

シールドトンネルの CIM モデルの開発

シールド 3D 線形シミュレーションおよび CIM モデル作成システム

河越 勝

近年、土木工事において CIM の導入が進んでいるが、シールドトンネルにおける CIM のスタイルは確立されていない状況にある。今回、シールドトンネルの 3D モデルを用いて施工時の線形シミュレーションを行い、その後 3D モデルに属性を付与することで CIM モデルを作成する一連のシステムを開発した。

本稿では、3D モデルの作成方法、3D モデルを用いた線形シミュレーション方法、3D モデルに属性を付与した CIM モデルの作成方法、および一連のシステムの開発について述べる。

キーワード：シールドトンネル、CIM、線形シミュレーション、3次元 CAD

1. はじめに

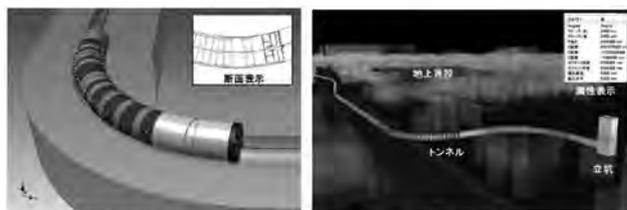
CIM は、計画、調査、設計段階から 3 次元モデルを導入することにより、その後の施工、維持管理の各段階においても 3 次元モデルを連携・発展させて事業全体にわたる関係者間の情報共有を容易にし、一連の建設生産システムの効率化・高度化を図るものである¹⁾。

今回、シールドトンネルの施工管理と維持管理を対象に CIM モデルの開発を行った。施工管理についてはシールドの 3D モデルを用いた「3D 線形シミュレーションモデル」、維持管理についてはシールド 3D モデルに属性を付与する「CIM モデル」の作成をシステム化した。

2. シールドトンネルの 3D モデル

シールドトンネルの 3D モデル化においては、その運用時期により「① 3D 線形シミュレーションモデル」と「② CIM モデル」の二種類を使い分ける必要があると考えた（図-1）。

「3D 線形シミュレーションモデル」は、施工前および施工中に運用するものであり、仮想空間にトンネルを構築し施工検討を行う。セグメントをリング継手面で接合拘束して、セグメント組立方向やシールド機の方向などを可変パラメータとして変化させ施工時のシミュレーションを行う。3次元のメリットは、水平方向と鉛直方向両方の検討が一度に出来る事、および斜め方向の測定やローリングの影響確認が容易なことなどである。



モデル	運用時期	内容・項目
①3D線形シミュレーションモデル	施工前	セグメントテーブル量検討 セグメント割付 シールド装置中折れ角チェック テーブルセグメント使用シミュレーション
	施工中	ジャッキストロークシミュレーション 中折れ角設定シミュレーション 蛇行量変化予想 クリアランス変化予想
②CIMモデル	施工後	セグメント種類、組立方向、蛇行量を自動モデリング ↓ NavisWorks (CIMソフト)に取込み、属性(リング種、検査記録等)を付加

図-1 シールドトンネル 3D モデル

「CIM モデル」は、施工後に運用するものであり、実際に組み立てた位置にセグメントを配置して、リング単位で掘進データなどの属性を与えて維持管理にも活用するモデルである。

3. 3D 線形シミュレーションモデル

(1) 概要

シールドトンネルの施工管理において線形管理は最も重要な項目である。特にシールド機とセグメントの位置関係を把握することが「シールド機の方向制御」や「テール部の競りによるセグメントの損傷防止」の観点において重要であり、従来は測量結果を方眼紙に手書きでプロットして確認と予測を行ってきた。今回、Excel と機械系 3 次元 CAD を連動させ、仮想空間にトンネルを構築し施工シミュレーションすること

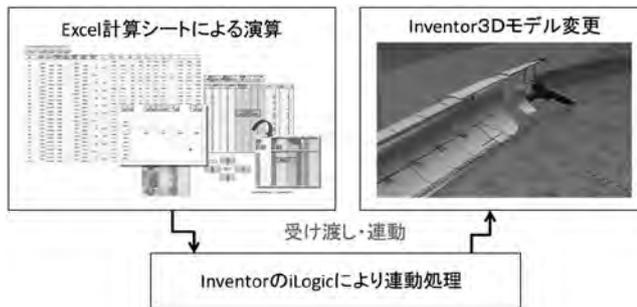


図-2 3D線形シミュレーションにおけるデータの流れ

により、2次元の作図では測りきれない部分まで把握可能なシステムを開発した。本システムの特徴は、Excelシートの一覧表に入力した数値諸元に連動して、3DCAD上のモデル形状と位置が変化することである(図-2)。3DCADは「パラメトリックモデリング機能」と「Excelとの連携機能」に優れた機械系3DCADのInventorを使用した(パラメトリックモデリング機能とは、3Dモデルが持つ寸法情報、接続情報などを後から変更することで形状を変えることが出来る機能のことである)。これにより、どのようなシールドトンネルでも、3DCADを直接操作する事無く、仮想空間でのシールドの動作シミュレーションを行うことが出来る。

(2) 目指す効果と手段

本システムは「トンネル蛇行量の低減」と「セグメントの損傷防止」を目指すものであり、そのために以下の検証やシミュレーションを行う。

<計画段階>

- ・セグメントの割り付け計画やシールドスペックの検証

<施工段階>

- ・施工段階におけるセグメント組立計画(テーパ使用位置および組立方向)の検証
- ・施工段階におけるシールド機の制御計画(中折れ角、ジャッキストローク差など)の検証
- ・施工段階における蛇行量予測および蛇行修正シミュレーション

(3) 3D線形シミュレーションモデル例

線形シミュレーション作業のフローは以下のとおりである(図-3参照)。①測量結果をExcelに入力する。②3DCAD上でExcelに入力したデータを読み込むことで現状の3Dモデルが作成される。③現状把握後、今後のセグメントの組立計画やシールドのコントロール計画をExcelに入力する。④再度3DCAD上で

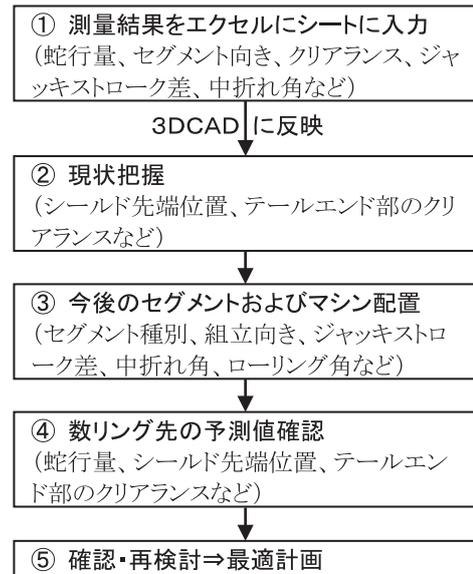


図-3 線形シミュレーション作業フロー

Excelデータを読み込むことで数リング先のシールド先端位置やテールクリアランスの変化が作図される。⑤以上のシミュレーションを行い施工計画に反映させる。

図-4に作図されたモデル例を示す。切羽部のセグメント(囲み部分)が測量結果に基づき3Dモデル上に固定配置され、それに連結して予測セグメントが配置される。予測セグメントはリング継手面と中心点を拘束し、組立方向やテーパ量はExcelシートに入力されたパラメータに従って変化する。これにより、実際の施工と同様の動きを仮想空間内で実現させた。また、シールド機のジャッキストローク差、中折れ角などを変化させることで設計中心線とのズレを目視確認できる。

Inventorは任意の方向の断面を2次元図として表示することが可能である。図-5は水平方向の断面を出力したものであり、蛇行量を数値で確認できる。

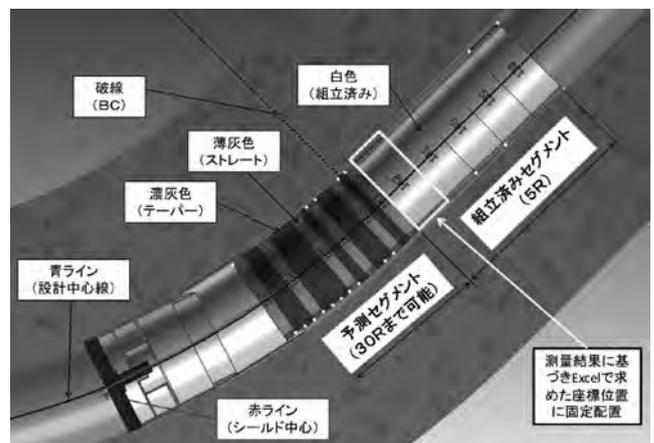


図-4 3D線形シミュレーションモデル例

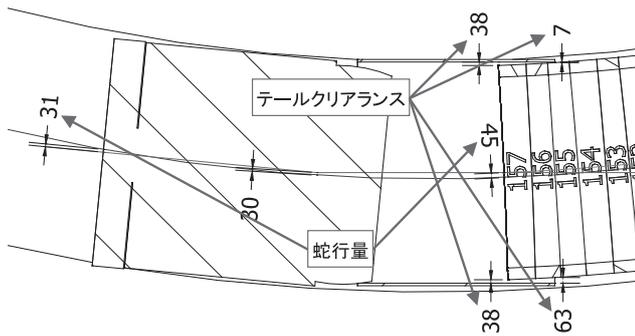


図-5 シミュレーション結果作図例

また、テールクリアランスも任意の位置で確認できる。

以上の施工シミュレーションを用いて蛇行量とテールクリアランスを予測することにより高品質なトンネルの築造が可能となる。

(4) 急曲線部での活用事例

以下に R=20 m の急曲線における検討例を示す。シミュレーション作業は 3D モデルを目視確認して繰り返し行なったが、確認作業は平面図に出力したものをを用いた。ここでは縦横縮尺比を 1:3 にしたもので解説する。

曲線施工の事前検討を平面図に出力したものが図-6 である。曲線施工時はシールド先端位置が設計中心線をトレースすること、テールクリアランスが確保されていることが重要であり、この検討例は十分両者を満足している。

次に、急曲線の入口における検討事例を図-7~9 に示す。図-6 と同様のシールド中折れ角を設定したところ、図-7 に示すようにシールド先端部がオーバーランとなる事が確認された。これは、カーブ直前のセグメントが直線用の幅 1,000 mm のセグメントであることより、クリアランスの確保を重視してストローク差を付けない事によるものである。図-6 と同様のストローク差を設定したものが図-8 であるが、この場合はテールクリアランスが不足し、セグメントが損傷する恐れがあることが懸念された。そこで、テールクリアランスを確保した状態でシールド先端部を設計中心線に合わせるように中折れ角を増加させたのが図-9 である。以上、曲線の入り口においては一時的に曲線内の標準的な中折れ角より大きな角度を設定する事が良いことが確認された。

このように曲線の入口部や出口部において、シールドとセグメントの挙動が現状に即して想定できることが優れた機能であり、実施工においても良好な結果を得た。

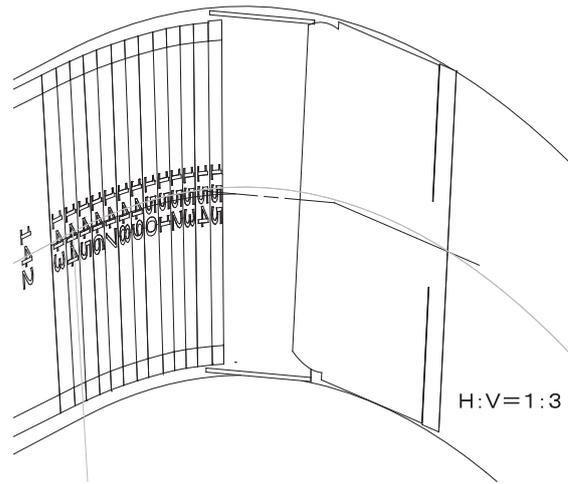


図-6 急曲線 (R=20m) 検討

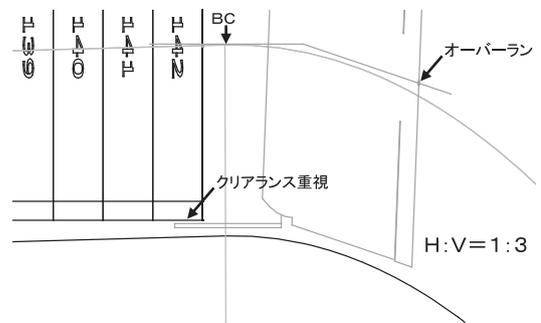


図-7 急曲線 (R=20m) 入口部検討【ケース1】

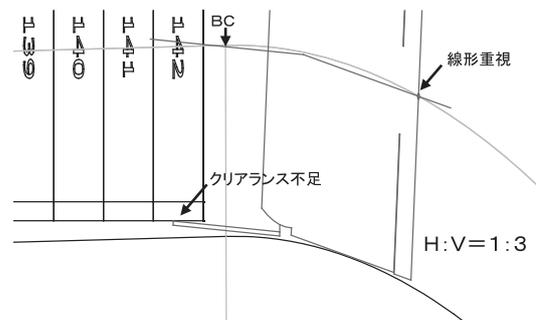


図-8 急曲線 (R=20m) 入口部検討【ケース2】

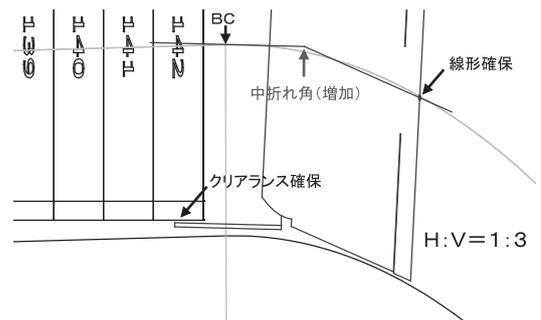


図-9 急曲線 (R=20m) 入口部検討【ケース3】

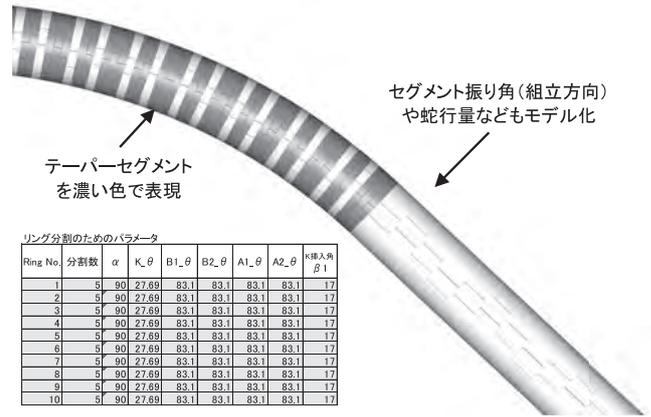
4. CIM モデル

(1) 概要

CIM モデルにおいては、セグメントのピース分割までモデル化し、振り角（組立方向）や蛇行量までを再現し、作成したモデルにリング単位で施工データを属性として付与し維持管理に活用可能なモデルとした。

(2) 3D モデル作成

セグメントモデルは、データサイズやパソコンの能力などの関係から、各ピースのアウトラインレベルまでを形状化した。ピース分割やKセグメントの挿入角なども一覧表に諸元を入力することで自動生成する（図—10）。

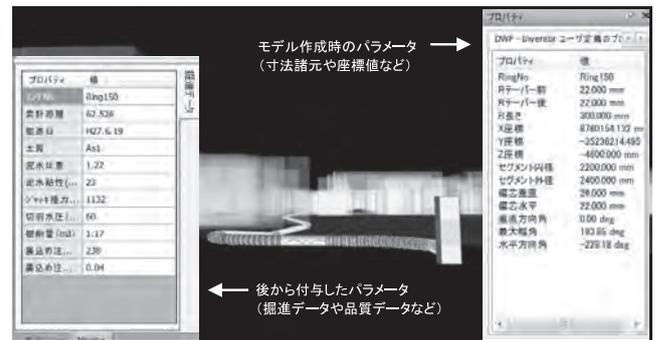


図—10 ピース分割モデル

(3) 3D モデルから CIM モデルへの変換

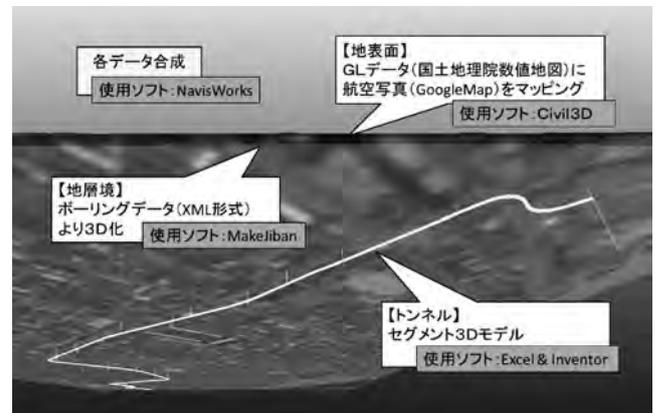
CIM モデルは、3次元モデルに属性情報が付与されたものである。Inventor で作成したモデルを Navisworks (3D データを属性も含めて統合するソフト) で読み込み、掘進時のデータを付与した状況を図—11 に示す。

図—11 の右表の属性値はモデルを作成するときに与えたパラメータであり、リング毎のプロパティとして直接取り込まれる。図—11 の左表の属性値は掘進データであり、Navisworks のアドオンソフトを用いて追加したものである。このように、検査記録や品質データなどを必要に応じて後から追加することが可能である。



図—11 属性値の付与（Navisworks 上で合成）

図—12 が地表面の標高データと写真画像や地層境のデータを合成したものである。このように必要に応じて他のソフトで作成したモデルデータを合成することで使用用途が広がるものとする。



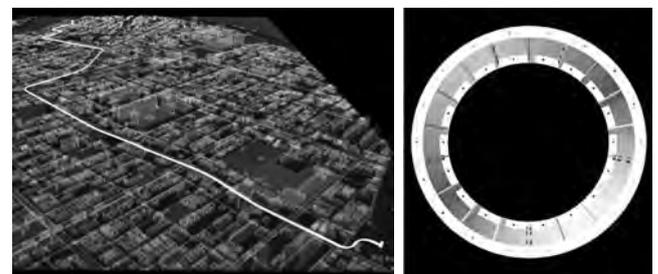
図—12 複合 3D モデル例（トンネル下部より見上げた視点）

(4) CIM モデルの課題と考察

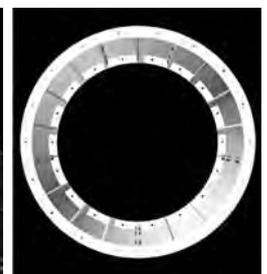
(a) データサイズとモデルの作り込みレベル

今回、実施工データを用いてモデルを作成したが、約 3,000 リング×5 ピースのデータ量であり、モデルの作成に時間を要し、またデータの処理にもパソコンにかなりの負荷がかかるものであった。図—13 が地上構造物とトンネルを合成した全体のモデルであるが、このようなモデルにセグメントの細部までを作り込むのは現実的では無い。

3D モデルはその活用場面に応じて詳細度のレベルを変えて作り込むべきであると考えられる。例えば、CIM モデル作成仕様<橋梁編>²⁾では、部材のアウトライン形状モデルの「レベル1」から、全ての部材を正確に表現する「レベル4」までの4段階のレベル



図—13 全体モデル（地上&トンネル）



図—14 単リングモデル

が設定されている。シールドトンネルにおいては、図—13 のような全体モデルではセグメントピースのアウトライン形状（レベル2相当）までが限界と思われる

表-1 ファイル形式と無償ビューワーソフトとの互換性

ファイル形式	拡張子	無償のビューワーソフト	互換性
Navis データ	nwd,nwf	Navisworks Freedom	外部リンクファイル以外は全て読み込み可能
3DPDF	pdf	Acrobat Reader	Inventor から変換可能だが属性が失われる
IFC	ifc	Solibri Model など	Inventor から変換可能だが全てが一つのパーツになり、属性も失われる

る。セグメントピースの詳細形状（レベル4相当）は図-14のような単リングモデルを別ファイルで作成し、全体モデルのプロパティでリンク付けをすることが現実的と考える。

(b) ファイル形式および汎用ソフトとの互換性

CIMモデルは維持管理に寄与することが目的の一つであり、そのためには構造物の管理者がデータを容易に閲覧できなければならない。今回作成したデータと無償のビューワーソフトとの互換性を表-1に示す。

Navisworksで作成したファイルは、Navisworks Freedomという無償のビューワーで殆どそのまま読み込むことが可能である。しかしながらNavisworksはその他の中間形式のファイルへの書き出し機能が少なく汎用性に欠けるところが課題である。セグメントモデルの作成を行ったInventorは、3DPDFやIFC形式での書き出し機能があるが、いずれも属性情報が失われた単なる3次元モデルとなる。

CIMモデルを活用するためには、ファイル形式の標準化と属性データを含めたデータ変換方法が必要不可欠と考える。

5. おわりに

本システムはExcelシートに連動して3次元モデルを自動作成するもので、殆どのシールドトンネルに適用可能であることより、今後の工事にも活用し、更に実用性を高めて発展させる所存である。

JICMA

《参考文献》

- 1) 国土交通省 CIM 導入推進委員会 CIM 導入ガイドライン（案）第1編共通編 4p 2017年3月
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所 社会資本マネジメント研究センター 社会資本情報基盤研究室 CIMモデル作成仕様（検討案）＜橋梁編＞ 5p 2015年4月

【筆者紹介】

河越 勝（かわごえ まさる）
 ㈱熊谷組
 土木事業本部
 シールド技術部長

