

長尺鋼管フォアパイリング（AGF工法）の 効果に関する研究

武内秀木¹・河上清和²・折橋恒春³・中川浩二⁴

¹正会員 農修 五洋建設(株) 技術研究所(〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1)

²正会員 工修 五洋建設(株) 名古屋支店(〒460-8614 名古屋市中区錦3-2-1 信愛ビル5F)

³正会員 工修 五洋建設(株) 大阪支店(〒530-0001 大阪市 北区梅田2-5-25 ハートSOSAKA17F)

⁴正会員 工博 山口大学工学部教授 社会建設工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2557)

最近、切羽安定対策や地表面沈下対策として長尺鋼管フォアパイリングが用いられることが多くなってきたが、その効果のメカニズムは必ずしも明らかになっていないようである。本研究では、長尺鋼管フォアパイリングの一種であるAGF工法(All Ground Fasten Method)の効果、施工実績データと室内模型実験データおよび現場計測データを使って、分析・検討した。その結果、施工実績データと室内模型実験からAGF工法には切羽安定効果があることが、現場計測データから地表面沈下抑制効果は注入式フォアポーリングよりも高いことが、明らかになった。さらにAGF工法を適用したトンネルでは地表面沈下曲線と鋼管たわみ曲線にはいくつかの特徴的な挙動があることがわかった。

Key Words: tunnel auxiliary method, umbrella pipe, surface settlement

1. まえがき

従来、坑口部や未固結地山、崖錐地山および強風化地山など低強度地山でのトンネル掘削では、切羽安定対策や地表面沈下抑制対策として、トンネル断面を数個に分割することによって一掘削断面積を小さくし施工されることが多かった。しかし、最近では上記のような低強度地山でも、種々の補助工法を併用することによって上半断面または全断面のまま掘削する傾向にある。このような傾向は、大断面を一度で掘削することにより地山を傷める回数が少ないので良好なトンネルが建設できること、大型機械が使用できるので施工の高速化を図ることができることによって経済的にトンネルが建設できること等、合理的なトンネル施工への指向を反映している結果と考えられる。このように地形・地質が悪い条件下でも大断面のままでの施工が可能になった要因の一つとして、地山先行補強を目的とする長尺先受工法の採用があげられる。わが国で施工実績のある主な長尺先受工法としては、わが国で開発されたA

G F工法、パイプルーフ工法、M J S工法(Metro Jet System)、イタリアで開発されたアンブレラ工法、R J F P工法(Rodin Jet Fore Piling Method)がある。このうちAGF工法とアンブレラ工法は長尺鋼管フォアパイリングに分類され、M J S工法とR J F P工法は水平ジェットグラウトに分類される。長尺鋼管フォアパイリングは土木学会トンネル標準示方書[山岳工法編]によれば、切羽安定対策や地表面沈下対策に用いられるとされている¹⁾。AGF工法は1992年に実施工に適用されて以来、図-1に示すようにオリジナルの工法の他に種々の改良型工法が開発され年々増加し、1997年11月末には245現場の施工実績を示すに至っている。このように施工量が増加しているのは、トンネル掘削で一般的に使用される油圧ドリルジャンボと注入用の小規模な機械設備だけで切羽前方地山中に地山改良補強体が施工でき、しかも工法専門の特殊作業員でなく通常のトンネル作業員だけで施工が可能であるという理由によるところが大きい。一方、施工実績は増加し、施工状況の報告²⁾や現場計測結果の紹介³⁾およ

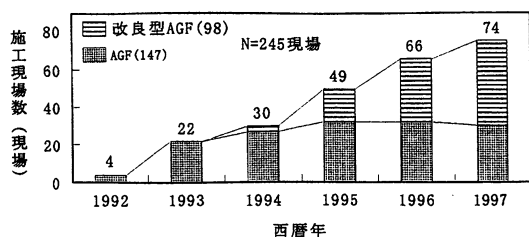


図-1 AGF工法の施工現場数

び模型実験での先受け効果の検討⁴⁾はなされているが、標準示方書に示された切羽安定効果と地表面沈下抑制効果を複数の現場計測データに基づいて定量的に分析した例は見られないようである。そこで本論文では、先ずAGF工法の効果のメカニズムについて分析し、その効果が切羽安定効果と沈下抑制効果に分けられることを示す。次にマサ土を使った室内模型実験結果と4トンネルの現場実績データに基づいて切羽安定効果と沈下抑制効果の程度を評価する。最後に地表面沈下および鋼管のたわみ実測データを詳しく紹介しAGF工法が施工された場合の地山挙動の特徴について明らかにする。

2. AGF工法の効果

(1) 効果の分析

ここではAGF工法の構成材料である鋼管と地山改良材の機能から効果の分析を行う。図-2はAGF工法の構成部材に着目してその効果を分析したものである。鋼管は削岩機の施工性からφ76.3~114.3mmのものが用いられ、トンネル外周地山中に放射状に打設される。鋼管は、トンネル縦断方向に着目すると支保工と地山で支持された梁材として機能し、鋼管の曲げ剛性によって切羽天端地山の沈下を抑制すると考えられる。またトンネル横断方向に着目すると、鋼管打設間隔を適切に設定することによって、鋼管間に「地山アーチ」が形成され土砂の抜け出しが防止されるものと考えられる。実施工でも、砂混じり崩積土地山で鋼管の剛性によって天端崩壊は防止できたが、鋼管打設間隔が広いことによって鋼管間からの土砂の抜け出しがたびたび懸念されたことが報告されている⁵⁾。施工実態調査⁶⁾でも打設間隔が広いほど切羽不安定の発生頻度が高い結果を示している。このように、鋼管の剛性と打設間隔が切羽天端地山の沈下や崩壊に対する安全性に影響することが確かめられている。地山改良材は、ウレタン系またはセメント系材料が用いられる。どちらも通常2.5MPa程度の高圧で鋼管内から地山中に圧入され、

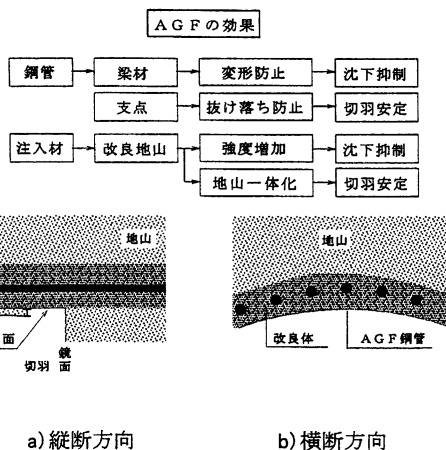


図-2 AGF工法の効果

鋼管周辺地山の土粒子または亀裂相互を結合固化する働きが期待されている。とりわけ砂質地山や亀裂性地山のような不連続地山を一体化し、ある程度の引張り強度を持った連続体地山に改良することによって、トンネル天端部の土砂の崩落や抜け出し防止が期待されている。実施工でも、シルト・砂・礫の互層からなるルーズな土砂地山で地山改良材の地山改良効果によって坑内への砂の落下が防止され、同時に沈下に対する抑制効果も認められたことが報告されている⁷⁾。また施工実態調査⁶⁾では素掘り面の剥落や崩落の発生割合は、粘性土よりも礫質土や砂質土の方が高くなっており、地山改良材の役割の重要性を示す結果となっている。以上、構成部材である鋼管と地山改良材からAGF工法の機能を分析すると、AGF工法の効果は切羽安定効果と沈下抑制効果として説明できる。

(2) 模型実験による評価

実施工現場でAGF工法の切羽安定効果と沈下抑制効果を評価することは、地山条件の制約や施工の安全性の面から難しい。そこで室内模型実験によって、先受工を施工しない場合と先受工を施工した場合の切羽安定状況や地表面沈下量を比較することによって先受工の効果を示す。図-3は切羽安定の安全率を指標にして地山強度と先受材剛性の関係を概念的に示したものである。強度の小さい地山で切羽の安定性を確保するためには、より剛性の高い先受材が必要になると考えられる。また同一強度の地山では、先受材の剛性が大きければ大きいほど地表面沈下量は抑制され、切羽安定の安全率も高くなると考えられる。実験では地表面沈下量と切羽面の押出し量に着目し先受材の効果を検討する。

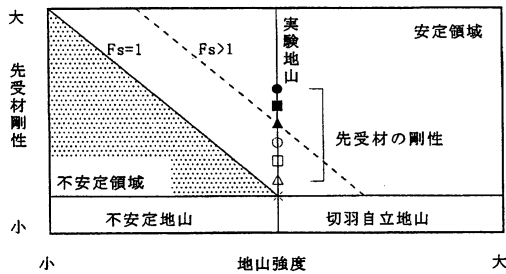


図-3 切羽安定性の模式図

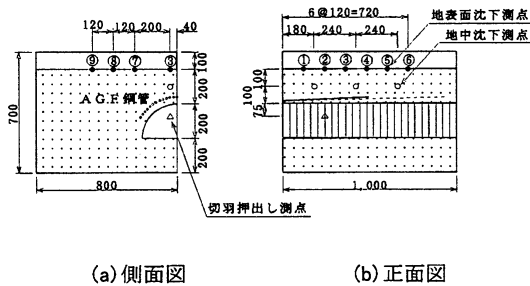


図-4 実験装置



写真-1 実験状況

a) 実験手法

模型の縮尺は1/25とし、実物での掘削直径10m相当のトンネルを想定した。実験の方法としては、直径40cmのトンネルの上半部分を掘削し地表面沈下量、地中変位量、切羽押し出し量および先受け材のひずみ量を測定するものである。実験に用いた土槽は、図-4に示すように幅100cm、奥行き80cm、高さ70cmである。トンネル掘削部分は掘削作業が容易なように上半断面のさらに半断面とした。土被り高さはAGF工法で実績が多く地表面沈下量が明確に生じるように20cm(0.5D ただしDはトンネル掘削直径)とした。実験地山は、図-3に示すように素掘りでは切羽が自立しない程度の地山を想定し、マサ土を一定の高さから篩いを通して自由落下させ作成した。地山改良材としては市販のスプレー糊を使った。掘削は写真-1に示すように人力とし、一掘削長は実トンネルで1mとなるように40mmとした。

b) 実験材料

模擬地盤の材料は土粒子の密度2.65g/cm³、均等

表-1 先受材諸元

材質	鋼棒	銅棒	銅管	アルミ棒
外径 mm	4	4	4	4
E・I kN・cm ²	26.4	15.1	11.5	8.9

係数は $D_{80}/D_{10}=11$ 、細粒分含有率は7.4%で粒度および含水比を調整したマサ土である。試験中を通じて含水比は4.5～5.0%で単位体積重量は14.0～14.2 kN/m³であった。支保材は先受工の効果が明確に表れるように、掘削面が崩壊しない程度の柔らかいものとし、材料は金網とスプレー糊とした。先受材は実際の鋼管の寸法および剛性から縮尺を考慮して、表-1に示すような4種類とした。このなかで曲げ剛性に関する相似則では銅棒がほぼAGF鋼管に相当するものである。地山改良域は鋼管部周辺地山に2層に分けてスプレー糊を一定時間吹付けることによってモデル化した。改良地山の強度は一面せん断試験の結果、粘着力 $C=0\sim 10\text{kN/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi=42\sim 45^\circ$ であった。支保工としては幅4cmに切断した6.5mmメッシュの溶接金網とスプレー糊(住友3M社製S333)を使った。

c) 実験ケース

実験Aとしては、素掘りの場合、支保工だけの場合、先受工として長さ50cmの銅棒を1.8cm(実寸で45cm)間隔に設置した場合について各々3ケース合計9ケースを行った。ただしこの長さの実験では沈下量が収束するまでのデータは採取できないので、実験Bとして先受工の長さを95cm(実寸で24m)とし、表-1に示す4種類の先受工設置の場合について各々3ケース合計12ケースについて行った。さらに外径は同一であるがより剛性の低いアルミ管、木材、軟質アルミ棒、麻紐について各々1ケースずつ行った。

d) 計測器

計測器の一覧を表-2に示した。地表面沈下量、地中沈下量および切羽押し出し量は棒状ダイヤルゲージを、先受材のひずみは箔ひずみゲージを使用して計測した。

e) 実験結果と考察

先受工による切羽安定効果を先受工の剛性および先受け長に着目して検討する。図-5は実験Aの結果で、鋼管中央部にあたる測点②での切羽距離と地表面沈下量の関係を示したものである。これによると、素掘りではどのケースも2基目掘削時に切羽は崩壊したが、支保工を設置すれば4間目まで切羽は自立した。これに対し先受工を設置することで切羽自立

表-2 計測器

計測項目	計測機器名	型式
地表面沈下量	棒状ダイヤルゲージ	SDP-100c
地中変位量	〃	〃
切羽押し量	〃	〃

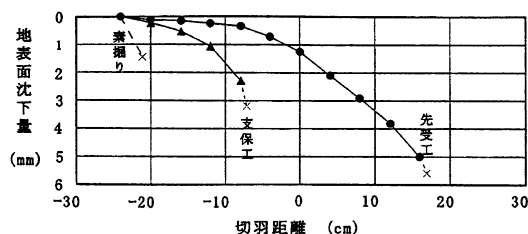


図-5 地表面沈下量 測点②(実験A)

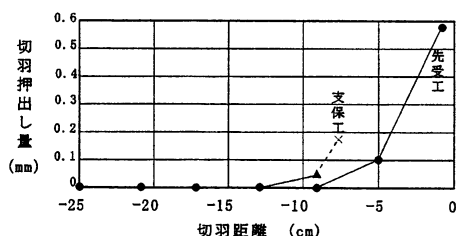


図-6 切羽押し量(実験B, 銅棒)

区間はさらに長くなった。この場合でも11間目掘削時に崩壊したが、これは崩壊時の先受け長が6~10cm(実寸では1.5~2.5mに相当)で、先受け長の不足により地山の支持力が不足し鏡面が崩壊したものである。地中沈下量についても同様の傾向が得られた。この実験により先受工には切羽安定効果があることが確認できた。図-5に示すように、地表面沈下量は掘削中は先受工がある場合の方がない場合より小さくなっており、先受工を設置することによる沈下抑制効果が認められた。図-6は実験Bの銅棒の場合の切羽部での地山押し量を示したものである。これによると支保工だけの場合は、切羽前方13cmから急激に押し量が大きくなり9~5cm(実寸で2.25~1.25m)の掘削中に切羽は崩壊している。これに対し先受工を施工した場合は9cmから急激に大きくなるが、切羽は自立し崩壊しない。すなわち先受工を施工することによって押し量が急激に増加する位置は切羽により近くなり、切羽の安定性は向上することがわかった。図-7は実験Bの結果であるが、先受工の剛性による地表面沈下量の違いを示したものである。軟質アクリル材と麻紐については剛性は不明であるが感触から木材よりは小さい。これらの材料は曲げ剛性がなくても引張り強度を有する部材でも

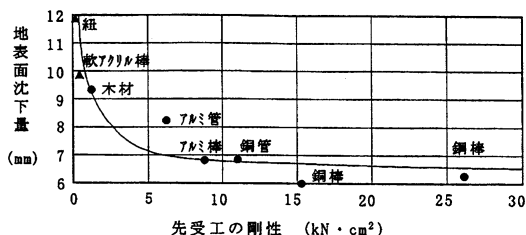


図-7 先受材剛性と地表面沈下量 測点③

少なくとも崩落防止の効果は期待でき、これが沈下抑制や切羽安定につながるかどうかをチェックすることを目的にしたものである。この地表面沈下量の計測値は掘削長はほぼ50cm(実寸で12.5m)で、先受け長は36cm(実寸で9m)以上はある場合のものである。これによると、多少のばらつきはあるが、全体的にみると剛性が大きいほど地表面沈下量が小さくなっており、同一強度の地山では、先受材剛性が大きければ大きいほど地表面沈下量は抑制されることが確認できた。

(3)現場計測データによる評価

現場計測によるAGF工法の沈下抑制効果の評価は、AGF工法を適用した場合と他の補助工法を適用した場合の地表面沈下量を比較することによって行う。以下、AGF工法を施工したトンネルのAGF工法適用区間を適用トンネルと記述し、他の補助工法を実施したトンネルの補助工法適用区間を比較トンネルと記述する。

a)適用トンネルと比較トンネルの地山条件

表-3は適用トンネルの地山条件等を示したものである。これらのトンネルでは、地形・地質条件からAGF工法を適用しなければトンネル掘削によって天端崩落や過度の地表面沈下および地すべりを誘発することが懸念され、対策工としてAGF工法が適用されたものである。適用トンネルの切羽観察では、いずれも次のような切羽状況であった。地山圧縮強度は「50kgf/cm²(4.9MPa)未満で、ハンマーの刃先がくい込み」、風化変質状況は「土砂状、粘土状、破碎、当初より未固結」、割れ目の間隔は概ね「5cm未満、破碎、当初より未固結」という状況である。しかし湧水はいずれも「なし~滴水程度」で、水による劣化は②トンネルにおいて若干見られる以外は「ほとんど見られない」。表-4は適用トンネルのAGF工法の選定理由と施工パターンを示したものである。本表の中で、シフト/延長の延長は第1シフトの管口から最終シフトの管先端までの水平距離である。拡張段数は次シフトの鋼管を打設するための

表-3 適用トンネルAGF施工区間の地山条件等

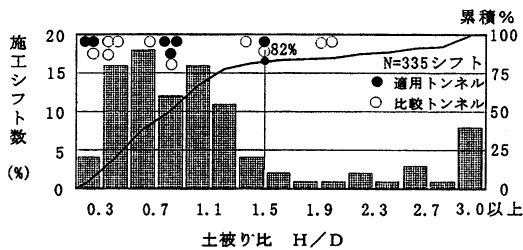
記号	坑口部土質	弾性波速度 (km/sec)	N値	土被り (m)	掘削径 (m)	掘削工法	鋼管沈下測定方法
①	凝灰質砂岩・泥岩互層	0.65	16	~9.0	12.0	ショートベンチ	ヒズミ計
②	崩壊性堆積土砂	0.8	3~8	1.7~15.4	11.0	側壁導坑	水平傾斜計
③	シルト・砂礫混合物	-	20	~8.6	12.9	ショートベンチ	//
④	風化花崗岩(マ土)	0.6~1.0	15~50	1.5~11.4	14.9	ショートベンチ	//

表-4 AGF工法の選定理由と施工パターン

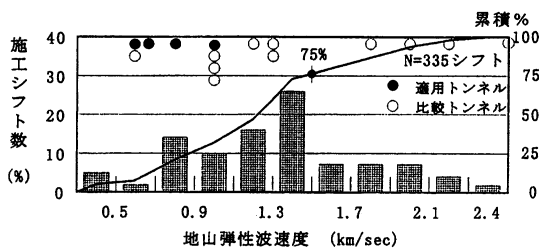
記号	選定理由	シフト/延長 (シフト/m)	拡幅段数	鋼管径 (mm)	肉厚 (mm)	間隔 (cm)	範囲 (°)	注入材
①	天端崩落, 地すべり誘発防止	2/18	1段	101.6	4.2	30	120	セメント系
②	天端崩落, 地すべり誘発, 偏土圧防止	4/39.5	4段	101.6	4.2	45	120	ウレタン系
③	天端崩落, 地表面沈下防止	3/30.5	3段	114.3	6.0	45	120	ウレタン系
④	天端崩落, 地表面沈下防止	4/39.5	3段	114.3	6.0	45	140	ウレタン系

表-5 比較トンネルの地山条件等

記号	坑口部土質	弾性波速度 (km/sec)	土被り (m)	掘削径 (m)	補助工法
⑤	強風化頁岩 崖錐堆積物	1.3~1.8	8	12.5	注入式フォアポ-リング*
⑥	土砂 風化粘板岩 砂岩	1.0~2.2	3~26	12.4	フォアポ-リング*
⑦	土砂 風化粘板岩	1.3~3.2	4~24	12.4	注入式フォアポ-リング*, フォアポ-リング*
⑧	砂岩頁岩互層 崩積土	1.0~2.0	3~18.5	12.4	注入式フォアポ-リング*
⑨	風化花崗岩 マ土	0.6~1.2	5~10	12.2	垂直縫地工法, フォアポ-リング*
⑩	段丘・崖錐性堆積物	1.0	4~15.5	11.4	注入式フォアポ-リング*



(a) 土被り別施工シフト数



(b) 弾性波速度別施工シフト数

図-8 AGF工法の適用地山

切り上げ段数である。すなわち4段は鋼管打設後曲げ加工寸法の異なる4種類の鋼製支保工を使って順次拡幅するものである。間隔は隣接鋼管との中心間隔で、範囲はトンネル中心とトンネルSLの交点を

中心にしたときの鋼管打設範囲の角度である。表-5は適用トンネルと比較するために、比較トンネルの地山条件、トンネル掘削径および適用補助工法を示したものである。比較トンネルの地形地質は低土被り、強風化、崖錐または崩積土地山と適用トンネルと比較的類似している。図-8はAGF工法が1996年3月までに適用された現場のうち、57現場 355シフトの土被り比と地山弾性波速度の分布を示したものである⁹⁾。この中には適用トンネルと比較トンネルの地山条件を併記した。なお土被り比はトンネル土被り高さを掘削直径で割った値である。これによると、適用トンネルはAGF工法を適用した地山の中では土被り比、地山弾性波速度ともやや条件の悪い地山に属するものである。また比較トンネルは適用トンネルよりもやや良好な地山条件と考えられる。

b) 地表面沈下量の比較検討

図-9は最終収束段階での土被り比とトンネル中心直上の地表面沈下量の関係を比較したものである。同一トンネルについては線で結び別記した。同一トンネルの途中で記号が変化するのは、その部分で適用補助工法が変わっていることを意味している。本図によれば、トンネル毎に沈下量がばらついており、また同一トンネルでは土被り比の違いによって沈下

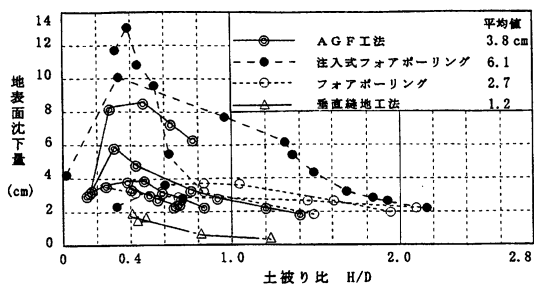
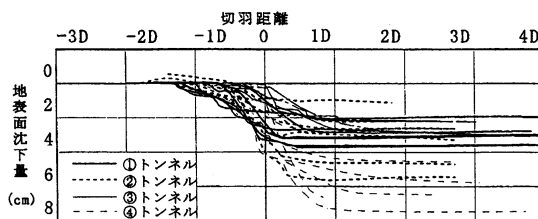


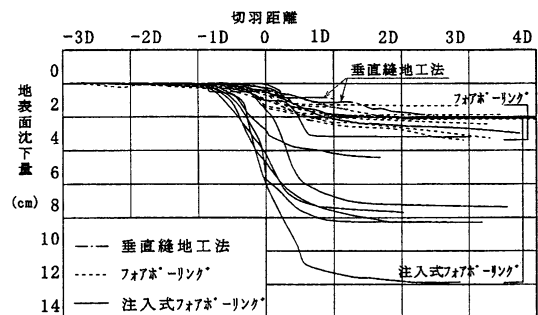
図-9 土被り比と地表面沈下量

量が大きく変化している。また補助工法別にみると、AGF工法は2~8.5cm、注入式フォアボーリングは2~13cmと沈下量の範囲が広いが、フォアボーリングは充填式フォアボーリングを示しており、概ね2~4cm、垂直縫地工法は2cm以下とばらつきは小さい。土被り比によってその傾向は異なるものの、平均値で比較すると、AGF工法は注入式フォアボーリングよりも小さくフォアボーリングや垂直縫地工法よりも大きい傾向を示している。適用トンネルの方が比較トンネルよりもやや悪い地山であることを考慮すると、AGF工法は注入式フォアボーリングに比較して沈下抑制効果はやや高いものと評価される。ただしフォアボーリングの沈下量は全体的に小さいが、これはもともと沈下量が小さくなった区間に対してフォアボーリングが適用されているのであって、フォアボーリングが沈下抑制効果に優れているということにはならない。垂直縫地工法は亀裂性の風化花崗岩に適用されたものであるが、沈下抑制効果は高いようである。どの補助工法を適用した場合でも、土被り比が0.4Dまでは地表面沈下量は増加するが、0.4Dよりも大きくなると2D程度までは次第に小さくなる傾向を示す。このような傾向の原因としては、土被り比が小さい範囲では支保工や補助工法の剛性で地表面沈下を抑制するが、一方で、地山アーチの形成も不十分で、土被りが徐々に大きくなるに従って地表面沈下量も大きくなる。しかし土被りが0.4D程度より大きくなると、今度は地山アーチ作用の効果により地表面沈下量は小さくなるものと推察されるが、そのメカニズムについては必ずしも明らかではない。これらのことより最終段階での地表面沈下量に関しては次のような特徴が認められた。

- (1) AGF工法は注入式フォアボーリングより沈下抑制効果はやや高い。
- (2) 補助工法の種類にかかわらず、最大沈下量は土被り比が0.4D前後のときに生じる傾向にある。ただし、そのメカニズムについては必ずしも明らかではない。



(a) 適用トンネル



(b) 比較トンネル

図-10 沈下量曲線

表-6 平均沈下量の比較 (cm)

土被りH/D	AGF工法	注入式FP	フォアボーリング*
0.3~0.5D	5.0	8.2	2.3
0.5~0.7D	3.5	4.6	

3. 適用トンネルの地山挙動の特徴

AGF工法施工トンネルの地山挙動について、地表面沈下に関しては、上半施工時の沈下量、沈下曲線の特徴、沈下速度およびトンネル横断方向の沈下形状について比較検討する。鋼管のたわみに関しては、上半施工時の適用トンネルの鋼管のたわみ形状、鋼管たわみを天端沈下と同一とした場合のトンネル天端沈下量、天端沈下曲線の特性および沈下速度について検討する。坑内外沈下の関連性については両沈下の相対沈下量について検討する。

(1) 地表面沈下について

a) 沈下量の比較

図-10は適用トンネルと比較トンネルの直上地表面の上半収束時での地表面沈下曲線をまとめて示し、表-6は各工法に共通した土被り比での平均値を示したものである。図-10によれば適用トンネルの地表面沈下量はAGF工法によって沈下抑制効果が期待されている割には1.2~7.5cmと比較的大きく、ばらつきの範囲も広い。土被り別の平均沈下量で比較す

ると、土被り比が0.3~0.5DではAGF工法が5.0cm、注入式フォアポーリングが8.2cmで、土被り比が0.5~0.7DではAGF工法が3.5cm、注入式フォアポーリングが4.6cmであった。フォアポーリングは両土被り比の範囲において2.3cmであった。適用トンネルの方がやや悪い地山であることを考慮すると、AGF工法は注入式フォアポーリングに比較して沈下抑制効果はやや高い程度と推察される。

b) 沈下曲線の特徴

地表面沈下曲線の一般的な傾向としては、トンネル切羽が測点直下に到達する以前から沈下が始まり、切羽前後では急勾配で進行し、その後、緩やかな勾配で安定状態に近づく傾向を示すといわれている⁹⁾。一方、実測データから直接沈下開始位置や先行沈下率などの沈下傾向を捉えることは、個々の計測点の局所的な条件の違いによるデータのばらつきがあり一般には難しい。ここでは計測値を近似式で表現することによって全体的な沈下傾向を捉える。この沈下曲線は指数関数的な傾向を示すが、近似式として一般化されたものは見られないようである。一方、内空変位・天端沈下の計測値に対する近似式としてはロジスチック曲線を適用した松本らの例がある⁹⁾。近似の精度に関してはロジスチック曲線の特長から限界はあるが、沈下曲線の全体的な傾向を捉え易いので、ここでは本研究で対象とした地形・地質条件のもとでロジスチック曲線によって沈下曲線の特徴を検討する。ロジスチック曲線の最も簡単な形は式(1)で示される¹⁰⁾。

$$\delta = \frac{k}{1 + e^{a \cdot 0 - a \cdot (L/D)}} \quad (1)$$

- ここで δ : 地表面沈下率(%)
- k : 沈下率の最大値で100%
- a_0 : 定数
- a : 定数
- L : 切羽距離
- D : トンネル掘削直径

ここで $L=0$ のとき、 $\delta = k / (1 + e^{a_0})$ となり、地表面沈下率は a_0 だけの関数となるので a_0 値は先行沈下率を規定する定数となる。また δ の L に関する変化率の最大値すなわち沈下勾配の最大値は、 $L/D = a_0/a$ のとき生じ、その値は $a \cdot k / 4D$ となる。したがって a 値は最大沈下勾配の大きさまたは沈下挙動範囲を規定する定数となる。図-11 は実測先行沈下率と近似曲線の a_0 値との関係をプロットし、式(1)における a_0 値と先行沈下率の関係も実線で併記したものである。また図-12 は実測沈下範囲と近似曲線から求めた a 値との関係をプロットし、式(1)における a 値と沈下範囲の関係も実線で併記し

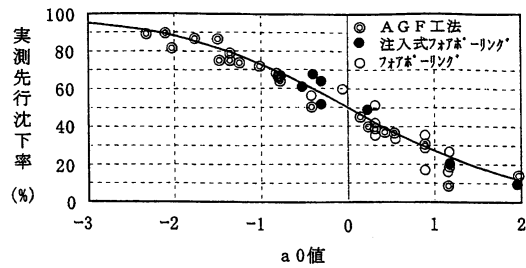


図-1 1 a₀値と先行沈下率の関係

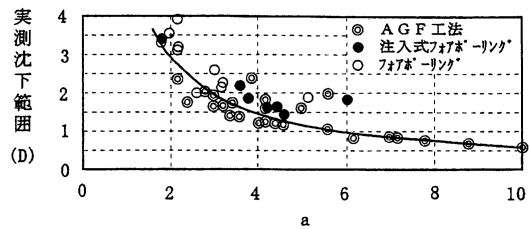
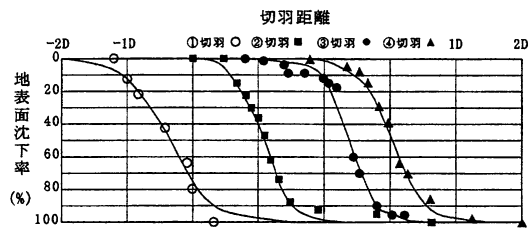
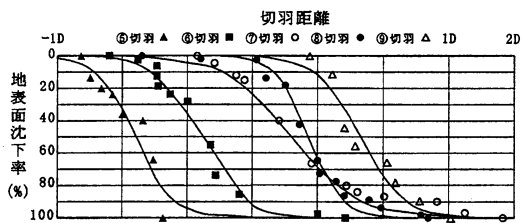


図-1 2 a値と沈下範囲の関係



(a) 適用トンネル



(b) 比較トンネル

図-1 3 沈下率曲線(土被り比0.65付近)

た。このとき沈下範囲は上半収束時沈下量の5%が生じた切羽位置から95%が生じた位置までとした。なお近似式の相関係数は、先行沈下率は0.97、沈下範囲は0.85であり、補助工法の種類にかかわらず先行沈下率や沈下範囲をロジスチック曲線で近似しても誤差は少ないことが分かった。図-13 は適用トンネルと比較トンネルに共通する土被り0.65D 付近の地表面沈下の実測値とその近似曲線を例示したものである。沈下量は各測点によって異なるので、沈下曲線の特徴を明快にするために最大沈下量でそれぞれ

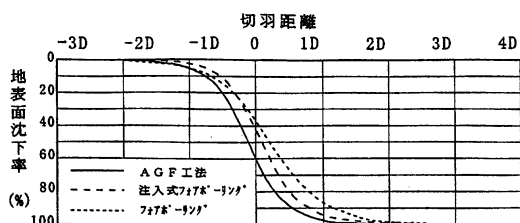


図-14 沈下率曲線

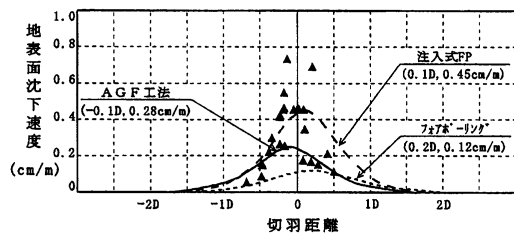


図-15 沈下速度の経距変化

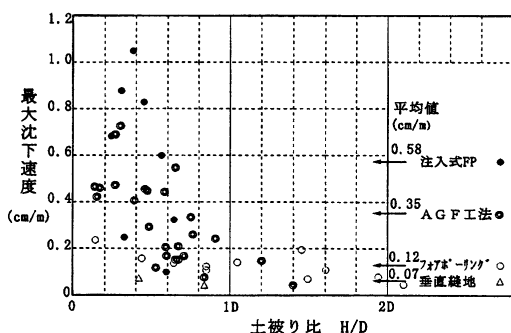
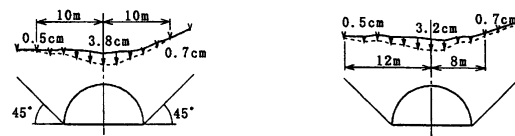


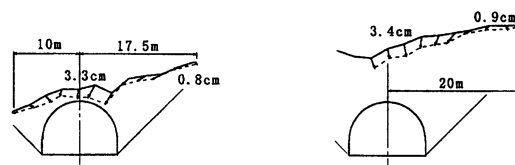
図-16 土被り比と最大沈下速度

規準化した沈下率で表示した。図中「①切羽」は①トンネルの切羽位置を示しており横軸の1目盛りは切羽距離1Dである。この図によれば、適用トンネルの沈下曲線の勾配は比較トンネルのそれに比べて急であり、沈下範囲が狭いことが傾向としては得られているが、そのメカニズムは明らかではなく、今後の検討が望まれる。図-14は各補助工法ごとの平均的な沈下曲線を示したものである。これらの図表からAGF工法を適用した場合の沈下曲線には次の特徴があることが分かった。

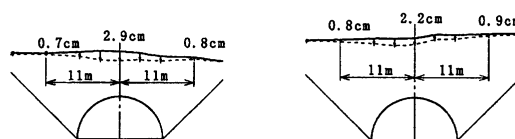
- (1) 沈下曲線は、ロジスチック曲線で比較的精度良く近似できる。
- (2) 沈下開始位置は他の補助工法の場合と比較して差はないが、切羽通過後の収束が早く、沈下挙動を示す範囲が狭い。
- (3) 先行沈下率は大きく、平均値では切羽到達時点で沈下の過半量は完了する。



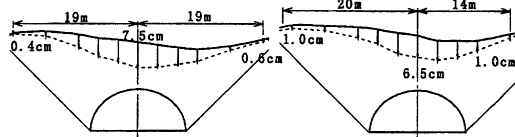
H=4.6m (a) ①トンネル H=7.0m



H=1.7m (b) ②トンネル H=8.2m



H=6.6m (c) ③トンネル H=8.6m



H=7.0m (d) ④トンネル H=8.5m

(H:土被り)

図-17 横断方向影響範囲

c) 沈下速度

地表面沈下の最も激しい切羽位置を明確にするために、沈下量の変化率である沈下速度について検討する。図-15は土被り比0.65D付近の平均的沈下速度を比較したものである。沈下速度は切羽進行1mに対して生じる地表面沈下量で表している。本図にはAGF工法適用時の個々の測点の最大沈下速度を▲印で併記した。これによると、AGF工法の地表面沈下速度は注入式フォアポーリングより緩やかな傾向にある。また沈下挙動が最も激しい位置は平均値では切羽到達前となったが、個々の測点では切羽の前後0.5D以内にばらついている。図-16は個々の測点の土被り比と最大沈下速度の関係を比較したものである。全体的な傾向としては最大沈下速度は土被り比の増大ともなって小さくなっており、土被りの影響があることを示している。またAGF工法は注入式フォアポーリングよりも沈下速度が緩い傾向

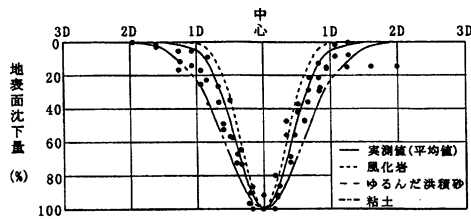


図-18 地表面沈下(横断方向)

にある。以上よりAGF工法適用時の沈下速度に関しては次のような傾向が明らかになった。

- (1) 地表面沈下速度は注入式フォアポーリングより緩やかな傾向にある。
- (2) 沈下挙動が最も激しいのは切羽前後0.5Dの範囲である。
- (3) どの補助工法適用時も、地表面最大沈下速度は土被り比の増大にともなって小さくなる。

このような傾向は得られているが、そのメカニズムについては明らかでなく今後の検討が望まれる。

d) 横断方向の沈下曲線

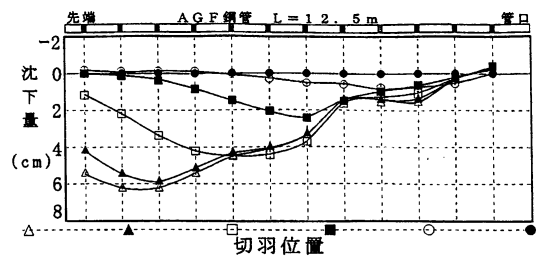
図-17 は上半収束時での沈下量の横断方向分布図を示したものである。地形の非対称性はあるが1cm以上の沈下量を示しているのは、どのトンネルもトンネル掘削盤から45°で立ち上げた線の内側に入っている。図-18 では適用トンネルについてトンネル中心からの離れと最大値で標準化した地表面沈下の関係をプロットした。さらに指数関数で近似した地表面沈下曲線と、島田によって提案されている地山別の沈下形状¹¹⁾も併記した。ただし島田の式の適用に際し、土被りとトンネル直径は適用トンネルの平均値とした。②トンネルは偏圧地形の影響が大きいので除外した。これによると急激な沈下の範囲はトンネルの左右約1Dで、2D離れるとほとんど影響はみられない。また図-18では近似曲線と島田の式による「ゆるんだ洪積砂」の沈下曲線がほぼ重なっており、適用トンネルはゆるんだ洪積砂と同様の沈下形状を示した。

以上より、横断方向の沈下曲線については次のような傾向があることが分かった。

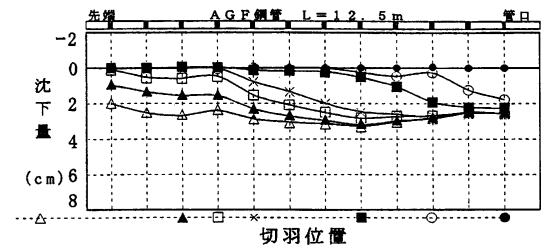
- (1) 急激な沈下の範囲はトンネルの左右約1Dで、2D離れるとほとんど影響はみられない。
- (2) 近似曲線では島田の式による「ゆるんだ洪積砂」と同様の傾向を示す。

(2) 鋼管のたわみについて

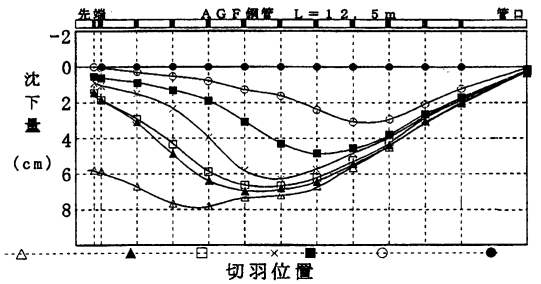
鋼管のたわみについては比較対象はないので適用トンネルの計測値の紹介と分析を行う。



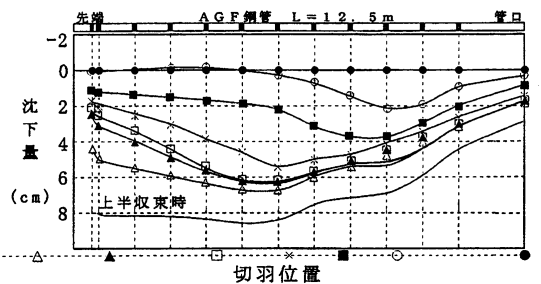
(a) ②トンネル



(b) ③トンネル



(c) ④トンネル 第1シフト



(d) ④トンネル 第3シフト

図-19 AGF鋼管の変形状況

a) 鋼管のたわみ曲線

図-19 は切羽進行に伴うAGF鋼管の変形形状を示したものである。①トンネルの鋼管のたわみ量はほとんど観測されなかったため図は省略した。図の下の記号は切羽位置を示しており、記号位置まで切羽が進行したとき鋼管の変形形状が図中の対応する曲線のようにであったことを示している。いずれのトンネルも管口から先端へ、右から左に向かって掘削されている。②および④トンネルの地山は比較的均

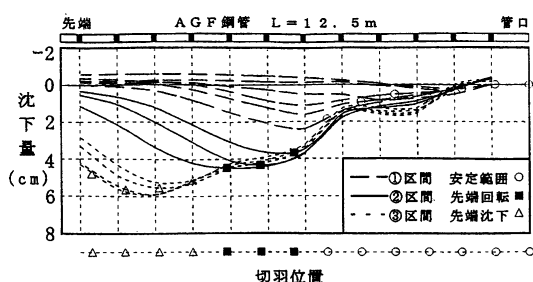


図-20 AGF鋼管の変形モード(②トンネル)

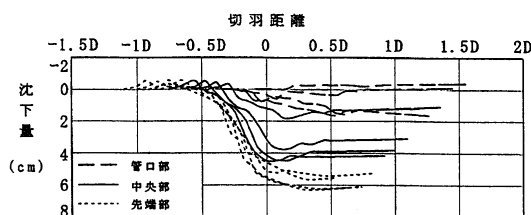
質で、かつ軟質であったため、たわみ形状は切羽付近で最大たわみを生じる典型的な傾向を示しているが③トンネルの地山は不均質な岩屑流堆積物で鋼管が巨礫を貫通しているためか全体的に一樣に沈下し、他とは異なった傾向を示している。沈下の最大値は切羽鏡面付近に生じており、切羽の進行に従って最大値の位置が移動する傾向にある。またどの場合も切羽が鋼管の下を通過しても鋼管の変形はもとには戻らず、たわんだ形状のまま保持される傾向にある。図-20 は比較的均質な地山に施工した②トンネルの鋼管の変形モードをより詳しく一切羽進行毎に示したものである。図中の記号○■△の位置がそれぞれ切羽位置を示している。鋼管全体の変形状況から鋼管の変形形状を次の3種類のモードに区分できる。

①区間は鋼管先端はほとんど沈下せず先端部分の回転角も生じない場合である。これは掘削の影響が鋼管先端付近まで及ばず先受長は十分な状態である。以下、①区間を管口部と記述する。

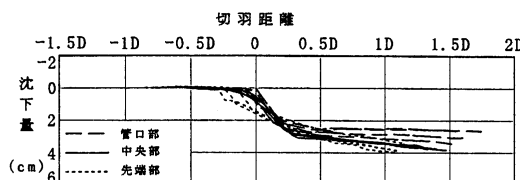
②区間は鋼管先端はわずかに沈下し回転も生じるが鋼管先端付近は上に凸の形状になる場合である。これは掘削の影響は鋼管先端付近まで及んでいるが、鋼管に対する地山の支持力がまだ期待でき、先受長が確保できている状態である。以下、②区間を中央部と記述する。

③区間は鋼管先端は沈下および回転を生じ鋼管全体が下に凸の形状で変形する場合である。これは掘削の進行とともに掘削の影響が鋼管先端まで及び、先端部分の地山が沈下しそれに連れて鋼管も共下がりした場合である。この状態では切羽前方地山の支持力は期待できず、先受長としては不十分である。トンネル上方の地山沈下を抑制するためには、次シフトのAGF鋼管が打設されている必要がある。以下、③区間を先端部と記述する。

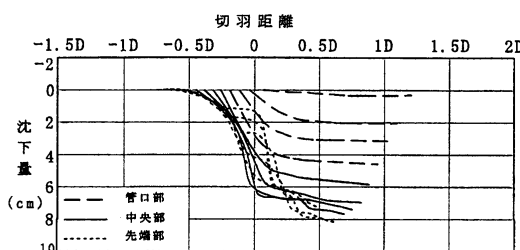
適用トンネルでは管口部は管口から5~9mの位置に切羽が到達するまでの区間で中央部は切羽が管口から8m~11mの位置にある場合であった。この時の先受長は4.5m~1.5mとなり、適用トンネルでの設計



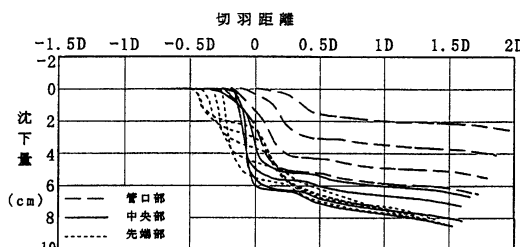
(a) ②トンネル



(b) ③トンネル



(c) ④トンネル 第1シフト



(d) ④トンネル 第3シフト

図-21 天端の沈下曲線

ラップ長、すなわち最小先受長はいずれも3.5mだったので、ラップ長はほぼ適切であったと考えられる。このように切羽位置によって鋼管の変形モードや鋼管沈下量が変わるので、鋼管の断面設計やラップ長の決定にはこれらの点を考慮する必要がある。

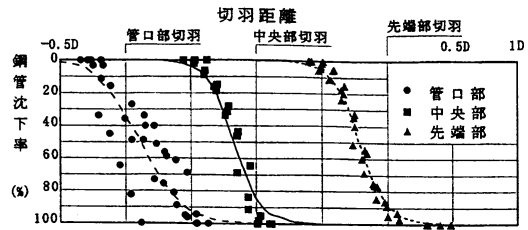
b) 天端沈下量曲線

鋼管は掘削面から30~130cm上方に位置しているが、鋼管はほぼ地山と共に挙動しているものと考えられる。そこで鋼管の沈下をトンネル天端の沈下と捉えることによってトンネル天端部地山の初期状態からの沈下傾向を検討する。図-21 は上半施工時の天端沈下曲線を示したものである。管口部では全般

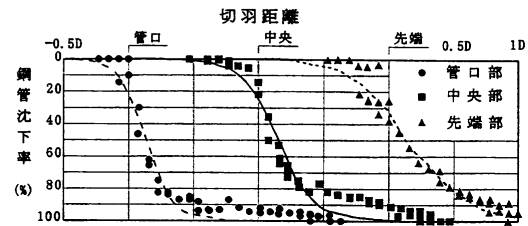
的に沈下量は小さい傾向にある。これは管口部では鋼管を打設するまでに先行沈下がある程度発生しており、この状態から計測が開始されること、鋼管打設のために鋼製支保工や鏡面処理として厚い吹付けコンクリートが施工されていること、さらに2シフト以降のAGF工法の場合、先行シフトの鋼管が先受工の役割を果たしていること等にも起因しているものと考えられる。中央部では管口部よりも沈下量が大きい、どの点も比較的一定の値を示している。これは管口部と先端部の鋼管が支保工と地山で支持されているため鋼管直下の地山が掘削によって失われてもこの間ではほぼ同様な変形量を示すことによるものと思われる。先端部では沈下量のばらつきは大きい。これは次シフトの鋼管打設のために一時的に切羽が停止し鋼管打設作業の影響を受けること、鋼管に対する切羽前方地山の支持長が除々に短くなり地山反力が小さくなること等によるものと思われる。

c) 天端沈下率曲線

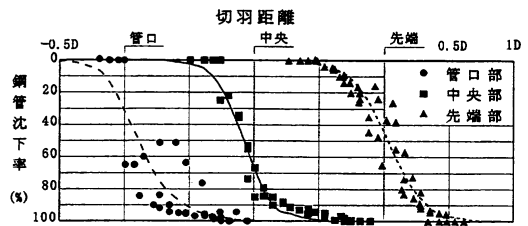
図-22 は最大値で規準化した実測沈下量とロジスティック曲線による近似曲線を示したものである。近似曲線は管口部を破線で、中央部を実線で、先端部を点線で示した。どのトンネルの沈下率曲線も切羽到達前と切羽通過後0.3D程度までは近似曲線がよく近似できているが、中央部や管口部では切羽が通過した時点から近似曲線から大きく外れる場合がある。これは地表面沈下が全体的にロジスティック曲線で近似できた点と異なる傾向である。この原因としては、地表面沈下ではトンネル付近の沈下が地表まで到達する間に全体的に平均化されてトンネル付近の局所的な沈下の違いは現れないが、天端沈下は地山の不均一さの影響、支保施工の影響、次シフトの鋼管打設基地の影響、当該鋼管の先端部直下に次シフトの鋼管が施工されることの影響、また支保の沈下の影響など局所的な沈下の違いが直接影響する点が考えられる。これらのいずれかの原因で天端沈下の近似曲線が計測値から外れるものと考えられる。このうち②トンネルの地山は軟質ではあるが比較的均質であり、しかも側壁導坑のため支保の沈下がほとんどなかったため切羽通過後早期に収束し、近似曲線とよくフィットしているものと考えられる。③トンネルの近似曲線と計測値が外れる原因としては、地山の不均質性の影響が考えられる。また当該鋼管の下には次シフトの鋼管が打設され、この鋼管の管口部が支保で支持されているので、この部分の沈下傾向が緩くなったことも考えられる。④トンネルの地山は比較的緩いが均質なマサ土であるから不均質性の影響はないと思われる。近似曲線と外れた原因とし



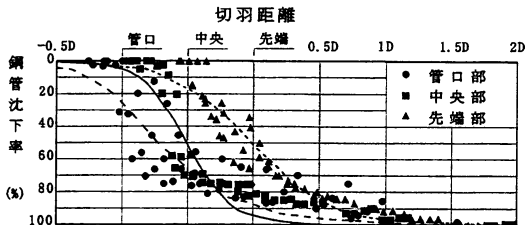
(a) ②トンネル



b) ③トンネル



(c) ④トンネル 第1シフト



(d) ④トンネル 第3シフト

図-22 天端沈下の近似曲線

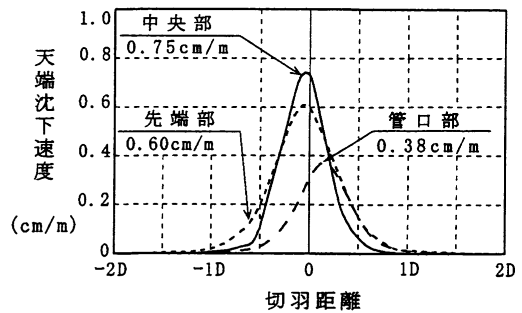


図-23 沈下速度の経距変化

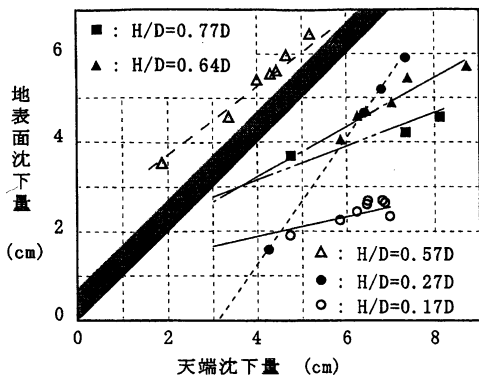


図-24 天端と地表面の沈下量の関係(④トンネル)

ては次シフトの鋼管打設の影響ではないかと思われる。

d) 沈下速度

図-23 は天端部の沈下速度の経距変化を示したものである。本図では鋼管の各部位毎に異なることと推察される沈下挙動の範囲や激しさを明瞭にするために近似沈下曲線の変化率の平均値で表示した。沈下速度が最も大きい位置は、管口部では切羽通過後0.1Dの位置、中央部、先端部では切羽前方0.1Dの位置となっており、沈下挙動が最も激しいのは切羽の前後0.1Dに集中していることが分かった。管口部だけが切羽通過後に最大沈下速度となるのは、管口部では初めから測点と切羽が近いことによるものと考えられる。最大沈下速度の平均値は管口部では0.38cm/m、中央部では0.75cm/m、先端部では0.60cm/mであった。中央部が最も大きいのは、管口部では鋼管打設時点では既に沈下が生じており全沈下量が計測されていない可能性があること、先端部では下方に次シフトの打設基地や鋼管が施工されており、沈下がだらだらと続くことによるものと考えられる。

(3) 坑内外沈下の検討

a) 沈下の関連性

地表面沈下とトンネル天端沈下の関連性について、島田は模型実験と多くの現場計測データより次の関係式を提案している¹¹⁾。

$$S_{oj} = a \cdot T \cdot e^{-bz} \quad (2)$$

ここで S_{oj} : 地表面沈下量
 T : 天端沈下量
 Z : $2H/D$ H :土被り, D :トンネル直径
 a : ゆるんだ洪積砂 $a=1.54$
 b : ゆるんだ洪積砂 $b=0.2\sim 0.3$

図-24 は④トンネルについて、トンネル天端と直

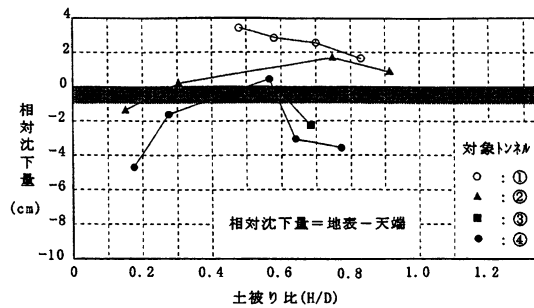


図-25 相対沈下量

上地表面の上半収束時の沈下量の関係を示したものである。ただし両者の関係を明確にするために計測誤差の影響が大きくなる可能性のある比較的小さい沈下量(3cm以下)に対応するデータは省いた。本図には島田の式による沈下量も陰影で併記した。島田の式によると適用トンネルの土被りの範囲では、ほぼ1:1の関係となり、地表面沈下量と天端沈下量がほぼ等しく共下がりする範囲となった。しかし④トンネルの実測値では各点での両沈下量の相関性は高いものの、その傾向は土被りによって異なり一定の傾向は見られない。この傾向は他の適用トンネルについても同様であった。

b) 相対沈下量

図-25 は上半収束時点での土被り比と天端と地表面の相対沈下量の関係を示したものである。相対沈下量の正の領域は地表面沈下量が天端の沈下量よりも大きく相対的に地山が縮んだ領域で、負の領域は、地表面よりも天端の沈下量が大きくトンネル天端と地表面の間の地山が相対的に伸びた領域と考えられる。全体的な傾向としては土被り比が0.5Dまでは相対沈下量は増加の傾向を示すが、0.75Dを超えるとすべて減少の傾向になり、0.6D~1.1Dの範囲で相対沈下量は負に転ずる傾向が見られる。一方、式(2)では、ゆるんだ洪積砂の場合、相対沈下量が負に転ずるのは0.7D~1.1Dとなる。以上より、適用トンネルでは相対沈下量が負値に転ずる土被り比はトンネル毎に異なるものの概ね0.6D~1.1Dの範囲となった。この原因としては、土被りが小さい範囲では支保工や先受工の影響で明確な傾向は見られないが、土被りが大きくなると地山アーチ作用の形成等によって切羽周辺の沈下の影響が直接地表面までには及ばないことが考えられる。

4. まとめ

本論文では、AGF工法の切羽安定効果と沈下抑

制効果を構成材料の面から分析するとともに、マサ土を使った室内模型実験結果および現場計測データによって検討した。さらに坑口部においてAGF工法が施工され地表沈下と鋼管変位の計測データが得られた4本のトンネルの地表沈下と鋼管のたわみ測定結果を通じてAGF工法が施工されたトンネルの地山挙動の特徴について考察した。これらの考察結果から以下に示すような知見が得られた。

- (1) マサ土を用いた室内模型実験によって先受工の切羽安定効果を確かめた。また先受け工の剛性が地表沈下量に影響することを確認した
- (2) AGF工法の地表沈下抑制効果は、地山の程度を考慮すると、注入式フォアポーリングよりもやや高い程度であることが認められた。
- (3) AGF工法施工時の地表沈下曲線は、注入式フォアポーリングと比較して、沈下速度は緩やかで、収束が早く、沈下挙動範囲は狭い。また沈下量が小さいため先行沈下率は大きい傾向にある。
- (4) AGF鋼管の変形モードは鋼管先端部の沈下と回転およびたわみ形状によって3タイプに分けられる。これによって先受け長が有効かどうかについて概ね区分できる。
- (5) トンネル天端沈下を鋼管の沈下として表した場合、孔内水平傾斜計によって先行沈下量を含めた全天端沈下量曲線を求めることが可能となる。天端沈下曲線は計測点が地山中にある場合はロジスティック曲線で近似できるが、切羽通過後は支保等の影響によりロジスティック曲線からは外れる。
- (6) AGF工法を施工した場合の天端沈下量と直上地表沈下量はほぼ比例関係を示す。またトンネル天端地山と地表面の相対的な距離は土被り比がおよそ0.5D以下の場合には徐々に縮む傾向を示すが、0.75Dを超えると徐々に伸びる傾向となる。

本研究では、対象としたトンネルは本数が少なく限られた地山条件でのデータの紹介や分析にとどまった。今後、種々の地山条件下での鋼管周辺地山の変位計測データの蓄積や室内模型実験の実施によって、AGF工法の効果のメカニズムをさらに明確にする必要がある。

謝辞：本論文は建設省、地方自治体および日本道路公団の道路トンネルの現場計測データに基づいて作成したものである。現場計測データの使用を快諾し

て頂きました建設省土木研究所トンネル研究室真下英人室長、(株)間組鈴木雅行氏はじめ関係の皆様には厚く御礼申し上げます。また、本論文の作成にあたりご意見を頂きました清水則一博士(山口大学助教授)に感謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説，pp. 231～248，1996. 5.
- 2) 例えば，河原俊厚，柚木孝昭，多田哲夫，佐々木武，武内秀木：矢板工法から長尺先受工を併用した吹付け工法へ，北陸路 北陸道路研究会会報，pp. 34～42，1995. 12.
- 3) 例えば，安保秀範，飯塚克次，笹尾春夫，山本博嗣，村山秀幸：強風化地山の坑口施工における注入式長尺フォアパイプの適用と計測，土木学会 第49回年次学術講演会第6部，pp. 301～302，1994. 9.
- 4) 足立紀尚，木村亮，荒巻智，林憲裕：トンネル掘削における長尺先受工法の補助効果に関する模型実験，地盤工学会 第28回土質工学研究発表会(神戸)，pp. 2309～2312，1993. 6.
- 5) 今中康昭，近森博，久達夫，武内秀木：注入式長尺先受工法を用いて地すべり地にトンネルを掘削，日本トンネル技術協会 施工体験発表会，pp. 157～162，1993. 12.
- 6) ジェオロンテ研究会 アソプレ工法分科会 AGF-WG設計SWG：注入式長尺先受工法(AGF工法) 実態調査に基づく設計パターン(案)，1997.
- 7) ジェオロンテ研究会 アソプレ工法分科会 AGF-WG：注入式長尺先受工法(AGF工法) 技術資料(三訂版)，pp. 148～149，1997. 9.
- 8) 日本トンネル技術協会：山岳トンネルの地表沈下防止および不良地盤対策に関する調査研究(その2) 報告書(日本道路公団仙台建設局委託)，1981. 3.
- 9) 松本嘉司，西岡隆，佐野可寸志：土被りの浅いトンネルの事前設計，土木学会論文集，第394号，p. 110，1988. 6.
- 10) 唐沢英雄：技術者のための数学の要点2 確率・統計理工図書刊，p. 111.
- 11) 島田隆夫：土被りの浅い鉄道山岳トンネルにおける地表沈下の形状および発生機構に関する研究，鉄道技術研究所報告No. 1162-509，1981. 2.

(1998. 9. 7受付)

