

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04605

研究課題名 (和文) 3次元データの活用による盛土の施工・維持管理技術の高度化と土工CIMの実装

研究課題名 (英文) Development of quality control methods of soil embankment using 3-dimensional data

研究代表者

小林 泰三 (Kobayashi, Taizo)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：10380578

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要 (和文) : 土工構造物の調査・設計から維持管理までのライフサイクルを一元的に管理するためには、地盤内部の情報化が不可欠である。本研究では、盛土造成に着目し、施工と同時に盛土内部の品質や土質特性を取得するために、(1)3次元測量技術を活用した締固め管理技術、(2)深層学習を用いた土の締固め品質評価技術、(3)車輪走行応答計測による地盤の剛性評価技術、(4)地盤情報の逆解析技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、施工と同時に、形状に加えて盛土内部の品質や動態の情報をデータ化・記録する技術を提案した。平成28年より、ICT技術を全面活用した情報化施工 (国土交通省:i-Construction) が行われるようになったが、扱われる3次元データは、盛土や切土の形状を表現するための「サーフェスデータ」に過ぎない。本研究で提案する地盤内部の情報化技術は、土工構造物の「サーフェスモデル」から「プロダクトモデル」への拡張を可能にし、調査・設計から維持管理までの情報の一元化による業務の効率化や生産性向上、維持管理の合理化を実現するための基盤技術となる。

研究成果の概要 (英文) : Modeling of geotechnical information inside soil structures is necessary to manage the life cycle of earthwork structures. In this study, focusing on embankment construction, four technologies were developed to obtain the quality and soil properties inside the embankment simultaneously with construction.

研究分野：地盤工学

キーワード：i-Construction ICT 土工 締固め 深層学習 逆解析

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

新しい形態の土工構造物の増加や大規模化等を背景として、道路に関連する土工構造物の設計指針を定めた「道路土工構造物技術基準¹⁾」が平成 27 年に新規制定された。ここでは、限界状態設計法の概念が取り入れられるとともに、設計時に維持管理の方法を考慮しなければならないことや、維持管理に必要となる記録の保存など、道路供用後の維持管理を見据えた設計が求められるようになった。一方、道路土工の施工現場においては、平成 28 年より、ICT 技術を全面活用した情報化施工（国土交通省：i-Construction²⁾）が行われるようになった。ここでは、土工工事の出来形や土量配分を行うための測量・設計から ICT 建設機械による施工、検査に至る一連のプロセスが 3 次元データに基づいて行われる。ICT 施工で得られる 3 次元データを維持管理や防災対策にまで延長して活用することができれば、効率的かつ合理的な道路管理が行えるようになる可能性がある。それを実現するためには、調査・設計、施工、検査、維持管理の各フェーズで個別に行われてきたデータの管理や活用（設計データや品質データの管理から安定管理、変状時の安定解析まで）を一気通貫して一元的に管理・活用する土工 CIM の構築が期待される。

2. 研究の目的

土工構造物の調査・設計から維持管理までのライフサイクルを一元的に管理するためには、地盤内部の情報化が不可欠である。本研究では、盛土造成に着目し、施工と同時に盛土内部の品質や土質特性を取得するための技術を開発する。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）。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）。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・管理手法として、次の 4 つの新技術開発を行う。

(1) 3 次元測量技術を活用した締固め管理技術

土の締固めは、盛土材のまき出し・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。ここでは、ドローンあるいは自動追尾トータルステーションを用いて転圧前と転圧後の地形をそれぞれ 3 次元計測し、差分解析によって圧縮沈下量を求め、その沈下量に基づいて締固め管理を行う手法を提案する。

(2) 深層学習を用いた土の締固め品質評価技術

近年、土の締固め現場において、施工しながら品質をリアルタイム評価する加速度応答法³⁾が再注目されている。加速度応答法とは、締固めによって地盤が硬くなると振動ローラ（振動輪）の振動波形が変化することに着目し、その波形の特徴量から締固めた地盤の剛性をリアルタイム評価しようとするものである。ここでは、同手法の信頼性向上や適用土質の範囲拡大に向けた新たな展開として、振動輪の加速度応答を数値シミュレーションによって再現し、それを AI に学習させて、振動波形から地盤剛性を推定する手法を提案する。

(3) 車輪走行応答計測による地盤の剛性評価技術

自走あるいはけん引によって地盤上に車輪が走行すると地表面に轍が発生する。その轍の深さ（車輪走行による地盤の沈下量）は、車輪の荷重と地盤の剛性に依存する。ここでは、車輪-地盤系の相互作用を一種の土質試験と見なし、車輪をけん引する力と地盤の沈下量から地盤剛性を評価する手法を提案する。将来的には、車輪型試験ツールを振動ローラ等の建設機械に搭載することで、あるいは、振動ローラの転圧輪そのものの応答を計測することで、走行（施工）しながら連続的な剛性評価を可能にしようとするものである。

(4) 地盤情報の逆解析技術

地盤断面図や 3 次元地盤モデルは、ボーリング調査によって得られた点の情報をもとに推定・補間されるのが一般的であるが、常に不確実性がつきまとう。本研究では、UAV やレーザスキャナなどを用いた 3 次元測量技術に着目し、これらを観測ツールとした地盤内部の逆解析手法を提案する。ここでは、盛土による軟弱地盤の沈下問題を例題に、地表面の変状の広域・多点観測から、複数層から構成される地層構造（層厚）を逆推定する手法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 3 次元測量技術を活用した締固め管理技術

締固めによって地盤の圧縮が鉛直一次元に生じるとすると、転圧面の任意点における締固め

前の密度 ρ_0 と締固め後の密度 ρ_c の間には次の関係が成り立つ。

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

ここに、 ε : 圧縮ひずみ、 α : 密度増加比であり、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ようになる。

本研究では、転圧の前後の地形を3次元計測し、面的な圧縮ひずみ分布から密度増加比分布を求める手法を提案するために、建設中の大規模造成現場の一角において実証モデル実験を実施した。長さ10m×幅8mの矩形の試験ヤードを対象に、11t級の振動ローラによる締固めを行った(図1)。転圧輪の幅は約2mであり、幅8mのヤードに対してA~Dの4レーンを設け、レーン毎に転圧回数(2~16回)を変化させて計測を行った。転圧による圧縮量の計測は、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を用いた振動ローラの軌跡追跡による方法の2種類の方法で行い(図2)、レーン毎の転圧回数の違いが評価できるかを検証した。

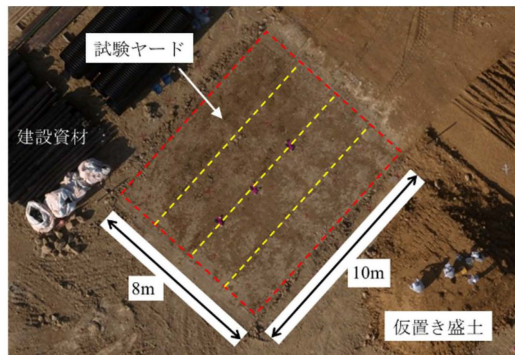


図1 現場実証実験

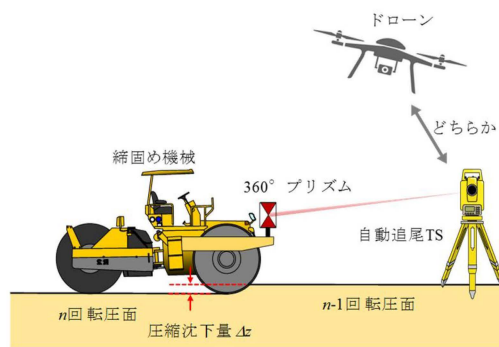
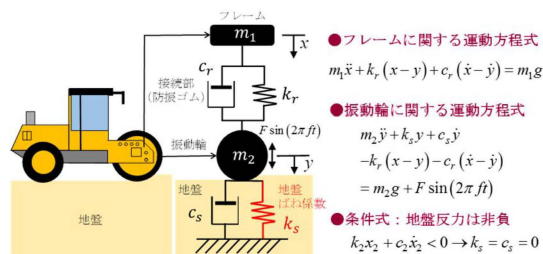


図2 ICT機器を用いた圧縮沈下量計測

(2) 深層学習を用いた土の締固め品質評価技術

教師あり深層学習では、予測・判定モデル構築のために大量の教師データ(学習データと正解ラベルのデータセット)が必要となる。本研究では、藤山・建山³⁾が提案した地盤-振動ローラ系の相互作用モデル(図3)に基づいて振動輪の加速度応答を再現した。ここでは、評価目的である地盤ばね係数(正解ラベル)を $k_s = 0.1 \sim 500 \text{ MN/m}$ の範囲で 0.1 MN/m 刻みに変化させて合計5,000個の加速度応答データ(教師データ)を作成するとともに(図4)、これを畳み込みニューラルネットワーク(CNN)に学習させて、振動波形から地盤剛性 k_s を推定するための回帰モデルを構築した。本検討では、上記(1)に示したフィールド実験で提案手法の実現可能性検証を行った。



m_1 : フレーム質量、 m_2 : 転圧輪質量、 x : フレーム鉛直変位、 y : 転圧輪鉛直変位、 k_r : 防振ゴムのばね係数、 k_s : 地盤のばね係数、 c_r : 防振ゴムの粘性減衰係数、 c_s : 地盤の粘性減衰係数、 F : 転圧輪の懸重力、 f : 転圧輪の振動数

図3 地盤-振動ローラ系の相互作用モデル

(3) 車輪走行応答計測による地盤剛性評価技術

本研究では、問題をシンプルにするため、車輪を自走させず、空転する車輪をけん引する走行状態を考えた。車輪をけん引するためのエネルギー率(単位時間当たりの仕事)が、轍を生成するため(地盤を圧縮させるため)の仕事率によって消費されると考える。ここで、車輪けん引速度を V [mm/s]、車輪に作用するけん引力を F [N]とすると、けん引エネルギー率は $\dot{E}_l = FV$ となる。また、車輪(車輪幅 B)と地盤の荷重-沈下関係($p-z$ 関係)が $p = k_w z$ という単純な線形モデルで近似できるとすると、締固めエネルギー率は $\dot{D}_c = 1/2 k_w (\Delta z)^2 BV$ となる。 \dot{E}_l と \dot{D}_c 等値して地盤反力係数 k_w について解くと次式を得る。

$$k_w = \frac{2F}{(\Delta z)^2 B} \quad (2)$$

上式は、空転する車輪をけん引し、時々刻々と変化するけん引力 F と沈下量 Δz を計測することで、測線上の地盤反力係数の変化を連続的に評価することができるようになることを示唆している。本研究では、提案する試験原理の妥当性を確認するために、図5に示す車輪走行実験装置を用いて検証実験を行った。

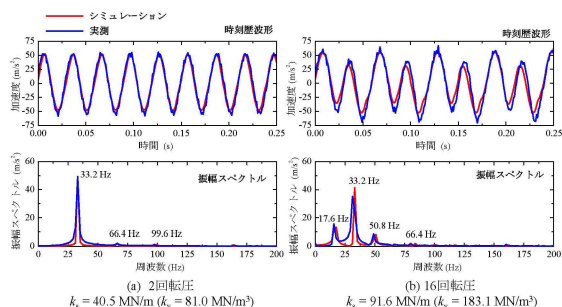


図4 振動輪の加速度応答の一例

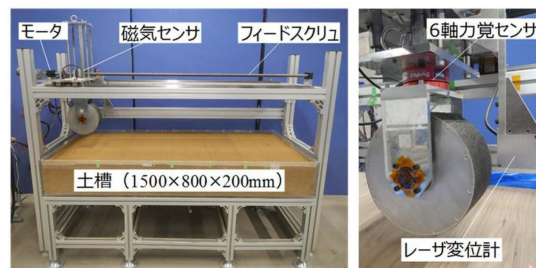


図5 車輪走行実験装置

(4) 地盤情報の逆解析技術

本研究では、市販の順解析ソフトウェア（有限要素解析ソフトウェア）とフリーのプログラミング言語（Python）を組み合わせることで、簡単に逆解析が実行できる環境を構築した。ここでは、ファイルの読み込み／書き換え、最適化関数の実行、FEMの実行の3つの命令文のみをコーディングすることで逆解析が実装できる。

ここでは、簡単な例題として、完全弾性体と仮定した水平多層地盤（層厚固定）に等分布荷重を作用させたときの地盤の沈下問題（平面ひずみ問題）を考えた（図6）。载荷領域周辺の地表面の変位観測から、1)地盤各層の弾性定数（ヤング率 E ）を推定する方法（各層の層厚は既知とする）と、2)地盤各層の層厚を推定する方法（各層の弾性定数は既知とする）について検討した。実現場の観測値を用いた逆解析が行えると良いが、本研究では基礎的な机上検討として、FEM解析で観測値を再現して逆推定を行った。

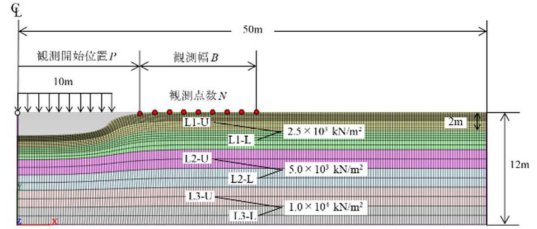


図6 水平多層地盤モデルの沈下問題

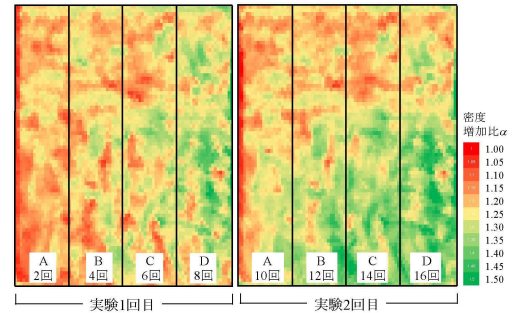


図7 密度増加比の分布

4. 研究成果

(1) 3次元測量技術を活用した締固め管理技術

上述した現場締固め実験において、ドローンを用いた写真測量によって得られた密度増加比 α の分布を図7に示す。この図から、転圧回数が増えると大きな α を示す領域が増えていることが分かる。図8は、図7に示した α の分布図を $10\text{ cm} \times 13\text{ cm}$ の長方形グリッドに分割し（グリッド数1184/レーン）、各グリッドの代表値（平均値）をレーン毎の頻度分布として表したものである。この図から、密度増加比は正規分布に近い分布を示し、転圧回数の増加によって α の平均値が増加するが、同時にばらつきも増大することが分かる。このように、沈下量を面的に計測することによって、締固めの統計的な品質評価が可能になる。

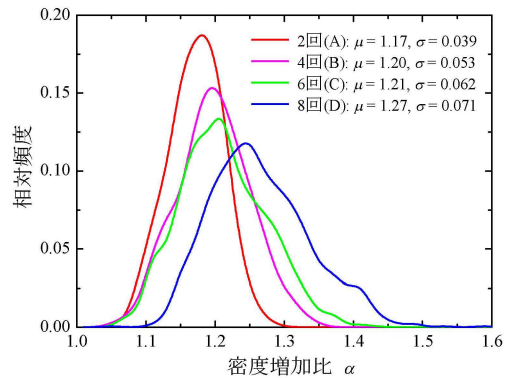


図8 密度増加比のばらつき

図9は、自動追尾TSで計測した沈下量と別途RI計測から求めた締固め度 D_c の関係を示したものである。ばらつきは残るものの、正の相関性が認められ、図中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、締固め度を区分化してデータ整理すると、転圧面に対する締固め度の分布図を得ることができた（図10）。工法規定方式で実施される事前の試験盛土において、密度計測に加えてTSで圧縮沈下量を計測することで、現場に応じた近似式を得ることができる。経験的推定値にはなるものの、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。

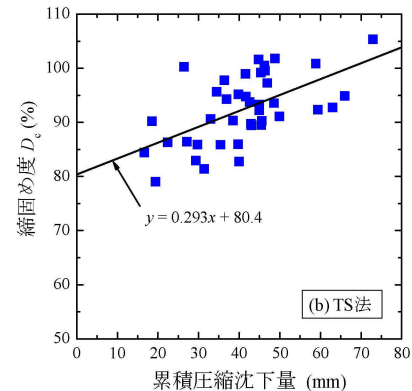


図9 圧縮量と締固め度の関係

(2) 深層学習を用いた土の締固め品質評価技術

本研究では、(a)時刻歴の加速度値を一次元配列した数値データ、(b)時刻歴応答のグラフ画像データ、(c)高速フーリエ変換で得られた振幅値を一次元配列した数値データ、(d)振幅スペクトルのグラフ画像データの4種類の教師データを作成し、教師データの形式による汎化性能の違いを検証した。図11は、上述したフィールド実験で取得した加速度応答から推定した地盤ばね係数[MN/m]と、別途、簡易支持力測定器（キャスポル）⁴⁾で実測した地盤反力係数[MN/m²]を比較したものである（図中の r は両者の相関係数を表す）。キャスポルによる実測値自体にも大きなばらつきが含まれるため、高い相関係数は得られなかつ

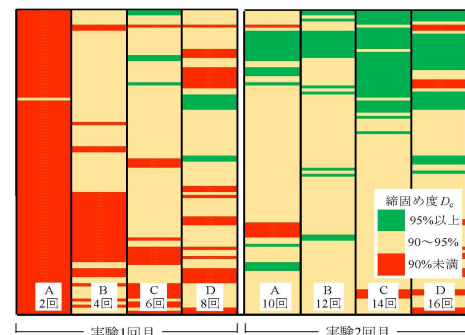


図10 推定された締固め度の分布

たが、(a)~(d)のいずれのモデルにおいても正の相関性を確認することができ、深層学習による地盤の剛性評価手法の実現可能性を示すことができた。盛土の締固めは、長年、密度（締固め度）によって管理されてきたが、本来、設計パラメータである剛性や強度といった力学特性によって品質評価されるべきである。近年では、路床・路体、舗装材料の弾性特性を考慮した舗装構造設計（多層弾性理論を用いた設計）が行われるようになり、道路土工と舗装の設計の一体化を試みる研究も見られるようになった。本提案技術は、地盤剛性をリアルタイムで面的に評価する点で、土工のみならず、舗装工の設計・施工の合理化に資する技術として期待できる。

(3) 車輪走行応答計測による地盤剛性評価技術
室内走行実験結果の一例として、真砂土（礫まじり細粒分質砂：平均含水比 14.9%）を対象に実施したけん引実験の結果を図 12 に示す。上段から、移動距離に対するけん引力 F 、沈下量 Δz 、地盤反力係数 k_w （式(2)より算出）の変化を示したものである。図中の◇は、直径 50mm の小型平板載荷試験を用いて別途計測した地盤反力係数 k_p である。車輪荷重が小さく、微小な沈下量しか発生しない $W=68.6, 98.0\text{N}$ のケースでは地盤反力係数の推定値 k_w が安定せず乱れる傾向があるが、ある程度の沈下が発生した $W=127.4, 156.8\text{N}$ のケースでは、別途計測した k_p とも良い一致が見られた。

(4) 地盤情報の逆解析技術

図 4 は、観測幅と観測点数を $B=20\text{m}$ 、 $N=40$ 点で固定し、観測開始位置 P のみを $0\sim 15\text{m}$ の範囲で変化させたときの層厚の逆解析結果を柱状図として示したものである。地点 A、地点 B とともに、正解に対して上位にある Ac1、As1、Ac2 層は比較的良好で安定した推定結果が得られたが、下位にある Ac3、As2、Acs 層の推定値は P の条件によって大きく変動した。下位層になると地表面の沈下に及ぼす影響が相対的に小さくなり、重根が存在することを示唆している。観測条件が不適切であるとき、重根が存在して解が安定しないことが推察される。本研究ではこのことを逆に利用して、不適切な条件を含む様々な観測条件で逆解析を行った上で、その解の安定性を評価することで、最適な観測条件を特定し、推定精度向上が実現できる可能性があることが分かった。

<引用文献>

- 1) 日本道路協会、道路土工委員会、道路土工構造物技術基準・同解説、平成 29 年。
- 2) 国土交通省、i-Construction、<https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>
- 3) 藤山哲雄、建山和由、振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法、土木学会論文集、No.652/III-51、pp. 115-123、2000。
- 4) 国土交通省・近畿地方整備局・近畿技術事務所、簡易支持力測定器による試験方法（第 1 版）、測定器使用マニュアル作成委員会基準（案）、1996。

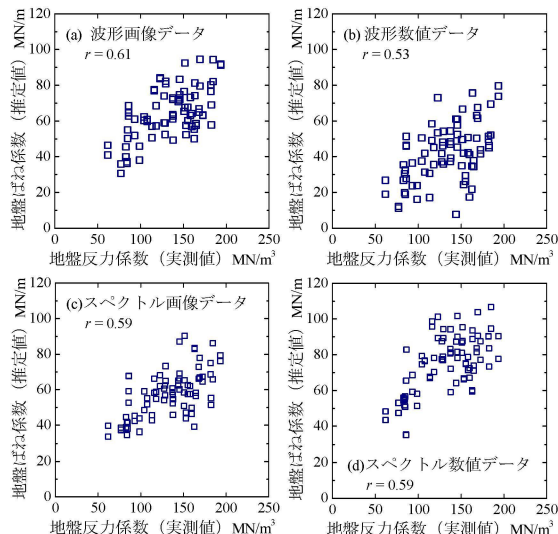


図 11 AI による地盤剛性の推定結果

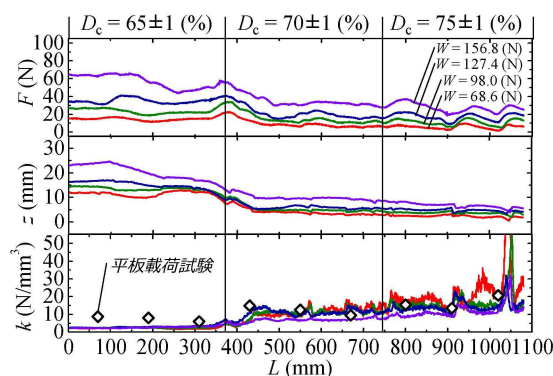


図 12 車輪走行実験の結果

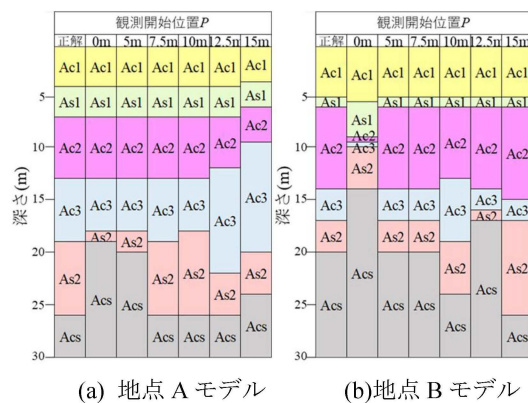


図 13 層厚推定結果の一例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 H. Suzuki, Y. Watanabe, T. Kobayashi, K. Iagnemma and S. Ozaki	4. 巻 7
2. 論文標題 Terramechanics-based investigation of grouser shape for rigid wheels: Comparison between rectangular and trapezoidal grouser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cogent Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小林泰三、土佐信一、竹添明生、池永太一、松浦良信、高森太郎、長谷川裕員	4. 巻 68(12)
2. 論文標題 3次元データを活用した新しい締固め管理技術の提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 15-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 安福規之、石蔵良平、小林泰三、谷山 充	4. 巻 48(11)
2. 論文標題 打撃エネルギーを利用したバックホウによる盛土法面締固め技術とその適用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 基礎工	6. 最初と最後の頁 92-95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hashiguchi Nobuki, Kodama Kota, Lim Yeongjoo, Che Chang, Kuroishi Shinichi, Miyazaki Yasuhiro, Kobayashi Taizo, Kitahara Shigeo, Tateyama Kazuyoshi	4. 巻 20(13)
2. 論文標題 Practical Judgment of Workload Based on Physical Activity, Work Conditions, and Worker' s Age in Construction Site	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3786~3786
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s20133786	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 和田康志、小林泰三	4. 巻 40
2. 論文標題 車輪の走行応答計測による地盤の剛性評価手法の構築に向けた基礎的検証実験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 テラメカニックス	6. 最初と最後の頁 7-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

1. 著者名 小林泰三	4. 巻 34
2. 論文標題 3次元データを活用した盛土の締固め管理手法の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JACIC情報	6. 最初と最後の頁 39-43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

1. 著者名 小林泰三	4. 巻 第120号、34(1)
2. 論文標題 3次元データを活用した盛土の締固め管理手法の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JACIC情報	6. 最初と最後の頁 39-43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

1. 著者名 寺本昌太、小林泰三	4. 巻 2
2. 論文標題 畳み込みニューラルネットワークを用いた盛土の締固め品質評価手法に関する基礎的研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AI・データサイエンス論文集	6. 最初と最後の頁 785-791
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceiii.2.J2_785	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

[学会発表] 計8件 (うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Y. Wada and T. Kobayashi
2. 発表標題 A method for estimating subgrade reaction modulus via measurement of wheel-terrain interactions
3. 学会等名 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Hashiguchi, Y. Lim, S. Kuroishi, S. Miyazaki, S. Kitahara, T. Kobayashi, K. Tateyama and K. Kodama
2. 発表標題 Real-time judgement of workload using heart rate and physical activity
3. 学会等名 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮原 悟、財津駿平、松浦 敦、小林泰三
2. 発表標題 3次元測量技術を活用した地盤構造の逆解析の高度化に向けた基礎的研究
3. 学会等名 Kansai Geo-Symposium2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田康志、小林泰三
2. 発表標題 車輪の走行状態計測による地盤の剛性評価手法の提案に向けた実験
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林泰三、竹添明生、池永太一、松浦良信、土佐信一、長谷川裕員、河西啓次
2. 発表標題 自動追尾TS を活用した土の締固め圧縮量計測と品質管理手法の提案
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林泰三、土佐信一、西川祐矢、池永太一
2. 発表標題 3次元測量技術を活用した土の締固め管理手法の提案
3. 学会等名 建設施工と建設機械シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮原 悟、財津駿平、松浦 敦、小林泰三
2. 発表標題 3次元測量データを活用した地層構造の逆解析手法の構築に向けた基礎的研究
3. 学会等名 土木情報学シンポジウム（土木学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺本昌太、小林泰三
2. 発表標題 深層学習を用いた土の締固め品質評価手法に関する基礎的研究
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

[図書] 計0件

[出願] 計1件

産業財産権の名称 演算装置、及び、モデル生成方法	発明者 小林泰三	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、未公開	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

[取得] 計0件

[その他]

—

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

[国際研究集会] 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------