

中折れ式シールド機挙動モデルによる 現場計測データのシミュレーション

SIMULATION OF ARTICULATED SHIELD BEHAVIOR BY IN-SITU DATA BASED ON KINEMATIC SHIELD MODEL

杉本光隆¹⁾, アピチャート・サラムーン¹⁾, 清水孝之²⁾, 団 昭博³⁾, 小林 亨³⁾

Mitsutaka SUGIMOTO, Aphichat SRAMOON, Takayuki SHIMIZU, Akihiro DAN, Tooru KOBAYASHI

The kinematic load model for conventional shield, which can simulate the shield behavior theoretically, had been proposed, taking account of the construction records and the previous researches. And furthermore, the kinematic shield model for articulated shield was proposed, modifying this model. In this paper, to validate the newly developed model, the simulation of shield behavior was carried out by using the actual site condition data and the in-situ data on shield control during excavation, where the articulated shield was applied. The obtained results were compared with the measured one. As a result, it was confirmed that the predicted shield behavior has a good agreement with the actual one.

Keyword: kinematic shield model, articulated shield, simulation, in-situ data

1. はじめに

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。

こうした背景を踏まえ、著者らは、これまでに、シールド機動力学モデルによる単胴型シールド機挙動モデル¹⁾および中折れシールド機挙動モデル²⁾を開発し、数値実験を行うことにより定性的にモデルの妥当性を検証してきた。このうち単胴型シールド機挙動モデルについては、現場計測データを用いたシミュレーション³⁾を実施し、その妥当性を確認しているものの、中折れシールド機挙動モデルに関しては現場計測デー

1) 長岡技術科学大学 環境・建設系

2) 東京都第三建設事務所 工事第二課

3) 日本シビックコンサルタント株式会社 技術本部技術研究部

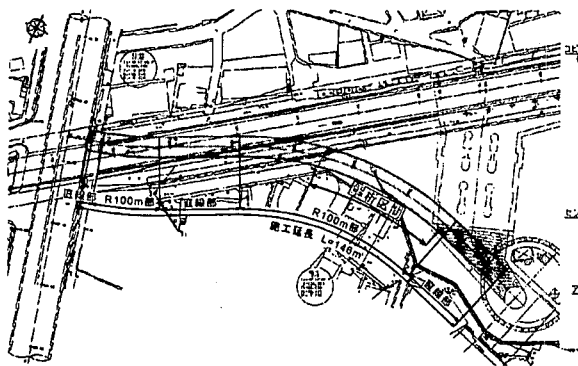


図-1 路線平面図

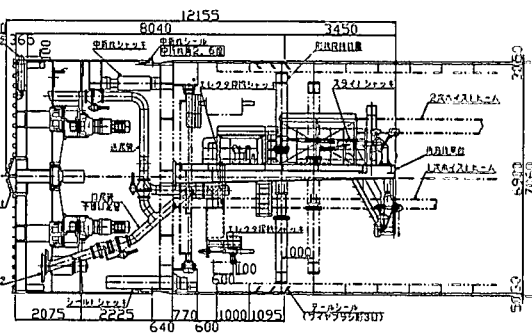


図-3 シールド機一般図

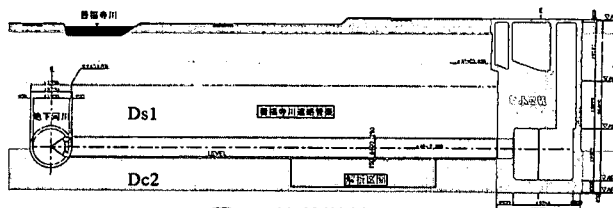


図-2 地質縦断面図

タによる検証を行っていない。そこで、本報告では、中折れシールド機挙動モデルを現場計測データに適用して、中折れシールド機挙動予測を行い、得られた結果を実測値と比較することにより、中折れシールド機挙動モデルの妥当性を検証することを目的とする。

2. 現場計測データ

(1) 現場概要

東京都山の手に位置する環状七号線地下調節池への流入施設として建設された善福寺川取水施設連絡管シールド工事を解析対象とした。路線平面図、地質縦断面図^{4), 5)}を図-1、図-2に、トンネル諸元、地盤物性値を表-1、表-2に示す。本シールドトンネルは、仕上り内径 6,400mm、施工延長 146m の二次覆工を省略した内水圧対応シールドトンネルで、R100m の左急曲線と R100m の右急曲線からなる S 字施工区間が全体の 50%以上を占めている。また、本シールドトンネルの土被りは 35~39m、トンネル中心での地下水位は 0.34MPa 程度で、通過土質は N 値 50 以上の上総層群舎人層の細砂層 Ds1 および固結シルト層 Dc2 である。

また、図-3に示すように、本現場で用いられたシールド機は、泥水式中折れシールド機(最大中折れ角 2.6°)で、曲線部は中折れ機構、コピーカッター、ジャッキ操作により発生する水平モーメントを用いて施工している。

(2) 計測データ

解析対象とした 27-90 Ring の 20cm おきのシールド機の制御・挙動に関する計測データを図-4に示す。ここで、 F_{3r} 、 M_{3p} 、 M_{3q} はそれぞれジャッキ推力、ジャッキ水平モーメント(右向き: 正)、ジャッキ鉛直モ

表-1 シールド工事諸元

工 法	泥水式シールド工法
施工延長	146m
平面線形	左・右カーブ半径 100m
縦断線形	水平
外径	6.900m
内径	6.400m
厚さ	0.250m
幅	一般部 1.000m 曲線部 0.750m
外径	7.060m
長さ	8.405m
土被り	35~39m
主な通過土質	上総層群舎人層 細砂、固結シルト

表-2 地盤物性値一覧

地層	Ds1	Dc2
湿潤密度(kN/m ³)	17.9	17.8
粘着力(kN/m ²)	0	163.0
内部摩擦角(deg)	34.0	0
土圧係数 K_{H0}	0.441	0.750
K_{V0}	1.000	1.000
地盤反力係数 水平(MN/m ³)	365.4	866.6
鉛直(MN/m ³)	365.4	866.6
切羽土圧係数 a	23.8	23.8
b	1	1
地盤-鋼の摩擦 動摩擦係数	0.02	0.02
付着力(kN/m ²)	0.0	0.0
換算N値	100	1256

ーメント（下向き：正）を， CT はカッタートルク（テールより見て反時計回り：正）を， ϕ_y ， ϕ_p ， ϕ_r はそれぞれヨーイング角（方位角に同じ），ピッチング角（下向き：正），ローリング角（テールより見て時計回り：正）を， θ_{CH} は水平中折れ角（前胴右向き：正）を， v_s ， σ_m ， γ_m は掘進速度，切羽圧，チャンバー内泥水密度を示している。また， CCR はコピーカッター範囲で，インバートを0度としてテールより見て時計回りの角度で示してある。なお，鉛直中折れ角は0度であった。

また，シールド機位置は，各リング掘削終了時に手動で計測されたテールクリアランス・ジャッキストローク，自動計測されたヨーイング角・ピッチング角・ローリング角・水平中折れ角，および，セグメント出来形から求めた。

3. 解析方法

本解析に用いたシールド機動力学モデル⁹⁾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を考慮できるモデルで，図-5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。

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-6に示す U_n と土圧係数 K の関係を適用して求められる。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。また，参考までに，シールドセグメントの設計に用いられる地盤反力係数⁹⁾の考え方を基に得られる U_n と土圧係数 K との関係を図-6に示す。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土圧係数 K が K_{min} に至る U_n で表され，いわゆる接触問題となる。

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）を未知パラメータとし，以下の6つのパラメータを未知数とした。

- Δ_x : x 方向の移動距離
- Δ_y : y 方向の移動距離
- Δ_z : z 方向の移動距離
- 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

さらに，中折れシールド機の場合には，中折れ点を中心として前胴と後胴が水平・鉛直方向に折れるので，以下の手順で中折

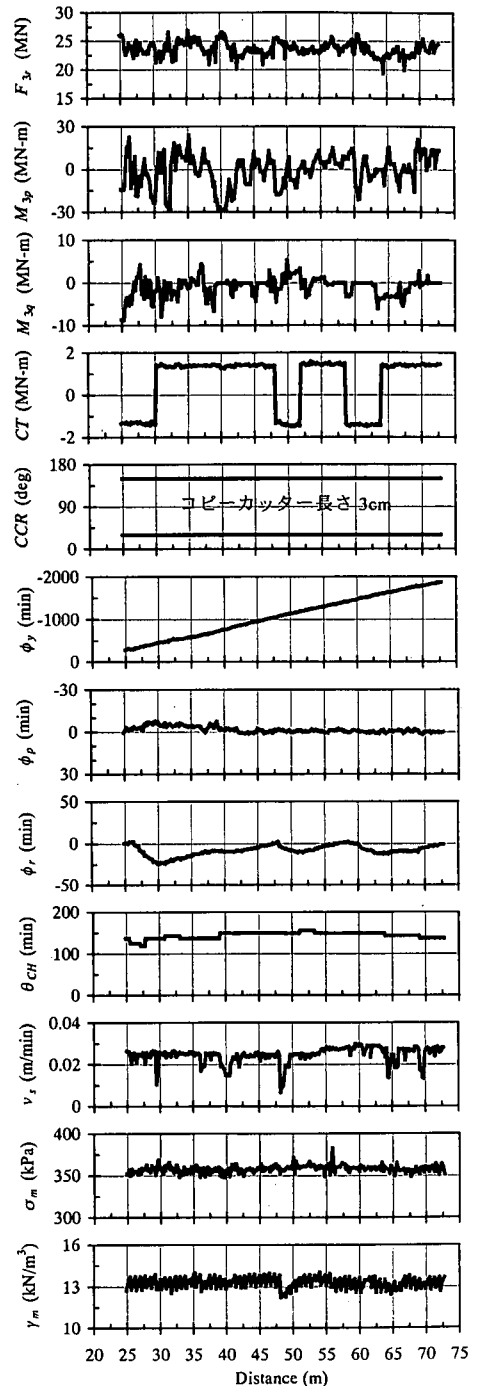


図-4 計測データ

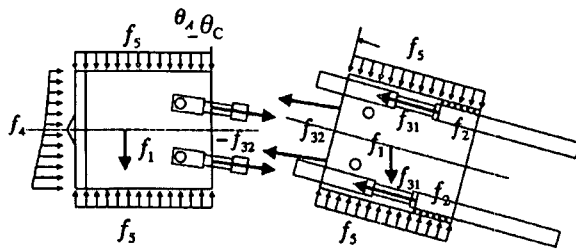


図-5 中折れ式シールド機動力学モデル

れシールド機の挙動予測を行った。

- ①中折れ点，水平中折れ角，鉛直中折れ角を基に，前胴・後胴の幾何学的位置関係を求める。
- ②前胴・後胴をそれぞれ独立した単胴型シールド機とみなし，単胴型シールド機挙動モデルにより前胴・後胴毎に作用する外力を求める。
- ③それらを合計し，式(1)に示す力の釣り合い式を解くことにより，シールド機挙動予測を行う。

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

なお，シールド機の挙動予測を行うためには，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。

4. シールド機挙動予測

(1) 解析条件

地盤反力の大きさは掘削領域から現在のシールド機スキンプレートまでの法線方向の距離 U_n により定まるため，シールド機の挙動に支配的な影響を与える。このため，シールド機的位置・回転角，コピーカッター長さ和使用範囲を用いて，27 Ring から掘削領域（長さ 23.25m）を設定した後，20cm おきのシールド機の制御データを用いて，本掘進を開始した 58 Ring から 90 Ring まで（長さ 24.0m）のシールド機の挙動予測を行った。

(2) シールド機挙動

図-7 にシールド機軌跡を，図-8 にシールド機のヨーイング角 ϕ_y ，ピッチング角 ϕ_p ，掘進速度 v_f の時系列変化を示す。計算値と実測値の誤差は，縦断線形で最大 2cm，平面線形で最大 11cm（90Ring），ヨーイング角で最大 25min（90Ring），ピッチング角で最大 8min，掘進速度で最大 2cm/min であり，本モデルによるシールド機の挙動予測結果は実機の挙動と整合していた。平面線形とヨーイング角で誤差が大きかったのは，シミュレーションでは距離とともに誤差が累積していくこと，および，計測された平面線形の精度が悪かったためであると考えられる。後者については，①解析対象区間が曲線部で，図-4 に示すように左向きジャッキ水平モーメントを作用させて掘進していること，②テールクリアランスが計測されたリング掘削終了時には，ジャッキ水平モーメントが作用していないために，力の釣り合いがとれるまでシールド機が右回りに回転すること，③計算値はジャッキ水平モーメントが作用している掘進状態を想定していること，に起因する。

- 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
- θ_c : 中折れ角

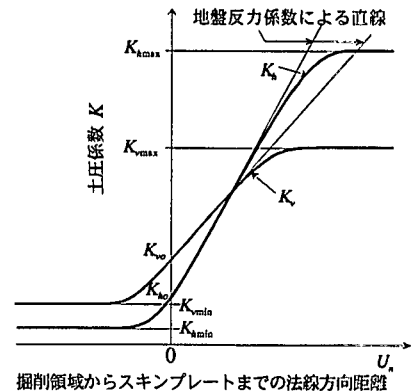


図-6 掘削領域からスキンプレートまでの法線方向距離と土圧係数の関係

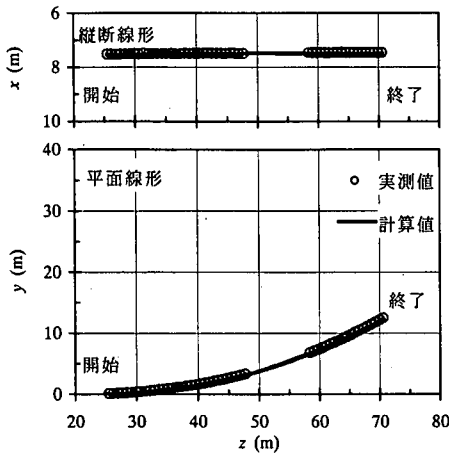


図-7 シールド機軌跡

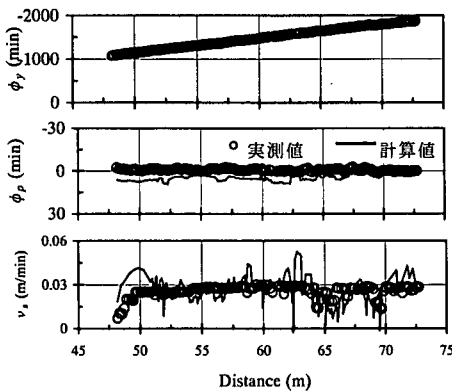


図-8 シールド機のヨーイング角，ピッチング角，掘進速度の時系列変化

(3) シールド機作用力

図-9 に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の距離分布（外向き：正）の例を，図-10 にスキンプレートに作用する法線方向の土圧分布の例を，インバート部で切断したスキンプレート展開図上に示す。図-9 より，以下のことがわかる。

- ①前胴・後胴ともに，左側（曲線内側）のスプリングライン周辺の胴中央付近の $|U_n|$ が，胴端部の $|U_n|$ より小さくなっている。これは力の釣り合いの結果であって，トンネル平面線形が左カーブしていること，前胴が左に中折れしていることに対応している。
- ②前胴・後胴ともに，スプリングライン上の左右の U_n の合計は，約-3cm となっている。これは，コピーカッター長さに対応している。また，30 度，170 度付近で，コンターが密になっている。これは，コピーカッター使用範囲 30-150 度に対応している。
- ③左右のスプリングラインに沿う U_n に凹凸がある。これは，シールド機蛇行のためである。

また，図-10 より，以下のことがわかる。

- ①左側（曲線内側）のインバート部や天端部の胴中央付近，および，右側（曲線外側）の胴端部付近で大き

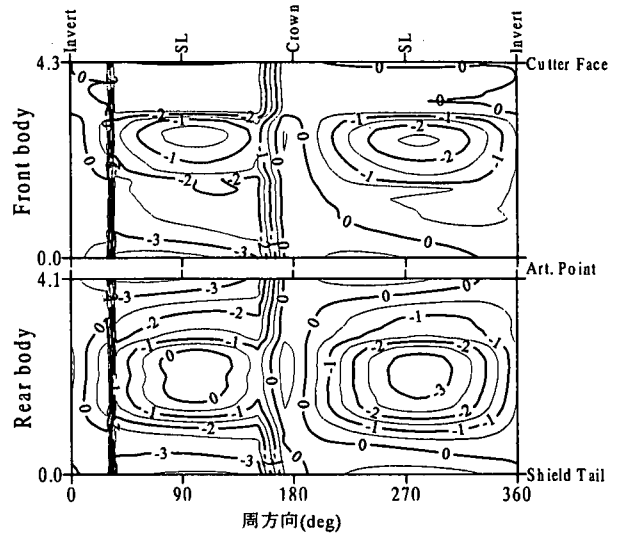


図-9 掘削領域からスキンプレートまでの法線方向距離 (cm) (距離 65.534 m)

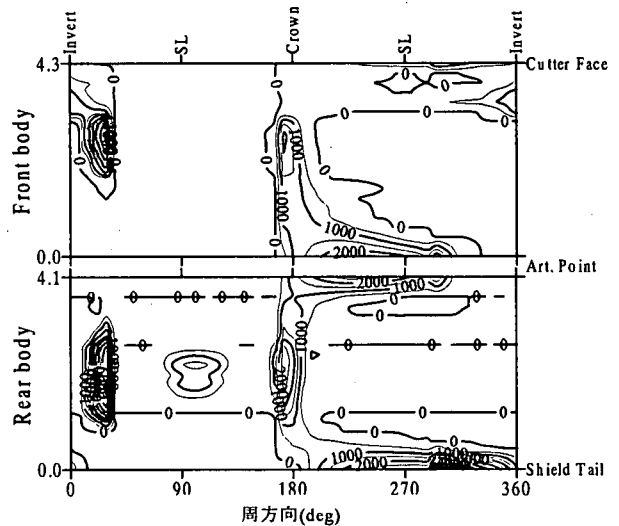


図-10 法線方向有効土圧分布 (kN/m²) (距離 65.534 m)

い地盤反力（法線方向土圧）が作用している。これは、図-9 に示すようにシールド機が地盤を押し込み、地盤が受働状態になっているためである。

②地盤反力がほとんど 0 になっている部分がある。これは、図-9 に示すように掘削領域とシールド機スキンプレートの上に隙間ができて、地山が自立しているためである。

上記より、本モデルは実機の挙動を適切に表現できること、コピーカッターによる余堀り部分を含む掘削領域と前胴・後胴の幾何学的位置関係は、地盤反力を規定し、シールド機の挙動に大きな影響を与えることがわかる。

5. おわりに

シールドトンネル現場における施工実績を考慮して開発した単胴型シールド機動力学モデルを拡張し、中折れ式シールド機動力学モデルを開発した。本報告では、中折れ式シールド機で得られた現場実測データを同モデルに入力して中折れ式シールド機の挙動予測を行なうとともに、得られた結果を施工実績と比較することにより、同モデルの合理性を検討した。

中折れ式シールド機の挙動予測結果は施工実績と整合していた。また、この結果は、地盤反力を規定する掘削領域（コピーカッターによる余堀り部分を含む）と前胴・後胴の幾何学的位置関係がシールド機の挙動に大きな影響を与えることを示し、既往の施工実績と整合している。これらの結果から、本モデルは実際の中折れ式シールド機の挙動を適切に表現できると考えられる。

したがって、いろいろな施工条件での現場実測データを用いて、本モデルによる中折れ式シールド機の挙動予測を行い、入力パラメータの精度を高めていけば、本モデルを用いてシールド機の挙動予測を行うことにより、複雑な地層構造でのシールド機の制御やシールド機の装備能力の事前検討の精度を高めることができるようになると思われる。

また、今後は、線形の変化する非定常状態での現場実測データを用いて、本モデルの検証をさらに行っていきたいと考えている。

最後に、貴重な現場データ等を提供していただいた現場関係者に深甚なる謝意を表すものである。

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) 山口宇玄、杉本光隆、A.Sramoon：中折れシールド機挙動モデルの開発、第 56 回土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅲ、Ⅲ-B075, 2001.
- 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に関する研究、トンネルと地下、Vol.33, No.4, pp.47-53, 2002.4.
- 4) 応用地質：神田川・環状七号線地下調節池（第二期）善福寺川取水施設工事（その 3 - 2）報告書, 2000.8.
- 5) ダイヤコンサルタント：神田川・環状七号線地下調節池（第二期）善福寺川取水設備工事（その 2）にともなう土質試験委託（その 2）報告書, 2000.8.
- 6) 土木学会：トンネル標準示方書(シールド工法編)・同解説, 土木学会, pp.42-47, 1996.