

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

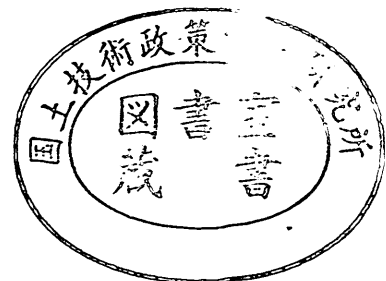
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 12

NO. 1

MAR. 1973

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第12巻 第1号 (Vol. 12, No. 1), 1973年3月 (Mar. 1973)

目 次 (CONTENTS)

1. 移動床模型実験用底質材料としての石炭粉の特性について
..... 田中則男・新保 修..... 3
(The Properties of Coal Grains as Bed Material in the Model Experiment on Littoral DriftNorio TANAKA and Osamu SHINBO)
2. 超音波式波高計について
..... 高橋智晴・佐々木弘・菅原一晃・鈴木禧実..... 59
(On the Ultrasonic Surface Wave Meter in Water Type
.....Tomoharu TAKAHASHI, Hiroshi SASAKI, Kazuteru SUGAHARA and Yoshimi SUZUKI)
3. 東京湾口航路潮流模型実験
..... 金子安雄・堀江 毅・上野信行・久保正則..... 83
(Hydraulic Model Test on Tokyo Bay New Fairways
.....Yasuo KANEKO, Takeshi HORIE, Nobuyuki UENO and Masanori KUBO)
4. 過圧密粘土の圧密特性中瀬明男・小林正樹・兼近明男.....123
(Consolidation Parameters of Overconsolidated Clays
.....Akio NAKASE, Masaki KOBAYASHI and Akio KANECHIKA)
5. 港湾における既設鋼構造物の腐食に関する研究善 一章.....141
(Study on Corrosion of Existing Steel Structures at Ports and Harbours
..... Kazuaki ZEN)
6. 模疑岩盤 (モルタル) の掘削抵抗について石塚浩治.....195
(A Study on Excavation of Model of Rock (a Mortar Specimen) by Bite-type Cutters.....Koji ISHIZUKA)

6. 模擬岩盤（モルタル）の掘削抵抗について

石 塚 浩 次*

要 旨

本報告は一軸圧縮強度 $100\sim 300\text{ kg/cm}^2$ の四角柱モルタル試料の一面を、バイトがある深さによって掘削するときの掘削抵抗を導びいた。

実験にはバイト幅の異なったもの ($0.5\sim 3.0\text{ cm}$) およびすくい角の異なったバイト ($0^\circ\sim 23^\circ$) によって行なった。すくい角が零度のバイトによって最初に試料の直角な面を掘削するときの掘削抵抗については、有限要素法および塑性方程式によって導びいた計算式によって、実験値との比較を行なった。これらの比較の結果、塑性方程式の計算式と実験結果は良く一致した。

また本報告においては、すくい角の変化したバイトによる掘削抵抗、バイトが試料面上を一定深さで特削している時の掘削抵抗についても、これらの状態の実験結果とすくい角零度における計算結果によって導びいた。

* 機材部 作業船研究室

6. A Study on Excavation of Model of Rock (a Mortar Specimen) by Bite-type Cutters

Koji ISHIZUKA*

Synopsis

Excavation forces required to excavate a mortar specimen of which uniaxial compressive strength is 100 to 300 kg/cm², keeping the depth of the cutter constant, are revealed in this paper. The cutters with the width of 0.5 to 30cm and with different front rakes are used in the experiments.

The excavation forces at the time of beginning of excavation are calculated by the theory of plasticity and the three dimensional finite element method and the comparison among the experimental results, the results of the theory of plasticity and those of the F.E.M. is made.

According to the comparison, the experimental results agree with the results of the theory of plasticity.

Besides, the excavation forces under stationary excavation of mortars are also revealed from the result of beginning of excavation.

* Member of the Dredger and Construction Equipment Laboratory, Machinery Division.

目 次

要 旨	195
1. ま え が き	199
2. 掘削力の計算式	199
2.1 有限要素法による計算	199
2.2 塑性方程式による計算	200
3. 試料の物理的性質	203
3.1 応力—ひずみ曲線, ヤング率, ポアソン比の測定	203
3.2 圧縮・引張強度, 内部摩擦角, 粘着力の測定	204
4. 実験装置および実験方法	205
4.1 実験装置	205
4.2 実験方法	205
5. 計算結果と実験結果の比較	206
6. すくい角の変化による掘削力	211
7. 定常の掘削における掘削力	213
8. 結 論	216
9. あとがき	216
参考文献	216
付 録	217

1. まえがき

最近における港湾工事，航路の整備における問題点のなかに，軟泥層，岩盤層の浚渫がある。前者はおもに公害の上からその浚渫方法および浚渫土の取扱いに苦慮するが，岩盤の浚渫においては掘削機構の把握について未知の問題がある。

今日における岩盤の浚渫には機械的方法，水力による方法また最近においては熱，電気の利用による方法も考えられている。

本報告においては上記の岩盤浚渫の内の機械的な方法による掘削機構を解明するために模型実験を行い，その掘削抵抗の計算方法を導びいた。模型実験は模倣岩盤としてモルタル試料を用い，掘削方法はバイトによって一定の深さで切込んだ場合について行った。

このようなバイトによる掘削は陸上の土木機械に良く用いられ，多くの算定式が提案されているが，まだ確立された研究は見られないようである。

今回においては一軸圧縮強度約 $100 \sim 300 \text{ kg/cm}^2$ の試料について実験を行い，掘削抵抗の計算は，3次元有限要素法と塑性理論によって求めた計算式とによって比較検討した。

2. 掘削抵抗の計算式

2.1 有限要素法による計算

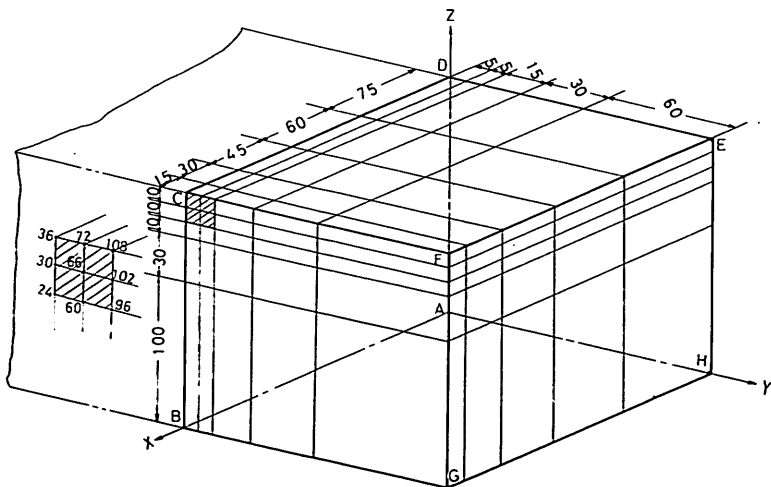
土や岩盤等を掘削する状態はほとんどが3次元状態で

の現象であり，その傾向は土質が硬くなるにしたがって爪等の使用により更に増す。したがって掘削抵抗（以下掘削力と呼ぶを）有限要素法によって計算する場合も3次元有限要素法の適用が望まれた。しかしながら現在において3次元有限要素法によって計算する場合，そのプログラミング，適応する材料の物理的性質について未解決の問題があり，それ程多くの適応例を見ない。

今回においては当研究室において開発したSF法（シーケンシャル・ファイル法）により行っている。SF法は剛性マトリックスの電子計算機への記憶が非零要素の一次元配列に行え，3次元有限要素法が一番の問題点である電子計算機の記憶する方法について解決された方法と言える。SF法によれば当研究室の電子計算機（TOSBAC 3400, 65K 語）による最大節点，要素数は x, y, z 面各々について6節点5要素の要素モデルについて扱える。全体の節点，要素数は216節点，125要素となる。上記の節点，要素数は電子計算機の内部記憶容量のみで計算できる数であるが，今回も上記の要素モデルによってモルタルのバイトによる掘削力を計算した。要素モデルを図-1示す。

図-1のモデルはバイト幅方向に対して対称となることから，バイトの幅中心に対して半分のモデルである。また境界条件は実験状態の試料固定法に合せて定めたものである。

次に今回における計算方法は下記に示す方法により行っている。



境界条件

- ABCD : $v=0, u, w \neq 0$
- CFGB : $u, v, w \neq 0$
- FEHG : $u, v, w \neq 0$
- EDAH : $u=0, v, w \neq 0$
- ABGH : $u, v \neq 0, w=0$
- DCFE : $u, v, w \neq 0$

- u : x 方向変位
- v : y 方向変位
- w : z 方向変位

図-1 3次元有限要素モデル

- (1) 図-1の斜線部(バイト部に相当)の各節点 No. 24, 30, 36, 60, 66, 72, 96, 102, 108に同じ量の変位を与える。
- (2) モルタル試料の応力-ひずみ関係を非線形とし、ひずみ増分法によって計算した。すなわち図-2に示す非線形応力-ひずみ関係に対し、微小ひずみ間を線形的に扱い、ヤング率は接線係数を用いる。
- (3) 一定変位部の変位増加により破壊規準によって破壊要素を判定し、破壊した要素を随時取除いた。
- (4) 変位は変位部の反作用の増加が零になるまで与えた。

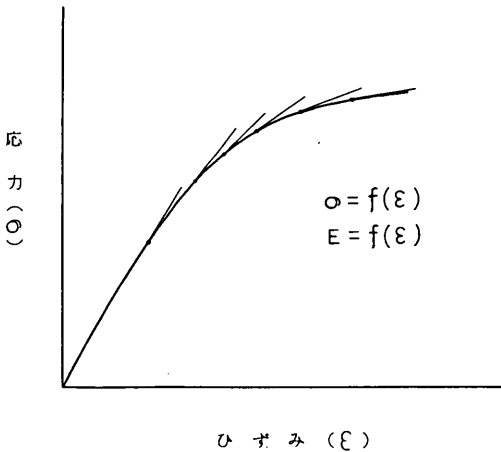


図-2 非線形応力-ひずみ曲線

また計算にあたっての仮定は次のとおりである。

- (1) 応力-ひずみ関係は三主応力制御による応力-ひずみ関係が必要であるが、試験機そのものが現在においてはなから今回は一軸圧縮試験 ($\sigma_1 \neq 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$) によって得たものを使用した。
- (2) モルタルの破壊規準をモール・クーロンの2次によった。すなわち

$$\tau^2 = 4\sigma_t(\sigma_t + \sigma)$$

ここで τ :せん断応力

σ_t :引張強度

σ :引張側をマイナス, 圧縮側をプラス主応力によって表わせれば次のようになる。

$$3\sigma_t + \sigma_3 \geq 0 \text{ のとき } \sigma_3 = \sigma_t$$

$$3\sigma_t + \sigma_3 < 0 \text{ のとき } 2\sigma_t(\sigma_1 + \sigma_3) = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2$$

- (3) ある要素の最大主ひずみが引張の状態の応力-ひ

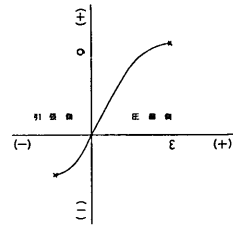


図-3 圧縮および引張側
応力-ひずみ曲線

ずみ関係は図-3に示すように、圧縮側の応力-ひずみ線図を引張強度に合せて、点対称的に縮小した。

- (4) バイト面にあたる一定変位部の支持はローラ支持とし、バイト面と試料面の摩擦を零とみなした。
- (5) 各要素の応力-ひずみ関係は最大主ひずみによって求めた。
- (6) ポラソン比は最大主ひずみの関数とした。

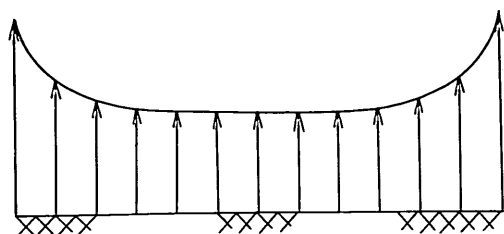
以上が今回における有限要素による計算方法ならびに計算にあたっての仮定であるが、バイトによる岩盤の掘削する場合は試料の物理的性質との関係の外に、バイト幅、掘削深さとの関係も調べなければならない。今回の有限要素法の計算におけるバイト幅、掘削深さの関係を求める計算においては、図-1に示すモデル要素寸法をバイトの縮小、拡大比に合せてバイト幅方向、掘削方向の各寸法ならびにx方向の各寸法を変化させた。例えば掘削深さの変化する場合は、z方向とx方向の各寸法を図-1の寸法に対する比の分だけ縮小、拡大した。

2.2 塑性方程式による計算

塑性方程式は2次元状態において展開されたもので、それゆえ掘削問題を解く場合においてはバイト幅方向の影響を調べなければならない。すなわち掘削状態における3次元の問題を塑性方程式によって解く場合、塑性方程式によって求まる圧力の外にバイト幅方向の圧力分布が必要となる。著者による文献⁹⁾において、砂を掘削する場合の実験において幅方向の圧力分布を実測し、実験式を求めた。この式が粘着力のある砂(水締め砂)についても実測値と一致することから、モルタル試料の掘削力の計算式にも適用した。すなわち水締め砂もモルタルも基本的には同様な物理的性質と考えられ、バイト幅方向の圧力分布は図-4に示すようになると思われる。

まず2次元状態における力の釣合いを考えると、モルタル自重=0としてバイトに作用する圧力は次のように

模擬岩盤（モルタル）の掘削抵抗について



(BITE)

図-4 バイト前面の幅方向の圧力分布

表わされる。

$$P = \left\{ \frac{e^{2\alpha \tan \phi}}{1 - \sin \phi} \cdot \frac{\sin(\Omega + \delta_p)}{\sin \Omega} - 1 \right\} \cdot \cot \phi$$

ただし

$$\sin \Omega = \frac{\sin \delta_p}{\sin \phi}$$

$$\alpha = \beta - \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2}(\Omega + \delta_p)$$

ここで

ϕ : 内部摩擦角

δ_p : バイト面と試料面の摩擦角

β : バイトの水平線からの傾き角

次に3次元の圧力分布は2次元部分の圧力に対して次のように表わされる。

$$P_\theta = \frac{P}{1 - \sin \phi} \frac{\sin(\Delta - \theta)}{\sin \Delta}$$

ただし

$$\sin \Delta = \frac{\sin \theta}{\sin \phi}$$

ここに

θ : 3次元部分における主応力方向の変化

上記の式の導き方については文献⁹⁾を参照されたい。し

$$\phi = 40^\circ$$

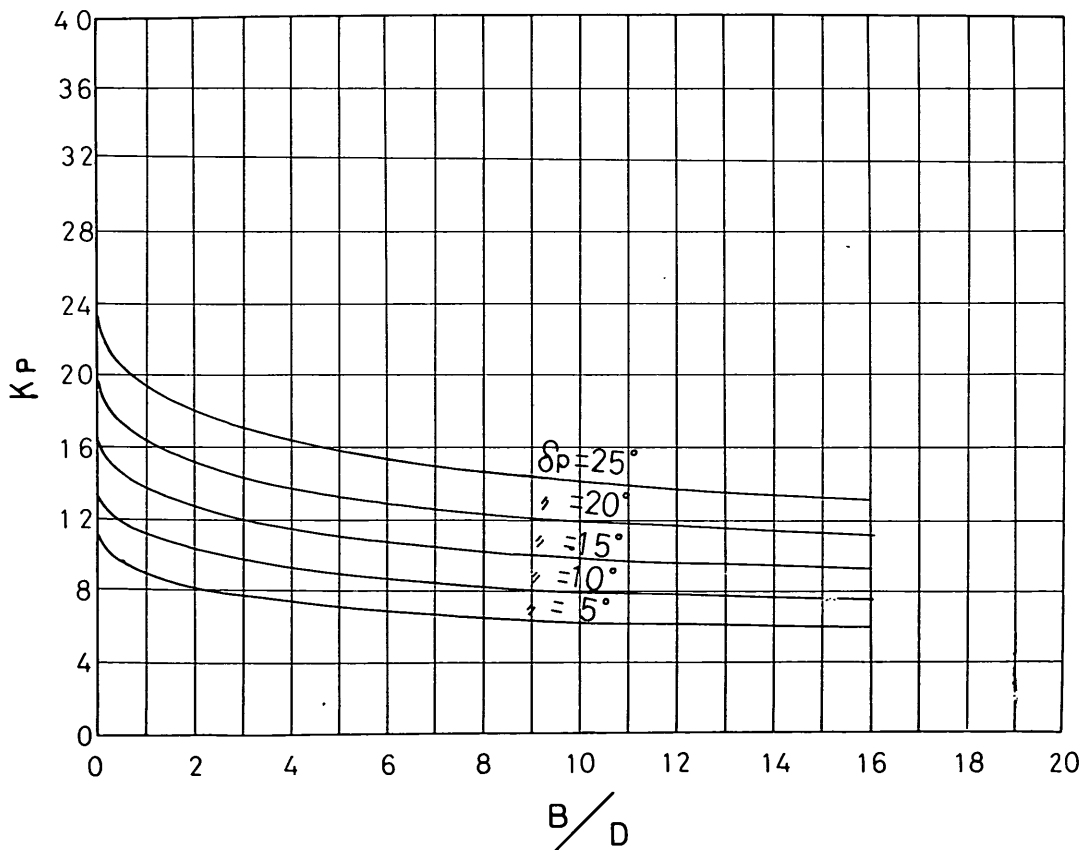


図-5 k_p 曲線

たがって3次元部の圧力増加を考慮した場合のバイトに作用する水平力 (F_H) は次のようになる。

- (1) バイトに作用する圧力分布が3次元状態のみの場合

$$F_H = d \cdot c \left\{ \int_0^\phi \frac{P}{1 - \sin \phi} \frac{\sin(D - \theta)}{\sin D} d\theta \right\}$$

- (2) バイトに作用する圧力分布が2次元状態を含む場合

$$F_H = d \cdot c \left\{ \int_0^\phi \frac{P}{1 - \sin \phi} \frac{\sin(D - \theta)}{\sin D} d\theta + B_2 P \right\}$$

ここで

$$\int_0^\phi d\theta = B_1 : 3 \text{次元部のバイト幅}$$

B_2 : 2次元部分のバイト幅

c : 粘着力

d : 掘削深さ

すなわち上式は c, ϕ, δ_p, B, d の関数となり、2次元状態の掘削力が次の式によって表わされるに対して、

$$F_H = P \cdot c \cdot B \cdot d$$

バイト幅方向の圧力分布を考慮した場合は

$$F_H = k \cdot P \cdot c \cdot B \cdot d = k_p \cdot c \cdot B \cdot d$$

ただし

$$k_p = k \cdot P$$

ここで k : 3次元部分の圧力増加係数
のように表わすことができる。

また k_p は p, δ_p, B, d との間に相関関係にあり、 B/d の関数として、 ϕ, δ_p のパラメーターとして表わすと 図-5, 6, 7 に示すようになる。

すなわち 図-5, 6, 7 を用いればバイトによる水平掘削力は c, ϕ, δ_p が試料の物理的性質として求めれば計算できる。

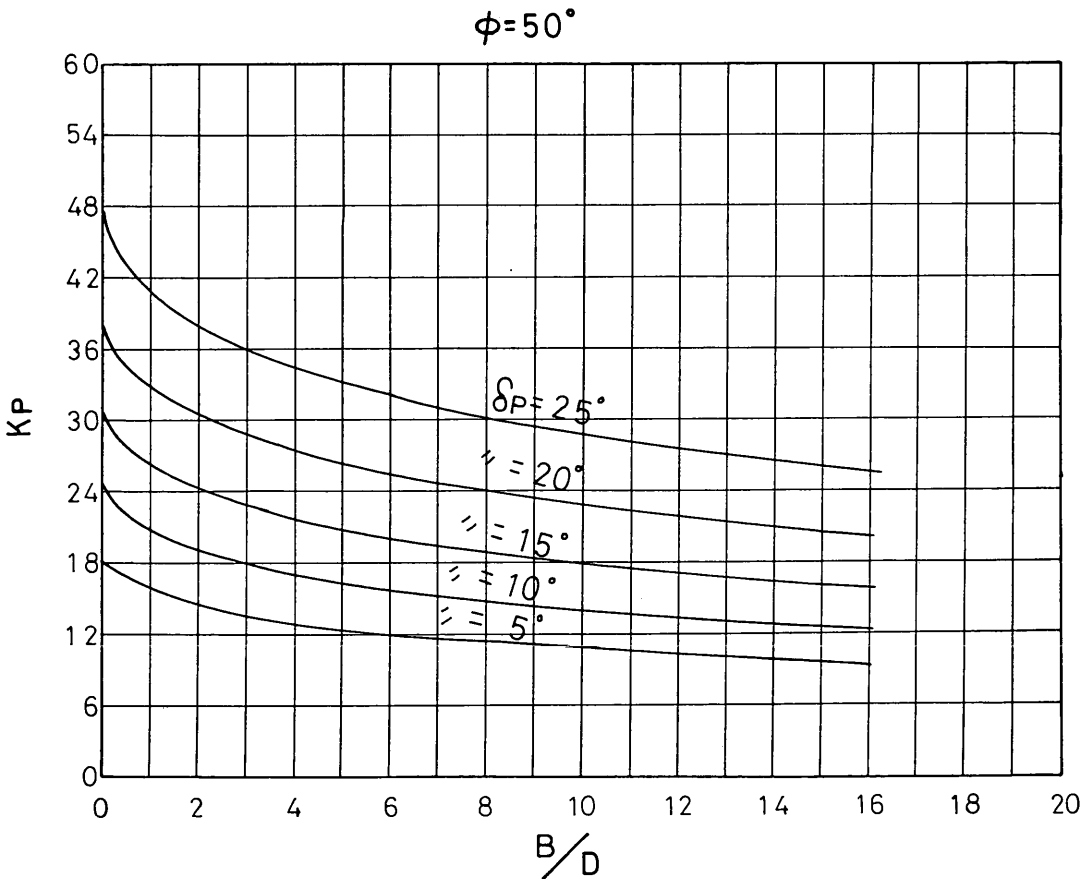


図-6 k_p 曲線

$$\phi = 60^\circ$$

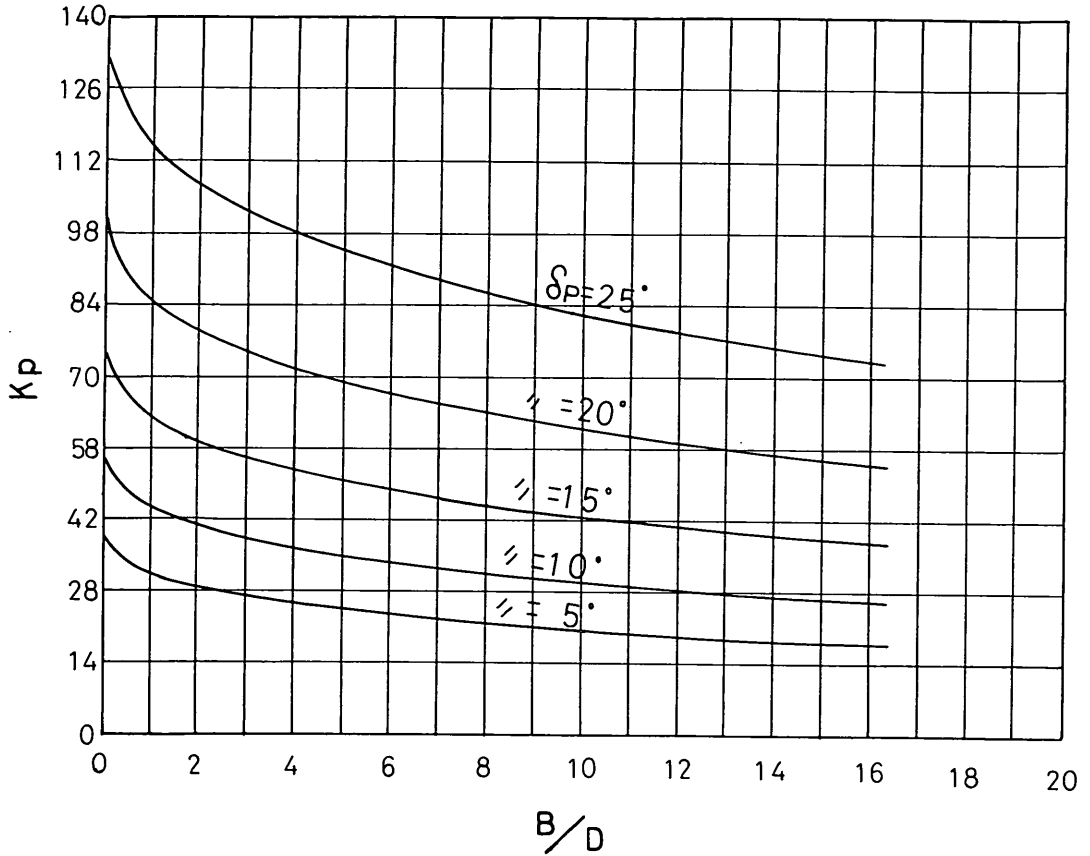


図-7 k_p 曲線

3. 試料の物理的性質

3.1 ヤング率, ポアソン比

今回の実験に供したモルタル試料は三種類あり、それぞれ砂・セメントの配合比を異った試料である。砂は平均粒径約 0.5mm の中砂と豊浦標準砂を用いた。これらの試料のヤング、ポアソン比は実験に供し終った時点で試料にコアサンプリングし、コアにひずみゲージを貼付

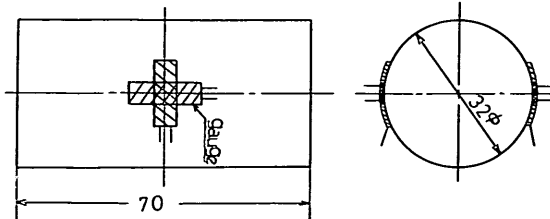


図-8 ヤング率, ポアソン比測定用テストピース

し、一軸圧縮試験により求めた。コアの形状, 大きさを図-8 に示す。

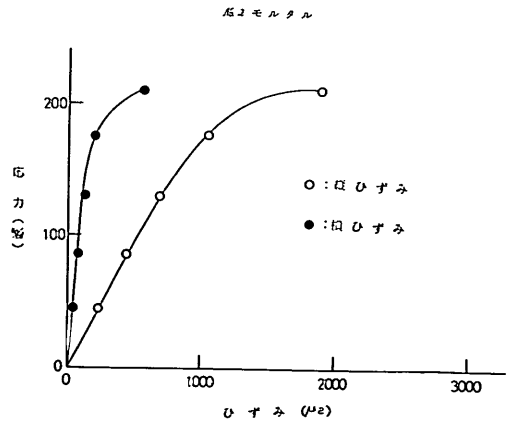


図-9 応力-ひずみ曲線

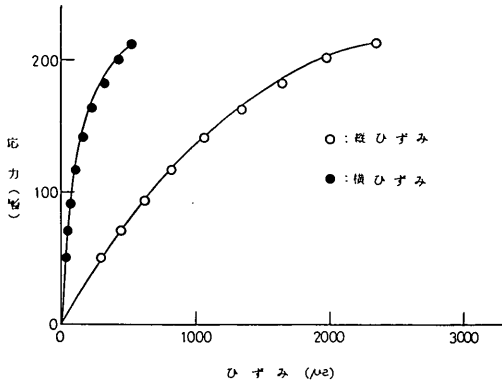


図-10 応力-ひずみ曲線

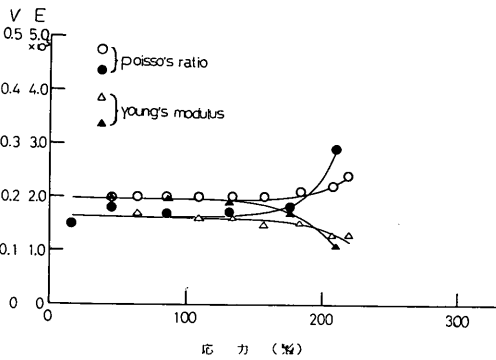


図-11 ヤング率, ポアソン比曲線

ゲージは鋼材用のもので、ゲージ長は 10 mm、ゲージ線線方法は 2 ゲージ法である。

一軸圧縮試験機は 30 ton アームスラを使用し、荷重の測定はひずみゲージを貼付した測定台を用いた。

ヤング率、ポアソン比の測定例を示すと 図-9, 10, 11 に示すようになった。

測定結果によればヤング率、ポアソン比とも、破壊付近までは線形であるが、破壊に近づくにしたがってヤング率は減少し、ポアソン比は増大する。線形部分のヤング率、ポアソン比は 表-1 に示すようになった。

表-1 ヤング率, ポアソン比測定結果

試料	ヤング率	ポアソン比
No. 1	1.2×10^5	0.20
No. 2	2.1×10^5	0.19
No. 3	2.3×10^5	0.22

3.2 圧縮・引張強度, 内部摩擦角, 粘着力の測定

内部摩擦角, 粘着力を求める方法は三軸主応力制御による破壊包絡線を描くか, または圧縮・引張強度の測定によりモール・クーロンの破壊規準を適応すれば求まる。

本来においては三主応力制御による包絡線を求めることが望まれるが, 今回においては三主応力制御試験機のないことにより後者の方法によって内部摩擦角を求めている。モール・クーロンの破壊規準は 1 次式と 2 次式があり, 圧縮強度, 引張強度によって表わした場合, それぞれ次のように表わされる。

$$\pm \tau = \frac{\sqrt{\sigma_t \cdot \sigma_c}}{2} \left(1 - \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_t \cdot \sigma_c} \sigma \right) \quad \text{1 次式}$$

$$\tau = 4\sigma_t(\sigma_t + \sigma) \quad \text{2 次式}$$

図-12 にそれぞれの破壊規準式を示す。

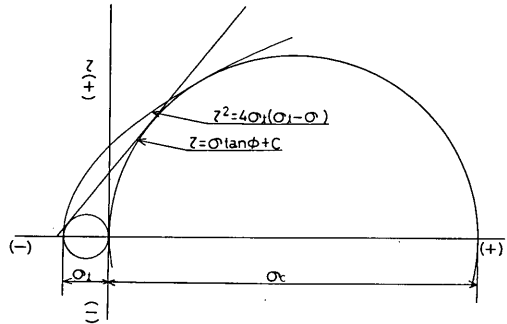


図-12 モール・クーロンの破壊規準

表-2 に供試モルタル試料のコア 8 個の測定による平均圧縮, 引張強度を示す。なお引張強度は現在においては一般的に用いられている圧裂試験によっている。

表-2 引縮, 引張強度測定結果

試料	圧縮強度	引張強度
No. 1	132 kg/cm ²	18 kg/cm ²
No. 2	240 "	30 "
No. 3	286 "	32 "

表-2 の圧縮, 引張強度から粘着力, 内部摩擦角を求めるモール・クーロンの式は次のようになる。

(a) 1 次式による場合

$$C = \frac{\sqrt{\sigma_c \cdot \sigma_t}}{2}$$

$$\phi = 90^\circ - \cos^{-1} \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t}$$

(b) 2次式による場合

$$C=2\sigma_t$$

$$\phi = \frac{d\tau}{d\sigma} = \frac{\sigma_t}{\sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_t \cdot \sigma}}$$

各試料についての内部摩擦角，粘着力を表-3に示す。

表-3 試料の粘着力，内部摩擦角

試料	粘着力		内部摩擦角	
	モール・クローン (1次式)	モール・クローン (2次式)	モール・クローン (1次式)	モール・クローン (2次式)
No. 1	24 kg/cm ²	36 kg/cm ²	50°	—
No. 2	42 "	60 "	50°	—
No. 3	48 "	64 "	52°	—

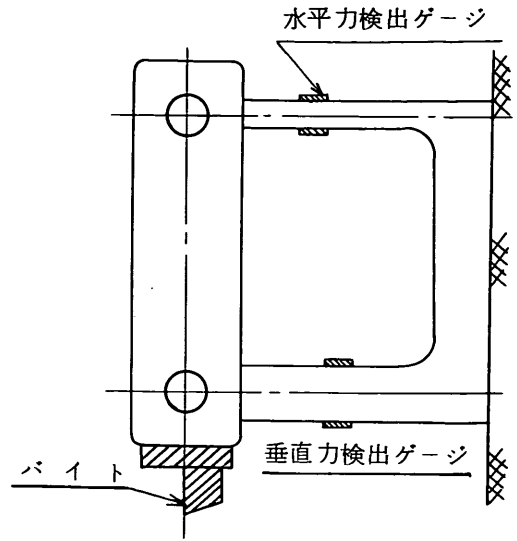


図-13 掘削力測定装置

4. 実験装置および実験方法

4.1 実験装置

モルタル掘削装置を写真-1に示す。掘削装置におけるバイトの移動は油圧により，押力は約 15 ton の能力を持ち，移動スピードは 0~20 cm/min の間で任意に設定できる。

また掘削深さは刃先を上下動され設定する構造である。掘削力の水平力，垂直力の検出は図-13に示す構造で，ひずみゲージにより検出している。測定部の検定カーブを図-14に示す。

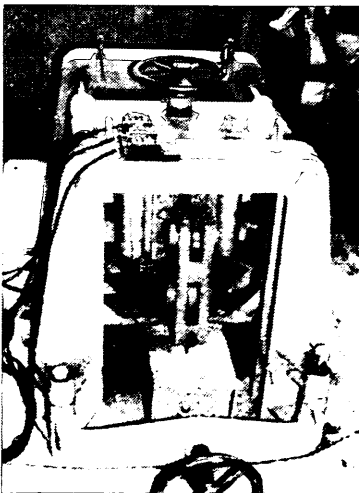


写真-1 掘削実験装置

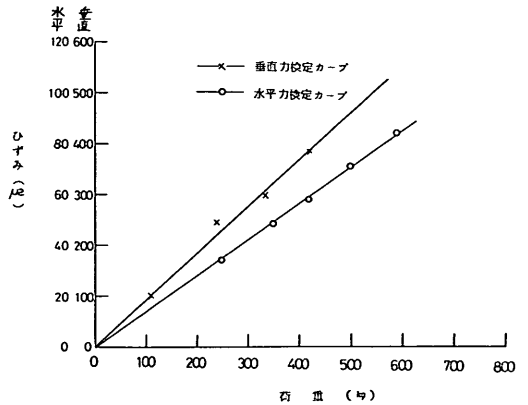


図-14 検定カーブ

4.2 実験方法

今回における掘削力はバイトが一定深さで掘削するときの力を求めたもので，掘削深さは 3.0~20.0 mm の間の任意の深さで実験を行なっている。

またバイト幅は 5, 10, 20, 30 mm の4種で，形状は図-15に示す。逃げ角は総てのバイトについて 10°である。上記のバイトはすくい角零度のものであるが，これらの多にバイト幅 20 mm のすくい角 11.5°, 23°の2種類のバイトがある。

実験におけるバイトの移動スピードは，総ての実験に

において 16 cm/min である。

供試試料のモルタルの形状は 30 cm × 30 cm × 30 cm の角ブロックで、同一砂・セメント配合によるものを分けて 4 個の試料を製作したものを使用した。

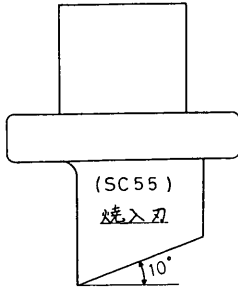


図-15 バイト形状

5. 計算結果と実験結果の比較

有限要素法による計算はかなり多くの計算時間を要する (今回の計算時間約 1.5 時間) ために、それ程多くの

計算例を示すことができなかつた。今回においては主に No. 2 試料について計算を行っている。No. 2 試料の有限要素法の計算に用いた応力-ひずみ関係は 図-9 に示す測定カーブと 図-11 に示すポアソン比曲線を用いている。ヤング率は 図-9 の応力-ひずみ曲線を、次の式によって近似した式によって求めた。ただしヤング率はプラスのみとしている。

$$\sigma = \frac{\epsilon}{a + b\epsilon^{2.5}}$$

ただし a, b は物理定数

次に塑性方程式による掘削力の求め方は (2) 式によって求めることができ、 k_p の値は ϕ, δ_p, B, d に応じて 図-5, 6, 7 から求められる。塑性方程式の計算に用いる内部摩擦角, 粘着力は塑性方程式がモール・クーロンの 1 次式をもとにして成立っているために、モール・クーロンの 1 次式によって求めた値を用いなければならない。

二つの計算方法による計算結果と実験結果を比較すると 図-16, 17, 18, 19, 20, 21 に示すようになる。図中

No. 1 試料

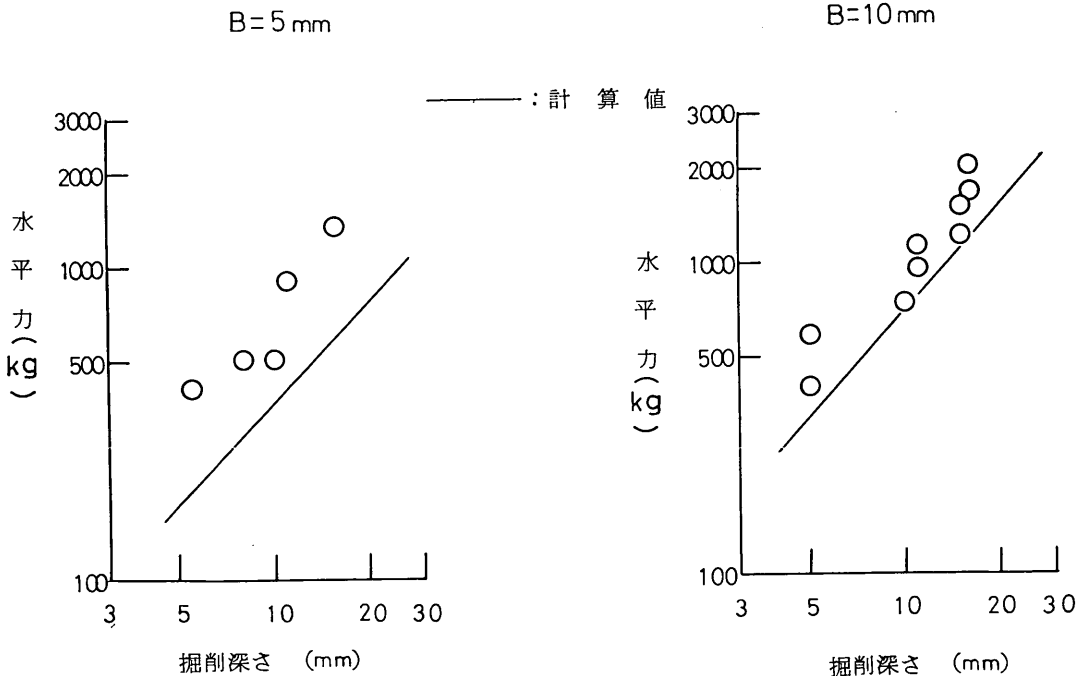


図-16 計算値と実験値の比較

模擬岩盤（モルタル）の掘削抵抗について

№1 試料

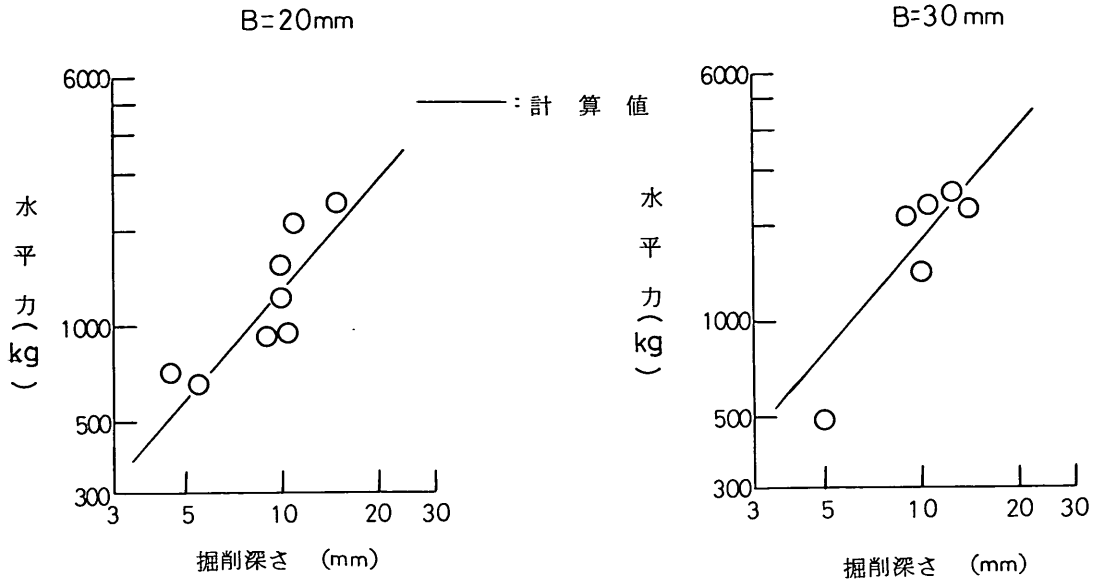


図-17 計算値と実験値の比較

№2 試料

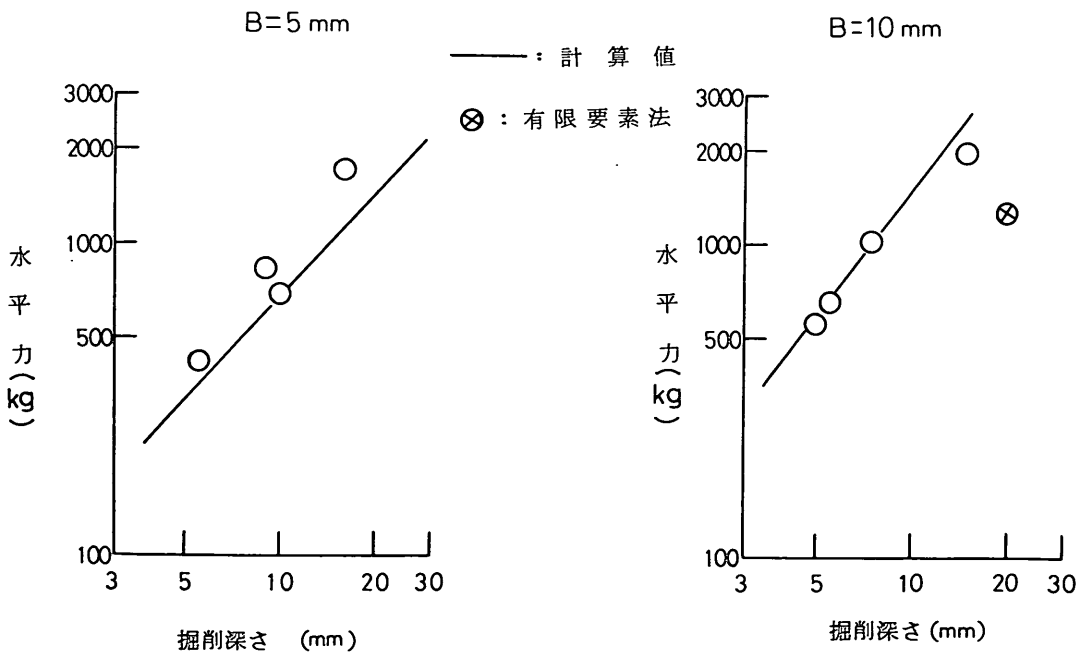


図-18 計算値と実験値の比較

№.2 試料

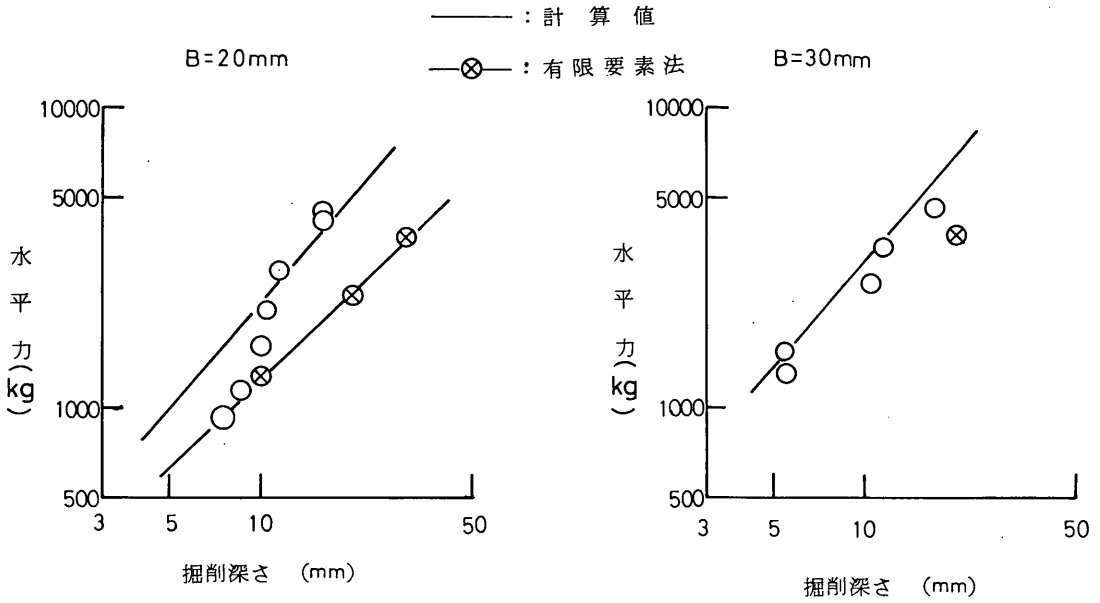


図-19 計算値と実験値の比較

№.3 試料

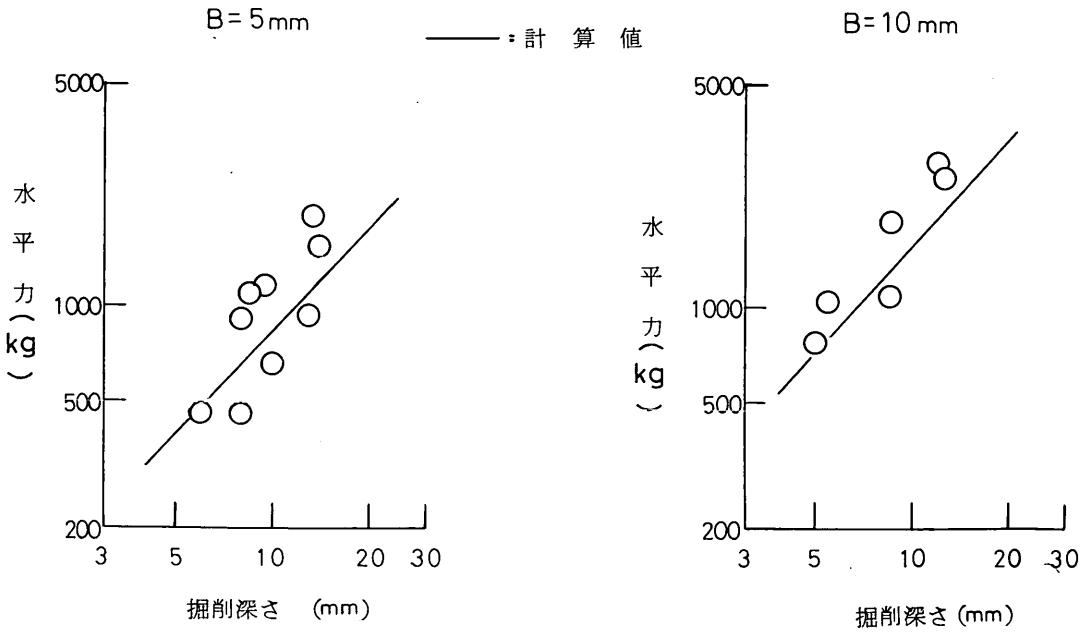


図-20 計算値と実験値の比較

№3 試料

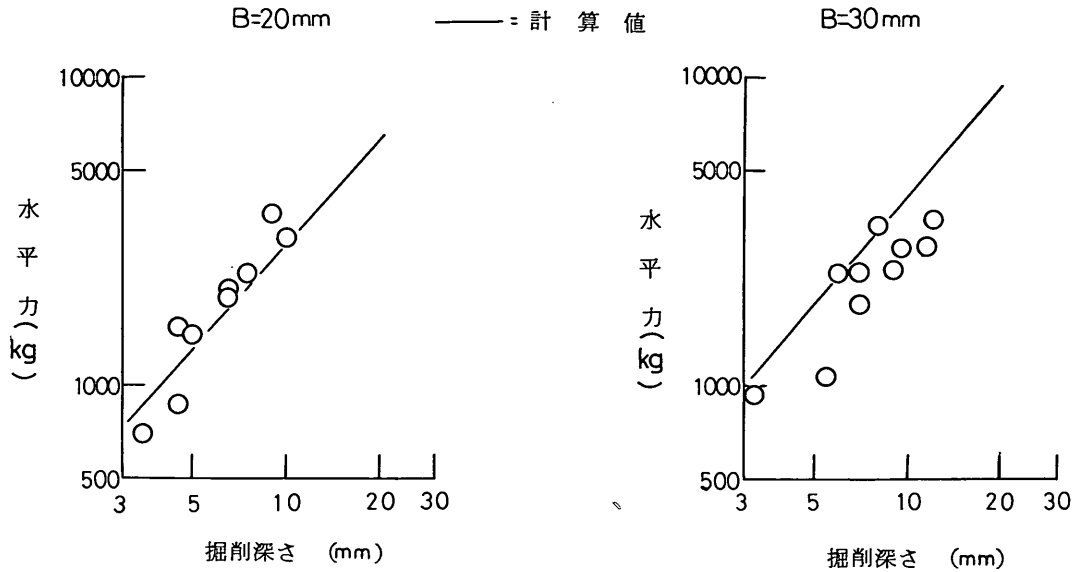


図-21 計算値と実験値の比較

における計算値は塑性方程式による計算値を示す。

これらの比較結果をみた場合、塑性方程式による計算式の結果とは良く一致したが、有限要素法による計算結果は実験値に対して 1/2~1/3 の値になった。

この有限要素法の計算結果に対しては要素数の少ないこと等の計算手法や仮定によるものと考えられる。ここではバイト面と試料面の摩擦係数を1として変位作用点を要素の破壊まで固定支持した計算値とヤング率、ポアソン比を一定、いわゆる線形問題として計算した値を図-22 に示す。すなわちこれらの計算値はバイト面と試料面の摩擦を考慮した最大値、また非線形の計算による最大値を与えるものであるが、前者の場合は 10% 弱、後者の場合でも 50% 増しにしかならない。すなわちなお現段階においては残りの仮定や計算手法に問題が残されているものと考えられる。

次にバイトの押上力すなわち垂直力の実測値の一例を示すと 図-23, 24 になった。

実測値による垂直力と水平力の平均値による比は0.25 前後となり、バイトに試料面上を引いたときのすべり摩擦係数と等しくなった。すなわちモルタルの垂直掘削力 (F_V) は次の式で計算できるものと考えられる。

$$F_V = F_H \tan \delta_p$$

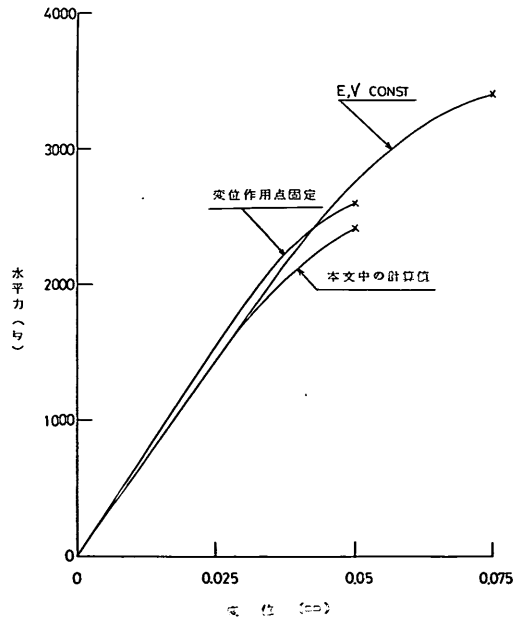


図-22 仮定条件の変化による有限要素法計算結果

№2 試料

B = 10 mm

B = 30 mm

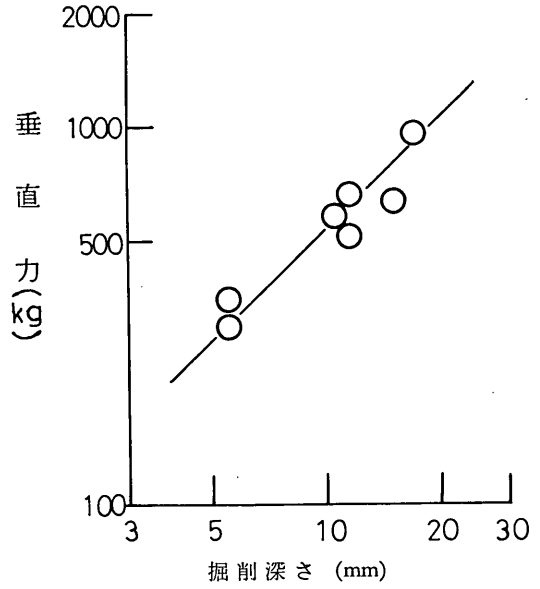
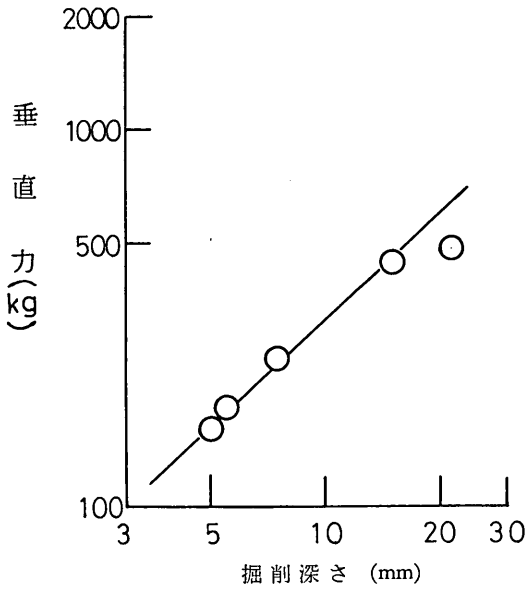


図-23 垂直掘削力の測定値

№3 試料

B = 10 mm

B = 30 mm

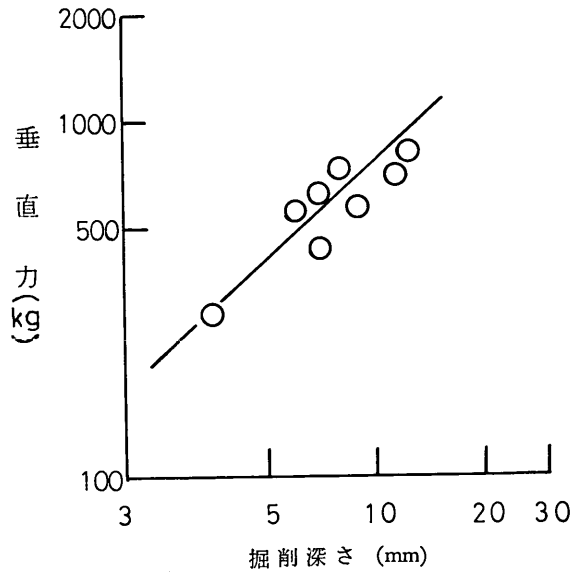
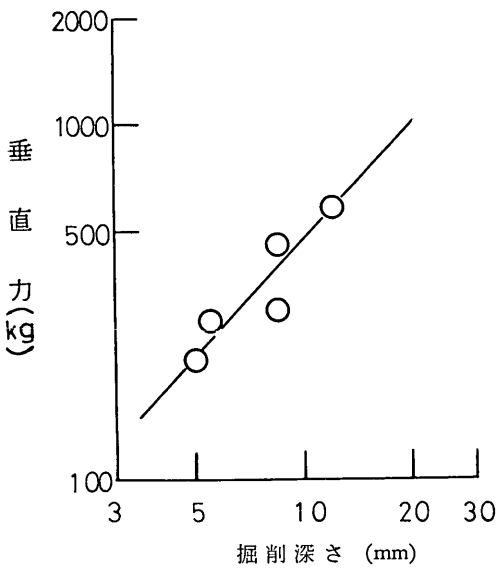


図-24 垂直掘削力の測定値

6. すくい角の変化による掘削力

実際の機械における掘削は、ある程度すくい角を持つバイトによって行なわれており、すくい角のあるバイトによる最初の掘削時の掘削力を求めてみた。

この実験に用いたバイトは幅 2.0cm のバイトで、すくい角零も含めて、刃先が鋭角な方向に 11.5°、23° の 3 種ある。このすくい角のあるバイトの水平掘削力の実測値を示すと 図-25、26 に示すようになり、すくい角零のバイトによる水平掘削力と同様な関係を示す。

しかしながらこの場合の掘削力は、バイトによるくさび的に押込むために起る破壊要素が加わるために、すくい角の零度のバイトにおけるような掘削力の計算式は適用出来ないと考えられる。そこですくい角の変化したときの掘削力を実験的に求めてみた。図-27 にはバイト幅 2.0cm、掘削深さ 1.0cm の場合におけるすくい角の変化に対する水平掘削力を示す。図は各試料における実測値の平均値をプロットしたものである。

図-27 からすくい角の変化による水平掘削力は次の双曲線によって表わすことができた。すなわち

$$F_{H\theta} = T e^{-\theta/R} \quad (3)$$

ここで $F_{H\theta}$: すくい角のあるバイトの水平掘削力

T : すくい角零度のバイトの水平掘削力

θ : すくい角 (θ°)

R : 試料の物理的性質による定数

図-27 の実線は (3) 式によって表わしたものである。(3)式において T は 2. によって計算されることから、すくい角の変化における水平掘削力は R が求めれば計算できよう。 R は試料によって異なり、図-28 には一軸圧縮強度との関係を示す。すなわち R は一軸圧縮強度との間には一次的な関係にあり、おおよそ次の式の関係になった。

$$R = 0.081\sigma_c$$

次に垂直掘削力はすくい角の変化にしたがって、バイト面と試料面の摩擦によって作用する押上げ力の外に、バイトが試料にくい込むために作用する引下げ力が作用するだろう。今回における実験結果によれば 図-29 に示すようになり、おおよそ次の式で表わされた。

$$\frac{F_D}{F_H} \doteq \tan\left(\delta_p - \frac{\theta}{3}\right)$$

16.2 試料

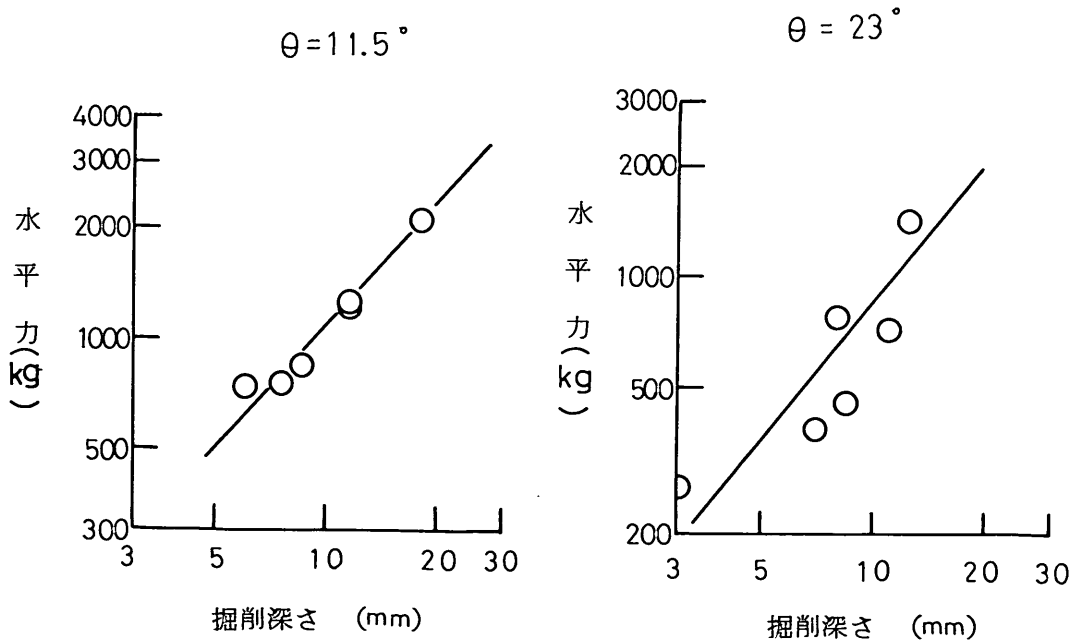


図-25 すくい角変化による水平掘削力

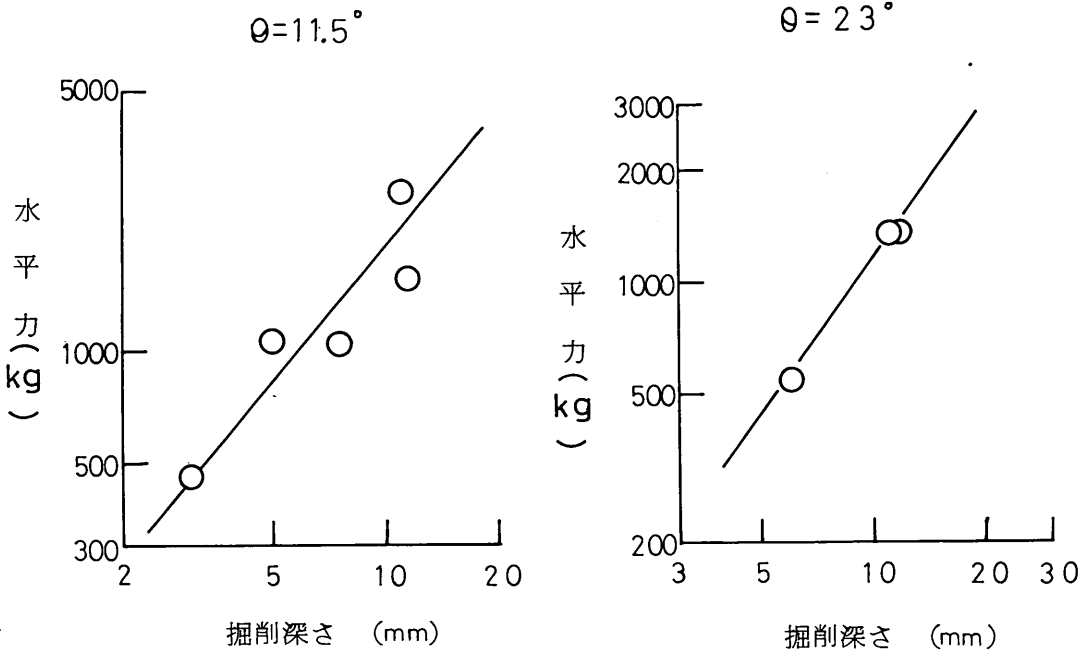


図-26 すくい角変化による水平掘削力

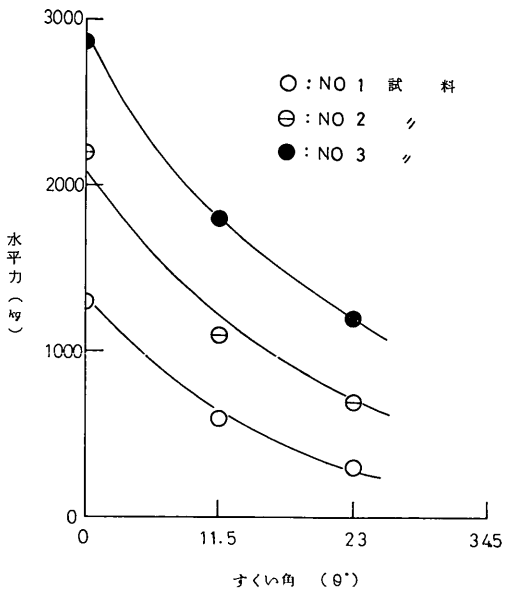


図-27 すくい角の変化による水平力掘削力曲線

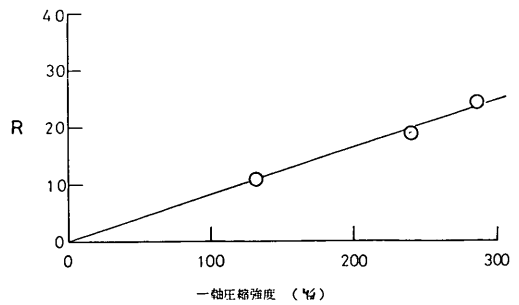


図-28 Rと一軸圧縮強度の関係

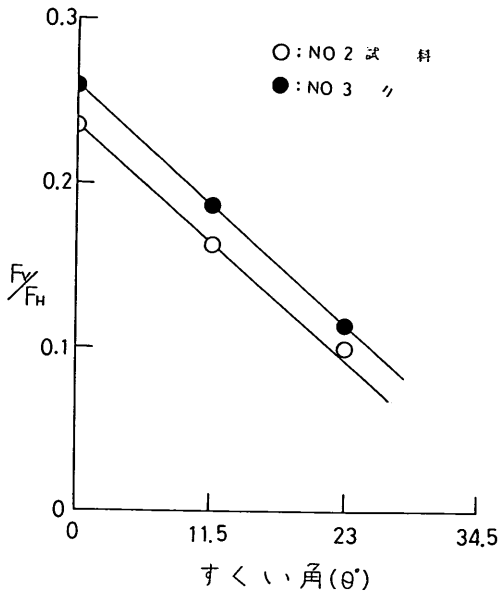


図-29 すくい角変化による垂直掘削力の変化

7. 定常の掘削における掘削力

ここに言う『定常の掘削における掘削力』とはバイトが今回の試料の直角な面を掘削した後の試料面上を、バイトが一定深さで掘削しているときに現われる最大の掘削力のことである。この状態における掘削は一般的な掘削機械における掘削状態の基本的なものとなると考えられる。

この定常における掘削力は初期において一度掘削破壊されてた後のものであるから、水平掘削力は初期の水平掘削力に比べて小さくなるのが予想される。しかしながら垂直力はバイトが試料面上を、試料の硬さに応じて押上げられるために増大する。

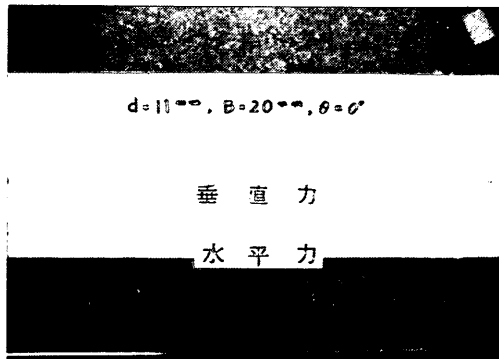


写真-2 測定記録

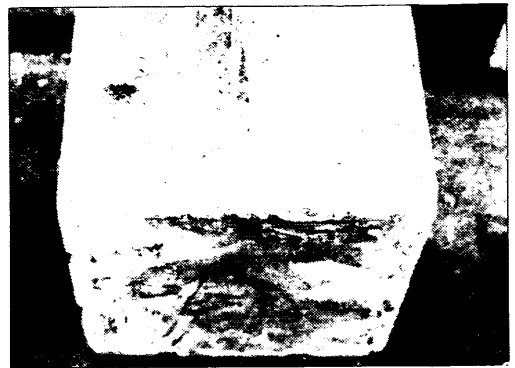


写真-3 掘削軌跡

写真-2, 3 には測定記録と試料の掘削跡を示す。

写真-2 からもわかるようにバイトが試料面を掘削しながら進む時、破壊をくり返すが、これらの試料破壊時に現われる最大の水平掘削力を示すと図-30, 31, 32 に示すようになり、掘削深さとの関係においては一次的に比例する。

この定常における水平掘削力が、試料の垂直面を最初に切込む時の掘削力（以後初期の掘削力と呼ぶ）に対しての割合を調べてみた。

図-33 にはバイト幅に応じた初期の掘削力（計算値による）に対する定常の掘削力の比を表わす。図-33 によればバイト幅によって異った比を表わすが、この関係は主に掘削機構の違いによると考えられる。例えば一定深さでバイト幅が変化した場合、バイト幅の大なるにしたがって初期の掘削による試料の横方向破壊範囲が広がり、そのために後の掘削力はバイト幅に反比例して減少すると考えられる。このバイト幅の増大と共に横方向の破壊する範囲が広まるのは、試料内部における2次元状態の要素が増すことによるものだろう。

実験の範囲内ではおおよそ次の式で近似できた。

$$\frac{\text{定常の水平掘削力}}{\text{初期の水平掘削力}} = C_p = \frac{a}{B^2}$$

バイト幅の零付近で C_p 無限大になるか、また交点を持つかによって C_p のバイト幅に対する関係も異なるが、今回は実験に用いたバイト幅の範囲における近似式とした。

次にこの状態の掘削時における垂直力は、初期の垂直力に対して増大することは前にも述べたが、一軸圧縮強度の高い試料について図-34 には示すような掘削軌跡を見せる。この押上げられる量は試料の性質の外にバイトを支えるアームの剛性にも関係すると考えられる。

図-35 には初期の状態と定常状態の F_v/F_h の値を示

№1 試料

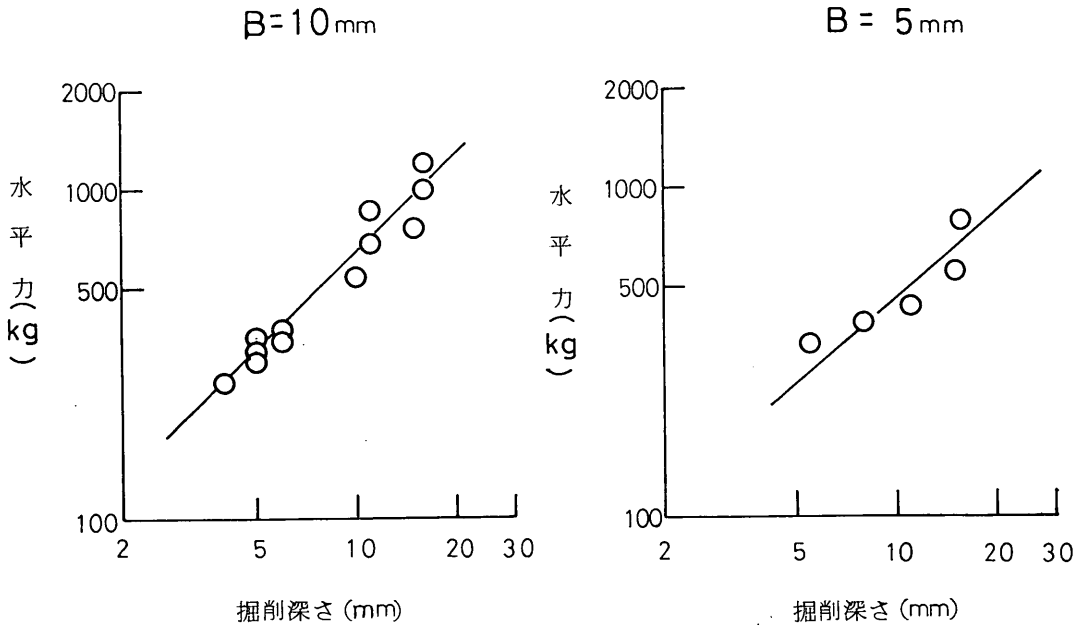


図-30 定常状態における水平掘削力

№2 試料

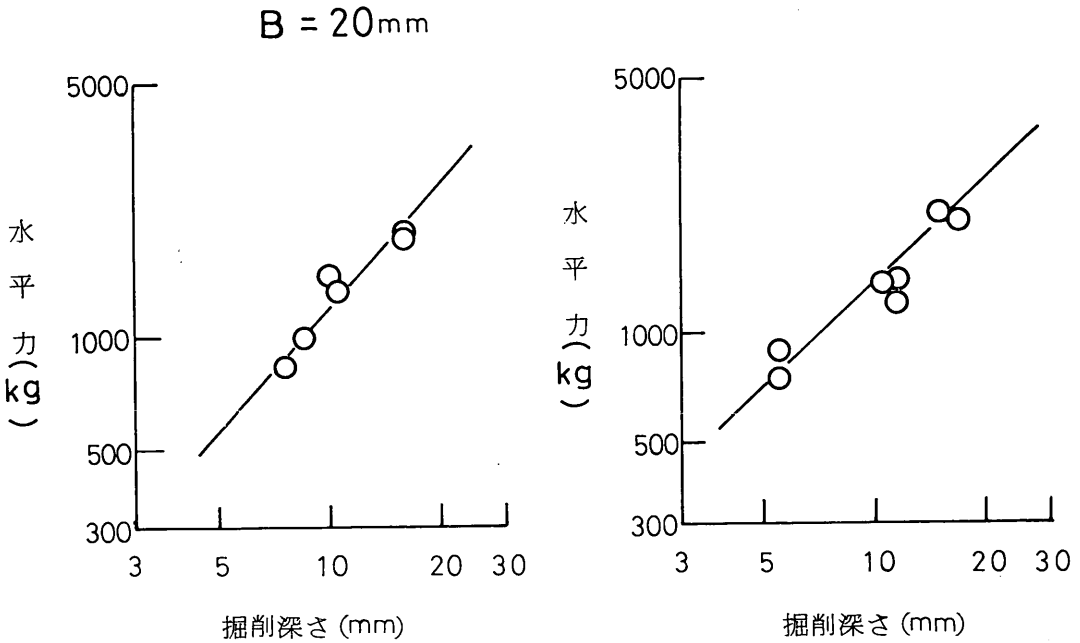


図-31 定常状態における水平掘削力

模倣岩盤（モルタル）の掘削抵抗について

№3 試料

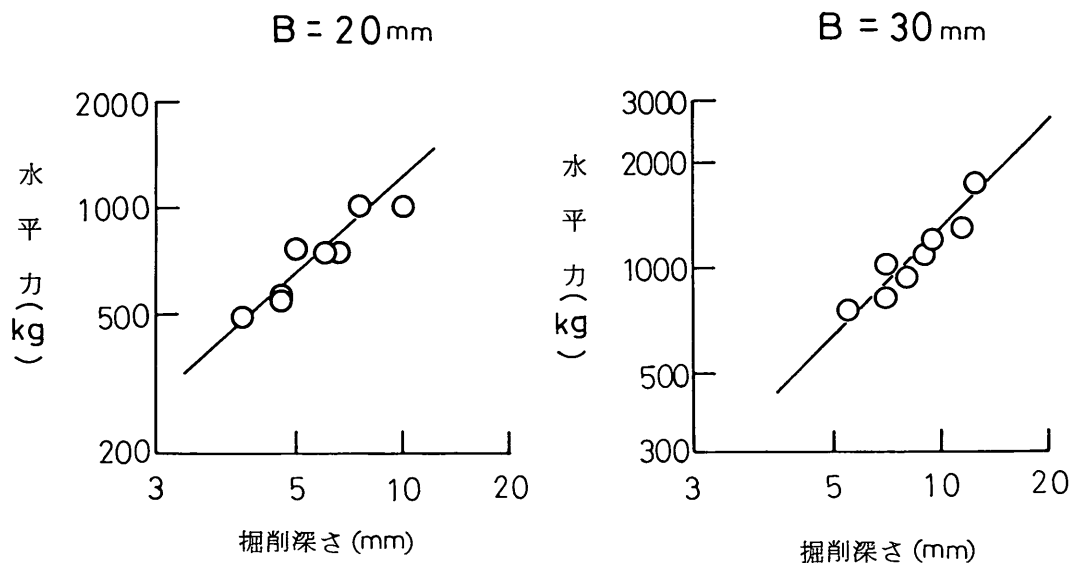


図-32 定常状態における水平掘削力

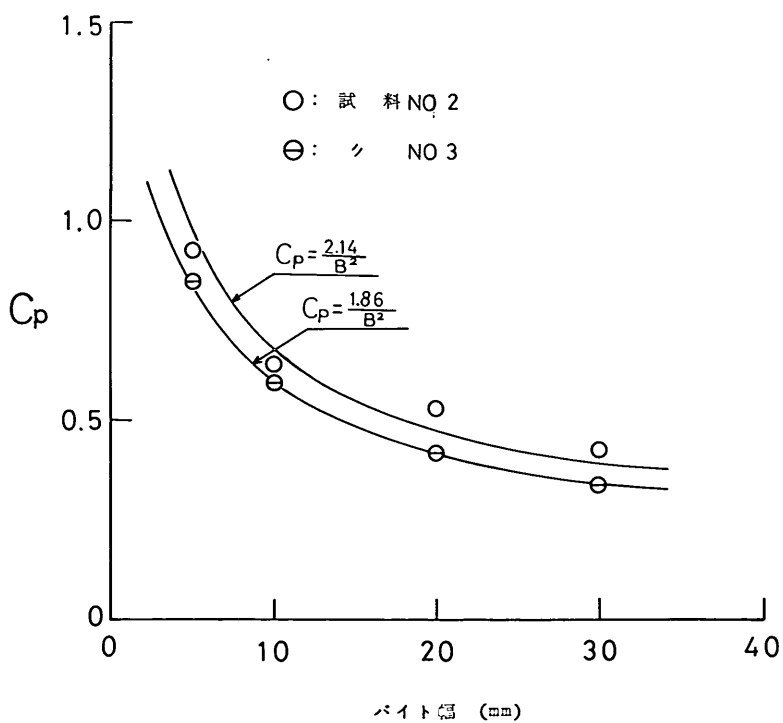


図-33 バイト幅に対する C_p 曲線

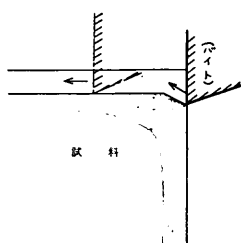


図-34 バイトの掘削軌跡

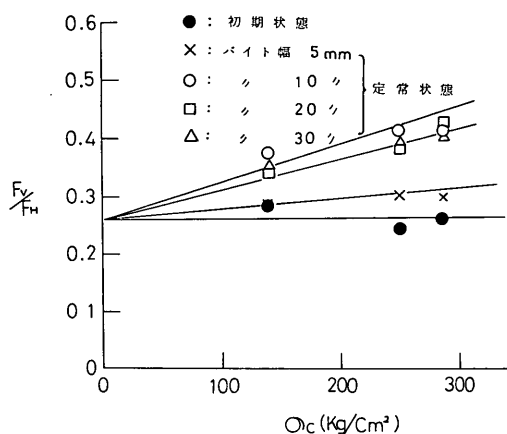


図-35 一軸圧縮強度に対する垂直掘削力の変化

す。この結果によれば初期の掘削時においては試料の一軸圧縮強度に関係なく一定で、バイト面と試料面の摩擦係数に等しくなる。定常の状態においては一軸圧縮強度の間に一次的に比例するように思われる。

8. 結 論

今回においては岩盤掘削の前段階とし模擬岩盤のモルタル試料を用いて実験と計算により掘削力を導びいた。それらの結果をまとめると、次のようになる。

- (1) バイトがある深さで直角な試料面を掘削するときの最初の水平掘削力は、塑性方程式から導びいた計算式によって計算できた。またこのときの垂直掘削力と水平掘削力の比は、バイト面と試料面の摩擦係数によって表わすことができる。
- (2) すくい角の変化した時の掘削力、バイトが試料面

を定常的に掘削しているときの掘削力は、結論 (1) の計算結果から導びくことができた。

- (3) 有限要素法の計算結果は実験値、塑性方程式による計算値に対して小さな値を示したが、今後計算手法、試料の物理定数の把握によって掘削力の計算に適応できるだろう。

9. あとがき

実際の花こう岩等の岩盤も基本的にはモルタル試料と同様の物理的性質を示すが、より複雑な物理的性質を示す。今後においては天然の岩石における場合にもモルタル試料における計算式が適応できるかを確かめることや、一般の浚渫機械の掘削機構についてはあてはめることも今後進めて行きたい。これらの課題を研究する上で有限要素法も有効な手段となるが、まずは試料の物理的性質を把握することが必要と考えられる。

最後に3次元有限要素法の使用法について御指導いただいた当研究室の岩崎技官に深く感謝の意を表わす。

(1972年12月18日受付)

参 考 文 献

- 1) 西松裕一：“岩石の切削抵抗と切込み深さの関係”，昭和49年度秋季北海道鉱業大会資料，1971年
- 2) 山下 秀，木下重教：“岩石の切削機構について”文献(1)同じ。
- 3) 山下 秀，木下重教：“切削刃物近傍の応力分布について”，文献(1)，(2)と同じ。
- 4) 宗形恒弥ほか：“フライス式カッタによる岩石の切削試験”，石川島播磨技報，1972年，pp. 472～479。
- 5) 川本眺万：“有限要素法の地盤工学への応用総説”，岩の力学講演会資料，1971年，pp. 23～31。
- 6) 北原義浩：“有限要素法の地盤工学への応用例”，岩の力学講演会資料，1971年，pp. 79～80。
- 7) 岩崎峯夫：“三次元有限要素法の実用的プログラム法”，港研資料，No. 148，1972年
- 8) 石塚浩次：“平板による土の掘削抵抗について”，港研報告11巻2号，1972年
- 9) 山口梅太郎，西松裕一著：“岩石力学入門”，東京大学出版会，1969年

付 録

3次元有限要素の実際問題に対する適応例をそれ程みないことから、ここにおいてはバイトによるモルタル掘削に適応した計算結果を述べる。

まず図-1, 2は、一定の変位を与えた面から x 方向に0.5 cmの地点の z 方向の最大せん断応力分布を示す。この最大せん断応力分布は線形（弾性係）問題としての計算結果である。

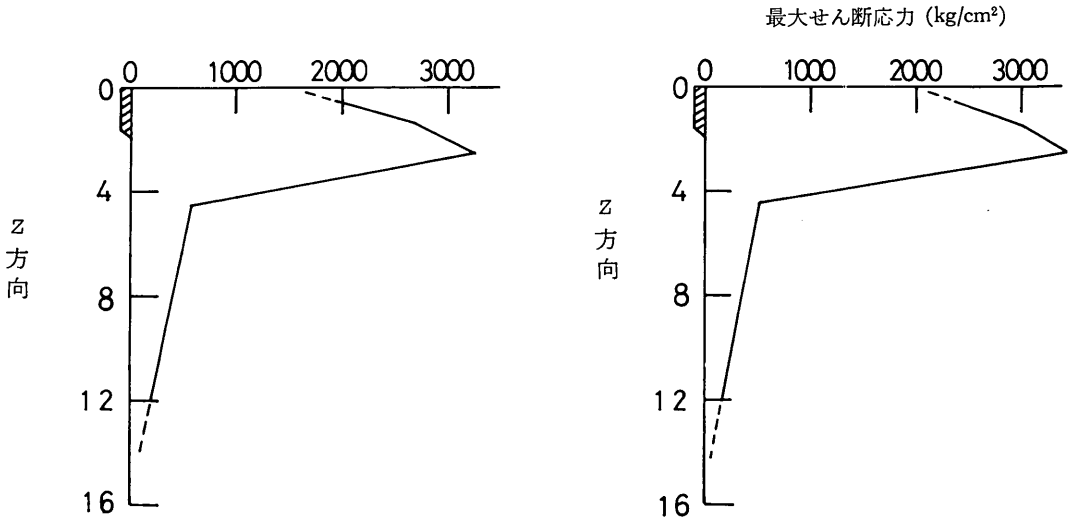
図-3は破壊要素を随時取除いたときの最終状態を示す。図は線形と非線形によって計算した結果を示した。破壊要素の状態は今回の計算における要素の少なさもあり、既知変位部分（バイト部分）の形状によって変る。

図-4, 5は既知変化部分における深さ方向、幅方向の圧力分布を示す。(A)は線形による計算、(B)は非線形の計算における最終状態の圧力分布を示す。

$E=30 \times 10^5$, $V=0.3$, 変位=1.0 mm

$X=0.5$ cm
 $Y=0.5$ cm

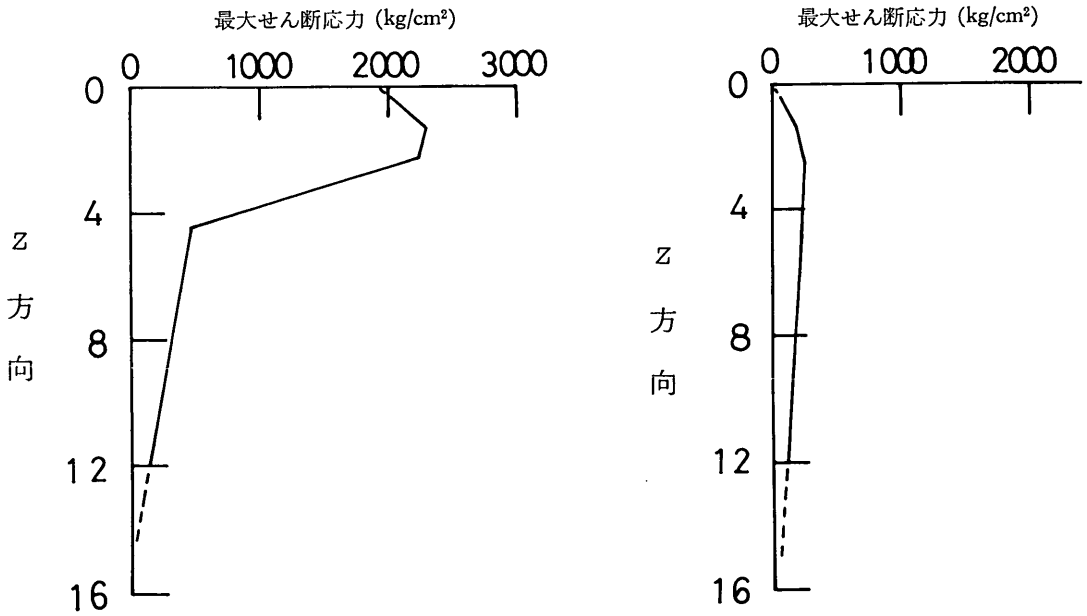
$X=0.5$ cm
 $Y=1.5$ cm



付図-1 掘削深さ方向の最大せん断応力分布

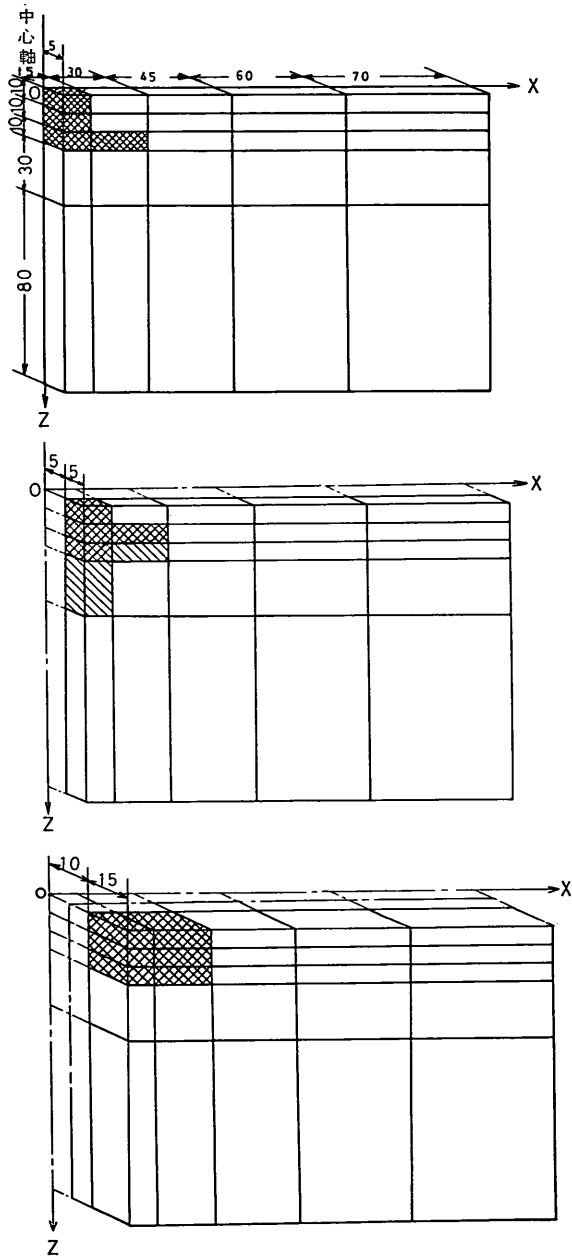
$X=0.5$ cm
 $Y=3.0$ cm

$X=0.5$ cm
 $Y=5.0$ cm



付図-2 掘削深さ方向の最大せん断応力分布

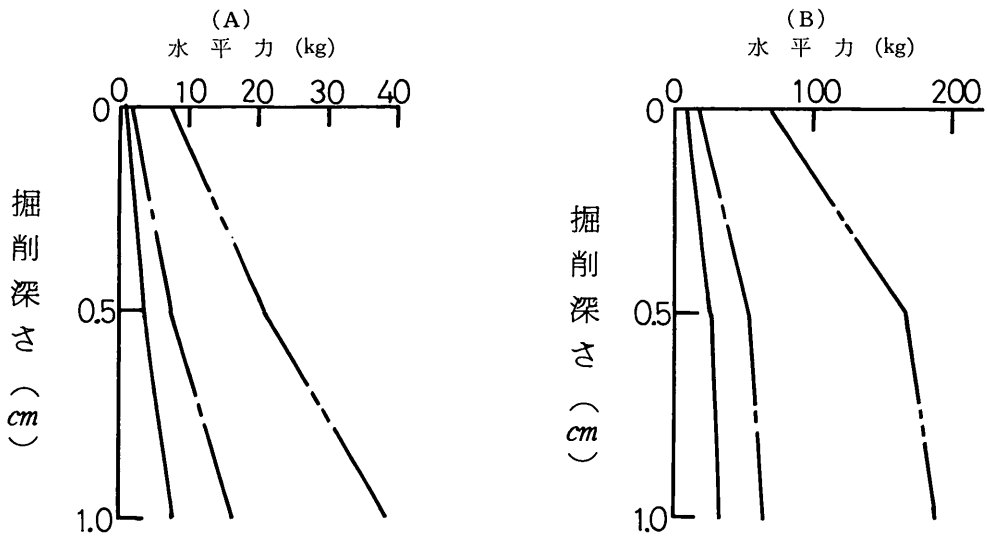
模倣岩盤（モルタル）の掘削抵抗について



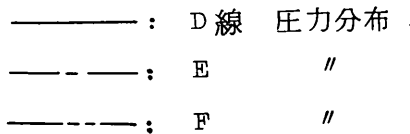
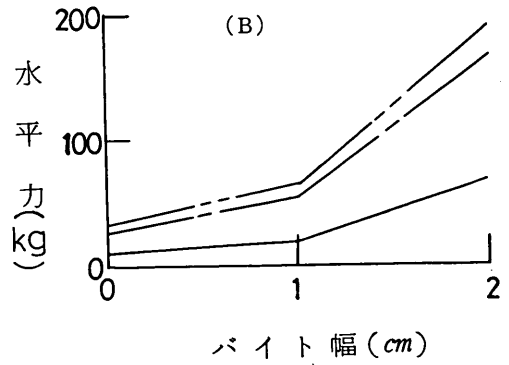
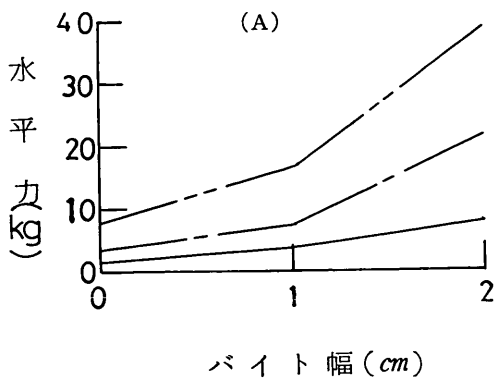
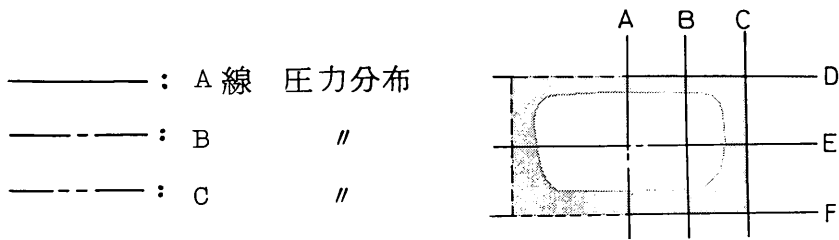
▨ : 塑性計算による破壊要素

▧ : 弾性計算による

付図-3 要素の破壊状態



付図-4 既知変位部分の圧力分布



付図-5 既知変位部分の圧力分布