

53. 超音波振動ごてを利用した左官ロボットの開発

ハザマ：*小林 正明

三菱商事(株)：相馬 勝

(株)エロイカコーポレーション：鳴原 学徳

1. まえがき

建築現場でのコンクリート床直押さえ作業は、その大部分を熟練した左官工の手作業に頼っているのが実情である。左官作業は中腰による力仕事であり、かつコンクリート硬化状態に合わせての長時間にわたる過酷な作業となっているため、建設業における3K作業の代表的な職種の1つといわれており、早くから省力化・自動化機械の開発・導入が望まれていた。これまでも国内で数例のコンクリート床仕上げロボットが開発されているが、これらのロボットはこての回転運動によってコンクリート表面を均すものであり、その大きさや重量の面などで適用条件が制約されることが多く、広く一般に普及させるには幾つかの課題が残されていた。

本ロボットは、非熟練作業員でも手軽に持ち運んで使える左官工の道具的位置づけを開発目標として取り組んできたもので、走行部前後にこてを配置して、コンクリート面での直進運動による往復走行で左官作業をおこなうものであり、この「こて」の一部に超音波振動子を取り付けることによって比較的小さな動力で施工を可能にし、ロボットの小型・軽量化を図ったことに大きな特徴がある。

本報では、試作ロボットの開発経過および施工実験について報告する。

2. ロボットの概念設計

建築現場における土間工事は平面規模の大きいものを除けば1日仕事であり、同じ現場では1回コンクリートを打設すると次回のコンクリート打設まで10日から2週間は間があき、その間は異なった現場での作業となる。そのため、ロボットといえども機械ごて(トロウエル)と同様に左官工が自ら持ち歩けることが望ましい。また、一般に施工階が上階に移行していくなかで、揚重クレーンに頼らずとも現場に設置してある荷物リフトを利用して、あるいは数人の左官工によって人力で階上へ運び上げられることが、ロボットを日常の道具として使用していく上で重要なファクターとなる。さらに、熟練した左官職人が減少しつつある現在、社会進出の目ざましい女性への新たな職場提供の機会を喚起すること

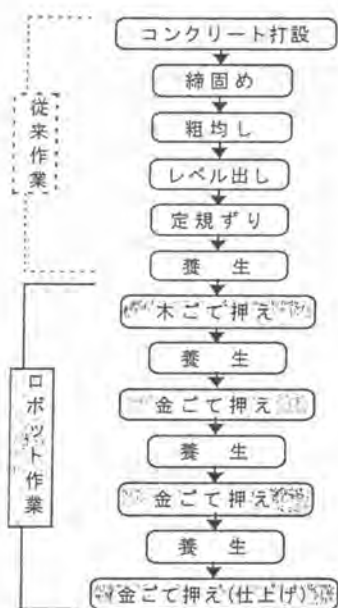


図-1 左官作業工程

も大事なことと考えられる。そこで本開発におけるロボットの設計概念を以下のように設定した。

- ① 熟練工でなくても木ごて押さえ、金ごて押さえ等の左官作業が容易にできる。ロボットの作業範囲を図-1に示す。
- ② 超音波技術の導入によりこての押さえ効果の増大を期待し、長尺のこてを走行装置の前後に配置して、左官工と同様に動作させるために往復走行させる方式とする。
- ③ 運搬、現場搬入が容易にできるように小型・軽量で、しかも分解・組み立てが可能なものとする。
- ④ ロボットの動力源はエンジン発電機とし、自立走行出来るようにする。
- ⑤ 品質、施工コストが従来作業と同等程度とする。

3. 予備実験

3. 1 予備実験の目的

ロボット開発にあたり、要素となる以下の技術について予備実験を行い、設計条件を設定した。

(1) 超音波こての施工条件

良好な仕上げ面を形成する施工条件を求め、こて試験装置を製作しコンクリート仕上げ実験を行った(写真-1参照)。実験では模擬的に轍を付けて、どの程度の深さまでこれを消すことが可能かを確認した。また、施工品質の確認のため、左官工と超音波こての仕上げ面をシュミットハンマーおよび超音波密度計を用いて強度と密度測定を行った。



写真-1 こて試験状況



写真-2 走行実験状況

(2) 走行方式の選定実験

最適な走行装置を選定することを目的に、木ごて押さえ・金ごて押さえ時のコンクリート上でこてを牽引しながら走行し、かつ、走行跡を残さない走行方法として、ゴムキャタピラ方式および低圧膜タイヤ(以下、バルンタイヤと記す)方式について牽引力、走行跡等の比較試験を行った(写真-2参照)。

3. 2 実験結果

(1) 超音波こての施工条件

実験により、超音波ごての施工条件に関して以下のような知見が得られた。

- ① ロボット投入時期は、木ごて押さえについては積算温度換算で40～60℃・h、金ごて押さえ時は80℃・h程度が適当である。
- ② こて角度は2～5°程度で平滑な面が形成できる。
- ③ こての移動速度は15～30cm/sで良好な仕上げ面が形成できる。
- ④ こて押しつけ力は木ごて押さえ時には4kgf程度、金ごて押さえ時には10kgf程度が必要である。
- ⑤ 牽引力は、平均で5～10kgf程度であり、最大で20kgf程度を必要とする（表-1参照）。
- ⑥ 轍深さは4mm以上になると消すことができず、コンクリート面に凹部となって残る。

施工品質については上記の施工条件において、左官工と同等の強度、密度となることが確認できた（表-2参照）。なお、轍については振動モーターを取り付けたパイプロプレートを新たに開発し、こて作業の前処理を行って完全に消し去るものとした。

(2) 走行方式の選定

走行装置については以下の知見が得られた。

- ① 牽引力は接地圧力の影響を受け、接地圧力が大きい程、牽引力も増大する。ただし、接地圧力の増大は轍深さも大きくすることになる。
- ② 未硬化コンクリート上を走行する際の牽引力は、ゴムキャタピラあるいはバルンタイヤの表面が平滑な場合、接地圧が等しければ牽引力は同等である。
- ③ ゴムキャタピラあるいはバルンタイヤの表面に凹凸がある場合には、凹凸部のコンクリート面への食い込みにより、コンクリートのせん断抵抗が加わり、牽引力は増加する。ただし、轍が残る可能性が高い。

以上のことから、キャタピラ式とバルンタイヤ式は、これらの方式の違いによる牽引力の差は無いものと考えられる。本ロボットにおいては、清掃の容易さ、メンテナンスのし易さからバルンタイヤ方式を採用した。

表-1 牽引力の測定例

作業内容	こて角度θ [deg]	こて速度V [cm/s]	こて押付力F [kgf]	轍深さ [mm]	こて移動水平力HF [kgf]	水平力最大値HFP [kgf]
木ごて	2	15	22	3	5	24
金ごて	2	15	22	2未満	—	—
金ごて	2	15	22	0.5未満	—	—
金ごて	2	15	22	0.5未満	5	27
金ごて	2	15	22	0.5未満	6	25

表-2 表面強度および伝播速度

施工条件	均しのみ	左官工	2回施工	6回施工
3mm以下平均値R	21.0	24.8	25.4	27.2
表面強度 [kgf/cm ²]	133.2	182.5	190.1	213.4
超音波平均値 V ₁ [μs]	32.6	30.5	30.1	30.1
音速 V ₁ [m/s]	3,069	3,279	3,322	3,323
超音波平均値 V ₂ [μs]	63.8	60.7	60.6	59.6
音速 V ₂ [m/s]	3,135	3,297	3,301	3,359
音速平均値 [m/s]	3,102	3,288	3,312	3,341

4. ロボットの概要

設計概念と予備実験の結果に基づき、ロボットを試作した。

ロボットは走行部・前後こて部・電源部・制御部・遠隔操作用ラジオコントロール部で構成され、6分割できる構造とした。こて部は、往復動作をさせるために走行部の前後に同じものを装備し、前後進の方向に応じてこて角度を自動的に変えられる機能を有する。こて部の構成は、外側から順に仕上げ用超音波こて、均し用超音波こてを並べ、その内側に骨材を沈め、のろ出しを促進するためのパイプロプレートを配置した。超音波こての振動方式は、せん断振動モードと水平振動モードの組み合わせとしている。重量軽減対策として、電源部は、一般の発電機では500w程度の出力で重量が20~30 kgfにもなるため、新たに高周波発電機を開発し、重量が15 kgfで700wの出力を実現できた。また走行部は、本体フレームにアルミ合金を用い、さらに一般のタイヤに比べ軽量のバルンタイヤを使用した。こて支持パイプも、剛性が高く、軽量のものを利用している。

ロボットの外観を写真-3に、ロボット仕様、各製品の単体重量を表-3~4に示す。また、ロボット分解状況、車載状況を写真-4~5に示す。



写真-3 ロボット外観



写真-4 ロボット分解状況

表-3 ロボット仕様

外形寸法	L1,805×W808×H795 mm
総重量(乾燥時)	91.8 kg
施工能力	最大 300 m ² /h
走行速度	0~50 cm/sec
動力源	高周波エンジン発電機 発電電圧 3 φ 220Hz 100 V 最大出力 700 W 騒音値 66 dB(A)/7m
超音波こて	振動周波数 26.75 kHz 前後各2枚
パイプロプレート	加振力 15 kg/F 前後各1枚
遠隔操作	無線周波数 72 MHz 電源(バッテリー) 9.6 V 1,100 mAh
運転方法	ラジオコントロールによる手動運転 ティーチングによる自動運転 割り込み遠隔手動運転
安全装置	障害検知兼用型安全バンパー 開口部検知センサ 運転表示回転灯

表-4 各製品の単体重量

部品名	外寸法 (L×W×H:cm)	数量	単重量 (kg)	総重量 (kg)
① 本体	61×60×36	1	29.1	29.1
② エンジン発電機	30×38×47	1	15.9	15.9
③ こて支持フレーム	62×82×33	2	15.9	31.8
④ パイプロプレート	61×10×8	2	4.0	8.0
⑤ 内側超音波こて	64×11×3	2	1.7	3.4
⑥ 外側超音波こて	74×10×	2	1.8	3.6
⑦ ラジコン操作機	20×13×22	1	1.3	1.3

5. 施工実験

(1) 試験フィールドにおける施工実験

試作ロボットの施工実験として、低・中層建物の柱に囲まれた床面を模擬した試験フィールド（約 7m × 7m）を作成し、コンクリート打設から金ごて 2 回押さえまでの施工実験を行い、ロボットの施工能力、動作動線、動作回数、騒音、施工精度、安全対策の各測定あるいは確認を行った。各々の測定結果を表 5～7 に、施工精度の測定位置を図 2 に示す。

安全対策として開発した安全バンパーは、ロボットの慣性走行（停止信号を送ってから完全停止するまでのオーバーラン）に対する緩衝域を十分有しており、障害物に衝撃を与えることなく確実に停止できた。また、同バンパーに取り付けたビームセンサーにより開口部の検出による停止動作も確実にあった。



写真-5 ロボット車載状況

表-5 ロボット施工能力

作業内容	施工面積	施工時間	施工能力
木ごて押え	49 m ²	9分57秒	295 m ² /h
金ごて1回目	49 m ²	8分50秒	333 m ² /h
金ごて2回目	49 m ²	9分02秒	325 m ² /h
平均		9分16秒	317 m ² /h

表-6 騒音測定結果

ロボットからの距離		7 m	15 m	30 m
エンジン発電機による 金ごて作業時	前	69.5	62.0	49.0
	左	70.0	60.0	51.0
	後	74.0	66.0	53.0
	右	72.0	65.0	53.0
平均値		71.4	63.3	51.5
商用電源による 金ごて作業時	前	65.0	57.0	46.0
	左	66.0	57.0	44.0
	後	68.0	61.0	50.0
	右	67.5	60.0	50.0
平均値		66.6	58.8	47.5

単位：dB(A)

測定器：リオン(株)製 精密騒音計 NL-14

表-7 施工精度測定結果

測定位置	単位：mm	
	平均値	標準偏差
I	1.0	0.63561
II	0.5	0.33628
III	0.7	0.49714
IV	1.0	0.58604
V	0.6	0.53362
VI	0.5	0.45895
VII	0.8	0.49766
VIII	0.9	0.60169
IX	0.7	0.50697
全平均	0.7	0.54998

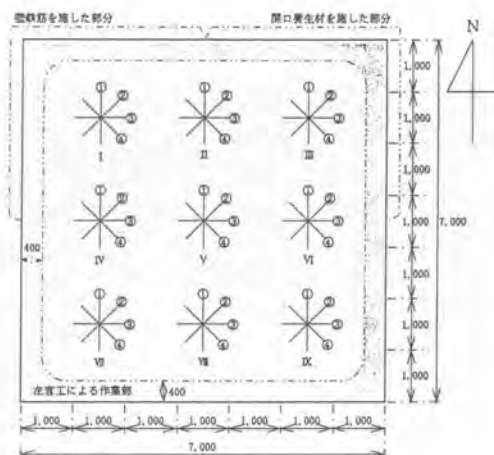


図-2 施工精度測定位置

(2) 現場施工実験

現場施工実験は、これまでに冷凍倉庫の床、焼却炉機械室床、集合住宅住居床などで延べ 700㎡を実施している。実施した現場では概ね好評を得ることが出来た。ただし、硬化し始めの段階にある、現場ごとに性状の異なるコンクリート上を走行することに対して、以下のような課題があげられた。

- ① 木ごと押さえ時は、施工により「のろ」が出た部分に片側のタイヤが乗ることからスリップを生じ易くなり、方向制御が困難になることがある。
- ② また、木ごと押さえはロボット投入時期の判断が難しく、早過ぎるとスリップを生じ易く、遅すぎると「のろ」が出にくくなり、良好な施工面が得られにくい。また、日射などの影響により打設面の硬化状態が異なる場合も同様なことが生じる。
- ③ 施工面の平滑性は左官工とくらべて遜色ないが、ロボットの急激な進路変更により、タイヤの轍が残ることがある。



写真－6 現場施工状況

これらの課題は、いずれもロボットを操作する作業員の技量によって左右される要素であり、多少の経験により解決出来ると考えている。

6. おわりに

今回開発した左官ロボットは、当初目標とした小型、軽量、施工品質の維持などの面ではまずまずの結果が得られた。ただし、水平精度は、あくまでも左官工の手作業による定木ずりの精度に依存するので、レベル出し、定木ずりを従来と同様に正確に行う必要がある。これまでの施工実験を通しての課題は、ロボットを投入するタイミングであり、投入が早すぎたため、深みにはまったロボットを救助に行かなければならないことも生じた。また、コンクリートが、まだ多少柔らかい場合に発生する轍の問題も同様の理由による。現在は、ロボット走行部に対し、轍を積極的に全面につけてしまうことも考えており、使い勝手を良くすることも追求したいと考えている。今回の一連のロボット開発により、さらに新たな施工法を生み出すことができ、現場の作業環境改善に貢献出来れば幸いである。