

建設プロジェクトにおけるボクセルモデルの導入効果に関する考察

前田建設工業(株) 正会員 ○川西 敦士, 長田 将吾
大阪経済大学 中村 健二
流通科学大学 寺口 敏生
法政大学 今井 龍一

1. はじめに

日本の建設業界では BIM (Building Information Modeling) と CIM (Construction Information Modeling) が鋭意推進されている。加速化した一端は、国土交通省が令和 2 年の第 3 回 BIM/CIM 推進委員会で、運用に向けた全体ロードマップ(案)¹⁾を示され、令和 5 年 4 月には直轄の業務・工事で BIM/CIM の原則適用²⁾が開始されたことが挙げられる。BIM は主に建築分野で、設計から施工、維持管理に至るまで、プロジェクトの初期段階で課題を特定し、解決するフロントローディングの進展に貢献しており、プロジェクトの効率化の兆しが見え始めている。その一方で、主に土木分野の CIM は、フロントローディングの進展が十分とは言い難い状況にある。国土交通省等の政府機関は、この実情に対応するためのガイドラインや政策を策定しているが、土木特有の複雑な地形条件等による不確実性を設計変更で吸収する文化が定着している。令和 6 年 4 月の日本建設業連合会の資料³⁾によれば、発注工事全体の 8 割が設計変更を行い、その額は当初契約額の 1.5 倍にも達する状況である。このことから、建設プロジェクト管理の改善を図る余地があると言える。

この実情を改善するためには、設計段階で建設現場の熟練者と協同でシミュレーションを行い、仮説の精度を高めていく活動が重要である。そこで著者らは、情報の簡便かつ効率的な表現ができる、ボクセルモデルの適用可能性に着目した。本論文では、特に土工シミュレーションに焦点を当て、ボクセルモデルを活用したシステムの可能性を考察する。

土工シミュレーションは、施工計画の精度を向上させるために重要な役割を果たすが、現状では大規模な土工事において、熟練した現場経験者でなければ、建設機械の効率的な稼働と工程の最適化は困難である。その理由は、土工工事ならではの多様な要素が有機的に絡み合うため、経験に基づいた仮説を立て、CPA (Cost Per Action) の最適化を図りながら進めることが、現在の最適解となっているためである。この課題解決の一策として、本研究では、情報を簡便かつ効率的に表現する手法のボクセルモデルを用いて、CIM のフロントローディングの遅れを補完ができないかを考察する。

2. 現在の土工シミュレーション技術の動向と課題

(1) 現在の技術動向

日本における土工シミュレーションの代表的な技術として、コマツ社のスマートコンストラクションがあげられる。スマートコンストラクションは、BIM/CIM の 3 次元モデルと AI とを活用するクラウドベースのプラットフォームで、施工着手前の土工シミュレーションを革新した。ドローンで取得した現場の 3D 点群データをクラウド上のプラットフォームにアップロードし、BIM/CIM モデルと統合する。AI はこのデータを解析し、土量計算や機械配置の最適化、リスク予測を行って効率的な施工計画を立案する。従来の手動データ収集や分析を不要にし、プロジェクト全体の生産性、コスト効率および、安全性を大幅に向上させている。

(2) 土工シミュレーションの現状の課題

土工シミュレーションには多くの利点がある一方、現行の 3 次元モデルは ICT 施工への活用が前提のため、高精度なモデルを求めるケースが多く、現場関係者に強いる技術的要件が厳しくなる。しかし、施工前検討で必ずしも高精度な 3 次元モデルが必要なわけではなく、工事の用途によって目的物の形状をある程度の精度で

キーワード ボクセルモデル, 空間 ID, BIM/CIM, フロントローディング, 土工シミュレーション

連絡先 〒102-8151 東京都千代田区富士見 2-10-2 前田建設工業株式会社 TEL090-5194-1740

表現するだけで十分なケースも多い。つまり、用途に応じた3次元モデルの作成に関しては、まだ検討の余地が残されており、ボクセルモデルのような柔軟で効率的な表現手法の導入可能性があると考えられる。

ここで、高精度な3次元モデルのみを扱う運用によって顕在化している課題を2つ挙げる。

a) 不十分なフロントローディング

現行のBIM/CIMの適用は、主に施工フェーズで詳細な検討ができることを前提にしており、施工会社が3次元モデルを作成することが殆どである。通常、民間会社が案件を受注して、現場に配属した責任者が着手する最初の業務は、実行予算の作成である。実行予算の作成は企業の利益目標を明確にする他、株主への説明責任の側面もあることから、受注後〇日以内といった作成期限を設けていることも多い。時間に余裕がない中で、施工手順を頭の中で構築しながら原価の積上計算を行うこの段階において、施工会社が3次元モデルを作成して詳細な検討を行う時間を確保することは困難である。

実行予算作成後からは、本格的に工事開始の準備として施工計画を詳細に検討していくが、3次元モデルを作成する時間は工期に含まれていない。したがって、施工会社が3次元モデルを作成するのは施工中であり、可視化によって設計に不備があることに気づいた場合、それは全て設計変更検討項目に挙げられる。

実行予算を作成する現場の責任者（＝建設現場の熟練者）が求めているのは、細部まで精密に再現された高精度な3次元モデルではなく、頭の中で構築した仮説と簡単に照合できるような、ラフなものである。高精度なモデルよりも、シンプルで操作しやすいユーザインタフェースが重要となる。

b) 一意に判定するオープンデータ規格の選定

オープンデータ規格は、データの標準化と統合に不可欠である。現在、土木分野の規格として進んでいるのが、異なるソフトウェア間で建物やインフラのデータを共有・交換することを目的にしたIFC(Industry Foundation Classes)という標準規格である。しかし、今回の土工シミュレーションにおいては、ほぼ普遍的な土質材料を扱うシーンが多く、橋やトンネル、設備等のオブジェクト情報と紐づけることを目的としたIFC標準規格は、あまりに高付加価値規格で求められていない。

3. ボクセルモデルを活用した土工シミュレーションの構想

(1) 土工シミュレーションの課題

これまで示した課題を解決するには、設計段階のフロントローディングの進展、そして施工計画前段階で熟練の現場経験者が主導で共創できる手軽さと分かりやすさが重要である。具体的な課題を以下に示す。

a) 簡便なフロントローディングの実現

CIMのフロントローディングが十分に進展していない背景には、緻密な計画に膨大な工数がかかることが挙げられる。これを解決するため、ボクセルモデルを用いた簡便かつ迅速なフロントローディングを実現することを課題と捉える。

ボクセルモデルは、従来の3次元モデルに比べてデータが軽量であり、複雑な地形やインフラ設備を簡潔に表現することができる。例えば、ドローンの点群データを簡易なボクセルに変換し、それを元に土工シミュレーションを行うことで、短時間で施工計画の立案から工程の最適化が実現できる。ボクセルモデルが現場の多様な要素を統合的に管理し、施工前段階における意思決定の迅速化と効率化を実現する。

ただし、ICT施工を活用する場合は、起工測量によりBIM/CIMを更新して、正確な施工数量を算出することは必須である。

b) 用途最適を目指したデータ形式の柔軟さ

ボクセルモデルの特性として、必要なデータの粒度に分割された状態で管理されるため、広範なステークホルダーに適した形状で提供できることも大きなメリットである。例えば、大規模土工では1m³の立方体形状にしたり、中規模土工では50cm³の立方体形状にしたり等、より効率的な運用の実現が期待できる。

c) 一意に判定できる空間IDの活用

筆者らが注目したのが空間ID⁴⁾である。ボクセルモデルに一意の空間IDを割り当てることで、地理的座標

情報に加えて、静的・動的情報を付加することが可能である。空間 ID は、ドローン運航のナビゲーションや自動運転等の実現を加速させる三次元空間の標準規格として注目されている。建設プロジェクトの調査、設計、施工に対応した形状表現に加え、3次元空間の統一規格化を見据えたデータ管理および情報連携が期待される。

(2) システムの構想 (案)

著者らは、仮想空間において設計者、熟練の施工経験者、発注者らが一堂に会し、協同で施工シナリオを構築するシステムを想定する。システムの核心は、各関係者がボクセルモデルを操作しながら、プロジェクトの様々なシナリオを試行錯誤する中で最適計画を導き出す点にある。ボクセルモデルを活用した土工シミュレーションシステムの具体的な要件は、**図-1** のような5つの視点に基づいて考察する。

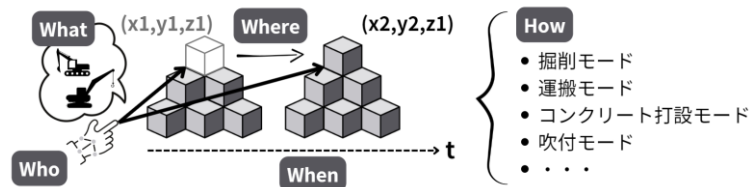


図-1 5つの視点から導かれるシステム構想概要

a) What の視点：ボクセルモデルの操作と付加情報の詳細

ボクセルモデルの操作は、重機、クレーン、運搬等の建設機械のアクション情報を付加する。各ボクセルには、マテリアル情報を付加することで、施工情報が具体的に反映される。これにより、施工現場での実際の動作をボクセルモデル上で忠実に再現できるようになる。例えば、地山を掘削する際、どのような重機を使用するかを選択して、掘削、積込等の情報を定義するイメージである。さらに、ボクセルに付加される情報には、建機別の作業限界数量、つまり、1日にどれだけの仕事ができるかという情報を含むことで、施工プロセスに合わせて定量データを計算することが可能になる。

ボクセルモデルはドローン測量データや簡易 3D データを変換する。マテリアル情報を付加した段階で、品質管理、出来形管理の頻度と対象物の大きさを含めて、適当なボクセルサイズに分解、結合する。

b) Where の視点：ボクセルモデルの移動と位置情報

ボクセルの移動や位置情報は、実際の施工挙動を反映するために視覚化される。これにより、シナリオの進捗状況や変更対応が容易になる。例えば、あるボクセルが掘削された後にどこに移動されるのか、またはどのエリアに新たな資材が配置されるのかを視覚的に確認することができる。これにより、誰がどのような意思決定をしたか、情報を整理しながら検討することができるため、有機的な意思決定を促進する。

c) When の視点：操作時間の自動計算とシミュレーション反映

各アクションに要する時間は自動で計算され、その結果がシミュレーション結果に反映される。これにより、施工計画の精度が向上し、プロジェクト全体のスケジュール管理が容易になる。例えば、重機が特定の量の地山を掘削するのに必要な時間が計算され、シミュレーション結果に組み込まれる。計画したシナリオどおりに施工可能かを事前評価し、必要に応じて計画を見直す想定である。

d) Who の視点：操作履歴の管理とシナリオ作成者の明確化

アクション履歴をシステム上で管理させることで、各操作者の履歴とパフォーマンスを明確化する。例えば、特定のボクセルに対する操作がいつ、誰によって行われたのかが記録されるため、履歴を使った分析と改善が期待できる。課題発見に資する気づきから、対策検討までのプロセスが迅速化する。

e) How の視点：操作モードの設定と施工プロセスの再現

システムでは、各工種に応じた操作モードが設定され、実際の施工プロセスが忠実に再現される。例えば、掘削、運搬、コンクリート打設および、吹付といった異なる工種ごとに最適な操作モードが提供され、各プロセスがボクセルに情報を付加しやすくする。施工の各段階で最適な方法を選択し、現場での効率的な作業が可能となる。また、これにより、施工中に発生し得る課題やリスクを事前にシミュレーションすることで、リス

ク管理も強化される。

(3) データアーキテクチャ（案）

これまでのシステム構想を構築するために必要なデータアーキテクチャ（案）の一覧を表-1に示す。対象は、ボクセル本体の情報、ボクセル本体の情報を書き換える操作ツール、操作結果の予測やフィードバックを繰り返しながら学習するデータエンジンの大きく3つの要素からなる。

表-1 データアーキテクチャの一覧表

対象	要素	説明
ボクセル本体	位置情報	各ボクセルの空間 ID と地理的座標(X,Y,Z)を定義
ボクセル本体	マテリアル情報	土質や地質などの材料特性情報を記録する
ボクセル本体	工種情報	掘削、舗装、埋戻し、盛土などの工種情報を記録する
ボクセル本体	状態フラグ	未着手、施工ステップ段階、施工済みを示すフラグ
ボクセル本体	履歴情報	日時、操作者、操作内容のログを管理する
操作ツール	操作 IF	ボクセルの移動、削除、追加を行う AR インターフェース
操作ツール	操作ツール	重機、クレーン、運搬車などの建設機械と、各ボクセルに対する掘削、運搬などの具体的アクションを設定するツールセット
データエンジン	AI エンジン	ボクセルの操作結果の予測、改善策をリアルタイムで提案するアルゴリズム。また、操作結果のフィードバックを提供する

4. 期待される効果

本章では、構想したシステムの実装によって期待される発現効果を考察する。

(1) 施工計画の精度向上と効率化

ボクセルモデルにより、複雑な地形や構造物の情報が簡便にデジタル化され、フロントローディングが容易になる。したがって、設計段階でのシミュレーションが可能となり、設計変更リスクが低減される。また、リアルタイムのフィードバック機能があるため、作業の効率化とリスク管理が向上する。

(2) データアクセスの平等化とオープンイノベーションの促進

空間 ID を活用したデータ管理により、異なるステークホルダー間での情報共有が容易になることで、業界全体でのオープンデータの活用が進む。その結果、利己的な競争優位が目的のデータビジネスが減少し、中小企業を含めた多様な企業によるイノベーションの創出が期待できる。

(3) 意思決定の迅速化と透明性の向上

ステークホルダー全体での意思決定が迅速かつ透明性をもって行われるようになることで、施工に関するノウハウを社会全体で形式知化することができるようになる。

5. おわりに

本論文では、ボクセルモデルを活用した土工シミュレーションシステムの適用可能性を考察した。本稿で構想したシステムが実装されると、空間 ID の利用を通じたフロントローディングを実現し、法人（個人）最適を前提にした社会課題の解決に、ボクセルモデルが寄与する可能性がある。

今後の展開として、維持管理データベース（DB）との連携が重要であり、そのためのデータ粒度やアーキテクチャの設計・開発も必要である。さらに、構想を実現するには、法人（個人）最適の実現に向けた社会全体での意識改革と具体的な実装計画の策定が求められる。こうした取り組みを通じて、業界全体の意識改革を進めつつ、新たなイノベーションを創出することで、より持続可能な社会インフラの構築に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省、令和2年度の主な取組について、第3回 BIM/CIM 推進委員会資料3, pp.1, R2.2.5
- 2) 国土交通省、令和5年度 BIM/CIM 原則適用について、第9回 BIM/CIM 推進委員会資料1, pp.3, R5.1.19
- 3) (一社)日本建設業連合会、適切な設計変更の確実な履行に向けて、pp.8, R6.4.3
- 4) 経済産業省/デジタルアーキテクチャ・デザインセンター、3次元空間情報基盤アーキテクチャ設計報告書、pp.12~14, 2022.7