

接触圧力を受ける導電性材料を用いた割裂引張試験による応力状態の測定方法の検証

京都大学 学生会員 ○陸 紫瑞 筒井爽人 正会員 ピパットボンサー・ティラポン 肥後陽介
鹿島建設(株) 正会員 永谷英基 川野健一 劉 偉晨

1. はじめに

地盤内応力に関する計測のうち土圧計測は極めて重要であるが、最も計測が難しい項目の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つの土圧計で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、1つのデバイスで多次元応力を測定することを目的として、導電性ゴムと電気抵抗率トモグラフィを用いた新たな土圧計測技術について開発を進めてきたので、その結果について報告する。

2. 電気抵抗率トモグラフィ

電気抵抗率トモグラフィ（以下、ERT: Electrical Resistivity Tomography）は、表面電極から測定された電圧データから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と比較して放射線源が不要であり、人体に影響す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いた技術であり、式(1)に示す時差相対 ERT¹⁾による導電率分布画像の再構成法によって記述される。

$$\Delta\sigma = R \cdot \Delta V \quad \text{式(1)}$$

ここに、

R : マクスウェル方程式と有限要素法から得られる再構成マトリクス

ΔV : 基準電圧と測定電圧の差から得られる電圧差

$\Delta\sigma$: 計測領域内部導電率分布のオフセット

3. 円柱型応力センサ

ERT は鉱物採掘調査を目的として地球物理学の分野に導入され、ここ数十年でセンサ分野に応用されるようになった²⁾。ERT と導電性ゴムに圧力が加わると体積圧縮に従い導電率が変化する性質を利用し、応力の大きさおよび作用方向を計算できる。そこで、直径4 cm、高さ4 cmの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を図-1に示す。左側にある画像は円柱型センサを圧縮している状況を示しており、中央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。右側の画像は、円柱型センサの中心座標を0とした場合の高さ1.8, 0, -1.8 cmにおける断面の導電率分布再構成画像である。時差相対 ERT に基づき解析を行うため、コンター図の0は測定時の導電率は0 S/cmではなく、初期状態との導電率の差が0 S/cmということを表している。図中の青色の部分の導電率の減少を表しており、圧縮箇所と変化部分が良く一致している。なお、図-2は上面と底面と同時に圧縮した結果を示している。

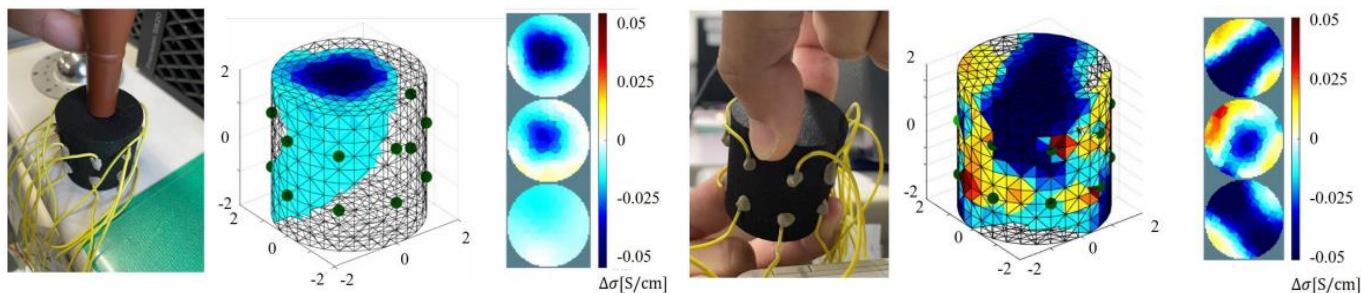


図-1 上面を圧縮した際の導電率コンター図

図-2 上面と底面を圧縮した際の導電率コンター図

キーワード 高導電性ゴム、円柱型センサ、応力測定、電気抵抗率トモグラフィ、割裂引張試験

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-2-236 TEL 75-383-3261

4. 割裂引張試験

一軸圧縮試験機を用いて、円柱型センサを対象にした割裂引張試験を行った。図-3に示すように電極に直接荷重を与えないため、3D プリンターを使って円柱型センサを挟み込める治具を製作した。円柱型センサを治具で固定し、半径方向に対して 0～45 N の範囲で载荷除荷を行った。本研究では荷重が変化した時の応答として導電率の変化が生じると仮定し、領域全体の平均導電率変化を測定対象とした。割裂引張実験における圧力-導電率関係と変位-導電率関係を図-4に示す。高導電性ゴムセンサーの平均導電率と荷重・変位には相関関係が存在することを確認できた。また、高導電性ゴムは完全な弾性体ではないため、荷重を受けた後はわずかながら残留変形が残ることも明らかとなった。

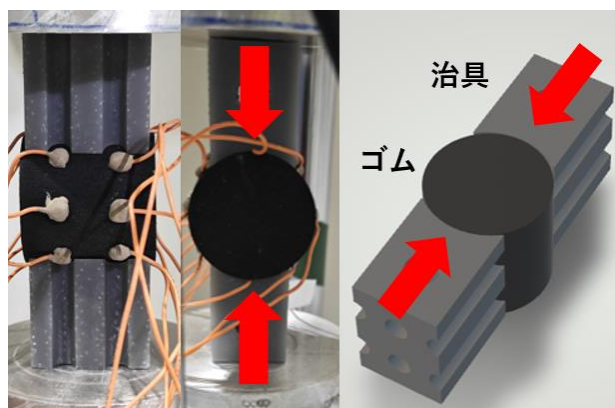


図-3 治具を用いた割裂引張試験

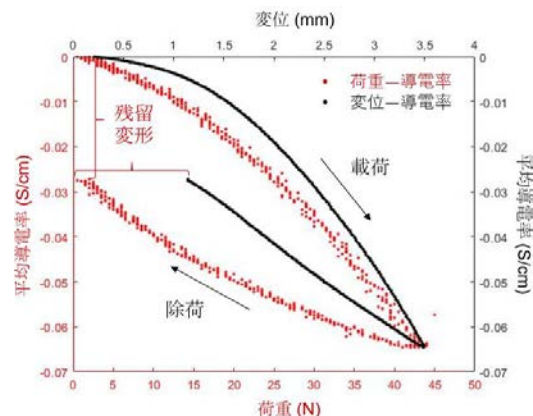


図-4 荷重-導電率-変位関係

5. 主応力推定手法

ERT から得られた導電率を用いて主応力状態を定量的に表現するための方法を考案した。円形断面を図-5のように 8 つのエリアに分割し、各エリアの正規化導電率 r_i と回転マトリクス M を用いて XY 座標系の成分を式(2)、最大主応力角度 β を式(3)を使って算出した。図-6 は式(2)、(3)による計算結果のまとめたものである。

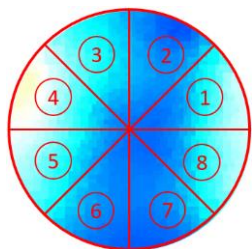


図-5 円の分割方法

$$\begin{Bmatrix} r_{xx} \\ r_{yy} \\ r_{xy} \end{Bmatrix} = [M^T \cdot M]^{-1} \cdot M^T \cdot \begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{Bmatrix} \quad \text{式(2)}$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2r_{xy}}{r_{xx} - r_{yy}} \right) \quad \text{式(3)}$$

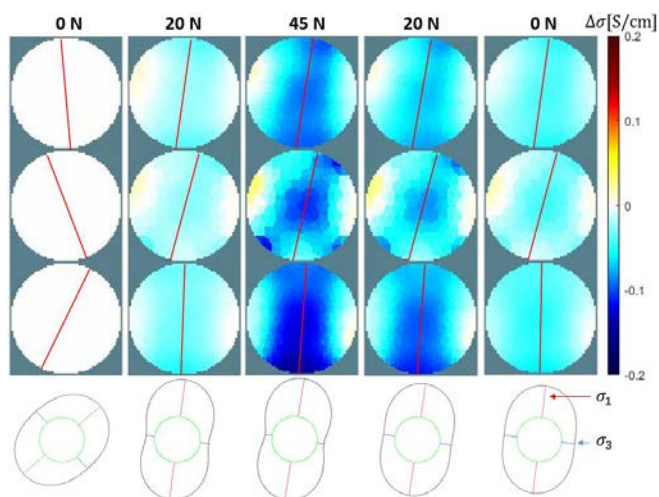


図-6 主応力方向

6. おわりに

ERT を用いた円柱型センサを開発し、応力の大きさおよび作用方向を ERT で計算できることを実証した。今後、土圧計としてプロトタイプ製作を進めていき、模型実験や現場に展開していく。

参考文献

- 1) Vauhkonen, P. J., Vauhkonen, M., Savolainen, T., & Kaipio, J. P.: Three-dimensional electrical impedance tomography based on the complete electrode model. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 46(9), 1150-1160, 1999.
- 2) Nagakubo, A., Alirezai, H. and Kuniyoshi, Y.: A deformable and deformation sensitive tactile distribution sensor, 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 1301-1308, 2007.