

第1回 橋梁 CIM の概要

講師：矢吹 信喜*

本講座の開設にあたって

プレストレストコンクリート（以下、PC）構造物は、PCに関する知識のみでは製作することはできず、さまざまな周辺技術に関する知識が必要となります。たとえば、PC道路橋においては「線形」など道路に関する知識、橋梁の機能を発揮するための「支承、伸縮装置、落橋防止構造、排水装置」などの付属物に関する知識、構造物を製作するための「設備・計画・設計」といった製造に関する知識などが必要になります。

また、最近では建設情報を計画から維持管理まで共有するための技術として「CIM」が注目されているとともに、施工の省力化技術としてプレキャスト製品などの工場製品が注目されています。

今回から開講する講座『PCの周辺技術を学ぼう』では、初学者や学生を対象として、PC構造物に大切な技術であるにもかかわらず、本誌などの学術誌においては注目を浴びることが少ない周辺技術の基本から最近の動向までを斯界を代表する技術者の皆様に解説をしていただきます。本講座が幅広い知識をもつPC技術者を目指すきっかけになれば幸いです。

講座名：「PCの周辺技術を学ぼう」

	題名（予定）	掲載予定
第1回	橋梁 CIM の概要	60巻3号
第2回	橋梁 CIM の適用事例	60巻4号
第3回	線形の基礎	60巻5号
第4回	支承	60巻6号
第5回	伸縮装置	61巻1号
第6回	その他の橋梁付属物	61巻2号
第7回	PC工場の設備	61巻3号
第8回	PC工場での管理	61巻4号
第9回	架設機材の計画・設計	61巻5号
第10回	架設機材の計画・設計	61巻6号

(文責：講座部会)

1. はじめに

国土交通省では、2012年度から3次元モデルを中心としてプロジェクトを進める CIM (Construction Information Modeling/Management)¹⁾ の活用モデル事業として試行業務(設計)を開始しました。2013年度からは試行工事を開始し、2016年度までの試行件数はおおの90件、196件となっています。2017年3月には「CIM導入ガイドライン(案)」を公開し、2018年3月にはその改訂版²⁾を発表しました。また、2015年からi-Constructionを開始し、ICT (Information and Communication Technology)、とりわけ3次元データの利活用、コンクリート部材のプレキャスト化、工事発注の平準化などの施策を含めて、生産性革命、働き方改革などに大々的に取り組んでいます。こうした取組み

の背景には、建設業の労働生産性が他産業と比較して低く、製造業の半分くらいしかないこと、建設業就労者の高齢化に伴う担い手不足が深刻であること、といった喫緊の課題があり、建設分野を魅力的なものにするためには大規模かつ広範な改革が必要であることが認識されています。

橋梁分野、とくに鋼橋の製作過程においては、3次元CADの利用はかなり早く1990年頃からすでに始まりました。たとえば、建設コンサルタントによる設計は2次元図面で行われていたため、鋼橋製作のなかで、キャンバー計算を行い、3次元モデルを作成し、鋼板の切削、ボルトの穴あけなどを自動化していました。また、仮組立てを3次元CAD内で仮想的に行うことまで実施していました。しかし、設計、現場での施工や維持管理との連携までには至りませんでした。プレストレストコンクリート(PC)橋

* Nobuyoshi YABUKI：大阪大学 大学院工学研究科 教授

については、2002年に当時の社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会3次元プロダクトモデル(3DPM)小委員会において、PC橋梁の3次元プロダクトモデルの開発と実務への適用に関する研究開発を実施しました^{3,4)}。この活動を通じて、橋梁のプロダクトモデルIFC Bridgeをフランスと共同で開発するプロジェクトも行いましたが⁵⁾、その後なかなか実務に適用しようとする動きは起こりませんでした。

一方、建築分野では、2004年頃からBIM(Building Information Modeling)⁶⁾という言葉が頻繁に使われるようになり、3次元モデルを設計から施工まで一貫して利用する動きが活発になり、フロントローディングやコンカレント・エンジニアリングを目指していました。そうしたなか、国土交通省が2012年にCIMの試行を開始したことは非常に価値があり、もしもこの時に開始していなかったらば、欧米どころかアジアでも相当に遅れた国となっていた可能性があります。

2. 3次元モデリング

2.1 立体のモデリング手法

CIMを実践していくうえで、CG(コンピュータグラフィクス)の基本である3次元モデリングを理解することはきわめて重要です。まず、立体のモデリング手法には、ワイヤフレームモデル、サーフェスモデル、ソリッドモデルの3種類があります(図-1)。ワイヤフレームモデルは、頂点と稜線しかなく、立体の輪郭しか表現できません。サーフェスモデルは、ワイヤフレームモデルに加えて立体の表面も表現できますが、中身がないため体積を求めることができません。ソリッドモデルは、立体の中身まで表現できるため、体積が求まり、面で立体を切った場合、断面が平面として表現されます。したがって、CIMでは通常、ソリッドモデルで部材を作成します。

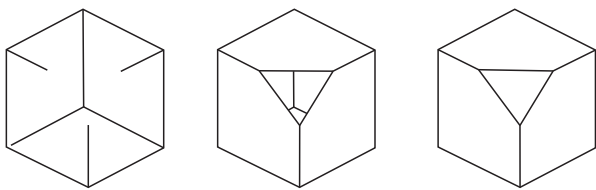


図-1 立体のモデリング手法(左からワイヤフレームモデル、サーフェスモデル、ソリッドモデル)¹⁾

ソリッドモデルの作成方法には大きく、①境界表現(B-Rep)、②スイープ表現、③CSG(Constructive Solid Geometry)、④その他のボクセル(voxel)、オクトリー(octree)などの4つに分類されます。CIMでは、①境界表現と②スイープ表現でほとんどモデリングされます。境界表現は、頂点、稜線、面の幾何情報とそれらの位相情報によって立体の境界を表現し、面のどちら側に立体の中身があるのかを定義することによってソリッドを表現する方法です(図-2)。スイープ表現は、立体の断面を表す2次元図形を直線、円、円弧などのある定められた経路に沿って移動させた時にできる軌跡として表現する方法です(図-3)。

2.2 レンダリングとVR/AR

このようにして作成された3次元モデルを2次元のディスプレイ上で人間が見て認識できるように写實的に画像を生成する技術をレンダリングと呼びます。レンダリングには、透視投影、隠面消去、シェーディング、テクスチャマッピングなどの効果付加処理があり、よりリアルに近い画像が生成できます。また、視点移動、画角の拡大縮小や3次元の立体を動かすアニメーションなどがCGでは可能です。

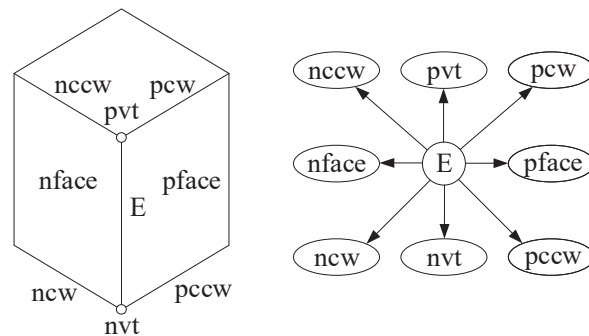


図-2 境界表現の代表的なデータ構造¹⁾

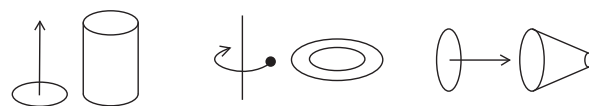


図-3 スイープ表現の例¹⁾

さらに、特殊なヘッドマウントディスプレイなどを用いることにより、3次元モデルを立体視することができ、あたかも自分が3次元モデルの世界の中に入り込んで、移動したり、物体のモデルを操作したりできるようなバーチャルリアリティ(VR)を実現することができます。一方、オーグメンテッドリアリティ(AR)は、現実のビデオ映像の上に仮想CGモデルを重畳する技術です⁷⁾。VRやARは、住民にこれから建設しようとする橋梁などの構造物を説明する際に、リアリティがあり有効だと考えられます。

3. プロダクトモデル

3.1 オブジェクト指向技術によるプロダクトモデル

CADはIvan Sutherlandによって1963年に発明されましたが、当初のCADシステムのモデルは3次元CGそのものでしたので、点、線、面などの幾何形状(図形)の集合にすぎませんでした。その後、誕生したオブジェクト指向技術を応用することによって、CADモデルは大きく変化しました。すなわち、単なる図形の集合ではなく、桁や橋脚、基礎杭といった具合に人間にとって意味があるモノ(プロダクト)として扱うことができるようになったのです。こうしたモデルをプロダクトモデルと称しますが、ここで簡単に説明します。

(1) クラス、インスタンス、属性

「橋梁」という言葉は、現実に存在する個別の橋をしめすのではなく、橋と呼べるものを集めたグループの総称で

あり、一つ概念を表す抽象化されたもので、これを「クラス」と呼びます。一方、たとえば、明石海峡大橋のような個別の橋梁は、橋梁というクラスに基づく実体であり、これをインスタンスと呼びます。

個々のインスタンスは、それらを特徴付ける情報を持ちます。たとえば、各橋梁には、橋名、位置、橋長、完成年月日、管理者、施工会社、主な材料などの情報があります。こうした情報を属性と呼び、インスタンスにもたせる属性を、あらかじめクラスのなかで定義しておきます。

(2) 汎 化

橋梁は、コンクリート橋や鋼橋に主に分類され、コンクリート橋はRC橋とPC橋、鋼橋は鋼桁橋、吊橋、トラス橋などに分類されます。さらに、鋼桁橋は鋼I桁橋、鋼箱桁橋などに分類されます。このように分類された橋梁の種類はクラスとして階層構造で表現することができ、上位をスーパークラス、下位をサブクラスと呼びます(図-4)。上位から下位のクラスに分類していくことを特化、逆に下位から上位に一般化していくことを汎化と呼びます。

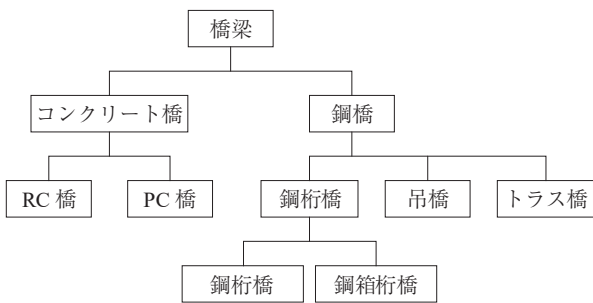


図-4 汎化による橋梁の分類例¹⁾

このような汎化の関係にある場合、スーパークラスの属性はサブクラスにそのまま継承されます。そのため、下位のクラスでいちいち同じ属性を定義し直す必要がないので、クラス全体のデータ量が軽く、データモデル作成者の負担も軽減されます。一方、下位のクラスにある独自の属性を定義することができ、その属性は上位には継承されず、下位のみ継承されます。

(3) 集 約

橋梁は、大きく上部構造、支承、下部構造の3つに分類されます。上部構造は、桁、床版、ケーブルなどの要素に分けられ、下部構造は、橋脚、橋台、基礎などの要素に分けられます(図-5)。このような分け方は、前述の汎化・特化とは異なり、全体と部分の関係であり、集約と呼ばれます。

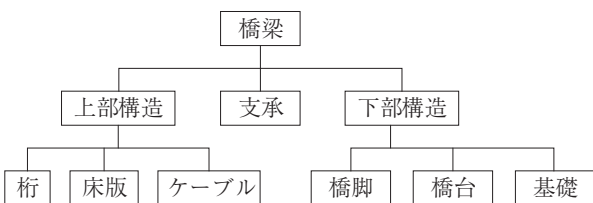


図-5 集約による橋梁の部材構成の例¹⁾

汎化と集約の関係以外に、関連(クラス間の結びつき)、依存(相手の変化によって影響を受ける)、実現(相手を具象化する)といった関係がプロダクトモデルにあります。

(4) スキーマとインスタンスファイル

これら一連の関係とクラスをある領域(たとえば、橋梁)で定義したプロダクトモデルは、もはや単なるCADデータの互換用フォーマットではなく、形状や材料、仕様、部材間の関係などの情報をオブジェクト指向技術に基づいて表現した汎用的なものといえます。一般化されたプロダクトモデルとして記述されたデータモデルをスキーマと呼び、通常テキストファイルあるいはデータベースとしてコンピュータに実装されます。ある固有の橋梁、たとえば明石海峡大橋に関する諸データをスキーマに基づいて作成したものをインスタンスファイルと呼び、スキーマとは明確に区別します。

3.2 プロダクトモデルの国際標準

(1) ISO-STEP

プロダクトモデルを皆が勝手に作成したのでは、ソフトウェア間や国と国との間でインスタンスファイルの互換性がなく、お互いにデータを共有することができません。そこで、プロダクトモデルに関する国際標準がISOで作成されており、ISO 10303(略称STEP)と呼ばれています。ISO-STEPでは、スキーマを表現するための言語EXPRESSやインスタンスを表現するPart-21ファイルなどの仕様も定められています。

(2) 建築物のIFC

ISO-STEPに基づいて、機械や船舶などの分野ではプロダクトモデルの標準化が1990年代に行われましたが、建築物は遅れました。そこで、IAI(International Alliance for Interoperability)という国際コンソーシアムが1996年に設立され、その後、bSI(buidingSMART International)と改称されましたが、建築物用のプロダクトモデルIFC(Industry Foundation Classes)の作成にとりかかり、2013年にIFCは国際標準ISO 16739となりました。

(3) 土木構造物のIFCの開発状況

土木分野では、1. はじめに、で記したようになり前から筆者らは橋梁やトンネルのプロダクトモデルの開発を研究として実施していましたが、bSIではなかなか国際標準にする作業を開始してくれず、ようやく2013年からbSIの中にInfrastructure Roomというインフラのプロダクトモデルを作成する分科会を設立し、活動を開始しました。現在、IFC Bridge, IFC Road, IFC Rail, IFC Maritime, IFC Tunnelの5つの領域のプロダクトモデルを2020年までに完成させようと努力しています。各プロダクトモデルの名称の頭にIFCがあるのは、IFCを拡張することによって橋梁や道路のスキーマを開発していることを表しているからです。

IFC Bridgeが完成して、ISOの国際標準になると、橋梁に関係する3D CAD、構造解析、構造計算、積算、製作・施工、維持管理に関わるすべてのソフトウェアがIFC Bridgeのスキーマに則った形式でデータをインポートおよびエクスポートできるようになり、異なるソフトウェア同士でも

データを交換したり共有したりすることができるようになるのです。bSIでは、各ソフトウェアがきちんと国際標準IFCに合致した入出力機能を有しているかどうかを検定する活動も行っており、IFC Bridgeなどのインフラ用プロダクトモデルについても同様に対応することになっています。

4. 詳細度

CIMモデルを建設コンサルタントや建設会社あるいは橋梁製作会社などが作成する際、どこまで詳細にモデルを作成するのかをあらかじめ発注者と確認・協議しておかないと、モデルを無駄に詳細に作ってしまったり、逆に粗すぎてトラブルになったりする可能性があります。そこで、BIMの世界でLOD (Level of Development) と呼ばれる詳細度をCIMモデルについてもCIM導入ガイドライン(案)²⁾で定めてあります。具体的には、詳細度100, 200, 300, 400, 500の5段階で、数が大きくなると詳細度も大きくなります。表-1に工種共通のCIMモデルの詳細度の定義を示します。

表-1 CIMモデルの詳細度(工種共通の定義)²⁾

詳細度	共通定義
100	対象を記号や線、単純な形状でその位置を示したモデル
200	対象の構造形式がわかる程度のモデル。標準横断で切土・盛土を表現、または各構造物一般図に示される標準横断面を対象範囲でスリーブさせて作成する程度の表現
300	附帯工等の細部構造、接続部構造を除き、対象の外形形状を正確に表現したモデル
400	詳細度300に加えて、附帯工、接続構造などの細部構造および配筋も含めて、正確にモデル化する
500	対象の現実の形状を表現したモデル

現在のところ、詳細度は形状についてのみ記されていますが、今後は属性に関する詳細度も検討される予定です。

5. CIMの効果と課題

5.1 これまでの試行事業での効果と課題

国土交通省のCIMの試行事業においては、受発注者双方にアンケートおよびヒアリングを行い、CIMの効果と課題を調査してとりまとめています。効果としては、

- ・可視化による品質向上・効率化
- ・可視化による関係者の協議打合せの円滑化
- ・干渉チェックの自動化
- ・数量算出の自動化、設計変更の効率化
- ・現場情報の共有化
- ・安全教育・安全管理の向上、効率化
- ・施工管理・品質管理の効率化

等があげられ、課題としては、

- ・人材教育のコスト
- ・機器やソフトの導入コスト
- ・3次元モデル作成の手間の増加
- ・人材不足

等があげられました。

以上の効果と課題は、CIMを導入したばかりの段階であげられやすいもので、容易に想像されました。試行事業では、設計のみ、あるいは施工のみCIMを適用したという工事が9割であり、設計から施工にCIMのモデルデータをそのまま使用して、連携させた例が少なかったことから、CIM本来の効果がまだ発揮できていないことがわかりました。

5.2 今後のCIMの効果について

本来、CIMは、計画・調査、設計、施工、維持管理とライフサイクルを通じて一つの3次元モデルデータを受発注者が共有しながら、各フェーズでデータを捨てずに蓄えながらプロジェクトを進めていき、維持管理ではすべてのデータを保持した状態で、さらに点検や補修データをくわえていくことが望まれます。また、フロントローディングやコンカレント・エンジニアリングを実行するためには、現在の設計・施工分離発注方式ではなかなか難しいところがあります。現在、建設会社に詳細設計への意見やアイデアを出してもらってECI (Early Contractor Involvement) を鋼橋プロジェクトに適用させつつ、CIMで業務を進めており、今後こうしたプロジェクトにおける効果と課題をしっかりと調査していく必要があると考えられます。

従来、わが国の建設現場においては、事前あまり細かい取り決めせず、日々の協力会社との打合せや状況を見ながらの現場合せといったアドホックな手法が好まれているように見受けられます。これでは、現場に大きな負担がかかりますし、効率が良い方法とは言い難いです。一方、本来のCIMでは、フロントローディングによって事前に3次元モデルを作成し、シミュレーションを十分に実施して、できるだけ現場で問題が発生しないようにすることが求められます。こうした事前の検討は作業量が増えるように感じるかも知れませんが、構造物のライフサイクルを通じてみれば、現場でのミスやトラブルを大幅に減らすことができます。その結果、無駄なトラブル処理に忙殺されることも少なくなり、週休二日制への働き方改革などが促進されるものと推察されます。

6. 4Dおよび5D CIMに向けて

CIMの3Dモデルとガントチャートに代表される工程計画とを融合させることにより、3Dが時間軸をもった4Dモデルになります。4Dモデルでは、たとえば、工程表のソフトウェアのカーソルを左から右に移動させると、3Dモデルが連動してアニメーションのように構造物が立ち上がっていき、逆方向に移動させると部材が消えていきます。4Dモデルを用いることにより、施工計画がより緻密になり、安全性の向上、適切な建設機械の配置、資材置場の確保、手戻りの削減、ひいてはコストの低減や休日の確保にも繋がっていくはずです。

また、施工現場におけるPC鋼材配置検査やコンクリート構造物の各種寸法検査にも4Dモデルを活用することで大幅な効率化が図れると考えられます。ARを用いて配筋やPC鋼材配置の検査を行うことも、研究から実務に段階

的に採用されていくことが期待されます⁸⁾。

4Dモデルと積算ソフトを連動させて、各工種の正確なコストを予定と実績ベースで求めて、コストを軸として加えて現場においてリアルタイムに管理する手法を5D CIMという場合があります⁹⁾。今後は、わが国の橋梁建設においては積極的にこうした科学的な手法を使用していき、生産性を向上させていくことが望まれます。

7. おわりに

多くの土木技術者は、CIMは単に3D CADを使用することだと思っているようですが、実はそうではありません。属性や他の部材との関係性を持ったオブジェクト指向に基づいた3次元プロダクトモデルを構造物のライフサイクルを通じて、受発注者や関係者が共有しながら、さまざまなソフトウェアを縦横に駆使して、データを増やしながら蓄積していき、皆で知恵を出し合って、プロジェクトの全体最適化を目指す新しい建設生産システム方式なのです。

本稿では、橋梁を例にしながら3次元モデリングとプロダクトモデルについて概説し、CIM導入ガイドライン(案)で記載されている詳細度について触れ、CIMの効果と課題について紹介したのち、4D/5Dモデルの利用を勧めました。今年度から、国土交通省の直轄大規模道路、河川、トンネル工事はCIM利用が義務化される予定です。本稿がプレストレストコンクリートに関係する皆様のCIM導入の一助になれば幸いです。

参考文献

- 1) 矢吹信喜：CIM入門－建設生産システムの変革－，理工図書，2016。
- 2) 国土交通省 CIM 導入推進委員会：CIM 導入ガイドライン（案），2018。
- 3) プレストレスト・コンクリート建設業協会 3次元プロダクトモデル検討小委員会：PC 橋への3次元プロダクトモデルの適用に関する検討報告書，2006。
- 4) 矢吹信喜，志谷倫章：PC 橋の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/V1-66，pp.171-187，2005。
- 5) 矢吹信喜：橋梁3次元プロダクトモデルの国際標準の構築，橋梁と基礎，No.7，pp.47-52，2005。
- 6) 『BIM その進化と活用』編集委員会：BIM その進化と活用－建築を目指す人，BIM に取り組む人のガイドブック－，日刊建設通信新聞社，2016。
- 7) 矢吹信喜，蒔苗耕司，三浦憲二郎：工業情報学の基礎，理工図書，2011。
- 8) 中村定明，横田勉，矢吹信喜：3次元プロダクトモデルを利用した施工管理技術，プレストレストコンクリート，Vol.52，No.6，pp.14-19，2010。
- 9) 織田一郎，矢吹信喜：複数の要素体系を有するWBSを用いた土木工事の生産性情報管理システムの検討，土木情報学シンポジウム講演集，Vol.42，pp.15-18，2017。

【2018年4月5日受付】



刊行物案内

既設ポストテンション橋のPC鋼材調査 および補修・補強指針

平成28年9月

本工学会「既設ポストテンション橋のPCグラウト問題対応委員会」において、ポストテンション方式の既設PC橋の実態把握（健全性・損傷事例の把握や規準等の整理）、PCグラウトの充填性調査手法の把握、PC鋼材の健全性調査手法の把握、ポストテンション橋の健全性診断の方法検討、PCグラウト充填不足・PC鋼材損傷の補修・補強の提案等の検討が行われ、その成果を指針としてまとめたものです。

定 価 4,800 円／送料 300 円
 会員特価 4,000 円／送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会