

# 人と重機の接触災害リスク低減システムの開発

## ICT で人と重機の協調安全を実現

奥田 悠太

建設現場では人と重機が同じエリア内で作業することが多く、製造業では一般的な「隔離の原則」や「停止の原則」の実現が難しいため、安全の確保は人の注意力に頼る部分が多い。そこで、山岳トンネル掘削工事に ICT 技術を導入し、人・モノ・環境が情報を共有することで安全を確保する協調安全 (safety2.0) という概念に基づいた安全管理システムの開発を目指すこととなった。

本稿では、トンネル掘削作業の「ずり出し作業」に着目し、ビーコンを利用した位置情報システムと、高照度赤色 LED ライトを利用した警告照明システム、AI を搭載した人検知カメラシステムを組み合わせ、人と重機の接触災害リスク低減システムの現場導入について報告する。

キーワード：山岳トンネル、協調安全 (safety2.0)、安全性・生産性の向上、ICT、ビーコン、AI

### 1. はじめに

建設現場において遠隔操作による無人化や、完全なる自動化施工の実現は依然として課題が多く、人と重機が同じ領域で協働して作業を行う必要がある。例えば山岳トンネル掘削工事におけるずり出し作業では、関係者以外の切羽近傍エリアへの立ち入りは禁止されているが、重機オペレーターやクラッシャーの監視員は切羽エリア内に立ち入って作業を行う必要があるため、単純に「人の作業エリア」と「重機の作業エリア」を設定してお互いの進入を禁止することができない。そこで、ICT・IoT・AI 技術により、人・重機・環境がお互いに情報を共有することで、人の状態、環境の状態に合わせて作業エリアへの入退場を管理する安全支援システムの開発を目指した。

本稿では、2019 年に熊本 57 号滝室坂トンネル西新設 (一期) 工事 (工事延長=2,679 m, 掘削断面積=107 m<sup>2</sup>) に導入したトンネル掘削工事のずり出し作業における、人と重機の接触災害リスク低減システムの構成と、導入にあたっての課題、導入効果について報告する。

### 2. システムの概要

本システムの開発にあたり、山岳トンネル掘削工事のずり出し作業での人と重機の接触災害リスクについて洗い出しを行った。

- ①人が切羽エリアに侵入し、重機と接触
  - ②重機オペレーターが切羽エリアで重機から降車し、他の重機と接触
  - ③重機が人の存在に気付かず接触
  - ④人が重機の接近に気付かず接触
- これらのリスク低減を実現するために以下のシステムを開発、現場導入した。

- ①ビーコンを用いた位置情報管理システム (図—1)
- ②警告照明システム (図—2)
- ③ホイールローダー制御システム (図—3)
- ④バックホウ制御システム
- ⑤ AI 搭載人検知カメラシステム (図—4)



図—1 位置情報管理システム



図—2 警告照明システム

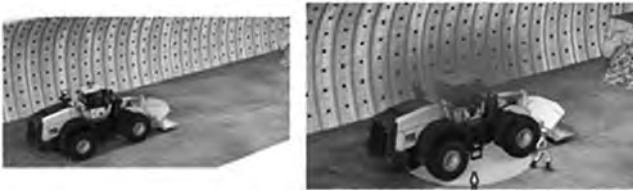


図-3 重機制御システム



図-4 AI搭載カメラシステム

### (1) ビーコンを用いた位置情報管理システム

本システムは、BLE (Bluetooth Low Energy) 信号を発する EXTx (以下 発信機) (写真-1) と、受信する EXBeacon (以下 受信機) (写真-2) により位置情報を測位するシステムである。受信機は坑内に10m 間隔で設置し、EXGateway (以下 中継機) と現場無線 LAN ネットワークを経由して EXCloud (以下 サーバー) へ情報が送信される。サーバー上で人や重機の位置がマッピングされ (図-5)、ずり出し作業中に切羽エリアに関係者以外の立ち入りがなく監視する。ビーコンによる位置測位の課題として、測位精度に10m 程度の誤差が生じることがあげられる。そこで切羽エリアと駐機エリアの境界には指向性



写真-1 発信機



写真-2 受信機



写真-3 照明架台と白色 LED 照明



白色 LED が消灯し、  
赤色 LED (警告灯) が点灯する

写真-4 赤色 LED 照明点灯モード



図-5 マッピング状況

アンテナを設置し、立入禁止ラインを切羽エリアから10m 程度後方に設定することで、確実に捕捉できるようにした。

### (2) 警告照明システム

本システムは照明架台に白色と赤色の高照度 LED 照明を設置し、点灯方法を一括で制御するシステムである。通常時は白色 LED 照明のみが点灯し、切羽近傍で200lx の照度を確保することで、作業の安全性向上を図った (写真-3)。位置情報管理システムで侵入者を検知すると、アラート信号を受信して赤色 LED 照明と白色 LED 照明が交互に点灯し (写真-4)、大音量スピーカーが発報する。これにより、騒音が大きな作業中のトンネル坑内においても確実に危険を知らせることが可能となった。

### (3) ホイールローダー制御システム

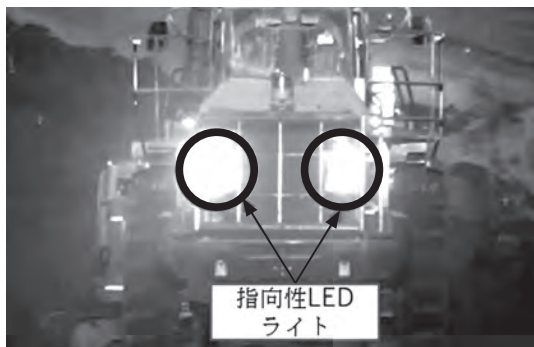
本システムは重機オペレーターの降車監視と、重機移動時の視認性を高めるためのシステムである。まず、重機の運転席内に設置したビーコン受信機でオペレーターの降車を監視し、ずり出し中に降車を検知した場合には、重機に設置した警告灯が発報し、周りの重機にオペレーターの降車を知らせる。これにより重機オペレーターがずり出し作業中に重機から降車して



写真一五 警告灯点灯状況



写真一八 シーケンシャルライト点灯



写真一六 指向性赤色LEDライト

接触するリスクを低減している（写真一五）。また、ホイールローダーの前後に指向性赤色LEDライトを設置し、前後進に合わせてライトが点灯（写真一六）し、周囲からの視認性を高めた。これにより、人が重機の接近に気付かずに接触するリスクを低減している。

#### (4) バックハウ制御システム

ホイールローダー制御システム同様、重機オペレーターの降車を監視し、降車を検知した場合は警告灯に加えて車体後部のシーケンシャルライトが赤色に発光する（写真一七）。前後進時にはシーケンシャルライトが外側から内側にむけて青色に発光し、周囲からの視認性を高めた（写真一八）。



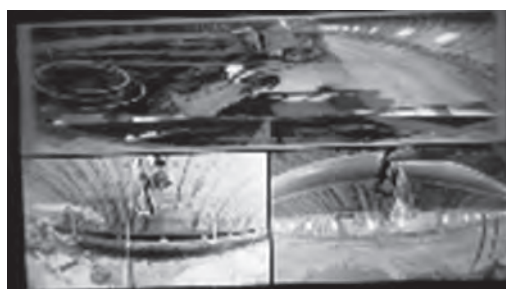
写真一七 警告灯点灯状況

#### (5) AI 搭載人検知カメラシステム

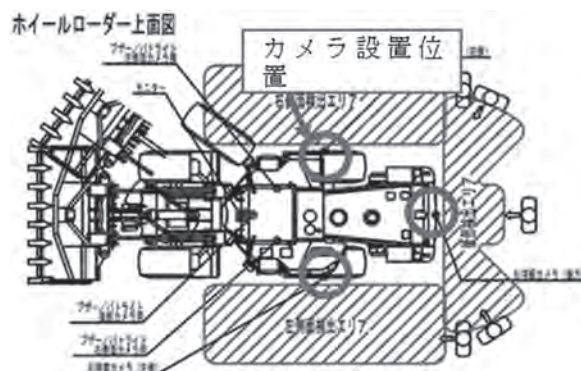
重機オペレーターの死角となる左右後方の三方向に人を検知するAIを搭載したカメラ（写真一九、10）を設置し、（図一六）に示す検知エリアに人または車両が侵入した場合には、運転席に設置したモニターとLEDライトが発報することで、重機オペレーターが周囲にいる作業員の存在に気付かずに接触するリスクを低減している。



写真一九 人検知カメラ



写真一〇 カメラモニター



図一六 AIカメラ検知範囲図

### 3. 現場導入結果

#### (1) 導入時の課題と解決策

##### (a) 現場のシステム運用体制の確立

本システムの導入にあたり、現場職員、協力業者、作業員から理解を得て、継続的にシステムを運用できる体制の構築が重要であった。そこで、アニメーション動画（図—7）を積極的に活用した勉強会を複数回実施し、システムの構成や運用イメージ、協調安全について説明を行った（写真—11）。システム導入後は、運用ルールや機器の使用感、要望について1か月間ヒアリングを実施し、ソフト・ハード両面で様々な意見を得ることができた。それらを考慮した運用ルールへの変更や、機器の調整を行うことで継続運用に対する理解が得られた。

##### (b) ビーコンの位置測位精度の確保

運用開始直後、切羽エリアへの侵入者がいないにも関わらず、警告照明システムが発報する誤作動が多発した。トンネル坑内、特に切羽エリア近傍にはクラッシャーや、テールピース台車、電源台車など鋼材が存在するため、ビーコンのBLE信号が乱反射しやすい上、ホイールローダーがクラッシャーにずりを投入する際に、（写真—12）に示すように照明架台とホイールローダーの車体により、BLE信号の反射断面が大



写真—12 誤作動多発時の状況

きくなったことが原因であった。そこで、BLE信号の受信回数と電波強度の関係性を見直すとともに、越境を検知するための指向性受信機の設置位置を50cm単位で検証を繰り返した結果、誤検知が発生しなくなった。

#### (2) システム導入による効果

##### (a) 接触災害リスクの見える化

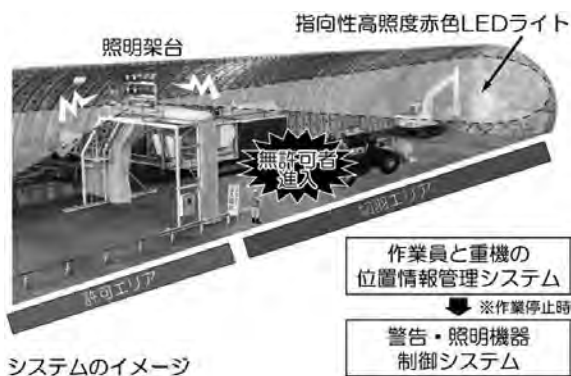
位置情報管理システムと警告照明システムの導入により関係者以外の立入りを常に監視し、異常発生時には迅速かつ正確にリスク伝達が可能となった。従来は、レーザーポインターやジェスチャーなどで作業停止指示を伝達しており、全重機を停止させるまで時間を要していた。警告照明システムの導入により、重機オペレーターからも「重機を停止させるか迷うことがなくなった」との評価を得た。

##### (b) 作業員の安全意識の改善

本システムの導入後、切羽エリア近傍で安全通路に関する注意回数について調査したところ、導入当初は3回／一方であったが、システムの定着とともに減少する傾向が見られた（図—8）。位置情報管理システムにより、切羽エリアへの侵入を監視されているため、後向きの作業員はずり出し作業中に切羽エリアに近づくなくなった。また、切羽監視員や重機オペレーターが後向きの作業員や見学者に対して、ずり出し作業中には切羽エリアに近づかないように指導する行動も見られた。

(c) 作業効率化に向けた作業員の自主的な取り組み  
補助工法で施工した鏡ボルトの回収作業に伴う降車回数（図—9）、こそく作業時のあたり確認に伴う降車回数（図—10）についても調査を実施した。その結果、降車回数や作業停止時間に関する指導を行っていないにも関わらず、いずれの回数も減少する傾向にあった。

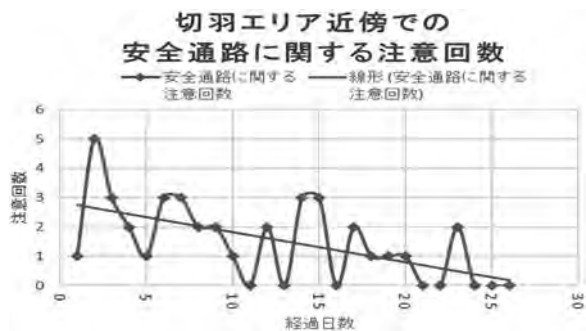
これらの結果から、ずり出し作業時の人と重機の接



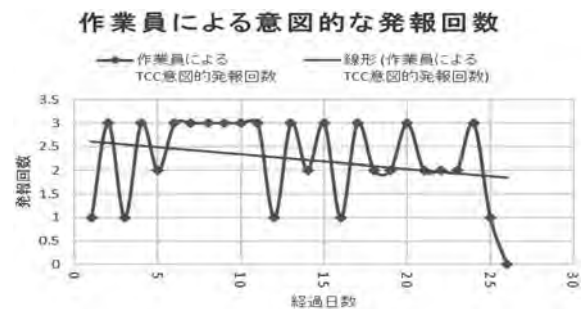
図—7 教育用アニメーション



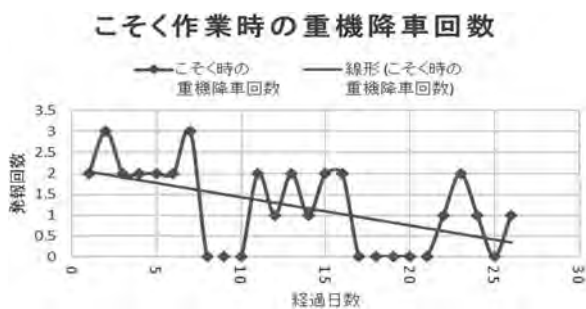
写真—11 現場勉強会



図一八 安全通路に関する注意回数



図一九 作業員による意図的な発報回数



図一〇 こそく作業時の重機降車回数

触災害リスクの低減という本来の目的に加え、安全支援システムの導入により一時的に生産性が低下するが、システムの運用が浸透するにつれて作業員の自主的な行動変化によって生産性が回復することが確認できた。

#### 4. おわりに

本システムは、ビーコンシステムによる位置測位や、AIによる人検知、無線通信技術によるネットワーク構築など要素技術を組み合わせたシステムだが、運用上のルールは「ルール違反をすると警告照明システムが発報する」、「発報したときは作業を止める」という非常にシンプルなルールである。そのため、経験年数が浅く現場に潜むリスクに気付かない人でも、リスクから身を守ることができる点で非常に有用性が高い。

本システムの導入にあたり、ハードの導入だけでなくソフト面の整備に取り組んだ結果、Safety2.0に適合する技術<sup>2)</sup>としてセーフティグローバル推進機構<sup>3)</sup>が認定する「Safety2.0」の適合認証を取得した。

今後は、本システムの改良に加えて、トンネル以外の工種への協調安全の普及に向けて取り組んでいく。

JCMA

#### 《参考文献》

- 1) 向殿政男：安全学からみた建設業に関する安全について、No.777, pp9-14, 2019.11.
- 2) 有山正彦：Safety2.0（協調安全）の社会実装化に向けて、安全と健康, 2019.8.
- 3) セーフティグローバル推進機構：労働災害防止の観点から協調安全「Safety2.0」を推奨社会への普及を目的に「Safety2.0 適合審査登録制度」を運用している。

#### 【筆者紹介】

奥田 悠太（おくだ ゆうた）  
清水建設㈱  
土木技術本部 イノベーション推進部

