

土木分野におけるCIMの活用事例 —シールド工事におけるプロダクトモデルの活用検証—

株式会社大林組技術研究所 主任技師 ふる や ひろし 古屋 弘

1. はじめに

近年、特に土木工事の分野で、現在われわれの多くが認識するICTを用いた「情報化施工」は、2008年7月に公表された「情報化施工推進戦略」¹⁾に基づく国土交通省のプロジェクトにより大きく歩み出し、施工の最適化を行う計測管理を主体とした「情報化施工」から、GPSに代表される高性能な計測装置や高機能なセンサ、およびネットワーク技術の建設現場での活用により、「ICT施工」と

と呼ばれる新しい情報化施工管理技術へと進化し、数多くの現場に普及しつつある。

ところで、情報化施工の概念は図-1のように分類され、従来は設計（未確定の条件をモデル化した予測値）と施工とのギャップを埋め、施工の合理性を追求することにより、経済的で安全な施工を行うことを目的としたもので、従来から観測施工（Construction by Information Retrieval System）とも呼ばれていたものであった。この情報化施工は依然として重要な概念であり、施工中の計測データから得られる情報をもとに、解析などを用いて施工における情報の不確実性を徐々に減

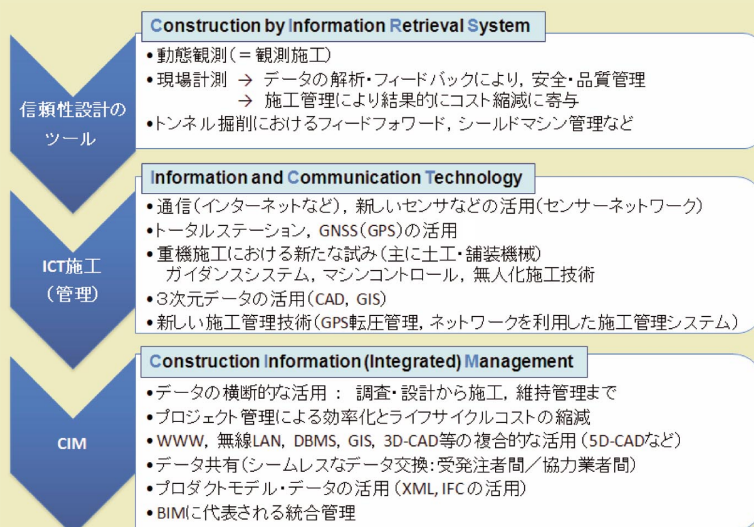


図-1 情報化施工の変遷

少させ、合理的で安全な施工を行うことを目的としている。

さらに近年では「新しい情報化施工」が進展しつつある。その代表が、屋外の測量におけるGNSS (GPS) に代表される高性能な計測装置や高機能なセンサの利用と、ネットワークの活用、さらにそれらを利用した施工管理システムの進化から、いわゆる「ICT施工」技術と呼ばれるようになった技術の適用である。このICTの活用は、調査や維持管理におけるツールとしても有効に活用され、プロジェクトの合理化に寄与するとともにLCC (Life Cycle Cost) の低減にも寄与する可能性を秘めている²⁾。

さらにICTの活用は、施工の効率化・高精度化のみならず、設計データをもとに施工時における受発注者間／施工業者間のデータ共有、およびCALS/ECの概念を取り入れた「建設工事の企画設計から施工管理全般に適用しようとする試み」にまで広がり、3次元モデルの活用とともに、建設のプロセスの中だけではなく、構造物の維持管理やアセットマネジメントにも活用が期待されている。これらは、建築におけるBIM (Building Information Modeling)、の活用と同様な考え方であるが、土木におけるプロダクトモデルの活用として、近年ではCIM (Construction Information Modeling) のような概念で、新たな情報化施工の方向性が示されている³⁾。

このような情報化施工の進展の中で、施工者は新たな技術やシステムを開発し、現場適用を試みてきた。それらは、重機のガイダンスシステムやコントロールシステム (AMC, AMG) のみならず、例えば、土工事における3Dプロダクトモデルを用いた施工管理システムの開発と施工への適用^{4,5)}や、モデル自体の研究開発も行われている⁶⁾。特に後者に関しては、道路や橋梁に対するプロダクトモデルの開発が実施され、さらに、シールドトンネルのプロダクトモデル開発も矢吹らにより試みられている⁷⁾。しかし、これらのモデルは実現場への適用には至っていないというのが現状である。

そこで、筆者は日本で始めた開発されたシールド工法用プロダクトモデルに着目し、3次元モデルを基盤としたプロダクトモデルを実現場に適用し、そのモデル検証と今後の利用に関する実用性を検証した。本報告は、シールド工事を題材とした3次元データおよびプロダクトモデルの活用の提案と、データ交換におけるIFC (Industry Foundation Classes)⁸⁾の活用に関して、研究的に現場適用を行った事例に関して紹介するものである。

2. プロダクトモデル およびIFCとは

プロダクトモデル (Product Model) とは、工業製品を設計・製造するための3次元データに製品のライフサイクル上で必要な多くの情報を統合的に盛り込んだもので、物体を構成する部品をオブジェクトとして扱い、それぞれに形状や材質等の属性情報を持たせ、それらを関連付けていくことによって製品のデータモデルを構築しているのが特徴といえる。飛行機・自動車などのメーカーにとっては、これはすでに根幹の技術となっている。

建築分野では参考文献8に示すように、IAI (International Alliance for Interoperability) がIFCを規定化しており、建築分野の要素 (梁や柱等) や設計、施工、維持管理等が規格化されている。土木分野においてもIFCに準拠し、道路や橋梁のプロダクトモデルの開発がなされており、今回紹介するシールドトンネルについても研究開発が試みられ⁷⁾、実施工への適用も行われた^{5,9)}。

3. シールド工事の特徴と課題

今回の報告では、プロダクトモデルのシールド工事での活用に関する実験的な試みに関して報告するが、シールド工事の特徴に関して以下に概説する。

シールド工事は、他の土木構造物の工事とは異

なり、いわゆるシールドマシンと呼ばれる掘削機械によって地中を掘削しながらトンネルを構築していく。土木工事の中では特に機械化施工が進んだ分野であり、施工の際はこのマシンの掘進方向を適宜調整しつつ掘削が行われ、典型的な工事の機械化に伴う特有の管理がなされている。また、シールド工事は、道路や鉄道、水路のような線形構造物であるとともに、都市土木（都市部での道路下などでの施工）であることが多い。このような条件下では、発注の際に線形制約や空間制約といった条件が一般的に課される。線形制約とは、設計時の線形変更を不可とする条件であり、空間制約とは、線形（平面線形・縦断線形）や横断形状は変更可能であるが、一定の空間に収まるように施工を行わなければならないという条件である。シールド工事では、専用のマシンにより地中を掘進していく施工であることから、地盤の性質や障害物等が施工上の問題となったり、周辺環境への悪影響を及ぼす原因となったりする。このため、上記の線形制約、空間制約の両者が課せられ、これらの条件を十分に考慮して施工管理を行う必要がある。

ところで、シールド工事は一般的な工事と同様に、発注時に作成された設計図書に基づき施工計画が作成される。一般的には図-2に示すように、設計図書に基づきそれぞれの利用状況に応じたデータを作成し活用することとなる。図に示されるように、設計図書から線形や数値の抽出、場

合によっては3次元化などを行い現場で利用されている。場合によっては、図面は現場の地盤情報等や地中障害物の情報が不足していることがあり、施工の際に設計図に基づいて作成される施工図の変更が必要となることもある。また、線形などの変更を行う場合、図面や帳票、竣工図書などの管理データも全て修正しなければならないといった問題が生じる。これらの作業は、工事の時間と労力を費やし、一般管理費を増大させる要因となることや、場合によっては工期を遅らせる原因となる場合もある。

これらの問題への対処の一つがBIMに類似する考え方の導入であり、プロダクトモデルの活用である。

4. シールド工法用プロダクトモデル

このように、プロダクトモデルを利用することで、建築におけるBIM利用のメリットで示されているように、各担当や、空間・時間的なフェーズの作業・情報の一元管理が可能となる。例えばシールド工事の場合は図-3のような活用が考えられる。

このような考え方は、構造物を構築するに当たり、多くの作業手順や作業担当者を必要とし、多くの設計図書を利用・管理しなければならない他の土木工事においても有効に機能するはずであ

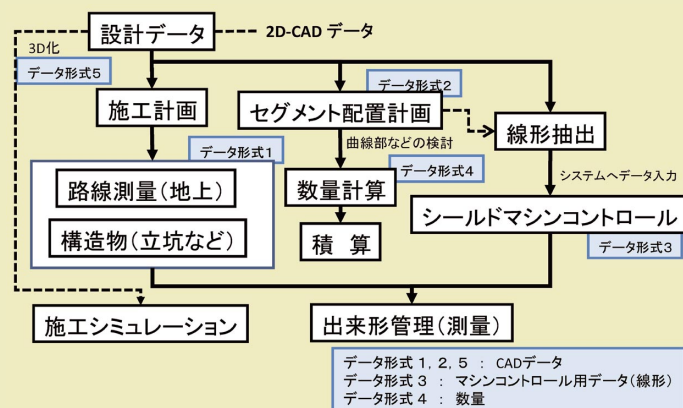
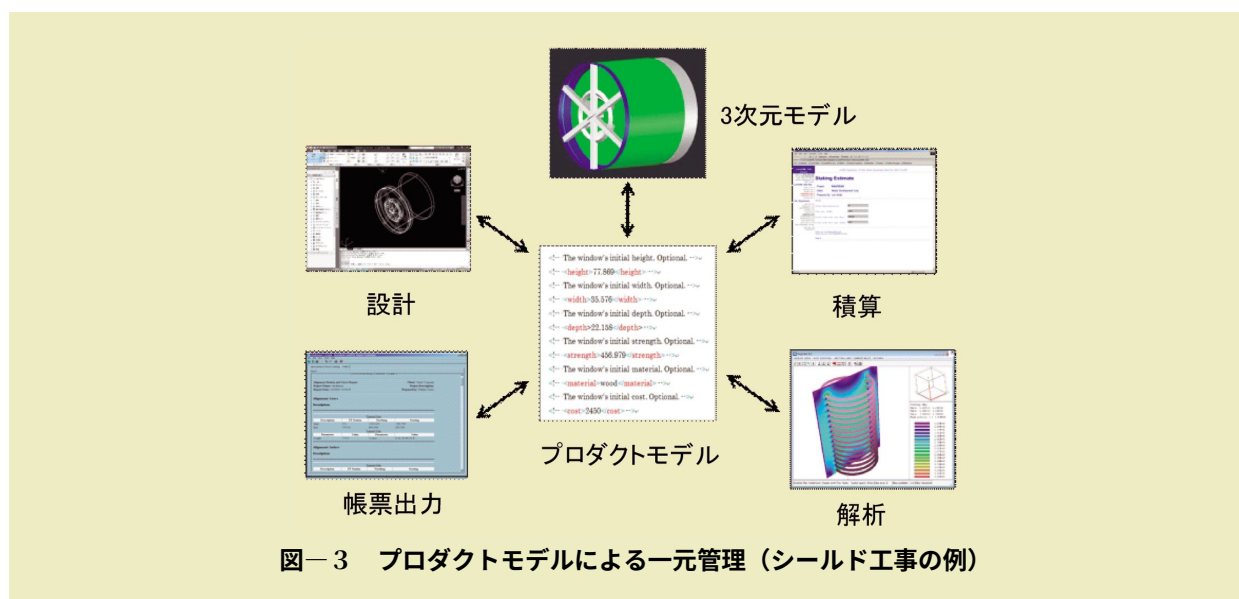


図-2 施工中に活用されるデータ



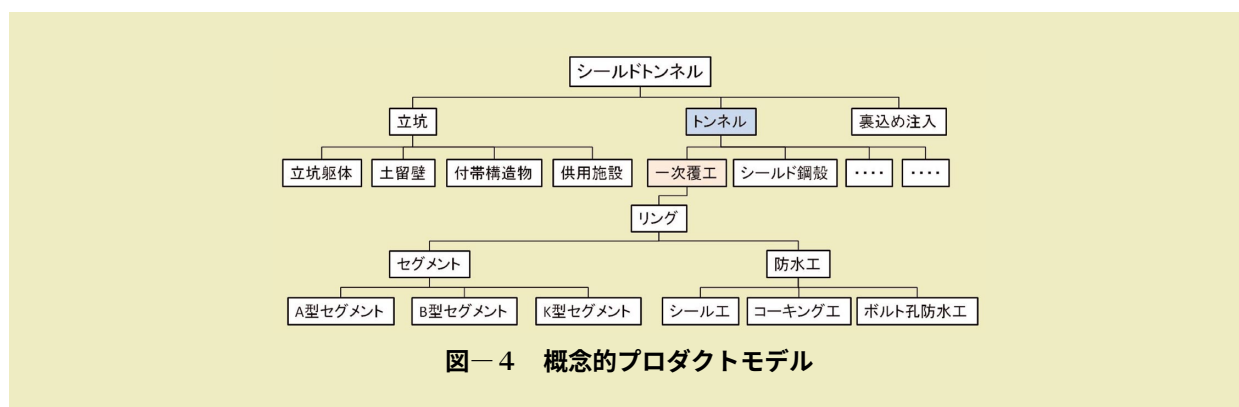
る。例えば構造物の設計変更が生じた場合、各作業データの修正を行う必要はなく、プロダクトモデルのデータに修正を加えるのみで、各作業データへ修正を迅速に反映でき、さらに、各作業におけるアプリケーションの互換性の違いにも対処することが可能となる。

以上のような背景から、今回紹介するシールド工事においてプロダクトモデルを実装し、その検証を行うべく実験的検討を行った。シールドトンネルに関するプロダクトモデルの適用に当たり、図-4に示すようなシールドトンネルの構成に関する概念モデルを作成した。シールドトンネルのライフサイクルにおいては、計画、調査、設計、施工、維持管理等さまざまな事象があるが、今回の実験的検証においては主に施工（工事）について着目している。

概念モデルは、参考文献6および7で提案された概念モデルに基づいて、シールドトンネルの工

事に関する全体像および要素と実体要素の関係を明らかにするため、これらの概念モデルを拡張するものとした。概念モデルはトンネルの構成における作業を単位として、上位要素からの階層図として作成した。なお、図-4で示す概念モデルは、シールドトンネルの工事の全体像を明らかにし、シールドトンネルを構成する要素がどのようなつながりを持つかを一般的に示したものである。このため、必ずしも実際の工事を全て反映しているわけではなく、今後の現場適用に当たっては以下のような点に注意が必要である。

- ① シールドトンネルの工事は、概念モデルで示した要素以外にさまざまな要素が関連するので、実際の工事仕様に従って必要なクラス（作業や構造物を表す要素）を追加・拡張する必要がある。
- ② シールドトンネルには数多くの掘削工法があり、工法に応じたクラスが必要である。



5. プロダクトモデルとIFCの連携

元来プロダクトモデルは、前述のように機械分野を主対象として国際標準が規定化されてきた。建築分野では、先に示したBIMの適用の普及から、信頼できるデータ交換の必要性が高まり、前述のようにIAIがIFC規定化している。

今回は、日本で開発されたシールドトンネルについての概念的プロダクトモデルである“IFCシールド”⁶⁾を利用した。概念的プロダクトモデルで定義されている要素は多岐にわたり、図-4のようにツリー状に表記されている。例えばトンネル要素に着目すると、トンネルというメインクラスと、一次覆工等のサブクラスで表記されている。これらは図-5に示すような利用法が考えられ、工程管理やモニタリング、工事資材の管理など工事管理の高度化が期待される。

ところで、IFCシールドでは以下のような工夫がなされている。

シールドトンネル等の地下構造物は、道路や橋りょう等の地上に構築される構造物と異なり、地盤というすでに何らかの物質が詰まった空間を掘削し構造物を構築する。従って、シールドトンネルの概念モデルは大きく地盤とトンネルに関する構造物に分ける必要がある。地盤は、本来複雑な要素により構成されるためその全てをモデル化する

ことは困難である。そこで、IFCシールドのスキーマにおいては、地盤を地層と地下水で構成するものとした地盤の概念モデルを考えている（この考え方は他の土木構造物に対しても有効な考え方である）。

また、トンネルに関する構造物は、立坑とシールドトンネルに分けられる。今回の検証実験では主にシールドトンネルについてモデル化している。立坑は主にコンクリート構造物として構築され、その施工方法はシールドトンネルとは異なるため、立坑の構造物は対象外とするものと定義されている。ただし、立坑はIfcWall, IfcColumn, IfcBeam等の既存のIFCのクラスを用いてモデル化することが可能である。

一方のトンネルは、シールドマシンにより地中を掘進し、セグメントライニングによりトンネルを構築する。セグメントライニングはその種類や用途に応じて多様な形式が存在し、個々の構成要素も非常に多い。本業務では、セグメントピースを最小単位としてトンネルのモデリングを行っている。

以上のように、IFCシールドのスキーマは開発されたが、現状では土木構造物の要素であるため、既存の建築などで活用されているIFCの規格で定義することはできない。従って、概念的プロダクトモデルを考慮しつつ、IFCの既存スキーマを拡張、もしくは代用する必要がある。また、開発されたプロダクトモデルは、あくまで概念的な

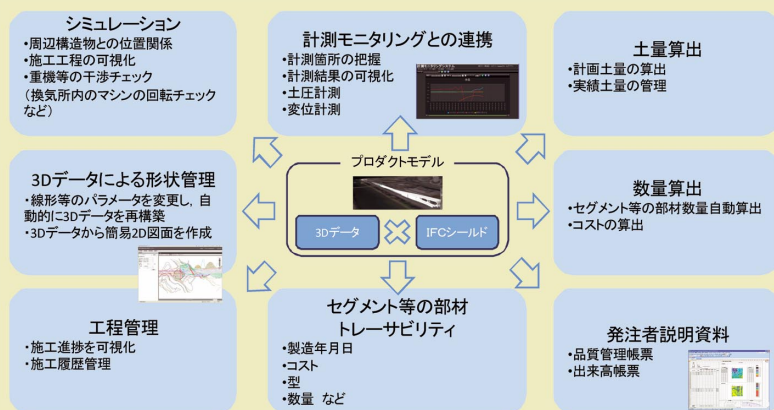


図-5 IFCシールドの活用イメージ

モデルであるため、今回の研究において、実現場に即したモデルとなり得るかを検証することとした。

6. プロダクトモデルとIFCの連携

このような背景から、概念的プロダクトモデルの検証を踏まえ、シールド工法用プロダクトモデルの構築と現場への適用を行うこととした。今回の3次元モデルの作成には、3次元地形および線形定義にはAutodesk社のCivil-3D、シールドセグメントを含む構造物はRevitStructure2011（以下「Revit」という）、工程検証にはNavisworksを、データ交換検証にはGoogle SketchUp¹⁰をそれぞれ使用した。

(1) プロダクトモデルの構築手順

今回の事例では、3次元モデルを構造物の形状管理に利用するだけでなく、検証結果から必要と見なされた情報を付加するための器として扱うこととした。すなわち、3次元モデルを情報の集積所と捉える。Revitは、3次元モデルのプロパティカスタマイズ機能を有しており、モデルへの情報の付加が可能である。そのための基礎として、図面から3次元モデルを作成した。その際に現場で最も利用価値の高い要素、すなわちRevitにて定義すべきプロパティを実現場を対象としてヒアリング調査を実施し、優先的に定義した。これは、概念的プロダクトモデルは、全てのシールド工事に対して、その要素を満たしているわけではないことに起因する。そのために実装に当たっては、各現場によって必要とされる情報が異なるため、今回のようなヒアリング調査は重要である。ヒアリングの結果、概念的プロダクトモデルの構造や用語の見直し、対象現場に該当しない要素の抽出などが挙げられた。

ところで、汎化したプロダクトモデルを作成すると、作成した3次元モデルに形状情報を定義し、任意の値を入力することで部材形状を適宜変

化させることが可能である。また、ヒアリング調査によって得られた属性情報を付加させることも可能である。さらに、作成した3次元モデルは、IFC形式のファイルとして入出力が可能である。書き出されたIFCファイルはIFCの規格を自動的に引き継いでいる。例えば、Revitで作成した壁のモデルをIFCファイルに出力するとモデルプロパティではIFCWallと定義される。

しかしながら、概念的プロダクトモデルには土木構造物特有の要素も含まれているため、現状では全ての3次元モデルがIFCの規格を引き継ぐことはできない。このような場合、マッピング¹¹機能を用いて、土木構造物特有の要素を既存のIFCスキーマ（後述）で代用し出力することとした。

(2) 現場への適用と想定される利用方法

各種情報をモデルに定義させた後、部材数量や土量の算出、工程シミュレーション等を行う。プロダクトモデルに座標情報を定義することで、測量データとの連携が図れるだけでなく、シミュレーションの際に線形座標ベースの工程管理が可能となる。また、IFCのデータフォーマットはオープンな仕様であり、さまざまなソフトウェアに対応しているため、必要に応じた用途で使い分けることが可能である。例えば、Google SketchUp⁹等の無償ソフトウェアにも対応しているため、高価な専用ビューワを保有していなくとも、モデルの閲覧が可能である。さらに、近年現場での活用も始まっているタブレット型の携帯端末を利用することで、図面だけでなく数量や調達管理などのいろいろな情報の現場での閲覧も可能となることが期待される。

7. 現場への適用事例

このようなプロダクトモデル、IFCの活用の有効性を検証するために、2010年8月から約1年間、実現場での適用実験を行った。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



図－6 現場概要

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。今回は、その中にある図－6のような①上りの大橋方面（長さ：550m）と②下りの大井方面（長さ：336m）のトンネルを対象とした。

(1) セグメントのプロダクトモデル構築

今回は、時間的な制約から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うこととした。図－7は、図面をもとに作成したセグメントの3次元モデルである。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の入出力を行っていくこととした。

なお、今回利用したRevitは土木工事における線形構造物に対して構造を配置することができない



図－7 セグメントの3次元モデル

かったため、Autodesk社の3次元CADであるCivil-3Dにてシールドトンネルの線形を定義し、その中心線を基準にセグメントをRevitで配置した。

(2) 現場のヒアリング調査

表－1はシールド工事の対象現場におけるヒアリング調査結果の一部である。表の青い部分に記述されているコーキング工やボルト孔防水工といった要素は今回の対象現場に存在しないため消去した。また、裏込め注入については、表では立坑やトンネルと同一階層で定義されていたが、現場では一次覆工の要素に含まれると判断された。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する要望が挙がった。

表－1 スキーマのヒアリング調査結果

表－1 スキーマのヒアリング調査結果				
シールドトンネル	立坑	立坑躯体		
		土留壁		
		付帯構造物		
		供用施設		
	トンネル	シールド鋼殻		
		一次覆工		
		リング	セグメント	Kセグメント Aセグメント Bセグメント
			防水工	シール工
			裏込め注入	
		付帯構造物		
		供用施設		
		裏込め注入		

(3) プロパティのカスタマイズ

図－8は、セグメントモデルのプロパティである。横幅Hや曲率Aのパラメータを定義し、任意の値を入力することで、3次元モデルに反映される。さらに、識別情報として、製造元や価格等のパラメータを定義した。セグメントは土木構造物であるため、IFCファイルに出力するときは既存のIFCスキーマで代用しなければならない。その際に、図－8、9のような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－8の左列はモデルカテゴリを表わしている。

Parameter	Value
Dimensions	
H	1700.0
A	48.236°
Identity Data	
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－８ セグメントのプロパティ

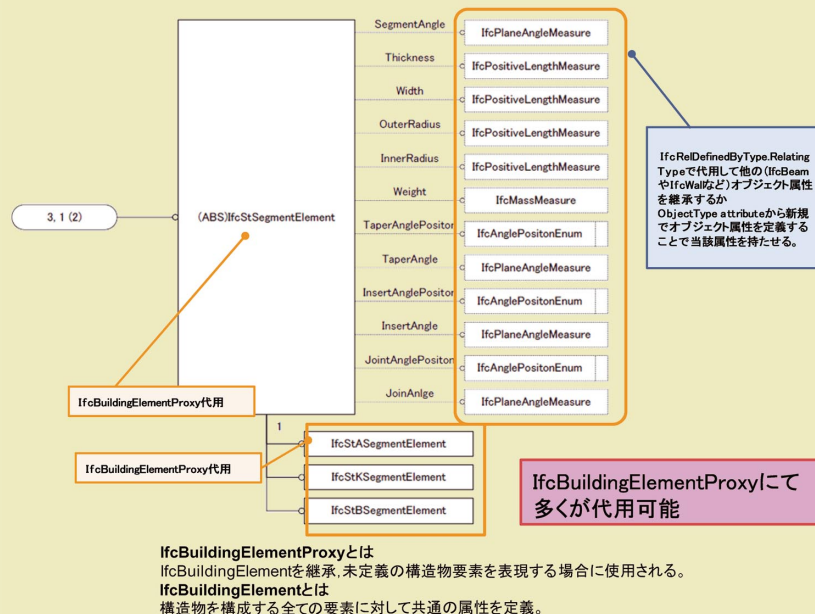
```
# Revit Export Layers
# Maps Categories and Subcategories to layer names and color numbers
# Category <tab> Subcategory <tab> Layer name <tab> Color number <tab>
# Out layer name <tab> Out color number
# Do not remove the colon (:) after certain category names.
#
Air Terminals          IfcAirTerminal
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 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－９ セグメントのマッピングファイル

図－９はIFCシールドのマッピングファイルであるが、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。現状ではIFCシールドのスキーマは汎用のソフトウェアでは定義されていないため、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、多くの要素はIFCクラス名にNot Exportedと表示される。

このため、IfcBuildingElementProxyを代用とすることとした。なおこのクラスは、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。

このように、今回はIfcBuildingElementProxyでセグメントの代用を行ったが、他のIFC要素でも代用できる可能性もあることがわかった。IFCシールドがCADソフト等へ実装されることが望ましいが、ユーザの数が増えないとこの実装は難しいといえる。しかし、IFCシールドのスキーマは工事管理において有用なスキーマであることから、当面は建築で近年使われつつあるIFC-Build-



図－10 RevitStructureでのスキーマの代用

ingのプロパティを代用することで、IFCシールドのスキーマの活用を図るべきであると考え（図-10）。

8. IFCによるデータ交換

今回の重要な検証要件である、異なるアプリケーション間でのIFCによるデータ交換を、モデル作成を行ったRevitStructureとGoogle SketchUp間で実施した。

データ交換に関しては、前述のIfcBuildingElementProxyを用いて図-9に示すファイルをRevitStructureから出力し、Google SketchUpによって読み込むこととした。読み込みは各セグメントごとに行い、それらを合わせることで図-11に示すように、3次元データを再構築することができた。

また、シールドトンネル本体ではなく今回の工事における立坑部の工程を模擬したシミュレーションデータも交換が可能となり、図-12に示すような施工順序の可視化も可能であることが確認できた。

なお、今回の研究に付随して、工程管理を3次

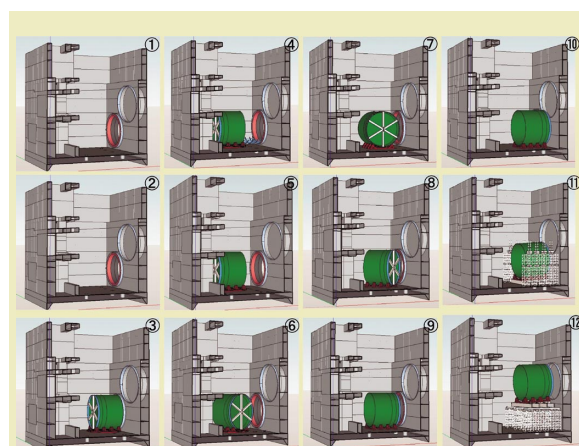


図-12 立坑部 シールドマシン転回のシミュレーション

元データで実施し、施工管理の高度化への実験も行った。Revitでの工程シミュレーションの実施状況を図-13に、またXMLを介して進捗状況をデータ出力後、Excelで工程のチャートを出力した結果を図-14に示す。なお、図-14にはセグメントコストも併記されているため、出来高管理も可能となっている。

これらの結果から、工事に参加する多様な業者が異なるアプリケーションを用いて施工状況などを参照することが可能となることが確認でき、必ずしもCADを有しなくても施工状況や進捗、出来高管理を共通のデータから実施できることが確

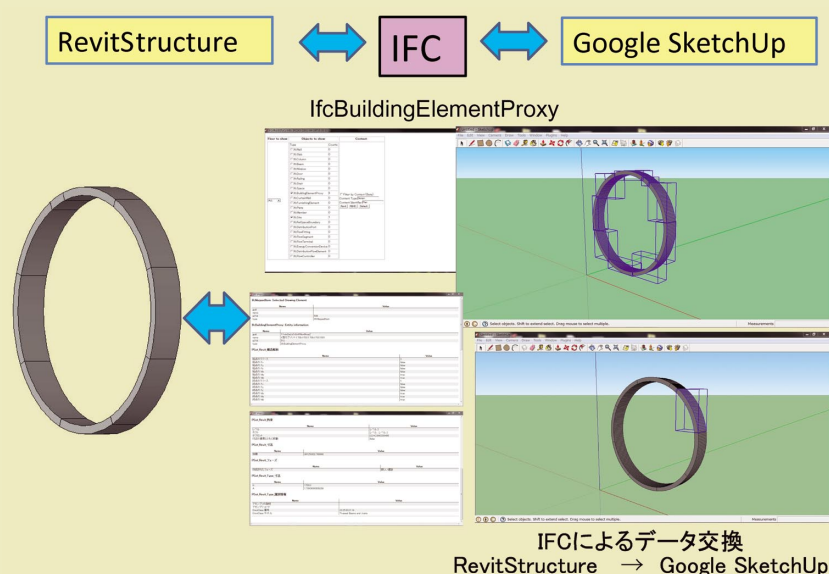


図-11 IFCによるデータ交換：RevitStructure→Google SketchUp

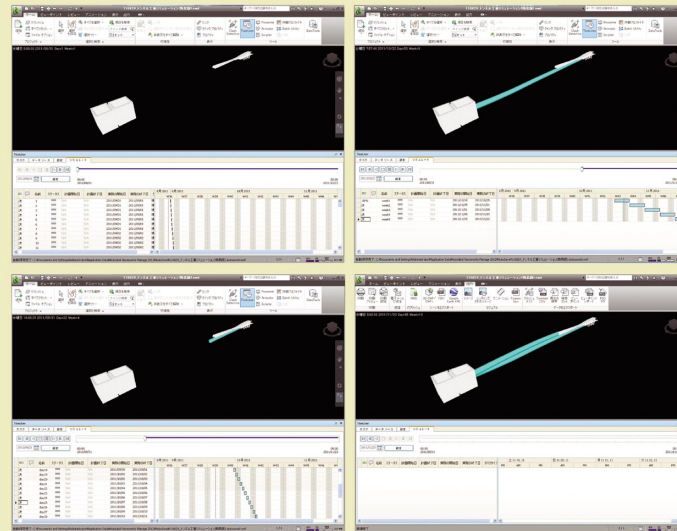


図-13 工程（出来高）管理への適用

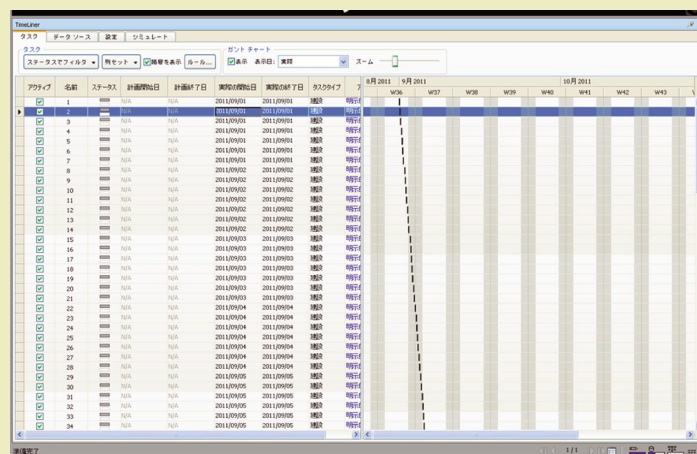


図-14 XMLによるExcelでの工程出力

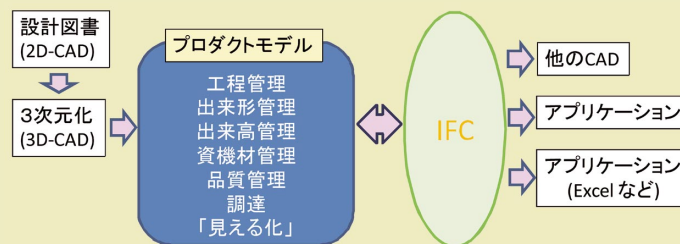


図-15 IFCシールドがもたらす機能

認できた。

以上のように、実施工の中でのIFCを用いることにより実現可能な業務形態を図-15に示す。IFCシールドを用いることにより、必ずしもCADを用いて設計図書や施工状況を確認する必要はな

くなる可能性があり、新しいプロダクトモデルのユースケースが生まれる可能性がある。

9. おわりに

今回のシールド工事をモデルとしたプロダクトモデルの現場適用では、現在、開発段階のシールド工法用プロダクトモデルに着目し、3次元データを基盤としたプロダクトモデル構築の手法を提案した。さらに、提案されたIFCシールドを用い、対象現場への適用および検証を行った。

今回は、時間的な制約から対象現場への工事進捗に伴うリアルタイムなシステム適用までは至っていないため、有効性の有無は検証が十分であるとはいえない部分もある。しかし、データ交換が可能である点と、それを用いた多種のアプリケーションでのデータ活用の可能性は十分検証でき、プロダクトモデルの現場施工での実用化の可能性を強く示すことができたと考える。

今回の事例はCIMの概念の施工部分の多くを実験的に実施したこととなったが、一般的に語られている「フロントローディング」に関して、今回の検証に基づいて気づいた点を述べる。

一般的にBIMでは、初期段階（一般には設計段階）に負荷をかけて（フロントローディング）事前に設計検討や問題点の改善を図ることにより、早い段階で設計品質を高め、施工時のリスクを低減しコストダウンを図れるとしているが、これは、実は施工を設計時にシミュレーションすることも含まれている。しかし、土木事業では、設計（および基本積算）と施工は基本的に分離されており、BIMにおけるフロントローディングの考え方は必ずしも当てはまらない。むしろ施工時の初期に、施工法や施工中のリスクを予測するために活用する「施工時フロントローディング」が重要な活用方法になるのではないかと考える。もちろん、図-5に示すようなデータ交換や調達を含めた他のシステムとの連携は重要な役割となることはいうまでもない。

CIMはまだ始まったばかりである。今後は発注者のみならず、コンサルタントや施工会社が一体

となって、プロダクトモデル活用の有効性を示すとともに、スキーマなどの検証をさらに行う必要がある。特に現場からの要望も高かった工程管理、コスト管理に対するプロダクトモデルの活用の有効性を示すことは重要な課題である。CIMの概念の実現に向けて、今回のような取り組みやシステムの実用化への働きかけを、いろいろな機会を作り行うことが重要であると考ええる。

【参考文献】

- 1) http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha08/01/010221_4_.html (2012現在)。
- 2) 古屋 弘：近年の施工管理の中での情報化施工，地盤工学会誌，Vol. 58，No. 1，pp24-25，2010. 1.
- 3) 佐藤直良：BIMからCIMへー建設生産システムのイノベーションに向けてー，2011年度公共調達シンポジウム，2011. 11.
- 4) 古屋 弘・千葉洋一郎：3Dプロダクトデータを用いた土工事施工支援システムの開発と現場適用，第29回情報利用技術シンポジウム論文集，Vol. 13，pp. 243-250，2004. 10.
- 5) 寺中愛瑛，小林一郎，古屋弘，柿本亮大：3D-CADを用いたシールド工法用プロダクトモデルの可視化，全国大会，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，2011.
- 6) 矢吹信喜，志谷倫章：プロダクトモデルを用いた包括的設計支援システムの開発，土木情報利用技術論文集，Vol. 12，pp. 273-280，2003.
- 7) 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. 19，pp. 261-268，2007.
- 8) 一般社団法人IAI日本：IFCとは，http://www.building-smart.jp/mission/whats_ifc.php (2011. 7. 22入手)。
- 9) 古屋 弘：シールド工事をモデルとした3次元データを用いた施工管理の研究（特に工程・コスト管理におけるプロダクトモデルの適用実験），日本建設情報総合センター，第9回研究助成事業成果報告会，第2010-02号，2011. 11.
- 10) Google：Google SketchUp
<http://sketchup.google.com/intl/ja/> (2011. 7. 25入手)。
- 11) Autodesk WikiHelp：2012 WikiHelp
<http://wikihelp.autodesk.com/Revit/jpn/2012> (2011. 6. 20入手)。