

3次元ジオストレス感知器における 内部構造の検討

間宮 基貴^{1*}・白石 啓太¹・ピパットポンサー ティラポン¹
北岡 貴文¹・大津 宏康¹

¹京都大学大学院 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:mamiya.motoki.65n@st.kyoto-u.ac.jp

Key Words : *pressure sensitive conductive particles, three-dimensional earth pressure sensor*

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。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、地盤物理模型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。3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¹⁾。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、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。しかし、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、土圧計周辺の応力伝達を乱すアーチ作用や変形部分への応力集中が起きることによって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。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、困難な作業となっている。そのほかの多次元応力測定法も大規模でコストが掛かるといったデメリットを抱えており、簡便な多次元応力測定技術は未だ開発で遅れをとっている。よってダイヤフラム型土圧計のように座屈やたわみの問題がなく、多次元方向の応力測定が可能な新しい原理の開発が望まれる。

新たな圧縮応力測定の原理として、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ている。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。

本研究では、感圧導電性粒子群を用いた応力測定の原理の、多次元応力測定への適用について検討する。抵抗値変化を複数の方向で行うことで、一台の測定器による多次元方向の圧力測定ができる可能性があると考えた。3次元圧力計の基本構造として、感圧導電性粒子群による半球型の集合体を考案した。粒子群にかかる圧力によって抵抗値が減少するが、圧力と抵抗値の関係をより明確にするためにいくつかの条件が考えられる。異なる形状、条件で粒子群をパッキングしたモデルに載荷・除荷試験を行い抵抗値の変化を計測し、計測器内部にある粒子群がよりセンサーとしての感度、精度に優れるような粒子群の固定状態について考察した。

2. 3次元応力測定法の理論

本実験に関する理論として、まず、7方向測定による3次元応力測定法の理論について述べる。これは、ある位置で異なる7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。各方向の測定応力および法線ベクトルをそれぞれ式(1)、式(2)で表す。

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ r_6 \\ r_7 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{n}_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i \cdot \sin \varphi_i \\ \sin \theta_i \cdot \sin \varphi_i \\ \cos \varphi_i \end{pmatrix} (i = 1, 2, \dots, 7) \quad (2)$$

応力成分を対称マトリクス形式で式(3)と表す.

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (3)$$

各方向の仮想断面に働く応力ベクトルの大きさは各方向の測定応力に等しいことから, 次の式(4)の関係が導き出せる.

$$(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_i) \cdot \mathbf{n}_i = r_i (i = 1, 2, \dots, 7) \quad (4)$$

測定方向によって決定されるマトリクスを $\mathbf{M}$ として, これらの関係をまとめて整理すると, 式(5)のようになる.

$$\mathbf{M} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{pmatrix} = \mathbf{R} \quad (5)$$

式(5)の両辺に左から $\mathbf{M}$ の転置行列 $\mathbf{M}^T$ を掛ける. さらに, 両辺に左から $\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M}$ の逆行列 $(\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M})^{-1}$ を掛けることで, 式(6)のように応力成分が求まり, 応力成分をもとに主応力の大きさと方向を求めることができる.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{pmatrix} = \left[(\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M})^{-1} \cdot \mathbf{M}^T \right] \cdot \mathbf{R} \quad (6)$$

以上が7方向の測定値から3次元応力成分を求める理論である. 理論上は応力マトリクスの未知数は6つなので, 6方向を測定すれば応力成分は求めることができるが, 6方向より多くの測定を行うことで, 各方向の測定の誤差の影響を低減し, より正確な応力成分を求めることができる.

7方向の粒子群抵抗値を測定し3次元応力測定法の理論が適用できる計測器の構造として, 図-1に示すように, 半球型にパッキングした粒子群に電極を取り付けた構造を考えた. 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. 数値解析により計算結



図-1 7方向の電極設定

果を求めることができたため, この方向設定が適切であると考えた.

3. 半球型粒子群への載荷・除荷試験

(1) 圧力計の性能に関わる諸条件

先行研究では, 感圧導電性粒子を用いた1次元, 2次元応力測定についての考察が行われた^{2,3)}. その中で, 圧力計の感度, 精度を上げるいくつかの要素が挙げられた. まず, パッキングした粒子群をより密な構造にするための, 粒子群への加圧である. 次に, 加圧によって粒子群の接触面積のみが変化するように, 粒子群の接触状態をエポキシ樹脂で固定することが効果的とされた. 最後は, 複数方向に流れる電流が相互に影響を与えないための, 仕切による各方向の粒子群の絶縁である. これらの要素は円柱型の1次元, 2次元圧力計において有効とされている. 本研究は, 加圧, エポキシ樹脂, 仕切による絶縁といった条件の半球型の3次元圧力計における作用について検討する.

(2) 半球型粒子群への載荷・除荷実験の概要

a) 実験条件

本実験は, 表-1に示す条件のもとでTest1, Test2, Test3の計3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.

正確に同一な形状のモデルを複数使って比較試験を行うために, 半球型パッキング部分と内部の仕切の造形は3Dプリンターで行った. 造形方式は熱溶解積層方式であり, 材料にはポリ乳酸を使用した.

半球型パッキング部分の形状は外径62mm, 内径60mmの中空の半球に10cm×10cm×0.5cmの土台がついた形となっている. 感圧導電性粒子として, 錆びにくく扱いやすいことから直径3mmのステンレス製の硬球を採用した. 3Dモデルにできるだけ密になるよう3mmステンレス製金属球を詰め, 10cm×10cm×1cmのアクリル板で底面に蓋をし, ネジで固定したものが各Testにおける圧力計サンプルの基本的な形状となっている. また, 電極の接続などに必要な穴, 溝を空けて, 設定した7方向に電流が

表-1 実験条件

	エポキシ樹脂による固定	仕切りの有無	加圧	載荷・除荷サイクル
Test1	固定あり	仕切あり	加圧あり	0kN→1.8kN→0kNを3回
Test2	固定なし	仕切あり	加圧なし(1サイクル目) 加圧あり(2サイクル目以降)	0kN→1.8kN→0kNを4回
Test3	固定なし	仕切なし	加圧なし(1サイクル目) 加圧あり(2サイクル目以降)	0kN→1.8kN→0kNを4回

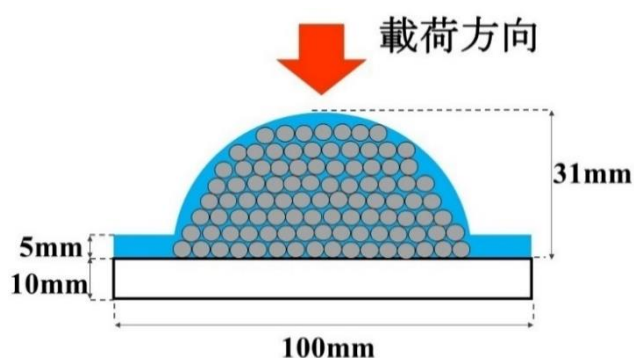


図-2 圧力計サンプルの概略図

流れるよう電極を接続した。Test1のパッキング部分には半球内の空間を三等分する三方向の仕切を設定した。仕切の方向が底面に沿って流す電流の方向と被るため、仕切の下部に溝を作ることで仕切と同じ方向に3mm金属球を直線配列できるようにした。半球の頂点方向には、金属球を直線配列するために直径3mmの円柱状の空洞を作った。これにより、7方向に電流を流しつつ各方向の硬球群が絶縁されている構造とした。また、底面中央の金属球は各方向に流れる電流の陽極となるため極めて重要であると考えた。そこで、回路の接触を安定させるため陽極となる部分のみ直径10mmのステンレス製金属球を用いた。Test1の圧力計サンプルには、硬球群の入った部分にエポキシ樹脂の主材と硬化剤を2:1の割合で混合したものを流し入れた。エポキシ樹脂の硬化時間はおおよそ70時間であるが、24時間程度経過したエポキシ樹脂がまだ硬化していない段階で、一軸圧縮試験機を用いて1.8kNの加圧を行った。これにより内部空間が少し狭くなるよう塑性変形させ、先行研究のような荷重をかけながらの固定を再現するとともに、先行荷重によって測定中の土圧計サンプルの変形を抑制することができると考えた。また、あえて半球頂点を変形させることで、載荷試験において荷重を一点ではなく直径おおよそ19mmの円形面で受けられるようにした。その後、エポキシ樹脂が完全に硬化するまで放置した。

Test2の半球型パッキング部分はTest1と同様に仕切によ

って7方向の硬球群が絶縁される形状とした。Test1とは異なり、Test2の圧力計サンプルにはエポキシ樹脂の注入を行わず、実験前の時点では加圧も行っていない。

Test3の圧力計サンプルには半球内部に仕切が無く、硬球群が一体の半球状となっている。10mm金属球は使用せず、3mmステンレス球のみを用いた。Test2と同様に加圧およびエポキシ樹脂の注入は行っていない。

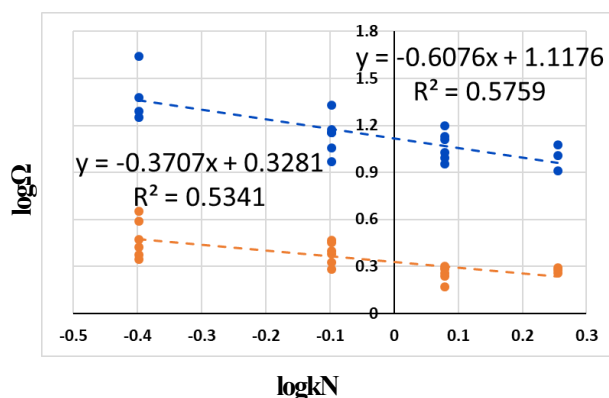
載荷・除荷のサイクルは、0kN→1.8kN→0kNのサイクルをTest1では3回、Test2、Test3では4回行った。荷重をかける方向は図-2に示す通りである。本実験で載荷する荷重において、ポリ乳酸で作製したパッキング部分は過去に経験していない荷重がかかると塑性変形を生じる。このためTest2、Test3の2サイクル目以降はパッキング部分の圧縮変形によって硬球群に加圧がなされているとみなした。

b) 実験方法

本実験では、圧力計サンプルに電流を流しながら荷重をかけ、荷重段階に対応する金属球群の各方向における電圧値、電流値をKelvinの4端子測定法によって測定した。載荷・除荷には一軸圧縮試験機を用い、載荷速度は0.4mm/minとした。電源には出力電流や出力電圧を一定に設定することの出来る直流安定化電源を使用し、定電流1.0Aを流した。実験条件で設定した0kN→1.8kN→0kNのサイクルで載荷・除荷を行い、0.4kN、0.8kN、1.2kN、1.8kN時点での電流、電圧を測定し、抵抗値を算出した。電熱による金属球の原子の熱振動による影響を抑えるため、サイクル間で電流と載荷を止めて圧力計サンプルの放熱を行った。

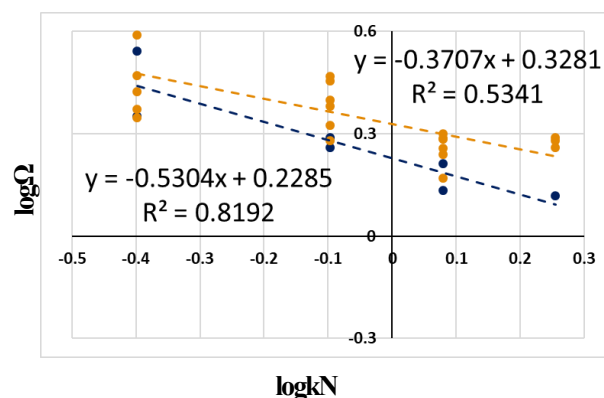
(3) 半球型粒子群への載荷・除荷実験の結果と考察

得られたデータから荷重-抵抗関係をまとめ、Greenwoodの接触抵抗の理論⁴⁾による両対数軸において荷重と抵抗値は線形関係になるという仮定をもとに、荷重と抵抗値を常用対数に変換した値から近似直線を求めた。土圧計測の感度に関わる傾きの大きさ、再現性に関わるばらつきの少なさという観点から近似直線を評価した。仕切のあるサンプルでは球の頂点に向かう方向と底面に沿った横方向は直線状に配列された硬球群に電流が流れ



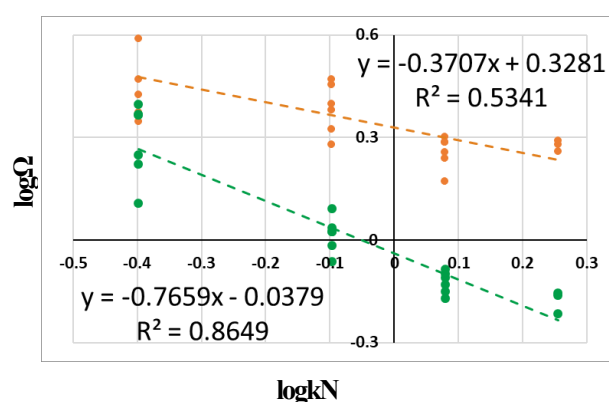
- : 樹脂あり (Test1, 上)
- : 樹脂なし (Test2サイクル2以降, 下)

図-3 樹脂の有無による比較



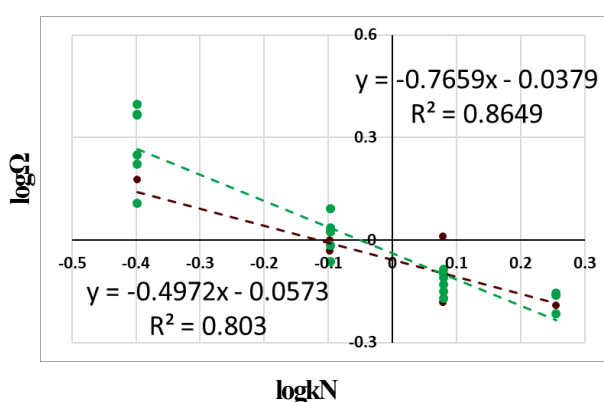
- : 加圧あり (Test2サイクル2以降, 上)
- : 加圧なし (Test2サイクル1, 下)

図-5 仕切がある場合の加圧の有無による比較



- : 仕切あり (Test2サイクル2以降, 上)
- : 仕切なし (Test3サイクル2以降, 下)

図-4 仕切の有無による比較



- : 加圧あり (Test3サイクル2以降, 上)
- : 加圧なし (Test3サイクル1, 下)

図-6 仕切がない場合の加圧の有無による比較

ているのに対し、仕切が無いサンプルでは硬球群全体が半球型三次元的配列をとっており、硬球配列の条件が異なる。そのため、比較には半球の斜め方向に電流が流れる硬球群の抵抗値を用いた。

樹脂の有無による比較では、Test1とTest2のサイクル2以降の結果を用いて比較した。比較結果を図-3に示す。樹脂ありのサンプルの方がデータの再現性が高いという結果が得られている。1, 2次元圧力計と同様に、樹脂による感圧導電性粒子の位置関係の固定は抵抗値データのばらつきを抑えるために有効であると考えられる。

仕切の有無による比較については、Test2のサイクル2以降とTest3のサイクル2以降を比較した。比較結果を図-5に示す。仕切がない方が近似直線の傾き、決定係数ともに大きいという結果となった。半球形状では仕切の存在によって粒子群同士の接触に与える影響が大きく、特に陽極となる10mm球が他の粒子群と接触できる面積が仕切によって大きく減少することが、このような結果となった一因として考えられる。

加圧の有無による比較では、Test2のサイクル1とサイクル2以降の比較と、Test3のサイクル1とサイクル2以降の比較を行った。比較結果を図-5、図-6に示す。仕切のあるTest2では加圧なしの方、仕切のないTest3では加圧ありの方が直線の傾きが大きいという結果となった。仕切りのあるサンプルに加圧すると、仕切の変形によって粒子群に何かしら抵抗値変化の感度を低下させる影響を与えていることが考えられる。決定係数はいずれも加圧なしの方が大きい場合が多かったが、これは加圧なしのデータが1サイクルのみで加圧ありのデータより少ないことが原因と考えられる。

これらの比較から、半球型土圧計において仕切は必ずしも感度、精度を高める役割を果たすとは限らないことがわかった。このデータからはエポキシ樹脂は効果的であると考えられるが、加圧に関しては3Dモデルの形状によって有効性が異なってくる可能性がある。感圧導電性粒子を用いた三次元圧縮応力測定においては、特に仕切の及ぼす影響が大きいと考えられる。粒子群の絶縁

だけにとどまらず、仕切の構造や剛性によって粒子群にかかる応力の状態を変化させていることが考えられる。仕切を設ける目的は粒子群の絶縁であり、荷重と抵抗値の関係を複雑化させないために、仕切は粒子群の応力状態を仕切が存在しない場合と同じものにできることが望ましい。仕切の剛性や仕切以外の絶縁方法の検討は圧力計において懸念すべき重要な事項であるといえる。エポキシ樹脂による固定については、樹脂固定によって土圧計内部の粒子群が動かなくなり、粒子の弾性的な変形による接触面積の変化のみで抵抗値が決定できるという考えのもと行った。逆に樹脂固定を行わない場合、粒子群の微小な移動が生じ、粒子群全体の配列変化も含めて抵抗値変化に影響が現れると考えられる。樹脂の有無が抵抗値変化のメカニズムを大きく変えている可能性があるため、さらなる検討が必要となる。

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圧縮応力測定の実験を3次元応力測定に適用するための、基礎的な実験を行った。加圧、仕切、エポキシ樹脂といった先行研究の圧力計に取り入れられた要素の、半球型3次元土圧計における作用について検討することを目的として、土圧計サンプルの条件を変えた比較試験を行った。その結果、仕切の設置が土圧計の性能向上に寄与できていない可能性が示された。加圧が土圧計に与える影響は、3Dモデルの仕切の有無によって効果が逆転した。土圧計における仕切は、粒子群の絶縁以外にも重要な影響を与えていると考える。エポキシ樹脂に関しては土圧計の精度を高める効果が期待できる。

本研究の今後の課題、展望を以下に挙げる。

- ・ X線 CTによって、3次元配列において荷重に対して粒子群の接触面積がどのように変化するかを観察し、接触面積が変化するメカニズムを明らかにするとともに荷重と接触面積、抵抗値のパラメータ関係を明確にする。
- ・ 感圧導電性粒子の半球内部における配列を最密充填構造となるよう厳密に定め、接触面積の変化を制御する必要がある。また、粒子群を2次元面的に並べ

た配列への荷重・除荷による抵抗値の変化についても検討する。

- ・ 異なる材料、剛性、サイズの金属球を用いた試験を行って荷重-抵抗関係に変化がみられるか試し、どのような感圧導電性粒子が圧力測定において適切であるかを検討する。
- ・ 粒子群の中に絶縁性の球を入れるなど、粒子群の絶縁における仕切以外のアプローチを試していく。
- ・ 圧力計内部の構造による性能の向上も考えられることや、土圧計測には円錐形なども用いられている⁹⁾ため、半球以外の形状についても3次元応力測定に適している可能性を検討する。
- ・ 例えば、ポリ乳酸材料に比べて成形は難しいが耐荷重性能に優れるABS樹脂(acrylonitrile butadiene styrene copolymer, ABS)など、3Dプリンターで利用できる他の素材の、土圧計研究への適用性を検討する。

謝辞：本研究はJSPS 科研費 JP17K18904 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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: ステンレス鋼球の電気抵抗と圧縮応力の特性に関する基礎的研究, 第53回地盤工学研究発表会, pp.77-78, 2018.
- 3) 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: 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, 第46回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.298-303, 2019
- 4) J.A.Greenwood: Constriction Resistance and the Real Area of Contact, British Journal of Applied Physics, Vol.17, pp.1621-1632, 1966.
- 5) 坂口清敏, 尾原祐三, 中山智晴, 菅原勝彦: 円錐孔底ひずみ法の応力測定精度, 資源・素材学会誌, Vol.108, No.6, p.455-460, 1992.