

BIM/CIM データを利用した FEM 構造解析モデル作成

清野 多美子* 鈴木 将之*

Generating FEM Structural Analysis Models from BIM/CIM Data

Tamiko Seino* Masayuki Suzuki*

国土交通省による法制化によって建設業界では BIM/CIM データの利用が進められている。BIM/CIM データをシミュレーションにも活用する方法として自動メッシュ作成の技術や BIM/CIM データから構造解析の自動化への取り組みについて紹介する。

<https://doi.org/10.69290/j.001180-vol32>

Keywords: BIM/CIM、IFC、シミュレーション、自動化、構造解析、地盤解析

1. はじめに

2020 年国土交通省により 2023 年までに小規模工事を除く公共事業に BIM/CIM を原則適用することが法制化された。建設業界では BIM/CIM データの活用が急ピッチで広がっている。従来、建築構造物などの FEM 構造解析は個別の CAD データから数値解析用のメッシュを作成し、各所から情報を集めた上で条件定義等のプリ処理を行い計算を実施、結果の検証を行うといった一連のプロセスを経て、主に部品単位で実施するのが一般的であった。BIM/CIM データ活用の一つのアイデアとして、標準化されたフォーマットの 3 次元モデルが組立なども含めたデータとなっていることから、自動でメッシュ分割から数値解析までを実施し、設計やメンテナンスなどにかかる工数を大幅に削減することが期待されている。

2. BIM データと FEM 構造解析

近年の BIM/CIM データを利用した構造解析の自動化に関する要望の増加を受け、アドバンスソフトでは IFC ファイルを FEM 構造解析に利用する方法への検討を実施している。有限要素法の解析を実施する上で必要となるのが FEM のメッシ

ュであるが、本章では BIM データから自動で FEM 構造解析モデルを作成する方法についての一考察を述べる。

2.1. IFC ファイルとは

IFC ファイルは BIM (Building Information Modeling) データを交換するための 3 次元モデルの国際標準規格である。IFC は Industry Foundation Classes の頭文字をとった用語であり、異なる BIM ソフト間や建築物の設計・施工・管理などにかかわる全体で情報共有できる点で従来の CAD データとは異なる特徴がある。データ構造は階層的に配置され、主に可読性に優れた STEP 形式や XML 形式などで保存される。IFC ファイルはオブジェクト (エンティティ) で構成され、階層構造の特徴としてはプロジェクト (IfcProject) を頂点とし、サイト (IfcSite)、建物 (IfcBuilding)、階 (IfcBuildingStorey) といった空間構造エンティティが続き、その中に実際の建築要素 (IfcWall, IfcSlab, IfcBeam など) が配置されるという構造を持つ。

2.2. IFC ファイルからのメッシュ作成

IFC ファイルが形状や構造のみならず属性情報を含んでいることにより、従来の CAD モデルから個別に FEM 解析モデルを作成し数値解析を実施するアプローチから、自動的に IFC ファイルか

*アドバンスソフト株式会社 第 2 事業部

2nd Computational Science and Engineering Group,
AdvanceSoft Corporation

ら解析モデルの作成、数値解析の実施、結果の評価までを実施する方法へのアプローチが進められている。国際標準規格化されたファイルフォーマットを用いることで、解析に必要な形状、構造や属性情報を統一した手順で読み込むことができ、自動的な解析に利用することができる。

ただ IFC ファイルは BIM/CIM モデルの情報を一元管理できる反面、数値解析の自動化においては解析に利用されないデータも数多く含むため、そのデータ構造を完全に理解するには多くの専門知識が必要となり、一からツールを作成した場合には多大な工数が必要となることが考えられる。これを代替する手段として IFC ファイルの読み取りと操作に用いられるようなオープンソースを活用することが考えられる。代表的なオープンソースソフトウェアの例としては以下のようなものがある。

- IfcOpenShell[2]
 - Python API、C++ API
 - IFC を様々な CAD 形式のファイル (STEP, OBJ, STL など) に変換可能
 - IFC ファイルの検証、情報の抽出などを行うことが可能
- IFC++ (または Ifcplusplus) [3]
 - C++

特に IfcOpenShell は数多くの開発者が携わって活発な開発が進められており、最新の IFC バージョンにも対応しているという特徴がある。例えばオープンソースの 3DCG ソフトウェア Blender[3] のアドオンツールや 3D CAD の FreeCAD の IFC 形式入出力機能[5]などでも IfcOpenShell が利用されている。

これらのライブラリを有効に活用することでメッシュ作成に必要な情報 (形状、接続情報、材料など) のみを抽出し自動メッシュツールの開発を迅速に進めることが可能である。

2.3. BIM データから自動メッシュ作成

大きく構造解析と言っても評価したい対象物

や項目により、対象とする解析の種類や解析規模は異なってくる。

- 建築構造物全体か一部分のみが対象か
- 静解析による変形の評価か、またはクリティカルな応力の評価か
- 地震波による振動解析か
- 構造物全体の固有値解析か
- 地盤と構造物の相互作用解析か

この時に対象とする問題によって、作成する FEM 解析モデルが異なってくるため問題の定義は重要である。問題の定義方法によってメッシュ作成のアプローチも異なってくる。

- ① FEM 要素形状 (ソリッド要素、シェル要素、梁要素、質量要素)
- ② FEM 要素の特性定義 (板厚、断面形状)
- ③ 解析対象物の材料特性 (弾性材、剛体、弾塑性などの非線形性の考慮)
- ④ エンティティ間の結合 (節点共有、MPC 結合、接触)
- ⑤ 境界条件の定義 (拘束条件、バネ境界)
- ⑥ 荷重条件
- ⑦ 計算リソース (計算機の規模、並列計算の可否、計算時間)
- ⑧ 解析に使用するソフトウェアとの連携方法

①のメッシュ形状に対するアプローチは⑦の計算リソースにも大きく影響する。近年では計算機性能の向上に伴って解析の大規模化が進みモデル全体をソリッド要素でモデル化することが増加している。ソリッド要素を利用した場合には②のような特性定義は不要で④～⑥に示すような解析条件定義も比較的楽になり問題の定義が単純化され解析精度も期待される。しかしソリッド要素を用いた場合、解析精度を高くするため要素サイズを小さくすると累乗的に要素数が増加し、モデル規模が大きくなりやすく、計算リソースが多く必要となる。

また③や④などの条件定義における非線形性

の考慮などによって問題は複雑化し計算時間は増大する。例えば解析を実施するのが、設計段階なのかメンテナンスのためなのか、計算の所要時間はどれぐらいを想定しているか、利用できる計算機の種類は何かによって、計算規模には制限が生じてくることが考えられる。

これらの要因から BIM モデルからのメッシュ作成にはより単純化したモデル、例えば建物の壁をシェル要素、柱を梁要素にすることが要求されるケースが考えられる。BIM モデルは 3D モデルであるため、モデルの単純化を行うためのルールを定義する必要がある。しかし対象とする IFC ファイルに含まれるエンティティの種類によってその複雑さは変化すると考えられる。

- 既存の IFC 規格で作成されたエンティティ（壁、床など）を利用する場合
⇒規格に応じたモデル化のルールを定めることでメッシュ作成の自動化が検討できる。
- 一般モデルのように他の CAD データから変換されたモデルや点群などから作成されたデータの場合
⇒ソリッドが点・線・面で構成された情報となるため、板厚や断面形状などの情報は自動化のプログラムの中で取得する必要がある。

3D のソリッドモデルをシェル要素や梁要素に単純化するには、その中立面や中心軸を利用することが一般的であるが、形状を単純化するが故にエンティティ同士を結合する時の座標位置にずれが生じる。この時エンティティの結合をどう扱うかといった問題が生じる。また地盤と構造物の相互作用解析を実施するための IFC ファイルの変換技術や、数値標高データから地盤の FEM 解析モデルを作成するなど、BIM データからの FEM 構造解析の自動化に向けて生じる数々の問題にアドバンスソフトは取り組んでいる。

最後に⑧の解析ソフトウェアとの連携について、多くの BIM ツールは構造解析のソルバー機能は搭載していない、もしくは数値解析部分は外部の構造解析ソフトウェアを使用することが想定

される。これらの外部の構造解析ソフトウェア実行のため入力ファイルを作成する機能に加え、アドバンスソフトでは汎用の構造解析ソフト Advance/FrontSTR を開発しており、このソルバー部をツールに組み込んだり、機能追加を実施することも可能である。

3. FEM 構造解析モデル作成事例

弊社が提供する地盤解析用のメッシュを作成するスクリプトを利用した事例、および構造物の BIM データから FEM 構造解析モデルを作成した事例を示す。

3.1. 地形を考慮した地盤のメッシュ作成

近年のインフラの施工・維持管理では老朽化や大規模地震への対応などの要因から、地盤構造の解析や地盤と建造物の相互作用解析の必要性が増している。ここでは地形を考慮した地盤メッシュの作成技術について紹介する。

アドバンスソフトでは汎用構造解析ソフト Advance/FrontSTR のプリポストの補助ツールとして、ライセンス利用者向けに付属スクリプト Advance/REVOCAP_PrePost を提供しており、その機能の一つとして地盤の解析を行うための地盤メッシュの作成機能（GEOS 機能）がある。この機能では国土院から提供されている数値標高データ[6]を用いて粗密付きの地盤メッシュを作成する。この時、防災科研から提供されている日本列島下の三次元地震波速度構造[7]を利用し地盤のヤング率とポアソン比を下記の式[8]で算出し、自動で定義することが可能である。

$$\text{ヤング率: } E = 2\rho V_s^2(1 + \nu) \quad (1)$$

$$\text{ポアソン比: } \nu = \frac{\left[\frac{1}{2}\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right]}{\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right]} \quad (2)$$

ここで、 V_s : 横波速度, V_p : 縦波速度, ρ : 密度

実行例として富士山付近（緯度 35.1~35.5 度、経度 138.4~138.8 度）の標高データを用いて地盤

メッシュを作成したメッシュ図を図 1 に、Z 座標分布を図 2 に示す。またヤング率の閾値を利用して材料のグループ分けを行った材料分布図を図 3 に示す。

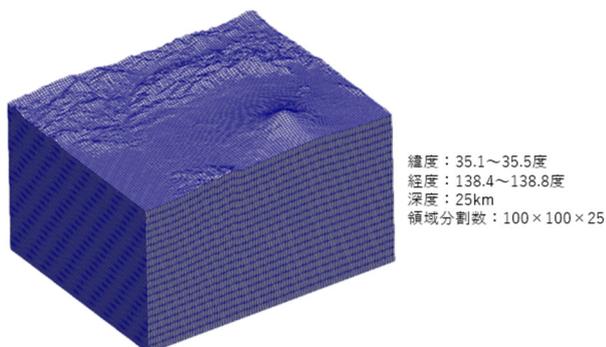


図 1 地盤メッシュの作成例 (富士山付近)

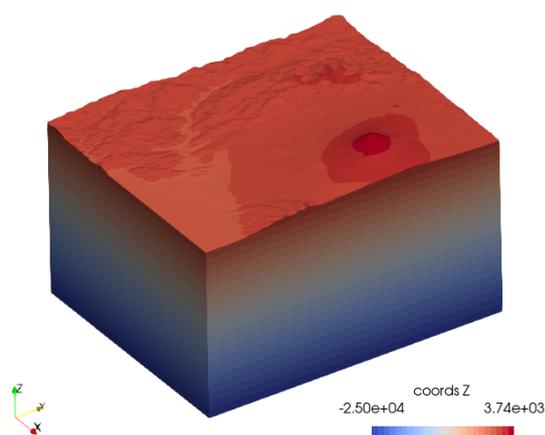


図 2 地盤メッシュの標高分布

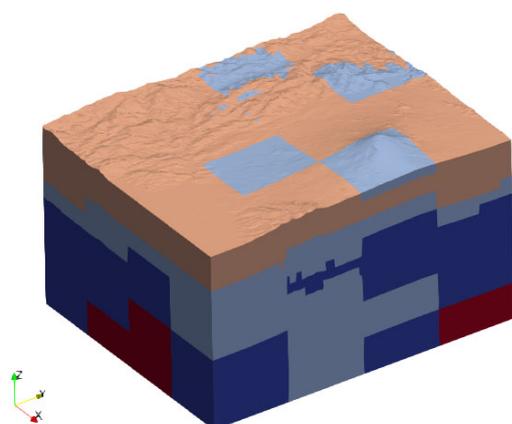


図 3 ヤング率の閾値を利用した材料分布

3.2. 部材ごとに定義された構造物の自動シミュレーション

BIM ソフトウェアにおいては、一般に図面に従い部材を配置することで構造物の設計を行う。このため BIM ソフトウェアから出力される BIM/CIM データは 2.1 章に示したような壁、スラブや梁といった部材ごとに定義された、形状、構造や属性情報を含むオブジェクトが含まれている。図 4 に BIM ソフトウェア Autodesk Revit により作成した構造物の例を示す。図 4 に示す構造物は柱、2 つの梁、2 つスラブの 5 種のテンプレートから部材を配置したものである。

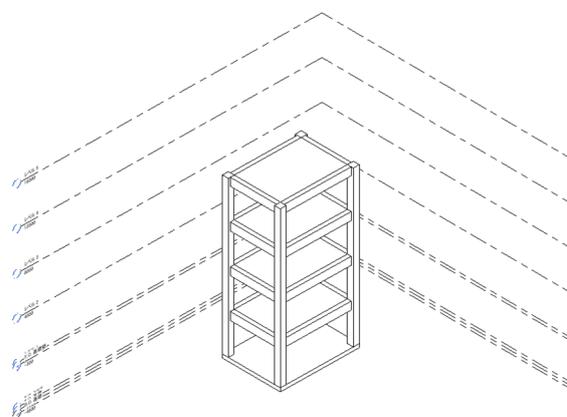


図 4 BIM ソフトウェア Autodesk Revit により作成した構造物の例

部材ごとのオブジェクトを用いた自動シミュレーションにアドバンスソフトは取り組んでいる。構造物全体にまとめるのではなく、部材ごとのオブジェクトを扱うメリットとして

1. 一般的な BIM ソフトウェア上では部材の接触面座標をバイナリ表現上で一致させていないことがあり、単純なソリッドの和では全部材を一体化したメッシュを作成することができないことが多いこと、
2. BIM ソフトウェア上でテンプレートから部材を配置することがあり、同一テンプレートから配置された部材の中間データを再利用することができることや、
3. 部材がシンプルな形状であった場合、六面体

メッシュ生成が非常に容易であること

などが挙げられる。

部材ごとに定義された BIM/CIM データから解析を行う手順例を以下に示す。

1. BIM/CIM データから部材ごとの表面形状、材質などを取得する。
2. 1 の部材ごとの表面形状に対し、FEM メッシュを適用する。
3. MPC により部材接触面の変位を一致させる条件を追加する。MPC を使うメリットとして接触面が多少不整合であっても接続が可能なことと、2 における表面メッシュ形状が不一致でも構わないことが挙げられる。デメリットとして線形ソルバーの収束性が若干悪化することが挙げられる。
4. 読み込んだ材質をメッシュに設定する。
5. そのほかの境界条件や解析条件などを設定する。例えば、地面に接する節点は完全拘束とするなど、いくつかの境界条件は機械的に設定することができる。
6. 2 から 5 により生成した解析データを FEM ソフトウェアにより解析を行う。
7. 6 により得られた解析結果に対しポスト処理を適用する。例えば、異常な大きさの応力が解析結果に含まれていた場合、機械的に警告を出すなどが考えられる。

図 5 に、図 4 に示したデータから生成した解析データの例を示す。図 5 において、部材ごとに六面体メッシュを生成し、そのために部材間のメッシュ形状が不一致であるため、MPC 条件を設定した。また、境界条件として地面に接する部分を完全拘束とし、全節点に重力を設定した。図 5 に示す通り、部材ごとに定義された BIM/CIM データから FEM ソフトウェアで解析可能なデータを生成することができるがわかる。

$$\text{MPC条件式 } u_s = \sum_i w_i u_i$$

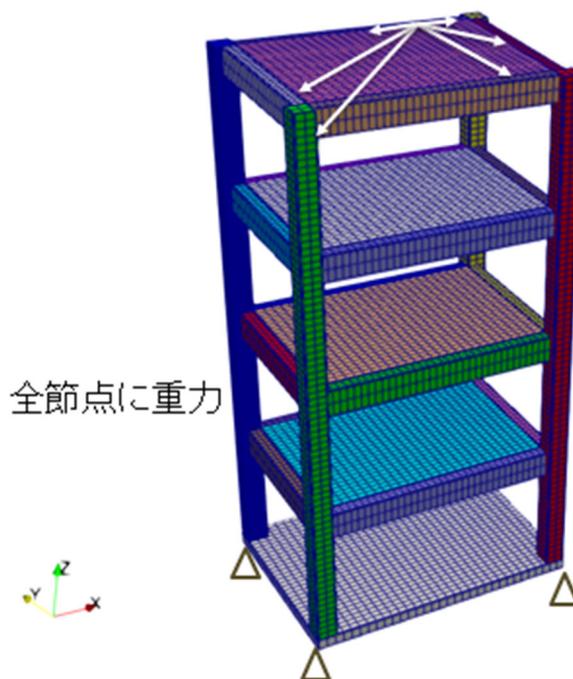


図 5 図 4 に示したデータから生成した解析データの例

4. まとめ

近年の BIM/CIM の利用拡大に伴って高まっている BIM/CIM データを利用した FEM 構造解析への適用について一考察を述べ、建設業界に関連する FEM 構造解析モデルの作成事例を紹介した。

BIM/CIM はデータの一元管理により異なるフェーズ、利用者間で共通に利用できるという利点がある反面、情報量が膨大となり利用者自身が必要な情報を抽出するのに苦勞すると言った声も聞かれる。BIM/CIM データを利用した数値解析の自動化でも同様の事が言え、まずは数値解析の目的および IFC ファイル内の必要な情報を明確化し、自動化ツールを作成する際には、作成したツールを利用する人間の必要な情報へのアクセス性を向上させることが重要であると考えられる。

4.1. 構造解析に利用する IFC ファイルについて

IFC ファイルと一括りにしても、内部のデータは BIM/CIM ツールから直接作成したエンティティなのか、外部からインポートしたものかなどで持っている情報量に違いが生じる。IFC を利用したツールを作成する上では、初めにどのように作

成された IFC ファイルに適用するのかを定義づける必要があると考える。ツールを利用するための IFC ファイル作成時の運用ルールを構築することも重要であると考えている。

4.2. 今後の開発について

アドバンスソフトでは BIM/CIM データを活用したシミュレーション技術の開発について積極的に取り組んでいる。今後の開発目標として現在も以下のような技術開発について検討および実施している。

- BIM/CIM データの活用
 - IfcOpenShell を利用した IFC ファイルからのモデル作成
 - IFC ファイルからの自動シミュレーション技術の開発
- 地盤解析モデルの作成
 - 無限要素の作成
 - ポリゴンで与えられる断層面形状の取り込み
 - 国土地理院様の数値標高データ以外の形式の地形データへの対応
 - 震源の定義

参考文献

- [1] 足達嘉信「建設分野における三次元情報モデルの概要」人工知能 35 巻 2 号 149-154, 2020 年 3 月
- [2] <https://ifcopenshell.org/>
- [3] <https://ifcquery.com/>
- [4] <https://bonsaibim.org/index.html>
- [5] https://wiki.freecad.org/Import/Export_IFC_-_compiling_IfcOpenShell
- [6] <https://service.gsi.go.jp/kiban/app/>
- [7] https://www.hinet.bosai.go.jp/topics/sokudo_kozo/
- [8] 松島他「地盤の S 波速度とポアソン比の特性評価について — 沖縄県を事例として —」土木学会論文集 No.700、2002.3

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、それぞれの文献タイトルの下に記載した DOI から、PDF ファイル（カラー版）がダウンロードできます。また、本雑誌に記載された文献は、発行後に、JDREAMIII（日本最大級の科学技術文献情報データベース）に登録されます。