

小断面トンネル自動吹付機システムの開発

(株)熊谷組
(株)熊谷組
(株)熊谷組

宮川 克己
手塚 仁
○ 梶野 瑞基

1. はじめに

わが国では「再生可能エネルギーの固定買取制度」(以下FIT制度 Feed-in Tariff)が2012年に法施行され制度が開始した。FIT制度により再生可能エネルギーによる発電量は大きく伸びてきている。再生可能エネルギーの中で小水力発電は用途の関係上断面積が10㎡程度の導水路トンネルを用いる場合が多数を占める。当社では小断面トンネルにおけるNATM施工機械群の開発プロジェクトを行っておりこの内の吹付施工での自動吹付機システムを開発したので報告する。

2. 自動吹付機システムの概要

2.1 背景

小断面トンネルでの吹付作業は、換気をおこなうものの狭隘な作業空間であるため粉塵による苦渋作業となる。そこで遠隔で吹付機を操作する自動運転技術を導入することとし、開発した自動吹付機システムを試作機に搭載し各種確認を行った。

2.2 自動吹付機システム概要

開発した自動吹付機システムは小型バックホウをベースに自動吹付ロボット機能を搭載し、オペレーターの吹付作業を忠実に再現できる教示(ティーチング)システムである。(写真-1)

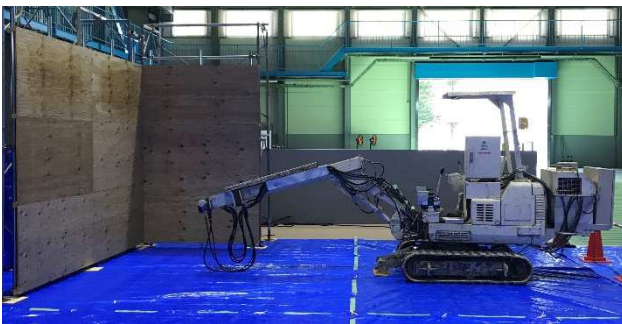


写真-1 自動吹付ロボット

(1) システム

吹付ロボットの可動部にセンサーを取り付けて、

各可動部の移動量を計測することで吹付ノズル先端の現在位置と姿勢をCPUユニットにより把握できるようにしている。

(2) 教示機能

様々な断面形状や距離に対応したオペレーターの吹付動作を記録し、PLC(Programmable Logic Controller)により再現するため微妙な吹付制御が反映され、自動で人と同様の吹付が何度でも行うことができる。

3. 自動吹付機システム搭載試作機

3.1 ロボット移動量の計測

今回使用した試作機のベースマシンは竹内製作所製ミニショベル1.6t級で可動部分各所にセンサーを設けた。センサーは、吹付ノズル(左右、前後)、ブーム(上下、左右、伸縮)、上部旋回体の各6軸に取り付け、各軸の移動量を計測、記録する。

(1) 吹付ノズル

吹付ノズルの左右と前後のスイング動作には、各々絶対値式ロータリーエンコーダーで計測し、計測範囲は、左右各179°、前後各114°である。

(2) ブーム

ベースマシンのミニショベルのブームは上部旋回体とブームスイングシリンダーによる左右動作とブームシリンダーによる伸縮動作となる。従って、ブームの上下動作はワイヤー式ポテンシオメーターを使用し、計測範囲は上方54°、下方18.5°。伸縮(スライド)動作も同様にワイヤー式ポテンシオメーターで0mmから1,000mm。左右動作は絶対値式ロータリーエンコーダーで左右各50°としている。

(3) 上部旋回体

上部旋回体もワイヤー式ポテンシオメーターを使用し、計測範囲は360°とした。(図-1)

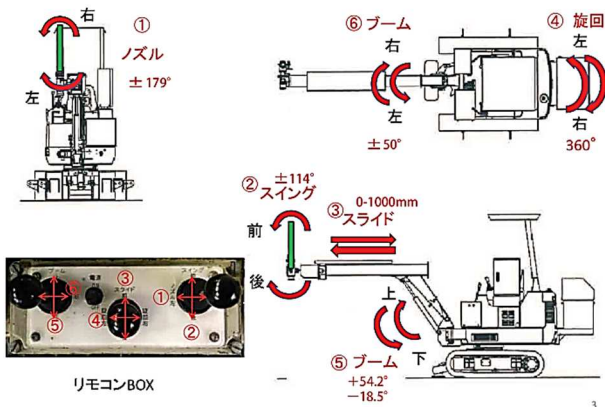


図-1 可動部動作範囲

3.2 油圧制御

吹付ロボットの動作開始位置を決め原点とし、自動運転の終了時は必ず原点へ自動復帰させる。原点復帰では比例電磁式制御弁を利用して油量を制御し精度よく円滑に動作させている。また、原点復帰時は、各センサーの計測値を基に移動量を算出して原点位置に戻す。

3.3 自動制御

自動運転での再現（ティーチングプレイバック）機能は、油圧の油量を一定にして教示操作での油圧弁開閉時間を記憶し、自動運転時にこの記憶した開閉時間で油圧を制御して再現性を図っている。（写真-2）



写真-2 操作画面

4. 自動吹付機システムの検証

4.1 システムの動作検証

自動吹付機システム搭載の試作機での再現性動作の確認を行った。

(1) 定量的測定による再現性動作検証

最初に吹付機ノズルにレーザーポインターを取り付け単独動作における移動量の実測値測定を行い教示と自動の移動量の誤差を定量的に測定してシステムとしての可否の判断をしたところ実用

耐えうると判断したので、次に複合動作における移動軌跡経路と自動運転経路の測定をした。測定は、原点位置から計測停止位置を任意の4点として教示経路に対して4回の自動運転経路での誤差を測定した。この測定結果より油圧シリンダーでの移動量誤差は小さく最大誤差も僅か96mmであった。（表-1）

この検証で得られた結果は、ノズルに関して、油圧モーターが油圧回路閉状態にかかわらず重量負荷等外力に負けて動いてしまう。アームに関して左右動作のアクチュエーターのあそび（ガタ）が移動動作に影響を与えるという機械的課題と、繰り返しの再現機能は、原点復帰の誤差量（ズレ量）が僅かだが漸次増加する傾向があることが判明した。

また、実吹付での荷重負荷を想定してノズルに10kgの負荷を載荷させ同様の測定も行ったが、油圧シリンダー動作に関しては大きな影響は認められなかった。（表-2）

表-1 複合動作誤差測定

単位mm	部位動作	平均誤差	最小誤差	最大誤差
原 点		16.2	11.2	21.2
中間点1	下、右	25.1	18.6	37.6
中間点2	伸、上、右	43.9	16.0	72.2
中間点3	伸、縮、下、右	55.4	24.9	96.1
最終点	伸、上、左	58.7	22.2	95.4

※) 1. 油圧モーター以外の油圧シリンダーでの動作確認とした

2. 測定回数4回で2度行った結果

表-2 ノズルに10kgの荷重負荷を載荷させた誤差測定

単位mm	部位動作	平均誤差	最小誤差	最大誤差
原 点		17.8	10.0	25.8
中間点1	下、右	29.5	20.0	40.3
中間点2	伸、上、右	33.4	26.9	39.0
中間点3	伸、縮、下、右	42.0	23.8	58.8
最終点	伸、上、左	42.7	26.9	55.1

※) 測定回数4回で行った結果

(2) 塗装吹付による動作比較検証

吹付機ノズルにエアースプレーガンを取り付け2色の塗料を用いて吹き付けを模した教示軌跡の再現性の視認確認を行った。この検証では、教示運転での塗装跡を自動運転で塗装がほぼ同一に重なる結果が見られ再現性は高いとの確認ができた。(写真-3)

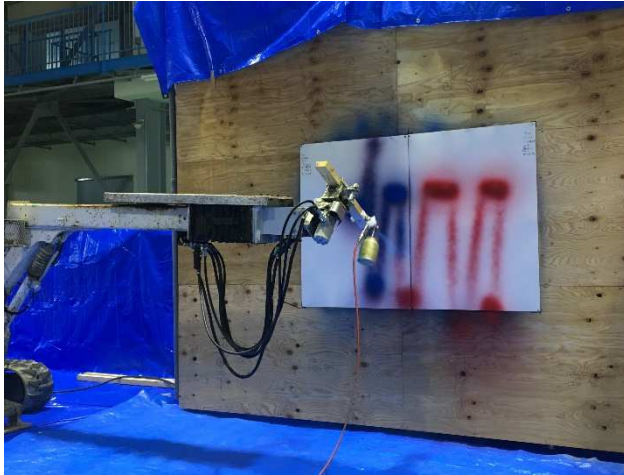


写真-3 塗装吹付による動作比較検証

(3) 実吹き付けによる再現性動作検証
 模擬トンネルを使用して実際の吹付作業と同条件で吹付が可能であるか検証を行った。(表-3)

表-3 実吹付検証仕様

項目	仕様
模擬トンネル	内空幅 5.2m、高 4.4m
コンクリートポンプ	湿式 MKW-25SNT 5~25 m ³ /H
	乾式 アリバ 280 12 m ³ /H
急結剤添加装置	液体急結剤ポンプ
粉体助剤圧送装置	ナトムクリート PAC150
コンプレッサー	エンジン式 100ps 2台
コンクリート強度	18N/mm ² W/C 50% s/a 60%
急結剤	クリアショット
	ナトミック Z

吹付は乾式と湿式の両方で確認した。検証は、教示吹付エリアと自動吹付エリアに分けそれぞれ基準点釘を9点設置して吹き付け厚さの差異を計測、比較した。(写真-4)

教示と自動の巻厚差測定結果は、最大 74 mmであった。実用上この程度の厚差は作業的に問題は無いと判断した。(表-4)



写真-4 模擬トンネルによる実吹付検証

(左：教示 右：自動再生)

この検証で得られた結果は、単独動作検証でも課題となったノズル部油圧モーターが、ホース重量並びに空圧変動に影響され位置の誤差が大きくなった。また、巻厚の誤差は、ロボットの動作差だけではなく吹付自体の吐出量の変動も要因の一つであることが解った。

表-4 計測点吹き付け厚さ測定 単位mm

点位置	教示運転	自動運転	巻厚差	
上段	左	80	74	6
	中	102	99	3
	右	99	25	74
中段	左	76	59	17
	中	133	170	-37
	右	128	80	48
下段	左	57	97	-40
	中	71	138	-67
	右	108	99	9

4.2 検証結果の考察

この自動吹付機システムを搭載した新規機械開発に向けた種々の検証より、多少の不具合や課題が判明したが、システムとしての有意性は有ると確認できた。新規開発においては、検証結果の最大の課題であった吹付ノズル部の油圧モーター駆動を荷重負荷に耐えうるアクチュエーターに変更することとした。また、制御に関して回転部エンコーダーの0°角度識別不良が発生したので単回転式エンコーダーから多回転式エンコーダーに変更することとした。

5. 新規開発機械の計画仕様

新規機械計画では、吹付材料を湿式と乾式の両タイプに対応できる本体ベースで設計し、現状は乾式吹付仕様で製作を行っている。(表-5)

表-5 計画仕様

本体関係	全 長	12,555 mm
	全 幅	1,600 mm
	全 高	1,990 mm
	重 量	8,600 kg
	ブーム	スライド 500 mm 旋回 左右 30°
	アーム	スライド 3,000 mm 旋回 左右 40°
	アウトリガー	油圧式 2本
	車輪	φ350 mm
搭載物	コンプレッサー	37KW
	吹付機	乾式：アリバ
		湿式：コンクリートポンプ
急結剤添加装置	1式	

を進めていく所存である。

6. おわりに

試作機を用いた自動吹付機システムの検証により実用化の目途がついた。現在はシステムの改良、調整を行い再現性の精度向上を図っており、並行して吹付の巻厚測定システムの開発も進め、吹き付けの自動化に向け更なる完成度を高めている。これらのシステムを搭載した新規機械は、完成した後当社つくば技術研究所内の模擬トンネル（写真-5）に搬入し動作確認、調整を行い2021年の現場導入に向け製作を進めている最中である。運用が開始されるとオペレーターの切羽作業の軽減が期待でき作業環境の改善並びに品質の向上に寄与できると期待しており、更には遠隔操作室からの操作も視野に入れている。



写真-5 つくば技術研究所内模擬トンネル

また、将来的には吹付パターンのデータ収集と機械学習による最適パターンの抽出を行い、自動巻厚測定システムと連携することで吹き付けの完全自動化を目指し施工効率の向上と安全性の確立