

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：82115

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04655

研究課題名（和文）道路舗装の層間はく離による早期劣化メカニズムの解明とその対策に関する研究

研究課題名（英文）Research on early degradation mechanism of road pavement due to interlayer debonding and its countermeasures

研究代表者

若林 由弥（WAKABAYASHI, YUYA）

国土技術政策総合研究所・道路構造物研究部・研究官

研究者番号：00776099

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：はじめに、多層弾性解析により層間はく離が生じた場合の舗装内部に生じる応力を計算し、従来の舗装の設計では考慮されていない損傷が発生しうることを示した。また、層間はく離が生じた場合のたわみ量の変化や逆解析を行った場合に生じる誤差について明らかにした。さらに、複数の層間接着条件を模擬した試験舗装を構築し、施工直後や荷重載荷後の舗装の劣化進行や内部挙動の変化について比較した。研究期間終了時点で劣化状況に明確な差は生じておらず、層間接着条件が舗装の耐久性に与える影響について明確とならなかった。また、層間はく離を模擬した工区では、荷重載荷により層間が接着してしまい、条件の見直しが必要であることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多層弾性解析による応力解析結果により、層間はく離が生じた場合、従来の設計で想定するようなアスファルト混合物が一体の場合と、舗装内部の挙動が異なることやそれにより設計で想定する損傷と異なる損傷が生じる可能性を示した。

これは、一般的なアスファルト舗装のみならず、新しい構造の舗装の設計においても同様に留意すべき点であり、検証の必要があることを明らかにした。

また、試験舗装では層間接着条件が耐久性に与える影響について明確にすることはできなかったが、ひずみ計による舗装の挙動の観測が妥当であることが明らかになった。本手法は様々な舗装構造に応用が利くものであり、

研究成果の概要（英文）：First, stresses in the pavement interior are calculated by multi-layer elasticity analysis when interlayer debonding occurs, showing that damage can occur that is not considered in current pavement design. The results also show the change in deflection and the error in the inverse analysis when interlayer debonding occurs.

In addition, test pavements were constructed to simulate several interlayer bonding conditions, and their deterioration progress and internal behavior were compared immediately after construction and after accelerated loading test. At the end of the study period, no clear difference in deterioration was observed, and the effect of interlayer bonding conditions on pavement durability was not clear.

In the section where interlayer debonding was simulated, it was found that the interlayer bonding occurred due to loading, and that a review of the conditions was necessary.

研究分野：舗装工学

キーワード：アスファルト舗装 層間はく離 FWD ひずみ 促進載荷 多層弾性解析

1. 研究開始当初の背景

舗装の理論設計においては、各層を構成する材料の弾性係数やポアソン比、そして層間すべり率を仮定し、疲労解析を行う。一般的に、アスファルト舗装の設計において、アスファルト混合物（以下、「アスコン」という）層は一体と考えられており、図-1 に示すようにアスコン層の下部に生じる引張ひずみの繰返しにより、舗装表面にひび割れが生じると考えられている。

しかし、現実には平坦性を確保するためアスコン層を2層に分けて施工する事が多く、アスファルト乳剤を層間に撒くことで一体化を図るものの、層間の接着が弱まりはく離が生じることがある。この場合、舗装構造によっては、最大引張ひずみが発生する箇所が図-2 に示すように、層間はく離が起こった上部の層の下部となり早期にひび割れが生じる可能性が高い。更に、鉛直応力の分散効果も小さくなり、路床上面の永久変形によるわだち掘れやひび割れが早期に発生するおそれもある。また、乳剤による層間の付着が十分であったとしても、1層で施工した場合に比べ、応力の伝達が十分になされているかどうか検証した事例は存在しない。

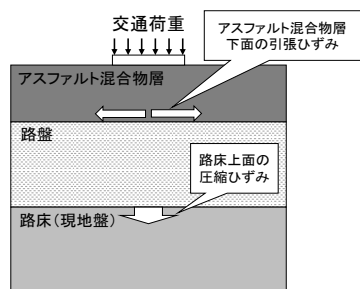


図-1 現在の設計法における着眼点

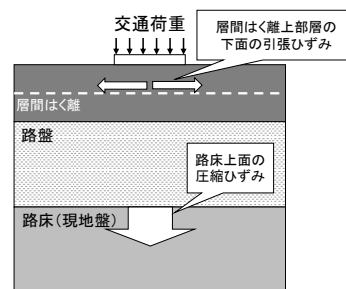


図-2 層間はく離発生後の着眼点

上記を踏まえ、層間はく離が舗装の耐久性に及ぼす影響や乳剤散布等による付着の効果について明確にすることが、設計時の耐久性の過大評価防止や施工時の層間付着に関する技術基準等の改善につながり、舗装の長寿命化の観点から有効であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、層間はく離による舗装の早期劣化に着目し、実験及び理論の両面から層間の付着状態による舗装の耐久性への影響を分析するとともに、施工上の対策についてその効果を検討するものである。

層間はく離による舗装の耐久性低下については、これまで考え方としての指摘はあったものの、実道上で試験施工することができないため、どの程度耐久性に影響があるのか検討することができないという課題があった。これに対し、本研究では(国研)土木研究所の保有する舗装走行実験施設にて試験舗装を施工し、荷重車による繰返し載荷試験を実施することで、実際の道路と同程度の環境下における劣化の進行を確認することができる。

また設計法についても、計算上は層間すべり率によって層間はく離の影響を加味することはできるものの、すべり率を直接測定することができなかったため、アスファルト舗装においては暫定的にすべりが発生しないものとして構造設計がなされてきた。本研究では、FWDによって測定したたわみからの逆解析により層間すべり率を算出する手法について確立するとともに、すべり率を考慮した構造設計法を構築する。

3. 研究の方法

研究期間内では、以下の内容について検討を行う。

(1) 層間すべり率を考慮した舗装の耐久性評価及び設計手法の構築

多層弾性解析により層間すべり率を従来の理論設計に組み込み、層間はく離が生じた際の舗装の挙動解析を行うとともに、FWD たわみの変化や逆解析時に生じる誤差について検討する。

(2) 逆解析による層間すべり率の推定

実道で舗装たわみ測定装置(Falling Weight Deflectometer, 以下FWDとする)により測定したたわみから、逆解析により各種舗装の層間すべり率を推定する手法を検討する。

(3) 試験舗装による力学的特性の検証

層間はく離の発生や各種の層間付着工法を適用した試験舗装を施工し、交通荷重載荷時に発生するひずみの発生状況を確認し、(1)の解析結果と比較する。

(4) 試験舗装を用いた繰返し載荷試験

(3)で施工した試験舗装に対し荷重車による繰返し載荷試験を実施し、路面劣化の進行や各層に発生するひずみを追跡観測することで、層間はく離が舗装の耐久性に及ぼす影響や各種層間付着法による効果について、検証する。

4. 研究成果

(1) 層間すべり率を考慮した舗装の耐久性評価及び設計手法の構築

層間はく離が力学的に舗装の疲労に及ぼす影響について検証するため、多層弾性解析によるたわみやひずみの計算を行った。計算には、国内で広く普及しているソフトウェアであるGAMESを使用した。このソフトウェアでは、層間の接続条件をすべり率 α で表現している。 α は $0 \leq \alpha < 1$ の値をとり、 $\alpha=0$ の時は完全に層間が接着している状態を表し、逆に α が1に近づくほど層間はく離が進行している状況を表す。

アスコン層20cmで深さ10cmの位置の層間のすべり率を変化させたところ、図-3のように、すべり率が大きくなるほど層間部分に強い引張ひずみが生じることが分かった。この結果はアスコン層内部の層間部分からひび割れが生じる可能性があることを示唆している。また、鉛直方向の圧縮ひずみについても、図-4のようにすべり率が大きくなるほどより深い位置まで鉛直応力が生じるため、路盤・路床の圧縮変形によるわだち掘れが発生しやすくなる可能性があることが示された。

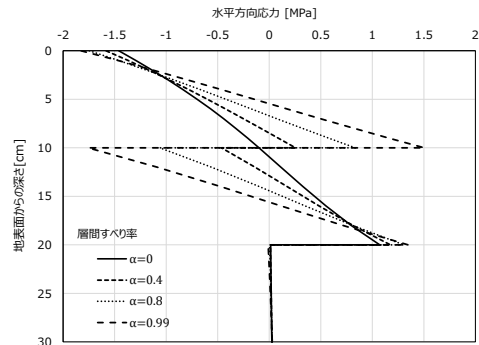


図-3 はく離による水平方向応力の変化

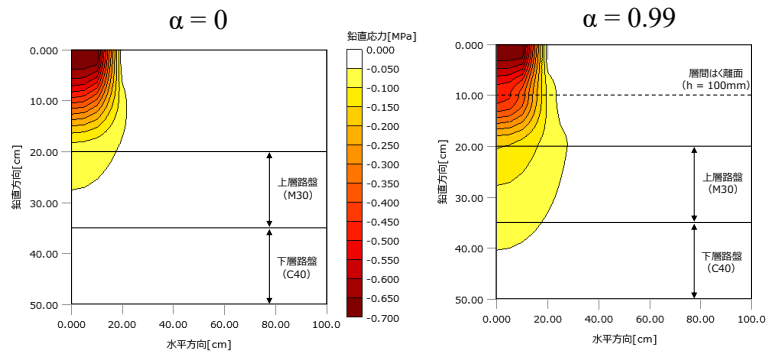


図-4 はく離による鉛直方向応力の変化

(2) 層間すべり率を考慮した舗装の耐久性評価及び設計手法の構築

層間はく離が生じてい

る舗装で測定したたわみに対し、アスコン層を一体とみなして各層の弾性係数について逆解析を行った場合、逆解析結果に誤差が生じると考えられる。そこで、層間はく離が生じている舗装モデルで計算されたたわみに対し逆解析を行い、誤差の検証を行った。

逆解析には、実際に現場で多く使用されている静的逆解析ソフトウェアのBALMを使用した。このソフトウェアは、各層の厚さ、ポアソン比、層間すべり率を既知の条件として与え、順解析により計算したたわみが計測たわみに近づくように各層の弾性係数の値を更新していき、計算たわみと計測たわみの差が許容誤差より小さくなる時の各層の弾性係数を出力する。この順解析にはGAMESが使用されており、ある舗装モデルについてGAMESで解析し算出したたわみをBALMで逆解析した場合、理論的には弾性係数はモデルと同一の値となると考えられる。

以下の3パターンについて逆解析を実施した。

- ・アスコン層を1層とみなした場合
- ・アスコン層は2層だが層間すべり率を0とし層間が完全に接着しているとみなす場合
- ・アスコン層を2層とし、かつたわみ計算時と同じ層間はく離(すべり率)を考慮した場合

表-1に、逆解析による弾性係数の計算結果を示す。アスコン層を1層とみなした場合、アスコン層の弾性係数や上層路盤の弾性係数は正解値より小さく推定される。この誤差は層間はく離が進行するほど大きくなり、完全に層間がはく離した状態($\alpha=0.99$)の逆解析結果では、アスコン層の弾性係数は半分以下、上層路盤の弾性係数は1/5程度となった。アスコン層を2層とし完全に接着しているとみなした場合、アスコン上層の弾性係数は正解値に近づいたが、下部のアスコン層(以下、「アスコン下層」という)の弾性係数が著しく低く推定される結果となった。これらの結果は、層間はく

表-1 層間はく離モデルに生じたたわみの逆解析結果

層間すべり率 正解値	計算パターン	逆解析初期値		各層弾性係数 [MPa]					
		すべり率	アスコン層 弾性係数[MPa]	アスコン層1	アスコン層2	上層路盤	下層路盤	路床	
0.4	解析モデル (正解値)			6,000	6,000	300	200	60	
	逆解析	アスコン1層	0	3,000	4,571		296	326	60
		アスコン2層 (完全付着)	0	9,000	4,571		296	326	60
		アスコン2層 (完全付着)	0	3,000	5,806	3,354	394	236	60
		アスコン2層 (完全付着)	0	9,000	5,806	3,354	394	236	60
		アスコン2層 ($\alpha=0.4$)	0.4	3,000	6,089	6,065	251	257	60
		0.4	9,000	5,764	6,633	220	290	60	
0.8	解析モデル (正解値)			6,000	6,000	300	200	60	
	逆解析	アスコン1層	0	3,000	3,459		141	659	60
		アスコン2層 (完全付着)	0	9,000	3,459		141	659	60
		アスコン2層 (完全付着)	0	3,000	7,221	1,384	298	255	60
		アスコン2層 (完全付着)	0	9,000	7,227	1,382	299	255	60
		アスコン2層 ($\alpha=0.8$)	0.8	3,000	6,289	5,365	344	183	60
		0.8	9,000	5,837	6,372	276	212	60	
0.99	解析モデル (正解値)			6,000	6,000	300	200	60	
	逆解析	アスコン1層	0	3,000	2,851		58	626	61
		アスコン2層 (完全付着)	0	9,000	2,846		60	568	61
		アスコン2層 (完全付着)	0	3,000	7,521	1,040	113	177	61
		アスコン2層 (完全付着)	0	9,000	7,521	1,040	113	177	61
		アスコン2層 ($\alpha=0.99$)	0.99	3,000	6,117	5,784	305	199	60
		0.99	9,000	6,027	5,949	301	200	60	

離によりアスコン下層に完全接着時より大きな鉛直応力が発生しひずみが大きくなったことを、アスコン下層の弾性係数を低くすることで整合させているためと考えられる。

一方、すべり率をモデルと同等の値にして逆解析を実施した場合、路盤の弾性係数に多少の誤差はあるものの、概ね妥当な値が推定された。

以上の結果より、アスコン層内に層間はく離が発生している舗装に対しアスコン層が一体となっている前提の下で逆解析を実施すると、推定結果に誤差が生じることや、適切な層間はく離の状態（すべり率）を設定することでその誤差を修正できる可能性があることが示された。

続いて、実際に層間はく離が生じていることが確認された実道で取得された FWD たわみデータの逆解析を行った。取得した FWD たわみ量のデータについて、アスコン層を一体とみなした場合の逆解析を行った。図-5 に、はく離の進行を考慮しない場合、すなわちアスコン上層とアスコン下層の間のすべり率を 0 とした際の、OWP の逆解析による弾性係数の推定結果を示す。

その後、すべり率を変化させた際の上層路盤弾性係数の逆解析結果を確認したところ、今回のケースでは、すべり率が 0.8 となった際に上層路盤の弾性係数が目安とされている 100MPa から 600MPa の範囲に最も近づくため、すべり率を 0.8 と仮定して各層の弾性係数の推定を行った。

図-6 に層間はく離を考慮した逆解析結果を示す。はく離を考慮しなかった場合と比べ、アスコン下層の弾性係数は高くなった。しかし、アスコン下層の弾性係数はアスコン上層の弾性係数と比較すると相対的に低いままである。BALM ではプログラムの制約により 6 層以上の層は設定できず、また、2 箇所の層間すべり率を考慮した逆解析は組み合わせ数が膨大となり現実的ではないため、層間すべり率を含め弾性係数を同時に推定する解析手法の構築が今後必要となる。

(3) 試験舗装による力学的特性の検証

(1) の解析結果の妥当性について検証するため、アスコン層の層間の条件を変えた試験舗装を構築した。図-8 に試験舗装の概要を示す。試験舗装は令和 3 年 5 月 11 日と 12 日の 2 日間で、国立研究開発法人土木研究所の舗装走行実験場内に施工した。基層と瀝青安定処理層の間の接着状態について、工区 1 では路盤紙を敷いて層間にはく離が生じた状態を模擬した。工区 2 および工区 3 ではタックコート散布し、工区 2 では通常の道路舗装工事で多く使用されている浸透用カチオン乳剤 PK-4（日本工業規格 JIS-K-2208）を、工区 3 では速分解型アスファルト乳剤 PKM-T-Q（日本アスファルト乳剤協会規格 JEAAS-2020）をそれぞれ使用した。PKM-T-Q は、アスコンとの付着性が高く作業車両のタイヤへの付着防止効果や養生時間が短い特徴を有しており、空港舗装の設計では標準で使用することが示されている。

なお、いずれの工区も表層と基層の間には PKM-T-Q を散布している。

さらに、荷重載荷時の舗装の挙動を確認するため、各工区の外側車輪通過部の舗装内部にひずみ計（株）東京測器研究所製：

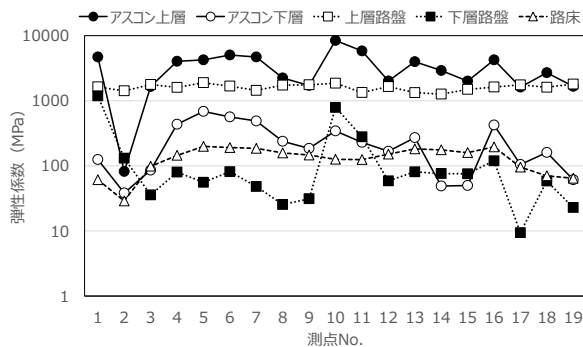


図-5 層間はく離を考慮した場合の逆解析結果

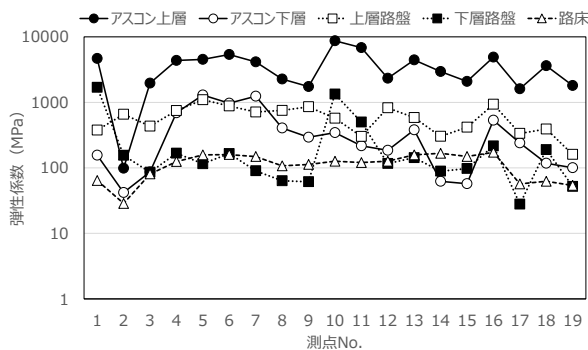


図-6 層間はく離を考慮した場合の逆解析結果

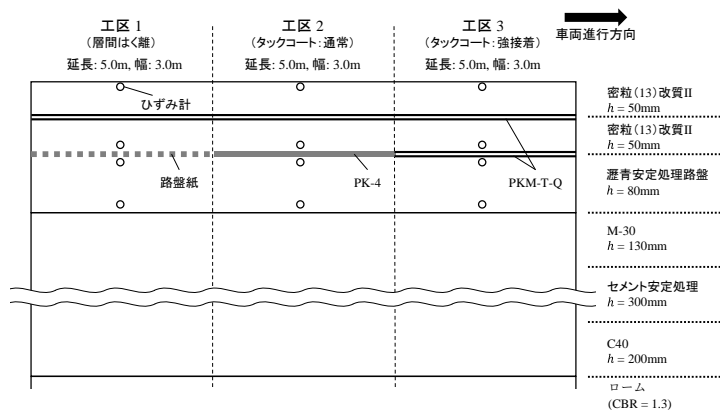


図-7 試験舗装概要

KM-100HB) を設置した。ひずみ計は路面から 20mm, 90mm, 120mm, 170mm の深さにそれぞれ設置した。

試験舗装施工後 2 週間後の令和 3 年 5 月 28 日に、各工区のひずみ計設置位置の直上で、舗装たわみ測定装置 (Falling Weight Deflectometer, 以下「FWD」という) による 49kN 載荷時に生じるひずみを測定した。

図-9 に試験舗装における FWD 荷重載荷時に発生したアスコン層内のひずみを示す。ひずみ分布を層間に路盤紙を敷設した工区 1 では、多層弾性解析で層間すべりを仮定した場合と同様、第 2 層の下面に生じる引張ひずみより第 3 層の上部に生じる引張ひずみの方が明らかに小さくなっていった。また、層間に標準のタックコート散布した工区 2 についても、第 2 層の下面に生じる引張ひずみより第 3 層の上部に生じる引張ひずみの方が若干小さくなった。この結果は前述の多層弾性解析による計算結果と整合しており、工区 1, 工区 2, 工区 3 の順で層間の接着が弱くすべり率が高くなっていると考えられる。一方、路面の圧縮ひずみについては工区 1 が工区 2 や工区 3 よりも小さかった。これは、表層付近がまだ十分に締固めておらず、ひずみ計が十分に固定されていなかったことなどが要因として考えられる。

(4) 試験舗装を用いた繰返し載荷試験

(3) で施工した試験舗装に対し、荷重車による促進載荷試験を実施し、施工直後及び 10 万輪相当の載荷毎に FWD 載荷時にアスコン層内部に生じるひずみをそれぞれ測定した。

図-9 に外側車輪通過部で FWD を載荷した際に生じたアスコン層内部のひずみの変化を示す。ひずみの絶対値は路面温度が高いほど大きく、低いほど小さくなっている。アスコン層は温度が高いほど弾性係数が低くなり外力作用時のひずみが大きくなる傾向にあることから、埋設したひずみ計により精度よくひずみを取得できていると考えられる。路盤紙を挟んだ工区 1 では、施工直後は 90mm の深さの引張ひずみが 120mm の深さの引張ひずみより大きくなっており、層間にすべりが生じていると考えられたが、促進載荷後は工区 2 や工区 3 同様の大小関係となっており、層間が接着してしまったと推察される。実際に 60 万輪相当の載荷後に工区 1 でコアを採取したところ、層間が接着している様子が確認された。

促進載荷試験結果より、いずれの工区も舗装構造としては健全な状態を保っており、現時点では比較するのに十分な荷重を与えられていないと考えられる。また、層間を離れを再現するために、路盤紙を使用するなどの検討を行ったが、路盤紙のような簡易な手法では載荷により層間が当座接着してしまうことが推察され、現象の再現は容易でないことがわかった。実際の層間を離れはひび割れ等からの水の浸入に起因して起こるため、再現方法に関しては、実道での層間を離れ部の分析等により検討していきたい。

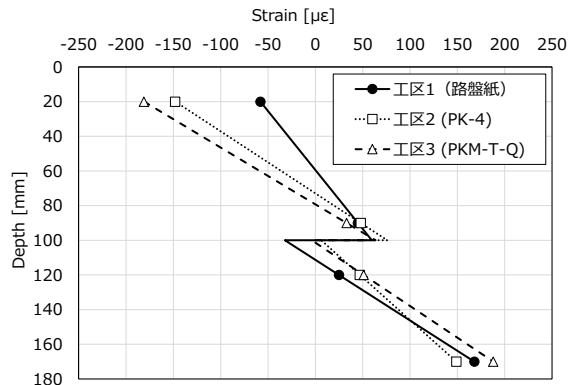
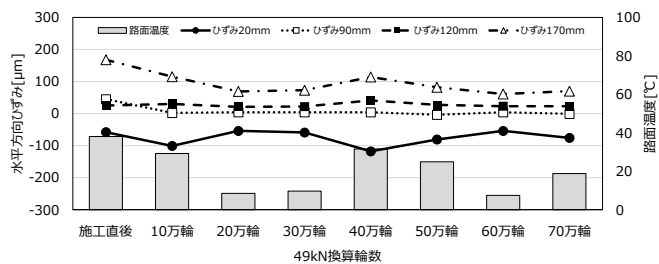
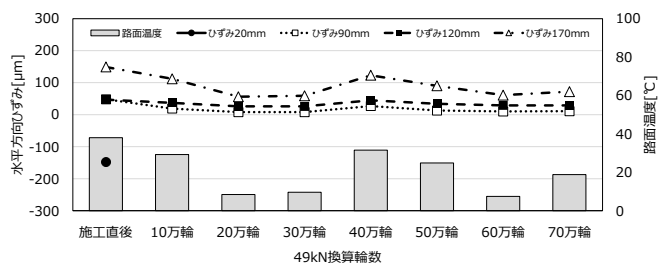


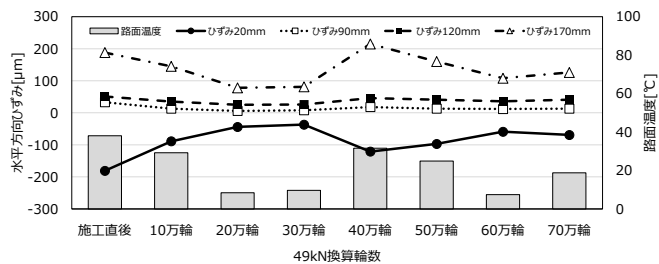
図-8 試験舗装におけるひずみ測定結果



(a) 工区 1 (路盤紙)



(b) 工区 2 (PK-4)



(c) 工区 3 (PKM-T-Q)

図-9 アスコン層内発生ひずみの変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 若林 由弥, 川名 太, 渡邊 一弘	4. 巻 76
2. 論文標題 アスファルト舗装の層間はく離が内部応力やたわみに及ぼす力学的影響に関する検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集E1 (舗装工学)	6. 最初と最後の頁 I_115 ~ I_122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejpe.76.2.I_115	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 若林由弥, 渡邊一弘, 永塚竜也, 前川亮太, 川名太, 竹内康
2. 発表標題 舗装の層間接着状態がたわみや内部ひずみに及ぼす影響に関する試験結果
3. 学会等名 第34回日本道路会議
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	前川 亮太 (Maekawa Ryota) (20455497)	国立研究開発法人土木研究所・土木研究所(つくば中央研究所)・主任研究員 (82114)	
研究分担者	川名 太 (Kawana Futoshi) (90349837)	東京農業大学・地域環境科学部・教授 (32658)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------