

逆T型プレライニングの補強効果に関する実物大実験

FULL-SIZED TEST ON THE REINFORCING EFFECT OF THE PRE-LINING WITH THE REVERSE T TYPE BODY

田口善文*・波田光敬*・香川和夫**

Yoshifumi TAGUCHI, Mitsutaka HADA and Kazuo KAGAWA

It is expected to develop the reliable reinforced method to decrease the surface settlement on the shallow tunnel in urban resion. A new pre-lining method which can make the continuous arched body on the top of the face has been developed. It makes a reverse T type body by using the high pressure grouting with three direction nozzle. The reverse T type body is not only economical shape but also effective function in a complex with the ground.

The grouting test was carried out in the imitation ground to see the shape of improved body and the effect. The model test chaging the shape of the reinforcement was carried out to investigate the effect of this pre-lining method. This paper describes the result of full-sized test and the model test.

Keywords: NATM, pre-lining, high pressure grouting, reverse T type, full-size test, model test

1. まえがき

近年、土被りの薄い未固結砂層中をNATMで施工するケースが数多く見られるようになった。これらの都市NATM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ことが重要な課題である。このために掘削断面を小分割して掘削したり、各種の補助工法を併用ながら施工しているのが実状である。しかし、従来のフォアパイリング等の先受工では横断方向の連続性がないために地山アーチ形成の機能が小さく、補強効果が少ないと考えられる。そこで、切羽前方地山内にあらかじめアーチシェルのプレライニングを施工することは切羽の安定性や掘削スピードから考えても非常に有効な方法である。

筆者らは、プレライニング工法のうち、高圧噴射による薬液注入工法に着目し、薬液を三方向に噴射して逆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¹⁾。逆T型にすることにより、経済的な断面となるばかりでなく、地山と複合体として有効に機能すると考える。

本報告は逆T型プレライニングの概要、出来形を確認するために行った現場実験および補強効果を解明するための模型実験結果について述べる。

* 正会員 株式会社 フジタ 技術研究所

**正会員 株式会社 フジタ 土木本部 技術部

2. 逆T型プレライニングの概要

逆T型プレライニング工法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工法である。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、地表沈下を効果的に抑制しようとするものである。また、逆T型にすることにより、経済的な断面形状となる。 逆T型プレライニングの概念を図-1に示す。

施工手順はφ90mmの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。削孔完了後、図-2に示すように注入ロッドの先端に設けた三方向の噴射ノズルから瞬結性の薬液を圧力100kgf/cm²程度で高圧噴射しながら、ロッドを一定速度で引抜く。この手順をトンネルアーチ方向に繰り返すと、一連の逆T型のアーチが完成する。使用薬液の配合を表-1に示す。薬液は瞬結性のLW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。

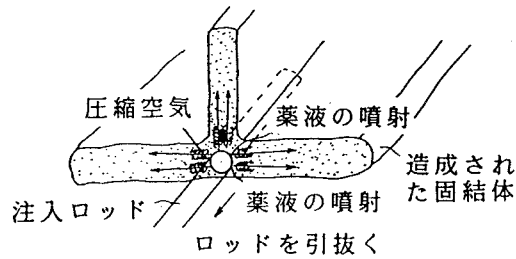
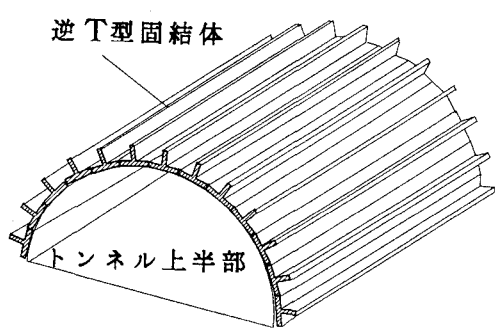


図-2 逆T型固結体の造成方法

表-1 薬液の配合

主剤 (ℓ)		硬化剤 (kg)	
3号 水：水ガラス 1：1		水 1.68	微粒子セメント 1

薬液1m³ 中、水ガラス250 ℓ、セメント250kg
減水剤2%添加
ゲルタイム40秒程度 (液温20℃)

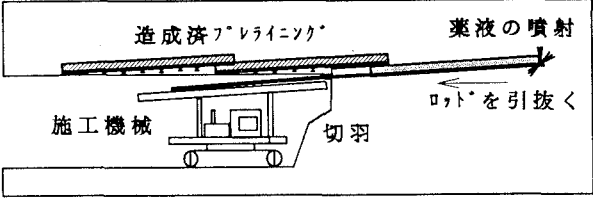


図-1 逆T型プレライニングの概念

3. 実物大トンネルの注入掘削実験

3.1 実験概要

逆T型固結体をアーチ状に造成した場合の出来形および個々の固結体のラップ状況を確認し、逆T型固結体によるトンネル補強効果を確認することを目的として、高さ5mのソイルセメント盛土を作製し、直径5m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、上半部にアーチ状に奥行き4mの逆T型固結体を造成した。逆T型プレライニングの施工対象地盤はN値10～30程度の洪積砂層である。実験地盤のN値、強度を施工対象地盤にあわせるために砂質土にセメントを混合したソイルセメント盛土を作製した。セメント

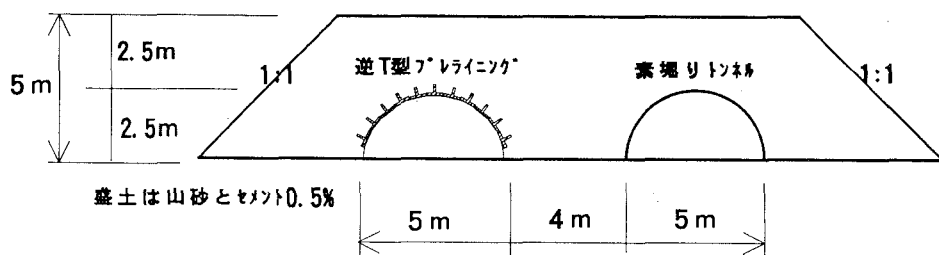


図-3 実物大実験の盛土概要

量の算定に当たっては、事前の試験盛土から0.5%とした。

盛土の寸法および施工断面を図-3に示す。トンネルが直径5mの上半部であることから盛土高さは5mとし、土被り比0.5Dの最も危険な状態を再現した。注入孔のピッチは60cmとし、合計11本施工した。注入時の諸元は引抜速度50cm/min、吐出圧力100kgf/cm²である。

3・2 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0.4m³のバックホーで行った。

図-4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直上に地中傾斜計を設置した。傾斜計は1m²ピッチで設置し、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の計測器番号を併示する。

図-5は素掘りトンネル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-5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-6、7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

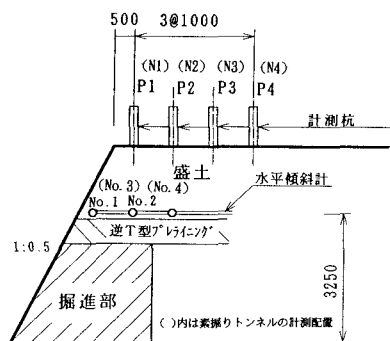


図-4 計測器の配置

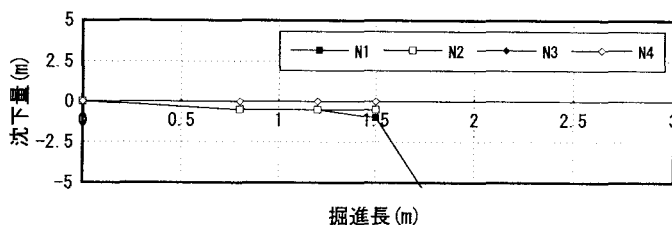


図-5 地表沈下(素掘り)

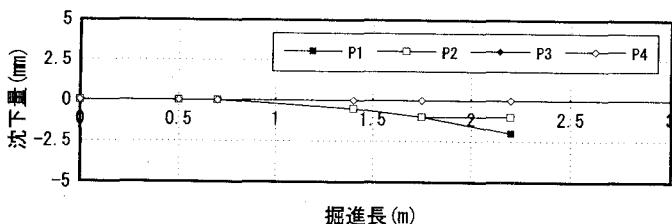


図-6 地表沈下(プレライニング有り)

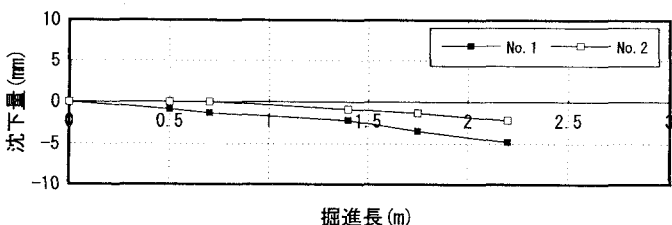


図-7 地中沈下(プレライニング有り)

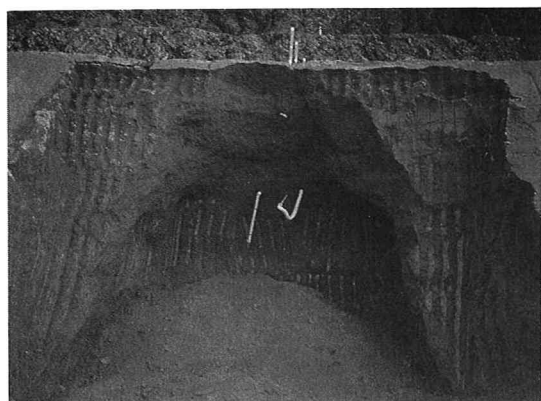


写真-1 素掘りトンネルの掘削

写真-2 プレライニングトンネルの掘削

定しており、地表沈下も1～2mm程度であった。天端直上の地中沈下は坑口付近で4mm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%程度であり、地山は安定していたことが分かる。坑口付近の2.2mを無支保で掘削できることは、その付近の応力状態が2次元状態であることを考えると、プレライニングの効果がかなり見られるようである。

3・3 出来形について

また、掘削実験終了後、逆T型の出来形を確認した。薬液の配合は前述の表-1と同様であり、ポンプ圧力100kgf/cm²、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。トンネルに添ってアーチ状に施工したが、各固結体のラップ状況は良好であり、浸透した薬液が各々の固結体を連結していた。

4. 補強効果解明のための模型実験

これまでに二次元の横断土槽を用いて、逆T型プレライニングの補強効果を調べ、その効果を確認した。²⁾³⁾しかし、実際の挙動は切羽付近の三次元であることから、今回は三次元の土槽実験を行った。模型実験装置は図-8に示すようにトンネル切羽部を三次元的にモデル化したものである。土槽は幅2.0m、奥行き1.2m、高さ1.2mの寸法である。

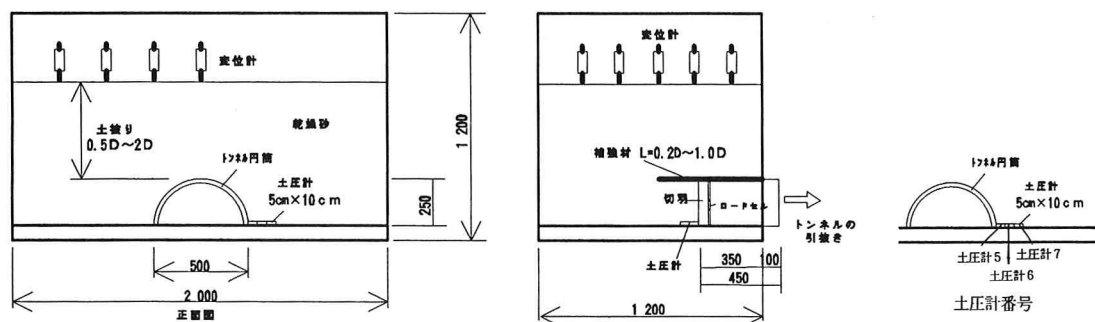


図-8 三次元模型実験概要

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の半円筒形となっている。掘削はトンネル円筒を引き抜くことにより再現している。トンネル引抜きはトンネル径が50cmであることから0.2D程度までとし、10cm引き抜いた。トンネル切羽は土槽前面から35cm奥に位置している。

地表面沈下は変位計により求め、また、トンネル周辺土圧の変化を見るために、幅5cm、長さ10cmの土圧計をトンネル周りに図のように配置している。

模型地山は空気乾燥状態にある遠州浜岡砂を高さ80cmの位置で所定の寸法の出口から自由落下させて作製した。この地山の密度は間隙比で0.75～0.78である。この装置を使って、種々の紙でモデル化したプレライグ材をトンネル上部に設置し、所定の土被り厚さまで砂を投入した。このような状態でトンネル引抜きに伴う補強材の有無や形状の違いによる補強効果の影響を模型地山の变形や土圧の変化から調べた。

図-9は土被り50cm(1.0D)、プレライニングの長さを25cm(0.5D)としたとき、逆T型の突起の有無で地表沈下を比較したものである。沈下測定点は沈下の最大値が生じたトンネルセンター上の切羽直上の点であり、土槽前面から35cm奥のポイントである。補強材には模造紙とケント紙を用いた。

突起の無い模造紙でも無補強の場合に比べてかなり補強効果が見られるが、高さ4cmの突起を付けることにより、ケント紙と同等の効果が見られる。このことから逆T型にすることにより地山と一体化し、補強効果が大きくなることが分かる。

逆T型の補強メカニズムを調べるために模型地山の土圧の変化を比較した。この実験では補強材にケント紙を用い、逆T型の突起の長さを変化させた。

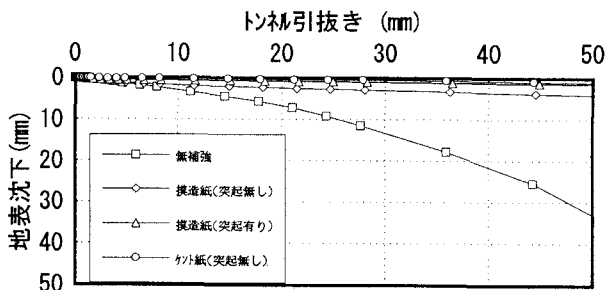


図-9 地表沈下の比較

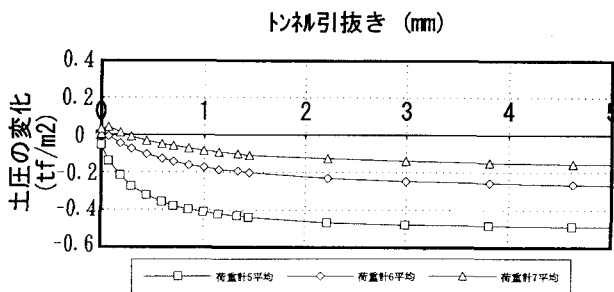


図-10 土圧の変化(無補強)

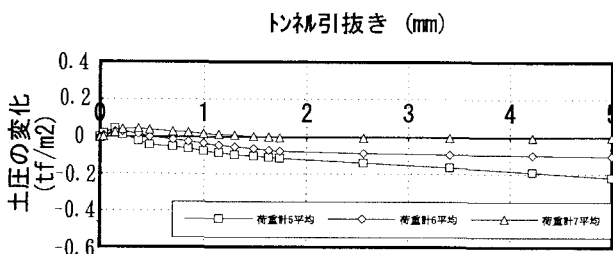


図-11 土圧の変化(突起有り、10cm)

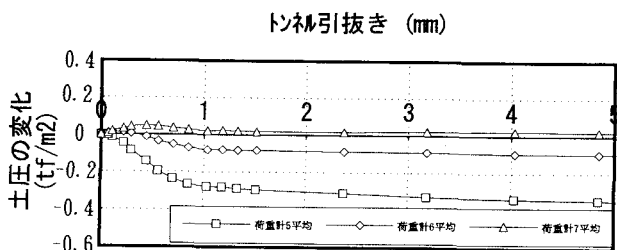


図-12 土圧の変化(突起無し)

図-10から図-12はトンネルを引抜く直前の土被り土圧を初期値として、トンネル引抜きに伴う土圧の変化を示す。ここに荷重計5はトンネル側面から0～5cmの間の土圧、荷重計6はトンネル側面から5～10cmの間の土圧、荷重計7はトンネル側面から10～15cmの間の土圧の平均値を意味する。

図-10は無補強の場合であるが、トンネル周辺の土圧は1～2mmのトンネル引抜きに間に急激に初期地圧より減少し、その後、一定値に収束する。また、トンネルに近い部分ほど減少の度合いが大きい。このことはトンネル引抜きに伴いトンネル側面から緩みが拡大していき、この場合トンネル側面から15cm(0.3D)以内では緩み領域となっていると考えられる。

一方、逆T型プレライニングの場合、図-11に示す突起の長さが10cmでは、変形が小さい初期の段階では全ての地点の土圧が上昇し、トンネル周辺に添ってグラウンドアーチが生じたかのような挙動を示す。その後、引抜き量の増加に応じて土圧が減少していくが、トンネル側面から10～15cmの所では初期地圧とほぼ同等となっている。これらのことから補強材を入れることによりゆるみ領域が小さくなると考えられる。

また、図-12はケント紙の突起無しの場合であるが、前二者の中間的な傾向を示す。

5. まとめ

逆T型プレライニングの出来形と補強効果を調べるために実物大の盛土実験を行った。また、補強メカニズムを検討するために模型実験を行った。

その結果以下のことが分かった。

- (1)実物大実験において、逆T型プレライニングで補強した場合、トンネル坑口部を2.2m掘削することができた。一方、無補強の場合は地山が崩壊した。
- (2)その時の固結体の出来形は厚み10cm程度であり、各固結体のラップ状況は良好であった。
- (3)模型実験によると、逆T型にすることにより地表沈下は減少し、補強効果はより増大する。また、プレライニングにより、トンネル周辺の緩み領域が減少する。

今後は、設計手法の確立のためにさらに詳細な模型実験を行っていく予定である。

6. 参考文献

- 1) 田口善文・波田光敬・福島伸二・香川和夫：逆T型プレライニングの形状および補強効果に関する基礎的実験、トンネル工学研究発表会論文報告集、vol. 2、pp. 179～184、1992. 10
- 2) 田口善文・波田光敬：プレライニングの補強効果に関する模型実験、第28回土質工学研究発表会、1993.
- 3) 田口善文・波田光敬：模型実験によるプレライニングの地山補強効果について、第48回土木学会年次学術講演会、1993.