

I-30 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

Development of a Comprehensive Design Support System Using a Product Model

矢吹 信喜¹志谷 倫章²

Nobuyoshi Yabuki

Tomoaki Shitani

【抄録】土木構造物の施工における、鉄筋のかぶりの不足、部材間の干渉、密集した配筋によるコンクリートの施工不良等の問題は、設計段階で解決可能なものが多く、又、解決すべきものであるが、現行の2次元図面による設計では困難である。本研究では、以前より開発を進めてきたIFCに基づいたプレストレスト・コンクリート中空床版橋の3次元プロダクトモデルを利用することにより、3次元CADシステム、設計照査システム、及び構造細目（かぶり等）照査システムを統合化したモデルを構築し、プロトタイプシステムを開発した。さらに、実際の橋梁事例を適用することにより、その有効性を検証した。

【Abstract】 Most construction-related problems such as lack of covering of reinforcing bars, interference among members, bad concrete placement due to densely arranged reinforcing bars can be and should be solved during the design phase. However, the current design practice using two-dimensional drawings makes it difficult to be solved. In this research, an integrated model was developed by using the IFC-based product model for prestressed concrete hollow slab bridges, 3D-CAD system, design checking software, and reinforcing bar covering checking system. A prototype system was developed based on the model, and the system was applied to an actual bridge design virtually for testing. The application showed the feasibility of the methodology and the system.

【キーワード】 プロダクトモデル, IAI, IFC, XML, 3次元CAD, 設計照査, 施工性, かぶり

【Keywords】 product model, IAI, IFC, XML, 3D-CAD, design checking, constructability, covering

1. はじめに

20年以上にわたって、各種構造物や製品に関する情報を異なったアプリケーション間で相互運用できるようにすることを目的に、3次元のプロダクトモデルに関する研究開発が行われてきた。この間、PDES¹⁾ (Product Data Exchange Standard), ISO 10303²⁾ (STEP: Standard for The Exchange of Product model data) や IAI (International Alliance for Interoperability) の IFC³⁾ (Industry Foundation Classes) 等の国際的な標準の開発が行われてきた。また、商用3次元CADシステムをベースにしたプロダクトモデル^{4) 5)} も開発されてきた。橋梁に関しては、国際的な標準と呼ぶに十分なものは未だ開発されていないが、最近IAIによるIFC-Bridge⁶⁾ が提案され、現在開発が進められている。

我々も、以前より数種類の構造物を対象としたプロ

ダクトモデルの開発を行ったが^{7) 8) 9)}、その際のモデリングの手法は、各クラスの属性を全てクラス内部に持たせる古典的なものであった。そこで、より柔軟なデータの実装を可能とするため、クラスの属性をプロパティセットとして別のクラスに持たせるという現代的な手法を採用し、IFCに準拠したプレストレスト・コンクリート(PC)中空床版橋のプロダクトモデルの開発を既に行った¹⁰⁾。さらに、いくつかのXMLを比較検討し、XMLのスキーマ言語の一つであるXML Schemaを用いたifcXMLを選択して、開発したモデルの実装を行った。

一方、プロダクトモデルの利用による生産性を考慮すると、土木構造物においては、設計段階のみで利用しても、構造解析や数量計算等の作業における効率化は見込めるものの、施工段階まで含めて包括的に利用しなければ、大幅な生産性の向上の実現は難しいと考

1 正会員 Ph.D. 室蘭工業大学工学部建設システム工学科 助教授 〒050-8585 室蘭市水元町 27-1
TEL: 0143-46-5219 FAX: 0143-46-5218 Email: yabuki@news3.ce.muroran-it.ac.jp
2 学生会員 室蘭工業大学大学院工学研究科建設工学専攻

えられる。そこで、我々は、PCあるいはRC（鉄筋コンクリート）構造物の施工段階において頻繁に問題となる鉄筋のかぶり、PC ケーブルやボイド管と鉄筋等との干渉、密集した配筋によるコンクリートの施工不良等の問題に着目した。こうした問題は、本来ならば設計段階で解決されて然るべき問題であるが、2次元図面による現行の設計では、複雑な構造物の場合は解決が困難であり、施工段階で問題が発覚し、手戻りや施工不良を引き起こしている。

そこで、本研究では、先に開発した PC 中空床版橋のプロダクトモデルを利用することにより、3次元 CAD システム、設計照査システム、及び鉄筋のかぶりチェックシステムを統合化し、設計段階で上記のような問題が解決可能であることを示すことを目的とした。尚、こうした異なるシステムを、商用 CAD システムの内部に全て持たせるアプローチもあるが、本研究の主眼は、異なるアプリケーションシステムの統合化にある。

2. PC 中空床版橋のプロダクトモデル

本論では、開発した PC 中空床版橋のプロダクトモデルの基本的な事項について記述する。詳細については、文献¹⁰⁾を参照されたい。

IAI の IFC は、建築ビルディングを対象としたプロダクトモデルであるから、橋梁に直接適用することは困難であるが、橋梁もビルディングも似たような構造物であるから、援用することとした。但し、コンクリート構造物の形状は、ビルディングより、橋梁の方がより自由度が高い点と、IFC では、コンクリート内部に鉄筋、PC ケーブルやシース等が「含まれる」ということを表現する詳細なモデルが存在しないことが問題であった。

そこで、我々は、コンクリート構造を、IFC で提供している形状要素 B-rep で表現することとした。B-rep とは、サーフェスで構成される、閉じた図形であり、内部に関する情報を持つことが可能である。B-rep により、自由度の高い 3 次元図形を表現しつつ、内部に鉄筋や PC ケーブル等を持つことが可能となった。さらに、鉄筋や PC ケーブル等の内在する部材がコンクリートの内部にあることを、IfcRelContainedInSpatialStructure という「含まれる」関係を表現するクラスを用いることにより示すこととした。

鉄筋や PC ケーブル等の部材については、円をベクトル方向に押し出すことによって表現されるソリッドを使用して図形表現し、一つ一つのクラスのオブジェ

クトとしてモデル化した。モデリングに関しては、施工を意識して、なるべく詳細なモデルとしたが、重ね継手に関しては、異なる 2 本の鉄筋を一部束ねたように表現するのではなく、形状的には 1 本の鉄筋とし、継手部の部分を属性として表現することとした。また、定着長の部分は、形状上の違いはないので、定着部の位置情報、定着種別、定着長等をプロパティセットとして定義した。

本研究で開発したクラスモデルを Express-G により表現したものを図-1 に示す。また、PC 中床版橋用に新たに付加した部材のクラスのプロパティセットを図-2 に示す。

3. プロダクトモデルの実装

プロダクトモデルの実装に関しては、リレーショナルモデルやオブジェクト指向モデル等、種々のデータモデルをベースとした開発言語を用いることが可能であるが、ISO STEP では、スキーマをオブジェクト指向の EXPRESS 言語で定義することとなっている。しかし、最近 XML が広く使用されていることから、我々は aecXML¹²⁾、BLIS-XML¹³⁾、及び ifcXML¹⁴⁾ を比較し、ifcXML を選択して、スキーマとインスタンスの両方を実装した。ifcXML は W3C (World Wide Web Consortium) が 2001 年 5 月に勧告したスキーマ言語である XML Schema を使用しており、DTD (Document Type Definition) とは異なり、多様なデータ形式をサポートしている。尚、詳細については、文献¹⁰⁾を参照されたい。

4. アプリケーションシステムの統合化

本研究では、図-3 に示すように、プロダクトモデルを中心として、3次元 CAD システム、PC 上部工の設計計算システム、及び鉄筋かぶりチェックシステムを統合化したシステムモデルを構築した。さらに、モデルの有効性を実証する目的で、プロトタイプシステムを開発した。以下、各システムとプロダクトモデルとの統合化について記す。

4.1 3次元 CAD システムとの統合化

本研究では、3次元 CAD システムとしては、AutoCAD 2002¹⁵⁾ を使用した。CAD システムとプロダクトモデルデータとの間でデータの相互運用ができるように、データの変換を行うコンバータプログラムを 2 つ (コンバータプログラム I 及び II) 作成した。

コンバータプログラム I は、3次元 CAD システム

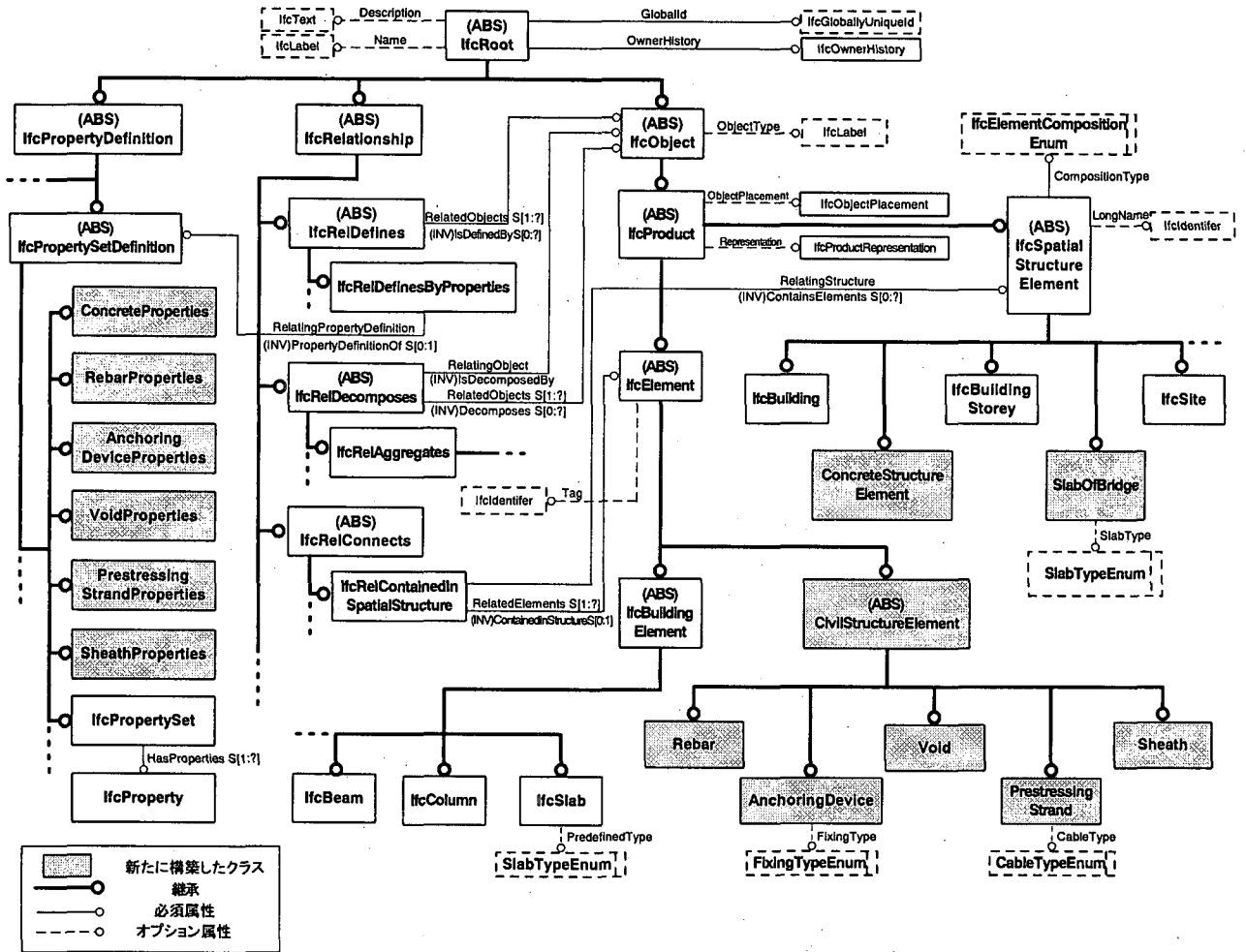


図-1 PC中空床版橋のプロダクトモデル

(AutoCAD 2002)において設計した構造物のデータを, ifcXML形式のプロダクトモデルのインスタンスファイルとして半自動的に生成するものである. 開発にはVBA (Visual Basic for Application)を用いた.

コンバータプログラムⅡは, ifcXMLのインスタンスファイルを一時DOM (Document Object Model)としてコンピュータ上のメモリに展開してからファイル内部のデータを読み取り, 3次元CAD上にモデリングを自動実行するものである. XMLパーサにMSXML version2.0を使用し, プログラム本体の開発にはVBAを用いた.

4.2 設計ソフトウェアとの統合化

3次元CADにおいてPC中空床版橋の概略設計を行った後, 力学的な照査を行う必要がある. 本研究では, FORUM8社製のPC中空床版の設計計算用ソフトUC-1¹⁶⁾を力学的な照査を行うサンプルソフトとして使用することとした. さらに, 照査実行時に必要となるデータをifcXMLインスタンスファイル内から抽出するコンバータプログラムⅢを開発した. コンバータ

プログラムⅢは, UC-1に入力すべきデータの一覧を表示し, ユーザの数値入力作業をサポートする. コンバータプログラムⅡと同様, XMLパーサにMSXMLを搭載し, Visual Basicを用いて開発した.

4.3 鉄筋かぶり照査システムとの統合化

設計ソフトウェアを用いて力学的な照査を実施した後, 主鉄筋, スターラップ等の配置や形状等を決定し3次元CADシステム上で詳細な設計を行う. その後, 鉄筋の定着や鋼材のかぶり等の構造細目に関する照査を行う必要がある. そこで本研究では, 構造細目の中でも特に鋼材のかぶりに着目し, 本プロダクトモデルのデータから最小かぶり値を求めるシステムをJava ServletとXML for Java Parser 2.0.9を用いて開発した. 設計基準として, 道路橋示方書¹⁷⁾の一部をプログラム化した. 以下に照査の簡単なフローを示す.

まず, ifcXMLインスタンスファイルの中から床版の上, 側面, 底面, さらに鉄筋の中心軸に関するデータを読み取り, それぞれ平面の方程式, 媒介変数を用いた直線の方程式として定式化する. 次に, 直線上の

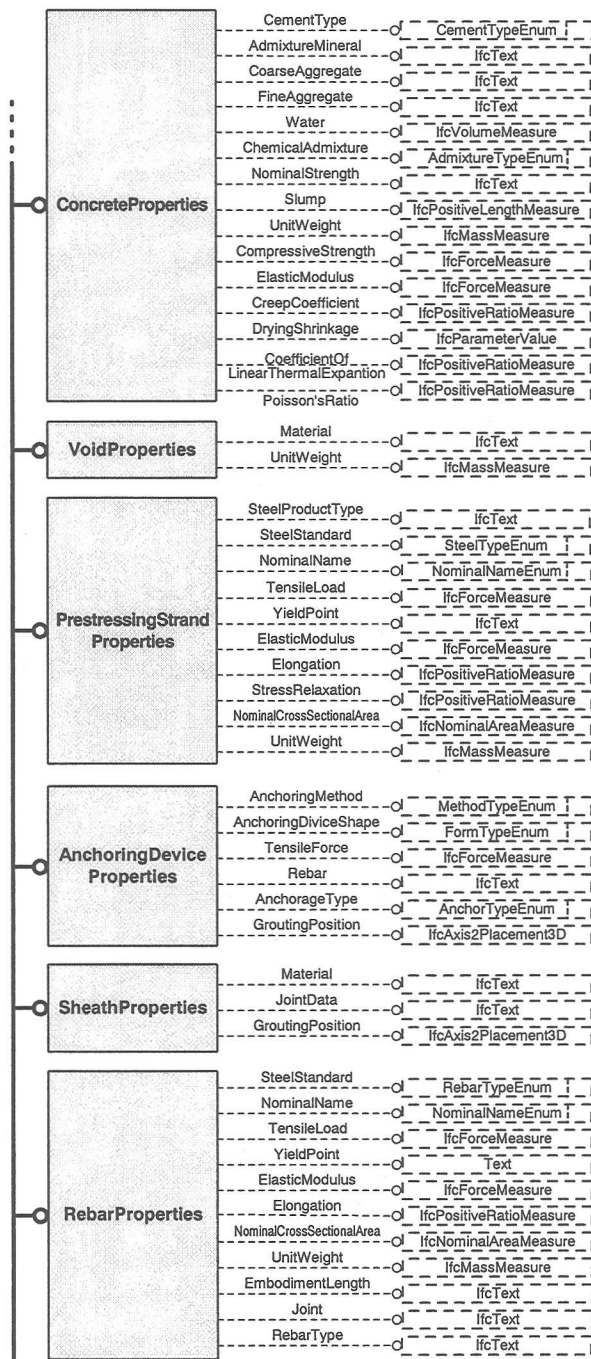


図-2 各部材クラスのプロパティセット

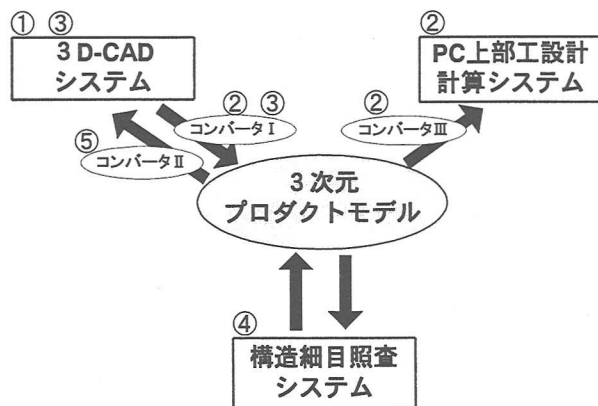


図-3 統合化したシステムモデル

始点から終点間に存在する各点と、平面との距離を求め、さらに鉄筋の半径の長さを差し引き、かぶりを求める。このうち最小値となったものを最小かぶり値とし、設計基準値との比較を行う。

上記の処理をインスタンスファイル内にある全ての鉄筋について行い、結果を画面に表示する。さらに、基準を満足しなかった鉄筋に関しては、修正を促すメッセージとかぶりの値が鉄筋のプロパティセット内に新たに書き込まれ、プロダクトモデルが更新される。さらに、コンバータプログラムⅡにより違反した鉄筋を3次元CAD上で色分けして表示出来るようにした。

5. 統合化システムの適用事例

本研究では、表-1に示すPC中空床版橋の設計に、本研究で開発した統合化システムを適用させ、システムの有効性を検討することとした。以下に、本システムを用いた設計作業の流れを示す(図-3)。

①まず、設計者は3次元CADシステムを用いて、PC中空床版橋の概略の設計を行う(図-4)。この段階では、鉄筋やスターラップ等はモデリングされず、鉄筋径とピッチ等のデータのみを決定する。

②次に、コンバータプログラムⅠを実行し、①の設計データを図-5に示されるスキーマに従って、インスタンスファイル(図-6)に変換して保存する。さらに、コンバータプログラムⅢを実行し、照査に必要

表-1 設計条件

構造形式	PC 単純中空床版橋
橋 長	110.000 m
桁 長	19.200 m
支 間	18.000 m
幅 員	13.300 m
斜 角	A1・90° 00' P1・60° 00'
活 荷 重	B 活荷重

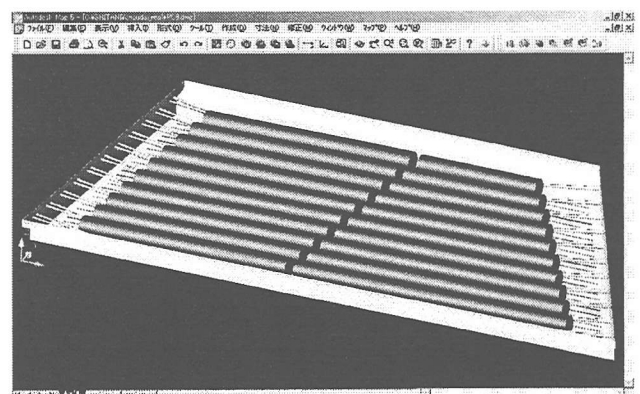


図-4 PC 中空床版の概略設計

```

+ <xsd:complexType abstract="true" name="Root">
+ <xsd:complexType abstract="true" name="Object">
- <xsd:complexType abstract="true" name="Product">
- <xsd:complexContent>
- <xsd:extension base="Object">
- <xsd:sequence>
- <xsd:element minOccurs="0" name="objectPlacement">
- <xsd:complexType>
- <xsd:choice>
- <xsd:element ref="ObjectPlacement" />
- <xsd:element ref="ObjectPlacementRef" />
- </xsd:choice>
- </xsd:complexType>
- </xsd:element>
- <xsd:element minOccurs="0" name="representation">
- <xsd:complexType>
- <xsd:choice>
- <xsd:element ref="ProductRepresentation" />
- <xsd:element ref="ProductRepresentationRef" />
- </xsd:choice>
- </xsd:complexType>
- </xsd:element>
- </xsd:sequence>
- </xsd:extension>
- </xsd:complexContent>
- </xsd:complexType>
- <xsd:complexType abstract="true" name="SpatialStructureElement">
- <xsd:complexContent>
- <xsd:extension base="Product">
- <xsd:sequence>
- <xsd:element type="Identifier" minOccurs="0" name="longName" />
- <xsd:element type="ElementCompositionEnum" name="compositionType" />
- <xsd:element name="containsElements" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded">
- <xsd:complexType>
- <xsd:attribute ref="Inverse" />
- </xsd:complexType>
- </xsd:element>
- </xsd:sequence>
- </xsd:extension>
- </xsd:complexContent>
- </xsd:complexType>
- <xsd:complexType name="SlabOfBridge">
- <xsd:complexContent>
- <xsd:extension base="SpatialStructureElement">
- <xsd:sequence>
- <xsd:element type="SlabTypeEnum" name="slabType" />

```

図-5 スキーマファイル (一部)

なデータの一覧を表示させ (図-7) 解析モデルを作成し (図-8), PC 上部工設計計算システム UC-1 を用いて力学的な照査を行う (図-9)。

③照査を満足したため、再度3次元 CAD システムに戻り、鉄筋、スターラップを含めた詳細な設計を行う (図-10)。作業終了後、再度コンバートプログラムⅠを起動しインスタンスファイルを更新する。

④次いで、構造細目照査システムにおいてかぶり計算を行う。まず、本システムにインスタンスファイルを読み込ませ、計算実行ボタンを押す。図-11は結果表示画面の一部である。スターラップの一つが基準値を満たしておらず、エラーが表示されているのが確認出来る。そこで、同フォーム下部にあるコマンドボタンをクリックし、エラーメッセージとかぶりの値を、エラーが報告されたスターラップのプロパティセットに書き込み (図-12)、終了する。

⑤最後に、コンバートプログラムⅡを用いて、先程更新されたインスタンスファイルを読み込ませ、自動的にモデリングを行う (図-13)。同図から、ユーザーは、かぶり値にエラーがあったスターラップを容易に確認し、修正することが出来る。

尚、本適用例には通常のパソコン (Windows2000, Pentium4, 2.4GHz, Memory : 1024MB) を用いたが、レスポンス時間は特に遅いという感覚は得られなかった。

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
- <!-- IFC 2x Final -->
- <SlabOfBridge id="_1001">
- <globalId>|.CY[0]+Hw=#rH0,xel/globalId>
+ <ownerHistory>
+ <name>Original Bridge</name>
+ <description />
+ <objectType />
+ <isDefinedBy inverse="_101" />
+ <isDecomposedBy />
+ <decomposes />
+ <objectPlacement>
+ <representation>
+ <longName />
+ <compositionType>COMPLEX</compositionType>
+ <slabType>PCHollowSlabBridge</slabType>
+ <containsElements inverse="_1000" />
- </SlabOfBridge>
- <CartesianPoint id="_1004">
- <coordinates>0,0,0</coordinates>
- </CartesianPoint>
- <CartesianPoint id="_1009">
- <coordinates>0,0,0</coordinates>
- </CartesianPoint>
- <CartesianPoint id="_1201">
- <coordinates>0,0,1275</coordinates>
- </CartesianPoint>
- <CartesianPoint id="_1202">
- <coordinates>0,0,1525</coordinates>
- </CartesianPoint>
- <CartesianPoint id="_1203">
- <coordinates>0,13100,1525</coordinates>
- </CartesianPoint>
- <CartesianPoint id="_1204">
- <coordinates>0,13100,1275</coordinates>
- </CartesianPoint>
- <CartesianPoint id="_1205">
- <coordinates>0,12450,1175</coordinates>
- </CartesianPoint>
- <CartesianPoint id="_1206">
- <coordinates>0,12450,525</coordinates>
- </CartesianPoint>
- <CartesianPoint id="_1207">
- <coordinates>0,650,525</coordinates>
- </CartesianPoint>
- <CartesianPoint id="_1208">
- <coordinates>0,650,1175</coordinates>

```

図-6 インスタンスファイル (一部)

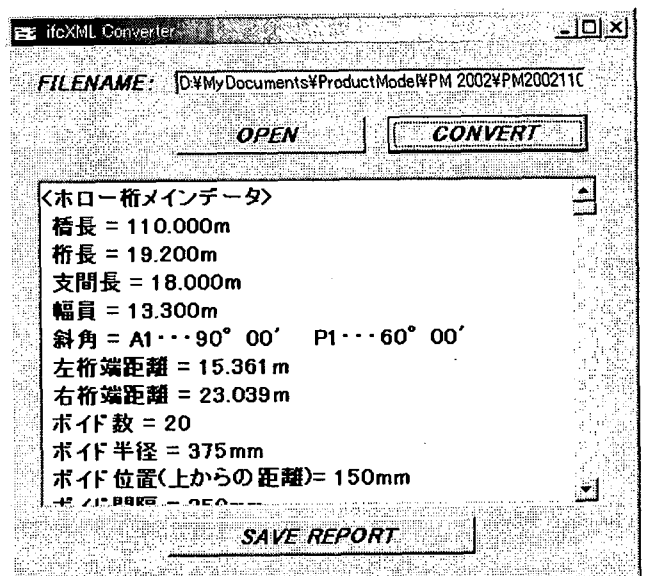


図-7 コンバートプログラムⅢ

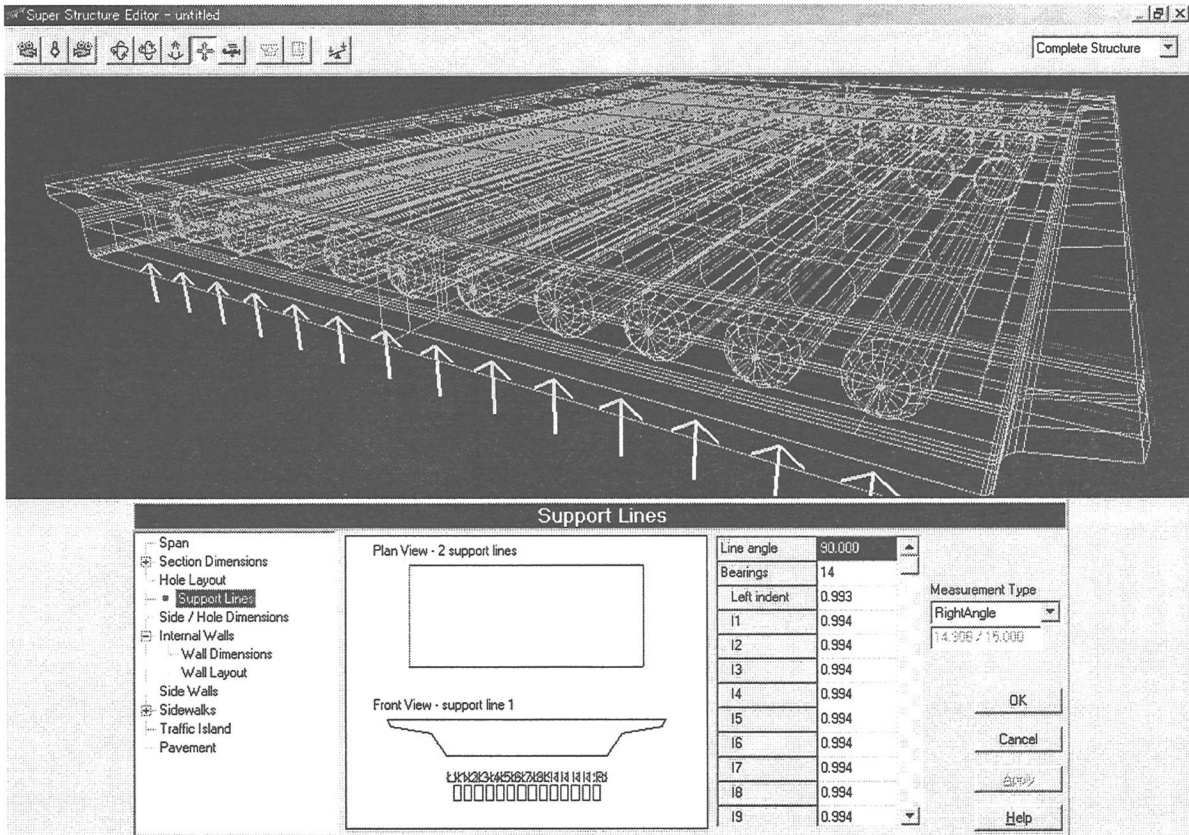


図-8 設計ソフトウェア UC-1 による PC 中空床版橋の解析モデル

Calculation Summary - untitled

Critical Failure Ratio Summary			
Calculation	Failure Description	Node	Critical Ratio
PC Analysis			
Tension Steel	Not Calculated		0.000
Concrete Shear Stress (Design Loads)	Critical Live Load	G2-12	0.978
Concrete Diagonal Tension Stress	Critical Live Load Neutral Axis	G2-11	0.257
Shear Reinforcing Stress	Critical Snow Load	G2-1	0.000
Fatigue Strength (shear reinforcing)	Not Calculated		0.000
Reinforcing Stress (PC)	Critical Live Load Top	G2-9	0.254
PC Cable Stress (PC)	Critical Live Load Cable Centroid	G2-8	0.734
Concrete Stress (PC)	Critical Construction Top	G2-15	0.706
Average Efficiency Rating			0.366
Strength Analysis (Ultimate Actions)			
Ultimate Moment Capacity	1.7D + 1.7Lmax + 1.0P	G2-9	0.738
Concrete Shear Stress (Ultimate Loads)	1.7D + 1.7L + 1.0P	G2-14	0.181
Average Efficiency Rating			0.459
PRC Analysis			
Flexural Crack Widths	Critical Live Load Bottom	G2-9	0.393
Fatigue Strength (longitudinal reinforcing)	No Support Settlement Bottom Steel	G2-9	0.440
Reinforcing Stress (PRC)	Critical Live Load Bottom	G2-9	0.353
PC Cable Stress (PRC)	Critical Live Load Cable Centroid	G2-9	0.799
Concrete Stress (PRC)	Critical Snow Load Bottom	G2-4	0.578
Average Efficiency Rating			0.513

Font... Help Details... Close

図-9 照査結果画面

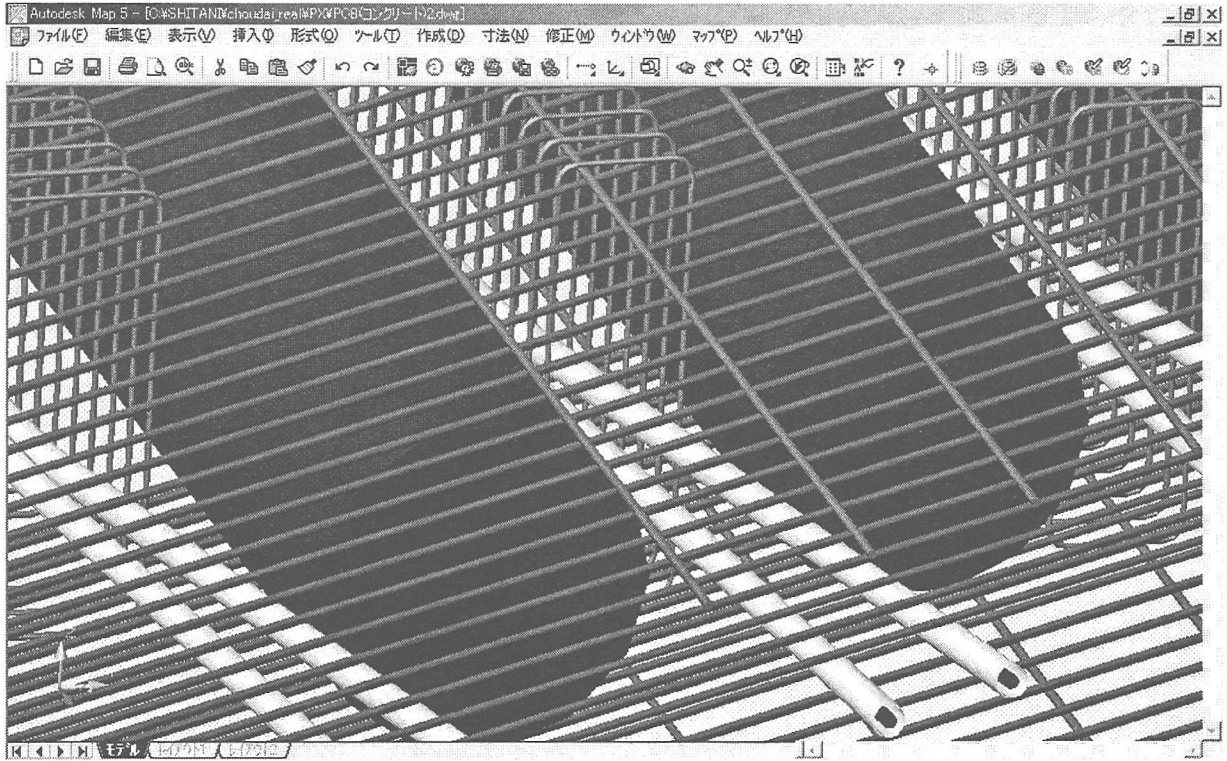


図-10 PC中空床版橋の詳細設計



図-11 かぶりの照査結果画面

```

- <PropertySet id="_9002">
  <globalId>].CY[$]o+Hw=#rH0,xε3</globalId>
  - <ownerHistory>
    <OwnerHistory href="_7001" />
  </ownerHistory>
  - <hasProperties>
    - <PropertySingleValue id="_9003">
      <name>かぶり値</name>
      - <nominalValue>
        <Real>25.0</Real>
      </nominalValue>
    </PropertySingleValue>
    - <PropertySingleValue id="_9004">
      <name>COLOR</name>
      - <nominalValue>
        <String>YELLOW</String>
      </nominalValue>
    </PropertySingleValue>
  </hasProperties>
</PropertySet>
    
```

図-12 新たにエラー情報が書き込まれたプロパティセット

6. おわりに

本研究では、IAIのIFCをベースに、PC中空床版橋の3次元プロダクトモデルを構築し、ifcXMLを用いて実装した。さらに、構造細目(かぶり)照査システム、3次元CADシステム、PC上部工の設計計算システムを開発又は整備し、各種コンバータプログラムを開発して、3次元プロダクトモデルを中心とした統合システムモデルを構築し、その適用例を示した。

その結果、プロダクトモデルによるデータ相互運用の有効性を示せた。また、プロパティセットを導入し

たプロダクトモデルとしたことにより、かぶりやエラー情報等、任意のデータの実装が容易にできることを示した。さらに、概略設計から詳細設計までの包括的な設計が可能となったことを示せたと考えている。今後は、設計作業の効率化を目標として、3次元CADシステムのユーザインタフェースの開発等に取り組んで行きたいと考えている。

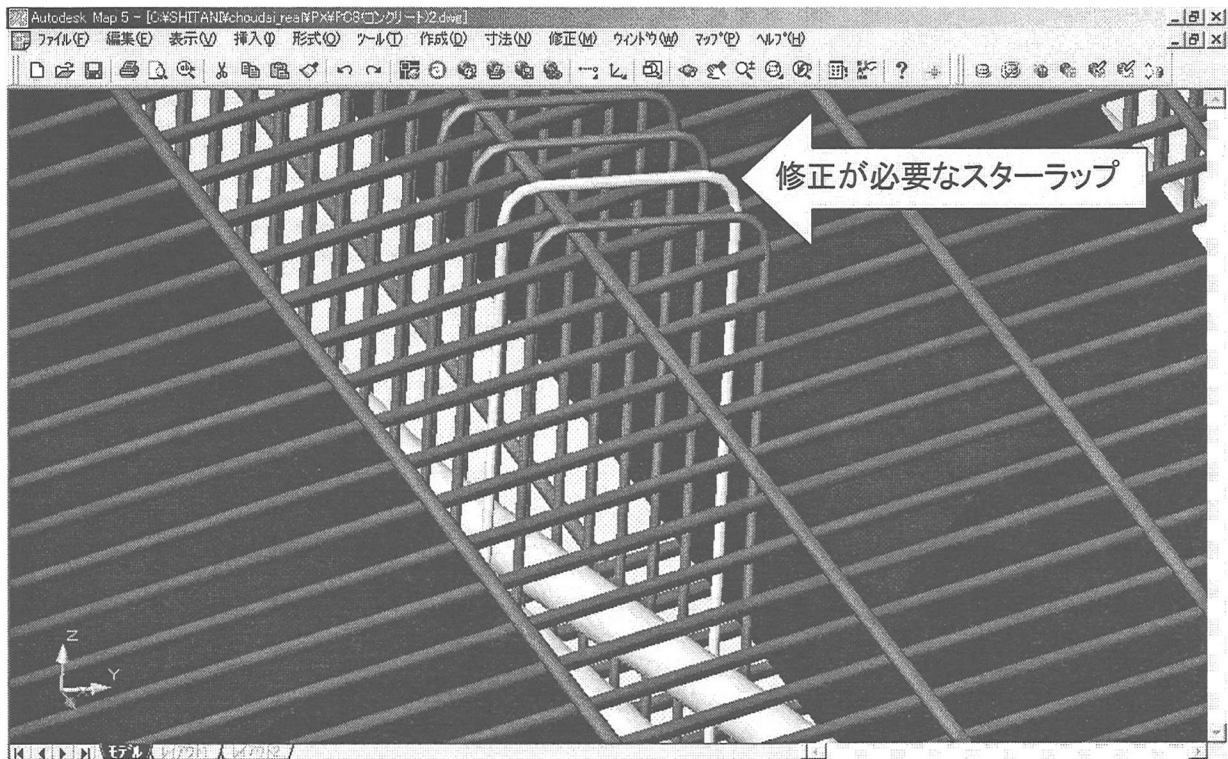


図-13 かぶりが不足した鉄筋の表示

謝辞：本研究を遂行するにあたり，(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会，(株)フォーラムエイト及びIAI日本支部構造分科会の皆様から御協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 木村文彦，小島俊雄：製品モデル表現とその利用技術－STEP，日本規格協会，1995.
- 2) ISO10303：Industrial Automation Systems and Integration・Product Data Representation and Exchange，1994.
- 3) IFC 2x：http://cic.vtt.fi/niai/technical/ifc_2x/
- 4) Xsteel：http://www.xsteel.com/
- 5) CIMsteel：http://www.leeds.ac.uk/civil/cae/cimsteel/cimsteel.htm
- 6) IFC-Bridge：http://www.iai-france.org/bridge/
- 7) 矢吹信喜，志谷倫章，宮島良将，岸徳光：統合化された鋼構造接合部の設計システムに関する研究，土木情報システム論文集，Vol.10，pp.175-184，2001.
- 8) 矢吹信喜，古川将也，加藤佳孝，横田勉，小西哲司：プロダクトモデルによるPC中空床版橋の設計照査と概略積算の統合化，土木情報システム論文集，Vol.10，pp.213-220，2001.
- 9) 矢吹信喜，齊藤大輔：3次元プロダクトモデルと電子タグによる水圧鉄管の点検情報システム，土木情報システム論文集，Vol.10，pp.113-120，2001.
- 10) 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.
- 11) XML Schema：http://www.w3.org/XML/Schema
- 12) aecXML：http://www.iai-na.com/domains/aecxml.htm
- 13) BLIS-XML：http://www.blis-project.org/
- 14) IfcXML：http://www.iai-international.org/iai_international/Technical_Documents/IFCXML.htm
- 15) AutoCAD 2002 ユーザガイド，オートデスク，2001.
- 16) UC-Win/UC-1 シリーズ 導入の手引き，フォーラムエイト，2002.
- 17) 道路橋示方書（I共通編・IIIコンクリート橋編）・同解説，日本道路協会，2002.