

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 27 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560563

研究課題名(和文)三次元複合線形におけるシールド機の理論的制御手法の開発

研究課題名(英文)Development of a theoretical shield control method for combined curved alignments in three dimensional space

研究代表者

杉本 光隆 (Sugimoto, Mitsutaka)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50196755

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：都市トンネル構築に一般に用いられるシールド工法は、シールド後方内部でトンネル覆工(セグメント)を組立てることから、トンネル線形確保には、シールドの動きを適切に制御する必要がある。

本研究では、三次元空間でのシールドの理論的制御法の開発を目的として、三次元空間でのシールド機制御法の開発、力学的釣合い条件を考慮したシールド制御法の開発、現場データや数値実験による同手法の検証、を実施した。

本研究成果は、今後増大すると予想される三次元複合線形でのより現実に近いシールド機制御を可能とするもので、トンネル施工精度の向上、セグメントの損傷軽減、ひいては、トンネル耐久性の向上に寄与すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Shield tunnelling method is a standard method to construct a urban tunnel. In the case of shield tunnelling, the proper control of shield behavior is essential to ensure a planned tunnel alignment, since tunnel linings are installed inside of the TBM.

This study aims to develop a theoretical shield control method in three dimensional space and carried out the followings: 1) the development of shield control method for combined curved alignments; 2) the development of shield control method taking account of force equilibrium conditions; and 3) the examination of the newly developed method by site-data and numerical experiments.

The results of this research enable shield control with more realistic in a combined curved alignment in three dimensional space, of which the use is expected to increase near future. This could contribute to improve the accuracy of tunnel construction, to reduce the damage of segments during construction, and finally to improve the durability of tunnel.

研究分野：土木工学，土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：地盤工学 機械力学・制御 シミュレーション工学 シールド工法 大深度地下

1. 研究開始当初の背景

都市部におけるライフライン整備には、地表面を占有することなく地下構造物を地中に直接構築できる**シールド工法**が標準工法として採用されてきている。シールド工法は、シールド機の前端を回転させて地盤を掘削するとともに、シールド機内でプレキャスト部材であるセグメントを組立て、トンネルを構築する工法である。トンネル覆工であるセグメントはシールド機内後部で組み立てられることから、シールドトンネルを計画線形に沿って構築するためには、シールド機の位置と向きを適切に制御する必要がある。

(1)シールド機の制御方法

シールド機の掘進方向を制御するには、以下の方法がある。

①**コピーカッターによる余掘り**：図1に示すコピーカッターの使用範囲・長さ（**コピーカッター使用条件**と呼ぶ）を制御して、余掘りを行い（図2参照）、シールド機に作用する地盤反力を調整する。

②**シールド機の中折れ**：図1に示すように、シールド機を前胴と後胴に分割し、中折れジャッキの伸縮により両者を屈曲（両者のなす角度を**中折れ角度**と呼ぶ）させて、シールド機の外周面がトンネル掘削面に沿うようにして、シールド機に作用する地盤反力を低減する。

③**シールドジャッキの選択**：図1に示すシールドジャッキは円周上に配置されているので、各ジャッキのon/offを選択（**シールドジャッキ使用条件**と呼ぶ）することにより、シールド機に水平・鉛直モーメントを作用させる。

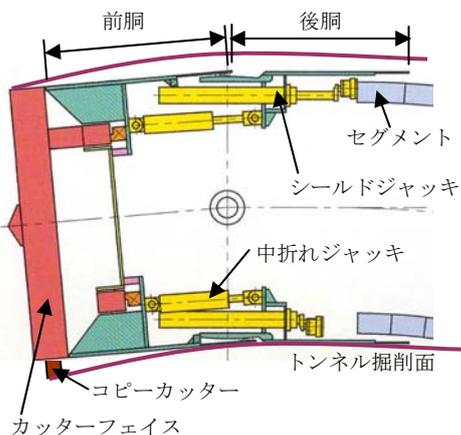


図1 シールド機平面図

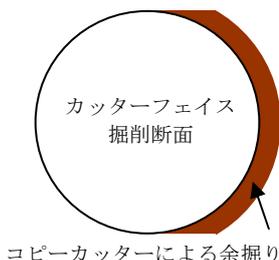


図2 掘削断面図

上記3つを合わせて、「**シールド機制御条件**」と呼ぶことにする。シールド機制御条件は、シールドを制御する時系列の条件で、シールド機挙動に対して共線性がある。

(2)現行の制御方法

現在、シールド機の制御は、以下のように行われている。

①事前に、トンネル計画線形、シールド機外周面、トンネル掘削面の**二次元平面上の幾何学条件**を用いて、**コピーカッター使用条件**と**中折れ角度**を設定する。

②現場では、上記の設定値を基に掘進を行い、シールド機の掘進方向を計測し、**現場合わせ**で、シールド機制御条件を調整する。

(3)現行の制御方法の問題点と課題

①大都市部では、既に多くの地下構造物が構築されているから、今後新設される地下構造物にあっては、近接施工が増え、線形条件が厳しくなって、**三次元複合線形**（平面曲線と縦断曲線を同時に有するトンネル線形）の採用が増加すると予想されるが、現行の方法では**対応できない**。

②コピーカッター使用条件と中折れ角度を求めるのに、シールド機の**力学的釣り合い条件**を考慮していないため、現行の方法で求められるシールド機の掘進方向は実際とは異なり、**現場での調整が必要**となる。コピーカッター使用条件や中折れ角度が不適切だと、トンネルの計画線形からの逸脱、地盤とシールド機の接触による過大なシールドジャッキ推力の発生、セグメントとシールド機の競りによるセグメントの損傷等が発生する。さらに、現在計画されている**リニア中央新幹線**等が通過する**大都市圏の大深度地下**は、硬質地盤であるため、地盤反力が大きく、こうした傾向が顕著になる。

2. 研究の目的

上記で述べたように、これまでのシールド機制御方法は、制御を二次元平面内に限定していること、シールド機の力学的釣り合い条件を考慮していないことから、三次元複合線形でシールド機を理論的に制御することはできなかった。そこで、本研究では、**三次元複合線形でのシールド機の理論的制御手法を開発**することを目的として、以下の研究を行う。

①**三次元空間でのシールド機制御条件計算法の開発**

②**力学的釣り合い条件を考慮したシールド機制御手法の開発**

③**現場データや数値実験によるシールド機の理論的制御手法の検証**

3. 研究の方法

(1)**三次元空間でのシールド機制御条件計算法の開発**

事前検討により、シールド機の形状（前胴長さ、後胴長さ、中折れ中心～エレクトアー間

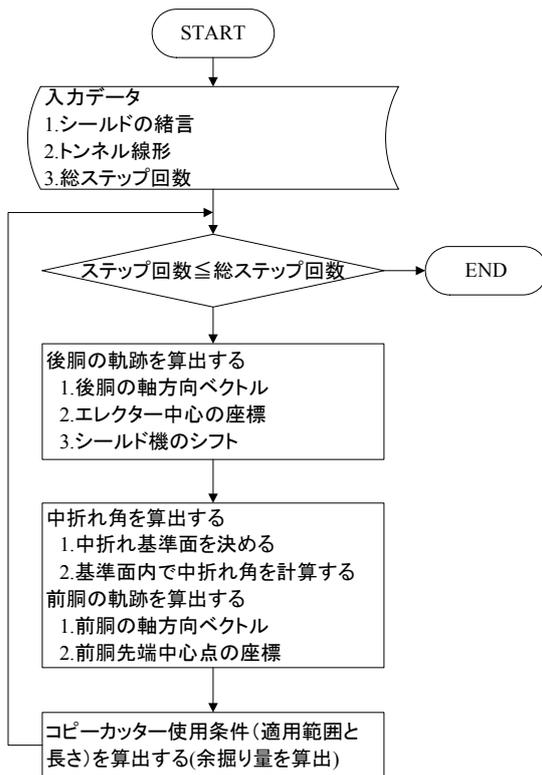


図3 シールド機制御条件算定の流れ

距離)によって、コピーカッター使用条件・中折れ角度の制約条件が異なることが明らかになっている。このため、シールド機をその形状により3タイプに分類し、三次元の解析幾何学を用いて、制約条件、トンネル計画線形、シールド外周面、トンネル掘削面を記述し、これらを基に、三次元複合線形でのコピーカッター使用条件・中折れ角度の計算法を開発する。

(2)力学的釣合い条件を考慮したシールド機制御手法の開発

上記(1)で得られるコピーカッター使用条件と中折れ角度を用いて、ジャッキ力・ジャッキモーメントを設定する方法を開発する。

(3)シールド機の理論的制御手法の検証

①パラメータスタディによる検証

1)シールド機形状:3タイプ;2)トンネル線形:平面曲線,縦断曲線;3)トンネル線形組合せ:平面曲線のみ,縦断曲線のみ,三次元複合線形をパラメータとして,パラメータスタディを実施し,得られたコピーカッター使用条件・中折れ角度の合理性を検討する。

②現場データによる検証

これまでに蓄積してきた現場データに,本研究で開発するシールド機制御条件計算法を適用して,コピーカッター使用条件・中折れ角度を求め,これら解析値と現場実績値を比較することにより,シールド機制御条件計算法の合理性を検討する。

③数値実験による検証

実地盤条件を考慮に入れて,数値実験用の

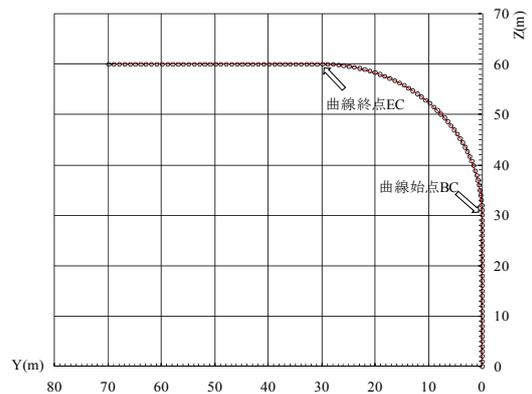


図4 計画線形

入力物性値を設定するとともに,上記(1)(2)で得られるシールド機制御条件を,シールド機動力学モデルに入力し,シールドの力学的釣合い条件を基にシールド挙動をシミュレーションし,得られた結果を設定したトンネル計画線形と比較し,本手法の妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1)三次元空間でのシールド機制御条件計算法の開発

シールドの曲線掘進時の施工実績を基に,以下の幾何学的条件を用いて,コピーカッター使用条件と中折れ角度を求める手法を開発した。

- 1)シールド機の1点(例えば,エレクトー中心) P_{CSE} は,計画線形上にある。
- 2)シールド後胴の軸方向は, P_{CSE} における計画線形の接線方向である。
- 3)曲線外側の余掘りが最小となる条件で,中折れ角が最小となるようにする。
- 4)シールドはトンネル掘削面内にある。

図3にシールド機制御条件算定の流れを示す。

さらに,シールド後胴の軸方向を任意の与条件とする計算法も開発した

(2)力学的釣合い条件を考慮したシールド機制御手法の開発

上記で得られたコピーカッター使用条件と中折れ角度を,シールド機動力学モデルに入力して,幾何学的条件から不釣り合い力を求めることにより,ジャッキ力とジャッキモーメントを算定する手法を開発した。

これで,シールド機制御条件(コピーカッター使用条件,中折れ角度,シールドジャッキ力)を算定できることになる。

(3)シールド機の理論的制御手法の検証

①パラメータスタディによる検証

a)解析条件

トンネル線形は,図-4に示すように,半径30mの左円曲線を有する平面線形とし,シールドの寸法は,マシン外径10m,機長10mで,シールド Type1, 2, 3は図-5において,それぞれ, $L_1=3.5, 0.5, 1.5m$, $L_{CSE}=2.5, 3.5,$

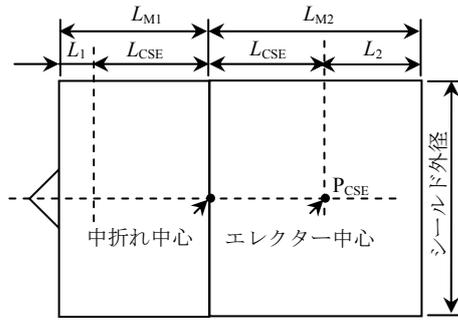


図5 中折れシールドの寸法

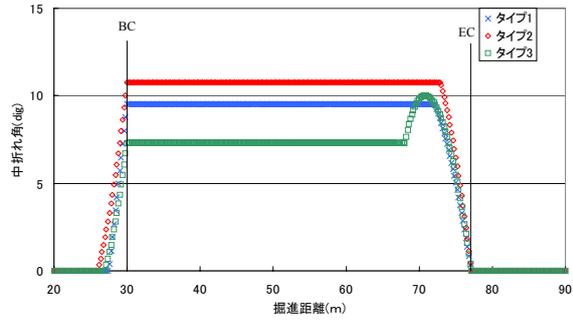


図6 中折れ角

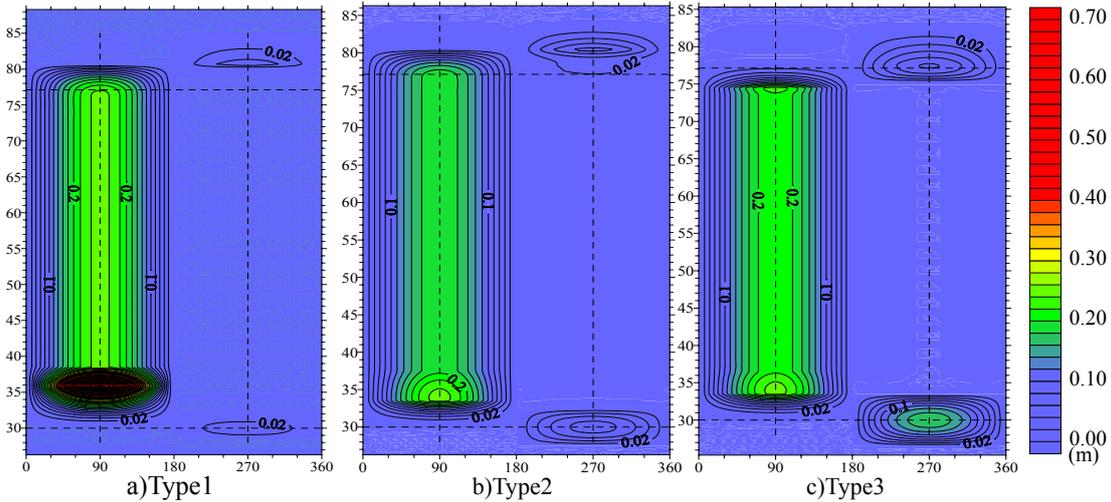


図7 コピーカッター使用条件

2.5m, $L_2=1.5, 2.5, 3.5$ mとした。

b)解析結果

各 Type の中折れ角を図-6 に示す。ここで、横軸はエレクター中心 P_{CSE} の距離、縦軸は水平中折れ角である。この図より以下がわかる。

1) Type1, 2 : 前胴の先端が曲線始点 $BC+L_{CSE}$ に到達した時点で中折れを開始し、 P_{CSE} が BC に到達した後、中折れ角は一定となり、その後、前胴の先端が曲線終点 EC に到達した時点で中折れ角は減少し始め、 P_{CSE} が EC に到達した時点で中折れは終了する。

2) Type3 : P_{CSE} が EC 直前で一度中折れ角が増加する。

3) 3 つの Type の中で、Type2 の中折れ角が最大となる。

各 Type の余掘り量を図-7 に示す。ここで、横軸はトンネルの周方向、縦軸はトンネルの軸方向の距離である。この図より以下がわかる。

1) 共通 : トンネルのインバート部(0,360度)とクラウン部(180度)から左 SL(曲線内側)に向けて余掘り量は増加し、右 SL(曲線外側)では余掘り量 0 となる。また、 $BC+L_{CSE}$ 付近の左 SL で余掘り量は最大となり、 BC と EC 付近の右 SL で余掘りが必要となる。

2) Type1 : BC 付近の左 SL で余掘り量が、他の Type と比べて最大となる。

3) Type3 : BC 付近の右 SL で余掘り量が、他の Type と比べて最大となる。

両者共に得られた解析値は、幾何学的に合理的である。

②現場データによる検証

a)解析条件

解析対象とした中折れシールドは、マシン直径=3.950m で、前胴長さ $L_{M1}=2.240$ m、後胴長さ $L_{M2}=3.525$ m、中折れ中心からエレクター中心までの距離 $L_{CSE}=2.369$ m である。

(図5参照)したがって、(1)の幾何学的制御条件を適用すると、曲線部では後胴前端曲線外側が最外周を通過することになる。また、図8に示すように、トンネル平面線形は半径20mの曲線を有し、縦断線形は上り勾配0.2% (一定)である。

b)解析結果

図9に水平中折れ角の実測値と解析値を示す。この図から以下のことがわかる。

1) 水平中折れ角を使用する位置(距離程)は、実測値と解析値でほぼ一致している。

2) 水平中折れ角は、解析値で約10度に対して、実測値は約8度となり、解析値の方が約2度大きい。

これらは、以下のように考えられる。すなわち、解析値は、エレクター中心で、後胴の向き=トンネルの計画線形の向きを仮定し、前胴先端のカッターフェイスが後胴前端曲線外側の軌跡に接するように求めた中折れ角で、力の釣り合いを考慮していない。一方、実際には、設定した中折れ角の基で、力の釣り合

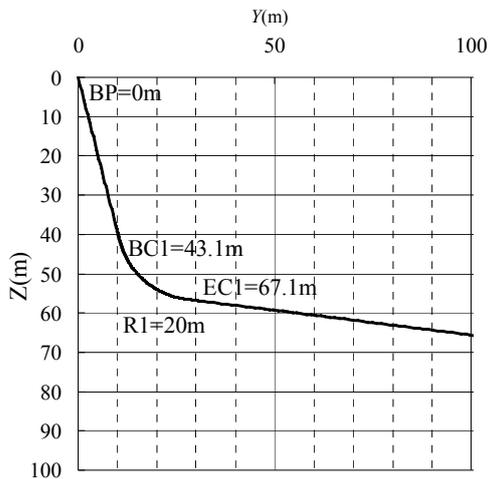


図 8 路線平面図

この結果として前胴と後胴の向きが定まる。したがって、力の釣り合いの結果、後胴が曲線内側を向いている場合、実測値は解析値より小さくなる。この結果は、本計算法で中折れ角やコピーカッター使用条件の初期値を求めた後に、力の釣り合いを考慮してシールドを制御する必要があることを示している。

図 10 に、曲線区間におけるコピーカッターの適用範囲と長さのコンター図を示す。図 10(a)解析値から以下のことがわかる。

- 1) BC, EC 近傍で、曲線外側を最大 50mm 余掘りしている。
- 2) BC 近傍では、曲線内側のコピーカッターによる余掘り量 (156mm) が曲線部 (133mm) より大きくなっている。
- 3) 曲線部では、曲線内側を余掘りしていて、スプリングラインで、最大のコピーカッター長さ 133mm が使用されている。

これらは、以下のように考えられる。

- 1) BC, EC 近傍で曲線外側を余掘りするのは、それぞれ、後胴後端、後胴先端の軌跡が掘削断面内に入るようにするためである。
- 2) BC 近傍で、曲線内側の余掘りが大きいのは、エレクター中心断面の曲線内側の軌跡が掘削断面内に入るようにする曲線部の定常状態と比べて、後胴曲線内側の軌跡が掘削断面内に入るようにする中折れ開始時には、曲線内側の余掘りを大きくする必要があるのである。
- 3) 曲線部のスプリングライン位置でコピーカッター長さが最大になるのは、シールドが掘削断面内に入るために必要で最小のコピーカッター長さを求めているためである。

図 10(b)実測値から以下のことがわかる。

- 1) BC 手前直線部で、下半を 30mm 余掘りしている。
 - 2) BC 直前で全周余掘り (曲線内側 50mm, 曲線外側 70mm) している。
 - 3) 曲線部では、曲線内側 30-180 度の範囲をコピーカッター長さ 80-119mm (BC, EC 近傍を除けば 100mm) で余掘りしている。
- これらは、以下のように考えられる。

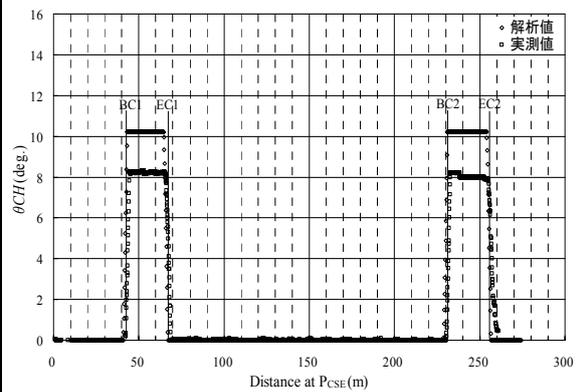
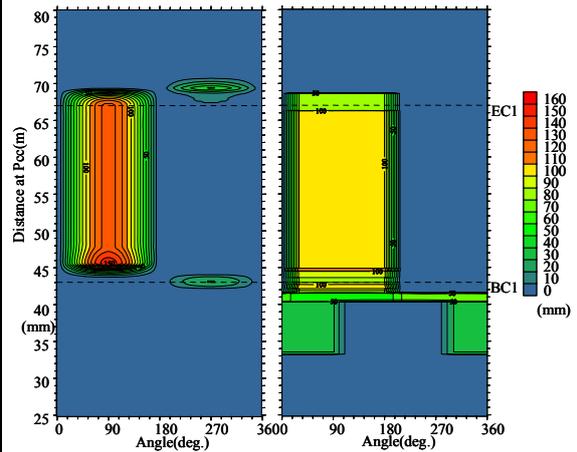


図 9 水平中折れ角の変化



(a) 解析値 (b) 実測値

図 10 コピーカッター適用範囲と長さ

- 1) BC 手前直線部での下半余掘り, BC 直前での全周余掘りは、蛇行修正のためである。
- 2) BC, EC 近傍を除く曲線部で、曲線内側 30-180 度をコピーカッター長さ 100mm で余掘りしているのは、コピーカッターの適用範囲と長さを一定として制御するためである。

上記より、以下のことがいえる。

- 1) 中折れ角は、曲線区間におけるシールド緒元、トンネル線形、シールドの操作条件に依存する。
- 2) コピーカッターの適用範囲は、主法線方向を中心に約 180°の範囲である。
- 3) コピーカッター長さの最大値は、トンネル線形の主法線方向上に存在する。
- 4) 実施工の初期値として、新たに開発したシールド機制御条件計算法を適用できる。

③数値実験による検証

本研究で開発した手法を用いて求めたシールド機制御条件を、シールド機挙動モデルに入力し、シールド機挙動シミュレーションを行い、得られたトンネルの線形をトンネル計画線形と比較し、両者が一致するように、ジャッキ力、ジャッキモーメント、余掘り有効率をトライアルで調整した。シールド機制御条件を図 11 に、シールド機挙動の解析値と計画値を図 12 に示す。ここで、図中の記号の定義は以下のとおりである。

- ・シールド機制御条件 (図 11)

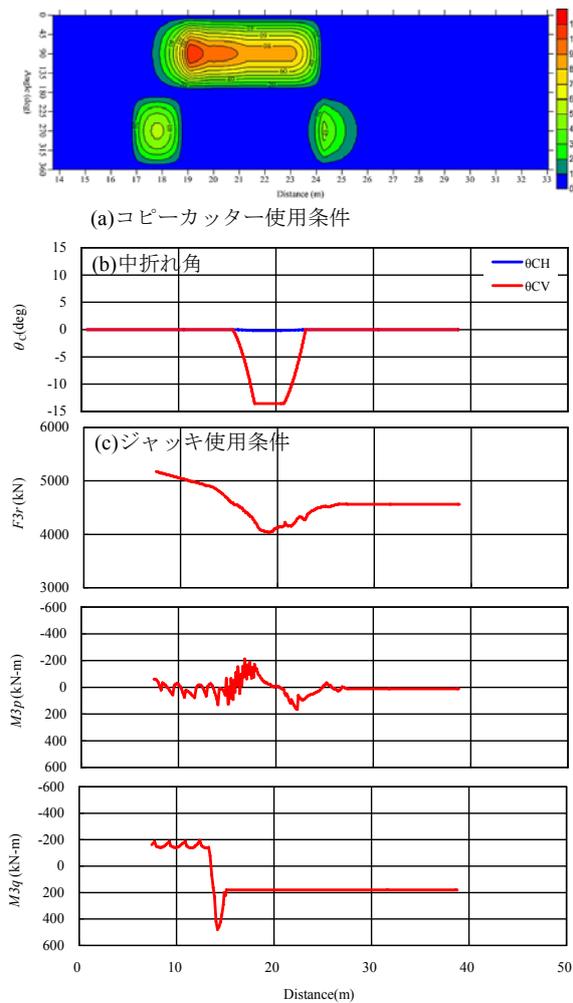


図 11 シールド機制御条件

Distance : 距離程

θ_{CH} : 水平中折れ角 (+ : 前胴左向き)

θ_{CV} : 鉛直中折れ角 (+ : 前胴上向き)

$F3r$: ジャッキ推力 (+ : 掘進方向)

$M3p$: ジャッキ水平モーメント (+ : 右向き)

$M3q$: ジャッキ鉛直モーメント (+ : 下向き)

・シールド機挙動 (図 12)

X : 鉛直座標 (+ : 下向き), v_s : 掘進速度

Plan : 計画値, Cal. : 解析値.

図 12 から, シールドの軌跡と掘進速度の解析値は計画値とよく一致していることがわかる. したがって, 以下のことがいえる.

1) シールド機制御条件計算法で求めた, コピーカッター使用条件 (使用範囲と長さ) と中折れ角は妥当である.

2) 適切なシールド掘進管理条件を設定すれば, 本解析で想定したトンネル線形を掘削可能である.

(4) 得られた成果の意義と今後の展望

本研究により, 三次元空間でのシールド機制御条件の記述と, シールド機の力学的釣り合い条件の考慮ができるようになったことから, 今後増大すると予想される三次元複合線形でのより現実に近いシールド機制御が可能となり, トンネル施工精度の向上, セグメン

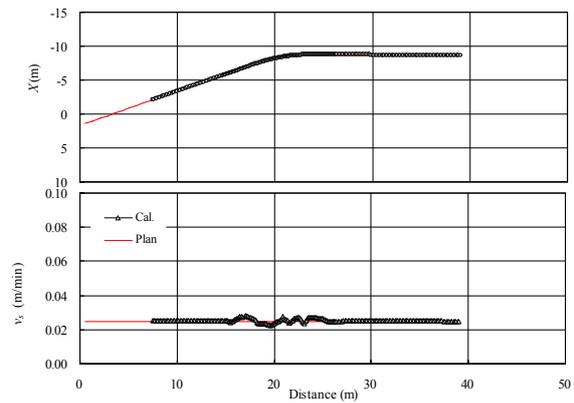


図 12 シールド機挙動

トの損傷軽減, ひいては, トンネル耐久性の向上に寄与すると考えられる.

今後は, 現場データにより提案する手法のさらなる検証を行うとともに, シールド制御システムへの展開を図っていきたい.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

① T.N. Huynh, J. Chen, M. Sugimoto: Analysis on shield operational parameters to steer articulated shield, 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (15ARC), 掲載決定, Fukuoka, Japan, ISSMGE, 2015. (査読有り)

② T.N. Huynh, J. Chen, M. Sugimoto: Study on steering method of H&V shield to construct a spiral tunnel, World Tunnel Congress 2015 (ISBN 978-953-55728-5-5), Extended abstract: pp.356-357, Full paper: pp.1-10, Dubrovnik, Croatia, ITA, 2015. (査読有り)

[学会発表] (計 1 件)

① 今村良輔, 中村良平, Huynh Hai Dong, 杉本光隆: 三次元の幾何学的条件を用いた中折れ装置付きシールドの制御方法とその適用, 第 67 回土木学会年次学術講演会講演概要集 III, III-113, 2012.9.6.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉本 光隆 (SUGIMOTO MITSUTAKA)
長岡技術科学大学・工学研究科・教授
研究者番号 : 50196755

(2) 研究分担者

豊田 浩史 (TOYOTA HIROFUMI)
長岡技術科学大学・工学研究科・准教授
研究者番号 : 90272864

玉井 達毅 (TAMAI TATSUKI)
長岡技術科学大学・工学研究科・助教
研究者番号 : 30633911