

博士論文

舗装版下で発生するポンピング現象の メカニズムに関する研究

(Experimental study on mechanism of pavement pumping and subbase erosion)

重廣 和輝

山口大学大学院創成科学研究科

2024年3月

論文題目

「舗装版下で発生するポンピング現象のメカニズムに関する研究」

目次

第1章 序論

- 1.1 研究の背景 1
- 1.2 本論文の構成 9

第2章 ポンピング現象に関する既往研究

- 2.1 ポンピング現象の発生条件やメカニズムに関する既往の研究 11
- 2.2 過去の研究によるポンピング現象に関する小型模型実験 17
- 2.3 本研究の目的 18

第3章 ポンピング現象メカニズム解明のための模型実験の開発

- 3.1 ポンピング模型実験作製条件 19
- 3.2 輪荷重周回型模型の開発 22
- 3.3 輪荷重周回型模型を用いた予備実験 25
- 3.4 まとめ 29

第4章 ポンピング現象の影響因子に関する実験

- 4.1 概要 31
- 4.2 輪荷重載荷時における過剰間隙水圧の測定 32
- 4.3 舗装版の性質がポンピング現象に及ぼす影響 42
- 4.4 交通条件がポンピング現象に及ぼす影響 45
- 4.5 舗装の排水性能がポンピング現象に与える影響 51
- 4.6 路盤の性質がポンピング現象に与える影響 53
- 4.7 まとめ 58

第5章 ポンピング現象発生時の路盤粒子の挙動

- 5.1 概要 61
- 5.2 路盤粒子追跡方法 62
- 5.3 載荷による路盤全体の粒子挙動 68

| | | |
|-----|-------------------------------|----|
| 5.4 | 異なる染色粒子を用いた載荷実験による噴出粒子の供給源の確認 | 74 |
| 5.5 | 舗装版目地部周辺の挙動 | 78 |
| 5.6 | まとめ | 81 |

第6章 結論

| | | |
|-----|----------|----|
| 6.1 | 研究結果の総括 | 83 |
| 6.2 | 今後の展望と課題 | 86 |

参考文献

第1章 序論

1.1 研究の背景

舗装は、人の移動や物流など、我々の生活を支える上で重要な土木構造物である。我が国では1960年代後半から経済の拡大に伴いマイカーブームが到来した。モータリゼーションの進展の背景には、道路舗装の整備がある。政府は1954年から、日常生活の基盤としての市町村道から国土構造の骨格を形成する高規格幹線道路に至る道路網を整備し、均衡ある国土の発展、活力ある経済、安心できる暮らしを実現することを基本方針とした『道路5箇年計画』を実施し、それに伴い道路の整備は進展してきた。図1-1¹⁾に示すように1960年以降、舗装のストックは急激に増加しており、2021年3月時点で、一般国道で55,829 km、全体で1,007,966 kmもの舗装が供用されている²⁾。

舗装は一般に、たわみ性舗装であるアスファルト舗装と剛性舗装であるコンクリート舗装の2種類に大別される。両舗装の構造を図1-2に示す³⁾。アスファルト舗装は、図1-2(a)に示すように、表層、基層および路盤から構成され、路床上に構築される。一方、コンクリート舗装は図1-2(b)に示すようにコンクリート版と路盤から構成され、路床上に構築されるが、舗装の高耐久化を図る目的で路盤の最上部にアスファルト中間層を設ける場合がある。表層（コンクリート舗装の場合はコンクリート版）は舗装最上部に位置し、交通の安全性や快適性などを確保する必要がある。そのため、塑性変形輪数や平坦性などの性能を一定水準確保する必要がある。路盤は上層（表層、基層、コンクリート版）の支持基盤であり、輪荷

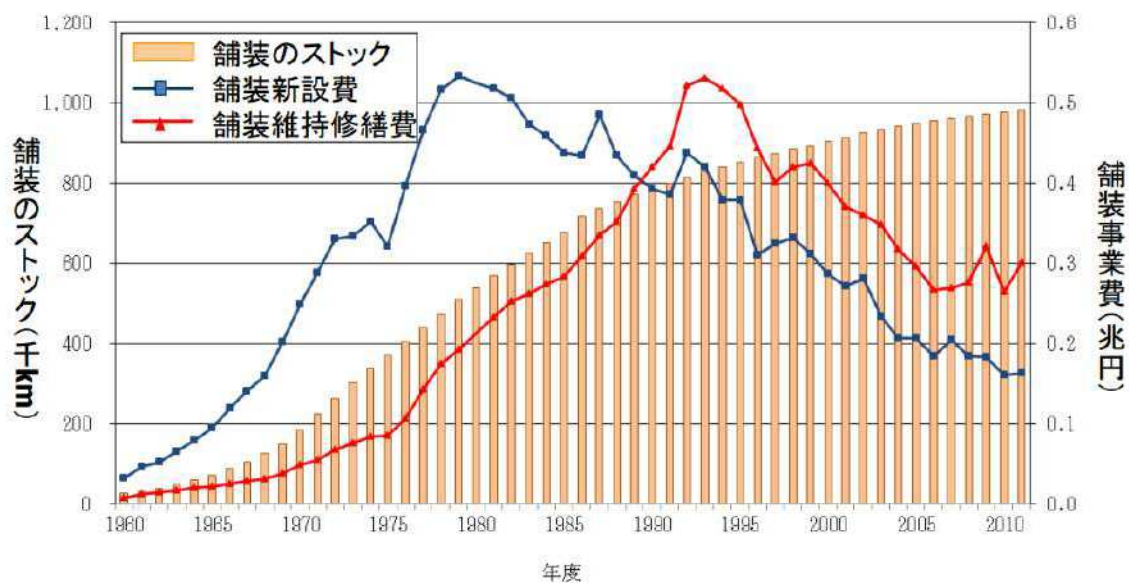


図1-1 舗装のストックと舗装関連予算の推移¹⁾

重により上層から伝播した力を分散しつつ路床に伝える役目がある。したがって、路盤では粒度分布が良い材料を適度に締固めて、丈夫な構造を形成する必要がある。

2022年において、一般国道では図1-3に示すように、総延長の約9割がアスファルト舗装で施工されており、コンクリート舗装の施工はわずか4.4%にとどまっている²⁾。高度経済成長期において、自動車交通が急増する中で、道路舗装の急速な延伸が求められた。初期投資の安さや施工のしやすさなどの理由から、アスファルト舗装の施工が進められ、現在では主流となっている。

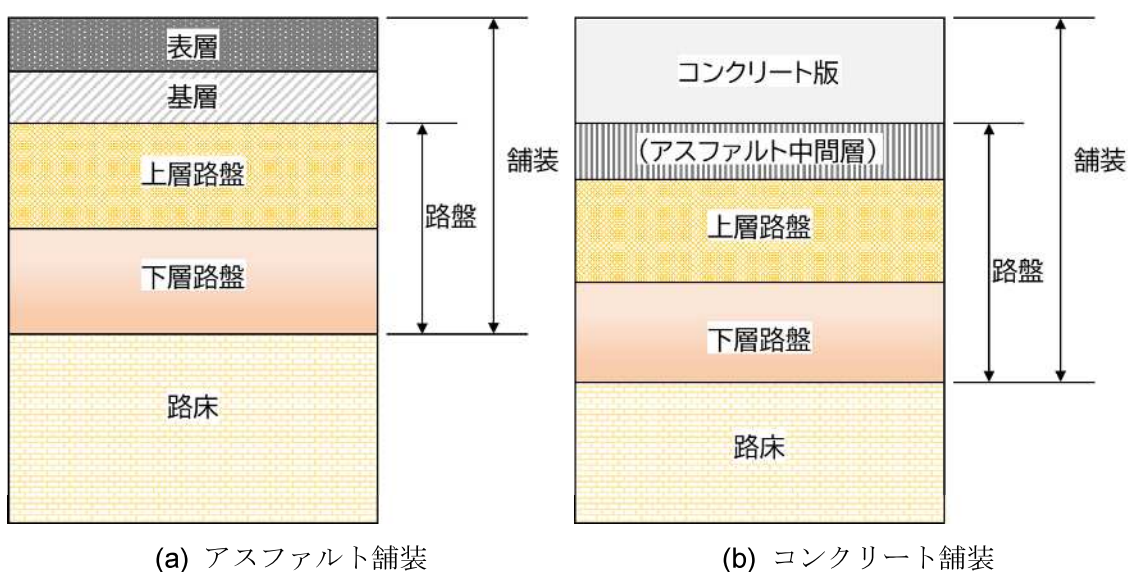


図 1-2 各舗装の構成⁴⁾

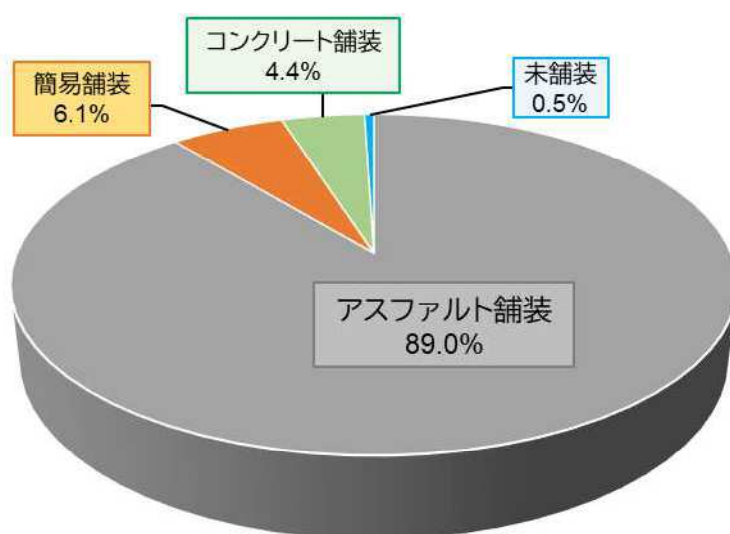


図 1-3 一般国道における舗装種別割合²⁾

膨大なストック量の道路舗装を限られた予算制約の中で維持管理するため、2017年より国土交通省が管理する道路舗装において5年に1度の頻度で点検が行われており、2022年より2巡目の点検が始まっている⁴⁾。点検結果から損傷レベルを区分し、舗装の健全性を3段階に分けて診断し、修繕の優先順位を定めている。舗装点検の基本的な考え方は、構造によって劣化進行の特性が異なる。そのため、高い路面性能が確保できるが、使用材料の特性に起因して劣化速度のばらつきが大きいアスファルト舗装と、目地部が構造的弱点であるものの、長期供用が期待できるコンクリート舗装に大別し、各舗装において異なる点検を行うようになっている。アスファルト舗装では、表層・基層を適時修繕することにより路盤以下の層を保護することを目的としていることから、ひび割れ率、わだち掘れ量、IRI（国際ラフネス指数）等の路面性状に特化した指標を用いて点検を行っている。一方でコンクリート舗装では高耐久性能をより長期間にわたり発現させることを目的としていることから、目地部や版のひび割れ等を重点的に目視点検する。舗装は各点検を行うことにより、計画的かつ効率的な修繕を実施することが可能であり、これにより舗装の長寿命化を計ることができる。

舗装は定期的な点検を行うことで、舗装に求められる3つの機能⁵⁾である快適性、安全性、経済性を確保することができる。舗装の快適性とは、車を運転する際の乗り心地、つまり、運転をする際に振動が少なく、騒音も少ないもの、いわゆる平坦性と静粛性が求められる。安全性とは、運転者が事故なくドライブするために求められる性能であり、路面のすべり抵抗性やレーンマーク等の視認性などが求められる。特に視認性は夜間や雨天時などの条件によって低下し、事故につながる可能性があることから、性能の確保が必要になっている。経済性の確保とは、つまり補修・保全の少ない舗装であり、アスファルト舗装であれば表層・基層を適時修繕することにより路盤以下の層を保護することでLCC（ライフサイクルコスト）の向上を図ることができる。

近年では、舗装の使用目的の多様化、高機能化により従来の要求（快適性、安全性、経済性）に加えて、排水性の付加や景観との調和、凍結抑制効果の付加など、より広範囲かつ高度な機能が舗装に求められている⁶⁾。特に排水性の付加に関しては、これまで路面排水により実施してきた方法ではなく、舗装表層に高い空隙率を有する開粒度アスファルト混合物を使用することで雨水を舗装内に浸透させ、**図 1-4**に示すように排水することができる排水性舗装が近年活用されている。排水性舗装の供用により、ハイドロプレーニング現象の抑制や雨天時における区画線の視認性の向上など、路面排水を行う際の安全上の課題を解決する⁶⁾。一方で、以前に使用されていた透水性舗装⁷⁾は、浸透した雨水を路盤層まで浸透させる構造（**図 1-4**）である。路盤は水分量が多くなると土粒子の間隙に水が浸透することから不安定な状態になり、路盤の強度や支持力は著しく低下する。そのため透水性舗装は力学

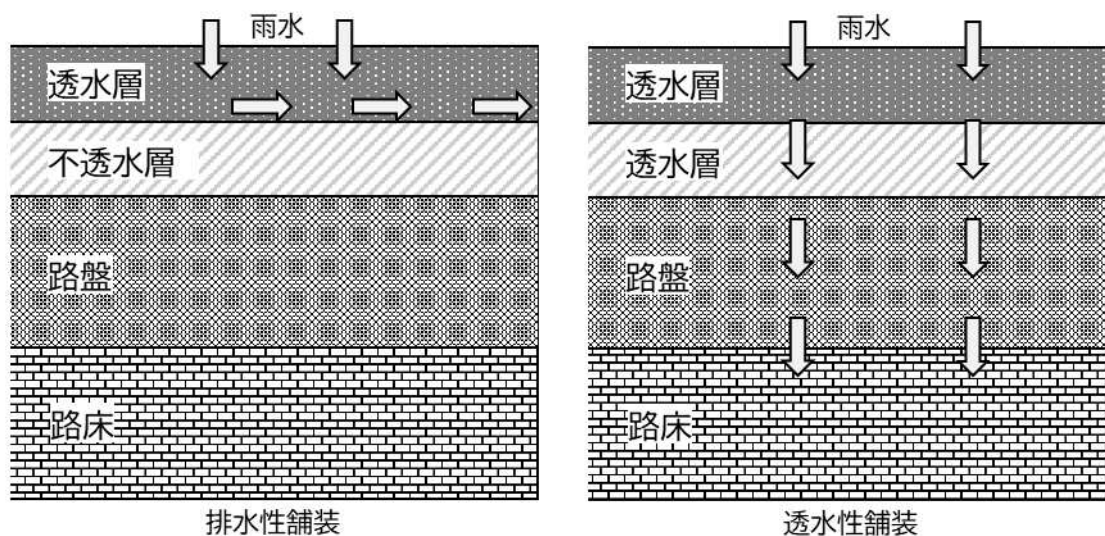


図 1-4 排水性舗装と透水性舗装の排水構造

耐久性に懸念があることから現在では車道での供用は限定的である⁸⁾。

舗装は繰り返し供用されることによって疲労によるわだち掘れやひび割れなどの破損に至るが、舗装は水に弱く、長期的に供用しなくとも地下水や雨水を起因として発生する破損が懸念されている。

地下水を起因とする破損には凍上がある。凍上は主に寒冷地において発生する損傷であり、気温の低下により土中の水分が凍り、地盤中に氷の層が形成されることによって地盤が隆起する現象である⁹⁾。一般に凍上は地盤内に不均一に発生する。そのため、凍上による隆起には差異があり、舗装表面ではひび割れが生じる。これにより、道路の耐久性が低下し、道路表面が崩壊するなどの被害が出る。

一方、雨水を起因とする損傷には、はく離がある。はく離はアスファルト混合物が水に接することにより骨材の表面からアスファルトが剥がれる現象である⁹⁾。骨材は一般にアスファルトよりも水との親和性が大きく、アスファルト混合物が水に接すると水はアスファルト被膜と骨材の間に浸透しアスファルトを骨材表面から剥がしてしまう。はく離が発生すると強度が低下するため、はく離が進行するとわだち掘れやひび割れの発生につながる。

舗装が雨水の影響で破損する過程で発生する現象の一つにポンピング現象がある。ポンピング現象は図 1-5¹⁰⁾に示すように、コンクリート舗装の目地や、アスファルト舗装のひび割れから路盤の細粒分が噴出する現象である。

これまでの研究により推測されているポンピング現象の発生過程¹¹⁾について図 1-6 より説明する。まず、舗装版の目地やひび割れから雨水が浸透し路盤が飽和する(図 1-6(a))。そこに車が通行することにより、荷重進行方向に対し目地手前の舗装版であるアプローチ版と目地奥の舗装版であるリーブ版がたわみとその復元を繰り返す(図 1-6(b), (c)) ことに



図 1-5 コンクリート舗装におけるポンピング発生状況¹⁰⁾

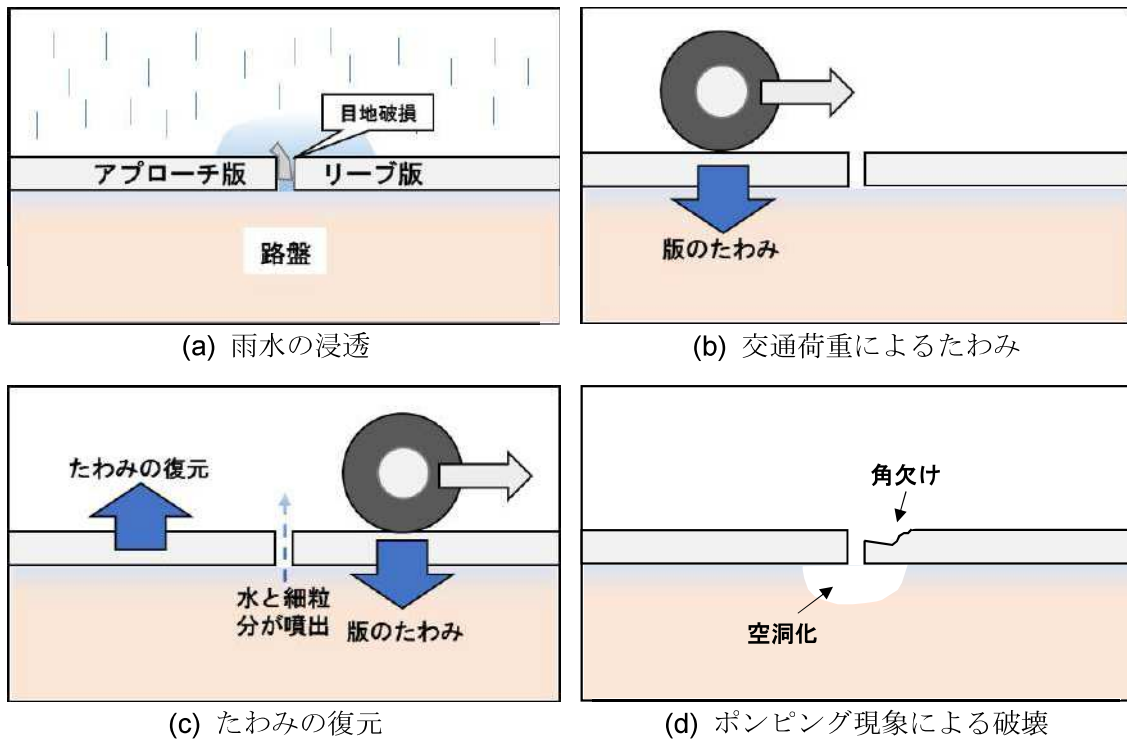


図 1-6 コンクリート舗装分野で推測されているポンピングの進行過程

より飽和土内の過剰間隙水圧が変動し、路盤粒子の挙動が発生する^{12),13),14)}。載荷が繰り返されると過剰間隙水圧の変動も大きくなり、路盤上に滞水した水とともに路盤粒子が激しく移動する。この際に舗装目地から水とともに路盤の細粒分が噴出する。ポンピング現象が発生すると路盤のエロージョン（舗装版下の空洞化）が進み、舗装の劣化が急速に進行することで角欠け（図 1-7¹⁰⁾）やポットホール（図 1-8¹⁵⁾）などの損傷が発生する。

角欠けやポットホールは車の通行によりタイヤのパンクなどの損傷や事故を引き起こす原因となる¹⁶⁾。特にポットホールの発生は世界的に深刻な問題であり、イギリスでは近年、ポットホールの急増¹⁷⁾がみられ、経済面での課題となっている。この問題に対処するため、イギリスでは毎年1月15日を National Pothole Day とし、ポットホールの発見を促進する日としている。また、韓国のソウル市内では降雨量の増加、人口集中により年間に70,000件以上ものポットホールの発生が確認されており社会問題になっている¹⁸⁾。

日本でも、特に降雪地帯では融雪期のポットホールが問題になっている。図 1-9 は、北海道の遠軽地域における国道3路線、合計160km区間において、ポットホールの発生件数を一年間調査した結果である¹⁹⁾。調査の結果から、ポットホールの発生件数は2月から徐々に増加し、3月、4月にピークを迎えることが分かる。この時期は融雪期にあたり、雪解け水が舗装のひび割れを通じて舗装体内に取り込まれることにより、ポンピング現象やはく離が引き起こされ、ポットホールの発生につながっている。



図 1-7 コンクリート舗装の目地部に発生した角欠けの例¹⁰⁾



図 1-8 アスファルト舗装で発生したポットホールの例¹⁵⁾

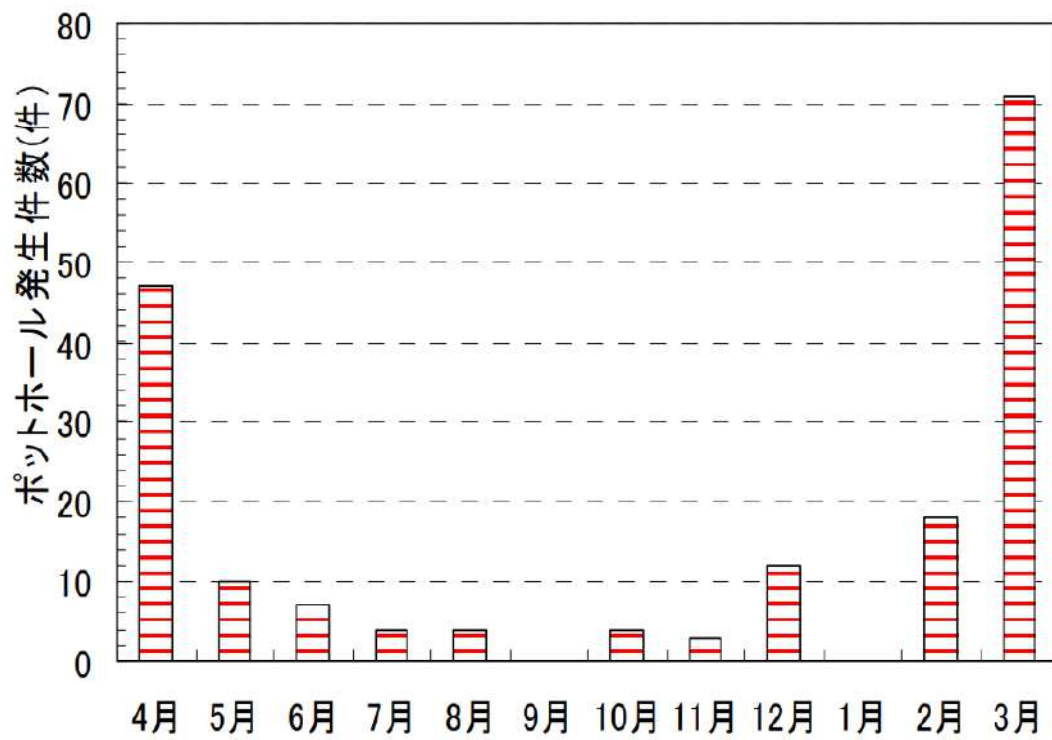


図 1-9 北海道遠軽地域におけるポットホールの月別発生件数¹⁹⁾

ポットホールは通常、ひび割れが徐々に進展して発生するものではなく、1か月という短い期間の中で突如発生する²⁰⁾ことから、定期的な点検により発生を予測することが困難な損傷である。そのため、ポットホールの原因となるポンピング現象の発生を抑制する必要がある。現在、ポンピング現象の対策としては、コンクリート版を支持する層（路盤層）を強化すべきという考え方から、コンクリート舗装版と路盤層の間でのアスファルト中間層の設置や路盤のセメント安定処理などの方法が行われている²¹⁾。また、ポンピング現象発生後の対策としては、アスファルト系やセメント系の材料を空洞に注入する方法が行われている²²⁾。舗装は現場の交通量や頻繁に通行する車種によって舗装構成が異なり、ライフサイクルコスト向上の観点から各舗装で適切な対策をとる必要がある。そのためポンピング現象の発生メカニズムの解明が望まれた。

ポンピング現象は古くから着目されており、1950年代後半にアメリカのイリノイ州でAASHTO（American Association of State Highway and Transportation Officials）が交通荷重に対する舗装の性能調査のために行った道路試験²³⁾では、目地の存在が不可避で剛性舗装であるコンクリート舗装で発生したすべての破壊ではポンピング現象が先行発生していることを確認された。そのため、ポンピング現象は舗装の損傷の一大要因であることが古くから認識されておりこれまで研究が行われてきた。しかし、ポンピング現象については、発生時の詳細な粒子挙動や特性などに関しては未だ把握されていない部分があり、ポンピング現象に対して適切な対策をとるためには、把握されていないポンピング現象のメカニズムを解明必要がある。

1.2 本論文の構成

本論文の構成を図 1-10 に示す。第 1 章では、まず序論として主に本研究の背景を述べる。次に第 2 章では舗装版下で発生するポンピング現象に関する既往研究を紹介するとともに、先行研究で行ってきた模型実験について説明を行う。第 3 章では本研究で新たに開発した模型（輪荷重周回型模型）の相似性について説明を行ったのちに輪荷重周回型模型がポンピング現象を発生することが可能か確認するため予備実験を行い、性能評価を行う。第 4 章から第 5 章まで輪荷重周回型模型を用いてポンピング現象のメカニズムを解明すべく载荷実験を行う。第 4 章ではさまざまな条件で路盤材噴出量を指標とした実験を行うことで、ポンピング現象の特性を把握する。第 5 章では目地周辺で载荷されるとき路盤粒子の挙動を把握し、ポンピング現象による路盤材の噴出過程を明らかにする。

最後に第 6 章として、以上の結果をまとめ、本研究から得られた結論を示すとともに今後の展望と課題について述べる。

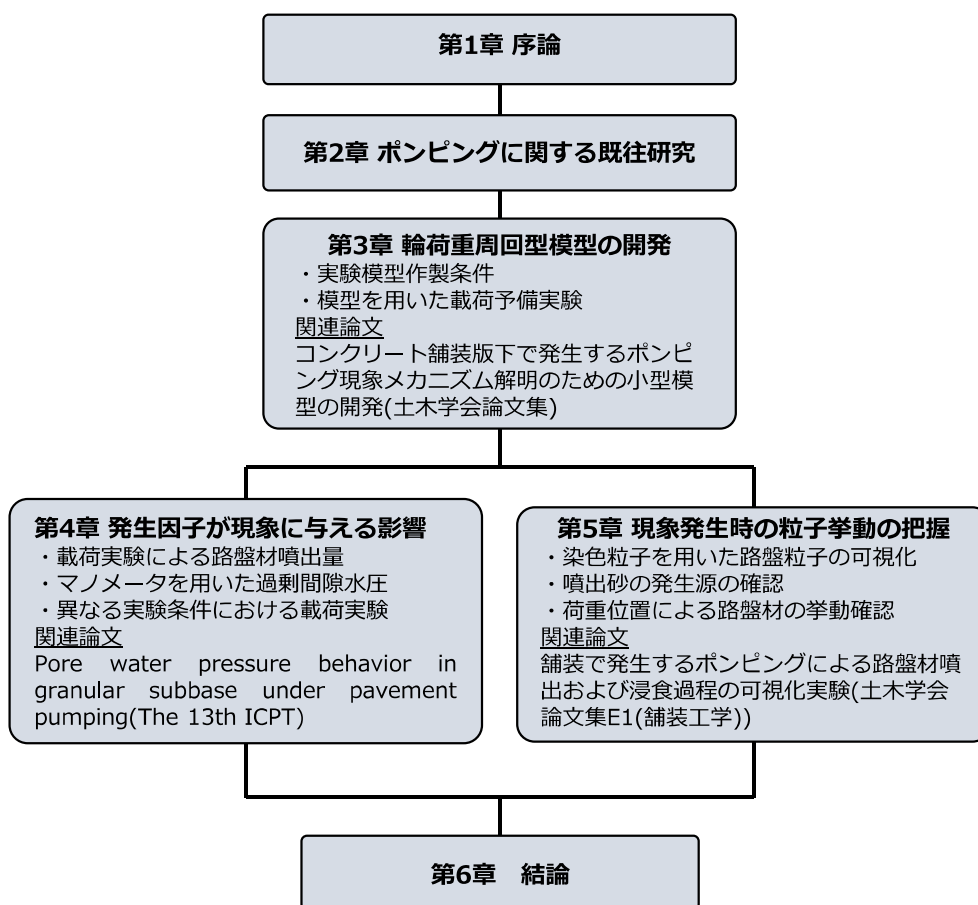


図 1-10 本論文構成フローチャート

第2章 ポンピング現象に関する既往研究

2.1 ポンピング現象の発生条件やメカニズムに関する既往の研究

1950年代後半に高速道路舗装の劣化について American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)はイリノイ州のテストトラックを用いて走行テストを行った²³⁾。その中で、コンクリート舗装で発生する損傷のほとんどはポンピング現象に関連していることを確認されており、ポンピング現象は古くからコンクリート舗装で発生する現象とされてきた。現在でも様々なコンクリート舗装でポンピング現象が確認されている。

目地部にダウエルバーを設置したコンクリート舗装では、ダウエルバーが長期供用により破損した目地から、水が浸入することにより腐食し最終的に破断する。荷重伝達機能を失ったコンクリート舗装は目地部でのたわみ量が増加することでポンピング現象が発生する^{24),25)}。また、目地を有さないCRCP（連続鉄筋コンクリート）でもポンピング現象の発生は確認されている。CRCPは施工後に横断ひび割れを誘発させることにより、車の快適性の向上を目指した舗装であるが、隣接した横断ひび割れがつながることにより、舗装版がはく離するパンチアウト^{26), 27)}を発生させる。このパンチアウト発生後にポンピング現象が発生する事例があり問題となっている。

ポンピング現象が発生するための条件については既往研究によりいくつか示されてきた。森口²⁸⁾は土質、水、荷重の3つを挙げている。すなわち、路盤材がシルトや粘土等の細粒分を多く含有している土質であること、自由水（路盤間隙を自由に動き回ることのできる水）があること、輪荷重が頻繁に通過することである。これらどれか一つが欠けてもポンピング現象は発生しないとしている。

Van Wijkら²⁹⁾は剛性舗装の設計にはポンピング現象を含める必要があるとし、ポンピング現象の予測モデルの構築を目指した。その中でポンピング現象の発生因子には5つあり、それぞれの因子の大きさがポンピング現象発生における路盤材の噴出や浸食に影響を与えている。一つ目は舗装版のたわみやたわみ速度である。舗装版のたわみとたわみ速度は舗装版と路盤の間を移動する水の速度と間隙水圧に影響を与えている。二つ目は路盤、路床の支持力や透水性などである。路盤と路床の支持力は舗装版のたわみに影響を与える。不安定な路盤は透水性に応じて間隙水圧の蓄積と表面浸食によってポンピング現象を発生させる。三つ目は舗装の排水特性である。排水性の良い材料はポンピングの発生リスクを低減させる。ポンピングを発生させるには水が必要であり、道路舗装に水が滞留する時間はポンピング現象に影響を与えるとされている。四つ目は環境要因である。降水量や降水強度などは路盤への水の供給に、温度変化は舗装版のたわみに、凍結融解や乾湿条件などは

路盤材料の浸食に影響を与えるとされている。五つ目は交通条件である。輪荷重の大きさは舗装版のたわみの大きさと速度の両方に影響を与えるとされている。理想のポンピング現象予測モデルではこれらの要素をすべて含める必要があるとした。

ポンピングの発生条件を確認すると、ポンピング現象が発生するためには水の存在が不可欠であることが分かる。そのためポンピング現象のメカニズムに関する研究では輪荷重がコンクリート舗装の目地部を通過する際の舗装版下飽和路盤の間隙水圧の挙動から考察が行われてきた。

Raad¹²⁾は繰り返し荷重による過剰間隙水圧の発生と消散という観点からコンクリート舗装で発生するポンピング現象のメカニズムの解明を目指した。実験では30回/分の頻度で輪荷重を載荷することによるコンクリート舗装版と路盤の界面に発生する過剰間隙水圧の動向をモニタリングした。図2-1は繰り返し載荷によるピーク間隙水圧と残留間隙水圧の変化を示している。荷重が繰り返されることで最大間隙水圧は上昇する様子が確認できた。また、1回目の載荷サイクルと比較し2回目の載荷サイクルで最大間隙水圧が高い値を示した。目地から雨水が浸透することで路盤の飽和度が上昇すると、車輪が目地上を通過することによって飽和土内の過剰間隙水圧が上昇する。過剰間隙水圧が上昇することで有効土圧は低下し、路盤のせん断強度と剛性の低下も招く。その結果、路盤の支持力は低下し、路盤の永久変形の増大、舗装の目地からの路盤材の噴出に繋がる可能性を示した。

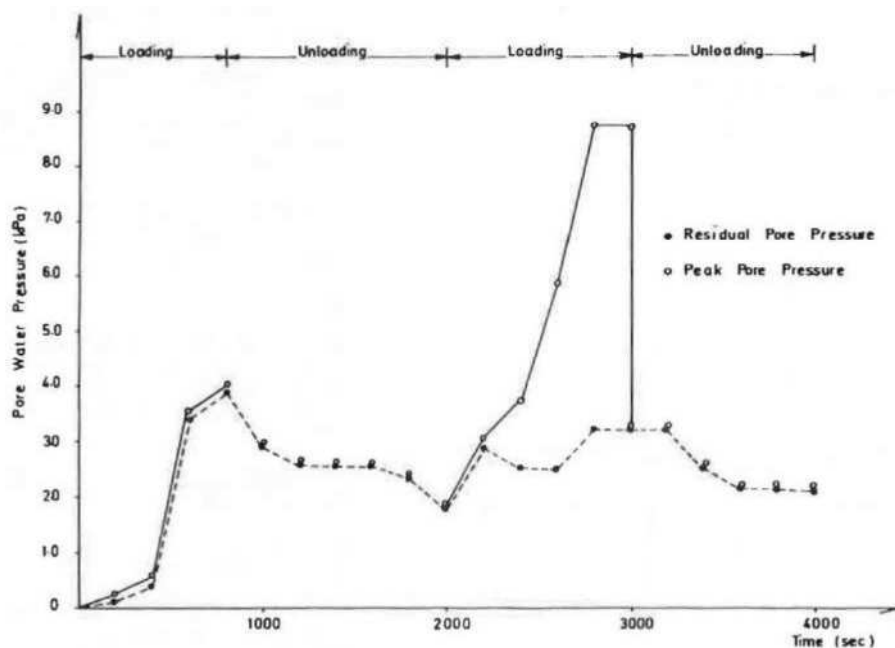


図2-1 繰り返し載荷によるコンクリート舗装版下における最大間隙水圧と残留間隙水圧の動向¹²⁾

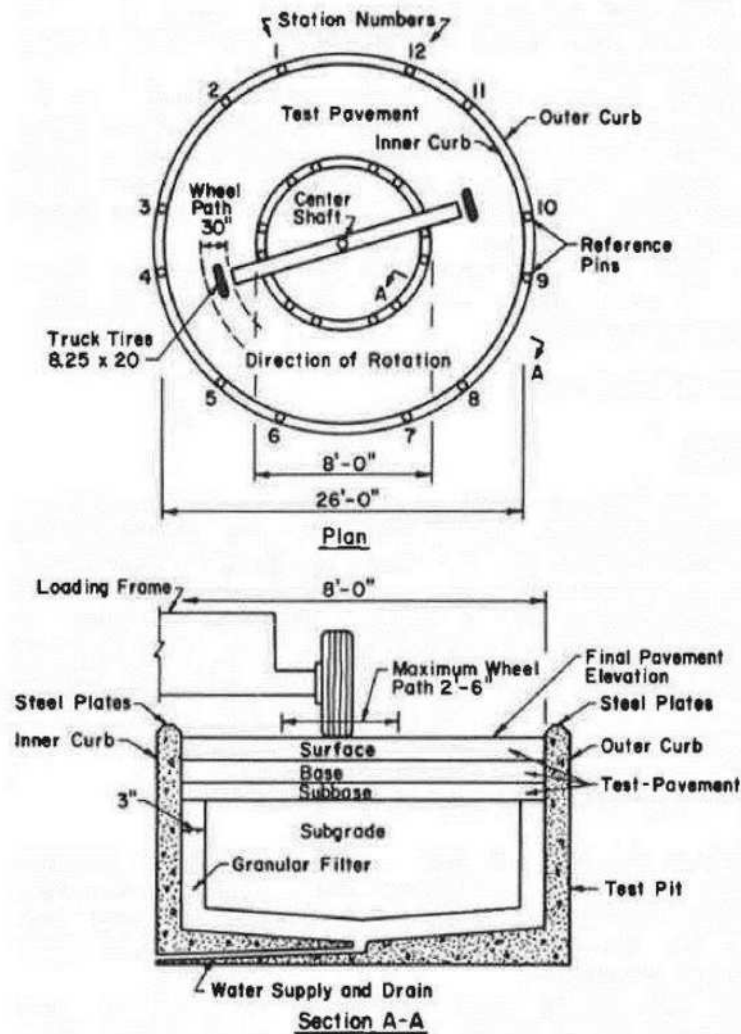


図2-2 イリノイ大学のテストトラック概略図¹³⁾

Dempsey¹¹⁾はポンピング現象のメカニズムを解明する一貫として、イリノイ大学のテストトラック（図 2-2）を用いた繰り返し載荷実験を行った。載荷実験の結果、飽和した高密度の路盤を有する舗装では繰り返し載荷されることにより、路盤の間隙水圧が蓄積され液状化を引き起こし、さらに載荷が繰り返されることによりポンピング現象が発生することを確認しており、間隙水圧の蓄積がポンピング現象に繋がるとした。

ポンピング現象が発生した時の舗装版下の様子を直接観察した研究として、Hansen ら¹⁴⁾は実道（コンクリート舗装）を削孔し、カメラや間隙水圧計を用いて重交通（セミトレーラー）通過時の路盤粒子の挙動、舗装版下の水圧の変化などを観察した。観察の結果、車輪が目地部を通過する際、路盤粒子は車輪の進行方向とは逆方向移動することを観察した。車輪が目地部を通過した後の間隙水圧の挙動は図 2-3 に示すように進行方向に対し目地より先

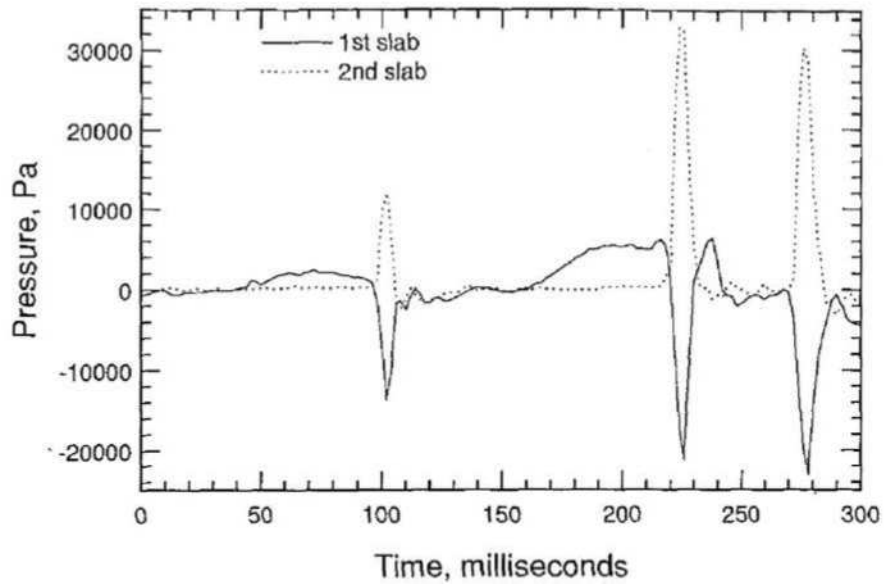


図2-3 コンクリート舗装をトラック（前1軸，後2軸）が72 km/hrで通過する際の横断目地前後で発生する過剰間隙水圧¹⁴⁾（1st slab＝アプローチ版：車進行方向に対し目地手前の版，2nd slab＝リープ版：車進行方向に対し目地奥の版）

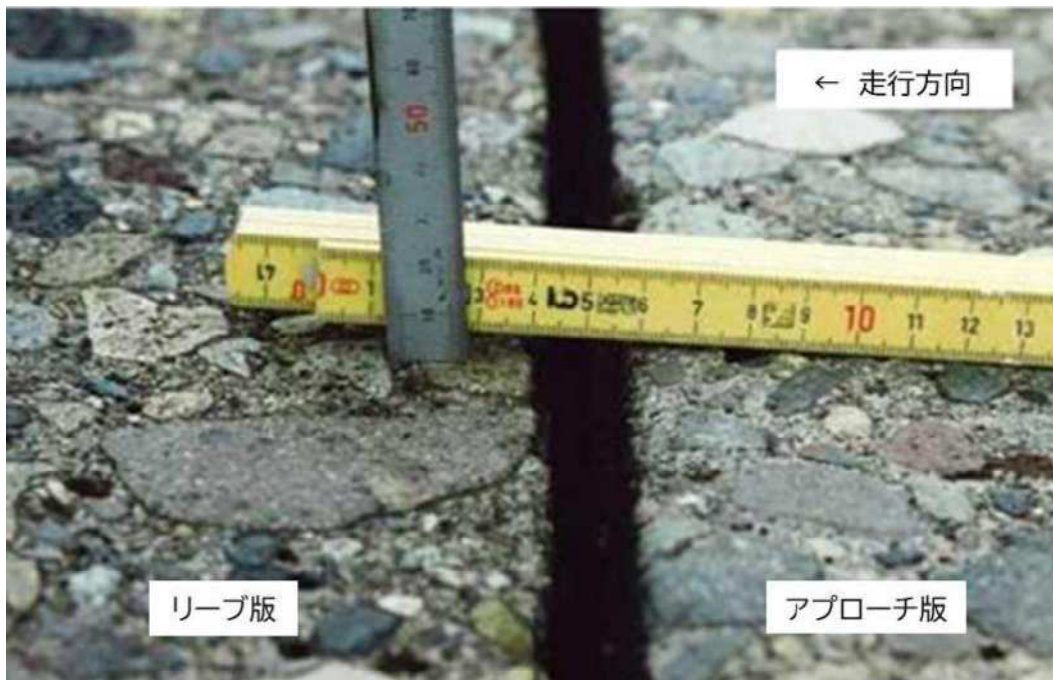


図 2-4 コンクリート舗装の横目地においてポンピング現象が発生しリープ版で段差が発生した様子³⁰⁾

の舗装版下（1st slab）で正圧，手前の舗装版下（2nd slab）で負圧となるため，圧力差によって路盤粒子は車輪の進行方向とは逆向きに移動する。

ポンピング現象は路盤が飽和状態にある際に，目地部へ輪荷重が載荷されることにより飽和路盤の間隙水圧が上昇することで発生することが知られおり，繰り返し載荷され間隙水圧の上昇が続きポンピング現象が繰り返されると，目地前後の路盤面で不均質な浸食が生じて，**図 2-4** に示すような段差が発生する³⁰⁾。

ポンピング現象は古くからコンクリート舗装で発生する現象とされてきた。コンクリート舗装は剛性が高く，舗装版が路盤の変形に追従しないことから路盤の変形した場合，舗装版と路盤の間に隙間が生じるためである。一方でアスファルト舗装はたわみ性舗装であり，舗装版が路盤の変形に追従することからポンピング現象が発生しにくいとされてきた。しかし近年ではアスファルト舗装でも，特に高機能舗装の局所的な変状の前兆としてポンピング現象の発生が注目されている。高速道路の高機能舗装部において，わだちが発生しポンピング現象による噴出が確認された OWP（外側車輪走行位置）と非わだち部である BWP（外側車輪位置と内側車輪位置の間）の一連のアスコン層を開削し路盤の状況を確認した研究³¹⁾では BWP 直下に比べ，OWP 直下で粒度が粗く，下層路盤表面には粗骨材が集積していることを確認した。このことから下層路盤上部から細粒分がアスコン層のひび割れを通じ噴出したため，粗骨材が取り残される状態になったことが考えられる。またポンピング現象が発生した OWP 直下の下層路盤面を確認したところ，周囲の路盤材が明るい茶色であるのに対し鼠色に変色していることを確認した。コンクリート舗装では雨水が目地を通じ浸透するのに対して，アスファルト舗装では発生したひび割れから雨水が浸透し路盤が飽和することでポンピング現象の発生につながることが考えられている³²⁾。

海外においても，例えば中国では 2012 年に湖北省に位置する全長 135 km の高速道路についてアスファルト舗装の表層の劣化に関する現地調査を実施したところ，**図 2-5** に示すように損傷の約 9 割がポンピング現象を伴うラベリングであると報告されており³³⁾，ポンピング現象がアスファルト舗装でも問題視されていることが分かる。

現在では，コンクリート舗装のみならずアスファルト舗装でも問題とされており，ライフサイクルコスト向上の観点から適切な対策をとる必要がある。そのためにはポンピング現象の発生メカニズムを解明する必要があるが，既往の研究により細粒分を含む粒状路盤の飽和と繰り返し荷重の組み合わせによってポンピングが生じることは定性的に理解されているものの，ポンピング作用の継続によって，どこの細粒分粒子がどのように運搬され浸食が進んでいくのかをつぶさに観察した事例は見当たらない。また舗装の剛性や目地の条件，荷重条件がポンピングの程度や路盤浸食の形態に与える影響についても，十分に理解が進んでいるとは言いがたい。そこで先行研究ではポンピング現象発生因子による具体的な影響

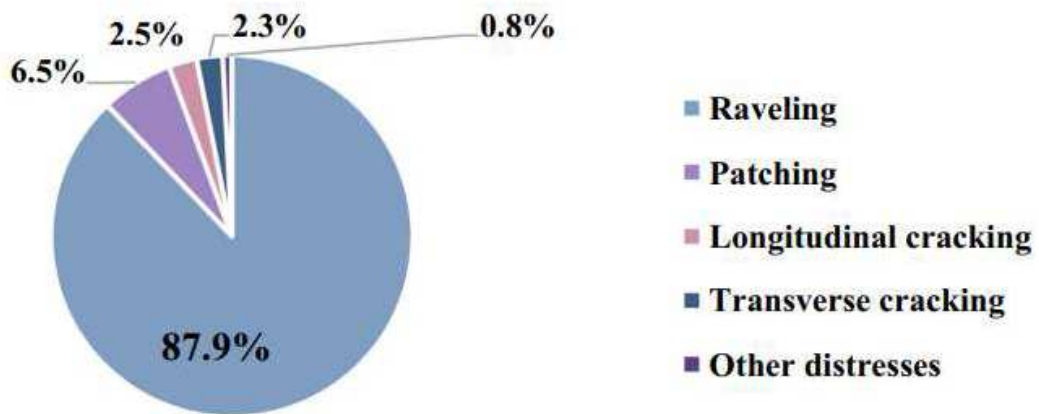


図2-5 中国の高速道路におけるアスファルト舗装表層の劣化原因³³⁾

やポンピング現象の発生過程の観察を行うためアクリル土槽を用いた小型模型実験を行ってきた。

2.2 過去の研究によるポンピング現象に関する小型模型実験³⁴⁾

過去の研究³⁴⁾では渡辺ら²¹⁾の研究を参考に表層版にアクリルを用いたポンピング現象を模擬的に発生させる小型模型を製作し、浸食形態などのメカニズムの解明のための実験を行った。過去の研究で製作した小型模型（輪荷重直線移動型模型）を図 2-6 に示す。

模型は幅 200 mm×深さ 100 mm×奥行 90 mm の直方体のアクリル模型を使用した。肉厚は 5 mm、舗装版厚さは 2 mm、目地幅は 1 mm とした。荷重部には円筒状（直径 100 mm、幅 82 mm）で 5 kg のおもりを用いて輪荷重の载荷を行った。この模型は荷重幅方向（紙面左右方向）に荷重を移動させる 2 次元鉛直断面モデルである。路盤材には飽和状態の珪砂 6 号を使用した。载荷は飽和土の上に厚さ 2 mm のアクリル板を置き、おもりを転がすことにより载荷を行う。輪荷重直線移動型模型を用いた実験では、指定载荷回数ごとに舗装版に噴出した砂の採取と路盤浸食形態の検測を行いポンピング現象の発生メカニズムに関して考察を行った。

しかし、輪荷重直線移動型模型を利用した実験では、おもりが目地部を通過しリープ版载荷後、終点（リープ版側の模型端部）に達した段階で荷重部を始点（アプローチ版側の模型端部）に戻し再度おもりを転がすことで繰り返し载荷を行うため、载荷 1 回ごとにおもりを持ち上げる手間が発生する。そのため、一定速度、一定周期の輪荷重を载荷することが困難であり、実験の再現性を確保できない課題があった。

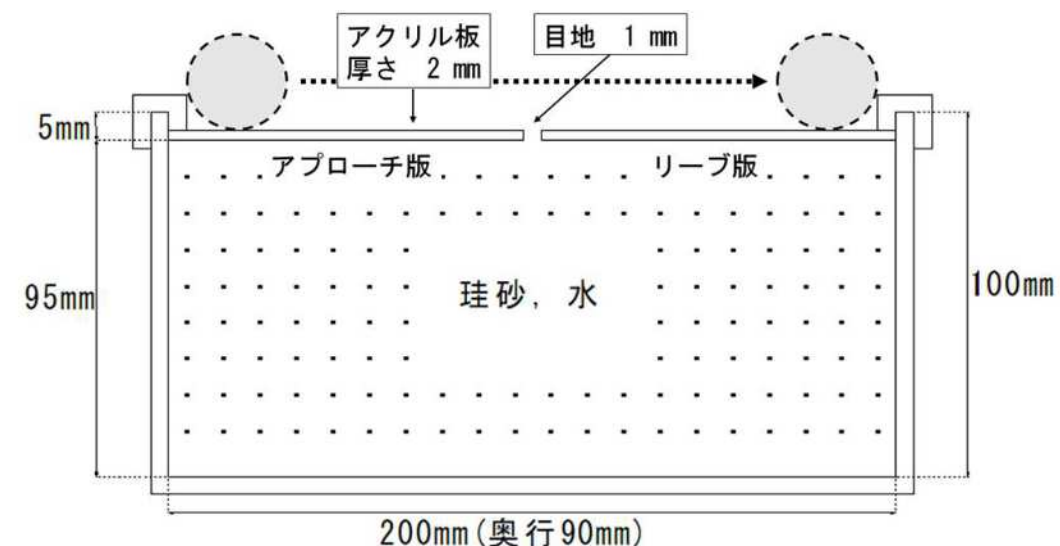


図 2-6 輪荷重直線移動型ポンピング実験の模型概略図³⁴⁾

2.3 本研究の目的

舗装はポンピング現象が発生することで角欠けやポットホールなどの損傷を引き起こすことで車を運転する際の快適性や安全性、そして経済性を損失してしまう。よってポンピング現象に対する適切な対策を行い、舗装のライフサイクルコストの向上させる必要がある。

そのため本研究では舗装のライフサイクルコストの向上のため、舗装で発生するポンピング現象の発生メカニズムを明らかにし適切な補修方法の提案を行うことを最終目的としている。これまでのポンピング現象に関する研究では、舗装版がたわむことで飽和土の水圧が上昇し、路盤材が噴出するという定性的な評価にとどまっており、より詳細なポンピング現象の噴出過程はいまだ未解明である。

しかし現場では、載荷時における舗装版下の路盤や路床の様子を可視化することは難しく、現場実験のみでポンピング現象の発生メカニズムを解明することは困難である。

過去の研究³⁴⁾ではその課題に対処するため模型実験を行うことでポンピング現象発生時の路盤の可視化を目指した。しかしポンピング現象のモデル化を目指した開発された沈下中直線型移動型模型では、一定の周期で載荷を行えず、実験の再現性の確保が困難であった。

そのため本研究では輪荷重直線移動型模型の課題を改善した新たな模型を開発することにした。開発した模型は粒子の動きを観察することに主眼を置いた模型設計となっている点と、既往研究¹³⁾より観察された不均質な路盤浸食を再現できるよう載荷方法を企てた。そして開発した模型を用いて実験を行うことによってポンピング現象の発生因子による影響を確認するとともに、載荷に伴う粒子の挙動を可視化実験により把握することでポンピング現象のメカニズムの解明にする。

第3章 ポンピング現象メカニズム解明のための模型実験の開発

3.1 ポンピング模型実験作製条件

過去の研究³⁴⁾で作製した輪荷重直線移動型模型の課題を踏まえて、本研究では新たな模型の開発に着手することとした。新たに開発する模型の条件は以下の通りである。

- ・一方向に一定周期の荷重が可能である
- ・荷重時に路盤粒子の動きが観察可能である
- ・ポンピング現象を容易に発生させることが可能である

荷重方法の選択肢としては供試体の表面を車輪が往復する交番荷重方式、もしくは定点で繰り返し荷重を行う定点荷重方式などの手法が代表的で実施しやすい。しかし荷重の移動方向は路盤材の移動に影響を及ぼすことが既往の研究^{12),14),30)}より示されており、本研究では一方向荷重を採用することにより繰り返し荷重をした場合、路盤に一様の力を伝達させる。また、精度の高い実験を行うために一定の荷重速度を繰り返すことが可能な方法を採用した。

本研究で開発する模型は舗装版や路盤材において、前述のポンピング発生²⁸⁾の3条件を参考にポンピング現象を発生させやすい条件を整えることとした。健全な舗装がポンピング現象を発生させる状態に至るまでには、例えばコンクリート舗装であれば、長期供用により目地が破損、雨水の浸入、ダウエルバーの破断という過程を経るため長い時間を要する。一方で本研究では路盤材が目地から噴出する時の浸食過程や噴出過程に着目したいことから、ポンピング現象が生じ始めるまでのプロセスは省き、ポンピング現象がすでに生じやすくなっている状態からの粒子の動きを観察する実験を行う。そのためポンピング現象を阻むと予想される要素、例えば路盤の粒度や締固め、舗装版と路盤との噛み合わせや摩擦、路盤の不飽和状態などは極力ポンピング現象が発生しやすい条件に調整した。

本実験は、①路盤の骨格構造がすでに緩んで粒子が動きやすくなっている状態、かつ②目地付近の路盤で滞水し、飽和した状態を実験開始時とし、粒子の動きや路盤面の浸食の進行を観察することを意図している。そのため輪荷重周回型模型の舗装版および輪荷重は、相似性については後述するが、基本的に路盤条件に応じてポンピング現象が生じる程度の条件であればよい。したがって、舗装版には弾性的にたわみ、路盤との摩擦が生じにくく粒子が移動しやすい材質であり、路盤表面を観察できる材料として透明アクリル板を使用した。実際のコンクリート舗装での現場計測^{11),12),14),33)}や室内計測^{11),14)}によれば舗装版が輪荷重によってたわんで復元する動作がポンピングには重要である。コンポジット舗装におけるセメント安定処理路盤の模擬エロージョン実験をおこなった渡辺ら²¹⁾も、舗装版模擬材とし

てアクリル板を使用している。

路盤材の代替として、珪砂 6 号を用いた。珪砂 6 号の物性値を得るため、土の締固め試験 (JIS A 1210) を A-b 法で行った。しかし、得られた試験の結果では乾燥密度の明確なピークを示さなかった。珪砂 6 号は粒径加積曲線 (図 3-1) から分かるように均等係数が小さいことから、均一な粒径であり、締め固まりにくく動きやすい材料である。このことから土の締固め試験の際にも珪砂 6 号はうまく締め固まらなかったことが考えられる。そのため表 3-1 に示した珪砂 6 号の最大乾燥密度は文献値³⁵⁾を用いている。

砂質土は一般にポンピングしにくい材料²⁸⁾とされるが、珪砂 6 号はその性状から動きやすい材料である。そのため飽和条件下での载荷によりポンピング現象が発生しやすいと考

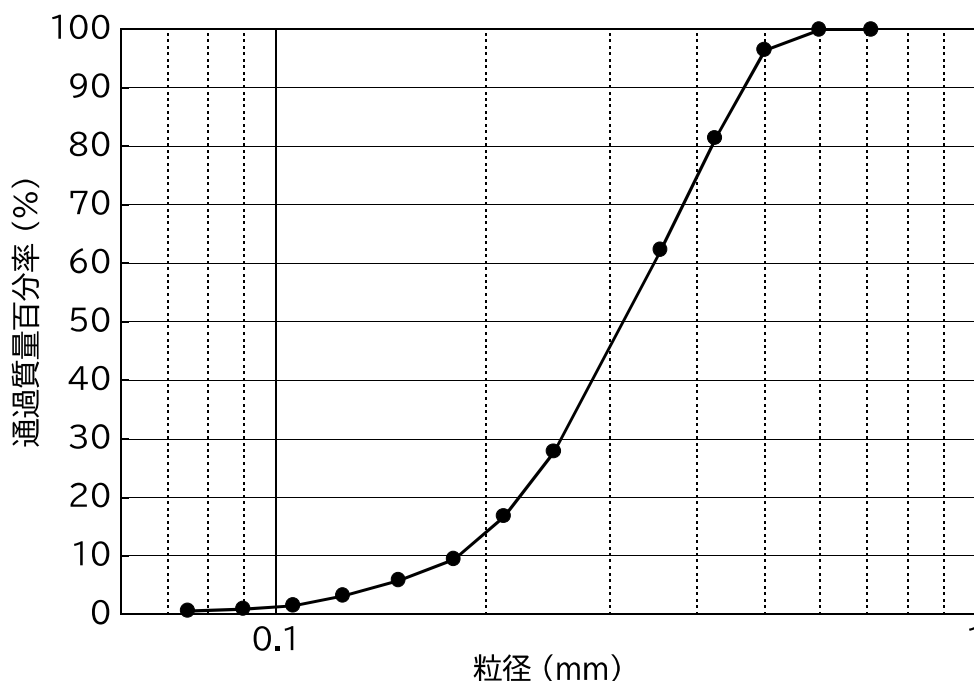


図 3-1 珪砂 6 号の粒度分布

表 3-1 珪砂 6 号の物性値

| 珪砂 6 号 | |
|-----------------------------|----------------------|
| 土粒子密度 (g/cm ³) | 2.650 ³⁵⁾ |
| 最大乾燥密度 (g/cm ³) | 1.554 ³⁵⁾ |
| 含水比 (%) | 13.9 ³⁵⁾ |
| 均等係数 | 1.92 |
| 曲率係数 | 0.99 |

えた。また、ポンピングしやすいシルトや粘土のような細粒土では路盤の挙動を粒子レベルで追うことは困難であるが、珪砂 6 号は近接すれば粒子レベルの挙動を観察することが可能である。

現実の舗装において路盤の飽和度は目地からの雨水浸透が起因となり、目地直下で部分的に高くなることが想定される。しかし、その浸透水の広がりには路盤材の透水性や空隙率、目地からの給水量に依存するため、実験条件の設定と再現性の確保が困難である。そのため本研究では路盤全体を飽和させた状態で実験をすることとした。飽和路盤の作製には空隙を極力抑えるために、水を先に入れ砂を後から投下する水中落下法³⁶⁾を用いた。飽和路盤によりポンピング現象が生じやすい路盤湿潤条件になると言える。

3.2 輪荷重周回型模型の開発

本研究で作製した輪荷重周回型模型を図 3-2、図 3-3 に示す。この輪荷重周回型模型は一方方向に一定周期の载荷を実現するため、輪荷重が周回する機構を採用した。土槽はリング形となっており、軸を中心に車輪付きの回転盤を手動で回転させることによって舗装版に载荷を行う。土槽の肉厚 10 mm、深さ 100 mm の透明アクリル円筒で作製している。舗装版は幅 90 mm の透明アクリル板で模擬し、舗装目地を模擬した一定幅のスリットを 1 か所設け

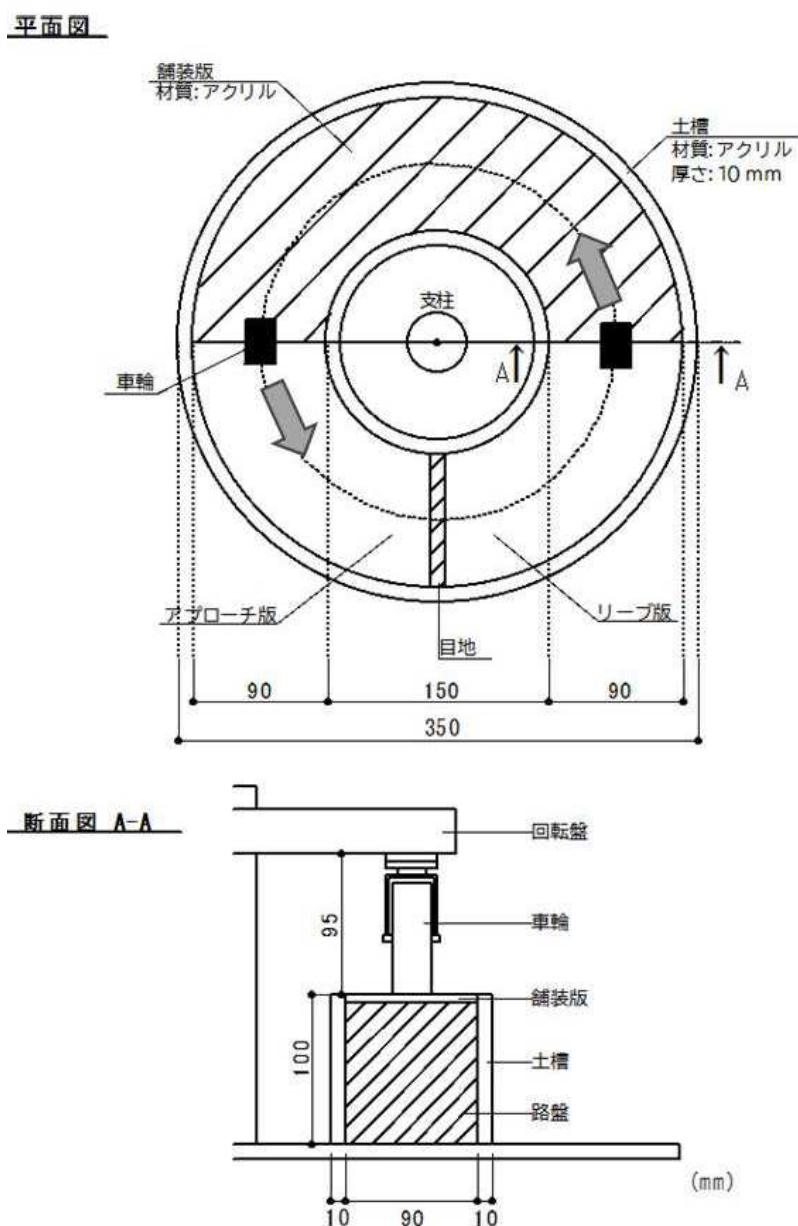


図 3-2 輪荷重周回型模型の概略図

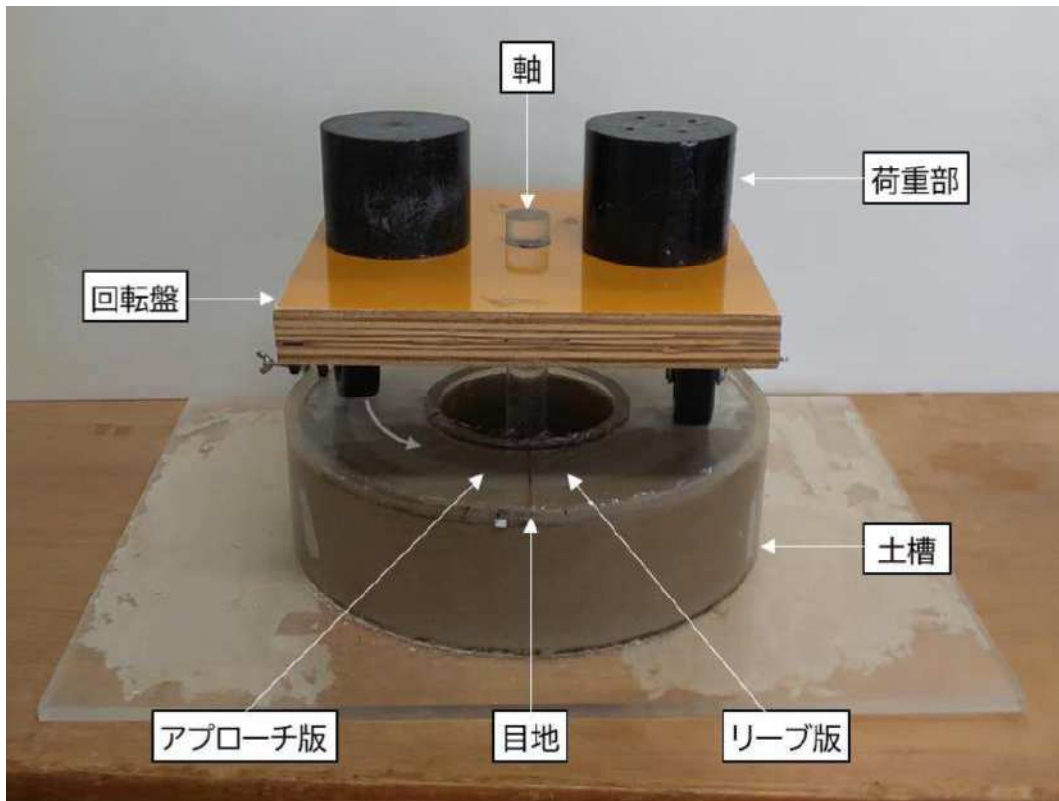


図 3-3 輪荷重周回型模型の外観

る。回転盤の上に載せるウェイトの大きさにより輪荷重の大きさを調整することが可能である。車輪は直径 75 mm で接地幅 27 mm のゴム車輪である。本研究では平面図に示すように、上から見て回転盤は反時計回りに回転させる。車輪の周回に対し、目地手前の版をアプローチ版、目地奥の版をリリース版と呼称する。平面図における、土槽斜線部（目地部と逆側）には樹脂で作製した治具を設置した。舗装版を固定することで目地部載荷時にたわんだ舗装版を復元させることが目的である。輪荷重周回型模型は舗装版の材料として用いたアクリル板が路盤の局所的な変形に追従しない点や横目地を有している点からコンクリート舗装の構造に近い模型である。

ここで実際のコンクリート舗装と模型との相似性を検討する。輪荷重周回型模型とコンクリート舗装（設計 CBR 4）の対比表を表 3-2 に示す。ポンピングの力学的な支配要因は路盤内に発生する過剰間隙水圧^{12),13),14)}であり、路盤の変形によって間隙水圧は変化する³⁷⁾ことから、過剰間隙水圧の大きさは輪荷重が舗装版を介して路盤面に与える載荷圧力の大きさと路盤の変形特性との比率で決定されると考えられる。コンクリート舗装における車輪の接地圧は下記の式³⁸⁾より算出する。

$$p = 0.420P + 0.290A + 1.448 \quad (3.1)$$

ここに、 P ：輪荷重 (tf)， A ：車輪の空気圧 (kgf/cm^2)， p ：車輪の接地圧 (kgf/cm^2)

表 3-2 現場と輪荷重周回型模型の対比表

| | 輪荷重周回型 ポンピング実験模型 | コンクリート舗装 (設計C B R 4) | |
|------|---------------------|--|---|
| 交通荷重 | 輪荷重 | 65.3 N | 49,000 N |
| | 荷重速度 | 0.42 m/s | 16.7 m/s |
| | 車輪接地面積 | 240 mm ² | — |
| | 車輪接地圧 | 0.27 MPa | 0.63 MPa |
| 舗装版 | 材料 | アクリル | コンクリート |
| | 厚み | 5 mm | 250 mm (250 以上 1000 台未満/日) |
| | 弾性係数 | 3,220 MPa ⁴⁰⁾ | 29,400 MPa (20°C) ⁴¹⁾ |
| | ポアソン比 | 0.37 ⁴⁰⁾ | 0.2 ⁴¹⁾ |
| 路盤 | 材料 | 珪砂 6 号 (弾性係数:37.7MPa ³⁹⁾) | 上層路盤：粒調碎石 (弾性係数 600 MPa ⁴²⁾) 下層路盤：クラッシュラン |
| | 厚み | 90 mm | 上層路盤：200 mm 下層路盤：250 mm |

輪荷重 P_1 を 49,000 N, 車輪の空気圧 A_1 を各自動車メーカーが定める 10 kgf/cm² とした時, 車輪の接地圧 p_1 は 0.63 MPa と算出できる. この車輪接地圧 p_1 が弾性係数 $E_1 = 600$ MPa の路盤表面に作用するとすれば, 載荷圧力 p_1 と路盤弾性係数 E_1 との比率 p_1/E_1 はおよそ 10^{-3} である. 本模型実験の路盤材である珪砂 6 号の弾性係数は文献値³⁹⁾より $E_0 = 37.7$ MPa であるから p/E を実物と模型で一致させるためには模型での載荷圧は $p_0 = 0.037$ MPa となる. 模型では載荷圧力を求めると $p_0 = 0.27$ MPa であるから, 結果として, 路盤の弾性係数に対する載荷圧の大きさについて, 模型は実物よりも約 7 倍相当の大きな載荷圧を与えている.

また, 模型の舗装版の弾性係数は実物の約 1/15, 厚みは 1/50 であることの影響について, 目地部を自由端とする片持ち張り (実物はスパン長 2.0 m, 模型は 0.2 m, いずれも単位幅) ととらえ, 自由端に輪荷重が静的に作用する時のたわみ比率を求めると, 模型の目地部でのたわみは実物の 1.52 倍となる.

以上のとおり, 路盤への載荷圧力および舗装版目地部のたわみの観点から, 模型は実物コンクリート舗装よりもポンピング現象を加速・強調するようなモデル化を行っていると言える.

3.3 輪荷重周回型模型を用いた予備実験

3.3.1 予備実験概要

輪荷重周回型模型がポンピング実験を行うことが可能であることを確認するため、予備実験により2つの項目を確認する。

- ・ 輪荷重周回型模型が一定周期で一定速度の載荷が可能であるか
- ・ 輪荷重周回型模型がポンピング現象を発生させることが可能であるか

一つ目の項目では、載荷速度を 0.42 m/s に設定し載荷を行う。輪荷重周回型模型による載荷速度の制御は目地上を車輪が通過するタイミングを拍子計（メトロノーム）で計りながら車輪付きの回転盤を回転させることにより行う。実験では載荷回数 100 回行ない車輪が目地直上に移動するタイミングを模型側方から撮影した動画より確認した。

二つ目の項目を確認するため、表 3-3 に示す条件で載荷実験を行った。舗装目地幅については路盤材として使用する珪砂 6 号が噴出可能であり比較的狭い幅である 2 mm を採用した。この条件下で目地部に輪荷重を 100 回載荷した。荷重速度は模型の回転盤を 66 rpm で周回させているので、0.42 m/s の速度に相当する。実験時の路盤材噴出量および路盤の浸食量を計測する。本研究において路盤材噴出量とは実験終了時に舗装版上に噴出した路盤材の乾燥重量を指す。

3.3.2 予備実験結果

輪荷重周回型模型において、定周期での載荷が可能であることを確認する。図 3-4 は車輪が目地を通過する時間を載荷回数ごとにまとめたものである。縦軸は実験開始時を 0 s とした経過時間を示している。実験の結果、決定係数が 1 であることから車輪は一定の時間間隔で目地を通過していることが分かる。目地部への載荷時間間隔について過去の研究³⁴⁾と比較すると標準偏差が 0.14 s、から 0.03 s に、変動係数は 10.5 % から 3.9 % にともに向上した。また、近似直線の傾き (0.909) は車輪が目地を通過する時間間隔を示しており、これに基づき荷重速度を算定すると 0.41 m/s となり、目標速度である 0.42 m/s とほぼ同一の値になっ

表 3-3 予備実験における実験条件

| | | | |
|------|----------|-----|--------|
| 荷重 | 65.3 N | | |
| 速度 | 0.42 m/s | 間隙比 | 0.72 |
| 目地幅 | 2 mm | 含水比 | 32.7 % |
| 舗装厚さ | 5 mm | 飽和度 | 100 % |

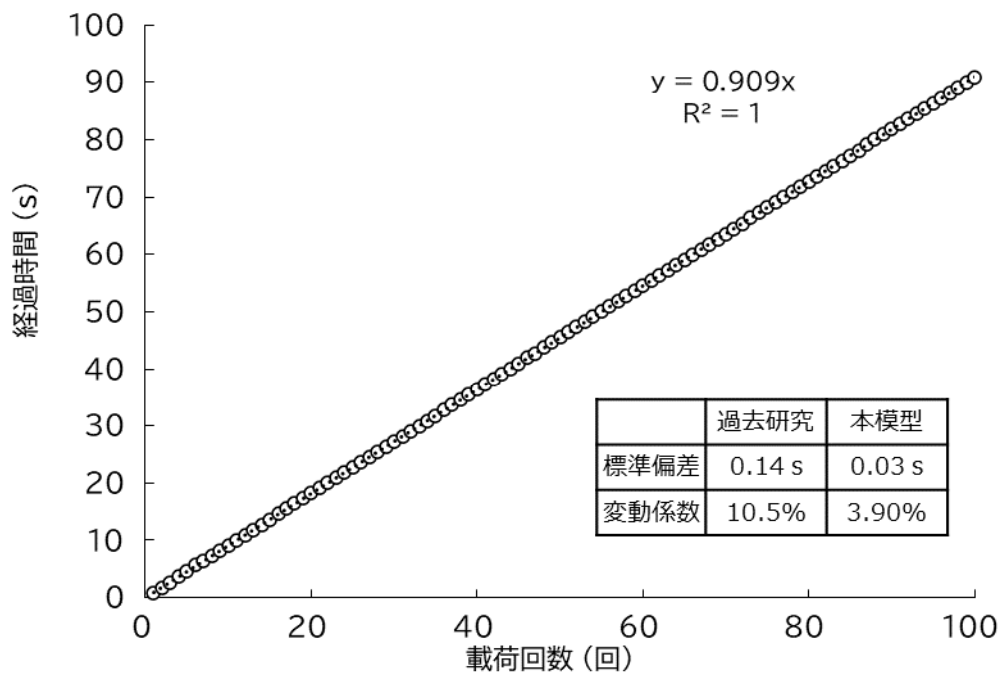


図 3-4 輪荷重周回型模型における目地部への载荷サイクル



図 3-5 輪荷重周回型模型を用いた予備実験における路盤材噴出状況

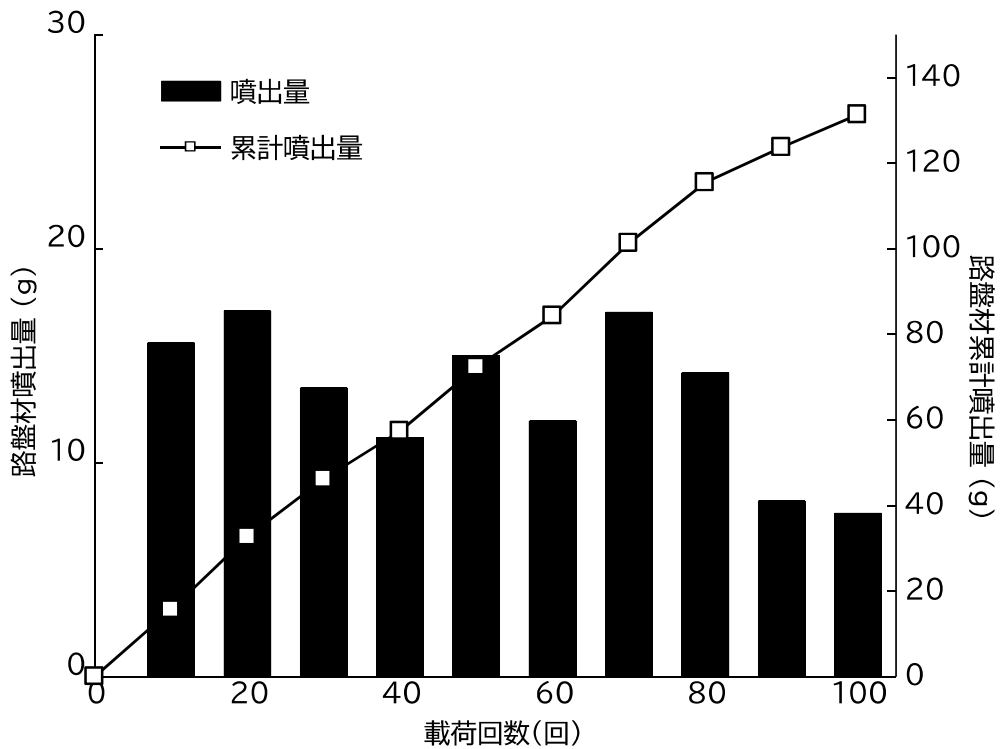


図 3-6 予備実験における载荷回数と路盤材噴出量の関係

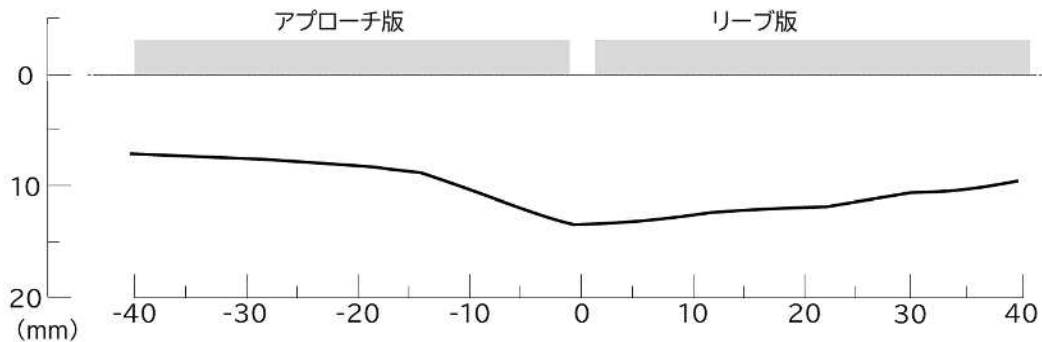


図 3-7 予備実験終了時の路盤表面形状

た。これらの結果より、輪荷重周回型模型は一定速度で一定周期の载荷が可能であることを確認できた。

輪荷重周回型模型においてポンピング現象を発生が可能か確認する。輪荷重の繰返しにより、図 3-5 に示すように目地から路盤材が噴出することを確認した。路盤材の噴出傾向を確認するため、载荷回数（車輪の目地通過回数）10 回ごとに回転盤を止め、舗装版上に噴出した砂を収集した。図 3-6 は载荷回数 10 回毎の路盤材の噴出量とその累積噴出量を示している。図より、载荷回数 80 回目までは累計噴出量が载荷回数の増加に対して線形的に増加している。しかし载荷回数 90 回目以降の噴出量は減少した。ここからポンピング現象に

より噴出する路盤材には上限があり，一定量の噴出が行われると噴出量は徐々に減少することが考えられる．また実験終了後の路盤表面の浸食形状を図 3-7 に示す．図は目地への載荷回数 100 回終了後の路盤表面形状を，静止画像よりトレースし，その座標デジタイズしたものである．図の縦軸は深さを表し，実験開始前の舗装版底面位置を基準としている．横軸は水平方向の位置を表しており，目地中央を基準としている．図より目地直下を最大として主にリープ版側で浸食が発生していることが確認できる．前章で示した実コンクリートでのポンピング現象による段差発生現場（図 2-4）³⁰⁾ではリープ版がアプローチ版よりも沈み込んでいる．これはリープ版下の路盤がアプローチ版下の路盤より強い浸食を受けていることを示唆しており，図 3-7 に示した本実験の不均質な浸食形状と整合する結果となっている．

3.4 まとめ

本章ではポンピング現象の発生メカニズムを解明するためにこれまで使用してきた輪荷重直線移動型模型の課題を解決する新たな模型を開発した。以下に、本研究で開発した輪荷重周回型模型の特徴を示す。

- ・本模型実験は健全な舗装がポンピング現象を発生させる過程は省き、ポンピング現象を発生しやすい状態から実験を開始しポンピング現象が発生する様子を再現したものである。
- ・輪荷重周回型模型の土槽と舗装版の素材は、載荷時の粒子挙動を観察するために透明アクリルを使用している。舗装版には横断方向に舗装目地を模擬したスリットを舗装版横断方向に入れている。
- ・土槽は円形で、車輪付きの回転盤を回転させることにより、一方向の載荷が可能である。
- ・本研究では、舗装版としてアクリル板を使用することや、路盤材として珪砂6号を飽和状態で使用するなど、ポンピング現象がすでに生じやすくなっている状態からの粒子の動きを観察する実験を行うことが目的である。そのため輪荷重周回型模型はポンピング現象を加速・強調するモデルとなっている。

予備実験において輪荷重周回型模型を用いた載荷実験によりポンピング現象を再現することが可能であるか確認したところ、輪荷重周回型模型が一定速度で一定周期の載荷が可能であること、載荷によりポンピング現象を発生させることが可能であることが確認できた。次章からは、輪荷重周回型模型を使用して載荷実験を行いポンピング現象の発生メカニズムを確認していく。

第4章 ポンピング現象の影響因子に関する実験

4.1 概要

本研究では、ポンピング現象のメカニズムを解明するために、『ポンピング現象の発生因子が舗装に与える影響』と『輪荷重載荷時における路盤粒子の噴出過程』の二つの観点から実験を行う。まず、『ポンピング現象の発生因子が舗装に与える影響』に関しては、既往の研究により示されているポンピング現象の発生因子に焦点をあて、異なる舗装条件や荷重条件での実験を通じて、これらの因子がポンピング現象の発生にどのような影響を与えるかを確認する。また『輪荷重載荷時における路盤粒子の噴出過程』については、現場では確認することが困難である、ポンピング現象発生時の路盤粒子の変位、噴出過程について輪荷重周回型模型を用いた可視化実験を行い路盤材の挙動を詳細に分析することでポンピング現象の発生過程を明らかにする。本章では『ポンピング現象の発生因子が舗装に与える影響』について着目し、輪荷重周回型模型を使用した載荷実験を行う。

ポンピング現象の発生には複数の因子が関与しており、ポンピング現象のメカニズムを解明するためには、発生因子がポンピング現象にどのような影響を与えるかを理解することが不可欠である。ポンピング現象の発生因子²⁹⁾には舗装のたわみやたわみ速度などの舗装版の性質、輪荷重の大きさや荷重速度を指す交通条件、舗装目地の大きさや路盤の水はけの良さを指す舗装の排水性能、路盤の支持力や透水性などを指す路盤の性質、そして降水量や、乾湿条件、温度条件などを指す環境要因などが挙げられる。環境要因については、温度や湿度、凍結融解など複雑な要素が絡むため、模型実験での検討が困難である。したがって、本模型実験では環境要因を除いた項目に焦点をあて、これらがポンピング現象へ与える影響を確認することとした。

実験では、載荷回数 100 回終了後の路盤材噴出量と舗装版下の飽和土における過剰間隙水圧を用いて、各発生因子がポンピング現象に与える影響を確認する。過剰間隙水圧の測定には輪荷重周回型模型にマンメーターを設置して計測する。計測方法については次節で詳細な説明を行う。

4.2 輪荷重載荷時における過剰間隙水圧の測定

4.2.1 輪荷重周回型模型における過剰間隙水圧測定方法

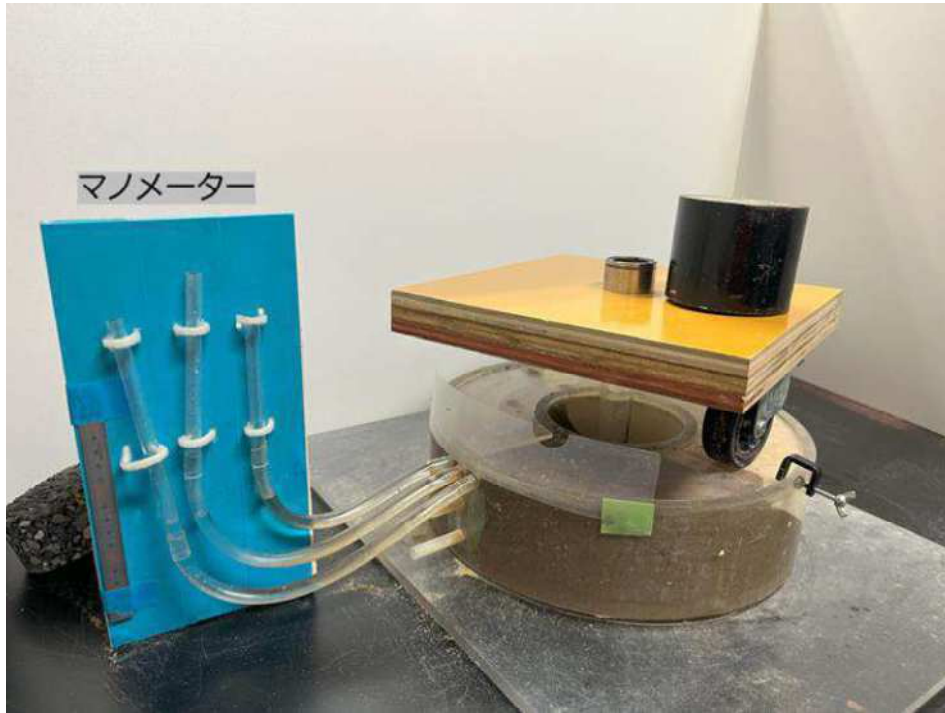
ポンピング現象は輪荷重が載荷され、舗装版がたわむことで飽和土内の過剰間隙水圧が上昇することにより発生することから、載荷による飽和路盤への影響を確認するには、過剰間隙水圧を計測する実験が必要である。実験では、**図 4-1** に示すように輪荷重周回型模型の土槽壁面にマンオメーターを取り付けることによって飽和路盤の過剰間隙水圧を測定する。マンオメーターは**図 4-1(b)**に示すように、舗装版底面から 5 mm の位置に 3 本設置しており、一度の載荷実験でアプローチ版下、目地直下、リーブ版下の一連の水圧を測定することができる。実験時にはマンオメーターの水の動きを撮影速度 30 fps の動画で撮影する。撮影した動画から、画像解析ソフトである Fiji⁴³⁾を使用してマンオメーター内の水位の変化を測定し、水圧を算出する。

図 4-2 に実験により得ることができる過剰間隙水圧の経時的変化の一例を示す。載荷実験により得られるマンオメーターの水位変動から算出すると**図 4-2(a)**の実線に示す、過剰間隙水圧のデータを取得することができる。図に着目してみると水圧波形には、目地への輪荷重の周期時間と同期している短周期の波と図中の点線で示す長周期の波が確認できる。本実験ではポンピング現象の発生度合いを短周期波の定量的評価によって行うため、**図 4-2(a)**の実験値の短周期波の一波長（輪荷重が目地上を通過する時間）ごとの平均をとることで、長周期波（**図 4-2(b)**）の抽出を行い、実験値（**図 4-2(a)**）から差し引くことによって短周期波（**図 4-2(c)**）を抽出した。得られた短周期波より、一度の輪荷重の載荷によって水圧が上昇する量を算出したものを一つの振幅値（**図 4-3**）とする。

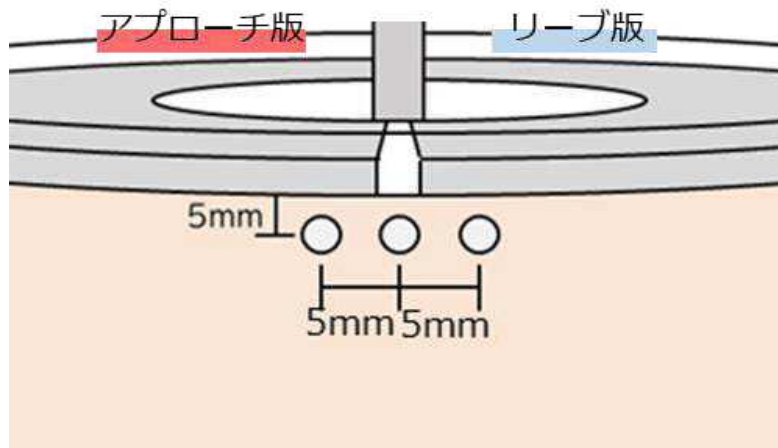
4.2.2 輪荷重載荷時における舗装版下飽和土の過剰間隙水圧の測定結果

様々な条件における輪荷重載荷による舗装版下飽和土の過剰間隙水圧の挙動を確認するため、**表 4-1** に示す条件で実験を行った。実験では舗装版厚さ、荷重速度、舗装目地幅の条件を変えた実験をそれぞれ実施し、各ケースで過剰間隙水圧の測定を行った。路盤条件は予備実験（**表 3-3**）と同様とする。測定結果を**図 4-4**～**図 4-6** に示す。図は各実験ケースによる載荷回数ごとの振幅値、つまり各実験ケースより得た水圧データから短周期波を算出し載荷回数ごとの水圧上昇量を算出している。

各実験結果の傾向を確認すると、舗装版厚さ 3 mm（**図 4-4(a)**）や舗装目地幅 1 mm（**図 4-6(a)**）のように、載荷初期では振幅が小さく、載荷回数を重ねると振幅が大きくなる傾向や、荷重載荷速度 0.56 m/s（**図 4-5(c)**）や舗装目地幅 4 mm（**図 4-6(d)**）のように載荷初期から振幅が大きい傾向など、実験によって異なる傾向を見せている。輪荷重周回型模型を用いた実

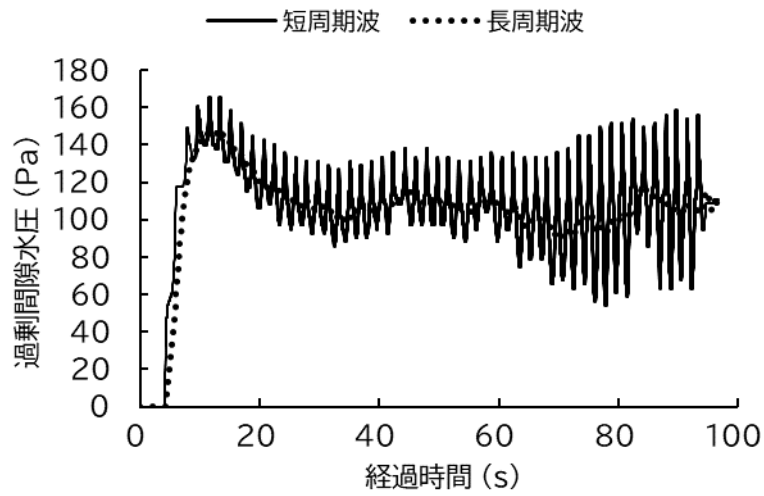


(a) マンメーター設置状況

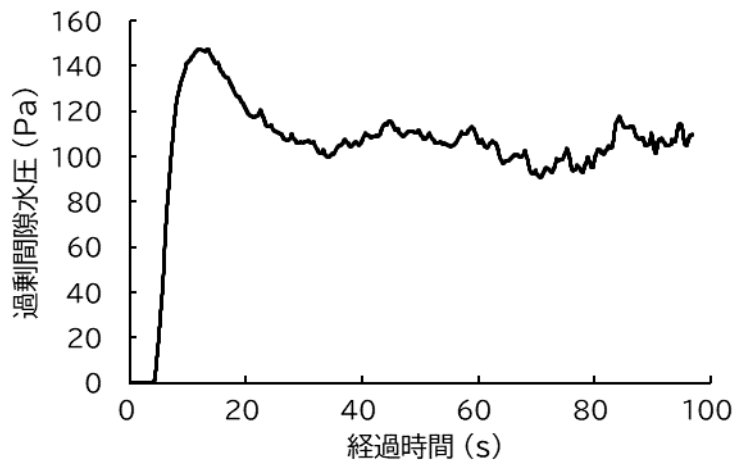


(b) 輪荷重周回型模型のマンメーター設置位置

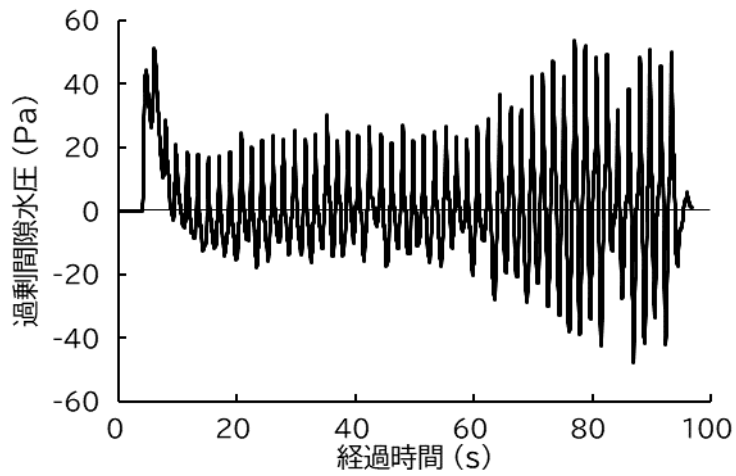
図 4-1 マンメーターを取り付けた輪荷重周回型模型の概況



(a) 過剰間隙水圧実験データ



(b) データ平均値 (長周期波)



(c) 間隙水圧波形データ (短周期波)

図 4-2 载荷実験による間隙水圧の算出過程

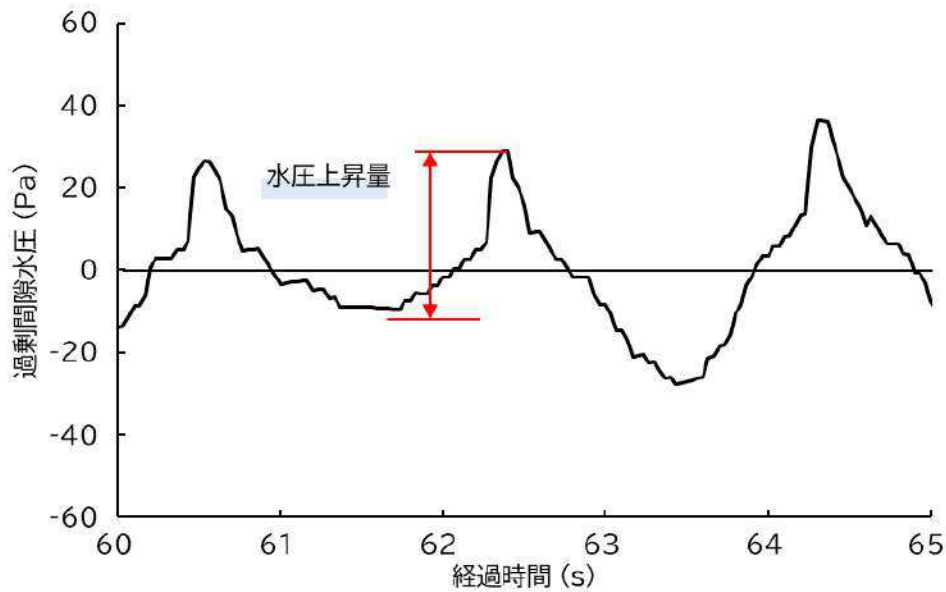


図 4-3 水圧振幅の定義

表 4-1 過剰間隙水圧測定実験の実験条件

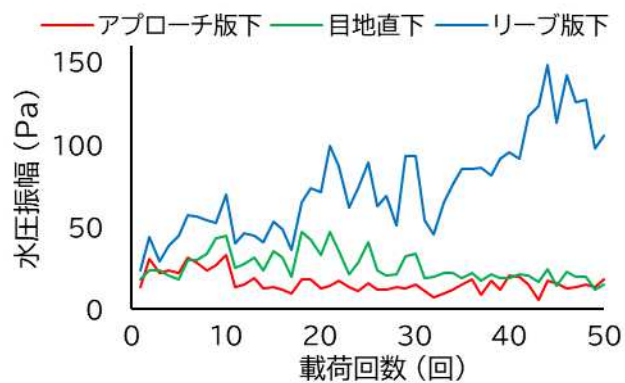
| | 舗装厚さ (mm) | 荷重速度 (m/s) | 舗装目地幅 (mm) | 载荷回数 |
|------|-----------|------------|------------|------|
| ケース① | 3 | 0.42 | 2 | |
| ケース② | 5 | 0.42 | 2 | |
| ケース③ | 8 | 0.42 | 2 | |
| ケース④ | 5 | 0.28 | 2 | |
| ケース⑤ | 5 | 0.56 | 2 | 50 |
| ケース⑥ | 5 | 0.69 | 2 | |
| ケース⑦ | 5 | 0.42 | 1 | |
| ケース⑧ | 5 | 0.42 | 3 | |
| ケース⑨ | 5 | 0.42 | 4 | |

験では、実験開始時の路盤に不陸が発生していると、舗装版への支持力が下がり舗装版がたわみやすくなるため、载荷初期から高い過剰間隙水圧を示す可能性がある、そのため実験時の路盤作製には丁寧な整生を行い、舗装版への支持力を確保することが今後の課題である。

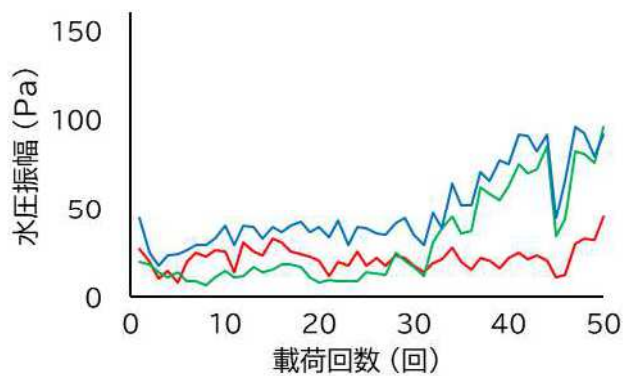
実験結果を確認すると、すべての実験ケースにおいて、リーブ版下の過剰間隙水圧が比較的大きくなっていることが分かる。輪荷重周回型モデルでは、舗装版の目地部で縁が切れている。そのため車輪がリーブ版に移動する際に強い衝撃が加わることで急激にたわむことが予想でき、その衝撃はリーブ版下の飽和路盤にも伝わることで過剰間隙水圧が大きくなっ

た可能性がある。過剰間隙水圧が路盤材料の移動に影響を与える因子であると考え、比較的大きい過剰間隙水圧を発生させるリープ版のたわみがポンピング現象の発生にとって影響が大きいことが考えられる。

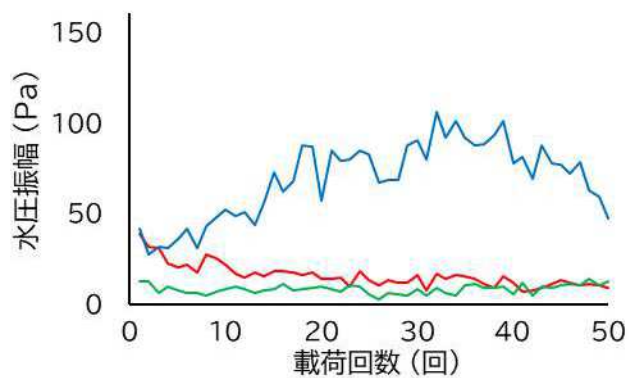
アプローチ版およびリープ版のたわみがポンピング現象に与える影響を確認するために、検証実験を行った。検証実験では、片側の舗装版のみがたわむ条件下で荷重実験を行い、ポ



(a) 舗装版厚さ 3 mm (ケース①)

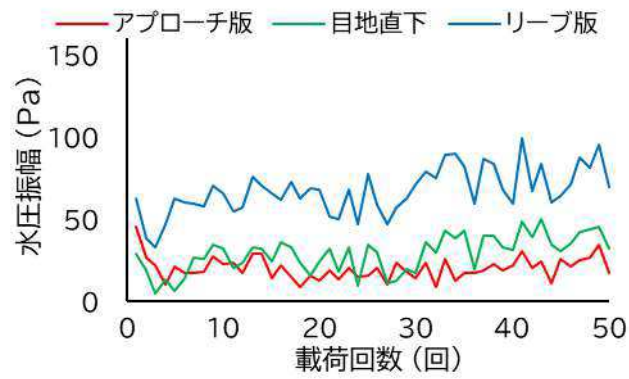


(b) 舗装版厚さ 5 mm (ケース②)

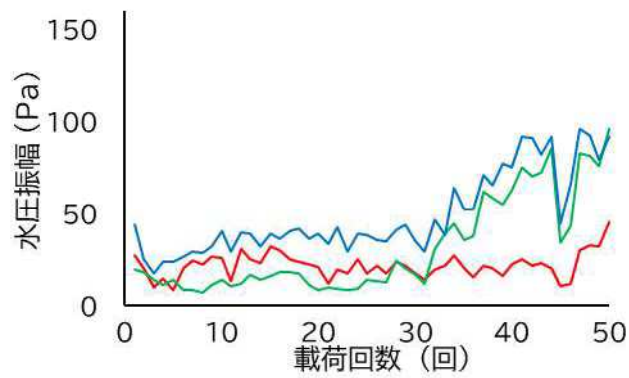


(c) 舗装版厚さ 8 mm (ケース③)

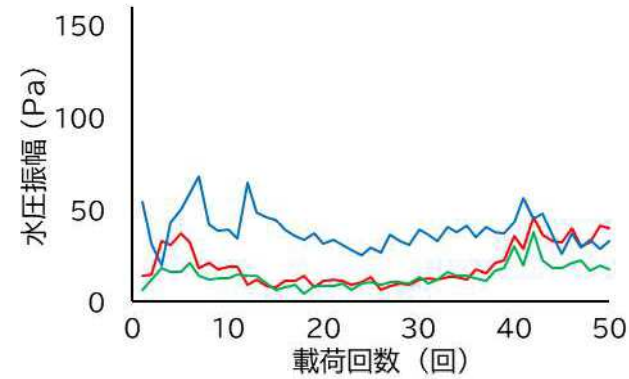
図 4-4 荷重回数の増加にともなう水圧振幅の変化 (舗装版厚さ別実験)



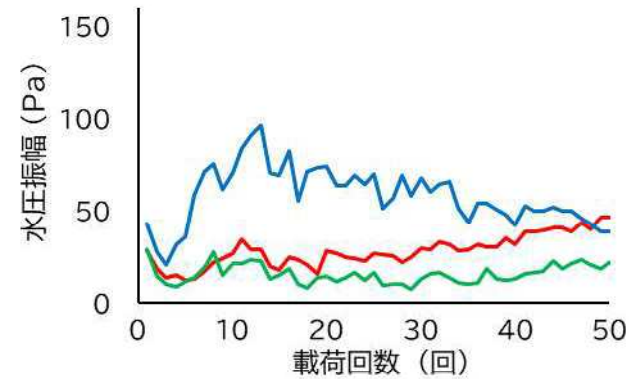
(a) 荷重速度 0.28 m/s (ケース④)



(b) 荷重速度 0.42 m/s (ケース②)



(c) 荷重速度 0.56 m/s (ケース⑤)



(d) 荷重速度 0.69 m/s (ケース⑥)

図 4-5 載荷回数の増加にともなう水圧振幅の変化 (荷重速度別実験)

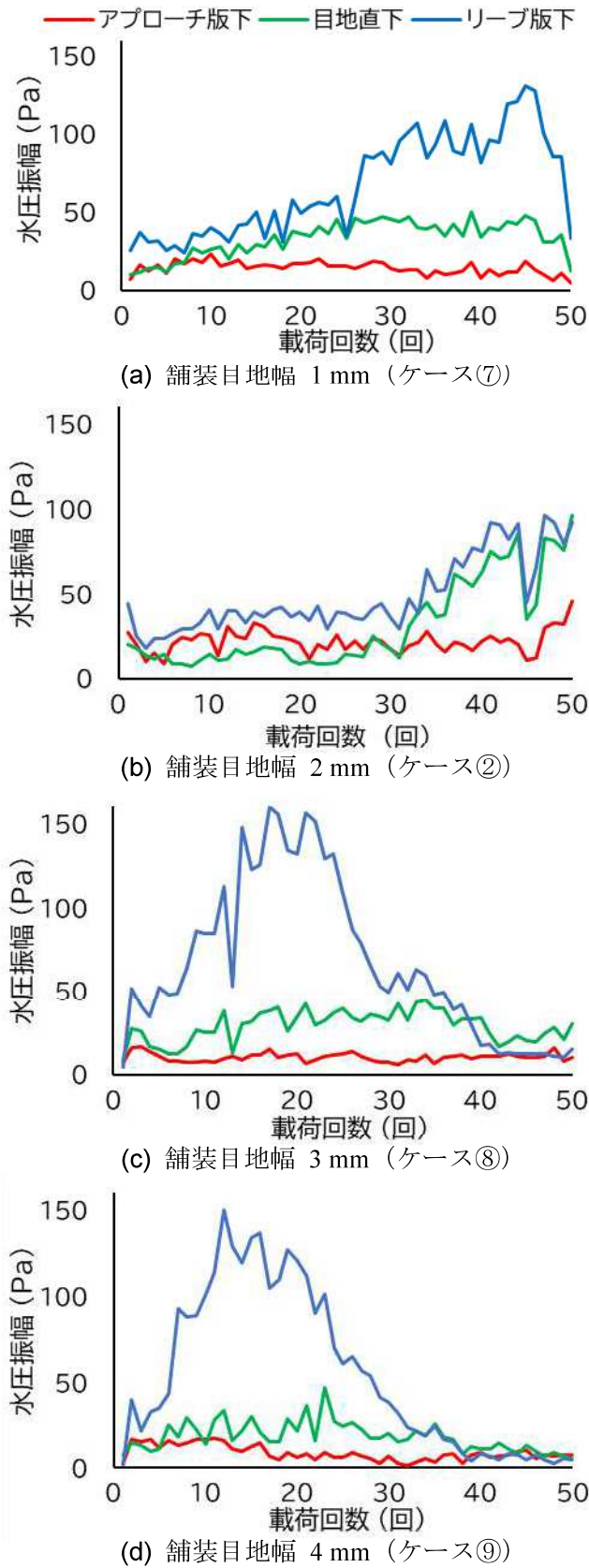


図 4-6 载荷回数の増加にともなう水圧振幅の変化（舗装目地幅別実験）

ンピング現象による路盤材の噴出量や浸食形態を比較することで、各舗装版のたわみによる飽和路盤への影響を確認する。片側の舗装版を固定するために、固定したい舗装版側の路盤層にたわみを阻害するためのスティック（木製）を設置する（図 4-7）。これにより、輪荷重の荷重により、片側の舗装版でのみたわみを発生させることができる。実験は水圧測定実験と同様の条件で行い、アプローチ版、リーブ版をそれぞれ固定したうえで輪荷重の荷重を実施した。

図 4-8 に、各舗装版がたわむ際の路盤材噴出量を示す。図よりアプローチ版のみがたわむ場合と比較して、リーブ版のみがたわむ場合で路盤材噴出量が多くなることが分かる。また、荷重終了時の路盤表面形状（図 4-9）を確認すると、アプローチ版のみがたわむ場合（図 4-9(a)）には路盤全体にわたる浸食が発生した。一方で、リーブ版のみがたわむ場合（図 4-9(b)）には、リーブ版下で偏った浸食が発生した。本実験結果や水圧上昇量の結果から考察すると、輪荷重による路盤材噴出や路盤浸食はアプローチ版と比較しリーブ版のたわみが与える影響が大きい事が分かる。ポンピング現象の発生因子による影響を確認するために過剰間隙水圧を指標とする場合、ポンピング現象への影響が大きいリーブ版下の水圧計測データの傾向を参照することとする。

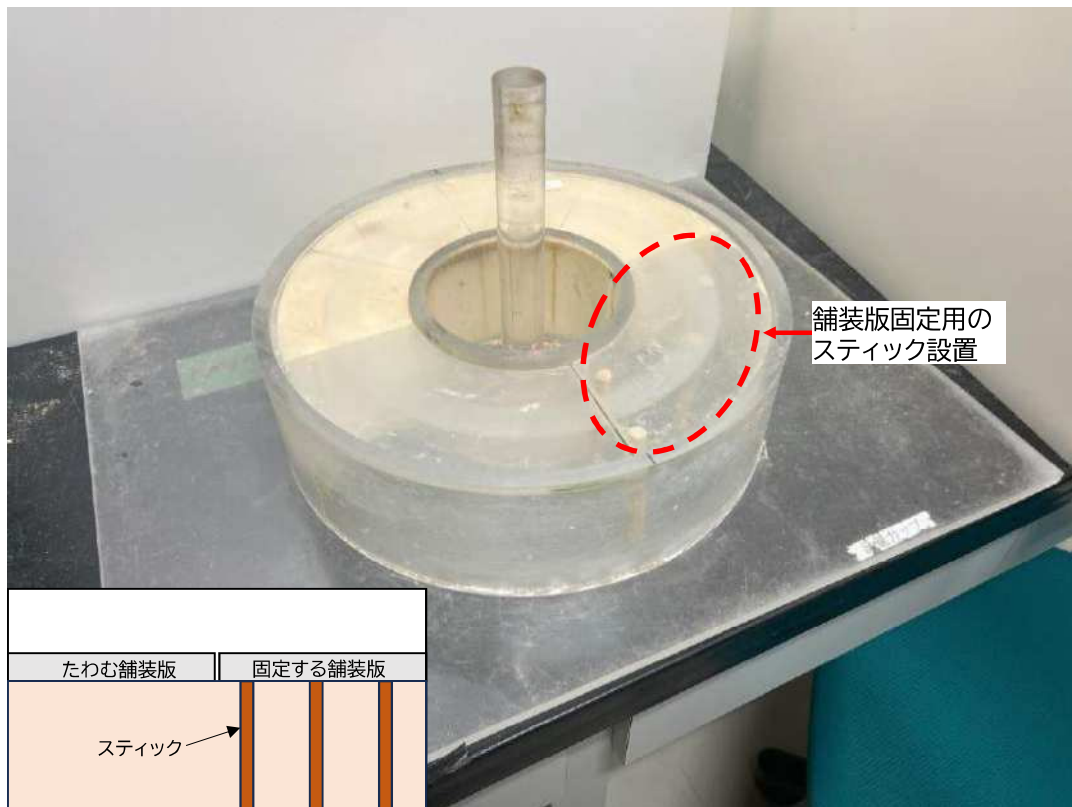


図 4-7 片側舗装版固定実験の概要

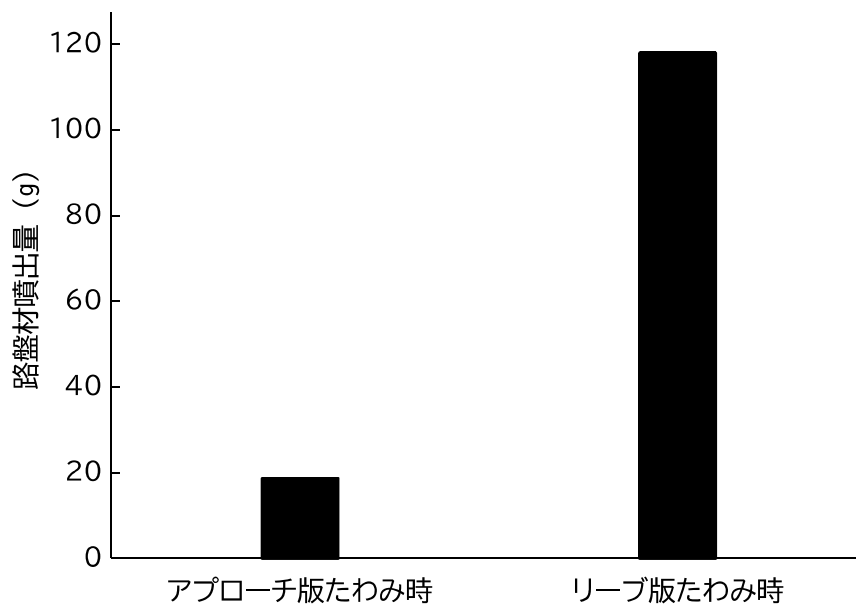
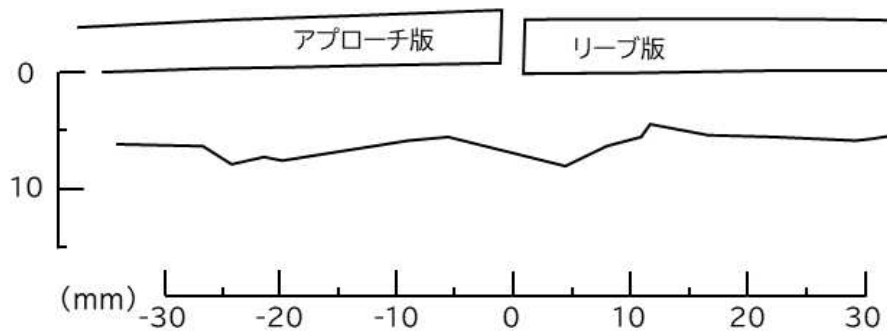
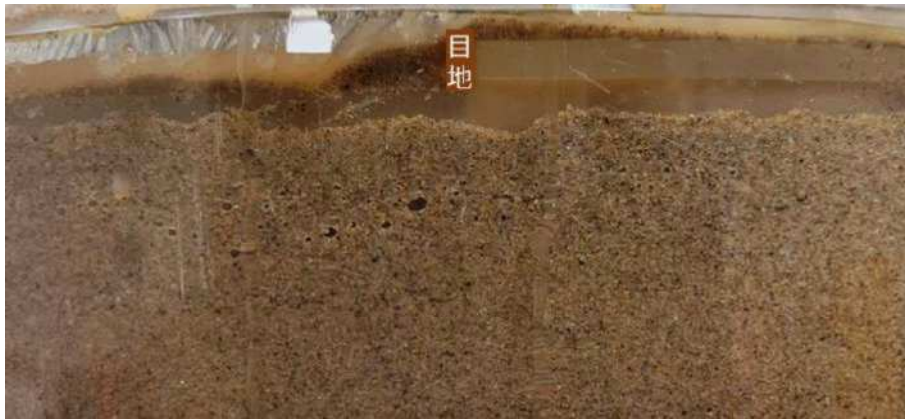
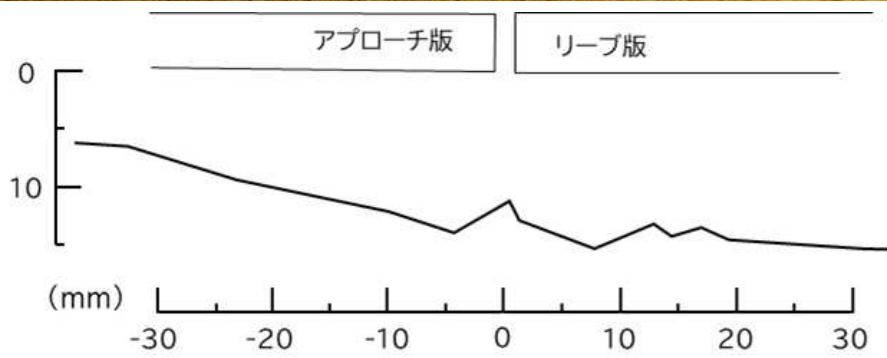
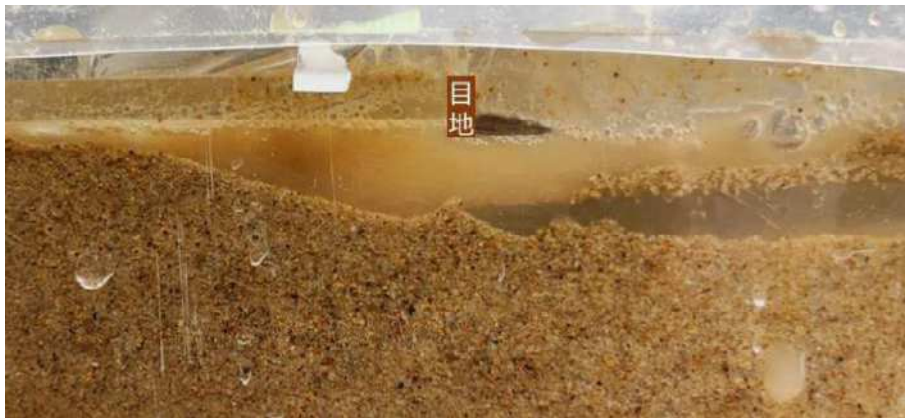


図 4-8 各舗装版のたわみによる路盤材噴出量



(a) アプローチ版のたわみ（リーブ版固定）時の路盤表面形状



(b) リーブ版のたわみ（アプローチ版固定）時の路盤表面形状

図 4-9 片側舗装版固定実験による実験終了時の路盤表面形状

4.3 舗装版の性質がポンピング現象に及ぼす影響

4.3.1 実験概要

本節では、舗装版の性質、つまり舗装版の厚みがポンピング現象に及ぼす影響を明らかにする。実験は表 4-1 におけるケース①②③の条件（ただし载荷回数は 100 回）で行い、舗装版の厚さが変化したときの路盤材噴出量と過剰間隙水圧を指標としてポンピング現象への影響を確認する。ここで路盤材噴出量は各ケースで载荷実験を 10 回行ない、载荷終了後に舗装版上に堆積した路盤材の乾燥重量を平均した値とした。また、過剰間隙水圧は水圧振幅の平均値を算出した。路盤材には珪砂 6 号を飽和状態にして実験を行い、路盤条件は前章における予備実験（表 3-3）と同様としている。実験は各ケースで 10 回ずつ行い、その平均値を算出した。

4.3.2 舗装版厚さとポンピング現象に関する実験結果

舗装版厚さと载荷実験終了時の路盤材噴出量の関係を図 4-10 に、各ケースにおける平均水圧を図 4-11 に示す。実験結果より、舗装版の厚さが薄くなると路盤材噴出量が増加する傾向が確認できた。また、各ケースにおける平均過剰間隙水圧、特に大きな値を示すリーブ

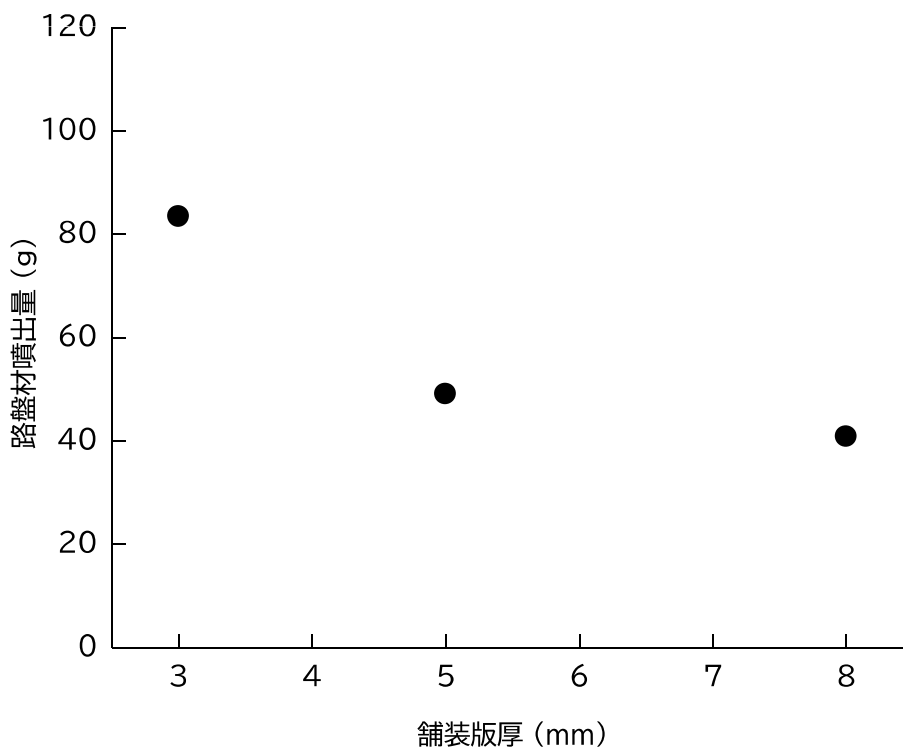


図 4-10 舗装版厚さと路盤材噴出量の関係

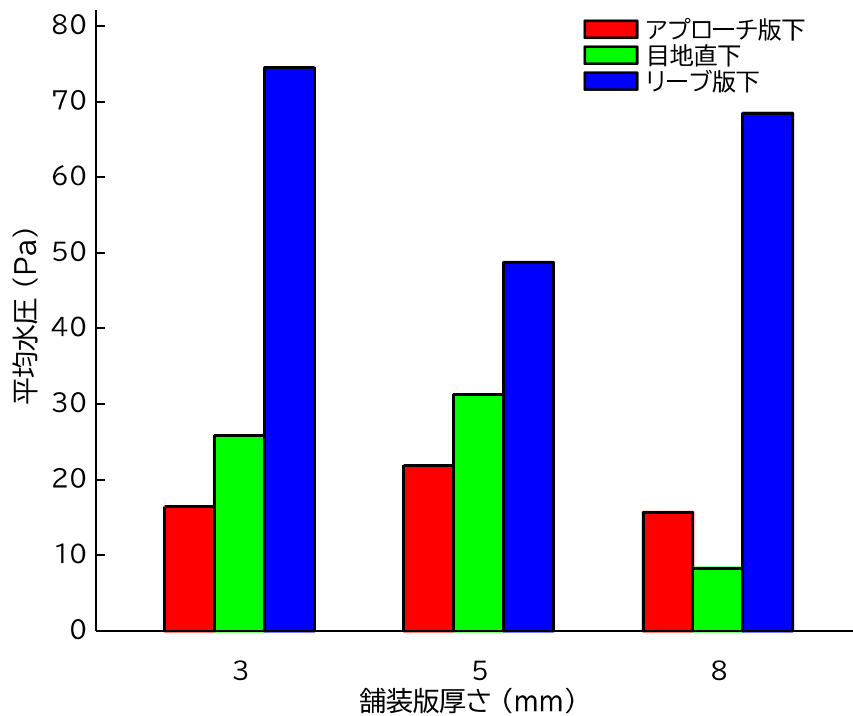


図 4-11 飽和路盤における平均水圧(舗装版厚さ別)

版下の水圧に着目すると、舗装版厚さ 8 mm のケースを除き、路盤材噴出量の結果と同様に舗装版が薄くなることによって大きな値を示した。

舗装版厚さの違いが舗装版のたわみ性状に与える影響を確認するために、簡易的な検証実験を行った。検証実験では、図 4-12 に示すように舗装版の片側を固定し、もう片側（自由端側）に任意のおもりを載せることによってそのたわみ量を計測する。この実験を異なる厚さの舗装版（ $t=5\text{ mm}$, 8 mm ）を用いて行い、たわみ量を比較する。検証実験の結果を図 4-13 に示す。実験の結果、舗装版の厚さが薄いほどたわみ量が増加した。舗装版のたわみ量は舗装版の断面 2 次モーメントに依存する。舗装版たわみ量と断面 2 次モーメントは反比例の関係にあり、舗装版が薄くなることにより断面 2 次モーメントが減少することで舗装版のたわみ量は増加する。

この結果から、舗装版が薄くなることによる舗装版のたわみ量の増加が飽和路盤の水圧を上昇させ、路盤材の噴出を活性化させたことが考えられる。つまり、载荷により舗装版がたわむ量がポンピング現象に影響を与えることがこの実験から確認できた。

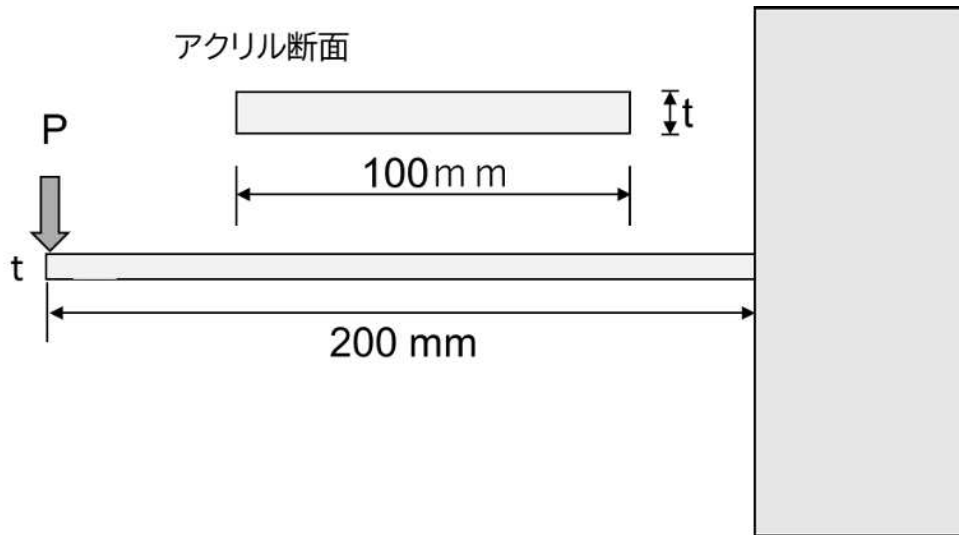


図 4-12 舗装版厚さによるたわみ量検測実験

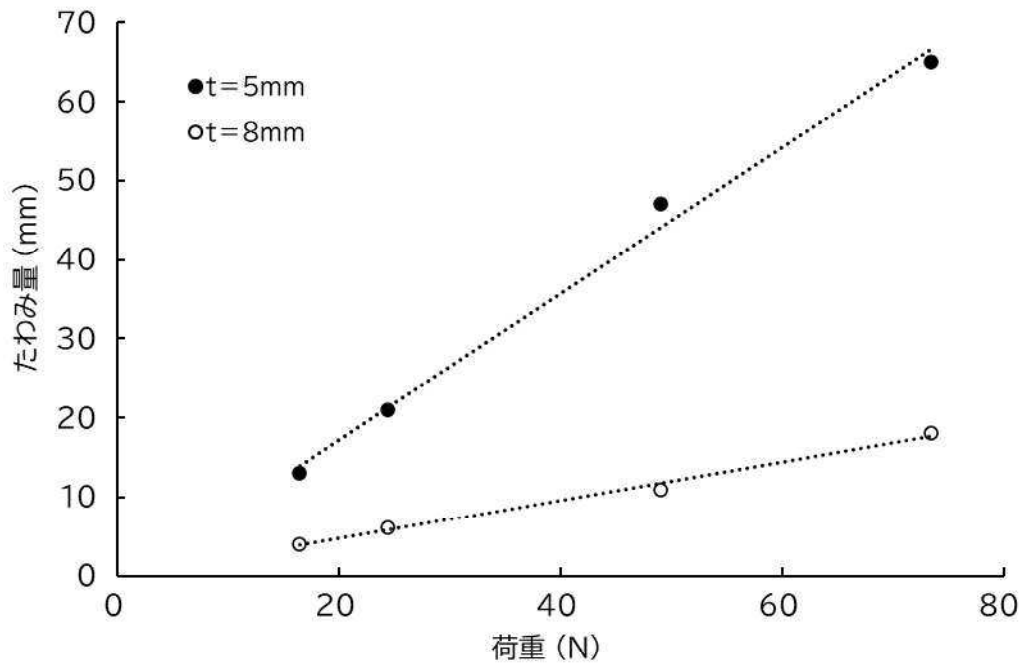


図 4-13 舗装版厚さによるたわみ量に関する検証実験結果

4.4 交通条件がポンピング現象に及ぼす影響

4.4.1 実験概要

本節では交通条件の違い，つまり輪荷重の速さがポンピング現象に及ぼす影響を確認する．実験では表 4-1 におけるケース②④⑤⑥の条件（ただし载荷回数 100 回）で行った．この実験では，輪荷重の速度が異なることでポンピング現象にどのような影響を与えるかを確認する．実験時の荷重速度を 0.28 m/s, 0.42 m/s, 0.56 m/s, 0.69 m/s の 4 ケースで実施し，輪荷重を 100 回载荷した際の路盤材噴出量と，平均過剰間隙水圧の計測を行った．路盤条件は予備実験と同様の条件で行った．

4.4.2 荷重速度とポンピング現象に関する実験結果

荷重速度による路盤材噴出量の結果を図 4-14 に示す．実験結果より，荷重速度が遅くなることにより路盤材噴出量が増加することが分かる．また，各実験ケースにおけるリーブ版下路盤の平均過剰間隙水圧（図 4-15）に着目すると，荷重速度 0.69 m/s のケースを除き，路盤材噴出量と同じく载荷速度が遅くなることにより大きな水圧上昇が発生することを確認した．

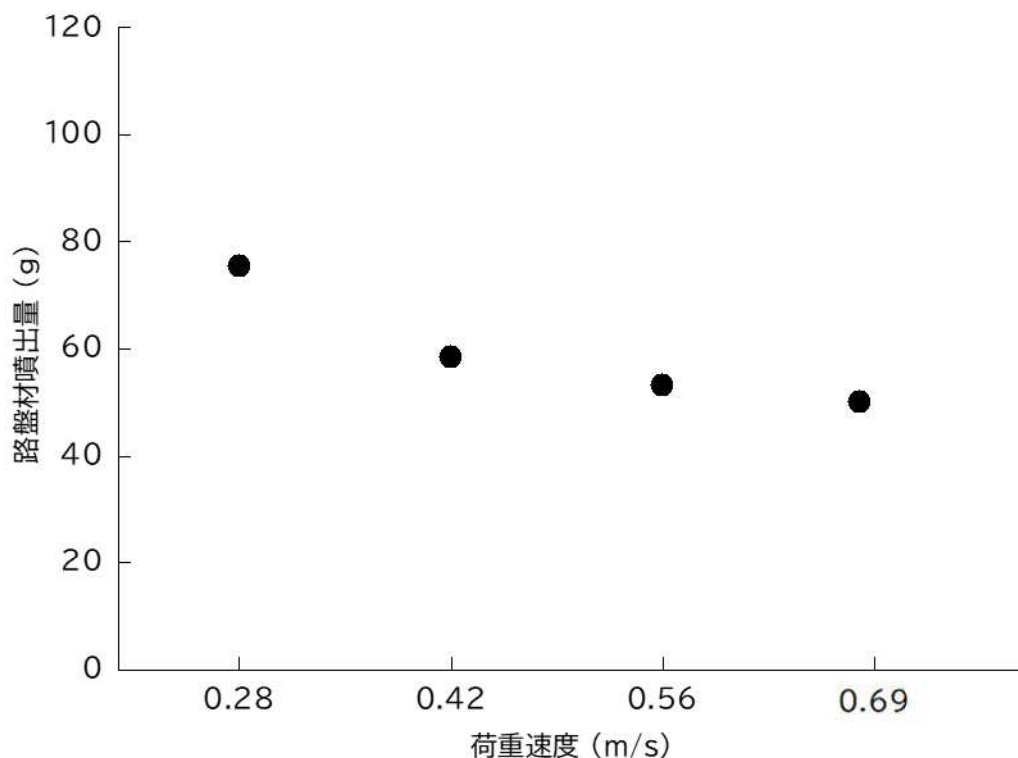


図 4-14 荷重速度と路盤材噴出量の関係

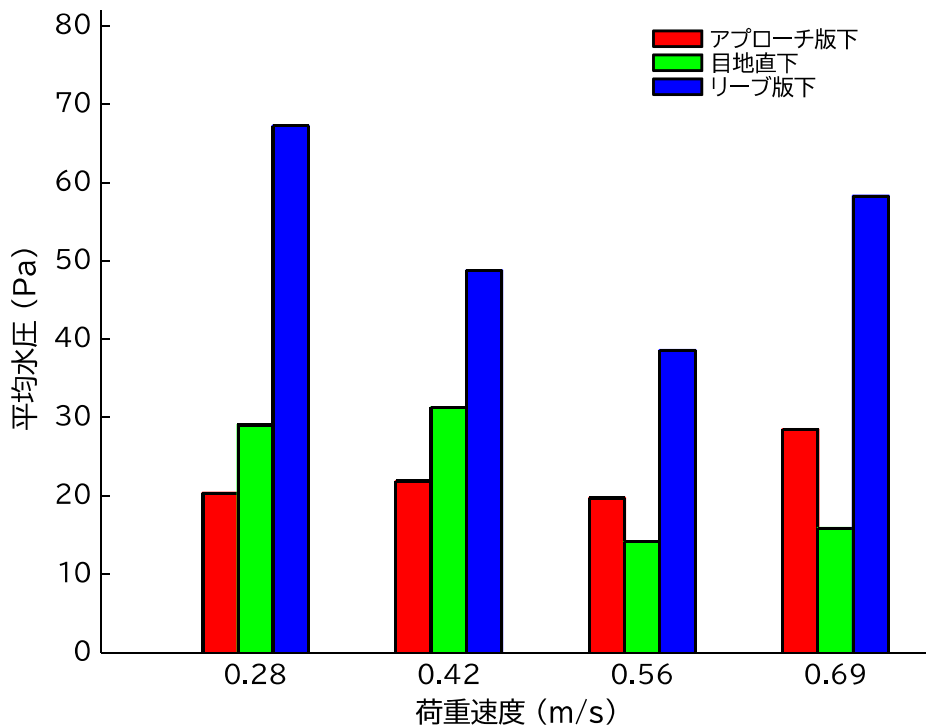


図 4-15 飽和路盤における平均水圧(荷重速度別)

輪荷重の速度は舗装版のたわみとその速度に影響を与えるとされている²⁹⁾。ポンピング現象は舗装版のたわみにより発生することから、荷重速度による舗装版のたわみ性状への影響を確認する。なお本研究では図 4-16 より、舗装のたわみ、または復元の速度が最大になる値を『たわみ速度』または『復元速度』、舗装がたわみ始めてからたわみが最大になるまでに要する時間を『たわみ時間』と定義する。

舗装版のたわみ性状を確認するため、模型の土槽を空の状態（路盤材を入れない状態）で舗装版を設置し、各速度で目地部への载荷を 10 回行ない舗装版のたわみ量を計測する。計測結果を図 4-17 に示す。図は各速度で 10 回行なった载荷のうちの代表的な 1 回のデータを抽出したものであり、車輪位置に対する舗装版のたわみの変位を示している。ここでたわみの変位とは、アプローチ版先端およびリーブ版先端（目地部）の鉛直変位であり、図の横軸は目地直上を基準（0）とした時の車輪位置を示している。図 4-17(a)より、荷重がアプローチ版上にある期間は、荷重が目地に近づくにつれてたわみが増加する。そのピークは図 4-17(b)に示すリーブ版のたわみの立ち上がりのタイミングに一致する。波形から明らかなように、アプローチ版はたわみのピーク以前（たわみ期）と以後（復元期）ではスピードが異なり、荷重速度に合わせて緩やかなスピードでたわみ、荷重がリーブ版に差し掛かると急速なスピードで復元する。これとは逆にリーブ版では急速なスピードでたわみ、緩やかに復元

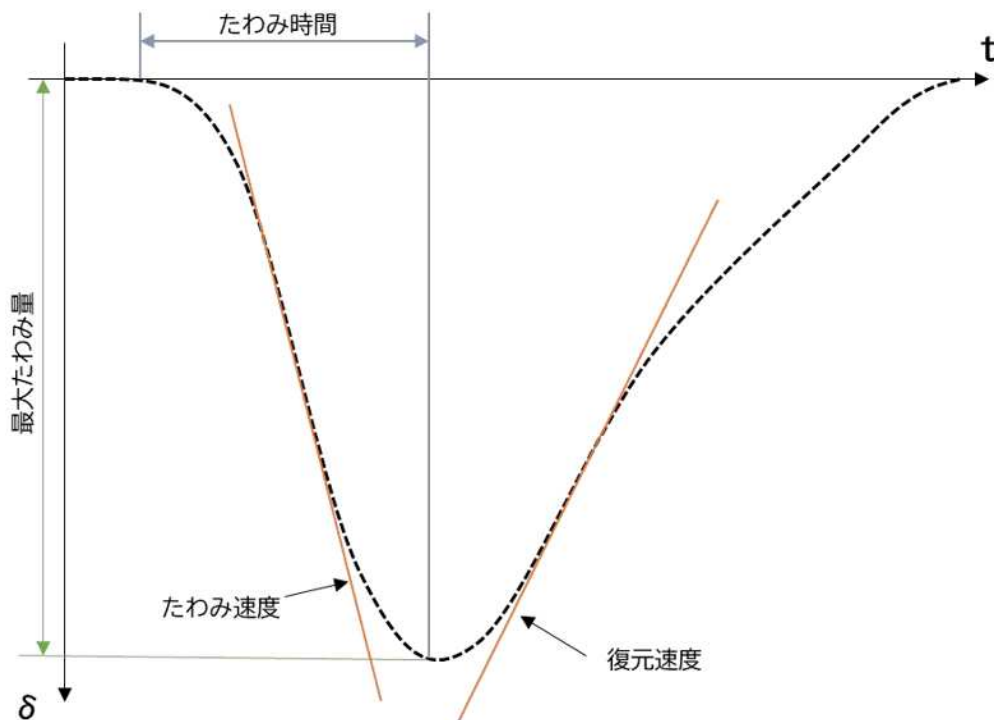


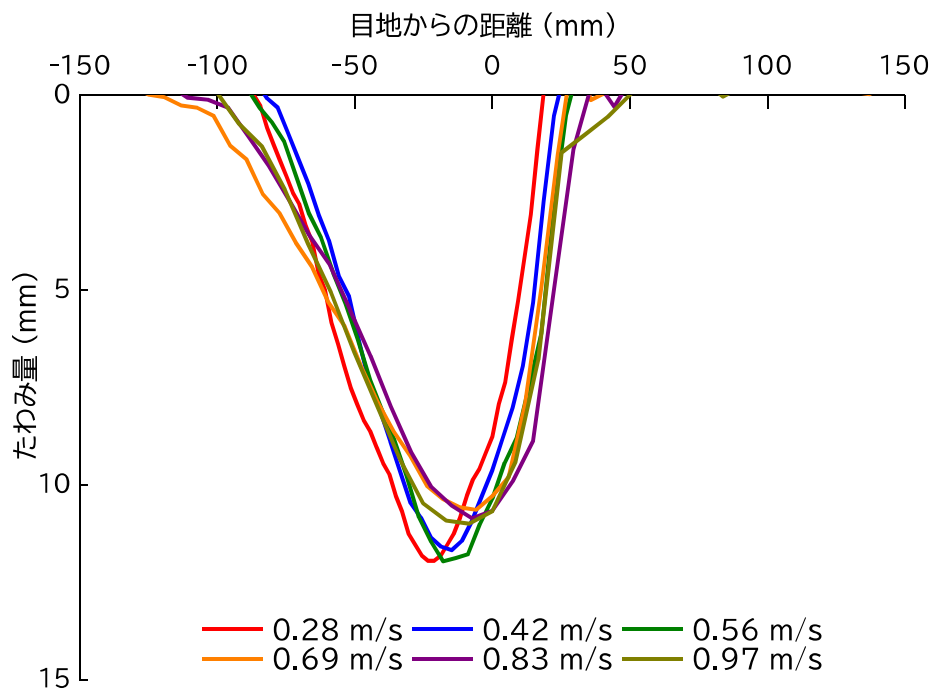
図 4-16 舗装版のたわみ性状に関する用語の定義

する。この結果から舗装版が最も急速に動くのはアプローチ版、リープ版ともに荷重がアプローチ版からリープ版へ差し掛かる瞬間であることが分かる。

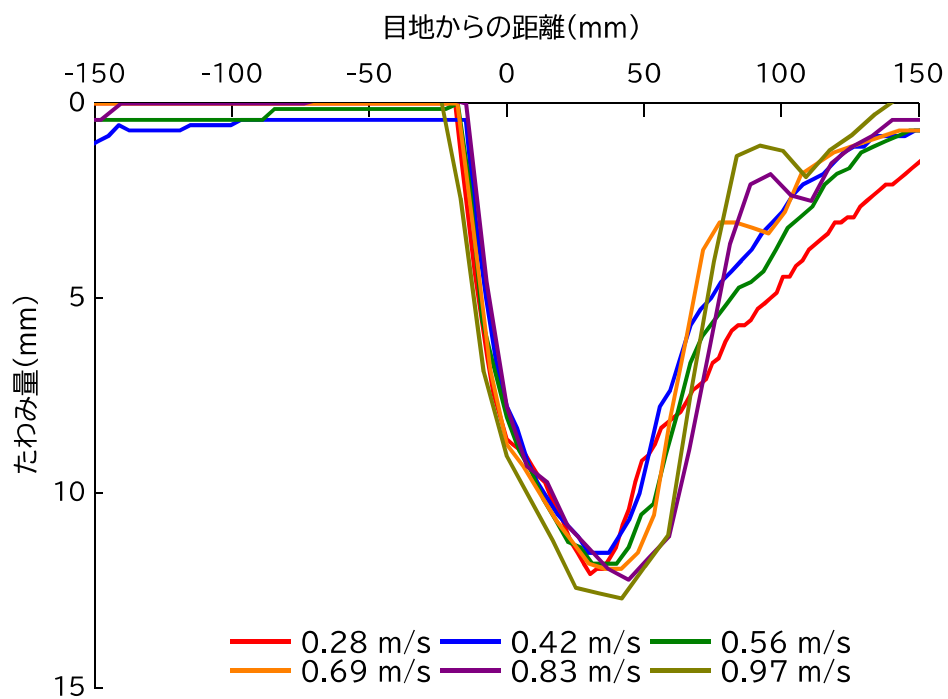
舗装版が急速にたわむと路盤の過剰間隙水圧の上昇に影響を与え、ポンピング現象が活発に発生することが考えられる。そこで各荷重速度による舗装版たわみ速度に着目する。図 4-18 は舗装版のたわみと、除荷による舗装版の復元の最大速度を載荷毎に算出し、平均値を示している。リープ版のたわみ速度は荷重速度の上昇に伴い増加することが分かる。また、それぞれの舗装版のたわみ速度、復元速度に関しても荷重速度の上昇とともに増加する。

ポンピング現象による路盤材噴出量に影響を与える要因にはたわみ速度とその継続時間がある。継続時間とは舗装版がたわみ始めてからたわみがピークに達するまでの時間を指す。図 4-19 に示すように、荷重速度が異なることにより舗装版のたわみ時間に違いがある。荷重速度が速くなることにより舗装版がたわむ時間が短くなるため、水圧上昇時間も短くなり、粒子が移動する時間が短くなるため路盤材噴出への影響が少なくなることが考えられる。

以上のように、ポンピング現象による路盤材噴出は舗装版のたわみ速度とその継続時間（たわみ時間）が要因となり発生する。舗装版のたわみ時間は各舗装版を荷重が通過する時間に関係していることから、荷重速度が倍増するとたわみ時間は半分になる、一方で図 4-18 より、荷重速度が倍増しても舗装版のたわみ速度はアプローチ版、リープ版ともに倍増



(a) アプローチ版



(b) リーブ版

図 4-17 荷重速度別舗装版たわみ量変化

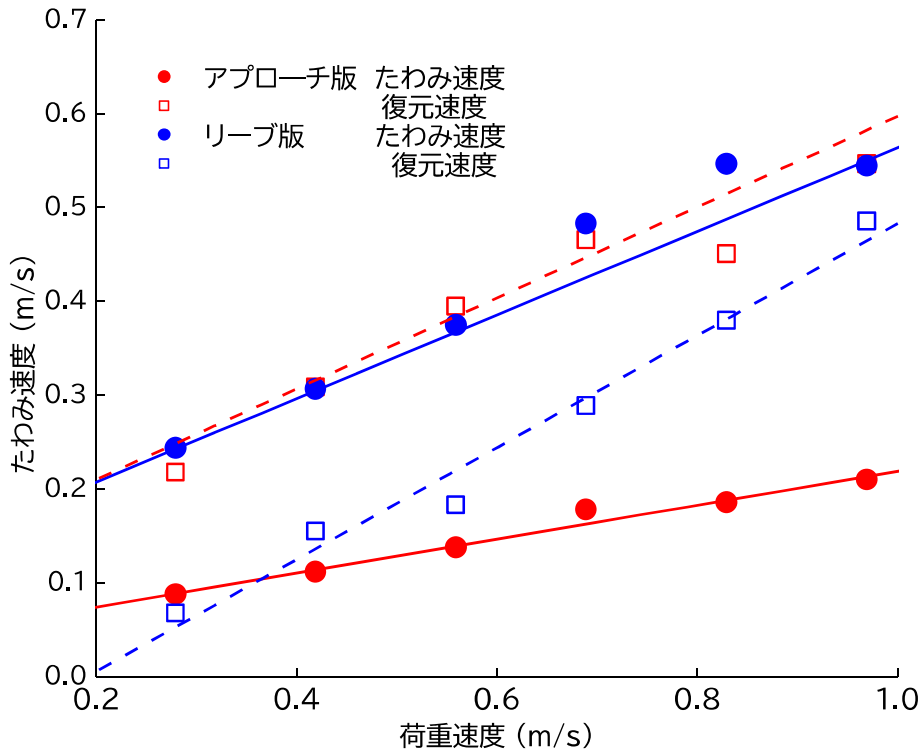


図 4-18 荷重速度と舗装版たわみ速度の関係

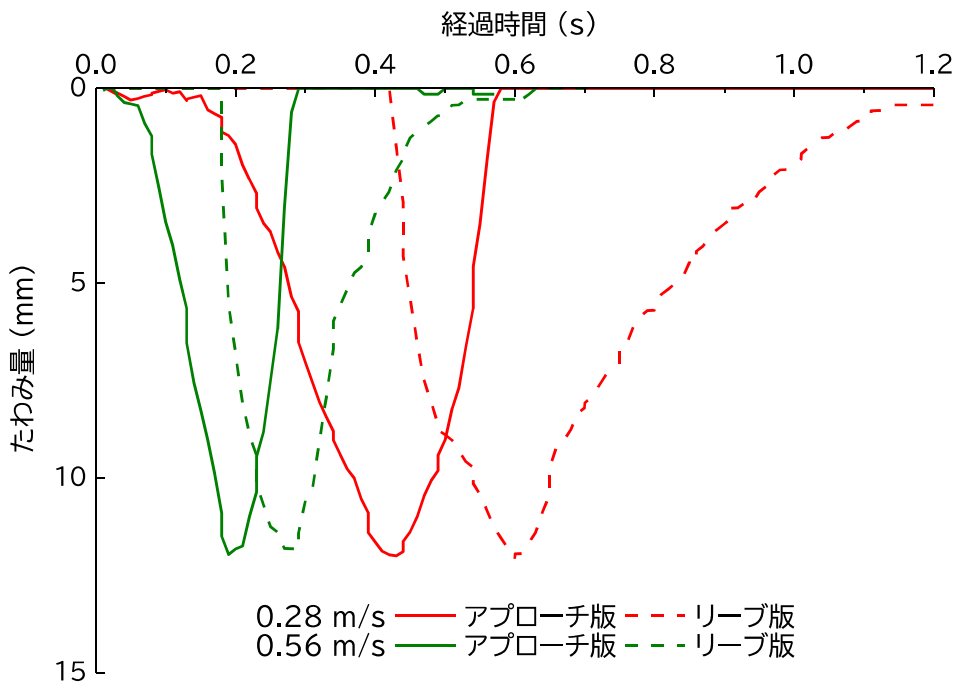


図 4-19 荷重速度によるたわみ時間の違い

には至っていない。そのため荷重速度が上昇することによるポンピング現象への影響は、舗装版たわみ速度よりも舗装版たわみ時間の方が大きく、過剰間隙水圧上昇による粒子の移動時間が減少することから路盤材噴出量が減少したことが考えられる。

また、本実験の測定範囲外であり、荷重速度 0.28 m/s 以下の範囲では荷重速度が遅すぎるとたわみ速度の低下により路盤材噴出に影響を与えるほどの過剰間隙水圧は発生しないことが予想できる。したがって、本実験における荷重速度が $0 \sim 0.28 \text{ m/s}$ の範囲内で噴出量の極大値を迎えることが考えられる。

4.5 舗装の排水性能がポンピング現象に与える影響

4.5.1 実験概要

排水性能が良い舗装は、水の存在が必須であるポンピング現象の発生リスクを大幅に減少することが予想される。排水性は路盤の透水性、保水性により定まる。排水性が悪く、水が長期にわたり舗装路盤内に滞留するとポンピング現象の発生リスクが高まる。このポンピング現象の活発性は载荷により水を排出する目地もしくはクラックの大きさにより影響されると推測できる。そのため、本節では舗装目地の大きさがポンピング現象に及ぼす影響を確認する。実験は表 4-1 におけるケース②⑦⑧⑨の条件（ただし载荷回数 100 回）で行った。舗装目地幅に関する検討では、舗装目地幅が 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm の場合の実験を実施した。路盤条件は予備実験と同様とする。

4.5.2 舗装目地幅とポンピング現象に関する実験結果

舗装目地幅と路盤材噴出量の関係を図 4-20 に、各ケースにおける平均水圧を図 4-21 に示す。図から舗装目地幅が広がると路盤材噴出量が大きくなることを確認できる。一方で、各ケースにおけるリーブ版の平均過剰間隙水圧を確認すると、一貫した傾向を見られなか

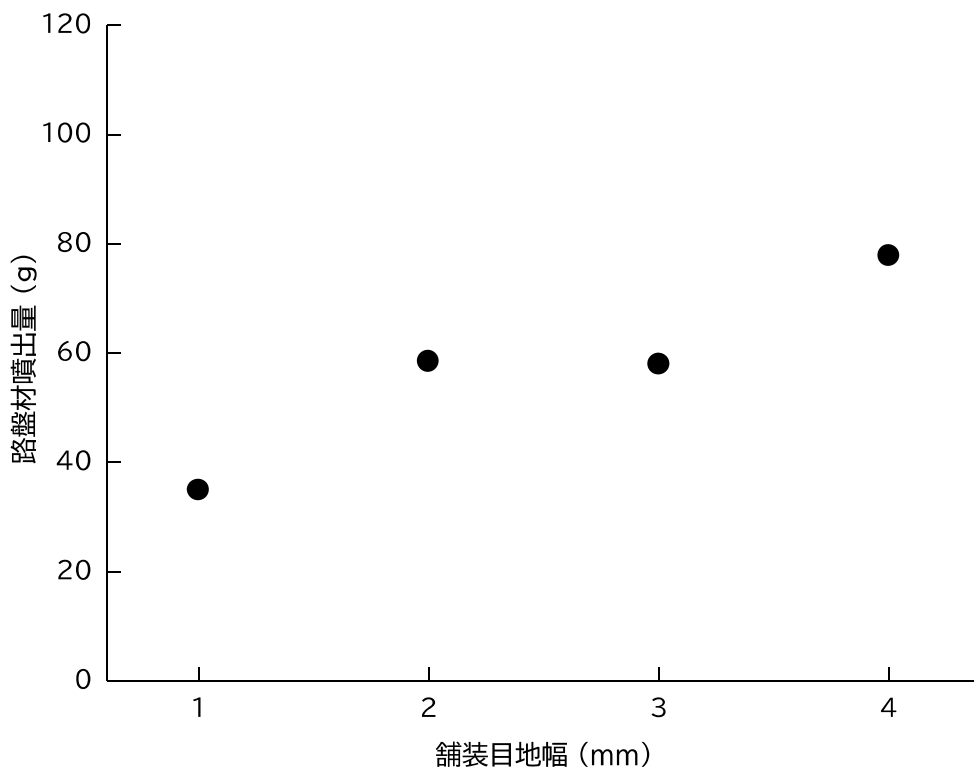


図 4-20 舗装目地幅と路盤材噴出量の関係

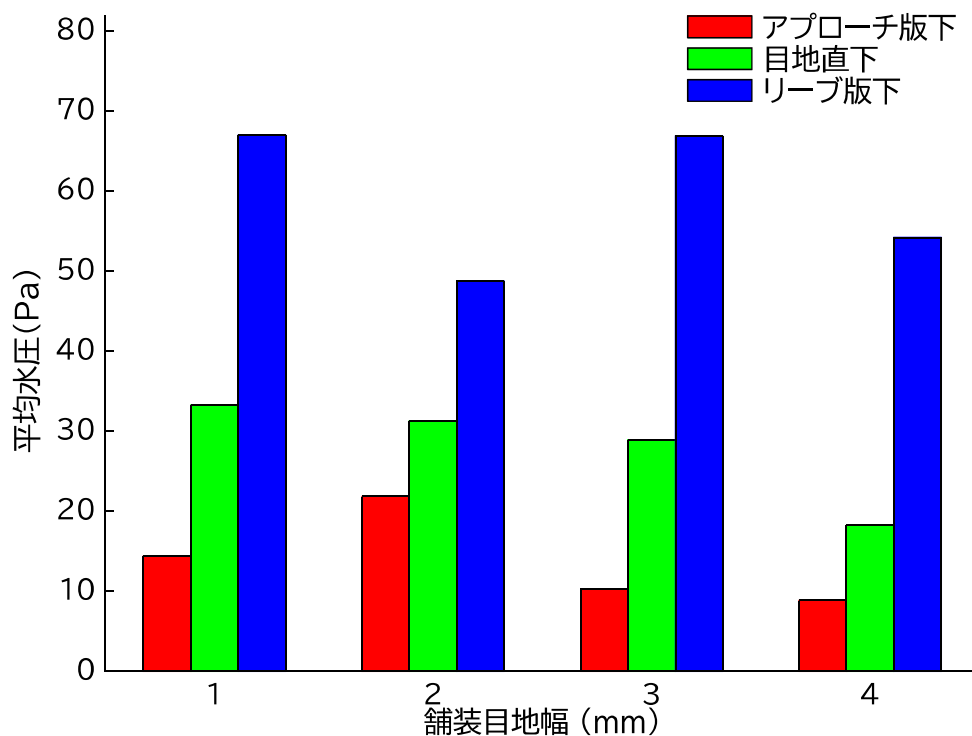


図 4-21 飽和路盤における平均水圧(目地幅別)

った。今回実験した舗装の目地幅の差異は最大で 3 mm 程度であることを考慮すると、舗装版の目地幅の違いが舗装版のたわみ性状に影響を与えたと考えることは難しい。したがって、舗装版のたわみによる舗装版下路盤への影響（主に水圧上昇量）が同程度になることが考えられ、舗装目地幅の広く路盤材の噴出口が広いケースで路盤材噴出量が増加したことが考えられる。しかし、今回実験を実施した目地幅の大きさ以上の条件で実験を行う場合、舗装版のたわみによる舗装版下路盤の過剰間隙水圧は目地部で消散しやすくなることが予想され、それに伴い路盤材噴出量も頭打ちになることが予想できる。

4.6 路盤の性質がポンピング現象に与える影響

4.6.1 実験概要

路盤の弾性係数などの特性は、舗装版の変形やたわみに影響を与える重要な要因である。不安定な路盤では、過剰間隙水圧の蓄積や路盤浸食など、ポンピング現象における作用を受けやすい可能性が考えられる。路盤の締固め度は舗装版の壊れやすさに直結する。路盤締固め不良は舗装版への支持力が低下し、亀甲状ひび割れなどの損傷を発生させる原因となることから、舗装の健全度を保つためには路盤層の締固め度の管理は重要になってくる。ポンピング現象は、荷重により舗装版がたわむことで路盤粒子が移動することで発生する現象であり、路盤の締固め度によって路盤粒子の移動しやすさに影響を与えることが考えられる。したがって、路盤の締固め度がポンピング現象に与える影響を確認する。

実験では、路盤締固め度の異なる条件で実験を行い、ポンピング現象に及ぼす影響を確認する。実験で使用する路盤材には、粒度分布の悪い試料である珪砂 6 号と、粒度分布の良い試料である岩国まさ土を使用した。両路盤材の物理特性と粒径加積曲線を表 4-2 と図 4-22 に、岩国まさ土の締固め曲線を図 4-23 に示す。表 4-2 より、珪砂 6 号の均等係数は 1.92 であり、粒径が揃っていることが分かる。また、曲率係数を確認すると、珪砂 6 号 ($U_c=4.81$) は粒度分布が悪く、岩国まさ土 ($U_c=1.03$) は粒度分布が良い材料であることが分かる。この実験では、路盤を締固める作業に時間を要することから、図 4-24 に示すように路盤厚を 48 mm と薄くしている。岩国まさ土を使用して路盤を作製する際、最適含水比に調整した試料を 6 層 (8 mm/層) に分けて突き固めた。その後、土槽側面の注水孔からゆっくり水を注ぐことによって飽和させた。一方、珪砂 6 号は粒径が揃っているため、突き固めることが困難である。そのため、珪砂 6 号の飽和路盤は水中落下法³⁶⁾にて作製後、土槽に振動を与えることによって締固め度を調整した。表 4-3 の条件で実験を行い、荷重回数 200 回行なっ

表 4-2 実験に使用した路盤材の物性値比較

| | 珪砂 6 号 | 岩国まさ土 |
|----------------------------|----------------------|-------|
| 土粒子密度(g/cm ³) | 2.650 ³⁶⁾ | 2.611 |
| 最大乾燥密度(g/cm ³) | 1.554 ³⁶⁾ | 1.868 |
| 最適含水比(%) | 13.9 ³⁶⁾ | 14.0 |
| 均等係数 | 1.92 | 94.87 |
| 曲率係数 | 4.81 | 1.04 |

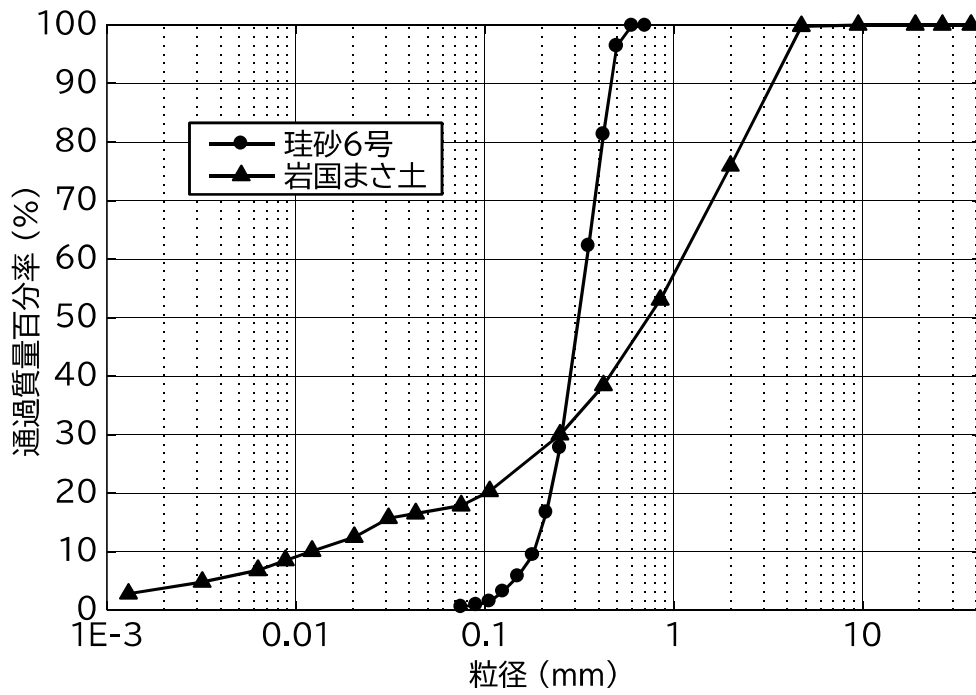


図 4-22 実験に使用した路盤材の粒径加積曲線

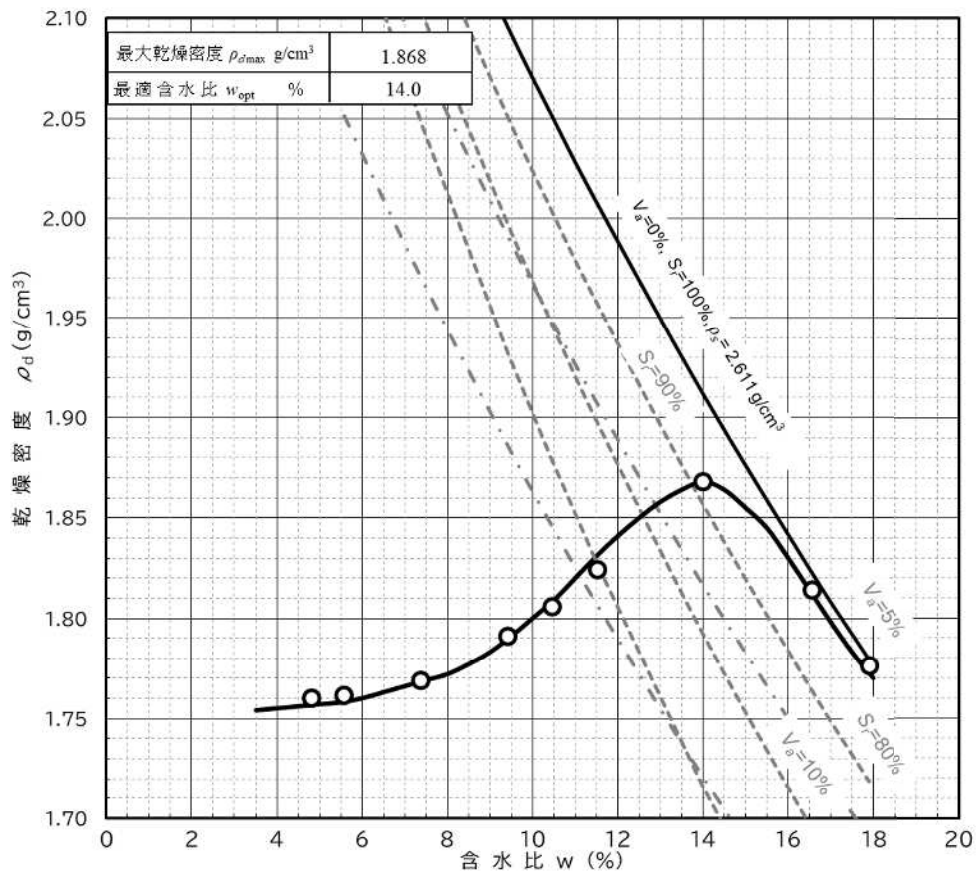


図 4-23 岩国まさ土の締固め曲線

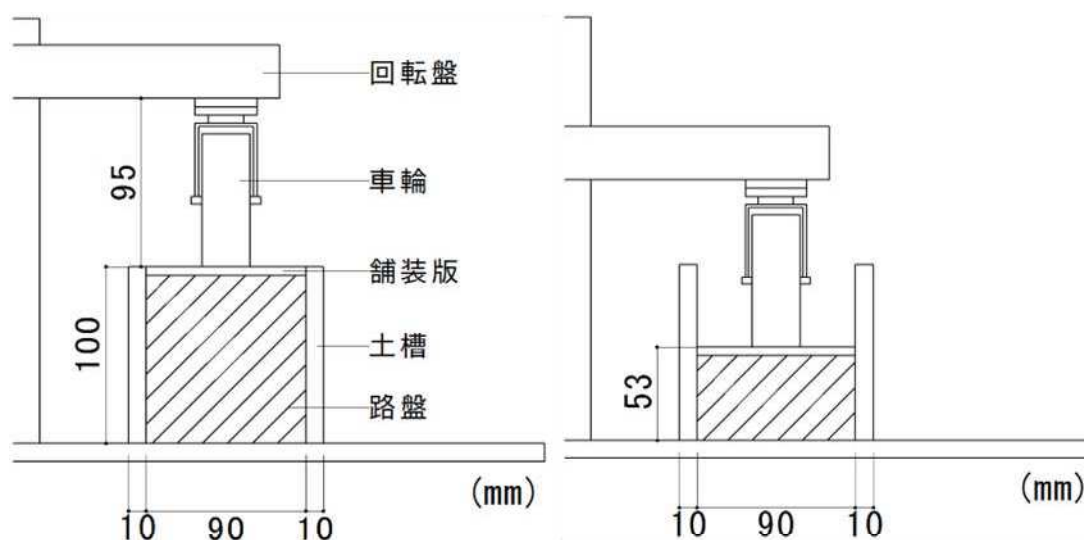


図 4-24 路盤材締固め度に関する実験の模型断面図(左：これまでに用いた模型，右：今回用いた実験模型)

表 4-3 路盤の性質がポンピングに及ぼす影響を検証するための载荷実験の実験条件

| | |
|----------|------|
| 载荷回数(回) | 200 |
| 速度 (m/s) | 0.42 |
| 目地幅(mm) | 2 |
| 舗装厚さ(mm) | 5 |

た際の路盤材の噴出量を計測する。

4.6.2 路盤締固め度とポンピング現象に関する実験結果

路盤締固め度による路盤材の噴出量を図 4-25 に示す。縦軸には载荷終了時の路盤材噴出量を、横軸は路盤作製時の締固め度を示している。珪砂 6 号では締固め度が上昇するにつれて路盤材噴出量が線形的に減少し、締固め度が 97% を越えるとほとんど噴出しなくなった。粒径範囲が狭く、密実に詰まりにくい材料である珪砂 6 号は、粒子が動きやすくポンピング現象を生じやすいが、丁寧に締固めれば耐ポンピング性能を向上させることが可能であることを示している。ポンピング現象によりひとたび路盤表面の浸食が始まると、舗装版のたわみが大きくなり、ポンピングと浸食が加速的に進行する。一方、岩国まさ土では、締固め度が 90 % の実験でも载荷 200 回では噴出がほとんど発生しなかった。粒径範囲が広く、密実に詰まりやすい岩国まさ土のような材料は、土の構造骨格が安定しているため、舗装版からの刺激によって粒子が動きにくく、ポンピングと路盤表面の浸食が進まないと言える。

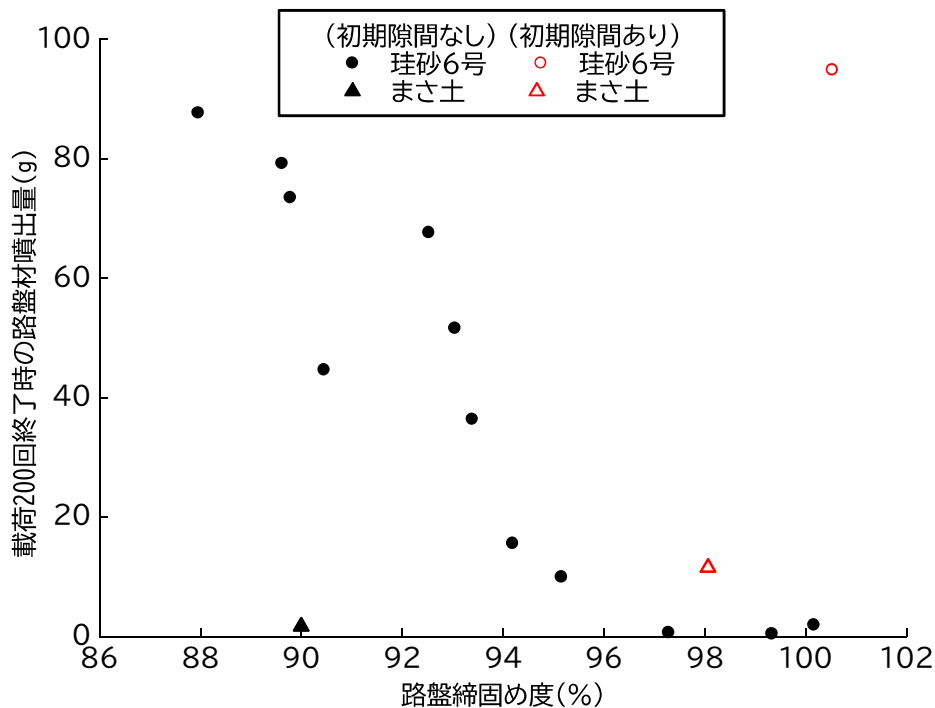


図 4-25 路盤材締固め度と路盤材噴出量の関係

締固め度が低い路盤で実験を行った場合、载荷によって路盤が締固まり、舗装版と路盤の間に隙間ができる。その結果、载荷に伴う舗装版のたわみ量が大きくなり、水の動きと連動してポンピング現象が活発になることが考えられる。舗装版と路盤層の間に隙間があることによりポンピング現象が活発化するかを確認するため検証実験を行った。検証実験では図 4-26 に示すように、路盤作製時に舗装版と路盤層の間に 0.5 mm の隙間をあらかじめ設け、载荷回数 200 回行った際の路盤材噴出量を確認した。図 4-25 より検証実験の結果を確認する。締固め度 100% の珪砂 6 号を路盤材として使用した時、初期隙間がないと路盤材噴出はほとんど発生しないが、初期隙間があると輪荷重 200 回で 94.8 g の路盤材が噴出しており、ポンピング現象が活発になることが分かった。また、路盤材としてまさ土を使用した場合、初期隙間がないと締固め度 90% でも路盤材噴出はほとんど発生しなかったが、初期隙間があると高い締固め度（締固め度 98%）でも微量ではあるが路盤材の噴出を確認した。载荷終了後の路盤状況（図 4-27）を確認すると、路盤表面は粗い粒子が散在しており、細粒分が噴出していることが分かった。また、リーブ版下で浸食が発生しており、载荷による粒子挙動が発生していることが分かった。これらの結果から、ポンピング現象は路盤表面と舗装版の間の隙間に大きく影響を受けることが分かった。路盤作製時の締固め度に対して線形的に噴出量が減少するのは、締固め度そのものがポンピング現象に影響を与えているわけではなく、初期密度が高くなることで路盤表面と舗装版の間の隙間が空しくくなるためである。



図 4-26 舗装版と路盤の間に隙間を設けたケースの検証実験

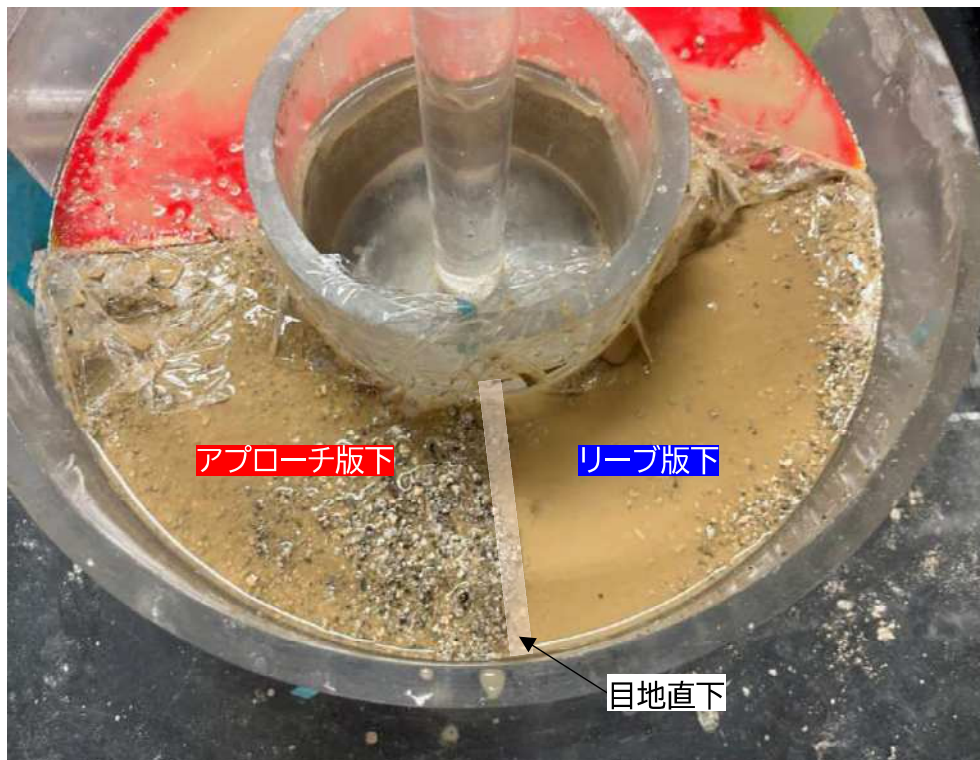


図 4-27 まさ土を用いた载荷実験（隙間あり）終了後の路盤状況

4.7 まとめ

本章では、前章で開発した輪荷重周回型模型を用いた載荷実験を行い、ポンピング現象の発生因子である舗装版の性質、交通条件、舗装の排水性能、および路盤の性質について載荷実験を実施し、ポンピング現象に及ぼす影響を確認した。本章で得た知見を以下に示す。

1. 舗装版は目地部で縁が切れていることから、載荷時の舗装版のたわみ性状はアプローチ版とリーブ版で異なる。リーブ版は輪荷重が目地を越えて載荷することによって、たわむ速度が比較的早く、舗装版下に大きな衝撃を与えるため、過剰間隙水圧の上昇量も大きくなる。そのためポンピング現象による路盤材の噴出はアプローチ版と比較し、リーブ版のたわみの影響が大きくなる。
2. 舗装版の性質がポンピング現象に及ぼす影響を確認するため、舗装版の厚さに関する載荷実験を実施したところ、舗装版厚が薄くなることでポンピング現象が活発に発生することが分かった。舗装版が薄くなることによって舗装版のたわみ量が増加する。載荷速度が同一で舗装版のたわみ速度とたわみ時間が同程度である場合、舗装版のたわみ量がポンピング現象の発生に影響を与えることが考えられる。
3. 交通条件がポンピング現象に及ぼす影響を確認するため、荷重速度に関する載荷実験を行ったところ、荷重速度が遅くなることでポンピング現象が活発に発生することが分かった。荷重速度の違いは、舗装版のたわみ速度とたわみ時間に作用し、ポンピング現象に影響を与えるが、荷重速度による路盤材の噴出量はたわみ時間の影響を大きく受け、荷重速度が減少することにより、舗装版のたわみ時間が増加することから、路盤材の噴出量は増加したことが考えられる。
4. 舗装の排水性能がポンピング現象に及ぼす影響を確認するため、舗装版の目地幅に関する載荷実験を行ったところ、舗装版目地幅が広くなることでポンピング現象が活発になることが分かった。舗装版下の過剰間隙水圧には一貫した傾向が確認できないことから、排出口の大きくなると路盤材の噴出が活発になったことが考えられる。
5. 路盤の性質がポンピング現象に与える影響を確認するため、路盤締固め度に関する載荷実験を行ったところ、路盤締固め度が上昇することによって、粒子間が密になり、ポンピング現象の発生が抑制されることが分かった。また、粒径範囲が広く粒度分布が良い

路盤材であれば、密実に締まりやすく、比較的締固め度が低くてもポンピング現象による噴出が発生しにくくなることが分かった。

6. ポンピング現象は载荷に伴い舗装版がたわむことにより発生する。そのため路盤の締固め度が高くても、舗装版と路盤の間に隙間があると舗装版がたわみやすくなり、滞水した水の動きも連動して、ポンピング現象が活発になる。そのため、舗装版と路盤の層間の隙間をなくすことでポンピング現象が抑制できることが考えられる。

第5章 ポンピング現象発生時の路盤粒子の挙動

5.1 概要

本章では、『輪荷重載荷時における路盤粒子の噴出過程』についての検討を行う。ポンピング現象はひび割れや目地部を車が通行することにより、飽和路盤の過剰間隙水圧が変動し噴出に至る過程はこれまでの研究により示されている。しかし載荷に伴う詳細な路盤粒子挙動を観察する研究は、現場で観察することが困難である点からほとんど行われてこなかった。

ポンピング現象を直接可視化した数少ない Hansen ら¹⁴⁾の研究ではコンクリート舗装を削孔し、カメラを用いて重交通が通過した時の路盤粒子の挙動を直接観察した。そこから車輪がひび割れや目地部を移動すると路盤材は輪荷重進行方向とは逆方向に移動することを確認した。この研究はポンピング現象の発生過程を考察するうえで重要な研究結果であるが、ポンピング現象による発生過程を考察するためには、よりつぶさに粒子の挙動を観察する必要がある。

そこで、本実験ではポンピング現象による路盤の噴出プロセスや浸食プロセスを把握することを目的として、輪荷重周回型模型を使用した載荷実験を行い、模型側面を撮影した動画を画像解析することにより粒子の挙動の観察を行う。しかし路盤材は各粒子の明暗差や輝度値の差が少なく、画像解析による粒子追跡が困難である。そのため本研究では、路盤粒子を追跡するための手法を開発し、その追跡精度を確認したうえで可視化実験を行う。可視化実験ではポンピング現象により噴出する路盤材の供給源の把握や、車輪の位置による路盤材の移動特性（移動方向や移動量）を把握し、路盤の噴出プロセスや浸食プロセスを解明する。

5.2 路盤粒子追跡方法

粒子追跡では、撮影した実験動画より特徴的な粒子を選定し、その移動を追跡する。画像解析には、プラグインが豊富で解析の自由度の高いフリーソフト Fiji⁴³⁾を使用し、Fiji 内のプラグインである追跡分析ツール TrackMate^{44),45)}を使用して輝点の自動検出と自動追跡を行った。図 5-1 はそのフローを示している。

まず、録画された実験動画を連続静止画に変換して Fiji に取り込み、8 bit グレースケールに変換して TrackMate に供する。TrackMate では、追跡対象を輝点（輝度の高い粒子）として検出したあと、輝点の自動追跡処理を行う。輝点の検出器は、輝点サイズに応じて Dog 検出器（Difference of Gaussian, 輝点径 $d \leq 5\text{px}$ ）、LoG 検出器（Laplacian of Gaussian, $d=5 \sim 10\text{px}$ ）、ダウンサンプル LoG 検出器（ $d \geq 10\text{px}$ ）を選択できる。輝点の検出結果をプレビューしながら、検出器、追跡すべき輝点の概算寸法、輝点として認識するための輝度の閾値、画像のノイズフィルタ等の条件を繰り返し調整し、動画全フレームにわたって追跡したい対象が輝点として検出されるように条件を設定する。

輝点の検出が終わったら、自動追跡処理に移行する。これは異なるフレーム間で輝点の同一性を認識させる過程である。数種の追跡アルゴリズムの中で、本研究は Simple LAP Tracker（LAP : Linear Assignment Program）を選択した。この追跡方法は輝点の融合・分裂できないものの解析時間が短い特徴がある。追跡条件の設定として、フレーム間の輝点の限界移動距離（Frame to frame linking）と許容フレームギャップ（Track segment gap closing, 輝点が切れてもつないでくれるフレーム数）がある。本研究ではそれぞれデフォルト値である 15 px と 2 frame に設定した。自動追跡処理を実行すると、最終的に輝点の ID と各フレームでの座標、輝度値が出力される。

実験動画から変換した 1 枚の静止画に対して、TrackMate により輝点を自動検出した結果の例を図 5-2 に示す。ここでは、検出条件として、輝度閾値 10 以上、輝点寸法 $d = 5\text{px}$ 以下を設定している。また、検出フィルタには LoG 検出器を用いている。図 5-2(b)でピンク色の円で囲まれているのが自動検出された輝点である。図より、舗装版も含め多数の輝点を検出されているものの、路盤は全体的に画像が暗く、砂粒子を識別するには粒子間のコントラスト（明暗差）が低い。このようにコントラストが低い状態で検出された輝点を、その後の自動追跡処理にかけた場合、連続するフレーム間で輝点の同一性を自動認識することが難しく、軌跡が不連続になったり、見失われたりしやすくなる。そのため、自動追跡結果の信頼度は低くなり、粒子挙動の正確な把握は困難である。この問題を解決するためには、ターゲットとする粒子のみ輝度を高め、背景とのコントラストを強調する必要がある。

粒子の輝度値を高め、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

用いて路盤粒子を可視化する手法を実施した。蛍光塗料はブラックライトにより照らされると可視光に変換され、輝度が高くなり、**図 5-3(a)**のように発色した画像が撮影できる。図は一部の珪砂 6 号に合成樹脂蛍光塗料を吹き付け（以下、染色粒子）通常の珪砂 6 号と混合し土槽に詰めた状況である。この画像を 8 bit グレースケール画像に変換したうえで、TrackMate で解析条件を設定し輝点を検出した結果が**図 5-3(b)**である。図より輝点として検出された粒子がピンクの丸で囲まれている。自動検出された点に着目すると蛍光塗料で染色された粒子のみがピンポイントにピンクの円で囲まれている。連続するフレーム間についても、染色粒子が輝点として検出されていることを確認できた。染色粒子と TrackMate を用いた自動追跡解析による路盤粒子可視化手法での解析精度（一つの路盤粒子の挙動を同一粒子の挙動として捉えることができるか）を確認するため、検証実験を行った。

検証実験では、TrackMate による自動追跡解析の精度を確認するため、Fiji 内の追跡分析ツール ManualTracking⁴⁶⁾による手動追跡解析との比較を行う。ManualTracking は連続画像に対して、追跡対象物の位置を 1 枚ごとに指定することで対象物の座標値 (x, y) を得ること

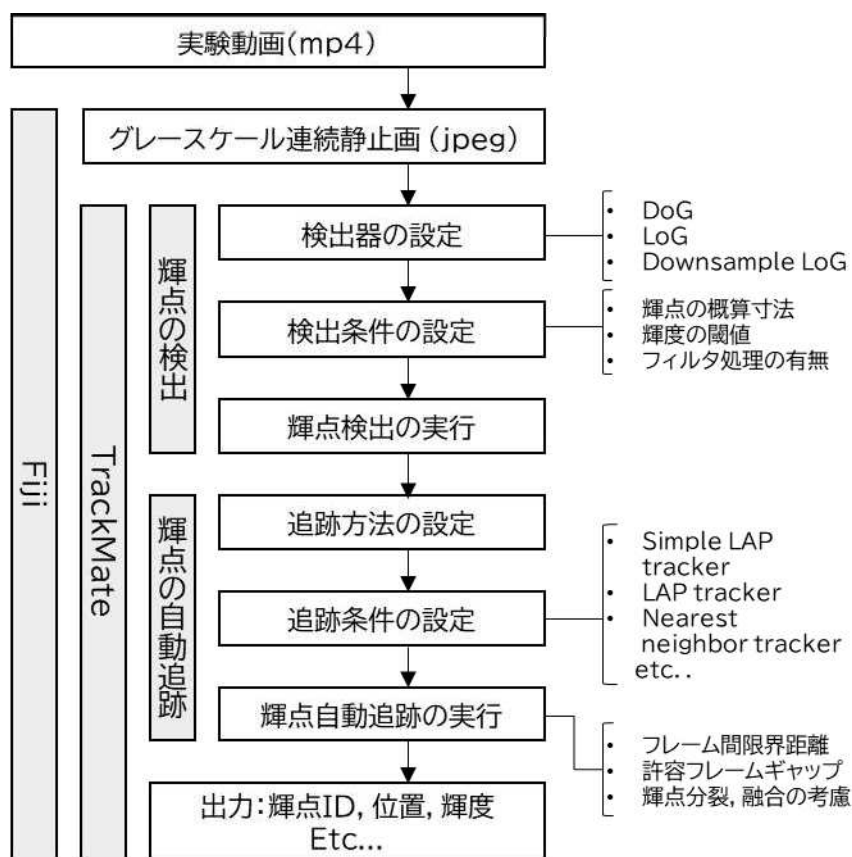


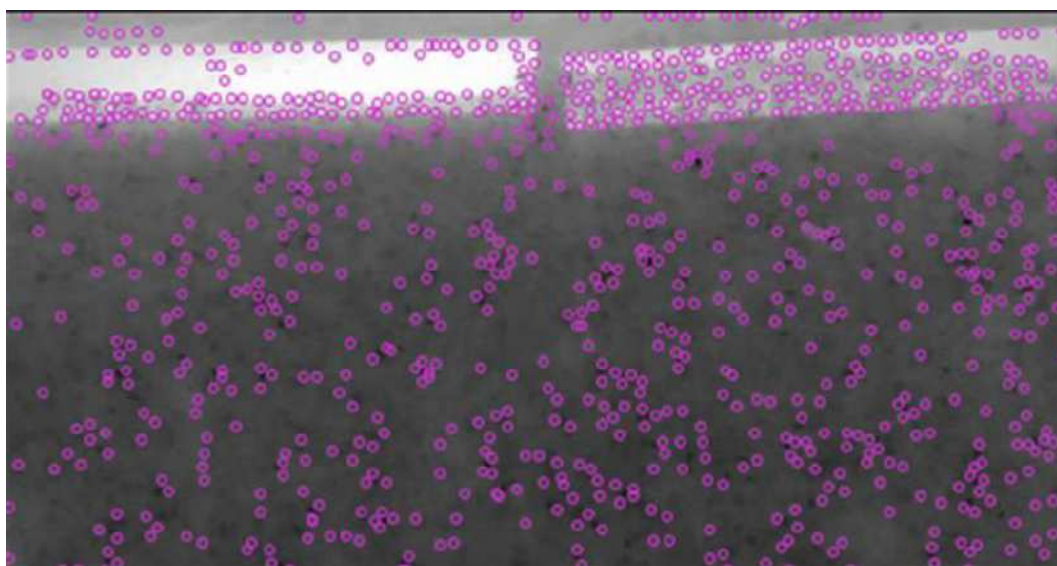
図5-1 画像解析ソフトFiji⁴³⁾を用いた粒子自動追跡の解析手順

ができるプラグインである。そのため時間は要するものの、画像上に追跡対象粒子が存在する限り、確実に粒子を追跡できることから、ManualTrackingによる手動追跡解析結果を真値として、自動追跡の解析精度を確認する。

検証実験では染色粒子の輝度値をより際立たせるため、暗室で行った。図 5-4(a)のように実験模型側方からブラックライトを照射し、同方向から実験時の様子を iPhone により撮影を行った。撮影は実験模型から 15 cm 離れた位置（図 5-4(b)）から行った。撮影領域は模型側方の目地付近、幅約 110 mm×高さ約 62 mm である。画像解析度は 1024 px×576 px で、

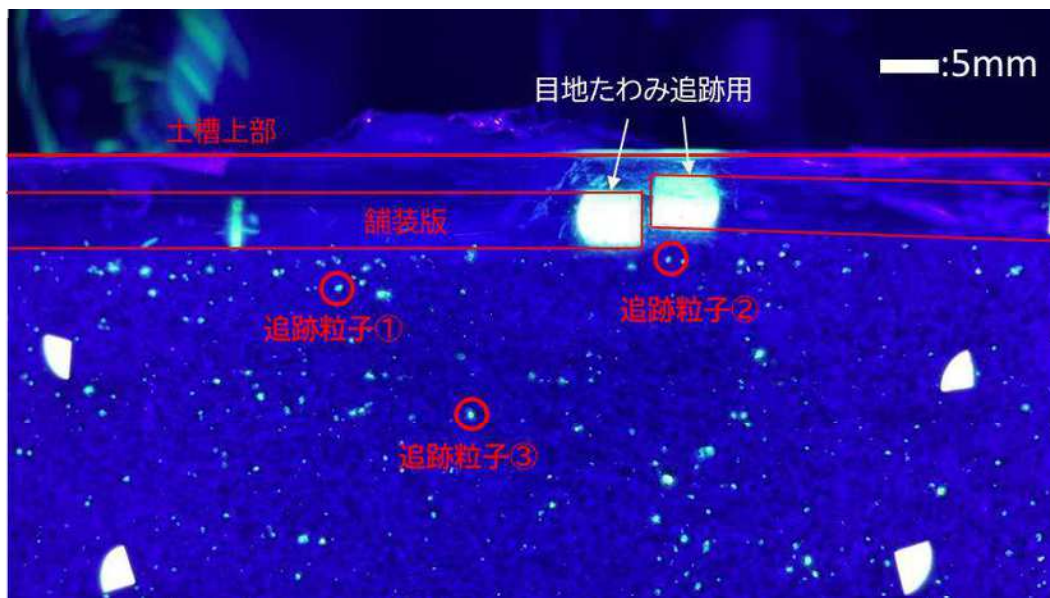


(a) 原画像

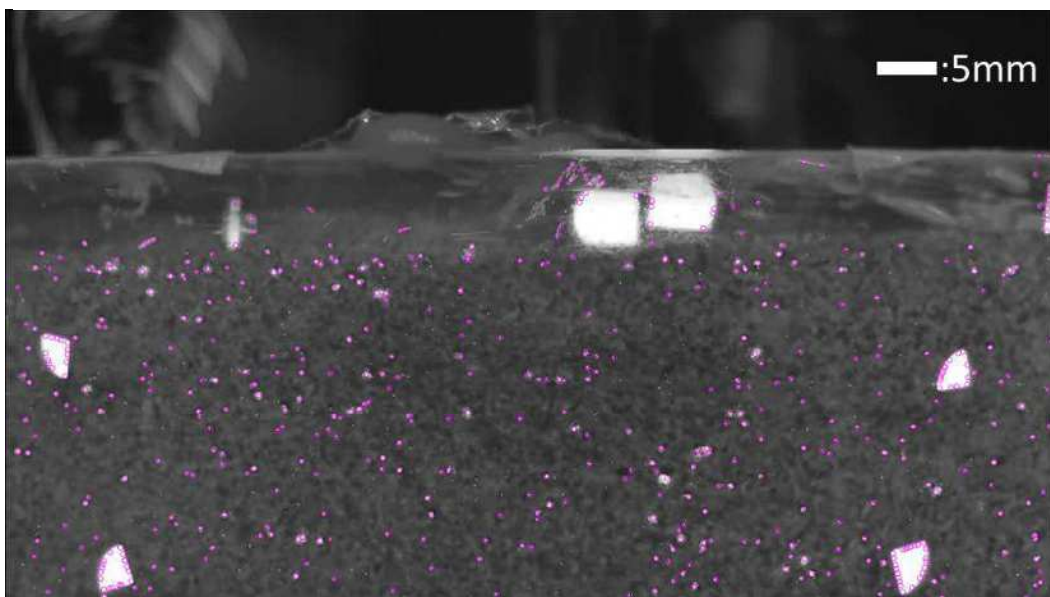


(b) 輝点検出後画像

図5-2 輝点の自動検出結果



(a) 原画像

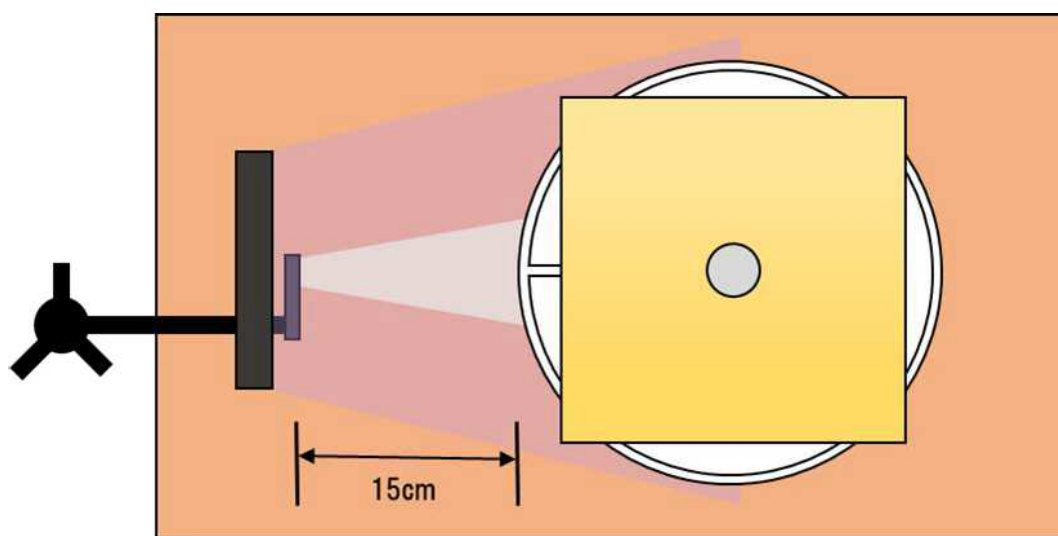


(b) 輝点の自動検出結果

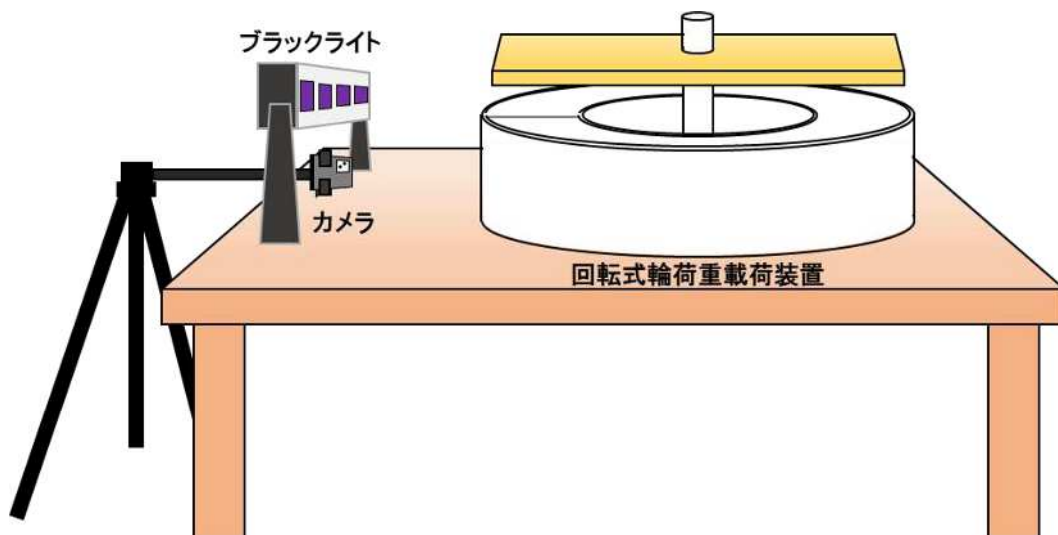
図5-3 染色粒子を混ぜた路盤にブラックライトを当てて撮影した実験画像とTrackMateによる輝点検出結果（目地端部に蛍光シールを貼り付けている）

撮影速度は 240 fps で行った。

検証実験では、図 5-3(a)で示すアプローチ版下粒子（追跡粒子 1）、リーブ版下粒子（追跡粒子 2）、深度の深い粒子（追跡粒子 3）の 3 つの路盤粒子について、808 枚の連続画像から、自動追跡と手動追跡で得られた輝点の水方向変位と鉛直方向変位を比較した。比較結果を図 5-5 に示す。いずれの追跡粒子でも水平方向、鉛直方向ともに決定係数 R^2 は 0.98 以上を示しており、手動追跡と自動追跡の結果に差はほとんどないことを示した。このことから、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粒子は路盤粒子追跡の手法として適当であるといえる。そのため、路盤粒子の可視化実験では自動追跡解析を交えて考察を行い、ポンピング現象による噴出過程の考察を行う。

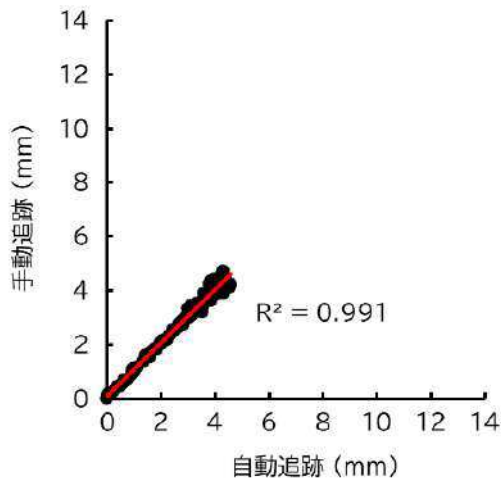


(a) 実験状況全体図

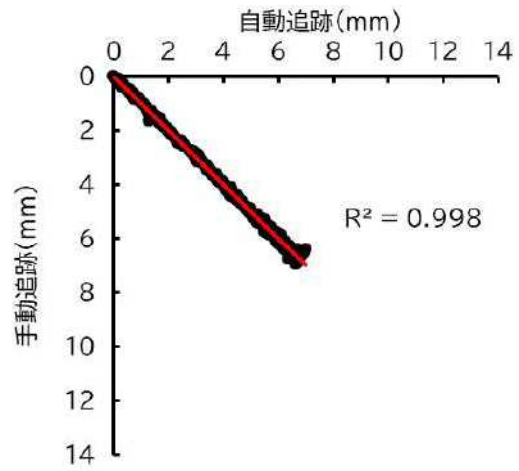


(b) 実験状況上面図

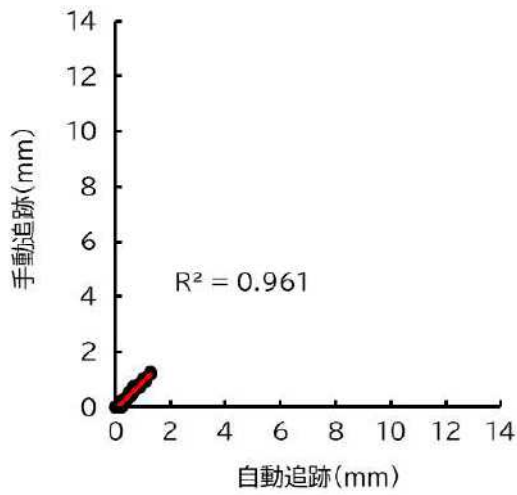
図5-4 ポンピング現象可視化実験概略図



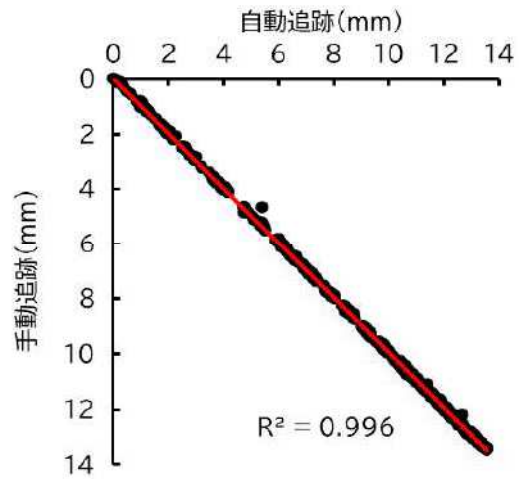
(a) 追跡粒子① 水平方向座標



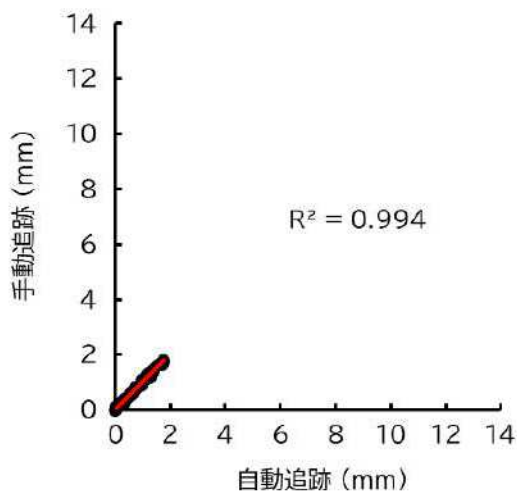
(b) 追跡粒子① 鉛直方向座標



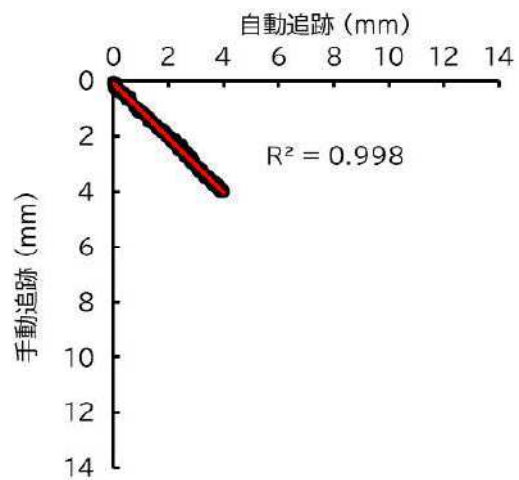
(c) 追跡粒子② 水平方向座標



(d) 追跡粒子② 鉛直方向座標



(e) 追跡粒子③ 水平方向座標



(f) 追跡粒子③ 鉛直方向座標

図5-5 追跡粒子の座標の自動追跡と手動追跡による結果の比較

5.3 荷重による路盤全体の粒子挙動

染色粒子を用いた荷重実験を行い路盤粒子の挙動を把握する。本実験では各舗装版下の粒子が土槽壁面を沿って移動する粒子の軌跡を追跡するために、**図 5-6** に示すように、各舗装版下（アプローチ版下，リープ版下）それぞれに染色粒子を混合した路盤材を設置し荷重を実施した。実験は舗装厚 5 mm，舗装目地幅 2 mm，荷重速度 0.42 m/s の条件で荷重回数 100 回行なった。

図 5-7 では、アプローチ版のみに染色粒子を混合したケースにおける、実験開始から荷重回数を 100 回行なうまでのアプローチ版下の染色粒子の軌跡である。軌跡の推移を明示するために、荷重回数 10 回ごとに色分けをしている。また図の横軸は目地中央を、縦軸は実験開始時の舗装版底面位置を原点として粒子位置を示している。**図 5-7(a)** より、アプローチ版下の粒子は全体的に沈下しながら右下向き（目地方向）に移動していることが確認できる。100 回の荷重で最も大きく移動したのは目地から左に 10 mm，舗装版から深さ 15 mm あたりに存在する染色粒子で、沈下方向へ最大 6 mm，目地方向へ最大 4 mm の移動が見られた。

図 5-7(b) は、**図 5-7(a)** の赤枠で囲ったエリアの染色粒子の軌跡の拡大図である。この図から、粒子が螺旋を描きながら右下方向に移動し、荷重回数 10 回目以降は、下向きまたは左下向きに移動していることが確認できる。さらに、荷重初期は粒子の挙動は大きく、荷重回数 20 回目以降は変位が小さくなっていることが分かる。

図 5-8 は、リープ版下に染色粒子を混合したケースである。**図 5-8(a)** から分かるように、リープ版側から約 20 mm の位置にある粒子は、初期にはほぼ下向きに変位し、荷重回数 10 回目以降は左下向きに移動している。**図 5-8(b)** の拡大図では、リープ版下の粒子も螺旋を描きながら荷重初期は右下から下向きに、荷重回数 10 回目以降は左下向きに移動したことが確認できる。**図 5-8(a)** における目地よりリープ版方向 40 mm よりも右側にある染色粒子は、一貫して右下方向に移動している。

アプローチ版下（**図 5-7(b)**）、リープ版下（**図 5-8(b)**）の染色粒子から、それぞれひとつ選び（A1 粒子，L1 粒子）、輪荷重の位置と粒子の軌跡との関係を調査した結果が**図 5-9** である。図は荷重開始から輪荷重が 3 回通過するまでの軌跡である。輪荷重は右向きに移動する。図より、輪荷重がアプローチ版上にあって目地に近づく過程では、A1 粒子も L1 粒子も右向きから右下に向かって移動する（オレンジ色矢印）。輪荷重が目地を通過してリープ版に移る過程では、粒子の移動向きが左向きに変わり（黄色矢印）、リープ版上の輪荷重が目地から遠ざかる過程では、再び粒子の移動の方向が左向きから右向きに反転している（緑色矢印）。以上より、路盤表面から若干深い位置では、アプローチ版側の粒子もリープ版側の粒子どちらも、輪荷重が遠ざかる過程で元の方向に戻ろうとする螺旋状の挙動を繰り返す

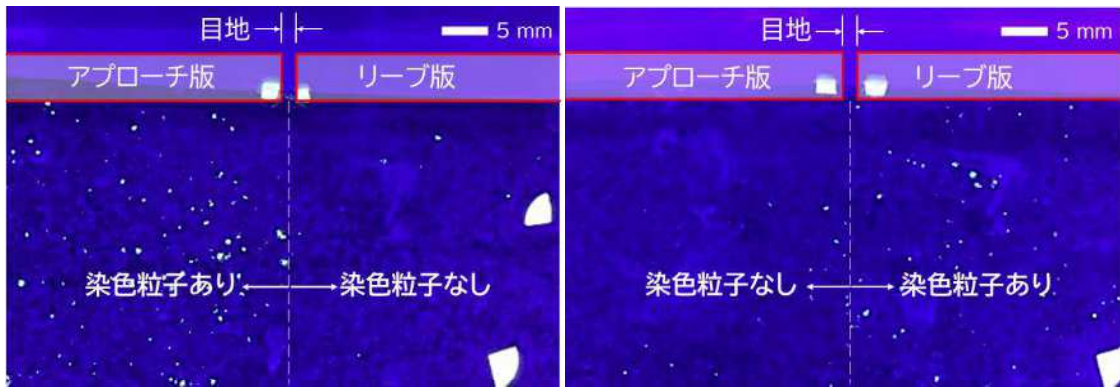
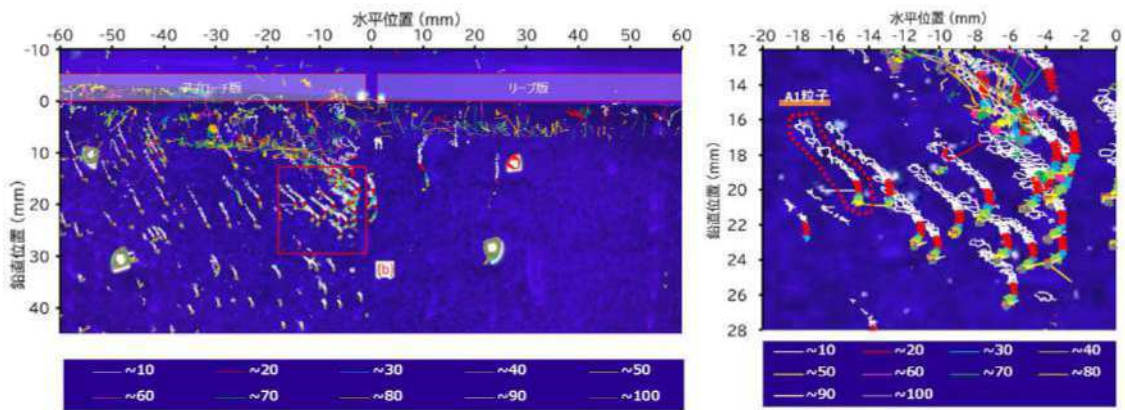


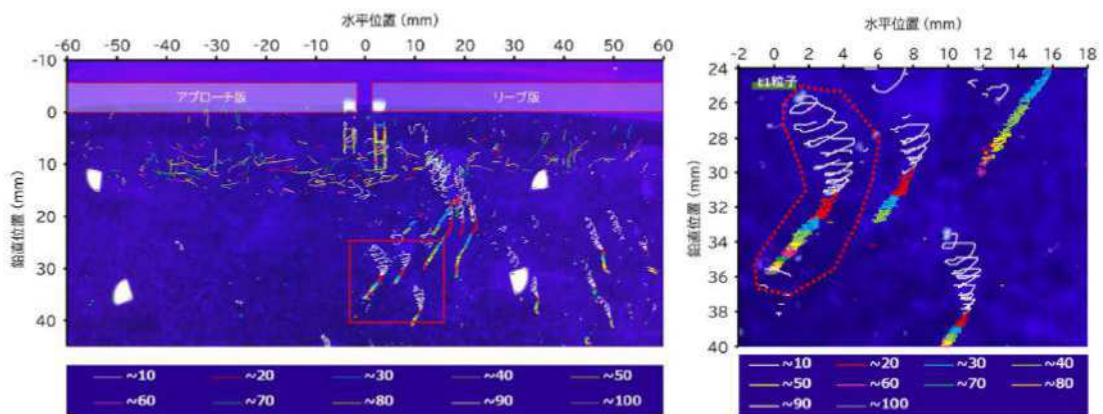
図5-6 染色粒子を用いた実験2ケース



(a) 全体図

(b) 拡大図

図5-7 载荷回数100回までの染色粒子の軌跡（アプローチ版下の路盤に染色粒子を入れたケース）



(a) 全体図

(b) 拡大図

図5-8 载荷回数100回までの染色粒子の軌跡（リープ版下の路盤に染色粒子を入れたケース）

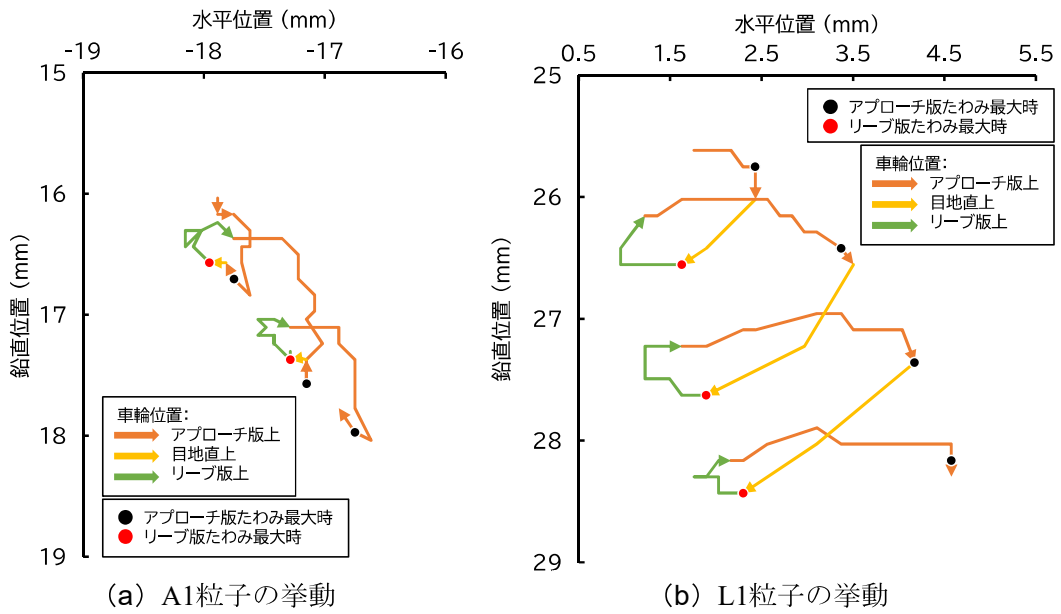


図5-9 輪荷重位置と染色粒子A1, L1の軌跡との関係

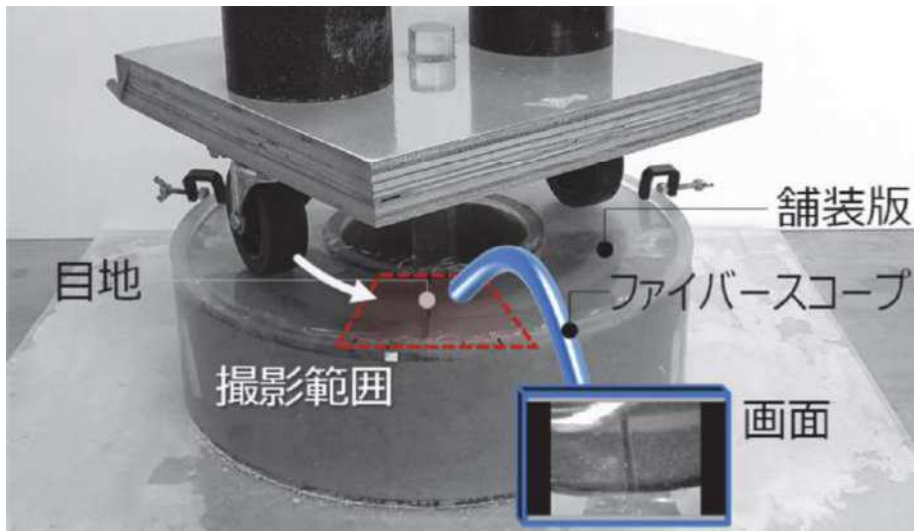
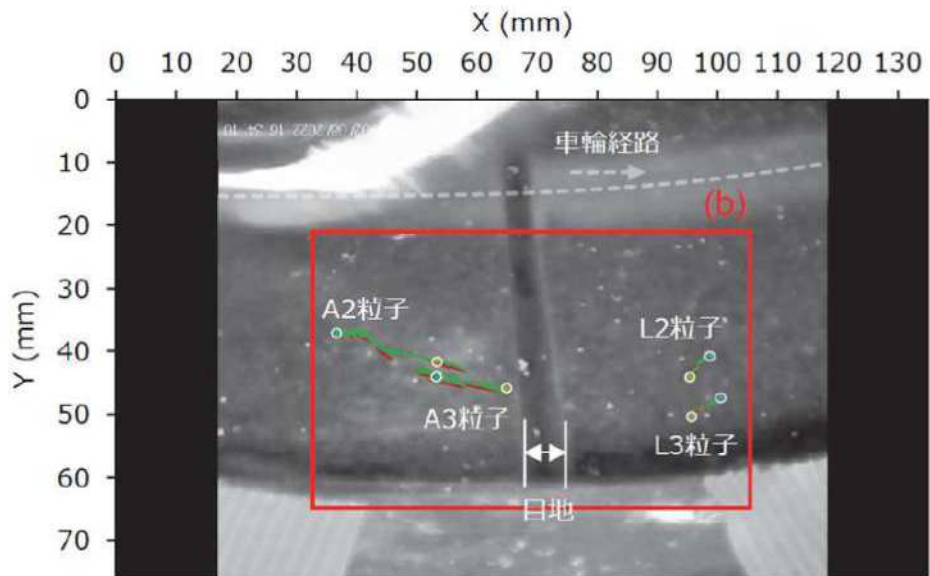


図5-10 ファイバースコープによる舗装版上面の撮影

ことが分かった。

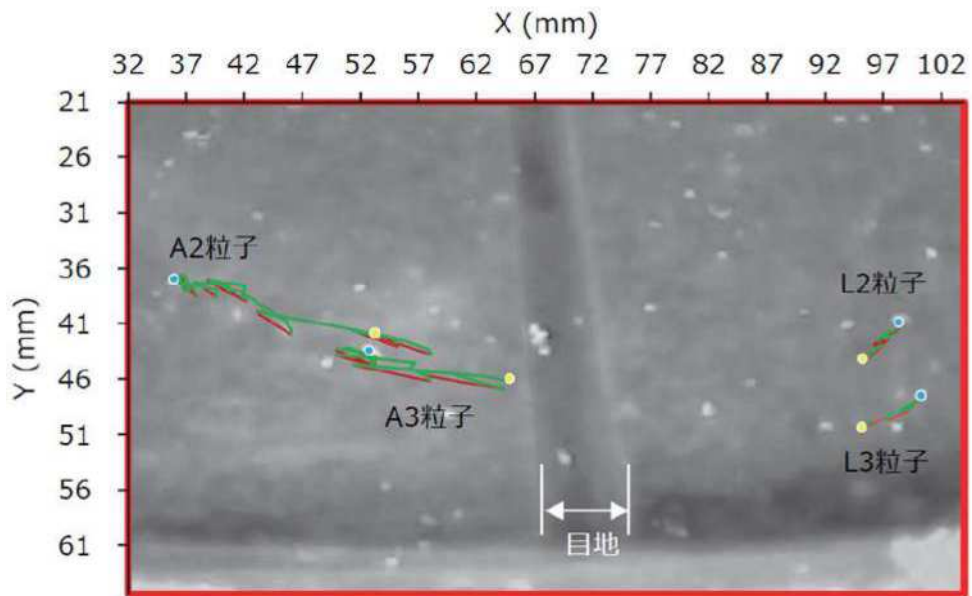
また図 5-10 では、路面表面の粒子の挙動を把握するために、マイクロファイバースコープを用いて、舗装版上面から染色粒子の平面的な挙動を観察した。マイクロファイバースコープの解像度は 640 px×480 px、撮影速度は 15 fps である。

図 5-11 は載荷回数 11 回目から 20 回目の染色粒子の軌跡（アプローチ版側，リーブ版側それぞれ 2 点）を示している。載荷回数 10 回の際に各染色粒子は水色の位置から黄色の位



- 目地に近づく向きの変位 ● 荷重11回目 (始点)
- 目地から遠ざかる向きの変位 ● 荷重20回目 (終点)

(a) 全体図



- 目地に近づく向きの変位 ● 荷重11回目 (始点)
- 目地から遠ざかる向きの変位 ● 荷重20回目 (終点)

(b) 拡大図

図5-11 舗装版上面から観察した路盤表面の染色粒子の軌跡 (荷重回数11回~20回)

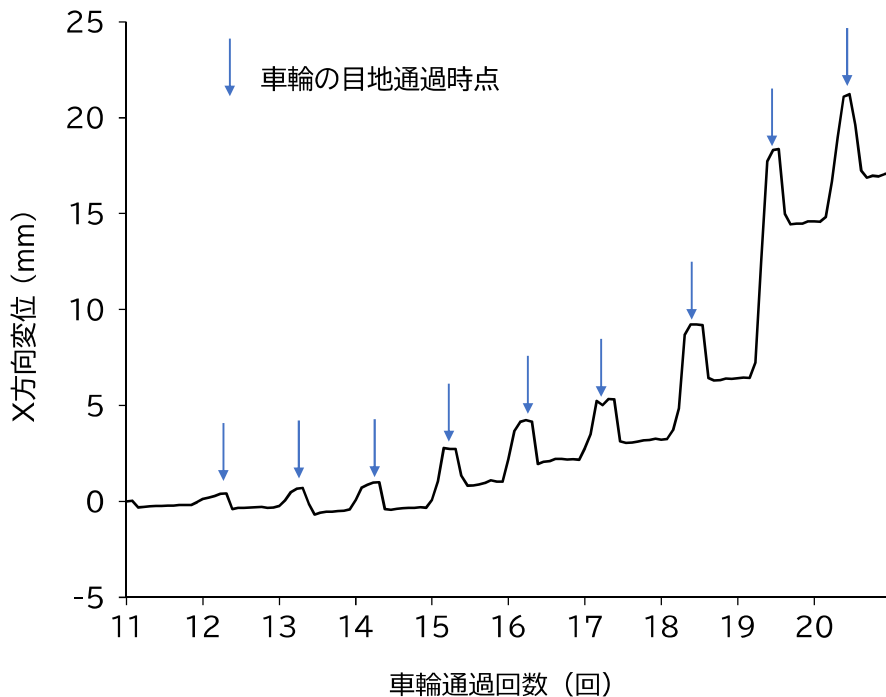


図5-12 染色粒子の移動の向きと輪荷重の位置との関係

置に移動したが、移動の向きは一方向ではなく、左右の移動を繰り返しながら終点に到着した。各移動方向を色分けし、目地方向への移動（アプローチ版側は右向き、リーブ版側は左向き）を緑色の軌跡、目地から離れる方向への移動を赤色の軌跡で表している。

染色粒子の移動方向と輪荷重の位置の関係を図5-12に示す。4つの染色粒子を代表して、移動距離が最も長いA2粒子について示している。縦軸の正方向は、図5-11における右向き（目地向き）の変位を示す。図より、車輪がアプローチ版を載荷している間は、A2粒子は目地方向に変位し、車輪が目地を通過してリーブ版に移動すると、粒子は目地から離れる方向に移動していることが分かる。このような傾向は他の3つの染色粒子についても同様の結果が得られており、粒子直上の舗装版がたわむ際には粒子は目地側に移動し、舗装版が除荷される際には粒子は目地から離れる方向に移動している。このような路盤粒子の水平移動は図5-7～図5-9で示した断面的な観察とも整合している。

これらの染色粒子の挙動から、模型路盤の挙動として次のような特徴が確認できる。①目地から比較的遠い領域では、路盤は沈下しながらやや右向き（輪荷重の進行方向と同じ向き）に変位している。②目地近傍の路盤は、舗装版の動きが大きいことに起因して粒子が大きく変位する。アプローチ版とリーブ版への載荷により、粒子は螺旋を描きながら沈下する。その螺旋状の軌跡は、直上の舗装版が載荷され、たわむ際に目地方向に移動し、除荷されたたわみが復元する際に目地から離れる方向に移動する。③図5-7(b)、図5-8(b)において、目地近

傍の路盤の沈下の向きが右向きから左向きに推移していることが観察できた。これはリーブ版下の路盤面の浸食が進行し、リーブ版に車輪が載るときの衝撃が強まるためであると推測される。

5.4 異なる染色粒子を用いた載荷実験による噴出粒子の供給源の確認

ポンピング現象により噴出する粒子の供給源を把握するため、図 5-13 に示すように、路盤表面に異なる染色粒子（アプローチ版下：緑色粒子，リーフ版下：赤色粒子）を配置した。輪荷重周回型模型を用いた予備実験により得た路盤の浸食結果（図 3-8）から，載荷実験による鉛直方向の浸食は 14 mm 程度発生することが分かっている。そのため染色粒子の設置厚さは載荷による浸食の影響を考慮し厚さ 18 mm で配置し，載荷実験を行った。

図 5-14 は，載荷回数 10 回時点での車輪通過に伴う路盤粒子の動きを示したものである。図より，まず車輪がアプローチ版から目地に近づく時（図 5-14(b)）には，画像中に赤い矢印で示すように，アプローチ版下の粒子（緑色粒子）が右側に移動し，目地近辺に集積した。そして，車輪がアプローチ版からリーフ版に移るタイミング（図 5-14(c)）で，リーフ版が急激にたわむことにより，図 5-14(d)で目地近辺に集積した粒子が噴出している。つまり，載荷回数 10 回時点では，アプローチ版側の粒子が目地付近に押し出されたものがポンピングしていると言える。載荷回数 10 回終了時点での舗装版上の噴出砂を見ても，図 5-15 のように，緑色の粒子がほとんどでありことから，アプローチ版側の路盤粒子がポンピングしていることが確認できる。

一方，載荷回数 20 回目の結果（図 5-16）に着目する。図 5-16(b)より，アプローチ版載荷時にアプローチ版下の粒子が目地付近に押し出される点は載荷回数 10 回目と同様であるが，図 5-16(c)に示すように，車輪がリーフ版に差し掛かる瞬間は載荷回数 10 回目と大きく異なり，下方の赤色染色粒子（リーフ版下粒子）までが大きく噴出していた。この時点ではアプローチ版側の粒子だけでなく，リーフ版側の粒子もポンピングしていることが分かる。

以上の結果から，載荷回数の少ない段階では主にアプローチ版側がポンピング現象によって噴出する粒子の供給源であるのに対して，載荷回数の増加とともに，リーフ版の粒子も

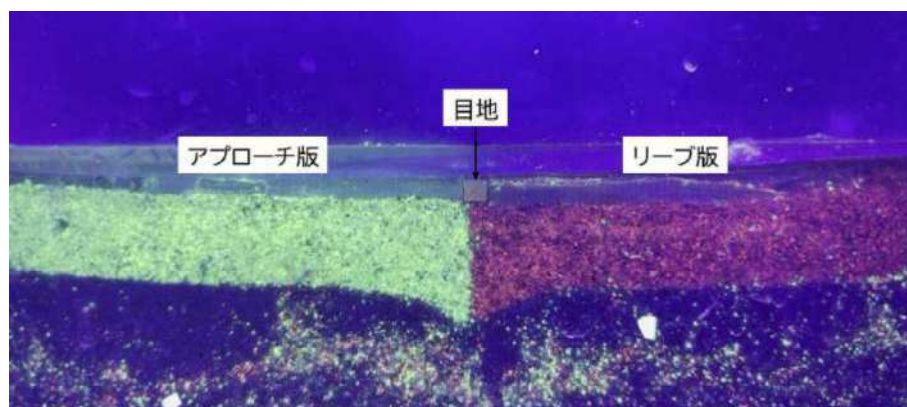


図5-13 異なる染色粒子を用いた載荷実験における路盤材配置状況（初期状態）

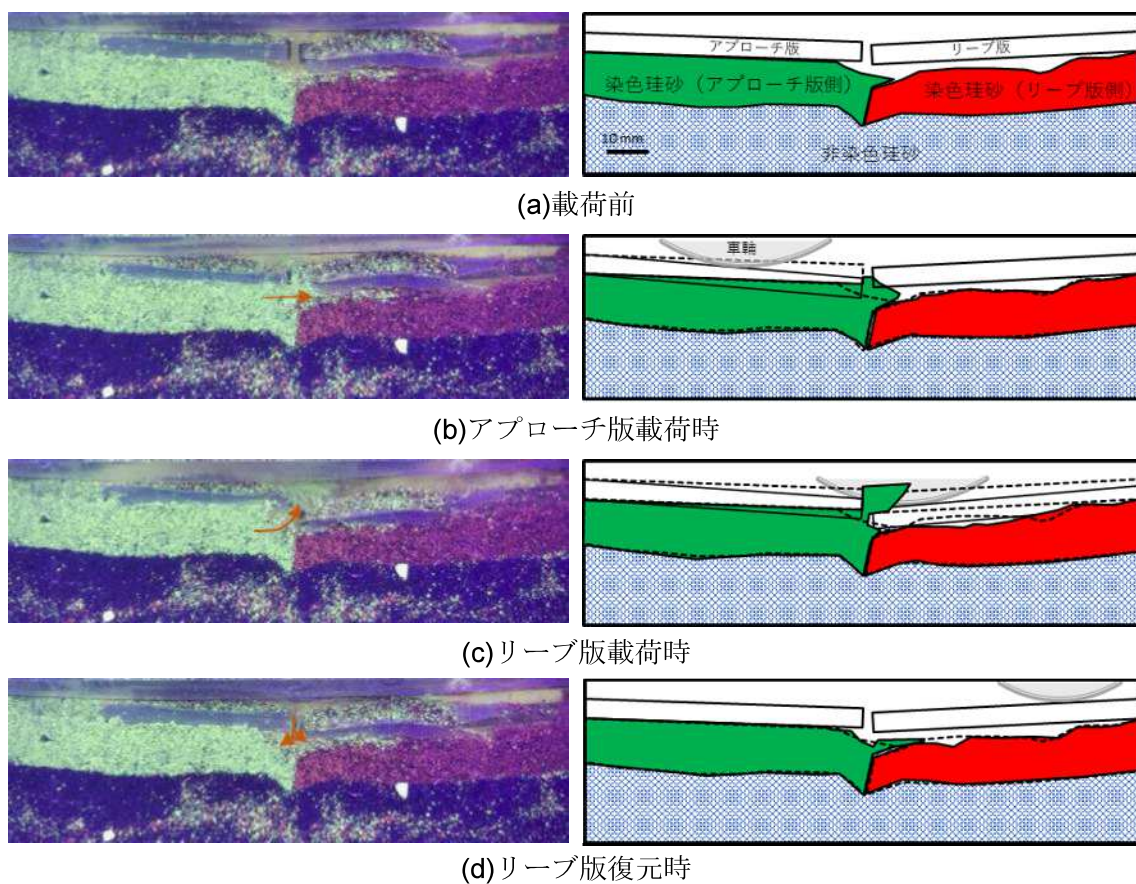


図 5-14 異なる染色粒子を用いた荷重実験による荷重回数 10 回目の路盤挙動

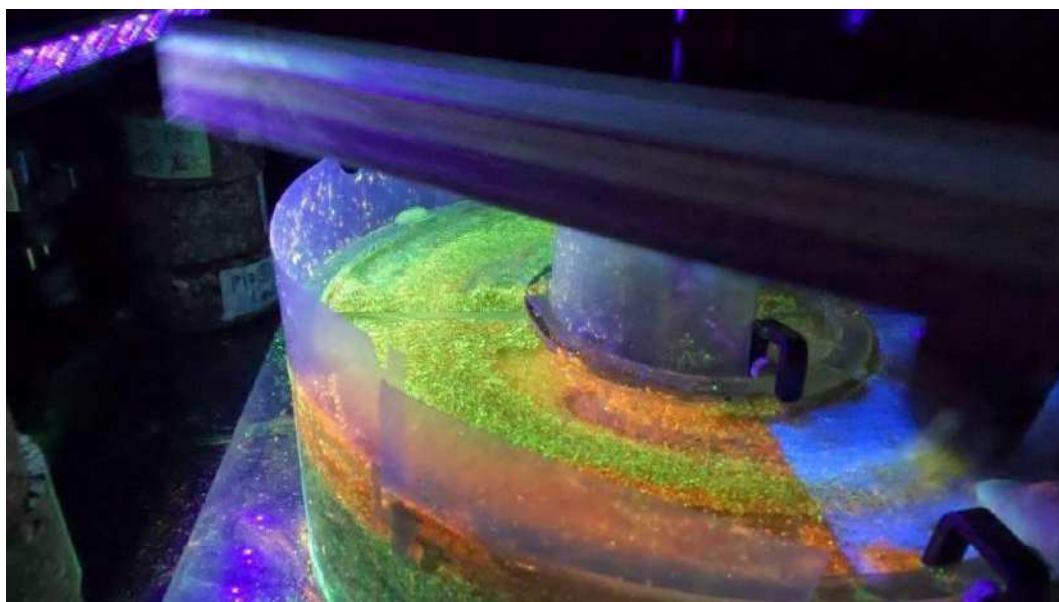


図 5-15 異なる染色粒子を用いた荷重実験におけるポンピング現象により舗装版上に噴出した路盤材の堆積状況 (荷重回数 10 回終了時)

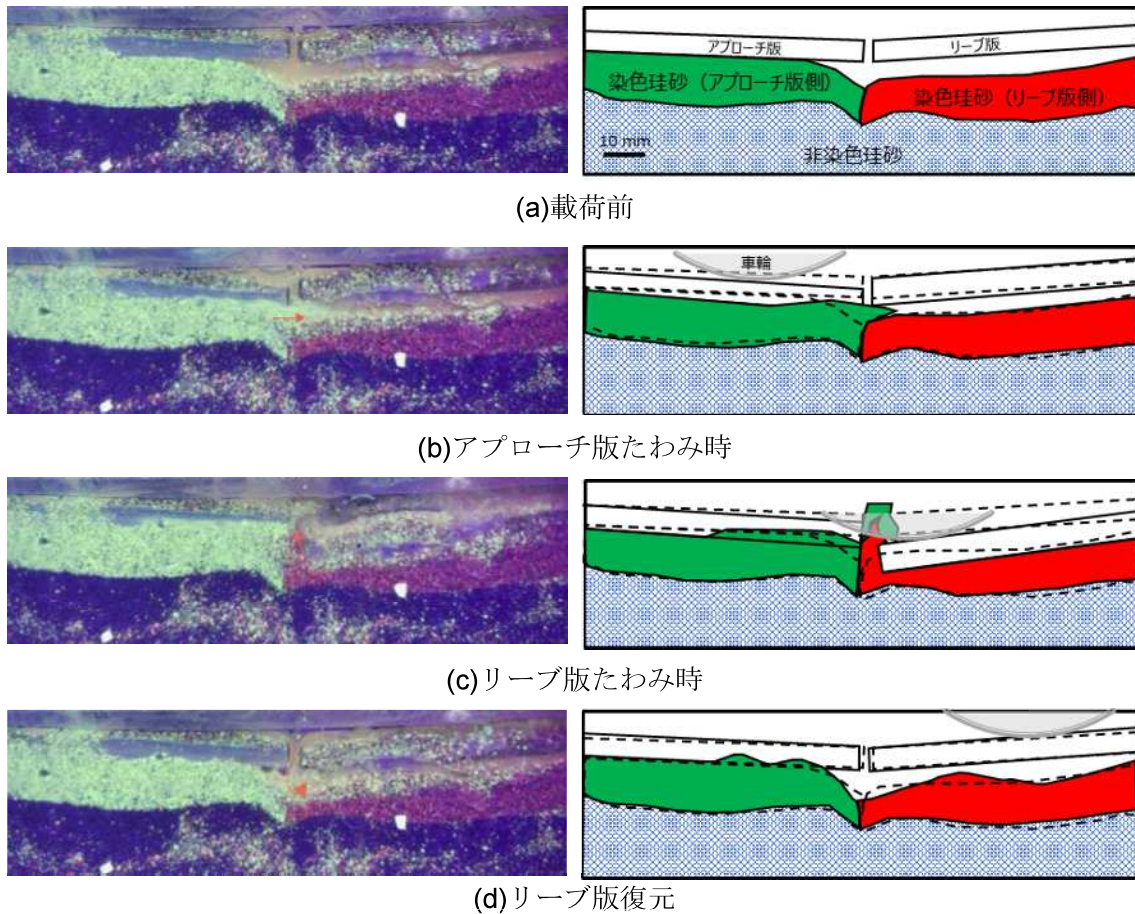


図 5-16 異なる染色粒子を用いた荷重実験による荷重回数 20 回目の路盤挙動

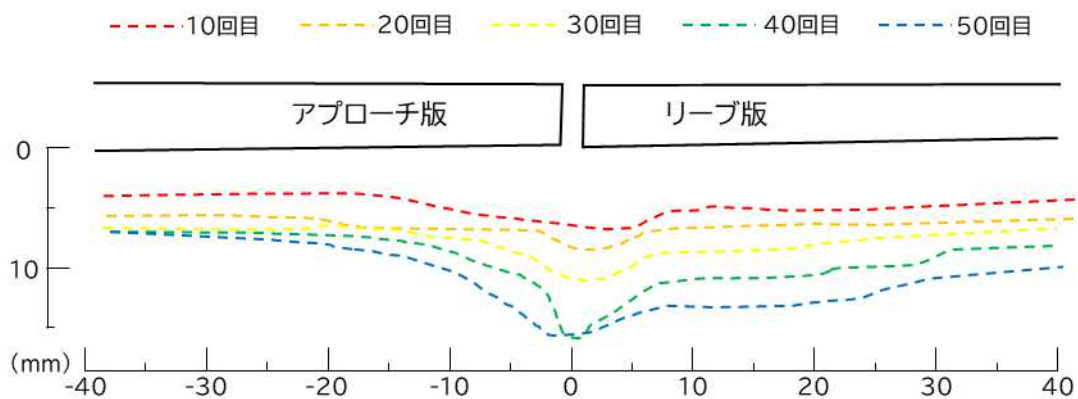


図 5-17 ポンピング現象可視化実験における路盤表面形状

ポンピングするように推移するといえる。

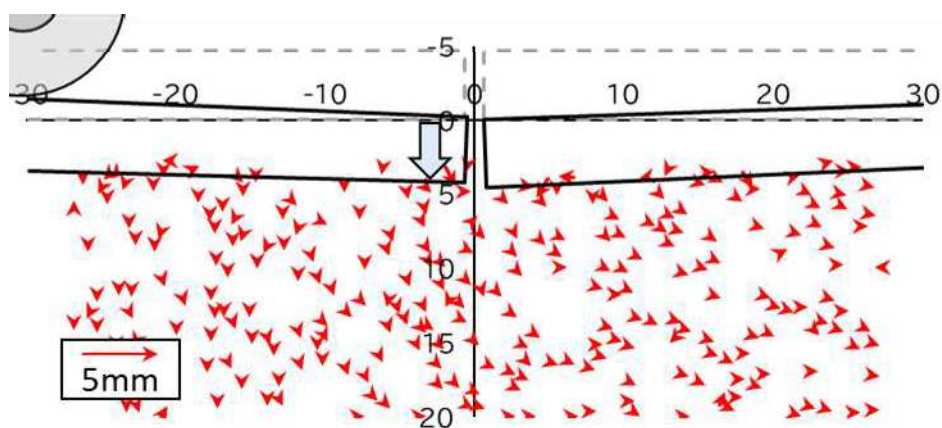
図 5-17 は、荷重回数 10 回ごとの路盤表面の形状を示している。図より荷重初期は、アプローチ版側とリーブ版側で路盤表面ラインは均等に下がるが、荷重回数を重ねるとしだいにリーブ版側のほうが強く浸食されるようになっていくことが確認できる。リーブ版下の

隙間の厚さが広がれば広がるほど，車輪がリーブ版に乗り移る際のリーブ版のたわみは大きくなるので，**図 5-16(c)**に示したように噴出が強く，浸食されるものと推測される．

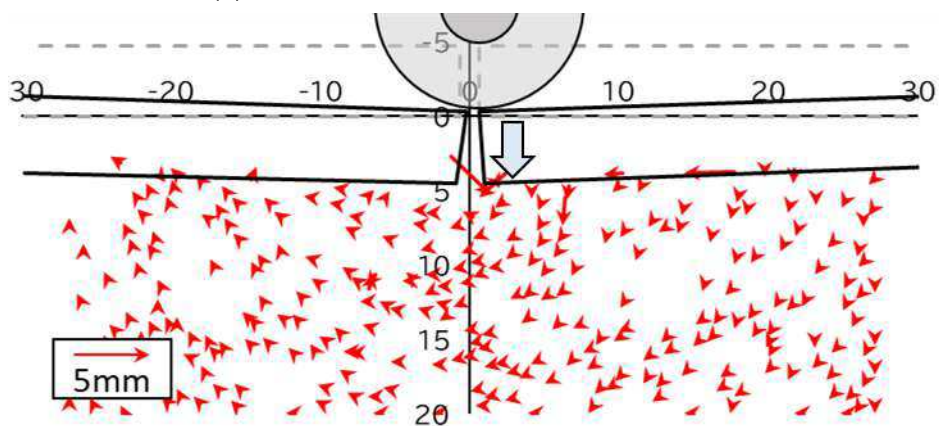
5.5 舗装版目地部周辺の挙動

前項の結果より、路盤粒子は载荷回数により異なる挙動を見せることが分かった。より詳細な挙動を確認するために、車輪位置による粒子の挙動を確認する。蛍光染色粒子をターゲットとして粒子追跡解析を実施した結果を図 5-18、図 5-19 に示す。赤いベクトルで示すのはターゲット粒子の 0.1 秒間の動きである。

载荷回数による粒子の移動量を比較する。アプローチ版载荷時（車輪位置：目地の手前 30 mm 地点）に着目すると、载荷回数 10 回目（図 5-18(a)）と 50 回目（図 5-19(a)）では移動量に変化はない。一方で車輪がリープ版に差し掛かる瞬間では、载荷回数 10 回目（図 5-18(b)）と比較し、载荷回数 50 回目（図 5-19(b)）で粒子の移動量が大きくなっていることが分かる。アプローチ版のたわみに伴うアプローチ版下粒子の移動は载荷回数を重ねてもほとんど変化はないが、リープ版のたわみに伴うリープ版下粒子の挙動は载荷回数を重ねると増加することが分かる。図 5-20 に载荷回数 50 回における車輪の位置による舗装版の

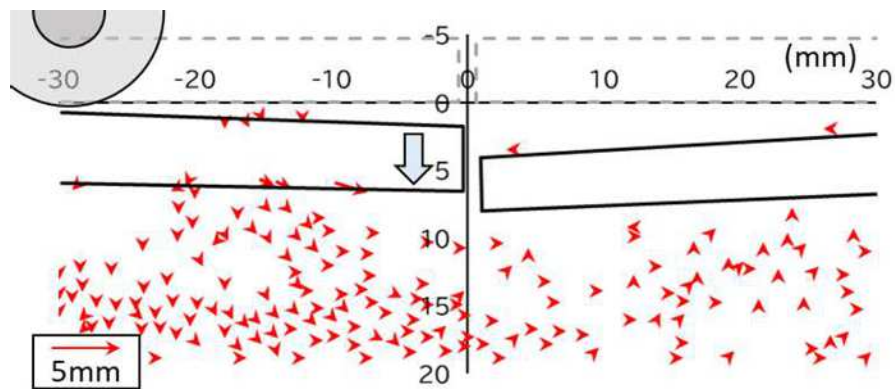


(a) アプローチ版载荷時の舗装版下粒子挙動

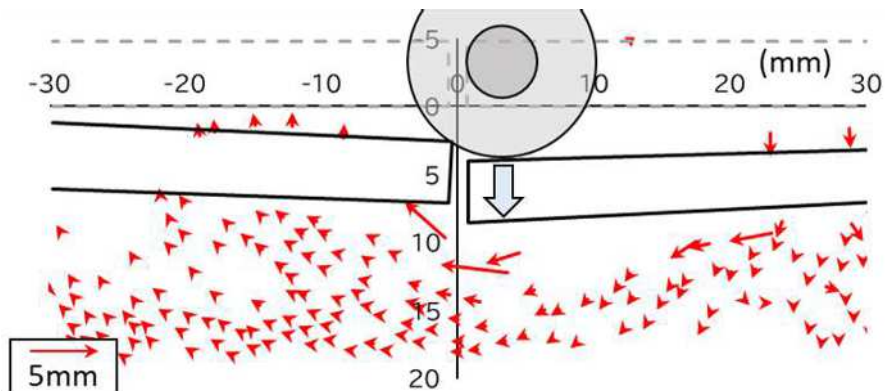


(b) リープ版载荷時の舗装版下粒子挙動

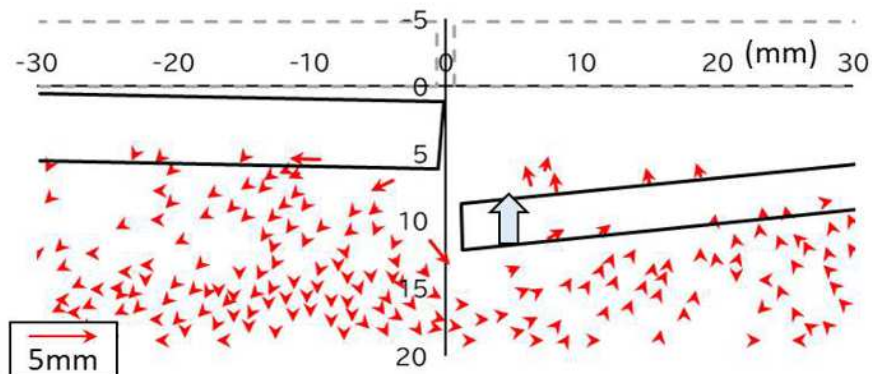
図 5-18 载荷 10 回目における目地付近の粒子挙動



(a) アプローチ版載荷時の舗装版下粒子挙動



(b) リーブ版載荷時の舗装版下粒子挙動



(c) リーブ版復元による舗装版下粒子挙動

図 5-19 載荷 50 回目における目地付近の粒子挙動

たわみ量と水圧の関係について示す。載荷が進行するとアプローチ版と比較しリーブ版側のたわみ量が大きくなる。舗装版は目地部で縁が切れていることから、車輪がアプローチ版からリーブ版へ移動する過程で大きな衝撃が発生する。載荷回数を重ねると徐々にリーブ版の稼働域が大きくなることでリーブ版下の水圧の上昇量が大きくなるため、リーブ版載荷時の粒子の移動が活発になることが考えられ、これが図 5-17 におけるリーブ版側への偏った浸食に繋がる。

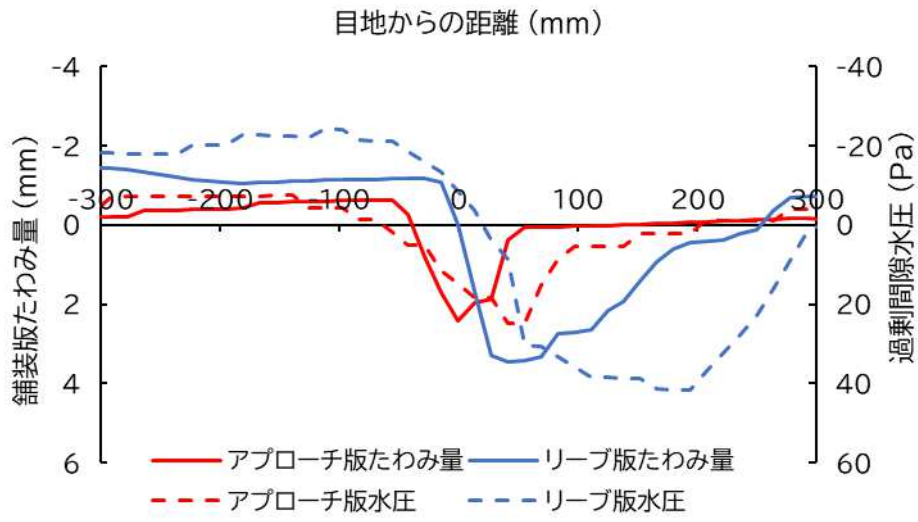


図 5-20 荷重 50 回目における舗装版たわみ量と過剰間隙水圧の関係

5.6 まとめ

本章では、輪荷重周回型模型を用いた実験により、ポンピング現象の噴出過程を把握するための手法として、蛍光塗料とブラックライトを使用した路盤粒子の可視化手法を確立した。この可視化手法では、路盤粒子の一部に蛍光塗料で染色した粒子を混合することにより、ブラックライトを照らすことで、輝度値が高い粒子を検出することが可能となり、輪荷重の載荷による粒子の挙動が追跡可能になる方法であり、画像解析ソフトを用いた粒子の自動追跡解析を高精度で実施することが可能である事を確認した。

確立した可視化手法を用いて、輪荷重の載荷に伴い路盤粒子の挙動を詳細に観察し、ポンピング現象による噴出過程を把握した。可視化実験より、輪荷重載荷時の路盤全体の挙動を確認すると、アプローチ版載荷時にはリーブ版側に移動し、輪荷重がリーブ版に移動するとアプローチ版側に移動する挙動を繰り返しながら鉛直下向きから左下（アプローチ版方向）に移動する様子が確認できた。

また目地周辺の粒子の挙動を可視化することで確認できた、ポンピング現象の発生による路盤粒子の噴出挙動を以下にまとめる。

- ① 車輪が目地に近づく際のアプローチ版のたわみにより、アプローチ版直下の水圧が上昇することにより、粒子はリーブ版側に移動する。
- ② 車輪がリーブ版に差し掛かる際のリーブ版のたわみに伴い、リーブ版直下の水圧が上昇し、目地近辺の粒子は水とともに舗装版上へ噴出する。同時に、路盤全体の粒子はアプローチ版側に移動する。
- ③ 車輪が目地から遠ざかる際のリーブ版の復元に伴い、目地近辺の粒子はリーブ版方向へ移動する。リーブ版復元時の様子を実験動画で確認すると、水流が目地直下を洗堀するようにリーブ版下へ移動することで目地直下が浸食する様子が確認できた。

図 5-17 に示したように、路盤の表面形状は目地直下を最大としてリーブ版下で偏った沈下形状を示した。目地直下が最大となったのは、③の段階で、目地直下で水流による洗堀が進行したためであると推測される。また、リーブ版側で偏った浸食が発生したのは各舗装版のたわみ方の違いにより、①の段階でアプローチ版下の粒子がリーブ版へ送られるよりも、②の段階でリーブ版のたわみにより噴出する粒子が多いからであることが予想される。

第6章 結論

6.1 研究結果の総括

本論文は、舗装で発生するポンピング現象をモデル化した輪荷重周回型モデルを開発し、そのモデルを用いた実験からポンピング現象の特性や発生過程等の発生メカニズムを明らかにしたものである。本研究で得られた成果を章ごとにまとめ、以下に記載する。

第1章では、本研究の背景として舗装の役割や、求められる性能について詳細に説明し、その中で舗装の役割や性能を阻害する損傷を引き起こす要因の一つとしてポンピング現象があることを述べた。さらに、ポンピング現象の歴史的、社会的背景についてまとめ、ポンピング現象が引き起こす問題点を記述し、その対策の必要性について示した。

第2章では、舗装版下で発生するポンピング現象が主にコンクリート舗装で生ずる現象であると示したうえで、既往の研究より明らかになっているコンクリート舗装で発生するポンピング現象の発生条件や発生メカニズムに関する知見を紹介した。そのうえで、より詳細なポンピング現象のメカニズム、具体的には載荷による粒子の挙動や浸食過程を把握する必要があるとし、ポンピング現象の発生メカニズムを解明するといった本研究の最終目的を述べた。この最終目的に基づき行ってきた先行研究について紹介し、ポンピング現象を解決するために必要な課題を明らかにしたうえで、本研究が掲げている目的について記述し、本研究の位置づけを示した。

第3章では、先行研究で使用した輪荷重直線移動型モデルの改善点を考慮し、新たに開発した輪荷重周回型モデルについての説明を行った。また、輪荷重周回型モデルの実コンクリート舗装に対する相似性を示し、輪荷重周回型モデルがポンピング現象を発生させやすく、現象を加速・強調した実験が可能なモデルであることを示した。さらに、載荷予備実験を通じて、輪荷重周回型モデルが定速、定周期での輪荷重の載荷を行うことが可能であり、路盤材の噴出や、載荷後の浸食形態からポンピング現象を発生させることが可能であることを確認した。これにより輪荷重周回型モデルが本研究目的に適したモデルであることを示した。

第4章では、ポンピング現象の発生因子が現象の発生に及ぼす影響を明らかにするために、輪荷重周回型モデルを用いて載荷実験を実施し、ポンピング現象の特性に関する結果を示した。以下に載荷実験により得られたポンピング現象が活発化する条件に付いて実験結果とともに示す。

- 1) 載荷実験における舗装版下の過剰間隙水圧を調査したところ、リーブ版下で比較的大きな水圧上昇が確認できた。輪荷重載荷が載荷された際の各舗装版のたわみ方を観察する

と、アプローチ版と比較して、リーブ版では早く急激にたわむといった異なる特徴が確認できた。この異なるたわみ方が、過剰間隙水圧の上昇に大きな影響を与えており、急激にたわむリーブ版下で大きな過剰間隙水圧上昇が発生することを確認した。ポンピング現象により路盤材の噴出はこのリーブ版のたわみによる影響が大きいことが確認できた。

- 2) 荷重速度が遅く、舗装版が薄く、目地幅が広くなると、ポンピング現象が活発化することが明らかになった。これらの結果から、ポンピング現象の発生には舗装版のたわみ性状が関係しており、たわみ量が大きく、たわみ速度が速く、かつ舗装版のたわみ量が最大に達するまでの時間が長いほど、ポンピング現象がより活発に発生することが明らかになった。
- 3) 締固め度が大きく、粒子が密実な路盤ではポンピング現象が発生しにくくなる。また、粒径範囲が広く、粒度分布が良好な路盤材では比較的締固め度が低くても密実に締まりやすく、ポンピング現象が発生しにくくなる。ただし、路盤の締固め度が高い条件であっても舗装版と路盤の間に隙間が存在すると、路盤上の滞水が舗装版のたわみにより活発な水流を生じさせ、それに伴いポンピング現象が活発に発生することが明らかになった。

第5章では、ポンピング現象発生時の路盤粒子の挙動を把握するために、蛍光塗料とブラックライトを用いた粒子の可視化手法を確立した。この手法を用いて、荷重に伴う粒子の挙動を観察した。荷重時の路盤の全体的な挙動は、アプローチ版が荷重された時にはリーブ版側に変位し、荷重がリーブ上に移動するとアプローチ版側に変位するという動きを繰り返しながら、徐々に目地方向に移動したことが確認できた。また、目地付近の路盤粒子の挙動を確認することで、ポンピング現象による路盤材の噴出過程を把握した。

路盤粒子の噴出過程を以下に示す。粒子は車輪が目地に近づく過程では、アプローチ版下の粒子がリーブ版側に移動する。その後、リーブ版のたわみによる水圧上昇を受けて、アプローチ版下から移動してきた粒子と目地近傍にあるリーブ版下粒子が目地から噴出する。また、リーブ版はポンピング現象に対して3つの役割を果たしており、a)アプローチ版下から横方向に押し出されてきた粒子を水圧によって目地を通して上に噴出させる役割、b) 同様に水圧によって粒子をアプローチ版側に押し戻す役割、c) リーブ版の復元に伴って発生する水流によって目地直下を洗堀させる役割があることが明らかになった。ポンピング現象によって路盤表面に偏った浸食が発生する理由はa)と比較しb)とc)の影響が大きいためであり、車輪が通過するたびにリーブ版下および目地直下の粒子が噴出されるとともに、目地直下で洗堀が進行するためであると推測される。また、荷重初期にはアプローチ版下粒子の噴出が確認できた。荷重初期には浸食が進行しておらず、リーブ版の可動域が小さいこ

とからリーブ版下の粒子が噴出しないことが考えられる。

本結果により、ポンピング現象は荷重条件、舗装条件によって舗装版のたわみ性状（たわみ量やたわみ速度）が変わり、ポンピング現象の活発度に影響を与えることが分かった。また、目地前後の舗装版ではポンピング現象による粒子挙動に異なる影響を与えており、特にリーブ版のたわみによって多くの路盤材が噴出することが確認できた。しかしこれは舗装版と路盤の間に隙間がある場合の限定的な話であり、今後は健全な舗装が浸食により、舗装と路盤の間に隙間を形成する過程を把握する必要がある。

6.2 今後の展望と課題

本研究ではポンピング現象のメカニズムを解明するために模型実験を実施した。これによりある一定のメカニズムは解明できたものの、不十分な点がいくつも見受けられる。ここで、本研究の延長線上で今後検討すべき項目を以下に記載する。

① ポンピング現象の発生因子が及ぼす影響の調査

第3章でポンピング現象の発生が活発になる条件をいくつか示したものの、いまだに検証できていないポンピング現象の発生因子（载荷条件：荷重の大きさ，土質条件：路盤含水比，路盤の排水条件，環境条件：温度，湿度など）について検証実験を行い，ポンピング現象の特性を把握する必要がある。また，これまでに検証した発生因子についても，実験回数が限られており，ポンピング現象の特性として確証を得るためには，更なる実験データを収集し，精度を向上させる必要がある。

② 目地部からの雨水浸透過程と飽和路盤の排水過程の把握

ポンピング現象が発生するためには，舗装版目地部から雨水が浸透し，路盤が飽和するといった過程を経る必要がある。飽和した路盤は拘束が緩み，粒子が動きやすくなることで，舗装版のたわみにより噴出する。したがって，ポンピング現象が発生するためには，路盤が飽和状態であることが欠かせない条件である。しかし，雨水が舗装版目地から浸透する過程や飽和路盤の排水過程は把握されておらず，降雨開始時からポンピング現象を発生しうる路盤状態になるまでにかかる時間や，飽和状態を継続する時間は理解されていない。水が路盤に浸透し排水する過程は，降雨強度や路盤材料，舗装構成によって異なることが予想される。したがって，各条件での特性を把握するためには，降雨開始からポンピング現象が発生するまでの時間や，路盤が飽和状態を継続する時間などを調査する必要がある。

③ アスファルト舗装を対象としたポンピング現象のメカニズムの解明

これまで行ってきた実験で使用してきた輪荷重周回型模型では，舗装版がアクリル板であり，そのたわみ特性（路盤の変形に追従しにくい特性）を考慮すると比較的コンクリート舗装に近い構造となっている。しかし，第1章で前述したように近年ではアスファルト舗装（特に高機能舗装）でもポンピング現象の発生が報告されている。そのため，アスファルト舗装を対象としたポンピング現象のメカニズムに関する検討を行うことが望まれる。

アスファルト舗装をモデル化する場合，たわみ性舗装であることに着目し，路盤の変形に追従する材料で舗装版を模擬する必要がある。現在，舗装版の材料としてはゴム版や樹脂系

材料などが挙げられる。路盤の剛性も考慮しつつ、これら材料を用いて実験を行うことでアスファルト舗装に対するポンピング現象のメカニズムも解明していきたい。

④ 実大スケール舗装におけるポンピング現象実験

これまで本研究では、ポンピング現象のメカニズムを解明するための手段として模型実験を行ってきた。模型実験の利点として、簡易的に実験を行いつつ現象のメカニズムを把握できるといった点が挙げられます。しかし、模型実験のみでは実舗装で発生する現象のメカニズムの正当性を示すことは難しく、正当性を確認するためには、実舗装における実験を行い、その結果を模型実験の結果と比較することが不可欠である。しかし、実舗装で検証は規模が大きくなるため、計画を十分にたて、準備を行ったうえで取り組む必要がある。

本研究の最終目的は、ポンピング現象のメカニズムを解明することにより、舗装種別により経済的なポンピング現象の対策手法を提案することである。そのためには、まだ十分に実証されていないポンピング現象の特性や発生過程などのメカニズムを、実験を通じて積み重ねていくことにより解明していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 渡邊一弘, 久保和幸: 舗装の特性を考慮したマネジメント, 土木技術資料, Vol.56, No.4, pp18-21, 2014.
- 2) 国土交通省: 道路統計年報 2022, <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/>, 閲覧日 2023/11/7
- 3) 日本道路協会: 舗装設計便覧, p.316, 2006.
- 4) 国土交通省: 舗装点検要領, p.50, 2016.
- 5) 土木学会舗装工学委員会: 舗装工学, p 476, 1995.
- 6) 竹本恒行: 高速道路における排水性舗装の現況と課題, 土木学会論文集, Vol.22, No.484, pp.1-99, 1994.
- 7) 西山哲, 大西有三, 矢野隆夫, 北山迪也, 和田実: 透水性舗装の雨水浸透機能に関する研究, 舗装工学論文集, Vol.12, pp.99-106, 2007.
- 8) 中島伸一郎, 小橋秀俊, 岸田潔, 木村亮: 浸水した透水性舗装の変形特性に関する実験, 土木学会舗装工学論文集, pp.41-48, 2009.
- 9) 日本道路協会: 道路土工要綱, p.416, 2009.
- 10) 松野三郎: コンクリート舗装の破損とパフォーマンス, 理工図書, p.150, 2014.
- 11) Dempsey, B.J.: Laboratory and field studies of channeling and pumping, *Transportation Research Record*, No.849, pp.1-17, 1982.
- 12) Raad, L.: Pumping Mechanisms of Foundation Soils Under Rigid Pavements, *Transportation Research Record*, No.849, pp.29-37, 1981.
- 13) Barry, J., D.: Laboratory and Field Studies of Channeling and Pumping, *Transportation Research Record*, No.849, pp.1-12, 1981.
- 14) Hansen, E.C., Johannesen, R., Armaghani, J.M.: Field Effects of Water Pumping Beneath Concrete Pavement Slabs, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.117, pp.679-696, 1991.
- 15) 松野三郎: アスファルト舗装の破損とパフォーマンス, 理工図書, p.131, 2011.
- 16) 道路新産業開発機構: 道路行政セミナー12月号, p.55, 1997.
- 17) Saeed, F., Qamariatul, S., Rahman, M., Woodside, A.: The state of pothole management in UK local authority, *Bituminous Mixtures and Pavements VI*, pp.153-159, 2015.
- 18) Lee, S., Kim, D.W., Choi, Y.W.: Development of Predictive Model for the Number of Potholes Using Multi Regression Analysis, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.14, No.3, pp.91-98, 2014.
- 19) 丸山記美雄, 安倍隆二: 北海道における舗装損傷の発生条件に関する調査検討, 土木第

- 69 回年次学術講演会学会 V-577, 2014.
- 20) 野並健斗, 橋本和明, 明石行雄: 基層以下の混合物損傷が原因で発生するポットホール対策の一考察, 土木学会全国大会第 69 回年次学術講演会, V-569, 2014.
 - 21) 渡辺真善, 岳本秀人, 丸山記美雄: セメント安定処理路盤の模擬エロージョン試験について, 平成 16 年度土木学会北海道支部論文報告集第 61 号, V 41, 2005.
 - 22) 日本道路協会: 舗装施工便覧 (平成 18 年版), p.280, 2006.
 - 23) National Research Council (U.S.): The AASHO road test Report 7: Summary Report. Washington: National Academy of Sciences National Research Council, p.59, 1962.
 - 24) 飯島尚, 窪田一夫: 矢板バイパスにおけるコンクリート試験舗装の供用性の評価, 土木学会論文集, 第 366 号/V-4, pp.65-74, 1986.
 - 25) 西澤辰男, 若林由弥, 内田雅隆, 藪雅行: コンクリート舗装横目地の劣化過程を考慮した逆解析による健全度評価手法の開発, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.74, No.2, pp.42-51, 2018.
 - 26) 佐藤勉, 桑山誠喜, 名古屋義和: 連続鉄筋コンクリート舗装損傷事例について, 土木学会東北支部技術研究発表会, IV-27, 2001.
 - 27) Darter, M.I., LaCoursiere, S.A., Smiley, S.A.: Structural distress mechanisms in continuously reinforced concrete pavement. *Transportation Research Record*, Vol.715, pp.1-7. 1979.
 - 28) 森口拓: 空港コンクリート舗装の構造設計法に関する一提案, 港湾空港技術研究所資料, No.82, pp.7-17, 1969.
 - 29) VanWijk, A.J., Larralde, J., Lovell, C.W., Chen, W.F.: Pumping Prediction Model for Highway Concrete Pavement, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.115, No.2, pp.161-175, 1989.
 - 30) 日本道路協会: 舗装点検必携 (平成 29 年版), p.228, 2017.
 - 31) 高橋茂樹, 小野義道, 佐藤正和: 高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクト, 土木学会論文集 E1, Vol.71, No.3, pp.I_93-I_101, 2015.
 - 32) 高橋茂樹: 高速道路におけるポーラスアスファルトの導入効果の検証と基層の脆弱化に関する研究, 北海道大学博士論文, 2013.
 - 33) Wang, W., Wang, L., Xiong, H., Luo, R.: A Review and Perspective for Research on Moisture Damage in Asphalt Pavement Induced by Dynamic Pore Water Pressure, *Construction and Building Materials*, Vol.204, pp.631-642, 2019.
 - 34) 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模型実験, 土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会, V-423, 2019.
 - 35) 野添重晃, 橋詰豊, 金子賢治, 熊谷浩二, 堀江征信: 短繊維混合補強土の最適混合率に及ぼす粒径の影響, ジオシンセティックス論文集, Vol.28, pp.143-148, 2013.

- 36) 島田正夫：横型砂地盤の作成方法に関する研究，室蘭工業大学技術部報告，Vol.9，pp.3-8，2002.
- 37) 兵動正幸，安原一哉，村田秀一，平尾和年：長期繰り返しせん断を受ける粘土の間隙水圧および変形予測，土木学会論文集，Vol.400，pp.151-160，1988.
- 38) 池田拓哉，伊藤正秀：大型車のタイヤ接地圧評価式の検討，土木学会全国大会第40回年次学術講演会，V-233，1985.
- 39) 大矢陽介，小濱英司，菅野高弘，川名太：舗装直下地盤の液状化による舗装の変形とFWDたわみに関する模型振動実験，構造工学論文集A（土木学会），Vol.60，pp.261-270，2014.
- 40) 曾我部雄次，都築正之，山本順一：衝撃を受けるPMMA材の粘弾性特性の三次元評価，日本機械学会論文集A編，Vol.53，No.486，pp.348-353，1987.
- 41) 西澤辰男：3次元FEMに基づいたコンクリート舗装構造解析パッケージの開発，土木学会舗装工学論文集，Vol.5，pp.112-121，2000.
- 42) 竹内康，木幡行宏，関根悦夫：室内実験結果を用いたアスファルト舗装の路床の弾性係数算出法の検討，土木学会論文集E1，Vol.68，No.2，pp.45-53，2012.
- 43) Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., Schmid, B., Tinevez, J., White, D., Hartenstein, V., Eliceiri, K., Tomancak, P., Cardona, A.: Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature methods*, 9(7), pp.676-682, 2012.
- 44) TrackMate documentation: <https://imagej.net/media/plugins/trackmate/trackmatemanual.pdf>
(2023.06.07 最終閲覧)
- 45) Tinevez, J.Y., Perry, N., Schindelin, J., Hoopes, G.M., Reynolds, G.D., Laplantine, E., Bednarek, S.Y., Shorte, S.L., Eliceiri, K.W.: TrackMate: An open and extensible platform for single-particle tracking. *Methods*, Vol. 115, pp.80-90, 2017.
- 46) Manual Tracking : <https://imagej.nih.gov/ij/plugins/track/track.html> (2023.10.25 最終閲覧)

謝辞

本研究を遂行するにあたり，指導教員である山口大学大学院創成科学研究科の中島伸一郎准教授より，丁寧かつ熱心なご指導を頂きました。私が研究室に配属されてからの6年間，中島准教授には研究計画から学会発表，論文執筆に至るまでのご指導のみならず，物事の捉え方，考え方，発表を行う上での心遣いなど多岐にわたりご教授いただきました。この研究室生活で培った経験は今後研究を行う上で大きな糧になります。深く感謝の意を表します。

本論文の審査をして頂きました，麻生稔彦教授，鈴木素之教授，吉武勇教授，渡邊学歩准教授には，有益なご意見とご助言を頂きました。本論文の審査でいただいたご指摘は今後の研究活動の動力源になるものです。深く感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり山口大学の清水則一名誉教授には在籍時のみならず退任後もご助言いただきました。土木研究所の宮下千花氏，日本道路の池田茜氏には研究の進行についてのご指摘やご助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

事務業務を中心に円滑な研究の進行に尽力くださいました，中島研究室秘書の上坂仁美氏に心より感謝いたします。

山口大学ものづくり創成センター機械工作工場の皆様には，本研究で開発した輪荷重周回型模型を作成するにあたり，材料の加工や模型の作成に関する相談などで大変お世話になりました。無茶な依頼をした時にも親身になり相談に乗っていただきました。心より感謝いたします。

本研究を実施するにあたり必要不可欠な実験施設の援助を行っていただいた，山口大学技術専門員の牧原貴之氏に心より感謝いたします。

本研究を進めるにあたりともに実験や論文執筆を行ってきた中島研究室卒業生の瀧沢涼氏，三宅佑典氏，Yanjinkham CHAGNAADORJ氏，山本耕希氏，有地宏徳氏には心より感謝申し上げますとともに今後のご活躍を心よりお祈り申し上げます。

大学への入学を後押ししてくれた父・孝志と母・マミに感謝いたします。勤めていた会社

を辞め、山口大学に入学し、博士の学位を取得できるに至ることができたのも2人の支えがあったからこそです。私の大学生活を、時々苦言を吐きながらも静かに見守ってくれた両親に改めて感謝いたします。

本論文作成に多数なる協力をしていただいたすべての方々に感謝の意を表します。

令和6年2月20日 重廣和輝