

シールド機による橋台杭の直接切削における施工実績と橋台変状 Construction achievements of cutting through abutment piles by TBM and associated abutment deformation

前島 一登*

Kazuto Maeshima

浅野 貴弘*

Takahiro Asano

阿部 浩二*

Koji Abe

長沢 勇樹*

Yuki Nagasawa

要 約

横浜湘南道路は、首都圏3環状道路の一番外側に位置する首都圏中央連絡自動車道（圏央道）の一部であり、本工事は藤沢IC～栄IC（仮称）間を結ぶ7.5 kmのうち、5.4 kmの上下線をシールド工法により築造するものである。このうち、城神明橋直下のシールド掘進では、シールド1号機による橋台杭（RC杭φ400 mm）の直接切削を行う。なお、土被り約9 mの深度を外径φ13.59 mの泥土圧シールドで掘進する。また、城神明橋は、県道藤沢厚木線と国道1号線バイパスとの立体交差用の重要構造物であり、周辺には、小学校や神社、多数の家屋が近接している。このため、小土被り区間で杭の直接切削による橋台変状の抑制や振動、騒音対策が課題となった。本稿では、橋台杭の直接切削における事前対策および杭切削中の対策と施工実績について報告する。

目 次

- § 1. 工事概要
- § 2. 橋台杭の直接切削
- § 3. 直接切削における課題と対策
- § 4. 施工実績と計測結果
- § 5. まとめ

§ 1. 工事概要

横浜湘南道路は、都心から半径40～60 kmの3環状道路の一番外側に位置する延長約300 kmの首都圏中央連絡自動車道（圏央道）の一部である（図-1）。

シールド1号機は外径φ13.59 m、2号機は外径φ13.24 mである。シールド1号機は発進立坑より発進後、曲線半径100 mの曲線施工を行い、回転立坑に向けて、上り線約2.7 kmを掘進する。回転立坑に到達後、掘進方向を180°変更し、横浜坑口に向けて、下り線約5.4 kmを掘進する。シールド2号機は、横浜坑口から回転立坑に向けて掘進後、1号機が通過した曲線区間のセグメントを直接切削し、地中接合することで上り線、下り線の道路トンネルを築造する計画となっている。



図-1 横浜湘南道路位置図

表-1 工事概要

工事件名	横浜湘南道路トンネル、同（その2）、同その3、同その4工事
発注者	国土交通省関東地方整備局 横浜国道事務所
工事箇所	自）神奈川県横浜市戸塚区小雀町 至）神奈川県藤沢市城南4丁目
工期	2015年2月13日 ～ 2028年9月30日
工事内容 （関連箇所抜粋）	シールド工 一次覆工1号機2,254 m 付帯工 城神明橋固結工

* 関東土木（支）横浜湘南道路（工）

§ 2. 橋台杭の直接切削

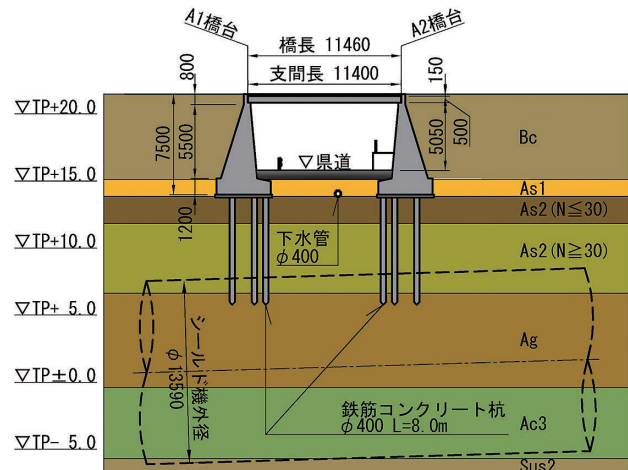
前述の通り、シールド 1 号機による城神明橋直下のシールド掘進では、城神明橋橋台杭の直接切削撤去を行う計画である。城神明橋の概要、地形、地質概要、および施工手順を以下に示す。

2-1 城神明橋の概要

橋梁の主な諸元は、以下の通りである。

なお、城神明橋橋台は、A1 橋台および A2 橋台で構成されている。

- ①橋 長 : 11.460 m
- ②支 間 長 : 11.400 m
- ③幅 員 : 16.000 m
- ④斜 角 : $\theta = 71^{\circ}30'00''$
- ⑤上部構造形式 : PC プレテンション I 桁
- ⑥下部構造形式 : 重力式橋台
- ⑦基礎形式 : 鉄筋コンクリート杭
 - 杭径 $\phi = 400$ mm
 - 杭長 $L = 8.0$ m
 - 本数 $N = 96$ 本



地層名	土質名	記号	N値範囲
盛土層	粘性土	Bc	
沖積層	砂質土	As1	12~16
	砂質土	As2	16~29
	砂質土	As2	34~
	礫質土	Ag	50~
	粘性土	Ac3	4~10
相模層	砂質土	Sus2	28

図一 2 城神明橋の土質分布図

2-2 地形、地質概要

城神明橋の基礎杭のうち、トンネルに支障する部分の周辺地盤は、図一 2 に示すように、N 値が 30 以上の細砂層 (As2) ならびに N 値が 50 以上の砂礫層 (Ag) である。

地下水位は、近傍のボーリングにて TP+8.8 m から TP+12.7 m の坑内水位が観測されている。

2-3 施工手順

施工手順は、以下の通りである (図一 3)。

なお、城神明橋橋台杭は、上下線 2 本のトンネルに支障する。本稿では、下記第 1 工程の 1 本目のトンネル (上り線トンネル) 構築時に橋台杭を直接切削した施工実績を示す。

第 1 工程

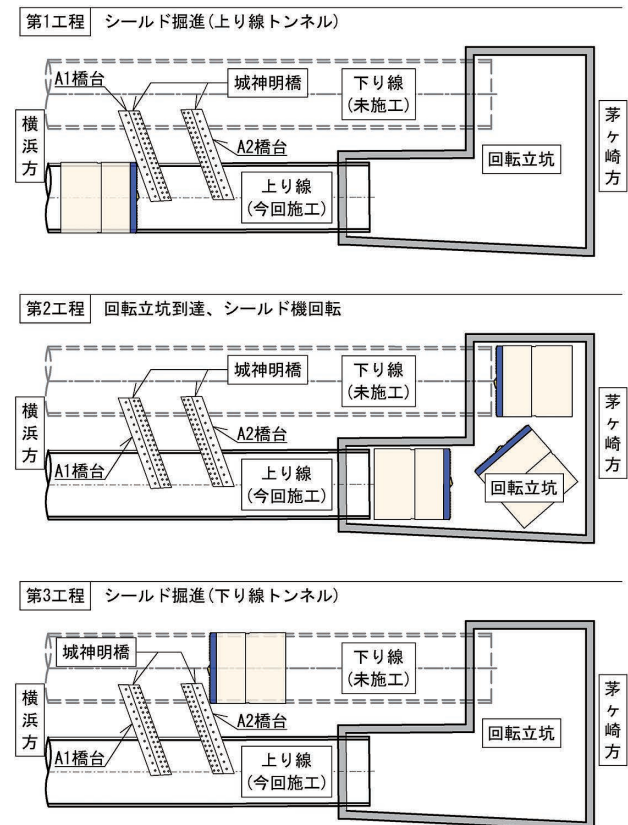
シールド 1 号機は、横浜方から茅ヶ崎方へ上り線トンネルを構築する。城神明橋橋台杭を直接切削する範囲は、杭先端の最大約 2 m、切削本数は 36 本である。なお、A1 橋台、A2 橋台の順で切削する。

第 2 工程

シールド 1 号機は、回転立坑に到達後、掘進方向を 180° 変更し、下り線発進を行う。

第 3 工程

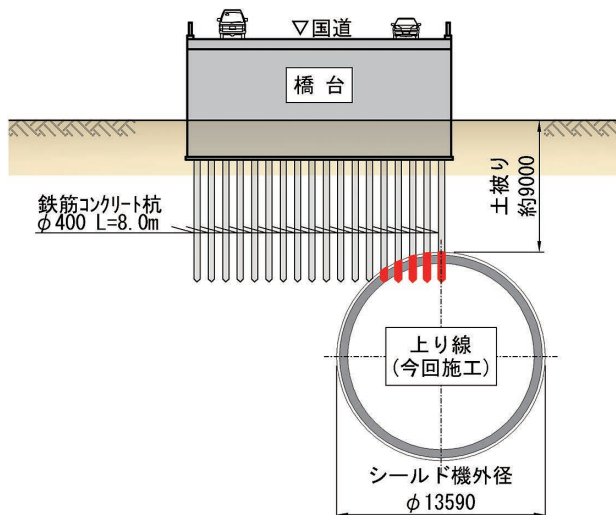
シールド 1 号機は、茅ヶ崎方から横浜方へ下り線トンネルを構築する。城神明橋橋台杭を直接切削する範囲は、杭先端の最大約 0.8 m、切削本数は 16 本である。なお、A2 橋台、A1 橋台の順で切削する。



図一 3 施工手順図

§3. 直接切削における課題と対策

前述の通り、城神明橋は、県道藤沢厚木線と国道1号線バイパスとの立体交差用の重要構造物であり、周辺には、小学校や神社、多数の家屋が近接している。なお、シールド外径 $\phi 13.59\text{m}$ に対し、土被りが約9mのため、小土被りでの掘進となる(図一4)。また、シールド機による杭の直接切削撤去は、最大5本を同時に切削する。このため、城神明橋の安定性への影響が懸念され、橋台変状の抑制や振動、騒音対策が課題となった。



図一4 城神明橋と上り線の横断面図

3-1 地盤改良による事前対策

(1) 地盤改良の目的

前述の課題に対し、地盤改良による事前対策を行った。シールド機による橋台基礎杭の切削後も橋台およびシールドトンネルの構造安全性を確保する必要がある。このため、以下に示す3点を目的とし、地盤改良を行った。

目的①

橋台基礎杭からの反力が集中荷重としてセグメントに直接作用すると、セグメントに局所的な応力集中が生じて、構造安全性が確保できない可能性がある。このため、杭反力を杭と地盤改良の付着力を介して改良体に伝達し、セグメントへは改良体からの面荷重として作用させることを目的とする。

目的②

シールド機による基礎杭切削時には、シールド推力により基礎杭が折れないように施工する必要がある。この杭切削時の基礎杭の構造安全性を確保するために、杭周囲の地盤強度増加を目的とする。

目的③

シールド施工に伴う橋台および地下埋設物の沈下を抑制するため、シールド上部の地盤強度を増加させることを目的とする。

(2) 改良目的と改良範囲

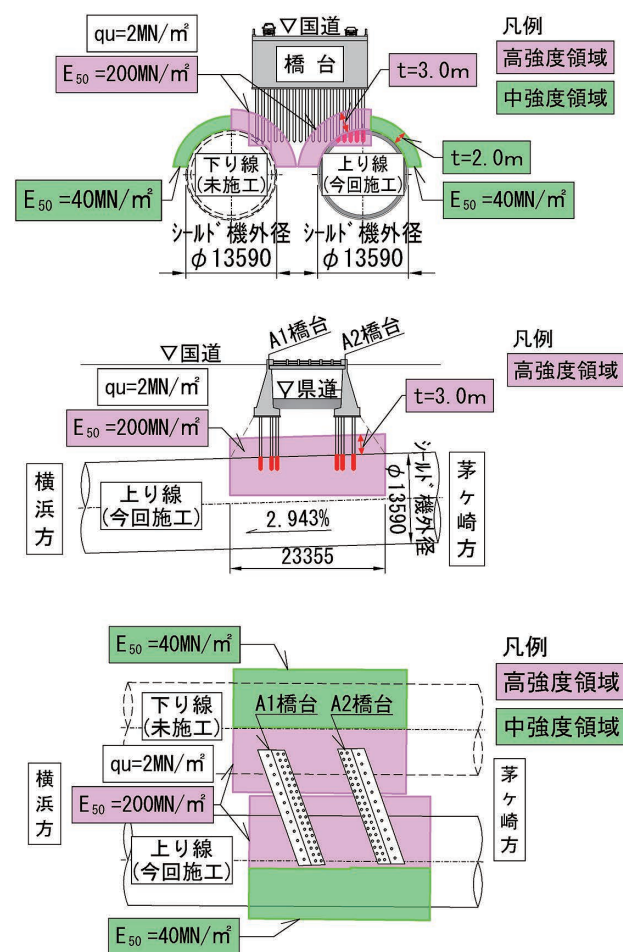
シールドトンネル直上には近接影響検討対象構造物として、城神明橋橋台のほか、仮設橋、歩道橋、埋設物(汚水管、電力ケーブル)がある。このため、改良強度および改良範囲は、シールドトンネルおよび城神明橋橋台をモデル化した2次元弾性FEM解析を用いて決定した(図一5)。なお、地盤改良の目的①、②を満足する範囲を高強度領域、それ以外を中強度領域の2つに分けて設定した。改良強度および改良範囲を以下に示す。

■改良強度

- ・一軸圧縮強度： $q_u = 2.0\text{ MN/m}^2$
- ・変形係数：
①高強度領域 $E_{50} = 200\text{ MN/m}^2$
②中強度領域 $E_{50} = 40\text{ MN/m}^2$

■改良範囲

- ・改良厚：
①高強度領域 $t = 3.0\text{ m}$
②中強度領域 $t = 2.0\text{ m}$
- ・改良延長： $L = \text{約 } 23\text{ m}$



図一5 地盤改良範囲

3-2 杭切削時の掘進管理と計測管理

(1) 杭切削時の掘進管理

施工時の対策として、以下の掘進管理を実施した。

① 掘進速度の変更

橋台基礎杭に過大な外力が作用し、切削範囲以外に損傷、折損しないように施工する必要がある。このため、通常の掘進速度 25~30 mm/min に対し、3 mm/min 以下に速度を落とし、杭に与える影響を最小限にした。

② 杭切削用ビットの使用

基礎杭の切削をスムーズかつ確実に行うため、地山ビットから新品の杭切削用ビットに交換を実施した(写真-1)。なお、一部のビットには温度センサーを取り付けており、リアルタイムでビット温度を計測、管理し、切削中のビット発熱による先端部の超硬チップの脱落を防止した。

③ 裏込め材の強度変更

基礎杭の切削に伴う橋台の沈下を最小限に抑えるため、シールド機通過後のテールボイドに充填する裏込め材を早期に強度発現する早強配合に変更した。また、シールド機外周のオーバーカットによる空隙に中間充填材(クレショック)を充填し、裏込め打設が可能となるまでの間の沈下抑制およびシールド機のノッキングを防止することにより、安定した速度で掘進を行った。



(a) 地山ビット

(b) 切削ビット

写真-1 地山ビットと切削ビット

(2) 杭切削時の計測管理

施工時の対策として、杭切削時の計測管理を実施した。計測内容について、以下に示す。

① 橋台の沈下量および水平変位量の計測

沈下量および水平変位量の計測のため、A1 橋台と A2 橋台の上端部 4 測点に水盛式沈下計とトータルステーションの計測点を設置した(図-6)。なお、計測器は、それぞれ自動計測器を使用した。また、計測管理値について、図-7 に示す 2 次元弾性 FEM 解析の結果(最大変位量)を 1 次管理値とし、橋台の管理限界値を 2 次管理値として設定した(表-2)。

② 振動および騒音の計測

シールド機直上において、振動、騒音の計測を実施した。なお、計測管理値は、藤沢市の環境基準より設定した(表-3)。

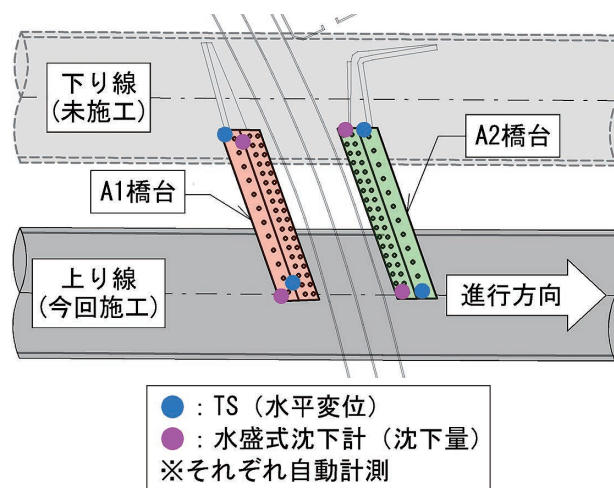


図-6 計測器設置図(平面図)

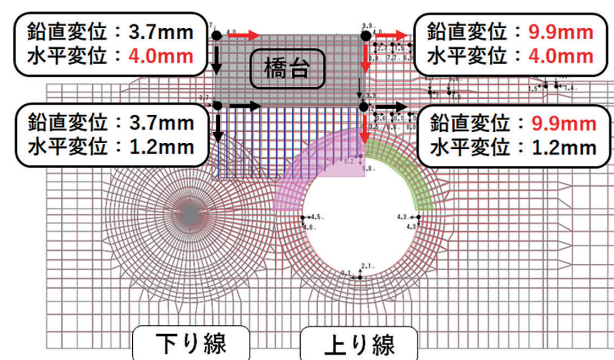


図-7 2次元弾性FEM解析結果(変位量)

表-2 計測管理値(沈下量, 水平変位量)

計測対象	1次管理値	2次管理値
沈下量	9.9 mm	13.0 mm
水平変位量	4.0 mm	10.0 mm

表-3 計測管理値(振動, 騒音)

計測対象	基準値(昼)	基準値(夜)
振動	65 dB	60 dB
騒音	70 dB	65 dB

§ 4. 施工実績と計測結果

前述の通り、今回の上り線シールド掘進において、城神明橋橋台杭の直接切削は、A1 橋台、A2 橋台の順となる。シールド機は、2022 年 10 月 17 日に A1 橋台の杭を切削開始し、同年 11 月 2 日にマシンテール部が A2 橋台を通過完了した。橋台杭切削時の計測結果について、以下に示す。

4-1 沈下量，水平変位置

沈下量，水平変位置は、橋台上端部 4 測点で計測した。各計測点名を以下に示す（図-8）。

- ・ U1：上り線側の A1 橋台上端部
- ・ U2：上り線側の A2 橋台上端部
- ・ D1：下り線側の A1 橋台上端部
- ・ D2：下り線側の A2 橋台上端部

(1) 沈下量

上り線側の計測点 U1 では、A1 橋台の杭切削開始と同時に沈下し、切削完了時点で 3 mm 沈下し、マシンテール通過完了時点で 7 mm 沈下した（図-9）。計測点 U2 では、A1 橋台の杭切削時よりも A2 橋台の杭切削と同時に沈下が進行し、切削完了時点で 4.5 mm 沈下し、マシンテール部通過時点で 7.5 mm 沈下した。

一方、下り線側の計測点 D1、D2 では、0～1.5 mm の沈下を推移した。

この結果より、切削部分である上り線側の測点 U1、U2 では沈下が顕著に表れ、下り線側の測点 D1、D2 では杭の直接切削による影響は小さかったと考えられる。また、FEM 解析の結果（最大沈下量）9.9 mm に対し、最大 8 mm 程度の沈下量であるため、概ね解析通りの結果が得られたと考えられる。

(2) 水平変位置（X 方向，Y 方向）

水平変位置は、平面図の上下方向を X 方向、平面図の左右方向を Y 方向として結果を示す（図-10、11）。

X 方向は、A1、A2 橋台の杭切削後、マシンテール部通過完了時点で平面図下方向に最大 3.8 mm 変位した。これは、下り線側の測点 D1、D2 と比較し、上り線側の測点 U1、U2 の沈下量が大きいことから、橋台上端部が上り線側に傾いた結果と考えられる。

また、Y 方向は、A2 橋台の杭切削前時点で平面図左方向に最大 2.7 mm 変位した。これは、A2 橋台の杭切削前は、計測点 U1 と比較し、計測点 U2 の沈下量が小さいため、橋台上端部が A1 橋台側に傾いた結果と考えられる。なお、計測点 U1 と U2 の沈下量の差が小さくなったため、Y 方向の変位置も小さくなったと考えられる。

また、FEM 解析の最大水平変位置 4.0 mm に対し、最大 3.8 mm の変位置であるため、概ね解析通りの結果が得られたと考えられる。

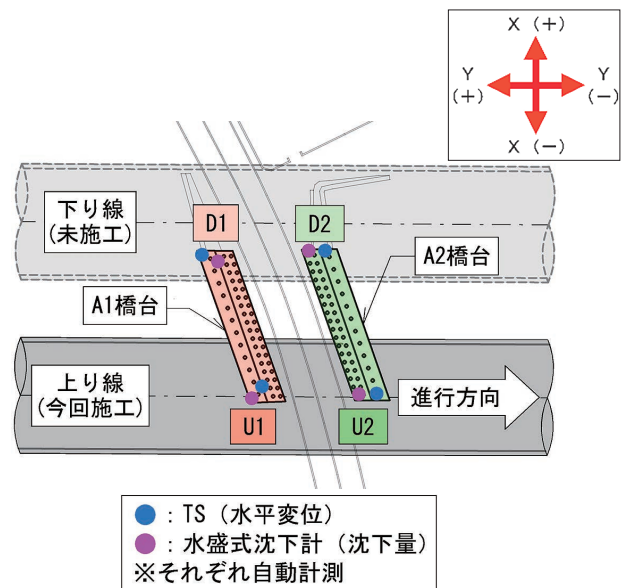


図-8 計測器設置図および計測点名

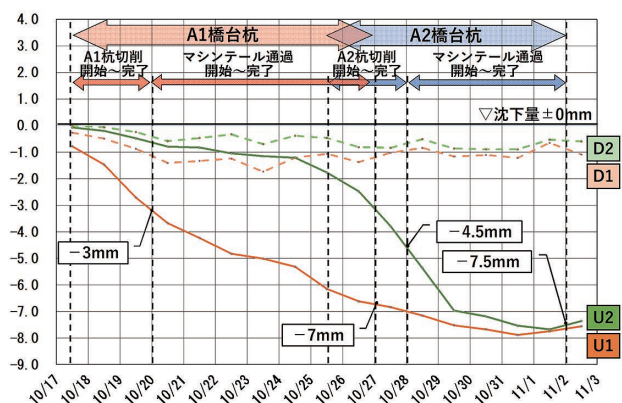


図-9 橋台変位図（沈下量）

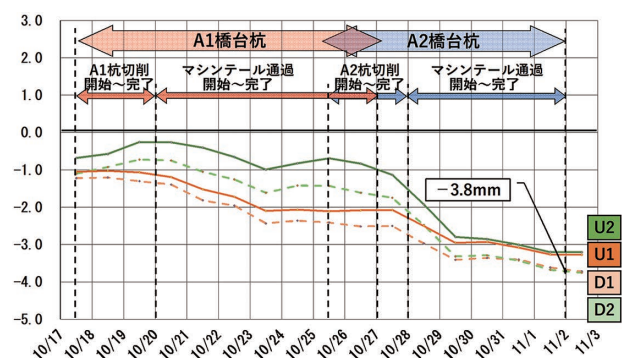


図-10 橋台変位図（X方向変位置）

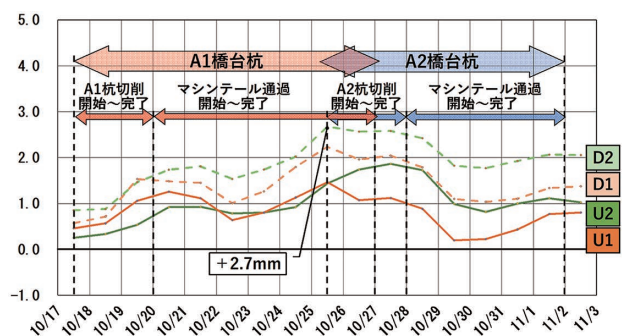


図-11 橋台変位図（Y方向変位置）

4-2 振動, 騒音

振動, 騒音の測定は, シールド機直上にて実施した(写真-2)。下図に昼夜の振動, 騒音調査結果を示す。

トンネル施工時における振動は, 昼夜ともに管理値内で収めることができた(図-12, 13)。

また, 騒音は, 夜間の暗騒音で一部管理値を超過する箇所が確認されたが(図-14, 15), 国道1号線付近であるため問題ないと考えられる。なお, 杭切削中の騒音値は, 管理値を下回っていることが確認できた。このため, 橋台杭の直接切削に伴う振動, 騒音は, 小さかったと考えられる。

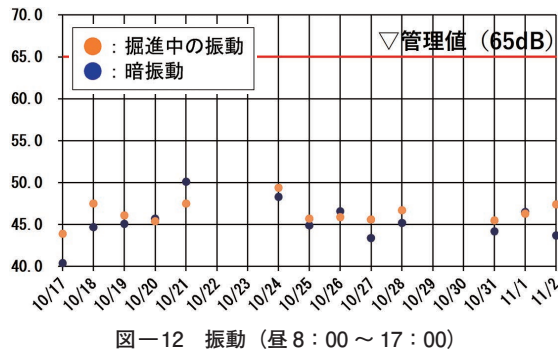


図-12 振動 (昼 8:00 ~ 17:00)

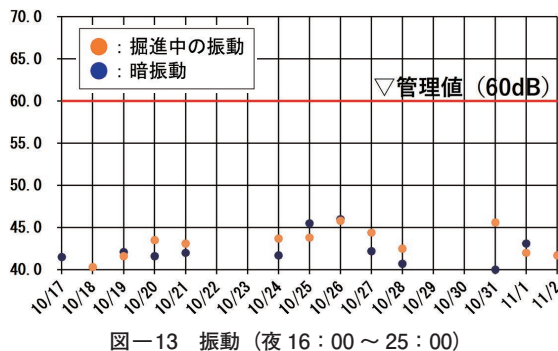


図-13 振動 (夜 16:00 ~ 25:00)

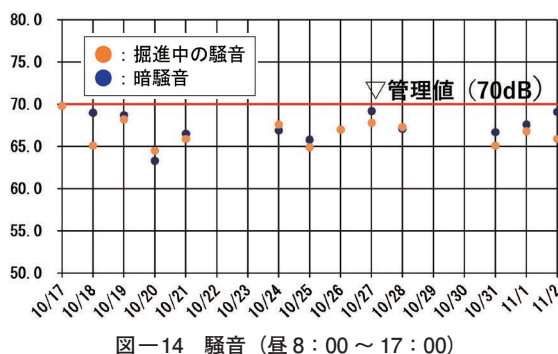


図-14 騒音 (昼 8:00 ~ 17:00)

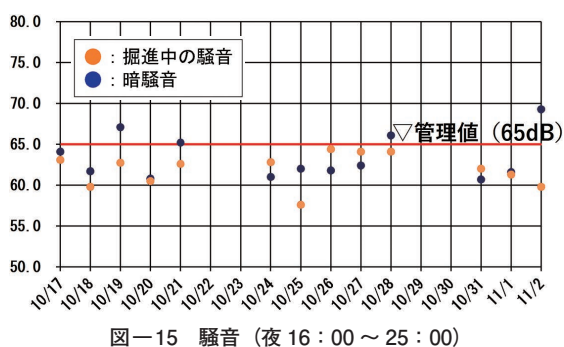


図-15 騒音 (夜 16:00 ~ 25:00)



写真-2 振動計・騒音計

§ 5. まとめ

本稿は, 本工事のうち, 県道藤沢厚木線と国道1号線バイパスとの立体交差用の重要構造物である城神明橋の橋台杭をシールド機で直接切削する工事内容であり, 国道および県道に大きな影響を与えることが懸念された。特に近年の大断面シールド工事に伴う陥没事故等により, 発注者や第三者から注目される内容であったため, 通常のシールド工事以上に地盤変状や振動, 騒音への対策と管理が求められた。

ここで, 地盤改良による事前対策や杭切削時の掘進管理体制を強化した結果, 地盤変状や振動, 騒音を最小限に抑えることができた。なお, 杭切削時の計測結果(沈下量, 水平変位量)は, FEM 解析の結果と同様の傾向を示しており, シールド機の掘進状況と変位量の相関関係が顕著に表れている。

現在, シールド機は, 回転立坑への到達, 立坑内での回転まで完了している。2025年度から下り線の掘進を開始し, 下り線側の城神明橋橋台杭の直接切削を行う計画であり, 今回の施工実績と計測結果を参考に, より安全な管理, 整備体制を確立することが重要であると考え。

最後に, 本工事の円滑な施工に際しては, 国土交通省関東地方整備局横浜国道事務所様をはじめ, シールド委員会, 本社土木設計部, 関係各位には多大なご支援を賜りました。ここに改めて感謝の意を表します。



写真-3 シールドマシン押し出し完了