

道路トンネル建設におけるシールド高速施工技術の開発 Development of technologies for rapid construction of road shield tunnels

林 裕悟¹・後藤 徹²・入田 健一郎¹・鎌倉 友之¹
Yugo HAYASHI・Toru GOTO・Kenitirou IRITA・Tomoyuki KAMAKURA

With the tendency of the long tunnels with large cross-sectional area using shield method, it is important that the time for the construction is reduced leading to the reduction of the construction cost for the projects. This paper discusses about the several technologies for the rapid construction of the shield tunnels based upon the experimental data and demonstrates their validities.

Key Words : large-sized shield tunnels , Rapid construction , Long-life Bit, Rotary Joint

1. はじめに

シールド工法による道路トンネルの施工では、幅員化した都市地下部での大深度道路建設や建設費コスト削減の観点から、長距離施工および高速施工が求められている。これらのニーズに対応して、現在、開発を進めている道路トンネル建設における長距離高速施工技術をここに紹介する。

大口径シールド工事は、資機材及び処理・発生する掘削土の量は膨大であるため、高速施工を可能とする各要素をバランス良く開発することが重要である。そこで、掘進とセグメント組立の同時施工やビット交換を不要とするシールド機セグメント新継ぎ手をはじめ、土砂の減容化、床版の同時施工について、開発を実施した。(図-1参照)

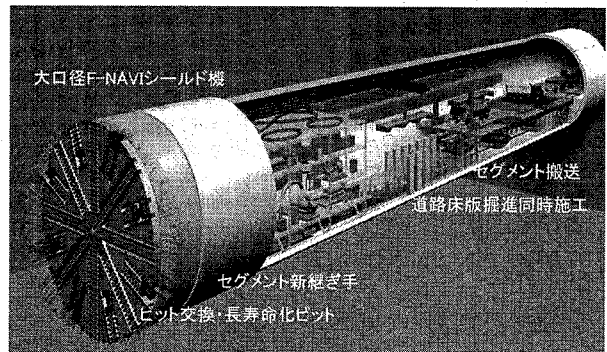


図-1 高速施工イメージ図

2. シールド機の開発

(1) 大口径 F-NAVI シールド機

単にシールド機の掘進速度を上げることは、その後方設備の負荷を増すこととなり、効果から考えて不適切である。そこで、掘進と同時にセグメントの組立を行ない、掘進 1 リングのサイクル時間を約半分に短縮できる大口径 F-NAVI シールド機的设计を行なった。

F-NAVI シールド機による高速施工法は、シールド機を本体部と前胴部に分けてそれらを半球状の球面座で接続させており、前胴部を上下左右全方向に向けることでシールドジャッキ（推進ジャッキ）の選択操作に一切関係なく、シールド機の掘進方向制御を実現している。このように、前胴部がシールド機を正しい位置に誘導するという意味で、Front-NAVIgate の略称として「F-NAVI シールド工法」と呼称している。¹⁾

キーワード：大口径シールド、高速掘進、長寿命ビット、回転継ぎ手

¹ 正会員 清水建設株式会社 土木技術本部 地下空間統括部

² フェロー 清水建設株式会社 土木技術本部 地下空間統括部

F-NAVI シールドは既に4件の同時掘進実績を有し、それぞれ500mを超す月進量を証明している。首振りなどの特徴的な機構は、機械配置の関係で小口径の場合に制約を受けることが多く、むしろ大口径には適用し易い。また大口径ほど制御するジャッキの負担率が小さく、推力面で小口径より有利である。コストは、標準的なシールド機に対し約15%増であるが、工事全体コストでは有効な技術である。

この技術は、既に実用化段階にあるため、今後、道路シールドトンネルへの適用に向けて実機の詳細設計を行い、各工事に提案していく予定である。

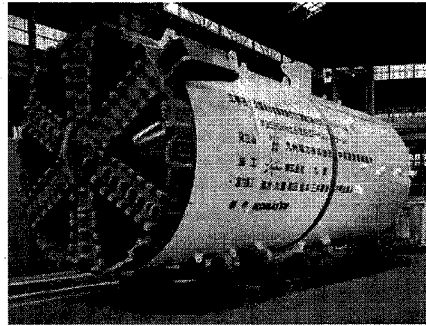


図-2 F-NAVI 実機

3. 長寿命化ビットの開発²⁾

大断面トンネルの施工では、カッタービットの摺動距離が大きく、交換が必要となる。工期短縮、高速施工が求められる長距離シールド工事では、そのビットの延命、機械的交換技術は重要な要素である。そこで、シールド機に装備する各機械的交換装置の開発が進められており、当社もカッタースポークを回転し新たなビットを出すリボビット工法を実用化した。しかし、この種の機械的交換はシールド機に多大な装備を付加させるため、そのコストは高いものとなるのが一般的である。

そこで、特殊な装置を用いず、切削ビットの素材である超合金チップの性状、その製作行程等を見直すことによって、ビット自らの寿命を延ばし、長距離掘進に対し交換を必要としない長寿命ビットを開発した。

(1) 長寿命化ビット概念

ビットの長寿命化の手段としては、磨耗量の低減となる硬い超合金チップ材を用いることと、磨耗代を稼ぐため大型化することが考えられる。しかし、硬いチップは耐磨耗性が良いが、抗折欠損性は悪い。逆に軟性合金は抗折欠損性が向上するが、耐磨耗性は落ちる。そのため、従来のシールド機に用いる切削ビットは、耐磨耗性、耐衝撃性を考慮して、E3 もしくは E5 と呼ばれる超合金のなかでは中程度のチップを採用している。

表-1 に JIS 鉋山工具用超硬チップ規格値を示す。

表-1 JIS 鉋山工具用超硬チップ規格値

記号	硬度 (HRA)	抗折力 (kgf/mm ²)
E1	90 以上	120 以上
E2	89 以上	140 以上
E3	88 以上	160 以上
E4	87 以上	170 以上
E5	86 以上	200 以上

表-2 チップ材料物性値

材 料	材 種	ヤング率 kgf/mm ²	線膨張係数/℃
母材 (シャン)	SKC24	22,000	13.79×10^{-6}
超合金チップ	E3	59,500	5.0×10^{-6}
	E5	55,500	6.0×10^{-6}

次にチップの大型化であるが、今まで大型ビットが製作できなかった理由は、母材となる鋼材と超合金チップを接合するろう付け溶接作業時に、それぞれの材料の線膨張係数が異なり、熱残留応力が発生し、有害なクラックが発生するためであった。(表-2 材料物性値を参照)

この2点を解決するため、母材となる鋼材と超合金チップ材の間に緩衝材となる軟性合金を挟み込み、また積層構造とすることにより、ろう付け溶接の際に起きる残留ひずみクラック発生の不具合を解消し、また、より硬度が高い工作機械等に用いる E2 チップを適正配置し使用することにより耐磨耗性を向上、大型化を図った。

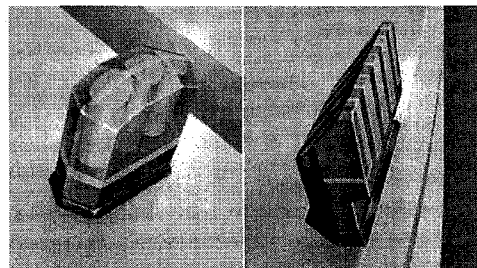


図-3 先行ビット

図-4 ゲージビット

(2) 長寿命ビット構造

長寿命化ビットの開発では、先行ビットの重要性に着目して、そのビットを中心に開発を行った。地山を切削する部位に E2 超合金チップを、衝撃を受け切削に寄与する部位に E5 チップを、切削された土砂流れの流れに対して磨耗防止する部位に E5 チップや硬化肉盛を配置する。その適切な配置により、其々のチップ性状を生かすことを考えた。

次に、特に物性値の大きく異なる E2 チップと母材との間に緩衝材となる軟性合金を挟みこむことと、各々のチップ単体寸法を 4cm 角程度の寸法に抑え、積層構造とすることによって、ろう付け溶接の際に起きる残留ひずみクラックの発生なく大型のビットを製作することを可能とした。なお、緩衝材となる軟性合金は E6 相当の超合金でビットと母材の中間の物性値を持っている。先行ビット、最外周に配置するゲージビットのイメージを図-3、図-4 に示す。

(3) 長寿命化ビット磨耗係数

ビットの磨耗係数は超合金チップ材の硬度に左右される。E5 チップに対する耐磨耗比を示すと、E3 チップが 2.0 倍、E2 チップが 3.3 倍程度である。ここで、掘削地盤を砂優勢の地質（砂 55%、砂礫 15%、粘性土 30%）と仮定すると、従来使われている E5 チップの磨耗係数は 15×10^{-3} 程度である。参考であるが、カッタービットに対する先行ビットの磨耗度は 1.5 倍、また先行されるビットで保護された状態でのビットの磨耗度は $2/3$ 程度に低減される。今回の特殊先行ビットは、形状から従来の先行ビットに対し 10%程度磨耗度が低いことも考慮して、表-3 に各ビットの磨耗係数を整理する。今回開発した長寿命ビットの耐磨耗性は E2 チップの性状に支配されるため、計算では E2 チップの磨耗係数を使うのが適当とした。

表-3 各ビットの設定磨耗係数

	E5	E3	E2
カッタービット A	15×10^{-3}	8×10^{-3}	—
先行ビット (B=1.5A)	23×10^{-3}	12×10^{-3}	—
特殊先行ビット (C=1.1B)	25×10^{-3}	13×10^{-3}	8×10^{-3}
後方カッタービット (D=2/3A)	10×10^{-3}	5×10^{-3}	—
後方先行ビット (E=2/3B)	16×10^{-3}	8×10^{-3}	5×10^{-3}

(4) 長寿命化ビットの経済性

大断面道路トンネルの掘削外径 $\phi 16\text{m}$ 、掘削距離約 7km の条件でビットの磨耗計算を行ない、チップ高さを設定して比較すると、今回開発したビットでのチップ高 100mm、E3 チップでは 140mm、E5 チップでは 200mm となり、製作価格に影響する使用するチップ重量で各材質を比較すると、1 : 1.3 : 1.9 となる。このように、従来から使用されたチップ材料で、この高さのビットが仮に製作できるとしても、開発したビットは十分にコストダウンが図れることがわかる。また、シールド機の機械的交換装置に対しても安価なことは明らかである。図-5 にチップ別の推定磨耗量を示す。

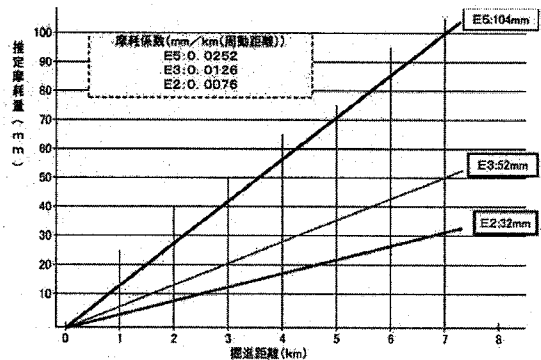


図-5 チップ別磨耗量算定図

(5) 開発ビットの実証

東京メトロ 13 号線新宿工区シールド機のビットの一部に開発したビットを装備し、耐磨耗性や欠け耐力について検証した。掘削対象地盤は砂・砂礫地盤である。到達時に従来ビットと比較し、その有効性を確認した。

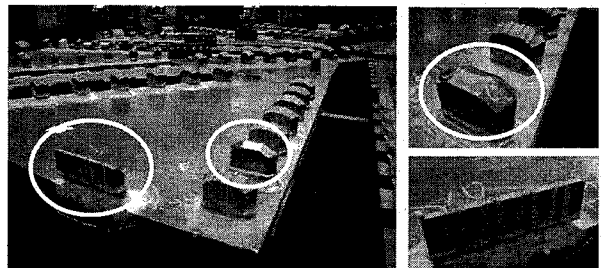


図-6 開発ビット装備状況

取り付けけた長寿命化ビットの装備状況を図-6 に示す。

【実証工事】

- (1) 工事件名 13 号線新宿工区土木工事
- (2) 発注者 東京地下鉄株式会社
- (3) 施工者 清水・三井住友・浅沼建設工事共同企業体
- (4) 工期 平成 16 年 1 月 28 日～平成 18 年 11 月 30 日
- (5) 工事内容
 - ① 路線延長 982.2 m (491.1 m×2 本)
 - ② 縦断勾配 最大 40‰
 - ③ 土被り 最小 10.9～最大 27.6m
 - ④ 掘削土質 東京層粘性土, 東京層砂層, 東京礫層, 上総層砂層
 - ⑤ セグメント FAKT セグメント 外径 $\phi 6,600\text{mm}$, 内径 $\phi 5,960\text{mm}$, 厚さ 320mm, RC 製
幅 1,600, 1,400mm の 2 種類, 分割数 6 等分割 K セグメント軸挿入型
 - ⑥ シールド機 泥水式シールド工法, 掘削外径 $\phi 6,760\text{mm}$ (図-7)

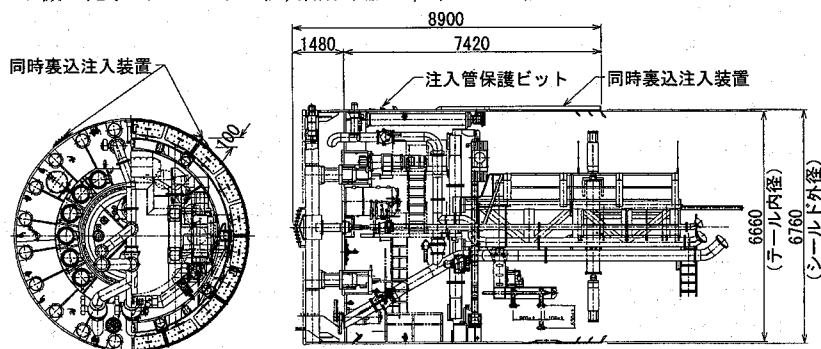


図-7 シールド機

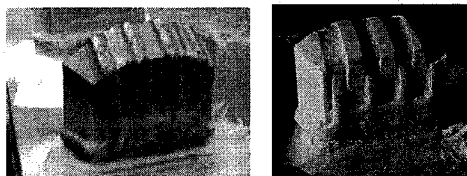


図-8 従来ビット (左: 掘削前、右: 掘削後)

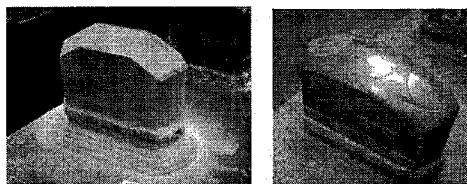


図-9 長寿命ビット (左: 掘削前、右: 掘削後)

上記工事での適用結果は, 当初の摩耗量算定に沿った結果となった。従来の先行ビットの摩耗量 17.0mm に対し本ビットの摩耗量は 4.5mm と約 1/4 であった。(図-8～10) また, 砂礫層掘進にもかかわらずビットに欠損箇所がなく, 耐久性も検証できた。現在, 本ビットと同一の考えのメインビットの製作に着手している。

(2列目が当該ビット)

この長寿命化ビットは, 大口径長距離のシールド工事を対象として開発したが, 小口径のシールド工事においても, 現在, 長距離化が進められており, 特に特殊な機械的交換装置の装備が難しい小口径シールド機

では, この長距離ビットはコストダウンが図れ, 有効である。今後, この長寿命化ビットが長距離シールド工事で一般的に採用されるよう, 積極的に提案活動していく計画である。

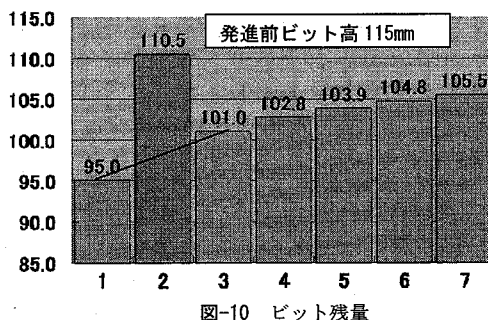


図-10 ビット残量

4. 回転継手の開発

ここ数年のセグメントの開発のニーズは大きく2つに区分けすることができる。1つはセグメント組立の自動化・省力化を含めた高速施工を可能とするものであり、もう1つは二次覆工を省略できる内面平滑対応のものである。セグメントを組み立てるエレクタについては、完全無人化を目指す自動組立、粗位置決めまで自動化しその後の作業を手動に頼る半自動組立、全てを作業員に任せる手動組立に分類される。今回の開発目的は、比較的安価な半自動エレクタで対応でき、内面平滑型で粗位置決めから短時間に簡単に接合・組み立てできるセグメント間継手を開発することとした。

(1) 新継手構造

新継手の部材は回転部材①とその部材を軸受け、収める雄金物②と、その対になり回転部材を受け入れる雌部材③からなる。接合手順はエレクターにてセグメントを把持し、所定の位置に旋回した後、雄金物から一部突出する回転部材を、相対するセグメント継手面の雌部材の凹部位置に合わせる程度の粗い作業で伸縮位置合わせを行う。従来は、この粗位置から噛み合う位置までの微調整に時間を所要している。その後、その粗い位置でエレクターにてセグメントを継手面に近づけると、オス継手の回転部材が回転しながらメス部材に挿入される際、セグメント本体は自然と所定の位置に引き寄せられ、微調整されて接合される。この微調整動作を促す回転構造が、本新継手の特徴である。最後にトンネル軸方向にセグメントを移動させるが、このセグメント間新継手は、その際にオス回転部材、メス部材のそれぞれにある凹凸が噛み合い引き抜き耐力を有すものとなる。(図-11)

継手は高強度、高剛性のダクタイル鋳鉄製金物とし、各3部材をそれぞれを鋳造による一体成型で製造する。RCセグメントには、取り付け治具を用いて精度良く型枠にセットし、コンクリート打設、製作する。

この新継手の開発は、ボルト M24(8.8) 相当を設計目標として作成し、試験を行った。

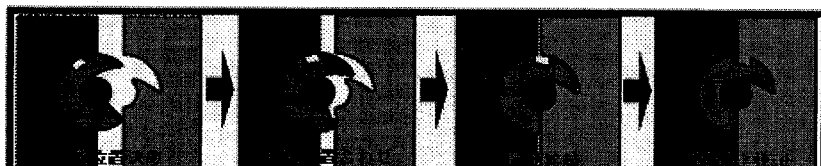
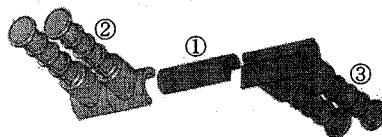


図-11 新継手接合イメージ

(2) 性能（強度）確認試験

＜スケルトン引張試験：図-12＞

アムスラー試験機を用いて、新継手の耐力を測定し、M24(8.8)ボルトと同等もしくはそれ以上の耐力を有しているかどうか、また、継手のどの位置で破壊するのかを確認することを目的として、スケルトンの引張試験を実施した。試験結果を表-4に示す。目標耐力 233kN は満足でき、オス金物（回転体）のツメ部が破断し、破壊に至った。

＜継手曲げ試験＞

実物大のセグメントにおける新継手の耐力およびバネ定数を測定し、その特性を把握することを目的として継手曲げ試験を実施した。

試験はA型セグメント2ピースを締結し、荷重は水平方向で5kN ピッチで破壊まで載荷した。試験結果を表-5に示す。その結果、理論値(78.69kN)を超え、82.10kNでオス金物（回転体）のツメ部が破断し

表-4 スケルトン引張試験結果

	M24(8.8)	供試体 1	供試体 2
耐力(kN)	233	280	270
破壊形態・・・オス金物（回転体）のツメの破断			

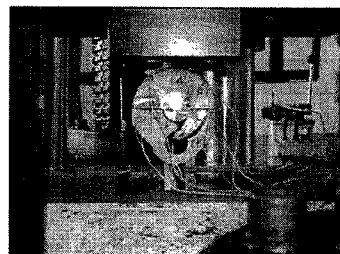


図-12 スケルトン引張試験要領

破壊に至った。

新継手の設計荷重に対する安全率は $S_f=1.94$ であった。以上のことから、今回開発した新継手の耐力は、従来のセグメント継手の設計法で設計できることが確認された。

表-5 継手曲げ試験結果

	荷重 kN		モーメント kN・m	
	計算値	実測値	計算値	実測値
設計荷重	42.37	—	38.57	—
破壊荷重	78.69	82.10	71.63	74.73
破壊形態・・・オス金物（回転体）のツメの破断				

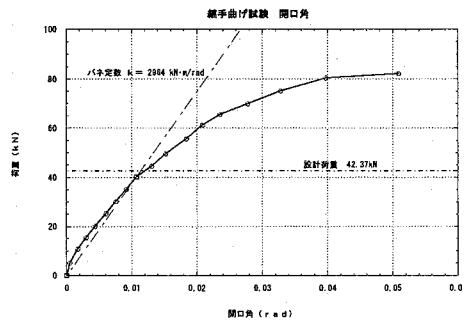


図-13 荷重－開口角グラフ

図-13に荷重－開口角の関係をグラフで示す。

試験結果から、設計荷重時のバネ定数は 2964 kN・m/rad となった。この値は実績のある内面平滑ワンパス継手と同等の値 [D25 タイプのバネ定数 $k=2750$ kN・m/rad] であり、継手の特性として十分満足することを確認した。

(4) 性能（組立）確認試験

このセグメント継手の開発コンセプト「短時間で組み立て可能であること」を確認するため、工場組み立て完成時の実際のシールド機を用いて組立試験を実施した。試験の結果、組立時間が約2分で目標を達成することができた。しかし、試験で使用したエレクトは、セグメントを把持した後に自由度がないため、本来の粗い位置から、継手が持つ自己微調整を十分に証明することはできなかった。この継手の自己微調整機能を発揮するには、自由度を持ち力制御できるエレクトを用いる必要がある。

この継手の性能は、ほぼ所定の性能を満足した。また、価格も他の内面平滑ワンパス継手とほぼ同等である。今後は、強度上余裕のあるところを削り、さらなるコストダウンを目指しながら、エレクトの改良と併せて実トンネルでの採用を目指す。また、大口径用継手として、M24 (8.8) より高強度の継手への展開を行う予定である。

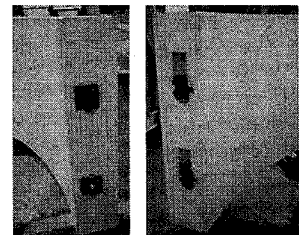


図-14 実物セグメント状況

5. 掘削土砂の減容化技術の開発³⁾

シールド工事は大半が都市域で行われているため、現場の搬出入の車両は、環境保全や交通阻害の観点から台数や搬出入時間を制限されることが多い。特に、道路トンネルのような大口径シールド工事では、搬出する土量が膨大となり高速施工を行う上で大きな課題となっている。

掘削残土を搬出する1日当りのダンプ台数が制限される場合、搬出できる土量により1日当りの掘進量も制限される。大口径シールド工事では、搬出土量の減容化が高速施工の重要なポイントの一つとなる。既に、現場内再利用などの改善策も多く実施されているが、ここでは、泥水式シールドの一次処理土の含水比を低減して搬出土量を減容化する技術（ハイパー・スクリーン・システム）について紹介する。

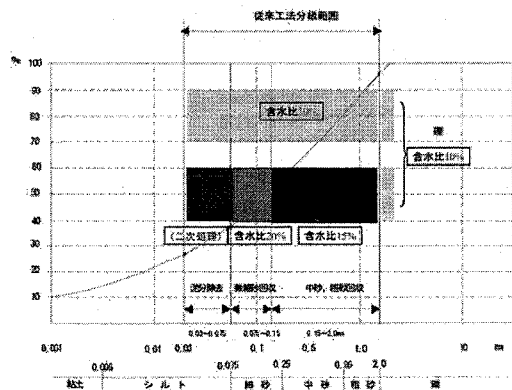


図-15 分級処理と含水比の関連図

(1) 一次処理土含水比の現状と開発

泥水式シールドで掘削した土砂は坑内を流体輸送し、地上の泥水処理プラントで処理する。処理土の礫・砂分は一次処理設備で、シルト・粘土分は二次処理設備で脱水分離する。汚泥として扱われる二次処理土は、再利用の観点から含水比を低減する高圧の脱水装置などが開発され、改善されている。しかし一次処理土は、一般残土として扱われることもあり、篩いだけの処理が一般的で処理土の含水比は高く、搬出土量は掘削土量に対し増加する。特に微細砂を多く含む地盤では、処理土の含水比が高いためダンプによる搬送に支障を生じる場合が多い。

改善のための固化材添加は搬出土量の増加を益々増長させている。

本技術の開発は、一次処理土の含水比の低減をねらいとした。土粒子径が大きく、表面積比が小さいほど含水比は小さくなるが、粒径別分級を行わない現状の設備は、微細砂等の微粒分に影響されて全体的に含水比が高くなっている。一次処理土の含水比は概ね 30% と言われているが、粒径別に処理した場合、含水比は礫が 10%、中砂・粗砂が 15%、微細砂が 20%とのデータがあり、含水比の低減には一次処理での分級が重要であることが判る。分級処理と含水比の関連を図-15 に示す。

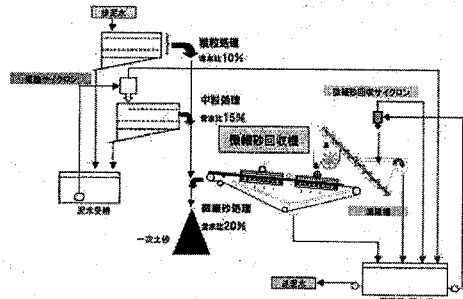


図-16 分級別一次処理フロー

(2) 一次処理分級システム

従来の一次処理設備は、粘土・シルト分と砂・礫分を分離するサイクロンと、砂・礫と水を分離する振動篩いからなる。サイクロンは、一般的に同一機種を使用し、粒径毎の分級を行わずに篩い分けをする。

開発した技術の特徴は、粒径に応じたサイクロンを多段に配置し、分級した土砂をその粒径に適した処理機によって水と土砂とを分離するシステムである。

開発した一次処理システム概念図を図-16 に示す。粗砂が分離できる大型サイクロンと微細砂が分離できる小型サイクロンおよび各々のサイクロンで処理される粒径に応じた振動篩い装置と新しく開発した微細砂回収装置を配置し、これらに加え従来でも行われている前処理機を含め、3段階に分けて処理する。

(3) 微細砂脱水回収装置の開発

従来の振動篩い装置では、振動篩網（篩い目寸法 0.8mm）上で粗粒分と粘性分が振動により濃縮結合し、造粒した状態で篩いに留まり分別されるため、含水比の高い処理となっている。逆に前処理で分級された微細砂は、粘成分による増粒が行われないため篩い装置を通り抜け、回収が困難であった。

開発した微細砂脱水回収装置はベルトフィルター、起振装置、真空吸引装置からなる。濾布を使用したベルトフィルターでシルト・粘土を脱水し、さらに高周波パイプレータの振動による水の分離と濾布背面からの真空脱水により微細砂を脱水回収する。濾布は材質、組織、繊維径、強度、通気度等を検討して選定した。同装置は実証実験を繰り返し行い、各装備の適正仕様と構造を決定した。微細砂回収装置の写真を図-17 に、実証実験プラントの写真を図-18 に示す。

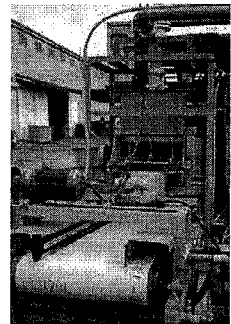


図-17 微細砂回収装置

(4) 微細砂回収装置の実証試験結果

実験により回収した微細砂の含水比は 16%であった。この値は極めて低く、良好な結果を得ることができた。図-19 に回収装置を通過した試料と捕集した試料の粒度試験結果を示す。開発した装置は微細砂を確実に回収したことが判る。図-20 にこの装置により脱水された微細砂の状況を示す。

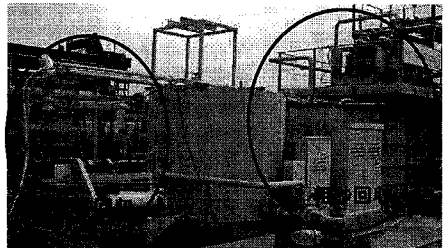


図-18 実証実験プラント

(5) 微細砂回収の効果

従来の泥水式シールドは、微細砂の回収が困難なため以

下の問題点があった。

- ・処理できない微細砂は調整槽を経て、送泥水として循環使用される。微細砂を多く含む送泥水は掘削切羽での確実な泥膜保持が困難となる。
- ・送泥水への微細砂の混入は、流体輸送ポンプの負荷を大きくする。特に長距離の流体輸送では負荷増加が顕著となる。
- ・調整槽内に堆積した微細砂をフィルタープレスで処理する場合、微細砂が多いとエアブローして脱水圧力が保持できず、処理する微細砂に粘土分を添加する必要がある。特に粘性分の少ない地山の掘削では、作泥と微細砂処理のための両作業で粘土を購入するため、コストアップとなった。

当装置の使用によりこれらの課題を解決でき、残土の減容化との相乗効果が期待できる。さらに利点として、残土を再利用する場合当システムは粒経別に残土を処理するため、再利用土の品質管理が確実に行なえる。

本システムの使用により、現在計画されている超大口径、長距離シールド道路トンネル工事の条件で試算すると、搬出残土量は 10%程度の減容化となる。さらに、二次処理設備において最近使われている超高压フィルタープレスを併用すると、30%近い減容化が図れることが判った。

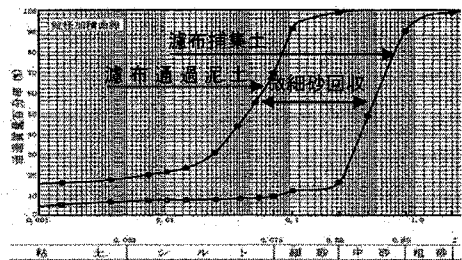


図-19 粒度試験結果



図-20 微細砂脱水状況

6. おわりに

今回開発した一連のシステムは、大口径道路シールドトンネルの高速施工を可能にし、工事の課題を解決できる技術である。今後は、モデル現場での適用・効果の再確認を行い、各技術の普及のため提案活動を進める所存である。

参考文献

- 1) 田代和登, 郡司靖丈, 後藤徹, 杉元裕紀: F-NAVI シールド工法による高速施工, 学会 2002 土木建設シンポジウム。
- 2) 浦田修, 浜口幸一, 阿曾利光: ビット交換なく長距離掘進を可能とした長寿命化ビット, 学会年次学術講演会, 2006。
- 3) 阿曾利光, 浜口幸一: 泥水式シールド一次処理微細砂回収による土砂減容化技術, 学会年次学術講演会, 2006。