

シールド機テール部に作用する施工時荷重の検討

地盤工学研究室 川崎 裕士
指導教官 杉本 光隆

1. はじめに

今までの研究により、中折れシールド対応の動力学モデルは、実挙動の再現が可能であるという結論を得ている。しかし、同解析ではテールクリアランスが実測値と一致せず、テール部の施工時荷重の影響について、十分に解析に反映されているとは言えない。そこで、本研究では、グリースの流動抵抗、ワイヤーブラシの作用位置の移動および裏込めの回り込み固化によるワイヤーブラシのバネ値の増加による影響を新たな要因としてモデルに取り込み、既往のシミュレーションを再検証し、施工時荷重としてテール部に作用する外力を明確にすることを目的とする。

本研究の手順を以下に示す。

実際の状況に沿った形でグリースの流動抵抗、ワイヤーブラシの作用位置の移動および裏込めの回り込み固化によるワイヤーブラシのバネ値の増加による影響を考慮できるようにシールド機動力学モデルを改良する。

中折れシールドに関する既往の解析結果を用い、パラメトリック・スタディーを行う。

実測データにより、これらの要因がシールド機挙動に及ぼす影響、及びテール部に作用する施工時荷重を解明する。

2. テール部に作用する施工時荷重のモデル化

2.1 グリースの流動抵抗

シールドが掘進すると、スキンプレート厚、テールクリアランスおよび余掘り量に応じ、テールボイドが発生する。これを放置すると、地山の応力開放が進み、周辺地盤に変状をきたすため、掘進後はすみやかにグラウトの充填が行われる。この裏込注入の回り込みや地下水の流入を防ぐために、テール部のワイヤーブラシ間にグリースを補充し、シールしているが、図 1.2

に示す急曲線施工時や拡径セグメント通過時などテールクリアランスが著しく減少する場合には、ワイヤーブラシ間に補充したグリースが急激な体積変形を受けることがある。グリースは流体ではあるが粘性があるため、体積変形を受けた際に、液体のように瞬時に移動できないので、マシンテール部に偏圧が生じる。この結果、セグメントが損傷し、出水事故に至ったという報告もある。

また、実際の施工では、シールド機とセグメントが競ると、掘進速度が減少すること、リング径が大きくなる部分で過大なグリース圧が発生していることから、ワイヤーブラシ間の体積速度に比例したグリースの流動抵抗がグリース圧に大きく影響を及ぼしていると考えられる。

2.2 ワイヤーブラシの作用位置の変化

ワイヤーブラシの変形による作用力については、前端と後端のワイヤーブラシ変形量の平均

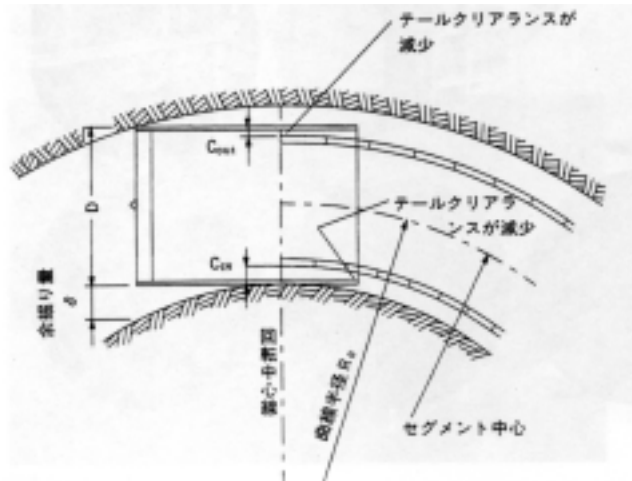


図 1 急曲線部のテール通過

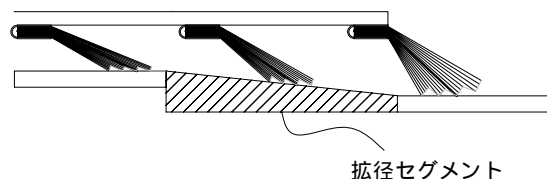


図 2 拡径セグメントのテール通過

に相当した分布荷重が作用すると仮定してきたが、これでは各ワイヤーブラシの変形による作用力のセグメントへの影響を評価することは、困難である。また、既往の研究において、図 3 に示すように裏込めがテール部に回り込み、ワイヤーブラシ中で固化することによって、ワイヤーブラシのバネ定数が増加することがわかっている。

よって本研究では、ワイヤーブラシ長さとしールド機のセグメントに対する傾きの関係から、ワイヤーブラシ作用位置を計算し、裏込めの回り込み固化によるワイヤーブラシのバネ定数の増加を考慮した各ワイヤーブラシの作用力をシミュレーションに反映できるようにする。

3. 定式化

3.1 グリースの流動抵抗による偏圧

$\sigma_{greaseij}$ は単位面積当たりのグリースによって作用する力であり、次式で与えられる。

$$\sigma_{greaseij} = \sigma_{grease-flij} + \sigma_{grease-in}$$

ここで、

$\sigma_{grease-flij}$: グリースの流動抵抗

$\sigma_{grease-in}$: グリース注入圧

さらに、 $\sigma_{greaseij-fl}$ は次式で与えられる。

$$\sigma_{grease-flij} = \begin{cases} \eta_{gr} \frac{1}{V_{23}} \frac{\partial V_{23}}{\partial t} & (0 < V_{23ij[k]} < V_{23ij[k-1]}) \\ 0 & (other) \end{cases}$$

$$\frac{1}{V_{23}} \frac{\partial V_{23}}{\partial t} = \frac{1}{V_{23ij[k-1]}} \frac{V_{23ij[k]} - V_{23ij[k-1]}}{\Delta t}$$

ここで、

η_{gr} : グリースの流動抵抗係数

t : 時刻

V_{23} : ワイヤーブラシ間のグリース体積

下サフックス k : 計算ステップ

Δt : 掘削時間

3.2 ワイヤーブラシの作用位置にかかる力

ワイヤーブラシの作用位置 r_{22} とそのテールクリアランス u_{22} は、次式を解くことで得られる。

$$|r_{22F} - r_{22}| = l_{WB}$$

$$u_{22} = R_{TI} - |r_{22} - r_{22MO}|$$

ここで、

r_{22F} : ワイヤーブラシ根元の位置

l_{WB} : ワイヤーブラシ長さ

r_{22MO} : ワイヤーブラシ作用位置からしールド機軸におろした垂線のあし位置

R_{TI} : しールド機テール部内径

よって、ワイヤーブラシによる作用力を表す F_{22ij} は次式で与えられる。

$$F_{22ij} = \begin{cases} 0 & (t_{WB} < U_{22ij}) \\ k_{WB1}(t_{WB} - U_{22ij}) & (t_{TD} < U_{22ij} \leq t_{WB}) \\ k_{WB1}(t_{WB} - t_{TD}) + k_{WB2}(t_{TD} - U_{22ij}) & (U_{22ij} \leq t_{TD}) \end{cases}$$

ここで、

k_{WB1} : ワイヤーブラシのバネ定数 (通常)

k_{WB2} : ワイヤーブラシのバネ定数 (裏込め固化時)

t_{WB} : ワイヤーブラシ高さ

t_{TD} : 裏込め回り込みによるクリアランス減少量

U_{22ij} : テールクリアランス

4. しールド機挙動解析

シミュレーションには、泥水式の中折れしールド(=3.94m)で土被り約 54m の洪積砂層と洪



図 3 裏込めが固化したワイヤーブラシ

積粘性土層の互層地盤中を約 190m 掘進した工場の現場実測データを用いた。掘進データの計測区間は、Ring No.151 ~ 262 の 111Ring であり、挙動シミュレーションは、このうち平面線形が R=20m の急曲線を含む区間で実施した。図 4 の地質縦断上にシミュレーション区間を示す。

5. 解析結果

5.1 実測データによるシールド機挙動シミュレーション

中折れシールド機動力学モデルの妥当性を確認するため、グリースの流動抵抗および裏込めの回り込み固化によるワイヤーブラシのバネ定数の増加を考慮しない状態で挙動シミュレーションを実施した。

図 5 にシールド機軌跡のシミュレーション結果と実測値を示す。シミュレーション結果は実測値とよく一致していることが分かる。図 6 にテール部に作用する施工時荷重のシミュレーション結果を示す。テールとセグメントの競りによる作用力 F_{22} が大きく生じていることがわかる。

5.2 グリースの流動抵抗および裏込めの回り込み固化によるワイヤーブラシのバネ定数増加の影響を考慮したシールド機挙動シミュレーション

ここでは、グリースの流動抵抗による影響が大きく現れると考えられる曲線部および拡径セグメントテール通過時について検討を行う。

5.2.1 解析結果

図 7 に流動抵抗係数 $\eta_{gr}=10000(\text{kN}/\text{m}^2 \cdot \text{min})$ の場合のシールド機軌跡のシミュレーション結果と実測値を示す。シミュレーション結果は実測値とよく一致していることが分かる。図 8 にテール部に作用する施工時荷重のシミュレーション結果を示す。

図 8 より、以下のことが分かる。

- 1) 流動抵抗および裏込めの回り込みを考慮しない場合は、テールとセグメントの競りのみがシールド機挙動に影響を与えるが、これらを考慮した場合、テールとセグメントの競り、ワイヤーブラシ、グリースの流動抵抗の全てが挙動に影響を与える。

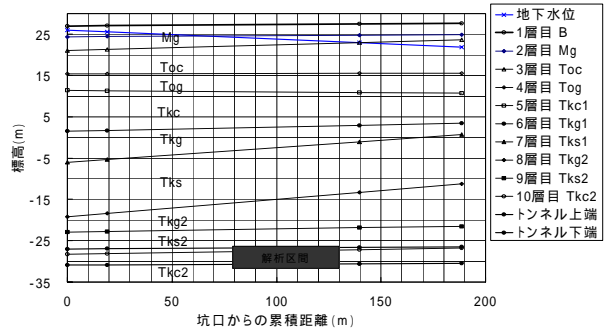


図 4 地質縦断図

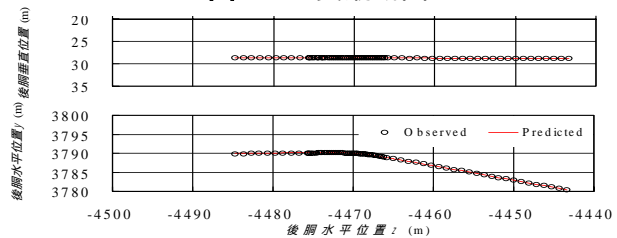


図 5 シールド機挙動解析結果(Case500)

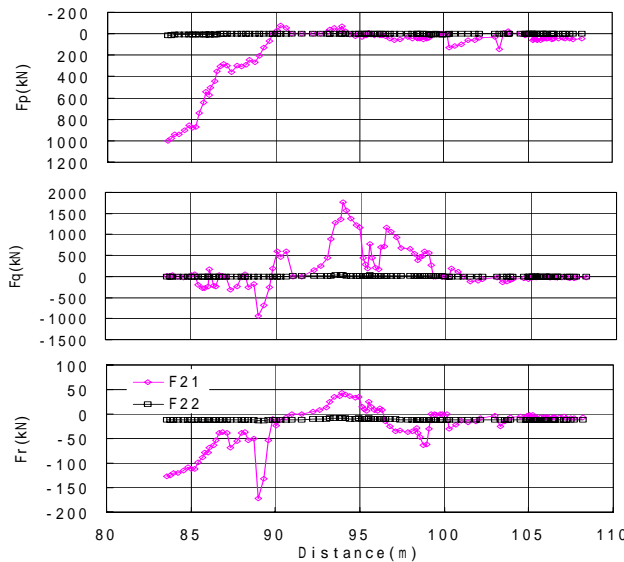


図 6 テール部作用力(Case500)

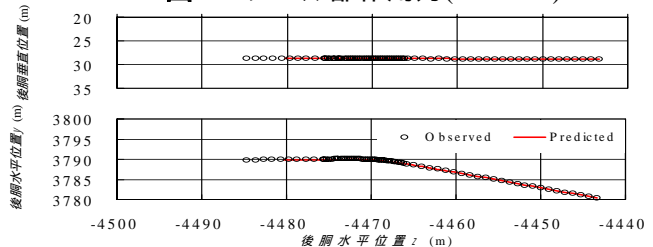


図 7 シールド機挙動解析結果(Case2071)

2) 解析開始位置の初期不正があった場合に、解析開始直後に過大な応力が発生する。これらは以下のためであると考えられる。

- 1) グリースの流動抵抗および裏込めの回り込み固化によるワイヤーブラシバネ値を設定したことで、新たな作用力が生じた。
- 2) 解析開始直前までは、計画線形上にシールド機計測位置があるとしているため、初期不正がある場合には、解析開始直後にグリースが充填されたワイヤーブラシ間の体積が急激に減少する箇所があると考えられる。

なお、既存の動力学モデルでは、図9に示す総推力の変動を説明することはできなかったが、図10に示すテール部とスキンプレート回りの推進抵抗の変動と図11の掘進速度の関係から、図12の作用力比較に示すように、グリースの流動抵抗 F_{23} とワイヤーブラシによる抵抗 F_{22} それに伴って発生するスキンプレート回りの摩擦抵抗 F_5 が発生していると考えられる。

6.結論

本研究により以下の結論を得た。

- 1) グリースの流動抵抗および裏込めの回り込み固化によるワイヤーブラシのバネ値の増加をより詳細に表現できるモデルを開発した。
- 2) 急曲線区間を掘進する泥水式中折れシールド機の現場実測データを用いたシールド機挙動シミュレーションを実施した。その結果、中折れシールド機動力学モデルによるシールド機挙動シミュレーション結果は、実際のシールド機掘進挙動によく一致した。これより、中折れシールド機動力学モデルの合理性を再確認した。
- 3) このモデルにより、拡径セグメントをシールド機テールが通過する際のシールドジャッキ推力変動を表現できることを確認した。したがって、このモデルを用いれば、より実

現象に近い状態でセグメントに作用する施工時荷重の評価することが可能となる。

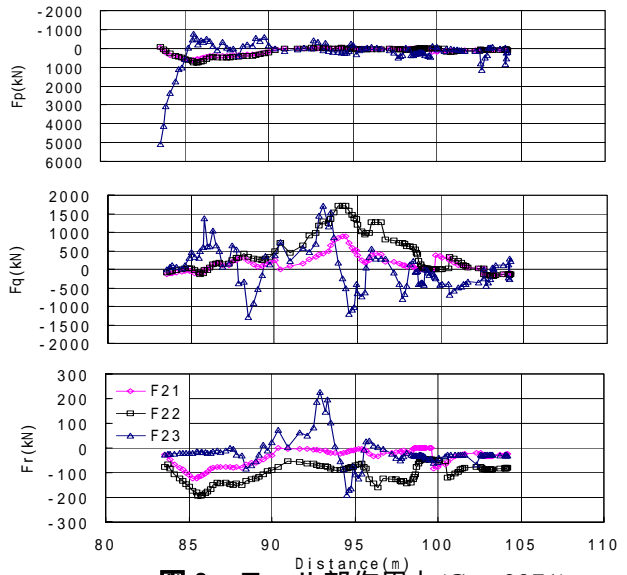


図8 テール部作用力(Case2071)

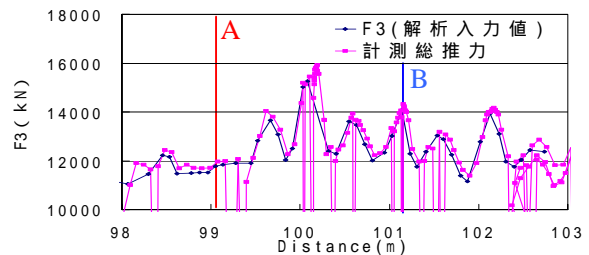


図9 総推力の変動

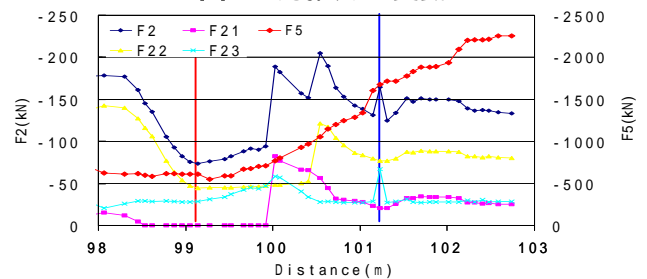


図10 テール部とスキンプレート回りの推進抵抗(Case2071)

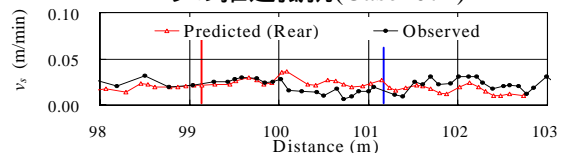


図11 掘進速度(Case2071)

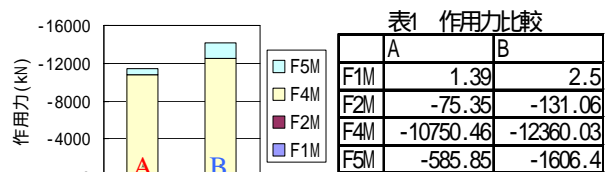


図12 作用力比較(Case2071)