

25. 3次元測量技術を活用した土の締固め管理手法の提案

立命館大学

国土防災技術株式会社

ジオサーフ株式会社

ソイルアンドロックエンジニアリング(株)

○ 小林 泰三

土佐 信一

西川 祐矢

池永 太一

1. はじめに

土の締固めは、長年、密度や含水比を計測することによって管理されてきた（品質規定方式と呼ばれる）。一方、近年では、建設現場への ICT 導入促進に伴い、締固め機械の走行回数（転圧回数）などを管理し、品質を確保しようとする手法が広がってきている（工法規定方式と呼ばれる）¹⁾。品質規定方式は、締固めた土の品質を直接評価することができるが、所定の面積を代表する点の計測である。一方、工法規定方式は、面的な管理ができるが、品質を直接評価するものではない。このように、締固めの品質管理手法には、一長一短があるのが現状といえる。BIM や CIM の普及促進が進む中、3次元データの利用拡大に向けて、品質を面的・空間的に、かつ直接評価できるような計測・管理手法の確立が期待される。本研究は、建設現場への導入が進む ICT 技術（ドローンによる写真測量技術、自動追尾型トータルステーション）を活用して、締固めの品質を面的に評価する手法を確立しようとするものである。

2. 3次元測量技術を活用した締固め管理

盛土は一般に、まき出し・敷均しの後、ローラやタンパなどによって締固めが行われるが、その際、圧縮によって地表面が沈下することになる。圧縮が鉛直一次元に生じると仮定すると、締固め前の密度 ρ_0 と締固め後の密度 ρ_c は次式で関係づけられる。

$$\rho_c = \frac{1}{1-\varepsilon} \rho_0 = \alpha \cdot \rho_0 \quad (1)$$

ここに、 ε : 圧縮ひずみ、 α : 密度増加比である。

上述したように、従来の品質規定方式では密度による管理が行われるが、式(1)は、締固めによる密度増加の度合いが、圧縮ひずみから簡単に計算できることを示している。

圧縮ひずみ ε は、評価点における圧縮沈下量をまき出し厚で除して与えられる。ここで、圧縮沈下量は、締固め前後のそれぞれの地表面の標高差で与えられ、まき出し厚は、締固め前の標高から前層締

固め後の標高の差分で与えられる。すなわち、転圧層毎に、転圧前後の地形を3次元測量し、差分解析することで、各層の圧縮ひずみ分布、延いては密度増加比分布が求められるようになる。転圧前後の地形を計測する手法として、本報では、ドローンを用いた写真測量による方法と、自動追尾トータルステーション（自動追尾 TS という）を用いた振動ローラの軌跡追跡による方法のふたつの方法を提案する。

ドローンを用いる方法（以降、ドローン法と呼ぶ）では、転圧前と転圧後にそれぞれ転圧面の空撮を行い、SfM（Structure from Motion）処理を行って3次元の数値表層モデルを得る。さらに得られたふたつの地形モデルを差分解析（標高差分）して、まき出し厚や圧縮沈下量を算出する。

自動追尾 TS を用いる方法（以上、TS 法と呼ぶ）では、振動ローラの転圧輪フレームに360°プリズムを設置し、遠方から自動追尾 TS によって振動ローラの軌跡を取得する。同一レーンを走行した2回分の軌跡データを抽出し、走行地点に応じた標高値を差分解析することによって、その2回の締固めの間に発生した圧縮沈下量を求める。

これらの手法の妥当性を検証するために、建設中の大規模盛土造成現場の一画において実証モデル実験を実施した。以下にその概要と結果を報告する。

3. 実証モデル実験の概要

実証実験では、長さ10m×幅8mの矩形ヤード（図-1）を対処に、11tクラスの振動ローラ（図-2）による締固めを行った。振動ローラの転圧輪の幅は約2mであり、幅8mに対してA～Dの4つのレーンを設け、レーン毎に転圧回数を変化させて計測を行った。ここでは、この矩形ヤードに対して、実験を2回に分けて実施した。すなわち、A～Dレーンに対して、実験1回目はそれぞれ2、4、6、8回の転圧を加え、実験2回目は10、12、14、16回の転圧を加えた。なお、転圧回数は、往路、復路に依らず1回と数える。

盛土材は、礫分（粒径2.0～75mm）:45.8%、砂

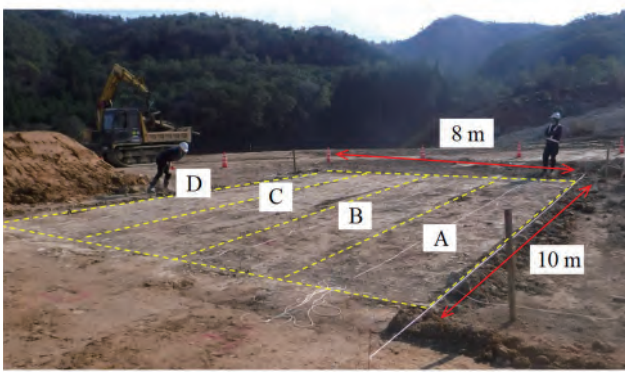


図-1 実験ヤード



図-2 実験に使用した振動ローラ

分 (0.075~2.0 mm) : 23.4%, 細粒分 (0.075 mm 未満) : 30.8% の細粒分質砂質礫 (GFS) であり, 最適含比 : 15.7% (最大乾燥密度 : 1.806 g/cm³) に対して, 12.1% の平均含水比で転圧を行った。本実験ではまき出し厚は特に管理しておらず, 30~50 cm の範囲でばらついた。

4. ドローンによる密度増加比の面的評価

図-3 は, ドローン法によって得られた密度増加

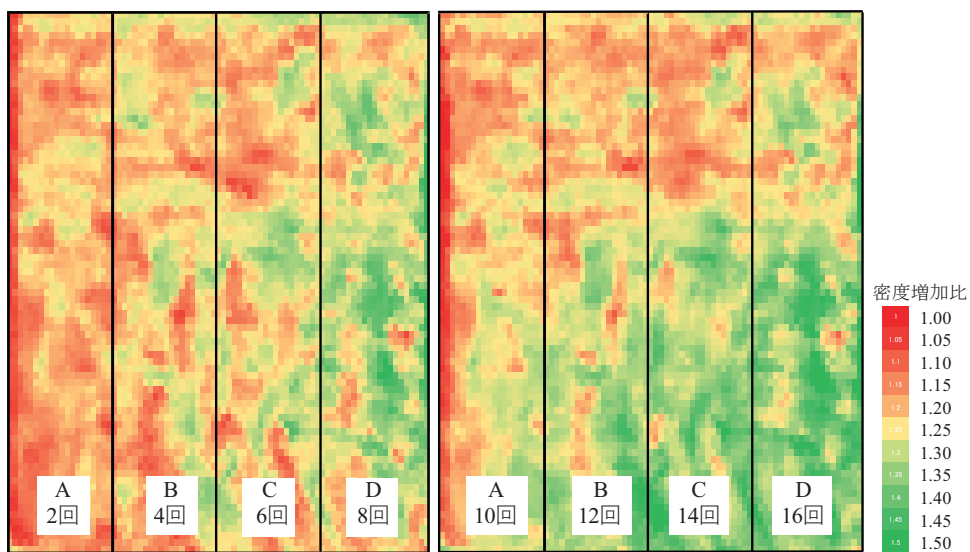


図-3 ドローン法で得られた転圧面の密度増加比分布

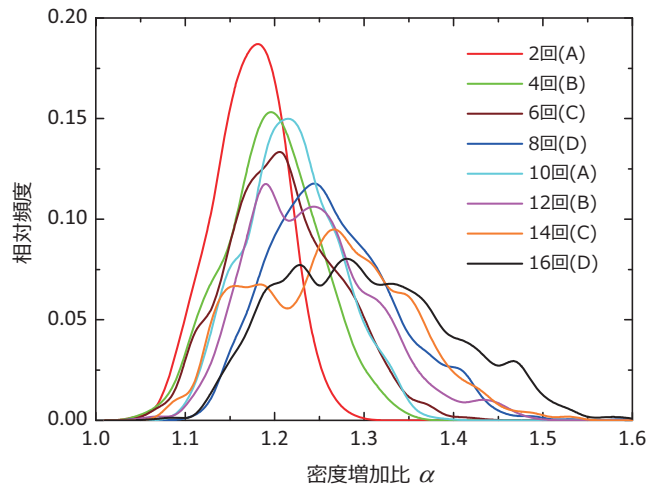


図-4 密度増加比の頻度分布

比 α の分布図である。ここに, 密度増加比 α は, 式(1)で説明したように, 転圧前に対する転圧後の密度比であり, α が大きいほど, 締固めによって大きな密度変化が生じたことを意味する。一般に, 転圧回数が増すと密度も増大するが(ただし, 所定の回数以上になると頭打ちする), この図でもその傾向が捉えられてるように見える。この図に見られる α のばらつきをレーン毎に相対頻度で表すと図-4が得られた。この図からも, 転圧回数が増えると α の平均値が増大することが分かる。ただし, 同時に α のばらつきも増大するようである。このように, 提案する手法では, 図-3のような視覚的な表現だけでなく, 面全体の平均値やばらつき(標準偏差)など, 統計的な品質管理に繋がる情報が得られるようになる。

本実験では, 各レーンにつき5点(レーン中央2m間隔)で締固め度(RI法²⁾)と地盤反力係数(簡易支持力測定器: キャスポル³⁾)の計測を行い, α との関係を調べた(図-5)。ばらつきは見られるも

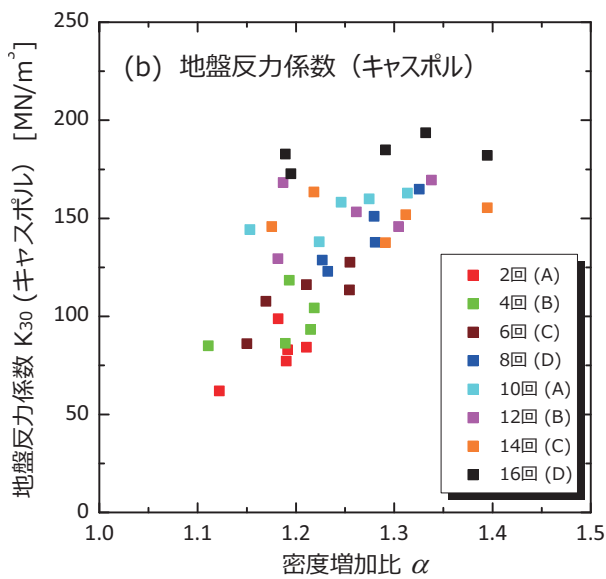
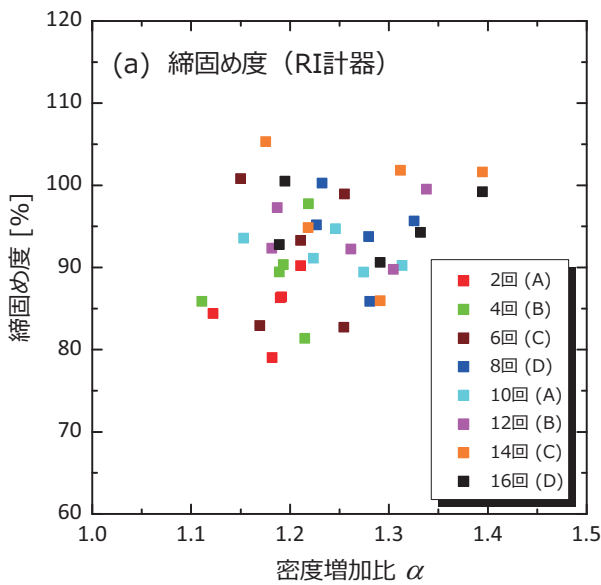


図-5 密度増加比と品質計測値の関係（ドローン法）

の、特に図(b)の地盤反力係数については、 α に対して比較的良い相関性のあることが確認できる。このことから、本手法によって得られる α が締固めの品質を示す指標となることが伺える。

5. 自動追尾 TS による圧縮沈下量の評価

TS法では、同一レーンを走行した任意の2回分のデータから、その間に生じた圧縮沈下量を求めることができる。図-6は、16回転圧を行ったDレーンに着目し、16回に至るまでの各転圧回における圧縮沈下量増分（前回走行時との差分、レーン全体で得られた平均値）を算出したものである。なお、振動ローラは往路と復路で締固め特性が若干異なることが知られており、その影響を除くために、ここでは、往路、復路毎に差分計算を行った。つまり、例えば往路であれば、前回の往路との差分であり、その値には、その間に走行した復路1回分の圧縮が含まれる。この図から、復路において一部データ

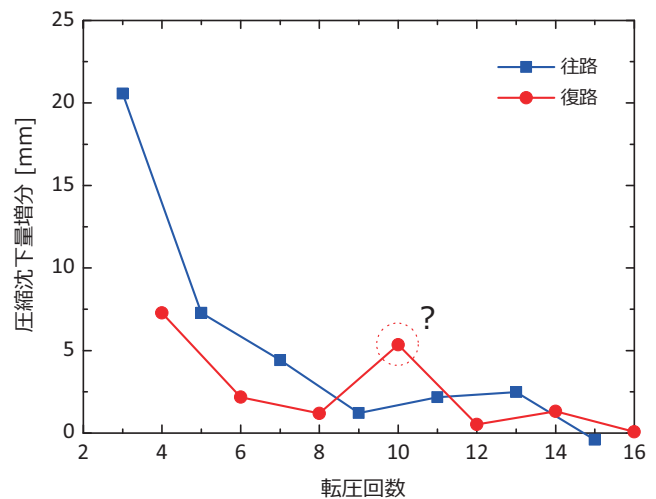


図-6 転圧回数と圧縮沈下量増分（TS法）

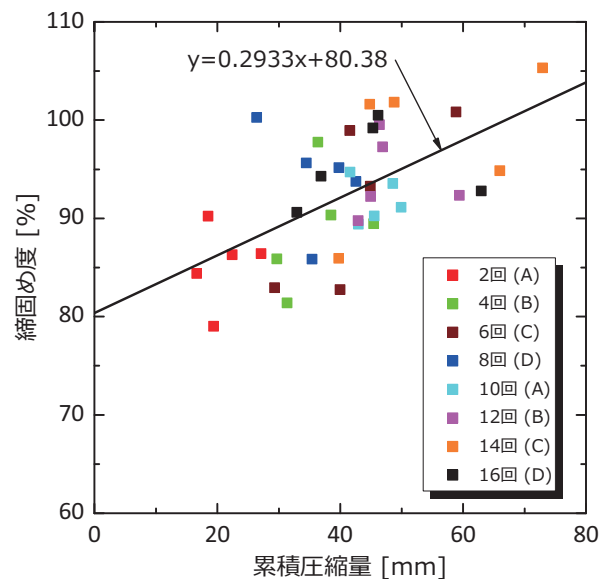


図-7 累積圧縮量と締固め度の関係（TS法）

の乱れがあるが、往路、復路ともに転圧回数が増えると圧縮沈下量増分は小さくなり、0に収束していくような傾向がみられる。所定の転圧回数に達すると、それ以上転圧しても地盤が圧縮されなくなことを表現していると考えられる。施工中にこの圧縮沈下増分をモニタリングすることで、締固め完了の施工判断に繋げることができると考えている。

第1回転圧時と最終転圧時の差分から、累積圧縮沈下量を求めることもできる。RI法で締固め度を計測した点に対応する地点の累積圧縮沈下量を抽出し、両者の関係を調べた（図-7）。ここでも α と締固め度に正の相関性が確認でき、図中に示す近似直線を得た。

この近似式を用いると、計測される累積圧縮沈下量を締固め度に変換することができるようになる。本実験結果に対して、例えば、「締固め度を90%

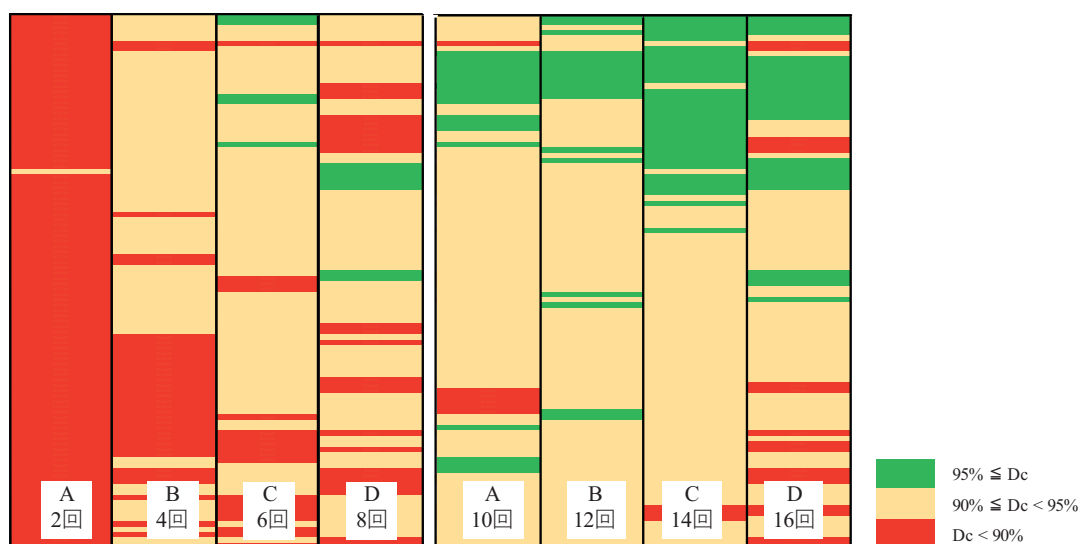


図-8 TS法で推定された締固め度の分布

未満」,「90~95%」,「95%以上」の3つに区分してデータを整理すると、図-8の締固め度分布図が得られた。

累積沈下量から間接的に得た推定値ではあるが、施工しながらデータが得られる利点があり、面的・空間的な品質のデータ管理やオペレータの施工判断支援のひとつとして応用できる可能性があると考えている。

なお、ドローン法によって得られた図-3と図-8を比較すると、全体的には両者ともに転圧回数が大きくなると締固めの度合いが高くなる傾向があるものの、10~16回転圧のレーンに着目すると、図-3の密度増加比の大きい領域と図-8の締固め度の大きい領域が逆転しているような傾向が認められる。TS法では、ドローン法とは異なり、転圧前（転圧0回）のデータを得ることができない。そのため、図-8に示す累積圧縮沈下量は、転圧を1回行った以降に発生した沈下量であり、ドローン法で得られるそれとは異なる。初回転圧時に最も大きな圧縮が発生するが、その初回沈下量を含めて解析したのが図-3（ドローン法）であり、含まないのが図-8（TS法）ということになる。現時点では推察の域を出ないが、まき出し厚や初期地盤の密度にばらつき（偏り）があり、レーン内で初回沈下量に大きな差異があったことがこの逆転現象の要因ではないかと考えている（初期地盤のばらつきの影響は、初回転圧時に影響を受けやすいと推察している）。

6. おわりに

ドローンによる写真測量技術や自動追尾TSは既に確立された技術として建設分野で普及が進んでいる。本研究は、これらの汎用技術を用い、簡単な

原理に基づいて、新しい締固め管理手法を提案しようとするものである。現時点では、実証データが不足しているため、信頼性や実用性を十分に確認できていないが、本実験から締固めによる圧縮量を計測することで締固めの品質を推定できる可能性のあることが示された。土工のCIMを深化・発展させていくためには、盛土内部の情報化が欠かせない。その一助になることを期待して、本手法の実用化に向けた更なる検討を進めていきたいと考えている。

本実証実験では、実験フィールドを提供頂いた清水建設(株)神戸支店をはじめ、福井コンピュータ(株)や五大開発(株)など、多くの関係者に協力を頂いた。末筆ながら感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 地盤工学会（土の締固め編集委員会）：地盤工学・実務シリーズ30 土の締固め、第3章 締固めに関する試験法と施工管理の考え方、pp.16-56, 2012.
- 2) 国土交通省：RI計器を用いた盛土の締固め管理要領(案), 1996.
- 3) 簡易支持力測定器使用マニュアル作成委員会：簡易支持力測定器による試験方法（第1版）、近畿地方整備局近畿技術事務所、1996.