

# 大断面シールド工事における発進立坑躯体等の 直接切削と狭隘な作業基地内での施工

## 環状七号線地下広域調節池（石神井川区間）の建設

金野 正一

環状七号線地下広域調節池整備事業は、都民の生命と財産を守るためのトンネル形式の洪水調節池を地下約40mの深さのところに泥水式シールド工法で築造するものである。この報文では、シールド機でRC躯体・RC連壁を直接切削によりシールド機を発進させたこと、並びに住宅地域での狭隘な施工場所で、施工の安全や近隣への影響を考慮してセグメント自動搬送システムを設置し本掘進を開始した事を述べる。今後同様な状況でのシールド発進、狭隘な基地での施工等の計画、設計、施工の一助になるように令和5年2月27日現在施工中の工事について紹介する。

キーワード：シールド、直接切削発進、調節池、狭隘地、セグメント自動搬送設備

### 1. はじめに

#### (1) 環状七号線地下広域調節池事業について

東京都では、台風や集中豪雨による水害から都民の生命・財産を守るため、河川の護岸や調節池などの整備による治水対策を進めている。神田川流域、石神井川流域および白子川流域では、1時間あたり75mmの降雨に対応するため、すでに整備されている貯留量54万 $m^3$ の神田川・環状七号線地下調節池と貯留量21万 $m^3$ の白子川地下調節池を連結する環状七号線地下広域調節池の整備を進めている。総延長13.1kmにもおよぶこれらの整備が完了すると合計140万 $m^3$ を超える貯留量を確保することができる。また、白子川、石神井川、妙正寺川、善福寺川、神田川の計5河川にまたがることから、貯留量を複数の流域間で相互に融通することができ、時間100mmの局地的かつ短時間の集中豪雨に高い効果を発揮することになる（図—1に環状七号線地下広域調節池全体図、図—2に概要図を示す）。



- |                                  |
|----------------------------------|
| ①環状七号線地下広域調節池（今回施工）              |
| 内径12.5m, 延長約5.4km, 貯留量約68万 $m^3$ |
| ②白子川地下調節池（供用中）                   |
| 内径10.0m, 延長約3.2km, 貯留量約21万 $m^3$ |
| ③神田川・環状七号線地下調節池（供用中）             |
| 内径12.5m, 延長約4.5km, 貯留量約54万 $m^3$ |

図—1 環状七号線地下広域調節池全体図

#### (2) 環状七号線地下広域調節池（石神井川区間）工事の概要

環状七号線地下広域調節池（石神井川区間）工事は、妙正寺川取水施設立坑（既設）と石神井川取水施設立坑（既設）を結ぶ調節池を構築する工事である。

- 1) 工事件名：環状七号線地下広域調節池（石神井川区間）工事
- 2) 工期：平成29年（2017年）3月9日～令和7

年（2025年）12月18日

- 3) 発注者名：東京都（所管：東京都建設局, 工事施工：東京都第三建設事務所）
- 4) 施工者名：大成・鹿島・大林・京急建設共同企業体
- 5) シールド機外径： $\Phi 13.45$  m

本稿では、環状七号線地下広域調節池（石神井川区



図一2 環状七号線広域調節池概要図

間) 工事のうち、立坑躯体及び連壁の直接切削方式を採用したシールド発進工法と、狭隘なシールド基地を克服するために採用したセグメント自動搬送システム(立坑リフトと自動搬送台車の組み合わせ)について報告する(写真一1, 2)。

## 2. RC壁の直接切削による発進

発進立坑のRC壁、RC連壁を直接切削によりシールド機を発進させた。RC壁、連壁を切削する際に、ビット交換が必要になったが施工の工夫と受発注者の協力により、無事発進をすることができた。その概要を紹介する。

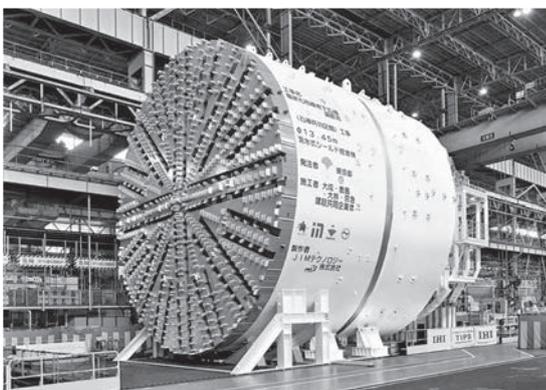
### (1) 立坑概要

#### (a) 立坑概要

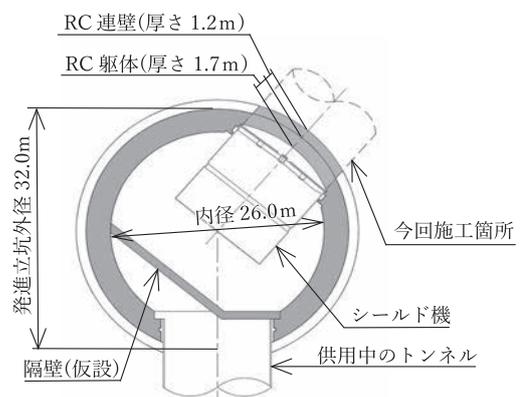
シールド発進に使用する発進立坑は、仮設山留としてRC連壁工法(厚さ1.2m)を採用し、RC躯体(厚さ3.0m)を構築した円形立坑である。シールド発進部は構築当初より仮壁構造となっており、側壁(RC躯体)は厚さ1.7mとなっている(図一3)。近年の地中障害の直接切削の実績から、今回のシールド発進は、RC躯体、連壁をシールド機により直接切削するものであった。通常、シールド機で直接切削して発進する場合は、RC躯体、連壁に使用する鋼材の代替に



写真一1 発進基地全景



写真一2 Φ13.45 mシールド機全景



図一3 シールド発進立坑

切削が容易である炭素繊維やFFU部材（Fiber Reinforced Foamed Urethane）等を使用するが、本工事において発進坑口には、そのような素材は用いられていなかった。これは、立坑築造開始時において、石神井川区間工事の計画が具体的になっていない状態であり、シールド工法による掘削迄の仮壁期間が相当長くなることが想定され、予測できない事象に対して安全側の設計が実施されたためである。

(b) 仮壁構造

仮壁部は、長期間の土水圧に対抗するために、鉛直方向主筋としてD35、D32、D29がピッチ200mm、水平方向には、D25がピッチ200mmでシールド掘進全断面に配筋されていた。コンクリートの設計強度は、 $24\text{ N/mm}^2$ であった。

(2) シールド機仕様

カッターヘッドを円錐形状（カッター面板勾配 $2^\circ$ ）とし、通常用いる土砂用先行ビットに対して超硬チップ容量が約48倍の高耐久ビットを、全断面掘削できるように配置した（図-4）。耐磨耗性及び耐衝撃性に優れている高耐久ビット（E5種相当品）を用いることにより、直接切削後の掘進延長5.4kmを、ビット交換なしで掘削することが可能なものとして設計、製作を行った。

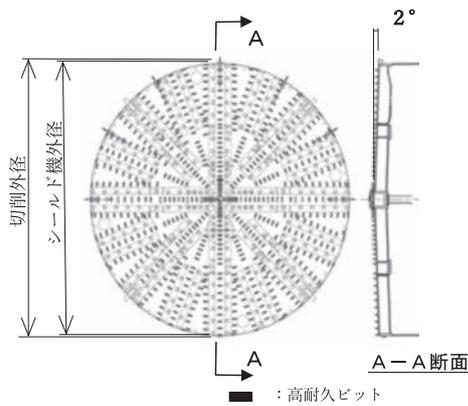


図-4 カッターヘッド

また、構造物切削時はカッターの回転速度を通常の約2倍（0.84 rpm）の高速回転とし、掘進速度を1～2 mm/minの超低速で掘進を行った。これは、構造物を薄く削ぎ取る様にして掘進を行うためである。

(3) ビット仕様（最外周ビット形状について）

RC構造物等の支障物切削に於いて、RC躯体を切削中に最外周先行ビット本体と台座溶接付近でビットが脱落する事象が発生した。図-5に当初ビットの破断位置を示す。破断脱落の原因は、最外周ビットへ面外力が作用し、面外力によるモーメントにより台座溶接部で破断したものと考えられる。そのため、対策として面外力により発生する曲げモーメントに対して十分な耐力を有する形状のビットに交換を実施した。これまでに経験した事がないビット脱落という事象が発生した要因を分析及び考察し、それに基づく改良・工夫を実施して無事切削を完了することができた。以下に今回の事象に対する分析・考察、改良・工夫した点、今後の掘進について述べる。

(a) 要因の分析及び考察

- ・ビット脱落の原因をRC壁切削面から凸状となった鉄筋が影響しているものと考え、RC壁切削完了後に5mm程度吐出した鉄筋にカッター回転による荷重が作用した場合をFEM解析した。その結果を図-6に示す。FEM解析では、鉄筋が再度切断されず、根元のコンクリートが圧壊する結果が得られた。
- ・第三者機関での調査の結果、溶接部の溶接金属と母

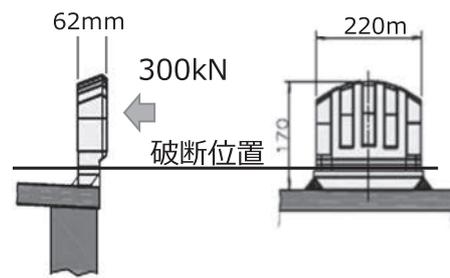


図-5 当初ビット破断位置図

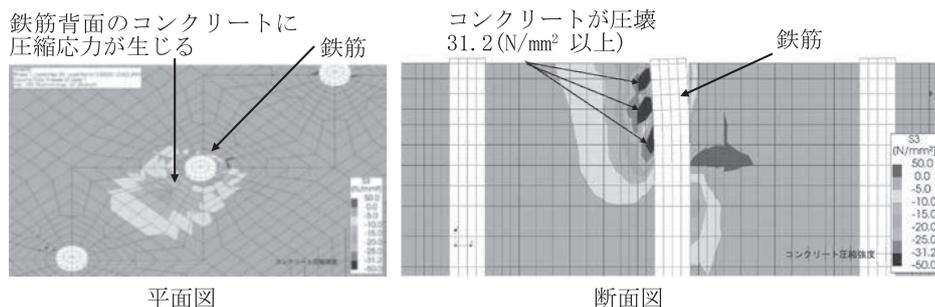


図-6 コンクリート圧壊解析図

材に剥離はなく、顕著な溶接欠陥は認められていない。溶接部強度計算結果から、破断荷重は約 300 kN と推定された。

上記分析結果から下記のように考察した。

- ・シールド機カッター回転に伴い、RC 壁切削面から凸状となった鉄筋より下部のコンクリートが圧壊し、削りとられ、掘削断面が大きくなった。シールド機カッター外周面と仮壁切削面の間に隙間が発生した (4 cm 程度)。
- ・切断された鉄筋片が掘進とともにシールド機カッター下部の隙間に集まり、カッター回転面の直角方向地山側から、最外周ビット側面 (外側) を押す構造となった。通常では考えられないビット側面からの力 (面外力) により、ビット溶接部に曲げモーメントが作用し台座溶接部で破断したと考えた。図一七に破断時の模式図を示す。

(b) 改良・工夫点

上記要因から最外周ビットに作用する面外力に対抗するために、底面幅 62 mm から 175 mm に増加したビット構造に変更し、面外力を作用させた FEM 解析を行った (図一八参照)。この解析により荷重 1,550 kN を作用させた時にシールド機との溶接部に  $400 \text{ N/mm}^2$  (母材 SS400 の引張強さ) の引張応力が発生する事が確認できた。溶接部の強度計算では、破断荷重は 1,270 kN 程度であり、上記の対策を実施した後、RC 連壁の切削では、ビットの破断による脱落は無かった。図一九に改良ビット図を示す。

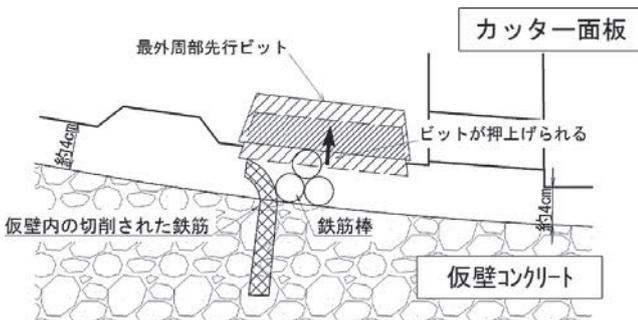
(c) 今後の掘進に対して

RC 連壁切削に於いて、最外周部先行ビットの超硬チップの欠け、割れが発生した為に、RC 連壁切削完了後にトリムビットを交換・追加した。この作業では、チャンバー内よりトリムビット全数 (16 個) を交換し、追加のトリムビット 16 個を配置した。図一十にトリムビット、カッタービットの形状を示す。ビット摩耗検討結果から、以後の地山区間の 5.4 km の掘進を可能と判断した。

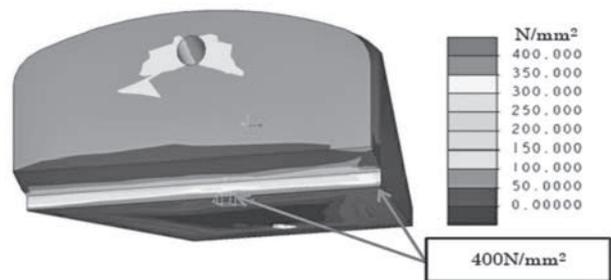
(4) 今後のシールド計画に対しての対応策

今回の取り組みを経て、今後の計画の対応策を以下に示す。

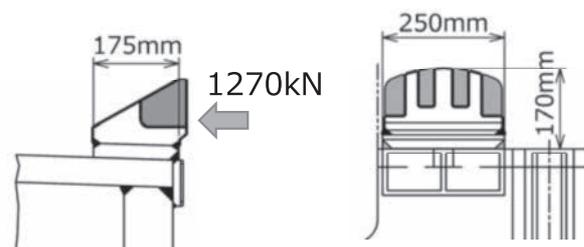
- ・最外周ビットは面外力が発生する可能性があるので、最外周先行ビットの底版幅を十分に確保する構造とする。
- ・最外周の先行ビットは、チップの割れ欠けが発生する為に、トリムビット、ティースビットだけで掘削が完了できるように、余裕を持った配置、条数とする。最外周のティースビットはシールド機チャンバー内



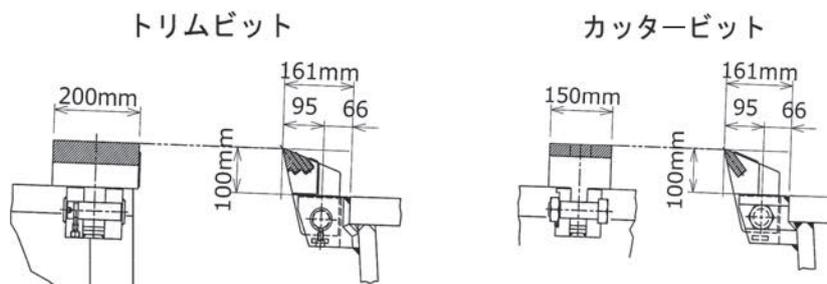
図一七 破断模式図



図一八 改良ビット応力解析



図一九 改良ビット図



図一十 トリムビット、カッタービット図

から交換可能な構造（ピン，ボルト接合）とする。

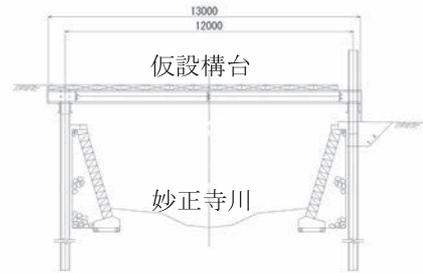
### 3. 狭隘な作業ヤードにおけるセグメント自動搬送システムを採用した施工について

#### (1) シールド発進基地概要

シールド本掘進時の発進基地計画を図一11に示す。発進基地は西武新宿線野方駅に近い住宅地域にあり北側，南側は住宅地に近接している。また東側は，都道環状七号線に面する場所である。妙正寺川上に仮設構台を設置（図一12）し，シールド基地として使用している。シールド発進基地面積は全体で3,930m<sup>2</sup>であり，その内，妙正寺川上の仮設構台面積は，1,620m<sup>2</sup>である。掘削外径φ13mクラスの泥水式シールド基地としては狭隘である。この狭隘なシールド基地から5.4km掘進のセグメント等資機材を供給する為に，立坑リフト（セグメントリフター）を設置し，掘進を実施する。セグメントの立坑下への投入をクレーンによる投入からセグメント搬送装置による投入に変更した。セグメント搬送5.4kmを実施する為に施工効率を向上させるとともに，安全にも配慮した立坑リフトを設置した。

#### (2) セグメント自動搬送システム

セグメント自動搬送システムは，地上ストックヤードから坑内セグメントストック場所までを自動で搬送するシステムである。立坑リフトによるセグメントの立坑下への搬入，坑内自動搬送システム，坑内セグメントストックと合せてセグメントその他資材の運搬を

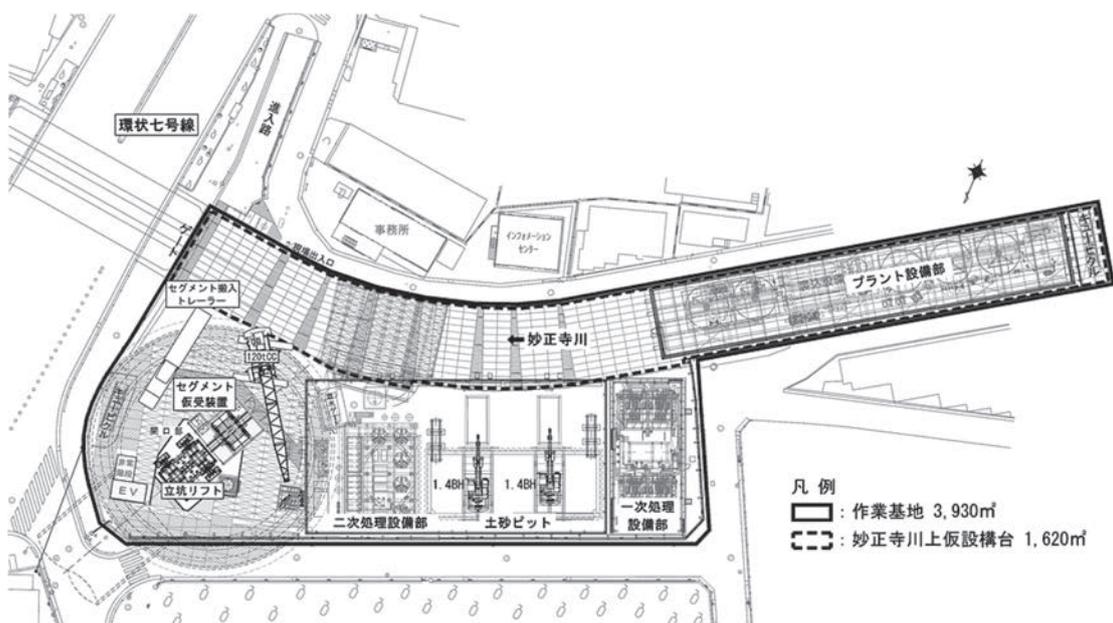


図一12 シールド発進横断面図

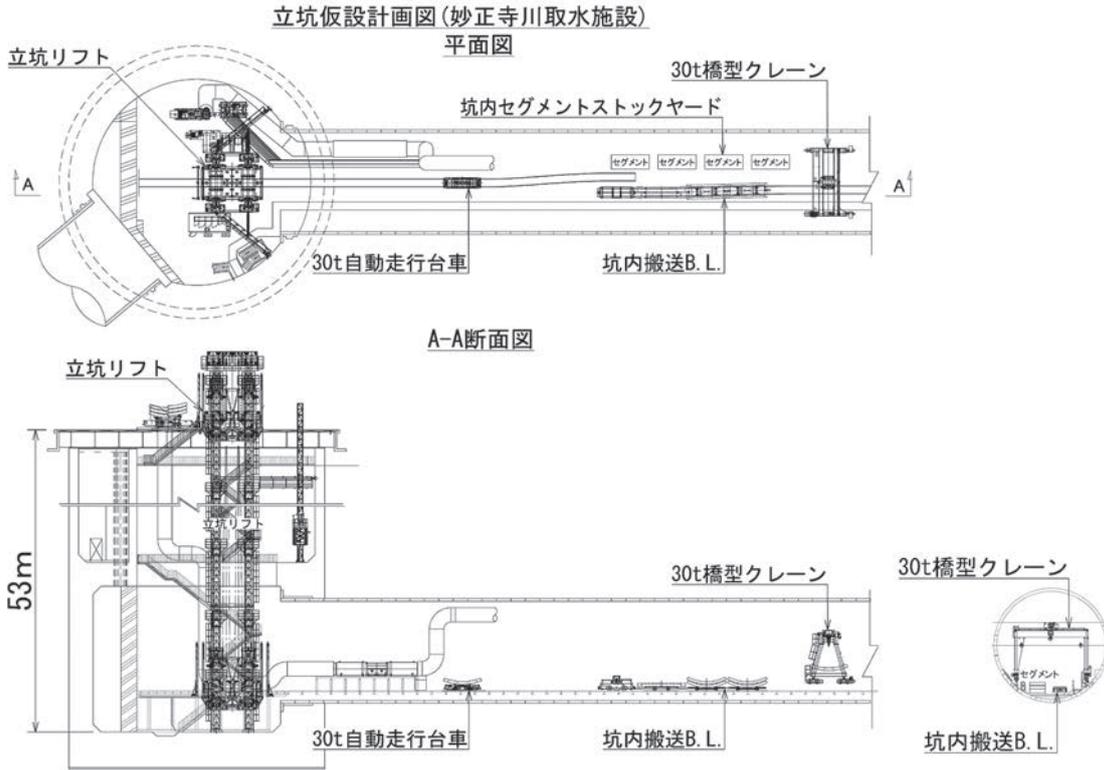
実施する。立坑リフト設備は，発進立坑が約50mと深く，資機材をクレーンで投入していた場合に，施工サイクルが確保されなくなる。また，深度50m揚程の資機材投入時の安全管理を考えた設置である。地上から坑内のセグメントストックヤード迄の運搬は資機材運搬自動走行台車による自動搬送システムとし，熟練操作員による操作を不要とした（図一13）。報文記載時は，立坑リフト，自動搬送装置の設置が完了し，坑内へ自動でセグメントを運搬している。坑内セグメントストックは，今後の実施である。

#### (3) セグメント仮受け装置概要

セグメント仮受け装置の概要を記載する。仮受け装置は，セグメント3ピース（30t）の積載が可能である。地上仮置き場から，120tクローラクレーンを使用して積載する。仮受け装置は，仮受けしたセグメント3ピースを，立坑リフトから自動で仮受け装置下部に進入してきた自動自走搬送台車が停止位置に停止した後，毎回同じ安定した位置に積載することができる装置である。仮受け装置は，下部空間を大きく開けてあ



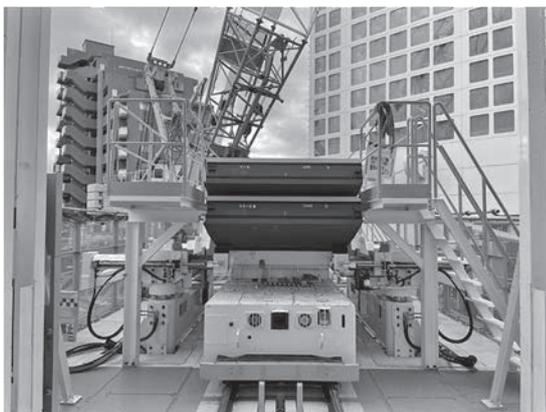
図一11 シールド発進基地図



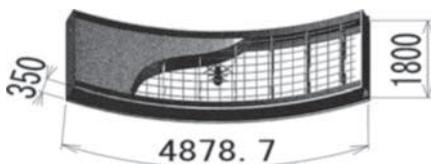
図一13 シールド仮設計画図

り、自動搬送台車が進入できる構造となっている。その後、操作員の搬送ボタン押下により自動で立坑リフト内に発進する（写真一3）。

図一14に当工事のセグメント図を示す。嵌合方式合成セグメントであり、セグメント幅1.8m、桁高35cm、1ピースが約9tである。1リングは9分割となっている。



写真一3 セグメント仮受け装置



図一14 セグメント図

(4) 立坑リフト

セグメント搬送用の立坑リフト仕様を表一1に示す。積載荷重は40tであり、セグメント3ピース約27tと自走台車約8t、合計35tの積載が可能である。

セグメント仮受け装置と自動搬送設備により地上に設置している120tクローラクレーンは、坑内搬送による待機時間が発生しなくなり、地上でのセグメント荷降ろし、仮置きに活用できる。立坑リフトの設置により、120tクローラクレーンの作業は、セグメント搬入トレーラからの荷降ろしと地上ストックヤードへの仮置き、地上ストックヤードからセグメント仮受け装置への積載だけになり、方番施工サイクルである、セグメント2R分の搬入であるトレーラ6台荷捌きと2R分の坑内投入が可能になった（写真一4～6に立坑リフトを示す。図一15に立坑リフト図を示す）。

表一1 立坑リフト仕様

積載荷重	40	t
昇降速度	0.334	m/s
昇降速度（軽負荷時）	0.667	m/s
昇降用電動機	280	kw
搬器自重	40	t
揚程	48.696	m
荷台有効面積	24.5	m <sup>2</sup>
昇降方式	ウインチ巻上方式	
電源	400	V



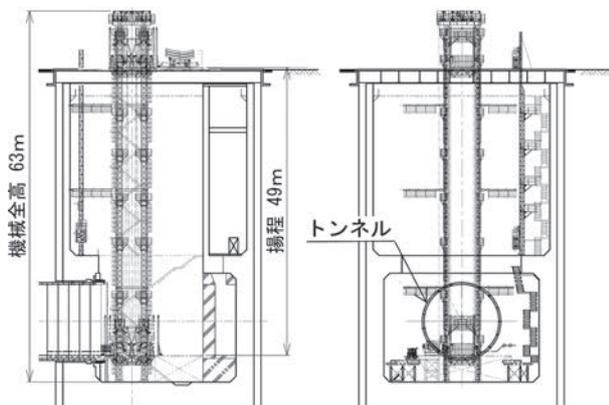
写真一四 立坑リフト地上部



写真一五 立坑リフト立坑下



写真一六 立坑リフト



図一五 立坑リフト図

### (5) 坑内セグメント仮置

セグメントを坑内に仮置きすることで自動搬送台車の運転回数を確保すると共に狭隘な地上部にセグメントを仮置きできない点を補う事ができる。地上部に仮置きできるセグメント数量は、3R分であり、日使用量4Rに対して、余裕がない。セグメント仮置き場迄自動搬送されたセグメントは、坑内橋形クレーンで荷下ろしされ、坑内セグメント置場に仮置きされる。ここで、坑内搬送設備（坑内軌道設備等）と地上からの自動搬送設備の受け渡しを行う。坑内搬送を優先させた、オペレーションを行う事によりシールド掘進に影響が出ない様になる（写真一七に坑内ストック用30t橋形クレーンを示す）。



写真一七 坑内ストック用30t橋形クレーン

## 4. おわりに

環状七号線地下広域調節池（石神井川区間）工事の内、シールド機による立坑壁直接切削発進と、シールド設備であるセグメント自動搬送システムについて紹介させていただいた。直接切削に於けるビット交換については、発注者である東京都第三建設事務所様や有識者委員会各位からの技術指導を受けて成功する事ができた。ここに、謝意を表す。シールド掘進は、まだ5 km 以上残っており、本掘進は端緒についたばかりであり、安全第一に工事を完成させる所存である。

JCMA

〔筆者紹介〕  
 金野 正一（こんの しょういち）  
 大成建設㈱  
 東京支店 環七地下調節池作業所

