

シールド機動力学モデルに基づく

裏込注入のシールド機挙動に与える影響評価

STUDY ON INFLUENCE OF BACK-FILL GROUTING ON SHIELD BEHAVIOR BASED ON KINEMATIC SHIELD MODEL

佐藤有美¹⁾・アピチャート・サラムーン²⁾・杉本光隆³⁾

Yumi SATO, Aphichat SRAMOON, Mitsutaka SUGIMOTO

Back-fill grouting gives the influence on shield behavior sometimes, according to site experience. From the viewpoint of the phenomena, it is considered that the influence of back-fill grouting on shield behavior results from the decrease of tail clearance due to hardening it inside the tail clearance and the decrease of overbreak around skin plate due to intruding it into the gap between ground and skin plate. Therefore, in this paper, the simulations of shield behavior were carried out by using the kinematic shield model, considering the tail clearance and the effective overbreak ratio as a parameter, and the influence of back-fill grouting on shield behavior was discussed based on the obtained shield behavior. As a result, it was made clear that the decrease of tail clearance and overbreak causes the restraint of the shield rotation.

Keyword: Kinematic shield model, back-fill grouting, shield behavior

1. はじめに

大都市部においては、使用可能空間の制約や軟弱地盤・地下水位面以深での施工といった理由から、シールド工法が都市トンネルの施工法として一般に採用されている。近年においては自動掘進システムが開発され、シールド機挙動や制御に関する多くの実測データが得られるようになってきている。しかし、こうした自動掘進システムは、「シールド機の実際の位置が計画位置よりある一定以上ずれた場合に、シールド機を計画位置に戻すよう経験的に制御する」ことを基本としているにすぎない。そのため、特殊シールド機の挙動予測・制御や、複雑な地層構造でのシールド機の制御、シールド機装備能力の設計については、経験や模型実験・実証実験に基づき行われているのが現状である。また、今後は、未知の条件となる大深度での施工や、浅深度でのきわめて正確な近接施工が要求される場合が増えると予想され、これらに対応するには、経験のみに基づいた従来のシールド機制御手法から、力学理論に基づいたシールド機制御手法への移行が必要であると考えられる。こうした背景をふまえ、著者らは施工実績に基づくシールド機動力学モデルを開発¹⁾し、その合理性を検証してきた。

ところで、施工実績や既往の研究によると、裏込注入がシールド機に作用する力に影響を与える^{2),3)}ことがあるとされている。そこで、本論文では、開発されたシールド機動力学モデルを用いて、裏込注入がシールド機の挙動に与える影響を定性的に評価することを目的とする。

2. 裏込注入がシールド機の挙動に与える影響

裏込注入がシールド機の挙動に与える影響として以下のことが考えられる。

(1) テールクリアランスの減少

-
- 1) 学生会員 修士(工学) 長岡技術科学大学大学院 工学研究科
 - 2) 正会員 博士(工学) 長岡技術科学大学 環境・建設系
 - 3) 正会員 工学博士 長岡技術科学大学 環境・建設系

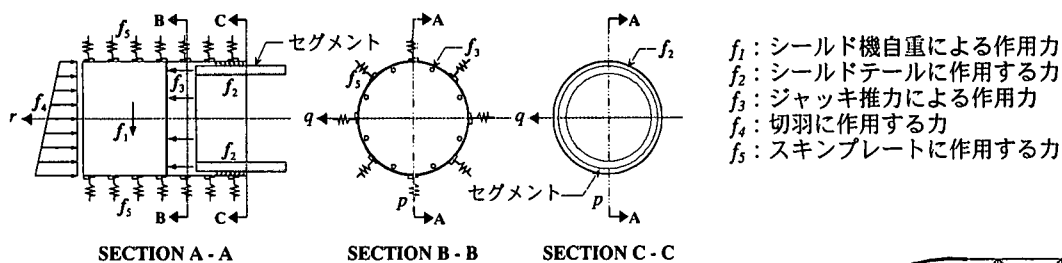


図-1 シールド機動力学モデル

裏込注入がテールクリアランス内部に回り込んで固化すると、テールクリアランスが減少し、シールド機の回転が抑制される。この原因として、以下のことが考えられる。

- ①グリースの給脂が不足した場合
- ②ワイヤブラシが破損した場合
- ③急曲線部等で部分的にテールクリアランスが増大した場合
- ④裏込注入圧が高い場合

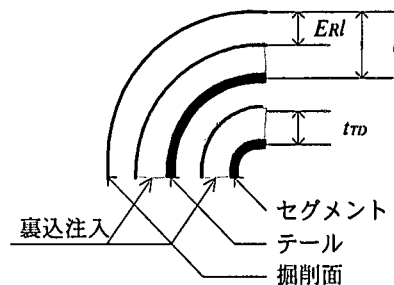


図-2 裏込注入固化厚 t_{TD} と余掘り有効率 E_R

これらの原因のうち、テールクリアランスの減少に大きく影響を与えるのは①，②，③で、これらの場合には、裏込注入圧が高くなくとも裏込注入がワイヤブラシのところに回り込むことがある。また④の場合、①，②，③の状態でなくとも、裏込注入がワイヤブラシのところに回り込む可能性が高くなる。

(2) 余掘り領域の減少

裏込注入が、オーバーカット、コピーカッターによる余掘り領域に回り込むと、余掘り領域が減少し、結果として地盤反力が増加し、シールド機の回転が抑制される。この原因として、以下のことが考えられる。

- ①コピーカッターの使用や、急曲線部でのシールド機と掘削領域の幾何学的位置関係から余掘り領域が大きくなった場合
- ②裏込注入量が過多の場合
- ③裏込注入圧が高い場合
- ④回り込みに対する対策が不十分な場合

これらの原因のうち、余掘り領域の減少に大きく影響を与えるのは①で、これが小さい限り、流動抵抗が大きくなるので、裏込注入は余掘り領域に回り込まないと考えられる。次に、②，③，④が同時に起こった場合、裏込注入が余掘り領域に回り込む可能性が高くなる。

以上より、裏込注入圧は、シールド機挙動へ影響を与える一つの因子に過ぎず、他の原因と複合して、シールド機挙動へ影響を与えると考えられることから、裏込注入のシールド機挙動への影響を、(1)テールクリアランスの減少、(2)余掘り領域の減少として表現し、直接評価することとした。

3. 解析方法

(1) 裏込注入の影響のモデル化

本研究で用いたシールド機動力学モデル¹⁾では、図-1に示すように、シールド機に作用する力のうち、主要な5つの作用力、すなわち、シールド機自重による作用力 f_1 、シールドテールに作用する力（以後、シールドテール作用力と呼ぶ） f_2 、ジャッキ推力による作用力 f_3 、切羽に作用する力 f_4 、スキンプレートに作用する力（以後、スキンプレート作用力と呼ぶ） f_5 を用いている。また、シールド機動力学モデルの特徴は、①地盤変形量を考慮、②動的釣り合い式を満足、③カッターフェイス回転方向を考慮、④マシンの横・縦滑りを考慮、⑤シールド機テール部におけるシールド機とセグメントの相対的位置関係を考慮、⑥緩み土圧を考慮できることである。

表-1 解析条件

トンネル	線形	平面線形 曲線	右向き半径500m
	地形	縦断線形	水平
	セグメン	土被り 地下水位	20m GL-0.0m
シールド機	自重	外径 幅	1.935m 1.000m
	自重	自重 重心位置	1000kN (0.000, 0.000, -0.500)m
	ジャッキ	本数 ジャッキ位置半径 ジャッキ断面積 ジャッキ長さ	12本 1.750m 314.159cm ² 2.000m
	C F	C F厚 開口率	0.300m 20%
	テール	テール内径 テール厚さ C ^M 原点-ガーダー端 鉄のヤング率 ワイヤブラシ高さ ワイヤブラシ長さ ワイヤブラシバネ定	1.960m 0.040m 1.700m 204000MN/m ² 0.140m 0.450m 100kN/m ³
	その他	マシン外径 掘削半径 チャンバー内径 マシン長 C F-バルクヘッド C F-C ^M 原点 エレクター中心	2.000m 2.000m 1.950m 5.000m 1.000m 1.400m (0.000, 0.000, -2.600)m
	地盤	単位体積重量 水中単位体積重量 水の単位体積重量 土粒子比重	20kN/m ³ 10kN/m ³ 10kN/m ³ 2.7
	強度	粘着力 内部摩擦角	0kN/m ² 30deg
	土圧	土圧係数 K_{hmin} K_{ho} K_{hmax} K_{vmin} K_{vo} K_{vmax} 地盤反力係数 k_h k_v 切羽土圧係数 a b	0.3 0.5 5.0 0.3 1.0 5.0 30 30 MN/m ³ 30, 1
	制御	掘進速度 C F 回転方向 C F 回転速度 泥水圧 泥水密度 コピーカッター グリース圧 ジャッキ推力 ジャッキ水平モーメント ジャッキ鉛直モーメント	0.04m/min 反時計回り(テールより) 0.9rpm 200kN/m ² 12kN/m ³ 未使用 560kN/m ² 6442.710(6386.770)kN 2614.960(63.520)kNm -828.630(-942.390)kNm

位置	動摩擦係数	動的付着力 (kN/m ²)	抵抗係数
セグメント-テール	0.3	0.0	0.0
セグメント-ワイヤブラシ	0.0	0.0	0.0
セグメント-ジャッキ	0.0	0.0	0.0
地盤-C F	0.1	0.0	-
泥水	0.0	0.0	-
地盤-スキンプレート	0.1	0.0	未知数

注: () : 直線

表-2 解析ケース

Case	t_{TP} (cm)	E_R (%)
0	0.0	50
1	2.5	50
2	0.0	0

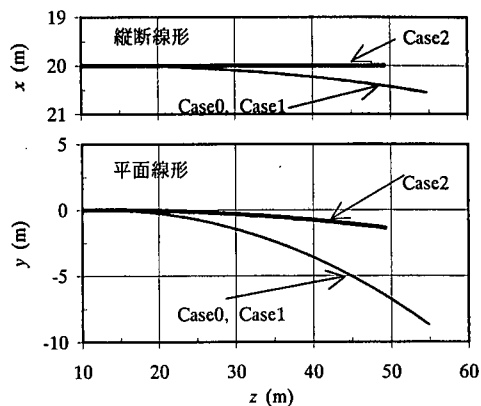
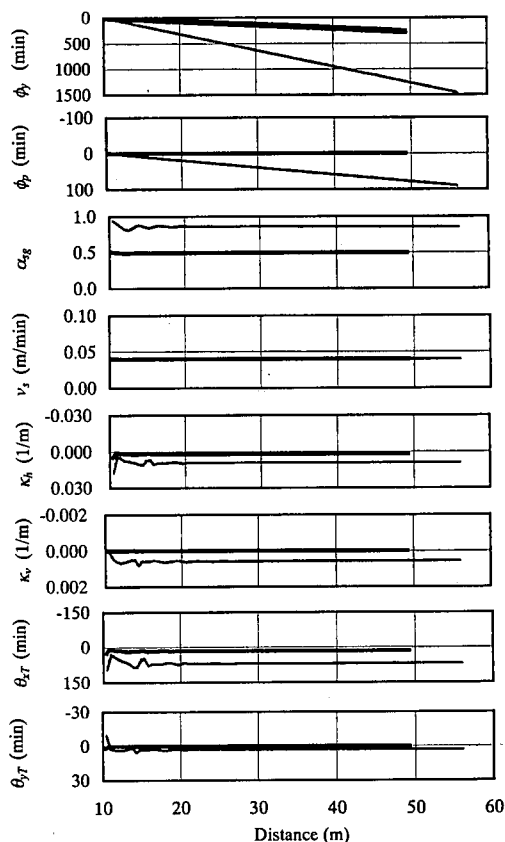


図-3 シールド機軌跡



----- Case 0 ——— Case 1 ——— Case 2

(Case 0 と Case 1 はほとんど一致)

図-4 シールド機挙動の時系列変化

このシールド機動力学モデルを用いて、テールクリアランスの減少については、シールド機とセグメントの幾学的関係から求められるテールクリアランスを、裏込注入がテールクリアランス内部で固化した厚さ（以後

裏込注入固化厚 t_{TD} と呼ぶ) だけ狭くすることにより表現した。また、余掘り領域の減少については、掘削領域とシールド機スキンプレートの幾何学的位置関係から求められる余掘り領域を、裏込注入がスキンプレート周りに回り込んだ厚さだけ狭くすることにより表現した。なお、掘削による余掘り領域に対する、裏込注入がスキンプレート周りに回り込んだ後に残る余掘り領域の比を余掘り有効率 E_R と呼ぶことにする。裏込注入固化厚と余掘り有効率の定義を図-2 に示す。

(2) 裏込注入の影響の評価方法

上記の裏込注入固化厚と余掘り有効率をパラメータとして、掘削中のシールド機の挙動をシミュレーションし、得られたシールド機の挙動を表すパラメータを比較検討することにより、裏込注入がシールド機の挙動に与える影響を評価した。

ここで、シミュレーションで直接得られるパラメータは、シールド機の移動を表す Δ_x^* (シールド機横断鉛直方向への移動距離)、 Δ_y^* (シールド機横断水平方向への移動距離)、 Δ_z^* (シールド機掘進方向への移動距離) と、シールド機の回転を表す ϕ_y (ヨーイング角)、 ϕ_p (ピッチング角)、 α (スキンプレートと地盤の摩擦によるカッタートルク抵抗係数 α_{xs}) の6つである。なお、ここでは、ローリング角の変化が小さいことを考慮し、ローリング角の代わりにローリングしないために必要なカッタートルク抵抗係数をパラメータとした。

また、シールド機の挙動を表示するにあたり、以下の指標を用いた。

- ①シールド機の移動を表すパラメータ Δ_x^* 、 Δ_y^* 、 Δ_z^* によるエレクター中心の軌跡 (以後、シールド機の軌跡と呼ぶ) と、シールド機の回転を表すパラメータ ϕ_y 、 ϕ_p 、 α
- ②シールド機の挙動予測計算点間でのシールド機の挙動の変化を表す、シールド機掘進速度 v_s 、シールド機の軌跡の水平・鉛直方向曲率 κ_h 、 κ_v
- ③シールド機の横滑り・縦滑り状態を表すシールド機の軌跡からシールド機軸への水平・鉛直方向の偏差角度 θ_{xr} 、 θ_{yr}

(3) 解析条件

トンネル諸元を定めた後、泥水式シールドの施工実績を参考にシールド機・地盤物性値・制御に関する項目を表-1 のように決定した。なお、テールクリアランスの減少については、テールクリアランス 5cm に対し、裏込注入固化厚 t_{TD} を 0, 2.5cm とすることにより、また、余掘り領域の減少については、掘削による余掘り領域 2cm に対し、余掘り有効率 E_R を 0, 50% とすることにより表現した。解析ケースを表-2 に示す。ここでは、テールクリアランスの減少を考察するために Case0 と Case1 を、余掘り領域の減少を考察するために Case0 と Case2 を比較した。また、本研究では、砂質地盤で水平に直線のトンネルを 10m 掘削した後、Case0 で半径 500m の曲線を掘削するのに必要なジャッキ力を与え、時間間隔 10 分で 980 分のシールド機の挙動予測を行った。

4. 解析結果と考察

シールド機の軌跡の縦断線形・平面線形、シールド機の挙動を示す指標の時系列の変化を、図-3、図-4 に示す。また、シールド機が定常掘削に至った後のシールド機の作用力を表-3 に、テールクリアランスの分布とワイヤブラシによってシールドテールに作用する圧力のマシン軸方向平均値の分布を図-5 に、シールド機周辺の法線方向の地盤変位分布と法線方向の土圧分布を図-6 に示す。図-6 はスキンプレートをインポート部で切って展開した図で、上がカッターフェイスで下がテールとなっている。

(1) テールクリアランスの減少

図-5 より、以下のことがわかる。

- ①シールド機が右にカーブする場合には、テールクリアランスが、カー

表-3 シールド機の作用力 (kN,kN-m)

Case	要因	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
Case 0 (t_{TD} 0cm, E_R 50%)	f_1	1000	0	26	0	-500	0
	f_2	0	-8	0	-27	-1	0
	f_3	0	0	6443	2615	-829	0
	f_4	66	27	-5857	-49	280	1041
	f_5	-1066	-19	-612	-2539	1049	-1041
	ΣF	0	0	0	0	0	0
Case 1 (t_{TD} 2.5cm, E_R 50%)	f_1	1000	0	26	0	-500	0
	f_2	0	-4	0	-14	-1	0
	f_3	0	0	6443	2615	-829	0
	f_4	66	27	-5857	-49	280	1041
	f_5	-1066	-23	-612	-2552	1049	-1041
	ΣF	0	0	0	0	0	0
Case 2 (t_{TD} 0cm, E_R 0%)	f_1	1000	0	0	0	-500	0
	f_2	0	-2	0	-7	0	0
	f_3	0	0	6443	2615	-829	0
	f_4	67	26	-5446	-39	272	983
	f_5	-1067	-24	-997	-2570	1057	-983
	ΣF	0	0	0	0	0	0

ブ外側（左側）で増加し、カーブ内側（右側）で減少すること

②テールクリアランスに対応してシールドテールに作用する平均圧力が変化すること

③裏込注入固化厚が増加すると、その分テールクリアランスが減少し、ワイヤブラシによってシールドテールに

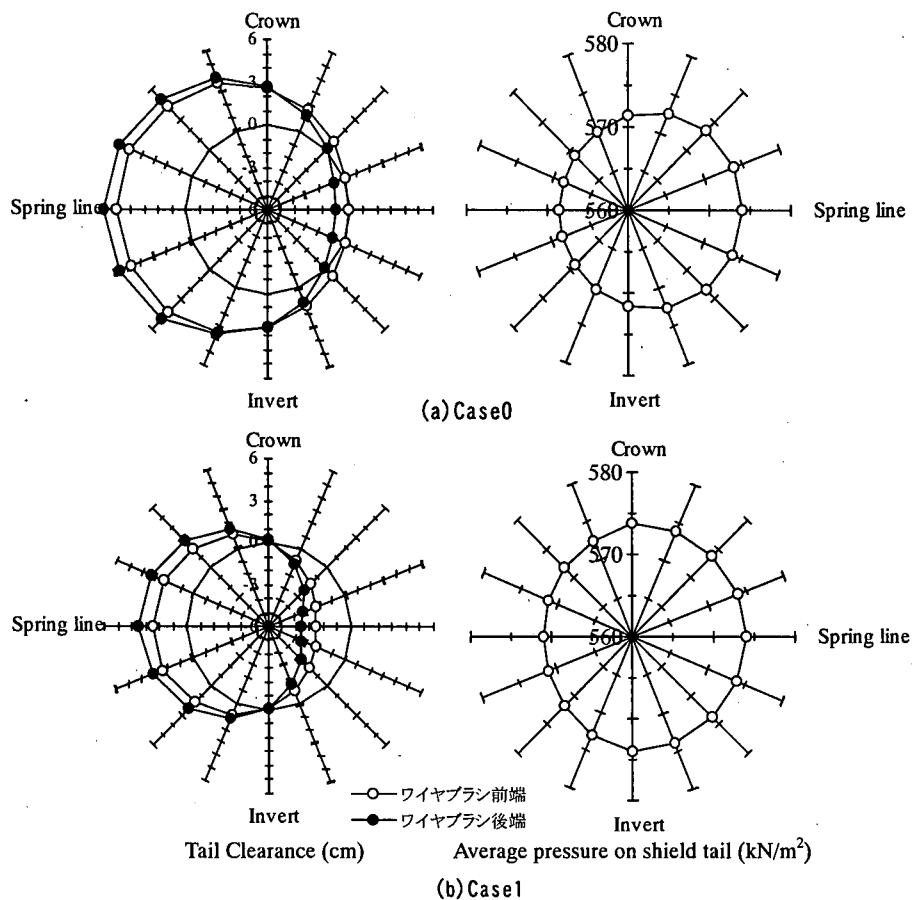


図-5 ワイヤブラシによってシールドテールに作用する圧力（テールから見た図）

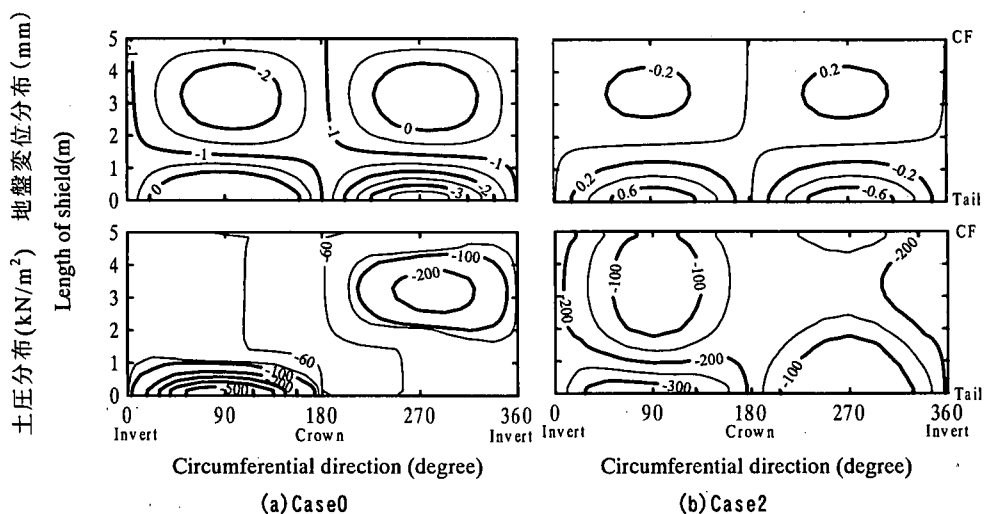


図-6 法線方向地盤変位分布と法線方向土圧分布

作用する平均圧力は増加するが、その増加は小さいこと

これらは、表-3 に示すように力の釣り合いの結果であって、幾何学的に合理的である。この結果、図-3、図-4 に示すように、裏込注入固化厚の増加に対して、シールド機の軌跡、シールド機の挙動の変化は小さくなったと考えられる。

上記より、裏込注入がテールクリアランス内部で固化し、テールクリアランスが減少する場合、ワイヤブラシによって発生するシールドテール作用力のシールド機の挙動へ与える影響は小さく、シールドテールとセグメントの競りによって発生するシールドテール作用力のシールド機の挙動へ与える影響が卓越すると考えられる。

(2) 余掘り領域の減少

図-6 より、以下のことがわかる。

- ①シールド機が右にカーブする場合には、CF 寄りの曲線内側のスプリングライン周辺、テールの曲線外側のスプリングライン周辺で地盤が受働状態となり、その反対側で主働状態となること
- ②法線方向の地盤変位に対応して、法線方向の土圧分布が発生すること
- ③余掘り有効率が減少すると、その分法線方向の地盤変位が 0 に近づき、法線方向の土圧分布がなめらかになること

これらは、表-3 に示すように力の釣り合いの結果であって、幾何学的に合理的である。この結果、図-3、図-4 に示すように、余掘り有効率が減少すると、シールド機の回転は抑制される。

また、図-4 より、上記の他に以下のことがわかる。

- ①余掘り有効率が小さい場合(Case2)と比較して、余掘り有効率が大きい場合、すなわち余掘り領域が大きい場合(Case0)には、 $\theta_{xT}=69\text{min}>0$ 、 $\theta_{yT}=3\text{min}>0$ となる。これは、シールド機軸がシールド機の軌跡より、カーブ内側、下向きとなっていることを意味していて、既往の経験則と整合している。
- ②余掘り有効率が小さい場合(Case2)と比較して、余掘り有効率が大きい場合(Case0)には、掘進距離 20m 位まで、シールド機の挙動は変動する。これは、余掘り領域が大きいために、シールド機が動きやすいこと、掘進距離 10m からシールド機シミュレーションを開始する時点で、力の釣り合いがとれていないためである。

5. 結論

本論文では、シールド機動力学モデルを用いて、裏込注入がシールド機の挙動に与える影響を、(1)テールクリアランスの減少、(2)余掘り領域の減少としてモデル化し、シールド機の挙動シミュレーションを行い、得られたシールド機の挙動を表すパラメータを比較検討することにより、裏込注入のシールド機の挙動に与える影響を評価した。得られた結論を以下に列記する。

(1) テールクリアランスの減少

裏込注入がテールクリアランス内部で固化し、テールクリアランスが減少する場合、ワイヤブラシによって発生するシールドテール作用力のシールド機の挙動へ与える影響は小さく、シールドテールとセグメントの競りによって発生するシールドテール作用力のシールド機の挙動へ与える影響が卓越する。

(2) 余掘り領域の減少

裏込注入がスキンプレート周りに回り込んだことにより発生する余掘り領域の減少は、シールド機のヨーイング・ピッチングを抑制する。

参考文献

- 1) 杉本光隆、Aphichat SRAMOON：施工実績に基づくシールド機動力学モデルの開発、土木学会論文集 No.763/Ⅲ-54,163-182,2001.3
- 2) 本川博他：R13m の急曲線の中折れシールドで施工、トンネルと地下 第 23 巻 11 号、pp.925-932,1992.
- 3) 社団法人地盤工学会：トラブル事例に学ぶ大深度地下構造物の設計・施工、pp.60-61,2001.