

柔な薄肉プレライニングの先受け効果

田口善文¹・香川和夫²・相良昌男³・吉川和行³

¹正会員 株式会社フジタ 技術研究所 土木研究部 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

²正会員 工修 株式会社フジタ 土木本部 生産技術部 (〒151-8570 東京都渋谷区千駄ヶ谷4-6-15)

³正会員 工修 株式会社フジタ 技術研究所 土木研究部 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

土被りの小さい未固結地山を掘削する都市N A T Mトンネルにおいては、切羽を安定させ、地表沈下を抑制するために、切羽前方地山にアーチシェル状の先受けを構築するプレライニング工法を採用することがある。しかし、プレライニングの設計法はまだ確立されておらず、切羽安定性の定量的評価など未解明な部分も多い。本文は、柔な薄肉プレライニングの補強効果を検討するために行った模型実験および実物大実験結果について述べる。模型実験では、プレライニングの地山補強効果が顕著に表われることを確認し、プレライニングの長さが切羽の安定や地表沈下に及ぼす影響について明らかにした。また、プレライニングを施工した場合の切羽の安定性を定量的に評価する方法を考察した。

Key Words : tunnel, lining, model test, design, NATM, pre-lining, face stability, full-sized test

1. はじめに

都市N A T Mと呼ばれる土被りの小さい未固結地山をN A T Mで施工する場合、切羽を安定させ、地表沈下を抑制することが重要な課題である¹⁾。このために掘削断面を小分割したり、各種の先受工を併用しながら施工しているのが実状である。

先受工は大きく分けて、フォアポーリング、パイプルーフ、水平ジェットグラウト、長尺鋼管フォアバイリングおよびプレライニングに分類される²⁾。しかし、従来のフォアバイリング等の先受工では横断方向の連続性が少ないためにアーチとしての支保機能が弱く、補強効果が小さいと考えられる。

最近では地表沈下を抑制し、切羽の安定性をより向上させるためにプレライニング工法の開発が盛んである³⁾。プレライニング工法は切羽前方地山内にあらかじめアーチシェル状の先受けを構築しながらトンネルを掘削する工法で、確実な先受け効果とともにトンネル横断方向のアーチによる支保効果を期待できる工法である。

また、筆者らはプレライニング工法の1つとして、高圧噴射による薬液注入工法に着目し、薬液を三方向に高圧噴射して逆T型の固結体をアーチ状に造成する逆T型プレライニング工法を開発している³⁾。逆T型にすることにより、経済的な断面となるばかり

りでなく、地山との複合体として有効に機能すると考える。

プレライニング工法は既に幾つかの現場に適用され、その先受け効果が実証されている⁴⁾。しかし、その設計法はまだ確立されておらず、プレライニングを施工した場合の切羽の安定性の定量的評価など未解明な部分も多い。

トンネル切羽の安定性に関する研究は、村山ら⁵⁾、土岐ら⁶⁾、久武ら⁷⁾、真下ら⁸⁾、松井ら⁹⁾により種々の方法で実施されているが、いずれもプレライニングを施工したトンネルを対象としたものではない。プレライニングの補強効果に関する実験的な研究では、米山ら¹⁰⁾がプレライニングを含むトンネルの模型実験により、沈下抑制効果や切羽安定性の向上効果について検討している。また、足立ら¹¹⁾は大型土槽を用いて、トンネル模型に作用する土圧分布を調べている。しかし、これらの模型実験は、プレライニングの基本的な補強効果の解明を目的としたものであり、プレライニングによる切羽安定効果や地表沈下の抑制効果を定量的に評価するまでには至っていない。

筆者らは、合理的なプレライニングの設計法の確立のために模型実験や数値解析を行っている^{12)~14)}。本文は、ケント紙でモデル化したプレライニングの模型実験および模擬地盤での逆T型プレライニング

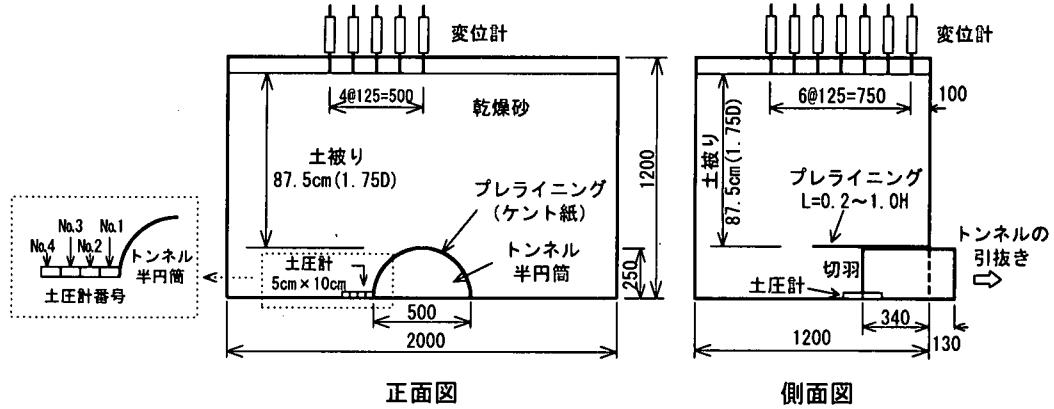


図-1 模型実験装置

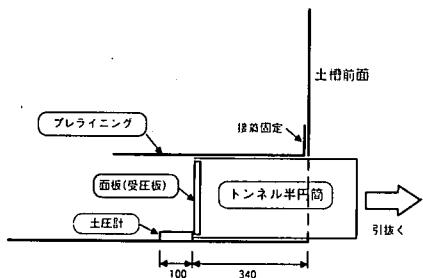


図-2 模型実験装置の詳細図

の実物大実験を行ない、柔な薄肉プレライニングの切羽安定効果や沈下抑制効果を検討した結果について述べる。また、プレライニングを施工した場合の切羽の安定性を定量的に評価する方法について考察した。

2. 柔な薄肉プレライニングの補強効果に関する模型実験

(1) 実験概要

プレライニングを含むトンネル切羽の安定性の実験は二次元平面ひずみモデルでは再現できないため、切羽付近をモデル化した三次元の模型実験を行った。模型実験装置を図-1に示す。実験土槽は幅2.0m、奥行き1.2m、高さ1.2mの寸法である。トンネルに相当する部分はトンネル上半掘削を想定して、直径50cm、高さ25cmの鉄製の半円筒となっている。掘削はこのトンネル半円筒そのものをスクリュージャッキで引抜くことにより再現している。トンネルの引抜きを円滑に行うために、半円筒の下端部にボールペアリングを設置した。

プレライニングは、薄肉の柔な構造体を想定し、

表-1 実験ケース

実験No.	1	2	3	4	5	6	7	
プレライニング の先受け長	長さ (cm)	0	5	7.5	10	15	20	25
	切羽高さ(H)との比	0	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1

なるべく薄い紙でモデル化することにしたが、模型地盤作製時に半円形の形状が保持できる条件から厚さ0.2mmのケント紙を使用し、トンネル上半180°の範囲に設置した。

図-2にプレライニングの設置方法の詳細を示す。プレライニングの端面は、実験土槽の前面板に接着剤で固定した。プレライニング脚部は、模型地盤の作製途中に脚部が動いて、所定の位置から離れないように土槽底部にあらかじめ設置したガイドレールの中に固定した。したがって、脚部の変位はすべての方向に固定の境界条件である。

プレライニング模型の切羽面からの先受け長さは5cm, 7.5cm, 10cm, 15cm, 20cm, 25cmの6ケースであり、トンネル上半の切羽高さをH(=25cm)、直徑をD(=50cm)とすると、0~1.0H(0~0.5D)の範囲で先受け部の長さを変化させ、その影響を検討した。

表-1に実験ケースを示す。全実験ケースは無補強の場合(プレライニング無し)を含め7ケースである。

地表面の沈下は図-1に示す変位計により計測した。トンネル切羽面に作用する水平方向荷重を測定するために、切羽板(面板)の後方にロードセルを組み込み、切羽板を受圧板として機能させ、トンネ

表-2 模型地盤の物性値

物理特性	空中落下法による 作製地盤の物性値	
比重	Gs=2.685	
最大間隙比	$e_{max}=0.933$	乾燥密度 $\gamma_d=1.51$
最小間隙比	$e_{min}=0.588$	間隙比 $e=0.778$
最大粒径	2.00mm	相対密度 $Dr=0.449$
均等係数	$U_c=2.22$	粘着力 $C=8.0kPa$
曲率係数	$U_c'=1.01$	内部摩擦角 $\phi=35^\circ$

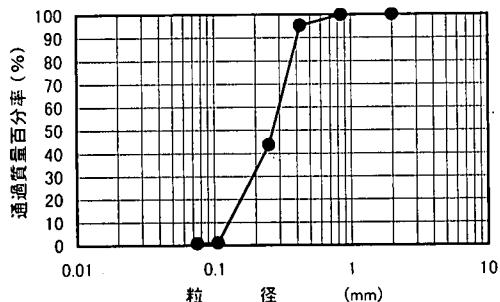


図-3 模型地盤の粒度加積曲線

ル引抜きに伴う切羽荷重の変化を計測した。

また、5cm×10cmの寸法の寸法の長方形の土圧計を土槽底盤部に図-1のように配置し、プレライニング側壁部の鉛直土圧の変化を調べた。

模型地盤は空気乾燥状態にある遠州浜岡砂を高さ1.0mの位置で所定の寸法の出口から自由落下させ、土被り厚さ87.5cm(=1.75D)まで砂を投入して作製した。この際、プレライニング内部に生じる空隙は、水平荷重が過大にならない程度に前方から砂を充填した。

この地山の単位体積重量 γ は別途30cm角の容器を使って空中落下法により測定した結果、 $\gamma=1.51tf/m^3(14.8kN/m^3)$ である。表-2に模型地盤の物性値を、図-3に粒度分布を示す。

実験は、トンネル半円筒を引抜くことで掘削を再現し、一定間隔の引抜量ごとに、地表沈下、切羽面の水平荷重およびプレライニング側壁部の鉛直土圧を計測した。

(3) 実験結果

a) 切羽面に作用する水平方向荷重について

図-4にプレライニングの先受け部の長さを種々変化させた場合のトンネル引抜量と切羽面に作用する水平方向荷重の関係を示す。全ての実験ケースにおいて1mm程度の引抜きで切羽荷重は急激に低下し、その後収束に向かう。

図-5はプレライニングの先受け長さの影響を

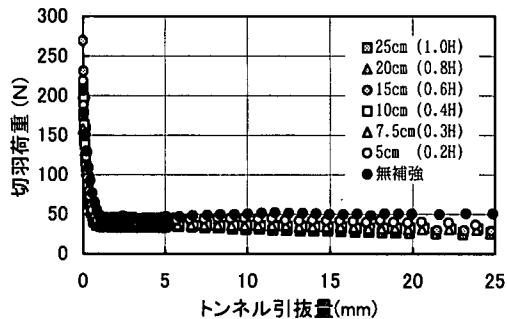


図-4 トンネル引抜きに伴う切羽荷重

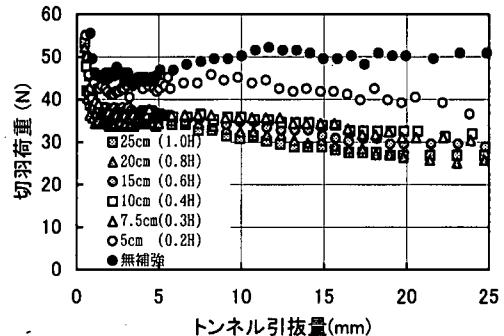


図-5 トンネル引抜きに伴う切羽荷重
(図-4の下方を拡大したもの)

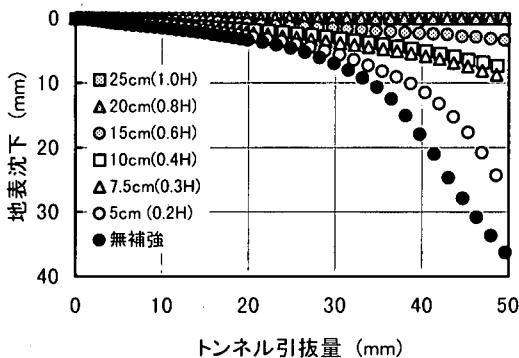


図-6 トンネル引抜きに伴う地表沈下

詳細に検討するために、図-4の下方を拡大したものである。図から、プレライニングが有る場合には切羽に作用する荷重が小さくなっている。特に、プレライニングの長さが7.5mm(0.3H)以上で切羽荷重は低い値を示し、補強効果が高くなると考えられる。

b) 地表沈下について

図-6にプレライニングの先受け部の長さの違いによる地表沈下の差異を示す。地表沈下の測定点は、沈下の最大値が生じたトンネルセンターの切羽面の直上付近で、土槽前面から47.5cmの地点である。無補強(プレライニング無し)の場合、トンネル引抜

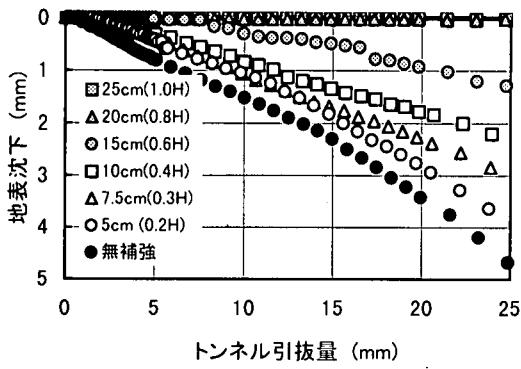


図-7 トンネル引抜きに伴う地表沈下
(図-6を一部拡大)

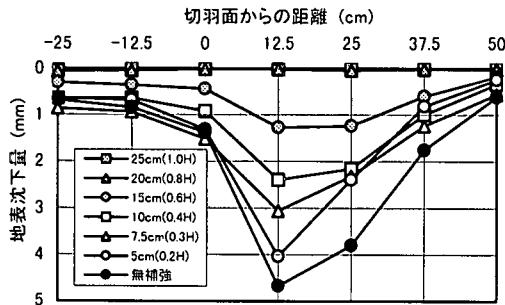


図-8 縦断面の地表沈下（引抜量25mm時）

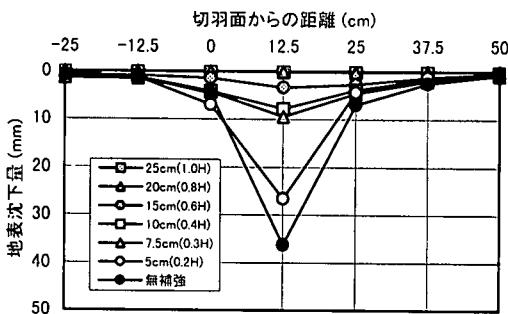


図-9 縦断面の地表沈下（引抜量50mm時）

量が25mm(0.05D)程度までは沈下が直線的に増加するが、それ以上のトンネルの引抜き量になると沈下が極端に増大する。先受け長さ5cm(0.2H)のケースも同様の傾向が見られる。一方、先受け部の長さが7.5cm(0.3H)以上では、プレライニングによる沈下抑制効果が顕著に表われており、プレライニングの長さが長い方が沈下抑制効果が大きい。

図-7は、図-6のトンネル引抜き量25mmまでの部分を拡大したものである。特に、先受け長さ15cm(0.6H)以上で補強効果が高くなっていることが分かる。また、無補強に比べて、先受け長さが7.5cm(0.3H)～10cm(0.4H)の付近で沈下曲線の勾配が緩くなっている。この先受け長さは、これまで

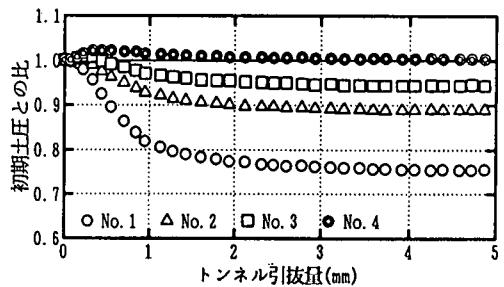


図-10 トンネル側壁部の鉛直土圧の変化
(プレライニング無し)

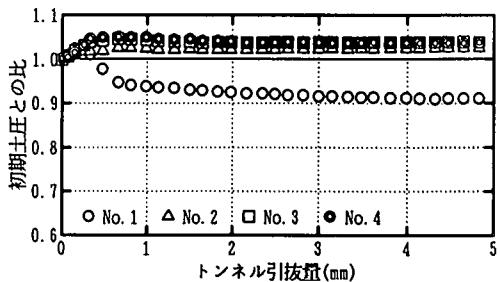


図-11 トンネル側壁部の鉛直土圧の変化
(プレライニング有り, 0.8H=20cm)

に行われた実験¹⁵⁾から推測すると、ほぼ切羽土塊のすべり線の位置に相当すると考えらえる。

図-8～図-9にトンネル縦断面での地表面の沈下分布を示す。図-8はトンネル引抜量25mm(0.05D)の場合、図-9は、トンネル引抜量50mm(0.1D)の場合である。横軸は切羽面を0として、切羽面からの離れを表示しており、切羽面から前方を(+)で、後方を(-)として示している。

図から、全体的な沈下の傾向はプレライニングの有無にかかわらず、切羽面から50cm(1.0D)前方までが大きく沈下し、特に切羽前方25cm(0.5D)までの影響度が大きい。

また、プレライニングの先受け長さの影響に関しては、これらの図からも15cm(0.6H)以上で補強効果がかなり高く、7.5cm(0.3H)～10cm(0.4H)の付近に補強効果の分岐点があることが分かる。

c) 側壁部鉛直土圧について

図-10～図-11に、トンネル引抜きに伴うプレライニング側壁部の鉛直土圧の変化を示す。図-10はプレライニング無しの場合を、図-11はプレライニング有りの場合である。図は鉛直土圧の増減をトンネルを引抜く直前の初期鉛直土圧で基準化している。

土圧測定位置は図-1に示すようにプレライニング設置部分の切羽面に最も近い側壁部であり、土圧計No.1はプレライニング側面から0～5cm(0～0.1D)

の間の土圧の平均値を意味する。同様に、土圧計No.2～No.4は、それぞれプレライニング側面から5～10cm(0.1～0.2D)の間、10～15cm(0.2～0.3D)の間、15～20cm(0.3～0.4D)の間の土圧である。

図-10は無補強の場合であるが、トンネル周辺の鉛直土圧は1mm程度のトンネル引抜きの間に急激に初期土圧から減少し、その後一定値に収束する。また、トンネルに近い部分ほど土圧の減少の割合が大きい。このことはトンネル引抜きに伴いトンネル側面からゆるみが拡大していき、この場合トンネル側面から15cm(0.3D)以内ではゆるみ領域となっていると考えられる。

図-11のプレライニング有りの場合、引抜きの開始初期にはすべての地点で初期土圧よりも増加する。さらに引抜いても、側壁に最も近いNo.1の土圧計以外は初期土圧よりも増加したままであり、プレライニングにより地山の緩みが抑制されていることが分かる。

3. 逆T型プレライニングに関する模型実験 および実物大実験

筆者らは、柔な薄肉プレライニングの1つの施工方法として、高圧噴射による薬液注入工法に着目し、薬液を3方向に高圧噴射して逆T型の固結体をアーチ状に造成する逆T型プレライニングを開発している。以下に逆T型プレライニングの概要と補強効果確認のために行った模型実験および実物大実験結果について述べる。

(1) 逆T型プレライニングの概要

逆T型プレライニングはトンネル掘削に先立ち、切羽前方地山内に瞬結性の薬液を3方向に高圧噴射させ、逆T型の固結体をトンネルアーチに添って構築する。図-12に逆T型プレライニングの概念を示す。切羽を掘削する前に、切羽前方地山内に土との複合体として地山を補強することによって、切羽の安定性を確保し、地表沈下を抑制しようとするものである。厚さ10cm程度の薄肉な平板状構造体に突起を付けて、その断面形状を逆T型にすることにより、トンネル横断面のアーチに沿った方向の構造体の断面二次モーメントが大きくなり、単純に平板の厚みを増加させる方法に比べて経済的な断面形状となる。また、周辺地山との複合体として機能しやすい形状となる。

施工手順は約90mm程度の薬液注入ロッドを用いて、切羽面からトンネル前方へ削孔する。ロッドが所定の位置に達し、削孔が完了した後、図-13に示す

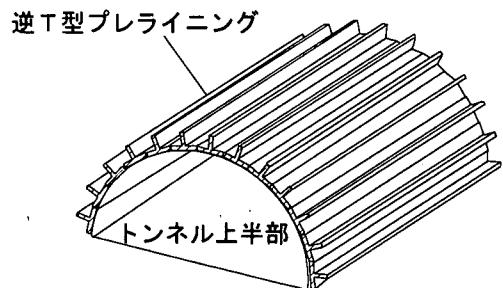


図-12 逆T型プレライニングの概念

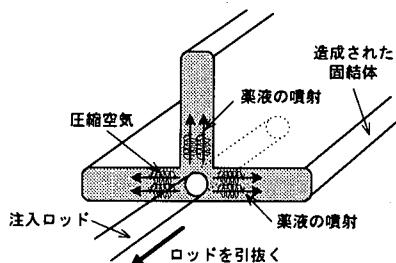


図-13 逆T型プレライニングの造成方法

表-3 噴射注入薬液の配合

主剤(%)	硬化剤(kg)
水:3号水ガラス	水:セメント
1:1	1.68:1
薬液1m ³ 中、水ガラス250%, セメント250kg ゲルタイム40秒程度(液温20°C)	

ように注入ロッドの先端に設けた3方向の噴射ノズル(ノズル径1～3mm)から瞬結性の薬液を圧力100kgf/cm²(9.8MPa)程度で高圧噴射しながら、ロッドを一定速度で引抜く。この削孔から噴射注入の手順をトンネルアーチ方向に順次繰り返すと、一連の逆T型のアーチが完成する。薬液の配合を表-3に示す。薬液は瞬結性のセメントー水ガラス系であり、ゲルタイムは温度によって異なるが、30～50秒程度である。

(2) 逆T型プレライニングの補強効果に関する模型実験

a) 模型実験概要

2章と同一の模型実験装置を使って、逆T型プレライニングの補強効果を調べた。プレライニング材にはケント紙(t=0.2mm)を用い、表-4に示すように逆T型プレライニングを模擬してプレライニング表面に突起を付けた。

逆T型プレライニングの断面寸法の目安は、直径

表-4 模型実験ケース

ケース	補強材	補強材の形状	凡例
1	無補強	無補強	
2	ケント紙	突起無し($B=0\text{cm}$, $H=0\text{cm}$)	
3	ケント紙	突起有り($B=6\text{cm}$, $H=4\text{cm}$)	
4	ケント紙	突起有り($B=6\text{cm}$, $H=10\text{cm}$)	

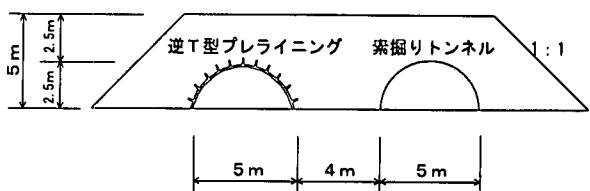


図-16 盛土の寸法および実験断面

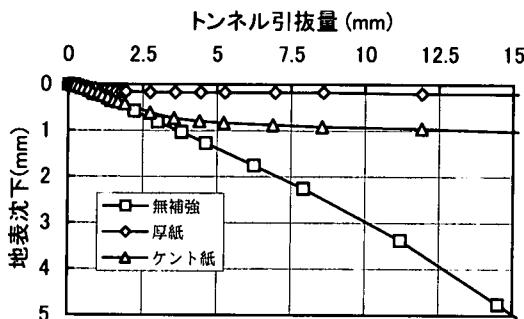


図-14 トンネル引抜きに伴う地表沈下（材質の違い）

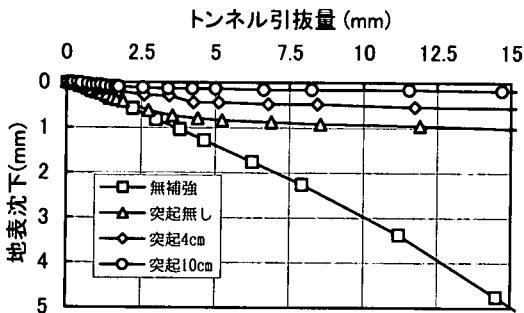


図-15 トンネル引抜きに伴う地表沈下（突起の違い）

5m程度のトンネルに対して、突起間隔60cm、突起高さ40cm程度である。模型実験のトンネル直径が50cmであることから、1/10の寸法として突起の間隔を6cm、突起の高さを4cmとした。また、極端な例として突起の高さを10cmとしたケースも行った。突起は、プレライニングと同じ種類のケント紙を用いた。

実験はプレライニングをトンネル上半部180°の範囲に設置し、50cm(1.0D)の土被りまで砂を投入した。模型地盤の材料、作製方法も2章と同一である。プレライニングの脚部は2章の模型実験と同様に土槽底板のガイドに固定しており、水平方向・鉛直方向の変位は拘束されている。

また、プレライニング模型に地表沈下がほぼ0となるような剛性が大きいプレライニングを想定した厚紙($t=0.65\text{mm}$)を使った実験も行い、ケント紙の場合と比較した。

b) 実験結果

図-14は土被り50cm(1.0D)、プレライニング

表-5 模擬地盤の物性値

物理特性	
比重	$G_s=2.745$
湿潤密度	$\gamma_t=1.91$
乾燥密度	$\gamma_d=1.48$
最大粒径	19mm
均等係数	$U_c=7.2$
曲率係数	$U_c'=0.99$

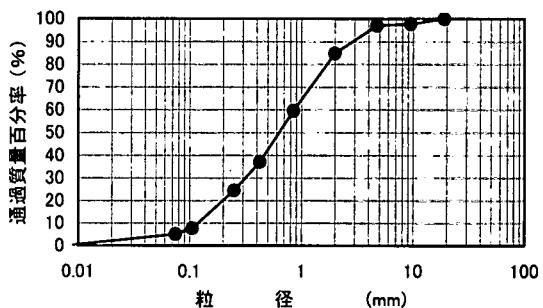


図-17 模擬地盤の粒径加積曲線

の長さを切羽面から25cm(0.5D)とした時のプレライニング模型の種類の違いによる地表沈下の差異を比較したものである。地表沈下の測定点は沈下の最大値が生じたトンネルセンターの切羽面の直上の点である。

無補強の場合にはトンネルの引抜きに応じて沈下が直線的に増大する。プレライニングを設置した場合、ケント紙ではトンネル引抜量2mm程度までは無補強と同程度の沈下量となるが、それ以降は沈下が減少する。さらに剛性の大きい厚紙では引抜量1mm程度から沈下が収束に向かう。

図-15は図-14と同じ条件でプレライニングの突起の有無で沈下量を比較したものである。逆T型プレライニングを想定しケント紙に4cmの突起を付けた場合、引抜量1mm程度から沈下は急激に減少し、収束に向かう。さらに突起10cmでは、図-14の厚紙と同程度の効果となる。このことから薄肉の構造体でも、形状をT型にすることにより地山と一緒に化し、地表沈下をほとんど発生させないような剛

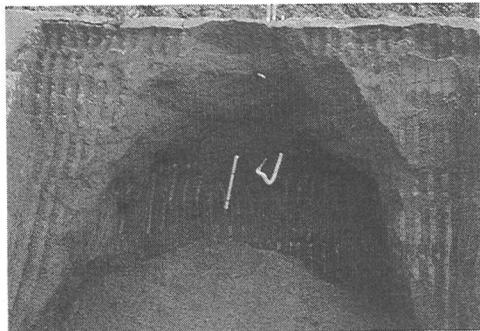


写真-1 素掘りトンネル

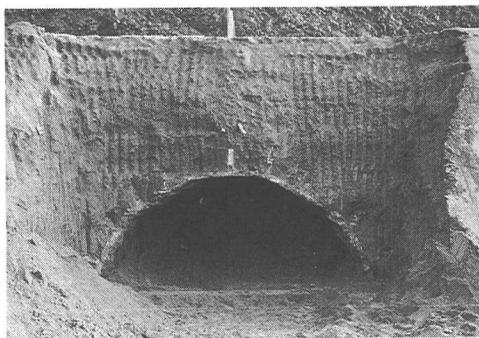


写真-2 プレライニングトンネル

性の高いプレライニングと同等の効果が得られることが分かる。

(3) 模擬トンネルでの実物大実験

a) 実験概要

柔な薄肉プレライニングの補強効果を確認するために、模擬地盤での逆T型プレライニングの実物大の施工実験およびトンネル掘削実験を行った。

模擬地盤として、高さ5mのソイルセメント盛土を作製した。盛土の寸法および施工断面を図-16に示す。また、ソイルセメント盛土に用いた山砂の粒度分布を図-17に、その物性値を表-5に示す。模擬地盤は一軸圧縮強度が 1.0kgf/cm^2 (0.1MPa)程度の地盤を目標とした。模擬地盤のセメント量の算定は、事前の試験施工結果からセメント量を0.5%と決定した。

施工実験は、直径5.0mのトンネル上半掘削(トンネル高さ2.5m、土被り2.5m)を想定して、盛土の法面からアーチ状に奥行き4.0mの逆T型固結体を造成した。注入孔のピッチは60cmとし、合計11本施工することで一連の逆T型プレライニングを造成した。注入時の諸元はロッドの引抜速度は50cm/min、薬液の吐出圧力は 100kgf/cm^2 (9.8MPa)である。

また、プレライニングの有無で補強効果を比較するために、プレライニング無しのケースも実施した。

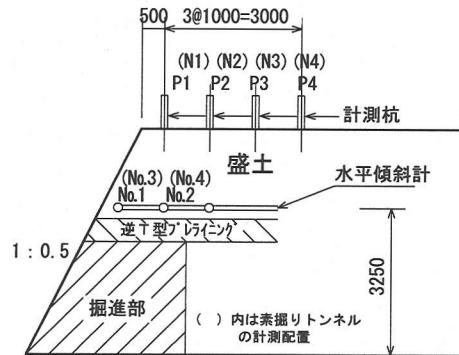


図-18 計測器の配置

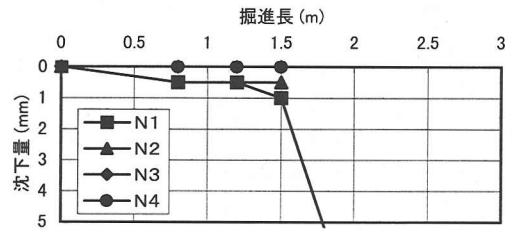


図-19 掘進長と地表沈下 (プレライニング無し)

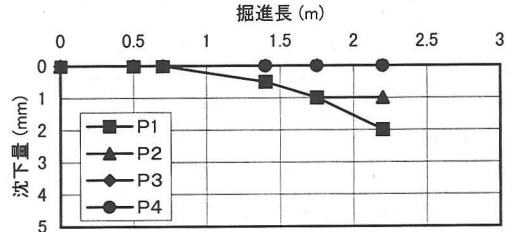


図-20 掘進長と地表沈下 (プレライニング有り)

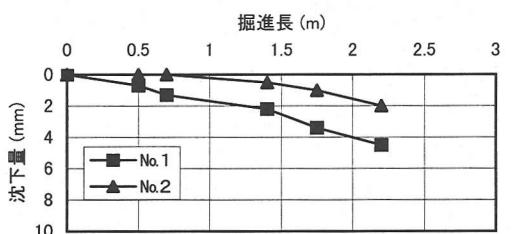


図-21 掘進長と地中沈下 (プレライニング有り)

b) 模擬トンネル掘削実験

逆T型プレライニング造成後、プレライニングの有無に対してトンネル掘削を行い、補強効果の差異を比較した。掘削は 0.4m^3 のバックホーを行った。プレライニングの脚部は硬い基盤の上に位置しており、鉛直方向には固定の条件であるが、水平方向は自由に動くことができる。

図-18に計測器の配置を示す。計測は杭による

地表面沈下測定とトンネル天端から75cm直上に設置した水平地中傾斜計により行った。傾斜計は1m間隔で設置し、傾斜角から沈下量に変換した。図中にはプレライニングが有る方のトンネルの計測器番号を示してあるが、()内には素掘りトンネル(プレライニング無し)の計測器番号を併示する。

図-19は素掘りトンネル(プレライニング無し)における掘進長と地表面沈下の関係を示す。写真-1および図-19に示すように、プレライニング無しのトンネルでは1.5m掘削した時点で坑口部が崩壊し、それ以上の掘削は不可能であった。

図-20、図-21はプレライニングトンネルにおける掘進長と地表面沈下、地中沈下の関係を示す。プレライニング有りのトンネルでは2.2m掘削したが、地山は安定しており、地表沈下も1~2mm程度であった(写真-2)。天端直上の地中沈下は坑口付近で5mm程度であり、天端沈下量をトンネル高さで除したひずみは0.2%程度となり、地山は安定していたことが分かる。法面の表面に近い坑口部分では、通常の地山内に比べて、最小主応力が小さくなっている、わずかのせん断応力の増加でも破壊しやすい条件であることを考えると、坑口付近の2.2mを無支保で掘削できたことは、プレライニングの地山補強効果がかなり見られるようである。

掘削実験終了後、逆T型固結体の出来形を確認した。ポンプ圧力100kgf/cm²(9.8MPa)、引抜速度50cm/分の目標とする注入パラメータを満足した固結体の出来形は厚み10cm程度となり、噴射到達距離は各孔の固結体がラップするために一概に言えないが、片側で30~50cm程度であった。

4. 切羽安定性の定量的評価に関する考察

(1) 切羽前方土塊の力のつり合い

プレライニングを実施工に適用するためには、プレライニングを施工したトンネルの切羽の安定性の定量的評価など、プレライニングの設計法を確立する必要がある。ここでは、切羽前方にすべり線を仮定し、切羽前方土塊の力のつり合いから切羽の安定性を検討する¹⁶⁾。一般に、すべり線の形状は円弧や対数ら線等が用いられているが、本文では計算を簡単にするために直線すべり線を仮定した。

図-22は直線すべりを仮定した場合の切羽前方土塊の力のつり合いを示す。Wはすべり土塊(△ABC)の自重であり、Qは切羽前方土塊に作用する鉛直荷重、Nはすべり線上の垂直力、Rはすべり線上の抵抗力である。本文では、切羽前方土塊に作用する鉛直荷重をQで、この鉛直荷重Qを分布荷重の

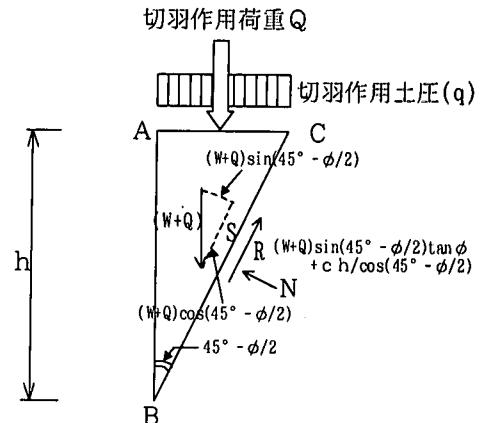


図-22 切羽前方土塊の力のつり合い

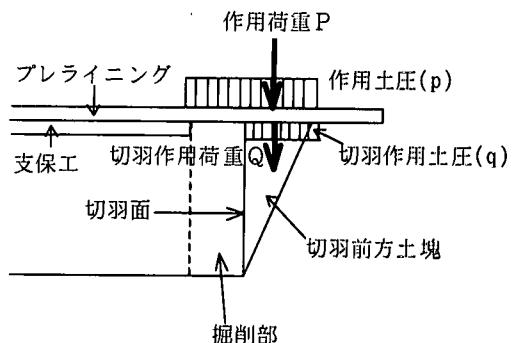


図-23 トンネル縦断方向の作用土圧の分布

形で表わした鉛直作用土圧をqで、鉛直作用荷重または鉛直作用土圧をQ(q)で表示することにする。鉛直作用土圧qは計算を簡単にするために一様な等分布荷重と仮定した。

柔な薄肉プレライニングに関する前述の実験結果を図-22にあてはめると、プレライニングが有ることで切羽前方土塊に作用する鉛直作用荷重Q(q)が減少し、切羽の安定性が向上する結果、切羽板に作用する荷重や地表沈下が小さくなること、さらに、先受け長さが切羽前方土塊のすべり線の位置より長いプレライニングでは、切羽前方土塊に作用する鉛直荷重Q(q)が大きく減少し、切羽の安定性や地表沈下の抑制効果が一段と高くなる現象が説明できる。

ここで問題となるのは、プレライニングを介して切羽前方土塊に作用する鉛直荷重Q(または、鉛直作用土圧q)の算定法である。

図-23は、プレライニングを施工したトンネルの縦断方向における切羽付近に作用する鉛直荷重の分布を示したものである。本来は、図のように単純な荷重分布とはならないが、説明を簡単にするため

に、プレライニング上面には一様な鉛直土圧 p が作用するものと仮定した。

切羽前方土塊の作用荷重 $Q(q)$ は、プレライニング上に作用する荷重 $P(p)$ から、プレライニングが支保する荷重を差し引いた値であり、切羽土塊の荷重負担分に相当する。この値はプレライニングの剛性、形状、長さ、脚部条件等により変化するものであり、例えば、全く変形・沈下しない剛なプレライニングがあり、地山荷重を全てこのプレライニングが先受けするとすれば、切羽の作用荷重 $Q(q)$ は 0 になるであろうし、反対に、紙のようなプレライニングを仮定すれば、プレライニングの先受け効果は全くなく、作用荷重 $Q(q)$ はプレライニング上に作用する荷重 $P(p)$ に等しくなるであろう。

この作用荷重 $Q(q)$ が算定できれば、直線すべりを仮定した時の切羽のすべりに対する安全率 F_s は、式(1)のように計算される。

$$F_s = R/S \quad (1)$$

$$S = (W + Q) \cos(45^\circ - \phi/2) \quad (2)$$

$$R = (W + Q) \sin(45^\circ - \phi/2) \cdot \tan \phi + c h / \cos(45^\circ - \phi/2) \quad (3)$$

ここに、

F_s : 切羽土塊のすべり安全率

S : すべり線 B C 上の滑動力

R : すべり線 B C 上の抵抗力

$Q(q)$: 切羽前方土塊に作用する鉛直方向の作用荷重（作用土圧）

h : 切羽高さ

W : すべり土塊 ($\triangle ABC$) の自重

c : 地山の粘着力

ϕ : 地山の内部摩擦角

である。

(2) 切羽前方土塊に作用する荷重 $Q(q)$ の算定法

前述のように切羽安定性の検討に用いる切羽の作用荷重 $Q(q)$ は、プレライニング外面の作用荷重 $P(p)$ と異なる。切羽に作用する荷重 $Q(q)$ は、プレライニング上面の作用荷重 $P(p)$ からプレライニングの荷重負担分を差し引いたものである。本文では、作用荷重 $Q(q)$ を簡単なモデルで算定した。

アーチシェル構造であるプレライニングの先受け効果を検討する場合、本来は三次元的な取り扱いをする方が望ましい。しかし、三次元的な解析は非常に複雑であり、実務上は横断方向または縦断方向の二次元断面で考える方が簡単である。横断方向に連結したアーチシェル状のプレライニングでは主に

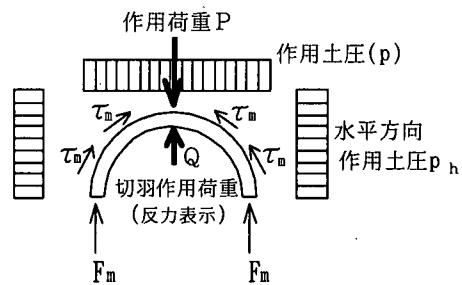


図-24 トンネル横断面での力のつり合い
(プレライニング有りの場合)

横断方向のアーチ構造体として機能すると考えられる。そのため本文では、横断方向の断面を用いて検討した。

筆者らが行った二次元のプレライニング横断方向の実験^[7]では、プレライニングは地山との摩擦力および脚部の支持力で外周の作用荷重を支えていることが確認されている。このことから、切羽の作用荷重 $Q(q)$ は、プレライニングへの作用荷重 $P(p)$ からプレライニングと地山の間の摩擦力、プレライニング底面の脚部反力などプレライニングで負担される荷重を差し引いたものと仮定できる。

このように考えると、図-24に示すトンネル横断面での鉛直方向の力のつり合いから、切羽作用荷重 $Q(q)$ は式(4)で表わすことができる。

$$Q = P - 2F_m - 2\tau_m h' \quad (4)$$

$$\tau_m = c_m + \sigma_m \cdot \tan \phi_m \quad (5)$$

ここに、

Q : 切羽前方土塊に作用する鉛直方向の作用荷重（反力を表示）

P : プレライニング外面の作用荷重

F_m : プレライニングの動員する脚部反力

τ_m : プレライニングと地山の間の動員する摩擦力

h' : プレライニングの施工範囲（高さ）

σ_m : 垂直応力

c_m : 動員する粘着力

ϕ_m : 動員する内部摩擦角

である。 $2\tau_m h'$ は、プレライニングと地山の間の鉛直上向きの摩擦力の合計を表わす。

プレライニングの動員する脚部反力 F_m は、安全側を考えると、切羽前方土塊の反力、すなわち切羽前方土塊に作用する鉛直作用土圧 q と同一と仮定して、式(6)で求められる。

$$F_n = a \cdot q \quad (6)$$

ここに, a はプレライニング脚部の面積, q は切羽前方土塊に作用する鉛直作用土圧である。

また, 式(5)に用いる垂直応力 σ_n は水平土圧係数 $K=1$, すなわち鉛直作用土圧 p と水平作用土圧 p_h が等しいとして次式から算定する。

$$\sigma_n = p = p_h \quad (7)$$

ここに, p は鉛直作用土圧, p_h は水平作用土圧である。鉛直作用土圧 p は, Terzaghiの緩み土圧, または経験値などから定まる作用土圧から求める。動員する粘着力 c_n , 内部摩擦角 ϕ_n は, 地山の粘着力 c , 内部摩擦角 ϕ または, 安全側をみて低減させた値を用いる。

アーチシェル状のプレライニングなど横断方向の構造が卓越するプレライニングでは, 3次元的なアーチシェルの挙動を無視した安全側の検討として, 式(4)が適用できると考える。今後は, 現場計測結果や数値解析を通して, 切羽安定解析方法の精度をさらに高める必要がある。

5.まとめ

柔な薄肉プレライニングを対象として, プレライニングの先受け長さを種々変化させた模型実験や逆T型プレライニングに関する実物大実験を行い, 薄肉プレライニングの切羽安定効果や地表沈下抑制効果について考察した。また, 切羽安定に関する定量的な評価方法を検討した。その結果, 以下のような知見が得られた。

(1) 模型実験から, プレライニングによる地表沈下の抑制効果, 切羽の安定性向上効果が顕著に見受けられた。

(2) 特に, プレライニングの長さが切羽高さの0.3倍に相当する0.3H (H:切羽高さ) 以上で切羽の補強効果が高くなる。また, 地表沈下に関しては, 0.3H~0.4H以上で補強効果が大きい。

(3) このことから, 柔なプレライニングでは, 切羽の潜在すべり線を越える長さがあれば補強効果が高くなる。

(4) さらに, プレライニングがあることで, 側壁部の地山を緩めない。

(5) 薄肉のプレライニングでも, その形状を逆T型にすることにより, 地盤との複合体として機能し, 補強効果が高くなる。また, 実物大実験により補強効果が検証できた。

(6) プレライニングを施工した場合の簡単な切羽安定の解析方法を示した。

本研究により, 柔な薄肉プレライニングの切羽安定効果や地表沈下に関する基本的な傾向が把握できた。今後は, 現場計測結果や数値解析を通して, 切羽安定解析方法の精度を高め, プレライニングの合理的な設計法を確立していきたい。

謝辞: 切羽の安定解析については, プレライニング工法検討委員会（委員長 足立紀尚 京都大学教授, 幹事長 田村 武 京都大学教授）での成果の一部をまとめたものです。ここに, 数多くのご助言を頂いた同委員会の委員および幹事の皆様に深甚な謝意を表します。

参考文献

- 1) 桜井春輔, 足立紀尚: 都市トンネルにおけるNATM, 鹿島出版会, 1988.
- 2) 土木学会編: トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説, 1996.
- 3) 田口善文, 波田光敬, 香川和夫: 逆T型プレライニングの補強効果に関する実物大模型実験, トンネル工学研究論文・報告集, 第3巻, pp.149-154, 1993.
- 4) 劍持三平, 香川和夫: 挖削に先行してアーチシェルをつくる-東葉高速線 勝田台トンネル-, トンネルと地下, 第23巻1号, pp.43-51, 1992.
- 5) 村山朔郎, 遠藤正明, 橋場友則: 機械化シールドの掘削性能に関する土質力学的考察, 第1回土質工学研究発表会, pp.75-78, 1966.
- 6) 土岐憲三, 田村武, 梅田昌彦: 切羽に作用する水平土圧の簡易計算法について, 土木学会第49回年次学術講演会, 第III部, pp.1368-1369, 1994.
- 7) 久武勝保: トンネル切羽の安定・崩壊挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, №517/III-31, pp.105-115, 1995.
- 8) 真下英人, 猪熊明: トンネル切羽の安定性に関する模型実験, トンネル工学研究論文・報告集, 第5巻, pp.117-122, 1995.
- 9) 松井幹雄, 西村和夫: 底面摩擦装置によるトンネル切羽崩壊実験のDEM解析, トンネル工学研究論文・報告集, 第5巻, pp.1-8, 1995.
- 10) 米山秀樹, 田口善文, 笹尾春夫, 指田健次: プレライニングの先受け・支保機構に関する模型実験, 土木学会論文集, №589/III-42, pp.109-120, 1998.3
- 11) 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, 第28回土質工学研究発表会, pp.2309-2312, 1993.
- 12) 相良昌男, 田口善文, 米山秀樹, 笹尾春夫: プレラ

- イニングトンネルの作用土圧に関する模型実験(その2), トンネル工学研究論文・報告集, 第6巻, pp.175-180, 1996.
- 13) 相良昌男, 田口善文, 香川和夫: 都市トンネルにおけるプレライニングの補強効果に関する模型実験, 第30回土質工学研究発表会, pp.1971-1972, 1995.
- 14) 田口善文, 香川和夫, 米山秀樹, 笹尾春夫: プレライニングトンネルの切羽安定性に関する考察, 土木学会第52回年次学術講演会, 第III部, 1997.
- 15) 例えば, 福島伸二, 望月美登志, 香川和夫: 土被りの浅い砂質地山トンネルの縦断模型試験, 第23回土質工学研究発表会, pp.1887-1888, 1988.
- 16) (社) 日本鉄道技術協会, プレライニング工法研究会編: プレライニング工法設計指針(案), 1996.
- 17) 田口善文, 米山秀樹, 笹尾春夫, 香川和夫, 相良昌男: プレライニングに作用する土圧に関する模型実験, 土木学会論文集, No.631/III-48, pp.152-161, 1999.9

(1999.3.12 受付)

REINFORCING EFFECTS OF THIN FLEXIBLE PRE-LINING

Yoshifumi TAGUCHI, Kazuo KAGAWA, Masao SAGARA
and Kazuyuki YOSHIKAWA

The pre-lining method has been applied in a shallow overburden or a soft ground tunnel to prevent surface settlement and stabilize cutting face. The pre-lining is the auxiliary method in which arch-shell linings are formed ahead of cutting face prior to excavation. However, design of this method is not established sufficiently. This paper describes the results of model test and full-sized test to investigate effects of reinforcement for the thin flexible pre-lining. As the results of model test, it is clarified that the pre-lining is effective for face stability and surface settlement. And quantitative estimation method for face stability is proposed.