

凍結工法を用いて既設一次覆工シールドにより口径の大きいシールドを直角に接合

中島 義成¹・猪八重 勇²・葛西 孝周³・
船倉 崇弘⁴・小泉 淳⁵

¹東京都下水道局建設部長（〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1（都庁第二庁舎6F））

E-mail:Yoshinari_Nakajima@member.metro.tokyo.jp

²東京都下水道局第一基幹施設再構築事務所長（〒111-0051 東京都台東区蔵前2-1-8）

E-mail:Isamu_Inoyae@member.metro.tokyo.jp

³東京都下水道局第一基幹施設再構築事務所設計課長（〒111-0051 東京都台東区蔵前2-1-8）

E-mail:Takanori_Kasai@member.metro.tokyo.jp

⁴東京都下水道局第一基幹施設再構築事務所設計課設計第一係（〒111-0051 東京都台東区蔵前2-1-8）

E-mail:Takahiro_Funakura@member.metro.tokyo.jp

⁵早稲田大学理工学術院創造理工学部社会環境工学科教授（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

E-mail:koizumi@waseda.jp

東京都区部における下水道施設は、近年の都市化の進展に伴う雨水流出量の増加から、雨水排除能力が不足し浸水被害の大きな原因となっている。

足立区千住地区においても既存施設的能力不足から浸水被害が発生しており、被害の軽減を図るため隅田川幹線（Di=4,750mm～5,500mm，L=3,389m，DP≒40m）と流末となる千住関屋ポンプ所の整備を行っている。

このうち、隅田川幹線Ⅰ期工事で施工したシールドトンネルの一次覆工（Di=4,750mm）と、今後、千住関屋ポンプ所からⅢ期工事で発進させるより口径の大きいシールドトンネル（Di=5,500mm）との接合箇所は、深さ約40mの高水圧下での施工となる。そこで凍結工法を用いてシールドトンネルの一次覆工（Di=4,750mm）を撤去し、Di=5,500mmのシールドトンネルが到達できるセグメント径に拡幅する工法を採用した。

Key Words : flood countermeasures, widening method of great-deep underground, shield method, freezing method, influence analysis

1. はじめに

東京区部の下水道は戦前から高度成長期にかけて整備された施設が多く、この間の都市化の進展にともなう雨水流出量の増大から既存施設の能力が不足し、浸水被害が発生する大きな原因となっている。

隅田川幹線の整備を行う足立区千住地区においても、既存施設の能力不足から浸水被害が多く発生している。これまで、将来隅田川幹線に接続する計画の主要枝線を先行的に整備し、隅田川幹線が流下できるようになるまで暫定貯留管として活用するなどの浸水対策を講じてきた。また、今後抜本的な浸水対策を行うためには、幹線やポンプ所などの基幹施設を整備する必要がある。この

ような経過を踏まえ、平成 21 年から本隅田川幹線工事で平成 22 年から流末となる千住関屋ポンプ所工事にそれぞれ着手し、平成 31 年までに雨水整備水準を従来の 50 mm/hr→50%から 50 mm/hr→80%に向上させ、浸水被害の大幅な軽減を図ることとしている。

2. 隅田川幹線工事の概要

隅田川幹線は、足立区千住桜木一丁目及び墨田区墨田五丁目を起点とし、足立区千住関屋町を終点とする流域面積約 292.85ha、全長約 3.4km、仕上り内径 4,750 mm～5,500 mm、深さ約 40 mの雨水幹線（合流式）である。

隅田川幹線の整備にあたっては、都立忍岡高校跡地（墨田区墨田五丁目）に発進立坑を築造し、千住西ポンプ所の既設特殊人孔（足立区千住桜木一丁目）までの区間を先行的に事業化した。Ⅰ期工事である仕上り内径 4,750 mm、延長約 3.1km のシールド工事はすでに完了している。

Ⅲ期工事は、仕上り内径 5,500 mm、延長約 0.27 km のシールド工事であり、足立区千住関屋町で建設中の千住関屋ポンプ所のケーソン躯体内からシールドマシンを発進し、墨堤通りの交差点部の土被り約 40 m の路下において、Ⅱ期工事である地中接合（拡幅）部に接合する計画になっている。図-1は隅田川幹線の位置図である。



図-1 隅田川幹線位置図

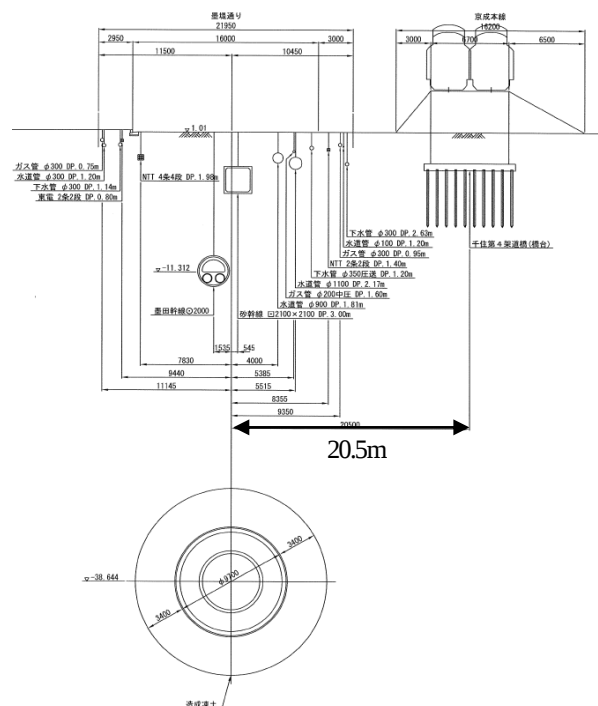


図-2 接続部断面

施工は極めて困難であり、ここに立坑を築造することはできない。また、大深度の立坑の築造は京成本線への影響も大きく、列車の運行の妨げになる可能性もある。このため、立坑築造は行わずに、Ⅲ期工事のシールドトンネルとⅠ期工事のシールドトンネルとを地中で接合することとした。

しかし、Ⅰ期工事で整備したトンネルの内径は 4,750mm であるのに対して、ポンプ所側から発進するⅢ期工事のトンネルの内径は 5,500mm であり、これらをどのようにして接合させるかが大きな課題であった。

地中接合方法として、当該箇所を掘進しながら拡大するシールド工法や、内径 5,500mm のトンネルを内径 4,750mm と同程度の管径に縮径し、千住関屋ポンプ所へ流入させる案も検討した。しかし、拡大シールド工法については、Ⅰ期工事で施工するセグメント径を、本工事で必要な外径 9,500mm に拡幅することは技術的に困難であり、また、管径を縮小すれば自由水面を確保できずに管きょが圧力状態となり、先行して整備している主要枝線の上流部で浸水被害が発生する可能性がある。これらのことから、図-3 に示すように、補助工法として地盤改良工法を併用し、Ⅰ期工事で施工した内径 4,750mm の一次覆工セグメントを撤去し、接合が可能となる大きさのセグメントに置き換える拡幅方法を採用した。

3. 地中接合部の拡幅工事

(1) 接合部の施工環境

Ⅰ期工事で施工した仕上り内径 4,750mm とⅢ期工事で施工する仕上り内径 5,500mm の管きょとの接合箇所は、主要幹線道路である都道墨堤通りにあり、交通量が非常に多い。また、図-2 に示すように、下水道幹線 2 本（墨田幹線：内径 2,000mm、砂幹線：内径 2,100mm×2,100mm）に加え、他企業の埋設物（ガス、電力、水道、NTT）が輻輳している。

さらに、地上には接合部の南側約 20.5m で京成本線（千住大橋駅～関屋駅区間）と近接している。京成本線は、成田国際空港へのアクセス路線で、年間約 300 万人の人々が利用しており、今後の国際化の進展により、利用者の増加が見込まれている重要な鉄道である。

(2) 地中拡幅工事の検討

下水道管きょの接合は、施工性と維持管理を考慮し、一般に立坑を設置して行うが、当該箇所では路上からの

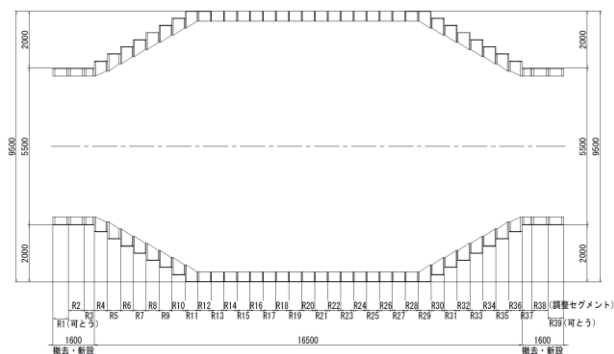


図-3 セグメント構造詳細図

4. 地盤改良工法の検討

(1) 凍結工法の採用理由

既設トンネルの一次覆工であるセグメントを拡幅する際に、まず、必要となる補助工法を検討した。大深度下での地中拡幅となるため、安全で確実な方法を採用する必要がある。しかし、周辺環境や埋設物の状況により地上からの施工は困難であることに加え、既設の内径4,750mmの管きよの下部には未改良部分が残ることが予想されるため、地上からの地盤改良工法は除外し、表-1に示すように、既設の管きよから施工できるインナー注入工法と凍結工法とを選択し、これらを比較検討した。

表-1 地盤改良工法比較表

地盤改良工法	インナー注入工法	凍結工法
改良強度	改良強度は小さい ・粘性土：粘着力の向上程度 ・砂質土：1kgf/cm ²	改良強度は非常に大きい ・粘性土：30～50kgf/cm ² ・砂質土：45～75kgf/cm ²
施工性	施工本数が多いため、既設トンネル外殻に悪影響を及ぼす	均一な改良と、既設トンネルに完全に密着した改良ができる
経済性	○	△
評価	×	○

インナー注入工法は、既設管きよ内からの施工が可能であるが、今回のようなシルト質土でN値20以上の地盤では脈状注入となり、安全性や信頼性に問題がある。

凍結工法は、インナー注入工法と比べて高価となるが、凍結範囲全体が均一に改良できるため、止水性に加えて必要な地山強度も期待できる。これらのことから、凍結工法を採用することとした。

(2) 土質調査

凍結工法を設計するにあたっては、事前に土質性状、塩分濃度、地下水流速等の把握が必要となる。このため本工事では、図-4に示すように、地中接合部の直上に近接した箇所で行った土質調査を実施した。

図-5は土質調査の結果を示したものである。凍結工の対象土質は、粘性土および砂と砂礫の互層で、地下水位はGL-2.19m、地下水の塩分濃度は0%であり、凍土の

造成には問題ないものであった。また、地下水の流速は、14.2 cm/日～25.8 cm/日であり、凍土を造成することができる限界流速（200 cm/日）¹⁾よりも小さいため、地下水流を低減させる対策は必要なく施工できることが判明した。

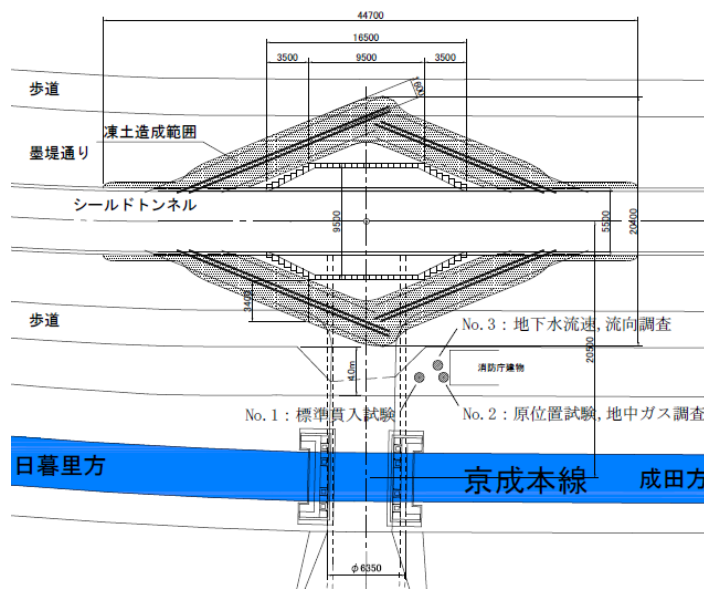


図-4 ボーリング調査位置図

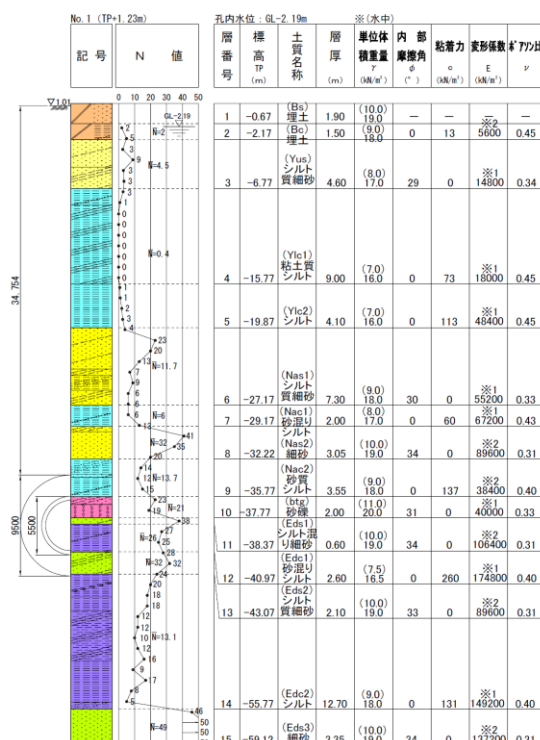


図-5 土質柱状図

(3) 凍結工法の設計

凍土の設計基準強度は、これまでの凍結工法の実績を踏まえ、圧縮強度を3,450 kN/m²、曲げ強度を2,050

kN/m²，せん断強度を1,700 kN/m²とし，必要凍土厚を算出した結果，セグメントの拡幅部外側に凍土をリング状に造成するための必要凍土厚は3.249mとなったが，凍結の管理誤差である凍結管の埋設長の1/100をこれに加えて，凍土厚は3.4mとした。

また，構造物と凍土の接着する長さである凍着長は，最低 2.5m 以上の確保が必要とされているが²⁾，本工事は大深度であることや，過去に当局で行った凍結工法の実績を踏まえ，接着するセグメント 3 リングを覆う範囲で接着させることとし，図-6 に示すように，拡幅部の片側 3.0m ずつとした。

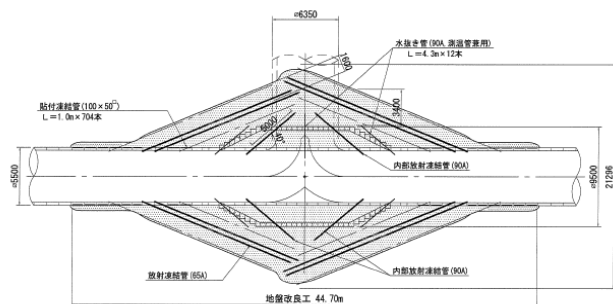


図-6 凍結工法改良範囲

設計された所定の凍結範囲を確保するため，放射凍結管 (65A) 128 本，測温管 (65A) 32 本を，拡幅部を包み込むような形に埋設する計画とした。また，拡幅工事の施工中の凍土の崩落を防止するため，内部にも放射凍結管 (95A) 58 本を埋設し，既設トンネルの壁面には貼付凍結管を設置した。凍結管の埋設完了後，冷凍機で冷却したブライン (塩化カルシウム溶液) を凍結管に循環し凍土を造成するとともに，凍結維持運転期間中の凍土の必要以上の成長を抑制し，凍上による周辺環境への影響を軽減させるため，図-7 に示すように，凍結管の外側に温水管 (65A) 128 本を設置することとした。

5. 地中拡幅工事の施工手順と既設セグメントの撤去時の変位抑制方法

(1) 地中拡幅工事の施工手順

図-8 は地中接合部の一次覆工であるセグメントの撤去と拡幅部用の鋼製セグメントの組立手順を示した図である。地中拡幅工事は所定の凍土厚を造成した後，凍土維持運転期間中に施工するが，拡幅工事には重機を使用するため，重機を坑内に搬入する前に枕木材の補強を行い，その後，拡幅部の上半部の既設の鋼製セグメントを切断し，ハンドリング荷重 1.6t の鋼材ハンドリング機を使用して解体し搬出する。なお，凍土の掘削には，人力掘削と機械掘削を併用することとした。

上半部の掘削完了後，解体に用いた鋼材ハンドリング機により拡幅用セグメントを組立て，施工箇所の敷鉄板，枕木を撤去する。つぎに上半部と同様の手順で下半部の施工を行い，拡幅用セグメントリングが組み立てられた後に，水平および垂直の出来形の精度を確認し，真円保持部材を設置して裏込め注入を行う。その後，裏込め注入が硬化したことを確認し，真円保持部材の解体，敷鉄板，枕木を復旧する。この手順で2リングずつ施工を行い，拡幅部の全長16.5m分の施工を行うこととした。

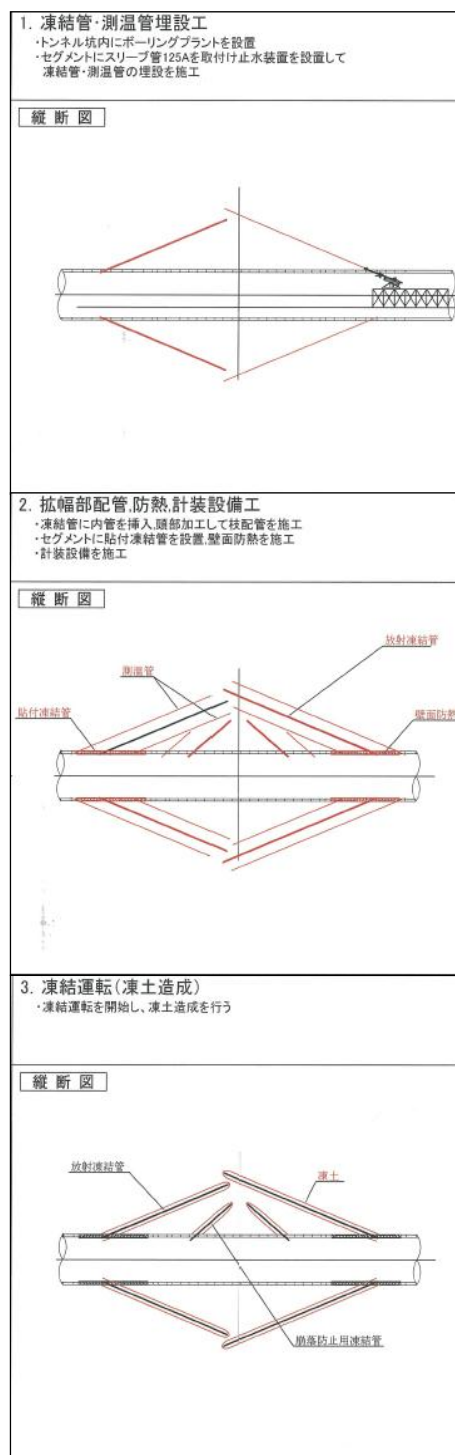


図-7 凍結工法施工手順

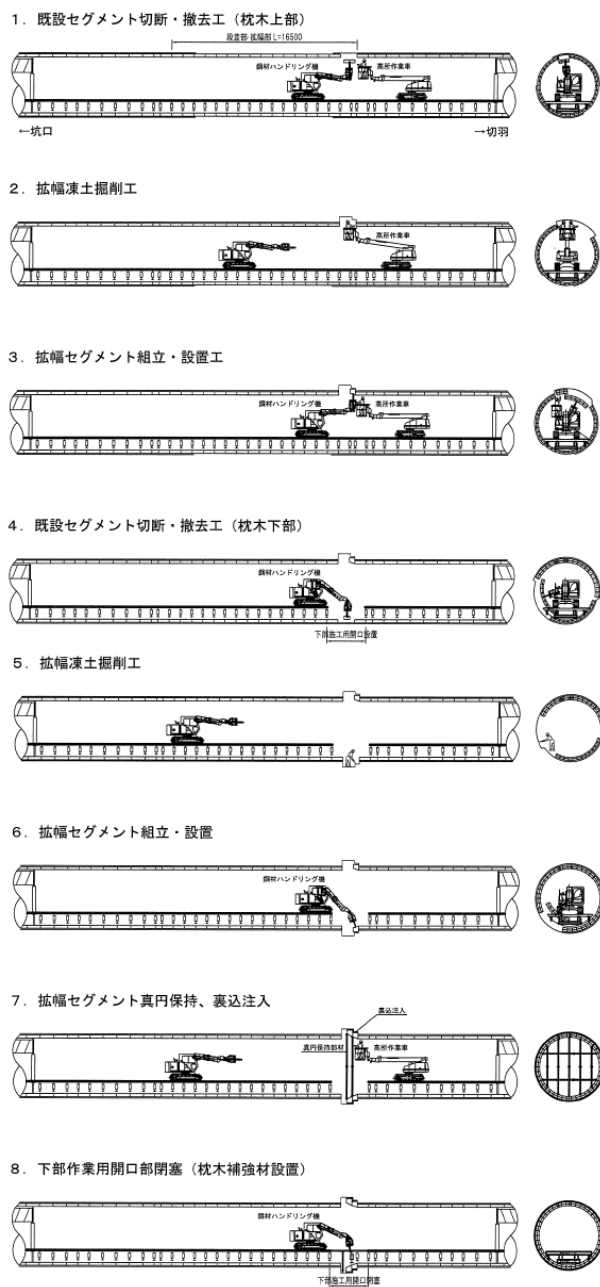


図-8 地中拡幅工の施工手順

(2) 既設一次覆工セグメントの撤去時の変位抑制方法

一次覆工のセグメントを解体する際に、凍結範囲外にあるセグメントリングの変形により地下水が流入する可能性が考えられたため、セグメントリングの変位を計測した。その結果、可とう性セグメントから10リング目までは0.05mmの変位量が発生することが判明した。

大深度下での施工では、水圧が非常に高く、軽微な変位量であっても出水事故につながるものが懸念される。変位量は地下水が進入しても直ちに凍結するほど非常に小さい値であったが、地下水の流入を完全に防止するため、図-9に示すように、セグメント内側にプレロードを作用させ、凍着範囲内にある5リング目以降の変位を0mmに抑える対策を講じることとした。また、万が一出水した場合の安全対策として、拡幅部の前後に鋼製隔壁を設置し、その中に必要注水量 $1,520\text{m}^3$ を注水できるようにして、地下水や地山の流入を防止することとした。具体的には、発進立坑用地である都立忍岡高校跡地（墨田区墨田五丁目）に約 100m^3 の貯水槽を4基設置するとともに、即時に水を注入できるように、軌条設備の下にも $1,150\text{m}^3$ を貯水し、迅速に隔壁内に水を填充できるようにした。

また、Ⅲ期工事で施工するシールドトンネル（内径 $5,500\text{mm}$ 、延長約 0.27km ）との接合は、拡幅部にエントランス装置（充填材（LW材）とソイルセメント、水を填充したソケット）を設け、ここにシールドを到達させる計画とした。この接合部は今回の拡幅部と同様に京成本線と近接するため、今後、京成電鉄と協議を行う予定にしている。

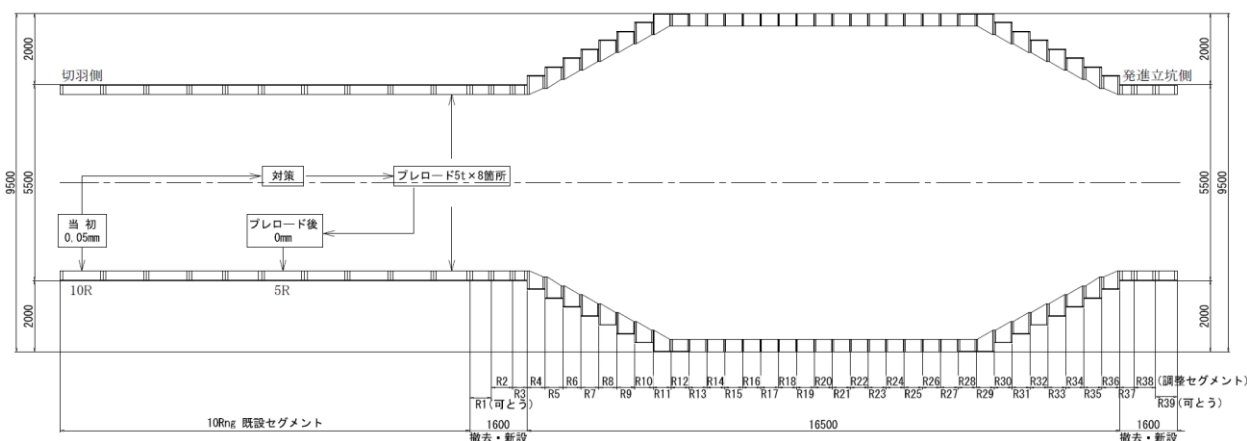


図-9 セグメント撤去時の変位抑制方法

6. 近接構造物（京成本線）への影響の検討

地中接合部と京成本線の位置関係は、図-2 に示したとおりである。地中接合箇所南側約 20.5 m に京成本線（千住大橋駅～関屋駅区間）が近接している。

このため、地中接合箇所における凍結工事、凍土内の拡幅掘削などによる京成電鉄の盛土軌道への影響についての検討を行い、軌道の変位量を確認し、軌道の安全性について検証した。

(1) FEM解析による京成電鉄の盛土軌道への影響

a) 凍土内の拡幅掘削

凍土内の拡幅掘削の盛土軌道への影響は 2 次元 FEM 解析により検討した。解析に使用した土質条件は図-4 に示したとおりである。また、解析に用いた土の単位体積重量、内部摩擦角、粘着力、ポアソン比は現地盤でのボーリングデータから得られたものを用い、凍土の変形係数は $483,000 \text{ kN/m}^2$ とした。

盛土軌道の沈下量の解析結果は、上り線で 5.5 mm、下り線で 6.4 mm であった。

b) 凍結工法による凍上の解析

地中接合部の周辺地盤を凍結することによる京成電鉄盛土軌道への影響は、まず、隅田川幹線直上における凍上量の分布を 3 次元凍上計算式により算出し、つぎに、その凍上量の分布を 3 次元 FEM 解析の入力変位として与え、地表面における凍上分布を算出した。凍結工法による凍上量の解析結果は、上り線 8.2 mm、下り線 11.5 mm であった。

c) 京成軌道における凍上量の経日変化

本工事の土質は、図-4 に示したとおり、粘性土が主体であり、粘性土層を凍上造成した場合、凍土の成長にともない、粘性土層が体積膨張し、地表面に凍上変位が現れる。

図-10 は凍上変位の経日変化を示したものである。本工事における設計凍土厚 3.4 m に達するまでの期間は、凍土造成から 106 日目であり、設計凍土厚に達した時の凍上変位量は 5.9 mm となった。1 日あたりの凍上変位量は、 $5.9 \text{ mm} \div 106 \text{ 日} = 0.056 \text{ mm/日}$ であり、非常に緩やかに上昇することが判明した。

このことから、施工にあたっては、京成電鉄と協議を重ねた結果、施工中の計測管理を徹底することとした。

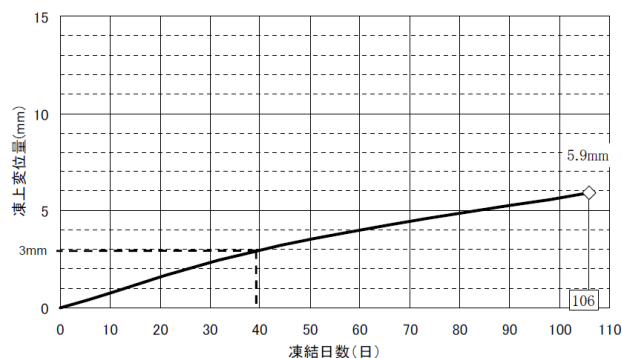


図-10 凍上変位の経日変化

7. おわりに

都市部での施工においては、様々な地中構造物が輻輳していることに加え、地上部においても鉄道や橋梁等と近接することもあり、施工方法に制限を受けることが多い。

本工事は、大深度での地中拡幅工事として凍結工法を採用した極めて施工例の少ない工事である。

工事に際しては、大変な困難工事となることが予想されるが、安全対策を万全に期し、トンネル施工の発展に寄与することを望む。

参考文献

- 1) 社団法人 日本建設機械化協会：地盤凍結工法-計画・設計から施工まで-, pp.10, 2006.
- 2) 公益社団法人 地盤工学会：地盤改良の調査・設計と施工-戸建住宅から人工島まで-, pp.165-166, 2013.

(2014. 9. 15 受付)

JOIN THE SHIELD WHICH HAVE LARGER OUTER DIAMETER TO THE SHIELD WITH PRIMARY LINING FROM A RIGHT ANGLE BY APPLYING FREEZING METHOD

Yoshinari NAKAJIMA, Isamu INOYAE, Takanori KASAI
Takahiro FUNAKURA, Atsushi KOIZUMI

Since rainwater runoff in quantity increases with the development of civilization in these days, sewer facilities in Tokyo are short of rainwater drainage ability. Therefore, flood damages occur.

By a lack of rainwater drainage ability, flood damages happen in Senjyu area, Adachi ward too. In order to decrease the damages, Sumidagawa trunk sewer (Di=4,750 mm~5,500 mm, L=3,389m, DP ≒40m) and Senjyusekiya pumping station are under construction.

Connecting point of primary lining of the shield tunnel (Di=4,750 mm) constructed by Sumidagawa trunk sewer work I and larger outer diameter shield tunnel (Di=5,500 mm) which is planned to construct by the work III with Senjyusekiya pumping station as the starting point is planned to construct under the high water pressure condition with the depth DP ≒40m.

The purpose of the present paper is to report that the method which remove primary lining of the shield tunnel (Di=4,750 mm), and expand segment diameter in order to be connected by the shield tunnel (Di=5,500 mm) by applying freezing method has adopted.