

# 中折れシールドを用いた現場実験による地盤反力係数の逆解析

地盤工学研究室 中川侑大  
指 導 教 員 杉本光隆

## 1. はじめに

これまで現場実測データを適用した検証により、シールド機動力学モデルは単胴型、中折れ対応型ともに実際のシールド挙動を再現可能であることが確認された。しかし、これまで用いていた地盤物性値は、地質調査報告書や経験式などの数値を参考に決めていたが、場合によっては 10 倍程度の幅を持っていることがあった。そこで、地盤物性値の中でシールド挙動に大きな影響を与え、かつ不明確な地盤反力係数に着目し、シールドを地盤に押し当てる中折れ実験を行い、地盤物性値を逆解析することとした。

## 2. 解析方法

本研究の手順を以下に示す。

入力物性値の推定(シールド挙動シミュレーション)直線区間におけるシールドの実測挙動とシミュレーション結果を比較することにより、余掘り有効率  $R_{RE}$  を推定する。本モデルにおいてシールド挙動に大きな影響を与える因子の 1 つにトンネルの有効な余掘り量が挙げられる。しかし、余掘り量がどの位有効になるかは明確になっていないのが現状である。そこで本解析では直接探査法を用いてこの値を推定した。また、余掘り有効率と地盤反力に関する物性値は互いに強い共線性を有する。それゆえ、すべての地盤物性値を同時に扱うことが難しい。

中折れ実験による地盤物性値の逆解析

より得られた  $R_{RE}$  を入力値として、側方静止土圧係数  $K_{H0}$ 、水平方向地盤反力係数  $k_H$ 、鉛直方向地盤反力係数  $k_v$  の 3 つの地盤物性値を逆解析する。

## 3. 実験方法

本実験(1 回の実験)は以下の 2 段階よりなる。

Stage A : 定常掘進およびデータ収集

直線区間において、4 機長分(7.2m × 4=28.8m)以上の定常掘進を行い、別途示す掘進データおよびシールド機挙動を収集する。

Stage B : 中折れ載荷・除荷

中折れシールド機はマシンが前胴と後胴とに分かれ、マシンが折れることによって急曲線での施工が可能となる。中折れ実験では、直線区間においてシールドを停止させ、中折れ機構を利用して段階的にシールドを

地盤に押し当て、その際のシールド制御力(シールドジャッキ力、中折れジャッキ力、切羽圧、中折れ角度など)とシールド挙動(前胴、後胴の位置または変位)を計測する。

## 4. 現場概要

解析区間：直線区間 (2550~2578Ring, 134Step)

平面線形：直線、縦断線形：下り 0.06%

土被り：13.42~13.53m

地盤：トンネルは軟弱地盤の下部有楽町層粘性土層上部 (Y1cu 層：N 値=0~2) と下部有楽町層粘性土層下部 (Y1cl 層：N 値=0~6) の境界に位置する。

シールド：泥土圧式 V 中折れシールド

## 5. シールド挙動シミュレーション

### 5.1 入力物性値

傾斜地盤の想定

シールドの掘進は直線区間にもかかわらず、図 5.1 に示すように現場実測データは右向きジャッキ水平モーメントを作用させていた。そこで、左右非対称のシールドジャッキモーメント  $M_{3q}$  でのシールド直進を表現するために、トンネル横断方向に 20° の傾斜地盤を想定するとともに軟弱地盤を考慮し、地盤物性値を決定した。

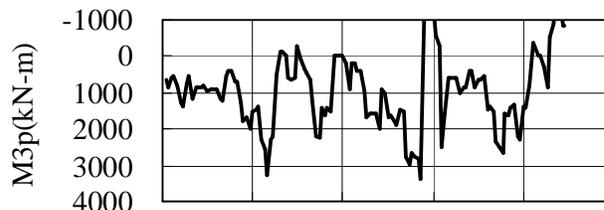


図 5.1 ジャッキ水平モーメント  $M_{3p}$  (時計回り：+)

動的付着力

図 5.2 に示すように、現場計測データはシールド上向きジャッキ鉛直モーメントは下向きを示し、通常では想定できない状態であった。そこで、通常、法線方向土圧に動摩擦係数を乗じて算出されるスキンプレート周り軸方向動摩擦力を動的付着力  $C_{ms}$  で与えた。また、軟弱地盤の下層(N 値=0~6)より、さらに軟弱な上層(N 値=0~2)の方が変形しやすいことから、上層のスキンプレート周りの軸方向動摩擦力を規定する動的

付着力  $C_{ms}$  を大きく設定した。

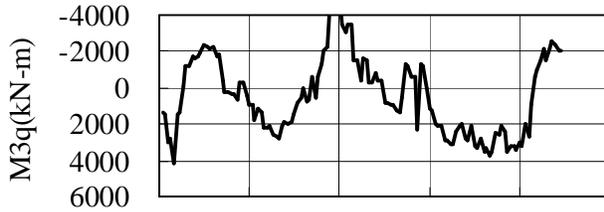


図 5.2 ジャッキ鉛直モーメント  $M_{3q}$  (下向き: +)

## 5.2 シールド挙動シミュレーション結果

### 5.2.1 シールド軌跡

#### (1) 縦断線形

図 5.3 に示すように、距離程約 2550m 付近までは計算値(シミュレーション結果)と計画位置はよく一致している。2550m 以降では最大で約 10cm の偏差が生じているが、経験値として  $\pm 10\text{cm}$  以内は許容範囲内であると考えられる。

#### (2) 平面線形

図 5.3 に示すように、シミュレーション結果と実測値はよく一致している。

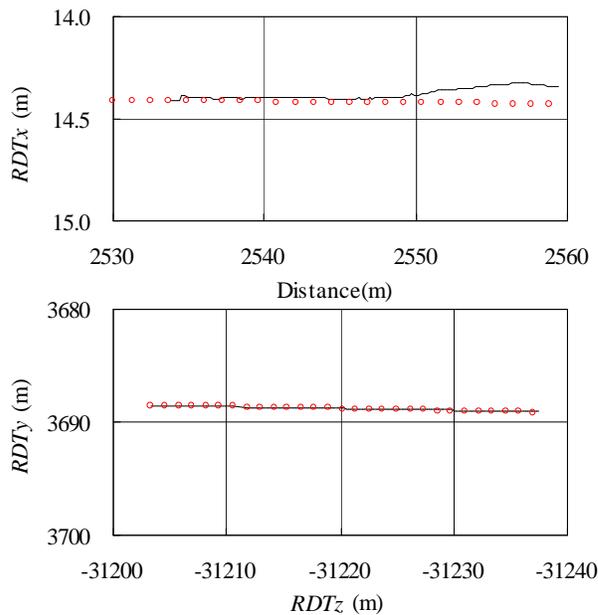


図 5.3 シールド軌跡

### 5.2.2 シールド挙動

#### (1) ヨーイング角 ( $\gamma$ )

図 5.4 に示すように、軟弱地盤の影響でシールド機が蛇行しながら掘進しており、ヨーイング角のばらつきはあるものの、計算値を中心に推移しているため、計算値と実測値はほぼ一致しているといえる。

これらは以下のためである。

設定した余掘り有効率は妥当であった。

設定した傾斜角度は妥当であった。

#### (2) ピッチング角 ( $\rho$ )

図 5.4 に示すように、距離程 2550m 付近までは、実測値より計算値のほうが約 10min 程下向きとなっているが、実測値と計算値はほぼ一致しているといえる。2550m 以降では計算値はさらに下向きとなり、最終値は実測値より計算値は約 25min 下向きとなっている。ただし、全体的な傾向は一致している。

これらは以下のためである。

設定した余掘り有効率は妥当であった。

距離程 2550m 付近において偏差が大きくなったのは、地盤物性値の変化、地質構造の変化が影響したと考えられる。これに対し、シミュレーションは各層を均質な地盤と想定しているため、これらの影響を表現できなかったと考えられる。

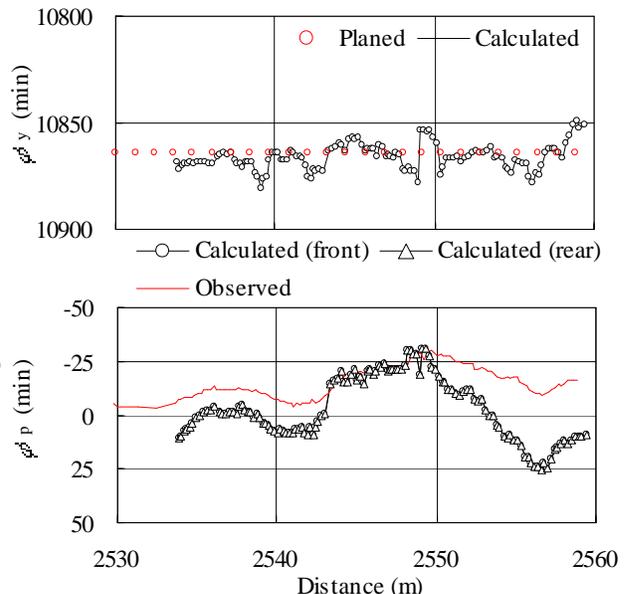


図 5.4 ヨーイング角  $\gamma$ 、ピッチング角  $\rho$

以上のことから、解析値の挙動と実測値の挙動がほぼ等しいことより、超軟弱地盤中のシールド機動力学モデルは実際の挙動を表現することができると考えられる。

### 5.2.3 シールドマシン周辺の地盤

#### (1) カッターフェイス法線方向全土圧分布 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )

図 5.5 に IS = 134 (Stage A の最終) におけるカッターフェイス法線方向全土圧分布図を示す。

この図より、以下のことがわかる。

カッターフェイス中心で土圧が大きくなっている。これは、カッタービット切り込み角がカッターフェイス中心で大きくなるためである。

下側 1/3 より上側 2/3 で土圧が大きくなっている。これは上部に位置する Y1cu 層が N 値 0~2 の軟弱地盤であるため変形しやすく、カッターフェイスに大きな切羽土圧が作用するためである。

トンネル横断方向における傾斜地盤の影響が見られる。

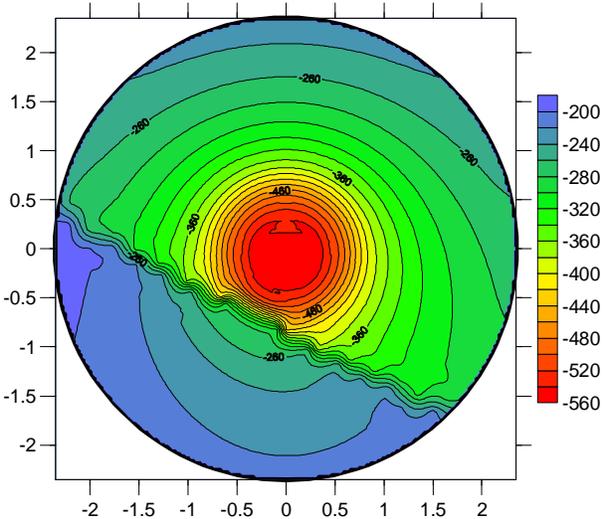


図 5.5 カッターフェイス法線方向全土圧分布

(2) スキンプレート周リ法線方向地盤変位分布 (mm)

図 5.6 に IS =134 におけるスキンプレート周リ法線方向地盤変位分布を示す。

この図より以下のことがわかる。

45°、315° 付近においてシールド軸方向にラインが入っている様子が見られる。これは 0~45°、315~360° つまり下側 90° の範囲において余掘り有効率  $R_{RE} = 0\%$  と設定しているためである。 $R_{RE} = 0\%$  はシールドマシンが土砂を全く取り込めないということを意味している。

地盤変位分布はシールド軸方向に変動している。マシンの中央付近、つまり中折れ点付近においてマシンの左側が受動状態、右側が主働状態となっている。これはシールドマシンが蛇行しながら掘進している様子を表している。

(3) スキンプレート周リ法線方向土圧分布 (kN/m<sup>2</sup>)

図 5.7 に IS =134 におけるスキンプレート周リ法線方向全土圧分布を示す。

90~315° より、0~90°、315~360° のほうが、等圧線が密になっている。これは、90~315° が Y1cu 層

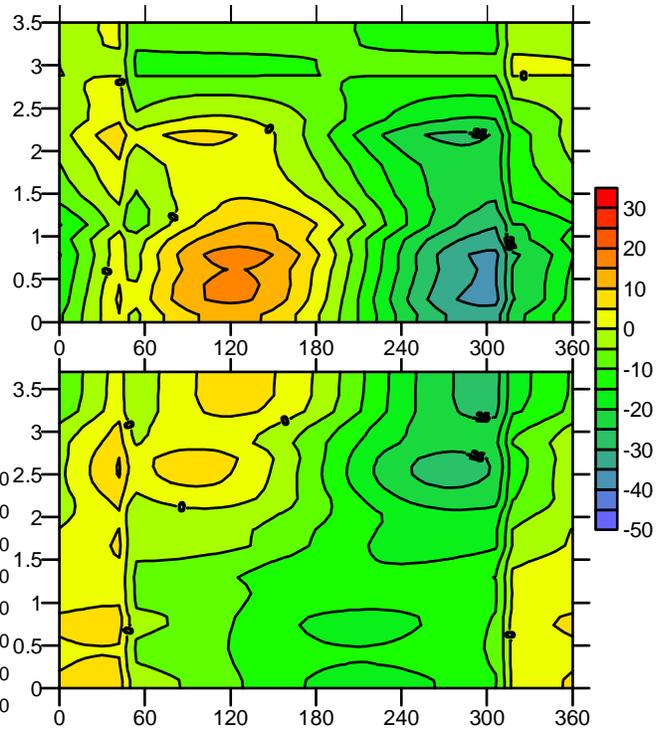


図 5.6 スキンプレート周リ法線方向地盤変位分布

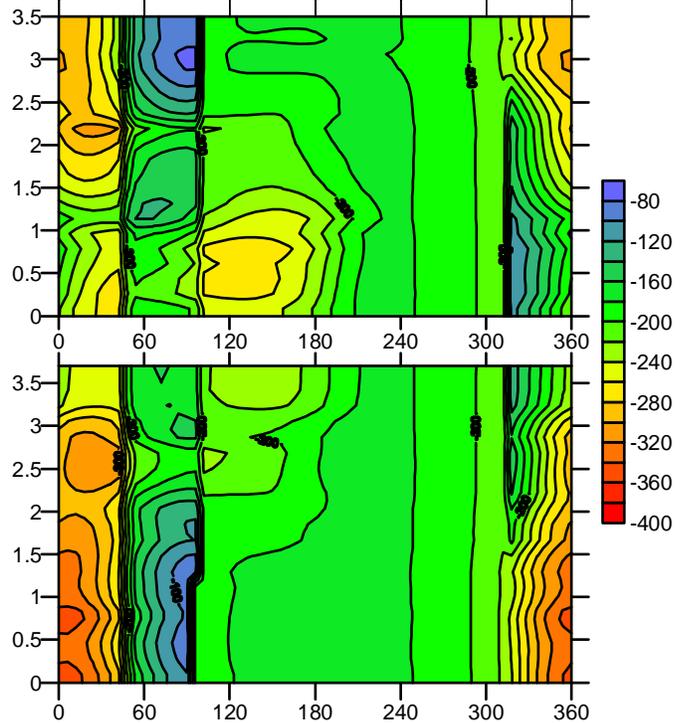


図 5.7 スキンプレート周リ法線方向全土圧分布

にあたり、N 値が 0~2 の軟弱地盤であるのに対して、0~90°、315~360° は Y1cl 層にあたり、Y1cu 層より硬い地盤であるためである。

45°, 90°, 315° 付近において、シールド軸方向にラインが入っている様子が見られる、これは0~45°, 315~360°, すなわち下側90°の範囲において余掘り有効率  $R_{RE} = 0$  と設定しているためである。

0~45°, 315~360° において大きな土圧が作用している。これは図5.6のスキンプレート周りに法線方向地盤変位分布が正、すなわち、シールドが地盤を押し込む受動状態となっていることに対応している。この下部の地盤反力は、シールド自重を支えるために発生している。

同じ角度における軸方向の地盤反力の変動は、シールドの蛇行のためである。

### 5.2.4 余掘り有効率の推定

直接探査法の結果、余掘り有効率  $R_{RE}$  は図5.8に示すように、0~45°, 315~360°, すなわち下側90°の範囲において余掘り有効率  $R_{RE} = 0\%$  と推定された。 $R_{RE} = 0$  はシールドマシンが土砂を全く取り込めないということを意味している。

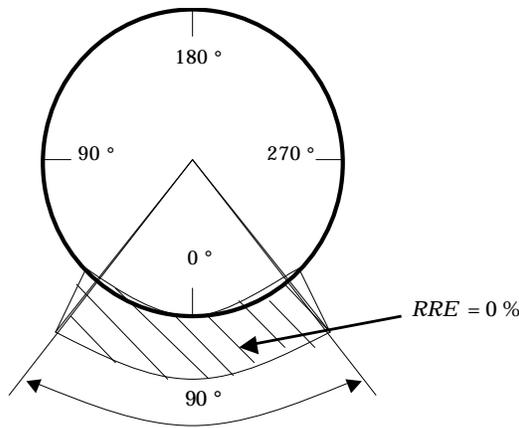


図5.8 推定された余掘り有効率  $R_{RE}$

## 6. 地盤物性値の逆解析

### 6.1 入力パラメータ

本解析で用いる入力データは、Stage A における実測データに Stage B となる中折れ実験データを加えたものとなる。したがって、シールド諸元などのデータは5.0のシールド挙動シミュレーションで用いたものを使用する。地盤物性値については、側方静止土圧係数  $K_{H0} = 0.738$ 、地盤反力係数  $k_H, k_V = 5\text{MN/m}^3$  とした。中折れ実験ではシールドマシンは停止しているため、 $a, b$  のみシミュレーションのときと値が異なる。 $a=0, b=1$  とした。

### 6.2 逆解析における未知パラメータと力の釣合い式の選択

各パラメータにおける力の構成要素の影響を考慮し、その結果から未知パラメータと力の釣合い式の組み合わせの適切な選択を行うこととする。

パラメータの感度解析においては解析対象の単純化をはかり、1パラメータに対して力の釣合い式を1式選択した。力の釣合い式は水平方向のモーメントである  $M_q$  を選択した。

今回は中折れ実験を行っているため、マシンが水平方向に折れることによりマシンが地盤に貫入される。したがって、今回の実験では検討する未知パラメータは、水平方向の力に効果が出そうなパラメータを選択した。側方静止土圧係数  $K_{H0}$ 、水平方向地盤反力係数を表すパラメータ  $a_H$ 、鉛直方向地盤反力係数を表すパラメータ  $a_V$  の3つとした。

### 6.3 M13 による感度分析

#### 6.3.1 M13 について

本モデルに含まれるアルゴリズム M13 により、最適地盤物性値を求める。

M13 とは地盤物性値1パラメータについて複数の値を入力し、入力値を1データずつ変更することにより残差二乗和(SSQ)を計算するものである。他のパラメータは変更しない。M13 により、各パラメータの極小値は1つつまり、それが最適物性値となる。

### 6.4 逆解析の結果

本モデルのアルゴリズム M13 を用いて、各パラメータを求めた結果を図6.1に示す。

なお、結果は左折れ実験における逆解析の結果を示している。

図6.1の上図のFB-RBは前胴で発生したモーメントの合計から後胴で発生したモーメントの合計を合計したものである。これは、地盤反力(スキンプレートに作用する力)により発生した外力モーメントと考える。一方、F32Mは中折れジャッキモーメントであり、内力モーメントと考える。FB-RBとF32Mが交差する点が地盤物性値の最適値となる。また、上図のFB-RBとF32Mの残差の2乗が残差二乗和SSQとなり、図6.1の下図のように描ける。

#### 6.4.1 $K_{H0}$

図6.1に載荷ステップ2段階目(IS=31)~載荷ピークの1段階手前(IS=40)までの  $M_q$  による力の合計を示す。なお、載荷1段階(IS=30)と載荷ピーク(IS=41)に関し

て、これらのデータに不安定さがあると考え、力の合計には含めなかった。

図 6.1(e)より、 $K_{H0}$ は約 1.2 となった。この値は Jaky の式から算出されたもの (0.738) と比較すると大きな値となっているが、この結果は妥当であると考えられる。

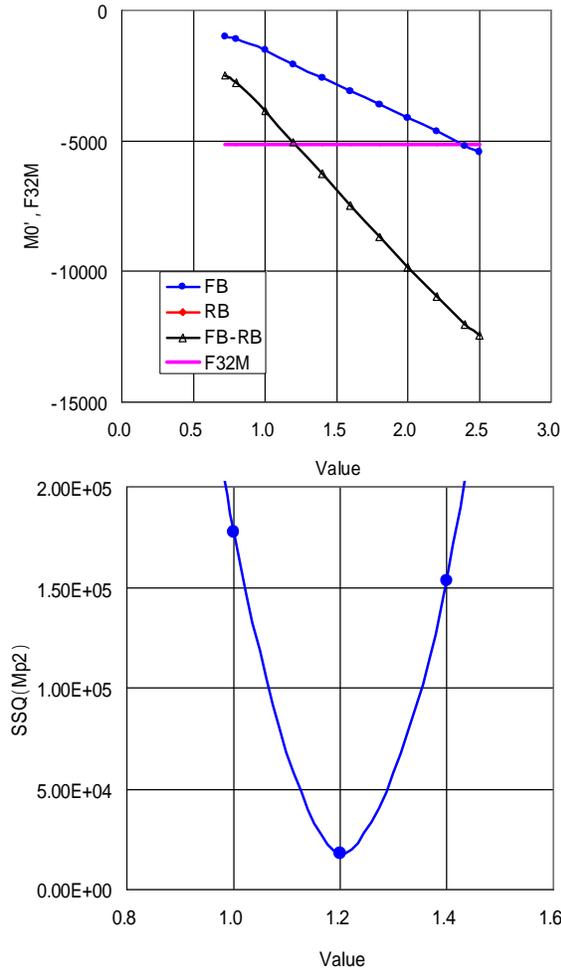


図 6.1  $K_{H0}$  の残差二乗和 (SSQ)

#### 6.4.2 $a_H, a_v$

$a_H, a_v$  に関しては最適地盤物性値が求まらなかった。

#### 6.4.3 考察

図 6.2 に IS = 41 におけるスキンプレート周りに法線方向地盤変位分布を示す。

図 6.3 に IS = 41 におけるスキンプレート周りに法線方向全土圧分布を示す。

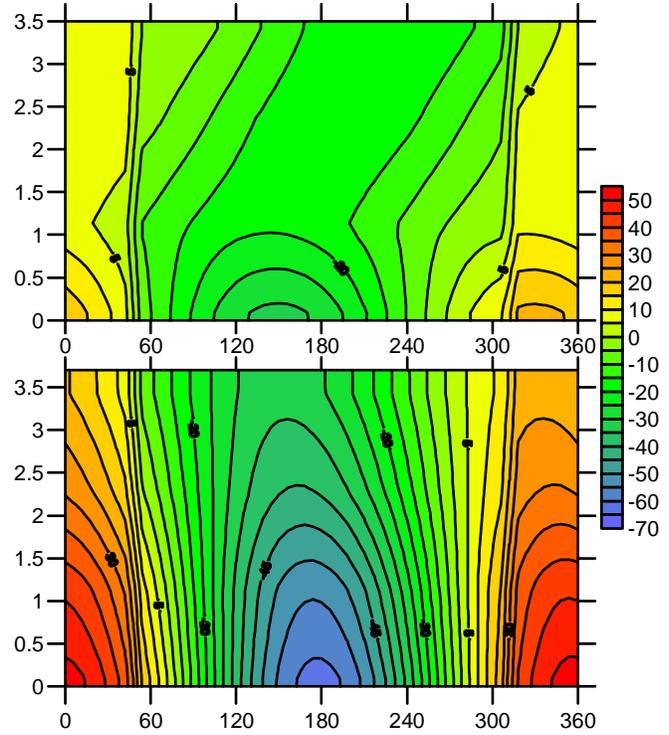


図 6.2 スキンプレート周りに法線方向地盤変位分布

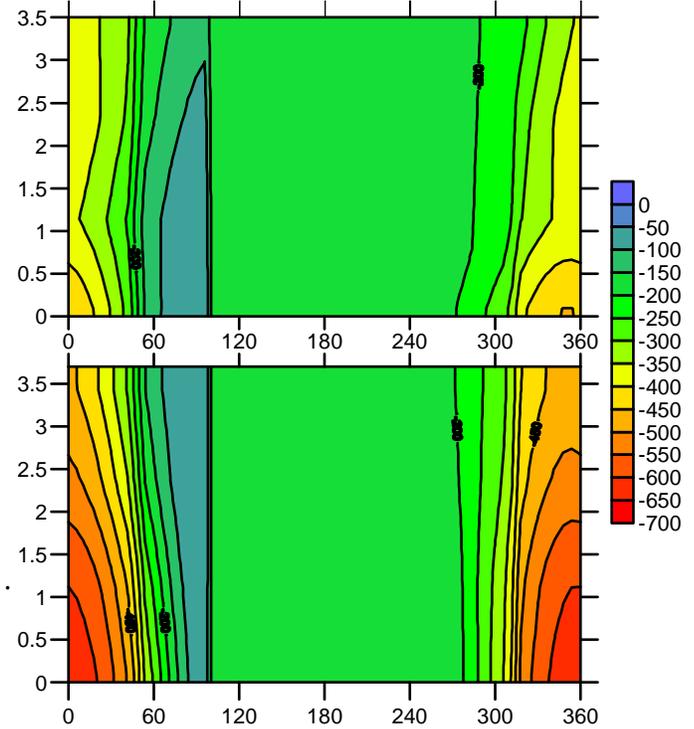


図 6.3 スキンプレート周りに法線方向全土圧分布

### 地盤変位について

・ 図 6.2 に示すように、横軸  $90^\circ$ 、 $270^\circ$  のラインにおいてカッターフェイスでは、左側が約-3mm、右側が約-16mm と主働状態となっていて、マシンを左に中折れさせているにも関わらず、カッターフェイス左側においてマシンが地盤に貫入していない。また、マシン中央(中折れ位置)では、左側が約-20mm、右側が約0mm となっている。こちらもカッターフェイスと同様に、右側においてマシンが地盤に貫入していない。

これは以下のためと考えられる。

今回の掘削の条件として余掘り量は10mm となっている。シールドの水平変位はカッターフェイス左側で約-13mm、中折れ位置で約6mm、テールで約3mm の変位が生じていた。余掘り量10mm より大きな変位が生じているのはカッターフェイス左側だけであり、その一番貫入しているカッターフェイス左側においても約3mm の貫入で非常に貫入量が少なくなっている。

図 6.4 に下限値と上限値は同一で  $K_{H0}$  の大きさのみを変化させた地盤反力曲線を示す。

図 6.5 に下限値と上限値は同一で  $a_H$  の大きさ(傾き)のみを変化させた地盤反力曲線を示す。

図 6.4 に示すように、ある一定の変位において、例えば変位が0mm のときの1, 2, 3 の  $K_{H0}$  の大きさは異なる。M13 では他のパラメータは固定して、この  $K_{H0}$  の値のみを1データずつ変更させるため、モーメントに差が生じ  $K_{H0}$  の最適物性値が求まると考えられる。また、 $K_{H0}$  においてはある程度の位が生じて、すなわち受働側でも主働側にあっても  $K_{H0}$  に差が生じるため、最適物性値が求まると考えられる。

一方、図 6.5 に示す地盤反力曲線では、変位が非常に小さいときは  $K_{H0}$  の値が変化しない。

したがって、上記のようにマシンを中折れさせているのにも関わらず、地盤への貫入量が非常に小さい場合には、水平モーメントがあまり出ず、 $a_H$ 、 $a_V$  の最適物性値が求まらないと考えられる。

・ 図 6.2 より、テールのインバート部において地盤の押し込みが大きくなっており、シールドが上向きとなっていることがわかる。ピッチング角  $\rho$  の実測値からもマシンは約16min 上向きとなっていることがわかる。図 6.3 に示すように、インバート部に非常に大きな力が作用していることがわかる。この鉛直方向の作用力が非常に大きいことも最適物性値が求まらない要因の一つとも考えられる。

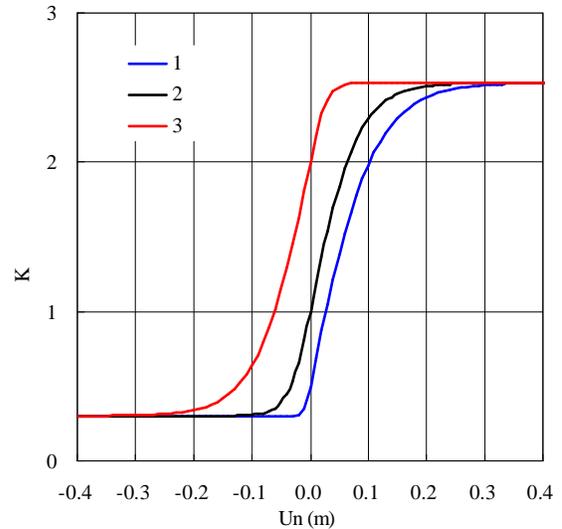


図 6.4  $K_{H0}$  変化

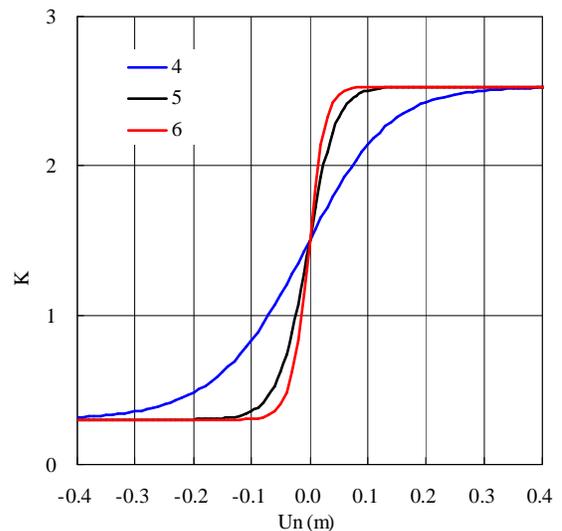


図 6.5  $a_H$  変化

## 7. まとめ

シミュレーション結果より、シールドの計算挙動と実測挙動とがほぼ等しいことにより、超軟弱地盤中のシールドの挙動を表現することができたと考えられる。

本解析において、未知パラメータに  $K_{H0}$ 、力の釣合い式に  $M_p$  を選択し、逆解析を行った結果、側方静止土圧係数  $K_{H0} = 1.2$  と求まった。

未知パラメータに水平方向地盤反力係数を表すパラメータ  $a_H$ 、鉛直方向地盤反力係数を表すパラメータ  $a_V$  を選択し、逆解析を行った結果  $a_H$ 、 $a_V$  の最適地盤物性値は求まらなかった。これを求めるためには、掘削領域外側までマシンを地盤に貫入させる必要があると考えられる。