

締固め度管理の自動化技術「T-iCompaction」の開発 -自動走行と自動計測が可能な振動ローラ-

大成建設(株) 正会員 ○後藤 洗一
大成建設(株) 正会員 青木 浩章
大成ロテック(株) 正会員 越村 聡介
ソイルアンドロックエンジニアリング(株) 正会員 池永 太一

1. はじめに

筆者らが開発する T-iROBO®シリーズは、建設現場において自動で作業を行うことが可能な建設ロボットである。そのなかで、盛土工事などにおいて用いられる振動ローラによる転圧作業を自動化した技術が T-iROBO Roller (図-1) である。T-iROBO Roller は 2012 年から開発がスタートし、2016 年には実際の施工現場において自動での転圧作業に用いる実証試験を行うなど¹⁾、完成度を高めてきた技術である。



図-1 T-iROBO Roller

振動ローラによる転圧作業の自動化は T-iROBO Roller の他にも各社に様々な事例があり、既に技術の開発段階を超えて実際の工事への適用と普及を目指す段階にある。一方で、

締固め施工において品質管理として行われる締固め度の計測は人による作業が行われている。盛土工事において、計測作業は転圧作業と交互に繰り返されるが、機械と人との混在防止や省力化の観点から、これも無人化・自動化することが望ましいと考える。

こうした背景から、筆者らは盛土工事における品質管理の自動化技術「T-iCompactionSM」を開発した。本稿では T-iCompaction のシステム、開発過程、機能の紹介と、転圧と品質管理を自動化する実証試験を造成工事現場で行った結果を示す。

2. T-iROBO ROLLER

T-iROBO Roller は人が搭乗しない状態で、自動での転圧作業が可能な振動ローラである。T-iROBO Roller の操作は機体から離れた操作室などから行うことができ、操作を行うオペレータは操作室などに設置した端末（ホスト PC）を操作して、転圧作業の範囲や締固め回数などの条件の指定、作業開始、停止の指令、作業状況の把握が可能である。機体とホスト PC は Wi-Fi や LTE 回線などを利用して接続する。

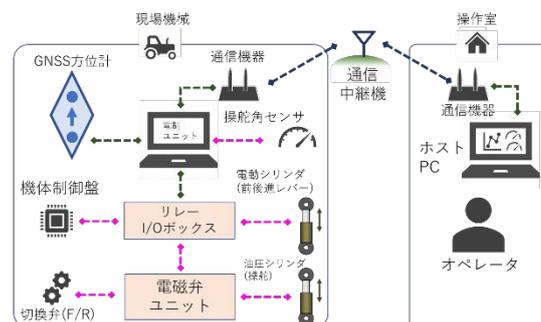


図-2 システム構成例

作業開始の指令を受けた T-iROBO Roller は、機体に設備

する GNSS 或いはトータルステーションにより取得した位置情報に基づき、入力された作業範囲や条件から自動生成される走行計画に従って自動走行を行う。T-iROBO Roller には、機体の各種状態を取得するためのセンサ、機体を動作させるためのアクチュエータや電磁油圧バルブ、およびそれらの制御器が搭載されている。また、障害物センサを備えており、人や物体が周囲にあるときには機体の動作を停止する。非常停止は複数の

キーワード 振動ローラ, 自動化, 品質管理, RI 計器, 締固め度

連絡先 〒254-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 334-1 大成建設株式会社 技術センター TEL 045-814-7247

システムを持ち、機体付近の人、現場の監視員、操作室のオペレータがそれぞれ機体を停止させる手段を持つことができる。オペレータ側の端末を含めたシステム構成を**図-2**に示す。

3. T-iCompaction

T-iCompactionはT-iROBO Rollerに搭載して使用することで、転圧作業に加えて品質管理をも自動化するために開発した技術であり、転圧作業の品質管理指標として代表的な締固め度の計測が可能である。締固め度の計測は現在、主に砂置換法や透過型RI計器により行われているが、これらは試料採取や盛土中への放射線源の打込みを伴う破壊検査である。破壊検査を自動で行うことは装置の複雑化・大型化や、計測に時間を要する点に問題がある。そこで、計器が移動しながら非破壊的に計測を可能とする技術を開発した。

T-iCompactionの計測原理は「散乱型RI計器」と同一である。散乱型RI計器では、計測面上に設置する放射線源からの放射線が材料中に入射し、材料中で散乱して再び計測面上に表れたものを計測面上の検出器で捉えて計数する。この計数値は締固め度と関係があり、その関係から締固め度を求める。このため非破壊での計測が可能である。一方、散乱型RI計器による計測を精度よく行うためには線源および検出器と計測面が一定の間隔を保つことが重要であり、このため計器外装と計測面が密着を保つ必要がある。

開発当初は**図-3**に示すように金属板の上に放射線源と検出器を載せて計測面上を滑走する方法を試みたが、滑走に伴い金属板が計測面を荒らすことで小石等が計器と計測面の間に入り、計器の密着性が低下する問題があった。そこで、**図-4**、**図-5**に示すように円筒形の外装を持ち、計測面上を移動に伴い転動する構造の計器を開発した²⁾。円筒型筐体の内部に格納された放射線源と検出器は、固定軸により支持され常に計測面と正対する。締固め度の計測には含水量と湿潤密度を計測する必要があるが、これらはそれぞれ独立した水分計および密度計で計測される。また、これらの計器をT-iROBO Rollerに搭載した状態で、計測面との密着を保ちつつ走行するため、**図-6**に示す追従機構を備える。各計器筐体がバネを介して独立に支持されることで、計測面の凹凸や不陸にあっても各計器が計測面との密着を保つことができる。T-iCompactionは昇降装置を介してT-iROBO Rollerに接続する。これにより、転圧や移動を行う際には計器を上昇し、接地しない状態とすることができるため、計器の損耗を抑える効果がある。また、昇降機構はT-iROBO Rollerのシステムから制御可能としている。T-iCompactionによる計測値は、T-iROBO Rollerシステムが持つ自己位置情報に紐付けて管理され、地図や図面上にヒートマップとして表示が可能である。



図-3 ソリ型 RI 計器（開発初期）



図-4 T-iCompaction

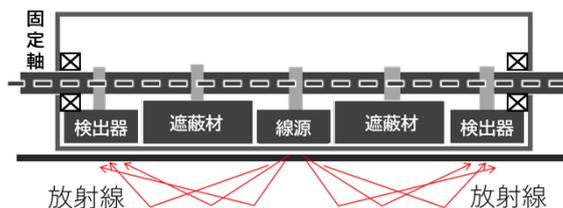


図-5 T-iCompaction 構造（図-4 A-A 断面）

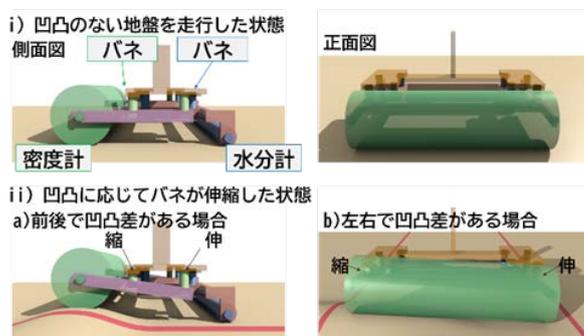


図-6 追従機構

T-iCompaction は自動での計測作業を目的として開発した技術であるが、人が搭乗操作する通常の振動ローラに搭載して使うこともできる。この場合も、施工範囲の全面的な計測が連続的に可能である特徴を活かして、品質管理の高度化や省力化に繋げることができる。このとき、計測データを帳票化する等の為に計測位置の情報が必要となる場合は、GNSS等の自己位置を取得するための方法を用意する必要がある。

4. 自動化システム

効率的な運用のため、転圧作業と締固め度の計測は、走行レーンごとに繰り返すシステムとした。或る1つのレーンに対し規定回数の締固めを行ったのち、そのレーンの締固め度を計測する。締固め度が管理値を満足していれば、次のレーンへ移動ののち、そのレーンの締固めを行う。計測の結果、締固め度に不足の箇所があるときは再度転圧を行い、再び計測を行う。再転圧を規定回数より繰り返してもなお既定値を得ざる場合は、オペレータに異常を報知し、又は保留して振動ローラを次のレーンの作業に移行することができる。以上を繰り返すことで、転圧作業と締固め度の計測を効率的に行うことができる。動作フローを図-7に示す。

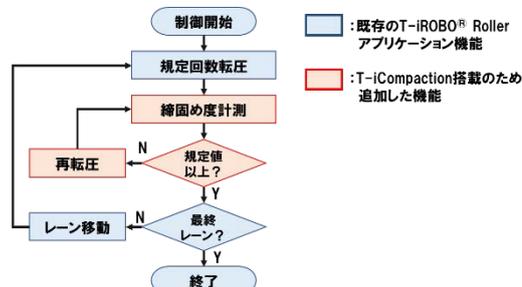


図-7 動作フロー

計測はレーンを進行方向へ任意の長さごとに区切ったセルを定義し、セルを通過する間に検出された放射線の計数値から含水量と湿潤密度を求め、それらから締固め度を計算し、そのセルの計測値とする。オペレータは自動制御に関する情報取得や指令を図-8に示す操作画面を通じて行う。操作画面には、自機の座標、走行速度や操舵方向など動作に関わる情報や現在作業しているレーンの番号、転圧を行った回数、現在の動作内容、T-iCompactionにより計測した締固め度などが表示される。締固め度は値に応じた色で画面中に表示され、視覚的に良不良を容易に識別可能である。

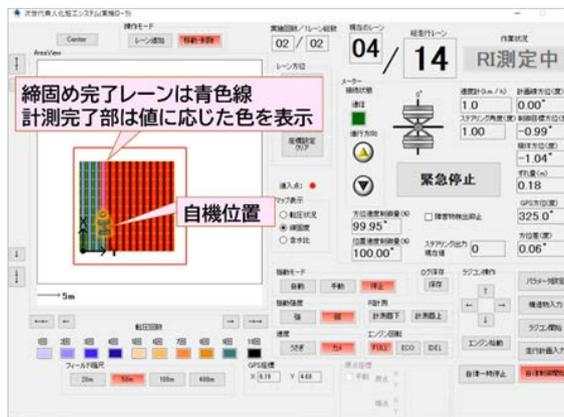


図-8 操作画面

5. 実証試験

T-iCompactionによる自動計測の実証を、造成工事現場で行った。実証試験は図-9に示す20m×21mを施工範囲として、自動転圧と自動計測を共に行った。試験条件は次のとおりである。

- ・レーン長：20 m
- ・レーン数：14
- ・1レーンの幅：1.5 m (振動ローラ輪幅と同じ)
- ・1レーンあたりの締固め回数：2回(1往復)
- ・締固め時の走行速度：2.5 km/h
- ・計測時の走行速度：1.0 km/h
- ・計測サイクル：進行方向 2 m ごと
- ・材料：砂質土

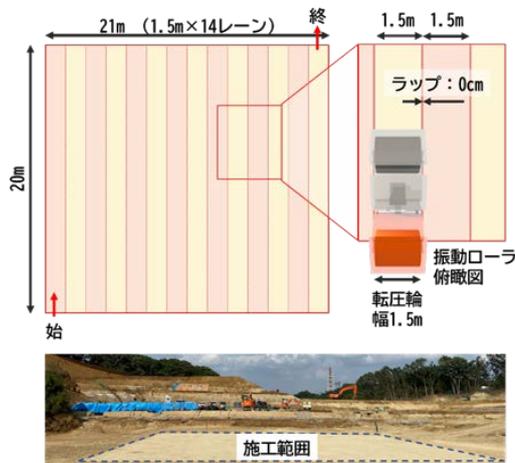


図-9 実証試験ヤード

実証試験で得られた締固め度のヒートマップを**図-10**に示す。セルの延長は、進行方向に2mとした。セルの幅はレーンの幅と同一である。即ち1レーンにつき10セル、施工範囲全体では14レーンなので140セルとなる。現行の施工管理³⁾では一例として同面積で5箇所の計測を行うが、T-iCompactionでは施工範囲の締固め状態を隈なく、かつ詳細に取得することができ、場所による締固め度の傾向を視覚的に取得可能である。

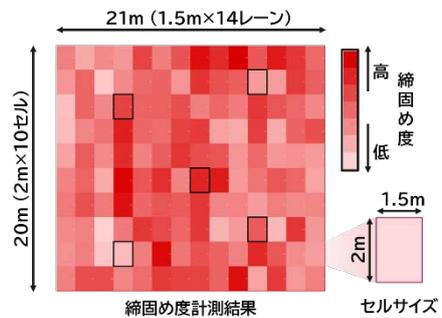


図-10 実験結果

計測精度の検証のため、同施工範囲のうち5点(**図-10**の黒枠部)で砂置換法および或る透過型RI計器による計測を行った。JIS法である砂置換法を基準として、同セルでのT-iCompactionおよび透過型RI計器の乾燥密度の計測結果をプロットしたグラフを**図-11**に示す。図では縦軸=横軸の位置を赤線で示している。砂置換法と透過型RI計器の計測点は実際には数十cmのずれがあり、またT-iCompactionはセル範囲を平均した値を表示するため、両方式とも砂置換法に対して多少の差は生じる。計測値差の標準偏差は其々T-iCompactionが0.063 g/cm³、透過型RI計器が0.048 g/cm³であり、同程度であった。

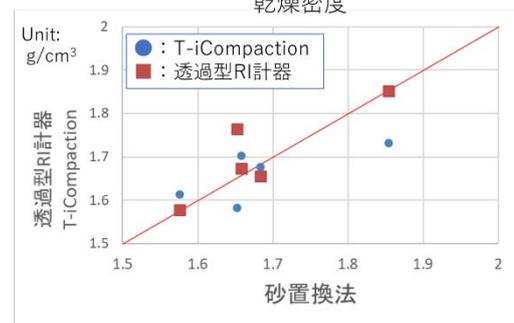


図-11 従来法との比較

図-12に、実験時の動作項目ごとに表示したタイムラインの一部を示す。このように、レーンごとに転圧→計測→レーン変更を1サイクルとして、これに2分半乃至3分を要した。14レーン全体では締固めとレーン移動に約20分、締固め度計測に約20分、計約45分で全ての動作を完了した。これに対して、同範囲の現行のRI計器による品質管理には約25分を要した。T-iCompactionによる計測は所要時間において現行法に劣らず、人手を要さず手戻りも防止できることから施工の効率化に寄与できるといえる。

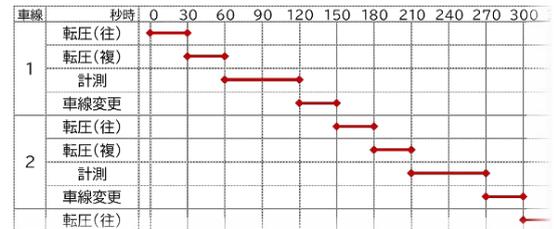


図-12 実験時のタイムライン (一部)

6. 結言

T-iROBO Rollerは、これまでは施工の自動化技術として開発してきた。一方、現場での品質管理業務もまた、それ自体にかかる時間に加えて移動時間や手待ち時間も発生すること、計測作業はしばしば苦渋作業となることから、自動化がもたらすメリットは大きいといえる。加えて、重機が稼働する範囲への作業者の立ち入りを削減することにより労働災害リスクの低減も期待できる。T-iCompactionにより施工だけでなく品質管理も自動化することで、人を現場作業の労苦から開放し、生産性、安全性を向上できることを期待している。今後、T-iCompactionは実現場での実証や試用を重ね、実施工での採用を目指す。

参考文献

- 1) 片山三郎, 宮崎裕道, 石井稔之: 自律制御型振動ローラによる転圧作業の現場検証 土木学会全国大会 71 回年次学術講演会, VI-075, 2016.
- 2) 青木浩章, 後藤洗一, 池永太一, 森安弘, 越村聡介: 転輪型 RI 密度水分計による非破壊計測の実験 土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会, VI-356, 2019.
- 3) RI 計器を用いた盛土の締固め管理要領 (案) 建設省技調発第 150 号, p.9, 1996.