

泥水式シールドの適正泥水圧に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE SUITABLE SLURRY PRESSURE IN A SLURRY TYPE SHIELD

栗原和夫*・森 麟**・田村昌仁***

By Kazuo KURIHARA, Akira MORI and Masahito TAMURA

The suitable slurry pressure in a slurry type shield should satisfy the following conditions : 1) to keep stability in the cutting face. 2) to minimize the deformation of ground around the cutting face. 3) never to generate the hydrofracturing around the cutting face by the slurry pressure. This paper investigates the suitable slurry pressure in sandy as well as cohesive ground using a model slurry type shield machine. As a result, it is clarified that the pressure acting on the cutting face is the sum of the slurry pressure and the pushing pressure on the cutting face by the cutter and that the suitable slurry pressure is given by Eq. (1).

$$P_{ms} = \sigma_n - P_c \dots\dots\dots (1)$$

P_{ms} : the suitable slurry pressure, σ_n : the earth pressure at rest around the cutting face, P_c : the pushing pressure on the cutting face by the cutter

Keywords : shield, slurry pressure, laboratory test

1. ま え が き

泥水式シールド工法は、切羽を泥水で加圧しながら切羽を安定させ、カッターで切削し、掘進を図るトンネル工法である。この工法は、対象地盤の適用範囲が広く補助工法をあまり必要としない利点を有しているため、近年盛んに用いられ都市部のトンネル工事では欠かせないものとなっている^{1),2)}。

泥水式シールド掘進の際の切羽の重要課題としては次の4つのものがある。①まず切羽を安定させ、崩壊させないこと、②切羽地盤の動きを押え掘進時の地盤変状を極力小さくしなければならないこと³⁾⁻⁶⁾、③泥水の噴発（ブロー現象）は急激な泥水圧の低下を招き切羽崩壊を引き起こすことがあり得るので、絶対にならないようにすること、④として砂・礫地盤の場合は、切羽からの泥水の散逸すなわち汜過が多過ぎると泥水圧の低下や泥水補給に問題が生じるので、このようなことのないこと。このうち、④の砂・礫地盤の場合の泥水の汜過現象は主に泥

水自身の性状を調整することによって対処すべき問題であるが、その他の3つの条件は泥水圧の大きさについてのもので、この3つの条件を満足する泥水圧を明確にすることにより解決できるといえる。

本研究は上記の泥水圧に関する3つの課題を満足する適正泥水圧の大きさの解明を目的としたもので、①と②の条件を満足するためには切羽の押え圧（シールド前面圧）を適切にする必要があり、その前面圧についてはすでに調査し報告している⁷⁾。しかし泥水シールドでは、前面圧に泥水圧のほかにカッター圧が含まれてくるので、本研究ではカッター圧の大きさとその支配条件を調査している。また、③の条件のためには、泥水のブロー発生圧を知る必要があるが、これについてはすでに研究結果を発表しており⁸⁾、本研究はこれら既発表の研究結果を合わせ用いて適正泥水圧のあり方を明らかにしたものである。研究手段としては、実験土槽に模型のカッター付きの泥水シールドを掘進させながら切羽周辺地盤の変状に及ぼす泥水圧とカッターの押え圧の影響を調査している。なお、実験においては砂質土地盤と粘性土地盤の両者を対象としている。

2. 切羽の安定条件と地盤変状の支配条件

切羽に必要な泥水圧として、まずシールド推進に伴う

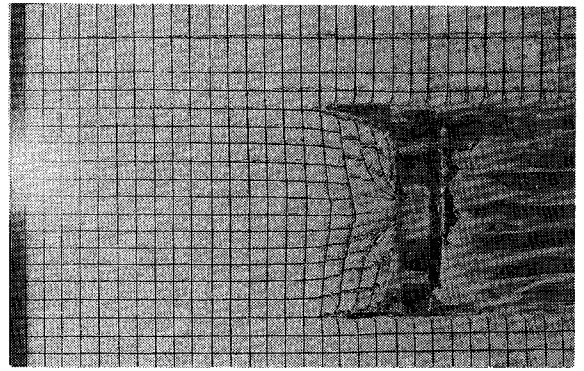
* 正会員 西松建設（株）技術研究部長
（〒105 港区虎の門1-20-10）

** 正会員 工博 早稲田大学教授 土木工学科
（〒160 新宿区大久保3-4-1）

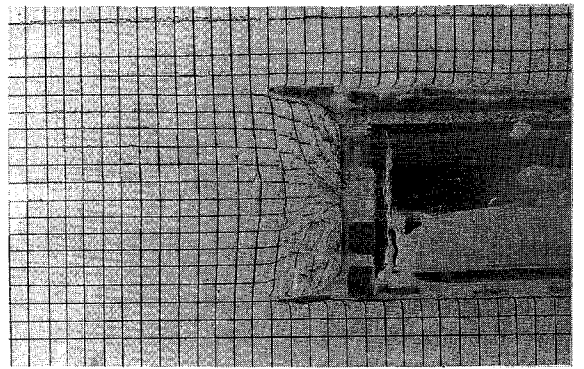
*** 正会員 工博 建設省建築研究所第三研究部
（〒305 つくば市立原1）

切羽地盤の動きについて考えてみる。この切羽地盤の動きを直接反映するものは取り込み土量である。取り込み土量は、シールドが掘進した部分の体積（シールドの断面積と推進距離の積）に対する取り込んだ土量の割合であり、取り込み土量が100%を越えると地盤沈下が、100%未満では地盤隆起が必然的に発生する。

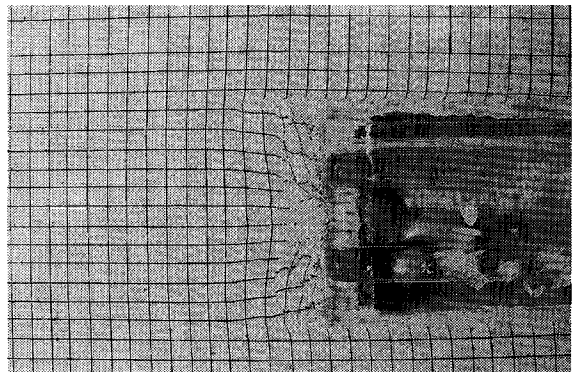
取り込み土量は切羽の押え圧に当たるシールドの前面圧と重要な関係があり、すでにシールド前面圧と取り込み土量の関係については、図一1のようになることを明らかにしている⁷⁾。なお、この実験は実験土槽に軟弱な練り返し粘土を詰め、直径120(mm)の半円筒形のブラインド型シールドを推進させて行ったものである。ここで、図中の横軸の圧力差は、前面圧からシールド中心位置における静止側圧（静止土圧と水圧との和）を減じたものである。なおこの場合の前面圧はシールド前面に作用する平均圧力である。圧力差がゼロ、すなわちこの前面圧が静止側圧に一致した場合に取り込み土量が100%になっており、前面圧を静止側圧に等しくすることが地盤変状を最小限にし得ることを示している。また、前面圧が静止側圧に比較して小さくなり、圧力差がマイナスになるほど取り込み土量が増加しA点で主動破壊となる。また圧力差がプラスになると取り込み土量が減少しB点で受働破壊が生じる。以上のことから、切羽の安定を確保して切羽の破壊を防ぐには圧力差がA点とB点の間に入っていればよいが、圧力差ゼロの状態が安定上最も優れている。これは取り込み土量が100%になる状態であり、切羽安定にとって最適な泥水圧と切羽地盤の動きを最小にする前面圧は一致する。写真一1



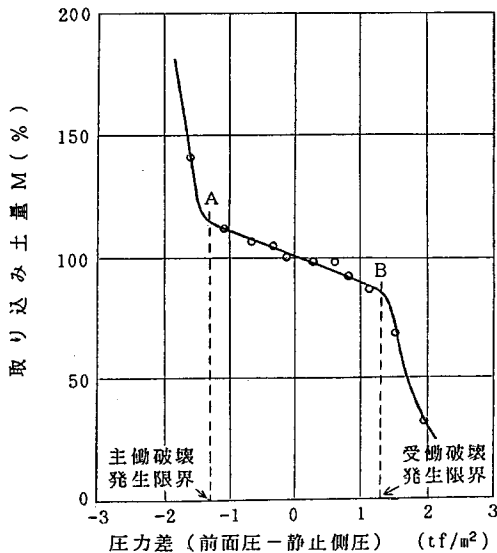
写真一1 取り込み土量 101% の切羽地盤の動き



写真二2 取り込み土量 104% の切羽地盤の動き



写真三3 取り込み土量 95% の切羽地盤の動き



図一1 圧力差と取り込み土量の関係
(試料の粘着力 $C_u=0.3 \text{ tf/m}^2$)

～写真三3には取り込み土量と切羽地盤の動きを示している。取り込み土量が101%ではシールド掘進に伴う切羽地盤の動きはシールド先端の地盤を除いて水平線、垂直線ともにほとんど認められない。しかし、104%ではやや沈下、95%ではやや隆起がシールド直上の水平線の動きから観察できる。また、シールド先端からやや離れたところの垂直線が104%ではシールドの方に引き寄

せられ、95%ではシールドに押されて前方に湾曲している。これらの状況からも、取り込み土量の大きさが地盤の動きを支配していることがわかる。

以上の実験結果は、ブラインド型シールドを用いた場合であるが、本研究で対象とする泥水式シールドでもシールドの切羽の押え圧である前面圧との関係でみれば同じことであり、前面圧と静止側圧が等しい場合に当然切羽に基づく地盤変状は最小になると考えられる。ただ、泥水式シールドの場合、前面圧は泥水圧だけでなく切羽面の切削時に生じるカッターによる切羽押え圧も付加されるので適正な泥水圧を決めるには、前面圧に占めるこのカッター圧の寄与分を明らかにすることが必要となる。

3. カッター圧の支配条件

泥水シールドの実工事にあたって泥水圧の決定にカッター圧は考慮されておらず、またその実測値もごくわずかでカッター圧についてほとんど明らかにされていない。このため今回実際土槽中に模型泥水式シールドを掘進させてカッター圧の大きさとその支配条件について調査した。カッター圧はシールド掘進に要する押込み圧でカッターディスクに作用する垂直成分に当たる。その全体はカッター回転軸の軸力として測定できる。

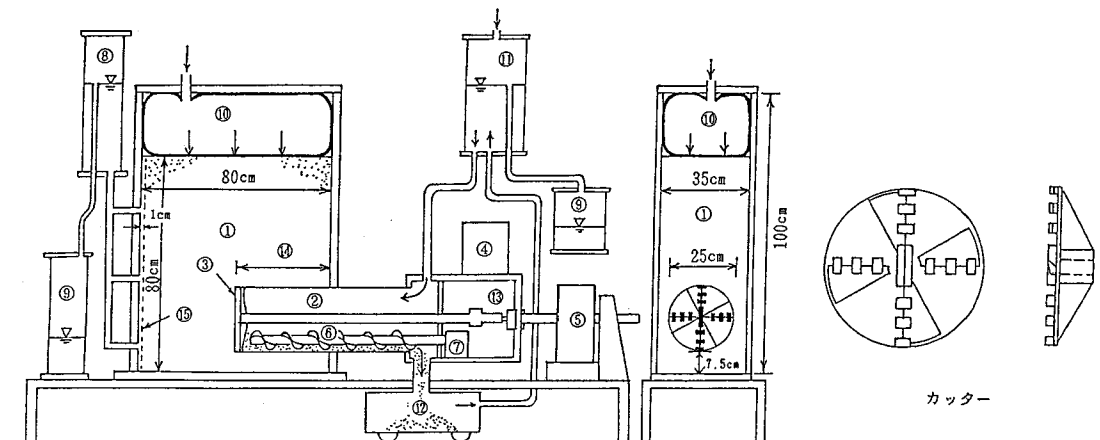
(1) 実験方法および試料

図-2には、使用した模型泥水式シールドの概要を示す。土槽は、高さ $H=100$ cm、長さ $L=80$ cm、幅 $B=35$ cmの直方体で、試料土は高さ 80 cmの高さまで入れる。模型シールドは、直径 25 cm、長さ 80 cmの円筒形のもので、先端に実機に類似のカッターディスクが装備されており、1回転で同一箇所を2度切削できるように

カッタービットが配置されている。

シールドは推進モーターを作動させて地盤中に推進させ、回転するカッターにより切削された土は泥水チャンパー中のスクリーコンベアを通して土溜めタンクに運送する。チャンパーの泥水は外部の泥水タンクに接続しており、泥水タンクを加圧して切羽面に所定の泥水圧を作用させる。土溜めタンクに入った削土分に当たる泥水が泥水タンクに戻るように接続されており、シールドの掘進中に泥水が自然循環できるようになっている。シールド掘進中における泥水の切羽からの汚過水は、土槽に接続した地下水用タンクへ排出される。土槽内の土表面には、加圧用ゴム風船を取り付けており、風船内を加圧して所定の上載圧を与える。

実験の手順は以下のとおりである。砂質土の場合、まずシールド機先端を発達部壁面の内側に合わせ、シールド前面に仕切り板を設置して試料土を土槽に詰め、シールドのチャンパーを泥水で満たして切羽が崩壊しないようにわずかな泥水圧を作用させながら仕切り板を引き抜く。その後、地下水圧は 0.1 (kgf/cm^2) に設定し、所定の上載圧および泥水圧を作用させてシールドを掘進させる。なお、ここでいう泥水圧、地下水圧とは、特に定めない限りシールド中心位置での値を用いている。シールドの掘進速度は1分間に 0.67 cm から 3 cm である。この掘進速度は現場の値と比較して大差ない。またカッターの回転数は1分間に 0.67 回から 3 回の範囲としたので切削厚さは実機の場合に近い。泥水タンクおよび地下水用タンクには、オーバーフロー用のタンクがそれぞれ接続されており、掘進中に水位が変化しないようになっている。粘性土の場合は、地下水圧を与えない点を除けば砂質土の場合とほぼ同様である。



①土槽 ②チャンパー ③カッター ④カッターモーター ⑤推進モーター ⑥スクリーコンベア ⑦スクリーコンベアモーター
⑧地下水用タンク ⑨オーバーフロータンク ⑩上載圧 ⑪泥水タンク ⑫削土溜めタンク ⑬ロードセル ⑭推進長 ⑮金網

図-2 模型泥水式シールド実験装置

実験土槽内の壁面には、土圧計および間隙水圧計を図一3に示す位置に設置しており、土槽中の土圧、水圧を測定できる。カッターのシャフト終端部には、軸力測定計器を取り付けており、シャフトに作用する軸力を求めてカッター圧を計算する。なお、カッター圧とはカッター軸力をシールドの断面積で除したものである。

地盤材料には砂質土としては豊浦標準砂を使用し、粘性土としては（カオリン粘土+豊浦標準砂+水）の混合土と（カオリン粘土+ケイ砂7号+石膏+水）をコンクリートミキサーを用いて種々の割合で混合し強度を変えたものを用いた。表一、表二にこれらの土の性状を示す。

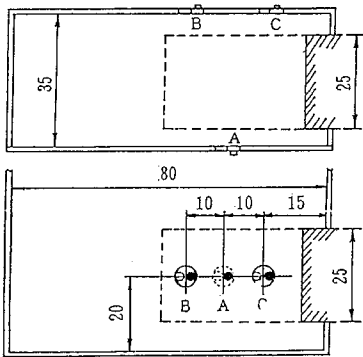
使用した泥水は、12% ベントナイト泥水であり、表一3には泥水のファンネル粘性および API 規格の汙過量を示す。ただし、粘性土地盤を対象とする場合には泥水のかわりに水を用いて実験を行っている。これは、粘性土は事実上不透水であり、泥水の汙過はなく泥膜の切削・再形成も考慮する必要がないためである。また、推進によりチャンパー内に切削した粘性土が入り攪拌されると自然泥水化するため、水の加圧でも泥水の加圧と同じ状態になる。

(2) 砂質土地盤におけるカッター圧

砂質地盤においてはシールド中心位置での地下水圧を 0.1 kgf/cm²、上載圧を 0.5 kgf/cm² に固定した条件下で、実験を行った。

a) 泥水圧とカッター圧の関係

カッターディスクの回転速度を 1 rpm としたときの有効泥水圧（=泥水圧-地下水圧）とカッター圧との関係



A、B、Cは土圧計及び間隙水圧計の位置を示す。 単位：cm

図一3 土圧計および間隙水圧計の設置箇所

表一 砂質土の性状

種類	間隙比 e	摩擦角 φ (°)	透水係数 k (cm/s)
豊浦標準砂	0.85	36	1.2 × 10 ⁻²

は3通りの切削厚さについて示すと図一4のようになる。どの切削厚さの場合も有効泥水圧を上げるとカッター圧は明確に増加している。これは有効泥水圧を上げると、摩擦材料である砂質土のせん断抵抗が増加し、切羽へのカッター押し込み抵抗などが大きくなるためと考えられる。

b) 切削厚さとカッター圧の関係

カッターの回転速度を 1 rpm に固定し泥水圧を 0.5 kgf/cm² とした場合における切削厚さとカッター圧の関係を求めると図一5のようになる。

カッター圧は切削厚さが厚くなるほど大きくなっており、直線的増加というより2次曲線的な増加のように思われる。畠の研究⁹⁾によると回転掘削における先端のくい込み抵抗は厚さの2乗に比例することが示されているが、図一5の関係はこれに近いものといえる。

c) 切削速度とカッター圧の関係

シールドの場合は回転掘削であるので、回転速度は一定であっても、切羽の切削速度はシールド中心から半径方向への距離に比例して大きくなる。この実験の模型シールドは径 25 cm であり、実機は数 m で数十倍の差がある。この切削速度がカッター圧に関係するかどうかを泥水圧と切削厚さをそれぞれ 0.3 kgf/cm² と 0.5 cm に固定して実験を行った。切削速度としては 1/2 半径の位置のものが平均切削速度に当たるので、この速度で表わすことにした。図一6に実験結果を示す。この実験では切削速度があまり大きくできなかったが、この範囲では切削速度が早いほどカッター圧が大きくなっており、両者はほぼ直線的に比例している。畠の実験結果によると¹⁰⁾、海底砂質土を平削る場合の切削抵抗は切削速度にほぼ比例しており、その理由として水中切削ではダイレイタンスによる負圧がせん断抵抗に影響し、負圧の大きさが切削速度にほぼ比例するためとしている。この

表二 粘性土の性状

種類 (配合)	粘着力 c _v (kgf/cm ²)
カオリン粘土+豊浦標準砂+水 重量比 (4:6:2.1)	0.03*
カオリン粘土+ケイ砂7号+水+石膏 重量比 (3:3:3:0.8~2.1)	0.29~1.94**

*: ベーン試験, **: 一軸圧縮試験で測定

表三 泥水の性状

濃度 N (%)	比重	ファンネル粘性 Fv (秒)	API 規格の濾過量 V (cc)
12	1.068	45.9	13.5

V: API 規格 (3.0(kgf/cm²)加圧、30秒間) の濾過量
N: ベントナイトの重量濃度

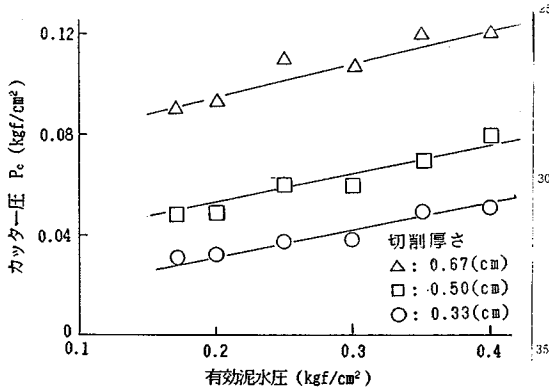


図-4 有効泥水圧とカッター圧の関係

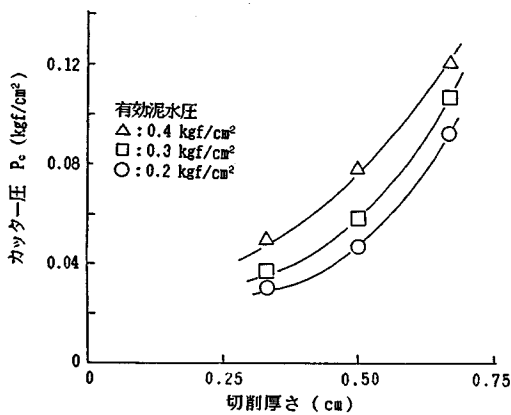


図-5 切削厚さとカッター圧の関係

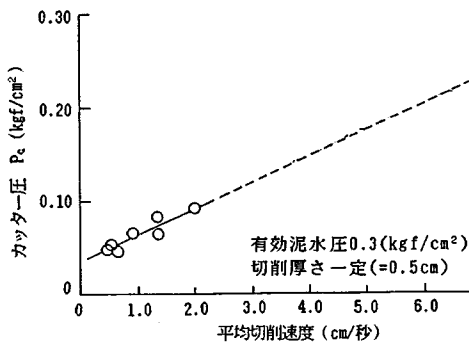


図-6 平均切削速度とカッター圧の関係

シールド実験の場合も水中切削なので同様な理由と考えられる。

d) 砂質土地盤のカッター圧の大きさ

以上の実験結果からカッター圧は有効泥水圧、切削厚さおよび切削速度が大きくなるほど増加することがわかった。特に実機の場合のカッター圧としてはこの模型シールドとの差の大きい切削速度の影響を大きく受ける

表-4 シールド現場におけるカッター圧の算定値

現場名	土質	泥水圧 (kgf/cm ²)	カッター圧 (kgf/cm ²)	分担率 (%)
城東上野線	砂れき	2. 2 5	3. 4 5	6 0
城東上野線	粘土混砂れき	2. 1 5	2. 8 7	5 7
江戸川	砂質土	1. 5 0	1. 7 7	5 4
都営八幡	砂質土	2. 1 8	3. 1 8	5 9
都営八幡	砂質土	1. 9 4	3. 9 4	6 7
大阪地下鉄	砂質土	1. 3 0	1. 1 6	4 7
大阪地下鉄	砂質土	1. 1 3	1. 2 2	5 2

分担率：前面圧 (= 泥水圧 + カッター圧) に対するカッター圧の割合である。なお、カッター圧はシールド推進中の総推力から周面摩擦抵抗 (= ゆるみ土圧 × 摩擦係数 μ) を差し引いて前面圧を求めカッター分担率を算定した。摩擦係数 μ は、シールド周面が泥水とずりのため 0. 2 と小さい値にとった。

と考えられるが、そのまま比例するとしなくてもカッター圧はかなり大きくなる。さらに実機の場合有効泥水圧や切削厚さが大きくなるとすれば、当然カッター圧の増加をもたらす。施工現場のデータから求めた数少ない実機のカッター圧を示すと表-4 のようになっている。なお、表中の分担率 (%) とは前面圧 (= 泥水圧 + カッター圧) に対するカッター圧の割合である。

これからもわかるように砂質土の場合には実機のカッター圧は前面圧の半分程度になり泥水圧分と同等程度の大きさを持ち得るので、カッター圧が切羽押え圧として重要な役割をもつことがわかる。

(3) 粘性土地盤におけるカッター圧

粘性土地盤では、上載圧はすべて 0.3 kgf/cm² とし、地下水圧は与えていない条件下で実験を行った。

a) 泥水圧とカッター圧の関係

カッターの回転速度を 1 rpm、切削厚さを 0.5 cm としたとき、泥水圧とカッター圧との関係は図-7 のようになる。粘性土の場合はカッター圧が泥水圧には無関係であることがわかる。これは砂質土の場合と異なり摩擦材料でなく切羽地盤のせん断抵抗が泥水圧には無関係であるためである。

b) 切削厚さとカッター圧の関係

カッター回転速度を 1 rpm に固定したとき切削厚さを変えた場合、カッター圧との関係は図-8 のようになる。切削厚さが厚いほどカッター圧は大きくなり、砂質土の場合ほど顕著ではないが 2 次曲線的増加傾向と思われる。

c) 切削速度とカッター圧の関係

切削厚さを 0.5 cm に固定したとき切削速度とカッター圧の関係は図-9 のようになる。この図から切削速度はカッター圧にまず無関係ということが出来る。これは粘性土では透水係数が非常に小さいので切削速度の大

小にかかわらず非排水せん断条件となるためと考えられる。

d) 粘着力とカッター圧の関係

カッター圧は切羽のせん断抵抗に大きく関係があるので粘性土中の石膏量によって粘着力を変え、その他の条件は一定にしてカッター圧と粘着力の関係を調べてみると図-10のようになった。この場合粘性土地盤の粘着力の増加によりカッター圧は比例的増加を示している。カッター押込み力は粘着力に比例すると考えられるので、この結果はそれを裏付けるものである。図-10の粘着力はシールド掘進前のものであるので、切羽粘着力は吸水により低下するはずである。

掘進中の切羽の粘着力低下状態は直接測定できないが、実験土槽に用いた試料の一軸試験供試体を水浸したときの経時的強度変化は図-11のようになっている。したがって水に接する切羽ではかなりの粘着力低下が予想される。吸水による粘着力低下が少なければカッター圧はその分大きくなっていく。

e) 粘性土地盤のカッター圧の大きさ

粘性土の場合には砂質土と異なり泥水圧と切削速度はカッター圧に無関係であり、切削厚さと粘着力にカッター圧は支配される。粘着力については切羽での吸水による低下が考えられるが、実際地盤の粘性土は本実験の人工粘土と異なり、掘進中に吸水による強度低下は比較的小さいと思われる。しかし、一般の地盤の粘着力程度では実験結果からみてそのカッター圧はわずかであり、実機の場合を考えてもカッター圧が大きく増加する要因

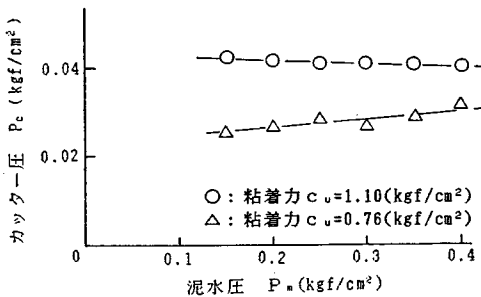


図-7 泥水圧とカッター圧の関係

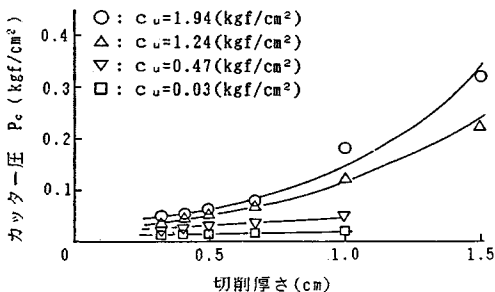


図-8 切削厚さとカッター圧の関係

は切削厚さのみなので、泥水圧に対する割合は砂質土の場合と違ってかなり小さくなる。

4. 泥水圧と地盤変状

シールド掘進時に切羽地盤を変動させると即時的に地盤沈下や地盤隆起を起こすだけでなく、土に乱れを与え、この乱れによる圧密沈下現象を長期間継続させることになる。このようなことは地上、地中構造物に悪影響を及ぼすので、シールド掘進時の地盤変動を極力小さくすることが重要である。従来泥水式シールドの泥水圧としては地中連続壁などの泥水掘削の際の孔壁安定の実績を利用した地下水圧+0.20 kgf/cm²程度とすることが多いが、理論的な根拠はない。著者は2.においてシールド掘進に基づく地盤変動を最も小さくするには切羽を押えるシールド前面圧を切羽中心位置に当たる静止側圧に等しくして両者の圧力差をゼロにする必要を示した。また泥水式シールドの前面圧は泥水圧と3.で述べたカッター圧の和となるので、地盤変動を最も小さくする前面圧の中の泥水圧の大きさが実際にどのようなになるかを実験により調査した。

(1) 実験方法および試料

シールド掘進時の地盤変状については、図-2の実験装置では求めることが難しいので、図-3の土槽の前面を透明なアクリル板に変え、ここに接して図-12に示

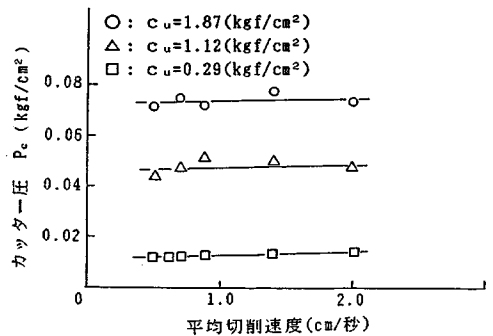


図-9 平均切削速度とカッター圧の関係

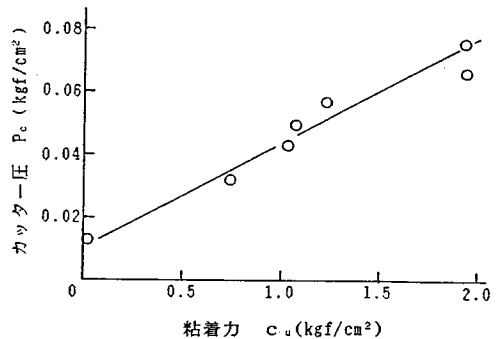


図-10 粘着力とカッター圧の関係

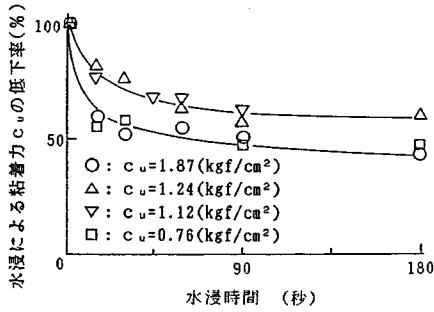


図-11 水浸による粘着力の変化

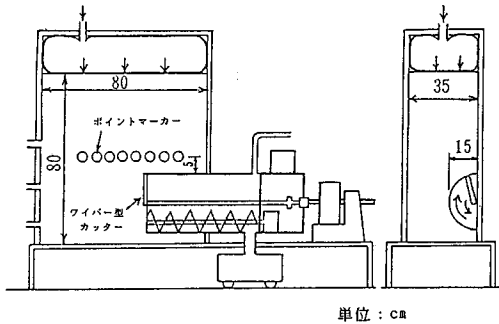


図-12 半円筒式模型シールド基本図

す半円筒式の泥水式シールド（直径 30 cm）を掘進させて地盤変状と前面圧の関係を調べることにした。この実験は、シールド、カッター形状が異なる点を除けば設備・装置は前章と同様である。地盤変状はアクリル板の内面全体にシリコングリースを塗布して、シールド天端通過予定線から上の部分にポイントマーカーを 5 cm 格子の交点に設置し、マーカーの変位量から調べた。この実験装置によりシールド中心縦断面の地盤変状が測定できる。

使用したカッターはワイパー型（半回転往復型）の一文字式でその全面積が切羽面にあたるもので、大きさは切羽面積の 8.5% である。カッターの回転速度は、砂質土地盤、粘性土地盤とともに、15 秒/半回転とした。泥膜はカッターによって 15 秒ごとに切削される。実用のシールド機でも、回転数とカッタースポーク、カッタービットの数から計算すると 10~15 秒ごとに同一箇所が切削されるので、本実験の場合は実際にほぼ一致している。掘進速度はどの場合もすべて 1 cm/分とした。

実験土槽に使用した試料は、砂質土としては豊浦標準砂、粘性土としてはカオリンと豊浦標準砂との混合土のそれぞれ 1 種であり、試料の性状は表-1、表-2 で示している。この実験では静止側圧（=地下水圧+静止土圧）の大きさが必要なため、シールド掘進前に所

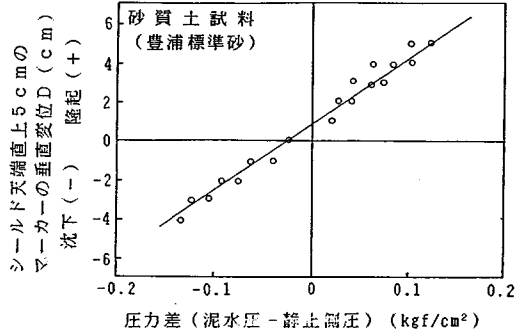


図-13 カッター圧を考慮しない場合の地盤変状と圧力差の関係

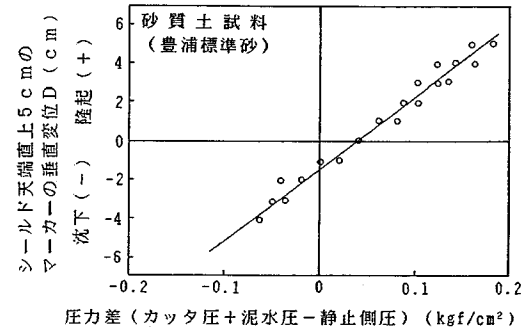


図-14 カッター圧を全部有効とした場合の地盤変状と圧力差の関係

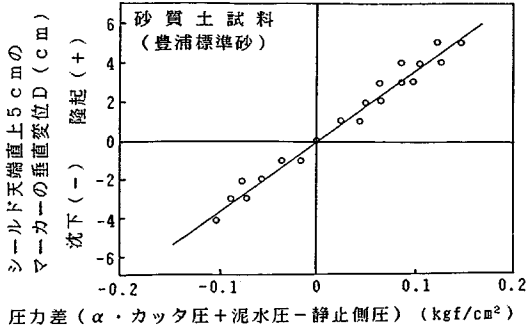
定の上載圧をかけた後、シールド中心深さの土槽壁面に設置した図-3の土圧計で測定し、同一条件の全実験の土圧の平均値を静止側圧とした。

(2) 砂質土地盤における地盤変状

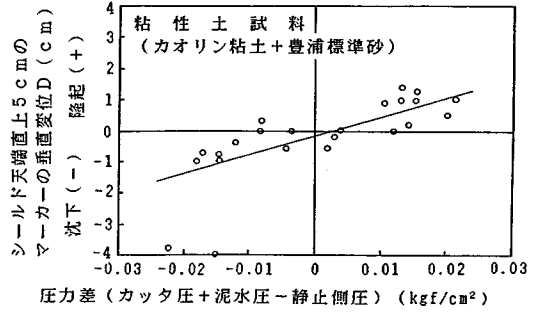
実験は、上載圧を 0.5 kgf/cm²、地下水圧を 0.1 kgf/cm² にすべて固定して行った。

図-13 には豊浦標準砂を詰めた土槽におけるシールドの掘進時における地盤変状と圧力差（=前面圧-静止側圧）の関係を示している。なお、地盤変状はシールドの天端直上 5 cm の線にあるマーカーの変位で表わすことにした。この場合は前面圧を泥水圧のみとみなしており圧力差ゼロに相当する条件では地盤隆起が生じていることがわかる。これは実際には泥水圧だけでなくカッター圧も切羽を押える役目を果たすためであり、実際の前面圧としては過剰になって地盤隆起が生じたものと思われる。

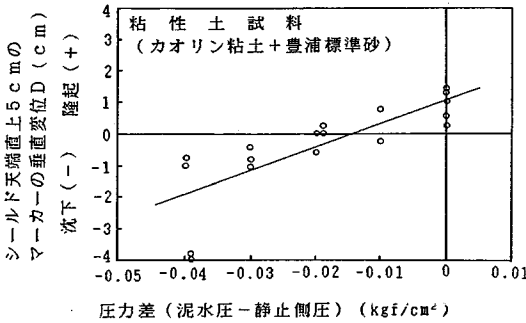
図-14 は、カッター圧のすべてが切羽の押え圧として有効と仮定した場合の結果であるが、前面圧は（カッター圧+泥水圧）であり、これと静止側圧が一致した圧力差ゼロの状態では図-13 とは逆に地盤沈下が生じていることがわかる。今回のカッターが一文字式のものであり押えところが全面的でなくごく限られていることが、押え効果を十分に発揮させなかった原因と思われる。



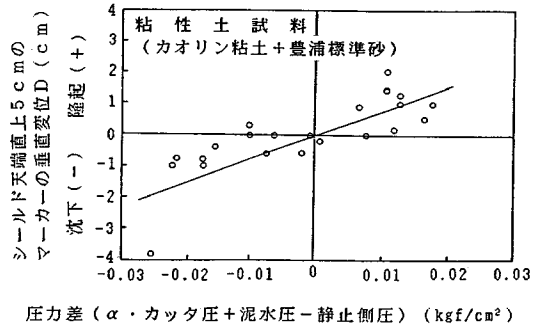
図一五 カッター圧の有効率 α を 0.41 とした場合の地盤変状と圧力差の関係



図一七 カッター圧を全部有効とした場合の地盤変状と圧力差の関係



図一六 カッター圧を考慮しない場合の地盤変状と圧力差の関係



図一八 カッター圧の有効率 α を 0.81 とした場合の地盤変状と圧力差の関係

この一文字カッターによる押え効果を有効率 α 、カッター圧を P_c とするとシールドの前面圧は $\alpha \cdot P_c$ と泥水圧 P_m との和となる。前面圧の大きさが静止側圧に一致したときに地盤変状が生じないという 2. の考え方をすると、 $\alpha=0.41$ となる。この α を用いた前面圧から圧力差を求めると、図一三は図一五のように書き改めることができる。すなわち、掘進に基づく地盤変状を最小にする泥水圧 P_{ms} は次式で示すことができる。

$$P_{ms} = \sigma_h - \alpha \cdot P_c \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 P_{ms} ：地盤変状を最小にする泥水圧 (kgf/cm²)

σ_h ：静止側圧 (kgf/cm²)

P_c ：カッター圧 (kgf/cm²)

α ：カッターによる押え圧の有効率

ただし、現場のシールドでは、本実験の一文字型カッターと異なりカッタービットが切羽全体にほぼ均等に散らばって分布しカッター圧が切羽全体に作用するので、有効率 α はおそらく 1.0 程度になると考えられる。

(3) 粘性土地盤における地盤変状

粘性土地盤の実験では、上載圧をどの場合も 0.3 kgf/cm² に固定し、地下水圧は与えていない。図一16 には、粘性土の場合のシールド掘進時における地盤変状と圧力差の関係を示す。前面圧として泥水圧のみを考え

ると、泥水圧が静止側圧に等しい圧力差ゼロの状況では、地盤隆起が生じておりこの傾向は砂質土の場合と同様である。この原因は、(2) の砂質土の場合と同様に前面圧の中のカッター圧を加えないためである。実測したカッター圧と泥水圧の和を前面圧としたときの圧力差で地盤変状を評価すると図一17 のようになるが、この前面圧を静止側圧に合わせた圧力差ゼロの状態では今度は地盤沈下が生じている。これは、前節で述べたように一文字型カッターのあたる部分が限られており、カッター圧の切羽押え効果が十分有効に発揮されないためである。この場合も (2) で述べたようにカッター圧のうち切羽安定に有効となる割合を有効率 α とし、式 (1) が成立するときの α を求めると 0.81 となる。この α を用いた有効カッター圧と泥水圧の和に当たる前面圧で圧力差を求めると図一18 の関係が得られる。粘性土の場合の α は砂質土の値より大きいがこれは土質の差によるというより、カッター圧分がかなり小さいため α 決定の誤差が大きく原因していると考えられる。実際シールドの α としては砂質土と同様に 1.0 と考えてよいであろう。

5. 切羽からの泥水噴発

泥水の噴発（ブロー現象）は、過剰な泥水圧による切羽地盤の割裂現象に起因しており、泥水圧が切羽地盤の割裂圧より大きいとブローが生じる。砂質土のブロー現象は、カッターによる泥膜の切除とその後の再形成が絶えず繰り返される切羽面での動的な現象と関係があり、この状態における動的ブロー圧はカッターが静止している静的ブロー圧よりも小さくなる。しかし、いずれにしても砂質土のブロー圧は静止側圧よりかなり大きいので通常の場合はブローの危険性はないといえる⁸⁾。

一方、粘性土の場合のブロー圧 P_{bc} は、動的と静的による差異はなく、土中の最小主応力を σ_{min} とすると次式で与えられることをすでに明らかにしている⁸⁾。

$$P_{bc} = \sigma_{min} + q_u \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 P_{bc} ：粘性土のブロー圧 (kgf/cm²)

q_u ：粘性土の一軸圧縮強度 (kgf/cm²)

上式の σ_{min} はこの場合、切羽の静止側圧が一般にこれに相当する。切羽からの泥水の噴発は絶対に発生させるはならないので、泥水圧を式 (2) で与えたブロー圧より十分小さく保持することが噴発防止のうえで必要である。

6. シールド掘進時の適正泥水圧

泥水式シールドの泥水圧の適正值は 1. で述べた①、②、③の 3つの条件を満足するものを原則とすべきである。しかし、すでに述べたように切羽破壊防止に対する①条件は掘進時の切羽に基づく地盤変状を最も小さくする②条件と一致するため、後者の②条件で代表させ得るので、他の 1つの泥水の噴発をさせない③条件との 2つによって適正泥水圧が決まることになる。②条件としての掘進時の地盤変状についての泥水圧は、3.、4. で述べてきたように切羽にカッター圧が作用するのでこれにかなりの影響を受ける。このため、地盤変状を最小限にする適正泥水圧比 P_{ms} はカッター圧を考慮した式 (3) で与えられることになる。これは式 (1) 中の α を 1 として実機の状況に合わせたものである。

$$P_{ms} = \sigma_h - P_c \dots \dots \dots (3)$$

砂質土の場合は切羽からの泥水ブロー圧が十分大きいので、適正泥水圧は一般の場合式 (3) で与えられる。ここで問題となるのは、3. で述べたように実際のシールドでのカッター圧が大きくなるので場合によっては式 (3) の泥水圧が地下水圧より小さくなることである。泥水圧としては地下水圧より大きく設定して地下水の流入を防止し、切羽を保持することが必要である。施工中の設定泥水圧の変動幅を考慮すると、泥水圧は最低でも地下水圧 + 0.2 kgf/cm² 程度は必要である。したがって、

このような場合には式 (3) による泥水圧は使用できないので、切羽前面圧を静止側圧と一致させて地盤変状を最小にすることは不可能な場合があることに留意すべきである。以上のような適正泥水圧として式 (3) を適用できる場合あるいは適用できずに地下水圧 + 0.2 kgf/cm² 程度に設定しなければならない場合であっても、カッター圧の大きさを明らかにすることが泥水圧を決めるうえで重要となるので、今後実際の施工にあたってはカッター圧を常時計測できるようにする工夫が是非必要である。

粘性土の場合は、カッター圧が小さいので式 (3) の泥水圧は砂質土の場合と異なり、切羽の静止側圧に近い大きくなる。この泥水圧が切羽からの泥水ブロー圧より小さいときは、適正泥水圧の条件を満たす。しかし、粘性土のブロー圧は式 (2) で与えられる値であるので、場合によっては式 (3) の泥水圧の方が大きくなり得ることが考えられる。通常の場合は、式 (2) 中の最小主応力 σ_{min} は静止側圧 σ_h に等しいとできるので、この条件下のシールド前面におけるブロー発生の可能性について考えるとシールド上端が最もブローしやすいことになる。このシールド上端でのブロー圧 P_{bu} は式 (4) で与えられる。

$$P_{bu} = K\gamma(H - R) + q_u \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 γ ：土の単位体積重量、 R ：シールド半径、 K ：静止側圧係数、 H ：シールド中心の土被り深さ

P_{bu} が小さいほど当然ブローしやすいことになるので、粘性土の一軸圧縮強度 q_u が小さく、シールド半径 R が大きいほどブロー圧が小さいことになる。また、式 (3) を満足するシールド上端での泥水圧 P_{mu} は、泥水の単位体積重量を γ_m とすると式 (5) のようになるので、式 (3) の条件を満たしかつブローが生じないための条件は、式 (4)、式 (5) より式 (6) で与えられる。

$$P_{mu} = P_{ms} - \gamma_m R \dots \dots \dots (5)$$

$$q_u > (K\gamma - \gamma_m) R - P_c \dots \dots \dots (6)$$

軟弱粘性土地盤では、3. で述べたようにカッター圧 P_c が小さく、また通常静止側圧係数は 1 に近いので $(K\gamma - \gamma_m)$ が大きい。しかも左辺の q_u が小さいため、軟弱粘性土地盤でシールド半径の大きいものを推進させるような場合には式 (6) が成立しにくくなる。すなわち式 (3) の泥水圧ではブローが発生し得るので、泥水圧を式 (3) で与えたものより低めに設定してブローを避けることが必要である。したがって、この場合は掘進時地盤変動を最小にすることは無理となる。

以上のことから、砂質土でも粘性土でも適正泥水圧は一般に式 (3) で与えられるが、砂質土ではカッター圧が大きくなると式 (3) の値より高めに、また軟弱粘性

土では泥水ブローのために式(3)のものより低めに泥水圧を設定せねばならない場合があることに注意すべきである。

7. ま と め

泥水式シールドの適正泥水圧は、a) 切羽地盤の動きを押え地盤変状を最小にできること、b) 切羽を割裂して泥水のブローを生じさせないことの2つの条件を満たすものでなければならない。このような適正泥水圧の大きさは、具体的にどのようなになるかを実験的に研究し、次のような結果を得た。

(1) a) の条件を満たすには、シールド前面圧をシールド位置の静止側圧と一致させる必要があり、この場合の泥水圧としては、静止側圧からカッター圧を差し引いたもので式(3)で与えられる。カッター圧は砂質地盤では大きく、粘性土地盤では小さくなる。

(2) 適正泥水圧は、a) の条件である式(3)の値が、b) の条件を満たす必要がある。砂質地盤では、b) の条件のブロー発生圧が十分大きいので、これを考慮する必要はないが、粘性土地盤ではブロー圧は式(2)で与えられ、 q_u の小さい粘性土でシールド径の大きい場合には、式(3)の泥水圧でブローの生じることもあり得る。したがって、このときには泥水圧をブロー発生圧以下にする必要があるので、a) の条件は満足されることになる。

(3) 砂質地盤では、カッター圧が大きくなるので、場合によっては式(3)で求めた適正泥水圧が地下水圧より小さくなることもあり得る。このときには、切羽が不安定になるので泥水圧は式(3)によらずに地下水圧+0.2 kgf/cm²程度に設定する必要がある。この場合に

は、a) の条件は満足されない。

(4) 上記の(2)、(3)の場合には、a) と b) を同時に満たす適正泥水圧は存在しないが、このほかの場合には式(3)によって求められる。

(5) 適正泥水圧を求めるには、カッター圧の大きさが必要であるので、シールド掘進時にカッター圧を直接測定する計器の設置が是非とも望ましい。

参 考 文 献

- 1) 栗原和夫：泥水加圧シールド工法，鹿島出版会，1982.
- 2) 矢野信太郎：シールド工法，鹿島研究所出版会，1965.
- 3) 水谷敏則ほか：シールドトンネルの切端の安定に関する検討，土木技術資料，26-11，pp.15~209，1984.
- 4) 坂口昌彦ほか：泥水加圧シールド工法の研究(その2) 切羽安定機構について，大成建設技術研究所報，第15号，pp.179~182，1985.
- 5) 内藤和章・卯城哲也：施工例からみた泥水加圧シールド工法の適用性の分析とその施工管理，シールドトンネルの設計と施工技術，第8巻，pp.1~5，1980.
- 6) 木島詩郎ほか：泥水加圧シールド工法の研究(その1) 切羽安定機構について，鹿島建設技術研究所年報，pp.105~110，1976.
- 7) 森 麟：シールド工事における取り込み土量と切羽地盤の動き，トンネル技術講演会テキスト，トンネル技術協会，pp.95~103，1986.
- 8) 栗原和夫・森 麟・田村昌仁：泥水式シールドのブロー現象に関する実験的研究，土木学会論文集，第397号，pp.95~104，1988.
- 9) 畠昭次郎：土と基礎・最近の工法，土質工学会，p.9，1967.
- 10) 畠昭次郎：土の掘削について，建設機械，No.4，p.30，1983.

(1989.1.18・受付)