

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

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

島田 英樹*・嶋田 健二郎**・松井 紀久男***
Hideki SHIMADA, Kenjiro SHIMADA and Kikuo MATSUI

Recently, for the concern of safety in construction as well as for environmental and economical reasons, a small-diameter shallow tunneling method has become important for outside plant engineering. 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 2-D Eulerian Lagrangian analysis.

1. はじめに

現在、わが国の都市部においては、上下水道、ガス、電力、通信ケーブル等の管設工事が急増し、地下空間の利用が過密化、深層化しつつある。このような状況の中で、既存の構造物を損傷あるいは支障することなく管を埋設できる工法として推進工法が脚光を浴びてきている¹⁾。

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支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。そこで、このような問題点の解決を可能にしたものが泥水加圧式推進工法である。この工法は、推進管外周の余掘り箇所に泥水を注入し、泥水圧を作用させながら掘削壁面とその近傍に泥膜を形成させることにより地盤の土荷重を保持し、その中で推進管を推進させ、推進抵抗の低下を図るという点で従来の推進工法と異なっている²⁾。

筆者らは既に、深度の浅い地山を対象とした泥水加圧式推進工法の安全かつ効果的な施工を対象とした一連の研究報告³⁾を行ってきたが、本報告では、主に注入泥水の地山への浸透挙動を解明するために数値解析によるシミュレーションを行い、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種々検討した結果について述べる。

2. 泥水加圧式推進工法

図1に本工法の標準施工図を示す。本工法では、推進管の先端に取り付けられた掘進機の推力を元押しジャッキの推進力によって推進管を介して、その耐荷力の範囲内で与えて掘削が行われる。本工法の特徴は、

* 正会員 工博 九州大学助教授 工学部資源工学科
** 非会員 九州大学大学院 工学研究科資源工学専攻
*** 正会員 工博 九州大学教授 工学部資源工学科

図1 泥水加圧式推進工法の標準施工図

1 : 地山
2 : 泥膜
3 : 充填材
4 : 推進管

図2 推進管とその周辺地山の模式図

解析モデルは、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場合を模した左右対称2次元鉛直断面の右半分であり、図3に示すようである。なお、推進管内径は1,000mm、推進管の厚さは90mm、余掘り部は50mm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ため、本解析では余掘り部にほぼ一様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4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、泥水注入後はほぼ瞬時に形成されるので³⁾、図5に示すように、時間 $t = 0$ 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

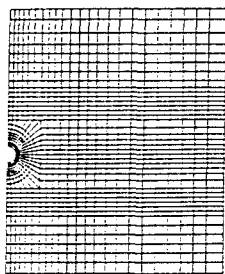


図3 解析モデル

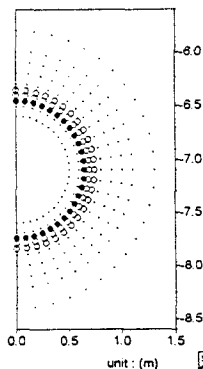


図 4 移動粒子配置図

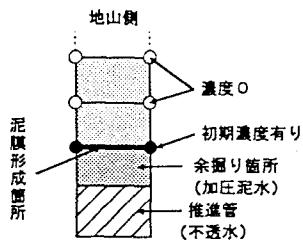


図5 推進管周辺の要素および移動粒子の配置

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する。本解析では、泥水注入後の地山への泥水浸透範囲について検討するため、泥膜の厚さについては厳密に考慮していない。浸透流はダルシーの法則に従うものとし、移流分散解析にはオイラリアン・ラグランジアン法を用いた。表1に解析に用いたパラメータを示す。

4. 解析結果および考察

4.1 泥水の浸透様式

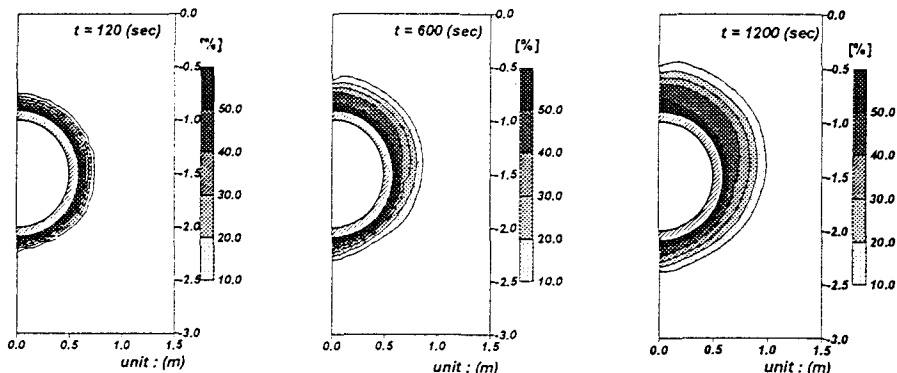
粗砂地山中の余掘り部に泥水を注入し、2、10、20分経過した後の地山への泥水の浸透状態、すなわち濃度分布を図6(a)~(c)に示す。図中で泥水濃度は初期濃度の50%から10%までのコンターで表し、また図中の斜線部は推進管、破線（図中では読み取り難いが）は余掘り部縁を表している。なお、地山には地下水位よりも 0.5kgf/cm^2 大きい（以下、 $+0.5\text{kgf/cm}^2$ の泥水圧と記載する）泥水圧が作用している。これらの図より、注入時間の経過とともに泥水成分が徐々に地山に浸透し、地山に移流拡散していることが分かる。また、泥水成分は推進管の下方向よりも上方向に浸透しやすい傾向にある。これは、推進管周辺の余掘り箇所は地下水位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は一定であるが、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。

余掘り部縁に形成される泥膜について見ると、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広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保たれている。このことから、解析に用いた粗砂地山においては、推進管上部では、地山側に若干逸泥する可能性が示唆され、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している。

以上の結果より、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分かる。また、現場や模型実験による観察結果でも同様の傾向が得られている³⁾。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える。一方、形成される泥膜の厚さに関しては、泥膜が迅速に形成されると泥膜形成後の加圧時間が増大し、泥膜の厚さも増大すると予想される。

表1 解析に用いたパラメーター

泥水比重	1.57	1.40	1.15
初期泥水濃度	0.55	0.50	0.20
泥水圧 (kgf/cm^2)	地下水位+0.50		地下水位+0.25
土質名	砂礫	粗砂	シルト質細砂 シルト混じり細砂
土粒子密度 (g/cm^3)	2.7	2.7	2.7
透水係数 (cm/sec)	3.0×10^{-2}	7.0×10^{-3}	9.0×10^{-4}
間隙率	0.40	0.24	0.10
配分係数 (cm)	0.70	0.80	1.0
膜分係数 (cm)	0.14	0.16	0.20
有効拡散係数 (cm^2/sec)	6.6×10^{-6}	4.0×10^{-6}	1.7×10^{-6}



(a) 2分経過後

(b) 10分経過後

(c) 20分経過後

図6 泥水の濃度分布

4.2 泥水圧および泥水比重の影響

まず、図7に $+0.25\text{kgf/cm}^2$ 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%以上で推進管の鉛直上方向について記している。また、推進管から離れる方向を正とし、地山は砂礫である。この図より、泥水圧が大きい方が泥水の浸透速度が増加するため、その浸透範囲が増大していることが分かる。また、両泥水圧とも泥水注入後2分程度で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、地山への泥膜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、泥水比重が浸透に及ぼす影響について見る。既報⁵⁾では、泥水を構成する粉末粘土、マサ土、逸泥防止剤、CMCおよび水の配合量（以下泥水成分とする）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、泥水成分の配合比から定まる泥水比重の浸透に及ぼす影響について検討する。なお、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8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%以上で推進管上方向について記している。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である。この図より、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。しかし、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。

以上のことから、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明らかに異なり、現場に適した泥水圧および泥水比重、すなわち泥水成分の配合比を選択する必要があると思われる。

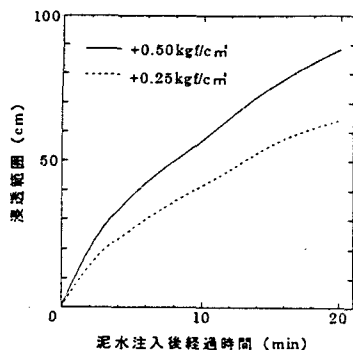


図7 泥水注入後の経過時間と泥水浸透範囲の関係（泥水圧が異なる場合）

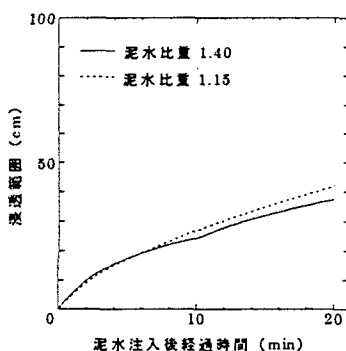


図8 泥水注入後の経過時間と泥水浸透範囲の関係（泥水比重が異なる場合）

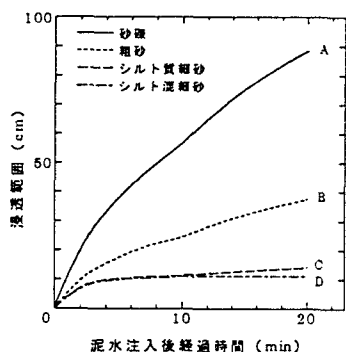


図9 泥水注入後の経過時間と泥水浸透範囲の関係（地山特性が異なる場合）

4.3 地山特性の影響

図9に地山特性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%以上で推進管上方向について記している。また、推進管から離れる方向を正としており、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中に+0.50kgf/cm²の泥水圧を作用させた場合である。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。すなわち、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、泥水の地山への浸透範囲が狭く、また泥水注入後約3分程度までにほぼ浸透が終了している。一方、透水係数の大きな砂礫および粗砂地山は、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ほぼ同様の傾向を示しているが、それ以降も浸透速度を若干低下させながらも浸透し続けて浸透範囲がかなり拡大することが分かる。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、それ以降の浸透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则认为。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。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、透水係数の大きい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⁶⁾、この点に十分留意する必要がある。

5. おわりに

本報告では、推進加圧式推進工法における注入泥水の地山への浸透挙動を解明するために数値解析によるシミュレーションを行い、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検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 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、透水係数の大きい地山では、泥水が効果的に作用せず逸泥する可能性が認められる。

6. 参考文献

- 1) 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
- 2) 井上雅文：長距離泥水推進(LDC)工法とその実績，第14回「最近の推進工法講習会テキスト」，pp.71～88，1994
- 3) 例えば，島田英樹・平野啓一・松井紀久男：泥水加圧式推進工法における泥水の掘削地山への影響について，第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.126～130，1996
- 4) 西垣 誠：地下水数値計算法(13)物質輸送のその他の解析法，地下水学会誌，33，pp.265～276，1991
- 5) 島田英樹・浦野敏一・松井紀久男：泥水加圧式推進工法における泥水特性の掘削地山への影響について，第16回西日本岩盤工学シンポジウム論文集，pp.53～58，1995
- 6) Shimada, H. & K. Matsui: Stability of Soil around Shallow Tunnel Using Pipe Jacking, Proceedings of International Symposium on Mining Science & Technology, pp.287～292, 1996
- 7) 謝 辞

本研究をまとめるにあたり、ご協力を得た昭和土木(株)技術顧問・今泉七郎氏および当学科技官・藤田修一氏に感謝の意を表す。また、解析にあたりご協力を得た当学科大学院・平野啓一君(現在、住友建設(株))にお礼を申し上げる。