

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02242

研究課題名（和文）Inventive concepts of 3D geo-stress sensing device using equivalent resistance of conductive particles subjected to contact pressures

研究課題名（英文）Inventive concepts of 3D geo-stress sensing device using equivalent resistance of conductive particles subjected to contact pressures

研究代表者

ピバットボンサー ティラポン（PIPATPONGSA, Thirapong）

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10401522

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、導電性材料としてステンレス球と導電性ゴムの両方を用い、新たな多方向応力測定センサーを開発した。要素実験とDEM（個別要素法）による数値解析を行い、接触圧力を受ける導電性粒子の等価抵抗値から適切な形状や材料を特定した。その結果、電気比抵抗トモグラフィー（ERT）の基本概念を使用し、3Dプリンターを活用した創意工夫を重視したジオストレス感知器を開発した。応力の方向と大きさを同時に測定できるように、三主応力試験機の性能検証装置を製作し、載荷・除荷実験に利用した。最後に、ERTを用いた円柱型導電性ゴムから求めた応力テンソル成分を一軸圧縮試験、割裂引張試験および遠心模型試験で検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気比抵抗トモグラフィー（ERT）の原理を用い、表面電極を検知部とすることで使用した対象物の内部導電率分布が推測できる導電性ゴムセンサーを開発し、応力状態を可視化することに成功した。円柱体ゴムを使用することで、ゴムの形状やサイズを自由に調整でき、様々な状態に応用が可能となった。センサーの初期状態と応力変化の導電率の差の総和が応力変化の応答となる不変量であることを確認した。円の直径方向の平面において、センサーを複数のエリアに分割し、各エリアの導電率総和から応力方向の決定法を考案し、応力状態の推定を可能にした。これらの理論や方法を使用することで、多次元応力を簡単に測定できるようになると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, a novel sensor for measuring multi-directional stress was developed, using both stainless spheres and conductive rubber as the conductive materials. Elementary experiments and numerical analyses using DEM (discrete element method) were performed to identify suitable shapes and materials based on the equivalent resistance of conductive particles under contact pressures. Consequently, the research focused on a geo-stress sensing device that employed the fundamental concepts of electrical resistivity tomography (ERT) and emphasized the inventive processes utilizing 3D printer. To enable simultaneous measurement of stress direction and magnitude, a three-dimensional stress testing device was created and employed for loading and unloading experiments. Finally, the stress tensor components determined from the cylindrical conductive rubber were validated through uniaxial compression tests, splitting tensile tests, and centrifugal model tests.

研究分野：地盤工学

キーワード：応力測定装置 電気抵抗 電気比抵抗トモグラフィー 電気抵抗率トモグラフィー 接触力学 多次元応力 三主応力試験機 個別要素法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 3次元応力場を測定することが可能となれば、地盤工学分野における様々なリスク低減につながることを期待されている。本研究で使用する感圧導電性粒子は、導電性粒子同士の接触面積の増加に従い、電気抵抗が減少するというヘルツの接触力学の基本概念に従うことが確認されている。さらに、ゲージ率を決定するための等価抵抗を理論的に求めることが可能である。これまでに、測的装置の中に詰め込む粒子の形状としては、主に球形の粒状体を均一に詰めるために、面心立方格子 (FCC) 構造などが利用されてきた。しかし、今回の方針としては、測定誤差による検討を行うためにも、形状の違いを考慮した検討が必要である。今後は、土圧計としてプロトタイプ製作を進め、模型実験や現場に使用する展開を見込む。

(2) 荷重・抵抗関係には一貫性のある抵抗値変化の方向依存性があり、荷重・抵抗関係の傾きの大きさと供試体内の各方向の鋼球群にかかる平均応力との間に強い正の相関が得られたため、抵抗値変化率と平均応力の比率を極座標において照らし合わせることで、荷重の方向と絶対値の分析方法を開発した。プロトタイプ形状の特性を理解するため、真三軸載荷装置を設計し、三軸圧縮試験による力学的な特性を検討する。更に、個別要素法 (DEM) を用いて、ミクロ的な構造を把握する。

(3) 真三軸圧縮試験機は、硬質岩石試料が破壊するような比較的大きな応力、ひずみ、温度などを制御して力学的特性を測定するために作製されている。しかし、多次元応力測定装置のキャリブレーションが可能な装置はこれまでに開発されていなかった。また、5台あるいは6台のオイルシリンダーや油圧ジャッキを用いて、押え板を介して圧力をかけて供試体を圧縮する機構である。この機構では、供試体がある方向に圧縮しても押え板同士が衝突せず、また軸変位によって生じる凶心の変化に追従して載荷軸の位置が調整されるという特徴がある。その反面、装置全体が大型化し、高重量、高価、という問題点が考えられる。

(4) 電気抵抗率トモグラフィ (ERT: Electrical Resistivity Tomography) は、表面電極から測定された電圧データを使用して、対象物内部の導電率やインピーダンスの分布を推定する非侵襲的な内部可視化技術である。従来の内部可視化技術である X 線 CT と比較し、放射線源が不要であり、体内に注入される電流量が少ないことから、経済的かつ安全な技術とされている。マクスウェル方程式に基づくこの技術は、ここ数十年でセンサの分野で広く応用されている。そして、導電性ゴムは圧力が加わると体積圧縮に応じて導電率が変化する。この特性を活かすことで、応力の大きさおよび方向を計算することが可能である。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、従来困難であった 3 次元応力場の測定を可能にする装置を開発することである。感圧導電性粒子の集合体に荷重をかけた際の電気抵抗値の変化から、荷重の大きさ及び方向を測定することで、感圧導電性粒子群に載荷・除荷を行う基礎的な実験を行う。感圧導電性粒子とは、圧力に応じて弾性的に形状が変化し、導電率が高い低抵抗の粒子のことを指す。従って、粒子群の接触面積変化による全体の体積変化を解明するために、接触力学に基づく理論開発により、感度と精度を高める目的をしている。

(2) 金属ステンレスボールの弾性変形と導電率が圧力に応じて変化する円筒形のジオストレス感知器が提案されてきた。ステンレスボールに圧縮荷重がかかると、ステンレスボール同士の接触面積が増減すると考えられる。したがって、この研究は、DEM を用いて、荷重の変化と接触面積との関係を調査することを目的としている。

(3) 本研究では、3 方向主応力制御型のジオストレス感知器キャリブレータを新たに開発する。このキャリブレータは、立方体形状の樹脂材料などを使用し、弾性変形を示すような比較的小さな変位レベルでの応力テンソル測定を目的とする。供試体の載荷には、3 つの電動アクチュエータを設置し、反力用のアクチュエータは省略して固定板を設けることで、装置全体の小型化、軽量化、およびコスト削減を実現している。このため、電源さえあれば装置を設置する場所を選ばずにキャリブレーションを行う可能である。また、供試体に内包されたジオストレス感知器および抵抗測定センサを装置外部から載荷中に制御できるため、各面の載荷板の間に微小な隙間を設けて、リード線が通る構造となっている。3 台のアクチュエータを独立に制御することで、一軸から三軸まで様々な応力履歴を自在に与えることができ、その際に生じる主応力成分や軸変位だけでなく、電気抵抗の経時変化も測定できる。

(4) 地盤内応力の計測において、極めて重要な項目である土圧計測は、最も困難な測定の 1 つとされている。現在、一般的に用いられている土圧計は、1 つで 1 方向のみしか計測できない。そのため、1 点に複数の土圧計を設置して主応力を計測することは困難である。こうした背景を踏まえ、導電性ゴムと電気抵抗率トモグラフィを組み合わせた新たな土圧計測技術を開発することを目的とし、研究を進めてきた。本報告では、その結果について報じる。得られた電率分布を円形や円柱形などのモデル化された対象領域で表現するために、導電性ゴムと ERT を用いた研究を行う。高導電性ゴムに圧力が加わると体積圧縮に従い導電率が低下する関係を活用し、応力の大きさおよび方向を計算する。

3. 研究の方法

本研究では、球形の粒状体構造以外の検討を考慮し、プロトタイプの特性を検討するため、個別要素法 (DEM) を用いて、ミクロ的な構造を把握する。また、三軸圧縮試験による力学的な特性の検討も行う。さらに、現場サイトを想定した遠心載荷模型実験など、複合的なアプローチを取ることで、形状の違いによる測定誤差を定量的に評価し、3次元応力場を測定する装置の改良を試みる。そして、開発したキャリブレーションは、材料の弾性域のみを対象とするため、応力とひずみが比較的小さく、想定される図心の変化も無視できるほど小さい。そのため、載荷用の電動アクチュエータの台数を3台まで減らすことができ、従来の真三軸圧縮試験機における問題点は解消される。また、ERTを用いた導電性ゴムの円柱型応力センサを開発し、デモンストレーション実験、遠心模型実験、一軸圧縮実験および割裂引張試験を通じて、載荷方向と大きさを同時に測定できることを検証する。

4. 研究成果

(1) 本研究では、新たに開発した三主応力試験機の機能を評価するために、発泡スチロールブロックを用いた性能検討を行った。一軸載荷試験と三軸同時載荷試験を行い、それぞれの試験からヤング率とポアソン比を求めた。本試験機は、角柱サンプルに対して、X軸、Y軸、Z軸の三軸載荷が可能な機能を有する試験機本体、制御装置、データロガー及び制御データ記録用ノートPCで構成されている。従来の真三軸試験機とは異なり、本試験機は材料の弾性範囲の変形のみを対象としている。載荷駆動用電動アクチュエータは、三軸の載荷板側に三台取り付け、それぞれに変位計が取り付けられている。荷重計は載荷板と反力板にそれぞれ取り付けられている。角柱サンプルを装置の中央領域に配置するための機構が備わっている。本装置の性能評価として、発泡スチロールブロックのヤング率を測定するための一軸載荷実験をサンプルの各軸方向に対して実施した。

(2) 算出された各正規化較正時ゲージ率をゼロ点からの距離として極座標系にプロットすると、影響曲線が得られる。影響曲線は、圧力センサに所定の方向から荷重が載荷された状態において、中心軸に対して垂直な方向に生じる応力成分の総和に対するそれぞれの方向における応力成分の割合を示すものである。割裂引張試験における円筒形ジオストレス感知器の影響曲線は、DEMシミュレーションによる接触力の分布解析を算出することで検証した。

(3) ERTと導電性ゴムに圧力が加わると、体積圧縮に従って導電率が変化する性質を利用することで、応力の大きさおよび方向を計算できる。そこで、円柱型の高導電性ゴム応力センサを開発した。円柱型センサの上面を圧縮した際の導電率再構成画像が示されている。左側の画像は、円柱型センサを圧縮している状況を示しており、真ん中の画像は測定した電圧から導電率分布を再構成した画像である。

(4) 導電性材料として導電性ゴムを用いて、新たな多方向応力測定センサを開発した。導電性材料の選定と基本的な動作を確認するための基礎実験を行った。応力方向推定を目的とした円柱体導電性センサを治具の中に入れた状態での載荷除荷実験および土槽内にセンサを埋設した遠心模型実験を実施した。遠心模型実験の結果を用いて、ERTから得られた導電率を利用して、円形断面を8つのエリアに分割した。

(5) 一軸圧縮試験機を用いて円柱型応力センサの軸方向に対する載荷除荷実験を行った。試験機とセンサの接触部分にはテープを貼り付けて通電を避け、載荷除荷サイクルを4回行った。導電率は荷重によって変化し、異なる高さの断面では、わずかに異なる導電率が観測された。本研究では、荷重の変化に応じて、導電率が変化するという仮定のもと、領域全体の平均導電率変化を測定対象としている。各サイクルの経路はおおむね一致しており、実験の再現性が確認された。ただし、ゴムは完全な弾性体ではないため、荷重を受けた後に僅かな残留変形があり、ヒステリシスが観測された。

(6) 一軸圧縮試験機を用いて、円柱型センサの半径方向に対する割裂引張試験を行った。治具を使用して、円柱型センサを固定し、半径方向に対して載荷除荷を行った。本研究では、荷重の変化に応じて導電率が変化するものと仮定し、領域全体の平均導電率変化を測定対象とした。高導電性ゴムセンサーの平均導電率と荷重・変位との間に相関関係が存在することが確認できた。また、高導電性ゴムは完全な弾性体ではないため、荷重を受けた後に僅かな残留変形が残ることも明らかになった。

(7) 電気抵抗トモグラフィー (ERT) を用いた導電性ゴムの円柱型応力センサを開発し、デモンストレーション実験、遠心模型実験、一軸圧縮実験および割裂引張試験を用いて、載荷方向と大きさを同時に測定できることを検証した。載荷方向や応力成分を求める方法について考察した結果、以下に得られた知見をまとめた。

内部可視化技術であるERTの原理を用い、表面電極から対象物の内部導電率分布が推測できる導電性ゴムセンサーを開発し、応力状態を可視化することに成功した。円形ゴムシートや円柱体ゴムを使用することで、ゴムの形状やサイズを自由に調整し、様々な状態に応用が可能となった。

センサの初期状態と応力変化の導電率の差の総和が、応力変化の応答となる不変量であることを確認した。この結果は、センサのキャリブレーションにおける有効性を示すことができた。また、円の直径方向の平面において、センサをいくつかのエリアに分割し、そのエリアごとの導電率総和から応力方向を推定する方法を考案し、多次元の応力状態の推定を可能にした。

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 高橋 邦夫, 升本 尚輝 | 4. 巻 39 |
| 2. 論文標題 重力下の平面上液滴(Sessile drop)形状から図を用いて表面張力と接触角を同時決定する非反復的手法 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 溶接学会論文集 | 6. 最初と最後の頁 32-38 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2207/qjws.39.32 | 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10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 ピパットボンサー・ティラボン, 白石啓太, 肥後陽介, 川野健一, 須賀原慶久 |
| 2. 発表標題 感圧導電性鋼球を用いた二次元主応力方向の測定原理の開発 |
| 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 間宮基貴, 白石啓太, ピパットボンサー・ティラボン, 肥後陽介, 川野健一, 須賀原慶久 |
| 2. 発表標題 ステンレス鋼球を用いた抵抗値変化の異方性による二次元載荷方向の推定方法 |
| 3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Z. Lu, T. Pipatpongsa, Y. Higo, K. Kawano, N. Sugahara |
| 2. 発表標題 Pyramid segmentation for load measurement based on electric contact theory |
| 3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Z. Lu, T. Pipatpongsa, Y. Higo, H. Nagatani, K. Kawano, N. Sugahara |
| 2. 発表標題 3D geostress measurement based on electric contact theory |
| 3. 学会等名 第15回岩の力学国内シンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 筒井爽人, 陸紫瑞, ピパットボンサー・ティラボン, 肥後陽介, 川野健一, 須賀原慶久 |
| 2. 発表標題 活性炭の電気抵抗と圧縮応力の特性に関する基礎的研究 |
| 3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Z. Lu, T. Pipatpongsa, Y. Higo, K. Kawano, N. Sugahara |
| 2. 発表標題 Tomography analysis for stress measurement method based on electrical conductivity distribution |
| 3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 ピパットボンサー・ティラボン, 間宮基貴, 肥後陽介, 永谷英基, 川野健一, 須賀原慶久 |
| 2. 発表標題 接触力学に基づく応力測定方法に向けた金属球集合体の分割方法 |
| 3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 筒井爽人, 陸紫瑞, ピパットポンサー・ティラボン, 肥後陽介 |
| 2. 発表標題 発泡スチロールブロックを用いた三主応力試験機の性能検討 |
| 3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Z. Lu, T. Pipatpongsa, Y. Higo, K. Kawano, H. Nagatani |
| 2. 発表標題 Distribution of contact forces in a cylindrical geo-sensing prototype determined by DEM simulations |
| 3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Z. Lu, T. Pipatpongsa, Y. Higo, K. Kawano, H. Nagatani |
| 2. 発表標題 Determination of contact areas in a cylindrical geo-sensing prototype using DEM simulations |
| 3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| 土木施工システム工学分野 https://cem.kuciv.kyoto-u.ac.jp/ |
|---|

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 | 肥後 陽介 (Higo Yosuke) (10444449) | 京都大学・経営管理研究部・教授 (14301) | |
| 研究分担者 | 木戸 隆之祐 (Kido Ryunosuke) (40847365) | 京都大学・工学研究科・助教 (14301) | |
| 研究分担者 | 高橋 邦夫 (Takahashi Kunio) (70226827) | 東京工業大学・環境・社会理工学院・教授 (12608) | |

| | 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 | 川野 健一 (Kawano Kenichi) | | |
| 研究協力者 | 須賀原 慶久 (Sugahara Norihisa) | | |

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 |
|---------|---------|