

泥水シールド工法における泥水に関する研究（その1）

——粗粒地盤における泥壁の形成について——

喜 田 大 三
川 地 武

Studies on Slurry in Slurry Shield Tunneling System (Part 1)

——Formation of Impermeable Layer at Facing on Sandy or Gravelly Ground——

Daizo Kita
Takeshi Kawachi

Abstract

In a slurry shield tunneling system, slurry is indispensable for stabilizing the face and transporting excavated soil. In this system, differing from the slurry trench method, the face is cut continuously, and therefore, it is needed to control velocity of penetration of slurry and mud cake formation. Accordingly, laboratory experiments were carried out to clarify the processes of these phenomena and the following results were obtained:

(1) The facing is made impermeable by penetration of slurry and this phenomenon may be attributed to clogging of slurry particles in voids of facing soil, or yield-resistant characteristics of slurry.

(2) In case there is no clogging, the distance of penetration is controlled by the yield value of the slurry.

(3) According to the results of pore pressure measurements, about 90 seconds are needed for formation of mud cake or a slurry-penetrated layer.

概 要

泥水シールド工法における泥水は切羽の安定および掘削ブリの流体輸送に有効に作用し、本工法における泥水はこれらの機能を考慮して調合、管理する必要がある。特に、本工法は従来の泥水工法と異なり掘削壁面すなわち切羽が連続的に切削されるので、切羽における泥壁の形成速度あるいは泥水の浸透範囲を適切に管理する必要がある。そこで、切羽を泥水によって不透水化することによって安定を図る必要がある粗粒地盤について、泥水の浸透および不透水層の形成状況を明らかにするため室内実験を行ない以下の知見を得た。(1) 泥水の浸透によって切羽は不透水化され、この不透水層は目づめ作用による場合と泥水の流動抵抗による場合とがある。(2) 目づめ作用がない場合の泥水の浸透範囲は地盤の透水係数および泥水の降伏値によって決定される。(3) 間隙水圧の測定結果によれば、切羽における不透水性のマッドケーキあるいは泥水浸透層の形成には90秒前後の時間を要する。したがって、切羽の安定には先行する泥水浸透層の存在が重要な役割を果す。

1. まえがき

下水道、地下鉄をはじめとするトンネル工事に泥水シールド工法が採用される例が多くなっている。本工法は圧気シールド工法などに比べて、薬液注入を必要としない、酸欠等を生じない、作業環境が良好、掘削ブリの搬出が容易であるなどの利点を有しているため、改良すべき点も多々見られるものの、今後もその適用範囲が拡大されるものと考えられる。本工法では加圧した泥水を用

いて切羽の安定化を図り、また掘削ブりは泥水によって流体輸送される。したがって、本工法では切羽の安定、ブリの運搬、分離を考慮した泥水の調合・管理が必要とされる。当社は泥水を使用した地下掘削工法であるOWS・SOLETANCHE工法の豊富な施工実績を有し、泥水の調合・管理に関しても系統的な研究開発を行ってきた¹⁾。この成果には泥水シールド工法の分野にも適用可能なものが多いと考えられるが、その適用に当たっては両工法の相違を考慮する必要があり、特に両工法にお

ける掘削切羽あるいは掘削壁面の置かれる状態の差異は十分に考慮する必要がある。

そこで、泥水シールド工法において切羽の安定に関与する切羽付近の泥水の挙動、特に泥水の浸透およびマッドケーキなどの形成による切羽の止水化に着目して室内実験を行ない、切羽の止水化と泥水の性状との関係、泥水圧の伝達様式などについて基礎的な知見を得た。

2. 実験方法

2.1. 浸透実験装置

試験は図-1に示す加圧浸透装置を用いて行なった。シリンダー内には粒径のそろったガラス玉 (0.2, 0.5, 1.0 m/m) を地盤モデルとして採用し、泥水の浸透距離を測定しやすいようにシルト泥水以外には色素を加えて着色している。

2.2. 供試材料

ベントナイト：山形県産の250メッシュのものを6~12%の濃度 (W/V) で使用した。

陶土：岐阜県産の粉末粘土を40%までの濃度 (W/V) で使用した。

シルト：東京神積層のシルト層から採取した粘性土を湿潤状態で使用した。これら粘土材料の粒径分布を図-2に示す。

ポリマー：地中連続壁工法で用いられている OP-4 および OP-7 を 0.5~1.0% の濃度 (W/V) で使用した。

以上の材料のほか、必要に応じて逸泥防止材のアスベストを使用した。なお、泥水は家庭用ミキサーで混練し、一夜以上放置したものを実験に供した。

2.3. 測定項目と方法

泥水の流動特性：測定は API 規格のファンネル粘度

計および B 型粘度計 (東京計器製) によった。粘度はファンネル粘度および B 型粘度計のローター回転数 30 rpm の粘度を採用し、後者は単に粘度と呼んでいる。降伏値は B 型粘度計によって得た流動曲線から求めた。

泥水の浸透性：図-1の装置を用いて泥水を加圧浸透させ、浸透距離、排水量を経時的に測定した。その際の圧力は 0.2 kg/cm² としている。

間隙水圧：泥水が浸透中の地盤モデル内の間隙水圧は、シリンダーの各部に取り付けた測定チップを水銀柱に接続して経時的に測定した。

3. 実験結果

3.1. 泥水の流動特性

図-3にいくつかの泥水の流動曲線を示したように、ズリ応力とズリ速度 (図中ではローター回転数) が直線関係にあるものと、直線とはならないで、ある降伏値を有するものとに大別できる。前者はニュートン流体、後者はビンガム流体と呼ばれる。ポリマー (OP-4) 泥水

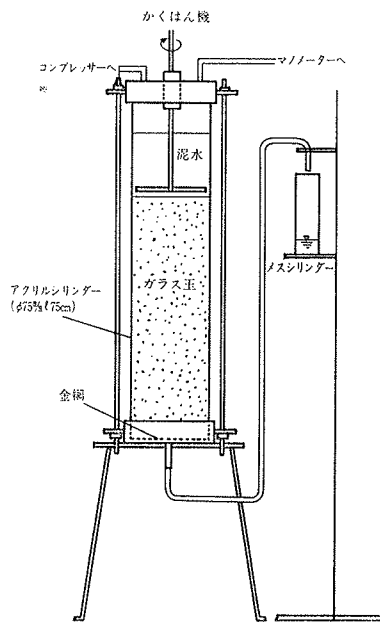


図-1 試験装置

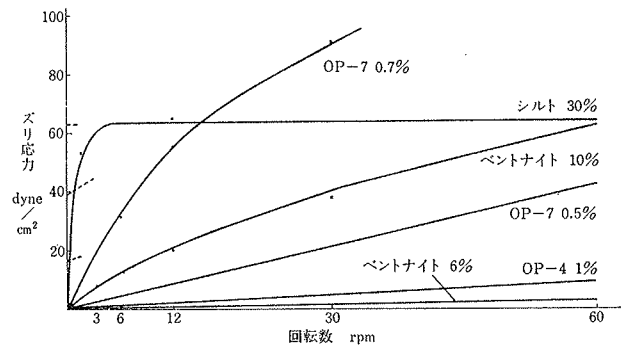


図-3 供試泥水の流動曲線の例

はニュートン流体、シルト泥水はビンガム流体であり、ベントナイト泥水とポリマー (OP-7) 泥水は低濃度ではニュートン流体、高濃度ではビンガム流体として挙動する。表-1には泥水の流動特性値を示したが、同一のファンネル粘度でも降伏値と粘度とに顕著な差があり、上述のビンガム流体では粘度がニュートン流体のそれに比べて高くなる。なお、シルト泥水の流動特性はその産出場所や土層によって顕著

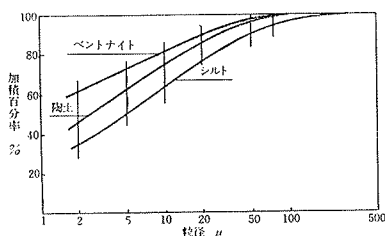


図-2 試料土の粒径分布

泥	水	ファンネル粘度 sec	粘度 cp	降伏値 dyne/cm ²
ベントナイト	6%	27.0	12	0
	8%	40.7	118	6.2
	10%	69.0	255	19.8
	12%	—	2800	180.5
ベントナイト アスベスト	6% 1%	54.0	140	6.5
OP-4	1%	40.1	42.4	0
OP-7	0.5%	38.5	220	0
	0.7%	72.0	1080	39.0
	1%	—	2520	154.0
シルト	15%	24.0	59	4.3
	20%	25.6	140	10.2
	25%	28.0	275	39.0
	35%	46.5	1050	175.0
陶土	20%	19.5	66	4.9
	30%	20	165	14.0

表-1 泥水の流動特性値

に異なり、この詳細については現在検討中である。

3.2. 泥水の浸透性

泥水の浸透距離の経時変化の例を図-4に示す。いずれの泥水の場合にも、加圧の初期には急速に浸透し、以後は浸透速度が減少し、粒子系の泥水では加圧5分後にはほとんど浸透しなくなる。溶液系すなわちポリマー泥水では、加圧5分後にも徐々に浸透距離が拡大してゆく。OP-4 泥水を除く他の泥水では加圧2分以内に浸透

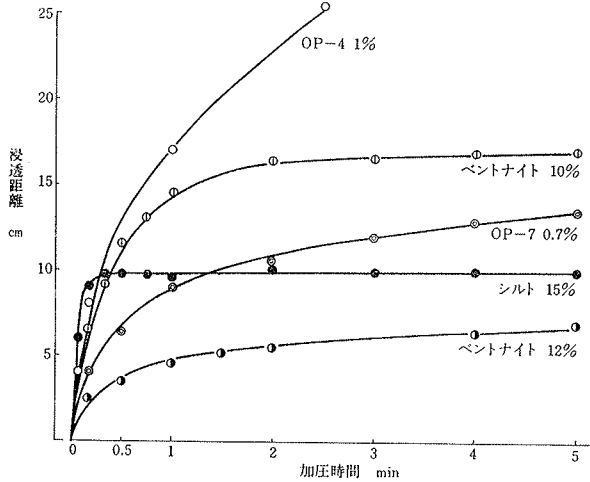


図-4 浸透曲線の例 (0.5m/m ガラス玉)

はほぼ終了しており、この段階ですでにマッドケーキあるいは不透水性の泥水浸透層が形成されていると理解できる。なお、後述する間隙水圧の測定結果によれば、加圧10~30秒で間隙水圧のピークがあらわれ、以後は減少してゆき、これがマッドケーキあるいは不透水性の泥水浸透層の形成に対応すると考えられる。なお、図中のポリマー (OP-4) の場合には浸透距離はどんどん拡大され、また間隙水圧のピークも見られないので、この泥水においては不透水層は形成されていないといえる。

次に、地盤モデルの透水係数と加圧5分後の浸透距離を図-5にプロットしたが、当然ながら透水係数の高い場合には浸透距離

が長くなる。ポリマー泥水では浸透距離と透水係数とは直線関係にあり、泥水の浸透がDarcyの法則に従っていることを示している。一方、粒子系の泥水ではある透水係数を境にして浸透距離が飛躍的に長くな

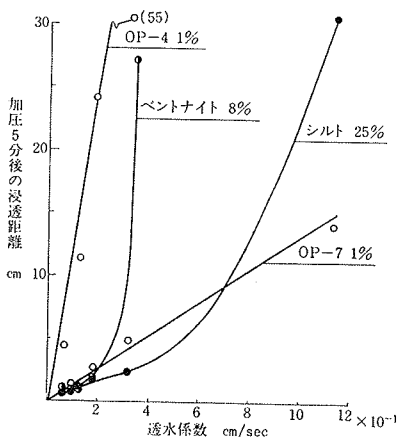


図-5 地盤モデルの透水係数

る。これらの泥水では、透水係数が小さい地盤モデルにおいては粒子の目づまりのために浸透距離が短かく、透水係数が大きい地盤モデルでは目づまりが起らず浸透距離が長くなっている。この境界の透水係数は確認していないが、泥水中の粒子の粒径に支配されると考えられ、ベントナイト泥水より粗粒分の多いシルト泥水で境界値が高くなっている。

なお、浸透距離と排水量はいずれの泥水にも共通な直線関係となり、泥水が間隙水を完全に置換したと仮定した際との関係とほぼ一致する。したがって、浸透中の泥水の希釈、拡散などは生じていないといえる。

3.3. 間隙水圧

泥水浸透中の地盤モデル内の間隙水圧は経時的に変化をする。図-6にある点における間隙水圧の経時変化の例を示したように、泥水が浸透し続けるベントナイト6%泥水の場合、浸透開始とともに間隙水圧は上昇し、加圧3分後に平衡値に達したまま以後は変化しない。この

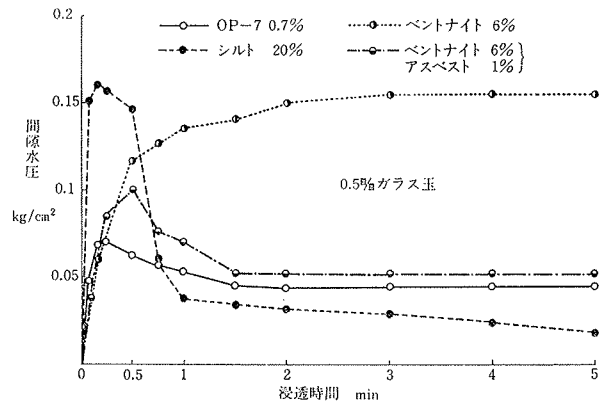


図-6 地盤モデル中の間隙水圧の変化(泥水との接触面から5cm)

泥水に逸泥防止材の添加されたものおよびシルト泥水などでは、浸透開始後15~30秒までは間隙水圧が上昇するが、以後は低下し、0.05 kg/cm²前後の間隙水圧で平衡に達する。これらの泥水では浸透速度も小さくなり、マッドケーキなどが形成されたことを示している。前者の場合、マッドケーキは形成されておらず、加えられた泥水圧は間隙水圧の増大を招き、切羽の安定化には寄与しないと思われる。後者の場合、間隙水圧がピークを過ぎ平衡に達した点がマッドケーキあるいは不透水層の形成を意味すると思われるが、この時間は加圧60~90秒である。なお、平衡状態における間隙水圧の値は形成されたケーキあるいは浸透層の止水性の目安と考えられるが、シルト泥水の場合に最も止水性が高い。

次に加圧5分後の間隙水圧の分布を図-7に示す。マッドケーキなどの形成されないベントナイト6%、泥水では全層が0.15 kg/cm²前後の値を示すのに対し、他の泥水では0.05 kg/cm²前後の値となり、泥水圧の大半が

マッドケーキなどの不透水層に伝達されている。後者の場合、シルト泥水およびアスベスト添加泥水では泥水との接触面付近で最低の間隙水圧を示し、接触面付近にマッドケーキが形成されている

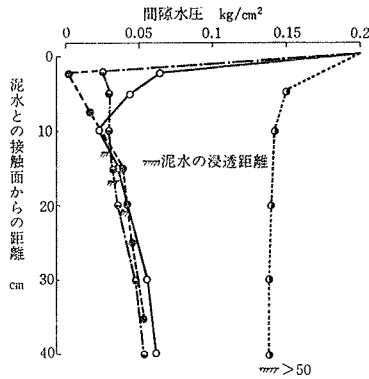


図-7 加圧5分後の間隙水圧の分布 (0.5 m/m ガラス玉, 記号は図-6と同じ)

こと示唆している。一方、ポリマー(OP-7)泥水では間隙水圧の最低値が接触面から10 cmの所に見られ、接触面にマッドケーキが形成されているのではなく、泥水浸透層の全体が不透水化していることを示唆している。したがって、泥水による切羽の不透水化は切羽面におけるマッドケーキの形成によるものと泥水浸透層全体の不透水化によるものに大別され、目づめ作用によるものは前者に、目づめ作用によらない溶液系泥水あるいは目づめ作用が発揮できない粒子系泥水は後者に属する。

4. 考察

4.1. 泥水の浸透距離と泥水の流動特性との関係

泥水シールド工法では切羽はカッターの回転によって連続的に切削され、切羽には泥水が浸透する。したがって、泥水の浸透性を適切に調節することが切羽の安定上あるいは工事の経済性向上のために必要とされる。すなわち、前述のように浸透性が余りに高い泥水では泥水を多量に消費するだけでなく、泥水圧を地山に伝達することができずに切羽を不安定にし、逆に浸透性の小さな泥水では切削に先行する泥水による土質改良効果が期待できず、切羽の安定上は不利である。泥水浸透層における粘着力が無視できない大きさになることはすでに確認²⁾しており、今回の実験でも泥水が浸透して不透水化した地盤モデルは泥水を除去しても切羽は垂直に自立することが確認された。

さて、泥水の粗粒地盤中の浸透現象は細管中の粘性流体の流動現象と理解できる。細管中のニュートン流体の流動には次式の Hagen-Poiseuille 式³⁾が適用される。

$$\Delta P = \frac{32\bar{v}l\mu}{g_c D^3}$$

ここに、 ΔP : 損失圧力 g/cm²

\bar{v} : 平均流速 cm/sec

l : 流動距離 cm

g_c : 重力加速度換算係数

D : 細管の直径 cm

μ : 流体の粘度 g/cm²sec

この式で、 ΔP が圧力 200 g/cm² に等しくなる点の l を求めることができ、 \bar{v} を 0.02 cm/sec, D をガラス玉粒子の間隙径 (0.5 m/m ガラス玉で 0.18 m/m, 1 m/m ガラス玉で 0.36 m/m) とした場合、図-8の曲線が得られる。図中に実測値をプロットしたが、0.5 m/m の場合には低粘度領域でのズレが大きく、この傾向はシルト

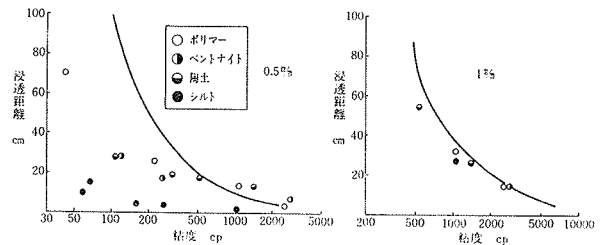


図-8 泥水の粘度と浸透距離の関係

泥水で著しい。これは 0.5 m/m の場合にはシルト、陶土の目づまり現象に起因していると思われる。一方、1 m/m ガラス玉の場合には計算値と実測値の対応がよく、この場合には目づまり現象が発生していないことを示している。

なお、ビンガム流体における浸透距離は降伏値と次式で示される関係にあるといわれる⁴⁾。

$$l = \frac{PR}{4\tau_f}$$

ここに、 l : 流動距離 cm

P : 圧力 dyne/cm²

R : 細管の半径 cm

τ_f : 流体の降伏値 dyne/cm²

ここで R をガラス玉の間隙の半径として計算すると図-9の曲線が得られる。図中に示した実測値は 0.5 m/m ガラス玉では図-8と同様シルト泥水でズレが目立つが、他の泥水は図-8におけるよりも計算値に近くなる。また、1 m/m ガラス玉では実測値と計算値の対応がよい。ところで、泥水の浸透範囲を調節することが求められ

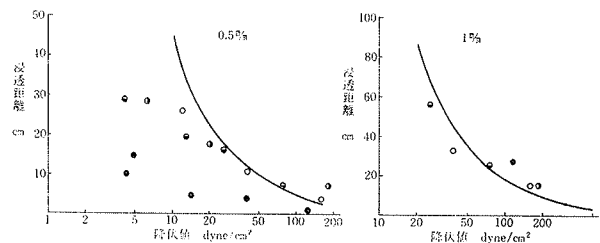


図-9 泥水の降伏値と浸透距離の関係 (記号は図-8と同じ)

る地盤は粗砂あるいは砂礫のように透水係数の大きな地盤あるいは地層であり、このような地盤では泥水の流動特性、特に降伏値によって浸透範囲を調節することはある程度可能であるといえる。

4.2. 切羽における不透水層の形成

上述のように、泥水にはその浸透距離が泥水の流動特性によって決まるものと泥水中の粒子の目づまりによって決まるものがある。これらの泥水の形成する不透水層には差異があり、前述の間隙水圧の分布から見ると、目づまりによる場合には泥水との接触面付近にマッドケーキが形成され、流動特性に基づく場合には泥水浸透層の全体で不透水層を形成している。前者を目づめ型、後者を浸透型と呼ぶことができるが、いずれのタイプで不透水層が形成されるかは、地盤の透水性によって決定されよう。泥水による切羽周辺の土質改良を期待する場合には浸透型が望ましいが、地盤によっては相当高い降伏値の泥水が必要となり、過大な降伏値は泥水中の掘削ズリの分離に支障を生じる。したがって、両タイプの中間的な泥水の調合・管理も必要となろう。

さて、泥水シールド工法では切羽における不透水層の形成速度が問題となる。カッターは2 rpm 前後で回転して切羽を切削するので、15秒ごとに切羽が切削されることになる。今回の実験結果では不透水層の形成には90秒前後を要するので、不透水層が完全に形成されるまでに切削されることになる。したがって、切羽の不透水化するなわち切羽での泥水圧の伝達を表面のマッドケーキのみに期待する目づめ型泥水は好ましくはない。この点に関しては、短距離に目づめ作用を発揮する泥水が好ましいとする見解⁵⁾もあり、さらに各種の地盤モデルについて、また切羽の切削される条件において実験的に確認を

する予定である。

5. あとがき

泥水シールド工法における泥水の調合・管理は切羽の安定、掘削ズリの運搬・分離などを考慮して行なう必要がある、特に切羽の安定は重要な課題である。本工法は実用化されて日が浅く、泥水についても在来の泥水工法における考えが適用されているが、本工法の特長をふまえた泥水の使用法の確立が望まれている。本報では粗粒地盤における切羽の安定、逸泥の防止を図るために、マッドケーキあるいは泥水浸透層の形成に着目して室内実験を行ない、泥水の浸透性を支配する要因を明らかにするとともに、切羽における泥水圧の伝達について知見を得た。今後は得られた成果をもとに、切羽の切削される状態における泥水圧の伝達様式を検討するとともに、ズリの運搬・分離をも考慮した泥水のあり方を検討する予定である。

参考文献

- 1) 喜田, 他: 泥水工法における泥水管理に関する研究 (第1報~第23報), 大林組技術研究所報 No. 1~No. 14, (1966~1977)
- 2) 喜田, 川地: 大林組技術研究所報 No. 13, (1976), pp. 90~96
- 3) 化学工学便覧, 丸善, (1968), p. 104
- 4) G. K. Jones: Grout and Drilling Muds in Engineering Practice, 26, Butterworths, London, (1963)
- 5) 三木, 他: 第11回土質工学研究発表会講演集, (1976), pp. 1133~1176