

投稿論文

建設機械施工における安全確保に関する一考察

—無人建設機械の導入と活用に向けて—

茂木 正晴¹・山口 崇²・油田 信一³

¹ 土木研究所 技術推進本部先端技術チーム主任研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail: moteki@pwri.go.jp

² 土木研究所 技術推進本部先端技術チーム上席研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail: t-yamaguchi573cl@pwri.go.jp

³ 芝浦工業大学 SIT 総合研究所 特任研究員 (〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)

E-mail: yuta@ieee.org

建設業における現場環境は、現場毎に一様ではなく天候等によっても日々変化している。また、作業対象となるプロダクトサイズも大きい。そのため、製造業と比して建設業の中で建設機械を用いた土木工事の自動化が難しく、日々の作業における安全の確保も、オペレータや作業者に依存せざるを得ない状況にある。これは建設業の大きな特徴であり、生産性の向上と安全の確保を如何にして両立させるかが大きな課題となっている。

本稿では、建設業の中で建設機械を用いた土木工事における事故について分類し、発生する被害を整理した。それに基づき、安全性確保に向けて、建設業の中で建設機械を用いた土木工事における協調安全の考え方と実現すべき技術的方策について検討結果を示す。また、無人建設機械の導入時に“安全性確保”の観点から遵守すべき事項を提案する。

キーワード: *Construction machine, Remote control, Automatic site and Autonomous control, Accident in construction site, Cooperative Safety for construction*

1. はじめに

国土交通省直轄工事事故発生件数(図-1)¹⁾を見ると平成25年度以降の減少傾向から近年は横ばいに推移しており、事故は継続的に発生している状況にある。作業時における事故を大別すると第三者に対する人的な公衆災害は大きく減少しているものの作業者同士や建設機械による労働災害(死傷事故)、構造物やインフラ等の公衆災

害(物損)は、ほぼ同数の発生が見られる(図-1)。

本稿では、建設業の中で建設機械を用いた土木工事(以下、建設機械施工)における事故と安全性について考察する。

我が国において直面している人口減少の中、建設業は他産業と比較して高齢化率が高い。建設機械オペレータ(以下、オペレータ)をはじめとする建設事業の担い手不足が深刻化している。そのため、建設現場の生産性の確保と向上は重要な課題となっている。一方、建設機械と作業者の協働する多様性のある現場作業環境では、作業者の死傷事故の発生の恐れが小さくない。したがって、建設機械施工における安全性の確保も、建設生産システムを考えるうえで重要な課題の一つである。

近年、ICT (Information and Communication Technology) の活用による建設生産システムの改革への取り組みが進められている。その一つに、デジタル技術を活用した建設機械の自動・自律化、遠隔操作化によりオペレータが搭乗しない建設機械(以下、無人建設機械)による施工があり、その実現と導入に向けた研究開発や現場での検証等が進められている。

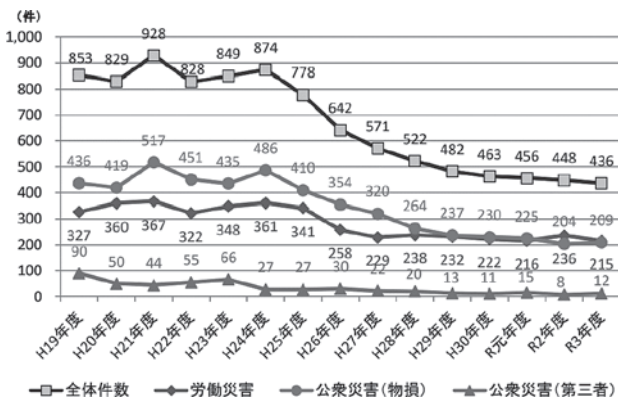


図-1 国土交通省直轄工事事故発生件数(労働災害及び公衆災害(物損と第三者)件数の推移)¹⁾

従来、無人建設機械による施工は、災害時に人が立ち入ることのできない危険なエリアにおける施工や、ダム施工現場のように、建設機械による自動施工が比較的容易に実現可能となるように整備された環境下に限って導入されてきた。しかし、無人建設機械は、将来的には建設生産システムの改革に向けて、複数の建設機械や作業員との協働といった様々な施工環境の中での活用が期待されている。

本稿では、まず、建設機械による施工時に発生する事故の分類と発生する被害について考察する。次に、IEC (International Electrotechnical Commission) が2020に発行した白書(Safety in the future)²⁾(以下、IEC白書)が提唱としている協調安全の考え方をサーベイする。そして、建設機械施工において実現すべき建設機械と作業員ならびに環境・環境システムに関する協調安全の在り方を述べる。また、その考え方にに基づき、建設現場で発生している事故を防ぐための技術的方策を提案する。最後に、建設現場に無人建設機械の導入する際の安全性確保のために遵守すべき事項を提案する。

2. 建設機械施工における事故の現状

2.1 建設業における事故

建設業(ここでは、建設機械施工の他に建築工事等も含む)における死傷者数は、図-2³⁾に示されるとおり、製造業を大きく上回り、未だ全産業の約3割を占めている。

現場では、作業時に事故が発生した場合、工事中断による工程の遅延や様々なペナルティ、工事コストの増加等が発生する。そのため、建設業における事故対策として、リスクアセスメントの実施や危険予知(KY)活動による事前の安全衛生対策などにより、不安全行動の予測・事故防止につながる管理体制を図っている。しかし、建

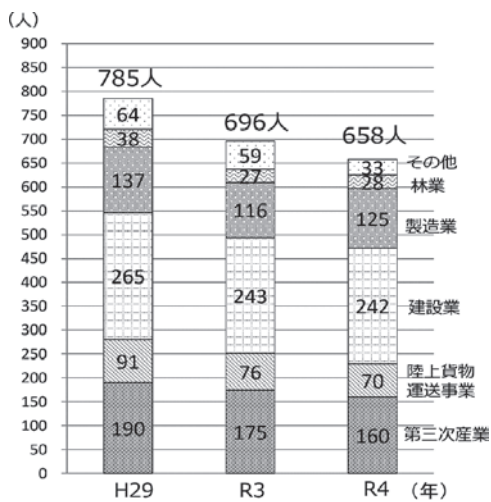


図-2 令和4年労働災害発生状況 (R4.12速報値)³⁾

設業は、製造業と同様な安全への啓蒙を図っているものの2倍程度の事故が発生している実態がある(図-2³⁾).

2.2 建設機械施工における事故実態と統計

建設業における工事事実態の内訳は、図-3⁴⁾に示すように種類別死傷者数の中で道路工事が最も事故件数の多い工事となっている。道路工事における建設機械に起因する死傷者数の約7割は、図-4⁴⁾に示すように挟まれ・巻き込まれ、激突され、といった建設機械と人に起因するものと考えられる。このことは、建設機械による施工時に人(オペレータと作業員)と混在した環境下での事故発生が高いことが伺える。また、吉川ら⁵⁾は、建設機械を用いた施工時における事故について、①建設機械等の転落による災害、②つり荷による災害、③建設機械の掘削等により溝等の崩壊するような災害、④建設機械等と作業員の接触による災害の4つに大きく分類している。また、“挟まれ・巻き込まれ、激突され”の事故は、建設機械の機種別の中では図-5⁵⁾に示すように、油圧ショベルによる事故が多く。これは、作業時の後退中や旋回中において作業員との間に接触が発生していることが考えられる。

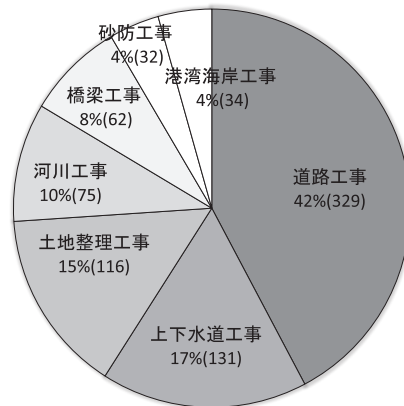


図-3 建設業における工事事実態の内訳⁴⁾
(平成29年, 休業4日以上, 単位: 人)

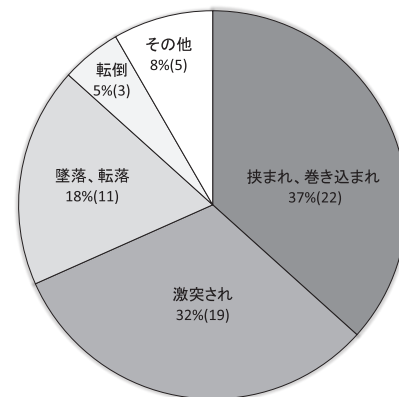


図-4 道路工事における建設機械に起因する死傷者数の内訳⁴⁾
(平成29年, 休業4日以上, 単位: 人)

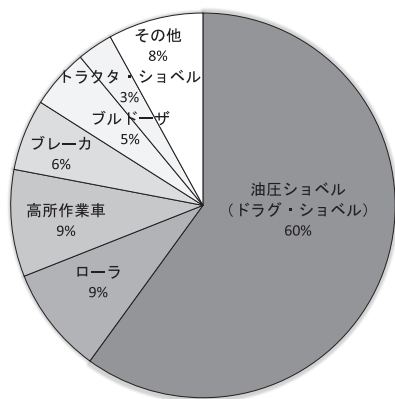


図-5 建設機械等による死亡災害の機種ごとの割合
文献⁵⁾より引用

2.3 事故実態に基づく分類と発生する被害の考察

土木工事における建設機械による施工時に発生する事故の分類から発生が想定される被害を検討した。

建設機械施工における事故は、①建設機械稼働時の前後進や旋回中に発生する機械単体による事故、②軟弱地盤、高低差等による転倒・転落・滑落、③建設機械と作業者の接触による、挟まれ・巻き込まれ、激突等の事故、④玉掛け等の機械と作業者が協調して行うべき作業における異常干渉、⑤建設機械の故障による暴走等の事故が考えられる。それらの各々について、表-1に示すように発生する被害には差異がある。特に、建設機械の単独事故と目される②軟弱地盤、高低差等による転倒・転落・滑落を除き、作業者と混在した作業環境における事故は、作業者の死傷事故のリスクが想定される。また、⑤故障による暴走のように建設機械施工時における機械の故障等は、多角的な被害の発生が想定される。

なお、建設機械による事故の多くは、オペレータや作業者の認識・判断ミス等によって発生していることが考えられる。オペレータや作業者は、周囲に注意を払いながら作業を遂行するが、その中で、認識ミス等による事

表-1 土木工事における事故の分類と発生する被害

事故等の分類	発生する被害の想定		
	構造物等への物損事故	オペレータの死傷事故	作業者の死傷事故
建設機械に係る具体的な事故等の状況			
走行時及び作業時の構造物への接触及び衝突	○	○	—
軟弱地盤、高低差等による転倒・転落・滑落	—	○	—
作業者の挟まれ・巻き込まれ、激突	—	—	○
作業者との協調作業時の異常干渉	—	—	○
故障等による暴走	○	○	○

故の発生は、一定数存在する。特に、建設作業においては、作業内容や現場環境の多様性が大きく、人の認知・判断におけるミスによるリスクは小さくない。認識ミスや無意識な行動等は、一般的に人の身体的・生理的な現象であり、ミスの発生を100%無くすることは難しい。

この人為的なミスを減らすためには、現場での作業においてオペレータや作業者に判断を委ねていた判断基準や詳細な手順等を明確に示すことや自動化の導入が防止策につながるものと考えられる。これについては、別の機会に検討を加えたい。また、建設機械の物理的な故障等によって発生する事故は、日々のメンテナンス等の体制をしっかりと取り組むことによって防止することが必要となる。

3. 建設機械施工における生産性と安全性の両立

3.1 建設機械施工の特徴

建設機械施工は、製造業などの“ものづくり”に比して、作業内容と作業環境に大きな違いがある。

まず、作業の工程や作業内容は、繰り返し作業のような様なものではない。この点では、受注生産品(一品生産)、あるいは、工芸品のような一品一品を吟味したうえで製品を製作する工程にも近いものともいえる。また、作業環境も多様性に富む。特に、環境そのものが作業の対象でもある。この作業環境は、作業の進行によって変化していくものであり、また、天候等によっても日々変化する。

建設作業に携わる人(オペレータや作業者)は、この条件下で自ら作業内容等を認識し、判断したうえで、作業を遂行している。また、環境そのものが作業の対象であるため、具体的な作業の対象や取扱われる建設機械のサイズが極めて大きい。そのため、それらとの接触がすぐに危険に結びつき、発生する事故も重大なものとなるリスクがある。

作業現場では、オペレータや作業者は、建設機械と作業者の混在した環境で、それぞれ自らの認識・判断によって環境の状況に応じて能動的(active)に多様な行動をとっており、この点が、製造業などの他産業と比した建設作業の大きな特徴である。

3.2 建設機械と作業者の分離と協調

建設機械による施工現場における死傷事故の多くは、人と機械の接触により発生している。そこで、作業環境の改善(人と機械に起因する物理的環境)として、一般に建設機械の稼働と人による作業を完全に分離させた施工環境が考えられる(図-6)。



図-6 建設機械と作業員を独立させた施工環境

しかし、現実には、狭隘箇所等や詳細な作業を作業員によって進めざるを得ないケースがあり、建設機械の可動範囲に作業員が立ち入った作業が存在して、建設機械と作業員の協調が求められる場合が少なくない。

特に、都市土木のように限定された作業環境内で進められる施工においては、建設機械と作業員の作業エリアを完全に分離することは難しく、建設機械と作業員が混在した環境下での作業が進められることとなる(図-7)。



図-7 建設機械と作業員が混在する施工環境

さらに建設機械と作業員(誘導員含む)が密接に協調して進められる共同作業も存在し、そこでは作業エリアの完全な分離は不可能である。例えば、図-8に示される建設機械によって保持された管渠の埋設物設置工事等は建設機械単体で行うことはできない。これは現地にいるオペレータによって操作される建設機械のすぐ近くにいる作業員(玉掛け、誘導員)によって行われる作業の例である。ここでは、建設機械(オペレータ)と作業員は、緊密な意思疎通を行いつつ協調して作業が遂行される。

このように、多様性のある現場環境における多様な作業の遂行のためには、機械と人との完全な分離は難しく、安全性を確保するために建設機械(オペレータ)と作業員に対して確実な協力・協調した取り組みが必要となる。

一方、安全性を確保するための確実な方法は、図-6に示す建設機械と作業員が働くエリアを分離し、稼働中の建設機械と作業員との接触を避けることである。そこで、例えば、必要に応じて建設機械を止めて、その間に作業員が建設機械のまわりで働くなど、建設機械と作業



図-8 建設機械と作業員による協調作業

員が混在しながら、実質的に建設機械の稼働エリアと作業員が働くエリアが分離される体制などを構築していく必要がある。

3.3 事故防止のための建設機械と作業員との連携

一般的に製造業における生産ラインであれ、建設機械施工であれ、安全のためのリスク回避と生産性向上は相反する性質を持つ。

製造業における生産ラインは、一般に、機械動作の自動化や制御の高度化により、生産性を維持若しくは向上させつつ安全性の向上が図られてきたと考えられる。

一方、建設機械施工では、作業対象や環境に多様性が大きく、目的とする作業においても想定外の危険が存在することも少なくない。そのため、安全性は一層重要であるものの、生産性の向上と安全の確保が相反する程度が大きく、それを勘案した安全性の確保の方策を定めていく必要がある。

建設機械施工における安全性確保の考え方は、建設機械・作業員の安全と作業環境の改善に焦点を当てる必要がある。したがって、安全性確保のためには、単一の要因やアプローチだけでなく、多くの要素の組合せによって達成できるものと考えられる。

そこで、一般的に人的要因から発生する事故への防止対策の訴求先となる4M(Man, Machine, Media, Management)^{6,7)}といった要素(要因)を参考に、建設機械施工における特殊性から目指すべき“人・機械・環境”の協調を具現化するための検討が必要となる。

大型機械と人(作業員)が混在して働く環境(作業現場)において、生産性を維持しつつ安全性を確保したい。そのためには、建設機械や作業員毎の個別の安全機能・安全化のみでなく、建設機械施工における総合的な視点から作業現場の安全性の向上を追求するアプローチが必要となる。この観点に立って、建設機械施工全体のシステムとしての安全性確保の方策を整理したものが図-9である。すなわち、施工現場の安全確保のためには、以下の要素について推進する必要がある。

- ①作業環境の改善(人と機械に関連する物理的環境)
- ②安全対策技術(支援技術を含む)の導入
- ③人・組織内における安全対策(教育・管理体制等)
- ④規制やルール等の整備

なお、本稿では、現場内で作業を行う建設機械(オペレータ)や作業員を対象とした、①作業環境の改善(人と機械に関連する物理的環境)、②安全対策技術の導入(支援技術を含む)の観点から安全性確保のために必要となる課題について検討を進めた。

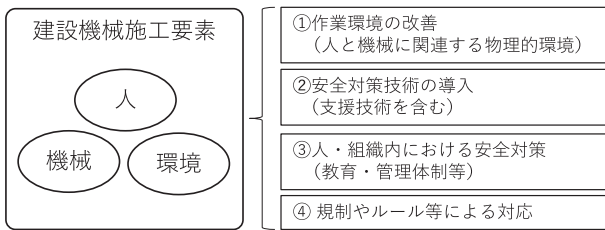


図-9 建設作業における全体システムとしての安全確保の方策

4. 建設機械・作業員・環境による協調安全

4.1 IEC 白書における協調安全

IEC では、安全・安心確保に関する国際規格とし、2020年にIEC/MSB(Market Strategy Board)がIEC白書²⁾を作成した。

このIEC白書では、これからのIT時代の機械を用いる生産工程における安全の概念について述べたものであり、人と機械の個別エリアでの安全確保から、ITの導入によって人と機械が協働して安全を実現するシステムにシフトし、安全性と効率性の両立を目指すことを提言し、次世代の安全は、“人・機械・環境が調和する総合的なシステム”^{2), 8)}により推進するものとし、人と機械が協働して安全を実現する協調安全を目指すものとしている。

IEC白書の提唱する協調システムは、人の持つ注意力・判断力を活かしつつ安全から逸脱した行為の抑制をAI等によって支援することで包括的な安全を再構築するものであり、人・機械・環境が調和した協調安全(Harmonious Safety)を目指すものとしている⁸⁾。図-10にIEC白書が提唱している協調安全のレベルを示す。

ここでは、まず、協調安全レベル(CSL)1で、どのエリアからでも動作停止可能なシステムとして、そのうえで、協調安全レベル(CSL)2～4で、人と機械の協調・協力のレベルが増し、結果として、システム全体が最適化されて、生産性と効率性の両立が段階的に図れるものとしている。

4.2 製造業と建設機械施工との相違

IEC白書は、基本的に製造業の生産ラインにおける安全性の達成を目的としているものと考えられる。

その生産ラインの多くは、比較的安定した工場内の作業環境における、比較的一様な作業内容の達成を目的としている。製造業では、自動化・無人化されたシステムの導入などにより、生産性の向上と事故削減の両方が果たされてきた。また、ここでは、事故は“期待された行動からの逸脱行為”により発生することを想定し、日々のKY活動等の啓蒙により、その逸脱行為を無くすこと

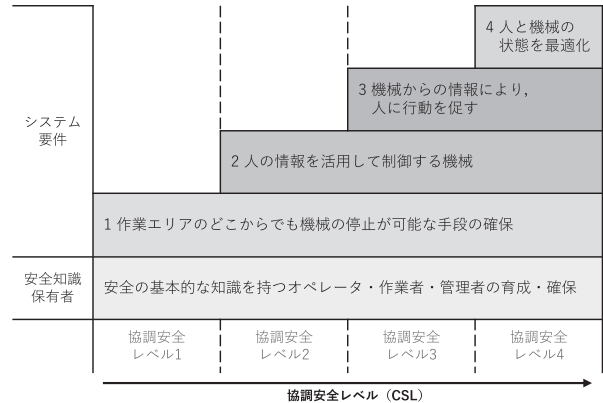


図-10 協調安全レベル (IEC 白書より引用)

で事故リスクを低減させ、安全性を向上させてきている。

したがって、IEC白書では、機械はかなりの部分で自動化が進んでいることを前提としており、手動操作の機械は原則として考察の範囲外となっているように見受けられる。

一方、建設機械施工では、3.1で述べたとおり、生産対象物のサイズが大きく環境全体に及び、また、その環境自体が多様で、時々刻々変化する、という特徴がある。したがって、機械・人・環境の3者連携における各者の役割は異なってくる。特に“環境”に関する考え方は大きく変わらざるを得ない。

4.3 建設機械施工の現場における協調安全の在り方

建設機械施工においては、単純にIEC白書に示された協調安全の考え方をそのまま安全性を確保するための方策とすることは難しい。そのため、人・機械・環境が調和する総合的なシステム^{2), 8)}を実現しようとする場合も、建設機械施工の特性を把握したうえで、取り組みを進める必要がある。

IEC白書における協調安全の各レベルを参考に、建設機械施工における協調安全レベルの考え方を再構築したものを図-11に示す。

ここでは、現時点において適用可能な方策として、建設機械・作業員・管理者が作業情報の共有を図ること、ならびに、安全のための建設機械の停止を可能とする手段を持つことを協調安全レベルCSL1とした。

協調安全レベルCSL2～4は、今後の建設機械施工に適用することを想定している。そして、例えば、接触が避けられない現場では、危険を察知してその情報を現場管理者と建設機械(オペレータ)と作業員が相互にその情報を用いて安全を確保するシステムとすること(CSL2)。作業内容や進め方の再構築と、環境の整備(建設機械や作業員と環境の間の通信システムの整備、ならびに、危険検知用センサシステムの設置など)により、

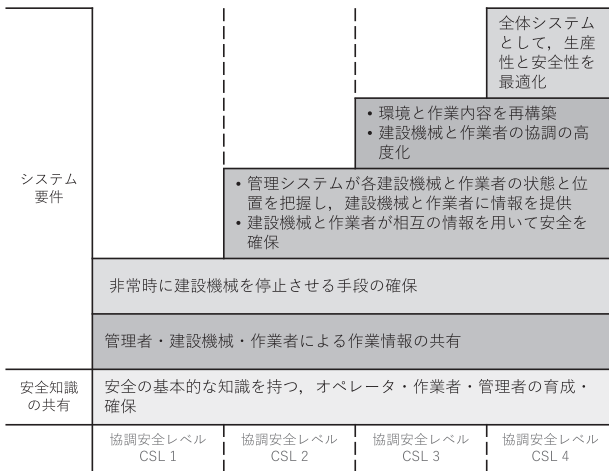


図-11 建設機械施工における協調安全レベル

建設機械(オペレータ)と作業員の協調を高度化すること(CSL3)。さらに、各者の行動を協調させることにより生産性と安全性の最適化を図ること(CSL4)。それらによって、建設施工現場におけるあるべき協調安全に到達するものと考えられる。

5. 建設機械施工における事故防止と安全性確保のための方策

表-1 に示した建設機械施工における事故実態から整理した具体的な事故状況に対し、建設機械(オペレータ)

と作業者、現場管理者において安全性確保のために実現すべき技術的方策について検討を行った。

事故発生の多くは、現場での作業においてオペレータや作業者に判断を委ねられる。また、オペレータと作業者の間で状況の認識について不一致が存在することがその発生要因として挙げられる。そこで、製造業における生産ラインのように詳細な手順や配置等の状況といった情報を明確に示すことが、その防止のための方策となる。また、それでも、その不一致は完全にはなくすことが出来ないことから、異常時の建設機械の非常停止機能の準備も事故抑制につながるものと考えられる。

そこで、表-1 で整理した事故状況の分類に示す具体的な事故等の状況に対応した安全性確保のために達成すべき技術的方策を検討した。検討では、現場内で直接作業を遂行する建設機械(オペレータ)と作業者、現場管理者を対象に、図-6 に示す①作業環境の改善(人と機械に起因する物理的環境)、②安全対策技術の導入(支援技術を含む)及び図-11 の協調安全レベルの考え方に基づき安全性確保のための技術的方策を整理した。表-2 では、安全性確保のために達成すべき、建設機械と作業者に関連する物理的環境に関連する技術として、建設現場内の環境情報の取得と共有(作業内の俯瞰)や建設機械や作業者の状態を提示することを挙げた。次に、支援技術を含む安全対策技術の導入として、接触等のおそれのある状況を検知し、状況を伝達することや自動的な建設機械の

表-2 建設機械施工における安全性確保のために実現すべき技術的方策

具体的な事故状況	安全確保のための技術的方策 (A. ~ W.)		
	建設機械 (搭乗・遠隔操作ではオペレータ)	作業者	現場管理者 (管理システム)
走行時及び作業時の構造物への接触及び衝突	A. 作業環境に関する情報の提示 B. 動作状況の把握 (提示伝達) C. 構造物への接触前に自動停止		
軟弱地盤、高低差等による転倒・転落・滑落	A. 作業環境に関する情報の提示 D. 建設機械の姿勢を把握(提示伝達) E. 危険領域に入る前に自動停止若しくは回避		S. 作業エリア内の俯瞰 T. 逸脱した行動を確認後、関係者に提示伝達
作業エリア内での作業者の挟まれ・巻き込まれ、激突	F. 作業者等の行動計画を予め把握 G. 作業エリア内の作業者の位置の検知と情報の提示伝達 H. 危険領域への進入者の検知と自動停止	O. 建設機械の行動計画を予め把握 P. 建設機械の作業エリア内への進入警告 Q. 建設機械の接近に伴う警告と回避行動	U. 危険と判断した場合の警告 V. 建設機械稼働状況のモニタリング W. 建設機械の緊急停止
作業者との協調作業時の異常干渉	I. 協調作業する作業者の行動を予め把握 J. 逸脱した動作への警告 K. 1工程毎の確認と作業プロセスのガイダンス	R. 協調作業する建設機械の行動計画を予め把握 J. 逸脱した動作への警告 K. 1工程毎の確認と作業プロセスのガイダンス	
故障等による暴走	L. 建設機械の異常動作を提示伝達 N. オペレータによる緊急停止 M. 異常動作の自動検知と自動停止	L. 建設機械の異常動作を提示伝達	V. 建設機械稼働状況のモニタリング W. 建設機械の緊急停止

停止、緊急停止の必要性を挙げている。表-2に示すA.～W.の技術的方策については、具体的な機能として、センサ・カメラ等の搭載による情報取得技術、GNSS等により計測される情報を視覚的に表現し提示する技術、作業現場内における建設機械や作業者の監視を可能とする技術、状況に応じた建設機械の停止機能及びそのための制御技術の開発が望まれる。

なお、F、G、Iについては、作業エリア内での作業者の動向を把握するうえで必要となる情報を建設機械オペレータが把握するための技術的方策である。具体的には、「F.作業者等の行動計画を予め把握」は、計画段階で予め作業者の動向を把握するもの、「G.作業エリア内の作業者の位置の検知と情報の提示伝達」は、作業計画で規定されていない協働する作業者の動向をリアルタイムに把握することを目的としている。また、「I.協調作業する作業者の行動を予め把握」は、建設機械と作業者の協調作業時の異常干渉を防ぐことを目的として、すぐ近くの作業エリア内に存在する作業者のみでなく、より広く、工事関係者の行動を予め把握することを求めている。

6. 自動化と無人建設機械の導入における安全確保

現在、建設業における労働者不足や高齢化率の高さが深刻化する一方、建設現場の生産性確保及び向上は重要な課題となっている。このため、必要とする労働力の削減や、非経験者に工事の遂行が強く求められている。そのため、ICT(Information and Communication Technology)を適用した施工の自動化や遠隔操作化への期待は大きく、様々な場面での試みが進められている。

しかし、従来行われてきた人力による作業や建設機械の操作と、自動・自律化・遠隔操作化による建設機械の作動については、安全確保の上でも考えるべき事柄に違いがある。本章では、特に建設機械施工における、オペレータ非搭乗の無人建設機械の導入について、安全確保の観点から検討する。

6.1 建設機械の自動・自律化と安全確保に関する注意

建設機械における自動・自律化は、作業時のオペレータの人的要因に起因する事故の削減に役に立つ可能性がある。しかし、現状の技術では、建設機械が自ら多様な現場環境の中で確実に状況を把握して自動的に働くようにすることは難しい。また、そこにいる作業者の存在や動きを建設機械が自ら確実に認識することは、現状では現実的ではない。その点で、建設機械と作業者が混在す

る現場環境では、建設機械の自動化は、安全性の観点からみると、一般に負の要因をとる。したがって、生産性の向上や作業者の削減を目的として自動化を導入する際には、改めて、安全確保のための配慮が必要となる。

ただし、環境や作業の形態を整備することで、ある程度の作業工程の自動化を図ることはできる。

危険検知用のセンサによる危険状態の自動検知、および、それに基づく自動停止機能などは、安全性の向上に役立つ。今後、自律・自動化を進めるうえでは、それらの機能を過信することなく、機能を活かすという視点で導入を進める必要がある。

自ら動作を決めて作業を進める自律機械は、予定された環境・状況の中において、予定された通り確実に(自動的に)働くことが期待される。しかし、予定外の状況に対する十分な対応能力を持たせることは、現実的ではない。IEC白書にも“安全性の問題は対象システムの内外での通常運転からの逸脱が原因で発生する。”²⁾と述べているように、安全性の確保は、予定された工程通り進んでいないときの対応が重要となる。特に、建設機械施工における作業のプロセスでは、元来実行されるべき作業工程とその作業環境が多種多様にわたる。そのため、自律化された建設機械における安全性の担保は極めて難しい。自動化システムの導入に際しての安全性の確保については、ここに注意する必要がある。

6.2 無人建設機械の導入

オペレータが建設機械に搭乗せず、自動・自律的に施工を行う建設機械、および、遠隔地にいるオペレータにより操作運転される建設機械を無人建設機械と呼ぶ。

自動・自律化された建設機械は、予めプログラムされた手順に基づき、建設機械に搭載したカメラやセンサ、GNSS等の機器によって、周囲の状況を認識し、自らの判断によって建設機械を作動させて作業を進める。

遠隔化された建設機械は、無線LAN等の通信技術により、建設機械と遠隔地にある操作室で、映像や操作情報を交換し、遠隔操作室にいるオペレータにより建設機械を操作する。

既に、ダム等の大規模建設現場では、自動化された建設機械による施工システムの試験的な導入が進められている。また、災害復旧活動等で活用されている無人化施工は、人の立ち入ることのできない危険な特殊環境における災害対応工事での活用が行われてきた。近年、これらの無人建設機械をさらに広く一般の施工現場に適用して、施工期間の短縮や作業コストの削減、オペレータの作業負担の軽減、安全性の確保、労働環境の改善を図るための、技術開発等や導入が進められている。

6.3 安全性の観点からの無人建設機械の特徴

ここでは、安全性の観点から無人建設機械施工のメリットとリスクを述べる。

6.3.1 無人建設機械の安全上のメリット

- (1)オペレータが建設機械に非搭乗となると、搭乗オペレータに関連する死傷事故等は回避される。
- (2)遠隔操作においては、一般に、複数のオペレータが一つの遠隔操作室で働く場合が多い。この場合、オペレータは互いにある程度の情報を共有し、調整を図りながら作業を行うこととなる。したがって、建設機械の操作には自動的にほかの人の注意も向けられることとなり、オペレータの勘違いなどによる人的要因による事故は軽減される。また、オペレータの突発的な不調にも対処できる。
- (3)自動制御においては、オペレータの不注意や勘違いなど、人的要因による事故が回避される。

6.3.2 無人建設機械の安全上のリスク

- (1)遠隔操作では、現場から届いた画像等の限られた情報に基づいて建設機械が操作される。したがって、オペレータは搭乗時に比して十分な情報が得られず、精密な作業ができないことが安全性への阻害要因となり得る。また、建設機械全周に対する俯瞰的な情報が得にくい恐れがある。さらに、現場の建設機械と遠隔操作室間の通信には若干の時間遅れがあり、現場で発生する事態への即応性が不十分となる可能性がある。
- (2)自動・自律機械については、作業者が操作する場合に比して、建設機械が持つ認知能力の不足が大きな問題となる。特に、自動建設機械から見て予定外の

状況が発生した時には、それに対処することはできないと考えるべきである。したがって、自動運転中は、常に外部からその動作をモニタ(監視)して、外部から非常停止などの対処をする体制が必要である。

6.4 無人建設機械に求められる技術的課題

建設機械施工において、自動・自律化とオペレータによる遠隔操作とした場合、想定される事故は異なる。また、施工環境での作業者の協働の有無等、建設機械の活用シーンによって想定される事故の様相には多様性がある。

そのため、無人建設機械を効率的に導入し、生産性の向上と安全性の確保の両立に役立てるためには、技術的に検討・開発すべきことは多い。しかし、それらは、まず、最低限の事故防止、あるいは安全確保の条件を満たしたものを導入し、それを運用しつつ、安全性と生産性の双方の向上を両立に必要な十分な機能や条件を明らかとし、その実現を図って行くことが望ましい。

表-2で整理した建設機械稼働時の安全性確保において配慮すべき課題(技術的方策となるA~W)について、無人建設機械が遠隔操作と自動制御で働く場合に関して、安全性確保のための技術課題を整理した(表-3)。

オペレータによる遠隔操作は、搭乗での操作と比較した場合、オペレータの取得できる知覚情報等(視覚・聴覚・触覚等)が不足するケースも考えられる。したがって、安全への配慮として、オペレータへの的確な情報の伝達(映像を中心とする知覚情報の提供)と作業手順の誤認知や操作インターフェースによる操作ミスを防止するためのフルブーフ機能やオペレータへの適切な誘導を促すガイダンス機能といった支援技術が求められる。

建設機械の自動・自律化では、オペレータによる逸脱

表-3 無人建設機械施工の各シーンにおける安全性確保のための技術課題

無人建設機械の活用シーン		無人建設機械施工の安全性確保のための技術的方策 (表-2のA~W)		
活用シーン (作業形態)	建設機械の運転モード	必須となる方策	活用状況及び技術開発動向に応じた技術的方策	
建設機械と作業者が分離された現場での建設機械施工の活用	遠隔操作	V, W	A, B, C, D, E, F, G H, L, N, M, S, T, U	
	自動・自律化		F, G, H, L, N, M, S, T, U	
作業者等と建設機械の混在した現場での活用	遠隔操作		A, B, C, D, E, F G, H, L, N, M, O P, Q, S, T, U	
	自動・自律化		F, G, H, L, N, M O, P, Q, S, T, U	
建設機械と作業者による協調作業	遠隔操作			I, J, K, R, L, N, M
	自動・自律化			

した行為は排除できるが、一方、環境の状況に対する認知能力の不足があり、その状況把握能力の向上に従って、実用化が進められることとなる。なお、機械制御のためのプログラムや建設機械本体・通信装置内の異常、あるいは、制御系の突発的な故障によって制御不能に陥り、建設機械が暴走して協働する作業員や周辺構造物等への接触事故等の発生が想定される。そのため、故障等の発生を排除・抑制することが必要である。

7. 無人建設機械導入時に遵守すべき条件

無人建設機械を導入する際に、従来の搭乗操作による建設機械の利用時と同等以上の安全を周辺の作業員に対して確保したい。そのためには、現実的には、無人建設機械と作業員を確実に分離すること、および、個別の建設機械や作業員毎ではなく、施工システム全体として、建設機械と作業員における接触を防ぐ機能を持たせることが必要である。当面は、これを建設機械と環境(管理システム)に準備させることが適切であろう。

そこで、建設機械と作業員への安全対策としては、以下の無人建設機械導入時に遵守すべき条件(1)~(3)のうちの1つまたは複数及び、(4)を実装することが求められる。

- (1)建設機械が作業するエリアと作業員が働くエリアを分離し、そのエリアの情報を建設機械と作業員に事前に周知・共有する。
 - ・手段の例：コーンを設置/地図情報の事前共有
- (2)建設機械または作業員が、そのエリアを越えたか、越えようとすることの検知と、その情報を各者に提示する。
 - ・検知手法の例：建設機械および作業員による認識/監視員による目視/レーザカーテンなどのセンサ/建設機械および作業員が持つ位置センサ(GNSSなど)を管理システム(監視室)が監視
 - ・情報共有の方法の例：センサ等に直接つながる機器による警告/管理室に情報を集め、建設機械と作業員に通知(放送あるいは作業員の持つタブレットに通知)/オペレータに情報を通知(遠隔操作、搭乗操作について)/自動機械のコントローラに通知(自動・自律化について)
- (3)建設機械自身により、その稼働域への作業員の侵入の検知とそれに対して対処する。
 - ・検知法の例：建設機械に搭載したセンサによる自動検知/遠隔操作については、オペレータがセンサ情報や全周カメラの映像などを見て認識
 - ・対処法の例：機械による警告音の発生/動作の低速

化と停止/管理システムへの通知と管理システムによる対処

- (4)建設機械の故障等を理由とする動作異常や暴走による被害を防止(検知と対処)する。
 - ・検知法の例：管理システム(管理者)の常時監視による異常検出
 - ・対処法の例：無人建設機械の稼働エリアの境界に物理的な柵を設置することにより、建設機械がエリアから逸脱することを防止/異常検出時の遠隔自動停止機能の実装/制御系と独立した非常停止機能の実装

なお、これらの安全確保のための機能自体についても、①機械の故障、②通信系の不調、③作業員の不注意や遠隔オペレータの体調不良等により正常に機能しない可能性が存在する。したがって、それらへの対処として可能な限り多重化等がなされた安全確保機能の準備が必要である。どの機能を実装・準備するといった判断は、リスクアセスメントにより決定する。

8. おわりに

建設機械施工において発生する被害には差異がある。特に作業員と混在した作業環境における事故は、作業員の死傷事故のリスクが想定される。また、建設機械の故障等による暴走は、多角的な被害の発生が想定される。

本稿では、現場内で作業を行う建設機械(オペレータ)や作業員を対象とした、作業環境の改善、安全対策技術の導入の観点から安全性確保のために必要となる課題について検討を進めた。

検討を進めるうえでIEC白書の提唱する“人・機械・環境”の調和を目的とした協調安全の各レベルを参考に、建設機械施工における協調安全レベルの考え方を示し、事故状況の分類に示す具体的な事故等の状況に対応した安全性確保のために達成すべき技術的方策を提案した。

具体的には、建設機械と作業員に関連する物理的環境に関連する技術として、建設現場内の環境情報の取得と共有(作業内の俯瞰)や建設機械や作業員の状態を提示することを挙げた。次に、支援技術を含む安全対策技術の導入として、接触等のおそれのある状況を検知し、状況を伝達することや自動的な建設機械の停止、緊急停止の必要性を挙げた。

建設現場の生産性確保及び向上を目的としたオペレータ非搭乗の無人建設機械の導入において、最低限の事故防止、あるいは安全確保の条件を満たしたものを運用しつつ、安全性と生産性の双方の向上を両立に必要な十分な

機能や導入時に遵守すべき技術的方策を提案した。

また、当面、無人建設機械を導入する場合、生産性と安全性を確保するうえで、建設機械と作業者の接触をなくするために遵守すべき条件を示した。

今後は、本稿により提案した安全への配慮に基づき測位・映像・センサ・機械制御等の技術の具体的な研究開発及び施工時における建設機械・作業者の行動分析を行い、事故発生の抑制を目的とした各種技術開発を具体的に進める必要がある。また、無人建設機械の導入においては、技術開発の動向や生産性向上を視野に入れつつ、当面、建設機械と作業者等の分離した環境下において安全性確保のために遵守すべき条件を満たした取り組みによる推進に期待したい。

謝辞：本稿をまとめるにあたり情報提供及び議論等に参加いただいた国土交通省味田悟氏、金森宗一郎氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 樋口恒一郎：“建設工事における事故と安全対策”，（社）全日本建設技術協会，<https://www.zenken.com/kensyuu/kousyuuukai/R04/687/higuchi.pdf>
- 2) IEC（国際電気標準会議）/MSB（市場戦略評議会）：“IEC 白書 Safety in the Future”，IEC（国際電気標準会議），https://www.japan-certification.com/wp-content/uploads/iec_wp-Safety-in-the-Future_JP20210713.pdf
- 3) 厚生労働省労働災害発生状況，<https://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzenisei11/rousai-hassei/dl/s22-12.pdf>
- 4) 厚生労働省職場の安全サイト，労働災害統計，<https://anzeninfo.mhlw.go.jp/user/anzen/tok/bnsk00.html>
- 5) 吉川直孝，伊藤和也，堀智仁，清水尚憲，濱島京子，梅崎重夫，豊澤康男：ドラグ・ショベルに係る死亡災害の詳細分析と再発防止，土木学会論文集 F6（安全問題）Vol.70, No.2, pp.L107- L114, 2014.
- 6) 石橋昭：“ヒューマンファクターとエラー対策”，保健医療科学，国立保健医療科学院，51（4），pp.232-244, 2002.
- 7) 小松原明哲：“安全人間工学の理論と技術－ヒューマンエラーの防止と現場力の向上－”，丸善，p.21, 2016.
- 8) 神余浩夫：“Safety in the Future - IT時代の安全概念-”，システム制御情報学会，システム／制御／情報，Vol.64, No.11, pp.430-434, 2020.

（2023.6.14 受付，2023.8.30 採用決定）

A Study on Safety Assurance in Construction Machinery Installation - Toward the Introduction and Use of Unmanned Construction Machinery -

Masaharu MOTOKI¹, Takashi YAMAGUCHI², Shinichi YUTA³

¹ Senior Researcher, Construction Technology Research Department, Public Works Research Institute

² Chief Researcher, Construction Technology Research Department, Public Works Research Institute

³ Project Researcher, SIT Laboratories, Shibaura Institute of Technology

The construction industry site environment is not uniform from site to site, but changes daily depending on weather conditions and other factors. In addition, the size of the products to be worked on is large. Therefore, it is more difficult to automate civil engineering work using construction equipment in the construction industry than in the manufacturing industry, and the safety of daily work is dependent on operators and workers.

This is a major characteristic of the construction industry, and a major challenge is how to achieve both productivity improvement and safety assurance.

In this paper, accidents in civil engineering works using construction machinery in the construction industry are categorized and the damage caused by such accidents is summarized. Based on this, the paper presents the results of a study on the concept of cooperative safety in civil engineering works using construction machinery in the construction industry and the technical measures that should be implemented to ensure safety.

In addition, the paper proposes the items that should be observed from the viewpoint of “safety assurance” when unmanned construction machinery is introduced.