

26. MC グレーダ施工におけるスリップ防止装置の適用効果について

大成ロテック株式会社
大成ロテック株式会社
大成ロテック株式会社

○ 高山 拓也
武岡 真一
田中 純

1. はじめに

建設業界における就業者数は、慢性的な人手不足であり、東京五輪や復興により建設需要が逼迫する中、現在もなお深刻な状況が続いている。これらの問題の対応策の1つとして、数年前から導入されてきたICT技術を利用したマシンコントロール（以下、MC）技術は、現在では一般的な技術となり、幅広く活用されている。

MC技術は測量や、丁張設置作業の削減、施工精度および生産性の向上など、様々なメリットがある反面、デメリットも存在しており、すべての作業において自動制御に頼ることは難しく、手動操作による補助を必要としているのが現実で、オペレータの技量に作業効率や施工精度が左右されるケースが多い。

例えば、モータグレーダの場合、MC施工中、作業装置に大きな負荷が掛かった際、スリップが発生する。この場合、熟練のオペレータは材料の抱え量や作業装置の負荷を感じ取り、排土板を上昇させてスリップを回避するが、非熟練者の場合は前者のようにいかずにスリップさせてしまうケースがある。スリップ後の路面はタイヤで大きく削られることにより、品質の低下が懸念される。スリップの発生により、施工面が削られている状況を写真-1に示す。削られた箇所は、深さを検測すると最大で50mm程度であった。なお、このような場合には、補足材料を入れ、再整正するなどの対応を現場では行っている。



写真-1 スリップ時の状況

このように、本来、オペレータの補助をするはずの自動制御が、逆にデメリットとなり、作業効率を低下させてしまうケースもある。そのため、当社では手動操作で荒均し作業まで行い、自動制御の使用は、仕上げ作業のような比較的負荷の少ない作業に留まっていた。

そこで、これらの矛盾を解決し、MC技術の利点を最大限に引き出す為、排土板にかかる負荷が過大な場合や、タイヤのスリップを検知した場合、排土板を自動上昇させ、スリップを回避する『スリップ防止装置』（以下、当該装置）を開発した。本稿では、当該装置における、基礎検証および、現場導入の結果より得られた導入効果について報告する。

2. 基礎検証

2.1 従来施工の問題点

従来施工の問題点について、以下のようにまとめる。

モータグレーダの主な作業工程は、①材料の荷下ろし、②荒均し、③仮転圧、④仕上げ作業、の流れである。荒均しの際は、作業装置にかかる負荷が大きいため、スリップが発生しやすく、必要に応じて手動により補助的に排土板を上昇させる。特に、材料を多く抱えた場合や、路盤が堅固な場合には手動操作が求められ、操作が遅れた場合に、タイヤがスリップしている傾向であった。

2.2 スリップ発生要因の分析と基礎検証

施工中に発生するスリップについて、要因を分析し、スリップが発生した際の機械装置の挙動を把握するため、基礎検証を実施した。基礎検証では、各作業装置にどのような兆候が現れるか調査するために、モータグレーダにセンサ等を取り付け、誘発的にスリップを発生させ、各センサの数値変化を解析した。今回の基礎検証で取り付けたセンサ、装置について写真-2示す。



写真-2 センサ、装置取り付け状況

- ① 圧力センサ(リフトシリンダ用):排土板のリフトシリンダに接続し、圧力を測定する。
- ② 圧力センサ(チルトシリンダ用):排土板のチルトシリンダに接続し、圧力を測定する。
- ③ 車輪回転数計測装置(前後輪):スリット板と光電センサから車輪の回転状況を計測する
- ④ ボタンスイッチ:スリップを目視確認した際にスイッチを押し、信号を記録してスリップ箇所を記録する。
- ⑤ データロガー:各センサからのデータを記録する。

2.3 基礎検証の結果

基礎検証の実施状況を写真-3、計測データ結果を図-1に示す。グラフは、横軸にデータの計測時間を表し、縦軸に、シリンダにかかる圧力と前後輪の回転差を表している。図-1のスリップ発生区間は、前後輪の回転差が生じているため、スリップしている状況であると判断できる。検証結果より、スリップ発生時の直前から、リフトシリンダ及びチルトシリンダの圧力が上昇している。スリップ発生直前から、作業装置の状況を時系列で追っていくと、①作業装置に負荷が掛かる、②各シリンダの圧力が上昇する、③作業装置に掛かる反力と車体の推進力のバランスが逆転してスリップが発生する、ということが分かった。

従って、各シリンダの圧力が高い状態で施工をしていた場合、スリップが発生する可能性が高いと判断できる。また、各シリンダの圧力が超過しないように制御する事で、スリップを防止することができる。



写真-3 試験施工状況

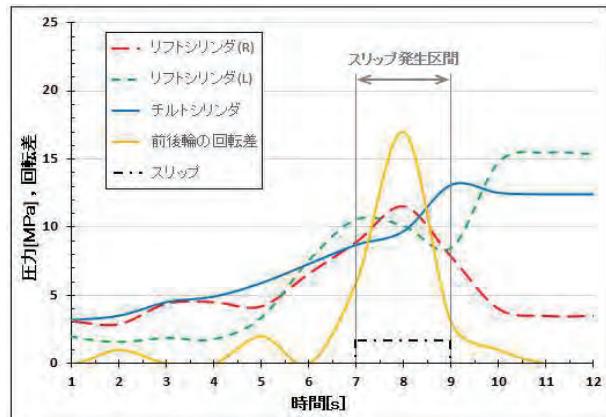


図-1 基礎検証データ結果

2.4 発生原因と各作業装置での反力の関係

2.3項の検証から作業装置に負荷が掛かると、各シリンダの圧力が上昇することが分かった。つまり2.1項で述べたスリップが頻繁に起こる傾向は以下のように推測できる。

(1) 材料の抱える量が多い場合

土圧から受ける反力により、排土板が負荷を受ける。この場合、車体の後方へ反力を受けるため、チルトシリンダの圧力が上昇する。その力とモータグレーダの駆動のバランスが逆転した時にスリップが発生する。材料の抱える量が多い場合におけるモータグレーダと反力の関係を写真-4に示す。



写真-4 材料の抱える量が多い場合の力の関係

(2) 施工面が堅固な場合

排土板を下げる際、施工面から受ける反力により、排土板が負荷を受ける。この場合、車体の上方に反力を受けるため、車体が持ち上げられる。それにより、駆動輪の接地圧が下がり、駆動とのバランスが逆転した際にスリップが発生する。施工面が堅固な場合におけるモーターグレーダと反力の関係を写真-5に示す。



写真-5 施工面が堅固な場合の力の関係

3. スリップ防止システム

3.1 開発コンセプト

基礎検証をもとに、当該装置の開発コンセプトを以下に示す。

① 作業の効率化

自動制御を最大限使用し、MC制御の作業効率を上げる。

② 品質、施工精度の向上

スリップによる施工面に与える影響を最小限にし、品質および施工精度を向上させる。

③ システムの簡素化

複雑な構造とせず、誰でも簡単に操作可能な装置とする。

3.2 システム概要とシステムフロー

当該装置は、制御BOXが各シリンダの圧力、スリップ状況を監視しており、異常を検知した際に、制御信号を切換える『切換BOX』を有している。そのため、任意に設定した圧力上限値の超過や、スリップを検知した際に、MC制御から制御信号が切替わり、自動で排土板が一定時間上昇するように当該装置を構築した。また、圧力上限値やスリップを検知した場合には、警告音とともに異常をアラーム表示させる。閾値の変更には、異常を検知した際に、閾値を更新する『更新スイッチ』、または、更新せずに継続させる『継続スイッチ』を備え、状況に応じてどちらかのスイッチをオペレータが選択する方式とした。当該装置の概要を図-2に、システムフローを図-3に示す。

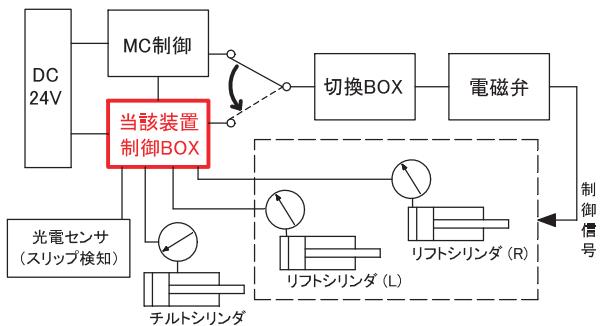


図-2 システム概要

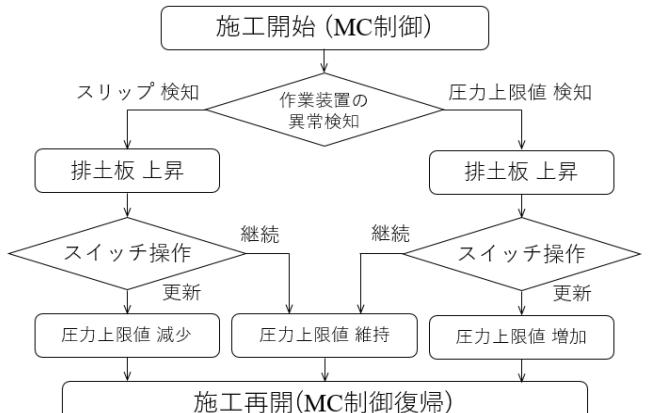


図-3 当該装置のシステムフロー

閾値の変更の例として、圧力上限値が 7.5MPa に設定した場合について解説する。

閾値が 7.5MPa でスリップが発生して、オペレータが『更新スイッチ』を選択した場合、閾値に係数 0.90 を掛けて圧力上限値を下方へ更新する。次回の施工では、閾値の更新により圧力上限値が減少し、スリップが発生しにくくなる。また、材料によって閾値は異なることから、更新に用いた係数は任意に変更できるプログラムとした。以上で述べたスリップ発生時のフロー図は図-4 の破線で囲まれた通りである。また、今回、運転席に取り付けたコントロールパネルを写真-6 に示す。

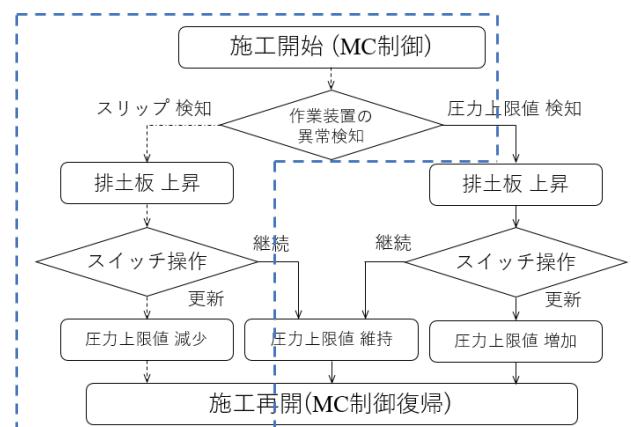


図-4 スリップ発生して圧力上限値が減少する動作のフロー

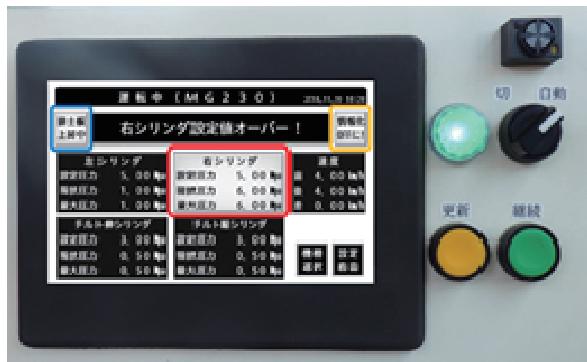


写真-6 コントロールパネル

4. 試験施工

4.1 試験施工の概要

当該装置の有効性を検証するため、下記の要領で試験施工を実施した。試験施工の概要を表-1に示す。

表-1 試験施工の概要

使用機械	モータグレーダ (MG230)
	自動追尾式トータルステーション
	スリップ防止装置
使用材料	RC-40
施工数量	施工面積 90m ² (延長 20m×幅員 4.5m), 厚さ 150mm

4.2 試験方法と評価

今回の試験施工では、熟練者(経験年数 28 年)のオペレータにモータグレーダを操作させ、路盤整正を当該装置の有、無の 2 条件で実施した。なお、当該装置の評価を確認するため、原則として自動制御中に手動操作は行わず、以下の 3 点を制約条件として敷き均しを行った。また、敷き均し試験中、タイヤがスリップした際には、前進が不可能となるため、手動操作により排土板を最低限上昇させ、荒均しを行い、敷き均し終了後、転圧して試験終了とした。

条件 1：施工は一方向のみの走行とする。

条件 2：走行回数は 5 回までとする。

条件 3：補足材料の追加を行わないこととする。

仕上がり面については、路盤整正終了後、路盤上の中央、右、左の 3 測点の平均値から設計面との誤差を計算し、1m ピッチでトータルステーションにより出来形を計測した。

4.3 試験施工結果

当該装置の有、無の 2 ケースにおいて路盤整正した結果を表-2、図-5、図-6 に示し、各ケースにおける試験結果および考察を以下に示す。

表-2 試験施工結果

	当該装置未使用	当該装置使用
標準偏差	9.62mm	4.23mm
誤差範囲	-24mm ~ +12mm	-8mm ~ +8mm

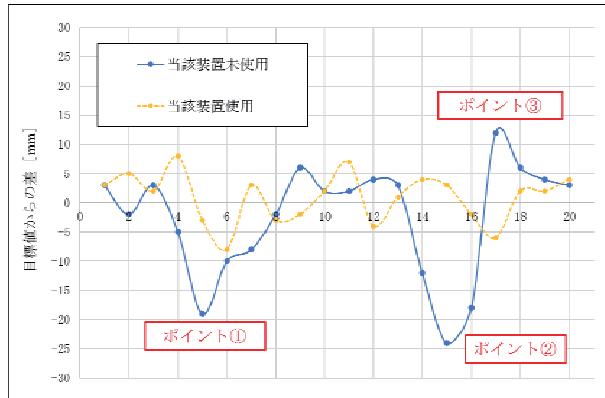


図-5 設計面との誤差

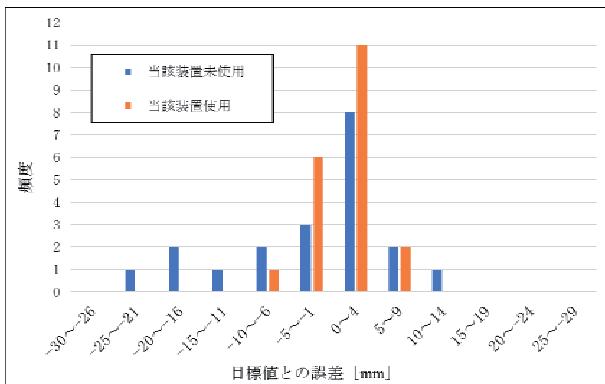


図-6 試験施工の施工精度

(1) 当該装置未使用の場合

図-5 のポイント①、ポイント②は、材料を多く抱えたことで、スリップが発生した箇所である。この箇所ではスリップが発生し、車体が沈みこみ、排土板が瞬間に下がったことで、設計面から低く仕上がる結果となった。また、瞬間に排土板が下がったことで、数メートルの間は制御が間に合わず、低い仕上がりとなった。

図-5 のポイント③については、施工面が低く仕上がった箇所を抜ける際に、車体が段差を乗り越えるため、車体が持ち上がり、瞬間に排土板が上昇し、高く仕上がる結果となった。

設計面との比較を計測した結果、ポイント②の付近で、設計面から-24mm の差異が見られた。実施工では、このような場合、追加の補足材料を入れる必要があるため、施工効率についても影響を与える他、表面が荒れ、品質低下の原因にもなる。

(2) 当該装置を使用した場合

スリップ発生の直前に、当該装置が圧力上限値を検知し、排土板を上昇させるため、スリップを回避して施工が可能になる。また、大きく掘れた箇所や、表面を荒らすこともなく、高精度な施工ができた。また、補助的な手動操作もなくなることで、オペレータの負担が軽減され、当該装置の有効性を確認できた。

4.4 オペレータの技量の違いによる精度比較

4.3項で述べた試験では、熟練者のオペレータで路盤整正を行ったが、非熟練者のオペレータが当該システムを使用した場合には、どのような影響があるのかを確認するため、前項で行った試験と同様の条件でオペレータを変更して路盤整正を行った。その結果を表-3に示す。

表-3 オペレータの比較

	オペレータA		オペレータB	
経験年数	28年		3年	
装置の有無	装置無	装置有	装置無	装置有
標準偏差	9.62mm	4.23mm	11.74mm	4.44mm
誤差範囲	-24mm ～ +12mm	-8mm ～ +8mm	-28mm ～ +14mm	-10mm ～ +8mm

非熟練者のオペレータの場合でも、当該装置を使用することで、熟練者のオペレータと比較しても施工精度は大きな差異が見られないことから、懸念していたオペレータの技量による施工精度の影響を解消することができた。また、非熟練者のオペレータからは、今までスリップする不安があったが、当該装置で不安が解消され、再整正の手間もなくなり、作業負担の軽減が期待できるとの評価を得られた。

5. 現場導入と従来施工との比較

5.1 現場導入結果

当該装置を和歌山県内の高速道路工事に導入し、装置の有効性を検証した。導入した工事現場の概要について、表-4に示す。

表-4 導入現場の概要

工事名	和歌山県内 高速道路現場
施工期間	2018年4月24日～2019年5月18日
施工場所	和歌山市寺内～吉礼
施工数量	14,836m ²

当該工事の路盤工には、荒均しにブルドーザを使用し、仕上げ整正では、スリップ防止装置を適用したMCモータグレーダを使用した。現場の特徴として、ランプ施工が多く、急勾配の箇所があり、スリップの発生しやすい施工条件であった。当該装置の圧力上限値は、試験施工結果のデータをもとに設定したが、施工条件も異なることから、試験施工の圧力上限値とは若干差異が見られた。しかし、施工開始から3日目には、閾値の調整が収束し、再整正もなく作業効率が向上した。施工初日から3日目以降の施工結果を表-5にまとめる。

表-5 導入現場の施工結果

	1日目	2日目	3日目以降 (平均値)
施工数量	1,659m ²	1,674m ²	1,823m ² /日
スリップ回数	8回	3回	0.33回/日
再整正回数	5回	1回	0.17回/日
標準偏差	5.09mm	4.62mm	4.35mm

上記の結果より、当該装置を使用することで、スリップの回数および再整正回数が減少し、作業効率の向上が期待できる。施工初日と施工3日目以降のデータを比較すると、施工数量が9.0%向上した。また、施工精度は、標準偏差において、14.5%の向上が見られた。施工全行程において、任意の点で計測した結果、標準偏差は4.48mmであった。

5.2 過去の施工実績との比較

前述したように、当該装置の導入により、生産性および施工精度の向上を確認できたが、過去の施工実績と比較して、当該装置の導入効果を評価する。導入現場の3日目以降の結果および、過去の施工実績との比較を表-6に示す。

表-6 過去の施工実績との比較

	過去の施工実績 (当該装置未使用)	導入現場実績 (当該装置使用) ※導入から3日目以降
標準偏差	4.58mm	4.35mm

当該現場の3日目以降のデータは、過去の施工実績と比較して、標準偏差が5.0%向上しており、当該装置を使用することで、スリップによる凹凸も少なく、高精度な施工が期待できる。

6. まとめ

従来の自動制御に頼る施工の場合には、スリップが発生する可能性があり、それにより再整正が必要となる場合があるなど、作業効率の低下が懸念であった。

試験施工の結果より、当該装置を使用する事で非熟練者のオペレータでも、熟練者のオペレータと同等の高精度な施工が期待できることを確認した。

現場導入の結果より、施工初日と比較してスリップの回数が減少していき、再整正回数も少なくなり、作業の効率が9.0%向上する結果が得られた。また、過去の施工実績と比較しても施工精度が5.0%向上しており、当該装置の有効性を確認できた。

以上の結果より、開発コンセプトについてまとめる。

① 作業の効率化

→スリップ防止することで、再整正がなくなり作業効率が9.0%向上した。

② 品質、施工精度の向上

→過去の施工実績と比較して標準偏差が4.58mmから4.35mmと5.0%向上し、スリップによる掘られた箇所もなくなり、品質も向上した。

③ システムの簡素化

→当該装置を使用した非熟練者のオペレータからは、スリップする不安がなくなり、再整正の手間がなくなり、作業効率の軽減が期待できると評価を得た。

オペレータが施工状況に応じて、スイッチを操作する必要があるが、簡単な操作のみでスリップが防止され、作業効率の向上や、品質および、施工精度の向上が期待できる。また、非熟練者のオペレータであっても高精度な施工が可能であり、当該装置の有効性を検証できたのではないかと考える。

7. 今後の課題

当該装置の評価を踏まえて、今後の課題について検討した結果を以下に示す。

(1) 施工データの蓄積

→当該装置の導入実績が1現場のデータのみであり、データの絶対数が少ない。今後とも積極的な現場への導入を図り、施工データの蓄積とオペレータの技量による比較などを評価していきたい。

(2) 操作性の改善

→当該装置は、コントロールパネルを運転席側方に設置しているため、一旦前方から視線を逸らして操作する必要がある。安全面を考慮し、今後は操作レバー付近で操作できるように改善する。

(3) 装置の普及拡大

システムの詳細な仕様を再検討し、当社保有の

全てのモータグレーダに搭載していく計画である。

8. おわりに

最後に、MC モータグレーダに当該装置を導入することにより、施工品質の向上および作業効率改善に効果が期待できることが確認できた。今後も、省力化や作業効率の向上など、MC 施工の普及拡大に寄与できる装置やシステムを提供できるように努力する所存である。