

コンクリート床仕上げロボットの改良開発

過去の課題を解決した改良試作機の設計及び製作

中村 洋祐^{*1}

Keywords : robot, concrete floor, remote control, autonomy, labor saving

ロボット, コンクリート床, リモコン, 自律, 省力化

1. はじめに

大成建設株式会社はコンクリート床仕上げ作業の省力化及びコンクリート床仕上げ作業を実施する作業員（以下：「土間工」とする）の腰や膝に負担の掛かる作業環境の改善を目的として、2014年よりコンクリート床仕上げロボットの開発を開始した。このコンクリート床仕上げロボットの開発内容については、大成建設技術センター報第49号（2016）「コンクリート床仕上げロボット（T-iROBO® Slab Finisher）の開発」¹⁾及び第52号（2019）「コンクリート床仕上げロボットにおける半自律制御操作システムの開発」²⁾として報告した。その後2018年からリース形式での建設現場での導入を開始したものの、機体の耐久性やバッテリー性能等の課題が顕在化して商品として耐えうることができなくなつたため、2020年にはリースを停止した。そして改めてその課題解決を目指して修正・改良開発を実施することを決定した。修正・改良前のコンクリート床仕上げロボット（以下：「コンクリート床仕上げロボット（旧タイプ）」とする）の外景を写真-1に示す。



写真-1 コンクリート床仕上げロボット（旧タイプ）

Photo.1 Concrete slab finishing robot (old type)

2. 不具合調査（課題の抽出）

建設現場でコンクリート床仕上げロボット（旧タイプ）を利用する状況下で、機体の様々な部分で破損例が確認された。以下に主な課題を示す。

- A. 鐧回転部下部の破損（ビスが破断）
- B. サーボモータの固定ビスが施工中に破断
- C. ギアのネジ山が摩耗
- D. 鐧角度変更ハンドルのかみ合い部の破損
- E. モータの過電圧エラーの発生
- F. 鐧が逆回転してしまう
- G. 鐧の固定用ビスが回らなくなる

またバッテリーについてもバッテリーセルが膨張するなど、10台中5台が使用できなくなった。図-1に不具合発生場所を記したコンクリート床仕上げロボット（旧タイプ）の内部イメージ図、写真-2に錐回転部下部の破損及びバッテリーボックスの膨張による不具合状況を示す。

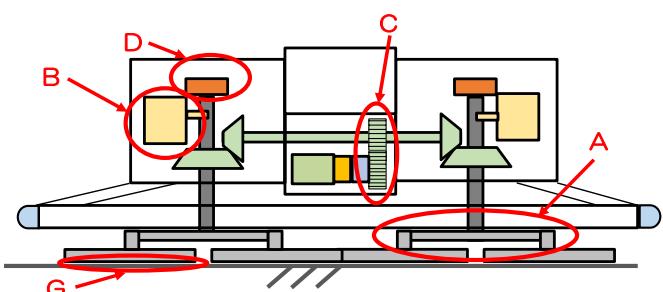


図-1 内部イメージ

Fig.1 Internal image of robot

* 1 技術センター 先進技術開発部 次世代建設技術開発室



写真-2 鍛回転部下部の破損及びバッテリーBOXの膨張による不具合状況

Photo.2 Problem status of damaged potating trowel and battery box

機体の破損について、課題 A~D の部材破損やビスの破断についての発生状況は、ロボットの初動や障害物への衝突による衝撃など瞬間に大きなトルクが発生した事象と、長時間ロボットを使用した事象との二つの状況が考えられる。開発段階においてロボットの鍛部分を操作中に鉄筋や木材に複数回衝突させる検証や、ロボットの電源をバッテリーでなく直結させて 8 時間程度の連続運転の検証を実施していたが、結果を見る限り、特殊な機体構造を持つコンクリート床仕上げロボット（旧タイプ）にはそれだけでは不十分であったと言わざるを得ない。課題 E に関しては過電圧によりモータが停止することは必要な機能であるが、頻繁に停止することは土間工の作業効率を下げる事になる為モータ自体の性能が不足していたと判断する。課題 F に関してはモータドライバ部分の配線の外れが原因であった。課題 G に関してはビスの溝部分に施工中に発生するコンクリートのノロが付着して硬化し、ドライバーの先端が入らなくなることが原因であった。またバッテリーについては短絡（ショート）でバッテリーのセルが過充電となることでセルが膨張したと考えられる。複数のバッテリーセルの消耗に対して電流が適切に分配されていれば発生しないため、BMS（バッテリーマネジメントシステム）が適切に動作しているか再確認する必要がある。

3. 修正手法の検討と実施

最初にコンクリート床仕上げロボット（旧タイプ）を分解し、細かい部分まで実物を確認して調査した。その上で設計用 CAD データを見直し、FEM 解析を実施して現行機の安全率を再検証した。その結果多くの部分で安全率が不足していることを確認した。写真-3 にコンクリート床仕上げロボット（旧タイプ）の分解調査状況、図-2 に解析調査のメッシュモデルと表-1 に解析調査の結果を示す（色が赤色の部分は安全率不足）。

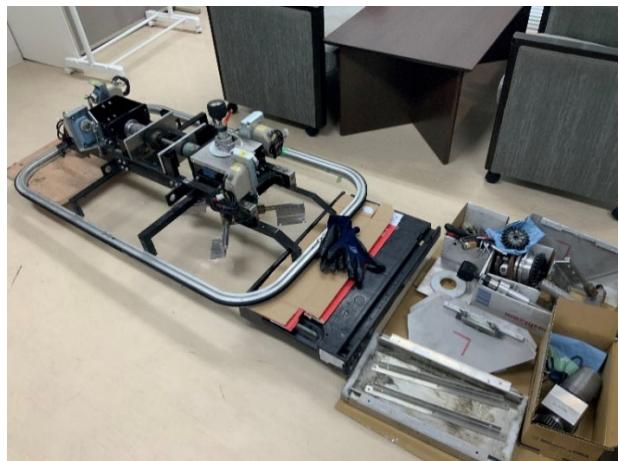


写真-3 ロボットの分解調査状況
Photo.3 Teardown investigation status of robot

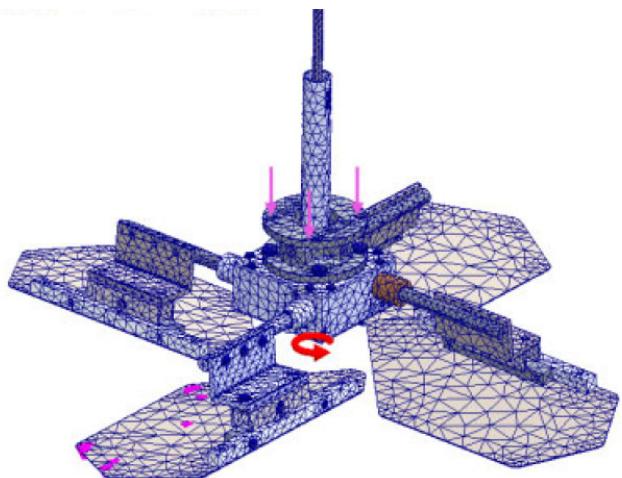


図-2 解析調査のメッシュモデル
Fig.2 Mesh model of analysis and investigation

表-1 解析調査の結果
Table 1 Result of analysis and investigation

No.	部品名	材質	ポンチ絵	安全率(コテ支持プラケットの角度0° ~ 17°)		
				0°	6.4°	17°
1	コテ	SKS5		2以上	1以下	1以下
2	ピン(支持部)	SUS303		1以下	1以下	1以下
3	止め輪(支持部)	SUS304		1以下	1以下	1以下
4	ブッシュ	C3604		2以上	1以下	1以下
5	支持ピン	SUS303		1以下	1以下	1以下
6	止め輪(支持ピン)	SWCH		1以下	1以下	1以下
7	トロウルホルダ	A6063		11	1以下	1以下
8	シャフト	SUS304		1以下	1以下	1以下
9	トロウルボックス	A5052		1以下	1以下	1以下
10	カムフォロア	スチール		1以下	1以下	1以下
11	ローラステー	SUS304		1以下	1以下	1以下

解析調査結果より、課題 A~D についてはこの安全率が適正となる設計を再度行い、検証することで対応した。また課題 E についてはモータの性能を向上すべく、

最大出力300Wであったモータを500Wに変更した。課題Fについては配線のハーネス等の設計を見直した。課題Gについては鍤の固定方法を再検討し、施工中にコンクリートのノロが飛散しても付着しない位置にビスを配置する設計とした。

またバッテリーについてはセル単位に流れる電流を監視可能なBMSに変更することで対応するものとした。

4. 改良試作機の設計方針

項目2~3で、コンクリート床仕上げロボット（旧タイプ）の顕在化した課題について分解調査及び解析を実施した結果、安全率の不足やモータ・BMSの変更などが必要であることが解明され、当初は部分的な設計見直しや修正で対応可能と考えていたが解析結果を元に一から再設計した新しいコンクリート床仕上げロボット（以下：「コンクリート床仕上げロボット（改良試作機）」とする）を製作して検証する必要性に基づきコンクリート床仕上げロボット（改良試作機）を製作した。また耐久性向上のための設計以外に機能的にコンクリート床仕上げロボット（旧タイプ）から改良した主な点は以下となる。

- A. 手動で実施していた鍤角度変更をリモコン操作により遠隔で実施可能とする
 - B. 左右の鍤回転部（以下：「トロウェル部」とする）の最大回転数を40rpm→150rpmに変更（図-3参照）
 - C. 左右の鍤が重ならないように設計し、走行の安定性を図る
 - D. 重心を下げて走行の安定性を図る
- 主な仕様の変更を表-2に示す。

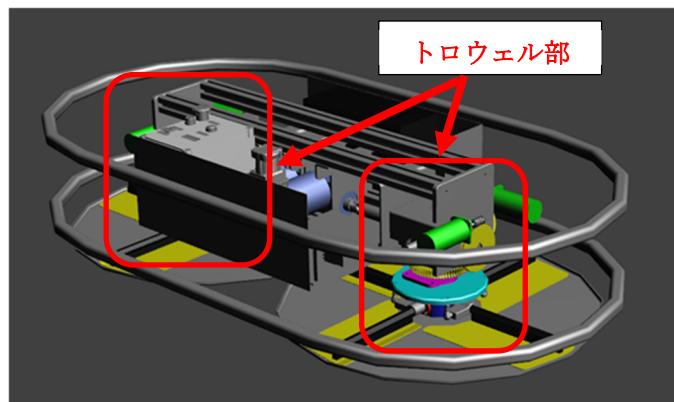


図-3 トロウェル部の位置

Fig.3 Position of trowel

表-2 仕様の変更
Table 2 Change of specifications

	コンクリート床仕上げロボット（旧タイプ）	コンクリート床仕上げロボット（改良試作機）
重量	約95kg（バッテリー含む）	約120kg（バッテリー含む）
寸法	L=1.4m W=0.8m H=0.6m	L=1.4m W=0.8m H=0.4m
工初走行仕様	電気式	電気式
工初走行供給方法	AC100V	AC100V
バッテリー電圧	24V	24V
バッテリー電圧容量	40A/h	55A/h
動力	DCモータ	DCモータ
鍤部回転数	約40rpm	20~150rpm
連続稼働時間	2~3時間	2~3時間
鍤枚数	4枚x2	4枚x2
操作方法	無線によるリモコン式	無線によるリモコン式
無線電波到達距離	約200m	約200m

5. 改良内容

- A. トロウェル部に鍤角度を変更するためのステッピングモータを配置し、リモコンでモータを回転させることで遠隔からの鍤角度変更を可能とした。
- B. 駆動モータを小型で高回転と高トルクを両立するためにD83-320KVに変更した。こちらは水冷モータとなり、高トルク時の温度上昇を水冷により押さえる仕様となる。
- C. コンクリート床仕上げロボット（旧タイプ）では平面的に左右のトロウェル部の角度を45度変えることでトロウェル部の軸を近づけてお互いのトロウェル部の間に隙間が出来ないように設計していた（図-4参照）。しかしその影響で走行時にロボットが振動し、鍤によるコンクリート床への傷を誘発している可能性があった。そのためコンクリート床仕上げロボット（改良試作機）ではコンクリート床への傷を減少させるために、左右トロウェル部の角度のズレが生じない設計とした。
- D. 重心を下げることで走行時の振動が減少することが予想されたため、コンクリート床仕上げロボット（改良試作機）は、ロボットの高さをコンクリート床仕上げロボット（旧タイプ）より約200mm低く設計した。

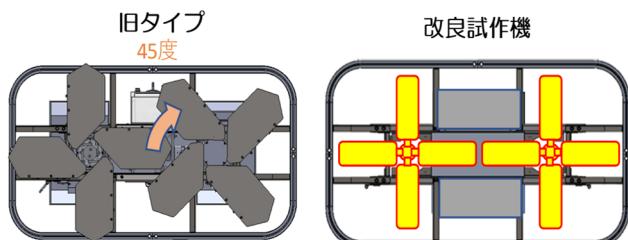


図-4 トロウェル部回転軸の平面位置

Fig.4 Plane position of trowel

6. トロウェル部の設計内容と耐久性の検証

トロウェル部には、ロボットを前進後進させるためにトロウェル部の軸を傾けるためのステッピングモータ（R1モータ, L1モータ）、左右移動させるためにトロウェルの軸を傾けるためのモータ（R2モータ, L2モータ）、鏝の角度を変更するために必要なモータ（R3モータ, L3モータ）が左右3か所ずつ、計6か所存在する。またそれぞれ、ウォームギア（R1, 2, 3ウォームギア, L1, 2, 3ウォームギア）とホイールギア（R1, 2, 3ホイールギア, L1, 2, 3ホイールギア）が重なることで力を伝える構造となる（図-5, 6参照）。この形式で設計することでモータの回転数により明確に軸を傾けることや鏝の角度変更ができる、正確に制御することが可能とした。

この設計はコンクリート床仕上げロボット（旧タイプ）には無く改良試作機で初めて試みた形式であるため、トロウェル部のみ製作した上でそれらギアの耐久性を個別に検証した。検証方法は弦歯厚法とし、50時間連続回転を実施してギアの葉のすり減りが30%以内におさまることを確認した。

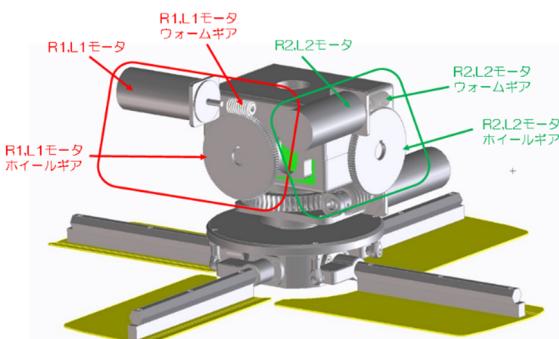


図-5 軸傾き機構

Fig.5 Mechanism of tilt trowel shaft

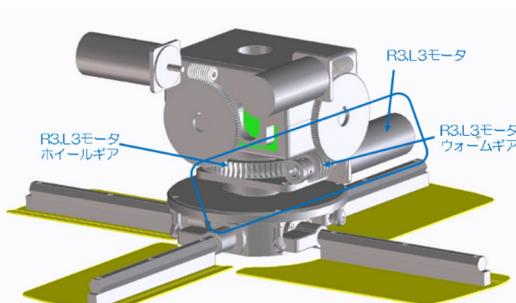


図-6 鏝角度変更機構

Fig.6 Mechanism of trowel angle change

7. コンクリート床仕上げロボット（改良試作機）の完成

コンクリート床仕上げロボット（改良試作機）について4つの変更内容を含めた改良設計を行い、また大きく変更したトロウェル部の耐久性の検証を実施した。その後、ロボットの組立を行い別途設計したカバーを取り付けてコンクリート床仕上げロボット（改良試作機）を完成させた。写真-4に組立状況、写真-5にカバーを取り付けて完成した状況を示す。



写真-4 組立状況

Photo.4 Assembly status



写真-5 完成状況

Photo.5 Completion status

8. テストヤードにおける検証

2023年1月に、ロボット製作会社の工場敷地内でコンクリートを打設し、コンクリート床仕上げロボット（改良試作機）の「A. 施工状況」、「B. 操作性」、「C. 電流値」、「D. 発生する音量」を確認した。また回転数や電流値の比較対象として2018年にリースしていたコンクリート床仕上げロボット（旧タイプ）と従来コンクリート床仕上げ施工で使用する機械である市販のハンドトロウェル（NSM-75：株式会社友定建機）でも施工を実施した。

時期：2023年1月

場所：東京都内

人員：土間工 4人（ロボット操縦はロボット製作会社社員で経験者が実施）

コンクリート打設面積：約 36m²

実験状況を写真-6、実験ヤードの状況を図-7に示す。

A. 稼働状況

コンクリート床仕上げロボット（改良試作機）でアマ出し、镘押さえ作業共に施工することができた。

B. 操作性

回転数が増す毎に床の凹凸に敏感に反応するため操作は困難になるが、50～70rpm程度の操作は十分可能であった。しかし100rpmを超える場合はコテの滑りや振動が発生するため、ロボットの部材細部の調整を行った上でさらなる操作性の確認をするものとする。

C. 電流値

アマ出し及び镘押さえ時に回転数を50, 100, 150rpmとしてコンクリート床仕上げロボット（改良試作機）の電流値を計測した。2, 3回目の镘押さえ時で50rpmの時に最小値17Aとなり、1, 2, 3回目の镘押さえ時で150rpmの時に最大値37Aとなった。ただし土間工によるとハンドトロウェルを使用する際には、通常は最大約90rpm程度までしか回転数を上げず、適正使用時は50rpm程度とのアドバイスがあった。しかし夏場にコンクリートの硬化が速く進む時には高回転にする可能性があるため、やはり150rpmの回転数を見据えた電流が流れることを想定すべきといえる。表-3に計測状況を示す。

D. 発生する音量

コンクリート床仕上げロボット（改良試作機）はエンジン式のハンドトロウェルよりは10db程度低い音量であった。表-4に計測状況を示す。



写真-6 実験状況

Photo.6 Experimental status

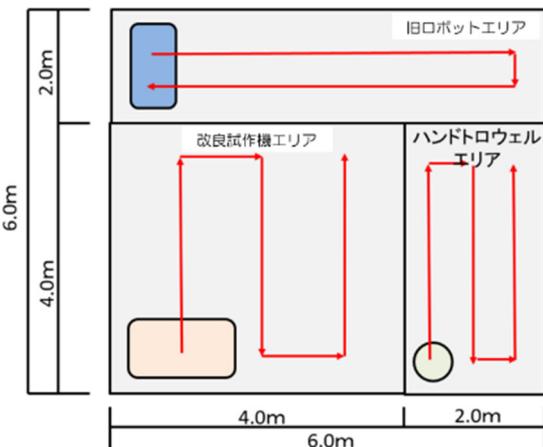


図-7 実験ヤード状況

Fig.7 Experimental yard

表-3 電流値等計測状況

Table 3 Measurement status of current value,etc

時間		1月26日		1月27日	
		アマ出し1回目	アマ出し2回目	1回目镘押さえ	2回目镘押さえ
	時間	1640	1740	1900	800
	気温(度)	5.7		0.4	1.1
	湿度(%)	23		-	55
	摩擦係数	0.049		0.208	0.427
	電流値(A)	平の円盤(新ロボ)	凸型円盤(新ロボ)		
改良試作機	回転数 50 rpm	22	23	21	17
	回転数 100 rpm	35	33	28	24
	回転数 150 rpm		36	37	37
ハンドトロウェル	*電流値ではなく 適切な回転数を記録する	90rpm	90rpm	50rpm	70rpm
時	回転数 50 rpm			13	

表-4 音量計測状況

Table 4 Measurement status of volume

作業前の騒音	50dB	円盤使用時の音量(db)		
		10m	20m	25m
改良試作機	回転数: 90 rpm	56.8	56.7	55
ハンドトロウェル	回転数: 90 rpm	68.4	66.9	64.6

9. 建設現場1での検証

2023年9月に建設現場1にてコンクリート床仕上げロボット（改良試作機）を使用して現場検証を屋外のレベルコンクリートで実施した。また、今回はロボットの一部の操縦を土間工で実施し、その感想をヒアリングした。

時期：2023年9月

場所：横浜市内

人員：土間工 2～8人

コンクリート打設面積：約 100m²/回

コンクリート配合：18-18-20 N

試行状況を写真-7に示す。



写真-7 検証状況 (建設現場1)
Photo.7 Verification status (Construction site 1)

以下に示すことが操作した土間工の意見となる。

- a. 鍤が回転している場所のコンクリートがカバーに隠れて見えないので、鍤がコンクリートに接している部分の状態がわかり難い。
 - b. コントローラーのレバー操作が硬いため指が疲労する。
 - c. バッテリーの残量や鍤の角度の状態が確認できる表示がほしい。
 - d. 鍤やアマ出し用の円盤の簡単な取り外しの仕方や、洗浄の仕方を検討すべき。
 - e. 操縦時のロボットの姿勢を自動で制御できないか。
 - f. 進行方向に対して 45 度傾けることで左右の鍤回転部（以下：「トロウェル部」とする）の間の施工できない隙間を無くせないか。
 - g. ロボットを使用したアマ出し開始のタイミングはハンドトロウェルとは異なるため、それがわかるようにすべき
 - h. 開口部や段差での落下防止センサーが必要なのではないか。
- a～d. に関しては土間工としての視点からの内容となり、ハード面での改良の指摘となる。e～f. については操縦におけるソフト面での改良の指摘となる。g. は従来の施工法の経験だけでは解明できない内容であり、また h. も安全面における指摘となるため、必要性も含めて今後検討する必要がある。

10. 建設現場2での検証

2023年12月に計3回、建設現場2にて現場試行を実施した。

時期：2023年12月（冬季）

場所：佐賀県内

人員：土間工 10人程度

コンクリート打設面積：約 100m²/回

コンクリート配合：27-12-20 N

試行状況を写真-8に示す。



写真-8 検証状況 (建設現場2)
Photo.8 Verification status (Construction site 2)

現場試行のポイントと結果は以下となる。

A. 床配筋のロボット施工への影響を検証。

テストヤードや建設現場1で検証した際には無筋のコンクリートであったため、今回の試行では床配筋上筋の上部の骨材が与える影響の有無を検証した。骨材の上筋干渉により仕上がり床面に骨材の大きさの小さな穴ができる可能性が有ると予測したが、特に骨材の影響は無かった。

B. 冬季におけるロボット施工の検証。

コンクリートの硬化に時間がかかることでロボットを載せるタイミングが遅れるため、通常施工より時間がかかるかどうかを検証した。その結果、時間がかかるかどうかという視点よりも、適切なロボット施工開始のタイミングが慣れていない土間工では判断できないことが問題となった。適切なタイミングを図りたいが環境は様々であるため、試行回数を重ねる必要があることがわかった。

C. 低スランプコンクリートでのロボット施工検証。

この建設現場のコンクリートは低スランプ（スランプ 12cm）のため、その状況下においてロボットを使用して床を仕上げられるかを検証した。結果としては、施工中のロボットの振動が多く発生し、床が適切に仕上げづらいことがわかった。その対応策として、コテ角度を立てることで多少振動が減少することを確認した。

また、スランプの低いコンクリートでの施工で電流値が上昇の有無をロボットの電流値表示から確認したが、あまり変わらない結果となった。

11. 建設現場3での検証

2024年3月に1回、建設現場3にて現場検証を実施した。

時期：2024年3月（春季）

場所：埼玉県内

人員：土間工 10人程度

コンクリート打設面積：約100m²/回

コンクリート配合：36-18-20 N

試行状況を写真-9に示す。



写真-9 検証状況（建設現場3）

Photo.9 Verification status (Construction site 3)

現場試行のポイントは以下となる。

a.OA下仕上げのアマ出し作業時のロボット施工検証。

a-1.OA下仕上げの際、比較的柔らかい状態でアマ出し作業を開始することが多いため、その状態でロボット施工する際にロボット走行による床への溝堀りの有無、そしてロボットの操作性の違いの有無を検証した。その結果、溝は出来やすいものの進行スピードを押さえることで溝を作らずに施工できることがわかったが、床が柔らかいため冬季施工と同様に施工開始するタイミングが難しいことを確認した。

a-2. 床が柔らかい場合は摩擦力が少ないため、トルクが下がり電流値が下がることが予想されたが、あまり変わらない結果となった。

b.コテによる床仕上げ作業時に、コンクリート硬度が高く粘性も高いため、ロボットで適切に押さえられるかの検証。またその際に操作性に変化があるかの検証。

床を仕上げることは可能。またスムーズに操作可能であることを確認した。

c.自律制御機能による施工の検証。

自律制御機能は問題無く稼働して施工できた。そしてリモコン操作よりむしろ安定した走行が可能であり、自律施工が有効であることを確認した。この結果より、床仕上げロボットによる施工は自律制御機能を使用した自律施工をメインと考えるべきとわかった。

12. 建設現場4での検証

2024年7月に建設現場4にて現場検証を実施した。

時期：2024年7月（夏季）

場所：埼玉県内、駐車場

人員：土間工 4人程度

コンクリート打設面積：約300m²/回

コンクリート配合：24-18-20 N

試行状況を写真-10に示す。



写真-10 検証状況（建設現場4）

Photo.10 Verification status (Construction site 4)

傾斜のある床の仕上げにおいて施工検証を実施した。床の傾斜が1.33～2.41%の面において、アマ出し作業及びコテによる仕上げ作業をコンクリート床仕上げロボット（改良試作機）で実施した。まずロボットがこの傾斜を登れるか、という点については問題無く登ることができた。特にロボットの前進方向より後進方向の方が登り易いことを確認した。そしてリモコンによる操作は平地より困難であるが、慣れれば施工可能であると感じた。また自律施工については、床レベルが高い水上からスタートすると傾斜を降りる方向に滑りやすくルートがズレ易いため、床レベルが低い水下を最初のスタート地点として登っていく方向に進行して施工することが有効であることがわかった。図-8にその

状況を示す。

電流値はこの程度の傾斜では特に変わらなかった。

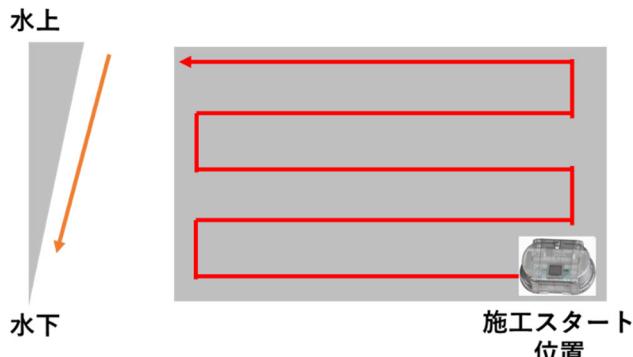


図-8 建設現場4の勾配と施工ルート

Fig.8 Gradient and construct way of construction site 4

13. おわりに

2020年にリースを停止したコンクリート床仕上げロボット（旧タイプ）の詳細調査を行い、コンクリート

床仕上げロボット（改良試作機）として再設計及び製作を実施した。そしてその機体を使用してテストヤードでの検証及び4つの異なる条件下の建設現場で試行を行った。その上で、それぞれの環境やコンクリート材料等によりロボット施工は可能であったが、少なからず課題が存在することがわかった。今後はその課題を修正する、または課題が存在しながらもその課題を踏まえてロボットを使用する方針を固めるために、高層建物の軽量コンクリート仕様など、まだ未実施の施工条件での試行を続けると共に、実用化に向けた運用・生産・普及展開体制の構築を実施していく予定である。

参考文献

- 1) 中村洋祐：コンクリート床仕上げロボット「T-iROBO Slab Finisher」の開発、大成建設技術センター報、第49号、52、2016
- 2) 中村洋祐：コンクリート床仕上げロボットにおける半自律制御操作システムの開発、大成建設技術センター報第52号、52、2019