

# 港湾技術研究所報告

REPORT OF PORT AND HARBOUR TECHNICAL RESEARCH  
INSTITUTE MINISTRY OF TRANSPORTATION, JAPAN

第3巻 5号

Vol. 3 No. 5

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……松田 任・岩田尚生

1964年12月

運輸省港湾技術研究所



# 鉛直ジェットによる海底土砂の切崩しについて

## 目 次

§1 序 論	2
§2 ジェットによる土砂の切崩しについての考察	2
§3 模型実験, および実験結果	5
3.1 模型実験の目的	5
3.2 実験装置, および実験	6
3.3 2次元観察装置による実験結果	7
3.4 3次元切崩し実験装置による実験結果	10
§4 エゼクタ式しゅん漕船飛龍号による実船試験, および試験結果	13
4.1 飛龍号の概要	13
4.2 実船試験の目的, および内容	15
4.3 実船試験結果	17
§5 結 論	19

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しについて

\*松田 任 \*\*岩田 尚生

STUDIES ON UNDERWATER EXCAVATIONS  
WITH A SUBMERGED JET

Jin Matsuda and Hisao Iwata

Synopsis

A submerged jet can be utilized to excavate the sea bottom obtain a large quantity of sand buried under the bottom. Experiments have been conducted for the most fundamental case of a vertical submerged jet impinging on the horizontal surfaces of sand and gravel. The sizes and depths of excavated holes were measured for various combinations of jet pressures and nozzle diameters. It was found that the hole depth is determined by the jet velocity, nozzle diameter, and grain size, and a semi-empirical relation among these quantities is presented in this report.

At the same time, a prototype test of underwater excavation was made with the jet venturi dredger "Hiryu-Go". The volume of excavated sand was almost proportional to the momentum of a jet, as expected from the results of model experiments.

---

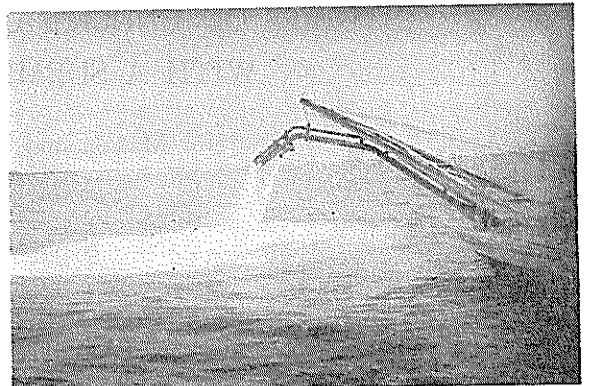
\* 機材部長

\*\*機材部作業船研究室

## 1. 序 論

現在各地のしゅん濩埋立工事に用いられているポンプ式しゅん濩船で、土砂掘削用のカッタを持たないもの、あるいは、海底の良質土砂のみを各種建設用資材として、供給することを目的とする高深度用エゼクタ式しゅん濩船では、ジェット切崩し装置によって海底土砂を切崩し攪拌し、うず巻ポンプまたはエゼクタで土砂混合水を水力輸送する方法が用いられている。この他にもジェット切崩し装置をもった簡単な土砂採取装置が方々で見受けられる。ジェット切崩し装置は、一般のしゅん濩に用いられている機械的な切崩し装置と比較して、摩耗部分がなく構造が簡単であるために、特に高深度しゅん濩を目的とするしゅん濩船には有利であるとされている。たとえば、ポンプ式しゅん濩船を例にとると、機械的なカッタ掘削装置のように、巨大な伝導軸やカッタを必要とせず、送水管とノズルのみを配置した写真一に示すような簡単な構造のもので、充分切崩し装置としての役目を果たすことができる。

このように利点の多いジェット切崩し装置の計画、並びに取り扱い上の問題は、現在のところ機械的な掘削装置よりも各種土質に対する適用範囲が狭いこと、および土質に対するジェットの切崩し特性が不明であること等が挙げられる。ある現場からの報告によると、上記の問題について次のような例がある。ジェット掘削装置をもつポンプ式しゅん濩船で、普通の状態の砂質土地域をしゅん濩しはじめたところ、吸込口附近の土砂が噴流によって遠くへ飛散してしまい、しゅん濩ポン



写真一 ジェット切崩し装置をもつ簡単なポンプ式しゅん濩船。(第二港湾建設局所属)

プは水のみを輸送する結果となった。ゆえに以後の作業にはジェット切崩し装置を用いないで運転したということである。これは切崩す土質に対して、ノズル口でのジェットの強さやノズルの配置が適切でないためにジェット切崩し装置が使用できなかった例である。次に最近開発されたエゼクタ式しゅん濩船の例であるが、海底面からのしゅん濩深度が大きな場所では、大変よく締まった状態の土砂の層が多く、ために排送管を流れる水量に対して、ジェットで切崩す土砂の量が不足がちとなり、低能率なしゅん濩作業を行なう結果を招くことがしばしばある。これも、土質に対するジェットの切崩し特性が不明であることが能率低下の原因である。

本報告は、ジェット切崩し装置についての手はじめの研究として、水中で砂や砂利層を切崩す際のジェットの強さと切崩し量の関係を二三の実験によって求め、今後の研究並びに調査に必要な基礎資料を得るとともに、実際面での上記ポンプ式しゅん濩船やエゼクタ式しゅん濩船のジェット切崩し装置の計画や取り扱いに必要な参考資料を得ようとするものである。更に上記実験結果とエゼクタ式しゅん濩船飛龍号の実船試験結果との関係について若干の考察を試みたものである。

## 2. ジェットによる土砂の切崩しについての考察

水中において、ノズル口から水を噴出させるとき、ノズル口前の静圧  $P_j$  およびノズル口外の静圧  $P_w$  とノズル口直径  $b_j$  が定まれば、ノズル口での噴出速度  $V_j$ 、および噴出流量  $Q_j$  は、次式によって求まる。

$$V_j = C_v \sqrt{2g(P_j - P_w) / r_w}$$

$$Q_j = \frac{\pi}{4} b_j^2 V_j \quad \left. \vphantom{Q_j} \right\} \quad (1)$$

ここに、 $C_v$  = 噴出時の速度係数

$g$  = 重力の加速度

$\gamma_w$  = 水の単位体積重量

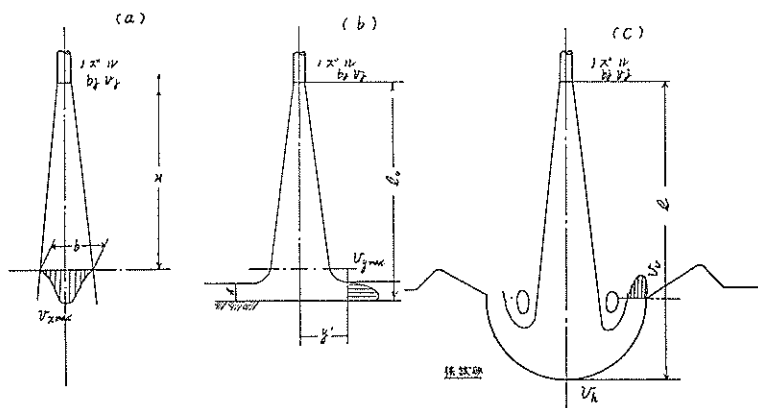
ここで、ノズル口には充分な丸味があって縮流は起らない場合について考える。ノズル口から噴出した水は、静止している周囲の水と混合し、ノズル口からの距離が遠くなるにしたがって、噴出軸方向の速度は小さく、ジェットの直径は順次に大きくなってゆく。このようなジェットの速度分布等に関して、無限に広い空間におかれた平面上の噴出口から平面に直角に水を噴出させた場合の理想噴流について、古くより数多くの研究が行なわれてきた。以下本章においてのみ慣例によって噴流なる語を用いる。これらの研究は、(1)噴出口の断面は無限に小さい。(2)噴流軸に垂直な断面を通る流れの運動量は一定である。(3)圧力こう配は零である。という仮定にたつてその理論が導かれている。(文献1) 噴出口断面が有限の値をもつ上記ノズル口から噴出する場合についても、噴流軸方向のかなりの範囲内で、Tollmienの公式によって速度分布の近似計算値を求めることができる。(文献2) すなわち、

(イ) 2次元噴流の場合、

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_x \max}{V_j} &= \frac{k_1}{\sqrt{x/b_j}} \\ \frac{V_x \sqrt{x}}{V_x \max k_1} &= f_1\left(\frac{\eta}{\sqrt[3]{2} C^2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(ロ) 3次元噴流の場合、

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_x \max}{V_j} &= \frac{k_2}{x/b_j} \\ \frac{V_x x}{V_x \max k_2} &= f_2\left(\frac{\eta}{\sqrt[3]{2} C^2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$



図一 砂面に衝突する噴流

ここに、 $V_x \max$  = 噴流軸上の流速 (中心流速)

$V_x$  = x 軸方向の流速

$x$  = 噴流軸方向の距離

$y$  = 噴流軸に直角方向の距離

$$\begin{aligned} \eta &= y/x \\ C &= \text{混合距離係数 } l/x \\ l &= \text{混合距離} \\ k_1, k_2 &= \text{常數} \\ f_1, f_2 &= \text{速度関數} \end{aligned}$$

上式で表わされる鉛直噴流の下方に図一1の(b)に示すように、噴流軸に直角に平板を置いた場合を考えよう。噴流はこの平板に衝突して方向を変え、噴流軸と平板の交点を中心として放射状に進行する。このとき平板に衝突する直前の軸方向の中心流速  $V_x \text{max}$  と、衝突して水平に方向を変えた直後の軸方向の最大流速  $V_y \text{max}$  の値は殆んど等しい値となる。すなわち近似的に、

$$V_x \text{max} \doteq V_y \text{max}$$

の関係となり、式(3)は次のように表わすことができる。

$$V_y \text{max} \doteq \frac{k_2 b_j V_j}{x} \quad \text{-----} \quad (4)$$

さて次に上記の平板が砂の層からなっている場合について考えてみよう。式(4)の  $V_y \text{max}$  が順次増加してある値に達すると、砂層表面の砂が砂面に沿って放射状に移動しはじめ、更に  $V_y \text{max}$  が増すと砂粒は順次に移動して図一1の(c)に示すような穴が掘られる。このとき切崩し穴の内面に沿って広がってゆく水流と砂粒とのつり合いについては、その現象が極めて複雑であるために、次のような仮定によってこれを実験的に確かめる方法をとった。

砂面に沿って流れる水平流によって表面の砂が移動する場合の砂粒の水平移動限界は、流れに対する砂粒の抵抗力と、水流が砂粒におよぼす作用力とが等しいときを考えて、次式によって表わされる。(文献2, 3)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\pi}{6} \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g d^3 \tan \phi &= k_h \frac{\pi}{8} C_D d^2 V_h^2 \\ \therefore V_h &= \varepsilon_h \sqrt{gd} \end{aligned} \right\} \text{-----} \quad (5)$$

- ここに、 $\rho_s$  = 砂粒の比重
- $\rho_w$  = 水の比重
- $g$  = 重力の加速度
- $d$  = 砂粒を球と考えたときの直径
- $\phi$  = 砂の摩擦角
- $k_h$  = 定数
- $C_D$  = 水に対する砂粒の抗力係数
- $V_h$  = 砂粒に接して流れる水平流速

$$\varepsilon_h = \left\{ \frac{4 \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \tan \phi}{3 k_h C_D} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

次に切崩し穴の内面に沿って広がり、順次に上方に方向を変えた上昇流と砂粒との関係については、砂粒の自由沈降速度と垂直上昇流速が等しいときにつり合いを保つから、切崩し時における砂流の垂直移動限界は次式によって表わすことができる。(文献1, 4)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\pi}{6} \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g d^3 &= k_v \frac{\pi}{8} C_D d^2 V_v^2 \\ \therefore V_v &= \varepsilon_v \sqrt{gd} \end{aligned} \right\} \text{-----} \quad (6)$$

ここに  $k_v = \text{定数}$

$$\varepsilon_v = \left\{ \frac{4 \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)}{v_u C_D} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

すなわち、水平流および垂直上昇流による砂粒の移動限界は、式(6)と式(6)に示すようにその係数が異なるだけで同じ形の式で表わされ、両式は一つの切崩し状態に対し、切崩し穴の底部に衝突して方向を変えた直後の水平流部分と、順次に方向を変えて砂面附近を流れる上昇流部分とにおいて常に同時に成立する。ここで噴出口と砂面の距離が等しく、砂粒一定の場合に、(1)切崩し穴の形状は相似である。(2)砂表面附近の砂粒を上方へ浮揚させるに必要な流速は切崩し穴の大小に関係なく等しい、(3)衝突して方向を変えた流れの層の厚さ  $h$  は  $x$  に比例する、と考えて式(3)の  $V_{x\max}$  と  $V_v$  との関係は次式によって表わされたとした。(文献4)

$$\frac{V_{x\max}}{V_v} \propto R_e^n \quad \text{-----} \quad (7)$$

ここに、 $R_e = \text{レイノズル数} \frac{V_{x\max} \cdot x}{\nu}$

$\nu = \text{水の運動粘性係数}$

$n = \text{実験によって定まる指数}$

上式と式(3)および式(6)とから次の関係を得る。

$$x \propto \frac{b_j V_j}{R_e^n \varepsilon_v \sqrt{gd}} \quad \text{-----} \quad (8)$$

鉛直噴流による砂の切崩し限界は上式によって表わされよう。以下、本報告においては、上式の  $b_j V_j$  の積を噴流、またはジェットの強さと呼ぶことにする。ただし上記の関係は粒状の砂の層に対するもので、砂粒と砂粒が結合した状態のものや粘土等を切崩す場合は、切崩し時間と切崩し量の関係を考慮する必要がある。以上述べたように、噴流により土砂を切崩すときの諸現象は、未だ理論的に充分解明されていない現状である。

### 3. 模型実験および実験結果

#### 3.1 模型実験の目的

ジェットによる海底土砂の切崩しの問題は、最近各種のしゅん洪船や諸工法にジェット切崩し装置の採用が試みられているにもかかわらず、これの計画並びに取り扱い等に必要な文献や資料が全くなく、その対策が待たれている現状である。ジェット切崩し装置について早急に研究を行なって解決すべき問題点としては、現在のところ次の事項が挙げられる。

- (1) 土質一定のとき、ジェットによる土砂の切崩し量は如何なる関係式によって与えられるかを見出すこと。
- (2) ジェットの強さが一定のとき、各種土質について夫々の切崩し現象を調べ、しゅん洪土質の分類を行なうこと。
- (3) ジェット切崩し装置のノズル配置と切崩し効果との関係を調査し、これと総合しゅん洪性能との関係を見出すこと。

上記の(1)については、一般の計画並びに取り扱いにおいて必要である他にたとえば後述の飛龍号実船試験結果でもわかるように、ジェット切崩し装置の噴出水流量を一定にしてジェットポンプ圧力を2倍に高めた場合、切崩し量は2倍となるか、または $\sqrt{2}$ 倍となるかというような問題を解決する場合に特に必要な事項であった。このための一般的な実験方法としては、平板並びに砂面に衝突して方向を変えた流れや、球面に沿って広がる流

れらの速度分布、境界層の問題等について水理学的に解明する方法も考えられた。しかしながら、今後実際面でのいろいろな型式のジェット切崩し装置により、種々の土質を取り扱ってゆく上において、実験室内での結果と実際面での結果を結びつけるためにも、ジェットによる土砂の切崩しの現象や切崩し量を直接確かめてゆく実験方法が適切であると考えたので、本報告においては、先ず最初に鉛直下向きのジェットによって粒状の砂および砂利を切崩す最も基本的な実験からはじめることにした。上記の(2)と(3)の事項については、現在のところもっぱら実船による調査を主とした研究を続けている。

上記の理由によって、本報告における模型実験では、下記内容について調べることを主目的とした。

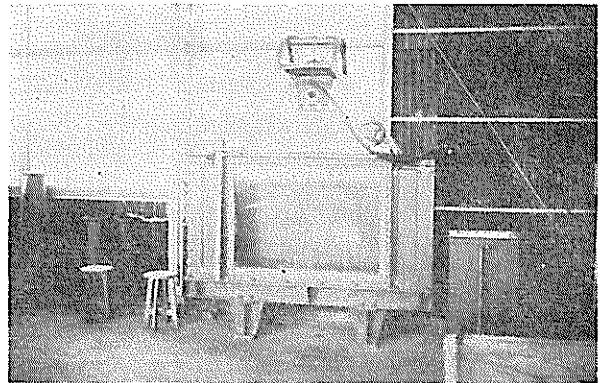
- (1) ジェットによる切崩しの現象を観察し、実験結果の解析を行なうための参考資料を得る。
- (2) ジェットの強さと切崩し量の関係を求める実験を行ない、先に述べた(8)式と実験結果を比較して式(8)の係数や指数を求める。
- (3) 実船による切崩し試験結果の解析に必要な関連事項を見出す。

上記の要望事項を満足させるために、2次元の模型による観察、並びに3次元の切崩し実験を行なってその結果をまとめた。

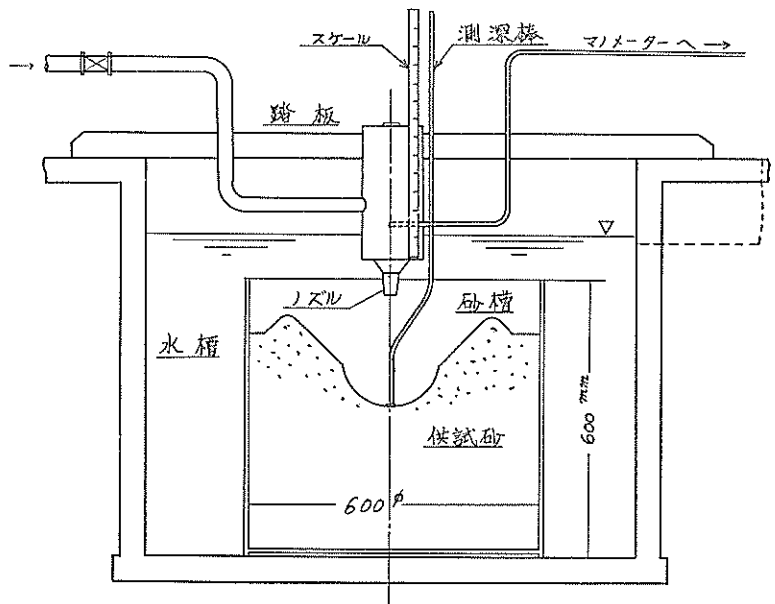
### 3.2 実験装置および実験

実験装置は、写真一2に示すように切崩しの現象を2次元的に観察するための装置、および図一2に示すような3次元切崩し実験装置の2種類の装置を使用した。写真一2の2次元観察装置は、前面が硝子張りの水槽の中に、前後両面共硝子張りで硝子間の内側巾が20mmの砂槽を入れて、砂槽内の供試砂を上方からジェットで切崩し、その切崩し状態を前面より観察するようになっている。

図一2のジェット切崩し実験装置は、供試砂の入った円筒型砂槽を水槽内に沈め、供試砂を上方からジェットで切崩し、このときのジェット圧力とノズル口から切崩し穴の底部までの深さを測定するようになっている。ジェット圧力は、ノズル口前でマノメータによって測定し、噴出流量の調節は、バルブの絞りを加減して行なう。切崩し深さの測定は、図のような形状の測深棒を用いた。



写真一2 2次元観察装置



図一2 ジェット切崩し実験装置



上記の実験装置による実験時水温は約  $19^{\circ}\text{C}$  であった。実験には、上記の両実験装置共、次の2種類の供試砂を用いた。

供試砂の種類	粒 径	形 状	備 考
砂	0.7~1.0 mm	角ばっている。	足 洗 産
砂 利	7 ~10. "	丸味が多い。	

本報告では、以下砂と砂利を総称して供試砂と呼ぶことにする。実験は、はじめに2次元観察装置により、ノズル口から噴出する水を着色して、砂面に衝突して方向を変える流れの状態を観察し、ジェットによって切崩される穴の形状の変化を調べ種々の測定を行なった。写真-3は、2次元実験用ノズルで噴出口断面は矩形である。

ジェット切崩し実験装置による3次元実験では、先ず表面の供試砂が動きはじめるときのノズル口での  $hV_j$  の積と、ノズル口から砂面までの距離  $l_0$  との関係を求める実験を行なった。このため口径の異なる3種類のノズルについて、ノズル口と砂面との距離を種々変化させ表面の砂または砂利が動きはじめるときのジェット圧力を測定した。  $P_j$  から式(1)によって噴出速度  $V_j$  が求まる。この実験では測定値  $V_j$  のばらつきが大きかった。次にジェットによる供試砂の切崩し限界を求める実験を行なった。この実験は、各ノズルについてノズル口から砂面までの距離を定め、ジェット圧力を順次に増してゆくときのノズル口から切崩し穴の底部までの深さ  $l$  を測深棒で測定した。ジェット圧力  $P_j$  から  $hV_j$  の積が求まり、これと  $l$  との関係から、砂および砂利に対する切崩し限界を表わす実験式を得ようとするものである。切崩し実験用ノズルは、写真-4に示すように直径が6, 8, 10, 13, 18, 20 mm の6種類を用いた。ノズル口から噴出する水の流量係数  $C_w$  は、0.96~0.98の範囲で、これは実験に先だつてあらかじめ各ノズル毎に測定した値を用いた。測深棒は直径が5 mm の鋼棒の先端に直径が20 mm の円盤を溶接したもので、ジェット圧力を一定に保つときの測定値のばらつきは、実験の範囲内で  $\pm 15$  mm 程度であった。このために  $l$  の測定は、同一の状態に対して4回測定してその平均値をとった。

### 3.3 2次元観察装置による実験結果

2次元観察装置において、ノズルを下方に向けて噴出速度  $V_j$  を順次に増してゆくと、水流の先端は左右交互に揺れながら進行し、その後方に続く水流の中心も絶えず左右に揺れていることが観察される。したがって、砂面に衝突して方向を変えた流れも、 $V_j$  の小さい範囲では左右対称とならず、その流量は大きく左右交互に増減する。供試砂が砂の場合は、この左右対称でない範囲のジェットによって、表面の砂が動きはじめ、次第に切崩

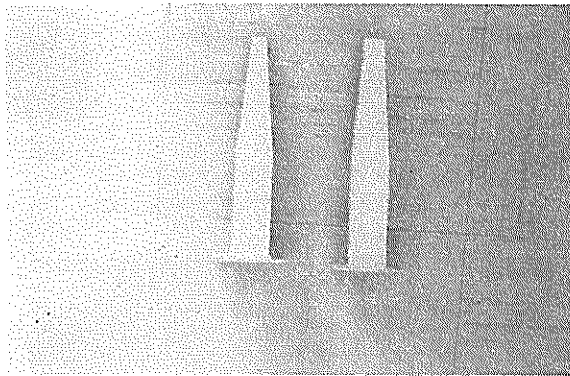


写真-3 2次元観察装置用ノズル

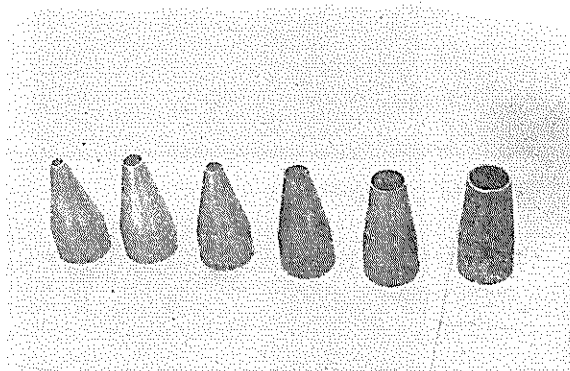
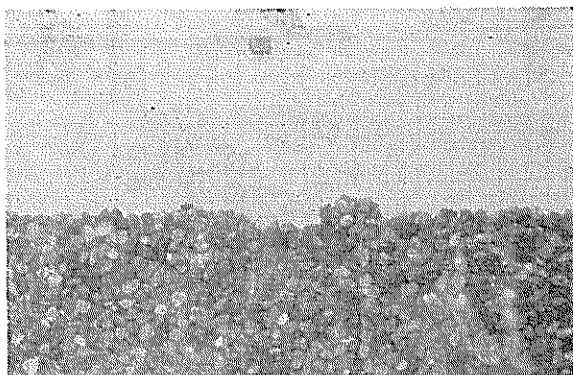
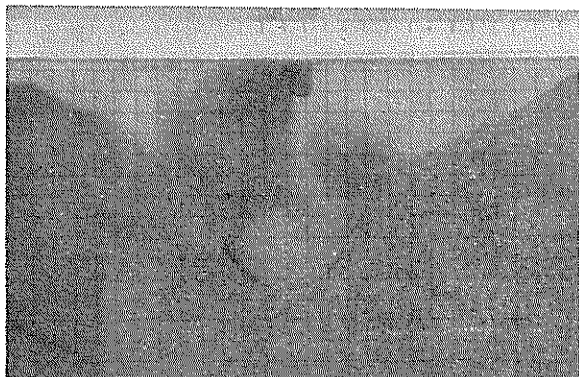


写真-4 3次元切崩し実験装置用ノズル

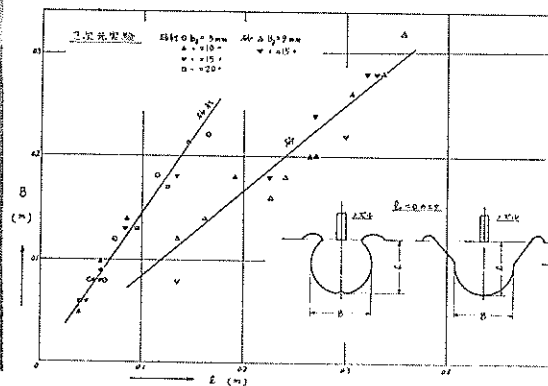
されてゆく。砂の切崩し状態の一例を写真一六に示す。砂利を切崩す際は、ジェットを中心が揺れることなく、写真一七に示すように切崩された穴の底部中心附近がやや高くなって残る状態となる。また砂を切崩す場合は、切崩された砂粒が上方へ向って流れる水流によって、一旦浮揚して後穴の周囲に落下するが、砂利を切崩す場合は、浮揚することなく、水流に押し上げられて盛り上げられた状態となる。したがって切崩されてできる穴の形状は、砂と砂利の場合を比較すると夫々異なる形状となる。図一三は、切崩す以前の供試砂の表面からの切崩し穴の深さ  $l$  と、穴の巾  $B$  を比較したもので、砂と砂利では、 $B/l$  の値が異なる結果となっている。この切崩し状態の相違は、後述の3次元実験においても、実験の範囲では、2次元の実験の場合と同様な傾向であった。



写真一五 表面の砂利が動きはじめるとき (2次元)



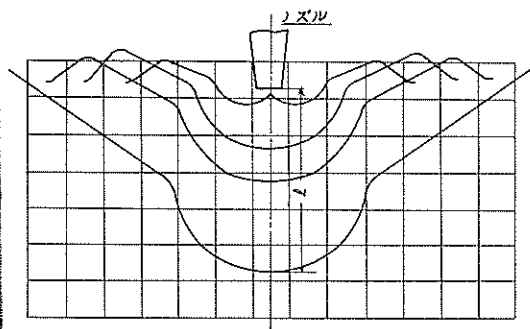
写真一六 砂の切崩し状態 (2次元)



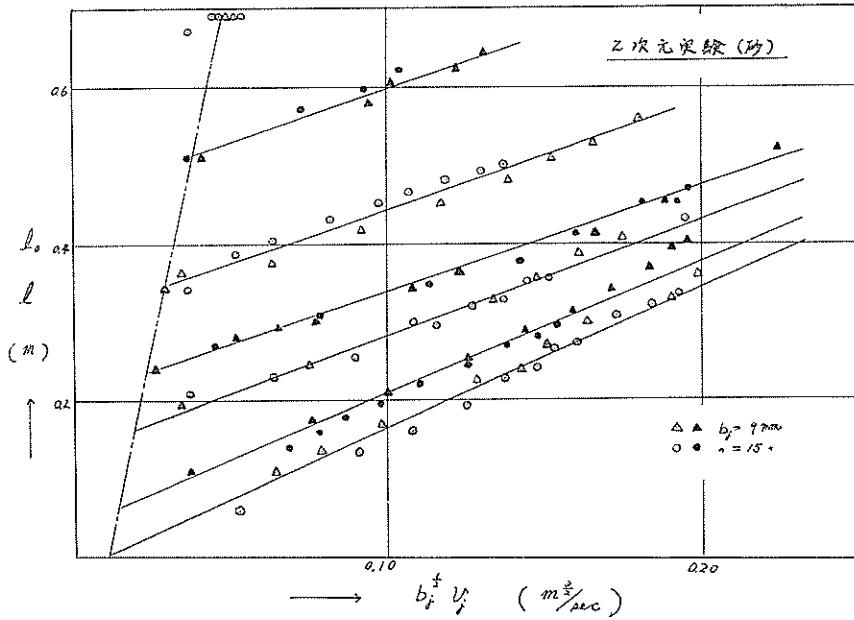
図一三 切崩し穴の巾 (2次元)



写真一七 砂利の切崩し状態 (2次元)



図一四 砂の切崩し穴の形状 (2次元)



図一五切崩し穴の深さ(2次元, 砂)

供試砂の表面の粒子が動きはじめてから、更に噴出速度  $V_j$  を増してゆくと、供試砂は衝突して方向を変えた流れによって順次に削りとられてゆき、切崩し穴の形状は図一四に示すような順序で大きくなってゆく。このとき噴出速度を一定に保てば、切崩し穴の形状も変化することなく、つり合いを保つ状態となる。また互いに結合していない粒状の砂、および砂利に対しては、噴出速度を定めてから切崩し穴の形状が一定の大きさになるまでに要する時間は、実験の範囲では殆んど無視することができた。

2次元のジェットの流れの速度分布は、すでに述べたように第2章の(2)式によって表わされる。いま  $x$  の代りにノズル口から切崩し穴底部までの距離  $l$  を考えると、衝突する直前の中心流速  $V_{x \max}$  は、

$$V_{x \max} = \frac{k_1 \sqrt{b_j} \cdot V_j}{\sqrt{l+x_0}}$$

で表わされる。ここに、 $x_0$  は  $x$  軸の原点からノズル口までの距離である。上式の  $V_{x \max}$  は、衝突して方向を変え切崩し穴の内面に沿い供試砂に接して流れる流速に関連し、これは供試砂一定で、ノズル口から切崩し穴までの供試砂面までの距離が等しい場合に式(7)の関係で表れされると考えられ、したがって、2次元のジェットで切崩し際の切崩し深さは近似的に次に示すような関係式で表わされる。

$$l \propto \left( \frac{b_j^{1/2} V_j}{R_e^n \varepsilon_v \sqrt{gd}} \right)^2 - x_0$$

上式で  $R_e = \sqrt{b_j} V_j / \nu$  であるから、 $R_e^n$  の値は  $b_j^{1/2} V_j$  の値の変化に伴って絶えず変化する。ゆえに上記の関係から、供試砂一定の場合の切崩し深さ  $l$  は、 $(b_j^{1/2} V_j)^{2(1-n)}$  によって定まると考え、砂についての実験記録を整理した結果を図一五に示した。図において、切崩し以前のノズル口から砂面までの距離  $l_0$  を  $0 \sim 0.52\text{m}$  の範囲で6種類の実験を行なっているので、 $b_j^{1/2} V_j$  の積と  $l$  の関係は夫々6本の曲線によって表わされている。図の鎖線は表面の砂が動きはじめるときの  $b_j^{1/2} V_j$  の積と  $l_0$  の関係を表わすことになる。これらの2次元実験の結果では、上式の指数  $n \approx 0.4$  すなわち  $l \propto (b_j^{1/2} V_j)^{1.2}$  の関係を得た。

### 3.4 3次元切崩し実験装置による実験結果

3次元の切崩し実験装置によって行なった実験結果について述べる。この場合のジェットの世界速度分布は、すでに述べたように式(8)によって表わされた。いま  $x=l+x_0$  とおくと衝突する直前の中心流速  $V_{e\max}$  は、次のように表わされる。

$$V_{e\max} = \frac{k_2 b_j V_j}{l+x_0}$$

上式と式(7)および式(8)とから、供試砂が一定で、ノズル口から切崩し前の供試砂面までの距離が等しいときに、3次元ジェットの切崩し深さ  $l$  は、近似的に次に示すような関係になると考えられる。

$$l \propto \frac{b_j V_j}{R_e^n \epsilon_v \sqrt{gd}} - x_0$$

$$\therefore l \propto \frac{V^n (b_j V_j)^{1-n}}{\epsilon_v \sqrt{gd}} - x_0$$

砂および砂利について行なった切崩し実験結果から、夫々の場合について  $l$  と  $b_j V_j$  の積との関係を求めて図一6および図一7に示した。図で黒色に塗りつぶした測定値は、表面の砂または砂利が動きはじめるときの  $l_0$  と  $b_j V_j$  の関係を求めたものである。これらの実験結果から上式の指数  $n=1/3$  すなわち  $1-n=2/3$  を得た。それゆえノズル口と切崩し前の供試砂表面の位置が等しい  $l_0=0$  の場合の切崩し限界を表わす実験式は次のようになる。

(1) 砂を切崩す場合で  $l_0=0$  のときの実験式

$$l = 11.2 \frac{v^{3/2} (b_j V_j)^{2/3}}{\sqrt{gdm}} - 0.032$$

(2) 砂利を切崩す場合で  $l_0=0$  のときの実験式

$$l = 12.0 \frac{v^{3/2} (b_j V_j)^{2/3}}{\sqrt{gdm}} - 0.032$$

ここに、 $l$  および  $b_j$  の単位は (m)、 $V_j$  の単位は (m/sec)  $g=m/\text{sec}^2$ ,  $v=10^{-6} \text{m}^2/\text{sec}$ ,  $dm$  は夫々の供試砂の平均粒径を表わし、砂の場合は  $dm=0.85 \times 10^{-3} \text{m}$ , 砂利の場合は  $dm=8.5 \times 10^{-3} \text{m}$  である。上式で砂と砂利の場合の比例係数の値 11.2 と 12.0 を得たことは、先に述べた切崩し限界を表わす式で  $l \propto 1/\sqrt{gd}$  の関係が正しいことを示している。ここで、砂について行なった実験の内、 $l_0=0$  でノズル直径  $b_j=6 \times 10^{-3} \text{m}$  のものは、その測定値が他と異なる傾向を示し、またその切崩し状態も砂粒の移動が他の場合とは異なる現象が認められたので、これを計算から除外した。(附)表一3は模型実験における測定結果の全部を示したものであり、(附)表一4はその計算表の一例である。

上記の模型実験の結果から、土質と  $l_0$  が一定の場合の切崩し限界は、 $l \propto (b_j V_j)^{2/3}$  の関係となり、切崩し容積  $q$  については、 $q \propto l^3$  と考えられるから  $q \propto Q_j V_j$  で表わすことができる。またジェットの圧力を増してから上記の切崩し穴の大きさに達するまでに要する時間は、実験の範囲では1秒以下であった。

今までに述べた実験の他に、断面が矩形のノズルによる切崩し実験や、2個以上のジェットノズルで同時に切崩す場合の実験等を行なって図一6、図一7の結果と比較した。その内容については文献4を参照されたい。また粘土や砂粒と砂粒が結合した状態の固結土についても二三の実験を行なったが、現在のところその現象を解明するに至っていない。

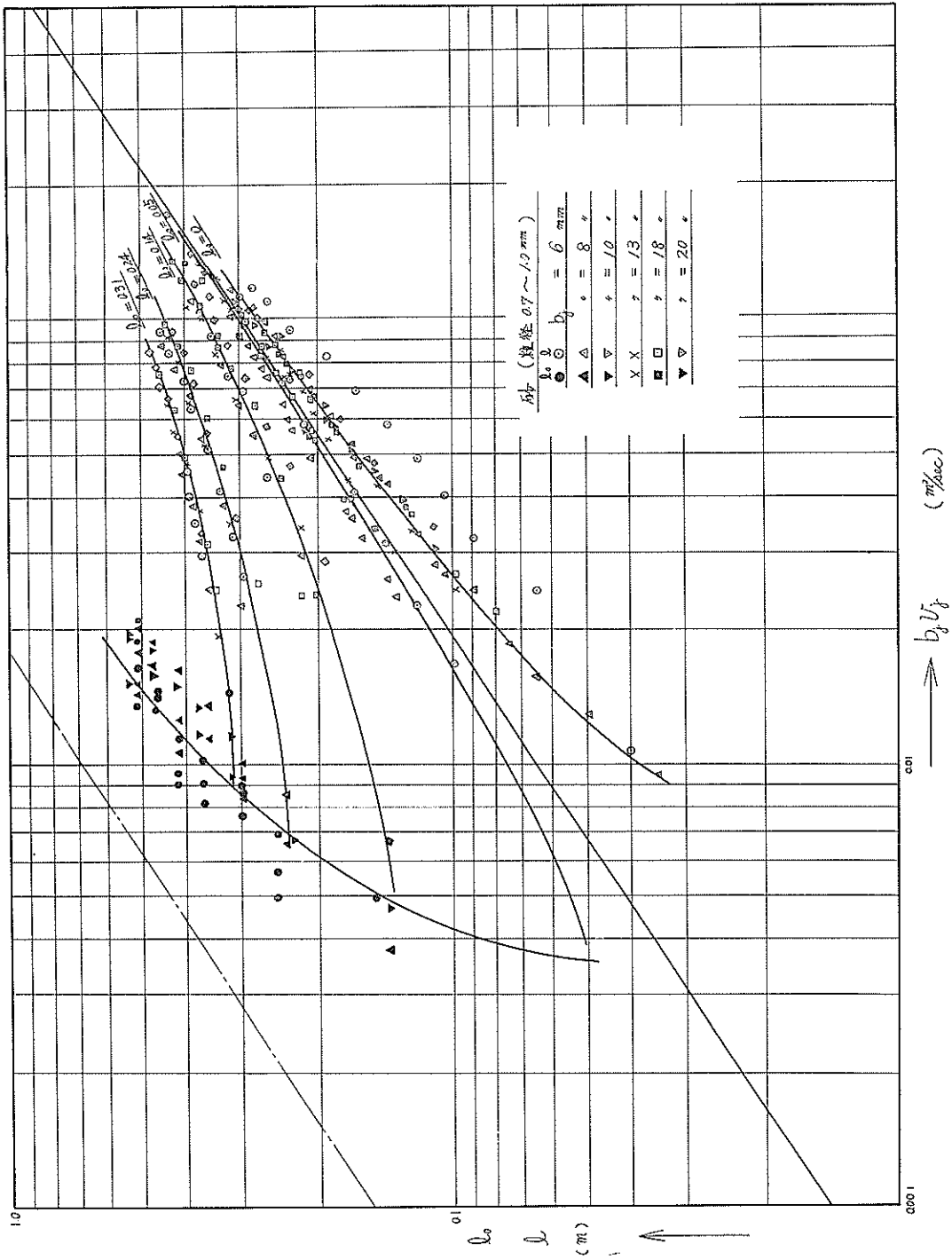
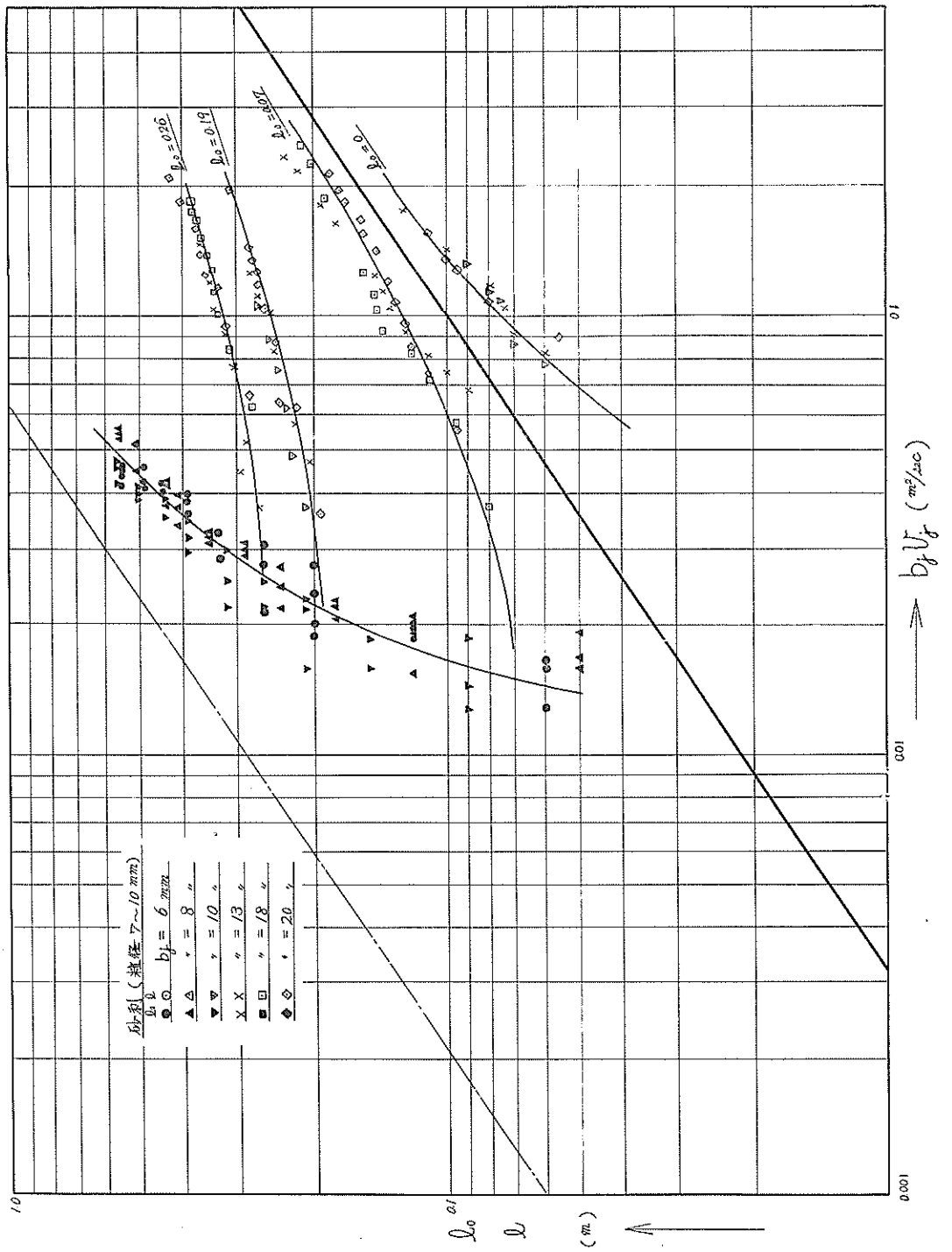


図-6 砂の切崩し実験結果

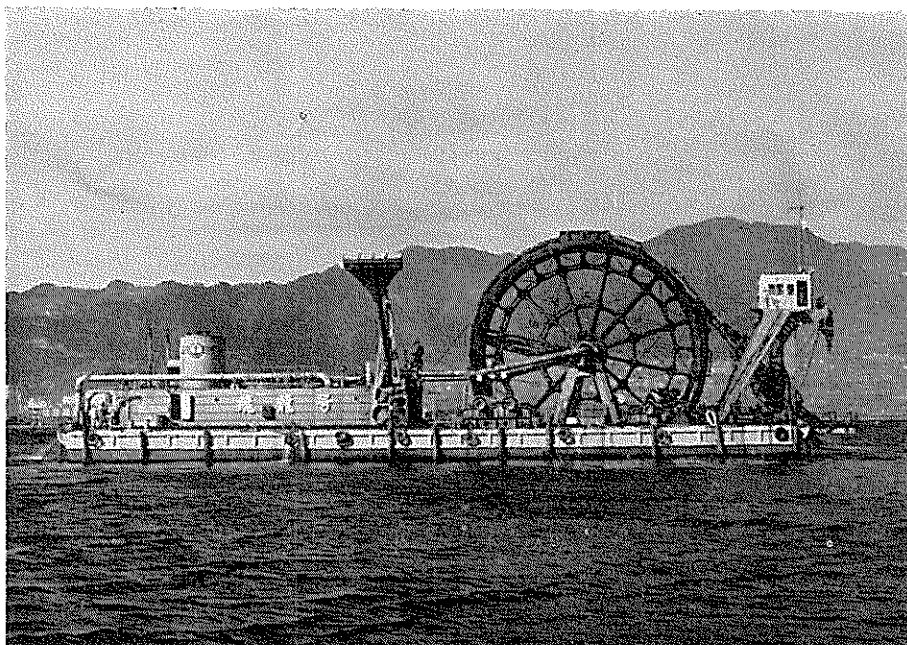


図一七 砂利の切崩し実験結果

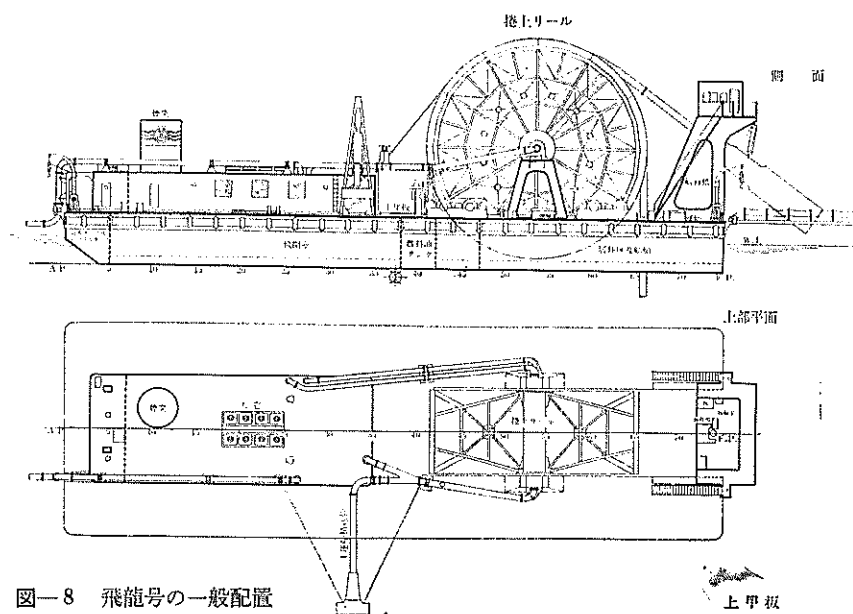
#### 4. エゼクタ式しゅん濺船飛龍号による実船試験および試験結果

##### 4.1 飛龍号の概要。

エゼクタ式しゅん濺船は、ベンチュリー管とジェットノズルを組合せたエゼクタ装置によって、切崩し攪拌された土砂混合水を水力輸送するためにその名称が与えられた。飛龍号は、第3港湾建設局所属のエゼクタ式しゅん濺船で1962年に建造された。現在神戸港外において海底の軟泥層を貫き、その下層にある良質の砂礫を採取して、これを各種建設用資材として供給するための作業を行なっている。写真一八は飛龍号の外観で、図一八にその一般配置を示す。



写真一八 エゼクタ式しゅん濺船 飛龍号



図一八 飛龍号の一般配置

エゼクタ式しゅん漕船は、他の種類のしゅん漕船と比較して摩耗部分が少なく、構造が簡単な点が有利であること以外に、これをポンプ式しゅん漕船と比較すると、しゅん漕用ポンプの吸込側圧力は、 $-0.6\sim-0.7\text{kg/cm}^2$ が限度となり、したがって、ポンプ式しゅん漕船では経済的なしゅん漕深さが20m程であるのに対し、エゼクタ式しゅん漕船では、エゼクタ装置を吸込口近くに配置できるために、吸込側圧力が問題となることがなく、深さが数十米に達する高深度しゅん漕作業も容易に行なうことができる。その作業方法を飛龍号の場合について説明すると、先ず海底の軟泥層を鉛直掘進用ジェットで約2～3mの直径で貫き、その下の砂礫層を鉛直掘進用ジェット、並びに水平切崩し用ジェットを交互に用いて直径が6m程の円柱形に切崩し、切崩した土砂混合水をエゼクタによって排送するようになっている。

次に飛龍号の主要目を示す。

(1) しゅん漕深度

最大しゅん漕深度 水面下 100m

(2) 船体主要寸法等

長さ(垂線間)	45.0m
巾(型)	14.5m
深さ(型)	3.5m
満載吃水	約1.7m
甲板間高さ(船体中心線にて)	
上甲板——機関室囲壁頂部	2.5m
上甲板——操縦室甲板	7.0m
操縦室甲板——操縦室頂部	2.3m

(3) 機関部、および電気部

エゼクタポンプ用原動機	
ディーゼル 1250PS×720RPM	1台
排送ポンプ用原動機	
ディーゼル 750PS×500RPM	1台
主発電機	
AC 15KVA×450V	1台
主発電機用原動機	
ディーゼル	1台
補助発電機	
AC 15KVA×450V	1台
補助発電機用原動機	
ディーゼル 20PS×900RPM	1台

(4) しゅん漕機械部

エゼクタ、およびジェット用ポンプ	
容量 1900m <sup>3</sup> /h 全揚程 105m 回転数 720RPM	1台



排送用ポンプ

容量 1000m<sup>3</sup>/h 全揚程 120m 回転数 1639RPM 1台  
 エゼクタ, およびジェット切崩し装置 1式

排送用ゴムホース

内径 0.38φ, 長さ 9.5m, 耐圧(常用) 3 kg/cm<sup>2</sup> 9本  
 エゼクタ給水用ゴムホース

内径 0.30φ, 長さ 9.5m, 耐圧(常用) 10.5kg/cm<sup>2</sup> 9本

ジェット給水用ゴムホース

内径 0.30φ, 長さ 9.5m, 耐圧(常用) 22.5kg/cm<sup>2</sup> 9本

含泥率測定装置

放射線式含泥率計, 放射線源コバルト60, 0.2キュリー 1台

上記のしゅん濩機械部の内, 排送用ポンプは現在ジェット増圧用ポンプとして用いられている。したがって, エゼクタ, およびジェット用ポンプを通過する水量の内, ジェット切崩し装置に送水される分は, 旧排送用ポンプによって加圧される。

4.2 実船試験の目的および内容。

飛龍号は建造された初期において, 神戸港外のしゅん濩区域土質に対し, ジェット切崩し装置の切崩し性能が不足し, そのためにエゼクタの揚水量に対して十分な含泥率を得ることができない状態であった。そこでジェット切崩し装置の圧力を 10 kg/cm<sup>2</sup> から 20 kg/cm<sup>2</sup> に高めて, 切崩し性能を増大させるための改造工事が第三港湾建設局で計画され, 飛龍号を建造した石川島播磨重工業株式会社で改造工事が実施された。この改造工事の前後に神戸港第3防波堤沖で, 飛龍号の夫々の状態においてしゅん濩性能試験が行なわれた。この試験は, 鉛直掘進用ジェットおよび水平切崩し用ジェットで切崩す場合に, 夫々最大の含泥率を得るようにしゅん濩装置を操作し, そのときのジェットおよびエゼクタ圧力, しゅん濩深度, 含泥率等を一定時間毎に測定し, 更に各試験は, 鉛直掘進用

ジェットノズル, および水平切崩し用ジェットノズルのノズル口直径や噴出角度を種々変えて行なっている。本論文では, 上記の試験の内, 主として鉛直掘進用ジェットについて, ジェットの強さと切崩し量の関係を調べ,

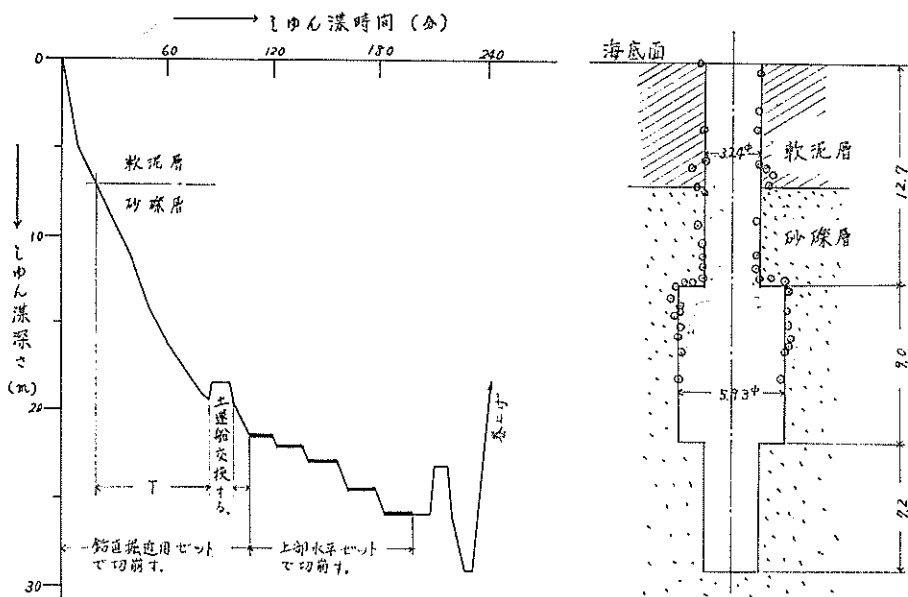
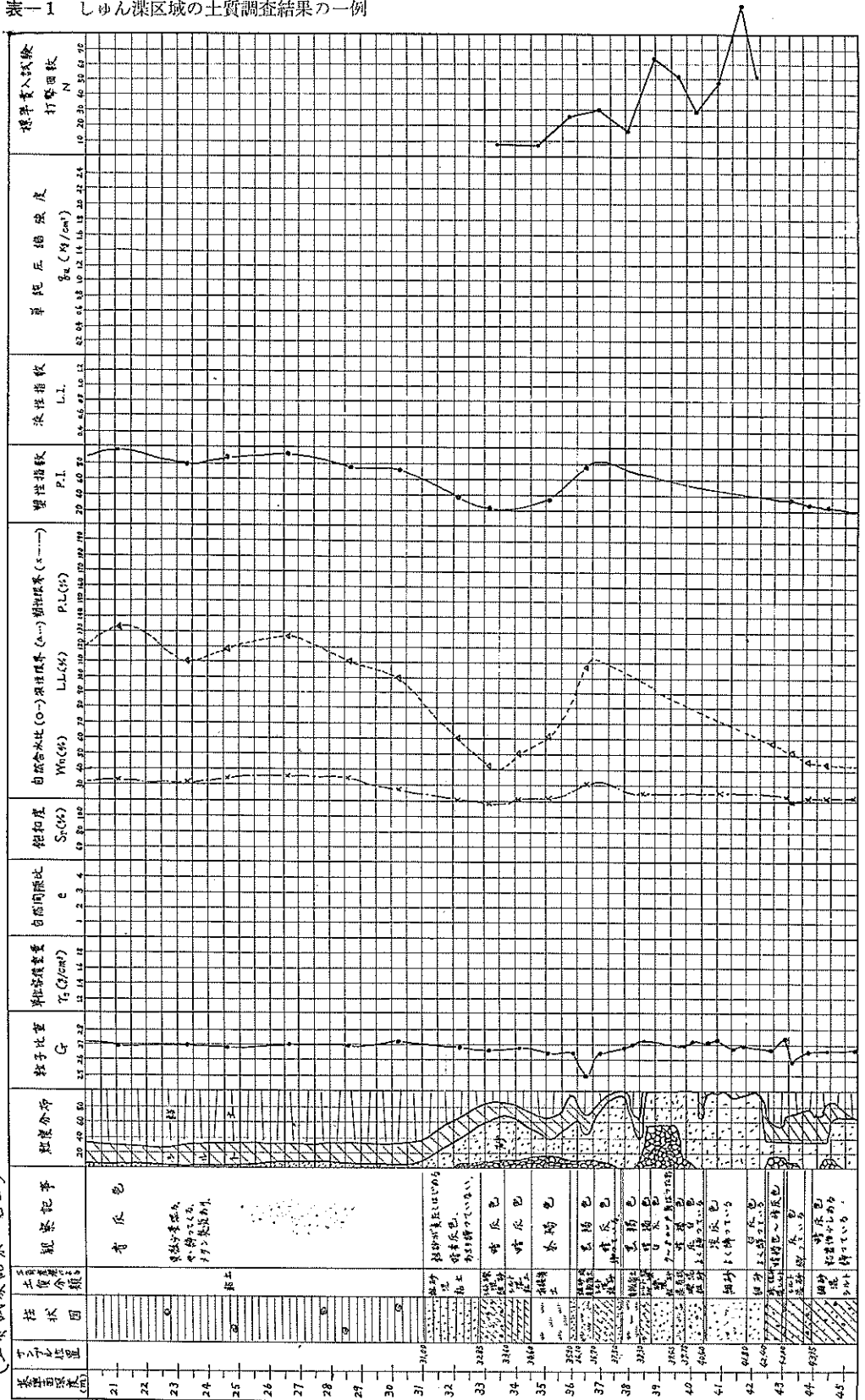


図-9 飛龍号のしゅん濩作業調査例

表-1 しゅん濠区域の土質試験結果の一例

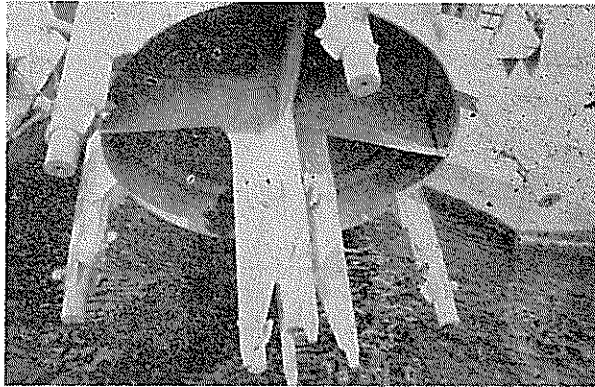
(土質試験結果一覽)



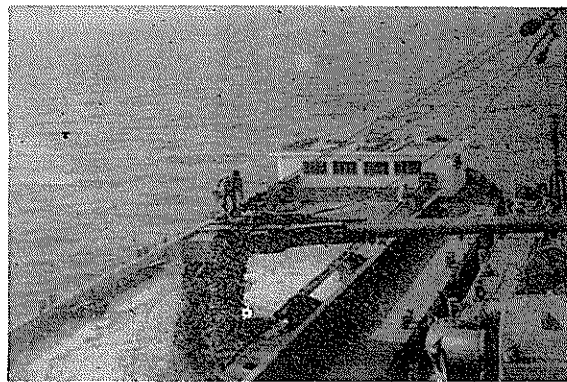
模型実験結果との関係を求めようとするものである。

図一9は、飛龍号のしゅん濩作業状態と切崩し穴の形状の一例を示したものである。図で切崩し穴の形状は、音響測深機を用いて測定した◎の符号で示した値と、含泥率計によるしゅん濩土量から計算した実験で示した値とがよく一致している。図一9のしゅん濩作業調査を行った区域の土質調査結果の一例を表一に示す。神戸港外における飛龍号のしゅん濩区域は、その殆んどが表一のような土質によって構成されているようである。

写真一9は、飛龍号の掘進用ジェットノズルの配置を示したものである。このノズルの噴出口部分は、自由に取り外すことができ、ノズル口径や噴出方向を変えることができる。写真の中央部は、排送用のエゼクタに通じる開口である。写真一10は、しゅん濩土砂の土運船への排送状態を示したものである。



写真一9 試験時の掘進用ジェットノズル配置の一例



写真一10 土運船へのしゅん濩土砂の排送状態

#### 4.3 実船試験結果。

飛龍号により行なわれた実船試験の結果について述べる。先に行なった模型実験の結果では、その切崩し深さ  $l$  が  $(b_j V_j)^{3/2}$  に比例した。このときの切崩し深さ  $l$  は、半球状に切崩された穴の直径に比例したから、切崩し容積  $q$  は  $l$  の3乗に比例することになる。ゆえに  $q$  について次に示す関係を得る。

$$q \propto Q_j V_j$$

上式の関係は、粒状の砂および砂利に対して実験の範囲内で適用できた。しかしながら、飛龍号のしゅん濩試験区域の土質は、粘土または、砂粒と砂粒が結合した状態の砂礫層であるために、ジェットによる切崩し土量は、切崩しに要する時間の影響を考慮することが必要となってくる。このような土質の場合にジェットの強さと切崩し土量の関係は、単位時間当りの切崩し土量によって比較する。土質一定の場合に単位時間当りの切崩し土量を  $q_n$  で表わすと、 $q_n$  については、切崩し土量の時間的変化を考慮せずに比較することができるから、

$$q_n \propto Q_j V_j$$

の関係になると考えられる。上式の関係は模型実験装置によって粘土を切崩す二三の実験を行なった際にも、 $q_n$  はほぼ  $Q_j V_j$  の積に比例するという結果を得ている。飛龍号の鉛直掘進用ジェットで切崩す場合は、単位時間に切崩される土量に相当する深さだけを掘進してゆくのであるから、上式の関係はそのまま適用できると考えられる。

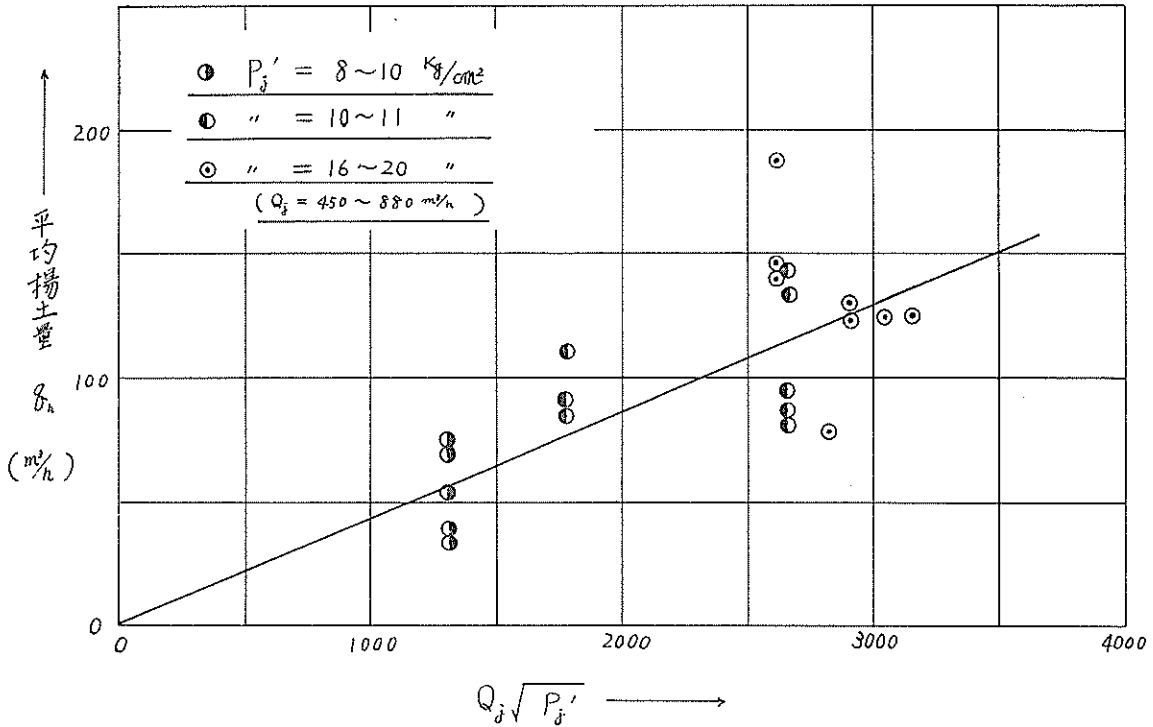
飛龍号による実船試験結果の中から、鉛直掘進用ジェットで砂礫層を掘進する場合のジェット圧力  $P_j$ 、噴出流量  $Q_j$  等と単位時間当りのしゅん濩土量  $q_n$  との関係を求めたものを表一2に示す。表の噴出流量  $Q_j$  の値は、直接切崩しに関係すると考えられるノズルから噴出する合計流量をとり、切崩した土砂を混合するためのノズル

や、土砂混合水を加勢するためのノズルから噴出する流量を除外した。また試験結果の測定値の中で、上部の土砂が明らかに自然に崩れ落ちたと考えられるものや、砂礫層の一部が特に切崩し困難であったために、平均の単位時間当りしゅん濘土量がいちじるしく少ない結果となっているものを除いてある。

表-2

飛竜号 浚渫試験成績表 (砂礫層掘進時)

試験 番号	$P_f$ $\frac{kg}{cm^2}$	$Q_j$ $\frac{m^3}{h}$	$Q_j \sqrt{P_f}$	平均揚土量 $\bar{Q}_h$ $\frac{m^3}{h}$	ゼットノズル		
					中央下向 <small>200L x 本</small> 35 $\phi$ x1	内周下向 <small>200L x 本</small> 20 $\phi$ x6	内周外向 <small>200L x 本</small> 12 $\phi$ x6
5-1	10.4	550	1,775.	92.7			
2	"	"	"	92.4	"	"	"
3	"	"	"	112.0	"	"	"
4	9.0	876	2,630.	141.5	50 $\phi$ x1	25 $\phi$ x6	15 $\phi$ x6
5	"	"	"	80.4	"	"	"
6	"	"	"	86.6	"	"	"
7	"	"	"	133.1	"	"	"
8	"	"	"	82.0	"	"	"
9	"	"	"	93.5	"	"	"
10	8.1	452	1,285.	71.0	35 $\phi$ x1	22 $\phi$ x6	—
11	"	"	"	75.0	"	"	—
12	"	"	"	33.2	"	"	—
13	"	"	"	37.0	"	"	—
14	"	"	"	53.0	"	"	—
6-1	17.9	670	2,840.	78.6	36 $\phi$ x1	18 $\phi$ x6	12 $\phi$ x6
2	17.9	705	3,140.	104.0	"	"	"
3	17.2	693	3,040.	104.0	"	"	"
6	18.5	680	2,930.	128.0	"	"	"
7	18.5	"	"	123.0	"	"	"
9	16.5	643	2,610.	188.0	"	"	"
10	16.7	645	2,640.	146.0	"	"	"



図—10 砂礫層掘進時の平均揚土量

次に  $V_j$  と  $P_j$  の関係は式(1)によって表わされる。飛龍号の場合は式(1)の  $P_j - P_w$  の値が操縦室計器圧力  $P_j'$  に等しいと考えてよい。ゆえに  $Q_j V_j \propto Q_j \sqrt{P_j'}$  であるから、表—2 の  $q_n$  と  $Q_j \sqrt{P_j'}$  の関係を調べた結果、図—10 に示すようにほぼ  $q_n \propto Q_j \sqrt{P_j'}$  の関係を得た。以上の結果から神戸港内での飛龍号試験区域の土質に対して  $q_n \propto Q_j V_j$  の関係となり、3次元模型実験結果と同様にジェットによる土砂の切崩し能力をノズル口での水流の運動量によって表示できることが確かめられた。

## 5. 結 論

以上の結果から鉛直ジェットによって海底土砂を切崩す際の切崩し土量は、一定の土質に対してノズル口での水流の運動量によって表わされることが判った。模型実験および実船試験の結果を要約すると夫々次のようになる。

- (1) 模型実験結果では、鉛直ジェットによる土砂の切崩し深さ  $l$  は、 $l \propto (b_j V_j)^{2/3}$  の関係となり、したがって、切崩し土量  $q$  は、 $q \propto Q_j V_j$  の関係を得た。粒状の砂、砂利等を切崩す場合は、切崩しに要する時間の影響を無視して考えることができる。
- (2) 実船試験結果では、単位時間当りの切崩し土量  $q_n$  は、 $q_n \propto Q_j \sqrt{P_j'^{3/2}}$  すなわち  $q_n \propto Q_j V_j$  の関係を得た。粘土や固結土を切崩す場合は、一定の切崩し量を得るための時間を考慮する必要がある。

上記の結論は、単に二三の模型実験、並びに実船試験の結果から得たものであり、厳密には理論的にもジェットによる土砂の切崩しの現象は、更に多くの要素に影響されると考えられる。これらの問題は最近各所で研究が進められている種々の土質についての洗掘の実験においても、いろいろの現象について検討されている。筆者らも今後の研究によって順次に確かめてゆきたいと考えている。

今までに述べた研究の内、二次元および三次元の模型実験は、エゼクタ式しゅん濺船飛龍号が建造される以前の1959年度に設計のための基礎資料を得るために実施したものである。その後神戸港内での飛龍号のしゅん濺区域の土質が予想以上に硬く、当初のジェット掘削装置による作業が困難であることが判明した。以来当所機材部でも研究の対称を粘土層や、よく締った砂礫層を切崩す方法や実船によるしゅん濺試験を主とした研究を進めてきた。このような理由で模型実験の内容も発表の機会を失ない現在に至った次第である。しかしながらこのように粒状の砂や砂利を切崩すときの資料も、小型の砂礫採取機や溝掘り装置等の計画に際しては、案外役立つようにも見受けられるので、その内容をまとめてみたものである。飛龍号については、その後種々の方法による実船試験がくり返されており、そのしゅん濺性能は除々に向上している。本研究の飛龍号による実船調査は、主として松田任が担当し、模型実験および諸記録の整理は、岩田尚生が担当した。

## 謝 辞

本研究に際し、飛龍号についての各種資料を提供して頂いた第三港湾建設局、並びに石川島播磨重工株式会社の関係者各位、および実船調査を手伝って頂いた元機材部、作業船研究室、内井敏之氏に厚く御礼申し上げたい。

終りに、模型実験を行なうに際して種々御指導を頂いた当所水工部、合田良実氏に深く感謝の意を表する次第である。

## 参 考 文 献

1. 日本機械学会誌 (No. 537) 流れ学特集 日本機械学会 1963年10月
2. 土木学会水理公式改訂委員会 水理公式集 土木学会 1963年11月
3. 佐藤昭二, 田中則男 沖浜帯における波による砂移動について 港湾技術研究所報告 第1巻1号
4. 日本作業船協会ポンプ浚渫船委員会 ポンプ浚渫船 日本作業船協会 近刊予定
5. 原田幸夫 流体の力学 横書店 1962年10月
6. Walter L. Moore and Frank D. Masch, JR. Experiments on the Scour Resistance of Cohesive Sediments, Journal of Geophysical Reserch, Volume 67 No. 4 April 1962

(附) 表-3-1 模型実験結果

表面の供試砂が動きはじめるとき			砂 (粒径0.7~1.0 mm)			表面の供試砂が動きはじめるとき			砂利 (粒径7~10 mm)		
$l_0$ m	$b_j$ mm	$v_j$ m/sec	$l_0$ m	$b_j$ mm	$v_j$ m/sec	$l_0$ m	$b_j$ mm	$v_j$ m/sec	$l_0$ m	$b_j$ mm	$v_j$ m/sec
0.15	6	0.82	0.48	8	2.07	0.06	6	2.12	0.12	8	2.56
0.25	"	0.82	"	"	2.33	"	"	2.60	0.18	"	2.56
"	"	0.95	0.52	"	1.78	"	"	2.68	"	"	2.76
"	"	1.16	"	"	1.90	0.12	"	3.12	"	"	2.81
0.30	"	1.26	"	"	2.23	"	"	3.22	0.24	"	2.73
"	"	1.43	"	"	2.60	"	"	3.32	"	"	3.04
"	"	1.50	"	"	"	0.20	"	3.22	"	"	3.36
0.37	"	1.34	0.14	10	0.47	"	"	3.32	0.26	"	3.62
"	"	1.50	"	"	0.67	"	"	3.92	"	"	3.65
"	"	1.70	0.23	"	0.67	"	"	4.51	"	"	3.67
0.42	"	1.50	0.32	"	0.94	0.26	"	3.62	0.35	"	3.93
"	"	1.58	"	"	1.16	"	"	4.58	"	"	3.89
"	"	1.90	0.38	"	1.16	"	"	5.09	"	"	4.05
0.47	"	2.18	"	"	1.34	0.33	"	4.70	0.41	"	4.22
"	"	2.33	0.43	"	1.50	"	"	5.46	"	"	4.69
"	"	2.37	0.48	"	1.58	0.39	"	6.01	"	"	4.98
0.52	"	2.23	"	"	1.78	"	"	6.41	0.44	"	4.68
"	"	8.73	0.54	"	1.90	"	"	6.56	"	"	5.14
"	"	3.15	"	"	1.95	0.44	"	6.77	"	"	5.39
"	"	3.49	"	"	"	"	"	7.08	0.51	"	5.48
0.14	8	0.47	"	"	0.49	"	"	6.96	"	"	5.52
"	"	0.82	"	"	"	"	"	7.09	"	"	6.51
0.24	"	0.82	"	"	0.55	"	"	7.66	0.55	"	6.68
"	"	1.06	"	"	"	"	"	6.91	"	"	6.85
0.30	"	1.06	"	"	"	"	"	7.36	"	"	7.00
"	"	1.16	"	"	"	"	"	7.40	"	"	"
"	"	1.26	"	"	"	"	"	7.66	0.09	10	1.26
0.36	"	1.43	"	"	0.05	"	"	1.96	"	"	1.42
"	"	1.71	"	"	"	"	"	2.07	0.15	"	1.84
0.42	"	1.34	"	"	"	"	"	2.37	"	"	1.58
"	"	1.58	0.12	"	0.12	"	"	1.90	0.21	"	1.84
"	"	2.01	"	"	"	"	"	2.37	"	"	2.18

(附) 表-3-2 模型実験結果

切崩し深さ		砂 (粒径0.7~1.0 mm)													
$l_0$ m	$b_j$ mm	$v_j$ m/sec	$l$ m	$l_0$ m	$b_j$ mm	$v_j$ m/sec	$l$ m	$l_0$ m	$b_j$ mm	$v_j$ m/sec	$l$ m	$l_0$ m	$b_j$ mm	$v_j$ m/sec	$l$ m
0	6	2.79	0.040	0	10	2.19	0.080	0	18	5.56	0.290	0.05	8	10.70	0.293
"	"	4.05	0.065	"	"	3.03	0.110	"	"	6.02	0.305	"	"	12.35	0.320
"	"	5.34	0.090	"	"	3.90	0.130	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	6.76	0.105	"	"	4.53	0.150	0	20	1.71	0.110	0.05	13	2.30	0.135
"	"	8.20	0.120	"	"	5.14	0.170	"	"	2.34	0.150	"	"	3.33	0.170
"	"	9.51	0.140	"	"	5.77	0.185	"	"	2.95	0.180	"	"	4.31	0.215
"	"	11.36	0.165	"	"	6.34	0.195	"	"	3.72	0.210	"	"	5.52	0.240
"	"	13.66	0.190	"	"	7.54	0.230	"	"	4.43	0.240	"	"	6.29	0.265
"	"	15.72	0.230	"	"	8.24	0.245	"	"	4.85	0.270	"	"	6.73	0.275
"	"	18.09	0.260	"	"	8.66	0.260	"	"	5.20	0.280	"	"	7.35	0.295
"	"	19.27	0.280	"	"	9.64	0.280	"	"	"	"	"	"	7.79	0.310
"	"	"	"	"	"	10.70	0.310	0.05	6	2.75	0.100	"	"	8.42	0.320
0	8	0.68	0.010	"	"	2.07	0.100	"	"	3.75	0.120	"	"	9.45	0.360
"	"	1.18	0.035	"	13	2.79	0.125	"	"	5.17	0.140	"	"	10.21	0.370
"	"	1.60	0.050	"	"	3.56	0.150	"	"	6.52	0.170	"	"	10.92	0.390
"	"	1.93	0.065	"	"	4.61	0.195	"	"	8.90	0.205	"	"	"	"
"	"	2.31	0.075	"	"	5.14	0.210	"	"	9.76	0.215	0.05	18	1.90	0.150
"	"	2.71	0.080	"	"	5.71	0.220	"	"	11.76	0.240	"	"	2.20	0.175
"	"	3.05	0.090	"	"	6.10	0.240	"	"	14.41	0.270	"	"	3.04	0.210
"	"	3.27	0.105	"	"	6.60	0.250	"	"	16.11	0.290	"	"	3.73	0.230
"	"	3.47	0.110	"	"	7.15	0.265	0.05	8	"	"	"	"	4.17	0.250
"	"	4.08	0.120	"	"	7.68	0.290	"	"	2.93	0.135	"	"	4.55	0.265
"	"	5.27	0.140	"	"	8.61	0.300	"	"	3.23	0.140	"	"	5.05	0.305
"	"	5.50	0.145	"	"	"	"	"	"	4.03	0.160	"	"	6.66	0.365
"	"	6.07	0.165	"	"	"	"	"	"	4.47	0.170	"	"	7.33	0.405
"	"	6.58	0.175	0	18	2.13	0.130	"	"	4.62	0.175	"	"	"	"
"	"	7.49	0.190	"	"	2.62	0.165	"	"	6.94	0.210	0.05	20	2.03	0.165
"	"	8.69	0.210	"	"	3.11	0.180	"	"	7.14	0.230	"	"	2.80	0.210
"	"	10.10	0.240	"	"	3.29	0.190	"	"	7.41	0.235	"	"	3.63	0.230
"	"	11.31	0.250	"	"	3.75	0.200	"	"	8.10	0.240	"	"	4.37	0.280
"	"	12.16	0.265	"	"	4.21	0.220	"	"	8.17	0.260	"	"	5.15	0.300
"	"	13.19	0.290	"	"	4.70	0.250	"	"	9.55	0.270	"	"	6.29	0.360
"	"	14.21	0.320	"	"	5.17	0.280	"	"	10.10	0.280	"	"	6.99	0.385



(附) 表-3-3 模型実験結果

切崩し深さ		砂 (粒徑0.7~1.0 mm)													
$l_0$ m	$b_j$ mm	$v_j$ m/sec	$l$ m	$l_0$ m	$b_j$ mm	$v_j$ m/sec	$l$ m	$l_0$ m	$b_j$ mm	$v_j$ m/sec	$l$ m	$l_0$ m	$b_j$ mm	$v_j$ m/sec	$l$ m
0.05	20	8.52	0.435	0.14	20	1.42	0.195	0.24	18	3.33	0.360	0.31	18	4.17	0.460
0.14	6	3.97	0.200	"	"	2.35	0.230	"	"	4.22	0.390	0.31	20	1.64	0.370
"	"	7.36	0.260	"	"	2.88	0.260	"	"	4.79	0.415	"	"	2.75	0.420
"	"	11.38	0.295	"	"	3.66	0.290	"	"	5.35	0.440	"	"	3.26	0.440
"	"	12.43	0.320	"	"	4.35	0.320	0.24	20	1.78	0.305	"	"	3.50	0.455
"	"	15.35	0.350	"	"	4.90	0.350	"	"	2.79	0.355	"	"	3.81	0.460
"	"	17.15	0.370	"	"	5.53	0.380	"	"	3.53	0.380	"	"	4.19	0.480
0.14	8	3.66	0.220	0.24	6	4.37	0.295	"	"	4.21	0.405	"	"	"	"
"	"	6.91	0.280	"	"	5.37	0.310	"	"	4.70	0.430	"	"	"	"
"	"	8.07	0.300	"	"	6.83	0.335	0.31	6	2.39	0.320	"	"	"	"
"	"	9.87	0.330	"	"	8.47	0.355	"	"	4.09	0.345	"	"	"	"
"	"	11.30	0.340	"	"	10.54	0.390	"	"	4.87	0.370	"	"	"	"
"	"	13.42	0.385	"	"	11.98	0.400	"	"	5.93	0.385	"	"	"	"
"	"	15.14	0.400	"	"	14.09	0.440	"	"	6.67	0.390	"	"	"	"
0.14	13	2.62	0.220	"	"	15.63	0.455	"	"	7.56	0.400	"	"	"	"
"	"	3.79	0.260	0.24	8	2.83	0.300	0.31	8	3.07	0.355	"	"	"	"
"	"	5.08	0.305	"	"	4.83	0.330	"	"	3.96	0.375	"	"	"	"
"	"	6.47	0.345	"	"	6.65	0.365	"	"	4.76	0.385	"	"	"	"
"	"	7.76	0.370	"	"	8.34	0.390	"	"	5.66	0.405	"	"	"	"
"	"	8.02	0.400	"	"	9.64	0.420	"	"	6.24	0.415	"	"	"	"
0.14	18	1.32	0.205	"	"	10.81	0.440	0.31	13	1.50	0.335	"	"	"	"
"	"	2.44	0.245	0.24	13	2.70	0.315	"	"	2.88	0.375	"	"	"	"
"	"	3.56	0.275	"	"	3.99	0.360	"	"	3.69	0.400	"	"	"	"
"	"	4.24	0.315	"	"	4.94	0.390	"	"	4.35	0.425	"	"	"	"
"	"	4.76	0.335	"	"	6.12	0.410	"	"	4.95	0.440	"	"	"	"
"	"	5.80	0.370	"	"	7.04	0.440	"	"	1.72	0.360	"	"	"	"
"	"	6.67	0.405	0.24	18	1.41	0.275	0.31	"	2.67	0.400	"	"	"	"
"	"	7.45	0.430	"	"	2.62	0.330	"	"	3.46	0.425	"	"	"	"

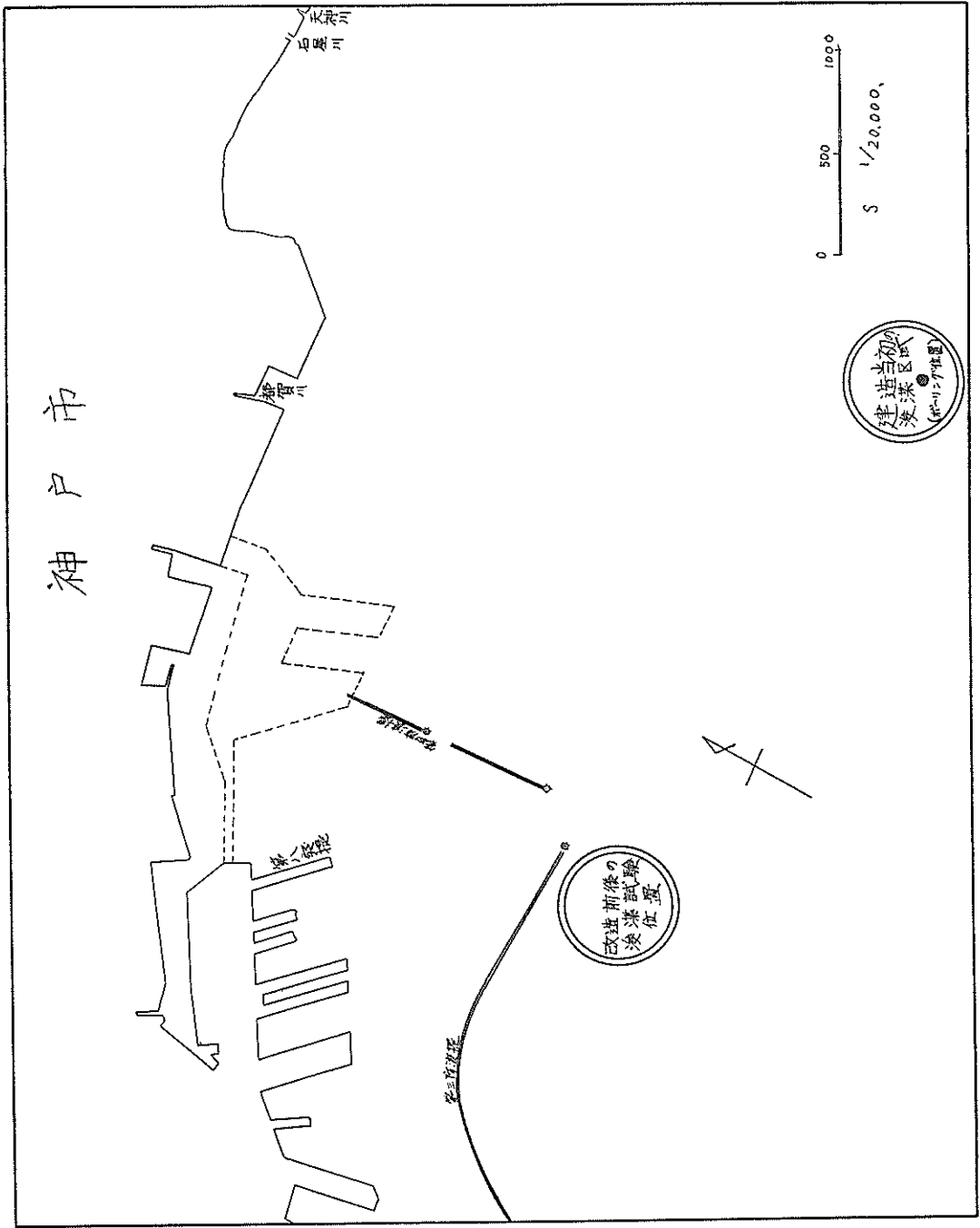
(附) 表-3-4 模型実験結果

切崩し深さ		砂利 (粒径 7 ~ 10 mm)													
$l_o$ m	$b_j$ mm	$v_j$ m/sec	$l$ m	$l_o$ m	$b_j$ mm	$v_j$ m/sec	$l$ m	$l_o$ m	$b_j$ mm	$v_j$ m/sec	$l$ m	$l_o$ m	$b_j$ mm	$v_j$ m/sec	$l$ m
0	10	7.38	0.060	0.07	18	3.18	0.095	0.19	13	6.38	0.245	0.26	18	9.13	0.371
"	"	8.65	0.070	"	"	3.94	0.110	"	"	7.73	0.250	"	"	9.61	0.375
"	"	10.82	0.075	"	"	4.61	0.120	"	"	8.45	0.270	"	"	10.16	0.380
"	"	11.24	0.089	"	"	5.13	0.140	"	"	9.65	0.275	"	"		
"	"	13.20	0.090	"	"	5.69	0.145	"	"			0.26	20	3.26	0.280
0	13	6.41	0.060	"	"	6.17	0.145	0.19	20	1.77	0.195	"	"	4.63	0.315
"	"	7.09	0.070	"	"	7.14	0.155	"	"	3.03	0.220	"	"	5.67	0.330
"	"	8.10	0.075	"	"	10.28	0.190	"	"	3.72	0.240	"	"	6.11	0.355
"	"	9.17	0.080	"	"	12.30	0.205	"	"	4.35	0.245	"	"	6.87	0.360
"	"	10.92	0.100	"	"	13.63	0.215	"	"	5.13	0.260	"	"	7.91	0.370
"	"	13.42	0.125	0.07	20	2.80	0.095	"	"	5.72	0.265	"	"	9.04	0.405
0	20	4.49	0.055	"	"	3.60	0.110	"	"	6.26	0.270	"	"	10.82	0.425
"	"	5.33	0.080	"	"	4.16	0.120	"	"	6.60	0.275	"	"		
"	"	6.36	0.095	"	"	4.77	0.125	"	"	7.04	0.280	"	"		
"	"	6.82	0.100	"	"	5.38	0.130	"	"	9.51	0.310	"	"		
"	"	7.83	0.125	"	"	7.05	0.145	0.26	13	2.88	0.265	"	"		
0.07	13	5.23	0.090	"	"	7.79	0.155	"	"	3.43	0.295	"	"		
"	"	5.43	0.100	"	"	8.34	0.155	"	"	3.97	0.285	"	"		
"	"	6.29	0.110	"	"	9.13	0.170	"	"	5.81	0.300	"	"		
"	"	7.15	0.125	"	"	10.44	0.175	"	"	6.96	0.320	"	"		
"	"	7.88	0.135	"	"		0.185	"	"	8.10	0.335	"	"		
"	"	8.72	0.145	0.19	10	3.69	0.210	"	"	9.07	0.345	"	"		
"	"	9.52	0.145	"	"	4.83	0.225	"	"	9.78	0.350	"	"		
"	"	10.28	0.160	"	"	6.08	0.230	0.26	18	11.31	0.360	"	"		
"	"	12.45	0.180	"	"	7.43	0.240	"	"	3.53	0.275	"	"		
"	"	13.97	0.195	"	"	8.81	0.250	"	"	4.61	0.310	"	"		
"	"	16.83	0.220	"	"	10.14	0.265	"	"	5.56	0.330	"	"		
"	"	17.80	0.235	"	"			"	"	6.20	0.335	"	"		
0.07	18	12.08	0.080	0.19	13	3.56	0.205	"	"	7.05	0.340	"	"		
				"	"	5.17	0.220	"	"	7.72	0.350	"	"		
										8.34	0.360	"	"		

(附) 表一4 模型実験結果計算表の一例

	No	指数 (1-n)	比例係数 $\alpha$	$x_0$	$e_l$	
供試材料 砂 粒徑 0.7 ~ 1.0 mm $l_0 = 0$ のとき	526100000000	+5010000 0000	511600700573	+5110065525284	+513840499910	
	526100000000	+5020000 0000	511117499671	+504365592630	+513834631930	
	526100000000	+5030000 0000	511032208585	+502456707853	+513830059904	
	526100000000	+5040000 0000	511065050569	+501495061091	+513826676385	
	526100600000	+5050000 0000	511164672967	+499123574392	+513824363336	
	526100000000	+5060000 0000	511318933316	+465192898301	+513822999772	
	526100600000	+5070000 0000	511528150225	+492347799102	+513822467656	
	526100000000	+5080000 0000	511798732250	+491831596762	+513822655575	
	526100000000	+5090000 0000	512541413505	-491525975035	+313823465590	
	526100000000	+5110000 0000	512570961084	-492914570513	+513824792388	
	526100000000	+5066666 6666	+511452006231	+493205559346	+513822559700	
	$[l = \alpha (b_j v_j)^{1-n} - x_0]$					
	供試材料 砂利 粒徑 7 ~ 10 mm $l_0 = 0$ のとき	5216000000000	+5010000 0000	+509549509194	+503842040749	-501027212300
		5216000000000	+5020000 0000	+505944431776	+503008908184	-501027412196
5216000000000		+5030000 0000	+504936215637	+501730758381	-501027595550	
5216000000000		+5040000 0000	+504596861265	+501091355697	-501027762291	
5216000000000		+5050000 0000	+504568511490	+497074499182	-501027912220	
5216000000000		+5060000 0000	+504726112546	+494512921452	-501028045172	
5216000000000		+5070000 0000	+505025251401	+492681328757	-501028161022	
5216000000000		+5080000 0000	+505450592308	+491305978256	-501028259693	
5216000000000		+5090000 0000	+506061725767	+482347931729	-501028341136	
5216000000000		5066666 6666	504911118087	+493231027190	-501028724309	
$[l = \alpha (b_j v_j)^{1-n} - x_0]$						

(附) 表一5一(a) 飛龍号実船試験位置



附) 表一五一(b) 実船試験成績表〔建造当初〕

(三建, 石川島, 港研)

飛龍号試験成績一覧表 (昭和37. 7. 23~37. 8. 6. の間に実施)									
試験回数	1	2	3	4	5	6	7	備考	
施行月日	7/23	7/24	7/25	7/30	7/31	8/2	8/6		
水深 (m)	15.0	15.6	15.8	15.0	15.0	14.7	15.5		
ヘドロ粘土層厚さ (m)	7.4	6.9	4.9	5.2	6.9	8.7	5.5	概略	
最大浚渫深度 (m)	39.4	44.6	44.1	44.0	33.4	48.4	44.4	水面下	
ジェットノズル	下部周囲下向	20φ	→				22φ	→	左記の他は同一ノズル
	下部周囲横向	15φ	→		12φ	→		15φ	
	上部横10°上向	40φ シングル	→	31φ ダブル	40φ シングル	→	40φ シングル+D.P.	→	
平均掘進速度 (m/mm)	0.123	0.191	0.245	0.224	0.253	0.368	0.505	於砂礫層	
上部ジェット作動時間	1h-33'	1h-11'	59'	56'	57.5'	63.5'	1h-21'	合計	
瞬間最大含泥率 (%)	26.3	29.4	32.6	22.2	33.5	22.8	21.3		
揚土時	掘進	揚土量 $q$ (m <sup>3</sup> )	113.6	121.6	86.5	95.0	191.1	106.3	粘土層は除外
	揚土時間 $h$ (分)	109	77	60	73.5	61	46.5	19	
	1時間当り揚土量 $q_h$ (m <sup>3</sup> /h)	62.5	94.4	86.5	77.5	188	137.1	138.7	
土量	上ト部作動時間	$q$	96.3	159.6	132.5	120.9	245.8	114.2	105.3
	$h$	100	84	78	83	119	89	128	
	$q_h$	57.8	113.9	101.9	87.3	123.9	77	82.2	
量	そ掘の後の時	$q$	28.4	67.7	23.1	/	/	/	/
	$h$	19	26.5	18	/	/	/	/	
	$q_h$	89.6	153.1	77.1	/	/	/	/	
総合	$q$	238.3	348.9	242.1	215.9		220.5	219.2	
	$h$	228	187.5	156	156.5		135.5	147	
	$q_h$	62.8	111.7	93.1	82.8		97.7	89.4	
浚渫平均直径	掘進完了迄 (m)	3.28	3.24	2.74	2.73	5.06	3.00	2.41	揚土量より推定
	上部ジェット作動時完了迄 (m)	4.36	4.35	3.71	3.80	7.25	3.36	3.45	
	その後の掘進完了迄	4.22	4.59	3.66	/	/	/	/	
特記事項	上部ジェット第グループのノズル1本は固縛した状態				上部ノズルは開閉させず				
	第1, 2グループのうち夫々1本は開かなかった形跡がある(但し噴射は可能)								
	1本目の孔は異物に突当たらずして中止		掘進時15分間は含泥率で20-30%で300.8m <sup>3</sup> /hの揚土量を得た。うねりのため途中から掘進不能。		1本目の孔は異物に突当たらずして中止				

(附) 表-5-(C) 実船試験成績表 [通常作業状態]

(三建)

試験番号	1	2	3	4	5	6	7	8		
施行月日	昭和37年 9.26	9.27	9.28	10.1	10.15	10.16	10.17	10.18		
水深 (m)	13.75	14.20	14.75		15.70	16.00	15.60	15.75		
ヘドロ 粘土層厚さ (m)	6.2	6.0	10.0							
最大浚渫深度 (m)	45.40	37.90	48.40		35.80	32.00	35.90	44.10		
ジノ エツ トル	下部周囲 向 $(\phi)$	22	22	22		22	22	22	22	
	下部周囲 横外向 $(\phi)$	12	12	12		12	12	12	12	
瞬間最大含泥率	—	—	—		—	—	—	—		
綜 合	揚土量 $q$ $(m^3)$	196	95	260		122	172	198	240	
	揚土時間 $h$ $(m)$	162	165	300		110	140	197	260	
	時間当り 揚土量 $q_h$ $(m^3/H)$	72.6	34.5	51.9		66.4	13.7	60.3	55.4	
揚内 土時 間訳	掘進時 $(min)$	162	165	300		95	110	157	170	
	上部切崩 $(min)$	—	—	—		15	30	40	90	
平均掘進速度 $(m/min)$	0.28	0.23	0.16		0.38	0.29	0.23	0.26		
計画 浚渫要領	0.5 m/min の掘進速度にて掘進のみ行う			0.5 m/min の掘進速度にて掘進し上部切崩を各 5 min 宛噴射し 2 m 掘進して再び上部切崩をかけ繰返し行う				左記要領と同じ		
上部切崩装置										

(附) 表-5-(d) 実船試験成績表 [改造後礫]

(三建, 石川島)

試験回数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
施行月日	昭和38年 10/17	10/23		10/24	10/25			10/26			
最大浸透深度 (m)	30.9	28.7	27	31	27	28	30.2	20	27	28.9	
ジェット水圧 (kg/cm <sup>2</sup> ) (ブリッジにて)	17.9	19.85	19.2	(F)18.5 (L)19.5	(F)18.5 (L)19.8	(F)18.5 (L)19.4	(F)18.5 (L)19.5	(F)16.7 (L)17.5	(F)19.5 (L)16.5	(F)19.7 (L)17.9	
エゼクター水圧 (kg/cm <sup>2</sup> ) (ブリッジにて)	(F) 9.7 (L) 9.8	9.3	9.4	(F) 9.2 (L) 9.6	(F) 9.1 (L) 9.4	(F) 9.1 (L) 9.8	(F) 9 (L) 9.4	(F) 9.3 (L) 9.3	(F) 9.3 (L) 9.3	(F) 9.3 (L) 9.6	
平均掘進粘土層	0.53	0.242	0.186	0.175	0.21	0.52	1.00	0.70	0.795	0.98	
速度 (m/min) 礫層	テイトイ 時間除 <sup>11</sup> 0.11	0.175	0.104	テイトイ 時間除 <sup>11</sup> 0.062	0.083	(max 0.49) 0.35	0.32	0.31	0.32	0.12	
揚 進 時	推土質 q (m <sup>3</sup> )	158	73	83	/	45	39	101	173	53	85
	揚土時間 h (分)	129	42	48	/	60	17	49	38	25	35
	時間当り 揚土大量 qn (m <sup>3</sup> /h)	78.6	104	104	/	45	128	123	273	188	146
上切 崩部 時 (2G)	q	36	/	/	/	16	14	14	55	/	48.7
	h	20	/	/	/	25	17	14	20	/	10
	qn	54.5	/	/	/	39	51	62	164	/	244
其掘 の進 後の 時	q	17	/	/	/	8	17	65	/	/	/
	h	14	/	/	/	15	11	27	/	/	/
	qn	74	/	/	/	32	90	144	/	/	/
量 合	揚土量 q (m <sup>3</sup> )	211	73	83	/	69	67	180	228	78.5	133.7
	揚土時間 h (分)	180	42	48	/	100	45	90	58	25	45
	1時間当り 揚土量 qn (m <sup>3</sup> /h)	71	104	104	/	42	90	120	237	188	182
			104				288			206	
土運船検収土量 (m <sup>3</sup> )	180	142		55	63	61	164	211	72	121	
					288			404			
特 記 事 項	アジテータ 一用 サブノズル	全 閉	35本6φドリル にて穿孔せるも 霧散して有効な らず			10φ%15ヶ復活					
	一般	10ズって 187いた。 点本中 の5結果 に砂が 掘進ノ詰		深試来 度みす。 30た mが の31 硬m 砂以上 掘進出		最大掘進 スピードを得る 様操縦した。		含泥率を最大にキープす る様掘進スピードを調整 した。			

港湾技術研究所報告 第3卷5号

1964年12月

編集兼発行者 運輸省港湾技術研究所

発 行 所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市川間162

印 刷 所 柿野屋印刷所  
横浜市鶴見区鶴見町394