

# ポンピングにおける路盤粒子の動きに関する基礎的実験

三宅佑典<sup>1</sup> 重廣和輝<sup>2</sup> Yanjinkham CHAGNAADORJ<sup>2</sup> 中島伸一郎<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)  
E-mail: b014vev@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

<sup>3</sup>正会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)  
E-mail: nakasima@yamaguchi-u.ac.jp

本研究では、ポンピング現象のメカニズム解明に向け、小型模型を用いて、輪荷重載荷時の路盤粒子の挙動の自動追跡を行った。路盤材の一部に蛍光スプレーを吹き付け、ブラックライトを当てることで、粒子間で発光強度に差が現れ、染色粒子の自動追跡が可能となった。輪荷重の 100 回載荷における 10 回ごとの粒子の挙動に着目すると、載荷 1-10 回における沈下挙動が大きく、その後は、徐々に沈下挙動が小さくなることがわかった。さらに、粒子全体の軌跡については、目地方向への挙動が確認された。

*Key Words : pavement, pumping, joint, model experiment, particle tracking*

## 1. はじめに

ポンピング現象(図-1)は、交通荷重による舗装版のたわみによって路盤表面付近の過剰間隙水圧が上昇し、開口部であるクラックから排水する過程で、路盤の細粒分が押し出されるプロセスであると想像する。ただし、もっと詳細な侵食過程、つまり路面を荷重が移動し、クラックの上を通り過ぎていくことが繰り返す中で、どのあたりの路盤材が侵食を受けやすいのか、荷重がどの位置にいるときに路盤材が動くのか、どの程度の深さの細粒分まで侵食の対象となるのかは、実験的に可視化してみないことにはわからない。そこで本研究では、実験中の路盤材の動きを粒子レベルで追跡することで、侵食プロセスを明らかにすることとした。

## 2. 実験装置

図-2 に示す輪荷重周回型ポンピング実験模型<sup>2)</sup>を使用

する。本装置はリング形状の亚克力製土槽に路盤模擬材である珪砂 6 号を詰め、その上に舗装版を模した亚克力板を載せることで舗装構造を模擬した。土槽は舗装版下の粒子の挙動や侵食形態を可視化するため、透明亚克力で作成されている。舗装版には舗装目地を模擬したスリットを 1 か所設ける。載荷は図-2 に示すように 5



図-1 ポンピング現象の例

kgの重りを2つ載せた車輪付きの回転盤を一定方向に周回させることで、目地から路盤材が噴出する。車輪の進行方向に対して、目地手前の版をアプローチ版、目地奥の版をリーブ版と呼び分ける。

### 3. 路盤粒子挙動の追跡

車輪による移動荷重によって舗装版下の路盤粒子が目地付近を移動し噴出に至る過程を観察するため、土槽側面から動画撮影を行った。動画の撮影速度は 30 fps、解像度は 1024×576 の条件で、図-2 の赤枠で示す領域 (幅 100 mm×高さ 60 mm) を定点撮影した。

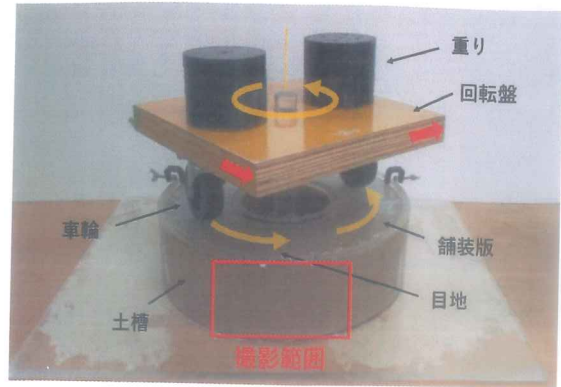


図-2 車輪周回型ポンピング模型実験装置

#### (1) 自動追跡

撮影した動画から特徴的な粒子を選び、その移動を追跡することとした。使用した画像解析ソフトは Fiji である。Fiji のプラグインである追跡分析ツール TrackMate<sup>3)</sup> を使用して、特徴点の自動抽出と自動追跡を行った。自動追跡を行うにあたり、32-bit の RGB カラーで表示された連続画像を 8-bit 画像へ変換した。TrackMate では、輝度、半径および形状の条件を指定することで、条件を満足する対象を抽出し、輝度に対して閾値を設定することでトラッキングすることができる。図-3 は本研究におけるトラッキング対象の自動抽出フローである。追跡精度の向上やデータ量の圧縮のため、輝点サイズによって検出フィルタを選択した。具体的には、5 px 未満の輝点は DoG 検出器、5~10 px の輝点は LoG 検出器、10 px 以上の輝点はダウンサンプル LoG 検出器の 3 種である。図-4 は、Trackmate による対象粒子の自動抽出結果の例である。追跡対象として抽出された粒子はピンク色の円で囲まれている。連続画像一枚ごとでは、粒子の抽出と追跡が行われていた。しかし、連続画像における一枚目画像の粒子の挙動を連続的に追跡する場合、同一粒子の判別が困難であり誤認識をしていることがわかった。路盤模擬材が珪砂 6 号のみであると粒子同士の輝度が同程度となってしまうことが原因と考えられる。8-bit 画像は輝度情報のみを含んでおり、輝度に対して閾値を設定することで、閾値以上の粒子を輝点とみなし追跡を行うため、路盤模擬材内で発光強度の差が重要であると考えた。

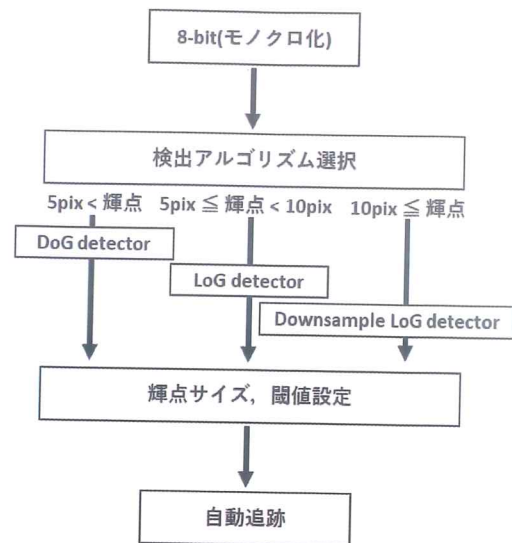


図-3 自動抽出フローチャート

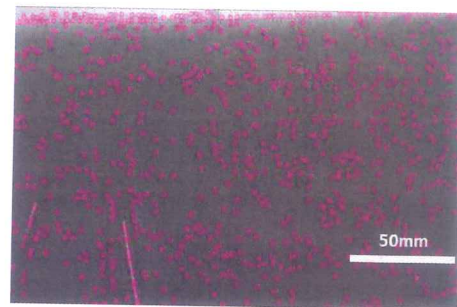


図-4 自動追跡結果(珪砂 6 号のみ)

#### (2) 追跡対象粒子の検討

自動追跡の精度を向上させるために、蛍光塗料とブラックライトを用いた実験の検討を行った。蛍光塗料はブラックライトを当てることで、可視光に変換され発光するため輝度値が高くなる<sup>4)</sup>。少量の珪砂 6 号に合成樹脂蛍光スプレーを吹き付け、スプレーを吹き付けていない珪砂 6 号と混合し、これを路盤模擬材として土槽に詰め

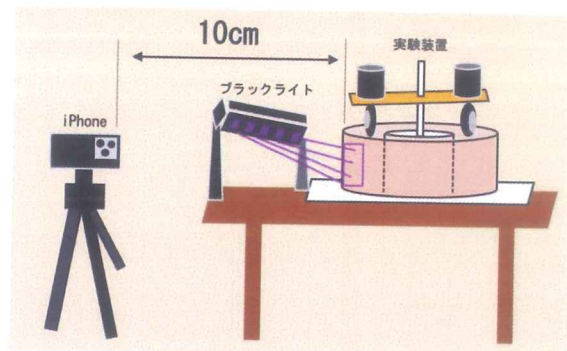
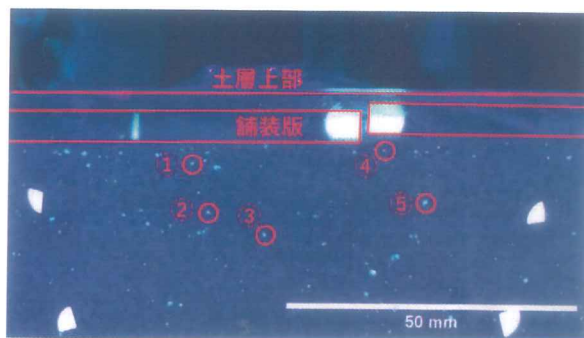


図-5 実験の模式図

た。図-5 に示すように、車輪周回型ポンピング模型実験装置の路盤部にブラックライトを照射し、装置から 10 cm 離れた位置から動画で実験の様子を撮影する。図-2 の赤枠箇所に対し、土槽側面からブラックライトを当てることで、蛍光スプレーが付着している粒子のみ発光強度が高くなり自動追跡が可能であると考えた。図-6(a) に解析前の画像を図-6(b) に解析後の画像を示す。図-6(b) より、蛍光スプレーが付着した粒子のみピンク色の円で囲まれており、輝点として認識されていることが分かる。



(a) 解析前画像



(b) 解析後画像

図-6 自動追跡結果(蛍光スプレー)

(3) 精度検証のための手動追跡

蛍光処理後の TrackMate による自動追跡の精度を確認するため、手動追跡による結果との比較を行った。手動追跡は、Fiji 内の追跡分析ツール Manual tracking 機能を用いた。Manual tracking は連続画像における対象物の動きを定量化することができる。図-7 のような連続画像において、路盤粒子のうち、目視可能である特徴的な粒子を一画像ずつ手作業で指定し座標値を得る。得られた座標値をもとに、水平方向、鉛直方向の粒子の変位を求め、自動追跡結果と精度の比較を行う。

染色砂粒子を用いた実験での精度検証のために、図-6(a) で示した画像内 5 つの粒子について、連続画像 1 枚目から最後の 2717 枚目までの粒子追跡における、手動追跡の結果を真値としたときの自動追跡との相関係数を求め、①の粒子の結果を図-8 に示した。水平方向、鉛直方向の相関係数はいずれも 1 に近い値となった。さらに粒子①から⑤の相関係数の平均値についても、水平方向は 0.9926、鉛直方向は 0.9988 と精度が高く、TrackMate を用いた自動追跡、蛍光スプレーとブラックライトを用いた染色砂粒子実験は路盤粒子追跡の手法として適当であることが分かった。

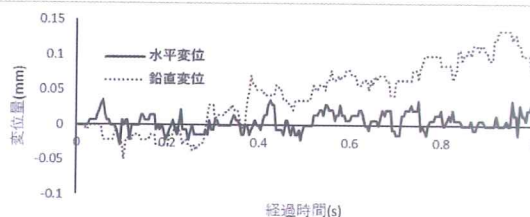
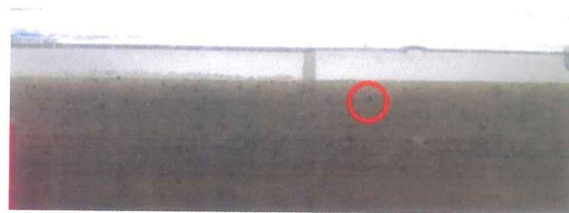
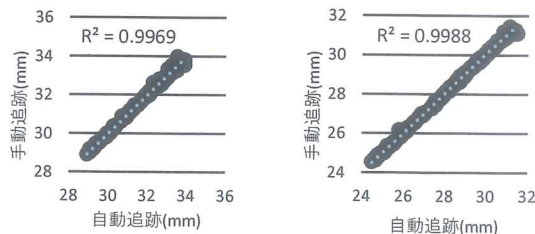


図-7 手動追跡の例

4. 結果

輪荷重載荷時の路盤粒子の挙動を把握するため、次のような実験を行った。図-9 に示すように、アプローチ版下の路盤粒子には蛍光スプレーを吹き付けた染色珪砂を混合し路盤材とした。対して、リーブ版下の路盤粒子は染色珪砂を含まず珪砂 6 号のみを路盤材として使用した。図-10 に輪荷重 100 回載荷時の路盤粒子の挙動について、自動追跡した結果を示した。図-10 における粒子の挙動を細かく把握するため赤枠で囲まれた箇所(図-11)に着目する。図-11 は載荷回数 10 回ごとの粒子の挙動を示したものである。図-11 より、白色の軌跡で示された載荷 1-10 回における粒子の沈下挙動が大きいことが分かる。さらに、1-10 回の白線、11-20 回の赤線、21-



(a) 水平方向 (b) 鉛直方向

図-8 自動追跡と手動追跡による相関係数

30回の青線と鉛直変位は減少し、荷重を重ねるごとに挙動は小さくなっている。本実験における路盤は飽和状態であるため、荷重による締め固めの影響が初めの1-10回にかけて大きくなったと考えられる。さらに、目地からの噴出による飽和度の低下も要因として挙げられる。また、図-11の粒子挙動について、全体の軌跡に着目すると目地方向への挙動が確認できる。これについては、荷重の荷重により舗装版のたわみとその復元が起こるが、この復元力は上向きのエネルギーを持っており、このエネルギーにより路盤粒子も目地方向に引き寄せられたと考えられる。しかし、図-10について舗装版直下では10回ごとの軌跡が密集しており、複雑な挙動が見取れる。ポンピングにより空洞が発生したことで、溜まった水に対する光の反射光や舗装版付近を漂っている染色珪砂が原因と考えられる。精度の向上に向けて反射光の映り込みを抑える必要がある。

5. まとめ

本研究では、小型模型を用いたポンピング実験における、路盤粒子の挙動を観察するため蛍光スプレーとブラックライトを用いた追跡対象粒子について自動を行った。自動追跡の精度について、手動追跡の結果を真値としたときの自動追跡との相関係数を求めたところ0.99と非常に近い値をとり、追跡精度が高く対象粒子、追跡手法として適当であることが分かった。また、粒子間で輝度の差をつけることで、蛍光スプレーが付着した粒子のみ輝点として認識し追跡できることが分かった。荷重100回載荷時の粒子挙動について、締め固めの影響で1-10回における沈下移動が顕著で、徐々に沈下量は下がった。さらに、目地方向へ引き寄せられていることも確認できた。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所 土木研究所：コンクリート舗装の変状に関する技術資料，土木研究所資料集第 4266 号，32p，2013.
- 2) 重廣和輝，中島伸一郎：舗装版下で発生するポンピング現象における基礎的小型模型実験，土木学会全国大会第75次学術講演会，V-423，2019.
- 3) Jean-Yves Tinevez, Nick, P., Johannes, S., Genevieve, M., H., Gregory, D, R., Emmanuel, L., Sebastian, Y, B., Spencer, L, S.,

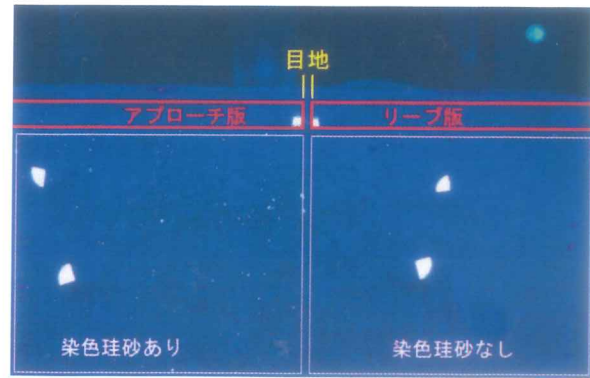


図-9 実験状況図

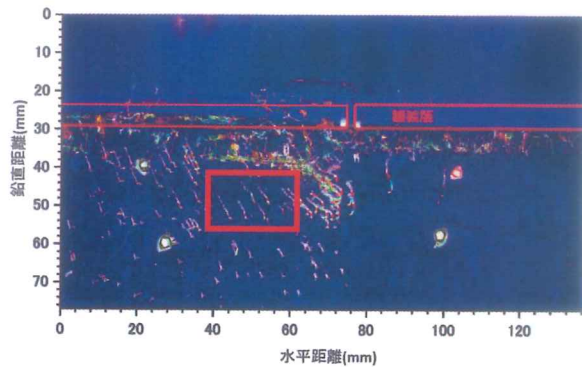


図-10 100回荷重載荷における粒子挙動

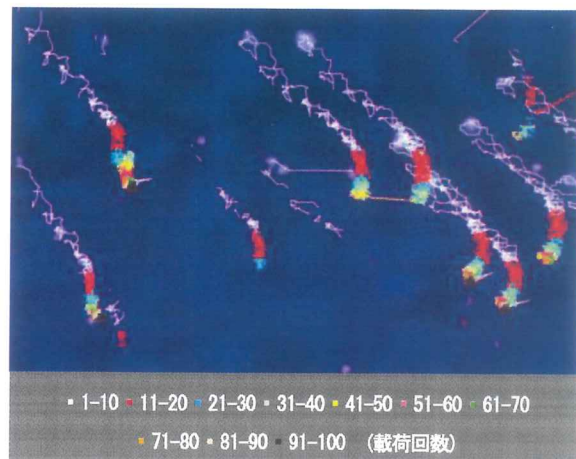


図-11 赤枠箇所拡大図

- Kevin, W, E., : TrackMate: An open and extensible platform for single-particle tracking , Vol. 115, pp.80-90, 2017.
- 4) 楠田啓,西山孝: 蛍光塗料を用いた前処理による画像認識と解析, 資源と素材, Vol. 112, pp.589-593, 1996.