

大断面シールドによる 急曲線下水道トンネル工事

増田 昌昭¹・北村 昌文²・有留 孝之³・田坂 秀博⁴

¹正会員 前田建設工業株式会社 東京土木支店 (〒102-0072 東京都千代田区飯田橋1-12-7)
E-mail:masuda.m@jcity.maeda.co.jp

²正会員 前田建設工業株式会社 東京土木支店 (〒102-0072 東京都千代田区飯田橋1-12-7)
E-mail:kitamura.m@jcity.maeda.co.jp

³非会員 日本下水道事業団 関東北陸総合事務所 施工管理課 (〒113-0034 東京都文京区湯島2-31-27)

⁴非会員 東京都下水道局 第一基幹施設再構築事務所 工事第一課 技術調査係
(〒111-0051 東京都台東区蔵前2-1-8)

本工事は、東京都品川区を流れる立会川下流域を発進立坑とし、勝島ポンプ所までの約980mの区間をシールド径10.3mの泥水式シールド工法により築造するものである。路線線形には、曲線半径が30mの急曲線施工区間が4箇所も含まれており、到達直前に曲線半径30mのS字曲線が存在する。さらにS字曲線区間においては、重要構造物である首都高速道路橋脚基礎との離隔が2m程度の近接施工となっている。そのため、近接構造物への影響を最小限に抑えるとともに、急曲線施工に伴う余掘り量の増加による周辺地山の緩み防止とシールド掘進反力の確保が求められた。急曲線施工対策を講じることにより良好な結果を得たので報告する。

Key Words : large size cross section, sharp angle curve, filling material for extra excavation segment with bag

1. はじめに

近年、1時間に雨量 50mm を越える急激な集中豪雨が発生し、都市において深刻な浸水被害が発生している。高度な都市機能を浸水被害から守るため、河川管理者、下水道管理者、地方公共団体等が一体となり、水害対策に取り組んでいる。

東京都品川区内を流れる立会川流域においても例外ではなく、集中豪雨による立会川の氾濫被害軽減を図るため「第二立会川幹線」を建設するとともに、勝島地域においてもポンプ所の建設を進めている。

本工事は、東京都下水道局から受託した日本下水道事業団発注の東京都勝島ポンプ所流入管渠工事である。立会川と勝島運河の合流部に発進立坑を設置し、勝島ポンプ所までの約 980m の区間をシールド径 10.3m の泥水式シールド工法により築造するものである。シールド路線の概要としては、発進直後に曲率半径 $R=80\text{m}$ 曲線があり、その後直線から $R=30\text{m}$ の急曲線部、 $R=300\text{m}$ の単曲線を経て、到達直前で $R=30\text{m}$ (3 箇所) の S 字曲線となっている。特に S 字曲線区間においては、首都高速 1 号

線の道路脚部があり、基礎との離隔は 2.0m 程度の近接施工となっている。そこで、重要構造物である首都高速道路への影響を最小限に抑えるため、急曲線施工に伴う余掘り増加による周辺地盤の緩み防止とともにシールド掘進反力の確保が求められた。

本稿では、急曲線施工に伴う事前の数値解析、急曲線施工に伴うトライアル計測結果や首都高速変状計測結果及び急曲線施工対策の取組みにより、良好な結果を得たのでその概要を報告する。

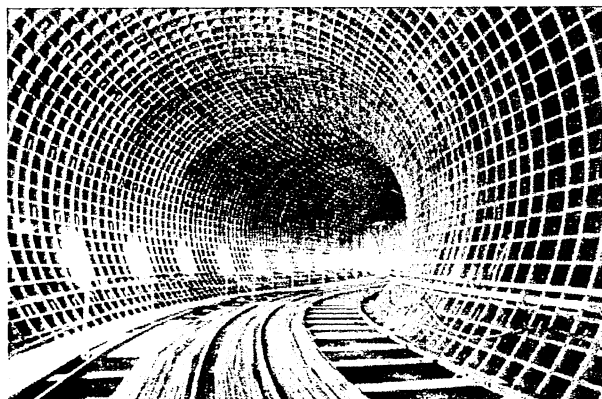


写真-1 S字急曲線区間トンネル内状況

2. 概要

(1) 工事概要

品川区内を流れる立会川流域の「浸水対策」と「勝島運河の水質改善」を目的とし、「第二立会川幹線」及び「浜川幹線」の2つの雨水幹線で収容した雨水を勝島ポンプ所へ送るトンネルを築造するものである。トンネル構造としては、トンネル内部を上下に仕切り、上部を浜川幹線、下部を第二立会川幹線とする横背割り複断面構造である。

工 事 名：東京都勝島ポンプ所流入管渠工事

企 業 者：東京都下水道局

発 注 者：日本下水道事業団

工事場所：東京都品川区勝島1丁目、2丁目

工 期：平成20年3月27日～平成26年3月14日

工事内容：泥水式シールドφ10.30m

セグメント外径φ10.10m

(急曲線区間はφ10.06m縮径セグメント)

線路延長L=990.95m

曲線半径：R=30m×4箇所

R=80m×1箇所，R=300m×1箇所

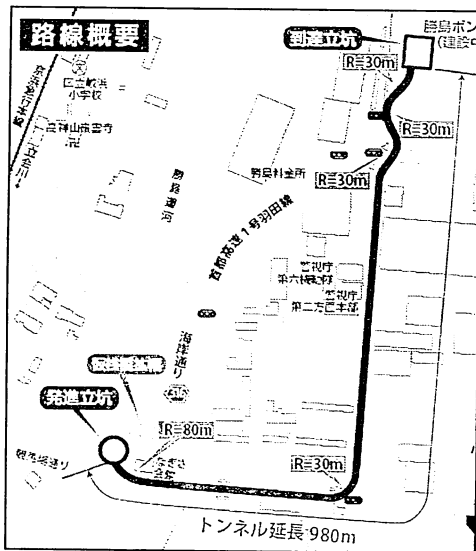


図-1 路線平面図

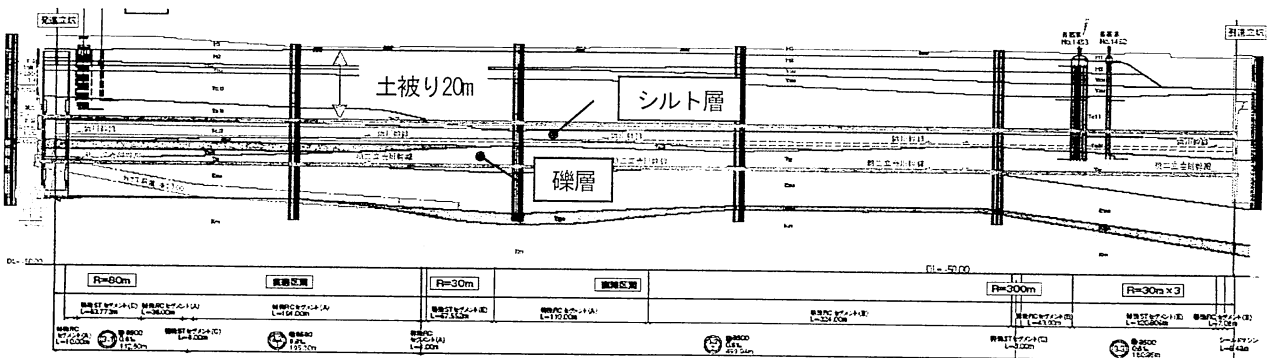


図-2 土質縦断面図

(2) 地質概要

図-2 に本工事の掘削対象土質を示す。シールドの土被りは全般にわたり約 20m 程度であり、地下水位は地表より 3m 程度である。また掘削対象土質は、大きく分けて上半部がシルト・粘土を主体とする地層であり、N 値が 10～20 程度である。下半部は砂礫を主体とする地層であり、N値が 50 以上もある硬質地盤である。このように極端に異なる土質性状の土を 1つの断面で掘削を行った。

3. 急曲線施工およびその対策

急曲線対策として、以下に示す「シールド機の対策」、「セグメントの対策」、「余掘り充填材及び袋付きセグメント」等の物理的な対策と、数値解析、トライアル計測、首都高速橋脚変状計測および地中変位計測等による情報化施工による対策を実施した。

(1) シールド機

急曲線施工に伴う余掘り掘削のため、コピーカッター（最大ストローク長250mm）を装備するとともに、余掘り量を低減させるため、最大で11.5度屈曲可能な球面タイプの中折れ機構を装備した。さらに余掘り量と回転抵抗を低減させるため、シールド機長をできるだけ短くし、外径と機長との比が1:1となるようにした。さらに、テールシールについては、大きな変形、損傷を考慮して追従性、耐圧性、耐久性に優れたシリコンシールを採用した。

(2) セグメント

直線区間のセグメントは、外径φ10.1m、幅 1.0m、厚さ 0.4m のRCセグメントを採用した。これに対し、急曲線区間ではテールクリアランスを確保するため、セグメント幅を 0.4m に縮幅し、外径を 40mm 縮径したφ10.06mの鋼製セグメントを採用した。さらにテールクリアランスが偏った場合を想定して、あえてKセグメン

トを用いずに全て A ピース構成した等分割のセグメントを採用した。その結果、1 リング内の最終組立位置が拘束されることがないため、テールクリアランスがある場所での組立が可能となった。

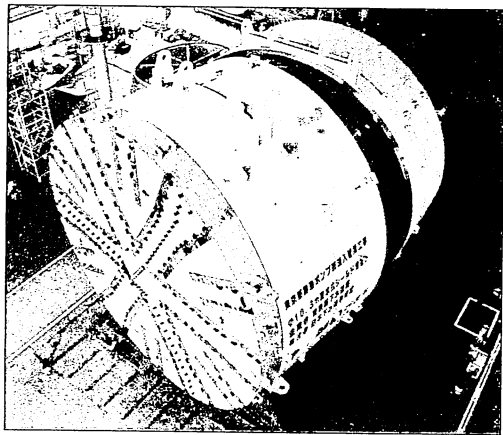


写真-2 シールド機（中折れ角度 11.5 度）

(3) 余掘り充填材

スキンプレート外周で急曲線施工に伴う余掘り部（余掘り量 161mm）の地山を全て泥水圧で対抗させることは、泥水の逸水等もあり困難である。そのため、シールド機側面から加泥材としても使用されている高粘性な塑性流動性ゲルとした余掘り充填材を注入することにより早期に地盤変形を抑制させる必要がある。そこで、粘土系の加泥材としても使用されている 2 液混合型の高粘性な塑性流動性ゲル化材を余掘り充填材として注入することにより、地山を保持することとした。

次に試験施工により得られた余掘り充填材の性状およびゲル化した写真を以下に示す。

表-1 余掘り充填材の性状

試験項目	測定値	規格値
ゲルタイム	4.5 秒	-
粘度（混合後）	300dPa・s	300～500dPa・s

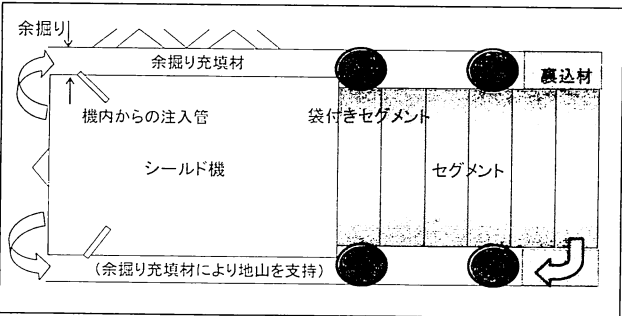


図-3 余掘り充填材施工イメージ図

(4) 袋付きセグメント

急曲線部においては、シールドジャッキ推力により直

線部及び緩和曲線部に比べて、トンネル軸方向に生じる曲げモーメントが大きくなり、曲線法線方向への分力が卓越するようになる。そこで、セグメントの変位を抑え、周辺地盤への影響を最小限に抑えるためには、セグメントと地山との早期一体化が必要である。しかしながら、早期にテールボイドを裏込注入により充填する必要がある一方で、シールド機テールにより近い箇所での裏込注入は、裏込注入材の切羽または余掘り部分への回り込みを発生させて必要な余掘り量を確保できなくなるという危険がある。さらに大断面かつ余掘り量が大きい場合、裏込注入材が切羽または余掘り部分へ回り込み易い。

そこで裏込注入材の切羽及び余掘り部分への回り込みを防止し、セグメントと地山との早期一体化を図るため、袋付きセグメントを採用した。また今回採用した袋付きセグメントは、製造時の特別な加工が不要であり、異形、標準タイプといったセグメント種別に関らず装備できるタイプである。

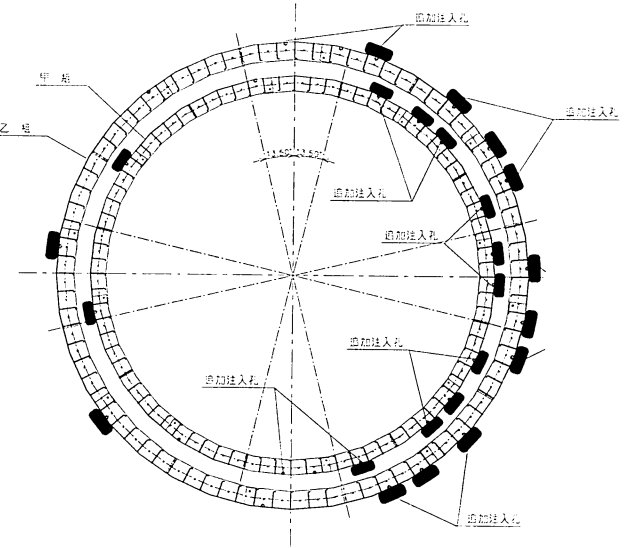


図-4 袋付きセグメント配置図

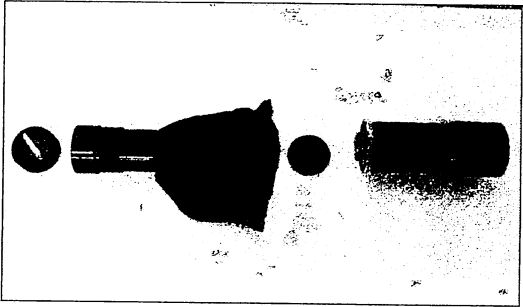


写真-3 後付けタイプ膨出袋

使用した袋付セグメント緒元は以下の通り。
膨張した袋：直径φ600mm、有効高さH=150mm
筒の長さ：L=157mm
筒の直径：φ70mm

4. 数値解析

急曲線施工に伴う周辺地盤への影響、埋設物への影響及び近接構造物である首都高速橋脚基礎への影響を事前に有限要素法により数値シミュレーションを行った。急曲線施工に伴う余掘量の増大を考慮して、応力解放率を35%とした。この結果、一部の埋設物および歩道橋基礎の変位量が許容値を上回ることが判明した。

(1) 1回目急曲線部事前数値解析（トライアル計測部）

1回目急曲線部（トライアル計測部）には、近接構造物として歩道橋基礎が最小離隔 4.9m で存在する。さらに地表面付近には、多数の埋設物が存在する。そこで、急曲線施工に伴う周辺地盤への影響、埋設物への影響及び近接構造物である歩道橋基礎への影響を事前に有限要素法により数値シミュレーションを行った。

以下に数値解析位置平面図および数値解析結果を示す。

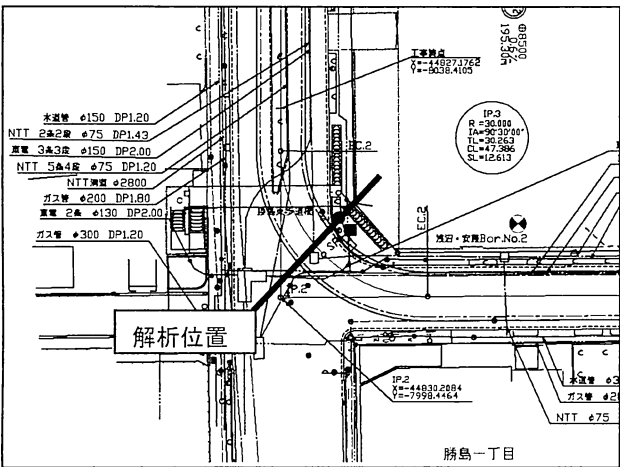


図-5 数値解析位置平面図（トライアル計測部）

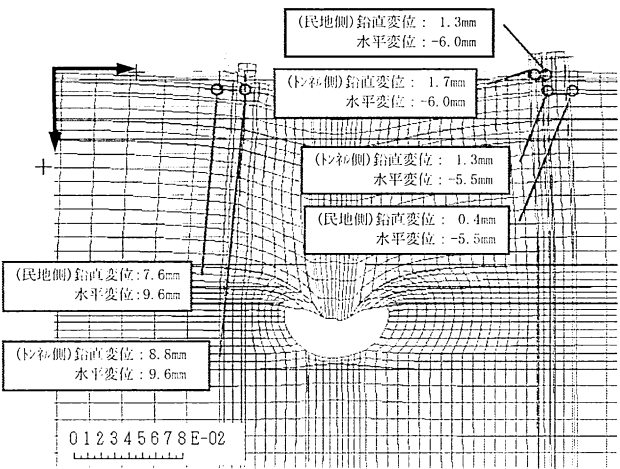


図-6 数値解析結果（トライアル計測部）

数値解析の結果、応力解放率を $\alpha = 35\%$ と想定した場合、歩道橋基礎および埋設管である $\phi 150\text{mm}$ 水道管の変位量が許容値を上回る結果であった。

(2) 首都高速基礎事前数値解析（S字急曲線部）

近接構造物である首都高速橋脚基礎が最小離隔 2.2m で存在する。さらにシールド線形が、S字急曲線施工区間であるため、その影響を上記1回目急曲線部と同様に有限要素法により数値シミュレーションを行った。以下に数値解析位置平面図、橋脚 No. 1453 の数値解析結果を示す。ここで、首都高速橋脚基礎は、影響範囲レベルⅢの範囲に入っており、要対策範囲となっている。

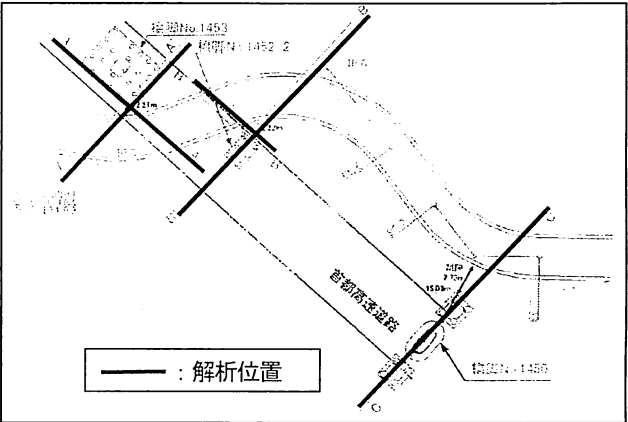


図-7 数値解析位置平面図（S字急曲線部）

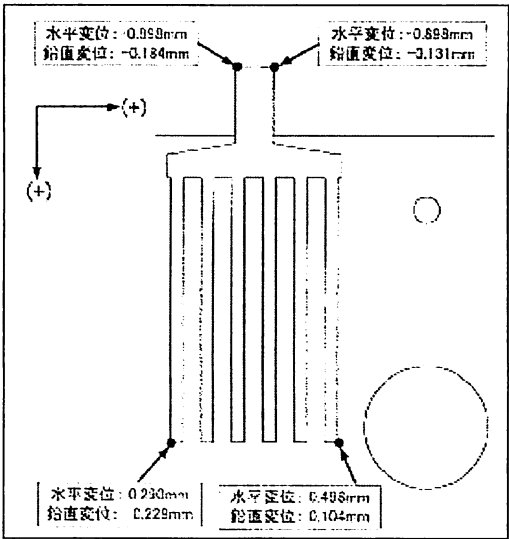


図-8 数値解析結果（S字急曲線部）

(3) 直線部での事前数値解析

シールド路線における地表面付近には、多数の地下埋設物が存在する。地下埋設物への影響を事前に有限要素法により数値シミュレーションを行った。直線部の場合には、余掘り量がないことと周辺地盤のN値が高いことから、応力解放率を $\alpha = 10\%$ とした。地下埋設物が多数存在する直線部での埋設物の変位量は、最大5.2mmであり、許容変位量以内であった。

(4) 地表面沈下事前数値解析

急曲線施工に伴う余掘り量の増大を考慮して、縦断方向における解放応力が働く区間（シールド機や裏込めで支

保されない地盤が不支持となる区間)の長さによる補正係数を設定し、有限要素法による数値シミュレーションを行った。さらに急曲線部分については、余掘り部分に余掘り充填材を充填させることにより、シールド機後方まで地山が保持できていると考え、応力解放率を直線部分と同様とした。

解析領域については、トンネル底部から下方境界までの距離を2Dとし、解析を実施した。解析ステップは、初期応力解析(ステップ1)を行い、次に掘削解析(ステップ2)を行う2ステップ方式とした。

解析結果より、シールド直上部での地表面沈下算定量は、直線部4.0mm~5.0mm、トライアル計測部4.7mm、S字急曲線部では5.4~6.0mmであった。

5. 計測結果および数値逆解析

シールド通過に伴う首都高速橋脚の変状、周辺地盤の変状、間隙水圧の変動及びセグメントの変状を把握するため、「首都高速道路に近接する構造物の施工指導要領書」に従い、表-2に示す計測機器の設置を行った。さらにトライアル計測として、1回目急曲線部において、近接構造物である首都高速橋脚基礎との離隔が2mであることを想定して、シールドとの離隔が同じになる場所に多段式傾斜計、間隙水圧計、鋼製セグメントにひずみ計を設置した。これらの計測結果をもとに逆解析を行い、有限要素法による数値シミュレーション結果の妥当性を検証した。さらにトライアル計測部における掘進管理実績をS字急曲線部にフィードバックさせることで、首都

高速橋脚基礎への影響および周辺地山への影響を最小限に抑える掘進管理を実施した。

表-2 計測設置機器一覧表

計測場所	計測項目	計測機器	摘要
トライアル計測部	地中変位	多段式傾斜計	2方向24測点
	間隙水圧	間隙水圧計	1箇所
	セグメント変形	ひずみゲージ	主桁16箇所/1断面 縦リブ8箇所/1断面
S字急曲線部	橋脚基礎鉛直変位	電子レベル	1台/1脚
	橋脚基礎傾斜	固定式傾斜計	2方向/1箇所
	地中変位	多段式傾斜計	
	間隙水圧	間隙水圧計	
	セグメント変形	ひずみゲージ	

(1) トライアル計測結果

急曲線施工に伴う余掘りやシールド推力によるセグメント移動や変形による周辺地盤の変状により、応力解放率を35%と想定していたが、余掘り充填材や袋付きセグメントの採用により応力解放率を8%に低減できた。

(2) 首都高速計測結果

図-9に示した変位分布図は、計測された地中変位分布図に有限要素法により解析を実施した結果を重ね合わせた1例である。この結果より応力解放率は、1.8%~8.5%であった。これは、トライアル計測区間と同様の結果である。

さらに、首都高速橋脚基礎の鉛直変位および傾斜については、管理許容値を満足する結果であり、首都高速橋脚基礎に対して影響はなかった。

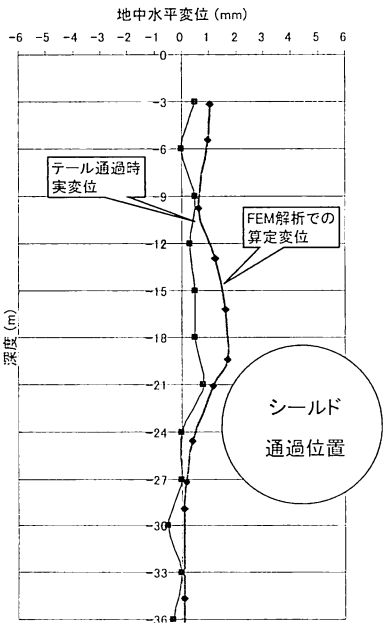


図-9 S字急曲線部における実測値と数値解析結果との比較

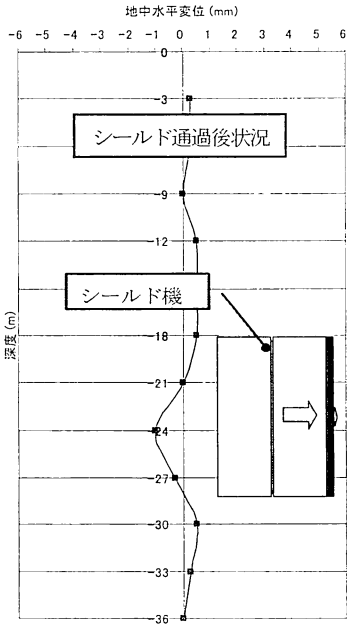
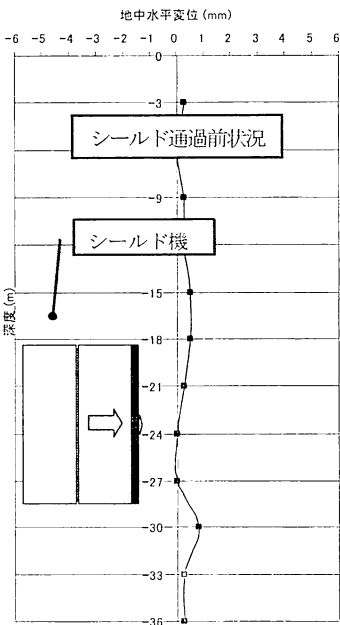


図-10 シールド通過前後における地中変位

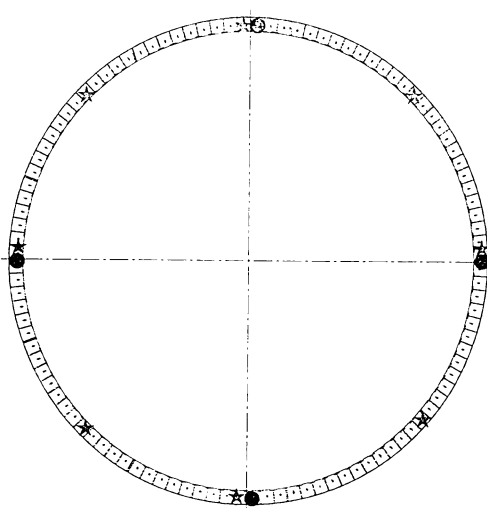
(3) 地表面沈下測量結果

急曲線部以外の直線部においても、同様にシールドトネル通過時に伴うトンネル直上部の地表面沈下量の実測値を与える応力解放率を用いて逆解析を行った。この結果より応力解放率は、3.0%～11.0%であった。

(4) セグメントひずみ計測結果

トライアル計測部および到達側 S 字急曲線区間においてセグメントのひずみ計測を行った。図-11 に計測器設置位置断面図を示す。図-12 にセグメントひずみ計測リング平面図および主桁応力（円周方向の応力）分布、縦リブ応力（縦断方向の応力）分布グラフを示す。

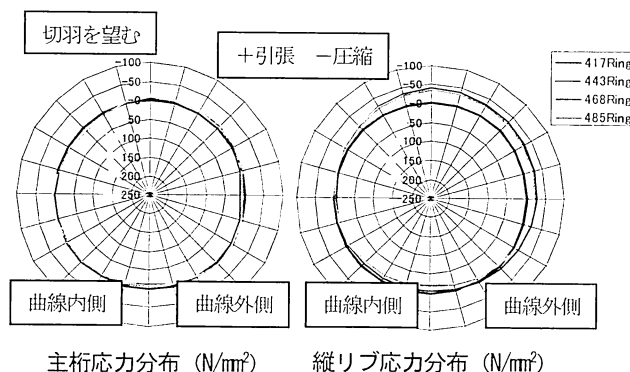
急曲線施工に伴うシールドジャッキ選択の偏りにより、曲線内側よりも曲線外側のセグメントにジャッキ推力が大きく載荷されていることがわかる。しかし、セグメントが曲線外側に変位することはなかった。



☆：主桁ひずみ計（内縁側，外縁側） 16測点

●：縦リブひずみ計（トンネル軸方向）8測点

図-11 ひずみ計設置位置図



主桁応力分布 (N/mm²) 縦リブ応力分布 (N/mm²)

図-12 セグメント応力分布図

6. おわりに

大断面かつ急曲線施工による周辺地盤や近接構造物への影響を最小限に抑えることを主眼において、有限要素解析及びその対策を実施した結果、周辺地盤や近接構造物へ影響を与えることなく施工を行うことができた。さらにシールドの平面蛇行及び鉛直蛇行に関しても大きく変位することなく、許容値以内に収めることができた。

今後、都市土木では、長距離、大深度、高速化、急曲線施工等の特殊条件に対する高度機技術が求められるため、新たな施工技術の工夫・改善を続けていくことが必要である。

最後に、本工事において多大なご指導ご鞭撻を頂いた日本下水道事業団関東・北陸総合事務所の皆様に、ここに深く感謝の意を表す次第である。

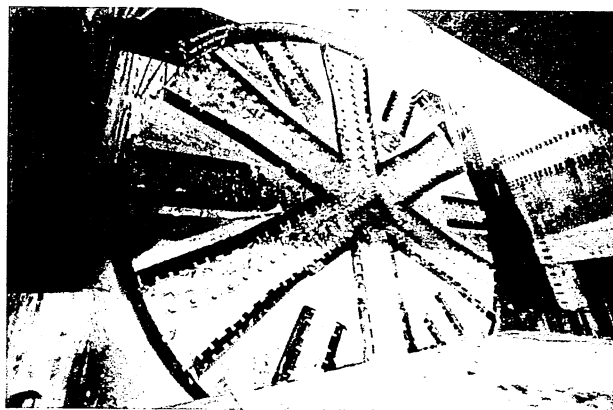


写真-4 シールド到達状況

参考文献

- 1) 日経コンストラクション：2010.11.26 号，pp.6-11，2010.10
- 2) 増田昌昭：大断面かつ急曲線シールドによる下水道トンネル工事，第 67 回施工体験論文発表会，（社）日本トンネル技術協会，pp.89-96，2010.11
- 3) 増田昌昭：大断面（φ10.3）かつ急曲線シールドによる下水道トンネル工事，第 55 回シールドトンネル工法施工技术講習会，（有）日本プロジェクトリサーチ，pp.59-72，2011.4

SHARP ANGLE SEWER TUNNELING PROJECT BY LARGE SIZE CROSS-SECTION SHIELD MACHINE

Masaaki MASUD , Masafumi KITAMURA, Takayuki ARIDOME
and Hidehiro TAsAKA

This project is to construct 980m sewer tunnel by using 10.3m diameter slurry shield machine. There are 4 sharp angle curves with radius of 30m in the tunnel route, and it includes the S shape curve with radius of 30m. Furthermore, the S shape curve part is located very close to the foundation of bridge pier of Tokyo Metropolitan Highway, and the distance is only about 2m. Therefore it was necessary not just to minimize the interference with adjacent structure. It is also necessary to secure counterforce of shield drive. We obtained good result by applying measures to cope with sharp angle curve tunneling.