

37. 次世代山岳トンネル施工システムの構築

重機・ヒト・環境の位置・移動・状態を統合ガイダンス

清水建設（株） ○ 小島 英郷
 (独) 労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所 清水 尚憲
 (株) 演算工房 林 稔

1. はじめに

世界では、ICT 機器の爆発的な普及や、AI、ビッグデータ、IoT 等の社会実装、あらゆる場面で革新的なデジタル・システムが生まれようとしている。

政府は「未来投資戦略 2018」での成長戦略と「Society 5.0」の本格的な実現にむけて、新たな仕組みの導入を進め始めている。その中で国土交通省は、全ての建設生産プロセスにおいて、ICT 等を活用する i-Construction を推進し、建設現場の生産性を 2025 年度までに 2 割向上させることを目指している。

この様な時代に合わせて、次世代を見据えた新たな施工管理の在り方を構築する試みを始めたので報告する。

2. システム概念

2.1 開発の背景

建設業における労働災害の発生件数は下げ止まりにあり(図-1)、山岳トンネル施工の労災保険比率は、建設業他職種に比べて4倍以上高い。その理由として切羽崩落災害と重機接触災害の二大重篤災害が、依然として繰返し発生している現状があり、少子高齢化問題や働き方改革などを内包する労働生産活動の中での安全性の向上が、生産性の向上に優先する喫緊の課題となっている。

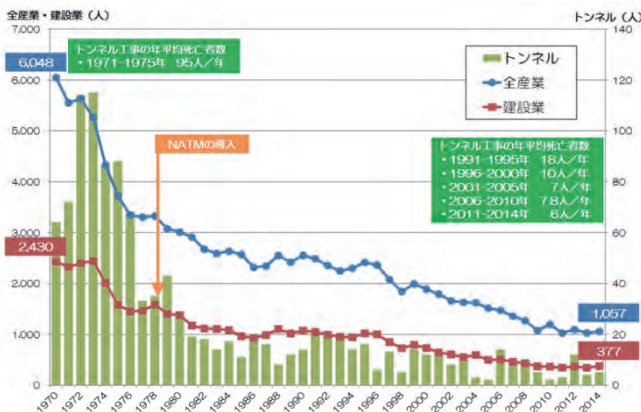


図-1 建設業の労働災害と山岳トンネルでの死亡事故件数の推移

2.2 基本概念

施工システムを構築するにあたり、二つの重要な考え方を概説する。

(1) 支援的保護システム¹⁾

生産現場にある安全衛生上のリスク低減は、安全管理体制や制御システムにより回避しているが、最終的に活動者の能力（教育や察知力）に依存して防御している。支援的保護システムとは、デジタルテクノロジーによる支援システムを組み込むことで、残留リスクに含まれる不確定性を低減することにより、ヒューマンエラーに起因する重篤災害を低減しようとするものである。(図-2)。

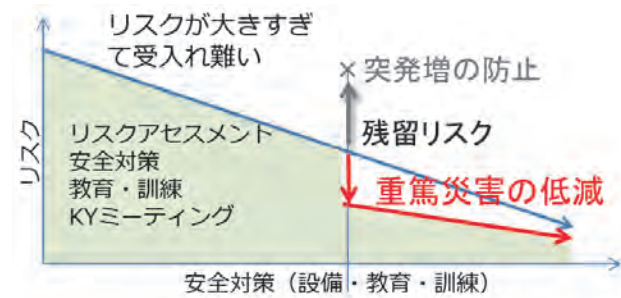


図-2 支援的保護システムの概念

(2) Safety2.0

建設現場の生産活動は、工程進捗にあわせて、工事環境、工事関係者、工事機械等の組合せが目まぐるしく変化する。生産する対象物に対して、安全システムの固定化は、運用体制が困難であることから、これまで元請管理責任の下で師弟関係的な安全リスク管理手法を熟成させてきた。一方、海外欧米などの建設現場では、早々に安全システムとしての考え方に主眼が置かれ、安全設備の様式、安全思想に差異が観られるとも言われている。

ヒトを主体とした安全の方法論、例えば相方への声掛けや命綱の捌き方など、師弟関係による教育的な安全技術を Safety0.0 とし、産業革命後に起きた機械化、ロボット化により、相互を隔離および安全装置の搭載によりヒトの安全を確保する時代の安全工学を Safety1.0 としている。Safety2.0

は、より高度なデジタルテクノロジーを生産現場に組み込むことで、ヒトと機械が協調しながら協働作業を可能とし、安全性と生産性を高次元で達成させようとするものである(図-3)。

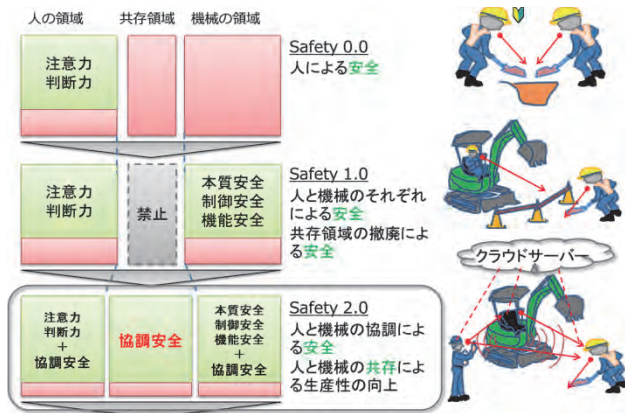


図-3 Safety2.0の概念

2.3 システムの構成

これまで、建設現場の生産活動は、現場代理人、監理技術者の頭脳に経験値としてデータを蓄積・高度分析と共に、彼らからの伝達指令がある一方で、協力関係にある工事関係者との情報共有と技術力、調整能力に下支えされてきた部分が多い。しかし、これらは全てアナログ生産体制であり、下げ止まりの重篤事故も散発する体制に限界状態が来ているとも云われている。

本施工システムは、「支援的保護システム」と「Safety2.0」の概念をベースに最新のデジタルテクノロジーを駆使し、ヒトと機械、生産環境の全てをデジタル情報で見える化、それらから安全ガイダンスを導出するとともに管制体制を通じてヒト・機械に直接指令を出すものである(図-4)。

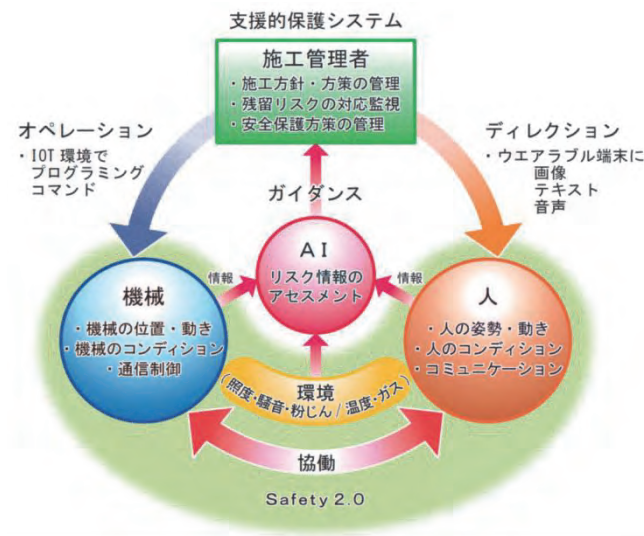


図-4 高度施工管理システムの概念

建設現場の生産活動に係る三要素(機械、ヒト、協働する環境)において、ヒトと機械の位置、移動、稼働状況とそのコンディションの情報、また、ヒト・機械に影響を与える作業環境をデジタル的に常時モニタリングすることで、生産指示に対するPDCA評価がより客観的になると同時に、膨大なデータ解析(もはやヒトによる対応はできないものでありAI人工知能からの判断ガイダンス)から、生産性と安全性がより安定的に底上げ・向上されるものと考えている。

2.4 山岳トンネル高度施工管理システム

山岳トンネル施工は、1970年代以降、工法発展とともに機械化・大型化、従事者の人数が激減し、生産性、安全性が飛躍的に改善されてきた。しかし、掘削作業は、固定された人員と機械編成によって、掘削箇所をサイクル作業を繰り返す工種であることから、他の工種に比べて本施工システムの構築と検証評価に都合が良いことから、まずはトンネル施工でのシステム開発に着手し、その後、他工種へも技術展開することとした(図-5)。

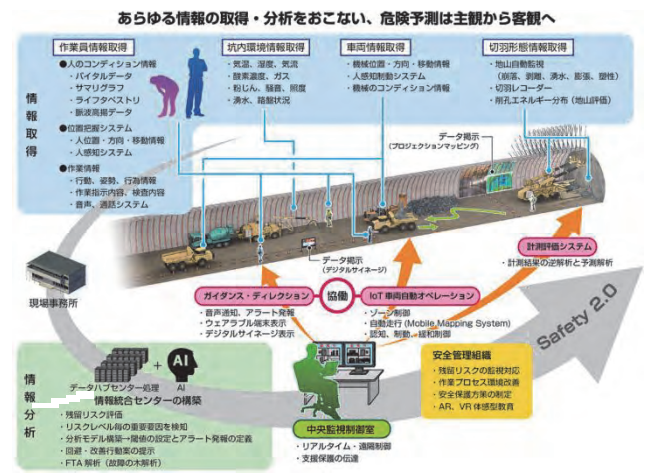


図-5 山岳トンネル高度管理システムの概念

構築する山岳トンネル高度管理システムは、さまざまな生産管理(安全衛生、品質・出来形、作業環境、歩掛進捗など)を含むものの中から、まずは安全衛生について、切羽崩落災害と重機接触災害の2大重篤災害の撲滅(100%)を開発目標とした。

(1) 山岳トンネル重篤災害撲滅の課題

山岳トンネルの労働災害は死に至る重篤災害につながる率が高く、それらは切羽崩落災害と重機接触災害の二つに代表される。このうち、重機接触災害の防止対策には、操縦者からの死角部における挟まれ轢過に対するさまざまな対策ルールがある。車両始動時にオペレーターが行う周囲の目視確認や車両発進・後退時のクラクション合図、作業毎の立ち入り禁止区域設定と重機稼働半径への立ち入り禁止ルールなどがある。最近では、強力なバ

ックブザー音装置やバックモニター、センサーカメラ、受発信タグ装着による接近センサー技術なども導入されている。しかしながら、それら運用とルール遵守徹底により安全が確保されているとしているにもかかわらず、最終管理体制が Safety0.0 に主眼が置かれているがゆえに、安全条件が揃わなくてもヒトの判断次第で稼働が可能な状態にあり、残留リスクの増減回避は、すべて瞬間的にヒトに委ねられた生産体制となっている。

(2) 山岳トンネルの施工環境

山岳トンネル施工では、作業指揮者や作業員は、ヘルメット、保護メガネ、耳栓、防塵マスク、保護手袋、落石防護用のバックプロテクター、保護長靴を常時着用しての作業であり、身体五感の低下状況にある。また、機械熱による高温多湿環境、照明機器による部分陰影の発生と変化、換気システムによる粉じん浄化の常時維持、削岩機等の高騒音に曝露される狭隘空間内での大型重機の高度な機械操作など、他工種の施工環境と比べても、心理・身体・機械・設備のすべてにおいて、過酷な作業形態である。

(3) 位置測位・コンディションシステムの概念

山岳トンネル高度管理システムの根幹技術となる、ヒトと機械の位置・移動・稼働・コンディションを把握するシステムの概念を示す(図-6)。

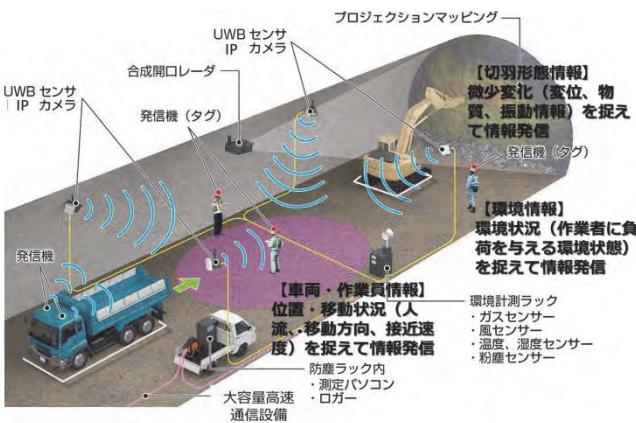


図-6 位置測位・コンディションシステム

3. 現場実証

新東名高速道路 高取山トンネル西工事 (中日本高速道路株式会社) での掘削工事において、約3ヶ月間のシステム検証を実施した(写真-1)。

3.1 装置と方法

UWB (Ultra Wide Band) 測位システムをトンネル側壁の高さ4m位置に20m間隔で設置した。UWB測位システムは、正確な時間情報を提供するマスターアンテナとの同期計測により、誤差が30cm以下の測位が可能であると言われている。掘削に係る作業員および重機車両の全てに発信タグを2個

ずつ付け追尾した。一方で、トンネル形状内では、電波の乱反射によりセンシング環境が低下することも知られており、画像からの位置測位と合せたハイブリッド方式も検証することとした。また、構成するシステム機器のロバスト性も確認した。



写真-1 位置・移動把握技術の検証状況

3.2 データの取得検証

(1) ヒトのコンディション

作業サイクルとヒトの運動頻度データを比較して相関関係を観たが、ヒューマンエラーを防止する為のコンディションデータを蓄積するためには、注意意識や交感神経の状態から心身状態の予測に至るアルゴリズムが必要と考える(図-7)。

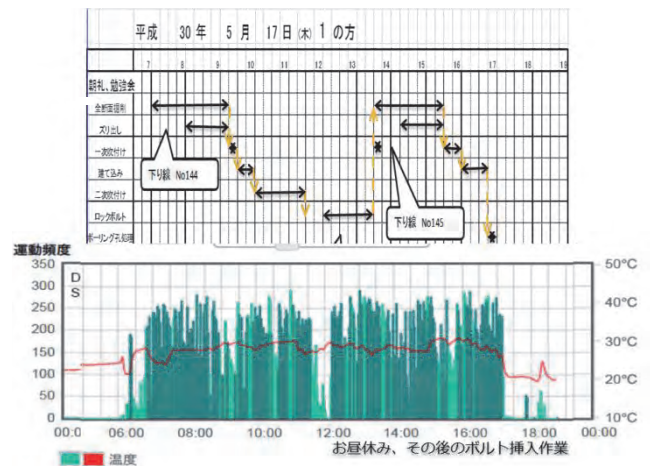


図-7 ヒトの活動量

(2) ハイブリッド追尾

取得したデータから、もっとも単純な一例を示す(図-8)。センシングエリアには、重機車両が一切なく、職長が始業前の環境点検に徒歩で入った状況である。UWB位置測位と画像処理による位置測位の結果を比較すると、UWB測位が公称精度以上にマルチパス発生の影響を受けることが分かった。



図-8 位置・移動の比較結果

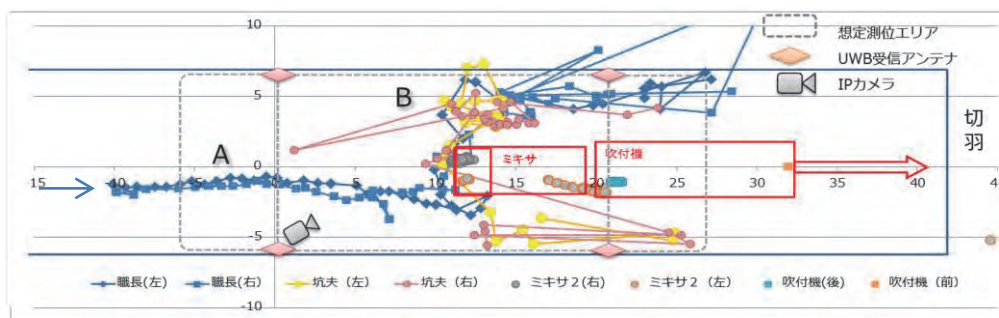


図-9 UWB位置測位システムによる結果

(3) 重機械による干渉

UWB 測位システムが、坑内環境の影響を受けている例を示す(図-9)。センシングエリアの半分に重機車両が駐機した吹付け作業中に、坑口側から進入した職長が坑夫に声を掛け(状況 A)、両者がミキサ車の反対側に向かった(状況 B)ものである。この駐機車両の有り無しにより、測位環境が大きく変化することが見て取れる。一方、動画データからの画像処理による位置測位は、モノのそばに立ち止った状態や車両背面を通過する行動は追尾できず、また、粉じんや光陰の関係から測位が乱れる場合も確認された。

3.3 危険パターン設定と抽出

社内にデジタル保管されているすべての事故報告書と、山岳トンネル施工マニュアル・個別作業手順書から、重機接触災害に繋がる 16 の危険パターンを分類設定し、取得データから危険パターンとの照合抽出が可能であることを確認した。(表-1)。

3.4 結果と考察

ヒトの活動量は、作業内容との相関性は見られしたが、ヒヤリハットにつながる心理的な状態変化の予測には、心拍や脈圧などの他の相関項目も取得評価するアルゴリズムが必要であると考えられる。

電波方式による測位システムは、狭隘部での大型重機(複雑な金属構造)による乱反射の影響は避けられないと考える。また、画像のヒト抽出技術

表-1 16危険パターンと抽出結果

No.	危険パターン名	検知有無	検知精度 ^{【※2】}
1	スリ出し作業中の立入禁止区域への進入	有	×
2	車両走行路への進入	— ^{【※1】}	—
3	重機が後退している	有	×
4	重機を離れる	有	×
5	止まっている重機の近くでの作業を行う(運転者搭乗中)	有	×
6	重機の急発進	有	△
7	重機車前周囲の確認をしない	有	×
8	必要な照度が保持されていない	有	○
9	坑内における重機の移動が最高速度(10km/h)を超え	有	△
10	車両系建設機械の乗車席以外の箇所に作業者が搭乗	有	×
11	坑内の気温が37度を超える場所がある	無	○
12	切羽近くに長時間滞在	無	×
13	換気が不十分なままの作業	無	○
14	(私病等により)1箇所に停止する	有	△
15	WBGT(熱中症指数)の値が、基準値を超過する	有	○
16	重機・車両の切返し中に作業員が近づく	—	— ^{【※1】}

【※1】:今回の評価期間中での測定は不可または困難

【※2】:測定精度に依存する、データクレンジング負荷 (○小 △中 ×大)

は、ヒトの立位特徴量を学習したもので、画角設定にはある程度の制限があった。システムのロバスト性が原因と思われる事象も度々発生し、取得データの欠損や精度の課題と合せて、高度なデータクレンジング技術が必要であることがわかった。

4. おわりに

3ヶ月間の現場実証において、システム概念の有効性が確認できた成果は大きかった。一方で、システムの運用面の課題が大きく、また、“初代 AI 安全所長”を育てあげるには、膨大なデータ量が必要であり、良質なデータ取得のためのフルオート化も重要な課題である。閉所空間内での位置測位の精度向上技術もタイムリーに取り入れて行きたい。

建設業界においても、デジタル化を避けることはできず、バーチャル空間(理想)と現実空間(現場)との高度な融合認知・ガイダンスが、今後の生産性と安全性を高める最重要技術と考えている。

参考文献

- 1) 清水尚憲,大塚裕,濱島京子,土屋政雄,梅崎重夫,福田隆文,北條理恵子,機械安全-支援的保護システム(Supportive Protective System,SPS)(統合生産システム(IMS)におけるSPSのリスク低減効果,日本機械学会論文集2018年84号860号p17-00425