

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

京都大学大学院工学研究科	正会員	○ピパットポンサー	ティラボン
京都大学大学院工学研究科	学生会員		間宮 基貴
京都大学大学院工学研究科	正会員		肥後 陽介
鹿島建設 (株)	正会員		永谷 英基
鹿島建設 (株)	正会員		川野 健一
坂田電機 (株)	非会員		須賀原 慶久

1. 目的

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り、最も難しい項目の一つとされている¹⁾。現在、多くの土圧測定に用いられる土圧計は、1つの土圧計に対して1方向のみ測定されており、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とされている。本研究では金属鋼球を用いた多次元応力測定についての研究を行う。鋼球群に荷重が加わると全体の接触面積が増大し、電気抵抗値は減少する。この関係性から応力の大きさおよび方向を計算する。

2. 実験概要

本実験では、図-1に示す直径5 cm、高さ5 cmの円柱形のサンプルを作成し、载荷除荷試験を行った。φ3 mmのステンレス (SUS304) 製の鋼球をシリコン樹脂で固めた。サンプル内部はアクリル板で絶縁された3つの鋼球群に分かれており、円の中央に陽極、外周部に陰極が設置してある。このサンプルに一軸圧縮試験機と治具を用いて直径方向に载荷試験を行った。サンプルの向きを変えながら、各ケースにおいて50 N~400 Nまでの载荷除荷サイクルを3回行った。設置状態の例を図-2に示す。载荷除荷を行いながら各方向の鋼球群の抵抗値を測定する。測定した荷重一抵抗値関係を両対数軸でプロットすると、線形関係に近くなる。近似直線の傾きを測定値とし、計算に用いる。

3. 影響曲線のフィッティング

円柱サンプルの各鋼球群にかかる応力の平均値と抵抗値変化の大きさをそれぞれ正規化した値には、相関関係があることが実験的に知られている²⁾。よって、理論的に計算される平均応力を面積分し全体に対する割合 $x(\theta)$ と測定された正規化ゲージ率 $r(\theta)$ を用いて、応力の大きさおよび方向が推定できると考えられる。各鋼球群にかかる応力の平均を極座標上に表したものを影響曲線と呼ぶ。図-3に影響曲線と载荷実験で得られた $x(\theta)$ を示す。この結果に対し、 $x(\theta)$ と $r(\theta)$ の相関関係を近づけるためのフィッティング処理を行う。



図-1 使用したサンプル

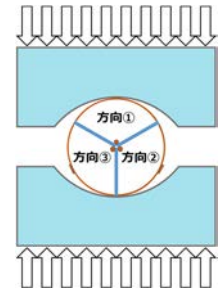
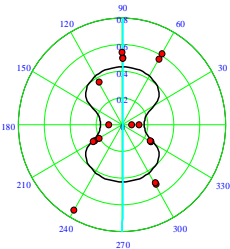
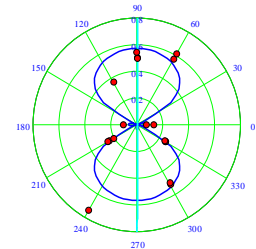


図-2 設置状態の例



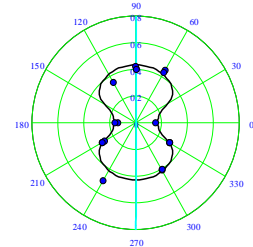
● 測定値
— オリジナルの影響曲線

図-3
オリジナルの影響曲線



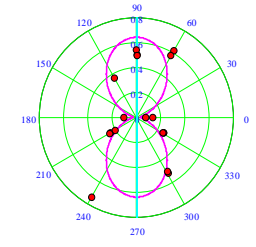
● 測定値
— フィッティングした影響曲線

図-4
線形フィッティング



● フィッティングした測定値
— オリジナルの影響曲線

図-5
測定点フィッティング



● 測定値
— cos2θフィッティングした影響曲線

図-6
cos 2θフィッティング

キーワード 電気抵抗, 接触力学, 平均応力, 载荷方向, センサ技術

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-2-236 TEL: 075-383-3261

フィッティング方法の一つは、式(1)に示す線形フィッティングである。ここで、 c_1, c_2 は線形近似による係数、 $x(\theta)$ はオリジナルの影響曲線の式である。線形フィッティングを行った結果を図-4に示す。測定値の当てはまりが改善されているが、 90° や 270° 付近で生じた負の値が逆方向の正の値として表示されている。次に、影響曲線はオリジナルのまま、測定値の方をフィッティングした。線形フィッティングの係数を用いた測定点フィッティングは式(2)で表される。ここで、 $r(\theta)$ は抵抗値変化の測定値、 $\hat{r}(\theta)$ はフィッティングした測定値である。測定点フィッティングを行った結果は図-5のようになり、負の値を出さずにフィッティングを行うことができた。もう一つのフィッティング方法として、式(3)に示す $\cos 2\theta$ でフィッティングがある。ここで、 d_1, d_2 は線形近似による係数である。 $\hat{r}(\theta)$ フィッティングを行った結果は図-6のようになる。

4. 応力成分の計算および較正

応力成分および主応力方向を計算するもう一つの手法として、較正係数を用いた計算を行う。この手法は、最低1方向、2段階の荷重試験でキャリブレーションを行うことができ、多次元応力測定においてキャリブレーション回数を大きく低減できるという特徴がある。

まず、較正計算に用いる係数を求める。図-2と同じ荷重状態で2段階の荷重で荷重試験を行ったとする。荷重が小さい方の試験においてかかる応力を初期応力 σ_0 、大きい方を最終時応力 σ_p とする。初期応力 σ_0 をかけた際に方向 i の測定検知部が示す抵抗値の値を初期抵抗値 R_i^0 、最終時応力 σ_p をかけた際に測定検知部が示す抵抗値の値を最終時抵抗値 R_i^p とする。基準平均応力および基準電気抵抗値を式(4)、式(5)のように設定する。荷重一抵抗値関係の傾きをゲージ率 S_i 、ゲージ率の総和を S^c とすると、 S^c は荷重方向に依らず近い値となることが実験的に判明している²⁾。 S_i を総和で正規化した値を正規化ゲージ率 r_i と呼ぶ。正規化ゲージ率は、式(6)で表される回転マトリクス M を用いて XY 座標系の成分として式(7)のように表現できる。ここで、 θ_i は各検知部が配置された角度である。最大正規化ゲージ率 r_i^c および最小正規化ゲージ率 r_{III}^c と呼ぶ値を式(8)で求める。以上で求めた係数 σ^c 、 S^c 、 r_i^c 、 r_{III}^c を用いて、応力の較正計算を行う。未知の方向 β からの荷重を受けたときに、検知部の示す抵抗値を R_i^t とする。荷重試験の初期抵抗値 R_i^0 と R_i^t を用いて、式(6)~式(8)と同様の計算で r_{xx} 、 r_{yy} 、 r_{xy} 、 r_i 、 r_{III} を求める。これらの値から、荷重方向が式(9)、最大および最小主応力が式(10)で求められる。実験結果を用いて計算した結果の一例を表-1に示す。ある程度の応力の大きさおよび方向が推定できている。

5. まとめ

測定値に合わせた影響曲線のフィッティングを行い、測定器サンプルの推定精度が向上した。また、一方向の荷重試験のみで行える、簡易な多次元応力測定の較正方法を確立した。

参考文献

- 1) 宮下秀樹, 中村三昭, 曹西: 低剛性土圧計の開発とその動作特性, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.3, pp.696-711, 2008.
- 2) ピパットポンサー・ティラポン, 白石啓太, 肥後陽介, 川野健一, 須賀原慶久: 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, 第55回地盤工学研究発表会, 21-5-4-02, 2020.

$$r(\theta) = c_1 x(\theta) + c_2 \quad (1)$$

$$\hat{r}(\theta) = \frac{r(\theta) - c_2}{c_1} \quad (2)$$

$$\hat{r}(\theta) = d_1 \cos(2\theta) + d_2 \quad (3)$$

$$\sigma^c = \sigma_0 \quad (4)$$

$$R^c = \left(\prod_{i=1}^n R_i^0 \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

$$M = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \cos(2\theta_1) & 1 - \cos(2\theta_1) & 2 \sin(2\theta_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 + \cos(2\theta_n) & 1 - \cos(2\theta_n) & 2 \sin(2\theta_n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{Bmatrix} r_{xx} \\ r_{yy} \\ r_{xy} \end{Bmatrix} = [M^T \cdot M]^{-1} \cdot M^T \cdot \begin{Bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{Bmatrix} r_i^c \\ r_{III}^c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{r_{xx} + r_{yy}}{2} + \sqrt{\left(\frac{r_{xx} - r_{yy}}{2}\right)^2 + r_{xy}^2} \\ \frac{r_{xx} + r_{yy}}{2} - \sqrt{\left(\frac{r_{xx} - r_{yy}}{2}\right)^2 + r_{xy}^2} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \text{atan2}(r_{xx} - r_{yy}, 2r_{xy}) \quad (9)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_I^t \\ \sigma_{III}^t \end{Bmatrix} = \sigma^c \frac{\left(\prod_{i=1}^n R_i^0 \right)^{\frac{1}{S^c}}}{(r_i^c - r_{III}^c)} \begin{Bmatrix} r_i - r_{III}^c \\ r_{III} - r_{III}^c \end{Bmatrix} \quad (10)$$

表-1 応力の計算結果

	荷重 角度	最大主応力 (kPa)	最小主応力 (kPa)
実際の応力	0.0°	80.0	0.0
測定応力	4.5°	89.3	-11.0