

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

BASIC STUDY ON THE SHAPE AND EFFECT OF THE PRE-LINING WITH THE REVERSED T TYPE BODY

田口善文*・波田光敬*・福島伸二*・香川和夫**

Yoshifumi TAGUCHI, Mitsutaka HADA, Shinji FUKUSHIMA 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 method which can make the continuous arched body on the top of the face has been developed. It makes a reversed T type body by using the high pressure grouting. The grouting test was carried out in the imitation ground and real ground to see the shape of improved body. 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 characteristics of the improved body under the various grouting parameter and the result of the model test.

Keywords: NATM, pre-lining, high pressure grouting, reversed T type, model test

1. まえがき

近年、都市部の洪積砂層において都市NATMと呼ばれる土被りの薄いトンネルの施工が数多く見られるようになった。これらのトンネルにおいては対象地盤がN値20程度の洪積砂層であり、土被りが10～20mと薄いために、切羽を安定させ、地表沈下を少なくすることが最も重要な課題である。そのために薬液注入、フォアパイル、パイプーフ、プレライニング工法等の補助工法が実施されている。その中でも薬液注入工法は改良された地盤の強度や改良範囲に信頼性を欠くが、高圧噴射による薬液注入は地盤を強制的に置換えあるいは攪拌混合するために非常に効果的な方法である¹⁾。

筆者らは高圧噴射の注入工法を使って、切羽前上方に逆T型の固結体をアーチ状に連続して造成する逆T型プレライニング工法を開発している。これまでに浜岡砂、山砂、ソイルセメントを使った模擬地盤を作成し、室内での基礎的な高圧噴射注入実験を行なうとともに、実際の地山での出来形を検証するためにいくつかの地山で注入実験を行なった^{2) 3)}。また、逆T型プレライニングの効果および補強メカニズムを確認するために補強材の形状を種々変化させて模型実験を行なった。

本報告はセメントー水ガラス系の瞬結性の薬液を用いて、高圧噴射により逆T型の固結体を造成した場合に、地盤の強度、注入ロッドの引抜速度等が固結体の形状、強度に及ぼす影響と逆T型プレライニングの補強効果を調べるために行なった模型実験結果について述べる。

* 株式会社 フジタ 技術研究所 土木研究部

** 株式会社 フジタ 土木本部 技術部

2. 実験概要

トンネルの切羽前方 $120^{\circ} \sim 180^{\circ}$ の範囲に逆T型固結体をアーチ状に連続して施工すると図-1のようになる。逆T型にすることにより土との複合体としてグランドアーチを形成しやすくなり、都市NATM等の補助工法として有効に機能すると考える。

逆T型固結体の造成方法はボーリングマシン等で水平方向に所定の深さまで削孔した後、ロッド先端の噴射装置の左右および上方の三方向から瞬結性の薬液を $100 \sim 200 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の圧力で高圧噴射しながら一定速度でロッドを引抜くことにより、単体の逆T型固結体を造成する。この作業をトンネル上半 $120^{\circ} \sim 180^{\circ}$ の範囲にアーチ状に連続して施工すると逆T型のブレライニングが完成する。

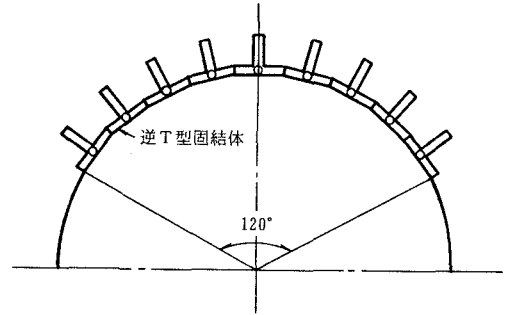


図-1 逆T型ブレライニングの概念

注入実験は大型土槽内に盛土して作製した模擬地盤と自然地山で行った。実験概要および装置を図-2に示す。室内実験は高さ1.5m、幅1.5m、奥行4mの土槽内に模擬地盤を作製した。盛土材には浜岡砂、山砂およびセメントを3%混合した山砂を用い、20cmごとにランマプレートで十分に転圧した。浜岡砂の盛土直後の $\gamma_t = 1.85 \text{ tf/m}^3$, $\omega = 17\%$, 山砂の $\gamma_t = 1.61 \text{ tf/m}^3$, $\omega = 11\%$, ソイルセメントの $q_u = 1.6 \text{ kgf/cm}^2$ 程度である。地山実験は $q_u = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の粘性土地山とN値30~50程度の砂質土地山を対象にした。図-3に使用した盛土材および砂質地山の粒度分布を示す。

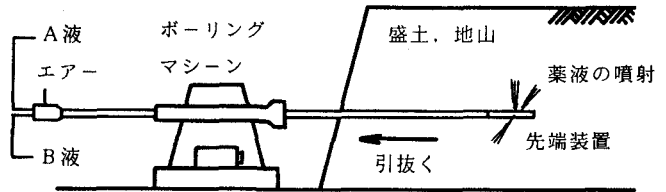


図-2 実験概要および装置

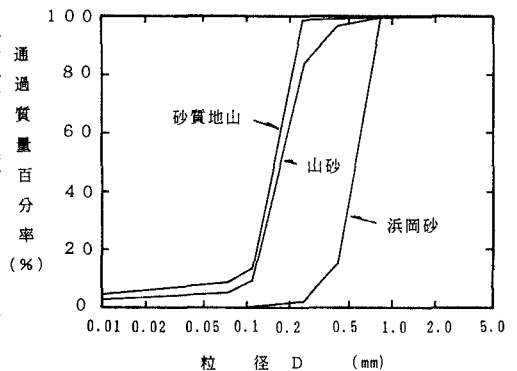


図-3 粒径加積曲線

実験方法は水平方向にボーリングマシンで2~3m程度削孔後、ロッドの先端から薬液を三方向に高圧噴射させながら一定速度でロッドを引抜くことにより単体の逆T型の固結体を造成し、その出来形と強度を調べた。

薬液は表-1に示すように水ガラス-セメント系の瞬結型を用い、薬液 1m^3 中に水ガラス250 ℓ , セメント250kgの配合である。セメントは浸透性を向上させるために微粒子セメントを使用した。実験時の薬液温度は 20°C 前後であり、ゲルタイムは40~50秒である。注入は2ショット方式を用い、薬液噴流のまわりにエアを併用した。

注入ロッドは $\phi 60\text{mm}$ と $\phi 90\text{mm}$ の二種類であり、三重管方式となっている。外管から順に水ガラス、セメントミルクエアの回路となる。先端装置は大きく分けて逆止弁機構と噴射機構からなり、ポンプから別々に送られた水ガラスおよびセメントミルクは先端で混合され3方向のノズルから高圧で噴射する。低圧時にはスプール弁の作用により、

表-1 薬液の配合

主剤 (ℓ)	硬化剤 (kg)
3号 水 : 水ガラス 1 : 1	微粒子 水 : セメント 1.68 : 1
薬液 1m^3 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°C)	

ロッド先端から削孔用の水が供給される。コンプレッサーから送られたエアは独立の回路をとって薬液の噴射流の回りから噴射する仕組みとなっている。

図-4に先端装置の断面図を示す。タイプAはφ60mmの先端装置にφ3.0mmのノズルを三方向に合計三個付けたものである。また、今回の実験では固結体の厚みを増加させるためにタイプBの先端噴射装置も用いた。タイプBはφ89mmのロッドにφ2.3mmのノズルを一方向に付き、40mmの間隔を開けて上下に二個、三方向に合計六個付けたものである。これら二種類の先端装置は140ℓ/minの高圧ポンプの流量に対して圧力が100kgf/cm²となる。

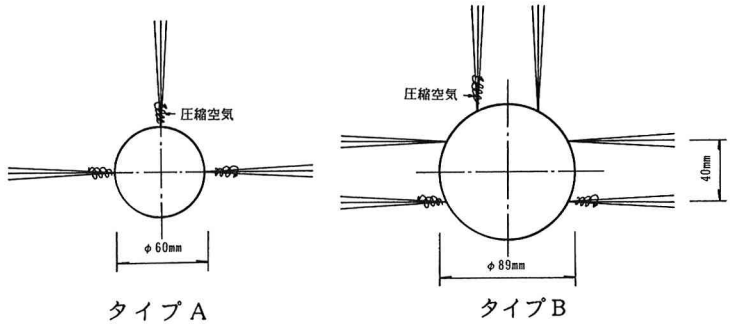


図-4 先端噴射装置

3. 注入実験結果

3.1 注入地盤の差異

写真-1および図-5に一連の実験における逆T型固結体の代表的な形状を示す。固結体は薬液を三方向に噴射しながら一定速度で引抜くために図のように逆T型を呈しており、斜線で示す薬液の攪拌混合部と浸透部に大別される。

表-2に各注入地盤に対する逆T形固結体の出来形の一覧を示す。表はポンプ圧力100kgf/cm²、引抜速度



写真-1 造成された逆T型固結体

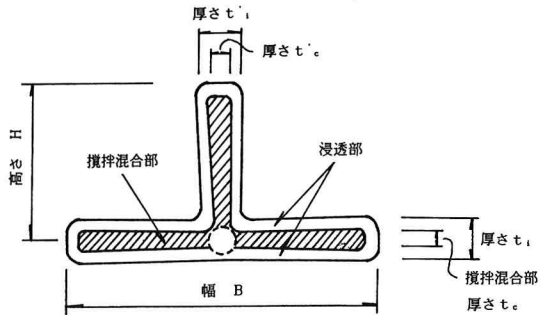


図-5 代表的な逆T型固結体の出来形

50cm/minの場合である。浜岡砂の場合、粒径が比較的大きいために浸透部分が厚く、攪拌混合部と浸透部の境界が明確でない。山砂およびソイルセメントでは粒径が小さいために浸透部が少なく、全体の厚さが薄くなる。砂質土および粘性土地山においては攪拌混合部および浸透部の厚さが極端に薄く、幅も高さも小さく

表-2 逆T型固結体の出来形 (引抜速度50cm/min) 単位 (cm)

	浜岡砂	山 砂	ソイルセメント	砂質地山	粘性土地山
厚さ t_i (厚さ t_e)	23 (不定)	17 (13)	12 (8)	5.0 (4.5)	6.5 (6.0)
幅 B	150以上	150以上	150以上	90	95
厚さ t_i' (厚さ t_e')	—	—	13 (9)	4.5 (4.0)	9.0 (8.0)
高さ H	—	—	60	47	38

なる。また、鉛直方向の突起と水平方向の平板の厚さを比較すると、前者は後者と同等か多少厚くなっている。

表-3は引抜速度を100cm/minとした場合である。固結体の厚さは早く引抜くために土質によらずほぼ一定であり表-2の引抜速度50cm/minの場合に比較して固結体の幅は変わらないが、厚さが極端に小さくなっている。

3.2 先端装置の差異

表-4は図-4に示すタイプAの先端装置を用いた時の各注入地盤に対する逆T型固結体の攪拌混合部の平均厚さの一覧を示す。表はポンプ圧力100kgf/cm²、引抜速度50cm/minの場合である。前述のように山砂の場合、地盤が軟らかいために平均厚みが10cm以上であるが、砂質土および粘性土地山においては攪拌混合部および浸透部の厚さがさらに薄くなる。また、地盤が固い砂質土地山では逆Tの接合部分の厚さが極端に薄くなっており、地盤と複合体としての機能させるためには接合部分を頑強にすることが必要であると考ええる。一方、出来形を厚くするためにロッドをゆっくり引抜くと薬液のロスとスライム量が増加し不経済となることが予想される。

出来形の厚みを増加させるためにタイプBに示す先端装置を使用して、同一の地盤で実験を行なった結果を表-5に示す。表はポンプ圧力100kgf/cm²、引抜速度75cm/minの場合であり、前述のタイプAの実験より引抜速度が早い。山砂およびソイルセメント地盤ではさほど変化がないが、砂質地山でも10cm前後の厚さが確保でき、接合部も厚くなる結果が得られた。

3.3 一軸圧縮強度

表-6は各地盤に対して造成された固結体の一軸圧縮強度およびカツレツ試験による引張強度を示す。図-6に一軸圧縮試験の応力-ひずみ曲線を示す。供試体は平板状固結体からコアボーリングし、φ5cm×10cmの円柱供試体を作製した。

表から、浜岡砂および山砂の固結体では $q_u=30\text{kgf/cm}^2$ 程度を示すが、ソイルセメントおよび粘性土地山では多少低下する。これは固結体の攪拌混合部の厚さの影響および固結体内のエアの混入量の違いと考えられる。また、ホモゲルの $q_u=50\text{kgf/cm}^2$ 程度である。カツレツ試験による σ_T 値は q_u 値の約1/8程度となっている。

以上のように、薬液を高圧噴射させながらロッドを一定速度

表-3 逆T型固結体の出来形 (引抜速度100cm/min) 単位 (cm)

	浜岡砂	山 砂	ソイルメント
厚さ t_i (厚さ t_e)	13 (不定)	9 (5)	7 (4)
幅 B	150以上	150以上	150以上
厚さ t'_i (厚さ t'_e)	15 (不定)	— —	11 (7)
高さ H	65	—	60

表-4 逆T型固結体の平均厚み (先端装置タイプA、引抜速度50cm/min) 単位 (cm)

注入対象地盤	山 砂	ソイルメント	砂質地山	粘性土地山
平均厚さ t_e	13	8	4.5	6
平均厚さ t'_e	—	9	4	8

表-5 逆T型固結体の平均厚み (先端装置タイプB、引抜速度75cm/min) 単位 (cm)

注入対象地盤	山 砂	ソイルメント	砂質地山
平均厚さ t_e	14	10	10
平均厚さ t'_e	14	9	8

表-6 一軸圧縮強度の比較 (養生3日) 単位 (kgf/cm²)

	浜岡砂	山 砂	ソイルメント	粘性土地山
圧縮強度 q_u	29	30	20	25
引張強度 σ_T	3.9	4.1	2.0	3.5

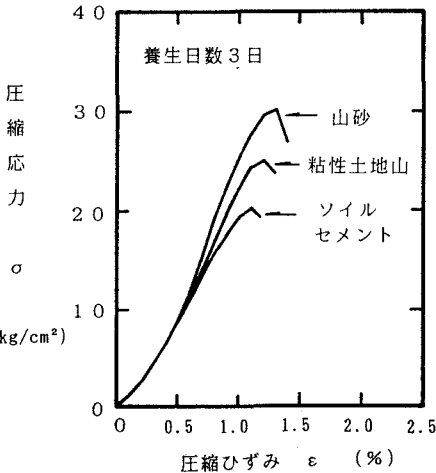


図-6 固結体コアの一軸圧縮強度

で引抜くことにより、逆T型固結体を造成することが可能であることが分かった。そこで、逆T型プレライニングの補強効果を調べるためにトンネル土槽実験を行った。

4. トンネル土槽実験

4.1 試験装置と試験方法

トンネル試験装置は図-7に示すようにトンネル横断部を二次元的にモデル化したものである。土槽は長さ82cm、幅30cm、深さ143cmで、上下左右の枠にゴム製のプレッシャーバックがついており、水圧により模型地盤に拘束圧をかけることが可能である。今回の実験では拘束圧は等方に0.5kgf/cm²とした。土槽前面は透明なアクリル板（厚さ30mm）からなっており、このアクリル板と地盤の間には摩擦除去のために厚さ0.25mmのゴムシートをシリコングリースにより張りつけてある。また、試験中の地盤の変形状況はゴムシートに描いたほぼ5cm×5cmの格子状の標点の座標値を写真撮影により読み取った。

トンネルに相当する部分は直径20cmのアクリルパイプにゴムチューブを巻き付け、水を充填して外径を30cmにまで膨張させた。ゴムチューブの水を徐々に排出してゴムチューブの径を収縮させることにより、トンネル掘削を再現している。 模型地山は空気乾燥状態にある遠州浜岡砂（ $e_{min}=0.864$, $e_{max}=0.584$, $U_c=1.74$, $D_{50}=0.56mm$ ）を高さ80cmで所定の寸法の出口から自由落下させて作製した。この時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、表-7に示す紙でモデル化した種々のプレライニング材をトンネル上部に設置し写真撮影により、トンネル径の収縮に伴う各々の標点の変形を読み取り、補強材の有無や補強材の形状の違いによる影響度を調べた。

4.2 土槽実験結果

図-8(a)はトンネル天端が11.5mm収縮したときの無補強の場合の変位ベクトルを示したものである。図から、トンネル天端上部では鉛直方向の沈下が卓越し、トンネル天端を中心としてアーチ状になっていることが分かる。この領域がゆるみ領域であり、その影響範囲は実験開始前のトンネル直径より小さい。また、アーチ状のゆるみ領域の外側は水平方向変位が卓越し、ゆるみ領域に向かって土が移動していることが分かる。特に水平方向からも拘束圧をかけているためにこの傾向は顕著である。

図-8(b)はトンネル径が図-8(a)と同じ量だけ収縮した場合のケント紙による逆T型の補強材（ケース3）を設置したときの変位ベクトルを示す。図から無補強の場合に比べて、トンネル上部の沈下が極端に小さくなっており、プレライニングが地山のゆるみを抑制していることが分かる。

図-9はトンネル径の収縮に伴う各ケースでの標点の沈下量を比較したものである。プロットした標点はトンネル天端から3cm上の点である。図から、無補強の場合にはトンネル天端の沈下とほぼ比例して直線的に沈下する。ケース2の突起を付けないケント紙の場合は、無補強に比べて多少の沈下抑制効果があるが、

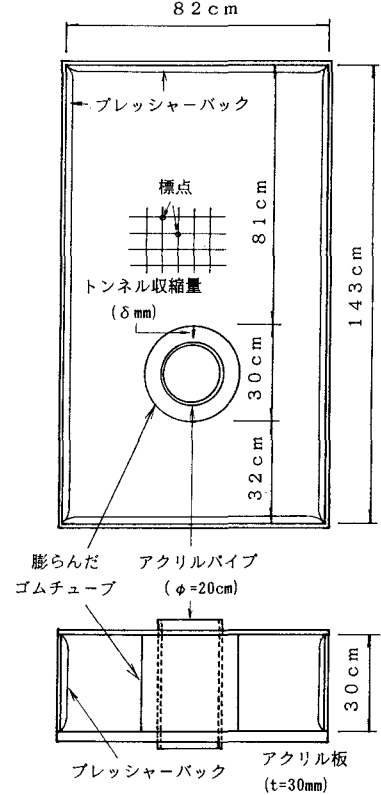


図-7 土槽試験装置

表-7 実験ケース

ケース	補強材の種類・形状		凡 例
1	無 補 強		
2	ケント紙 ($t=0.2mm$)	$B=0mm, H=0mm$ (突起無し)	
3	ケント紙 ($t=0.2mm$)	$B=36mm, H=30mm$ $\theta=120^\circ$	
4	ボール紙 ($t=0.65mm$)	$B=36mm, H=30mm$ $\theta=120^\circ$	

突起を付けたケース3の場合には無補強の場合に比べて約半分の沈下量となっている。

また、ケース3ではケース4のボール紙を使った場合とほぼ同等の沈下抑制効果があり、薄い紙でも突起を付けることにより地山と一体化し、土との複合体として地山を有効に補強するようである。

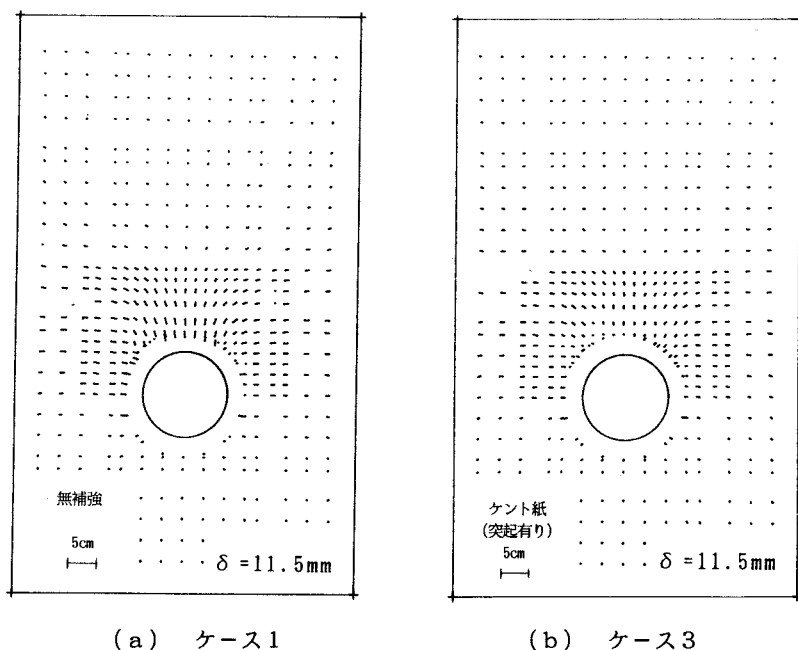


図-8 変位ベクトルの比較

種々の地盤に対し、セメント-水ガラス系の瞬結型薬液を高圧噴射させて、逆T型改良固結体の出来形、強度について調べた。また、逆T型プレライニングの補強効果を調べるためにプレライニングを紙でモデル化して土槽実験を行なった。

その結果、以下のことが分かった。

- (1) 注入対象地盤の粒度分布および強度により、固結体の厚さおよび幅は大きく変化する。
- (2) 固結体の強度はホモゲル強度より小さく、 $q_u = 20 \sim 30 \text{kgf/cm}^2$ を示す。
- (3) 二連のノズルにすることにより、逆T型固結体の厚みが全体的に厚くなり、固い地盤でも10cm程度の厚さを確保することができる。
- (4) 補強材としてケント紙を使った場合、逆T型にすることにより補強効果がより大きくなる。

今後は三次元土槽を使った模型実験や実物大の現場実験により、逆T型プレライニングの効果を詳細に検討していくつもりである。

6. 参考文献

- 1) 柴崎光弘・太田想三・久保弘明：ジェットグラウト工法，鹿島出版会，1983
- 2) 田口善文・香川和夫・酒向信一：高圧噴射注入実験による逆T型改良固結体の特性について，第46回土木学会年講，1991
- 3) 田口善文・波田光敬・香川和夫：三方向の高圧噴射により造成した逆T型固結体の形状について，第47回土木学会年講，1992

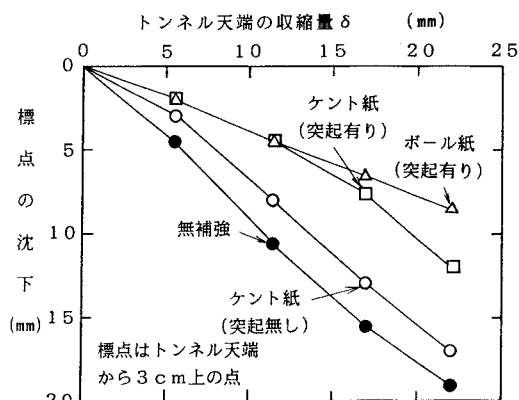


図-9 各ケースでの沈下の比較