

Safety2.0 に基づいたトンネルの安全管理

トンネル工事の重機接触リスク低減

上 岡 真 也

人と機械が互いに情報を共有しながら状況に応じて安全を管理しようとする協調安全「Safety2.0」の概念をもとに、新たな安全管理システムを開発し、トンネル現場における切羽でのズリ出し作業に導入したハード面での取り組み「人と重機の接触災害リスク低減システム」の事例と、現場従事者の安全意識の向上を目指したソフト面での取り組み「安全漫画プロジェクト」の活動について紹介する。

キーワード：協調安全、Safety2.0、山岳トンネル、ICT、重機接触リスク、安全漫画、OJT

1. はじめに

我が国に機械が導入された頃は、危ない機械を人間が注意して使っていた時代があった。コスト、機能、納期等を重視して、安全の実現は人間の作業に任されていた。安全機能は人間が発揮していた時代であり、この時の安全を「Safety0.0」と呼ぶことにする。Safety0.0時代における安全原則は、「自分の身は自分で守る」であった。これは現在でも重要な原則であり続けている。一方、人間は間違えるものであり、ついうっかりのために労働災害が絶えなかった。これを防ぐために、次は安全を技術で実現する時代が来た。まず、機械設備側を安全化し、残ったリスク情報を提供して作業者に安全を委ねるといふ順番である。この時代は技術が安全機能を発揮している時代であり、「Safety1.0」と呼ぼう。Safety1.0は機械安全技術の時代であり、現在はここにある。Safety1.0時代の安全原理は、隔離の原則（危ない機械と人間とは分離する）および停止の原則（機械が止まっているときにしか、人間は近づくことはできない）である。

近年、ICTの発展のお陰で安全技術にも新しい方向が見えてきた。ヒトとモノと環境がデジタル情報を用いて情報を共有し、お互いにコミュニケーションすることで、協調して安全を確保することができるようになった。このようにICTを用いて安全を実現する時代を「Safety2.0」と呼び、ヒトとモノと環境が協調して安全を実現する考え方を「協調安全」と呼ぼう。協調安全を実現する安全の技術がSafety2.0であり、Safety2.0はスマート化による安全技術である。すなわち、Safety0.0は人間に依存した人間科学の時代で

あり、Safety1.0は技術に依存した自然科学が加わり、Safety2.0は環境や組織を取り込んだ社会科学が加わった時代、といった順に前を含み形で発展してきたとみることができる。

建設業ではSafety0.0の段階となる作業員への教育、KYや指差呼称活動が未だ主体であり、将来的にはSafety1.0の完全自動化・遠隔化の実現が望まれるが、現状ではまだ時間を要するため、人と重機が柔軟に対応しながら協働する必要がある。そこで、Safety2.0の概念に基づいた新たな安全管理システムを開発し現場導入を実施した。加えて、重機を操作する人や重機のそばで作業する可能性のある人に対しての意識付け教育も行う事で、安全意識の更なる向上を目指した。

本稿では、熊本57号滝室坂トンネル西新設（一期・二期）工事（工事延長=2,679m、掘削断面積=107m²）において開発・現場実証を行った「人と重機の接触災害リスク低減システム」、および漫画教材を通して安全意識の向上を図った「安全漫画プロジェクト」について報告する。

2. Safety2.0の取り組み（ハード面での取り組み）

(1) 現場での取り組み

熊本57号滝室坂トンネル西新設工事において、トンネル掘削のズリ出し作業における人と重機の接触災害リスクとして、①人の切羽エリア侵入時に重機と接触、②重機オペレーターがズリ出し作業中に重機から降車して接触、③人が重機の接近に気付かずに接触、

④重機が人の存在に気付かずに接触、の4つのリスクに着目しこれらを低減することを目的に、ビーコンを用いた位置情報管理システム（図一1）、警告照明システム（図一2）、ホイールローダー制御システム（図一3）、バックホウ制御システム、AI搭載人検知カメラシステム（図一4）を導入した。

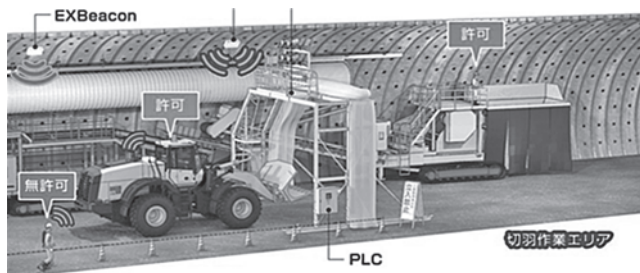
(a) ビーコンを用いた位置情報管理システム（以下ビーコンシステム）

本システムは、BLE (Bluetooth Low Energy) 信号を発する発信機 (EXTx タグ, 写真一1) を人や車両に設置し、信号受信機 (EXBeacon ビーコン, 写真

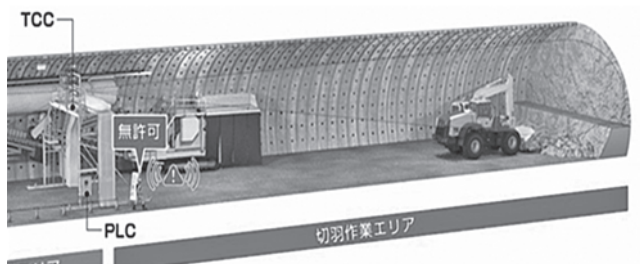
一2) を坑内各所に設置することで位置情報を管理するシステムである。受信機は坑内に 10 m 間隔で設置し、中継機 (EXGateway) と現場無線 LAN ネットワークを経由してサーバー (EXCloud) へ情報が送信される。サーバー上で人や重機の位置がマッピングされ(図一5)、ずり出し作業中に切羽エリアに関係者以外の立ち入りがないか監視する。

(b) 警告照明システム

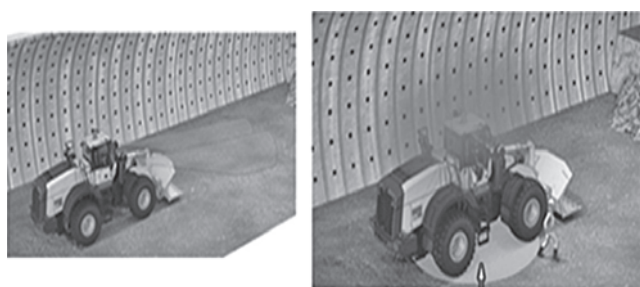
本システムは照明架台に白色と赤色の高照度 LED 照明を設置し、点灯方法を制御するシステムである。通常時は白色 LED 照明のみが点灯し、切羽近傍で 200 lx の照度を確保することで作業の安全性向上を図った(写真一3)。ビーコンシステムで侵入者を検知すると、アラート信号を受信して赤色 LED 照明と白色 LED 照明が交互に点灯し、大音量スピーカーが発報する(図一6)。これにより、騒音が大きな作業中のトンネル坑内においても確実に危険を知らせるこ



図一1 位置情報管理システム



図一2 警告照明システム



図一3 ホイールローダー制御システム



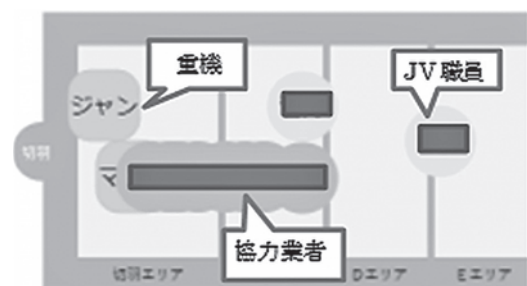
図一4 AI搭載人検知カメラシステム



写真一1 発信機



写真一2 受信機



図一5 マッピング状況



写真-3 照明架台と白色 LED 照明

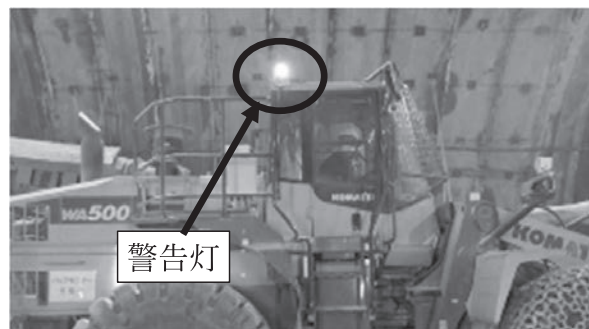


写真-4 警告灯点灯状況

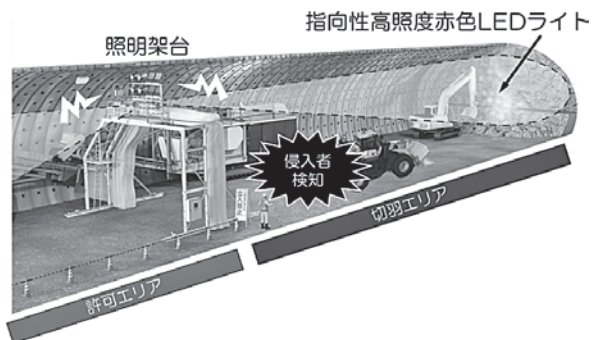


図-6 警告照明システム発報イメージ

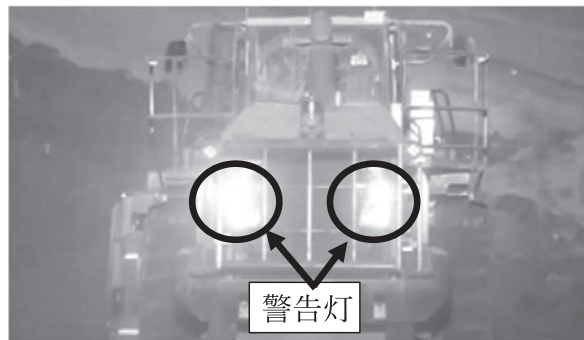


写真-5 指向性赤色 LED ライト

とができる。

(c) 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。重機の運転席内に設置した受信機でオペレータの降車を監視する。ずり出し作業中に降車を検知すると重機に設置した警告灯(写真-4)と警告照明システムが発報し、周りの重機にオペレータの降車を知らせる。これにより重機オペレータがずり出し作業中に重機から降車して接触するリスクを低減している。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を点灯させて周囲からの視認性を高めた(写真-5)。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。

(d) 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同様、重機オペレータの降車を監視し、降車を検知した場合は警告灯と警告照明システム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。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-6)。

(e) AI 搭載人検知カメラシステム

重機オペレータの死角となる左右後方の三方向に人を検知する AI を搭載したカメラを設置し、検知エリアに人または車両が侵入すると運転席に設置したモニターと LED ライトが発報する(図-7)。これにより、



写真-6 シーケンシャルライト点灯状況



図-7 AI 搭載人検知カメラ

重機オペレータ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。

(2) 課題とシステムの改良

上記システムにて実証を行ったところ、ビーコンを用いた位置情報検知は作業員や関係者のタグ装着が不可欠なことや、電池交換や通信チェックなどのメンテ

ナンスの負担、坑内環境において電波強度不安定による誤認知の発生などが確認された。また、警報が発報された際の重機の停止は運転手による手動停止であり、依然として人の注意力や判断力に頼る部分が残っていたため、これらのシステムに改良を加え、より実用性が高い下記3つのシステムに改善を図った（図—8）。

(a) 人検知カメラによる切羽作業エリア侵入検知システム

ビーコンを用いた位置情報検知に代わり、切羽作業エリアへの人の侵入を人検知カメラによって検知し、人検知信号を「警告・照明機器制御システム」に有線発信する。

(b) 重機の死角への人接近および運転手降車検知システム

ずり出し作業を行うホイールローダー、バックホウ、ブレイカの3台の重機に搭載しており、AI搭載人検知カメラシステムを改善した以下の機能を有している。①重機搭載の人検知カメラが重機死角への人の接近を検知し人検知信号を「警告・照明機器制御システム」に無線発信する。②重機運転手の降車を着座センサーが検知し、人降車信号を「警告・照明機器制御システム」に無線発信する。③各重機運転席内の作業停止スイッチを押すと作業停止スイッチ信号を「警告・照明機器制御システム」に無線発信する。

(c) 警告・照明機器制御システム

従来の各システムから信号を受信し、赤色警告照明とホーンスピーカーを作動させる機能に加え、以前は発報に気付いた重機運転手が手動操作で重機停止を行っていたのに対し、発報と同時に3台の重機を自動停止させる機能を追加した。なお、作業停止スイッチ

信号を受信した場合は警告音とは異なる発報音を鳴らし、警告音と区別している。

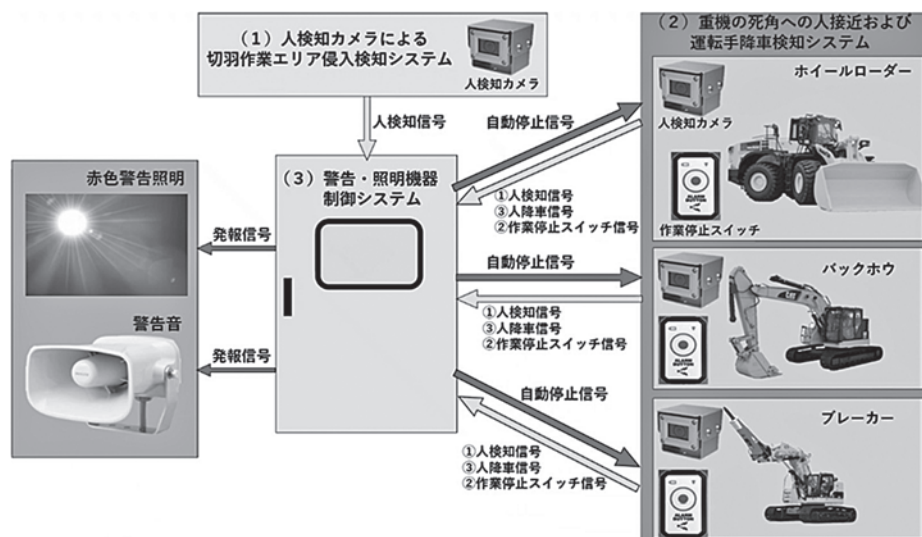
(3) システムの運用

運用に当たっての運用フローを以下に示す。①重機に乗車したオペレータ以外の人はずり出し作業中に切羽エリアに侵入禁止。②重機オペレータはずり出し作業中に切羽エリア内で降車禁止。③上記に違反した場合、警告照明システム及び警告灯が発報し、重機が自動停止。④切羽監視責任者は警告照明システム制御盤に表示される発報原因を確認し、発報原因を除去して発報を解除。なお、発報原因が存在し続けている間は発報を解除できない。

従来は①②に示すルールを教育することで安全を確保していたが、本システムでは各システムにより異常な侵入や降車をリアルタイムで検知し、接触リスクの存在をほかの作業員へ共有することで重機接触災害リスクを低減している。

(4) 導入効果

システム導入当初（旧システム含む）は、立入禁止エリアへの人の侵入による警報が1日に4～6回と多発した。この内訳を分析すると、エリア外からの侵入と重機オペの降車による侵入で、コソクの状況確認、AGF鋼管の分別、機械トラブル等の作業上必要なやむを得ない理由が大半であった。このように、ずり出し時に立入禁止のルールを定めても、やむを得ず侵入しなければならない状況がしばしばあることがわかった。これらのことはある程度想定されていたが、本システムにより数値化されることで、無視できない回数であることが新たな気づきとして表面化した。過去の



図—8 システムブロック図

ずり出し時の重機接触災害においても、立入禁止エリアに作業上必要と人が判断し無断で立ち入ったことが原因であることが多いことを鑑みると、これらの例外作業に対するルールを定め、周知徹底することが重要であると考えた。そこで、作業員自ら警報を発報できるリモコンボタンを立入禁止エリア境界部と重機のコックピットに追加した。これにより、やむを得ず立入禁止エリアに侵入する必要がある場合は、リモコンボタンを押して発報し、重機が停止したことを確認してから作業を行うことを作業員の共通認識とした。これを意図的発報とし、これまでの不安全行動による警報と分けて考えた。

図-9、10に、立入禁止エリアへの侵入の警報回数と意図的発報回数を週ごとに1日当りに平均したグラフを示す。図-9から、本システムを導入した4月は、警報回数、すなわち不安全行動が1日に4~6回あったが、徐々に低減して12月にはほぼ0となっていることがわかる。一方、意図的発報は図-10に示すように継続的に活用され、作業上必要と判断された作業が発生したときに作業員自らが危ないことを認識

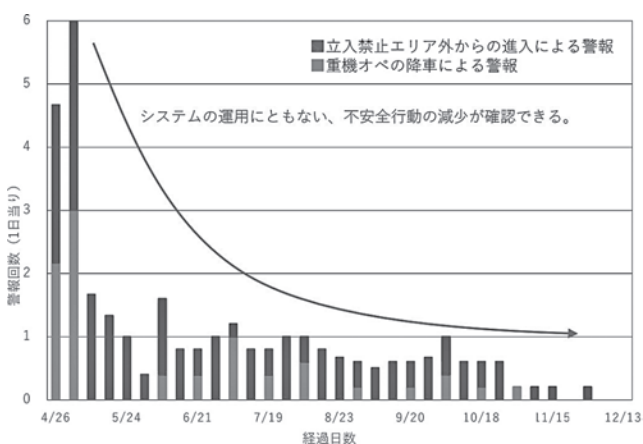


図-9 切羽作業エリアへの立入の警報回数

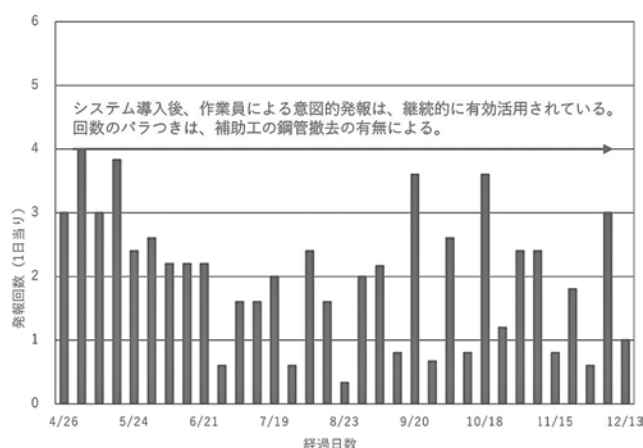


図-10 作業員による意図的発報回数

して安全を確保してから行動していることがわかる。

以上のことから、本システムは不安全行動による立入禁止エリアへの侵入を感知し、重機オペに伝えることで重機接触災害を防止するという効果だけでなく、作業上必要な突発的作業においてやむを得ず立入禁止エリアに侵入しなければならない場合に、作業員自ら意図的発報し重機を停止させるルールを徹底するという安全意識向上の効果もあった。これら作業員の安全意識の向上は、作業員の意見も取り入れながら一緒になって本システムを改良していったことが大きかったことを付け加える。このように、本事例はICTにより例外作業を見える化し、その例外作業にも対応してルールを徹底することで、災害防止を図れることを示唆している。

3. 安全漫画による教育 (ソフト面での取り組み)

人と機械が協調して安全確保を行う Safety2.0 の概念において、機械設備を整えるのと同様に現場従事者の安全意識の向上も重要な要素となっている。建設業の現場管理者の職務は、建設現場の特性（一品受注生産・現地屋外生産・労働集約型生産）から、ルーチンワークより状況対応的業務が多くなるため、技術者の育成には主としてOJT (On-the-Job Training) が活用される。一方、OJTによる教育の質やレベルは指導者、現場環境、施工体制など限られた現場条件に依存してしまうという課題がある。特に、現場の安全管理は、現場条件によってリスクの変化が大きいため、安全の知識や技術の運用に関しては経験値が重要になる。そこで、ソフト面である教育の観点からは「安全漫画プロジェクト」を立ち上げた。通常、教材としての漫画は難しい事項をわかりやすく説明することを目的としたツールとして用いられるが、今回、それに加えて現実の多様な現場条件をケーススタディとして整理する漫画作成プロセスにも教育効果を求めた。フィクションの漫画のストーリー作りは現場経験値をシンボリックに伝承できるため、OJT教育を補完する試みとして実施した。

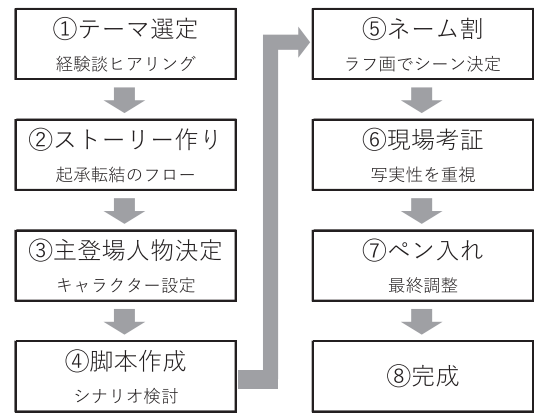
(1) テーマの設定

建設工事のなかで労働災害の発生頻度が高く、かつ重篤な災害となるケースが多い山岳トンネルの建設工事を対象とした。“人・技術・組織・危険の芽”の四つの側面から具体的な事象を取り上げ、トンネル工事に携わるすべての社員に向けて、現場担当者が経験し

た安全管理上の課題，語り継いでいくべき想いを漫画で表現することで，受け手側にも関心を持ってもらうよう努めた。制作にはプロの漫画家と脚本家に加わってもらい，現場職員から意見を吸い上げつつ，テーマ選定とシナリオ作りを進めた。現場において正確な情報に基づいて適切な判断を行うためには現場内の良好なコミュニケーションは重要で，そのカギは現場所長だけではなく従事する職員一人ひとりの意識や考え方によるところも大きい。良好なコミュニケーションが得られる雰囲気醸成について，過去の成功例や失敗例を用いてわかりやすく伝え，それぞれの立場で自らの言動を考える機会と位置付けて漫画の制作にあたった。

(2) 教育効果を考えた製作手順

漫画の制作手順を図—11に示す。本取り組みは経験談をフィクション化してわかりやすいストーリー作りで漫画化にあたり，成果品としての漫画の教育効果よりもその過程で作成チームのメンバーが意見を交換して，“安全を考える”ことを重要な目的の一つと考えた。ある事象に対して解説や結論が与えられる前に自分で考え自分なりの意見を持つことによって，活動への取組姿勢がより能動的なものになるため，ストーリーを確定する前にできるだけ参画者の経験談を語ってもらい(①テーマ選定)，テーマ選定に反映させた(②ストーリー作り)。ストーリー作りでは，ストーリーの流れを明確にするために“起承転結のフロー”を作成してメンバーと制作意図の情報共有を図った。登場人物については，ストーリー展開の中で必要な人物を限定して，できるだけ絞って設定し，キャラクターに



図—11 漫画制作手順

も個性を持たせた (③主要登場人物決定)。

シナリオについては参画メンバーから現場で交わされる会話の現実性や各シーンの写実性を重要視して，可能な限り丁寧に作り上げた (④脚本作成，⑤ネーム割，⑥現場考証)。

④から⑧に至る過程で何回も参画者の意見をフィードバックして漫画作成の達成感を感じられるよう配慮した。

以上のような流れで現場と一体となって計7編の漫画を制作した (表—1)。読み切りの短いストーリーであるため，内容を深く掘り下げることができない部分や真に大事にしてもらいたい内容について補足するために，漫画の最後にテーマにした事項を漫画のシーンを振り返りながら補足解説を加えた (図—12)。

(3) 成果

本取り組みの成果を表—2に示す。参画者においては，対話を通して自分の考えを整理し，新たな視点

表—1 制作漫画一覧

	File1	File2	File3	File4	File5	File6	File7
タイトル	トンネル編 (人・技術・組織)			危険の芽を摘め編			
	あの時に 言っといてよかった	ミスから生まれた 「機械の安全化」	見えないリスクを 追え!	「リスクの消える化」を 防げ	異文化を超えて	職務って何なんだ	どうすればいいの?
	人・技術・組織	人・技術・組織	人・技術・組織	「慣れ」というリスク	ミスコミュニケーション	危険の芽に向き合う	リスク情報 (未達・誤認・不足)
まとめ	コミュニケーションとは、言葉のやり取りだけではない	取り扱いミスの原因になりかねない焦りやプレッシャーは取り除いてあげる	的確な情報収集でハザードが危険事象に変化する兆候を見逃さない	危険予知能力は経験や知識で決まる	信頼を深め、ミスコミュニケーションを防ぐ	変化したリスクは自分の役割を超えていないか	リスク情報は作業員に合わせてタイムリーに伝える
	One on Oneで気持ちを伝え、キーパーソンにアプローチ	安全の確保に重要な役割を担う機械・設備を信頼するためには・・・	トラブル時は最前線に立ち、本質を捉えながら柔軟に対応する	思い込みによるヒューマンエラーを防ぐカギ	ハリハットの分析はまずハザードから考える	なぜ、共感が得られないのか〜どう見られているかに気を留めよう〜	状況に応じたマネジメントを通じてリスク情報を生かす
	関係者間で目的を共有し、その遂行に向け個々の力を結集	取り扱いミスの問題は責任追及ではなく原因究明で改善策をたてる	チームワークを意識し、若手には役割とOJTの機会を提供する	武勇伝のような成功体験はリスクを見失わせる	部下には結果を得るための方法まで指示する	大事なことを優先する	トップのコミットメントで“現場”は強くされる
カバー							

表一 漫画制作の成果

成果	具体的内容
安全問題への自発的な制作への取り組み	“安全”のテーマを一時的にトップダウンで解説形式に表現するのではなく、参画者から多くの意見を取り入れたため、より自発的な取り組みにつながった。
人の経験に対する新たな気づき	シナリオ作成時には、テーマ（広く“安全”に関する事）についてお互いの経験を話すことによって気づきの連鎖を生み出し、新たな発見につながった。
能動的な姿勢の醸成	自分たちが関与して作り出したものには愛着と責任を感じ積極的に受け入れる傾向があるので、現実の安全課題に対してより能動的に取り組む効果も期待できる。
メタ認知力の向上	漫画作成の過程で編集スタッフ（現場経験のない）にわかりやすい説明が求められ、自分たちのやっていることを客観視できた。
現場参画者が取り組みやすい方法を実践	漫画作成のファシリテータとしての役割を本社スタッフ側で行うことによって作業所から参画したメンバーに多くの負担をかけないで進めることが可能になった。
プライバシー問題を回避して経験を表現	経験談をベースにして目の前で起こりうる現実であるにもかかわらず、“漫画”というフィクションに昇華させているため、プライバシーの問題が生じない。
バーチャル体験の共有	漫画の形で現場での出来事をストーリーの中で表現することによって、制作側や読者側双方で「体験が共有」される。この体験は、漫画という仮想世界の中の疑似体験（間接体験）でしかないが、知識の一つとして理解が深められた。



図一 12 補足解説例

から以前よりも早い段階で危険を予測できるといった効果や、トンネル工事の安全管理のエッセンスを可視化するアプローチによって、読む人の記憶に残り、安全意識の向上を図る効果も得ることができた。さらに、若手職員の教育だけでなく、ベテランにも安全とは何かを再認識する機会となった。今後は安全漫画の社内向けの公開やトンネル専門工事会社にも配布して周知を図るとともに、全国のトンネル工事現場に向けた勉強会も実施していく予定である。

4. おわりに

人と機械の協調安全（Safety2.0）の概念に基づき、ハード面においては人の侵入検知により警報を発するとともに重機を自動停止するシステムの確立を図ることができ、人と重機が作業の状況に応じて協調しながら作業を進めることが可能となった。この取り組みにより Safety2.0 に適合する技術としてセーフティーグローバル推進機構が認定する「Safety2.0」の適合認証を取得も果たしている。今後は全トンネル現場への展開を目的にさらなるブラッシュアップを進めていくとともに、ソフト面として安全漫画の教材も用いて職員・作業員の安全意識向上を行い、トンネル現場の重篤災害の撲滅に取り組んでいく。

JICMA

【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、道路建設、2019.11.
- 2) 向殿政男：建設業の安全対策として ICT 技術を活用した現状と将来の展望、総研レポート、2022.12
- 3) 星州人、平野宏幸、三原泰司：Safety2.0（協調安全）の考え方に基づいた山岳トンネルの重機接触災害防止対策、2020 施工体験発表会
- 4) 有山正彦：協調安全（Safety2.0）の社会実装化に向けて、安全と健康、2019.8.

【筆者紹介】



上岡 真也（うえおか しんや）
清水建設㈱
土木技術本部 地下空間統括部
主査