

# 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

白石 啓太<sup>1\*</sup>・ピパットポンサー ティラポン<sup>1</sup>・肥後 陽介<sup>1</sup>  
北岡 貴文<sup>1</sup>・大津 宏康<sup>1</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
\*E-mail:shiraishi.keita.66z@st.kyoto-u.ac.jp

本研究では、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である感圧導電性粒子を用い、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、2次元方向の載荷・除荷実験を行った。3方向測定による2次元応力測定法の理論のもと、円柱を形成する感圧導電性粒子群に対して直径方向に載荷・除荷を行い、複数の方向で抵抗値の測定を行うと、各方向で抵抗値の変化の仕方が異なると考えた。実験結果としては、載荷方向による感圧導電性粒子群の抵抗値変化に異方性を示すことを確認した。今後、2次元的応力の主応力の方向と大きさの推定が可能となれば、感圧導電性粒子による原理を更に応用し、いまだ未開発で遅れをとっている3次元的応力の測定法の開発も期待される。

**Key Words :** *pressure sensitive conductive particles, X-ray computed tomography, principal stress*

## 1. はじめに

岩盤工学において、地圧を正確に把握することは、地殻利用の深部化、大規模化を図っていく中で、重要な課題の一つである。また、地盤工学においても、地盤内の応力成分・応力方向の情報は、地盤の崩壊過程の予測や仮定などを確認する上で決定的な情報であるが、地盤物理モデルや実際の現場の両方において、正確に応力を評価することは難しい。三次元地圧計測法として、現在最も信頼性の高い方法とされているのが、応力解放法であるが、その測定原理にはひずみゲージが用いられており、センサの貼付方法などの関係で深部地圧計測には不向きであるとされている<sup>1)</sup>。また、土に関する計測においても、土圧計測は極めて重要であり、最も難しい計測項目の一つとされている。現在の主流の土圧計である、ダイヤフラム型土圧計<sup>2)</sup>は、ダイヤフラムと呼ばれる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である。そのため、土圧計と周囲の土の相対的な剛性差や、受圧板のたわみ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る。従来から、正確な土圧測定を必要とする場面では大きな問題となることが指摘されている<sup>3)4)</sup>。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が、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。

本研究では、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である感圧導電性粒子を用いて応力計測に関する基礎的検討を行った。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。

まず、基礎的実験として、 $\mu$ フォーカスX線CTスキャナを用いて撮影を行った。画像の解析を行うことで、感圧導電性粒子群に対する載荷条件を変えると、感圧導電性粒子群全体の接触面積と抵抗値に変化が生じることを定量的に検証した。次に、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、2次元方向の載荷・除荷実験を行い、載荷方向による感圧導電性粒子群の抵抗値の変化に関する考察を加えた。

## 2. $\mu$ フォーカスX線CTによる検証実験

### (1) X線CTの概要

X線CT (X-ray Computed Tomography) とは、X線の特徴の

一つである透過性を利用して物体を走査し、コンピュータによって処理することで、物体の内部画像を構成する技術のことである。原理としては次に示す通りである。まず、ワークテーブルの上に物体を置き、ワークテーブルを一回転させ、物体に対して360°全方向からX線を照射する。照射されたX線は物体を通過する際に、物体によって一部減衰した後、線源の反対側に位置するX線検出装置に到達して記録される。一般的に、物体の線吸収係数と物体の密度の間には近似的に線形関係があるため、1断面を格子状に分割したときの各部位での線吸収係数を未知数とし、一周にわたって連立方程式を解くことで物体内部の密度分布を可視化することが出来る<sup>9)</sup>。本研究では、X線CTの一種であるμフォーカスX線CT(通称: μ X線CT)を用いて、感圧導電性粒子群に荷重がかかったときの感圧導電性粒子群全体の接触面積の変化を分析することを試みた。

## (2) μフォーカスX線CTによる検証実験の概要

本実験では、感圧導電性粒子群に対しての载荷条件が異なるTest1とTest2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载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、载荷をおこなうための载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。セルと载荷装置には、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。

Test1では、载荷装置の载荷軸自体の質量18.6 Nが感圧導電性粒子群に载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、193 kPaの荷重による载荷を行った。抵抗値の測定を終えたのち、撮影を行った。

Test2では、Test1での撮影を終えた状態に、さらに100 Nの重りを载荷した状態で、Test1と同様に抵抗値を測定した。载荷軸と重りを合わせた質量を、応力に換算すると、123.2 kPaの荷重による载荷を行った。抵抗値の測定を終えたのち、撮影を行った。

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株式会社製を用いた。2ケースの撮影は同じ条件で行い、撮影条件を表-1に示す。

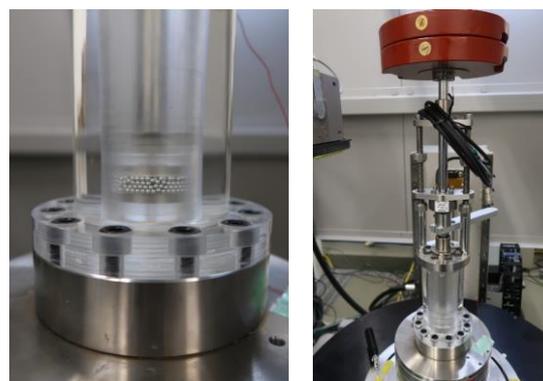


図-1 実験時の様子

表-1 撮影条件

管電圧 [kV]	160
管電流 [μA]	320
ボクセルサイズ[μm]	36.463
ビュー数	2253
積算枚数	15
ゲイン	0.5
積分時間 [ms]	133
スライス厚 [mm]	0.04

## (3) 解析方法

本解析では、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、異なる载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。以下に、解析の流れを簡単に説明する。

まず、撮影で得られた二値化画像に対しErosionという作業を行っていく。Erosionとは、任意のvoxelとよばれる格子型の要素の周辺に存在する設定した数のvoxelを取り除いていきながら、物体の輪郭を削っていく作業である。元々の画像における粒子同士の接触部分が、Erosionを数回行うことで分離されていく。個々の粒子が分離されたところでErosionの作業を終える。次に、Clusteringという作業を行う。Clusteringとは、Erosionによって分離された個々の粒子に対してラベリングを行う作業である。次に、Attributionという作業を行う。Attributionとは、Erosionとは逆の作業であり、任意のvoxelの周辺に設定した数のvoxelを付け加えていき、物体の輪郭を拡大させていく作業である。この作業は、Erosionした回数と同じ回数行う。今回の解析では、Erosionを6回行った。次に、

表-2 実験条件

	計測方法	サンプル内の仕切りの有無	载荷・除荷サイクル(単位はN)
Test1	3方向同時計測	仕切りなし	0→24→0を1回, 0→746→0を1回, 0→196→0を3回, 0→1569→0を2回
Test2	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

ラベリングが行われAttributionを終えた画像に対して、個々の粒子の接触面積を算出し、それらを合計し感圧導電性粒子群の全体の接触面積を求めた。

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \mathbf{M}_3^{-1} \cdot \mathbf{R}_3 \quad (1)$$

と求めることができる。ただし式(1)の $\mathbf{M}_3^{-1}$ 、 $\mathbf{R}_3$ は、それぞれ式(2)、式(3)に示す通りである。

#### (4) 実験・解析結果と考察

取得したX線CT画像の解像度は36.463  $\mu\text{m}$ であった。

Test1では、19.3 kPaの载荷が行われた感圧導電性粒子群の抵抗値は、2.60  $\Omega$ であった。接触面積の解析結果は $5.97 \times 10^3 \text{ mm}^2$ であった。Test2では、123.2 kPaの载荷が行われた感圧導電性粒子群の抵抗値は、2.37  $\Omega$ であった。接触面積の解析結果は $6.11 \times 10^3 \text{ mm}^2$ であった。

以上の結果から、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。

$$\begin{pmatrix} \frac{1 + \cos 2\theta_1}{2} & \frac{1 - \cos 2\theta_1}{2} & \sin 2\theta_1 \\ \frac{1 + \cos 2\theta_2}{2} & \frac{1 - \cos 2\theta_2}{2} & \sin 2\theta_2 \\ \frac{1 + \cos 2\theta_3}{2} & \frac{1 - \cos 2\theta_3}{2} & \sin 2\theta_3 \end{pmatrix} = \mathbf{M}_3 \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_{n_1} \\ \sigma_{n_2} \\ \sigma_{n_3} \end{pmatrix} = \mathbf{R}_3 \quad (3)$$

以上の理論は、ある点における応力状態に関して、方向によって異なる測定応力と、方向の関係から応力成分を求めるという考え方である。この考えをもとに、円柱を形成する感圧導電性粒子群に対して直径方向に载荷・除荷を行い、複数の方向で抵抗値の測定を行うと、各方向で抵抗値の変化傾向も異なると考えた。本実験では、まず、3方向の抵抗値の測定を行うこととした。

#### (2) 2次元方向の载荷・除荷実験の概要

##### a) 実験条件

本実験は、表-2に示す条件のもとでTest1、Test2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。

Test1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-2に示す通りである。载荷・除荷のサイクルは、24 Nまでのサイクルを1回、74 Nまでのサイクルを1回、196 Nまでのサイクルを3回、1569 Nまでのサイクルを2回という順で行った。

Test2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-2に示す通りである。载荷・除荷のサイク

### 3. 2次元方向の载荷・除荷実験

#### (1) 2次元応力測定法の理論

本実験に関する理論として、まず、3方向測定による2次元応力測定法の理論について述べる。これは、ある位置に3つの応力測定器を異なる3方向に設置し、その各方向の応力を測定し、その位置での応力成分を求める理論である。

xy平面の原点において、異なる3方向( $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ 方向)の応力を測定する場合を考える。各方向の測定応力を $\sigma_{n_1}$ ,  $\sigma_{n_2}$ ,  $\sigma_{n_3}$ とすると、原点での応力成分 $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\tau_{xy}$ は、

ルは、392Nまでのサイクル1回、784Nまでのサイクルを1回、1569Nまでのサイクルを3回、という順で行った。

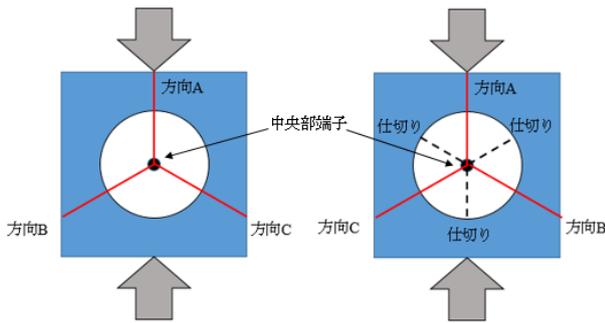


図-2 サンプルに力をかける方向(左: Test1, 右: Test2)

### b) 実験方法

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°毎に、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方向の3つの端子と合わせて、端子を4つ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。Test1, Test2で用いた回路の概略図を図-3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。Test2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。

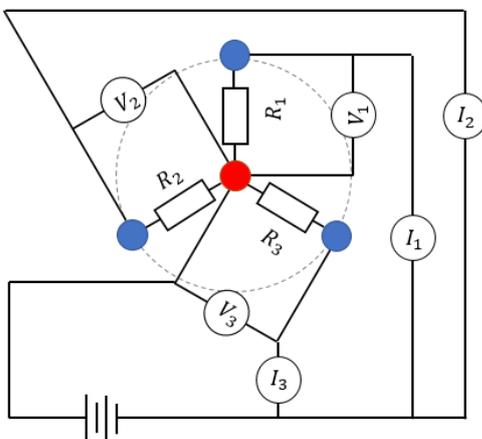


図-3 Test1, Test2で用いた回路の概略図

### (3) 2次元方向の載荷・除荷実験の結果と考察

本実験で測定した電圧値と電流値から求めた抵抗値を、実験条件で設定した方向ごとに、両対数グラフで荷重-抵抗関係として整理した。ただし、データ整理の際には、サンプル側面部分に対して載荷・除荷を行った実際の荷重を、サンプル側面の面積である24cm<sup>2</sup>を用いて応力に換算し、その値が感圧導電性粒子群にかかっている荷重値であるとした。例を挙げると、剛性試験機によって196Nの載荷を行っている際には、81.725kPaの等分布荷重が感圧導電性粒子群にかかっていると仮定した。

Test1の方向A～方向Cの荷重-抵抗関係を、それぞれ図-4に示す。Test1では、49Nまでと、74Nまでと、196Nまでの計5サイクルの荷重-抵抗関係は、3方向ともほぼ横ばいの直線であり、抵抗値の変化は微小であった。1569Nまでの2回のサイクルでは、方向Bと方向Cで同じような傾きの荷重-抵抗関係が得られ、方向Aのみ異なる抵抗値の変化の仕方をすることが分かった。方向Bと方向Cは、載荷・除荷の方向に対して、線対称の位置関係にあり、同じ傾向の荷重-抵抗関係が得られたことは妥当であると考えた。Test1の結果から、載荷・除荷の方向に対する感圧導電性粒子群の抵抗値の変化の仕方に関して、異方性があることを確認した。Test2以降では、ある1方向に流れる電流が、他の方向に流れる電流と干渉しあって抵抗値の変化の妨げとなっている可能性を考え、感圧導電性粒子群を、絶縁性をもつ仕切りによって3つのブロックに分けて3方向の電圧値と電流値の測定をすることとした。また、49Nまで、74Nまで、196Nまでの載荷・除荷のサイクルで、抵抗値に変化はほとんどみられないと考え、392Nまでのサイクルを1回、784Nまでのサイクルを1回、1569Nまでのサイクルを3回の計5サイクルを行うこととした。

Test2の方向A～方向Cの荷重-抵抗関係を、図-5に示す。全体的な傾向として、載荷・除荷のサイクルの回数を重ねるごとに抵抗値が大きくなっていく傾向がみられた。仕切りを用いて感圧導電性粒子群を3つのブロックに分けたことで、各ブロックを均等に上下の亚克力板で固定することが困難となり、載荷・除荷のサイクルの回数を重ねるごとに接触状態に変化が生じたことが原因であると考えた。方向Aの荷重-抵抗関係は、載荷を行うと抵抗値が急激に増加し、除荷を行うと抵抗値が減少するという傾向がみられたものの、大きく乱れたグラフとなっており、方向Aのブロックの感圧導電性粒子群の固定状態に問題があったと考えた。方向Bと方向Cでは、特に1569Nまでの3サイクルでは、載荷過程では抵抗値が減少し、除荷過程では抵抗値が増加するという同じような傾向がみられた。方向Bと方向Cは、載荷・除荷の方向に対して、線対称の位置関係にあり、同じ傾向の荷重-抵抗関係が得られたことは妥当であると考えた。また、

Test2の方向Bと方向Cは、Test1の方向Bと方向Cと位置条件的には同じであり、傾きの大きさは異なるが同じ傾向であることが確認できた。

以上の結果から、感圧導電性粒子群に対して直径方向に載荷・除荷を行い、3方向で抵抗値の変化の仕方の異方性を確認することができたところもあったが、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は確認できていない。載荷・除荷過程の回数を重ねることで、同じ荷重段階における抵抗値のズレもみられ、感圧導電性粒子群の接触状態に変化が生じていると考えられるところもあった。今後は、サンプルをもっと改良していく必要があり、特に感圧導電性粒子群の固定方法について検討していく必要があると考えた。

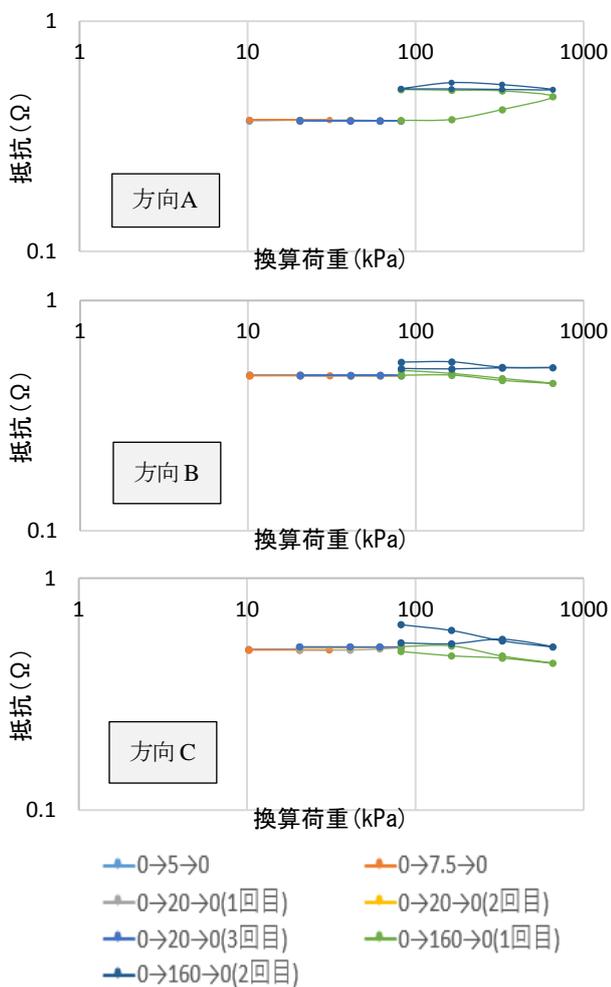


図-4 Test1の方向A～方向Cの荷重-抵抗関係

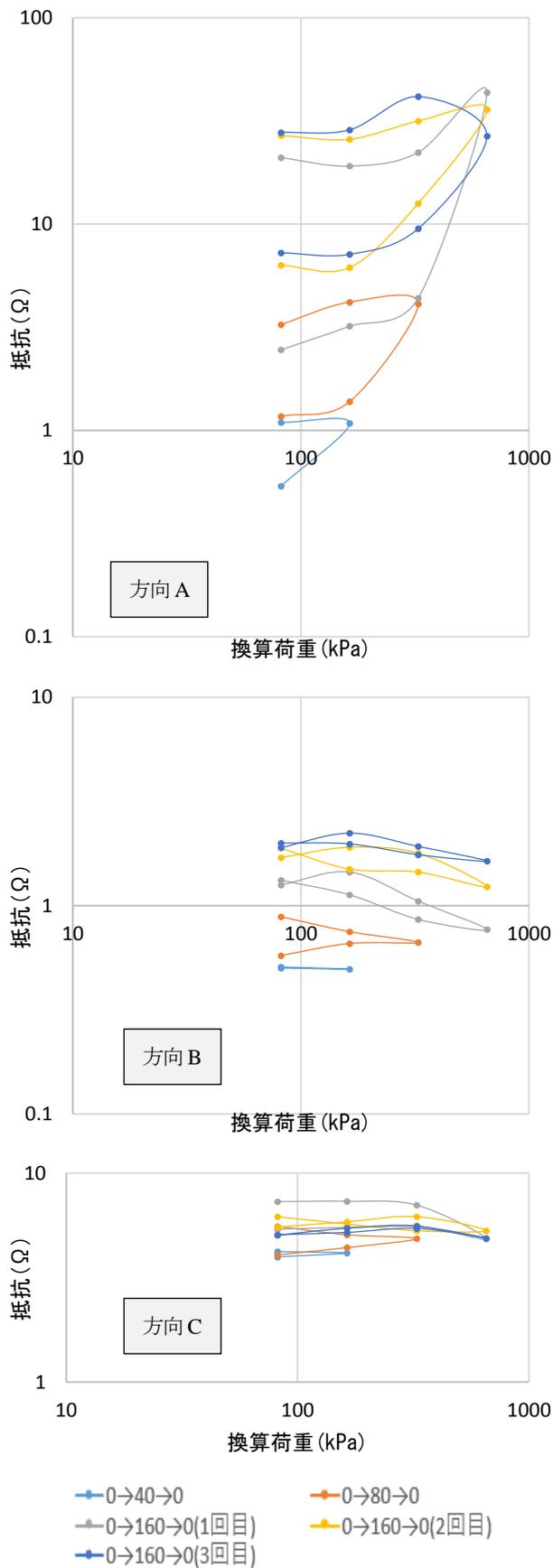


図-5 Test2の方向Cの荷重-抵抗関係

#### 4. 結論と今後の課題

本研究では、感圧導電性粒子を用いた未開発の圧縮応力測定の方法を調べるために、基礎的実験を行った。

下記、本研究で得られた成果を以下に列挙する。

- 感圧導電性粒子群に対する載荷条件を変えることで、感圧導電性粒子群全体の接触面積と抵抗値に変化が生じることを定量的に検証した結果、感圧導電性粒子群全体の接触面積は大きくなると、抵抗値は減少するという傾向が確認できた。
- 2次元方向の載荷・除荷実験によって、荷重方向に対する抵抗値の変化の仕方の異方性を検討した結果、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。

本研究の今後の課題、展望を以下に列挙する。

- 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を得るために、載荷条件、感圧導電性粒子のサイズなどを変えて、より多くのX線CT撮影をしていく。また、感圧導電性粒子群に対する載荷・除荷の繰り返しによって、接触面積だけではなく、接触点の数の変化についても調べていく。
- 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。
- 2次元方向の載荷・除荷実験に関しては、サンプルを改良していく必要がある、特に感圧導電性粒子群の

固定方法について検討していく。

- 今回の実験では、アクリル板の加工のし易さ、使用した剛性試験機の寸法などの観点から、3枚のアクリル板を用いて感圧導電性粒子群の固定を行ったが、異なる形状のサンプルについても検討する。また、抵抗値の測定方向の数も増やして実験を行うことで測定誤差の影響の軽減が可能であるか試していく。

上記に挙げた今後の課題を検討することで、2次元的主応力の方向と大きさの推定が可能となれば、感圧導電性粒子による原理を更に応用して、いまだ未開発で遅れをとっている3次元の主応力の測定法の開発も期待される。

#### 参考文献

- 尾原祐三, 坂口清敏, 中山智晴, 菅原勝彦: 応力解放過程の球面孔底ひずみ変化を利用した岩盤応力測定, 資源と素材(Shigen-to-Sozai), Vol.109 p.57-64, 1993
- 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, pp.51-57, 1994.
- 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, pp.29-44, 1972.
- M.H.Khosravi, T.Pipatpongsoo and J.Takemura: Experimental analysis of earth pressure against rigid retaining walls under translation mode, Geotechnique 63, No.12, pp1020-1028, 2013.
- 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, No.10, pp.41-48, 2017.

## CONSIDERATION OF MEASUREMENT PRINCIPLE IN TWO-DIMENSIONAL PRINCIPAL STRESS DIRECTION USING PRESSURE-SENSITIVE CONDUCTIVE PARTICLES

Keita SHIRAIISHI, Thirapong PIPATPONGSA, Takafumi KITAOKA, Yosuke HIGO and Hiroyasu OHTSU

In this research, pressure sensitive conductive particles, which are elastic low-resistance particles whose shape changes elastically according to pressure and have high conductivity, are used to measure the principal stress which was difficult to measure with existing measuring instruments. In order to estimate the direction, loading and unloading experiments in the two-dimensional direction were carried out. As the experimental results, 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.