

泥水式シールドによる砂質切羽地盤の 間隙水圧とその発生メカニズム

森 仁司*・栗原和夫**・森 麟***・
近藤啓二****

本論文の目的は、シールド掘進により間隙水圧を上昇させるメカニズムを調査し、実際の施工条件下での間隙水圧の上昇量を予測する方法を提示することである。その結果、間隙水圧の上昇量は、泥水の切羽への浸透に基づく泥水浸透速度に支配される。また、施工時における間隙水圧の上昇量を、FEMを用いた予測値と現場での測定値を比較し、透水性の低い砂質地盤では、切羽面での有効泥水圧は、非常に小さくなることがわかった。

Keywords : slurry shield, porewater pressure, sandy soils, FEM

1. ま え が き

泥水式シールド工法における砂質土地盤での切羽安定機構は、従来の考え方では、切羽に作用する土圧のうち地下水圧分を差し引いた値に当たる有効土圧を 0.2 kgf/cm^2 程度と見込むかあるいは計算により求め、この土圧に有効泥水圧になると考えていた差圧(泥水圧-地下水圧)で対抗するというものであった^{1),2)}。しかし、切羽面は、実際にはおおむね15~45秒ごとにカッターで切削されるので、この時間内で泥膜の切除と再形成を繰り返すことになり、泥水はある程度切羽地盤に浸透することが知られている^{3),4)}。このため、切羽地盤の間隙水圧は地下水圧より上昇すると考えられるので、有効泥水圧はその分低下することになり、切羽安定上の問題点となる。ただし、ここでいう有効泥水圧とは、(差圧-過剰間隙水圧)のことである。そこで、泥水の浸透と間隙水圧の挙動を調査するために静的な浸透実験⁵⁾⁻⁷⁾が行われ、泥水性状と泥水圧により地盤の間隙水圧が変化することが報告されている。しかし、これらの報告では、シールド機の掘進速度やカッター回転数などの切羽面の切削の影響が考慮されておらず、また、過剰間隙水圧発生のメカニズムについても不明な点が多く、この過剰間隙水圧の定量的評価にまでは至っていない。

以上のような状況を踏まえ、本研究では、砂質土地盤において動的なシールド模型実験を行い、過剰間隙水圧発生のメカニズムの詳細な解明を行った。また、これをもとに、現場地盤条件下でシールド施工時の過剰間隙水圧を、有限要素法を用いて予測する手法を提示した。

2. 実験概要

砂質土地盤を対象とした泥水式シールドでは、前述したように、シールド機が掘進しながら切羽面に形成された泥膜の切除と再形成を繰り返す動的な状態であるので、実際の泥水式シールドと同等のメカニズムの模型シールドを土槽中に掘進させ、カッター回転数、シールド掘進速度、泥水圧等を変化させて、切羽地盤の間隙水圧の分布とシールド掘進による地下水の排水流量から切羽で発生する地下水流速を測定した。また、シールド掘進による切羽への泥水の浸透現象は、動的な浸透現象であるが、カッター切削インターバル時間内では、静的な浸透現象であると考えられるので、泥水浸透実験装置を用いて、切削インターバル内での泥水の浸透状況を正確に把握する実験も行った。以下にその概略を述べる。

(1) 動的シールド模型実験

a) 地山試料と使用泥水

表-1に土層に用いた地山試料の土質定数を示す。地山試料は、豊浦標準砂、珪砂7号および珪砂8号の3種類で、締固め方法は、3層に分けて水中落下させ、各層をバイブレーターで30回、突き棒で120回突固め、土槽上端まで均一な地山を作製するように努めた。

表-2に使用した泥水の配合と性状を示す。泥水材料は、群馬産ベントナイト(#300)と愛知産木節粘土を使用した。泥水は、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。

b) 実験装置

シールド模型実験装置の概略を図-1に示す。土槽に上載圧はかけず、泥水の地盤への浸透状況を観察するために土槽側面の一方をアクリル板とした。また、シールド掘進による地盤内の間隙水圧の変化を測定するために、図-2に示すように土槽壁面のシールド中心の高さに、5cm間隔で6個間隙水圧計を配置した。

* 正会員 工修 西松建設(株)技術研究所
(〒242 大和市中鶴間 2470-4)

** 正会員 工博 西松建設(株)技術研究所長

*** 正会員 工博 早稲田大学教授 土木工学科

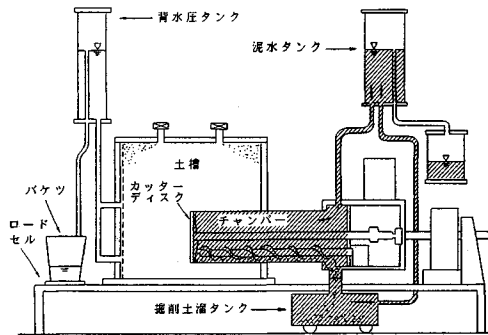
**** 学生会員 早稲田大学大学院修士課程

表一 地山試料の土質定数

種類	間隙比 e	乾燥密度	
		ρ_d (g/cm ³)	k (cm/sec)
珪砂5号	0.786	1.471	7.34×10^{-2}
豊浦標準砂	0.792	1.576	1.45×10^{-2}
珪砂7号	0.698	1.541	6.69×10^{-3}
珪砂8号	0.972	1.404	1.10×10^{-3}

表二 泥水の配合と性状

種類	配合比			比重	ファンネル粘性 (500cc/500cc) (sec)	イールド バリュウ (ctf/100ft ³)
	ベントナイト	木節粘土	水			
12%ベントナイト泥水	12	0	88	1.08	128~153	32~47
1:3:9泥水	10	30	90	1.19	89~82	24~31



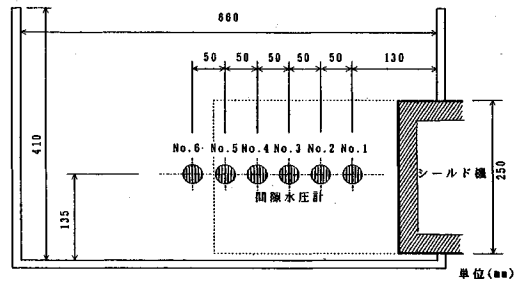
図一 シールド模型実験装置

背水圧タンクは、土槽内に所定の地下水圧をかけ、シールド掘進中は土槽終端面の地下水圧を設定値に維持するためのものである。シールド掘進時に泥水の切羽への浸透により流動した地下水は、土槽終端部よりこのタンクに流入し、オーバーフローする。この水を地下水の排水流量としてロードセルを用いて連続的に測定した。

シールド機は、直径25cmの円筒で先端にはカッターディスクが装着されている。チャンパーに相当するシールド内部には一定の泥水圧を常時作用させることができる。掘削土砂は、チャンパー内に設置したスクリーコンベアで、掘削土溜タンクへ輸送する。また、カッターの回転数、掘進速度は自由に変化できる。

c) 実験方法

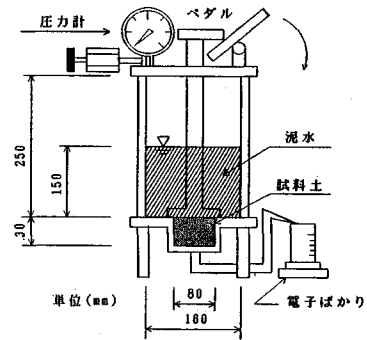
実験は、まず地山とカッターフェイスを仕切っている矢板を抜き取り、シールド機を8cmまで掘進させる。次に、泥水圧を設定泥水圧まで加圧し、同時に背水圧タンクによって地下水圧(どの実験もシールドセンターで0.1 kgf/cm²)を作用させ実験開始とし、これを掘進距離の原点とした。所定の掘進速度とカッター回転数のもとで、シールド機を発進させて掘進1cmごとに泥水圧、間隙水圧および地下水の流動量を測定し、35cmまで掘進して実験終了とした。実験条件としては、表-3に示



図二 間隙水圧計配置図

表三 動的シールド模型による実験条件

地山試料	使用泥水	掘進速度 (cm/min)	回転数 (rpm)	設定泥水圧 (kgf/cm ²)	地下水圧 (kgf/cm ²)
豊浦標準砂	12%ベントナイト泥水	1	2/3	0.1	0.1
		0.5	1	0.2	
珪砂8号	1:3:9泥水	0.25	2	0.3	0.1
				0.4	



図三 泥水浸透実験装置

す各項目の影響が明確にできるように、その組合せを選択した。

(2) 静的泥水浸透実験

泥水浸透実験装置の概略を図-3に示す。実験装置は、直径8cm、高さ3cmの切羽土砂をつめた土層と、直径16cm、高さ25cmの泥水加圧室からなっている。土層と加圧室は、ベダルにより開閉可能な蓋で仕切ることができる。泥水の浸透により排水される水は、排水パイプを通して、メスシリンダーに入るようになっている。このとき、排水面の高さは土層上端に合わせた。実験方法は、土層の試料を水中落下させ、突き棒で均一に締め固める。次に、加圧室を組み立て、土層に蓋をし、加圧室に高さ15cmまで泥水を入れる。その後、泥水に所定の圧力をかけ、蓋を外したときを測定開始とし、その後の排水量の経時変化を電子ばかりで測定する。

3. 砂質切羽地盤における間隙水圧とその発生メカニズムについて

(1) シールド掘進時の地下水の流動量について

図-4は、豊浦標準砂に12%ベントナイト泥水を用

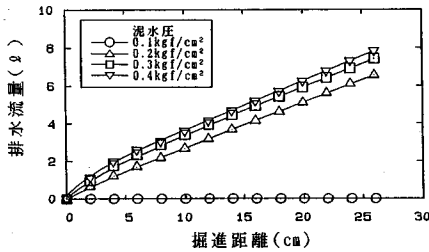


図-4 地下水の流動量と掘進距離の関係

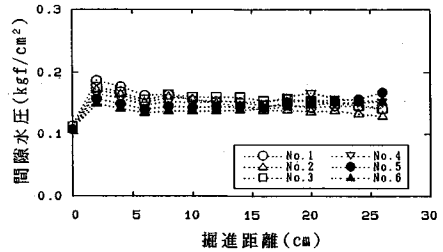


図-6 間隙水圧と掘進距離の関係(珪砂8号)

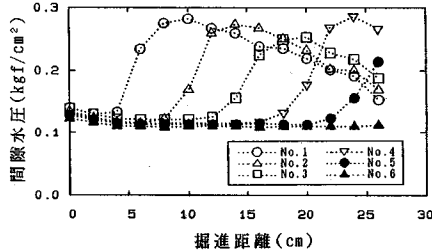


図-5 間隙水圧と掘進距離の関係(豊浦標準砂)

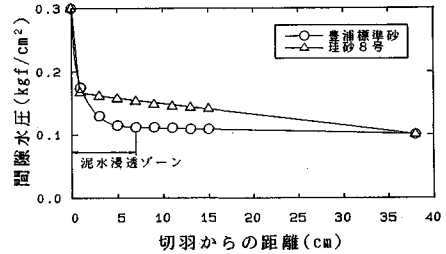


図-7 切羽前方の間隙水圧の分布

いて掘進速度 1 cm/min, 回転速度 1 rpm とし, 4 種類の泥水圧で掘進させたときの地下水の流動量と掘進距離の関係である。図から, 泥水圧 0.1 kgf/cm² とし, 差圧 P_0 (泥水圧-設定地下水圧) が 0.0 kgf/cm² のときは, 地下水の流動はみられない。これは, 掘削土砂中に含まれる間隙水をすべてチャンパー内に取り込んでいることを意味している。泥水圧 0.2~0.4 kgf/cm² では, 泥水圧の増加に伴い地下水の流動量は増加している。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との差圧によって生じることがわかる。

(2) 地盤の間隙水圧の挙動について

シールドの掘進により地下水が流動し地下水流速が発生するということは, 切羽地盤内に動水勾配が生じていることを意味するので, 地盤内の間隙水圧の挙動について調査した。

図-5 と図-6 は, 豊浦標準砂と珪砂 8 号に対して 12% ベントナイト泥水を用いて泥水圧 0.3 kgf/cm², 掘進速度 1 cm/min, 回転数 1 rpm で掘進したときに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-5 から, 豊浦標準砂では, おのお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。図-6 から, 珪砂 8 号では, 掘進開始と同時に各位置での間隙水圧が上昇している。

図-7 は, シールド機が 5 cm 掘進する間の No. 4, 5, 6 の間隙水圧計の値を用いて, 切羽から前方の間隙水圧の分布を示したものである。図から, 豊浦標準砂では, 切羽面付近で間隙水圧が設定泥水圧から急激に低下しているゾーンとそれ遠の間隙水圧の上昇のわずかなゾーン

の 2 つに区別できる。また, 珪砂 8 号では, 切羽前方の間隙水圧が全体的に上昇している。

泥水が切羽に浸透した部分では, 泥水の浸透抵抗が大きく急激な圧力損失が生じるので, 豊浦標準砂で, 間隙水圧の急激低下ゾーンは, 泥水の浸透ゾーンと考えられ, これは, アクリル板を通して観察した泥水浸透ゾーンの厚さとほぼ一致している。透水係数の小さい珪砂 8 号では, この浸透ゾーンはみられないので, 地盤の透水係数によって, 切羽面に泥水浸透ゾーンが形成される場合と泥水浸透ゾーンが形成されない場合がある。

(3) 間隙水圧の上昇のメカニズム

前節から, 泥水の浸透形態は, 2 種類あることがわかったので, これらの浸透形態における過剰間隙水圧発生メカニズムについて考える。

豊浦標準砂では, 地盤の透水係数が大きいため泥水浸透ゾーンが形成され, このゾーン内では泥水の浸透抵抗により圧力損失が生じて間隙水圧はチャンパーの設定泥水圧から急激に減少する。また, 泥水浸透ゾーン以遠の間隙水圧があまり上昇していないのは, 地盤の透水係数が大きく, 実験土槽終端の排水面までの排水距離が短いので, シールド掘進によって発生した地下水流速では, 動水勾配が小さくてすむためである。したがって, 間隙水圧の高い泥水浸透ゾーンが切羽安定上の問題になる。

一方, 珪砂 8 号では, 地盤の透水係数が小さいために, シールド掘進により発生した地下水流速で地盤中を流れるにはかなり動水勾配を必要とするので, 切羽地盤のかなり前方まで間隙水圧が上昇してしまう。つまり, 珪砂 8 号において有効泥水圧を大きく確保するには, シール

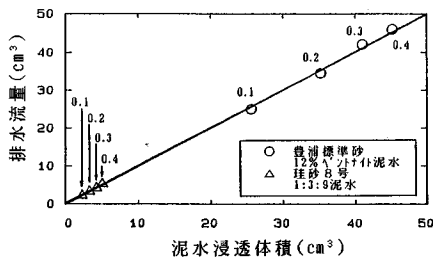


図-8 排水流量と泥水浸透体積の関係

掘進によって発生する地下水流速を小さくして地盤の間隙水圧が上昇しないようにすることが必要である。

(4) 発生地下水流速と泥水浸透速度について

シールド掘進により地下水流速が発生するのは、差圧によって切羽への泥水自身の浸透と泥水からの滲過水の2つが考えられるので、シールド機の Cutter 切削インターバルを30秒とし、この時間における静的浸透実験を行って調査した。

豊浦標準砂に12% ベントナイト泥水を用いた場合と、珪砂8号に1:3:9泥水を用いた場合に、泥水圧0.1~0.4 kgf/cm²で30秒間の静的浸透実験を行ったときの排水流量と、泥水浸透体積を比較したものを図-8に示す。ここで、泥水浸透体積とは、泥水を着色して、泥水が地盤に浸透した長さを測定し、供試体断面積と地盤の間隙率から算出したものである。また、図中の直線は、排水流量と浸透体積が等しい場合に当たる。図-8から、排水流量と泥水浸透体積は等しいとみなせるので、Cutter 切削インターバル内では、脱水による滲過水量はほとんどないと考えられる。したがって、発生する地下水流速は切羽からの泥水の浸透により発生し、その切羽面では、(発生地下水流速)=(泥水浸透速度)と考えてよい。このことは、喜田らが⁴⁾、泥水浸透実験の結果から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という指摘とも合っている。

ここで、泥水浸透速度と浸透形態の関係について考える。切削インターバルでのシールド掘進速度より泥水浸透速度が速いとCutterによって切削しても、泥水浸透ゾーンは切り残されて、次第に浸透ゾーンが成長する。一方、泥水浸透速度がシールドの掘進速度より遅ければ、切削インターバルに形成された泥水浸透ゾーンはCutterで切除されてしまう。したがって、切削インターバル内で、泥水浸透ゾーンの形成とCutterによる切除を繰り返すことになり、その結果、泥水浸透ゾーンは形成されなくなる。つまり、泥水の浸透形態は、泥水の地盤への浸透速度が、シールド掘進速度より速いか否かにより、泥水浸透ゾーンを形成する場合 (Type 1) と泥水浸透ゾーンを形成しない場合 (Type 2) に大別できる。

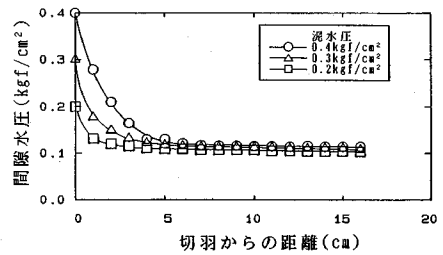


図-9 泥水圧の違いによる切羽前方の間隙水圧の分布 (豊浦標準砂)

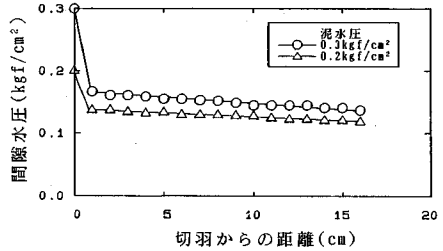


図-10 泥水圧の違いによる切羽前方の間隙水圧の分布 (珪砂8号)

ただし、この場合の泥水の浸透速度は、シールド掘進速度との比較であるので、実際に泥水が地盤の間隙中を移動する速度、すなわち、ダルシー則でいう流速を地盤の間隙率で除した泥水の実質浸透速度である。

(5) 間隙水圧上昇量と発生地下水流速について

切羽地盤の間隙水圧上昇量は、両浸透形態とも発生地下水流速および地盤の透水係数の関係が重要となることがわかったので、これらの要因について調査した。

ここで、この実験の状況に近い次元の流れで考えると、間隙水圧の上昇量 Δp はダルシー則により次式のようなになる。

$$\Delta p = vL\gamma_w/k \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 Δp は切羽地盤の過剰間隙水圧 (kgf/cm²)、 v は発生地下水流速 (cm/s)、 L は排水距離 (cm)、 k は地盤の透水係数 (cm/s)、また、 Δp の単位を (kgf/cm²) で表現したので、水の単位体積重量 γ_w は (kgf/cm³) で表示する。式 (1) から、切羽地盤の発生間隙水圧は、発生地下水流速と排水距離および地盤の透水係数により決まることがわかる。しかし、排水距離と地盤の透水係数は、現場の地盤状況によりあらかじめ決まってしまうので、この条件下で過剰間隙水圧を下げるには、発生地下水流速を小さくする必要がある。そこで、この発生地下水流速を変化させる方法について考える。

豊浦標準砂、珪砂8号に対して12% ベントナイト泥水を用い、設定泥水圧を変化させてシールド掘進をしたときの間隙水圧の分布を図-9と図-10に示す。これらの図から、豊浦標準砂、珪砂8号のいずれも、設定泥水

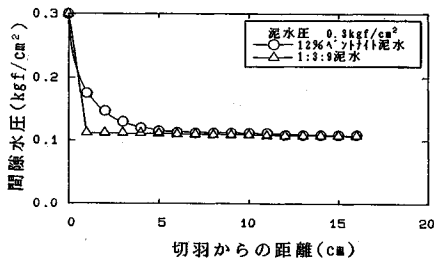


図-11 泥水の違いによる切羽前方の間隙水圧の分布 (豊浦標準砂)

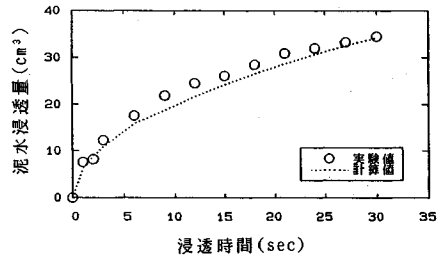


図-12 泥水浸透量と浸透時間の関係

圧が高いほど切羽地盤の過剰間隙水圧も上昇している。また、豊浦標準砂に対して、12% ベントナイト泥水と1:3:9 泥水を用いた場合の間隙水圧の分布を図-11に示す。この図から、12% ベントナイト泥水に比べ、1:3:9 泥水の方が切羽地盤の過剰間隙水圧は小さいことがわかる。以上の結果から、泥水圧を上げると間隙水圧は上昇し、1:3:9 泥水を使うと、間隙水圧の上昇は小さくなる。したがって、発生地下水流速は、設定泥水圧と泥水性状によってコントロールできることになる。

4. 泥水の砂質切羽地盤への浸透のメカニズム

3. から泥水式シールドによる切羽地盤の間隙水圧上昇量は、泥水浸透に基づく切羽面での発生地下水流速によってコントロールできる。また、切羽面におけるこの地下水流速は泥水浸透速度に等しいこともわかったので、泥水浸透速度について調査する。

(1) 泥水浸透のメカニズム

ここで、泥水が砂質切羽地盤へ浸透するときの泥水浸透のメカニズムについて考えてみる。泥水は切羽面から有効泥水圧 ($P_0 - \Delta p$) により浸透することになるが、浸透開始後 t 秒において泥水浸透距離が 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、 t 秒のときの泥水浸透速度 v_s は、次のような式で示せるものと考えられる。

$$v_s = \frac{dl_s}{dt} = ak \frac{(P_0 - \Delta p)}{l_s \gamma_w} \dots \dots \dots (2)$$

式(2)を解くと、浸透開始 t 時間後の泥水の浸透距離 l_s と浸透速度 v_s は次式のようにになる。

$$l_s = \sqrt{2ak(P_0 - \Delta p)t / \gamma_w} \dots \dots \dots (3)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{ak(P_0 - \Delta p)}{2t\gamma_w}} \dots \dots \dots (4)$$

- ここに、 l_s : 浸透距離 (cm)
- P_0 : 差圧 (kgf/cm²)
- Δp : 浸透ゾーン先端の過剰間隙水圧 (kgf/cm²)
- v_s : 泥水浸透速度 (cm/s)
- t : 浸透時間 (s)
- ak : 泥水の地盤に対する浸透係数 (cm/s)

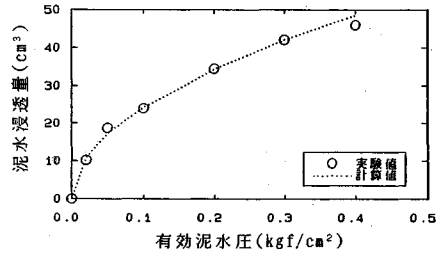


図-13 泥水浸透量と有効泥水圧の関係

- k : 地盤の透水係数 (cm/s)
- α : 泥水性状による k の補正係数
- γ_w : 水の単位体積重量 (kgf/cm³)

そこで、上式の妥当性を切削インターバルを30秒としたときの静的浸透実験の結果を用いて比較検討する。ここで、図-3の実験装置は、鉛直方向の浸透のため、位置水頭を考慮する必要があるが、泥水の圧力水頭に比較してかなり小さいので今回は無視している。また、本実験における泥水浸透ゾーン先端の過剰間隙水圧 Δp は、供試体の厚さが3cmなので、排水距離がきわめて小さく、過剰間隙水圧 Δp はほとんどゼロと等しくなり、(泥水圧=差圧=有効泥水圧)と近似できる。また、30秒間における泥水浸透速度の変化は浸透量、すなわち排水量の変化として現れるので、浸透量から要因を考察する。

a) 泥水浸透量と浸透時間

図-12は、豊浦標準砂に12% ベントナイト泥水を用いて泥水圧0.2 kgf/cm²で静的浸透実験を行ったときの浸透量と浸透時間の関係を示したものである。また、図中の曲線は、式(3)と地盤の間隙率 n を用いて浸透量 Q を算出したもので、次式によって求められる。

$$Q = nA\sqrt{2ak(P_0 - \Delta p)t / \gamma_w} \dots \dots \dots (5)$$

なお式(5)中の浸透係数 ak は、30秒後の浸透距離の実測値から式(3)を用いて算出し、 $ak = 2.0 \times 10^{-4}$ cm/s、 $\alpha = 0.014$ を得た。図から、計算値は、実測値を良くシミュレートしており、浸透量は浸透時間 (t) の平方根に比例している。したがって、泥水浸透速度としては、浸透時間 (t) の平方根に反比例することになる。

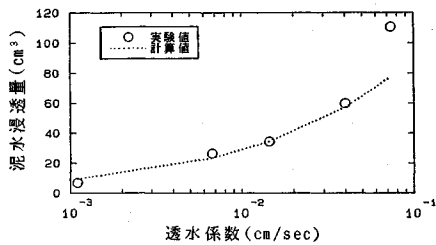


図-14 泥水浸透量と砂の透水係数の関係

b) 泥水浸透量と有効泥水圧

図-13は、豊浦標準砂に12% ベントナイト泥水を用い、泥水圧を変化させて浸透実験を行ったときの30秒後の浸透量と有効泥水圧の関係を示したものである。図中の曲線は、a)における有効泥水圧0.2 kgf/cm²のときの $ak=2.0 \times 10^{-4}$ cm/sを用いて式(5)から各有効泥水圧に対する浸透量を計算したものである。計算値は、実測値を良くシミュレートしており、砂と泥水が一定な場合は浸透係数 ak は、泥水圧にほぼ無関係であることがわかる。図-13において浸透量は有効泥水圧の平方根に比例しているため、泥水浸透速度は、有効泥水圧の平方根に比例して速くなるといえる。

c) 泥水浸透量と透水係数

図-14は、12% ベントナイト泥水を用いて有効泥水圧0.2 kgf/cm²で砂を変えて浸透実験を行ったときの30秒後の浸透量と透水係数の関係を示したものである。図中の曲線は、式(5)から浸透量を計算したものである。このとき式(5)の α の値はどの砂にも豊浦標準砂の0.014を用いた。図から、計算値は、透水係数 4.0×10^{-2} cm/sまでは実測値と良く合っているが、 7.5×10^{-2} cm/sでは大きくはずれている。これは、使用泥水が同じでも砂が異なると α は一定値ではなく、その砂ごとに ak を求める必要があることを意味する。つまり α は、粘性係数のみの関数ではなく、泥水の粒子径と地盤の間隙径に影響されるということである。この ak が求められれば、浸透量と泥水浸透速度は、 ak の平方根に比例することがわかる。ただし、このようになるのは、泥水の流動現象が切削インターバルにおいて、浸透が主体で汜過が無視できる場合である。

(2) シールド掘進時に切羽に泥水浸透ゾーンが形成される場合 (Type 1)

シールド掘進時に泥水の浸透ゾーンが形成される (Type 1) の場合について、泥水浸透速度とシールド機の cutter 回転数および掘進速度の影響について調査した。なお、本実験では、泥水浸透ゾーンを図-7にあるような地盤内で間隙水圧が急激に上昇を始めた位置と切羽面との領域と定義し、その距離を泥水浸透距離とした。

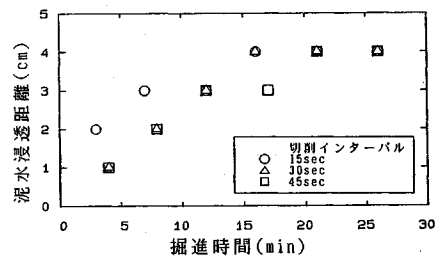


図-15 切削インターバルの違いによる泥水浸透距離と掘進時間の関係 (豊浦標準砂)

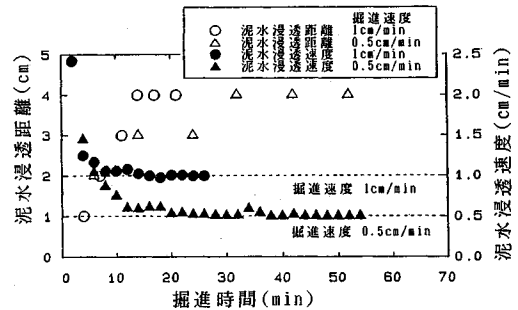


図-16 掘進速度の違いによる泥水浸透距離および泥水浸透速度と掘進時間の関係 (豊浦標準砂)

a) 浸透距離と切削インターバルの関係

図-15は、泥水圧0.3 kgf/cm² (差圧 $P_0=0.2$ kgf/cm²)、掘進速度1 cm/minで、Cutter回転数により切削インターバルを15~45秒に変えて掘進したときの浸透距離の時間的変化を示したものである。図から、各切削インターバルともに浸透距離は、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。しかし、切削インターバルの違いによる差はほとんどみられない。

シールドの場合、Cutterによる切削は、切羽の部分部分を時間差を生じながら切削するので、切羽表面には、切削時間のずれにより浸透性の異なる部分が混在することになる。しかし、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からはほぼ一様に浸透が生じるものと考えられる。したがって、Cutterにより切羽面を切削する効果は、不透水性の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Cutterが回転しても、その間ではあまり差が生じないと考えられる。

b) 浸透距離と掘進速度の関係

図-16は、泥水圧0.3 kgf/cm² (差圧0.2 kgf/cm²)、回転数1 rpm、掘進速度1.0 cm/minおよび0.5 cm/minで掘進したときの浸透距離と切羽面における発生地下水流速 (排水流量/シールドの断面積) の時間的変化を示

したものである。図から、時間経過とともに浸透距離は 4 cm に近づき、発生地下水流速は掘進速度に相当する 1 cm/min および 0.5 cm/min にそれぞれ近づいている。泥水浸透速度は発生地下水流速と等しいことから、泥水浸透ゾーンが形成される場合 (Type 1) の泥水浸透速度は、切削インターバルを一定とすると、浸透距離が一定になるまでは浸透距離の伸びに伴い減少し、やがてシールドの掘進速度と同じになる。その後は掘進により切削された分と浸透先端部の伸びが同一になり、泥水浸透ゾーンは、一定の厚さに維持される。この状態では、(発生地下水流速)=(シールド掘進速度)となるので、過剰間隙水圧を下げるには、掘進速度を低下させることでも可能である。しかし、掘進速度は、施工上あまり遅くできないので、そのときは泥水性状を変えて、泥水浸透速度を小さくする必要がある。

(3) シールド掘進時に泥水浸透ゾーンが形成されない場合 (Type 2)

この場合は、カッター切削インターバル内の泥水浸透距離がその間のシールド掘進距離より小さい場合に当たるので、(1) で示したような切削インターバルごとに新しい切羽面への静的浸透現象の繰返しとみなすことができ、切羽の地盤土に対する泥水浸透速度は、使用予定の泥水を用いて、標準的泥水圧 0.2 kgf/cm² で 30 秒間静的浸透実験を行い、浸透量から浸透係数 ak を決定すれば、式 (4) によって任意の切削インターバル (t)、有効泥水圧 ($P_0 - \Delta p$) に対しての泥水浸透速度を求めることができる。ここで、(Type 1) の場合は、(2) で考察したように切削インターバルは、泥水浸透速度にほとんど影響を与えなかったが、(Type 2) の場合は、切削インターバルごとの静的浸透現象の繰返しなので、泥水浸透速度は、浸透時間、すなわち切削インターバルに大きく左右される。したがって、カッター回転数を速くするほど、泥水浸透速度が速くなり過剰間隙水圧は高くなる。

5. 現場の排水条件を考慮した場合の泥水式シールドによる切羽の過剰間隙水圧について

これまでに、実験土槽での泥水式シールドの砂質切羽地盤における間隙水圧の上昇量とその発生メカニズムについて述べた。この中で、切羽地盤の間隙水圧上昇量は、切羽への泥水浸透速度に等しい発生地下水の流速と地盤の透水係数および排水距離が関係することを明らかにした。図-7 などの実験結果では、切羽の有効泥水圧はかなりあるが、しかし、現場地盤では排水距離が実験土槽よりはるかに長いので、実験結果から直接、現場の排水条件での切羽間隙水圧上昇量を推定することはできない。そこで、図-18 に示すような現場の状況として代表的な一つの排水条件の地盤を想定した。ただし、シ-

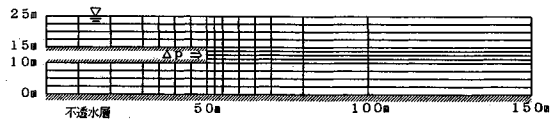


図-18 解析モデルメッシュ図

ールド前方の排水長を 100 m としたのは、それ以上にしても解析結果にほとんど影響を与えなかったためである。そこで、これまでの実験結果と有限要素法を用いて、切羽地盤の透水係数と泥水を種々に変えた場合に発生する過剰間隙水圧を予測してみる。

(1) 切羽地盤の間隙水圧の求め方について

過剰間隙水圧発生メカニズムは、地盤中での間隙水圧と泥水の 2 相からなる三次元的な流れによるものであるが、解析を行うにあたり以下のような仮定をたてた。

まず、①求める過剰間隙水圧は、高めに算定されるが、概算値を求めることを目的としているので二次元解析とした。②切羽前方では、泥水浸透ゾーンと、それ以遠の地下水領域からなっているが、泥水浸透ゾーンの大きさは、1 回当たりの切削厚さ以内であり、想定した地盤やシールド径に対して無視できるほど小さくなるので、解析モデルには取り込まない。③上述理由から、浸透距離はシールド掘進中常に小さいので、泥水は切羽面に一次的に浸透するものとして考える。この泥水浸透速度とそれによって発生する地下水流速は、浸透ゾーンの先端の境界面 (モデル地盤の切羽面) で等しくなる。したがって、過剰間隙水圧は、切羽面での発生地下水流速をモデル地盤中に流し得るような間隙水圧に相当する。

以上のような仮定に基づいて、切羽面での間隙水圧上昇量を、次のような方法により推定する。最初に、使用予定泥水と現場の切羽地盤の土を用いて、静的泥水浸透実験を行う。このとき有効泥水圧を 0.2 kgf/cm² とし、30 秒間加圧した場合の累積排水流量 Q を測定する。この場合の泥水浸透速度 $V_{0.2}$ は次式のようなになる。

$$V_{0.2} = Q / At \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 $V_{0.2}$: 有効泥水圧 0.2 kgf/cm²、切削インターバル 30 s としたときの泥水浸透速度 (cm/s)

Q : 有効泥水圧 0.2 kgf/cm²、30 秒間加圧時の累積排水流量 (cm³)

A : 供試体断面積 (cm²)

t : 切削インターバル (s) (ここでは 30 s)

ただし、ここでいう泥水浸透速度 $V_{0.2}$ は、前述した式 (4) の v_s とは異なり、切削インターバル時間内のシールド全断面の平均流速である。さらに、4. (1) の b) で示したように泥水浸透速度は有効泥水圧の 2 乗根に比例することを利用して、任意の有効泥水圧での泥水浸透速度は次式により求められる。

表一四 差圧の違いによる過剰間隙水圧と有効泥水圧 (12% ベントナイト, 切削インターバル 30 (s)) (単位: kgf/cm²)

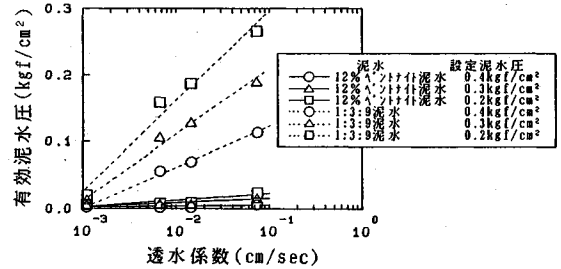
地盤 (透水係数 (cm/s))	差圧	0.2kgf/cm ² 0.3kgf/cm ² 0.4kgf/cm ²		
		珪砂5号 (7.34×10 ⁻²)	過剰間隙水圧 有効泥水圧	0.194 0.006
豊浦標準砂 (1.45×10 ⁻²)	過剰間隙水圧 有効泥水圧	0.198 0.002	0.295 0.005	0.391 0.009
珪砂7号 (6.69×10 ⁻²)	過剰間隙水圧 有効泥水圧	0.198 0.002	0.295 0.005	0.392 0.008
珪砂8号 (1.10×10 ⁻²)	過剰間隙水圧 有効泥水圧	0.198 0.002	0.297 0.003	0.394 0.006

表一六 切削インターバルの違いによる過剰間隙水圧と有効泥水圧 (1:3:9 泥水, 差圧 0.4 kgf/cm²) (単位: kgf/cm²)

地盤 (透水係数 (cm/s))	切削インターバル	15sec 30sec 45sec		
		珪砂5号 (7.34×10 ⁻²)	過剰間隙水圧 有効泥水圧	0.217 0.183
豊浦標準砂 (1.45×10 ⁻²)	過剰間隙水圧 有効泥水圧	0.298 0.102	0.213 0.187	0.160 0.240
珪砂7号 (6.69×10 ⁻²)	過剰間隙水圧 有効泥水圧	0.312 0.098	0.242 0.158	0.187 0.213
珪砂8号 (1.10×10 ⁻²)	過剰間隙水圧 有効泥水圧	0.393 0.007	0.380 0.020	0.360 0.040

表一五 差圧の違いによる過剰間隙水圧と有効泥水圧 (1:3:9 泥水, 切削インターバル 30 (s)) (単位: kgf/cm²)

地盤 (透水係数 (cm/s))	差圧	0.2kgf/cm ² 0.3kgf/cm ² 0.4kgf/cm ² 2.1kgf/cm ²			
		珪砂5号 (7.34×10 ⁻²)	過剰間隙水圧 有効泥水圧	0.087 0.113	0.112 0.188
豊浦標準砂 (1.45×10 ⁻²)	過剰間隙水圧 有効泥水圧	0.130 0.070	0.174 0.126	0.213 0.167	0.602 1.498
珪砂7号 (6.69×10 ⁻²)	過剰間隙水圧 有効泥水圧	0.144 0.056	0.196 0.104	0.242 0.158	0.717 1.383
珪砂8号 (1.10×10 ⁻²)	過剰間隙水圧 有効泥水圧	0.195 0.005	0.289 0.011	0.380 0.020	1.705 0.395



図一十九 有効泥水圧と透水係数の関係

$$V_1 = V_{0.2} \times \sqrt{\frac{P_0 - \Delta p}{0.2}} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 V_1 : 有効泥水圧が $(P_0 - \Delta p)$ のときの泥水浸透速度 (cm/s)

$V_{0.2}$: 有効泥水圧が 0.2 kgf/cm² のときの泥水浸透速度 (cm/s)

P_0 : 差圧 (kgf/cm²)

Δp : 泥水浸透ゾーン先端での間隙水圧上昇量 (kgf/cm²) (未知量)

次に、図一八に示す、土被り 10 m、シールド口径 5 m、地下水位は地盤上面にあり、地盤の下面は不透水層であるような鉛直断面での二次元解析モデルを用いて、泥水浸透ゾーン先端の切羽間隙水圧上昇量 Δp をとりあえず 0.02 kgf/cm² と仮定したときの地下水流速を求め、発生地下水流速は切羽間隙水圧上昇量 Δp に比例するので、泥水浸透ゾーン先端での切羽間隙水圧上昇が Δp (kgf/cm²) のときの発生地下水流速 V_2 は次式のようなになる。

$$V_2 = V_{0.02} \times \frac{\Delta p}{0.02} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 V_2 : 間隙水圧上昇量が Δp のときの地下水流速 (cm/s)

$V_{0.02}$: 間隙水圧上昇量が 0.02 kgf/cm² としたときの地下水流速 (cm/s)

Δp : 泥水浸透ゾーン先端での切羽間隙水圧上昇量 (kgf/cm²)

3. (4) で述べたように、泥水浸透速度と切羽面での

発生地下水流速は同一になるはずなので、式 (7) で求めた泥水浸透速度と式 (8) の発生地下水流速が等しくなる必要がある。この条件に合う Δp が、現場の排水条件における泥水浸透ゾーン先端での切羽地盤での間隙水圧の上昇量ということになる。したがって、この間隙水圧の上昇量は、式 (7)=式 (8) としたときの次式を Δp について解けば求められる。

$$\left(\frac{V_{0.02}}{V_{0.2}}\right)^2 \times 2500 \times \Delta p^2 + 5\Delta p - 5P_0 = 0 \dots\dots\dots (9)$$

切削インターバル (t) が 30 秒以外の場合は、4. (1) の a) で示したように泥水浸透速度は浸透時間 (t) の平方根に反比例することを利用して、式 (6) で得られた $V_{0.2}$ に対して、

$$V_{0.2(t)} = V_{0.2} \times \sqrt{\frac{30}{t}} \dots\dots\dots (10)$$

を求め、この $V_{0.2(t)}$ を式 (9) の $V_{0.2}$ の代わりに用いれば同様にして求められる。

(2) 解析に基づく現場切羽地盤の過剰間隙水圧および有効泥水圧について

前節で述べた方法により図一八の解析モデルについて求めた、種々の条件下での切羽地盤の過剰間隙水圧と有効泥水圧 (差圧-過剰間隙水圧) を表一四~六に示す。また、表一四、五の有効泥水圧についてグラフにしたものが図一十九である。表一四から、12% ベントナイト泥水ではどの砂でも有効泥水圧がほとんどない。表一五から、1:3:9 泥水では差圧 0.2~0.4 kgf/cm² に対する有効泥水圧は、透水係数の大きい珪砂 5 号では 56~66%

であるが、透水係数の小さい珪砂 8号で 2.5~5% になっている。表-6 から、切削インターバルが長いほど泥水浸透速度が実質上遅くなるので有効泥水圧が大きくなることがわかる。さらに、図-19 から、珪砂 8号 (透水係数 1.10×10^{-3} cm/s) では、差圧を 0.2~2.1 kgf/cm² の範囲で変化させてもあまり有効泥水圧は上昇しないのに対して、珪砂 5号 (透水係数 7.34×10^{-2} cm/s) では、差圧の増加とともに有効泥水圧は大きくなっている。

以上の結果から、珪砂 5号のように透水係数の大きい地盤に対しては、泥水性状を変化させたり、泥水圧を上げて差圧を大きくすれば有効泥水圧を期待できることがわかる。ただし、透水係数の大きい地盤に対して差圧を大きくすると有効泥水圧は期待できるが、逆に、泥水浸透速度が速くなるために、(Type 1) になる可能性がある。(Type 1) になる場合は、泥水浸透ゾーンができるために、施工時の泥水のロスや地下水の汚染などが考えられるため、好ましくない。したがって、透水係数の大きい地盤では、泥水浸透速度がシールド掘進速度を越えない範囲に差圧をとどめることが望ましい。

一方、珪砂 8号のように透水係数の小さい地盤では、泥水性状や設定泥水圧を変えても間隙水圧は下がらず、有効泥水圧は期待できないことがわかる。これは、前述の式 (1) から、設定泥水圧や泥水性状を変化させて泥水浸透速度を小さくしても、地盤の透水係数が 1.10×10^{-3} cm/s と非常に小さいために過剰間隙水圧としてはあまり変化がないものと考えられる。このことから、従来、透水係数の小さい地盤の方が、切羽の安定は達成されやすいと考えられてきたが、泥水の浸透に基づく間隙水圧の上昇によって、有効泥水圧が小さくなるため、切羽安定上は必ずしも安全ではないといえる。

(3) 現場切羽地盤の間隙水圧の実測例と解析結果との比較

実際のシールド工事において、シールド掘進に伴う地盤の間隙水圧の変化を測定した事例をもとに、上述の解析結果と比較検討してみる。この場合、地下水の排水条件は解析モデルと少し異なっている。現場で差圧を 0.3 kgf/cm² 程度に保持した泥水式シールド工事において、切羽直上部 0.25 m の間隙水圧の変化を測定した例によると⁹⁾、透水係数が 1.0×10^{-3} cm/s の地盤に対して、シールド接近時の間隙水圧は差圧の 90% 程度まで上昇していることを示している。したがって、有効泥水圧としては差圧の 10% 程度に過ぎないことになる。これは、本節の解析結果 (表-5) において、珪砂 8号 (透水係数 1.10×10^{-3} cm/s) に対する有効泥水圧が、差圧 0.2~0.4 kgf/cm² ではわずかしかならないことと、かなり良く合っている。

また、現場で差圧を 2.1 kgf/cm² 程度に保持した泥水式シールド工事において、切羽側方部 3.0 m の間隙水

圧の変化を測定した例によると⁹⁾、砂礫地盤に対して、シールド接近時の間隙水圧は 0.5 kgf/cm² (差圧の 24%) 程度まで上昇していることを示している。地盤の透水係数が、解析結果 (表-5) の豊浦標準砂に近いとすると、解析結果とほぼ一致し、透水係数の大きい地盤では設定泥水圧を上げて差圧を大きくすれば有効泥水圧が期待できるという考察とも一致する。これらの対比結果は本解析手法の妥当性を示すものといえよう。

(4) 切羽の安定について

従来、砂質土地盤における泥水シールドの切羽の安定は、切羽面に完全な不透水性の泥膜を形成し、(泥水圧) - (地下水圧) で得られる有効泥水圧で、有効土圧に対抗することで達成されていると考えられていた。しかし、切羽は 15~45 秒ごとにカッターにより切削されるので、泥水は切羽地盤に浸透し、地下水に流れが生じて、切羽地盤の間隙水圧が上昇することがわかった。特に透水性の小さい砂層では現場の長い排水距離の条件下で、間隙水圧はかなり上昇し、有効泥水圧は一般にほとんど期待できないことがわかった。

現場においては大体切羽の安定が達成されているように考えられるが、その理由としては、著者らがすでに明らかにしたカッター圧 (掘進時にカッターが切羽面を押す平均圧力) の作用によるものと考えられる¹⁰⁾。砂質土地盤のカッター圧の大きさは、泥水圧分と同等程度の大きさをもち得るので、カッター圧が切羽押え圧として重要な役割をもっている。

6. ま と め

本論文は、砂質土地盤において泥水式シールドを掘進した場合、切羽地盤の過剰間隙水圧発生メカニズムとその上昇量および泥水の切羽地盤への浸透形態について調査したものである。ここで得られた主な知見は以下のようなものである。

(1) 泥膜は、カッターにより 15~45 秒間隔で切削されるため泥水圧と地下水圧の差圧によって泥水が地盤へ浸透し、前方の間隙水を押し出すことによって地下水の流動が生じ、切羽面での発生地下水流速は泥水浸透速度と等しくなる。切羽地盤の間隙水圧は発生地下水流速に比例して上昇し、有効泥水圧は減少する。この間隙水圧上昇量は、発生地下水流速を決める差圧、泥水性状、地盤の透水係数、排水距離によって変化する。

(2) 泥水の浸透形態は 2 種に大別される。泥水性状と泥水圧によって決まる泥水の実質浸透速度がシールド掘進速度よりも速い場合は、泥水浸透ゾーンが形成され、泥水の実質浸透速度の方が遅い場合は、泥水浸透ゾーンが形成されない。

(3) 泥水浸透ゾーンを形成する場合 (Type 1) は、浸透距離が掘進につれて伸びるが、泥水浸透速度は、浸

透距離の伸びとともに減少し、(泥水浸透速度)=(シールド掘進速度)となった時点で浸透距離は一定となり、それ以後定常状態となる。したがって、(Type 1)の場合の間隙水圧上昇量を定める発生地下水流速は、シールド掘進速度に等しくなる。したがって、切羽の間隙水圧上昇量は、掘進速度を変化させることでコントロールできる。

(4) 泥水浸透ゾーンを形成しない場合(Type 2)は、カッター切削インターバル(15秒~45秒)における泥水の静的浸透とその切削除去の繰返しとみなすことができ、このときの泥水の浸透現象は式(3)、(4)で説明できることを静的浸透実験の結果から検証した。

(5) 現場におけるシールド切羽に生ずる間隙水圧上昇量を地下水流の排水条件を考慮した有限要素法を用いて予測した結果、従来ほとんど考慮されていなかった切羽地盤の間隙水圧の上昇量は一般に大きく、特に透水性の小さい砂層では有効泥水圧としては非常に小さくなる。

(6) 泥水式シールドにおいて、切羽土圧に対抗するものとしては泥水圧の効果が、一般にきわめて小さいので、大部分はカッター圧に依存するとみなすことができる。

参考文献

- 1) 奥園 清・白石和雄：連載講座、泥水加圧シールド工法(2)、トンネルと地下、第13巻5号、pp.61~68、1982.
- 2) 塚田 章ほか：シールド工法の実例、鹿島出版会、1984.
- 3) 小林健郎ほか：泥水式シールドにおける泥水の基本特性試験、前田技術研究所報、Vol.24、pp.85~94、1983.
- 4) 喜田大三・川地 武：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、No.17、pp.76~80、1978.
- 5) 藤原雅博ほか：泥水式シールドの最適泥水性状について(その2)、土木学会第44回年次学術講演会概要集、Ⅲ-7、1989.
- 6) 斉藤顕次ほか：泥水特性に関する基礎的研究(その3)、西松建設技報、Vol.19、pp.7~11.
- 7) 山田邦光ほか：泥水シールド工法における泥水圧の地盤への伝達について、第17回土質工学研究発表会、pp.1265~1268.
- 8) 木島詩郎・玉井達郎：泥水加圧式シールド工法の研究(その3)、鹿島建設技術研究所年報、第27号、pp.45~50、1979.
- 9) 中村信義・小野重剛：大断面泥水加圧シールド工法によるトンネル周辺地盤の挙動について、土木学会第41回年次学術講演会概要集、Ⅲ-426、1986.
- 10) 栗原和夫・森 麟・田村昌仁：泥水式シールドの適正泥水圧に関する実験的研究、土木学会論文集、第409号、pp.37~46、1989.

(1990.8.9受付)

THE MECHANISM OF THE INCREASES OF THE PORE WATER PRESSURE IN SANDY SOILS BY TUNNEL DRIVING WITH SLURRY TYPE SHIELD

Akira MORI, Kazuo KURIHARA, Hitoshi MORI and Keiji KONDOU

From the field measurements of slurry type shield tunnelling, the pore water pressure surrounding the face in sandy soils was cleared to increase as the shield machine advances.

This paper investigates the mechanism by which the pore water pressure in sandy soils is increased and presents a method to predict the increases of the pore water pressure in an actual construction. The results of the investigation reveal that:

- 1) The increases in the pore water pressure are directly related to the groundwater velocity, and its velocity is caused by slurry penetration to the face.
- 2) By comparing the numerical solutions calculated using FEM with measurements obtained in the field, it was found that the effective slurry pressure, especially in low permeable sandy soils, was extremely marginal.