

プレライニング（PASS工法）により 施工した都市NATMの挙動計測

MEASUREMENTS OF GROUND BEHAVIOR OF THE URBAN TUNNEL CONSTRUCTED BY PRE-LINING (PASS METHOD)

沼沢隆治*・太野垣泰博**

田口善文***・香川和夫***・原隆文****

Ryuji NUMAZAWA, Yasuhiro TAYAGAKI, Yoshifumi TAGUCHI, Kazuo KAGAWA and Takafumi HARA

We have developed the pre-lining method (PASS method) that can make the thin lining of arch-shell shape on the face, stabilizing the face and decreasing the surface settlement before the excavation. We applied this method to a shallow tunnel in diluvial sandy layer. Ground surface settlement, steel support stress and shotcrete stress were measured in order to evaluate the ground behavior. This paper presents the comparison between those field measurements and the numerical analysis. The results show that the ground behaves as elastic body by the pre-lining.

Keywords: shallow tunnel, diluvial sand, field measurements, pre-lining, numerical analysis

1. はじめに

東葉高速線は営団地下鉄東西線の西船橋駅から京成電鉄成田線勝田台駅に至る延長16.2kmの鉄道新線であり、勝田台トンネル池上工区はこの東葉高速線の終点付近の153mをNATMで施工する。当工区では土被りの極めて薄い未固結砂層を掘削するために切羽の安定性確保および地表沈下の抑制が大きな課題である。そこで掘削に先立って切羽前方地山内にあらかじめアーチシェル状の薄肉ライニングを構築するプレライニング（PASS工法）を採用した。¹⁾

プレライニングにより施工したトンネルの地山挙動の把握および今後の設計資料収集のために地表沈下測定等のA計測をはじめ、地中沈下測定、支保工応力測定等の特殊計測を実施した。本報告はこれらの計測結果について報告する。

2. 地形、地質概要

当工区は京成電鉄勝田台駅の北側に位置しており、地上部は標高30m前後の台地となっている。トンネル土被りは6～7mであり、MATMによる施工限界に近い地形条件である。付近には閑静な住宅街が広がり、トンネルに近接して数件の民家が存在している。地質は図-1に示すように土被り部は関東ローム層および凝灰質粘土層で覆われており、いずれもN値10以下の軟弱な地盤である。トンネル掘削部は成田砂層および洪積粘土層で構成されており、特に、上半部に出現する砂層はN値10～20程度と軟弱なうえに細粒分が少ない箇所があり、切羽の不安定化、地表沈下の増大が懸念された。

* 正会員 日本鉄道建設公団 関東支社 ** 正会員 日本鉄道建設公団 関東支社 八千代鉄道建設所
*** 正会員 株式会社フジタ **** 正会員 株式会社フジタ 関東支店

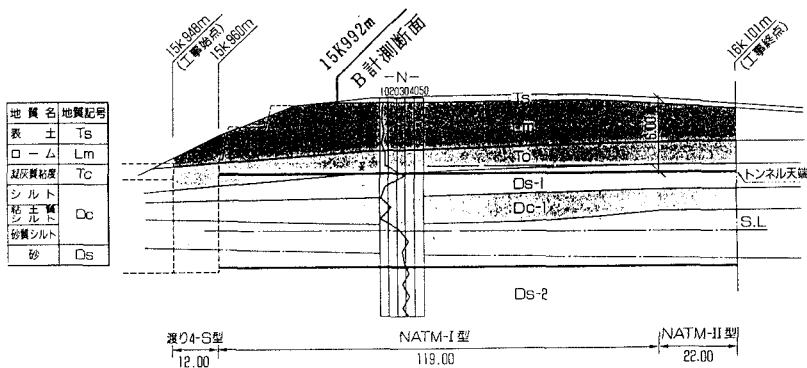


図-1 地質概要

3. プレライニング (PASS工法) の概要

3.1 プレライニング (PASS工法)

プレライニング工法は、掘削に先立って切羽前方地山内にあらかじめアーチシェルの薄肉ライニングを構築するものであり、先受工の働きと同時に一時支保の役割を持つものである。プレライニングは先受工として先行変位を抑制するとともに、その内圧効果により地山アーチの形成を助けるために、地表沈下の抑制や切羽の安定性向上の効果が大きいと考えられる。また、大断面の機械掘削が可能になり施工性が向上するとともに肌落ち等の危険がなく安全性が向上する。

プレライニングの施工手順は図-2に示すようにまず専用の5軸オーガ式削孔注入機により長さ4m、厚さ17cm幅81cmのスリット状掘削を行なう。次にオーガの引抜きに併せてモルタルをスリット内に充填し、1ピースのモルタル壁を造成する。この壁をトンネルアーチに添って上半125°の範囲に連続的につくり、アーチシェルのプレライニングを完成させる。これら一連の作業は削孔の位置決めからモルタル注入に至るまで全て自動制御により行なう。

このような手順で施工したプレライニングの出来形を掘削時に測定した結果、目標とする精度を満足することができた。

3.2 トンネルの施工

PASS工法区間 (NATMI型) の掘削標準図を図-3に示す。支保はH-125の鋼製支保工と吹付コンクリートによる構造とした。

掘削方法は、できるだけ加背を大きくして機械掘削を主体とした施工形態を可能とするためにショートベンチ工法を採用したが、プレライニング機械が全長15mであり、上半盤での機械掘削との離合を考慮するとベンチ長は40～50mとなった。

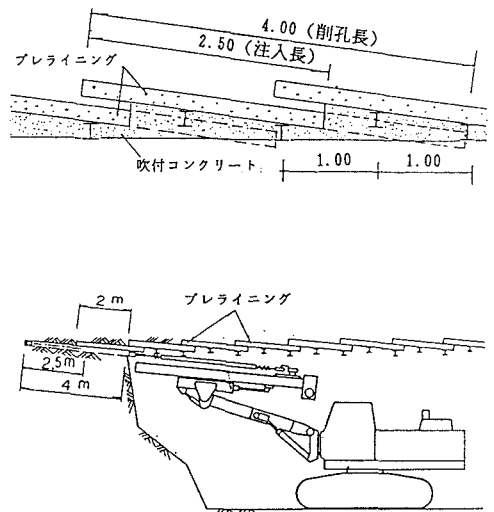


図-2 プレライニング施工手順

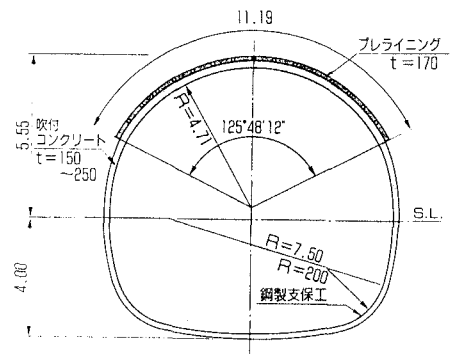


図-3 掘削標準図

4. 計測結果

計測は日常施工管理としての地表沈下、天端沈下、内空変位等のA計測と地中鉛直変位、地中水平変位、鋼製支保工応力、吹付コンクリート応力測定、連結傾斜計による天端上部沈下測定等のB計測を行った。B計測は15K992mの地点で行い、天端上部沈下測定は坑口から60mの間で実施した。図-4に計測器の設置断面を示す。

4.1 地表沈下

図-5に15K975m~16K060mまでの上半掘削時におけるトンネルセンター部の地表沈下を切羽距離で整理したものを示す。上半掘削の地表への影響は切羽前方10mから始まり、切羽到達時には10~16mmの沈下である。その後、切羽通過後10m程度で沈下は収束し、最終沈下量は22~30mmである。

図-6は上述の地表沈下曲線を最終沈下量で除して無次元化したものである。図から上半切羽到達時の先行沈下率は約30~40%である。また、図中には無支保の条件での三次元弾性解析結果を併示している。図から、実測値と三次元解析を比較すると、切羽到達以降の沈下挙動はほぼ一致しているが、切羽到達以前では実測値の方が沈下率が小さい。このことは、プレライニングが先行沈下を抑制した結果であると考えられる。図-7は15K992m地点の上半収束時のトンネル横断方向の沈下曲線を示す。沈下曲線はほぼ正規分布を示している。変曲点の位置はトンネルセンターから左右ともに6m地点であり、

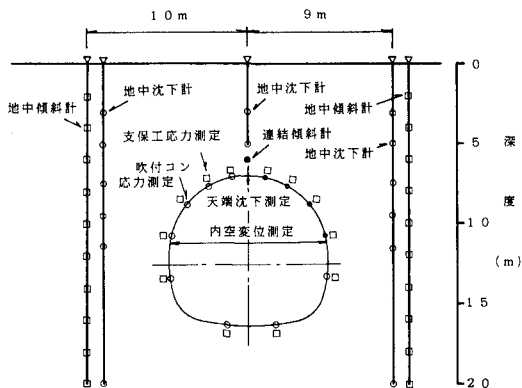


図-4 計測器の配置 (15K992m)

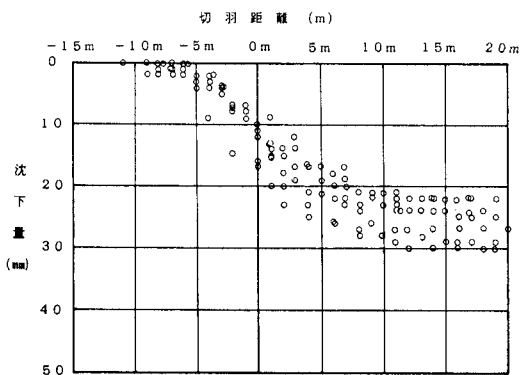


図-5 地表沈下 (上半収束時)

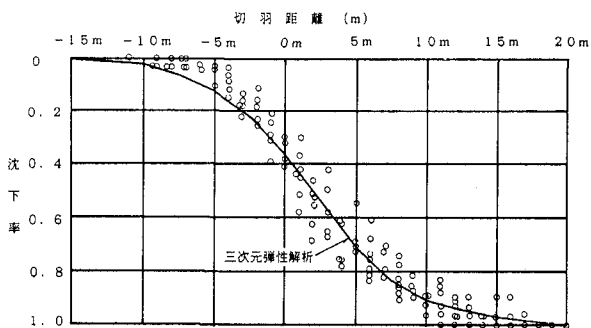


図-6 無次元化した地表沈下 (上半収束時)

トンネル幅とほぼ同じ範囲で沈下が大きくなっている。また、横断方向の沈下の影響範囲はトンネルセンターから15m程度である。

4.2 天端および天端上部沈下

図-8に16K005mの地表沈下、天端沈下および天端上部沈下の経時変化を示す。天端上部沈下とはトンネル天端1m上方の地山に水平方向に傾斜計を1m間隔で連続して接続し、切羽進行

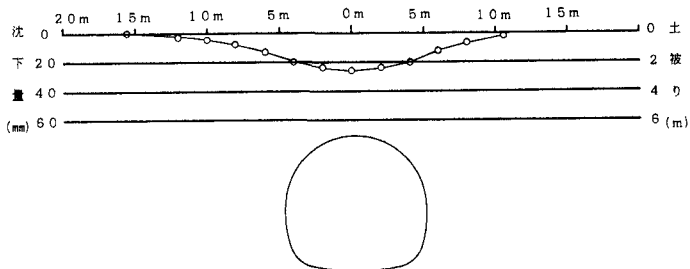


図-7 横断方向の沈下 (上半収束時)

に伴う沈下量を算定したものである。図から、天端上部沈下と地表沈下はほぼ同等の沈下を示しており、同図に併示するレベルによる天端沈下を参考にすると地表沈下と天端沈下はほぼ同等か後者が多少大きい程度である。また、内空変位は上半収束時で0~3mm程度であり、非常に小さい値となっている。

4.3 地中沈下

地中沈下測定は地中変位計をトンネルセンターから左右9mの位置とトンネルセンター部に設置した。トンネルセンター部の変位計は不動点が存在しないために地中変位計の頭部をレベルで計測している。

図-9はトンネルセンターから右側の地中沈下の経時変化を示す。図から、最上段(地表面)の沈下に着目すると、トンネル切羽前方20mから1mm程度の沈下が生じ、切羽前方5mから極端に大きくなる。その後切羽到達時には約3.5mmの沈下が生じ、最終時には8mmの沈下である。収束の時期は切羽通過後10m程度でほぼ収束する。先行沈下率は40%程度であり、トンネルセンターの地表沈下とほぼ同程度となっている。他の深度の地中沈下計も地表部と同様の沈下傾向を示すがNo.3~4(D_{s-1} 層)の相対変位が大きい。

トンネルセンター直上部の地中沈下は1mm程度の相対変位を生じているが、切羽通過前は地表沈下の方が大きく、切羽通過後は天端付近の沈下が大きい。

図-10は上半収束時の地中沈下および鉛直ひずみの分布を示す。鉛直ひずみは各地中沈下測定点の変位差を距離で除して求めたものである。図より、 T_c 、 D_{s-1} 層で大きく沈下し、 L_m 層では一体化して沈下している。 $T_c \sim D_{s-1}$ の付近はひずみの卓越した領域であり、ゆるみ領域の境界であると考えられる。しかし、 T_c 、 D_{s-1} 層の圧縮ひずみは0.2%以下であり、通常の土質試験結果から推定すると、ほぼ弾性範囲内であると考えられる。

4.4 地中水平変位

地中水平変位はトンネルセンターから左右10mの断面に2m間隔で設置した。

水平変位は切羽前方5mから大きく変位する。切羽到達時には約4mmの水平変位が生じ、切羽通過後10mでほぼ収束する。この時の水平変位量は10mm程度である。先行沈下率を算定すると40%程度であり、地表沈下、地中沈下とはほぼ同様の値である。

図-11は上半収束時の地中水平変位の分布およびせん断ひずみの分布を示す。図によると D_{s-1} 層から上方地山で大きくトンネル方向に傾斜していることが分かる。また、せん断ひずみは0.2%前後である。

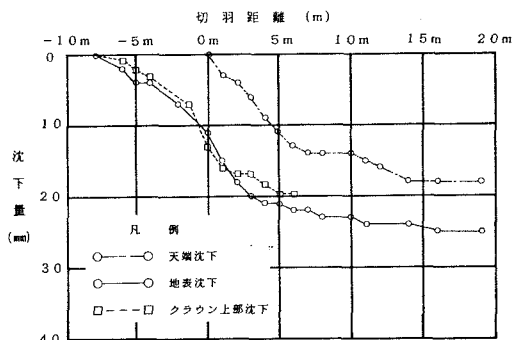


図-8 沈下曲線(16k005m)

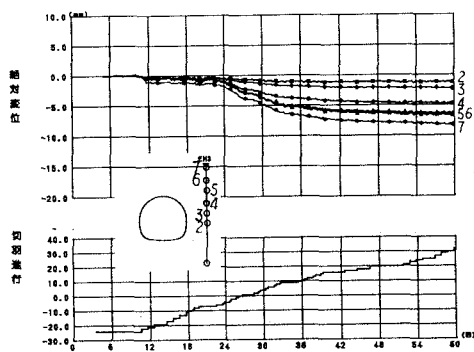


図-9 地中沈下の経時変化

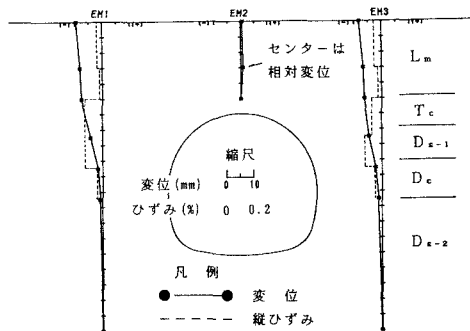


図-10 地中沈下の分布

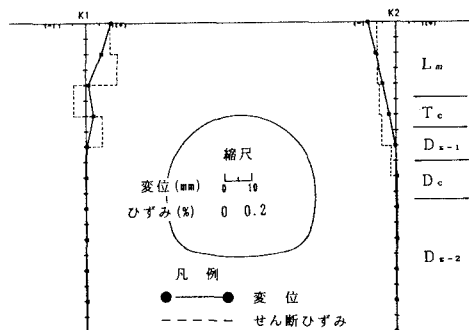


図-11 地中水平変位の分布

4.5 支保工応力

図-12に15K992mの鋼製支保工の軸力の経時変化を示す。図から、天端付近の支保工軸力は切羽通過後2m程度で収束するが、支保工脚部の軸力は切羽通過後10mでほぼ収束し、その後も20m程度までわずかながら上昇する。

図-13は上半収束時の15K992mの軸力分布図を示す。軸力の分布図から支保工脚部で23~27tf、天端部は5tf程度であり、脚部の1/4~1/5となっている。

図-14に曲げモーメントの分布図を示す。モーメントの分布は天端付近で内側に凸、脚部付近では外側に凸の分布を示す。これらの結果から、鉛直荷重が大きく卓越しており、水平方向の土圧は小さいと考えられる。

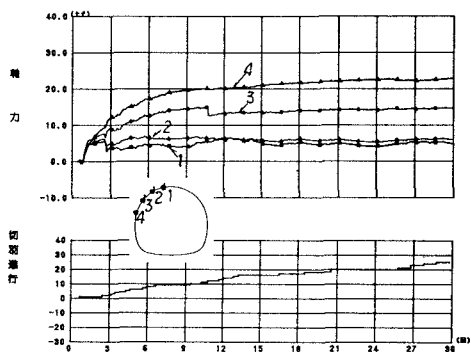


図-12 支保工軸力の経時変化

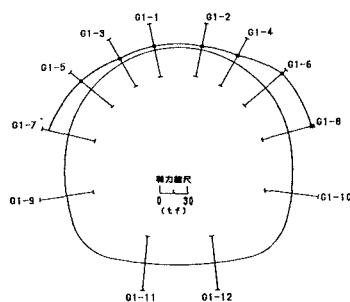


図-13 支保工軸力の分布図

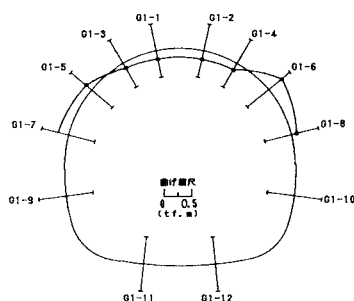


図-14 支保工モーメントの分布図

4.6 吹付コンクリート応力

図-15は15k992mの吹付コンクリート応力の経時変化を示す。吹付コンクリート応力は切羽通過後ほぼ10mで収束する。

図-16に吹付コンクリート応力の分布を示す。数カ所で引張応力を示すところもあるが、全体的に圧縮応力であり、吹付コンクリート脚部で13~18kgf/cm²、天端付近で8kgf/cm²程度であり、脚部の方が大きい。このことは、鋼製支保工の場合と同様に鉛直荷重の方が卓越していることを意味する。

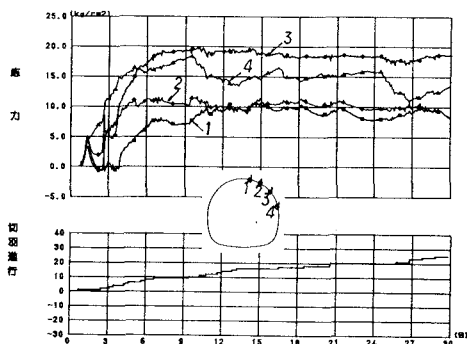


図-15 吹付コンクリート応力の経時変化

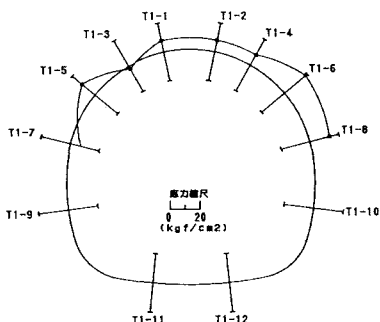


図-16 吹付コンクリート応力の分布図

4.7 荷重分担率について

これまでの支保工応力の計測結果から、各支保の概略の荷重分担を求める。上載土被り荷重が一体となって落ち込むような挙動をすると仮定し、側壁部分の平均的な支保工軸力、吹付コンクリート応力の値を使用

して、奥行1 m当りの鉛直方向の荷重分担を考えると、上載土被り荷重 P_v に対して、支保工の支える荷重 P_s と吹付コンクリートが支える荷重 P_c の和は P_v の約2/3となる。従って、その残り約1/3がプレライニングを含めた地山アーチで分担されている勘定となる。プレライニングがどの程度地山アーチの形成に役立っているかは、他の補助工との定量的な比較を行なうかあるいは詳細な数値解析を行なう必要がある。

5. FEM解析との比較

プレライニングの効果を検討するために、二次元弾性解析結果と実測値との比較を行なった。図-17は上半掘削時の横断方向の沈下形状を比較したものである。図から、プレライニング有りとなしでは約半分の

沈下量となっている。二次元解析は平面ひずみ条件を仮定しているためにトンネル軸方向のプレライニングの効果を過小評価している。このために実際はさらにプレライニングの効果があるものと考えられる。また、実測値と解析値を比較すると実測値が多少小さいもののほぼ同様の傾向を示していることから、全体的には弾性状態で掘削されたものと推察される。図-18は支保工軸力の解析値と実測値を比較している。プレライニング有りの場合、解析値と実測値はほぼ同様の傾向を示し、応力的にも弾性挙動にほぼ近いようである。

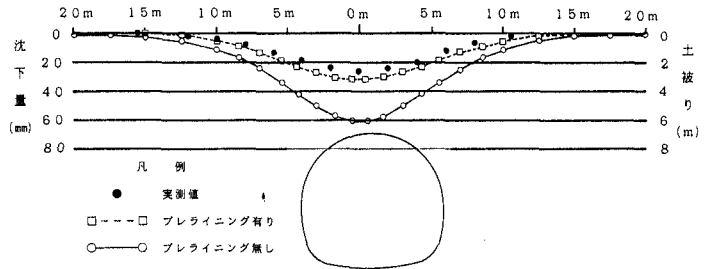


図-17 弾性解析との比較（沈下）

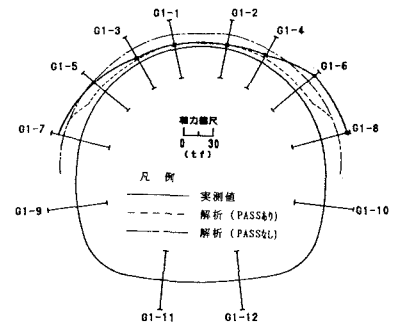


図-18 弾性解析との比較（軸力）

6. まとめ

土被りの薄い都市NATMにプレライニング工法を適用し、地表沈下、地中変位、支保工応力等の現場計測を実施し、FEM解析等と比較した。その結果、以下のことが分った。

- (1) 上半掘削時の地表沈下は20~30mm程度であり、切羽前方1 Dから沈下が始まり切羽通過後1 Dで収束する。また、FEM解析と比較すると切羽到達以前の沈下率が小さく、プレライニングの効果であると考えられる。
- (2) 支保の荷重分担は吹付コンクリートと鋼製支保工が全土被り荷重の約2/3を受け持ち、残りの約1/3をプレライニングを含めた地山アーチが受け持つ。また、支保工応力は900kgf/cm²程度であり、支保工サイズは妥当であった。
- (3) 地表沈下、支保工応力をFEM弾性解析と比較するとほぼ同様の値を示し、全体的には弾性状態で掘削されたと考えられる。

7. おわりに

土被りが薄く、未固結砂層という施工条件の困難な大断面トンネルにプレライニング工法を採用し、地表沈下・切羽の安定性・施工速度の向上について一定の成果を上げながら、無事掘削を完了させることができた。さらに今後は三次元解析や他工法との比較を行ない、プレライニングの効果・メカニズムについて十分検討し、設計等へ反映させていくつもりである。最後に、工法の研究・開発にあたり適切なご指導を頂いた京都大学教授 足立紀尚氏に深甚の謝意を表します。

8. 参考文献

- 1) 太野垣ら：五軸オーガによるプレライニング構築技術とその施工について、土木学会年講VI, 1991