

特集 BIMを活用した建築生産システム Building Construction System Utilizing BIM

Summary

Building Information Modeling (BIM) is a digital representation of physical and functional characteristics of a facility. In the building life cycle, BIM is a technique to promote the project while maintaining its integrity by creating a three-dimensional digital model of the project, aims to improve the improvement and profitability of the quality of the projects by sharing and utilizing the information by using the integrated model.

Ideal operational method of the three-dimensional model, continue to improve the accuracy of the model with each passing each phase of the construction from design, it is to take advantage of even the construction stage. In practice, however, there is little so far is such a case, the purpose of BIM use is different by position (design office, general contractor, subcontractor, etc.) and construction project phases. Current situation, each has remained to enter the required data now, it has become an obstacle to the three-dimensional use of expansion at the production stage. In order to solve these problems, the authors developed systems, have obtained the productivity improvement effect by application to the project.

In rebar construction, it is strong needs that want to take advantage of the BIM for complex reinforcement plans and quantity surveying, automatic creation of shop drawing, and has been required BIM tool that can be easily operated. However, while the development and application of BIM tools that target the equipment construction and steel frame construction is progressing, commercial BIM tool that actually reached the level that can be utilized in practice intended for rebar construction work did not exist until now. The authors developed RC structure integrated production system (RCS) to support the improvement of quality and productivity by consistently in the whole process of reinforced concrete construction. RCS is applied a number of the actual project, it was possible to raise certain results.

The authors have been developing methods capable of deducing the Synchronized Multi-Site Scheduling using the interface matrix obtained from the relationship between preceding and following of the tasks for the construction work with a repetitive nature. In this study, several structural construction plans were estimated by carrying out simulations using the construction delivery time which are the criteria for the structural construction method plans, as objective variables. In this study, the Synchronized Multi-Site Scheduling method is in conjunction with the quantity information of the 3D model. Redefine the 3D model for using the technique of dividing and combining the 3D model utilized in the construction simulations. Various simulations are created by the 3D model is redefined with reference to the productivity data and unit price information. In concrete terms, the performance of each structural construction method plan was estimated by carrying out four process simulations for the skeleton construction work above the ground for a high rise RC office building using 1) site division 2) component division as variables.

BIM is not a modeling methods and tools to represent a mere 3-dimensional shape. It is becoming one of the key technologies that underpin the design production management system in all phases ranging from design to production. However, BIM is in developing, challenges many. It will take some time before BIM is widely used, got benefit of the effect. Thus, we believe that while achieving maximum leverage identify firmly on the limit of BIM at the present time, it is essential that we complete the steady research and development aimed at solving problems for the future at the same time.

Keywords: building information modeling, 3D model, reinforced concrete construction, 4D/5D simulation, synchronized multi-site scheduling method

1 はじめに Introduction

多葉井 宏 Hiroshi Tabai*1

国内建設投資は1992年の84兆円をピークに最近ではその半分にまで縮小しており、若年労働者の減少、技能労働者の著しい高齢化に建設業界全体が直面している。昨年、一般社団法人日本建設業連合会が発表した「建設業長期ビジョン」では、特に団塊の世代の大量退職に対応するため、建設労働者の世代交代に向け、女性や若者の就業増加や更なる生産性向上の早急な実現が強く求められている。建設業はどちらかというと労働集約型産業であり、工場での生産性向上を図ってきた製造業とは異なり、依然、大幅な生産性向上の実現には至っていない。このような状況の中で、ICTや建設情報基盤としてのBIM（Building Information Modeling）の導入が世界的にも取り上げられており、BIMを3次元モデル作成のツールとして利用するだけでなく、設計から施工に至る全プロセスに一貫して活用することは、生産性の向上、品質・安全性の確保などの観点から、目指すべき方向であり大きな期待感がある。

本報では、先ず2章にて、BIMの定義やその歴史について述べるとともに、BIMの施工段階への活用によって期待される効果と、これまでのところ活用展開の妨げとなっている課題などについて述べる。そして3章以降では、この課題に対して当社が研究開発し、実際にプロジェクトで効果が得られている2つの取り組みの内容について述べる。1つ目は、RC一貫生産システムの開発の内容について詳述する。これまで鉄筋工事を対象にして実務で活用できる水準に達しているBIMツールが存在しなかったが、鉄筋コンクリート工事の全生産プロセスにおいて、BIMモデルを軸に一貫したデータ連携を行い、品質・生産性の向上を支援できるシステムを開発している。2つ目は、BIMを用いた多工区同期化工程計画手法の内容について詳述する。設計者によって作成されたBIMモデルはそのままでは施工段階に活用できないが、施工計画にも活用できるように新たにBIMモデルの分割・合成手法を考案するとともに、本手法によりBIMモデルを再定義した上で構工法計画を生成し、コストと工期のシミュレーション評価を行っている。

*1 技術研究所 新生産システム部 情報化グループ長 Group Leader, Research & Development Institute

2 BIMの概要 BIM Overview

多葉井 宏 Hiroshi Tabai*1

2.1 BIMとは何か What is BIM?

BIMとは、コンピューター上に作成した3次元の形状情報に加え、室等の名称・面積、材料・部材の仕様・性能、仕上げ等、建築物の属性情報を伏せ持つ建物情報モデルを構築することをいう¹⁾。建築のライフサイクルにおいて、プロジェクトに関する3次元のデジタルモデルを作成し、その整合性を保ちながらプロジェクトを進める手法であり、統合化されたモデルを用いて情報を共有・活用することで、プロジェクトの品質の向上と収益性を改善することを目的とする。

BIMの利活用として有効であると言われている手法としては、①3次元オブジェクトCADシステムを用いて建物の3次元モデルを作成し、設計内容について顧客との合意形成を促進させる、②モデルでデザインを含む様々な検討作業やシミュレーションを行い、品質を向上させる、③モデルを元に様々な出力（図面、数量等）を行う、④各プロセスで継続的にモデルを更新・活用し施工段階でのモデルの不整合をなくすことにより生産性向上や工期短縮を目指す、⑤BEMSなど建物運用段階のリアルタイムデータと連携することで、より正確な建物の運用状態の把握、予測、それらに基づいた意思決定を行うことなどが考えられる。

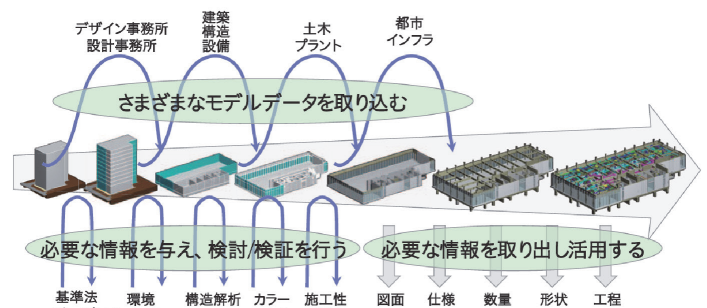


Fig. 1 BIMの一貫活用²⁾
Consistent BIM

2.2 BIMの歴史 The History of BIM

BIMという言葉が登場したのは1990年代になってからと言われている。3次元でなければ設計自体が難しい自動車など工業製品の設計の分野で育まれてきた3次元CADが、必要に迫られ建築設計にも利用されるに至った。21世紀に入り欧米の建築実務者などの間でBIMの概念が共有され、実践が始められるようになった³⁾。2004年、米国の

Table 1 海外のBIM動向
The history of overseas BIM

国	公共機関の取り組み動向
米国	2007年度からGSA（連邦調達庁）が主要プロジェクトでの発注条件
	同年、NIBS（国立建築科学研究所）が国レベルのBIMガイドラインNBIMSが公開
	同年、IPD（BIMを使った設計・生産の統合的なプロジェクト推進方式）発表
フィンランド	2007年、政府資産運用管理公社が発注するプロジェクト要件としてBIMを適用
	2012年、産学官が結集してBIMガイドラインCOBIM “Common BIM Requirements 2012” 発行
英国	2009年、BIMガイドラインAEC（UK）BIM Protocol発行
	2016年までには完全に協働的な3DBIMの実現を要求
	RIBA（英国王立建築家協会）の事業部門の1つがNational BIM Libraryサービス無償提供
韓国	2010年、公共調達庁が施設事業に対するBIM基本ガイドライン発刊
	2016年から全ての公共施設にBIM適用のロードマップ策定
シンガポール	2012年、建設局がBIMガイドを出版
	2015年から5000m ² を超える建物の意匠、構造、設備設計の確認申請はBIMで電子申請

*1 技術研究所 新生産システム部 情報化グループ長 Group Leader, Research & Development Institute

国立標準技術研究所（NIST）から「米国の建設産業における不適切な情報の相互運用に関するコスト分析」と称する報告書が発表され、建設プロジェクト過去40年間で生産性が低下した主要産業における情報共有が不十分なために年158ドル（約2兆円）がアメリカの建設産業において無駄なコストとなっており、その3分の2は建物のオーナーが負担しているとの調査結果が述べられた。さらには、それを改善するためには、使用されるソフトウェア間の相互運用性向上のためにBIMの採用や中立なデータ形式の策定が重要であることが指摘された。これがきっかけとなり、建築主からの要求がBIM推進の大きな要因となった⁴⁾。

国内においては、2009年にいくつかの雑誌によりBIMの特集号が発行され、この年はBIM元年と位置づけられた⁵⁾。その後、2010年に国土交通省が「官庁営繕事業におけるBIM導入プロジェクトの開始」としてBIM導入に関する取り組みの発表を行った。2012年には、社団法人日本建築家協会がBIMガイドラインを発行し、設計者がBIMを導入する際の検討課題と期待効果を明示した。そして、2014年度には国土交通省が官庁営繕事業の設計業務や工事に適用する「官庁営繕事業におけるBIMモデルの作成及び利用に関するガイドライン（BIMガイドライン）」が公表された。以降、国内においてもBIM活用に取り組む設計事務所や建設会社は増えてきているが、発注者側からの要求というよりは、発注者との合意形成の迅速化や生産性の向上などを目的として活用が進められているのが現状である。

2.3 BIMの施工段階への活用と課題

Utilization and Challenges to BIM in Construction Phase

BIMを施工段階で活用することによって、施工図・製作図の生産性・整合性の向上、数量積算の合理化・省力化、製造用CAD/CAMとのデータ連携、原寸模型（モックアップ）製作の省力化、施工シミュレーションによる工事計画理解度の向上、意匠・構造・工法などが複雑なプロジェクトの施工計画支援、新製品・新工法の開発・評価の効率化などの効果が一般的に期待されているが、これまで先行して活用を進めてきている建設会社各社では、施工段階で具体的にどのようにBIMを活用し、どのようなメリットを得るかということを試行錯誤している段階にある⁶⁾。

BIMの特徴の1つは、設計の最初期にマンパワーをかけて整合性の高い設計を3次元で行うことによって、設計から施工のプロセス全体での効率化とスケジュールの圧縮を図るものである。理想とされている3次元モデルの運用方法は統合モデルに対して設計からの各フェーズを追うごとに精度を高めていきながら、最新で整合性のとれた必要な情報を引き出し、施工段階にも活用していくというフローである。しかし、実際にはそのような事例はこれまでのところほとんどなく、立場（設計事務所、建設会社、専門工事会社、等）や建設プロジェクトフェーズに応じてBIMの活用目的が異なっていることもあり、現状は、それぞれが今必要なデータを入力するに留まっており、将来を見据え全体像を把握したモデル構築が行われているとはいえず、生産段階での3次元活用展開の妨げとなっている⁷⁾。

3次元モデルを作り込む業務負荷が大きいことに加え、計画段階で作成した様々な情報を生産段階で十分に活用できていないことが、効率やコスト面での足かせとなっている。今後これらを解決していくためには、①設計から生産までのあらゆるプロセスで情報の作り込みを省力化する技術（情報連携を含む）を確立すること、②3次元情報を生産段階で有効に活用するためのツール群を整備すること、③設計、調達、施工計画・管理など一連の業務をBIMにふさわしい形へ変革すること等が求められる。

次章以降では、これらの課題に対して、当社が研究開発し、実際にプロジェクトで効果が得られている取り組みの内容について述べる。

参考文献

- 1) 大臣官房官庁営繕部整備課施設評価室：「官庁営繕事業におけるBIMモデルの作成及び利用に関するガイドライン」、国土交通省、2014年3月
- 2) 竹中工務店：「竹中サステナビリティレポート2013」、p.24、2013年4月
- 3) 山梨知彦：「CADからBIMへ、さらにAIへ」、建築雑誌、p.40、2016年4月
- 4) 山下純一：「海外諸国におけるBIMの取り組み」、建築コスト研究、pp.11-16、2013年7月
- 5) BIM・FM研究部会：「ファシリティマネジャーのためのBIM活用ガイドブック」、JFMA、2015年4月
- 6) 社団法人日本建設業連合会 生産委員会 IT推進部会 BIM専門部会：「専門工事会社におけるBIM活用実態調査報告書2011年版」、平成24年5月
- 7) 中垣圭司：「設計施工でのBIM導入事例と課題」、電気設備学会誌、pp.384-387、2013年6月

3 RC一貫生産システム RC Structure Integrated Production System

松田 耕 Kou Matsuda*1

多葉井 宏 Hiroshi Tabai*2

2章で述べてきたように施工段階でのBIM活用が模索される中で、鉄筋工事については複雑な配筋検討や数量積算、加工図・加工帳の自動作成などのニーズが強く、簡単な操作で使用できる鉄筋用BIMツールが求められている。しかし、設備工事や鉄骨工事を対象にしたBIMツールの開発・適用が進んでいる一方で、鉄筋工事を対象にして実際に実務で活用できる水準に達している市販BIMツールはこれまで存在しなかった¹⁾。筆者らは鉄筋コンクリート工事の全生産プロセスにおいて、BIMモデルを軸に一貫したデータ連携を行い品質の確保・生産性の向上を支援するRC一貫生産システム（以下 RCS：RC structure integrated production System）を開発した。RCSを実際のプロジェクトに多数適用し、一定の成果を上げることができたので以下に報告する。

3.1 鉄筋工事の課題 Problem of Rebar Works

鉄筋工事は部品点数が多くかつ部品形状も多様であるため、全生産プロセスを通して手間のかかる工事である。また、施工は複雑な形状の部品を編みこむように行われるため、手戻りが生じないように事前に詳細な納まり検討が必要となる。BIMを導入することで現状の鉄筋工事で生じている様々な手間を削減することが期待されている。以下に鉄筋工事の流れに従って現状の課題点や手間が多くかかっている点について述べる。

(1) 設計

構造設計者は構造解析ソフトを利用して各部材に必要な鉄筋を設計する。この段階では施工担当者（作業所、鉄筋専門業者）がまだ決まっていないことが多く、施工ノウハウが反映されにくい。その結果、構造上問題なくとも実際には施工できない設計図でプロジェクトが進んでしまう場合があり、後に設計変更などの手戻りが生じる（課題①）。実際には配筋詳細計画時に納まっていなかったことが判明して設計変更及び積算・見積の手戻りが生じることが多い。設計段階で納まりも検討できる仕組みが必要だと考えられる。

(2) 積算・見積

積算はプロジェクトが進行する過程で何度か行われている。建設会社、鉄筋専門業者、職長がそれぞれ多大な工数をかけて積算を行っている（課題②）上に、それらの積算数量に差異が生じるため突合せにもさらに工数がかかっている（課題③）。これは、設計図書には配筋詳細図が部分的にしか描かれず、各主体が配筋を各々想定して積算しているためだとされている²⁾。鉄筋の積算基準は規定されているが、積算基準による数量が実際の施工数量に近いとは限らないことも明らかになっている²⁾。精度のよい積算数量を得るためには、配筋詳細図のレベルで詳細に積算することが必要だと考えられる。また、突合せの手間を減らすためには配筋を可視化することで根拠を持った交渉を行うことができる仕組みが必要だと考えられる。

(3) 配筋詳細計画

柱梁仕口や杭基礎など複数の部位が取り合う部分は複雑な納まりとなる。鉄筋施工担当者は特に納まりが複雑な部分をピックアップして配筋詳細計画を行う。構造図では各部材に必要な鉄筋の本数やピッチのみが指定されることが大半で、配筋詳細図は部分的にしか描かれない。鉄筋は部品数が多い上に配筋ルールが複雑なため、配筋詳細計画には多くの手間がかかっている（課題④）。また、配筋が納まらない場合はコンクリート躯体図や構造図を変更することになり、手戻りが生じる（課題①）。配筋ルールを自動的にチェックしながら簡単な操作で配筋詳細計画が行えるツールが必要だと考えられる。また、手戻りを防止するためには早い段階で配筋詳細計画を可視化する仕組みが必要だと考えられる。

*1 技術研究所 新生産システム部 研究員 Researcher, Research & Development Institute

*2 技術研究所 新生産システム部 情報化グループ長 Group Leader, Research & Development Institute

(4) 設備設計との調整

スリーブが梁を貫通する場合は、その位置やスリーブ径に応じた補強筋が必要になる。この調整には、建築施工担当者、鉄筋工、設備工（電気、空調、衛生）、補強筋メーカーが関与し、これら多くの主体がそれぞれ個別に重ね合わせや調整を行っているために手間がかかっている（課題⑤）。また、貫通可能範囲、補強筋、干渉、かぶり厚など複雑なルールを全ての貫通孔について速く正確にチェックすることは品質上の課題でもある（課題⑥）。これらを解決するためには、コンクリート躯体情報、配筋情報、スリーブ情報、補強筋計算を統合的に扱えるツールが必要だと考えられる。

(5) 加工図・加工帳作成

構造図、コンクリート躯体図、配筋詳細計画を基に職長は全ての鉄筋について加工図・加工帳を作成する。加工図は鉄筋の部品図でどの形状の鉄筋をどこに何本配置するかを描いたものである。複雑な部分にしか行われていない配筋詳細計画を全部材について行い、それまであまり検討されない継手位置やトップ筋長さなどについても詳細に検討を加える。加工図は手書きもしくは2次元CADで描かれることが多い。加工図作成中に納まらない箇所が判明した場合は、コンクリート躯体図や構造図を変更することになり、手戻りが生じる（課題①）。加工帳は鉄筋の部品表で加工図に描かれた鉄筋を現場への搬入単位ごとに集計したものである。加工図・加工帳作成には多くの手間がかかっている（課題⑦）。また、加工図は職長によって描かれ方が異なり、第三者から見て必ずしも分かりやすいものではないため、エビデンス性に課題がある（課題⑧）。加工図・加工帳を半自動的に作成することで手間を削減し、だれが見ても分かりやすいアウトプットが得られるツールが必要だと考えられる。

(6) 鉄筋加工場における鉄筋加工

職長が作成した加工帳に従って鉄筋加工場で鉄筋が加工される。職長からFaxやメールで送られてきた加工帳の内容を鉄筋加工場のシステムに入力するために手入力の作業に手間がかかっている。システムからは製造ロットごとに加工形状や本数を記した絵符とよばれるタグが発行される。製造ラインでは絵符を加工鉄筋に結び付けて管理する。ところが、システムと切断機や曲げ機は連動していないことが多く、作業員が絵符の内容を再度機械に手入力するという手間が発生している。また、搬出時においても、ドライバーが手作業で加工帳と積荷を確認している鉄筋加工場が多い。すなわち、鉄筋加工データが各所で連動していないために都度手入力や確認の手間がかかっている（課題⑨）。加工帳のデータが鉄筋加工場のシステムに連動し、絵符にはバーコードを印字して加工・搬出を管理するといったシステムが必要だと考えられる。

(7) 現場における鉄筋施工

現場では職長が加工図を用いて作業員に配筋指示を行う。加工図は必要最低限の情報のみ描かれることが多く、鉄筋工事の経験が浅いと理解することは難しい。しかし、作業指示のために実際の配筋に近い分かりやすい加工図を描くには手間がかかり現実的ではない（課題⑩）。鉄筋工の高齢化や人材不足のため鉄筋工事の知識が浅い作業員が増えているため、この課題はますます深刻になっている。そこで、だれが見ても分かりやすい加工図や鉄筋納まり図が半自動的に得られるツールが必要だと考えられる。

(8) 配筋検査・記録

構造計算書偽装問題以降、鉄筋工事に求められる品質管理書類は増えている。特に配筋検査においては、検査野帳の作成、配筋写真の撮影、多くの関連書類を持参しながらの検査など管理業務に手間がかかっている（課題⑪）。BIMモデルとデータ連携してモバイル機器によって配筋検査を行い、検査結果から半自動的に検査書類が作成されるツールが効果的だと考えられる。

3.2 鉄筋コンクリート工事とBIM Reinforced Concrete Works and BIM

前節で述べたように、鉄筋工事には多くの課題があり、BIMを用いてこれらを解決したいと考えられてきた。しかし、鉄筋工事にBIMを導入するためにはいくつかの課題があり、その実現が困難であった。鉄筋工事をBIM化するにあたって、これまでの課題点を以下に述べる。

(1) 多品種多量の鉄筋オブジェクト

鉄筋のBIMモデルは多品種多量の鉄筋オブジェクトが複雑に組み合わせられたものとなる。プロジェクトの規模が大きくなると鉄筋モデルのデータ容量が大きくなりソフトの動きが重たくなるという課題があった(課題⑫)。また、鉄筋オブジェクトの形状が複雑なため3Dモデルでの入力、編集にも手間がかかっていた(課題⑬)。扱うオブジェクトが多品種多量でもソフトとしては軽快に動く仕組みや複雑形状を簡単に操作できるインターフェイスが必要であった。

(2) データ連携

鉄筋情報は構造解析ソフト、積算ソフト、構造図作成ソフト、2次元CADなど様々なシステムに入力されるが、これらのソフトはデータが連携していないためソフトごとに多くの入力手間がかかっていた。初めに入力される構造解析ソフトの鉄筋情報をそのまま連携してBIMモデルを作成すれば、各プロセスにおける入力手間の削減が期待できる。しかし、本研究の着手時には鉄筋モデルをやりとりするデータ形式のフォーマットが整備されていなかった(課題⑭)。

(3) オブジェクト単位

既存のBIMモデルにおいて鉄筋はコンクリート部材に従属するものとして扱われることが多い。しかし、鉄筋は複数のコンクリート部材をまたいで繋がっているため、コンクリート部材の単位で鉄筋が切れているのは現実と整合していない(課題⑮)。現実には鉄筋オブジェクト単位として鉄筋をとらえ直す必要があると考えられる。

3.3 RCSの開発項目

New Developments Realized by RCS

以上、鉄筋工事における課題を述べてきた。筆者らは鉄筋工事の全プロセスにわたって見られるこれらの課題を網羅的に解決するシステムとしてRCSを開発した。Fig. 1にRCSの全体構想を示す。

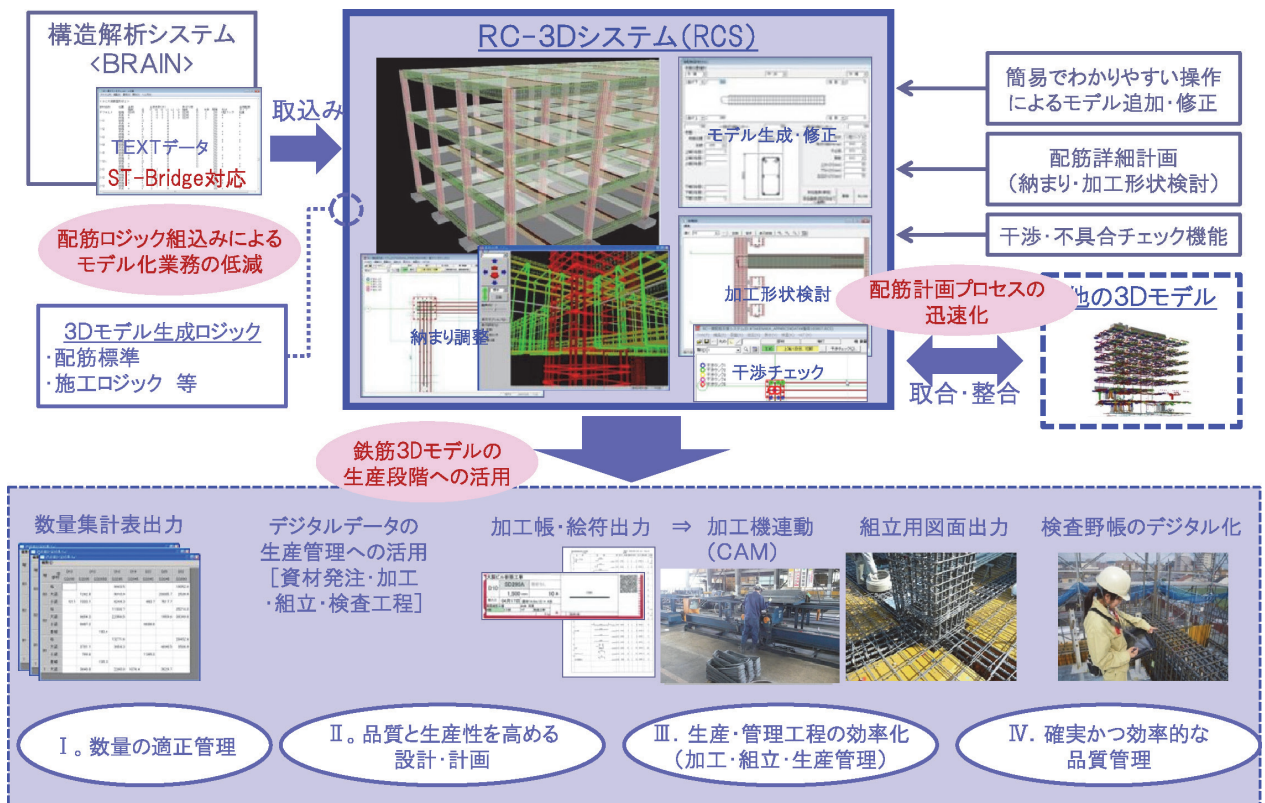


Fig. 1 RCSの全体構想
The whole framework of RCS

この全体構想を踏まえながら、RCSによって前節までに述べた課題がどのように解決できるのかを示す。

(1) 構造解析ソフトとのデータ連携

RCSはST-Bridgeという標準フォーマットに対応している。ST-Bridgeは日本国内の構造設計情報について構造関連ソフトウェア間のデータ連携のための標準フォーマットであり、2012年に一般社団法人buildingSMART Japan（旧IAI）によって策定された³⁾。ST-BridgeによってRCSでは構造解析ソフトで入力された鉄筋データを活用でき、モデリングの手間が大幅に削減できている（課題⑭）。また、ST-Bridgeを活用してRCSが自動的に納めた柱梁仕口部の配筋状況を構造解析ソフト上で表示することも行っている。これによって、構造設計の段階で鉄筋の納まりを可視化できるため、納まらない設計を回避し、かなり早い段階での手戻り防止効果が期待できる（課題①）。

(2) 詳細配筋の半自動生成と簡易編集機能

■配筋標準ロジックの組み込み

構造解析ソフトには定着鉄筋の配筋についての情報は入力されないため、仕口部や杭基礎など複数部材が取り合う部分の鉄筋はRCSでモデリングする必要がある。しかし、定着のルールは複雑であるため、膨大な定着鉄筋を配筋標準に従いながら手入力するのは現実的ではない。そこで、RCSでは配筋標準図のルールを整理してロジック化し、プログラムに組み込んでいる。これによって、定着鉄筋は構造解析ソフトのデータをインポートするだけで自動的に生成され、モデリングの手間が削減できる（課題⑬）。

また、構造設計の段階で定着鉄筋まで入力されたモデルが得られるため、このモデルを積算に活用することで従来よりも精度の高い積算が少ない手間で可能になる（課題②）。さらに、RCSを活用して配筋を可視化することで、根拠を持った突合せを行うことができる（課題③）。

■簡易編集機能

①未決機能

配筋検討を簡易に行うために、鉄筋の端部条件として『未決』という概念を導入した。『未決』とは仕口部の鉄筋納まりが確定していない状態を指す。『未決』状態の仕口においては、鉄筋の定着開始面に『未決マーク』（×印）を発生させ、仕口内の鉄筋は描画しない。『未決』を導入することで、鉄筋の繋ぎ操作が簡易になる（課題④）。従来のBIMソフトでは仕口部中央まで鉄筋が伸びているのが一般的だが、その方法だと鉄筋繋ぎこみが行いにくい。

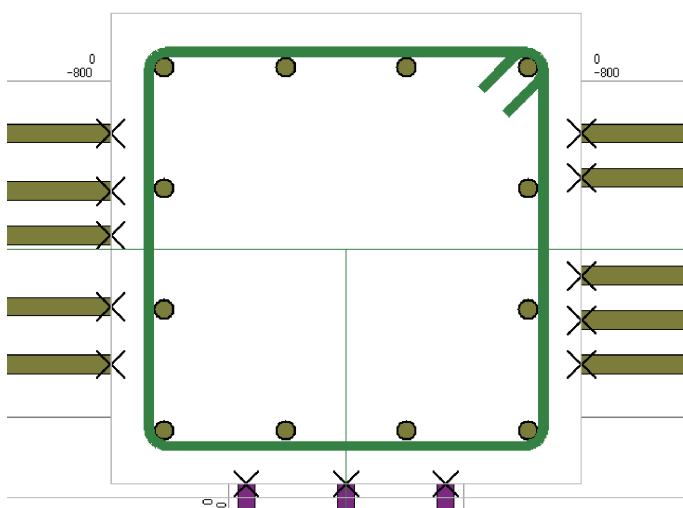


Fig. 2 伏図表示における梁筋の未決
Unfixed mark of beam rebar plot on plan

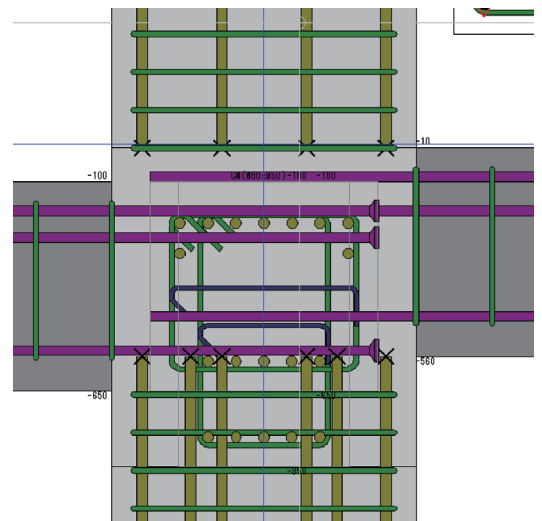


Fig. 3 軸組図における柱筋の未決
Unfixed mark of column rebar plot on section

鉄筋の繋ぎこみ機能には『位置合わせ接続』、『延長して接続』、『曲げて接続』などを用意している。『曲げて接続』では配筋標準で規定されるように帯筋と交わる位置で自動的に折れ曲げることもできる。

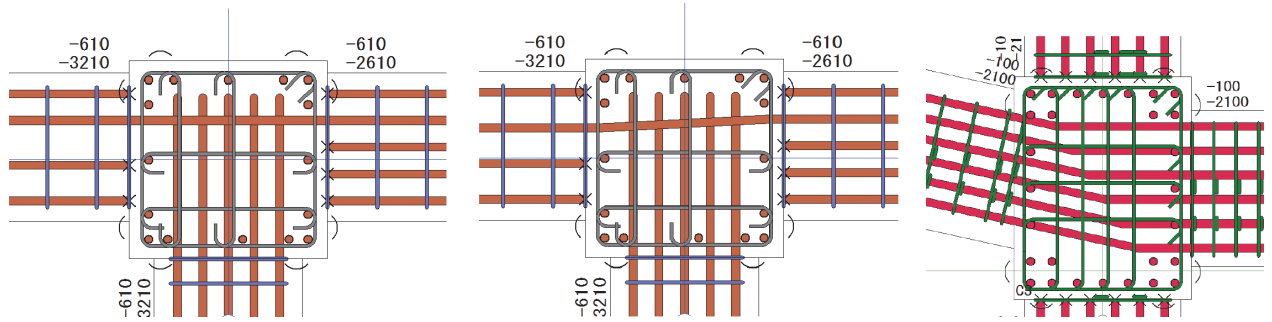


Fig. 4 『位置合わせ接続』(左), 『曲げて接続』(中), 『延長して接続』(右)
Connection by fitting position (left), Connection by bending (center), Connection by extension (right)

軸組図においては柱断面図を併記して柱主筋の繋ぎこみを簡易化する工夫を行っている。柱軸組図の横に柱頭／柱脚の柱断面図が併記される。柱断面図は軸組に対して左右方向の位置が合わせて描かれる。柱主筋は軸組に対して、前面／背面／左側面／右側面の表示オンオフができる。軸組図と柱断面図のどちらを用いても各種鉄筋編集(鉄筋繋ぎこみ／移動／伸縮／定着設定)ができるのでユーザーは編集作業がよりやりやすい方を選択できる。未決マークは軸組図、柱断面図ともに表記される。

②定着寸法設定機能

RCSの半自動生成によって生成する鉄筋は配筋標準を満たす最低長さである。例えば、定着長さL2以上という場合はL2で生成する。しかし、実際には加工誤差や施工誤差などを見込んで多少長めの鉄筋で計画しなければならない。このような計画を簡易に行えるようにしたのが、定着寸法設定機能である(課題④)。

定着寸法設定機能では、定着条件に応じて各種既定寸法を自動算出する。柱梁取り合い形状(L型、十字型など)を自動判定して、該当する配筋標準ルールを表示する。規定を満たしていない鉄筋にはアラートを出す。L2などの規定値は寸法値をRCSが自動計算して表示するので、計画者が規定値を手計算する必要がなくなる。

③トップ筋と通し筋の入れ替え機能

仕口部の納まりによっては通し筋とトップ筋を入れ替えたい場合がある。この操作を簡易に行えるようにしたのがトップ筋と通し筋の入れ替え機能である(課題④)。左端、中央、右端(梁)または柱頭、柱脚(柱)の主筋本数の配置によって、トップ筋のパターンは多様であるが、どのようなパターンについても簡単に入れ替えられる。

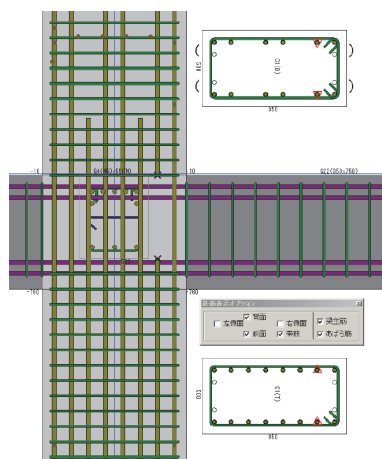


Fig. 5 軸組図における柱断面の併記
Plan of column showed in section

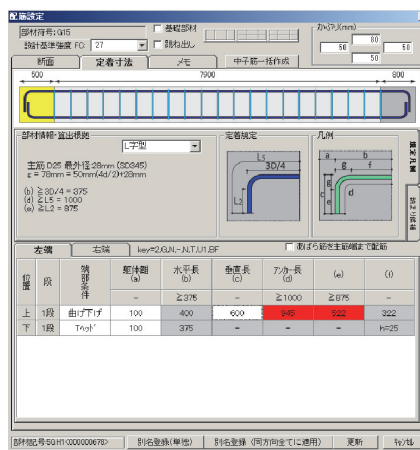


Fig. 6 定着寸法設定機能
Setting of length of fixed rebar

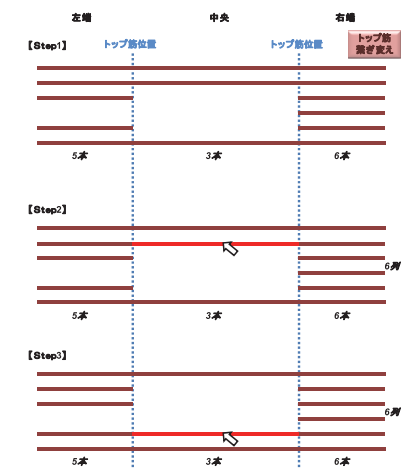


Fig. 7 トップ筋と通し筋の入れ替え機能
Change of cut off rebar with connected rebar

④多段筋追従機能

梁筋は多段筋となっていることが多い。RCSは伏図表示において、ラジオボタンでどの段数の鉄筋を表示するかを簡易に切り替えられる。既存のBIMツールでは3D表示で見ると余計な鉄筋まで表示されて操作しづらかったが、RCSではこのように必要な鉄筋だけ表示する機能を各画面（3D、伏図、軸組図）で用意している。

梁主筋を編集（移動/伸縮）する際に、その主筋の真下にある多段筋が追従する。2段筋、3段筋は1段筋と同じように納めることが多いからである。この機能によってもモデリングの手間が削減される（課題④）。

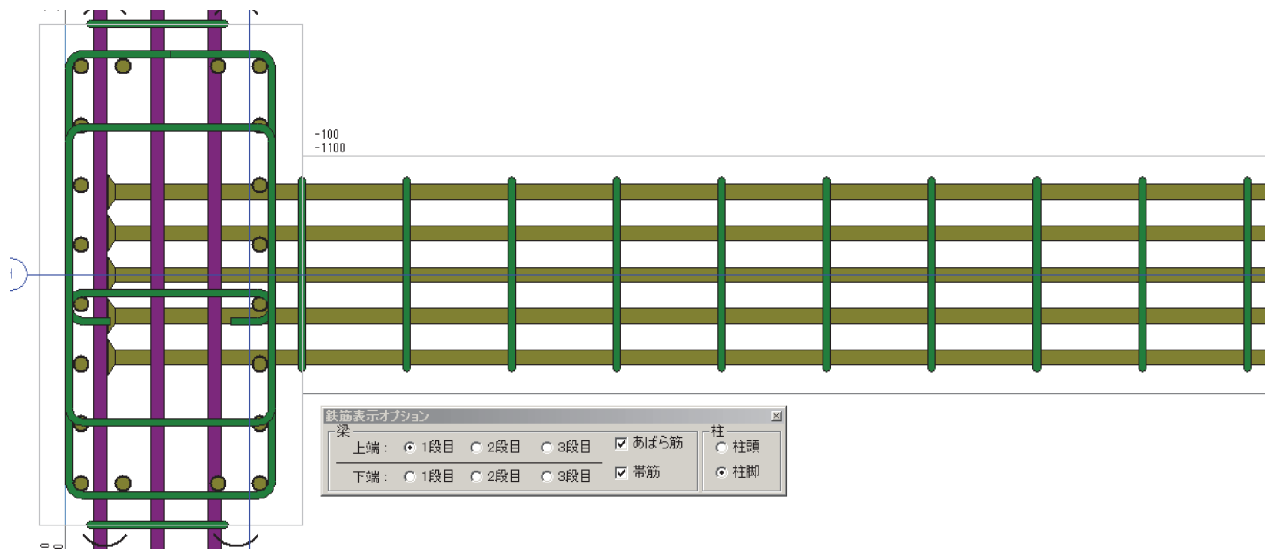


Fig. 8 多段筋追従機能
Reaction of rebar on several layers

■3Dモデルの簡易表示機能

既存のBIMツールでは鉄筋モデルが重たくなるという課題を解決するために、RCSでは鉄筋を常に必要な情報に絞って表示する仕組みにしている（課題⑫）。3D表示では、視点近傍の鉄筋のみ読み込んで表示し、遠くにある鉄筋は表示しない。余計な鉄筋を表示しないためかえって見やすい表示となり、操作性が上がる。伏図、軸組図においても前節で述べたように必要な段、必要な面の鉄筋しか表示しない。そのかわり表示を簡易に切り替える機能を用意し、操作性を向上する工夫をしている。

RCSは、建築面積11,000m²、延床面積156,000m²を超える規模のプロジェクトにおいても軽快に操作できた実績がある。RCSはこれまで80人を超える職長に配布しており、職長が通常使用する程度のスペックのPCでも問題なく操作できることが確認できている。

■プロジェクトにおける活用

RCSの詳細配筋の半自動生成と簡易編集機能を活用して実際のプロジェクトで納まり検討を行った実績は多数あるが、ここでは以下の2例を紹介する。

①病院（RC造、地下1階、地上5階、延床約8,900m²）における柱梁仕口部の配筋検討

本プロジェクトでは外周柱が扁平で鉄筋納まりが厳しかったため、プレートナットとTヘッドが検討された。RCSで配筋詳細検討を行い、柱頭にプレートナット、梁端部にTヘッドを用いる計画となった。配筋納まり図にはRCSからの出力が用いられ、関係者間での打ち合わせに活用された。

また、段差梁の部分についてもRCSで検討された。低い梁の上1段筋と高い梁の上2段筋を繋げる納まりをRCSで検討し、配筋納まり図を作成した。

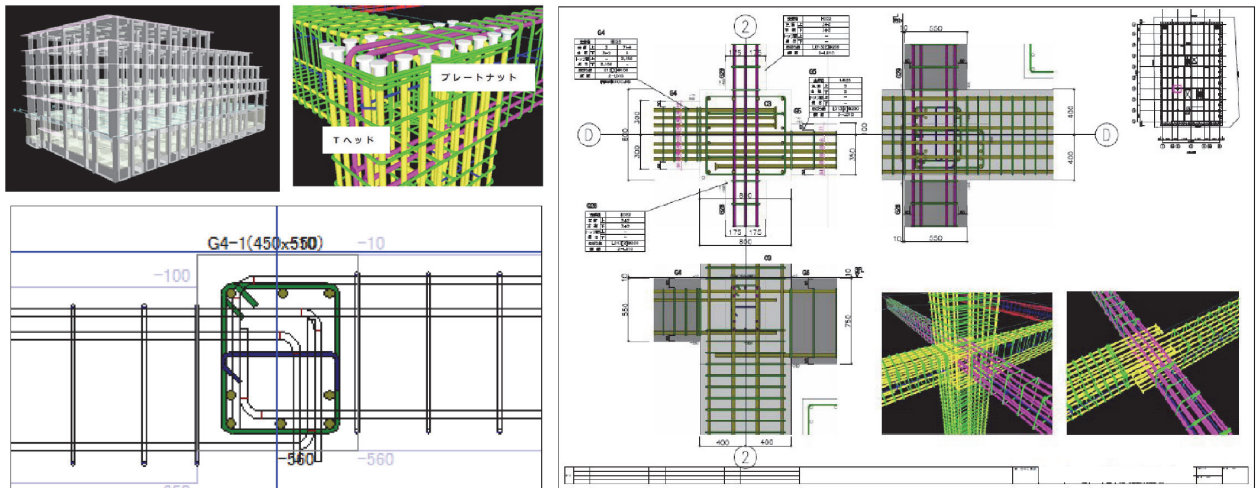


Fig. 9 柱梁仕口部の配筋検討
Study on detail of rebar in beam and column

②複合施設（RC造/SRC造/S造，地下2階，地上37階，塔屋2階，延床約15,600m²）における杭と基礎梁の配筋検討

本プロジェクトでは基礎梁と場所打杭の納まりが厳しかったため、RCSを用いて詳細検討を行った。その結果、杭のある全28箇所中24箇所で何らかの納まり上の問題があることが明らかとなった。

構造設計者と打合せを行い、梁主筋径のサイズアップなど一段あたりの梁主筋本数を減らす対策を行い、納まりの改善を図った。納まり検討、変更提案、変更対応までを予定通り大臣認定申請前に完了でき、着工後に問題となる可能性のあった手戻り要因を事前に排除することができた。

その後、RCSに躯体図の情報を反映し、さらに詳細な配筋計画を行った。事前に関係者間での情報の共有が行われていたため、難しい納まりの多い基礎配筋にも関わらず大きな指摘を受けることなく手戻りのないスムーズな施工を行う事ができた。

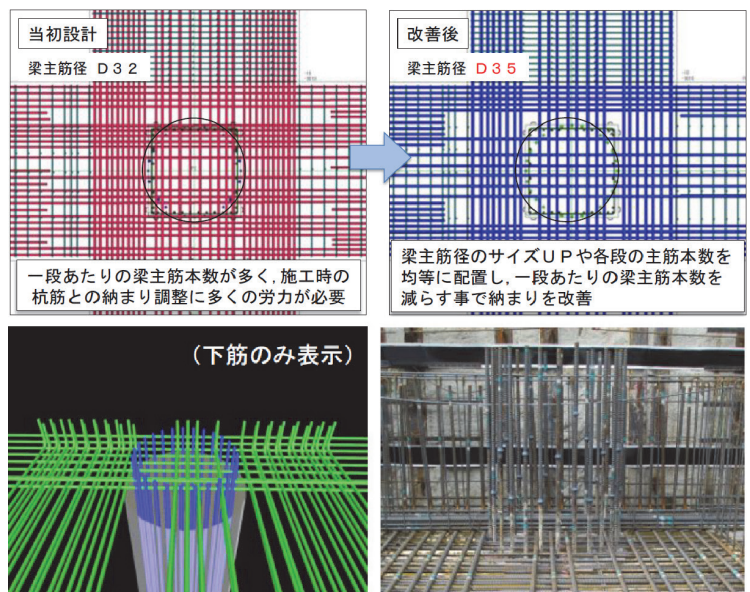


Fig. 10 杭基礎梁の配筋検討
Study on detail of rebar in pile and foundation

(3) 梁貫通孔機能

梁貫通孔情報、補強筋情報を一括して管理できる梁貫通孔機能をRCS内に実装した。梁貫通孔機能は、設備用BIMソフトで作成したスリーブ情報と、補強筋構造計算システムで作成した補強筋計算結果の情報を連携させることにより、梁貫通孔に関連する鉄筋を自動的に再配置しBIM連携モデルを作成する。本機能は、補強筋計算プログラムをRCS内に取り込むことで実現している。

梁貫通孔設置可否判定は、構造図や既成補強筋のルールに従い、自動的に行える機能である。この際、特に複雑な以下の3点のルールを整理し、自動判定ロジックを組み立てている（課題⑥）。

- ・貫通孔径により補強要否・貫通可能範囲が異なる。
- ・梁貫通孔と梁主筋のかぶり厚判定やスラブとの干渉判定など他部材と貫通孔位置の判定が必要である。
- ・補強筋と躯体のかぶり厚判定や、補強が必要な場合には鉄筋鋼種・径・コンクリート強度など躯体構成材料の判定が必要である。

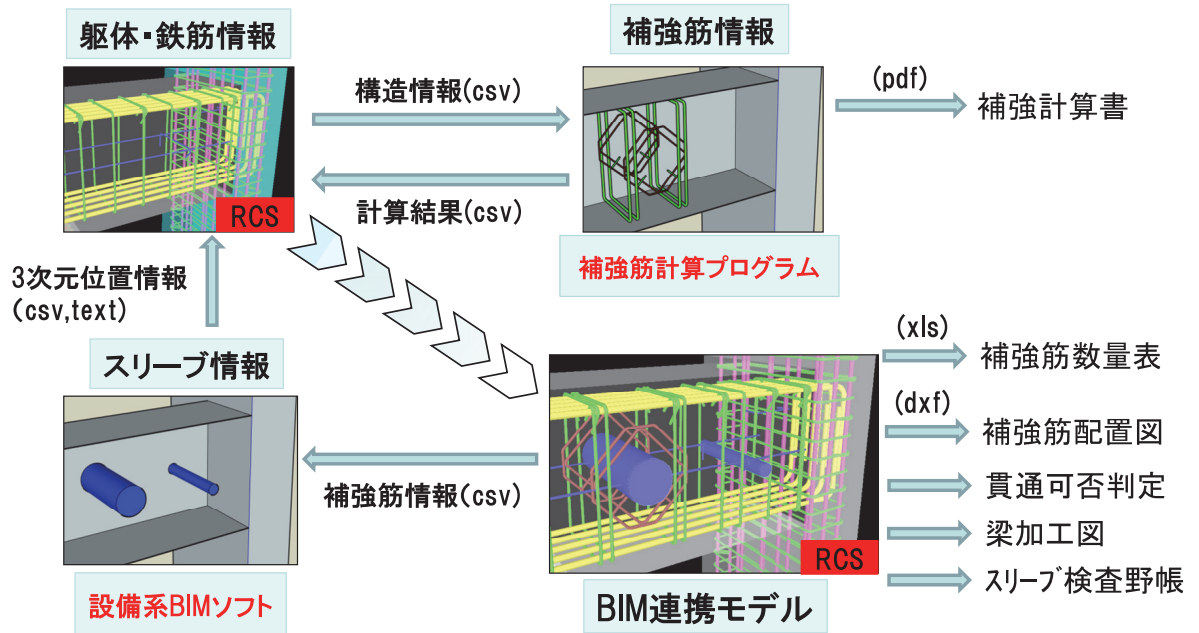


Fig. 11 ツール間のデータ連携
Data I/O systems between existing tools and RCS

本システムでは、自動判定を可能にするため、全ての梁貫通孔が、判定に必要なデータを保持している。

RCSへの梁貫通孔機能実装により、スリーブ情報を一元的に扱えるようになり、作業所における施工管理工数を従来比約80%削減できたと報告されている（課題⑤）。また、NG判定箇所を100%事前検討段階で把握することができた。

この機能を活用すれば、設計段階における事前検討も可能になる。また、加工図への梁貫通孔の表示により、鉄筋工が1枚の図面で貫通孔補強筋を含む全ての配筋を行うことができ、さらなる効率化と品質確保が実現可能である。

(4) 加工図・加工帳機能

■RCSにおける加工図・加工帳のインターフェイス

RCSでは鉄筋の納まり調整が完了すれば、加工図は自動的に出力される。加工図上で行わなければならない調整は、継手位置の調整だけである。また、加工帳も加工図から自動的に出力されるため、加工図・加工帳作成の手間は大幅に削減される（課題⑦）。RCSから出力される加工図・加工帳は見やすいフォーマットに統一されているので、誰にとっても見やすくエビデンス性が高い（課題⑧）。RCSの加工図には品質管理に必要な情報も盛り込まれている。部材の断面情報、寸法情報、継手可能範囲、トップ筋長さ、せん断補強筋の枚数、貫通孔補強筋情報など、既存の加工図にはない情報が記入されているため、鉄筋工事に詳しくない作業員にも分かりやすく、品質の確保が期待できる（課題⑩）。また、追終筋の1本手前の鉄筋に圧接時切寸法を表示したり、鉄筋寸法の算出には圧接による鉄筋縮み、曲げ伸び、鉄筋の500mm丸めなどを考慮したりすることで、職長が普段暗黙のうちに検討しているノウハウをできるだけ可視化して盛り込んでいる。

あるオフィスビル（RC造、地下2階、地上4階、延床約5,500m²）では、RCSの加工図・加工帳機能を柱梁に活用することで、職長の加工図作成工数を削減し、鉄筋工事の施工歩掛を同種建物と比較して5.3%～11%向上できたと報告されている。また、同様の取り組みを行った他のオフィスビル（RC造、地上2階、延床約660m²）においても、職長の工数を50%削減し、鉄筋工事の施工歩掛を同種建物と比較して17%～21%向上できたと報告されている。

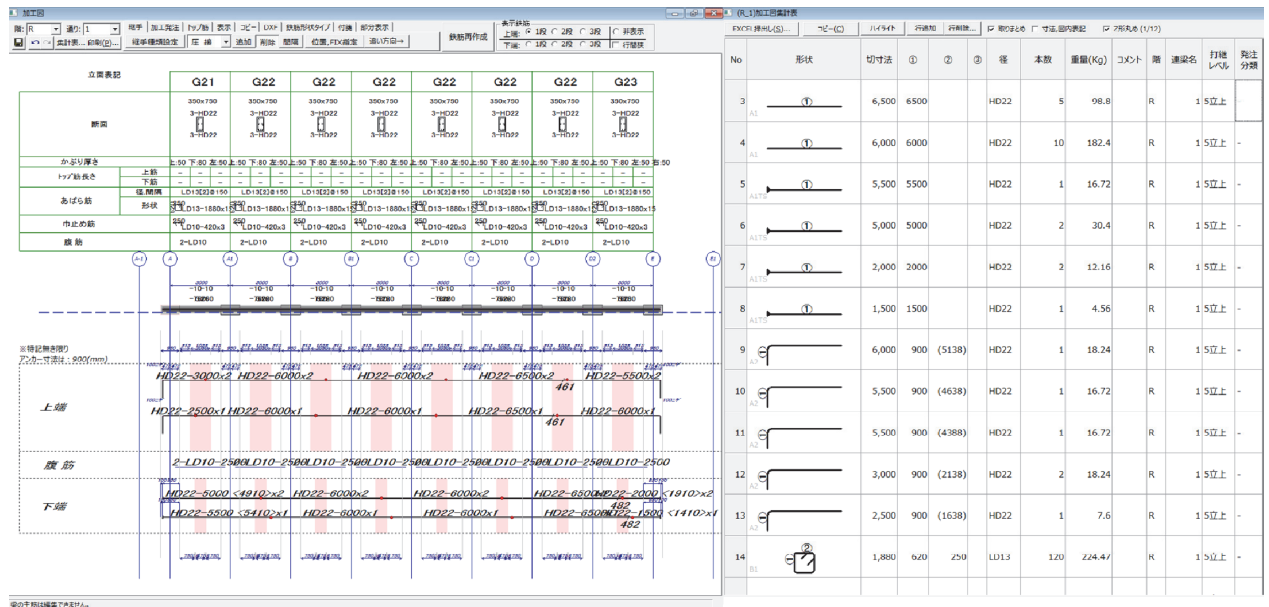


Fig. 12 RCSによる加工図・加工帳
Detail plan for rebar construction and BOM showed by RCS

■鉄筋オブジェクト単位の設定

既存のBIMモデルにおいて鉄筋はコンクリート部材の単位でモデリングされる。ST-Bridgeにおいても鉄筋はコンクリート部材単位で定義されているため、RCSにおいてもST-Bridgeインポート時には部材単位の鉄筋オブジェクトとなる。しかし、RCSではFig. 13のように鉄筋オブジェクトの単位を部材単位だけでなく連梁単位や加工鉄筋の単位でも扱えるようになってきている。これら異なる単位の鉄筋オブジェクトはRCSの中で必要に応じて自動変換されている。これによって、インポート時は部材単位の鉄筋オブジェクトでも加工帳出力時には加工鉄筋の単位でオブジェクトとなっている。RCSでは鉄筋オブジェクトの単位を自動的に遷移させることで、現実と整合した鉄筋オブジェクトが実現できている（課題⑮）。

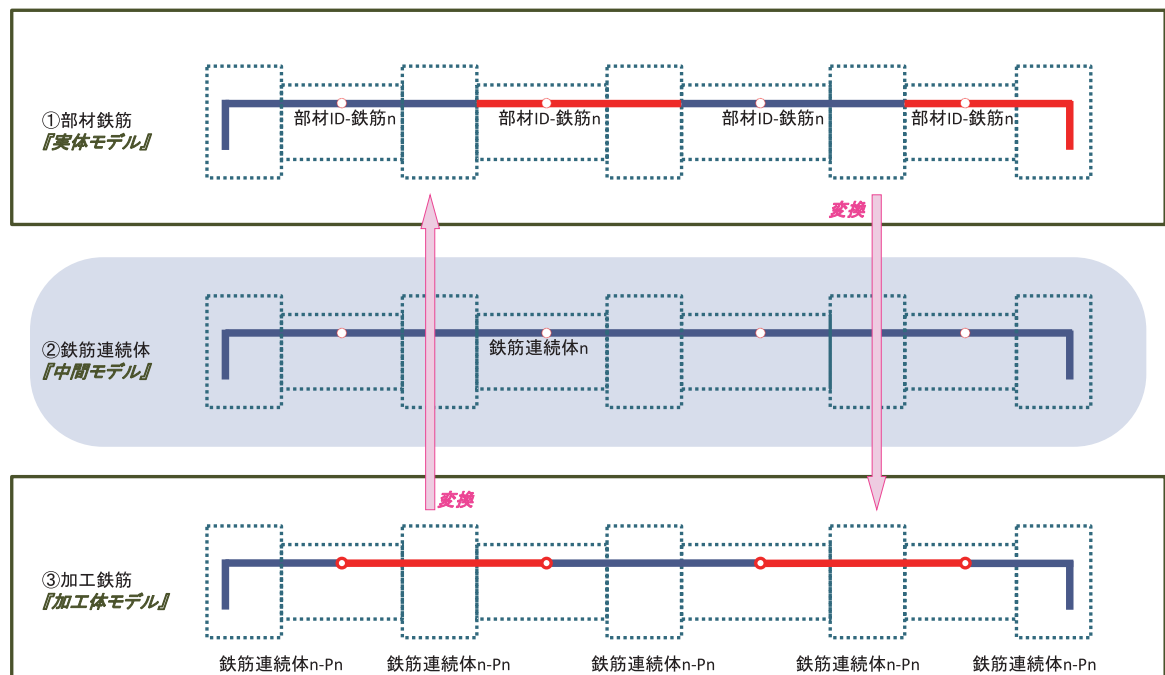


Fig. 13 鉄筋オブジェクト単位の定義
Definition of rebar object unit

(5) 配筋検査機能

RCSの躯体・鉄筋モデルと連動させて、伏図モデル・部材符号・躯体断面情報・配筋情報などからデジタル化された検査野帳や配筋図を自動作成し、モバイルPCにてFig. 14に示すような検査野帳を表示させるとともに、Photo 1に示すように電子ペーパーに配筋図等を表示させて検査業務に利用できるシステムを構築した。配筋検査の事前準備作業においては、配筋箇所全部位について配筋図等を作成する必要があったが、本システムでは整備されたRCSの躯体・鉄筋モデルがあれば、追加の作業もなく配筋図の表示をペーパーレスで自動に行うことができる。配筋検査時においては、配筋検査に必要なパソコン内のデータをすべて表示できるため、施工現場にはモバイルPCを持ち込むだけで済み、従来のように構造図や検査野帳を持ち込むことは不要となった。検査対象箇所の配筋図をワンタッチで呼び出し、表示するとともに、検査結果を簡単に記録することが可能となった。また、配筋検査では、配筋図を検査対象部材と一緒に写し込んだ記録写真が必要である。従来は配筋図を紙に印刷して黒板などに貼り付けるなどして写真撮影を行っていたが、本システムでは、配筋図を電子ペーパー（A3サイズを使用。電子ペーパーは液晶画面等とは異なり、直射日光下でもはっきりと認識できることが特徴で、屋外作業が多い建設現場では非常に有効な表示媒体である。）に出力して記録写真撮影に利用する。これにより、検査業務の省力化とペーパーレス化を実現できる。本システムは実際のプロジェクトの配筋検査に適用し、検査野帳作成に費やす準備段階での作業時間を1/5に、検査部位ごとに配筋図を用いて検査記録写真を撮影する現場での作業時間を1/3に軽減できることを確認できた（課題⑪）。

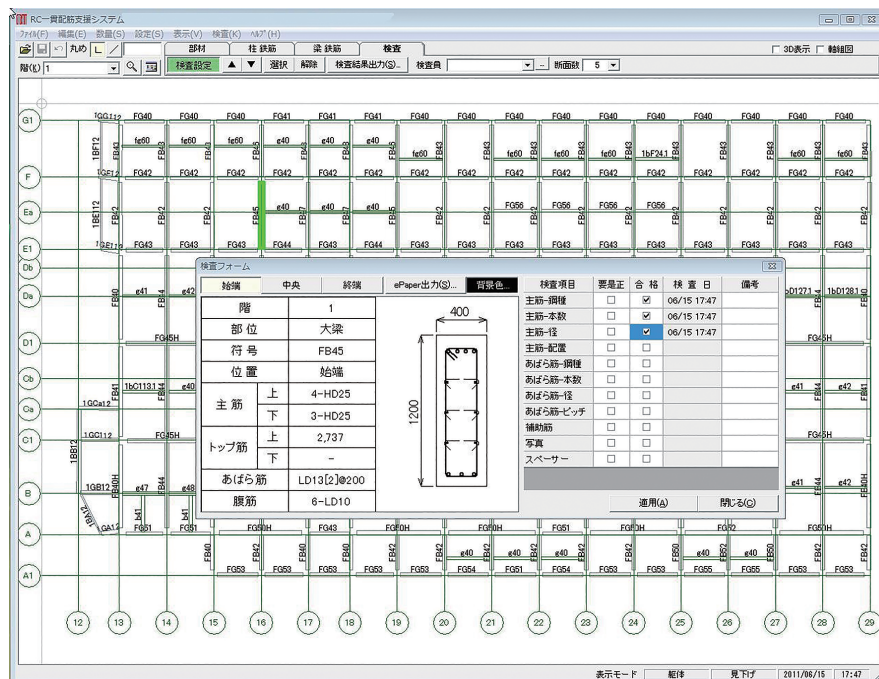


Fig. 14 配筋検査画面
Interface of field inspection of rebar

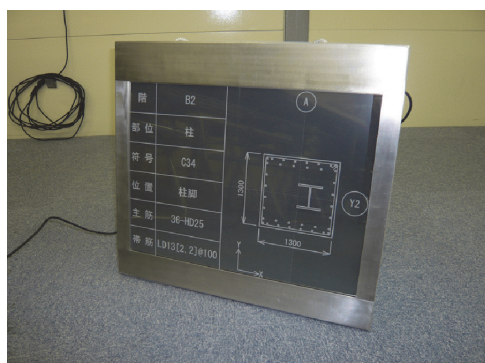


Photo 1 電子黒板
Electronic blackboard for field inspection of rebar



Photo 2 配筋検査状況
Field inspection of rebar by RCS

以上、本節では鉄筋工事における課題とRCSによるその解決を概説した。内容を表にまとめる。

Table 1 鉄筋工事における課題とRCSによる解決
Problems on rebar works and solution by RCS

課題	課題の内容	RCSによる解決
①	構造設計時に配筋検討が不十分なことによる手戻りが生じる	ST-Bridgeに対応、配筋標準ロジックの組み込みによる詳細配筋の半自動生成
②	複数の主体が手間のかかる積算を重複して行なっている	配筋標準ロジックの組み込みによる詳細配筋の半自動生成
③	積算数量の突合せに手間がかかる	詳細配筋の可視化
④	配筋詳細計画に手間がかかる	配筋標準ロジックの組み込みによる詳細配筋の半自動生成、簡易編集機能
⑤	スリーブに関する複数の図面を個別に重ね合わせている	梁貫通孔機能
⑥	全ての貫通孔について複雑なルールを速く正確に確認する必要がある	梁貫通孔機能
⑦	加工図・加工帳の作成に手間がかかっている	加工図加工帳機能
⑧	加工図のエビデンス性が低い	加工図機能
⑨	鉄筋加工場においては工程ごとに加工情報を手作業で確認している	鉄筋曲げ機/切断機とのデータ連動による加工工程の効率化(未実装/構想のみ)
⑩	職長から作業員への作業指示に使える分かりやすい加工図を作成するには手間がかかる	加工図機能
⑪	配筋検査に手間がかかる	配筋検査機能
⑫	鉄筋をBIMソフトでモデル化すると重たくなる	3Dモデルの簡易表示機能
⑬	鉄筋の形状は複雑なため、3Dモデリングに手間がかかる	配筋標準ロジックの組み込み、簡易編集機能
⑭	鉄筋モデルのデータを異なるBIMソフト間でやりとりできない	ST-Bridgeに対応
⑮	既存のBIMソフトにおける鉄筋オブジェクトの取り扱いが現実と整合していない	鉄筋オブジェクト単位の設定

3.4 今後の展望

Prospects for the Future

RC工事の高効率な生産システムを目指し、前節までに述べた機能を実装したシステム開発を進めてきた。これまでに、純RC造だけでなく、S造の基礎周りやSRC造など様々なプロジェクトに適用され、品質確保や生産性向上などの面で一定の効果をj得ている。今後は、資材発注から加工・組立・検査に至るまでにデジタルデータの生産管理への適用をさらに広げ、例えば、加工場における鉄筋曲げ機/切断機とのデータ連動による加工工程の効率化、情報の見える化による製造・加工・搬送の効率化、RCSモデルと融合した新構工法開発、生産プロセスにおけるロボット開発適用などにより、鉄筋工事におけるデジタルファブリケーションを促進させたいと考える。

現状の生産プロセスの中にシステムを導入しただけでは、効果にも限界がある。RCSを他の市販3次元CADや生産管理ツールとの連携のもと、プロジェクトに継続的に適用する中で、RC工事の生産体制・プロセスのさらなる改善・変革を促すことで、さらなる高効率な生産システムを目指している。

参考文献

- 1) 竹中工務店リリース情報, 2015年10月 (<http://www.takenaka.co.jp/news/2015/10/06/index.html>)
- 2) 松田耕:「プロジェクトの進展に伴う鉄筋積算数量の差異に関する研究」, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1343-1344, 2011年7月
- 3) 一般社団法人building SMART Japanホームページ (<http://www.building-smart.jp/>)

4 BIMを用いた多工区同期化工程計画手法

A Research on Synchronized Multi-Site Scheduling Using BIM Tool

田澤 周平 Shuhei Tazawa*1

著者はこれまで基準階タクト工程などの繰り返し型の性質を持つ建築工事を対象として、工程要素間の先行後続関係により定義されるインターフェイス・マトリクス（以下、IFM）を用いて多工区同期化工程計画を算出する手法を開発してきた^{1), 4), 5)}。本研究ではこれまでの手法を応用し、BIMモデルが持つオブジェクトの数量情報と多工区同期化工程計画の連携を行う。さらに3Dオブジェクトの分割・合成手法やボリューム計算機能、或いは工区分割手法と連動させ、建築物の最終出来形を現したBIMモデルから生産設計者や施工計画者の能動的な意図に基づいた多様な構工法計画を生成する。その手法により得られた構工法計画を建設プロジェクトの評価軸である「工期」、「コスト」を目的変数としたシミュレーションを行い構工法計画の評価を行った。具体的には高層RCオフィスビルの地上躯体工事を対象として、①工期（工区分割）②採用される構工法（部材分割）を変数としたBIMを用いた施工シミュレーションを行い各構工法計画のパフォーマンスの評価を行った。

本論の構成は大きく2つの部分からなる。本論の前半部分ではBIMモデルと構工法計画の連携に関する部分である。設計者によって作成されたBIMモデルの3Dオブジェクトそれ自身は建物の最終的な出来形を現すものである。或いはBIMというソフトウェアの性質上、最終的な目的は2Dの図面を作成することが目的とされている。そのため施工計画者にとってはBIMモデルだけでは計画に必要な情報量が少なく施工計画に有用な情報を得ることができない。即ち、3Dオブジェクトは施工計画にそのまま利用することは困難であるという課題を示す。その解決方法としてブーリアン演算を用いた分割、結合の操作により3Dオブジェクトを再定義する操作方法に関して詳述する。論文の後半部分では前半部分で述べた手法を建物の3Dモデルを用いて、コストと工期を評価するシミュレーションを行う。最後に本システムの施工計画における有用性と今後の課題に触れ、まとめる。

4.1 施工計画のための3Dモデルの再定義

Redefinition of 3D Models for Construction Planning

現状、BIMツールで作成される3Dモデルは、柱、梁、床のような部材の組み合わせによって建物の全体のモデリングがされる。国際的な3Dオブジェクトクラスの標準であるIndustry Foundation Class (IFC) のクラスの定義も同様である。それゆえ、BIMを用いて各部材を数量積算する際、モデリングで用いた部材の表面積や体積が積算される。現状のBIMを用いた数量積算はソフトウェア側で定義

BIMツールで定義される設計段階の3Dモデル

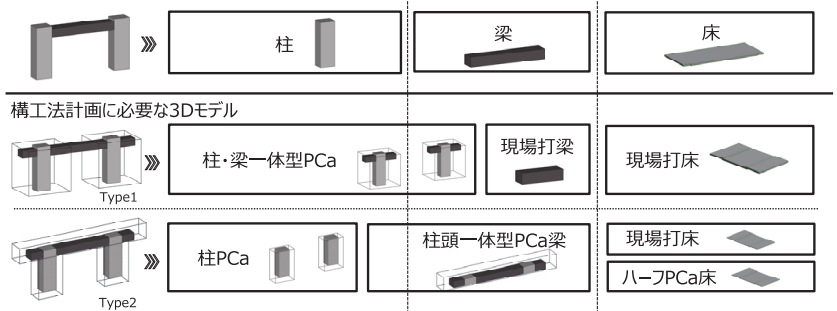


Fig. 1 設計段階と施工段階のBIMモデルの違い

Difference between BIM model for design phase and pre-construction phase

されたオブジェクトクラスによる単位で数量積算がされ、施工中の工程に現れる部材を正確に数量積算する条件を満たさない。鉄筋コンクリートの柱梁による門型のフレームを例にするとFig. 1で示すように、BIMソフトウェアでは柱、梁、床でモデルを定義するが、施工段階では柱・梁一体型PCa構工法及び現場打床の場合（Type 1）や、柱頭一体PCa梁構工法及びハーフPCa床の場合（Type 2）など多種多様に分割される。すなわち施工段階でBIMモデルを用いた数量積算を行い、施工計画を立案するためには、これに応じたオブジェクトクラスの再定義が必要となる。

一方、施工計画段階で施工中の部品の3Dモデルをその都度修正し直して、施工計画を比較検討することはモデリングの労力がかかり非現実的であるとも考えられる。そのため次節では単一の3Dモデルから複数の部品の状態で完成形のモデルを分割、結合する手法を提案する。

*1 技術研究所 新生産システム部 研究主任 博士（工学） Associate Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

4.2 部材分割手法
Division of Building Components

部材分割や工区分割は3Dモデルをブーリアン演算という和と差と積の集合演算による手法により分割や合成を行う。建物のBIMモデル同士を合成するのではなく、BIMモデルと施工計画に必要となる仮想領域モデルの和の集合演算で、BIMオブジェクトを分割・再定義を行う。仮想領域とは、施工計画者が自由に定義できる部分分割の領域である。本稿の施工シミュレーションにより採用される構工法（部材分割）に関して、設計者の作成したBIMモデルをFig. 2に示す通り在来工法と複合化工法の二種類の部材分割を行った。在来工法では柱梁に関して1つのPCa柱に対して1つのPCa梁、梁の接合は鉄筋の配筋と型枠によるものとして、部分的にコンクリート現場打ちする工法を採用した。また床に関してはデッキプレートに鉄筋を配筋しコンクリートを打設する工法を選択する。複合化工法の施工シミュレーションでは2本のPCa柱に対して、1本のPCa梁、梁の接合はグラウト注入で行う。また床に関してはS小梁と一体となったハーフPCa床の部品を工場製作し、鉄筋の配筋は上筋のみで床の上半分を現場打ちコンクリートで行う工法を選択した。

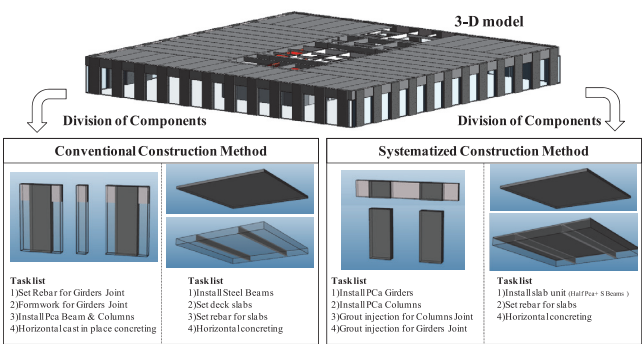


Fig. 2 構工法計画毎の部材分割例
Division of Building Components

4.3 シミュレーションの前提条件
Pre-Condition of Construction Simulation

シミュレーション対象の建物の仕様を下記に示す。構造形式はRCのオフィスビルであり、地上躯体工事を対象とした。フロア数は25フロアである。本シミュレーションは、各階の基準階で行われる工事を対象としたため、地下や基礎、屋上の工事をシミュレーションの対象外としている。また地上のセンターコアのRC壁はセルフクラッキングとし基準階での工事と無関係に行われることを前提としているため検討を行っていない。

シミュレーションのパラメータは①工期（工区分割）、②採用される構工法（部材分割）の二つである。①工期（工区分割）に関してはFig. 3に示す通り4工区分割と3工区分割に関する比較を行う。工区を分割し1日単位で工区を移動しながら工程を完了させていくものである。②採用される構工法（部材分割）は前節Fig. 2で示した通りである。に区分割を3工区分割と4工区分割、部品分割を在来工法と複合化工法の2種類作成したためトータルで4つの5Dシミュレーションモデルを検証した。3Dモデルに基づいて、数量を把握して、前述したIFMにて工程計画を行った。工程計画のIFMの内容をTable 1, 2に示す。施工シミュレーションの結果を以下に述べる。

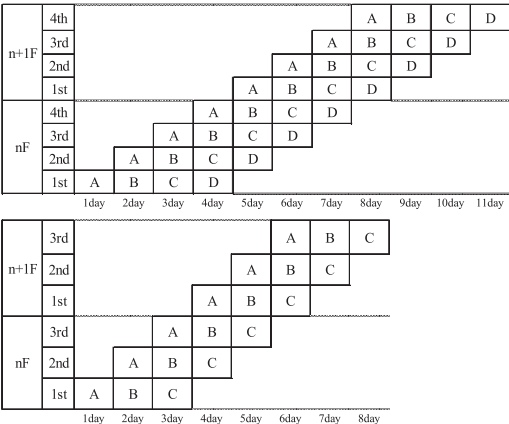


Fig. 3 4日タクト工程と3日タクト工程
1 floor completed in 4days and 3days

Table 1 シミュレーションno. 1, no. 2の前提条件
Specifications of Simulation no. 1 and no. 2

ID	Task (component & activity)	job category	work duration (hour)			Task Group		Preceding activity
			1-Site Division	4-Site Division	3-Site Division	4-Site Division	3-Site Division	
101	Install Steel Girders	erectors	2.00	0.50	0.67	A	A	115, 116
102	Install Steel Girders	Tower Crane	2.00	0.50	0.67	A	A	115, 116
103	Set rebar for PCa Girders	Rebar	8.00	2.00	2.67	A	A	101, 102, 115, 116
104	Formwork for Girders	formworker	8.00	2.00	2.67	A	A	103
105	Install Steel Beams	erectors	7.60	1.90	2.53	B	B	101, 102
106	Install Steel Beams	Tower Crane	7.60	1.90	2.53	B	B	101, 102
107	Install Steel stairs	erectors	0.40	0.10	0.13	B	B	105
108	Install Steel stairs	Tower Crane	0.40	0.10	0.13	B	B	106
109	Set deck slabs	Tower Crane	8.00	2.00	2.67	B	B	104, 105, 107, 108
110	Set deck slabs	Deck	8.00	2.00	2.67	B	B	104, 105, 107, 108
111	Lift rebar for slabs	Tower Crane	1.00	0.25	0.33	B	B	109, 110
112	Lift rebar for slabs	erectors	1.00	0.25	0.33	B	B	109, 110
113	Set rebar for slabs	Rebar	24.00	6.00	8.00	C	B	111, 112
114	Grout injection for PCa Columns	Grout	8.00	2.00	2.67	B	A	115, 116
115	Install Precast Concrete columns	erectors	7.00	1.75	2.33	A	A	
116	Install Precast Concrete columns	Tower Crane	7.00	1.75	2.33	A	A	
117	Horizontal concreting	concrete	8.00	2.00	2.67	D	C	113
118	Climbing unit scaffolds	erectors	3.00	0.75	1.00	D	C	117

Table 2 シミュレーションno. 3, no. 4の前提条件
Specifications of Simulation no. 3 and no. 4

ID	Task (component & activity)	job category	work duration (hour)			Task Group		Preceding activity
			1-Site Division	4-Site Division	3-Site Division	4-Site Division	3-Site Division	
201	Install Steel Girders	erectors	2.00	0.5	0.67	A	A	214,215
202	Install Steel Girders	Tower Crane	2.00	0.5	0.67	A	A	214,215
203	Install Precast Concrete Beams	erectors	6.00	1.5	2.00	A	A	201,202
204	Install Precast Concrete Beams	Tower Crane	6.00	1.5	2.00	A	A	201,202
205	Install Steel stairs	erectors	2.00	0.5	0.67	A	A	203,204
206	Install Steel stairs	Tower Crane	2.00	0.5	0.67	A	A	203,204
207	Grout injection for PCa Beams	Grout	8.00	2	2.67	B	B	203,204
208	Install Slab Units	erectors	8.00	2	2.67	B	A	205,206
209	Install Slab Units	Tower Crane	8.00	2	2.67	B	A	205,206
210	Grout injection for PCa Columns	Grout	2.00	0.5	0.67	A	B	214,215
211	Lift rebar for slabs	Tower Crane	2.00	0.5	0.67	B	B	208,209
212	Lift rebar for slabs	erectors	2.00	0.5	0.67	A	B	208,209
213	Set rebar for slabs	Rebar	24.00	6	8.00	C	B	211,212
214	Install Precast Concrete columns	erectors	7.00	1.75	2.33	A	A	
215	Install Precast Concrete columns	Tower Crane	7.00	1.75	2.33	A	A	
216	Horizontal concreting	concrete	8.00	2	2.67	D	C	210,213
217	Climbing unit scaffolds	erectors	3.00	0.75	1.00	D	C	210,216

4.4 BIMを用いた施工シミュレーション Scheduling Simulation Using BIM Tool

シミュレーションモデル no. 1のマルチアクティビティチャートをFig. 4に示す。このシミュレーションモデルの場合は各職種のトータルの作業時間が8時間を超えていないためクレーンの増加を行わなかった。タワークレーンの1日の作業時間は8時間以内であるためタワークレーンは1台のみ設置することで本シミュレーションモデルが成立した。工期は103日、延べ労働者数は2900人という結果となった。

シミュレーションモデルno. 2のマルチアクティビティチャートをFig. 4に示す。このシミュレーションモデルの場合は、鉄筋工の職種のトータルの作業時間が8時間を超えてしまうため、鉄筋工に関してはもう1班増員、尚且つ班の人数を増加させて作業時間の短縮を図った。またタワークレーンに関しても一日の稼働時間が8時間を超えてしまうためタワークレーンは2台設置することで本シミュレーションモデルが成立した。工期は77日、延べ労働者数は3300人という結果となった。

シミュレーションモデルno. 3のマルチアクティビティチャートをFig. 5に示す。このシミュレーションモデルの場合は各職種のトータルの作業時間が8時間を超えてはいないためクレーンの増加を行うことはなかった。タワークレーンの作業時間は8時間以内のため1台設置することで本シミュレーションモデルが成立した。工期は103日、延べ労働者数は1900人であった。延べ労働者数はno. 1に比べて減少するという結果であった。

シミュレーションモデルno. 4のマルチアクティビティチャートをFig. 5に示す。このシミュレーションモデルはno. 2と異なり、鉄筋工の職種のトータルの作業時間とタワークレーンの稼働時間が8時間を超えることはなかった。そのため1フロアを3日で施工するという高速施工の工程計画にも関わらずタワークレーンは1台のみの設置で本シミュレーションモデルが成立した。工期は77日、延べ労働者数は1425人という結果となった。

シミュレーションの結果から省人化を達成するためには複合化工法が有効であることが分かった。また1フロア3日タクトという高速施工を達成するためには在来工法ではクレーンが1台では不成立で仮設費が増加してしまうものの、複合化工法採用により、シミュレーションno. 4ではタワークレーンが1台でも成立するという結果が得られた。プロジェクトの評価軸で工期が優先される場合はno. 4が有効であり、労務資源が制約的な条件ではno. 3が有効であるとの結果が得られた。最終的に検討したシミュレーションモデルをFig. 6に示すようにアニメーション化を行い施工手順の確認を行った。

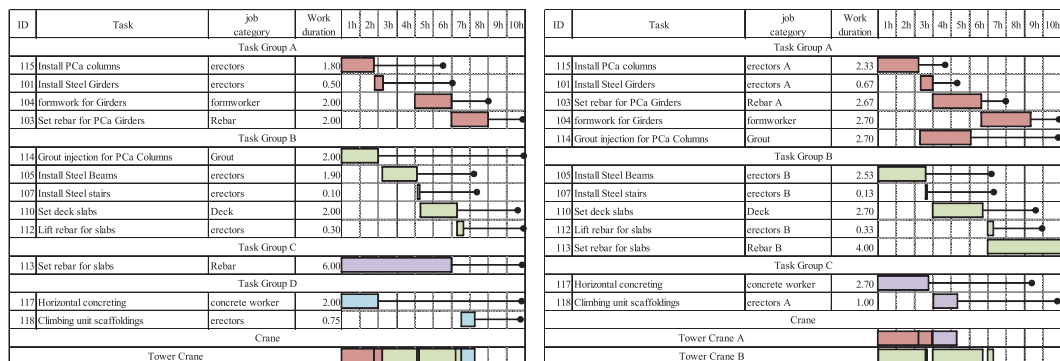


Fig. 4 シミュレーションno. 1, no. 2のマルチアクティビティチャート
The multi activity chart of simulation no. 1 and no. 2

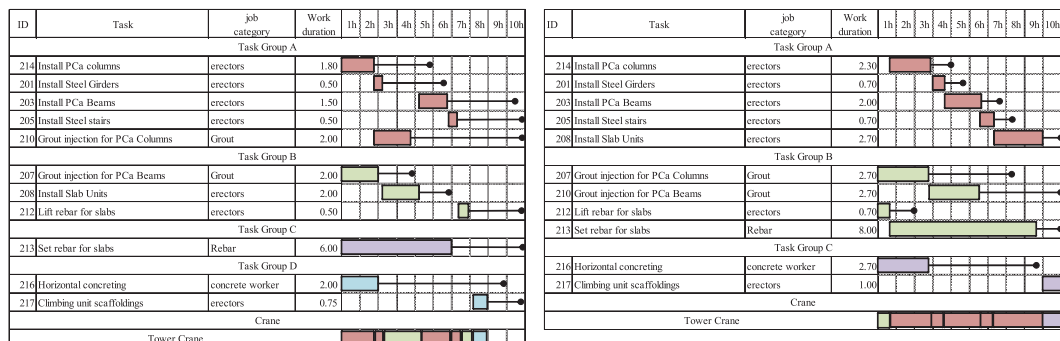


Fig. 5 シミュレーションno. 3, no. 4のマルチアクティビティチャート
The multi activity chart of simulation no. 3 and no. 4

Table 3 シミュレーション結果
Simulation results

	1 floor completed in 4 days The number of divisions of the location:4	1 floor completed in 3 days The number of divisions of the location:3	Team organization	
Delivery time	103days	77days	Job category	number of workers per team
Conventional Construction Method	Simulation model no.1 Number of Tower Crane : 1 Total number of workers : 2900 number of workers per day : 29	Simulation model no.2 Number of Tower Crane : 2 Total number of workers : 3300 number of workers per day : 44 *Annotation Erectors:2team Reber:1team 5workers/1team 10workers	erectors	5
			grout	4
			deck	5
			Rebar	5/10
			Form worker	5
			concrete worker	5
Systematized Construction Method	Simulation model no.3 number of Tower Crane : 1 Total number of workers : 1900 number of workers per day : 19	Simulation model no.4 number of Tower Crane : 1 Total number of workers : 1425 number of workers per day : 19	erectors	5
			grout	4
			Rebar	5
			concrete worker	5

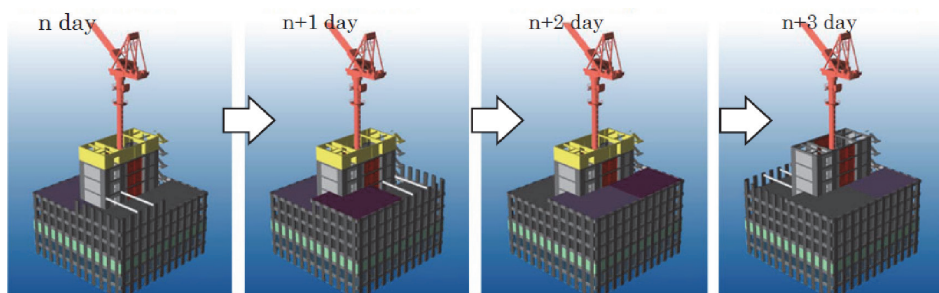


Fig. 6 シミュレーションno. 3の4Dシミュレーション
4D Animation of the simulation model no. 3

4.5 今後の展望

Prospects for the Future

本論で得られた知見は以下の3点に要約される。①設計者によって、或いはBIMソフトウェアの標準的なオブジェクトの定義による3Dモデルは施工計画者がそのまま計画のためにモデルを利用することはできないことを明らかにした。②それゆえ3Dモデルの再定義の手法が必要となり、本論ではブーリアン演算を援用した手法の提案を行い、それらを用いて複数の構工法計画を作成した。③工期（工区分割）と採用される構工法（部材分割）を変数とした4つのBIMを用いた構工法計画シミュレーションを行った。結果から工期制約的な条件ではシミュレーションno. 4が、労務資源制約的な条件ではシミュレーションno. 3が有効であるとの結果を得た。

今後は、施工シミュレーションに用いた施工計画の計画値と実際の施工での実績値と整合性を図るとともに、実績値の収集方法の自動化や実績値の施工計画へのフィードバック手法の開発・展開を図る予定である。

参考文献

- 1) Shuhei Tazawa et al. : "A research on Synchronized Multi-Site Scheduling Using 5-D Building Information Modelling Technique" Proceedings of the 2014 International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, ASCE, pp.737-744, 2014
- 2) Masao Ando et al. : "Synchronized Multi-Site Scheduling", Habitat International, Vol.14 No.2/3, 1990
- 3) 北野信吾他 : 「4次元構工法モデリング手法を用いた多工区分割同期化構工法計画」日本建築学会, 建築経済委員会, 第18回建築生産シンポジウム, 2002年7月
- 4) 志手一哉, 田澤周平 : 「高層集合住宅の内装工事における多工区同期化工程計画手法」竹中工務店, 竹中技術研究報告, No.68, pp.33-41, 2012年
- 5) 志手一哉他 : 「高層集合住宅の内装・設備工事における多工区同期化工程計画手法」日本建築学会計画系論文集, 第78巻 第683号, pp.193-201, 2013年1月
- 6) 小池新, 田澤周平他 : 「施工計画段階のBIMの利用方法に関する研究（その2）構工法計画段階における3Dモデルに関して」日本建築学会大会（近畿）学術講演梗概集（建築社会システム）, pp.139-140, 2014年9月

5 まとめ Conclusion

菅田 昌宏 Masahiro Sugata*1

これまで述べてきたように、BIMは単なる3次元の形状を表現するモデリング手法やツールではなく、設計から生産に及ぶ全てのフェーズにおける設計生産マネジメントを推進するための大系を下支えする基幹技術の一つとなりつつある。ここ数年来、BIMおよびBIMツールを核とした様々な解析やシミュレーションツール群が種々提供されるようになっており、これらを自在に扱うことのできる技術ノウハウを獲得してゆくことが、BIMの目的の一つであるプロセスの大幅な合理化を進める上で、何よりも重要といえる。以下では、このようなBIMツールを用いることで我々の未来がどのように発展してゆくかを俯瞰してみたい。

まず、BIMを活用することで、設計および生産情報のデジタル化ならびにそのデータ連動が飛躍的に進展すると考えることは想像に難くない。このようなデータ連動のアイデアは数十年前から検討がなされてきたものの、技術的な問題から実用に耐えうるツール整備がなされていなかったことによって、未だ実用的なものとなっていないのが現状である。このデータ連動が実現できれば、設計情報はスムーズに調達や部材製作などの生産計画情報へと連続しメーカーや協力企業をも含めて、手戻りが無く、大幅な合理化・省人化・短工期化・低コスト化が実現できるシステムの構築が可能になるだろう。さらに、上述したデータ連動は、近年におけるIoTの進展によってもさらに加速されるものと推測されるので、大いに期待できると考えられる。

一方、デジタル化の波は、デジタルファブリケーション・ロボット活用による更なる省人化を押し進める原動力となり、これらが人工知能・AIの発展をバックグラウンドとして、この数十年のうちに急速な展開をみせるものと推測される。例えば、ザハ・ハディッドに代表されるような曲線美の極みといったような施工的には困難な建築であっても、3Dプリンターに代表されるような、様々なデジタルファブリケーションの技術を活用することで、これまでよりも容易に建築可能になるであろう。さらにこのような施工技術革新と相まって、コンピューターを用いた設計、すなわちコンピューショナルデザインも開花期を迎え、これまでも増して、多様で個性にあふれた建築の創出が進むものと考ええる。

上記のような状況を考えると、もはやじっくり腰を据えてどうすべきかを考えるといった悠長な取り組みでは世の中から完全に遅れてしまうだろう。とにもかくにも、BIMおよびこれを下支えするAI、IoT、RTなどのデジタル化されたテクノロジーを取り入れて、どんどん実際に使って改良改善を重ね、私たちの手足となって活用できるツールに育ててゆくことが何よりも肝要であるといえる。

*1 技術研究所 新生産システム部長 博士（工学） General Manager, Advanced Construction System Dept., Research & Development Institute, Dr. Eng.