

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 16 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00787

研究課題名（和文）コアレス地盤調査法の開発とデジタル地盤工学への挑戦

研究課題名（英文）Development of core-less ground investigation method and challenge to digital geotechnical engineering

研究代表者

水谷 崇亮（Mizutani, Takaaki）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・グループ長

研究者番号：70371763

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、従来のサンプリングが困難な条件下において地盤調査を高度化、省力化することを目的として、原位置地盤内において地盤のコアを採取する代わりに、コアのCT画像を取得する原位置デジタルサンプリング法を新たに開発し、実証試験や得られたデータの解析からその実現可能性を検証した。その結果より、原位置デジタルサンプリング法の重要な各工程が連続的に実施可能であり、得られたCT画像よりコアの特徴（粒子形状や堆積構造）を可視化できることを示した。これらの結果は、本研究でめざすコアレス地盤調査や原位置デジタルサンプリング法の実現するものであり、その実現に向けて大きな進歩となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CT画像に基づく地盤や岩盤の工学特性評価に関する研究が、撮影技術や多様な解析技術（画像解析、数値解析、機械学習など）の顕著な発展とともに、国内外で活発に進められている。これらの研究は現地でサンプリングをしてコアを採取してくる、あるいは実験室で供試体を再構成し、室内の装置で試料を撮影することを前提としているのに対して、本研究では原位置かつ地盤内でコアを撮影することを試みるものである。これが実現すれば、従来のサンプリング法の適用やサンプルリターンが困難であった場所などを対象として、地盤調査の高度化や省力化が期待され、その成果は関連分野のパラダイムシフトにつながるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, for ground investigation under conditions where conventional sampling is difficult, a new sampling method named “in-situ digital sampling method”, in which instead of taking a core of the ground in the in-situ ground, an in-situ CT image of the core is acquired, was developed, and its feasibility was verified through demonstration tests and analysis of the obtained data. As a result, it was shown that each important step of the in-situ digital sampling method can be performed continuously, and the features of the core (particle shape and sedimentary structure) can be visualized from the obtained CT images. These results demonstrate the concept of the coreless ground investigation and in-situ digital sampling method aimed at in this research, and are a great step towards their realization.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤の微視構造 原位置X線CTスキャン 画像解析 デジタル地盤工学 ボーリング・サンプリング

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

小型化・可搬化が進む X 線技術によって、近年では医者が装置を持ち込んで在宅でのレントゲン検査が可能となっており、特に外出困難な患者にとっては不可欠な技術となっている。土木工学で扱う地盤は、まさに外出困難な患者であり、対象地盤によってその特性は様々である。これまでコアの採取方法が重要な研究テーマとなってきたが、地盤種別(特に粘着性のない砂礫地盤)によっては依然としてコアの採取が技術的に難しいことや、特殊な地盤環境(例えば汚染土、海底地盤、惑星など)ではコアを持ち帰ること自体に問題が生じる。在宅レントゲン検査の如く、現地で地盤を X 線 CT スキャンし、持ち帰った画像データから地盤の工学特性を詳細に知ることができれば有効な課題解決策となる。

また、高品質なコアを採取できた場合でも、破壊試験を前提とした従来の土質試験法では、一度試験を行うと、微視構造(各土粒子の形状やその配列構造、間隙構造)の等しいフレッシュなコアを再び準備することはできないため、地盤の多様な力学パラメータを知るためには、微視構造の違いを無視して、土質、間隙比の等しい供試体を等価な供試体とみなして試験を行う必要がある。この時、コアが均質な連続体とみなせない、特に砂礫地盤のように粒径が大きい場合には、粒状体としての挙動が顕在化し、過去の堆積履歴の違いや微視構造の再現性が力学特性やそのばらつきに有意な影響を与える。原位置地盤の CT 画像からコンピューター上でデジタルコアを作製し、画像解析や数値解析のほか、デジタルコアを 3D プリントしたクローン供試体による疑似的な土質試験が可能となれば、従来のような実際のコアを使った各種土質試験に代わって、微視構造を再現した高度な工学特性評価が可能となる。

近年、廃炉地盤工学、海底地盤工学、宇宙地盤工学などと称されるように、エネルギー資源の乏しい日本において新たな資源開発や世界的な宇宙開発の進歩とともに地盤工学が担う役割は確実に大きくなっている。従来のサンプリングが困難な状況下で、いかにして地盤情報を取得し、有効活用するかは地盤工学において重要な分野課題と言える。実際のコアを必要とせず、原位置地盤の CT 画像から工学特性を評価するコアレス地盤調査法は、この課題解決に迫る革新的な方法で、従来の地盤調査の概念を覆す大きなブレークスルーとなる。

2 . 研究の目的

前述 1 . のコアレス地盤調査法(図 1)を確立するために、本研究では以下 3 つの主要な技術の開発が必要と考えた。

原位置で地盤を X 線 CT スキャンする技術 : X 線 CT スキャナを地中に挿入し、サンプラー内の地盤試料を撮影するボーリング技術(以下、原位置デジタルサンプリング法という)である。

CT 画像からデジタルコアを作製する技術 : 得られた CT 画像を で利用可能なデジタルデータに変換する技術であり、コンピューター上で微視構造を再現したデジタルコアを作製する技術である。

デジタルコアから工学特性を評価する解析技術 : 得られたデジタルコアから物理特性を評価するための画像解析技術や、力学特性を評価するための数値解析技術である。

はこれまで研究例や実施例がなく、当研究分野では初めての試みとなる。CT 画像を用いた、の試みにはこれまでも国内外で数々の研究成果があり、スキャン技術の進歩とともに CT 画像を元データとした画像・数値解析による解析的評価、3D プリント技術と組み合わせた実験的評価が可能になってきている。本研究では、コアレス地盤調査法の実証を目的として、これら一連の技術開発を行うとともに、モデル地盤を対象とした実証試験を実施した。

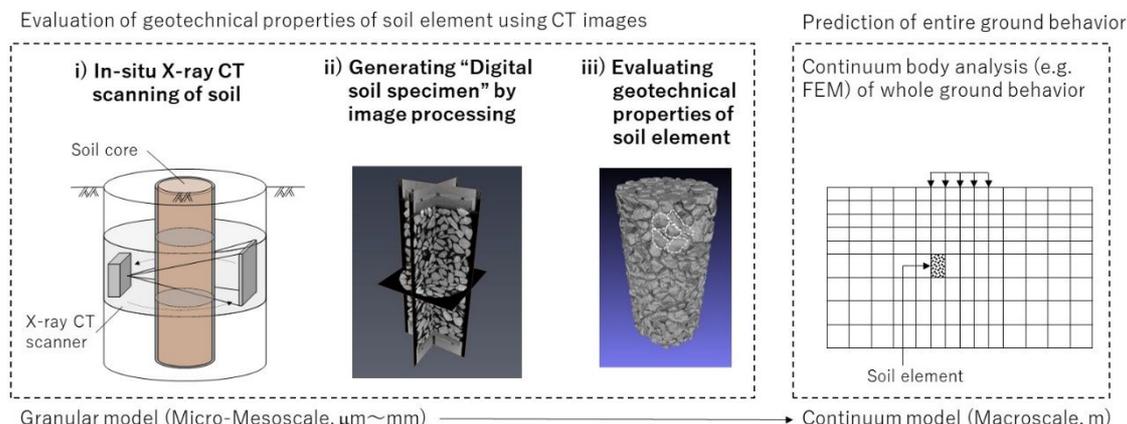


図 1 コアレス地盤調査法による地盤評価のフレームワーク



### (3) 画像処理による地盤構造の評価と利用

前述の実証試験により得られた礫地盤の CT 画像を対象として画像処理を行い、当スキャン方法の撮影性能を検証した。ここで画像処理の主な目的は、異なる深度の CT 画像を接続し、連続的なコアの 3 次元画像を作成すること、CT 画像をもとに数値解析モデルや 3D プリント用モデルを作成するために礫粒子をセグメント化することである。これらの目的を達成するにあたり、主に ノイズ除去、二値化、画像接続、セグメント化の画像処理を行った。では、メディアンフィルターや Relative Total Variation を用いたノイズ除去を行った。では、礫の土粒子密度およびコアの乾燥密度から算出される粒子体積と、二値化処理後の画像から算出される粒子体積が等しくなるように輝度値の閾値を定めた。では、オーバーラップしていると考えられる領域の水平方向の二値画像を用いて、異なる深度の 2 枚の画像から差分画像を求め、最も差が小さい、すなわち撮影深さが最も近い位置を検出した。画像接続では、この検出された位置を境界として、3 つのデータセットを組み合わせた。では、接続された画像に対して Watershed によるセグメント化を行った。

## 4. 研究成果

原位置デジタルサンプリング法に必要な装置の開発および実証試験を通じて、以下の研究成果を得た。

### (1) 模型地盤を対象とした原位置デジタルサンプリング法の実証試験

施工実験では、サンプリングチューブの挿入に課題(チューブ先端が閉塞し、途中で挿入不可となった)が残ったものの、目標とした最大掘削深 800mm まで掘削マシンを挿入することができた。また、掘削深 700, 750, 800mm ではコアのスキャンを実施し、CT 画像を取得することができた。図 4 は、挿入中の掘削マシンの鉛直変位と鉛直荷重の時刻歴を示している。掘削深 700mm における 1 回目のスキャンまでおよそ 25 分をかけてほぼ一定の掘削速度による掘削が可能であった。2, 3 回目のスキャンに至る掘削では、鉛直荷重の急増が見られたが、掘削リグの許容荷重内で問題なく掘削を進めることができた。

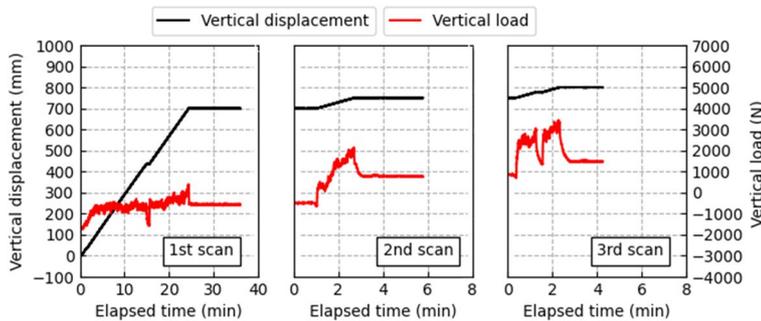
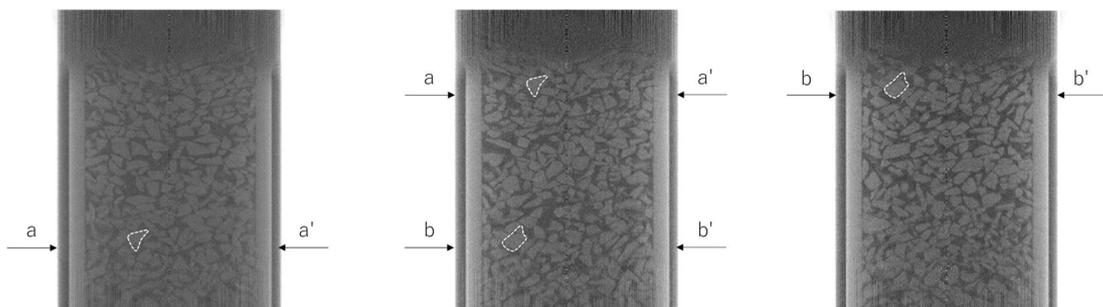


図 4 掘削マシン貫入時の鉛直変位，鉛直荷重の時刻歴

### (2) 画像処理による地盤構造の評価と利用

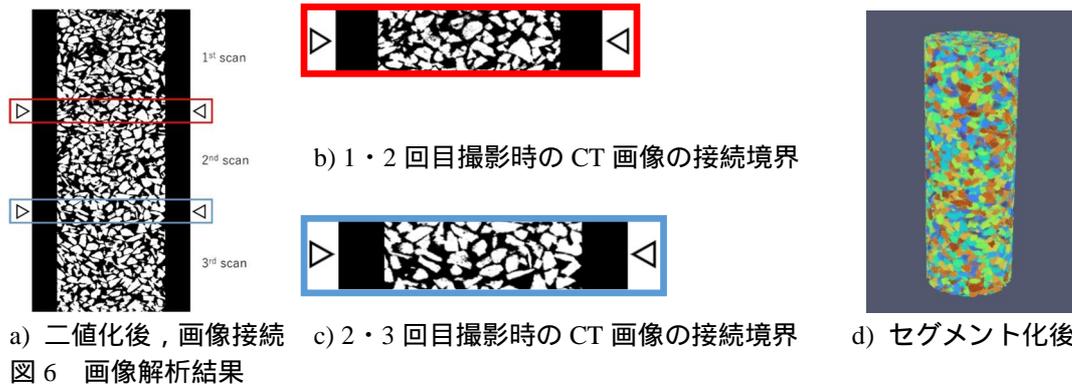
図 5 は、施工実験において前述 3 深度でスキャン、再構成された CT 画像の鉛直断面を示している。図より、いずれの深度においてもサンプリングチューブ内の礫粒子およびその堆積構造が明瞭に確認できる。また、鉛直方向の撮影範囲がオーバーラップするように異なる 3 深度でスキャンしたため、各図中白点線で囲まれた粒子のように、1 回目のスキャンで得られた CT 画像(図 5a)中 a-a' 上の粒子は、次のスキャンによる CT 画像(図 5b)中の上方で発見することができる。2 回目、3 回目の CT 画像(図 5b および図 5c)中の b-b' 上の粒子も同様の位置関係である。



a) 1 回目撮影 (掘削深 700mm) b) 2 回目撮影 (掘削深 750mm) c) 3 回目撮影 (掘削深 800mm)

図 5 CT 画像例

図 6 は、前述の画像処理結果を示している。図 6a より、異なる 3 深度の CT 画像を接続したことから、コア径 55mm に対して、長さ約 155mm の連続したコアの CT 画像が作成されていることがわかる。境界断面付近をズームした図（図 6b および図 6c）より、図中 印で示される境界断面付近でも不連続な様子は見られない。すなわち、各スキャンの間で行われる掘削マシンによる掘削がコアの堆積構造の乱れに与える影響は少ないことがわかる。図 6d はセグメント化および各粒子を色別に示した状態の 3 次元画像を示している。図より各粒子が識別されている様子がわかる。



### (3) 研究総括 - 今後の課題と展望 -

本研究では、原位置地盤内において地盤の CT 画像を取得する原位置デジタルサンプリング法の開発を行い、実証試験や得られたデータの解析からその実現可能性を検証した。その結果、原位置デジタルサンプリング法の核となる工程、すなわち 撮影対象地盤を保護するためのサンプリングチューブの挿入、CT スキャナを内蔵した掘削マシンの挿入、地盤内におけるコアのスキャンを連続的に実施可能であることを示した。また、得られた CT 画像の処理により、地盤構造（粒子形状や堆積構造）を可視化することができた。これらの結果は、研究開始当初の目標として掲げたコアレス地盤調査や原位置デジタルサンプリング法の概念を実証するものであり、その実現に向けて大きな一歩であると考えられる。以下では、本研究で未解決となっている課題や、今後の展望について記載する。

#### ✓ 対象地盤・目的の選定と装置・方法の最適化

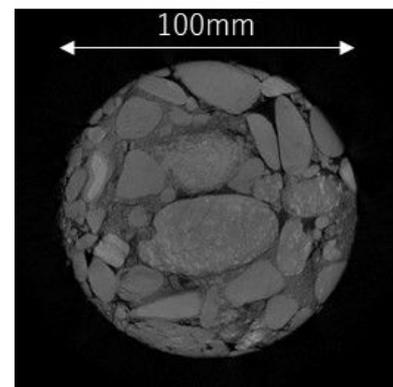
本研究では、原位置デジタルサンプリング法の概念実証を最優先に開発を進めた。そのため、現状での掘削性能や撮影性能を踏まえて、得られる CT 画像から粒子形状や堆積構造を可視化し易ように、乾燥礫地盤を対象として実証試験を実施した。一方、実際の礫地盤を対象とした場合、大きな礫粒子が形成する粒子骨格の間隙には、可視化できないような小粒子（マトリクス粒子）が存在することが多いこと（図 7）、地下水の影響により画像が不鮮明になるほか、装置の防水対策なども必要となることが考えられる。また、より深い位置での掘削や、強固な地盤（あるいは岩盤）を対象とするには、現在の掘削方法や掘削性能の見直しが必要になると考えられる。今後、当方法の対象地盤や目的（粒子形状などマイクロな構造まで可視化する / できるのか、平均的な密度の分布などマクロな情報が必要なのかなど）に応じて、装置や方法を最適化することが必要となる。

#### ✓ マトリクス粒子の影響、評価

実地盤には様々な粒径の粒子が含まれており、前述の通り礫地盤のように大きな粒子が骨格を形成する地盤でも、骨格粒子間にはマトリクス粒子が存在し、地盤の工学特性に影響を及ぼすことが考えられる。CT 画像からこのような地盤の工学特性を評価する場合には可視化できる礫粒子だけでなく、可視化できないマトリクス粒子の影響を適切に評価する必要があり、そのため解析手法（DEM や MPM、またはその連成など）の開発が不可欠である。

#### ✓ 地盤調査の高度化、省力化

開発の初期段階である現在ではコアの回収を前提としているが、今後装置の最適化や各種解析方法（画像解析、数値解析、機械学習等）と組み合わせることにより、コアの回収を減らす（あるいは不要とする）、画像診断や画像のデータベース化により必要な時点で多様な評価が可能になるなど、地盤調査の高度化、省力化が期待される。



Typical gravel soil

図 7 礫地盤コア CT 画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nakamura Keita, Matsumura Satoshi, Mizutani Takaaki	4. 巻 403
2. 論文標題 Taylor particle-in-cell transfer and kernel correction for material point method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering	6. 最初と最後の頁 115720 ~ 115720
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cma.2022.115720	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松村聡, 近藤明彦, 水谷崇亮, 小濱英司, 小林泰三, 米岡威, 武政学, 齋藤典生
2. 発表標題 X線CT技術を利用したデジタル地盤工学への挑戦
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 近藤明彦, 松村聡, 中村圭太, 水谷崇亮, 小濱英司, 小林泰三, 武政学, 小林陵平, 和田賢士
2. 発表標題 原位置デジタルサンプリング法の開発～画像取得編～
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松村聡, 近藤明彦, 中村圭太, 水谷崇亮, 小濱英司, 小林泰三, 武政学, 小林陵平, 和田賢士
2. 発表標題 原位置デジタルサンプリング法の開発～画像処理編～
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小林陵平, 武政学, 松村聡, 近藤明彦, 中村圭太, 水谷崇亮, 小濱英司, 小林泰三, 和田賢士
2. 発表標題 原位置デジタルサンプリング法の開発～地盤掘削編～
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 地盤試料の探査装置及び探査方法	発明者 近藤明彦ら13名	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-192423	出願年 2020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
研究分担者	中村 圭太  (Nakamura Keita)  (00827347)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・主任研究官    (82627)	
研究分担者	小林 泰三  (Kobayashi Taizo)  (10380578)	立命館大学・理工学部・教授    (34315)	
研究分担者	松村 聡  (Matsumura Satoshi)  (20748305)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・主任研究官    (82627)	
研究分担者	小濱 英司  (Kohama Eiji)  (80371764)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・グループ長    (82627)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	近藤 明彦  (Kondo Akihiko)  (80755893)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・主任研究官    (82627)	

	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
研究協力者	米岡 威  (Yoneoka Takeshi)		基礎地盤コンサルタンツ
研究協力者	武政 学  (Takemasa Manabu)		基礎地盤コンサルタンツ
研究協力者	小林 陵平  (Kobayashi Ryohei)		基礎地盤コンサルタンツ
研究協力者	和田 賢士  (Wada Kenji)		つくばテクノロジー

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