

車両走行により自然発生する乾燥砂路面凹凸パターンの実験的研究

Experimental study on spontaneous corrugation patterns on dry sand due to moving vehicle

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 池田愛子(Aiko Ikeda)
学生員 Teeranai Srimahachota
会員 鄭好(Hao Zheng)
フェロー 蟹江俊仁(Kanie Shunji)

1. 諸言

未舗装路(図-1(a))および積雪凍結路(図-1(b))ではタイヤ跡に沿って凹凸状の起伏が路面上に発生することが確認されている¹⁾。また、鋤など農具の使用時にも農地で凹凸起伏が生成される場合がある。日本でも1950年代から「そろばん道路」として認知され竹下らにより研究されていた²⁾。世界有数の積雪寒冷地である北海道の冬期においても積雪凍結路面にそろばん道路が自然発生し、走行車両の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。近年雪氷関連研究者の間で注目を集めている現象であるが、蟹江らによる定性的研究にとどまり、車両走行により自然発生する路面凹凸の形成機構はいまだに解明されていないため、そろばん道路への現在の対処法は経験的かつ対処療法的なものに限られている³⁾。そろばん道路生成メカニズムを科学的アプローチで解明し、新しい道路管理技術を提案することにより、道路交通の安全性と快適性の向上に寄与することが望まれている。



(a) 未舗装路



(b) 積雪凍結路

図-1：自然発生した凹凸路面

本研究では、乾燥砂を用いた実験によるアプローチから凹凸起伏の形成機構の解明をめざす。自動車のタイヤから地面に与えられる力の影響を観察し、路面材料の変位変形挙動に関わる物性評価を行うことで、路面凹凸パターンを数学的に説明したい。

2. 乾燥砂を用いた再現実験

凹凸形成再現実験を行うと、乾燥砂を用いた場合において凹凸起伏が確認された。室内実験装置に乾燥砂を敷き



(a) 実験前



(b) 実験後

図-2：室内再現実験

詰めた路面に振動子を設置し回転させると、ある臨界速度を超え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))。観測時間とレーザーにより読み取った路面表面の高さを図-3に示す。高速フーリエ変換(FFT)を用いて実験データを整理すると、図-4の路面周期と凹凸波形の振幅のグラフが得られた。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。

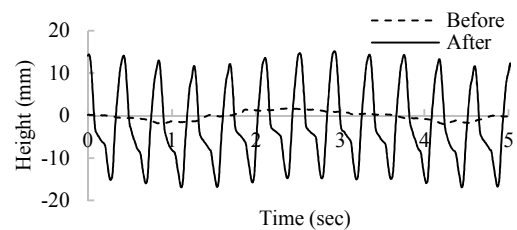


図-3：路面表面の高さ

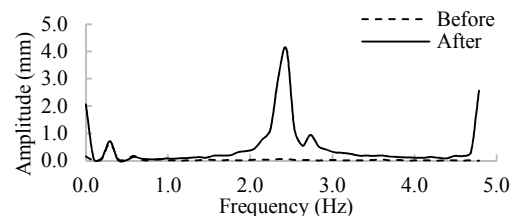


図-4：路面表面の周期

再現実験に成功したため、本研究ではそろばん路面の生成を数学的に説明するためのモデル構築を目標に、自動車のタイヤが路面表面に与える力と、それによる貫入量との関係を実験的に求めることとした。

3. 解析モデルの検討

乾燥砂路面に自然発生する凹凸起伏を数学的に説明するために、実験で用いた振動子を模した図-5のような1自由度系のモデルについて考える。

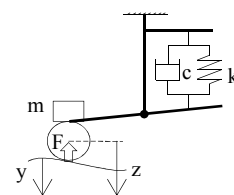


図-5：1自由度系の振動子モデル

自動車のタイヤに見立てた質量 m の接触子は、ばねによる復元力(ばね定数 k)とサスペンションによる減衰(減衰係数 c)、路面からの外力 F により振動する。路面表面の高さを y 、接触子の位置を z とし、時間 t における

図-5の1自由度振動子の運動方程式を式(1)に示す。

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = F(y, z, t) \quad (1)$$

それぞれの項は力を表しており、外力は説明変数が3つある関数である。

4. 微小応力実験

式(1)で示した解析モデルは外力に3つの変数が含まれている。本研究ではモデル化の最初のステップとして、路面への接触子の貫入量($y-z$)と路面から接触子への静的反力の関係を実験的に調べることにした。

本実験で使用した試験器の概要を図-6に示す。路面材料として豊浦硅砂(旧豊浦標準砂)を用いた。自動車のタイヤに見立てた接触子には、円柱型、半球型に加え、接地面からの角度が異なる三角柱型の3種類の形状を用意した(図-7)。素材はいずれもプラスチック製である。接触子の上部にはおよそ5Nの錘を載せ、接触子を徐々に降下させながら載荷重と貫入量との関係を計測していく。載荷重の大きさは下部に設置した電子天秤で計測し、その最大値は上載荷重である5Nとなる。また、接触子の位置はレーザー変位計で計測した。

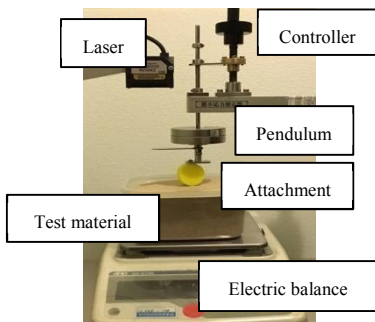
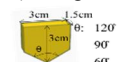


図-6：微小応力試験器

a) Triangular prism



b) Hemisphere



c) Cylinder



図-7：接触子

1回の実験において接触子の下降と上昇をそれぞれ3回ずつ繰り返した。接触子が最も深い位置まで沈み込みレーザー値が変化しなくなった時点で下降の実験を終了し、上昇の実験へと移行した。上昇時は質量が0gもしくはその近辺値で変化しなくなった時点で終了とした。

5. 実験結果

実験により得られたデータを、横軸に変位(mm)、縦軸に力(N)をとりグラフ化した。図-8に自動車のタイヤと同型の円柱型接触子について3回の下降・上昇の始点をそれぞれ原点にそろえたものを示す。下降時は変位と力の関係は線形的に増加しており、上昇時は小さな変位量でも急激な力の減少が見られる。また、1回目の上昇の終点、つまり2回目の下降の始点は1回目の下降の始点と一致していない。これより試料は塑性変形していると言える。さらに3回の下降時を比較すると、グラフの傾きは回数を重ねるにつれて大きくなっている。これは1回目の下降により試料が固められ、2回目以降の下降では試料が大きく変形しないことを表している。

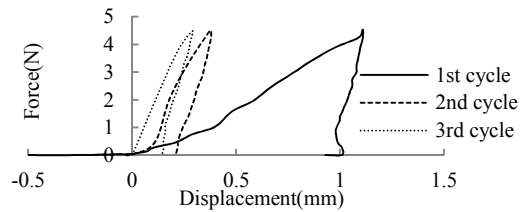


図-8：変位と力の関係(円柱型)

他の接触子についても同様の結果が得られた。形状効果を調べるために接地面からの角度が異なる三角柱型と半球型、円柱型について、それぞれ1回目の下降のグラフのみをまとめたものを図-9に示す。接地面との角度が大きいくほどグラフの傾きが小さく、試料は変形しやすいことがわかる。また、接触子の形状の違いによっても試料の沈み込む変位量は変わってくる。三角柱型、半球型、円柱型の順にグラフの傾きが大きくなっており、より試料変形が起こりづらいことを表す。これは接触子の試料との接地角度の違いによるものと考えられる。接地角度が小さい接触子ほど図-9におけるグラフの傾きが大きく、試料変形が起こりづらいと言える。

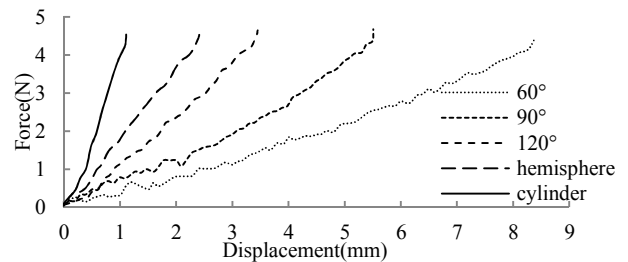


図-9：変位と力の関係

6. 結論と今後の展望

試料に豊浦硅砂を用いてさまざまな種類の接触子について微小応力試験を行った結果、試料は接触子の形状により異なる塑性変形を起こし、変位と力の関係は線形であることがわかった。収集したデータは解析モデルに外力 F として組み込むことができる。

今後の展望として、試料に人工雪を用いた微小応力試験を行い、豊浦硅砂を用いた場合との違いを考察したい。また、今回の実験では温度や湿度等外的要因を正確に保つことができなかったため、今後は冷蔵庫等を利用して一定条件下の実験データを収集したい。

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) 竹下春見, 小林浩二: そろばん道路・砂利道の波, 道路: road engineering & management review, Vol.54, Issue 2, pp.69-71, 1954
- 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