大深度併設シールドトンネル間のNATM切拡げ工事におけるシールド施工時荷重の影響

熊谷　幸樹[1]・越後　卓也[2]・白石　均[3]・市川　健[4]

[1]飛島建設　土木事業統括部　トンネルG（〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸3-2-1）
E-mail: koki_kumagai@tobishima.co.jp
[2]飛島建設　首都圏土木支店　土木部（〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸3-2-1）
E-mail:takuya_echigo@tobishima.co.jp
[3]東京都　第一建設事務所　環二工事課（〒104-0044 東京都中央区明石町2-4）
E-mail:Hitoshi_Shiraishi@member.metro.tokyo.jp
[4]東京都　第六建設事務所　補修課（〒120-0025 東京都足立区千住東2-10-10）
E-mail:Ken_2_Ichikawa@member.metro.tokyo.jp

南品川換気所避難連絡路接続工事は，南品川換気所と2本の本線シールドトンネル(大井行：東京都，大橋行：首都高速道路，φ12.3m)を接続する避難路トンネルを構築する工事で，地下水面下の大深度地下で併設トンネル間をNATMにより切り拡げてRC躯体構造物を築造する．対象地山は未固結の砂層(Ks層)と被圧水が差し込む砂混じりの土丹層(Kc層)の互層であるため，複数の地盤改良工により地山の止水性と強度の向上を図った．本報告では，併設シールドトンネル間のNATM切拡げ時の施工手順および施工結果について述べるとともに，併設シールドトンネル間掘削中のセグメント応力の経時変化に基づき，土丹層のような硬質地盤ではシールドトンネルの施工時荷重が残留し，シールドトンネル間切拡げ時に影響する可能性があることを示した．

Key Words : *parallel shield tunnels, deep underground, NATM, shield construction load*

1.　はじめに

南品川換気所避難連絡路接続工事は，南品川換気所と2本の本線シールドトンネル(大井行：東京都，大橋行：首都高速道路，φ12.3m)を接続する避難路トンネルを構築する工事[1)]で，地下水面下の大深度地下で併設トンネル間をNATMにより切り拡げてRC躯体構造物を築造する工事である(図-1)．対象地山は，流動化しやすい砂層(Ks層)と被圧水が差し込む砂混じりの土丹層(Kc層)の互層であるため，複数の地盤改良工により地山の止水性と強度の向上を図った．

本報告では，併設シールドトンネル間のNATM切拡げ時の施工手順および施工結果について述べるとともに，併設シールドトンネル間掘削中のセグメント応力の経時変化に基づくシールドトンネル施工時の施工時荷重の影響について考察した．

2.　工事概要と複合的な地盤改良工の施工[2)]

(1)　工事概要

品川線には4つの換気所が建設され，本線トンネルの換気，災害時の地上への避難通路として機能する．その一つである南品川換気所は，目黒川直下約50mを走る2本の本線トンネルと送排気用の換気ダクト計4本，避難

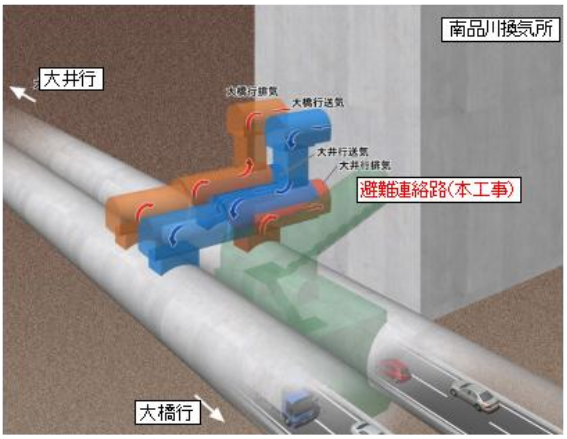


図-1　南品川換気所の概念図

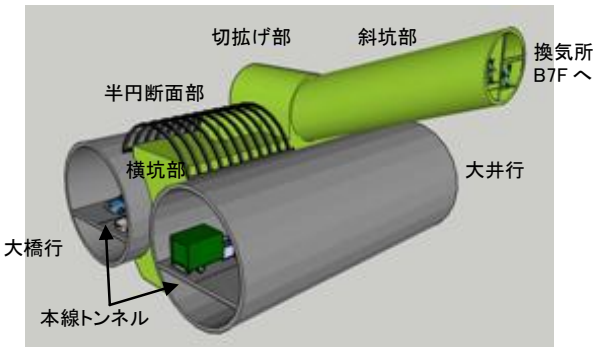


図-2　避難連絡路の構造概要図

表-1　NATMによるトンネル工の工事概

部位	掘削工法	諸元等
斜路部	NATM	延長17.4m，内径5.5m
切拡げ部		延長8.6m，幅7.85m
半円断面部		延長11.7m，幅8.5m
横坑部		外寸：幅8.6m，延長19.5m，高さ13.5m 内寸：幅4.2m，延長16.5m，高さ11.4m

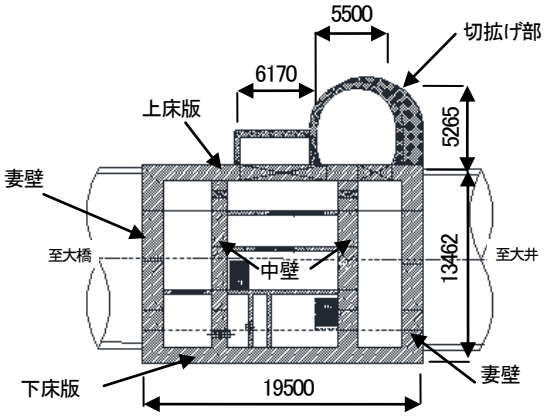


図-3　NATMによるトンネル工の工事概要

路1本で接続される(図-1)．このうち，本工事は，南品川換気所と本線トンネルを結ぶ避難用の連絡トンネルを構築するもので，構造概要図を図-2に示す．本工事は，換気所B7Fから本線トンネル上部へ勾配約20°で下る「斜坑部」，さらに「切拡げ部」，「半円断面部」を経て，本線との直接の接続部となる「横坑部」を本線トンネル間にNATMにより掘削し，躯体を構築する(表-1)．主な躯体構造物は，本線トンネル間に構築する上床版，下床版，両端部の妻壁と中間部2箇所の中壁などであり，ウォータータイトのRC構造となっている(図-3)．

(2)　複合的な地盤改良工の概要と施工[3]

本工事の施工深度は，目黒川直下約35～60mの大深度地下であることから，常に高い地下水圧下での施工となる．また，対象地山は未固結の砂層(Ks 層)と地下水が差し込む砂混じりの土丹層(Kc 層)が積層する複雑な地層であった．そのため，河川下で，かつ地下水位以下でのトンネル掘削を安全に行うため，地下水の坑内流入抑制と流動化しやすい砂層や砂混じりの土丹層での安定化を図

表-2　地盤改良工と薬液注入工の施工概要

地盤改良箇所	対象地盤	工法名称	施工条件	施工時期
斜坑部上部	砂層	高圧噴射撹拌工法	地上から鉛直下向き施工	平成24年1月～同年2月
斜坑部下部	土丹層	ダブルパッカ工法	地上から鉛直下向き施工	平成24年3月
切拡げ部	砂層	凍結工法	地上から斜め施工	平成24年3月～平成25年4月
半円断面部横坑部	土丹層	低圧浸透注入工法	本線内から施工	平成23年11月～平成24年4月

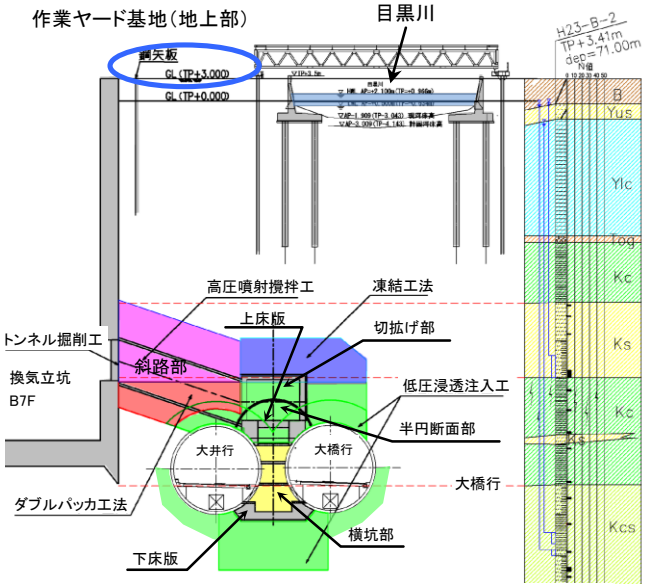


図-4　複合的な地盤改良工と薬液注入工の施工概要
(断面図)

ることを目的として，対象地山の地質性状と施工条件を考慮した計4種類の地盤改良工と薬液注入工を使い分けて施工することとした(表-2，図-4)．

地上部からの施工が可能な斜路部周辺では，砂層に対して止水と地盤強度の向上を目的とした高圧噴射撹拌工法を，砂層の介在する土丹層に対してダブルパッカ工法を採用した．一方，目黒川の直下に位置する切拡げ部と横坑部の砂層に対しては地上部からの斜め施工が可能な凍結工法を，本線シールド周辺の土丹層に対しては本線内からの施工が可能な低圧浸透注入工法を採用した．地盤改良工・薬液注入工は，地盤を氷点下の低温にする凍結工法が他の地盤改良工の止水性や強度などの品質に悪影響を与えないよう，低圧浸透注入工法，高圧噴射撹拌工法，ダブルパッカ工法の順に着手し，これらの施工が完了後，凍結工法により切拡げ部上部に凍土(14.05m×13.5m×3.6m)を造成した．NATMによる切拡げ部のトンネル施工は，所定の凍土造成が完了後に開始することとした．

3.　工期短縮のための施工手順の見直しと実施工

(1)　横坑部の多段分割掘削による工期短縮

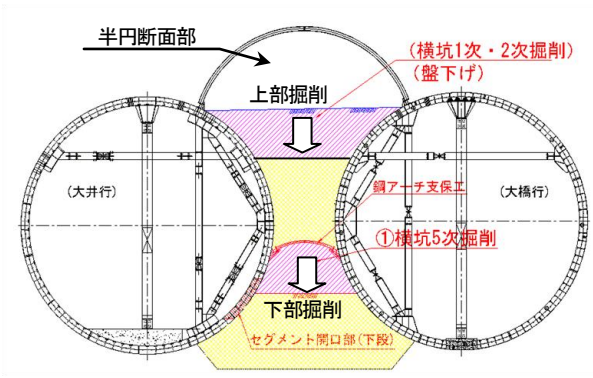


図-5　複合的な多段分割掘削の手順概要

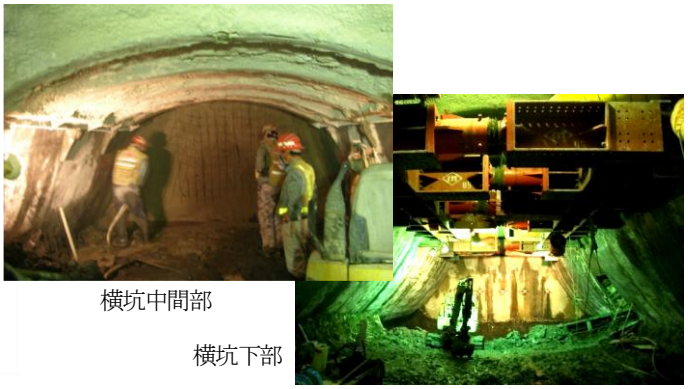
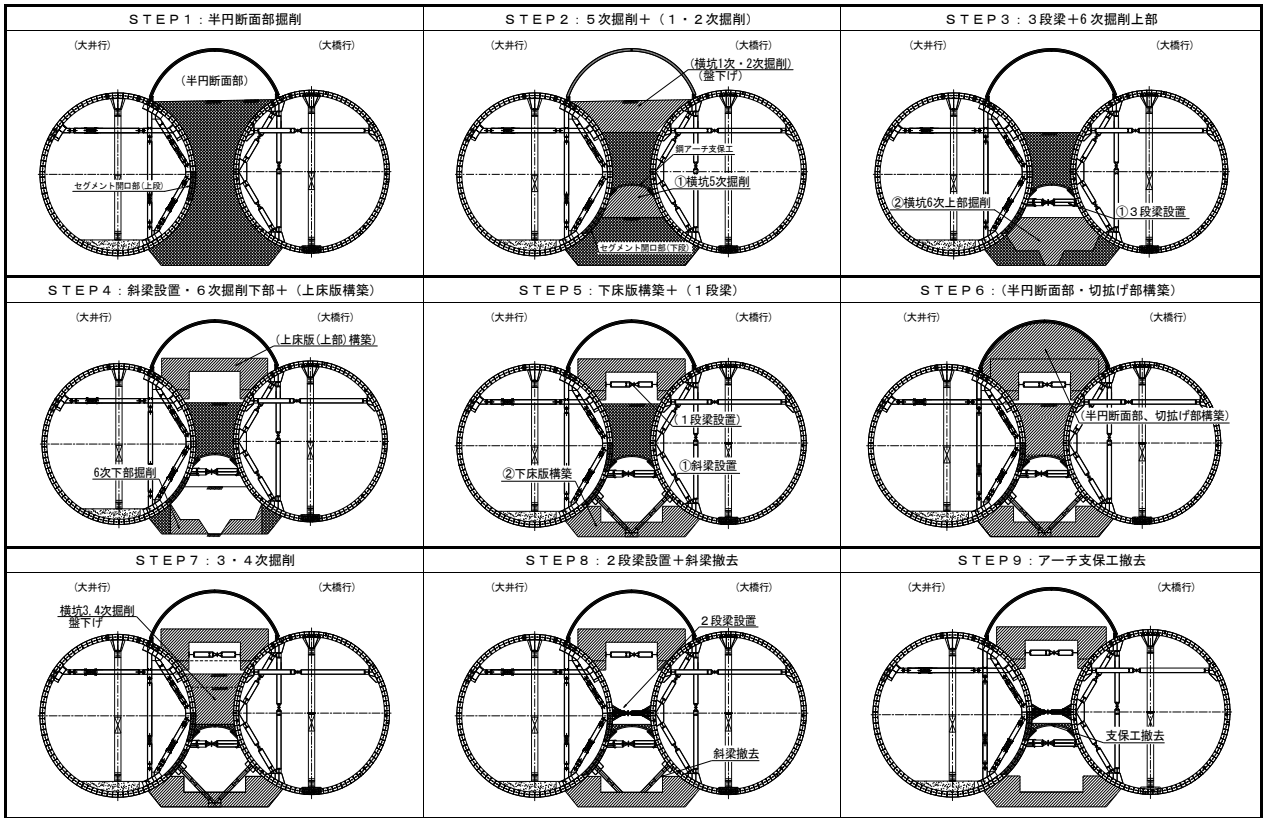


写真-1　横坑部の掘削状況



※図中の括弧内の施工ステップは換気所側からの施工を示す.

図-6　横坑部の多段分割掘削による掘削および躯体構築の施工手順

当初の施工計画では，まず，南品川換気所立坑B7Fを作業基地とし，斜路部，切拡げ部，半円断面部，横坑部の2次掘削までを完了後，上床版を構築する．次に，横坑部を上部から下部に向かって片押しで掘削を進めながら，横坑部両妻壁を逆巻きで構築した後，下床版，中壁および中間スラブを順巻きで構築する施工手順であった．この手順では，掘削ずり搬出や資機材の搬出入は立坑を通じて行うこととなり，立坑内の作業ヤードや搬入経路を躯体構築完了まで確保しておく必要があった．しかしながら，この施工手順では同時施工中の立坑内の建築工事において作業に支障をきたして遅延し，品川線工事の全体工程に影響を及ぼすことが判明した．そこで，本工事の施工手順を抜本的に見直して，工期を約2か月短縮することが必要となった．

掘削手順の見直しの結果，横坑上部での掘削および上床版構築に加わえて，供用時には避難路用の開口部となる大井行本線トンネル側からも同時並行で下方に向けて掘削を進める多段分割掘削を採用し，下床版を構築後，妻壁，中壁および中間スラブを順巻きで構築することとした(図-5).

多段分割掘削により上下同時に並行して掘削することは，本線トンネル間の中間部地山が不安定化したり，本線トンネルに悪影響を及ぼす可能性があるため，三次元FEMによる予測解析を実施し，トンネル間支保工のサイ

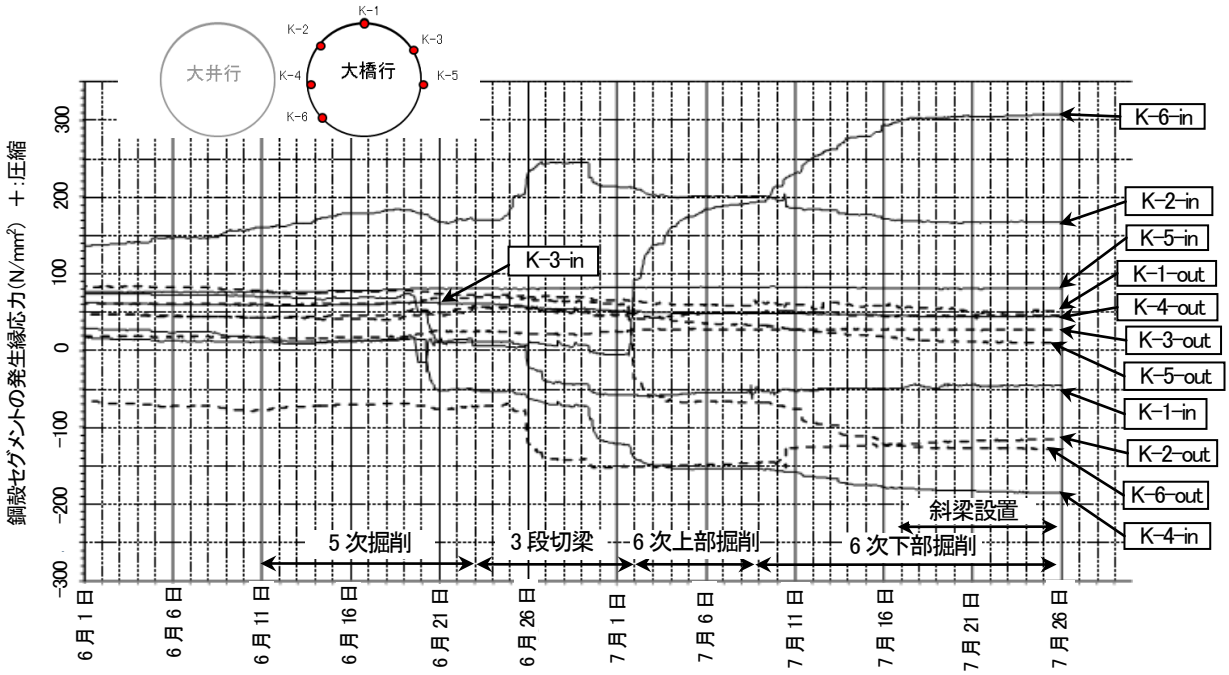


図-7　大橋行本線トンネルのセグメント応力の経時変化：No. 26 セグメント

写真-2　斜梁の設置状況

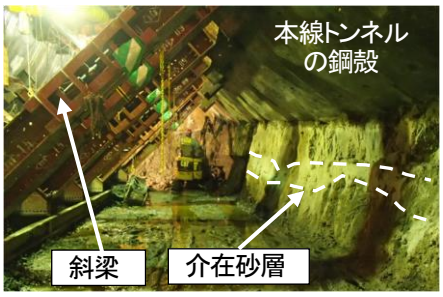


写真-3　底盤部付近の介在砂層

写真-4　斜坑部の仕上り状況

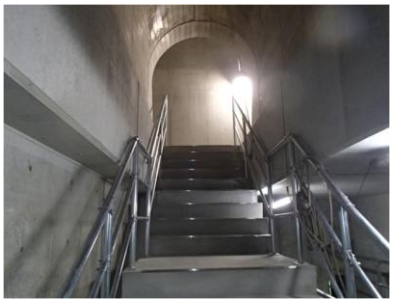


写真-5　半円断面部の仕上り状況

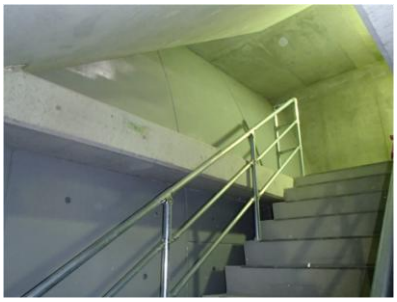


写真-6　横坑部の仕上り状況

写真-7　鋼殻切断部の仕上り状況

ズ変更や，横坑中間部5次掘削時には鋼製アーチ支保工を設置するなどの安全対策を講じた上で施工することとした(**写真-1**).

⑵　実施工とセグメント応力増加に対する対策

実施工は**図-6**に示す通り，半円断面部掘削完了後(STEP1)，上部では上床版構築を目指して横坑1次，2次掘削を行うと同時に，横坑中間部ではセグメント開口箇所から鋼アーチ支保工と吹付けコンクリートで地山を支保しながら横坑5次掘削を施工した(STEP2)．次に，上部では上床版構築へと進み，横坑下部では3段梁(H-500@1.5m)設置後に横坑6次上部掘削を行った(STEP3)．その後，上部では上床版構築を完了し，横坑下部では掘削底盤および本線トンネルの安定化のために下床版の早期構築を目指して6次下部掘削を進めた(STEP4).

しかしながら，6次下部掘削中，大井行・大橋行本線トンネルのそれぞれ4時と8時方向のセグメント応力が事前の予測解析を上回る値まで増加し，大橋行本線トンネルではトンネル下部のセグメント応力が予測値：145N/mm^{2}に対し，一次管理値：310N/mm^{2}に迫る値に達した(**図-7**)．そのため，掘削床付け面から両本線トンネルに斜梁(H-350@1.5m)を設置し，以後の6次下部掘削に

表-3　シールドトンネル間下部掘削時のセグメント応力増分値の比較

先行(大橋行)シールドトンネル　セグメント応力:K-6-IN

リング	主桁厚 (mm)	6次上部掘削			6次下部掘削			
		7/1	7/8	増分	7/8	7/25	増分	増分比率
No.19	61	32.5	41.7	9.2	41.7	59.8	18.1	171%
No.20	28	66.8	85.4	18.6	85.4	103.8	18.4	151%
No.22	72	-60.5	101.5	162.0	101.5	138.0	36.5	144%
No.23	30	-60.8	155.7	216.5	155.7	203.4	47.7	128%
No.25	62・73	-73.6	46.1	119.7	46.1	182.2	136.1	156%
No.26	35	-5.1	191.1	196.2	191.1	306.9	115.8	218%
No.27	62・73	-10.0	135.0	145.0	135.0	231.5	96.5	122%
No.29	30	-32.5	183.7	216.2	183.7	295.2	111.5	180%
No.30	28	-16.9	192.1	209.0	192.1	293.5	101.4	98%
No.31	72	-27.5	29.1	56.6	29.1	85.2	56.1	179%
No.35	25	102.1	113.5	11.4	113.5	153.0	39.5	
							平均	154%

後行(大井行)シールドトンネル　セグメント応力:T-6-IN

主桁厚 (mm)	6次上部掘削			6次下部掘削		
	7/1	7/8	増分	7/8	7/25	増分
55	22.5	30.4	7.9	30.4	41.0	10.6
28	43.3	58.2	14.9	58.2	70.4	12.2
75	-90.1	30.9	121.0	30.9	56.3	25.4
28	-20.1	188.6	208.7	188.6	225.8	37.2
75	-84.1	-34.2	49.9	-34.2	53.3	87.5
35	172.5	245.7	73.2	245.7	298.9	53.2
52	22.6	167.2	144.6	167.2	246.4	79.2
28	5.1	153.8	148.7	153.8	215.7	61.9
35	108.4	207.6	99.2	207.6	311.5	103.9
75	-14.6	49.5	64.1	49.5	80.9	31.4
25	204.2	204.7	0.5	204.7	196.5	-8.2

伴う本線トンネルの変形を抑制し，セグメント応力増加の防止を図った(STEP5，写真-2).

底盤部床付けとなる下部6次掘削では，写真-3に示すように大橋行本線トンネル側の掘削面に介在砂層が分布し，数か所からの総湧水量は最大毎分450Lとなったが入念な追加の地盤改良工により湧水量の増加も収束傾向となり，切り回し排水を行い対応した.

次に，上部は3次，4次掘削に伴う上床版の変形抑制を目的とした1段梁(変形抑制梁)を設置し，横坑下部では斜梁を残置したまま下床版の打設・構築を完了した．これにより上床版と下床版の構築が完了し，両本線トンネルは上部および下部で連続的な梁構造体として連結され，施工段階における本工事の躯体構造物の安定性を確保することができた.

さらに，引き続き上部は半円断面部，切拡げ部の躯体構築を進め，横坑下部では妻壁と中壁の順巻き施工を進めた(STEP6)．以後，STEP7では横坑3次，4次の盤下げ掘削を行い，STEP8では2段梁(H-350)設置，6次掘削部の斜梁を撤去し，STEP9では最後の掘削となる横坑5次掘削のためにSTEP2で設置した鋼アーチ支保工などを撤去した(図-6)．切梁軸力の予測値と計測値を比較し，本線トンネルや構築済みの躯体構造物に悪影響が発生しないかを確認しながら中間梁撤去時期を決定した．これによって，躯体構造物は下床版構築後，3段梁，2段梁を早期に撤去しながら，順に上部に向けて妻部，壁部および中間スラブを順巻きで施工することができた.

また，上床版を先行構築したことで，後工程である半円断面部，切拡げ部，斜路部の躯体構築は横坑下部とは別班編成で進めることができ，換気立坑内からの資機材搬入などが不可能となる施工期限内に上部躯体の構築を無事完了することができた(写真-4)．また，ウォータタイトRC構造である躯体の品質は確保しつつ，本工事を無事工期内に完了することができた(写真-5, 6, 7).

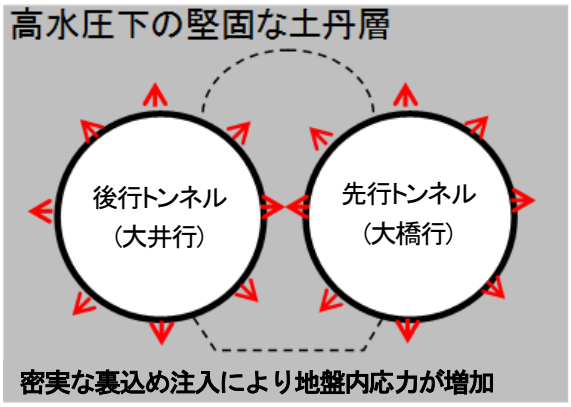


図-8　シールド施工時荷重による残留応力の概念図

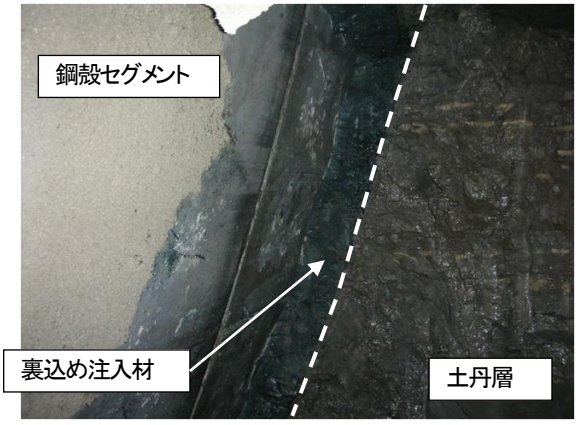


写真-8　裏込め注入材の充填状況：大橋行

4.　シールド施工時荷重の影響に関する考察

(1)　下部掘削時の斜梁施工の概要

多段分割掘削によりシールド間下部を掘削中，併設シールドトンネルの鋼殻応力に予測解析を上回る応力増加が発生し(図-7)，その原因究明と原因に対する効果的な

対策を立案実施する必要があった．

応力増加後の掘削において，シールド間中央部を床付けまで先行掘削して変形抑制のための斜梁を設置した（**写真-2**）．また，斜梁設置後に再掘削に伴う予測解析を行うと同時に，シールド縦横断方向にブロック分けした掘削方法を採用し，試験掘削区間を設けてセグメントへの影響を監視しながら施工を進めた．

⑵　下部掘削時のセグメント応力増分について

表-3に，シールドトンネル間下部である6次掘削時におけるセグメント応力増分値の一覧を大橋行と大井行で対比して示す．同表より，セグメント応力の増分値は総じて先行シールドトンネルである大橋行のそれが大井行よりも大きく，最大で約2.2倍，平均で約1.5倍であったことが分かる．これは，**図-8**に示す通り，高水圧下の堅固な土丹層ではシールド施工時の裏込め注入圧により，先行した大橋行側の地盤内により大きな残留応力が保持された中で，横坑部掘削によって予測解析では考慮されなかった残留応力が解放されたためと推察された[4]．なお，**写真-8**に示す通り，横坑部掘削時に観察された本線シールドトンネルの裏込め注入材の充填状況は密実であったことを確認している．

5.　おわりに

本報告では，大深度併設シールド間をＮＡＴＭにより切拡げて構造躯体を構築する際の多段分割掘削および躯体構築方法について述べた．さらに，併設シールドトンネルが土丹層のような比較的に硬質な地盤に位置する場合には，NATMによりシールド間を切拡げるとシールドセグメントには大きな応力増分が発生することを示した．これは，シールド施工時の裏込め注入圧等の施工時荷重が残留していることが影響している可能性を示した．したがって，大深度硬質地盤中の併設シールド間をNATMにより切拡げる場合には，切拡げ前の地盤内およびシールドセグメントの応力状態を十分に事前調査し，その結果を設計の初期状態に反映させることが重要であると考えられる．

今後は，シールド施工時の裏込め注入圧等の影響だけでなく，大深度地下における真の土圧による掘削解放力や凍結工法等の地盤改良工に伴う地盤内応力増加を考慮した解析的な検討により， NATM切拡げ時のセグメントの応力変化に及ぼす影響を明らかにしていく所存である．また，本報告が，大深度地下での併設シールドトンネル間のNATMによる切拡げ工事の施工に多少なりとも参考になれば幸甚である．

謝辞：最後に，本工事の施工にあたっては，首都大学東京大学院西村和夫教授，首都高速道路株式会社東京建設局をはじめとする関係各位の皆様方からの貴重なご指導を頂きながら平成26年1月に無事工事を完了し，平成27年3月の品川線開通を迎えることができた．この場をお借りして，改めて深く感謝の意を表す次第である．

参考文献

1）東京都：中央環状品川線南品川換気所ダクト・避難路接続工事パンフレット．
2）白石均，市川健，篠原浩史，熊谷幸樹：複合的な地盤改良工と多段分割掘削を併用した避難連絡坑の施工　－中央環状品川線南品川換気所避難連絡路接続工事－，トンネルと地下，第46巻1号，pp.13-22，2015.
3）熊谷幸樹，越後卓也，白石均，市川健：大深度併設シールドトンネル間の NATM 切拡げ時の地下水圧分布について，第 70 回土木学会年次学術講演会第VI部門VI-664，pp.1327-1328，2015.
4）土木学会：シールドトンネルの施工時荷重，トンネルライブラリー第17号，pp.16-18，2006.

（2015.8.7受付）

STUDY ON THE INFLUENSE OF SHIELD CONSTRUCTION LOAD IN WIDENING GROUND BETWEEN PARALLEL SHIELD TUNNELS BY NATM

Koki KUMAGAI, Takuya ECHIGO, Hitoshi SHIRAISHI
and Ken ICHIKAWA

Connecting works of cross passages at Minami-Shinagawa Ventilation Facility to the main line tunnels, which are parallel shield tunnels with 12.3m large section in diameter, the passage tunnels were excavated adjacent to the main line tunnel by means of NATM and an RC structure was built. This paper contains an outline of integral soil stabilization in combination with multiple stabilizing techniques adopted with the aim of avoiding the effects of water inflow or ground collapse on the main line tunnel and a study on the influence of shield construction load on widening ground between the main tunnel by NATM based on the observational data of steel segment stresses.