

推進工法を用いたパイプルーフ工法適用時の地山の安定性

STABILITY OF SOIL IN THE CASE OF AN APPLICATION OF A PIPE JACKING SYSTEM ON THE PIPE ROOF METHOD

島田英樹*・松井紀久男**・森田 智***・松元文彦***・酒井栄治***

Hideki SHIMADA, Kikuo MATSUI, Tomo MORITA, Fumihiko MATSUMOTO and Eiji SAKAI

Tunnels in an urban area, in many cases, are constructed in soft ground which contains underground water, near existing facilities and structures. Structural stability for the tunnel and also the nearby structures and facilities is vital in this kind of work. Slurry pipe jacking was firmly established as a special method for the non-disruptive construction of underground pipelines of sewage systems. This method utilizes mud slurry that is formed around the pipes in order to stabilize the surrounding soil. In the pipe roof method the tubing elements that are constructed by slurry pipe jacking are near each other longitudinally, and create a rigid and stable lining before the excavation of the main tunnel. This paper discusses the application of a slurry pipe jacking system on the pipe roof method by means of numerical analysis. Because of the rigid behavior of the lining, the results show little subsidence, making this method a reliable method of constructing large tunnels with small cover in urban areas.

Key Words : slurry pipe jacking, pipe roof method, stability of soil, numerical analysis

1. はじめに

推進工法は都市部における上下水道、ガス、電力、通信ケーブル等のライフライン施工の需要により、非開削工法の中でも有効な方法として利用され急速な進歩を遂げてきている¹⁾。しかし現在、都市部における下水道普及率は既に 65%を超えており、今後下水管渠埋設への推進工法の需要は低減することが予測され²⁾、また、他の生活関連整備に伴う管路構築においても同様に一段落の傾向にある³⁾。このような理由から、推進工法の新たな適用分野が模索されており、現在、山岳トンネルの長距離先受け工法や地下浅部のアンダーパス先受け工法への利用等が図られているが、推進工法を用いた先受け工法が地山の安定性に及ぼす影響等の問題点については、これまでに十分には行われていない。本報告では、この問題を解析により種々検討した結果について述べる。

2. 先受け工法について

(1) AGF 工法とパイプルーフ工法

地下浅部に大断面空洞を開削する場合、地表の沈下あるいは既存の地下埋設物への影響を抑制するために AGF 工法やパイプルーフ工法などの先受け工法が適用される。

AGF (All Ground Fasten) 工法は、空洞開削前に切羽からドリルジャンボ等により長尺の鋼管を打設し、この鋼管周辺にグラウト材などを注入することにより、開削周辺地山の改良補強をはじめ、地山の緩みの抑制や施工の安全性を確保するために用いられる。一方、パイプルーフ工法は、トンネルの坑口を断崖斜面に造成する必要がある。

* 正会員 博士 (工学) 九州大学大学院助教授 工学研究院地球資源システム工学部門

** 正会員 工学博士 九州大学大学院教授 工学研究院地球資源システム工学部門

*** 非会員 アルファシビルエンジニアリング㈱

る場合や、坑口周辺地山が軟弱な場合、あるいは土被りが薄い場合、掘削断面外周に沿って掘削方向に一定間隔で鋼管を挿入し、掘削断面に対して鋼管がループを形成することにより坑口を防護するために用いられる。しかし、パイプルーフ工法ではオーガーなどで削孔された後に鋼管が挿入されるが、この手法では長距離の削孔が不可能であるという欠点を有する。

(2) 推進工法を用いたパイプルーフ工法

推進工法は、主に推進用ヒューム管内径 800mm～3,000mm の下水道管渠埋設工事の施工法として多く用いられている。本工法は掘進機前面のカッター後方に隔壁を設け、切羽と隔壁間のカッターチャンバー内に泥水を圧送・充填し、切羽の安定を図りながら、カッターを回転させ、地山を掘削する工法である。掘削された地山は、このカッターチャンバー内で泥水と攪拌混合され、ピンチバルブを介して地上へ搬出される。使用される泥水は、一般に粉末粘土、CMC、逸泥防止剤等を混合させたものであり、図-1 に示すように、カッターチャンバー内の掘削外周に泥膜が、またその近傍地山に泥水浸透層が形成される。その結果、地下水の流入防止および地山の土粒子の移動崩落が抑えられ、地山の安定性確保等の効果が得られる。なお本工法では、推進管の先端に取り付けられた掘進機の推力を発進立坑に据え付けた元押しジャッキの推進力によって推進管を介して与えられる。また本工法では、推進管径よりも常に 20～60mm 程度大きく地山が掘削される。この管と地山の間に生じる余掘り部に、推進抵抗の低減を図るために掘削対象地山に適合された滑材が充填される。

このように、本工法では泥水による切羽の安定を図りながら、オーバーカットした推進管周辺と地山の空隙に滑材を注入させることにより地山の崩壊および推力の低減が可能であることから、長距離（推進長が 200m 以上）および急曲線（曲率半径が 50m 以下）推進工事において非常に有効な手法として多く採用されており、本工法により種々の特性を有する地山に対しても、200m を超える推進距離および曲率半径が 50m 以下の推進工事を、補助工法なしで施工できるという実績が得られている⁴⁾。

このように、推進工法は推進管を元押しジャッキの推進力で埋設することが可能であり、かつ長距離の推進も可能なため、上述したパイプルーフ工法の欠点を解消することが出来ると考えられ、推進工法の手法をパイプルーフ工法に適用することは極めて有効的である。この場合、鋼管を埋設する坑口付近に元押しジャッキを上下操作自在のユニバーサル架台の上に据え付け、通常の推進工法と同様の手法により鋼管が推進される。設計された長さまで鋼管が推進された後、推進先端に取り付けられている掘進機が坑口まで戻ることができるように工夫されたリターン回収可能装置により、掘進機が坑口に引き戻されると鋼管のみが地山に残される。その後鋼管内の空間にはモルタルが充填される。このような方法を用いることで長距離のループを形成することが可能になり、種々の大断面トンネルに対する補助工法として十分利用できる⁵⁾。

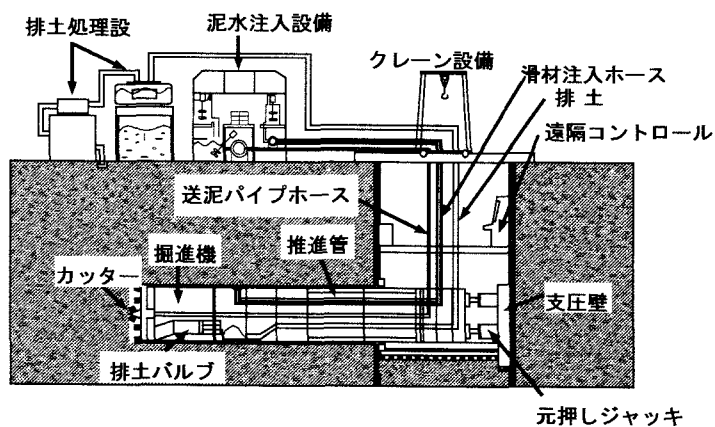


図-1 推進工法の模式図

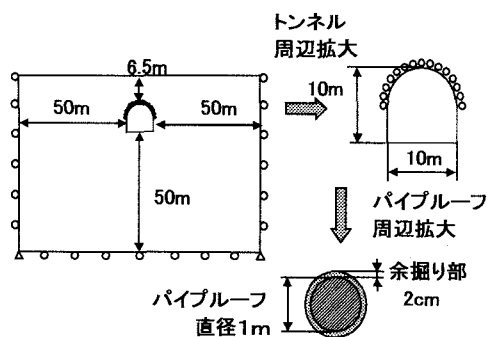


図-2 解析モデル（パイプルーフ工法）

3. AGF 工法とパイプルーフ工法の比較

推進工法の手法を用いたパイプルーフ工法による補助工法の有用性について確認するためには、まず従来の補助工法である AGF 工法との比較を行う必要がある。そこで、まず両者を主要空洞掘削の補助工法として適用した場合の周辺地山へ安定性について検討するために数値解析を行った。

(1)解析方法

解析に用いたトンネルのモデルは、土被り 6.5m、幅 10m、高さ 10mの馬蹄形であり、周辺地山はシルト混じり粗砂である。この馬蹄形トンネルの掘削時に AGF 工法およびパイプルーフ工法による先受け工法を施した場合および先受け工法を施さない場合の地山の破壊状態ならびに地表沈下量を比較した。解析には、有限要素解析プログラム Phase²を用いて Mohr-Coulomb の破壊条件式を適用した。図-2 に推進工法を用いたパイプルーフ工法を適用した場合のモデルを示す。なお、トンネルの内壁とパイプルーフの間隔を 50cm、パイプルーフの直径は 1.0 m、余掘り部の厚さは 2.0cm、パイプルーフの本数は 15 本とした。また、先述のように推進工法は、掘進機前面のカッター後方に隔壁を設け、切羽と隔壁間のチャンバー内に泥水を圧送・充填し、切羽の安定を図りながらカッターを回転させ、掘削・推進が行われるので、推進工法によりパイプルーフを推進する一連の工程を図-3 のようにモデル化した。なお、推進終了後、余掘り部に裏込め材を充填させることによって余掘り部を固結させる工程についてもモデルに反映させる必要があるため、隣接するパイプルーフの推進と同時に前段階で推進したパイプルーフの余掘り部に注入した充填材が固結すると仮定した。この解析に用いた各種特性値を表-1 に示す。

次に、AGF 工法を適用した場合のモデルを図-4 に示す。このモデルは 1.2m の鋼管を打設角度 5° でトンネル上半分に 180° 展開したものを想定している。しかし、このモデルを正確に評価するためには 3 次元解析を用いる必要があるが、ここでは簡易的に鋼管が届く範囲が地盤改良されると仮定した。表-2 に AGF 工法を適用した場合に用いた各種特性値を示す。

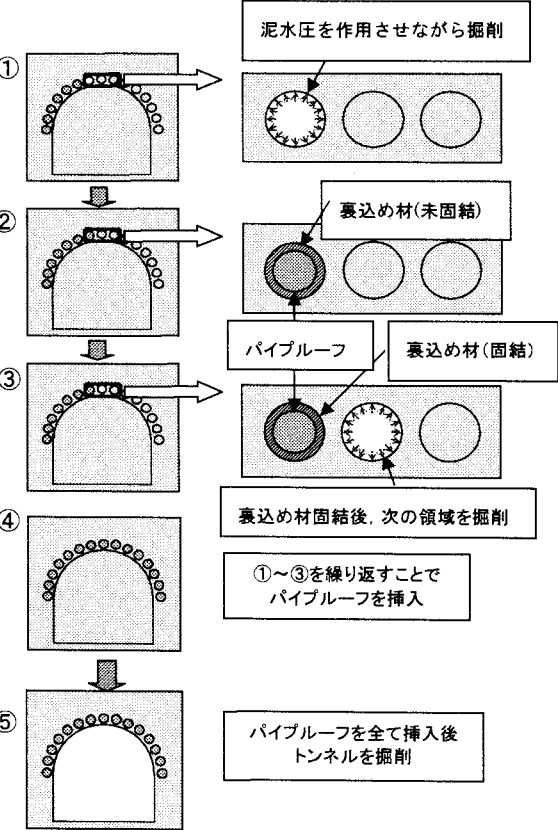


図-3 パイプルーフを推進する一連の工程

表-1 解析に用いたパラメータ (パイプルーフ工法)

	密度 (MN/m ³)	ヤング率 (MPa)	ポアソン比	圧裂引張強度 (MPa)	内部摩擦角(°)	粘着力 (MPa)
シルト混じり粗砂	0.018	40	0.35	0.04	35	0.03
鋼管	0.786	1.0×10 ⁵	0.25	150	50	150
裏込め材固結前の余掘り部	0.018	0.1	0.49	10000	89.9	10000
裏込め材固結後の余掘り部	0.018	3650	0.2	1.9	40	3.95

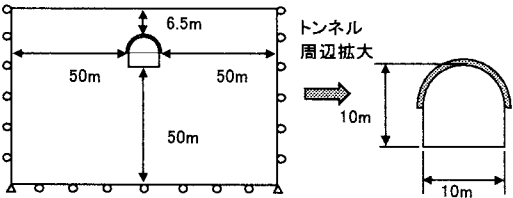


図-4 解析モデル (AGF 工法)

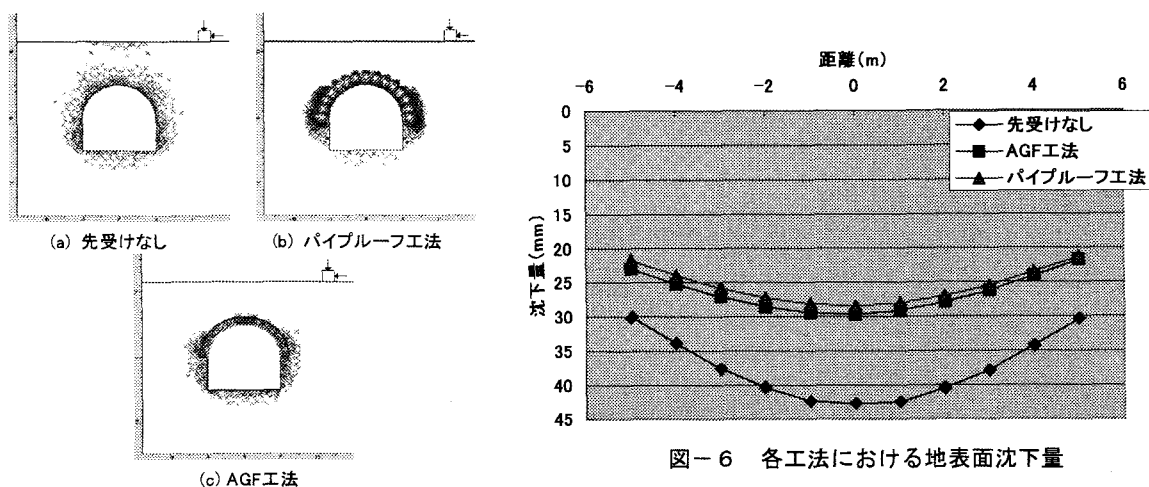
表-2 解析に用いたパラメータ (AGF 工法)

	密度 (MN/m ³)	ヤング率 (MPa)	ポアソン比	圧裂引張強度 (MPa)	内部摩擦角(°)	粘着力 (MPa)
シルト混じり粗砂	0.018	40	0.35	0.04	35	0.03
改良領域の物性値	0.018	80	0.35	0.08	40	0.06

(2) 解析結果および考察

図－5 (a)～(c)に先受け工法を施さなかった場合、先受け工法のパイプルーフ工法、AGF 工法を施した場合のトンネル周辺地山の破壊領域をそれぞれ示す。これらの図より、先受け工法を施さなかった場合には、破壊領域が地表面にまで到達しているのに対し、先受け工法を施した場合では、いずれもトンネル周辺部に破壊領域が留まっており、トンネル開削に伴う地表面への影響が抑制されていることが判る。また、パイプルーフ工法と AGF 工法について比較すると、パイプルーフ工法ではパイプルーフ周辺に破壊領域が集中しているのに対し、AGF 工法では破壊領域がトンネル上部に一様に広がっている。さらに、パイプルーフ工法では、トンネル下部領域の破壊が効果的に抑制されている。

図－6には、トンネル天端上の地表面からの距離と地表面沈下量の関係を示す。この図から、地表面沈下量は先受け工法の有無により、かなり大きな差が生じることが分かる。また、パイプルーフ工法と AGF 工法の地表面沈下量は同程度の値を示している。本解析では、AGF 工法をモデル化するために鋼管が届く範囲全てが地盤改良されていると仮定したが、実際には確実に地盤が改良されるのは鋼管付近のみであるため、AGF 工法の場合には本解析結果よりも改良効果は小さくなると思われる。したがって、このことを併せて考慮すると、先受け工法としてはパイプルーフ工法の方が、地山の安定性を確保する上で優位性が認められる。



図－6 各工法における地表面沈下量

図－5 各工法における破壊領域

4. パイプルーフ工法適用時の周辺地山の安定性

前章では、先受け工法としてのパイプルーフ工法の優位性について述べたが、パイプルーフ工法を設計する際には、用いるパイプの径や本数、トンネル内壁とパイプ間の距離についての指針が必要である。そこで、これらのパラメータを変化させた解析を実施した。

(1) パイプルーフの本数

まず、パイプルーフの本数が地表面沈下量に及ぼす影響について検討する。解析方法および解析に用いたパラメータは3.1節のとおりであり、パイプルーフの本数を0, 9, 11, 13, 15および17本とした。図－7 (a)～(f)に各パイプルーフの本数による破壊領域を、図－8にトンネル天端上の地表面からの距離と各本数による地表面沈下量の関係をそれぞれ示す。

これらの図より、パイプルーフの本数が増大するほど破壊領域が減少し、また地表面の沈下量が減少することが分かる。また、より詳細に見ると、パイプルーフの本数に係わらずトンネル側壁部の破壊が卓越している。これは、トンネル下半分のパイプルーフにより保護されていない箇所の変形が大きいいため、その変形に追従して破壊が進展したと考えられる。さらに、パイプルーフの本数が9本の場合は天端付近まで破壊領域が卓越しているが、11本以上ではトンネルの斜め上部方向の破壊領域は認められなくなる。これは、パイプルーフが9本の場合、

各パイプルーフが受け持つ土被り圧が相対的に大きいためである。しかし、パイプルーフが 11 本以上になると隣接するパイプルーフは鉛直方向で重なる領域が存在するため、1 本あたりが負担しなければならない土被り圧が減少するためである。このような理由から、パイプルーフの本数が増大するとともにトンネル上部の破壊領域が減少していくと判断される。

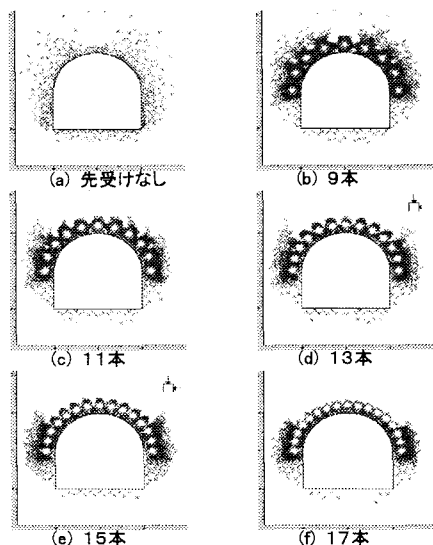


図-7 破壊領域（パイプルーフの本数を変化させた場合）

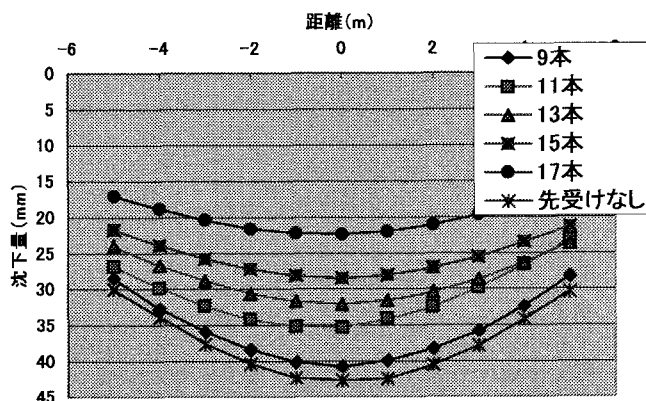


図-8 地表面沈下量（パイプルーフの本数を変化させた場合）

(2) トンネル内壁とパイプルーフの間隔

次に、トンネル内壁とパイプルーフの間隔が地表面沈下量に及ぼす影響について検討する。解析方法および解析に用いたパラメータは 3.1 節のとおりであり、トンネル内壁とパイプルーフの間隔を 10, 30, 50 および 90cm とした。図-9 (a)～(d) にトンネル内壁とパイプルーフの間隔による破壊領域を、図-10 にトンネル天端上の地表面からの距離と各間隔による地表面沈下量の関係をそれぞれ示す。

これらの図より、間隔が 10cm のときの破壊領域および地表面沈下量が最も小さいことが分かる。また、この間隔が増大するにつれて破壊領域も地表面沈下量も大きくなる。これは、パイプルーフがトンネル内壁に近いほどトンネルが有する剛性とパイプルーフの剛性が一体となって土被り圧等に抗するためであると思われる。したがって、この間隔距離が増大するほど、パイプルーフのみの剛性で土被り圧を保持するために破壊領域が増大したと考えられる。この結果から、トンネル内壁とパイプルーフ間の間隔が小さくなるほど、破壊領域および地表面沈下を抑制できると言えるが、実際の施工においては、パイプルーフがトンネル内壁に近いとパイプルーフ自身がトンネル内に崩落する恐れが生じるため、施工上の余裕を含めてある限度間隔を取る必要がある。

(3) パイプルーフの径

最後にパイプルーフの径が地表面沈下量に及ぼす影響について検討する。解析方法および解析に用いたパラメータは 3.1 節のとおりであり、パイプルーフの径を 0.8, 1.0, 1.2 および 1.4m とした。図-11 (a)～(d) にパイプルーフの径による破壊領域を、図-12 にトンネル天端上の地表面からの距離と各径による地表面沈下量の関係をそれぞれ示す。

これらの図より、パイプルーフの径が増大するほど破壊領域および地表面沈下量は減少することが分かる。これはパイプルーフの径が増大するほど、隣接するパイプルーフ間の距離が小さくなり、各パイプルーフに作用する土被り圧等が相対的に小さくなるためである。したがって、このパイプルーフの径の大小は、先述したその本数との関係を考慮して検討しなければならない。

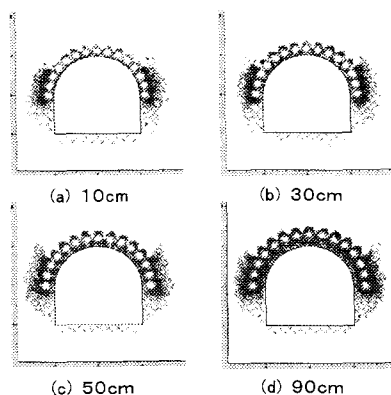


図-9 破壊領域(トンネルパイプルーフ間の間隔を変化させた場合)

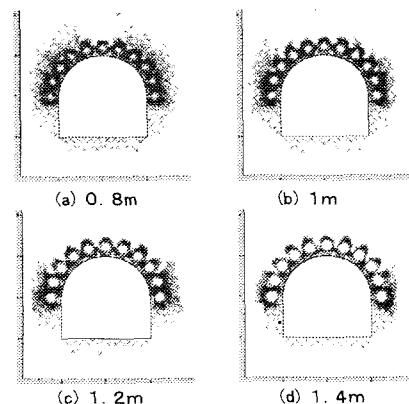


図-11 破壊領域(パイプルーフの径を変化させた場合)

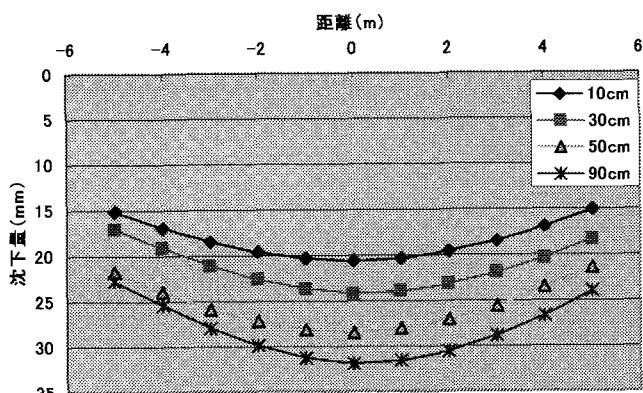


図-10 地表面沈下量(トンネルパイプルーフ間の間隔を変化させた場合)

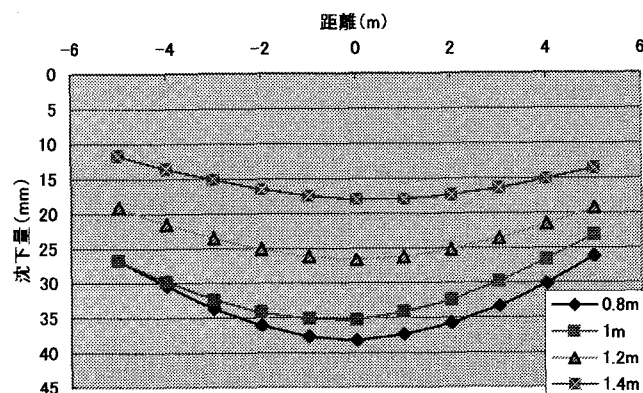


図-12 地表面沈下量(パイプルーフの径を変化させた場合)

5. まとめ

2種の推進工法を用いた先受け工法の周辺地山の安定性に及ぼす影響等を明らかにするために、解析により種々検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 先受け工法としては、パイプルーフ工法の方がAGF工法よりも優位性がある。
- 2) パイプルーフ数の増大、あるいはパイプルーフ径の増大により、周辺地山の破壊領域の減少ならびに地表面沈下の抑制が可能である。
- 3) トンネル内壁とパイプルーフ間の間隔が小さくなるほど、破壊領域および地表面沈下を抑制できる。しかし、実際の施工においては、パイプルーフがトンネル内壁に近いとパイプルーフ自身がトンネル内に崩落する恐れがあるため、ある程度の間隔をとる必要があると思われる。

今後、推進工法によるパイプルーフ工法の適用例が増えてくることが見込まれているので、実績データをも含めてさらに検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) Katano, S. & Ogawa, T. : Proc. of Int. Congress on Tunneling Ground Conditions, pp.151-156, 1994
- 2) 日本下水道協会：下水道推進工法の指針と解説, 2000
- 3) 酒井栄治・島田英樹：第27回「最新の推進工法施工技術」講演会テキスト, pp.59-92, 日本プロジェクトリサーチ, 2003
- 4) 島田英樹・松井紀久男：資源と素材, Vol.113[No.9], pp.669-676, 1997
- 5) 酒井栄治・森田 智・島田英樹・松井紀久男：トンネル工学研究論文・報告集, Vol.13, pp.485-490, 2003