

ニューマチックケーソン工法における排土設備自動化

○坂本	浩平
橘	伸一
藤原	啓
南坂	義雄
浅利	和輝
荒地	智晴

1. はじめに

近年、日本社会は急速な少子高齢化に直面しており、建設業界においてもその影響は顕著である。特に、熟練作業員の高齢化と若年層の労働力不足により、人手不足や技術継承が課題となっている。このような状況において、施工現場の生産性を向上させるためには、従来の人手依存型の作業から脱却し、先進的な技術を導入した自動化施工への移行が求められる。

ニューマチックケーソン工法における掘削土の排土作業は、排土クレーンによって揚重された排土用バケットを、マテリアルロックを介して函内に搬入し、掘削土を積込んだ後、再び函外へ搬出する行程を繰り返すことで行われ、マテリアルロック操作員の配置が必要であった。

本報告では、マテリアルロック操作員の作業負荷軽減の課題を解決するため、排土作業を自動化するシステムを開発した。開発したシステムの構成、仕様および実証結果を報告する。

- ② 排土クレーンにて排土用バケット揚重，マテリアルロック内搬入
※マテリアルロックの下扉閉
マテリアルロック内減圧
- ③ 減圧後，マテリアルロックより排土用バケット搬出
※マテリアルロック上扉開
- ④ 転倒装置で排土用バケットの転倒排土
※排土クレーン横行
- ⑤ 排土用バケットをマテリアルロック直上へ移動
※排土クレーン横行
位置合わせ
- ⑥ 排土用バケットをマテリアルロック内へ搬入
※マテリアルロック上扉閉
マテリアルロック内加圧
- ⑦ 加圧後，排土用バケットを函内まで降下，着地
以後①～⑦の繰り返しである。

2. 概要

本工法の特徴は、掘削中に断続的にケーソン本体が沈下と傾斜を繰り返すことである。これにより排土クレーンとマテリアルロックの位置関係は常に変動する。また排土用バケットの搬入出時にはマテリアルロック内に設置された上下扉の動作に接触しないよう、所定の格納範囲内で正確に停止させることが重要である。

開発した「排土設備自動化システム」は、排土クレーンとマテリアルロックに搭載したセンサーにより、排土用バケットの位置を自動検出することで、上記の揚重・扉開閉・加減圧を一括制御し、排土用バケット搬入出の一連動作を自動化するものである。

排土作業の流れは以下のとおりであり、概念図を図-1に示す。

- ① 排土用バケットへ掘削土積込み、排土開始

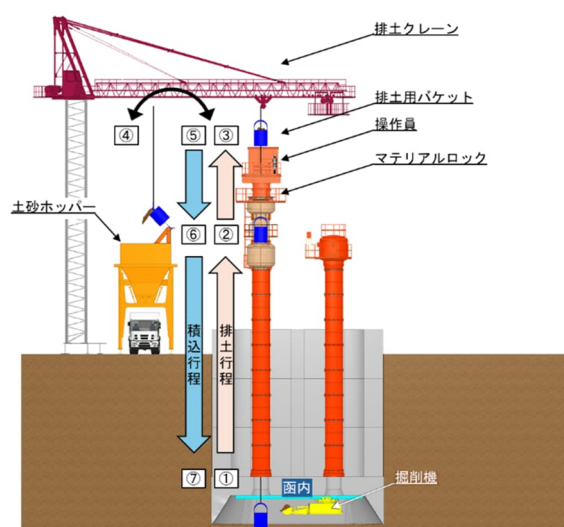


図-1 排土作業概念図

排土用バケットをマテリアルロック内へ搬入する際の詳細について図-2 に示す。

マテリアルロックは排土用バケットを搬入後、加圧のために上扉を閉鎖するが、その時の排土用バケットの弦との離隔は40cm程度である。

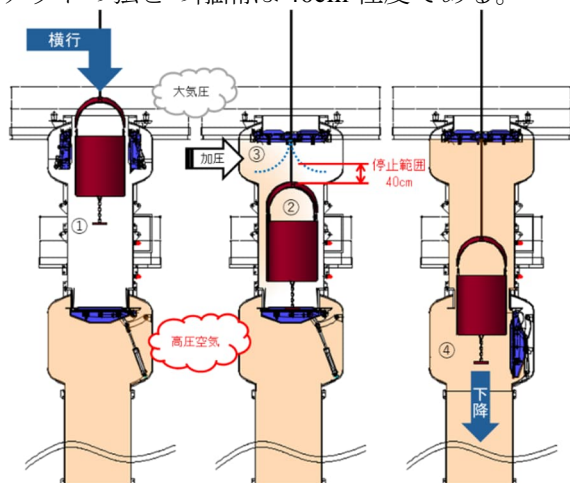


図-2 各行程詳細図

2. 機器構成および仕様

(1) 自動化対応マテリアルロック

自動化に対応する機器構成を図-3に示す。

- ・マテリアルロック加減圧操作：電動送排気弁
- ・上下扉開閉検知：近接スイッチ
- ・排土用バケット検出：排土用バケット検知センサー
- ・マテリアルロック圧力計測：デジタル圧力計
- ・各種信号受け渡し制御：自動運転制御盤 (PLC)

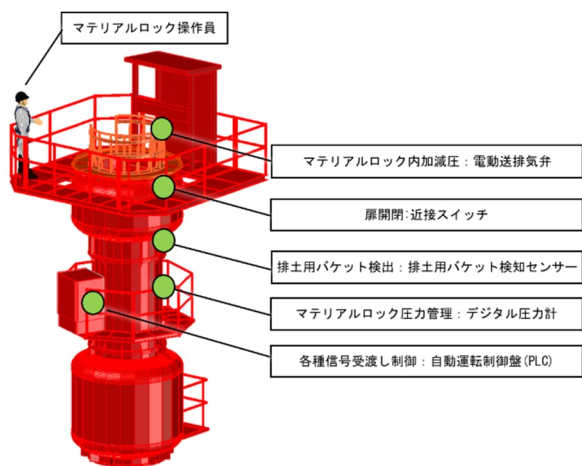


図-3 マテリアルロックおよび制御用機器

(2) 自動化対応排土クレーン

自動化に対応する機器構成を図-4に示す。

本システムで採用した排土クレーンは、マスト横にジブを備えた水平クレーンであり、マスト後方までの吊荷移動と、旋回が可能である。

この特徴を活かし、沈下掘削に伴いマテリアルロックが偏心した場合には吊芯を合わせることが可能である。

- ・揚程長、横行長計測：回転エンコーダ

- ・吊荷重量計測：ウインチ荷重計
- ・たわみ量計測：ロードセル
- ・荷振れ防止制御：荷振れ防止インバータ
- ・排土用バケット位置計測：位置計測カメラ

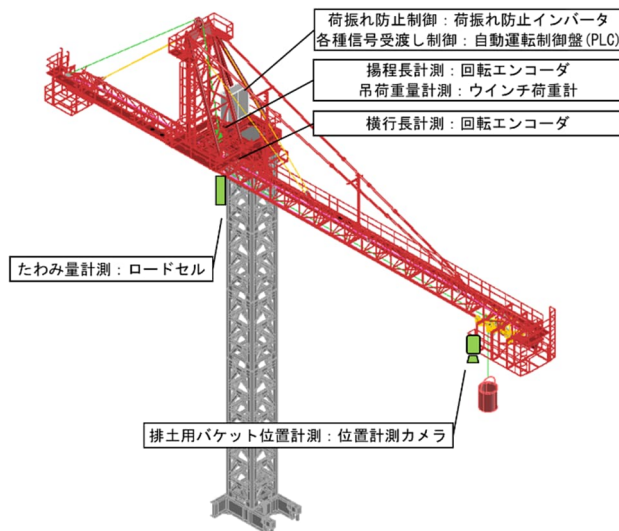


図-4 排土クレーンおよび制御用機器

4. 自動運転フローおよびシステム構成

(1) 自動運転フロー

図-5に示す自動運転フローは、排土設備自動化における一連の動作手順である。本フローは、排土用バケットの搬入・搬出、マテリアルロック内の加減圧、扉の開閉、排土動作までを含む全行程を対象としており、各ステップはセンサー情報に基づく制御信号により自動的に実行される。

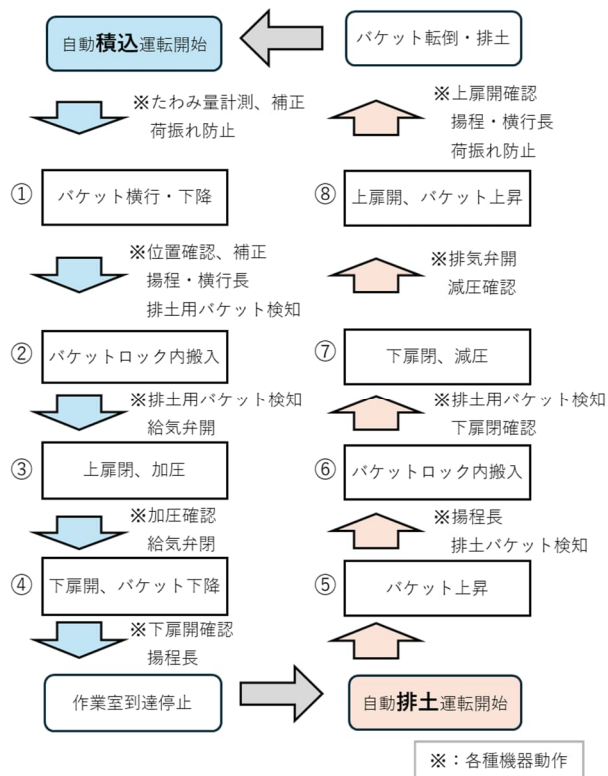


図-5 自動運転フロー

(2) システム構成

主なシステム構成は以下①～⑤である。

- ① 巻上げ・横行長の計測
- ② ロードセルによるクレーン全体のたわみ量計測
- ③ 荷重変動によるワイヤーの伸縮長算定

様々な要因により排土クレーンの吊芯はマテリアルロック中心からずれるため、各要素に対して上記①～③のセンサーにより変動値を計測している。位置変動要素と計測方法について図-6 に示す。

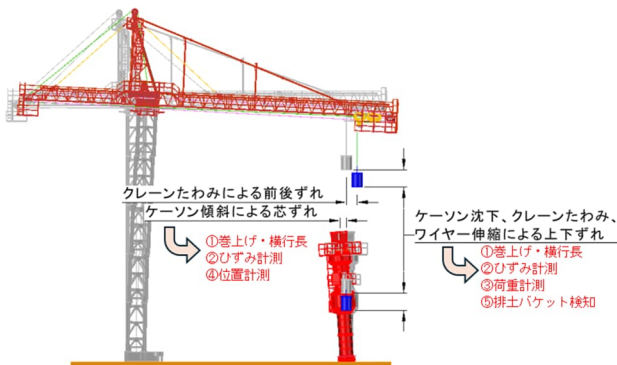


図-6 位置変動要素と計測方法

④ カメラによるマテリアルロック位置計測

マテリアルロック搬入口の直径は、排土用バケット外径+40cm であり、排土用バケットをマテリアルロックへ安定して搬入するために、排土クレーンジブに搭載した位置計測カメラで相対位置を計測し、ずれに応じて位置補正する。

水平方向ずれの許容範囲について図-7 に示す。

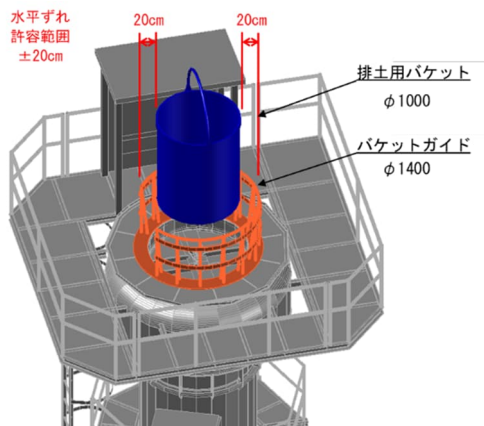


図-7 水平方向ずれ許容範囲

⑤ マテリアルロック内排土用バケット上下位置計測

排土用バケットをマテリアルロック内へ搬入時には、上扉の閉鎖動作に接触しない高さで停止させる必要があり、その許容範囲は図-2 に示すように 40cm である。停止位置は揚程高で管理しているが、巻上げ、横行長の計測に加えて、マテリア

ルロック内に設置した排土用バケット検知センサーにより排土用バケットの位置を直接検出することで、位置検出の信頼性を向上させている。排土用バケット検知センサーの使用内容は以下のとおりである。また排土用バケット検知センサーによる制御について図-8 に示す。

- ・センサーはマテリアルロック内の上下2か所に設置している。
- ・上下どちらかのセンサーが排土用バケットを検知すると、巻上げ（下げ）速度を「2速」から「1速」に減速する。
- ・上下センサー同時検知により排土用バケットの所定位置停止を判断しており、これは次ステップへと移行するトリガーでもあるため、インターロックの役割も担っている。

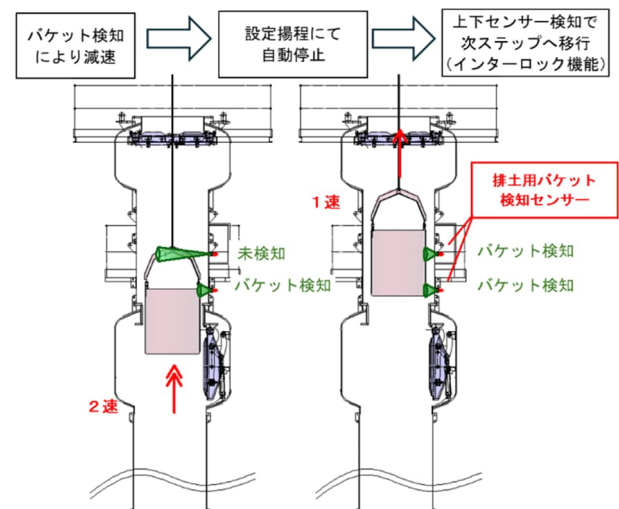


図-8 排土用バケット検知センサー

これらの検出値をフィードバックし、リアルタイムで次ステップの目標値を更新することで補正された動作量を指示することが可能である。

5. 実証

自動化施工を実現するにあたり、自動化（一部）施工による実証を行い、排土クレーンの搬入出工程の動作安定性や手動操作と比較したサイクルタイムを計測した。

5.1. 定義「自動化施工」と「自動化（一部）施工」

便宜上、自動化施工と自動化（一部）施工を図-9 のように区分した。

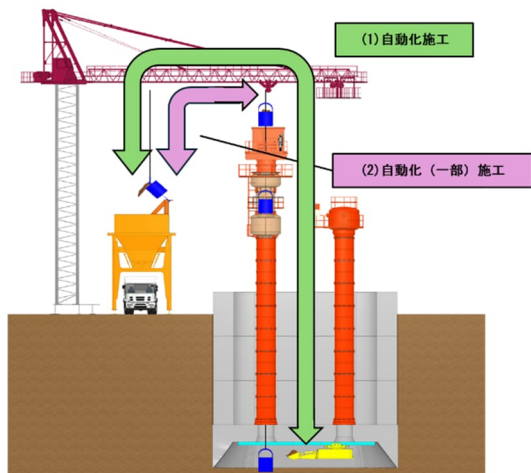


図-9 自動化施工と自動化（一部）施工区分

(1) 自動化施工について

自動化施工とは、「函内で積込み、マテリアルロックから出た排土用バケットを移動し排土クレーン後部の排土設備で排土させ、排土完了した排土用バケットを函内まで移動させる」システムである。

(2) 自動化（一部）施工について

自動化（一部）施工とは、「マテリアルロックを介さずに排土用バケットを移動しクレーン後部の排土設備で排土させ、排土完了した排土用バケットをマテリアルロック上まで移動システムである。

5.2 自動化（一部）施工

自動化（一部）施工の動作行程を図-10 に示す。

行程①（搬出）と行程②（搬入）について、自動運転と手動運転でそれぞれサイクルタイムを計測した。計測結果を表-1 および表-2 に示す。

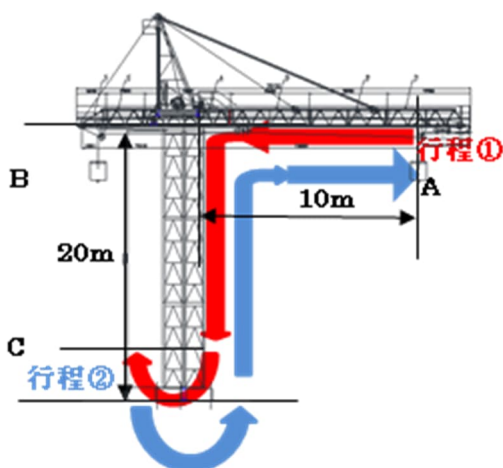


図-10 自動化（一部）施工行程

(1)条件

- ・吊荷は空荷排土用バケット（約 0.4t）
- ・A⇔B 横行（10m）
- ・B⇔C 巻き上げ下げ（20m）

(2)サイクルタイム

表-1 自動化（一部）施工

実施回数	1 回目	2 回目	3 回目	平均
工程①	1分25秒	1分24秒	1分25秒	1分24秒
工程②	1分15秒	1分15秒	1分15秒	1分15秒

※A⇔B「2 速」、B⇔C「2 速」

表-2 手動運転

実施回数	1 回目	2 回目	3 回目	平均
工程①	1分36秒	1分35秒	1分31秒	1分34秒
工程②	1分34秒	1分31秒	1分33秒	1分32秒

※A⇔B「2 速」、B⇔C「3 速」

(3)結果

- ・自動運転では、手動運転に比べ同等以上のサイクルタイムであった
- ・自動運転は、横行の加減速による排土用バケットの荷振れが大きい
- ・手動運転は、荷振れ抑制のためのインching操作分時間ロスがある

(4)荷振れ防止インバータ

排土用バケットをマテリアルロック内へ自動搬入するためには、マテリアルロック中心±20cm 以内で荷振れなく停止させることが重要であるため、横行用ウインチに荷振れ防止機能を備えたインバータを採用した。

荷振れは、吊荷の加減速により発生し、その振動周期は吊荷の固有振動数（共振周波数）による。固有振動数は吊荷の重量とワイヤー長により算定できるが、重量パラメータは影響が少ないと判断し、ワイヤー繰り出し長のみをリアルタイム計測しインバータへフィードバックした。

① 制振制御によるクレーン動作の変化

制御有効時と無効時のインバータ出力周波数波形を図-11 に示す。

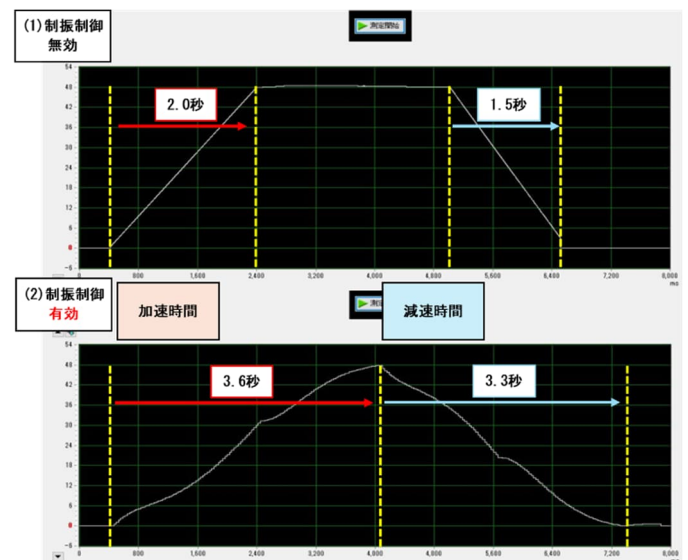


図-11 インバータ出力周波数

縦軸がインバータ周波数、横軸が加減速に要した時間である。横行「2速」を入力し、最高速度到達時間と減速停止時間を計測した。

制御有効時は、加速時間・減速時間ともに約1.7秒長くなっている。また加速度も一定ではなく、手動運転のインチャング操作に近い動作が含まれていることがわかる。

② 荷振れ検証結果

実際に排土用バケットを横行した際の荷振れ防止効果について表-3に示す。また制振制御有効時と無効時の荷振れ状況を図-12および図-13に示す。

＜条件＞

- ・地上揚程 5m
- ・横行「2速」
- ・5m 横行後停止

表-3 制振制御結果

吊 荷	荷振れ防止結果	振 幅
バケットのみ (400kg)	有効	4cm
	無効	92cm
バケット+錘 (計 1100kg)	有効	7cm
	無効	157cm



図-12 制振制御 無効時（バケット+錘）



図-13 制振制御 有効時（バケット+錘）

③ 荷振れ防止インバータ効果

- ・制振制御機能により、荷振れ幅が95%低減した
- ・吊荷重量による荷振れの変化はなく、重量変化にも追従する制御である。

5.3. 自動化施工

排土クレーンの排土動作に加え、マテリアルロックへの搬入出と、実際の排土作業を想定し実証を行った。

自動化施工の工程を図-14に、実証時の設備配置を図-15に示す。

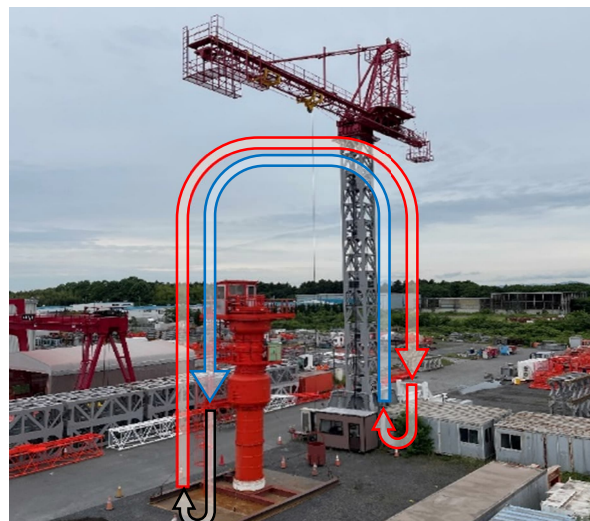


図-14 自動化施工行程

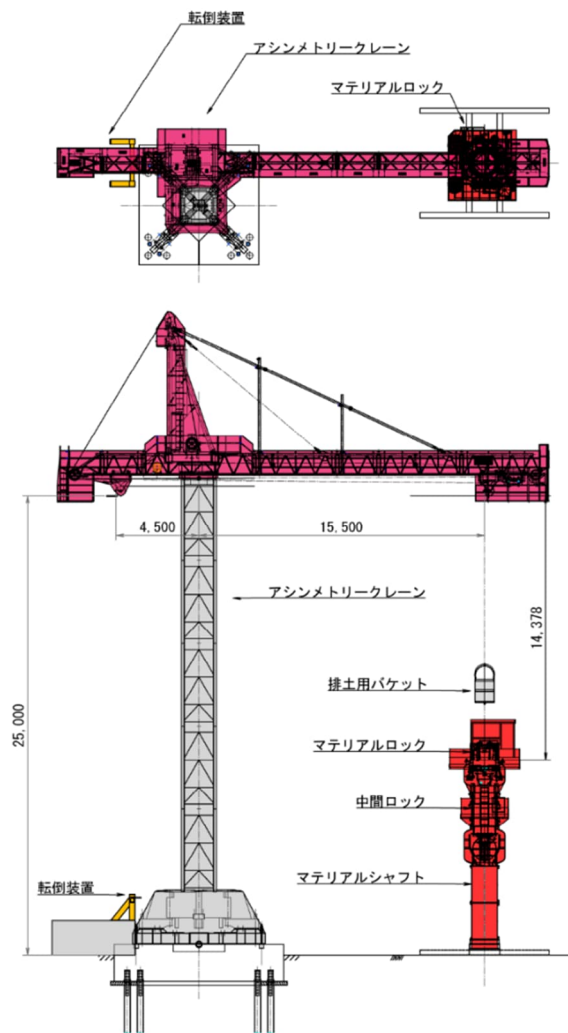


図-15 設備配置

実証時は土砂積込み後を想定し、排土用バケットをマテリアルロック下のシャフト内に吊込んだ状態から自動排土を開始した。シャフト内より搬出、排土（排土用バケット転倒）、マテリアルロック再搬入してシャフト内へ戻るまでを1行程とし、自動運転と手動運転のサイクルタイムを計測した。実証では圧縮空気による高気圧環境は再現していないため、給排気にかかる時間をそれぞれ20秒に設定しサイクルタイムに加算した。

計測結果を表-4 および表-5 に示す。

(1)条件

- ・巻上げ（下げ）（20m）
- ・横行（20m）
- ・マテリアルロック搬入出
- ・給気・排気（各20秒）
- ・排土用バケット転倒（転倒装置）

(2)サイクルタイム

表-4 自動化施工

吊 荷	1回目	2回目	平均
バケット単体	4分47秒	4分48秒	4分47秒
バケット+錘	4分33秒	4分31秒	4分32秒

表-5 手動運転

吊 荷	1回目	2回目	平均
バケット+錘	5分04秒	5分09秒	5分06秒

(3)結果

- ・自動運転は、手動操作と比較しサイクルタイムは約15%短縮した
- ・自動運転では、サイクルタイムのばらつきが小さい
- ・自動運転は、ステップごとの移行がほぼ0秒のシームレス動作であり、位置合わせは演算で得られた目標値に向けて動作と停止を行うため、無駄のない運転が可能である

7. フェイルセーフの設計

ニューマチックケーソン工法では、函内圧力の適正管理が最重要事項である。本システムではフェイルセーフとして以下を採用し、発動条件を図-16に示す。

- (1)電動送排気弁は停電や通信障害等発生時、自動で弁を遮断する緊急動作アクチュエータを採用した。
- (2)下扉開閉検知センサーの誤作動時に、函内圧力の誤排気防止のため、排気時間の上限値を設定した。設定時間以上排気が継続した場合には、排気弁を閉鎖し自動運転中断、異常警報を報知する。

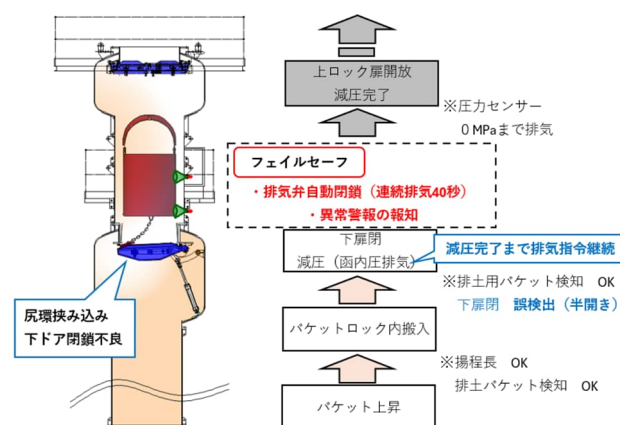


図-16 センサー誤作動時のフェイルセーフ

7. おわりに

排土設備自動化施工システムの活用により、サイクルタイムが短縮され施工効率向上による工期短縮が期待できる。

また、従来必要であったマテリアルロック操作員の常時配置が不要になり、吊荷との接触リスクも低減され安全性が向上する。

本技術は、建設現場における省力化と安全性向上に資するものであり、労働力不足が深刻化する建設業界において働き方改革の推進に寄与するものと考えられる。

今後は現場適用を通じて実用性を検証するとともに、異なる施工条件への適用性やシステムの汎用性について検討する予定である。