

学位論文要旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	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)
氏名(Name)	重廣 和輝

現在、我が国では約100万kmもの舗装が供用されており、この膨大な舗装のストックを限られた予算制約のなかで維持管理していくために、長寿命化技術の進展が求められている。舗装の効率的な維持管理のために、舗装劣化メカニズムの解明、実践的な診断・予防技術の確立、修繕における構造設計や材料評価の合理化などの取り組みが不可欠である。

舗装の劣化現象のなかで、コンクリート舗装とアスファルト舗装に共通の前兆現象のひとつに、目地やひび割れから路盤の細粒分が噴出するポンピング現象がある。ポンピングが放置されると、舗装のポットホールや角欠けなど、車両交通に有害なレベルの損傷に急速に進展する。特に近年、高速道路舗装において、従来はポンピングが生じにくいとされていたアスファルト舗装でも、ポンピングを伴うポットホールが頻発することが問題視され、そのメカニズムの解明が求められている。舗装目地やひび割れからの雨水浸透と繰返し輪荷重の複合作用によって、舗装版下で生じる力学現象と路盤粒子の運搬プロセスを明らかにする必要がある。

本研究では、舗装のポンピング現象とその継続に伴う路盤の浸食プロセスを可視化し、それら支配要因と影響度を明らかにすることを目的とする。輪荷重により路盤材がポンピングして目地から噴出する様子や、路盤表面の浸食が進行していく様子を観察することが可能な実験模型を新たに開発した。この模型を用いて、舗装条件や路盤条件がポンピング現象に与える影響や、路盤内の過剰間隙水圧挙動、輪荷重載荷による路盤粒子の動きを明らかにした。以下に、本研究の概要を各章ごとに示す。

第1章『序論』では、本研究の背景として、舗装の役割と要求性能、損傷について記述した。舗装はポットホールや角欠けなどの表層の損傷によって、車両走行の安全性や快適性といった舗装の性能が著しく低下する。これらの損傷を引き起こす原因のひとつにポンピング現象があり、対策を行うために発生メカニズムの解明を行う必要があることを記述した。

第2章『ポンピング現象に関する既往研究』では、1950年代から主にコンクリート舗装の分野で進められてきたポンピング現象に関する現場計測および大型実験による研究成果を概観するとともに、近年、高速道路の高機能舗装で顕在化しつつあるアスファルト舗装でのポンピング問題を紹介し、ポンピングのメカニズムや発生条件に関する既往の知見をまとめた。また、本研究に先行して行われたポンピング模型実験の概要と課題を示した。以上の過去の研究レビューを踏まえて、ポンピング現象のメカニズム解明における本研究の位置付けと、取り組むべき課題を明らかにするとともに、模型実験の開発にあた

り配慮すべき事項を整理した。

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』では、輪荷重により路盤材のポンピングを繰返し発生させることのできる輪荷重周回型模型実験を新たに開発した。円形土槽内に飽和砂路盤を詰め、スリットを入れたアクリル板を上載したものを舗装模型とし、その上で車輪を周回させる実験装置である。ダウエルバーのない普通コンクリート舗装の横目地部を想定した模型であり、模型全体を透明アクリルで作製することにより、ポンピングを伴う路盤粒子の動きや路盤面の浸食、舗装版のたわみと復元を詳細に観察することを可能にしている。本章では、路盤条件、舗装版条件、載荷条件の各項目について、模型実験の設計の詳細を記述した。また、予備実験により、一方向に定速で定周期の載荷が可能であることを確認したほか、目地部からの路盤材の繰返し噴出、載荷回数増加に伴う路盤面の偏った浸食など、舗装のポンピング現象を再現していることを確認した。

第4章『輪荷重周回型模型を用いたポンピング現象の発生因子が及ぼす影響に関する実験』では、輪荷重周回型模型を用いた載荷実験を行った。荷重速度、舗装版の厚さ、舗装目地幅、路盤の締固め度などの条件を変化させ、路盤材噴出量、路盤の過剰間隙水圧、路盤面の浸食形状などの観点から、ポンピング現象に与える影響を把握した。実験の結果から、ポンピング現象の度合いには、舗装版のたわみ性状(たわみ量、たわみ速度、たわみ時間)が支配的であることが明らかとなった。また、路盤の締固めの影響について、同一路盤材であれば締固め度が高いほどポンピングは発生しにくくなること、粒度分布の良好な路盤材ほどポンピングは発生しにくいこと、ただし、舗装版と路盤との間に隙間が空いている場合には、締固め度が高い場合であってもポンピングが容易に生じることを実験的に明らかにした。路盤粒子が密に充填され構造骨格が強固な場合、舗装版のたわみや過剰間隙水圧による刺激によって粒子どうしが分離しづらいが、舗装版と路盤表面との隙間により上面が開放されている場合には水流により表面が浸食されてしまうことを示している。

第5章『ポンピング現象発生時の路盤粒子の挙動』では、ポンピングによる路盤の粒子挙動を把握するために、路盤粒子の可視化実験を実施した。この実験では、蛍光塗料で染色した粒子を路盤内に混合し、ブラックライトを照射しながら実験時の動画撮影を行った。そして、染色粒子の座標を画像解析で追跡することで、ポンピング現象発生時の路盤内での粒子の挙動を観察した。実験の結果、輪荷重の移動とポンピングによる粒子の動きとの関係の詳細な観察により、路盤材が噴出するまでには、輪荷重が目地を通過してリーブ版に差し掛かる瞬間に、リーブ版の衝撃的なたわみにより、目地付近のリーブ版下粒子とアプローチ版側から寄せ集まった粒子が、一斉に目地を通過して舗装版上に噴出する、というプロセスを踏むことが明らかになった。また、ポンピングの繰返しによる路盤表面浸食はリーブ版側に偏って大きく発生したが、これはアプローチ版とリーブ版で輪荷重によるたわみ量およびたわみ速度が異なることが理由であることを観察により明らかにした。

第6章『結論』では本研究の各章の成果について取りまとめるとともに、今後の課題や展望について述べた。

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目
(Dissertation Title)

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)

氏 名(Name)

SHIGEHIRO Kazuki

More than one million kilometers of paved roads are currently in service across Japan, and road administrators are compelled to maintain these enormous amounts of pavement within a limited budget. To extend the lifespan of these pavements and ensure the sustained safety of road infrastructures, intensive efforts are essential. These efforts include understanding the mechanisms behind pavement aging, establishing practical diagnostic and preventive techniques for managing aging, and rationalizing structural design and material evaluation for pavement repairs.

Pumping is a common early precursor of pavement distress, involving the ejection of fine granular subbase material from beneath the pavement slab through joints or cracks due to water pressure induced by the slab's deflection under traffic load. This phenomenon rapidly escalates, resulting in significant pavement damage like faults, potholes or slab edge breakage, significantly impacting vehicular traffic safety. Pumping has long been recognized as an issue in concrete pavement distress. However, the recent frequent occurrence of potholes linked to pumping, even in asphalt pavements on expressways, has raised concerns. This highlights the pressing need for understanding its underlying mechanism.

The aim of this study is to identify the primary factors contributing to the pumping phenomenon and ascertain their impact. A novel model experiment was developed to replicate pavement pumping, specifically simulating the ejection of subbase material caused by repetitive wheel loading and the subsequent erosion of the subbase surface. This study conducted the pumping experiments, varying both pavement and subbase conditions, to assess ejected material, observe excessive pore water pressure behavior within the subbase layer, and track the movement of subbase particles under wheel loading. The principal findings of this thesis can be outlined as follows:

Chapter 1 describes the background of this research, outlining the role and performance requirements of pavements, as well as their damages. The performance of the pavement, specifically driving safety and ride comfort for vehicle traffic, undergoes a significant decline due to surface layer damages like faulting, potholes and slab edge breakage. Given that one of the causes leading to these damages is the pumping phenomenon, this chapter emphasizes the indispensable need to clarify the mechanism behind the pumping to address and mitigate such issues.

Chapter 2 serves as a literature review focusing on pavement pumping phenomena. It surveys field measurements and large-scale experiments conducted mainly in the field of concrete pavements since the 1950s. Additionally, it introduces the recent pumping issues in asphalt pavements, particularly in expressways in Japan, summarizing existing findings about the mechanisms and conditions leading to pumping. Furthermore, it outlines our model experiments conducted before this research, presenting their results and challenges. Based on these reviews, it clarifies the position of this study concerning the pumping phenomenon's mechanisms, identifies the

challenges to address, and organizes considerations necessary for the development of model experiments.

Chapter 3 details the development of a new model experiment setup aimed at simulating pavement pumping. This experiment involves a pavement model consisting of a cylindrical soil tank filled with saturated sand and an acrylic plate to represent pavement slab with a single cross joint. Loading is performed by the wheels rotating on the acrylic plate. This chapter describes the detailed design of the model experiment concerning the subbase conditions, pavement slab conditions, and loading conditions. Preliminary experiments were conducted to verify the replication of pavement pumping phenomena, including the repeated ejection of subbase material through the joint aperture and uneven erosion of the subbase surface with an increase in loading cycles.

In Chapter 4, loading experiments were conducted using a new model. The loading speed, pavement slab thickness, pavement joint aperture, and subbase compaction were varied in the experiments. The experimental results indicate that pavement deflection is the dominant factor in the pumping phenomenon. Regarding the subbase conditions, pumping is less likely to occur under higher compaction degree and better grain size distribution. However, even in the case of good subbase condition, pumping can easily occur when there is a cavity underneath the pavement slab. The presence of cavity significantly intensifies the deflection of pavement slabs and the movement of water accumulated underneath the slabs, leading to the loosening of soil particle skeleton structures.

In Chapter 5, the movement of subbase material during the pumping experiment was visualized using sand particles dyed with fluorescent paint and ultraviolet light (blacklight). The movement of the dyed subbase particles were tracked by video image analysis. The observation revealed that the subbase material was ejected by the rapid deflection of the leave slab as the loading wheel passed through the joint and onto the leave slab. The uneven erosion on the leave slab side was caused by the difference in the amount and rate of deflection between the approach slab and the leave slab.

Chapter 6 summarizes the results of the whole chapters of this study and discusses future issues and prospects.

(様式 9号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	重廣 和輝
審査委員	主 査： 中島 伸一郎
	副 査： 麻生 稔彦
	副 査： 鈴木 素之
	副 査： 吉武 勇
	副 査： 渡邊 学歩
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 (Experimental study on mechanism of pavement pumping and subbase erosion)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>我が国の膨大な舗装ストックを効率的に維持管理していくためには、舗装劣化メカニズムの解明が不可欠である。本研究は、舗装劣化の前兆現象として知られるポンピングとそれに伴う路盤浸食のメカニズム解明を目的に、模型実験システムを開発し、舗装条件や路盤条件がポンピングに与える影響や、輪荷重による路盤内の過剰間隙水圧挙動、路盤粒子の運搬プロセスについて検討している。実験結果に基づき、路盤内の過剰間隙水圧は、輪荷重が目地を通過した直後に大きく発生して目地からの噴砂が生じること、噴砂による路盤面の浸食はリープ版下で顕著であること、舗装版と路盤面との間に隙間がある場合には、路盤が十分に締め固められていてもポンピングが生じやすいことなど、ポンピングによって路盤内に生じる力学現象を明らかにしている。また、蛍光染色した路盤粒子の動きを動画解析によって追跡し、舗装版がたわんで路盤粒子が水流とともに動き、噴砂に至るまでの複雑な運搬プロセスを可視化している。本論文は、これらの実験的研究の成果をとりまとめたものであり、全6章で構成されている。各章の内容を以下に示す。</p> <p>第1章は、研究の背景として、舗装の性能および損傷の一般事項を整理し、効率的な維持管理のためには損傷メカニズムの解明が不可欠であることやポンピングによる路盤の浸食メカニズム解明の重要性を解説している。そのうえで研究の目的と論文の構成を示している。</p> <p>第2章は、ポンピングに関する既往研究のレビューであり、1950年代から主にコンクリート舗装の分野で進められてきたポンピングに関する現場計測および大型実験による研究成果を概観するとともに、近年、高機能舗装で顕在化しているアスファルト舗装でのポンピング問題を紹介し、ポンピングのメカニズムや発生条件に関する既往の知見をまとめている。</p> <p>第3章では、ポンピングをシミュレートする模型実験システムを構築している。路盤条件、</p>	

(様式 9 号)

舗装版条件、載荷方法の各項目について模型実験の設計の詳細を記述している。輪荷重周回型の載荷機構を採用することで定周期の一方向繰返し載荷を実現するとともに、模型全体を透明アクリルで作製することで、舗装版下で生じる粒子の挙動を観察可能にした。

第 4 章では、輪荷重周回型模型を用いたポンピング実験を各種条件で実施している。路盤内の過剰間隙水圧は、輪荷重が目地を通過した直後に大きく発生して目地からの噴砂が生じること、噴砂による路盤面の浸食はリープ版下で顕著であること、舗装版と路盤面との間に隙間がある場合には、路盤が十分に締め固められていてもポンピングが生じやすいことなど、ポンピングによって路盤内に生じる力学現象を明らかにしている。

第 5 章では、蛍光染色した路盤粒子を用いてポンピング実験を実施し、噴砂・浸食に伴う路盤粒子の動きを動画解析によって追跡している。輪荷重により舗装版がたわんで路盤粒子が水流とともに動いて噴砂を生じ、その後の目地直下の局所的な水流により路盤面が洗掘するまでの複雑な運搬プロセスを可視化している。

第 6 章では、本研究で得られた知見をまとめ、今後の課題と展望を示している。

公聴会には、学内外から 38 名（対面 15 名、オンライン 23 名）の聴講者があった。公聴会における主な質問内容は、①実験模型と実物舗装との挙動の相似性について、②ポンピングによる路盤浸食の影響深さについて、③浸水条件とポンピングとの関係について、④縦断ひび割れにおけるポンピングの可能性について、などであった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容および審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は次のとおりである。（関連論文 計 3 編、参考論文 計 0 編）

- 1) 三宅佑典, 重廣和輝, Yanjinkham CHAGNAADORJ, 中島伸一郎: 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, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.78, No.2, pp.I_256 - I_263, 2023.
- 2) 重廣和輝, 中島伸一郎: 舗装で発生するポンピングによる路盤材噴出および浸食過程の可視化実験, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.79, No.2, 2024 (2023 年 11 月掲載決定, 印刷中).
- 3) 重廣和輝, 中島伸一郎: コンクリート舗装版下で発生するポンピング現象メカニズム解明のための小型模型の開発, 土木学会論文集 (2023 年 12 月掲載決定, 印刷中).