

ステンレス鋼球を用いた抵抗値変化の異方性による二次元载荷方向の推定方法

京都大学大学院工学研究科	学生員	○間宮 基貴
京都大学大学院工学研究科	非会員	白石 啓太
京都大学大学院工学研究科	正会員	ピパットポンサー ティラポン
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	川野 健一
坂田電機（株）	非会員	須賀原 慶久

1. 目的

地盤工学分野において、地盤内の応力方向の情報は様々な土木構造物の施工管理や安定性などを確認する上で決定的な情報であるが、地盤物理模型実験や実際の現場の両方において、応力状態の計測は困難かつ高価なものである。本研究では、1つのデバイスでの2次元载荷方向の測定原理を確認することを目的として、金属鋼球を用いた実験的研究を行う。金属鋼球群に荷重が加わると、それぞれの金属鋼球同士の接触面積が増加し、金属鋼球群全体としての抵抗値は減少する。荷重に対する金属鋼球群の抵抗値の関係を調べることで、新たな圧縮応力測定の方法を導き出せると考えた。そして、未知の方向から载荷されるサンプルの各方向の抵抗値変化の大きさの実測値の割合から、サンプルに対してどの方向に载荷がなされているかを推定する手法を検討する。

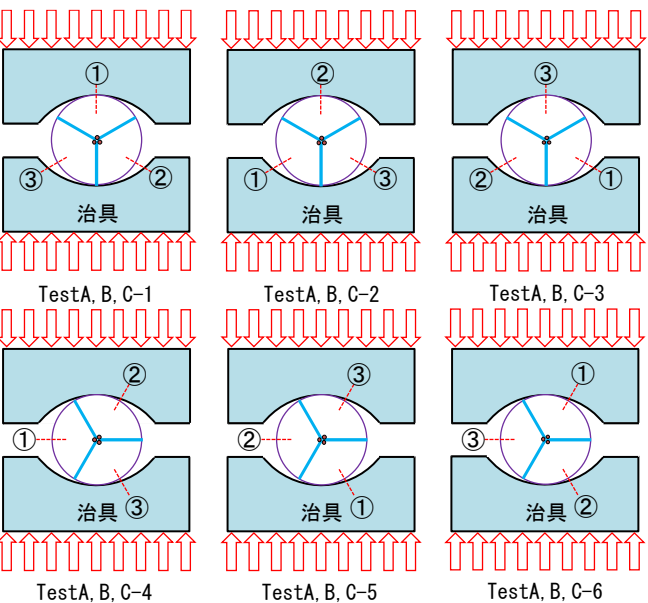


図-1：Test A, Test B, Test C の载荷状態

2. 実験概要

本研究では、円柱形の鋼球群サンプルに対して直径方向に载荷除荷を行い、測定方向ごとの抵抗値を測定する2次元方向の载荷・除荷実験を3ケース行った。サンプルの寸法は直径5cm、高さ5cmである。金属鋼球は、直径3mmのステンレス製の鋼球を使用した。サンプル内部の鋼球群はシリコーン樹脂で固定を行っている。サンプル内部は120°ごとの3つの鋼球群に分かれており、鋼球群間で電流が流れないように作成している。絶縁のための仕切の材質を変えてサンプルを3種類作成した。アクリル板で仕切られたサンプルをTest A、仕切りの材質にセロハンテープを用いたサンプルをTest B、シリコーン樹脂によって絶縁されたサンプルをTest Cで使用した。それぞれのサンプルに対し剛性試験機と治具を用いて図-1に示すTest A, Test B, Test Cごとに6つのケースの载荷状態で196Nまでのサイクルを2回、392Nまでのサイクルを3回の計5回の载荷除荷サイクルで実験を行った。各方向に直流安定化電源を用いて定電流0.5Aを流し、Kelvinの4端子測定法によって電圧値を測定し、抵抗値を算出した。

3. 結果の解析

白石¹⁾によると、荷重-抵抗値関係を両対数軸で近似直線を引いた傾きと、各方向にかかる平均応力との間には強い相関がある。まず、各方向にかかる平均応力の理論解 $X_p(\theta)$ は式(1)のようになる。

$$\chi_p(\theta) = \int_0^{\frac{1}{2}\pi} \int_0^{\frac{1}{2}\pi} \frac{-(1-\rho)(1+\rho)(1+\rho^2)\rho d\phi d\rho}{(1+2\rho\cos\phi+\rho^2)(1-2\rho\cos\phi+\rho^2)} \quad (1)$$

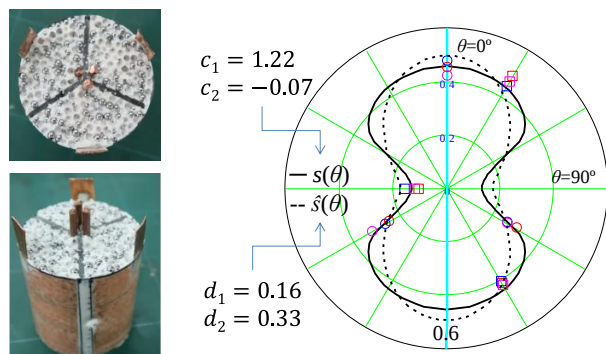


図-2：Test A のサンプルとフィッティング曲線

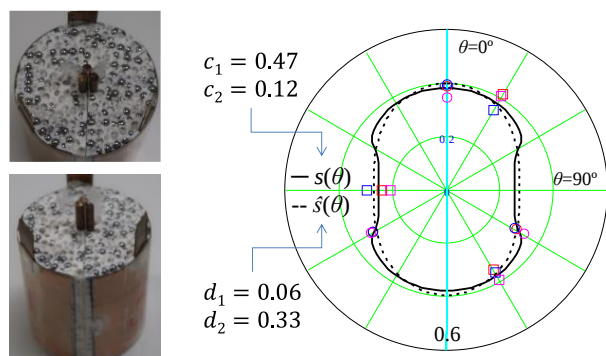


図-3：Test B のサンプルとフィッティング曲線

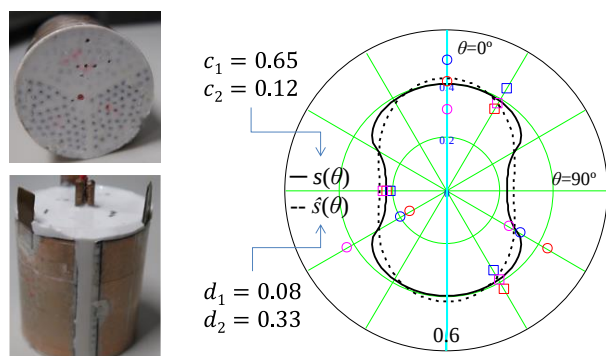


図-4：Test C のサンプルとフィッティング曲線

3 方向に分けられたそれぞれのエリアで面積分を行い、 $X_p(\theta)$ を算出する。各方向の平均応力の割合 $x(\theta)$ は式(2)のようになる。

$$x(\theta) = \frac{1}{\pi} \left(\chi_p \left(\theta - \frac{\pi}{3} \right) - \chi_p \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) \right) \quad (2)$$

そして、Test A～Test C から得られた抵抗値変化の傾きの大きさを極座標上に表し、 $x(\theta)$ を実験結果に合わせてフィッティングした曲線 $s(\theta)$ と $\hat{s}(\theta)$ を描くと図-2～図-4のようになる。極座標の角度 θ はサンプルに対する荷重の方向を表している。実線は $x(\theta)$ を実験データで線形フィッティングさせた曲線 $s(\theta) = c_1 x(\theta) + c_2$ で、点線は $\cos(2\theta)$ 関数でフィッティングした曲線 $\hat{s}(\theta) = d_1 \cos(2\theta) + d_2$ である。ただし、 c_1, c_2, d_1 と d_2 は線形近似による係数を表す。全体的に曲線に沿って測定値が良く一致していることが分かる。

表-1：フィッティング曲線による荷重方向の推定

Test	曲線 $s(\theta)$	曲線 $\hat{s}(\theta)$
A-6		
B-6		
C-6		

荷重方向の推定手法について説明する。未知の方向から荷重がかかった際の抵抗値の対数変化率の割合を計算し、極座標上にプロットする。各方向の測定値とフィッティングした曲線が一致するように回転させて、得られる曲線 $s(\theta - \beta)$ と $\hat{s}(\theta - \beta)$ の軸が、荷重方向 β であると推定される。荷重方向を $\beta = 0^\circ$ としてそれぞれの実験結果ケース A-6, B-6, C-6 を用い、荷重方向の推定を行った結果が表-1 のようになった。ある程度の荷重方向が推定できている。

4. まとめ

本研究で用いた測定手法により、3 分割された円柱形のサンプルにかかる荷重の方向を特定することが可能であると考えられる。仕切の材質とサンプル作成方法の検討に加え、弾性解を使った荷重方向の推定方法を詳細に調べていくために、さらに細かい角度で荷重角度を変えて実験を行っていく。

参考文献

1) 白石啓太, ピパットポンサー・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発表講演集, pp. 77-78, 2018.