

## 17. シールドトンネルのプロダクトモデルの開発と応用

大阪大学  
株式会社コンポート  
株式会社大林組

○ 矢吹 信喜  
有賀 貴志  
古屋 弘

### 1. はじめに

2008年より国土交通省が推進している情報化施工では、3次元モデルとGPSや種々のセンサー類のデータに基づいて、施工機械を半自動的にコントロールするAMC、オペレータの操作を支援するAMGおよび効率的な出来形管理などが実施されている。さらに、建築分野で進められてきているBIM (Building Information Modeling) の土木版であるCIM (Construction Information Modeling) を国土交通省では進めようとしている。

こうした技術の中核に位置するのが3次元モデルであるが、特定のアプリケーションソフトウェアに依存するとデータの互換性がなく、異なるソフトウェア間でデータの効率的な交換や共有ができない。そこで、ISO (International Organization for Standardization) では、オブジェクト指向技術に基づいた3次元プロダクトモデルの標準化を推進している。機械分野では、ISO 10303 (略称STEP: Standard for the Exchange of Product model data) として、かなり規定化されている。一方、建築分野では、buildingSMART International (元IAI: International Alliance for Interoperability) が建物のプロダクトモデルIFC (Industry Foundation Classes) を開発し、ISOの国際基準にすべく活動している。最近BIMモデルと言われるのはこのIFCを指すことがほとんどである。

土木分野では、道路についてはLandXMLが世界各国で既に使用されているが最近は更新されていない。国土交通省では道路中心線形のデータモデルを公開している。橋梁については日仏の協力によりIFC-Bridge<sup>1)</sup>を開発し、IFCへ取り込まれることを狙ったがまだ実現していない。シールドトンネルについては、日本はその施工実績について延長で世界の約2分の1を占めていることもあり、今後の国際展開等を考慮して、プロダクトモデルIFC-ShieldTunnelを以前開発した<sup>2)3)</sup>が、あまり利用されなかった。その主な理由は、CAD等のソフトウェアベンダーが新しいプロダクトモデルとの互換性を持つデータ変換プログラムを開発しないか

らである。ベンダーは、ISOや国で新しいプロダクトモデルを標準として扱おうとするまで待っているため、何もしなければ互換性のあるソフトウェアは作られない。そこで、我々は、以前開発したIFC-ShieldTunnelを精査し、改善すべき点は修正し、より汎用性があり使いやすいものにする事とした。さらに、構築し直したIFC-ShieldTunnelを実際のシールドトンネル工事に適用するために、データ交換において工夫を凝らし、対象とした施工現場で検証を実施することとした。

### 2. プロダクトモデル

プロダクトモデルは、CADをはじめ、計画、解析や設計計算、積算、施工計画、施工管理、点検、維持管理などライフサイクルで使用される異なるソフトウェア間で構造物の形状、属性、関係などの種々のデータを共有したり、交換するために開発されたオブジェクト指向技術に基づいた汎用的なデータモデルである。プロダクトモデルを開発する上で、各部材の名称や範囲、お互いの関係を明確にすることが重要である。プロダクトモデルの構築では、構造物や部材などのオブジェクトをエンティティと呼び、エンティティをいくつかの部分に階層的に分割していく方法(part-ofの関係)と似ているが異なるものをいくつかの種類に分類していく方法(is-aの関係)の2つの方法で全体を構成する。さらに、これら2つの関係以外の関係、すなわち、「支持される」や「接している」などを加える。また、エンティティの寸法や材質、仕様などの属性を定義する。当初は、部材等の物体のみをエンティティとして定義していたが、製造や施工などのプロセスもプロダクトと関連付けて定義したり、設計、施工、利用者などの人間などもプロダクトモデルの一部として定義されるようになっていく。

従って、プロダクトモデルを構築する際、目的、範囲や詳細度を決めないと、際限なくなってしまう、膨大で完成が不可能となる。また、専門、国、地域などによって、エンティティのとらえ方が異

なるため、全員の完全な合意を得ることも困難である。さらに、技術開発によって、新しい種類の構造や機械、部品などが開発されれば、モデルの更新が必要になる。そのため、国際的な標準化を実施するためには、辛抱強く話し合いと試験を行っていくことが肝要である。

### 3. シールドトンネルの概念的プロダクトモデル

#### 3.1 シールドトンネル

シールドトンネルは、土砂地盤中を掘削する機械であるシールド（シールドマシン）で地山の崩壊を防ぎながら、掘削、推進を行い、シールドのテール部で覆工することによりトンネルを構築するシールド工法で築造されたトンネルをいう。シールドトンネル<sup>4)</sup>は主に都市部で開削工事が不向きな箇所にある道路トンネル、鉄道トンネル、地下河川、下水道等に採用され、シールド工法で建設が行われる。シールド工法には多くの種類があるが、シールドマシンによって掘削された土砂を泥土に変換し、泥土圧でシールドマシンの前面（カッターヘッド）の安定管理を行う土圧シールド工法が主流を占めている。掘削土砂を泥土に変換できるため、砂礫層、シルト粘土層、シラス層など広範囲の土質に適応が可能となっている。

#### 3.2 概念的プロダクトモデルの構築

我々が2005年にシールドトンネルのプロダクトモデルの開発に着手した際、そうしたモデルは世界中探しても見当たらなかった。そこで、モデル化の範囲や詳細度などを決めるために概念的なモデルを、5W1H（いつ、誰が、どこで、何を、何故、どのように）を意識しながら、分割と分類の方法を用いて階層化や関係化により作成した。階層の頂上はRoot（根）といい、そこからProduct, Process, Organization, 調査計測データ、知識の5つのモデルに分類し、Productの下には、地盤、シールドトンネル、仮設備、その他人工物の4つのエンティティに分類し、さらに、各エンティティを細かく分類していった。シールドトンネルの下の階層には、空洞、一次覆工、二次覆工、付帯設備、到達覆工、発進部覆工、その他を置き、例えば、一次覆工の下には、セグメント、シールド材、ボルトなどを置いた。セグメントはさらに、普通とテーパセグメントに分け、各々、鋼製とコンクリート系セグメントに分類し、さらに各々、A型、B型、K型といった形状でも分類した。その他、仮設備やその下のシールドマシン、あるいは付帯設備や到達覆工などについても部材単位までモデル化した。Product以外のProcess, Organization, 調査計測データのモデルについても同様に分類した。但し、知識モデルについては当初、シールドトンネルに関する設計、施工、維持管理等を遂行するた

めのノウハウを想定したが、これらのノウハウは技術者や組織の経験に基づく形のない情報そのものであり、実体化した資料や書籍等をモデル化し、ノウハウ等は今後の課題としている。尚、モデル化に当たっては、用語の使用法が極めて重要であることから、辞典<sup>4)</sup>、標準示方書<sup>5)</sup>など参考にしながら、シールドトンネルの専門技術者数名に作業に参加してもらった。詳細については、文献<sup>2)3)</sup>を参照されたい。

### 4. IFC-ShieldTunnelの開発

概念的なプロダクトモデルはあくまで概念的であるから、コンピュータに実装して処理できるようにするためには、エンティティ間に存在するより多くの関係や属性などを詳細に定義しコード化する必要がある。コード化されたプロダクトモデルをゼロから開発したのでは膨大な時間がかかる。我々は橋梁のプロダクトモデルを開発する際、既にモデル化や実装がかなり進んでいた建築のIFCを拡張することにより、IFCが保有している豊富な情報資源を利用して、短期間でプロトタイプを作成することができた<sup>1)</sup>。そこで、シールドトンネルにおいても同様のアプローチを取った。尚、IFCには開発時期により様々なバージョンが存在するが、我々は当時の最新版であったIFC2x3を利用した。

IFC2x3には4つの構成要素、すなわち、1) ドメイン要素：建設業界のライフサイクルに携わる様々な業種での使用に特化したクラス、2) 相互運用要素：構造物を構成する部材のように、形状及び属性を有するクラスの定義が行われている、3) コア要素：オブジェクトを定義するクラス、4) リソース要素：オブジェクトを定義するために用いられる形状表現のためのクラス（線や点、面など）や、オブジェクトが有する属性（材料、重量など）を定義するクラス、により構成されている。

IFC2x3においては、コア要素の中にIfcRootのサブクラスとして3種の基本構造クラスIfcObjectDefinition, IfcRelationship, およびIfcPropertyDefinitionが存在し、それぞれ、要素、要素の関連付け、要素の属性情報を表現し、そのまたサブクラスとして各種のオブジェクトが定義されている。要素は空間要素がIfcSpatialElement, 物理要素がIfcElementで定義され、属性情報については、クラス内のAttributeあるいは別にクラスとして設けたIfcPropertySetで定義する。オブジェクトの形状や位置表現に関しては、リソース要素であるIfcRepresentationItemというクラスを用いて行う。

モデル化に当たっては、なるべくIFCの基本的な構造やクラスを使えるものはそのまま用いたが、

建築のプロダクトモデルである IFC では土木分野に適用する際、不足するクラスがあることから、IFC に存在しないクラスを新たに定義した。IFC では、クラスなどの名称の先頭に “Ifc” を付ける規則がある。IfcObjectDefinition の下の階層に IfcObject があり、その下に IfcElement があり、さらにその下に建築用部材と並んで、土木用部材のエレメントとして IfcCivilElement を置いた。シールドトンネル独特のクラスについては、その下に IfcStElement を設け (St は Shield Tunnel の略)、そ

の下の階層に IfcStShaftElement, IfcStTunnelElement, IfcStJointStructureElement, IfcStTemporaryFacility, IfcStShieldMachineElement 等のクラスを、概念的プロダクトモデルに基づいて付加した。図-1 に IFC-ShieldTunnel のスキーマの一部を示す。角に丸みがあるエンティティはその上か下に他のエンティティが接続しており略していることを示している。シールドトンネルの A, B, K セグメントおよびセグメント間のジョイント、二次覆工等のエンティティを図-2 に示す。

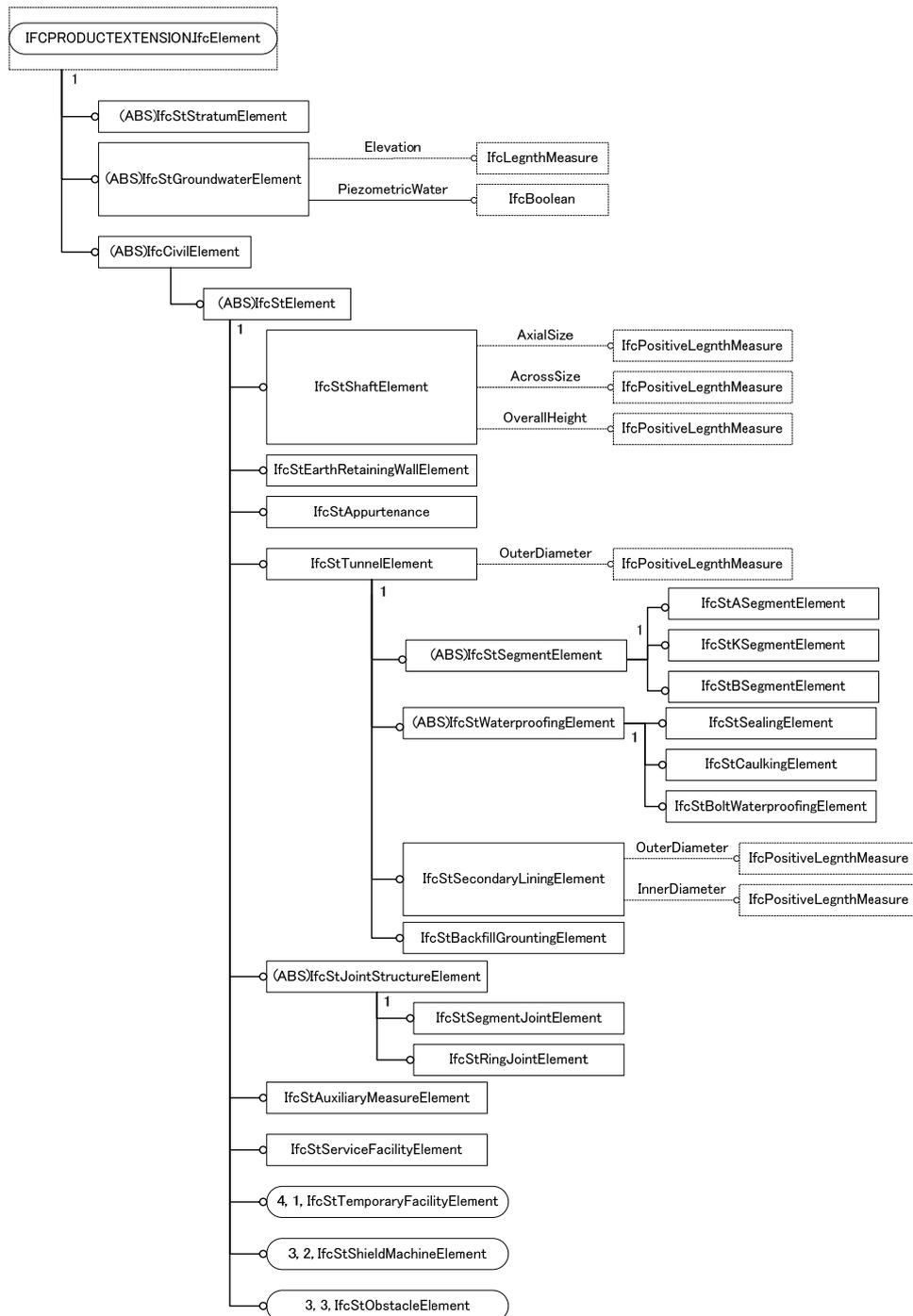
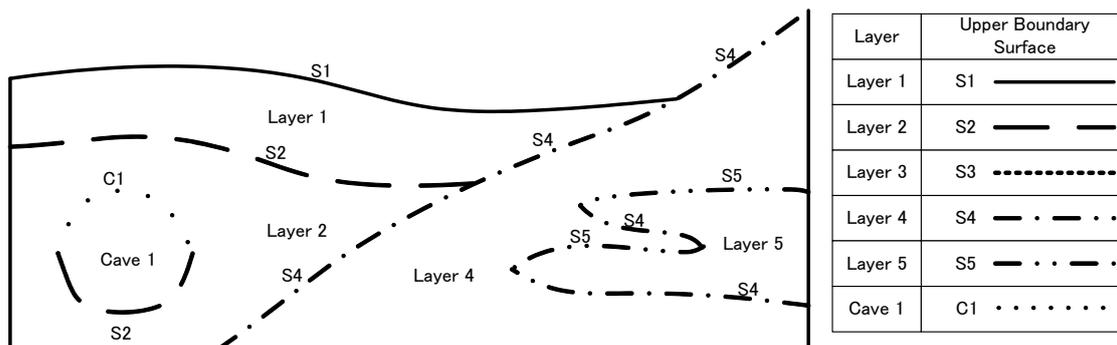
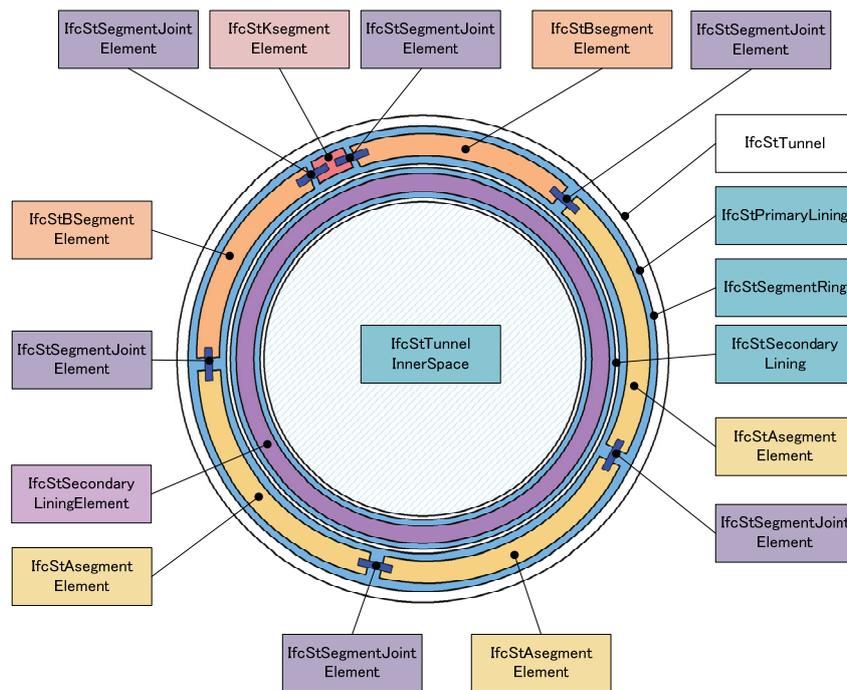


図-1 開発した IFC-ShieldTunnel のスキーマ図の一部



地盤については、地層の境界面に名称を付け、TIN（不整三角網）などを用いて面を表現し、地層名については地層内の任意の点から鉛直に直ぐ上部の境界面の名称の番号に Layer を先頭に付けるという方法を用いている（図-3）。地層は、IfcElement のすぐ下にある IfcStStratumElement によってモデリングされる。また、地下水についても IfcStGroundwaterElement によって表現される。一方、トンネルは地盤に空洞をもうけるため、中身が詰まった地層からソリッドな部分を取り除く必要がある。本研究では、空洞を Cave として挿入し、Cave 内部の全ての点で、IfcStVoidElement と名付けられた空洞であるようにモデリングした。また、Cave の上面には空洞の境界面、下面には地層の境界面を設けることとした。

IFC-ShieldTunnel のスキーマは、ISO-STEP に従い EXPRESS 言語で記述した。さらに、コンピュー

タで処理しやすいように IfcXML でも記述した。IfcXML で適当な寸法のセグメントのインスタンスファイルを記述し、市販の AutoCAD でファイルを読んで画面上にモデリングできるコンバータプログラムを Visual Basic for Application を用いて開発した。詳細については、文献<sup>2)3)</sup>を参照されたい。

## 5. 施工現場への適用事例

IFC-ShieldTunnel は 2007 年にひとまず完成したが、前述のように実務で利用されなかった。しかし、2010 年 8 月から約 1 年間にわたり、実現場で適用実験を行うことができた。対象現場は、東京都品川区の中央環状品川線大井地区の大井ジャンクションから大橋ジャンクションまでの延長約 9.4km のトンネル工事である。その中で図-4 に示す上りの大橋方面（延長 550m）と下りの大井方面（延長 336m）のトンネルに適用した。



図-4 シールドトンネル工事現場の概要図

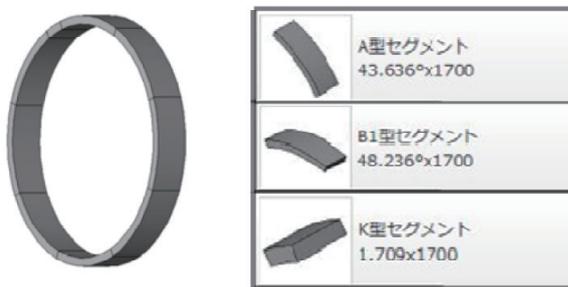


図-5 セグメントの3次元モデル

本研究では、トンネルを構成する部材であるセグメントに着目し、検証を行った。モデリングには Autodesk 社の Revit Structure 2011 を主に用い、線形構造物の配置のために一部で Civil 3D も利用した。図-5 に、図面をもとに作成したセグメントの3次元モデルを示す。対象現場のトンネルセグメントは円筒形で、A 型セグメント、B 型セグメント、K 型セグメントの3種類で構成されている。それぞれのセグメントは形状の異なる2種類が存在し、計6種類のセグメントを中心線形を利用して配置し、この3次元モデルを利用してプロパティのカスタマイズや IFC の入出力を行った。

次に、図-6 に示すように、Revit Structure を用いてセグメントモデルにプロパティを与えた。横幅 H や曲率 A のパラメータを定義し、モデルをパラメトリックにデザインできるようにすれば、任意の値をパラメータに入力することで3次元モデルに反映させることができる。さらに、識別情報として、製造元や価格などのパラメータを定義した。シールドトンネルのセグメントは、建築部材ではないため IFC ではサポートされていない。従って、Revit Structure で作成したモデルを IFC ファイルに出力する際には、既存の建築用の IFC スキーマを代用することになる。その際には、図-6、図-7 に

Parameter	Value
<b>Dimensions</b>	
H	1700.0
A	48.236°
<b>Identity Data</b>	
Keynote	トンネル部材
Model	B1型セグメント
Manufacturer	〇〇〇工業
Type Comments	構造コンクリート
URL	http://www.〇〇〇.co.jp/
Description	シールドトンネル用部材
Assembly Description	
Assembly Code	
Type Mark	
Cost	¥〇〇〇〇〇
OmniClass Number	23.25.30.21.14
OmniClass Title	Trussed Beams and Joists

図-6 セグメントのプロパティ

```

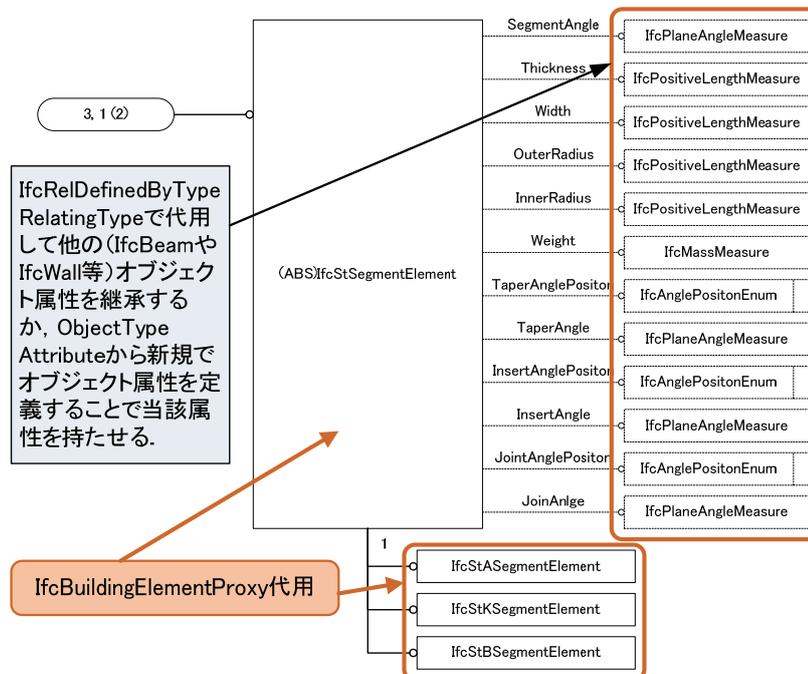
# Revit Export Layers
# Maps Categories and Subcategories to layer names and color numbers
# Category <tab> Subcategory <tab> Layer name <tab> Color number <tab>
# Cut layer name <tab> Cut color number
# Do not remove the colon (:) after certain category names.
#-----
Air Terminals                IfcAirTerminal
Area Polylines               Not Exported
Area Tags                    Not Exported
Areas                        IfcSpace
Cable Tray Fittings          IFCCableTrayFitting
Cable Trays                  IFCCableTraySegment
Callouts                     Not Exported
Casework                     IfcFurniture
Casework Tags                Not Exported
Ceiling Tags                 Not Exported
Ceilings                     IfcCovering
Ceilings                     Surface Pattern IfcCovering
Color Fill                   Not Exported
Color Fill Legends           Not Exported
Columns                      IfcColumn
Communication Devices        IfcBuildingElementProxy
Conduit Fittings             IFCConduitFitting
Conduits                     IFCConduitSegment
Constraints                   Not Exported
Contour Labels               Not Exported
Curtain Panel Tags           Not Exported

```

図-7 セグメントのマッピングファイル

示すような IAI 標準に基づいた新しいマッピングファイルを作成する必要がある。図-7 の左列はモデルカテゴリを表している。図-8 は IFC-ShieldTunnel のマッピングファイルを示す。コメント行の下に記載された右列が IFC クラス名を表わしている。規定の IAI 標準に基づいたマッピングファイルを使用して IFC 形式に書き出した場合に、自動マッピングされていない要素は IFC クラス名に Not Exported と表示される。

そこで、IfcBuildingElementProxy と呼ばれる IFC のクラスを代用することとした。このクラスは、構造物を構成する全ての要素に対して共通の属性を定義するクラスであり、これを用いて概念的プロダクトモデルの当該属性を代用する。これは、オブジェクトタイプが不明である場合の IFC の汎用データとして用いられる要素である (図-7)。



現場への適用に当たっては、施工現場の技術者へのヒアリングも実施し、IFC-ShieldTunnelについての意見を聴取した。その結果、プロダクトモデルでは、裏込め注入が立坑やトンネルと同じ階層に定義されているが、これは高すぎて、実際は一次覆工の下の階層に移動すべきだと判断された。セグメントリングについての変更点はなかったが、概念的プロダクトモデルに表記されている内容に沿って、幅や角度、重量を定義するだけでなく、コストや座標情報を定義した方が良く、という要望が挙がった。

この他に、IFC-ShieldTunnel を用いて Revit Structure と Google SketchUp との間でセグメントリングの3次元モデルのデータ交換を成功させた。また、Revit Structure で工程シミュレーションデータを作成し、IFC-ShieldTunnel を介して、進捗状況を EXCEL で工程チャートに変換し、コストも併記させることも実施した。自動化するために、Revit Structure の Visual Basic for Application (VBA) を用いてプログラムを作成した。これは、IFC-ShieldTunnel が3次元に時間軸を加えた4次元CAD、さらにコスト軸を加えた5次元CADに資することを示唆している。

## 6. おわりに

2005年から開発を開始したシールドトンネルのプロダクトモデル IFC-ShieldTunnel は、途中何回かの改善を図りながら、2010年に一旦完成した。しかし、我々は、シールドトンネルに続いて、開削トンネルのプロダクトモデル IFC-Cut&CoverTunnel を2011年に開発し、さらに

は山岳トンネルのプロダクトモデル IFC-MountainTunnel を2012年に開発した。現在、これら3つのプロダクトモデルを統合化して、IFC-Tunnel とする作業を実施している。

本論では、シールドトンネルのプロダクトモデルについて、その意義や開発のプロセスを含めて紹介し、実現場への一部適用によって得られた知見について述べた。今後は、改良を施し、統合化した IFC-MountainTunnel を、実際のシールドトンネル工事へ適用し、種々のソフトウェアとの間でデータの共有や交換を行い、広範なシミュレーションを行うことによって、作業の効率化、品質の向上、コストの削減に貢献することを示していきたいと考えている。さらに、適切なプロダクトモデルの開発、維持管理およびソフトウェアベンダーの協力により、CIMを推進していきたい。

## 参考文献

- 1) 矢吹信喜, 志谷倫章: PC橋梁の3次元プロダクトモデルの開発と応用, 土木学会論文集, No.784/VI-66, pp.171-187, 2005.
- 2) 矢吹信喜, 東谷雄一朗, 秋山実, 河内康, 宮亨: シールドトンネルのプロダクトモデルの開発に関する基礎的研究, 土木情報利用技術論文集, Vol.16, pp.264-268, 2007.
- 3) Nobuyoshi Yabuki: Representation of caves in a shield tunnel product model, Proc. of the 7th European Conference on Product and Process Modelling, pp.545-550, 2008.
- 4) 土木学会: 土木用語大辞典, 1999.
- 5) 土木学会: 2006年制定トンネル標準示方書 [シールド工法]・同解説, 2006.