

平成30年度

技術発表会

平成30年11月20日

場所 名古屋市中小企業振興会館 会議室

一般社団法人 日本建設機械施工協会中部支部

《 目 次 》

- 1 スマコンアプリ上で実現する運行管理・工事現況把握と進捗管理
～クラウドシステムを使った運行管理（トラックビジョン）
・現況把握（エブリディドローン）のご紹介～ 1
コマツカスタマーサポート株式会社 児玉 浩 氏

- 2 ハンディ型レーザースキャナの活用
－ 非 GNSS 環境下で取得可能な 3 次元データの
最新の精度検証と施工への活用について － 7
株式会社アスコ大東
技術本部 楠本 博 氏

- 3 土木施工業界は VR 技術により「想像」から「体感」へ
～ i-Construction・CIM の普段使い～ 13
福井コンピュータ株式会社
中部営業所 山崎 健太郎 氏

- 4 急傾斜地における土留め「竹割り型土留め工法」
－ 平成 28 年度 153 号新郡界橋下部工事 － 19
太啓建設株式会社 鬼頭 進一 氏

- 5 先端非破壊検査手法によるコンクリート構造物の劣化評価
－ コンクリート構造物長寿命化のための診断技術 － 25
京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻
インフラ先端技術産学共同講座 特任助教
一般財団法人東海技術センター
事業統括本部 部門長 奥出 信博 氏

論文をカラーでご覧になりたい方は、当支部ホームページに掲載してありますのでご覧ください。

スマコンアプリ上で実現する運行管理

・工事現況把握と進捗管理

～クラウドシステムを使った運行管理(トラックビジョン)・現況把握(エブリディローン)のご紹介～

コマツカスタマーサポート株式会社

児玉 浩

1. コマツのスマートコンストラクション

建設現場の「安全性の向上」「生産性の向上」「労働力不足の解消」などの建設現場における課題から生まれたコマツの新たなダントツソリューションサービス「スマートコンストラクション」は、建設現場に関わる「人」「建設機械」などの情報をICTでつなぎ、現場を「見える化」し安全で生産性の高いスマートな「未来の現場」の実現を目指しています。

現場の「最適化」を実現するアプリのプラットフォーム SMARTCONSTRUCTION CLOUDを利用したコマツが提案する、新たな商品についてご紹介致します。



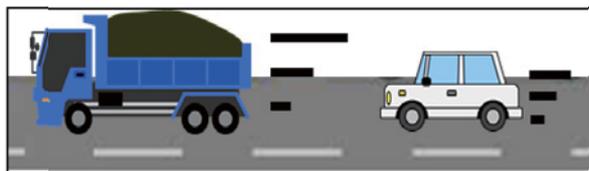
2. トラックビジョン

現場で稼働するダンプトラックや建機、作業員の位置情報までを一元管理し、作業実績が見えるトラックビジョンについて

① すべてのダンプトラックの位置情報（運行状況）を瞬時に確認

従来手法

以下のように目視によりダンプの運行状況の確認を行う。



運行経路追跡パトロール状況

従来手法によるダンプトラック運行管理は現場監督による安全パトロールや運行経路内の危険箇所へ誘導員の配置など実施。

目視だけではダンプトラック全てをリアルタイムで稼働状況を把握するのは困難です。

TRUCK VISION活用

ダンプ位置情報をリアルタイムに共有
～ダンプトラック・建機位置表示機能～



位置情報は3秒に1度更新

全てのダンプの運行履歴を日々管理
～運行履歴の表示機能～



※過去の進行速度を閲覧可能

トラックビジョンを活用することで、ダンプトラックや建機の位置情報をリアルタイムに見える化し、共有することができます。また、ダンプトラックの正確な運行履歴を保存します。そして接近通知やアラート機能で効率的かつ安全な運行を支援いたします。

② 運転手へ運行経路の周知、危険個所の注意喚起の徹底

従来手法

運行経路や危険個所を運転手に
運搬時におけるルールの周知を行う。



運行前の周知会及び合同安全教育状況



従来では、工事前にドライバーを集め、経路、危険個所等を周知したり内容を纏めた紙の資料を渡し、教育されていたと思われます。

TRUCK VISION活用

運行経路を表示リアルタイムに共有



運行ルート上の危険ポイントで
アラートを鳴るよう設定し、注意喚起
～アラート鳴動設定機能～



20キロ制限です	すれ違い待ちエリアです
25キロ制限です	ポイントに接近
30キロ制限です	一時停止してください
40キロ制限です	一般車両歩行者に注意してください
45キロ制限です	減速してください

運転手の運搬経路遵守、安全運転意識向上を実現

・運行ルート上に危険ポイントを設定すれば、アラートを鳴らしてドライバーへ注意喚起を行うことができる為、アラートを鳴らしてドライバーへ注意喚起を行うことができる為、運搬経路厳守や、安全運転意識向上を実現することが可能になります。

③ 運転手同士でダンプトラックの位置情報を共有し、構内入場時での混雑を防ぐ

従来手法

ダンプトラック誘導状況



ダンプトラックの混雑を防ぐために
誘導員を配置し、車両間隔の調整を行う。

TRUCK VISION活用

ダンプの運転手がお互いの位置情報を確認し、間隔調整に活用



建機・誘導員側でダンプの接近を把握
～ダンプ接近通知機能～



通知により積み込む準備ができ効率良く
施工を行い、積み込場周辺での混雑を回避する

- ・ドライバー同士がダンプトラックの位置情報を共有することで、構内入場時の混雑を防ぎます。
- ・今までは、誘導員により、車両間隔の調整を行っていましたが、TRUCK VISIONでは自分のダンプ位置情報だけでなく、全てのダンプの位置情報が共有できるので間隔調整が、図のように可能になります。
- ・また、誘導員や建機もスマートフォンを持てば、ダンプが近づいてきた時、接近通知を受け取ることが出来ますので、建機は積込みの準備、誘導員は段取り変え等を、効率よく実施できるようになります。

3. ペイロードメータ

積込み作業時でのダンプトラック積載量の見える化を図ります

①積載量を見える化し積載量を最大にまで高める

従来手法

積荷姿で積載量推測や積込回数で管理
といった方法しかなかった



- ・従来は積荷姿の目測や、積み込回数からの推測で重量を管理していた為、若手とベテランの経験による差がありました。

ペイロードメータ活用

1杯ごとの積載量や満載までの残量が可視化される



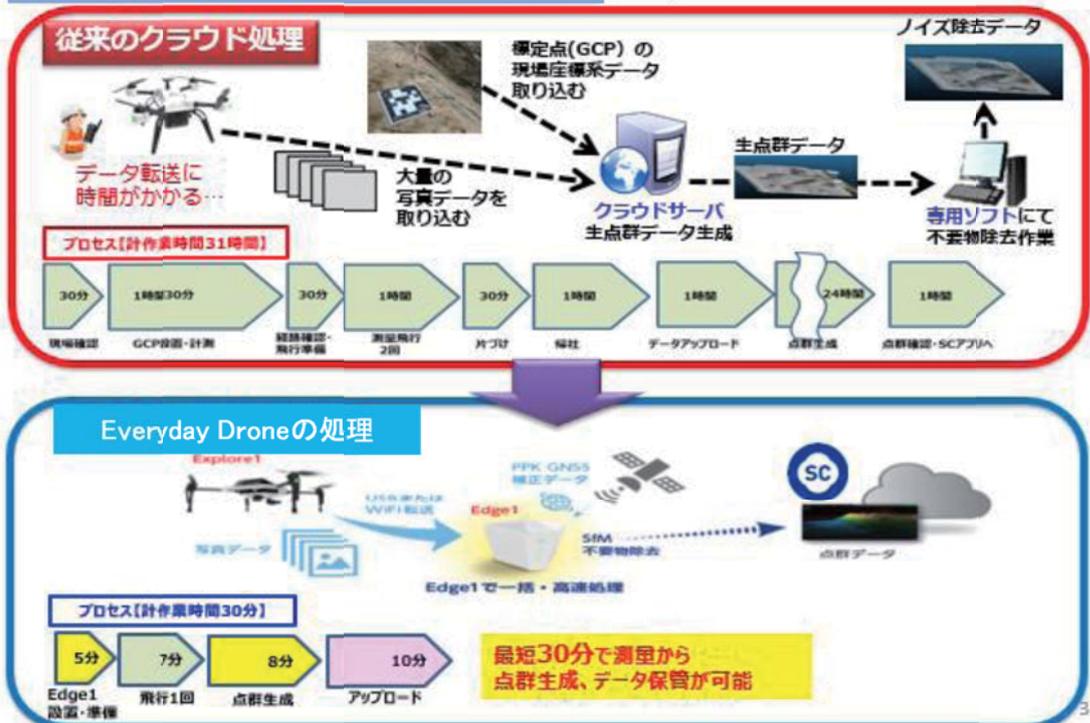
・ペイロードメータではリアルタイムに積載量が見える化されるので、経験に頼らず積載量を最適化することができます。

4. エブリデイドローン

最新型ドローンを利用し、ボタン一つで簡単に土量を計測致します

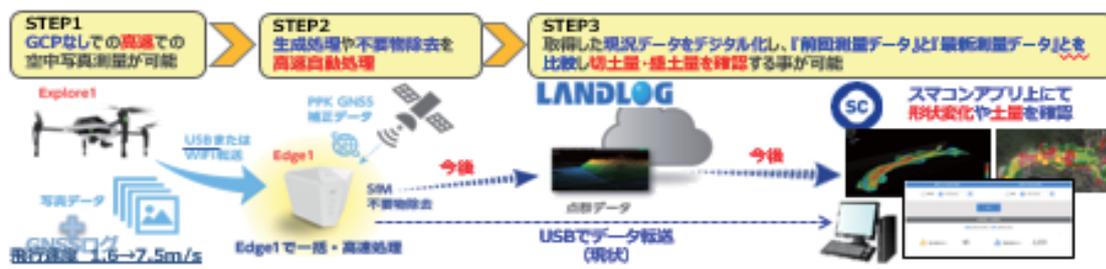
従来UAV測量とEveryday Drone比較

(20,000㎡の面積を測量した場合)



・従来は、GCPを設置し、UAVを飛行させ、写真データをサーバーにアップロードし点群化不要物除去のプロセスを経て、成果物としておりましたが「Everyday Drone」はそれらのプロセスを自動化することに成功致しました。

エブリデイドローン作業プロセス



・「Everyday Drone」は、自動運航する専用ドローン「Explore1」と、現場で高速にデータ処理ができるGNSSベースステーション「EdgeBox」を使い、これまで丸一日かかっていた現場の3D現況測量データ生成を約30分で完了させる新サービスです。

これにより、誰でも毎日簡単にドローン測量ができ、現場の進捗管理に大きな進化をもたらします。

ハンディ型レーザースキャナの活用 —非 GNSS 環境下で取得可能な 3 次元データの最新の 精度検証と施工への活用について—

株式会社アスコ大東
技術本部
楠本 博

1. はじめに

近年、地形地物を 3 次元で計測する手法の技術開発が進んでいる。工業製品の加工などでは 3D スキャナや 3D プリンターの普及がこれまでも進んできたが、土木分野では特に i-Construction の施策が後押しする形で、起工測量や出来形管理などで 3 次元計測をフィールドへ適用する研究、開発が一気に進んできた。さらに、近年増加する一方である大規模な台風や豪雨などの自然災害に対する調査などにも利用されるなど、より一層の技術開発が加速している状況である。

ここでは、これらの中で、今後、注目すべき技術として、非 GNSS 環境下で 3 次元データを取得できるハンディ型レーザースキャナについて、当社で行った精度検証と今後の建設分野での活用シーンについて考察した。

2. 3 次元計測の種類と活用シーン

現在、利用されている 3 次元計測の技術を建設分野に限定して、主にセンサー別に簡単にまとめたものが表-1 である。手法としては大きくセンサー別に一次取得できるデータの種類の分けことができ、代表的なものとしてはレーザースキャナによる点群とカメラによる写真である。

表-1 3 次元計測方式

一次取得データ	一般的な呼称	利用するセンサーと制御機器類	地理座標が必要な場合の前処理	3次元モデル作成のための後処理	活用シーン
点群	MMS※1	レーザースキャナとGNSS※4やIMU※5などの地理座標取得や姿勢制御機能を有した機器の組み合わせ	原理的にはGNSSにより付与可能。ただし、長距離や広範囲では既知点設置が望ましい	精度向上のための点群の全体調整	道路や河川堤防など、延長のある区間の周辺環境を3次元で復元。維持管理等に活用。
	UAV搭載レーザースキャナ				広範囲な地形測量に適用。現在は土工事の起工測量にも活用。
	固定式レーザースキャナ	レーザースキャナのみ	既知点設置が必要		高精度で3次元計測できるため、地形測量や、建築の屋内計測にも活用。
	ハンディ型レーザースキャナ※2	基本はレーザースキャナのみ	既知点設置が必要		SLAM(リアルタイム)※6
写真	カメラ(徒歩等)	基本はカメラのみ	既知点設置が必要	SFM※7	簡易な3次元画像で良い場合。
	UAV※3搭載カメラ		既知点設置が必要	SFM	用途はほぼ、レーザースキャナに重なるが、SFMで画像を3次元化する。災害の初動調査などで活用。

※1 Mobile Mapping System / 移動体計測システム

※2 ここでは、一般に手持ちまたは台車程度に搭載可能なレーザースキャナとする

※3 Unmanned Aerial Vehicle / 無人飛行機

- ※4 Global Navigation Satellite System / 全球測位衛星システム
- ※5 Inertial Measurement Unit / 慣性計測装置
- ※6 Simultaneous Localization and Mapping / 自己位置推定と環境地図作成を同時に行う技術
- ※7 Structure from Motion / 複数の画像から特徴点を見つけて立体モデルを作成する技術

ただし、表-1 に示したセンサーと制御機器類の組み合わせは、必要最小限のもので、近年では、精度向上のために、追加で組み合わせる場合も出てきており、すべての製品を網羅することは難しい。

表-1 の内、今回取り上げるハンディ型レーザースキャナは、他では見られない大きな特徴が二つある。第一は、地下や高架下、その他で測位衛星を捕捉できないか、安定した捕捉ができないような非 GNSS 環境下で、レーザーを用いて点群を取得し、精度良く 3 次元点群モデルを構築できる点にある。第二は、SLAM 処理によって、計測時にリアルタイムで点群をマッチングさせることができるため、計測完了と同時に、3 次元の点群が作成できる点にある。通常、後処理では高性能な PC を使っても数十分から数時間を要することに加え、マッチングに失敗することも多々ある。ハンディ型レーザースキャナはリアルタイムにモニターでマッチングを確認しながら、点の欠如を補うように計測することも可能である。

3. ハンディ型レーザースキャナの種類

ハンディ型レーザースキャナの開発は近年盛んであるが、2017 年の時点では、表-2 のような製品が市場に投入されている¹⁾。その内、精度、即時性などから Stencil は、他に比べて屋内計測用途としては優れており、マイクロソフト社が主催するインドアローカライゼーション協議会でも 2016 年と 2017 年の二年連続で第一位を獲得している²⁾。表-3 に Stencil の主要諸元を示す³⁾。

表-2 各種インドアスキャナ

機器名称
VILMA
Viametris iMS3D
Würzburg backpack
Nav Vis
Matterport
Slammer
Zebedee
Pegasus
Stencil

表-3 Stencil の主要諸元

主要性能	
IMU	X, Y, Z, Roll, Pitch, Yaw
プロセッサ	Intel NUC i7 Dual Core
STORAGE	250 GB SSD
OS	Ubuntu Linux OS
レーザー	Velodyne VLP-16 lidar 水平360°、垂直30°
精度	±30mm
点データ取得	30万点/秒
付属カメラ	画素640×360
バッテリー時間	2時間

(注) 最新の Stencil2 では GNSS が搭載された。

4. Stencil の精度

(1) Stencil 開発者による検証

Stencil は、KAARTA 社によって開発された製品である。Stencil は手持ちのほか、背負子、自動車、電車、UAV などにも搭載可能とされている。

点群の精度については開発者の KAARTA 社自ら精度検証も行き、その結果をレポートで詳しく報告している⁴⁾。図-1 に示すような長辺 10.5m、短辺 5.5m 程度のキャビンを対象とし、スキャナを手持ちで周囲を一周し計測したものである。図中の Sphere1～4 は、検証するために用いた固定式レーザー(FARO Focus X330)用の基準点である。また、GNSS は当然利用していない。

結果、基準点間の誤差は最大 14mm(表-4)に対し、壁長では、最大 4.5cm(表-5)となっている。基準点はプラスチック製のボールで表面点群から中心点を出すのに対し、壁などのエッジは詳細には凹凸もあり、また点群が直接存在しないため、あくまで参照エッジとなることが原因と考えられる。

表-4 基準点間誤差

	Stencil (meters)	FARO (meters)	Distance Error (millimeters)
Side 1-2	10.323	10.318	5
Side 2-3	15.349	15.351	-2
Side 3-4	14.291	14.277	14
Side 4-1	18.608	18.615	-7

表-5 壁長誤差

	Stencil (meters)	FARO (meters)	Length Error (cm)
Wall 1	10.414	10.458	-4.4
Wall 2	5.538	5.554	-1.6
Wall 3	10.418	10.463	-4.5
Wall 4	5.553	5.563	-1.0

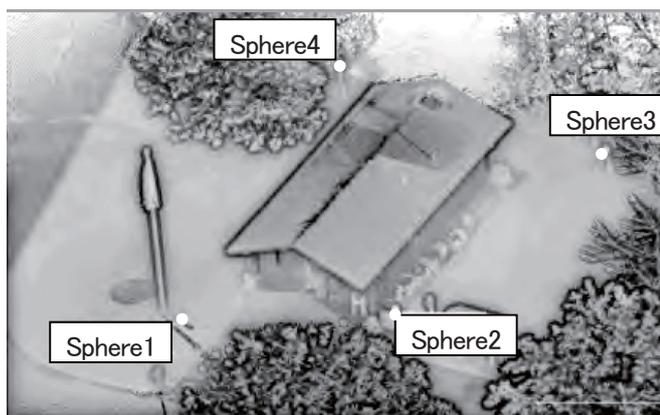


図-1 検証空間

ただし、この検証後の 2018 年現在では、Stencil はトラッキングの取得を目的に、CCD カメラを組み合わせ、取得される画像の特徴点から自己位置推定の機能をさらに向上させており、より高速な SLAM の実現を果たしている。また、同時に点群の精度向上にも寄与しているものと考えられる。

(2) 当社での検証

各種センサーから得られる入力データは、直接見ることはできず、結果的に SLAM の結果、アウトプットされた点群として利用されるため、そこでの精度が重要となる。したがって、センサーや制御機器の種類、組み合わせが最終精度に大きく影響することは容易に推測できるが、これまでの知見から、測定対象の幾何形状や表面の材質、測定軌跡、測定回数によっても左右されることがわかっている。さらに、計算ソフトや点群のノイズ、照明、大気、レーザービームの発散なども影響すると言われている⁴⁾。

以上のことから、ハンディ型レーザースキャナの精度をひとくくりに論じたり、公称スペックを結果の精度ととらえることは意味がなく、ユーザーは自ら使用する機器を、ユーザーの利用環境で検証することが必要となってくる。

そこで、次に当社が導入した Stencil について、検証を行った事例を紹介する。

検証では固定式レーザー(FARO Focus X330)との比較を行った。図-2 はその検証で実施した事務室と測定軌跡を示す。結果は、計測が一方向からとなってしまう(開放空間)奥の通路で、点群の精度が悪くなっている事がわかる(図-3)。計測した点の誤差の分布は図-4 に示しており、開放空間の通路で 3cm 程度～4.8cm までとなっているが、事務室内ではほぼ 1cm 以下の誤差が中心となっている。このようなループ状の計測ルートを取ることは海外の論文でも指摘されている⁵⁾。

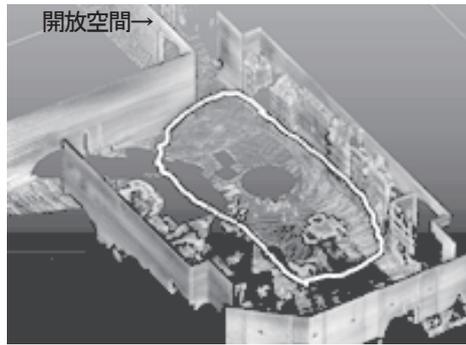


図-2 事務所室と計測ルート

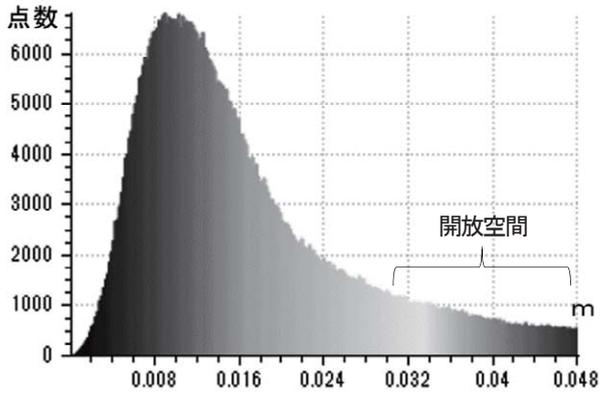


図-4 誤差の分布



図-3 固定式レーザースキャナとの比較
測定が一方向からの開放空間ではズレが大きい

また、あえて屋外の広い空地で検証を行ったが、特徴点のある対象物がほとんどない場合には SLAM でも自己位置推定ができない。そのため、図-5 のような工作物を複数設置してみた所、40m 程度の間隔に一ヶ所設置するだけで、誤差の最大値が高さ方向で約 10cm、平面内では約 4cm 程度となることがわかった(図-6)。計測の最初と最後は歩行速度や体勢が急変し、IMU の乱れが生じ易く、また、高さ方向の大きな誤差は、特徴点が取れなかったためと考えられることから、始終点付近とZ値の大きな誤差はこの場合、考慮すべきではない。



図-5 広い空地

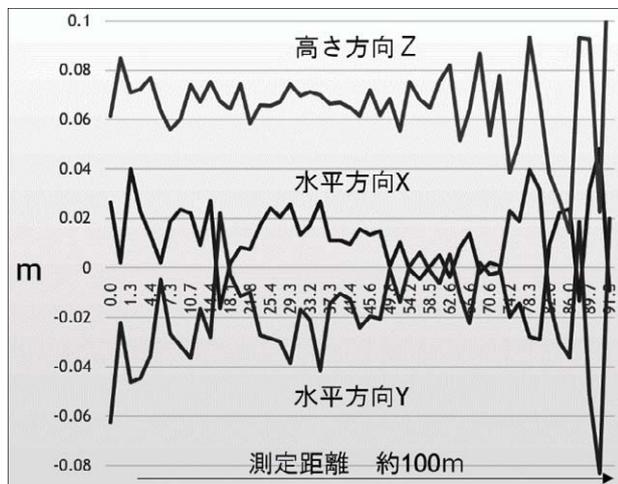


図-6 TS(自動追尾)とStencilによる自己位置推定の誤差

(3) 検証結果の考察

ここまでの検証から、Stencil の精度に関して得た知見を以下にまとめた。

- ・ 閉鎖空間では、非 GNSS 環境下でも、測定環境や測定ルートに留意することで、ほぼ 3cm 以内の良好な精度を得ることができる。
- ・ 開放空間では、何らかの特徴点を持つ対象物を、意図的に設置する必要がある。
- ・ 測定者の測定ルートは起点からループ状のルートを取り、最後は終点に戻るのが良い。
- ・ ループ状計測の周回自体は一周で十分であるが、互いの対象物の影となって欠損部が多くなるような幾何空間であれば、周回の効果は期待できる。
- ・ 高さ方向(z)は特徴点自体が少ないか距離が短くなるため、水平面より精度が落ちる傾向にある。
- ・ 対象物の寸法計測を行う場合、それらのエッジは、現時点では人の手によって定義せざるを得ないため、点群の精度とは別に、経験が左右する。

5. 建設工事への展開

(1) Stencil の建設工事への活用

実際には、Stencil も含むハンディ型レーザースキャナは、ゲームやロボティクス、林業や建築物のアーカイブ作成などでの活用実績が多い。一方、建設関連では計測の結果自体は見映えのする 3 次元で見せられるが、測量以降の活用事例がほとんど報告されていない。国内でも屋外用の UAV や MMS が増々、i-Construction の一環として、ICT 土工に活用されているのに比べると、ハンディ型レーザースキャナを活用した事例がほとんど見られない。海外の一部で、建築の内部工事の出来高管理に利用されている先進的な事例⁶⁾が見られる程度である。当然、本技術が、まだ精度向上の技術開発にしのぎを削っている段階ということが理由の第一であると言えよう。

そこで、最後に、今回の各種の検証で得られた結果から、建設工事に期待できる活用方法を考えてみたい。本技術は、現況をリアルタイムに 3次元で復元することができるため、特に、対象工事の出来形の確認だけでなく、施工中の工事機械の作業空間や、資材の搬入、搬出のための運搬スペースなどの確認が容易にできる。そのため、施工計画の精度向上や作成時間が短縮などの効率化が期待できる。特に、対象工事の進捗によるものだけでなく、周辺環境自体も日々変化するような現場では有効と考えられる。以下に上記の特徴を生かして活用が期待できる工事例をあげる。

- ・ 駅の改修工事(段差解消、エレベーター設置、ホームドア設置、各種設備の維持更新工事)。
- ・ 大規模なペDESTリアンデッキや立体構造物で構成されたイベント広場、駅前広場などの改築工事、補修工事。
- ・ 都市内高速道路の路下環境を含んだ周辺の整備工事。
- ・ 地下街での改修、維持工事。
- ・ 大規模掘削時の支保工の設置や小型重機類の投入、作業スペースなどの確認。

6. 課題

今後、建設工事にハンディ型レーザースキャナを活用するためには、計測機器単独の開発だけでは普及は進みにくい。目的を特化したアプリケーションによって計測から実務的なアウトプットまで一連で処理できるようなシステムが必要であろう。例えば次のようなアプリケーションが考えられる。

- ① 素早い差分処理のビジュアル化。それによる、日々の出来高進捗管理ソフトとの連動。
- ② 計測した空間内で施工機械や人の動きを容易にビジュアルに再現できるもの(図-7)。
- ③ 資材の寸法形状と運搬機械を入力すれば、搬入、搬出経路を自動で再現するもの(図-8)。
- ④ ②および③の情報をウェアラブルカメラに送ることで案内機能をもたせる。

これらのソフトウェアでは AI 技術が非常に有効な手段となるであろう。



図-7 ウェアラブルカメラを装備したオペレータが AR 内で、マシンガイダンスを利用して移動

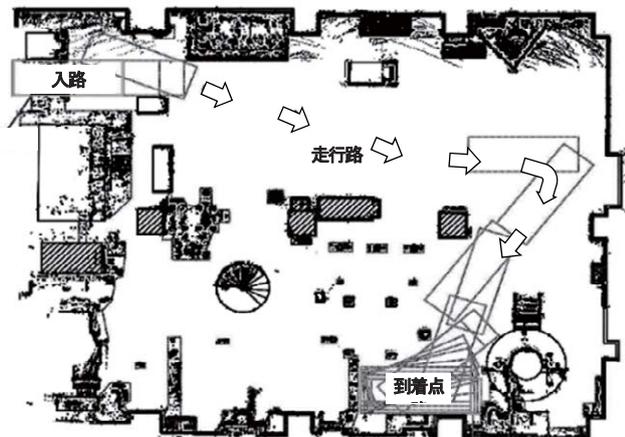


図-8 運搬機械の軌跡(AIの活用)

参考文献

- 1) Comparison of the Selected State-Of-The-Art 3D Indoor Scanning and Point Cloud Generation Methods: Ville V. Lehtola, Harri Kaartinen, Andreas Nüchter, Risto Kajaluoto, Antero Kukko, Paula Litkey, Eija Honkavaara, Tomi Rosnell, Matti T. Vaaja, Juho-Pekka Virtanen, Matti Kurkela, Aimad El Issaoui, Lingli Zhu, Anttoni Jaakkola and Juha Hyypä : MDPI Remote Sens.2017,9,796:
- 2) <http://www.kaarta.com/kaarta-wins-indoor-localization-2017/> (2018.10.15 時点)
- 3) <https://static1.squarespace.com/static/57f7e2b215d5dbb87f65e7b2/t/58cc4aa646c3c4081398dc8a/1489783463807/Stencil+spec+sheet+3.17+web.pdf/> (2018.10.15 時点)
- 4) Measurement accuracy of Lidar-based SLAM systems: Kaarta Report 001,September,2016
- 5) INVESTIGATION OF GEOMETRIC PERFORMANCE OF AN INDOOR MOBILE MAPPING SYSTEM: Mehdi Maboudi, Dávid Bánhidí, and Markus Gerke, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2, 2018 ISPRS TC II Mid-term Symposium "Towards Photogrammetry 2020", 4-7 June 2018, Riva del Garda, Italy
- 6) <https://www.doxel.ai/> (2018.10.15 時点)

土木施工業界はVR技術により「想像」から「体感」へ

～i-Construction・CIMの普段使い～

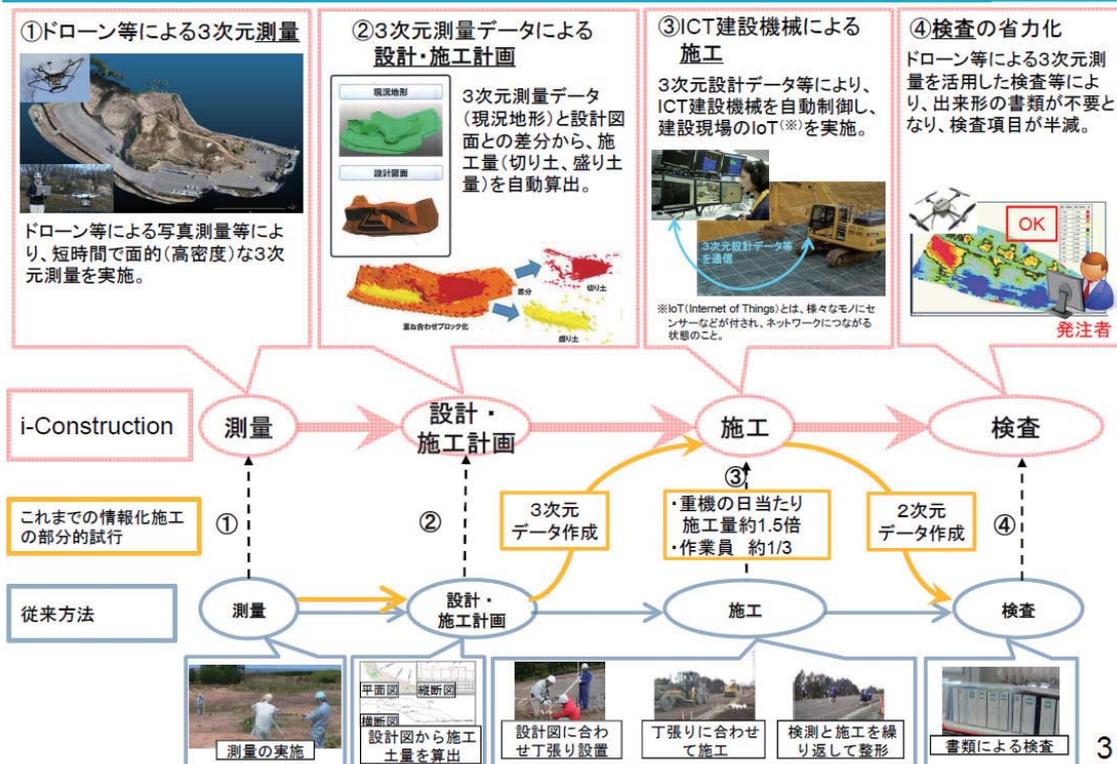
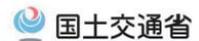
福井コンピュータ株式会社
 中部営業所
 山崎 健太郎

■i-Construction における 3次元活用

2016年度、国土交通省は建設業会が抱える課題「生産性の低迷」「労働災害」「労働者不足」を払拭すべく生産性革命として「i-Construction」の導入を表明致しました。

施策の1つである「ICT技術の全面的活用」により建設現場において3次元データの活用がより普及し始めました。

ICT技術の全面的な活用(土工)



※2015年12月15日 国土交通省 第1回 i-Construction 委員会 資料2より

従来の施工(情報化施工)と比較し、起工測量から検査までを3次元データを活用することにより、生産性向上に繋がるとされています。

■愛知県における ICT 実施状況

・愛知県の発注工事において 2018 年度ICT活用工事を発注
愛知県建設部は 2018 年 4 月 1 日移行に契約する工事から適用

<対 象>

掘削・盛土が 10,000m³ 以上の河川・道路土工

舗装路版が 5,000m² 以上の舗装工事(金額:8,000 万円以上)

<発注方法>

発注者指定型…3次元設計データ作成・ICT 建機による施工・TS 出来形管理

施工者希望型…i-Con プロセスにおける「3次元測量」「3次元設計データ作成」「3DMG・MC」

「3次元出来形管理」「TS 出来形管理」の何れか 1 部実施でもよい

■CIM 導入ガイドライン(案)の策定

2017 年度は i-Construction の一環でもある CIM のガイドラインが策定されました。

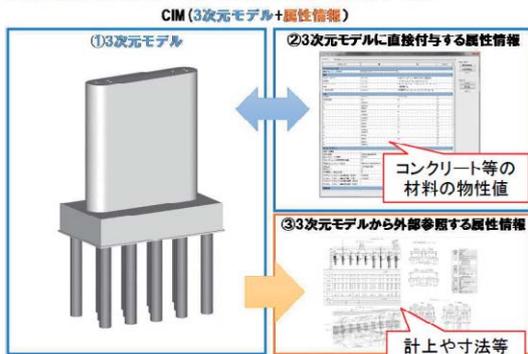
CIM導入ガイドライン



- これまでの CIM 試行業務、工事における知見を集約し、**CIMモデルの作成方法** (作成指針、留意点等)や**活用事例**を記載している。
- CIM の活用により、属性情報の活用による維持管理効率化、3次元モデルの活用 (見える化)によるフロントローディング、関係者間協議円滑化等が期待できる。

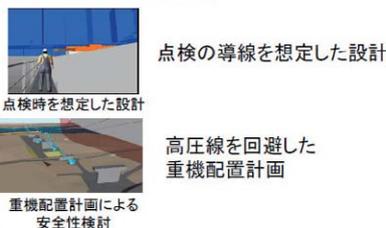
属性情報の活用

調査・設計段階、施工段階において属性情報を付与し、維持管理時に必要な情報を蓄積する。



3次元モデルの活用

① フロントローディング



② 関係者間協議



17

2017 年 4 月 国土交通省 「ICT の全面的な活用の推進に関する実施方針別紙 1~10」より

ガイドラインには、CIM モデルの作成方法、活用事例が記載されており、CIMにおける主な活用としては以下 3 点となります。

- ・属性情報を活用した維持管理の効率化
- ・3次元モデルの活用による、現場の“見える化“(安全管理など)
- ・関係者間協議

工種としては、「土工、河川構造物、ダム、橋梁、トンネル」が挙げられます。

CIMを活用するポイントとしては3Dデータを活用してどんな効果が提案できるかが重要となってきます。

第2編 土工編

道路土工及び河川土工を対象に、測量段階でUAV等を用いた公共測量を行うこと、設計段階（土工の3次元設計）で3次元データを作成すること、更には施工段階で3次元データをICT活用工事に活用する際に適用する。

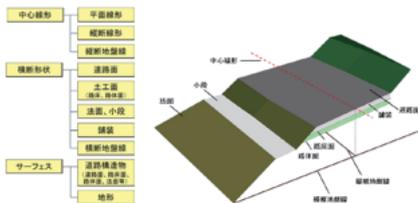
第3編 河川編

河川堤防及び構造物（樋門・樋管等）を対象にCIMの考え方をを用いて調査・設計段階でCIMモデルを作成すること、作成された堤防・構造物モデルを施工時に活用すること、更には調査・設計・施工の堤防・構造物モデルを維持管理に活用する際に適用する。

※抜粋

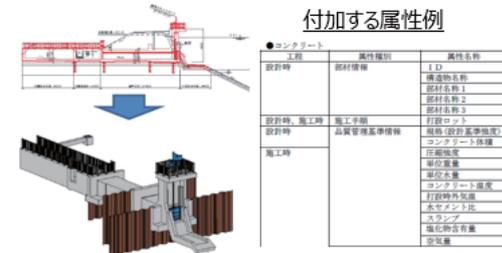
CIM（土工編）→ i-Construction 活用

土工の3次元設計とは、土木設計業務において、**ICT活用工事を行うために3次元設計データを作成すること**をいう。
CIM（土工）の3次元設計データとは「LandXML1.2に準じたデータ交換標準（案）Ver.1.1 平成29年3月」に基づき作成されたものと規定されている。



CIM（河川編）

特徴として、樋門・樋管のCIMモデルを活用の記事がある



CIM導入ガイドライン（案）第2/3編 土工/河川編

第4編 ダム編

ロックフィルダム、重力式コンクリートダムを対象にCIMの考え方をを用いて調査・設計段階でCIMモデルを作成すること、作成されたCIMモデルを施工時に活用すること、更には調査・設計・施工のCIMモデルを維持管理に活用する際に適用する。

第5編 橋梁編

橋梁の上部工（鋼橋、PC橋）、下部工（RC下部工（橋台、橋脚））を対象にCIMの考え方をを用いて調査・設計段階でCIMモデルを作成すること、作成されたCIMモデルを施工時に活用すること、更には調査・設計・施工のCIMモデルを維持管理に活用する際に適用する。

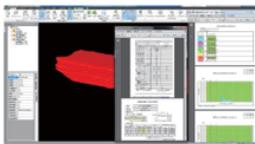
第6編 トンネル編

山岳トンネル構造物を対象にCIMの考え方をを用いて調査・設計段階でCIMモデルを作成すること、作成されたCIMモデルを施工時に活用すること、更には調査・設計・施工のCIMモデルを維持管理に活用する際に適用する。

※抜粋

CIM（ダム）

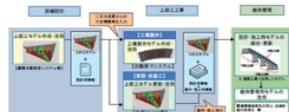
調査（事業計画）、設計段階では、前工程で得られた成果を活用し、ダム設計成果としてCIMモデルを作成する。発注者は、CIMの活用に関する実施方針、国土交通省内の事務連絡等を踏まえ、CIM活用業務を発注する。



CIM（橋梁）

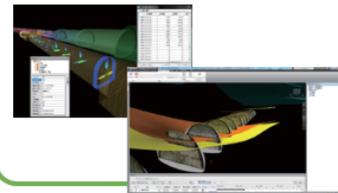
事業の上流側となる調査・設計段階からCIMを活用することで、**概略検討及び詳細設計の効率化、検討内容の綿密化、設計品質の向上等が期待できる。**
CIMを活用により、**施工管理効率化、施工計画検討の綿密化、関係者間情報共有の円滑化、出来形管理の効率化等の効果が期待できる。**

○平成29年度時点の詳細設計→上部工事—維持管理用のCIMモデルの活用



CIM（トンネル）

期待できる効果は、ダムや橋梁同様である。
活用方法① 施工管理情報の蓄積
活用方法② 施工管理情報の共有



CIM導入ガイドライン（案）第4～6編 ダム/橋梁/トンネル編

■VRの活用により現場の“見える化“へ ～その1～

CIMのガイドラインで“見える化“に着目を置いた際に活用できるのが最新技術でもあるVR技術です。

UAV(ドローン)による測量の一般化により急速に普及が進む点群データ(現況点群)とCIMモデル(計画データ)を合成したデータを3D空間上に表すことによって、施工プロセスや工事完成イメージを3D空間上で確認できるようになり、設計段階や工事着手前における問題点の確認や、完成イメージの把握が簡単に行えるようになります。



圧倒的な没入感で空間イメージを体感できるため、社内における工事シミュレーションや地元説明会などで、より具体的な検討や提案が可能になります。

■VRの活用により現場の“見える化“へ ～その2～

- ・起工測量や進捗管理に使用する点群データをそのまま活用することにより、周辺状況を再現するためのモデリングが不要となり、手軽にVRが実現できます。
- ・確認できない高所の出来栄や埋め戻し前の状況も点群データを利用し、バーチャル空間でいつでも再現・確認が可能となります。

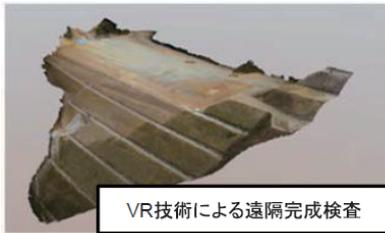


- 危険な急傾斜地をVRで計測ができる
 - 点群利用により、既設構造物のモデリング
- ※データ提供: YDN(やんちゃな土木ネットワーク)

■3次元データによる現地立ち合いでの確認・検査行為の代替

VR活用することによって、土工の完成検査や、段階確認が行われる不可視部分の出来形について、3次元データの確認に代えられるよう、検証作業を実施しております。

【点群データによる監督・検査の合理化】



VR技術による遠隔完成検査



3次元点群データによる遠隔段階確認

■出来形管理基準

(※)鉄筋工の例
・平均間隔D,
(1リフト1面当たり)

■工事監督技術基準

・上記の30%を段階確認

22

※国土交通省中部地方整備局 資料22ページより

■VR実務活用実証

三重県の建設会社様で実際にVRを用いて施工計画の検討、安全教育の実施や施工状況シミュレーションから完成検査での状況説明にて活用されております。



※8月9日に実施された完成検査の状況写真

■VRと3次元データを活用した試行(完成検査)

未来投資会議構造改革徹底進捗会

「地域経済・インフラ」会合(第1回)

資料1カナツ技研建工業株式会社提出資料より

＜今後の監督及び検査の合理化を視野に＞
VRシステムによる現地再現(施工段階毎)

監督・検査の省力化

部分使用等により、完成時の現場状況を担保できない場合

↓
3次元データから仮想空間データを作成、着手時・中間検査時・完成時の出来形を再現(仮想空間内での出来形確認)



中間検査時点のUAV観測データに施工状況3Dモデルを配置



18

■VR技術を活用することよってのメリット

- ・現況と計画の位置関係が確認でき、干渉していないかの確認が行え、手戻り防止に繋がる。
- ・データさえあれば過去の状況の振り返り・把握が行える。
- ・現場作業や、発注者にVR空間に入ってもらうことで、現場に行かずとも実際の状況をよりリアルに把握ができ、尚且つ、現場では足を踏み入れるには危険な箇所の確認が行える為、安全性向上に繋がる。

■福井コンピュータソリューションマップ

CIM・i-Construction	①起工測量	②設計・施工計画	③施工	④検査
 測量CADシステム【トレンドワン】	基準点測量 平面・立面図作成	点群連携 概略線形計画		
 土木施工管理システム【エクストランド武蔵】		情報化施工用 3次元設計データ ヒートマップ連携データ作成		
 3D点群処理システム【トレンドポイント】	点群処理 フィルタリング・TIN作成	縦横断現況作成 土量計算		3D検査 ヒートマップ出来形管理
 現場端末システム【トレンドフィールド】	杭打ち測量 GNSS現況測量		3Dモデルを活用した 進捗管理・現場検査 	
 CIMコミュニケーションシステム【トレンドコア】		現場シミュレーション・ 関係者間の情報共有 		

■最後に

i-Constructionは、国土交通省だけでなく、地方自治体においてもさらなる普及が進みます。
i-Constructionは、“目的”ではなく、“手段”のひとつです。（“目的”は建設現場の生産性向上）
生産性革命の実現に、3次元データは必要不可欠。（3次元データを“どう活かすのか”がポイント）
まずは、できることから取り組んでみましょう。

福井コンピュータは、これからも皆様のお役に立つ、常に新しいご提案に努めてまいります。

建設ICT導入普及優良会員

国土交通省 中部地方整備局（建設ICT導入普及研究会）

急傾斜地における土留め 「竹割り型土留め工法」

— 平成28年度 153号新郡界橋下部工事 —

太啓建設株式会社
鬼頭 進一

1. はじめに

国道153号は、名古屋市から豊田市・飯田市を経て塩尻市に至る延長214kmの主要幹線道路であり、愛知県西三河地域と長野県伊那地域の物流を担うとともに、豊田市中心部と明川・稲武地区を結ぶ唯一の幹線道路として地域の生活を支えています。

伊勢神改良は、昭和35年に供用した伊勢神トンネルの断面不足による高さ制限や大型車同士のすれ違い困難の解消及びトンネル前後区間の急カーブ・急勾配の回避による事故危険性の低減や利便性の向上など、幹線道路としての機能性確保と1次緊急輸送道路としての信頼性向上を目指し平成24年度に事業化されました。(図-1参照)

ここでは、伊勢神改良区間に含まれる新郡界橋下部工で実施した「竹割り型土留め工法」について説明します。

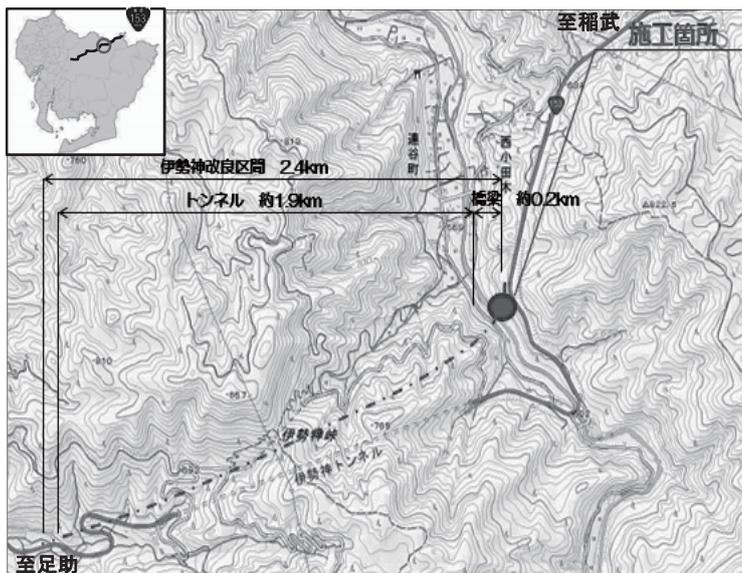


図-1 位置図

2. 計画の概要

伊勢神改良新郡界橋の概要を以下に示します。

(図-2参照)

橋梁位置：愛知県豊田市連谷町～小田木町

橋長：134m

道路幅員：9.5m(0.5+3.25+3.25+0.5+2.0)

上部工形式：2径間PCラーメン箱桁橋

下部工形式：橋台 逆T式橋台

橋脚 中空断面橋脚

路面から水面(HWL)までの高さ46m

基礎工形式：A1:深礎杭 直径2m

P1:大口径深礎杭 直径11.5m

A2:直接基礎

P1橋脚

土留形式：竹割型土留め $\phi=15.5\text{m}$ 、 $H=12.4\text{m}$

伊勢神地区橋梁全体一般図

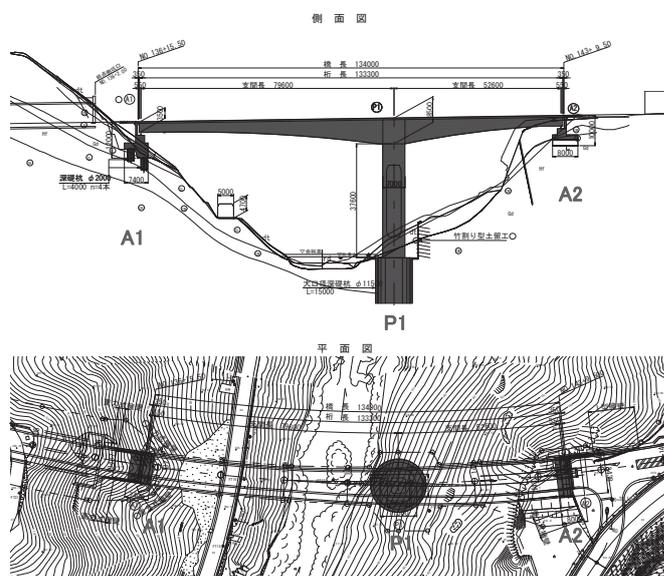


図-2 橋梁概要図

3. 工事概要

今回の工事では、掘削高12.4m、掘削径15.5mの竹割り型土留めを施工しました。掘削土量は土砂850m³、硬岩630m³、吹付面積326m²、補強材257本の施工になります。(図-3参照)

4. 施工条件

県道から川を挟んだ山の斜面での施工でありまた、河川際での作業になる為、濁水・高アルカリ水の流出の無いよう法面養生・PH処理装置の設置を行いました。(写真-1・図-4参照)

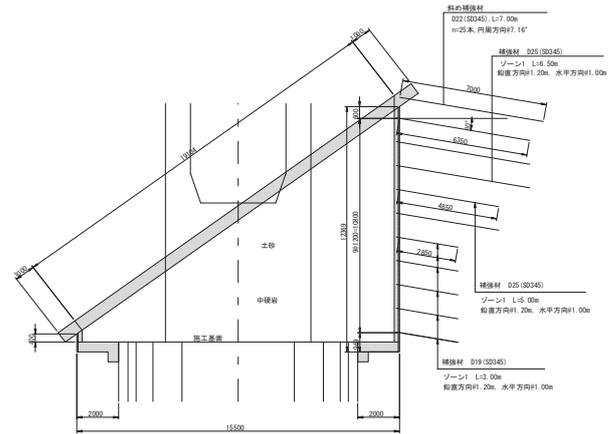


図-3 竹割り型土留め構造



PH処理装置

写真-1 法面養生・PH処理機

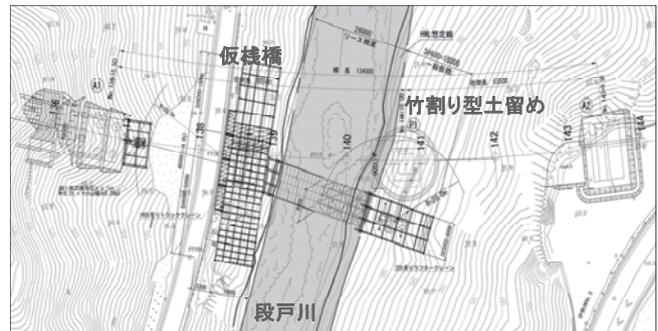


図-4 現場平面図

5. 竹割り型土留め工法の概要

竹割り型土留め工法は、竹割り型掘削の切土法面の補強を目的とし、掘削により生じる変形をリングビームと補強材、吹付けコンクリート壁により抑制し、地山を補強する工法であります。(写真-2・図-5参照)

1) 竹割り型土留め工法の特徴

- ①掘削形状が円筒状で、掘削後、早期にコンクリートを吹付けることで地山のゆるみを軽減できます。
- ②補強材を用いることで、地山の変形を抑制し吹付けコンクリート壁に作用する土圧を軽減できます。
- ③主な構造部材が吹付けコンクリートと補強材で構成されており、大きな重機を必要とする作業が無いので、斜面上での施工性に優れています。
- ④斜面を鉛直に掘削するので、用地・掘削土量を削減し、自然環境に与える影響を軽減できます。



写真-2 竹割り型土留め工 完成写真

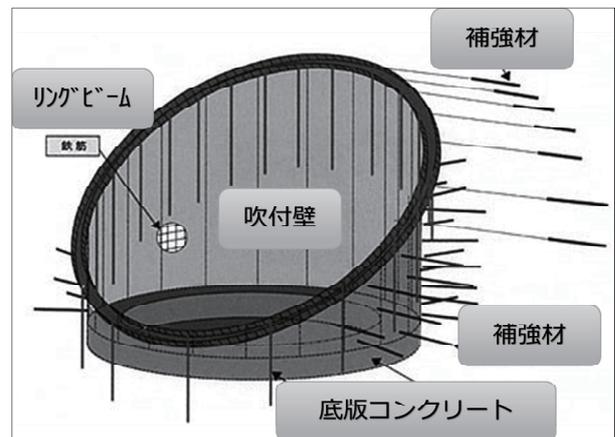


図-5 竹割り型土留め工概略図

2)各部位の役割

【リングビーム】

・掘削前に地表面に設置し、掘削時における吹付コンクリート壁部の変位(前倒れ)を抑制するリング状の構造部分である。地山に発生するせん断ひずみを小さくし、地山の安定性を大きく低下させないことを目的に設置します。(図-6参照)

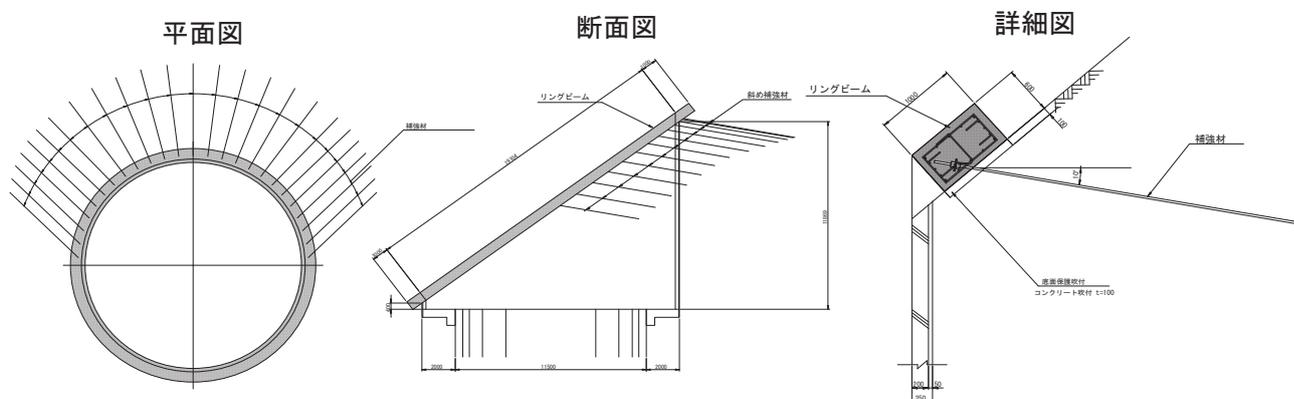


図-6 リングビーム構造図

【補強材】

・地山に挿入され、引張り力を伝達させる部材で、地山と一体となる事により地山の安定性を増加させ、変形を抑制する効果があるため、吹付け壁に作用する土圧を軽減させる目的で設置します。

リングビームと吹付けコンクリート壁の自重を掘削時に支える部材となり、地山にすべり面が生じた場合、すべり面から先で抵抗し、地山を保護します。(図-7・図-8参照)

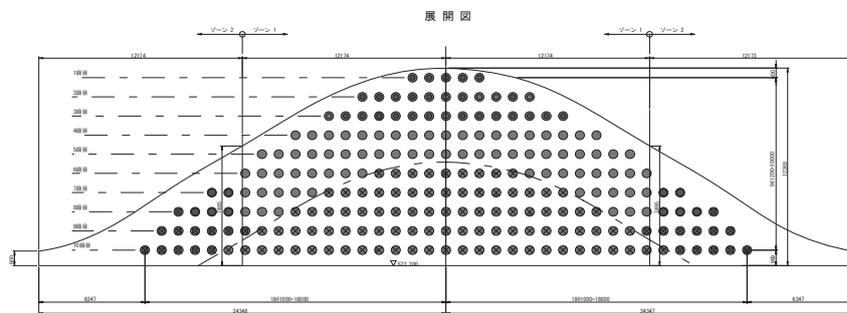


図-7 補強材配置図

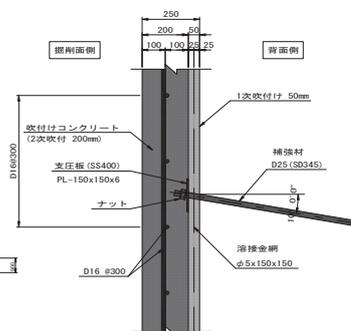


図-8 壁面断面図

【底板コンクリート】

・竹割り型掘削の掘削底面に、掘削形状の保持および大口径深礎掘削時の坑口部の土留めとして設置します。(図-9参照)

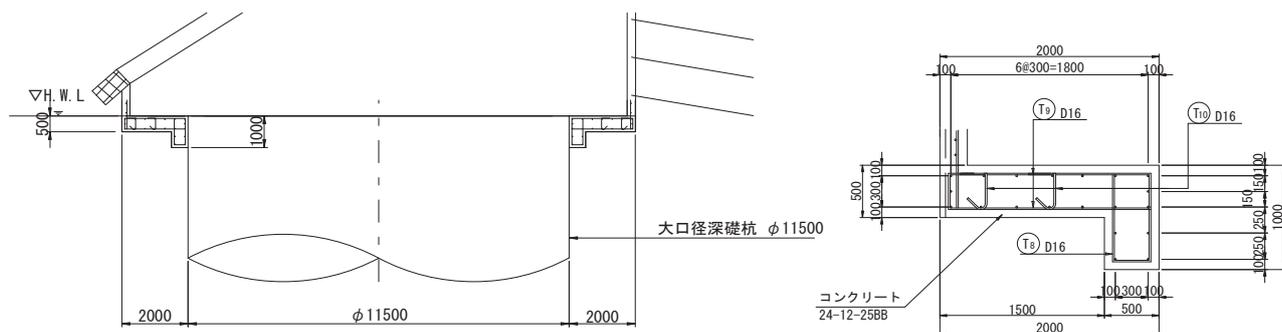


図-9 底板断面図

6. 従来工法との比較

斜面上で橋梁下部工等の構造物を建設する場合の掘削方法としては、法付きオープンカットや、親杭横矢板方式による土留めが一般的です。しかし、地形が急峻になると、オープンカットでは長大な法面が発生することから、自然環境や景観に悪影響を与えます。また、斜面の安定性や供用開始後の維持管理が問題となってきます。(図-10参照)

また、親杭横矢板方式による土留めでは、土留め杭が長尺となるうえに、グラウンドアンカーを設置しながらの掘削となるため、工費が割高となり工期も長くなります。竹割り型土留め工法は、土留め杭や支保工が不要なため鋼材の使用量が削減されることや大型の建設機械が不要であることから、経済性に優れ、また斜面を円筒状に垂直に掘削することで掘削土量を最小限に抑えられ、切土のように景観が大きく変わることもなく景観上も優れています。(図-11参照)

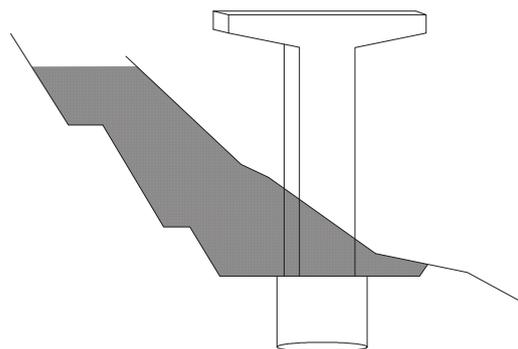


図-10 従来工法(オープンカット)

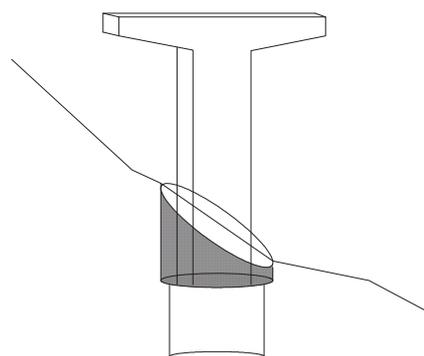


図-11 竹割り型土留め工法

7. 竹割り型土留め工法の適用範囲

1) 掘削高さ及び掘削径

竹割り型土留め工法の適用範囲は、最大掘削高さが5m~20m、掘削径が18mまでとされています。

・技術登録(出願人:アイサワ工業株式会社、株式会社クボタ建設)

1)公開特許:リングビーム・逆巻き壁・ロックボルトで構成された土留め構造物による掘削工法
(特願 2000-159131 平成12年 4月 20日)

・参考文献:日本道路公団「竹割り型土留め工法設計・施工マニュアル(案)」平成16年5月

8. 竹割り型土留めの施工

図-12に竹割り型土留め工法の施工フローを示します。

①リングビームの施工

リングビームの施工は、斜面上での鉄筋・型枠組立となり、法面ロープ高所作業の資格が必要になります。補強材は設置後、引抜試験を行い定着を確認し、吹付けコンクリートを打設します。(写真-3参照)

②壁面の施工

壁面の掘削は、補強材打設間隔に合わせ1.2m毎とした。吹付けコンクリート壁は、

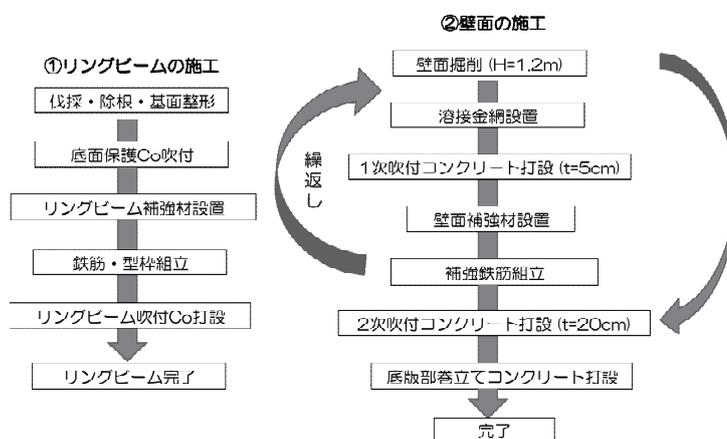


図-12 竹割り型土留め施工フロー

早期に地山の保護を目的とする1次吹付け(t=5cm)と長期耐久性を目的とする2次吹付け(t=20cm)の2層構造になります。吹付けコンクリート壁の施工は、掘削後直ちに溶接金網を設置し、1次吹付けを行います。1次吹付け後、補強材を壁面に設置し、地山を補強します。その後、吹付け壁面に補強鉄筋を組立(写真-4参照)、2次吹付けを行い壁面が完了します。この作業を繰り返し、底版まで施工し壁面が完了します。(写真-5参照)



写真-3 リングビーム吹付



写真-4 壁面施工状況

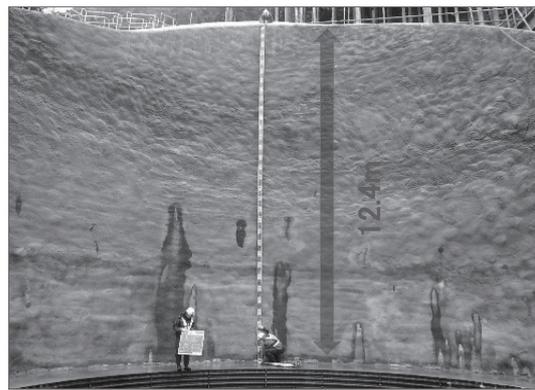


写真-5 壁面完了

③底版の施工

吹付けコンクリート壁の鉄筋を底版コンクリートに定着させ一体化します。底版コンクリートは、深礎部のライナープレートの内型枠として設置し鉄筋を組みコンクリートを打設します。(写真-6参照)



写真-6 底版施工状況

9. 施工時の動態観測

竹割り型土留め工は、施工時に動態観測を行うことを原則としています。本工事での観測頻度・項目等は「設計・施工マニュアル(案)」に基づき実施しました。

- ・ 観測期間：竹割り型土留め施工開始から完了までとしました。(165日間)
- ・ 観測頻度：1日2回(作業開始前・作業後)
- ・ 目視観察：吹付け壁面・掘削面の観察
- ・ 変位計測：リングビーム上にピンを設置し光波測距儀にて計測しました。(図-13参照)

管理基準は「設計・施工マニュアル(案)」に示すフロー(図-14参照)に基づき図-15のとおりとしました。

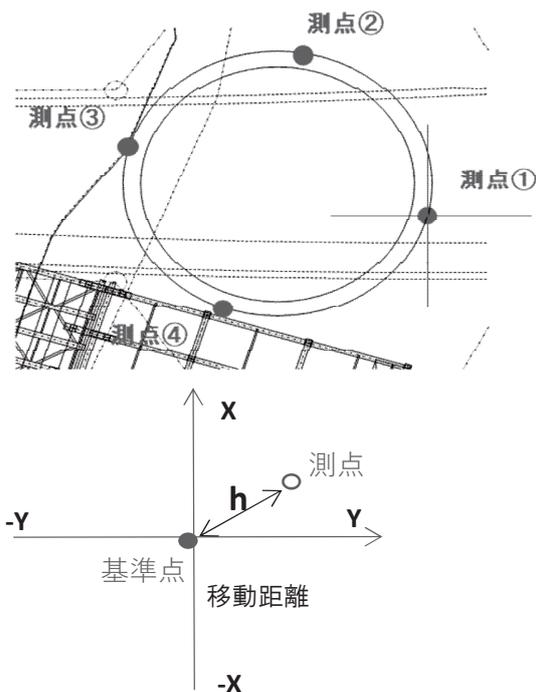


図-13 変位観測図

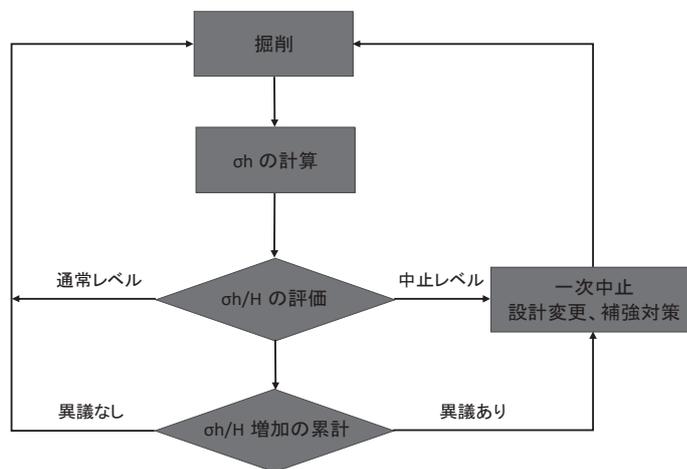


図-14 動態観測評価フロー

	通常レベル	警戒レベル	中止レベル
土砂	$\sigma h/H \leq 0.20$	$0.20 < \sigma h/H \leq 0.40$	$0.40 < \sigma h/H$
軟岩	$\sigma h/H \leq 0.15$	$0.15 < \sigma h/H \leq 0.30$	$0.30 < \sigma h/H$
硬岩	$\sigma h/H \leq 0.10$	$0.10 < \sigma h/H \leq 0.20$	$0.20 < \sigma h/H$

(単位：%)
H：掘削高
σh：水平変位

図-15 観測レベル表

本工事での観測結果は、計測した数値が最大6mmで、通常レベルの範囲内であったため、工事に支障なく施工を完了することができました。

(観測レベル表より 土砂部 $\sigma = 0.006$ $H = 6\text{m}$ $\sigma h/H = 0.006/6 \times 100 = 0.1\% \leq 0.2\%$)

10. おわりに

本工事の施工現場は、急傾斜地であり、掘削用施工機械の搬入が仮栈橋上からの吊り下ろししか手段がなかった為、大型機械を必要としない「竹割り型土留め工法」は施工性において現場に合致していました。

「竹割り型土留め工法」は、1サイクルの掘削高が1.2mであり掘削後直ちに溶接金網を設置し、1次吹付けを行うことにより、施工中の安全性も十分でありました。

また、施工中は、設計段階では予測できない事態が生ずる場合を考慮し、動態観測が義務づけられていますが、本工事では、地盤条件が良好であったことから動態観測結果では変位も無く施工を完了することが出来ました。

以上竹割り型土留工法は、急斜面での施工範囲や、施工機械に制限される場所での施工は大変有効な工法でありますので、今後一層普及していくことを期待します。

先端非破壊検査手法によるコンクリート構造物の劣化評価 — コンクリート構造物長寿命化のための診断技術 —

京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 インフラ先端技術産学共同講座 特任助教
一般財団法人東海技術センター 事業統括本部 部門長
奥出 信博

1. はじめに

コンクリート構造物の延命化が叫ばれる昨今、構造物の状態を正確に判断し、適切な補修・補強を行い、要求性能を保持あるいは回復させながら維持管理していくことが求められる。コンクリートの補修工法には、ひび割れ注入工法をはじめ、様々な工種が存在する。しかしながら、補修施工そのものが適切になされたか否かを評価するための技術は十分に成熟しておらず、施工管理基準も体系的に確立していない。

本稿では、弾性波を利用したひび割れの充填評価を目的とした種々検討について紹介する。

1. RC 床版を対象としたひび割れ充填評価に関する検討

(1) 概要

供用後 46 年が経過した鉄筋コンクリート床版において、網目状のひび割れが散見された 3 つの床版パネルを対象に、ひび割れ注入工法による補修を行い、AE トモグラフィ解析¹⁾から得られる弾性波の速度分布を補修前後で比較した。その結果、いずれの床版パネルにおいても注入により速度の回復傾向が見られ、本手法から得られる弾性波速度が注入材によるひび割れや空隙の充填状態を把握する一指標となり得ることを確認した。

(2) 対象構造物

計測対象とした鉄筋コンクリート橋の平面図及びその特徴を図-1及び表-1に示す。対象橋梁は、北陸地方に位置する供用後 46 年が経過した市道橋である。複数ある床版パネルのうち、図に示す 3 つの床版パネルを計測の対象とした。いずれの床版パネルにおいても、コンクリート表面にはアルカリシリカ反応が主たる要因と考えられる網目状のひび割れ(幅は0.1mm前後)が散見された。このひび割れに対し、床版下面より樹脂注入による補修を実施し、その前後における弾性波の速度分布の比較を行った。

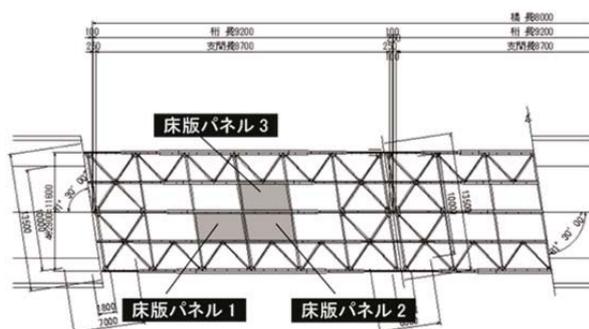


図-1 対象橋梁の平面図

表-1 橋梁の概要

特徴	北陸地方の市道 鉄筋コンクリート橋
形式	3 径間非合成桁
橋長	88.0m
供用年数	46 年
床版厚	200mm+アスファルト 50mm
状態	アルカリシリカ反応が主たる要因とみられる網目状のひび割れが床版表面に顕在化

(3) 補修の概要

各床版パネルに適用した補修工法の概要を表-2に示す。いずれの床版パネルにおいてもエポキシ系樹脂を注入材として用いた。床版パネル 1 及び 2 で用いた樹脂は、低粘度かつ低圧注入を特徴としており、エア抜きを伴いながらスプリングの反発力を利用して注入する方法である。一方、床版パネル 3 に適用した方法は、注入器に備えたゴムバンドにより、樹脂を加圧注入する方法である。A、B の 2 種類の工法を採用した理由としては、

当初、最終的にこれら工法の優位性について論ずることを目的としたためである。しかしながら、初期損傷が異なる条件下において、一意的に優位性を判断する適切な手段が未だ見出すことができておらず、現状、当該目的の達成には至っていない。

(4) 弾性波速度の解析

これまで塩谷・小林らは、AE 源を用い構造物内部のひび割れ等の損傷程度を効率的に可視化する非破壊検査手法「AE トモグラフィ法」を提案してきた¹⁾。本技術は、構造物に生じたひび割れや空隙等が、見かけの弾性波速度を低下させるという性質を利用したものであり、その有用性についてはこれまで複数報告してきた²⁾。「AE トモグラフィ法」の最大の特長は、波線追跡を利用した位置標定手法にあり、損傷を伴うような不均質材料でも優れた位置標定が可能となる。図-2に波線追跡法の概念図を示す。受信点 j から、対象領域を有限要素に分割する全ての節点 i に対し波線追跡を行い、各節点への走時が最小となる経路において理論走時 T_{ji} を得る。次いで T_{ji} と受信点 j における初動走時 T_j の差より潜在的な推定発信時間を得る。これを受信数 N に対し行い、最終的に推定発信時間の分散が最小となる節点を発信点と推定する。

表-2 補修の概要

	床版パネル1及び2	床版パネル3
工 法	工法 A	工法 B
注 入 材	エポキシ系樹脂 粘度 500±200mPa・s	エポキシ系樹脂 粘度 600±100mPa・s
加圧方式	スプリング加圧方式 スプリングの反発を利用し低圧注入する	ゴムバンド方式 注入器に備えたゴムの復元力を利用して加圧
加 圧 力	初期：0.06N/mm ² 安定時：0.02N/mm ²	初期：0.4N/mm ² 安定時：0.098N/mm ²

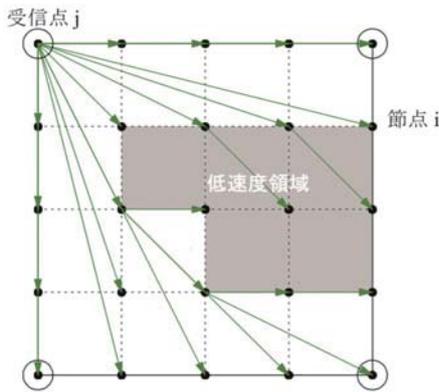


図-2 波線追跡法の概念図

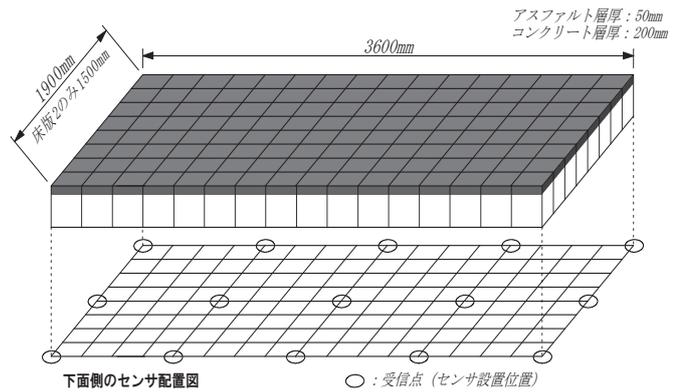


図-3 解析モデル

(5) 計測条件

図-3にAEトモグラフィの解析モデルと受信点(センサ)の位置を示す。モデル上部の塗潰し部はアスファルト層(厚さ:50mm)を示している。床版パネル1及び3における解析領域は3600mm×1900mm×250mmとした。床版パネル2はセンサの設置位置に制限があったことから、3600mm×1500mm×250mmの領域を対象とした。AEトモグラフィ解析の要素は、対象領域を16×8に分割した計128要素とした。図中の下側には床版下面に配置したセンサ(5×3の計15点)を示した。AEトモグラフィの解析に必要な弾性波は、直径5mmの鋼球をアスファルト面に打撃することにより生じさせた。対象領域内に弾性波を一様に生じさせることを意識し、各床版パネルそれぞれ、1打撃/2秒程度の頻度で、ランダムに約12分間打撃を行った。弾性波の受信には、周波数応答が3Hz～約15kHzの圧電型加速度センサを15個用いた。アスファルト面からの鋼球打撃により生じた弾性波を床版下面に配置したセンサで検出した。

(6) 結果

解析要素毎に得られた速度の頻度分布を図-4に整理した。いずれの床版パネルにおいても、補修後は速度領域が全体的に速い速度側にシフトしているのが分かる。注入材のひび割れ等への充填効果により、弾性波

の迂回や分散要因が排除された結果、見かけの速度が向上したものと推察される。いずれの床版パネルにおいても例外なくこの速度の回復傾向が示されている。AE トモグラフィ法から得られる速度分布が、コンクリート床版における注入材の充填状況を把握するための一指標となり得る可能性が示唆された。

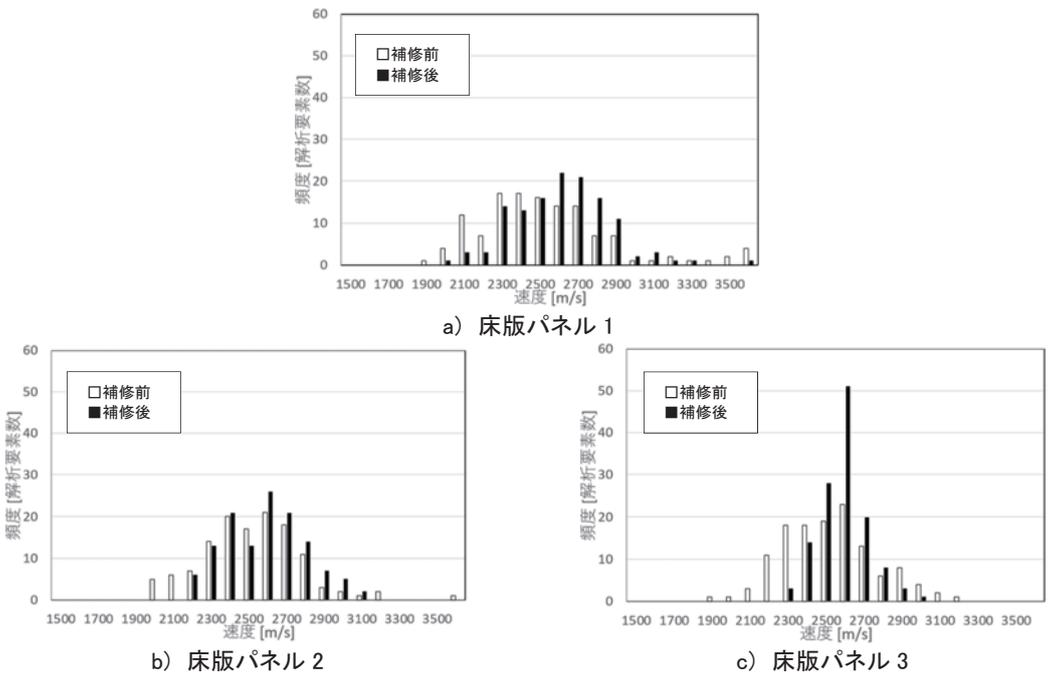


図-4 速度の頻度分布

2. 表面波を利用したひび割れ充填評価の検討

(1) 概要

水力発電施設内の送水管の架台コンクリートを対象に、エポキシ系樹脂によるひび割れ注入を実施した。ひび割れ注入の前後において表面波を用いたトモグラフィ解析を行い、双方の速度分布の結果を比較することで、充填の評価を行うことを試みた。

(2) 対象構造物

対象構造物は、水力発電施設内の送水管の架台コンクリートである。この写真を図-5に示す。アルカリシリカ反応が主要因と考えられる網目状のひび割れが対象面の左端上部を中心に表面に顕在化しており、ひび割れ部には遊離石灰を伴っていた。図中、赤ラインで示す縦 2,000mm × 横 2,000mm のエリアを速度分布解析の対象範囲とした。

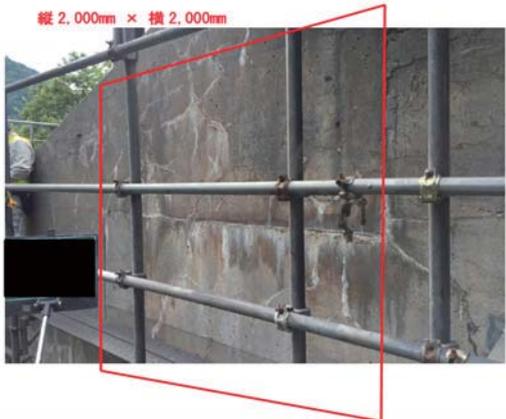


図-5 対象構造物と解析範囲

(3) 表面波速度の解析

計測は、片面からのアクセスに制限されていたことから、表面波を利用し、弾性波の送受信を同一面側から行うことを試みた。表面波は、コンクリートの表面において楕円軌道を描きながら伝播する。波の影響を受ける深度は、励起された波の波長に依存する。つまり、励起する波の波長を制御することにより、所定の深度まで影響

を与える表面波を生じさせることができると考えられる。表面波の当該影響深度に空隙や亀裂等が存在した場合、表面波の伝播が妨げられるため、コンクリートを伝わる見かけ上の伝播速度は低下すると考えられる。一方、ひび割れの注入等により空隙が樹脂等で満たされると、伝播速度は回復傾向を示すと考えられる。

本計測では、複数の深度における速度分布を得るために、複数の波長を持つ波を励起することとした。波の励起は鋼球の打撃により行うこととした。鋼球打撃における鋼球とコンクリートの接触時間 T_c は鋼球径 D を用いると式(1)で与えられることが知られており³⁾、また入力関数は正弦波の 1/2 波長と近似し、 $2T_c$ を 1 波長と仮定すれば、その重心周波数は式(2)で得られる。

$$T_c = 0.0043D \quad (1), \quad f = 1/(2T_c) \quad (2)$$

一方で、速度と重心周波数の関係より、鋼球径と励起される表面波の波長との関係は、おおよそ表-3に示す通りとなる。本計測においては鋼球径 5mm, 10mm, 30mm, 50mm の 4 種類を用いることとした。

表-3 鋼球径と波長の関係

鋼球の直径 (mm)	表面波の波長 λ (mm)
5	98
10	196
30	588
50	980

※表面波の速度は 2280m/s として波長 λ を算出した

(4) 計測条件

図-6に鋼球による打撃点と、センサ位置との関係を示す。図には、送受信の波線イメージも示した。センサは、周波数応答が 3Hz～約 15kHz の圧電型加速度センサを 9 個用いた。検出した波形は、TEAC 製の加速度計測システム WX-7000SYR により 200kHz のサンプリングレートで記録した。なお、センサは酢酸ビニル系のホットメルトボンドによりコンクリート表面に接着した。

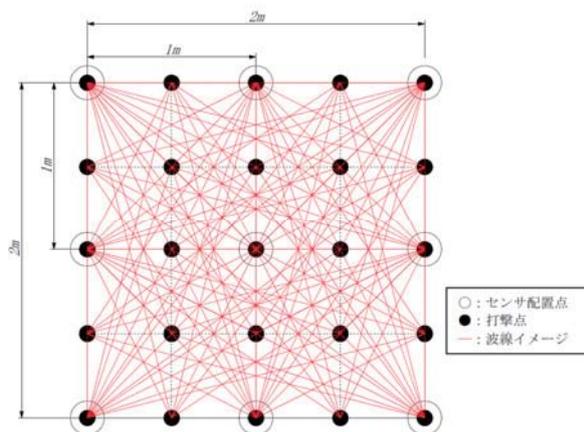


図-6 打撃点とセンサの位置

(5) 結果

各波長における速度分布の結果を図-7に示す。図には補修前に目視で確認できたひび割れも併せて示した。目視による確認の結果、補修前は対象面の上半分、特に左上の網目状のひび割れが目立ち、エフロレッセンスを伴っていた。表面波の解析から得られた速度分布の結果においても、補修前は対象面の左上端部付近に低速度領域が示される。補修後の結果は、補修前に示されるような赤色やオレンジ色の低速度領域は見られず、補修により表面波速度が飛躍的に回復したことが示されている。つまり補修により密実性が向上したものと

推察される。また、いずれの波長における結果も速度が回復傾向を示していることから、樹脂がごく表面にのみ充填されたのではなく、深部においても充填されたと解釈できる。

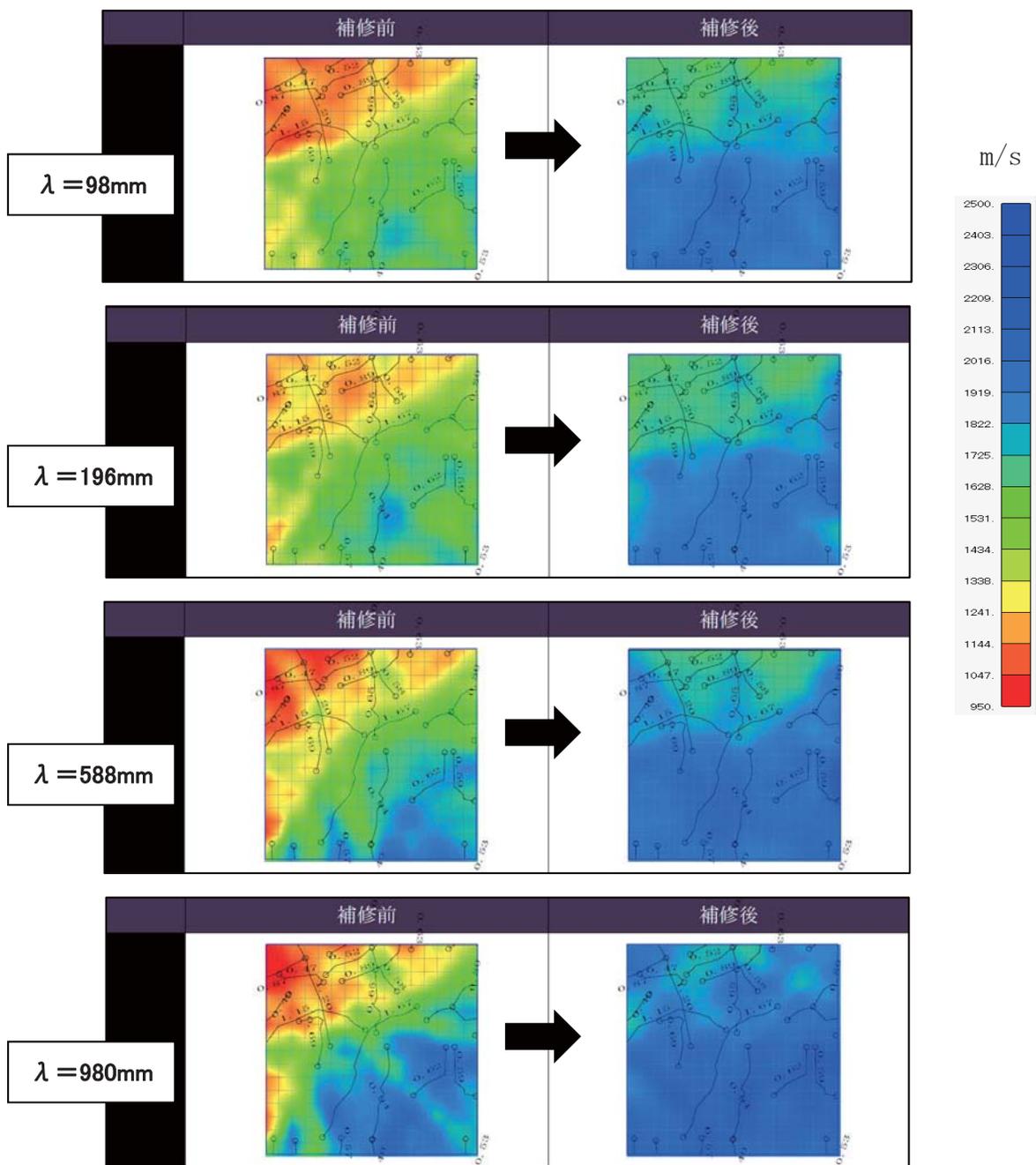


図-7 補修前後の速度分布

3. まとめ

ひび割れの充填評価に弾性波速度を利用することは有効な手段であることが分かった。現状、ひび割れの充填評価に関する非破壊検査手法は確立していないことを踏まえると、これら手法は客観的な指標として既に実用化レベルにあるようにも思われる。しかしながら、現段階では定性的な指標でしかない。今後は、充填に伴う弾性波の伝播挙動の基礎的研究を進めるとともに、表面波の波長と対象深度との関係も明らかにすることで、定量的な指標となるよう研究開発を進める方針である。

4. 謝辞

「1. RC 床版を対象としたひび割れ充填評価に関する検討」を遂行し、取りまとめるに際し、多大なご支援をいただきました株式会社新日本コンサルタントの古野昌吾氏、岡田成昇氏をはじめ、ご協力いただきました数多くの関係者の方々に感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1)Yoshikazu Kobayashi, Tomoki Shiotani: Computerized AE Tomography, Innovative AE and NDT Techniques for On-Site Measurement of Concrete and Masonry Structures, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 239-MCM, Springer, 47-68, 2016.
- 2)例えば、塩谷智基, 奥出信博, 桃木昌平, 小林義和:AE トモグラフィーによるインフラ構造物の健全性評価手法の提案, 日本非破壊検査協会, 第 18 回 AE 総合コンファレンス論文集, 39-42, 2011
- 3)Sansalone, M.J. and Streett, W.B. :Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y.,1997