

小型建機の走行による振動に基づいた地盤のコーン指数推定

○日浦 愛子（東京大学），筑紫 彰太（東京大学），ルイ笠原 純ユネス（東京大学），
永谷 圭司（東京大学），千葉 拓史（フジタ），茶山 和博（フジタ），山下 淳（東京大学），
浅間 一（東京大学）

Estimation of Cone Index Using Vibrations During Movement of a Small Construction Machine

○Aiko HIURA (The University of Tokyo), Shota CHIKUSHI (The University of Tokyo),
Jun Younes LOUHI KASAHARA (The University of Tokyo),
Keiji NAGATANI (The University of Tokyo), Takumi CHIBA (Fujita Corporation),
Kazuhiro CHAYAMA (Fujita Corporation), Atsushi YAMASHITA (The University of Tokyo),
and Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract : It is important to determine the trafficability at the landslide site. This paper proposes an estimation method of cone index. In the proposed method, a small construction machine is first ran to acquire data and estimate the cone index. Then, the trafficability of the subsequent large construction machine is determined. The acquired data are vibrations of the small construction machine which vary depending of the strength of the ground. The results of the experiment show that the cone index can be estimated by the proposed method.

1. 緒言

1.1 研究背景

日本は環太平洋造山帯に位置する等の地理的条件により自然災害が多く発生するという性質を有している [1]. 特に地震，台風，豪雨による水害や津波といった被害は頻発している. 日本における 1 年間の土砂災害の平均発生件数は 1000 件以上を記録している. 近年では，平成 30 年に過去最多となる 3459 件もの土砂災害が発生し，死者・行方不明者は 161 名に及んだ [2].

土砂災害において，犠牲者や被害を最小限に抑え，更なる被害の拡大を防ぐために欠かせないのが油圧ショベルなど大型建機の迅速な投入である. しかし，建設機械の現場への投入には複数の課題が存在する. まず，二次災害の危険性から人の立ち入りが難しい現場が存在する. このため建設機械を遠隔操作する無人化施工への需要がある [3]. しかし，水分を多く含んだ軟弱な地盤上を走行すると建設機械の身動きが取れなくなることや転倒することなどの危険性があり，無人化施工では施行中にこのような危険を察知することが難しい.

したがって災害現場では建設機械の使用前に地盤の強度を確かめて車両走行の可否を判定する，走破性判定を行う必要がある.

建設機械を支える支持力の低い軟弱な地盤であれば建設機械は走行できず，支持力が高く強固な地盤であれば建設

機械は走行することができる. このことから，走破性判定を行うためには地盤の強度を調査する必要がある. 地盤の強度を示す指標として広く用いられているのがコーン指数である. コーン指数は，コーンペネトロメータと呼ばれる棒状の貫入試験機を地面に圧入しその抵抗を測ることで計測することができる [4]. 特定の種類の建設機械の走行に必要なコーン指数は既に明らかになっている. しかし，人の手で計測を行う方法は大変な時間と手間がかかる. また，二次災害の危険性がある災害現場においては人が現場に立ち入ることは大変危険である.

1.2 関連研究

走破性判定のためコーン指数を計測する手法に関する研究はこれまでに多く行われてきている. 無人で貫入試験を行うことができる手法としてクローラロボットに貫入試験機を搭載し，遠隔操作する方法が挙げられる [5]. 今まで人が行っていた貫入試験をロボットが代行する手法だが，この手法は貫入試験機をロボットの中央である 2 つのクローラ間に設置しており計測するためにはロボットでその計測対象部分上に移動する必要がある. 他の研究として，月面における移動ロボットの走破性判定を目的として開発された貫入試験機を搭載された移動ロボットがある [6]. この移動ロボットは貫入試験機を機体の前方に取り付けており，計測したい部分に機体が移動する必要がない. しかし両手法に共通する問題点として貫入試験機は棒状であるため点

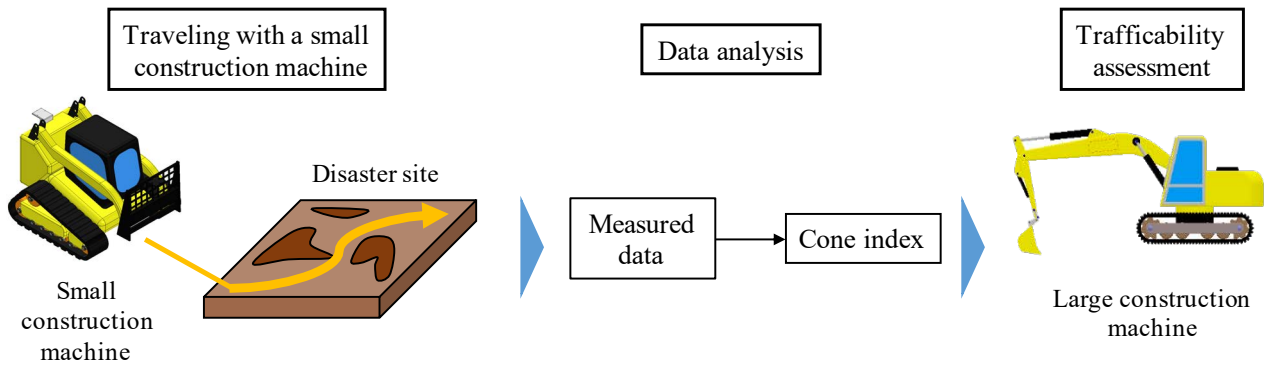


Fig. 1: Overview of the proposed method.

ごとの判断となり、一度の計測で測定可能な範囲が狭いということが挙げられる。このため迅速な復旧作業が求められる災害対応においては問題がある。

また、別の手法として地盤を撮影したスペクトル画像を用いてコーン指数を推定する手法が挙げられる [7, 8]。スペクトル画像による反射光強度を用いたこれらの手法は画像による推定となるため、一度の計測で広範囲を測定対象とすることができるが、この手法にも問題点は存在する。水分の浸透や地盤表面の乾燥など様々な要因により地盤表面と内部で状態の相違が起こりうる。つまり、スペクトル画像による判定は地表面と内部の中でも浅い部分しか確認することができないため、建機荷重の影響範囲である地盤内部の中でも深い部分を考慮することはできない。

1.3 研究目的

ここまで述べたように、土砂災害の迅速な復旧工事に用いられる建設機械は二次災害の危険を減らし、安全性を確保するため使用前に速やかに地盤のコーン指数を計測して走破性判定を行う必要がある。また、画像を用いたコーン指数の推定で一度に広範囲を計測可能な方法は地盤内部の深部の影響を考慮できない。そこで本研究の目的を災害対応において地盤内部全体を考慮した迅速な走破性判定手法の確立とする。

2. 提案手法

2.1 提案手法の概要

提案手法の概要を、図 1 に示す。本研究では、まずセンサを取り付けた小型建機で地盤を走行しセンサにより走行中のデータを取得する。このとき、走行する場所は事前に画像を用いて行われる地盤外面を中心に考慮した走破性判定 [8] により小型建機が走破可能とされたエリアとする。小型建機が走行時に取得したデータにより災害現場のコーン

ン指数を推定することで、後続の大型建機の走破性判定を行う。

土砂に限らず物は高い場所から低い場所に移動し、その際軽い物ほど遠くに運ばれる。これにより土砂災害現場でも大きな岩などは移動しにくい軽土砂は遠くまで運ばれることで、現場内の場所ごとに地質が異なる場合が存在する。平成 30 年に起きた呉市での土砂災害現場でも標高の低い下流では微粒土砂、中流では 0.5~1.0m 程度の石礫や流木が堆積し、上流に行くほど堆積している石は大きくなっていった [9]。このように災害現場では距離が離れるにつれ段階的に地質が変わって行くため、復旧工事において一部のコーン指数を調べるのでは不十分でありその場所ごとに調査する必要がある。

災害現場へ投入される建設機械の中で小型建機は小回りが効くため細い道なども通行することができ狭い現場でも高い性能を発揮する。また、サイズが小さく軽いため接地圧が小さい機械が多く地盤へ沈む可能性が低い。このため作業能率は高いがそのサイズにより分解・解体して輸送を行うことで運搬に時間を要する大型建機 [10] よりも先に災害現場へ投入することが可能である。そこで大型建機を土砂災害現場へ投入する前に、センサを取り付けた小型建機で走行し災害現場の地盤の状態を調査することでデータを取得し現場における場所ごとのコーン指数を推定する。現場のコーン指数を推定することで、後続の大型建機の走破性判定を行うことができる。また、実際に現場を走行させることで地盤の内部を考慮することができ、走行経路における車体幅のデータを一度に取得し迅速な走破性判定を行うことができる。

2.2 取得するデータ

コーン指数を推定する際のデータには建設機械の走行において、地盤の強度により変化するデータを使う必要がある。この条件を満たすものとして振動が挙げられる。

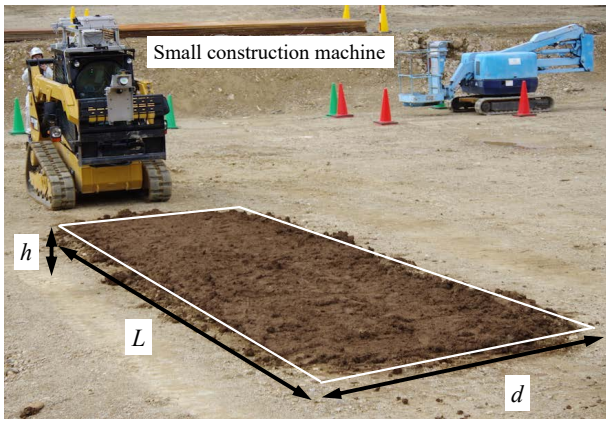


Fig. 2: Experimental environment.

地盤の支持力が低い軟弱な地盤の上を建設機械が走行する場合、建設機械の自重を支える土の力が弱いため地盤への沈み込みが大きい。このため地表面の凹凸などによる振動は吸収されると考えられる。つまり地盤がダンパの様な役割を果たし振動の振幅は小さくなる。逆に、地盤の支持力が高い強固な地盤の上を走行する場合は地盤の反力が十分あるため地表の凹凸による振動が吸収されることなく現れるので振幅は大きくなる。このように地盤の強度により振動の振幅が変化することは明らかになっている [11]。振動を用いた地盤の硬さ評価として、現場を締め固める際に振動ローラの加速度応答を利用する方法が実践されている。締め固めが進行する度に地盤の剛性が増大し、加速度の波形は変化する。これを利用して、施工中の振動ローラの回転軸に加速度センサを取り付け、加速度の変化を計測・解析することでリアルタイムかつ面的に地盤の締め固め具合を判定している [12, 13]。しかし、この研究は締め固めを対象としているため建設機械自ら特定の振動を地盤に与えていることや、建設機械が十分走行できる程度の強度を持つ地盤のみを考えているという問題点がある。

2.3 振動データの解析

振動データは小型建機の走行開始時や走行終了時を避け、走行開始から時間が経ち特異な振動が収まった部分のデータを利用する。特異な振動とは、走行開始時の加速などが原因による地盤の性質に依存しない振動のことである。また、地盤を走行する際の建設機械の速度は振動に影響を与えないように一定にする。地盤を走行しているときの振動データは全て均等な大きさに分割し、時間に依存する振動データをフーリエ変換して周波数成分に分解する。フーリエ変換したデータをモデル生成のための訓練データと、学習済みモデルの精度を確認するためのテストデータの2つにデータを分割する。最後にフーリエ変換したデータを用いてニューラルネットワークでの学習を行い地盤のコーン

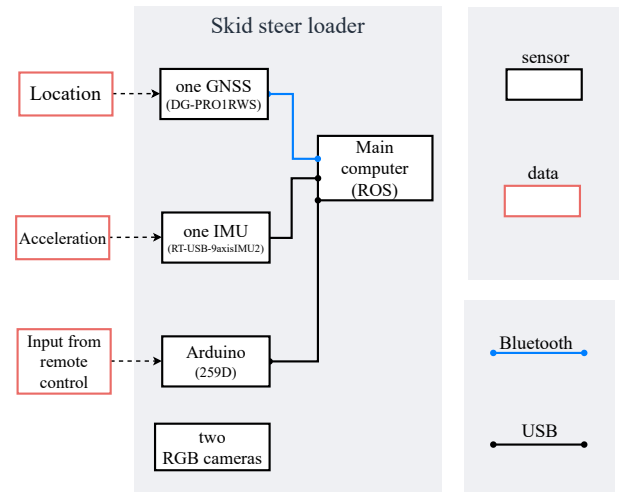


Fig. 3: System diagram.

指数を推定する。振動データは小型建機のエンジンによる振動や地表面の凹凸による振動など様々な振動を含み、非線形性がある。従って、識別器にニューラルネットワークを採用する。

ニューラルネットワークには全結合型ニューラルネットワークで、入力層と m (m は自然数) 層の隠れ層、出力層で構成されているものを用いる。入力層にはフーリエ変換した振動データの 1 Hz ごとのスペクトルを入力し、出力層から推定したコーン指数を出力する。

3. 実験

3.1 実験環境

本研究の提案する手法の有効性を確認するため検証実験を行った。実験環境は図 2 に示すように、強固な地盤を長さ L が 15 m、幅 d が 1.8 m の範囲で深さ h を 0.15 m 掘削した後に砂質粘性土を入れて軟弱な地盤を作成した。強固な地盤は礫が含まれる粗粒土であった。軟弱な地盤はデータ取得後に土を掘削、混合することで、その後の走行において建設機械の自重により応力を受けた部分が影響しないように調整した。また、加水する度にも土を掘削、混合することで場所により偏りが出ない様に設定した。

本実験では小型建機に日本キャタピラー合同会社製のスキッドステアローダ 259D を用いた。スキッドステアローダの走行はリモコンの遠隔装置により行い、前後と左右方向への入力量を Arduino で記録した。本研究のシステム図を図 3 に示す。スキッドステアローダに取付けるセンサには GNSS, IMU を用いる。GNSS で小型建機の絶対位置と移動距離を取得し、IMU で振動、加速度、実際のスキッドステアローダの速度のデータを入手する。これらのセンサは全て ROS を用いたメインコンピュータに

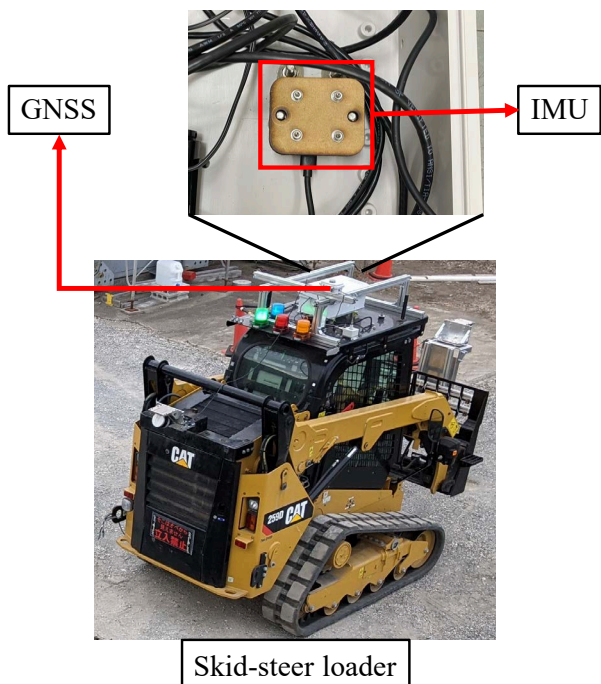


Fig. 4: Location of sensors mounted on a small construction machine.

繋がっている。取付けるセンサにはビズステーション株式会社製の GNSS モジュールである DG-PRO1RWS と、株式会社アールティ製の IMU センサモジュールである RT-USB-9axisIMU2 をそれぞれ使用した。

スキッドステアローダに設置したセンサの位置を図 4 に示す。IMU の位置は走行中の振動測定のため、またエンジンによる振動のみを拾わないため、建設機械の中央にある搭乗部の上部に設置した。GNSS は IMU の特定時間における正確な位置情報を取得するため IMU の真上に設置した。また、IMU, GNSS, Arduino などの全てのデータは同期させた。

3.2 実験手順

3.2.1 データの計測

小型建機を走行させる前にコーンペネトロメータで軟弱な地盤のコーン指数を計測した。コーン指数の計測は軟弱な地盤の 3.75 m, 7.5 m, 11.25 m の地点で 2 箇所ずつ計 6 箇所で購入試験を行いコーン指数を算出し、その平均を軟弱な地盤のコーン指数とした。強固な地盤は、コーンペネトロメータを地盤に規定深さまで貫入することができずコーン指数の計測が不可能であった。このため強固な地盤のコーン指数をほとんどの車両が問題なく走行できる 1500 kN/m^2 と設定した。

走行経路は、センサを取り付けた小型建機で軟弱な地盤を走行した後、旋回し強固な地盤を直進し、元の位置に戻

るため再び旋回する。この 1 周を 1 つのデータとして記録する。軟弱な地盤の走行前と走行後、強固な地盤上を直進する際の走行前と走行後の 4 つのタイミングで一時停止し、直進している間は加速や減速を避けた。また、データ取得後には軟弱な地盤の土をバックホウで掘削、混合して、その後の走行でデータを取得する際に影響が出ないようにした。軟弱な地盤に加水してコーン指数を下げた場合もバックホウで掘削、混合し場所により偏りが出ないように調整、整形した。

振動のデータは IMU により取得した地平面と垂直な方向の加速度データを利用する。小型建機の走行開始の際の加速による振動や、異なる状態の地盤に移動する際、建設機械が傾くことにより地盤の強度に依存しない振動が存在する。これらを採用しないため地盤中心部を走行している時の振動を抽出した。

3.2.2 データの解析

IMU は 100 Hz でサンプリングされており、軟弱な地盤または強固な地盤を直進している時の 600 個のデータつまり計 6 秒のデータをそれぞれ抽出した。そして 600 個のデータを時間的に 10 個に分割したため 0.6 秒間のデータを 1 つのデータとして数える。軟弱な地盤の振動データ 100 個、強固な地盤の振動データ 90 個の計 190 個のデータを MathWorks 社製の数値解析ソフトウェア MATLAB により高速フーリエ変換 (FFT) を実施した後、振動とコーン指数をそれぞれのデータの最大値と最小値を用いて正規化した。その後、150 個の訓練データ (うち 80 個は軟弱な地盤のデータであり 70 個は強固な地盤のデータ) と 40 個のテストデータ (うち 20 個は軟弱な地盤のデータであり 20 個は強固な地盤のデータ) の 2 つにデータを分割した。分割する際、1 周のデータが訓練データとテストデータで分かれられないように分割した。これは訓練データに用いたデータと同じ状態の地盤を走行した際のデータをテストデータに用いると学習の精度にかかわらずコーン指数推定の精度が上がるのが推測されるためである。最後に訓練データを用いてニューラルネットワークで学習し、地盤のコーン指数を推定した。ニューラルネットワークは 5 層で構成された全結合型ニューラルネットワークを作成した。入力層に周波数 1 Hz ごとに 1 から 30 Hz までのスペクトルの値を入力し、隠れ層 3 層を通して、出力としてコーン指数を得た。ニューラルネットワークの活性化関数には全て ReLU を用いた。その後、テストデータを用いて作成したニューラルネットワークの精度を確認した。

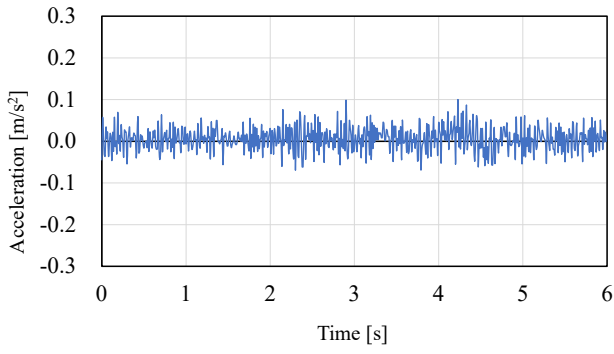


Fig. 5: Vibration data when running on soft ground.

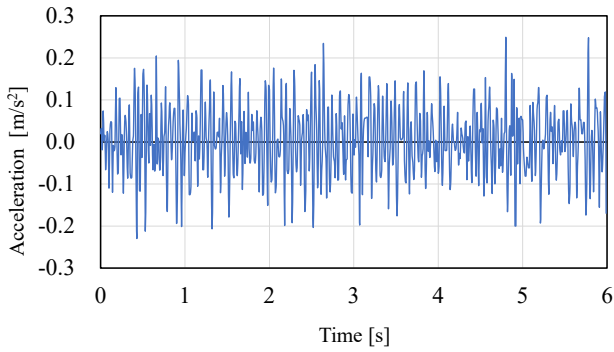


Fig. 6: Vibration data when running on hard ground.

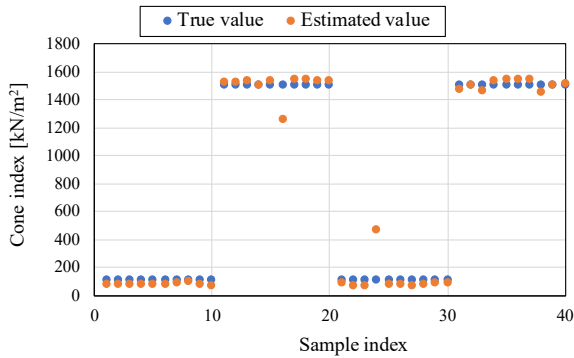


Fig. 7: True and estimated values of cone index for test data.

Table 1: Error between the true value of the cone index and the average of the estimated values using the proposed method.

sample index	1-10	11-20	21-30	31-40
True value [kN/m ²]	113.98	1500	112.96	1500
Average of the estimates [kN/m ²]	80.68	1504.22	118.38	1508.63
Error [kN/m ²]	33.30	4.22	5.42	8.63
Variance	54.63	6959.18	13324.51	1143.93

3.3 実験結果

小型建機が軟弱な地盤と強固な地盤を走行し得られたそれぞれの振動形状を図 5, 6 に示す。軟弱な地盤では振幅の小さな振動が得られたのに対し、強固な地盤では軟弱な地盤の振動に比べ振幅が 2 倍以上大きな振動が得られた。本実験で作成した軟弱な地盤は深さが浅く、建設機械の自重は軟弱な地盤のみではなく、その下に存在する強固な地盤にも支えられていたと考えられる。このため振動は計測したコーン指数が表している地盤よりも硬い地盤における振動に近づいていると考えられる。また、フーリエ変換する前後どちらの振動を見ても、全てのデータに共通した地盤の状態による周波数成分の明確な違いは見られなかった。

訓練データで学習したモデルの精度をテストデータで確認した結果を図 7 と表 1 に示す。図 7 の横軸はテストデータのインデックスを表しており、1~10, 11~20, 21~30, 31~40 といった 10 個ずつのデータは分割する前に同じ 1 周分のデータであるため、青い点で表されているコーン指数の真値が等しくなっている。図 7 においてオレンジ色で表されているコーン指数の推定値と真値を比較すると、コーン指数が大きい強固な地盤のデータもコーン指数の小さい軟弱な地盤のデータも、大半がコーン指数の誤差が 100 kN/m² 以内で推定することができた。これは、軟弱な地盤は全てのデータのコーン指数が 60 kN/m² から 120 kN/m² の範囲に収まっており、強固な地盤は全て設定した 1500 kN/m² になっているため、データのコーン指数にばらつきが無かったことが挙げられる。振幅も 2 倍以上異なったように、軟弱な地盤と強固な地盤では振動の特徴が大きく異なっていたと考えられる。

また、軟弱な地盤、強固な地盤どちらにもコーン指数を 200 kN/m² 以上誤推定するデータがあった。原因として、サンプリング時間の短さが挙げられる。サンプリング時間が短いと、細かい場所ごとにコーン指数を推定できるというメリットがある一方、瞬間的に発生した特異な振動がコーン指数の誤差に与える影響が大きくなるというデメリットがある。

表 1 では図 7 で表されたデータのコーン指数の真値と、10 個のデータのコーン指数推定値の平均、真値と推定値の平均との誤差、10 個のデータの分散が示されている。データのインデックスが 11~20 であるデータと、インデックスが 21~30 であるデータはコーン指数を 200 kN/m² 以上誤推定するデータがあったため分散が大きい値になっている。しかし誤推定したデータがあったため、結果的にコーン指数の推定値の平均は真値に近くなった。

4. 結言

本研究において、大型建機の走破性判定のため小型建機で現場を走行させ地盤の内部全体を調査した。その走行時の振動データを利用することで地盤のコーン指数を推定する方法を提案し、手法を構築して有効性の検証実験を行った。実験の結果、得られた振動の振幅が強固な地盤では大きく、軟弱な地盤では小さかったため、地盤の強度により得られる振動の振幅に違いがあることが確認された。また強固な地盤、軟弱な地盤ともに高い精度でコーン指数を推定することができた。したがって、地盤のコーン指数を走行中の振動で推定することの有効性が確認でき、大型建機の走破性判定に利用できることが分かった。

今後は更に高い性能で地盤のコーン指数を推定するため、データの分割頻度の再考や、振動以外のデータを用いた解析を行うことを提案する。また、砂質粘性土や礫を含んだ粗粒土以外の種類の地盤で実験を行うことで、土質が走行中の振動に与える影響を明らかにする。

参考文献

- [1] 内閣府: http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h22/bousai2010/html/honbun/2b_1s_1_01.htm, (2021年10月31日閲覧)
- [2] 国土交通省: <https://www.mlit.go.jp/common/001287382.pdf>, (2021年10月31日閲覧)
- [3] 藤野健一, 橋本毅, 油田信一, 建山和由: “無人化施工に最適なオペレータの選抜手法に関する研究”, 土木学会論文集 *F3*, Vol. 74, No. 1, pp. 11-17 (2018)
- [4] J.V.Perumpral: “Cone Penetrometer Applications - A Review”, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 30, No. 4, pp. 939-944 (1987)
- [5] 古屋弘, 山古屋弘, 山田祐樹, 栗生暢雄, 清酒芳夫, 森直樹: “遠隔搭乗操作によるマルチクローラ型無人調査ロボットの開発”, 大林組技術研究所報, No.80, pp.1-10 (2016)
- [6] K.Zacny, J.Wilson, J.Craft, V.Asnani, H.Oravec, C.Creager, J.Johnson, T. Fong: “Robotic Lunar Geotechnical Tool”, *Proceeding of the 2010 ASCE Earth and Space*, (2010)
- [7] R.Fernández, H.Montes, C.Salinas: “VIS-NIR, SWIR and LWIR Imagery for Estimation of Ground Bearing Capacity”, *Sensors*, Vol. 15, No. 6, pp. 13994-14015 (2015)
- [8] 筑紫 彰太, 山内 統広, 田村 雄介, 山川 博司, 永谷 圭司, 藤井 浩光, 千葉 拓史, 山本 新吾, 茶山 和博, 山下 淳, 浅間 一: “スペクトル画像を用いた土質パラメータの推定に基づく建設機械の走破性判定”, 精密工学会誌, Vol. 86, No. 12, pp. 1057-1063 (2020)
- [9] 長谷川 祐治, 中谷 加奈, 荒木 義則, 海堀 正博, 里深好文: “呉市天応地区で発生した土砂災害と土砂・洪水氾濫の検証”, 土木学会論文集 *B1(水工学)*, Vol. 75, No. 1, pp. 324-331 (2019)
- [10] 行川 恒弘: “災害時における道路復旧機械の紹介 ([特集] 自然災害と機械工学)”, 日本機械学会誌, Vol. 112, No. 1091, pp. 814-816 (2009)
- [11] 山口 晶, 風間 基樹, 日下部 伸, “神戸沖合人工島地盤のオンライン地震応答実験”, 土木学会論文集, No. 701/III-58, pp. 181-195 (2002)
- [12] 藤山 哲雄, 古谷 弘, 高橋 浩, 石黒 健, 細谷 芳巳: “振動ローラ加速度応答を用いた地盤剛性評価装置「 α システム」の開発”, 土木建設技術シンポジウム論文集, pp. 137-142 (2005)
- [13] 古屋 弘: “加速度応答法を用いた盛土のリアルタイム品質管理手法”, 大林組技術研究所報, No.77, pp. 1-10 (2013)