 $\alpha=60^\circ$ 、 $n=6$ をとればほとんどひとつの曲線上にのる。このことは、 α 、 β 、 n 、 v (掘削速度) が一定であれば、

$$\frac{t}{B_1} = f\left(\frac{p}{B_1 R_s}\right) \dots\dots\dots (4)$$

という関数 f が一義的に決まることを意味しており、この関数形が決まれば実機の掘削深さを推定することができる。ここで地盤を代表する値として R_s が非常に大きな意味もってくる。

図-30 にもどって、埋設機がある距離けん引されて掘削深さが最大値 t に達したとき、埋設機にかかる力を考えてみる。 W_1 は安定翼の重量、 W_2 は多段刃の重量でそれぞれの重心に作用する。掘削抵抗水平分力 H を $K_1 R_s B_1 t^2$ と表わし、着力点は結合ピンから下方 $k_1 t$ になるとする。 t は一定のまま進んでゆくから、掘削抵抗の垂直分力と刃先における貫入抵抗はつり合っていると考えられる。

多段刃について、安定翼との結合ピンの周りのモーメントのつり合いから、

$$W_2 l_G = H k_1 t = K_1 k_1 R_s B_1 t^3$$

多段刃が相似形の場合は、ピンから重心までの距離 l_G は寸法に比例するから、 $l_G = k_2 B_1$ とおくことができる。よって、

$$W_2 k_2 B_1 = K_1 k_1 R_s B_1 t^3$$

$$\therefore W_2 = K_2 R_s t^3, \left(K_2 = K_1 \frac{k_1}{k_2} \right)$$

となる。相似形でかつ同じ材料を用いておれば重量 W_2 は寸法 B_1 の三乗に比例する ($W_2=k_3B_1^3$)。また接地面積は B_1 の自乗に比例するから、接地圧 p は結局 B_1 に比例することになる ($p=k_4B_1$)。

さきの式を変形すると

$$t^3 = \frac{W_2}{K_2 R_s} = \frac{k_3 B_1^3}{K_2 R_s}$$

$$\therefore \frac{t^3}{B_1^3} = \frac{k_3}{K_2} \frac{1}{R_s} = \frac{k_3 \cdot p}{K_2 R_s k_4 B_1} = K \frac{p}{R_s B_1}$$

これから式(4)の関数 f の形は $\sqrt{\quad}$ であることとなり、これは 図-32 からもうかがうことができる。係数 K の値がわかれば、実機の掘削可能深さを算出することができるが、いろいろ仮定があり K の正確な値を求めることは困難であるから、図-32 から直接よみとることとする。

全抵抗 F については摩擦抵抗と掘削抵抗水平分力との和と考えられるから、地面との間の摩擦係数を μ とすれば次式のようにになる。

$$F = \mu(W_1 + W_2) + (A/C)1.8 R_s B_n t^2 10^{-0.45\alpha}$$

.....(5)

ここで、 B_n は溝底の幅に当たり、 A は速度による補正係数で 図-28 から、 $A=1.4$ となる。 C は多段刃としたための補正係数で 図-31 から $C=1.5$ となる。

5. 試作機設計のための検討

設計条件の第1として、比掘削抵抗 $R_s=0.04 \text{ kg/cm}^2$ の砂地盤に対して、掘削深さ $t=0.7 \text{ m}$ が与えられている。そこで 図-32 において上の条件を入れ、 $\alpha=60^\circ$ 、 $n=6$ の関係を用いて接地圧 p と第1段刃幅 B_1 との関係を出算すると 図-33 の p 曲線のようになる。次に安定翼の重量 W_1 を 2 t 一定とし、多段刃の方を相似形であるとして刃幅 B_1 から接地面積を求め、これに接地圧 p を乗じて多段刃本体の重量 W_2 を算出し、 W_1 と W_2 の和 W を同図中にプロットする。さらにこの

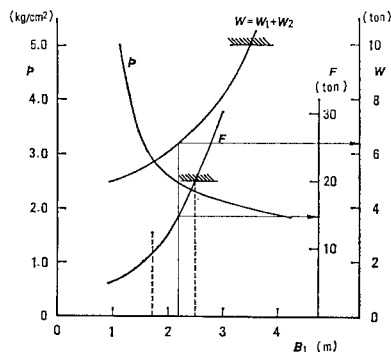


図-33 B_1 を決定するための検討図

値を用いて式(5)から全抵抗を計算し同図中に F 曲線として記入する。このとき μ は実測値として $2/3$ を用いた。また、 $B_n=B_1-2t$ として計算を行ったが、これは $C=1.5$ という補正係数が、相前後する2枚の刃幅の差を $2t/n$ とするという条件のもとに導き出されているためである。

設計条件の第2は、クレーン容量 10 t および KDD 丸のけん引力が最大 20 t というもので、この条件を図-33 中に入れると、第1段目の刃幅は 2.5 m 以下でなければならないことになる。

次に B_1 の下限の方であるが、最もせまい n 段目の刃幅 B_n でも、直径約 0.25 m の中継器が入るだけの溝幅が掘れなければならないから、 $B_n \geq 0.3 \text{ m}$ となり、 B_1 は B_n+2t であるから、 B_1 は少なくとも 1.7 m 以上でなければならない。この両限界を図中に記入すると破線のようになる。

いま、多段刃本体は模型実験で用いたもの(図-29)と幾何学的に相似形であるとして検討を行っているから、第1段目の刃幅 B_1 が決ると本体のディメンジョンは全部決ることになる。

ところが、模型では多段刃本体の中央部が1枚の板になっているが、実際にはこの部分が中空になっている、ケーブルと中継器が通過することになる。したがって接地面積が増し接地圧が下がる。また、 $R_s=0.04 \text{ kg/cm}^2$ 以上の固い地盤に遭遇することも考えなければならない。

このような点を考慮すると、図-33 の p のなるべく小さいところで設計しておいて、あとでおもりを付加するなどして掘削性能を増すようにするのがよいと思われる。

この考え方でゆくと、 B_1 はなるべく上限に近い方がよい。しかし、全抵抗 F は B_1 のわずかな変化でもかなり大きく変動するから、船のけん引力に余裕をもたせる意味では、 B_1 は上限より少し小さい値がよいと思われる。

以上の考察から、 B_1 として 2.2 m をとることに決定する(図-33 中の縦の実線)。この縦の実線が W 曲線と交わるところの W の値は約 6.3 t 、 F 曲線と交わるところの F の値は約 15 t で、これが $R_s=0.04 \text{ kg/cm}^2$ の土をこの実機で 0.7 m 掘ったときの全抵抗の推定値となるわけである(埋設速度は 4 ノット)。

6. 試作機による海浜実験

前節の検討によって実機の概略寸法が得られたので、KDD において試作1号機が作られ、これを用いて鹿島灘に面した海岸などで実験が行われ、その度に改良が加

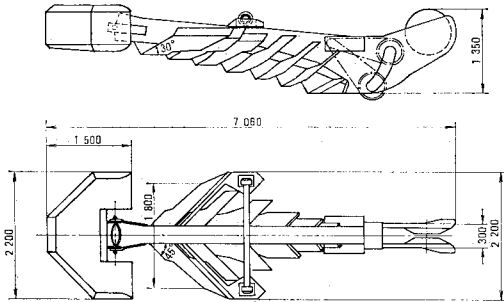


図-34 最終試作機の概要 (KDD による)

えられて最終の形となったものを 図-34 に示す。外寸法は図示のように、長さ 7m 余、幅 2.2m、高さ 1.35m で、重量は安定翼部分が 1.8 t、本体が 4.9t 合計 6.7 t である。

改良部分の主なもの、7 段刃となったこと、そのうち前 3 段は、掘削部分とその土を横へ流す部分とにわけられて段がついたこと、1 段ごとの掘削深さが等しくなく後の方が大きくなっていることである。いずれも抵抗をへらし、食い込みをよくするための改良である。

安定翼の部分には、安定翼自身の水平面からの傾きと安定翼と多段刃本体との傾きを電氣的に検出する装置が組み込まれており、これによって掘削深さを知ることが

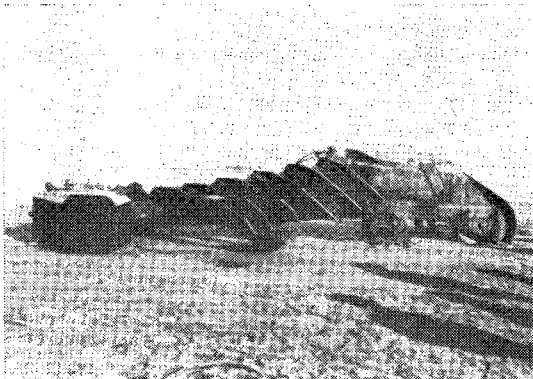


写真-1 最終試作機の外形 (裏面)

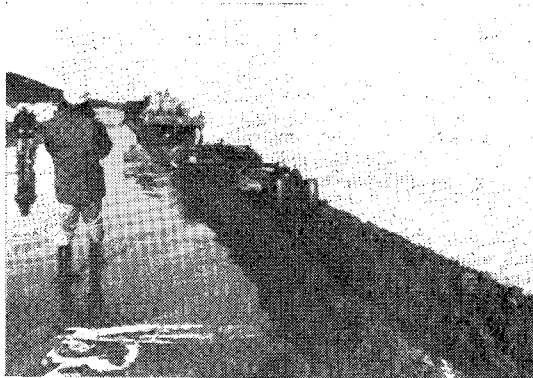


写真-2 試作機による海浜実験

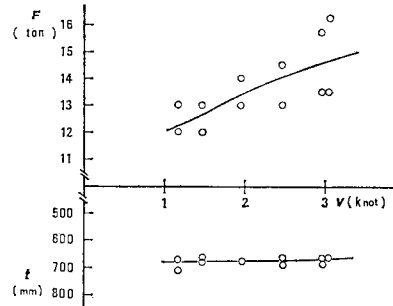


図-35 海浜実験結果 (KDD による)

できるようになっている。なお最後尾にある車輪は、これを船上に引き上げるときのローラーの役目をするものであり、その少し前にある一点鎖線でかいてあるものはケーブルおよび中継器を掘削溝底へ押しつける役目を果たす。

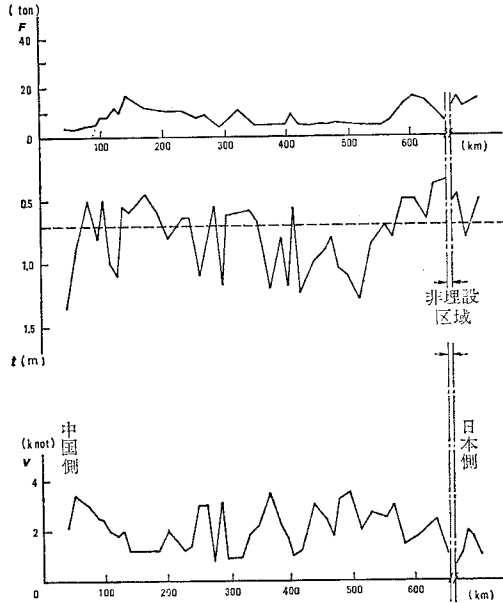
最終試作機の外形を 写真-1 に示す。逆におかれているが、図-34 よりいっそうよくわかる。海浜での実験の一例を 写真-2 に示す。ここでは溝がよくわかるように波打ち際から少し離れたところで掘削を行っているが、実際にデータをとったものはもっと海側に行った水中で行っている。

海浜実験で得られたデータの一例を 図-35 に示す。図よりわかるように、掘削深さは 0.7m より少し小さく、速度が大きくなると少し浅くなる。全抵抗 F は平均して 2 ノットで 13.3 t ぐらいで、えい航しているブルドーザの能力が小さいため、3 ノットまでしか行っていないが、これを外そうすると 4 ノットで約 15 t ぐらいとなり、これは前節の終わりで推定した値と一致している。なお、この海浜の R_s は実測の結果 0.04 kg/cm³ にほとんど等しい値であった。

7. 日中海底ケーブル設置結果

最終試作機ではほぼ満足のできる結果が得られたので、これに耐摩耗肉盛溶接を施して刃先の耐久力を大きくしたものを実際に使用することとし、昭和 51 年 6 月末より上海側から長崎方向へむけて埋設作業を開始、同 7 月中旬に埋設作業を終了した。そのときの 実測データを 図-36 に示す。図の上からけん引抵抗、埋設深さ、施工速度の順であり、深さのところ引いた被線は目標値 0.7m の線である。全長の約 1/2 以上は予想より軟弱な地盤で、掘削深さも 1m 以上あり、抵抗も 5~6t 程度と小さく、施工速度も早い。

硬いところになると深さが 0.5m を切るところもあり抵抗も大きく、速度を落して念入りに施工している状態がうかがわれる。目標の 0.7m に達してはいないが、



図—36 日中海底ケーブル埋設施工結果
(KDD による)

このように硬いところでは、トロールボードもそう深くはもぐらないはずであるから、ケーブル損傷のおそれはないものと思われる。

8. 結 論

以上、海底砂質地盤の掘削に関する基礎的な研究とそれをもととして海底ケーブル埋設機の開発に成功した経過について報告したが、特に興味をおぼえた点を取りあ

げると次のようである。

- (1) 水浸時の砂の掘削中に表われる速度依存性
- (2) 自重でバランスを保ちながら掘削する機械の鋭敏性

前者については本文中に詳述してあるが、1枚の刃では掘削抵抗が速度に対して強く左右されるが、多段刃になるとその影響が著しく小さくなること、全体の抵抗も多段刃の方が約50%低下することが特に注目すべきものと考えられる。後者については、大馬力で強引に作業を行う機械と異なり、本埋設機のような機構では、刃の角度や大きさ、重量、土の強度、掘削速度などの多くの因子のわずかな変化にも敏感に应答してその掘削性能が変化するので、最適条件を見出すのがかなりめんどうである反面、非常にやりがいのある仕事であったことである。今後もしこういう問題があれば意欲的に取組たいと思っている。

終わりに、本研究に対して協力をいただき、特に海浜実験ならびに本番の施工データの提供をいただいたKDD 海底ケーブル建設部の諸兄に感謝の意を表すものである。

参 考 文 献

- 1) 島 昭治郎ほか1名：土木学会論文報告集，第280号，pp. 81~85，昭和53年12月。
- 2) 村山朔郎・島 昭治郎：土木学会誌40巻3号，pp. 10~16，昭和30年3月。
- 3) 島 昭治郎ほか2名：昭和53年度土木学会年次学術講演会予稿，III-257。
- 4) 島 昭治郎ほか1名：昭和44年度土木学会関西支部年次学術講演会予稿，III-40。
- 5) Duncan, C.C. : IEEE Trans. COM-17, No. 1, pp. 74~82, 1962.

(1978.8.4・受付)