

インターラクティブシールド機シミュレータによる
シールド機挙動予測結果に関する現場技術者へのアンケート調査
QUESTIONNAIRE SURVEY ON PREDICTED SHIELD BEHAVIOR TO SKILLED SITE ENGINEERS
BY INTERACTIVE SHIELD SIMULATOR

佐藤 有美・小川原ゆりえ・杉本 光隆...

Yumi SATO, Yurie OGAWAHARA and Mitsutaka SUGIMOTO

Based on the construction records and the previous researches, the kinematic load model on shield, which can simulate the shield behavior theoretically, was proposed. To validate the newly developed model, the questionnaire surveys on shield response against shield operation were carried out to the site engineers of shield tunnelling. And furthermore, for the questionnaire survey, the interactive shield simulator was developed based on the proposed model. As a result, it was found that the simulated shield behavior against the shield operation had a good agreement with the site engineers' experience.

Key Words: shield tunneling machine, shield behavior, simulation, questionnaire survey

1. 開発の背景

シールドトンネルの建設では、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経験則を基にしているにすぎず、シールド機の挙動を理論的に表現できる力学モデルは未だ確立されていない。このため、①特殊断面シールド機の挙動予測・制御、②複雑な地層構造でのシールド機の制御、③シールド機の装備能力の設計等は、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。さらに、今後は、未知の条件となる大深度での施工や、浅深度での極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、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の制御手法への移行が必要であると考えられる。

力学モデルの開発にあたっては、理論的な考察とともに、実測データを用いて理論の合理性を検証することが重要である。そこで、モデルの検証を目的として、①パラメータスタディによる数値実験^{1),2)}、②実測データによるシールド機挙動予測³⁾、③現場技術者に対するアンケート調査、を行った。これらの内、現場技術者に対するアンケート調査を実施するに当たっては、シールド機動力学モデルに基づいてインターラクティブシールド機シミュレータ⁴⁾を開発するとともに、このシミュレータを用いて、各種シールド機操作に

キーワード シールド機、シールド機挙動、シミュレータ、アンケート調査

* 学生会員 長岡技術科学大学大学院 エネルギー・環境工学専攻

** 正会員 新潟県

*** 正会員 長岡技術科学大学大学院教授 環境・建設系

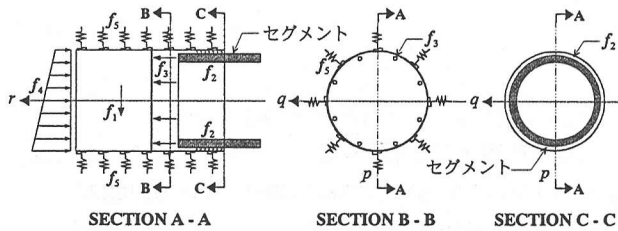


図-1 シールド機動力学モデル

対する各種シールド機の応答について、現場技術者の方に評価していただいた。その結果、シールド機動力学モデルによって求められたシールド機挙動は、現場技術者の方の経験や勘と、整合していることが明らかとなった。本論文では、新たに開発したインターラクティブシールド機シミュレータの概要と、そのアンケート結果について述べる。

2. シールド機動力学モデル

2.1 シールド機動力学モデルの概要

シールドトンネルに関する施工実績や既往の研究によると、掘進中のシールド機挙動に影響を与える条件は、過去に掘削した空間（以後、掘削領域と呼ぶ）、テールクリアランス、動的な力の釣り合い、カッターフェイス回転方向、シールド機のスライド、シールド機天端部での緩み等であると考えられる。そこで、これらの条件を考慮に入れた、円形単胴型シールド機に作用する荷重モデル（以後、シールド機動力学モデルと呼ぶ）¹²⁾を開発した。シールド機動力学モデルは、図-1に示すように、シールド機に作用する主要な外力（以後、作用力と呼ぶ） $f_1 \sim f_5$ で構成されている。本モデルを用いれば、地盤物性値の逆解析・シールド機の挙動予測・シールド機の制御を行うことができる可能性がある。

作用力のうち、スキンプレート作用力 f_5 は、スキンプレートに作用する地盤反力と、それによる摩擦力である。この地盤反力は、掘削領域からシールド機スキンプレートまでの法線方向距離 U_n に、図-2に示す U_n と土圧係数 K の関係を適用して求めた。ここで、静止土圧係数は $U_n=0$ における土圧係数 K 、地盤反力係数は $U_n=0$ における曲線の傾きとなる。なお、掘削領域表面の地盤変位は、地山が自立しない場合には U_n で、地山が自立する場合には図-3に示す矢印で表され、いわゆる接触問題となる。

作用力のうち、スキンプレート作用力 f_5 は、スキンプレートに作用する地盤反力と、それによる摩擦力である。この地盤反力は、掘削領域からシールド機スキンプレートまでの法線方向距離 U_n に、図-2に示す U_n と土圧係数 K の関係を適用して求めた。ここで、静止土圧係数は $U_n=0$ における土圧係数 K 、地盤反力係数は $U_n=0$ における曲線の傾きとなる。なお、掘削領域表面の地盤変位は、地山が自立しない場合には U_n で、地山が自立する場合には図-3に示す矢印で表され、いわゆる接触問題となる。

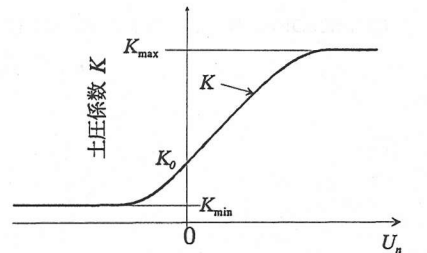
2.2 シールド機挙動予測手法¹⁾

シールド機挙動は時系列のシールド機位置と回転角で表される。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発揮される周方向動摩擦力の度合い（以後、カッタートルク抵抗係数と呼ぶ）をパラメータとした。

したがって、以下の6つのパラメータを未知数として、

- Δ_x : x 方向の移動距離の増分
- Δ_y : y 方向の移動距離の増分
- Δ_z : z 方向の移動距離の増分
- ϕ_y : ヨーイング角（方位角）
- ϕ_p : ピッチング角（下向き：正）
- α : カッタートルク抵抗係数

- f_1 : シールド機自重による作用力
- f_2 : シールドテール作用力
- f_3 : ジャッキによる作用力
- f_4 : 切羽作用力
- f_5 : スキンプレート作用力



掘削領域からスキンプレートまでの法線方向距離

図-2 掘削領域からスキンプレートまでの法線方向距離と土圧係数の関係

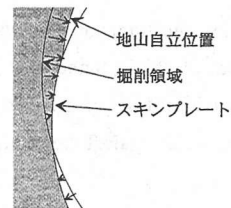


図-3 地盤変位（地山が自立する場合）

表-1 計測データ入力項目

作用力項目	計測項目
シールドテール 作用力	グリース圧
ジャッキによる 作用力	ジャッキ圧, 追従圧 稼働状況
切羽作用力	カッタートルク* カッターフェイス回転方向 カッターフェイス回転速度 掘進速度* 切羽圧 チェンバー内泥水密度
スキンプレート 作用力	マシン位置* マシン回転角* ジャッキストローク* コピーカッター長さ コピーカッター使用範囲

*：シミュレーションでは，計算結果．

式(1)に示す力の釣り合い式を解くことにより，掘削中のシールド機挙動を求めることができる．

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^5 F_i^M \\ \sum_{i=1}^5 M_i^M \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

なお，シールド機の挙動予測を行うためには，表-1に示すシールド機の制御・挙動に関する計測データ，トンネル諸元，地質縦断面図，地盤物性値，シールド機の諸元が必要となる．

3. インターラクティブシールド機シミュレータ

アンケート調査にあたり，シールド機動力学モデルの計算結果をビジュアルにインターラクティブに表示できる，シールド機シミュレータを開発した．

インターラクティブシールド機シミュレータは，シールド機挙動シミュレーションに必要なパラメータを設定した後，通常使用されているシールド機操作画面上でシールドジャッキ等の操作を行い，その設定値を基に，シールド機動力学モデルを用いて，シールド機挙動のシミュレーションを行い，その結果をリアルタイムにグラフィック画面に表示するシステムである．

インターラクティブシールド機シミュレータの画面構成を表-2に示す．

表-2 画面構成

パラメータ設定画面	プロジェクト設定画面	グラフィック表示画面	メニュー画面
	シールドマシン設定画面		データ表示画面
	地盤物性値設定画面		マシン位置偏差表示画面
	計算条件設定画面		平面線形表示画面
	数値微分パラメータ設定画面		縦断線形表示画面
	シールド操作初期値設定画面		変位分布表示画面
	地盤構造設定画面		土圧分布表示画面
シールド機操作画面	計画線形設定画面		3D 画面
			テールクリアランス表示画面

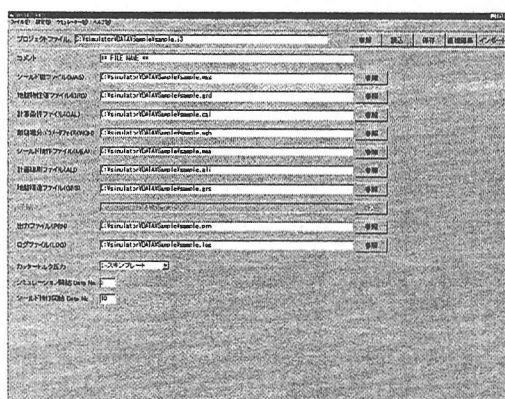


図-4 プロジェクト設定画面

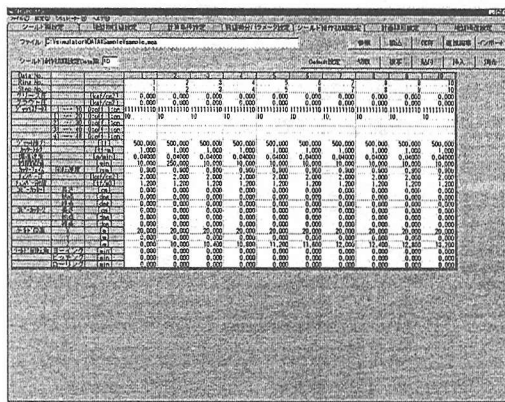


図-5 パラメータ設定画面

3・1 パラメータ設定画面

シミュレータを起動すると、メイン画面が表示される。この画面で、プロジェクト設定、パラメータ設定、シミュレーション起動を行う。図-4 に示すプロジェクト設定画面では、シミュレーションするために必要なファイル名を設定する。図-5 に示すパラメータ設定画面では、シミュレーションを行うために必要な諸データを設定する。



図-6 シールド機操作画面

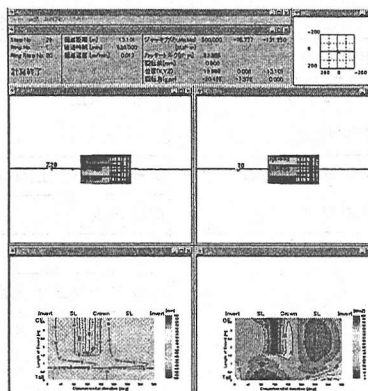


図-7 グラフィック表示画面の例

3・2 シールド機操作画面

メイン画面よりシミュレーションを選択すると、図-6 に示すシールド機操作画面が表示され、グラフィック表示画面を見ながら、シールド機を操作する要領で設定条件を入力できる。

3・3 グラフィック表示画面

(1) メニュー画面

メニュー画面では、[ファイル]、[画面]、[画面変換]、[その他]を指定できる。[ファイル]では、シミュレーション結果の読み込み・保存と、表示されている画面を保存・印刷する。[画面]では、表示する画面を選択する。[画面表示]では、画面の移動・拡大／縮小・回転・リセットを行う。[その他]では、より詳細に画面を操作できる。

(2) グラフィック表示

最初に表示される画面は、図-7 に示すように、シールド機軌跡の平面線形・縦断線形、地盤変位分布図、土圧分布図、および、シールド機の計画線形からの偏差、基本データの画面である。そのほかに表示できる画面は、図-8 に示す 3D 画面である。

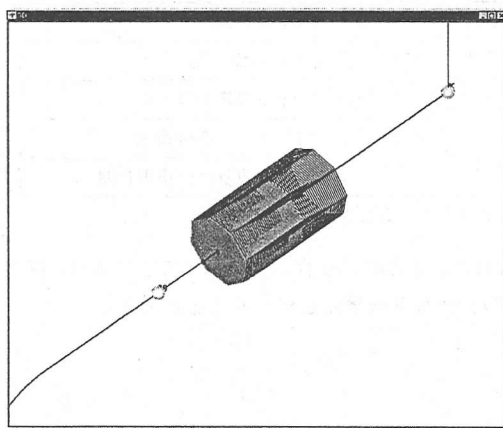


図-8 3D 画面の例

4. アンケート調査

上記のインタラクティブシールド機シミュレータを用いて、シールド機挙動に精通している技術者を対象に、シールド機挙動予測結果と施工実績との整合性について、アンケート調査を行った。回答していただいた現場技術者のシールド関係経験年数を図-9 に示す。

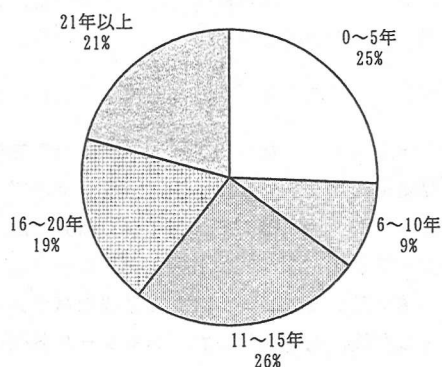


図-9 シールド関係経験年数
(回答者数 43 人)

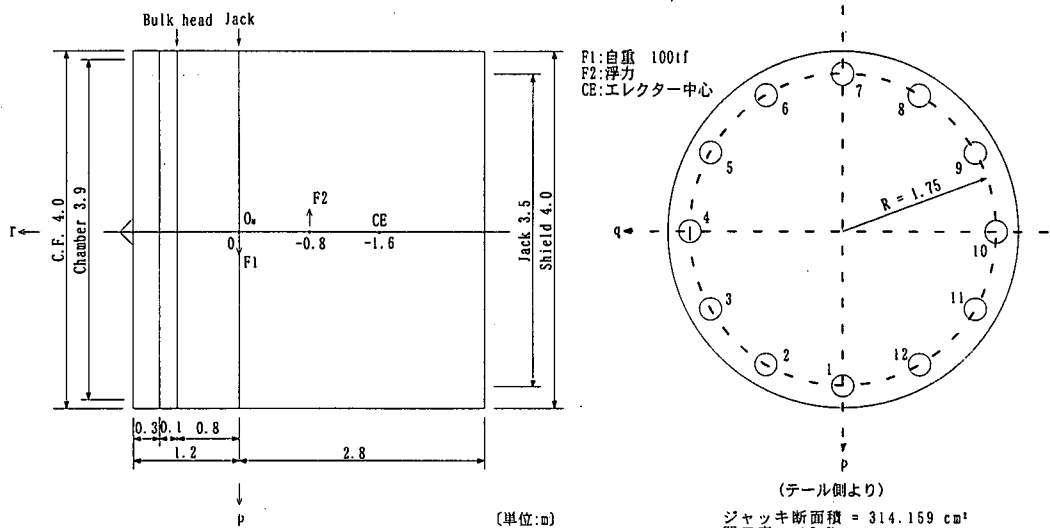


図-10 シールド機諸元

4・1 調査項目

アンケートにおけるシールド機制御項目は、

- ① ジャッキパターン
- ② 推力
- ③ カッター回転
- ④ コピーカッター
- ⑤ 泥水圧
- ⑥ 泥水密度

の6つで、これに対するシールド機挙動の評価項目は、

- ① トンネル線形（平面線形・縦断線形）
- ② シールド機方位角（ヨーイング角・ピッチング角）

の4つとした。評価は

○：経験と合っている

△：経験に合っているとも、異なっているとも言えない

×：経験と異なる

－：評価できない

で行った。なお、平均値は、○、△、×をそれぞれ1、0、-1点とし、－の回答を除いて求めた。

4・2 調査方法

シールド機操作に精通した技術者の前で、以下のように実際にインターラクティブシールド機シミュレータを操作し、シールド機挙動シミュレーションを行った。シミュレーションでは、シールド機諸元、トンネル縦断線形、地盤物性値を図-10、11、表-3のように想定した。

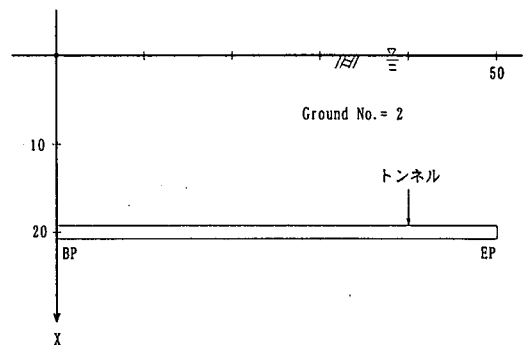


図-11 トンネル縦断線形

表-3 地盤物性値

地層	2
湿潤密度(kN/m³)	20.0
真比重	2.0
粘着力(kN/m²)	0.0
内部摩擦角(deg)	30.0
土圧係数 K_{H0}	0.500
K_{V0}	1.000
地盤反力係数 水平(MN/m³)	50
鉛直(MN/m³)	50
切羽土圧係数 a	30
b	1
地盤-鋼の摩擦 動摩擦係数	0.1
付着力(kN/m²)	0.0

①まず、計画線形に沿った10m分の掘削領域を設定した後、コピーカッターを10°～170°の範囲で5cm

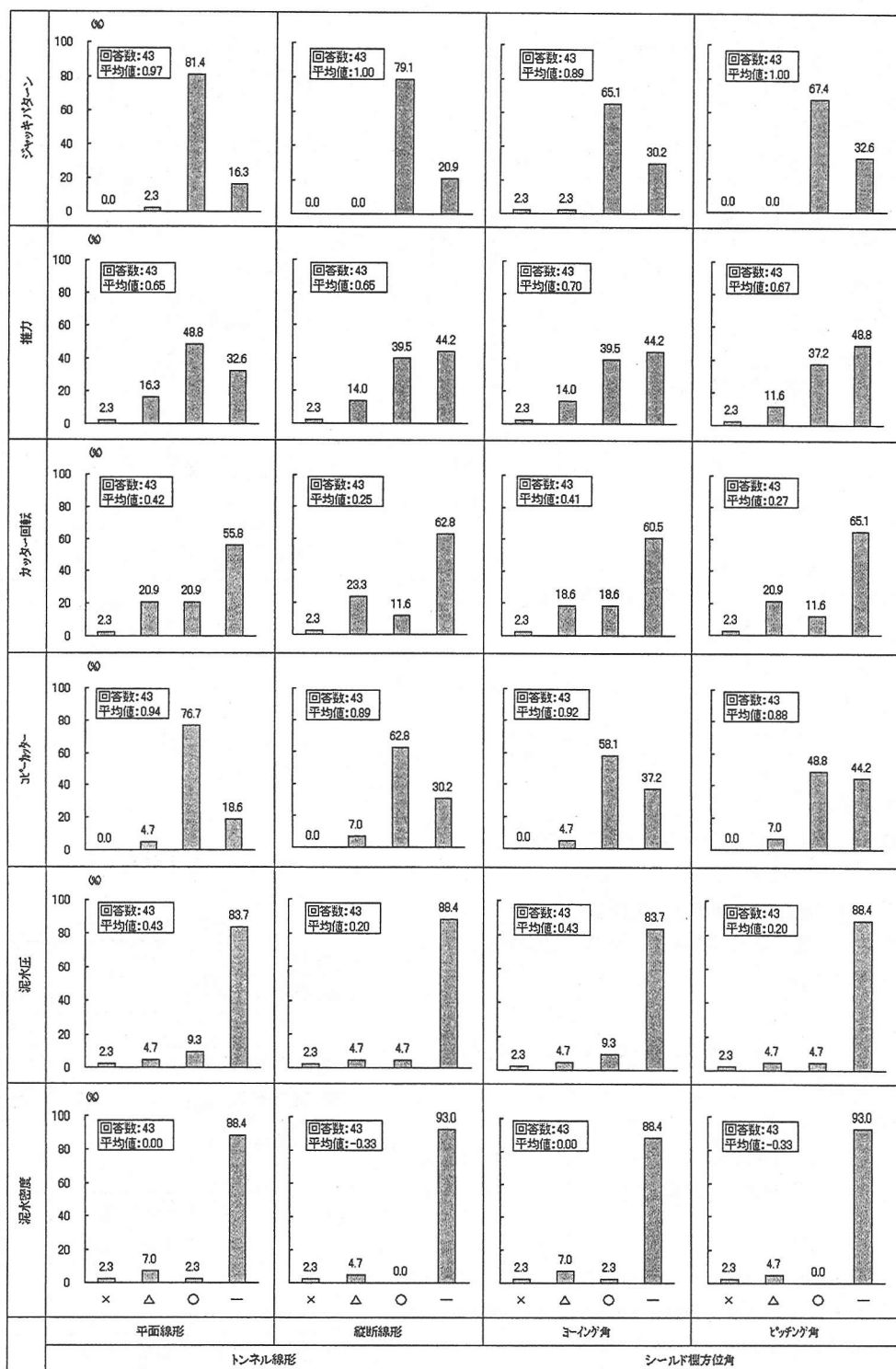


図-12 アンケート調査結果

表-4 アンケート調査結果のまとめ(単位：%)

評価項目 制御項目	トンネル線形										シールド機方位角									
	平面線形					縦断線形					ヨーイング角					ピッチング角				
	×	△	○	－	Ave.	×	△	○	－	Ave.	×	△	○	－	Ave.	×	△	○	－	Ave.
ジャッキパターン	0.0	2.3	81.4	16.3	0.97	0.0	0.0	79.1	20.9	1.00	2.3	2.3	65.1	30.2	0.89	0.0	0.0	67.4	32.6	1.00
推力	2.3	16.3	48.8	32.6	0.65	2.3	14.0	39.5	44.2	0.65	2.3	14.0	39.5	44.2	0.70	2.3	11.6	37.2	48.8	0.67
カッター回転	2.3	20.9	20.9	55.8	0.42	2.3	23.3	11.6	62.8	0.25	2.3	18.6	18.6	60.5	0.41	2.3	20.9	11.6	65.1	0.27
コピーカッター	0.0	4.7	76.7	18.6	0.94	0.0	7.0	62.8	30.2	0.89	0.0	4.7	58.1	37.2	0.92	0.0	7.0	48.8	44.2	0.88
泥水圧	2.3	4.7	9.3	83.7	0.43	2.3	4.7	4.7	88.4	0.20	2.3	4.7	9.3	83.7	0.43	2.3	4.7	4.7	88.4	0.20
泥水密度	2.3	7.0	2.3	88.4	0.00	2.3	4.7	0.0	93.0	-0.33	2.3	7.0	2.3	88.4	0.00	2.3	4.7	0.0	93.0	-0.33

伸ばし、推力を 5600kN に設定して、
10 分間隔でシミュレーションする。

②次に、アンケート調査のシールド
機制御項目を変化させ、シールド機挙
動をシミュレーションする。

③さらに、アンケート参加者の指示
に基づき、シールド機操作画面に条件
を設定し、シールド機挙動をシミュレ
ーションする。

表-5 経験年数別評価

制御 項目	経験年数	トンネル線形				シールド機方位角			
		×	△	○	－	×	△	○	－
推 力	0～5	0.0	31.8	40.9	27.3	0.0	31.8	40.9	27.3
	6～10	0.0	25.0	37.5	37.5	0.0	0.0	12.5	87.5
	11～15	0.0	9.1	50.0	40.9	0.0	9.1	45.5	45.5
	16～20	12.5	12.5	18.8	56.3	12.5	12.5	18.8	56.3
	21 年以上	0.0	0.0	66.7	33.3	0.0	0.0	55.6	44.4

設定したシールド機の操作条件と、

平面線形、縦断線形、地盤変位分布・土圧分布、マシン位置の計画線形からの偏差、などの画面に表示され
るシールド機挙動のシミュレーション結果を基に、アンケートに回答して頂いた。

4・3 アンケート調査結果

アンケート調査結果を図-12、表-4、表-5に示す。これらの図表より以下のことがわかる。

①ジャッキパターン、コピーカッターを制御して得られるシールド機挙動のシミュレーション結果は、ト
ンネル線形、シールド機方位角ともシールド機挙動に精通した技術者の経験と合致している。また、推力を
制御して得られるシールド機挙動のシミュレーション結果は、経験年数の長いシールド機挙動に精通した技
術者の経験と合致している。

②カッター回転（方向・回転数）、泥水圧、泥水密度を制御して得られるシールド機挙動のシミュレーシ
ョン結果によると、これらの制御項目は、トンネル線形、シールド機方位角にほとんど影響を与えない。一
方、アンケート調査では、「評価できない」が50%以上（特に泥水圧、泥水密度は80%以上）となった。ア
ンケートのコメント欄によると、実際の現場では、これらの制御項目とシールド機挙動の關係に着目してシ
ールド機操作を行っていないため、「評価できない」を選択したとのことである。これは、いいかえれば、
これらの制御項目がシールド機挙動に影響をほとんど与えないことを意味している。したがって、カッター
回転（方向・回転数）、泥水圧、泥水密度がトンネル線形、シールド機方位角にほとんど影響を与えないと
いう点で、シールド機挙動のシミュレーション結果は、シールド機挙動に精通した技術者の経験と合致して
いる。

①、②より、シールド機動力学モデルに基づくシールド機挙動のシミュレーション結果は、シールド機挙
動に精通した技術者の経験と合致しているので、シールド機動力学モデルの合理性を検証できたと考える。

さらに、シールド機動力学モデルとインタラクティブシールド機シミュレータについて、貴重な御意見、

御要望を頂いた。これらについては、今後の課題としたい。

5. まとめ

インタラクティブシールド機シミュレータの概要とシールド機挙動に精通した現場技術者へのアンケート調査結果を示した。これらにより、得られた結論を以下に列記する。

①インタラクティブシールド機シミュレータ

今まで開発してきたシールド機シミュレーションプログラムでは、リアルタイムにシールド機を操作できない、リアルタイムにビジュアルに連続的にシールド機挙動を把握できないといった問題点があった。しかし、インタラクティブシールド機シミュレータを用いることにより、シールド機操作に対するシールド機の応答や、シールド機スキンプレート周りの地盤変位分布や、法線方向土圧分布等が、リアルタイムにビジュアルに容易に把握できるようになるとともに、シールド機の応答をみて、シールド機の操作をインタラクティブに行えるようになり、シールド機挙動の把握やシールド機制御に関する検討が容易に行えるようになった。本システムによるシールド機周辺の変位分布図、土圧分布図および、テールクリアランスのリアルタイムの表示は、シールド機挙動を理解する上で、有効であると考えられる。

②現場技術者へのアンケート調査

ジャッキパターン・推力・コピカッターを制御して得られるシールド機挙動（トンネル線形・シールド機方位角）のシミュレーション結果は、現場技術者の経験と合致する。一方、カッター回転（方向・回転数）・泥水圧・泥水密度はシールド機挙動（トンネル線形・シールド機方位角）にほとんど影響を与えない。この点で、シミュレーション結果は現場技術者の経験と合致する。これらにより、シールド機動力学モデルによるシールド機挙動は、現場技術者の経験とよく整合していることが明らかとなった。

実際の施工への適用にあたっては、機械製作精度などのより詳細な情報の考慮や、パラメータの逐次同定のアルゴリズムの開発といったことが必要になると考えられる。

なお、本研究は、平成 11 年度運輸分野における基礎的研究推進制度「大都市部地下インフラストラクチャー整備のための動力学に基づくシールド機挙動の理論的・実証的解明」において行ったものである。

最後に、本研究のアンケート調査にご協力いただいた方々に、深甚な謝意を表すものである。

6. 参考文献

- 1) 杉本光隆, Sramoon A.: 施工実機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.673/III-54, pp.163-182, 2001.
- 2) 杉本光隆, Sramoon A.: 掘削領域を考慮したシールド機作用力モデルの提案, トンネルと地下, Vol.32, No.9, pp.797-804, 2001.9.
- 3) 杉本光隆, Sramoon.A., 小西真治, 佐藤豊: シールド機挙動のシミュレーションの研究, トンネルと地下, Vol.33, No.4, pp.47-53, 2002.4.
- 4) 杉本光隆, 金澤秀和, 佐藤有美, 小川原ゆりえ: シールド機動力学モデルに基づくリアルタイムシールド機シミュレータの開発, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.10, pp.303-306, 2000.11.