

(27) 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

Effect of Mud Slurry on Stability of surrounding Soil in Using Pipe Jacking

島田 英樹*・平野 啓一**・松井 紀久男***

Hideki SHIMADA, Keiichi HIRANO and Kikuo MATSUI

Recently, small-diameter shallow tunnels have been often constructed by using the pipe jacking which is one of the sewage tunnel drivage methods. Simply, the system involving the pushing or thrusting of the drivage 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 performance of the mud slurry around the pipes by means of laboratory tests and 2-D Eulerian Lagrangian analysis.

1. 緒 言

わが国の都市開発事業において、推進工法は埋設工法の中で有効な工法として多用され、急速な進歩を遂げてきている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、図1に示すように推進管外周の余掘り箇所泥水を注入し、泥水圧を作用させながら掘削壁面とその近傍に泥水被膜（以下、泥膜と呼ぶ）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⁾。

本報告では、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の中^{3)~5)}で、主に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述べる。

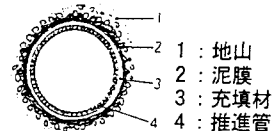


図1 推進管とその周辺
地盤の模式図

2. 模型実験による検討

2.1 実験方法および試料

実験は、1,000×600×200mmの土槽内に空洞を設けた図2に示す装置を用いて行った。この空洞に外径100

* 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

以上の手順で表1に示すように土被り深さ、泥水圧、泥水の比重をパラメータとして実験を行った。

図 3 (a), (b) に 3 種の泥水圧における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それぞれ示す。ただし、泥水浸透範囲は空洞の上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。これらの図より、まず泥水圧の増加とともに地表面沈下量が減少することが分かる。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が分かる。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。

Time (min)	0.07 kg/cm² (cm)	0.10 kg/cm² (cm)	0.15 kg/cm² (cm)
0	0.0	0.0	0.0
1	0.0	0.5	4.5
2	0.0	1.0	6.0
3	0.0	1.5	6.5
4	0.0	2.0	6.8
5	0.0	2.5	7.0
6	0.0	2.5	7.0
7	0.0	2.5	7.0
8	0.0	2.5	7.0
9	0.0	2.5	7.0
10	0.0	2.5	7.0

Time (min)	Settling Range (cm) at Ratio 1.15	Settling Range (cm) at Ratio 1.28
0	0.0	0.0
2	0.6	0.3
4	1.0	0.5
6	1.1	0.6
8	1.3	0.7
10	1.5	0.8
12	1.5	0.9

Figure 10 is a line graph showing the relationship between the diameter of the water injection hole (D) and the height of the water column (H) over time. The y-axis is labeled "泥水湧出高 (cm)" (Mud water surge height in cm) and ranges from 0 to 4. The x-axis is labeled "泥水注入後時間 (min)" (Time after mud water injection in min) and ranges from 0 to 10. Three curves are plotted for different D/H ratios: $D/H=1/4$ (solid circles), $D/H=1/3$ (open circles), and $D/H=1/2$ (solid triangles). All curves start at (0,0) and increase over time, with higher D/H ratios resulting in higher surge heights.

Time (h)	Settlement (cm) at 0.07 kgf/cm²	Settlement (cm) at 0.10 kgf/cm²	Settlement (cm) at 0.15 kgf/cm²
0	0.00	0.00	0.00
1	0.10	0.08	0.05
2	0.15	0.12	0.08
3	0.22	0.15	0.10
4	0.28	0.18	0.12
5	0.32	0.20	0.13
10	0.34	0.21	0.14
15	0.35	0.22	0.14

泥水注入後時間 (h)	地表面沈下量 (cm) (Ratio 1.15)	地表面沈下量 (cm) (Ratio 1.28)
0	0.00	0.00
0.5	0.12	0.32
1.0	0.15	0.38
2.0	0.18	0.42
4.0	0.20	0.46
6.0	0.21	0.48
8.0	0.22	0.48
10.0	0.22	0.48

Time after water injection (h)	Distance (cm) for $D/H=1/4$	Distance (cm) for $D/H=1/3$
0	0.00	0.00
0.5	0.12	0.12
1.0	0.14	0.14
2.0	0.18	0.20
4.0	0.20	0.25
8.0	0.21	0.27
12.0	0.22	0.28

図5 十被りの影響

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	0.075	1.15
⑤	1/4	0.150	1.15
⑥	1/4	0.100	1.28

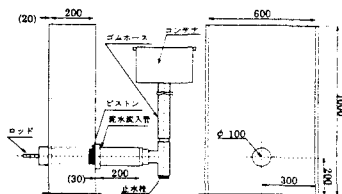


図2 模型実験装置(unit:mm)

ことによるものと考えられる。すなわち、泥膜が地山材料の隙間に形成されても、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。

図5(a),(b)に3種の土被りにおける泥水注入後の経過時間と泥水浸透範囲および地表面沈下量の関係を示す。ただし、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。これらの図より、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变形量が大きくなり、地山の崩落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。

図6に推進管径と土被りの比D:H=1:4、泥水圧0.075kgf/cm²、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易いことが分かる。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隙間で目詰め材の役割を果たし易くなるため、泥膜の薄い空洞上部の方が逸水し易かったと考えられる。

表2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。この表からも先の結果と同様に泥膜は上部よりも下部方向に厚く形成される傾向にあり、前述の試験結果を裏づける。

以上のことから、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、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考えられる。また、推進管外周の余掘り箇所に適切な泥水を注入し、その中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。

3. 数値解析による検討

3.1 解析の概要

近年、飽和一不飽和領域が混在した地盤内における地下水の流れ、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⁶⁾。この中でもオイラリアン・ラグランジアン法⁷⁾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。そこで、本工法における泥水の浸透現象を解明するために、掘削地山周辺の物質輸送解析を行った。

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、地山の土粒子の隙間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動状態におかれ、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

表2 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

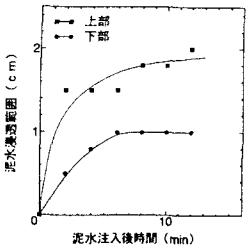


図6 空洞の上下方向における泥水注入後の経過時間と泥水浸透範囲の関係

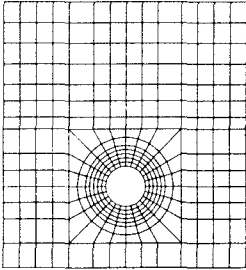


図7 解析モデル

泥水注入後の泥水浸透範囲について種々検討した。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。

3.2 解析モデルおよび解析方法

図7に解析モデルを示す。本モデルは、上記の模型実験を想定するために2次元鉛直断面をとり、1,000×600mmの均質な乾燥地山に直径100mmの空洞が掘削されたものである。浸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8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⁵⁾。そこで、本解析では時間 $t=0$ 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。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、移流分散解析には前述のオイラリアン・ラグランジアン法を用いた。表3に解析に用いるパラメータを示す。

3.3 解析結果および考察

図9(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る。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と考

表3 解析に用いたパラメータ

D/H	1/4
泥水圧 (kgf/cm ²)	0.075
泥水比重	1.15
地盤密度 (g/cm ³)	1.50
間隙率	0.30
透水係数 (cm/s)	3.0×10^{-3}
縦分散係数 (cm)	2.0
横分散係数 (cm)	0.4
拡散係数 (cm ² /s)	2.0×10^{-5}

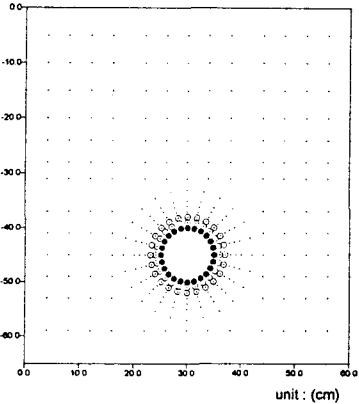


図8 空洞周辺の要素および節点

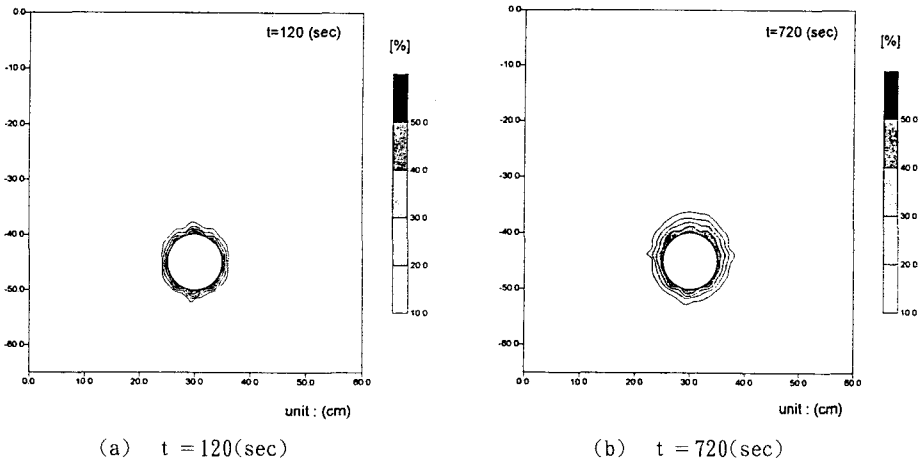


図9 泥水の濃度分布

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10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%の範囲を示している。この図より、空洞の下方よりも上方に泥水成分が浸透しやすい傾向にあることが分かる。これは、前掲図6の空洞の下方よりも上方に泥水が浸透し易いという結果を裏づける。したがって、泥水の浸透範囲を推定することは、地山の安定性を検討する上で極めて重要であることが分かるが、本解析のこのような傾向は乾燥地山の模型実験を対象に解析したことに起因するものと考えられ、地下水が存在するような実現場ではさらなる検討が必要であると思われる。

以上のことから、本解析により泥水成分が地山に浸透することにより形成される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と考えられ、今後さらに検討を加える予定である。

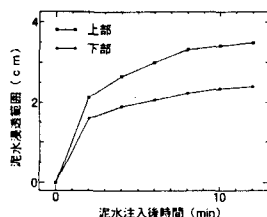


図10 泥水注入後の経過時間と泥水浸透範囲の関係

4. 結 言

今回の模型実験および数値解析により以下のことが明らかとなった。

- (1) 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的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。
- (2) 推進管外周の余掘り箇所適切に泥水を注入し、その中で推進管を推進させれば、明らかに推進抵抗の低下を図ることができる。
- (3) 泥水成分が地山に浸透することにより形成される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。

5. 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) 島田英樹・松井紀久男：LDC工法による深度の浅い地山掘削に関する検討，第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 216～220，1995
- 4) 島田英樹・松井紀久男：LDC工法による深度の浅い掘削地山の安定性について，第5回北海道応用地学合同研究会論文集，pp. 33～38，1995
- 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) 例えば、小林 晃：オイラー・ラグランジェ手法を用いた岩盤内の拡散挙動解析，第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 241～246，1987
- 7) 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

6. 謝 辞

本研究をまとめるにあたり多大のご協力を得た昭和土木（株）技術顧問・今泉七郎氏に感謝の意を表する。また、実験にあ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・嶋田健二郎君にお礼を申し上げます。