

3次元プロダクトモデルを活用した詳細設計システムの構築と現場実装に向けた取組み

清水建設株式会社	正会員	○松下 文哉	清水建設株式会社	正会員	宮岡 香苗
清水建設株式会社	正会員	連 勝	清水建設株式会社	正会員	鈴木 宏昇
清水建設株式会社	正会員	Vincensius Y.A.P.	清水建設株式会社	正会員	大野 広志
清水建設株式会社	正会員	土田 一輝	清水建設株式会社	正会員	荒木 尚幸

1. 背景・目的

近年、国土交通省は i-Construction の政策を掲げ、2025 年までに生産性 2 割向上を目標として示している。この i-Construction の取組みの中で、BIM/CIM (Building Information Modeling/ Construction Information Management) の導入など 3 次元データの利活用は中核をなす技術として位置付けられ、設計、施工、維持管理といった建設生産プロセス内での活用が期待されている。国土交通省では、BIM/CIM の全面適用に向け、受注者に対して BIM/CIM の実施目的を示すリクワイヤメントを業務、工事の双方に対して設定している¹⁾。受注者はこのリクワイヤメントに対し、実施内容 (ユースケース) を発注者に BIM/CIM 実施計画書として提案し、協議の上、BIM/CIM の具体的な活用事例を決定する。BIM/CIM を有効に活用するためには、このユースケースの設定が重要となる²⁾。

本研究開発では、対象業務として詳細設計、ユースケースとして「コンクリート構造物の構造細目の照査及び配筋施工図作成」を対象とする。従前の配筋施工図の作成は設計者が決定したコンクリート構造物の断面仕様を CAD オペレータに伝達し実施されていた。CAD オペレータは 2 次元 CAD ソフトウェアを活用し配筋施工図を作成し、設計者は出力される 2 次元図面を用いて構造細目の照査や配筋施工図の確認が実施されていた。この従前の手法では、設計人工の約 4 割 (清水建設株式会社が受注した設計施工案件において、設計人工全体に対する配筋施工図の作成及び照査業務に充てられた人工の割合) が配筋施工図の照査や確認に充てられており、合理化が望まれる業務及びユースケースである。そこで、本研究開発では、3 次元プロダクトモデルを活用しコンクリート躯体構造物の照査及び配筋施工図の生成が可能な詳細設計システムを提案することを目的に、システム設計、開発、検証、評価を実施する。さらにシステムの現場実装に向けた取組みも述べる。

なお、本稿では、各機能の詳細なアルゴリズムについて触れることは避け、詳細設計における既往研究及び現状の課題整理し、開発範囲を明確にしたうえで、具備すべき機能を明らかにし、実装した機能を組み合わせたシステムとして提案することに主眼を置く。各機能の詳細なアルゴリズム等については別途、論文等を参考にしたい^{3), 4), 5)}。

2. 既往の研究及び取組みと課題の特定

BIM/CIM の中心技術である 3 次元プロダクトモデルについては、研究開発及び標準化が進められ^{6), 7), 8)}、土木分野においても活用が進展している。この中で、配筋を対象とした過去の BIM/CIM のユースケースを鑑みると、例えば過密配筋部の確認、打設開口の確認、配筋の干渉チェックなどが報告されている⁹⁾。これらのユースケースからは 3 次元プロダクトモデルとして配筋を表現することによって、「視認性が向上する」、「干渉位置が明確になる」といった効果が報告されている。しかし、利用された 3 次元プロダクトモデルが、その後、施工に直接利用されるケースは少なく、モデルの利用範囲が限定的となっている。

本稿で提案する詳細設計システムは従前のユースケース以外に、構造細目の照査、配筋施工図作成が実現可能である点に特徴がある。ここで対象とする配筋施工図とは、施工時に必要となる配筋の展開図 (立面図、平面図、断面図)、加工図などの 2 次元図面と鉄筋集計表を指す (図-1)。また、各図に含まれる情報の一例を表

キーワード BIM/CIM, 3次元プロダクトモデル, 構造細目の照査, 配筋施工図

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋 2-16-1 TEL 070-4223-8381



図-1 配筋施工図の具体例

表-1 配筋施工図の種類と記述内容の具体例

図面の種類	記述内容
展開図 ※立面図，断面図，側面図，平面図を作成	<ul style="list-style-type: none"> 各部位（例：壁，スラブ，柱）の断面図 継手種類及び位置，鉄筋径 各種寸法線
加工図 ※代表的な鉄筋を抜き出して記述	<ul style="list-style-type: none"> 配筋種別 鉄筋の径，寸法，曲げ内半径，フック余長
鉄筋集計表 ※配筋種別に対して記述	<ul style="list-style-type: none"> 配筋種別 数量（本数，質量）

-1 に示す．ここでの配筋種別とは，配筋が属する部位（例：壁，スラブ，柱）及び配筋の役割（例：主筋，配力筋，せん断補強筋）から決定される分類番号である．例えば壁に属する配力筋であれば Fh-1 と分類される．

また，既往技術として 3 次元モデルから 2 次元図面を切り出すことは可能であり，例えば Revit (<https://www.autodesk.co.jp/products/revit/>) や Rhinoceros (<https://www.rhino3d.co.jp/>) といったソフトウェアにその機能が実装されている．また 3 次元モデルと配筋施工図は連動しているため，モデルに修正が発生した場合，3 次元モデルのみ修正すれば，関連する配筋施工図が自動的に修正される．このため，施工計画の過程で比較的修正の多い配筋施工図に対して，既往技術を活用した配筋施工図の作成は生産性向上の観点で有効であると捉えられる．一方，本稿で提案する詳細設計システムを確立するためには，既往技術では対応できない技術的課題として残されるため，これらを解決することが求められる．この具体的な内容は 3 章で述べる．

3. システムの設計

(1) ワークフローの整理

設計施工一括発注方式（DB 方式）の断面仕様の決定から配筋施工図の発注者への提出までの概略ワークフローを図-2 にまとめる．この図に示す通り，はじめに，設計担当者が設計外力に対する各部材に発生する断面力を算定し，この結果を用いて鉄筋径，ピッチといった断面仕様を決定する．次に CAD オペレータが設計者の指示のもと施工図を作成する．作図された施工図は設計担当者が確認し，発注者に提出するとともに，施工担当に引き継がれる．また施工図は施工計画の変更などによって修正が発生することが多いため，設計担当，施工担当は最新版図面を管理する必要がある．このワークフローのうち，提案する詳細設計システムを用いた場合，以下 2 点が従来の手法から変更される．

- i. 配筋施工図の作成において従来の 2 次元の施工図作成に対し，提案する手法では 3 次元プロダクトモデルを作成し，このモデルから 2 次元図面を切り出すことで配筋施工図を作成する
- ii. 従来，手間がかかっていた 2 次元施工図を用いた構造細目の照査について 3 次元プロダクトモデルを用いた自動照査に置き換える

このワークフローが実現されることで，従来，設計者の負担となっていた配筋施工図の作成及び照査業務の負担が軽減されることが期待される．

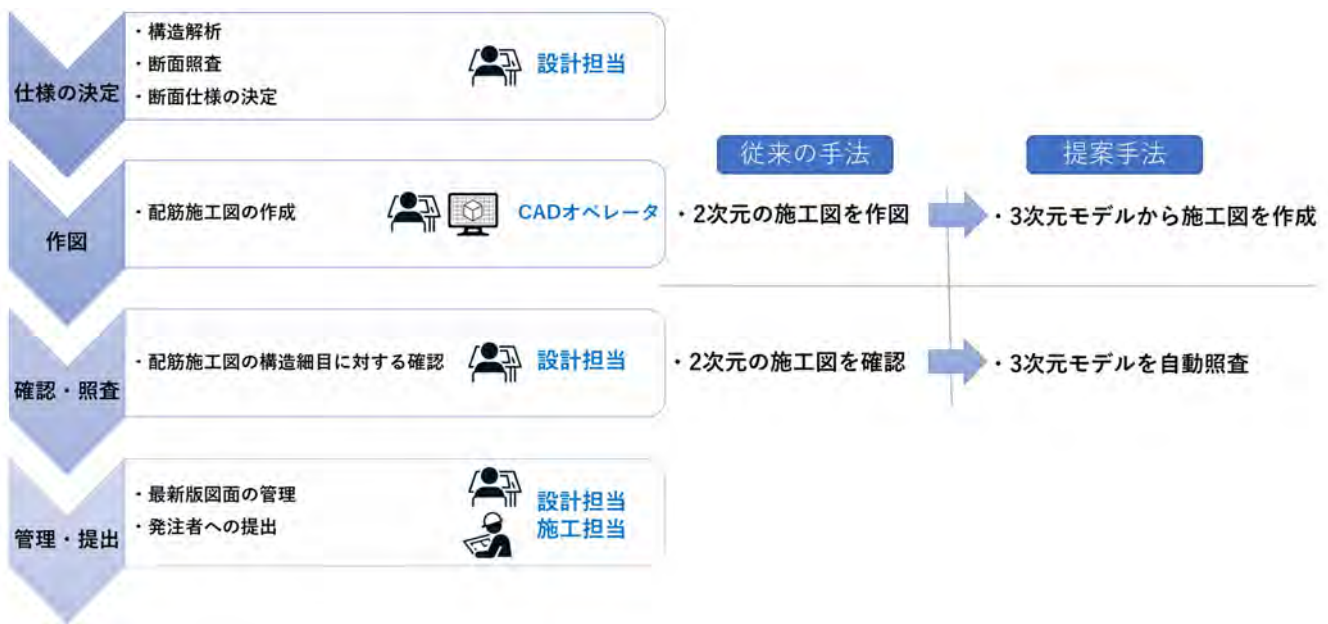


図-2 配筋施工図に係る概略ワークフロー

表-2 配筋施工図の種類と記述内容の具体例

No	要求仕様	解決策の方針
1	配筋施工図は施工計画に応じて修正が多いため、容易に修正できることが求められる	3次元モデルから2次元施工図を作成することによって、3次元モデルのみ修正すればすべての2次元施工図が連動し自動的に修正を反映可能
2	構造細目に対する照査の負担軽減が求められる	3次元プロダクトモデルのジオメトリや属性情報を用いることで照査の自動化が可能
3	展開図作成時のタグ付けの合理化が求められる	配筋モデルに配筋種別を付与することでタグ付けを合理化可能
4	鉄筋集計表作成の合理化が求められる	配筋モデルに配筋種別を付与することで配筋種別に応じた鉄筋集計の自動作成が可能
5	3次元プロダクトモデルのモデリングの合理化が求められる	パラメトリックモデルを活用したモデリングの自動化で合理化可能
6	配筋モデルを容易にレンダリングできることが求められる	配筋モデルを施工ステップや部位ごとにグループ化し不必要な範囲を非表示にすることで実現可能
7	鉄筋ロス率を低減することが求められる	鉄筋ロス率が最小になる、定尺長に対する配筋寸法を割付けることで実現可能

(2) 要求仕様と機能定義

前節で述べたワークフローを実現するため、またコンクリート構造物の合理的な詳細設計を実現するための要求仕様とその仕様を満たすための解決策の方針を表-2に示す。表-2に示した要求仕様のうち、No3のタグ付けとは、鉄筋径や配筋分類番号を2次元図面に矢視を用いて図示することを指す。また、配筋モデルは、モデリングする部材点数が多いため、モデリング自体に人工がかかることが懸念される。このためNo5の要求仕様が生じる。また、部材点数が多いため、3次元空間上へのレンダリング処理に時間を要するため、表示する部材点数を減らす工夫が必要である。このため、No6の要求仕様が生じる。

次にこの要求仕様を満足するために新規に開発すべきプログラムと、その機能を定義する(表-3)。要求仕様のNo1は前章で述べた通り、既往の技術で実現可能なため、開発対象外とする。また表-3に示す機能のうち、構造細目の自動照査機能が対象とする照査項目は、「重ね継手長の照査」「あきの照査」「かぶりの照査」「曲げ内半径の照査」「フック余長の照査」とする。

表-3 開発プログラムと機能の定義

開発するプログラム	機能	該当する要求仕様の No
配筋種別の自動分類機能	配筋が属する部材や主筋, 配力筋, せん断補強筋などに応じた配筋種別を自動分類可能な機能	No3, No4
構造細目の自動照査機能	3次元プロダクトモデルで表された配筋に対して, 構造細目の照査を実施する機能	No2
配筋の自動モデリング機能	断面仕様や基本設計情報を入力値として自動的に配筋モデルのモデリングが可能な機能	No5
画層の自動分類機能	施工ステップや部位に応じた画層の自動設定が可能な機能	No6
注文数量の自動作成機能	ロス率の最小化を考慮した定尺長に対する鉄筋寸法の自動割付を行い注文数量を自動算出可能な機能	No7

表-4 各機能の開発に利用したツール一覧

開発するプログラム	機能
配筋種別の自動分類機能 構造細目の自動照査機能	Revit アドイン (プログラミング言語: C#)
配筋の自動モデリング機能	Rhinoceros-Grasshopper (プログラミング言語: C#, Python) Rhino.Inside (Rhinoceros のモデルを Revit に読み込む際に利用するアドイン)
画層の自動分類機能	Dynamo
注文数量の自動出力機能	Python ※Google が公開している Integer Optimization プログラムを活用



図-3 開発ツールとそのアウトプットの関係図

4. 各機能の開発

開発するシステムで利用する3次元プロダクトモデルはRevitを用いモデル化する。また各機能の開発に利用したツールの一覧を表-4に示す。Revitアドインは図-3に示す通り、C#を記述されたソースコードをビルドすることによって、照査用のコマンドがRevit上で利用できるようになる。一方で、自動モデリング機能はGrasshopperといったビジュアルプログラミングツール(GAE)を用いて、モデル化する手法を採用した。この理由は、前者は、実現する機能が照査のためユーザが安易に機能を改変できないことが望ましい。一方で、後者は部材ごとにカスタマイズが必要のため、ユーザも含めてプログラム可能であることが望ましい。このため、前者はユーザがソースコードを改変できないアドインを採用し、後者は比較的、修正が容易なGAEを採用した。なお、画層の自動分類機能、注文数量の自動作成については実装し易さからツールを選定した。

5. 検証・評価

本章では開発した各機能の有効性を検証する。「配筋種別の自動分類」、「画層の自動分類機能」、「構造細目の自動照査機能」についてはサンプルモデルを用意し検証を行った。「配筋種別の自動分類」の検証結果を図-4に示す。この図ではスラブの主筋及び壁のせん断補強筋を選択し、付与されたか配筋種別情報を例示する。図に示す通り、主筋に対してはS3、せん断補強筋に対してはWs1と分類されており、正しく配筋種別が分類されたことが分かる。またこの分類結果を用いて、図-5に示す通り要求仕様 No4 の鉄筋集計の自動作成、要求仕様 No3 のタグ付けの合理化が実現できることを確認した。前者に対しては、配筋種別でソートすることで集計表を自動作成できる。後者に対しては該当する鉄筋を2次元図面上でクリックすることでタグ中に配筋種別の情報を自動入力できる。また「画層の自動分類機能」については、躯体に画層名を入力しプログラムを実行することで、属する配筋の全てが入力された画層に分類されることが確認できた。よって要求仕様 No6 は満たされる。

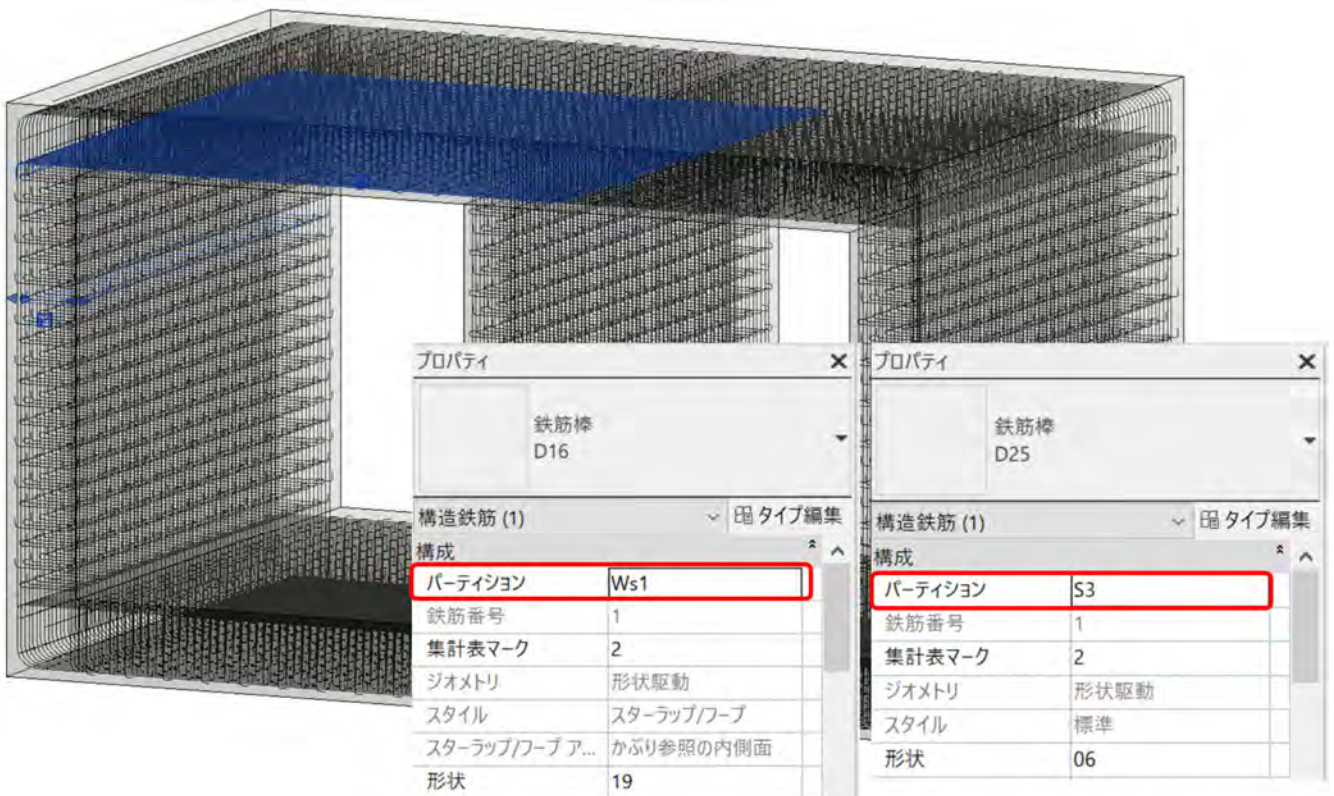


図-4 配筋種別の自動分類結果

鉄筋番号	鉄筋径	長さ	本数	単位重量	重量
S1-18	25	8410 mm	1	3.980 kg	33.481 kg
S1-19	25	8370 mm	1	3.980 kg	33.304 kg
S1-20	25	8320 mm	1	3.980 kg	33.126 kg
S1-21	25	8280 mm	1	3.980 kg	32.949 kg
S1-22	25	8230 mm	1	3.980 kg	32.772 kg
S1-23	25	8190 mm	1	3.980 kg	32.595 kg
S1-24	25	8150 mm	1	3.980 kg	32.418 kg
S1-25	25	8100 mm	1	3.980 kg	32.241 kg
S1-26	25	8060 mm	1	3.980 kg	32.064 kg
S1-27	25	8010 mm	1	3.980 kg	31.887 kg
S1-28	25	7970 mm	1	3.980 kg	31.710 kg
S1-29	25	7920 mm	1	3.980 kg	31.533 kg
S1-30	25	7880 mm	1	3.980 kg	31.356 kg
S1-31	25	7830 mm	1	3.980 kg	31.179 kg
S1-32	25	7790 mm	1	3.980 kg	31.002 kg
S1-33	25	7740 mm	1	3.980 kg	30.825 kg
S2	25	6630 mm	66	3.980 kg	26.387 kg
S2-3	25	9150 mm	1	3.980 kg	36.399 kg
S2-4	25	9100 mm	1	3.980 kg	36.222 kg
S2-5	25	9060 mm	1	3.980 kg	36.045 kg

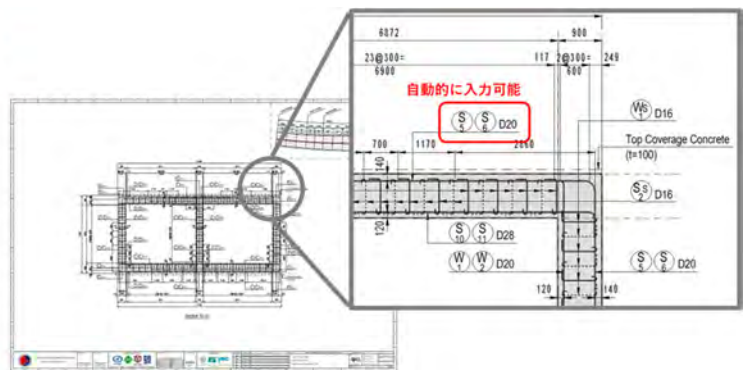


図-5 鉄筋集計表の自動作成結果（左）・タグ付けの半自動実行結果

「構造細目の自動照査機能」について、ここでは「重ね継手長の照査」の検証結果を示す。照査値として入力された重ね継手長の基本定着長と最小継手間隔に対して、図-6 に示す通り照査が実行できた。照査は重ね継手位置を特定したうえで(例:図-6 のオレンジ色の範囲)、重ね継手長が基本定着長以上の場合は緑(合格)、以下の場合は赤(不合格)の判定が表示される。その他、「あきの照査」「かぶりの照査」「曲げ内半径の照査」「フック余長の照査」も問題なく実行できることが確認された。よって要求仕様 No2 は満たされる。

次に「配筋の自動モデリング機能」について、駅舎の RC 地中連続壁を対象に機能を開発した。断面仕様の情報を入力することで図-7 に示す通り、自動的に配筋モデルがモデリングされることが確認された。よって要求仕様 No5 が満たされる。

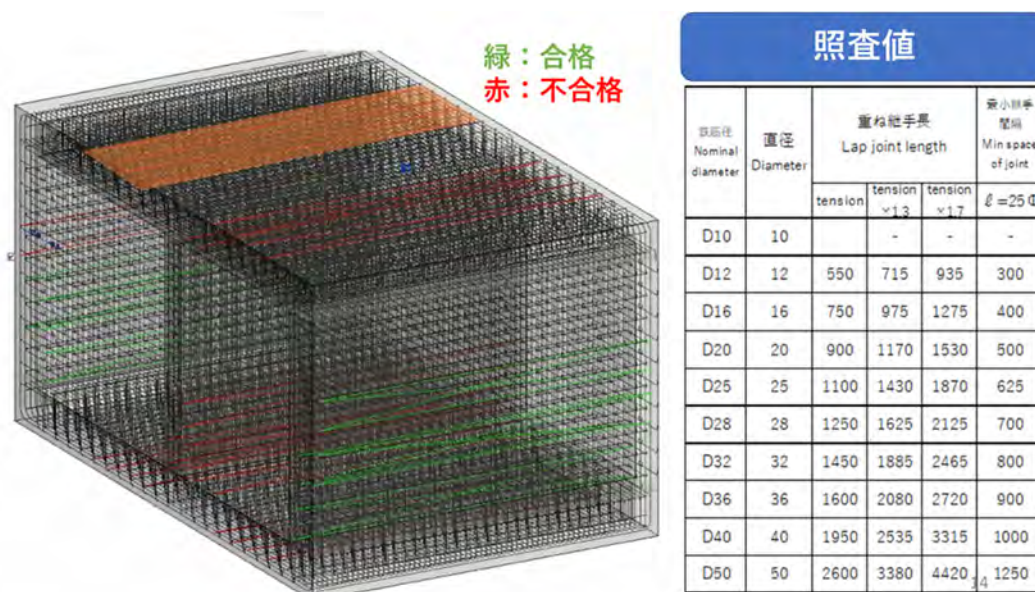


図-6 重ね継手長の照査

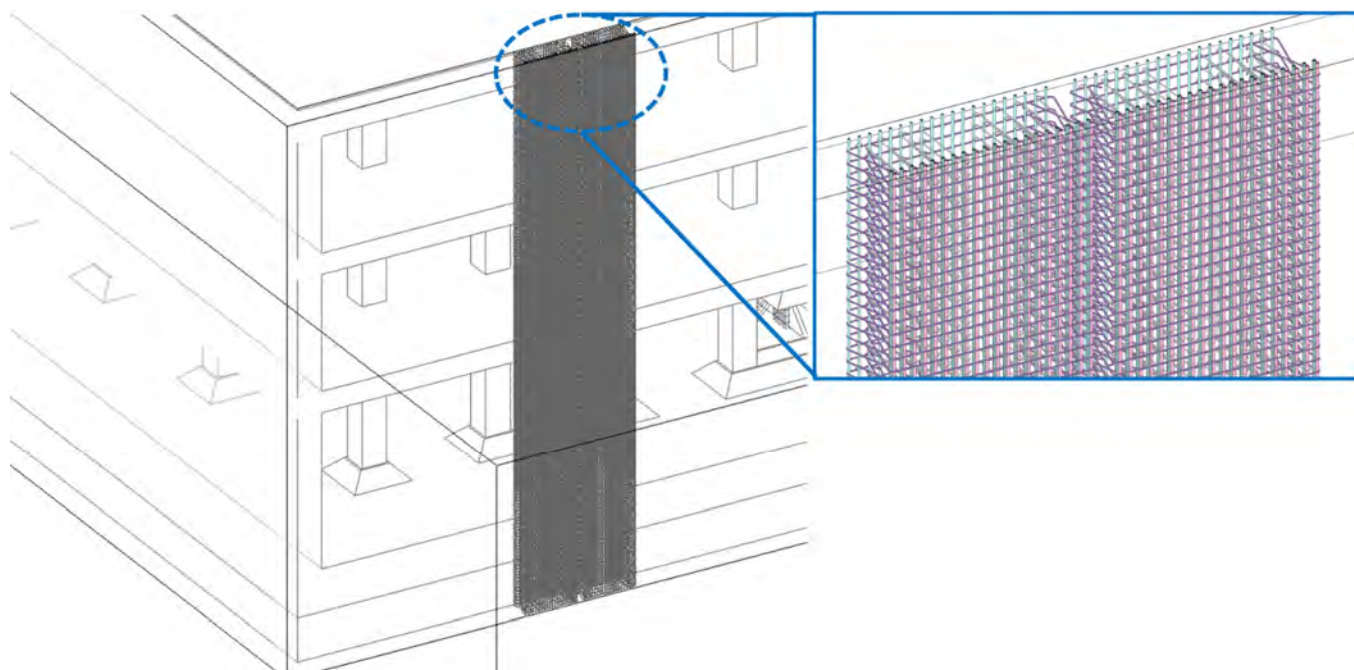


図-7 自動モデリングの実行結果

「注文数量の自動出力機能」の検証フローを図-8 に示す。まずサンプルモデルから出力された鉄筋集計表から特定の径に対する数量を Dynamo を用いて出力し、この結果を開発した最適化プログラムの入力値とする。さらに定尺長も入力値として入力する。このプログラムからの出力値を可視化すると、割り付けられた鉄筋の長さとしロス（グレー）となる数量が表示されることが確認された。よって要求仕様 No7 が満たされる。

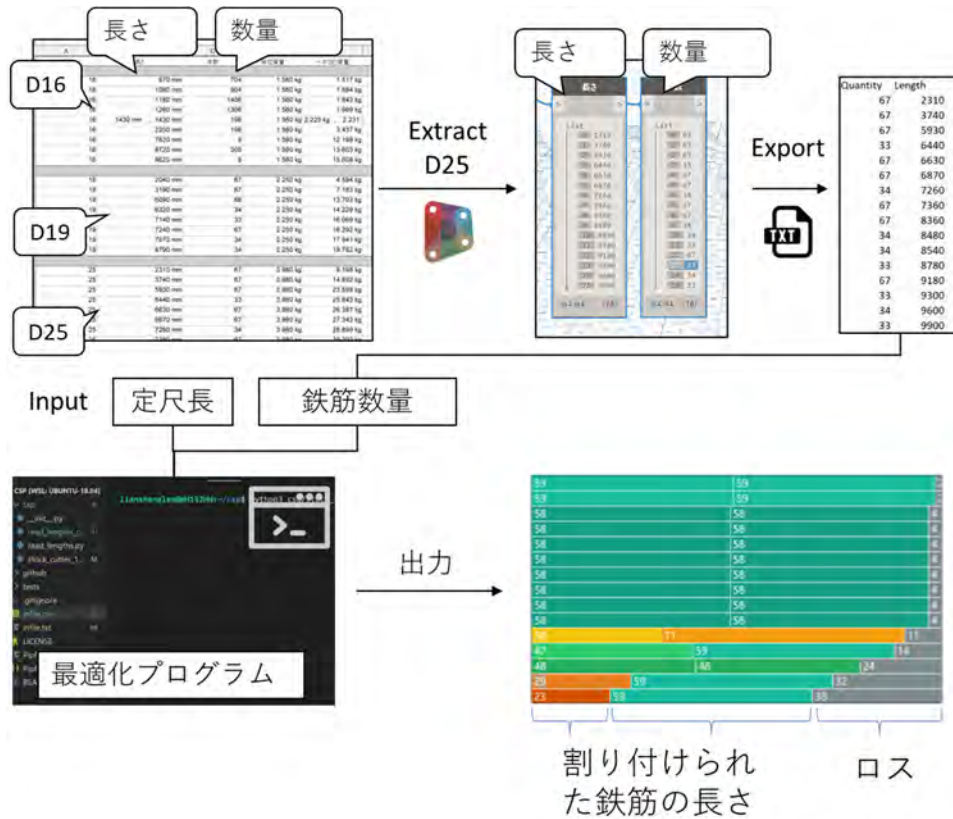


図-8 注文数量の自動出力機能の検証フロー

6. 現場実装に向けた取組み

開発したシステムを現場実装する際に検討すべき項目を表-5 にまとめる。設計施工一括発注方式 (DB 方式) では施工者は設計業務について請負契約を設計会社と締結するケースが一般的である。この時、設計者から提出される配筋図は基本設計図面であり、施工性を考慮した配筋計画を立てる。開発した詳細設計システムのうち、「配筋の自動モデリング機能」には入力値を与えることが必要となるため、立案した配筋計画を「指示書」としてまとめ CAD オペレータへの指示及び入力値を生成することが必要となる。次に、「画層の自動分類機能」を活用するための分類方法を施工ステップや部位に応じて決定する必要がある。駅舎を対象とした際のモデルの構成例を図-9 に示す。

表-5 現場実装時の検討項目一覧

検討項目	検討内容
指示書	設計者から提出される基本設計に対して施工者の配筋計画情報を考慮したドキュメント CAD オペレータが参照するほか、配筋の自動モデリング機能の入力値となる
モデル構成	施工ステップや部位に応じた画層の分類
テンプレート作成	図枠、各種パラメータなど配筋モデルに必要な基礎情報が入力されたテンプレートファイル
運用に必要な組織体制	本システムを活用し照査、モデル化、施工図作成可能な組織

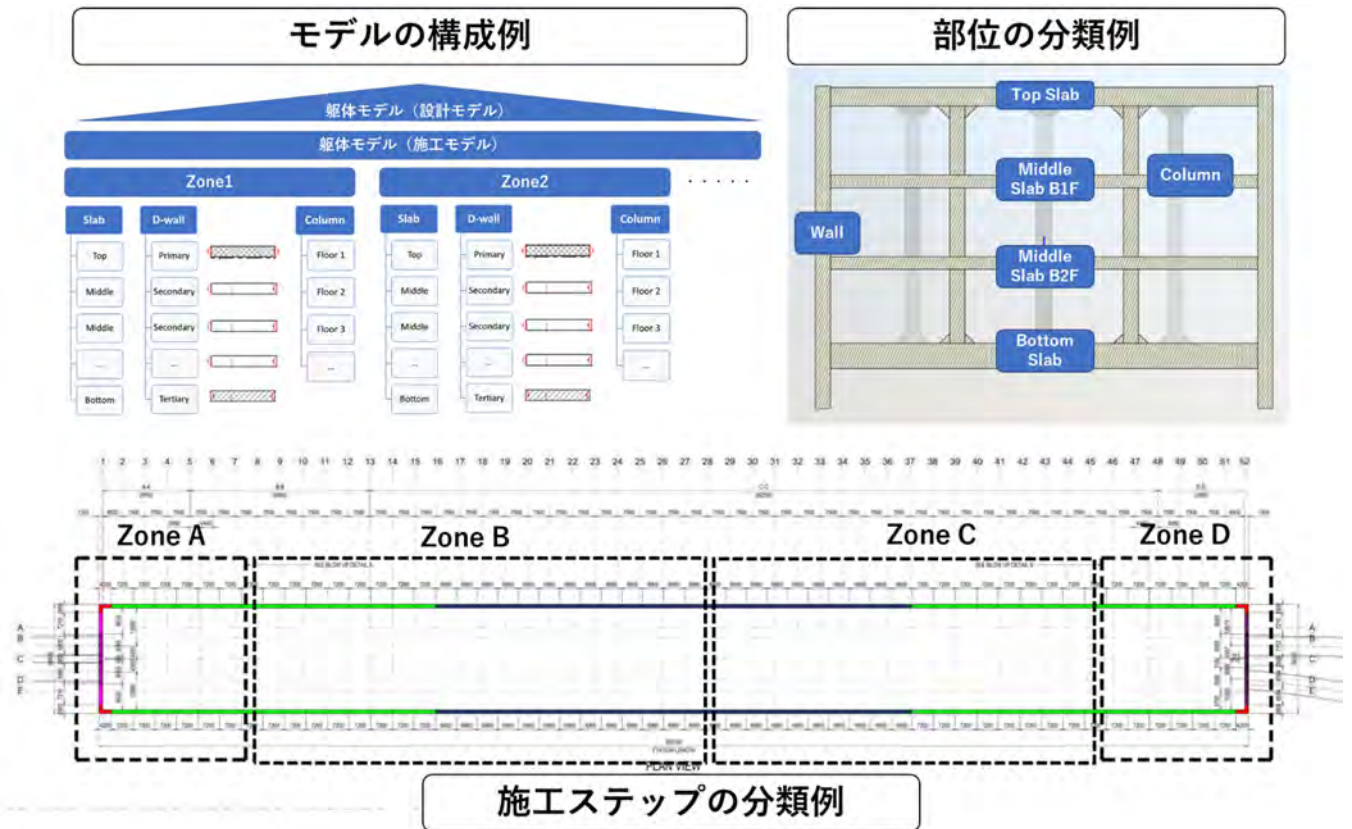


図-9 駅舎を対象とした分類例（左上：モデルの構成例，右上：部位の分類例，下：施工ステップの分類例）

7. 結論と今後の展望

本稿では「コンクリート構造物の構造細目の照査及び配筋施工図作成」を対象とする詳細設計システムの構築を実施した。また、検証を通じて、定義した要求仕様をすべて満たすシステムが構築されたことを確認した。さらに現場実装に向けた検討項目を整理した。今後は、本システムの実用化に向けて現場実装を進めていきたいと考えている。

8. 参考文献

- 1) 第 5 回 BIM/CIM 推進委員会：令和 5 年度の BIM/CIM 原則適用に向けた進め方，pp.10-11，2021，<<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001389577.pdf>> (入手 2022.6.9)。
- 2) 土木学会 建設マネジメント委員会 i-Construction 特別小委員会：小委員会活動報告書 PartIII WG3「国際標準・データプラットフォーム・プロセス間連携」，pp.22-30，2022。
- 3) 松下文哉，連勝，大野広志，荒木尚幸：3次元プロダクトモデルを活用した配筋種別自動分類プログラムの開発，第 47 回土木情報学シンポジウム（投稿中）
- 4) 松下文哉，小澤一雅：施工計画策定プロセスに着目した仮設構造物プロダクトモデルの生成手法の開発，第 2 回 i-Construction 推進に関するシンポジウム，2020。
- 5) Fumiya Matsushita, Masamiki Matsubara, Shunsaku Ota, Kairi Saito, Sheng Lian, Kanae Miyaoka, Naoyuki Araki：Development of the automated verification system for structural details of rebar arrangement shop drawings utilizing BIM, Intelligence, Informatics and Infrastructure（投稿中）。
- 6) 有賀貴志，矢吹信喜，城古雅典：ブロックモデルを用いた土工計画および積算シミュレーション，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol. 66 No. 3，pp.432-446，2010。
- 7) 有賀貴志，矢吹信喜：コンクリート構造物の変状管理におけるプロダクトモデルの適用，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol. 69 No. 2，pp.71-81，2013。
- 8) 有賀貴志，矢吹信喜，新井泰：変状データを含む開削トンネルのプロダクトモデルの構築，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol. 68 No. 1，pp.58-70，2021。
- 9) 一般社団法人日本建設業連合会：2019 施工 CIM 事例集，2019。