

東名多摩川橋床版取替工事にて施工シミュレータ「GEN-VIR」を活用

生産性向上とリスク把握に向けた取り組み

河 原 大 輔・酒 井 伯 文

(株)大林組とトヨタ自動車(株)未来創生センターは、現場作業員の疲労負担軽減や生産性向上を目的とした3DCGを用いた作業シミュレーション技術である、施工シミュレータ「GEN-VIR」の共同開発を進めている。本報では、これまでに開発してきた施工シミュレータの機能紹介と共に、STEP3（令和5年4月～7月に実施）とSTEP4（令和5年9月～12月に実施）の床版取替工事における、生産性向上とリスク把握に向けた取り組みについて紹介する。

キーワード：GEN-VIR, DX, シミュレーション, 工程計画, 生産性向上, リスクアセスメント

1. はじめに

建設・土木業界では就業者数の減少や高齢化が進んでおり、施工効率の向上と安全で負担の少ない作業への改善が求められている。実際の施工現場においては、着工後の工事進捗と共に作業が習熟し、また課題が具体化されることで、日々現場改善が図られ、生産性の向上が進んでいる。一方で、一品受注生産という特性上、事前に現場の課題を目で見ることができないため、着工前により具体的な改善を進めることは非常に困難である。そこで、事前に現場を可視化し、課題を抽出しながら改善につなげる手段として、(株)大林組とトヨタ自動車(株)未来創生センターは共同で、施工シミュレータ「GEN-VIR」（GEN-VIRはトヨタ自動車(株)の登録商標である。以下、本シミュレータ）の開発を進めている。

東名多摩川橋が位置する東京IC～東名川崎IC間は、交通量が10万台/日を超える重交通区間であり、従来のリニューアル工事のように車線数を減少させて工事を行った場合、大規模な渋滞の発生が懸念されていた。そのため、6車線をできるだけ確保しながら工事を行うためにSTEP1～5の施工ステップに分割して床版取替工事を実施した。床版取替工事は繰り返しの要素が多いため、自動車の生産工場で用いられているトヨタ生産方式(TPS)の考え方を応用することで、施工方法の効率化を図れる可能性がある。自動車製造で培われたTPSの考え方を施工現場に導入し、誰かの仕事を楽にすることを目指し、各工程に対して改善活動を推進した。

2. 本シミュレータの概要

本シミュレータは、(株)大林組とトヨタ自動車(株)未来創生センターが共同開発している3DCGを用いた作業シミュレーション技術である。現場作業員の疲労負担軽減や生産性向上を目的とし、バーチャル空間上で施工時の作業をシミュレーションすることができる。本シミュレータは、バーチャル環境を用いる3Dシミュレータ部、結果を可視化・分析するデータ分析部および、数理最適化によって工程順序を生成する最適化部で構成されており、以下の機能が備わっている(図1)。

- ①車両や施工機械などを3DCGで再現
- ②BIM/CIM等のデータから施工対象のデータを取り込み可能
- ③作業に要する時間と作業場所を入力することで、作業場所への移動と作業を実行する作業員・車両・施工機械モデルを実装
- ④移動経路は経路探索により環境に応じた最短経路を生成
- ⑤3D環境を観察し、次に実施すべき作業を自動で選択して作業員や車両・施工機械に指示することも可能
- ⑥各作業員の作業フロー、作業時の姿勢、危険源への暴露状態の状態をロギングし、シミュレーション内で実施した作業を時系列で可視化

(1) 3Dシミュレータ部

3DCGを用いて構造物・建機・作業員をバーチャル

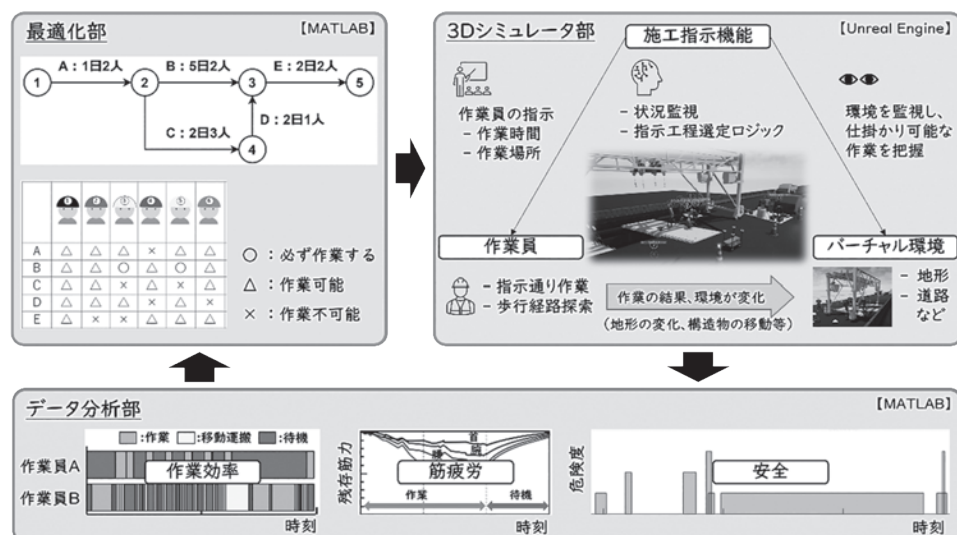


図-1 本シミュレータ概要

空間上で可視化する部分であり, Epic Games 社のゲームエンジンである Unreal Engine を活用している。本シミュレータは, Unreal Engine の持つプログラミング機能や豊富なライブラリ群を活用することで, 作業員や建機等の動作を定義することが可能であり, これにより多様な動きを表現している。

3D シミュレータは作業時間や作業場所等を定義し, 各作業の順序や担当者をプログラミングすることで, 各々のバーチャル作業員が, 独立・連携して作業を進めていくマルチエージェント型のシミュレータとなっている。シミュレーションの結果として, 各作業員の作業フロー, 作業時の姿勢, 危険源への暴露状態が, 後述する分析用のログデータとして出力される。

3D シミュレータにおける各作業情報の定義は, GUI 上で作業情報を定義できるようにし (図-2), また作業順序の指示は, Unreal Engine の持つプログラミング機能である Blueprint を活用して, フローチャートライクにできるようにシステムを構築した (図-3)。



図-2 作業情報設定画面



図-3 作業指示プログラミング画面

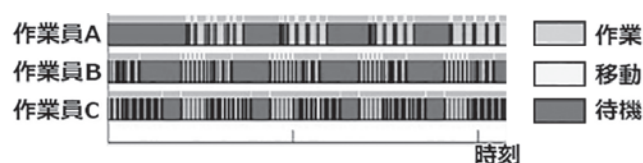


図-4 作業の時刻歴グラフ

(2) データ分析部

3D シミュレータ部の出力結果を可視化し, 分析時に活用する部分であり, 主に以下3つの機能を有する。

(a) 作業ムダの分析

施工効率を向上させるにはムダを排除していく必要がある。そこで, 各作業員の作業の時刻歴を【作業・移動・待機】に分類し可視化した (図-4)。これにより, ムダの量や発生しているタイミングを把握することができ, 作業順序や作業の割り付け, 人員数の具体的な検討が可能となる。改善を突き詰めることで, ムダを極限まで排除することができれば, 作業員の

方々は極力手を止めることなく作業し続けられるようになり, 施工効率は向上する。

(b) 筋疲労分析

前述したように, ムダを排除することで手を止めることなく作業し続けられるが, その結果身体的な負担が増加してしまうのは望ましくない。特に, 重筋作業が多い建設工事においては, より一層の留意が必要である。そこで, 各作業員の筋疲労をシミュレーションする技術を導入した。

3D シミュレータから出力される各作業員の作業姿



図-5 筋疲労算出フロー

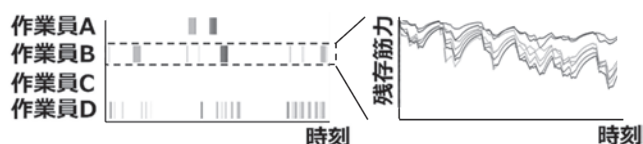


図-6 筋疲労の時刻歴グラフ

勢ログデータを用いて筋負荷を計算し、作業フローのログデータより得られる作業時間と併せて筋疲労モデルに入力することで、各作業員の部位（腕・腰等）ごとの筋疲労を時系列的に算出できる（図-5）。各作業員の筋疲労状態を可視化することで、疲労している身体部位の数量や身体部位ごとの筋疲労の推移を把握でき、身体的な負担も考慮した工程検討が可能となる（図-6）。

(c) 安全に関する分析

あらゆる現場において労働災害は起きてはならない事象であり、建設工事においては死亡につながる事例も多いため、より一層の対策が求められる。そこで、現場に存在する危険源に対して、作業員がどの程度、暴露されるかをシミュレーションするリスクの見える化機能を開発した。

3Dシミュレータ上で危険なエリアと、それに対応するリスクの情報を定義することで（図-7）、シミュレーション時に作業員が危険エリアに侵入したタイミングがログデータとして出力される。3Dシミュレータから出力された結果を基に、危険源への暴露履歴を可視化した（図-8）。これにより、災害リスクに作業員が接近するタイミングとその大きさを把握することができ、結果として事前の周知徹底や安全対策検討につなげることが可能になる。

(3) 最適化部

3Dシミュレータは工程計画に基づき、2.(1)に示す方法で工程情報を入力するが、工程計画は担当者の経験や知見に依存しており、必ずしも効率的な日程や人員配置になっていない。そこで、混合整数計画法を用いた工程計画を導入した。工期最短や人員最少等の多目的最適化を実現するため、工程のリードタイムや



図-7 危険エリアの定義



図-8 危険源への暴露履歴の可視化

○:必ず担当する △:作業できる ×:作業できない

作業員	1	2	3	4	5	6	誰か同じ人
工程							
A	△	△	△	×	△	△	
B	△	△	○	△	○	△	
C	△	△	×	△	×	△	=
D	△	△	△	×	△	×	=
E	△	×	×	△	△	△	

C工程とD工程は同じ人が担当

図-9 最適化へ入力する現場知見

作業間の依存関係、リソース制約を元に最適化で導出した工程計画を提案できる。各作業員の職能（担当可能な作業）と、連続作業（同じ人に担当してほしい作業）を最適化の制約条件として追加することで（図-9）、現場の知見を織り込んだ最適化を実現する方法を構築した。

3. 東名多摩川橋床版取替工事における取り組み

東名多摩川橋床版取替工事は、東名高速道路の東京IC～東名川崎IC間における東名多摩川橋（上下線）の床版取替を行う工事である。道路横断方向にステップを5分割し、上下6車線を供用しながら作業を進めていくなかで（写真-1）、日々の進捗を確保するためには作業員及び元請職員が早出や長時間に及ぶ残業を繰り返しているのが実状であった。そこで要因として考えられた項目を抽出し、施工シミュレータを活用した施工改善を実施した。



写真—1 東名多摩川橋空撮写真

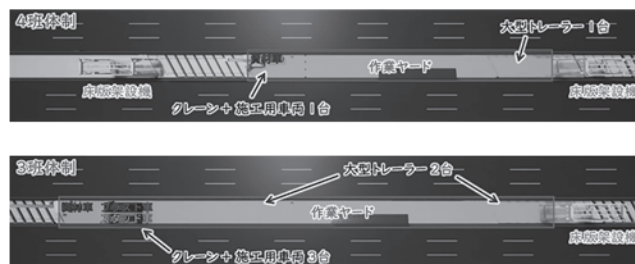
(1) 施工シミュレータを活用した施工班数の見直し

STEP1, STEP2 では工程短縮を目的に、配置可能な最大の施工班数として4班体制での施工を採用していたが、STEP1, STEP2と同様に4班体制にて3枚/日・班で施工した場合、車両入退場に伴う待機時間が約3時間/日・班発生し、所定の労働時間（昼作業、夜作業ともに8時間）以内で作業を完了させるには2枚/日・班の施工が現実的であることがわかった。さらに、STEP3は常設作業帯が上下線中央部に位置するため、走行速度が速い追い越し車線を利用して工事車両を入退場させる必要があり、車両入退場時の衝突事故の発生リスク上昇も懸念されていた。

高速道路上で行う床版取替工事では、常設作業帯が確保できる場合にはより多くの工事車両を残置しておくことが待ち時間や移動時間の削減のために効果的である。しかし、床版取替の進捗に合わせて床版架設機が前進し、床版搬入出のための大型車両を出し入れする作業ヤードは最低限確保する必要があるため、その他の車両を残置させるためのスペース確保は困難になる。

車両入退場に伴う待機時間を改善し、より効率良く施工を行うため、4班体制と3班体制の車両配置シミュレーション比較を行い（図—10）、最適な工事車両配置や車両入退場回数の削減、有効な車両待機場所などを考慮した計画の見直しを実施した。

3班体制では、施工エリアを有効活用した最適な車両配置により、車両入退場回数が減り、入退場に伴う待機時間を大幅に削減できることで、3枚/日・班の施工が実現可能というシミュレーション結果が得られた。また、全体での工事車両入退場回数は32回から12回に削減できるため、一般車両との衝突事故発生のリスクを大幅に削減できることも確認した（表—1）。さらに、発注者への説明に検討したシミュレーション動画を活用することで、3班体制への変更により生産性や安全性が向上し、働き方改革にも寄与することを理解していただき、班数の変更を実現した。



図—10 4班体制と3班体制のシミュレーション比較

表—1 4班体制と3班体制の実施工時間比較

班体制	1日あたりの 施工時間	車両入退場の 回数	車両入退場に 伴う待機時間
4班体制	19時間20分	32回	185分
3班体制	16時間00分	12回	15分
	▲3時間20分	▲20回	▲170分

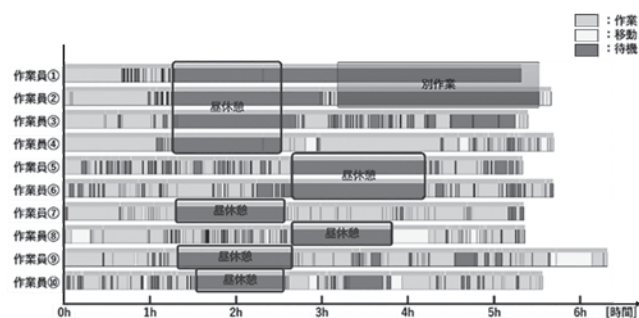
実施工では、シミュレーション結果と概ね同様に施工可能であることを確認し、車両入退場に伴う待機時間の大幅な削減を実現した。STEP1では約3時間/日の残業を繰り返すサイクルとなっていたが、STEP3ではほぼ残業のないサイクルとなり、より効率的で安全な施工を実現した。

(2) 施工サイクルの最適化

日々、床版取替工事を繰り返し行っていく中で、施工班間で作業員数、作業手順、施工時間に大きな差が発生していたため、その要因を明らかにし、施工班間の差を埋めるための施工方法の改善が求められていた。現状の作業員の動き（移動や休憩時間等を含む）を記録・分析し、施工時間が長くなる班の傾向を確認した（図—11）。分析の結果、施工時間が長くなる傾向にある班の特徴は以下の通りであった。

- ①同じ作業に集中している時間が短い（中途半端な状態で次工程に移る等）
- ②担当作業が明確になっておらず、手待ちになるときがある
- ③次作業の段取りができていない場合がある（作業の途中で工具を取りに行く等）
- ④作業の流れや進捗を全員で理解できていない
- ⑤休憩時間がバラバラでチーム全体の作業効率が良くない

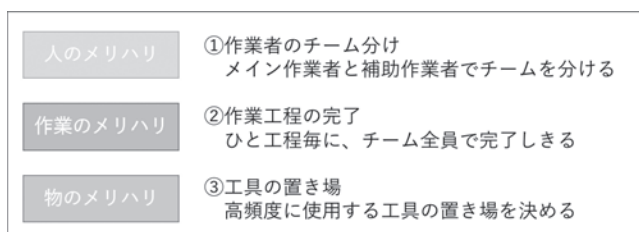
対象班の施工サイクルを改善するため、施工シミュレータにて理論上最適な施工サイクルを検討した（図—12）。一方で、作業員にはそれぞれの施工経験があり、単純に現場に反映させることは難しいと考え、班毎の作業効率に大きく差が生じていた床版撤去完了後の足場設置～ケレンまでの一連の作業を対象に、作業を整



図—11 改善前の実作業ログ



図—12 切り作業のシミュレーション

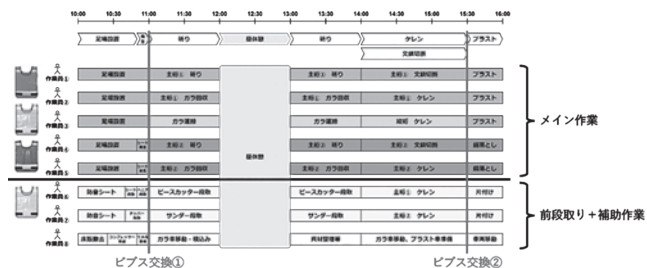


図—13 作業を整流化するためのルール

流化するためのルールを作業員に提示した (図—13)。

提示したルールを現場に反映しやすくするため、トヨタ自動車(株)のかんばん方式を参考にし、作業員には色付きビブスを着用して作業を実施した。ビブスを着用することにより、班の中での個々の役割を意識付け、誰がどこでどの作業をするかを明確にし、作業中のメリハリをつけられるようにした (図—14)。

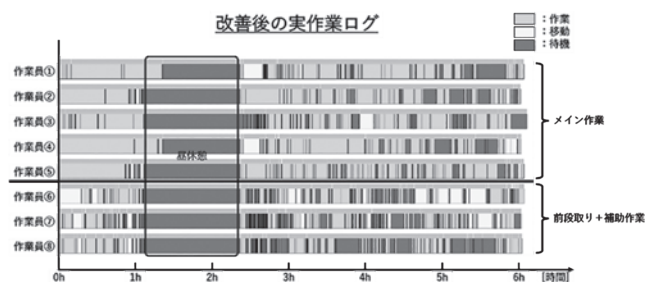
足場設置～ケレンまでの一連の作業において、改善前は「中途半端な状態で次工程に移る」「担当作業が明確になっていない」「次作業の段取りができていない」「休憩のタイミングがバラバラ」等、作業内容に無駄が生じていたが、適切なルールを設定し、それに沿って作業した結果、「ひと工程毎に完了させた」「担当作業が明確になった」「次作業の段取りができていない」「休憩のタイミングが同じ」等、作業の整流化によって作業のムダを改善し、効率の良い施工サイクルを実現した (図—15)。施工初期の延べ労働時間と比較す



図—14 整流化した施工サイクル



図—15 整流化された作業

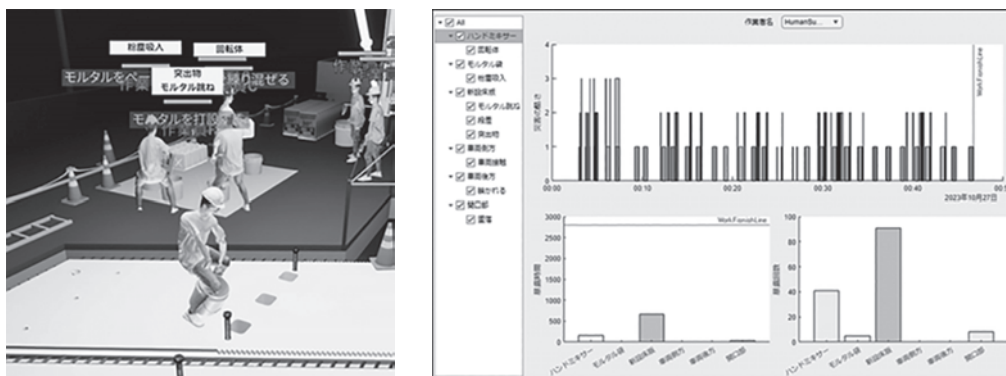


図—16 改善後の実作業ログ

ると、約 20% の省力化を実現できており (図—16)、施工シミュレータの適用により理想の動きに近づけることができた。また、職長や作業員からは、「作業に集中しやすくなった」「区切りが明確で都度達成感がある」「工程間のつながりが早くなった」といった声も上がり、施工シミュレータを活用した改善は、納得性の高い施工サイクルの構築につながることを確認した。

(3) リスクの見える化機能を活用した労働災害防止活動

STEP1～3の施工経験から作業の習熟度が高まる一方で、日々のサイクル作業に慣れたことで安全への意識が低下することが懸念されていた。現場のリスク把握を目的としたリスクの見える化機能により、経験が少ない人でも事前に、作業内容とそれに伴うリスクを把握することで (図—17)、より具体的な安全対策



図ー17 リスクの見える化（シミュレーションとリスク分析）



写真ー2 現場での労働災害防止活動

の検討に繋がるため、シミュレーション動画を活用した労働災害防止活動を実施した（写真ー2）。

職長や作業員からは「紙や写真よりも具体的でイメージしやすい」「俯瞰視点から確認できるので危険な箇所が分かりやすい」といった意見があった。リスクの見える化機能を活用することで、事前に作業内容とそれに伴うリスクを全員の共通認識として把握することができ、より具体的な安全対策の検討に繋がり、安全意識の向上に効果があることを確認した。

4. おわりに

東名多摩川橋床版取替工事にて施工シミュレータ「GEN-VIR」を活用した生産性向上とリスク把握に向けた取り組みを通して、様々な知見や課題を把握しながら施工シミュレータの技術開発を進めることができた。また実際の改善結果や現場からのコメント等から、これらの機能が現場改善にニーズがあり、一定の効果を発揮することが確認できた。一方で、各々の機能の性能について現時点で不十分であることや、よりスピーディな現場改善や効果検証のためには、実作業分析の効率化が必要であるという課題も確認できた。

今後もより良い建設現場の実現に向けた技術開発を進めていく。

謝 辞

筋疲労計算および作業改善に関して、豊田中央研究所の関係各位より助言をいただいた。また、NEXCO 中日本ならびに東名多摩川橋 JV 工事事務所関係者の方々に多大なご協力を頂戴した。ここに深く感謝申し上げる。

JICMA

《参考文献》

- 1) 河原ほか、「施工シミュレータ適用によるバーチャル現場の構築」、配管技術 2023 年 10 月号
- 2) 「もっといい工程をつくろう 工程シミュレータでバーチャル現地現物～リスクの見える化と工程の最適化～」、ウェブページ (<https://global.toyota.jp/mobility/frontier-research/40465130.html>)
- 3) 「東名リニューアル工事にて施工シミュレータ「GEN-VIR®」を活用」、ウェブページ (https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20240322_1.html)
- 4) 酒井ほか、「施工シミュレータの開発～実施工への活用に向けて～」、第 6 回 i-Construction の推進に関するシンポジウム、2024 年 7 月
- 5) 櫻田ほか、「施工シミュレータを用いた床版取替工事の改善（その 1）～安全で効率的な班体制と作業フローの事前計画～」、令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会、2024 年 9 月

【筆者紹介】

河原 大輔（かわはら だいすけ）
 (株)大林組
 技術本部 技術ソリューション部
 主任



酒井 伯文（さかい のりあき）
 トヨタ自動車(株)
 未来創生センター R-フロンティア部
 生産革新研究領域
 生産革新グループ長

