

ガラス繊維ロッドとアラミド繊維を用いた切削セグメントの 地中切削実験

Underground cutting experiment of cuttable segments with glass fiber rod and aramid fiber

久住 慎也* 坂野 陽一**
Shinya Kusumi Yoichi Sakano
齊藤 一男**
Kazuo Saito

要 約

西松建設は、2014年度にガラス繊維ロッドとアラミド繊維を用いた切削セグメントを開発し、優れた強度と切削性を実験で確認した。今般、地中を模擬した流動化処理土内に、切削セグメントを用いた2本のトンネルを設置し、これをシールド機が切削しながら掘進する実験を行い、①線形精度、②土中での掘進負荷、③切削セグメントと内部に設置したRC構造体（先行エレメント）の挙動などを確認した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工法概要
- § 3. 地中切削実験の概要
- § 4. 実験結果
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

当社は、道路トンネルの分岐合流部などを構築する「3C 先行覆工地中拡幅工法（3C：Cut and Connect in a Circle）」を開発した（図-1）。東京外かく環状道路等の地下40m以上の大深度で、トンネル分岐合流部等の大断面地中拡幅部を非開削で構築する技術である。

本工法は、小口径シールドを先行（切削セグメント）と後行（鋼製セグメント）の2段階に分けてラップ施工し、シールド内部を鉄筋コンクリートにより連結することで、地山を露出させずに、円形の大口径先行覆工を構築する工法である。この外殻先行覆工により地下大空間を形成することで、地下水位の高い未固結の一般土砂においても、大深度で、安全・確実に大断面拡幅工事を行うことができる。そこで、当該工法の要素技術であるセグメントの切削性能を検証するために本実験を行った。

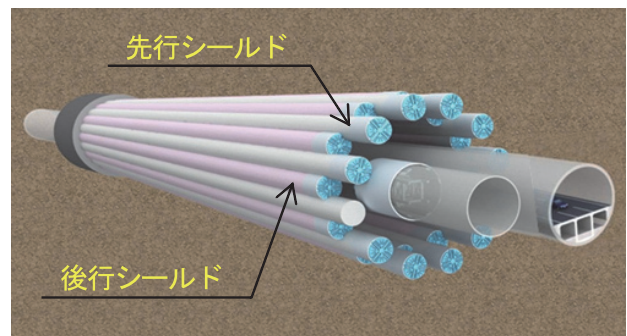


図-1 3C 先行覆工地中拡幅工法の概要図

§ 2. 工法概要

3C 先行覆工地中拡幅工法は、以下の手順で構築する。

- ①小口径先行シールド（切削セグメント）掘進後、内部にRCにより外殻先行覆工の一部（先行エレメント）を構築し、流動化処理土で充填する。
- ②小口径後行シールド（鋼製セグメント）が、先行シールドをラップして掘進し、凍結工法により周囲を止水した後に、小規模の切り上げを行う。次に、内部にRCにより先行覆工の一部（後行エレメント）を構築し、先行エレメントと接続することで外殻先行覆工を構築する。
- ③円形の外殻先行覆工を構築後、棲壁等を構築し、止水された中で、内部の地山を掘削し、大規模な地中拡幅部を構築する（図-2）。

* 土木設計部設計二課

** 関東土木(支)土木計画部

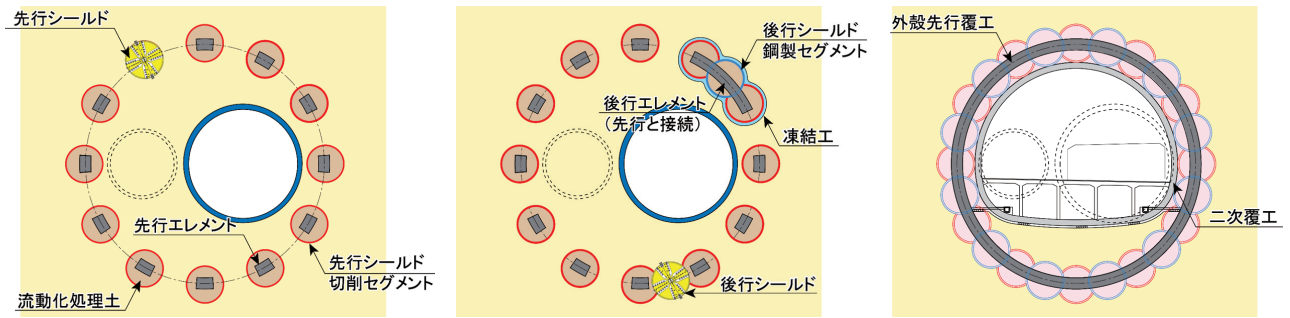


図-2 3C 先行覆工地中拡幅工法の施工手順

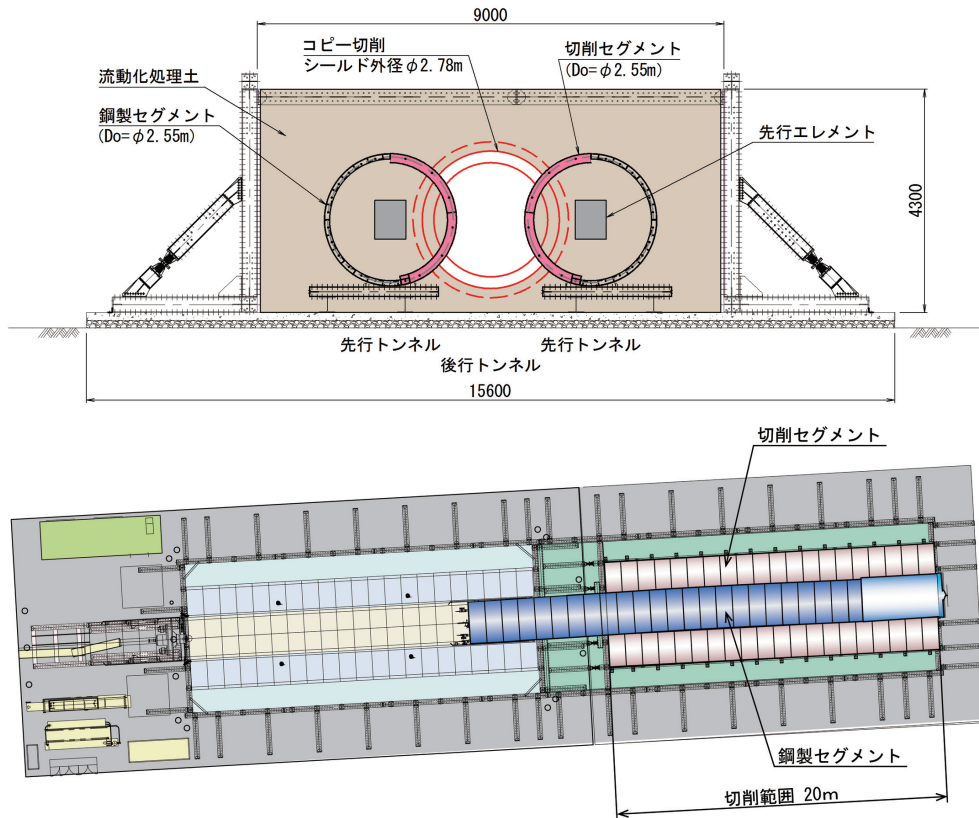


図-3 実験概要図

§3. 地中切削実験の概要

図-3に示すように、流動化処理土にて固結地盤を模擬したボックス内(幅9m×高さ4.3m×延長20m)に外径φ2.55mの先行トンネルを2本配置し、その間に外径φ2.68mの後行シールド機で両側の先行トンネルを切削しながら掘進する。先行トンネルは切削される部分のみ切削セグメントを使用し、非切削部は鋼製セグメントを使用した。

また、後行シールド機が先行トンネルを切削する際の近接影響を検討するため、先行トンネル内にRC製の先行エレメント(幅600mm×高さ700mm×延長4100mm)を設置した。

3-1 切削セグメント

切削セグメントには以下の性能が必要である。

- ① RCセグメントと同等の耐力を有する。
- ② 切削時のシールド機への負荷が小さい。

上記の性能を満足するために、コンクリートの粗骨材として、切削性に優れる軽量骨材(写真-1)を使用した。また、鉄筋の代わりにガラス繊維製異形ロッド(写真-1)を使用し、鉄筋と同等の強度を確保した。さらに、コンクリートに0.5 vol%のアラミド繊維(写真-1)を混入し、ひび割れ抑制効果を向上させた^{1), 2), 3)}。切削セグメントの構造図を図-4に、仕様を表-1に示す。

3-2 シールド機

本実験で使用したシールド機の外観を写真-2に、その仕様を表-2に示す。



写真-1 切削セグメント使用材料

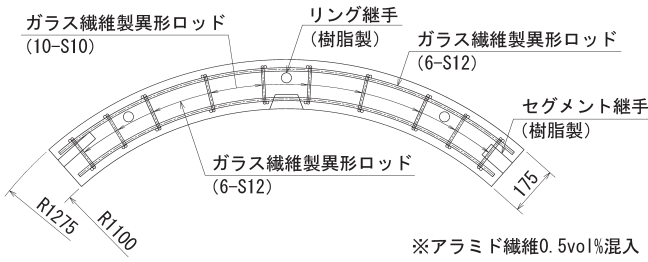


図-4 切削セグメント構造図

表-1 切削セグメント仕様

外径×幅×桁高	2,550 mm×1,000 mm×175 mm
設計基準強度	42 N/mm ²
骨材	軽量骨材
筋材	ガラス繊維製異形ロッド
アラミド繊維	0.5 vol%

表-2 シールド機仕様

シールド外径	φ 2.68 m
シールドジャッキ	700 kN/本×10本 = 7,000 kN
カッター回転数	2.5 rpm (最外周速度21 m/min)
カッタートルク	331 kN・m (α = 17.2)
コピーカッター	100 kN×100 mm×1本



写真-2 シールド機

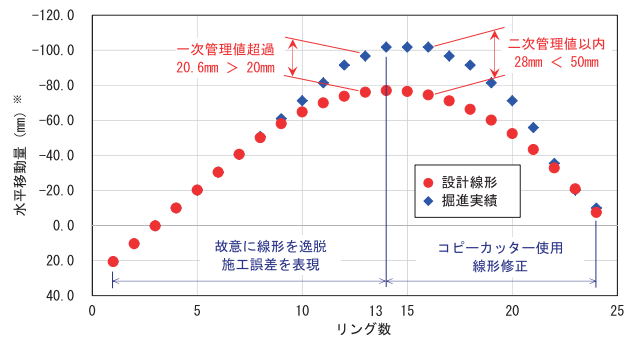


図-5 線形実績

§ 4. 実験結果

4-1 線形精度

(1) 計測概要

以下の手順により曲線施工を模擬し、曲線施工時の蛇行修正が可能であることを確認する。

- ① R = 500 m の設計線形を設定し、施工誤差を表現するために故意に線形を逸脱させて掘進を行う。
- ② 掘進実績と設計線形との差が一次管理値 (= 20 mm) を超過した時点で、コピーカッターを使用して線形の修正を行う。
- ③ 線形修正後、二次管理値 (= 50 mm) 以内で線形精度を管理できることを確認する。

(2) 計測結果

線形実績を図-5に示す。13リング時点で一次管理値を超過し、線形修正を開始した。線形を修正して3リング後の16リング時点で設計線形との誤差が最大28mmとなり、さらに6リング後の22リングで設計線形に戻すことができた。一次管理値を超過しても10mm以内で線形を修正できたことから、二次管理値 (= 50 mm) を掘進管理値としてもよいと判断した。

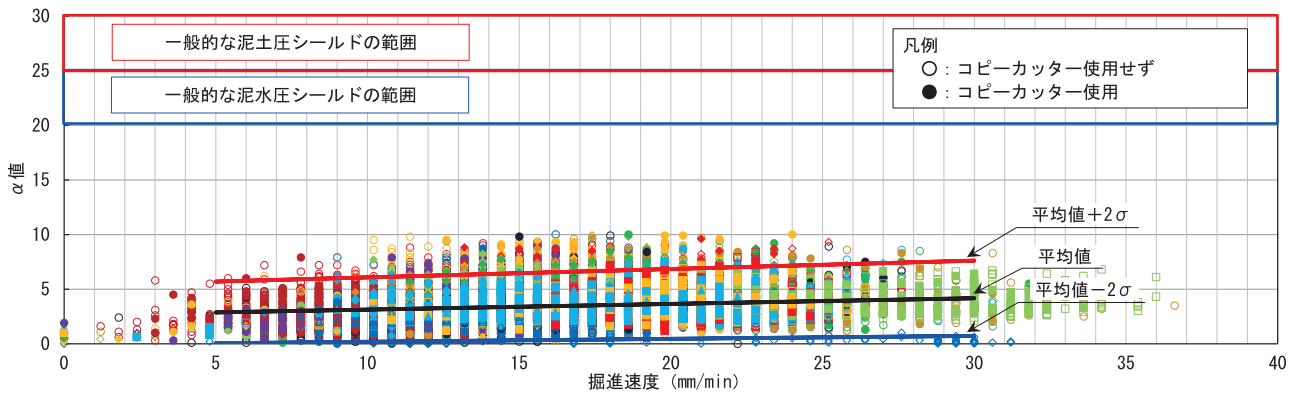


図-6 掘進速度とα値

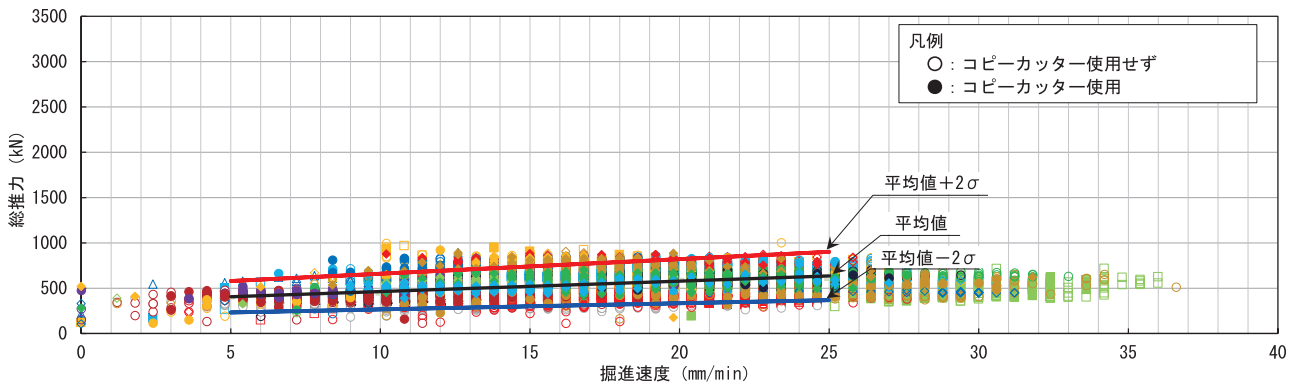


図-7 掘進速度と推力

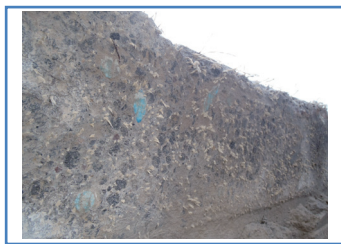


写真-3 切削断面



写真-4 排土状況

4-2 掘進負荷

(1) 計測概要

後行シールド機が先行トンネルを切削する際の後行シールド機への負荷、および、コピーカッターの使用による後行シールド機への影響を確認するために、掘進速度とトルク、推力を計測した。なお、トルクはα値（トルク係数：トルク÷シールド外径の3乗）で評価した。

(2) 計測結果

①掘進速度とα値の関係を図-6に示す。α値は掘進速度による影響を受けているが、掘進速度によるα値の増加は小さく、掘進速度30 mm/min程度でもα値は平均5以下と小さい値であった。また、コピーカッターを使用してもα値にはほとんど変化がなく、α値

のばらつきを考慮しても通常のシールド機に装備されるトルク（α値=20~30）で十分切削が可能であることを確認した。

②掘進速度と推力の関係を図-7に示す。推力はトルクと同様に掘進速度の影響を受けているが、その影響は小さい。また、推力の平均値は700 kN（面換算で124 kN/m²）であり、通常のシールド機に装備される推力（=1,200 kN/m²）⁴⁾の10%程度で掘進が可能であることを確認した。

③切削断面を写真-3に示す。切削断面は滑らかでコピーカッターを使用した面においても、トルクの増大やセグメントの大割れはなく、スムーズに排土できた（写真-4）。

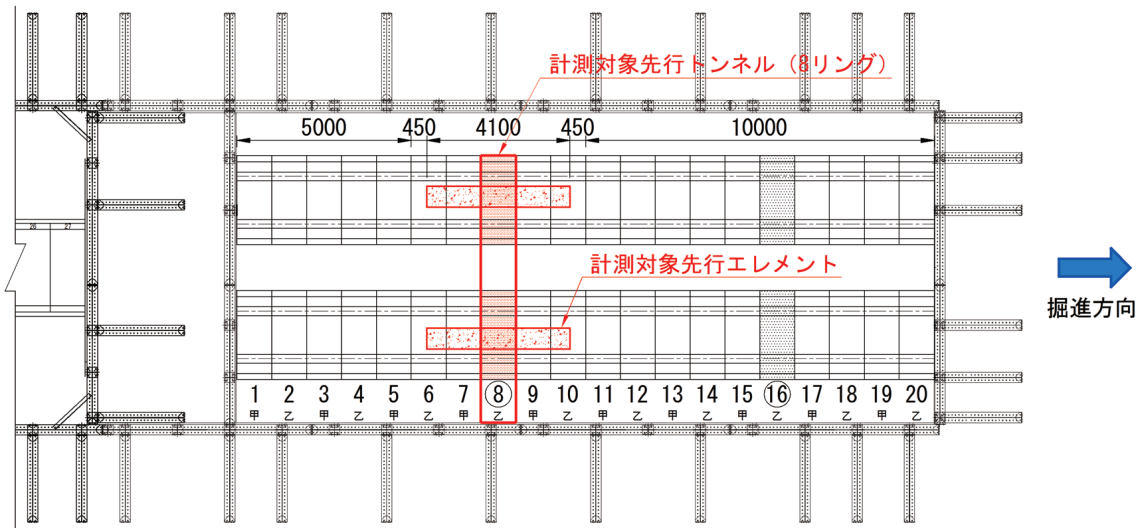


図-8 先行エレメントおよび先行トンネル計測箇所

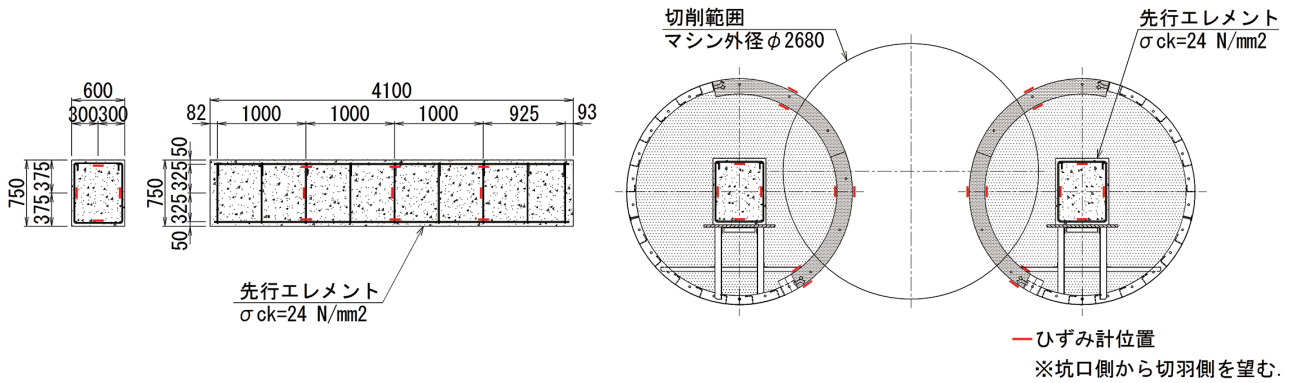


図-9 ひずみ計位置図

4-3 先行エレメントおよび先行トンネルの挙動

(1) 計測概要

後行シールド機が先行トンネルを切削する際の先行エレメントおよび先行トンネルの挙動を観測するために、**図-9**に示す位置にひずみゲージを貼付して計測を行った。先行エレメントは埋設した鉄筋に鉄筋ゲージを、先行トンネルへはコンクリートゲージをセグメント内外面に貼付した。

(2) 計測結果

先行トンネル8リングに貼付したひずみゲージの挙動を**図-10, 11**に示す。各測定箇所の測定結果は、8リング中央に設置したひずみゲージの発生ひずみ量とコンクリートおよび鉄筋のヤング係数から算出した発生応力度である。結果は、7リング掘削時から9リング掘削時までを時系列に示す。

先行エレメントおよび先行トンネルの発生ひずみ量は最大20μ程度、発生応力度は0.6 N/mm²であった。また、鉄筋の発生ひずみ量は最大25μ程度、発生応力度は5 N/mm²と非常に小さな値であり、切削に伴う先行エレメントと先行トンネルへの影響はほとんど生じないことを確認した。

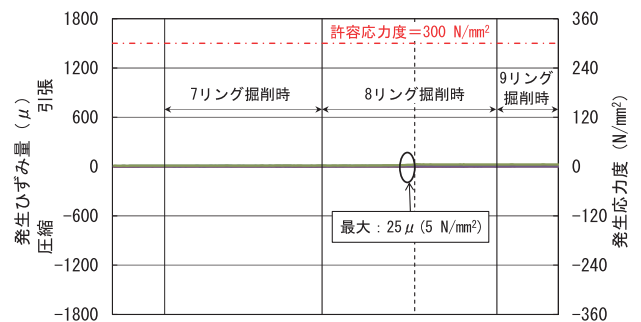


図-10 先行エレメント軸方向鉄筋ひずみおよび平均発生応力度

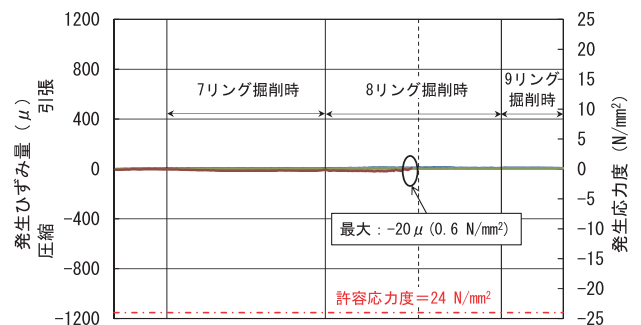


図-11 先行トンネル軸方向コンクリートひずみおよび平均発生応力度

4-4 ビットの摩耗

(1) 計測概要

全ビットに対して、掘進前後のビット形状を測定し、ビット摩耗量を算出した。

(2) 計測結果

写真-5に示すように、掘進終了後のビットがほとんど摩耗していないことを確認した。また、全ビットの摩耗量を測定し、摩耗量と摺動距離から各ビットの摩耗係数を算出した結果、最大値でも礫地盤と同程度の0.037 mm/kmと小さい値であった。

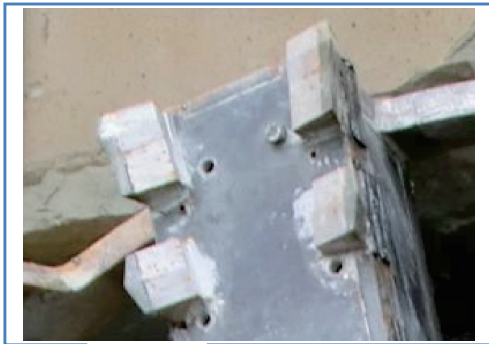


写真-5 シールド到達時ビット状況

§5. まとめ

以下にまとめを示す。

- (1) シールドジャッキ制御およびコピーカッターの使用により、掘進管理値±50 mm以内で線形精度を確保できることを実証した。
- (2) 小さな切削負荷（低トルク、低推力）で通常のシールド掘進速度30 mm/min程度が確保できることを確認した。
- (3) 切削セグメントは大割れすることがなく、排土性状が良好であることを確認した。
- (4) 切削に伴う先行エレメントと先行トンネルへの影響はほとんど生じないことを確認した。
- (5) ビットの摩耗係数が0.037 mm/kmと小さい値（礫地盤と同程度）であることを確認した。

謝辞. 本実験は、2016年夏に公開実験を行ったものである。公開実験では、多数の有識者の方々にご参加頂き、多くのご意見とご指導を頂戴した。実験成果をまとめるにあたり、深く感謝申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 村上賢治他：シールド機で切削可能なセグメントの開発，西松建設技報VOL.37，pp.1-6，2014.
- 2) 村上賢治他：シールド機で切削可能なセグメントの開発（その1），土木学会第69回年次学術講演会，VI-594，pp.1187-1188，2014.
- 3) 小林正典他：シールド機で切削可能なセグメントの開発（その2），土木学会第69回年次学術講演会，VI-595，pp.1189-1190，2014.
- 4) 公益社団法人 土木学会：2016年制定トンネル標準示方書 [共通編]・同解説／[シールド工法編]・同解説，p.168，2016.