

乾燥砂路面上のそろばん道路：その動的変形に関する基礎的研究

Washboard on sand surface of road: Fundamental Study on the dynamic transformation

北海道大学工学部環境社会工学科
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 橋本風惟(Kai Hashimoto)
学生員 池田愛子(Aiko Ikeda)
会員 鄭好(Hao Zheng)
フェロー 蟹江俊仁(Kanie Shunji)

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¹⁾。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²⁾。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³⁾。しかし、そろばん道路の形成機構はいま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。そろばん道路の生成メカニズムを解明するため、室内再現実験や数値解析、定点カメラによる観測などのアプローチをしている。乾燥砂を用いた室内再現実験における凹凸起伏の様子を図 2 に示す。

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。微小応力試験器による実験で、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。また、路面の変位変形挙動に関わる物性評価を行い、そろばん現象の数値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



(a)実験前

(b)実験後

図 2：室内再現実験

2. 静的微小応力実験

試料への接触子の载荷と除荷を繰り返し、その始点をそれぞれ原点に揃えたものを図 3 に示す。試料は塑性変形し、1 回目の载荷により試料が固められ、2 回目以降の载荷では試料が大きく変形しないことが分かった⁴⁾。

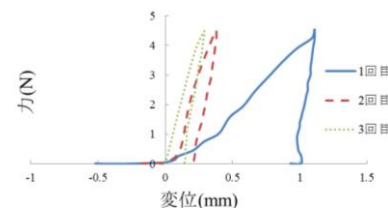


図 3：変位と力の関係(円柱型接触子)

3. 動的微小応力実験

3.1. 実験目的

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、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。静的微小応力実験と比較することにより、静的微小応力実験から動的微小応力実験への移行を計る。

3.2. 実験方法

接触子のある程度の高さから試料へ落下させる载荷を繰り返した。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図 4 に示すように試験器を設定した。1 回目の载荷は水平な試料表面に接触子を落下させ、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くと、それ以上落下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。接触子と水平試料表面から接触子までの高さを約 7.5mm で統一した。

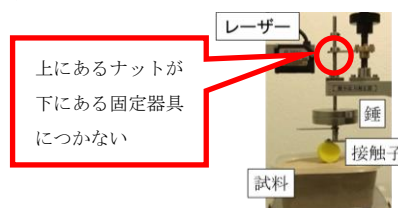


図 4：動的微小応力試験器

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5に示す。また、载荷回数とポテンシャルエネルギーの関係を図6に示す。この時、ポテンシャルエネルギー： $E(\text{mJ})$ を、実験に用いた錘と試験器の重さ： $m(\text{kg})$ 、重力加速度： $g(\text{m/s}^2)$ 、試料表面から接触子までの高さ： $h(\text{mm})$ を用い、式1から求めた。

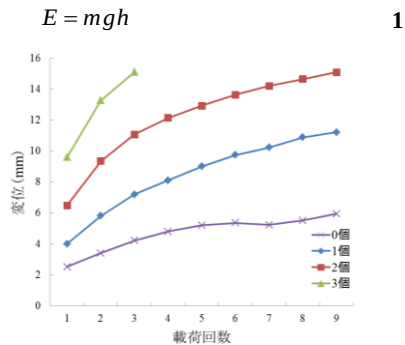


図5：载荷回数と水平試料表面からの変位の関係

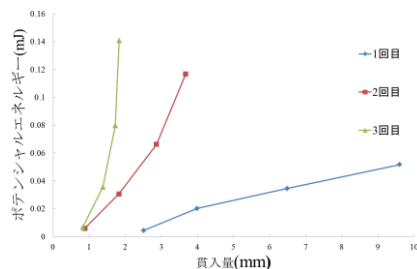


図6：载荷回数とポテンシャルエネルギーの関係

3.4. 考察

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図5から分かり、錘0個では8mm、錘1個では12mm、錘2個では16mmあたりである。錘0個の実験で、貫入量が減少しているところが幾つか見られるのは、接触子を手動で落下させており、接触子の落下位置にばらつきが出たためである。

ポテンシャルエネルギーが大きいほど、貫入量が小さくなるのは、载荷をしていくことにより試料が押し固められていくからである。また、载荷回数が増すほど試料表面から接触子までの高さが大きくなるので、ポテンシャルエネルギーも大きくなる。図6より1回目から3回目までの载荷回数とポテンシャルエネルギーの関係はおおまかに比例の関係にあると考察できたが、4回目以降の载荷はポテンシャルエネルギーに関わらず貫入量は変わらなかったため省略した。

4. DEM 解析

動的微小応力実験を個別要素法(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7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。妥当性については実験と整合性を合わせることで考えていきたい。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8で表すよう求めた。DEMで载荷を繰り返すと、接触子の貫入量が小さくなっていき、やがて貫入しなくなる。このことから、DEMでの再現でも貫入する限界値があることが分かる。

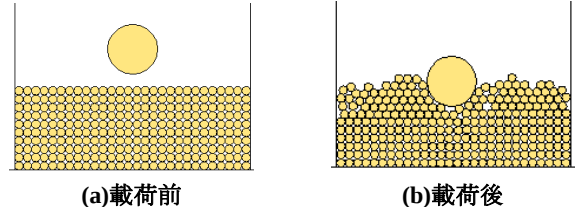


図7：DEM 解析

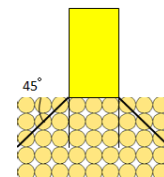


図8：奥行き方向の有効幅の設定

5. 結論と今後の展望

動的微小応力実験を行った結果、貫入量は载荷回数に依存することが分かった。また、貫入量は同じ载荷回数との比較であればポテンシャルエネルギーにも依存することが分かった。静的微小応力実験と比較してみても、変位と力(ポテンシャルエネルギー)の関係は線形であることが共通している。どちらも载荷を繰り返すと、試料が押し固められ大きく変形しない。

今後の展望として、今回は試料に乾燥砂を用いたが、湿潤砂や人工雪など様々な試料で実験をし、実験データの比較をしていきたい。また、接触子も円柱型だけでなく、半球型や三角柱型でも実験を行い、実験データの比較をしていきたい。またDEM解析でより正確な解析が出来るようさらなるパラメーターを検討したい。最終的には、連続的に载荷していく解析モデルを作り、動的微小応力実験と合わせ、路面上に出来るそろばん道路を追っていきたい。

参考文献

- 1) Taberlet N., Morris S., McElwaine J.: Washboard road: The dynamics of granular ripples formed by rolling wheels, *Physical Review Letters* 99, 068003, 2007
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 池田愛子, Teeranai Srimahachota, 鄭好, 蟹江俊仁: 車両走行により自然発生する乾燥砂凹凸路面の実験的研究, 土木学会年次技術講演会講演概要集(CD), 2017