

## (53) 低速インターネット通信環境下における デジタルツイン利用環境の構築

佐藤 功一<sup>1</sup>・石田 仁<sup>2</sup>・藤田 真司<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 ペンタテクノサービス株式会社 技術部 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

E-mail: satou-k@penta-techno.co.jp

<sup>2</sup>正会員 五洋建設株式会社 ICT 推進室 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

E-mail: hitoshi.ishida@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>3</sup>正会員 五洋建設株式会社 ICT 推進室 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

近年、建設現場ではデジタルツインが活用されつつあるが、その際には光回線や 5G 回線などの高速なインターネット通信環境が必要となることが多い。一方、現状は高速な通信環境の確保が難しい現場も多く、しばしばデータ登録や閲覧時にデータ転送や表示の遅延により操作性が低下する。本研究では、インターネット回線が低速な場合にも、高機能なデジタルツインを実現できる現場通信環境の構築を試みた。現場通信環境と活用する各種データ容量を鑑み、坑口へのエッジサーバの設置や光ファイバー等を組み合わせた柔軟なネットワーク構成と運用方法を考案したことにより、低速インターネット環境下においても、現場から常時、かつ円滑にデジタルツインを活用できる環境を構築することができた。

**Key Words:** digitaltwin, iot sensor, LoRaWAN, wifi, edgserver

### 1. はじめに

建設現場では、現場の施工情報を BIM/CIM モデルにリアルタイムに反映し可視化することで、遠隔地から現場の状況を把握し、多様な分析を行うデジタルツイン（以下 DT と略す）が活用されつつある<sup>1)2)</sup>。DT を活用するためには、光回線や 5G 回線などの高速なインターネット通信環境が必要となることが多い。一方、現状では、高速な通信環境を確保するのが難しい現場も多く、特に土木工事においては、工事を行う地域に通信インフラが行き届いていないケースも多い。本研究では、実際の施工現場において利用可能な通信規格が 4G 回線に限られる低速なインターネット通信環境下でも、高機能な DT を実現することが可能な現場通信環境の構築を試行した。ここで、高機能とは、協力会社も含めた様々な関係者が、BIM/CIM モデル等のデジタル空間を共有するだけでなく、施工中の日常管理を目的とした状況写真や動画などをタイムリーに共有可能な機能のことを意味する。また、発注者が遠隔から施工の状況を確認することを可能とするものである。

本研究で試行した現場は「平成 29-32 年度見の越トンネル工事」である。（図-1 参照）



図-1 工事現場位置図

試行現場における外部通信速度は、上り 5Mbps～8Mbps、下り 13Mbps～86Mbps(試行期間における実測値)である。外部通信が低速であることから、ブラウザによるデータの登録や、容量の大きいコンテンツの閲覧が利用者の操作性を損なうと予想し、対策を講じることとした。

表-1 機能要件

機能	説明
施工管理情報	切羽写真, 打撃試験動画音声の連携
IoTセンサ連携	IoTセンサーの測定値のリアルタイム連携
チャットアプリ	現場と関係者間の連絡用のチャット機能

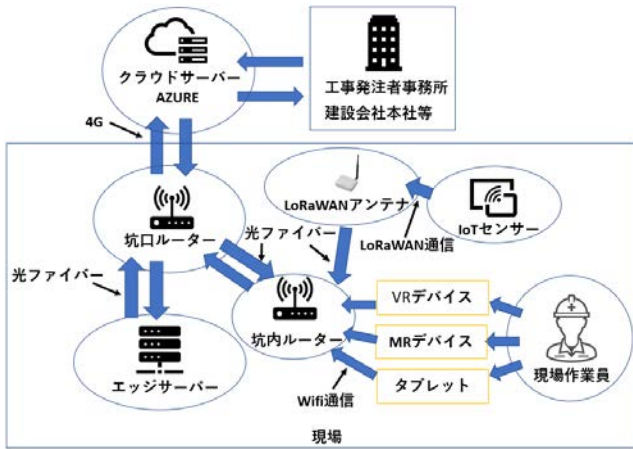


図-2 システム概要

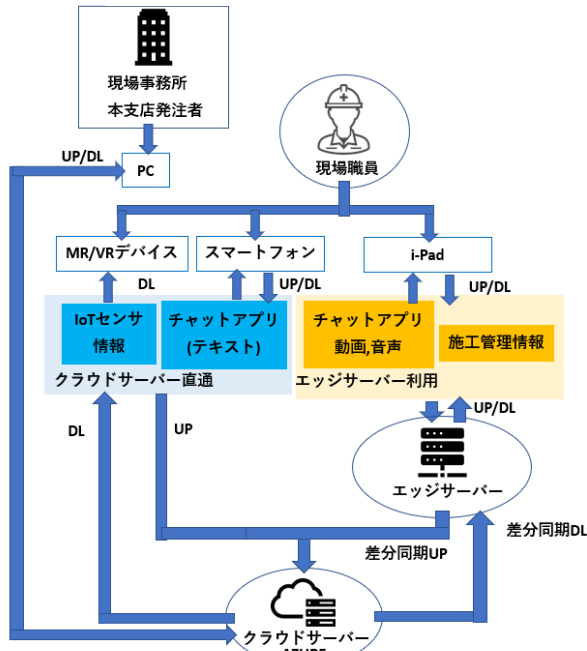


図-3 データの流れ

## 2. システム概要

### (1) DT の機能要件

本試行における DT の機能要件を表-1 に示す。本試行では表-1 に示した通り、IoT センサ情報や施工管理情報を DT に登録する。現場担当者と調整した管理項目と通信頻度、システム構築にあたって想定したデータ容量を表-2 に示す。

### (2) システム構成

システムの概要を図-2 に、システム構成を表-3~6 に示す。

表-2 使用機能の通信頻度とデータ容量

使用機能	通信頻度	データ容量
切羽写真	随時	8Mbps
打撃試験動画	随時	36Mbps
打撃試験音声	随時	6.4Mbps
IoTセンサ	随時	0.0352Mbps
チャットアプリ	随時	数kb

表-3 使用通信方式

通信構成	速度理論値
4G	50Mbps-1Gbps
光ファイバー	100Mbps-100Gbps
Wifi通信	5GHz : 1201Mbps 2.4GHz : 574Mbps
LoRaWAN	250bps-50kbps

表-4 利用端末一覧

デバイス構成	デバイス名	台数
VRデバイス	MetaQuest2	1個
MRデバイス	HoloLens2	1個
タブレット	ipad	作業員数分
PC	各メーカー端末	作業員数分
スマートフォン	各メーカー端末	作業員数分

表-5 通信機器一覧

通信機器構成	機器	台数
坑口ルーター	NEC Aterm HT100LN	1台
坑内ルーター	TP-LINK AX20/55	6台
エッジサーバー	Raspberry Pi4	1台
LoRaWANアンテナ	Senseway SW-GW01	6台

表-6 IoT センサー一覧

IoTセンサ名	必要データ容量(Mbps)	個数
扉センサ	0.0016Mbps (上り)	1個
コントラファンセンサ	0.0016Mbps (上り)	1個
熱煙検知	0.0016Mbps (上り)	1個
作業員のバイタルセンサ	0.0016Mbps (上り)	10個
水質センサ	0.0016Mbps (上り)	1個
漏水センサ	0.0016Mbps (上り)	1個
熱電対	0.0016Mbps (上り)	1個
粉塵センサ	0.0016Mbps (上り)	6個

利用者が DT を活用するにあたり、端末として PC, iPad, スマートフォン, VR デバイス, MR デバイスを用いた。

これらの利用方法とデータの流について、図-3 に示す。

### (3) 各種データ同期方法

本試行現場では、図-3 に示すようにデータの種類によってクラウドとの通信方法を変えている。通信容量の小さい IoT センサはクラウドに直接データを送信するが、容量の大きい写真、動画、音声データについては坑内に設置したエッジサーバーに一旦格納し、その後エッジサ

表-7 機能別データ同期タイミング

エッジサーバー使用機能	データ同期タイミング
切羽写真連携	特定の時間に差分を同期
打撃試験動画連携	特定の時間に差分を同期
打撃試験音声連携	特定の時間に差分を同期
チャットアプリ(写真, 動画)	特定の時間に差分を同期
チャットアプリ(テキスト)	随時

表-8 一般的な坑内通信の課題

通信方法	通信速度	課題
Ethernet (100BASE-TX等)	100Mbps	ノード間の距離が100m以内と短く、多段接続を行うと遅延が生じる
Wifi	IEEE802.11ax:9.6Gbps IEEE802.11ac:6.9Gbps	設置間隔を延ばしすぎると安定性が低下する <sup>6)7)</sup> 多段接続を行うと遅延が生じる
DSL (Digital Subscriber Line)	50Mbps	長距離に対応できるが通信速度が遅い



図-4 現場配置機器

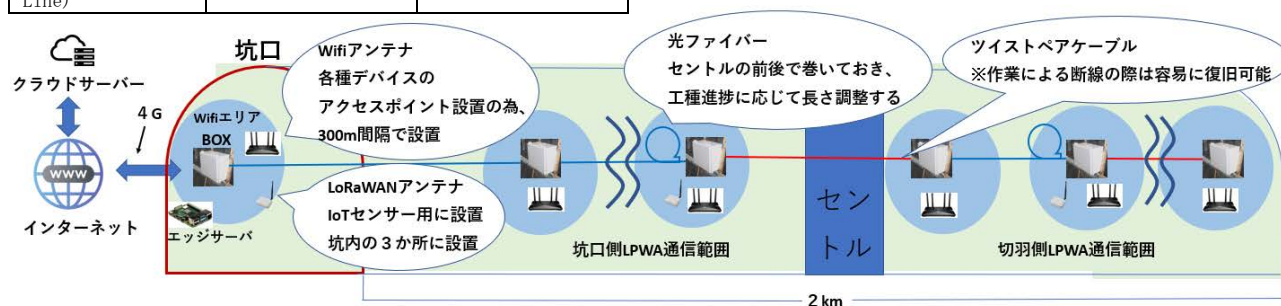


図-5 坑内の通信機器構成と配置概要

サーバーとクラウド間で自動同期を取ることによりデータ送信する仕組みとした。

エッジサーバーとクラウドサーバーのデータ同期タイミングは表-7 に示す。ここに示した通り、容量の小さいテキストデータと容量の大きい写真や動画が混在するチャットアプリもエッジサーバーを利用するものとしたが、即時性が求められるテキスト部分はリアルタイムにクラウドと同期、写真や動画については、他の通信を阻害しないよう通信の空きを利用して同期を取るものとした。

また、日々の切羽写真や観察記録を登録する iPad のローカルアプリケーション(自社開発の切羽観察簿)も利用したが、この場合は iPad に蓄積した更新データをバックグラウンドで自動的にクラウドに送信するため、エッジサーバーを使用せずとも、利用者の操作は通信速度に阻害されない。

#### (4) 現場通信環境の構築

トンネル現場では電源が不安定になるケースが多いことが、過去の事例からわかっている。そのような環境で通常の PC を使用すると故障のリスクが高いため、エッ

ジサーバーには電圧の変化に耐久性のある Raspberry Pi4 を使用した。実際に設置したエッジサーバーを図-4 に示す。坑内の通信環境として、光ファイバー(100BASE-LX)と LoRaWAN アンテナを用いた坑内通信ネットワークを構築した。光ファイバーを選定した理由としては、通常の坑内の通信環境として用いられる Ethernet(100BASE-TX 等)、DSL(Digital Subscriber Line)、Wifi 等に、それぞれ表-8 に示す課題があるのに対し、光ファイバーは長距離の通信に対応し、かつ通信速度が早く遅延が生じないためである。

また、LoRaWAN を選定した理由としては、電源が確保しにくい現場において、少ないアンテナで現場全域がカバーできることや、IoT センサの低消費電力化が可能のため、電池やバッテリー駆動を用いて現場の任意の場所にセンサを配置することが可能となるためである。

上記の内容を基に構成した、坑内通信機器構成と配置概要を図-5 に示す。

坑内では、セントルと切羽付近において毎日作業箇所の移動が発生し、移設作業時にケーブルの断線が起きやすい。そのため、セントルと切羽付近は断線が生じた際にも容易に復旧が可能なツイストペアケーブルを用いる



写真-1 設置状況



写真-2 移動時(セントル移設時)

こととし、セントル前後の光ファイバーは巻いて置き、(写真-1 参照)作業箇所の移動に対応可能な配線とした。(写真-2 参照)これにより、坑内の Wifi アクセスポイントの移設も容易となった。

### 3. 適用結果

以下の通り目標とした通信環境の構築を行うことが出来た。

- ・エッジサーバーの配置とエッジサーバーを利用するデータ通信を精査することで、トンネル坑内においても操作性を損なうことなく DT を活用することが可能となった。
- ・LoRaWAN を利用することで、試行現場の坑口から切羽までの 2km の区間の任意の場所に IoT センサを配置することが可能となり、区間全域で IoT センサデータの収集が手軽に行える環境を構築できた。
- ・幹線に光ファイバーを併用し、トンネル内での敷設や移設方法を検討することにより、高速な坑内通信を安定して供給することが出来た。

### 4. おわりに

利用するデータ通信の種類に応じて坑口に設置したエッジサーバーを活用することで低速なインターネット通信環境であっても、坑内配線に光ファイバー等を組み合わせた柔軟なネットワーク構成を採用することにより、工事の進捗に合わせて移設が容易となり、常時 DT を活用可能な環境を構築することができた。今後も、通信環境に課題がある現場を対象とし、機器構成や配置、運用の見直し、エッジサーバーの使用機能、データ同期タイミング、選定する IoT センサの精査を実施することで、

円滑な DT 活用を目指していきたい。

**謝辞：**本研究は 2021 年度国土交通省「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」の助成を受けた。また、実施にあたり、国土交通省四国地整局山鳥坂ダム工事事務所から多大なご協力を受けた。ここに記して感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) 小林崇, 赤松輝雄, 保田敬一, 平原幸男, 金野幸治, 藤本美枝子: BIM/CIM と ICT を活用した PC 中空床版橋における品質管理の高度化について, 土木学会第 76 回年次学術講演会, VI-714, 2021.
- 2) 福田毅, 吉河 秀郎, 佐ノ木 哲: デジタルツインを基本とした地山予報(地下水環境常時予測)システムの開発, 土木学会第 76 回年次学術講演会, VI-198, 2021.
- 3) 石井 喬之, 片山 三郎, 畠山 峻一, 黒羽 陽一郎, 原山 之克: デジタルツインによる現場可視化技術の開発(その 1)~ マネジメント支援に向けたプラットフォームの構築~, 土木学会第 75 回年次学術講演会, VI-633, 2019.
- 4) 太田 兵庫, 平出 敬信, 黒羽 陽一, 郎原山之克, 鴨居 隆, 網本 明洋: デジタルツインによる現場可視化技術の開発(その 2)~ 桜川ダムにおける遠隔立会・打設当番の試行~, 土木学会第 75 回年次学術講演会, VI-634, 2019.
- 5) 若林 良幸, 富田 隆司, 保田 敬一, 辻井 祐, 金野 幸治, 町田 浩三: BIM/CIM と ICT を活用した橋梁工事における品質管理の高度化について, VI-713, 2021.
- 6) 市澤 佑樹, 上野 裕太, 藤田 真司, 石田 仁: 山岳トンネル坑内におけるメッシュ型無線 LAN の適用性の検証, 土木学会第 76 回年次学術講演会, VI-16, 2020.
- 7) 森 英治, 松尾 健二: 公共通信網未整備地域における広域対応型情報化施工の試みについて, 平成 28 年度近畿地方整備局研究発表会論文集, No-6, 2016.