

図-2 シールド路線平面・断面図

1.2 地質概要

当該路線は山の手台地とよばれる台地上に位置し、その地層構成は下位より、上総層群 (Ks, Ksw, Kc, Kg)、江戸川層 (Edg)、武蔵野礫層 (Mg)、立川礫層 (Tg)、ローム層 (Lm) および埋土層 (B) となっている。シールド掘削断面の地層は玉石を含む礫層から硬質な砂層、粘性土層と多岐にわたる。

特徴として、発進から900mまでは江戸川層 (Edg) で、調査では厚み150mmの玉石が確認されたことから最大礫径 (長径) 450mm程度を想定しておく必要があった。

発進から1,300mより上総砂層 (Ks) となり徐々に水位が低下する。2,000m付近では下部に位置する上総礫層 (Kc) に地下水が吸われるような形でさらに低下し、シールドは無水区間を通過する可能性があった。

3,600mから3,800m区間は立川断層と想定されており、地層が不連続になっている。(図-2)

1.3 路線概要

発進立坑は警視庁総合教養訓練所グラウンド内にあり、シールド路線は発進から900mまでは市道、その後は芋窪街道 (都道)、五日市街道 (都道) 直下を通過するが、平面線形としてR=40mの曲線が左右2箇所づつ、到達直前に右曲がりのR=23mと30mがある。縦断線形は発進から1,227mまでは下り4.41%、その後は水平となる。土被りは発進地点で20m前後、水平区間は25~31mであった。

周辺環境は、発進立坑付近は公園、学校がある比較的閑静な住宅街に対して、900m以降は交通量の多い芋窪街道、五日市街道である。また発進から900m~2,100m間の芋窪街道では多摩都市モノレール (高架) 直下を並走し、1,300m地点では西武拝島線を横断する。(図-2)

2. 技術的課題とその対策

2.1 ビット摩耗対策

今回の掘進は4kmを超える長距離であることからシールド機のビットの摩耗が懸念された。ビットの摩耗はシールド機製作メーカーが保有する摩耗係数 (実績の平均) によってある程度予測できる。今回採用したシールド機械メーカーが保有するデータによれば、通常のビット配置で計画した場合の本工事のビット摩耗予測図は図-3のとおりになる。なお、ビットのチップ材質は砂や砂礫掘削において実績が多いE5種で検討した。ビットのチップはそれ自体の高さ (40mm) の半分以上の摩耗が進行すると欠落する懸念があることから許容摩耗量を20mmとした。これに対し推定量は39.7mmとなり、1,400m地点でビット交換が必要になる。地中でのビット交換は地盤改良が不可欠であるが、本地点付近の地上部は交通量が多い都道であるため用地確保が困難であった。また地盤改良を不要とする機械式交換工法は本工事のシールド断面では効果的な装備が困難であった。そこで次のようなビット延命化対策を施すこととした。

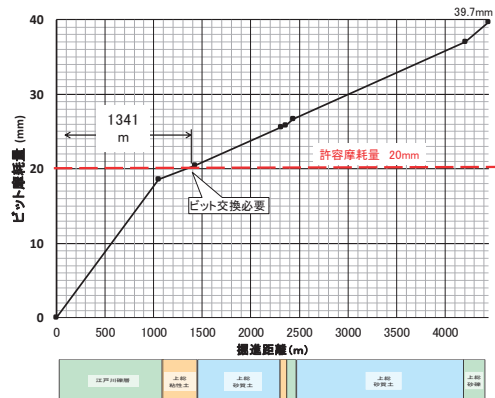


図-3 ビット摩耗予測図

2.1.1 対策① 特殊段差ビットの採用

摩耗延命策として、同パス上に40mmの高低差を設けた特殊段差ビットの設置を採用することとした。(図-4) これにより「高」のビットが先行で働き(今回は許容摩耗量の20mmまで)、その後「低」が働くものとした。ただし、この対策をもって「低」ビットは許容摩耗量20mmに対し予測値は19.7mmと全く余裕のないものであった。(図-5)

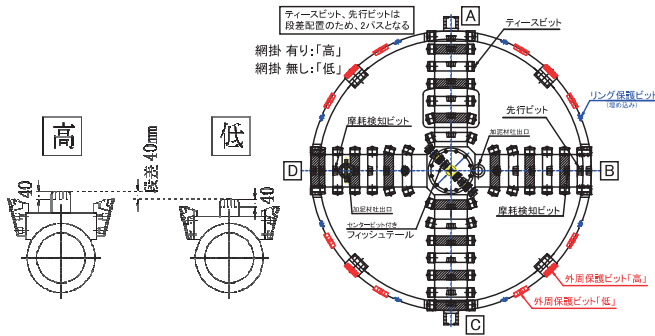


図-4 特殊段差ビット

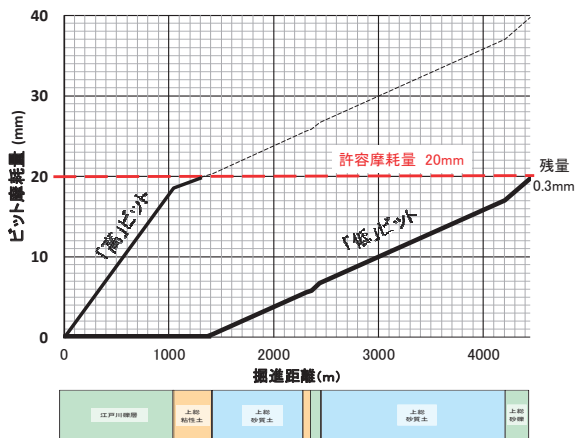


図-5 特殊段差ビット摩耗予測図

2.1.2 対策② ビットの耐摩耗性の向上

耐摩耗性を高めるために図-6に示すように従来のチップの面積比で2倍のビットを採用することとした。摩耗低減効果としてチップ幅比(50mm/31mm≒1.6倍 低減効果38%)は見込めると考えられたが、今回は安全側の設定として20%の摩耗低減効果を見込むものとした。これにより「低」ビットの残許容摩耗量は7mmとなった。(図-7)

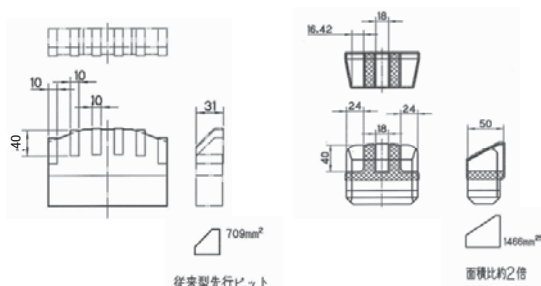


図-6 先行ビットの改善

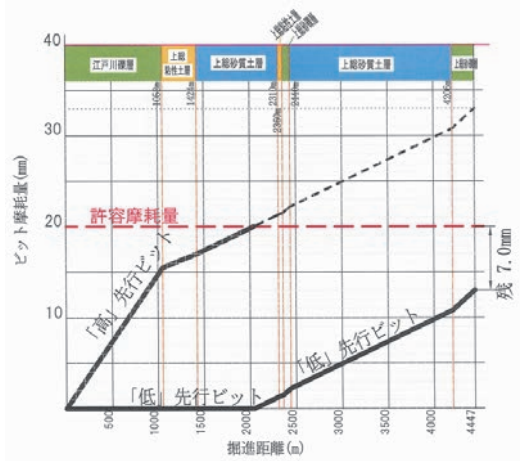


図-7 ビット摩耗予測グラフ

2.1.3 対策③ 最外周先行ビットの配置

一般にビットの摩耗は摺動距離に比例することから掘進速度を上げることはビットの延命化につながる。したがってシールド機外周の周面抵抗を減らし必要推進力を下げることで掘進速度を上げられるよう計画した。今回はオーバーカット量を20mmとした。(図-8)

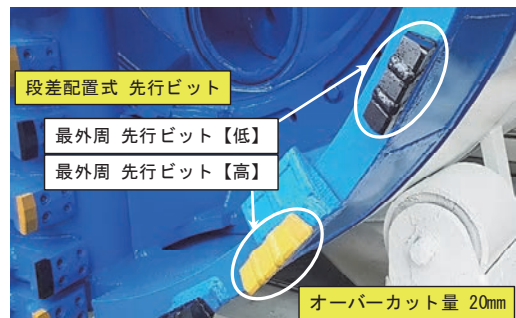


図-8 最外周先行ビット

2.1.4 対策④ 多段導通式摩耗検知器の装備

早期に追加対策を施せるよう多段導通式摩耗検知器を用いてビットの摩耗量の継時変化を把握し、到達までの摩耗を予測した。本装置は複数の導通線を階層状に配置した多段導通型センサーを先行ビットに埋め込み、導通線の切断を検出することにより先行ビットの摩耗量を測定するものである。今回は「高」「低」先行ビットそれぞれに1基ずつ装備した。(図-9、10)

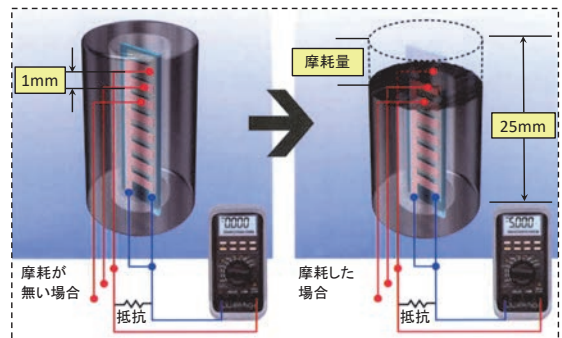


図-9 摩耗検知センサー

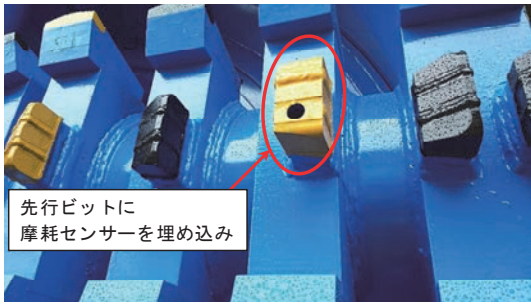


図-10 摩耗検知ビット

2.2 長距離施工に伴うサイクルタイム増加の抑制

本工事は玉石を含む礫層区間があり、坑内断面が小さいことなどから掘削土の搬出にズリトロ鋼車方式を採用した。本方式は長距離施工では鋼車運搬時間の増大からタイムロスが大きく、工程を遵守するにはそのタイムロスを抑制する必要がある。

2.2.1 坑内軌条の複雑化

構内での鋼車の待ち時間を抑制するため、バッテリー編成を2編成にしたうえで、坑口部、1400m部、2600m部の軌条に分岐を設け、掘進距離に応じて鋼車の実車と空車の入れ替え作業を行うこととした。また鋼車どうし、鋼車と人との接触などの軌条災害を防止するため、それぞれの分岐の両端に信号機を設置するとともに、運行ルールを作成し順守させることとした。(図-11)

3. 施工実績

3.1 ビットの摩耗

3.1.1 摩耗検知器データから判断された特殊先行ビットの摩耗経過

発進直後の地層は玉石を含む江戸川礫層のため、700mまでは「高」「低」ビットともに急激に摩耗が進行した。(図-12) 発進直後の「低」は、同パス上に40mm高く装備されている「高」に守られ摩耗が抑えられると想定していたが、「高」に同調するように摩耗し、発進から

700m地点で「高」13mm、「低」7mmまで摩耗し、その後進行は一旦収まった。一方1,100m地点で「高」の検知器が測定不能となり、以降は「低」の検知器でビット全体の摩耗状況を判断せざるを得なくなった。

700mから1,700mまでの1kmでは摩耗は進行しなかった。これは同パス上にある「高」ビットによる保護効果、さらに1,050~1,400m間が上総粘性土層であったことが考えられる。

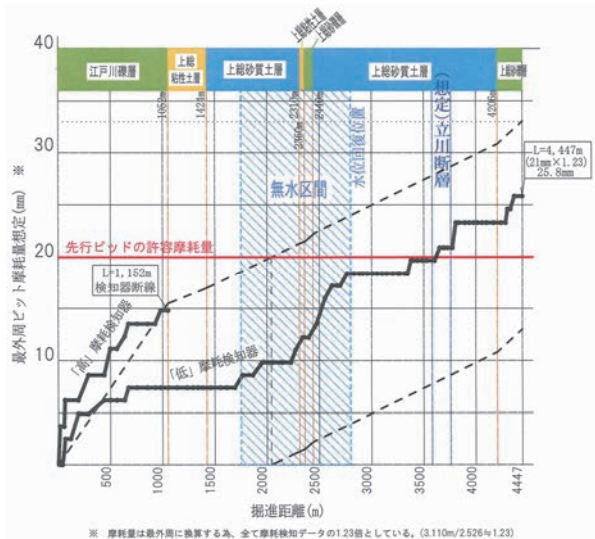


図-12 摩耗検知器データ

図-13は工事着手時に実施したボーリング調査での地下水位と、掘進停止時にチャンバーのスプリングラインに設置した土圧計の数値を示したグラフである。ボーリング調査では2,000m付近の狭い範囲でシールド断面が無水となる区間が想定されたが、掘進停止時の土圧計の数値から判断すると無水区間は1,800~2,800mと広範囲に存在していたと思われる。一般に無水状態では地山の研磨効果が増大すると考えられ、ビットの摩耗も増長することが懸念されていた。図-12の摩耗検知データはそれを示しており、土質変化がさほど大きくない延長1,000mの無水区間で摩耗は10mm進行した。また後述

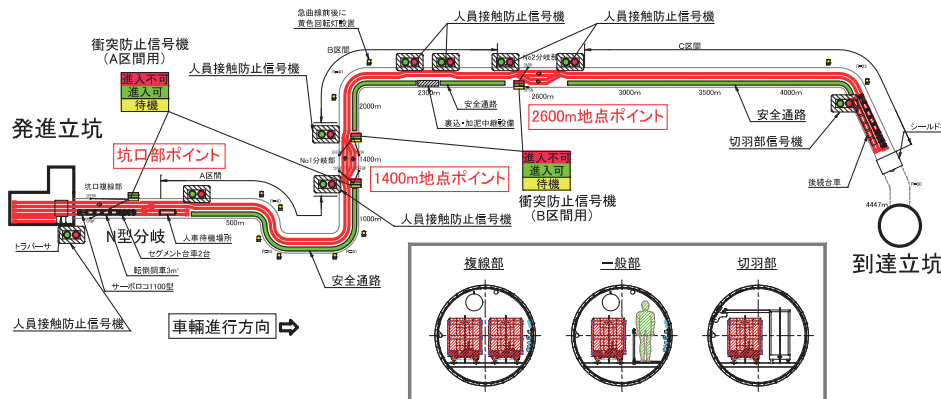


図-11 坑内軌条図

するが、立川断層が存在する3,600mから3,800m間では、水位が変動して度々無水状態となったため摩耗の進行は激しかった。

摩耗は3,600m地点で許容量の20mmを超えたが、カッタートルク、推力等に特段の異常は認められなかったため、掘進を継続した。

4,200mから到達点までは上総砂礫層であったためか摩耗はさらに進化した。

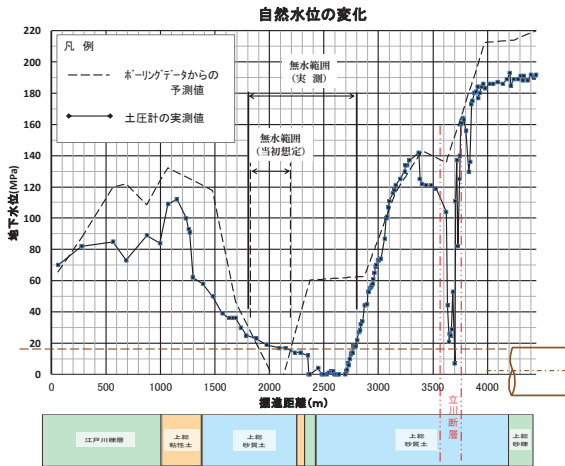


図-1.13 地下水位データ

3.1.2 地層ごとの摩耗係数の実績

表-1はビットの摩耗予測に用いた砂層の摩耗係数(9×10-3mm/Km)を1.0とした場合の各々の摩耗係数比を表したものである。

表-1 各地層での摩耗係数比 (※)

	礫層			粘性土	砂層				立川断層
	初期 A、A	500m～ B、B	4200m～ H		無水 C	被圧水下 D	E	G	
「高」	5.8	2.4	—	—	—	—	—	—	—
「低」	3.2	0.8	3.8	—	2.6	6.7	0.5	1.3	—
下段 平均値	2.6			0.0	4.7		0.9		4.8
当初想定値	1.8～1.4			0.8	1.0				—

※ 当初想定値の砂層の摩耗係数(9×10⁻³mm/Km)を 1.0とした場合の数値

(1) 江戸川礫層 (A, B)

当初想定では、ビット配置は同一パス上に40mmの段差の「高」「低」の配置になっているので、「高」の摩耗が20mm程度までは「低」の摩耗が抑えられると推測した。それに対し実際は、発進から300mまででビットの摩耗は「高」が9mm、「低」が5mmと一気に進化した。これはこの区間が玉石を含む礫層で摩耗係数は高かったことに加えて、摩耗検知器が埋め込まれている母材が先行して摩耗したと考えられる。後述する到達後のビット摩耗量の測定結果より、母材はビットより先行して4mm程度多く摩耗し、以降はビットと同じ摩耗性状を示すこと

が判明している。このため、発進から300m区間の実際の摩耗は、「高」ビットに守られほとんど生じなかったと推定される。

(2) 上総粘性土

約400m弱の粘性土を確認したがこの間の摩耗は認められなかった。これは粘性土といった研磨作用の少ない対象土であったことに加え、「高」ビットによる防護効果があったものと考えられる。

(3) 上総砂質土 (C,D,E,F,G)

砂質土に入り、約1,800m付近から2,800m付近までの区間 (C,D) が掘進断面に自然水が満たされない状態が続いた。また2,800m付近から徐々に復水し、その後は急激な摩耗の進行はなくなった。表-1に示すように摩耗係数比は、E,G区間の0.9に対して無水状態のC,D区間では4.7と5倍以上の値となっている。

(4) 立川断層区間

図-1.13に示されるように、立川断層区間では地山の色、粘性等が数mの掘進で変化することに加えて、自然水位も急激に変化し、一時無水状態も確認された。したがってこの区間に関しても摩耗係数比は4.8と大きかった。

3.1.3 到達後のビット実測検証

摩耗検知器によるビットの摩耗予測管理を検証するため、シールド機到達後に各ビットの摩耗量を実測した。

(1) 摩耗検知器の信頼性の検証

「高」側の摩耗検知器については、1,100m地点において測定不能となったが原因は、工場検収後の配線の導通試験より、検知器の脱落が原因と判断される。(写真-2)



写真-2 「高」摩耗検知ビット

一方「低」側の摩耗検知ビットは健全であり、到達まで摩耗量を計測することができた。本ビットのチップ部の実際の摩耗量は17mm(4mm)であったが、検知器を埋め込んでいる母材部は検出値と同一の21mmであった。これにより摩耗検知器の信頼性の高いことが証明された。(写真-3)



写真-3 「低」摩耗検知ビット

予測するチップ部と検出する母材部との相違があるものの、計測値が安全側に表示され、かつ1mmピッチで正確に母材部の摩耗を把握できるため、掘進中の予測管理および早期対策の検討に有効であることがわかった。

(2) 先行ビットの摩耗

「高」側の先行ビットについては、内周側中心部に近い一部のビットを除き、チップは全て欠損、脱落していた。(写真-4)

「低」側の先行ビットについては、中心からの配置距離(摺動距離)に応じて0~23mmのチップ摩耗が見られた。また、母材側面に5~16mmの母材摩耗が散見された。

(写真-5) このことから摩耗検知ビットの計測結果は実態を表していたと判断できる。



写真-4 「高」先行ビット



写真-5 「低」先行ビット

(3) ティースビットの摩耗

先行ビットの保護効果によりティースビットの欠損や脱落は無かったが、全般的に母材摩耗が見受けられた。

(写真-6)

「低」側のティースビットについては、母材に若干の摩耗が見られるものの、チップ自体は全く摩耗していなかった。(写真-7)



写真-6 「高」ティースビット



写真-7 「低」ティースビット

(4) 外周保護ビットの摩耗

外周リングにはオーバーカット量20mmの先行ビットを段差配置した。

「高」側は、チップが全て摩耗し無くなっており、母材と台座は「低」側の外周保護ビットと同じ高さまで摩耗していた。(写真-8)

「低」側の摩耗については、外周部の先行ビットと同程度の摩耗であったが、ビット側面側の母材が著しく摩耗しており、チップが脱落寸前であった。(写真-9)



写真-8 「高」外周保護ビット



写真-9 「低」外周保護ビット

一般的に同径程度のシールド機では外周保護ビットを4個程度取付けるが、今回同一パス上に段差配置で合計12個取り付けたため、掘進中のシールド機外周の摩擦抵抗の上昇やカッタートルクの上昇も無く、到達まで掘進速度を維持することができた。したがって、外周保護ビットの増数及び段差配置によるオーバーカット対策は有効であった。

(5) 摩耗低減対策の提言

最外周保護ビットは、地山の外縁を掘削するため、摩耗すると即掘進停止につながる重要なビットである。一方、最外周保護ビットは、摺動距離が最も長くビットの摩耗が激しい。ビット実測検証結果では、母材の摩耗進行が激しく、ビット自体が許容摩耗量に達していない場合でもビットが脱落するおそれがあることが判明した。

このため、母材表面にハードフェーシング(硬質金属の硬化肉盛り)を施し、母材自体の摩耗の進行を遅らせることが、最外周保護ビットの耐久性の向上につながると考えられる。

母材の摩耗の進行とハードフェーシングの効果については、今後、砂礫層を掘進するシールド機で検証を行う予定である。

3.2 立川断層について

当初設計段階では、調査ボーリングにより断層位置は発進から3,580m～3,760mの範囲と想定されていた。図-14は、自然水位と掘進中の掘進平均速度の変化を示したものである。想定された断層位置の範囲で急激に水圧が乱高下しており、掘進速度も非常に低い値でばらついている。工程確保のためカッター圧、ジャッキ圧の上限で掘進速度を管理しており、掘進速度の変化が掘削地盤の変化を表していると言える。以上より、断層位置は当初の想定どおりであったと思われる。

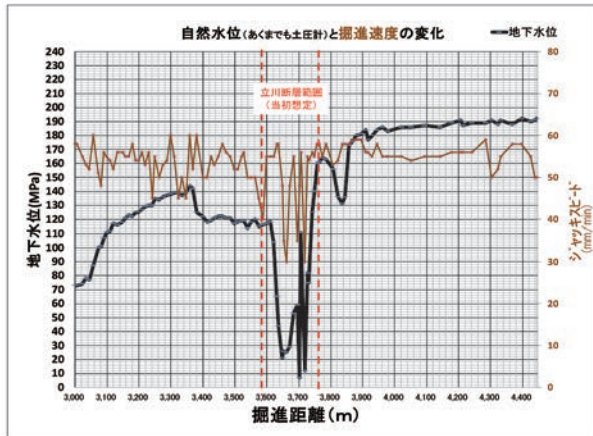


図-14 自然水位と掘進速度

3.3 長距離施工でのサイクルタイムの維持

図-15に示すように坑内に離合箇所を設けることにより、距離によるサイクルタイムのロスを抑制することができた。

図-16は、急曲線部等を除いた全路線の掘進距離に伴った進捗と、その際の掘進速度を示したものである。一般に進捗は掘進距離が伸びるごとに増大し、サイクルタイムが長くなることによって落ちていくが、これまでの対策により50mm/min前後で掘進できた。

今回の長距離掘進は、掘進速度の増大と坑内ずり鋼車2編成化によるサイクルタイム維持の相乗効果によって、月進250～400m/月を維持し、トータル18ヶ月での到達となり、全体工期では約2ヶ月の短縮が図れた。

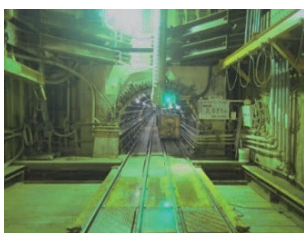
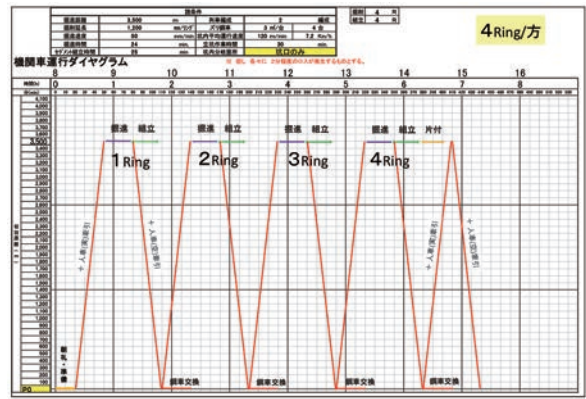


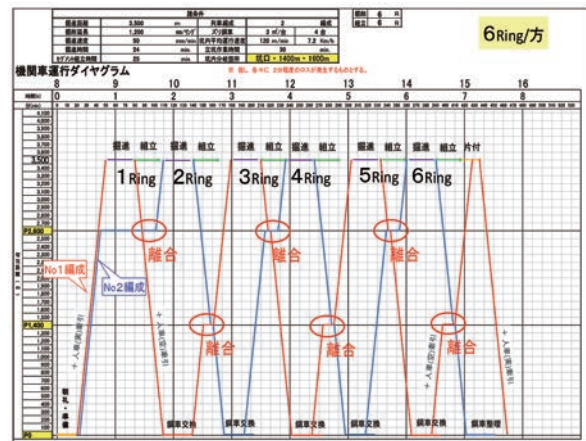
写真-10
発進坑口部の離合箇所



写真-11
2,600m地点の離合箇所



離合なし (バッテリー1台、鋼車2セット)



離合が3箇所 (バッテリー2台、鋼車2セット)

図-15 坑内ダイヤグラム

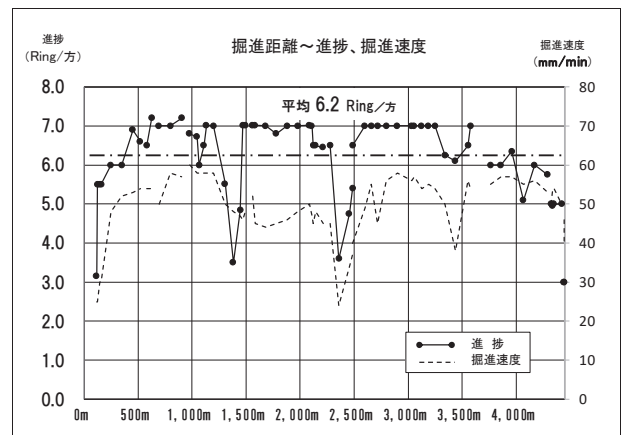


図-16 掘進距離ごとの進捗と掘進速度

4. あとがき

本工事では、4kmを超える複合地盤のシールド掘進に対して、ビットの強化と段差ビットの配置、最外周ビットの増設と余掘り量の増大による掘進速度の増加などの対策を取ることによって、ビット交換なしで到達させることができた。特に、余掘り量を増大させて掘進速度を増加させ、ビットの摺動距離を削減することによりビット摩耗を低減させる対策は、ある程度の土被りをもつ硬質地盤においては効果があると考えられる。

さらに、最外周ビットにおいては母材の摩耗進行がビ

ットの耐久性に影響することが分かったため、母材の補強対策について提言を行った。

また、多段式摩耗検知装置によるビット摩耗量の経時変化の測定と、到達後のビット摩耗量の実測により、各土質におけるビット摩耗係数や無水区間におけるビット摩耗の増大の程度など、様々な知見を得ることができた。

さらに、掘進速度の増加に加えて、適切な離合区間の設定による鋼車運行の円滑化によりサイクルタイムのロスを防ぎ、工程を2か月短縮することができた。

地上占用が困難な都市部では、泥土圧式シールドによる長距離施工が増えていくものと思われる。これらの工事に対して、今回得られた知見が活用されれば幸いである。

謝辞：本工事の発注者である東京都水道局多摩水道改革推進本部をはじめ関係各位より、ご指導ならびにご協力をいただいたことに感謝いたします。

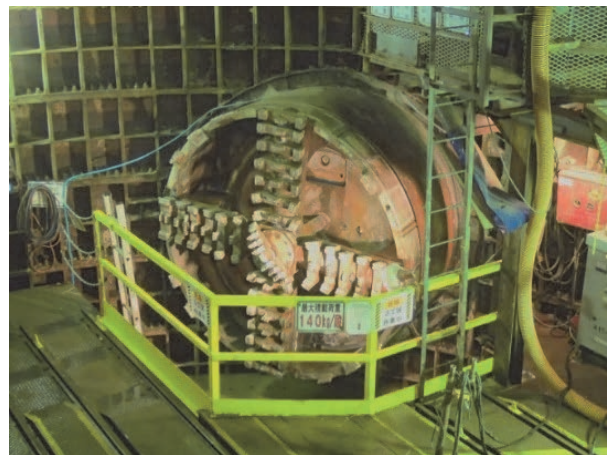


写真-12 到達状況

【参考文献】

- 1) トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説, 土木学会, 2016.

Summary The shield tunneling discussed in this paper was part of a Bureau of Waterworks Tokyo Metropolitan Government project to construct a dual system and network of transmission pipes. The mud pressure shield machine used had a boring diameter of 3,080 mm. Relatively long, the tunnel measured 4,447 m. The excavated earth ranged widely in characteristics and included gravel layers with boulders, layers of extremely hard sand with N values exceeding 50, and cohesive soil layers. It was known in advance that the machine would encounter a segment of the Tachikawa fault. The location of the tunnel beneath a heavily traveled Tokyo metropolitan trunk road made it difficult to replace cutter bits, due to the area of the surface they would occupy. The need to remain on schedule created pressure to minimize time losses per excavation cycle through the long tunnel.

This paper discusses how the tunneling was successfully completed under these circumstances.

Key Words : Long-distance shield, Bit wear, Wear detector, Fault, Rail double track