泥水加圧式推進工法における注入泥水の地山への浸透挙動*

島田 英樹¹ 松井 紀久男²

Seepage Behavior of Mud Slurry on Soil around Pipe in Using Pipe Jacking

by Hideki SHIMADA¹ and Kikuo MATSUI¹

1. Faculty of Engineering, Kyushu University, Higashi-ku, Fukuoka 812-81

Basically, the pipe jacking system involving the pushing or thrusting of the drive machine through concrete pipes ahead of jacks. The method utilizes the mud slurry which is formed around the pipes for stability of surrounding soil. However, it is not well understood the behavior of the soil and mud slurry around the pipes. From this point of view, this paper discusses the seepage behavior of the mud slurry on soil around the pipes by means of laboratory tests and 2-D Eulerian Lagrangian analysis.

The results of this research are summarized as follows;

- 1) It can be applied to the seepage behavior of the mud slurry by using 2-D Eulerian Lagrangian analysis.
- 2) Large slurry permeation zone tends to form thick mud screen around the pipe.
- 3) The mud screen between the soil and the pipe is easily formed by high density mud slurry and high slurry pressure.
- 4) Once the mud screen was formed, the thickness of the mud screen increased gradually because it behaves like a filter paper under pressure.
- 5) Thick mud screen prevents the mud slurry from permeating into the soil.

KEY WORDS : Small Diameter Tunnel, Pipe Jacking, Mud Slurry, Mud Screen, Seepage Analysis

1. 緒 言

わが国は、国土が狭い上に都市に人口や経済拠点が集中し、過密な都市構造となっている。この都市構造の中では、上下水道、ガス、電力、通信ケーブル等のライフラインの管理設や隧道工事は、都市部の地下浅部空間に施工せざるを得ない。また、これらの工事は、ほとんどが密集市街地でなされるため、交通障害、騒音、振動、地盤沈下、建物への影響防止などに配慮する必要がある。このような背景から、推進工法は都市における埋設工法の中で有効な方法として多用され、急速な進歩を遂げてきている¹⁾。しかし一般的な推進工法は、掘削に伴う地盤の緩みによる土荷重を推進管自体の剛土保作用により保持しているため、これの長距離推進あるいは曲線推進の際、推進抵抗が急増する傾向にある²⁾。この問題の解決を図り、このような長距離、曲線推進現場への適用を目指したものが、近年発展のめざましい泥水加圧式推進工法である³⁾。しかし、この新しい工法である泥水加圧式推進工法は、これまで工学的に脚光を浴びなかったため、既に数多くの施工実績はあるものの系統的かつ普遍的な検討が見られず、現場経験に

依っている場合が多い。また、地山の安定性、低推力推進システム、低推力泥水の開発等の多くの未解決の課題が残され⁴⁾、これらの解明への現場からの要請も大きい。一方、このような深度の浅い地山中の小口径トンネル周辺地盤の安定性の検討には、筆者らがこれまで主に鉱山を対象として行ってきた地下空洞の開削、維持や岩盤制御に関する研究⁵⁾の知見や手法を利用、応用することができる。

以上のような観点から、本論文では泥水加圧式推進工法の安全かつ効果的な施工を目的とした研究の第一歩として、本工法において最も重要な因子である泥水に関連する項目を取り扱う。すなわち、掘削地山壁面に形成される泥水被膜（以下、泥膜と呼ぶ）や泥水の地山への浸透挙動等の掘削地山の安定性に及ぼす泥水特性の影響について把握するために、模型実験および数値解析により種々検討を行った結果について報告する。

2. 泥水加圧式推進工法

本工法では、推進管の先端に取り付けられた掘進機の推進力を元押しジャッキによって、推進管であるヒューム管の耐荷力の範囲内で与えて掘削が行われる。図1に泥水加圧式推進工法の標準施工図を、図2に施工手順を示す³⁾。図2より、以下の手順で施工が行われる。すなわち、

- ① 元押し装置を推進立坑に据え付けて掘進機を推進計画線に合わせてセットする。

* 1997年1月27日受付 7月1日受理 資源・素材学会平成8年度春季大会において一部発表

1. 正会員 工博 九州大学助教授 工学部資源工学科

2. 正会員 工博 九州大学教授 工学部資源工学科

〔著者連絡先〕 FAX 092-642-3614 (九大・資源)

キーワード：小口径トンネル、推進工法、泥水、泥膜、浸透解析

図1 泥水加圧式推進工法の標準施工図

図2 施工手順

図4 模型実験装置

び地山の土粒子の移動崩落が抑えられ、地山の安定性の確保等の効果が得られる²⁾。また、形成された泥膜と推進管の間に低推力泥水を充填することにより推進抵抗の低減を計ることができる。

3. 模型実験による検討

前述のように、泥水の注入により地山の安定性を確保し、安定した低推進力を得るためには、余掘り外周部に注入した泥水の浸透挙動をはじめ、泥膜形成過程について把握する必要がある。そこで、まず泥水の掘削地山への影響について模型実験により明らかにする。

3・1 実験方法

実験は、1,000 mm × 600 mm × 200 mm の槽内に空洞を設けた図4に示す装置を用いて行った。この空洞に外径 100 mm のアクリルパイプを挿入し、槽内に模擬地山材料を充填させることにより開削地山をモデル化した。地山材料としては、粒径 2 mm 以下の珪砂を用い、地山の密度は落下法により 1.47 g/cm³ とした。泥水は、300 mm × 400 mm × 250 mm のプラスチック製のコンテナから流入管を経てアクリルパイプ内に送られ、泥水圧はコンテナの高さを変化させることによりシミュレートした。このアクリルパイプには、直径 4 mm の孔が 165 個設けられており、この孔から地山に泥水圧を作用させた。この際、泥水圧が急激に作用しないようにアクリルパイプ内にピストンを挿入し、これを徐々に引き抜きながら泥水を流入させた。泥水浸透範囲は、ピストンがアクリル槽壁面と一致したときを時刻 $t = 0$ として、2 分ごとにアクリル槽表面から上下左右の 4 方向について測定した。

② 掘進機のカッタービットで地山を回転掘削し、元押し装置で埋設管を押し込む。

③ 管一本の推進終了ごとに推進管を接続する。

④ 到達立坑から掘進機を回収する。

本工法では、推進管径よりも常に 3~6 cm 程度大きく地山が掘削される。そして、掘進機と地盤の間に生ずる余掘り箇所、掘削対象地山に適合した高濃度の泥水が加圧充填される。この泥水は、粉末粘土、CMC、逸泥防止剤等を混合させた高濃度のものであり、その機能は次のとおりである。すなわち図3に示すように、余掘り外周部に泥水を加圧充填させることにより、余掘り部縁に泥膜が、その近傍地山に泥水浸透層が形成される。その結果、これらの存在と加圧泥水の作用により地下水の流入防止およ

図3 推進管とその周辺地山の模式図

表 1 泥水成分の配合量

	比重	粉末粘土 (g)	CMC (g)	逸泥防止剤 (g)	水 (g)
泥水 A	1.15	224.5	1.8	10.0	904.5
泥水 B	1.28	430.0	2.5	13.0	822.0

表 2 実験に用いた泥水の実験値

	泥水 A	泥水 B
湿潤密度 ρ_w (g/cm ³)	1.1	1.3
含水比 W (%)	424.2	199.4
液性限界 W_L (%)	106.7	119.2
塑性限界 W_P (%)	55.6	51.0
塑性指数 I_P (—)	54.1	68.3

表 3 模型実験に用いたパラメータ

実験番号	土被り D/H	泥水圧 (kgf/cm ²)	泥水比重 (—)
①	1/4	0.100	1.15
②	1/3	0.100	1.15
③	1/2	0.100	1.15
④	1/4	0.070	1.15
⑤	1/4	0.150	1.15
⑥	1/4	0.100	1.28

次に、泥膜および泥水浸透層の形成による地山の安定性への効果について検討するため、泥水注入 15 分後に泥水およびアクリルパイプを槽内から取り出し、地表面変形量を測定した。なお、予備的に行った実験で泥水注入から 10 分程度経過後に泥水の浸透が停止することを確認している。地表面沈下量は、アクリルパイプを引き抜いたときを時刻 $t = 0$ とし、 $t = 0$ から 10 分、30 分、1 時間、3 時間、6 時間および 12 時間後の地表面沈下量をカセットメータで測定した。沈下量測定箇所は、空洞の中心を通る鉛直線と地山表面の交差部である。また、アクリル槽から泥水およびアクリルパイプを取り出した後、空洞の軸方向に対してほぼ中央部から上下左右方向に内径 8 mm、長さ 50 mm の注射器を利用して泥膜を採取し、泥膜の厚さを計測した。泥水は、表 1 に示すように、粉末粘土、CMC、逸泥防止剤および水を実現場の配合表をもとに比重 1.15 (泥水 A) および 1.28 (泥水 B) の 2 種類を作製した。また、これら泥水の実験値を表 2 に示す。なお、実験の相似性については厳密には考慮していないが、参考までに推進管径を 1 m とすると、幾何学的なスケールファクタは 1/10 となる。

以上の手順で、表 3 に示すように泥水圧、泥水比重、土被り深さをパラメータとして実験を行った。

3・2 実験結果および考察

泥水圧、泥水比重および土被り深さの 3 つのパラメータにおいて、この中の 2 つを一定として、泥水注入後の経過時間と泥水浸透範囲の関係および地表面沈下量の関係を検討する。ただし、泥水浸透範囲は空洞の上方向のみについて記述し、空洞から離れる方向を正とする。まず、3 種の泥水圧との関係について見たのが図 5(a), (b) である。これらの図より、泥水圧の増加とともに地表面沈下量が減少し、また泥水圧が大きいくほど泥水浸透範囲が大きくなることから、これは、泥水浸透範囲が広範囲になるにつれて、泥水成分が空洞周辺地山に浸透・充填されるため、自重による地山の変形量が小さくなることによるものと思われる。次

図 5 泥水圧の影響

図 6 泥水比重の影響

図 7 土被りの影響

に、2 種の泥水比重との関係について見ると図 6(a), (b) のようであり、比重が大きくなるほど、泥水浸透範囲が小さくなるが、地表面沈下量は大きくなっている。比重の大きい泥水ほど固形物が多く含まれているため、空洞近傍地山材料の間隙で目詰り材のような役割を効果的に果たし、泥水成分が地山に浸透し難く、より厚い泥膜が形成され、地表面沈下量が小さくなると考えられるが、逆の結果となっている。この理由は、今回地山材料に乾燥した珪砂を用いたことによるものと考えられる。すなわち、泥膜が地山材料の間隙に形成されても、さらに奥部に浸透する泥水中に CMC 中の繊維状の物質がかなり存在した可能性があり、その結果浸透範囲の大きい低比重の泥水の方が小さな地表面沈下となったと思われる。最後に、3 種の土被りに対する関係について見たのが図 7(a), (b) である。ただし、実験番号③の土被りの比 $D : H = 1 : 2$ の沈下量は、地山材料の崩壊により測定できなかった。この結果より、今回の実験範囲では土被りが小さくなるにつれて地山の変形量が大きくなり、地山の崩壊に至ることが分かる。これは、土被りが小さいほど空洞周辺で発生した変形が地表に影響を及ぼすためである。一方、土被りが大きい場合には、泥水浸透範囲が大きく、かつ地表面沈下量が小さくなる傾向にあることから、泥水の地山への浸透による地表面沈下抑制効果が期待される。

いま泥水の浸透範囲は空洞の上方向のみを述べたが、ここでこの上下方向の差異について検討する。一例として図 8 に、推進管

図8 空洞上下方向における泥水注入後の経過時間と泥水浸透範囲の関係

表4 形成された泥膜の厚さ

実験番号	測定方向 (mm)			
	上	下	左	右
①	2.0	3.0	1.0	2.0
②	1.0	3.0	2.0	2.0
③	(-)	(-)	(-)	(-)
④	1.0	1.0	1.0	0.0
⑤	2.0	5.0	3.0	2.0
⑥	2.0	3.0	1.0	1.0

図9 解析モデル

径と土被りの比 $D:H = 1:4$ 、泥水圧 0.07 kgf/cm^2 、泥水の比重を 1.15 とした実験番号④における泥水注入後の経過時間と泥水浸透範囲の関係を示す。ただし、泥水浸透範囲は空洞の上下方向について記載し、空洞から離れる方向を正としている。この図より、空洞の下方向よりも上方向に泥水が浸透しやすいことが分かる。また、固化した泥膜は上部よりも下部の方が厚いことが観察された。これは、泥水の構成成分の比重の違いによるものと考えられる。すなわち、泥水中の比重の小さい成分が上部に、その大きい成分が下部に徐々に分離し、結果的に空洞の上下部で泥膜の形成に差が生じたと思われる。また、泥膜が形成されるとこの泥膜がろ過材として作用し、泥水のろ過の進行とともに泥膜はさらに成長し、泥膜の厚さが増大する。このように泥膜の厚さが増大するにつれて、空洞近傍地山材料の間隙で目詰め材の役割を果たしやすくなるため、泥膜の薄い空洞上部の方が逸水しやすかったと考えられる。表4には、実験番号①～⑥における形成された泥膜の上下左右方向の厚さを示している。この表からも、泥膜は上部よりも下部方向に厚く形成されていることが分かり、いま述べた理由を裏づけている。

以上の実験結果から、泥水の種々の特性によって定量的には異なることも多いが、定性的には適切な泥水を地山に圧入浸透させることにより、空洞周辺の地山中に泥水中の固形分、例えば CMC の繊維物質等が充填され、さらに泥水圧が作用することにより空洞壁面に強固な泥膜が形成されて、地山が安定な状態に保たれると言える。また、この推進管外周の余掘り箇所形成された泥膜の内側で推進管を推進させれば、推進抵抗の明らかな低下を得ることが可能であると思われる。

4. 数値解析の泥水加圧式推進工法への適用

近年、飽和-不飽和領域が混在した地山内における地下水流れ、あるいは地下水流場における物質の移動現象に関する研究が盛んに行われてきている⁷⁾。この中でも、特にオイリアン・ラグランジアン法⁸⁾は、物質移動を評価する上で極めて有効な方法とされており、この手法を用いることにより本工法の特徴である泥水の掘削地山への影響について検討することが可能であると思われる。そこで、前節の模型実験より得られた結果との比較により、オイリアン・ラグランジアン法の本工法への適用性の可否について検討した。

4・1 オイリアン・ラグランジアン法について⁸⁾

オイリアン・ラグランジアン法は、物質の移流分散に伴う濃度変化をラグランジェ的手法およびオイラー的手法によりそれぞれ求めるという特徴を有する。

オイラー的手法とは、有限要素法等で通常用いられている固定座標系、すなわちある点 (x, y, z) を解析対象として、その点を通る物質の流量や濃度を算出する方法であり、この手法により分散に伴う濃度変化が求められる。一方、ラグランジェ的手法では、浸透場中に存在する粒子の時間経過に伴う移動を取り扱う。すなわち、浸透流速から対象粒子の時刻ごとの位置を直接求める方法であり、この手法により移流に伴う濃度変化が求められる。

上述の両手法の特徴を併せもったオイリアン・ラグランジアン法では、以下のように物質輸送解析が行われる。まず、解析対象は有限要素に分割され、これとは別に移流の計算に必要な移動粒子が配置される。次に、有限要素法による浸透流解析より各節点の流速が算出され、この流速が有限要素メッシュとは別に配置された移動粒子に補間される。これにより、移動粒子は補間された流速に従って移流し、移動後の粒子位置がラグランジェ的手法により求められる。ここで、移流のみでは粒子濃度は変化しないので、移流前後の粒子濃度は等しい。移流後の移動粒子位置が算出された後、粒子濃度は移動粒子を含有する要素の節点に内挿され、各節点における移流による濃度が求められる。最後に、オイラー的手法である有限要素法により分散に伴う濃度変化が算出され、これと先に得られた移流による濃度変化の和として解析対象の移流分散による濃度変化が求められる。以上の解析過程を規定の時間ステップまで繰り返す。

4・2 泥水加圧式推進工法への適用

泥水加圧式推進工法では、先述のようにオーバーカットした余掘り部に高濃度の泥水を適切な圧力で注入することにより、地山側に浸透流を生じさせ、地山の土粒子の間隙に目詰め作用を起こしながら泥膜および泥水の浸透層が形成される。その結果、泥膜を介して地山側の地下水圧と余掘り部側の泥水圧の間に圧力差が生じるため、地山側の土粒子は受働状態におかれ、土粒子の移動崩落が抑えられると考えられる。そこで、余掘り部には一定の濃度および圧力を有する泥水が存在し、この泥水成分が浸透水として地山に分散すると仮定し、以下の解析により泥水注入後の泥水浸透範囲について検討した。ただし、ここで用いる泥水の濃度とは、溶質を水以外の泥水成分と仮定した場合の、泥水全体の重量に対する溶質重量の百分率である。また泥水の浸透層とは、泥膜の外側に泥水成分が浸透する領域のことを意味する。

4・3 解析モデルおよび解析方法

図9に解析モデルを示す。本モデルは、前節の模型実験を想定するために2次元鉛直断面をとり、 $1,000 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ の均質な乾燥地山に直径 100 mm の空洞が掘削されたものである。浸

図10 空洞周辺の要素および節点

表5 解析に用いたパラメータ

D/H	1/4	D/H	1/4
泥水圧 (kgf/cm ²)	0.07	透水係数 (cm/s)	3.0×10^{-3}
泥水比重	1.15	縦分散係数 (cm)	2.0
地盤密度 (g/cm ³)	1.50	横分散係数 (cm)	0.4
間隙率	0.30	拡散係数 (cm ² /s)	2.0×10^{-5}

透流解析については、両側面および底面を不透水境界とし、空洞周辺縁の水頭を既知とした。また移流分散解析に関しては、空洞円周縁の濃度を既知とした。移流の計算に必要な移動粒子は、図10に示すように空洞縁およびその周辺部の節点に均等配置した。ここで、図中の黒丸は一定の濃度を有する節点、白丸は濃度0の節点である。泥膜は、泥水注入後瞬時に形成される⁹⁾。そこで、本解析では時刻 $t = 0$ のみ黒丸で表された節点に濃度を有する粒子が存在し、それ以降は余掘り部から濃度をもった粒子が供給されないと仮定した。また、 $t = 0$ 以降は黒丸で表される節点から移流が生ずると考える。なお、本解析では泥膜の形成過程すなわち泥膜厚さの経時変化に関してシミュレートできないので、泥水注入後の地山への浸透範囲をもとに本工法への適用性の可否について検討した。浸透流はダルシーの法則に従うものとし、移流分散解析には前述のオイラリアン・ラグランジアン法を用いた。表5に解析に用いるパラメータを示す。

4・4 解析結果および考察

図11(a), (b)に解析結果の一例を示す。これらの図は、余掘り部に泥水を注入した後、120秒および720秒経過後の泥水の濃度分布を示したものであり、10~50%の泥水濃度をコンターで記載している。これらの図より、泥水の浸透層は泥水注入後直ちに(a)図のように空洞縁近傍に均等に形成されることが分かる。そして、時間が経過するにつれて上下左右方向に浸透し、(b)図で示されるような浸透層が形成されていく。このことから、泥水注入直後に空洞周辺に泥水が浸透し、先述の泥水成分が拡散していくものと思われる。また、空洞縁近傍には泥水注入直後に泥水濃度の濃い部分が卓越するため、この影響により泥膜が形成されることが考えられる。さらに、泥水注入後に空洞周辺に浸透層が形成されることから、地下水の空洞への流入の防止および泥水成分の地山間隙中への充填による地山の安定性の確保等の効果が期待できる。

次に、泥水注入後の経過時間と泥水浸透範囲の関係について図12に示す。ただし、泥水浸透範囲は空洞の上下方向について記

図11 泥水の濃度分布

図12 泥水注入後の経過時間と泥水浸透範囲の関係

載し、空洞から離れる方向を正としている。また、泥水の浸透範囲は泥水濃度が10%以上の範囲を示している。この図より、空洞の下方よりよりも上方に泥水成分が浸透しやすいことが明らかであるが、この結果は前掲図8で示した実験結果と同様である。

これらのことから、オイラリアン・ラグランジアン法を用いることにより、泥水加圧式推進工法における泥水の地山への浸透現象を説明することができると考える。そこで次章では、この解析手法を用いて、実際の現場を想定して泥水の地山への浸透特性に関する検討を行う。

5. 泥水の地山への浸透特性

5・1 解析モデルおよび解析方法

図13に解析モデルを示す。本モデルは典型的な現場を模したもので、土被り6.5m、地下水位4.5mの現場に直径1,280mmの空洞が掘削された左右対称2次元鉛直断面の右半分である。なお、推進管内径は1,000mm、推進管の厚さは90mm、余掘り部

図13 解析モデル

図14 移動粒子配置図

表6 解析に用いたパラメータ

泥水比重	1.53	1.40	1.15
初期泥水濃度	0.55	0.50	0.20
泥水圧 (kgf/cm ²)	地下水压 + 0.50		地下水压 + 0.25
土質名	砂礫	粗砂	シルト質細砂
土粒子密度 (g/cm ³)	2.7	2.7	2.7
透水係数 (cm/s)	3.0×10^{-2}	7.0×10^{-3}	9.0×10^{-4}
間隙率	0.40	0.24	0.10
縦分散係数 (cm)	0.70	0.80	1.0
横分散係数 (cm)	0.14	0.16	0.20
有効拡散係数 (cm ² /s)	6.6×10^{-6}	4.0×10^{-6}	1.7×10^{-6}

は 50 mm である。

浸透流解析については、底面および対称軸を不透水境界とし、右側面の圧力水頭を既知とした。また、余掘り部には一定の泥水圧が作用するように一定の圧力水頭を作用させた。厳密には、推進管の高低差に伴う圧力水頭の差をも考慮する必要があるが、現場では推進管の上下左右方向から一定圧力の泥水が送泥ポンプより注入される¹⁰⁾ため、本解析では余掘り部に一樣の泥水圧が地山に作用すると仮定した。移流分散解析に関しては、空洞円周縁の濃度を既知とした。移流の計算に必要な移動粒子は、図14に示すように空洞縁およびその周辺部の節点に均等配置した。ここで、図中の黒丸は一定の濃度を有する節点、白丸は濃度0の節点である。また、図15に示すように時刻 $t = 0$ のみ黒丸で表された節点に濃度を有する粒子が存在し、それ以降は余掘り部から濃

度をもった粒子が供給されないと仮定した。さらに、 $t = 0$ 以降は黒丸で表される節点から移流が生ずると考える。表6に解析に用いるパラメータを示すが、これらは実際に施工された現場のデータを参考にしたものである。

5・2 泥膜形成と泥水浸透の効果

泥水加圧式推進工法は、前述のようにオーバーカットした余掘り外周部に粉末粘土、CMC、逸泥防止剤等を混合させた液状の泥水を注入し、掘削壁面とその近傍に泥膜を形成させ、土被り等の荷重に対して一体構造として挙動させることにある。すなわち、本工法における地山の安定性は、注入泥水により形成された泥膜と泥水成分の地山中への浸透の相互作用により確保される。そこで、まず本工法における泥膜形成および泥水浸透の効果について述べる。

余掘り外周部に注入された泥水は、泥水圧が地下水压より大きい場合、ダルシーの法則に従いながら掘削壁面とその近傍に浸透し、地山中の間隙より大きな泥水成分は、地山表面に堆積し泥膜が形成される。形成された泥膜はろ材として作用し、ろ過の進行とともに泥膜はさらに成長する。この際、土被り等の荷重は、余掘り外周部に充填された一定圧力の泥水が泥膜を介して地山に作用することにより支持され、掘削地山の安定性が確保される¹¹⁾。一方、泥水の浸透層では、地山中の間隙に泥水成分が満たされ、この間隙に存在する泥水のゲル化により地山の粘着力が増大する。例えば宮森¹²⁾は、標準砂とベントナイト8%、CMC 0.05%の泥水を混合した供試体の粘着力を三軸圧縮試験より求めた結果、 $0.1 \sim 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の値が得られたと報告している。したがって、泥水の地山への浸透により地山の粘着力は改善されるが、泥水が地山に浸透しやすいほど余掘り外周部には泥膜が形成され難い傾向にあり¹³⁾、逸泥に伴う泥水圧の低下等の問題を引き起こす可能性が高い。

これらのことを踏まえて、解析結果をもとに泥水の地山への浸透様式をはじめ、泥水圧や泥水比重、地山特性と注入泥水の地山への浸透挙動の関連性について以下で検討する。

5・3 泥水の浸透様式

まず、泥水が余掘り部に注入された後の泥水の地山への浸透様式について検討する。図16(a)~(c)は、粗砂地山中の余掘り部に泥水を注入した後、2, 10, 20分経過後の泥水の濃度分布をそれぞれ表したものである。ただし、泥水濃度は初期濃度の50%から10%まで10%刻みのコンターで表し、地山には地下水压よりも 0.5 kgf/cm^2 大きい（以下、 $+0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の泥水圧と記載する）泥水圧が作用している。また、図中の斜線は推進管であり、その外側に余掘り部が存在している。これらの図より、注入時間の経過とともに泥水成分が徐々に地山に浸透し、地山に移流

図16 泥水の濃度分布

図 17 泥水注入後の経過時間と泥水浸透範囲の関係（泥水圧が異なる場合）

図 18 泥水注入後の経過時間と泥水浸透範囲の関係（泥水比重が異なる場合）

図 19 泥水注入後の経過時間と泥水浸透範囲の関係（地山特性が異なる場合）

拡散していることが分かる。また、泥水成分は推進管の下方向よりも上方向に浸透しやすい傾向にある。これは、推進管周辺の余掘り箇所と地下水圧よりも大きな泥水圧が余掘り部に一様に作用しているためである。すなわち、推進管周辺の圧力水頭は推進管上下部で一定であるが、位置水頭は推進管上部の方が大きいため、位置水頭と圧力水頭の和として表される全水頭は推進管上部の方が大きくなる。この結果、注入泥水の流速は推進管上部の方が大きくなり、推進管の上方向に泥水成分が浸透しやすい結果が得られたと考えられる。

次に、余掘り部縁に形成される泥膜について検討する。前掲図 16(a)～(c)より、泥水注入時間の経過とともに、初期濃度の 50 % コンターは推進管上部で余掘り部から上方向に若干拡がっていることが分かる。一方、推進管側部および下部では、初期濃度の泥水が余掘り部縁にほぼ保たれている。このことから、解析に用いた粗砂地山では、推進管上部では地山側に若干逸泥する可能性が認められる。一方、推進管側部および下部では、泥膜が余掘り部縁に形成されることを示唆している。

したがって、この解析結果からも現場や先述の模型実験による観察結果と同様の傾向、すなわち泥水の浸透範囲が小さいほど余掘り部縁近傍に泥膜が形成されやすいことが裏付けられる。これは、余掘り部周辺地山に泥水成分の迅速な目詰まりにより形成された泥膜が、さらなる泥水成分の浸透に対して摩擦抗力を発生させ、泥水成分の地山への浸透速度の低下を促すことに起因していると考えられる。

5・4 泥水圧および泥水比重の影響

泥水圧および泥水比重が泥水の浸透に及ぼす影響について検討する。まず、図 17 に泥水圧が異なる場合の泥水注入後の経過時間と泥水浸透範囲を示す。ただし、泥水浸透範囲は泥水濃度 10 % の範囲を示し、推進管の鉛直上方向について記載したものである。また、推進管から離れる方向を正とし、砂礫地山中にそれぞれ $+0.25 \text{ kgf/cm}^2$ および $+0.50 \text{ kgf/cm}^2$ の泥水圧を作用させた場合について示している。この図より、泥水圧が増大するにつれて泥水の浸透速度が増加するため、泥水の浸透範囲が増大していることが分かる。また、両者とも泥水注入後 3 分程度で泥水の浸透速度が低下しており、余掘り部周辺に泥水成分の目詰まりが若干生じていることが推測される。このことから、泥水圧は余掘り部周辺の泥膜形成に必要な時間にはほとんど影響がないと思われるが、泥水圧が大きいほど泥水のろ過作用が促進されるため、地山への泥水成分の浸透に伴う地山の粘着力の向上が期待される。また、土被り等の荷重に対しても、より大きな支持能力を発揮す

るが、過剰な泥水圧は地表の隆起等の問題を発生させる可能性がある。

次に、泥水比重の泥水の浸透に及ぼす影響について述べる。既報⁶⁾では、泥水を構成する粉末粘土、逸泥防止剤、CMC、水の配合量と泥水比重や粘性、液性限界、塑性限界等の関係について検討し、泥水成分がこれらの諸特性値に複雑に関与していることを示した。ここでは、泥水成分の配合比は変化せず、泥水成分の量のみが増加すると仮定して泥水比重を算出し、これの泥水の浸透に及ぼす影響について検討する。これは、泥水比重が大きいほど泥水濃度が大きいことを意味する。図 18 に泥水比重 1.15 および 1.40 における泥水注入後の経過時間と泥水浸透範囲を示す。ただし、泥水浸透範囲は泥水濃度 10 % の範囲を示し、推進管上方向について記載したものである。また、推進管から離れる方向を正とし、粗砂地山中に $+0.50 \text{ kgf/cm}^2$ の泥水圧を作用させた場合について示している。この図より、大きな差異は見られないが、比重の大きい泥水は小さいそれより浸透し難い傾向にあることが分かる。これは、泥水比重の増大とともに余掘り部周辺で泥水成分のより迅速な目詰まりにより泥膜が形成されやすくなることに起因していると考えられる。したがって、比重の大きな泥水を注入した方が余掘り部周辺に迅速に泥膜が形成され、土被り等の荷重に対して速やかに支持できると思われる。一方、より比重の大きな泥水は、送泥の際より高圧なポンプを必要とし、場合によっては送泥が停止する可能性もあるため、これらを総合的に判断する必要がある。

以上のように、泥水の地山への浸透挙動や泥膜の形成は、泥水圧および泥水比重によって明らかに異なるため、これらの値の選択、決定に当たっては、現場地山特性をも考慮して十分に検討する必要がある。

5・5 地山特性の影響

図 19 に、4 種の地山における泥水注入後の経過時間と泥水浸透範囲を示す。ただし、図中の A～D はそれぞれ砂礫、粗砂、シルト質細砂およびシルト混じり細砂地山であり、いずれにも $+0.50 \text{ kgf/cm}^2$ の泥水圧を作用させた場合である。また、泥水浸透範囲は、推進管上方向について泥水濃度 10 % の範囲を示し、推進管から離れる方向を正としている。この図より、シルト質細砂およびシルト混じり細砂地山と砂礫および粗砂地山の泥水浸透挙動が大きく異なっていることが分かる。まず、透水係数の小さなシルト質細砂およびシルト混じり細砂地山では、泥水注入後約 3 分程度までは泥水の地山への急激な浸透が生じているが、それ以降はほぼ停止している。一方、透水係数の大きな砂礫および粗

図20 泥水の濃度分布

砂地山は、泥水注入後約3分程度まではシルト質細砂およびシルト混じり細砂地山とはほぼ同様の傾向を示しているが、これらの地山ではそれ以降も浸透速度を若干低下させながら泥水が地山に浸透し続けていることが分かる。これは、シルト質細砂やシルト混じり細砂の透水係数が砂礫や粗砂に比してかなり小さいため、泥水注入後直ちに余掘り部周辺に泥膜が形成され、それ以降ろ過の進行が抑制されることに起因していると思われる。その結果、これらの地山では、加圧された泥水が泥膜を介して地山に効果的に作用するため、地山の安定性が確保されと考える。一方、砂礫や粗砂地山では、時間の経過とともに泥水浸透範囲が拡大し続けるため、シルト質細砂やシルト混じり細砂地山のような泥膜形成の効果はほとんど期待できない。

このことをさらに詳しく見るため、前掲図16と同じように、図20(a)、(b)に砂礫およびシルト混じり細砂地山中の余掘り部に泥水を注入した10分後の泥水の濃度分布をそれぞれ示す。これらの図より、シルト混じり細砂地山の初期濃度50%コンターは、余掘り部縁に保たれていることが分かる。一方、砂礫地山の初期濃度コンターは、余掘り部からかなり広がっている。このことから、シルト混じり細砂地山では、逸泥に伴う泥水圧の低下は少ないと考えられるが、砂礫地山では注入泥水の逸泥に伴い泥水圧が低下する可能性が極めて高いと思われる。したがって、砂礫のような透水係数の大きな地山では、泥水圧の低下に起因する問題、例えば地山と推進管の接触による管の締め付けやその結果生ずる推進抵抗の増加、あるいは地表構造物の沈下等を引き起こす可能性が高いため、このような地山に対しては、余掘り部周辺の目詰まりを促進させるために、泥水中に粒径の大きな骨材や化学添加剤等を混入させる必要がある。

以上のことから、透水係数の小さな地山では注入泥水が地山に対して効果的に作用するが、透水係数の大きな地山では泥水が効果的に作用せず、逸泥する可能性が高いことが分かる。また、今回の解析では解析対象地山の特性は均一で変化しないと仮定しているが、実際の現場では推進管周辺の地山特性が複雑に変化する場合も少なくないため、この点にも十分留意する必要がある。

6. 結 言

本論文では、泥水加圧式推進工法の根幹をなす注入泥水の掘削

地山への影響および浸透挙動等を解明するために、模型実験の結果をもとにオイリアン・ラグランジュ法による数値解析法の適用性の確認を行った。また、この数値解析法を用いて泥水の地山への浸透様式をはじめ、泥水圧や泥水比重、地山特性と注入泥水の地山への浸透挙動の関連性等についてシミュレートした。これらの結果を要約すれば以下のようである。

(1) オイリアン・ラグランジュ法を用いることにより、泥水加圧式推進工法における泥水の地山への浸透現象を明らかにできる。

(2) 泥水の浸透範囲が小さいほど余掘り部縁近傍に泥膜が形成されやすい傾向にある。

(3) 泥水圧および泥水比重が異なると注入泥水の地山への浸透挙動は異なり、現場に適した泥水圧および泥水比重を選択する必要がある。

(4) 透水係数の小さな地山では、注入泥水が地山に対して効果的に作用するが、透水係数の大きな地山では、泥水が効果的に作用せず逸泥する可能性が認められる。

(5) 泥水が地山に浸透することにより、空洞周辺の地山中に泥水中の固形分が充填され、さらに泥水圧が作用することにより空洞壁面に強固な泥膜および浸透層が形成され、地山が安定な状態に保たれる。したがって、この浸透層を把握することは、地山の安定性を考慮する上で重要である。

(6) 推進管外周の余掘り箇所適切に泥水を注入し、泥膜を形成させた中で推進管を推進させれば、推進抵抗の低下を図ることができると考える。この推進抵抗関連については別報で報告する予定である。

謝辞 本研究を遂行するに当たり、多大のご協力を得た当学科技官・藤田修一氏および同大学院・平野啓一氏（現、住友建設（株））、嶋田健二郎氏に感謝の意を表する。また、当学科助手・一ノ瀬友友博士には、本研究への貴重なご意見やご検討をいただいた。ここにお礼を申し上げる。

引 用 文 献

- 1) Katano, S. and Ogawa, T. : Proc. of Int. Congress on Tunneling and Ground Conditions, p. 151-156, (1994)
- 2) 土質工学会：推進工法の調査・設計から施工まで、新日本印刷、(1986)
- 3) 井上雅文：第14回「最近の推進工法講習会テキスト」、p. 71-88, (1994)
- 4) Hough, C. M. : Tunnels and Tunneling, July, p. 51-52, (1978)
- 5) 例えば、Matsui, K., Shimada, H. and Ichinose, M. : Proc. of 15th Int. Conf. on Ground Control in Mining, p. 589-598, (1996)
- 6) 島田英樹・浦野敏一・松井紀久男：第16回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, p. 53-58, (1995)
- 7) 例えば、小林 晃：第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p. 241-246, (1987)
- 8) 西垣 誠：地下水学会誌, 33, p. 265-276, (1991)
- 9) 島田英樹・松井紀久男：第5回北海道応用地学合同研究会論文集, p. 33-38, (1995)
- 10) 中本 至：最新の推進工法のすべて、理工図書、(1986)
- 11) 沼尾博之・島田英樹・松井紀久男：平成8年度資源・素材学会九州支部春季例会講演要旨集, p. 10-12, (1996)
- 12) 宮森建樹：第8回土質力学研究発表会, p. 825-826, (1973)
- 13) Shimada, H. and Matsui, K. : Proc. of Int. Sym. on Mining Science & Technology, p. 287-292, (1996)