

# ブラインド式シールド工法に関する考察

齋藤 二郎

内藤 和章

鈴木 公雄

## 概 要

きわめて軟弱な地盤においては、切羽を安定させて地表面の陥没あるいは、沈下を防止するためには、ブラインド式シールド工法が最適であるが、本工法の適用可能な地盤の判定方法および設計理論は確立されていない。本研究は適用可能地盤判定の一助として試作した貫入試験器に関する室内実験および設計理論の確立と本理論の妥当性に関する模型実験と考察である。本研究により、試作した貫入試験器から地盤の性状をかなり正確に把握できること、理論式は模型実験においては、よく適合することが判明した。したがってこの理論式を用いれば、より合理的な設計が行なえるものと考えられる。しかし、これは模型実験より得られた結論であり、将来実施される本工事において各種測定を行なって本結論の妥当性の検討あるいは、修正を行なう予定である。

## 1. 序

シールド工法は、各種の土質に適用される安全な工法であるとされているが、きわめて軟弱な地盤においては、なお多くの問題がある。すなわち、通常のオープンタイプのシールド工法では、切羽が不安定であるために、切羽面のふくれ出しによる地表面沈下あるいは、切羽の崩壊という事故に至る危険が大きい。このような地盤に対しては、ブラインド式シールド工法が最も安全かつ能率的である。本工法によると、切羽のゆるみは完全に阻止できる。

当社の従来の実績によると、 $q_u=0.5\sim 1.0\text{ kg/cm}^2$ 程度のかかなり安定したシルト質地盤においても、オープンタイプのシールドでは、切羽のゆるみから生じたと考えられるかなり大きい地表面沈下を起した例が多い<sup>1)</sup>。一方、浮間幹線シールド工事において、ブラインド式シールド工法を採用して成功を納めたが、この場合は逆に地表面を浮上させたこと、推力が大で反力受けセグメントの挫屈を生じたことなどの問題があった。すなわち、ブラインド式シールド工法は、安全な工法ではあるが、次のような問題点を有している。

- (i) り取り入口の大きさが不相当であると、地表面を浮上、たまたに沈下させる。
  - (ii) シールド推進に要する推力が大きい。
  - (iii) 土質が変化したときの順応性が低い。
- (iii)については、土質調査を詳細に行ない、十分検討を行なうこと、いつでもオープンタイプのシールドに改造できる構造にすることにより解決される。

(i), (ii)の地表面変位、推力に関しては、未解決の問題が多いので、以下これらの問題を解決して、本工法の設計の一助とするために基礎的研究を行なったので、ここに報告する。

## 2. ブラインド式シールド工法における所要推進力に関する理論的検討

ブラインド式シールド工法における所要推進力は、推進による地盤の破壊、流動状態を判然とさせないと解明できない。一般に、本工法が適用される地盤は、流動性の大きい細粒土に限られる。また、シールドの形状により推進力は大きく変化する。

これらの特性を完全に理論式で表現することは困難であるが、一般に認められている仮定のもとでは、ある程度理論化できる。理論式あるいは実験式が確立されれば、実際の本工法の合理的な設計が可能になり、従来の経験を加味して、本工法は発展すると考えられる。

### 2.1. 対象とする粘性土の性質

粘性土に応力が作用すると、弾性的、塑性的、粘性的挙動を示す。ブラインド式シールド工法においては土はかなり早い速度でセン断されるので、塑性変形と粘性変形が主体となる。粘性項は、粘土においては構造粘性を考える必要があるが、ここでは、簡単のために、粘性の項を省略して塑性変形に関する理論式を立てて、粘性項についてはおいて検討することとする。

### 2.2. 塑性理論による推進力の算定

塑性理論によると、セン断応力が降伏値に達すると、土は塑性破壊を起すことになる。したがって、時間の

要素が無視されるので、セン断速度すなわち推進速度に関係なく推進力が決定される。実際には、この推進速度は無視し得ないのであるが、粘性土においては後に記す解析法により、かなり実際に近い値が得られるものと考えられる。

2.2.1. 所要推進力の算定方法 ブラインド式シールド工法における所要推進力Pは

- (i) 先端部の貫入力  $P_A$
- (ii) スキンプレートと地盤間の全マサツ力  $P_B$

の和である。すなわち

$$P = P_A + P_B \dots\dots\dots(1)$$

ここでは  $P_B$  は容易に次式で与えられる。

$$P_B = (k + \mu q) \pi D_1 L \dots\dots\dots(2)$$

ここに

$D_1$ : シールドの外径,  $L$ : シールドの長さ,  $k$ : スキンプレートと地盤間の付着力,  $\mu$ : 同マサツ係数,  $q$ : スキンプレート周圧 (有効応力) である。軟弱な粘土においては、土の粘着力を  $c$  とすると

$$\mu = 0, k = C \dots\dots\dots(3)$$

であるから

$$P_B = C \cdot \pi D_1 L \dots\dots\dots(4)$$

となる。

2.2.2. 先端部貫入力  $P_A$  の算定 ブラインド式シールド先端部の形状は 図-1 に示すごとくである。

図-1 において、 $\overline{NO}$  がブラインドと称する直径  $D_2$  のズリ出口を有する隔壁である。本格的なタイプは  $\overline{MN}$  を鋼板で製作するが、通常はこの鋼板はなく、 $\overline{NO}$  だけである。この場合、 $\triangle MNO$  部分には上がつまり〔クルジュモフ効果的なもの〕実質上  $\overline{MN}$  に相当するセン断面が生ずる。

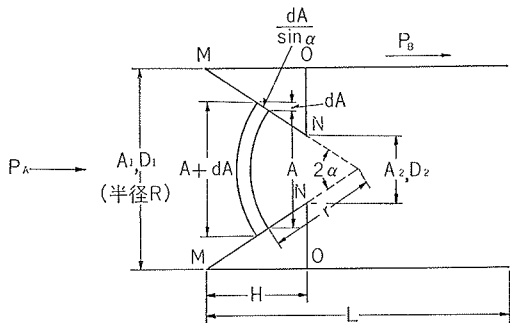


図-1 ブラインド式シールド先端部形状

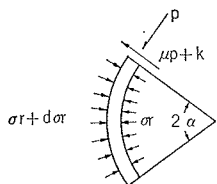


図-2 理論解析説明図

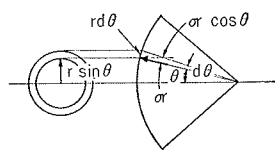


図-3 理論解析説明図

図-1, 図-2, 図-3 を参照して、 $\sigma_r$  方向の均合方程式をたて、土が塑性変形を起す条件を考慮すると、次式を得る。

$$\frac{dA}{A} = \frac{\sigma_{dr}}{\sigma_r \{-1 + (1 + \mu \cot \alpha) N\phi\} + 2C(1 + \mu \cot \alpha) \sqrt{N\phi} + k \cot \alpha} \dots\dots\dots(5)$$

ここに  $N\phi = \tan^2(45^\circ + \phi/2)$  ただし  $\phi$ : 内部マサツ角。

(5)式で  $-1 + (1 + \mu \cot \alpha) N\phi = 0$  の場合は、 $A = A_2$ ,  $\sigma_r = 0$  なる条件で積分し、貫入力  $P_{A'}$  は  $P_{A'} = A_1 \{\sigma_r\}_{A=A_1}$  で与えられることを考慮に入れると次式を得る。

$$P_{A'} = \frac{2C(1 + \mu \cot \alpha) \sqrt{N\phi} + k \cot \alpha}{-1 + (1 + \mu \cot \alpha) N\phi} \cdot A_1 \cdot \left\{ \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^{-1 + (1 + \mu \cot \alpha) N\phi} - 1 \right\} \dots\dots\dots(6)$$

次に  $\phi = 0, \mu = 0$  の場合は  $N\phi = 1, -1 + (1 + \mu \cot \alpha) N\phi = 0$  ゆえ次式を得る。

$$P_{A'} = A_1 (2C + k \cot \alpha) \ln \frac{A_1}{A_2} \dots\dots\dots(7)$$

次に角  $\alpha$  が大きい場合は、セン断変形の影響が無視できない。

理論計算によると、この影響は次式で与えられる。

$$\Delta P_{A'} = A_1 \cdot \frac{8\sqrt{2}}{9} \alpha C \sqrt{N\phi} \dots\dots\dots(8)$$

したがって、全先端貫入力  $P_A$  は

$$P_A = P_{A'} + \Delta P_{A'} \dots\dots\dots(9)$$

より求められる。

さて、一般の軟弱地盤粘土では、 $k = C$  と認められる。したがって、本研究で取り扱う理論式は次のものとする。

$$P_B = C \cdot \pi D_1 L \dots\dots\dots(10)$$

$$P_A = CA_1 \left[ (2 + \cot \alpha) \ln \frac{A_1}{A_2} + \frac{8\sqrt{2}}{9} \alpha \right] \dots\dots\dots(11)$$

さて、(1), (10), (11)式より  $P$  は次式のように表現できる。

$$P = a + bL \dots\dots\dots(12)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} a &= P_A : \text{const} \\ b &= C \cdot \pi D_1 : \text{const} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

したがって、実験において、貫入量  $L$  と所要推進力  $P$  の関係を求め、これが直線となれば、 $P$  軸との交点が  $P_A$  となり、直線の勾配が  $b = C \cdot \pi D_1$  であり、したがって  $C$  が求められる。この  $C$  は、セン断速度の影響を包んだものである。次に、地盤は無限ではなく、地表面なる境界を有しているために、 $P_A$  は限界がある。この限界値は、 $D_2$  の大きさにより変化するが、最大  $D_2 = 0$  の場合の水平方向受働土圧を越えない。この圧力は Broms, Brennemark<sup>2)</sup>によると、

$$P_A \text{ limit} = A_1 [\gamma h + (6 \sim 8) \times C] \dots\dots\dots(14)$$

ここに、 $\gamma h$  は土被重量である。(14)式は、Terzaghi の極限支持力公式とほぼ一致する。

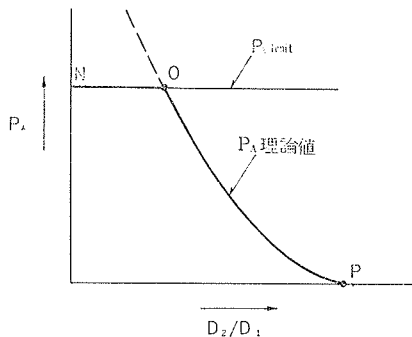
そこで $P_A$ の限界値は

$$P_A \text{ limit} = A_1 (\gamma h + 7C) \dots\dots\dots (15)$$

とする。

以上の理論的考察によると、先端貫入力 $P_A$ とズリ出口径 $D_2$ の関係は、図一4に示したN-O-Pなる曲線に近いものになると考えられる。

ここで $D_2/D_1$ が小さくなって、 $P_A$ が $P_A \text{ limit}$ に近づくと、ズリの流入は激減し地表面の浮上が著しくなるものと考えられる。



図一4  $P_A$ と $P_2$ の関係

### 3. ブラインド式貫入試験器

ブラインド式シールド工法を適用するには、既に述べたように土質を詳細に把握しなくてはならない。従来、通常の土質試験結果のみから判断して、正確な判断ができなかった場合が多い。そこで、ブラインド式貫入試験器を試作したので、以下その概要と、室内実験結果について記す

#### 3.1. 概要

ブラインド式シールド工法の適用性を左右する土質の要因は、土の粒度、含水比、強度、鋭敏比、液性指数等であるが、これらを、非常に早い速度でセン断される機構において、どのように判断すべきか明らかでない。そこで、実際のブラインド式シールド工法における同様の土の破壊機構を有する試験によれば、これらを総合的に判断できるとして試作したものが本ブラインド式貫入試験器である。

本器の詳細は次節で述べるが、ボーリング孔内で簡単に試験できる特徴を有している。試験は、貫入量と貫入圧の関係を求めるだけであり、両者の関係を図上にプロットして、直線部分が得られたなら、(12)式より $a=P_A$ 、 $b=C\pi D_1$ が求まりしたがって、(13)式より $C$ が求められる。この $C$ は、セン断速度、地盤のかく乱の影響を含んだものであり試験時の貫入速度を適当にす

ることにより、実際の工事における $C$ を求めることができる。すなわち、本試験器の特色は、試験が簡便であることと、実際の粘着力が求められることである。

#### 3.2. ブラインド貫入試験器の概要

本試験器は、(11)式の理論式を基礎として考案したものである。(11)式によると、右辺の[ ]内は無次元であり、したがって、 $\alpha$ と $l_n(A_1/A_2)$ したがって $D_1/D_2$ が一定であれば、大きさに関係なく $P_A/CA_1$ したがって $P_A/CD^2$ は一定となる。そこで、基本的には、試験器の $\alpha$ と $D_1/D_2$ を実際のシールドと同じものにすれば良いが、実際には、 $\alpha$ 、 $D_1$ 、 $D_2$ は、それぞれの工事において異なるので、試験器もそれに応じて、種々変化させ得るようにした。

このような基本的な考えのもとに試作した試験器先端部の形状寸法を図一5に示す。

試験器の概要は、図一6に示すごとくである。

貫入はウォームギヤにより定速貫入できるようにした貫入圧の測定は、100kg プルービングリングによる。試験時のロード重量はカウンターウェイトにより殺すことにした。

なお、本試験器について、先端貫入力 $P_A$ の理論値を(11)式で算定した結果を図一7に示す。

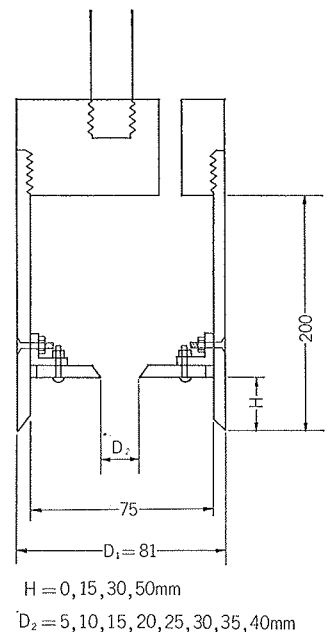
#### 3.3. 貫入試験器に関する室内実験結果

本実験は、ブラインド式貫入試験器の特性を調べるために、室内で行なったものである。

3.3.1. 実験装置 貫入試験器は、先端部に直接プルービングリングと取手を取り付けた。実験は、 $D_1$ 、 $H$ を一定にして、 $D_2$ 、 $L$ を種々変化させて貫入力 $P$ を実測した。ここに

- $D_1 = 81\text{mm}$
- $H = 15\text{mm}$
- $D_2 = 75, 40, 30, 20,$   
 $10, 0\text{mm}$
- $L = 0 \sim 200\text{mm}$

実験試料は、粘土を高含水比のもとで均一にして、てん充して長期圧密したものである。試料土の液性限界 $w_L = 54.8\%$ 、塑性限界 $w_P = 22.4\%$ 、塑性指教 $I_P = 32.4\%$ 、含水比 $w = 75.0\%$ 、液性指数 $I_L = 1.62 > 1$ である。実験装置の概要を図一8に示す。



図一5 貫入試験器先端部形状

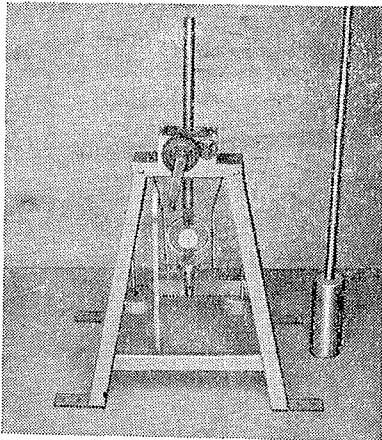


図-6 貫入試験器概要

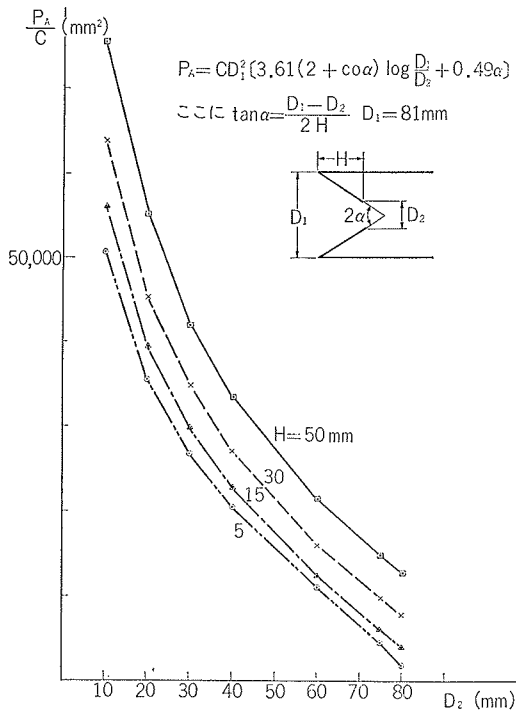


図-7  $\frac{P_A}{C}$  と  $D_2$  との関係

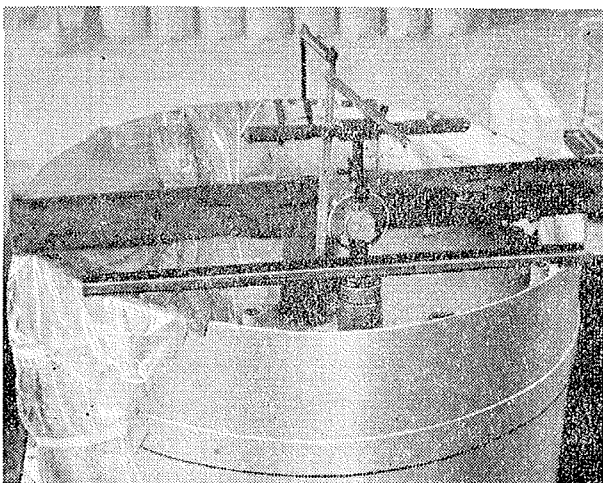


図-8 実験装置概要

3.3.2. 実験結果 測定結果を図-9に示す。この図によると、 $P$ と $L$ とは、ほぼ直線関係にあるので、(12)、(13)式より  $a=P_A$ 、 $b$  を求めまた  $b$  より  $C$  を求めると図-10のようになる。また、この  $C$  より(11)式から  $P_A$  および(15)式から  $P_A \text{ limit}$  を求めて図-11に記した。これによると理論値と実測値はよく一致していることがわかる。したがって本試験器により真の値に近い土の粘着力を求めることができ、この粘着力から求めた先端貫入力の理論値は実測値とよく一致することは、この方法が合理的であることを示していると考えられる。

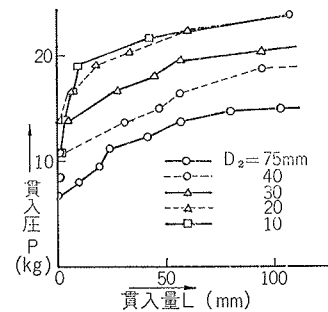


図-9 貫入量  $L$  と貫入圧  $P$  の関係

$D_2$ (mm)	$a=P_A$ (kg)	$b$ (kg/cm)	$C$ (kg/cm <sup>2</sup> )
75	6.4	$\frac{b}{c}=1.04$	0.05
40	10.6	1.00	0.039
30	13.4	1.08	0.0425
20	15.5	1.68	0.066
10	17.0	1.36	0.053
0	"	"	"

図-10  $a(=P_A)$ 、 $b$ 、 $c$  の算定

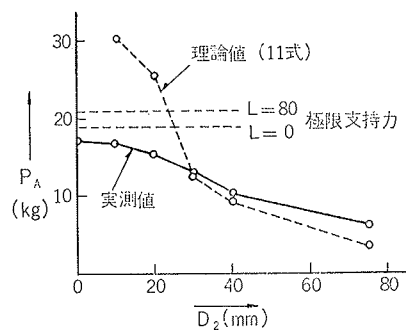


図-11  $P_2$  と  $P_A$  の関係

#### 4. ブラインド式シールド推進実験

3. では貫入試験器の妥当性について記したが、これは、外径81mmの小径のものであり、実際の大径のブラインド式シールドでは、土の破壊流動機構が異なって理論式が適合しなくなる懸念がある。そこで、本章においては、外径500mmの模型ブラインドシールドを作り推進実験を行なったので、その結果について記す。なお、予備実験として、貫入試験器の先端部を

用いて水平方向の推進実験を行なった。

#### 4.1. 予備実験

4.1.1. 実験装置 実験に使用したブラインド式シールドは、貫入試験の先端部で、外径  $D_1=81\text{mm}$ 、ズリ出口径  $D_2=15\text{mm}$ 、ブラインド位置  $H=15\text{mm}$  である。貫入はウォームギヤで定速貫入できるようにし、本実験では貫入速度  $5\text{cm/min}$  とした。試料粘土は3.の実験で使用したのと同じものであり、実験時の含水比  $w=78.3\%$ 、液性指数  $I_L=1.7>1$  である。土被りは  $13\text{cm}$  とした。貫入圧の測定には、特製のストレングージタイプのロードセルを使用した。測定内容は、貫入量と貫入圧および、地表面変位である。実験装置の概要を図-12に示す。

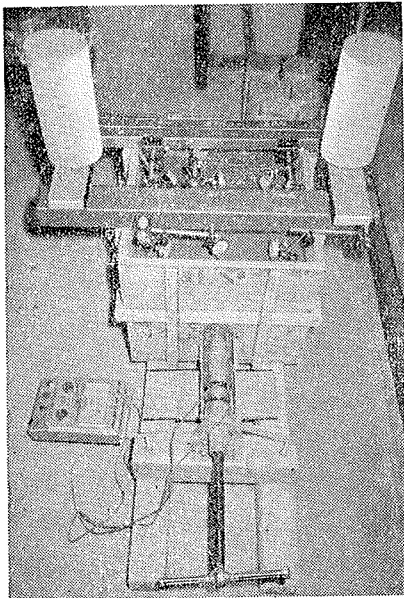


図-12 実験装置の概要

4.1.2. 実験結果 測定結果を図-13に示す。これ

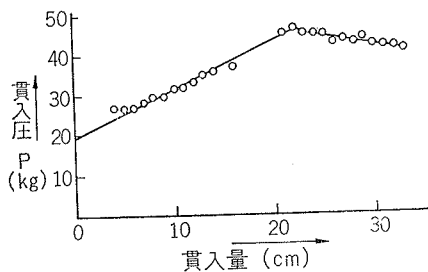


図-13 貫入量  $L$  と貫入圧  $P$  の関係

によると、貫入量が  $20.5\text{cm}$  までは直線的に増加している。貫入量が  $20.5\text{cm}$  を越えると、貫入圧が一定となっているのは、シールド長が  $20.5\text{m}$  であることによる。(12)式から、 $a=P_A$ 、 $b$ 、 $C$  を求めると

$$a=P_A=20.0\text{kg}$$

$$b=1.18\text{kg/cm}$$

$$C=b/25.45=0.0464\text{kg/cm}^2$$

となる。一方、この  $C$  を利用して、(11)式より  $P_A$  の理論値を算定すると、 $P_A/C=480$  ゆえ

$$P_A=0.0464 \times 480=22.2\text{kg}$$

次に(15)式より  $P_A$  limit 求めると

$$P_A \text{ limit} = 3.14 \times \left(\frac{8.1}{2}\right)^2 (1.6 \times 10^{-3} \times 13.0 + 7 \times 0.0464) = 17.8\text{kg}$$

すなわち  $P_A$  の実測値と理論値はほとんど一致しており、これは  $P_A$  limit に近い。このことは、排出したズリが  $84\text{gr}$  で微少であり、地表面の浮上が著しかったことから、 $P_A$  limit の算定法が妥当であることがわかる。なお地表面浮上量測定はダイヤルゲージで詳細に行なったが、その結果の報告は、紙面の都合上省略する。

#### 4.2. $\phi 500$ ブラインド式シールド推進本実験

4.2.1. 実験装置 実験装置は、貫入試験器の製作と同様に、実際のシールドを基準にして、相似律を考慮して製作した。本装置の仕様は、次のごとくである。

外径  $D_1=500\text{mm}$

ズリ出口径  $D_2=30, 60, 90, 120\text{mm}$

ブラインド位置  $H=0, 90, 150, 190\text{mm}$

シールド長  $L=1,000\text{mm}$

貫入装置は、無段変速機を有する電動装置として、定速貫入できるようにした。推進力の測定には、 $3,000\text{kg}$  プルービングリングを使用した。粘土試料箱は  $1,500 \times 1,500 \times 1,500$  の大きさとし、土被り不足に対しては、上載荷重を載荷するようにした。なお、地表面変位の測定はレベルによった。実験装置の概要を図-14、図-15に示す。なお、本実験装置に関する先端貫入力  $P_A$  の理論値を(11)式によって算定した結果を図-16に示す。

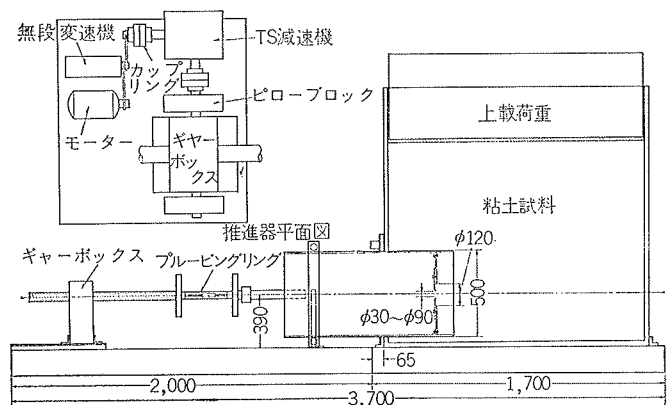


図-14  $\phi 500$ ブラインド式シールド実験装置概略図

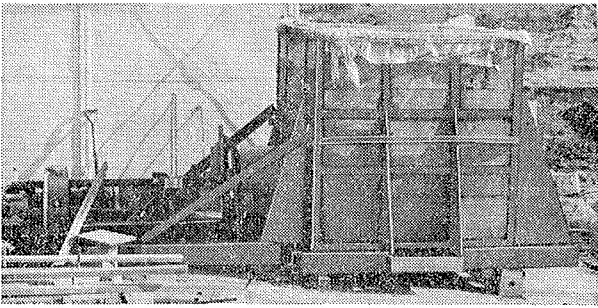


図-15 実験装置概要

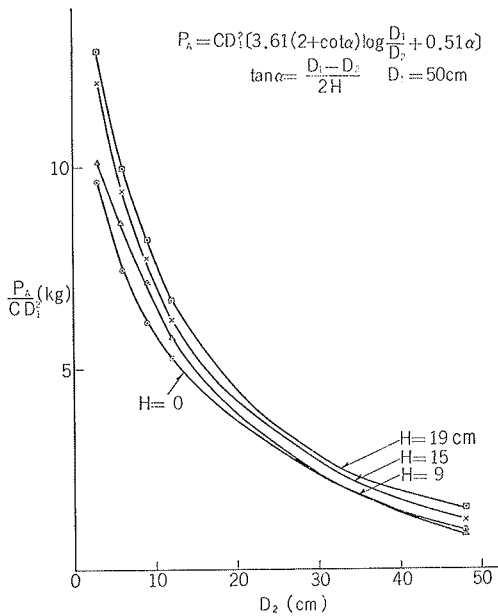


図-16  $\frac{P_A}{C}$  と  $D_2$  との関係

4.2.2. 実験方法 まづ、粘土試料を十分攪拌して均一にして試料箱につめ、所定の上載荷重のもとで、3～5日間圧密させた。実験の能率を向上させるため、一回の貫入実験中、ブラインドを取り替えることにより、ズリ出口径  $D_2$  を3～4段階に変化させた。貫入速

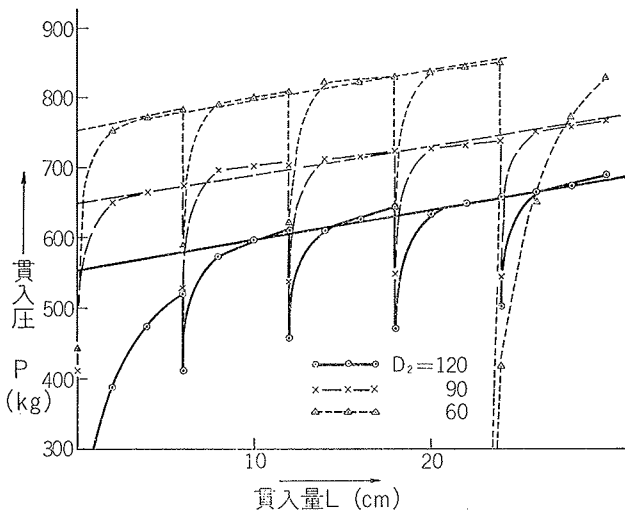


図-17 貫入量  $L$  と貫入圧  $P$  の関係

度は、実際のシールドの標準5cm/minを基準としてやや小さくした。

4.2.3. 実験結果 実験は3ケース行なった。

(実験一I) 土被り40cm, 上載荷重0.45t/m<sup>2</sup>, 試料粘土含水比75%, 単位重量1.5t/m<sup>3</sup>, 液性限界72%, 実施貫入速度5cm/minである。実験は、ブラインド位置  $H=90$ mmとし、ズリ出口径  $D_2=120, 90, 60$ mmと変化させた。測定結果を、図-17に示す。本実験では30cm推進毎に地表面測定のために一時停止したが、よい直線性が得られた。

この図から(12)式によって、 $a=P_A$ を求めると、図-18

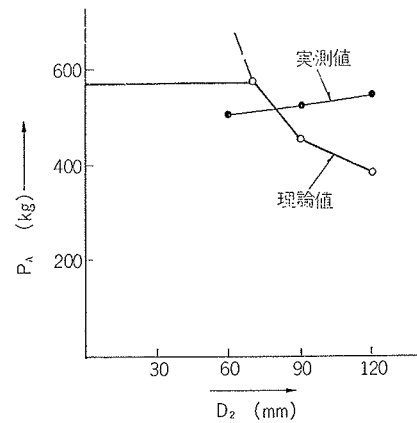


図-18  $D_2$  と  $P_A$  の関係

のごとくなる。更に(13)式から  $C$  を求め、(11)式より  $P_A$  理論値と(15)式より  $P_A$  limit を求めて同図に併記した。これによると、実測値と理論値はかなりよく一致していることがわかる。また、 $P_A$  が  $P_A$  limit に近づくと、排出ズリの量は激減し、地表面浮上量が増加した。

(実験一II) 土被りは40cmであるが、上載荷重を大きくして1.47t/m<sup>2</sup>とした。実験結果を図-19に示す。

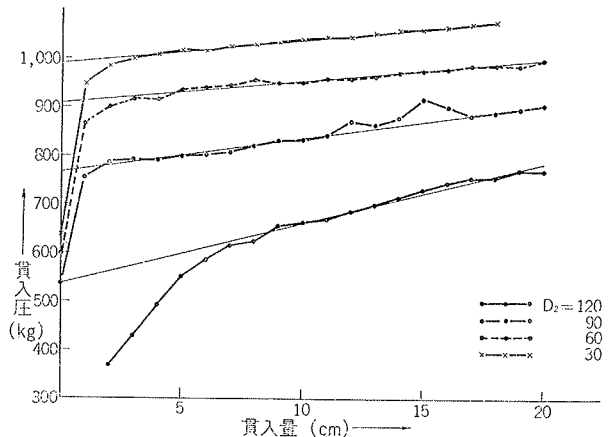


図-19 貫入量と貫入圧の関係

(実験一I)と同様にして  $a=P_A$  と  $P_A$  理論値および  $P_A$  limit を算定して図-20に示す。これによると、実測値

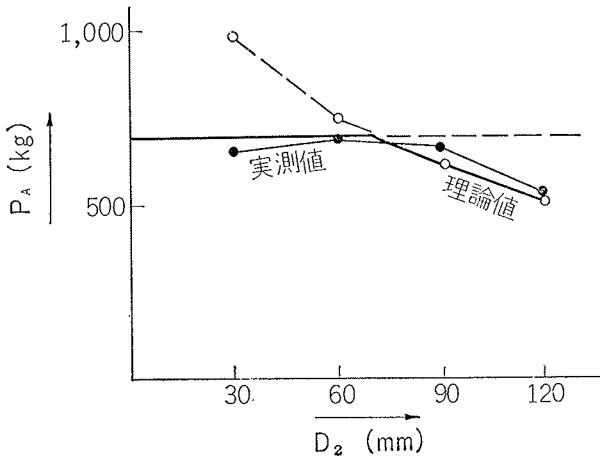


図-20  $D_2$  と  $P_A$  の関係

と理論値はほぼ一致している。さて、図-20でわかるように  $P_A$  は  $P_A$  limit に近い値である。そこで、排出したズリの容積の詳細測定結果をみると、貫入容積に対する比は  $D_2=120\text{mm}$  で44.3%,  $D_2=90\text{mm}$  で28.6%,  $D_2=60\text{mm}$  で14.3%,  $D_2=30\text{mm}$  で0% であり非常に小さい。すなわち、 $P_A$  が  $P_A$  limit に近づくと地表面の浮上は著しくなる。

(実験-III) 土被りおよび上載荷重は(実験-II)と同様であるが、粘土の含水比をやや低下させた。測定結果を図-21に(実験-I), (実験-II)と同様にして求めた  $P_A$  と  $P_A$  理論値,  $P_A$  limit の関係を図-22に示す。これによると実測値と理論値はよく一致しており、やはり  $P_A$  は  $P_A$  limit に近い。排出したズリ容積と貫入容積の比は  $D_2=120\text{mm}$  で44.6%,  $D_2=90\text{mm}$  で38.0%で,  $D_2=60\text{mm}$  で31.2%,  $D_2=30\text{mm}$  で7.4%と少なく、(実験-II)と同様の結果を得た。

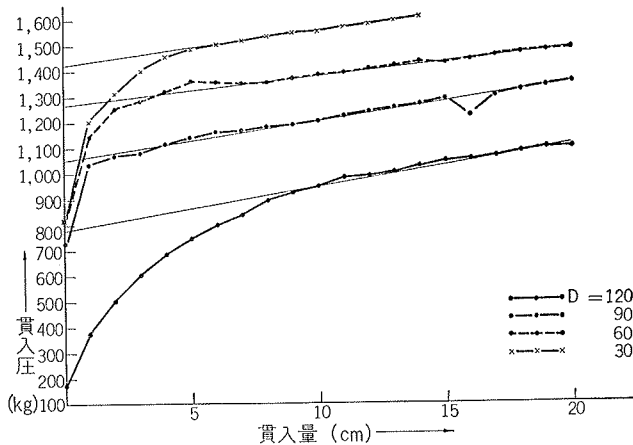


図-21 貫入量と貫入圧の関係

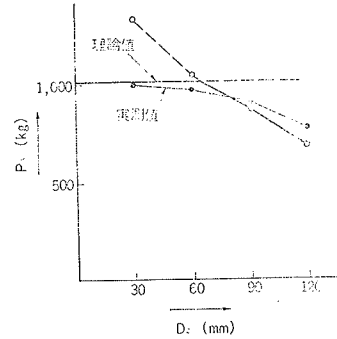


図-22  $D_2$  と  $P_A$  の関係

#### 4. 結語

以上の理論的考察, 実験結果をまとめると

(i) ブラインド式シールド工法における所要推進力は、塑性理論によると (10), (11) 式ようになる。ただし、本理論式は、粘性項を省略しているため、時間の要素が入っていない。

(ii) 土被りが小さい場合は、推進力に関して、(15)式で与えられる上限値があり、推進力がこの値に近づくと排出されるズリの量は減少し、地表面の浮上が増加する。

(iii) ブラインド式シールド工法の適用可能な地盤の判定は容易ではなく、3.で述べたブラインド式貫入試験を行なって判定の一助とすることが望ましい。本試験器は、ボーリング孔内で容易に試験できること、実際の状態に近い粘着力が得られる利点がある。貫入試験器に関する室内実験によると、本器の特色が確認できた。

(iv) (i), (ii)で述べた理論式の妥当性を確認するための外径81mm, 50mmの模型ブラインド式シールドの実験によると、本理論式の妥当性が確認できた。また貫入力が増え上限値に近づくと、排出されるズリの量が激減した。ただしこれは、模型実験から得られる結論であり将来実施現場において本理論式の妥当性の確認あるいは、修正を行なう予定である。

#### 参考文献

- 1) 都志茂シールド工事における地表沈下に関する検討書, 大林組技術研究所
- 2) Broms, Brennemark; Stability of Clay at Vertical Opening, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Janu. 1967.