

- 29 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

Fundamental Study on Development of a Shield Tunnel Product Model

矢吹信喜¹・東谷雄一朗²・秋山 実³・河内 康⁴・宮 亨⁵

Nobuyoshi Yabuki, Yuichiro Azumaya, Minoru Akiyama, Yasushi Kawanai, Toru Miya

抄録: 世界のシールドトンネルの施工実績の約半分は日本が占めているが、そのプロダクトモデルは開発されておらず、また施工に関する詳細なデータは工事関係者個人が主に所有している。本研究では、今後の国際貢献と国際展開を考慮し、貴重な施工実績データを残すためにシールドトンネルのプロダクトモデルの開発を行うこととした。まず、シールドトンネルの特徴を調査し、地盤や空洞等のクラスを有する概念的なプロダクトモデルを開発した。その一部を、IFC を拡張することにより実装し、3次元 CAD システムとの間でプロダクトモデルデータのやり取りの実験を行った。

Abstract: Although about half of the shield tunnel works done in the world exist in Japan, their product model has not been developed and detail construction related data are owned by engineers who worked at the construction sites. Considering the international contribution and business chances, in order to preserve the precious construction data for the future use, we decide to develop a product model for representing shield tunnel construction. As its first step, we investigated the characteristics of shield tunnels and developed a conceptual product model. Then, we implemented some part of the model by expanding IFC. We performed experiments of exchanging product model data with a 3D CAD system.

キーワード: シールドトンネル, プロダクトモデル, IFC

Keywords: shield tunnel, product model, IFC

1. はじめに

土木構造物のライフサイクルには、計画、調査、設計、設計照査、積算、施工管理、維持管理などの様々な作業が含まれる。各作業は、コンピュータでのアプリケーションシステムを用いた自動化による効率化を図っている。しかし、アプリケーションシステム間でのデータ互換性が乏しいため、人の手により作業を行わなくてはならず、「自動化の島問題」が指摘されている¹⁾。

このような問題を解決するため近年プロダクトモデルの研究開発が行われている。プロダクトモデルは、構造物や製品などを構成する各オブジェクトの形状、様々な属性情報、オブジェクト間の関係等を定義する、ある程度標準化されたデータモデルである。一般的には構造物、製品に関するデータをテキストファイルとして表現し、コンピュータで実装する。プロダクトモ

デルを用いることにより、アプリケーションシステム間のデータの相互運用を自動化することが可能となり、効率化が図れる他、人の手入力によるミスを防ぐ事にも繋がる。

プロダクトモデルに関しては、ISO (International Organization for Standardization) が国際標準として STEP²⁾ (Standard for the Exchange of Product model data : ISO-10303) を開発しており、機械分野を主対象として規定化されている。一方建築分野は、IAI (International Alliance for Interoperability) が IFC³⁾ (Industry Foundation Classes) を開発している。土木分野は遅れていたが、最近では、道路、橋梁等のプロダクトモデルが開発、提案されている^{4)~7)}。

しかし、トンネルのように既に固体が存在する地盤の中を掘削して空洞を作成し、その後コンクリートなどで支保する構造物のプロダクトモデルを開発した例は見当たらない。そこで本研究では、トンネルを対象

1 : 正会員 Ph.D. 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 准教授
(〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1, Tel :0143-46-5219, E-mail : yabuki@news3.ce.muroran-it.ac.jp)
2 : 元 室蘭工業大学建設システム工学科学生 (現 東亜建設工業株式会社勤務)
3 : 財団法人日本建設情報総合センター 標準部長 審議役
4 : 財団法人日本建設情報総合センター 標準部 主任研究員
5 : 株式会社東京建設コンサルタント 技術管理本部 主任技師

としてプロダクトモデルを開発することとし、特にシールドトンネルを対象とした。シールドトンネルの施工実績は、世界の約2分の1を日本が占めている。しかし、プロダクトモデルの開発は未だ行われていない。また、実際の施工データの多くは工事に携わった個々の技術者が所有しており、近い将来逸散してしまう可能性があることがわかった。今後の国際貢献や国際展開を考慮し、またシールドトンネルの貴重な施工実績データを利用可能な形態で後世に残すためにも、シールドトンネルのプロダクトモデルを開発する必要があると考えた。

そこで、本研究では、シールドトンネルの設計・施工プロセスを調査し、モデル化の範囲や目的についての基礎的な検討を行い、概念的なプロダクトモデルを構築することとした。次に、IFCを拡張することにより、構築した概念的なシールドトンネルのプロダクトモデルの一部をコンピュータに実装し、プロダクトモデルと3次元CADシステムとの間のデータの互換性の確認を行うこととした。

2. シールドトンネルについて

シールドトンネル⁸⁾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。

具体的な施工法としてはまず立坑を掘削し、クレーンによって下ろされたシールドマシンを立坑内で組立てて掘進を行う。掘進と同時にマシン内部では、あらかじめ工場製作されたセグメント(トンネル本体を幾つかに分割した円弧の部材)を、機械により組みあげてセグメントリングを構築する。1セグメントリングが完成すると、シールドマシンはセグメントリングにジャッキの反力をとってシールドマシンを前進させ、さらに掘進を行う。以上の工程を繰り返し行いトンネル建設が行われる。必要に応じて、セグメントリングの上からコンクリートなどによる支保が行われ、二次覆工と呼ばれている。

3. シールドトンネルの概念的プロダクトモデル

(1) モデリングの考え方

プロダクトモデルの構築の際、必要なデータは、い

わゆる5W1H(いつ、誰が、どこで、何を、何故、どのように)に帰結すると考えられる。「何を」と「どこで」の情報は、狭義のプロダクト、すなわち、物(オブジェクト)を表すクラスを定義すればよい。「いつ」と「どのように」は、プロセスモデルで表現でき、「誰が」は、組織(オーガナイズーション)モデルで表現できる。プロダクト、プロセスおよび組織の3つのモデルを構築し、組み合わせするという考え方は、IFCでも基本となっている。これに「何故」を加えれば、5W1Hの情報を表現することが可能になるが、そのためには、筆者らは、「知識」と「計測データ」のデータモデルが必要だと考えた。計測データは事実であり、知識は事実と論理の組合せであり、事実と論理は理由を説明するための根幹であるからである。従って、シールドトンネルの概念的プロダクトモデルの構築に当たっては、全クラスの根(Root)の下には、オブジェクトを定義するProduct、施工内容を定義するProcess、施工に携わる組織関係を定義するOrganization、施工に関する種々の計測データを定義する調査計測データ、施工記録を定義する知識という5つのクラスをモデルとして配置することとした(図-1)。尚、モデリングに当たっては、シールドトンネルの専門書^{9)~11)}を調査すると共に、シールドトンネルの専門家に意見を聞きながら矛盾や漏れがないよう注意しながら構築した。

(2) 各クラスについて

a) Product

Productクラスでは、単にシールドトンネルの部分の構造を表現するだけではなく、地盤、地上と地下の人工物、およびシールドマシン等の仮設備を表現できるモデルとする必要があると考え、図-2に示すように分類した。さらに、シールドトンネルについては、図-3に示すようなクラスを定義した。これまでに構築されてきた道路や橋梁などの構造とシールドトンネルが異なる概念は、前者は通常、固体などの物がない空間に部材を配置して構造物を建造していくのに対し、後者は地盤という既に固体が詰まっている空間に空洞を掘削し、その後、セグメント等で空洞内部に構造物を建設するという点である。道路でも掘削部分はあるが、シールドトンネルの場合は、全線にわたって、空洞そのものが構造物の主要部分となる点が異なる。そこで、シールドトンネルクラスの下に空洞クラスを設けた。

仮設備のクラスを図-4に、その中のシールドマシンを図-5に、さらに調査計測システムを図-6に示す。

b) Process

Processモデルは、図-7に示すように、主な施工過程を表現する。但し、これらのクラスは必ずしも施工の順番通りに並んでいるわけではなく、各作業をクラ

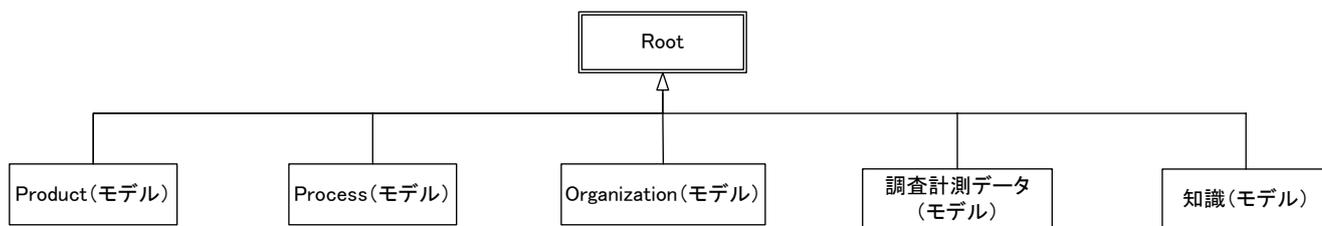


図-1 シールドトンネルの概念的プロダクトモデルの主な構成 (これより下の階層は省略)

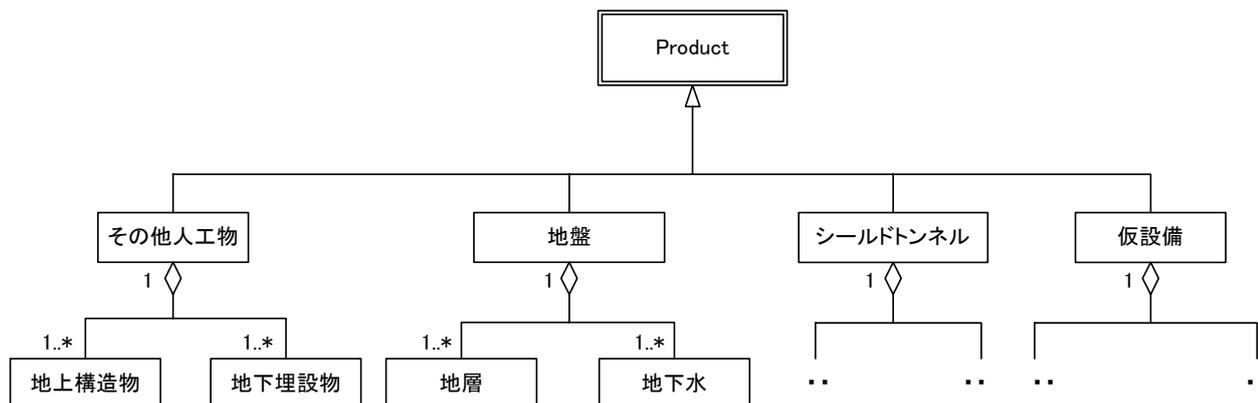


図-2 Product クラスの概念的プロダクトモデルの一部

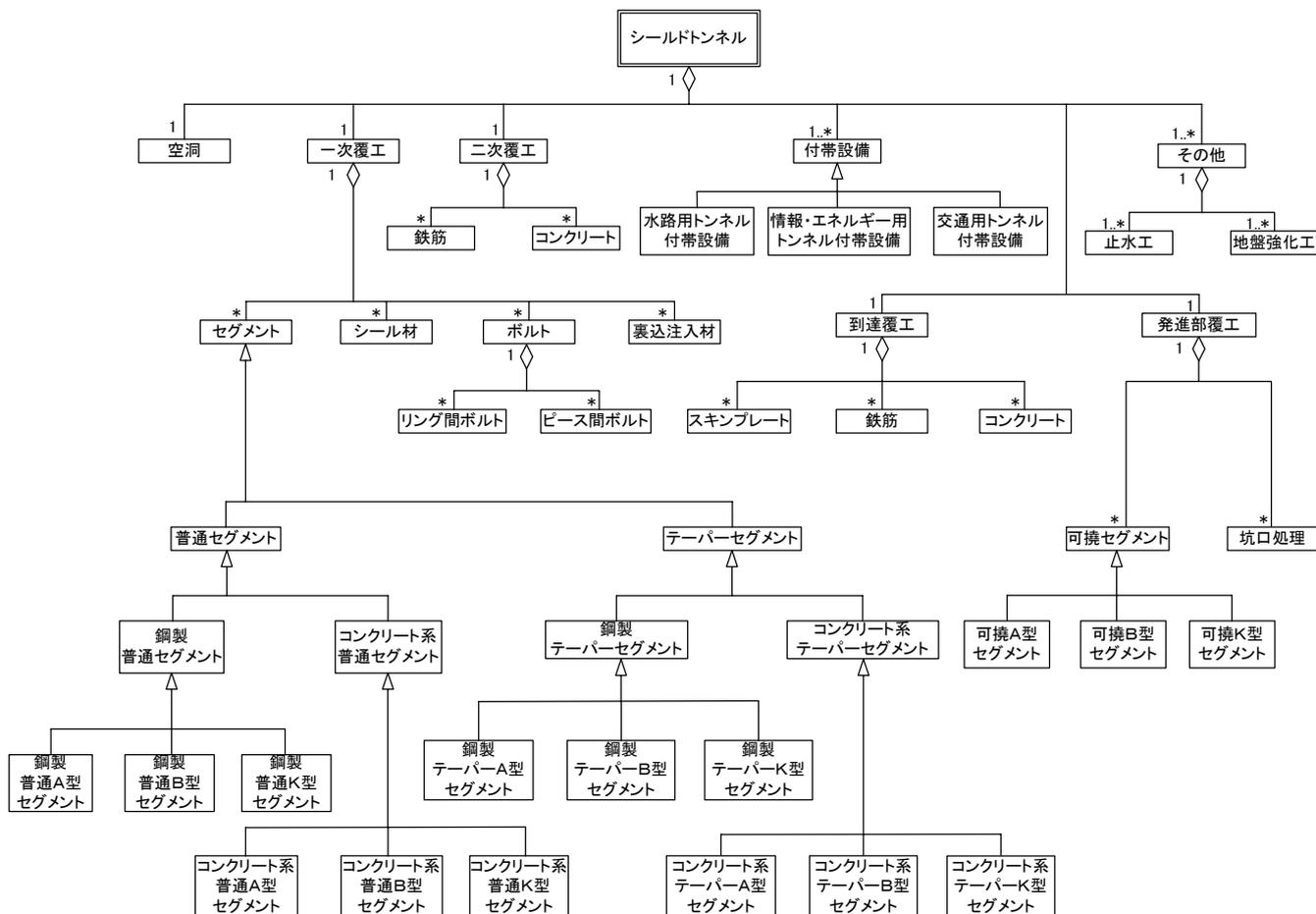


図-3 シールドトンネル本体の概念的プロダクトモデル

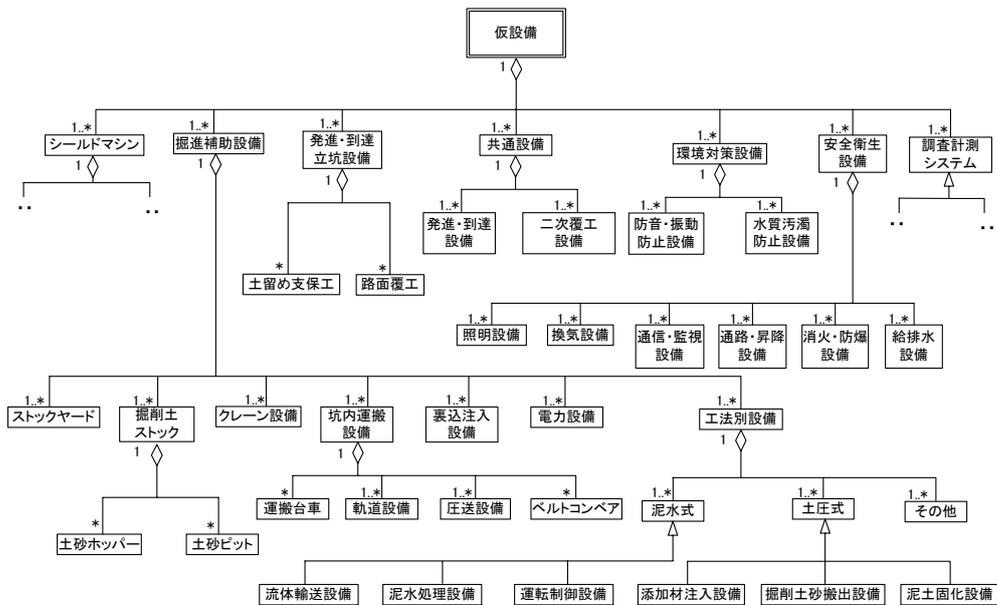


図-4 シールドトンネルの仮設備の概念的プロダクトモデル

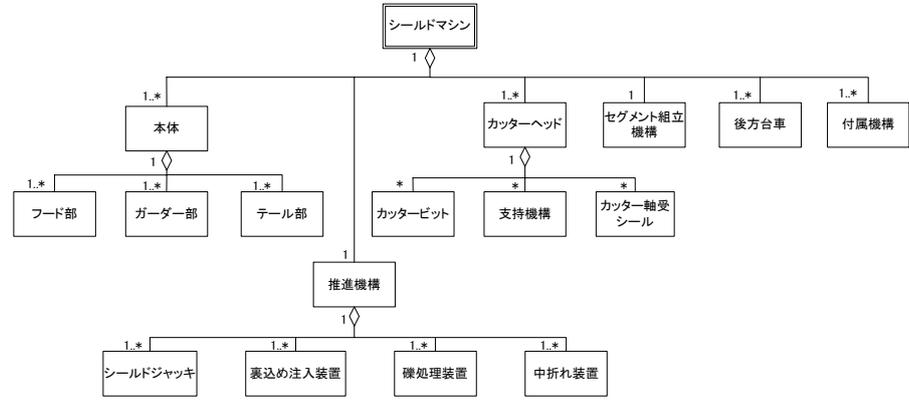


図-5 シールドマシンの概念的プロダクトモデル

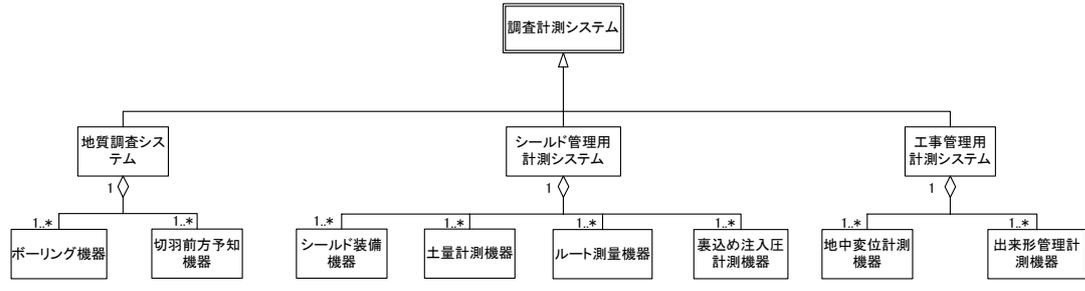


図-6 計測システムの概念的プロダクトモデル

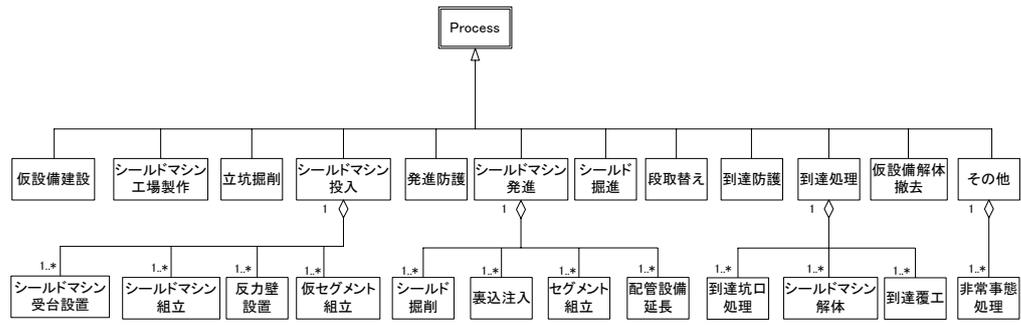


図-7 Processの概念的プロダクトモデル

の順番通りに並んでいるわけではなく、各作業をクラスとして表現するものである。各作業のクラスのインスタンスの中に、いつからいつまでどのような機械を使って行うのかといった情報が属性として記入されて始めて順番が決まる。

c) Organization

組織モデルは組織をどう捉えるかによって、モデル化が大きく異なってくる。本研究では、単純に発注者、コンサルタント、施工業者の3者のみをクラスとして表現し、その下は、図-8に示すように単純にした。

d) 調査計測データ

調査計測データクラスとしては、地質調査、シールド管理用、工事管理用の3つの種類のデータに分類し、各々必要に応じて細かいクラスを定義した(図-9)。

e) 知識

知識については、モデリングの手法としては、述語論理、ルール、セマンティックネットなどがあるが、本研究では知識モデルについては未開発である。

4. IFCの拡張によるシールドトンネルのプロダクトモデルの構築

(1) IFC2x3

前章で記したのはあくまで概念的なプロダクトモデルであり、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、クラス間の関係や各クラスの属性などを詳細に定義する必要がある。我々は、これまでも橋梁のプロダクトモデルを開発する際にも、既に建築分野で構築が進んでいる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多少の変更作業で利用してきた¹²⁾。そこで、本研究でも同様なアプローチを採用した。

IFCの現在のバージョンはIFC2x3であり、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であり、3種の基本構造クラス IfcObjectDefinition, IfcRelationship, IfcPropertyDefinition を有する、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3種の基本構造クラス IfcObjectDefinition, IfcRelationship, および IfcPropertyDefinition が、IfcRootのサブクラスとして存在し、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。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。

(2) 開発対象としたプロダクトと開発したクラス

本研究では、IFCの拡張によるアプローチの基本的な検討として、概念的プロダクトモデルの中から、掘削される地盤とシールドトンネルのクラスの一部をモデリングの対象として選定した。開発したシールドトンネルのプロダクトモデルのクラスと関連するIFCのクラスを図-10に示す。本研究でIFCに新たに追加したクラスの名前は IfcSt で始まる。Ifc はクラスの先頭に付けるよう IFC 内でのクラス定義の条件になっている。St は ShieldTunnel の略であり、これにより既存の IFC のクラスと区別できる。以下に開発したクラスについて述べる。また、本研究で拡張開発を行ったクラスについてはハッチングを行い既存のクラスと区別した。以下、主なクラスについて説明する。

a) 地盤

地盤はシールドトンネル施工において、シールドマシンにより掘削空洞が構築されトンネル建設が行われる空間である。本研究では、地盤を建設空間という概念で考える事とした。

IFC に建設現場を定義するクラスとして存在する IfcSite が地盤のようなシールドトンネルの建設空間を表すのに適切だと考えた。IfcSite は IFC 内で IfcSpatialStructureElement のサブクラスとして定義されている。このクラスは空間構造物を定義する場所であり、ここで定義されたクラスは、IfcRelationship のサブクラスである IfcContainedIn- SpatialStructure を用いる事により、内部に構造物要素 (IfcElement) が存在する事を定義可能である事がわかった。そこで本研究では、IfcSite の中に地盤という概念を加えようと考えたが、このクラスは本来建設現場を経度、緯度で位置定義するクラスであった。また、地盤というのは土質や地下水の有無など、特有の属性を有するクラスである事から、ユーザが理解しやすいよう IfcSite のサブクラスに地盤である IfcStGround という名前のクラスを定義することとした。

b) シールドトンネル

シールドトンネルは、本研究で新たに追加した地盤というクラスの内部に含まれる要素であると考えた。前述の通り、IfcSpatialStructure のサブクラスとして定義した IfcStGround の中に IfcElement およびそのサブクラスが含まれるという表現は、IfcRelationship のサブクラスを用いる事により可能となる。そこで本研究では構造物要素を定義する IfcElement のサブクラスにシールドトンネル要素である IfcStShieldTunnelElement という名前のクラスを定義した。

さらに、IfcStShieldTunnelElement のサブクラスとして、掘削空洞である IfcStExcavatedCave、一次覆工であ

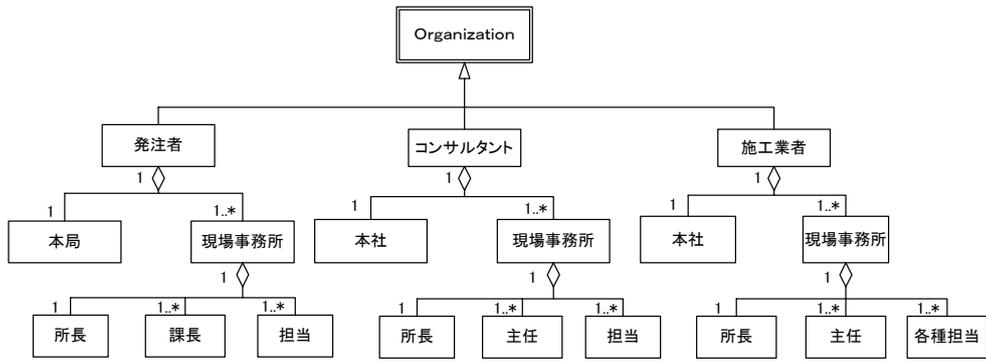


図-8 Organizationの概念的プロダクトモデル

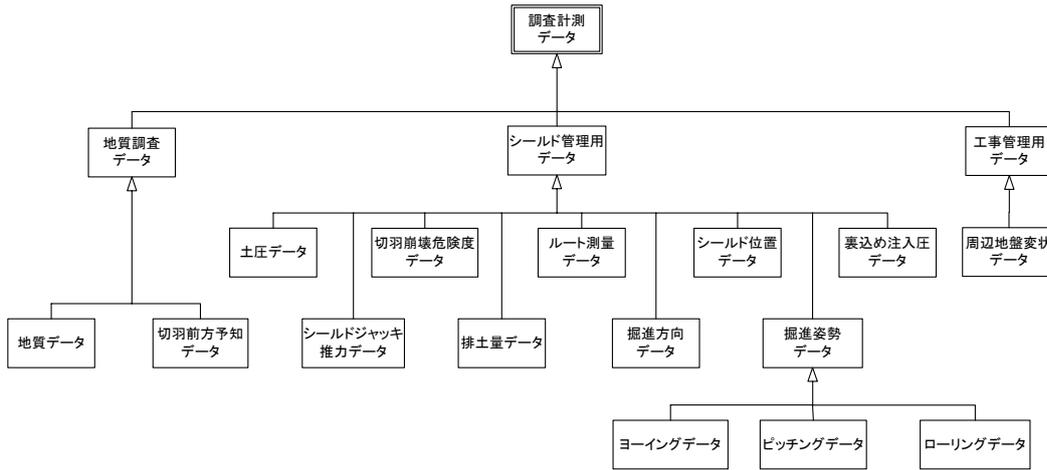


図-9 調査計測データの概念的プロダクトモデル

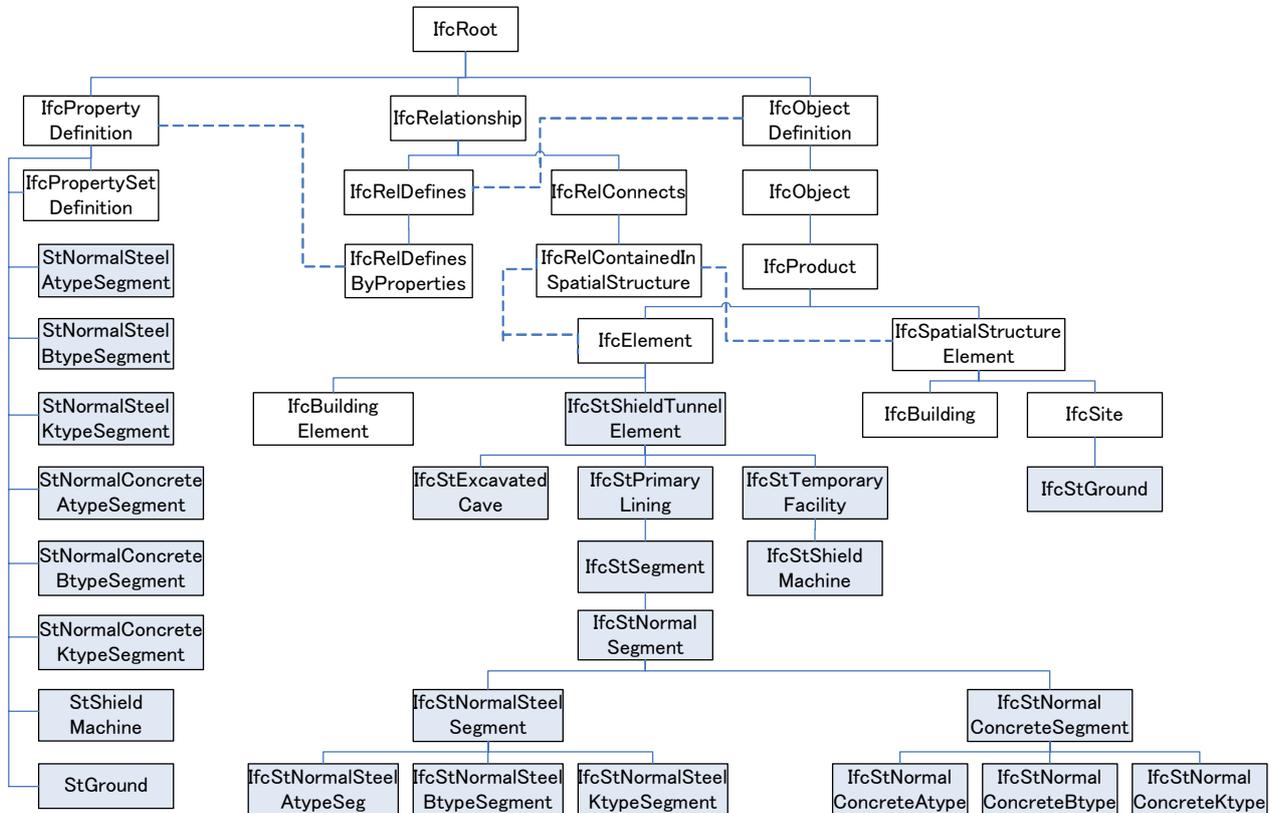


図-10 IFCを拡張することにより構築したシールドトンネルのプロダクトモデル

る IfcStPrimaryLining , 仮設備である IfcStTemporaryFacility という名前のクラスをそれぞれ定義した。掘削を行うシールドマシンは、仮設備であるから、仮設備を定義したクラスのサブクラスにシールドマシンである IfcStShieldMachine を定義した。

特に一次覆工のクラスについては、セグメントを定義する事としたが、若干複雑であるため以下に詳しく述べる。

一次覆工は IfcStShieldTunnelElement のサブクラスとして定義した。本研究では仮設備の一つであるセグメントについても拡張開発をした。まず、一次覆工である IfcStPrimaryLining のサブクラスに、セグメントである IfcStSegment を定義した。さらにそのサブクラスに今回対象とした普通セグメントである IfcStNormalSegment を定義した。トンネル施工における普通セグメントには普通鋼製セグメントと、普通コンクリート系セグメントがあり、それぞれを IfcStNormalSegment のサブクラスに IfcStNormalSteelSegment, IfcStNormalConcreteSegment と定義した。また、トンネル施工に用いられるセグメントは通常 A, B, K 型があり、それぞれについても IfcStNormalSteelSegment, IfcStNormalConcreteSegment のサブクラスに定義した。

(3) 開発したクラスの定義

プロダクトモデル構築は、モデル図にクラスを追加するだけでは終わりではなく、Express 言語を用いて新たに加えたクラスを定義しなくてはならないため、Express 言語によりそれぞれを Express スキーマに定義した (図-11)。

また、IfcPropertyDefinition クラスは Express スキーマでの定義のような決まりというのは特になく、しかし本研究では、新たに加えた IfcStNormalSteelSegment, すなわち、普通鋼製 A 型セグメントを対象として具体的な属性内容を実験的に表形式でまとめる事とした。具体的な属性としては、鋼タイプ (SteelType), 溶接タイプ (WeldingType), 溶接継手タイプ (WeldingJointType), 塗装材 (CoatingMaterial), 設計強度 (DesignStrength), セグメント重量 (SegmentWeight) を定義した。鋼タイプ, 溶接タイプ, 溶接継手タイプに関しては、あらかじめ使用すると考えられるものを幾つか挙げ、ユーザが自由に選べる方法をとった。

5. プロダクトモデルの実装例

(1) インスタンスファイルの作成

本研究ではプロダクトモデル構築後、3次元 CAD システム間との間でデータの受け渡しができるか検討した。まず、ifcXML¹³⁾ を用いてプロダクトモデルの各オブジェクトのインスタンスファイルを作成した (図

```

8622 -- Elements↓
8623 ↓
8624 ↓
8625 ENTITY IfcStShieldTunnelElement ↓
8626 ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONEOF↓
8627   (IfcStExcavatedCave↓
8628     ,IfcStPrimaryLining↓
8629     ,IfcStTemporaryFacility )) ↓
8630 SUBTYPE OF (IfcElement); ↓
8631 END_ENTITY;↓
8632 ↓
8633 ENTITY IfcStExcavatedCave↓
8634 SUBTYPE OF (IfcStShieldTunnelElement);↓
8635 END_ENTITY;↓
8636 ↓
8637 ENTITY IfcStPrimaryLining↓
8638 ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONEOF↓
8639   (IfcStSegment));↓
8640 SUBTYPE OF (IfcStShieldTunnelElement);↓
8641 END_ENTITY;↓
8642 ↓
8643 ENTITY IfcStTemporaryFacility↓
8644 ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONEOF↓
8645   (IfcStShieldMachine));↓
8646 SUBTYPE OF (IfcStShieldTunnelElement);↓
8647 END_ENTITY;↓
8648 ↓
8649 ENTITY IfcStSegment↓
8650 ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONEOF↓
8651   (IfcStNormalSegment));↓
8652 SUBTYPE OF (IfcStPrimaryLining);↓
8653 END_ENTITY;↓

```

図-11 Express 言語によるスキーマ表現 (一部)

```

<IfcGeometricRepresentationContext href="B1001" />
</ContextOfItems>
- <Items>
- <IfcExtrudedAreaSolid>
- <SweptArea>
- <IfcArbitraryClosedProfileDef>
  <ProfileType>AREA</ProfileType>
- <OuterCurve>
- <IfcCompositeCurve>
- <Segments>
- <IfcCompositeCurveSegment>
  <Transition>CONTINUOUS</Transition>
  <SameSense>FALSE</SameSense>
- <ParentCurve>
- <IfcPolyLine>
- <Points>
- <IfcCartesianPoint>
- <Coordinates ex:cType="list">
  <IfcLengthMeasure pos="0">150</IfcLengthMeasure>
  <IfcLengthMeasure
    pos="1">259.8076</IfcLengthMeasure>
  <IfcLengthMeasure pos="2">0</IfcLengthMeasure>
</Coordinates>
</IfcCartesianPoint>
- <IfcCartesianPoint>
- <Coordinates ex:cType="list">
  <IfcLengthMeasure pos="0">175</IfcLengthMeasure>

```

図-12 ifcXML を用いて作成したオブジェクトのインスタンスファイル (一部)

図-12) . ifcXML は、IFC におけるオブジェクトデータを実装するために制定された実装形式である。ifcXML によるインスタンスファイルは、オブジェクトの形状だけでなく、配置情報を与えたり、複数のオブジェクトを同時に組み合わせる事が可能となっている。インスタンスファイル作成の対象としたオブジェクトは、地盤、掘削空洞、セグメント (A, B, K 型) である。

インスタンスファイル内での具体的な形状表現方法について述べる。本研究では、対象としたオブジェクトの表現に IfcRepresentationItem のサブクラスである IfcSweptAreaSolid というクラスを用いて表現した。このクラスは面を押し出して SolidModel を作成するという概念である。地盤は直方体であるため任意の寸法で四角形の面を作成し、その面に厚さ (奥行き) を与えて SolidModel とした。掘削空洞も同様に作成したが、

掘削空洞の場合はシールドマシンによって構築されるため、面の形状は円で表現した。セグメントは、セグメントを構成する外側と内側それぞれの弧の半径を定義し、2つの弧の始点と終点を与えて面を作成した。面の作成後は他と同様に厚さを与えてモデルを作成した。

(2) コンバータプログラムの作成

作成したインスタンスファイルを、そのままの形式で3次元CADシステムはデータ処理する事が不可能である。そこで、作成したインスタンスファイルをCADソフトが読み込む事により、そのデータがCAD画面上にモデリングをするコンバータプログラムをVisual Basic for Applicationを用いて開発した。

(3) コンバータプログラムによる実装

コンバータプログラム開発後、実際にそれぞれのインスタンスファイルを実装した。まず簡単な地盤をモデリングし、次にその地盤から掘削空洞を差し引くという表現をしなくてはならなかったが、本研究では、AutoCAD2004のSolidObject同士の差を求めるsubtractという機能を利用し、地盤から掘削空洞データを差し引くようにプログラミングを行い表現した(図-13)。

セグメントは、A、B、K型のインスタンスファイルを実装し、それぞれに位置情報を与えてセグメントリングを作成した(図-14)。

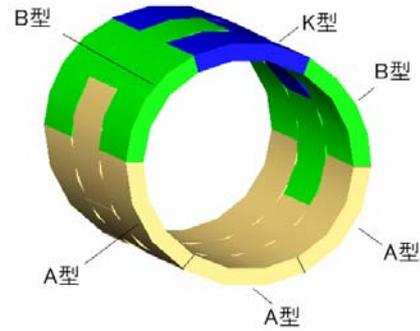


図-13 掘削空洞内でのトンネルの表現

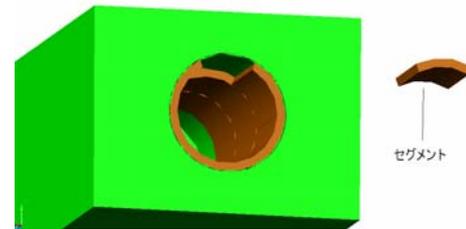


図-14 セグメントリングの実装例

法人日本建設情報総合センターの研究助成を受けた。また、同財団のシールドIT研究会のメンバー各位から多くの助言を頂いた。ここに感謝の意を表する。

6. まとめ

本研究では、シールドトンネルを対象とした概念的なプロダクトモデルを構築し、IFCを拡張することにより概念的プロダクトモデルの中から主なクラスの一部を定義した。さらに、ifcXMLを用いて簡単なシールドトンネルのモデルの実装を行い3次元CADシステムとの間でデータのやりとりを実施した。

本研究の成果であるプロダクトモデルは、シールドトンネルの貴重な設計および施工実績データ等を保管する際の標準的なデータ仕様を表現するものである。世界をリードする我が国のシールドトンネル工事に関するデータは、現状では、将来逸散してしまう可能性があるが、本プロダクトモデルを利用することにより、設計、施工、計測データ等を貯蔵し、必要に応じて検索したり、他のアプリケーションシステムで処理することが可能になり、有用だと考えられる。

今後の課題は、本研究で対象としていないモデルの実装、土木構造物のライフサイクルにおける各種アプリケーションシステムとの相互運用を可能とし、実際の工事への適用、さらに計測データモデルの構築などが挙げられる。

謝辞: 本研究を遂行するにあたり、第一著者は、財団

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, 2005.3.
- 2) ISO10303, Industrial Automation Systems and Integration - Product Data Representation and Exchange, 1994.
- 3) IFC: <<http://www.iai-international.org/index.html>>, (入手 2005.10.)
- 4) 本郷延悦, 石村久治: 橋梁鋼上部工を対象としたJHDM構築に関する研究, 土木情報利用技術論文集, Vol.12, pp.11-20, 2003.
- 5) 矢吹信喜, 町中啓樹: 鋼桁橋プロダクトモデルとVR-CADの開発及び立体視の有効性検討, 土木情報利用技術論文集, Vol.14, pp.87-94, 2005.10.
- 6) IFC-BRIDGE: <<http://www.iai-france.org/bridge/>>, (入手 2005.2.)
- 7) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 道路中心線形データ交換標準(案)基本道路中心線形編 Ver.1.0, 2006.12.
- 8) 土木学会: 土木用語大辞典, 1999.
- 9) 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.
- 10) 土木施工編集委員会編: トンネル・シールド工事, 山海堂, 2003.
- 11) 日本トンネル技術協会: トンネル技術ステップアップ研修会-シールドトンネル-, 2005.
- 12) 矢吹信喜, 志谷倫章: IFCに基づいたPC中空床版橋の3次元プロダクトモデルの開発, 土木情報システム論文集, Vol.11, pp.35-44, 2002.10.
- 13) ifcXML: <http://www.iai-international.org/ifcXML2/RC2/IFC2X2_FINAL/ifcXML%20Implementation%20Guide%20v1-0.pdf>, (入手 2005.5.)

(2007.5.18受付)