

ウォータージェット・多段鋤併用式 海底ケーブル埋設機の開発に関わる基礎研究

建山和由¹・西谷誠之²

¹正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²工修 日本道路公団 清見工事事務所 (〒506-0101 岐阜県大野郡清見村大字牧ヶ洞 2447)

通信ケーブルや電力ケーブルを海底砂地盤に効率的に埋設するための機械の開発に関わる基礎研究を行った。ここでは、従来からケーブル埋設に利用されてきたウォータージェット式と多段鋤式を組み合わせた埋設機を想定し、多段鋤前面部分の地盤をウォータージェットを用いて流動化させることにより効率的に掘削を行う掘削機構を採用した。本論文ではこの機械の設計法を確立すべく、ウォータージェットによる砂地盤の流動化領域の拡大状況について室内実験による検討を行った。この知見を基に、今回想定した埋設機が海底砂地盤を掘削する際に海底地盤から作用する抵抗を予測する手法を提案し、さらに模型実験、ならびに試作機を用いた実機実験によりその適用性を調べた。

Key Words : submarine cable, cable layer, water-jet, soil cutting

1. はじめに

1851年、英仏間にドーバー海峡横断海底通信ケーブルが敷設されて以来、通信用海底ケーブルは国際間通信の一翼を担ってきた。この海底ケーブルも1965年に国際衛星通信が商用化されてからは、主役の座を譲った感があったが、衛星通信に引け取らない能力を有する光ケーブルが実用化されてからは、光海底ケーブルの需要は急速に増加しつつある。

また、海底ケーブルは通信用ケーブルだけでなく電力送電にも利用される。電力海底ケーブルは、従来本土から遠く離れた発電設備のない島部への電力供給や河川、港湾、湖沼を横断する送配電線に用いられてきた。しかし、近年では国間、地域間の大規模な電力連繫線としても利用されるようになり、その利用は多様化しながら増大している。

これらの海底ケーブルの敷設方法は、大陸棚等の水深200mまでの浅海部とそれに続く海溝・海盆等の深海部で異なる。このうち、深海部ではケーブルを海底面に敷設するだけでよい。しかし、浅海部では底引き漁具、船舶の投錨、波浪によるケーブルの移動等によりケーブルが損傷を受ける可能性が高いため、ケーブルを海底地盤内に埋設する必要がある。

ケーブルを海底地盤に埋設するためには、専用の

ケーブル埋設機と呼ばれる施工機械が使用される。その施工では、埋設機をケーブル敷設船で牽引することにより海底地盤に溝を掘削し、その中にケーブルを敷設する。図-1, 2に代表的な埋設機を示す。

図-1は鋤式埋設機で、鋤部で海底地盤を掘削して溝を作る機械である。埋設速度が比較的大きい(2~3ノット=約3.7~5.6 km/h)ため外洋でも使用可能であるが、大きな牽引力を要するため、大型の曳航船を用いなければならない。基本的に岩盤以外の地盤に適用することができる。

図-2はウォータージェット式の埋設機で、1MPa程度の高圧ノズル水を埋設機前面に噴射し、その勢いで砂を掘削する機械である。埋設速度は小さいが(0.5ノット=約0.93 km/h程度)、牽引抵抗が小さいため小型の曳航船でも施工可能で、修理後の再埋設に利用されることが多い。基本的に砂質土の掘削に適用され、粘土地盤、大礫を含む地盤、岩盤には適用されない。

この他、埋設機には機械掘削式埋設機がある。これは、チェーンカッターやディスクカッターで海底地盤を掘削する埋設機で、海底岩盤を掘削する際に利用される。ケーブル埋設工事はこれらの機械を用いて行われるが、工事においては特に下記の2点の改善が求められている。

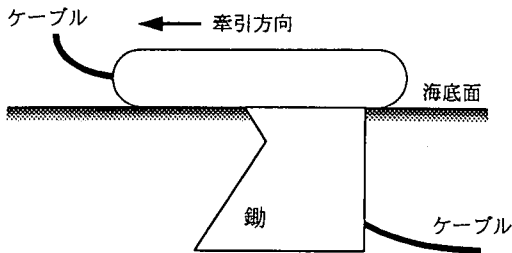


図-1 鋤式ケーブル埋設機

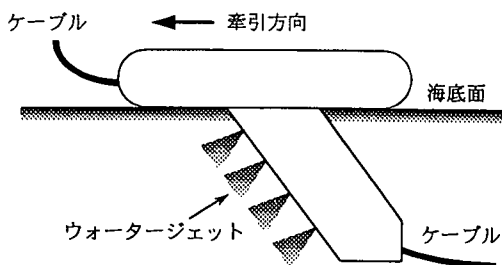


図-2 ウォータージェット式ケーブル埋設機

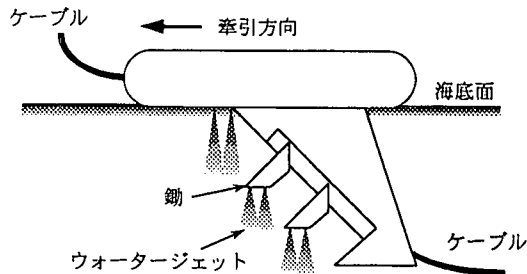


図-3 ウォータージェット・多段鋤併用式ケーブル埋設機

とウォータージェット（以下、「WJ」と略記する）を組み合わせたもので、各掘削鋤のすぐ前部の砂地盤をWJで流動化させることにより牽引抵抗の軽減を図ろうとするものである。既往のWJ式埋設機では埋設機側面に設けたノズルからWJを噴射させて前面の地盤を掘削するため、WJは図-2に示すように斜め前方方向に噴射されるが、今回想定した埋設機ではWJの役割は各段の鋤前面の地盤を流動化させることにあるため、その噴射方向は図-3に示すように鉛直下向きとした。

一般にWJを飽和砂地盤に噴射すると砂地盤は流動化し、砂と水が混じり合った流動化領域ができる。この流動化領域が砂地盤内に広がっていく速度（以下、流動化速度と呼ぶ）は比較的小さく、WJ式埋設機では牽引速度をこの流動化速度より大きくとることができないため、埋設機の説明のところで述べたように小さな牽引速度で施工せざるを得ないことになる。しかしながら、今回考案した埋設機では多段鋤の前面の限られた領域をWJで流動化させればよいから従来機よりは牽引速度を大きくとることができ、また流動化した砂地盤内を掘削するため掘削抵抗の大幅な軽減が期待される。図-4はこの考えを模式図に表したものである。

一般に固定ノズルから水面下の砂地盤に向ってWJを噴射させると地盤内の砂粒子は水に浮遊し流動化状態を呈する。この流動化領域の深さ（以下、流動化深さと呼ぶ）は、図-4(a)に示すように時間とともに増加するが、その増加割合は徐々に小さくなり、それ以上流動化が広がらない限界の深さに達する。

この流動化領域の広がり方は、土質、WJの噴射条件（ノズル内径、噴射圧力等）により異なる。図-4(a)には、流動化が起こりやすい状態（流動化効率：大）と起こり難い状態（流動化効率：小）の2種類の場合を示している。次に、ノズルを砂地盤に対して一定速度で移動させるとノズルは次々に新しい地盤を流動化させることになるため、流動化深さはノズルを固定した場合に比べて小さくなる。このときの流動化深さは、図-4(a)の流動化効率の良否

(1) 埋設の高速化

ケーブル埋設工事は天候や海流の状況に大きく影響されるため、気象と海象の安定している限られた期間に作業を終えることが要求される。埋設作業の高速化を図るには埋設機の牽引速度を上げる必要があるが、牽引速度を上げると牽引抵抗が増大する¹⁾。このため、施工速度は曳航船の牽引能力で規定され、それ以上の速度では牽引することができない。牽引抵抗を低い値に保ちつつ牽引速度を増加させる方法の開発が望まれる。

(2) 埋設の大深度化

船舶錨や漁具の大型化に伴い、ケーブルの埋設深度を大きくとることが求められている。しかし海底砂地盤の掘削においては埋設機に作用する掘削抵抗は掘削深さの2乗に比例して増加するため¹⁾、曳航船の牽引能力から埋設深度も制限されることになる。

畠は、所定の深さを数段階に分けて複数の鋤で掘削することによりトータルの掘削抵抗を小さく抑え、また牽引速度の影響を軽減し得るという考えから多段鋤式の埋設機を開発した²⁾。この埋設機械はKDDが1980年に実施した長崎-上海間海底ケーブル敷設工事で実用化され、その有効性が証明された。この工事における規定の埋設深度は0.7m、牽引速度は2~3ノット（約3.7~5.6 km/h）であったが、近年ではより深い溝を高速で掘削することのできる埋設機の開発が望まれている。

図-3は、このような事情を背景に今回考案した埋設機の概要である。この埋設機は多段鋤式の埋設機

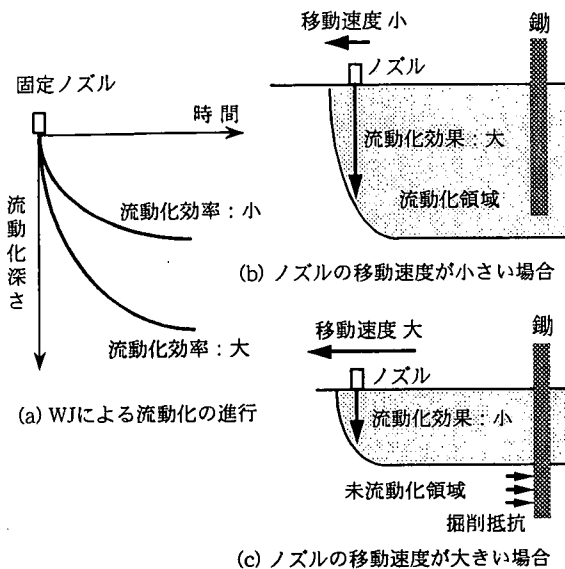


図-4 砂地盤における流動化深さの考え方

とノズルの移動速度により決まることになる。図-4(b)に流動化深さが大きい場合を、また図-4(c)に流動化深さが小さい場合を示している。

ノズルの後方に掘削用の鋤を装備させる場合、図-4(b)の場合には鋤前面の砂は完全に流動化しているため鋤に作用する掘削抵抗は非常に小さくなるが、図-4(c)の場合には鋤前面の一部の砂しか流動化していないため鋤には未流動化地盤から大きな掘削抵抗が作用することになる。今回、想定した埋設機では埋設作業中、図-4(b)かそれに近い状態が得られることを目指しており、このためには鋤前面に鋤の深さに相当する流動化領域を生じさせるようWJの噴射条件を調整する必要がある。

本研究では、上記の考え方のもと、WJによる流動化効率とWJ噴射条件、砂の特性との関係について実験により考察を行い、その結果をもとに今回想定した埋設機的设计上の考え方を議論する。

2. ウォータージェットの噴射条件と流動化速度に関する実験

前述のように水面下の砂地盤に向かってノズルからWJを噴射させると地盤内の砂粒子は水に浮遊し流動化状態を呈する。この領域は平面的にはノズルを中心とする円筒形を示し、鉛直下向きにその領域が広がっていく。本節では、WJの噴射条件（噴射ノズルの内径、噴射圧力等）と地盤内での流動化領域の拡大状況との関係を以下に示す実験により調べた。

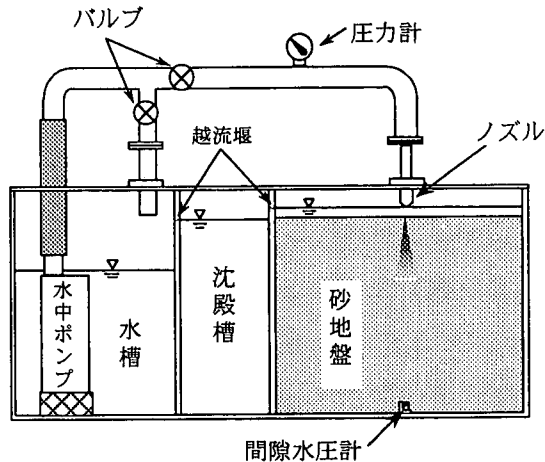


図-5 WJ噴射実験装置概要

(1) 実験装置と概要

図-5に固定ノズルを用いたWJの噴射実験装置を示す。土槽は幅1.8m×奥行1.6m×深さ0.64mの鉄製の槽を用い、これを水槽、沈砂槽、実験土槽の3つのブロックに分けて使用した。水槽内には水中ポンプ（出力2.2kw、吐出量0.3m³/min）を設置し、水槽内の水を吸い上げて実験土槽に固定したノズルから噴射させ、実験土槽内の砂地盤に流動化を生じさせた。WJの噴射圧力はポンプとノズルの間に設けた圧力計で確認して調整を行うことができる。ノズルから噴射させた水は実験土槽-沈砂槽間、ならびに沈砂槽-水槽間に設けた越流堰を経て水槽に戻る仕組みとした。この堰により実験土槽内の水位は一定に保たれている。

実験で使用した試料はケイ砂4号と6号でその物性値は表-1に示すとおりである。実験ではこの砂を実験土槽に投入した後、棒状バイブレーターで十分に締固め、コーン貫入試験により毎回ほぼ同様の地盤が作成されていることを確認した。

表-2は今回の実験で採用したノズル内径と圧力である。この実験条件に従いノズルの内径とWJの圧力を変化させ、これらが砂地盤の流動化状況に与える影響を調べた。なお、図-6は今回実験で使用したノズルから噴射されるWJ噴射時の流速と圧力との関係を実測した結果である。この時、流速は、単位時間あたりにノズルから噴射される流量を計測し、これをノズルの断面積で除して求めた。後述の議論では、この図を利用して圧力の計測値からWJ噴射時の流速と流量を計算した。

表-1 実験で用いた砂の特性

	ケイ砂 4号	ケイ砂 6号
砂粒子密度 ρ_s (kg/m ³)	2.63×10^3	2.63×10^3
平均粒径 D_{50} (mm)	0.94	0.27
均等係数 U_c	1.26	1.75
透水係数 k (m/sec)	2.6×10^{-3}	2.54×10^{-4}
実験時相対密度 D_r (%)	100	98

表-2 実験におけるWJの噴射条件

WJ 噴射圧力 (kPa)	49.0, 98.0, 147.0, 196.0, 245.0
ノズル内径 (mm)	5.0, 8.0, 10.0, 15.0, 20.0

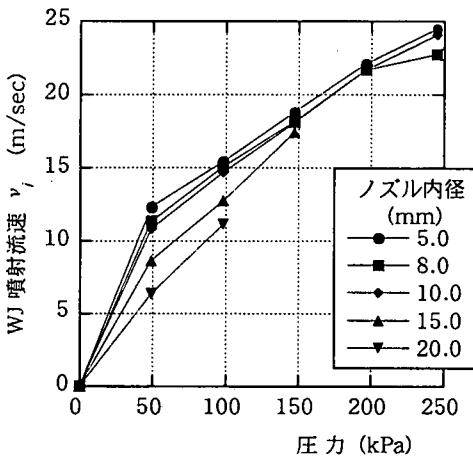


図-6 WJの噴射特性

実験では時間経過に伴う砂地盤の流動化領域の拡大状況(図-4(a))を計測する必要があるが、これは砂地盤内の現象であるため直接目視観測等で計測することができない。そこで、ここでは図-5に示すような実験土槽の底面に間隙水圧計を設置し、その計測結果から地盤内の流動化領域の進行状況を把握した。図-7はこの計測の原理を示したものである。WJを負荷する前は間隙水圧計にはその深度に相当する静水圧のみが作用している。次に、WJを負荷して砂地盤内に流動化を生じさせると、間隙水圧計の上部は砂粒子が水に浮いた混合流体状態になり、間隙水圧計の計測値は上昇する。このとき間隙水圧計の計測値は「(砂地盤の飽和単位体積重量 - 水の体積重量) × 流動化深さ」分が増えることになるため、間隙水圧の変化を計測すれば流動化深さの変化を把握することができる。

図-8はこの方法により砂地盤内の流動化深さを計測した結果である。このうち図-8(a)はWJを噴射さ

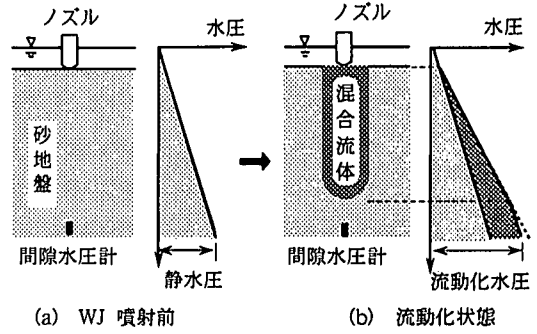
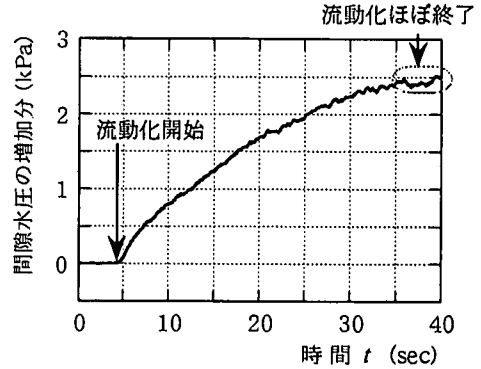
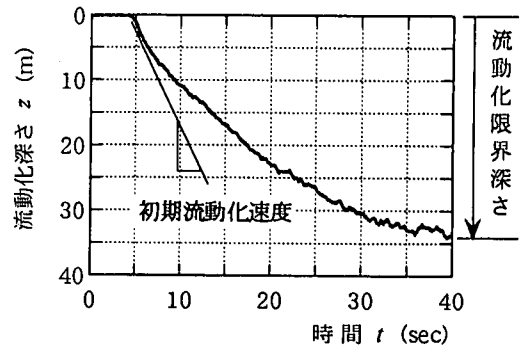


図-7 流動化状況の計測原理



(a) 間隙水圧増加の一例



(b) 流動化深さの増加の一例

図-8 間隙水圧の増加と流動化深さの計測例 (ノズル内径 10mm, 圧力 49kPa)

せたときの間隙水圧計の計測値の変化を、図-8(b)は間隙水圧の変化から流動化領域の深さを求めた結果である。図-8(b)に示すように流動化深さは時間とともに増加して行くが、その傾きは徐々に減少していき、ある程度の時間が経過するとそれ以上流動化領域が広がらない深さに到達する。この深さを流動化限界深さ、また、この曲線の初期接線勾配の傾きを初期流動化速度と呼ぶことにする。本論文では、時間に伴う流動化領域の拡大状況を式(1)で表す双曲線により近似する。

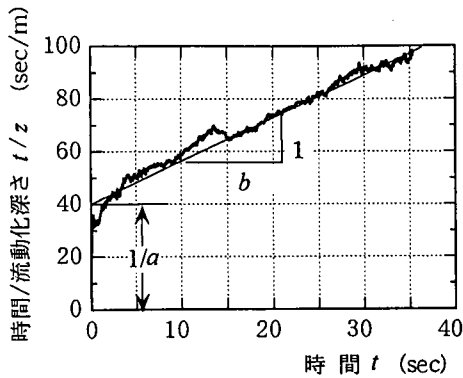


図-9 双曲線近似におけるパラメータの決定

$$z = \frac{at}{1 + \frac{a}{b}t} \quad (1)$$

ここで、

z : 地盤内における流動化深さ (m)

t : WJを噴射し始めてからの経過時間 (sec)

a, b : WJの噴射条件, 地盤条件等により決まる定数.

流動化領域の計測結果 (図-8) は $t/z \sim t$ の関係にプロットし直しなすと図-9に示すように直線で近似することができる. この直線の傾きと縦軸切片を求めると式(1)中の定数 a, b の値を求めることができる.

この式において時間を無限大 ($t \rightarrow \infty$) とすると $z_{\infty} = b$ となるため, 定数 b は流動化限界深さ z_{∞} に一致する. また式(1)の両辺を t で微分して $t \rightarrow 0$ とすると $dz/dt \rightarrow a$ となる. このことより定数 a は $z \sim t$ 曲線の初期接線勾配, すなわち初期流動化速度 v_0 に相当することがわかる.

以下, 初期流動化速度 v_0 , ならびに流動化限界深さ z_{∞} と WJ の噴射条件 (ノズル内径, 噴射流速) や砂粒子特性との関係について実験結果をもとに議論を行う.

(2) 実験結果

図-10は, 表-2に示す各条件の実験により得られた初期流動化速度 v_0 を WJ の噴射流速 v_j に対してプロットした結果である. WJ の噴射流速は図-6で示した WJ の噴射特性を利用して水圧から求めている. この図より明らかなように初期流動化速度は WJ の噴射流速とともに増加するがその関係はノズルの内径や地盤特性により異なることがわかる.

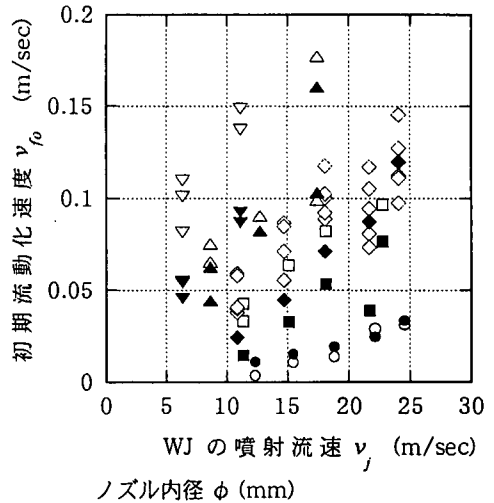


図-10 固定ノズルによる流動化実験結果

そこで, これらの諸量間の関係を調べるため次元解析を行う. これは, ここで扱う流動化現象が, 砂と水の2層混合問題で, その流れも非常に複雑で理論的に表現することが困難なためである.

(3) 次元解析

次元解析で使用する π ナンバーを求める方法には一般に, 下記の3通りの方法がある³⁾.

- 1) 現象を支配する微分方程式を用いる方法.
- 2) 現象に関する諸量を用いて無次元数を作る.
- 3) 現象に関する物理法則とその中で用いる諸量を利用する方法.

ここでは, 現象を表す微分方程式が得られていないこと, ならびに2)の方法ではあらゆる変数を同等に扱うため, 必ずしも有効な π ナンバーが得られるとは限らない等のことを考え, 3)の方法を用いることにする.

ノズルから噴射された WJ で地盤が流動化する現象を想定した場合, 砂粒子に作用する主な力としては, 下記の3種類が考えらる. ただし, i, k, ρ_w, g はそれぞれ, 動水勾配, 砂地盤の透水係数, 水の密度, 重力加速度を, また, ρ, l, v, t はそれぞれ, 密度, 長さ, 速度, 時間の代表値を表し, [] は, 諸量の次元を意味する.

a) 水の流れにより粒子が受ける力 (透水力 F_p)

$$[F_p] = [l][\gamma_w][l]^3 = \frac{[v]}{[k]}[\rho_w][g][l]^3 \quad (2)$$

透水力は水が砂粒子の表面付近を流れるときに水の粘性に起因して発生する。そのため、透水力は砂粒子の大きさに依存すると考えられる。そこで、長さの代表値 l には砂粒子の平均粒径 D_{50} を用いる。また、砂粒子に透水力が働くのは流動化現象の起こっている最前線と考えられるので、速度の代表値 v には初期流動化速度 v_{j0} を用いると透水力は式(2)'で表される。

$$F_p = \frac{v_{j0}}{k} \rho_w g d^3 \quad (2)'$$

b) 水や砂粒子に作用する慣性力 F_i

$$[F_i] = [m][a] = [\rho][l]^2 \frac{[v]}{[t]} = [\rho][l]^2 [v]^2 \quad (3)$$

WJの噴射実験において、水の流速は砂粒子の移動速度に比べ著しく大きいので、密度 ρ 、長さ l 、速度 v の代表値としては、それぞれ水の密度 ρ_w 、ノズル内径 d 、WJの噴射速度 v_j を採ることとする。この場合、慣性力は式(3)'で表される。

$$F_i = \rho_w d^2 v_j^2 \quad (3)'$$

c) 重力

$$[F_g] = [m][g] = [\rho][l]^3 [g] \quad (4)$$

砂地盤の流動化現象において重力は砂粒子に作用し、その運動挙動に影響を与える。そこで、ここでは長さ l の代表値としては砂粒子の平均粒径 D_{50} を、また、密度 ρ の代表値としては砂粒子の密度 ρ_s から浮力分として水の密度 ρ_w を引いた密度を用いることとする。このとき、重力は式(4)'で表される。

$$F_g = (\rho_s - \rho_w) D_{50}^3 g \quad (4)'$$

式(2)', (3)', (4)' はいずれも力の単位を持つため、これらの比を採ると2種類の π ナンバーを作ることができる。式(5), (6)は得られた π ナンバーである。

$$\pi_1 = \frac{F_i}{F_g} = \frac{\rho_w d^2 v_j^2}{(\rho_s - \rho_w) D_{50}^3 g} \quad (5)$$

$$\pi_2 = \frac{F_g}{F_p} = \frac{k(\rho_s - \rho_w)}{v_{j0} \rho_w} \quad (6)$$

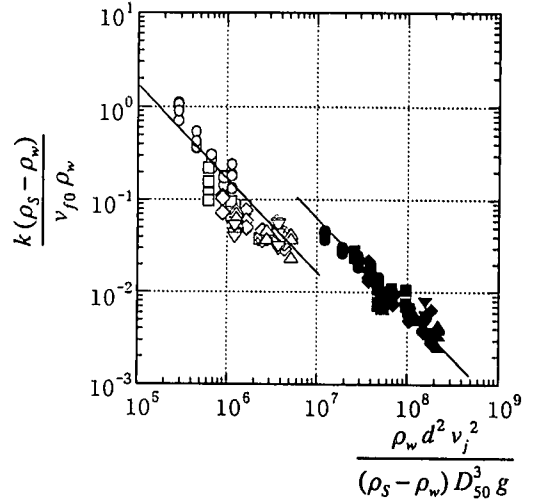


図-11 次元解析の適用結果
(プロット点の凡例は図-10と同じ)

図-11は、図-10の実験結果を横軸に式(5)、縦軸に式(6)の π ナンバーをとって整理し直したものである。砂粒子の密度 ρ_s 、平均粒径 D_{50} 、砂地盤の透水係数 k には表-1の諸元を用いた。この図より、式(5), (6)で表される π ナンバー間には式(7)で表される関係があることがわかる。

$$\frac{k(\rho_s - \rho_w)}{v_{j0} \rho_w} = C \left\{ \frac{\rho_w d^2 v_j^2}{(\rho_s - \rho_w) D_{50}^3 g} \right\}^{-1} \quad (7)$$

ここで、 C は砂地盤の特性により決まる定数であり、図-11上ではケイ砂4号で $C=1.6 \times 10^5$ 、ケイ砂6号で $C=6.7 \times 10^5$ である。前述の次元解析ですべての現象を考慮していれば、式(7)は地盤特性の影響を受けない唯一の関係式として表されるべきところが、何らかの効果の考慮をきれていないために土質により異なる定数を含む関係式となっている。

式(7)を変形して初期流動化速度 v_{j0} と他の諸量との関係を表す式に直すと式(8)が得られる。

$$v_{j0} = \frac{k}{C D_{50}^3 g} \cdot (d \cdot v_j)^2 \quad (8)$$

式(8)のうち右辺第一項は土質特性による項、第二項はWJの噴射条件による項である。このうち右辺第一項は今回使用した試料砂の物理特性(表-1)と図-11で求めた C の値を代入すると、ケイ砂4号で2.0、ケイ砂6号で1.97となり、今回使用した試料では砂の特性によらずほぼ同一の値が得られた。以下の議論ではケイ砂4号、6号とも $k/C D_{50}^3 g = 2.0$ を用いることとする。

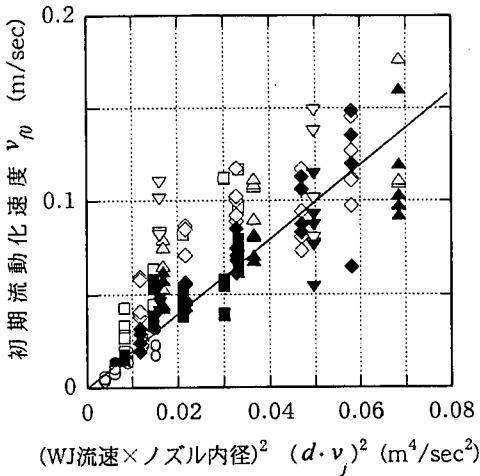


図-12 初期流動化速度とWJの噴射条件との関係
(プロット点の凡例は図-10と同じ)

なお、式(8)中の $(d \cdot v_j)^2$ は $(d^2 \cdot v_j) v_j$ と表すことができる。この式に水の密度 ρ_w と $\pi/4$ を乗じると $(\rho_w \cdot \pi \cdot d^2 \cdot v_j / 4) v_j$ が得られる。この式の()内はノズルから噴射されるWJの単位時間あたりの質量であり、これに流速 v_j を乗じた量はWJの運動量を表すことになる。よって、式(8)中の $(d \cdot v_j)^2$ はWJの運動量に比例することになり、流動化現象はWJの運動量によりその領域の大きさが決まるといえる。

図-12はこの結果に従い、図-10の実験結果を整理したものである。この図の横軸は式(8)の $(d \cdot v_j)^2$ である。この図より、ばらつきはあるものの今回使用した砂試料の範囲であれば、砂質特性によらず、初期流動化速度は $(d \cdot v_j)^2$ により表し得ることがうかがえる。

以上は、初期流動化速度に関する議論であるが、流動化限界深さについては、過去の研究結果を参照する。松田らはWJにより砂地盤を掘削したときの掘削限界深さを式(9)で与えている⁴⁾。

$$z_{\infty} = C_z \frac{(d \cdot v_j)^{2/3}}{\sqrt{D_{50}}} \quad (9)$$

ここで、 C_z は土質より決まる定数である。この式を参考に先の実験結果より求めた流動化限界深さを式(9)右辺に対してプロットすると図-13が得られた。この図より明らかなように今回の実験結果をみる限り、流動化限界深さ z_{∞} (m)は式(9)右辺の3乗に比例し、式(10)で表されることがわかる。

$$z_{\infty} = 2.0 \times 10^{-4} \frac{(d \cdot v_j)^2}{D_{50}^{3/2}} \quad (10)$$

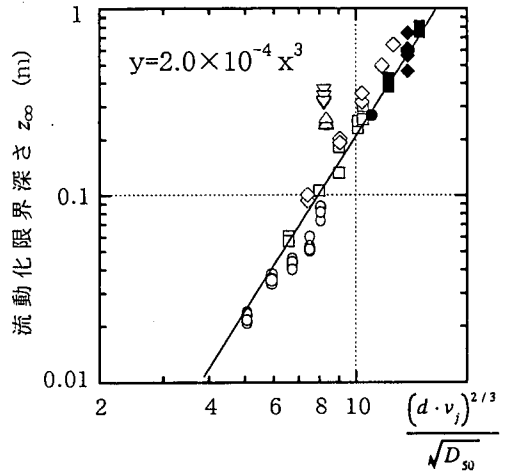


図-13 流動化限界深さと $\frac{(d \cdot v_j)^{2/3}}{\sqrt{D_{50}}}$ との関係
(プロット点の凡例は図-10と同じ)

式(1)、(8)、(10)より、ノズルからWJを砂地盤に対して噴射させたとき、地盤内に広がっていく流動化領域の深さ z は式(11)で表されることがわかる。

$$z = \frac{v_{r0} t}{1 + \frac{v_{r0}}{z_{\infty}} t} \quad (11)$$

ただし、 $v_{r0} = 2.0 (d \cdot v_j)^2$
 $z_{\infty} = 2.0 \times 10^{-4} \frac{(d \cdot v_j)^2}{D_{50}^{3/2}}$

式(11)を用いると、WJの噴射条件(ノズル内径、噴射速度)と砂粒子径から砂地盤内に生じる流動化状態を予測することができる。

3. ノズルが移動する場合の流動化領域の把握

前節では、ノズルを定位置に固定した状態でWJを噴射させた場合の砂地盤内の流動化領域について議論を行った。しかしながら、ノズルが海底面上を移動しながら砂地盤内に流動化領域を発生させる場合には固定ノズルの場合に比べ限界深さは小さくなる。これはノズルが移動する場合には、地盤内のある地点が受けるWJの継続時間が制限されるためである。図-14はこの様子を表している。

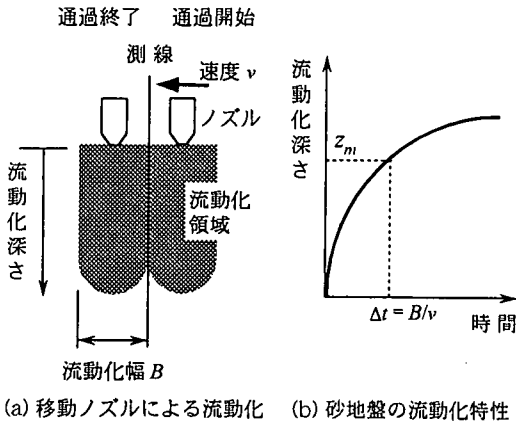


図-14 移動ノズルによる砂地盤の流動化

いま、図-14(a)に示すように地盤内に鉛直の測線を想定する。この測線をノズルが速度 v_f で通過する場合、測線位置の土がWJの噴射を受ける時間 Δt は $\Delta t = B / v_f$ で表される (B は流動化領域の幅 (m))。このとき地盤内に発生する流動化深さ z_m は図-14(b)の固定ノズルによる砂地盤の流動化特性から求めることができる。ここで図-14(b)の流動化特性は前節の議論で定式化したため (式 (11))、移動ノズルによる流動化深さを求めるには流動化領域の広がり (流動化幅 B) を知る必要がある。

(1) 流動化幅 B の定式化

WJにより砂地盤内に作られる流動化領域は、ノズルを中心とする円筒形を呈する。図-14ではその直径を流動化幅と定義したが、この流動化幅は流動化限界深さと同様にWJの噴射条件と砂質特性により決まると考えられる。そこで前節の固定ノズル実験において流動化幅を計測し、図-13と同じく式(9)右辺に対してプロットすると図-15が得られた。ただし、流動化幅は細長い金属棒を砂地盤に手で貫入・移動させて流動化領域と未流動化領域との境を特定することにより計測した。流動化領域は厳密にはきれいな円筒形ではなく、場所による変動が大きいため、流動化幅の計測値もばらついているが、この結果を式(12)により近似する。

$$B = 1.3 \times 10^{-2} \cdot \frac{(d \cdot v_f)^{2/3}}{\sqrt{D_{50}}} \quad (12)$$

この式より、流動化幅はノズル内径、WJの噴射速度、砂粒子の平均粒径より推定することができ、さらに式(11)と組み合わせることにより、移動ノズルの場合の流動化深さを推定することができる。

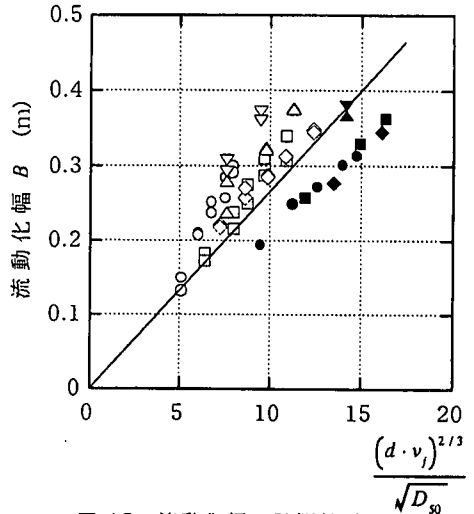


図-15 流動化幅の計測結果
(プロット点の凡例は図-10と同じ)

4. WJ・多段鋤併用埋設機に作用する掘削抵抗の予測

WJ・多段鋤併用埋設機では図-4に示したように多段鋤前面の地盤をWJを用いて流動化させることにより鋤に作用する掘削抵抗の軽減を図ることを想定している。このとき図-4(b)に示すようにノズルによる流動化深さが鋤による掘削深さより大きければ鋤には砂・水混合流体から作用する非常に小さな抵抗のみが作用する。これに対し流動化深さが鋤の深さより小さい場合には図-4(c)に示すように鋤には砂・水混合流体からの抵抗とともに未攪乱地盤からの掘削抵抗が作用する。鋤などの掘削刃に作用する掘削抵抗の予測については多くの研究があるが^{5),6)}、ここでは伊勢村による掘削抵抗の推定式を用いる。

(1) 掘削抵抗の予測

伊勢村は図-16に示すように水底砂地盤を平刃で掘削する際に掘削刃に作用する掘削抵抗の水平方向成分を式(13)で表されるとした⁷⁾。

$$H_\alpha = \left(C_1 R_s \cdot 10^{-m_1 \alpha} + C_2 \frac{\gamma'}{k} v_f \cdot 10^{-m_2 \alpha} \right) b_c z_c^2 \quad (13)$$

$$V_\alpha = H_\alpha \tan(\phi - \delta) \quad (14)$$

ここで、
 H_α : 掘削抵抗の水平分力 (N)
 V_α : 掘削抵抗の鉛直分力 (N)
 b_c : 掘削刃の幅 (m)
 z_c : 掘削深さ (m)
 α : 掘削刃のすくい角 (deg)

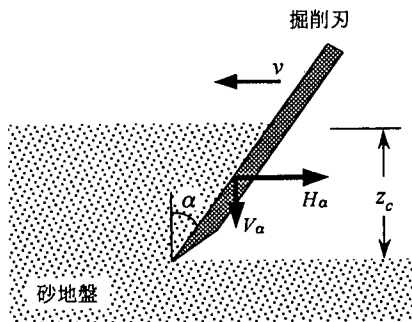


図-16 掘削刃による地盤の掘削

- v_t : 掘削速度 (m/sec)
- R_s : 砂地盤の比掘削抵抗 (N/m^3)
- γ' : 被掘削土の水中単位体積重量 (N/m^3)
- k : 被掘削土の透水係数 (m/sec)
- ϕ : 被掘削土の内部摩擦角 (deg)
- δ : 掘削刃と被掘削土との摩擦角 (deg)
- C_1, C_2, m_1, m_2 : 土質に依存する実験定数

式(13)中の諸量のうち比掘削抵抗は、被掘削地盤のせん断強度を表す指標であり⁸⁾、簡単な原位置試験か、もしくは被掘削地盤が水底地盤であればその粒度特性から推定することができる⁹⁾。実験定数は被掘削地盤の土質特性に依存し、水底砂地盤では $C_1=1.6$, $C_2=3.54 \times 10^{-2}$, $m_1=0.0138$, $m_2=0.0106$ である⁸⁾。

今回の掘削問題では、前節までの議論よりWJによる流動化深さを推定し、式(13)においてWJにより攪乱されていない部分の深さを掘削深さ z_c と置くことにより掘削抵抗を算定することができる。なお、WJにより流動化された砂・水混合体から掘削刃が受ける抵抗は上記の掘削抵抗に比べ非常に小さく実質上ゼロと見なすことができるため、掘削抵抗の算定には含めないこととする。

(2) 掘削実験による検証

ここで述べた掘削抵抗の予測法の適用性を検討するため、掘削実験を行った。実験は図-5と同じ土質を用い、これに鋤(幅0.05m, 掘削深さ0.4m)とその前でWJを噴射するノズルを取り付けた移動台車とを組み合わせた(図-17参照)。台車はモーターによるケーブルの巻き取りにより牽引し、その張力を計測することにより牽引抵抗を求めた。牽引速度は5.09, 9.1cm/secの2段階とし、ノズル内径とWJの噴射圧力は固定ノズル実験と同様の値を用いた。使用した試料は固定ノズルの噴射実験で用いたケイ砂6号である。

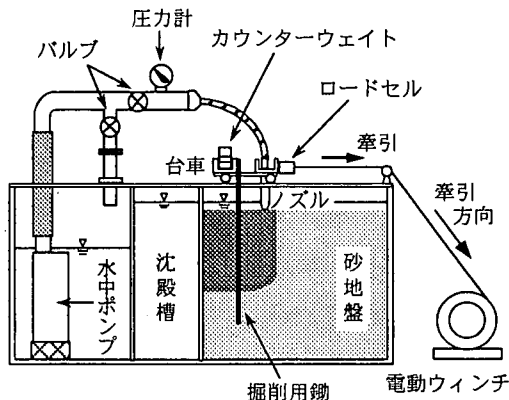


図-17 模型鋤による掘削実験

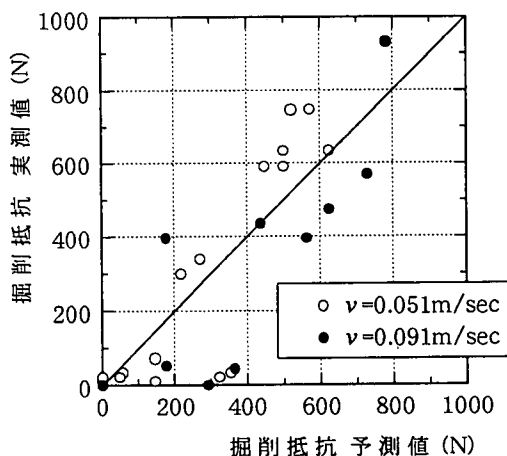


図-18 模型実験による掘削抵抗の計測結果と予測結果

図-18は実験結果であり、掘削抵抗の実測値と予測値の比較結果が示されている。この結果を見ると、特に掘削抵抗の小さな領域でバラツキが顕著に現れている。この領域では、WJにより流動化深さが鋤の深さとほぼ同じになるため、掘削抵抗の値が小さく、流動化深さの予測における誤差が掘削抵抗に大きく影響するためと考えられる。これらのばらつきはあるものの、この図では予測値と実測値は対応しており、WJを併用した場合の鋤に作用する掘削抵抗がここでの議論により予測することが可能と判断した。

5. 実物試作機による検証

前回までの議論の適用性を実物の試作機を用いた実験により検証した。この埋設機は電力ケーブルの海底への埋設を目的として開発した機械で、本研究はこの試作機の開発に関わる基礎研究である。図-19に埋設機の概要を示す。

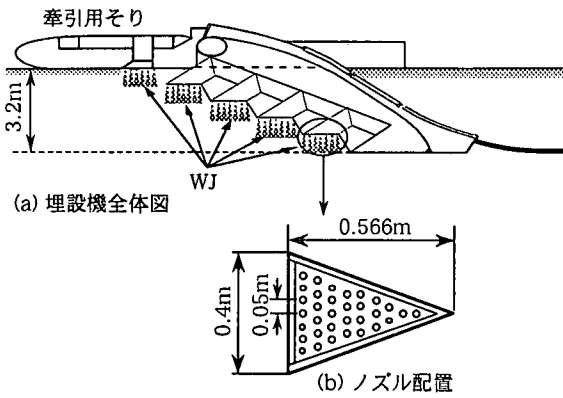


図-19 試作埋設機概要

表-3 試作機実験で使用した砂試料の特性

飽和単位体積重量 γ_{sat} (N/m ³)	2.63×10^5
平均粒径 D_{50} (mm)	0.51
均等係数 U_c	2.367
透水係数 k (m/sec)	8.0×10^{-5}

この埋設機は図-19(a)に示すように埋設深さ3.2mを5段の鋤で掘削するもので、各段の鋤は高さ0.64m、幅0.4m、すくい角45度、にげ角のない平刃である。各段の鋤の下面には図-19(b)に示すようなWJ噴射用ノズル（ノズル内径10mm、WJの噴射流速25.5~41.3m/sec）がつけられている。これらのノズルは、本来、後続の鋤前面の砂地盤を流動化させることができる範囲で、でき得る限り間隔を広げて配置することが望ましいが、ここでは後続の鋤全面の砂が確実に流動化するように鋤底面全面に比較的密に配置した。

実験用供試地盤は、水を満たした実験用プールの中に表-3に示す砂を投入し、パイプレータで締め固めて作製された。実験では試作機を0.4~1.26km/hの速度で牽引し、そのときの牽引抵抗が計測された。

ここではこのときの牽引抵抗を前節までの手法で予測し、実測値との比較を行った。ただし、この試作機では図-19(b)に示すように複数のノズルが三角形断面の中に近接して配置されているため、各ノズルが干渉し、ノズル面下の流動化領域の大きさが影響を受けることも懸念されるが、この影響についての定量的な把握ができていないため、干渉の影響を考慮せずに予測を行った。

図-20はその結果である。ただし、図中の掘削抵抗の予測値は埋設機に作用する掘削抵抗に機械前部の牽引用そり下面と地表面との間の摩擦抵抗を加え

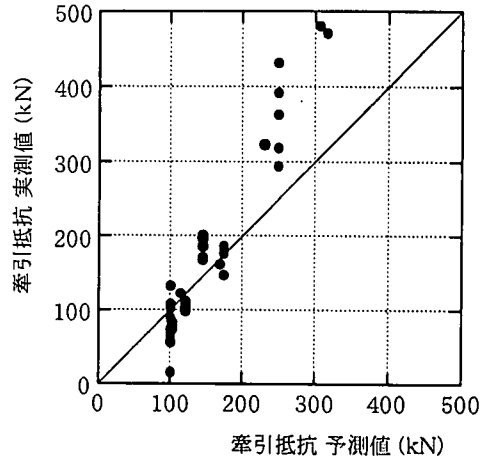


図-20 実物試作機による実験結果と予測結果の比較

た値とした。ここで、摩擦抵抗は機械総重量(235.2kN)と(14)式で表される掘削抵抗の鉛直方向成分の和に摩擦係数 $\tan \delta$ ($\delta = 15\text{deg}$ とした) を乗じて計算した。

この図より、掘削抵抗の大きな領域では、予測結果より実測結果の方が高めの抵抗を示している。この原因としてはノズル干渉の影響、供試地盤の強度の不均一性などが考えられる。

しかしながら、この予測手法によりある程度は埋設機の掘削抵抗を推定することが可能と考えている。

6. まとめ

以上、本論文では、WJ・多段鋤併用式ケーブル埋設機の開発に関わる基礎研究として、WJによる砂地盤の流動化と鋤による砂地盤の掘削抵抗の予測について研究を行った。この結果、これらの現象に関連するすべての要因を完全には考慮していないが、埋設機に作用する掘削抵抗をある程度予測することが可能という結論を得た。この結果は今後の埋設機的设计に有効に利用することができる。以下は、その設計手順である。

- (1) 開発すべき埋設機に関わる基本仕様（埋設深さ、掘削幅、最大牽引抵抗、牽引速度等）の設定
- (2) 多段鋤の段数、各段の掘削深さの設定
- (3) WJ噴射条件の設定（ノズル内径、WJ噴射流速）
- (4) 設定した多段鋤の段数とWJ噴射条件により(1)の基本仕様を達成し得るか否かの検討。ただし、WJの噴射条件は水中ポンプの能力を考慮する必要がある。

(5) 基本仕様が満足されない場合には(2),(3)の設定を変えて再検討を繰り返し、最終的な諸元の決定を行う。

なお、今回の研究結果は平均粒径 0.94mm, 0.27mm の比較的粒径のそろった砂に対する実験結果である。海底の砂は、これらに近い砂が多いが、砂の特性がこれらと大きく異なる場合には追加検討が必要である。

謝辞：実物試作機を用いた実験は関西電力株式会社、電源開発株式会社、住友電気工業株式会社、古川電機工業株式会社、株式会社フジクラ、日立電気株式会社の共同研究として行われたものである。データを提供いただいた各社に謝意を表す。

<本論文で用いた記号一覧>

- ρ_s : 砂粒子密度 (kg/m^3)
- γ_{sat} : 飽和砂の単位体積重量 (N/m^3)
- D_{50} : 砂の平均粒径 (mm)
- U_c : 砂試料の均等係数
- k : 砂試料の透水係数 (m/sec)
- D_r : 砂試料の実験時相対密度 (%)
- v_j : WJ の噴射流速 (m)
- d : ノズルの内径 (mm)
- z : 地盤内における流動化深さ (m)
- z_{∞} : 流動化限界深さ (m)
- v_{j0} : 初期流動化速度 (m/sec)
- B : 流動化幅 (m)
- t : WJ を噴射し始めてからの経過時間 (sec)
- a, b : WJ の噴射条件, 地盤条件等により決まる定数。
- H_{α} : 掘削抵抗の水平分力 (N)
- V_{α} : 掘削抵抗の鉛直分力 (N)
- b_c : 掘削刃の幅 (m)
- z_c : 掘削深さ (m)
- α : 掘削刃のすくい角 (deg)
- v_r : 掘削速度 (m/sec)

- R_s : 砂地盤の比掘削抵抗 (N/m^3)
- γ' : 被掘削土の水中単位体積重量 (N/m^3)
- k : 被掘削土の透水係数 (m/sec)
- ϕ : 被掘削土の内部摩擦角 (deg)
- δ : 掘削刃と被掘削土との摩擦角 (deg)
- C_1, C_2, m_1, m_2 : 土質に依存する実験定数

参考文献

- 1) 畠昭治郎：海底砂地盤の掘削とその応用，土木学会論文報告集，第 288 号，pp.127-138, 1979 年。
- 2) Hata, S. : Submarine cable : multi-blade plough, *Geotechnique* 29, No.1, pp.73-90, 1979.
- 3) 江守一郎，D.J.シューリング共著：模型実験の理論と応用，技報堂出版，1973 年。
- 4) 松田任他：ジェット掘削に関する研究（その 1）鉛直ジェットによる海底土砂の切崩について，港湾技研報告 Vol.3, No.5, pp.1~29, 1964 年。
- 5) Hettiaratchi, D.R.P. and Reece, A.R. : Symmetrical three-dimensional soil failure, *Journal of Terramechanics*, Vol.4, No.3, pp.45-67, 1967.
- 6) Mckyes, E.: The calculation of draft forces and soil failure boundaries of narrow cutting blades, *ASAE May*, pp.20-24, 1977.
- 7) 伊勢村邦郎：水中掘削の機構に関する基礎的研究，京都大学大学院工学研究科修士論文，1980 年。
- 8) 畠昭治郎，金子義信：砂質土の掘削抵抗と掘削刃前面の土圧分布について，土木学会論文報告集，第 280 号，pp.81-85, 1978 年。
- 9) 畠昭治郎，牛嶋龍一郎，相原敬：水底土砂の掘削特性について，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集，III-8, 1980 年。

(1999.12.14 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON DEVELOPMENT OF A NEW TYPE OF SUBMARINE CABLE LAYER

Kazuyoshi TATEYAMA and Masayuki NISHITANI

Fundamental study has been carried out to develop a new type of submarine cable layer. The new cable layer has multi-ploughs which will excavate trenches in sea bed and water-jet device which will make sandy soil fluid in front of each plough. The cutting resistance acting on the ploughs is expected to be reduced by flowing sandy soil, and the deep and high-speed excavation will be realized. In this paper, the relationship between the nozzle conditions, soil properties and flowing phenomena of sandy soil has been investigated through the experiments, and the design of the new cable-layer was discussed by predicting the cutting resistance acting on the layer.