

泥水特性に関する基礎的研究（その7） （砂質土地盤における泥水の浸透機構に関する実験的研究）

Fundamental Study on Characteristics of Slurry —part 7—
(Experimental Study on the Infiltration of Slurry into Sandy soils)

森 仁司*
Hitoshi Mori

要 約

本研究は、泥水式シールドにおける泥水の砂質土地盤への浸透機構の解明を目的としたものである。その結果、泥水の浸透現象に対するシールド機の Cutter 回転数および掘進速度の影響が明らかになった。また、泥水の浸透速度が時間の経過に伴い減少し、シールド掘進速度と同じになった時点から一定になる過程を、ダルシー則を用いた式から説明し、地下水の流動形態は、泥水の浸透形態により支配されることも示した。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 実験概要
- §3. 地下水の流動と間隙水圧の挙動
- §4. 泥水浸透ゾーン形成のメカニズム
- §5. 泥水の浸透機構
- §6. まとめ
- §7. おわりに

§1. はじめに

泥水式シールドにおける切羽は、Cutterによって連続的に切削され常に新しい切羽が現れるため、切羽表面には完全な泥膜は形成されず、泥水は前方へと浸透する。この浸透現象を把握し制御することは、切羽の安定、逸泥の防止を図る上で極めて重要である。しかし、泥水は、粒子を含んだビンガム流体であり、しかも浸透現象は地

盤の透水性に大きく影響されるため、そのメカニズムは複雑であり未だ十分解明されていない。

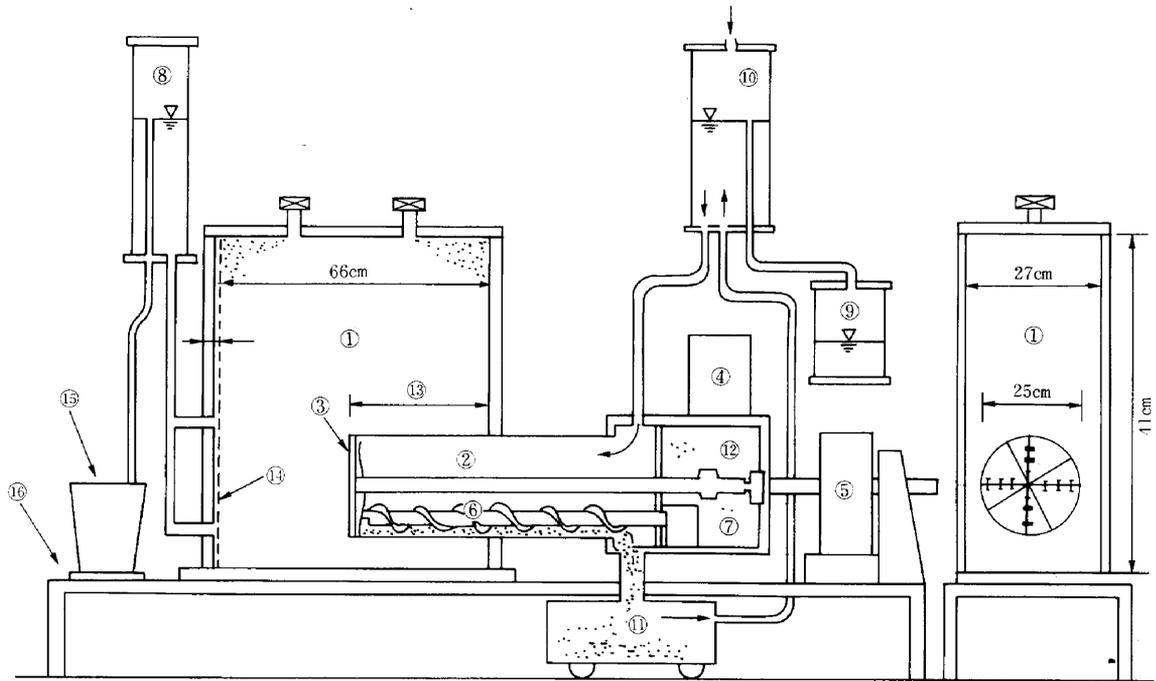
泥水の浸透と泥水特性との関係を解明するために、多くの鉛直の浸透実験^{1)~3)}が行われた。これらの実験結果から泥水の浸透現象に関して解っていることをまとめると以下のようである。

- (1) 透水係数が 10^{-1} ~ 10^{-2} オーダーの地盤に対しては、泥水は、よく浸透する。また、低濃度の泥水では、疑似的にニュートン流体として取り扱うことができる。
- (2) 泥水の浸透ゾーンでは、泥水が間隙水と完全に置換した状態であり、希釈、拡散は生じていない。
- (3) 同一地盤に対して、静的なろ過実験で泥膜を形成する泥水を、切羽を切削する動的なろ過実験に用いた場合は浸透ゾーンを形成する。

しかしながら、実際のシールド機におけるCutterの回転数や掘進速度の違いがどの様に影響して、泥水が流動するのは不明である。

そこで、本研究では、シールドの模型実験を行い、Cutterの回転数や掘進速度を変化させて、地盤中の間隙

*技術研究所技術部土木技術課



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スクリュウコンベアー ⑦スクリュウコンベアーモーター ⑧背水圧タンク ⑨オーバーフロータンク ⑩泥水タンク ⑪掘削土溜めタンク ⑫ロードセル ⑬掘進距離 ⑭金網 ⑮バケツ ⑯流出量測定用ロードセル

Fig.1 単型泥水シールド実験装置の概略図

水圧の変化や地下水の流動量を測定し、砂質土地盤における地下水の流動と泥水の浸透のメカニズムの解明を試みる。

§ 2. 実験概要

2-1 実験装置

本研究の実験装置の概略を Fig. 1 に示す。実験装置は、土槽、シールド機、掘削土溜めタンク、泥水タンクおよび背水圧タンクから成っている。

土槽の寸法および間隙水圧計の位置の詳細を Fig. 2 に示す。土槽は、アルミ性の箱で前面には、泥水の地盤への浸透状況を観察できるようにアクリル板を配置した。また、背面には、シールド機の掘進による地盤内の間隙水圧の変化を測定するために、間隙水圧計をシールド機が掘進してくる壁面から13cmの位置より5cm間隔で6個、シールド前面での間隙水圧を測定のために38cmの位置に2個配置した。

シールド機は、長さ36cmの円筒で先端にはカッターディスクが装着されている。内部にはスクリュウコンベアーがあり、掘進土溜めタンクへ土砂輸送を行う。チャンパー

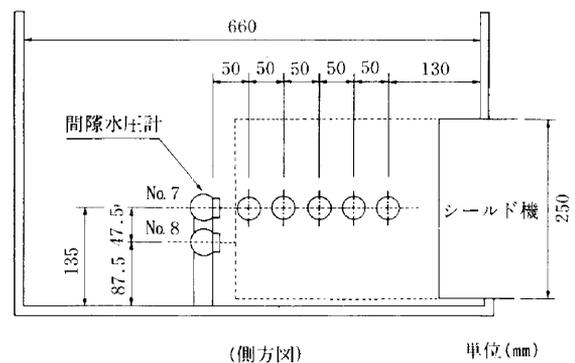
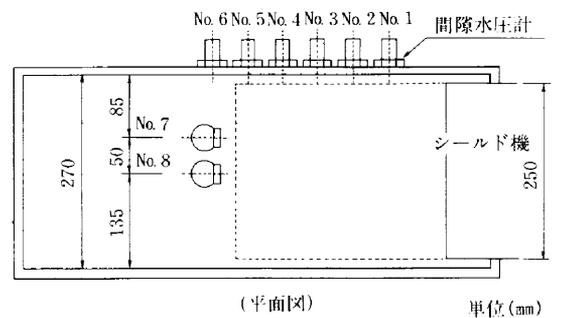


Fig.2 実験土槽および間隙水圧計の位置

内は泥水タンクとホースによって接続され所定の泥水圧を設定することができる。また、カッターおよび推進用にそれぞれ取り付けられたモーターの回転数を調整することによってカッターの回転数、掘進速度を変化させることができる。カッターディスクの形状を Fig. 3 に示す。

背水圧タンクは、土槽内に0.1kgf/cm²(シールド中心)の地下水圧をかけるためのものである。シールド機の掘進により流動した地下水は、このタンクに流入し、オーバーフローした水を地下水の流動量としてロードセルを用いて測定した。

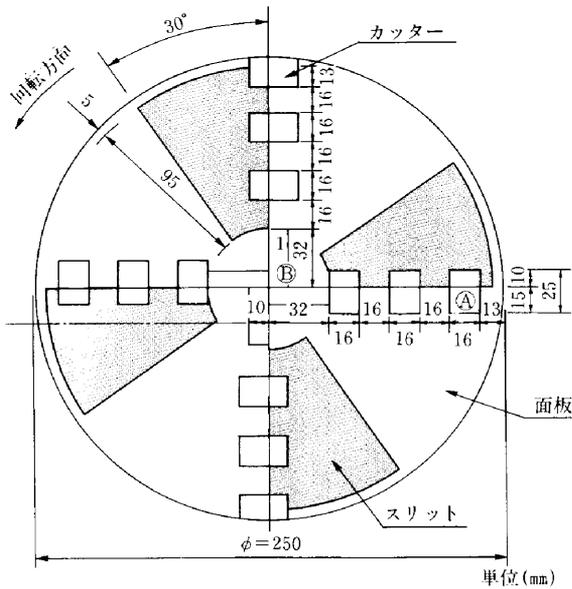


Fig.3 面板型カッターディスク

Table 1 地山試料の性状と実験状態

試料	特性	土粒子比重	間隙率	透水係数 (cm/s)
豊浦標準砂		2.64	0.44	1.45×10^{-2}

用いて測定した。

2-2 模型地盤および使用泥水

地山に用いた試料は、豊浦標準砂を用いた。締固め方法は、3層にわけて水中落下させ、各層をバイブレータで30回、突き棒で120回突固め、均一な地山を作製するように努めた。標準砂の性状と実験状態を Table 1 に示す。

泥水材料は、群馬産ベントナイト(#300)を使用した。作泥方法は、コンクリートミキサーで4時間攪拌し、17時間養生させ、実験開始前に30分間再攪拌した。使用泥水の特性を Table 2 に示す。

2-3 実験方法

実験は、まず地山とカッターフェイスを仕切っている矢板を抜取り、シールド機を8cm掘進させて一旦停止させた。ここで、泥水圧を設定圧まで加圧し、同時に背水圧タンクによって常時地下水圧(0.1kgf/cm²)を作用させ実験開始とした。

つぎに、シールド機を再発進させて掘進1cm毎に泥水圧、間隙水圧および地下水の流出量を測定し、35cm(8cm+27cm)まで掘進して実験終了とした。

本実験の計測システムは、圧力変換器およびロードセルをスイッチボックスを介して、データロガ(T.D.S.301)に接続したもので、結果はプリンターとマイクロディスクレコーダ(RM-351)で記録した。

§ 3 . 地下水の流動と間隙水圧の挙動

3-1 地下水の流動について

Fig. 4 は、ベントナイト12%泥水を用いて掘進速度1cm/min、回転数速度1rpmで泥水圧を変化させた時の地下水の流動量と掘進距離の関係を示したものである。

図から、差圧0kgf/cm²の時は、地下水の流動はみられ

Table 2 使用泥水の特性

測定項目		測定器具	測定値
泥 水 比 重		マッドバランス	1.08
レオロジー特性	ファンネル粘性 (FV)	ファンネルロート (500cc/500cc)	138 (sec)
	見掛け粘性 (AV)	ファンVGメータ (MODEL 135)	58.0 (cp)
	塑性粘性 (PV)		42.0 (cp)
	イールドバリュウ (YV)		32.0 (1bf/100ft ²)
	ゲルストレンゲス (GS)		12.0 (1bf/100ft ²)
ろ 過 特 性	ろ過水量	API規格ろ過試験器 (3kgf/cm ² , 30分)	8.0 (cc)
	泥膜厚		3.0 (mm)

ず、 $0.1 \sim 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ では、差圧の増加に伴い地下水の流動量は増加する。しかし、その量は、差圧の一乗には比例していない。

したがって、シールド機の掘進による地下水の流動は泥水圧と地下水圧の差によって生じ、差圧 0 kgf/cm^2 の場合の地下水はずりと共に取り込まれていると考えられる。

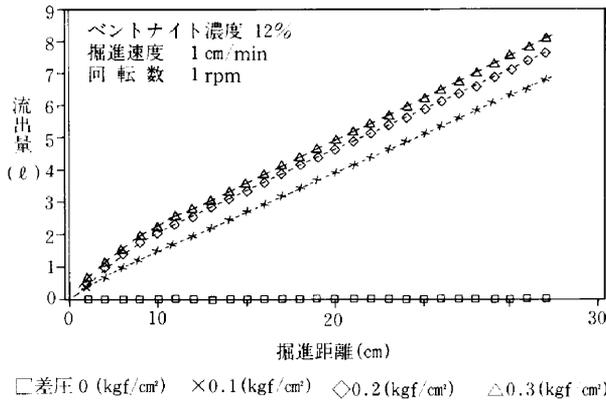


Fig.4 泥水圧の違いによる貫入量と流出量の関係

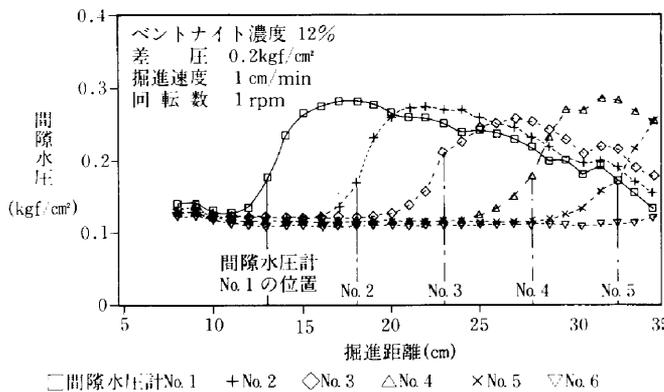


Fig.5 掘進距離と間隙水圧計の変化

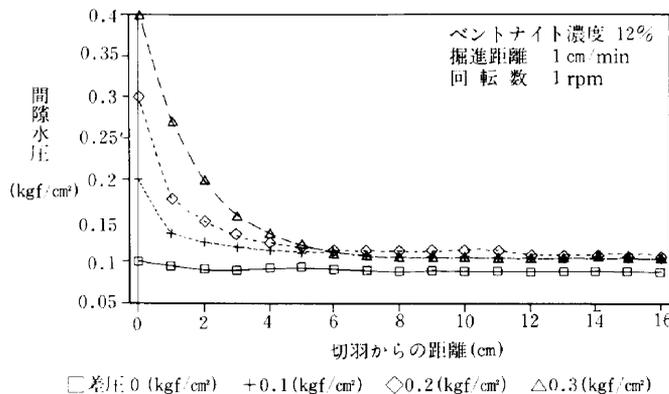


Fig.6 泥水圧の違いによる間隙水圧分布

3-2 地盤の間隙水圧の挙動について

差圧により地下水の流動が生じることが分かったので、その時の地盤内の間隙水圧の挙動について調査する。

Fig.5は、差圧 0.2 kgf/cm^2 、掘進速度 1 cm/min 、回転数 1 rpm で掘進した時の各位置に設置した間隙水圧計の変化を示したものである。

図から、各々の間隙水圧計が設置されている位置にシールド機が接近するにつれ、間隙水圧が上昇しているのが分かる。また、間隙水圧が上昇を始めた時のシールド機の位置とその水圧計の位置の差は掘進が進むにつれ大きくなり、その後一定になっている。

つぎに、Fig.6は、シールド機が 5 cm 掘進する間のNO.2、NO.3、NO.4の間隙水圧計の値をもとに各泥水圧に対する切羽から前方の間隙水圧の分布を 1 cm 間隔で示したものである。

図から、差圧 0.3 kgf/cm^2 では、切羽から約 6 cm の間で間隙水圧が急激に減少している。また、 0.2 kgf/cm^2 では、 4 cm 、 0.1 kgf/cm^2 では、 2 cm で急激に減少している。

以上の結果から、シールド機の前方に間隙水圧の上昇したゾーンが存在しており、しかも掘進に伴い前方に移動しながら大きくなっていることが認められる。ここで、もし切羽表面に完全な泥膜が形成されていれば、間隙水圧の上昇は生じないので、このゾーンは、泥水の浸透により形成されたものと考えられる。また、この浸透ゾーンでは、間隙水圧上昇のため有効泥水圧が減少しているので、切羽の安定を図る上で、浸透ゾーンを小さくする必要があると思われる。

§4. 泥水浸透ゾーン形成のメカニズム

シールド機前方に泥水の浸透ゾーンが存在し、成長していることが分かった。そこで、この浸透ゾーンの形成のメカニズムとシールド機の回転数および掘進速度の影響について調査する。なお、本実験では、泥水浸透ゾーンを地盤内で間隙水圧が上昇を始めた位置と切羽の間の領域と定義し、その距離を浸透距離とした。

4-1 浸透距離の時間的变化

Fig.7は、掘進速度 1 cm/min 、回転数 1 rpm 、差圧 0.2 kgf/cm^2 で、掘進した時の浸透距離の時間的变化を示したものである。

図から、浸透距離は、時間の経過に伴い伸びているが、その伸びは段々小さくなっている。

まず泥水は、泥水圧と地下水圧の差圧 Δp によってプレーンな地盤中に浸透する。そして、浸透距離の伸びに比例して浸透抵抗が増大するため、その伸量は時間と

ともに減少し、静的な浸透現象の場合は浸透抵抗と差圧 Δp が釣り合ったところで浸透ゾーンの成長は停止する。ところが、シールドの様な動的な浸透現象では、カッターによって15~45秒間隔で浸透ゾーンの一部を切削するために浸透抵抗が減少し浸透は継続される。その結果として浸透ゾーンは前方へ移動しながら成長する。この時の浸透距離の伸びは、切り残された浸透ゾーンの大き

さによる浸透抵抗と差圧 Δp との力の差によって決まるためプレーンな地盤に浸透するよりも小さくなる。したがって、Fig.7様に時間の経過に伴い伸びは段々と小さくなると考えられる。

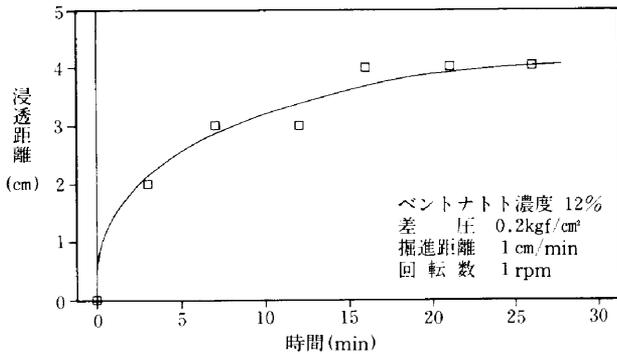


Fig.7 浸透距離の時間的変化

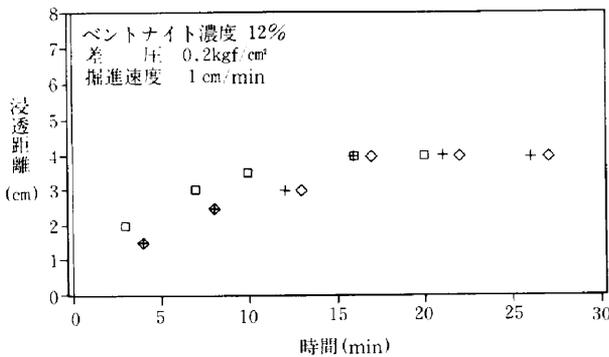


Fig.8 カッター回転数の違いと浸透距離の関係

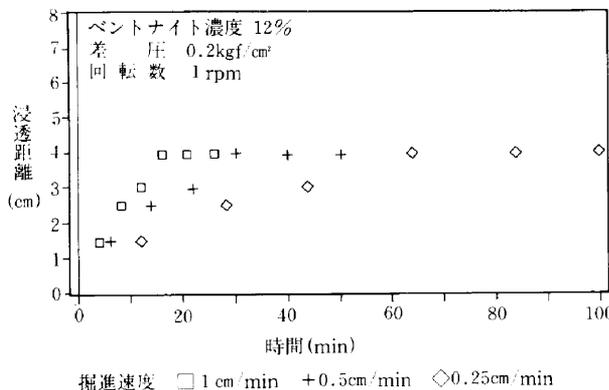


Fig.9 掘進速度の違いと浸透距離の関係

4-2 浸透距離とカッター回転数の関係

Fig.8は、差圧0.2kgf/cm²、掘進速度1cm/minで、回転数を変化させて掘進した時の浸透距離の時間的変化を示したものである。

図から、回転数の違いによる浸透距離に差はみられない。

カッターによる切削は、切羽全面を同時に切削するのではなく、切羽の部分部分を時間差を生じながら切削するものである。したがって、切羽表面には、泥膜の形成時間の違いにより浸透性の異なる部分が混在することになり、回転数の少ないものほど浸透距離は短くなるように思われる。ところが、地盤の間隙は互いに連続しているので、切羽表面の一部が浸透性が悪くても隣の浸透性の良い部分から泥水が回り込んだりして切羽全体で浸透が生じるので、カッターにより切羽面を切削する効果は、完全（難透水）な泥膜の形成を一定間隔で阻害するだけとなり、本実験のように15~45秒間隔でカッターが回転しても、その間では余り差が生じないと考えられる。

4-3 浸透距離と掘進速度の関係

Fig.9は、差圧0.2kgf/cm²、回転数1rpmで、掘進速度を変化させて掘進した時の浸透距離の時間的変化を示したものである。

図から、掘進速度が速い程浸透距離の伸びは速い。しかし、その距離は各掘進速度とも約4cmで止まっている。

つぎに、Fig.10は、掘進速度を変化させた時の浸透距離と掘進距離の関係を示したものである。

図から、掘進速度が違って同一掘進距離ならば、浸透距離は同じになっている。

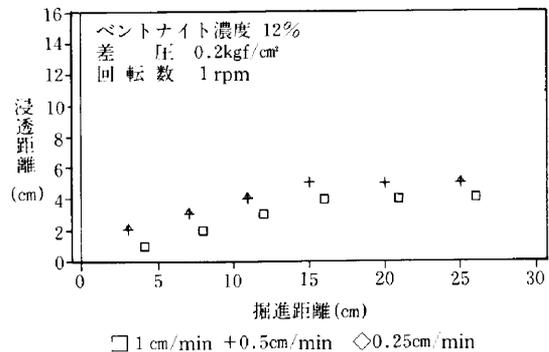


Fig.10 掘進速度の違いによる浸透距離と掘進距離の関係

泥水の浸透に対する掘進速度の影響は、形成された浸透ゾーンを切削して浸透抵抗を減少させることにある。

そこで、掘進速度 1 cm/min と 0.5 cm/min を比較すると、1 cm/min は、0.5 cm/min より 2 倍速く浸透ゾーンを切削するので、浸透抵抗は 2 倍速く減少し、浸透距離は時間的には 2 倍速く伸びる。しかし、掘進距離で比較すれば、0.5 cm/min は、1 cm/min と同一掘進距離に到達するには 2 倍時間がかかるが、切削した浸透ゾーンの大きさは同じとなる。したがって、浸透抵抗は同じだけ減少させたことになり、浸透距離は同じになると考えられる。

§ 5. 泥水の浸透機構

5-1 泥水浸透速度

4 章で述べたように泥水の浸透ゾーンは、時間の経過とともに前方へと成長し、その伸びは時間とともに減少していく。この成長の度合は、泥水の浸透速度の変化として捕らえることができ、浸透速度の時間的変化を微分方程式により記述できれば、浸透現象を支配する要因を明確にできる。

いま、シールド前方から地下水圧に対して一定の圧力差 Δp を保った時に、浸透開始後 t 時間において泥水が l_s に達したとする。また、泥水の浸透現象も水の浸透と同じくダルシーの法則が適用できるとすると、泥水の浸透速度は、

$$\frac{dl_s}{dt} = k_s \frac{\Delta p}{l_s} \quad (1)$$

で表現できる。

(1) 式を解くと、浸透開始 t 時間後の泥水の浸透距離 l_s は、

$$l_s = \sqrt{2k_s \Delta p t} \quad (2)$$

また、浸透速度 v_s は、

$$v_s = \sqrt{\frac{k_s \Delta p}{2t}} \quad (3)$$

ここで、

- k_s : 泥水の浸透抵抗係数 (cm/sec)
- Δp : 圧力差による水頭値 (cm)
- l_s : 浸透開始 t 時間後の浸透距離 (cm)
- v_s : 泥水の浸透速度 (cm/sec)

t : 浸透時間 (sec)

を得る。

5-2 浸透抵抗係数の算出方法

5-1 において、ある時間での泥水の浸透速度を記述するのに、泥水の浸透抵抗係数なるものを使用した。本実験における浸透抵抗係数の算出方法について述べる。

Fig. 11 は、シールド機が 5 cm 掘進している間の NO. 2, NO. 3, NO. 4 の間隙水圧計の値をもとに、切羽から前方の間隙水圧の分布を示したものである。

この図から、点 a と b の間を通る直線を引き、c と d を通る直線との交点を e とする。この e 点の時の間隙水圧の値を p_1 、切羽からの距離を l_s 、a 点での間隙水圧を p_2 とする。また、シールド機が 5 cm 掘進する間に流出した水量の平均流量を Q 、土槽の流出断面積を A とすると、泥水の浸透抵抗係数は、次式で求まる。

$$k_s = \frac{Q l_s}{A (p_2 - p_1)} \quad (4)$$

ここに、

- k_s : 泥水の浸透抵抗係数 (cm/s)
- Q : 平均流量 (cm³/s)
- l_s : 泥水の浸透距離 (cm)
- A : 流出断面積 (cm²)
- p_2 : 設定泥水圧の水頭値 (cm)
- p_1 : 浸透ゾーン先端圧の水頭値 (cm)

5-3 泥水の浸透抵抗係数の意味

この係数は、ダルシーの法則における透水係数と同じ次元をもっているが、この係数の中には粘性が高く粒子分も含んでいる泥水が地盤中を流動するときに受ける抵抗とシールド機の掘進速度の違いにより切り残された浸透ゾーンの大きさから生じる抵抗の両方の影響が含まれている。

5-4 浸透抵抗係数の適用性について

泥水は、ビンガム流体であり、その特性であるシキソ

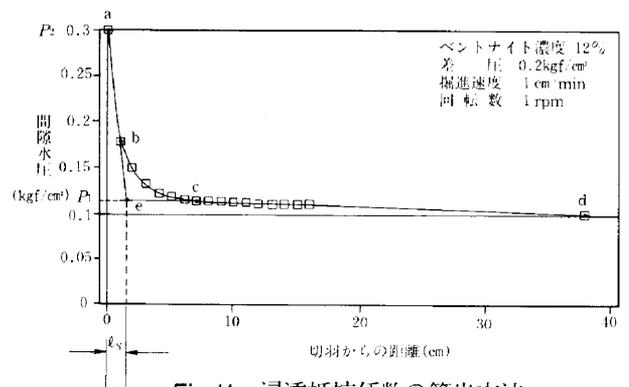


Fig.11 浸透抵抗係数の算出方法

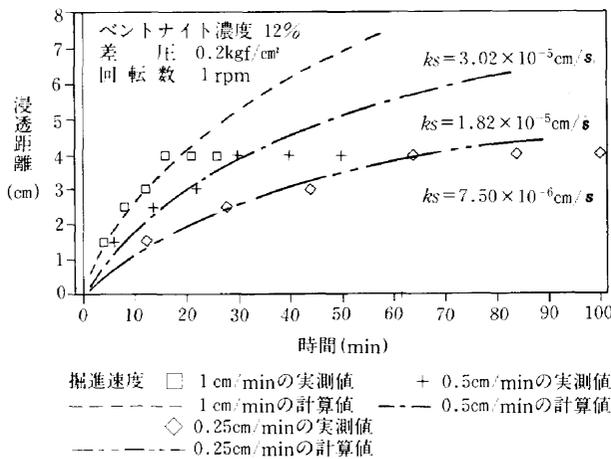


Fig.12 浸透距離の実測値と計算値の比較

トロピー性により流動する速度に応じて粘性が変化する。つまり、泥水の粘性係数は、ニュートン流体のように、流速の変化に対して粘性係数が一定にならない。したがって、粘性の影響を受ける浸透抵抗係数は、流速の変化に応じて変化すると言える。

しかしながら、本実験における地下水の流速の変動の範囲は非常に小さいので、この部分での泥水の粘性係数はほぼ一定と近似できる。したがって、泥水においても、地盤中を浸透するときは浸透抵抗係数を一定として用いることは妥当なことと言える。

5-5 泥水の浸透距離の実測値と計算値の比較

実際の掘削実験から測定した浸透距離と5-1節の(2)式から得られる浸透距離の比較検討を行った。

Fig.12は、ベントナイト濃度12%の泥水を用いて差圧0.2kgf/cm²、カッター回転数の1rpm掘進速度を変化させて実験を行った時の浸透距離の実測値と計算値を比較した結果である。図中の曲線は、(2)式から浸透距離を計算したものである。

図から、浸透距離の計算値は、掘進速度1cm/minでは、15分間、0.5cm/minでは30分間、0.25cm/minでは60分間実測値をシュミレートしている。しかし、その後実測値は、約4cmでほぼ一定になり計算値から外れる。また、(4)式から算出した浸透抵抗係数ksは、掘進速度が2倍になれば2倍になっており、浸透距離が一定になるまでの経過時間は掘進速度の一乗に反比例している。

このことから、泥水式シールドにおける泥水の地盤中での浸透のメカニズムは、以下のものであると考える。

まず、泥水は、(1)式のようにある浸透抵抗を受けながら圧力差Δpに比例し浸透距離lsに反比例するような速度で流動し、やがて浸透距離はその泥水のイーールドバリューから生じる限界距離に到達する。また、限界距離

に到達する時間は掘進速度が速いほど速いので、泥水浸透速度は掘進速度に正比例している。

その後は掘進により切削された分だけ浸透距離が回復し浸透距離の伸びは止まり、泥水浸透速度=シールド掘進速度となって定常状態になると考えられる。

5-6 泥水の浸透と地下水の流動

3章において、地下水の流動は泥水圧と地下水圧の差によって生じ、その差圧により泥水の浸透が生じることが分かった。つまり、地下水は泥水の浸透により押し出されるので、シールド機の掘進による地下水の流動形態は、上述の泥水の浸透形態と同じになると考えられる。

これは、Fig.4の地下水の流出形態が、差圧の1乗に比例せず、前半が曲線的流出(1)式的状態をし、後半は直線的流出(定常状態)をしていることから理解しうる。

§6. まとめ

本研究では、砂質土地盤における泥水の浸透機構の解明を試みた。その結果、明らかになったことは以下のとおりである。

- (1) 地下水の流動は、泥水圧と地下水圧の差圧によって泥水の地盤への浸透が生じ、その泥水が前方の地下水を押し出すことによって生じる。したがって、地下水の流動形態は、泥水の浸透形態に支配される。
- (2) シールド機の掘進により泥水の浸透ゾーンが形成され、掘進に伴い成長する。この浸透ゾーンの中では、間隙水圧が上昇しているために有効泥水圧が減少しているため、切羽の安定を図る上では、浸透ゾーンを小さくする必要がある。
- (3) 泥水浸透ゾーンの成長に対するカッター回転数の影響は、カッターが15秒~45秒間隔で同一地点を切削する場合ではほとんどない。
- (4) 泥水浸透ゾーンは、掘進速度が速いものほど時間的に速く大きくなるが、掘進距離が同じならば、浸透ゾーンの大きさは同じになる。したがって、泥水浸透速度は、掘進速度に比例している。
- (5) 泥水浸透ゾーンは(2)式で表現できるような形態で成長し、泥水浸透速度は時間経過に伴い減少する。そして、泥水浸透速度=シールド掘進速度になった時点で定常状態となって、泥水浸透ゾーンの成長は停止する。

§7. おわりに

本実験は、早稲田大学森麟教授の御指導で行ったもの

であります。ここに謹んで感謝の意を表します。また、実験に際し、大学院生の稲垣賢一君、近藤啓二君、学部生の浅井大三君、細田泰宏君には、多大な御助力を賜ったことに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 木島詩朗他：泥水加圧式シールド工法の研究（その2）鹿島建設技術研究所報，第25号，pp96～100,1976
- 2) 喜田大三他：泥水シールド工法における泥水に関する研究（その1），大林組技術研究所報，NO17，pp76～80,1978
- 3) 小林健朗他：泥水加圧式シールド工法における泥水の基本特性試験，前田技術研究所報，VOL24，pp85～94,1983