

# ICT 技術を用いた人と重機の接触災害リスク低減システムの開発

## 人と重機の協調安全

清水建設（株）

○ 奥田 悠太  
藤井 暁也  
佐藤 有

### 1. はじめに

情報を得るためのセンシング技術、情報を運ぶための無線通信技術、情報を分析するための AI やクラウド技術の発展は目覚ましく、現実世界の様々な情報を収集して解析し、現実世界にフィードバックすることで安全性や生産性を向上させるデジタルツインの実現が現実となりつつある。

そこで、建設現場においても、人と機械が同じ領域で協働する環境において、ICT・IoT・AI 技術などを用いて人・機械・環境が情報を共有しながら安全を確保しようという協調安全という考え方に<sup>1)</sup>に基づいた安全システムの導入を目指した。

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＝2679m、掘削断面積＝107m<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. 開発の背景

我が国における建設業の死傷労働災害の発生件数は、横ばいで推移し下げ止まりの状況にある。建設業の現場では、人と重機が同じ領域で協働して作業することが一般的で、製造業では一般的な「隔離の原則」や「停止の原則」の実現は難しい。そのため、指差呼称やゲーパー合図といったルールの周知徹底、安全教育の実施による安全意識の向上などに取り組んでいるが、これらは人の注意力に依存し、人の安全意識の差や現場経験量・集中度・疲労度によっても安全レベルにばらつきが生じる。以上の理由から新たな安全管理手法の導入が望まれていた。

### 3. 開発コンセプト

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を防止するために、以下 4 つのケースを想定した。

- ①人の切羽エリア侵入時の重機との接触。
- ②重機オペレーター降車時の他の重機と接触。
- 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。

これらの接触のリスク低減を実現するために以下のシステムの開発を行い、現場に導入した。

- a)ビーコンを用いた位置情報管理システム（図-1）
- b)警告照明システム（図-2）
- c)ホイールローダー制御システム（図-3）
- d)バックホウ制御システム
- e)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

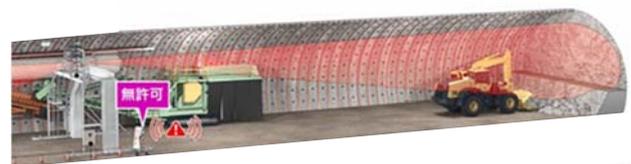


図-2 警告照明システム



図-3 重機制御システム



図-4 AI 搭載カメラシステム

#### 4. システム構成

システムブロック図を（図-5）に示す。まず、位置情報により人と重機の位置を把握し、ずり出し作業時にオペレーター以外の人や作業に関係のない車両が切羽エリアに侵入しようとした場合、警告照明システムが作動し、異常を知らせる。これにより①人が侵入し、重機と接触するリスクを低減している。また、重機オペレーターがずり出し作業中に切羽エリア内で降車した場合には、ビーコンにより降車を検知し、重機に設置した警告灯で周囲に異常を知らせることで、②重機オペレーター降車時の、他の重機と接触するリスクを低減する。万が一、ビーコンの故障などで侵入者がいた場合には、重機に設置した AI カメラにより重機オペレーターに人の接近を知らせることで、③重機が人の存在に気付かず接触するリスクを低減している。④の人が重機の接近に気付かず接触するリスクは、指向性ライトや、シーケンシャルライトにより重機の接近を周囲の人に知らせることでリスクを低減する。

##### 4. 1 ビーコンを用いた位置情報管理システム

トンネル坑内では GNSS 等の位置測位システムを利用することはできない。そこでビーコンシステムを採用した。ビーコンシステムとは、BLE(Bluetooth Low Energy)信号を発する EXTx（以下 発信機）と、受信する EXBeacon（以下 受信機）により位置情報を測位するシステムである。故障や電池切れなどに対してロバスト性を確保するために、人や重機に発信機を 2 個ずつ装着した（写真-1）。トンネル坑内には 10m 間隔で受信機を設置し（写真-2）、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。サーバーでは受信した情報と、あらかじめ設定された地図を照合して人や重機の位置を特定し、マッピングする（図-6）。また、クラウドに登録する情報には所属会社や所属グループの情報が付与されてお

り、入退許可を管理することができる。

ビーコンシステムは Bluetooth 信号の受信強度によりどの受信機の近傍にいるかを判定しているため、測位位置に 10m 程度の誤差がある。そこで切羽エリアと駐機エリアの境界には指向性アンテナを設置すると共に、越境判定ラインを切羽エリアから 10m 程度後方に設定することで、侵入前に確実に捕捉できるようにした。

##### 4. 2 警告照明システム

ビーコンを用いた位置情報システムにより、人及び車両の進入を検知した場合、作業中の重機オペレーターと侵入者に対し、迅速かつ確実に異常を伝達する必要がある。そこで、防爆カーテンの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可能な警告照明システムを導入した。通常時は白色 LED 照明のみ点灯しており、切羽近傍で 200 lx 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）。



写真-1 発信機



写真-2 受信機

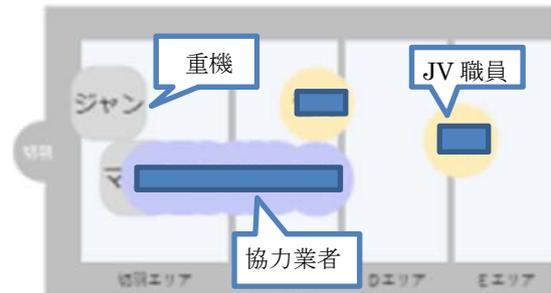


図-6 見える化マッピング

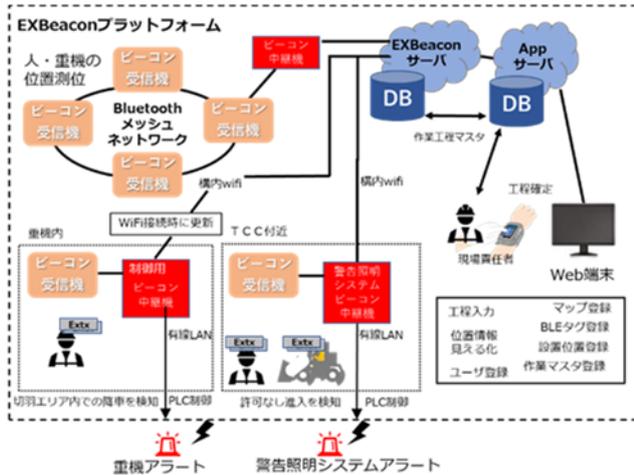


図-5 システムブロック図



写真-3 防爆カーテン及び警告照明システム

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 照明が点灯し、大音量スピーカーでアラートを発することで、作業中のトンネル坑内でも確実に危険を認識することができる（写真-7）。

本システムは発報の原因となった侵入者が、切羽エリア外に出るまで発報を停止できないプログラムになっており、侵入者が完全に退場するまで重機作業を再開できない。

#### 4. 3 ホイールローダー制御システム

重機オペレーターの降車検知はビーコンシステムで実施した。着座スイッチなど物理的に運転席への着座・離席を検知する方法もあるが、作業員が重機の周囲の状況を確認するために腰を浮かせて前のめりになっただけでも降車と検知し、発報してしまう可能性があるため、ビーコンシステムを採用した。

本システムは、ビーコンの受信機を重機の運転席内に設置し、重機オペレーターの発信機の電波強度からオペレーターの降車を検知する。降車を検知すると、重機に設置した警告灯が点灯（写真-4）し、周囲にオペレーターの降車を知らせる。

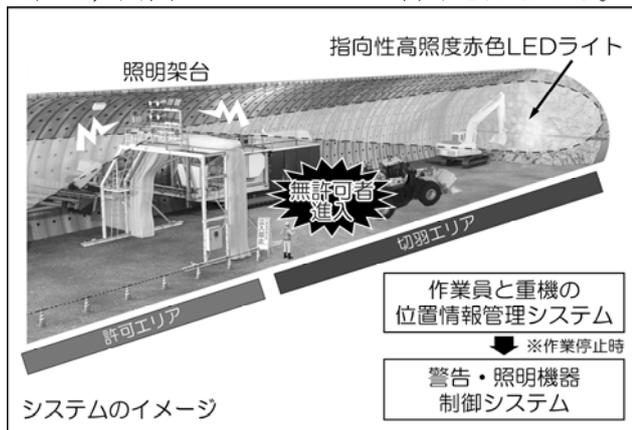


図-7 警告照明システム



写真-4 警告灯点灯状況

また、車体の前後には、重機の前後進に合わせて点灯する指向性赤色 LED ライトを設置した（写真-5）。これにより騒音の大きなトンネル坑内においても、視覚的に重機の動きを察知することができる。

#### 4. 4 バックホウ制御システム

ホイールローダー制御システムと同様のシステムをバックホウにも搭載し、重機オペレーターの降車をビーコンシステムにより検知する。降車を検知すると、警告灯が点灯するとともに、シーケンシャルライトが赤色で点滅し、周囲に異常を知らせる（写真-6）。重機の前後進に合わせてシーケンシャルライトが外側から内側に向けて青く発光（写真-7）し、周囲に重機の移動を知らせる。



写真-5 指向性赤色 LED ライト



写真-6 警告灯及びシーケンシャルライト点灯



写真-7 シーケンシャルライト（走行時）

#### 4. 5 AI 搭載人検知カメラシステム

位置情報管理システムでは、発信機を一人（一台）につき2個設置し、受信機も複数台設置することでロバスト性を確保しているが、機器の故障などにより侵入を検知できない場合、侵入した人に重機オペレーターが気付かず接触する可能性がある。そこで、オペレーターの死角となる重機後方と左右にAIを搭載した人検知カメラを設置した（写真-8、写真-9）。本システムは、カメラに内蔵されたAIによって、図-8に示す検知エリアへの人や車両、重機の進入を検知し、運転席に設置したモニターの発光とブザーによりアラートを発する。

### 5 導入プロセスでの課題と解決策

#### 5. 1 現場運用体制の確立

新しいシステムを現場に導入するには、実際にシステムを活用する現場職員・作業員の理解を得ることが重要である。

解決策として、協調安全とは何か、システム構成、運用イメージ等について、アニメーション動画を積極活用した勉強会を複数回実施することで、システムへの理解を得ることができた（写真-10）。

導入後は、作業員に対して運用ルールや機器の使いしやすさ、要望などのヒアリングを1カ月間毎日実施することで、ソフト・ハード両面で様々な要望を得ることができた。それらを加味した運用ルール・機器の設置を行うことで、現場の理解を得ることができ、継続運用が可能となった。



写真-8 人検知カメラ



写真-9 モニター

カメラ設置位置

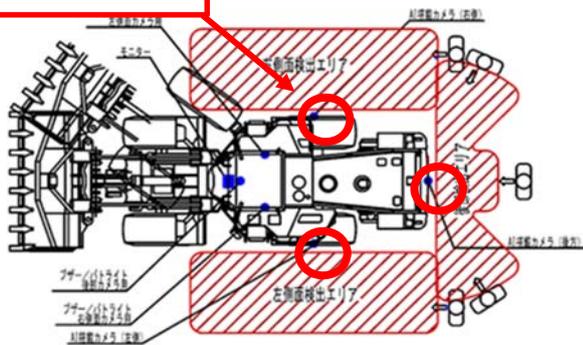


図-8 AI 搭載カメラの検知エリア

#### 5. 2 位置測位精度向上

トンネル坑内は円筒形の空間が直線または緩やかな線形で連続しているため、電波が遠方まで到達しやすい環境である。一方で支保工や重機、ベルトコンベヤーなどの鋼材が存在するため、電波が乱反射しやすい環境でもある。試験運用中には、切羽エリア外で作業していたにもかかわらず、切羽エリアに侵入したと誤検知し、警告照明が発報する誤作動が多発した。これは、越境ライン付近が、クラッシャーやテールピース台車により電波の反射状況が特に複雑な上、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-11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、切羽方向の見通しが悪くなり、Bluetooth信号の乱反射が増長されるためだと推測された。そこで、Bluetooth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単位で移動して検証を繰り返した結果、誤検知が発生しなくなった。



写真-10 勉強会



写真-11 誤検知多発状況

## 6 導入効果

本システムの導入により、下記3点の効果が得られた。

### 6.1 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坑夫以外の侵入を常に監視し、迅速かつ正確にリスク伝達が可能となった。これまでの人による監視では、常時監視が難しいうえ、現場職員や切羽監視責任者が作業を停止させたい場合、レーザーポインターやジェスチャーなどで停止指示を出しており、重機に接近する必要がある上、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。

### 6.2 作業員の主体的な安全行動

これまではルール違反を犯しても自らが警告を受けるだけであった。しかし、本システムの導入により、切羽エリアに侵入すると警告照明システムが作動するため、掘削作業全体に支障をきたす。そのため、オペレーター以外の作業員はざり出し中の切羽エリアに近づかなくなった。また、重機オペレーター側は、侵入者によって作業が止められないように、自ら他の作業員に注意を行うようになった。切羽エリア近傍での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、システムの定着と共に減少する結果が得られた(図-9)。

### 6.3 作業効率化に向けた自主的な取り組み

補助工法で施工した鏡ボルトの鋼材などは、ざり出し中に重機から降車して回収する必要がある。本システムの導入により、降車して作業する場合には警告照明システムを意図的に発報させ周りの重機を停止させるルールとした。図-10に示すよう

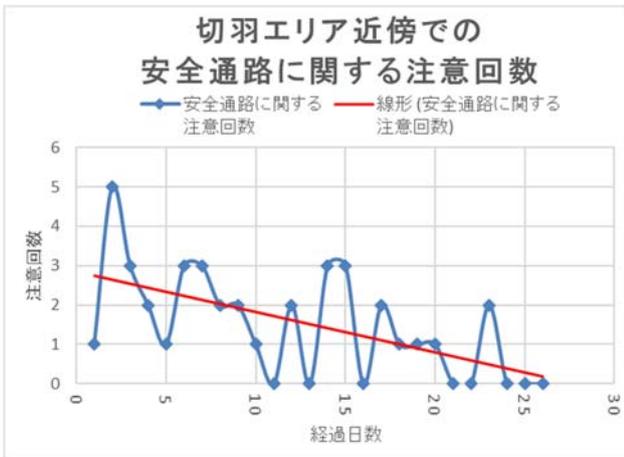


図-9 安全通路に関する注意回数

に、導入当初は平均で2.6回/一方の発報があったが、統計開始後26日目には1.9回/一方に減少した。現場職員から作業員に対し、発報回数や停止時間などについて指示は行っておらず、作業員が自主的に停止回数を減らすための取り組みを行っていると考えられる。

これらの結果から、ざり出し作業時の人と重機の接触災害リスクの低減という本来の目的に加え、安全装置の導入により一時的に生産性が低下するが、システムの浸透が進む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。

## 7 今後の開発

今回実施した熊本57号滝室坂トンネル西新設(一期)工事での本システムの現場実装により以下の要望・課題が明確になった。

### 7.1 切羽エリアへの入場権限の付与について

去年度導入した位置検知管理システムでは、重機・クラッシャーオペレーターが日替わりで交代し、入場を許可する人の限定が難しく、掘削作業に携わる坑夫は入場可能、それ以外の後向き班や現場職員は不可で区別をしていた。今後は、重機・クラッシャーオペレーターを特定し、対象となる人にだけ都度入場許可を付与するシステム(図-11)を構築することで、更なるリスク低減を目指す。

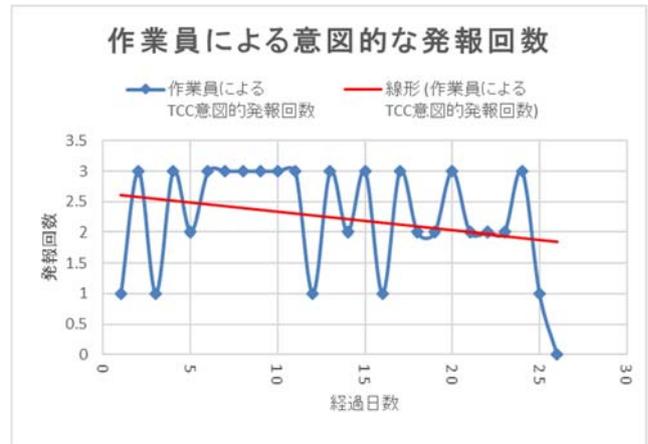


図-10 作業員による意図的な発報回数



図-11 オペレーターへの入場許可



図-12 システムの連動

## 7. 2 システムの連動

現システムでは、重機制御システムと警告照明システムは連動しておらず、重機オペレーターの降車を検知すると、重機に取り付けた警告灯が点灯する。しかし、警告照明システムと比較すると視認性に劣り、他の重機オペレーターが気付かない可能性がある。そこで、現場に整備された無線LANネットワークを経由して各システムの制御盤同士が情報を共有できるようにアンテナの増設を行い、重機オペレーターの降車を検知すると警告照明システムが自動で作動するシステムへの改造に取り組む(図-12)。

## 7. 3 位置測位、降車検知精度の向上

切羽エリアへの入場権限の付与や、システムの連動を実施する場合、重機に乗車しているオペレーターの未検知や判定ミス、降車誤検知は、警告照明システムの誤発報につながる。警告の誤発報が頻発すると、作業員からのシステムに対する信頼度の低下を招き、本システムの継続利用にとって大きな障害となる。先に述べた通り、ビーコンシステムは10m程度の測位誤差を持っており、詳細な位置を把握するためには受信機を検知したい場所ごとに設置する必要があるが、費用とメンテナンスの面で増設は難しい。そこで、着座スイッチや通行検知ゲートなど、物理的に人を検知可能な機器とビーコンシステムを組み合わせることで、検知精度を確保できないか検討を行う。

## 7. 4 AI搭載カメラシステムの高度化

本システムで採用したAI搭載人検知カメラは、単眼カメラを採用しており非常に低コストではあるが、距離推定が行えない。一方でステレオカメラを用いたAI搭載人検知カメラはカメラと人の距離を推定することができるが、非常に高価であり、現場のすべての重機に搭載するにはコストがかかる。そこで、単眼カメラで人との距離推定が可能なカメラシステムを開発し、現場実装に向けて現場検証をすすめている<sup>2)</sup>(写真-12)。

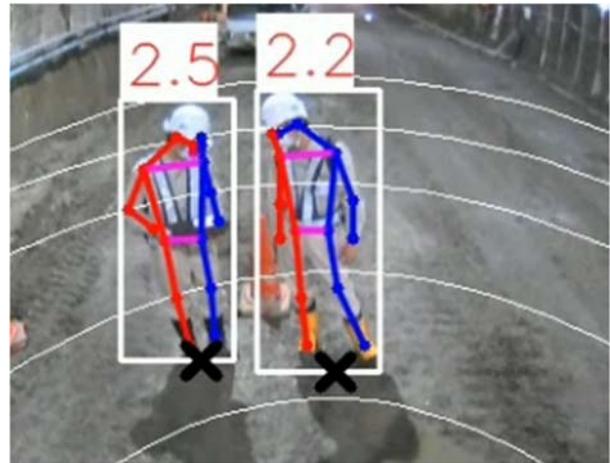


写真-12 単眼カメラにより距離推定

## 8 おわりに

本システムについて、ビーコンシステムとカメラによる現場状況の取得、Bluetooth信号や現場無線LANネットワークによる情報の運搬、クラウドサーバーやAIでのデータの解析、警告照明システムによる情報のアウトプットを1つのシステムとして現場に導入したことは大きな成果といえる。また、協調安全の考え方は建設現場ではまだ普及していないものであったが、開発部署と作業所、協力業者が協議を重ねて運用方法などの検討や運用責任者の選任、運用マニュアルの整備を行った結果、safety2.0に適合する技術<sup>3)</sup>としてセーフティーグローバル推進機構<sup>4)</sup>が認定する「safety2.0」の適合認証を取得することができた。ICT, IoT, AI, 無線通信技術の発展は目覚ましく、将来的にはオートメーション化によって人と機械を時間的・空間的に分離することで安全を確保することが望ましい。しかし、建設現場におけるフルオート化にはまだ壁が多い。そこで、人と重機の協調安全「Safety2.0」に基づいた安全管理手法と技術を広く普及展開する必要がある。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適応に向けて取り組んでいく。

### 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) 谷口俊一・平原大暉・園田亜斗夢・岡澤岳・奥田悠太・鳥海不二夫:建設機械による災害防止のための対人距離推定手法の研究
- 3) 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.
- 4) セーフティー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。