

シールド切羽の安定に関する実験的研究

齋藤二郎
内藤和章
藤原紀夫

概要

この報告はシールド切羽の安定に関し、乾燥砂を用いて行なった二次元と三次元の模型実験結果をとりまとめたものである。切羽を主働側に変位させながら、切羽面に作用する合土圧、地表面の沈下、地中の沈下、スベリ面の形状等について実験した。その結果、合土圧は切羽外径の約 0.3% 主働側に変位したときに主働状態を生じた。静止土圧は主働土圧の 2.5~6 倍となり、土被りが大きくなるにつれて大きくなる傾向を示した。地表面の沈下は土被りが大きくなるにつれて小さくなるが、その範囲は広がった。また、地中の沈下は切羽上部でアーチを形成し、そのアーチの内部で大きく起こった。スベリ面はセン断面となって明瞭に現われた。

1. まえがき

シールド工事において切羽の安定は重要である。切羽の安定が保たれないと切羽の崩壊をきたし、作業ができなくなる。崩壊しないまでも大きな地表面沈下の誘因となってしばしば問題を起こす。(図-1) は実際にシールド切羽が崩壊した例である。

切羽が掘削されるとそこに応力が集中し、塑性領域が拡大される。同時に、それまでこの部分が受けていた土圧は外方の地盤に転嫁されていわゆる三次元的なドーム作用によって外圧を支持することになる。本研究はこの現象を二次元と三次元の模型実験を行なうことによって、現象的に把握することを目的としている。

2. 二次元模型実験

2.1. 実験装置と方法

2.1.1. 実験装置 実験槽は(図-2)に示すごとく高さ; 1.00, 幅; 0.40, 奥行き; 1.20mの内法寸法をもった鋼鉄板製の箱で、側面は透明アクリル板で作ってあり実験中に砂の動きが観察できるようになっている。底板から20cmの所にシールドトンネルの二次元的な模型として、高さ; 20, 幅; 40, 長さ; 50cmのボックス型の内箱が、下からボールベアリング(φ5mm)で受けておかれている。実験槽に砂を詰めると切羽に相当する内箱の前面に土圧が作用してこの内箱を押し出そうとする。この力を切羽に作用する合土圧と考える。この力は内箱の後方でささええたブルーベリングリングによって測定する。

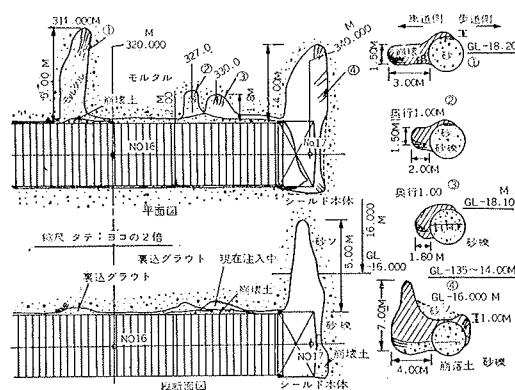


図-1 シールド切羽崩壊の実例

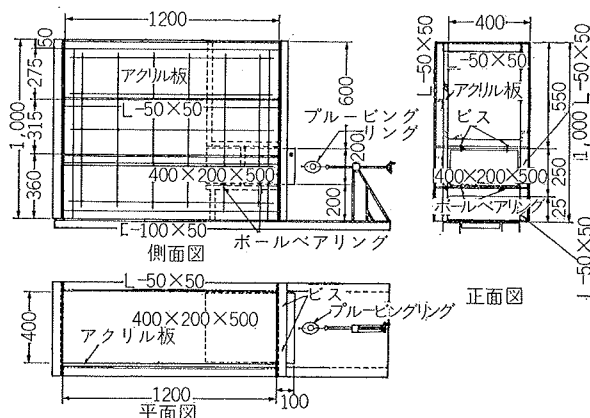


図-2 二次元実験装置

2.1.2. 実験試料土 試料土は荒川の上流で採取した川砂を天日で乾燥させて、4mmのフルイでふるったものである。粒度試験結果を(図-3)に示す。均等係数は2.29である。また、直接セン断試験による内部摩擦角 $\phi=48.0^\circ$, 含水量 $w=0.4\%$, 単位体積重量

$\gamma_s = 1.50 \text{ g/cm}^3$, 真比重 $G_s = 2.63$ であった。

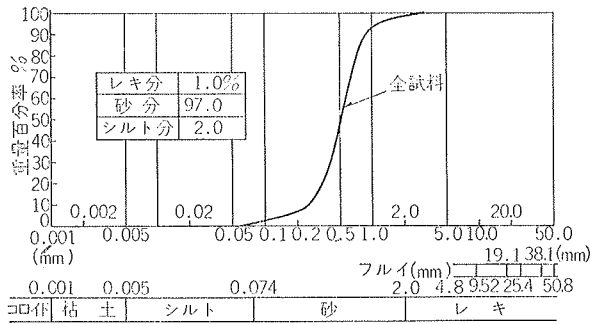


図-3 試料土の粒度試験結果

2.1.3. 実験方法 砂を詰める前に、内箱を固定装置により固定する。次に、砂を 10cm の層厚ごとにしながら所定の土被りまで詰める。この際、層厚 10cm ごとにアクリル板のすぐ近くに標準砂で厚さ 2cm の水平の層を作る。この層はアクリル板を通して縞模様となっははっきり観察できる。次に、地表面の沈下を測定するために 10cm の間隔でダイヤルゲージを取り付ける。次に、切羽の水平変位を測定するために、内箱の後方の上部と下部にダイヤルゲージを取り付ける。プルービングリングを内箱に押しつけて変位測定用のダイヤルゲージを見ながら、内箱を変位させないように固定装置に作用している力をプルービングリングに移し換える。この力は静止土圧であると考え。この後プルービングリングを主動側に引きながら、切羽面に作用する合土圧と地表面の沈下を測定する。同時にアクリル板の前面から写真をとって、地中沈下および砂の動きを観察する。実験は土被りが 0D, 1D, 2D, 3D (D; シールド模型高さ) の 4 つの場合についておのおの 3~4 回行なった。

2.2. 実験結果とその解析

2.2.1. 切羽面に作用する土圧 土圧測定結果を土被りが 0D, 1D, 2D, 3D の場合についておのおの、(図-4), (図-5), (図-6), (図-7) に示す。土圧は切羽が主動側に変位するにつれて静止土圧から急に小さくなり、0.25~0.75mm (シールド高さの 0.125~0.375%) 変位すると主動状態を生じ、その後はほぼ一定値を示している。

村山ら^{1),2)} はシールド切羽の安定を(図-8)に示すように考えた。すなわち、切羽前面は Terzaghi が提唱した上端支持の土留背面の対数らせり面を仮定し、上部はアーチ状にゆるむとして、

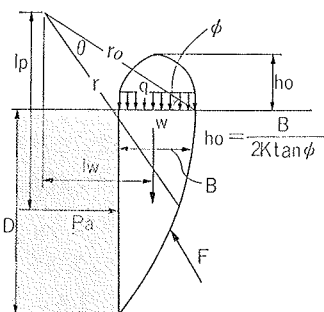


図-8 シールド切羽のつりあい図

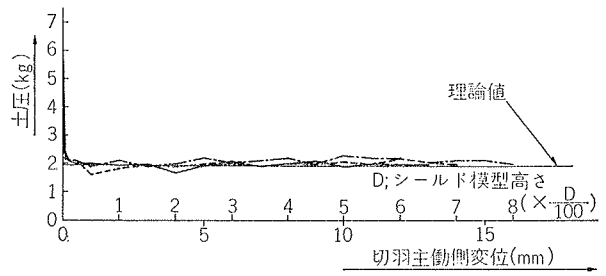


図-4 切羽面に作用する土圧 (土被り; 0D)

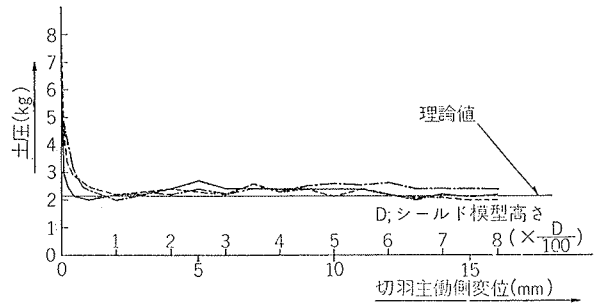


図-5 切羽面に作用する土圧 (土被り; 1D)

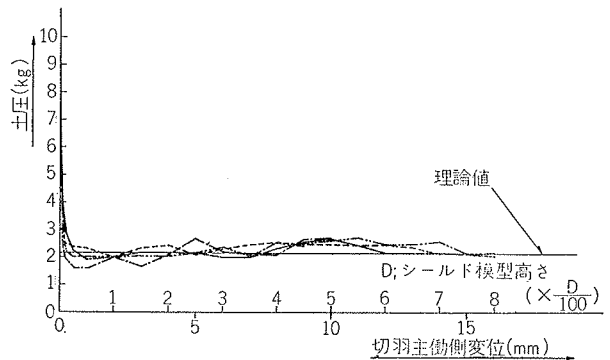


図-6 切羽面に作用する土圧 (土被り; 2D)

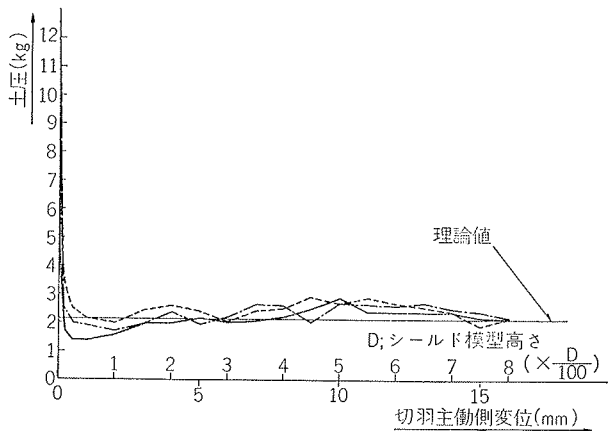


図-7 切羽面に作用する土圧 (土被り; 3D)

つりあい関係式を次式で与えた。

$$P_a = (W_a + q \cdot B) l_w / l_p \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 W_a ; 対数らせり面内の土の重量 B を変化させて、(1)式によって求めた P_a の最大値が切羽面に作用する主動土圧などとしている。

この理論を用いて求めた主動土圧の計算値を(図-4)~(図-7)の中に理論値として示しておいた。

測定値と理論値とはよく一致しているのがみられる。

(図-9)は静止土圧と主動土圧(切羽変位 4mm)とを土被りを変数としてプロットしたものである。静止土圧は主動土圧の3~5倍で土被りが大きくなるにつれて大きくなる傾向を示している。したがって、切羽上部の土をゆるめないうで沈下を防止するには主動土圧計算値の数倍の力で切羽を押える必要がある。

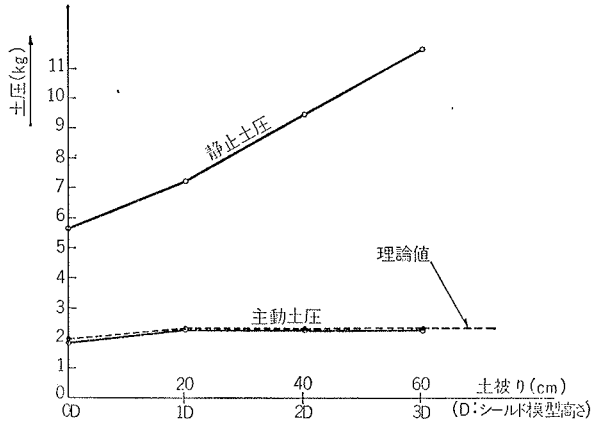


図-9 静止土圧と主動土圧

2.2.2. 地表面の沈下 切羽が主動側に 8mm 変位したときの地表面の沈下曲線をまとめて(図-10)に示す。最大の沈下を示す位置は土被りがない場合には切羽のすぐ近くで、土被りがある場合には切羽の前方 5~10cm の所である。このことは後に掲げる写真にも見られる。最大沈下量は土被りが大きくなるにつれて小さくなっているがその範囲は広がっている。

(図-11)は最大沈下を示した沈下量を切羽変位を変数としてプロットしたものである。沈下は切羽変位にほぼ比例して起きている。

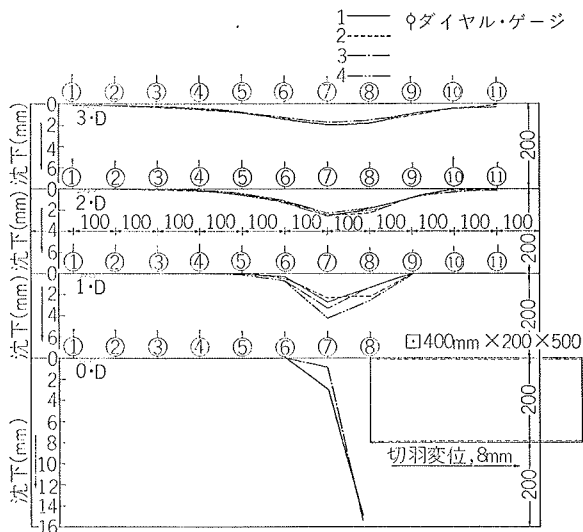


図-10 地表面の沈下比較図(土被り; 0D, 1D, 2D, 3D)

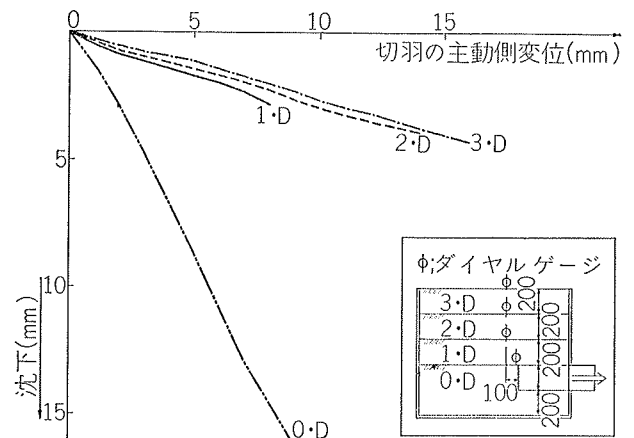


図-11 地表面沈下と切羽変位との関係

2.2.3. 地中の沈下およびスベリ面の形状 切羽が主動側に16mm変位したときの地中沈下状況を示す写真を土被りがおのおの0D, 1D, 2D, 3Dの場合について(図-12), (図-13), (図-14), (図-15)に示す。切羽の近くでは明瞭なスベリ面が観察されるが、地表面に近くなるにつれて、わずかに下に凸な曲線となって破壊面は見られなくなる。

(図-16)は土被りが1Dの場合について村山らが仮定した破壊面と実験で明瞭に現われた破壊面とを比較して示した1例である。上部のアーチ部分は実際とはかなりかけはなれているが、これは切羽変位が16mmと大きすぎたためであろう。

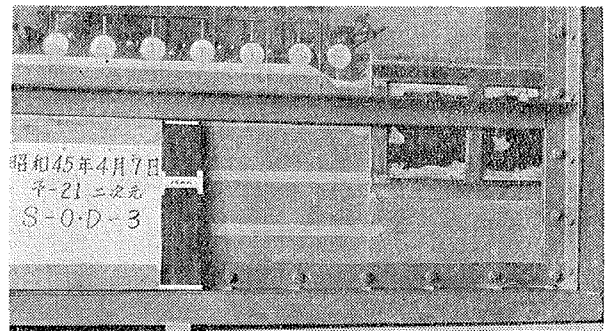


図-12 地中の沈下(土被り; 0D)

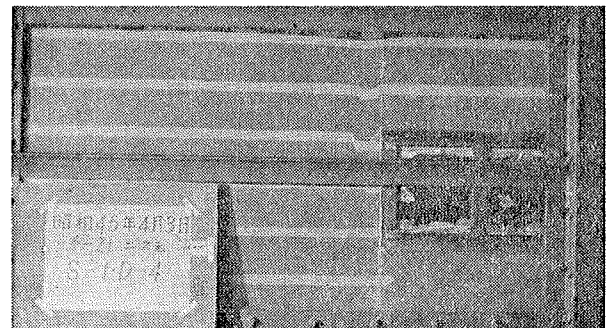


図-13 地中の沈下(土被り; 1D)

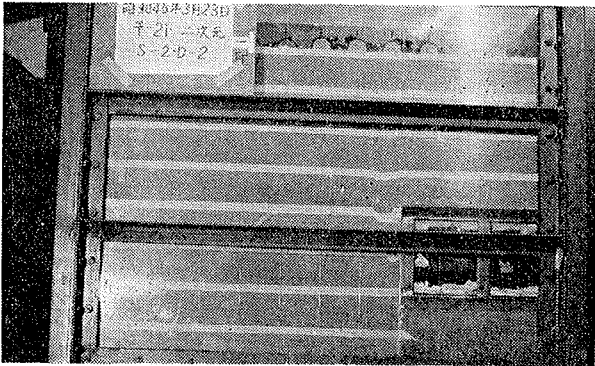


図-14 地中の沈下 (土被り; 2D)

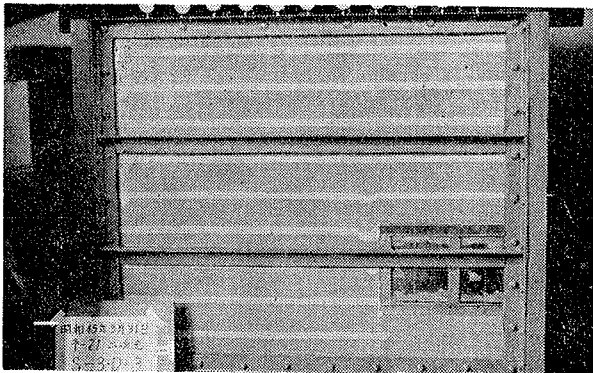


図-15 地中の沈下 (土被り; 3D)

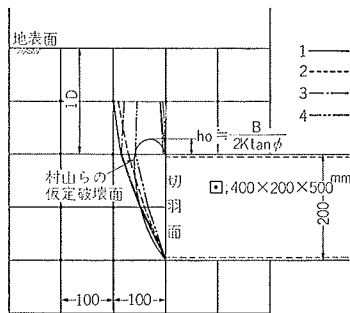


図-16 スペリ面の形状 (土被り; 1D)

3. 三次元模型実験

3.1. 実験装置と方法

3.1.1. 実験装置 実験槽は(図-17)に示すごとく高さ; 1.40, 幅; 2.50, 奥行き; 0.90mの内法寸法をもった鋼鉄板製の箱で, 前面は透明アクリル板で作っており, 実験中に砂の動きが観察できるようになっている。底面から 20cmの所にシールド切羽に相当するφ302mmの孔があけてある。この孔の部分の詳細図を(図-18)に示す。この孔を押えるためにφ300mm, 長さ150mmの内筒が, 下にボールベアリング(φ8mm)をしいておかれている。実験槽に砂を詰めると切羽面に相当するこの内筒の前面に土圧が作用してこの内筒を押し出そうとする。この力を切羽に作用する土圧と考える。この力は内筒の後方できさえたプルーピング

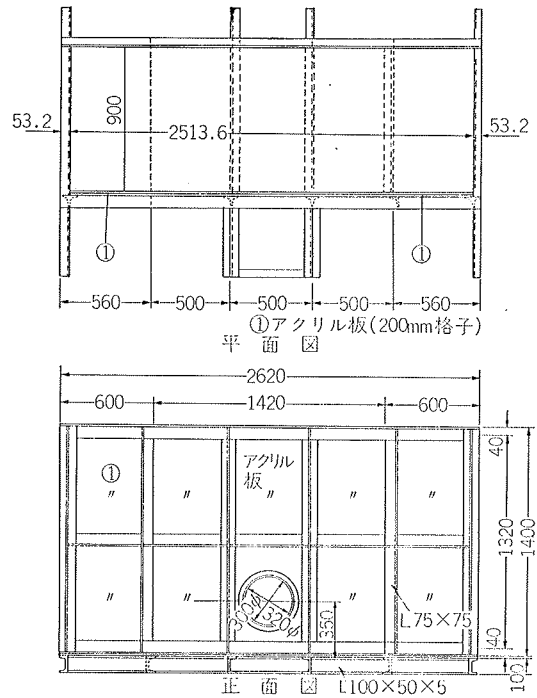


図-17 三次元実験槽

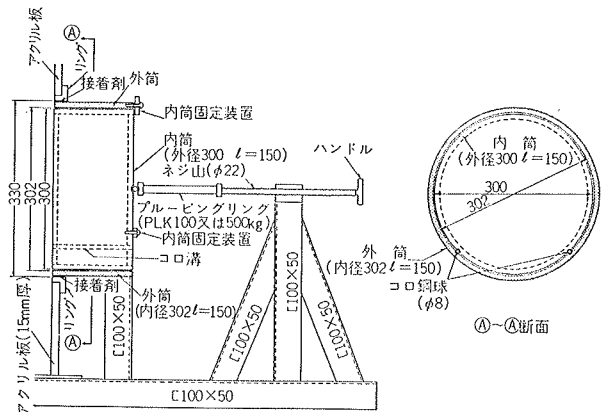


図-18 切羽部分詳細図

リングによって測定する。

3.1.2. 実験試料土 二次元模型実験で使用したのと同じである。

3.1.3. 実験方法 実験槽に砂を詰める前に, トンネル切羽に相当する内筒を固定装置によって固定する。次に砂を 20cmの層厚ごとにならしながら所定の土被りまで詰める。この際, 層厚 20cmごとにアクリル板のすぐ近くに標準砂で厚さ2cmの水平な層を作る。この層はアクリル板を通して水平な縞模様となって観察される。砂詰めが終わると地表面沈下を測定するために20cmの格子の交点にアルミシャーレを置きこれを沈下板としてダイヤルゲージを取り付ける。次に切羽の水平変位を測定するために内筒の後部の上下にダイ

ヤルゲージを取り付ける。プルーベリングを内筒に押しつけて、変位測定用のダイヤルゲージを見ながら、内筒を変化させないで固定装置に作用している力をプルーベリングに移し換える。その後、プルーベリングを主働側に引きながら切羽面に作用する合土圧と地表面の沈下を測定する。同時にアクリル板の前面から写真をとって地中の沈下状況、スベリ面の発生状況を観察する。

実験は土被りが 0D, 1D, 2D, 3D (D; シールド切羽の直径) の 4 つの場合についておのおの 3~4 回行なった。

3.2. 実験結果とその解析

3.2.1. 切羽面に作用する土圧 土圧測定結果を土被りが, 0D, 1D, 2D, 3D の場合についておのおの (図-19), -20, -21, -22) に示す。土圧は切羽が主働側に変位するにつれて急に小さくなり, 約1mm (切羽直径の 0.33%) 変位すると主働状態を生じ, その後の値はほぼ一定値を示している。

村山ら^{1), 2)} は前述した二次元の問題を三次元に拡張して次のように考えた。(1) 式の P_a は D の 2 乗に相関する値となっている。そこで, P_a を切羽中心の鉛直断面に作用する土圧とし, P_{a0} とする。土圧は横断方向に P_{a0} を頂点とし, 両端で 0 となる放物線分布をすると考えて合土圧 ΣP_a を次式で示した。

$$\begin{aligned} \Sigma P_a &= 2P_{a0} \int_0^R \{1 - (x/R)^2\} dx \\ &= 0.67 \cdot D \cdot P_{a0} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2)$$

この理論を用いて求めた主働土圧の計算値を (図-19), -20, -21, -22) の中に理論値として示しておいた。測定値と理論値はよく一致しているのが見られる。参考のために土圧分布を円形分布と考えれば次式となる。

$$\begin{aligned} \Sigma P_a &= 2P_{a0} \int_0^R \sqrt{1 - (x/R)^2} dx \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot D \cdot P_{a0} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(3)$$

(図-23) は静止土圧と主働土圧 (切羽変位 3mm) を, 土被りを変数としてプロットしたものである。静止土圧は主働土圧の 2.5~6 倍で土被りが大きくなるにつれて大きくなる傾向を示している。したがって, 実際のシールド工事において, 砂地盤の場合, 切羽上部の地盤を全くゆるめないようにして沈下を防止するには主働土圧の計算値の数倍の力で切羽を押える必要がある。

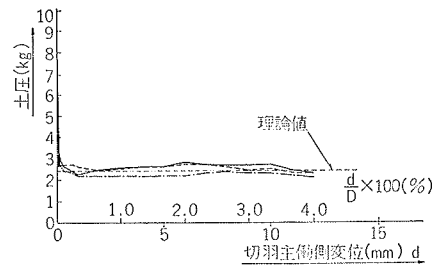


図-19 切羽面に作用する土圧 (土被り; 0D)

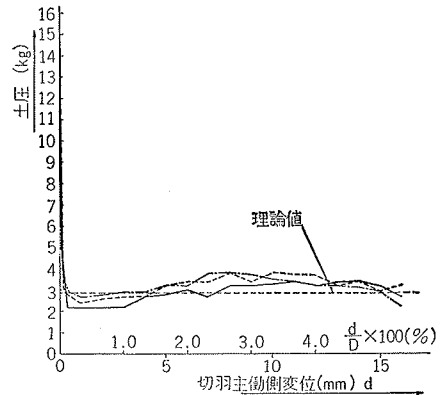


図-20 切羽面に作用する土圧 (土被り; 1D)

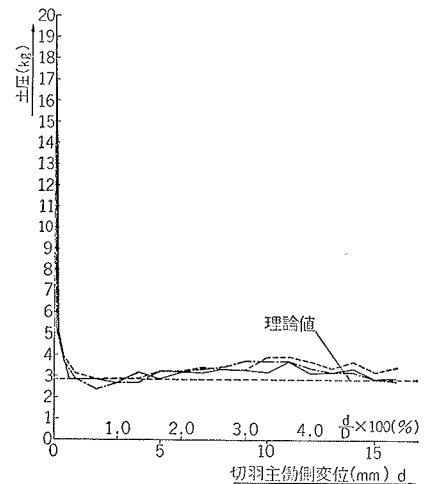


図-21 切羽面に作用する土圧 (土被り; 2D)

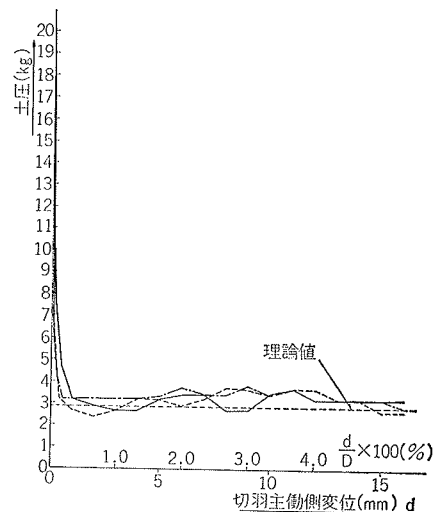


図-22 切羽面に作用する土圧 (土被り; 3D)

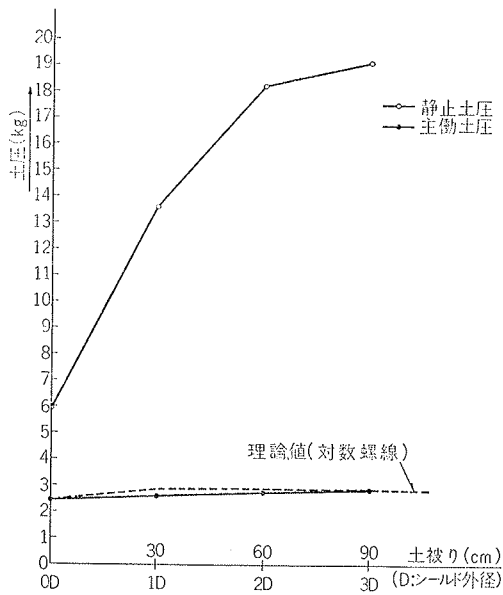


図-23 静止土圧と主動土圧

3.2.2. 地表面の沈下 切羽が主動側に12mm変位したときの地表面の沈下曲線を(図-24)にまとめて示す。土被りが大きくなるにつれて沈下量は小さくなるがその範囲は広がっているのが見られる。最大の沈下を起こす位置は切羽の真上で前方に5cm離れた所で、その値は土被りが0D, 1D, 2D, 3Dの場合おのこの25.5, 15.0, 5.0, 2.0mmで切羽直径の8.5,

5.0, 1.67, 0.67%であった。

(図-25)は最大沈下を示した沈下量を、切羽変位に対してプロットしたものである。この曲線からも土被りが大きくなるにつれて沈下量が小さくなっているのが見られる。また、沈下量は切羽変位に対してほぼ比例しているが、わずかに上に凸な弓なりの曲線となっている。これは砂がせん断されるときに体積が膨張している、すなわち正のダイラタンスー現象が生じていることを示していると解釈できる。

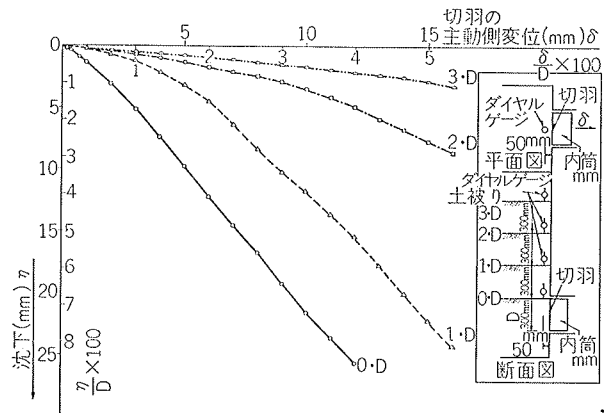


図-25 地表面沈下と切羽変位との関係

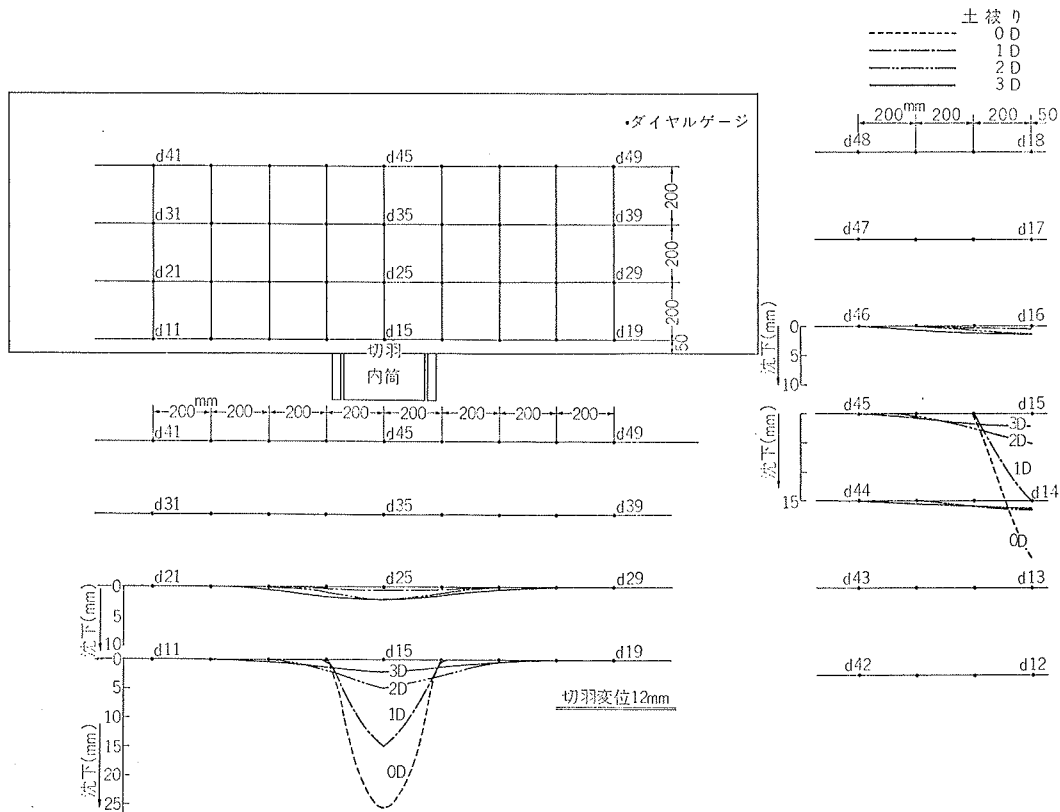


図-24 地表面の沈下比較図(土被り; 0D, 1D, 2D, 3D)

3.2.3. 地中の沈下およびスベリ面の形状 切羽が主働側に16mm変位したときの地中沈下状況を示す写真を土被りが0D, 1D, 2D, 3D, の場合についておのおの(図-26), -27), -28) -29)に示す。切羽の坑頂から上に1D(30cm)までは切羽直径の7~8割の幅で両側に明瞭なセン断面, すなわちスベリ面ができてきているのが見られる。土被りが30cm以上の地中では明瞭なスベリ面は現われず, わずかに下に凸な沈下曲線を示している。土被りが3Dの場合の地表面では, この沈下曲線もほとんど目には見えない。

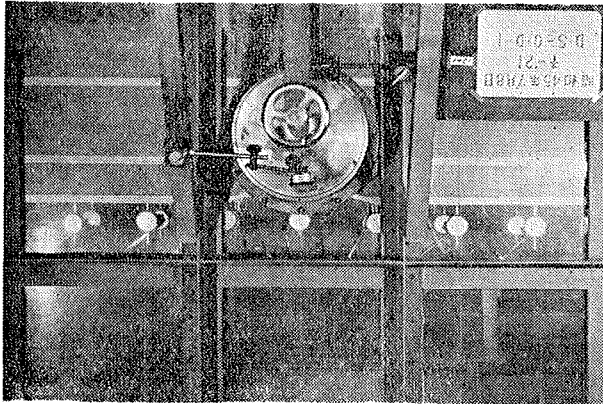


図-26 地中の沈下(土被り: 0D)

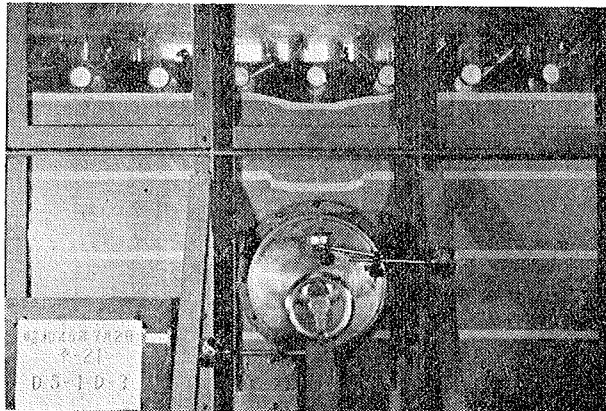


図-27 地中の沈下(土被り: 1D)

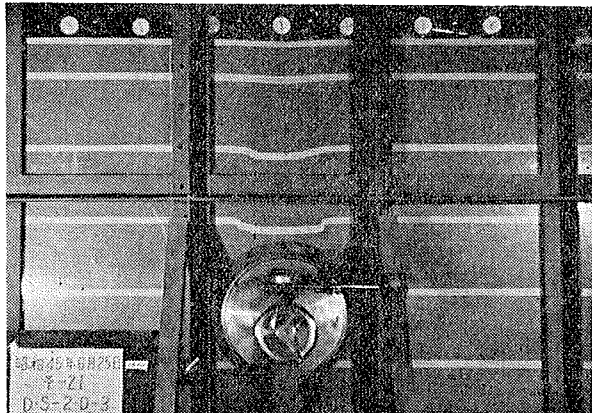


図-28 地中の沈下(土被り: 2D)

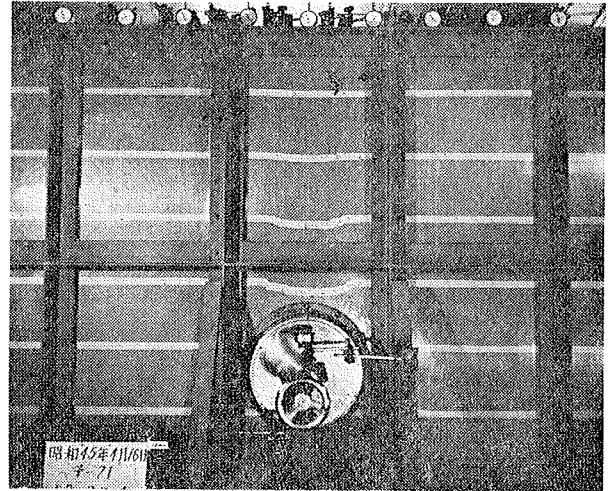


図-29 地中の沈下(土被り: 3D)

地中沈下の深さによる影響を見るために, 切羽主働側変位15mmのときの切羽の坑頂の真上で起こった地中の沈下を坑頂からの距離(h)に対してプロットすると(図-30)のごとくなる。地中の沈下は土被りには関係なく切羽の坑頂からの距離(h)に関係し, hが大きくなるにつれて沈下量は小さくなっているのが見られる。

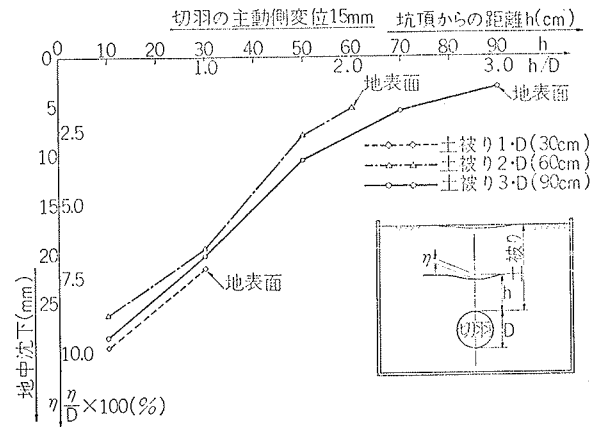


図-30 地中沈下の深さによる変化

3.2.4. 地中の砂の動き 切羽面が主働側に変位するにつれて, 地中の砂がどのように動くかを調べるために, 切羽変位 2mmごとに重ねどりの写真をとった。(図-31), -32), -33), はおのおの土被りが1D, 2D, 3Dの場合についてこれをグラフ化したものである。切羽の真上で切羽直径よりやや小さい幅で, 直径よりやや大きいアーチ状の土がおもに動いているのが見られる。このアーチの高さは切羽変位に関係し変位が大きいのほど高くなる。切羽変位が同じであれば, 土被りが大きいほど高くなる。またアーチ内部の土は切羽変位よりもやや大きい沈下を示す。

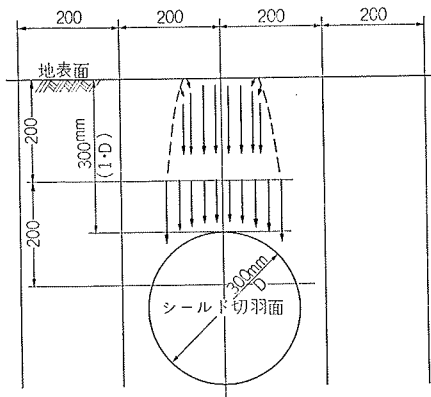


図-31 地中の砂の動き (土被り: 1D)

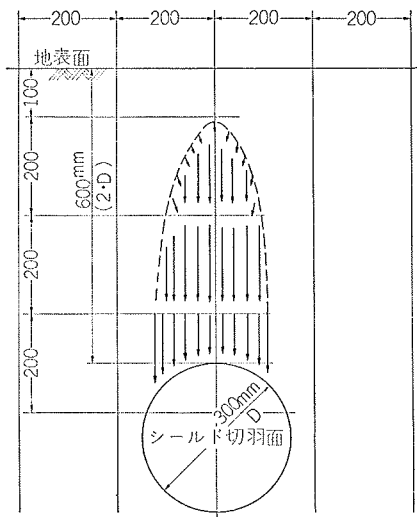


図-32 地中の砂の動き (土被り: 2D)

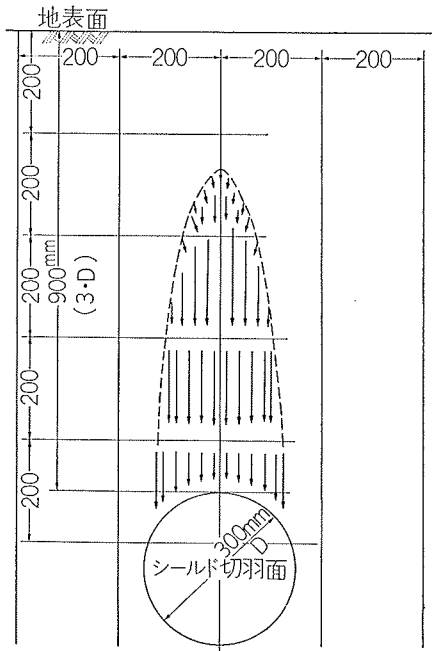


図-33 地中の砂の動き (土被り: 3D)

4. まとめ

シールド切羽の安定に関して、乾燥砂を用いて行なった二次元と三次元の模型実験から得られた結論を簡条書きにして示すと次のごとくなる。

(1) 切羽面に作用する合土圧は切羽が主動側に変位するにつれて急に小さくなり、切羽直径の約 0.3% 変位したときに主動状態を生じ、その後ほぼ一定値を示す。

(2) 主動土圧の大きさは村山らりの提唱する対数らせんのスベリ面を仮定した図解法による値とよく一致する。

(3) 静止土圧は主動土圧の 2.5 ~ 6 倍を示し、土被りが大きくなるにつれて大きくなる傾向を示す。

(4) 地表面の沈下は切羽の真上でわずか前方の所で最大沈下を示す。土被りが大きくなるにつれて最大沈下量は小さくなるが、その範囲は広がる。

(5) 地中の沈下は土被りには関係なく、切羽の坑頂からの距離(h)に関係し、hが大きくなるにつれてすなわち、地表面に近くなるにつれて小さくなる。

(6) スベリ面は切羽直径の 8 割の幅で直径よりやや大きい高さのアーチ状に明瞭なセン断面となって現われる。

参考文献

- 1) 村山, 遠藤, 橋場, 山本, 佐々木: 機械化トンネルシールドの切羽の安定に関する実験的研究 第21回土木学会講演集 III-73
- 2) 村山朔郎: 機械化シールドについて 土木学会関西支部 41.1