

急曲線部におけるシールド挙動の事前予測と事後解析の比較

長岡技術科学大学 学 〇野田裕太郎, 高見和稔, Huynh le chu an 正 杉本光隆

1. はじめに

都市の過密化に伴い、都市機能の拡充や環境整備に対する要求などから、地上空間を補う資源として地下空間が注目され、東京を始め大阪、名古屋など各地域の中心都市に鉄道・道路・地下河川・上下水道などのネットワークを構築するための地下開発が望まれるようになった。しかし、トンネル掘削工事における急曲線施工は、周辺地盤の変状や地表面の過大な沈下といった問題を引き起こす可能性があり、技術的に困難な施工である。

谷沢川分水路工事(図-1)では、発進直後と到達直前に曲線半径 $R=20\text{m}$ の急曲線が存在するため、シールド掘進精度を確保する必要がある。また、急曲線ではジャッキ着地点を偏心させて掘進するため、セグメントに偏圧が生じやすく、さらに、余掘り量が大きいため、セグメントはジャッキ推力の影響を受けやすく、過大な応力の発生による損傷、継手の目開きによる漏水が生じやすい。このようなことから、シールドの方向制御やセグメントへの影響等の詳細な事前予測を行い、掘進計画に反映させるとともに、急曲線施工が可能であることを確認することとした。

2. 解析対象

2.1 対象現場

対象現場は、図-1に示す $R=20$ の急曲線区間である。シールド機の発進直後と到達直前に曲線半径 $R=20\text{m}$ の急曲線 ($R/D=3.2$, D : シールド外径 6.25m) が存在する。高密度な市街地で、交通量が非常に多い幹線道路直下での施工であることが現場の特徴である。

2.2 シールド機

使用するシールド機諸元は以下のとおりである。
シールド機: 泥土圧式シールド(中折式)
シールド機外径: 6.25m
セグメント外径: $6.1\sim 6.03\text{m}$
施工延長: 3205.5m

3. 解析方法

シミュレーションに必要な入力データは大きく分けて以下の8つである。

- ①シールド機諸元: マシン半径, 自重, 重心など
- ②地盤物性値: 静止土圧係数, 地盤反力係数など
- ③計算条件: 解析メッシュ(要素)の数など
- ④計測精度
- ⑤シールド掘進管理条件: ジャッキ力, 中折れ角, コピーカッター長さ・使用角度など



図-1 解析対象線形

- ⑥計画線形：曲線半径，勾配など
 - ⑦地層構造：地下水位，各地層の位置座標など
 - ⑧セグメント諸元：セグメント割付，半径，幅など
- これらのうち，「シールド掘進管理条件」は以下のようにして定めた。

1) シミュレーションの計算点（切羽側セグメント中心位置）におけるトンネルの位置と向き：上記の⑥計画線形を用いて求める。

2) 中折れ(角度，向き)，コピーカッター(長さ，範囲)：
①シールド機諸元，⑥計画線形，および，1) で求めたシミュレーション計算点におけるトンネルの位置と向きを基に，三次元幾何学条件から求める¹⁾。

3) ジャッキ力：上記の⑤以外のデータと⑤シールド掘進管理条件に2) で求めた中折れ角度，コピーカッター(長さ，範囲) および，想定する掘進速度や，切羽圧力，裏込め注入圧等のその他シールド掘進管理条件を設定し，シールド機動力学モデル²⁾により順解析を行い，その結果得られる不釣り合い力を，ジャッキ力(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)とする。

4) シールド機挙動シミュレーション：3) で求めたジャッキ力を⑤シールド掘進管理条件に設定し，シールド機挙動シミュレーションを行う。

5) シールド機挙動の検討：シールド機挙動(位置，回転角，掘進速度)について解析値と計画値が一致するように，ジャッキ力，コピーカッター(長さ，範囲)を調整する。

6) 掘進可能性の検討：上記で得られたジャッキ力，中折れ角，コピーカッター長さが，シールド装備能力内であることを確認する。

4. 事前予測結果

シールドマシン発進直後にある急曲線区間のシールド挙動の事前予測結果を図-2，図-3にそれぞれ示す。事前予測では「3. 解析方法」に従って，シールド機挙動シミュレーションを繰り返し行い，計画値と解析値が一致するよう，掘進管理条件を求めた。

表-1に解析ケースにおける操作条件と制約条件を示す。ここで制約条件を有する操作条件は，コピーカッター長さ，中折れ角度，ジャッキ力，ジャッキモーメントである。また，掘削可能な条件は，上記の制約条件を満たし，平面曲線半径解析値が計画値以下で

あることである。

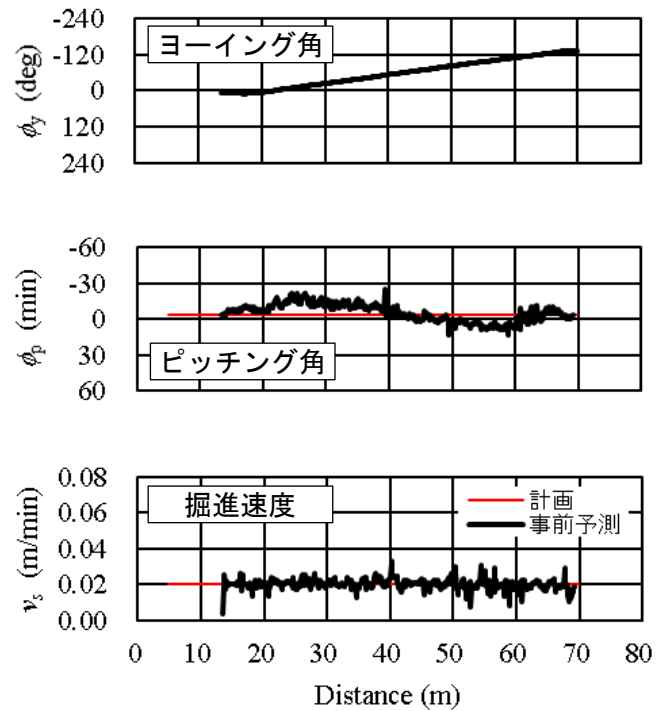


図-2 シールド挙動の事前予測結果

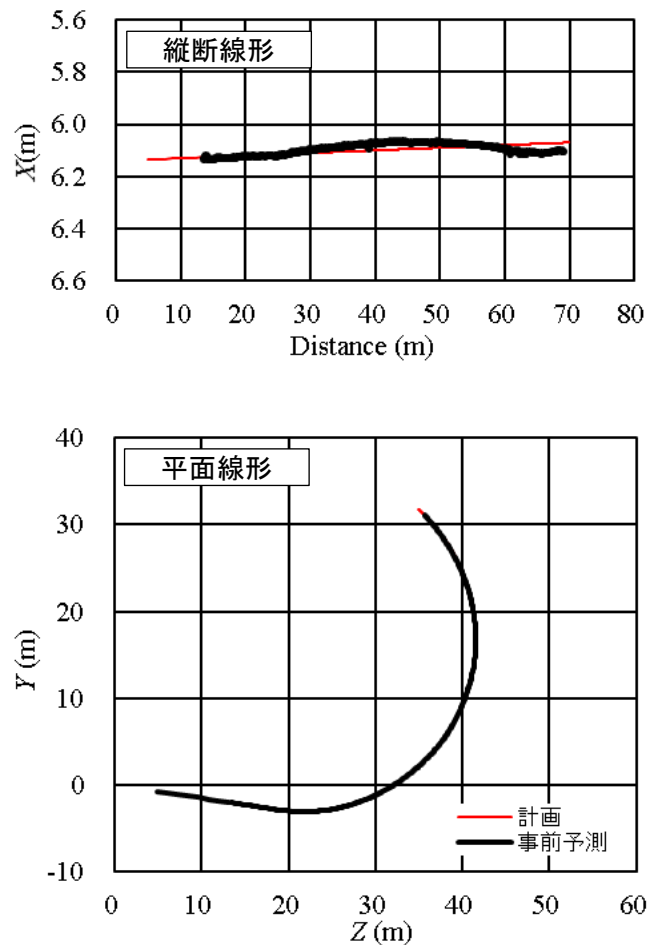


図-3 シールド軌跡の事前予測結果

表-1 に示すように、解析ケースで全ての制約条件を満たすことから、本解析条件を基にすると、適切にシールド機の掘進管理を実施すれば、当該シールドトンネル区間を掘削することは可能であると判断した。

5. 事後解析結果

5.1 入力データの作成

現場施工終了後、現場実測データを基に設定したシールド操作データを、シールド機力学モデルに入力し、シールド機挙動シミュレーションを行い、シールド機挙動の実測値と解析値が一致するように地盤条件などを検討した。シミュレーションでは、連続掘進を前提としているので、シールドが停止している状態および掘進開始直後、掘進終了直前などの異常値を含むデータを削除する必要がある。現場実測データと、異常値を削除したデータの例を図-4、図-5に示す。シールド機挙動シミュレーションでは、異常値を削除したデータを基に、掘進距離間隔（ステップ）を5cmとした解析用計測データを用いた。

5.2 パラメーターの調整

シミュレーションは、ステップ毎にシールド操作条件（ジャッキ力やコピーカッター使用条件など）の実測値を入力しているため、線形を合わせるためには、まず掘進速度を合わせる必要がある。そこで事後解析では、掘進速度が合うように切羽作用力を調整した。切羽作用力 F_4 はマシン軸方向に作用する切羽水圧と切羽有効土圧で構成され、切羽有効土圧はカッタービットの貫入抵抗・切羽抵抗²⁾により次式で表される。

$$F_4 = \sum A_j (\sigma_w + \sigma_n') \quad (1)$$

$$\sigma_n' = \left(a \frac{v_s}{f \cdot r_i} + b \right) \sigma_{n0} \quad (2)$$

ここで、

A_j : 計算点切羽面積

σ_w : 掘削時 CF 法線方向水圧

σ_n' : 掘削時 CF 法線方向有効土圧

σ_{n0}' : 静止時 CF 法線方向有効土圧

v_s : シールド機の世界度

f : CF 回転速度

r_i : 計算点の半径

表-1 各操作条件における制約条件の確認

操作条件	単位	予測結果	制約条件
最大コピーカッター長さ	(mm)	222	300
最大中折れ角	(deg)	12.250	13.000
最大ジャッキモーメント	(kN-m)	6168.47	31358.88
ジャッキ力	(kN)	9107.50	38430.00

注：シールドジャッキ 60%使用時を想定。

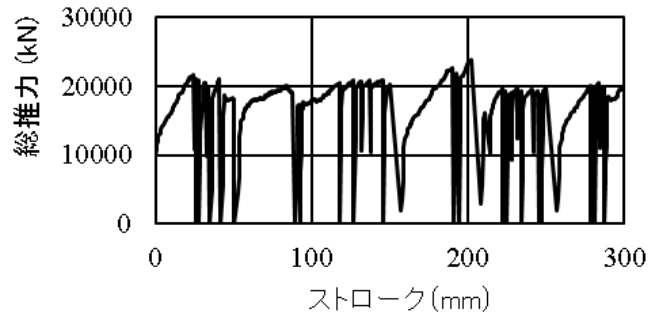


図-4 現場計測データ（異常値削除前）

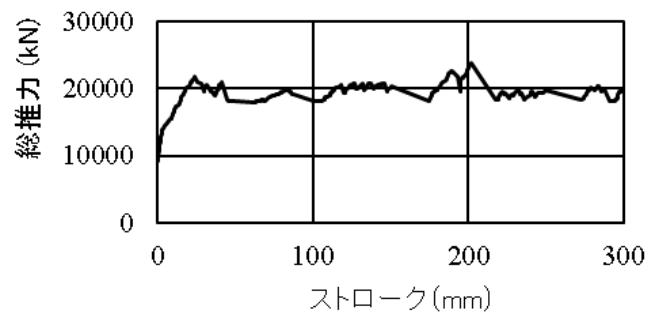


図-5 現場計測データ（異常値削除後）

a : 切羽土圧の調整係数

b : $v_s = 0$ における切羽土圧の調整係数

(2)式において主な変数は a と v_s のみであることから、 a を変化させて掘進速度 v_s を調整した。

また、実現場では余掘部で土砂の取り残しが発生する。そのため現場で設定しているコピーカッター長さや全周余掘り長さより、実際に掘削されている余掘り範囲の方が小さくなる。このため、本解析では全周余掘り有効率EREとコピーカッター長さ有効率ECCを用いて、実際の余掘り範囲を推定した。それぞれの有効な長さは現場データに有効率を乗じた値である。

事前解析と事後解析において設定した a 、ERE、ECCの値を表-2に示す。切羽土圧の調整係数 a については、事前解析で想定した30が事後解析で800と

なったのは、事前解析で想定した地盤より実地盤の方が硬質で、ジャッキ推力実測値が想定より大きくなったため、掘進速度実測値の下で切羽作用力を大きくすることが必要だったためである。また、ERE、ECCについては、事前解析では想定した全周余掘り、コピーカッター長さが有効長であるのに対して、事後解析では実測値で、掘り残し等を考慮に入れて有効長とすることが必要だったためである。

5.3 解析結果

シールド挙動・軌跡の実測値と解析値を、それぞれ図-6、図-7に示す。

これらの図より距離程 60m 近傍で、ピッチング角の解析値が実測値より約 20min 程上向きになり、水平面内におけるシールド軌跡の解析値が実測値よりやや曲線外側になっているが、解析値は実測値とおおむね整合していると考えられる。

6. まとめ

事前予測の結果、本現場条件では、シールドの装備能力を用いて、計画線形を施工可能と判断した。

さらに本研究では、実測されたシールド掘進条件を用いて事後解析を実施し、実測データと比較することにより、モデルの妥当性を確認した。さらに、事前解析、事後解析で用いた切羽土圧の調整係数 α 、余掘り有効率 ERE、ECC を比較し、その違いを検討した。今後は、この検討結果を用いて、到達立坑近傍の急曲線でシールド挙動解析を実施し、シールド制御条件の精度を高めたいと考えている。

参考文献

- 1)中村良平, 中島千博, 杉本光隆: 三次元の幾何学的条件による中折れシールドの制御手法, 第 66 回土木学会年次学術講演会講演概要集 III, III-113, 2011.9.
- 2)杉本光隆, A. Sramoon: 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, 2001.3.

表-2 修正パラメーター

	α	全周余掘り有効率(ERE)	コピーカッター長さ有効率(ECC)
事前予測	30	1	1
事後解析	800	0.5 (下部30度は1.0)	0.5

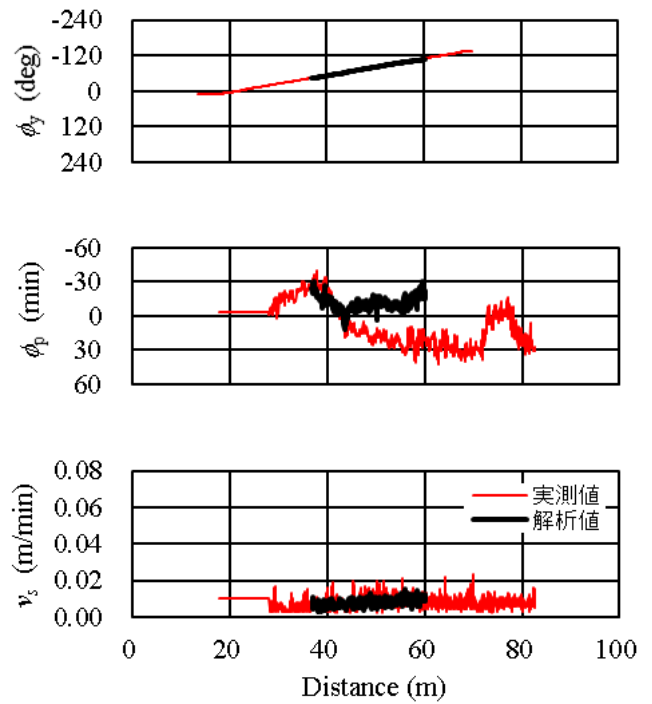


図-6 シールド挙動の事後解析結果

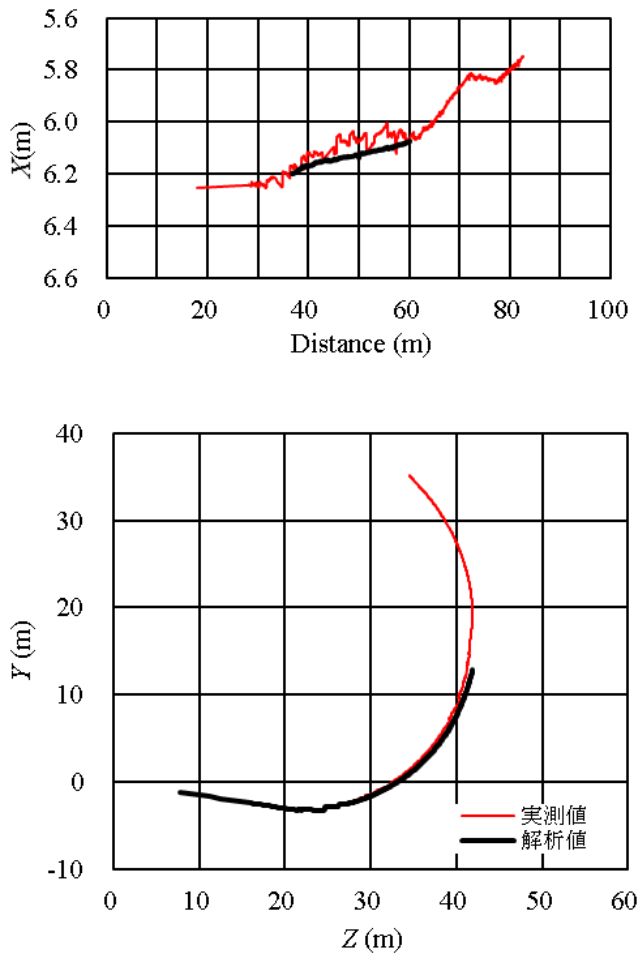


図-7 シールド軌跡の事後解析結果