

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18904

研究課題名（和文）Realizability of 3D geo-stress sensing device via electrical resistivity under contact pressure in granular media

研究課題名（英文）Realizability of 3D geo-stress sensing device via electrical resistivity under contact pressure in granular media

研究代表者

ピパットボンサー 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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、既存の測定器では十分に測定することができない3次元応力テンソル成分の測定を可能にするデバイスを開発するため、感圧導電性粒子の高価値で斬新なアプリケーションを実現することを目指している。圧縮圧力下の粒状体における応力鎖構造および接触面積はマイクロフォーカスX線CTシステムにより明らかにすると同時に、金属球を用いて、応力誘起導電異方性による電気機械特性を調べる。本研究では感圧導電性粒子の原理を活用するため、製作および応用に関する開発にも取り組む。本研究の成果により、試作品のゲージ率校正を明らかにするとともに、粒子配置、加工梱包、電極の配置の最適化といった挑戦的問題が解決される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多次元方向の応力測定が可能な新しい原理の開発成果として、圧力に応じて弾性的に形状が変化し、導電性が大きい低抵抗の粒子である感圧導電性粒子を用いた応力計測を検討した。感圧導電性粒子群に荷重が加わると、感圧導電性粒子群全体の接触面積が大きくなり、群全体としての抵抗は減少すると考えられる。この考えのもと、感圧導電性粒子を用いて、ひずみゲージに替わる、座屈やたわみの問題がない新たな圧縮応力測定に関する原理を導き出せると考えた。

研究成果の概要（英文）：This research aims to realize high-value niche applications of pressure-sensitive conductive granules for developing the device enabling to measure three-dimensional stress tensors in which the existing devices cannot perform well. Electro-mechanical characteristics of stress-induced conductive anisotropy in metallic balls are explored while force chains and contact areas in granular media under applied pressure are investigated by micro focus X-ray CT system. Loading and unloading experiments in two-dimensional directions were carried out. It was confirmed that it shows anisotropy due to the resistance value change of the pressure sensitive conductive particle group depending on the direction of loading. The research also develops assembly and applications of conductive particles in three dimensions that lag behind the current advances in one-dimensional measurement. Challenging problems in optimization of confinement, packing processes, alignment of electrodes are solved.

研究分野：地盤工学

キーワード：粒状体 圧縮応力 接触力学 土圧計測 導電性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 土に関する計測のうち、土圧計測は極めて重要であり、最も難しい項目の一つとされている。そして、空気圧や水圧の測定とは異なり、土圧計や土圧計の設置場所の状態によって測定値が大きく異なることが一般に知られている。現在、土圧計として最も多く使用されているのは、受圧面が変位するタイプのダイヤフラム型土圧計である。ダイヤフラム型土圧計とは、受圧板の引張たわみをひずみゲージで測定して土圧に換算するという仕組みを用いているが、土圧計と周囲の土の相対的な剛性差や、ダイヤフラムと呼ばれる受圧板の変形によって土圧計周辺でアーチ作用や応力集中が起こることで誤差が生じてしまい、正確な土圧測定を必要とする場面で大きな問題となることが従来から指摘されている。

(2) 特に、多次元方向の土圧測定が必要な際には、多くの圧力計を干渉させずに同じ地点に入れる必要があるため、困難な作業となる。既存の地盤内3次元応力測定には、フラットジャッキ法、オーバーコアリング法、水圧破碎法およびアコースティックエミッション法などがあるが、これらは大掛かりな試験が必要になる、材料特性が大きく影響するといった難点を抱えている。

2. 研究の目的

(1) 既存のダイヤフラム型土圧計では、受圧面の引張たわみを計測する引張型のひずみゲージのメカニズムを用いている。これは、座屈を避けるためであり、圧縮型のひずみゲージは用いられていない。ダイヤフラムが引っ張られるためには、その面においてたわみが生じる必要があるが、そのたわみは土のアーチ効果や応力集中を誘発し、履歴現象を生じさせる原因となっている。そういった背景を踏まえて、本研究では、座屈やたわみの問題がない圧縮型測定器に関する未開発な原理を調べることを目的とし、感圧導電性粒子を用いて基礎的実験を行った。

(2) 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、導電性が大きい低抵抗の粒子のことを指す。応力鎖は、感圧導電性粒子のつながりを高めるので、電流は応力経路を辿る可能性がある。感圧導電性粒子群に荷重が加わると、感圧導電性粒子同士の接触面積は大きくなる。金属の抵抗値は、長さに比例し、断面積に反比例するので、感圧導電性粒子群全体の接触面積が大きくなると、群全体としての抵抗は減少すると考えられる。これらの考えのもと、感圧導電性粒子を用いて新たな圧縮応力測定の原理を導き出せると考えた。

(3) また、この原理を用いることで、多次元応力および主応力方向の測定も試みた。感圧導電性粒子による多次元応力測定の技術が実用化できれば、今まで測定方向ごとに土圧計を設置していた多次元土圧測定を一台の土圧計で担えるようになり、土圧計測に必要なスペースの縮小、測定の簡略化が期待される。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、感圧導電性粒子群に対する載荷荷重を大きくすると、感圧導電性粒子群全体の接触面積は大きくなり、抵抗値は減少することを確認するために、 μ フォーカスX線CTスキャンを用いて撮影を行い、画像の解析を行った。本実験では、感圧導電性粒子群に対しての載荷条件が異なるTestAとTestBの2ケースの撮影を行った。以下に、使用した装置や撮影方法、撮影条件などの概要を説明する。高分解能の画像を得るためには、材料の密度は小さいほうが好ましいため、本実験では感圧導電性粒子として、金属の中で比較的密度の小さいアルミ製の直径2mmの硬球を用いることとした。感圧導電性粒子群に対して載荷を行うための装置として、X線CTのワークテーブルに搭載することができるX線CT用の圧縮試験機を使用した。この圧縮試験機は、図1に示すように、供試体をセットするための円筒状の亚克力製のセルと、載荷をおこなうための載荷装置で構成されている。セルの供試体をセットする部分の直径は3.5 cmである。このセルに対して、感圧導電性粒子を出来るだけ密な状態になるように敷き詰めた。セルと載荷装置には、供試体からの排水を行えるように設計された管があり、そこにリード線を通して感圧導電性粒子群に対して通電できるようにした。TestAでは、載荷装置の載荷軸自体の質量18.6 Nが感圧導電性粒子群に載荷されている状態で、4端子測定法で抵抗値を測定した。応力に換算すると、19.3 kPaの荷重による載荷を行った。抵抗値の測定を終えたのち、撮影を行った。TestBでは、TestAでの撮影を終えた状態に、さらに100 Nの重りを載荷した状態で、TestAと同様に抵抗値を測定した。載荷軸と重りを合わせた質量を応力に換算すると、123.2 kPaの荷重による載荷を行った。抵抗値の測定を終えたのち、撮影を行った。

(2) 本実験では、2ケースの撮影を行う μ フォーカスX線CTとして、KYOTO-GEO μ XCT (TOSCANER-32250 μ hdk, 東芝ITコントロールシステム製)を用いた。2ケースの撮影は同じ条件で行った。本解析では、図2に示すように撮影で得られた二値化(感圧導電性粒子相と空気相の分離)画像をもとに、異なる載荷条件における感圧導電性粒子同士の接触面積を定量化した。取得したX線CT画像の解像度は36.463 μ mであった。TestAでは、19.3 kPaの載荷が行われた感圧導電性粒子群の抵抗値は、2.60 であった。接触面積の解析結果は5.97 \times 10³ mm²であった。TestBでは、123.2 kPaの載荷が行われた感圧導電性粒子群の抵抗値は、2.37 であった。接触面積の解析結果は6.11 \times 10³ mm²であった。

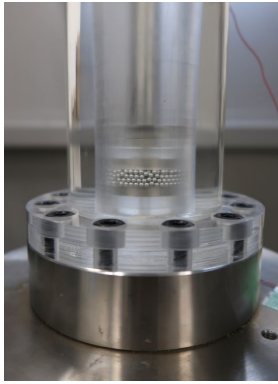


図1 X線CTスキャン用の圧縮試験機

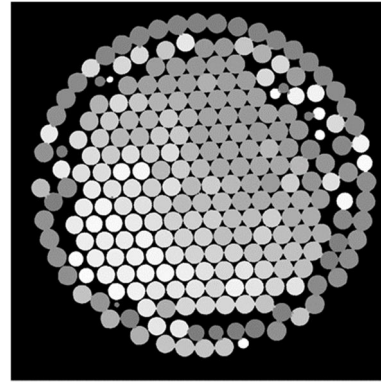


図2 CT撮影した粒子群

(3) 撮影結果から感圧導電性粒子群に対して载荷する荷重を大きくすると、感圧導電性粒子同士の接触面積は大きくなり、抵抗値は小さくなるという傾向が実際に検証できた。本研究で行うことの出来た撮影は、2 ケースの载荷条件の撮影のみであり、载荷の大きさ、抵抗値、感圧導電性粒子同士の接触面積の3つのパラメータの関係を求めるには至っていない。これらの関係を得るためには、载荷条件、感圧導電性粒子のサイズなどを変えて、より多くの撮影をしていく必要がある。その過程で、接触面積の解析結果を比較しながら、解析手法についても検討していく必要があると考えた。

(4) また、感圧導電性粒子群に一軸方向に荷重がかかったときの抵抗値の挙動を明らかにすることを目的として、様々な条件で1次元方向の载荷・除荷実験を行い、感圧導電性粒子群の荷重-抵抗関係、荷重-変位関係を調べた。ステンレス鋼球群に対し、1次元方向の载荷・除荷実験を行った。载荷と除荷を行うための装置として、圧密試験機を使用した。図3に示すように、4端子測定法に基づき、電源の出力電流を定電流2Aに設定し、鋼球群の両端の電圧値と垂直変位を測定項目とした。ステンレス鋼球には直径3mmのものを使用した。使用した鋼球群の質量は、Test1では219.17g、Test2とTest3では133.3gであった。载荷と除荷のサイクルはTest1では2回ずつ、Test2とTest3では4回ずつ行った。Test1では、鋼球群の固定を行わずに载荷・除荷を行い、Test2とTest3では、図4に示すように、鋼球群をエポキシ樹脂による固定を行って载荷・除荷を行った。

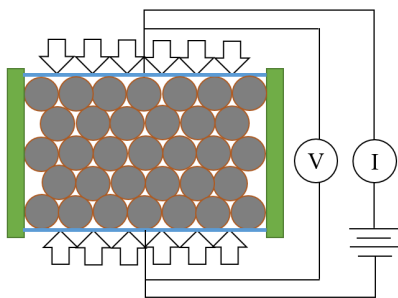


図3 用いた回路の概略図

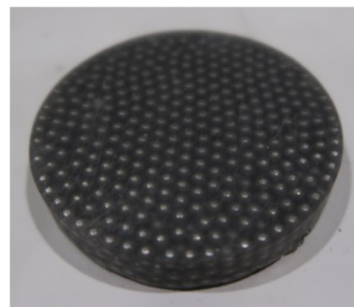


図4 エポキシ樹脂固定サンプル

(5) Test3の荷重-抵抗関係を比較するとTest2と同様に、綺麗な線形関係が得られた。圧密試験機に貼り付けたビニルテープの馴染もうまくいったため、Test2と比べて、载荷1回目の抵抗値の乱れは小さくなった。Test2と同様に、载荷過程と除荷過程の同じ荷重段階での抵抗値の差は十分小さい。Test3の方が全体のグラフの傾きの大きさは大きくなっており、近似直線の傾きの大きさは2.1倍程度大きくなった。また、抵抗値の初期値は小さくなった。このことから、エポキシ樹脂で固定を行う段階での感圧導電性粒子群の接触面積が大きくなっており、グラフの傾きには初期の接触状態が影響すると考えた。鋼球群に一軸方向に载荷・除荷を行った際の抵抗値の挙動を明らかにすることを目的として、様々な条件で1次元方向の载荷・除荷実験を行い、鋼球群の荷重-抵抗関係を調査した。鋼球群の固定を行わない場合には、载荷・除荷過程の繰り返しのループにおいて良い一致がみられたが、载荷・除荷過程の同じ荷重段階での抵抗値の差はみられたため、载荷・除荷を行うことで、鋼球同士の接触状態に変化が起きていると考えた。そこで、エポキシ樹脂で鋼球群の接触状態の固定を試みた結果、载荷・除荷過程の同じ荷重段階での抵抗値の差は十分に小さくなった。また、エポキシ樹脂による固定をする際の鋼球群の初期接触状態が、鋼球群の傾きに影響することも分かった。特に、10kPa程度の荷重をかけた状態でエポキシ樹脂による固定を行うことが適切であり、荷重-抵抗関係において十分な傾きを持つ線形関係が得られることを確認した。

(6) 1次元方向の載荷・除荷実験と異なる方向から力を加える二次元方向の載荷・除荷実験を行い、載荷方向による抵抗値の変化の仕方の異方性を調べた。本実験は、表1に示す条件のもとでTest a(図5)、Test b(図6)の計2ケースの実験を行った。以下に各ケースの実験条件、使用したサンプルについて説明する。電源の出力電流は、定電流1Aに設定した。Test aでは、端子を4つ持つサンプルを使用し、各荷重段階で方向A~方向Cの電圧値と電流値の測定を同時に行った。荷重をかける向きは図7に示す通りである。載荷・除荷のサイクルは、24Nまでのサイクルを1回、74Nまでのサイクルを1回、196Nまでのサイクルを3回、1569Nまでのサイクルを2回という順で行った。Test bでは、端子を4つ持ち、感圧導電性粒子群に仕切りを加えたサンプルを使用し、各荷重段階で方向A~方向Cの電圧値と電流値の測定を同時に行った。荷重をかける向きは図7に示す通りである。載荷・除荷のサイクルは、392Nまでを1回、1569Nまでを1回、1569Nまでを3回、という順で行った。

表1 実験条件

Test	計測方法	サンプル内の仕切りの有無	載荷・除荷サイクル(単位はN)
a	3方向同時計測	仕切りなし	0 24 0を1回, 0 74 0を1回, 0 196 0を3回, 0 1569 0を2回
b	3方向同時計測	仕切りあり	0 392 0を1回, 0 784 0を1回, 0 1569 0を3回

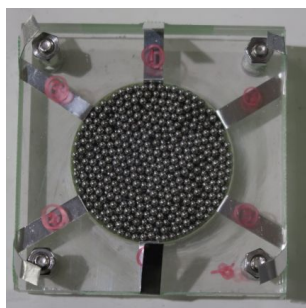


図5 二次元方向載荷・除荷実験で使用したTest aのサンプル

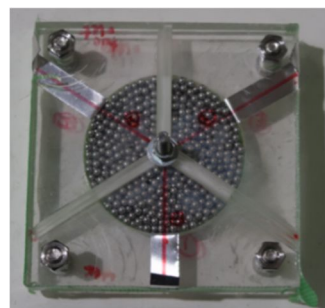


図6 二次元方向載荷・除荷実験で使用したTest bのサンプル

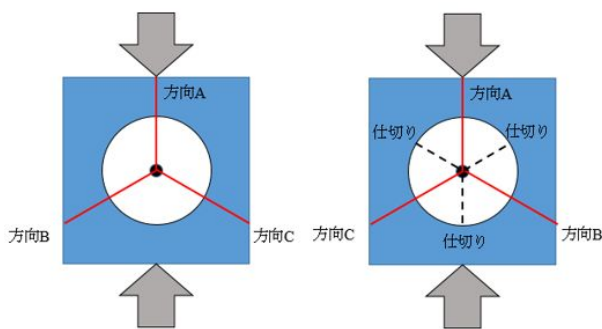


図7 サンプルに力をかける方向(左: Test a, 右: Test b)

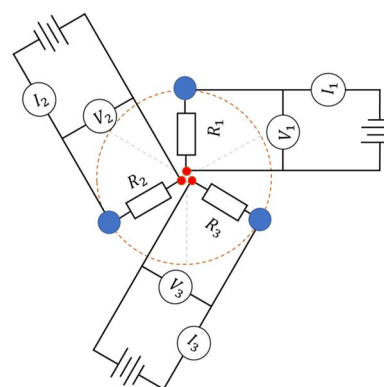


図8 用いた回路の概略図

(7) 本実験では、直径方向に面的に載荷・除荷を行うために、10cm×10cmの厚さ0.8cmの3枚の亚克力板を用いた。中央に直径6cmの穴を開けた真ん中の亚克力板に、感圧導電性粒子として直径3mmのステンレス製の硬球を出来るだけ密な状態になるように敷き詰め、残りの2枚の亚克力板で挟んで四隅をボルトで固定した。120°毎の3方向の抵抗値を計測するための端子を取り付けた。これらのサンプルに載荷・除荷を行う装置として、剛性試験機を使用した。電源として、出力電流を定電流に設定できる直流安定化電源を用いた。感圧導電性粒子群の中央部に端子を付け加え、3方向に3つの端子を持つサンプルを用いた。これにより、3方向の電圧値と電流値を同時に測定することが可能である。Test a, Test bで用いた回路の概略図を図8に示す。灰色の点線内が感圧導電性粒子群をあらわしている。この回路上で、実験条件に基づいて載荷・除荷を行った。Test bでは、電流の流れ方を操作する目的で、感圧導電性粒子群を3つのブロックに分けるための、絶縁体の仕切りを取り付けた。端子と剛性試験機が接触する部分はビニルテープによって絶縁処理をした。

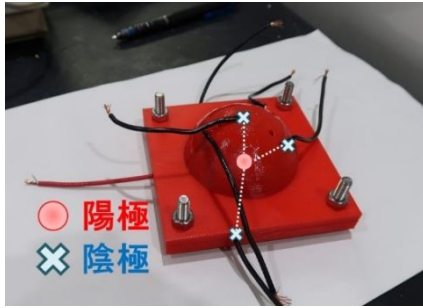


図9 半球型サンプル

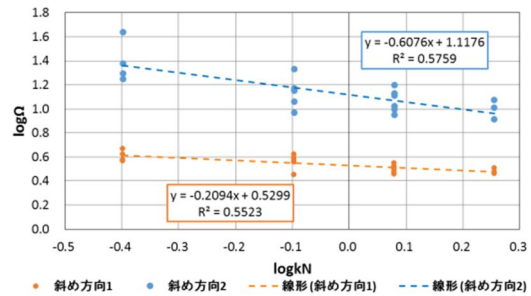


図10 対数近似直線の比較

(8) また、図9のように3Dプリンターを用いて三次元応力測定を想定した半球型の土圧計サンプルを作成し、荷重方向に対して対称位置にある斜め2方向の荷重-抵抗関係の対数近似直線を図10の通り調べた。感圧導電性粒子として3mmのステンレス製鋼球を用い、半球型のパッキング部分を作製した。先行研究において、粒子群を加圧しながらエポキシ樹脂で位置関係を固定し、仕切によって複数方向に流れる電流が相互作用を起こさないようにすることが荷重-抵抗関係の精度を上げるとされていたため、それらの要素を取り入れ、感圧導電性粒子群による3次元土圧計サンプルを作製した。底面の中心を陽極として、球の頂点に向かう1方向、底面に沿った横3方向、底面から45度傾いた斜め3方向の計7方向に電流が流れるように電極を接続した。7方向すべてを仕切によって絶縁するため、縦と横の方向は粒子群の直線配列を採用した。完成した土圧計サンプルに一軸圧縮試験機を用いて繰り返し載荷を行い、直流安定化電源によって定電流1.0Aを流しながら、各荷重段階に対応する電気抵抗値を測定した。載荷は半球の頂点の方向から行き、範囲は0.4~1.8kNとした。粒子群の抵抗値は小さいため、Kelvinの低抵抗の4端子測定法を用いて電流と電圧を測定し、抵抗値を算出した。

4. 研究成果

(1) μ フォーカスX線CTスキャンの結果から、感圧導電性粒子群に対して載荷する荷重を大きくすると、感圧導電性粒子同士の接触面積は大きくなり、抵抗値は小さくなるという傾向が実際に検証できた。載荷の大きさ、抵抗値、感圧導電性粒子同士の接触面積の3つのパラメータの関係性を求めるには至っていない。

(2) 1次元方向の載荷・除荷実験において、荷重-抵抗関係において十分な傾きを持つ線形関係が得られることを確認した。感圧導電性粒子を用いた、一軸方向の圧縮応力測定器のプロトタイプを作成できたと考える。

(3) 既存の測定器では測定することが困難であった主応力方向の推定を目的とした2次元方向の載荷・除荷実験の結果としては、荷重方向に対して、3方向で抵抗値の変化の仕方の異方性をみることができたケースもあったが、主応力方向を推定できるほどの抵抗値の変化の仕方の異方性を明らかにするには至らなかった。

(4) 半球型土圧計サンプルにおいて、感圧導電性粒子を用いた応力測定の原理が半球型3次元形状においても適用できることを示した。粒子群の仕切やエポキシ樹脂といった、2次元までの土圧計の構造をそのまま使うと逆効果となる場合もあることが分かった。荷重に対して対称位置にある方向で結果が異なるなど、近似直線の精度や荷重方向による抵抗値変化の異方性において、圧力測定に適用できるほど有意なデータは得られていない。土圧計サンプルの構造を今後検討していく必要がある。

<引用文献>

松沢 宏,石井 恒久,土中土圧計四種の作動に関する研究,土木学会論文集,Vol.203,1972,29-44

大根 義男,成田 国朝,奥村 哲夫,新たに開発した土圧計の精度と現場への適用性に関する実験,愛知工業大学研究報告,Vol.29,1994,51-57

肥後 陽介,高野 大樹,椋木 俊文,X線CTから見る土質力学(2) X線CTの概要と研究動向,地盤工学会誌,Vol.65(10),2017,41-48

J.A.Greenwood: Constriction Resistance and the Real Area of Contact, British Journal of Applied Physics, Vol.17,1966,1621-1632

A. Fairweather: The closure and partial separation of an metallic contact, Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part I: General, Vol.92(56),1945,301-321

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔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 白石啓太, ピパットボンサー・ティラポン, 北岡貴文, 大津宏康
2. 発表標題 ステンレス剛球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53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 間宮基貴, 白石啓太, ピパットボンサー・ティラポン, 北岡貴文, 大津宏康
2. 発表標題 3Dプリンターで製造したジオストレス感知器の試作開発
3. 学会等名 2019年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白石 啓太, ピパットボンサー・ティラポン, 肥後陽介, 北岡貴文, 大津宏康
2. 発表標題 感圧導電性粒子を用いた 2次元主応力方向の測定原理の考察
3. 学会等名 第 46 回岩盤力学に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 間宮基貴, 白石啓太, ピパットボンサー・ティラポン, 北岡貴文, 大津宏康
2. 発表標題 3次元ジオストレス感知器における内部構造の検討
3. 学会等名 第47回岩盤力学に関するシンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 圧力センサおよび圧力測定装置	発明者 ピパットボンサー・ ティラポン, 肥後陽 介, 白石啓太, ファ	権利者 京都大学
産業財産権の種類、番号 特許、(特開)2019-219222	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

研究室ホームページ http://georisk.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・工学研究科・准教授 (14301)	