コンクリート床直仕上げ作業用ロボットの開発に関する 基礎的研究

THE FUNDAMENTAL RESEARCH FOR THE DEVELOPMENT OF CONCRETE FLOOR SLAB FINISHING ROBOT

新井一彦

Kazuhiko ARAI

This paper describes preliminary surveys and fundamental experiments for the development of concrete floor slab finishing robot.

The author discusses the unique development procedure and notes the importance of setting proper development target. An analysis of working hours is presented as an example of one such survey, together with details on robot task allocation and function setting. Data for robot design was obtained from experiments on the selection of finishing tools suitable for robot, and on the dimensions and weight of locomotion equipment capable of traveling over green concrete.

Key words; コンクリート、床仕上げ、ロボット、開発プロセス、基礎実験、
仕上げツール、移動装置
concrete, floor slab finishing, robot, development procedure,
fundamental experiment, finishing tool, locomotion equipment

1. 序 論

建築生産の合理化の一手段として、近年建築用ロボットの研究開発が進められるようになってきた。建築分野へのロボットの導入に当たっては様々な制約条件があり、しかも新規にロボットを開発しなければならないことが多く、製造業におけるロボットの導入方法とは異なったアプローチの必要性があるとされている。^{1) 2)}

新たにロボットを開発するに当たっては、ロボット化対象作業の選定、期待される効果の評価などと同時に、対象とする作業の実態や制約条件などについての基礎的な調査を行い、開発目標ならびに要求機能を的確に把握することが必要である。仕上がり精度などの品質に深く係わる作業を対象する場合には、ロボットに適合した作業ツールの開発が、また、建築工事においてはロボットの移動性に関する検討が特に重要であり、移動装置の設計に当たって技術的に未解決な部分の調査・実験が不可欠である。

以上の観点から、ロボットの開発目標や要求機能を明らかにするための調査や床面の仕上がり精度の確保を可能とする仕上げツールの選定実験、移動装置の設計のための実験など、ロボットの開発に至る事前の検討を本研究の範囲とした。

なお既往の研究として、コンクリート床直仕上げロボットの開発に関する報告^{3) 4)}もあるが、それらは開発事例の紹介が主体で、基礎的な実験の記述は走行装置部の特定の部分で若干触れられている程度に止まっている。一方、近年では大学において仕上げツールに焦点を当てた機械ごての仕様の影響に関する基礎的な考察や左官用回転羽根ごての研究も報告^{5) 6)}されている。

2. 建築用ロボットの開発プロセスと検討課題

建築用ロボットは、製造業での導入のように既に市販されているロボットを選定して使用するという状況には

なく、建築作業の使用目的に合わせた新しいロボットを開発しなければならない場合がほとんどである。そのため、建築用ロボットの開発に当たっては、テーマの設定から実用化に至るまでのプロセスを十分に検討し、実用的なものを効率良く開発する手段を講ずることが重要となる。筆者は、ロボットの開発プロセスと検討課題について予めその内容を吟味して、表-1¹⁾に示す開発の進め方を創案した。開発プロセスを7つのPhaseに分類し、各Phaseごとにその段階での検討課題を逐次検討しながら開発を進めることとした。

本論文は、Phase 1 においてコンクリート床直仕上げ作業が開発テーマとして設定⁸⁾された以後の検討、すなわち、Phase 2 及びPhase 3 の範囲に関して行った調査・実験を対象とする。

Phase 2では、開発すべきロボットの開発目標を設定するために a. ~ g. に関する検討のうち、a. 対象作業工程の調査・分析、c. 仕上がり精度の目標値の設定について本論文では示した。

Phase 3では、ロボットの基本設計を行うに当たり、a. ~ e. に関する検討のうち、d. 仕上げツールの選定ならびに移動装置の設計データ収集のために行った機能要素の開発・実験について本論文では示した。

なお、この開発プロセスに従って開発を進めたコンクリート床直仕上げロボットは現在、市販の段階に至っている。

3. コンクリート床直仕上げ作業に関する実態調査

3. 1 作業工程に関する調査

コンクリート床直仕上げ（以下、床直仕上げと呼ぶ）における作業工程の実態把握ならびにロボット化の対象

範囲を確認することを目的として調査を行った。

(1) 調査方法

工事現場において床直仕上げ作業を直接観察すると共に作業者からのヒアリング調査により作業工程を調査した。

(2) 調査結果及び考察

床直仕上げ作業工程は近年、トロウエル（動力ごて、パワーフィニッシャーとも呼ばれる、以下、トロウエルと呼ぶ）を用いた方法が一般的になりつつあり、その作業工程は図-1のようであった。この場合、トロウエルでは仕上げられない床スラブ周辺や壁際などの付近は従来

図-1 コンクリート床直仕上げの作業工程

表-1 建築用ロボットの開発プロセスと検討課題

Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Phase 6	Phase 7
テーマの設定	開発目標の設定	基本設計	詳細設計	製作	実証実験	実用化
a. ロボット化のフィロソフィーの統一 b. ロボット関連シーズ調査 c. ロボット化ニーズの調査・分析 d. ニーズの評価 e. ニーズ別開発計画の立案 f. 優先順位などの適合評価	a. 対象作業工程の調査・分析 b. 現状作業の問題点の抽出 c. 仕上がり精度の調査及び評価方法の検討 d. 制約条件の調査・設定 e. 要求条件の設定 f. 開発目標の設定 g. 評価	a. ロボットの機能及び仕様条件の設定 b. ロボット施工システムの検討 c. ロボット機能に対する機種と構成の計画 d. 各機能要素の開発・実験 e. 評価	a. ロボット本体の設計 b. 周辺機器の設計 c. 制御設計 d. 制御プログラムの設計 e. 評価	a. ロボットの製作 b. ロボットの組立 c. 調整 d. 試運転 e. 評価	a. 性能把握実験 b. 改造、改善 c. ロボット施工システムの確立 d. ロボット施工マニュアルの作成 e. 評価	a. ロボット施工システムの運用 b. 運転要員の教育 c. 保守要員の教育 d. 改善・改良 e. ロボット普及の推進

と同様に作業者が金ごてにより仕上げ作業を行っている。

通常、左官専門工事業が請負う作業範囲は、コンクリート粗均しから最終の金ごて仕上げ作業工程までとなっており、このうち、コンクリート粗均しから定規ずり、木ごて仕上げ作業まではコンクリート床表面の平坦化の作業であり、それ以降は床面の平滑化作業となる。

床直仕上げロボットは、前述した作業の後半部分を作業範囲とするものであり、コンクリート床表面の表面粗さを細かくするための平滑化作業を行う。床直仕上げロボットによる作業工程は図-1に示したようにトロウエルによる作業工程をロボットに代替することとなる。

3. 2 作業時間の測定

左官工の床直仕上げ作業における作業時間の実態を把握し、ロボットが分担する作業時間の割合の推定ならびにロボットの要求機能の設定の留意事項を検討することを目的として作業時間の測定を行った。

(1) 測定方法

5分間隔のワークサンプリング方法により、作業者が行っている作業内容を記録した。測定対象とした左官工は13名で、施工床面積は2,475㎡である。

(2) 測定結果及び考察

作業内容別による作業時間（養生の待機時間、測定視野外で測定不能などの時間を除く）の構成比率を図-2に示す。ここで、養生に必要な待機時間を除いた理由としては、温度・湿度、風などの環境条件ならびにコンクリートの調合などの諸条件によりコンクリートの硬化度合いは大きく変動するが、このインターバルは今回のロボットの開発に関して特別影響を及ぼすものではないからである。一方、仕上げに要する正味作業時間はコンクリートの硬化状態が見合っていれば仕上げ作業時間自体は諸条件に対して大きな変動がないと考えられ、この作業時間を分析の対象とした。

左官工の作業を平坦化作業と平滑化作業に分類して作

図-2 コンクリート床直仕上げ作業の作業時間の構成

業時間の構成比率を算出すると、前者が53.4%、後者が46.6%であり、ほぼ同様の比率であることが分かった。平滑化作業における木ごて仕上げ、トロウエル掛け、最終金ごて仕上げの合計作業時間は、全作業時間の32.8%を占めている。また、トロウエルが入り込めないスラブ周辺部の金ごて仕上げの割合は13.8%と比較的大きな比率を示している。

この測定結果から、床スラブ周辺部の金ごて仕上げを除くと、左官工の全作業時間のおよそ3分の1の作業をまた、平滑化作業時間のおよそ3分の2の作業をロボットが分担することになることが分かった。ロボットの作業分担割合をさらに高めるためには、床スラブ周辺部などへ接近可能で小回りがきく方法を考案する必要がある。

4. 直仕上げ床面の仕上がり精度の許容値設定に関する実験

ロボットで直仕上げを行う場合には仕上がった床面を客観的に評価する必要がある。しかしながら、JASS 5ならびに一般の建築工事の仕様書にはコンクリート床面の仕上がり精度として、表面粗さや段差などに関する定量的な仕様は見受けられない。そのため本実験ではコンクリート下地として求められる直仕上げ床面の表面粗さ、段差に注目して、それらに関する独自の許容値を設定することを目的とした。本実験では、床仕上げ材料としては塩化ビニル床タイル（以下、Pタイルと呼ぶ）を想定した。

(1) 実験項目

実験は次に示す3項目について行った。

- ① キャスター試験によるPタイル目地幅の広がり
- ② キャスター試験によるPタイルのひび割れ状況
- ③ キャスター試験後のPタイルの接着強度

(2) 実験方法

試験に用いた供試体の寸法は、400×400×40mmのコンクリート板で、その表面は所定の表面粗さ（ここでは表面粗さの表示方法として最大高さを言い、測定長さ30cmにおける凹凸の最大の差を言う。以下、表面粗さと呼ぶ）として、0.10mm（記号：A）、0.15mm（B）、0.30mm（C）の3水準、また、段差は0.3mm（D）、0.5mm（E）、0.8mm（F）の3水準の供試体を製作し、2週間空中養生した。なお、供試体の表面状態は不陸測定器⁹⁾により確認した。その後、Pタイル(300×300mm)を4分割し、一般に使用されているSBR合成ゴム系接着剤により供試体に接着し試験体とした。試験体数は各々2体とした。

Pタイルの目地幅の広がり及びひび割れ状況に関する実験は、床材料試験方法のキャスター試験装置¹⁰⁾を用いて、キャスター部に60Kgの荷重をかけ、Lissajou曲線に近似した8の字型の図形の軌跡を試験体に与えた。試

験回数は連続で100回とした。なお、キャスト試験（以下、Ca試験と呼ぶ）は、Pタイルを接着後14日目に行った。また、Ca試験後、Pタイルの目地幅の広がり及び表面のひび割れ状況について目視により観察した。

接着強度試験はCa試験後、Pタイルがキャストと接触した部分（以下、Ca試験内と呼ぶ、記号：A～F）と非接触部分（以下、Ca試験外と呼ぶ、記号：A'～F'）について行った。接着試験体の寸法はCa試験での供試体の寸法の関係から27×27mmとし、建研式引張試験機を用いて行った。試験は、Ca試験後3日目に行い、試験体数は各々4体とした。

(3) 実験結果及び考察

(a) Pタイル目地幅の広がり

Ca試験後のPタイル目地幅の広がり¹¹⁾を図-3に示す。表面粗さA試験体のPタイル目地幅の広がり¹¹⁾の平均は1.13mm、同様に表面粗さB試験体は1.39mm、表面粗さC試験体は1.69mmであった。この結果、Pタイル目地幅の広がり¹¹⁾は表面粗さが粗くなるほど大きくなる傾向を示した。

また、段差については段差D試験体のPタイル目地幅の広がり¹¹⁾は1.50mm、同様に段差E試験体では2.03mm、段差F試験体は2.45mmであった。この結果から、段差が大きくなるほどCa試験後のPタイル目地幅の広がり¹¹⁾は大きくなる傾向が認められた。

(b) Pタイルのひび割れ

Ca試験後のPタイルのひび割れは、いずれの表面粗さ試験体にもひび割れは認められなかった。しかし、段差試験体¹¹⁾の場合は、段差D試験体はキャストとの摩擦によりPタイルに含有している炭酸カルシウムがPタイル表面に抽出し、白色化する現象が認められたが、ひび割れは生じていない。段差E試験体は段差部に沿ってPタイルに部分的なひび割れが生じた。また、段差F試験体では段差部に沿ってPタイルは全面的にひび割れが認められた。

この結果、Ca試験後のPタイルのひび割れは、表面粗さにはあまり影響されず、段差が大きいほど影響は大きくなる傾向を示した。

(c) Pタイルの接着強度試験結果

Ca試験後のPタイルの接着強度の試験結果¹¹⁾を図-4に示す。

Ca試験内での表面粗さA試験体におけるPタイルの接着強度の平均は2.33Kgf/cm²で、同様に表面粗さB試験体では2.00Kgf/cm²、表面粗さC試験体では1.13Kgf/cm²と表面粗さが粗くなるに従い接着強度は小さくなる傾向が認められた。一方、Ca試験外の試験体では表面粗さによる差異は判然としていない。

Ca試験内での段差試験体では段差の小さい方が若干大きな接着強度を示しているが、それほど大きな差は認め

られなかった。また、Ca試験外の段差試験体も段差の大きさによる差異は判然としていない。

また、表面粗さ試験体ならびに段差試験体ともCa試験内の方がCa試験外より、いずれも大きな接着強度を示した。Ca試験内の試験体は、60Kgの荷重を受けており圧密の効果によるものと考えられる。また、全体的に今回の試験における接着強度は低めの値であったが、これは養生期間が短かったこと、Ca試験によってPタイルが移動し接着層に影響を与えたことが一因と考えられる。

以上の実験結果を踏まえて、今回のロボット開発に当たっての開発目標として、床面の表面粗さは最大高さの表示で0.1mm以下、段差は0.3mm以下を仕上がり精度の目標値とすることとした。床面の仕上がり精度に関する設定値を普遍化するには今後さらに多くの実験結果を得る必要がある。

図-3 キャスター試験後のPタイル目地幅の広がり

図-4 キャスター試験後のPタイルの接着強度の比較

5. ロボットの移動装置の設計に必要なデータを得るための実験

5. 1 ロボットの移動装置に加わる荷重とコンクリートの沈みに関する実験

本実験は、コンクリートを床に打設して間もない初期状態においてロボットが移動する際に、コンクリート表面が沈み走行障害を起こしたり、床面の仕上がり性状に対する影響を検討すると同時にロボットの移動機構に必要な設計上のデータを得ることを目的として行った。

(1) 実験項目

ロボットの移動装置としてローラーを使用することを前提として、コンクリートの床表面上を走行させたときのコンクリート表面の沈み量（以下、沈み量と呼ぶ）を主な実験項目とし、同時にコンクリートの圧縮強度ならびに内部温度を測定した。

(2) 実験方法

長さ100cm、幅70cm、厚さ10cmの試験体のコンクリート表面上を1時間毎にローラーを走行させ沈み量を測定した。使用したローラーは径 30cm、長さ30cm、質量は30Kg及び60Kgの2種類で材料は鋼管を使用した。沈みの測定は試験体の両脇にマグネットスタンドを配置し、そこにピアノ線をローラーの高さに合わせて張り、ローラーをコンクリート上で走行させ、ローラーの最高部とピアノ線との隙間を厚さゲージで測定し、その値を沈み量とした。同時にコンクリートの圧縮強度($\phi 10 \times 20$ cmモールド)をコンクリート打設後4、5、6、7時間にCBR試験機により測定した。実験は、温度20℃、湿度80%の室内で行い、コンクリート及び養生温度を自動記録した。コンクリートの調査は床面に打設されるコンクリートの施工事例の調査結果から、普通コンクリート、設計基準強度210Kg f/cm^2 、スランプ18cmが多く用いられており、この結果を踏まえて表-2に示す計画調査とした。

(3) 実験結果及び考察

積算温度^{1,2)}（以下、 $T^{\circ}\text{T}$ と呼ぶ）とローラーの走行による沈み量との関係を示すと図-5及び6^{1,3)}のとおりである。

両者の関係は指数曲線を示し、ローラー質量が30Kgのときの沈み量は、25 $T^{\circ}\text{T}$ で10mm前後、60 $T^{\circ}\text{T}$ で5mm前後、100 $T^{\circ}\text{T}$ で2mm前後となり、140 $T^{\circ}\text{T}$ でほぼ0mmとなった。また、ローラー質量が60Kgのときの沈み量は、70 $T^{\circ}\text{T}$ で5mm前後、100 $T^{\circ}\text{T}$ で3mm前後、140 $T^{\circ}\text{T}$ でほぼ0mmとなった。ちなみに、140 $T^{\circ}\text{T}$ のときのコンクリートの圧縮強度は1.97Kg f/cm^2 であった。

ローラーの走行によるコンクリート表面の障害について観察した結果を示すと、ローラー質量が30Kgの場合、100 $T^{\circ}\text{T}$ で、また、60Kgの場合80 $T^{\circ}\text{T}$ で、ローラーにセメントペーストが部分的に付着し、コンクリート表面を乱す現象が見られた。この現象を回避するための方策に

表-2 コンクリートの計画調査

設計基準強度 (Kg f/cm^2)	水セメント比 (%)	スランプ (cm)	細骨材率 (%)	空気量 (%)
210	60	18	40.0	2
1 m ³ 当たりの質量 (Kg f/m^3)				
水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
174	290	752	1,134	1,74

注) セメント：普通ポルトランドセメント、細骨材： $\rho=2.63$ （表乾比重）
粗骨材： $\rho=2.65$ （絶乾比重）、混和剤（A E 減水剤）

図-5 積算温度とコンクリート表面の沈み量との関係
(ローラー質量：30 Kg)

図-6 積算温度とコンクリート表面の沈み量との関係
(ローラー質量：60 Kg)

図-7 ロロー質量30Kgと60Kgのコンクリート表面の沈み量の関係

については次項5.2で検討する。

ローラー質量30Kgと60Kgのときの沈み量の関係を図7に示す。前者には直線関係が認められるが、ローラー質量が30Kgに対して60Kgの沈み量は、ほぼ1.4倍となった。

ここで、ロボットの走行開始時期との関係を見みると、1回目のロボットの走行時期は100^oT前後であると考えられ、このときのローラー質量が30Kgの場合では沈み量が約2mm、ローラー質量が60Kgの場合は約3mmとなっている。100^oT時点における3mm前後の沈み量は、従来使用されているトロウエルを使用しても羽根（金ごて相当部分）の回転により沈んだ部分のコンクリート表面を平坦化と同時に平滑化することは可能である。また、100^oT時点での接地圧はローラー質量が30Kgの場合で0.2Kgf/cm²、60Kgの場合で0.35Kgf/cm²であった。

これらの実験結果を、ロボットの移動ローラーの寸法を設計する際のデータとして使用することとした。

ここでは、コンクリートの硬化度合いの判断指標としてT^oTを用いたが、コンクリート表層部の性状を把握するための目安として採用しており、今後、その性状を正確に捉えるための試験方法やセンサの開発が課題である。

5.2 ローラーへのセメントペースト付着防止実験

前項で観察されたローラーへのセメントペーストの付着防止対策を検討することを目的として実験を行った。

(1) 測定項目及び評価方法

コンクリート表面上にローラーやタイヤを走行させたときのコンクリート表面及びローラーやタイヤ（以下、総称して走行装置部と呼ぶ）の表面状態について、次に示す項目について観察した。

- 走行時のすべり：コンクリート表面で走行装置部が滑りを生じる現象
- ノロ押し：コンクリート表面のセメントペーストを走行装置部が押し流す現象
- ノロ付着：走行装置部にコンクリート表面のセメントペーストが付着する現象
- コンクリート表面の剥離：コンクリートの一部が走行装置部に付着し、コンクリート表面が剥離する現象
- 旋回時の削り：走行装置部がコンクリート表面上をこじり、表面に傷をつける現象
- 洗浄性：試験を終了した後の走行装置部の洗浄の容易さ

以上の項目について、良好の場合は○、やや不良の場合は△、不良の場合は×で評価した。また、上記a～fの項目を総合的に評価し、ローラーへのセメントペーストの付着防止に適する材料を◎、やや適す材料を○、不適な材料を×で、総合評価した。

(2) 実験方法

供試体は、幅60cm、長さ250cm、厚さ5cmの型枠に、水セメント比56%、スランプ18cm、1m³当たりの使用材料の質量、水165Kg、セメント295Kg、細骨材765Kg、粗骨材1,135Kg、コンクリート混和剤（AE減水剤）1.18Kgのコンクリートを打込んだ。走行装置部はコンクリート打込み後、材齢3、3.5、4、4.5時間で、コンクリート表面上を走行させた。コンクリートの温度は30～31℃であった。ローラーの寸法は、外径318.5mm、長さ350mmを使用し、総質量は70Kgとした。

実験に先立ち、走行装置部として使用されるローラーへの付着防止対策として①鋼管ローラーの表面を他の材料で被覆する方法 ②ローラーの材質を他の材料に変える方法 ③被覆材料の表面に凹凸や形状を変化させる方法及びそれらを組合せる方法などを含めて、表3に示す17種類の材料を選定した。

一次実験では17種類の走行装置部について実験したが、その段階で一次実験の評価を行い、ローラー付着防止に適する材料として◎表示が得られた走行装置部について二次実験を実施し、最も適正と思われる走行装置部を選択することとした。

(3) 実験結果及び考察

表3 走行装置部へのセメントペースト付着防止実験結果

実験項目	ローラーの被覆材料			測定項目						総合評価
	材質	形状	寸法 (t:厚さ) (h:芝の 高さ)	走行時のすべり	ノロ押し	ノロ付着	コンクリート表面の剥離	旋回時の削り	洗浄性	
一次実験	天然ゴム	平面	t=6mm	○	×	×	×	×	×	×
	発泡ポリエチレン	平面	t=9mm	○	×	×	△	△	△	○
	天然イグサ	むしろ型		○	△	△	○	△	△	△
	ポリプロピレン	人工芝	h=6mm	○	○	○	○	○	○	◎
	コンクリート調剤材	コーティング		△	×	×	×	×	×	×
	オイルレスメタル漆	オイルレスブッシュ	(φ125×120)	△	×	×	×	×	×	×
	天然ゴム	Wヘリカル型	t=12mm	○	×	×	△	×	×	×
	塩化ビニル	四角型		○	×	×	△	×	×	×
	塩化ビニル	大小円形型		○	×	×	△	×	×	×
	天然ゴム	凹凸溝型（縦）		△	×	×	△	×	×	△
	天然ゴム	凹凸溝型（横）		○	×	×	△	×	×	×
	ポリウレタン系樹脂	小六角型		○	×	×	△	×	×	×
	ポリ塩化ビニル樹脂	深溝凹型		○	○	○	×	△	○	○
	ゴムタイヤ※	産業車輪用タイヤ	(φ270mm)	○	○	○	○	△	×	○
	ゴムタイヤ※	スクーター用タイヤ	(φ320mm)	○	○	○	○	△	○	○
	ゴムタイヤ※	トラクタ用タイヤ	(φ342mm)	○	○	○	○	△	○	○
	合成ゴム	平面		△	×	×	×	×	×	×
二次実験	ポリプロピレン	人工芝（無溝型）	h=6mm	○	○	○	○	○	○	◎
	ポリ塩化ビニル樹脂	深溝凹型（無溝型）		○	○	○	○	△	○	◎
	ナイロン(GS-3)	人工芝（縦・長）	h=12mm	○	○	○	○	△	○	○
	ナイロン(B)	人工芝（縦・短）	h=6mm	○	○	○	○	○	○	◎
実	ナイロン(BS-BF3)	人工芝（柔・長）	h=12mm	○	○	○	○	△	○	○
	ナイロン(TS-4)	人工芝（柔・短）	h=5mm	○	○	○	○	○	○	◎

注) 表中の個別評価で○印は良好、△印はやや不良、×印は不良を示し、総合評価の◎印は最良、○印はやや良、×印は不適を示す。

※印は、被覆材料ではなく、走行装置自体を変更したものである。

一次及び二次実験結果¹⁴⁾を表-3に示す。

一次実験において、a. 走行時すべりは、4種類の材料を除いて良好であった。また、b. ノロ押し、c. ノロ付着、d. コンクリート表面の剥離は、各々8種類が良好であり、e. 旋回時削りは3種類、f. 洗浄性は6種類が良好との評価が得られた。6つの項目がすべて良好と評価された材料はポリプロピレン製の人工芝だけであった。また、この人工芝を試験後、清掃せずにそのまま放置し、再度実験を行った結果においても、すべての項目を満足した。

二次実験では耐アルカリ性を考慮してナイロン製の人工芝に変更し、芝の硬さ、長さを組合せて4種類の人工芝について実験を行った。その結果は、表-3の二次実験結果に示すように芝の硬さ及び芝の長さは洗浄性に影響を及ぼす以外、その他の項目への影響は少ないことが判明した。この結果から、芝が短ければ芝の硬さに拘らず総合評価で適合すると判断された。

6. ロボットに適合するツールの選定ならびに仕上げ方法に関する実験

6. 1 仕上げツールの選定に関する実験

走行を伴いながら作業を進める床直仕上げロボットの設計においては、移動装置と同時に作業を行うツールの選定が重要な要素となる。ここでは、床仕上げ作業に適したロボット用の表面仕上げツールを選定することを目的として実験を行った。

(1) 実験に用いたツールの種類

コンクリート床表面仕上げ作業用ツールとして次に示す3種類のツールを用いて実験を行った。

- ローラー：径 250mm、長さ300mm（表面：クロームメッキ）
- 金ごて：幅 200mm、長さ300mm、厚さ1mm（ステンレス製）
- トロウエル：径 600mm、3枚羽根、質量30Kg（電動）

(2) 測定項目及び評価方法

コンクリート表面の仕上がり性状の測定項目及び評価は次に示す方法で行った。

- ツールがコンクリート表面と接触した部分のコンクリート表面の面積：接触面積を比率表示（%）
- コンクリート表面に形成された縞模様の高さ（以下、波高と呼ぶ）：表面状態を6段階で評価し、重み付けを行って点数表示（点）
- セメントペーストの状態：表面状態を5段階で評価し、重み付けを行って点数表示（点）
- 細・粗骨材の引きずり：ツールにより骨材を引きずりコンクリート表面に生じる欠陥数を点数表示

(点)

- その他：上記d. では評価し得ないコンクリート表面に生じた気泡などの欠陥を1種類の欠陥につき1点を与え点数表示（点）

(3) 実験方法

実験に当たり、図-8に示すレール走行式で所要のツールが取付けられる実験装置を試作した。供試体の寸法は、全長は27m程で、幅は70cm、厚さは15cmとした。一試験体の長さは150cmとし、同一条件になるように連続してコンクリートを打込んだ。コンクリートの調合は、水セメント比 60%、スランプ 18cm、1m³当たりの使用材料の質量は、水 180Kg、セメント 300Kg、細骨材 906Kg、粗骨材 906Kg、コンクリート混和剤（AE減水剤）1.48Kgとした。なお、コンクリート表面性状の観察における有効幅は50cmとした。実験装置の走行速度は20～200mm/secである。

実験は木ごて仕上げならびに最終金ごて仕上げに相当するタイミングに実施した。仕上げ開始のタイミングは左官工の判断によった。同時に、T° Tとの関連を表示するため養生温度、コンクリート温度を測定した。

表-4に実験条件を示す。

(4) 実験結果及び考察

(a) 木ごて仕上げのタイミングにおける実験結果

実験結果を表-5に示す。同表にはコンクリート表面とツールの接触比率等と床面の仕上がり性状が良好であ

図-8 レール走行式実験装置

表-4 実験条件

仕上げ タイミ ング	ツール の種 類	押え圧 (kgf/cm ²)	回転数 (rpm)	走行速度 (mm/sec)	こて及び 羽根角度 (度)
木ごて 仕上げ	ローラー	1.3, 8	30, 150, 300	30, 60, 100	-
	金ごて	5, 10	100※	30, 100	5, 10
	トロウエル	-	180	30, 100, 150, 200	8
金ごて 仕上げ	ローラー	20, 45, 60, 70	30, 150, 300	30, 100	-
	金ごて	5, 10, 25, 40	100※	10, 100	5, 10, 15
	トロウエル	-	180	150	8

注) ※印の数値は、撓動数（往復動：回/min.）を示す。

った実験条件を示している。全体的な傾向として、走行速度は遅く、回転数は早い条件のときが良好な結果を示した。

(b) 金ごて仕上げのタイミングにおける実験結果
実験結果を表-5に示す。金ごて仕上げ時はコンクリ

表-5 実験結果

仕上げ タイミ ング	ツールの 種類	コンクリート表面の評価		良好な実験条件			
		ツールの 接触比率	その他の表 面状態	押え圧 (kgf/cm ²)	回転数 (rpm)	走行速度 (mm/sec)	こて、羽 根角度
木ごて	ローラー	40~100%と ばらつき大	細骨材の露 出あり	1	300	30	-
	金ごて	70~100%と 比較的良好	骨材の引き ずりあり	5	100	30	5°
仕上げ	トロウエ ル	100%で良好	表面状態は 良好	-	180	150	8°
金ごて	ローラー	10~50%と 非接触面大	ペーストの 浮出し少	60	300	30	-
	金ごて	30~100%と ばらつき大	ペーストの 浮出し少	40	100	30	10°
仕上げ	トロウエ ル	100%で良好	表面状態は 良好	-	180	150	8°

(注) 裏印の数値は、滑動数(往復回; 回/min.)を示す。

図-9 ツール別によるコンクリート表面性状の比較
(木ごて仕上げタイミング)

図-10 ツール別によるコンクリート表面性状の比較
(金ごて仕上げタイミング)

ートが硬化しつつある状態であるため、ローラー及び金ごての場合のツールの接触比率は木ごて仕上げ時より非接触部が多くなっており、また、ばらつきも大となった。しかし、トロウエルを仕上げツールとした場合の実験結果は、1条件での実験ではあったが、すべての条件を満足し、コンクリート表面は良好な状態であった。

(c) ツール間の比較

これらの結果から、木ごて仕上げタイミングならびに金ごて仕上げタイミングについて、それぞれ良好な実験条件を示したときのコンクリートの表面性状の評価をトロウエルとの比較で纏めて示すと図-9及び図-10のとおりである。

ここで、最も重要視しなければならない評価項目はコンクリート表面との接触比率である。左官工がこの作業を行う場合は、非接触面を目で見て判断し、その場所に何回もこてを当てることにより仕上げを行うことができるが、ロボットによる作業ではそのような判断機構を現在の技術では採用することができないため、単純な走行だけで100%の接触が可能なツールを選定することが必要である。以上のような判断から、今回の実験においては、ロボットに適正な仕上げツールとして、両タイミング共良好な仕上がり性状が得られたトロウエルを採用することとした。

6. 2 トロウエルによる表面仕上げ作業工程と仕上がりに関する実験

木ごて工程と最終金ごて工程をトロウエルだけで仕上げるための作業方法と仕上がり性状を検討して、適正な作業条件を探ることを目的に実験を行った。

(1) 実験項目ならびに評価方法

実験項目としては、仕上がり面の表面粗さの測定と官能検査を行った。コンクリート表面の仕上がり面の表面粗さの測定には、不陸測定器⁹⁾を用いた。また、Pタイルの下地としての仕上りの適正度合いについて床仕上げ材料メーカーの技術者2名による目視観察ならびにコンクリート表面の手触りなどによる官能検査を行った。試験体は水平に置き、屋外で昼間に行った。

(2) 実験方法

実験条件としては、表-6に示す4種類の表面仕上げ方法を設定した。仕上げタイミングに関しては養生温度ならびにコンクリート温度を測定し $T^{\circ}T$ を算定した。実験に使用した1試験体の寸法は、幅3.6m、長さ3m、厚さ13cmである。実験で用いたトロウエルの仕様は、エンジンタイプで羽根回転数110rpm、羽根外形950mm、質量85Kg、羽根の幅160mm、長さ330mmの4枚羽根を使用した。コンクリートの計画調合は、普通コンクリートで、水セメント比49%、スランプ12cmで、1m³当たりの使用材料の質量は、水153Kg、セメント313Kg、細骨材780Kg、粗骨材1,081Kg、コンクリート混和剤(AE減水剤)

1. 25Kgとした。

(3) 実験結果と考察

4つの異なった方法で仕上げられたコンクリート表面の仕上がり性状を図-11に示す。仕上げ方法C及びDの表面粗さ(最大高さ)の平均は0.08mmで最も良好な仕上がり性を示した。次いで、仕上げ方法Bの表面粗さは0.14mmであり、比較的良好な結果であった。仕上げ方法Aの表面粗さは0.53mmで良好な結果は得られなかった。

この結果を知らせないで、各試験体のコンクリートの表面性状を床仕上げ材料メーカーの技術者によりPタイル下地としての官能検査を行った。その結果は、2名の技術者共、Pタイルを全面的に貼れる下地はC及びDの仕上げ方法で、Bの仕上げ方法は部分的にPタイルが貼れる、仕上げ方法AはPタイルの下地として相応しくないとの判断が下された。この結果から、Pタイルを全面的に貼れるコンクリートの表面粗さは0.1mm以下であり、部分的に貼れるとの判断が下された表面粗さは0.1mm～0.2mmの範囲であった。また、0.2mmを越えるとPタイルの下地としては相応しくないとの評価が得られた。この結果は、4項で示した表面粗さの実験結果と適合するものであった。

本実験から、トロウエルだけでコンクリート表面の仕上げを行うには2工程の仕上げだけではPタイルの下地としては不十分であり、最低でも3工程が必要であることが分かった。また、トロウエルによって最終的な仕上げとすることも可能であることが確認できた。

以上のことから、コンクリート表面仕上げツールとしてトロウエルを使用し、適切なタイミングで3工程の仕上げを行えば、Pタイルの下地として要求されるコンクリート表面粗さを確保できる見通しが得られた。

7. 結 論

コンクリート床直仕上げロボットの開発をめぐる、今回行った調査・実験から得られた結論は次のとおりである。

- 1) コンクリート床直仕上げロボットを開発するに当たり、その開発プロセスならびに検討課題を創案し、開発の手順を提示した。また、ロボットの開発以前に、作業実態の把握の調査ならびにロボット設計のための基礎的実験を行うことの重要性を指摘した。
- 2) 左官工による床直仕上げ作業について作業時間を測定し、作業工程ならびに作業の実態を把握すると共にロボットにより代替可能な作業範囲とその作業分担割合を推定した。また、ロボットの要求機能の設定に関し留意すべき知見が得られた。
- 3) まだ固まらないコンクリート表面上を走行する直仕上げロボットの移動装置とコンクリート表面の沈み量

表-6 実験条件(表面仕上げ方法)

作業工程(回)		1	2	3	4
実験条件	目標積算温度(T' T)	100	125	150	165
	羽根回転数(rpm)	10	60	60	—
	羽根角度(度)	0	6	10	—
仕上げ方法	A (2工程で仕上げを終了)	T → T	—	—	—
	B (2工程で開幅をあけて仕上げ)	T	→ T	—	—
	C (3工程で仕上げを終了)	T	→ T	→ T	—
	D (4工程で4工程目を金ごてで仕上げ)	T	→ T	→ T	→ K

注) Tはトロウエル仕上げ、Kは左官工による金ごて仕上げを示す。

図-11 表面仕上げ方法と表面粗さとの関係

との関係を明らかにして、移動装置の設計上のデータを得た。また、走行装置部へのコンクリート付着防止の方法としてナイロン製の人工芝が有効であることを実証した。

- 4) キャスター試験ならびに床仕上げ材メーカー技術者による官能検査の結果からPタイルの下地として要求されるコンクリート表面の仕上がり精度に関して、表面粗さ(最大高さ)、段差の目標値を設定し、定量的な評価の可能性を示した。
- 5) ロボット用の仕上げ作業ツールとして、トロウエルの有効性を確認すると共に、それを用いた仕上げ方法について検討を加え、適正なタイミングで3回仕上げればPタイルの下地として要求されるコンクリート表面の仕上がり性状が得られることを実証した。

今後の課題として、ロボットの仕上げ開始のタイミングを的確に把握するためのセンサの開発や作業者の技能を定量的に捉える手法の開発、仕上がり精度など仕様の定量化等が挙げられる。

[謝 辞]

本研究に当たり、ご協力を頂いた鹿島建設(株)の開発チームメンバー関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 田村 恭、長谷川幸男、嘉納成男、三浦延恭；建築作業ロボット化に関する研究－その1 建築工事へのロボット導入の基本的アプローチについて－、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、pp. 485～486、1986.8
- 2) A. H. Slocum ; Development of Integrated Construction Automation Methodology , International Joint Conference on CAD and Robotics in Architecture and Construction , (Marseille), pp. 450～468, June.1986
- 3) 菊池、大下、古田、今井；コンクリート床仕上げロボットの開発と実用化に関する研究、第1回建築施工ロボットシンポジウム論文集、日本建築学会材料施工委員会、pp. 1～6、1987.2
- 4) 梶岡、岡田、高松、小峯；床仕上げ左官ロボットの開発と適用事例、第2回建築施工ロボットシンポジウム予稿集、日本建築学会材料施工委員会、pp. 67～72、1988.2
- 5) 三上貴正、荒川琢也、小野英哲；コンクリート直仕上に及ぼす機械ごての仕様およびコンクリート性状の影響の考察、日本建築学会構造系論文報告集、No.453、pp.15～26、1993.11
- 6) 難波進太郎；動力ごてと左官ロボットののための新しい左官用回転羽根ごての開発、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、pp. 901～902、1989.10
- 7) 新井一彦、山田文三、斎藤 実、坂野弘一；建築用ロボットの開発プロセスに係わる考察－コンクリート床直仕上げロボットの開発を事例として－、第3回建築施工ロボットシンポジウム予稿集、日本建築学会材料施工委員会、pp. 137～142、1989.1
- 8) 新井一彦；建設ロボットの開発プロセス、施工、No.271、pp. 57～64、1988.5
- 9) 柿崎正義、原田 実、和美広喜、西田光行、荒屋敷明夫；床仕上げ面精度の測定法、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、pp. 229～230、1976.10
- 10) C. Brind ; Performance Requirement for Floors Joint [RILEM-ASTM-CIB] Symposium Proceedings , Concept in Buildings, pp.601～612, 1972.2
- 11) 新井一彦；コンクリート床直仕上げ作業のロボット化（ロボット開発のための基礎実験及びロボットシステム）、鹿島建設技術研究所年報、Vol.34、pp.101～106、1986.6
- 12) 笠井芳夫；コンクリートの初期強度、初期養生に関する研究、博士論文、1968.10
- 13) 新井一彦、和美広喜、斎藤 実、坂野弘一；コンクリート床直仕上げロボットの開発、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、日本コンクリート工学協会、pp. 689～692、1985.6
- 14) 新井一彦、山田文三、斎藤 実、坂野弘一、和美広喜；コンクリート床直仕上げ作業用ロボットの開発とその適用事例、フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集、日本コンクリート工学協会、pp. 169～174、1989.4

（1994年12月9日原稿受理，1995年7月31日採用決定）