

土木学会

土木情報学委員会

三次元モデルを活用した建設生産性向上

研究小委員会（第二期）

活動報告書

令和7年6月

三次元モデルを活用した建設生産性向上研究所員会（第二期）

活動報告書

< 目 次 >

| | |
|--|--------------|
| 1. 本小委員会の目的 | |
| 1.1 活動目的 | 1 - 1 |
| 1.2 活動期間 | 1 - 1 |
| 1.3 メンバー | 1 - 2 |
| 2. 第一期の活動概要 | 2 - 1 |
| 3. WG1 | |
| 3.1 活動概要 | 3 - 1 |
| 3.2 調査 | 3 - 3 |
| 3.3 設計 | 3 - 14 |
| 3.4 施工 | 3 - 30 |
| 3.5 維持管理 | 3 - 41 |
| 4. WG2 | |
| 4.1 活動の背景と概要 | 4 - 1 |
| 4.2 Theme01_プレキャストはなぜ 採用されにくいのか？ | 4 - 3 |
| 4.3 Theme02_ロボット施工のために | 4 - 6 |
| 4.4 Theme03_レゴ実験 Season1（レゴブロックを用いた梁） | 4 - 10 |
| 4.5 Theme04_レゴ実験 Season2（3D プリント部材を用いた実験） | 4 - 15 |
| 4.6 おわりに | 4 - 20 |
| 5. まとめと将来展望 | 5 - 1 |

■ 対外発表論文 資料-1

1. 論文名：建設事業における生産性向上に向けて

ジャーナル名：令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会

発表年：2021/9 資料-2

2. 論文名：取替可能なプレキャスト部材の特性について（実験結果）

ジャーナル名：令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会

発表年：2021/9 資料-6

3. 論文名：取替可能なプレキャスト部材の特性について（FEM解析）

ジャーナル名：令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会

発表年：2021/9 資料-10

4. 論文名：BIM/CIMでの設計から施工への情報伝達時の課題と解決策の方向性

ジャーナル名：土木情報学シンポジウム講演集

発表年：2022 資料-14

5. 論文名：三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会報告

ジャーナル名：土木情報学シンポジウム講演集

発表年：2022 資料-19

6. 論文名：建設プロセスにおけるBIM/CIMデータ活用展望と課題

ジャーナル名：令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会

発表年：2022 資料-24

7. 論文名：バックキャスト的思考によるプレキャスト部材の接合構造に関する検討

ジャーナル名：令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会

発表年：2022 資料-27

8. 論文名：三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会報告
ジャーナル名：土木情報学シンポジウム講演集
発表年：2023 資料-30

9. 論文名：維持管理における BIM/CIM データ活用について
ジャーナル名：令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会
発表年：2023 資料-35

10. 論文名：プラスチック製ブロックを用いたプレキャスト構造の検討（その 1）
ジャーナル名：令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会
発表年：2023 資料-39

11. 論文名：プラスチック製ブロックを用いたプレキャスト構造の検討（その 2）
ジャーナル名：令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会
発表年：2023 資料-43

12. 論文名：BIM/CIM データで自動建設機械を運用する際の課題と解決策
ジャーナル名：土木情報学シンポジウム講演集
発表年：2024 資料-47

13. 論文名：三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会報告
ジャーナル名：土木情報学シンポジウム講演集
発表年：2024 資料-52

14. 論文名：自動建設機械で BIM/CIM データを活用する際の課題と解決策
ジャーナル名：令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会
発表年：2024 資料-57

15. 論文名：自動建設機械での施工に適したプレキャスト構造に関する実験的検討

ジャーナル名：令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会

発表年：2024 資料-60

16. 論文名：建設生産性向上のための3次元モデル活用のありかた

ジャーナル名：令和7年度土木学会全国大会第80回年次学術講演会

発表年：2025 資料-64

17. 論文名：自動建設機械での施工に適したプレキャスト構造に関する実験的検討（その二）

ジャーナル名：令和7年度土木学会全国大会第80回年次学術講演会

発表年：2025 資料-67

1. 本小委員会の目的

1.1 活動目的

我が国の建設業界は少子高齢化に起因する労働力不足を解消し、生産性向上を図る手段として BIM/CIM を積極的に導入してきた。その結果、土工を対象として一定の効果が確認されている。その一方で、BIM/CIM 導入目的である生産性向上が建設プロセス(設計・施工・維持管理)の各段階での課題(生産性が上がっていない)場面も散見されている。本研究小委員会では現状における建設プロセスの課題と解決策の方向性についてそのあり方を明らかにする事を木手として研究を実施した。

1.2 活動期間

活動期間:2021.7~2025.6(2か年)

活動は WG1、WG2 の 2 つのワーキングと小委員会の分けて活動を実施した。各ワーキングは原則 2 ヶ月に 1 回実施し、小委員会は年 2 回実施した。

1.3 メンバー

以下に小委員会の活動メンバーを記す。

表 1.3-1 小委員会メンバー

| 番号 | 職位 | WG | 氏名 | 会社名 | 活動期間 |
|----|-------------|----|--------|-------------------------|----------------|
| 1 | 小委員長(兼WG主査) | 両方 | 中嶋 道雄 | 若築建設株式会社 | 2021/7～2025/6 |
| 2 | 副小委員長 | 両方 | 渡邊 武志 | パシフィックコンサルタンツ株式会社 | 2021/7～2025/6 |
| 3 | 副小委員長 | 両方 | 柳川 正和 | 清水建設株式会社 | 2021/7～2025/6 |
| 4 | 委員(WG主査) | 2 | 井口 重信 | Calta株式会社 | 2021/7～2025/6 |
| 5 | 委員(幹事) | 1 | 矢尾板 啓 | 株式会社パスコ | 2021/7～2025/6 |
| 6 | 委員 | 1 | 古川 裕也 | 日本工営株式会社 | 2021/7～2025/6 |
| 7 | 委員 | 2 | 大瀧 諭 | 日本工営株式会社 | 2021/7～2025/6 |
| 8 | 委員 | 1 | 浮田 真樹 | ライカジオシステムズ株式会社 | 2021/7～2023/12 |
| 9 | 委員 | 1 | 井波 丈明 | 株式会社長大 | 2021/7～2025/6 |
| 10 | 委員 | 1 | 徳永 高志 | 株式会社フジタ | 2021/7～2023/12 |
| 11 | 委員 | 1 | 黒澤 祐哉 | 株式会社フジタ | 2023/12～2025/3 |
| 12 | 委員 | 両方 | 石濱 裕幸 | 株式会社安藤・間 | 2021/7～2025/6 |
| 13 | 委員 | 2 | 松下 裕昭 | 丸栄コンクリート工業株式会社 | 2021/7～2025/6 |
| 14 | 委員 | 2 | 阪口 裕紀 | 丸栄コンクリート工業株式会社 | 2021/7～2025/6 |
| 15 | 委員 | 2 | 石井 喬之 | 大成建設株式会社 | 2021/7～2025/6 |
| 16 | 委員 | 2 | 高野 和成 | パシフィックコンサルタンツ株式会社 | 2021/7～2025/6 |
| 17 | 委員 | 両方 | 橋本 紗百合 | パシフィックコンサルタンツ株式会社 | 2021/7～2025/6 |
| 18 | 委員 | 2 | 中井 裕司 | 前田工繊株式会社 | 2021/7～2025/6 |
| 19 | 委員 | 2 | 牧野 航大 | 前田工繊株式会社 | 2021/7～2022/1 |
| 20 | 委員 | 2 | 大久保 誠 | 前田工繊株式会社 | 2022/1～2025/6 |
| 21 | 委員 | 1 | 鈴木 義章 | 東日本高速道路株式会社 | 2021/7～2023/9 |
| 22 | 委員 | 1 | 関 茂和 | 東日本高速道路株式会社 | 2023/9～2025/6 |
| 23 | 委員 | 1 | 石田 篤徳 | 中日本高速道路株式会社 | 2021/7～2025/6 |
| 24 | 委員 | 2 | 水上 夏子 | ヒロセ補強土株式会社 | 2021/7～2025/1 |
| 25 | 委員 | 1 | 前田 庫利 | 東洋建設株式会社 | 2021/7～2025/6 |
| 26 | 委員 | 1 | 新居 和展 | サイテックジャパン株式会社 | 2021/7～2025/6 |
| 27 | 委員(監査役兼任) | 1 | 辰巳 大介 | 国土交通省国土技術政策総合研究所 | 2021/7～2025/6 |
| 28 | 委員 | | 志村 直紀 | ヒロセ補強土株式会社 | 2021/7～2023/12 |
| 29 | 委員 | 1 | 長村 徹 | JIPテクノサイエンス株式会社 | 2021/7～2025/6 |
| 30 | 委員 | 1 | 高見澤 拓也 | 東日本旅客鉄道株式会社 | 2021/7～2022/7 |
| 31 | 委員 | 1 | 石田 将貴 | 東日本旅客鉄道株式会社 | 2022/7～2025/6 |
| 32 | 委員 | 1 | 松本 裕樹 | Calta株式会社 | 2024/2～2025/6 |
| 33 | 委員 | 1 | 岡崎 春介 | 株式会社竹中土木 | 2024/2～2025/6 |
| 34 | 委員 | 2 | 三吉 憲一 | 株式会社竹中土木 | 2024/2～2025/6 |
| 35 | 委員 | 1 | 宮内 芳維 | ONESTRUCTURE株式会社 | 2024/2～2025/6 |
| 36 | 委員 | 1 | 阿部 喜生 | 株式会社不動テトラ | 2024/2～2025/6 |
| 37 | 委員 | 2 | 岡 裕二 | 株式会社キャスト・アール | 2024/2～2025/6 |
| 38 | 委員 | 1 | 澤井 崇 | ジオ・サーチ株式会社 | 2024/2～2025/6 |
| 39 | 委員 | 1 | 池田 仲裕 | 東急建設株式会社 | 2024/2～2025/6 |
| 1 | オブザーバー | 2 | 石田 仁 | 五洋建設株式会社 | |
| 2 | オブザーバー | 1 | 谷野 知伸 | 中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京株式会社 | |
| 3 | オブザーバー | 1 | 宮澤 啓之 | 中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京株式会社 | |
| 4 | オブザーバー | 1 | 武内 雄司 | 中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京株式会社 | |
| 5 | オブザーバー | 1 | 浅田 一央 | 福井コンピュータ株式会社 | |
| 6 | オブザーバー | 1 | 宮谷 孝文 | 豊国工業株式会社 | |
| 7 | オブザーバー | 1 | 下見 広司 | 豊国工業株式会社 | |
| 8 | オブザーバー | 両方 | 竹田 宥一郎 | 東日本旅客鉄道株式会社 | |
| 9 | オブザーバー | 2 | 伊東 佑香 | 東日本旅客鉄道株式会社 | |
| 10 | オブザーバー | 1 | 飯島 悠介 | 首都高速道路株式会社 | |
| 11 | オブザーバー | 1 | 川添 英生 | ライト工業株式会社 | |
| 12 | アドバイザー | — | 岩波 光保 | 東京科学大学 | |
| 13 | オブザーバー(事務局) | 両方 | 杉山 健太郎 | パシフィックコンサルタンツ株式会社 | |

2. 第一期の活動概要

2.1 活動の背景・目的、検討事項

(1) 背景・目的

第一期（活動期間：2019.6～2021.5）では下記背景・目的のもと議論を重ねた。

【背景】

我が国の建設業界では少子高齢化に起因する労働力不足を解消し、生産性向上を図る手段として BIM/CIM を積極的に導入し、土工を対象として一定の効果が確認されている。

その一方で、BIM/CIM 導入目的である生産性向上が建設プロセス（設計・施工・維持管理）の各段階での課題（生産性が上がっていない）場面も散見されている。

【目的】

上記、背景を踏まえ本小委員会は現状における建設プロセスの課題と解決策の方向性を示すことを目的とする

(2) 検討事項

検討内容は下記9項目である。次頁から各検討項目について要旨を記載する。

- ① 設計・施工・維持管理の作業分析
- ② 省力化事例調査
- ③ BIM/CIM モデルを活用した 3D モデルの考察（ジョイント部）
- ④ PCa 製品を用いた構造物構築検討（3D-FEM）
- ⑤ PCa 製品を用いた構造物構築検討（実験）
- ⑥ 施工性の評価
- ⑦ 運用中の検討
- ⑧ LCC（ライフサイクルコスト）評価
- ⑨ ロボットによる施工検討、それに適した設計や環境の検討

2.2 設計・施工・維持管理の作業分析

(1) 目的

現状において BIM/CIM を導入しているにも関わらず、建設生産性向上が進まない要因を把握し、(BIM/CIM の導入)による改善化ポイントの把握を目的として実施

(2) 課題抽出

「新QC七つ道具」の「問題点系統図」を用いて抽出した課題は下記、5項目であった。

- ① 鉄筋干渉チェック後の配筋図修正に時間を要する
- ② 設計から施工へのデータ受け渡しができていない
- ③ 施工段階では設計内容の変更提案が出来ない
- ④ 労働力が不足している
- ⑤ 品質が低下している

(3) 解決策

上記、課題に対する解決策を下表のようにとりまとめた。

表 2.2-1 現状の課題と解決

| 項目 | 内容 | 解決策 |
|------------------------|---|---------------|
| 鉄筋干渉チェック後の配筋図修正に時間を要する | 配筋図作成⇒3Dモデル作成 ⇒干渉チェック⇒3Dモデル修正 ⇒配筋図修正のプロセス | メリハリをつけたモデル構築 |
| 設計から施工へのデータ受け渡しができていない | 3Dモデル(設計)がそのまま施工では使えないため、施工者は3Dモデルを再構築している | 新たな建設プロセスの導入 |
| 施工段階では設計内容の変更提案が困難である | 施工段階では施工者が提案できる事項が施工部分に限定されてしまう | |
| 労働力が不足している | 建設業界に従事する人口が減ってきている | プレキャスト化 |
| 品質が低下している | 技術伝承ができていない 職人(鉄筋・型枠)が不足している | |

(4) BIM/CIM 導入により見えてきたこと

建設事業の生産性向上目的とした BIM/CIM(3D モデル)導入であるが、導入により見えてきた課題を以下に示す。

表 2.2-2 BIM/CIM 導入によって見えてきた課題

| 段階 | 項目 | 内容 |
|---------|-----------|--|
| 調査 | 3D測定の品質 | ・資格化が必要 ・内容が判らなくても計測出来てしまう |
| 調査⇄設計 | 地盤情報 | データの標準化 ⇒現状はLandXML、IFCが標準。地質・土質モデルはオリジナルファイルとなっている |
| | 地形モデル | 堤防や道路盛土の層・法尻が明確なモデル地形モデル |
| 設計 | データの信頼性 | 例えば地下埋設・・・モデルは概略値であり試掘が必要とかの情報 |
| | 施工時留意事項 | 発注者・施工者に伝えたい事項 |
| 設計⇄施工 | 属性情報 | 設計思想がわかる資料 ex. ずらして良い鉄筋/ずらせない鉄筋 |
| | 部材のグルーピング | 前壁、外筋、法線直角方向等のグルーピングが必要 (1本ずつグルーピングしてあるとミルシートの属性情報を1本ずつ付ける必要がある) エプロン舗装は全工区1枚となっていると、目地毎に分割している。 |
| 施工 | — | — |
| 施工・維持管理 | 必要情報の整理 | 維持管理段階に必要な情報を整理することで、施工段階でのモデルの作り方が決まってくる。 |
| 維持管理 | 点検結束 | 建築限界測定、コンクリート剥離、Uドブラー、衝撃振動試験 |

2.3 省力化事例調査

主として施工段階で採用されている省力化の事例（4事例：Cb_p プレキャスト桁、C_{tp} プレキャスト桁、ARMROLLER 等）について工事報告書の確認や文献調査を実施した。

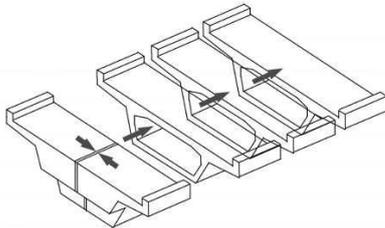


図 2.3-1 PC 桁ブロック割・組立イメージ

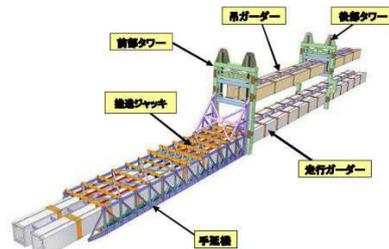


図 2.3-2 移動式架設機の概要

2.4 BIM/CIMモデルを活用した 3D モデルの考察(ジョイント部)

仕口・継手と言った構造物における部材間の接合部における接合方法には様々な工法が現存する。今回の「取り換え可能なジョイント部」を考案するにあたり、既存技術（3事例）を整理した。

■ 実例 1 鋼管杭・鋼管矢板継手ハイメカネジ ■ 実例 2 PC スラブ継手 (SLJ スラブ)

ハイメカネジ®の概要

ハイメカネジは、鋼管杭・鋼管矢板の現場接合に用いるねじ式の機械式継手です。PIN継手、BOX継手、逆回転防止ピンにより構成され、鋼管に対して同等以上の耐力が得られます。

ハイメカネジの特長は「優れた施工性」と「幅広い適用範囲」です。鋼管の接合法として実績があり、信頼性の高いねじ技術をベースにしているため、「がたつきが少なくしっかり締結できる」のも利点の一つです。

ハイメカネジは1998年に開発・実用化されて以来、施工現場における接合作業の省力化・品質向上、工期短縮などが高く評価され、多分野にわたりご採用頂いております。

図 2.4 ハイメカネジ

ループ継手を有するPCスラブ

SLJスラブ

【一般的なループ継手】

【エンドバンド継手(SLJスラブ)】

図 2.4 SLJ スラブ

■ 実例3 PJ 工法分割接合型PCBOX

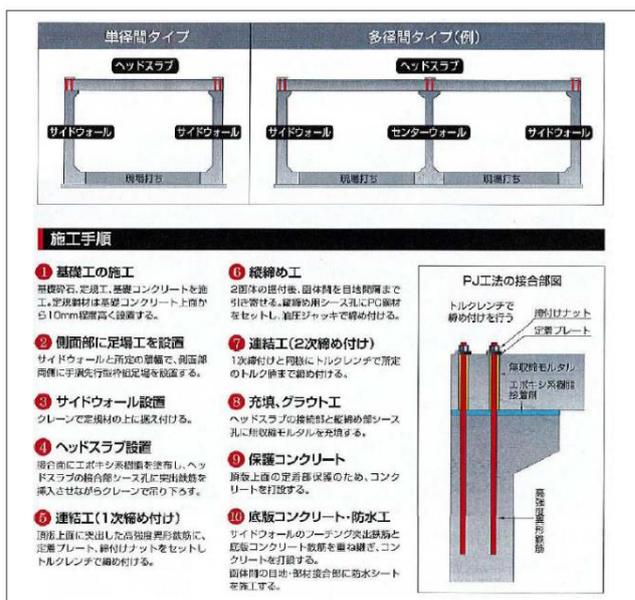


図 2.4 工法分割接合型 PCBOX

事例として記載した3例は基本的に施工後のメンテナンス等は考慮されていない。

今回の命題は、外力が作用した際に終局を迎える部位をあらかじめ設計時に限定し、実際にその部位が終局を迎えた場合は、取り換える事を想定している。

2.5 PCa を用いたラーメン構造に関する試算

PCa を用いた構造を検討する際、PCa 同士の接合方法が大きな課題として考えられる。本検討はこの課題に対して、現実的な規模の構造物で各種パラメーターを設け、既存の場所打ちコンクリート構造との比較を行った。

検討の結果、PCa 部材と連結部材の剛性は同等とすることが可能と考えられる。(連結部材は不要と考えられる) 連結部材端部の条件をピン接合とするとPCa 部材と連結部材の間での回転が自由となることで変形量が無限大となり、現実的ではない。

一方、連結部材端部の条件を固定に近づけることで、回転が拘束され現実的な変形量に近づく。しかし、実際の連結部材端部の条件は複雑で、実験等を通じて定量的に算出する必要がある。鉛直方向の部材は、曲げモーメント、せん断力を適切に伝達する必要があるため、水平力に対して部材間を絶縁(ピン接合)することは出来ない。現場で組み立てる際はピン接合であっても最終的には固定度を上げる必要がある事が確認出来た。

例えば、鉛直方向に組み立て後、外側から何らかの方法で固定度を上げる手段を講じることも考えられる。

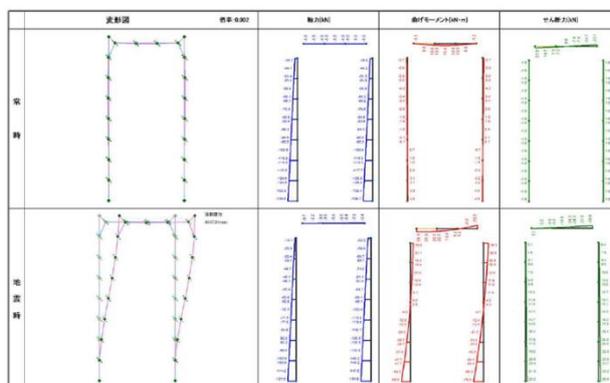


図 2.5 検討結果(例)

2.6 再利用可能な PCa 桁の考案

(1) 基本形状

基本的な考え方は、PCa 部材をレゴブロックの様に組み合わせる事で、組み立て、取り外しが可能とするような形状を考案した。以下にその概念図を示す。基本直線部分をベースにそれらをつなぎ合わせる事ができる土台パーツやコーナーパーツを組み合わせ、ラーメン形状や梁、柱の形状を構成可能なようにした。部材の大きさは 10t トラックで輸送が可能なように 1.0m×1.0m×4.0m とし、その重量は 9.8t 程度である。

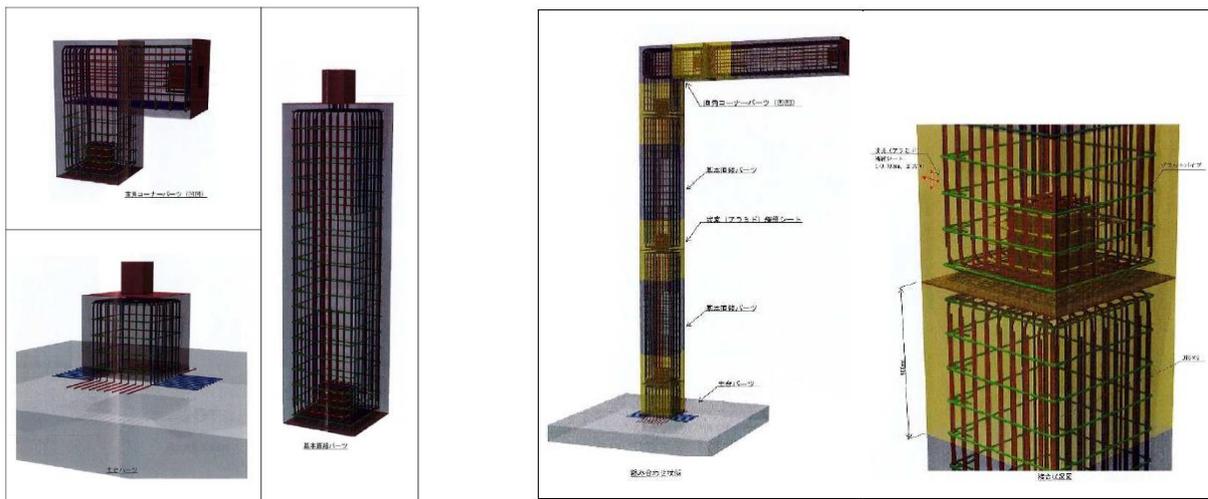


図 2.6-1 考案したプレキャスト部材の形状

(2) 接合部の考察

施工現場で PCa 部材と PCa 部材を連結する方法として、接合部付近を炭素繊維シートで被う事で曲げモーメント、せん断力を適切に伝達させることができると考え、以下に示す方法で部材をくみ上げる事を想定した。結合部には施工性を考慮して凹凸を設ける事とした。

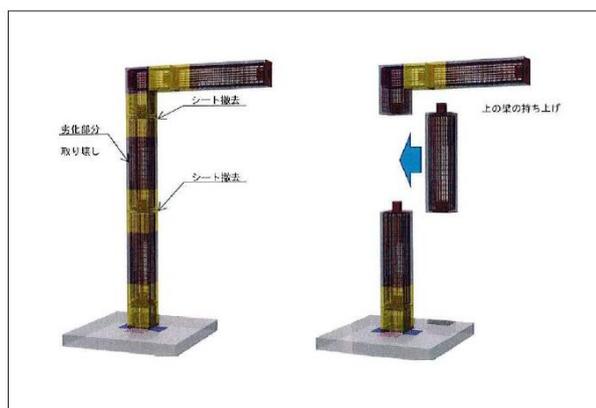


図 2.6-2 プレキャスト部材の接合方法

(3) 施工手順と取り換え方法

一般的な設置手順を図 2.6.3 に示す。PCa 部材同士を差し込み、隙間をグラウトで充填する事によりがたつきを無くし、その後シートで巻くと完成である。コンクリートの現場打設が無いので連続して施工が可能で、コンクリート養生期間も不要である。

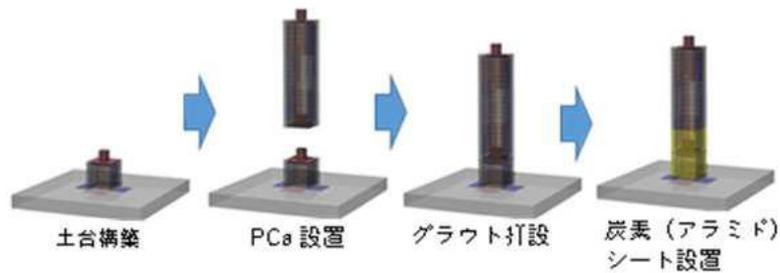


図 2.6-3 プレキャスト部材の施工手順図

劣化した部材の取り換え手順を図 2.6.4 に示す。取り換えパーツに隣接するシートをスクレイパー等で撤去し、対象パーツを取り外す。取り外しが難しい場合は取り壊しを行う。その後上部パーツをジャッキで持ち上げ、その後は図 2.6.3 の手順で新しいパーツを設置する。

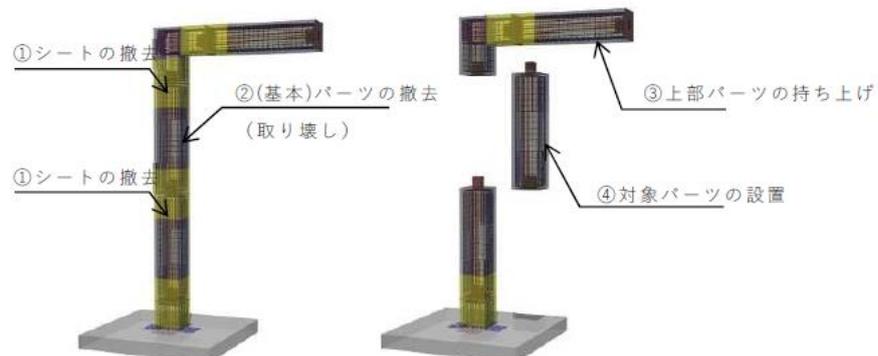


図 2.6-4 プレキャスト部材の施工手順図

2.7 PCa 製品を用いた構造物構築検討(解析)

(1) 検討概要

載荷試験の再現を目的に 3D-FEM 解析を実施した。Pca 試験体については、補強を行わなかった場合を想定した「Pca 補強なし」と、補強繊維がコンクリートに完全に付着した場合を想定した「Pca 補強あり」をベースに、「Pca 補強なし」については接合部の鉄筋を増やした場合や、「Pca 補強あり」については補強繊維のコンクリートとの付着力を落とした場合などについても解析を実施した

補強繊維とコンクリートの付着の表現、荷重-変位関係での剛性の違いなどの課題はまだあるが、3D-FEM 解析によって試験体の破壊過程を概ね再現できた。接合部の補強鉄筋を増やすことでの耐力向上などの結果も得られたことから、接合構造の工夫により合理的な構造が設計できると考える。

今後、解析の精度の向上と合理的な接合部の構造についての検討が必要である。

表 2.7-1 3D-FEM による検討ケース

| CASE | 内容 |
|------------|----------------------|
| Control | Control の再現 |
| Pca 補強なし | Pca の「補強なし」を再現 |
| Pca 補強なし-2 | 補強鉄筋を追加した場合 |
| Pca 補強あり | Pca の「補強あり(完全付着)」を再現 |
| Pca 補強あり-2 | 補強繊維の付着力を軽減した場合 |

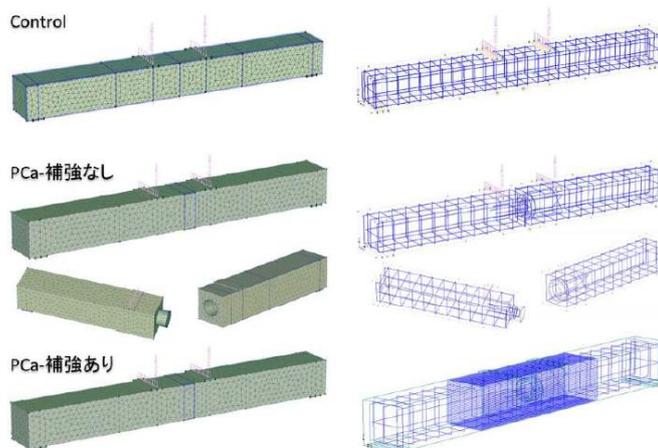


図 2.7-1 3D-FEM モデル

(2) PCa 補強なし

図 2.7.2 に「Pca 補強なし」の解析結果を示す。「Pca 補強なし」では、凹側の接合部の周方向補強鉄筋が降伏するとともに軸方向のひび割れが発生した。その後、軸方向のひび割れは増えるとともに下方に損傷範囲が拡大していった。

この解析結果より、接合部に配置された補強鉄筋を追加することで、最大荷重を増加させることが予想されるため、図 2.7.3 のように接合部の凸側、凹側の両者の補強鉄筋を追加した場合について解析を実施した。図 2.7.4 に解析結果を示す。30kN 時では、接合部の円周方向補強鉄筋のひずみが「Pca 補強なし」では 4252μ と降伏ひずみを超えているのに対し、補強鉄筋を追加した「Pca 補強なし-2」では 1117μ となり降伏には至っていない。「Pca 補強なし」で最大荷重に至った 51kN 時においても同様の傾向を示し、「Pca 補強なし-2」については「Pca 補強なし」の 30kN 時とほぼ同程度の損傷程度で収まっている。このことから、接合部の適切な補強により耐力向上が見込まれることが分かった。

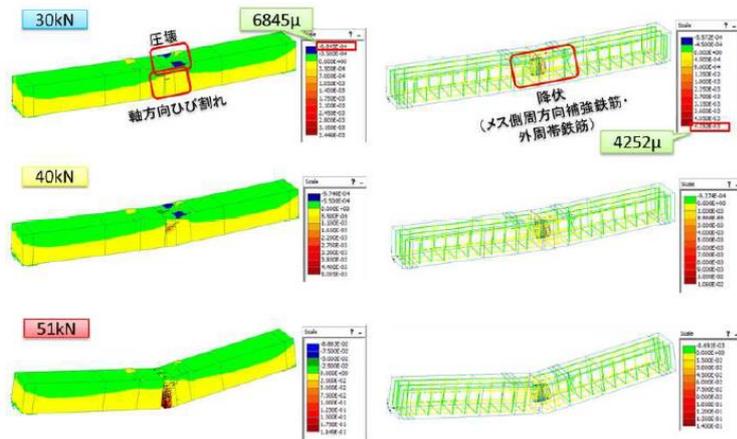


図 2.7-2 FEM 解析結果 (PC-a 補強なし)

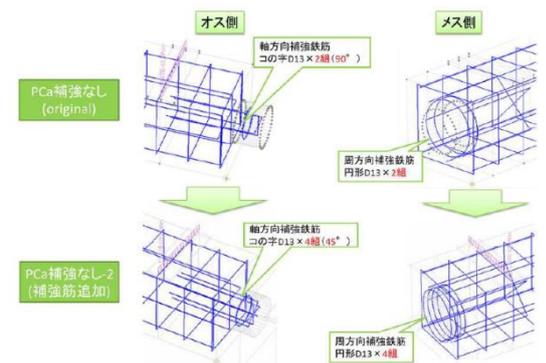


図 2.7-3 補強鉄筋イメージ

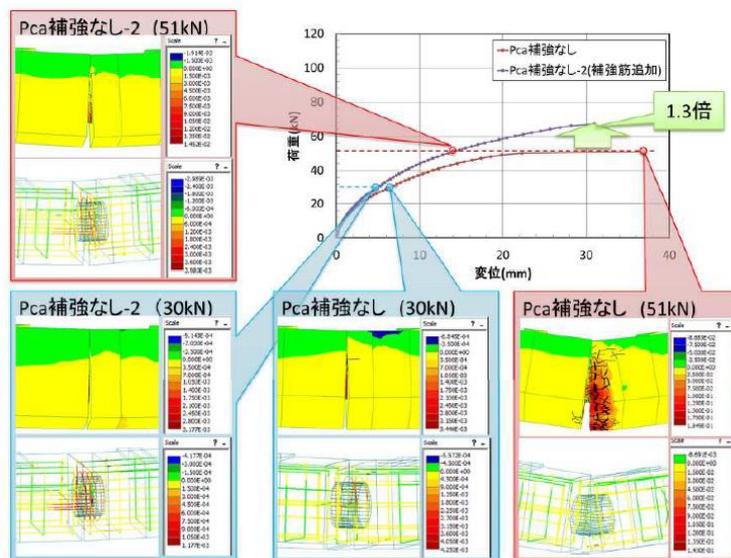


図 2.7-4 接合部に補強鉄筋を設けた場合

(3) PCa 補強あり

図 2.7.5 に「Pca 補強あり」の解析結果を示す。載荷とともに接合部の下縁側からのひび割れが徐々に増えていくがそれ以外の現象の変化はみられない。

「Pca 補強なし」のように接合部の梁軸方向に生じるひび割れや、補強鉄筋の降伏なども見られず、補強繊維の補強効果が現れている。載荷試験では補強繊維のひずみが約 9000 μ でコンクリートとの付着が離れ耐力低下を起こすが、本解析では完全に付着するモデルとしているためその傾向は再現できていない。

そこで、補強繊維とコンクリートの付着を一定程度落とした「Pca 補強なし-2」として、ATENA で提供されている CEB-FIB Model Code 1990 における鉄筋とコンクリートの付着モデルの適用を試みる。条件としては付着性状が良くない「poor」を設定した。なお、図 2.7.6 には「Control」等の解析結果と実験結果も合わせて示す。

完全付着から付着性状を落とすことで、剛性の低下がみられ、実験結果に近い状況とはなった。しかし完全な再現までは至っていないため、今後、検討をしていきたい。

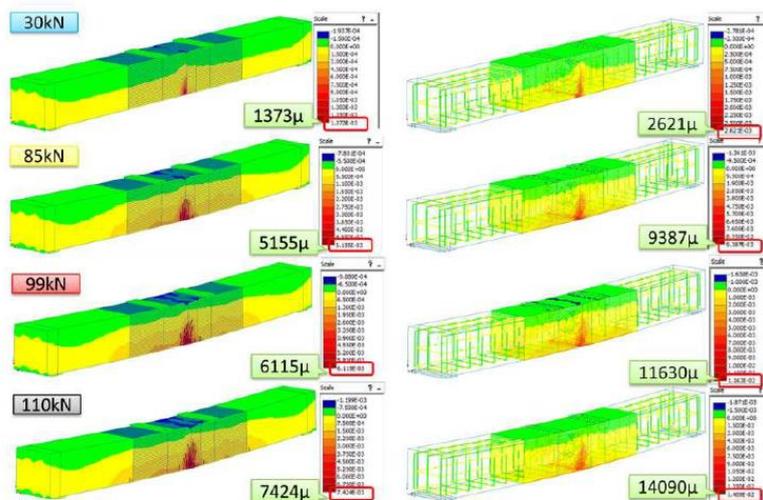


図 2.7-5 FEM 解析結果 (PC-a 補強あり)

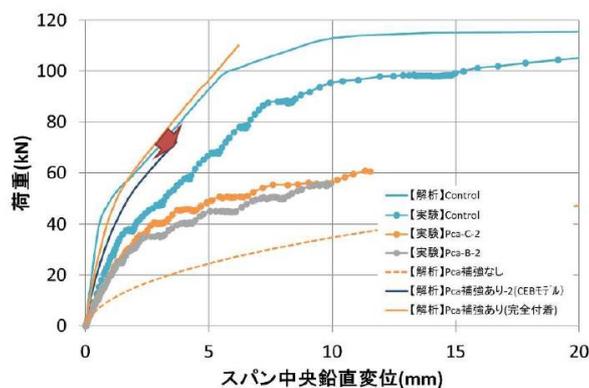


図 2.7-6 繊維補強の付着 (考慮せず) の場合

2.8 PCa 製品を用いた構造物構築検討(実験)

コンクリート試験体を作成し、載荷実験を行った。ジョイントを設けたものは、PCa-B、PCa-C どちらのタイプも破裂音と共に一気にシートが剥離し、ジョイント部が破壊した(写真 2.8.1 参照)。また、写真 2.8.2 を見るとコンクリート先行破壊を予想していた PCa-B はジョイントの雄部及び雌部で激しく破壊しているが、シート先行破壊の PCa-C では雄部の破壊が少ない。

最大耐力は Control に比べて PCa-B、C は同程度の約半分であった。PCa-B では最大力となる変位 10mm 程度まで、桁主筋、ジョイント主筋ひずみが直線的に増加して、曲応力がジョイント部まで伝達している。変位 8mm 程度からはスターラップひずみが増加しており、せん断応力が増加している事が分かる。一方 PCa-C では、変位 4mm までは曲げが直線状に増加しており、その後緩やかに維持されている。せん断に関しては変位 4mm から緩やかに増加していた。

ジョイント部の隙間の有無で、コンクリート及びシート先行破壊が再現されているが、耐力が半分程度となっているため、今後耐力増加について検討が必要である。

表 2.8-1 実験ケース一覧

| 名称 | 形態 | シート | 適用 |
|---------|-------------|-----|----|
| Control | 分割無し | 無し | |
| PCa-B | 2分割 | 有り | |
| PCa-C | 2分割(3mmの隙間) | 有り | |

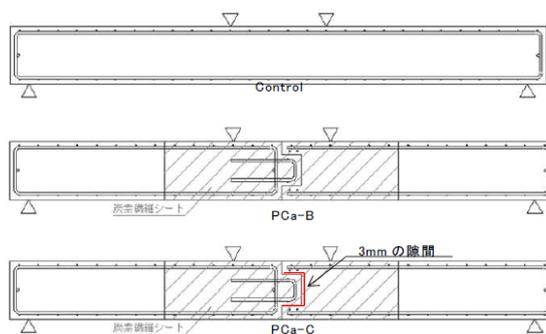


写真 2.8-1 シートの剥離状況



PCa-B



写真 2.8-2 ジョイントの破壊状況

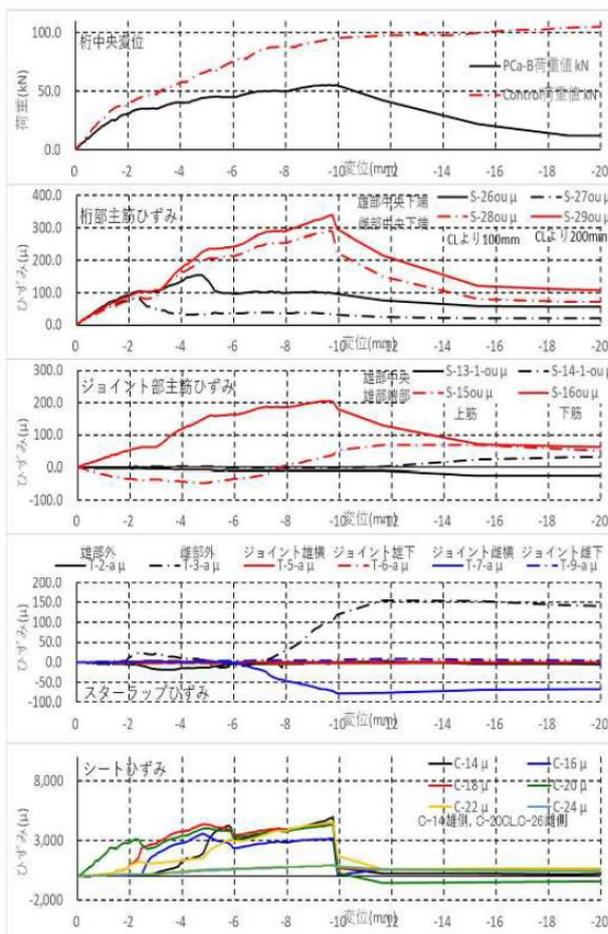


図 2.8-2 PCa-B 実験結果

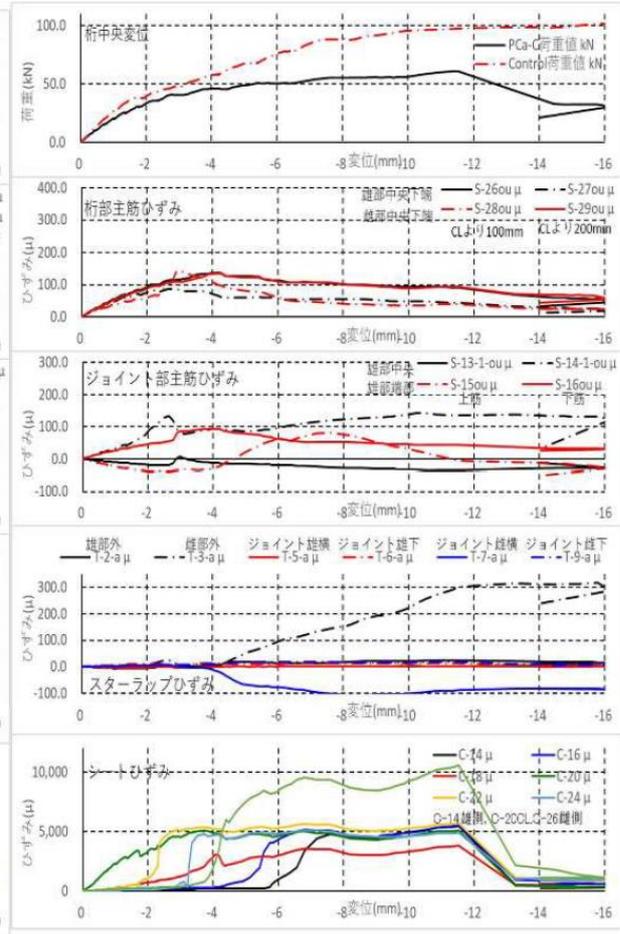


図 2.8-3 PCa-C 実験結果

2.9 施工性の評価

樋門を対象とし、現状の建設機械を用いて施工した場合に必要な施工機械の仕様をおよび施工手順を確認した。PCa を用いた場合、RC 構造に比べて施工性(工期、工事の難易度)の観点で優位であることを確認した。

2.10 運用中の補修検討

Pca 間連結部の凹凸分を乖離させるためヒューズ箇所にはジャッキ受できる構造とする必要がある。また、ジャッキアップ工法を採用する場合は、樋門構造物自体が上下するため、土木構造物に付属する機械設備や電機などの配線においてもフレキシブルに対応できるよう事前に余長についての検討も必要であることを確認した。

2.11 LCC(ライフサイクルコスト)評価

樋門を想定した場合のLCCを算出したところ、初期コストは RC、PCa の差異はわずかであった。しかし、劣化時に撤去・復旧する場合に比べて、損傷箇所のみ補修する場合は LCC を大幅に低減できることを確認した。

2.12 ロボットによる施工検討、それに適した設計や環境の検討

ロボット活用については、使用する PCa 部材の制作、運搬から組立てまで一連の作業を作業員の代替とすることで省人化の効果がある。しかし、PCa 部材を把持するためにロボット自体の重量が大きくなる可能性があるなど課題が残る。

今後、把持機構、上昇機構、グラウト注入機構、部材交換に着目した検討が必要である。

2.13 メンバー

以下に小委員会の活動メンバーを記す。

表 22.13-1 WG メンバー

| 番号 | 職位 | 氏名 | 期間 | 所属 |
|----|---------|--------|----------------|----------------------|
| 1 | 小委員長 | 渡邊 武志 | 2019.7～2021.6 | パシフィックコンサルタンツ株式会社 |
| 2 | 委員 / 幹事 | 矢尾板 啓 | 2019.7～2021.6 | 株式会社パスコ |
| 3 | 委員 | 古川 裕也 | 2019.7～2021.6 | 日本工営株式会社 |
| 4 | 委員 | 浮田 真樹 | 2020.6～2021.6 | ライカジオシステムズ |
| 5 | | 橋本 照政 | 2019.7～2020.5 | ライカジオシステムズ |
| 6 | 委員 | 工藤 克士 | 2019.7～2021.6 | 川田テクノシステム株式会社 |
| 7 | 委員 | 武井 俊哉 | 2019.7～2021.6 | 水源地環境センター |
| 8 | 委員 | 徳永 高志 | 2019.7～2021.6 | (株)フジタ |
| 9 | 委員 | 林 俊斉 | 2019.7～2021.6 | 株式会社安藤・間 |
| 10 | 委員 | 松下 裕昭 | 2019.7～2021.6 | 丸栄コンクリート工業株式会社 |
| 11 | 委員 | 石井 喬之 | 2019.7～2021.6 | 大成建設株式会社 |
| 12 | 委員 | 石原 力也 | 2019.7～2021.6 | 日本ヒルティ株式会社 |
| 13 | 委員 | 平尾 健二 | 2019.7～2021.6 | 佐藤工業株式会社 |
| 14 | 委員 | 高野 和成 | 2019.7～2021.6 | パシフィックコンサルタンツ株式会社 |
| 15 | 委員 | 中嶋 道雄 | 2019.7～2021.6 | 東洋建設株式会社 |
| 16 | 委員 | 井口 重信 | 2019.7～2021.6 | JR東日本 |
| 17 | 委員 | 金井 眞 | 2019.7～2021.6 | 株式会社シュテルケ |
| 18 | 委員 | 柳川 正和 | 2019.7～2021.6 | 清水建設株式会社 |
| 19 | 委員 | 鈴木 義章 | 2020.7～2021.6 | 東日本高速道路株式会社 |
| 20 | | 木村 泰 | 2019.7～2020.6 | 東日本高速道路株式会社 |
| 21 | 委員 | 井波 文明 | 2019.12～2021.6 | 株式会社長大 |
| 1 | オブザーバー | 石田 仁 | 2019.7～2021.6 | 五洋建設株式会社 |
| 2 | オブザーバー | 橋本 紗百合 | 2020.6～2021.6 | パシフィックコンサルタンツ株式会社 |
| 3 | オブザーバー | 中井 裕司 | 2020.6～2021.6 | 前田工織株式会社 |
| 4 | オブザーバー | 牧野 航大 | 2020.6～2021.6 | 前田工織株式会社 |
| 5 | オブザーバー | 谷野 知伸 | 2020.9～2021.6 | 中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京㈱ |
| 6 | オブザーバー | 大瀧 諭 | 2020.9～2021.6 | 日本工営株式会社 |
| 7 | オブザーバー | 水上 夏子 | 2020.11～2021.6 | ヒロセ補強土株式会社 |
| 8 | オブザーバー | 杉山 健太郎 | 2019.7～2021.6 | パシフィックコンサルタンツ株式会社 |
| 9 | 監査役 | 櫻井 義夫 | 2020.9～2021.6 | 国土技術政策総合研究所 |
| 10 | | 黒台 昌弘 | 2019.7～2020.8 | 株式会社安藤・間 |

3. WG1

3.1 活動概要

3.1.1 背景・目的

建設業では、労働者不足が深刻な課題となっており、生産性の向上が急務であり、解決方策として3Dモデル(BIM/CIM)の導入、PCaの利活用が推進されている。本小委員会では、3Dモデルの活用を前提に①設計・施工・維持管理の一連のプロセスを整理し、全体最適化の在り方についての提案や②汎用的なPCa部材による構造物の設計、施工、補修の在り方等について研究することを目的としてWG1、WG2に分けて研究を実施してきた。研究内容として下記を目的として実施した。

【WG1】全体最適化検討

- 1) 調査⇔設計⇔施工⇔維持管理で必要なデータの整理
- 2) 汎用性確保を考慮したデータ規格の在り方検討
- 3) データプラットフォームの在り方を検討

1)の調査⇔設計⇔施工⇔維持管理で必要なデータの整理では、維持管理、施工、設計、調査計画、ソフトウェア(プラットフォーム)のそれぞれに従事している委員より現在行っている仕事の内容を紹介してもらい、その中で必要と考えられるデータを討議した。必要と考えられるデータは維持管理などの現プロセスで活用しているデータに関して事例を紹介した。次に2)の汎用性確保を考慮したデータ規格の在り方検討については、1)の整理で出されたデータを前プロセスが次のプロセスに渡すにはどのようにしたら良いかを検討した。3)のデータプラットフォームの在り方を検討については、現在進められているプラットフォームの構築状況などを調査し、今後の在り方について検討を行った。

3.1.2 概要

以下にこれまでのWG1の活動概要を示す。

活動期間:2021年6月1日～2025年5月31日までの4年間

活動回数:2021年7月14日(第1回)～2025年3月26日(第23回)の全23回

活動人員:WG1委員21名(第1回)～WG1委員21名(第23回)

活動報告では、建設の各プロセスである、調査、設計、施工、維持管理での必要なデータや規格の在り方、データプラットフォームでの活用について記載する。

3.1.3WG の内容

以下に実施した WG の議題と内容を一覧表に示す。

表 3-1 WG1 の議題と実施内容

| 回数 | 実施年月日 | 議題 | 実施内容 |
|------|------------|--|---|
| 第 1回 | 2021/7/14 | 維持管理での仕事内容、必要なデータ | 河川維持管理など |
| 第 2回 | 2021/9/16 | 施工での仕事内容、必要なデータ | ダムや港湾でのBIM/CIM |
| 第 3回 | 2021/11/18 | 設計でのBIM/CIM活用及び課題 | 設計でのBIM/CIMの課題など |
| 第 4回 | 2022/1/18 | 調査・計画でのBIM/CIM活用及び課題 | 調査計画段階の課題等 |
| 第 5回 | 2022/3/17 | ソフトウェアでのBIM/CIM活用及び課題 | ソフト会社での機能と内容紹介 |
| 第 6回 | 2022/5/19 | 厳島神社に学ぶ情報伝達の重要性 | 厳島神社見学後に維持管理に関して |
| 第 7回 | 2022/7/30 | 設計-施工間でのBIM/CIMの課題と解決策 | BIM/CIM試行工事受領データで困った事例, 現在のBIM/CIMで欠けている点、改善点 |
| 第 8回 | 2022/9/22 | プラットフォームの在り方討議 | 空間情報プラットフォームの事例紹介 |
| 第 9回 | 2022/11/22 | 公共施設・民間施設での維持管理 維持管理での3Dモデルの必要性 | 国の基準および民間事例として高速道路での維持管理事例紹介 |
| 第10回 | 2023/1/24 | 構造物のプロダクトモデルとしての在り方 今後を考えた時のBIM/CIMの在り方の検討 | これまでのWG1活動のとりまとめと今後の進め方について |
| 第11回 | 2023/4/3 | 土木学会年次講演会研究討論会の内容について とりまとめの投稿内容について | |
| 第12回 | 2023/5/23 | 自動施工に利用されるデータ 国交省BIM/CIM全面適用に関して | 港湾ケーソン自動据付, シールドの自動化 |
| 第13回 | 2023/8/3 | コマツIoTセンター見学会 | IoTバックホーの体験およびコマツとの意見交換会 |
| 第14回 | 2023/9/20 | 施工BIM/CIMの課題 調査、設計、施工、維持管理全般を通じたデータに関して | コマツプラットフォームでの施工上の課題 |
| 第15回 | 2023/11/30 | 外環シールド現場見学会 | Nexco中日本外環シールドの見学会 |
| 第16回 | 2024/1/29 | J-LandXMLでのICT機器との連携方法と注意点 openBIMワークフローでのデータ連携やDX基盤のありかた | J-LandXMLおよびIFC規格について |
| 第17回 | 2024/3/15 | マシンコントロール・ガイダンスの現状と将来について 建設ロボット等でBIM/CIMデータを活用する際の課題と解決策 | |
| 第18回 | 2024/5/21 | 鉄道工事におけるDX推進の取組み 道路での維持管理とBIM/CIMデータ | |
| 第19回 | 2024/8/2 | 電線共同溝事業の現状とBIM/CIM化への期待 | |
| 第20回 | 2024/9/25 | 自動建設機械を動かす際に必要なBIM/CIMデータとは 建設自動化に必要な事・もの、修正すべき事・もの | |
| 第21回 | 2023/11/21 | 河川管理での3次元データの活用について リニューアル工事でのデータ活用について | |
| 第22回 | 2025/1/23 | 日本の港湾が抱える課題と自動化・DXによる対応策 | |
| 第23回 | 2025/3/26 | PC床板製作時の自動配筋システムについて | |

3.2 調査

3.2.1 検討の主な流れ

通常建設プロセスの初めには、事業化計画(F.S)を実施する。事業化計画では目的や必要な機能に応じて構造物などを計画し、整備や維持管理にかかるコストと便益を比較して今後この事業を進めるかを定める。この中で重要な点が整備に関わるコストであるが、コストの決定要因として、各種の構造物を設計するための条件や、施工方法を想定するための条件、維持管理を実施する為の条件が必要になる。これらの条件は目的や掛けられるコスト条件以外に、主に以下の項目である

- 現地地形など現地形状や既設構造物の形
- 土質や地層構造等
- 風速や外力などの自然条件

これ以外にも利用上の載荷重や地震力などがある。

これらを調査する為には、地形測量やボーリング調査、風速や波の計測など現地で調査を実施するものが中心である。

土木構造物は比較的大きなものが多く、切り土や盛土など地形によってその構造や施工方法が変化しコスト面への影響が大きい事から地形測量に着目して討議を行った。その際には計測機械とその使い方、データの種類、プラットフォームについて検討を行った。

3.2.2 計測機械とその使い方

地形計測手法は、従来はトランシットやレベル、スチールテープ等で長さや高さなどを計測してきたが、近年は3次元レーザーや写真で点群を計測する SfM 等の手法も活用されてきており、デジタルで3次元計測を行うことが容易になってきている。主な計測原理を以下に示す。

1. レーザーを用いる方法
2. 写真を用いる方法
3. 水中を計測する方法

(1) レーザーを用いる方法

1. のレーザーを用いる方法では、レーザー光を用いて対象物までの距離高精度に計測する方法である。その基本的な原理は、レーザー光を照射し、その反射光を捉えて、光が往復する時間や位相の変化を計測することに基づいている。従来は1点のレーザー発生源を高速に回転させる等を行い、多点を計測する方式が多かった。近年では多数のレーザーを同時に発して計測する方式もある。

それらの機器を何に積載するかによって、レーザーの出力や全体の重量などに制限が発生する。主な記載・計測方法を以下に示す。

- 地上型レーザースキャナー (TLS):

地面に設置して使用し、周囲の地形や構造物を三次元的に高精度で計測する方法。主に3脚などに設置して利用する。広範囲に計測が可能で、精度が良い事が特徴である。



図 3-1 地上型レーザースキャナーの例(出典: ニコントリムブル HP, https://www.nikon-trimble.co.jp/products/product_detail.html?tid=430,2025/5/3)

- UAV レーザースキャナー (ULS):

ドローンなどの無人航空機に搭載し、広範囲の地形や植生などを効率的に計測する方式。

- 航空レーザースキャナー (ALS):

航空機に搭載し、広範囲の地形データを迅速に取得する方法。森林地域の計測にも適している。

- 車載型レーザースキャナー/モバイルマッピングシステム (MMS):

車両に搭載し、走行しながら道路周辺の情報を効率的に取得する方式。高速道路やコンテナヤードなどの施設共用を停止できない施設で、高速に移動しながら計測が可能なシステム。



図 3-2 モバイルマッピングシステムの例

- ハンディ型レーザースキャナー:

手持ちで使用できる小型のレーザースキャナーで、屋内や複雑な形状の物体などの計測

に適している方式である。



図 3-3 ハンディ型レーザースキャナーの例(出典: ニコントリムブル HP, https://www.nikon-trimble.co.jp/products/product_detail.html?tid=448, 2025/5/3)

(2) 写真を用いる方法

写真測量 (Photogrammetry) は、複数の写真から対象物の三次元的な形状、位置、寸法に関する情報を高精度に取得する技術として、長年にわたり発展を続けてきた。航空写真測量に端を発し、地上写真測量、近接写真測量へとその適用範囲を拡大してきた背景には、撮像技術の進歩、計算機処理能力の飛躍的な向上、そして高度な解析アルゴリズムの開発が挙げられる。

- Structure from Motion (SfM) および Multi-View Stereo (MVS) アルゴリズムの高度化

SfM は、既知のカメラ位置や姿勢情報を必要とせず、複数の重複した画像シーケンスからカメラの運動とシーンの三次元構造を同時に復元する技術である。一方、MVS は、SfM によって推定されたカメラパラメータを用いて、密な三次元点群を生成する。近年の研究では、これらのアルゴリズムのロバスト性、精度、計算効率の向上、特に大規模データセットやテクスチャの乏しい対象物への適用に関する研究が活発である。深層学習を用いた特徴点抽出やマッチング、幾何学的制約の導入による誤対応の抑制などが試みられている。

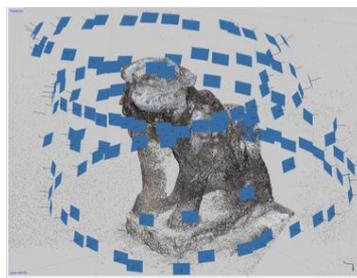


図 3-4 SfM の原理イメージ(https://hdtopography.github.io/learning/SfM-MVS/GIS_uchiyama_2018/1.about_sfm/1.about_sfm.html, 2025/5/11)

- UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を活用した写真測量

UAV、いわゆるドローンを用いた写真測量は、その機動性とコスト効率性から急速に普及し

ている。低高度からの高解像度な画像取得が可能であり、広範囲の地形測量、災害状況の把握、農地のモニタリングなど、多様な分野での応用が期待されている。研究の焦点は、UAV の飛行経路最適化、高精度な位置・姿勢決定、リアルタイム処理、そして LiDAR との統合による更なる高精度化に向けられている。

- 屋内および近接環境における写真測量

グローバル・ポジショニング・システム(GPS)などの外部測位が困難な屋内環境や、微細な構造物の計測においては、特徴点の安定的な抽出と高精度なカメラキャリブレーションが重要な課題となる。SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術との融合や、マーカーレスでの高精度な三次元復元に関する研究が進められている。

- 時系列写真測量と動的シーンの解析

経時的に取得された写真データを用いて、地盤変動、構造物の変形、植生の成長といった動的な現象を定量的に解析する研究も注目を集めている。高頻度なデータ取得と効率的な解析手法の開発が求められている。

(3) 水中を計測する方法

水中など光が吸収しやすい場所の計測は、潜水艦のソナーに代表される音波を利用した測量を行ってきた。近年では光の波長が長く、高出力で浅水域を計測可能なグリーンレーザー方式も出現してきている。ここでは音波測量について記載する。

音波測量 (Sonic Surveying) は、音波の伝播特性を利用して、対象物までの距離、形状、内部構造、または媒質の特性に関する情報を取得する技術の総称である。水中探査に端を発し、非破壊検査、医療診断、さらには大気や地盤の調査へと応用範囲を広げてきた。音波測量は、一般的に音波を発生させ、対象物との相互作用 (反射、屈折、透過、散乱など) を経て戻ってくる音波を計測・解析することで情報を得る。使用する音波の周波数帯域によって、超音波 (ultrasound)、可聴音 (audible sound)、低周波音 (infrasound) に分類され、それぞれの特性に応じて異なる応用分野で利用される。また、計測原理に基づいて、パルス反射法 (pulse-echo method)、連続波法 (continuous wave method)、ドップラー法 (Doppler method) など、様々な手法が存在する。

- 高分解能イメージング技術の開発

音の分解能は光に比べて低いため、より微細な構造を検出するための高分解能イメージング技術の開発が活発である。高周波数の音波の利用、高度な信号処理アルゴリズムの導入、アレイ型振動子の開発などが進められている。特に、三次元イメージング技術の向上は、複雑な形状の対象物の内部構造の可視化に貢献している。

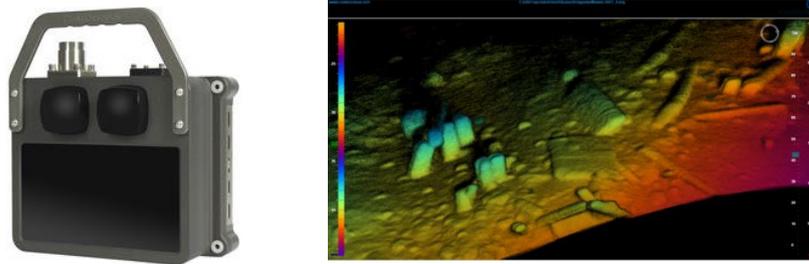


図 3-5 4D ソナーの外観および計測例(出展:マリメックス)

WEB,<https://www.marimex.co.jp/catalog/catalogcat/kaiyou/>,2024/12/10)

- 水中音響通信とセンシングネットワーク

海洋資源探査、環境モニタリング、水中ロボット制御などの分野において、水中での効率的な情報伝達と広範囲なセンシングを実現するための研究が進められている。水中音響通信の信頼性向上、低消費電力化、マルチホップ通信ネットワークの構築などが課題となっている。また、環境音解析による海洋生物のモニタリングや、海底地形の三次元マッピングへの応用も注目されている。

- 機械学習・深層学習の導入

音波データの解析に機械学習や深層学習の手法を導入することで、ノイズ除去、信号識別、異常検出、画像再構成などの性能向上が図られている。特に、複雑なパターン認識や大量のデータ解析において、その有効性が示されている。

3.2.3 データの種類

上記に示したデータ形式はいずれも点群データである。点群データは、3次元空間における物体の形状、表面性状、位置情報などを高密度な点の集合として表現するデータ形式であり、測量、土木、建築、製造業、自動運転、文化財記録など、多岐にわたる分野で活用が拡大している。本稿では、点群データの代表的なフォーマット、その特徴、および今後の展望について考察する。

(1) 主要な点群データフォーマット

点群データは、その取得方法や利用目的、ソフトウェアの互換性などに応じて様々なフォーマットが存在する。フォーマットは主に計測機械が出力するフォーマットやソフトウェアで利用できるように調整されたフォーマットなどがある。このほかに土木構造物で利用する目的で LandXML 等が規定されている。以下に、主要なフォーマットを示す。

- LAS (LiDAR Data Exchange Format)

LiDAR センサーで取得されたデータを格納するための業界標準フォーマットの一つ。点の座標 (X, Y, Z) に加え、反射強度、スキャン角度、クラス分類、RGB 色情報、GPS 時間など、豊富な属性情報を格納できる。バイナリ形式であり、データサイズが比較的コンパクトで読み込み速度に優れる。ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) によって仕様が管理されている。

- PLY (Polygon File Format)

スタンフォード大学で開発された、ポリゴンモデルだけでなく点群データも格納可能なフォーマット。アスキー形式とバイナリ形式が存在する。点の色、法線ベクトル、テクスチャ座標などの属性情報を格納できる汎用性の高いフォーマットである。

- XYZ

最も基本的な点群フォーマットの一つで、各点の X, Y, Z 座標をテキスト形式で記述する。シンプルで扱いやすい反面、属性情報の格納には限界がある。RGB 色情報などを追加した XYZRGB 形式も存在する。

- PCD (Point Cloud Data)

Point Cloud Library (PCL) で用いられるネイティブなフォーマット。柔軟なデータ構造を持ち、様々な属性情報を効率的に格納できる。バイナリ形式とアスキー形式が存在する。

E57: ASTM (American Society for Testing and Materials) によって標準化された、ベンダーニュートラルな点群データフォーマット。様々な 3D スキャナーからのデータを統一的に扱うことを目的としており、座標、強度、色情報、法線ベクトル、スキャンパラメータなど、多様な情報を格納できる。

- COPC (Compressed Optimized Point Cloud)

LAS フォーマットをベースとした圧縮フォーマットであり、データサイズを大幅に削減しつつ、ランダムアクセス性能を維持する。大規模な点群データの効率的な管理・利用に適している。

LandXML の解説 (論文調)

1. 緒論

LandXML は、土木・測量分野における設計データ交換のためのオープンな XML ベースのデータフォーマットである。2000 年に米国で提唱され、当初は LandXML.org によって開発・運営が行われてきた。同団体は活動を停止したが、現在は Open Geospatial Consortium (OGC) および buildingSMART の OpenINFRA プロジェクトに引き継がれ、その重要性は依然として高い。本稿では、LandXML の概要、特徴、および国内における展開について考察する。

(2) LandXML

LandXML は、異なるソフトウェア間でのデータ互換性を確保し、設計・測量業務の効

率化を図ることを目的としている。XML 形式を採用しているため、テキストベースで可読性が高く、ソフトウェアによる解析も容易である。主要な特徴として以下が挙げられる。

多様なデータ形式のサポート: 地形データ (TIN、DEM)、線形データ (平面線形、縦断線形)、横断データ、測量データ (点群、観測データ)、構造物データなど、土木・測量分野で扱われる広範なデータ形式を記述できる。

拡張性: XML の柔軟性により、必要に応じて独自の属性や要素を追加することが可能である。

ベンダーニュートラル: 特定のソフトウェアベンダーに依存しないオープンなフォーマットであるため、異なるシステム間でのデータ共有を促進する。

国際的な標準: 世界各国で利用されており、国際的なデータ交換の基盤となり得る。

● J-LandXML

日本国内においては、国土交通省国土技術政策総合研究所を中心に、LandXML 1.2 をベースとした「3次元設計データ交換標準(案)」、通称「J-LandXML」が策定・公開されている。J-LandXML は、日本の道路事業や河川事業などの特性に合わせて、LandXML のデータ表現方法を一部規定したものである。具体的には、横断幅員構成や直線部の横断勾配、すりつけ率など、国内の設計基準や実務で必要となる情報をより詳細に記述できるよう拡張されている。

J-LandXML の導入により、設計段階で作成された 3次元設計データを、ICT 施工をはじめとする後続の工程で効率的に活用することが期待されている。例えば、設計データを基に施工機械の自動制御データや出来形管理データを作成することで、再入力の手間を削減し、生産性の向上に貢献する。

● LandXML の課題と今後の展望

LandXML は多くの利点を持つ一方で、複雑な構造物や詳細な設計情報を完全に表現するには限界があるという指摘もある。また、バージョン間の互換性や、ソフトウェアによる実装の差異なども課題として挙げられる。今後の展望としては、以下のような点が考えられる。

InfraGML との連携: OGC が開発を進める地理空間情報標準である InfraGML との連携を強化し、より高度な情報モデルの記述を可能にする。

BIM/CIM との統合: 建設分野における BIM (Building Information Modeling) / CIM (Construction Information Modeling) の推進に伴い、LandXML がこれらのワークフローの中でより効果的に活用されるための標準化やガイドラインの整備が求められる。

データ品質の向上: データ交換時の情報損失を防ぎ、品質を確保するための仕組みや検証ツールの開発が重要となる。

LandXML は、土木・測量分野における重要なデータ交換フォーマットであり、国内においては J-LandXML として独自の発展を遂げている。そのオープン性と拡張性は、異なるシステ

ム間の連携を促進し、業務効率化に貢献する。今後の技術動向や標準化の進展を踏まえ、LandXML がより広範かつ効果的に活用されることが期待される。また、今後のデータ量の増大に対応するための高効率な圧縮技術の開発、属性情報の多様化とそれを格納するための柔軟なフォーマットの進化、そして様々な分野での利用を促進するためのオープンで標準化されたフォーマットの普及が挙げられる。また、AI 技術との連携により、点群データからの意味抽出や解析が高度化するにつれて、それらの情報を効率的に記述・格納するための新たなフォーマットやメタデータ標準が登場する可能性もある。

3.2.4プラットフォームについて

点群プラットフォームは、3次元計測技術によって取得された点群データを効率的に管理、共有、活用するための基盤となるシステムである。近年、LiDAR やフォトグラメトリといった技術の発展に伴い、建設、測量、防災、文化財記録、都市計画など、多様な分野で大量の点群データが取得されるようになってきている。これらのデータを最大限に活用するためには、専門的な知識や高スペックな環境だけでなく、組織内外の関係者が容易にアクセスし、協働できるプラットフォームが不可欠となる。本稿では、代表的な点群プラットフォームである国土交通省の PLATEAU (プラトウ) プロジェクトを例にして、その機能、利点、そして今後の展望について考察する。

(1) 点群プラットフォームの機能と種類

点群プラットフォームは、一般的に以下のような機能を提供する。

- データ管理・保存

大容量の点群データを安全かつ効率的に保管・管理する機能。様々なフォーマットに対応し、メタデータによる検索性向上も重要となる。

- 可視化

Web ブラウザや専用ソフトウェア上で、点群データを 3 次元的に表示・閲覧する機能。視点の移動、ズーム、断面表示、属性情報の表示などが含まれる。

- 計測・解析

点群データ上での距離、面積、体積計測、断面図作成、標高分析、変状検出などの基本的な解析機能。

- 共有・連携

組織内外のユーザーとのデータ共有、アクセス権限管理、異なるデータ形式との連携機能(例: BIM/CIM モデルとの重ね合わせ)。

- 付加価値機能

アノテーション(注釈付与)、属性情報の編集、時系列変化の可視化、AIによる物体認識・抽出など、高度な活用を支援する機能。

点群プラットフォームの種類は、提供主体や対象とする分野、機能範囲によって多岐にわたる。

- クラウド型プラットフォーム

クラウドサーバー上にデータを保管し、Webブラウザを通じてアクセスするタイプ。初期投資を抑えられ、場所を選ばずに利用できる利点がある。

- オンプレミス型プラットフォーム

自社サーバー内にシステムを構築するタイプ。セキュリティやカスタマイズの自由度が高い反面、初期投資や運用管理の負担が大きい。

- 特定分野向けプラットフォーム

建設、防災、文化財など、特定の分野の業務フローに特化した機能を提供するプラットフォーム。

(2) 国土交通省 PLATEAUプロジェクト

PLATEAUは、国土交通省が推進する3D都市モデルの整備・活用・オープンデータ化プロジェクトであり、大規模な点群データを含む都市空間情報を統合的に扱うプラットフォームとしての側面も持つ。PLATEAUの特徴は以下の通りである。

- オープンデータ: 全国主要都市の3D都市モデル(点群データを含む場合がある)を無償で公開し、産学官民による多様な活用を促進している。
- 標準化: CityGMLという国際標準規格をベースにデータモデルを構築し、異なるデータ間の相互運用性を高めている。
- エコシステム形成: 3D都市モデルを活用したユースケース開発、技術開発、人材育成などを推進し、持続的なエコシステムを形成することを目指している。
- 多様なデータ連携: 点群データだけでなく、BIM/CIM、GIS、画像データなど、様々な都市関連情報を統合的に扱うことを視野に入れている。

PLATEAUの公開データは、都市計画、防災シミュレーション、自動運転、観光、エンターテインメントなど、幅広い分野での活用が期待されている。特に、高精度な点群データと意味情報を持つ3D都市モデルを組み合わせることで、より高度な分析やシミュレーションが可能になる。

(3) 点群プラットフォームの利点

点群プラットフォーム導入の主な利点は以下の通りである。

- 業務効率の向上

大容量データの効率的な管理・共有により、データ探索や受け渡しの手間を削減し、業務プロセスを効率化する。

- コラボレーションの促進

関係者間でのデータ共有と可視化により、円滑なコミュニケーションと意思決定を支援する。

- 高度な分析・活用

計測・解析機能や他のデータとの連携により、点群データが持つ潜在的な情報を最大限に引き出し、新たな価値を創出する。

- コスト削減

現場への移動回数削減、再測量の防止、人的ミスの低減などにより、コスト削減に貢献する。

- 安全性向上

危険な場所への立ち入りを減らし、リモートでの計測や状況把握を可能にすることで、作業者の安全性を向上させる。

(4) 今後の展望

点群プラットフォームは、今後ますます高度化・多様化していくと予想される。以下に今後の展望を記載する。

AIとの連携強化: AI 技術を活用した点群データの自動処理、物体認識、異常検知などの機能が進化し、より効率的で高度な分析が可能になる。

リアルタイム処理: リアルタイムでの点群データ取得・処理・可視化技術が発展し、災害対応や自動運転などの分野での応用が拡大する。

XR 技術との融合: VR/AR/MR などの XR 技術と連携することで、点群データをより直感的かつ没入感のある形で体験・活用できるようになる。

分野特化型プラットフォームの進化: 各分野のニーズに特化したプラットフォームが登場し、より専門的な機能やデータ連携が強化される。

オープン化と標準化の推進: PLATEAU のようなオープンデータ化の動きが広がり、データフォーマットや API の標準化が進むことで、より広範なデータ活用が促進される。

点群プラットフォームは、大量の 3 次元空間情報を効率的に管理・活用するための重要なインフラであり、その進化は様々な分野のデジタルトランスフォーメーションを加速する鍵となる。国土交通省の PLATEAU プロジェクトをはじめとする取り組みは、点群データのオープン化と

活用を推進する上で重要な役割を果たしており、今後の技術発展と標準化の進展により、点群プラットフォームは拡大・発展していくことが期待される。

3.2.5まとめ

調査フェーズは、以前より進められている点群取得が大きな動きとなり、活用が最も進んでいるフェーズであると考えられる。ただし、データ量の多さに起因する流通の課題がある。今後はプラットフォーム上での利用が想定され、流通に関しては問題が無くなるものと考えられる。

3.3 設計

3.3.1 検討の主な流れ

近年、労働力不足や生産性向上の要求が高まる土木分野において、設計業務の効率化・高度化を図るための自動設計ソフトウェアの導入が進んでいる。ここでは、土木設計ソフトウェアの具体的な事例をいくつか紹介し、その機能、適用分野、および導入効果について考察する。また土木設計に必要なデータを整理し、データの汎用性を高めるために必要な項目を検討した。

3.3.2 土木設計ソフトウェアの事例

現在利用されている主な BIM/CIM ソフトウェアを列挙する。

(1) Autodesk Civil 3D

Autodesk Civil 3D は、土木設計、測量、GIS データを統合した包括的なプラットフォームであり、線形設計、縦横断設計、土量計算、排水設計、地形モデリングなど、広範な機能を有する。AutoCAD を基盤とするため、既存の AutoCAD ユーザーにとって比較的導入が容易であり、InfraWorks をはじめとする Autodesk 製品との連携もスムーズである。設計から施工計画、維持管理まで、土木プロジェクトの全ライフサイクルをサポートし、動的な設計変更への高い対応力と、国内外における豊富な情報とサポート体制は大きな利点である。しかし、多機能である故の操作の複雑さや、比較的高価な点が課題として挙げられる。

(2) Autodesk Revit

主に建築設計向けの BIM ソフトウェアである Revit は、土木構造物（橋梁の上部工、擁壁、カルバートなど）のモデリングにも応用可能である。構造設計、設備設計との連携機能が豊富であり、Parametric Design による形状変更や属性変更の容易さ、BIM モデルからの図面作成、数量算出、干渉チェックなどの機能を有する。建築分野との連携が不可欠なプロジェクトにおいて、情報共有と連携作業を効率化し、意匠、構造、設備を含めた統合的な BIM モデルの構築に貢献する。豊富なオブジェクトライブラリやカスタマイズ機能も利点である。一方で、Civil 3D のような地形モデリングや線形設計、土量計算といった土木特有の機能は限定的であるため、大規模な土木インフラ全体のモデリングには他の土木専用ソフトウェアとの連携が必要となる場合がある。

(3) Autodesk InfraWorks

Autodesk InfraWorks は、大規模なインフラプロジェクトの初期計画・設計段階における 3D モデル作成と可視化に特化したソフトウェアである。現実世界のコンテキストを統合し、道路、橋梁、河川、地形などの要素を組み合わせた概念設計モデルを迅速に作成できる。Civil 3D

との連携が強化されており、詳細設計へのスムーズな移行が可能である。視覚的に分かりやすいプレゼンテーション資料の作成や、複数の設計案の比較検討を容易にする。しかし、詳細な設計や解析機能は Civil 3D に依存する部分が多いため、概略設計に利用されている。

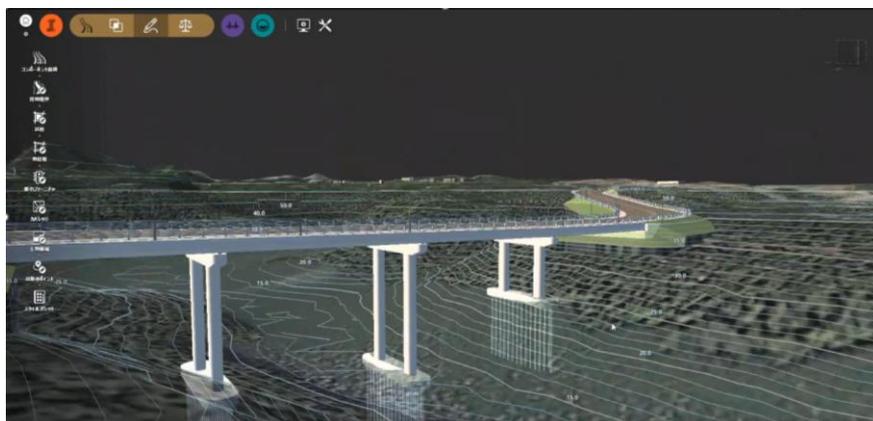


図 3-6 InfraWorks での道路計画例(Autodesk 社)

(4) Autodesk Navisworks

Navisworks は、複数の異なる CAD/BIM ソフトウェアで作成された 3D モデルを統合し、プロジェクト全体のレビュー、干渉チェック、工程管理、プレゼンテーションなどに活用できるソフトウェアである。Civil 3D、Revit、ARCHICAD など、多様なファイル形式に対応し、タイムライン機能による 4D シミュレーションや、数量拾い機能などを備える。プロジェクトに関わる全ての関係者が、統合された 3D モデル上で情報共有や意思決定を行うことを可能にし、設計段階での干渉を事前に発見し、手戻りを削減する。施工計画の可視化や進捗管理にも役立つ。モデルの作成機能はなく、あくまで統合・レビューを目的としたソフトウェアであり、大規模なモデルを扱う場合には高い PC スペックが要求されることがある。

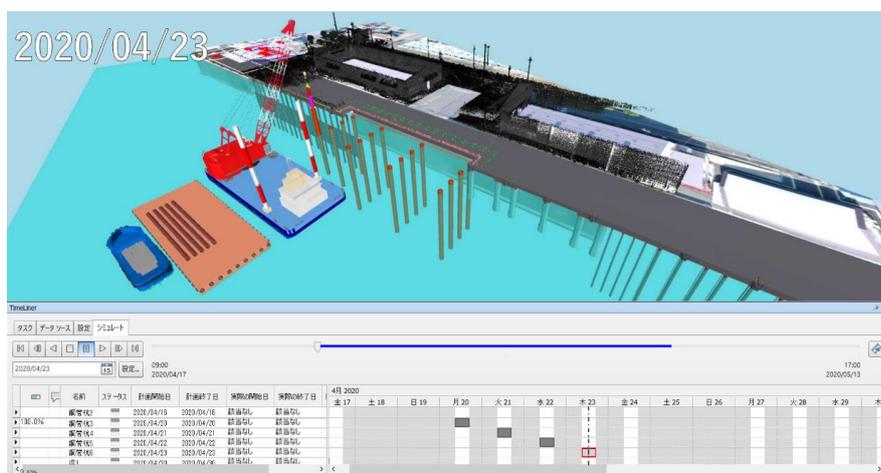


図 3-7 Navisworks での施工検討例

(5) GRAPHISOFT ARCHICAD

ARCHICAD は、本来建築設計向けの BIM ソフトウェアであるが、IFC 形式を介して土木モ

デルとの連携が可能である。直感的で使いやすいインターフェースや、GDL による柔軟なオブジェクト作成、BIMx によるプレゼンテーションや情報共有の容易さが特徴である。建築分野との連携が重要なプロジェクトにおいては、情報共有を円滑に行い、視覚的に分かりやすい 3D モデルによるコミュニケーション促進に寄与する。比較的導入しやすい価格帯も魅力である。一方で、土木設計に特化した機能は他の土木専用ソフトウェアに比べて限定的であり、大規模な土木構造物の詳細設計には機能が不足する可能性がある。

(6) 福井コンピュータ Civil 3D 連携ソリューション

福井コンピュータは、Autodesk Civil 3D を基盤としつつ、日本の設計基準や図面作成基準に特化したカスタマイズと機能拡張を提供している。自社の測量 CAD や構造解析ソフトとの連携を強化し、日本の建設業における豊富な実績と手厚いサポート体制を強みとする。日本の基準に合わせた効率的な設計・図面作成や、既存の福井コンピュータ製品とのスムーズな連携が期待できる。Civil 3D がベースであるため、Civil 3D 自体の課題も考慮する必要がある。

(7) 川田テクノシステム V-nasClair

川田テクノシステム V-nasClair は、測量、設計、施工、維持管理といった建設ライフサイクル全般をカバーする国産 BIM/CIM ソフトウェアである。直感的な操作性と豊富な設計支援機能に加え、VR/AR 技術を活用した現場可視化ソリューションなども提供する。オールインワンで幅広い業務に対応できるため、導入コストや連携の手間を削減できる可能性があり、国産ソフトウェアならではの使いやすさが考慮されている。比較的新しいソフトウェアであるため、導入実績やユーザーコミュニティの規模は今後の発展が期待される。

(8) その他ソフトウェア

上記以外にも、特定の分野（道路、河川、トンネルなど）に強みを持つ BIM/CIM ソフトウェアや、汎用 CAD に BIM/CIM 機能を付加した製品が存在する。これらのソフトウェアは、特定の専門分野においては高度な機能を提供する一方で、汎用性に欠ける場合や、他のソフトウェアとの連携が必要となる場合がある。

3.3.3 土木設計に必要なデータ

土木設計は、社会基盤となる構造物を構築するための重要なプロセスであり、その過程では多種多様なデータが必要とされる。これらのデータは、構造物の安全性、機能性、経済性、そして周辺環境への影響を評価し、最適な設計を行うために不可欠であり、また近年では、これらのデータの汎用性を高め、設計段階のみならず、施工、維持管理といったライフサイクル全

体での効率化を図る必要がある。

土木設計で必要となるデータを大きく以下のカテゴリに分類した。

- 基礎情報・現況データ

設計対象地の地形、地質、地下水、既存構造物、用地、環境、気象、水文、交通量など、プロジェクトを取り巻く自然・社会条件に関するデータ。

- 設計条件・基準

関連する法令、省令、告示、技術基準、設計指針・マニュアル、過去の類似事例、発注者からの要求事項など、設計を行う上での制約や目標となるデータ。

- 設計データ

線形、構造物、土工、排水施設、舗装、付属施設など、設計の結果として生成される構造物の形状、寸法、使用材料、配置などを示すデータ(2D 図面、3D モデル、数量計算書など)。

これらのデータは、設計の進行段階に応じて詳細化され、前後プロセスで活用されるため、汎用性が重要となる。

3.3.4データ規格

国土交通省 BIM/CIM データ納品 規格を以下に示す。主に設計で利用する BIM/CIM データは、構造物モデル及び土工モデル、線形モデルである。データ形式は、各種のソフトウェアに依存したオリジナル形式と流通を考慮した共通ファイル形式があり、共通ファイル形式は J-LandXML と IFC2x3 となっている。オリジナルファイル形式ソフトウェアの機能に依存する。

表 3-2 BIM/CIM 納品データ規格一覧

| データ種類 | フォルダ | データ規格 |
|--------------------|--------------------|---------------------------|
| 地形モデル (広域地形) | LANDSCAPING | J-LandXML 及びオリジナルファイル |
| 地質・土質モデル | GEOLOGICAL | オリジナルファイル |
| 土工形状モデル 及び線形モデル | ALIGNMENT_GEOMETRY | J-LandXML L及びオリジナルファイル |
| 構造物モデル | STRUCTURAL_MODEL | IFC 2x3 及びオリジナルファイル |

(1) IFC

IFC規格は、1995年IAI(International Alliance for Interoperability)によって開発がスタートした。現在はbSI(building SMART International)によってIFC4.3が策定されている。以下にIFCのバージョンと国交省が現在利用しているバージョンの違いを示す。

| 発刊 | バージョン | ISO | 適用 |
|-------|-------------|--------------------|-------|
| 1996年 | IFC1.0 | | 建築規格 |
| 1999年 | IFC2.0 | | |
| 2007年 | IFC2x3TC1 | ISO/PAS 16739:2005 | |
| 2013年 | IFC4 | ISO 16739:2013 | |
| 2017年 | IFC4ADD2TC1 | ISO 16739-1:2018 | 土木を含む |
| 2020年 | IFC4.3RC2 | RC:リリース候補版 | |

国交省指定バージョン

図 3-8 IFCバージョンの概要

IFCは、建物やインフラ構造物の形状、属性、関連情報などを包括的に記述できるオープンなデータモデルであるが、IFC2x3に関しては、定義している構造物要素(Element)は2x3の場合壁・窓・階段等の建築要素のみとなっており、土木で利用する際は鉄筋とその他要素で記述する仕様となっている。

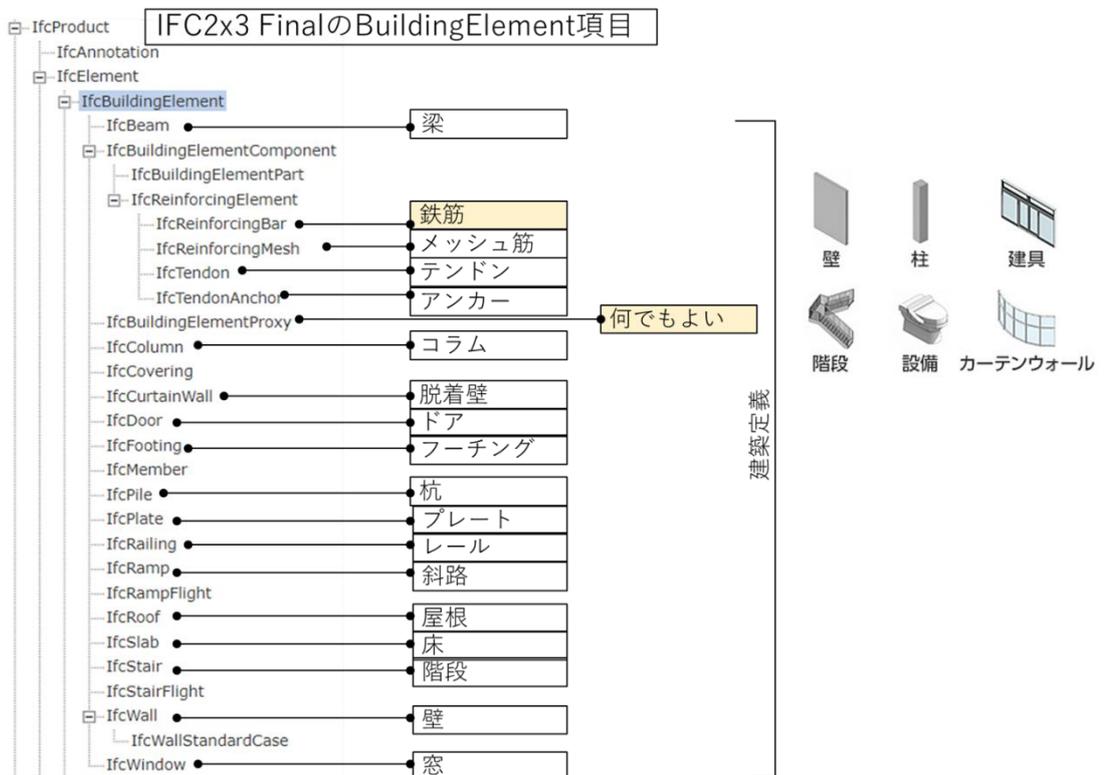


図 3-9 IFCのBuildingElementの主な項目

土木分野におけるBIM/CIMの導入効果を最大化するためには、各段階(企画、設計、施

工、維持管理)を通じた円滑な情報連携が不可欠である。異なるソフトウェア環境下での情報共有を促進し、再入力や手戻りを削減することは、業務効率化と生産性向上に直結する重要な要素となる。さらに、IFC (Industry Foundation Classes) 形式で作成されたデータは、その一貫性と再利用性において利点を有する。長期にわたるデータ活用は、維持管理段階における効率的な情報利用を可能にし、将来的な改修・更新時の基礎データとして極めて有効である。このような整合性の取れた情報共有は、設計検討の深化、施工計画の高度化、品質管理の効率化などを実現し、建設生産性全体の向上に大きく寄与する。加えて、国際的なデータ標準である IFC に準拠することは、グローバルな建設市場における連携や技術交流を促進する上で重要な意義を持つ。このような背景から、国土交通省は、「BIM/CIM 活用ガイドライン」や各種技術基準等において、IFC の活用を段階的に推進している。その具体的な取り組みとして、まずデータ標準の策定が挙げられる。プロジェクトの特性や段階に応じて、IFC のどのスキーマや属性を利用すべきかを示すデータ標準を策定・公開することにより、データ作成者と利用者間で共通認識を示し、効率的な情報連携を促進している。次に、情報交換要件の明確化が重要視されている。各事業段階における情報交換の目的と範囲を明確化し、必要な IFC エンティティや属性を具体的に指定することで、実効性の高いデータ連携を目指している。さらに、BIM/CIM ライブラリの整備も積極的に進められている。IFC に準拠した BIM/CIM オブジェクトのライブラリ整備を支援することにより、データ作成の効率化と品質向上を図っている。また、技術検証と普及活動も重要な柱の一つである。モデルの品質検証ツール開発や、講習会・セミナーの開催などを通じて、IFC の適切な活用方法の普及に努めている。そして、様々な事業において IFC を活用した BIM/CIM を試行的に導入するプロジェクトの実施は、その効果や課題を検証し、今後の本格的な導入に向けた貴重な知見を蓄積する上で不可欠な取り組みとなっている。これらの多角的な取り組みを通じて、国土交通省は IFC に立脚した土木分野における BIM/CIM の高度な活用を推進し、建設業界全体の効率化と品質向上を目指している。

1) IFC 適用における課題

IFC (Industry Foundation Classes) の適用は、土木分野における BIM/CIM のデータ連携と活用に多くのメリットをもたらす一方で、その普及と定着に向けて克服すべきいくつかの課題も存在する。まず、ソフトウェア間の互換性の問題が挙げられる。IFC はオープンな標準規格として提唱されているものの、各ソフトウェアにおける IFC の実装状況は一様ではない。このため、データの受け渡しにおいて、情報が完全に移行されず欠落したり、意図しない形状や属性への変換が生じたりする可能性があり、プロジェクト全体の情報共有の効率性を損なう要因となる。

次に、データ品質の確保に関する課題が存在する。IFC 形式でデータを作成する際のモデリングルールや属性情報の付与方法は、プロジェクトの特性や担当者によって異なる場合が多い。このようなデータ作成ルールの不統一は、データの品質にばらつきを生じさせ、その後の設計レ

ビュー、数量算出、施工管理といった様々な段階でのデータ活用に支障をきたす可能性がある。また、IFC の構造や活用方法に関する専門知識を持つ技術者の育成も喫緊の課題である。BIM/CIM 導入を円滑に進め、IFC のメリットを最大限に引き出すためには、適切な知識とスキルを備えた技術者の育成が不可欠となる。教育機関における専門カリキュラムの整備や、実務を通じた継続的な研修体制の構築が求められる。さらに、IFC の標準化の複雑性も無視できない。IFC は非常に多様な情報を扱うことができる反面、個々のプロジェクトの要件に応じて適切なスキーマや属性を選択し、プロジェクト全体で一貫した標準化を行うことは、高度な専門知識と時間、労力を必要とする場合がある。効率的かつ効果的な IFC 活用のためには、プロジェクト初期段階における明確な標準化戦略が重要となる。

現行の建設関連法規や手続きと IFC ベースのデータ活用との整合性の問題がある。現在の法制度や行政手続きは、必ずしも IFC 形式のデータ活用を前提としていない場合があり、電子納品や申請手続きにおいて、IFC データをそのまま利用できないケースが存在する。IFC の普及を促進するためには、関連法制度の見直しや、IFC に対応した新たな手続きの整備が不可欠となる。これらの課題に対し、技術的な解決策の開発、人材育成、標準化の推進、そして法制度の整備といった多角的な取り組みを進めることで、IFC の潜在的なメリットを最大限に引き出し、土木分野における BIM/CIM の更なる発展に繋げることが期待される。

(2) J-LandXML

LandXML の概要については調査項目で記載したので、ここではデータ規格について記載する。J-LandXML のデータ構造概要の他に、適用状況、そして今後の展望について記載する。J-LandXML は XML ベースのデータ構造を採用しており、基本的な構成要素と特徴について詳細に記載する。

1) XML ベースの基本構造

J-LandXML は、Extensible Markup Language (XML) を基盤として構築されている。XML は、データを階層的な構造で記述するためのマークアップ言語であり、タグと呼ばれる要素を用いて情報を囲み、その属性として追加情報を持たせることができる。J-LandXML もこの XML の特性を活かし、地理空間情報を構造的に表現している。

J-LandXML 文書の基本的な構造は、以下の要素から構成される。

XML 宣言 (XML Declaration):

文書の先頭に記述され、XML のバージョンや文字エンコーディングなどを指定する。例えば、`<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>` のように記述される。

ルート要素 (Root Element):

文書全体を包含する唯一の最上位要素であり、J-LandXML では `<LandXML>` タグがこれに該当する。このルート要素は、J-LandXML 文書であることを示すとともに、バージョン

情報などのメタデータを含む。

子要素 (Child Elements):

ルート要素 <LandXML> の直下、または他の要素の内部に配置される要素であり、地理空間情報の具体的な内容を記述する。これらの要素は、情報の種類や特性に応じて階層的に配置される。

属性 (Attributes):

各要素の開始タグ内に記述され、その要素に関する追加情報を提供する。属性は、要素の特性や状態などを簡潔に記述するために用いられる。

2) 主要なデータ要素とその構造

<LandXML> ルート要素の下には、地理空間情報の種類に応じて様々な子要素が存在する。主要なデータ要素とその構造の概要を以下に示す。

<Units>: 長さ、角度、面積、体積などの計測単位を定義する要素。これにより、データの解釈における曖昧さを排除し、異なるシステム間での正確な情報共有を可能にする。

<CoordinateSystem>: 座標系に関する情報を定義する要素。地理座標系、投影座標系、標高系など、データの位置情報を特定するために重要な情報が含まれる。

<Surfaces>: 地形サーフェス (TIN: Triangulated Irregular Network やグリッド) データを記述する要素。三角形や点の集合として地形形状を表現し、標高情報などを含む。

<Surface>: 個々のサーフェス情報を格納する要素。

<PntList>: サーフェスを構成する点の座標リスト。

<Faces>: サーフェスを構成する三角形 (またはポリゴン) の頂点情報を参照する要素。

<Breaklines>: サーフェスの形状を特徴づける線形要素 (例えば、尾根線や谷線)。

<Alignments>: 道路や河川などの線形データを記述する要素。始点、終点、曲線要素 (円弧、クロソイドなど) のパラメータなどを含む。

<Alignment>: 個々の線形情報を格納する要素。

<Start>: 線形の始点座標。

<PI>: 線形を構成する交点 (Point of Intersection) 情報。

<Curve>: 円弧要素の情報 (半径、中心角など)。

<Spiral>: 緩和曲線要素の情報 (パラメータなど)。

<Profiles>: 縦断線形データを記述する要素。線形に沿った標高変化を示す。

<Profile>: 個々の縦断線形情報を格納する要素。

<PVI>: 縦断線形を構成する交点 (Point of Vertical Intersection) 情報 (距離、標高など)。

<Curve>: 縦断曲線の情報 (半径、長さなど)。

<CrossSections>: 横断データ (断面形状) を記述する要素。線形に直交する方向の形状を示す。

<CrossSection>: 個々の横断情報を格納する要素(測点位置など)。

<OffsetElev>: 横断構成点のオフセットと標高のペア。

<Parcels>: 区画(土地)に関するデータを記述する要素。境界線、面積、属性情報などを含む。

<Parcel>: 個々の区画情報を格納する要素。

<Boundary>: 区画の境界線を構成する点または線形要素への参照。

<Area>: 区画の面積。

<Structures>: 橋梁、トンネルなどの構造物に関するデータを記述する要素。形状、材質、属性情報などを含む。

<Structure>: 個々の構造物情報を格納する要素。

<Solid>: 構造物の3次元形状をソリッドモデルとして表現。

<Feature>: 構造物の属性情報(名称、材質など)。

<CgPoints>: 地上測量などで取得された点の座標データを記述する要素。点番号、座標値、属性情報などを含む。

<CgPoint>: 個々の点の情報を格納する要素。

これらの主要な要素以外にも、J-LandXML は、注釈情報、測量観測データ、図面情報など、様々な地理空間情報を記述するための要素を備えている。

3) データ構造の特徴

J-LandXML のデータ構造は、以下の特徴を持つ。

階層性: 地理空間情報を論理的なまとまりごとに要素として構造化し、親子関係によって階層的に表現する。これにより、データの整理と管理が容易になる。

柔軟性: XML の特性により、必要に応じて独自の要素や属性を定義することが可能であり、多様な地理空間情報に対応できる柔軟性を持つ。ただし、過度な拡張は相互運用性を損なう可能性があるため、注意が必要である。

可読性: XML 形式はテキストベースであり、ある程度の可読性を持つ。専用のソフトウェアを用いなくても、テキストエディタで内容を確認することができる。

拡張性: XML 関連の技術(XML Schema、XSLT など)を活用することで、データの検証、変換、表示など、様々な処理を効率的に行うことができる。

4) データ構造の課題と今後の方向性

J-LandXML のデータ構造は多くの利点を持つ一方で、いくつかの課題も存在する。XML ベースであるため、データ量が大きくなるとファイルサイズが増加し、処理に時間を要する場合がある。また、複雑な構造を持つため、データの作成や解析には専門的な知識が必要となる。今後の方向性としては、より効率的なデータ表現方法の検討や、他の標準規格(例えば、CityGML、IFC など)との連携強化が考えられる。また、Web 技術との親和性を高め、Web ベースでのデータ共有や可視化を容易にするための取り組みも重要となる。

3.3.5 土木設計データの汎用性

土木設計においては、効率的情報共有、生産性や品質向上のためにデータの汎用性を高めることが重要な課題となっている。

汎用性を高めるためには、以下のような取り組みが必要と考えられる。

- データフォーマットの標準化

異なるソフトウェアやシステム間でのデータ互換性を確保する必要があるためデータフォーマットの共通化が必要である。現在の共通のデータフォーマット(例: LandXML、IFC)は、「3次元設計データ交換標準(J-LandXML)」等が作成されているが、利用に際して不十分な点があるため更なる標準化が必要である。

- データモデルの共通化

設計、施工、維持管理の各段階で利用するデータの意味や構造を共通化し、一貫した情報管理の為にモデルの共通化が必要である。データの検索性、管理性、再利用性を向上させる必要があり、データの内容、作成者、作成時期、利用条件などの属性情報を適切に付与する必要があり、このルールの作成がより必要である。

- オープンデータ推進

地形や地盤情報などの公共性の高いデータについては、オープンデータとして公開する事で同じ調査を不要とし、調査・設計期間を短縮化させる。国地盤やプラトウなど集約されたオープンデータ公開を推進すべきである。

- クラウドプラットフォームの活用

クラウド上にデータを集約し、関係者間で共有・連携することで、場所や時間にとらわれないデータアクセスと協働作業を可能にする。

- API(Application Programming Interface)の活用

これまでに蓄積されたデータを全て共通化する事は現実的では無いため、異なるシステム間でデータを連携するためのAPIを整備し、柔軟なデータ連携環境を構築する必要がある。この際には、現実的な変換スピードが保てるか、データ精度などについて十分な精査を行う必要がある。

土木設計に必要なデータは多岐にわたるが、その汎用性を高めることは、設計業務の効率化、品質向上、コスト削減、そして建設生産システム全体の最適化に不可欠である。データフォーマットの標準化、データモデルの共通化、オープンデータの推進、クラウドプラットフォームの活用といった取り組みを通じて、土木設計データの価値を最大限に引き出すことが、今後の土木分野の発展に大きく貢献すると言える。

3.3.6 具体的な課題と解決策

(1) BIM/CIM で情報伝達に関するルールが定まっていない事に起因する課題

2次元図面基準類は土木製図基準(2009)(土木学会)や、CAD図に関してはCAD製図基準(平成29年3月)(国土交通省)等があり、紙からCADになった現状でも問題なく施工可能な状態である。BIM/CIMデータによる設計意図の伝達で、構造物形状以外にルールが定まっていないために発生している課題を列挙する。

1) 時系列情報

2次元図面では、現況図、撤去構造物図、構造図と時系列的なデータが含まれていることが多い。2次元図面では図面を分ける事と表題の文字情報によって、その情報がいつの時間であるかを伝達しており、BIM/CIMではこの時系列を混在する際の課題がある。

2) 線種やハッチ

2次元図面では細線・太線等の線の太さによって、目的物の種類等を区分している。また撤去構造物や隠れる構造、中心位置等を破線や一点破線等で表現している。ハッチに関しては現況構造物との取り合いが重要で施工箇所が分かりにくい場合に描画されることが多い。BIM/CIMでは線ではなく面で表される情報が中心であるために、表現方法としての課題がある。

| 線の種類 | 定義 | 一般的な用途 (図1.4.1, 1.4.2および関連図参照) |
|--|--|---|
| A  | 太い実線 | A1 見える部分の外形線 A2 見える部分の稜を表す線 |
| B  | 細い実線(直線または曲線) | B1 想像上の相貫線 B2 寸法線 B3 寸法補助線 B4 引出し線 B5 ハッチング B6 図形内に表す回転断面の外形 B7 短い中心線 |
| C  D  | フリーハンドの細い実線 ¹⁾ 細いジグザグ線(直線) ¹⁾ | C1, D1 境界が細い一点鎖線でない場合、対象物の一部を破った境界または一部を取り去った境界を表す線(破断線) |
| E  F  | 太い破線 細い破線 | E1 隠れた部分の外形線 E2 隠れた部分の稜を表す線 F1 隠れた部分の外形線 F2 隠れた部分の稜を表す線 |
| G  | 細い一点鎖線 | G1 図形の中心を表す線(中心線) G2 対称を表す線 G3 移動した軌跡を表す線 |
| H  | 細い一点鎖線で、端部および方向の変わる部分を太くしたもの | H1 断面位置を表す線(切断線) |
| J  | 太い一点鎖線 | J1 特別な要求事項を適用すべき範囲を表す線 |
| K  | 細い二点鎖線 | K1 隣接する部品の外形線 K2 可動部分の可動中の特定の位置または可動の限界の位置を表す線 K3 重心を連ねた線(重心線) K4 加工前の部品の外形線 K5 切断面の前方に位置する部品を表す線 |

備考 1) 二つのうちどちらかを用いることができる。一枚の図面の中には一種類の線を用いることを推奨する。

図 3-10 土木製図基準で定められた線種と用途

3) 構造物名称やブロック番号等

構造物のブロック割の番号や構造物の名称等は、平面図と断面図等の図面同士をつなげるために必要な情報である。BIM/CIMでは平面図、断面図と言った概念が無いためこれらの

情報は不要と考えられる。ただし施工順序の規定等，設計以外での利用頻度は多い。フロントローディングの場合，属性による付与は可能であるが，設計者が意図的に明示したい場合の手法が統一されていない。

4) 設計や計画上の仮想的な情報

土圧作用範囲である主動崩壊角や受動側の荷重を考慮している仮想海底面等，設計や計画上の仮想的な情報を示していることがある。BIM/CIM では仮想情報表示を前提としていないため，仮想と現実が混在する状況となる。

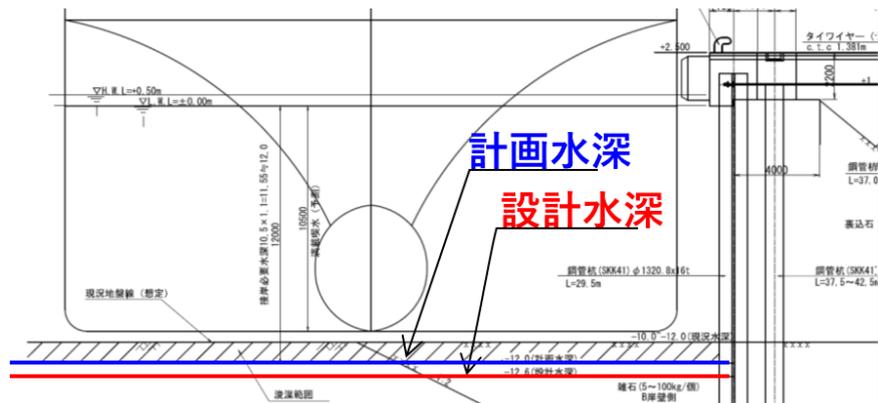


図 3-11 仮想的な情報の例：港湾での計画水深と設計水深

5) 本体工に比べて薄いシート類や小さいものの表示

シート類は本体工に比べて非常に薄く，その設置範囲や形状を図示するために，本来構造物に密着させるにもかかわらず図面上では隙間を開けて図示する事が多い。また小さい部材は，図面中で認識や寸法表示が難しいので別図面として図示する事が多い。BIM/CIM ではスケラブルであるために拡大すればわかる事であるが，見落としやすく，意図的に明示できないと言った課題がある。

6) 表現が変わることによる暗黙の了解

杭図面は，支持層への貫入量が明示されていれば，支持層が実際変動しても貫入量を守る施工がなされる。また支持層まで貫入されていなければ摩擦杭であると認識して地盤を乱さない施工を行う。このように暗黙的に設計者と施工者の意思伝達を行っている項目について，表示方法が変わると認識できなく恐れがある。

7) 設計されている(確定部分)と現地合わせの部分

図面上では施工者が設計意図を考慮して自由に施工して良い部分と，制限を設けている部分が混在している。地下埋設構造物の様に現地調査の上，確定してから施工者が施工する部分等の表現方法が BIM/CIM には無いものとする。また表現する事で逆に施工制約が発生する懸念もある。

8) 溶接記号

溶接記号や鉄筋機械式接手等の記号は，2次元での表現を前提としているために，3次元

での表現に課題がある。

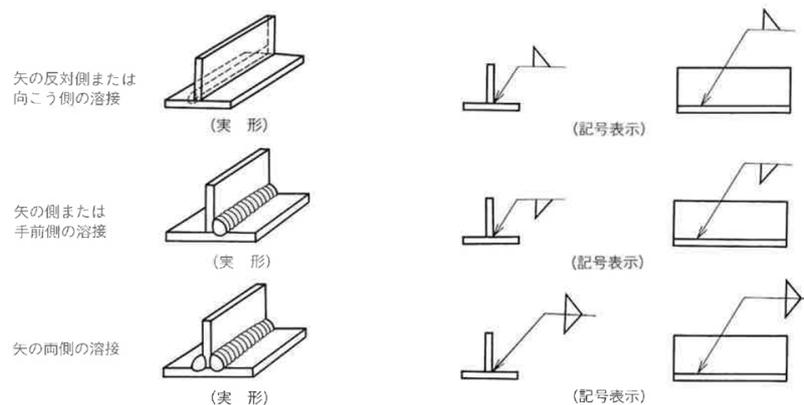


図 3-12 溶接記号の例

9) 製品依存に繋がる形状の表示

高欄等の一般的な製品は、製品依存が発生しないように相当品としての記載をいる。3次元モデルは、リアリティが高い事と、干渉が解消されている状態であるため、製品依存につながりかねない課題がある。

(2) プロダクトモデルの課題

IFC規格は杭オブジェクトとしてモデル化すると、形状を球に変更しても属性に石材など杭以外の値を入力しても杭として認識されるプロダクトモデルを考慮した規格である。現状のIFC2x3は建築規格であるため、土木オブジェクトが規定されておらず、3次元モデル成果物作要領(案)R4.3では属性で各種のオブジェクトを区分しようとしている。ただし例えば杭を"杭","PILE","鋼管杭φ1500mm"と設定した場合、人が見る意味は杭であるがソフトウェア上では違うものとして認識する言った課題がある。

(3) 現場活用時の課題

1) 現場で使うときの見え方

現状のCAD製図基準では色の指定もあり、黄色は紙が白であるため印刷後に日光下で非常に見えにくい。このように現場で利用されるメディアや状況を考慮して利用しやすい基準・規格が必要である。

2) 人力施工時必要なデータと機械・自動施工時に必要なデータ

現在では、機械施工比率が大きいがいまだ人力施工もいまだ残る状態である。また、3次元データを元に施工するICT施工等の自動化施工も多くなっている。人力施工の場合は、人の認識能力から従来2次元図面のような必要な情報に絞り込まれた状態である必要がある。ただし近年は現場でもタブレットやVR等による機器によるサポートも増えている。また@250mm等の鉄筋位置は、人間が施工しやすい煩雑な寸法値を避ける工夫が盛り込まれている。一方ICT

施工などの自動化では BIM/CIM データをそのまま活用して施工するため、寸法値は不要であり、機械識別可能な状態であれば問題は無い。そのため mm 単位や不規変化形状なども許容される。BIM/CIM では人力・機械・自動 施工区分意図が違うと大きな問題とる。

3) 施工検査時に必要な寸法値

施工検査は図面上の寸法値が、現場で合致しているかを確認する。そのため BIM/CIM モデルにも検査の観点からの検査箇所である寸法記入は必要である。ただし近年採用されている自動機械の軌跡を検査値として利用した検査や、点群を利用した検査等の場合は寸法が必要ではなく、形状すべてが検査対象となってしまう課題がある。

(4) 課題解決の方向性

BIM/CIM により構造物を建設する際は、2次元図面で使っていた情報はすべて伝達する必要があり、更に動きや時系列等 BIM/CIM の特性で伝達可能になった事項を含めるべきである。伝達方法は、従来の2次元図面時の方法が良いか、BIM/CIM の新しい機能を使って伝達したほうが良いのかを考えて決定する必要がある。

1) 基準類の新設・拡充

BIM/CIM モデルを想定した設計思想や意図等を伝達するための基準が定まっていない事項が多い。以下に基準類を新設または拡充したほうが良いと考えられるものを列挙する。

2) 時系列情報

IFC 規格で扱える時系列情報は、IfcTimeSeriesSchedule 等の時間を扱うエンティティと各オブジェクトを関連づける事で表現は可能ある。ただし、Rel から始まる関連付けの方法や時間に関するエンティティが複数あるため、表現方法が複数存在する。そのため、MVD 等の表現方法の規定が必要である。

3) 線種やハッチ

BIM/CIM モデルは、主に面で構成され2次元を前提とした線種のルールをそのルールをそのまま適用するまま適用するには無理がある。そのため、隠れる部分は透明度(Transparent)を利用する等、BIM/CIM が得意とする方法でかつ方法でかつ現場で見やすい等のデータ利用状況を加味して決定する必要がある。施工対象範囲などのハッチは、施工対象範囲などのハッチは、3次元では色次元では色の違いや施工範囲ボタン等で表示・施工範囲ボタン等で表示・非表示非表示が切り替わるなどの手が切り替わるなどの手法が考えられるが、設計者法が考えられるが、設計者と施工側が同じように見える同じように見える＝思想が伝達する事を念頭に基準作成が必要である。

4) 仮想的な情報

仮想的な情報は、仮想的な情報は、その構造物を建設する際に副次的にその構造物を建設する際に副次的に必要な情報であり、必要に応じて確認可能な状態にする必要に応じて確認可能な状態にするべきである。そのためには、どのように付与するか基準策定が必要であると同時に、ボタンを押すと表示・非表示が切り替わる等のように、ソフトウェア側表現も統一すると設計者がそれに応じた仮想的な情報を付与する事が出来る。

5) ソフトウェア等の拡充

IFC は、ISO を適用した国際ルールである。IFC は多岐 の項目とコネクション等の手続きを含み、の項目とコネクション等の手続きを含み、それゆえに難それゆえに難解な規格である。また同じことを表現する方法が複数存在する。そのため国では bSJ と協力を行い、MVD 等のデータ交換のシナリオに応じ、IFC 規格のどの機能を使って表現するかを規定している。ゆえに、IFC 規格が定まり、MVD 等の交換規格を定め、ソフトウェア交換規格を定め、ソフトウェアに反映させて初めてユーザーが利用できることになるため、早期にユーザーデータ交換出来る状況が望まれる。

6) 施工時の閲覧性

BIM/CIM モデルの状態では、全体が俯瞰可能な状態でモデルの状態であるが情報量が多すぎて個別の施工にそのまま適用するには向かない。特に人が判断して施工する場合には、従来の図面程度の情報量となるように検索及び絞り込みが可能な機能がソフトウェア側に必要である。また、現場での閲覧性を考慮すると 2 次元図面も利用される。この事を念頭に目的と利用シーンに応じた 2 次元、3 次元のハイブリッド利用を考慮してゆく必要がある。

7) 人力施工・機械化自動での利用シーンに関して

今後、機械による自動施工が標準的に適用される状態を想定し、モデル化時のルールが必要となる。ただしこの場合、工法の拘束が大きくなると考えられ、自動施工機械毎の能力に依存する部分が大きくなる。これらを解消するための 1 例として設計時に施工者が関与する設計時に施工者が関与する ECI や、設計施工一括発注等の設計と施工を融合させた設計を進める事が考えられる。

8) 施工検査のため寸法表示

現行の施工検査では、土木工事施工管理基準及び規格値(国土交通省)の様に基準で定められた測定位置及び誤差の他に、設計者が定めた基準値を示しており、この部分の検査を行う。現状では 3 次元モデル表記標準(案)(国土交通省)や、3 次元モデル表記標準(案)に基づく 3DA モデル作成の手引き(案)(国土交通省)によって、3 次元投影図や 3DA 図面などが示されており、従来の検査は可能な様になっている。ただし、近年発達している点群での検査に対しては、実際の検査方法や機種による誤差、点群の場合の許容誤差などに関する基準類が必要である。

3.3.7まとめ

土木設計は測量・土質調査、計画、設計の主なデータを3次元で統合する最も中心的なフェーズであると考えられる。そのため設計以外のデータの不具合などを調整する必要や、施工・維持管理へのデータを正確に渡す必要がある。

設計データは、この後の施工フェーズで活用できるよう、マシンリーダブルである事が重要であるが、構造物 IFC 規格では、Element 項目が鉄筋とその他となっており、そのままではマシンリーダブルとならない。そのため属性に部材名を入れることとなっているが、構造物階層が4段階だけであり、属性の入力方式も曖昧さや、運用面でこなれていない状況が散見される。

以上から、BIM/CIM を最も活用されていないフェーズであると考えられる。今後規格などの新設や統一が求められるものと考えられる。

3.4 施工

3.4.1 検討の流れ

建設業は、社会インフラの整備・維持を通じて、経済活動と国民生活を支える根幹産業である。しかしながら、近年、熟練労働者の高齢化と若手入職者の減少による深刻な労働力不足、厳しい労働環境、そして生産性向上の遅滞といった構造的な課題に直面している。同時に、自然災害の頻発と激甚化、高度化する社会インフラへの要求、そして環境負荷低減への社会的要請の高まりは、建設業に対し、より効率的で、安全で、持続可能な施工方法への転換を強く求めている。このような背景の下、情報通信技術（Information and Communication Technology, 以下 ICT）を建設施工プロセスに積極的に導入し、生産性向上、省人化、高精度化、安全性向上、そして環境負荷低減を目指す「ICT 施工」が、その解決策の有力な一手として注目され、急速な普及を見せている。本稿では、ICT 施工の現状を詳細に概観し、その導入と普及における多岐にわたる課題を深掘りするとともに、今後の技術革新と社会情勢の変化を考慮した上で、その将来展望を多角的に考察する。

3.4.2 ICT 施工の現状

ICT 施工は国土交通省が主導して導入している情報を施工に活用して生産性を向上しようとしている施工法の名称である。ここでは主な ICT 施工方法を以下に示す。

(1) ICT 建設機械による施工（マシンガイダンス・マシンコントロール）

GNSS（Global Navigation Satellite System）やレーザー技術を搭載したブルドーザー、バックホー、グレーダー、振動ローラなどの ICT 建設機械の導入が進んでいる。特に、大規模な土工工事や舗装工事において、設計データに基づいた自動・半自動制御による高精度な施工、丁張りの省略、手元作業員の削減といった効果が確認されている。直轄工事においては一定の普及を見せるものの、中小規模の工事や、複雑な地形・狭隘な現場での活用は限定的である。レンタル可能な ICT 建機の登場により、中小企業への導入のハードルは下がりつつある。



図 3-13 MG（マシンガイダンスの利用状況）

(2) 3次元出来形管理:

ドローンや地上型レーザースキャナーを用いた3次元測量により、施工後の構造物の形状を高精度に計測し、設計データとの差異を可視化する技術が普及しつつある。これにより、品質管理の効率化、手戻りの削減、検査の迅速化が期待できる。特に、土工や舗装工事においては、面的かつ迅速な出来形管理が可能となり、従来の点検測量と比較して大幅な効率化を実現している。構造物工においても、複雑な形状の出来形管理への適用が進みつつある。



図 3-14 3次元出来形管理帳票の例(出展:関東地方整備局)

https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000827056.pdf,2025/5/15)

(3) IoTセンサーによる品質管理・安全管理

温度センサー、湿度センサー、振動センサーなどを構造物や作業環境に設置し、リアルタイムにデータを収集・監視する試みが始まっている。これにより、コンクリートの養生管理の最適化、地盤の変位監視、建設機械の稼働状況の把握、作業員のバイタルデータモニタリングによる安全管理などが期待される。しかし、本格的な普及には至っておらず、実証実験段階の事例が多い。現場環境への耐久性や、収集したデータの分析・活用方法の確立が課題となっている。

(4) ドローンによる進捗管理・安全管理:

ドローンに搭載したカメラによる空撮画像を3次元モデル化し、工事の進捗状況を可視化する技術が導入されつつある。広範囲の進捗状況を効率的に把握できるため、工程管理の精度向上に貢献する。また、人が立ち入ることが困難な場所の点検や、災害発生時の状況把握など、安全管理への応用も期待されている。しかし、天候に左右されやすい、飛行規制があるなどの制約もある。

(5) ウェアラブルデバイスによる作業支援・安全管理:

スマートウォッチやスマートグラスなどのウェアラブルデバイスを活用し、作業指示の伝達、作業履歴の記録、危険情報の通知、作業員のバイタルデータモニタリングなどを行う試みが一部で始まっている。ハンズフリーでの情報アクセスやリアルタイムなコミュニケーションが可能になる

ため、作業効率や安全性の向上が期待される。しかし、デバイスの耐久性、バッテリー持続時間、現場での使いやすさなどが課題となっている。



図 3-15 遠隔臨場実施状況(出展 NEXCO 中日本 HP,https://www.c-nexco.co.jp/corporate/pressroom/news_release/5425.html,2025/5/15)

3.4.3 民間主導の自動建設機械など

近年の建設現場では、ICT 施工の他にも生産性向上のトップランナーを目指して独自開発している工法や施工機械が出現している。以下にそれらの例を示す。

(1) 自動運転バックホー

マシンコントロールバックホーは、コマツ等から発売されているがコントロールされている動作は人が運転しているバケットの操作を設計面以上に動作させない作動制御が中心であり、バックホーには人が搭乗している。以下に示す自動運転バックホーは、人が搭乗せずバックホーが自律的に動作するバックホーである(出展:重機の遠隔操作システムと自動運転技術の複合による作業現場の安全運用を検証, 安藤・ハザマ HP,<https://www.ad-hzm.co.jp/info/2023/20231213.php>,2023.9.1)。更にこの例では、2 台が同時に作動するなど、他の変化する作業を考慮しながら、自律的に作動する。この様に完全に人が不要となる自動運転機械が近年は登場してきている。



図 3-16 自動運転バックホーの作動状況

(2) 鉄筋自動組立システム

鉄筋組立は、鉄筋を人が持ち運んで現地へ設置し、結束線で鉄筋同士を結びつける作業である。鉄筋はその種類や計上、配筋ピッチがそれぞれ違うため自動化が難しい工種でもある。以下の事例はプレキャストの部材作成の工場内で、鉄筋をロボットが自動で組立っている状況である(出展：三井住友建設「PC床版製作に鉄筋組立自動化システム「Robotaras®Ⅱ」を導入」, <https://www.smcon.co.jp/topics/2021/09031300/>,2025/5/15)。この事例では、PC床板の配筋や結束を配筋アームや結束ロボットなどにより自動で組み立てる。ただしこれはプレキャスト製品であるため、同じ形状・配筋の製品を数多く製作するために、このような工場では効率が良いと言った利点があるため開発されたものと考えられる。



図 3-17 鉄筋の自動組立状況

(3) シールドマシンの自動運転

シールドトンネル工事は、比較的機械化が進んでいる工事であるが、掘進計画やシールド機オペレーターへの指示等に多大な手間と時間を要している。旧来は機械が発生する音による判断など職人技で掘進指示を出してきた経緯がある。近年は数々の計測センサーを組み合わせることでそのデータで判断を行うが、切羽圧力やシールド機負荷状態など多数のデータを監視しながら指示を考える必要がある。紹介する自動運転シールド機は、これらのデータを AI でデータの判断をサポートするシステムである(出展：清水建設シミズ・シールド AI」によるシールド機自動運転に着手 , <https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2021/2021052.html>,2025/5/15)。

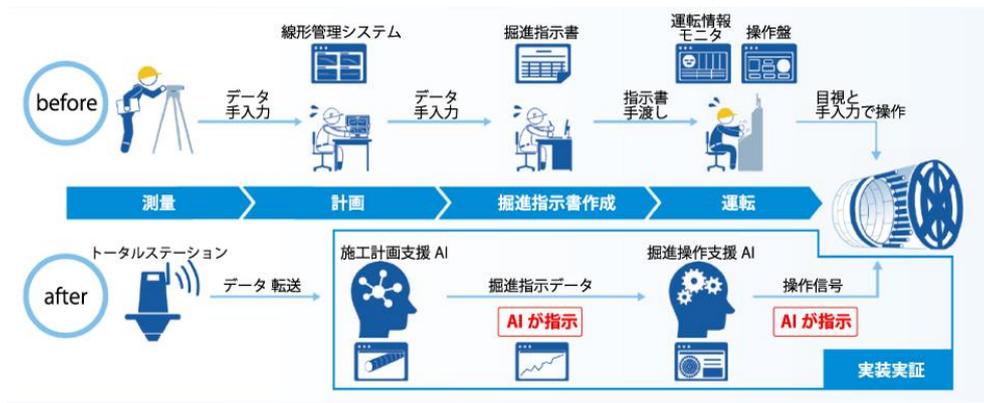


図 3-18 自動運転シールドの概念図

(4) 自動施工技術基盤 OPERA

OPERA とは、建設機械の遠隔操縦支援技術や、自動運転技術開発を行う上で必要となる自動運転対応建設機械

実験フィールド

無線通信システム

シミュレータ

ミドルウェア

を公開・提供する研究開発用プラットフォームである。OPERA は、茨城県つくば市の土木研究所にて開発・整備されている。(出展：土木研究所 HP, 自動施工技術基盤 OPERA <https://www.pwri.go.jp/team/advanced/opera.html>)



図 3-19 OPERA のロボット OS で自動運転をしている状態

3.4.4 土木施工における必要なデータ

(1) 土木施工の各段階における必要データ

土木施工は、準備段階、施工段階、完成・引渡し段階という一連のプロセスを経て完了する。各段階においては、それぞれ特有のデータが必要となる。

- 準備段階

工事着手に先立ち、設計図書、現況測量データ、地質調査資料、環境調査資料、関係法令・許認可情報、施工計画、施工図・CAD データ、積算資料などが準備される。これらのデー

タは、工事の全体像を把握し、安全かつ効率的な施工計画を策定するための基礎となる。特に、詳細な設計図書と現況測量データは、施工の精度と効率性を左右する重要な情報源となる。

- 施工段階

施工段階では、準備段階で作成されたデータに加え、丁張りデータ、出来形管理測量データ、品質管理データ(材料試験データ、施工管理データ、出来形管理データ、写真管理データ)、安全管理データ(作業員名簿、安全点検記録、KY活動記録、事故・災害報告書)、工程管理データ(作業日報、工程表、進捗管理データ)、環境管理データ(騒音・振動測定データ、水質測定データ、廃棄物管理データ)、そして ICT 施工を導入している場合は、3次元設計データ、ICT 建設機械の稼働データ、3次元出来形管理データなどが生成・活用される。この段階では、設計図書を基に、実際の施工状況をデータとして記録し、品質、安全、工程、環境の各側面から管理を行うことが重要となる。

- 完成・引渡し段階

工事完了後には、実際に施工された構造物を記録した竣工図、完成写真、発注者による検査記録、引渡し書類、維持管理データなどが作成・提出される。近年では、これらの成果物を電子媒体で納品する電子納品が普及しており、CAD データ、XML データ、PDF データなどの形式でデータが提供される。この段階で作成されるデータは、構造物の履歴として、将来の維持管理活動において重要な役割を果たす。

(2) 土木施工データにおける汎用性の重要性

土木施工におけるデータの汎用性は、を高めることが課題となっている。データの汎用性とは、ある段階で生成されたデータを、異なる段階や異なるシステム間で円滑に再利用できる能力を指す。土木施工におけるデータの汎用性向上は、以下の点で重要な意義を持つ。

情報共有の効率化：設計段階で作成された 3次元モデルや設計情報は、施工段階の ICT 建設機械の制御データや出来形管理の基準データとして活用できる。また、施工段階で取得された出来形データや品質管理データは、完成図書や維持管理計画の基礎情報として利用可能となる。これにより、情報の再入力や伝達ミスを削減し、業務効率を大幅に向上させることができる。

3.4.5課題

(1) 開発投資

施工段階における ICT 活用を阻む技術的な課題として、まず挙げられるのは初期投資の負担である。ICT 建設機械、3次元測量機器、そしてそれらを運用するための関連ソフトウェアの導入には、一般的に高額な初期投資が必要となり、特に経営基盤が脆弱な中小建設業者にとっては、その導入が大きな経済的負担となる。

(2) 開発者の人材確保

ICT 技術者の育成・確保の遅れが挙げられる。ICT 機器の適切な操作、現場で収集されたデータの高度な処理と分析、そして ICT システム全体の管理・運用には、専門的な知識とスキルを有する技術者が不可欠である。しかしながら、現状では、その育成と確保が需要に追いついていない状況が見受けられる。

(3) 機器等の現場への対応

建設現場特有の環境への適応性も重要な課題である。多様な現場環境、例えば悪天候、激しい振動、高濃度の粉塵など、ICT 機器が必ずしもその性能を十分に発揮できるとは限らない。したがって、過酷な現場環境に耐えうる堅牢性や耐久性が求められる。さらに、異なるメーカーの ICT 機器やソフトウェア間におけるデータ連携の課題も存在する。

(4) データ形式などの汎用化

データ形式やインターフェースの標準化が遅れているため、現場で収集されたデータを効率的に統合・活用することが困難な場合があり、情報連携のボトルネックとなっている。加えて、建設プロジェクトで取り扱われる工事の進捗情報や設計情報といったデータは機密性が高く、サイバー攻撃のリスクに対する堅牢なセキュリティ対策の構築も不可欠である。

3.4.6データ形式汎用化への一考察

生産性の向上には、各フェーズで統一的にデータを活用する必要があり、3次元モデルに属性付与する事によってデータの再利用性を図る意図がある。ただしモデル構成や属性付与ルール等が明確化されておらず、以下の課題がある。

(1) 3次元モデルのフォーマット(オリジナルか IFC/J-LandXML のどちらか)

国土交通省における 3次元モデル形式は、オリジナルファイル形式と共通形式(IFC または J-LandXML)の 2種類である。汎用性を考えると共通形式が良いが、現在はオリジナルフォーマットでの活用が多いものと考えられる。

(2) 3次元モデルの階層構造

モデル(形状)は、構造物全体があり、壁や底板などに分かれ、その中に鉄筋を含むなど階層構造で考えた方が管理しやすい。例えば属性付与で竣工年月日を鉄筋や底板にそれぞれ付与するより、構造物一括で付与した方が良いためである。これらの階層構造は、3次元モデル成果物作成要領(案)港湾編(令和4年4月版)等ではルール付けがされているが、細かな構造物や部材で定めのないものがあるため、統一的なルール作りが望まれる。

(3) 属性情報の付与ルール

属性の入力は、マシンリーダブルを考慮する事が望まれる。そのため全・半角の差や、データ変換によって対応できない文字コード体系、矢板 III(半角の $i \times 3$)型、SP-3, SP-III(全角の 3)等の表記方法などを考慮したルールが必要であると考えられる。

(4) モデル化範囲(詳細度)の制限

現状での国の設計発注仕様は、詳細度が 100~500 で区分され、外形が分かる程度のモデル化で良い=詳細度 300 等の指定となっている。本来の設計から施工への伝達内容は、設計項目全てが必要であり、言い換えると構造物が製作・施工出来ない範囲でのモデルは施工側では不要と考えられる。計画、基本設計段階では上記の詳細度も受容できるが、最終成果は構造物が全て製作可能な詳細度が必要である。

(5) 溶接記号などの記号の問題

図面では細かな部分や仮想的な部分を表現するための記号が使われるが、この記号の 3次元化ルールの定めがない。主な記号類を以下に示す。

1. 溶接記号, 2.法面や勾配方向などを定める記号, 3.地盤や岩盤を示す記号, 4.立ち入り禁止や民地境界などを定める境界
- 2.

(6) 自動建設機械を動かす情報の共通化

自動建設機械が標準工法となった場合には、機械の所有会社のみが施工できることとなる。一方、社会全体での建設生産性の向上を考慮すると共通の自動化機械の指令データフォーマットで作動する事が望ましい。ただし、全てを共通化すると、開発会社のインセンティブが無くなるため、大まかに作動する指令システムのみを共通フォーマットとし、細かな動きは各社毎に違う仕組みが良いのと考えられる。これにより同じ動きをする自動建設機械でも A 社の自動建設機械は燃費が良い、工程短縮が可能等の差別化が図られ、開発各社へのインセンティブになるものと考えられる。

(3)共通自動化データの分類・範囲(その1)

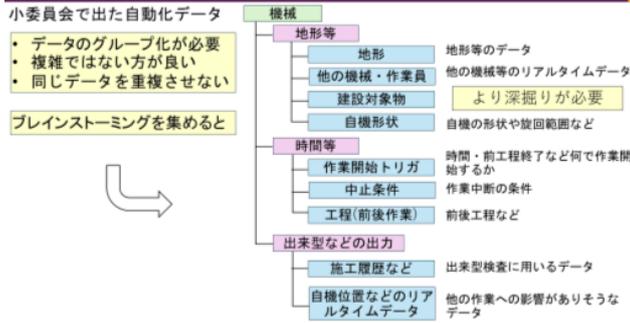


図 3-20 データ階層の試案結果図

(3)共通自動化データの分類・範囲(その3)

共通自動化データの分類・範囲(案)

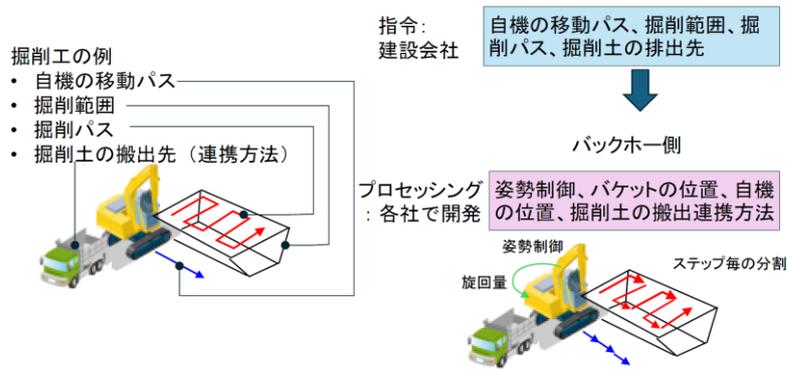


図 3-21 自動建設機械の指令データ共通化概念図

(7) プラットフォームの必要性

現状では同じ IFC ファイルでも、表示ソフトの差によって確認可能な属性やモデル表示が異なるなどの差が発生している。この状況に対応するために bSJ, OCF 等の団体が利用状況に応じた各ソフトの検定を行っている。ただし利用状況は自動建設などの高度利用に対応しておらず、現状では目視確認と数量計算のみである。このため共通のプラットフォームまたはファイル規格に対応したミドルウェアが必要である。

3.4.7 将来展望

人工知能 (AI) の進化と実装は、建設業における意思決定の高度化を実現する可能性がある。画像認識、自然言語処理、機械学習といった AI 技術は、過去の膨大なデータ解析に基づいた最適な設計案の自動生成、複雑な施工計画の最適化、建設機械の自律運転、品質管理における不良箇所の高精度な自動検出、さらにはインフラ維持管理における異常の早期予測などを現実のものとすると考えられる。また、IoT (Internet of Things) とセンサー技術の深化は、建設現場のあらゆる要素をネットワークで繋ぎ、温度、湿度、振動、ひずみといった多様なデータをリアルタイムに収集・分析することを可能にする。これにより、従来の手法では困難であった精緻な進捗管理、リアルタイムな安全管理、そして予防保全型の高度な維持管理が実

現する。

XR (Extended Reality) 技術、すなわち VR (Virtual Reality)、AR (Augmented Reality)、MR (Mixed Reality) の普及は、設計段階における仮想体験を通じた関係者間の合意形成を促進し、施工前の詳細なシミュレーションによる潜在的なリスクの低減に貢献する。また、現場作業員への直感的かつ効果的な指示・教育、さらには遠隔地からの臨場感のある現場管理などを実現し、生産性と安全性の向上につながるものと考えられる。現実世界の建設現場や構造物をサイバー空間に高精度に再現するデジタルツインの実現は、シミュレーションや高度な分析を通じて、より効率的で持続可能な建設生産プロセスや維持管理計画の策定を支援する。設計段階から維持管理段階までの情報を統合的に管理することで、建設ライフサイクル全体での最適化が可能となる。

深刻化する人手不足に対応するため、ロボット技術と自動化の進展は不可避である。多様な種類の建設ロボットが開発・実用化され、危険な高所作業や繰り返しの多い単純作業を人間の作業員から代替するようになる。これにより、省人化と安全性向上が同時に達成される。

設計、調達、施工、維持管理といった建設サプライチェーン全体がデジタルプラットフォームで繋がり、情報がリアルタイムかつシームレスに共有・活用されるサプライチェーンのデジタル化は、無駄なコストや時間の削減、そしてより効率的なサプライチェーンマネジメントを実現する。

建設業界が、IT、通信、製造業など、異業種の先進的な技術やノウハウを積極的に取り込み、新たな ICT ソリューションを開発・実装するオープンイノベーションの動きは加速する。特に、革新的な技術を持つスタートアップ企業との連携は、技術導入の重要なポイントと成ものと考えられる。さらに、ICT は持続可能な建設への貢献においても重要な役割を果たす。建設プロセスにおける資源の効率的な利用、エネルギー消費の最適化、廃棄物の削減などを通じて、環境負荷の低減に貢献する。BIM/CIM による材料の最適化や、IoT センサーによるエネルギー消費のモニタリングなどがその具体的な例である。ICT 施工は、建設業が直面する構造的な課題を克服し、持続可能な発展を遂げるための不可逆的な潮流である。現状では、技術的な成熟度、経済的な負担、制度的な制約、そして人材育成の遅れといった課題が存在するものの、政府の強力な推進、技術革新の加速、そして社会全体のデジタル化の流れを背景に、その導入と普及は着実に進んでいる。将来的には、AI、IoT、XR、ロボット技術といった高度な ICT が建設生産プロセスのあらゆる段階に深く浸透し、生産性、安全性、品質、そして持続可能性を飛躍的に向上させることが期待される。この変革を成功させるためには、産学官が緊密に連携し、技術開発の推進、人材育成体制の強化、制度改革の断行、そして何よりも建設業界全体の意識改革を粘り強く進めていくことが不可欠である。

3.4.8 まとめ

建設に関しては、ICT 施工が導入されて情報を電子的に活用している状態である。また新

たな自動運転建機も開発が活発であり、今後の発展が期待できる。建設生産性の向上を期待可能な中心的フェーズで有り、更なる自動化に関しても、官民連携の検討が活発化される事を期待する。

3.5 維持管理

3.5.1 検討の流れ

高度経済成長期以降に集中的に整備された我が国の土木構造物は、社会経済活動を支える上で不可欠な役割を果たしてきた。しかしながら、建設後長期間が経過し、老朽化が進行する構造物が増加の一途を辿っており、その維持管理は喫緊の課題となっている。近年の自然災害の激甚化や頻発化も、構造物の健全性維持の重要性を一層高めている。本稿では、土木構造物の維持管理業務の現状を概観し、その遂行における多岐にわたる課題を深掘りするとともに、持続可能な維持管理体制を構築するための方向性について考察する。

3.5.2 維持管理の現状

土木構造物の維持管理は、点検、診断・評価、補修・補強・更新の設計および施工、記録・情報管理などが主要な要素となる。このフェーズは、維持管理計画に基づき定められた期間ごとに点検・評価を繰り返す。その中で、補修や補強が必要と判断すると設計、施工を行い、維持管理計画を見直す事を行っている。この流れは、建設全体の流れと同様であるが、その違いは点検・評価プロセスがある事である。

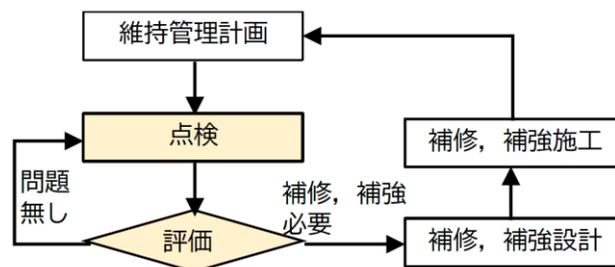


図 3-22 維持管理内のプロセス

(1) 点検・評価方法と目的

国や地方自治体等、鉄道・道路・製鉄等の民間での維持管理事例を調査した。国と民間どちらも、基本的には以下の図に示すような国が発行する維持管理要領やマニュアルなどを基に点検・評価が行われている。ただし、民間に関しては利用実態や施設などの特殊性に応じた独自の

維持管理要領などを定める例があるが、流れは同様である。点検は、変状の発生や進行を効率的かつ早期に発見する事で構造物の性能が、低下する可能性や進行を早期に発見することを目的として実施している。

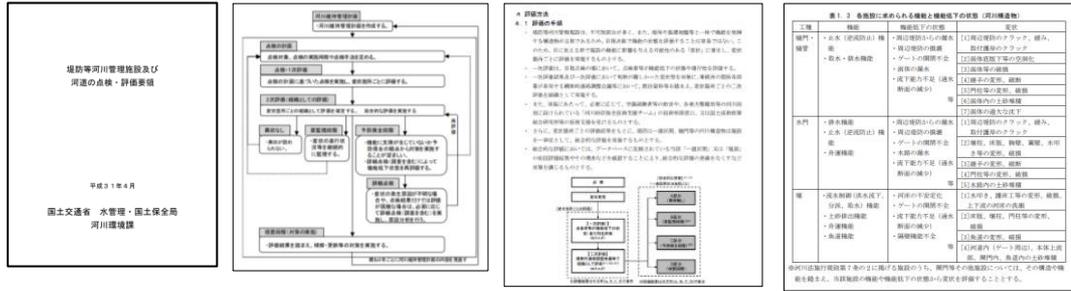


図 3-23 国が発行する維持管理の実施要領の例

出展：堤防等河川管理施設及び稼働の点検・評価要領 国土交通省 水管理国土保全局 河川環境課 平成 31 年 4 月

(2) 点検

構造物の変状や劣化の状況を把握するために定期的に実施される点検は、維持管理段階である。従来は近接目視点検が主体であったが、近年では、橋梁点検における近接目視の原則廃止や、トンネル、法面、港湾施設など多様な構造物種別における効率化・高度化のニーズから、ドローン、赤外線カメラ、打音検査ロボット、水中点検ロボットといった新技術の導入が進んでいる。また、点検結果の記録・共有には、タブレット端末や専用ソフトウェアの活用が見られる。また民間での点検手法については、国に定められている手法に比べ、目的に応じた多彩な方法を採用している例が多かった。以下に、高速道路会社での点検手法について例を示す。斜張橋の斜材の維持管理ロボットや赤外線によるひび割れの発見、ドローンによって取得した画像によるひび割れの自動認識など、それぞれの構造物部材に応じた点検手法を開発している。これらの手法は点検時の安全性向上や自動化によるコスト削減、詳細な劣化進行の把握などを目的としている。また、国でも ICT 施工やレーザースキャナ(TLS,MMS 等)による測量マニュアル案、出来形管理基準案が策定されるなど、新しい測量・点検手法を導入している。レーザースキャナによる点群計測などに代表されるように、このような計測方法が発達すると、従来のスケールでの寸法計測等と比べ、飛躍的にデータ量が増加する。

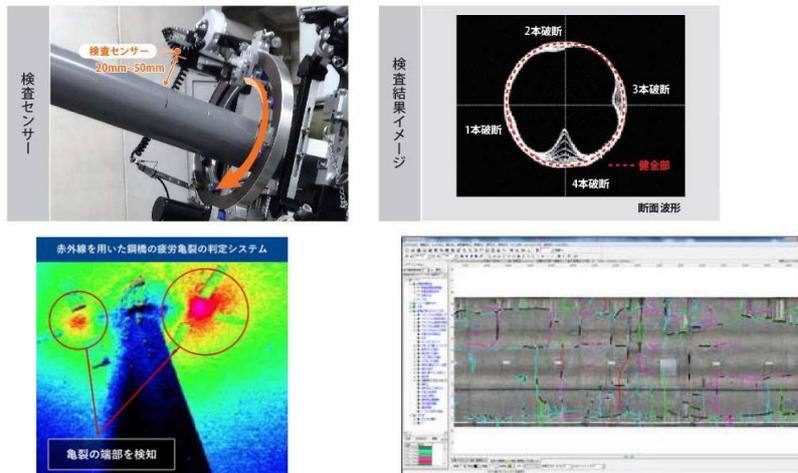


図 3-24 民間での点検手法の多様化の例(出展：中日本ハイウエイエンジニアリング東京 HP,[https://www.c-](https://www.c-nexcohet.jp/tech/284/)

[nexcohet.jp/tech/284/](https://www.c-nexcohet.jp/tech/284/)より)

(3) 診断・評価

点検結果に基づき、構造物の健全性を評価し、必要な措置の内容や緊急度を判断する診断は、専門的な知識と経験を要する。非破壊試験（超音波探傷試験、ひび割れ深さ測定など）や、詳細な調査・解析が行われる場合もある。近年では、過去の点検・補修履歴データや、構造物の設計情報、環境条件などを統合的に解析し、劣化予測を行うための技術開発が進められている。

(4) 補修・補強

診断結果に基づき、構造物の機能回復や性能向上を図るための措置が実施される。これには、軽微な補修から、大規模な補強、さらには構造物の更新までが含まれる。近年では、プレキャスト部材の活用による工期短縮、高耐久性材料の適用によるライフサイクルコストの低減、そして ICT 技術を活用した効率的な施工などが推進されている。また、既存の構造物を最大限に活用するリニューアル技術への関心も高まっている。

3.5.3 維持管理に必要なデータ

(1) 記録・情報管理

点検、診断、措置に関する記録は、構造物の履歴情報として蓄積され、その後の維持管理活動の基礎となる。従来は紙媒体での管理が中心であったが、近年では、データベースや GIS（地理情報システム）を活用した電子的な情報管理システムへの移行が進んでいる。これにより、過去のデータの検索性向上、経年変化の分析、そして維持管理計画の策定支援などが期待されている。

3.5.4 維持管理での課題

(1) 老朽化の進行と管理対象の増大

建設後 50 年を超える老朽化した構造物の割合は年々増加しており、今後もその傾向は続くと言われている。これは、維持管理の対象となる構造物の量が飛躍的に増大することを意味し、限られた予算と人員で、より多くの構造物を効率的に管理していく必要に迫られている。特に、地方公共団体が管理する中小規模の構造物においては、予算や専門人材の不足が深刻な状況にある。

(2) 維持管理予算の制約

多くの地方公共団体において財政状況が厳しく、維持管理に十分な予算を確保することが困難となっている。これにより、必要な点検や補修が遅れたり、抜本的な対策が先送りされたり

するリスクが高まっている。また、維持管理予算の配分においても、緊急度の高い対策に偏重し、予防保全的な措置が十分に行き届かない傾向がある。

(3) 専門人材の不足と高齢化

維持管理業務には、構造物の専門知識、点検・診断技術、補修・補強に関する知識、そして現場での経験が不可欠であるが、これらの専門人材の不足と高齢化が深刻化している。特に、高度な診断技術や補修設計能力を持つ技術者の育成が急務である。また、若手技術者の入職も伸び悩んでおり、技術承継の遅れも懸念されている。

(4) 点検・診断技術の効率化と高度化の遅れ

従来の近接目視点検は、多くの時間と労力を要するだけでなく、点検者の主観による評価のばらつきや、死角が生じる可能性も指摘されている。新技術の導入は進みつつあるものの、その適用範囲や精度、そしてコスト面での課題も存在し、広範な普及には至っていない。また、点検データに基づいた精緻な診断技術や、将来の劣化予測技術の確立も十分とは言えない状況にある。

(5) 維持管理情報の統合的な管理・活用の遅れ

点検、診断、措置に関する情報は、依然として紙媒体や分散した電子データで管理されているケースが多く、必要な情報を迅速に検索したり、経年変化を分析したりすることが困難である。統合的な情報管理システムの導入は進みつつあるものの、その機能や使いやすさ、そして既存データとの連携などに課題が残されている。また、蓄積されたデータを AI などの技術を活用して分析し、維持管理の効率化や高度化に繋げる取り組みは緒に就いたばかりである。

(6) 自然災害リスクの増大と予防保全の重要性

近年、気候変動の影響により、台風や豪雨などの自然災害が激甚化・頻発化しており、土木構造物が甚大な被害を受けるリスクが高まっている。事後的な復旧対策には多大なコストと時間を要するため、設計段階からの耐災害性の向上に加え、日常的な点検や早期の補修による予防保全の重要性が増している。しかし、予防保全の実施には、長期的な視点と安定的な予算の確保が必要となる。

(7) 関係機関との連携不足

土木構造物の維持管理は、管理者(国、地方公共団体、道路会社など)だけでなく、設計コンサルタント、建設業者、点検業者など、多くの関係機関が連携して行う必要がある。しかし、情報共有の不足や役割分担の不明確さなどにより、連携が円滑に進まないケースも見られる。

3.5.5 維持管理体制構築に向けた方向性

点検結果の管理は従来、紙媒体にて行って来たが、近年では上述したような大量のデータを BIM/CIM データの属性として付加し、一元管理が行えるようになってきている。以下の図に国での維持管理プラットフォームの例を示す。このような大量のデータは、紙の状態では活用出来ない事から、このようなプラットフォームでの活用に移行しつつある。プラットフォーム上では点群同士で比較した地形変化や補修個所の図面参照等が可能となり、維持管理に活用されている。プラットフォームでは管理基準以上の地形変化の場合に色分けする事で、全体を俯瞰的に見た際に維持管理上課題がある個所が発見しやすく、その箇所の以前やそれ以前の地形変化や設計図面、補修図面などが即座に確認できる事で、緊急時の対応も行いやすい。持続可能な土木構造物の維持管理体制を構築するためには、以下の方向性に沿った取り組みを推進していく必要がある。

(1) 予防保全への転換と戦略的な維持管理の推進

事後的な対策から、早期の点検・診断に基づいた予防保全へと軸足を移し、構造物のライフサイクル全体を見据えた戦略的な維持管理を推進する必要がある。そのためには、長期的な維持管理計画の策定、優先順位に基づいた効率的な予算配分、そして計画的な点検・補修の実施が不可欠となる。

(2) ICT・AI 技術の積極的な導入と活用

点検業務の効率化・高度化には、ドローン、ロボット、AI 画像診断などの新技術を積極的に導入し、省人化と精度向上を図る必要がある。また、蓄積された維持管理ビッグデータを AI で解析し、劣化予測の精度向上や、最適な補修時期・方法の提案に繋げることも重要となる。さらに、IoT センサーを活用したリアルタイムな構造物のモニタリングシステムの導入も、早期の異常検知や予防保全に有効である。

(3) 維持管理情報の統合的な管理・共有システムの構築

点検、診断、措置に関する情報を一元的に管理し、関係者間でリアルタイムに共有できるクラウドベースのプラットフォームを構築する必要がある。これにより、情報の検索性向上、経年変化の分析、そして維持管理計画の策定・共有が効率的に行えるようになる。BIM/CIM の概念を維持管理段階にも拡張し、設計情報、施工情報、維持管理情報を統合的に活用することも重要となる。



図 3-25 河川(国)での維持管理プラットフォーム例(出展:荒川河川事務所 HP、

<https://arage.maps.arcgis.com/apps/webappviewer3d/index.html?id=aad07ecc86dc4a09a547216eca0fa23a>)

(4) 専門人材の育成と技術承継の推進

維持管理に必要な専門知識・スキルを持つ技術者を育成するための体系的な研修プログラムを開発・実施する必要がある。また、熟練技術者の知識や経験を若手技術者に効果的に伝承するための仕組みづくりも重要となる。産学官が連携し、維持管理に関する教育・研究を推進することも不可欠である。

(5) 民間活力の導入と連携強化

維持管理業務の効率化・高度化を図るためには、民間企業の持つ技術やノウハウを積極的に導入することが有効である。PPP/PFI(官民連携/民間資金活用事業)の推進や、包括的な維持管理業務委託の導入などを検討する必要がある。また、管理者、設計コンサルタント、建設業者、点検業者などの関係機関が、情報を共有し、連携を強化するための枠組みづくりも重要となる。

(6) 国民への情報公開と理解促進

老朽化が進む社会インフラの現状や、維持管理の重要性について、国民への情報公開を積極的に行い、理解と協力を得る必要がある。構造物の健全性に関する情報を分かりやすく提供することで、維持管理に対する国民の意識を高め、必要な予算確保への支持を得やすくすることが期待される。

(7) 長期的な視点と持続可能な財源の確保

持続可能な維持管理体制を構築するためには、短期的な視点ではなく、長期的な視点に立ち、安定的な財源を確保することが不可欠である。将来の維持管理需要を見据えた予算計画を策定し、必要な財源を確保するための仕組みづくりが求められる。

我が国の土木構造物の維持管理業務は、老朽化の進行、予算制約、人材不足など、多くの課題に直面しており、その現状は決して楽観視できるものではない。しかしながら、ICT・AI技術の進展、BIM/CIMの推進、そして関係者の意識改革といった潮流は、持続可能な維持管理体制構築への道筋を示している。今後は、本稿で考察した方向性に沿って、産学官が連携し、具体的な取り組みを加速していくことが求められる。それにより、安全・安心で持続可能な社会インフラを次世代に引き継ぐことが可能となるだろう。

3.5.6 まとめ

鉄道や高速道路等の民間施設に関する維持管理は、現状で膨大な施設を維持・管理しており長い歴史があるためその管理方法を各社で統一することは難しいものと考えられる。一方国の施設は、国が構築し国が管理する構造物に関しては、BIM/CIM原則化後の構造物は3次元での管理が主流となるものと考えられる。

3次元モデルをベースとした維持管理は、何かを探すためのキーが構造物になるものと考えられるため、検索が早く、人の直感になじみが深いものと考えられる。従来は10kmポストにある3号電灯などの文字による管理であるが、モデルを見て直接選択可能であり、現地との融合性も問題ない。この様に一度3次元モデルによる管理が出来て、利便性を認識できた段階から順次3次元による維持管理が増加するものと考えられる。また、検索の早さから災害時の対応が早急になる等の効果が期待される。

4. WG2

4.1 活動の背景と概要

建設業界では、深刻な労働力不足や高齢化といった課題を背景に、生産性向上が喫緊の課題となっている。その具体的な施策のひとつとして、設計・施工・補修を通じた構造物のプレキャスト化の促進が期待されている。しかし、実務上は多くの技術的・制度的な課題が存在しており、プレキャスト化が飛躍的に進展しているとは言い難い状況である。WG2 では、将来的なプレキャスト構造物の姿を、「レゴブロック」のように各構成要素をロボットで積み上げて構築するというビジョンで捉えて活動を行ってきた。このような理想的な将来像を出発点とし、そこから現在の課題を明らかにして逆算的に検討を進める、いわゆる“バックキャスト”型のアプローチをとった。

図 4.1 にレゴブロックと第一期で実施した試験体との対比を示す。接合部の面積比は 22%と 30%と比較的近いが、接合部の径/高さの比は 2 倍近く異なり、レゴブロックのほうが小さい埋め込み長で非常に高精度な接合構造を有することが分かる。本 WG では、このような玩具の構成原理を土木構造物に応用できないかという観点から、活動を進めた。

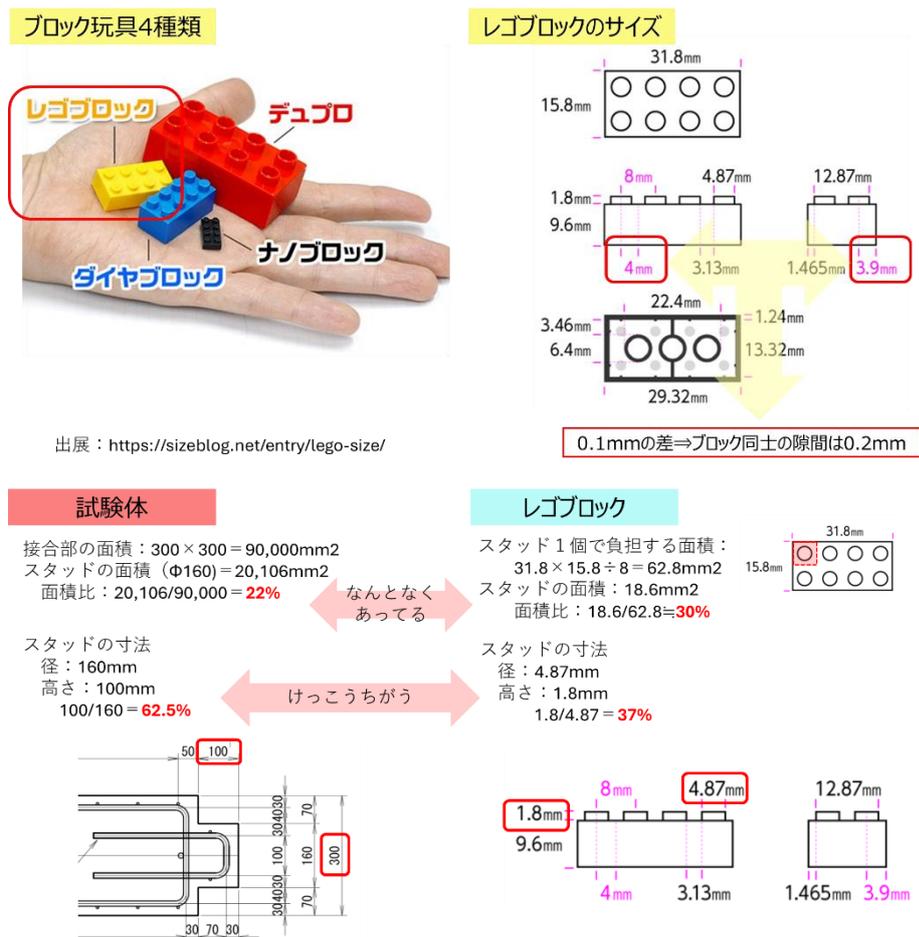


図 4.1 レゴブロックと第 I 期試験体との比較

表 4.1 に示す、全 22 回の委員会と模型実験などを通して、プレキャスト化促進のための課題や今後の方向性について議論をしてきた。本報では、WG の活動の中でも中心的な議論の内容を以下の 4 項目に分けて報告する。

Theme01_プレキャストはなぜ採用されにくいのか?・・・4.2

Theme02_ロボット施工のために・・・4.3

Theme03_レゴ実験 Season1 (レゴブロックを用いた梁)・・・4.4

Theme04_レゴ実験 Season2 (3D プリント部材を用いた実験)・・・4.5

表 4.1 WG2 活動実績

| 実施日 | 回 | 主題 |
|------------|------|---|
| 2021/8/19 | 第1回 | プレキャスト化のメリット |
| 2021/10/14 | 第2回 | プレキャスト部材の接合方法 |
| 2021/12/16 | 第3回 | 接合方法分類 |
| 2022/2/10 | 第4回 | 話題：木質継手構造に関する話題 プレキャスト部材接合構造アイデア |
| 2022/4/14 | 第5回 | レゴブロックを用いた载荷試験（案）の検討 |
| 2022/6/16 | 第6回 | レゴ梁試験の計画, |
| 2022/6/30 | 試験 | レゴ梁試験 |
| 2022/8/23 | 第7回 | 話題：ロボット施工 目指す姿 (BETONBLOCK, イクシス) |
| 2022/10/20 | 第8回 | 東大レゴ部OB高橋さんとの意見交換内容の共有 |
| 2022/12/15 | 第9回 | 話題：コンクリート3Dプリンタ |
| 2023/2/16 | 第10回 | 話題：會澤高圧コンクリート デジタルコンクリート |
| 2023/4/25 | 第11回 | プレキャストの評価 (VFM) |
| 2023/6/22 | 第12回 | 3DPT試験体案の検討 |
| 2023/8/24 | 第13回 | 3DPT試験体案の検討 |
| 2023/10/26 | 第14回 | 話題：多関節ロボットの活用, EPS盛土 |
| 2023/12/21 | 第15回 | 3DPT試験計画 |
| 2024/2/21 | 第16回 | 話題：ビジュアルフィードバック (チトセロボティクス西田CEO) |
| 2024/3/20 | 試験 | 3DPT試験実施 |
| 2024/4/24 | 第17回 | 試験結果報告 |
| 2024/6/26 | 第18回 | 話題：DTPD小委委員会 (AnotedModel) |
| 2024/8/21 | 第19回 | 話題：鉄筋結束マシンに取り付けたカメラ動画から生成した点群による配筋 検査への実用性検証 |
| 2024/10/30 | 第20回 | プレキャストの有効利用の例 (羽田D滑走路) |
| 2024/12/11 | 第21回 | 話題：AutodeskUniversity報告 追加試験計画 |
| 2025/2/1 | 試験 | 追加試験 |
| 2025/4/24 | 第22回 | 話題：重機類のBIMモデル 追加試験結果報告 |

4.2 Theme01_プレキャストはなぜ採用されにくいのか？

(1) 目的

プレキャスト工法が実務上で広く採用されにくい理由について、事例の収集、接合構造にフォーカスした分析、プレキャスト構造の特性を上手に利用している構造の分析などを実施した。あわせて、理想の接合構造の提案などについても実施した。

(2) プレキャスト構造(部材)の事例

図 4.2-1 に、道路、鉄道におけるプレキャスト構造(部材)の代表的な採用事例を示す。PC 桁や PRC 桁といったそのまま本設の構造部材として用いられる例から、プレキャスト高欄、プレキャスト支持部材、支承部の埋設型枠など部材や部材の一部として用いられる例などがある。いずれも施工状況の制約や、プレキャスト部材の高品質などの性能を生かした使われ方をされるケースが多く、全面的にプレキャスト構造(部材)で、構築された構造物というのはまだまだ事例が少ないと思われる。



図 4.2-1 道路、鉄道におけるプレキャスト構造(部材)の採用例

(3) プレキャスト化のメリット分析

プレキャスト工法は、建設現場における効率性や品質確保の観点から高い潜在力を有するものの、依然としてその採用率は限定的である。そこで、プレキャスト工法の導入促進に資する各種メリットについて整理・分析を行った。図 4.2-2 に委員で抽出したプレキャスト化のメリットを示す。

まず、部材の標準化による設計省力化や製造の一貫性確保が可能であり、高品質な構造体の供給が実現できる点が挙げられる。さらに、工場製作によって天候の影響を受けにくく、施工の安定性が向上する。施工人員の削減や施工ヤードの縮小など、現場作業の効率化にもつながる利点が多数挙げられた。加えて、以下のような利点も挙げられた：

3D モデルとの親和性が高く、設計・施工の一貫管理がしやすい

ロボット施工などの自動化技術との相性が良く、省人化に貢献

高放射線下、水中、線路直上などの施工困難条件においても対応が可能

自重による応力や初期収縮の抑制、環境負荷低減といった構造性能面での効果

これらのメリットは、コストや工期に直接的に寄与する可能性があり、定量的な効果検証が今後の普及に向けた鍵となると思われる。

- ・サイズを統一化(標準化)できる
- ・塩害環境下でも表面塩化物イオン濃度の初期値を低減できる
- ・軽量化可能
- ・設計が不要(省力化)できる
- ・自重による初期応力、クリープを回避できる
- ・初期収縮を抑えられる
- ・部材が高品質になる
- ・3Dモデルを扱う際のハードルが下げられる
- ・点検箇所が分かりやすい(現場打ち部分)
- ・劣化シミュレーションがしやすい・高精度になる
- ・安全性が向上する
- ・海上で施工しなくてよい
- ・並列作業が可能
- ・均質なものができる
- ・ロボット施工などに向いている(省人化につながる)
- ・線路の直上で施工しなくてよい
- ・天候に左右されない
- ・現場での騒音軽減(日数、db)
- ・監督業務が容易
- ・高放射線下で施工しなくてよい
- ・少人数で施工可能
- ・混和材を多く混入できる⇒環境負荷軽減・高品質
- ・施工ヤードが少なくて済む
- ・高強度のものが作れる
- ・水中コンクリートを打設しなくてよい
- ・気温の影響を受けにくい
- ・薄肉部材が作れる

図 4.2-2 プレキャスト化によるメリットの例

(4) 接合構造に関する分析

プレキャスト部材の施工において課題となるのが、部材間の接合構造である。接合部は現場打設構造と比較して弱点となりやすく、必要性能を確保するための追加工や施工精度がコスト増の要因ともなる。図 4.2-3 に、既存の接合構造を求められる施工精度ごとに分類したものを示す。例えば、鋼製せん断キー、シールド継手、Jacket 工法などは精度の高い接合構造であるがその分高価である。一方、ループ継手、重ね継手、ジベル、といった接合方法は高い精度は要求されず安価ではあるが性能が限定的である。

また、木構造に目を向ければ、金輪継ぎと言われる、部材間の接合部に直交する方向からくさびを打ち込んで接合するような方法もある(図 4.2-4)。基本的には引張に弱く、最後に楔や栓を打ち込んで効果を出す継手も多数存在する。用途や使用部位・作用断面力に合わせて選定されており、プレキャスト構造の接合方法を考える上でも参考になると思われた。

これら構造も参考に、図 4.2-5 に示すような新しい接合方法のアイデアも出し合った。これら構造は、一部機能に特化していたり制約があったりするものの、使用箇所や用途を限定すれば高い適用性が期待できると思われる。

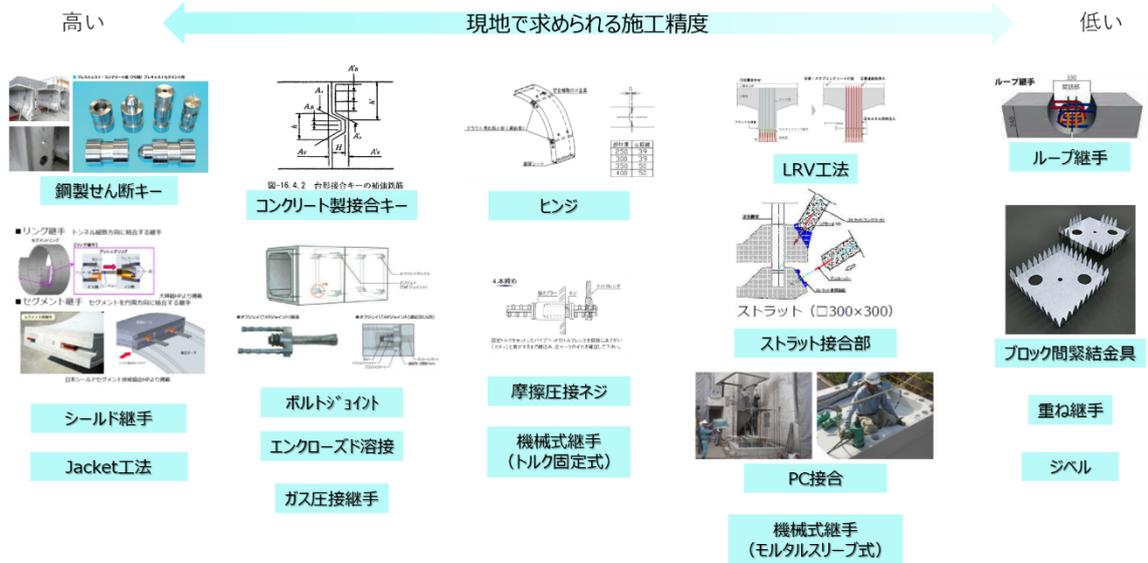


図 4.2-3 接合構造の例と精度ごとの分類

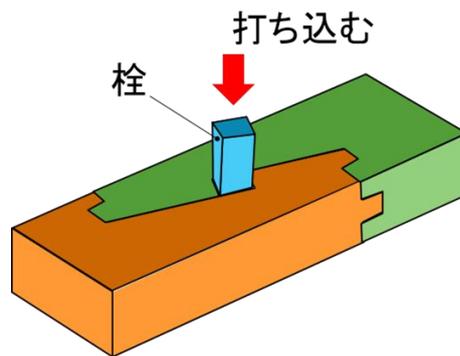


図 4.2-4 木質継手構造の例（金輪継ぎ）

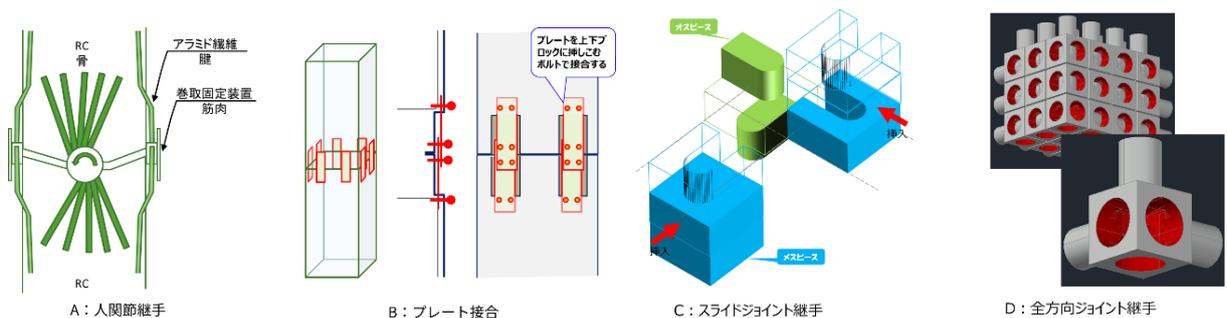


図 4.2-5 あたらしい接合構造のアイデア

(5) プレキャストの特性をうまく活用している事例

プレキャストの特性をうまく活用している事例として、羽田空港 D 滑走路のプレキャスト床版の事例について分析した(図 4.2-6)。羽田空港 D 滑走路では、プレキャスト床版を大規模に採用しており標準寸法 6.6m×3.3m のプレキャスト床版約 10,700 枚を用いて栈橋部床版が構築され、全体の約 7 割が工場製作の部材により構成されている。プレキャスト部材を用いることで品質が担保され

ることだけでなく初期の自己収縮を抑えることができ、収縮により生じる不静定力を大きく軽減することを能にしている。そのため基礎構造や部材寸法を極力小さくすることができている。また、接合部の構造については、ループ継ぎ手などを用いるとともに、供用開始後は重点的に管理が可能なような維持管理のための工夫が施されている。この事例は、プレキャスト工法のポテンシャルを具現化した事例として極めて示唆的であり、今後の適用拡大に向けた実証的裏付けと考えられる。

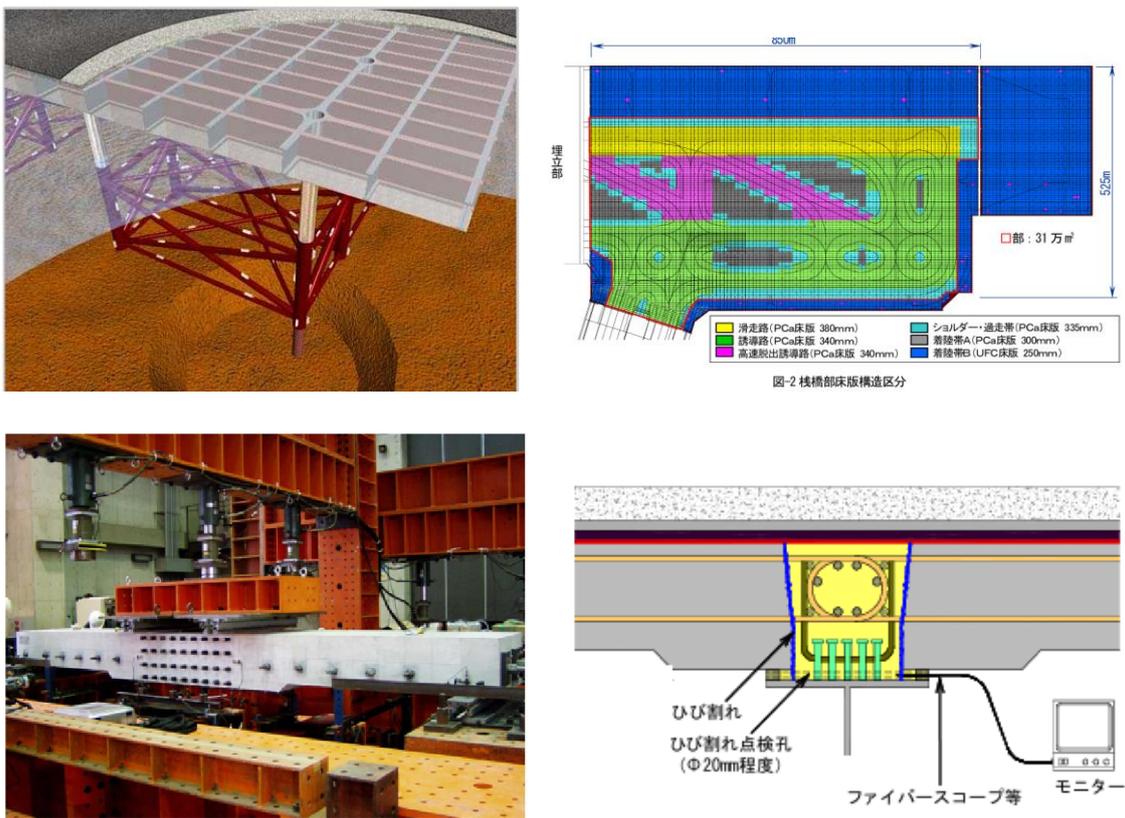


図 4.2-6 羽田空港 D 滑走路の施工

4.3 Theme02_ロボット施工のために

(1) ロボット施工に関する実事例

BIM/CIM モデルを作り、それ通りにプレキャスト部材を製作し、ロボットにより組立てて施工ができる姿を想定すると、ロボット施工に関する技術についても分析する必要がある。

図 4.3-1 に示す「Bentonblock」は“レゴのように構造物を組む”という発想を現実の土木スケールで実現している実例であり、

- ・モジュール構造
- ・積層可能
- ・規格化されたサイズ

といった点で、ロボットによる自動施工や BIM ベースの制御と親和性が高い。ブロック自体は、鋼製

型枠に流し込んだコンクリートで出来ており、積み重ね可能なブロックが出来上がる。用途としては、防音・防風用の仮設壁、土留めや法面構造、洪水防止構造、港湾の構造物などに使われることが多い。レゴのように突起と窪みがあり、位置決めしやすく、必要なときに必要な数だけ製作ができる。施工イメージは、クレーンでブロックを持ち上げ、BIM等のモデルに従って並べていくため、省人化が期待でき実物大のレゴブロックに近いと言える。



図 4.3-1 Bentonblock の例

図 4.3-2 に示した事例は 3D モデル(仮想空間)上に施工フローまで加味した BIM/CIM を構築しておき、実際に模型サイズで、その通りに施工が可能かを検証した事例である。BIM/CIM モデルで計画した通りに、現場の実ロボットが遠隔で作業し、その出来形を遠隔値でリアルタイムに把握可能であることを確認している。模型レベルの検証ではあるが、仮想空間での記録がそのとおりに現実空間に再現されており、このままスケールアップすることができれば、プレキャスト部材を無人でロボットが施工する将来が期待される。



図 4.3-2 BIM/CIM モデルとロボットの双方向連動

これら実例の分析を通して見えてきたのが以下のような課題である。

- ・ブロック(部材)の製作誤差をどのように取り扱うか
- ・仮想空間と現実区間との間の環境差異・変化をどのように取り扱うか

解決のヒントとなる技術として、設計場面では「3D Annotated Model」、施工場面では「ビジュアルフィードバック」の技術が、解決のヒントとなることが分かった。以下に、これら技術についての調査結果をまとめる。

(2) 3D Annotated Model

3D Annotated Model は、BIM/CIM モデルに寸法や属性、品質情報、施工誤差などの意味ある注釈(annotation)を付加した情報モデルである。単なる3次元形状のモデルにとどまらず「その部材がどのような機能、許容誤差、材料特性を持つか」といった情報が埋め込まれている(図 4.3-3)。

BIM/CIM モデルでは設計通りの寸法のモデルを描画するのが一般的であるが、現物の部材には必ず製作誤差や施工誤差があり、モデル通りにはならないことが多い。そのためロボットには、「精度許容範囲」や「代替処理条件」を伝達する必要があり、それを伝える手法としてアノテーションが有効と考えられる。

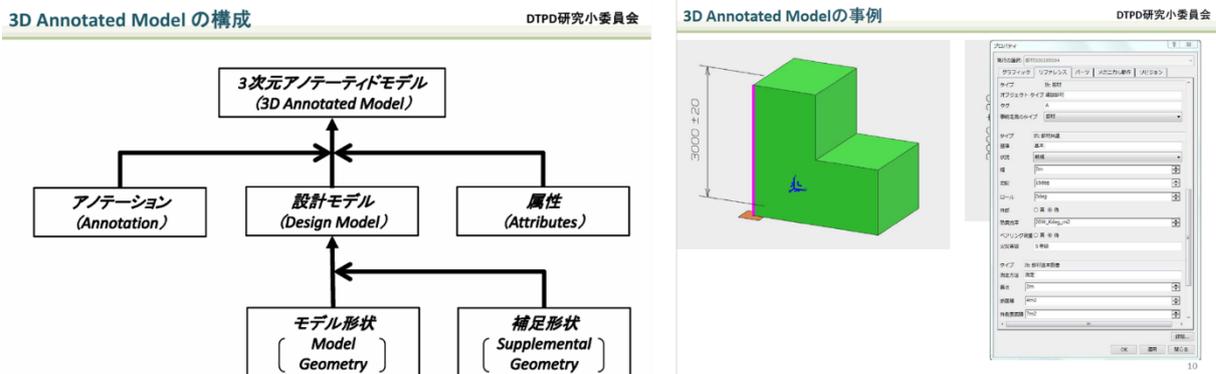


図 4.3-3 3D Annotated Model※

※3DPT 小委員会 城古様による話題提供資料より

図 4.3-4 に橋脚の各箇所幾何公差を属性として付与した例を示す。部材の厚みであったり、橋脚天端の高さだったり、設計値との差の基点の取り方が異なるため、それに応じて付与方法も異なる。ロボットが機械施工する際には、3D モデルの設計寸法を読み取る際に、これら施工誤差などの情報についても同時に読み取り、制御へ活用することが必要であると考えられる。

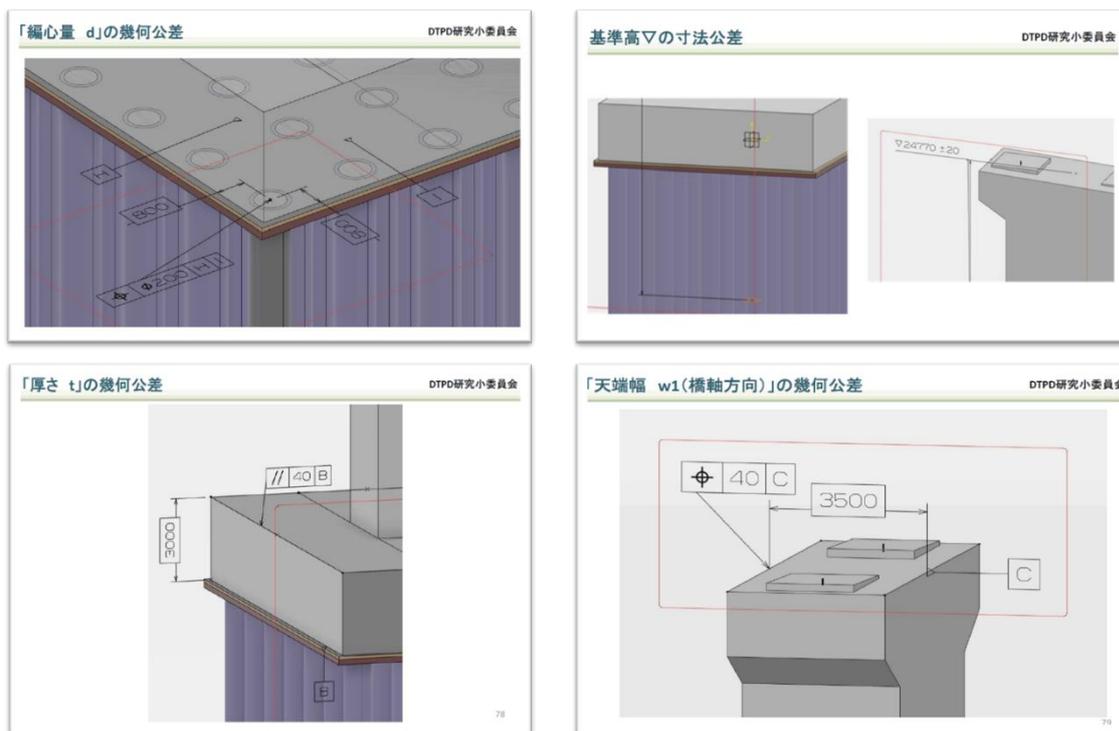


図 4.3-4 橋脚モデルへの幾何公差情報の付与例※

※3DPT 小委員会 城古様による話題提供資料より

(3) ビジュアルフィードバック

(2) で述べたように設計時点で施工誤差などの情報を加味した BIM/CIM モデルを用意しても、環境の差異などにより、用意した BIM/CIM モデルと現地の状況が異なると、ロボットによる施工が難しくなる。そこで、工場で用いるアームロボットの制御技術である「ビジュアルフィードバック」の技術に着目した。

厳格に管理された工場であっても、作業環境は計画と全く同一になることは少ない。そのためロボットの設置位置や部品の位置が微妙にずれると必要精度が担保できなかつたり、最悪の場合には製造自体ができなくなる。そのため、ロボットアーム等に取り付けたカメラ画像を用いてロボットの動きを制御するのが「ビジュアルフィードバック」の技術である(図 4.3-5)。ロボットアームに取り付けた 2 台のカメラでロボットアームの位置および姿勢をリアルタイムで把握し、その情報をロボットアームの制御に返すことで、ストローに細い棒を通すような高精度な制御も可能となる。建設用ロボットへの適用事例なども出てきており、今後の適用拡大が期待される。

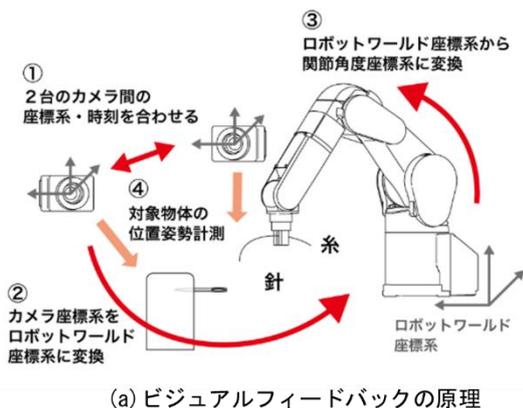


図 4.3-5 ビジュアルフィードバックの技術※

※出展: <https://chitose-robotics.com/>

4.4 Theme03_レゴ実験 Season1(レゴブロックを用いた梁)

(1) 実験概要

レゴブロックのように組立てた構造を検討するにあたり、実際のレゴブロックを用いて単純梁の耐荷物機構にあたるブロックの積み方の影響を検討した。

載荷試験に用いたレゴブロックは、レゴ社が提供する「デュプロ」というレゴ社製品の中でも大きいサイズのブロックで(図 4.4-1)、接続する円形のスタッド(以下、ポッチ)が4個、8個、16個の立方体のブロックである。



図 4.4-1 実験で用いたレゴブロック

このブロックを以下の条件のもとに積層し、ブロックの積み方のみを変更させることで最大荷重をどれだけ向上させることが可能か、図 4.4-2 に示す7ケースの積み方で試みた。なお、図 4.4-2 には後述する崩壊時のブロック同士の接合が離れた箇所のラインも合わせて示す。

- ・支点間距離は 1m, 載荷点は上部中央
- ・4 ポッチ, 8 ポッチのブロックを基本使用 (16 ポッチは一部のみ)
- ・断面形状は 5 段分の T 字形状
- ・ポッチの向きは鉛直上向きに配置

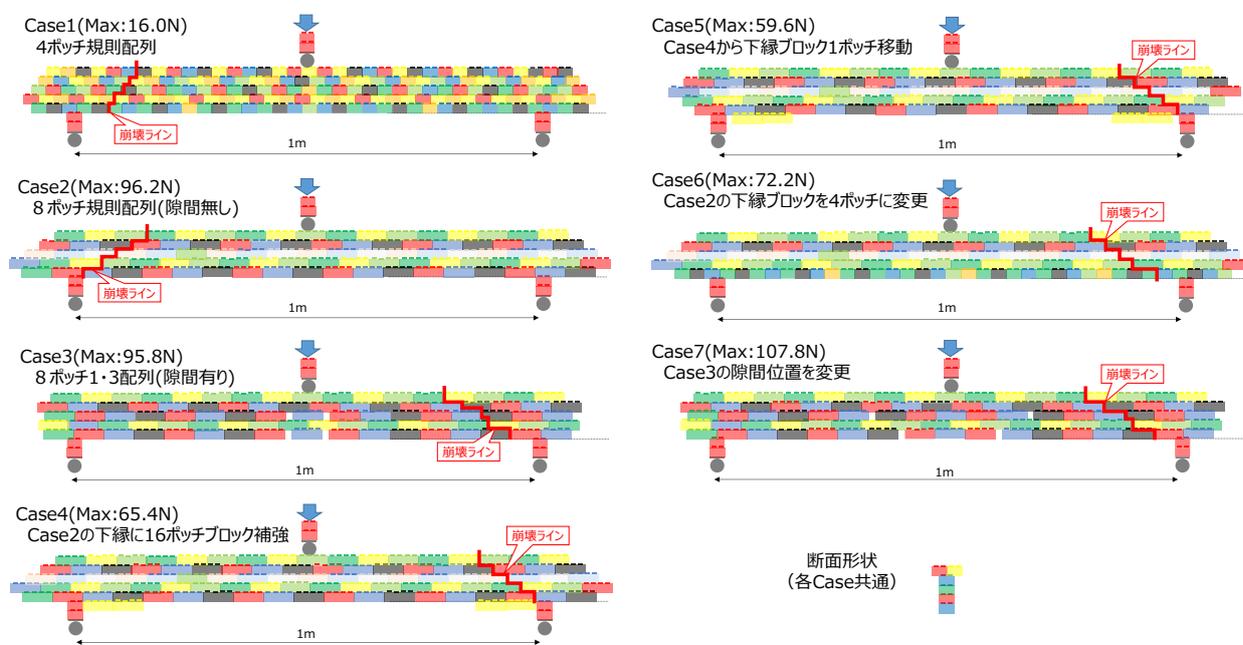


図 4.4-2 ブロックの積み方 (7 ケース)

(2) 実験結果

図 4.4-2 に各 Case の崩壊ラインを, 図 4.4-3 に載荷中および崩壊時の状況の一例を示す. いずれの Case でも試験終了後のブロックの損傷などはなく, 支点付近から載荷点に向かうせん断方向にブロックのかみ合わせがはずれることで崩壊に至った. 崩壊ラインは, 支点から載荷点に向かうせん断方向に生じるが, 想定される崩壊ラインに支障するブロックなどがある場合には, その隣りから崩壊が生じた. Case3~7 の 8 ポッチを基本にした試験体については, 荷重の増大とともに, 崩壊ラインとなる付近の, 二段目と三段目, 三段目と四段目の水平方向のブロック間の隙間が上下に目開きする状況もみられた.

図 4.4-4 に荷重-中央変位関係を示す. 4 ポッチのみの Case1 より, 8 ポッチを主に使った Case2~7 のほうが最大荷重も剛性も大きくなった. また 8 ポッチを主に使った Case2~7 の中では, 隙間なく積んだ Case2, 4, 5 が同程度の剛性, 次いで 3 等分点付近に隙間を設けた Case7, 最下段を全て 4 ポッチのブロックにした Case6 と隙間を中央付近に集中させた Case3 が同程度で小さい剛性となった.

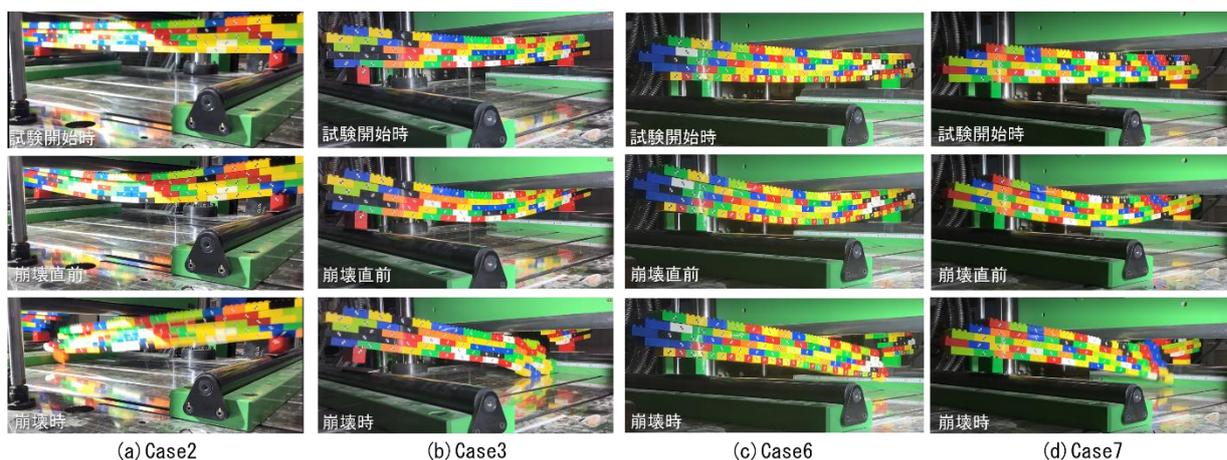


図 4.4-3 载荷中および崩壊時の状況

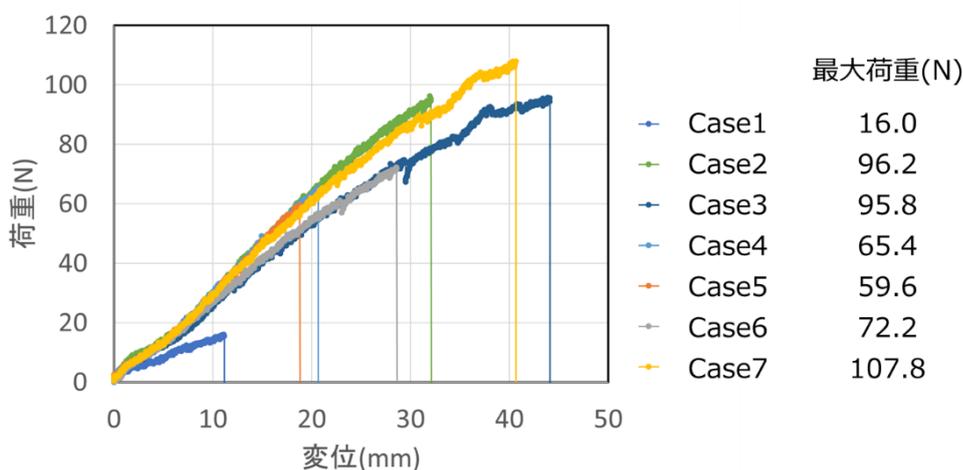


図 4.4-4 荷重－変位関係

(3) 考察

Case2, 4, 5 は 16 ポッチの補強ブロックの有無およびその位置のみの違いである。崩壊ラインの生じた位置は左右の違いはあるが同じ位置で生じているが、最大荷重が大きく異なった。これは引張の生じる下縁側に 16 ポッチのブロックで補強することにより補強付近の剛性を高めるとともに、崩壊ラインのみに目開きを集中させることになったために、最大荷重が低下したものと思われる。Case4 と Case5 の差異は、16 ポッチのブロックが支点部への支障の有無によると想定される。Case3 と 7 では、スパン中央付近に隙間を集中させたことで Case3 のほうが剛性が小さくなり、崩壊ラインでの目開き量が開きやすかったことが、最大荷重が小さくなった原因と考えられる。ブロックの積み方の差異による、梁全体の剛性および最大荷重などを変化させることが可能であり、より合理的なブロックの積み方の検討が簡便にかつ速やかに行えることが分かった。

(4) 解析概要

Case2とCase7を対象に2次元FEM解析を実施した。解析に先立ちレゴブロックの圧縮、引張、およびせん断の要素試験を実施した(図4.4-5)。圧縮試験については下側ブロックに上側ブロックを押し込む際の、引張試験については、下側ブロックから上側ブロックを引き抜く際の、せん断試験については3つのブロックのうち中央のブロックをせん断方向に押し抜く際の荷重と変位の関係から、傾きを算出した。複数試験体に対し複数回実施し、それらの平均値を用いて、解析モデルに用いるバネ定数として設定した。

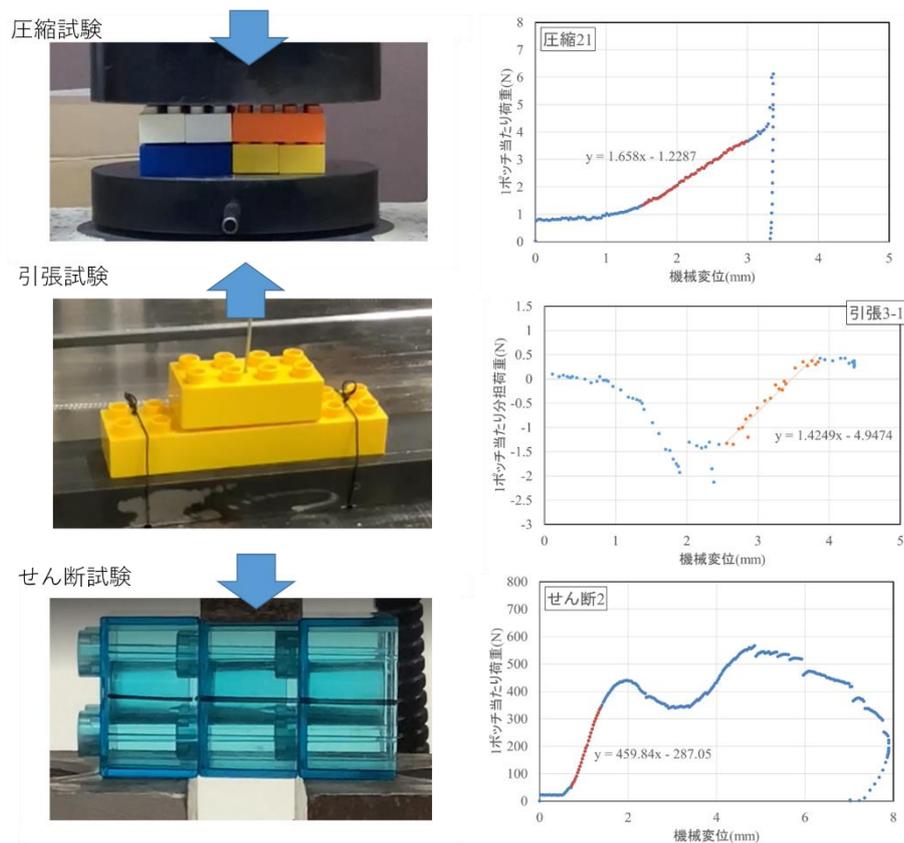


図 4.4-5 要素試験

ブロックは1メッシュ8プリミティブの板要素とした。板厚をレゴブロック側面の板厚の1.24mmの2倍の2.48mmとし(最上段はその2倍)、材料特性はほぼ剛体と仮定した。ブロック同士の間には0.2mmの隙間を設定し、鉛直方向(引張・圧縮)、水平方向(せん断)に、要素試験から得られたバネ定数を持つバイリニア型の非線形バネ要素を設けた(図4.4-6)。ブロックの隅角部にはブロック同士が接触した際に圧縮力のみを伝達させるGAP要素を設置した。支点部の境界条件はピン支持とし、荷重は実測したブロック自重を載荷後、中央に荷重増分で載荷させた。

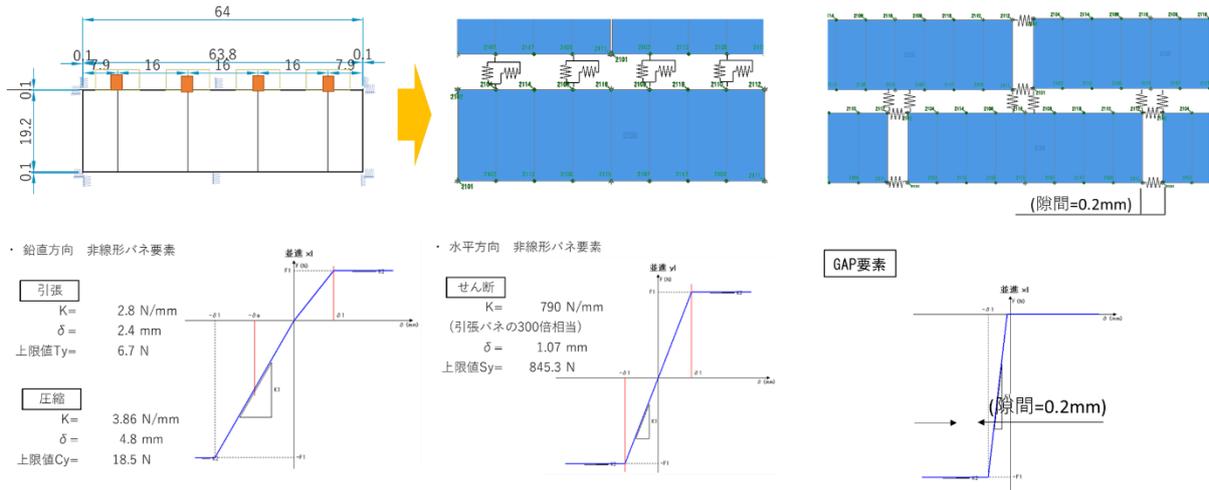


図 4.4-6 モデル化の概要

(5) 解析結果と実験結果との比較

図 4.4-7 に最大荷重時の変形形状と崩壊ライン，最大変位等を示す．実験結果の黄緑色のバネ要素はバネ要素が降伏を，黄色のバネ要素はバネ要素が負担できる荷重の限界に達したことを示す．Case2 では最大荷重と最大荷重時変位とともに，崩壊ラインも実験結果と整合する結果となった．黄色のバネに隣接するブロックでも黄緑色のバネ要素が見られ，実験中に見られた 2 段目と 3 段目，3 段目と 4 段目の境の目開きの状況も再現ができていた．Case7 では最大荷重と最大荷重時変位は実験結果とよく整合する結果となったが，崩壊ラインについては実験結果と異なった．解析結果では，実験結果の崩壊ラインより 3 ブロック内側のブロックに隙間を設けた位置が崩壊ラインとなった．

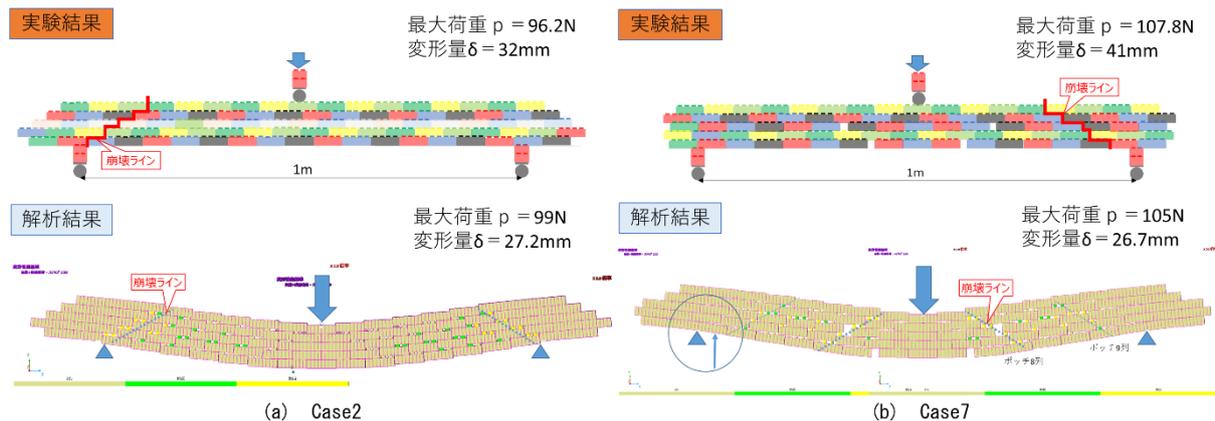


図 4.4-7 実験結果と解析結果の比較

図 4.4-8 に崩壊中のコマ送り動画の一部を示す．Case2 では主たる崩壊ラインは①であったが，下縁より 3 段目から下側にも続くラインにもブロックが離れたラインは続いており，解析結果においてバネ要素が黄色となった一致とほぼ整合する．Case7 についても崩壊ラインは最終的な崩壊ライン

①よりも3ブロック内側までの位置にも存在しており(崩壊ライン②), 崩壊ライン①と②の間の3分のブロックについては, ほぼすべてのブロックが隣接するブロックと離散しており, 崩壊寸前であったことが確認できた. この結果は解析結果とほぼ一致しており, 解析結果の精度が高いことを裏付けていた.

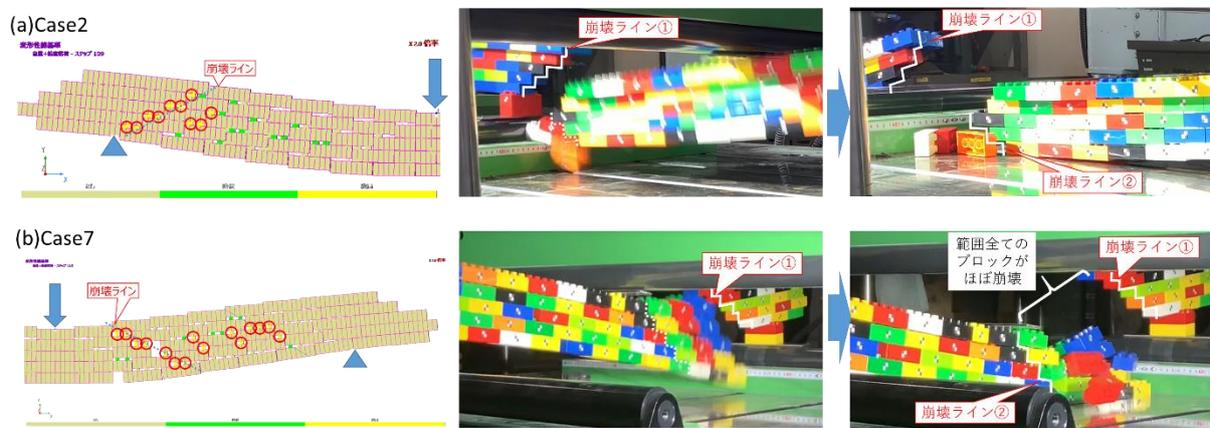


図 4.4-8 崩壊直後の状況 (再検証)

以上のように, 二次元 FEM 解析により再現解析を行った結果, 実験結果を良く再現できるとともに, 崩壊直前・直後のブロック間の接合状況を精度高く推定することができた.

4.5 Theme04_レゴ実験 Season2(3D プリント部材を用いた実験)

(1) 土木構造物に適用できそうなレゴブロックのノウハウ

4.4 で実施したレゴブロックの実験結果を踏まえ, 土木構造物に適用できそうなレゴブロックのノウハウについて, 東京大学 LEGO 部 OB の高橋秀人氏にヒアリングを行った. 同氏は, レゴブロックを用いて作品製作を行うデザイナーで, いわば“レゴブロック”のプロである.

レゴブロックは, 角を合わせて積む構造によって, 木製の積み木と比較して容易かつ高精度な位置決めが可能である(図 4.5-1 左). また, 複数のユニットに分割したレゴ作品を組み合わせる際にも, 予め位置合わせ機構を設けることで, 現場での高精度な接合が可能となる(図 4.5-1 中央). これは, 構成要素の嵌合精度と, 各部品間の設計段階における整合性に起因している. 土木分野においても, 同様の考え方が接合精度向上に貢献している. シールドトンネルのセグメント工事では, 「ワンパス継ぎ手」と呼ばれる機構を導入することで, 従来のボルト締結式に比べて簡便かつ確実な位置決めを可能としている(図 4.5-1 右). この方式では, プッシュグリップ構造やリング嵌合機構により, 接合前に精密な位置合わせが可能であり, その後のボルト締結作業を効率化できる.

玩具と土木構造物という異なるスケールにおいても, 接合部の「位置決め精度向上」は共通する課題である. レゴブロックのポッチ構造が示すように, 接合前に物理的なガイド機構を持たせることで, 後工程の負担を軽減し, 精度の高い接合が可能となる. これは建設現場においても同様であり, 施工の効率化・品質向上につながると考えられる.

レゴブロックの角を揃えて積むのは、積み木の角を揃えて積むより容易。



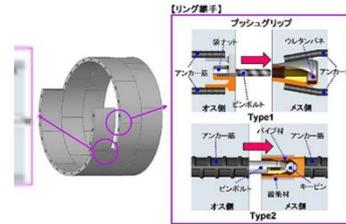
積み木とレゴブロックの比較

レゴブロック作品をいくつかのユニットに分割して運搬し、現場で接合する場合に、接合精度を上げるための仕組みを作ることがある。



作品のユニット間の接合部分の例

シールド工のセグメントにおいて、ワンパス継手を導入することで、ボルト締結式継手で位置決めしてからボルトで締結するよりも、位置決めが容易になった。



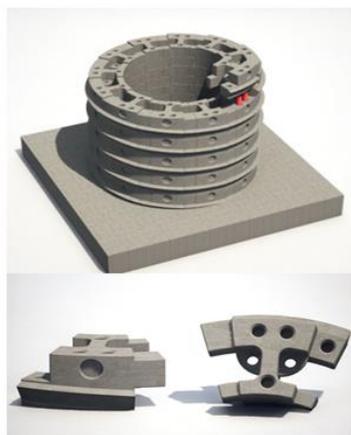
大林組のワンパス継ぎ手

画像は <https://www.obayashi.co.jp/> を一部加工

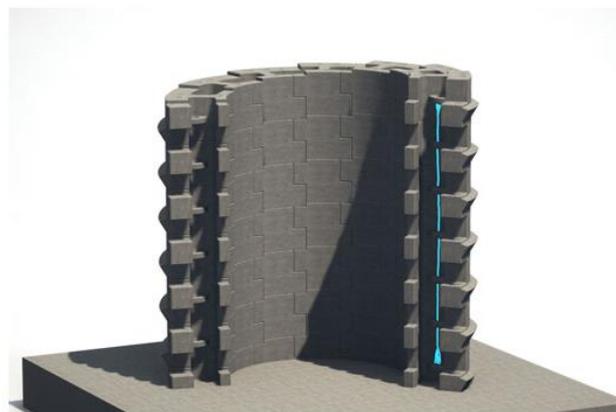
図 4.5-1 接合精度のポッチによる向上※

※高橋秀人氏作成資料より

橋脚のような構造の場合、上部構造からの鉛直荷重や地震や風圧などによる水平荷重に耐える必要がある。レゴブロックのポッチ接合の原理を橋脚構造に応用した構造として図 4.5-2 のようなものを想定した。この構造では、同一形状の部材を螺旋状に積み上げ、接合部にあたる「ポッチ」構造の方向を上下方向に統一することで、積層方向の力の伝達性を高めている。部材の内部を通して鉛直方向に配置した緊張材（テンション材）によりブロック同士を圧縮状態で一体化できる。この構造は、積層・接合・緊張の 3 要素で構成される。これは、プレキャストセグメント工法やシールド工法の組立方法と類似しており、省力化や部材の標準化に対し有効と考えられる。



同じ形の部材を螺旋状に積む。



断面の空洞は、積み上げ後に緊張材を設置するだけでなく、部材を積んでいる途中で仮設の緊張材で上下をつないだり、コンクリートを流したりするのにも使える。

図 4.5-2 橋脚構造に適用した場合のイメージ※

※高橋秀人氏作成資料より

図 4.5-2 で示した橋脚構造を機械施工する場合を想定すると、図 4.5-3 に示すような施工方法が考えられる。図 4.5-3 左のつり上げ型重機では、橋脚直下に作業スペースが確保できる現場を想定し、部材の搬入・取り付けを人力またはクレーンで行う。クレーンへの部材引き渡しが容易で、橋

脚内外の干渉を避けやすい利点がある。図 4.5-3 右のキャッチ型重機は、水底や谷底など、外部クレーンのアクセスが困難な環境を想定し、部材を橋脚外周から装着する方式である。水中施工や船上作業などでも対応できる構造であり、重機自体が部材をキャッチして上昇しながら積み上げる。

従来の橋脚施工では、足場構築や大型クレーンの設置が必須であり、地形や周辺環境に応じて大きな制約を受けていた。本構造および施工法であれば、橋脚自体の構造的特徴を積極的に活用することで、重機の自由度を高め、施工環境への柔軟な対応が可能となると考えられる。

最小のスペースで、作業員が危険な高所作業を行わずに作業できるように、自動で橋脚を立てるための専用の重機を用いる。これらの重機は、橋脚の外側の螺旋状のつばりを利用して、回転しながら上下する。

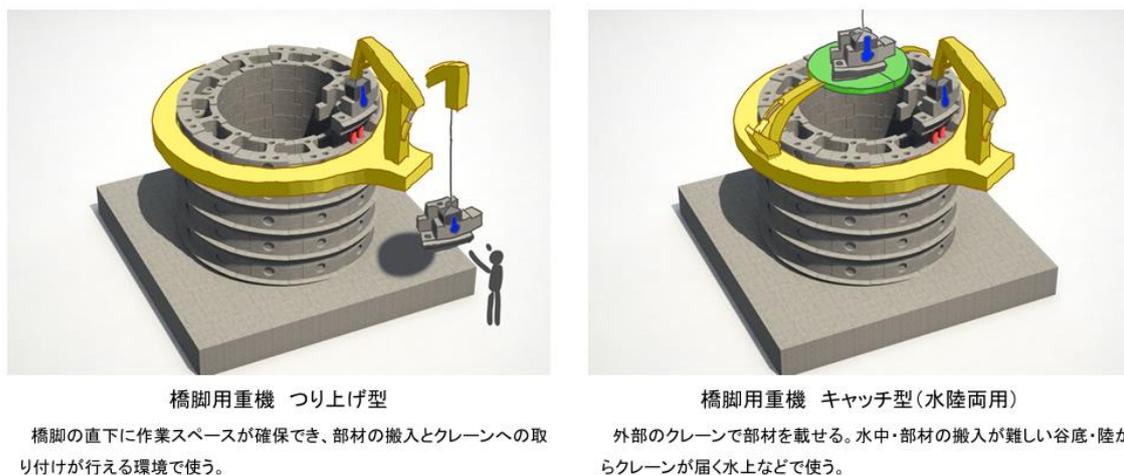


図 4.5-3 機械施工イメージ※

※高橋秀人氏作成資料より

(2) 実験概要

図 4.5-2 で示した構造を実際に実施した場合を想定し、樹脂製ブロックを 3D プリンタで製作し、耐荷性を確認することとした。想定構造と試験体へのモデル化を図 4.5-4 に、試験体と試験装置の概要を図 4.5-5 に示す。1 種類のピースで組み立てられることを条件とし、らせん状に 1 周 12 ピース積み上げることで円筒形の橋脚を構築する。この構造の耐荷性を確認するため、約 1/15 に縮小した梁試験体を作成し、3 点曲げ载荷試験で崩壊過程などを確認した。プレキャスト構造で組み立てた構造にとって重要となるのが各ピースの接合精度であるので、製作時に各ピースの上下の凹凸部分の寸法に遊間がないものを CASE1、遊間を 0.4mm (両側で 0.8mm) 設けたものを CASE2 として、2 種類の試験体で実施した。実物は RC 構造となることを想定し、試験体との剛比を揃える形で、各ピースは樹脂製の 3D プリンタで製作し、軸方向には各ピースの内部にアンボンドの鋼線を 12 本通し、試験体外方まで伸ばして約 3kg の重りをぶら下げて軸力を導入した。载荷中は、鋼線の端部にワイヤー式変位計を取り付けて、引き込まれる量の変化を計測した。载荷は中央の鉛直変位状況を確認しながら 40mm 程度まで行い、その後に除荷した。

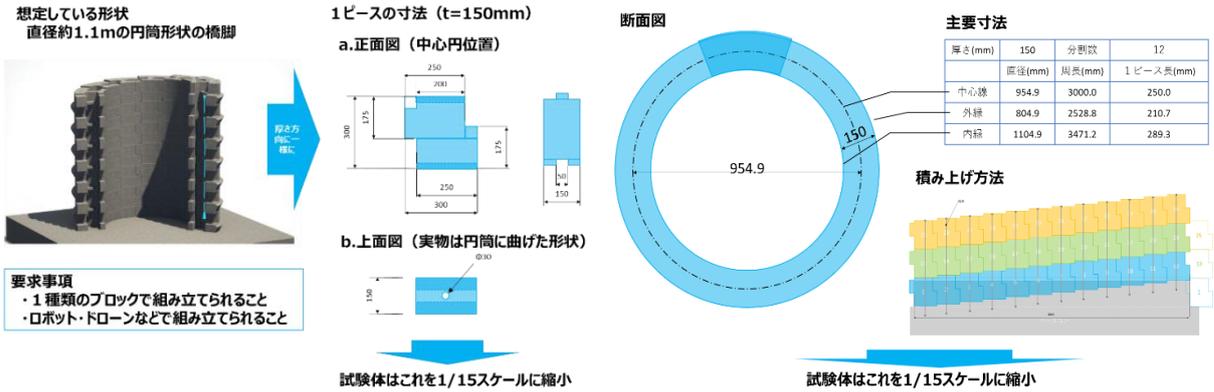


図 4.5-4 想定構造とモデル化

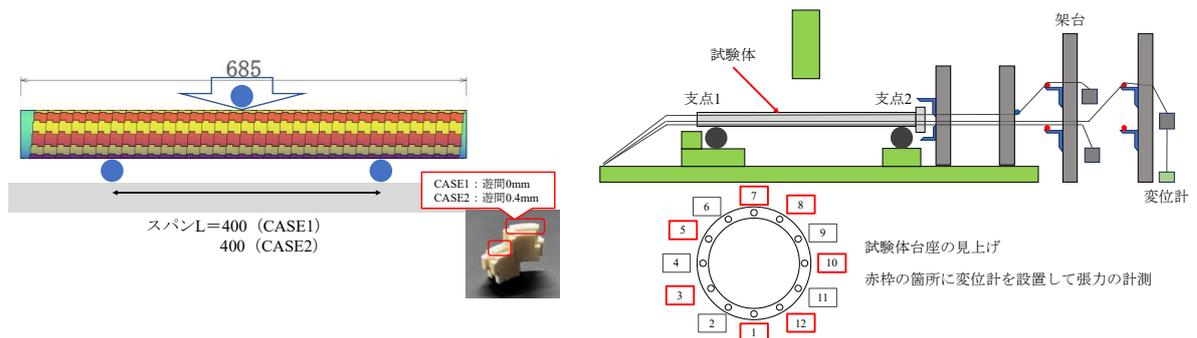


図 4.5-5 梁試験体と試験装置

(3) 実験結果

図 4.5-6 に各ケースでの試験状況を示す. いずれのケースも中央載荷点付近の断面が加力方向につぶされるような楕円形状になりながら, 鉛直変位が増大した. CASE1 では, 載荷点付近の下縁から上方向にブロック間の隙間が開き, 変形の進行とともにその隙間が広がる様子が確認された. 変位量が 50mm に達しても崩壊することはない, 除荷後には載荷点での変位まで変形が戻り, ブロック間の離隔もほとんどが閉合された. CASE2 は, スパン中央付近での載荷点からのブロック間の隙間が大きく開き, 梁軸方向へのブロック間の隙間が開く状況が顕著にみられた. 除荷後も, ブロック間の隙間が閉合することはない, 残留変形も大きく残った.

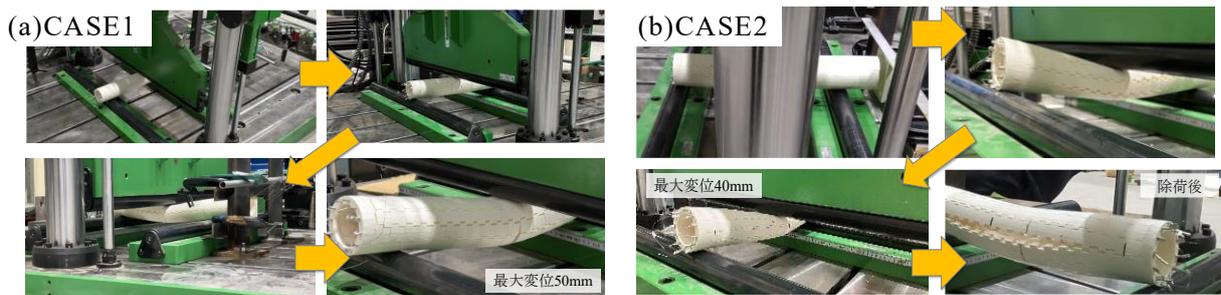


図 4.5-6 試験状況

図 4.5-7 に荷重-変位関係および載荷前後における断面形状を示す。CASE1 は CASE2 に比べて剛性が高く、最大荷重が大きくなった。また 除荷後の残留変形は、CASE1 では 10mm、CASE2 では 15mm が残留していた。

変形状況を見ると、いずれのケースも中央載荷点付近の断面が加力方向につぶされるような楕円形状になりながら、鉛直変位が増大した。CASE1 では、載荷点付近の下縁から上方向にブロック間の隙間が開き、変形の進行とともにその隙間が広がる様子を確認した。変位量が 50mm に達しても崩壊することはない、除荷後には載荷点での変位まで変形が戻り、ブロック間の離隔もほとんどが閉合された。CASE2 は、スパン中央付近での載荷点からのブロック間の隙間が大きく開き、梁軸方向へのブロック間の隙間が開く状況が顕著にみられた。除荷後も、ブロック間の隙間が閉合することはない、残留変形も大きく残った。

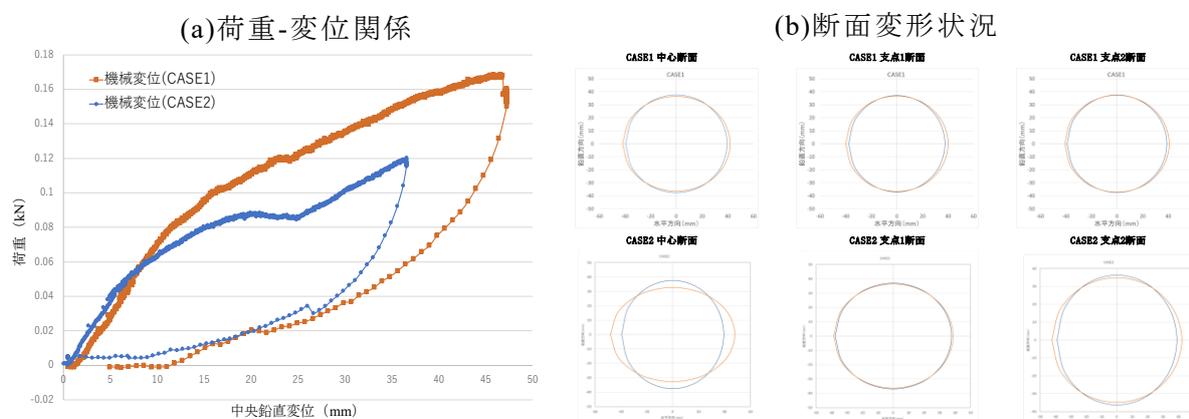


図 4.5-7 荷重-変位関係と断面変形状況

各変位時における下縁 (No.1) の鋼線および上縁 (No.7) の鋼線の引き込み変位量変化を図 4.5-8 に示す。下縁 (No.1) の鋼線は、CASE1 については荷重が増大するにつれてワイヤーの引き込み量が増大するが、CASE2 についてはあまり増大しない。逆に上縁 (No.7) の鋼線は、CASE1 については引き込み量の増大が見られないが、CASE2 については、荷重の増大に伴いワイヤーの引き込み量が増大した。この結果は、CASE1 は断面形状の変化が少ないために等断面で変形が進むため、下縁に配置した鋼材 (No.1) のほうが上縁に配置した鋼材 (No.7) よりも引き込み量が大いことを示す。反対に、CASE2 ではスパン中央部で断面形状が楕円形に変形することで、下縁に配置した鋼材 (No.1) よりも、上縁に配置した鋼材 (No.7) のほうが引き込み量が大きくなったことを示す。部材間の遊間が大きくなることで断面形状が変化することで中央部の鉛直変位が増大したことになる。

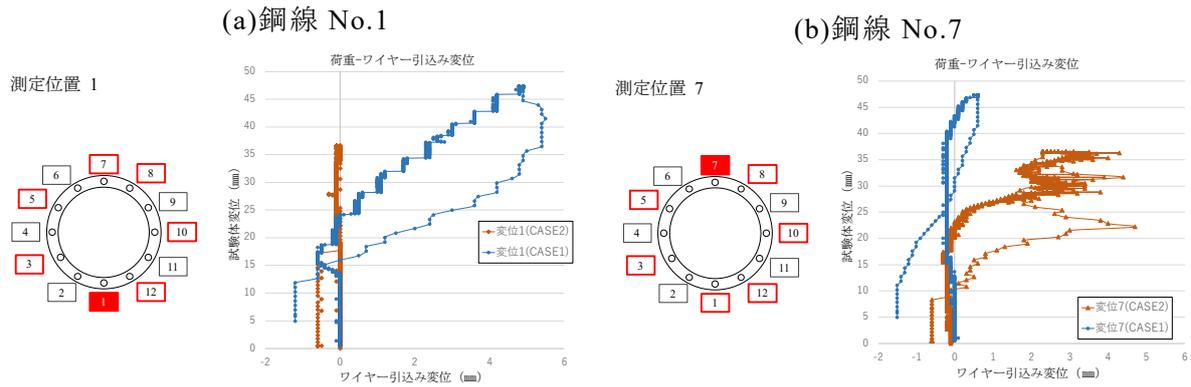


図 4.5-8 鋼線の引き込み変位量

以上より、プレキャスト部材の遊間が広がることで最大荷重は 25%低下し、部材のたわみ量を断面形状の変形により吸収することが分かった。

4.6 おわりに

WG2 では、プレキャスト工法の現状と課題、ならびにロボット施工やレゴブロックを用いた実験を通じて、バックキャストの視点でプレキャスト構造の適用拡大可能性について検討した。

まず、プレキャスト工法は高品質・省力化・省人化に大きなメリットを持つものの、接合構造の施工精度やコスト面での課題が普及の障壁となっていることが明らかになった。特に接合部の性能はプレキャストの採否に与える影響が大きく、改善の余地が多いと考えられた。

次に、ロボット施工の促進に向けては、BIM/CIM モデルの精度や誤差情報の伝達、そして現場環境の変化に対応可能なビジュアルフィードバック技術の活用などが参考になると思われる。これにより、施工の自動化・無人化が現実味を帯びてくる。

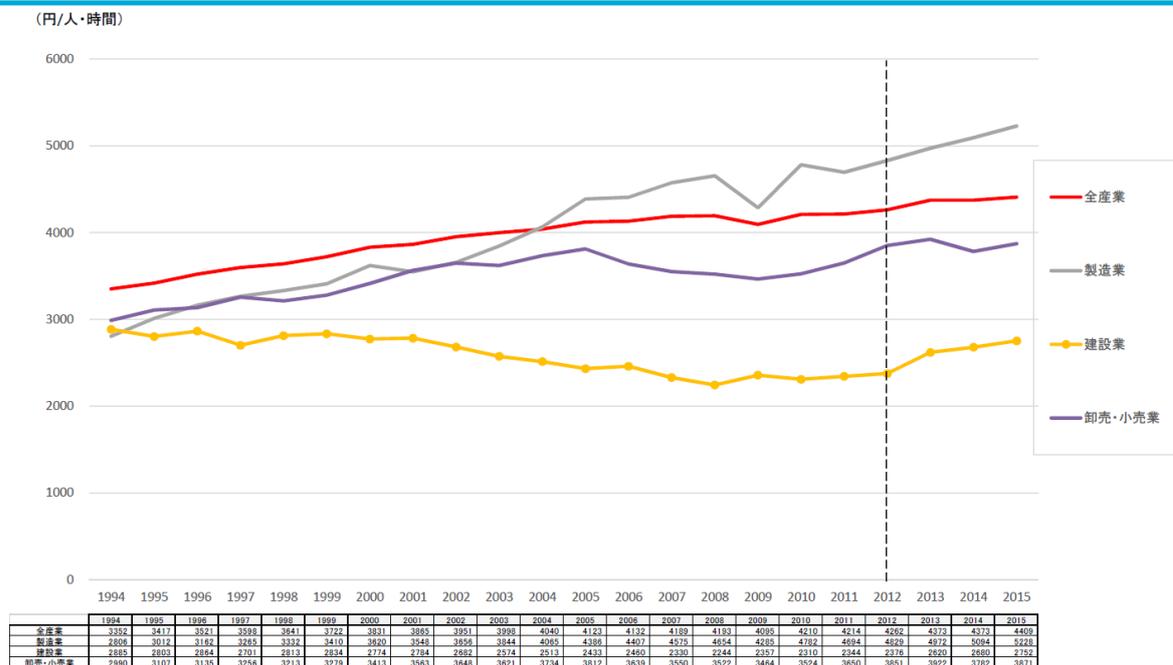
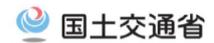
さらに、レゴブロックを模した実験および 3D プリント部材を用いた実験では、部材(ブロック)の積み方や接合部の遊間が構造物の耐荷性能や変形に大きく影響することが確認された。

これら検討の内容は、まだ基礎的な検討に過ぎないが、今後、本 WG の活動内容が、プレキャスト工法のさらなる普及とロボット施工技術の発展に参考になれば幸いである。

5. まとめと将来展望

2021年に前小委員長である渡邊氏の任期が切れて私が小委員長になってから、感じた3次元モデルを活用した建設生産性向上について将来展望を以下に記載します。私が始めにBIM/CIMについて仕事で携わるようになったのが2016年頃からです。その頃は国土交通省が、2025年までに建設生産性20%向上を目指していました。最初に感じたのが建設生産性って何だろうと言った疑問でした。国の説明用の資料を見ると、全産業に対する建設業での1人あたりの付加価値額であり、単位は、円/人・時間のグラフでありました(以下の図参照)。特に自動車会社などの製造業に比べて半分程度でありました。20%生産性向上の根拠はこのあたりかと感じました。

就業者・時間あたりの付加価値労働生産性の推移(実質)



出所: 内閣府「国民経済計算」をもとに作成。(年次) 付加価値労働生産性=実質GDP÷(就業者数×労働時間数) 4

図 5-1 就業者・時間当たりの付加価値労働生産性(国土交通省 HP)

<https://www.mlit.go.jp/common/001180298.pdf,2025/05/19>

土木建設業は、主に国や鉄道などのインフラを活用した民間企業向けにインフラを生産する業種であり、例えば景気が良いので橋を多く作ろうと言った生産量の増減が比較的少ない業種であるかと思います。この数字を考えたときに、売上高が変わらないで付加価値を上げようとする

- ・労働コストを下げる
- ・1人当たりの生産量を増やす

の2つが考えられます。

国が発注するインフラ建設は、作業員1人当たりのコストは調査し、国としての単価を設定され

しており、入札時には総額ですが最低価格が決められているために労働コストを下げることは難しい状態です。

そこで考えられるのは少ない人数で作業を実施する事ですが、設備投資をして自動で作業可能な開発を行うと、一見 1 人当たりの生産量が増える様に見えますが、得られた付加価値が開発費を下回らないとこの数字は上がっていきません。また、インフラ整備は主に税金などで整備される観点から、仕様を定め、安価に製作する事が求められます。すなわち仕様で定められた最低限の品質を安く製作する事に集中する必要がある事になります。こういった性格から、建設業の技術開発は今まで出来なかった作業の新規分野開発の他に、コストが安い材料の開発、コストが安い機械の開発などに集中していたものと考えられます。

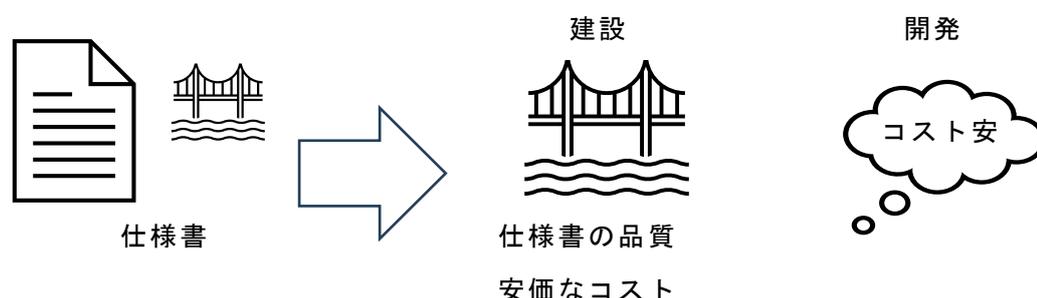


図 5-2 従来の技術開発の考え方

この考えを続けていくと、建設会社は一定の労働賃金であれば多く働ける労働力を確保したいと考えられ、労働者へのトレーニング実施で付加価値の増加や、安くよく働ける労働者の囲い込みなどが発生すると考えられます。ただし現状では少子高齢化による建設労働人口の減少により、労働者自体が減少しており、優良な労働力を確保出来ない状態であると考えられます。海外の建設業では、洋上風力発電などの新たな市場開拓により、システムとしての建設の売り込みや、中国などのアジア企業ではアフリカなどへ事業規模を拡大し、技術開発の利用頻度を上げることにより開発コストを抑える等を行っている。こういった中で、我々が行ってゆくべき技術開発の方向性は以下の様なものではないかと考えられます。

- 協調と競争領域を分離し協調領域での技術開発
- 品質の向上
- 新規分野の開発

協調領域での技術開発は、複数社の建設会社や国の資金を投入した状態での基盤となる部分の技術開発を行う事で、開発スピードを上げると共に、開発コストが抑えられる特徴を持っている。現状でも民間の建設会社が集まって開発を進めている建設 RX コンソーシアムや国が主導で民間を巻き込んで開発を行っている OPERA 等がこの手法に当たると考えられます。

仕様書上の品質向上で、例えば耐久性を 50 年から 100 年に伸びる施工の場合、現状は受注差別化に寄与しない。今後は、こういった品質向上を VE 提案で差別化となる仕組みを導入すべきではないかと考えられる。ただし、例えば上記の例でも 50 年後に交通量増大で撤去・新設予定の道路を 100 年耐久で作成する事に意義は無いため、入札前には事業の目的や機能を明確にする必要が発生すると考えられます。

新規分野の開発は、新たな機能や利便性を生み出す可能性がある。例えば土砂掘削や盛土の完全自動化(遠隔施工)となった場合、現在考えられている利便性は、24 時間稼働による工期短縮や現場に人が居ないことで安全性向上等のメリットが考えられます。このほかに遠隔操作施工を行う場合、ゲームが得意な若者の就業率の増加などが考えられます。一方自動建設機械は、人間が行うような複雑な作業を 2 台で同調して作業を行うなどが現状では出来ない。今後技術力が上がっても、故障の要因となるような複雑機構を取り入れにくいと考えられます。そうなってくると土木構造物は、シンプルで、多少構造応力的に余裕があるものが増加するものと考えられます。これが WG2 で研究をしていた Pca 構造では無いかと考えます。

長い間研究を重ねてきて、現状の停滞状態を打破する方向性が見えてきたのでは無いかと考えます。この経験を糧に今後のインフラ整備に役立って頂けたらと思います。

最後に、ご協力頂いた講師や企業の方々、また精力的にご活動頂いた委員の皆様やオブザーバーの皆様、ありがとうございました。

2025/5/20

小委員会 中嶋 道雄

對外發表論文

論文名：

建設事業における生産性向上に向けて

To improve construction productivity

ジャーナル名：

令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会

発表年月：2021/9

第VI部門

CIM(1)

2021年9月10日(金) 13:00 ~ 14:20 VI-14 (Room39)

[VI-692] 建設事業における生産性向上に向けて To improve construction productivity

○渡邊 武志¹、高野 和成¹、古川 裕也²、大瀧 諭²、石井 喬之³、林 俊齊⁴、井波 丈明⁵、徳永 高志⁶ (1.パシフィックコンサルタンツ、2.日本工営、3.大成建設、4.安藤・間、5.長大、6.フジタ)

Otakeshi watanabe¹, kazunari takano¹, Yuya Kogawa², Satoshi Otaki², Takayuki Ishii³, Toshinari Hayashi⁴, Takeaki INAMI⁵, Takashi Tokunaga⁶ (1.Pacific Consultants, 2.Nippon Koei, 3.TAISEI CORPORATION, 4.HAZAMA ANDO COPORATION, 5.CHODAI, 6.Fujita Corporation)

キーワード：汎用PCa、ロボット施工

precast concrete products, robotbconstruction

オンライン会場（Zoom）はこちら

建設工事においてはPCaの積極的な活用が推進されている現状を踏まえ、PCa導入により工事費や施工がどう変わるかについて議論した内容を報告する。

- ①大規模構造物へのPCa適用について：現時点で想定される課題と解決方法について示した。
- ②ロボット化施工：PCaブロックでの構造物構築時のロボット施工に向けてロボットタイプ別に施工イメージを確認し、メリット/デメリットについて把握した。

オンライン会場（Zoom）はこちら

建設事業における生産性向上に向けて

| | | | |
|-------------------|--------|------------------|--------|
| 大成建設(株) | 正 石井喬之 | (株)長大 | 正 井波文明 |
| (株)安藤・間 | 正 林 俊斉 | (株)フジタ | 徳永高志 |
| 日本工営(株) | 正 古川裕也 | 日本工営(株) | 大瀧 諭 |
| ○パシフィックコンサルタンツ(株) | 正 渡邊武志 | パシフィックコンサルタンツ(株) | 正 高野和成 |

1. はじめに 本報は土木学会土木情報学委員会「三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会（発注者、受注者（設計・施工）、メーカー等で構成）」での討議内容について報告するものである。

我が国の建設業界は少子高齢化に起因する労働力不足を解消し、生産性向上を図る手段としてBIM/CIMを積極的に導入し、土工を中心に一定の効果が確認されている。一方、PCaについても積極的な活用が推進されている現状を踏まえ、PCa導入により施工がどう変わるかについて議論した内容を以下に記す。

2. 汎用 PCa 導入のメリットと建設の方向性 3次元設計・施工に PCa 製品を導入した場合のメリットと今後の方向性を表-1 に示す。規格化・統一化された製品であるため施工しやすく、取り換えやすいこと

（例えば壊れた箇所のみ取り換えることも可能）が特徴である。また、今後、ロボット施工への適用性も高いと考える。

表-1 PCa 製品導入メリットと今後の方向性

| | |
|-----------|--|
| 製品 (PCa化) | 大量生産される汎用部品群：少数の部品で構成 組み立てやすさ/取り換えやすさ |
| 設計 | 3次元設計が可能（施工手順書も作成可能） |
| 施工 | 簡単に組み立てられる ⇒将来的には大型組み立て機や簡易な運搬台車の開発 |

3. 中・大規模構造物への PCa 適用について

3-1. RC 施工時の課題

小規模構造物（BOX や水路、縁石）では多くの現場で PCa 製品が採用されており、施工の省力化に繋がっている。一方、中・大規模の梁・柱構造物、壁部材は大半が現場打ちで施工されており、施工の省力化が求められている。RC 構造物は足場構築、鉄筋組立、型枠設置、コンクリート打設、養生（散水）、型枠脱型、表面処理と多くの手順と時間を経て完成する（図-1 左）。また、規模が大きければ上記作業に加えて、コンクリート打継や鉄筋継手処理が必要になる。さらに水域や地下水が豊富な箇所であれば、止水のため、締切構造物（図-2）が必要となるため、施工の長期化、難易度のアップにより、施工リスクもアップする。このように RC 施工時の課題は多い。

3-2. PCa 施工方法

PCa 施工（据付）の手順は、柱構造物の場合、足場構築、PCa 部材吊上げ、PCa 部材位置出し、PCa 部材固定、炭素繊維の巻付けという手順（図-1 右）になり、現場作業が大幅に削減される他、コンクリート硬化時間の短縮、仮設構造物設置期間の短縮等により、経済性に優れる結果となる。PCa 施工の課題として、①搬入可能な部材寸法が限定（陸送であれば重量・高さ規定がある）されること、②据付時の位置出しに高い精度が求められることが挙げられる。解決方法として①部材寸法は分割施工することで対応が可能と考える。②位置出しは、下部 PCa 部材に取り外し可能な仮固定金物（図-3）を事前に配置することで対応可能と考える。

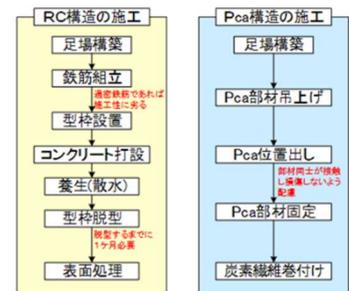


図-1 RC/PCa 施工手順

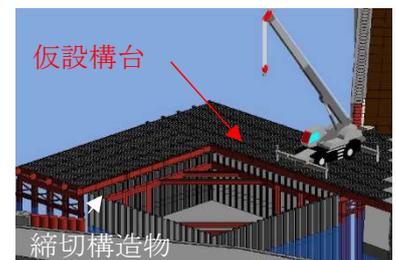


図-2 締切構造物

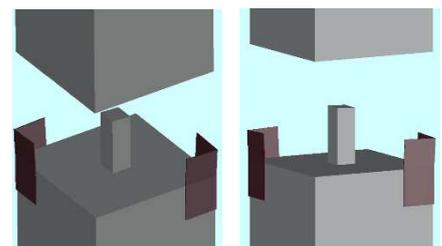


図-3 PCa 構造位置出し金物

キーワード：汎用 PCa、ロボット施工

連絡先：〒812-0012 福岡市博多区博多駅中央街 7 番 21 号 パシフィックコンサルタンツ株式会社 Tel 092-418-8034

資料-4

JSCE 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会

4. ロボットを活用した施工方法の検討 ロボット技術が向上した将来において人力を極力介在させないようにするという視点から、汎用 PCa を用いたロボット施工イメージを図-4 に示す。

現状では実装可能ではないが、汎用 PCa 部材の運搬や据付け等をロボットにより行うことで省人化が可能になると考えた。

ロボットを活用した汎用 PCa 部材の組立て方法について橋脚の施工を例に、作業自由度が高いと目された多軸ロボットとクレーン型ロボットを参考にイメージの構築を試みた。

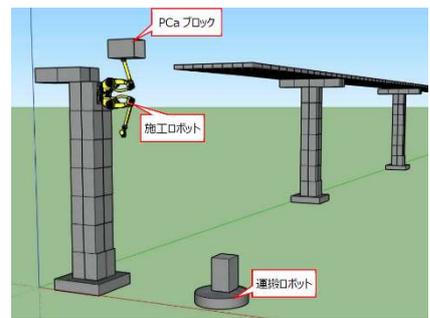


図-4 汎用 PCa を用いたロボット施工

4-1. 多軸ロボットを活用した組立て方法 現在、最も普及しているタイプの産業用ロボットである垂直多関節型の人間の腕の構造に近いロボットを活用した組立て方法を考えた。特徴は自由度が非常に高く、回り込んでの作業を得意とする点である。ただし、制御は複雑になる。組立ての手順を図-5 に示す。組み立ては①作業ヤード内に並ぶ PCa 部材の一つをロボットの支持として使用し、一方の部材を把持する (図中①)。②把持した部材を支持部材の上に重ねるように移動し、積み重ねていく (図中②)。③新たな部材を搬入し、繰り返し作業を行う (図中③)。多軸ロボットによる組立のメリットは、アーム型のため様々な部材形状に対応可能であること、繰り返し精度が高いこと、ロボット自身が移動可能であるため、施工後の維持管理にも適用し易いことが挙げられる。一方、デメリットとして、作業には正確なティーチングを要すること、高速動作が難しいことが挙げられる。

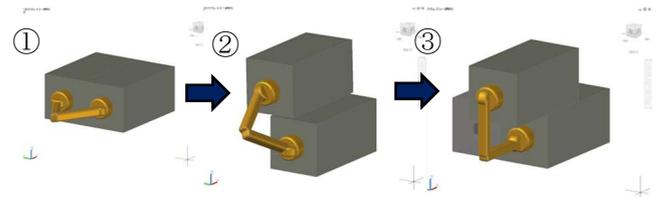


図-5 多軸ロボットによる組立てイメージ

4-2. クレーン型ロボットを活用した組立て方法

重量物を把持し任意の箇所に移動するためには、建設現場や工場等で使用されるクレーン機構の活用が考えられる。今回検討を行ったのは門型クレーンに似た機構であり、4本の支柱端部が PCa 部材により支持可能な点である。これはロボット自体が昇降し構造物の高さに依存しないようにするためである。クレーンの先端はフックではなく支柱同様把持機構を備えている。最低4つの部材が並んでいればロボットで組立てが可能であり、図-6 に示すイメージでは4つの部材を基礎として組立て部材を把持する。ワイヤーにより部材を把持する (図中(a))。把持した部材を引上げ、所定の場所への積み重ねを繰り返す (図中(b))、既定の部材が積み終わると (図中(c))、支柱の把持機構が移動し最上層の部材によりロボットを支持する。クレーン型ロボットによる組立てのメリットは、機構がシンプルのため多軸ロボットより製作コストが抑えられること、誤作動が起こりにくいことが挙げられる。

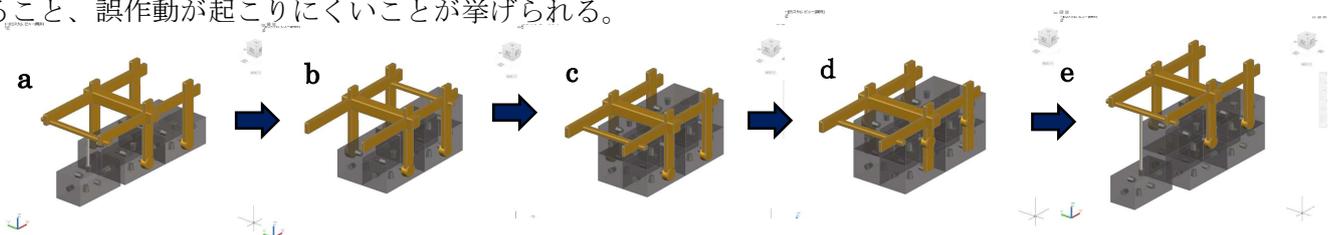


図-6 クレーン型ロボットによる組立てイメージ

5. まとめ 本報により報告した内容を以下に示す。

- ①大規模構造物への PCa 適用について：現時点で想定される課題と解決方法について示した。
- ②ロボット化施工：PCa ブロックでの構造物構築時のロボット施工に向けてロボットタイプ別に施工イメージを確認し、メリット/デメリットについて把握した。

6. 今後の予定 本小委員会では、引き続き上述の内容について検討していく予定である。

参考文献

- 1) .汎用 PCa 化による建設生産性向上の可能性に対する一考察.土木学会全国大会.2018

論文名：

取替可能なプレキャスト部材の特性について（実験結果）

Characteristics of replaceable precast members

(experimental results)

ジャーナル名：

令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会

発表年月：2021/9

第VI部門

CIM(1)

2021年9月10日(金) 13:00 ~ 14:20 VI-14 (Room39)

[VI-693] 取替可能なプレキャスト部材の特性について（実験結果）
Characteristics of replaceable precast members
(experimental results)

○中嶋 道雄¹、渡邊 武志²、井口 重信³、柳川 正和⁴、松下 裕昭⁵、中井 裕司⁶（1.東洋建設株式会社、2.パシフィックコンサルタンツ株式会社、3.東日本旅客鉄道株式会社、4.清水建設株式会社、5.丸栄コンクリート工業株式会社、6.前田工織株式会社）

○Michio NAKAJIMA¹, Takeshi WATANABE², Shigenobu IGUCHI³, Masakazu YANAGAWA⁴, Hiroaki MATSUSHITA⁵, Yuji NAKAI⁶（1.Toyo Construction Co.,LTD., 2.PACIFIC CONSULTANTS CO., LTD., 3.East Japan Railway Company, 4.SHIMIZU CORPORATION, 5.MARUEI CONCRETE INDUSTRY CO.,Ltd, 6.MAEDAKOSEN CO., LTD.）

キーワード：生産性向上、プレキャスト、接合構造

Productivity improvement, Precast, Joint Structure

オンライン会場（Zoom）はこちら

筆者らは、建設の生産性向上策として取り換え可能で汎用性がある PCa部材を考案して来た。本論文は考案した PCa部材にどのような特性があるのかを実験を行いその結果を示す。考案された PCa部材は、汎用性を持たせた各パーツをジョイントで接合し、接合部付近を繊維シートを巻いて補強したものである。実験対象となる PCa部材は最も汎用性が高いと思われる基本直線パーツを2つつなげた形状とした。

オンライン会場（Zoom）はこちら

The authors have devised a replaceable and versatile PCa member as a measure to improve construction productivity. In this paper, we experiment with the characteristics of the devised PCa member and show the results. The devised PCa member is made by joining versatile parts with joints and wrapping fiber sheets around the joints to reinforce them. The PCa member to be tested has a shape in which two basic straight parts, which are considered to be the most versatile, are connected.

取替可能なプレキャスト部材の特性について（実験結果）

○東洋建設(株) 正会員 中嶋道雄 パシフィックコンサルタンツ 正会員 渡邊武志
 東日本旅客鉄道(株) 正会員 井口重信 清水建設(株) 柳川正和
 丸栄コンクリート工業(株) 松下 裕昭 前田工織(株) 正会員 中井裕司

1. 目的

筆者らは、建設の生産性向上策として取り換え可能で汎用性がある PCa 部材を考案して来た(参考文献参照)。ここでは考案した PCa 部材にどのような特性があるのかを実験を行った。以下にその結果を示す。

2. 実験条件

考案された PCa 部材は、汎用性を持たせた各パーツをジョイントで接合し、接合部付近を繊維シートを巻いて補強したものである。実験対象となる PCa 部材は最も汎用性が高いと思われる基本直線パーツを 2 つつなげた形状とした。以下に PCa 部材の構成概念と基本直線パーツの構造図を示す。

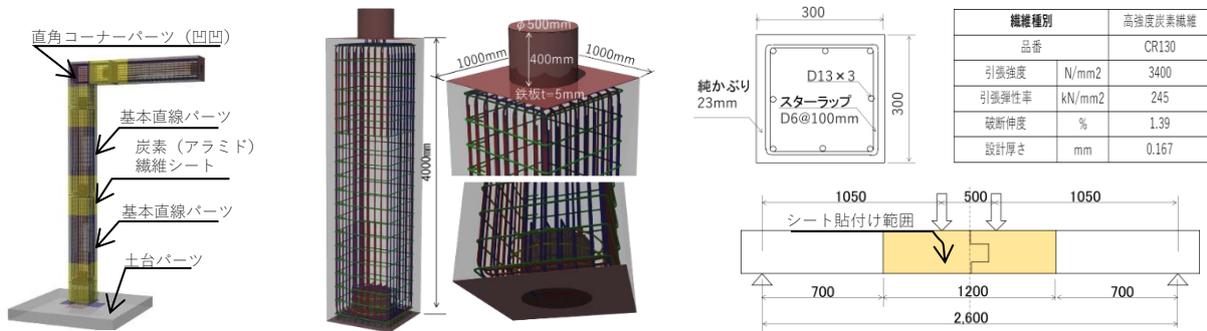


図 1 PCa 部材構成概念図

図 2 基本直線パーツの構造図

図 3 実験モデル図

このような PCa 部材が成立するかを確認するために、ジョイント部の耐力に着目して曲げ実験を行った。実験桁は、実際の桁の大きさの 1/3 程度と想定し、桁長 1.3m で 0.3m 断面の桁を製作した。

ジョイント部は繊維シートと鉄筋コンクリートそれぞれの耐力を考え、鉄筋コンクリートが先行して破壊するジョイント部に隙間を設けないケースと、ジョイント部に隙間を設置してシート先行破壊の 2 ケースを設定した。以下にジョイント部の耐力の概念図及び、実際に製作したジョイント部の写真を示す。

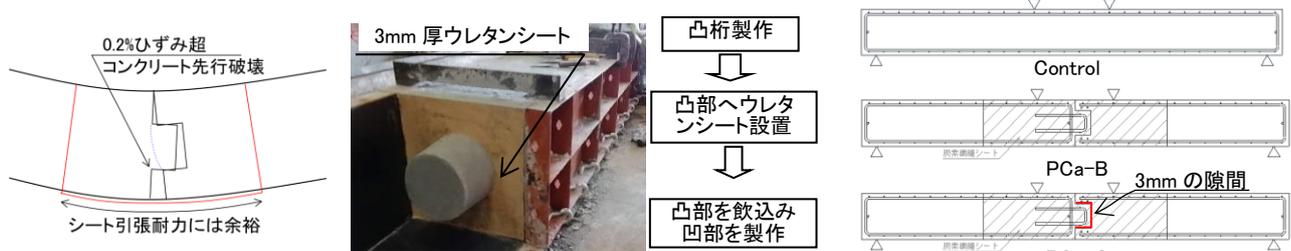


図 4 ジョイント部破壊概念

図 5 ジョイント部製作状況

図 6 実験ケース図

実験を行ったケースは、図-6 に示すとおり、ジョイントの無い Control とジョイント部に隙間が無い PCa-B 及び隙間が有る PCa-C の 3 種類である

3. 実験結果

ジョイントを設けたものは、PCa-B, PCa-C どちらのタイプも破裂音と共に一気にシートが剥離し、ジョイント部が破壊した(図 8 参照)。また図 9 を見るとコンクリート先行破壊を予想していた PCa-B はジョイントの雄部及び雌部で激しく破壊しているが、シート先行破壊の PCa-C では雄部の破壊が少ない。

キーワード 生産性向上, プレキャスト部材, 接合構造

連絡先 〒135-0064 東京都千代田区神田神保町 1-105 東洋建設(株) 土木技術部 TE103-6361-5464

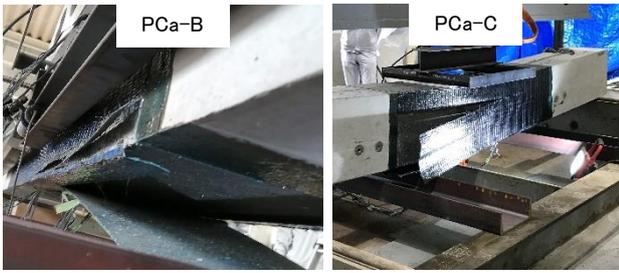


図 7 シート剥離状況

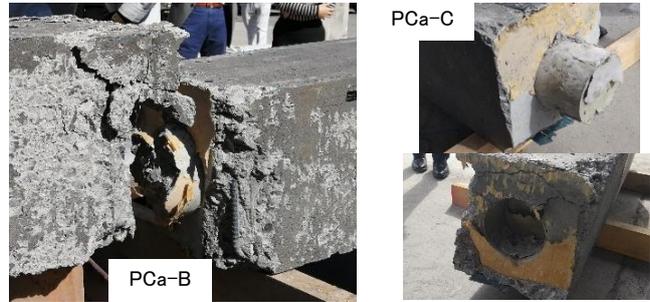


図 8 ジョイントの破壊状況

以下に桁中央変位毎の荷重及び、主鉄筋、ジョイント部主筋、スターラップ、シートのひずみ図を示す。最大耐力は Control に比べて PCa-B,C は同程度の約半分であった。PCa-B では最大耐力となる変位 10mm 程度まで、桁主筋、ジョイント主筋ひずみが直線的に増加して、曲応力がジョイント部まで伝達している。変位 8mm 程度からはスターラップひずみが増加しており、せん断応力が増加している事が分かる。一方 PCa-C では、変位 4mm までは曲げが直線状に増加しており、その後緩やかに維持されている。せん断に関しては変位 4mm から緩やかに増加している。ジョイント部の隙間の有無で、コンクリート及びシート先行破壊が再現されているが、耐力が半分程度となっているため、今後耐力増加について考察を行ってゆきたい。

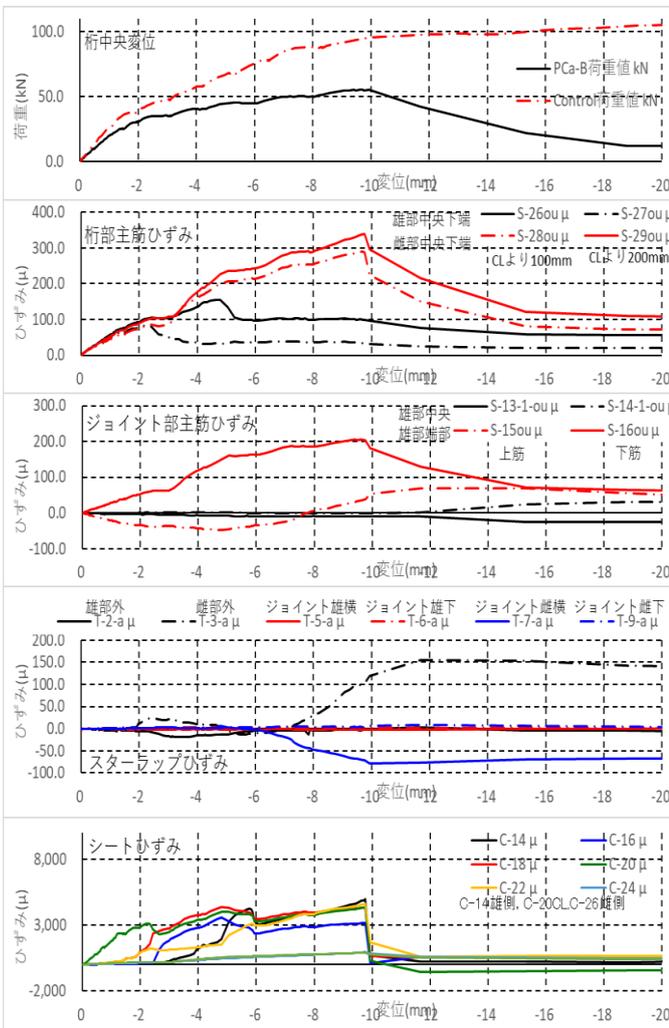


図 9 PCa-B 実験結果

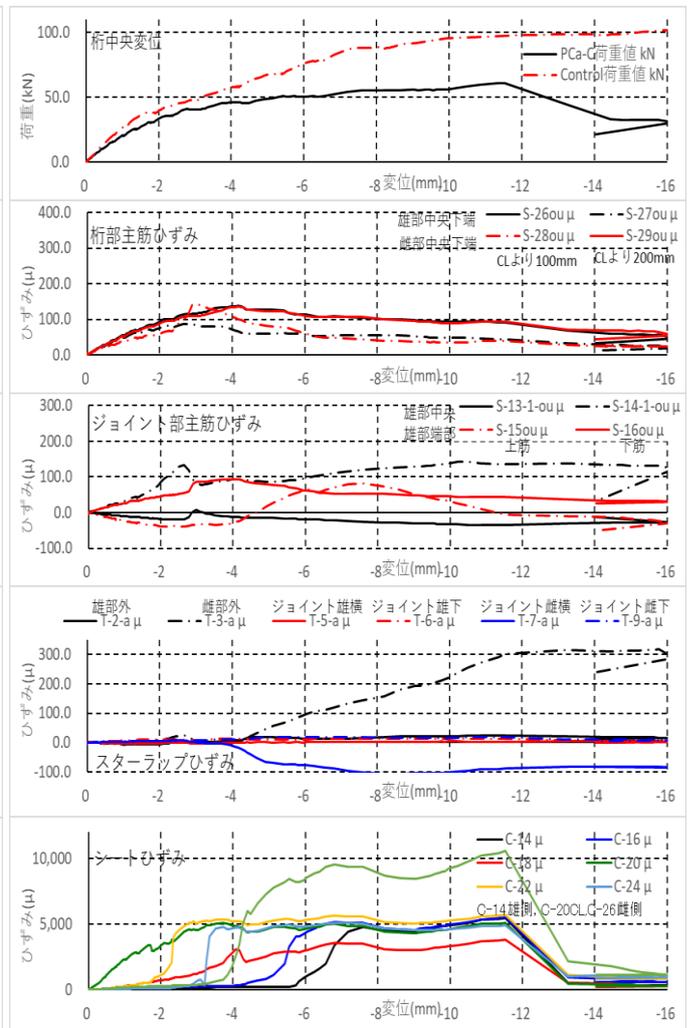


図 10 PCa-C 実験結果

なお本論文は、土木学会の「三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会」によって研究されたものである。ご協力くださった方々に感謝申し上げます。

参考文献

- ・ 取り替え可能なプレキャスト部材の考案(中嶋ら) 土木学会全国大会 2020
- ・ 取替可能なプレキャスト部材の特性について (FEM 解析) (井口ら) 土木学会全国大会 2021

論文名：

取替可能なプレキャスト部材の特性について（FEM解析）

Characteristics of replaceable precast members (FEM)

ジャーナル名：

令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会

発表年月：2021/9

第VI部門

CIM(1)

2021年9月10日(金) 13:00 ~ 14:20 VI-14 (Room39)

[VI-694] 取替可能なプレキャスト部材の特性について (FEM解析)
Characteristics of replaceable precast members (FEM)

○井口 重信¹、渡邊 武志²、中嶋 道雄³、柳川 正和⁴、松下 裕昭⁵、中井 裕司⁶ (1.東日本旅客鉄道株式会社、2.パシフィックコンサルタンツ株式会社、3.東洋建設株式会社、4.清水建設株式会社、5.丸栄コンクリート株式会社、6.前田工織株式会社)

○Shigenobu IGUCHI¹, Takeshi Watanabe², Michio Nakajima³, Masakazu Yanagawa⁴, Hiroaki Matsushita⁵, Yuji Nakai⁶ (1.East Japan Railway Company, 2.PACIFIC CONSULTANTS CO., LTD., 3.TOYO CONSTRUCTION CO.,LTD., 4.SHIMIZU CORPORATION, 5.MARUEI CONCRETE INDUStRY CO.,Ltd, 6.Maeda Kosen Co., Ltd.)

キーワード：プレキャスト、接合構造、FEM
Precast, Joint Structure, FEM

オンライン会場 (Zoom) はこちら

筆者らは、建設の生産性向上策として取り換え可能で汎用性がある PCa部材を考案して来た。本論文は考案した PCa部材の特性を確認した実験の FEM解析による結果の再現およびその考察である。補強繊維とコンクリートの界面を適切にモデル化することで精度向上が見込まれる点、接合部の配筋の工夫により耐力向上が見込まれる点などが明らかとなった。

オンライン会場 (Zoom) はこちら

取替可能なプレキャスト部材の特性について (FEM 解析)

東日本旅客鉄道(株) 正会員 ○井口重信 パシフィックコンサルタンツ 正会員 渡邊武志
 東洋建設(株) 正会員 中嶋道雄 清水建設(株) 正会員 柳川正和
 丸栄コンクリート工業(株) 松下裕昭 前田工織(株) 正会員 中井裕司

1. はじめに

土木学会の「三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会」では、建設工事の生産性向上策として取替可能で汎用性のあるプレキャスト部材を考案してきた¹⁾。ここでは、考案したPCa部材の載荷実験のFEM解析による再現と、耐力向上のための補強対策を施した場合のシミュレーションを行ったので、以下で概説する。

2. FEM 解析モデル

FEM解析は載荷実験を行ったPca-C試験体の再現を目的にした「補強あり-1」と、補強をしなかった場合を想定した「補強なし-1」を基本に、表-1に示す4ケースを実施した。

FEM解析のモデル図を図-1に示す。試験体の詳細については、別稿の載荷実験の詳細を参照されたい。FEM解析はコンクリート材料の非線形特性等を提供しているATENAを用いて行った。SOLIDモデルで作成し、鉄筋はコンクリートとは別に離散鉄筋として配置した。補強繊維については、表層位置に2mm間隔で等断面積の鋼材が配置されているようにモデル化した。「補強あり-1」では補強繊維とコンクリートは完全付着としたが、「補強あり-2」ではCEB-FIB Model Code 1990の鉄筋とコンクリートの付着モデルを用い、付着性状が良くない「poor」を設定した。中央の接合部の界面には、圧縮方向に力が作用したときのみ作用力を伝達する接触要素を配置した。材料モデルを表-2に示す。鉄筋についてはミルシートの降伏荷重を設定したバイリニアで、コンクリートについては試験時の圧縮強度試験の値を用いてATENAで提供されるコンクリート用の非線形材料モデルを用いた。補強繊維については、カタログに示される引張強度および弾性係数を用いてバイリニアでモデル化した。

3. FEM 解析結果

図-2に、載荷実験と解析4ケースの荷重-変位関係を示す。「補強なし」、「補強あり」ともに、緩やかに剛性

表-1 解析ケース

| | 解析(実験)ケース | 概要 |
|----|-----------|-----------------------------|
| 実験 | Pca-C | 載荷実験(別稿参照) |
| 解析 | 補強あり-1 | Pca-Cを再現。補強繊維はコンクリートと完全付着 |
| | 補強あり-2 | 「補強あり-1」で補強繊維とコンクリートの付着力を低減 |
| | 補強なし-1 | Pca-Cで補強繊維がなかった場合を再現 |
| | 補強なし-2 | 補強なし-1で接合部に鉄筋を追加 |

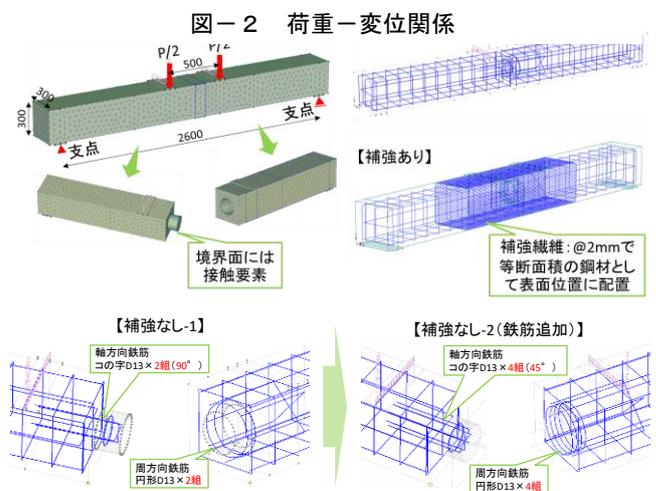


図-1 FEM 解析モデル

表-2 材料モデル

| 材料 | モデル | 数値等 |
|--------|------------------|---|
| 鉄筋 | バイリニア | 帯鉄筋(D6) : $\sigma_{sy}=358\text{N/mm}^2$ (ミルシート値) |
| | | 主鉄筋(D13) : $\sigma_{sy}=398\text{N/mm}^2$ (ミルシート値) |
| コンクリート | 非線形モデル (ATENA提供) | 凸側 : $f'_c=45.4\text{N/mm}^2$ (圧縮強度試験値) |
| | | 凹側 : $f'_c=39.5\text{N/mm}^2$ (圧縮強度試験値) |
| 補強繊維 | バイリニア | $\sigma_{sy}=3400\text{N/mm}^2$, $E=245\text{kN/mm}^2$ (炭素繊維カタログ値) |

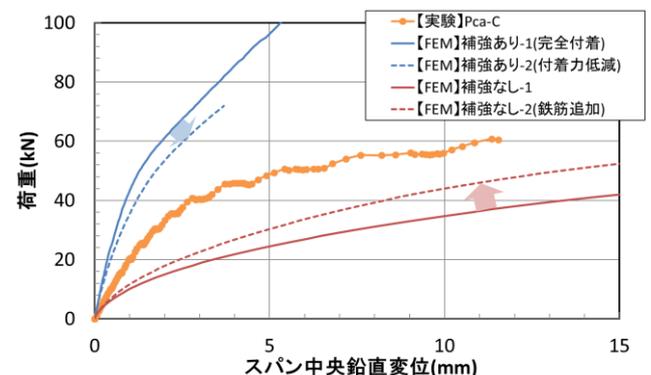
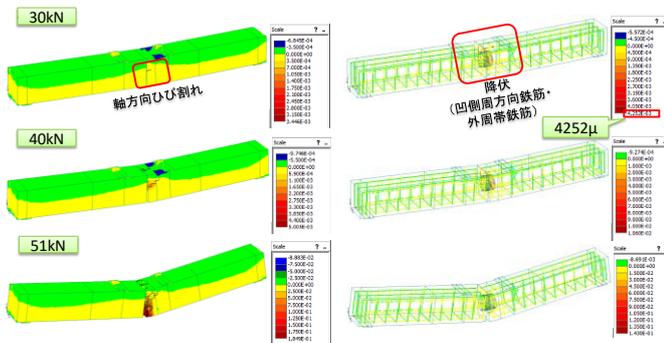


図-2 荷重-変位関係

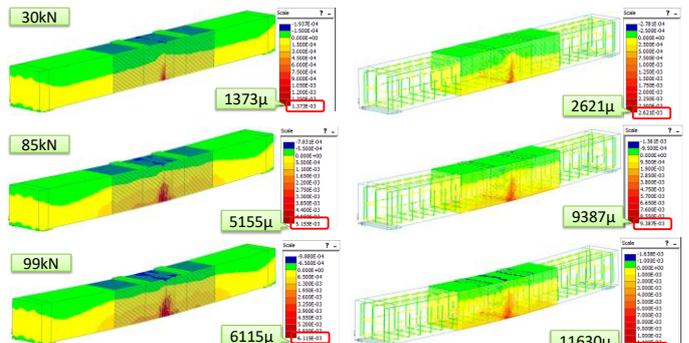
キーワード プレキャスト, 接合構造, FEM

連絡先〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-2 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部 技術戦略G TEL03-5334-1288



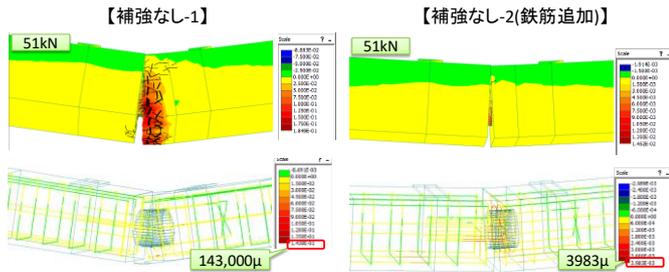
※変形:5倍表示, ひび割れ:0.1mm以上のみ表示, コンター:梁軸方向ひずみ

図-3 ひずみ・ひび割れ分布(補強なし-1)



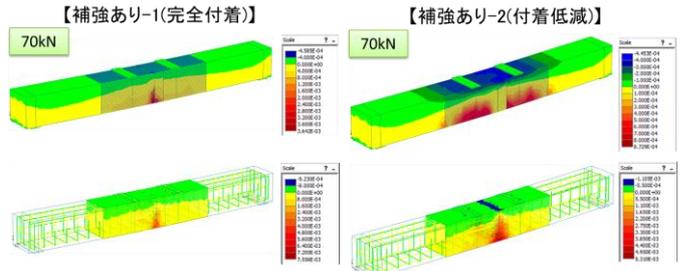
※変形:5倍表示, ひび割れ:0.1mm以上のみ表示, コンター:梁軸方向ひずみ

図-4 ひずみ・ひび割れ分布(補強あり-1)



※変形:5倍表示, ひび割れ:0.1mm以上のみ表示, コンター:梁軸方向ひずみ

図-5 補強なし-1, 2の比較



※変形:5倍表示, ひび割れ:0.1mm以上のみ表示, コンター:梁軸方向ひずみ

図-6 補強あり-1, 2の比較

低下をしながら変形が増大していった。実験結果は「補強あり」と「補強なし」の中間位置することから、傾向は再現されていると思われる。また、「補強あり-2」は実験結果に近づくことから、実際には補強繊維とコンクリートの付着力の限界値はもっと小さいものと考えられる。「補強なし-2」は「補強なし-1」に比べ上側へシフトすることから、接合部の配筋状況により本構造の耐荷性能が左右されることも分かった。

図-3, 4に「補強なし-1」, 「補強あり-1」のひずみとひび割れ分布を示す。「補強なし-1」では、30kNくらいから、接合部の凹側側面に軸方向のひび割れが入り、接合部の周方向鉄筋や外周の帯鉄筋が降伏し、凸側が凹側を下側へ押し広げるようにして変形が進んでいった。「補強あり-1」では、補強繊維の軸方向ひずみが荷重の増大とともに増える他は、目だった変化はなく安定的に変形が進んでいった。Pca-Cの載荷実験では載荷終盤では補強繊維がコンクリート面から離れたため、最終的な損傷状況は「補強なし-1」に近いものとなっていた。図-5に「補強なし-1」に接合部の鉄筋を追加した「補強なし-2」との比較を示す。同じ51kN時で比較すると、「補強なし-1」では凹部周囲の損傷が著しく周囲の鉄筋ひずみも降伏ひずみをはるかに上回っているのに対し、「補強なし-2」では損傷は凸部に集中しており凹部は周囲の鉄筋ひずみも降伏ひずみを超えた程度で損傷が軽微である、鉄筋を追加した効果が現れている。図-6に「補強あり-1」でコンクリートと補強繊維の付着力を低減させた「補強あり-2」との比較を示す。損傷の進み方については両者に大きな差異は少ないが、「補強あり-1」ではスパン中央にひずみが集中するのに対し、「補強あり-2」ではひずみが分散する傾向がみられた、おそらく載荷実験も「補強あり-2」に近い状況だったと推測される。

4. まとめ

考案した取替可能なプレキャスト部材の載荷実験の再現を概ね可能となったと考えている。今後は精度を向上させるとともに、より合理的なプレキャスト部材の構造について検討していきたい。なお、本論文は、土木学会「三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会」によって研究された内容である。ご協力頂いた方々に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 中嶋道雄ら: 取替可能なプレキャスト部材の特性について(実験結果), 土木学会年次学術講演概要集, 2021

論文名：

BIM/CIM での設計から施工への情報伝達時の課題と解決策
の方向性

ジャーナル名：

土木情報学シンポジウム講演集

発表年月：2022

BIM/CIMでの設計から施工への 情報伝達時の課題と解決策の方向性

中嶋 道雄¹・井波 文明²・石浜 裕幸³・橋本 紗百合⁴

¹ 正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 国土基盤事業本部 港湾部
(〒101-8462 東京都千代田区神田錦町三丁目 22 番地)

E-mail: michio.nakajima@tk.pacific.co.jp

² 正会員 株式会社 長大 社会基盤事業本部 第1設計保全事業部
(〒305-0812 茨城県つくば市東平塚 730)

E-mail: inami-t@chodai.co.jp

³ 正会員 株式会社 安藤ハザマ 建設本部 土木技術統括部 土木設計部 CIM 推進グループ
(〒105-7360 東京都港区東新橋 1-9-1)

E-mail: ishihama.hiroyuki@ad-hzm.co.jp

⁴ 正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通基盤事業本部 構造技術部
(〒101-8462 東京都千代田区神田錦町三丁目 22 番地)

E-mail: sayuri.hashimoto@tk.pacific.co.jp

土木に関する BIM/CIM 適用は、国土交通省を中心として 2012 から適用が始まり、2023 年にはすべての設計業務・工事を適用対象としている。現在での国発注工事は、2 次元図面を正式な契約書類として、3 次元 BIM/CIM データは副次的に位置付けされている。今後 BIM/CIM での正式契約書類となった際の課題と解決策の方向性を以下に示す。

Key Words : BIM/CIM, i-construction, ICT construction, virtual construction

1. 概要及び背景

土木への BIM/CIM 適用は、国土交通省を中心として 2012 年から適用が始まり、2023 年にはすべての設計業務・工事を適用対象としている。現在での国発注工事は、2 次元図面を正式な契約書類として、3 次元 BIM/CIM データは副次的に位置付けされている。今後 BIM/CIM での正式契約書類となった際の課題と解決策を以下に示す。

示す。主に設計で利用する BIM/CIM データは、構造物モデル及び土工モデル、線形モデルである。データ形式は、各種のソフトウェアに依存したオリジナル形式と流通を考慮した共通ファイル形式があり、共通ファイル形式は J-LandXML と IFC2x3 となっている。オリジナルファイル形式は個々のソフトウェアの機能に依存するため、ここでは共通ファイル形式でデータ流通を行った際の情報伝達を前提と考え、構造物をターゲットにして IFC 規格での流通を前提としている。

2. データ流通及び規格

(1) データ流通時の規格

国土交通省 BIM/CIM データ納品規格を、以下の表に

表-1 BIM/CIM 納品データ規格一覧¹⁾

| データ種類 | フォルダ | データ規格 |
|--------------------|--------------------|---------------------------|
| 地形モデル (広域地形) | LANDSCAPING | J-LandXML 及びオリジナルファイル |
| 地質・土質モデル | GEOLOGICAL | オリジナルファイル |
| 土工形状モデル 及び線形モデル | ALIGNMENT_GEOMETRY | J-LandXML L及びオリジナルファイル |
| 構造物モデル | STRUCTURAL_MODEL | IFC 2x3 及びオリジナルファイル |

(2) IFC 規格

IFC (Industry Foundation Classes)規格は、BIM 共通フォーマットとして 1995 年から IAI(現 bSI)によって作成され、2022 年現在、国土交通省の BIM/CIM 対象納品規格は、IFC2x3 に加えて土木モデルビュー定義²⁾となっている。この定義で利用可能なオブジェクトは、鉄筋と鉄筋以外(一般構造物)の 2 種類であるが、これは IFC が建築中心のためである。現在では土木構造(道路、鉄道、トンネル、港湾)の追加活動が行われており、2021 年に IFC4.3 としてドラフト版が発表された³⁾。

3. 設計から施工へのデータ流通時の課題

(1) 設計データの流通

施工側に受け渡される設計データは、文字中心の仕様書及び図形中心の図面の2種類のデータが通常である。近年では紙による情報から電子データによる伝達に変化してきており、仕様書においてはpdf形式、図面に関してはSXF(P21)形式またはdwg形式が一般的である。

(2) 規格基準

現状で定まっている BIM/CIM 設計関連規格基準を、以下の表に示す。

(3) BIM/CIM で情報伝達に関するルールが定まっていない事に起因する課題

2次元図面基準類は土木製図基準(2009)(土木学会)や、CAD図に関してはCAD製図基準(平成29年3月)(国土交通省)等があり、紙からCADになった現状でも問題なく施工可能な状態である。BIM/CIMデータによる設計意図の伝達で、構造物形状以外にルールが定まっていないために発生している課題を列挙する。

a) 時系列情報

2次元図面では、現況図、撤去構造物図、構造物図と時系列的なデータが含まれていることが多い。2次元図面では

図面を分ける事と表題の文字情報によって、その情報がいつの時間であるかを伝達しており、BIM/CIMではこの時系列を混在する際の課題がある。

b) 線種やハッチ

2次元図面では細線・太線等の線の太さによって、目的物の種類等を区分している。また撤去構造物や隠れる構造、中心位置等を破線や一点破線等で表現している。ハッチに関しては現況構造物との取り合いが重要で施工箇所が分かりにくい場合に描画されることが多い。BIM/CIMでは線ではなく面で表される情報が中心であるために、表現方法としての課題がある。

c) 構造物名称やブロック番号等

構造物のブロック割の番号や構造物の名称等は、平面図と断面図等の図面同士をつなげるために必要な情報である。BIM/CIMでは平面図、断面図と言った概念が無いためこれらの情報は不要と考えられる。ただし施工順序の規定等、設計以外での利用頻度は多い。フロントローディングの場合、属性による付与は可能であるが、設計者が意図的に明示したい場合の手法が統一されていない。

d) 設計や計画上の仮想的な情報

土圧作用範囲である主動崩壊角や受動側の荷重を考慮している仮想海底面等、設計や計画上の仮想的な情報を示していることがある。BIM/CIMでは仮想情報表示を前提としていないため、仮想と現実が混在する状況となる。

e) 本体工に比べて薄いシート類や小さいものの表示

シート類は本体工に比べて非常に薄く、その設置範囲や形状を図示するために、本来構造物に密着させるにもかかわらず図面上では隙間を開けて図示する事が多い。また小さい部材は、図面中で認識や寸法表示が難しいので別図面として図示する事が多い。BIM/CIMではスケラブルであるために拡大すればわかる事であるが、見落

表-2 BIM/CIM 関連基準等の一覧

| 分類 | 基準名称 | 発行元 | 内容 |
|----|---|--------------------------|----------------------------------|
| 2D | 土木製図基準(2009) | 土木学会 | 基本的な図面描画基準 |
| | CAD製図基準(平成29年3月) | 国土交通省 | 土木製図基準を元に、CAD上で表現する際の規定 |
| 3D | 3次元モデル成果物作成要領(案)R4.3 | 国土交通省 | 3DモデルのLOD,オブジェクト階層,属性等 |
| | LandXML1.2に準じた3次元設計データ交換標準の運用ガイドライン(案)Ver.1.4 | 国土交通省大臣官房技術調査課 | LandXMLでの道路・河川構造物での設計データの内容規定案 |
| | 設計-施工間の情報連携を目的とした4次元モデル活用の手引き(案) | 国土交通省 | 4Dモデル(施工検討)作成手順例,データ交換方法の例 |
| | BIM/CIM活用ガイドライン(第8編港湾編)R4.3 | 国土交通省 | 構造形式毎の作成必須物,構造物の単位,活用内容の具定例 |
| | 土木モデルビュー定義2018 | bSJ(Building Smat Japan) | IFCでの3D形状・属性の確認時のデータ上必須のオブジェクト定義 |
| | 国土交通省モデルビュー定義(数量情報の連携)2019 | 国土交通省大臣官房技術調査課 | IFCでの数量情報伝達時のデータ上必須のオブジェクト定義 |
| | 土木IFC対応ソフトウェア確認要件(案)R1.5 | 国土交通省大臣官房技術調査課 | IFC対応ソフトウェアの必須要件書 |

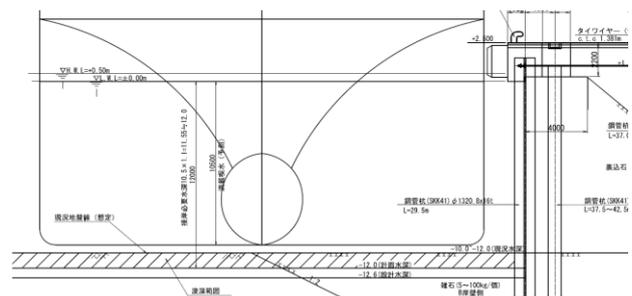


図-1 ハッチ及び仮想的な水深(設計水深)の例

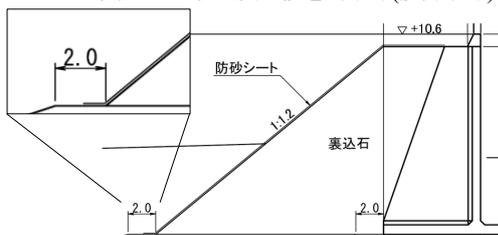


図-2 隙間を開けて描画されたシート類の例

しやすく、意図的に明示できないと言った課題がある。

f) 表現が変わることによる暗黙の了解の表示

杭図面は、支持層への貫入量が明示されていれば、支持層が実際変動しても貫入量を守る施工がなされる。また支持層まで貫入されていなければ摩擦杭であると認識して地盤を乱さない施工を行う。このように暗黙的に設計者と施工者の意思伝達を行っている項目について、表示方法が変わると認識できなくなる恐れがある。

g) 設計されている（確定部分）と現地合わせの部分

図面上では施工者が設計意図を考慮して自由に施工して良い部分と、制限を設けている部分が混在している。地下埋設構造物の様に現地調査の上、確定してから施工者が施工する部分等の表現方法がBIM/CIMには無いものとする。また表現する事で逆に施工制約が発生する懸念もある。

h) 溶接記号や鉄筋継ぎ手などの記号

溶接記号や鉄筋機械式接手等の記号は、2次元での表現を前提としているために、3次元での表現に課題がある。

i) 製品依存に繋がる形状の表示

高欄等の一般的な製品は、製品依存が発生しないように相当品としての記載をしている。3次元モデルは、リアリティが高い事と、干渉が解消されている状態である場合、製品依存に繋がりがかねない課題がある。

(4) プロダクトモデルの課題

IFC規格は杭オブジェクトとしてモデル化すると、形状を球に変更しても属性に石材など杭以外の値を入力しても杭として認識されるプロダクトモデルを考慮した規格である。現状のIFC2x3は建築規格であるため、土木オブジェクトが規定されておらず、3次元モデル成果物作成要領（案）R4.3では属性で各種のオブジェクトを区分しようとしている。ただし、例えば杭を"杭","PILE","鋼管杭φ1500mm"では人が見る意味は杭であるがソフトウェア上では違うものとして認識すると言った課題がある。

4. 施工側に必要なデータ

(1) 現場で使うときの見え方

現状のCAD製図基準では色の指定もあり、黄色は紙が白であるため印刷後に日光下で非常に見えにくい。このように現場で利用されるメディアや状況を考慮して利用しやすい基準・規格が必要である。

(2) 人による施工時に必要なデータと機械施工や自動施工時に必要なデータ

現在では、機械施工比率が大きいのが人力施工もいまだ

残る状態である。また、3次元データを元に施工するICT施工等の自動化施工も多くなっている⁴⁾。人力施工の場合は、人の認識能力から従来の2次元図面のような必要な情報に絞り込まれた状態である必要がある。ただし近年は現場でもタブレットやVR等による機器によるサポートも増えてきている⁵⁾⁶⁾。また@250mm等の鉄筋位置は、人間が施工しやすい煩雑な寸法値を避ける工夫が盛り込まれている。一方ICT施工などの自動化施工ではBIM/CIMデータをそのまま活用して施工するため、寸法値は不要であり、機械識別可能な状態であれば問題は無い。そのためmm単位や不規変化形状なども許容される。BIM/CIMでは人力・機械・自動施工区分意図が違おうと大きな問題となる。

(3) 施工検査時に必要な寸法値

施工検査は図面上の寸法値が、現場で合致しているかを確認する。そのためBIM/CIMモデルにも検査の観点からの検査箇所である寸法記入は必要である。ただし近年採用されている自動機械の軌跡を検査値として利用した検査⁷⁾や、点群を利用した検査等の場合は寸法が必要ではなく、形状すべてが検査対象と言ったことになる。

5. 課題解決の方向性

(1) 方向性

BIM/CIMにより構造物を建設する際には、2次元図面で使えていた情報はすべて伝達する必要があり、更に動きや時系列等BIM/CIMの特性で伝達可能になった事項を含めるべきである。伝達方法は、従来の2次元図面時の方法が良いのか、BIM/CIMの新しい機能を使って伝達したほうが良いのかを考えて決定する必要がある。

(2) 基準類の新設・拡充

BIM/CIMモデルを想定した設計思想や意図等を伝達するための基準が定まっていない事項が多い。以下に基準類を新設または拡充したほうが良いと考えられるものを列挙する。

a) 時系列情報

IFC規格で扱える時系列情報は、IfcTimeSeriesSchedule等の時間を扱うエンティティと各オブジェクトを関連づける事で表現は可能である。ただし、Relから始まる関連付けの方法や時間に関するエンティティが複数あるため、表現方法が複数存在する。そのため、MVD等の表現方法の規定が必要である。

b) 線種やハッチ

BIM/CIMモデルは主に面で構成され2次元を前提と

した線種のルールをそのまま適用するには無理がある。そのため、隠れる部分は透明度(Transparent)を利用する等、BIM/CIM が得意とする方法でかつ現場で見やすい等のデータ利用状況を加味して決定する必要がある。

施工対象範囲などのハッチは、3次元では色の違いや施工範囲ボタン等で表示・非表示が切り替わるなどの手法が考えられるが、設計者と施工側が同じように見える＝思想が伝達する事を念頭に基準作成が必要である。

c) 仮想的な情報

仮想的な情報は、その構造物を建設する際に副次的に必要な情報であり、必要に応じて確認可能な状態にするべきである。そのためには、どのように付与するかを基準策定が必要であると同時に、ボタンを押すと表示・非表示が切り替わる等のように、ソフトウェア側表現も統一すると設計者がそれに応じた仮想的な情報を付与する事が出来る。

(3) ソフトウェア等の拡充

IFC は、ISO を適用した国際ルールである。IFC は多岐の項目とコネクション等の手続きを含み、それゆえに難解な規格である。また同じことを表現する方法が複数存在する。そのため国ではbSJ等と協力を行い、MVD等のデータ交換のシナリオに応じどの機能を使って表現するかを規定している。ゆえに、IFC規格が定まり、MVD等の交換規格を定め、ソフトウェアに反映させて初めてユーザーが利用できることになるため、早期にユーザーがデータ交換で利用できる状況が望まれる。

(4) 施工時の閲覧性や検索性

BIM/CIM モデルの状態では、全体が俯瞰可能な状態であるが情報が多すぎて個別の施工にそのまま適用するには向かない。特に人が判断して施工する場合には、従来の図面程度の情報量となるように検索及び絞り込みが可能な機能がソフトウェア側に必要である。また、現場での閲覧性を考慮すると2次元図面も利用される。この事を念頭に目的と利用シーンに応じた2次元、3次元のハイブリッド利用を考慮してゆく必要がある。

(5) 人力施工・機械化施工・自動機械施工での利用シーンに関して

今後、機械による自動施工が標準的に適用される状態を想定し、モデル化時のルールが必要となる。ただしこの場合、工法の拘束が大きくなると考えられ、自動施工機械毎の能力に依存する部分が大きくなる。これらを解消するための1例として設計時に施工者が関与するECIや、設計施工一括発注等の設計と施工を融合させた設計を進める事が考えられる。

(6) 施工検査のための寸法表示

現行の施工検査では、土木工事施工管理基準及び規格値(国土交通省)の様に基準で定められた測定位置及び誤差の他に、設計者が定めた基準値を示しており、この部分の検査を行う。現状では3次元モデル表記標準(案)(国土交通省)や、3次元モデル表記標準(案)に基づく3DAモデル作成の手引き(案)(国土交通省)によって、3次元投影図や3DA図面などが示されており、従来の検査は可能な様になっている。ただし、近年発達している点群での検査に対しては、実際の検査方法や機種による誤差、点群の場合の許容誤差などに関する基準類が必要である。

6. 今後の方向性

以上までから、今後に必要な解決策を以下に示す

- 製図基準のBIM/CIM版のような設計者(モデル作成者)と施工者等が利用するモデル作成基準の作成
- IFCのようなデータ共通規格の普及
- MVDのようなデータ流通時に提供側と受け手が同じデータと表現を担保できる規格の作成
- 上記規格のソフトウェアへの早期適用

このように、現実的にBIM/CIMで工事を発注して施工するには各種の基準の新設・改定を早期に進める必要があると考えられる。また同時にBIM/CIMならではの機能で、活用可能な項目や方法などの機能開発を進めてゆく必要がある。

謝辞

この論文は、土木学会の三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会での情報を元に執筆を行った。ここに情報提供いただいた方々への感謝を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：BIM/CIMモデル等電子納品要領(案)及び同解説、<<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001472866.pdf>>,(入手2022/6/1).
- 2) 一般社団法人 Building Smart Japan：土木モデルビュー定義2018,<https://www.building-smart.or.jp/old/download/files/20170331_civil_mvd.pdf>,(入手2022/6/1).
- 3) Building Smart International: IFC4.3 Development、<<http://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/>> ,Introduction>,(入手2022/6/1).
- 4) 中嶋道雄, 前田庫利：建設会社でのBIM/CIM利用方向性に関する検討, 海洋開発論文集, 77巻2号,pp.I_541-I_546,2021.
- 5) 中嶋道雄：港湾工事でのCIMの活用, 土木施工(株)オフィススペース, 2019年1月号, pp.99-102, 2019.
- 6) 中嶋道雄, 前田庫利：港湾工事におけるBIM/CIMのVRへの活用方法の開発, 海洋開発論文集, 76巻2号,pp.I_534-I_539,2020.

論文名：

三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会報告

ジャーナル名：

土木情報学シンポジウム講演集

発表年月：2022

三次元モデルを活用した建設生産性向上 研究小委員会報告

ACTIVITY REPORT OF THE CONSTRUCTION PRODUCTIVITY
IMPROVEMENT RESEARCH COMMITTEE
USING A THREE DEMENSIONAL MODEL

渡邊武志¹・中嶋道雄¹・井口重信²・柳川正和³

Takeshi WATANABE, Michio NAKAJIMA, Shigenobu IGUCHI, Masakazu YANAGAWA

- ¹ 正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町三丁目 22 番地)
² 正会員 東日本旅客鉄道株式会社 東京建設 PMO (〒141-0031 東京都品川区西五反田三丁目 5 番 8 号)
³ 清水建設株式会社 土木技術本部 イノベーション推進部 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16-1)

本報は土木情報学委員会「三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会」での活動内容(期間 R2.7~R3.6)について報告するものである。本小委員会の活動内容を以下に示す。①建設プロセス(調査・設計・施工・維持管理)における BIM/CIM の実施状況と課題整理, ②汎用 PCa 採用時のメリット, 構造物を構築時の接合方法の検討, ③厳島神社改修状況見学報告

Key Words: BIM/CIM, 3Dmodel, precast concrete

1. はじめに

我が国の建設業界は少子高齢化に起因する労働力不足を解消し、生産性向上を図る手段として BIM/CIM を積極的に導入してきた。その結果、土工を対象として一定の効果が確認されている。その一方で、BIM/CIM 導入の目的である生産性向上が建設プロセス(設計・施工・維持管理)の各段階で図れていない場面も散見される。こうした状況を踏まえ、本研究小委員会では①現状における BIM/CIM 活用状況と課題, ②PCa 製品の活用について議論を重ねてきた。以下、本研究小委員会活動の活動状況について報告する。

2. 建設プロセスにおける BIM/CIM データの活用

BIM/CIM は導入フェーズを経て、活用フェーズ(調査・計画, 設計, 施工, 維持管理)の各建設プロセスでの 3Dモデル活用と建設プロセス間におけるシームレスな情報伝達へと移行してきている。

このため建設プロセス毎に BIM/CIM データをどのように活用し、何が課題となっているかについて以下にとりまとめた。

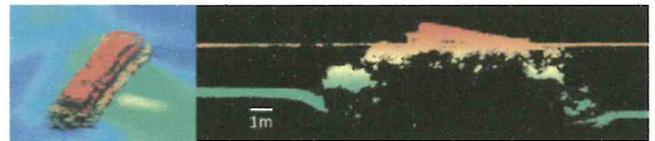


図-1 離岸堤の3次元測量データ(左:鳥瞰, 右:断面)

(1) 調査時の BIM/CIM の実施事項と課題

調査時の BIM/CIM の活用については、航測会社が事例を紹介し、討議を行った。調査段階は、BIM/CIM の起点であり、調査時に取得したデータを設計や施工段階で有効に活用することが期待されている(図-1)。近年、測量はドローン測量や地上レーザスキャナの普及により、3次元データの取得が大部分を占めている。例えば、航空レーザによって取得された3次元データは広範囲であり、データ容量も大きい(ペタバイト)。このようなデータの取り扱いについて、測量会社では GIS をベースとした3次元に対応したソフトにより対応している。しかし、後続する建設プロセス(設計以降)で使用される CAD ソフトでは読み込みが困難なケースもあり、設計以降の建設プロセスでの3次元測量データ活用上の課題となっていることが確認された。

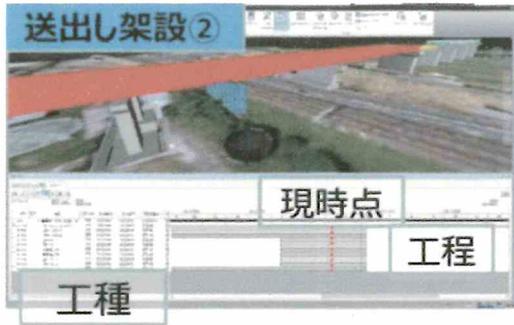


図-2 設計時での活用事例

(2) 設計時のBIM/CIMの実施事項と課題

設計時のBIM/CIMの活用については、コンサルが事例を紹介し、討議を行った。設計時での活用は、複雑な鉄筋の取り合いや干渉等の確認や改善に利用している。

また、点群や既存3Dモデルから、複雑な形状の構造物の建築限界の確認に利用している事例も確認できた。その他、数量の自動算出や設計時での施工検討に利用していることも確認された。(図-2)

設計時に正確な現地形状を受け取ることで、建築限界や既存施設との取合いについて判断できるため、これらのデータを受け取り、設計成果を施工側に送り出す事が重要な点であると考えられる。ただし、設計時には3Dモデル作成が多いが、流通のための規格が定まっていない状況もあり、ソフトウェアの充実度が不足しているといった課題がある。また、本来必要なプロダクトモデル(3次元データに鉄筋や鋼管杭と言った分類が定まったモデル)の規格が定まっていない事や作成可能なソフトが不足していることが課題となっていることが確認された。

(3) 施工時のBIM/CIMの実施事項と課題

施工時でのBIM/CIMの活用については、建設会社が事例を紹介し、討議を行った。施工段階でBIM/CIMの利用は、3Dモデルで可視化する事により工事内容の周知や説明などに利用している例が多かった。

図-3に施工時の活用事例(トンネル施工)を示す。

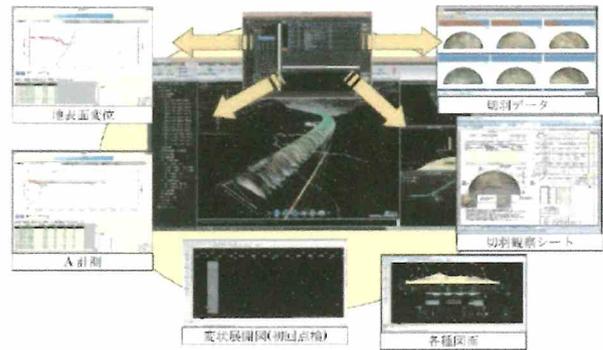


図-3 施工時の活用事例(トンネル施工)

次いで、3Dデータを利用し、ICT施工に活用するケースが多かった。これは自動化施工の一環であり、設計時のBIM/CIMデータをベースとしてその形状になるように施工機械を自動的に作動させる施工方法である。

この他、ドローン等で点群を取得し、現地の再現や施工結果の検証などに利用している。これらのデータの活用及び情報の付加を考慮すると、今後は施工成果となる出来形を自動的にBIM/CIMモデルに付与し、維持管理での活用を行う事が考えられる。

(4) 維持管理時のBIM/CIMの実施事項と課題

維持管理のBIM/CIMの活用については、鉄道会社や高速道路会社での維持管理事例を紹介し、討議を行った。鉄道会社や高速道路会社は、その施設によって営業を行っていることもあり、非常に細かな維持管理を行っている状況である。また、各社独自の維持管理データベースを作成し、その中ですでに情報の付加とそれによる補修計画や補修によってアップデートされた情報を管理している状況である。このように道路や鉄道などはすでに予防保全型の高度管理を行っている。

また、例えば道路や線路などの構造物であれば管理は拠点からの距離で管理しており、その事業主体によって管理単位が違う等、現状管理しているデータ構造を変化させる必要がある。このように構造等の差や、民間や公共の事業主体別で維持管理情報の情報量や項目を考慮する必要があると考えられる。

(5) まとめ

調査、設計、施工、維持管理での各建設プロセスでの、事例や課題を紹介してきた。調査で発生した大量のデータはその後のプロセスでの活用に必要不可欠であるため、データ流通の観点から標準的なプラットフォームが必要であると考えられる。また、設計段階では作成のためのデータ形式規格の設定や対応ソフトが必要である。施工段階では建設プロセスでの生産性の向上から、自動化施工を支える建設機械や資材の移動を入・出力できる

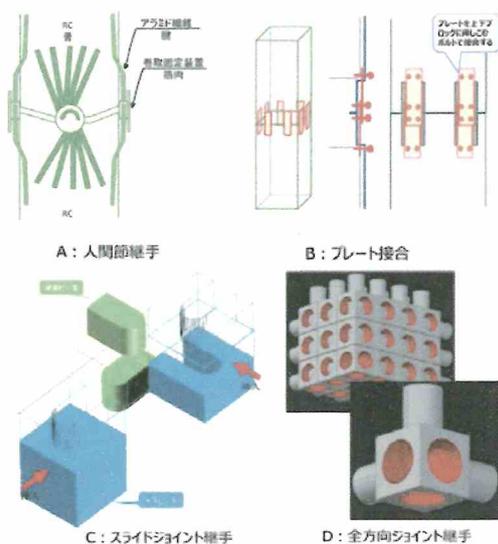


図-7 接合構造のアイデア

いる部材接合方法で、多種多様な継手が存在する。基本的には引張に弱く、最後に楔や栓を打ち込んで効果を出す継手も多数存在する。コンクリートのプレキャスト製品で言うモルタル充填に近いイメージである。また、継手によって使用する部位が異なり、伝達する断面力などが異なる。柱の接合構造には、腐食時に部分的に入れ替える際に用いる「金輪継」といった継手構造もあり、用途や使用部位・作用断面力に合わせて選定されている(図-6)。この点は、コンクリート製のプレキャスト構造を検討する際にも、多いに参考になる知見かと考える。

c) 新しい接合構造のアイデア

前述のような検討を踏まえ、既成概念にとらわれない新しい接合構造のアイデアを出し合った。図-7にその一例を示す。Aは人の間接を模した継手で、RC部材から伸びるアラミド繊維が接合部付近の巻取固定装置で巻き取ることで接合できるものである。塑性域以降は巻取装置が緩むことで、全体破壊を防ぐことも考慮している。Bは鉛直荷重のみを主に支持することに機能を絞ることで、現地作業の省力化やロボット等での施工を念頭に置いたものである。CおよびDはレゴブロックのようなジョイントを多く設ける構造である。引張荷重への抵抗は少ないと思われるが、積み上げるだけで施工が可能である。いずれのアイデアも、一部の機能を犠牲にしながらも、一部の機能に特化した接合構造であるが、使用箇所や使用用途を考慮することで適用可能かと考える。

(3) まとめ

プレキャスト化には課題が多いのが実情であるが、そのメリットとして定性的なものも多いので、定量化する



写真-1 鳥居全景



写真-2 回廊部 東柱



写真-3 親柱補修状況

などの方向性も大切かと思われる。その際、期待する効果からプレキャスト構造を選定するという思考も重要だと考えられる。また、接合構造についても、機能や性能を限定したり、限定された性能でも適用可能なプロジェクトで適用するといった考え方もあるかと思われる。今後、ブラッシュアップし、実用的な接合構造を検討していきたい。

4. 厳島神社見学

PCa化検討にあたり、建造物の弱部を予め想定しておき、①損傷の状況に合わせて適宜取り換える、②取り換えやすい構造(ヒューズ部材化)も着目する事項の1つである。今回、大鳥居修理工事の状況を厳島神社のご厚意により、見学させて戴く機会を得たので今回、報告させて戴く。

写真-1に改修状況外観を示す。写真-2に回廊部の東柱の改修状況を示す。回廊部の東柱は材料劣化(虫害・腐食)が激しいため、基本的に傷んだ部分を撤去し、新材を入れ替える構造となっている。写真-3に鳥居親柱の補修状況を示す。親柱も無垢材ではなく、傷んだ箇所を撤去し、別の材料で補修する構造を採用していることが確認された。今回の見学で得られた知見を本小委員会での研究に活かしていきたいと考えている。

本報は研究1年目の成果について報告した。引き続き、業界の垣根を超え、委員が一丸となって研究を継続することで、明るい建設業界の構築に少しでも寄与できるよう邁進していく所存である。

参考文献

- 1) 中嶋道雄: 建設プロセスにおけるBIM/CIMデータ活用展望と課題, 年次学術講演会, 2022.
- 2) 井口重信: バックキャスト的思考によるプレキャスト部材の接合構造に関する検討, 年次学術講演会, 2022.

(2022.8.09 受付)

論文名：

建設プロセスにおける BIM/CIM データ活用展望と課題

ジャーナル名：

令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会

発表年：2022

建設プロセスにおける BIM/CIM データ活用展望と課題

○パシフィックコンサルタンツ(株) 正会員 中嶋 道雄 中日本高速道路(株) 正会員 石田 篤徳
(株)安藤・間 正会員 石濱 裕幸 日本工営(株) 古川 裕也
(株)パスコ 正会員 矢尾板 啓 東日本旅客鉄道 正会員 高見澤 拓哉
パシフィックコンサルタンツ(株) 正会員 渡邊 武志

1. 目的

BIM/CIM は、各建設プロセス（調査・計画，設計，施工，維持管理）での情報を 3 次元モデルに付加し、その情報を活用する事を目的として運用されている。しかし、後プロセスでの情報活用の高度化に向けて、どのような情報を 3 次元モデルに付加すれば良いかについての議論はあまりされていない。

土木学会の「三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会」では、各建設プロセスに係る委員（発注者，調査者，設計者，施工者，維持管理者）約 35 名によって、上記の課題に対して討議を行っている。今回、各建設プロセスでの討議が 2022/1 に完了したため、本報で討議内容・結果について報告する。

2. 維持管理での BIM/CIM の実施事項及び課題

維持管理の場合は、鉄道会社や高規格道路会社での維持管理事例を紹介し、討議を行った。鉄道会社や高規格道路会社は、その施設によって営業を行っていることもあり、非常に細かな維持管理を行っている状況である。また各社独自の維持管理データベースを作成し、その中ですでに情報の付加とそれによる補修計画や補修によってアップデートされた情報を管理している状況である。このように道路や鉄道などはすでに予防保全型の高度管理を行っており、公共施設である河川や港湾構造物は主に事後保全型の管理を行っている。また、例えば道路や線路などの構造物であれば管理は拠点からの距離で管理しており、その事業主体によって管理単位が違う等、現状管理しているデータ構造を変化させる必要がある。

このように構造等の差や、民間や公共の事業主体別で維持管理情報の情報量や項目を考慮する必要がある。

3. 施工時での BIM/CIM の実施事項及び課題

施工状態での BIM/CIM の活用については、建設会社はその事例を紹介し討議を行った。施工段階での BIM/CIM の利用は、3D モデルで可視化する事により工事内容の周知や説明などに利用している例が多かった。以下にトンネルでの利用例を示す。

2 点目は 3D データを利用した ICT 施工に活用を行っている。これは自動化施工の一環であり、設計データの BIM/CIM データを目標としてその形状になるように施工機械を自動的に作動させる施工方法である。

3 点目はドローン等で点群を取得し、現地の再現や施工結果の検証などに利用している。これらのデータの活用及び情報の付加を考慮すると、今後は施工成果となる出来形を自動的に BIM/CIM モデルに付与し、維持管理での活用を行う事が考えられる。

4. 設計時での BIM/CIM の実施事項及び課題

設計段階での活用は、複雑な鉄筋の取り合いや干渉等の確認や改善に利用している。また点群や既存 3D

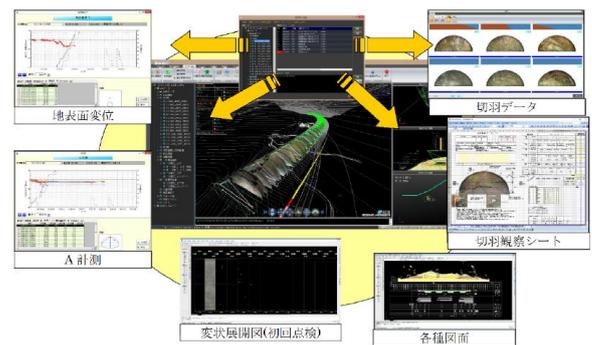


図-1 施工段階でのトンネルでの BIM/CIM データ利用例

モデルから複雑な形状での建築限界等の確認に利用している点がかがえた。そのほかには数量の自動算出や設計時での施工検討に利用している。以下にこれらの事例を示す。

設計時には正確な現地形状を受け取ることで、建築限界や既存施設との取合いが判断できるため、これらのデータを受け取り、設計結果を施工側に送り出す事が重要な点であると考えられる。ただし、設計時には3Dモデル作成が多いが、流通のための規格が定まっていない状況からソフトウェアの充実度が不足しているといった課題がある。また、本来必要なプロダクトモデル（3次元データに鉄筋や鋼管杭と言った分類が定まったモデル）の規格が定まっていない事や作成可能なソフトが不足していることが課題である。

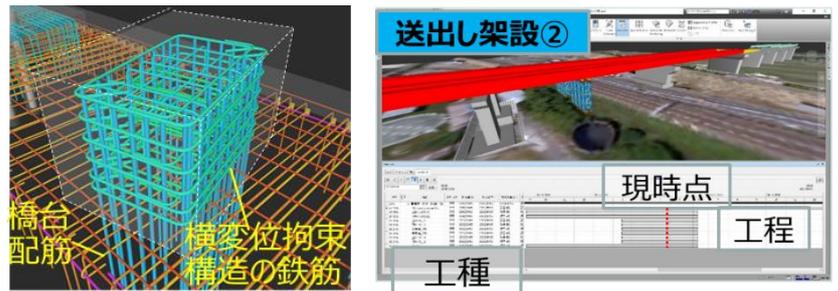


図-2 設計時での活用例

調査段階は、BIM/CIMの起点であり、調査時に取得されたデータが設計や施工段階で有効に活用されることが期待されている。測量においては、ドローン測量や地上レーザスキャナの普及により3次元データを取得するケースが多くなっているが、航空レーザ等の3次元データは広範囲でありデータ容量も大きくなっている。このようなデータの取り扱いについて、測量会社ではGIS（地理情報システム）をベースとした3次元に対応したソフトにて対応するが、設計以降で活用されるCADソフトでは読込むことが困難なケースもあり、設計以降のフェーズでの3次元測量データ活用の障壁になっていると考えられる。

5. 調査時でのBIM/CIMの実施事項及び課題

調査段階は、BIM/CIMの起点であり、調査時に取得されたデータが設計や施工段階で有効に活用されることが期待されている。測量においては、ドローン測量や地上レーザスキャナの普及により3次元データを取得するケースが多くなっているが、航空レーザ等の3次元データは広範囲でありデータ容量も大きくなっている。このようなデータの取り扱いについて、測量会社ではGIS（地理情報システム）をベースとした3次元に対応したソフトにて対応するが、設計以降で活用されるCADソフトでは読込むことが困難なケースもあり、設計以降のフェーズでの3次元測量データ活用の障壁になっていると考えられる。

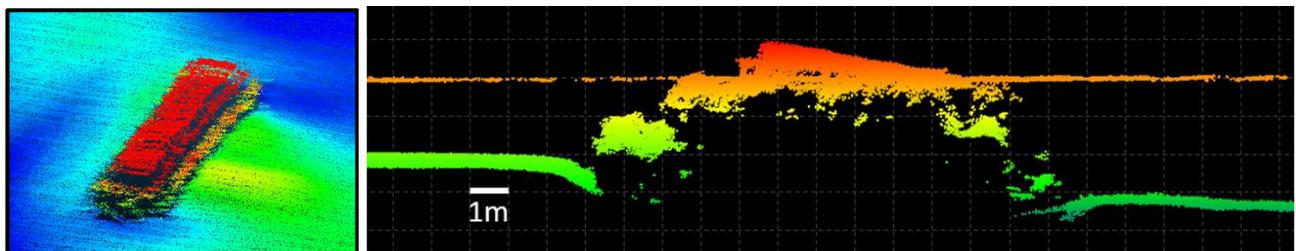


図-3 離岸堤の3次元測量データ例（左：鳥瞰、右：断面）

6. まとめ

調査、設計、施工、維持管理での各建設プロセスでの、事例や課題を紹介してきた。調査で発生した大量のデータはその後のプロセスでの活用に必要不可欠であるため、データ流通の観点から標準的なプラットフォームが必要であると考えられる。また設計段階では作成のためのデータ形式規格の設定や対応ソフトが必要である。施工段階では建設プロセスでの生産性の向上から、自動化施工を支える建設機械や資材の移動を入・出力できるBIM/CIM規格が必要であり、またGPS等で得られた施工データは自動的にデータに取り込める仕組みが必要である。維持管理プロセスでは、構造形式や事業主体によってこれらのデータを変換し、それぞれに応じた維持管理活用が可能なプラットフォームが必要と考えられる。

なお本論文は、土木学会の「三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会」によって研究されたものである。ご協力くださった方々に感謝申し上げます。

参考文献

- ・土木BIM/CIMデータ利用方向性に関する検討 中嶋ら 第46回 土木情報学シンポジウム2021
- ・建設会社でのBIM/CIM利用方向性に関する検討 中嶋ら 土木学会論文集B3（海洋開発）Vol. 77, No. 2, 2021

論文名：

バックキャスト的思考によるプレキャスト 部材 の 接合構造
に関する検討

ジャーナル名：

令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会

発表年：2022

バックキャスト的思考によるプレキャスト部材の接合構造に関する検討

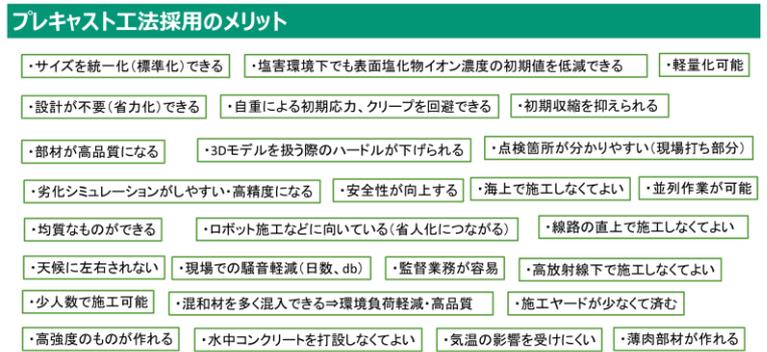
東日本旅客鉄道(株) 正会員 ○井口 重信 パシフィックコンサルタンツ(株) 正会員 中嶋 道雄
 (株)安藤・間 正会員 石濱 裕幸 大成建設(株) 正会員 石井 喬之
 清水建設(株) 正会員 柳川 正和 パシフィックコンサルタンツ(株) 正会員 渡邊 武志

1. はじめに

建設業における生産性向上の施策の一つとして、プレキャスト化促進に向けて各所で様々な検討が進められている。しかし、課題は多く一朝一夕に進んでいないのが現状だと思われる。土木情報学委員会の「三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会」では、レゴブロックのように各ピースをロボットが積んでいくことで構造物を構築できないか、というような将来のあるべき姿からバックキャスト的な思考で、プレキャスト化促進のための検討を行ったので以下に、その概要を示す。

2. プレキャスト化のメリット

まず初めに、プレキャスト化促進のための起動力となるプレキャスト化によるメリットについて、ブレインストーミング手法で列挙した(図-1)。プレキャスト化により、海上や線路直上、高放射線下などの厳しい環境下での作業を極力減らすことができることや、並列作業が可能、少人数でも施工可能といったコストや工期に直結しそうな効果も挙げられたが、品質のばらつき軽減、品質自体の向上、軽量化・高強度化がしやすい、といった現場打設のときよりも高品質・高度化する内容のほか、安全性の向上、点検箇所が分かりやすくなるといった定性的な効果も多く挙げられた。これら定性的な効果は、コスト換算することで現場打設よりもメリットを挙げられる可能性を秘めていると思われる。また、どのような効果を得たいのかを先に考えてから、それに適したプレキャスト工法を選定するということが重要だと思われる。



⇒ コスト換算すれば、現場打設よりもメリットが出るか？

図-1 プレキャスト工法採用のメリット

3. プレキャスト化促進の主要課題(接合構造)解決に向けた検討

3.1 コンクリート部材を対象にした場合の接合方法

プレキャスト化を促進する上で大きな課題となるのが、接合構造である。接合部は、一体でコンクリート打設した構造物と比べて弱点となりやすいだけでなく、必要な性能を確保するためにコストが増大する要因ともなる。また、接合精度を高く求められるほど、現地での施工精度も高く求められ、結果としてコスト増となることから、現状用いられている接合構造の例を挙げ、それらを現地で求められる施工精度から分類を試みた(図-2)。鋼製せん断キー、シールドトンネルの継手などは、高い精度で製作され、現地での接合管理も厳格なものとなるが、完成後には一体で施工したものと同等の性能を期待で

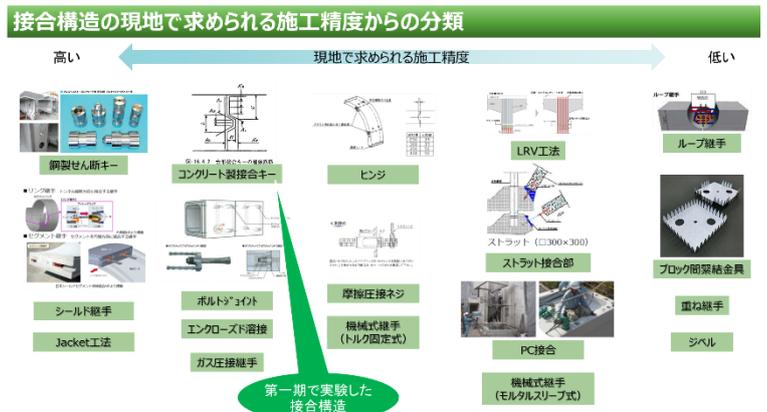


図-2 現地で求められる施工精度からの接合構造の分類

完成後には一体で施工したものと同等の性能を期待で

キーワード：プレキャスト、接合部、生産性向上

連絡先：〒141-0031 東京都品川区五反田 3-5-8JR 目黒 MARC ビル E-mail : s-iguchi@jreast.co.jp

きる。一方で、床版の接合などによく用いられるループ継手や、鉄筋の重ね継手などによる接合は、耐荷力を発揮する作用の方向や種類が限定されるといった条件はあるが、現地での接合が容易であり低コストで接合が可能である。第一期での小委員会ではコンクリート製接合キーを対象に縮小模型による载荷試験を実施したが、第二期となる今期は、プレキャスト化が進まない要因の一つである価格が安く、汎用性が高い構造を目指し、従来よりも材料は増やさず、現場作業も極力増えない構造の検討を行うこととした。

3. 2 他構造（木構造）の接合構造の例

コンクリート構造に限らず発想の転換をはかるため、他構造（木構造）の接合構造について調査を行った。木質継手構造は、日本古来の宮大工などで用いられている部材接合方法で、多種多様な継手が存在する。基本的には引張に弱く、最後に楔や栓を打ち込んで効果を出す継手も多数存在する。コンクリートのプレキャスト製品で言うモルタル充填に近いイメージである。また、継手によって使用する部位が異なり、伝達する断面力などが異なる。柱の接合構造には、腐食時に部分的に入れ替える際に用いる「金輪継」といった継手構造もあり、用途や使用部位・作用断面力に合わせて選定されている（図-3）。この点は、コンクリート製のプレキャスト構造を検討する際にも、多いに参考になる知見かと考える。

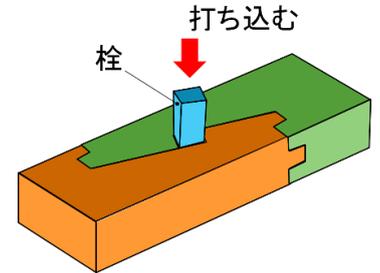


図-3 木質継手の例
（金輪継）

3. 3 新しい接合構造のアイデア

前述のような検討を踏まえ、既存概念にとられない新しい接合構造のアイデアを出し合った。図-4 にその一例を示す。A は人の関節を模した継手で、RC 部材から伸びるアラミド繊維が接合部付近の巻取固定装置で巻き取ることで接合できるものである。塑性域以降は巻取装置が緩むことで、全体破壊を防ぐことも考慮している。B は鉛直荷重のみを主に支持することに機能を絞ることで、現地作業の省力化やロボット等での施工を念頭に置いたものである。C および D はレゴブロックのようなジョイントを多く設ける構造である。引張荷重への抵抗は少ないと思われるが、積み上げるだけで施工が可能である。いずれのアイデアも、一部の機能を犠牲にしながらも、一部の機能に特化した接合構造であるが、使用箇所や使用用途を考慮することで適用可能かと考える。

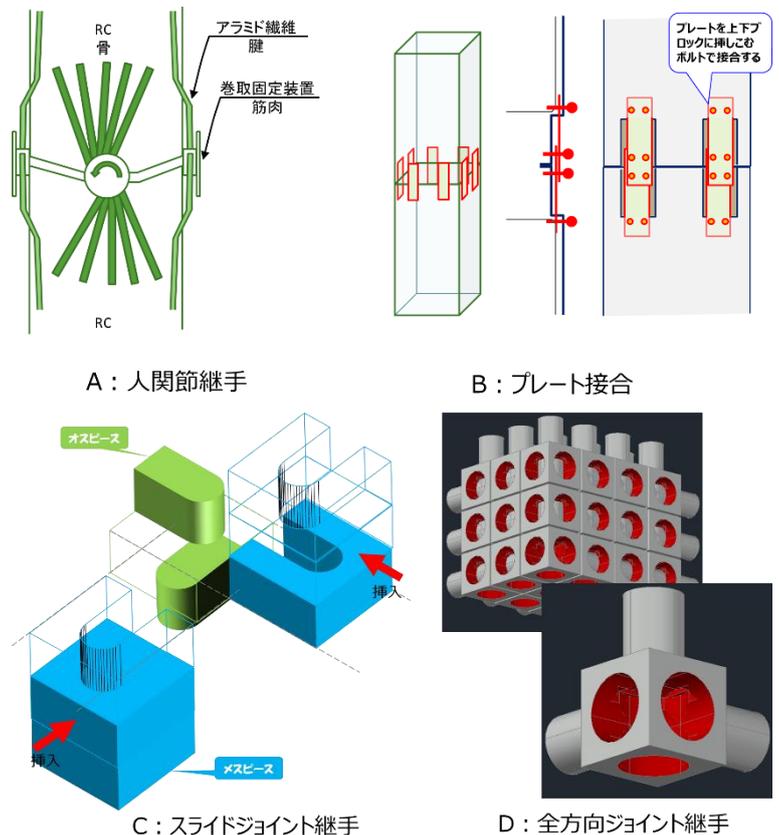


図-4 新しい接合構造のアイデア

4. おわりに

プレキャスト化には課題が多いのが実情であるが、そのメリットとして定性的なものも多いので、定量化するなどの方向性も大切かと思われる。その際、期待する効果からプレキャスト構造を選定するという思考も重要だと考えられる。また、接合構造についても、機能や性能を限定したり、限定された性能でも適用可能なプロジェクトで適用するといった考え方もあるかと思われる。今後、ブラッシュアップし、実用的な接合構造を検討していきたい。

参考文献

- ・中嶋ら：取替可能なプレキャスト部材の特性について（実験結果），土木学会年次学術講演概要集，2021
- ・井口ら：取替可能なプレキャスト部材の特性について（FEM解析），土木学会年次学術講演概要集，2021

論文名：

三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会報告

ジャーナル名：

土木情報学シンポジウム講演集

発表年：2023

三次元モデルを活用した建設生産性向上 研究小委員会報告

中嶋 道雄¹・井口 重信²・渡邊 武志³・柳川 正和⁴

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町三丁目 22 番地)

E-mail: michio.nakajima@tk.pacific.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事部 (〒101-0051 東京都渋谷区代々木二丁目 2 番 2 号)

E-mail: s-iguchi@jreast.co.jp

³正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町三丁目 22 番地)

E-mail: E-mail: takeshi.watanabe@os.pacific.co.jp

⁴清水建設株式会社 土木技術本部 イノベーション推進部 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16-1)

E-mail: m-yanagawa@shimiz.co.jp

本報は土木情報学委員会「三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会」での活動内容（期間 R3.7~R5.7）について報告するものである。本小委員会は発注者、受注者（設計・施工）、メーカー、ソフト会社のメンバーで構成されている。本小委員は、2つのワーキンググループで構成され、WG1は、BIM/CIMを活用する事により調査、計画、設計、施工、維持管理全般の全体最適化を目指して討議を行っている。WG2は同じ規格のプレキャスト部材を大量に普及させることにより、設計や施工、維持管理における生産性向上を目指して討議を行っている。ここではこの2つのWG活動で得られた建設生産性向上に関する知見を紹介する。

Key Words: BIM/CIM, 建設アライアンス, フロントローディング, 生産性向上, PC a ブロック

1. WG1:全体最適化の活動報告

(1) はじめに

BIM/CIMは、調査、計画、設計、施工、維持管理での各建設フェーズで発生した情報を3Dモデルに付加し、情報活用する事を目的としている。WG1では、R3.7からR4.7までにすべてのプロセスでの課題を討議し、R4.7からR5.7までは維持管理プロセスでのBIM/CIMデータ活用について討議を行っており、その結果を報告する。

(2) 調査、設計、施工時での実態と課題

a) 調査時でのBIM/CIMの実施事項及び課題

調査段階は、BIM/CIMの起点であり、調査時に取得されたデータが設計や施工段階で有効に活用されることが期待されている。測量においては、ドローン測量や地上レーザスキャナの普及により3次元データを取得するケースが多くなっているが、航空レーザ等の3次元データは広範囲でありデータ容量も大きくなっている。このようなデータの取り扱いについて、測量会社ではGIS（地理情報システム）をベースとした3次元に対応したソフト

にて対応するが、設計以降で活用されるCADソフトでは読み込むことが困難なケースもあり、設計以降のフェーズでの3次元測量データ活用の障壁になっていると考えられる。

b) 設計時でのBIM/CIMの実施事項及び課題

設計段階での活用は、複雑な鉄筋の取り合いや干渉等の確認や改善に利用している。また点群や既存3Dモデルから複雑な形状での建築限界等の確認に利用している点がかがえた。そのほかには数量の自動算出や設計時での施工検討に利用している。設計時には正確な現地形状を受け取ることで、建築限界や既存施設との取合いが判断できるため、これらを考慮した設計結果を施工側に送り出す事が重要な点である。ただし、流通のための規格が定まっていない事や、ソフトウェアの充実度が不足しているといった課題がある。

c) 施工時でのBIM/CIMの実施事項及び課題

施工状態でのBIM/CIMの活用については、建設会社はその事例を紹介し討議を行った。施工段階でのBIM/CIMの利用は、3Dモデルで可視化する事により工事内容の

周知や説明などに利用している例が多かった。またこれ以外には、3D データを利用した ICT 施工に活用を行っている。これは自動化施工の一環であり、設計データの BIM/CIM データを目標としてその形状になるように施工機械を自動的に作動させる施工方法である。3 点目はドローン等で点群を取得し、現地状況再現や施工結果の検証などに利用している。これらのデータの活用及び情報の付加を考慮すると、今後は施工成果となる出来形を自動的に BIM/CIM モデルに付与し、維持管理での活用を行う事が考えられる。

(3) 維持管理での実態

a) 維持管理フェーズ内のプロセス

施工フェーズから続く、維持管理フェーズは図-1 のようなプロセスに分類され、維持管理計画に定められた期間ごとに点検・評価を繰り返す。その中で、補修や補強が必要と判断すると設計、施工を行い、維持管理計画を見直す事を行っている。この流れは、建設全体の流れと同様であるが、その違いは点検・評価プロセスがある事である。ここでは点検・評価に注目して検討を行った。

b) 点検・評価方法と目的

国や地方自治体等、鉄道・道路・製鉄等の民間での維持管理事例を調査した。国と民間どちらも、基本的には国等が発行する維持管理要領やマニュアルなどを基に点検・評価が行われている。ただし、民間に関しては利用実態や特殊性に応じた独自維持管理要領などを定める例がある。点検は、変状の発生や進行を効率のかつ早期に発見する事で構造物の性能が、低下する可能性や進行を早期に発見することを目的として実施している。

c) 点検方法の多様化とデータ量

民間での点検手法については、国の設定手法に比べ、目的に応じた多彩な方法を採用している例が多かった。以下の図-2 に、高速道路会社での点検手法についての例を示す。斜張橋の斜材の維持管理ロボットや赤外線によるひび割れの発見、ドローンによって取得した画像によるひび割れの自動認識など、それぞれの構造物部材に応じた点検手法を開発している。これらの手法は点検時の安全性向上や自動化によるコスト削減、詳細な劣化進行の把握などを目的としている。また、国でも ICT 施工やレーザースキャナ(TLS,MMS 等)による測量マニュアル案、出来形管理基準案が策定されるなど、新しい測量・点検

手法を導入している。レーザースキャナによる点群計測などに代表されるように、このような計測方法が発達すると、従来のスケールでの寸法計測等と比べ、飛躍的にデータ量が増加する。

d) 点検方法の多様化とデータ量

点検結果管理は従来、紙媒体にて行って来たが、近年では上述したような大量のデータを BIM/CIM データの属性として付加し、一元管理が行えるようになってきている。以下の図-3 に国での維持管理プラットフォームの例を示す。このような大量のデータは、このようなプラットフォームでの活用に移行しつつある。プラットフォーム上では点群同士で比較した地形変化や補修個所の図面参照等が可能となり、維持管理に活用されている。プラットフォームでは管理基準以上の地形変化の場合に色分けする事で、全体を俯瞰的に見た際に維持管理上課題がある個所が発見しやすく、その箇所の以前やそれ以前の地形変化や設計図面、補修図面などが即座に確認できる事で、緊急時の対応も行きやすい。

(4) 課題と今後の方向性

現状では新たな計測機器や方法が開発され、それを活用する基盤としてのプラットフォームが開発されつつある。このような状況下で、紙などの旧来方式で維持管理されている施設を、どの様にスムーズにプラットフォームへ移行できるかが課題と考えられる。また紙設計図しかない既存構造物の BIM/CIM モデル作成や、点群と旧来の計測機器の違いで発生する管理単位や評価補法をどのように共存するか等の課題がある。また、管理者が異なる場合は、BIM/CIM モデルの作成方法や点検・評価結果の付加方法の差などが社会全体での生産性を低下させることが懸念される。そのため共通のルール作成が必要

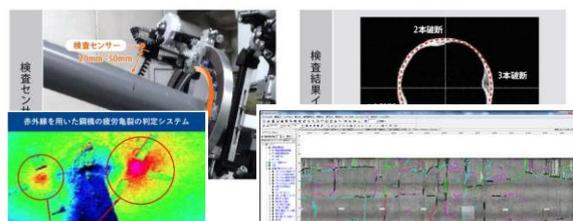


図-2 民間での点検手法の多様化の例

出展：中日本ハイウェイエンジニアリング東京 HP <https://www.nexco-hstjtech284/>より

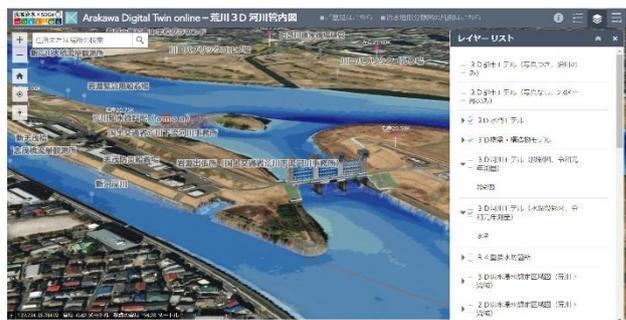


図-3 河川(国)での維持管理プラットフォーム例

出展荒川河川事務所 HP より <https://aragmapsarcgis.com/apps/webappviewer/3d/index.html?d=ad07cc86dc4d09c547216ca0fa23a>

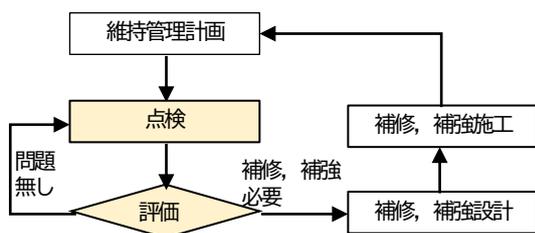


図-1 維持管理内のプロセス

であると考えられる。ただし、各構造物の特性や利用性を考慮した上で最低限の共通項を抽出し、ルールを作成する必要がある。

2. WG2:プレキャスト (PCa) 化 WGの活動報告

(1) はじめに

建設業における生産性向上の施策の一つとして、プレキャスト化促進に向けて各所で様々な検討が進められている。しかし、課題は多く一朝一夕に進んでいないのが現状だと思われる。本WGでは、レゴブロックのように各ピースをロボットが積んでいくことで構造物を構築できないか、というような将来のあるべき姿からバックキャスト的な思考で、プレキャスト化促進のための検討を行ってきている。

(2) PCa化のメリット

プレキャスト化促進のための起動力となるプレキャスト化によるメリットについて、ブレインストーミング手法で列挙した(図-4)。コストや工期に直結しそうな効果も挙げられたが、現場打設のときよりも高品質・高度化する内容のほか、安全性の向上、点検箇所が分かりやすくなるといった定性的な効果も多く挙げられた。これら定性的な効果は、コスト換算することで現場打設よりもメリットを挙げられる可能性を秘めていることが浮き彫りとなった。

(3) PCa化促進のための課題検討

PCa化を促進する上で大きな課題となるのが、接合構造である。接合部は、一体でコンクリート打設した構造物と比べて弱点となりやすいだけでなく、必要な性能を確保するためにコストが増大する要因ともなる。また、接合精度を高く求められるほど、現地での施工精度も高く求められ、結果としてコスト増となることから、現状用いられている接合構造の例を挙げ、それらを現地で求められる施工精度から分類を試みた(図-5)。第一期ではコンクリート製接合キーを対象に縮小模型による荷重試験を実施したが、第二期でとなる今期は、プレキャ

スト化が進まない要因の一つである価格が安く、汎用性が高い構造を目指し、機能や性能は限定しつつも、従来よりも材料は増やさず、現場作業も極力増えない構造の検討を行うこととした。

(4) 新しい接合構造のアイデア

以上のような検討を踏まえ、既存概念にとらわれない新しい接合構造のアイデアを出し合った。図-6にその一例を示す。いずれのアイデアも、一部の機能を犠牲にしながらも、一部の機能に特化した接合構造であるが、使用箇所や使用用途を考慮することで適用可能と考える。

(5) レゴブロックを用いた荷重実験

本WGの活動イメージで掲げているプラスチック製ブロックである「レゴブロック」を用いた荷重実験によるアプローチも実施した。荷重スパンと断面の形状を同一にするという条件のもと、ブロックの積み方だけを変えた場合にとどの程度耐荷性能が向上するのかを実験と解析の両面から検証した。図-7に試験体の一例を、図-8にその荷重中と崩壊時の状況を示す。ほぼ同じブロックを用いても最大荷重や崩壊するラインが異なる結果となった。全7ケースの荷重変位関係(図-9)から見ても、

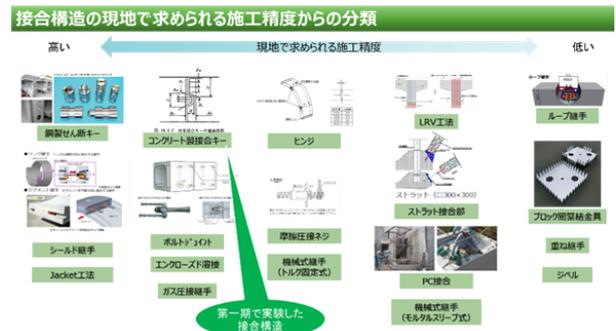


図-5 施工精度からの接合構造の分類

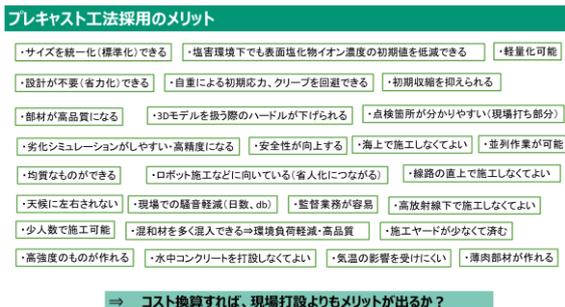
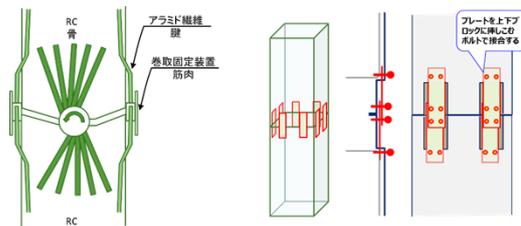


図-4 PCa化のメリット

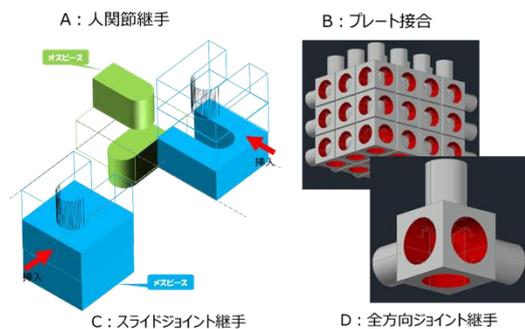


図-6 新しい接合構造のアイデア

ブロックの積み方だけで、大きく耐荷性能を変えた構造が作れることが分かった。

各ピース間のブロックの押し込みや引抜き、せん断試験などの要素試験結果を、接続部のバネ要素の材料定数等に用いた FEM 解析による再現も行った。図-10 に解析結果の一例を示す。最大荷重は最大荷重時変位ともに試験結果とほぼ同じ結果となったが、case7 については、崩壊ラインが試験結果と異なる結果となった。詳細な崩壊ラインの分析を行ったところ、解析上では複数の接合部で同時並行で崩壊が進んでおり、その傾向は実験結果の崩壊時の状況からも確認ができ、解析により精度良く崩壊過程が追えていることが分かった (図-11)。

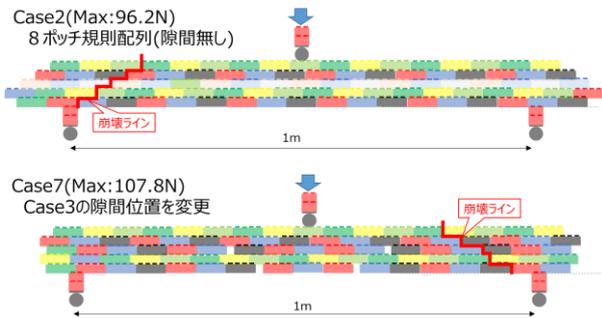


図-7 ブロックの積み方

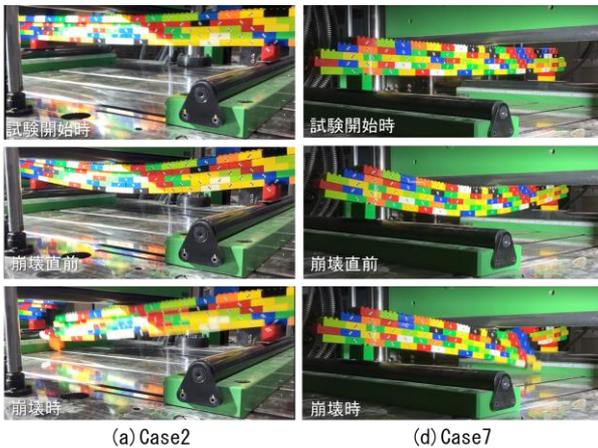


図-8 荷重中および崩壊時の状況

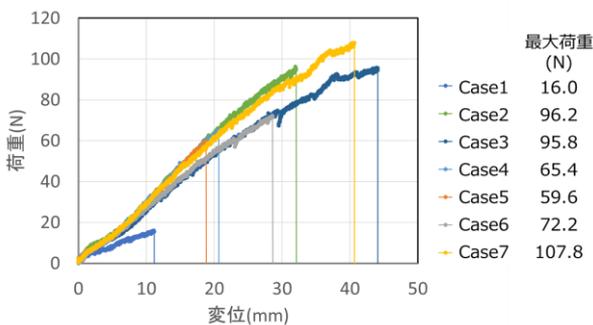


図-9 荷重-変位関係

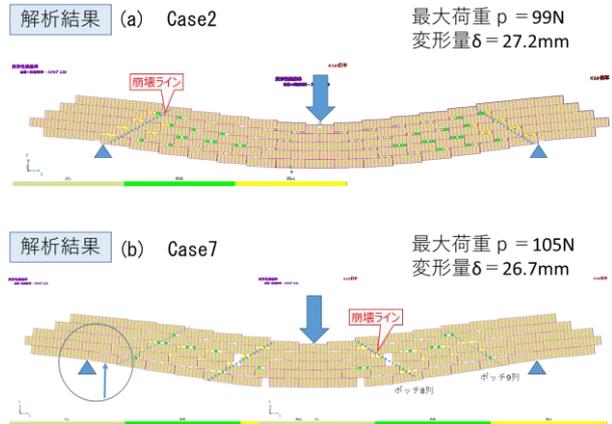


図-10 FEM 解析結果

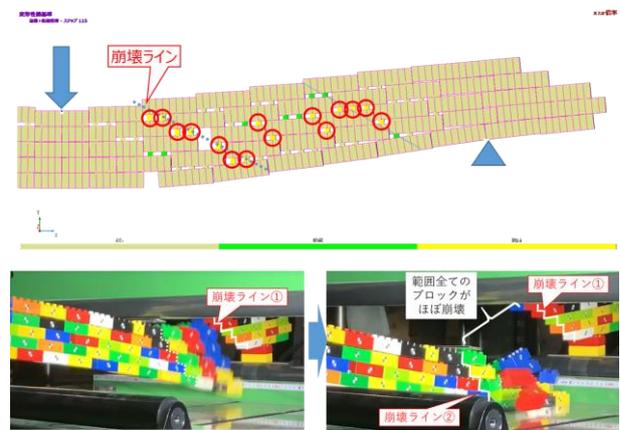


図-11 崩壊ラインの詳細 (Case7)

今後は、本検討結果を活用し、実物を想定したモデルでの検討を実施予定である。

REFERENCES

- 1) 中嶋道雄ら：取り替え可能なプレキャスト部材の考案,令和 2 年木学会年次学術講演会,2020
- 2) 井口信ら：取替可能なプレキャスト部材の特性について (FEM 解析), 木学会年次学術講演会 2021
- 3) 中嶋道雄ら：建設プロセスにおける BIM/CIM データ活用展望と課題, 木学会年次学術講演会 2022
- 4) 井口重信ら：バックキャスト思考によるプレキャスト部材の接合構造に関する検討, 土木学会年次学術講演会, 2022

(Received August 28, 2023)
(Accepted September 1, 2023)

論文名：

維持管理における BIM/CIM データ活用について

Current Status, Issues and Solutions of BIM/CIM Data

Utilization in Maintenance of Civil Engineering Structures

ジャーナル名：

令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会

発表年：2023

[共通セッション] データ連携とプロセス改革

データ連携とプロセス改革（その1）

2023年9月14日(木) 13:30 ~ 14:50 CS-11 (広島工業大 五日市キャンパス三宅の森Nexus21 803/広島大 東広島キャンパス工学部講義棟 B115)

[CS17-05] 維持管理における BIM/CIM データ活用について Current Status, Issues and Solutions of BIM/CIM Data Utilization in Maintenance of Civil Engineering Structures

*中嶋 道雄¹、柳川 正和²、宮澤 啓之³、矢尾板 啓⁴、石田 篤徳⁵、徳永 高志⁶、渡邊 武志¹、井口 重信⁷ (1. パシフィックコンサルタンツ株式会社、2. 清水建設株式会社、3. 中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京株式会社、4. 株式会社パスコ、5. 中日本高速道路株式会社、6. 株式会社フジタ、7. 東日本旅客鉄道株式会社)

*Michio NAKAJIMA¹, Masakazu YANAGAWA², Hiroyuki MIYAZAWA³, Akira YAOITA⁴, Atsunori ISHIDA⁵, Takashi TOKUNAGA⁶, Takeshi WATANABE¹, Shigenobu IGUCHI⁷ (1. Pacific Consultants Co.,Ltd., 2. SHIMIZU CORPORATION, 3. Central Nippon Highway Engineering Tokyo Co. Ltd., 4. PASCO CORPORATION, 5. Central Nippon Expressway Company Limited, 6. Fujita Corporation, 7. East Japan Railway Company)

キーワード：BIM/CIM、生産性向上、データ活用、DX

BIM/CIM, Productivity improvement, Data utilization, DX

BIM/CIMは、調査から維持管理で発生した情報を3Dモデルに付加し活用することを目的としている。ここでは維持管理での情報活用の現状と課題、および課題解決策を検討した。近年の維持管理での点検事例では、点検に伴う自動化やレーザースキャナなどを使用した高度計測を実施している。そのため大量のデータを取り扱うためにプラットフォームが普及しつつある。維持管理の利便性の向上や社会全体での生産性向上のため、BIM/CIMモデル作成ルールや、最低限で共通の属性付与ルールの作成が必要である。

The purpose of BIM/CIM is to add and utilize information generated from surveys and maintenance to 3D models. In this paper, we examined the current status and problems of information utilization in maintenance and management, and the solutions to the problems. In the recent maintenance and management inspection cases, automation and altitude measurement using laser scanners are being carried out. Therefore, platforms are becoming popular to handle large amounts of data. In order to improve the convenience of maintenance and improve the productivity of society as a whole, it is necessary to create BIM/CIM model creation rules and at least common attribute assignment rules.

維持管理における BIM/CIM データ活用について

○パシフィックコンサルタンツ(株) 正会員 中嶋 道雄

中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京(株) 宮澤 啓之

中日本高速道路(株) 正会員 石田 篤徳

東日本旅客鉄道(株) 正会員 井口重信

清水建設(株) 正会員 柳川 正和

(株)パスコ 正会員 矢尾板 啓

(株)フジタ 正会員 徳永 高志

パシフィックコンサルタンツ(株) 正会員 渡邊 武志

1. 目的

BIM/CIM は、調査・計画、設計、施工、維持管理での各建設フェーズで発生した情報を 3 次元モデルに付加し、その情報を活用する事を目的として 2018 年頃から運用されている。設計や施工プロセスでの活用は活発に議論されているが、維持管理段階での活用についてはあまり議論されていないのが現状である。そこで土木情報学委員会の「三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会」では、維持管理プロセスでの BIM/CIM データ活用方法について討議を行っており、その結果を報告する。

2. 維持管理での実態

2.1 維持管理フェーズ内のプロセス

施工フェーズから続く、維持管理フェーズは図-1 のようなプロセスに分類される。このフェーズは、維持管理計画に基づき定められた期間ごとに点検・評価を繰り返す。その中で、補修や補強が必要と判断すると設計、施工を行い、維持管理計画を見直す事を行っている。この流れは、建設全体の流れと同様であるが、その違いは点検・評価プロセスがある事である。ここでは点検・評価に注目して検討を行った。

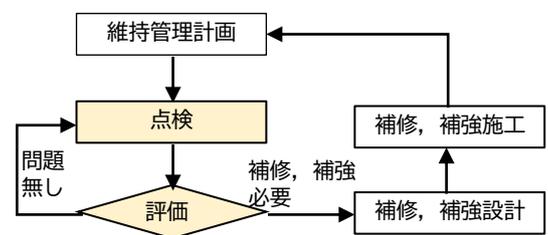


図-1 維持管理内のプロセス

2.2 点検・評価方法と目的

国や地方自治体等、鉄道・道路・製鉄等の民間での維持管理事例を調査した。国と民間どちらも、基本的には以下の図-2 に示すような国が発行する維持管理要領やマニュアルなどを基に点検・評価が行われている。ただし、民間に関しては利用実態や施設などの特殊性に応じた独自の維持管理要領などを定める例があるが、流れは同様である。点検は、変状の発生や進行を効率的かつ早期に発見する事で構造物の性能が、低下する可能性や進行を早期に発見することを目的として実施している。

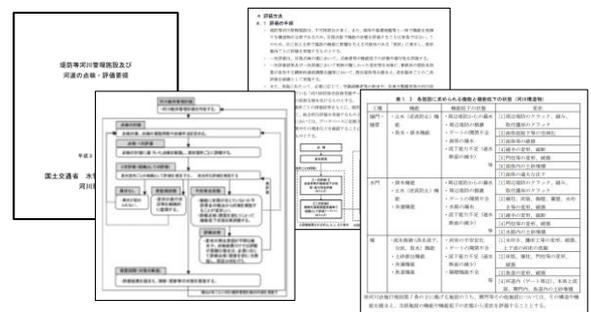


図-2 国が発行する維持管理の実施要領の例

出展：堤防等河川管理施設及び稼働の点検・評価要領 国土交通省 水管理国土保全局 河川環境課 平成 31 年 4 月

2.3 点検方法の多様化とデータ量

民間での点検手法については、国に定められている手法に比べ、目的に応じた多彩な方法を採用している例が多かった。以下に、高速道路会社での点検手法について例を示す。斜張橋の斜材の維持管理ロボットや赤外線によるひび割れの発見、ドローンによって取得した画像に

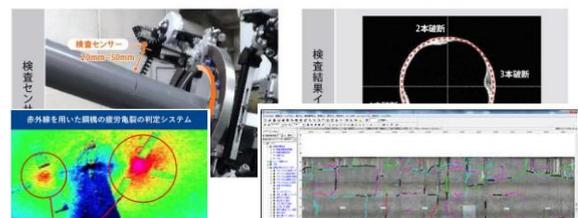


図-3 民間での点検手法の多様化の例

出展：中日本ハイウェイエンジニアリング東京 HP<https://www.c-nexco-het.jp/tech/284/>より

よるひび割れの自動認識など、それぞれの構造物部材に応じた点検手法を開発している。これらの手法は点検時の安全性向上や自動化によるコスト削減、詳細な劣化進行の把握などを目的としている。また、国でも ICT 施工やレーザースキャナ(TLS,MMS 等)による測量マニュアル案, 出来形管理基準案が策定されるなど、新しい測量・点検手法を導入している。レーザースキャナによる点群計測などに代表されるように、このような計測方法が発達すると、従来のスケールでの寸法計測等と比べ、飛躍的にデータ量が増加する。

2.4 点検方法の多様化とデータ量

点検結果の管理は従来、紙媒体にて行って来たが、近年では上述したような大量のデータを BIM/CIM データの属性として付加し、一元管理が行えるようになってきている。以下の図-4 に国での維持管理プラットフォームの例を示す。このような大量のデータは、紙の状態で活用出来ない事から、このようなプラットフォームでの活用に移行しつつある。プラットフォーム上では点群同士で比較した地形変化や補修個所の図面参照等が可能となり、維持管理に活用されている。プラットフォームでは管理基準以上の地形変化の場合に色分けする事で、全体を俯瞰的に見た際に維持管理上課題がある個所が発見しやすく、その箇所の前やそれ以前の地形変化や設計図面、補修図面などが即座に確認できる事で、緊急時の対応も行いやすい。



図-4 河川(国)での維持管理プラットフォーム例
出展:荒川河川事務所 HP より
<https://arage.maps.arcgis.com/apps/webappviewer3d/index.html?id=aad07ecc86dc4a09a547216eca0fa23a>

3. 課題と今後の方向性

現状では新たな計測機器や方法が開発され、それを活用する基盤としてのプラットフォームが開発されつつある。そのような状況下で、現状稼働しており紙などの旧来方式で維持管理されている施設を、どの様にスムーズにプラットフォームへ移行できるかが課題と考えられる。その中には大量にある完成済み構造物の BIM/CIM モデルをどのように構築するか、紙と BIM/CIM で管理単位が違う大量の点検・評価結果をどのように付与するかなどが課題となる。

また、国や民間等の管理者が異なる場合、BIM/CIM モデルの作成方法や点検・評価結果の付加方法が違うケースがあり、維持管理の共通化や将来性、コスト低減などが阻害され、社会全体での生産性を低下させることが懸念される。そのため、共通のルール作成が必要であると考えられる。ただし、各構造物の特性や利用性を考慮した上で最低限の共通項を抽出し、ルールを作成する必要がある。また、各自このルールを拡張して独自に利用しやすいルールとすることも重要である。

4. まとめ

維持管理での点検事例や課題を紹介してきた。点検で発生した大量のデータはその後のプロセスでの活用に必要不可欠であるため、データ活用の観点からプラットフォームが活用されつつある状態であり、今後発達するものと考えられる。また、共通利用が可能となるような最低限の BIM/CIM モデル作成のルールと維持管理データ付加方法のルールが必要であると考えられる。

なお本論文は、土木学会の「三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会」によって研究されたものである。ご協力くださった方々に感謝申し上げます。

参考文献

- ・ BIM/CIM での設計から施工への情報伝達時の課題と解決策の方向性 中嶋ら 土木情報学シンポジウム 2022
- ・ 建設プロセスにおける BIM/CIM データ活用展望と課題討 中嶋ら 土木学会年次講演会, 2022

論文名：

プラスチック製ブロックを用いたプレキャスト構造の検討
(その1)

Examination of the pre-cast structure with the plastic
blocks(1)

ジャーナル名：

令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会

発表年：2023

第VI部門

建設マネジメント (4)

2023年9月14日(木) 14:40 ~ 16:00 VI-7 (広島工業大 五日市キャンパス三宅の森Nexus21 509)

[VI-622] プラスチック製ブロックを用いたプレキャスト構造の検討 (その1)

Examination of the pre-cast structure with the plastic blocks(1)

*井口 重信¹、坂田 英輝²、石田 将貴¹、石田 篤徳³、中嶋 道雄⁴、渡邊 武志⁴ (1. 東日本旅客鉄道株式会社、2. 株式会社シュテルケ、3. 中日本高速道路株式会社、4. パシフィックコンサルタンツ株式会社)

*Shigenobu Iguchi¹, Sakata Eiki², Ishida Masaki¹, Ishida Atsunori³, Nakajima Michio⁴, Watanabae Takeshi⁴
(1. East Japan Railway Company, 2. Starke, 3. Central Nippon Expressway Company, 4. Pacific Consultants CO., LTD.)

キーワード：プレキャスト、接合方法、室内載荷実験

Pre-cast, Joint method, Loading test

土木情報学委員会 三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会では、プレキャスト化促進のための課題抽出および提言を目的に活動を行っている。その活動の一つとして、レゴブロックのように簡易に組立可能なブロック状の部材を組み合わせたプレキャスト構造の適用を検討している。本稿では、その一環として、レゴブロックを用いて単純梁を作成し、ブロックの積み方などにより耐荷力、耐荷機構に与える違いについて実験的に検討を行った。その結果、ブロックの積み方の差異による梁全体の剛性および最大荷重などを変えることができ、合理的なブロックの積み方の検討が簡便に行えることが分かった。

プラスチック製ブロックを用いたプレキャスト構造の検討（その1）

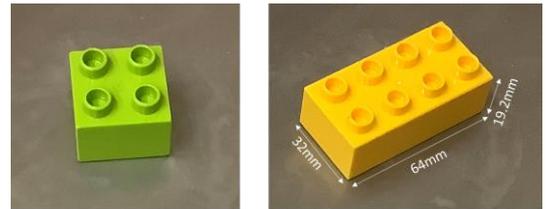
東日本旅客鉄道(株) 正会員 ○井口 重信 (株)シュテルケ 正会員 坂田 英輝
 東日本旅客鉄道(株) 正会員 石田 将貴 中日本高速道路(株) 正会員 石田 篤徳
 パシフィックコンサルタンツ(株) 正会員 中嶋 道雄 パシフィックコンサルタンツ(株) 正会員 渡邊 武志

1. はじめに

土木情報学委員会 三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会では、プレキャスト化促進のための課題抽出および提言を目的に活動を行っている。その活動の一つとして、レゴブロックのように簡易に組立可能なブロック状の部材を組み合わせたプレキャスト構造の適用を検討している。本稿では、その一環として、レゴブロックを用いて単純梁を作成し、ブロックの積み方などにより耐荷力、耐荷機構に与える違いについて実験的に検討を行ったので、以下で概説する。

2. 载荷試験概要

载荷試験に用いたレゴブロックは、レゴ社が提供する「duplo」というレゴ社製品の中でも大きいサイズのブロックで（図-1）、接続する円形のスタッド（以下、ポッチ）が4個、8個、16個の直方体のブロックである。このブロックを表-1に示す条件で組み合わせ、ブロックの積み方のみを変更させることで最大荷重をどれだけ向上させることが可能か、図-2に示す7ケースの積み方で試みた。なお、図-2には後述する崩壊時のブロック同士の接合が離れた箇所も合わせて示す。



(a) 4ポッチ

(b) 8ポッチ

図-1 使用したレゴブロック「duplo」

表-1 ブロック積みの条件

| | |
|---|---------------------------------|
| 1 | 支点間距離は1m、载荷点は上部中央 |
| 2 | 4ポッチ、8ポッチのブロックを基本使用（16ポッチは一部のみ） |
| 3 | 断面形状は図-2に示す5段分のT字形状 |
| 4 | ポッチの向きは鉛直上向きに配置 |

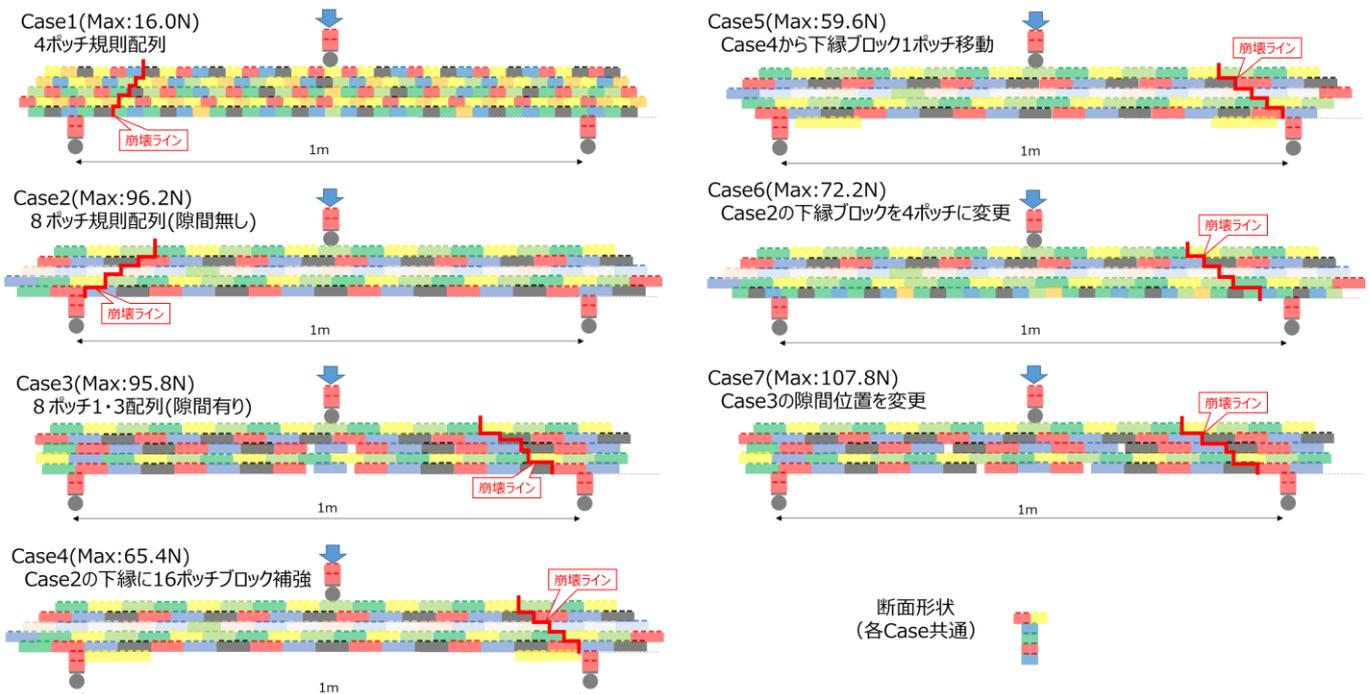


図-2 ブロックの積み方

キーワード プレキャスト, 接合方法, 室内载荷実験

連絡先 〒141-0031 東京都品川区五反田 3-5-8JR 目黒 MARC ビル 4F E-mail : s-iguchi@jreast.co.jp

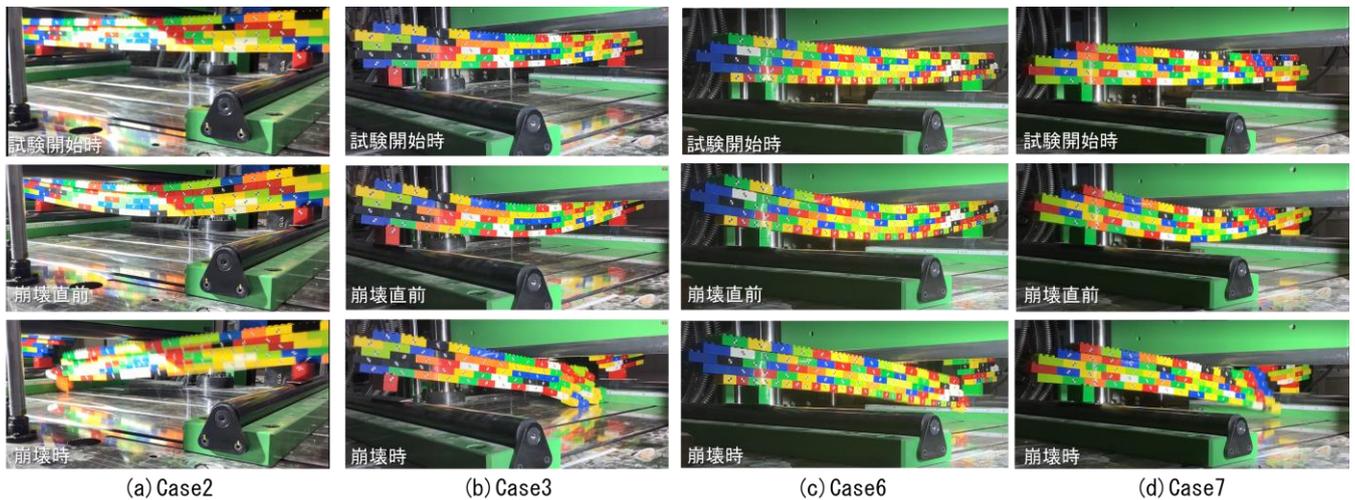


図-3 荷重中および崩壊時の状況

3. 荷重中および崩壊時の状況

図-2 に各 Case の崩壊ラインを、図-3 に荷重中および崩壊時の状況の一例を示す。いずれの Case でも試験終了後のブロックの損傷などはなく、支点付近から荷重点に向かうせん断方向にブロックのかみ合わせがはずれることで崩壊に至った。崩壊ラインは、支点から荷重点に向かうせん断方向に生じるが、想定される崩壊ラインに支障するブロックなどがある場合には、その隣りから崩壊が生じた。Case3～7 の 8 ポッチを基本にした試験体については、荷重の増大とともに、崩壊ラインとなる付近の、二段目と三段目、三段目と四段目の水平方向のブロック間の隙間が上下に目開きする状況もみられた。

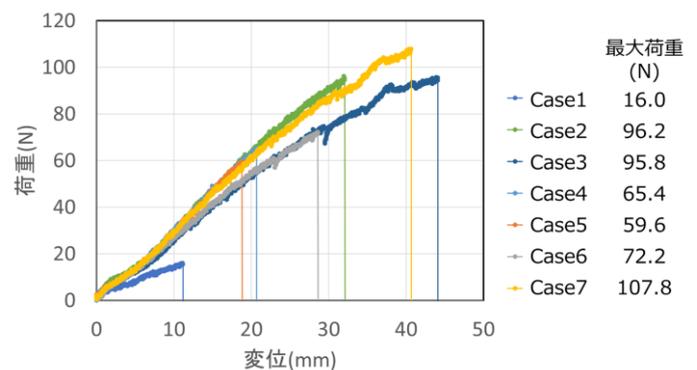


図-4 荷重－中央変位関係と最大荷重

4. 荷重－変位関係

図-4 に荷重－中央変位の関係と最大荷重値を示す。4 ポッチのブロックのみの Case1 よりも 8 ポッチのブロックを主に使った Case2～7 のほうが最大荷重も剛性も大きかった。8 ポッチを主に使った Case2～7 の中では、隙間なく積んだ Case2、4、5 が同程度、次いで 3 等分点付近に隙間を設けた Case7、最下段を全て 4 ポッチのブロックにした Case6 と隙間を中央付近に集中させた Case3 が同程度で小さい剛性となった。

5. 考察

Case2、4、5 は 16 ポッチの補強ブロックの有無およびその位置のみの違いである。崩壊ラインの生じた位置は左右の違いはあるが同じ位置で生じているが、最大荷重が大きく異なった。これは引張の生じる下縁側に 16 ポッチのブロックで補強することにより補強付近の剛性を高めるとともに、崩壊ラインのみに目開きを集中させることになったため、最大荷重が低下したものと思われる。Case4 と Case5 の差異は、16 ポッチのブロックが支点部への支障の有無によると想定される。Case3 と 7 では、スパン中央付近に隙間を集中させたことで Case3 のほうが剛性が小さくなり、崩壊ラインでの目開き量が開きやすかったことが、最大荷重が小さくなった原因と考えられる。

6. おわりに

今回実施したレゴブロックによる梁載荷試験により、ブロックの積み方の差異による、梁全体の剛性および最大荷重などを変化させることが可能であり、より合理的なブロックの積み方の検討が簡便にかつ速やかに行えることが分かった。

論文名：

プラスチック製ブロックを用いたプレキャスト構造の検討
(その2)

Examination of the pre-cast structure with the plastic
blocks (2)

ジャーナル名：

令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会

発表年：2023

第VI部門

建設マネジメント (4)

2023年9月14日(木) 14:40 ~ 16:00 VI-7 (広島工業大 五日市キャンパス三宅の森Nexus21 509)

[VI-623] プラスチック製ブロックを用いたプレキャスト構造の検討 (その2)

Examination of the pre-cast structure with the plastic blocks

*坂田 英輝¹、井口 重信²、金井 眞¹、石田 将貴²、中嶋 道雄³、渡邊 武志³ (1. 株式会社シュテルケ、2. 東日本旅客鉄道株式会社、3. パシフィックコンサルタンツ株式会社)

*Eiki Sakata¹, Shigenobu Iguchi², Makoto Kanai¹, Masaki Ishida², Michio Nakajima³, Takeshi Watanabe³ (1. Starke, 2. East Japan Railway Company, 3. Pacific Consultants Co., LTD.)

キーワード：プレキャスト、接合方法、室内載荷実験、FEM解析

Pre-cast, Joint method, Loading test, FEM analysis

土木情報学委員会 三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会では、プレキャスト化促進のための課題抽出および提言を目的に活動を行っている。その活動の一つとして、レゴブロックのように簡易に組立可能なブロック状の部材を組み合わせたプレキャスト構造の適用を検討している。本稿では、その一環として、レゴブロックを用いて単純梁を作成し、ブロックの積み方などにより耐荷力、耐荷機構に与える違いについて行った実験の解析的検討を行った。その結果、実験結果を良く再現できるとともに、崩壊直前・直後のブロック間の接合状況を精度高く推定することができた。

プラスチック製ブロックを用いたプレキャスト構造の検討（その2）

(株)シュテルケ 正会員 ○坂田 英輝 東日本旅客鉄道(株) 正会員 井口 重信
 (株)シュテルケ 正会員 金井 眞 東日本旅客鉄道(株) 正会員 石田 将貴
 パシフィックコンサルタンツ(株) 正会員 中嶋 道雄 パシフィックコンサルタンツ(株) 正会員 渡邊 武志

1. はじめに

土木情報学委員会 三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会では、プレキャスト化促進のための課題抽出および提言を目的に活動を行っている。その活動の一つとして、レゴブロックのように簡単に組立可能なブロック状の部材を組み合わせたプレキャスト構造の適用を検討している。本稿では、その一環として、レゴブロックを用いて単純梁を作成し、ブロックの積み方などにより耐荷力、耐荷機構に与える違いについて行った実験の解析的検討の内容について述べる。なお、本検討では、レゴブロックを用いたプレキャスト構造の検討（その1）における、Case2 および Case7 を対象に実施した。

2. 要素試験

解析に先立ちレゴブロックの圧縮、引張、およびせん断の要素試験を実施した（図-1）。圧縮試験については下側ブロックに上側ブロックを押し込む際の、引張試験については、下側ブロックから上側ブロックを引き抜く際の、せん断試験については3つのブロックのうち中央のブロックをせん断方向に押し抜く際の荷重と変位の関係から、傾きを算出した。複数試験体に対し複数回実施し、それらの平均値を用いて、解析モデルに用いるバネ定数として設定した。

3. モデル化

ブロックは1メッシュ 8 プリミティブの板要素とした。板厚をレゴブロック側面の板厚の1.24mmの2倍の2.48mmとし（最上段はその2倍）、材料特性はほぼ剛体と仮定した。ブロック同士の間には0.2mmの隙間を設定し、鉛直方向（引張・圧縮）、水平方向（せん断）に、要素試験から得られたバネ定数を持つバイリニア型の非線形バネ要素を設けた（図-2）。ブロックの隅角部にはブロック同士が接触した際に圧縮力のみを伝達させるGAP要素を設置した（図-3）。支点部の境界条件はピン支持とし、荷重は実測したブロック自重を載荷後、中央に荷重増分で載荷させた。

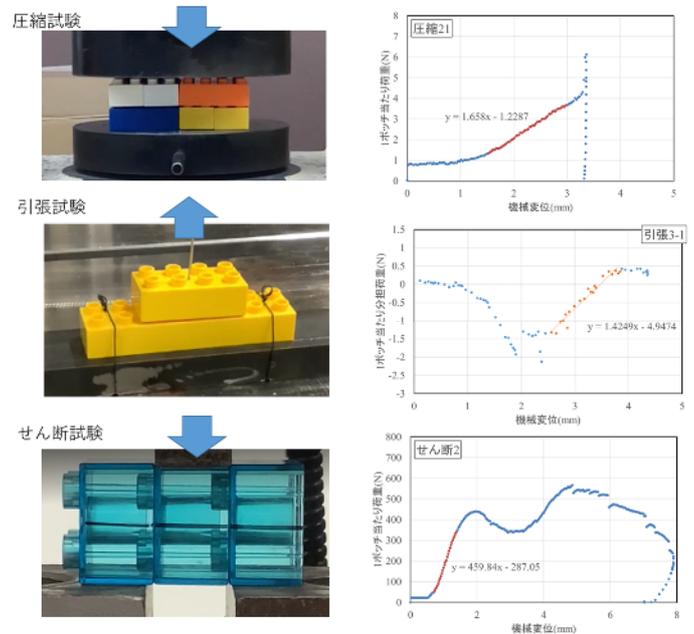


図-1 要素試験状況と荷重－変位関係の例

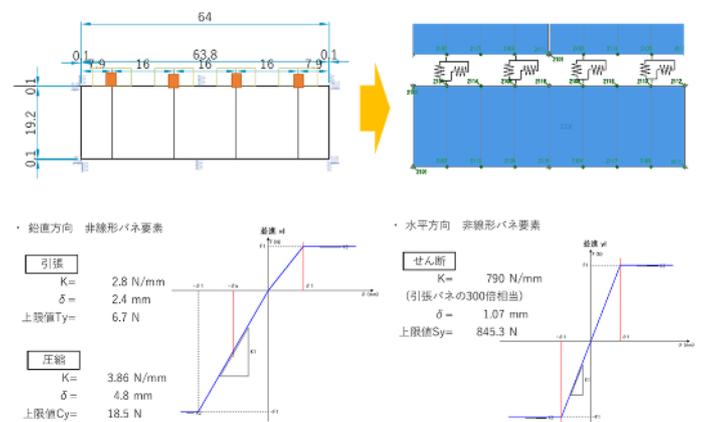


図-2 モデル化の概要

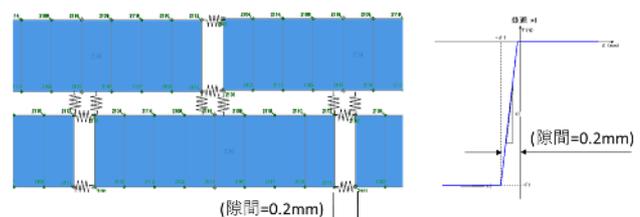


図-3 GAP要素

キーワード プレキャスト, 接合方法, 室内載荷実験, FEM 解析

連絡先 〒120-0036 東京都足立区千住仲町2番3号ハマノ第1ビル6階 E-mail: e-sakata@starke.co.jp

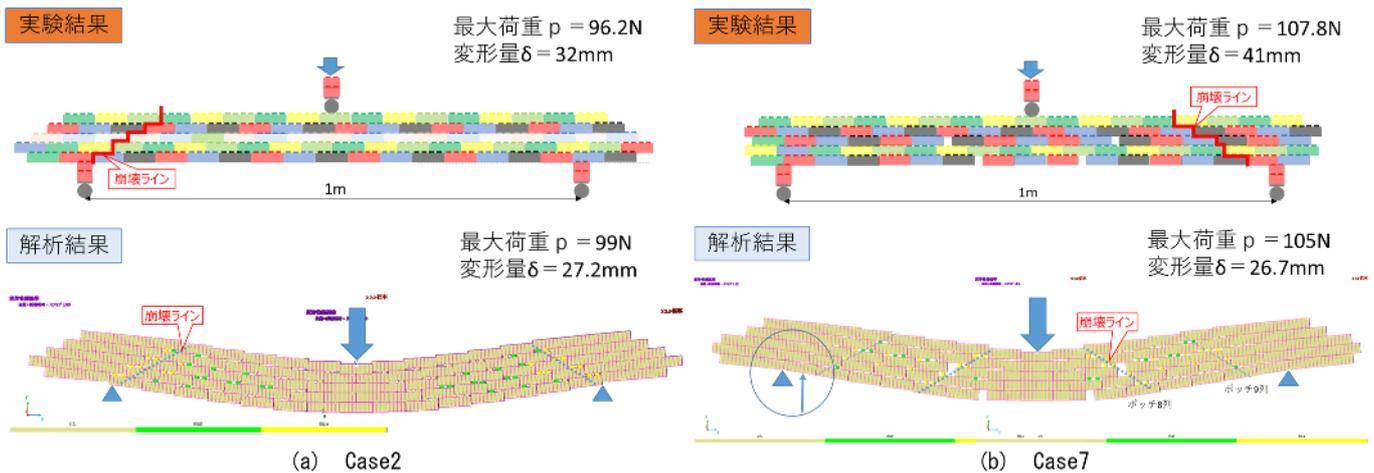


図-4 実験結果と解析結果の比較

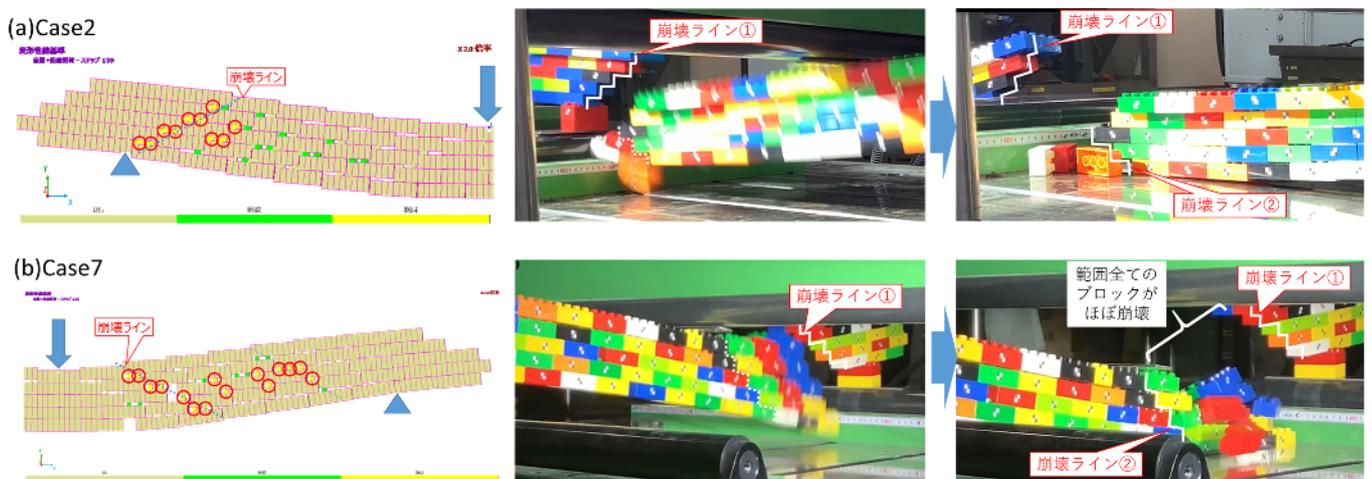


図-5 崩壊直後の状況（再検証）

4. 解析結果と実験結果の比較

図-4 に最大荷重時の変形形状と崩壊ライン、最大変位等を示す。実験結果の黄緑色のバネ要素はバネ要素が降伏を、黄色のバネ要素はバネ要素が負担できる荷重の限界に達したことを示す。Case2 では最大荷重と最大荷重時変位とともに、崩壊ラインも実験結果と整合する結果となった。黄色のバネに隣接するブロックでも黄緑色のバネ要素が見られ、実験中に見られた2段目と3段目、3段目と4段目の境の目開きの状況も再現が出来ていた。Case7 では最大荷重と最大荷重時変位は実験結果とよく整合する結果となったが、崩壊ラインについては実験結果と異なった。解析結果では、実験結果の崩壊ラインより3ブロック内側のブロックに隙間を設けた位置が崩壊ラインとなった。

5. 崩壊直後の状況の差異検証

図-5 に崩壊中のコマ送り動画の一部を示す。Case2 では主たる崩壊ラインは①であったが、下縁より3段目から下側にも続くラインにもブロックが離れたラインは続いており、解析結果においてバネ要素が黄色となった一致とほぼ整合する。Case7 についても崩壊ラインは最終的な崩壊ライン①よりも3ブロック内側までの位置にも存在しており（崩壊ライン②）、崩壊ライン①と②の間の3列分のブロックについては、ほぼすべてのブロックが隣接するブロックと離散しており、崩壊寸前であったことが確認できた。この結果は解析結果とほぼ一致しており、解析結果の精度が高いことを裏付けていた。

6. おわりに

レゴブロックの梁載荷試験を二次元 FEM 解析により再現解析を行った結果、実験結果を良く再現できるとともに、崩壊直前・直後のブロック間の接合状況を精度高く推定することができた。

論文名：

BIM/CIM データで自動建設機械を運用する際の課題と解決策

ジャーナル名：

土木情報学シンポジウム講演集

発表年：2024

BIM/CIM データで自動建設機械を運用する際の課題と解決策

中嶋 道雄¹・井口 重信²・柳川 正和³・石濱 裕幸⁴・石田 篤徳⁵

¹正会員 若築建設株式会社 (〒153-0064 東京都目黒区下目黒 2-23-18)
E-mail: michio.nakajima@wakaciku.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 東日本旅客鉄道株式会社 (〒101-0051 東京都品川区西五反田 3 丁目-85)
E-mail: s-iguchi@jreast.co.jp

³清水建設株式会社 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16-1)
E-mail: m-yanagawa@shimiz.co.jp

⁴株式会社安藤・間 (〒105-7360 東京都港区東新橋 1-9-1)
E-mail: ishihama.hiroyuki@ad-hzm.co.jp

⁵中日本高速道路株式会社 (〒460-0003 名古屋市中区錦 2 丁目 18-19)
E-mail: a.ishida.ab@c-nexco.co.jp

BIM/CIM は、調査・計画、設計、施工、維持管理での各建設フェーズで発生した情報を 3次元モデルに付加し、その情報を活用する事を目的としている。一方今後の少子高齢化による建設就業人口減少によって、建設生産性向上が現在の急務の課題である。建設生産性向上に直結する解決方法が建設の自動化であると考えられる。本論では、BIM/CIM データで自動建設機械を運用する際の課題を現状の開発や活用事例の中から整理し、今後の自動建設を予測した上での解決策を考察した。

Key Words: BIM/CIM, 建設自動化, 自動建設機械, 生産性向上,

1. 目的

BIM/CIM は、調査・計画、設計、施工、維持管理での各建設フェーズで発生した情報を 3次元モデルに付加し、その情報を活用する事を目的としている。一方今後の少子高齢化による建設就業人口減少によって、建設生産性向上が現在の急務の課題である。建設生産性向上に直結する解決方法が建設の自動化であると考えられる。本論では、BIM/CIM データで自動建設機械を運用する際の課題を現状の開発や活用事例の中から整理し、今後の自動建設を予測した上での解決策を考察した。

2. 現状での BIM/CIM と自動建設の活用状況

(1) BIM/CIM

BIM (Building Information Modeling) の始まりは、1970 年代にカーネギーメロン大学のチャックイーストマン教授が、ソリッドモデリングと建物オブジェクトに情報を

持たせた概念と言われている。建築設計では、意匠設計後に構造設計を行う設計手法を用いていた。ただし、意匠、構造等はそれぞれが他を同時に干渉・影響するため、同時に他の状況を確認しながら検討を進めて行く手法が効率的と考えた概念である。その後 1980 年代には GraphiSoft 社の ArchiCAD や Charles River Software 社 (現 Autodesk 社) の Revit 等の BIM ソフトが誕生し、BIM の概念を具現化するソフトウェアが誕生する。これらはパラメトリックオブジェクトを使用し、意匠、構造等の他に構造・日照計算等を相互に確認、検討しながら設計可能なソフトウェアである。2000 年台に入るとハードウェア環境等の発達と共に BIM ソフト利用と機能が増加して行き、建築では、設計合理化手段として BIM の活用が充実してきている。

土木分野では、2012年に国土交通省が CIM (Construction Information Modeling) を提唱し、建築 BIM を土木の世界にも広げようとした。工事において CIM が適用されるようになると Modeling ⇄ 設計概念から Management の意味合いを持つようになった。また、この CIM の名称は日本

のみで使用されてきたため、国際性及び建築統合のため、2018年には BIM/CIM と改称された。2023年には全ての国土交通省発注工事は BIM/CIM 適用となっている。

(2) 現状での活用状況

建設現場では、3D-LIDAR 等で現地地形や障害物をデータ化し、設計データと組み合わせて建設施工シミュレーションが実施されている²⁾。以下の図-1 に活用事例を示す。これにより旧来の施工計画書をベースとして各作業の施工可否を判断していたものが、現地状況や施工進捗を正確に反映した施工検討へと変化している。また BIM/CIM データを元に、目標とする座標への杭打ちなど ICT 建設機械との連携例も見られる。

3. 現状での BIM/CIM と自動建設の活用状況

(1) 自動施工機械の現状と自動化レベル

現状での建設機械の自動化は、土木分野での ICT バックホー・ブルドーザー等の土工機械が実用化されており、その他に建築などで利用されるパネル設置装置や屋内の資材運搬ロボット等も研開発が進められている。土木での自動建設機械のレベル認識のために、自動化レベル分け案を作成した。表-1 にこの案を示す。現状で実施されている建設機械の自動化レベルは、レベル1のマシンコントロールは実用化されており、レベル2のプログラムで動作する自動建設機械が限定的に現場で利用される状態であると考えられる。そのため、レベル2から3に向かっている途中であると言える。

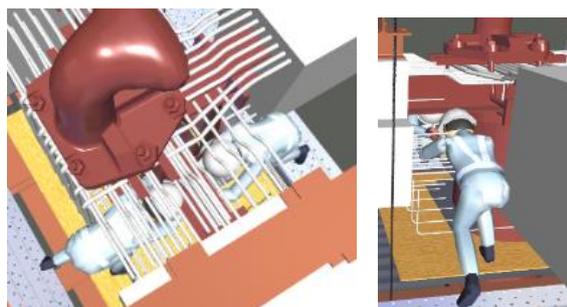


図-1 施工計画での BIM/CIM の活用例³⁾

表-1 建設機械の自動化レベル案

| 段階 | 名称 | 適用 | 運転主体 |
|------|---------|------------------------------------|----------------|
| レベル0 | 自動化なし | 人の運転による機械化施工 マシンガイダンスを含む | 人 |
| レベル1 | 部分動作自動化 | 機械の単独動作の自動化 動作制御などのマシンコントロールを含む | 人(労力低減) |
| レベル2 | 全動作自動化 | 機械の全動作を自動で行う ただし、プログラム通りに作動する | 機械(ただし、管理者が必要) |
| レベル3 | 自立自動運転 | 周囲状況に応じて自律的に運転する | 機械(ただし、管理者が必要) |
| レベル4 | 連携自動運転 | 他の自動運転機械と連携して自立で運転する | 機械(現場内に限る) |
| レベル5 | 完全運転自動化 | 危険回避、機械の搬送、一般道の走行等を含めたすべての動作の自動化 | 機械(全てのフィールド) |

(3) 自動化活用の事例

a) レベル1 (マシンコントロール)

以下の図-2 は、指定した標高以下の掘削が出来ないマシンコントロールを実施した状態である。規制形状は面などの単純な形状以外にも、幾何学的な3次元形状に対応可能である。この機能はバックホーの位置を GNSS 等および各種センサーを組み合わせて、機械位置、回転、方向やバケット刃先を認識し、制御を行っている。ただし操作は人が行っており、過度の操作制限を行うマシンコントロールを行っている。

b) レベル2 (複合動作自動化)

図-3 は、安藤ハザマが開発した自動運転振動ローラである。この振動ローラは、GNSS や方位計等を装備し、位置、方向、操舵角などの自車状態を把握し、自動運転・制御を行っている。また、ステレオカメラにより、設定範囲内の人を検知後運転停止システムも搭載されており、すでに現地での実施工に投入されている状態である。

4. BIM/CIM データの活用での課題と解決策

(1) 活用するデータの種類と注意点

ICT バックホーでは、J-LandXML (LandXML1.2) のデータの内、中心線とその横断面データが設計データとなって動作する。法面の場合、刃先が設計データより上になると設計斜面の裏にバケットが回ってしまうために、50cm ほど斜面を伸ばす事等が必要になる場合がある(現状では対策機器が存在する)。また、高速道路のように本道に側道が交差する場合、本道と側道の中心線が合わないために3次元形状が十分に表現できない部分が発生



図-2 レベル2でのマシンコントロール (ICT バックホー)の実施状況



図-3 レベル4複合自動化施工の実施状況⁴⁾

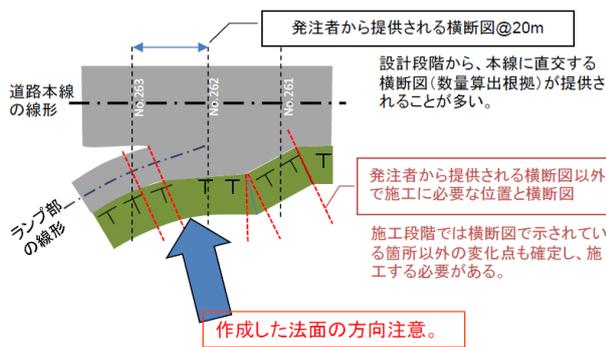


図4 本道中心とランプ中心の差によるデータの注意点(マシンコントロール/マシンガイダンス技術(バックホウ編)の手引書【施工者用】近畿地方整備局)

する課題がある(図4 参照). 天井クレーンの自動運転システム等⁵⁾, 限定された場所で動作する機械の多くが, 独自開発プログラムによって作動するシステムとなっており, J-LandXML 等の共通データを利用しない機械も多く存在する.

(2) 共通の自動化指示データの必要性

自動建設機械は, 普及前の現在では国内に数台しかない機械も多く, 開発会社が独自データ形式で自動化されている場合が多い. 建設機械は元請け会社の下で協業者が保有している場合が多いため, 自動建設機械があっても利用できない可能性が大きい. 今後の普及を考慮するとデータ規格の共通化が必要であると考えられる. 以下の図4にこれらの概念図を示す. ただし, 開発者の有利性が無ければ開発費をかけ自動建設機械の開発が促されないと考えられる. 自動建設機械の利用促進と, 開発者の有利性を同時に満足するためには, 共通規格と独自規格の区分けも重要である. 解決策の例として, 同じ自動化指示データを流しても A 社の自動建設機械は B 社のものより省エネルギーで動く, 安全に作業できる等の領域分けを行う事が考えられる. また自動建設機械の保有会社が集まり, 共同で建設ロボットなどを開発している例(建設 RX コンソーシアム⁶⁾)や, 国立研究開発法人 土木研究所が自律施工技術基盤 OPERA を開発, 提供している.

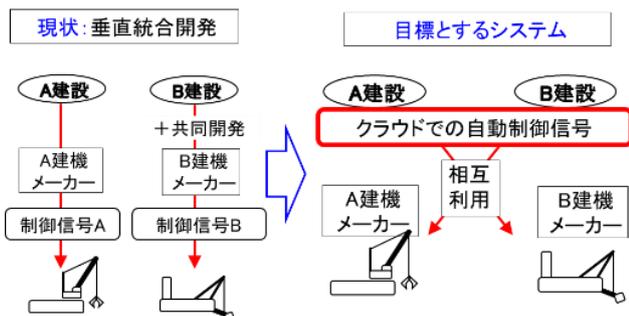


図-5 自動化データの共通化の概念¹⁾

(3) 建設自動化時に必要なデータ

建設自動化に必要なデータは, 各工種や機械によって変化するものと考えられる. ここでは共通的に必要になるデータと, 現在でも普及している ICT バックホウによる土工, 自動クレーンによる重量物の移動について考察した. 以下のデータ例を示す.

a) 自動機械への入力データ

i) 形状などのデータ

1. 地形等のバックグラウンドデータ
地形や電柱, 建物など動かないものと想定して, 機械などが衝突を避けたり, 機械が走行可能と判断したりするためのデータ.
2. 他の作業機械や作業員の配置データ
動きをトレースしながら衝突などを避けるべきデータ.
3. 建設対象物を示す構造物などのデータ
機械によって掘削すべき土工形状や, 吊り上げるべき荷などの目的のデータ. また機械などの走行パスや吊り荷の旋回パスなどを含む.
4. 動かそうとする建設機械のデータ
操作する自動機械のデータ

ii) 時間や関係などのデータ

1. 動作開始のトリガーとなるデータ
開始時間で始めるか, 前工程の作業が終了してから始めるかなどの開始判断に用いるデータ.
2. 終了前に中止する際の条件データ
作業中に他の作業の影響などで中止する場合の条件のデータ.
3. 工程データ
前後関係の工種などの判断のための工程データなど.

b) 自動機械から出力されるデータ

1. 開始時間や終了時間などのデータ
2. 作業の成功・中断のフラグデータ
3. バケットの移動履歴や, クレーンの旋回履歴・荷重履歴などの出来型に利用できるデータ
4. その他他の作業への影響を及ぼす機械位置やバケット位置などのリアルタイムデータ

自動化時に必要なデータは, 共通規格・独自規格範囲の分け方で大きく変わってくると考えるが, 上記の例は現状で建設会社が施工計画を考慮する場合に設定可能と考えられる範囲を考察して示した.

(4) 安全性確保の課題

自動建設機械が建設現場で働くようになると, 人と機械との共存が発生する. 従来の機械は人が作業をする事となっていたため, 人が安全荷を配慮する事を行ってきたが, 自動化によって事故時の責任が自動機械の製作者

か自動作業を指示者が不明確になると言った課題が発生する。この課題に対しては、例えばシールドトンネル現場では、先端のカッター付近はセグメント組立機械が有り、以下の図-6に示すとおり機械作動部分は人が入らない様に明確に区分されている。建設現場も人の立ち入りを制限することは日常行われているため、これに準じて自動機械だけが作業するエリアを作成する事で対処可能と考えられる。

(5) 施工計画の将来像

従来は代表的な工種の代表的な状況を図面に示し、安全性や作業内容を明記すれば良かったが、自動化になるとどの程度スピードでどのように動くかを全ての作業で指示を行う必要性が出てくる。この作業によって現状の施工計画書作成時よりより詳細に作業計画を作成する必要がある。従来は現場が始まってから対処しがちであった、掘削時にバケットを上げると電線に引っかかる事や、クレーンの巡回時に道路標識が障害なる等の細かな障害対応も必要になり、フロントローディングで不具合を対処可能となるため現場は予定通りに進むことが多くなるが、事前の施工検討時間は長くなるものと考えられる。このほかに、事前にスキャンした現場形状が電柱の移設などで現場開始後に変化した際の現場での修正など発生すると考えられる。

これらの自動化の施工計画は、その利便性を考慮すると映画やアニメーション作成と同様の操作となるものと



図-6 自動化時安全確保のイメージ(シールドトンネル現場)

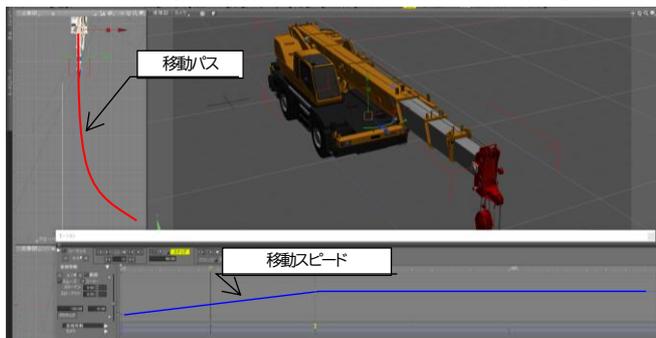


図-7 施工計画の将来像のイメージ

考えられる。以下の図-7アニメーションソフトで建設機器の移動パスやスピードなどを設定している状況を示す。将来的にはこの様な3次元空間内で建設機器の動きをシミュレートし、安全性などを確認する様になるものと考えられる。また、今後自立的に機械が作動になると、周囲の状況認識後に現状と設計の差を認識して工種を自動的に判断し、必要な自動機械を選定し、協調させるAI施工計画プログラムが発達するものと考えられる。

5. 今後の方向性

上記から共通の自動化データ規格作成や、施工計画表現方法を規格化して行くことが重要である。規格化に際しては、関係者や利害関係が多いと考えられたため、国の機関や土木学会などの期間で決定されることが望ましい。今後は、本検討結果を活用し、実物を想定したモデルでの検討を実施予定である。

謝辞：

この論文は、土木学会 土木情報学委員会の三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会にて討議した内容を整理したものである。ご協力いただいた皆様に感謝いたします。

REFERENCES

- 1) 中嶋道雄ら：建設プロセスにおけるBIM/CIMデータ活用展望と課題, 木学会年次学術講演会 2022
- 2) 中嶋ら) 土木BIM/CIMデータ利用方向性に関する検討, 土木情報学論文集, 2019
- 3) 中嶋道雄：港湾工事におけるCIMの活用, 海洋開発論文集, 2020
- 4) 自動運転システムと新しい品質管理手法を組み合わせた施工を実現, 安藤ハザマ HP (<https://www.ad-hzn.co.jp/info/2019/20190424.php>)
- 5) 遠隔操作も可能な「天井クレーンの自動運転システム」を開発, 大林組 HP (https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20221005_2.html)
- 6) 建設RXコンソーシアム HP, <https://rxconso.com.dw365-ssl.jp/>

論文名：

三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会報告

ジャーナル名：

土木情報学シンポジウム講演集

発表年：2024

三次元モデルを活用した建設生産性向上 研究小委員会報告

中嶋 道雄¹・井口 重信²・渡邊 武志³・柳川 正和⁴

¹正会員 若築建設株式会社 (〒153-0064 東京都目黒区下目黒 2-23-18)
E-mail: michio.nakajima@wakachiku.co.jp

²正会員 CalTa 株式会社 (〒108-0074 東京都港区高輪 2-18-10)
E-mail: s-iguchi@caltaco.jp

³正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町三丁目 22 番地)
E-mail: E-mail: takeshi.watanabe@os.pacific.co.jp

⁴正会員 清水建設株式会社 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16-1)
E-mail: m-yanagawa@shimiz.co.jp

本報は土木情報学委員会「三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会」での活動内容（期間 R5.7~R6.7）について報告するものである。本小委員会は発注者、受注者（設計・施工）、メーカー、ソフト会社のメンバーで構成されている。本小委員は、2つのワーキンググループで構成され、WG1は、BIM/CIMを活用する事により調査、計画、設計、施工、維持管理全般の全体最適化を目指して討議を行っている。WG2は同じ規格のプレキャスト部材を大量に普及させることにより、設計や施工、維持管理における生産性向上を目指して討議を行っている。ここではこの2つのWG活動で得られた建設生産性向上に関する知見を紹介する。

Key Words: BIM/CIM, construction alliance, front loading, productivity improvement, precast blocks

1. 小委員会の構成および実施状況

当小委員会は2つのワーキンググループで構成され、WG1は、BIM/CIMを活用する事により調査、計画、設計、施工、維持管理全般の全体最適化を目指して討議を行っており、WG2は同規格のプレキャスト部材を大量に普及させることにより、設計や施工、維持管理における社会全体での生産性向上を目指して討議を行っている。表-2に当小委員会の委員構成を示す。当小委員会はWG1で22名、WG2で16名の合計33名(重複有り)で活動を行っており、オブザーバー13名を加えると46名で活動を行っている。2つのWGは隔月で活動を行っており、WG活動の他には現場見学会や学会での発表も実施している。表-1にWG以外の活動内容を示す。

表 1 WG 以外の活動内容

| 活動内容 | 年月日 | 参加人数 |
|-----------------|------------|------|
| 土木学会年次講演会 研究討論会 | 2023/9/12 | 7名 |
| 同上 論文発表3編 | 2023/9/13 | - |
| 東京外環シールドトンネル見学会 | 2023/11/30 | 13名 |
| 小委員会 | 2023/12/22 | 13名 |

表 2 委員構成一覧表

| 番号 | 職位 | WG | 氏名 | 会社名 |
|----|-------------|----|--------|-------------------|
| 1 | 小委員長(兼WG主査) | 両方 | 中嶋 道雄 | 若築建設(株) |
| 2 | 副小委員長 | 両方 | 渡邊 武志 | パシフィックコンサルタンツ株式会社 |
| 3 | 副小委員長 | 両方 | 柳川 正和 | 清水建設株式会社 |
| 4 | 委員(WG主査) | 2 | 井口 重信 | Calta株式会社 |
| 5 | 委員(幹事) | 1 | 矢尾板 啓 | 株式会社パスコ |
| 6 | 委員 | 1 | 古川 裕也 | 日本工営株式会社 |
| 7 | 委員 | 2 | 大瀧 諭 | 日本工営株式会社 |
| 8 | 委員 | 1 | 井波 文明 | 株式会社長久 |
| 9 | 委員 | 1 | 黒澤 祐哉 | (株)フジタ |
| 10 | 委員 | 両方 | 石濱 裕幸 | 株式会社安藤・間 |
| 11 | 委員 | 2 | 松下 裕昭 | 丸栄コンクリート工業株式会社 |
| 12 | 委員 | 2 | 阪口 裕紀 | 丸栄コンクリート工業株式会社 |
| 13 | 委員 | 2 | 石井 喬之 | 大成建設株式会社 |
| 14 | 委員 | 2 | 高野 和成 | パシフィックコンサルタンツ株式会社 |
| 15 | 委員 | 両方 | 橋本 紗百合 | パシフィックコンサルタンツ株式会社 |
| 16 | 委員 | 2 | 中井 裕司 | 前田工織株式会社 |
| 17 | 委員 | 2 | 大久保 誠 | 前田工織株式会社 |
| 18 | 委員 | 1 | 関 茂和 | 東日本高速道路(株) |
| 19 | 委員 | 1 | 石田 篤徳 | 中日本高速道路株式会社 |
| 20 | 委員 | 2 | 水上 夏子 | ヒロセ補強土株式会社 |
| 21 | 委員 | 1 | 前田 庫利 | 東洋建設株式会社 |
| 22 | 委員 | 1 | 新居 和展 | サイテックジャパン株式会社 |
| 23 | 委員(監査役兼任) | 1 | 辰巳 大介 | 国土技術政策総合研究所 |
| 24 | 委員 | 1 | 長村 徹 | JIPテクノサイエンス株式会社 |
| 25 | 委員 | 1 | 石田 将貴 | JR東日本 |
| 26 | 委員 | 1 | 松本 裕樹 | Calta株式会社 |
| 27 | 委員 | 1 | 岡崎 春介 | (株)竹中土木 |
| 28 | 委員 | 2 | 三吉 憲一 | (株)竹中土木 |
| 29 | 委員 | 1 | 宮内 芳維 | ONESTRUCTURE株式会社 |
| 30 | 委員 | 1 | 阿部 喜生 | 株式会社不動テトラ |
| 31 | 委員 | 2 | 岡 裕二 | (株)キャスト・アール |
| 32 | 委員 | 1 | 澤井 崇 | ジオ・サーチ株式会社 |
| 33 | 委員 | 1 | 池田 仲裕 | 東急建設株式会社 |

2. WG1:全体最適化の活動報告

(1) はじめに

WG1では、令和5年7月から令和6年7月までの間に合計6回のWGを実施した。表3にWG1の実施内容一覧を示す。

表3 WG1の実施内容

| 回数 | 年月日 | 実施概要 | 人数 |
|------|------------|---|-----|
| 第13回 | 2023/8/3 | コマツ IOT センター見学 | 10名 |
| 第14回 | 2023/9/20 | 施工 BIM/CIM の課題 | 16名 |
| 第15回 | 2023/11/30 | シールドトンネルでの自動施工について | 13名 |
| 第16回 | 2024/1/29 | <ul style="list-style-type: none"> J-LandXML での ICT 機器との連携方法と注意点 openBIM ワークフローで実現するデータ連携や DX 基盤のありかた | 23名 |
| 第17回 | 2024/3/15 | <ul style="list-style-type: none"> マシンコントロール・ガイドの現状と将来について 建設ロボット等で BIM/CIM データを活用する際の課題と解決策 | 23名 |
| 第18回 | 2024/5/21 | <ul style="list-style-type: none"> 鉄道工事における DX 推進の取り組み 道路での維持管理と BIM/CIM データ | 13名 |

この期間では主に、設計フェーズから建設フェーズへ渡された BIM/CIM データを、自動建設機械等で活用する際に現状の自動建設機械の開発状況やそこから浮かび上がる課題と解決策について討議を行った。以下にその概要を示す。

(2) 施工での BIM/CIM データの活用

a) 自動化分類

土木自動建設機械の自動化達成認識のために、自動化レベル分け案を作成した。表4に自動化レベル分け案を示す。現状では、レベル1のマシンコントロールは実用化されており、レベル2のプログラムで動作する自動建設機械が限定的に現場で利用される状態であると考えられる。

表4 建設機械の自動化レベル(案)

| 段階 | 名称 | 適用 | 運転主体 |
|------|---------|------------------------------------|----------------|
| レベル0 | 自動化なし | 人の運転による機械化施工 マシンガイドを含む | 人 |
| レベル1 | 部分動作自動化 | 機械の単独動作の自動化 動作制御などのマシンコントロールを含む | 人(労力低減) |
| レベル2 | 全動作自動化 | 機械の全動作を自動で行う ただし、プログラム通りに作動する | 機械(ただし、管理人が必要) |
| レベル3 | 自立自動運転 | 周囲状況に応じて自律的に運転する | 機械(ただし、管理人が必要) |
| レベル4 | 連携自動運転 | 他の自動運転機械と連携して自立で運転する | 機械(現場内に限る) |
| レベル5 | 完全運転自動化 | 危険回避、機械の搬送、一般道の走行等を含めたすべての動作の自動化 | 機械(全てのフィールド) |

b) レベル1(マシンコントロール)

以下の図1は、広く販売されている ICT バックホーにおいて指定した標高以下の掘削が出来ないマシンコントロールを実施した状態である。この様にレベル1:マシンコントロールは実用化されていると考えられる。



図1 レベル2マシンコントロールの実施状況

c) レベル2(複合動作自動化)

以下の図2は、自動運転振動ローラである。機械の移動に加えて振動をコントロールしており、現地での施工に投入されている状態である。



図2 レベル4複合自動化施工の実施状況^{*)}

(3) BIM/CIM データの活用での課題と解決策

a) 活用するデータの種類と注意点

ICT バックホーをコントロールする J-LandXML は、中心線とそれに直交する断面で定義されているが、高速道路のように本道に側道が交差する場合、本道と側道の中心線が合わないために3次元形状が十分に表現できない部分が発生するなどの課題がある。また独自システムによって作動する自動機械も多数あり、特定のデータでしか作動しない自動機械が多い。

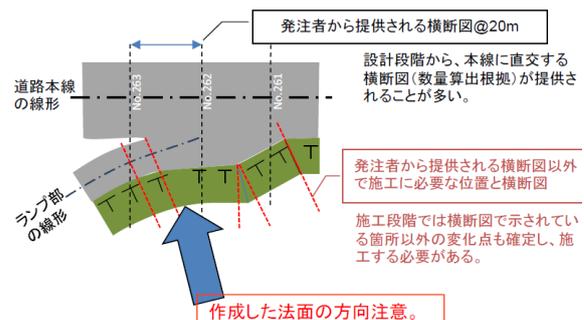


図3 本線と側道のデータの取扱注意点(マシンコントロール/マシンガイド) ダンプ技術(バックホウ編)の手引書[施工者用]近畿地方整備局

b) 共通の自動化指示データの必要性

建設機械は、大型起重機船等の国内に数台しかない機械も多く、独自データで動く場合、他社で利用できない。開発者の有利性と自動建設機械の利用促進を同時に満足する、自動化データ規格が必要であると考えられる。

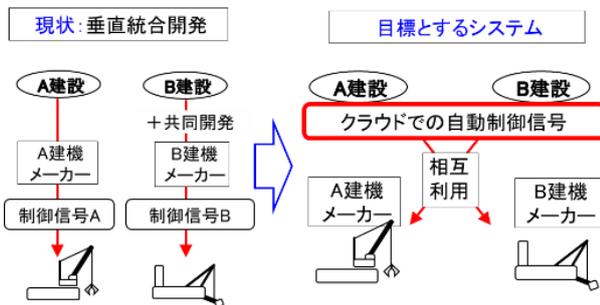


図 4 自動化データの共通化の概念⁶⁾

c) 施工計画の将来像

将来的にははに示すように3次元空間内で建設機器の動きをシミュレートし、安全性などを確認する様になるものと考えられる。また、今後自立的に機械が作動するようになると、周囲の状況認識後に現状と設計の差を認識して工種を自動的に判断し、必要な自動機械を選定し、協調させる AI 施工計画プログラムが発達するものと考えられる。

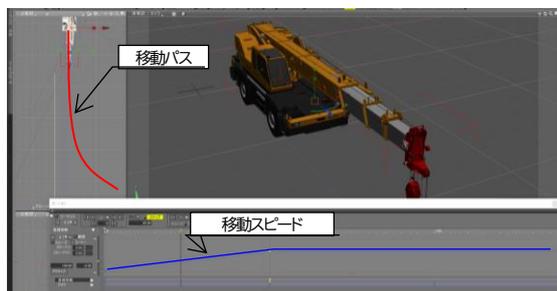


図 5 施工計画の将来像のイメージ

(4) 今後の方向性

上記から共通の自動化データ規格作成や、施工計画表現方法を規格化して行くことが重要である。この流れとしては各ゼネコンが共同でロボット開発を行う「建設RX コンソーシアム」や、自動建設機械の主にハードウェア側の基盤として土木研究所が開発している「OPERA」等が活動を行っているが、施工計画側の入力としての規格策定の動きは現状では無い。規格化に際しては、関係者や利害関係が多いと考えられたため、土木学会等の協調領域で決定されることが望ましいと考えられる。

2. WG2:プレキャスト (PCa) 化 WG の活動報告

(1) はじめに

WG2では、令和5年7月から令和6年6月までの間に合計6回のWGと、樹脂性ブロックを用いた載荷試験1回を実施した。表5にWG2の実施内容一覧を示す。

表 6 WG2の実施内容

| 回数 | 年月日 | 実施概要 | 人数 |
|------|------------|---|-----|
| 第13回 | 2023/8/24 | 20年未来を想定したプレキャスト構造に関するFD | 9名 |
| 第14回 | 2023/10/26 | ブロック試験体の検討1 | 13名 |
| 第15回 | 2023/12/21 | ブロック試験体の検討2 | 13名 |
| 第16回 | 2024/2/21 | <ul style="list-style-type: none"> ロボット施工時の誤差解消のための新技術に関する講演および討議 ブロック試験体の検討3 | 20名 |
| — | 2024/3/26 | ブロック試験体の載荷試験 | 13名 |
| 第17回 | 2024/4/24 | 載荷試験結果速報 | 10名 |
| 第18回 | 2024/6/26 | 3Dアノテッドモデルに関する講演および討議 | 20名 |

WG2では、プレキャスト化促進のための課題抽出および提言を目的に、レゴブロックのように簡易に組立可能なブロック状の部材を組み合わせたプレキャスト構造の適用性を中心に検討してきた。これまでレゴブロックを用いた検討などを行ってきたが⁴⁾、今年度はより実物に近い形状を模した樹脂製ブロックを3Dプリンタで製作し、円筒状に組み立てた単純梁で曲げ載荷試験を実施した。

(2) 載荷試験の概要

当WGで目指したのは究極に機械化・省人化された10年後、20年後の建設現場でのプレキャスト構造で、ロボットアームやUAV等で各ピースを運搬し組み立てられるような橋脚構造を想定した。想定構造を図6に示す。プレキャストの効果を最も発揮するように1種類のピースのみで組み立てられることを条件とし、らせん状に1周12ピース積み上げることで円筒形の橋脚を構築する(図7)。

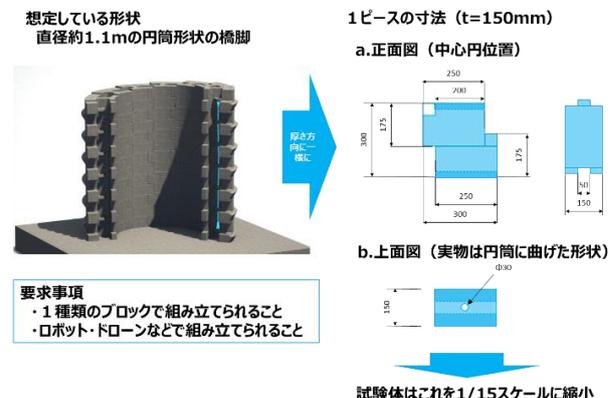


図 6 想定する橋脚構造

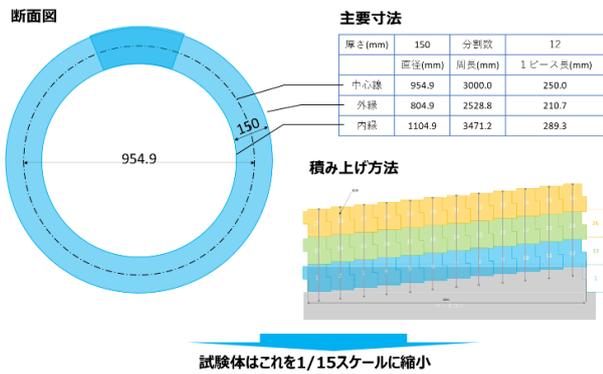


図7 ブロックの積層イメージ

この構造の耐荷性を確認するため、約1/15に縮小した梁試験体を作成し、3点曲げ載荷試験で崩壊過程などを確認した(図8)。プレキャスト構造で組み立てた構造にとって重要となるのが各ピースのかみ合わせ精度であるので、各ピースの上下の凹凸部分の寸法に遊間がないものをCASE1、遊間を0.4mm(両側で0.8mm)設けたものをCASE2として、2種類の試験体で実施した。実物はRC構造となることを想定し、試験体との剛比をそろえる形で、各ピースは樹脂製の3Dプリンタで製作し、軸方向には各ピースの内部にアンボンドの12本の鋼線を通して組立てた。そのうち載荷試験時に最下縁となる鋼線については初期状態ではONとして拘束された状態とし、載荷に伴い発生する軸力を計測した。その他の鋼線には緊張力を導入していない。載荷は中央の鉛直変位が50mmになるまで行い、その後は除荷をした。

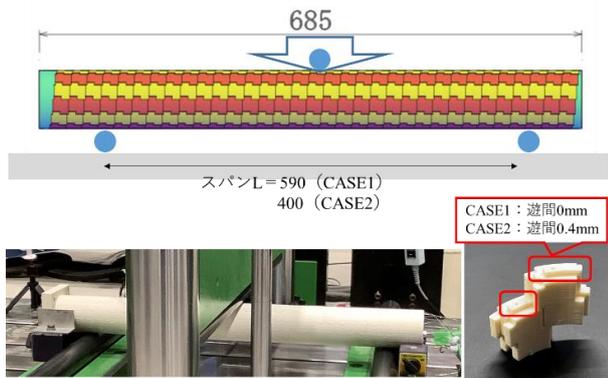


図8 試験体の概要

(3) 載荷試験結果

a) 変形過程

図9にCASE1の変形過程状況を示す。載荷点付近の断面が加力方向につぶされるような楕円形状になりながら鉛直方向に変形が進んだ。CASE1では載荷点付近の下縁から上方向にブロック間の離れが生じ、その離れが広がる形で変形が進んだ。50mmの変形時でも崩壊することはなく、除荷後は載荷点位置で10mmの変位まで変形が戻り、ブロック間の離隔もほとんどが閉合された。

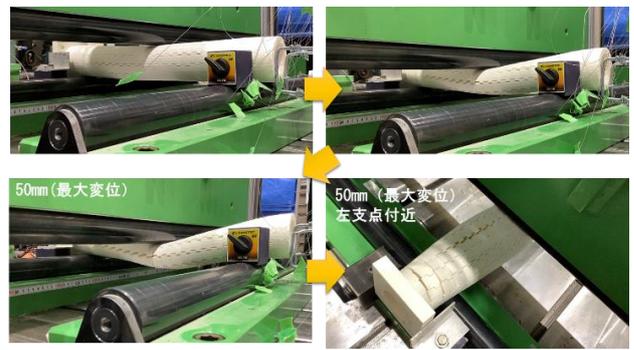


図9 試験状況(CASE1)

b) 荷重-変位関係

図10に荷重と中央の鉛直変位の関係を示す。なお、試験体を弾性体と仮定し、CASE1のスペンをCASE2と同じL=400mmとした場合の想定の変形曲線も合わせて示す。推定ではあるが、スペンの比を考慮してもCASE1のほうが剛性も高く最大荷重が大きかったと思われる。除荷後の変形については、CASE1では10mm程度、CASE2では20mm程度が残留していた。

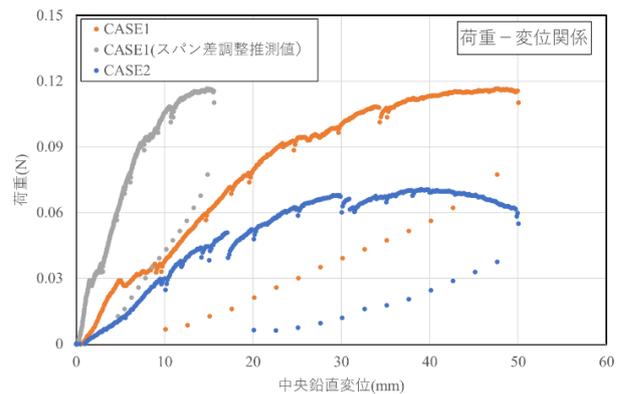


図10 荷重-変位関係

(4) まとめ

載試験結果よりブロック間の遊間の微小な差異が変形形状や耐荷性能に大きく影響することが分かった。今後、シミュレーションなども活用し考察を加える予定である。

参考文献

- 1) 自動運転システムと新しい品質管理手法を組み合わせた施工を実現、安藤ハザマ HP(<https://www.ad-hzm.co.jp/info/2019/20190424.php>)
- 2) 遠隔操作も可能な「天井クレーンの自動運転システム」を開発、大林組 HP(https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20221005_2.html)
- 3) 中嶋ら) 土木 BIM/CIM データ利用方向性に関する検討、土木情報学論文集,2019
- 4) 井口ら; 土木学会年次学術講演会, Vol78, VI-622, プラスチック製ブロックを用いたプレキャスト構造の検討(その1),2023

論文名：

自動建設機械で BIM/CIM データを活用する際の課題と解決策

ジャーナル名：

令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会

発表年：2024

自動建設機械で BIM/CIM データを活用する際の課題と解決策

○若築建設(株) 正会員 中嶋 道雄 清水建設(株) 正会員 柳川 正和
 (株)不動テトラ 阿部 喜生 安藤・ハザマ 石濱 裕幸
 東日本旅客鉄道(株) 井口 重信

1. 目的

BIM/CIM は、調査・計画、設計、施工、維持管理での各建設フェーズで発生した情報を 3 次元モデルに付加し、その情報を活用する事を目的としている。この中で設計フェーズから建設フェーズへ渡された BIM/CIM データを、自動建設機械等で活用する際に現状の自動建設機械の開発状況やそこから浮かび上がる課題と解決策について述べる。

2. 施工での BIM/CIM データの活用

2.1 活用の種類

現状での建設機械の自動化は、土木分野でのバックホーやブルドーザー等の土工機械が実用化されており、その他に建築などで利用されるパネル設置装置や屋内の資材運搬ロボット等も研開発が進められている。土木での自動建設機械の自動化達成認識のために、自動化レベル分け案を作成した。表-1 にこの案を示す。現状で実施されている建設機械の自動化レベルは、レベル1のマシンコントロールは実用化されており、レベル2のプログラムで動作する自動建設機械が限定的に現場で利用される状態であると考えられる。そのため、レベル2から3に向かっている途中であると言える。

表-1 建設機械の自動化レベル(案)

| 段階 | 名称 | 適用 | 運転主体 |
|------|---------|------------------------------------|----------------|
| レベル0 | 自動化なし | 人の運転による機械化施工 マシンガイダンスを含む | 人 |
| レベル1 | 部分動作自動化 | 機械の単独動作の自動化 動作制御などのマシンコントロールを含む | 人(労力低減) |
| レベル2 | 全動作自動化 | 機械の全動作を自動で行う ただし、プログラム通りに作動する | 機械(ただし、管理者が必要) |
| レベル3 | 自立自動運転 | 周囲状況に応じて自律的に運転する | 機械(ただし、管理者が必要) |
| レベル4 | 連携自動運転 | 他の自動運転機械と連携して自立で運転する | 機械(現場内に限る) |
| レベル5 | 完全運転自動化 | 危険回避、機械の搬送、一般道の走行等を含めたすべての動作の自動化 | 機械(全てのフィールド) |

2.2 自動化活用の事例

(1)レベル1(マシンコントロール)

図-1 は、ICT バックホーにおいて指定した標高以下の掘削が出来ないマシンコントロールを実施した状態である。単純な形状以外にも事前入力された幾何学的な 3 次元形状に応じて、バケット刃先の制御を行える。この機能はバックホーの位置を GNSS 等で追従しながら、機械の回転方向やバケット刃先をセンサーで追従しており、3 次元形状と照らし合わせることで制御をしている。



図-1 レベル2でのマシンコントロール (ICT バックホー)の実施状況

(2)レベル2(複合動作自動化)

図-2 は、安藤ハザマが開発した自動運転振動ローラである。この振動ローラは、GNSS や方位計等を装備し、位置、方向、操舵角などの自車状態を把握し、自動運転・制御を行っている。また、ステレオカメラにより、設定範囲内の人を検知後運転停止システムも搭載されており、すでに現地での実施工に投入されている状態である。



図-2 レベル4複合自動化施工の実施状況*1

3. BIM/CIM データの活用での課題と解決策

3.1 活用するデータの種類と注意点

ICT バックホーでは、J-LandXML (LandXML1.2) のデータの内、中心線とその横断面データがあれば設計データとして動作するが、法面の場合刃先が設計データより上になると設計斜面の裏にバケットが回ってしまう場合も有るために、50cm ほど斜面を伸ばす事等が必要になる場合がある。また、高速道路のように本道に側道が交差する場合、本道と側道の中心線が合わないうえに 3 次元形状が十分に表現できない部分が発生するなどの課題がある。天井クレーンの自動運転システム等*2、限定された場所で動作する機械の多くが、独自開発プログラムによって作動するシステムとなっており、J-LandXML 等の共通データを利用しない機械も多く存在する。

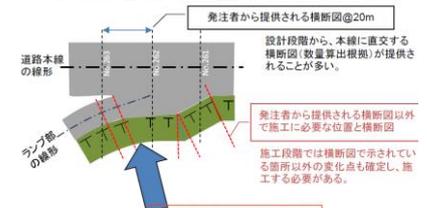


図-3 本道中心とランプ中心の差によるデータの注意点(マシンコントロール/マシンガイダンス技術(バックホウ編)の手引書【施工者用】近畿地方整備局)

天井クレーンの自動運転システム等*2、限定された場所で動作する機械の多くが、独自開発プログラムによって作動するシステムとなっており、J-LandXML 等の共通データを利用しない機械も多く存在する。

3.2 共通の自動化指示データの必要性

建設機械は、大型起重機船等の国内に数台しかない機械も多く、こういった機械が独自データ形式で自動化されている場合、他社が使用できない状態となる。特に建設機械は、元請けではなく協力業者が保有している場合が多いため、上記の場合人による施工方法伝達や紙による施工計画から各協力業者が自動化をプログラミングする等、自動化のメリットを生かせず、建設生産性向上を阻害される要因となる。ただし、開発者の有利性が無ければ開発費をかけて自動建設機器の開発が促されないと考えられるため、自動建設機械の利用促進と、開発者の有利性を同時に満足する、自動化データ規格が必要であると考えられる。

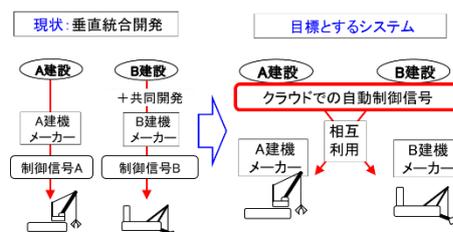


図-4 自動化データの共通化の概念^{*3}

3.3 共通自動化データの範囲

共通となる自動化データ範囲は、現状の施工計画書で用いられている工種毎の移動や回転等の基本的な動作とすることが重要と考えられる。表-2 に共通自動化データ案を示す。機械や物の移動を表す移動パスは、開始点と中間点、終了点のX,Y,Z座標に加え(制限)スピードや2点間が線形かスプラインか等の線形情報を有する必要があると考えられる。このほかに制限速度や、動作のきっかけとなるトリガー情報も必要になると考えられる。掘削工では、掘削エリアの3次元幾何学形状に加え、北側から南側に向けて掘削するなどの機械の移動パスが必要になる物と考えられる。ただし、これらの共通自動化データは、施工上必要な情報と、建設機械を開発する開発側の意見や施工計画を行う際に利用されるソフトウェアやプラットフォームなどを縦断的に十分な論議を得て決める必要がある。

表-2 共通自動化データ(案)

| 工種 | 動作区分 | 自動化データ |
|---------|---------|------------------------------------|
| トラック運搬工 | トラックの移動 | 移動パス（始点、終点、中間点の座標、制限速度等）、移動開始トリガー等 |
| クレーン場重工 | 荷物の移動 | 機械の座標、荷物形状・重さ、荷物の移動パス、移動開始トリガー等 |
| 掘削工 | 掘削 | 掘削エリア、機械の移動パス |

3.4 施工計画の将来像

現状の施工計画書では、工種毎に機械配置や実施作業内容、安全上の注意点について記載を行っており、BIM/CIM では上記の内容を3次元で表現している状態である。これに加え自動建設機器を使うようになると、機器の移動等が表現できる必要がある。図-5 にアニメーションソフトで建設機器の移動パスやスピードなどを設定している状況を示す。将来的にはこの様な3次元空間内で建設機器の動きをシミュレートし、安全性などを確認する様になるものと考えられる。

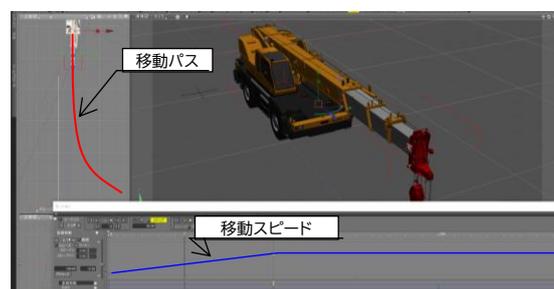


図-5 施工計画の将来像のイメージ

また、今後自立的に機械が作動するようになると、周囲の状況認識後に現状と設計の差を認識して工種を自動的に判断し、必要な自動機械を選定し、協調させるAI施工計画プログラムが発達するものと考えられる。

4. 今後の方向性

上記から共通の自動化データ規格作成や、施工計画表現方法を規格化して行くことが重要である。この流れとしては各ゼネコンが共同でロボット開発を行う「建設RXコンソーシアム」や、自動建設機械の主にハードウェア側の基盤として土木研究所が開発している「OPERA」等が活動を行っているが、施工計画側の入力としての規格策定の動きは現状では無い。規格化に際しては、関係者や利害関係が多いと考えられたため、土木学会等の協調領域で決定されることが望ましいと考えられる。

謝辞： 本論文は、土木学会の「三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会」によって研究されたものである。ご協力くださった方々に感謝申し上げます。

参考文献

- *1: 自動運転システムと新しい品質管理手法を組み合わせた施工を実現, 安藤ハザマ HP(<https://www.ad-hzm.co.jp/info/2019/20190424.php>)
- *2: 遠隔操作も可能な「天井クレーンの自動運転システム」を開発, 大林組 HP(https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20221005_2.html)
- *3: 中嶋ら) 土木 BIM/CIM データ利用方向性に関する検討, 土木情報学論文集, 2019

論文名：

自動建設機械での施工に適したプレキャスト構造に関する実
験的検討

ジャーナル名：

令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会

発表年：2024

第VI部門

2024年9月5日(木) 16:20 ~ 17:40 Ⅲ A404(川内北キャンパス講義棟A棟)

BIM/CIM (5)

座長：前田 宗宏（鹿島建設）

16:50 ~ 17:00

[VI-88] 自動建設機械での施工に適したプレキャスト構造に関する実験的検討

*井口 重信¹、中嶋 道雄²、阪口 裕紀³、岡 裕二⁴、佐藤 舞衣子¹、伊東 佑香¹ (1. 東日本旅客鉄道株式会社、2. 若築建設株式会社、3. 丸栄コンクリート工業株式会社、4. 株式会社キャストアール)

キーワード：BIM/CIM、機械施工、プレキャスト、載荷試験

自動建設機械での施工に適したプレキャスト構造について実験的な検討を実施した。円筒状の橋脚を想定し、1ピースのブロックだけで施工可能な構造を、1/15スケールで縮小した梁載荷試験体の曲げ試験を行った。かみ合わせ部の遊間の違いにより耐荷力や変形性能が変わることと、残留変位などにも影響があることが分かった。

自動建設機械での施工に適したプレキャスト構造に関する実験的検討

○東日本旅客鉄道(株) 正会員 井口 重信 若築建設(株) 正会員 中嶋 道雄
 丸栄コンクリート工業(株) 正会員 阪口 裕紀 (株)キャストアール 正会員 岡 裕二
 東日本旅客鉄道(株) 正会員 佐藤 舞衣子 東日本旅客鉄道(株) 正会員 伊東 佑香

1. はじめに

土木情報学委員会「三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会」では、プレキャスト化促進のための課題抽出および提言を目的に活動を行っている。その一つとして、レゴブロックのように簡易に組立可能なブロック状の部材を組み合わせたプレキャスト構造の適用性を検討している。これまでレゴブロックを用いた検討などを行ってきたが¹⁾²⁾、本検討ではより実物に近い形状を模した樹脂製ブロックを3Dプリンタで製作し、円筒状に組み立てた単純梁で曲げ載荷試験を実施した。

2. 試験概要

当小委員会で目指したのは究極に機械化・省人化された10年後、20年後の建設現場でのプレキャスト構造で、ロボットアームや UAV 等で各ピースを運搬し組み立てられる橋脚構造を想定した。想定構造を図-1に示す。1種類のピースで組み立てられることを条件とし、らせん状に1周12ピース積み上げることで円筒形の橋脚を構築する。この構造の耐荷性を確認するため、約1/15に縮小した梁試験体を作成し、3点曲げ載荷試験で崩壊過程などを確認した(図-2)。プレキャスト構造で組み立てた構造にとって重要となるのが各ピースのかみ合わせ精度であるので、各ピースの上下の凹凸部分の寸法に遊間がないものをCASE1、遊間を0.4mm(両側で0.8mm)設けたものをCASE2として、2種類の試験体で実施した。実物はRC構造となることを想定し、試験体との剛比をそろえる形で、各ピースは樹脂製の3Dプリンタで製作し、軸方向には各ピースの内部にアンボンドの12本の鋼線を通して組立てた。そのうち載荷試験時に最下縁となる鋼線については初期状態ではONとして拘束された状態とし、載荷に伴い発生する軸力を計測した。その他の鋼線には緊張力を導入していない。載荷は中央の鉛直変位が50mmになるまで行い、その後は除荷をした。

3. 試験結果

3.1 変形過程 図-3、図-4に各ケースでの変形過程状況を示す。どちらのケースも載荷点付近の断面が加力方向につぶされるような楕円形状になりながら鉛直方向に変形が進んだ。CASE1では載荷点付近の下縁から上方向にブロック間の離れが生じ、その離れが広がる形で変形が進んだ。50mmの変形時でも崩壊することはない。除荷後は載荷点位置で10mmの変位まで変形が戻り、ブロック間の離隔もほとんどが閉合された。CASE2は、スパン中央付近での下縁からのブロック間の剥離は小さく、梁軸方向へのブロック間の離隔が広がる状況が顕著にみられた。除荷後も、ブロック間の離隔

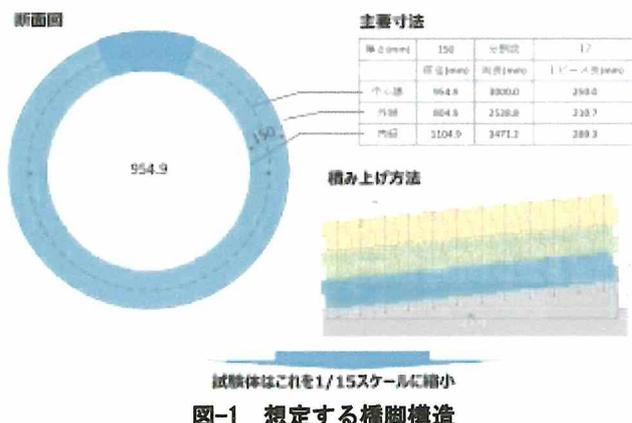
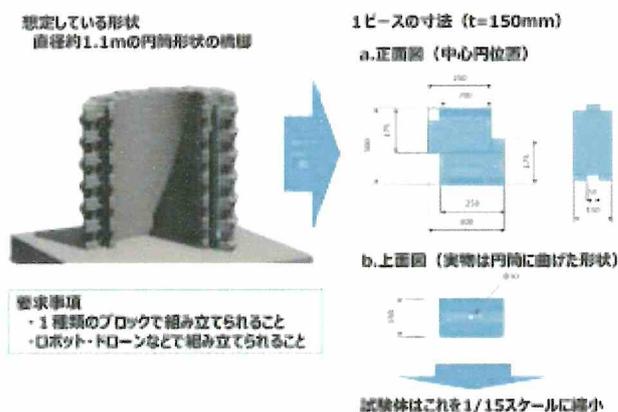


図-1 想定する橋脚構造

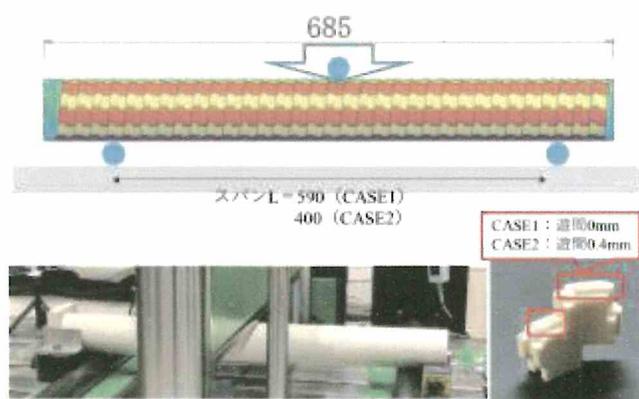


図-2 試験体の概要

キーワード BIM/CIM, 機械施工, プレキャスト, 載荷試験

連絡先 〒141-0031 東京都品川区西五反田3丁目5番8号 JR 目黒 MARCビル, s-iguchi@jreast.co.jp

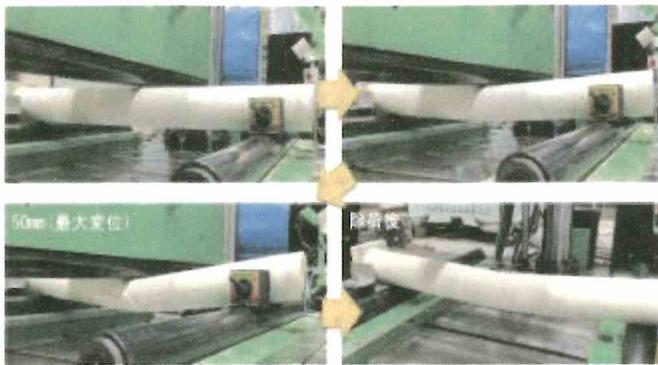


図-3 試験状況 (CASE1)



図-4 試験状況 (CASE2)

が閉合することなく、残留変形も大きく残った。

3.2 荷重－変位関係 図-5 に荷重と中央の鉛直変位の関係を示す。なお、試験体を弾性体と仮定し、CASE1 のスパンを CASE2 と同じ $L=400\text{mm}$ とした場合の想定の変形曲線も合わせて示す。推定ではあるが、スパンの比を考慮しても CASE1 のほうが剛性も高く最大荷重が大きかったと思われる。除荷後の変形については、CASE1 では 10mm 程度、CASE2 では 20mm 程度が残留していた。

3.3 各変位時での変形状況 荷重前、荷重中、除荷後の、左右支点付近および中央断面位置での直交2方向の直径の計測値から推定した断面形状の変化を図-6 に示す。両ケースともに、両支点部は端部の一体形でプリントした拘束治具の影響により円形に近いが、中央部付近では水平方向に押しつぶされたような形状になりながら鉛直方向の変位を吸収していた。CASE1 よりも CASE2 のほうがこの傾向は顕著で、CASE2 では、中央変位が 50mm 時に、長径と短径で 2 倍以上の差が生じていた。

3.4 下縁鋼材の緊張力 各変位時での下縁鋼材に発生した緊張力の推移を図-7 に示す。どちらのケースでも変形により緊張力が発生していくが、CASE1 では、25mm 時をピークに増加しなくなった。これは、中央付近に発生したブロックの離脱の影響があると考えられる。一方で、試験終了時まで梁直角方向の剥離が少なかった CASE2 では、変位 50mm 時まで緊張力は伸び続けた。

4. まとめ

今後、考察を加えるとともに、シミュレーション(図-8)などで試験結果の検証を行う予定である。なお、本論文は、土木情報学委員会「三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会」によって研究されたものである。ご協力くださった方々に記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 井口ら;土木学会年次学術講演会, Vol78, VI-622, プラスチック製ブロックを用いたプレキャスト構造の検討(その1),2023
- 2) 坂田ら;土木学会年次学術講演会, Vol78, VI-623, プラスチック製ブロックを用いたプレキャスト構造の検討(その2),2023

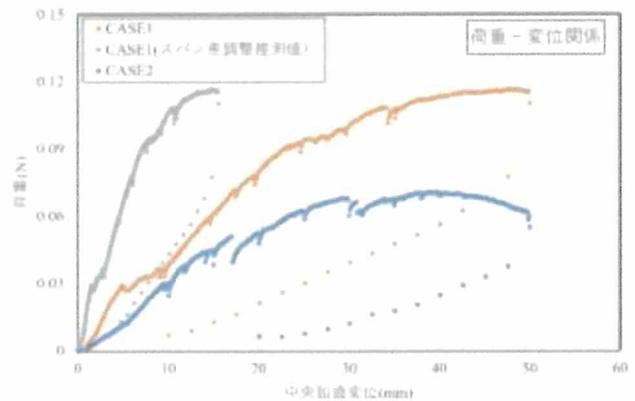


図-5 荷重－変位関係

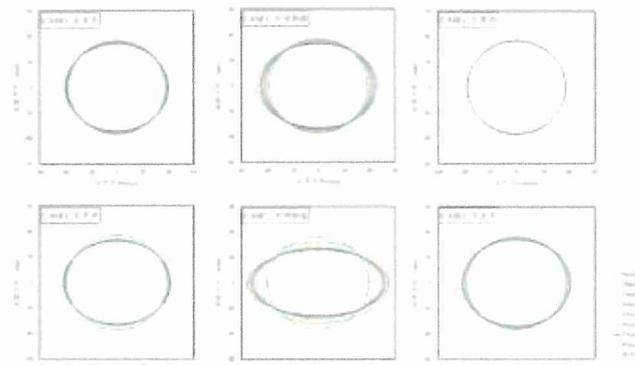


図-6 各変位時での推定変形状況

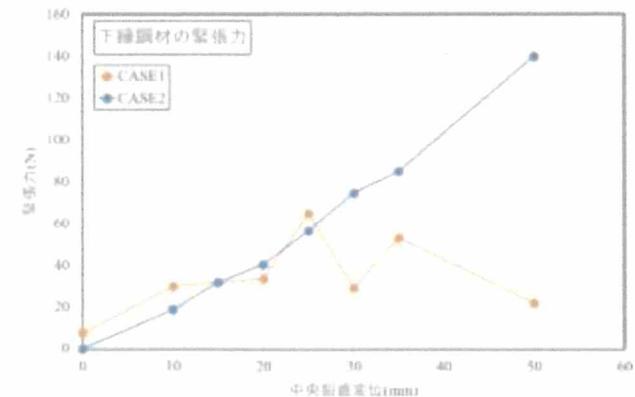


図-7 下縁鋼材の緊張力の推移



図-8 シミュレーション

論文名：

建設生産性向上のための3次元モデル活用のありかた

ジャーナル名：

令和7年度土木学会全国大会第80回年次学術講演会

発表年：2025

建設生産性向上のための3次元モデル活用のありかた

○若築建設(株) 正会員 中嶋 道雄 CalTa(株) 正会員 井口 重信
ジオ・サーチ(株) 正会員 澤井 崇 東急建設(株) 正会員 池田 伸裕
東日本旅客鉄道(株) 竹田 宥一郎 日本工営(株) 古川 裕也

1. 目的

BIM/CIM は、調査・計画、設計、施工、維持管理での各フェーズで発生した情報を3次元モデルに付加し、その情報を活用する事を目的としている。各データを全フェーズで活用する際の課題やあり方について「3次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会」で討議してきた内容について、ここで報告する。

2. 建設生産性向上

2.1 建設生産性向上の現在

測量・調査フェーズでは、ドローンによる上空からの測量や、MMS による点群取得、弾性波や電磁波を用いた地中情報等の三次元化などの新しい機器による計測や3次元可視化が活発化している。この後の設計、建設フェーズの利用に向けて現地地形等をより詳細に取得する方向に進んでいる。

設計フェーズでは、道路線形計画の自動化や各種配筋計算等がソフトウェア化され、一部は自動化されているが、基準ごとに異なる設計条件や設計方法等が課題となっており、生産性をめざましく向上できていない状態ではない。また3次元モデルなどの設計成果物は、2次元での図面を作成した後に3次元化されている事が多いため、設計から3次元モデルまでの一括利用による設計は一部の先進事例に限られる状態である。

施工フェーズでは、現地作業の労働力減少に伴い、2016年に国土交通省による i-Construction と呼ばれる ICT 機器を活用した取り組みが提唱され、現在は i-Construction2.0(建設現場のオートメーション化)へのステップアップが図られている。図-1 に示すような各社の自動建設機械の開発など、生産性向上が実感可能な段階に来ているものと考えられる。また建設会社を中心とした建設 RX コンソーシアムが2021年に立ち上がり、単独で開発していた建設機械を各社で利用可能となるように開発が進められている。この様に施工フェーズでの生産性向上は、着実に進められており今後は複合作業や複雑作業が自動化するものと考えられる。



図1 自動運転建機動作状況*1

維持管理フェーズでは、劣化状況等の記録のための計測・調査については、測量・調査フェーズと同様にその計測方法が多彩になっている(図-2 参照)。一方管理のための台帳は、道路、鉄道、河川などの各分野で、旧来から独自の方法やフォーマットで管理されている。特に高速道路や鉄道などの構造物によって利益を得ている管理者は、顧客へのサービス向上のために独自に管理・維持補修を行っており、3次元管理への早急な切り替えは難しい。しかし、3次元データの優位性が見込まれるものから、既存のデータベースと連携をさせながら3次元データを活用する様になってきている。

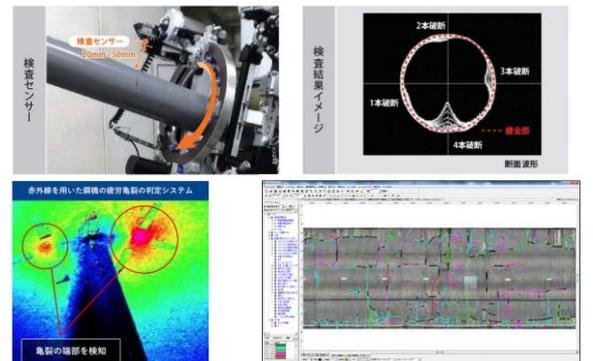


図2 斜張橋における斜材の点検ロボットの例*2

2.2 3次元モデルの活用と課題

生産性の向上には、各フェーズで統一的にデータを活用する必要があり、3次元モデルに属性付与する事によってデータの再利用性を図る意図がある。ただしモデル構成や属性付与ルール等が明確化されておらず、以下の課題がある。

(1) 3次元モデルのフォーマット(オリジナルか IFC/J-LandXML のどちらか)

国土交通省における3次元モデル形式は、オリジナルファイル形式と共通形式(IFC または J-LandXML)の2種類である。汎用性を考えると共通形式が良いが、現在はオリジナルフォーマットでの活用が多いものと考えられる。

(2) 3次元モデルの階層構造

モデル(形状)は、構造物全体があり、壁や底板などに分かれ、その中に鉄筋を含むなど階層構造で考えた方が管理しやすい。例えば属性付与で竣工年月日を鉄筋や底板にそれぞれ付与するより、構造物一括で付与した方が良い

ためである。これらの階層構造は、3次元モデル成果物作成要領(案)港湾編(令和4年4月版)等ではルール付けがされているが、細かな構造物や部材で定めのないものがあるため、統一的なルール作りが望まれる。

(3) 属性情報の付与ルール

属性の入力は、マシンリーダブルを考慮する事が望まれる。そのため全・半角の差や、データ変換によって対応できない文字コード体系、矢板 III(半角の $i \times 3$)型、SP-3、SP-III(全角の 3)等の表記方法などを考慮したルールが必要であると考えられる。

(4) モデル化範囲(詳細度)の制限

現状での国の設計発注仕様は、詳細度が 100~500 で区分され、外形が分かる程度のモデル化で良い=詳細度 300等の指定となっている。本来の設計から施工への伝達内容は、設計項目全てが必要であり、言い換えると構造物が製作・施工出来ない範囲でのモデルは施工側では不要と考えられる。計画、基本設計段階では上記の詳細度も受容できるが、最終成果は構造物が全て製作可能な詳細度が必要である。

(5) 溶接記号などの記号の問題

図面では細かな部分や仮想的な部分を表現するための記号が使われるが、この記号の3次元化ルールの定めがない。主な記号類を以下に示す。

- 1.溶接記号
- 2.法面や勾配方向などを定める記号
- 3.地盤や岩盤を示す記号
- 4.立ち入り禁止や民地境界などを定める境界

(6) 自動建設機械を動かす情報の共通化

自動建設機械が標準工法となった場合には、機械の所有会社のみが施工できることとなる。一方、社会全体での建設生産性の向上を考慮すると共通の自動化機械の指令データフォーマットで作動する事が望ましい。ただし、全てを共通化すると、開発会社のインセンティブが無くなるため、大まかに作動する指令系統のみを共通フォーマットとし、細かな動きは各社毎に違う仕組みが良いのと考えられる。これにより同じ動きをする自動建設機械でもA社の自動建設機械は燃費が良い、工程短縮が可能等の差別化が図られ、開発各社へのインセンティブになるものと考えられる。

(7) プラットフォームの必要性

現状では同じ IFC ファイルでも、表示ソフトの差によって確認可能な属性やモデル表示が違うなどの差が発生している。この状況に対応するために bSJ、OCF 等の団体が利用状況に応じた各ソフトの検定を行っている。ただし利用状況は自動建設などの高度利用に対応しておらず、現状では目視確認と数量計算のみである。このため共通のプラットフォームまたはファイル規格に対応したミドルウェアが必要である。

3. まとめ

自動施工や維持管理フェーズにおいて3次元モデル作成ルールに関する課題が多く発見された。ルールが早急に定まらない原因として、開発主体のインセンティブ不足や協調領域の発達不足があると考えられる。協調領域として土木研究所が開発しているハードウェア研究基盤の「OPERA」があるが、ルール作成に際して、関係者や利害関係が多いと考えられるため、土木学会等の協調領域で決定されることが望ましいと考えられる。

謝辞：本論文は、土木学会の「三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会」によって研究されたものである。ご協力くださった方々に感謝申し上げます。

参考文献

- *1:重機の遠隔操作システムと自動運転技術の複合による作業現場の安全運用を検証, 安藤・ハザマ HP, <https://www.ad-hzm.co.jp/info/2023/20231213.php>,2023.9.1
- *2:斜張橋における斜材の点検ロボット, 中日本ハイウェイエンジニアリング東京 HP, <https://www.c-nexco-het.jp/tech/284/>,2025.3.24
- *3:中嶋ら) BIM/CIM データで自動建設機械を運用する際の課題と解決策, 土木情報学シンポジウム論文集, 2024

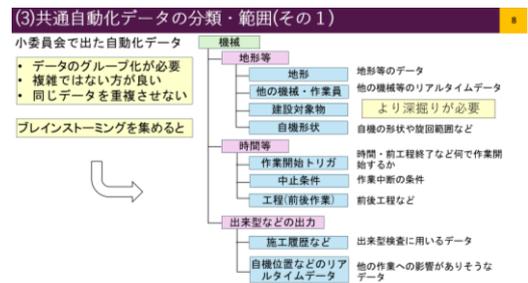


図3 データ階層の試案結果図*3

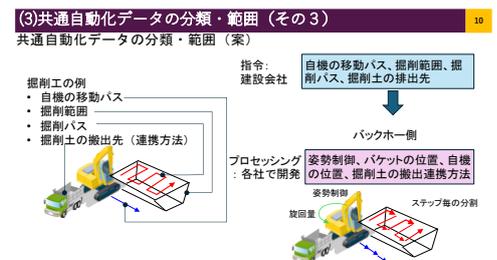


図4 自動建設機械の指令データ共通化概念図*3

論文名：

自動建設機械での施工に適したプレキャスト構造に関する実
験的検討（その二）

ジャーナル名：

令和 7 年度土木学会全国大会第 80 回年次学術講演会

発表年：2025

自動建設機械での施工に適したプレキャスト構造に関する実験的検討（その二）

○CalTa(株) 正会員 井口 重信 若築建設(株) 正会員 中嶋 道雄
 東日本旅客鉄道(株) 青木 千里 (株)安藤ハザマ 石浜 裕幸
 中日本高速道路(株) 石田 篤徳 東日本旅客鉄道(株) 竹田 有一郎

1. はじめに

土木情報学委員会「三次元モデルを活用した建設生産性向上研究小委員会」では、プレキャスト化促進のための課題抽出および提言を目的に活動を行っている。その一つとして、レゴブロックのように簡易に組立可能なブロック状の部材を組み合わせたプレキャスト構造の適用性を検討している。これまで3Dプリンタで製作した樹脂製ブロックを円筒状に組み立て鋼線を挿入した単純梁を用いて検討を行ってきた¹⁾。既往の試験では、梁試験体のスパンが揃えられなかったこと、各ピースに挿入した鋼線に張力の導入ができなかったことから、目的とする構造を再現してその挙動を把握することが十分に行えなかった。そこで、本検討では試験体のスパンを揃え、鋼線に一定の張力を導入した状態で載荷試験を行ったので、その概要を以下で述べる。

2. 試験概要

本試験では、1種類のピースをらせん状に1周12ピース積み上げて円筒形の橋脚を想定し、本構造を約1/15に縮小した棒部材で3点曲げ載荷試験を実施した(図-1)。このようなプレキャスト構造の場合、各プレキャスト部材の製作精度が構造性能に大きく影響するため、上下の凹凸部分の寸法に遊間がないものをCASE1、遊間を0.4mm(両側で0.8mm)設けたものをCASE2として試験を実施した。試験では、2種類の試験体で支間を同じにして実施した。実物はRC構造を想定しているため、試験体においても剛比を揃えるように設計し、各ピースは樹脂製の3Dプリンタで製作した。試験では、軸方向には各ピースの内部にアンボンドの鋼線を12本通し、試験体外方まで伸ばして約3kgの重りをぶら下げて軸力を導入した。載荷中は、鋼線の端部にワイヤー式変位計を取り付けて、引き込まれる量の変化を計測した(図-2)。載荷は中央の鉛直変位状況を確認しながら40mm程度まで行い、その後を除荷した。

3. 試験結果

3.1 変形過程 図-3, 図-4に各ケースでの変形過程を示す。いずれのケースも中央載荷点付近の断面が加力方向につぶされるような楕円形状になりながら、鉛直変位が増大した。CASE1では、載荷点付近の下縁から上方向にブロック間の隙間が開き、変形の進行とともにその隙間が広がる様子を確認した。変位量が50mmに達しても崩壊することはなく、除荷後には載荷

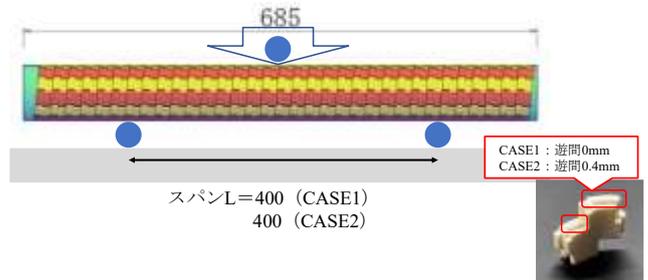


図-1 試験体の概要

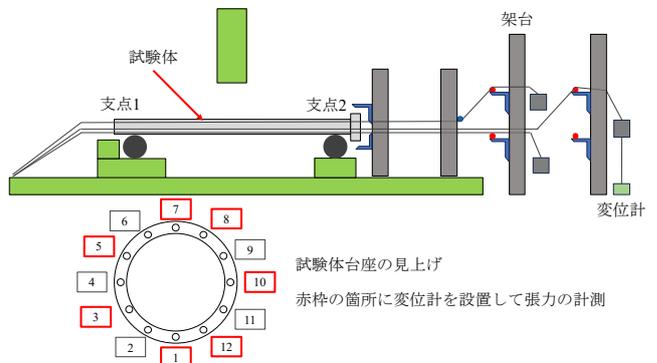


図-2 鋼材の引き込み量計測



図-3 CASE1 試験状況

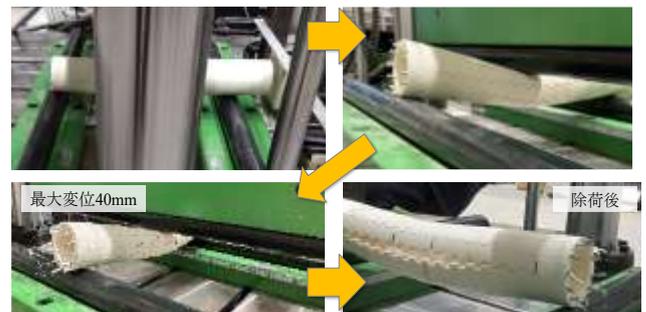


図-4 CASE2 試験状況

キーワード BIM/CIM, 機械施工, プレキャスト, 載荷試験

連絡先 〒108-0074 東京都港区高輪二丁目 18 番 10 号高輪泉岳寺駅前ビル 9 階 s-iguchi@calta.co.jp

点での変位まで変形が戻り、ブロック間の離隔もほとんどが閉合された。CASE2 は、スパン中央付近での載荷点からのブロック間の隙間が大きく開き、梁軸方向へのブロック間の隙間が開く状況が顕著にみられた。除荷後も、ブロック間の隙間が閉合することはなく、残留変形も大きく残った

3.2 荷重－変位関係 図-5 に中央鉛直変位に対する荷重の関係を示す。CASE1 は CASE2 に比べて剛性が高く、最大荷重が大きかった。除荷後の残留変形は、CASE1 では10mm, CASE2 では15mmが残留していた。

3.3 各変位時での断面形状 載荷前および除荷後における、左右支点付近および中央断面位置での直交 2 方向の直径の計測し、推定される断面形状を図-6 に示す。両ケースとも、支点部は端部の一体形でプリントした拘束治具の影響により円形を維持していたが、中央部では水平方向に潰れたような楕円形状になりながら鉛直方向の変位を吸収していた。CASE2 ではこの傾向がより顕著で、中央変位が 35mm 時に、長径と短径の比が 1.5 倍以上となった。

3.4 下縁鋼材の緊張力 各変位時における下縁 (No.1) の鋼線および上縁 (No.7) の鋼線の引き込み変位量変化を図-7, 図-8 に示す。下縁 (No.1) の鋼線は、CASE1 については荷重が増大するにつれてワイヤーの引き込み量が増大するが、CASE2 についてはあまり増大しない。逆に上縁 (No.7) の鋼線は、CASE1 については引き込み量の増大が見られないが、CASE2 については、荷重の増大に伴いワイヤーの引き込み量が増大した。この結果は、CASE1 は断面形状の変化が少ないために等断面で変形が進むため、下縁に配置した鋼材 (No.1) のほうが上縁に配置した鋼材 (No.7) よりも引き込み量が大きいことを示す。反対に、CASE2 ではスパン中央部で断面形状が楕円形に変形することで、下縁に配置した鋼材 (No.1) よりも、上縁に配置した鋼材 (No.7) のほうが引き込み量が大きくなったことを示す。部材間の遊間が大きくなることで断面形状が変化することで中央部の鉛直変位が増大したことになる。

4. まとめ

本試験より得られた知見は以下のとおり

- ・プレキャスト部材の遊間が広がることで、最大荷重で約 25%低下する
- ・プレキャスト部材の遊間が広がることで、部材の鉛直

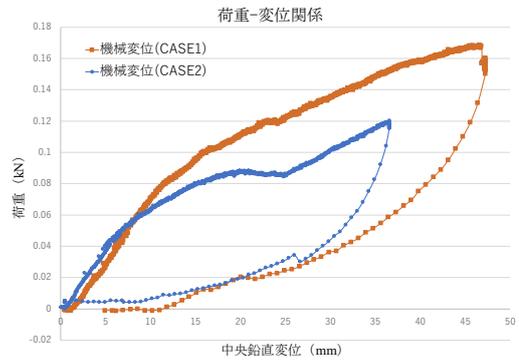


図-5 荷重－中央鉛直変位関係

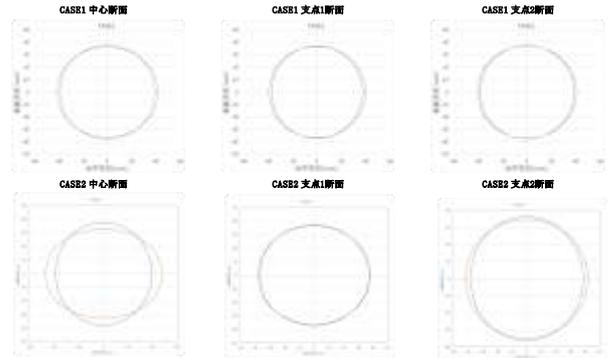


図-6 各変位時での断面形状

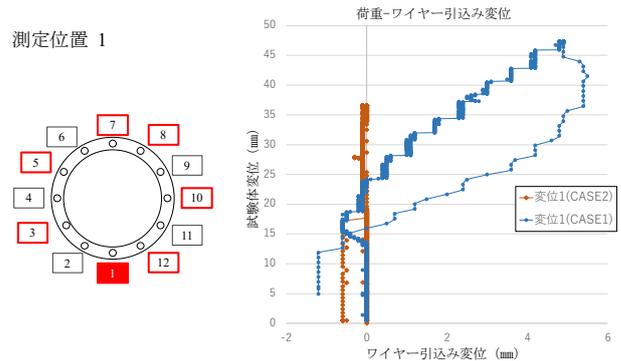


図-7 ワイヤー引込み変位 (鋼線 No. 1)

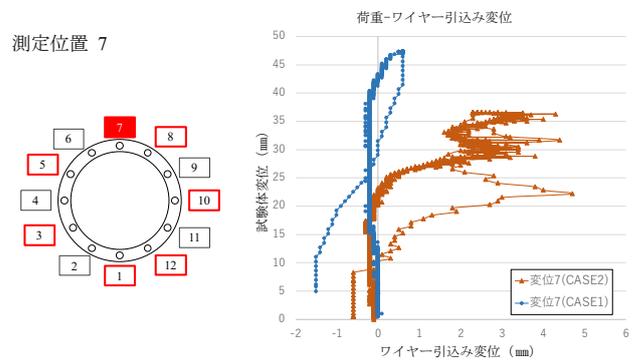


図-8 ワイヤー引込み変位 (鋼線 No. 7)

たわみ量を断面形状の変形により吸収する

参考文献

- 1) 井口重信ら；自動建設機械での施工に適したプレキャスト構造に関する実験的検討，土木学会全国大会年次学術講演会，Vol79，VI-88，2024