

乾燥砂路面上のそろばん道路：簡易室内実験による基礎的研究

Washboard road on sand surface: Fundamental Study on the laboratory experiments

北海道大学工学部工学院
北海道大学大学院工学院
北海道大学大学院工学研究院
北海道大学大学院工学研究院

○ 学生員
学生員
会員
フェロー

橋本風惟(Kai Hashimoto)
池田愛子(Aiko Ikeda)
鄭好(Hao Zheng)
蟹江俊仁(Shunji Kanie)

1. 緒言

積雪凍結路(図 1(a))および未舗装路(図 1(b))上を車両が繰り返し通過すると、タイヤ跡に沿って凹凸状の起伏が路面に自然発生することが確認されている。この凹凸起伏は「そろばん道路」と呼ばれ、多くの科学者から注目を集めている¹⁾。そろばん道路を走行すると、車体が大きく振動し、道路利用者に不快感を与える。さらに、タイヤのグリップ力を低下させるため、制動不良によるスリップ・スピン事故を引き起こす原因として車両走行の安全性に影響を与えている。冬に路面が雪で覆われている札幌ではそろばん道路が現れる。蟹江ら²⁾の観測に基づき、積雪凍結路でのそろばん道路は、通常かなりの量の積雪で、0℃から-2℃の温度範囲が提示されたときに発生することが分かった。しかし、そろばん道路の形成機構は未だ解明されていないことが多く、そろばん道路への効果的な対処法は確立されていないため、現在は経験的かつ対処療法的なものに限られている。

本研究では、乾燥砂を用いた実験によってそろばん道路の形成機構を解明することを目的としている。自動車のタイヤと地面の接地による影響を調べ、路面の変位変形挙動に関わる物性評価を行い、そろばん現象の数理モデルを構築する一助としたい。



(a)積雪凍結路



(b)未舗装路

図 1：そろばん道路

2. 室内再現実験

豊浦砂を用いて室内再現実験³⁾を行うと、凹凸起伏が確認された。室内実験装置に乾燥砂を敷き詰め作成した路面に振動子を設置し回転させた。時間が経過すると路面表面は水平状態(図 2(a))から徐々に波打ち、実験終了

時にはそろばん路面となった(図 2(b))。



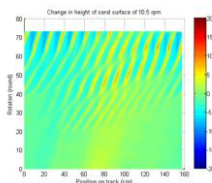
(a)実験前



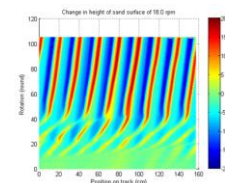
(b)実験後

図 2：室内再現実験

観測時間とレーザーにより読み取った路面表面の高さの変位を図 3に示す。観測時間や路面を回す速度、振動子から路面表面にかかる力、振動子の固有周期等によってそろばん路面の周期や振幅が異なる。また、これらの要因はそろばん路面の成長にも大きく関わっている。



(a)路面周回速度10.5rpm



(b)路面周回速度18rpm

図 3：路面表面変位のコンター図

3. 動的微小応力実験

3.1. 実験目的

室内におけるそろばん現象の再現実験に成功したため、本研究ではそろばん路面生成過程を数学的に説明するためのモデル構築を目標に、微小応力試験器を用いて、そろばん道路が生成する過程における自動車のタイヤと地面の接地による影響を調べる。試料には豊浦砂を用い、乾燥砂におけるそろばん道路の形成機構について考察する。接触子には、直径3cm、幅1.5cmのプラスチック製円柱型接触子を用い、タイヤに見立てた接触子を試料である豊浦砂に落下させる。接触子が試料に沈み込む様子を観察し、変位や周囲への試料の飛散等を調べ、試料の影響幅と影響高さについて考察する。

3.2. 実験方法

接触子がある程度の高さから試料へ落下させる載荷を

キーワード そろばん道路 凹凸起伏 乾燥砂 室内再現実験 微小応力実験 DEM 解析

連絡先 〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目 北海道大学大学院工学院 TEL 011-706-6115

繰り返した。動的な貫入量と力の関係を測定するために、接触子が沈み込む最大値を取れるよう試験器を設定した。1回目の载荷は水平にした試料表面に接触子を自由落下させ、2回目以降は、試料表面を均さずに前回の载荷による変形を保ったまま実験を行った。微小応力試験器の上にあるナットが下にある固定器具に付いた場合、それ以上貫入することが出来ないため、実験を終了とした。今回は、1個 210g の錘を用い、接触子の上部に載せる錘の数を0個から3個まで変えて実験を行い、比較検討した。試料に荷重がかかる試験器部分の重さは約 60g である。接触子を上限まで持ち上げた時の水平試料表面から接触子までの高さが約 7.5mm になるよう統一した。

3.3. 実験結果

载荷における貫入量が0に近づき、これ以上は貫入しないと考察したため実験は9回で終了とした。錘3個の実験においては、上にあるナットが下にある固定器具についたため、3回で終了とした。载荷回数と水平試料表面からの変位の関係を図4に示す。

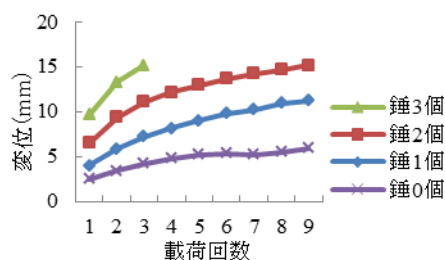


図4：载荷回数と水平試料表面からの変位の関係

3.4. 考察

図4より载荷回数が増えるにつれてグラフの傾きが小さくなっており、貫入量が小さくなっていることが分かる。これは载荷により試料が押し固められていき、試料が大きく変形しなくなったためではないかと考えられる。また、接触子に載せた錘の個数ごとに貫入する限界値があることが分かる。

4. DEM 解析

そろばん道路発生の詳細な数値モデルシミュレーションの作成において、载荷時に試料がどこへ行くかが重要だと考えた。筑波大学の松島亘志先生が公開されている個別要素法(DEM)⁴⁾は、動的微小応力実験の定性的な反応を見ることができ、貫入時の試料の動きや、試料の飛散の様子が分かる。動的微小応力実験をDEMで再現するようモデルの構築をした。計算結果のモデルは図5の

通りである。現象が再現出来る範囲内で計算負荷を軽減させるため、試料は実際より大きい粒径 5mm と設定した。バネ定数は粒子の振動方程式と連続体の波動問題を差分法で解く場合の運動方程式の等価性より求めた。この時、試料の奥行き方向の有効幅は、乾燥砂の鉛直荷重分散角が 45° であるため、図6で表すよう求めた。本解析では、錘3個の動的微小応力実験の再現を目指した。実験値とDEM解析の比較を図7に示す。接触子の変位と载荷回数の関係が非常に類似していることから動的微小応力実験の再現ができているといえる。

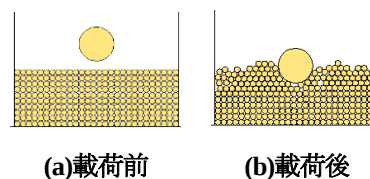


図5：DEM 解析

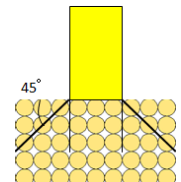


図6：有効幅の設定

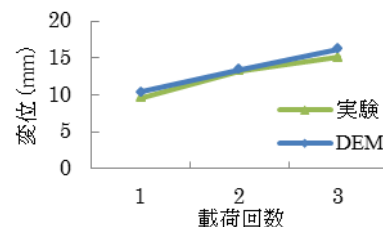


図7：実験値とDEM解析の比較

5. 結論と今後の展望

室内再現実験で発生する凹凸起伏は、観測時間や路面周回速度、接触子にかかる力、振動子固有周期等の影響を受けていることが分かった。動的微小応力実験で、貫入量は载荷回数に依存することが分かった。

今後の展望として、室内再現実験で動的相互作用が分かったので、微小応力実験やDEM解析により遷移状態を調べ、連続的に载荷していく解析モデルを作り、最終的にそろばんに収束するという解明をしていきたい。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP16K01278 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 永田泰浩, 金田安弘, 富田真未: そろばん道路の発生過程について, 北海道の雪氷, 第32号, 80-83.2013
- 2) 蟹江俊仁, Hao Zheng, 横見瀬大地, 金田安弘, 永田泰浩, 正木智: そろばん道路の発生過程とその条件: 定点カメラ観測に基づく一考察, 北海道の雪氷, Vol.35, pp.55-58, 日本雪氷学会北海道支部, 2016
- 3) Teeranai Srimahachota, 池田愛子, 鄭好, 蟹江俊仁: Washboard Road: Corrugation on dry granular sand and snow roadbed, 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD), 2017
- 4) Matsushima, T. and Saomoto, H.: Discrete Element Modeling for Irregularly-shaped Sand Grains, Proc. NUMGE2002: Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Mestat (ed.), pp.239-246, 2002.