

アンダーパスの急速施工法の開発と 実証実験工事経過報告

井澤昌佳¹・吉田公宏²・林成卓³・太田行⁴

¹正会員 株式会社大林組 土木技術本部技術第二部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

²正会員 株式会社大林組 土木技術本部設計第一部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

³正会員 株式会社大林組 土木技術本部技術第二部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

⁴正会員 株式会社大林組 土木技術本部設計第一部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

都市部では多くの交差点で慢性的に渋滞が発生し、多大な経済損失につながっている。このような交差点では立体化工事が必要とされているにもかかわらず、工期が長いこと、工事による二次交通渋滞など周辺環境への影響の問題等があり、なかなか着工へと進まないのが現状である。今回開発されたアンダーパスの急速施工法は、こうした立体化工事のうちアンダーパスを従来工法の1/3の短期間で急速施工する工法で、アプローチ部からトンネル部の矩形の道路断面を1台のシールドマシンによって連続的に施工するという、世界でも例を見ない立坑が不要なシールド工法である。現在、延長100mのトンネルを実際に構築する実証実験工事を施工しており、本論文では本工法と本工事のこれまでの経過を報告する。

キーワード：立体交差化, 急速施工, シールド工法, 地上発進・到達, 低土被り

1. はじめに

都市内の主要交差点における慢性的な交通渋滞は、経済活動や周辺環境に多大な悪影響を及ぼしている。このような交差点の渋滞の解消は、活力ある都市活動の確保を目的とする都市再生プロジェクトの一つとして重要な位置付けを持つとともに、NO_x (窒素酸化物) やPM (粒子状物質) などの軽減により環境保全にも寄与する。

そこで当社では、このような「20世紀の負の遺産」とも言われる慢性的な交通渋滞の原因となっている交通ボトルネック問題を解決するための施工技術として、都市環境に配慮しつつ短期間で経済的に立体交差化を実現するための工法を開発した。立体交差化にはオーバースタック構築とアンダーパス構築があるが、このうちアンダーパスを急速施工する技術が本論文で紹介するURUP (Ultra Rapid Under Pass, ユーラップ) 工法である。

本工法は、高さ×幅が約3.5m×3.5mの矩形シールドを掘削する幅に合わせて複数配列した「マトリックスシールド」を用いて、地表からそのままトンネルを掘り進め、交差点部を開削することなく地下立体交差を施工しアプローチ部の出口に到達させる。

シールドマシンで掘削する際に通常必要となる立坑や、アプローチ部などの大規模な開削工事が不要となるので、大幅な工期短縮が可能であり、かつ工事に伴う交通渋滞や騒音・振動も大幅に軽減することが可能である。従来工法には

開削工法

函体あるいはエレメントを推進・牽引する非開削工法

があるが、工期は に比較して1/3、工費は と同程度、 と比較して2割ほど安価になる(標準的な線形・施工状況で比較した場合)。

このように都市環境に配慮しつつ大幅な工期短縮が可能となった背景には、以下の2点の新技术が挙げられる。

シールドマシンの地上発進・地上到達

低土被り(シールドマシン径の1/2程度)掘進

に関しては世界でも例を見ない新技术であり、また にも関わらず低土被り掘進という観点では既往最高レベルのシールド技術である。

このような性格をもつ新技术を机上検討のみで開発することには限界があり、詳細技術を確立するために当社では実際にトンネルを施工する実証実験工事を行なうことにした。本工事は平成16年11月に施

工を始めたが、本論文執筆時点で本工事は施工中であり、本論文ではURUP工法の概説の他に、本工事からこれまでに得られた知見を報告する。

2. URUP工法の概要

(1) アンダーパス工事の従来工法

アンダーパス工事の従来工法には、既に述べたように開削工法と非開削工法がある。開削工法は、交差点を含む全線を地表から掘り下げてアンダーパスを構築、その後上部を埋めて再び道路を復旧させるというものである。工期が長く、交差点部の道路占用の必要もあるため、工事による渋滞を長期間にわたりひきおこすというデメリットがあった。

一方、交差点で道路占用の必要がない非開削工法でも、図-1に示すように立坑を構築し、掘削設備を設置してトンネル部を掘削、最後にアプローチ部の開削というように工事が3工程に分かれ、長い工期を要するという問題点があった（この非開削工法の例としては、函体を推進・牽引するR&C工法・フロンテジヤッキング工法、エレメントを推進・牽引するPCR工法・HEP&JES工法などがある）。

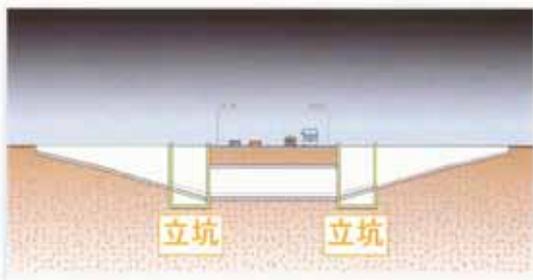


図-1 従来工法（非開削工法）

(2) URUP工法

URUP工法は、アプローチ部からトンネル部を1台の



図-2 URUP工法の施工方法

シールドマシンで連続して施工するため、立坑が不要となり、短時間で施工できることが最大の特長である。図-2に示すようにシールドマシンが地上から発進し、交差点下の低土被り部を掘進、再び地上部へ到達する。この低土被り部の掘進を可能とする、特徴的な構造をもつシールドマシン（これを「マトリックスシールド」と呼ぶ）を開発した。

(3) マトリックスシールド

マトリックスシールドを正面から見た場合、2車線対応のマトリックスシールドは1辺約3.5mの矩形シールド（これを「ヘッド」と呼ぶ）が3列×2段の行列状（マトリックス状）に配置されている。それぞれのヘッドには独立したチャンバーがあり、個別のヘッド毎に掘進が可能となっている。すなわち、ヘッド毎に独立した切羽管理が可能となっている。

マトリックスシールドは2つの特長を持っている。

1. 図-3に示すようにマトリックスシールドには側部に壁状の掘削機構（これを「側部カッター」と呼ぶ）を有している。アプローチ部で掘進する際は側方地盤上を交通に開放しながら施工するため、側方地盤の変状を防ぐことが重要である。掘進時にこの側部カッターをシールドマシン全体の掘進に先行させることにより、矢板のように掘削に対する土留効果を持たせることができる。

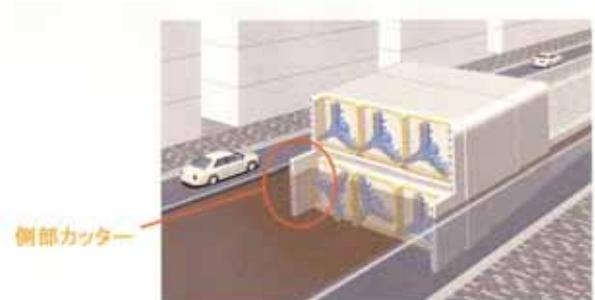


図-3 側部カッター

2. 図-4に示すようにヘッドの外径をDとした場合、掘進単位は1つのヘッドであることから掘進可能な土被りは0.7D～1Dである（シールド工法では、地上での地盤変状を起こさずに掘進可能な土被りの最低値は、シールドマシン外径の0.7倍～1倍程度であることが経験的に知られている）。すなわち、D=3.5mとすれば、シールドマシン全体の外径2D=7.0mに対し、その1/2の3.5m程

度の低土被りでの掘進が可能となる。

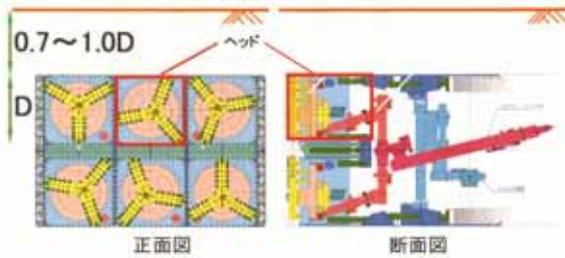


図-4 ヘッドと土被りの関係

土被りに関しては、アンダーパスの縦断線形が上方にくるほどアンダーパスの全長が短縮でき、アンダーパス工事の工事量および交差点間にアンダーパスを設置する際の自由度という観点から有利になるため、交差点部では可能な限り低土被りとするべきである。

一方交差点部では、通常地上から3m以内にライフライン等の地中構造物が埋設されている可能性がある。そのため、地下埋設物を避けるために交差点部では3.5m程度の土被りを確保する必要がある。

以上のことから、URUP工法では交差点部の土被りの標準値を3.5mとした。

断面形状に関しては、以下の理由により円形断面ではなく矩形断面を採用した。

1. 建築限界は通常矩形であり、またアンダーパスのトンネル部は自然換気が可能な延長であることが多いので換気設備が通常不要である。すなわち掘削断面を矩形とすることが可能であり、また換気設備の設置スペースを考慮する必要がないため、円形断面に比較して掘削量の観点から有利になる（標準的な断面では円形断面に比較して16%ほど低減できる。図-5参照）。

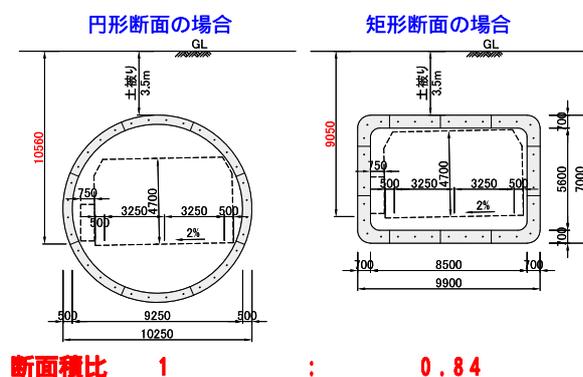


図-5 円形断面と矩形断面の比較

2. 円形断面の方がセグメント径に対する土被りの比が小さくなるため、より低土被り掘進となり施工が困難になる。仮に円形断面でも矩形断面と同じ土被りで施工可能であるとしても、矩形断面の方がアンダーパスの縦断線形が上方に位置し、アンダーパスの全長を短縮できる。

マトリックスシールドはヘッドの組み合わせにより、様々なサイズの掘削断面に対応が可能である。

(4)浮上り対策

アンダーパスのアプローチ部は躯体がU型であるため躯体重量が軽く、地下水位によっては地下水の浮力による躯体の浮上りを考慮する必要がある。開削工法では躯体の底版厚を大きくすることにより躯体重量を増すことが可能であるが、URUP工法はシールド工法であり、セグメントだけでは浮力に対抗できるだけの重量が不足することがある。さらにセグメント本体は、運搬・組立等の施工性を考慮すると本来軽くする必要があるのである。URUP工法では以下のように対処する。

1. 標準断面で検討した場合、アンダーパス完成後は浮上りに対して十分な安全率（通常は1.1）を確保できるが、施工時（セグメント組立直後）は、坑内の舗装および舗装下の基礎コンクリートがない状態であり、一部の区間で所定の安全率を確保できない箇所が生じる（図-6参照）。この場合、シールドマシンが後方台車とともに所定の安全率を確保できるようなウェイトを牽引して施工する。

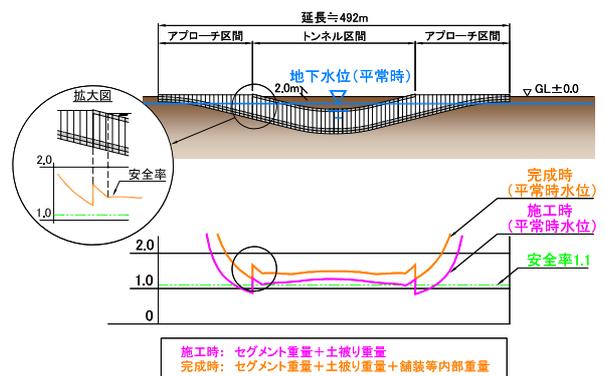


図-6 完成時と施工時の浮上り安全率

2. 上記の完成後の安全率は地下水位を通常考えられるGL-2m（平常時）として算定したものである。これに対し、完成後に何らかの理由により地

下水位が一時的にGLまで上昇した場合（異常時）、やはり一部の区間で所定の安全率を確保できない箇所が生じる（図-7参照）。この場合、所定の安全率を確保するために一部の区間でグラウンドアンカーを用いる、舗装下の基礎コンクリートに重量コンクリートを用いる、舗装下にウェイト（インゴット）を設置する等の対策をとる。

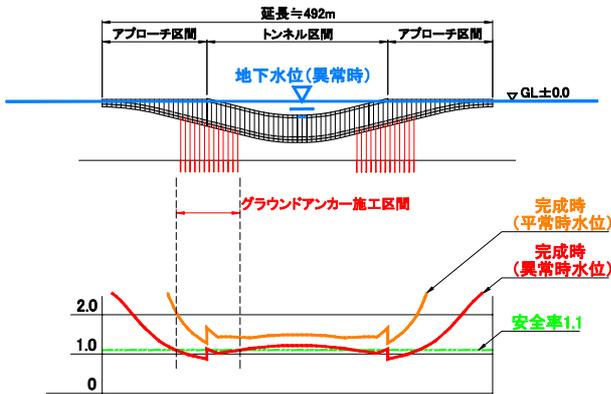


図-7 平常時と異常時の浮上り安全率

(5) アプローチ部の掘進手順

アプローチ部は以下に示す手順で掘進する。

1. 図-8に示すように、シールドマシンの受台を地上に構築し、後方にシールドマシンが前進する際の反力を受ける反力架台を組む。
2. 受台上にシールドマシンを設置する。このときシールドマシンは切羽面がほぼ地表面から出ている状態である。
3. 側方地盤の変状防止のために必要があれば側部カッターを張り出す。
4. 通常のシールド工法と同様に、マシン全体がセグメント幅分前進した後、セグメントを組み立てる。このとき、張り出した側部カッターはシールドマシンに対し常に先行している。

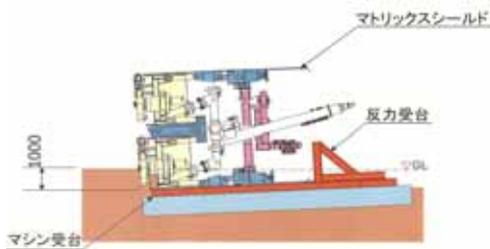
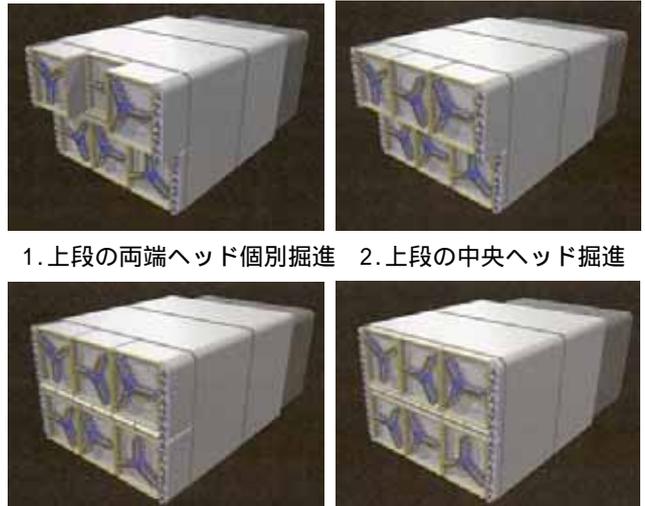


図-8 反力架台

(6) トンネル部の掘進手順

トンネル部は図-9に示す手順で掘進する。

1. 上段の両端のヘッドを個別に掘進する。
2. 上段の中央のヘッドを掘進する。このとき先行した両端のヘッドは側方地盤のゆるみを抑制する効果をもつ。
3. 下段のヘッドを掘進する。このとき先行した上段ヘッドは上方地盤のゆるみを抑制する効果をもつ。
4. シールドマシン全体が前進し、セグメントを組み立てる。



1. 上段の両端ヘッド個別掘進 2. 上段の中央ヘッド掘進
3. 下段ヘッド掘進 4. シールドマシン前進

図-9 トンネル部の掘進手順

(7) URUP工法の特長

URUP工法の特長をまとめると、以下のようになる。

1. 発進・到達立坑が不要であるので、超短期間での急速施工が可能である。延長約500m片側1車線のアンダーパスのケーススタディによれば、工期は従来工法（開削工法、非開削工法とも）の3年から、1/3以下の10ヶ月へと短縮が可能である。
2. 交差点部での道路占用工事が不要なため、開削工法と異なり二次交通渋滞を緩和できる。また、4車線アンダーパスを往路・復路に分離して2車線ずつ施工する場合、往路（例えば上り線）を施工した後、シールドマシンをUターンさせて復路（この場合下り線）を施工するという施工法が可能である。この場合には上下線全体の完成を待たずして往路（上り線）完成時点で往路（上り線）の交通開放ができるため、交通渋滞を早期に低減できる（ただし、アンダーパスに直交する道路の交通渋滞は、上下線全体の完成を待つ必要がある）。

3. 立坑構築・アプローチ部掘削などの開削工事が不要であるため、騒音・振動の原因となる杭打機・大規模掘削重機などは使用しない。開削工法およびURUP工法以外の非開削工法と最も異なる点があるが、この点である。なお、シールド設備は防音ハウスで囲うことが可能であり、工事期間も短いため、周辺環境に与える影響は最小限に抑制できる。また、構造に必要な断面のみ掘削するため、建設発生土量も最小化できる。すなわち、非常に環境負荷の小さい工法である。
4. マトリックスシールドはヘッドの組合せにより構成されユニット化されているため、現地での組立解体作業を簡素化できる上、様々な幅員の断面への対応が可能である。すなわち、ヘッドを転用することが可能であり、コストダウンが可能である。

3. 実証実験工事

先述したように世界でも例を見ないシールドマシンの地上発進・地上到達と、シールドマシン径の1/2程度の土被りでの低土被り掘進という新技術を確立するため、実証実験工事を計画した。東京都清瀬市にある当社技術研究所において現在施工中であり、本論文執筆時点での進捗率は延長の約6割である。完工は平成17年3月の予定である。

(1) 検証項目

1. 地上からの斜め発進

側部カッターによる側方地盤変位防止の有効性と、姿勢制御のための中折れ装置・可動そりの有効性の確認。
2. 低土被り掘進

マトリックスシールドのヘッドが個別掘進するこ



図-10 平面図・縦断図

とによる有効性と、掘進時の滑材の有効性の確認。

3. 地上への斜め到達
 1. と同様の項目について検証する。

(2) 実験計画

図-10に実験計画平面図と縦断図を示す。

1. 施工延長：約100m
2. 土被り：最大で2.2m（本工事のシールドマシンの約1D）
3. 縦断勾配：10%
4. 縦断曲線：R=100m
5. 平面曲線：R=300m
6. シールドマシン：幅4.80m × 高さ2.15m × 長さ5.65m

(3) 実験シールドマシン

低土被り掘進をするため実機と同様に泥土圧式シールドとした。シールドマシンの大きさについては、実験機であるため以下の目的を満たす範囲内で最小限の大きさとした。

1. 人が通行できるセグメント内空高さ（1.8m）を確保するため高さを2.15mとした。
2. 個別掘進の有効性を確認するため、少なくとも左右に2連のヘッドをもつ構造とした。
3. 側部カッターの有効性を確認するため、側部カッターを装備した。

以上の目的を満たす構造を検討した結果、2列×1段の側部カッターを装備するマトリックスシールドとした。

(4) 施工状況写真

本工事の施工状況写真を写真-1～写真-6に示す。当現場の地盤はほとんどが関東ローム層であるが、他の土質の地盤でも掘進可能であることを確認するため、発進基地付近を砂質土層に置き換えた（これを「砂置換」と呼ぶ、写真-1参照）。また、土被り0.7D=1.5m付近では、アプローチ部掘進時に予想される地盤変状が交差点部に波及することを完全に防止するため、固化材による地盤改良を行なった（これを「地中エントランス」と呼ぶ、写真-2参照）。

1. シールドマシン発進状況（写真-3）

側方地盤変位防止のため側部カッターを張り出して発進した。シールドマシン側部にある白線は、実際の施工時における切回しの車道を模擬している。
2. アプローチ部掘進状況（5R, 写真-4）

【縦断図】



写真-1 砂置換状況

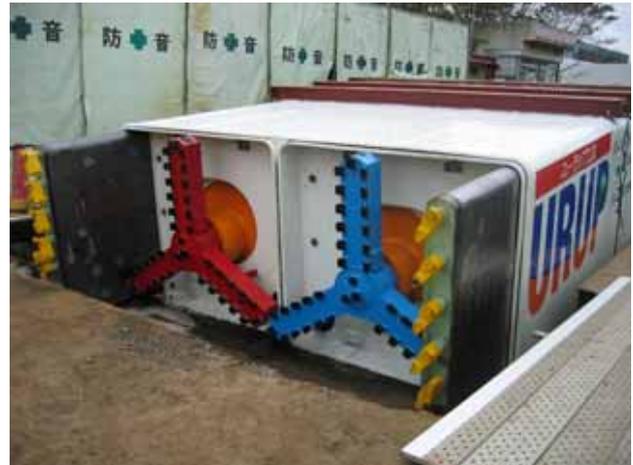


写真-3 シールドマシン発進状況

【縦断図】

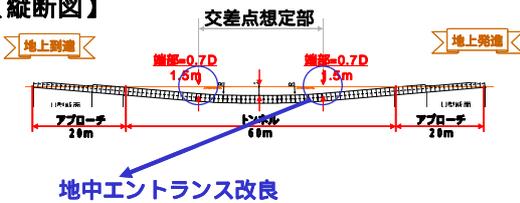


写真-2 地盤改良状況



写真-4 アプローチ部掘進状況

3. トンネル部地中貫入状況 (16R, 写真-5)

アプローチ部の掘進が終了し、トンネル部の地中貫入を始めた状況である。初めはカッターの掘削でシールドマシン直上の土砂を取り込んでしまう状況が続いたが、土被りが300mmを超えるとマシン直上の土砂を取り込まずに掘進が可能となった。また、この時点でも周辺の地盤変状はほとんど見られなかった。

4. トンネル部地中貫入完了 (21R, 写真-6)

土被りが500mmを超えると、地盤は完全にトンネル状態を形成し、土被り0.7D=1.5m付近の地盤改良地点よりかなり手前で地盤変状の波及を防止することが可能であることを確認した。また、ヘッド個別掘進、切羽土圧の管理、滑材の使用により、地盤沈下を抑制することが可能であることを確認した。

実証実験工事施工前は、アプローチ部掘進時における掘削による周辺地盤への地盤変状の波及が懸念されたが、アプローチ部掘進時は周辺地盤を目視で確認することにより切羽土圧・加泥材注入量を適切に管理することが可能であり、結果として写真に見られるように切羽前面以外の地盤はほぼ乱すことなく掘進が可能であることを確認した。



写真-5 トンネル部地中貫入状況



写真-6 トンネル部地中貫入完了

(5)各種測定データ

本工事の検証項目に対して、得られた測定データを以下に示す。

1. アプローチ部掘進時の側部カッターによる側方地盤変位防止の有効性を検証するため、側部カッターを掘進に先行させた結果、側方地盤の沈下は見られなかった。今後地上へ斜め到達する際に同様の実験を行ない、側部カッターの有効性を詳細に検証する予定である。
2. アプローチ部掘進時のシールドマシンの姿勢制御に関して、可動そり・中折れ装置・シールドジャッキ等の有効性を検証した結果、図-11に示すように平面・縦断線形において $\pm 50\text{mm}$ 、ローリングにおいて $\pm 0.5^\circ$ 以内の施工精度での掘進が可能であることを確認した。

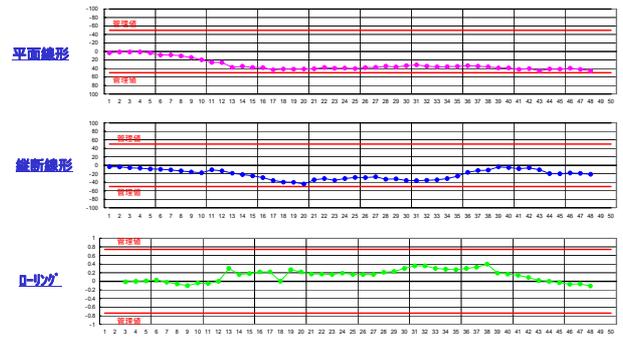


図-11 アプローチ部における、線形の変位量と掘進リング数の関係

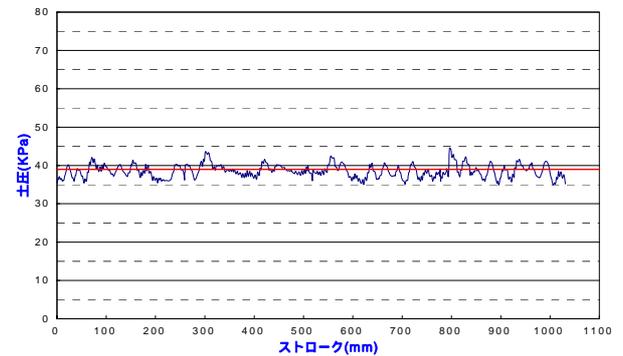


図-12 トンネル部における、切羽土圧とジャッキストロークの関係

3. トンネル部掘進時のシールドマシン前方での地盤変状防止には、マトリックスシールドのヘッド個別掘進とともに切羽での適切な土圧管理が不可欠である。今回土圧管理には自動土圧制御システムを導入したが、図-12に示すようにチャンバー内土圧の変動が $\pm 5\text{kPa}$ という高精度での土圧管理が可能であることを確認した。
4. トンネル部掘進時のシールドマシン直上での地盤変状防止には、適切な滑材注入圧管理が不可欠である。また、シールドマシン後方での地盤変状防止には、適切な裏込注入圧管理が不可欠である。図-13に示すように、両者を適切に管理することにより、シールドマシン進行による最終的な地盤沈下量は 10mm 以内に抑制できることを確認した。

4.まとめ

アンダーパス工事にURUP工法というシールド工法を適用することにより工期の大幅な短縮が可能とな

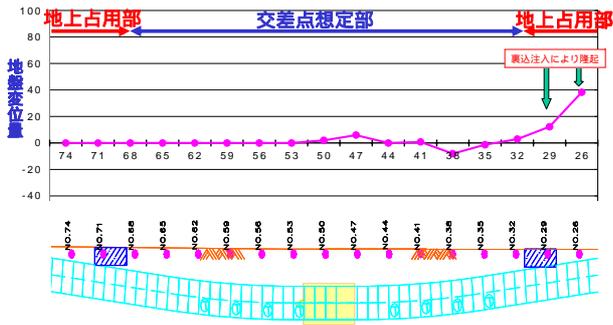


図-13 トンネル部における、最終的な地盤変位量

るが、このシールド技術の実現可能性に関して実証実験工事からは良好な結果が得られている。

今後工事は縦断曲線を経て上り勾配となる。地上部への斜め到達区間（平面曲線R=300mを含む区間でもある）において、側部カッターによる側方地盤変位防止の有効性、可動そりや中折れ装置・シールドジャッキによる姿勢制御の有効性、平面・縦断曲線施工を確認し、本工法の詳細技術を確立したいと考えている。