

3.3. 大型スリップフォームペーバにおける 3次元数値制御による機械施工の実用性について

前田道路株式会社 ○菊地 重徳、古島 勝、内山 伸一郎

1. はじめに

情報化施工の一環である3次元機械制御技術(以下、3D-MC と略す)は、モーターグレーダやブルドーザ等の主に土工機械分野で実用化され、普及しつつある。

写真-1に3D-MC モーターグレーダを示す。本工法は、トータルステーション(以下、TS と略す)又はGPS(Global Positioning System; 全地球測位システム)を利用し、リアルタイムで3次元位置情報を把握しながら施工する。従来方式の施工に比べて下記のメリットが知られている。

- 1) 丁張りの設置を大幅に省略できる。
- 2) 重機オペレータの省熟練化が図られ、経験の少ないオペレータでも精度の高い施工が可能となる。
- 3) 計画高に対する現状が随時把握でき、都度の検測が不要となり、連続作業により作業能率が向上する。
- 4) 検測作業者が重機周辺を頻繁に歩行する必要がなく、安全性が向上し、省力・省人化が図られる。
- 5) 従来の丁張りによる点の管理に対し、連続した面の管理が可能となる。
- 6) 設計段階で作成されたCAD データを施工時の機械制御データに利用できると共に、施工後のデータをその後の保守管理にも活用できる可能性がある。



写真-1 3D-MC モーターグレーダ

モーターグレーダやブルドーザ等を用いる土工では、材料の敷きならしと転圧が繰り返行われることもあり、現在の3D-MC による精度は十分に実用の範囲にある。スリップフォームペーバやアスファルトフィニッシュによる舗装工事では、1回走行するだけのいわゆるワンパス施工であり、3D-MC が適用可能であるか否かは判断が難しいと考えられ、普及が進んではいない。弊社ではスリップフォームペーバによるコンクリート版の舗設において、3D-MC の適用可能性を探るため、3D-MC スリップフォーム舗装の試験施工を実施した。その概要と結果について紹介する。

2. 施工編成と仕様

スリップフォームペーバは米国 GOMACO 社製 GHP-2800 を使用した。走行は2クローラ方式で、左右クローラの速度差によりステアリングを行う。舗設高さの調整は左右の脚を昇降させて行う。概略の仕様を表-1に示す。

表-1 GHP-2800 主要諸元

エンジン定格出力	244.9 kW / 2200 min ⁻¹
モールド幅	3980 ~ 9480 mm
スプレッドングスクリュー直径	406 mm
タンパー回転数 最高	120 min ⁻¹
パイプレータ回路数	標準 16, オプション 8
パイプレータ振動数 最高	183 Hz (11000 min ⁻¹)
トラッククローラ長	3660 mm
トラッククローラパッド幅	400 mm
本体高さ昇降量	914 mm

スリップフォーム工法は連続鉄筋を事前に敷設しておくのが一般的であるが、今回は3D-MC による機械の動作把握が目的であるので無筋とし、コンクリートだけを舗設した。生コン供給も一般的には連続鉄筋が

あるため、プレーサプレッダや横取機を使用するが、今回は無筋としたので、アジテータトラックから直接路面に生コンを荷降ろしする簡便な方法を採用した。

今回使用した 3D-MC システムはライカ ジオシステムズ社製である。モールド後方の左右脚柱付近にそれぞれマストを立てて 360° プリズムを設置し、2 式の TS で自動追尾する。更にもう 1 式の TS を設置し、出来形の管理や施工中の微調整に使用する。また、各マストの基部には 2 軸勾配センサーが取り付けられている。3 式の TS は無線通信を介してスリップフォームペーバに積載されたコンピュータと DATA 通信を行い、二つの 2 軸勾配センサーの DATA と合わせて、



写真-2 センサー取付状況

走行ステアリングとモールド高さとの両方を同時に自動制御する。センサーの取付状況を写真-2に、TSと無線通信機器取付状況を写真-3に示す。



写真-3 TS・無線通信機器

今回使用した 3D-MC システムの概略仕様を表-2に示す。なお、不可視赤外線レーザーを使用しており、気象条件によって性能は若干変動する。

表-2 3D-MC 主要諸元

TCA1201+M ガイド(TS と内蔵ソフトウェア)	
測定範囲	5 ～ 200 m
高さ精度	±2 ～ 4 mm
水平精度	±5 ～ 10 mm
測定回数	5 ～ 10 Hz

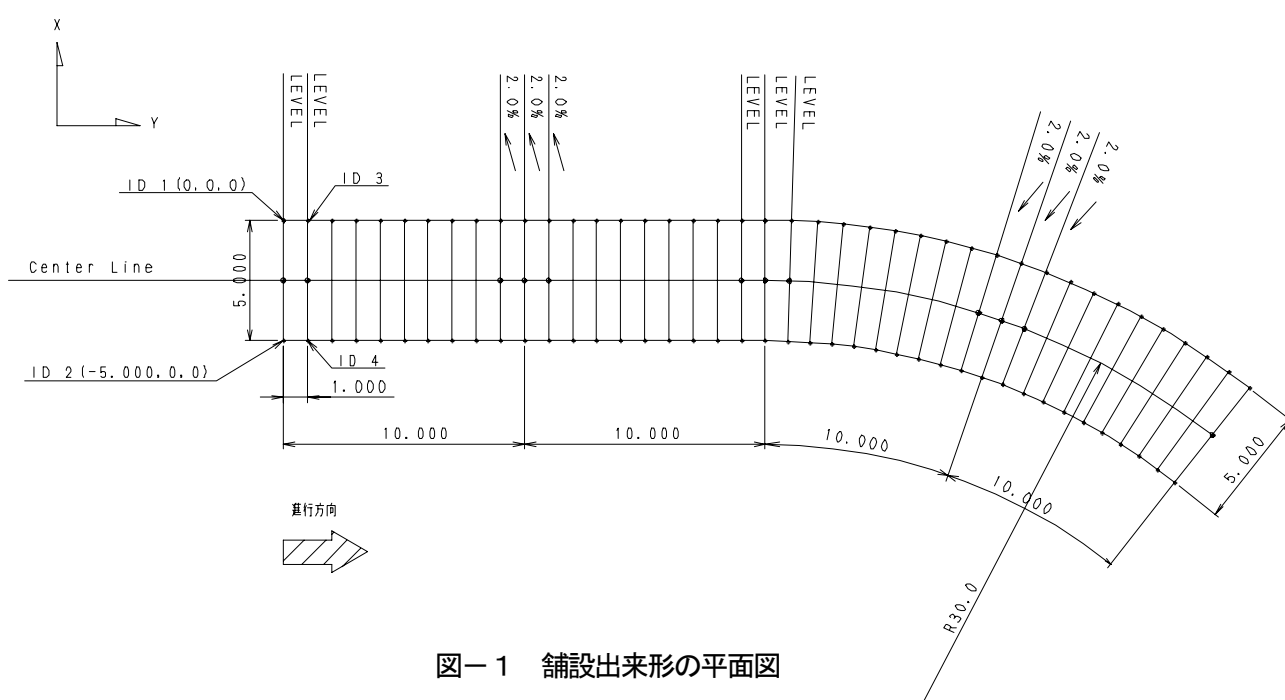


図-1 舗設出来形の平面図

3. 舗設出来形の計画

施工場所は弊社機械センターの構内であり、広さ・目的・費用等を検討し、幅員5m×延長約40mとした。性能確認試験であることから、通常の施工ではありえない厳しい変化条件を設定した。今回の施工条件をクリアできれば、殆ど実際の施工が可能になるという考え方である。図－1に計画平面図を示す。

センターラインの舗装厚さは常に20cmを目標とする。スタートから延長1mは水平に舗設し、延長9mまでの間に右上がり横断勾配2%まで傾斜をつけ、延長11mまで維持し、延長19mまでに水平に戻す。延長21mまで水平を維持し、延長29mまでの間で逆に左上がり横断勾配2%まで傾斜をつけ、終端まで維持する。これに加えて、後半の延長20mは曲率半径30mで右カーブしながら走行する。スタートラインから5m毎に検測ラインを設ける。舗設後に各検測ラインの中央・両端の3次元座標値を測定し、①平面方向＝ステアリングの精度、②高さ方向＝舗装厚さの精度を検証する。舗設条件を整理したものが表－3である。

表－3 舗設条件の変化

検測ライン	0	1	2	3	4	5	6	7
延長(m)	0	5	10	15	20	25	30	35
横断勾配	右上がり最大2%				左上がり最大2%			
走行ライン	直進				R30m右カーブ			

4. 試験施工の準備

4－1. データファイルの作成

3D-MCを稼働させるためには計画した出来形のデータファイルが当然必要である。3次元CADから設計データを作成する方法、又は、Excelを使用して設計データを作成・編集する方法がある。今回は後者によって、82ポイントのデータファイルを作成した。初めての作業であり、約4時間をこれに要した。一つのファイルデータのポイント容量は3000点までとされているが、2000点程度でファイル分割する手法が推奨されている。

4－2. 機器の取付と設定

機器の取付・設定はメーカーから技術協力を得て1日、

トリミング（材料を使わない試運転）に1日、計2日を要した。TSの配置状況を写真－4に示す。



写真－4 TSの配置状況

5. 試験施工の実施

2005年7月21日に試験施工を実施し、アジテータトラック10台、計40m³を舗設した。舗設した生コンの概略仕様を表－4に、舗設状況を写真－5に示す。アジテータトラックから路盤上にある程度分散して荷降ろしされた生コンは、横断方向に均一になるようスプレッディングオーガにより撒き広げられ、モールドが生コンを敷きならしていく。

表－4 生コンの概略仕様

曲げ強度	4.5 N/mm ²
スランプ値	5 ± 1.5
骨材最大粒径	25 mm



写真－5 前方から見た舗設状況

スタートライン直後に、スリップフォームペーパー通過後の両外端の下がりを計測できるように、予め杭を設置した。水系を張って下がりをスケールで測定し、スタート時の舗装高さが設計値に合致しているかを確認した。写真－6に状況を示す。

モールドによる敷きならし後の表面のコテ仕上げは、一般的にはスリップフォームペーパーに連結されたオートフロート装置を使用する。今回の試験施工では縦断方向に急激な高さ変化を設けており、オートフロートが追従できずに、形成した表面を削り取る等、試験目的を阻害する可能性が予見された。よって、今回はコテ仕上げを行わず、モールドで敷きならしたままの状態とすることにした。敷きならし状況を写真－7に示す。



写真－6 水系による高さの確認



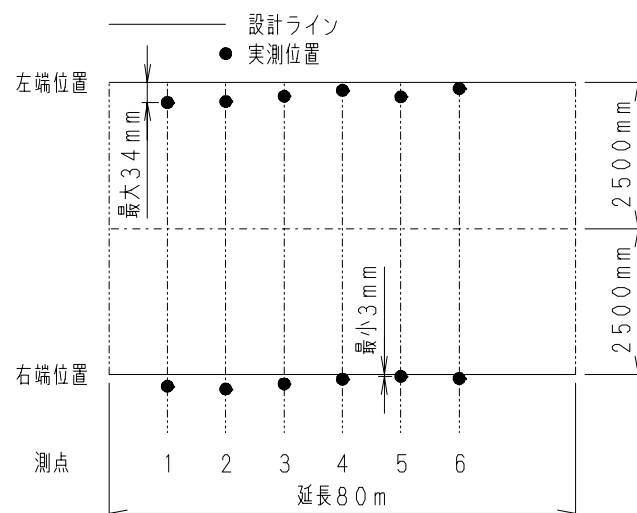
写真－7 敷きならし状況

6. 施工結果とデータの考察

施工の翌日、舗装したコンクリートがある程度固まった状態で、ハンドプリズムを使用して TS により測

定し、検測ライン（測点）No.1～No.6 において左端・中央・右端の計 18 点について 3 次元データを得た。

6－1. 水平方向データの考察



図－2 水平方向の測定結果

左右両端 12 点の水平方向の測定結果を図－2に示す。水平方向の設計ラインは、スタートから測点 No.4 までは直線走行、測点 No.4～エンドラインまでは曲率半径 30mの右カーブ走行である。実測位置（●）の傾向を見ると、測点 No.1 で約 30mm 右オフセットしていた端点が徐々に設計ラインに近づき、測点 No.4 で約 10mm 右オフセットとなっている。この間の延長は 15mであり、直線走行部が続いていれば、更に設計ラインに近づく可能性がある。スタートラインに機械を配置した時にモールドが若干右にオフセットしていたと考えられ、これをスタート前に補正する等の処理が実際の施工では必要である。今回の結果より、水平方向の位置精度は概ね 10mm 以内と推定される。

測点 No.5, No.6 の実測位置に注目すると、左端と右端との距離が接近し、舗装幅が狭くなったデータになっている。これはモールドが変形した訳ではなく、モールド幅は一定であるが、モールドの延長方向長さに対してカーブの曲率半径が 30mと小さかったため、一旦形成された右端面をモールド右側後端が削り取る状態で走行したことによるものである。直線走行部に比べると舗装幅が 20～30mm 減少した。曲率半径の小さい急カーブを舗装する場合にはこのような幅員減少が生じる可能性があり、3D-MC の性能に係わらないこれらの現象を考慮する必要がある。

6-2. 高さ方向データの考察

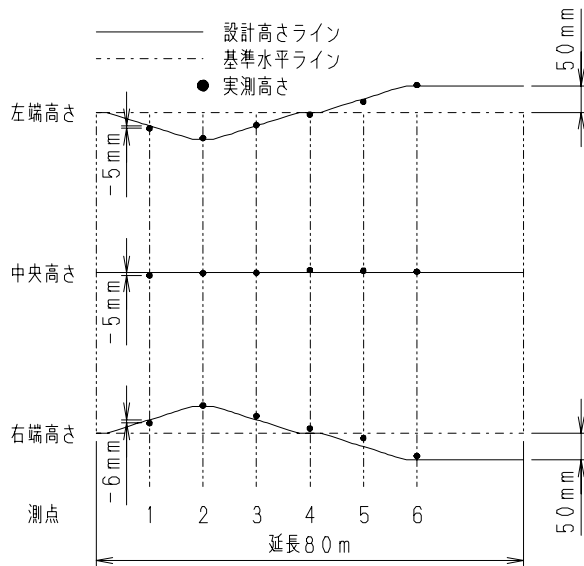


図-3 高さ方向の測定結果

測定した18点の高さ方向のデータを図-3に示す。舗設作業中の検測において、測点 No.1 で高さ位置を測定したところ、全幅において-5~-6mmで、設計ラインより一様に下がっていることが確認された。そこですぐに+5mmの調整操作を行った。測点 No.2 では両端+2mm、中央+1mmの値となっており、調整の効果が出たものと考えられる。



写真-8 舗設後の状況

スリップフォームペーバの左クローラ側から後方を見た舗設後の状況を写真-8に示す。左側端面の舗装厚の急激な変化を観察できる。

測点 No.2~No.6 の間は、右上がり勾配→水平→左上がり勾配の過程であり、左端側は一貫して厚くする方向、右端側は一貫して薄くする方向にモールドが制

御される。この間、左端側は-1~+5mmの実測高さに対し、右端側は+7~+10mmと厚い方に片寄せた値となっている。左端側の一貫して厚くする方向ではモールドが高くなる(上がる)ことを妨げるものがないので、モールドが素直に制御に従う。右側の一貫して薄くする方向は、既に舗設されたコンクリートが下がろうとするモールドに抵抗し、なかなか下がりきらない現象によるものと考えられる。今回は延長20mで高さ100mmを下げる設計ラインであったが、図-3で見ると、実測点は延長方向に2~3mのズレがあり、追従が遅れていると考えられる。当然この応答性は生コンの性状に大きく依存するものであり、生コンのスランプによってモールドを下げる方向の追従性は異なると考えられる。

高さ補正をする前の測点 No.1 のデータと右端側のデータを除くと、±2mm以内に60%、±5mm以内に100%のデータが入る。今回の試験施工は水平な路盤上の延長30mの距離の中で、左右両端の舗装厚さが15cm~25cmと変化し、変化率は±25%になる。実際の施工ではありえない急激な変化における今回の結果からすれば、一般的な施工条件での高さ精度には問題ないと推定する。

今回試験施工における舗設速度は0.5~1.0m/minであるのに対し、3D-MC システムからの制御周波数は6Hzであり、延長方向に1.4~2.8mm進行するごとに一度のペースで制御が掛かっていた計算になる。下式の関係がある。

$$P = 1000 \cdot V / (60 \cdot Q)$$

P : 制御ピッチ [mm]

V : 走行速度 [m/min]

Q : 制御周波数 [Hz]

走行速度と制御周波数との関係は位置精度に関係すると考えられる。今回のような大型スリップフォームペーバの場合、材料供給能力の制限から舗設速度は非常に低速であり、制御周波数は十分であると判断する。中小型スリップフォームペーバの舗設速度は大型機に比べて速いが、速度5m/minとしても制御ピッチは14mmである。これからして、スリップフォームペーバに3D-MCを適用する場合、制御周波数は十分に高く、問題にはならないと推定する。

7. まとめ

考察の結果を以下に箇条書きに簡単にまとめる。

スリップフォームペーバにおいて、3D-MC を適用する場合、

- 1) 水平方向の位置精度は 10mm 以内である。
- 2) スタートラインに機械を配置した際、水平方向の位置補正をしておく必要がある。
- 3) スタート直後及び施工中に舗装高さを検出し、高さ方向の位置補正をする必要がある。
- 4) 一般的な施工条件での高さ精度に問題はない。
- 5) 制御周波数は 6 Hz で問題はない。
- 6) 縦断方向の高さ変化の設計ラインは、生コンの性状を考慮して検討する必要がある。

今回の 3D-MC では TS を 3 台使用し、写真-4 に示す配置とした。TS の配置順序に制限はなく、左右のマスト先端に各々ある 360° プリズムに対して、2 台の TS が 1 : 1 に対応する条件を守れば良い。カーブ走行等によって TS の視線に対し、左右の 360° プリズムが交錯する状況もあり得る。このような場合には、左右のマスト高さに差をつけ、360° プリズムが同じ高さにならないように設定して TS の混乱を防ぐ方法が有効である。

位置精度に関して、第3項で記した通り「通常の施工ではありえない厳しい変化条件」であったことから、逆に一般的な施工条件での位置精度データが採取されていないことは課題ではあるが、3D-MC の舗装工事での実地適用の可能性を十分に期待できると考える。

8. おわりに

今回の試験施工は TS を使用する 3D-MC システムによって行った。これとは別に、高精度の GPS (例えば millimeter GPS) を使用する 3D-MC システムも舗装工事への適用が始まっている。このシステムは主に 4 種類 (①基地局、②移動局、③ゾーンレーザー発光器、④通信アンテナ) の装置で構成される。基地局と移動局は RTK-GPS (Real Time Kinematic-GPS) によって 3 次元位置情報を取得する。更に、移動局はゾーンレーザー発光器からのレーザー光線を受光し、高さ方向の位置精度を mm 単位に補正する。移動局は一つのシステムの中で複数設置できる。今回試験施工

したスリップフォームペーバに仮想的に当てはめると、360° プリズムの位置に移動局が設置されるイメージである。必要とされる 3 次元位置情報の数量が多い場合、その数量分の移動局を設置すればよい。TS がその追尾するプリズムに対して「1 : 1」の関係であるの 비해、高精度 GPS の基地局と移動局は「1 : 多」の関係である。その観点から、同一施工区域内で多数の重機が同時に稼動する大規模工事には高精度 GPS による 3D-MC が適し、道路舗装のようにワンパスの単機で施工する場合は TS による 3D-MC がシンプルで適すのではないかと、という考え方もある。

いずれにしても、3D-MC によって施工するためには、設計ラインのデータファイルは必須である。施工機械に対しては各種機器の取付・調整も必要である。実地施工での省人化、省熟練化のメリットは大きいですが、施工時には表れないソフト面・ハード面での事前準備作業が相当な量で必要になることを考慮しなければならない。これら準備に掛かる手間と、実地施工で得られるメリットとを勘案すると、3D-MC 施工には適する工事規模があり、工事の規模が大きくなるほどメリットがあると考えられる。

3D-MC システムに係わる機器は現在のところたいへん高価である。また、測量機器としての性格を有することから、その精度・性能を維持するため、定期的なメンテナンスが必要になると予想される。

実地施工では表面に出ない要素や工事規模の適否を含めて、各工事に関して事前に経済性を十分に検討する必要がある。3D-MC システムは基本的に光学機器メーカーの製品であり、対象とする建設機械とのマッチングや調整に問題がでる可能性がある。また、トラブル発生時の原因追求の際、どちらに原因があるのかで対応が遅れる懸念もある。これらの課題の解決と更なる精度の向上をメーカーサイドにお願いしたい。時代の要請からしても、3D-MC システムはこれから更に普及していくと考えられる。

最後に、今回の試験施工に積極的に協力して頂いた荒山重機工業(株)、ライカ ジオシステムズ(株)に感謝申し上げます。