

大断面分割シールド工法 (ハーモニカ工法)の施工実績

武田 伸児¹・小柳 善郎²・服部 佳文³・佐藤 充弘³

¹正会員 大成建設株式会社 土木本部土木技術部都市土木技術室(〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

²正会員 大成建設株式会社 東京支店 (〒163-6009 東京都新宿区西新宿6-8-1)

³正会員 大成建設株式会社 土木本部土木設計部陸上第二設計室(〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

大断面分割シールド工法とは、矩形断面の大きなトンネルまたは構造物を、複数の小断面に分割し個々の断面を推進工法により小型のシールドマシンで繰返して掘削し大空間を作り上げた後、その内部に一体の構造物を作り上げる工法である。本論文は、東京ミッドタウンプロジェクトに関連して整備の進められている地下通路③における施工実績を元にハーモニカ施工、鋼殻の施工時の計測結果からハーモニカ工法について述べるものである。

キーワード：大断面分割シールド工法, ハーモニカ工法, アンダーパス, 矩形推進, 鋼殻

1. はじめに

都市部には交通渋滞発生箇所があり、交通渋滞を解消するための立体交差事業が進められている。

また都市再生事業として交通渋滞の解消があげられ、工事による渋滞の併発を抑えるための非開削技術の開発が必要とされている。

開削工法でアンダーパス方式の立体交差を構築する場合、地上部に施工ヤードを設置し躯体の構築を行うが、広い施工ヤードを必要とし、既設道路の車線数の減少や、工事に伴う新たな交通渋滞など、既存の交通流への影響や、施工期間の長期化などによる周辺環境に与える影響、特に渋滞解消のための工事が渋滞を誘発するという現象が問題となっている。



図-1 大断面分割シールドのイメージ

またアンダーパスのように土被りが浅く、地上部の鉄道営業線や幹線道路の下を非開削工法で施工する場合、軌道沈下や路面沈下与える影響は多大であり、影響を抑えた工法の開発が必需とされている。

そこで、これらの問題を解決し短期間でアンダーパスを構築する技術のとして大断面分割シールド工法（以降ハーモニカ工法）を開発した。

2. 開発技術の概要

ハーモニカ工法は、矩形断面の大きなトンネルまたは構造物を、いくつかの小断面に分割し個々の断面を小型のシールドマシンで繰返して掘削し大空間を作り上げた後、その内部に一体の構造物を作り上げる工法である。

断面の寸法・分割数の決定は自由度があり、要求されるアンダーパスの寸法、現場条件、掘削機、函体の運搬条件などによって決定される。ハーモニカ工法で使用する矩形の函体は鋼製を基本とし、隣接する函体間には特殊構造の継手を採用し、離隔の制御と止水性を高めている。

また、トンネル同士を接触させながら掘進を行うため、掘進方法はテール内でセグメントを組立てるシールド方式ではなく、立坑内で鋼殻を供給する推進方式となるが、推進力は元押しジャッキ方式と、シールドジャッキ方式を併用する。

掘削機械は密閉型の泥土圧式のマシンを使用し、切羽を保持しながら沈下を抑制して掘進する。

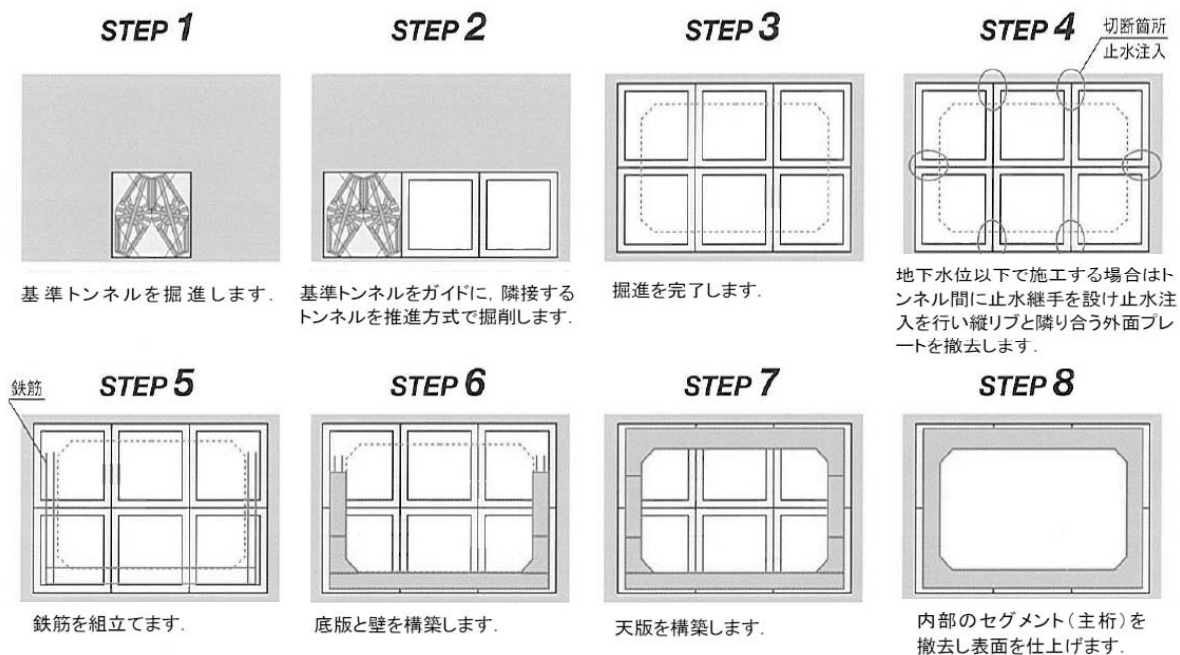


図-2 ハーモニカ工法施工手順

(1) 開発技術の特徴

ハーモニカ工法は以下の特徴を有する。

- ① 元押しジャッキ方式とシールドジャッキ方式の組み合わせで100mを越す掘進が可能である。
- ② 鋼殻の形を線形に合わせて製造するため、曲線施工が可能である。
- ③ 曲線施工により最小の掘削断面の施工により全体工事費の削減が可能である。
- ④ 密閉型掘進機械により切羽管理が可能であり、地表面への影響が少ない。
- ⑤ 掘進終了後も、本設構造物完成までの期間、鋼殻隣接部が中間杭、切梁となり路面への影響を抑制する。
- ⑥ 小断面のため地表面への影響範囲が少なく、低土被りでの施工が可能である。
- ⑦ 継手部の止水性能実験により十分な止水性を確保している。

(2) 施工方法

ハーモニカ工法の施工手順を図-2に示す。ここでは矩形トンネルの断面を上下2分割、横方向を3分割とした合計6分割の断面について説明する。

- STEP1 基準トンネルとして下段中央より掘削する。この基準トンネルはアンダーパス線形の基準となるため慎重な施工が要求される。
- STEP2 順次、基準トンネルに隣接するトンネルを掘進する。
- STEP3 構台を組み立て、上段トンネルを順次掘進する。
- STEP4 トンネル間の隙間に止水処理をする。
- STEP5～7 覆工を部分的に解体しながら鉄筋を組み立て、コンクリートを打設し大断面のトンネルを構築する。
- STEP8 コンクリートの養生後、内部の不要な覆工

材を切断・撤去し仕上げを行う。



写真-1 Y型継手



写真-2 I型継手

(3) 鋼殻・継手部止水構造

小断面のトンネルの鋼殻は、施工時のガイド(溝)の挿入が容易であることや、隣接する鋼殻部が、接続時の撤去が容易であること、および鋼殻の鋼材を本体利用できる事などから鋼製を標準とする。

個々の鋼殻間には、隣接する鋼殻の離れを防ぐため、ねじれ、引っ張りに強い熱押鋼材で製作された継手部を設け、この継手部には鋼殻のガイド、および止水部等の機能も持たせる。

継手の形状には、鋼殻の2方向の姿勢を制御することが可能なY型と、1方向の姿勢が制御可能なI型がある。(写真-1, 2)

鋼殻継手部の止水性能を高めた構造とするために、継手空隙部に止水材料を注入する。この止水材に要求される性能は下記項目が挙げられる。

- ①地下水压(0.2MPa)に耐えうる止水性
- ②地下水中でも分離しない水中不分離性
- ③鋼殻ガス切断時でも燃焼しない不燃性

これら条件を満たす止水材料を選定するため、施工手順に従い実物大試験体を製作し、実際の環境に近い条件(0.2MPa)で止水性能試験を行った結果、継手部の止水材料としてアクリル系の止水材を採用した。(写真-3～写真-6)。



写真-3 継手部状況
(掘削完了時)

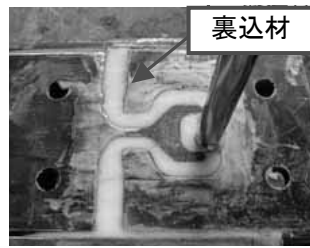


写真-4 裏込材注入状況

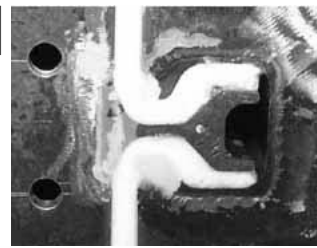


写真-5 継手部洗浄後状況

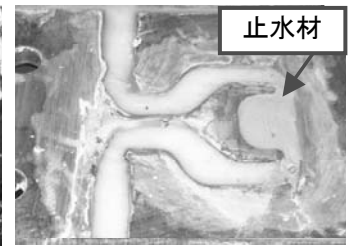


写真-6 止水材注入状況

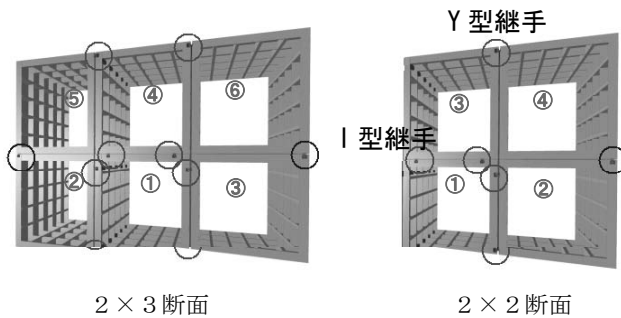


図-3 継手配置例

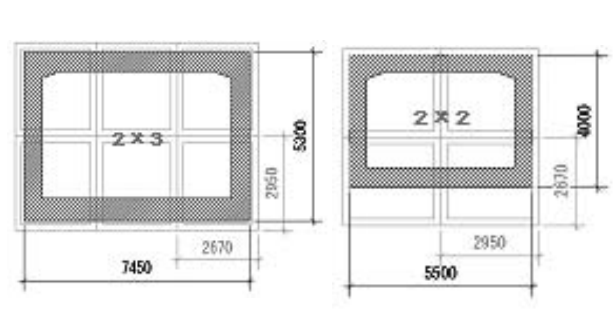


図-4 断面形状

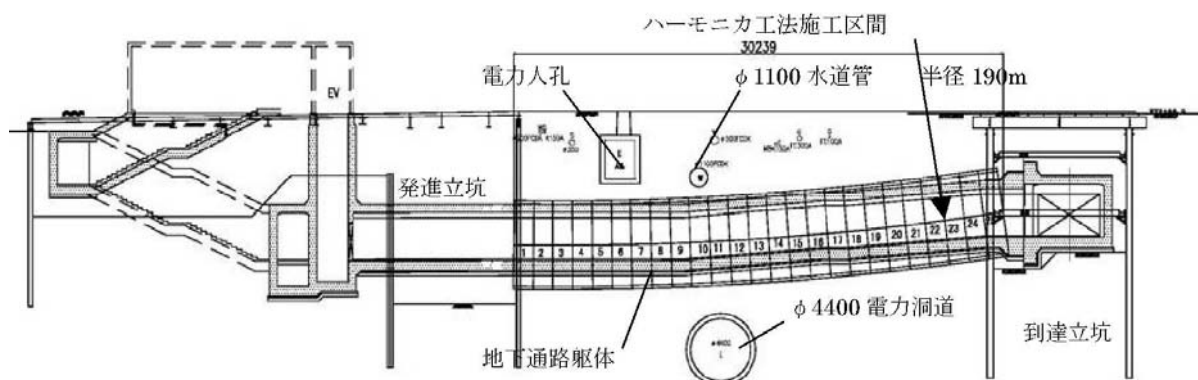


図-5 地下通路③縦断面図

2×3断面、および2×2断面で施工する場合の継手配置例を図-3に示す。

最終函体が閉合しない場合を考慮して、2×3断面では5函体と6函体目の1列、2×2断面では2函体と4函体目の1列を、お互いに拘束しないI型継手とする。

3. 施工実績

(1) 工事概要

(仮称) 外苑東通り地下通路整備工事は、東京ミッドタウンプロジェクト関連工事に伴い、外苑東通り直下に新築建物地下部へ直結する通路を施工するものである。

地下通路③の縦断面図平面図を図-5、図-6に示す。

地下通路③は、幅5.5m×高4.0mで、地下通路の上下には重要埋設物が存在し、特に躯体縦断線形は、バリアフリーのため踊り場のある複雑な線形で計画されている。縦断曲線線形と重要埋設物との位置関係からトンネルの通過可能なスペースは非常に限られていた。

重要埋設物により開削工法が不可能であり、また限られたスペースを最小限の掘削断面で施工する必要があり、地下通路①及び地下通路③についてハーマニカ工法が採用された。2006年2月に地下通路③の掘進・構築が完了した。

(2) 掘削断面及び縦断線形の検討

掘削断面は躯体外形に外周部の鋼殻の主桁高さ(200mm)を考慮した寸法とし、2950mm×2670mmとした。

検討条件として、

- a) 土被りを3.5m以上とする
- b) 路面沈下抑制のため余掘りを少なくする
- c) 地下通路①と掘進機を併用

の3点から地下通路①は6分割断面、地下通路③は4分割断面とした。

推進機械は①地下通路、③地下通路で推進機械を転用するため、90°回転可能な推進機械とし、鋼殻のサイズは縦長及び横長の鋼殻を効率よく配置した。(図-4参照)

重要埋設物との隔離から、縦断線形を直線とすることは不可能であり、また掘削量を最小限にするため、線形に沿った縦断線形とし、半径190mの単曲線とした。曲線施工が可能なハーモニカ工法の優位性により厳しい条件下での施工を可能とした。

この線形を確保するため、鋼殻は台形形状とした。掘進延長は30mである。



図-6 地下通路③平面図

(3) 土質条件と掘進設備

工事範囲の地層は、地表面より、表土、ローム層(Lm)、凝灰質粘性土層(Lc)から成っている。掘削範囲はLm層及びLc層であり共に火山灰層でN値は2~6、常態においては安定しているが軟弱である。重要埋設物及び路面沈下を制御するために、掘進装置は密閉型推進機を使用し、方向制御と曲線施工を可能とするために中折れ装置を装備した。また、矩形形状の掘削断面に対しカッターは揺動型を採用した。(写真-8参照)

(4) 鋼殻推進施工

ハーモニカ工法は、隣接する鋼殻同士を最小離隔10mm程度で掘削したのちに躯体を構築する工法であるため鋼殻の掘進精度は高く要求される。1辺が

2.5mを超える断面で、かつ継手を介した最小10mmの離隔で矩形推進工を施工した事例はない。第1函体は後の函体の精度を決める基準管となるため、高い施工精度が求められる。今回工事では、中折れ装置及び綿密な掘進管理により水平、鉛直方向とも管理基準値(水平方向 $\pm 70\text{mm}$ 、鉛直方向 $\pm 40\text{mm}$)の範囲で掘進完了した。図-7及び図-8より水平方向については、基準函の施工線形に沿って推進されている事が分かる。鉛直変位は、3函体目が1函体に、4函体目が2函体に影響されていることから、下段の函体の影響を大きく受けていることが判る。したがって、基準函の精度が全体施工精度を決めると評価できる。写真-7~写真-11に施工ステップを示す。

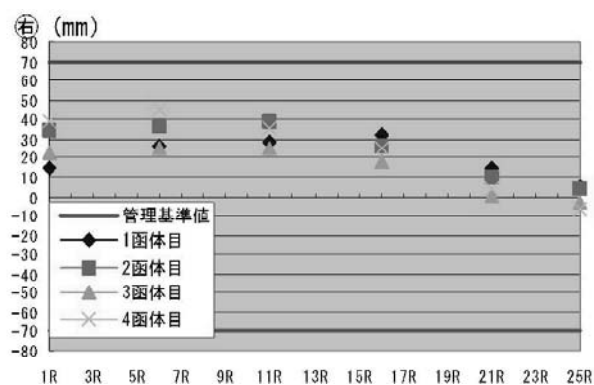


図-7 函体水平変位(施工順序は写真-1 参照)

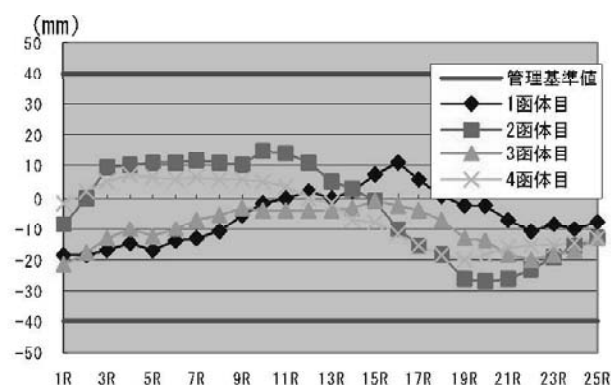


図-8 函体鉛直変位



写真-7 掘進状況

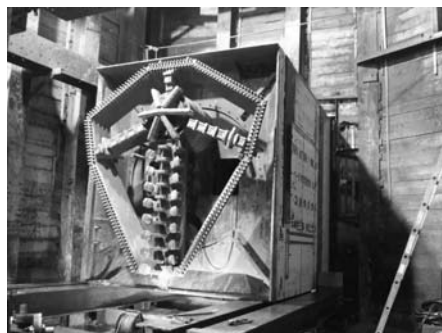


写真-8 基準函到達

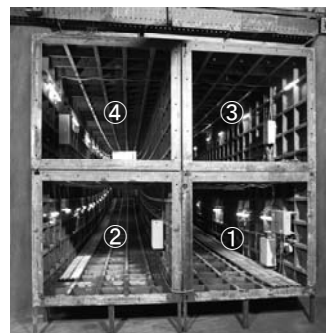


写真-9 4 函体推進完了



写真-10 構築終了（鋼殻撤去前）



写真-11 構築完了（鋼殻切断，止水完了）

鋼殻の推進は、実績として最大 3.5 函体/方 (4.4m/方)，平均 2 函体/方 (2.5m/方) で推移した。函体間の継手が競らないよう精度管理し、泥土圧管理を適正に行うことで様々な重要構造物及び路面の沈下はすべて規格値内であった。

(5) 掘進計測結果と考察

今回、ハーモニカ工法による施工において、鋼殻の計測を行い、推進時及び構築時の鋼殻の挙動を確認し、この結果から合理的かつ経済的な鋼殻の設計手法の確立をめざした。計測断面および計測項目を図-9 に示す²⁾。

通常の推進工では、ハーモニカ工法のように推進

管が隣接し接触しながら掘進されることがないため、ハーモニカ工法の推力計算手法の検証が必要となる。ハーモニカ工法は各施工ステップ (B1→B2→U1→U2) 毎に荷重状態が変化するため、計測断面を 3 箇所設け、各鋼殻の断面力の変化を計測した。ハーモニカ工法の施工ステップ及び構造モデルを図-10 に示す。

今回はヒューム管推進とハーモニカ工法との推力比較を行う。

ハーモニカ工法における各鋼殻推進時の推進力の計測結果を図-11 に示す。計算値は B1 鋼殻を対象に参考文献 1)「下水道推進工法の指針と解説」より算定した。

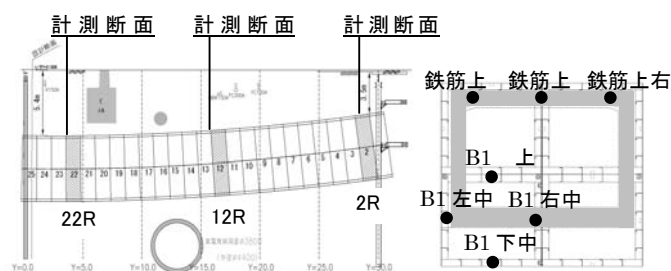


図-9 計測断面および鋼殻ひずみ計測位置

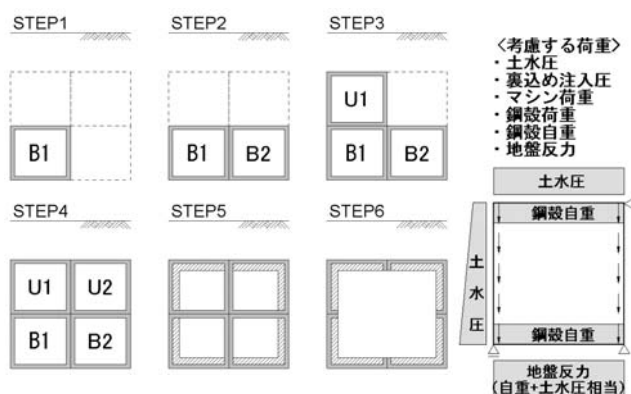


図-10 施工ステップおよび構造モデル²⁾

第1鋼殻のB1鋼殻推進時の最大推進力が1500kNとなり設計値3890kNの40%程度となった。

第2鋼殻目以降は、設計において、地山との接触面が減少することから、周辺摩擦力が減少し、第1鋼殻目目比べ推進力が小さくなると考えていたが、いずれの鋼殻もB1鋼殻推進時よりも大きくなった。

これは、第2鋼殻目以降は先行鋼殻の注入した裏込め材中を掘削すること、継手の競合いによる抵抗を受けることなどが原因であると考えられる。

一方、ヒューム管推進Φ1200、推進延長L=635mにおける、設計推力と推力計測結果の1例を図-12に示す。これを見ると、設計推力8000kNに対し、施工時最大推進力が3000kNとなり、設計推力の38%程度となることがわかる。

これから、ハーモニカ工法とヒューム管推進工法の推力はほぼ同じ推移を示すと考えられ、ハーモニカ工法における推力計算手法は、下水道推進工法の指針にある推力計算式¹⁾で設計してよいと判断される。

ハーモニカ工法における鋼殻の縦リブの応力計測結果を表-1に、ヒューム管推進工法における、ヒューム管歪計測結果を写真-12に示す。

表-1から、ハーモニカ工法における、各函体のRING22推進時の推力計測値を見ると、推力はRING22>RING12>RING2という順に大きい傾向がある。前方のリングに行くにしたがって、函体と土の付着力や継手の抵抗力によって、伝達される推進力が減少していると考えられる。

ヒューム管推進工法の計測では、10本毎(約24.4m)のヒューム管に作用する推力を歪計で計測した。元押しジャッキ推力の各断面への分散状況を示す。歪値の傾向から、推進管には、元押し推力が設計推力と同様に、推進距離に従い増加する傾向がわかる。

ハーモニカ工法も軸力計測結果から、同様の推力分散がわかり、これからも計算手法が正しいことが判断される。

ハーモニカ工法の推力計算においては、今後施工される①通路において、データ集積を行い、設計手法の確立をはかっていく予定である。

4. まとめ

今回の施工により、ハーモニカ工法は、鋼殻間の最小離隔10mm程度でも十分精度を確保した状態での曲線施工が可能であることを確認した。

この実績により従来基本的に直線での施工が主であった非開削工法の適用範囲を広げることが可能となる。現在地下通路①の施工中であり、本工事に引き続き、西大阪延伸線建設工事、国道1号原宿交差点立体交差工事において施工予定である。

今後、掘進実績を重ね、さらなる合理化を進める予定である。

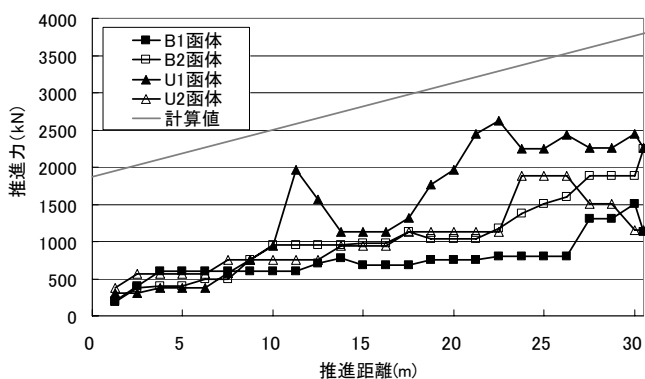


図-11 ハーモニカ工法の推進力の計測結果

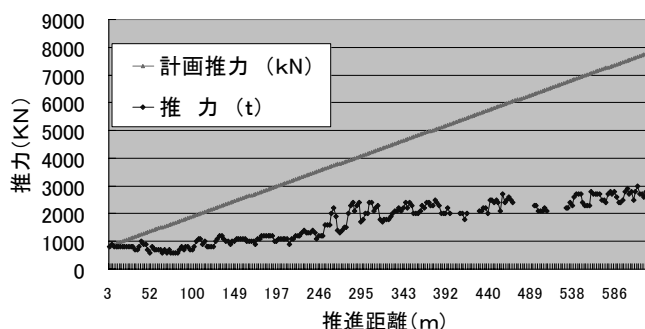


図-12 ヒューム管推進の推進力の計測結果

表-1 B1 函体推進時の縦リブ軸力の変動量

推進リング	推進力(kN)
Ring 2	400
Ring 12	680
Ring 22	1300

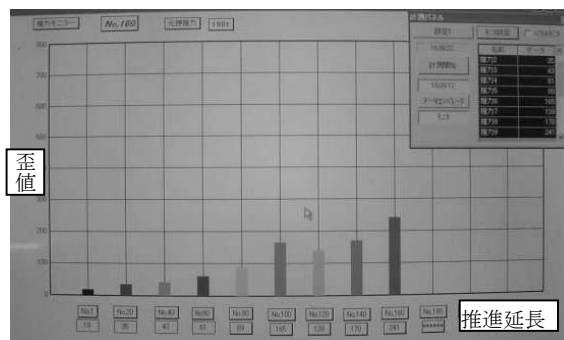


写真-12 歪計測

参考文献

- 1) 下水道推進工法の指針と解説、社団法人 日本下水道協会、2005年2月
- 2) 小柳善郎, 服部佳文, 佐藤充弘, 山口義久, 大断面分割シールド工法(ハーモニカ工法)の鋼殻挙動計測, 第61回土木学会年次学術講演会概要集