

現場施工データに基づく大断面シールド機の挙動解析

Behavior analysis of the large-cross-section shield machine based on field measuring data

田嶋仁志¹・岸田政彦²・団 昭博³・斉藤正幸³

Hitoshi Tajima, Masahiko Kishida, Akihiro Dan and Masayuki Saitou

¹正会員 工博 首都高速道路公団 工務部設計技術課 (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関1-4-1日土地ビル)

²正会員 首都高速道路公団 工務部設計技術課 (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関1-4-1日土地ビル)

³正会員 工修 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 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里2-26-2)

With an analytical system that models the excavator of a shield tunneling machine and its peripheral ground and selects appropriate conditions of excavating by numerical analysis, this report discusses the influence of construction conditions on segments. For the discussion, construction loads on segments and tail clearances obtained by behavioral analysis of the shield tunneling machine were evaluated quantitatively through reverse analysis based on construction data on the behavior of the shield tunneling machine.

Key Words : Large-cross-section shield tunneling, behavior of shield tunneling machine
simulation analysis, construction load

1. はじめに

シールド工事では、シールド機の掘進に伴って計画線形とのずれ(蛇行)が発生するため、道路シールドトンネルでは蛇行量の発生を考慮して内空断面を設定し、施工管理を行っているのが一般的である。この蛇行量が予想以上に大きく発生した場合には、ジャッキ推力やジャッキパターンを使用して計画線形へと修正するが、その際にジャッキ推力やテールシールド圧力等の施工時荷重がセグメントに作用し、セグメントに悪影響を及ぼすことが懸念される。

一方、近年のシールドトンネルでは、セグメント厚の縮小や広幅化等の合理的なセグメント構造を採用する事例が増加しており、施工時荷重の作用によりセグメントに及ぼす影響が、より顕著になることが予想される。しかし、施工時荷重の実態が解明されていないのが現状である。

そこで本報告は、施工時荷重の影響がシールド機の挙動に関連することに着目し、大断面シールド機の挙動を把握

することを目的として、シールド機の挙動解析を実施した。また、線形の違いによるテールクリアランスの変化についても定量的に評価を行った。

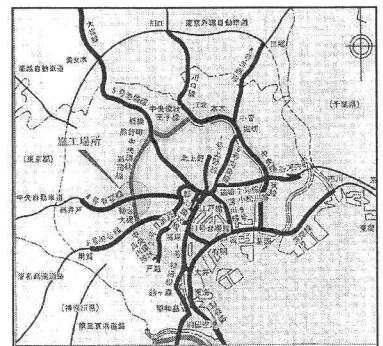


図-1 西新宿シールド

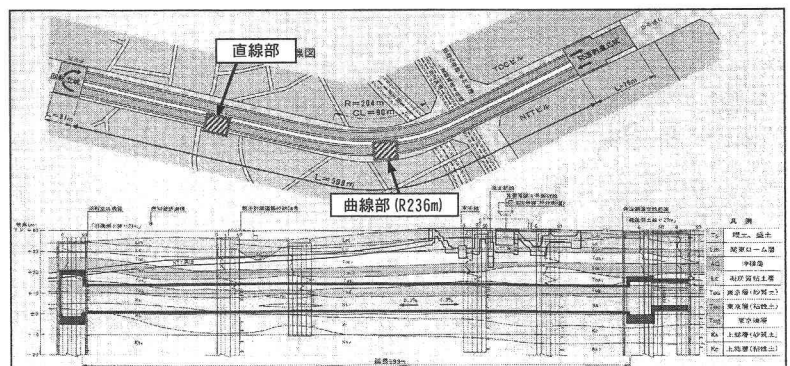


図-2 路線平面図および地質縦断

2. 現場計測データ

(1) 現場概要

本解析では、中央環状新宿線で唯一シールド掘進が完了している西新宿シールド(図-1)を解析対象とした。西新宿シールドは、国道20号線(甲州街道)と交差する初台交差点付近の都道環状6号線(山手通り)地下に構築する、施工延長599m、土被り21m～27m、最小離隔2.6mの併設トンネルである。また、施工区間の中間付近には、当該シールドの規模で急曲線施工となる区間(外回り; R204m, 内回り R236m)が存在する、極めて厳しい施工条件である。施工付近の地質状況は図-2に示すように、地表面より表層、関東ローム層、東京層(砂層・粘土層)、東京礫層および上総層群で構成されており、このうち東京礫層および上総砂層を泥水式シールド工法によって掘進する。西新宿シールドのトンネル諸元ならびに地盤物性値を表-1および表-2に、それぞれ示す。

なお、本現場で用いられたシールド機は、図-3に示す泥水式中折れシールド機(最大中折れ角 1.5°)で、曲線部では中折れ機構、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されている。

(2) 計測データ

本解析は、線形の違いとシールド機の挙動の関係を把握することを目的としているため、セグメントの挙動計測を実施した内回り区間のうち、直線部およびR236m曲線部を解析の対象とした。本解析の対象範囲を含む施工区間における、リング毎のシールド機制御ならびに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 、 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、チャンパー内泥水密度を、また、 CCR はコピーカッター範囲を示してある。なお、鉛直中折れ角は直線部および曲線部ともに0度であった。

3. 挙動予測解析

(1) 解析方法

表-1 トンネル諸元

シールド機	外径	13,230mm
	長さ	13,120mm
セグメント	外径	13,000mm
	内径	11,900mm
	厚さ	550mm
	幅	1,200mm

表-2 シールド通過地盤物性値一覧

地層	Tos2	Tog	Ks1
湿潤密度 (kN/m^3)	19	20	18.6
粘着力 (kN/m^2)	20	0	38
内部摩擦角 (deg)	34	40	37
土圧係数 K_{H0} K_{V0}	0.44	0.36	0.40
	1.00	1.00	1.00
地盤反力係数 水平 (MN/m^3) 鉛直 (MN/m^3)	18.2	78.2	91.0
	18.2	78.2	91.0
切羽土圧係数 a b	30	30	30
	1	1	1
地盤-鋼の摩擦 動摩擦係数 付着力 (kN/m^2)	0.1	0.1	0.1
	0.0	0.0	0.0
N 値	14	50	50

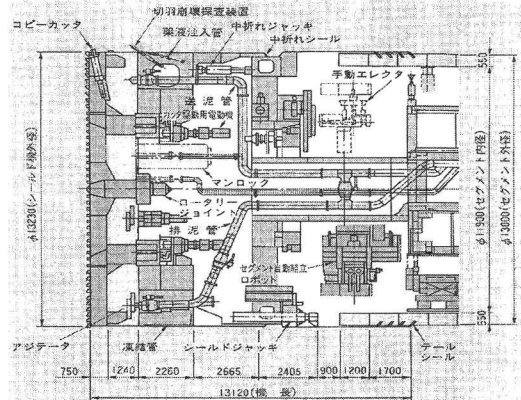
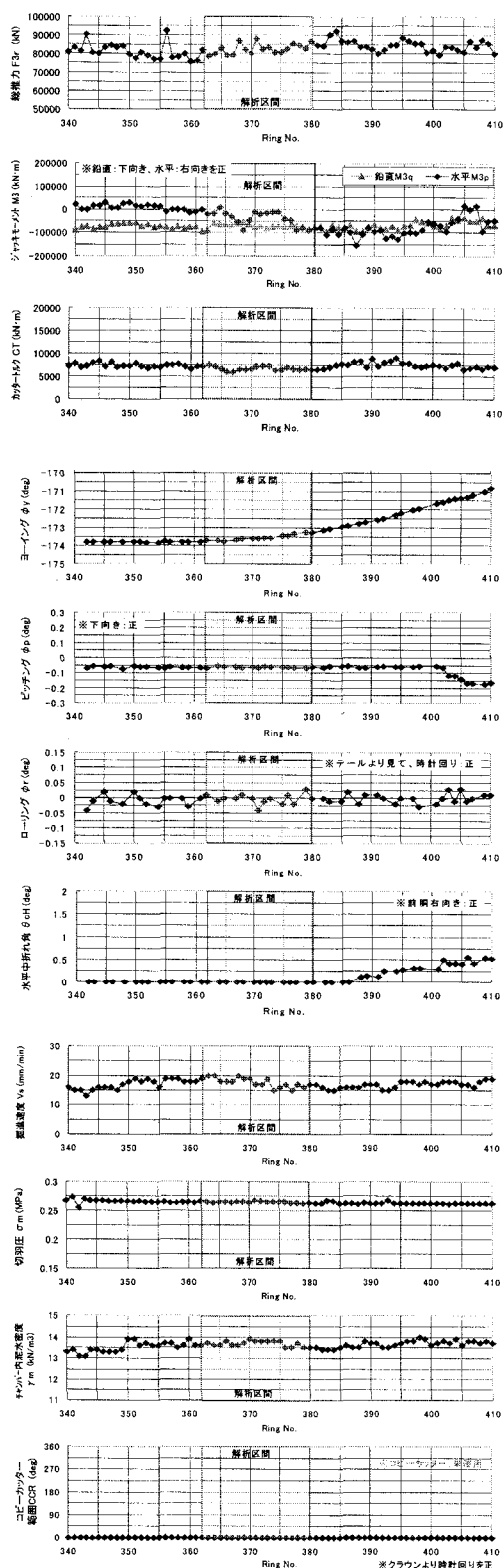


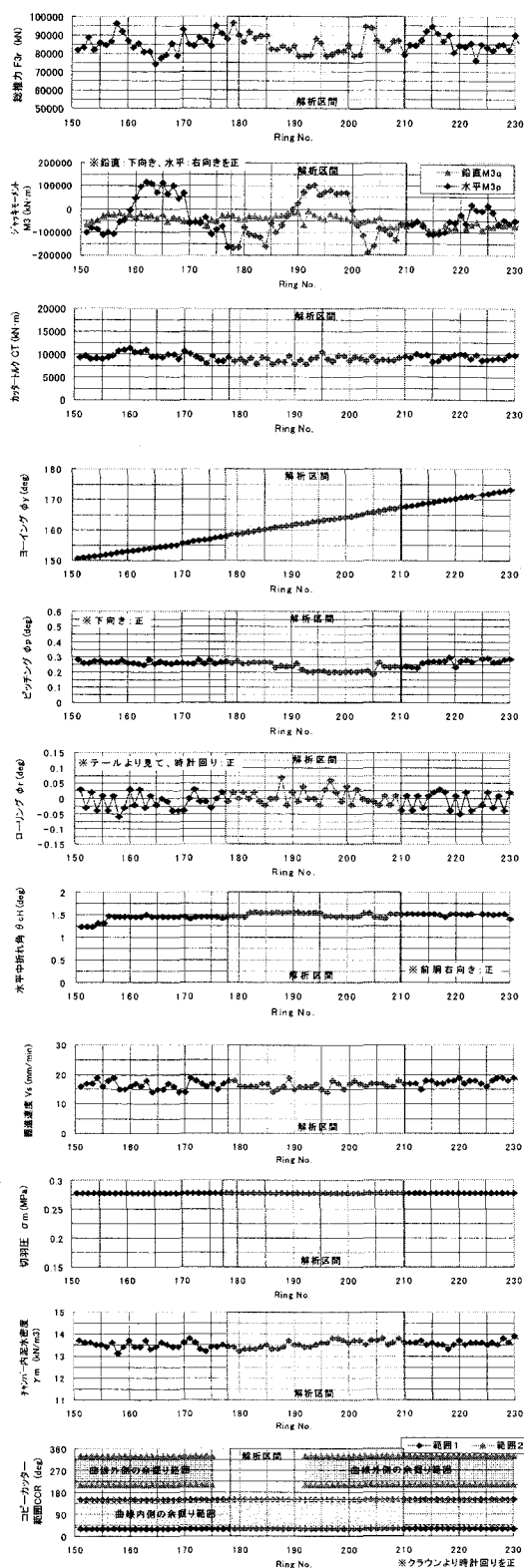
図-3 シールド機構造諸元

本解析に用いたシールド機動力学モデル¹⁾は、過去に掘削した空間(掘削領域と称す)、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²⁾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



(1)直線部



(2)曲線部

図-4 現場計測データ

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。

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

これらより、図-4に示した計測データのうち F_{3r} , M_{3p} , M_{3q} , θ_{CH} , σ_m , γ_m および CCR が本解析の入力条件となり、 ϕ_y , ϕ_p , ϕ および r_s に対して計測データと比較することで解析手法を評価している。

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。

(2) 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、シールド機の位置・回転角、コピーカッター長さ和使用範囲を用いて、直線部では342 Ringから361 Ringを、曲線部では151 Ringから

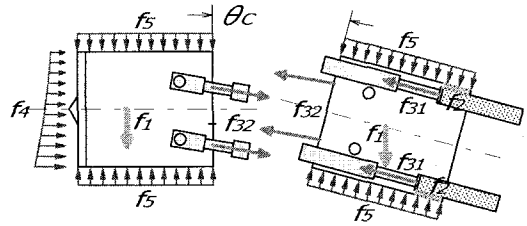


図-5 中折れシールド機力学モデル
 f_1 : シールド機自重による作用力 f_4 : 切羽作用力
 f_2 : シールドテール作用力 f_5 : スキンプレート作用力
 f_3 : ジャッキによる作用力 θ_c : 中折れ角

図-5 中折れシールド機力学モデル

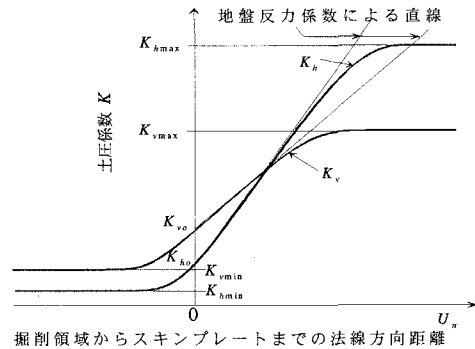


図-6 掘削領域からスキンプレートまでの法線方向距離と土圧係数の関係¹⁾

177Ringを掘削領域（初期設定のための解析区間）に設定した後、リング毎のシールド機の制御データを用いて、直線部では362 Ringから380 Ringまで（長さ23m）、曲線部では178 Ringから210 Ringまで（長さ40m）のシールド機の挙動予測を行った。

(3) 解析結果

直線部の解析結果として、図-7に掘進速度を、図-8にシールド機姿勢制御に関する情報（ヨーイング、ピッチング、ローリング）を、図-9にシールド機の中折れ中心位置における掘進軌跡の時系列変化を示す。これらより、計算値と実測値の誤差は、縦断線形（Z座標）で最大1cm、ピッチングで最大5min程度であり、掘進速度、ローリング、ヨーイングおよび平面線形（X, Y座標）については整合性が高いことが確認できる。よって、本モデルによるシールド機の挙動予測結果は、実機の挙動を概ね再現できたと考えられる。なお、ピッチングの誤差については、計測機器の誤差および掘削地盤に関する情報の不確かさが影響しているものと考えられる。

一方、曲線部の予測解析結果として、図-10に掘

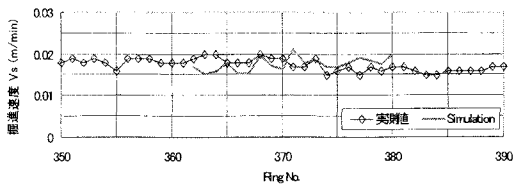


図-7 掘進速度の比較 (直線部)

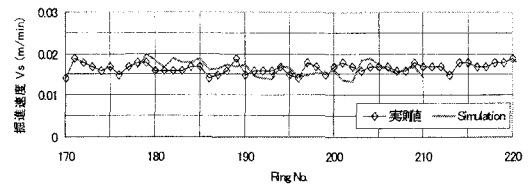


図-10 掘進速度の比較 (曲線部)

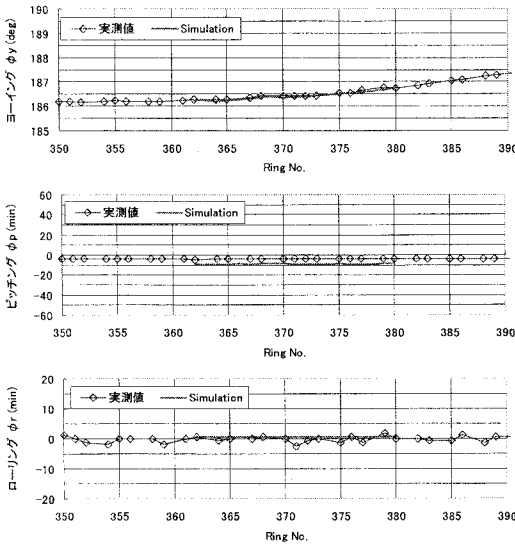


図-8 シールド機姿勢制御データの比較 (直線部)

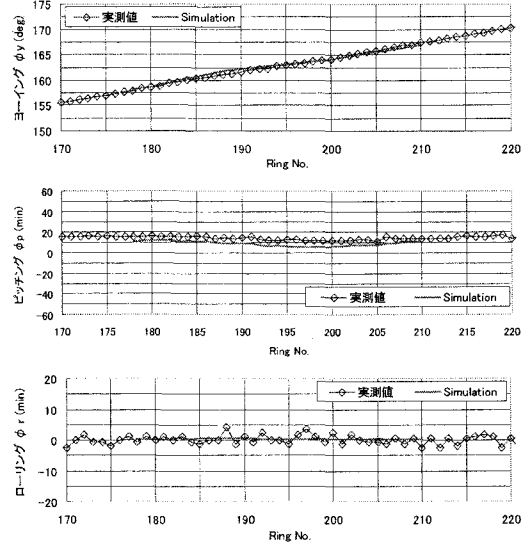


図-11 シールド機姿勢制御データの比較 (曲線部)

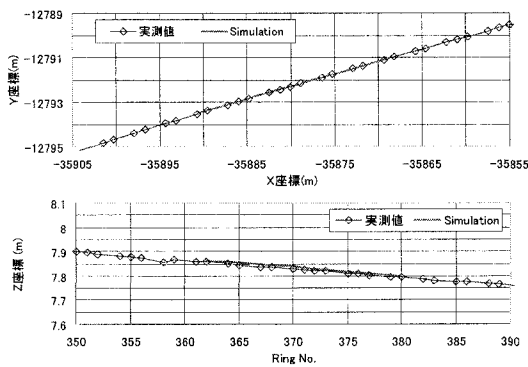


図-9 中折れ中心位置での掘進軌跡の比較 (直線部)

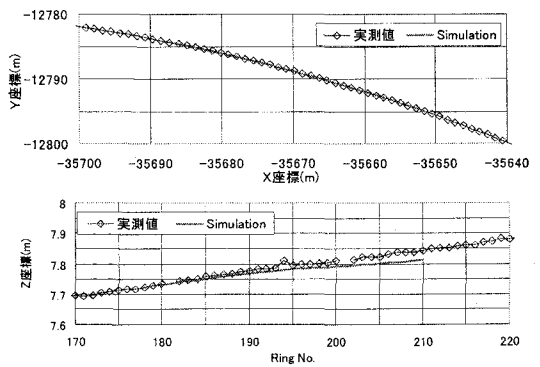


図-12 中折れ中心位置での掘進軌跡の比較 (曲線部)

進速度を、図-11にシールド機姿勢制御に関する情報(ヨーイング、ピッチング、ローリング)を、図-12にシールド機の中折れ中心位置における掘進軌跡の時系列変化を示す。これらより、計算値と実測値の誤差は、縦断線形(Z座標)で最大3cm、ピッチングで最大5min、ヨーイングで1° (185Ringから190 Ring)であり、掘進速度、ローリング、および平面

線形(X,Y座標)については整合性が高いことが確認できる。よって、本モデルによるシールド機の挙動予測結果は、実機の挙動を概ね再現できたと考えられる。なお、縦断線形ならびにヨーイングの誤差については、本解析で使用した実測値が1リングの代表値を用いていること、曲線部では中折れ角、コピーカッターの使用範囲やコピーカッターストロー

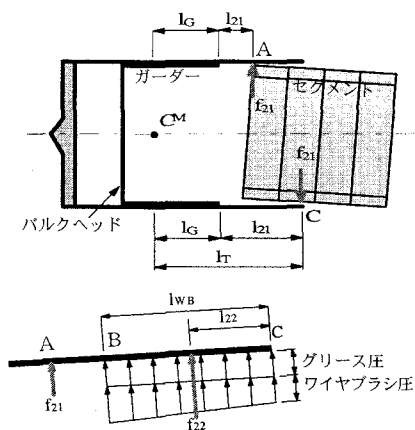


図-13 スキンプレートとセグメントの位置関係

クといった、施工情報が解析パラメータとして加わったことによるものと考えられる。これらについては、より細かい測定間隔の実測値を用いた解析を実施することにより、解析精度を向上させることができると思う。

以上のことから、本モデルを用いることにより、異なる線形に対しても大断面シールド機の挙動を再現することが可能と判断される。

(4) セグメントへの作用力に関する検討

シールド掘進時にセグメントへ作用する施工時荷重を推定するために、シールド機挙動予測解析よりテールクリアランスの分布状態を、図-13に示すようにセグメント組立位置 (A点)、テールシールの切羽側端部 (B点) およびシールドテール位置 (C点) の3箇所について定量的に把握した。表-3に直線部および曲線部でのテールクリアランス分布を示す。これより、以下のことがわかる。

- ・直線部のテールクリアランスは、セグメントリング全周に対しておおそ均等に分布しており、セグメント組立位置では設計値が45mmに対して解析値は最小で43mmと同水準である。また、トンネル軸方向の各点 (A, B, Cの各点) で比較すると、テール端部のC点でテールクリアランスは40mmと蛇行の影響により僅かながら減少しているものの、いずれの位置において同程度のクリアランスが確保されていることがわかる。
- ・これに対し、曲線部のテールクリアランスは、セグメントをシールドテール内の中央付近に組み立てた状態 (A点) であっても、計画線形を確保するために中折れ角やシールドジャッキパターンを工夫して掘進することにより、シールド機の掘進

表-3 テールクリアランス分布

	直線部 (373Ring 掘進中)	曲線部 (203Ring 掘進中)
ジャッキパターン		
テールクリアランス分布		
最小値	A点 43mm B点 43mm C点 40mm	A点 37mm B点 35mm C点 14mm

※) 設計テールクリアランス: 45mm

方向とセグメントの軸の差 (偏角) が生じ、これにともなってテール端部 (C点) では曲線内側のクリアランスがA点に比べて1/3程度にまで極端に小さくなる可能性がある。本解析ではセグメントリングを剛体とし、かつ真円としてモデル化しているが、実施工では、自重や土水圧などの作用にともなってセグメントリングは変形していること、さらに組立誤差があることなどを考慮すると、このような傾向はより顕著となる可能性がある。

以上のことから、直線部ではテールの位置によらずテールクリアランスの変化は小さいことから、セグメントに作用するテールシール圧は概ね均等に作用すると思われる。これに対し、曲線部ではテール

ル内の中央にセグメントを組み立てたとしても、テール端部では極端にテールクリアランスが小さくなるため、セグメントに作用するテールシール圧はセグメント断面方向のみならずセグメント幅方向に対しても局部的に高くなるものと考えられる。このことから、曲線施工区間では、テールシール圧の影響を三次元的に受けやすい状況にあるといえる。

4. まとめ

掘進線形として直線部および曲線部を想定し、シールド機挙動予測解析によりセグメントへ及ぼす施工時荷重の影響を検討した結果を以下にまとめる。

- ・実施工データに基づいた大断面シールド機の挙動に関する逆解析を行った結果、直線部、曲線部ともにシールド機の挙動を再現できた。
- ・直線部と曲線部との総推力および使用ジャッキ本数を比較すると、曲線部の方が少ないジャッキを使用して大きな総推力を発生させており、セグメントに作用するシールド機作用力として考えると厳しい状況にある。
- ・挙動予測により得られたテールクリアランスの分布を比較すると、直線部ではセグメントリング全周に対しておおよそ均等に分布するのに対し、曲

線部では中折れや使用ジャッキパターンの影響により、シールドテール端部では曲線内側のクリアランスが極端に小さくなる可能性がある。また、セグメント横断面方向のみならずセグメント幅方向に対しても、テールシール圧は局部的に高くなるといえる。

これらのことから、ジャッキ推力ならびにテールシール圧等の施工時荷重がセグメントに及ぼす影響を把握するためには、セグメントリングならびにセグメントに作用する施工時荷重を三次元でモデル化した数値解析を実施することが望ましい。

今後は、本解析により得られた施工時荷重がセグメントへ及ぼす影響を把握する。さらに、施工時荷重の影響を考慮した設計手法について検討を進めていきたい。

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, pp163-182, 2001.3
- 2) 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.