



道路舗装の維持管理に資する表面処理工法に関する研究

塚本, 真也

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2019-03-25

(Date of Publication)

2020-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7504号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007504>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

道路舗装の維持管理に資する
表面処理工法に関する研究

平成31年1月

神戸大学大学院工学研究科

塚本 真也

論文目次

1. 序論.....	1
1.1. 本研究の背景.....	1
1.1.1. 我が国の舗装整備の変遷と現状.....	1
1.1.2. 我が国の舗装種別の変遷と現状.....	3
1.1.3. 我が国のアスファルト舗装技術の変遷と現状.....	4
1.1.4. 我が国の気象条件.....	5
1.1.5. 人口減少・高齢化社会.....	6
1.2. 本研究の目的.....	7
1.3. 論文の内容と構成.....	9
2. 既往の研究.....	13
2.1. アスファルト舗装の破損形態とその発生原因に関する研究.....	13
2.2. 疲労ひび割れに関する研究.....	16
2.3. アスファルトの劣化・老化に関する研究.....	18
2.4. 予防的工法とアセットマネジメントに関する研究.....	18
2.5. 道路橋床版分野の研究.....	19
3. 大型車交通量の少ない道路舗装に適した維持修繕工法の選定.....	26
3.1. 概要.....	26
3.2. 舗装の維持修繕工法の種類と分類.....	26
3.3. 舗装の破損と維持工法の選定の目安.....	36
3.4. フォグシールに適した材料の選定.....	38
3.4.1. 使用材料.....	38
3.4.2. 促進耐候性試験.....	44
3.4.3. アスファルト性状試験.....	47
3.4.4. ねじり骨材飛散試験.....	54
3.4.5. ひび割れ抵抗性評価試験.....	56
4. 水を供給する曲げ疲労試験によるフォグシール工法の評価.....	61
4.1. 概要.....	61
4.2. 試験方法の検討.....	62

4.2.1.	曲げ疲労試験装置	62
4.2.2.	試験供試体の作製方法	66
4.2.3.	疲労試験の試験条件	73
4.2.4.	試験中に供試体へ水を供給する方法の検討	76
4.2.5.	試験供試体の散水面形状の検討	85
4.2.6.	試験供試体の養生方法の検討	87
4.3.	水の有無がアスファルト混合物の疲労特性に与える影響	89
4.3.1.	試験供試体	89
4.3.2.	試験結果および評価方法の検討	89
4.4.	フォグシールがアスファルト混合物の疲労特性に与える影響	95
4.4.1.	試験条件	95
4.4.2.	試験結果および考察	97
5.	現場透気試験によるフォグシール工法の評価	102
5.1.	概要	102
5.2.	試験方法の検討	103
5.2.1.	現場透気試験器の検討	103
5.2.2.	透気漏れ防止材の検討	106
5.2.3.	空気の流れの確認実験	112
5.2.4.	測定方法	118
5.3.	評価方法の検討	119
5.3.1.	透気速度による評価	119
5.3.2.	透気係数による評価	121
5.3.3.	現場透気試験の再現性	128
5.4.	フォグシール施工箇所での測定	130
5.4.1.	概要	130
5.4.2.	劣化・老化が進行した舗装路面での測定	130
5.4.3.	微細なひび割れが発生している舗装路面での測定	133
5.4.4.	試験供試体での測定	137
6.	フォグシール工法の長期供用性調査およびライフサイクルコスト分析 ..	153
6.1.	概要	153
6.2.	長期供用性調査	153
6.2.1.	調査箇所	153

6.2.2.	調査方法	154
6.2.3.	調査結果および考察	155
6.3.	水を供給する曲げ疲労試験に基づくライフサイクルコスト分析	170
6.3.1.	フォグシールによる舗装の延命効果の試算	170
6.3.2.	ライフサイクルコストの試算	172
7.	結論	177

謝辞

1. 序論

1.1. 本研究の背景

1.1.1. 我が国の舗装整備の変遷と現状

道路は豊かな生活の実現と活力ある地域社会の形成に欠くことのできない社会基盤である¹⁾。中でも舗装は道路利用者に直接作用して道路交通サービスを提供する施設であり、その状態を健全な状態に保つことは我々の生活を維持・向上させていく上で重要である。

まず我が国の道路整備・舗装整備の変遷と現状について述べる²⁾。我が国の道路舗装は、戦後の復興とともに、1954年に始まった第1次道路五箇年計画を契機に着実に道路整備が推進されてきた。図 1.1 は舗装整備延長の推移を示したものである。1965年ごろの舗装総延長は50,000km弱であり、全道路延長に対する舗装した割合(舗装率)は5%程度であった。このうち、幹線道路(国道、都道府県道)に限っても舗装率は18%程度であり、多くの場所は砂利道で、その延長は125,000 kmであった。当時の年間の舗装延長は3,000 km程度であったことから、砂利道の箇所を舗装するだけでも40年以上の歳月が必要になると計算できる。こうしたことより、1964年に始まった第四次道路整備五カ年計画より、従来は道路法に基づく政令「道路構造令」に適合するように道路を幅員や線形を改良した後に舗装していたものが、道路の構造は未改良のままでも舗装されるようになった。特種改良第四種という事業であったことから、通称「特四舗装事業」と呼ばれている。その国の施策に追従して(社)日本道路協会より、1964年に「簡易舗装要綱」が発刊されている。

簡易舗装要綱に基づき構築された舗装は通称「簡易舗装」と呼ばれており、自動車交通量が1,000台未満/日、かつ重車両が少ない道路(100台未満/日)を対象に舗設されてきた。その舗設方法は、砂利道の在来砂利層を極力活用しつつ、舗装は路床土の強さに応じて路盤を構築し、その上に3~4 cmの表層を浸透式工法、常温混合式工法または加熱混合式工法で舗設するというものであった。この簡易舗装は、良好な路面を保持するために、たえず維持修繕を行うことが必要とされていた³⁾。

このようにして、我が国の道路は、1970年代、1980年代に急速に簡易な舗装が行われてきており、建設から30~40年程度経過しており、老朽化が進行していることを伺い知ることができる。

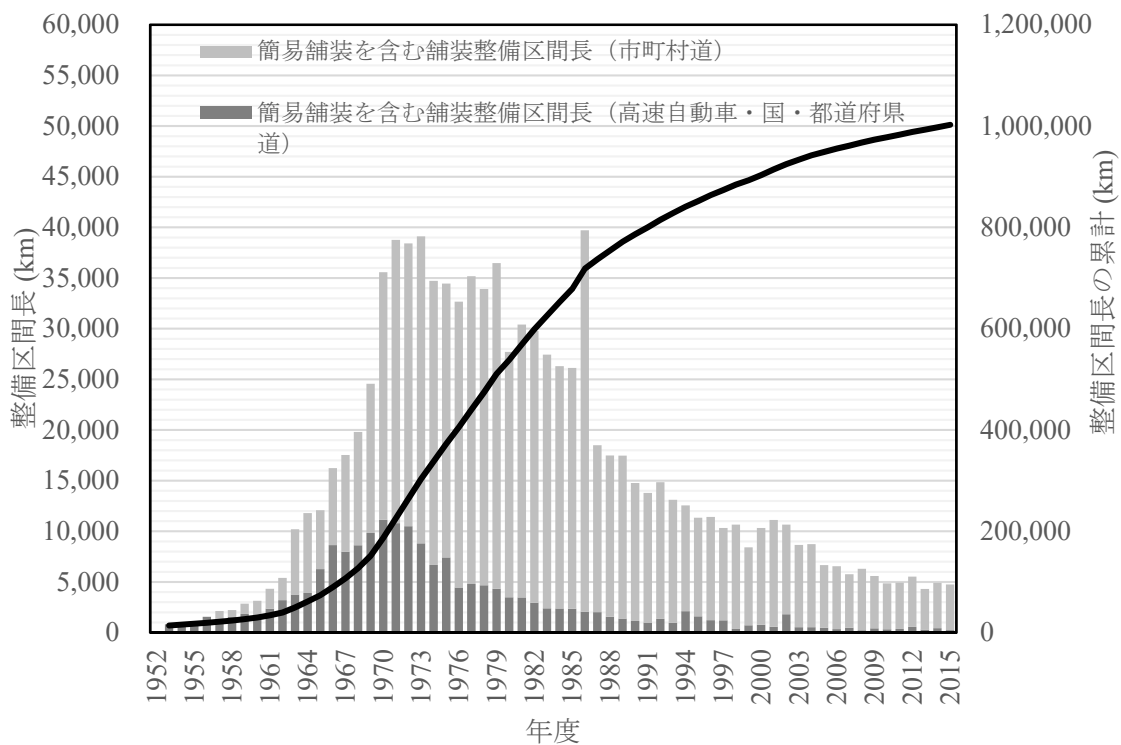


図 1.1 舗装整備延長の推移 (道路統計年報⁴⁾より作成)

1.1.2. 我が国の舗装種別の変遷と現状

我が国の舗装の種別の変遷と現状について述べる。1954年当時は主要な道路においてコンクリート舗装が多く施工されており、国道の約80%、地方道の約30%がコンクリート舗装であった⁵⁾ものの、その後の急速な経済成長に伴うモータリゼーションの進展により道路事業が増大し、石油需要の増大による石油化学工業の発展とアスファルトの国内生産の増加が相まって、コンクリート舗装よりも経済的で素早く施工できるアスファルト舗装の施工量が増大してきた。

図1.2は2012年の道路種別ごとの舗装路面の延長割合を示したものである。高速道路、一般国道といった交通量が多い路線においてはアスファルト舗装が主流であるが、都道府県道、市町村道と交通量が少なくなるに伴って簡易舗装が主流となっており、その簡易舗装の総延長は約650,000 km⁴⁾と膨大である。

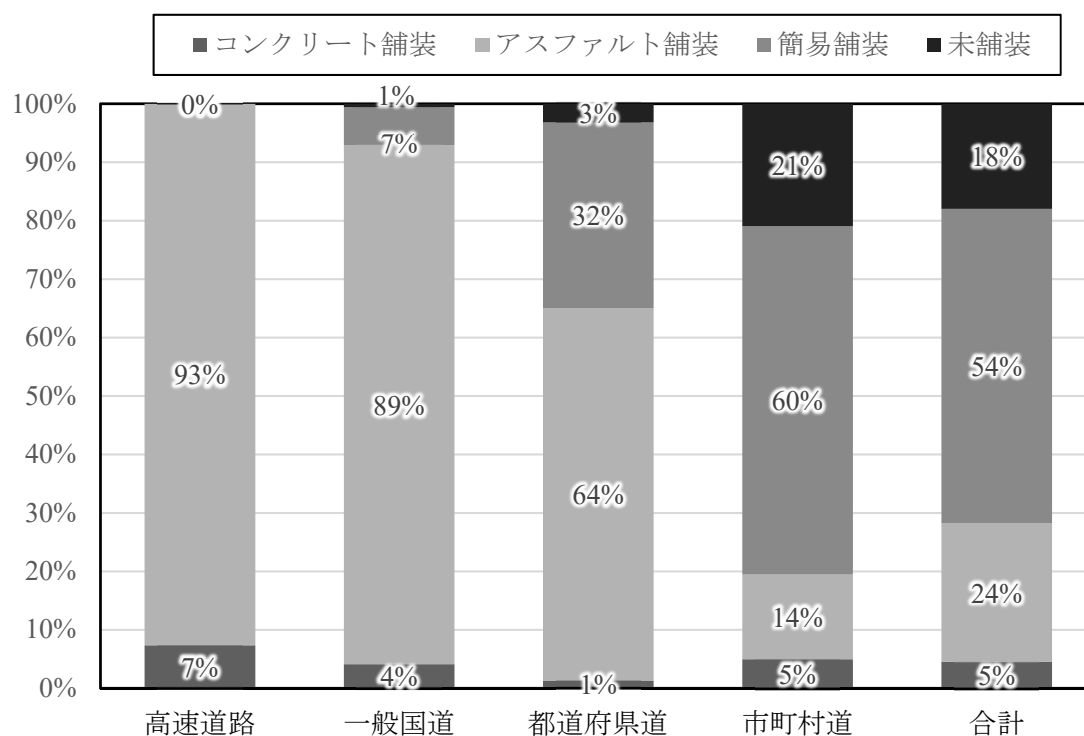


図 1.2 道路種別ごとの舗装路面の延長割合（道路統計年報⁴⁾より作成）

1.1.3. 我が国のアスファルト舗装技術の変遷と現状

我が国のアスファルト舗装技術の変遷と現状について述べる。1960年に始まった名神高速道路の建設において、我が国のアスファルト舗装技術は飛躍的な進歩を遂げた^{6), 7), 8)}。このときアスファルトプラントで製造したアスファルト混合物をアスファルトフィニッシャで敷きならし、ローラーで転圧するという施工方法が確立し、今日に至るまで、我が国の舗装工事の標準的な方法となっている^{1), 9)}。施工の機械化の進展に伴い、アスファルト舗装に使用されるアスファルト混合物は、機械化施工に適した連続粒度のアスファルト混合物が多く利用されるようになった。また、路面の平坦性を確保するためには層を重ねて施工することが有効であるため、1層を5cm程度の層厚で敷きならし、設計上の必要に応じて、数層を重ねて施工するようになった。このためアスファルト混合物の最大粒径は13mm程度が適当^{10), 11), 12)}とされ、現在では密粒度アスファルト混合物(13)が一般的に用いられている。

図 1.3 は、近年のアスファルト混合物の製造量の推移を示したものである¹³⁾。再生アスファルト混合物の製造比率は年々増加しており、2017年度実績では約75%に達している。一般に、アスファルト混合物に用いられるアスファルトは高分子材料であり、紫外線等により不可逆的に性状が変化し硬く脆くなる。そのため、再生アスファルト混合物は再生用添加剤などを用いて品質を改善し利用されている。しかしながら、再生アスファルト混合物のアスファルト舗装の供用性への影響は必ずしも明らかではなく、アスファルトが硬く脆いのであれば、アスファルト舗装の主要な破壊形態のひとつである「ひび割れ」に対しては好ましくない方向に影響を与えているであろうことも考えられる。

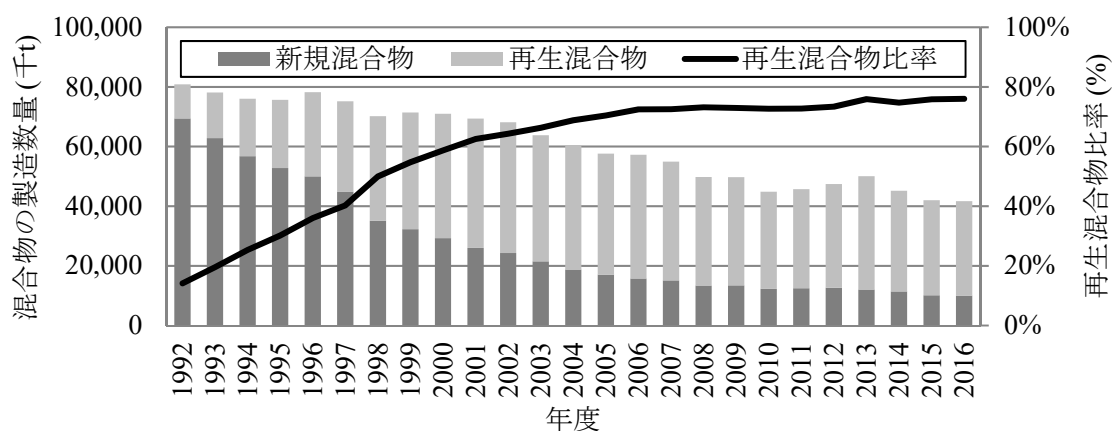


図 1.3 アスファルト混合物の製造数量の推移¹³⁾

1.1.4. 我が国の気象条件

我が国の舗装を取り巻く気象条件について述べる。日本の気象は図 1.4 に示すとおり、世界平均の降水量に比べて約 2 倍である。また、北海道や日本海側の地域では低温で降雪があることから、路面の凍結防止対策として、塩化ナトリウムの散布が行われている。1991 年以降は、スパイクタイヤが使用されなくなり、その散布量は増加している。水分と塩分は道路構造物の損傷要因であり、我が国の道路構造物は厳しい気象環境下にあることが分かる。

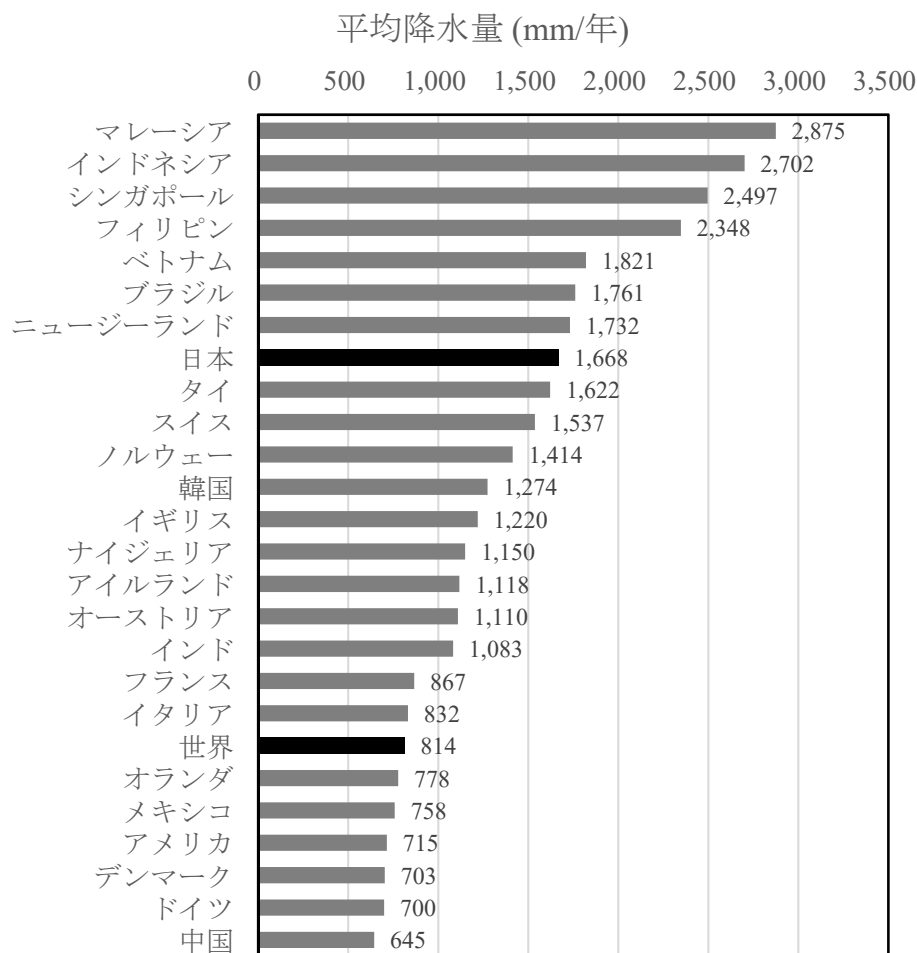


図 1.4 世界各国の降水量¹⁴⁾

1.1.5. 人口減少・高齢化社会

日本の総人口は 2008 年の 128 百万人をピークより減少しつつある。図 1.5 は日本の総人口の推移と推計を国立社会保障・人口研究所等の資料からまとめたものである。日本の総人口は 2048 年ころには 1 億人を下回り、その後も減少し、2110 年には 43 百万人と明治のころの人口と同程度になると予想されている。「生産者年齢」と呼ばれる 15～64 歳の人口は 1980 年代にピークを迎え、その後、緩やかに減少しており、人口が減少するとともに高齢化も進行している。このため、今後、税収の減少による財源の不足が避けられない情勢で、このままでは道路構造物を適切に維持管理していくのが難しくなることが指摘¹⁵⁾されている。

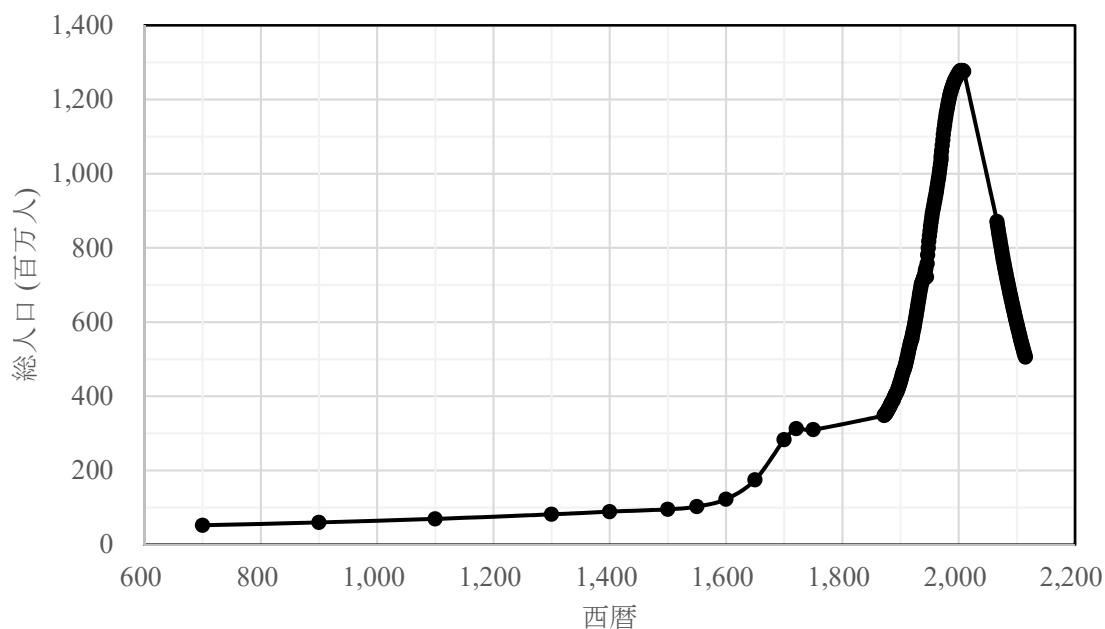


図 1.5 日本の総人口推移と推計^{16), 17), 18)}

1.2. 本研究の目的

本研究では、アスファルト舗装の現状および既往の研究を踏まえ、道路舗装の維持管理に資する表面処理工法に関する研究を行う。

道路舗装の維持管理を効率的かつ合理的に行っていくためには、舗装が破損する原因に対して有効な補修方法を見出していくことが重要である。

舗装が破損する原因は、大型車交通量の多い道路幹線等と、大型車交通量の少ない生活道路等では異なっている。幹線道路等では主にわだち掘れやひび割れなどの破損が生じるが、この原因については、これまでの多くの研究により、主にアスファルト混合物の流動や疲労破壊であることが明らかとなっており、その対処方法も確立しつつある。大型車交通量の少ない生活道路等では、主にひび割れによる損傷が生じ、最終的には**写真 1.1**に示すような亀甲上のひび割れに進展することがある。この原因としては雨水や紫外線に長期間暴露されることによるアスファルト混合物の劣化・老化であると考えられている^{19), 20)}。

一方で、大型車交通量の少ない生活道路等の維持管理の現状は、ポットホールなどの路面損傷が発見されると応急的な処置として補修を行い、ポットホールが頻発するようになり応急的な処置で対応できなくなると、アスファルト混合物層を取り換えるというのが一般的である。アスファルト混合物の劣化・老化の状態をさほど意識することなく維持管理が行われているように考えられる。

図 1.6に本研究の仮説および目的を示す。アスファルト混合物の劣化・老化を予防的工法により抑制することによって、舗装のライフサイクルコストを縮減することができ、道路舗装の効率的な維持管理に資することができるものとする。アスファルト混合物が劣化・老化する因子としては、舗装表面から雨水が浸透することや、紫外線によりアスファルト自体が劣化していくことが考えられていることから、予防的工法として、舗装の表面処理工法が有効であるとする。この表面処理工法の歴史は古く、これまでにフォグシール工法、チップシール工法、スラリーシール工法、マイクロサーフェシング工法、カーペットコートといった各種の工法が開発されてきているが、前述のとおり生活道路の維持管理に予防的工法として積極的に活用されているとは言い難い状況であり、この理由としては、表面処理工法を用いることによる管理経費の節減効果や、効果的な活用方法などが具体的かつ十分に示されていないことにあると考える。

これらのことより、本研究では、表面処理工法の有用性を定量的に説明することに取り組む。まず、フォグシール等の表面処理工法が紫外線によるアスファ

ルトの劣化を抑制する効果があることを明らかにしたい。つぎに、雨水の浸透がアスファルト混合物の疲労破壊特性に与える影響を明らかにし、表面処理工法がアスファルト混合物の疲労破壊特性を改善する効果を明らかとしたい。さらに、表面処理工法を適用すべき路面の状態を見だし、最終的には、表面処理工法が大型車交通量の少ない道路舗装の維持管理において有用であることを明らかとしていきたい。



写真 1.1 アスファルト舗装の劣化・老化による損傷²⁰⁾

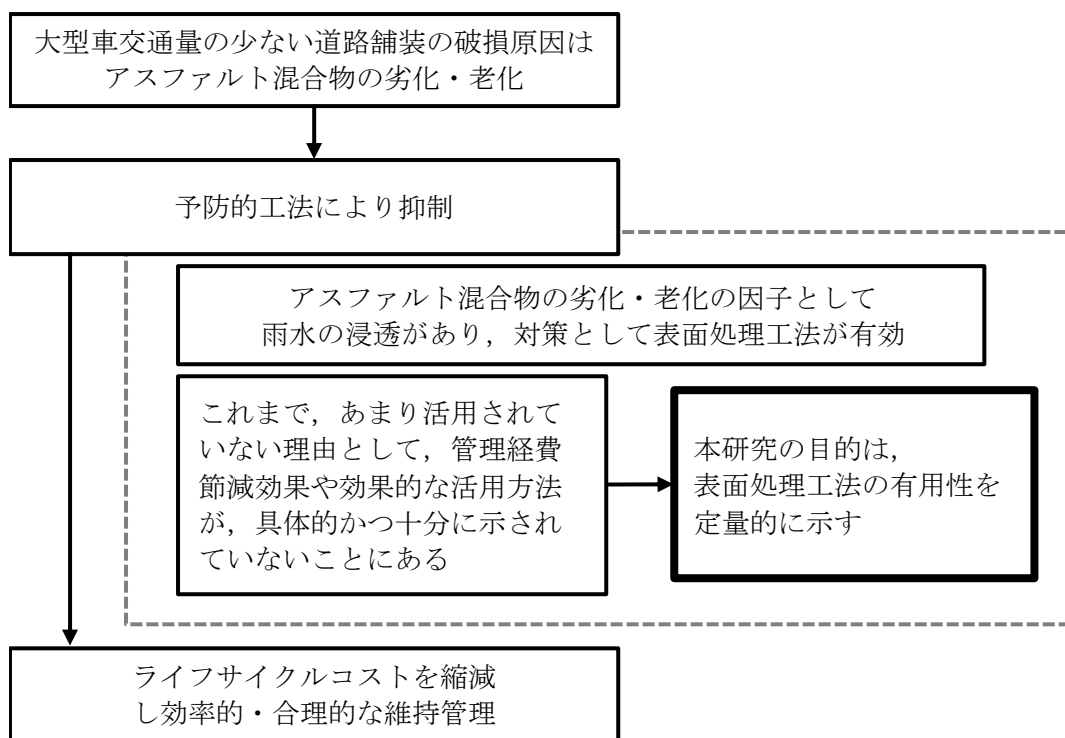


図 1.6 本研究の仮説と目的

1.3. 論文の内容と構成

本論文では研究内容を7章に分けて示した。各章の概要は次のとおりである。

第1章 序論

研究の背景、目的および本論文の内容と構成について述べている。

第2章 既往の研究

アスファルト道路舗装の破壊形態について分類整理するとともに、本研究に関連する既往の研究を総括し、現状と課題について整理している。

第3章 大型車交通量の少ない道路舗装に適した維持修繕工法の選定

大型車交通量の少ない道路舗装の破損の主要因であるアスファルト混合物層の劣化・老化に対して効果的な維持修繕工法を選定するため、資料調査に基づき既存の維持修繕工法を分類し、それらの特徴を整理している。これにより表面処理工法のひとつであるフォグシール工法が適していることを示している。フォグシール工法は、路面に水で希釈したアスファルト乳剤を薄く散布するだけの最も簡便な表面処理工法であり、小さいひび割れや表面の空隙を充填し、老化したアスファルト舗装の路面を若返らせる効果が期待できる工法である。

また、フォグシール工法に用いるアスファルト乳剤には各種のものが市販されていることから、紫外線によるアスファルト混合物の劣化を抑制する効果の観点より室内試験を実施し比較・検討している。

第4章 水を供給する曲げ疲労試験によるフォグシール工法の評価

雨水等の水分がアスファルト混合物の疲労破壊特性へ与える影響を把握するために実施した「水を供給しながらのアスファルト混合物の曲げ疲労試験」について述べている。まず、水を供給しながらのアスファルト混合物の曲げ疲労試験は一般的な試験ではないことから試験供試体の作成方法、水の供給方法等について検討している。つぎに、水を供給する場合と供給しない場合の曲げ疲労試験結果を示し、水がアスファルト混合物の疲労破壊特性へ与える影響について述べている。さらに、試験供試体にアスファルト乳剤を塗布し水を供給した場合の曲げ疲労試験結果を示し、フォグシール工法がアスファルト混合物の疲労破壊特性を改善する効果について述べている。

第5章 現場透気試験によるfogシール工法の評価

実際の道路舗装へfogシール工法を適用することを想定し、fogシール工法を適用する場所を選定することや、fogシール工法施工後にその性能を確認することを目的とする現場透気試験について述べている。道路舗装に適用する現場透気試験は一般的な試験ではないことから、試験器を試作し、試験方法や測定値の評価方法について述べている。また、実際に劣化・老化しているアスファルト舗装路面、目視で確認できない微細なひび割れが発生している箇所および各種のアスファルト混合物供試体において、fogシール工法の施工前後で現場透気試験を実施し、fogシール工法がアスファルト舗装の透気性を改善する効果について述べている。

第6章 fogシール工法の長期供用性調査およびライフサイクルコスト分析

実際にfogシール工法が施工された道路舗装にて実施した路面性状調査等の長期供用性調査結果について述べている。また、水を供給する曲げ疲労試験結果に基づきfogシール工法によるアスファルト舗装の延命効果を試算し、ライフサイクルコストの縮減効果について述べている。

第7章 結論

各章で得られた知見を総括して本研究の結論を取りまとめている。

以上の記した各章の位置づけと全体のフローチャートを示すと図 1.7 のとおりである。

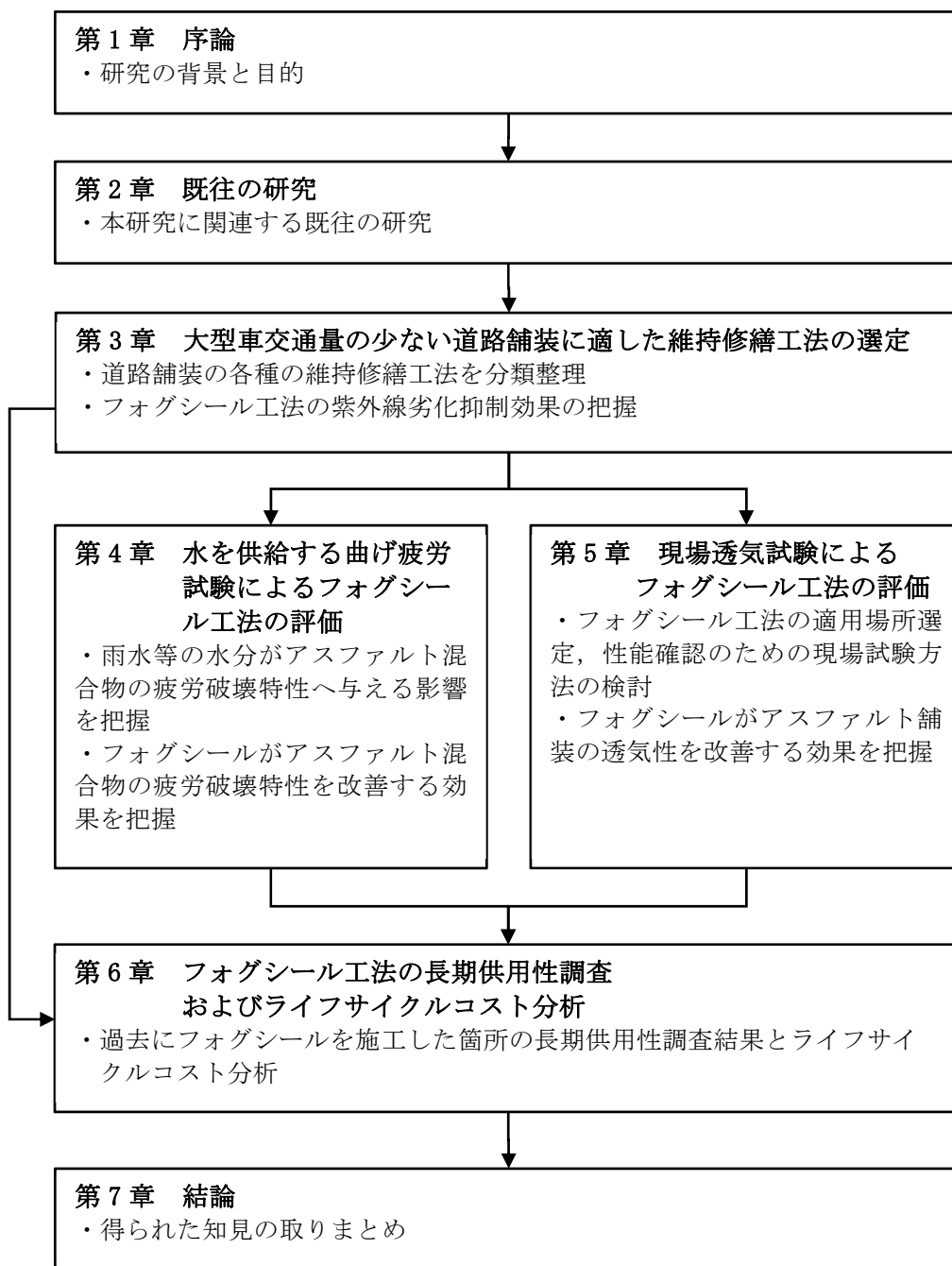


図 1.7 本研究のフローチャート

参考文献

1. (公社)日本道路協会：舗装設計施工指針，丸善，2006.
2. 多田宏行：語り継ぐ舗装技術－道路舗装の設計・施工・保全－，鹿島出版会，2000.
3. (公社)日本道路協会：簡易舗装要綱，1964.
4. 国土交通省：道路統計年報 2016.
5. 松野三朗，谷本誠一：アスファルト混合物の配合とその供用性－主として幕張試験舗装の観測結果－，土木技術資料，Vol.13, No.3, pp.11-17, 1971.
6. 高橋敏五郎：名神高速道路山科舗装記(1)，道路建設，1961.5.
7. 高橋敏五郎：名神高速道路山科舗装記(2)，道路建設，1961.6.
8. 高橋敏五郎：名神高速道路山科舗装記(3)，道路建設，1961.7.
9. (公社)日本道路協会：舗装施工便覧，丸善，2006.
10. (公社)日本道路協会：アスファルト舗装要綱(昭和 25 年版)，1950.
11. (公社)日本道路協会：アスファルト舗装要綱(昭和 42 年版)，1967.
12. 昆布谷竹郎：アスファルト舗装施工法の変遷，土木学会論文集，No.384/V-7, pp.11-19, 1987.
13. (公社)日本アスファルト合材協会：平成 18 年度アスファルト合材の現況，アスファルト合材，No.84, 2007.
14. (一財)国土技術研究センター：www.jice.or.jp/knowledge/japan/commentary04， 2019.1 確認.
15. 国土交通省：国土交通白書 2015, p.1, 2015.
16. 社会工学研究所編：『日本列島における人口分布の長期時系列的分析：時系列推計と要因分析』，社会工学研究所，1974.
17. 総務省統計局：日本の長期統計系列，男女別人口・人口増減及び人口密度，<http://www.stat.go.jp/data/chouki/index.html>，2019/1 確認.
18. 国立社会保障・人口問題研究所：出生中位(死亡中位)推計，平成 29 年推計，www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2017/db_zenkoku2017/g_tables/pp29gts01.htm，2019/1 確認.
19. 笠原靖，植村正，牛嶋幸司郎：供用中におけるアスファルト舗装の老化の研究，石油学会誌，18 卷，1 号，1975.
20. (公社)日本道路協会：舗装点検必携，丸善，2017.

2. 既往の研究

我が国は人口減少・高齢化社会が進行する厳しい財政的制約の下で、老朽化する道路舗装を適切に維持管理することが求められている。

そのため、維持補修の少ない長寿命の舗装の開発することや、予防的修繕工法により寿命を延命化することが求められており¹⁾、これまでに数多くの研究が行われてきている。

本章では、アスファルト道路舗装の破壊形態について分類整理するとともに、本研究に関連する既往の研究を総括し、現状と課題について整理する。

2.1. アスファルト舗装の破損形態とその発生原因に関する研究

アスファルト舗装は、供用開始直後から車両の通行や雨水、紫外線などの影響によって、わだち掘れやひび割れなどの形態で破損し、徐々にその性能が低下していくものである²⁾。アスファルト舗装の破損は、発生形態別、発生原因別に分類するのが一般的である。発生形態別の分類は、1924年にHubbard³⁾が分類表を発表してから、Vallerge⁴⁾、Hveemら⁵⁾、Monismith⁶⁾などによって様々な分類方法が提案された。SHRPでは、“Distress Identification Manual”⁷⁾として破壊のカタログを作成している。

我が国でも破損の種類、発生原因に応じて分類している^{8), 9)}。表 2.1 に我が国のアスファルト舗装の損傷の種類を示す。このうち、ひび割れやわだち掘れといった損傷は、1960年ごろより大きな課題であるとされ¹⁰⁾、アスファルト混合物の粒度や配合設計方法が検討されてきた^{11), 12)}。

表 2.1 アスファルト舗装の損傷の種類⁹⁾

損傷の種類		発生原因などによる細分類
ひび割れ	線状のひび割れ	疲労ひび割れ
		わだち割れ
		凍上によるひび割れ
	亀甲状のひび割れ	路床・路盤の支持力低下（不足）によるひび割れ
		融解期の路床・路盤の支持力低下によるひび割れ
		路床・路盤の沈下によるひび割れ（不等沈下によるひび割れ）
		アスファルト混合物の劣化・老化によるひび割れ
		基層の剥離に伴うひび割れ
	その他のひび割れ	施工継目のひび割れ
		リフレクションクラック
		温度応力ひび割れ
		構造物周辺のひび割れ
	わだち掘れ	路床・路盤の圧縮変形によるわだち掘れ
アスファルト混合物の塑性変形によるわだち掘れ		
アスファルト混合物の摩耗によるわだち掘れ		
縦断方向の凹凸	単路部等における縦断方向の凹凸	
	交差点部等における縦断方向の凹凸（コルゲーション）	
その他	寄り	
	くぼみ	
	すべり抵抗値の低下（ポリッシング）	
	ポーラスアスファルト舗装の骨材飛散	
	ポーラスアスファルト舗装の空隙づまり，空隙つぶれ	
	ポーラスアスファルト舗装の部分的な寄り（側方流動）	
	剥離	
緊急補修が必須の損傷	ポットホール	
	段差	

(1) ひび割れ

アスファルト舗装のひび割れは、アスファルト混合物の疲労破壊によるものとその他によるものに分けられる。

疲労ひび割れは、小さな応力が繰返し作用することで、アスファルト混合物に疲労のダメージが蓄積し発生するひび割れをいう。アスファルト舗装の設計において、この疲労ひび割れに対する抵抗性は必須の性能のひとつとされている^{13),14),15)}。現在の舗装の設計では、交通荷重の繰返しによって、アスファルト混合物層の下面に生じる引張りひずみにより混合物がひび割れると考えられている。このようなひび割れは、路床、路盤の支持力が小さく、アスファルト混合物層厚が比較的薄い場合に生じ、アスファルト安定処理路盤を用いるような混合物層が厚い舗装では生じにくいとされている¹⁶⁾。一方、混合物層厚が比較的厚い舗装では、車輪走行位置付近で道路縦断方向に舗装表面から下方に向かって成長する縦表面ひびわれが生じると言われている^{17),18)}。その発生メカニズムは明らかではないが、松野らは路面が高温となりアスファルトのスティフネスが低下した場合に舗装表面の載荷縁部に大きな引張りひずみが生じることによって発生するという推定を行っている^{19),20),21),22)}。またバインダの劣化が関与しているとの研究もある²³⁾。

その他のひび割れとしては温度ひびわれがある。アスファルト混合物の温度が急激に低下し、体積変化によって生じる引張りひずみ、引張り応力が破壊基準値を超えることによって舗装表面から発生するひびわれである。温度ひびわれは、一般に寒冷地域で、交通量が少なく、アスファルト混合物の厚さが薄い道路に多く発生する。通常20～30m間隔で発生し、供用年数とともにひび割れ間隔が狭くなる²⁴⁾。我が国で温度ひびわれが発生するのは、ほぼ北海道地方に限られる。

アスファルト舗装のひびわれは、騒音の増加や乗り心地の悪化などにつながり、深刻なひび割れを放置するとポットホールが発生するなど走行安全性を損なう損傷に発達するとともに、舗装の耐久性に深刻なダメージを与えることがある。しかし、ひびわれの発生要因やメカニズムは非常に複雑で、盛んに研究が行われているものの、いまだアスファルト混合物のひびわれ抵抗性を評価する方法が確立されるには至っていない。

(2) わだち掘れ

わだち掘れは、車輪走行位置においてアスファルト舗装の路面に帯状の凹部が生じる現象であり、原因別に分類すれば、アスファルト混合物の変形によるもの、タイヤチェーンなどによるアスファルト混合物の摩耗によるもの、路盤以下の部分の圧密沈下によるものに分けられる²⁴⁾。幹線道路ではアスファルト混合物層厚が厚いことから、アスファルト混合物の変形によるもの、タイヤチェーンなどによるアスファルト混合物の摩耗によるものが多い²⁵⁾。

アスファルト混合物の変形によるものは、表層、基層などのアスファルト混合物からなる層が車輪荷重によって粘弾性的な流動や圧縮変形を起こし、車輪荷重が除荷後も変形が回復せずに永久変形として残存するものである。主に路面温度が高温となる夏季に進行する。また、舗装の表面に近いほど日中の温度上昇が大きくなるため永久変形が大きいとされる²⁶⁾。

摩耗によるわだち掘れは、タイヤチェーンを装着したタイヤにより舗装表面が削り取られるもので、積雪寒冷地域の特有の現象である。かつては摩耗したアスファルト混合物の粉塵が問題となっていたが、近年ではスパイクタイヤの使用禁止によって摩耗によるわだち掘れの発生は少なくなっている。

このように、わだち掘れは、従来から盛んに研究が行われてきており、現在ではホイールトラッキング試験により、アスファルト混合物の性能を評価することが一般的に行われている²⁷⁾。

2.2. 疲労ひび割れに関する研究

アスファルト舗装の疲労ひび割れに関する既往の研究では、主に引張りひずみの大きさと破壊に至るまでの載荷回数との関係を室内疲労試験によって求めることが行われている。

アスファルト舗装に対して疲労破壊という概念を初めて指摘したのはHveemらであるとされる²⁸⁾。以来、アスファルト混合物の疲労挙動の解明を目的として、様々な方式の疲労試験が開発されてきた。

アメリカでは、DeaconとMonismithによって開発された4点曲げ疲労試験が多く行われてきた^{29),30)}。またヨーロッパでは、台形供試体を用いた2点曲げ疲労試験も行われている³¹⁾。これら供試体は繰返したわみを与える試験で、ひずみ制御あるいは応力制御により試験が行われている。一方、供試体に作用する応力やひずみが供試体の横断面に一様ではなく疲労プロセスの厳密な解析やモ

デル化が困難であるとされている³²⁾。

関節引張り試験装置を用いた疲労試験は、供試体の作製が容易であること、実路から採取したコアが使用できること、比較的短時間に試験が行えることなどの特徴から、簡易な疲労試験として Collop ら^{33), 34)}および Roque ら³⁵⁾によって検討された。しかし、試験中に供試体に変形が生じるため破壊に至るまでの載荷回数が他の試験に比べて小さいことなどが指摘されている³⁶⁾。

push-pull 一軸疲労試験は、Lytton ら³⁷⁾が取り組んでおり、SHRP に採用されている。Di Benedetto ら³⁸⁾や Kim ら^{39), 40)}によって改良も進められている。この試験は供試体中央部断面に一樣なひずみが生じることおよび低ひずみでの制御が可能であることなどの特徴がある^{41), 42), 43), 44), 45)}。

このほか、Pell らによって開発された回転片持ちばりの疲労試験^{46), 47)}、Dijk らによって開発されたホイールトラッキング疲労試験⁴⁸⁾、フランスの LCPC で開発された 5 点曲げ疲労試験⁴⁹⁾などがある。

我が国では、4 点曲げ疲労試験が多く行われており⁵⁰⁾、舗装調査・試験法便覧⁵¹⁾では、つくば舗装技術交流会による試験精度の向上に関する検討結果⁵²⁾に基づき標準的な試験方法を定めている。

このようにアスファルト混合物の疲労試験には多くの方法が提案されているが試験方法の違いによって得られる疲労寿命に大きな違いがあるとの研究結果もある³⁶⁾。また、異なる温度でアスファルト混合物の疲労寿命を測定すると疲労試験をひずみ制御で行うか応力制御で行うかによって逆の結果が得られる。例えばひずみ制御で試験を行う場合、高温（スティフネスが小さい）の方が破壊に至るまでの回数が大きいのに対し、応力制御では低温（スティフネスが大きい）の方が破壊に至るまでの回数が大きくなる⁵³⁾。このため、アスファルト混合物の疲労破壊基準式を考える場合、ひずみまたは応力だけでは評価することができず、ひずみとスティフネス⁵⁴⁾、あるいは、ひずみと応力⁵⁵⁾によって破壊に至るまでの載荷回数を整理している。

一方、縦表面ひびわれは発生原因が明らかではないが⁵⁶⁾、路面とタイヤの間に働く水平方向の力によるとする Molenaar らの説^{57), 58)}、荷重が取り除かれた後の残留応力によるとする Hugo らの説^{59), 60)}、タイヤ縁部に発生する引張ひずみによるとする松野らの説^{61), 62), 63), 64)}などの研究がなされてきている。またこれらの現象は弾性解析によって説明することができないため、アスファルト混合物の粘弾性的な特性によって説明しようとする試みが行われており載荷時にアスファルト混合物の粘性要素によって失われる散逸エネルギー^{65), 66), 67), 68), 69)}または散逸クリープひずみエネルギー^{70), 71), 72), 73), 74), 75)}の累積に起因するアス

ファルト混合物の疲労破壊とする説がある。

2.3. アスファルトの劣化・老化に関する研究

アスファルト混合物は紫外線等の影響により劣化・老化するものである⁷⁶⁾。アスファルト混合物は5%程度のアスファルトにより骨材を結合しており、その力学的特性はアスファルトの性状に大きく依存していることからアスファルトの劣化・老化についての研究も多い^{77), 78), 79), 80)}。アスファルトは劣化すると一般に針入度や伸度が減少し軟化点が上昇する。特に問題とされているのが、針入度が極端に低下しアスファルトが脆化した場合と考えられている。

また、再生アスファルト混合物では、このような特性をもつアスファルトを繰返し利用していることから、再生されたアスファルト混合物と新規のアスファルト混合物の性能に違いあるいは供用性能などに着目した研究も多い^{81), 82)}。

アスファルト混合物の供用中に生じる劣化については、1967年に国道16号線幕張地区で行われた幕張試験舗装にて調査されている^{83), 84), 85), 86)}。ここでは実路で供用された舗装について、表層混合物のアスファルト性状と舗装の破損について検証され、残留安定度が40以下、または15℃伸度が10cm以下になった場合に、ひび割れ率が急速に増加するが、アスファルト量の変化や混合物の種類の違いを考慮すると伸度が10cm以下になっても舗装のひび割れは必ずしも発生するとは限らないことが述べられている。また、新たな破損形態として、車両通過位置での舗装表面に生じた縦ひび割れについても報告されている。

2.4. 予防的工法とアセットマネジメントに関する研究

舗装のストックが増大した今日、修繕が必要となる舗装の量が膨大になることに加えて、修繕工事に伴う道路の交通渋滞をはじめとする環境問題も深刻であることから、膨大な道路のストックを限られた予算や人員で効率的に維持管理してことが求められている。このため、ライフサイクルコストの概念の導入やアセットマネジメントなど新たな管理手法に関する研究やシステム構築に向けた研究が積極的に行われている^{87) ~ 95)}。

ライフサイクルコストを縮減するためには、舗装の性能が低下する初期段階での維持および修繕により、性能低下の速度を遅らせ、本格的な打換え工事な

どの時期をなるべく遅らせることが有効であると考えられており、「舗装の構造に関する技術基準・同解説」²⁷⁾においても、施工及び管理にかかる費用等を総合的に勘案して有効である場合に予防的工法を積極的に採用することが示されている。

一方、道路舗装の補修工法や補修材料は多くの種類があるが、それらの補修方法の期待される効果を定量的に把握することが重要な課題となっている。補修方法の期待される効果を算定する手法には、過去の経験から統計的に算出するなどの研究が行われているが⁹⁶⁾、新たな補修材料や統計処理できるほど実施されていない補修工法については対応できないものと考えられる。そのため、使用する材料特性などから耐用年数や舗装の状態の経時的な変化を推定し、耐用年数を算定することも重要であると考えられる。

2.5. 道路橋床版分野の研究

舗装と同様に交通荷重の繰返し作用を受ける道路橋の床版においても、その劣化を予測する研究や維持管理を高度化するための研究が活発に行われている^{97), 98)}。松井らは床版の耐久性に関する研究^{99), 100)}を行っており、コンクリート床版ではひび割れ部に雨水が浸入すると、ひび割れ面における摩耗や骨材まわりの付着切れが促進され、コンクリート内の材料組織を崩壊させる骨材化現象が生じるとしている。この骨材化現象は、荷重走行位置に確認されることが多く、この現象に伴って床版の圧縮側コンクリートは抵抗力を失い、曲げ耐荷力、せん断耐荷力ともに減少する。そして、床版としての機能が大きく損なわれ、その寿命は1/50~1/80へと大幅に短縮することを述べている。舗装も床版と同様に繰返しの交通荷重を受けることから、雨水によって大幅にその寿命は短縮するものと考えられる。

参考文献

1. 国土交通省：これからの舗装マネジメントについて，国土交通省ホームページ，
<http://www.mlit.go.jp/common/001145725.pdf>, 2018/1 確認.
2. (公社)日本道路協会：舗装の維持修繕ガイドブック 2013, 2013.
3. Hubbard, P. : Research Work to improve Asphalt Paving Mixture, Municipal and County Engineering, No.11, 1924.
4. Vallerger, B.A. : On Asphalt Pavement Performance, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.24, 1955.
5. Hveem, F.N. : Closing Statement to 1st ICSDAP, 1962.
6. Monismith, C.L. : Moderator's Report of Session III of 3rd ICSDAP, Vol.1, 1972.
7. SHRP : Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Studies, National Research Council, SHRP-LTPP/FR-90-001, 1990.
8. (公社)日本道路協会：舗装の維持修繕ガイドブック 2013, p.91, 2013.
9. (公社)日本道路協会：舗装点検必携，丸善，2017.
10. 多田宏行：語り継ぐ舗装技術－道路舗装の設計・施工・保全－，鹿島出版会，2000.
11. 松野三朗，谷本誠一：アスファルト混合物の配合とその供用性－主として幕張試験舗装の観測結果－，土木技術資料，Vol.13, No.3, pp.11-17, 1971.
12. 阿部頼政：アスファルト混合物の諸性質と配合設計，アスファルト，No.100, 1975.
13. (公社)日本道路協会：舗装設計施工指針，丸善，2006.
14. (公社)日本道路協会：舗装設計便覧，丸善，2006.
15. (公社)土木学会：舗装標準示方書，丸善，2007.
16. 寺田剛，吉田武，東嶋奈緒子，池田拓哉：アスファルト舗装の修繕に関する実態調査，道路建設，13/2, pp.72-76, 2001.2.
17. 川島義昭，福島公，三好康夫：高速道路におけるアスファルト舗装のひびわれ－実態と発生機構に関する考察－，昭和 58 年度日本道路公団試験所報告，pp.67-79, 1984.
18. 野上幸治，高橋哲躬：アスファルト舗装に関する試験調査法－ひび割れ測定法－，アスファルト，No.147, pp.26-31, 1986.
19. 松野三朗：わだち割れ(1)，舗装，pp.3-8, 1984.2.
20. 松野三朗：わだち割れ(2)，舗装，pp.14-21, 1984.3.
21. 西澤辰男，松野三朗：アスファルト舗装の車輪走行位置に生ずる表面ひびわれについて，土木学会論文集，No.478/V-21, pp.71-80, 1993.
22. Himeno, K.Watanabe, T. and Maruyama, T. : Estimation of the Fatigue Life of Asphalt Pavement, Proceedings of 6th International Conference of the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, USA, pp.272-289, 1987.
23. 金井利浩，岡部俊幸，東滋夫：アスファルトの劣化を考慮した縦表面ひび割れに関する一検討，第 23 回日本道路会議，pp.490-491, 1999.
24. 日本道路協会：道路用語辞典(第 3 版)，丸善，1997.

25. 伊藤豪誠, 近藤陽, 池田拓哉 : アスファルト混合物の動的安定度の目標値設定手法の提案土木技術資料, 31-1, pp.30-35, 1989.
26. 阿部頼政 : アスファルト舗装の破壊形態とその原因, ペテロテック, Vol.2, No.7, pp.618-622, 1979.
27. 日本道路協会 : 舗装の構造に関する技術基準・同解説, 2001.9.
28. Hveem, F.N. and Carmany, R.M. : The Factors Underlying the Rational Design of Pavements, HRB Research Record, No.28, pp.101-136, 1948.
29. Deacon, J.A. : Fatigue of Asphalt Concrete, Doctoral Dissertation, University of California, Berkeley, 1965.
30. Santucci, L.E. and Schmidt, R.J. : The Effect of Asphalt Properties on the Fatigue Resistance of Asphalt Paving Mixture, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.38, pp.65-97, 1969.
31. Van Dijk, W. and Visser, W. : The Energy Approach for Pavement Design, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.46, pp.1-40, 1977.
32. Soltani, A. and Anderson, D.A. : New Test Protocol to Measure Fatigue Damage in Asphalt Mixture, International Journal of Road Materials and Pavement Design, Hermes Lavoisier, Paris, France, Vol.6, No.4, pp.485-514, 2005.
33. Read, J. M. and Collop, A. C. : Practical Fatigue Characterization of Bituminous Paving Mixtures, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.66, pp.74-108, 1997.
34. British Standard Institution : Method for the Determination of the Fatigue Characteristics of Bituminous Mixtures Using Indirect Tensile Fatigue, Draft for Development ABF, 1995.
35. Roque, R., Ruttlar, W. G., Ruth, B. E., Tia, M., Dickison, S. W. and Reid, B. : Evaluation of SHRP Indirect Tension Tester to Mitigate Cracking in Asphalt Pavements and Overlays, Final Report to the Florida Department of Transportation, 1997.
36. Di Benedetto, H., de La Roche, C., Baaj, H., Pronk, A., and Lundstrom, R. : Fatigue of Bituminous Mixtures, RILEM TC i82-PEB 'Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials', Materials and Structures, Vol.37, pp.202-216, Apr., 2004.
37. Lytton, R. L., Uzan, J., Fernando, E. G., Roque, R., Hiltunen, D. and Stoffels, S. M. Development and Validation of Performance Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes, Strategic Highway Research Program, Report No.SHRP-A-357, National Research Council, Washington, DC, 1993.
38. Di Benedetto, H., Soltani, A. and Chaverot, P. : Fatigue Damage for Bituminous Mixtures : A Pertinent Approach, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.65, pp.142-158, 1996.
39. Kim, Y. R., Lee, H. and Little, D.N. : Fatigue Characterization of Asphalt Concrete using Viscoelasticity and Continuum Damage Theory, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.66, pp.520-569, 1997.
40. Little, D. N., Lytton, R. L., Williams, D. and Kim, R. : An Analysis of the Mechanism of Micro damage Healing Based on the Application of Micromechanics First Principles of

- Fracture and Healing, Journal of the Associations of Asphalt Paving Technologists, Vol.68, pp.501-542, 1999.
41. 向後憲一, 姫野賢治: アスファルト混合物の一軸疲労試験, 土木学会第 62 回年次学術講演会概要集, 第 V 部, V-292, 2007.
 42. 向後憲一, 姫野賢治: 載荷波形および休止時間の違いがアスファルト混合物の疲労挙動に及ぼす影響, 土木学会舗装工学論文集, Vol.12, pp.83-89, 2007.
 43. Kogo, K. and Himeno, K. : The Effects of Different Waveforms and Rest Period in Cyclic Loading on the Fatigue Behavior of the Asphalt Mixtures, Sixth RILEM International Conference on Cracking in Pavements, Taylor & Francis, pp509-517, 2008.
 44. 向後憲一, 和地敬, 姫野賢治: アスファルト混合物の疲労限界に関する検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会概要集, 第 V 部, V-37, 2008.
 45. 向後憲一, 姫野賢治: 低ひずみ領域でのアスファルト混合物の疲労挙動, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp.526-532, 2008.
 46. Pell, P. S. and Tylor, L. F. : Asphaltic Road Materials in Fatigue, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.38, pp.371-422.
 47. Pell, P. S. and Cooper, K. E. : The Effect of Testing and Mix Variables on the Fatigue Performance of Bituminous Materials, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.44, pp.1-37, 1977.
 48. Van Dijk, W. : Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.44, pp.38-74, 1975.
 49. Houel, A. and Arnaud, L. : A Five Point Bending Test for Asphalt Cracking on Steel Plates, Sixth RILEM International Conference on Cracking in Pavements, Taylor & Francis, pp.261-270, 2008.
 50. つくば舗装技術交流会: 疲労試験に関する検討, TPT Report, No.4, pp.51-69, 2004.
 51. (社)日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧, 丸善, 2006.
 52. つくば舗装技術交流会: 疲労試験に関する検討, TPT Report, No.4, pp.23-43, 2005.
 53. 丸山障彦, 中村健, 雑賀義夫: アスファルト混合物の疲労特性, アスファルト, Vol.44, NO.208, 2001.
 54. Claessen, A. I. M., Edwards, J. M., Sommer, P. and Uge, P. : Asphalt Pavement Design, The Shell Method, Proceedings of Fifth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, pp.37-94, 1977.
 55. 丸山瞳彦, 渡辺隆, 吉原一彦: アスファルト混合物の疲労破壊包絡線, 土木学会論文報告集, No.306, pp.71-78, 1981.
 56. Rolt, J. : Top-down cracking myth or reality, The World Bank Regional Seminar on Innovative Road Rehabilitation and Recycling Technologies, Amman, Jordan, 2000.
 57. Molenaar, A. A. A. : Fatigue and Reflection Cracking due to Traffic Loads, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 53, pp.440-474, 1984.
 58. Gerritsen, A. H., Van Gurp, C., Vander Heide, J., Molenaar, A. and Pronk, A. : Prediction and Prevention of Surface Cracking in Asphaltic Pavements, Proceedings of the 61h International Conference on Asphalt Pavements, pp.379-391, 1987.

59. Hugo, F. and Kennedy, T. W. : Surface Cracking of Asphalt Mixtures in Southern Africa, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.54, pp.454-501, 1985.
60. Malan, G. W., Straus, P. J. and Hugo, F. : A Field Study of Premature Surface Cracking in Asphalt, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.58, pp.143-162, 1989.
61. 松野三朗：わだち割れ(1), 舗装, pp.3-8, 1984.2.
62. 松野三朗：わだち割れ(2), 舗装, pp.14-21, 1984.3.
63. 西湊辰男, 松野三朗：アスファルト舗装の車輪走行位置に生ずる表面ひびわれについて, 土木学会論文集, No.478/V-12, pp.71-80, 1993.
64. 松野三朗, 内田喜太郎, ひびわれ抵抗性能, アスファルト, Vol.44, No.208, 2001.
65. 姫野賢治, 渡辺隆, 丸山瞳彦：低スティフネス状態におけるアスファルト混合物の疲労破壊特性に関する研究, 土木学会論文集, No.366, pp.143-151, 1986.
66. 姫野賢治：アスファルト舗装の疲労ひびわれ破壊に関する基礎的研究, 博士論文, 東京工業大学, 1986.
67. Himeno, K., Watanabe, T. and Maruyama, T. : Estimation of the Fatigue Life of Asphalt Pavement, Proceedings of the 6th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, pp.272-289, 1987.
68. Rowe, G. M. and Brown, S. F. : Fatigue Life Prediction Using Visco-Elastic Analysis, Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, pp.1109-1122, 1997.
69. Daniel, J. S., Bisirri, W. and Kim, Y. R. : Fatigue Evaluation of Asphalt Mixture Using Dissipated Energy and Viscoelastic Continuum Damage Approaches, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.73, 2004.
70. Roque, R., Birgisson, B., Sangpetngam, B. and Zhang, Z. : Hot Mix Asphalt Fracture Mechanics, A Fundamental Crack Growth Law for Asphalt Mixtures, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.71, pp.310-344, 2002.
71. Roque, R., Birgisson, B., Drakos, C. and Dietrich, B. : Development and Field Evaluation of Energy-Based Criteria for Top-down Cracking Performance of Hot Mix Asphalt, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.73, 2004.
72. Kim, B. and Roque, R. : Evaluation of Healing Property of Asphalt Mixture, Preprint of Transportation Research Board 85th Annual Meeting, Washington D.C., 2006.
73. Kim, J., Roque, R. and Birgisson, B. : Interpreting Dissipated Energy from Complex Modulus Data, International Journal of Road Materials and Pavement Design, Hermes Lavoisier, Paris, France, Vol.7, No.2, pp.223-245, 2006.
74. Birgisson, B., Wang, J., Roque, R. and Sangpetngam, B. : A Viscoelastic Displacement Discontinuity Method for Analysis of Pavements with Cracks, International Journal of Road Materials and Pavement Design, Hermes Lavoisier, Paris, France, Vol.7, No.4, pp.417-455, 2006.
75. Wang, J., Birgisson, B. and Roque, R. : Effects of Viscoelastic Stress Redistribution on the Cracking Performance of Asphalt Pavements, Journal of the Association of Asphalt Paving

- Technologists, Vol.75, pp.637-675, 2006.
76. (公社)日本道路協会：舗装の維持修繕ガイドブック 2013, 2013.
 77. 菅原照雄：アスファルト混合物の物性，土木学会論文集，第 348 号，V-1, pp.27-36, 1984.8.
 78. 安崎裕，片倉弘美，高木信幸：再生加熱アスコンの供用性評価，土木技術資料 31-9, pp.48-53, 1989.
 79. 竹下春見，南雲貞夫：現場で使用されている舗装用アスファルト A, B, C 型についての室内試験結果，土木技術資料, pp.5-7, 1960.
 80. P. Hubbard and H. Gollomb：Hardening of Asphalt with Relation to Development Pavements, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.9, pp.165-194, 1937.
 81. 和田広海，丸山暉彦，鈴木秀輔：再生アスファルト混合物の長期供用性に関する研究，土木学会年次学術講演会, No.59, 2004.9.
 82. 平川一成，寺田剛，佐々木巖，久保和幸：高針入度のアスファルトを用いた再生アスファルト混合物の適用性に関する検討，土木学会年次学術講演会, No.70, 2015.9.
 83. 松野三朗，谷本誠一：幕張試験舗装の概要と供用状況について，土木技術資料, pp.13-23, 1970.
 84. 飯島尚，小島逸平，寺島憲一：アスファルト舗装用混合物の配合設計に関する幕張試験舗装の解析，土木技術資料, pp.34-39, 1982.12.
 85. 飯島尚，岩崎尚義：幕張試験舗装におけるアスファルトの老化と供用性，土木技術資料, pp.117-122, 1985.
 86. 小島逸平，猪股和義：幕張試験舗装調査結果，第 15 回日本道路会議, pp.267-268, 1983.
 87. 小林潔司：アセットマネジメントの重要性と国際化対応，道路建設, pp.17-20, 2011.
 88. 松島格也，小林潔司，貝戸清之：京都モデルによる地方自治体における舗装マネジメントシステム，日本道路会議, p.3003, Vol.31, 2015.
 89. 笠原 篤：舗装マネジメントシステムからアセットマネジメントシステムへ，土木学会舗装工学論文集，第 10 巻, 2005.12.
 90. 藤崎哲朗，村尾裕二：東京都道路アセットマネジメントの取組，第 26 回日本道路会議，第 26 巻, 2005.
 91. Potucek, J. and Lang; J：Road Network Asset Management through Integration and Enhancements of Existing Systems, ICMP, 2004.
 92. 谷口聡，伊藤正秀，野村敏明，阿部忠行：舗装データベースを用いた供用性曲線作成手法に関する研究，舗装工学論文集，第 8 巻, pp.99-106, 2003.12.
 93. (公社)日本道路協会：舗装設計便覧, 2006.2.
 94. 小林潔司，吉兼秀典，三浦真紀，久保和幸，高木干太郎，小梁川雅，橋本修治：道路舗装の長寿命化～これからの維持管理のあり方と長寿命化技術～，道路建設, No.737, 2013.3.
 95. 小林潔司，貝戸清之，大井明，Nguyen Dinh THAO，北浦直樹：データ欠損を考慮した複合的隠れマルコフ舗装劣化モデルの推計，舗装工学論文集，第 21 巻, 2016.
 96. 榊原正倫，戸塚博文，池田省吾：加熱薄層舗装のアセットマネジメントによる適応性について，日本道路会議, No.3012, 2011.

97. 阿部忠：道路橋 RC 床版の疲労寿命予測および健全度評価に関する一考察，構造工学論文集, Vol.61A, 2015.3.
98. 森川英典：劣化予測技術の現状と課題，コンクリート工学, Vol.42, No.5, pp.52-62, 2004.5.
99. 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集 9-2, pp.627-632, 1987.
100. 松井繁之編著：道路橋床版－設計・施工と維持管理－，森北出版株式会社, p.191, 2007.

3. 大型車交通量の少ない道路舗装に適した

維持修繕工法の選定

3.1. 概要

本章では、大型車交通量の少ない道路舗装の破損の主要因であるアスファルト混合物層の劣化・老化に対して効果的な維持修繕工法を選定するため、資料調査に基づき既存の維持修繕工法を分類し、それらの特徴を整理している。これにより表面処理工法のひとつであるフォグシール工法が適していることを示している。フォグシール工法は、路面に水で希釈したアスファルト乳剤を薄く散布するだけの最も簡便な表面処理工法であり、小さいひび割れや表面の空隙を充填し、老化したアスファルト舗装の路面を若返らせる効果が期待できる工法である。また、フォグシール工法に用いるアスファルト乳剤には各種のものが市販されていることから、紫外線によるアスファルト混合物の劣化を抑制する効果の観点より室内試験を実施し比較・検討している。

3.2. 舗装の維持修繕工法の種類と分類

舗装の維持修繕の方法は、修繕工法と維持工法に分けて整理されることが一般的である¹⁾。修繕工法は、維持工法で不経済もしくは十分な回復効果が期待できない場合に実施する工法とされている。舗装の維持工法は、反復して行う手入れまたは軽度な修理であり、路面の性能を回復させることや舗装の構造的な強度低下を遅延させることを目的に行う工法とされている。また、舗装が破損する前に予防的に実施される場合は、予防的修繕工法、予防的補修工法と呼ばれることもある。

修繕工法には、「打換え工法」、「局部打換え工法」、「オーバーレイ工法」、「切削オーバーレイ工法」、「路上路盤再生工法」、「路上表層再生工法」などの工法がある。「打換え工法」は、既設舗装のアスファルト混合物層を全層および路盤の一部、または既設舗装すべてを打ち換えるもので、状況により路床の置換え、路床または既設の路盤の安定処理を行うこともある。我が国の道路舗装の設計は、路床の支持力、交通量に基づき行われることから、大型車交通量の少ない道路舗装では、表層の厚さは5cm程度と薄いため、「打換え工法」により表層

の混合物層を取壊し新たな混合物層を舗設する工法が一般的である。舗装と周辺構造物等の高さを考慮しなくてよい場合に限っては「オーバーレイ工法」も採用される。これらの修繕工法は、次に述べる維持工法に比べ施工費用を要するため費用対効果を勘案して検討する必要がある。

維持工法の代表的なものを表 3.1²⁾に示す。維持工法には、「パッチング工法」、「シール材注入工法」、「切削工法」、「グルーピング工法」、「薄層オーバーレイ工法」、「わだち部オーバーレイ工法」、「路上表層再生機等を使用した路面維持工法」、「表面処理工法」がある。「表面処理工法」は、既設舗装の上に 3 cm 未満の薄い封かん層を設ける工法である。路面の老化やひび割れ、摩耗などが生じた場合や予防保全の観点から行い、舗装の表面を再生することで遮水性やすべり抵抗の向上など舗装の機能を回復・向上させる効果が期待できる。予防的維持工法として用いる場合、舗装の破損が軽微なうちに処置することで延命効果が期待できる。表面処理工法には、使用材料、施工方法によっていくつかの工法があり、乳剤系、アスファルト混合物系や樹脂系材料が用いられる。

これらの工法の概要および大型車交通量の少ない道路舗装に適用する場合の課題について述べる。

表 3.1 維持工法の種類²⁾

維持工法の種類	
パッチングおよび 段差すり付け工法	加熱混合式
	常温混合式
シール材注入工法	
切削工法	
グルーピング工法	
薄層オーバーレイ工法	
わだち部オーバーレイ工法	
路上表層再生機等を使用した路面維持工法	
表面処理工法	フォグシール
	チップシール
	スラリーシール
	マイクロサーフェシング
	カーペットコート
	樹脂系表面処理

(1) パッチングおよび段差すり付け工法

パッチングおよび段差すり付け工法は、舗装が破損した際に応急的に行う工法である。一般的に市販されているパッチング材料の外観を写真 3.1 に示す。写真 3.2 にパッチングの施工状況を示す。ポットホールや段差、局部的なひび割れや沈下等の凹部に対してパッチング材料で応急的に充填することにより、車両の走行性を回復させる工法である。交通量の少ない道路舗装においても本工法は応急的な処置として行われる。



荷姿：袋（20kg）

写真 3.1 市販されているパッチング材料



写真 3.2 パッチングの施工状況

(2) シール材注入工法

シール材注入工法は、アスファルト舗装面に発生したひび割れにシール材を充填して雨水等の進入を遮断し、舗装の破損を遅延させるために行う工法である。写真 3.3 にシール材注入工法の施工状況を示す。本工法は大型車交通量の少ない道路舗装においても有効な補修工法であるが、ひび割れ 1 本 1 本に対して処置を施すことから大面積を効率的に施工することが難しいという課題がある。



写真 3.3 シール材注入工法の施工状況

(3) 切削工法

切削工法は、アスファルト舗装表面に連続的あるいは断続的に凹凸が発生して平坦性が極端に悪くなった場合などに、その部分を機械によって削り取り、路面の平坦性とすべり抵抗性を回復させる工法である。写真 3.4 に切削工法に用いられる切削機の外観を示す。「わだち掘れ」、「寄り」によって混合物が盛り上がった部分の切削除去に用いられる。本工法は応急的な処置である。大型車交通量が少ない道路舗装においてはアスファルト混合物層が 5cm 程度と薄いことから適用するのは難しいものと考えられる。



写真 3.4 切削工法に用いられる切削機³⁾

(4) グルーピング工法

グルーピング工法は、一般の密粒度系アスファルト舗装、コンクリート舗装に適用され、舗装表面に一定形状の浅い溝を等間隔に切り、すべり抵抗性の向上を図る工法である。写真 3.5 にグルーピング工法の施工状況を示す。大型車交通量が少ない道路舗装においてはアスファルト混合物層が 5cm 程度と薄いことから適用するのは難しいものと考えられる。



写真 3.5 グルーピング工法の施工状況

(5) 薄層オーバーレイ工法

薄層オーバーレイ工法は、既設舗装の上に 3 cm 未満の加熱アスファルト混合物を舗設する工法である。このうち、多量の細骨材を用いて専用の混合物で施工する工法はカーペットコートとも呼ばれている。写真 3.6 に薄層オーバーレイ工法の施工状況を示す。大型車交通量が少ない道路舗装において有望な維持修繕工法であると考えられ、近年ではポリマー改質アスファルトを用いて耐久性を高める技術開発や、混合物層の厚さが薄いことから施工中の温度低下が速いため施工性を改善する技術開発が行われている。起終点、街きよ、人孔等において、段差が生じないように縦横断勾配を計画することに留意する必要がある。



写真 3.6 薄層オーバーレイ工法の施工状況

(6) わだち部オーバーレイ工法

わだち部オーバーレイ工法は、レール引き工法とも呼ばれ、路面のわだち掘れ部分だけをオーバーレイするものである。主に積雪寒冷地域の摩耗わだちに対して行われている。混合物の流動わだちに対して維持を目的として行われることもある。写真 3.7 にわだち部オーバーレイ工法の適用箇所を示す。大型車交通量が少ない道路舗装においては、流動わだちや摩耗によるわだちは生じにくいことから活用する機会は少ないものと考えられる。



写真 3.7 わだち部オーバーレイ工法の適用箇所

(7) 路上表層再生機等を使用した路面維持工法

路上表層再生機等を使用した路面維持工法は、路上表層再生工法を簡易にした機械編成で、既設舗装のかきほぐし深さと新たなアスファルト混合物の厚さの合計がおおむね 40mm 以下とする工法である。機械編成や使用機械を簡易にしたことで市街地や生活用道路のような小規模な箇所への適用が可能であるが、既設表層混合物のかきほぐし厚さが薄く、混合する新たなアスファルト混合物の量も少ないため、ひび割れやわだち掘れ、摩耗などで構造的補修対策が求められるような箇所には適用が難しい。大型車交通量の少ない道路舗装においては、アスファルト混合物層が薄いことから施工するのが難しいものと考えられる。

(8) 表面処理工法（フォグシール工法）

フォグシールは、アスファルト舗装に適用され、アスファルト乳剤を水で1～3倍に希釈したものを舗装面に $0.5\sim 0.9\text{ l/m}^2$ 散布し、小さいひび割れや表面の空隙を充填して、古くなった舗装面を若返らせる工法である。写真 3.8 にフォグシール工法の施工状況を示す。FHWA の報告書⁴⁾によると、その適用効果は2～4年程度とされている。



写真 3.8 フォグシール工法の施工状況

(9) 表面処理工法（チップシール工法）

既設舗装表面にアスファルト乳剤および骨材を散布して薄い層を構築する工法で、構築する層数によりシールコート・アーマーコートに分類される。舗装路面の保護やリフレッシュ効果に加え、舗装の各種機能の向上が期待できる。

写真 3.9 にチップシール工法の施工状況を示す。大型車交通量が少ない路線に適用できるものと考えられるが、供用後の骨材飛散もあり生活道路等への適用は難しいものと考えられる。保護効果は3～7年程度⁴⁾とされている。



写真 3.9 チップシール工法の施工状況

(10) 表面処理工法（スラリーシール、マイクロサーフェッシング工法）

既設舗装表面上に細骨材、フィラー、アスファルト乳剤などを混合してスラリー状にしたものを専用のペーパーもしくは人力で敷きならす工法で、舗装表面の保護効果やリフレッシュ効果に加え、舗装の機能の向上が期待できる。写真 3.10 にマイクロサーフェッシング工法の施工状況を示す。マイクロサーフェッシング工法は比較的交通量が多い路線まで適用可能なことがある。スラリーシールの保護効果は 2～7 年程度⁴⁾、マイクロサーフェッシング工法の保護効果は 2～9 年程度⁴⁾とされている。



写真 3.10 マイクロサーフェッシング工法の施工状況

(11) 表面処理工法（カーペットコート工法）

舗装表面に 2.5cm～3cm 未満の加熱アスファルト混合物を敷きならす工法で、薄層オーバーレイ工法の一つである。図 3.1 にカーペットコートの舗装構成を示す。多量の細骨材を用いた専用の混合物で施工し、舗装表面の保護効果やリフレッシュ効果に加え、舗装の機能の向上が期待できる。近年、特殊な改質アスファルトを使用することで耐久性を高める技術開発も行われている⁵⁾。本工法は交通量の少ない道路舗装においても有効な技術であり、その保護効果は 2～12 年程度⁴⁾で比較的交通量が多い路線まで適用可能とされている。

3. 大型車交通量の少ない道路舗装に適した
維持修繕工法の選定

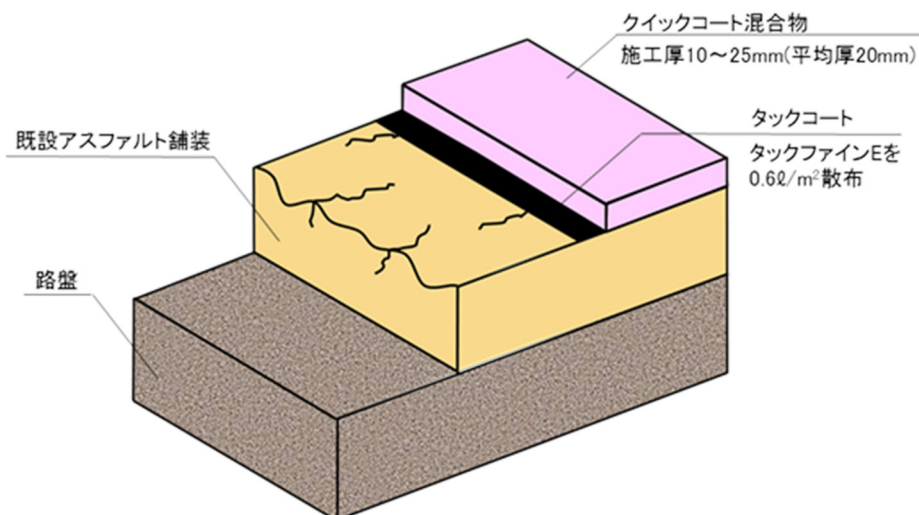


図 3.1 カーペットコートの舗装構成例

(12) 表面処理工法（樹脂系表面処理）

樹脂系表面処理工法は、一般的なアスファルト舗装、コンクリート舗装に適用され、舗装面上にバインダとして樹脂を薄く均一に塗布し、その上に耐摩耗性の硬質骨材を散布して路面に固着させる工法である。写真 3.11 に樹脂系表面処理工法の適用状況を示す。ニート工法とも呼ばれる。樹脂系表面処理工法は、特に湿潤時のすべり抵抗性を高めることを目的としている。着色磁器質骨材等を用いてカラー化を図り雨天時の視認性を高め、注意喚起を目的に使用されることもある。



写真 3.11 表面処理工法（樹脂系表面処理）⁶⁾

3.3. 舗装の破損と維持工法の選定の目安

前述のとおり舗装の維持工法には各種の方法があり、目的や用途によって選定する必要がある。表 3.2²⁾にアスファルト舗装の破損と工法選定の目安を示す。表中の L, M, H の記載は路面の損傷程度を表している。損傷のひとつである「アスファルト混合物の劣化・老化によるひび割れ」については、損傷程度 L (ひび割れ率で 15%程度以下) の場合は「パッチングおよび段差すり付け工法」、損傷程度 M, H (ひび割れ率で 15~35%程度, 35%程度以上) の場合は「表面処理工法」あるいは「薄層オーバーレイ工法」が工法選定の目安とされている。

一方、舗装と同様に交通荷重の繰返し作用を受ける道路橋の床版分野では、その劣化を予測する研究や維持管理を高度化するための研究^{7), 8) 9)}が活発に行われている。それらの成果として、コンクリート床版のひび割れ部より雨水が浸入すると大幅にその寿命は短縮するため、現在では床版防水工によって雨水等の浸入を防止することが図られている。

道路舗装においても同様に、表 3.2 では、「アスファルト混合物の劣化・老化によるひび割れ」の損傷程度 L の場合には表面処理工法は工法選定の目安とはされていないものの、アスファルト混合物を表面処理工法によって、雨水や紫外線から保護することによって、アスファルト混合物の劣化・老化を遅延させることが可能であると考えられる。

そこで、本研究では、舗装への雨水の浸入を抑制する効果が期待できる表面処理工法を対象とし、なかでも、経済的で効率的に施工が行えるフォグシール工法に着目し各種の室内試験を実施することとした。

表 3.2 舗装の破損と維持工法選定の目安²⁾

維持修繕工法		破損 の分類	維持工法						
			段差 パツチ すり付 けおよ び工法	シー ル材注 入工法	切削 工法	表面 処理工 法	空隙 づまり 洗浄工 法	薄層 オーバ レイ工 法	わだ ち部オ ーバ レイ
アスファルト舗装の破損									
ひび割れ	●線状 ・疲労ひび割れ ・わだち割れ ・施工継目ひび割れ ・リフレクションクラック ・温度応力ひび割れ ・凍上によるひび割れ	路面、構造		L,M					
	●亀甲状 ・路床・路盤の支持力 低下・沈下による ひび割れ ・基層の剥離に起因した ひび割れ	路面、構造	L,M						
	●凍上・凍結融解による ひび割れ	構造		L,M					
	●アスファルト混合物の 劣化・老化による ひび割れ	路面、構造	L			M,H		M,H	
	●構造物に起因したひび割れ	路面、構造	○	○					
わだち掘れ	路床・路盤の圧縮変形による わだち掘れ	構造	L			L		L,M	
	アスファルト混合物の塑性変形による わだち掘れ	路面、構造	L		M	L		L,M	
	アスファルト混合物の摩耗によるわ だち掘れ	路面	L			L		L,M	M,H
平坦性の低下	縦断方向の凹凸	路面、構造	○					○	
その他の破損	段差	路面、構造	○		○				
	ポットホール	路面、構造	○						
	剥離	路面、構造							
	ポリッシング (すべり抵抗値の低下)	路面				M,H		H	
	コルゲーション	路面						○	
	くぼみ	路面、構造	○						
	寄り	路面、構造	○		○				
ポーラス アスファルト 舗装特有の破損	骨材飛散	路面	○			○			
	空隙づまり	路面					○		
	空隙つぶれ	路面							
	部分的な寄り（側方流動）	構造							
備考	L, M, H : 工法選定上の区分 (M): 路面破損の場合にのみ適用 ○ : 路面破損の場合に適用する工法 ◎ : 構造破損の場合に適用する工法								

3.4. フォグシールに適した材料の選定

フォグシールは、アスファルト舗装に適用され、アスファルト乳剤を水で 1～3 倍に希釈したものを舗装面に 0.5～0.9 l / m² 散布し、小さいひび割れや表面の空隙を充填して、古くなった舗装面を若返らせる工法である。

アスファルト乳剤には一般に MK-2, MK-3 を使用するとされている¹⁰⁾。一方、近年では、表面保護を目的としたアスファルト乳剤や、ポリマー等により性状を改質した高性能なアスファルト乳剤も市販されていることから、本研究では、フォグシール工法に適したアスファルト乳剤の選定を目的に表 3.3 に示す室内試験を実施した。

表 3.3 アスファルト乳剤を選定するための室内試験一覧

試験内容	評価の視点
保護材の促進耐候性試験	劣化抑制効果の把握
混合物を促進劣化した後のアスファルト性状試験	
混合物のねじり骨材飛散試験	荷重に対する耐久性
混合物のひび割れ抵抗性評価試験	

3.4.1. 使用材料

本研究では市販されているアスファルト乳剤を用いて検討することとした。我が国では各種のアスファルト乳剤が日本工業規格（表 3.4）や日本アスファルト乳剤協会規格（表 3.5）にて規格化されている。

表 3.6 に本研究で用いた表面保護材（以下、保護材と称す）の一覧を示す。日本工業規格の PK-1 および PK-2 は表面処理用との記載があるが、チップシール工法に用いられる乳剤であり、フォグシール工法には MK-2 を用いるのが一般的とされている¹⁰⁾。アスファルト乳剤協会規格は、アスファルト乳剤および改質アスファルト乳剤について規格化されており、フォグシールや表面処理用のものはないが、タックコート向けの施工中の施工車両タイヤへの付着を抑制した PKM-T が規格化されている。フォグシールへの適用を考える場合も一般交通車両へのべたつき、付着させないことが重要であると考えられることから、本研究では PKM-T についても検討対象とした。また、規格化はされていないが舗装表面保護強化用アスファルト乳剤として市販されているもの、アスファルト乳剤ではないが超薄層の表面処理材として市販されているアスファルト乳

3. 大型車交通量の少ない道路舗装に適した
維持修繕工法の選定

剤モルタルについても対象とした。なお、市販の材料を用いたが、フオグシー
ルとして利用するため水で希釈し、製造業者の想定と異なる散布量としたため、
ここでは、保護材 A, B, C と表記した。

表 3.4 アスファルト乳剤の日本工業規格

種類および記号 項目	カチオン乳剤								アニオン乳剤
	PK-1	PK-2	PK-3	PK-4	MK-1	MK-2	MK-3	MN-1	
エングレー度 (25℃)	3~15		1~6		3~40			2~30	
ふるい残留分 (1.18mm) %	0.3以下								
付着度	2/3以上				-				
粗粒度骨材混合性	-				均等であること		-		
密粒度骨材混合性	-				均等であること		-		
土混じり骨材混合性	-						均等であること		-
セメント混合性 %	-								1.0以下
粒子の電荷	陽 (+)								-
蒸発残留分 %	60以上		50以上		57以上			57以上	
蒸発残留物	針入度(25℃) 1/10mm	100を超え200以下	150を超え300以下	100を超え300以下	60を超え150以下	60を超え200以下	60を超え200以下	60を超え300以下	60を超え300以下
	トルエン可溶分 %	98以上				97以上			97以上
貯蔵安定度 (24hr)	1以下								
凍結安定度 (-5℃)	-	粗粒子,塊がないこと		-					
主な用途	温暖期浸透用および表面処理用	寒冷期浸透用および表面処理用	プライムコート用およびセメント安定処理層養生用	タックコート用	粗粒度骨材混合用	密粒度骨材混合用	土混じり骨材混合用	セメント・アスファルト乳剤安定処理混合用	

表 3.5 アスファルト乳剤の日本アスファルト乳剤協会規格

(a) その1 アスファルト乳剤

項目	種類および記号	アスファルト乳剤の種類および記号		
		PK-P	PK-H	MK-C
エングラード(25℃)		1~6	—	—
セイボルト	(50℃) s	—	20~500	—
フロール秒	(25℃) s	—	—	30~500
ふるい残留分(1.18mm) %		0.3以下		
付着度		2/3以上		—
浸透性	s	300以下	—	—
粒子の電荷		陽 (+)		
密粒度骨材混合性		—	—	均等であること
留油分(360℃までの)		15以下	5以下	3~20
蒸発残留分 %		40以上	65以上	50以上
蒸発残留物	針入度(25℃) 1/10mm	100を超え300以下	80を超え300以下	—
	フロート時間(60℃) s	—	—	20~170
貯蔵安定度(24hr) 質量%		2以下	—	1以下

(b) その2 改質アスファルト乳剤

項目	種類および記号	改質アスファルト乳剤					
		PKM-T	PKR-T	PKR-S-1	PKR-S-2	MS-1	
エングラード(25℃)		1~15	1~10	3~30		3~60	
ふるい残留分(1.18mm) %		0.3以下					
付着度		2/3以上				—	
粒子の電荷		陽 (+)					
蒸発残留分 %		50以上	50以上	57以上		60以上	
蒸発残留物	針入度(25℃) 1/10mm	5を超え30以下	60を超え150以下	100を超え200以下	200を超え300以下	40以上	
	軟化点 °C	55.0以上	42.0以上	42.0以上	36.0以上	50.0以上	
	タフネス	(15℃) N・m	—	—	4.0以上	3.0以上	—
		(25℃) N・m	—	3.0以上	—	—	3.0以上
	テナシティ	(25℃) N・m	—	—	2.0以上	1.5以上	—
(15℃) N・m		—	1.5以上	—	—	2.5以上	
貯蔵安定度(24hr) 質量%		1以下					
タイヤ付着率(60℃) 質量%		10以下	—	—	—	—	
凍結安定度(-5℃)		—	—	—	粗粒子, 塊のないこと	—	

表 3.6 表面保護材の一覧

名称	塗布・散布量	区分
MK-2	0.5 l / m ²	アスファルト乳剤(水で2倍に希釈)
保護材 A	0.5 l / m ²	タイヤ付着抑制型アスファルト乳剤 PKM-T (水で2倍に希釈)
保護材 B	0.4 l / m ²	舗装表面保護強化用改質アスファルト乳剤 パーミエマルジョン
保護材 C	2.0 kg / m ²	アスファルト乳剤モルタル

(1) MK-2

本研究では MK-2 を水で2倍に希釈して用いた。使用したアスファルト乳剤の性状を表 3.7 に示す。

表 3.7 使用した MK-2 の性状

項目	種類および記号	カチオン乳剤	
		MK-2	
試験項目		標準的性状	試験結果
エングラード度 (25℃)		3~40	8
ふるい残留分 1.18mm %		0.3 以下	0
付着度		—	—
粗粒度骨材混合性		—	—
密粒度骨材混合性		均等であること	合格
土混じり骨材混合性		—	—
セメント混合性 %		—	—
粒子の電荷		陽 (+)	陽 (+)
蒸発残留分 %		57 以上	58.1
蒸発残留物	針入度(25℃) 1/10mm	60 を超え 200 以下	96
	トルエン可溶分 %	97 以上	99.15
貯蔵安定度 (24hr) %		1 以下	0
凍結安定度 (-5℃)		—	—

(2) 保護材 A (タイヤ付着抑制型アスファルト乳剤)

通常はタックコート用として市販されている改質アスファルトを用いた高性能なアスファルト乳剤である。タイヤ等への付着を低減しており、施工中のアスファルト乳剤の剥がれを抑制できる。使用した乳剤の標準的性状を表 3.8 に示す。本研究では、このアスファルト乳剤を水で2倍に希釈して用いた。

表 3.8 タイヤ付着抑制型アスファルト乳剤の性状

種類および記号		改質アスファルト乳剤		
		PKM-T		
		標準的性状	試験結果	
項目				
エングラード(25°C)		1~15	6	
ふるい残留分(1.18mm) %		0.3 以下	0.0	
付着度		2/3 以上	2/3 以上	
粒子の電荷		陽 (+)	陽 (+)	
蒸発残留分 %		50 以上	51	
蒸発 残留物	針入度(25°C) 1/10mm	5 を超え 30 以下	20	
	軟化点 °C	55.0 以上	62.5	
	タフネス	(15°C)N・m	—	—
		(25°C)N・m	—	—
	テナシティ	(25°C)N・m	—	—
		(15°C)N・m	—	—
貯蔵安定度(24hr) 質量%		1 以下	1	
タイヤ付着率(60°C)質量%		10 以下	0.6	
凍結安定度(-5°C)		—	—	

(3) 保護材 B (舗装表面保護強化用改質アスファルト乳剤)

通常はポーラスアスファルト舗装の表面を保護・強化し骨材飛散を抑制する目的で市販されているアスファルト乳剤である。60°Cの高温下においても「べたつく」ことなく強固な保護膜を形成する。表 3.9 に使用した乳剤の性状を示す。路面に散布する用途で開発されているアスファルト乳剤であるため、水で希釈することなく用いた。

表 3.9 舗装表面保護強化用改質アスファルト乳剤の性状

項目	舗装表面保護強化用改質アスファルト乳剤	
	メーカー規格	試験結果
エングラード(25°C)	1 ~ 6	2
粒子の電荷	陽 (+)	陽
固形分 %	45 以上	46
粗骨材の剥離面積率 %	5 以下	0
高温付着性 (60°C)	塗膜にべた付き無し	合格

(4) 保護材 C (アスファルト乳剤モルタル)

アスファルト乳剤に砂とセメントを混合したモルタル状の材料である。ある程度の厚みが確保できることから荒れた路面の凹みを埋める効果も期待できる。表 3.10 に材料の基本配合、表 3.11 に改質アスファルト乳剤の性状を示す。



写真 3.12 アスファルト乳剤モルタルの施工状況

表 3.10 アスファルト乳剤モルタルの基本配合

材料種	配合率 (%)
改質アスファルト乳剤	31
砂	55
セメント	12
その他	2

表 3.11 改質アスファルト乳剤の性状

試験項目		試験結果
エングレー度(25℃)		5
ふるい残留分(1.18mm) 質量%		0
蒸発残留分 質量%		51
蒸発残留物	針入度(25℃) 1/10mm	35
	軟化点 °C	55.0
	タフネス(25℃) N・m	30.0
	テナシティ(25℃) N・m	14.0
貯蔵安定度(24hr) 質量%		0

3.4.2. 促進耐候性試験

(1) 試験方法

表面保護材の耐候性を確認するため、気象による劣化を短時間で評価することができる促進耐候性試験を行った。試験は「舗装調査・試験法便覧 C015T 耐候性試験方法」¹¹⁾に準じて実施した。メタルハライドランプにより紫外線を促進照射するダイプラ・ウィンテス株式会社製スーパーウィン・ミニを用いた。

耐候性試験機の外観を写真 3.13 に、運転条件を表 3.12 に示す。照射時間は自然界の1年に相当する200時間^{12), 13)}とした。

評価方法はJIS K 5600-8-4に準じてデジタルマイクロスコープを用いた目視評価とした。デジタルマイクロスコープはキーエンス社製VHX-100Fを用いた。デジタルマイクロスコープの外観を写真 3.14 に示す。



写真 3.13 耐候性試験機の外観

表 3.12 耐候性試験機の運転条件

項目		試験機運転条件
試験温度	℃	20
散水量	ml/hr	100
照射照度	W/m ²	450
積算照射量	MJ/m ² /hr	1.62
供試体照射角	deg.	2.0
照射時間	hr	200



写真 3.14 デジタルマイクロスコープ VHX-100F

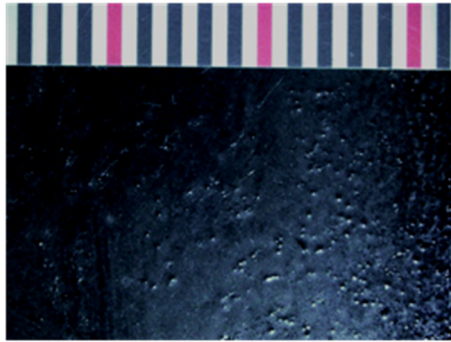
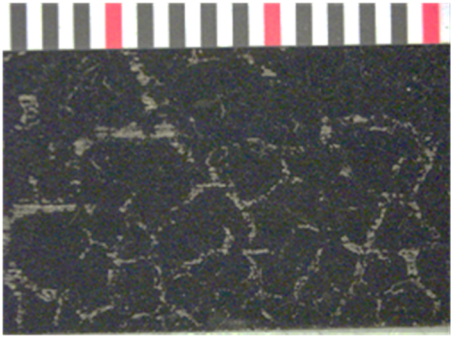
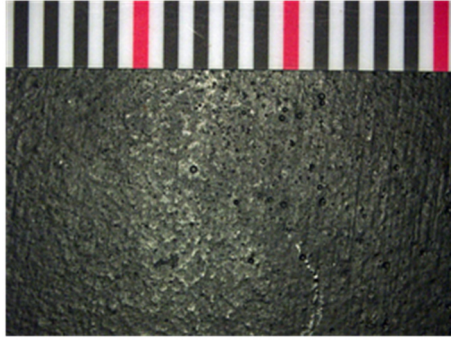

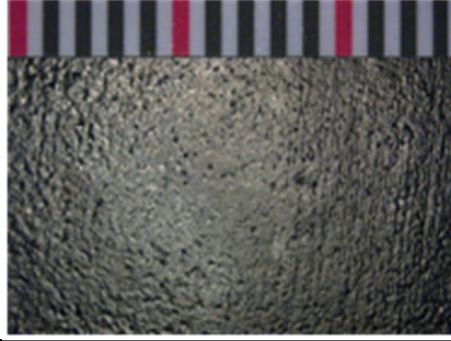
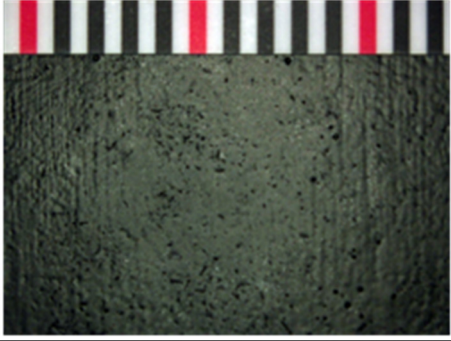
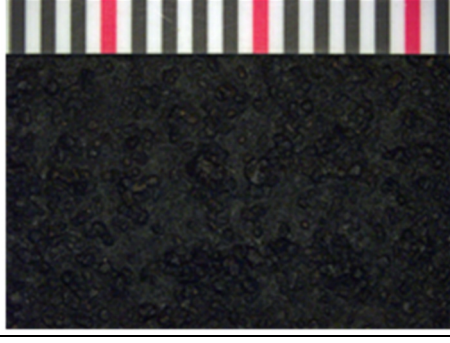
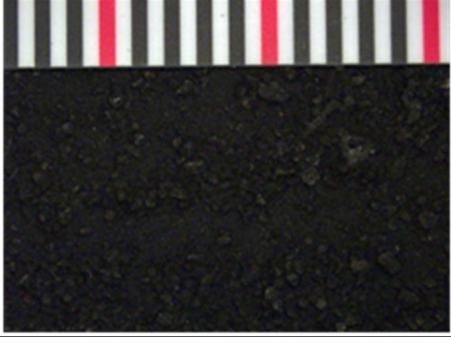
(2) 試験結果と考察

促進耐候性試験の結果を表 3.13、表 3.14 に示す。MK-2 は「割れ」が確認され、JIS K 5600-8-4 で規定されている割れの等級は「3」、割れの状態は「方向性のない割れ」、密度「4～5」であった。保護材 A, B, C に関してはいずれも良好な結果であり、 Fog Seal に一般的に利用されている MK-2 より耐候性に優れていることが分かる。

表 3.13 促進耐候性試験の試験結果

名称	割れ	割れ等級	割れの状態	密度
MK-2	あり	3	方向性のない 割れ	4～5
保護材 A	なし	—	—	—
保護材 B	なし	—	—	—
保護材 C	なし	—	—	—

表 3.14 デジタルマイクロスコープで撮影した写真(×10)

名称	試験前	試験後
MK-2		
保護材 A		
保護材 B		
保護材 C		

3.4.3. アスファルト性状試験

(1) 試験方法

アスファルト混合物の表面に保護材を施すことによって、アスファルト混合物中のアスファルトの劣化を抑制できるものと考えられる。そこで保護材を塗布したアスファルト混合物を劣化させたのちに、混合物よりアスファルトを抽出回収し、各種のアスファルト性状試験を実施した。試験のフローチャートを図 3.2 に示す。なお、前述した促進耐候性試験の結果より MK-2 に関しては試験対象から除外している。

回収したアスファルトに対して実施した試験の一覧を表 3.15 に示す。針入度，軟化点，組成分析，赤外分光分析の 4 項目である。

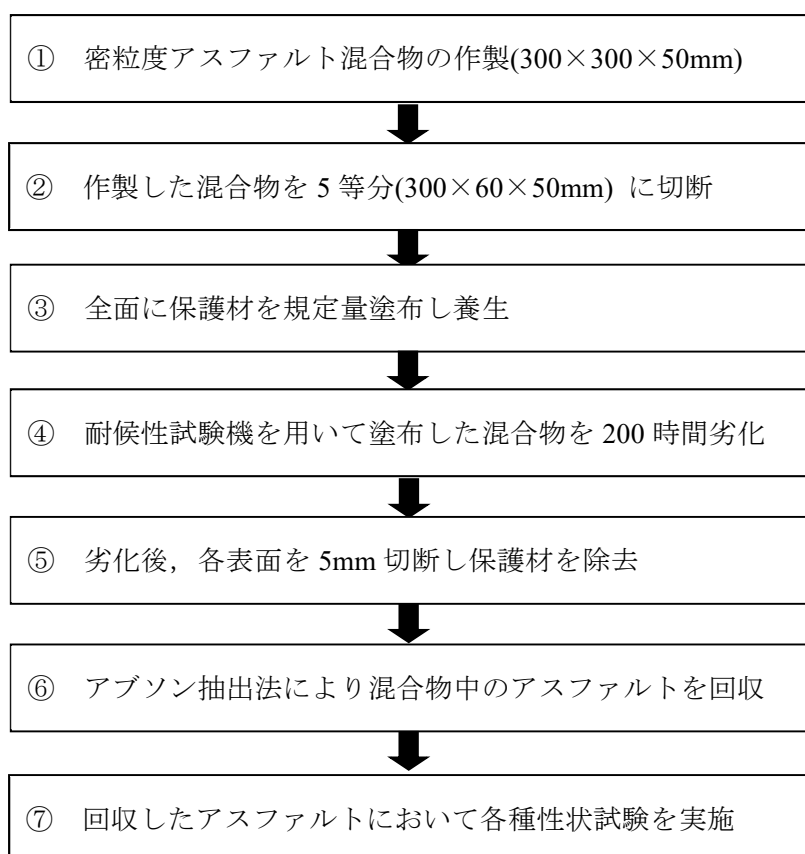


図 3.2 試験のフローチャート

表 3.15 アスファルト性状試験の一覧

評価項目	試験方法	備考
針入度	針入度試験	JIS K2207:1996
軟化点	軟化点試験	JIS K2207:1996
組成分析	TLC/FID 法によるアスファルト組成分析試験方法	石油学会:石油類試験規格 JPI-5S-70-2010 ¹⁴⁾
赤外分光分析 (吸光度比)	全反射測定法による赤外分光法	JIS K0117:2000

1) アスファルトの回収方法

アスファルトの回収はアブソン法 (ASTM1856-95a) に基づいてアスファルトを抽出した。舗装調査・試験法便覧においても試験方法が決められており、アスファルトの抽出方法に用いる溶剤としてトリクロロエチレンが推奨されているが、本研究では環境への安全性を考慮して、プロピルブロマイドを用いて回収している。表 3.16 に抽出条件を示す。

表 3.16 アスファルト抽出の条件

項目	内容
135℃時の不活性ガス流量 (ml/min)	200
160℃時の不活性ガス流量 (ml/min)	1,600
160℃保持時間 (min)	30
抽出に用いた溶剤	n-propyl bromide

2) 針入度および軟化点

針入度、軟化点は、アスファルトの性状を評価する一般的な試験である。舗装調査試験法便覧¹¹⁾に準じて実施した。

3) 組成分析

組成分析はアスファルトの科学的成分の分析を行う試験である。アスファルトは、分子量や分子構造の異なる複雑な炭化水素の混合物である。主な成分は、パラフィン、ナフテン、芳香族炭化水素であり、数パーセント程度の酸素、窒素、硫黄を含む有機化合物と少量の有機金属化合物を含んでいる。これまでの研究¹⁵⁾より、アスファルトを構成する化学組成を個々に分離して分析すること

は困難であることから、アスファルトの組成分析は化学成分の構造が似ているものを大きく4つ程度のグループに分類して分析する方法が一般的となっている。分析方法には各種のものがあり、極性の違いにより分別するカラムクロマトグラフィーや化学反応性の違いによる分別する化学沈殿法などが知られている^{15),16)}。我が国では石油学会規格として規定されている「アスファルトのカラムクロマトグラフィーによる組成分析法(JPI-5S-22)」が用いられている。この方法はアスファルトを各種の溶剤を用いて展開溶出させて分離する方法で、アスファルトの成分を飽和分、芳香族分、レジン、アスファルテンに分類するものである。表 3.17 にアスファルトの組成成分とその概要を示す。

一般にアスファルトは経年劣化に伴って低分子成分は蒸発すると共に反応性の大きい芳香族分やレジンが重縮合（1種または数種の化合物が縮合の反復によって高分子化合物をつくる反応）によりアスファルテンに変化し、アスファルテンはさらに高分子化するといわれている。アスファルテンなどの高分子が多くなることに従い、アスファルトの物性は硬くあるいは脆くなる。

上記の石油学会法は各種の溶剤を用いてアスファルトを分離する方法のため、その手続きが非常に煩雑であることに加え、試験の過程の手続きの微少な差異によりその結果に差異が生じやすい。従って、再現性のよい試験を行うためにはかなりの熟練を要し、経験豊富な技術者が分析を行っても、技術者によりその分析結果は一致しないことがある。そこで、本研究では、アスファルトの組成分析に熟練を要することがなく再現性のよい結果を得ることができるといわれている自動分析装置を用いることとした。自動分析装置にはイアトロスキャン New MK-5（三菱化学ヤترون製）を用いた。その外観を写真 3.15 に示す。

イアトロスキャンの原理および分析方法を図 3.3、図 3.4 に示す。この装置は薄層クロマト用検出装置で、水素炎イオン化検出器（FID）および炎光光度検出器（FPD）から構成されている。事前にアスファルトをクロマロッドと呼ばれる棒状の吸着体上にスポットし、これを各種溶媒により展開させる。このクロマロッドに対し水素炎を一定速度で走査させることにより成分を完全燃焼させ、このときに発生する燃焼ガスの物質量を FID により測定し、燃焼時の光を FPD により計測することで各成分を検出するものである。

表 3.17 アスファルトの組成分

組成分	外観	構成物質	分子量
飽和分	無色／淡黄色の澄んだ液体物質	パラフィンおよびナフテン	300～2,000
芳香族分	赤褐色で粘りのある液体	芳香族の小さな集合	300～2,000
レジン	暗褐色で粘りのある固体または半固体	縮合した芳香族環構造	500～50,000
アスファルテン	暗褐色，黒褐色の固体粉末	縮合した環構造の層状構造	1,000～100,000



写真 3.15 ヤترون社製の New MK-5

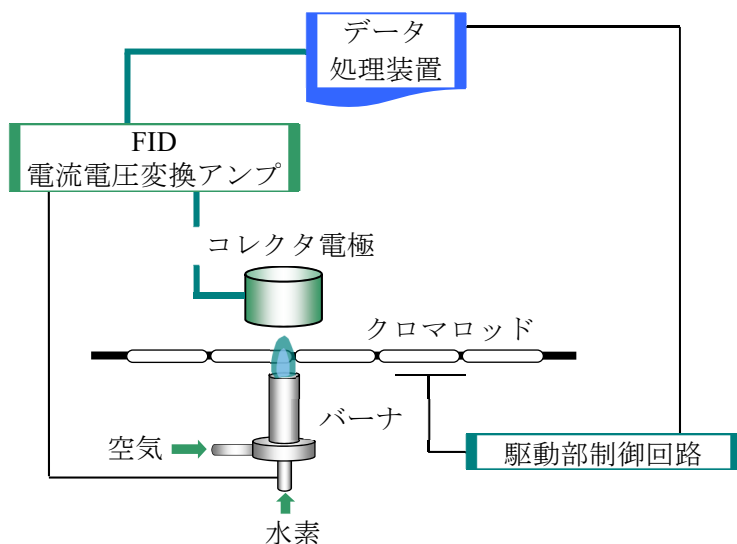


図 3.3 組成分析機器（イアトロスキャン）の原理

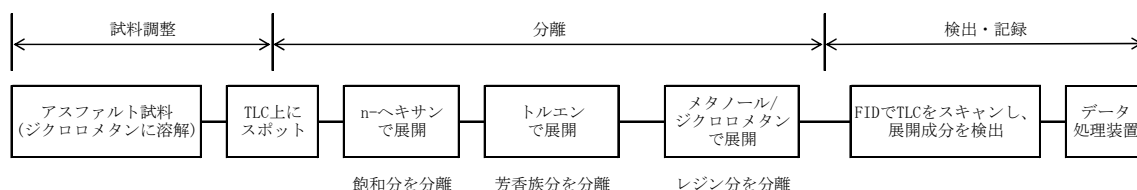


図 3.4 組成分析機器（イアトロスキャン）の分析方法

4) 赤外分光分析

赤外分光分析はフーリエ変換赤外分光分析装置を用いて試料表面を直接測定する全反射測定法（ATR 法）により測定した。使用した島津製作所製フーリエ変換赤外分光分析装置を写真 3.16 に示す。

赤外分光分析は、赤外線を分子に照射し、吸収される度合いを調べることによって化合物の構造推定や定量を行うものである。

既往の研究^{17), 18)}より、赤外吸光分析結果によるスペクトル分析は、針入度や伸度など、他の劣化指標との相関関係が高く、アスファルトバインダの劣化を評価するための指標として有効であるとされており、Puelle ら¹⁹⁾は、さまざまな波数に着目しアスファルトの劣化に関する検討を行っている。本研究では、これら既往の研究で得られた知見より、酸化劣化の進行を表すとされるカルボニル基の増加に着目し、劣化による影響のない $1,600\text{ cm}^{-1}$ 付近の吸光度とカルボニル基の $1,700\text{ cm}^{-1}$ 付近の吸光度の比を吸光度比 $R_{c=0}$ として劣化の程度を評価することとした^{20), 21)}。



写真 3.16 フーリエ変換赤外分光分析装置の外観

(2) 試験結果と考察

1) 針入度および軟化点

針入度および軟化点の試験結果を表 3.18 に示す。一般的にアスファルトの劣化に伴いアスファルトは硬く脆くなり、針入度は低下し軟化点は増加する^{15), 22), 23)}とされている。保護材によって針入度の低下が抑制されており、アスファルトの劣化を抑制できていることが分かった。一方、軟化点については大きな差異はなかった。

表 3.18 アスファルトの針入度および軟化点

表面保護材	針入度 (1/10 mm)	軟化点 (°C)
未劣化, 保護材なし	74	47
保護材なし	59	49
保護材 A	72	47
保護材 B	72	47
保護材 C	67	48

2) 組成分析

アスファルトは劣化に伴い飽和分と芳香族分は減少する傾向があり、レジン分とアスファルテン分は増加する傾向にある²³⁾とされている。試験結果を図 3.5 に示す。ここでは比較のため劣化をさせていないアスファルトの試験も示す。飽和分と芳香族分の合計は、未劣化の状態に比べてわずかに減少しているだけである。

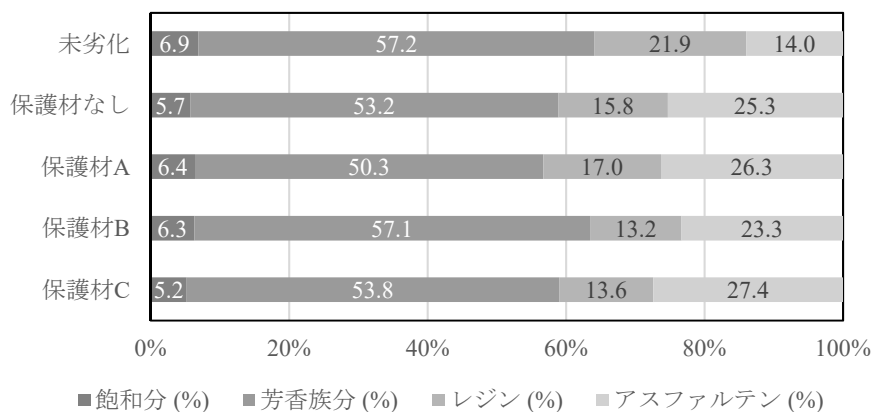


図 3.5 組成分析結果

3) 赤外分光分析

赤外分光分析により得られたスペクトルの一例を図 3.6 に示す。試験結果を図 3.7 に示す。アスファルトの劣化により吸光度比 $R_{c=0}$ は増加するとされている^{20),21)}。本試験においても、促進耐候性試験により若干ではあるが吸光度比は増加しているが、その増加量は軽微なものであり、保護材の有無や保護材の種類の違いは明確ではない。本試験は散水および紫外線を照射するものであり、材料の酸化による劣化はさほど進行していないためと考えられる。

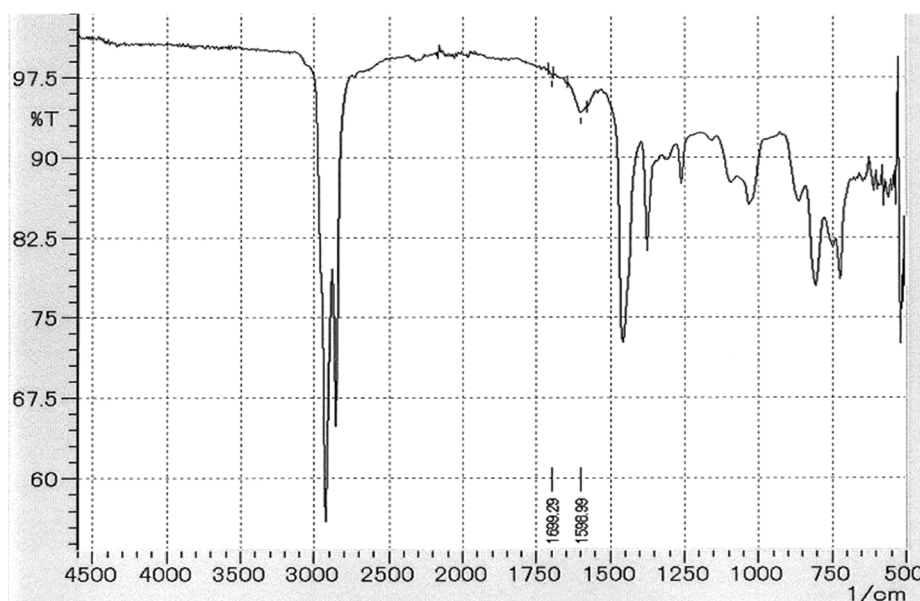


図 3.6 未劣化の混合物から抽出したアスファルトのスペクトルの一例

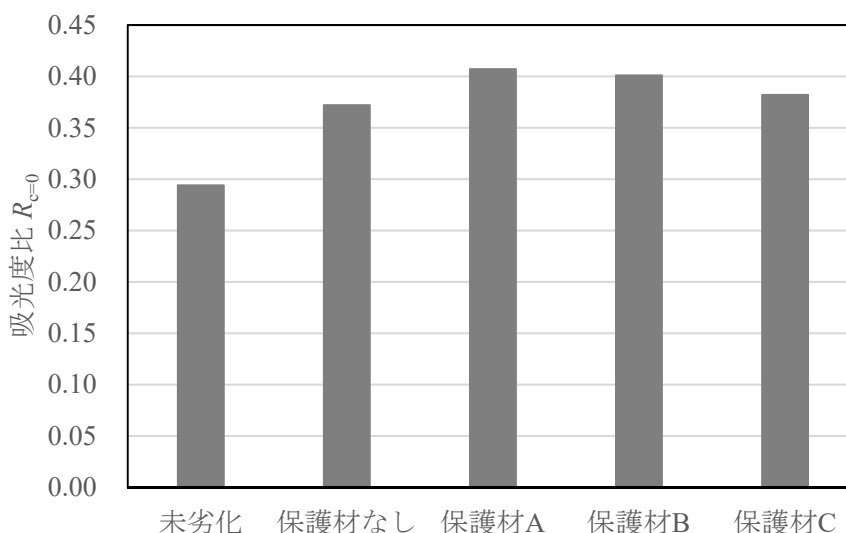


図 3.7 赤外分光分析による吸光度比の測定結果

3.4.4. ねじり骨材飛散試験

ここでは表面保護材が舗装路面の強度を高める効果があるのか評価するために、ねじり骨材飛散試験を行った。ねじり骨材飛散試験は、アスファルト舗装の表層にポーラスアスファルト混合物を用いた場合に、混合物の骨材がタイヤでねじられることにより飛散する程度を評価する試験²⁴⁾である。

(1) 使用材料

使用したアスファルト混合物の使用材料および配合は、「4.2.2(1) アスファルト混合物の使用材料および配合」と同様である。

(2) 試験方法

ねじり骨材飛散試験機における試験条件を表 3.19 に、試験機の外観を写真 3.17 示す。ねじり骨材飛散試験は、舗装性能評価法に準拠し、試験機はタイヤ旋回タイプ B を用いた。

表 3.19 ねじり骨材飛散試験機(タイヤ旋回タイプ B)を用いた試験条件

項目		タイヤ旋回タイプ B
試験輪	型式	ハンドカート用
	寸法	直径 200mm×幅 65mm
	トレッドパターン	リブラグパターン
載荷方式		載荷版
載荷荷重		490～1,372 N
テーブル回転数		10.5 回/分
走行半径		0～12.5 cm
試験温度		常温～70 °C
供試体の大きさ		300×300×50 mm

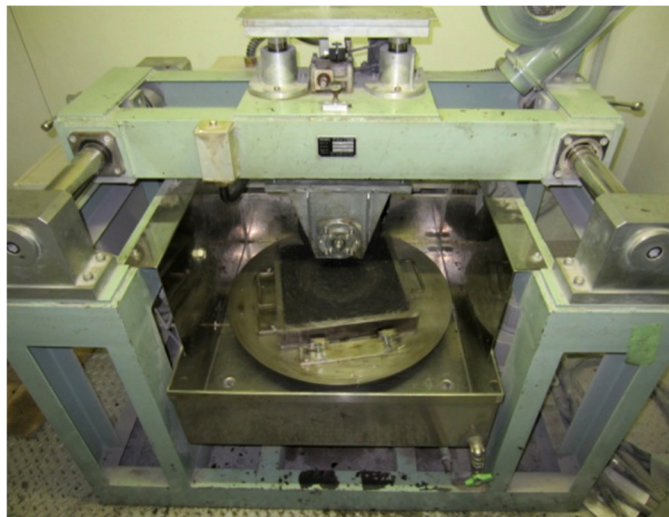


写真 3.17 ねじり骨材飛散試験機の外観

(3) 試験結果と考察

ねじり骨材飛散試験の結果を図 3.8 に示す。試験結果が小さいほど、骨材飛散の量が少ないことを示すものである。

いずれの試験供試体も 120 分の試験終了後のねじり骨材飛散率は 6~7 %と良好な結果である。保護材の有無による結果の相違は特に認められないことから、密粒度アスファルト混合物に保護材を施しても骨材飛散を抑制する効果は高まらないものと考えられる。

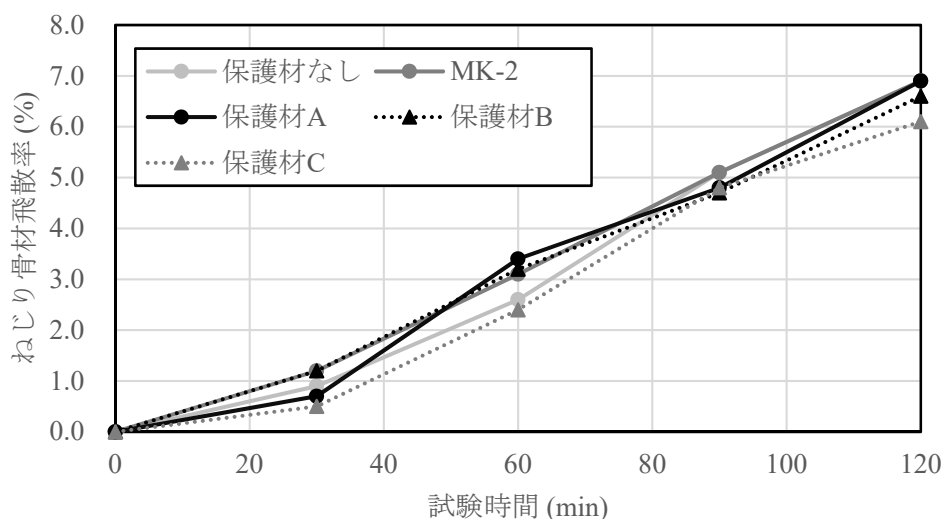


図 3.8 ねじり骨材飛散試験の結果

3.4.5. ひび割れ抵抗性評価試験

(1) 試験方法

表面保護材が交通荷重に対する混合物のひび割れ抵抗性に与える影響を評価するため、リフレクションクラックによるひび割れ発生のメカニズムを模擬するひび割れ抵抗性評価試験^{25), 26)}を実施した。図 3.9 に試験装置の概要を、表 3.20 に試験条件を示す。

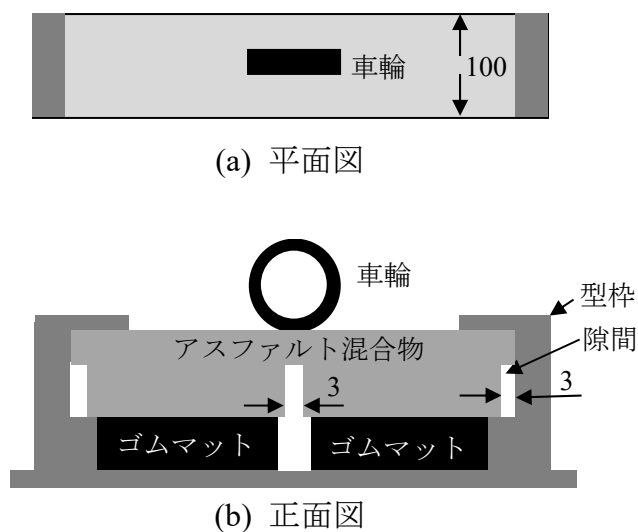


図 3.9 ひび割れ抵抗性評価試験の装置概要

表 3.20 ひび割れ抵抗性評価試験の試験条件

供試体	供試体寸法 (mm)	80×100×300
	上層混合物層厚 (mm)	30
	下層混合物層厚 (mm)	50
	下層スリット幅 (mm)	3
	下層サイドの隙間幅 (mm)	3
試験条件	試験温度 (°C)	25
	タイヤ走行速度 (回/min)	42
	タイヤ走行距離 (mm)	230
	荷重 (kN)	1,200
	車輪寸法 (mm)	φ : 200, W: 50
	ゴム板硬度(JIS 硬度)	30

(2) 試験結果と考察

ひび割れ抵抗性評価試験の状況を写真 3.18 に示す。ひび割れ発生状況を写真 3.19 に示す。試験結果は、試験供試体表面にひび割れが発生したときの走行回数で整理した。その結果を図 3.10 に示す。保護材の有無によって特に差異が認められない。保護材を行っていない場合の 1,625 回の走行回数に比べて、保護材を行った場合は 1,469～1,672 回とほぼ同程度の値を示しており、その差異は試験供試体によるバラツキを考慮すると、測定誤差の範囲であると考えられる。よって、保護材を施しても交通荷重に対するひび割れ抵抗性は高まらないものと考えられる。

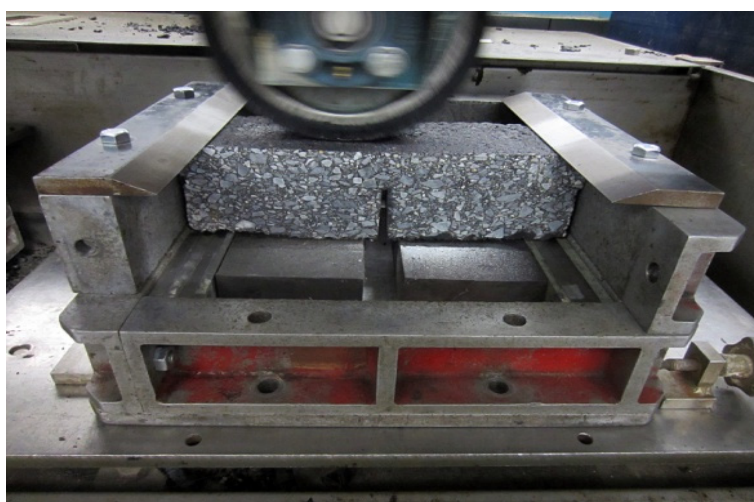


写真 3.18 ひび割れ抵抗性評価試験の試験状況

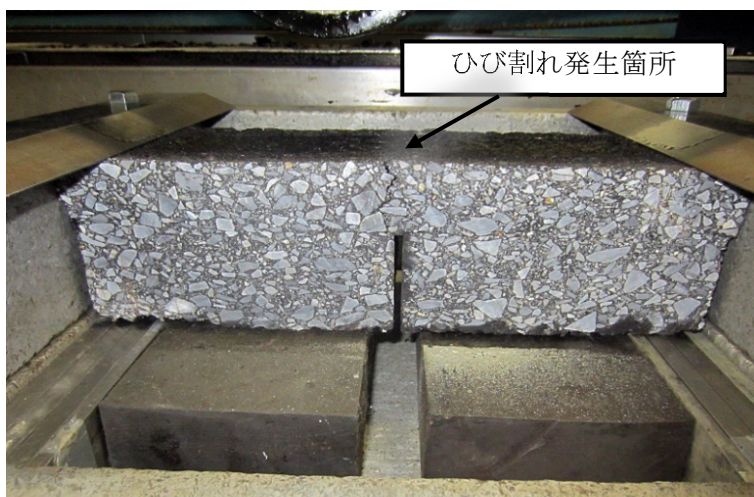


写真 3.19 ひび割れ抵抗性評価試験でのひび割れ発生状況

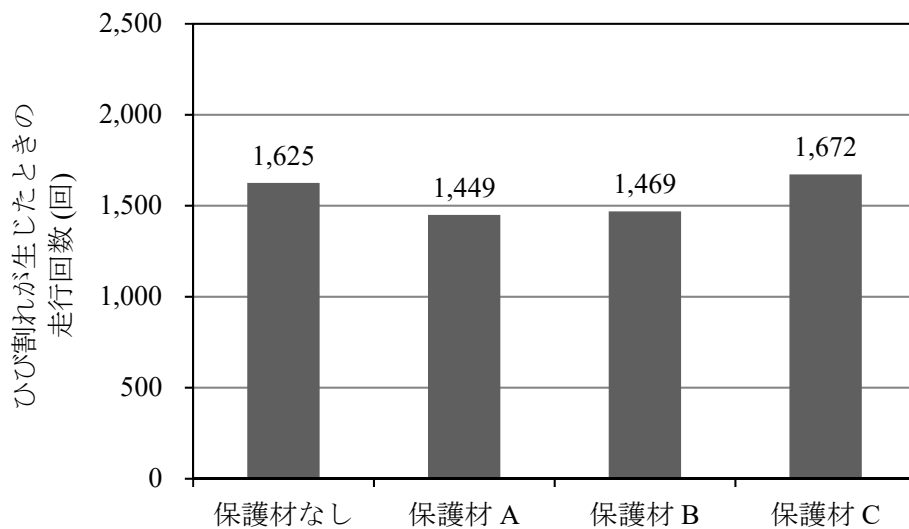


図 3.10 ひび割れ抵抗性評価試験の結果

参考文献

1. (公社)日本道路協会：舗装設計施工指針，丸善，2006.
2. (公社)日本道路協会：舗装の維持修繕ガイドブック 2013，2013.
3. 酒井重工業株式会社，ホームページ，
https://www.sakainet.co.jp/products/road_maintenance/er555f.html，2018/11 確認.
4. FHWA：Selecting a Preventive Maintenance Treatment for Flexible Pavements, p.9, 2000.
5. 松下裕弥，平戸利明，塚本真也，増戸洋幸：中温化ポリマー改質アスファルトを用いた高耐久表面処理工法の開発，アスファルト合材協会 30 周年記念論文集，pp.42-47，2015.
6. アトミックス株式会社，ホームページ，https://www.atomix.co.jp/road/hc_epozds/，2018/10 確認.
7. 森川英典：劣化予測技術の現状と課題，コンクリート工学，Vol.42，No.5，pp.52-62，2004.5.
8. 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集 9-2，pp.627~632，1987.
9. 松井繁之編著：道路橋床版－設計・施工と維持管理－，森北出版株式会社，p.191，2007.
10. (一社)アスファルト乳剤協会，アスファルト乳剤，p.23，2015.
11. (公社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，丸善，2006.
12. 永原篤：促進耐候性試験，舗装，Vol.46-1，pp24~28，2011.1.
13. 永原篤，村山雅人：気象劣化に基づいたアスファルトおよびアスファルト混合物の性状評価と室内再現試験，土木学会第 64 回年次学術講演会，pp.63-64，2009.9.
14. (公社)石油学会：TLC/FID 法によるアスファルト組成分析試験方法 JPI-5S-70-2010.
15. 高橋正明：用語の解説・4 大組成分，アスファルト，No.163，pp.71-72，1999.
16. 青木秀樹：用語の解説アスファルトの組成分析，Vol.41，No.199，pp.48-50，1999.
17. 笠原靖，植村正，牛島幸司郎：供用中におけるアスファルト舗装の老化の研究－アスファルトの劣化に及ぼす路面からの深さの影響－，石油学会誌，pp.30-33，1975.1.
18. 飯島尚，小島逸平，寺島憲一：アスファルト舗装用混合物の配合設計に関する幕張試験舗装の解析，土木技術資料，pp.34-39，1982.12.
19. J.Puello, N.Afanasjeva, Malvarez：COLOMBIAN BITUMENS：RHEOLOGICAL AND FTIR ANALYSIS DURING THEIR ACCELERATED AGING, 4th Euroasphalt & Eurobitume, 2008.
20. 田中邦則，鈴木勲，梶谷行男：舗装用アスファルトの熱劣化による性状変化，東京都土木技術研究所年報，pp177-184，1991.
21. 焼山明生，佐々木巖，山口勝之，高橋智子：高粘度改質アスファルトの紫外線劣化に関する研究，舗装工学論文集，Vol.10，pp.221-224，2005.12.

3. 大型車交通量の少ない道路舗装に適した
維持修繕工法の選定

22. 小島逸平, 坂本浩行, 伊藤正秀 : 特集・舗装用アスファルト規格の変遷と品質試験の背景ーアスファルトの劣化評価試験, アスファルト, Vol.29, No.148, pp.30-35, 1986.
23. 谷口豊明, 伊藤達也 : アスファルトの劣化, アスファルト, Vol.33, No.164, pp.67-83, 1990.
24. (公社)日本道路協会 : 舗装性能評価法別冊ー必要に応じ定める性能指標の評価法編一, pp.38-43, 2008.3.
25. 安崎裕, 池田拓哉 : ひび割れ防止材の室内試験による評価, 第 17 回日本道路会議論文集, pp.584-585, 1987.
26. 深代勝弘 : リフレクションクラック抑制の一検討, 第 22 回日本道路会議論文集, pp.394-395, 1997.

4. 水を供給する曲げ疲労試験による

フォグシール工法の評価

4.1. 概要

アスファルト舗装の劣化・老化による破損は、亀甲状のひび割れとして顕在化するが、そのひび割れが発生するメカニズムは、紫外線や風雨等によりアスファルト自体が硬化、収縮することによって発生するとされている^{1),2)}。一方、既往の研究³⁾では、舗装の実物大供試体を用いた繰返し载荷試験を実施しており、繰返し载荷に伴って路面に発生する目視では観察できないほどの微細なひび割れ（以下、「微細なひび割れ」という）へ雨水が浸入することで、舗装の破損が急速に進行することを明らかにしている。これらのことから、大型車交通量の少ない道路舗装の損傷は、交通荷重による疲労、温度応力による疲労、アスファルト自体の硬化、雨水による疲労破壊抵抗性の低下が複合的に作用して発生しているものと考えられる。

本章では、水を供給しながらのアスファルト混合物の曲げ疲労試験によって、雨水等の水分がアスファルト混合物の疲労破壊特性へ与える影響について述べる。図 4.1 に本研究における水を供給する曲げ疲労試験の位置づけを示す。試験の目的は、雨水浸透がアスファルト混合物の劣化・老化を進行させることを明らかとし、アスファルト混合物に保護材を塗布することで劣化・老化を抑制できることを示すことである。まず、水を供給しながらのアスファルト混合物の曲げ疲労試験は一般的な試験ではないことから試験供試体の作成方法、水の供給方法等について述べる。つぎに、水を供給する場合と供給しない場合の曲げ疲労試験結果を示し、水がアスファルト混合物の疲労破壊特性へ与える影響について述べる。さらに、試験供試体に表面保護材を施した場合の水を供給する曲げ疲労試験結果を示し、表面保護材がアスファルト混合物の疲労破壊特性を改善する効果について述べる。

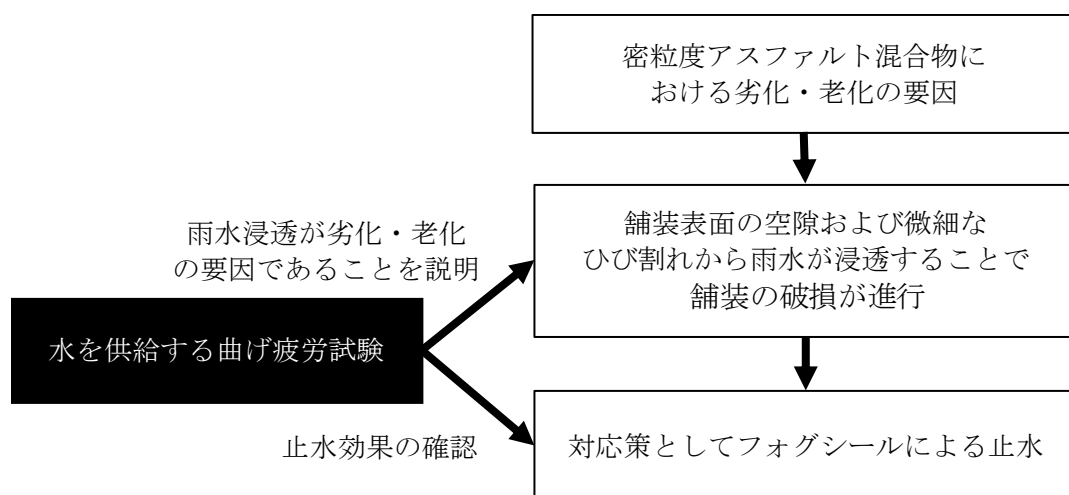


図 4.1 本研究における水を供給する曲げ疲労試験の位置づけ

4.2. 試験方法の検討

ここでは、本研究で用いた試験装置、試験供試体の作製方法、試験条件、試験供試体へ水を供給する方法について述べ、さらに、試験供試体の整形方法、養生方法に違いが試験結果に与える影響について述べる。

4.2.1. 曲げ疲労試験装置

曲げ疲労試験の概要および試験装置について述べる。アスファルト混合物の疲労試験には各種の方法があり、梁状の試験供試体に対して曲げ変形を加える方法が一般的であるが、円筒状の試験供試体に対して圧縮・引張り変形を加える方法⁴⁾、ゴム床版上のスラブ状供試体に荷重を加える方法^{5), 6)}などが知られている。これまでに原理の異なる装置が多く提案されているが、これはアスファルト混合物が温度によりその性質が大きく変化することに起因している。アスファルト混合物はその粘弾性的な性質から常温でもクリープ変形を起こしやすく、温度が高いと試験供試体の固定方法によっては供試体の形状を保持できず試験を行えないなどの現象が生じる。したがって、供試体の形状や保持の仕方によって試験を行うことができる温度に限界があることから、疲労試験を行う温度条件などにより疲労試験の方法が選択されている。

我が国のアスファルト混合物の疲労試験は舗装材料の研究を目的として行うことが多いため、疲労試験装置を導入している機関は必ずしも多いとは言えな

い状況にあるが、現在は梁状の試験供試体に対して曲げ変形を加える方法が最も普及している⁷⁾。この梁状の試験供試体に対して曲げ変形を加える疲労試験方法は「舗装調査・試験法便覧」⁸⁾に一般的な方法が示されている。このため、本研究でも梁状の試験供試体を用いることとした。

曲げ疲労試験装置には、2点で供試体を支持しその中央で載荷し曲げ変形を加える方式と、2点で供試体を支持しその中央から一定距離オフセットした2点で載荷し曲げ変形を加える方式がある。前者は、曲げモーメントが中央の載荷部に頂点をもつ三角形となるが、後者は供試体の両端付近の2点とスパン長の三等分点位2点で供試体を支持し、中央にある2点の支持点が上下に可動し曲げ変形を与えるため、中央部の曲げモーメントが一定になるという特徴がある。個々にメリット・デメリットがあり、前者は供試体に加える変位を確実に測定・制御することができるが、載荷点付近の骨材の配置等の影響を受け結果がばらつきやすいというデメリットがある。一方、後者は2点の可動部間に均一な曲げ変形を与えることができるものの、供試体に生じる変形を直接測定することができないため、試験装置により結果が異なりやすいというデメリットがある。本研究で用いた試験機の外観を**図 4.2**、**写真 4.1**に示す。この装置の両端支持部および中央の可動部は、拘束による曲げモーメントが生じないようにヒンジ構造となっている。供試体に対する載荷は油圧シリンダを用い、シリンダ軸の変位を測定する変位センサと油圧シリンダに取り付けたロードセルを用いて供試体を与える変形をコントロールする。支持部や可動部では供試体を固定するために締め付けを行う必要があるが、アスファルト混合物はクリープ変形を起こしやすいため固定部に緩みが生じる。固定部に緩みが生じると供試体に所定の変形を与えることができなくなるため、一定時間毎に締め付け状態を確認する必要がある。このため、本研究では固定部の締め付け力を常に監視し、一定の締め付け力になるよう自動で制御する機構を備えた装置を用いた。

試験状況を**写真 4.2**に示す。写真上部のギアが取り付けられた部分が自動締め付け機構であり、供試体固定部上の円形の部品が締め付け力を監視するロードセルである。

アスファルト混合物は温度によって力学的特性が異なることから、これらの試験装置を恒温槽内に設置し温度を一定に保った状態で試験を行った。恒温層には空気槽と液槽のものがあり、空気槽を用いても一般的な試験条件においては繰返し変形に伴う発熱による供試体の温度上昇は無視できるといわれているため、本研究では試験温度を $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ の精度で制御できる空気槽を用いた。恒温槽の仕様を**表 4.1**に示す。

4. 水を供給する曲げ疲労試験による
フォグシール工法の評価

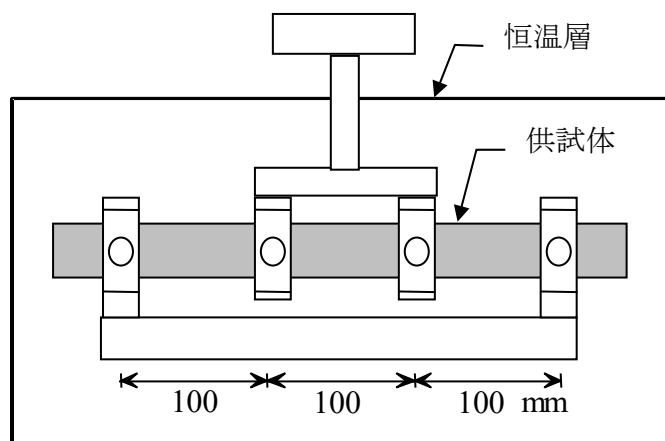


図 4.2 载荷装置の構造

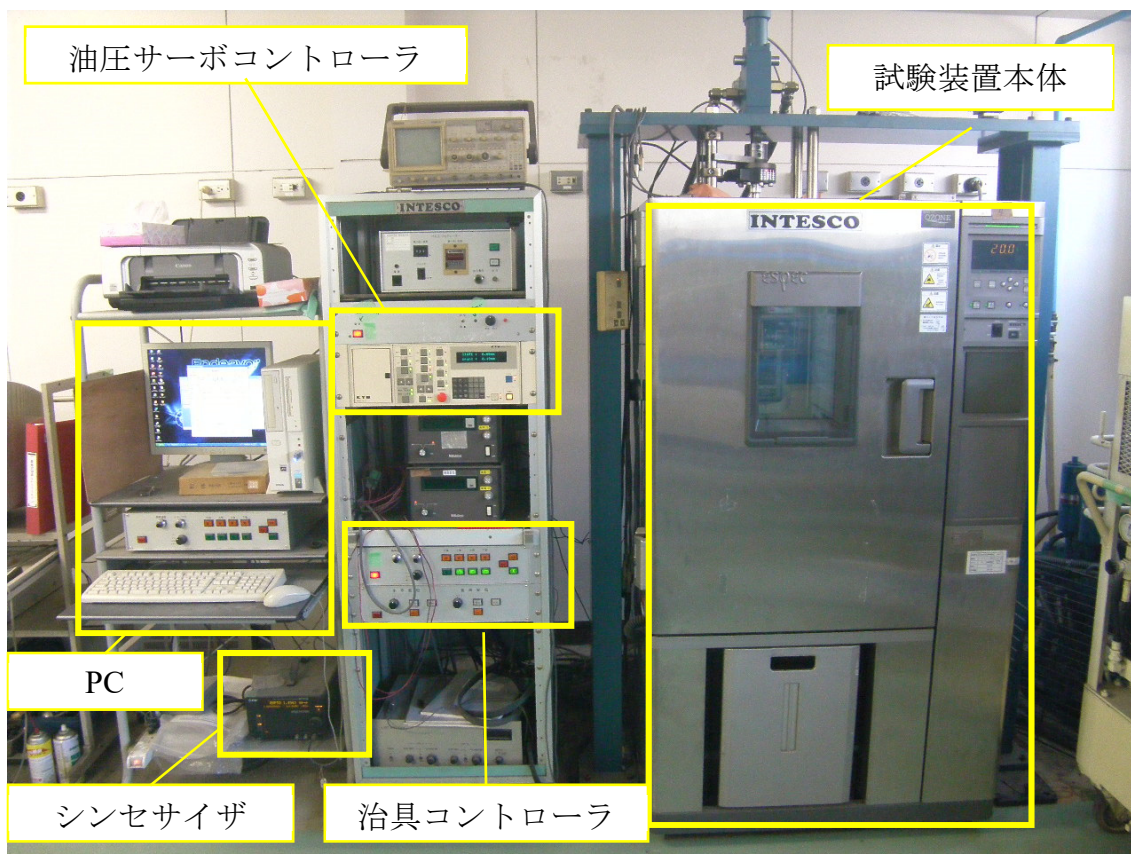


写真 4.1 曲げ疲労試験機の外観

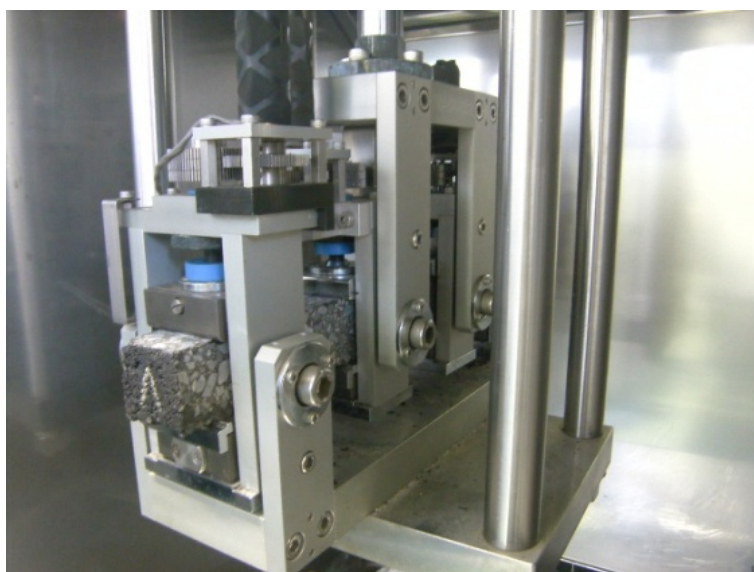


写真 4.2 載荷装置

表 4.1 恒温槽仕様

型式		PU-2KT
電源		AC200V, 3φ, 3W, 50/60Hz
最大電流		15.0 A
調温方式		平衡調温方式 (BTC システム)
運転可能外囲温度範囲		0 °C ~ +40 °C
内容量		225 l
重量		290 kg
寸法	内法 (W×H×D)	50×75×60 cm
	外法 (W×H×D)	91×159×97.3 cm
性能	温度範囲	-40 °C ~ +100 °C
	温度変動幅	± 0.3 °C
	温度分布	± 0.5 °C
	温度上昇時間	-40 °C → +100 °C : 45 分
	温度下降時間	+20 °C → -40 °C : 50 分

4.2.2. 試験供試体の作製方法

ここでは、本研究で用いた舗装材料について示し、試験供試体の作成方法について述べる。

(1) アスファルト混合物の使用材料および配合

1) アスファルト混合物の種類

アスファルト混合物には多くの種類があるが、我が国では 10 種類の混合物が規定されている。代表的な混合物の規格を表 4.2 に示す。同表では寒冷地用のものとポーラスアスファルト混合物を省略している。一般に車道の表層には粗粒度アスファルト混合物を除き 4 種類の混合物が用いられる⁹⁾。細粒度アスファルト混合物は粒度の細かい混合物で耐流動性に劣るため摩耗層や歩行者系道路舗装の表層として利用される混合物である。密粒度ギャップアスファルト混合物は粒度が不連続で粗骨材の多い粒度となっており、特にすべり抵抗性を高めたい箇所に採用される混合物である。開粒度アスファルト混合物は、すべり止め舗装として車道に用いられったり、歩道の透水性舗装などに用いられったりする混合物である。密粒アスファルト混合物は近年では寒冷地域を除いて最も一般的に用いられている混合物である。そこで、本研究では寒冷地域を除いて最も一般的に用いられている最大粒径が 13mm の密粒度アスファルト混合物を用いることとする。

アスファルト混合物は品質規格が規定された碎石、砂、石粉などのフィラーを所定の粒度となるよう混合し、アスファルトで結合したものである。アスファルトは常温では流動性がなく混合することができないため、加熱した骨材と加熱して流動性をもたせたアスファルトを混合し製造される。アスファルト混合物の性状は、アスファルト量により大きく異なることから、粒度のほかにアスファルト量 (%) の範囲が規定されている。

表 4.2 アスファルト混合物の種類と粒度範囲

混合物の種類	① 粗粒度 アスファ ルト 混合物	② 密粒度 アスファルト 混合物		③ 細粒度 アスファ ルト 混合物	④ 密粒度 ギャップ アスファ ルト 混合物	⑨ 開粒度 アスファ ルト 混合物	ポーラス アスファ ルト混合 物⑩⑪ 省略
	(20)	(20)	(13)	(13)	(13)	(13)	
仕上がり厚	4~6	4~6	3~5	3~5	3~5	3~4	寒冷地用⑤⑧ 省略
最大粒径(mm)	20	20	13	13	13	13	
通過 質量百 分率 %	26.5mm	100	100	-	-	-	
	19mm	95~100	95~100	100	100	100	
	13.2mm	70~90	75~90	95~100	95~100	95~100	
	4.75mm	35~55	45~65	55~70	65~80	35~55	
	2.36mm	20~35	35~50		50~65	30~45	
	600μm	11~23	18~30		25~40	20~40	
	30μm	5~16	10~21		12~27	15~30	
	150μm	4~12	6~16		8~20	5~15	
75μm	2~7	4~8		4~10	4~10		
アスファルト 量 (%)	4.5~6	5~7				2~7	

2) アスファルト

我が国では舗装に用いるアスファルトとして、舗装用石油アスファルト¹⁰⁾、ポリマー改質アスファルト¹¹⁾、硬質アスファルト¹²⁾が規格化されている。

硬質アスファルトは主に橋梁上の舗装などに用いられているが、一般的な舗装用アスファルトとして用いられることは少ない。

ポリマー改質アスファルトは耐流動性などの性能を高めたアスファルトであり、その適用箇所は拡大しているが、アスファルト混合物の全体の使用量に対するポリマー改質アスファルトの使用割合は概ね 15%程度で推移¹¹⁾しており、主に交通量の多い路線などで利用されているものである。

舗装用石油アスファルトは表 4.3 に示すように 4 種類に分類され、各種類に対して規格値が示されている。各種類の名称は、針入度の範囲がそのまま用いられている。積雪寒冷地では 80~100 のものが主に用いられているが¹³⁾、一般的な地域のアスファルト混合物には 60~80 のものが用いられている。

以上のことより、本研究ではストレートアスファルト 60~80 を使用するも

のとした。表 4.4 に本研究で用いたアスファルトの物性値を示す。

表 4.3 舗装用石油アスファルトの品質規格 (JIS K 2207-1996)

項目	種類	種類			
		40~60	60~80	80~100	100~120
針入度 (25°C)	1/10 mm	40 を超え 60 以下	60 を超え 80 以下	80 を超え 100 以下	100 を超え 120 以下
軟化点	°C	47.0~55.0	44.0~52.0	42.0~50.0	40.0~50.0
伸度 (15°C)	cm	10 以上	100 以上	100 以上	100 以上
トルエン可溶分	%	99.0 以上	99.0 以上	99.0 以上	99.0 以上
引火点	°C	260 以上	260 以上	260 以上	260 以上
薄膜加熱後の質量 変化率	%	0.6 以下	0.6 以下	0.6 以下	0.6 以下
薄膜加熱後の針入 度残留率	%	58 以上	55 以上	50 以上	50 以上
蒸発後の針入度比	%	110 以下	110 以下	110 以下	110 以下
密度	g/cm ³	1.000 以上	1.000 以上	1.000 以上	1.000 以上

表 4.4 本研究で用いたアスファルトの物性値

項目	種類	ストレートアスファルト 60/80		試験方法
		規格値	試験結果	
針入度 (25°C) 1/10 mm		60 を超え 80 以下	70	JIS K 2207
軟化点 °C		44.0~52.0	45.5	JIS K 2207
伸度 (15°C) cm		100 以上	100+	JIS K 2207
トルエン可溶分 質量%		99.0 以上	99.99	JIS K 2207
引火点 °C		260 以上	358	JIS K 2265
薄膜加熱後の質量変化率 %		0.6 以下	0.1	JIS K 2207
薄膜加熱後の針入度残留率 %		55 以上	69.9	JIS K 2207
蒸発後の針入度比 %		110 以下	98	JIS K 2207
動粘度 120°C mm ² /s		-	805	JIS K 2207
動粘度 150°C mm ² /s		-	183	JIS K 2207
動粘度 180°C mm ² /s		-	61.6	JIS K 2207
密度 (15°C) g/cm ³		1.000 以上	1.038	JIS K 2207
最適混合温度 °C		153~158		
最適締固め温度 °C		142~147		

3) 粗骨材

本研究ではアスファルト混合物の粗骨材として硬質砂岩を用いた。表 4.5 にその性状を示す。これらの材料は一般的なアスファルト混合所で用いられているものである。

表 4.5 本研究で用いた粗骨材の性状

使用材料	種類	6号砕石	7号砕石
	材質	硬質砂岩	硬質砂岩
	産地	茨城県石岡市	茨城県桜川市
通過質量 百分率 (%)	19 mm	100	
	13.2 mm	99.4	100
	9.5 mm		100
	4.75 mm	4.0	72.8
	2.36 mm	—	3.3
	0.6 μm	—	—
	0.3 μm	—	—
	0.15 μm	—	—
	0.075 μm	—	—
表乾密度	g/cm ³	2.704	2.708
かさ密度	g/cm ³	2.690	2.674
見掛密度	g/cm ³	2.728	2.654
吸水率	%	0.53	0.75

4) 細骨材

本研究ではアスファルト混合物の細骨材として2種類の天然砂と砕砂、フィラーとして石粉を用いた。表 4.6 にその性状を示す。これらの材料は一般的なアスファルト混合所で用いられているものである。

表 4.6 本研究で用いた細骨材の性状

使用材料	種類	砕砂	粗目砂	細目砂	石粉
	材質	硬質砂岩	天然砂	天然砂	石灰岩
	産地	栃木県 下都賀郡	埼玉県 川越市	千葉県 佐原市	栃木県 佐野市
通過質量 百分率 (%)	13.2 mm	100	100	100	100
	4.75 mm	100	100	100	100
	2.36 mm	88.4	90.8	99.8	100
	0.6μm	26.8	29.8	87.8	100
	0.3μm	14.3	18.5	41.3	98.0
	0.15μm	7.7	2.9	6.9	97.0
	0.075 μm	4.7	1.6	0.4	85.0
表乾密度	g/cm ³	2.675	2.567	2.526	—
かさ密度	g/cm ³	2.652	2.535	2.446	—
見掛密度	g/cm ³	2.713	2.620	2.657	2.76
吸水率	%	0.84	1.29	3.25	—

5) 配合

アスファルト混合物の粒度やアスファルト量は、マーシャル安定度試験に基づく配合設計方法により決定した。所定の突固め回数でマーシャル供試体を作成し、空隙率、飽和度、マーシャル安定度試験結果である安定度およびフロー値が基準値に適合する配合とした¹³⁾。

表 4.7, 図 4.3 に示すとおりアスファルト混合物の粒度は規格で示された粒度範囲の中央値に近くなるように骨材配合比を決定した。

本研究は大型車交通量の少ない道路舗装を対象としていることから、マーシャルランマを用いて両面 50 回突き固めた時の密度を基準密度とし、アスファルト量を求めた結果 5.4 %となった。アスファルト混合物の基本性状を表 4.8 に示す。

表 4.7 アスファルト混合物の配合および粒度

項目		6号	7号	砕砂	粗目	細目	石粉
配合率	%	34.0	22.0	11.0	15.0	12.0	6.0
通過質量百分率 (%)	19 mm	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	13.2 mm	99.4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	4.75 mm	4.0	72.8	100.0	100.0	100.0	100.0
	2.36 mm	0.0	3.3	88.4	90.8	99.8	100.0
	0.6 mm	0	0	26.8	29.8	87.8	100.0
	0.3 mm	0	0	14.3	18.5	41.3	98.0
	0.15 mm	0	0	7.7	2.9	6.9	97.0
	0.075 mm	0	0	4.7	1.6	0.4	85.0

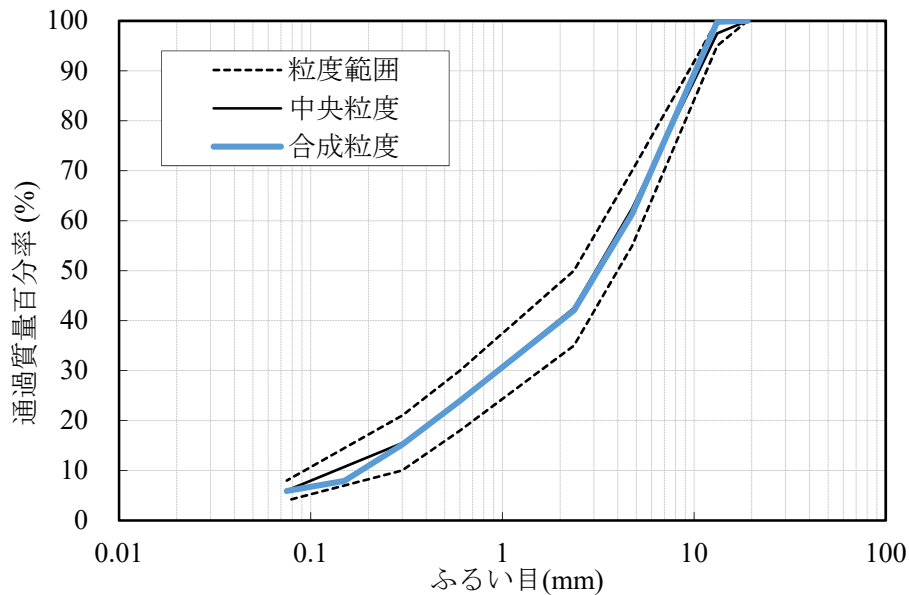


図 4.3 アスファルト混合物の合成粒度

表 4.8 アスファルト混合物の基本性状

項目	基準値	試験結果
理論密度 (g/cm ³)	—	2.480
基準密度 (g/cm ³)	—	2.370
空隙率 (%)	3~7	4.4
飽和度 (%)	65~85	78.4
安定度 (kN)	4.90 以上	9.0
フロー値	20~40	31

(2) 試験供試体の整形方法

試験供試体は、室内ミキサーにより混合し、 $300 \times 400 \times 50$ mm の型枠につめ、ローラーコンパクタにより締固め度が 100 % になるように締め固めたものより整形した。図 4.4 に試験供試体の作成方法を示す。舗装調査・試験法便覧⁸⁾では4面カットした供試体を作成することが望ましいとしていることから、本研究では、 $300 \times 400 \times 50$ mm のスラブ状の混合物から、ダイヤモンドカッターを用いて $40 \times 400 \times 40$ mm の供試体を6本切り出した。このときスラブ状のアスファルト混合物の 300 mm 辺の両端部は型枠に拘束された部分であり他の部位と密度等が異なることが考えられるため、端部から 20 mm までの部分は供試体に用いなかった。なお、本研究では水を供給しながらの試験を行うことから、舗装表面すなわち供試体の転圧面のテクスチャも試験結果に影響を与えられ、供試体の両側面と底面の3面をカットした供試体も作成し比較検討している。

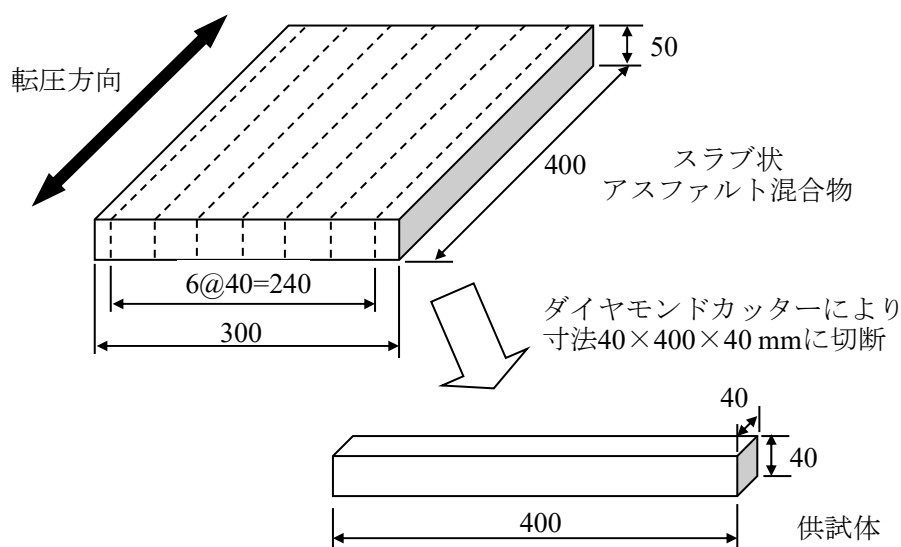


図 4.4 試験供試体の作成方法

4.2.3. 疲労試験の試験条件

ここでは、曲げ疲労試験の条件として、制御方法、载荷波形およびひずみレベル、载荷周波数、試験温度について述べる。

(1) 制御方法

疲労試験は試験供試体に繰返し変形を与える試験であるが、供試体に加える変位を一定に保つひずみ制御方式と供試体に加える荷重を一定に保つ応力制御方式がある。一般に強度の異なる材料の疲労寿命の大小を比較する場合、応力制御方式では材料強度が高いものほどひずみが小さくなることから疲労寿命は長くなる傾向を示すが、ひずみ制御試験では逆に発生する応力が大きくなるため疲労寿命は短くなる傾向を示し、両試験では結果が逆の傾向を示すことが知られている¹⁴⁾。

応力制御方式は供試体内部に一度欠陥が生じると変位が増加し急激に破壊に至るため、破壊点が明確であるという特徴がある。一方、ひずみ制御方式は供試体内部に欠損が生じると応力が小さくなるものの急激に破壊が進行することが少なく破壊点が明確でない場合が多いが破壊の進行過程が観察できる利点があると考えられる。

以上のことより、本研究では、アスファルト舗装に微細なひび割れが生じた後の破壊の進行過程を詳細に観察するため、ひずみ制御方式による試験とした。

(2) 载荷波形およびひずみレベル

ひずみ制御方式により疲労試験を行う場合、载荷波形や与えるひずみレベルを設定する必要がある。既往の研究では载荷波形を正弦波とし、供試体に与える最大ひずみを $200\sim 800\times 10^{-6}$ (m/m) 程度に設定しているものが多い^{15), 16)}。

既往のアスファルト混合物の疲労に関する研究¹⁷⁾では、疲労試験で载荷する波形について各種の考え方が示されているが、笠原らは交通荷重によってアスファルト混合物層下面に生じるひずみは、Bell Shape Wave (ベルのような波形) になるとし、この波形を用いて疲労試験を行っている。Bell Shape Wave はひずみの振幅が対称形状ではなく、供試体の上端と下端では受けるひずみの大きさが異なる。正弦波を与える疲労試験と周波数などの条件を同じにして試験を行うと、Bell Shape Wave を与えたものは正弦波を与えたものよりも疲労しにくいという結果が得られており、ひずみ波形が疲労特性の評価に大きな影響を与

えると指摘している。また、破壊状態についても言及しており、引っ張りひずみが大きくなる側から必ず破壊することが報告されている。

また、向後には載荷波形として正弦波、三角波、二山波を用いて疲労試験を行った結果について取りまとめている¹⁸⁾。これらの載荷波形は供試体上端と下端が受けるひずみと同じになる対称形の波形を用いているが、これに加え一周期の載荷を行った後に波形載荷を休止した場合の影響についても言及している。この研究では、正弦波よりも二山波の方が疲労破壊しやすいという結果が示されているほか、休止時間が長いほど蓄積した疲労が回復し、同じ波形を載荷した場合でも疲労破壊回数が大きくなることが示されている。

このように、疲労試験の載荷波形として一般に用いられている正弦波と実際の交通により発生するひずみ波形は必ずしも同じではなく、表層が受ける疲労をそのまま再現することにならないが、既往の研究¹⁸⁾から載荷波形の形状が変化してもひずみと破壊回数の相対的な関係はそれほど変化しないことが示されているため、本研究では載荷波形を正弦波とした。

また、本研究では、雨水の存在の有無が疲労蓄積に与える影響を把握することを目的としており、疲労による破壊に至る進行過程をより詳細に把握することを意図して、ひずみレベルについては 200×10^{-6} (m/m) とした。

(3) 載荷周波数

疲労試験ではひずみレベルの設定に加え、ひずみ振幅を与える周期(周波数)を設定する必要がある。我が国ではアスファルト混合物の曲げ疲労試験の周波数を 5 Hz ないしは 10 Hz としている研究が多く、中でも 5 Hz で行っている例が多い。

既往の研究¹⁹⁾では、舗装構造が異なる舗装上に大型貨物車を走行させて舗装内部の生じるひずみを計測している。この研究において、アスファルト混合物層が 100 mm の薄い舗装の上を 30 km/h で走行した例では、舗装内部にひずみが生じている時間は 0.04 秒程度、10km/h で走行すると 0.18 秒程度であることが示されている。また、舗装内部でのひずみは発生している時間は、アスファルト混合物層の厚さにより異なり、混合物層厚が厚くなるほど、影響時間は長くなることが示されている。アスファルト混合物層厚が厚くなるほど影響時間が長くなるのは、アスファルト混合物層が薄いときは舗装体が路盤層以下の比較的弾性的な性質の影響が大きくなっており、アスファルト混合物層が厚いときはアスファルト混合物の粘弾性的な性質が支配的となるためと考えられる。

一方、日本の生活道路の平均走行速度は図 4.5²⁰⁾より、15～20 km 程度であることから、道路にひずみが生じている時間は 0.14 秒程度と算出できる。本研究で対象としている大型車交通量の少ない道路舗装においては、アスファルト混合物層厚は 50 mm 程度であることが多く、既往の研究¹⁹⁾の 100 mm よりも薄いことから、ひずみが生じている時間は 0.14 秒よりも更に短いものであると考えられる。

以上のことより、車両が時速 15km で走行した場合に舗装内部でのひずみが発生している時間は 0.1 程度であると仮定した。これは、両振りの正弦波による载荷の周期に直すと約 0.2 秒、5Hz 程度に相当するものである。よって、本研究では载荷周波数を 5Hz とした。

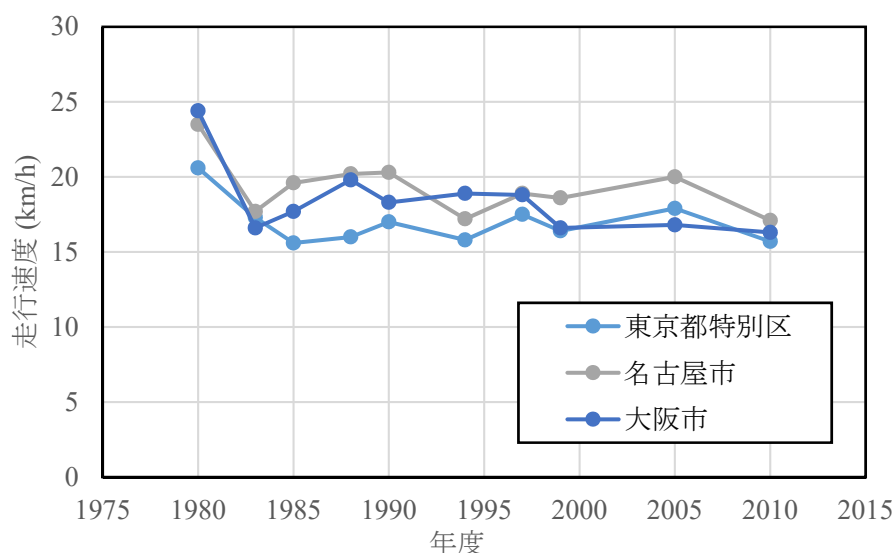


図 4.5 生活道路の平均速度²⁰⁾

(4) 試験温度

舗装の構造を評価する際に標準温度の 20℃に補正して評価²¹⁾されていることや、日本の平均気温(図 4.6)²²⁾などを考慮して、本研究での試験温度は 20℃とした。

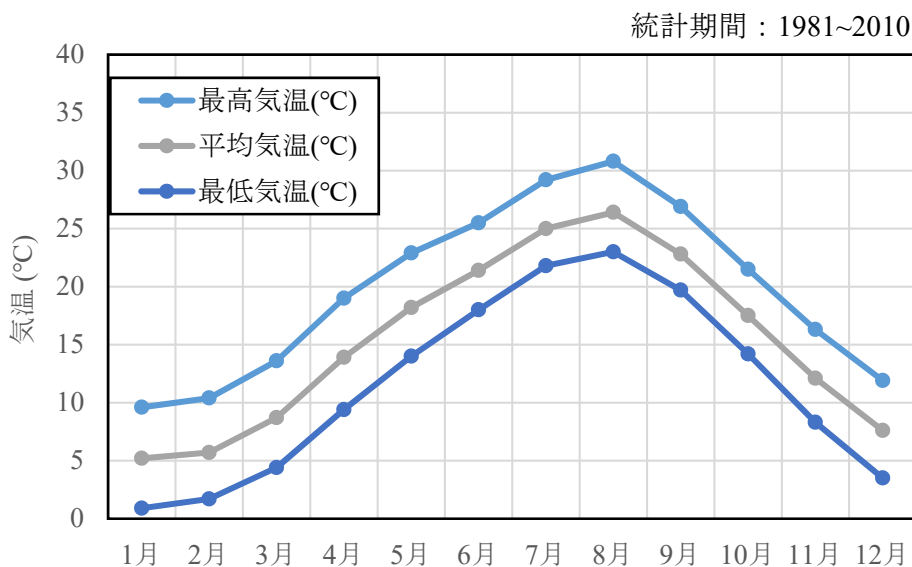


図 4.6 東京都の気候²²⁾

4.2.4. 試験中に供試体へ水を供給する方法の検討

ここでは、試験供試体へ水を供給する方法として、部分滞水法、全水浸法、3 点点滴法の 3 つの方法について比較し、本研究の目的に適した水の供給方法について述べる。

(1) 部分滞水法

部分滞水法は、試験供試体の上部中央に型枠を設置し滞水させる方法である。図 4.7 にイメージ図を示す。ひび割れが発生すると想定される供試体中央上部面に型枠を設置し、供試体中央部を常時滞水状態にする。

曲げ疲労試験では、試験が正常に行われた場合、供試体中央部にひび割れが発生するため、供試体中央部を常時滞水状態とすることで、水の影響下における応力変化を把握することができるものと考えられる。また、型枠設置箇所に保護材を塗布することで、保護材の止水効果も評価することができるものと考えられる。

作製した型枠を図 4.8 に示す。型枠材にはステンレス四角パイプを加工したものを使用した。その他の使用材料を表 4.9 に示す。型枠固定材には油性粘土を、漏水防止材としてシリコンを使用している。

滞水型枠の設置状況を写真 4.3 に、装置の模式図を図 4.9 に示す。滞水させ

る水量は型枠内の約半分（24 ml）程度とした。装置はサイフォンの原理により、試験中に型枠内の水位が低下すると自動で水が補給される仕組みとした。なお、吸水容器は恒温槽外に設置したが、水温は 20 °C に保たれるように調整した。

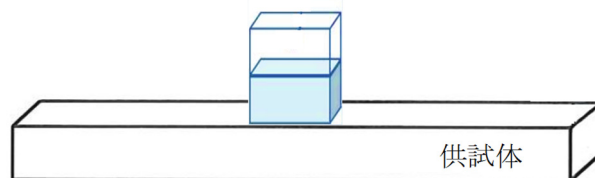


図 4.7 部分滞水法のイメージ図

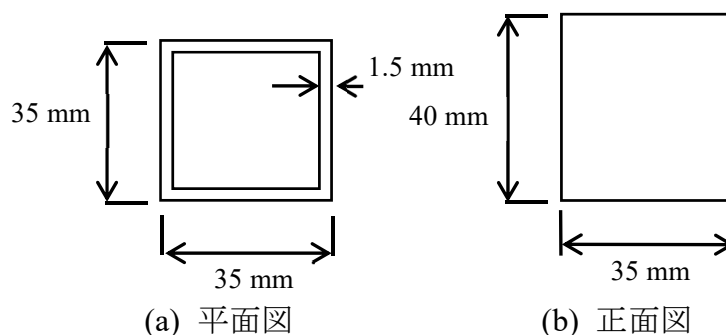


図 4.8 滞水型枠の寸法図

表 4.9 部分滞水法に用いた材料

材料名	材質
滞水型枠	ステンレス製四角パイプ（SUS304） 未研磨 35×35×40 mm
型枠固定材	油性粘土 HiP シリーズ エアコンパテ 不乾性
漏水防止材	信越シリコーン：KF-96-1000CS



写真 4.3 滞水型枠の設置状況

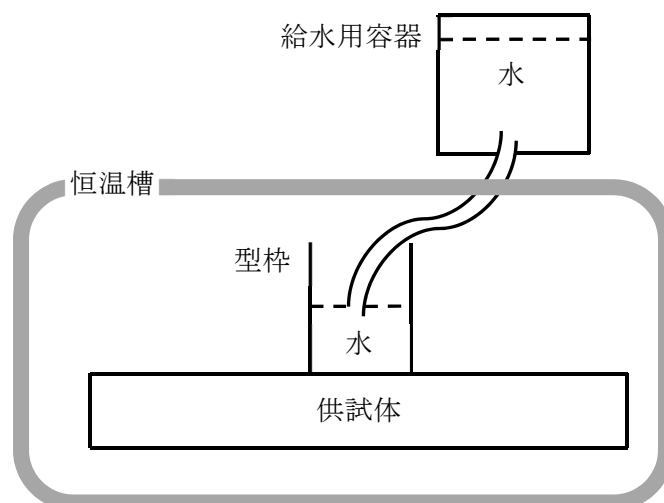


図 4.9 部分滞水装置の模式図

(2) 全水浸法

全水浸法は、試験供試体および载荷装置を水槽に水浸した状態で試験を行う方法である。図 4.10 にイメージ図を示す。恒温槽内に水槽を設置し、供試体を曲げ疲労試験機の試験治具ごと水槽に沈めて試験を行った。

図 4.11 に試験の模式図を、写真 4.4 に試験状況を示す。実際の舗装は舗装表面から雨水の浸透があることから、この状況を模擬するため、供試体の側面4面および供試体下面に防水処理を施した。防水処理は、供試体の変形特性への影響を軽微なものとするため、薄膜で止水できる市販のシリコン系防水剤を噴霧した。

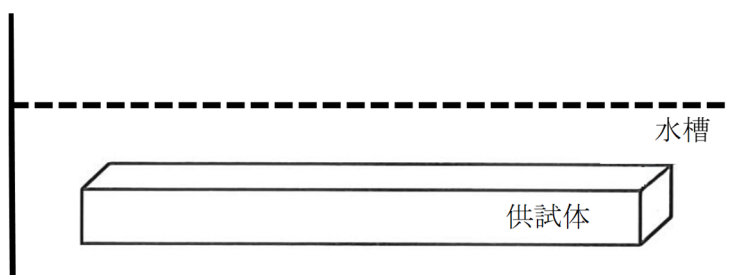


図 4.10 全水浸法のイメージ図



写真 4.4 全水浸法の試験状況

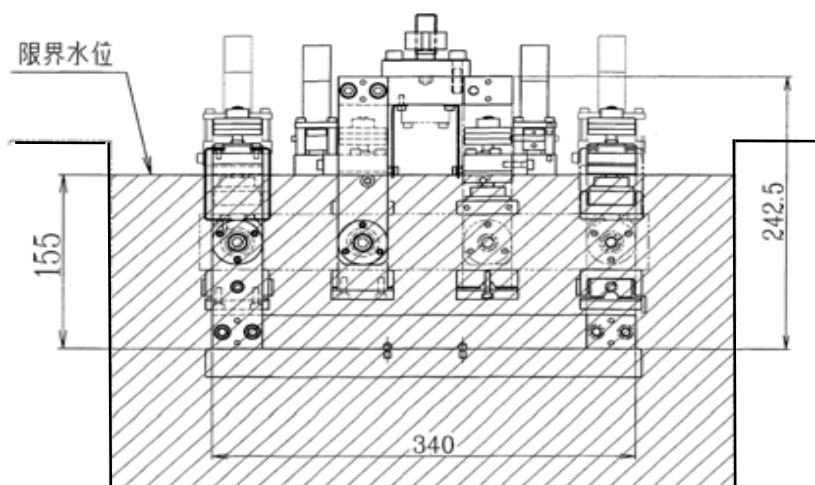


図 4.11 全水浸法の模式図

(3) 3 点点滴法

3 点点滴法は、試験供試体の上面 3 箇所へ常時、水を点滴する方法である。図 4.12 にイメージ図を示す。散水を行うための装置仕様を表 4.10 に示す。点滴装置接続概要図を図 4.13 に、装置設置詳細図を図 4.14 に、散水状況等を写真 4.5、写真 4.6、写真 4.7 に示す。点滴装置の設置場所は試験機の各治具間とした。このとき、点滴装置が接触しないように設置した。

点滴装置は水栓と直接接続することで水圧により点滴のように常時散水を行う構造となっている。水量は測定した結果 1.2 l/h 程度であった。

水温が変化する水道栓から直接散水することになるため、水温が安定する 5 月～7 月および 9 月～11 月に試験を実施した (図 4.15²³⁾参照)。また、水道栓からの水は、室温が 20℃に調整された室内、恒温槽内のホースを通り散水装置

に達するが、水温を安定させるため、ゆっくりと通過させることを意図してホースの長さを10mとした。これにより、供試体に接する段階の水温を20℃の一定に保つことができることを確認している。

また、散水した水は供試体側面をつたって下に落ちるため、実際の舗装では空気、雨水に暴露されることのない側面部に防水処理を施している。防水処理は供試体の変形特性への影響に配慮して、薄膜で止水できる市販のシリコン系防水剤を噴霧した。

供試体は、20℃に設定された恒温槽にて6時間以上の養生を行った。

試験治具への供試体の取付けは、供試体作製時の転圧方向と試験時の載荷方向が一致するように取り付けた。

供試体への散水は、試験開始と同時に行うが、作製した供試体表面はカッターによる切断面であり、試験開始直後は水をはじくため、水がすぐになじむように事前に湿ったウエスにより供試体表面の油分を拭き取った。

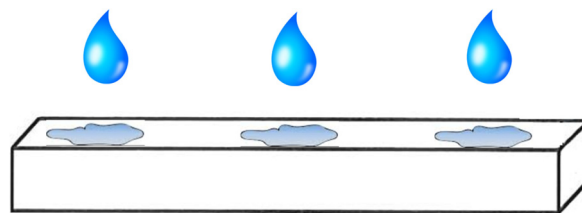


図 4.12 3点点滴法のイメージ図

表 4.10 点滴装置の仕様

製品名	ポタポタと水をまく
製造元	株式会社 タカギ
全長 (mm)	120
口径 (mm)	4.0 (内径) 7.0 (外径)
耐熱温度 (℃)	60
原料樹脂	ポリプロピレン

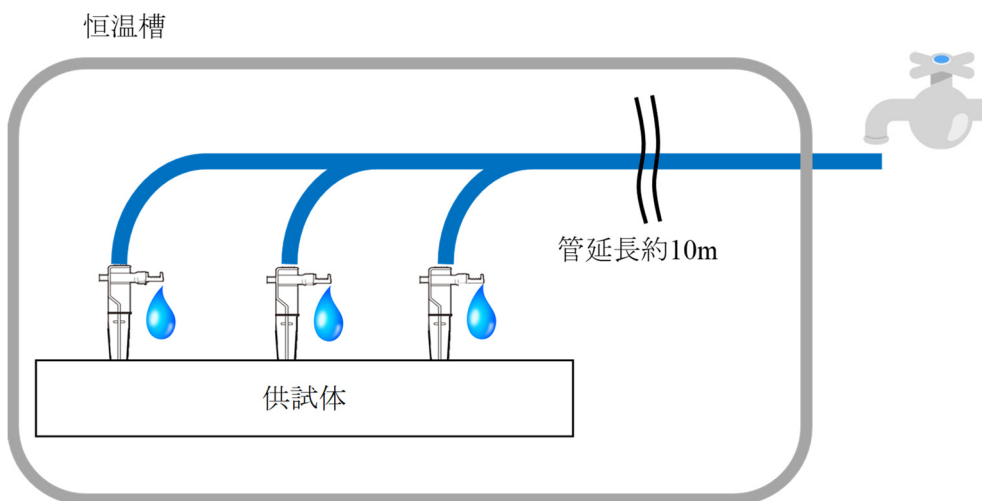


図 4.13 点滴装置接続概要図

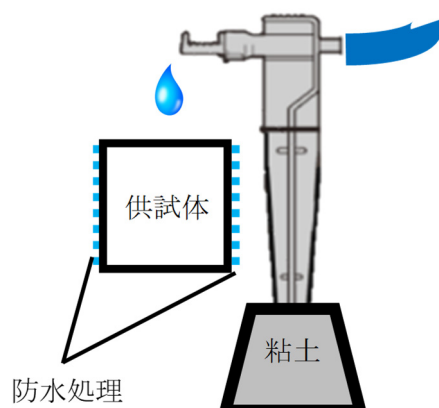


図 4.14 点滴装置設置図



写真 4.5 点滴装置による散水状況

4. 水を供給する曲げ疲労試験による
 フォグシール工法の評価

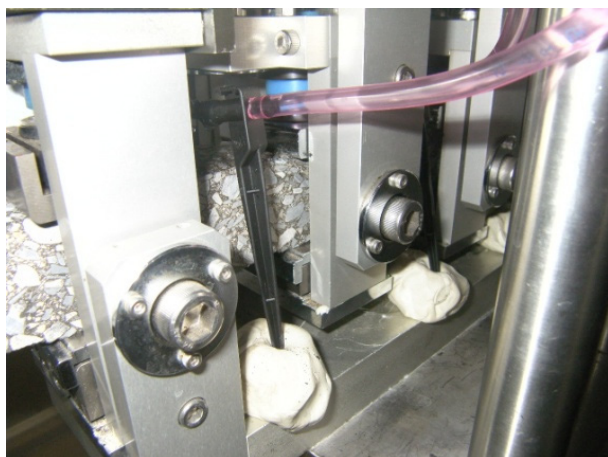


写真 4.6 点滴装置の固定状況



写真 4.7 試験供試体表面の水膜の状況

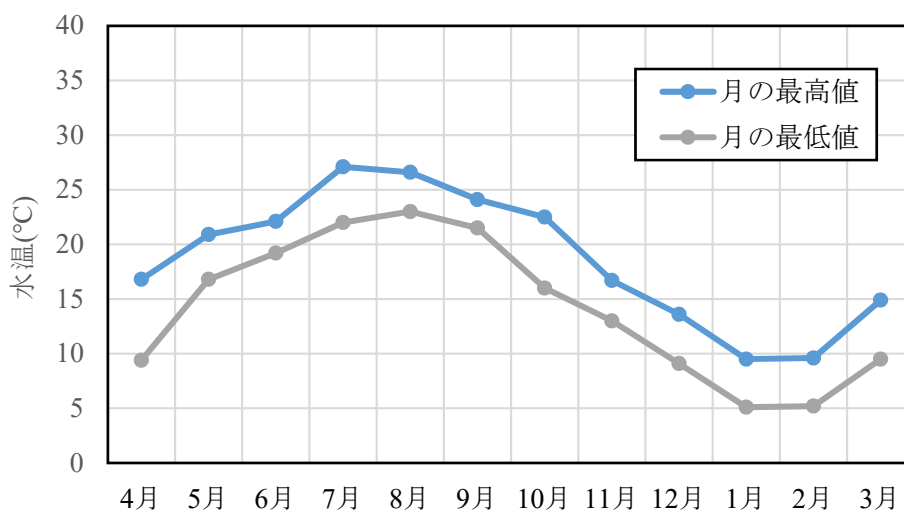


図 4.15 水道水の水温と気温 ²³⁾

(4) 試験結果と考察

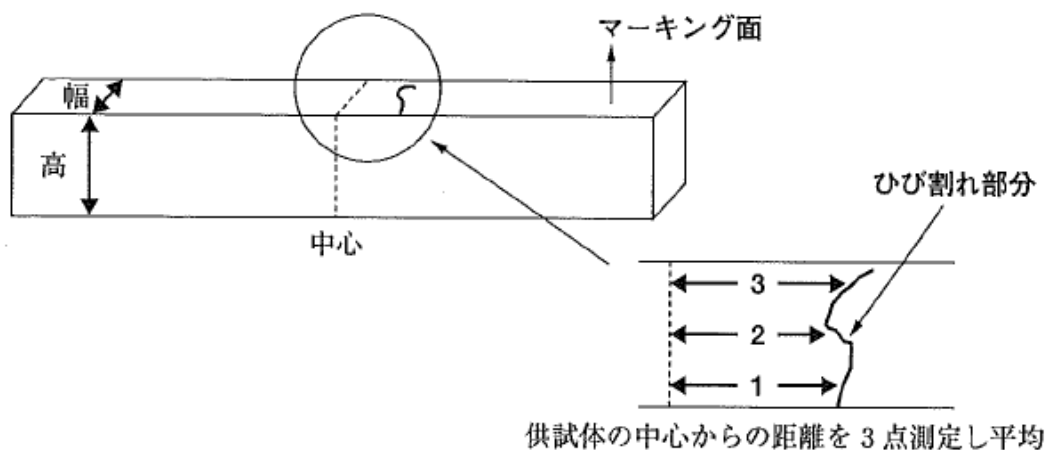
舗装調査・試験法便覧⁸⁾では、図 4.16 に示すように、試験終了後に、試験供試体の中央部からひび割れ発生位置までの距離を 3 点測定し、その平均距離が ±20 mm を超えた場合には、試験が適正に行われなかったものとし再度試験を行うことになっている。

部分滞水法、全水浸法、3 点点滴法による試験終了後にひび割れが生じた位置を表 4.11 に示す。部分滞水法による曲げ疲労試験の供試体は、5 本中 4 本が中心から 20mm より離れたところでひび割れる結果となった。一例として部分滞水法による試験後供試体を写真 4.8 に示す。このように供試体中心でないとひび割れが生じた要因としては、給水用容器が試験中の供試体を拘束していることが考えられ、安定して試験結果を得るのが難しいことが分かった。また、給水用容器内の水には限りがあるため、ひび割れ等による型枠外への水漏れにより滞水状態を持続するのも困難であった。

全水浸法では、5 本中 3 本が供試体中心から 20mm より離れた位置でひび割れる結果となった。また、曲げ疲労試験による破壊回数も、試験条件が同一であるにもかかわらず約 20,000 回～約 80,000 回と大きくばらつく結果となった。これは、全水浸法では、試験供試体の側面 4 面および供試体下面に防水処理を施していたが、市販のシリコン系防水剤を噴霧する方法で行っていったため、防水処理が不十分であったことが考えられる。

3 点点滴法については、5 本すべてが 20 mm 以内でひび割れており、適正に試験を実施できている。

これらのことより、水を供給する 3 つの方法の中では、3 点点滴法が最も適切であると考えられる。3 点点滴法は、試験試験中に円滑に水を供給することができ、点滴装置自体が試験供試体に接触しないことも利点である。



供試体の中心からの距離を3点測定し平均

図 4.16 供試体のひび割れ測定位置⁸⁾

表 4.11 部分滞水法のひび割れ発生位置一覧

項目		供試体中心からの距離 (mm)			平均
		測点 1	測点 2	測点 3	
部分滞水法	1	19	18	12	16.3
	2	80	60	51	63.7
	3	35	34	31	33.3
	4	22	25	29	25.3
	5	23	27	22	24.0
全水浸法	1	33	32	28	31.0
	2	27	25	27	26.3
	3	18	18	15	17.0
	4	34	31	36	33.7
	5	18	19	15	17.3
3点点滴法	1	4	10	17	10.3
	2	13	10	11	11.3
	3	9	10	12	10.3
	4	11	5	14	10.0
	5	1	1	4	2.0

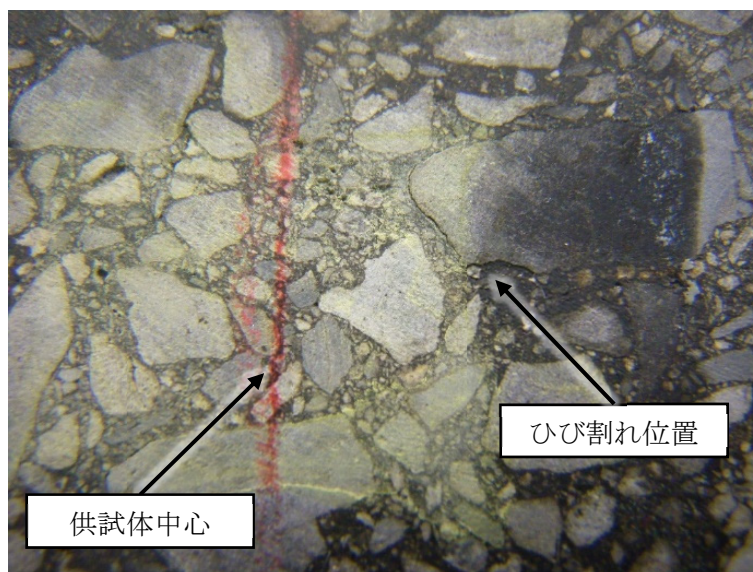


写真 4.8 部分滞水法による試験後の供試体

4.2.5. 試験供試体の散水面形状の検討

舗装調査・試験法便覧⁸⁾では、試験供試体は $300 \times 400 \times 50$ mmのスラブ状の混合物から4面をカットして $40 \times 400 \times 40$ mmの供試体を作成することが望ましいとしているため、本研究においても4面をカットした供試体を作成しているが、水が与えられる面（以下、散布面と称す）はカッターによる切断面であり、カッターによる切断面はきめが細かく緻密であることから、一般的な舗装表面と比較し水の浸透性に違いがあると考えられる。そこで、散水面を一般的な舗装表面と同じテクスチャになるように、3面をカットする供試体を作製し試験を実施した。図 4.17 に供試体の側面図、写真 4.9 に作成した供試体を示す。カッターによる切断面を4面から3面とすることで、散水面である表面は粗面状となり実際の舗装表面に近い状態となる。

表 4.12 に曲げ疲労試験終了後に、試験供試体上のひび割れが生じた位置を示す。4面カット供試体と比べ3面カット供試体は破損位置がばらつく傾向があり、供試体中心から20mm以上離れていることもある。3面カット供試体では、供試体表面に凹凸があることから、表面の凹部では、わずかではあるが断面積が小さいため、応力が集中して、その場所からひび割れた可能性が考えられる。表 4.13 に試験供試体に水滴を垂らした際の経時変化を示す。4面カット供試体では、1時間後には供試体に水滴が浸透しているのが分かるが、3面カット供試体では、アスファルトの油分が多いことから、浸透していくのに時間を要しているのが分かる。このこともひび割れ発生位置がばらつく要因ではないかと推察される。

以上のことより、3面カット供試体では、試験結果のバラツキが大きくなることから、本研究では、4面カットの供試体を用いることとした。

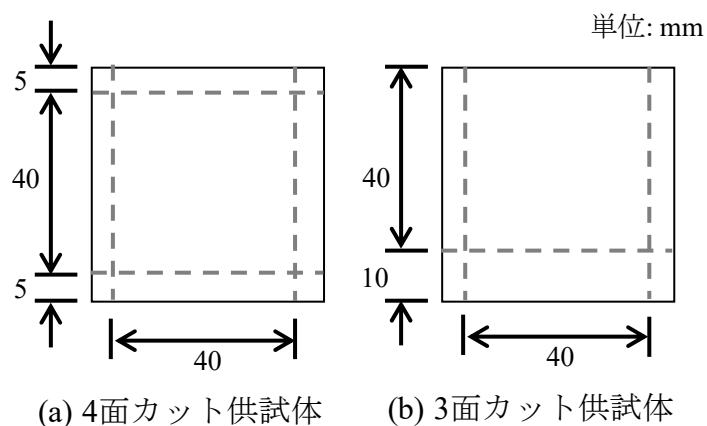


図 4.17 試験供試体の側面図

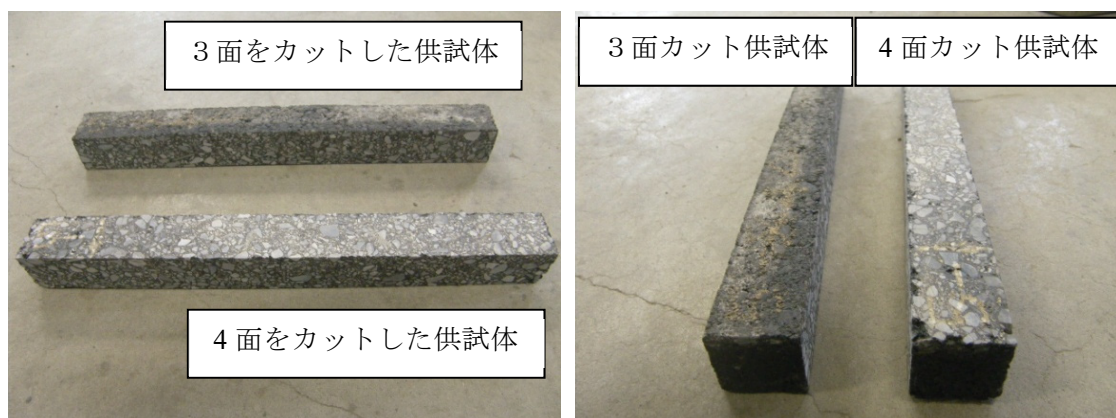




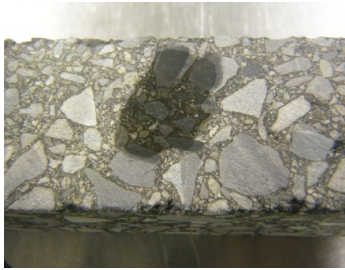




写真 4.9 3面カット供試体と4面カット供試体

表 4.12 試験供試体作製方法別の破損位置測定結果

項目		供試体中心からの距離 (mm)			平均
		測点 1	測点 2	測点 3	
3面	1	31	32	32	31.7
	2	31	30	27	29.3
	3	17	17	24	19.3
	4	19	18	23	20.0
	5	32	34	23	29.7
4面	1	3	7	5	5.0
	2	7	4	0	3.7
	3	8	14	19	13.7
	4	10	9	8	9.0
	5	15	13	13	13.7

表 4.13 試験供試体作製方法別の散水状況

	4面をカットした供試体	3面をカットした供試体
散水直後		
1時間後		
2時間後		
4時間後	—	

4.2.6. 試験供試体の養生方法の検討

試験供試体表面の油分の影響で、点滴により供給した水分がはじかれ試験結果がばらつくことが考えられた。そこで、事前に 20℃に調整された水槽で一定時間の水浸養生を行った供試体について曲げ疲労試験を実施した。水浸養生の試験条件と試験結果を表 4.14 に示す。

試験条件 C および D に関しては、水浸養生を行わない試験条件 B の結果とほぼ同等であった。1 分間程度の水浸養生では水の浸透が促進されないと考えられる。

試験条件 E に関しては、水浸養生を行わない条件 B の結果と比較し、疲労抵抗性が小さくなる傾向がみられた。供試体が事前に十分吸水し、水の浸透も促進され疲労抵抗性が低下したと考えられる。しかし、試験条件 F に着目すると、試験条件 A と比較した場合、疲労抵抗性が小さくなっている。これは、試験中の散水の有無に関わらず、試験前に 24 時間水浸養生することが原因であると考えられる。

以上のとおり、試験前の試験供試体を水浸養生することで、早期に応力低下する傾向が認められるが、その原因は水浸による影響とも考えられ、水の供給の有無に着目して材料評価を行うことを考える場合、水浸養生を行うことにより問題がより複雑になるものと考えられることから、本研究においては水浸養生を行わないものとした。

表 4.14 水浸養生条件

試験条件	試験前の 水浸養生時間	試験中 の散水	応力値 30% における 平均载荷回数	備考
A	—	無	124,400	—
B	—	有	58,800	—
C	1 分間	有	55,100	≒条件 B
D	60 分間	有	57,000	≒条件 B
E	24 時間	有	39,100	<条件 B
F	24 時間	無	100,400	<条件 A

4.3. 水の有無がアスファルト混合物の疲労特性に与える影響

4.3.1. 試験供試体

試験供試体は締固め度が 99.0～101.0%の範囲内のものを使用した。また、舗装調査・試験法便覧⁸⁾では、試験終了後のひび割れが生じた位置について、供試体中央部からの距離を 3 点測定し、その平均距離が±20 mm を超えた場合には、試験が適正に行われなかったものとし再度試験を行うことになっている。本研究においても同様に測定を行い、すべての供試体においてひび割れ位置は 20mm 以下であることを確認している。

4.3.2. 試験結果および評価方法の検討

(1) 接線の交点による評価

1) 評価方法

舗装調査・試験法便覧⁸⁾では、両端固定 2 点荷重では供試体中央の正確なひずみ量を測定できないことから、式(4.1)より試験時の中央変位量を算出する。また、荷重から式(4.2)により応力を算出し、横軸に荷重回数、縦軸を応力として両者の関係を図 4.18 のように整理する。描いた図より応力変化が小さい点と大きい点において各々接線を引き、その交点における荷重回数を破壊回数と定義している。

$$d = \frac{\varepsilon(3L^2 - 4l^2)}{12h} \quad (4.1)$$

ここに、 ε : ひずみ

d : 中央の変位量 (mm)

h : 供試体の高さ (mm)

L : スパン長 (mm) (300mm)

l : 支点からの荷重点までの距離 (mm) (100 mm)

$$\sigma = \frac{3Pl}{bh^2} \quad (4.2)$$

ここに、 σ : 曲げ応力 (MPa)
 P : 荷重 (N)
 b : 供試体の幅 (mm)
 h : 供試体の高さ (mm)
 l : 支点からの载荷点までの距離 (mm) (100 mm)

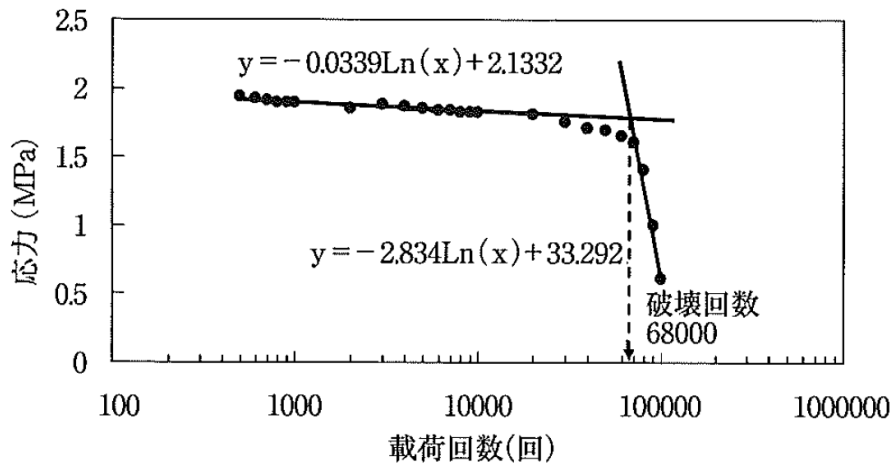


図 4.18 舗装調査・試験法便覧における評価方法⁸⁾

2) 試験結果

試験供試体に水を与える条件下と水を与えない通常の条件下で実施した疲労試験結果について述べる。それぞれの条件で供試体数は5本とした（以下、水を与えない通常の試験供試体を N1～N5、点滴により水を与えた試験供試体を W1～W5 という）。

図 4.19 に曲げ疲労試験結果を示す。明確なことは分からないものの水を与えた試験供試体は 30,000～40,000 回付近から応力が小さくなっている傾向が認められる。

舗装調査・試験法便覧では、前述したとおり载荷回数を対数スケールの軸として変曲点を挟んだ接線の交点を破壊回数と定義している。図 4.20、図 4.21 に供試体 N3、供試体 W3 の試験結果および破壊回数を示す。供試体 N3 は水を供給しない通常の試験であり、破壊回数は 26,000 回と求まる。供試体 W3 は水を供給しているもので、応力の推移をみると供試体 N3 に比べ急速に応力が低下しているが、破壊回数は 55,000 回と大きく評価されている。このように、水の供給の有無を比較する場合には、接線の交点を破壊回数と定義する方法では、破壊回数を適切に求めることが困難なこともあり、異なる評価方法が必要であると考えられる。

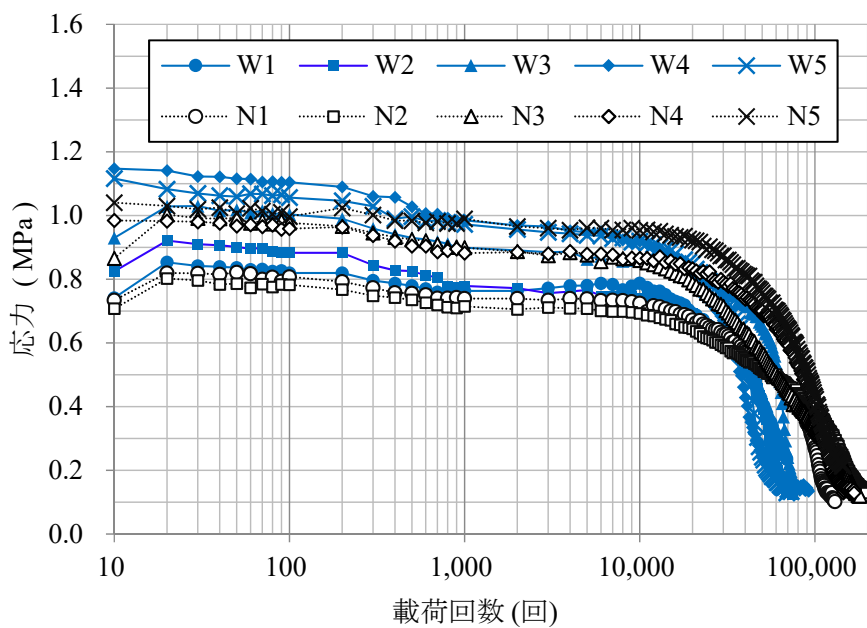


図 4.19 曲げ疲労試験結果

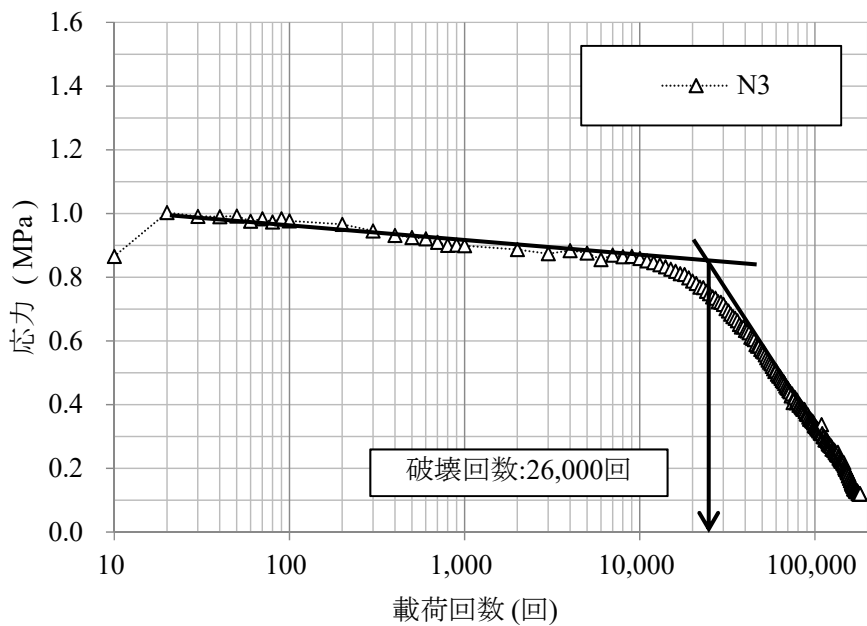


図 4.20 試験供試体 N3 の破壊回数

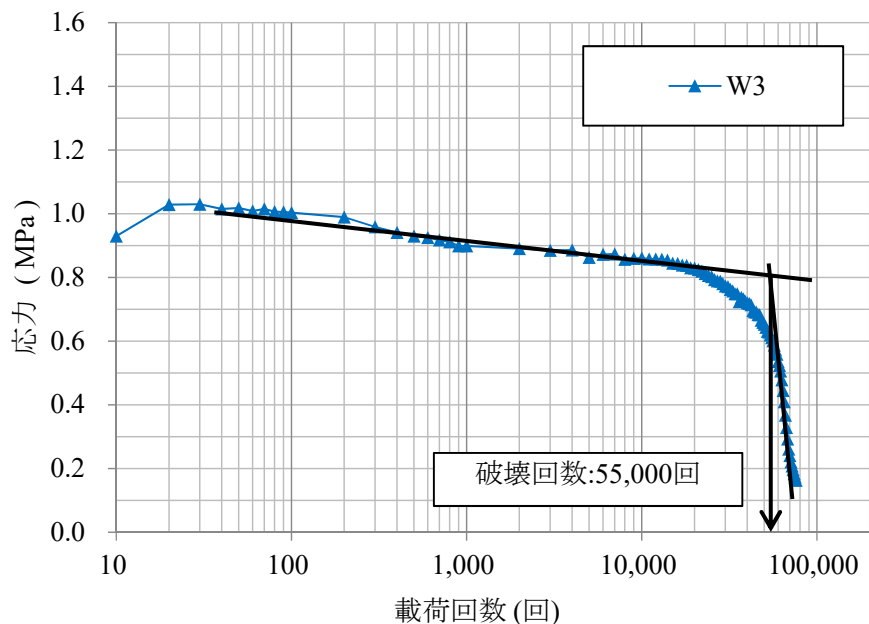


図 4.21 試験供試体 W3 の破壊回数

(2) 一定応力値まで低下した点での载荷回数による評価

図 4.19 の曲げ疲労試験結果より、試験供試体の違いによって初期応力に差があることから、縦軸の応力を各試験で概ね安定する 10,000 回载荷時の応力を 100%として相対評価することとした。また、横軸は対数軸であるが、より明確に水の供給の有無を識別するために線形軸でプロットすることとした。その結果を図 4.22 に示す。これにより、水の有無の影響による差異をより明確に識別できる。水を供給しない試験結果は载荷回数の増加に伴い一定の勾配で応力が低下しているのに対し、水を供給する試験では 30,000~40,000 回付近より勾配が異なり急速に応力が低下している。

破壊回数の評価については、応力を相対評価したことから新たな方法が必要となる。ここでは、応力が急激に減少し始める 60% (以下、「応力値 60%」という) および応力が急激に落ちた後に再び低位安定を示す前の 30% (以下、「応力値 30%」という) における载荷回数で疲労抵抗性を評価することとした。破壊回数、応力値 60%及び応力値 30%における载荷回数の結果を表 4.15, 表 4.16 に示す。

応力値 30%および応力値 60%による評価は、破壊回数での評価に比べ変動係数が小さく、より適正に評価できているものと考えられる。

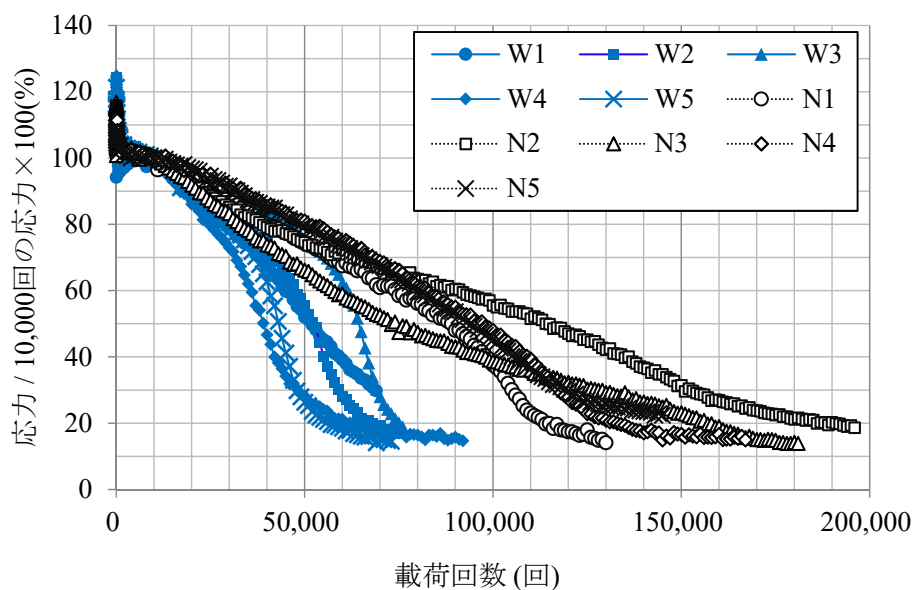


図 4.22 疲労試験結果（線形軸表示）

表 4.15 破壊回数および応力値 30%、60%における载荷回数（水無し）

水の有無	供試体 No	締固め度 (%)	破壊回数 (回)	応力値 30% における载荷回数 (回)	応力値 60% における载荷回数 (回)	
無	N1	99.0	70,000	105,000	74,000	
	N2	98.9	61,000	151,000	91,000	
	N3	100.6	26,000	128,000	58,000	
	N4	100.5	90,000	123,000	83,000	
	N5	101.1	55,000	119,000	80,000	
	平均 (回)			60,400	125,200	77,200
	標準偏差 (回)			23,400	16,800	12,400
	変動係数 (%)			39	13	16

表 4.16 破壊回数および応力値 30%, 60%における载荷回数 (水有り)

水の 有無	供試体 No	締固 め度 (%)	破壊回数 (回)	応力値 30% における載 荷回数 (回)	応力値 60% における載 荷回数 (回)	
有	W1	99.1	30,000	69,000	45,000	
	W2	99.1	39,000	59,000	48,000	
	W3	100.0	55,000	69,000	61,000	
	W4	99.9	25,000	48,000	36,000	
	W5	100.6	35,000	48,000	41,000	
	平均 (回)			36,800	58,600	46,200
	標準偏差 (回)			11,500	10,500	9,400
	変動係数 (%)			31	18	20

4.4. フォグシールがアスファルト混合物の疲労特性に与える影響

フォグシールがアスファルト混合物の疲労特性に与える影響を評価するため、水を供給する曲げ疲労試験中に試験を中断し、試験供試体にフォグシールを施した後に試験を再開する試験を実施した。

4.4.1. 試験条件

(1) 試験供試体の作成方法

使用したアスファルト乳剤は表 3.6 に示す保護材 A と保護材 B である。それぞれの条件で試験供試体は 5 本とした（以下、保護材 A を塗布した供試体を FA1～FA5、保護材 B を塗布した供試体を FB1～FB5 という）。

本試験では、微細なひび割れ発生後にフォグシールにより雨水を封かんすることで舗装の延命効果を把握することを意図していることから、図 4.22 において水を供給する条件下で応力が急激に低下し始める傾向を示す 30,000 回載荷時に微細なひび割れが生じ始めると仮定してフォグシールを塗布することとした。フォグシールを塗布した供試体を写真 4.10 に示す。

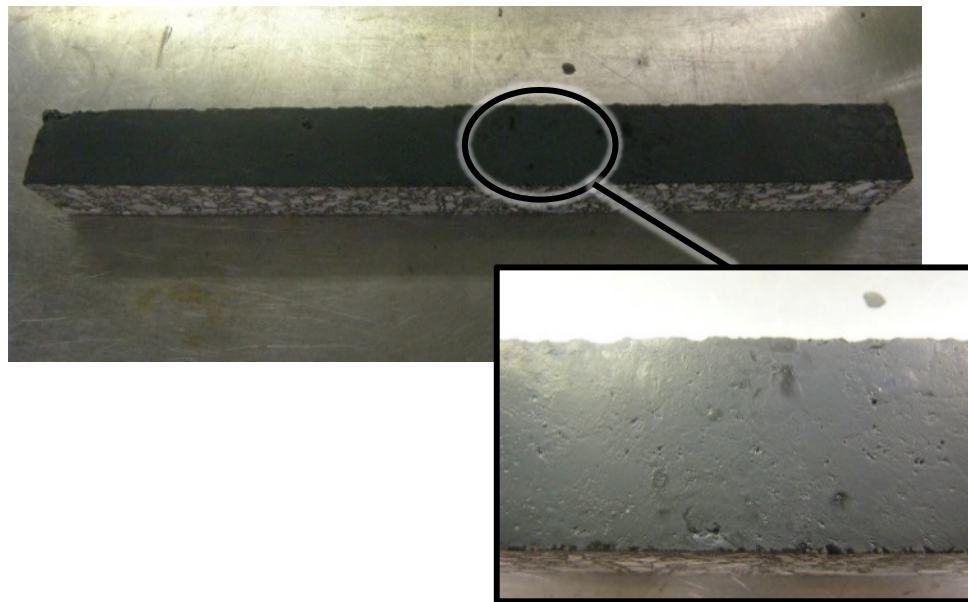


写真 4.10 フォグシールを塗布した試験供試体

(2) フォグシールの塗布方法の検討

30,000 回載荷時に試験を一度中断して試験供試体を取り出し、供試体表面に刷毛にて塗布し、養生後に再度、水を供給する条件で試験を再開するが、疲労試験では試験を中断すると、わずかではあるが一時的に応力が増加することが想定される²⁴⁾ことから、その影響を小さくし、かつ試験条件を統一できるように、予備試験を実施した。

供試体にフォグシールを施す作業時間、アスファルト乳剤が分解するまでの時間を計測したところ、2 時間程度必要なことが分かった。そこで、予備試験では、30,000 回まで載荷した供試体を試験機から取り出し、20℃に設定された恒温槽にて 2 時間養生した後に、曲げ疲労試験を再開した。再開した直後は一時的に応力が増加するが、載荷するに伴い応力は低下する。載荷回数 30,000 回時点の応力レベルに戻るまでの回数を整理し表 4.17 に示す。載荷回数 30,000 回時点の応力レベルまで戻るのに要する回数は、平均 3,000 回（10 分程度）であり、供試体の破壊回数が 100,000 回オーダーであることからすると、フォグシールの養生時間における疲労回復の影響は軽微なものであると考えられる。そこで、本研究では、供試体取り出しから試験再開までの時間を 2 時間とした。

表 4.17 疲労試験中断時の応力と同等となる試験載荷後の載荷回数

保護材の種類	供試体 No	締固め度 (%)	試験を 30,000 回で中断，2 時間後に再開したのちに，30,000 回時点の応力と同等になる載荷回数	
			載荷回数	平均回数
			(回)	(回)
保護材 A	1	99.1	40,000	33,540
	2	99.1	34,000	
	3	99.4	30,500	
	4	99.8	39,000	
	5	100.3	30,900	
保護材 B	1	99.5	30,800	
	2	99.6	34,000	
	3	99.4	33,000	
	4	99.6	33,000	
	5	99.9	30,200	

4.4.2. 試験結果および考察

保護材 A, B 共に 5 本の試験供試体に対して点滴法により供試体に水を与える条件下で同様に曲げ疲労試験を行った。結果を図 4.23, 表 4.18, 表 4.19 に示す。応力値 30%における载荷回数の評価では, フォグシール材を塗布した供試体の平均値は 100,800 回, 95,600 回となり, 表 4.15, 表 4.16 に示す水を与えていない供試体の 125,200 回には届かないものの, 水を与えフォグシールを施していない供試体の 58,600 回に比べ大きく延びていることが分かる。応力値 60%における評価も同様である。これが個々の供試体の結果の差に対し統計的に有意なものか確認するため, 説明変数に水の有無のダミー変数, 乳剤 A の有無のダミー変数, 乳剤 B の有無のダミー変数とする重回帰分析結果を表 4.20, 表 4.21 に示す。「応力値 30%における载荷回数」の補正 R² 値は 0.499, 「応力値 30%における载荷回数」の補正 R² 値は 0.364 とさほど大きくないものの, それぞれの説明変数の P 値は 5%以下であり相応の関係性が認められる。

これらの供試体は 30,000 回载荷時で一度供試体を取り出した際には, 目視でひび割れは確認されなかったが, 30,000 回载荷時は水を与える条件下では急激に応力が落ち始める時であり, 既に目視では確認できない微細なひび割れが入っており, それに対して塗布したフォグシール材が浸透し, 水滴の浸透を抑制したことにより, 延命効果が発揮されたと考えられる。

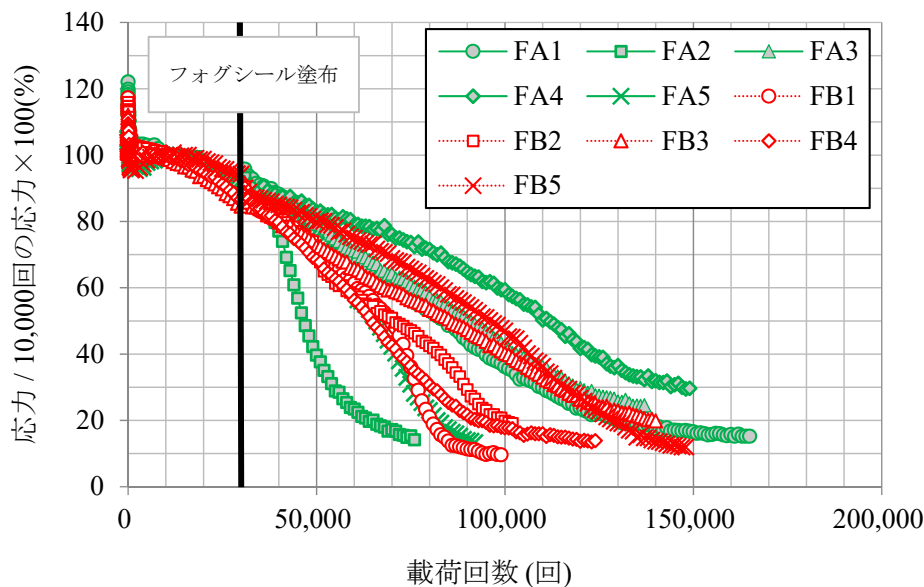


図 4.23 フォグシールを塗布した試験結果

表 4.18 保護材 A の疲労試験結果

フォグシールの種類	供試体 No	締固め度 (%)	破壊回数 (回)	応力値 30% における載荷回数 (回)	応力値 60% における載荷回数 (回)
保護材 A	FA1	99.1	50,000	110,000	71,000
	FA2	99.1	37,000	54,000	44,000
	FA3	99.4	50,000	118,000	76,000
	FA4	99.8	90,000	147,000	98,000
	FA5	100.3	45,000	75,000	60,000
	平均 (回)		54,400	100,800	69,800
	標準偏差 (回)		20,600	36,600	20,000
	変動係数 (%)		38	36	29

表 4.19 保護材 B の疲労試験結果

フォグシールの種類	供試体 No	締固め度 (%)	破壊回数 (回)	応力値 30% における載荷回数 (回)	応力値 60% における載荷回数 (回)
保護材 B	FB1	99.5	60,000	77,000	61,000
	FB2	99.6	41,000	90,000	57,000
	FB3	99.4	32,000	114,000	68,000
	FB4	99.6	47,000	81,000	58,000
	FB5	99.9	80,000	116,000	83,000
	平均 (回)		52,000	95,600	65,400
	標準偏差 (回)		18,700	18,300	10,700
	変動係数 (%)		36	19	16

表 4.20 応力値 30%の重回帰分析結果

(a)回帰統計

重相関 R	0.760
重決定 R ²	0.578
補正 R ²	0.499
標準誤差	22,751
観測数	20

(b)分散分析表

	自由度	変動	分散	観測された分散比	有意 F
回帰	3	1.14×10^{10}	3.78×10^9	7.312	0.003
残差	16	8.28×10^9	5.18×10^8	-	-
合計	19	1.96×10^{10}	-	-	-

(c)分析結果

説明変数	係数	標準誤差	t 値	P 値	下限 95%	上限 95%	下限 75%	上限 75%
切片	125,200	10,175	12.31	0.00	103,631	146,769	113,055	137,345
水	-66,600	14,389	-4.63	0.00	-97,104	-36,096	-83,776	-49,424
フォグシール材 A	42,200	14,389	2.93	0.01	11,696	72,704	25,024	59,376
フォグシール材 B	37,000	14,389	2.57	0.02	6,496	67,504	19,824	54,176

表 4.21 応力値 60%の重回帰分析結果

(a)回帰統計

重相関 R	0.682
重決定 R ²	0.465
補正 R ²	0.364
標準誤差	13,747
観測数	20

(b)分散分析表

	自由度	変動	分散	観測された分散比	有意 F
回帰	3	2.62×10 ⁹	8.75×10 ⁸	4.630	0.016
残差	16	3.02×10 ⁹	1.89×10 ⁸	-	-
合計	19	5.65×10 ⁹	-	-	-

(c)分析結果

説明変数	係数	標準誤差	t 値	P 値	下限 95%	上限 95%	下限 75%	上限 75%
切片	77,200	6,148	12.56	0.00	64,167	90,233	64,167	90,233
水	-31,000	8,694	-3.57	0.00	-49,431	-12,569	-49,431	-12,569
フォグシール材 A	23,600	8,694	2.71	0.02	5,169	42,031	5,169	42,031
フォグシール材 B	19,200	8,694	2.21	0.04	769	37,631	769	37,631

参考文献

1. 笠原靖, 植村正, 牛嶋幸司郎: 供用中におけるアスファルト舗装の老化の研究, 石油学会論文集, pp.30~33, 1974.
2. 谷口豊明, 伊藤達也: アスファルトの劣化, アスファルト, Vol.33, No.164, pp.67~82, 1990.
3. 渡邊一弘, 堀内智司, 久保和幸: 繰返し載荷試験装置を用いた舗装の長期の疲労蓄積に関する一考察, 土木学会舗装工学論文集, 第 19 巻, I151-I158, 2014.
4. 向後憲一, 姫野賢治: アスファルト混合物の一軸疲労試験, 土木学会第 62 回年次学術講演会, pp.583-584, 2007.9.
5. 姫野賢治, 渡辺隆, 丸山暉彦: アスファルト混合物の拡張された疲労破壊基準に関する研究, 土木学会論文集, 第 378 号/V-6, pp.259-268, 1987.2.
6. Jian Qiu, A. A. A. Molenaar, M. F. C. van de Ven, Shaopeng Wu, Jianying Yu: Investigation of self-healing behavior of asphalt mixes using beam on elastic foundation setup, Materials and Structures, Delft University of Technology, 2012.
7. つくば舗装技術交流会: 疲労試験に関する検討, TPT Report, No.4, pp.23-43, 2005.
8. (公社)日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧, B018T, 2007.4.
9. (公社)日本道路協会: 舗装施工便覧, 丸善, p.94, 2006.
10. 日本工業標準調査会: JIS K 2207-2006 石油アスファルト.
11. (一社)日本改質アスファルト協会: 改質アスファルトポケットガイド, 2007.
12. (公社)日本道路協会: 舗装設計施工指針, 2006.
13. (公社)日本道路協会: 舗装施工便覧(平成 18 年版), pp.95-108, 2013.
14. 姫野賢治, 渡辺隆, 丸山暉彦: 低スティフネス状態におけるアスファルト混合物の疲労破壊特性に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 366 号, pp.143-151, 1986.
15. 丸山記美雄, 田高淳, 笠原篤: 配合の異なる混合物の曲げ疲労試験結果, 舗装, 第 41 巻, pp.8-11, 2006.3.
16. 向後憲一, 姫野賢治: 載荷波形および休止時間の違いがアスファルト混合物の疲労挙動に及ぼす影響, 土木学会舗装工学論文集, 第 12 巻, pp.83-89, 2007.
17. 笠原篤, 岡川秀幸, 菅原照雄: アスファルト混合物の動的性状とその舗装構造の力学解析への利用, 土木学会論文集, 第 245 号, pp.107-117, 1976.
18. 向後憲一, 姫野賢治: 載荷波形および休止時間の違いがアスファルト混合物の疲労挙動に及ぼす影響, 土木学会舗装工学論文集, 第 12 巻, pp.83-89, 2007.
19. 井上直, 久保和幸, 渡邊直利: 交通荷重が影響する時間に合わせたレジリエントモデュラス試験の載荷時間の検討, 土木学会学術講演会, Vol.62, pp.175-176, 2007.
20. 国土交通省: 道路交通センサス, 三大都市の旅行速度の推移,
http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/data_shu.html, 2019/1 確認.
21. 雑賀義夫, 阿部長門, 姫野賢治, 丸山暉彦: FWD から得られる特性値の温度補正に関する検討, 舗装, vol.30, pp.10-15, 1995.8.

22. 国土交通省 気象庁：<http://www.jma.go.jp/jma/>, 2019/1 確認.
23. 東京都 水道局：水道水の水温と東京の気温, 2014.
24. 向後健一, 姫野賢治：載荷波形および休止時間の違いがアスファルト混合物の疲労挙動に及ぼす影響, 土木学会舗装工学論文集, 第 12 巻, pp.83-89, 2007.

5. 現場透気試験によるフォグシール工法の評価

5.1. 概要

大型車交通量の少ない道路舗装では、密粒度アスファルト混合物が利用されており、混合物の空隙や目視では確認できない微細なひび割れなどから、雨水が浸透することによって舗装破損が進行すると考えられる¹⁾。このため、実際の道路舗装においてフォグシール工法を適用すべき場所を考える場合、微細なひび割れが現場に発生しているのか否かを評価する必要があると考えられるが、目視で確認できないひび割れを認識するのは困難である。また、フォグシールを実際の道路舗装へ適用した後のことを考えると、フォグシールが適切に機能しているのか、正しく施工できているのか確認することが必要になると考えられるが、フォグシールにより微細なひび割れを確実に処置できたかを確認するのは困難である。一方、道路橋床版の分野では電磁波レーダーを用いて床版のひび割れや土砂化の状態を評価する研究が行われており、目視で確認できないものの評価方法の一つとして考えられるが、電磁波レーダーの測定結果は水分量の影響を大きく受けることから、測定時の天候によって水分量が大きく変化する舗装表面のひび割れについて評価するのは難しいものと考えられる。

以上のことより、実際の舗装へフォグシール工法を適用することを想定し、フォグシールを適用すべき場所を選定することや、フォグシール施工後にその性能を確認することを目的とする現場透気試験^{2),3)}について検討している。本研究における現場透気試験の位置づけを図 5.1 に示す。本章では、まず道路舗装に適用する現場透気試験は一般的な試験ではないことから、試験器を試作し、試験方法や測定値の評価方法について述べる。つぎに、実際に劣化・老化しているアスファルト舗装路面、目視で確認できない微細なひび割れが発生している箇所および各種のアスファルト混合物供試体において、フォグシール工法の施工前後で現場透気試験を実施しフォグシールがアスファルト舗装の透気性を改善する効果について述べる。

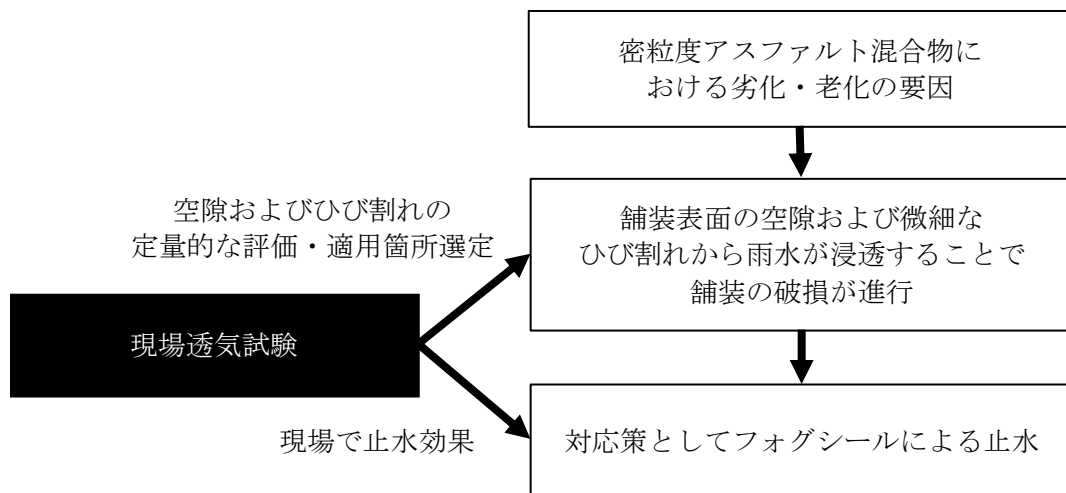


図 5.1 本研究における現場透気試験の位置づけ

5.2. 試験方法の検討

ここでは、本研究で用いた現場透気試験器および試験の方法について述べる。

5.2.1. 現場透気試験器の検討

現場透気試験は、舗装表面に現場透気試験器を設置し、試験器と舗装表面の空間の空気を真空ポンプで吸い上げることで一定の負圧をかけると、一定時間後に舗装から通気してくる空気により負圧が消散するので、その速度を測定する試験である。舗装表面における空隙および微細なひび割れの評価、フォグシールの施工後の性能確認を目的としている。

現場透気試験器の構造を図 5.2 に、仕様を表 5.1 に、外観を写真 5.1 に示す。試験器は負圧を計測する本体に手動式の真空ポンプが接続され、真空ポンプにより生じる負圧は本体および手動式ポンプのアナログダイヤルゲージに表示される。この試験器は既往の研究²⁾でも利用されており、アナログダイヤルゲージを目視にて読み取り、負圧が消散する時間をストップウォッチにより計測している。しかし、損傷が進行しているアスファルト舗装路面においては、路面に微細なひび割れが生じていることから、現場透気試験器により測定すると数秒程度で負圧が消散してしまい、ストップウォッチによる計測では人為的な誤差が大きくなるものと考えられる。そこで、本研究では、負圧の時間的変

化を記録することができる圧力センサを取り付けた。圧力センサを取り付けることで負圧が常時デジタル表示され、詳細な負圧の値を読み取ることが可能となる。また、圧力センサは負圧の変化を感圧素子にて電気信号に変換しアナログ出力を行うことができる仕様とし、データロガーにより負圧の時間的変化を記録することとした。圧力センサ取り付け状況を写真 5.2 に、圧力センサおよびデータロガー、その他取り付けした各機器の仕様を表 5.2 に示す。

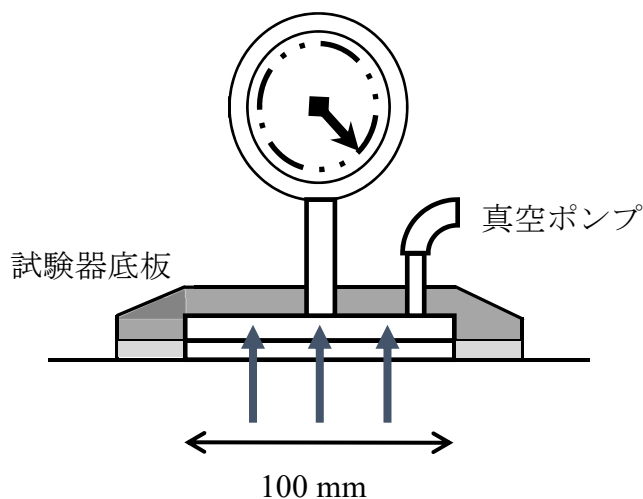


図 5.2 現場透気試験器の構造

表 5.1 現場透気試験器の仕様

試験器名称		現場透気試験器
質量 (ポンプを除く) (g)		4,740
高さ (mm)		260
底板直径 (mm)		200
試験孔 (mm)		100
圧力の種類		負圧
真空ポンプ		手動式
ダイヤル ゲージ 本体側	製造元	長野計器(株)
	径 (mm)	105.0
	目盛 (MPa)	-0.002
	仕様 (MPa)	-0.10
ダイヤル ゲージ ポンプ側	製造元	(株)高島計器
	径 (mm)	55.0
	目盛 (MPa)	-0.005
	仕様 (MPa)	-0.10

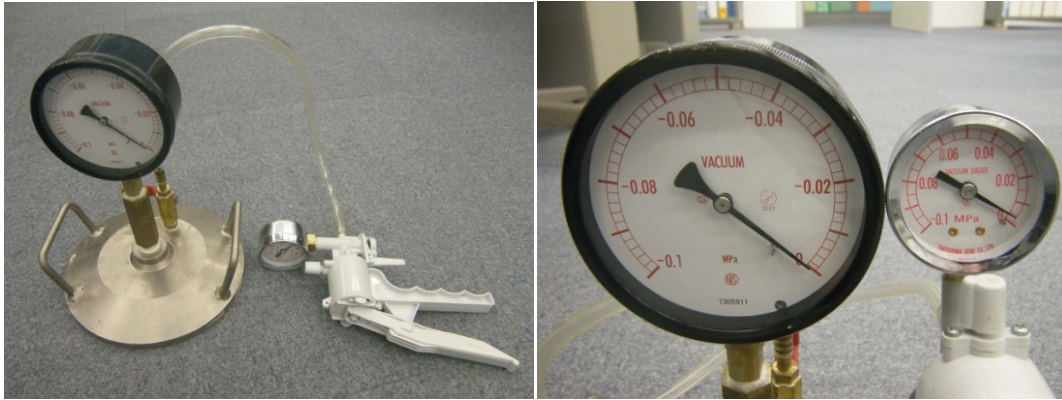


写真 5.1 現場透気試験器の外観

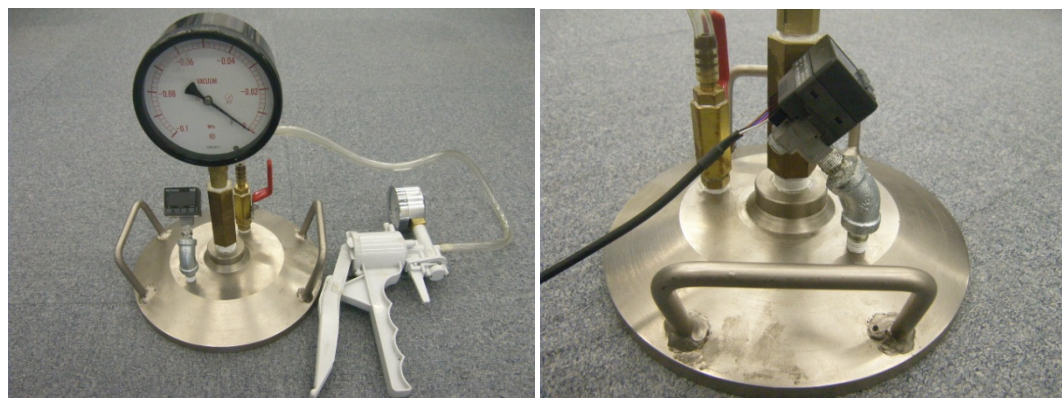




写真 5.2 圧力センサの取り付け状況

表 5.2 圧力センサ等の仕様

機器名	型式	製造元	性能	外観
超小型 デジタル 圧力センサ	AP-C31	株式会社KEYENCE	出力：1~5 V 耐圧力：500 kPa	
電圧 データロ ガー	VR-71	株式会社T&D	入力：2 ch 定格：±15 V 質量：93 g	
モバイル ジャンプ スタータ	—	中国製	出力：5~19 V 入力：12 V - 1 A 容量：14,000 mAh	—
レール式 端子台	TN13B	春日電気株式会社	600 Vmax	—

5.2.2. 透気漏れ防止材の検討

現場透気試験器は舗装表面に設置した試験器と舗装表面の空間の空気を真空ポンプで吸い上げる構造となっており、この空間の空気量の変化を計測するが、特に密粒度アスファルト舗装表面は粗いため試験器との接着が難しく、この接触箇所における透気漏れを確実に防止することが、現場透気試験で正しく計測する際には重要である。ここでは、透気漏れ防止材について検討を行った。

密粒度アスファルト舗装表面が粗面状であることを考慮すると、透気漏れ防止材は舗装表面の隙間等に密着することができる粘性の物質が適していると考えられる。

透気漏れ防止材として検討した材料一覧を表 5.3 に示す。現場で容易に実施することを考慮して市販されているものを中心に材料を選定した。ゲル状物質はスライムという名称で玩具として市販されているものであるが、本研究では、大量に使用することや今後も継続して入手できることを考慮して、水、ホウ砂、ポリビニルアルコールから製造したものを使用した。

表 5.3 透気漏れ防止材候補一覧

透気漏れ防止材	概要
エアコンパテ	INABA DENKO エアコン配管用パテ
液体シリコン	信越化学工業株式会社 KF-96-1000CS
木工用ボンド	セメダイン株式会社 酢酸ビニル樹脂エマルジョン木材接着剤
シリコーンシーラント	DCM ホールディングス株式会社 目地補修材
ゲル状物質	混合物 (水+ホウ砂+ポリビニルアルコール)

(1) 検討結果

透気漏れ防止材について粘性度、自硬性、路面への付着性、気密性の観点より評価した。

粘性度は作業時の感覚で評価しており主観的なものである。自硬性は材料そのものが硬化性を有する否かである。路面への付着性は試験後の容易に取り除くことができるか否かの観点で評価している。気密性については、鉄板面上に試験器を設置し、 -30 kPa の負圧を与え 3 分間で負圧が減少するか否かで評価

した。





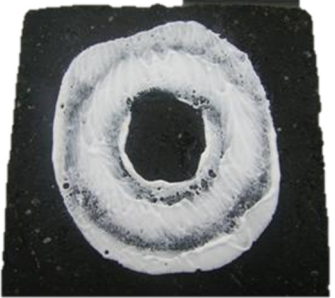





評価結果および状況を表 5.4, 表 5.5 に示す。実際の道路で試験を行うことを考慮すると、試験後は硬化することなく容易に取り除けることが望ましいため、本研究では、気密性があり路面へ付着しない材料であるゲル状物質を用いることとした。

ゲル状物質の試験後の状況を観察すると、ゲル状物質が負圧により試験器内側に流動し評価路面を覆う状況が確認されたため、試験中のゲル状物質の流動を抑制する流動抑制器具およびシリコンマットを用いることとした。写真 5.3 に流動防止器具の設置状況を示す。流動防止器具はφ100 mm の塩ビ管を、厚さ 5 mm に切断したものである。写真 5.4 にシリコンマットの外観を、写真 5.5 に設置状況を示す。シリコンマットは、材質はコスモスーパーゲルシート（品名：HC04N）であり、大きさは 200×300×5 とし、試験孔の部分にφ100 mm の穴を空けたものである。

表 5.4 透気漏れ防止材の評価結果

透気漏れ防止材	粘性度	自硬性	路面への付着	気密性
エアコンパテ	固い	なし	付着しない	低い
液体シリコン	柔らかい	なし	浸透し付着	高い
木工用ボンド	柔らかい	あり	浸透し付着	高い
シリコーンシーラント	やや固い	あり	硬化し付着	高い
ゲル状物質	柔らかい	なし	付着しない	高い

表 5.5 透気漏れ防止材付着状況

透気漏れ防止材	試験前設置状況	試験後付着状況
エアコンパテ		
液体シリコン		
木工用ボンド		
シリコンシーラント		
ゲル状物質		

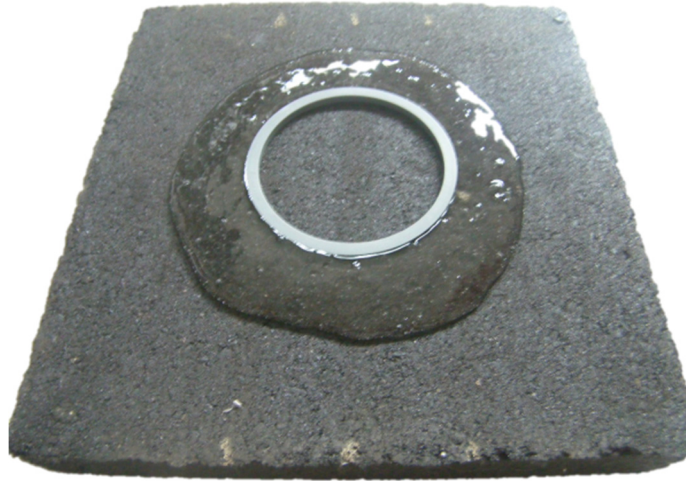


写真 5.3 透気漏れ防止材の流動抑制器具の設置状況

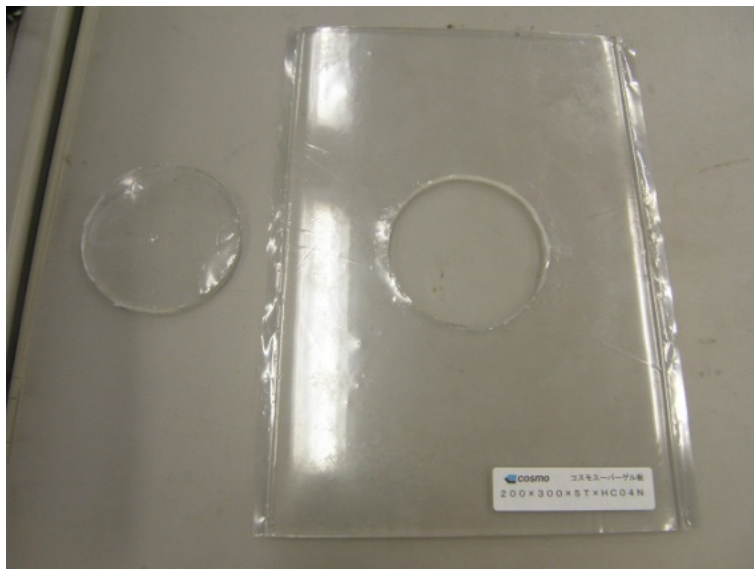


写真 5.4 シリコンマット

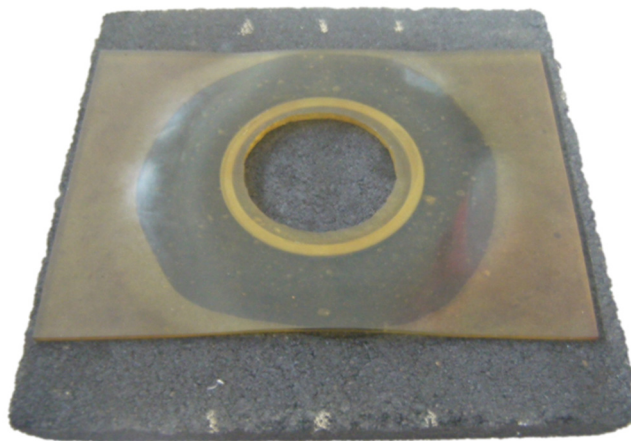


写真 5.5 透気漏れ防止材のシリコンマット設置状況

(2) 透気漏れ防止材（ゲル状物質）の製造方法

ゲル状物質は、水、ホウ砂、ポリビニルアルコール（以下、PVA）の3つの材料が架橋結合したものである。表 5.6 に使用材料を、写真 5.6 に製造したゲル状物質の外観を示す。

現場透気試験を一回行うのに必要なゲル状物質の量は約 200g である。その製造手順を以下に示す。

- 水、ホウ砂、PVA 入り洗濯のり、容器 2 つ、ビニール袋、スパチュラを用意する
- 水 100g に対しホウ砂 4g を入れ、ホウ砂水溶液を製造する（水溶液①）
- 洗濯のり 65g に水 35g を入れ希釈する（水溶液②）
- 水溶液①にスパチュラ等で十分混合しながら水溶液②を少しずつ投入する
- 全体が均一な状態になるまで 1 分以上攪拌する
- 容器を密閉し 12 時間以上養生する
- 養生後、ビニール袋等に入れ密封・保存する

なお、ゲル状物質は路面状況によるが、およそ 5～10 回程度繰返し使用することができる。夏季における高温の路面ではゲル状物質が溶けて路面に付着することがあり、冬季の低温の路面ではゲル状物質が固くなることあるため、使用する路面温度に応じて水分量を±10%程度の範囲で適宜調整した。

表 5.6 ゲル状物質の使用材料



材料名	ホウ砂	PVA 入り洗濯のり
概要	健栄製薬株式会社 白色の結晶性粉末 Na ₂ B ₄ O ₇ ・10H ₂ O 含有	主成分：PVA 液性：弱酸性 濃度 8%
写真		



写真 5.6 ゲル状物質の外観

5.2.3. 空気の流れの確認実験

現場透気試験において、アスファルト混合物内の空気の流れを確認するため、表 5.7 に示す 2 種類の実験を行った。ここでは、試験器内部の空気の流れも観察するため、透明なアクリル板で作製した試験器を用いた。アクリル板の寸法図を図 5.3 に、圧力センサおよび手動式真空ポンプ取り付け状況を写真 5.7 に示す。

表 5.7 実験方法

No.	実験方法
1	気体の可視化を試みた実験
2	供試体の側面を閉塞しての実験

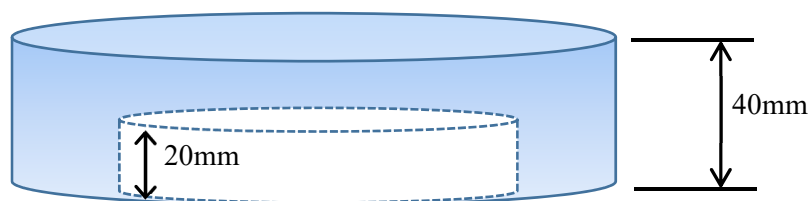


図 5.3 アクリル板による試験器底板の寸法図

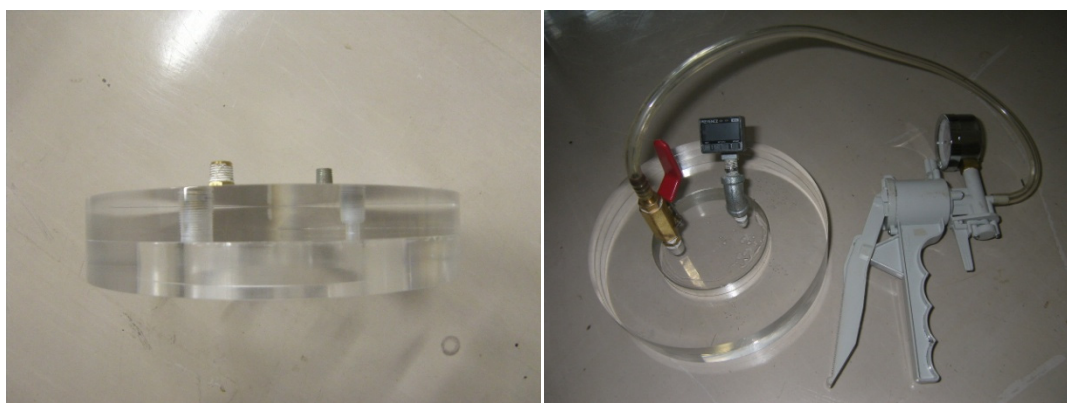


写真 5.7 アクリル板で作製した現場透気試験器

(1) 気体の可視化を試みた実験

現場透気試験器内および密粒度アスファルト混合物内の気体の流れを確認するため、密閉された容器内にて煙等を用いて気体を可視化し試験を行った。気体の可視化に使用した材料は線香、カラスモークボール、ドライアイスである。

作製した密閉容器を図 5.4, 写真 5.8 に示す。容器の材質はいずれも透明なアクリル板である。容器には手動式真空ポンプや圧力センサの配線を通す穴が空いており、供試体および現場透気試験器を設置することで、上部下部各々を密閉させる構造となっている。供試体は上部下部各々を密閉させる蓋の役割をするため、供試体と密閉容器の間はシリコンを用いて密閉した。

現場透気試験器および供試体を設置した状況を図 5.5, 写真 5.9 に示す。供試体は「4.2.2(1) アスファルト混合物の使用材料および配合」と同じ材料を用いて、室内ミキサーにより混合し、300×300×50mm の型枠につめ、ローラーコンパクタにより締固め度が 100%になるように締め固めて作製した。同一条件の供試体を 3 枚作製した。

表 5.8 に実験結果を示す。線香は発生する煙の量が少なく気体の流れを確認できるほどではなかったが、現場透気試験に負圧をかけた際に、一瞬、試験孔内の気体が白く濁る現象(写真 5.10)を確認できた。

スモークボールについては発生した煙の量が多く実験装置内部を視認することができなかった。また、煙の粒子が大きく重いいためか現場透気試験器による負圧力では気体の動きを観察することはできなかったが、供試体下面はスモークボールの色で着色される事象(写真 5.11)を確認できた。負圧をかけることで供試体下面より気体が供試体へ流入しているものと理解できる。

ドライアイスについては発生する煙が水蒸気であるため、水蒸気発生後容器内を充満することなく下部に留まる結果となり、気体の動きを確認することができなかった。

線香により気体の可視化することで、試験孔内が曇る現象を確認できたことから、密閉容器の上部側で煙を発生させる実験も行ったところ、容器の下部側で煙を発生させた実験と同様に、試験孔内が白く濁る結果となった。このため、現場透気試験器の測定時におけるアスファルト混合物内の気体の流れには図 5.6 に示すように供試体の表面、側面および底面からの気体の流入があることが確認できた。

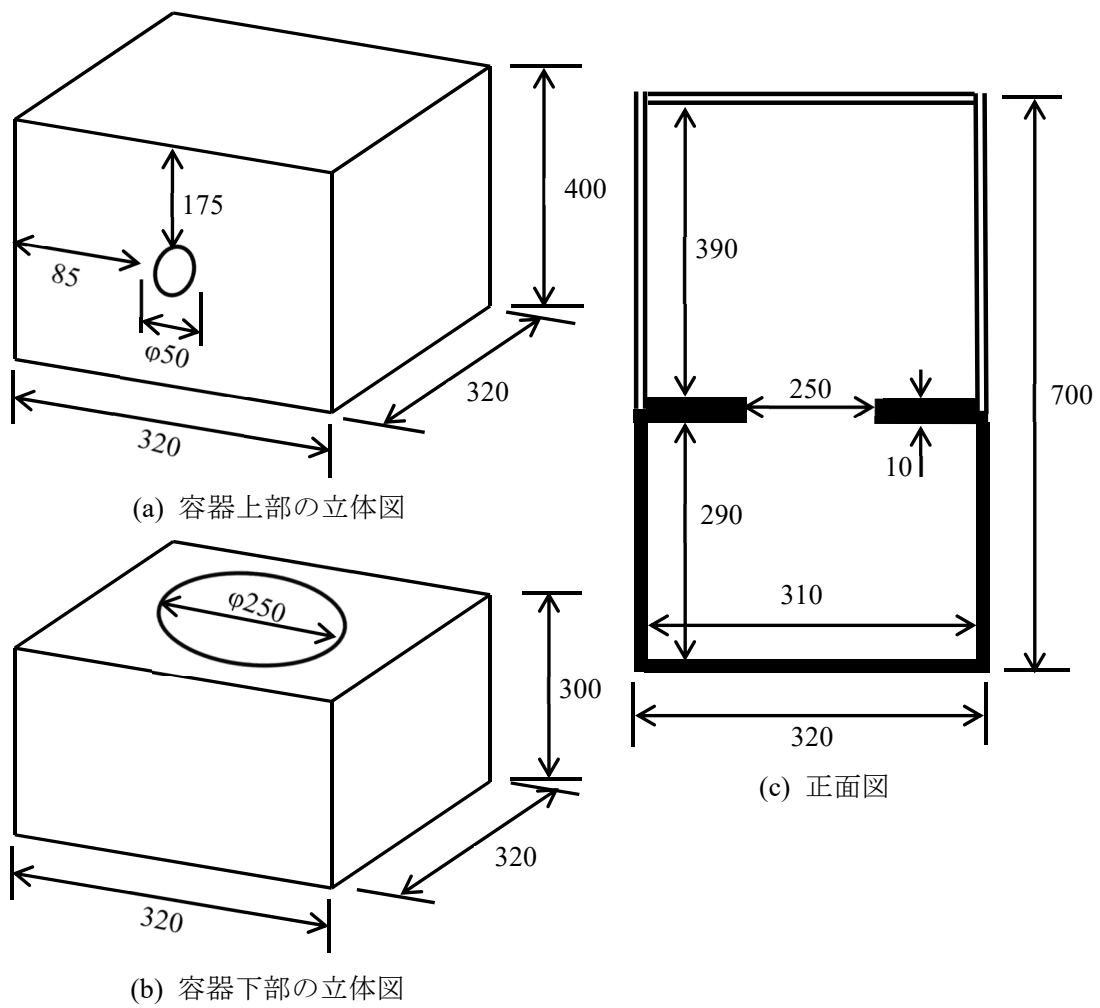


図 5.4 密閉容器の寸法図



写真 5.8 密閉容器の外観

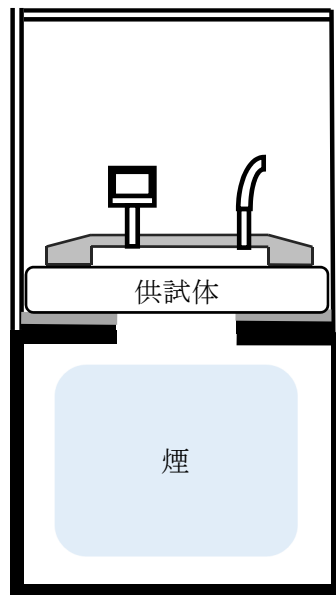
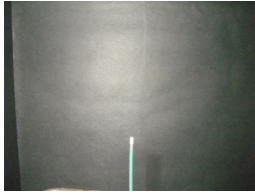
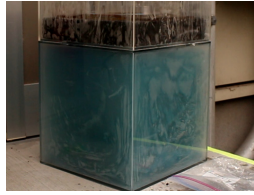
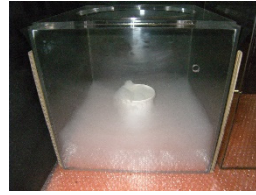


図 5.5 密閉容器に設置した現場透気試験器の模式図



写真 5.9 密閉容器に設置した現場透気試験器の状況

表 5.8 気体の可視化を試みた実験結果

煙源	線香	スモークボール	ドライアイス
原材料	タブ粉, 槍	花火, 煙玉	二酸化炭素
発生気体	煙	煙	水蒸気
気体色	白	緑	白
煙量	少ない	多い	多い
可視化	不可	可	可
供試体通過	可	不可	不可
気体の動き	視認不可	視認不可	視認不可
状況写真			

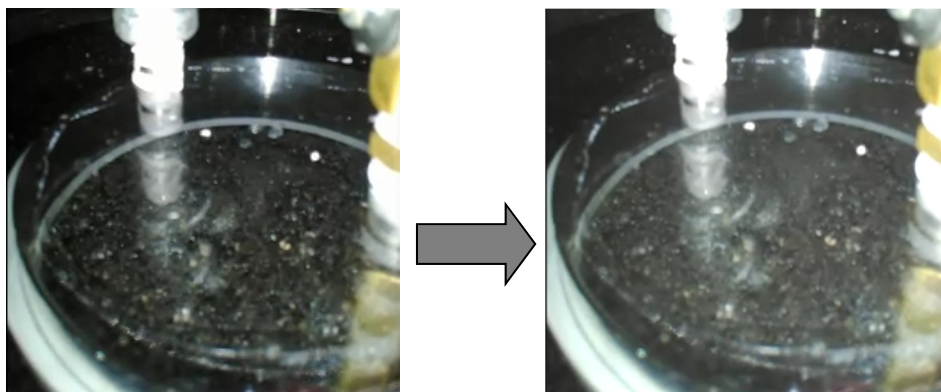


写真 5.10 煙により試験孔内が一瞬曇った状況

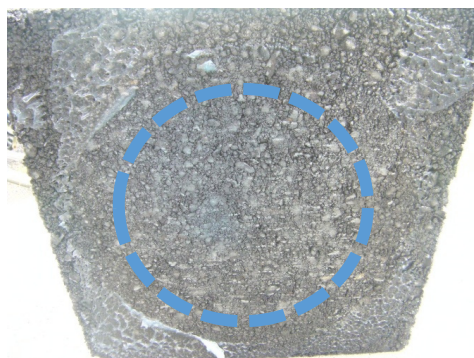


写真 5.11 スモークボールの煙（緑色）が供試体の下面を着色した状況

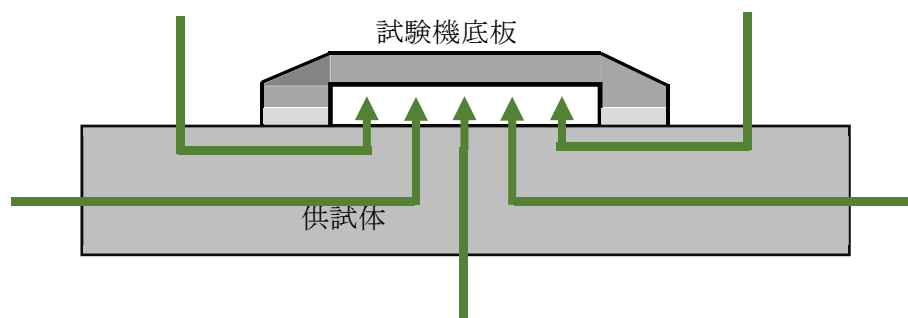


図 5.6 現場透気試験における気体の流れのイメージ図

(2) 供試体の側面を閉塞しての実験

供試体の表面，側面からも空気が流入していることが確認されたことから，どこからの流入が多いのか確認するため，写真 5.12，図 5.7 に示すように供試体の表面，側面から空気が流入しないようにパテにより閉塞した状態で試験を実施した。

試験結果を表 5.9 に示す。負圧が， -5.0kPa から -1.0kPa になるまでの時間を透気時間とし，1 秒間あたりの負圧の消散速度を透気速度として整理している。側面からの空気の流入は約 10% であり，表面からの空気の流入は約 20% である。側面からの空気の流入は，実際の道路舗装では無視できるものと考えられる。表面からの空気の流入については，透気漏れ防止材で用いるシリコンマットの寸法を 300×200 と試験器よりも少し大きくすることで抑制することにした。

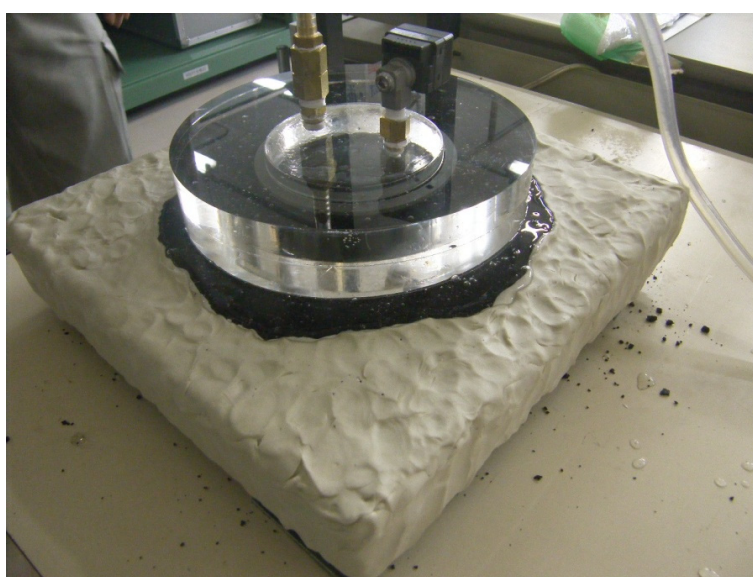


写真 5.12 パテによるコーティング状況

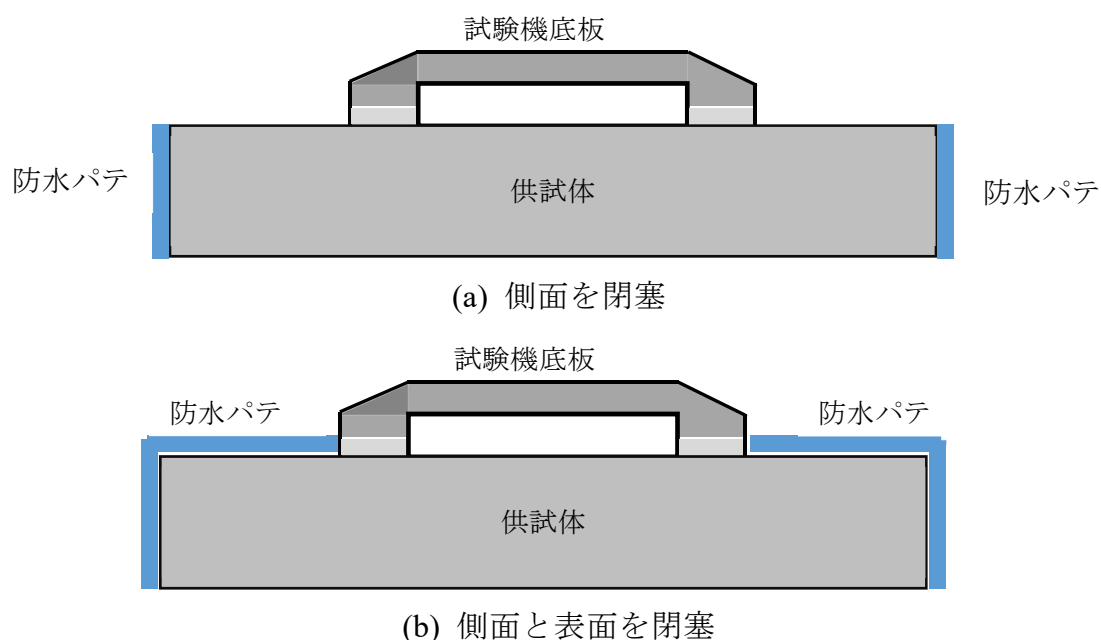


図 5.7 側面および表面を閉塞した供試体の模式図

表 5.9 供試体の側面等を密閉した供試体の実験結果

パテ	透気時間 (s)	透気速度 (kPa/s)	割合 (%)
無し	0.51	7.89	100.0
側面のみ	0.57	7.06	89.4
側面と表面	0.7	5.74	72.7

5.2.4. 測定方法

これまでの検討より、本研究では、現場透気試験の標準的な測定方法として、以下のとおりとした。

- 測定に先立ち測定する舗装路面の清掃を行う。清掃に水を使用すると、試験結果に影響を与える可能性があるため、水を使用した清掃は行わないようにした。
- 路面の清掃後、試験器の設置を行う。現場透気試験器の設置図を図 5.8 に示す。測定を行う箇所に流動防止器具を設置し、ゲル状物質を厚さ 5 mm 程度のドーナツ型に均一に均した後、気泡がなるべく入らないよう空気を押し出しながらシリコンマットを圧着させる。透気漏れ防止材の設置

が完了した後、シリコンマットと試験器底板の試験孔が合うように試験器を設置し安定させる。

- 試験器設置後、手動式真空ポンプを用いて負圧をかける。かける負圧は -10.0 kPa （真空ポンプのグリップ一握り）を目安とし、負圧を与えてから完全に消散するまでを1回の測定とする。同一測点においては4回以上の測定を行い、負圧が、 -5.0 kPa から -1.0 kPa になるまでの間をデータロガーで計測する。
- 試験終了後はゲル状物質内の気泡の有無の確認を行い、気泡が見られた場合は試験が適正に行われなかったものとし再度試験を行う。

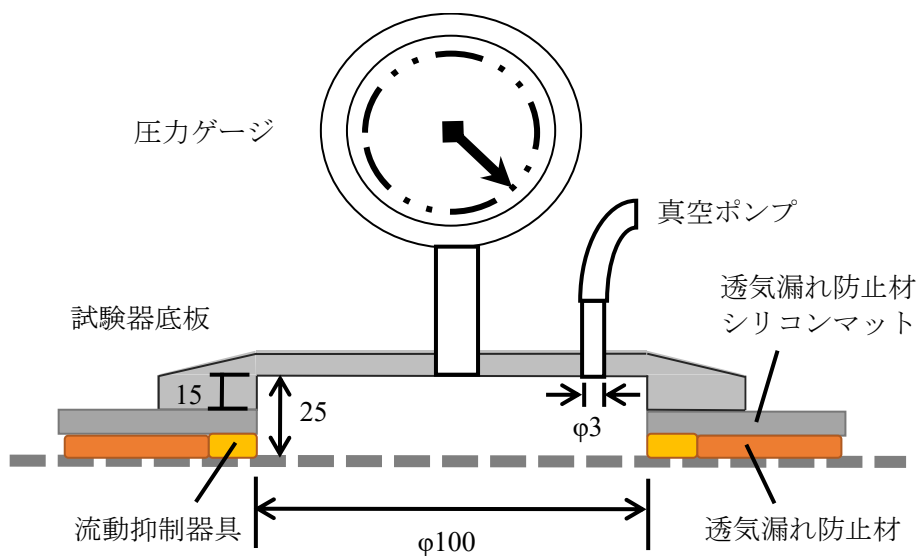


図 5.8 現場透気試験器の設置図

5.3. 評価方法の検討

5.3.1. 透気速度による評価

(1) 透気速度の算出方法

現場透気試験では、試験器内部の負圧の圧力変化を計測している。本研究では、この計測値より、現場で簡易に路面の状態を評価する方法として、式(5.1)、式(5.2)により、変化した圧力を時間で除して、圧力変化の速度（以下、透気速度）を算出することとした。図 5.9 に算出方法のイメージを示す。同一地点の測定であっても測定開始時の圧力と測定終了時の圧力によって、透気速度は異なるため、測定開始時の圧力を -5.0 kPa 、測定終了時の圧力を -1.0 kPa と設定

した。測定開始時の圧力については、あまり過大な圧力を舗装に与えると舗装が変形する恐れがあることを考慮して設定した。測定終了圧力は、あまりに小さいと試験器のノイズの影響が無視できなくなることを考慮して設定した。また、通常の舗装であれば、1～20秒程度で測定終了時の -1.0 kPa まで達するが、 -1.0 kPa に達するまでに 60 秒以上要する場合は、不透気として結果を整理するものとした。なお、ここでは、測定は同一地点にて、4 回の測定を行い、1 回目の測定結果は棄却し、2～4 回目の測定結果を平均して路面を評価することとした。

$$V = \frac{|(P_e - P_s)|}{t} \quad (5.1)$$

ここに、 V : 透気速度 (kPa/s)

P_s : 測定定開始圧力 (kPa) (-5.0 kPa/s)

P_e : 測定終了圧力 (kPa) (-1.0 kPa/s)

$$t = \frac{t_2 + t_3 + t_4}{3} \quad (5.2)$$

ここに、 t : 平均透気時間 (s)

t_2, t_3, t_4 : 2～4 回目の時間 (s)

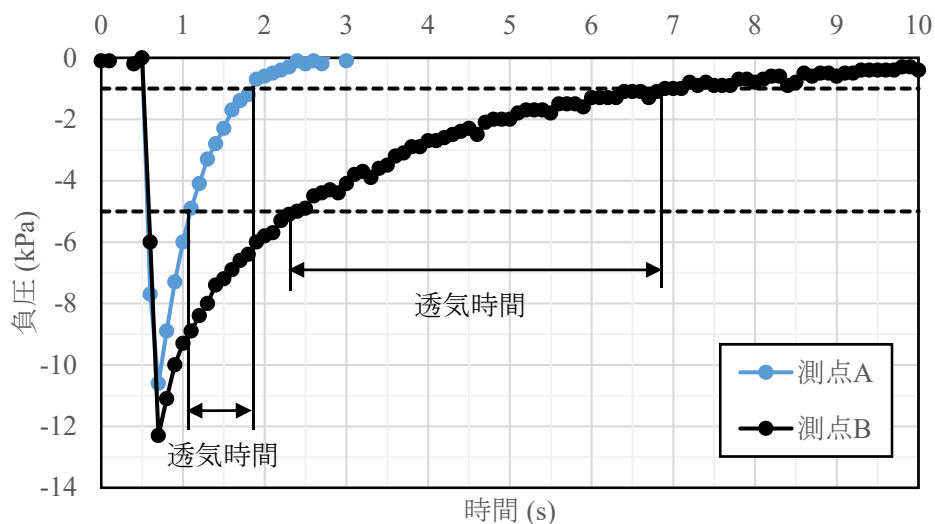


図 5.9 透気速度算出方法のイメージ

(2) 透気速度による評価の課題

透気速度による評価では、測定開始圧力を -5.0 kPa、測定終了圧力を -1.0 kPa 設定したが、透気性の高い箇所においては -5.0 kPa 以上の負圧を、手動式の真空ポンプでは与えることができず、透気速度による評価を行うことができないという課題がある。対応策として、電動式の真空ポンプを用いることも考えられるが現場で簡単に計測することが難しくなる一面もある。また、この場合の消散速度は非常に大きく、透気時間は非常に短い時間となり、本研究で用いた圧力センサには常時 ± 0.2 kPa 程度のノイズがあることから、そのノイズが測定結果に与える影響が大きくなる。一方、透気性の低い箇所では、現実的な時間内に試験が終了しないという課題もある。

このため、透気性が同じような路面を現場で簡便に評価するような場合には透気速度で比較検討することができるが、透気性が大きく異なるも舗装を比較するような場合には、透気速度とは異なる評価指標が必要であると考えられる。

5.3.2. 透気係数による評価

(1) 透気係数の算出式

コンクリート構造物の分野でも透気試験が行われており、空気の通しにくさを表す指標として透気係数を求めている³⁾。本研究においても透気係数を算出することとした。コンクリート構造物で用いられている透気試験器と、本研究で用いた現場透気試験器は機構が異なることから、以下に示す方法で透気係数を算出した。

透気係数 k は、ダルシー法則により動水勾配と流速の比例定数であり次式で表される。

$$v = ki = k \left(-\frac{\Delta h}{\Delta s} \right) \quad (5.3)$$

ここに、 v : 流速 (mm / s)

i : 動水勾配

Δh : 損失水頭 (mm)

Δs : 試料の長さ (mm)

式(5.3)の動水勾配をアスファルト混合物内の圧力の勾配で表現すると次式になる。

$$v_a = -k \frac{dP}{dx} \cdot \frac{1}{\gamma_a} \quad (5.4)$$

ここに、 v_a : 容器に流入する空気の流れ

P : 容器内の圧力

γ_a : 空気の単位体積重量

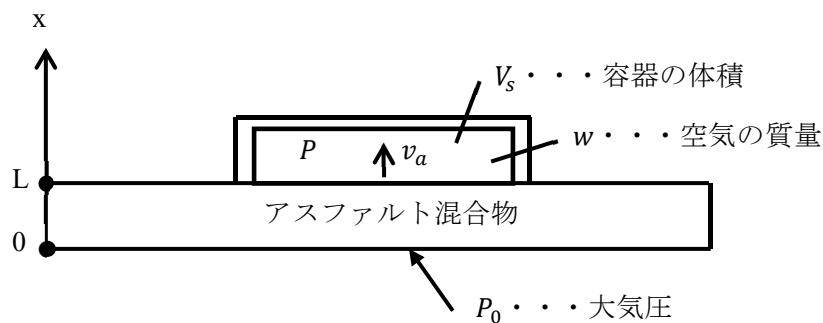


図 5.10 現場透気試験のイメージ

既往の研究⁴⁾より、コンクリートを透過する空気の流れはダルシーの法則に従い見掛けの流速は圧力勾配に比例するとされていることから、アスファルト混合物層内部の圧力分布は次式で表すことができる。

$$P_x = \left(\frac{P_x^2 - P_0^2}{L} x + P_0^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.5)$$

$$\frac{dP_x}{dx} = \frac{1}{2} \left(\frac{P_x^2 - P_0^2}{L} x + P_0^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \frac{P_x^2 - P_0^2}{L} \quad (5.6)$$

ここで、 P_x : アスファルト混合物層内部の圧力

P_0 : 大気圧

L : アスファルト混合物層厚

式(5.6)において $x \rightarrow L$ のとき舗装表面の圧力勾配は次式で表わされる。

$$\frac{dP}{dx} = \frac{P^2 - P_0^2}{2LP} \quad (5.7)$$

また、試験孔体積、温度を一定と仮定し、気体の状態方程式より次式が成り立つ。

$$PV_s = \frac{RT}{M} w \quad (5.8)$$

$$dP \cdot V_s = \frac{RT}{M} dw \quad (5.9)$$

ここで、 V_s ：試験孔体積
 M ：空気モル質量
 R ：気体定数
 T ：温度
 w ：空気質量

また、連続の式より次式が成り立つ。

$$dw = v_a \cdot A \cdot \rho_a \cdot dt \quad (5.10)$$

ここで、 A ：透気面積
 ρ_a ：空気単位体積質量

式(5.9)に式(5.10)、式(5.4)、式(5.7)を代入し、

$$dP \cdot V_s = -k \frac{RT}{M} \cdot \frac{P^2 - P_0^2}{2LP} \cdot \frac{1}{\gamma_a} \cdot A \cdot dt \cdot \rho_a \quad (5.11)$$

$$\frac{2P}{P^2 - P_0^2} dP = -k \frac{RTA}{MV_s L} \cdot \frac{\rho_a}{\gamma_a} dt \quad (5.12)$$

$$\ln(P^2 - P_0^2) + C = -k \frac{RTA}{MV_s L} \cdot \frac{\rho_a}{\gamma_a} \cdot t + D \quad (5.13)$$

式(5.13)において透気時間 t_1 から t_2 までの定積分は、

$$\left[\ln \left(\frac{P_{t_2}^2 - P_0^2}{P_{t_1}^2 - P_0^2} \right) \right] = -k \frac{RTA}{MV_s L} \cdot \frac{\rho_a}{\gamma_a} \cdot [t_2 - t_1] \quad (5.14)$$

である。

式(5.14)を整理して、透気係数 k は式(5.15)により求めることができる。

$$k = -\frac{MV_s L}{RTA} \cdot \frac{\gamma_a}{\rho_a} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \ln \left(\frac{P_{t_2}^2 - P_0^2}{P_{t_1}^2 - P_0^2} \right) \quad (5.15)$$

ここに、 k : 透気係数 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

M : 空気モル質量 ($0.028966 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$)

R : 気体定数 ($8.3144598 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T : 気体温度 (K)

L : 舗装厚 (m)

A : 試験孔断面積 (m^2)

V_s : 試験孔体積 (m^3)

γ_a : 空気の単位体積重量 ($11.82 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$)

ρ_a : 空気の単位体積質量 ($1.205 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

P_0 : 大気圧 (kPa)

t_1 : 測定開始時間 (s)

t_2 : 測定終了時間 (s)

P_{t_1} : 測定開始圧力 (kPa) (絶対圧)

P_{t_2} : 測定終了圧力 (kPa) (絶対圧)

(2) 透気係数の算出方法

透気係数は、測定開始時間（圧力）、測定終了時間（圧力）に関係なく、常に同じ値を求めることが可能になると考えられるが、実際には測定装置に起因する誤差などがあり、現場透気試験の測定方法、透気係数の算出方法を標準化し

ておくことが望ましいと考えられる。そこで、路面の状況の異なる地点 A～D の 4 箇所現場透気試験を実施し、その結果より、時間の組み合わせを変えて透気係数を算出した。

測定した現場透気試験の測定結果を図 5.11 に示す。解析開始時間と透気係数の関係を地点ごとに図 5.12～図 5.15 に示す。図では解析時間を 0.1 秒、0.5 秒、1 秒、2 秒と変えてそれぞれ算出した結果を示している。解析開始時間 0 秒で解析時間が 0.1 秒のプロットは、0～0.1 秒の測定結果より求めた透気係数、解析開始時間 0.1 秒で解析時間が 0.1 秒のプロットは、0.1～0.2 秒の測定結果より求めた透気係数を示している。

図 5.11 より、地点 A は 1.5 秒程度で負圧が消散しているため、図 5.12 の解析時間 2s では正しく解析できないことがわかる。解析時間 1s の結果は解析開始時間 0～0.5s の間は概ね一定の安定した値が得られているが、0.5s 以後は値が発散している。解析時間 0.5s の結果も同様に 0～1s の間は概ね一定の安定した値が得られているが、1s 以後は値が発散している。解析時間 0.1s についても同様である。つまり解析開始時間 0s～負圧が消散する 1.5s までの値を用いて解析すると概ね一定の安定した透気係数が求まることがわかる。地点 B～地点 D についても同様の傾向が認められる。

解析時間の違いに着目すると、正しく解析が行えている範囲については解析時間が長い方がより安定して一定の値が得られている。従って、なるべく解析時間を長くする方が適切であるものと考えられる。つまり、場所によって、解析すべき時間が大きく異なっており、時間を統一して解析するのは困難であることが分かる。

以上のことより、本研究では、様々な箇所をより統一的方法により解析するため、透気速度と同様に、解析開始時間を負圧が -5 kPa になった時間とし、解析終了時間を負圧が -1 kPa に至った時間とした。なお、この方法による結果も図 5.12～図 5.15 に示しているが、安定的に一定の値が得られている数値とほぼ同程度であり適切に解析できているものと考えられる。

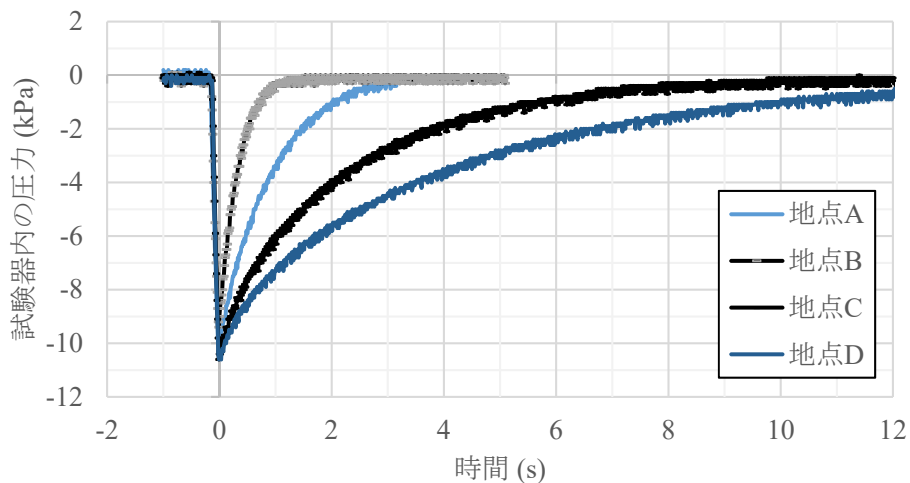


図 5.11 現場透気試験結果

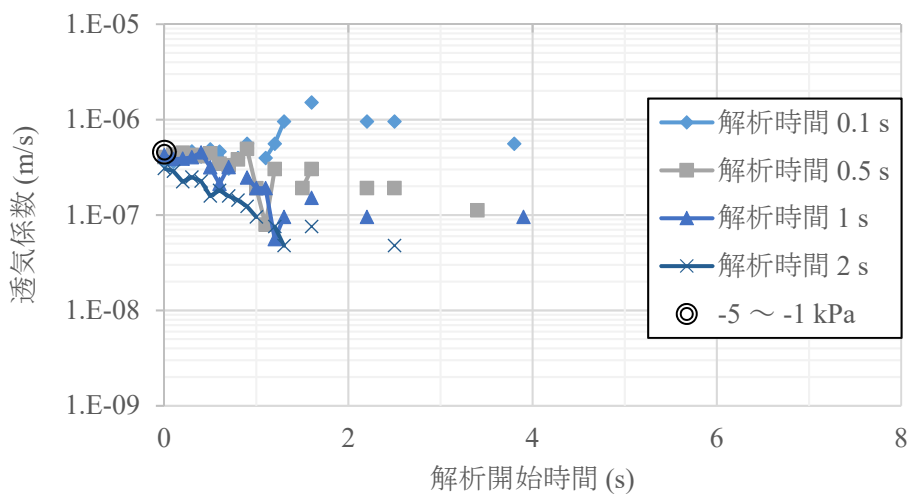


図 5.12 地点 A の透気係数

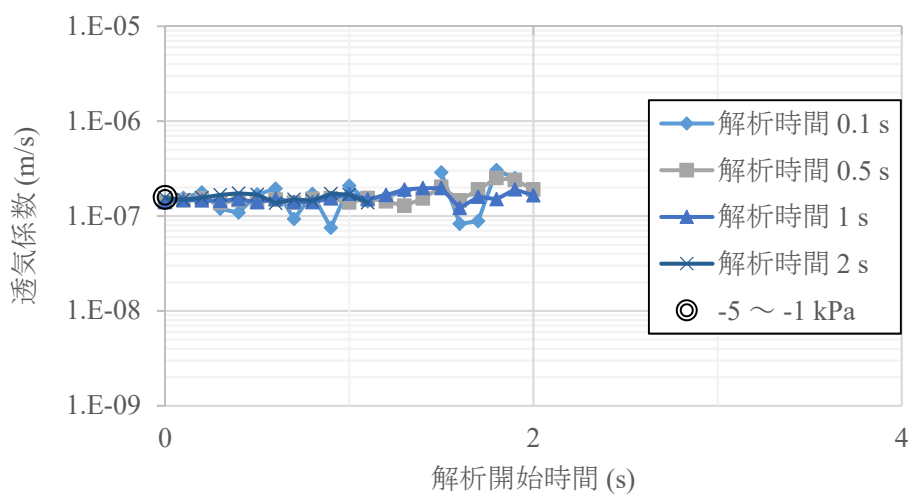


図 5.13 地点 B の透気係数

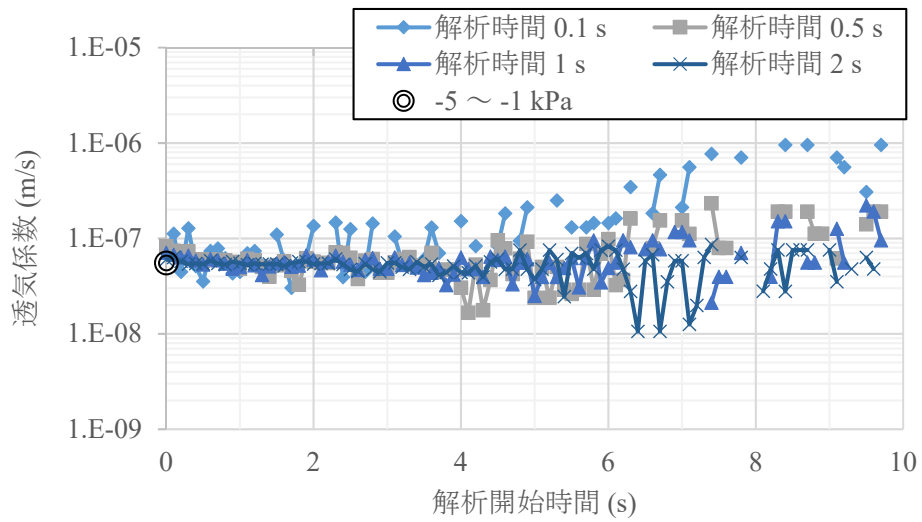


図 5.14 地点 C の透気係数

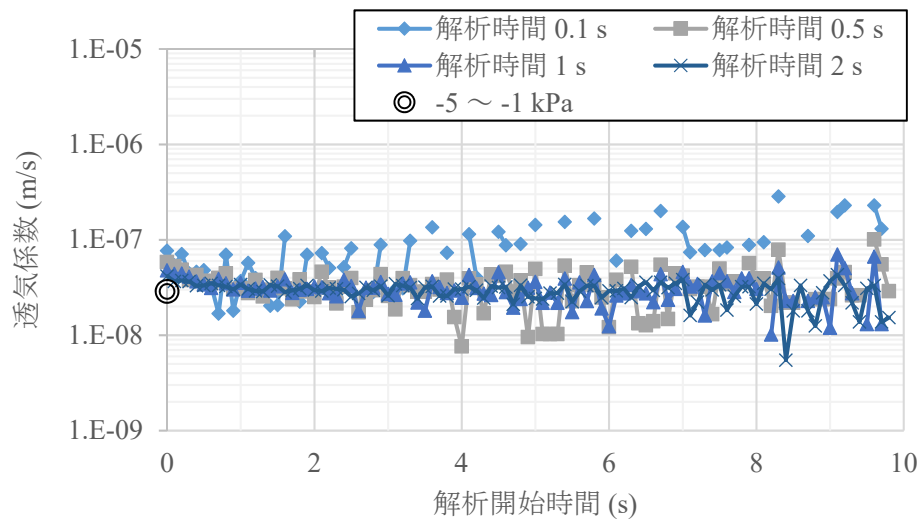


図 5.15 地点 D の透気係数

5.3.3. 現場透気試験の再現性

現場透気試験の再現性を確認するため、同一測点において連続して測定した。その結果を図 5.16 に示す。測定は 11 回で、各測定の間隔は 5 秒程度と連続して測定している。

測定値より算出した透気係数を図 5.17 に、透気速度を図 5.18 に示す。図 5.18 より、1 回目だけが少し大きな値を示しているが、2～11 回目はほぼ同じ値となっている。1 回目は、透気漏れ防止材と舗装路面との馴染みの問題が考えられるため、測定値は棄却することとした。

表 5.10 に 2～11 回目の測定結果の平均値、標準偏差、変動係数を示す。また 2～4 回目の結果についても合わせて示す。2～4 回目の平均値と 2～11 回目の平均値はほぼ同等の値を示しており、その変動係数も 5%程度と十分に小さいことが分かる。現場透気試験を繰り返して測定した場合の試験結果の標準偏差および変動係数が十分に小さいことから、現場透気試験は十分な再現性があることが分かった。

以上のことより、本研究では、同一地点にて、合計 4 回の測定を行い、1 回目の測定結果は棄却し、2～4 回目の測定結果を平均して路面を評価することとした。

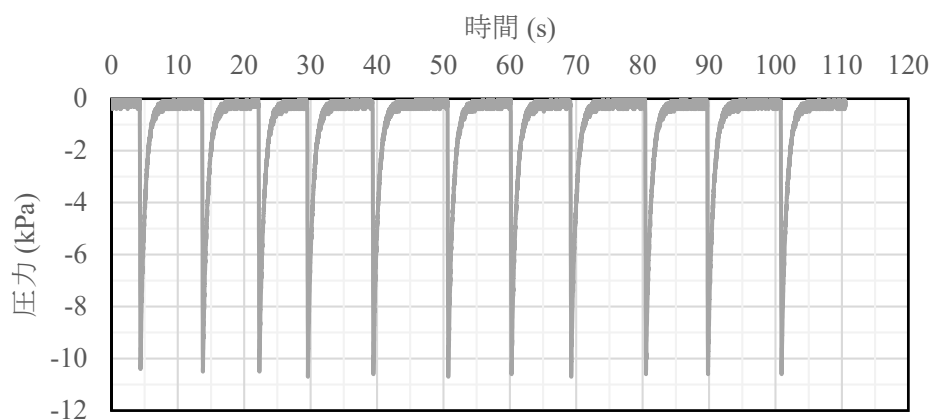


図 5.16 同一測点における負圧の測定結果

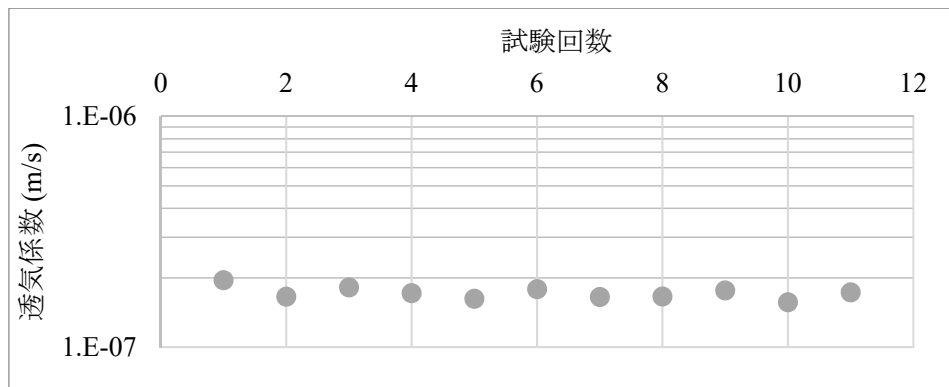


図 5.17 同一測点における透気係数

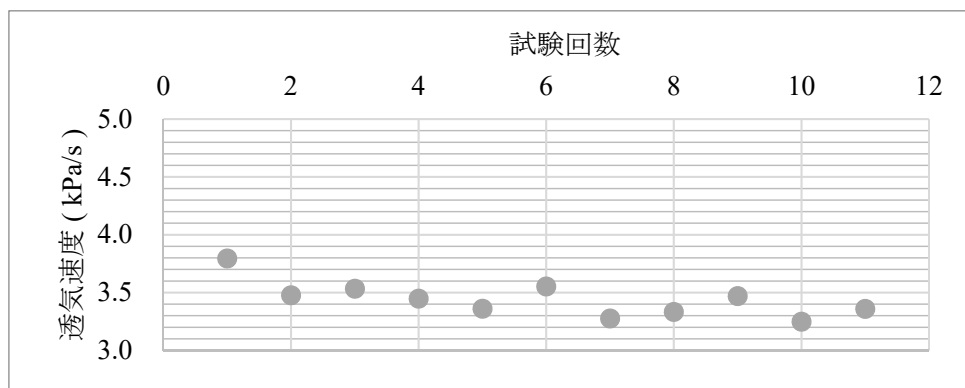


図 5.18 同一測点における透気速度

表 5.10 同一測点における繰返し試験結果

評価指標	使用したデータ	平均値	標準偏差	変動係数
透気係数(m/s)	2～11 回目	1.70E-07	7.91E-09	4.7%
	2～4 回目	1.73E-07	8.15E-09	4.7%
透気速度 (kPa/s)	2～11 回目	3.41	0.11	3.1%
	2～4 回目	3.47	0.04	1.3%

5.4. フォグシール施工箇所での測定

5.4.1. 概要

フォグシール工法の施工前後で同一箇所にて現場透気試験を実施し、現場透気試験結果の相違からフォグシールの効果を確認した。

表 5.11 に現場透気試験を実施した箇所の一覧を示す。劣化・老化が進行した舗装路面、目視で確認できない微細なひび割れが発生した試験舗装路面および新たに作成した試験供試体にて実施した。フォグシール工法は表 3.6 で示した保護材 A または保護材 B を用いて施工は刷毛により塗布した。

表 5.11 現場透気試験の実施箇所一覧

No.	試験対象	対象の混合物種類	層厚 (cm)	舗装表面の状態
1	劣化・老化が進行した舗装路面	密粒度アスファルト混合物 (13)	3.0~4.0	劣化老化目づまり
2	微細なひび割れが発生している舗装路面	密粒度アスファルト混合物 (13)	5.0	微細なひび割れ
3	供試体	密粒度アスファルト混合物 粗粒度アスファルト混合物 SMA 混合物	5.0	新設

5.4.2. 劣化・老化が進行した舗装路面での測定

現場透気試験を実施箇所の概要を表 5.12 に、舗装表面の状態を写真 5.13 に示す。23 年間供用された駐車場舗装であり、その表面はアスファルトの劣化・老化により舗装表面の細粒分が失われた状態にある。

試験状況を写真 5.14 に示す。写真に示すとおり、保護材 A、保護材 B をそれぞれ 5 箇所で施工し、その施工前後で現場透気試験を行った。

試験の結果を表 5.13, 図 5.19, 図 5.20 に示す。保護材を塗布することにより、全測点において透気速度が大幅に減少することが確認された。保護材の違いに着目すると、保護材 A の減少率は 82%, 保護材 B は 72%と、若干ではあるが保護材 A の方が減少率は大きい。保護材 A を施した路面の方が透気係数は大きいことから、施工前の透気係数の違いによる影響も考えられる。

透気係数も透気速度と同様の傾向であり、すべての地点で大きく改善している。保護材 A を適用した地点 A~E は、もともとの舗装があまり良くなく透気

係数が大きく 10^{-7} m/s オーダーであったが、Fog Seal を施工することで、 10^{-8} m/s オーダーへと改善することができた。地点 F のように、もともとが、 10^{-8} m/s オーダーの個所についても Fog Seal を塗布することで更に改善していることが分かる。このことは、地点 A～E においてはアスファルト乳剤を 0.5 l/m^2 塗布しているが、より多くのアスファルト乳剤を塗布することで更に透気係数を改善できる可能性があることを示唆しているものと考えられる。

表 5.12 劣化・老化が進行した舗装路面の概要

場所	茨城県つくば市
舗装用途	駐車場
供用期間	23 年間
混合物	密粒度アスファルト混合物(13)
舗装厚	3～4 cm



写真 5.13 劣化・老化が進行した舗装路面の状態

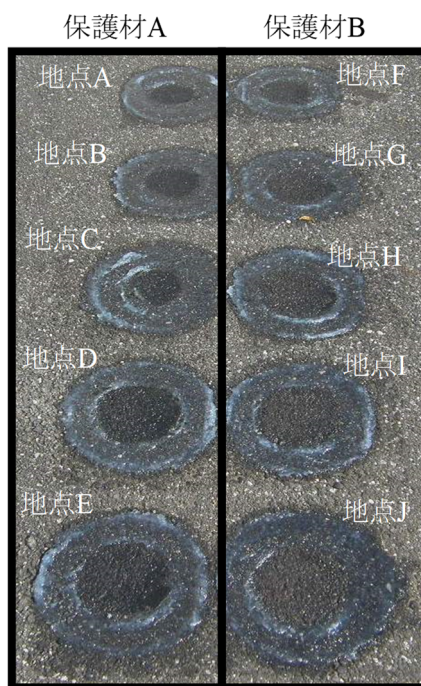


写真 5.14 劣化・老化が進行した舗装路面での測定状況

表 5.13 保護材施工前後の透気速度および透気係数

保護材	地点	透気速度 (kPa / s)		透気係数 (m / s)		改善率 (%)	
		保護材無し	保護材有り	保護材無し	保護材有り		
保護材 A	A	1.82	0.28	9.96E-08	1.53E-08	85	82
	B	2.45	0.42	1.34E-07	2.30E-08	83	
	C	1.85	0.63	1.01E-07	3.45E-08	66	
	D	2.93	0.32	1.60E-07	1.75E-08	89	
	E	2.73	0.31	1.49E-07	1.70E-08	89	
保護材 B	F	0.19	0.06	1.04E-08	3.29E-09	68	72
	G	1.14	0.34	6.24E-08	1.86E-08	70	
	H	1.33	0.35	7.28E-08	1.92E-08	74	
	I	0.17	0.03	9.31E-09	1.64E-09	82	
	J	0.06	0.00	3.29E-09	1.10E-09	67	

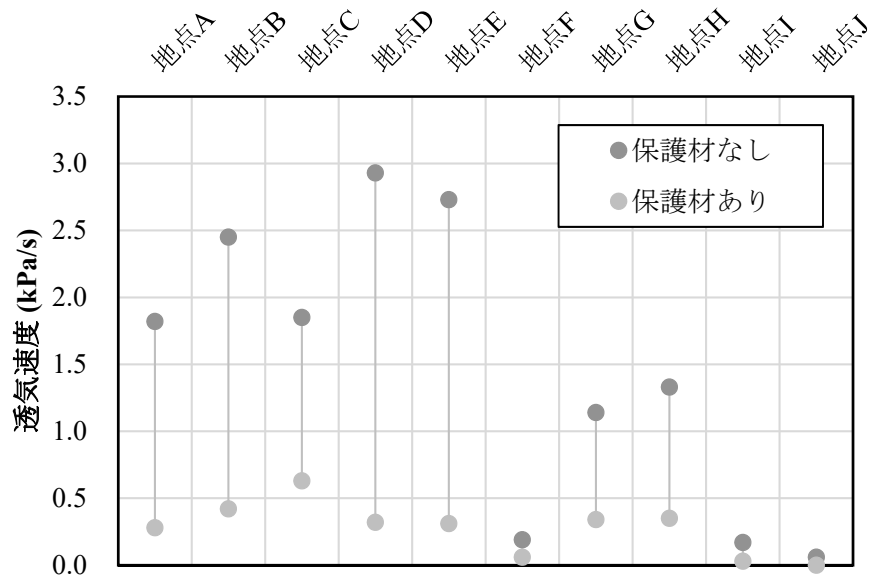


図 5.19 フォグシール施工前後の透気速度

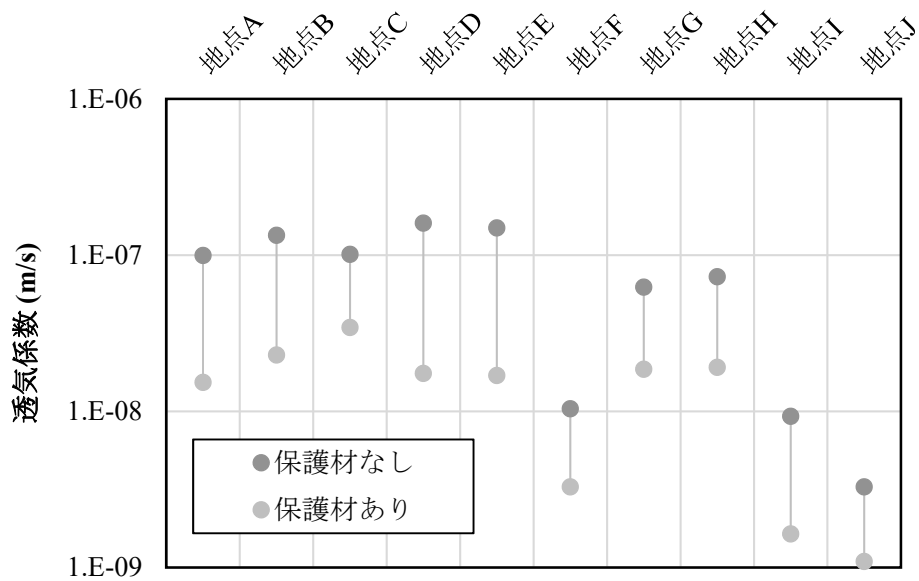


図 5.20 フォグシール施工前後の透気係数

5.4.3. 微細なひび割れが発生している舗装路面での測定

目視で確認できないほどの微細なひび割れから雨水が浸透し舗装の破壊を促進するとの研究報告¹⁾がある。この微細なひび割れに対してフォグシールを施工し、その前後で現場透気試験を実施した。

試験場所は、(国開) 土木研究所構内にある実大供試体で、繰返し載荷試験により微細なひび割れが発生した場所である。写真 5.15 に実大供試体の外観を

示す。図 5.21 に実大供試体の舗装構成を示す。また、荷重位置周辺の微細なひび割れ発生状況を写真 5.16 に示す。微細なひび割れは写真中のチョークでなぞっている箇所に生じている。このひび割れは、目視では確認できないが水浸した状態で繰り返し荷重をすると水が入り出す現象が確認されている。

現場透気試験の実施箇所を図 5.22 に示す。試験は、現場透気試験器の底板で微細なひび割れを覆うように設置した場合、微細なひび割れを半分だけ覆うように設置した場合を行った。比較として、ひび割れの発生していない健全部についても測定した。塗布する保護材については、前述した「5.4.2 劣化・老化が進行した舗装路面での測定」より、保護材 A と保護材 B で大きな相違は認められなかったことから、ここでは保護材 A を用いた。散布量は 0.5 l/m^2 である。写真 5.17 にフォグシール施工後の状況を示す。

試験の結果を表 5.14、図 5.23 に示す。微細なひび割れ部において、フォグシール施工前の透気係数は 10^{-7} m/s オーダーであるがフォグシールを施工することで 10^{-8} m/s オーダーまで改善できていることが分かる。これは健全部のフォグシール施工前と同程度の透気係数であり、微細なひび割れの処置としてフォグシールが適切であることを示しているものと考えられる。また、健全部での結果に着目すると、フォグシールを施工することでさらに透気係数を改善できている。これは、一見、健全そうなところであっても、フォグシールによりさらに性能を高めることが可能であること、予防的工法として有用であることを示唆しているものと考えられる。

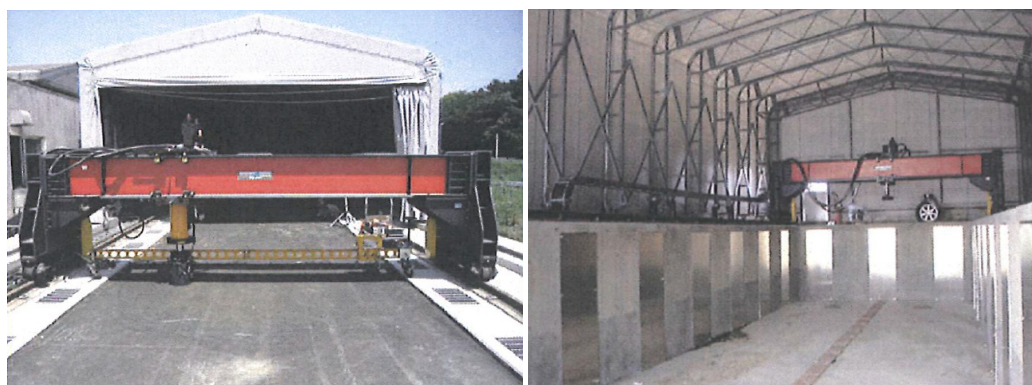


写真 5.15 実大供試体の外観（国立研究開発法人土木研究所構内）

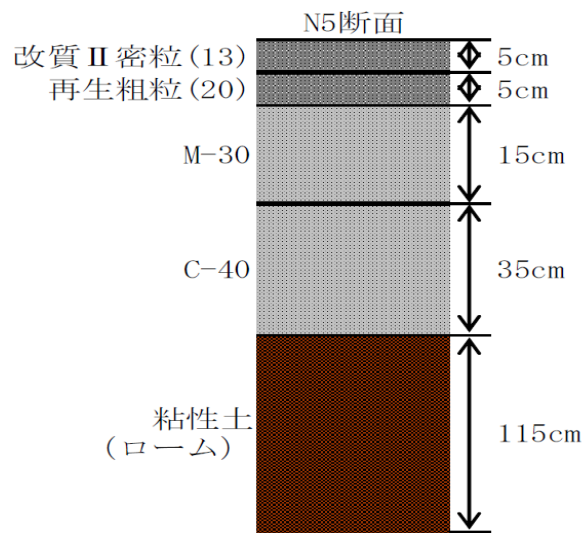


図 5.21 実大供試体の舗装構成¹⁾



写真 5.16 微細なひび割れの発生状況¹⁾

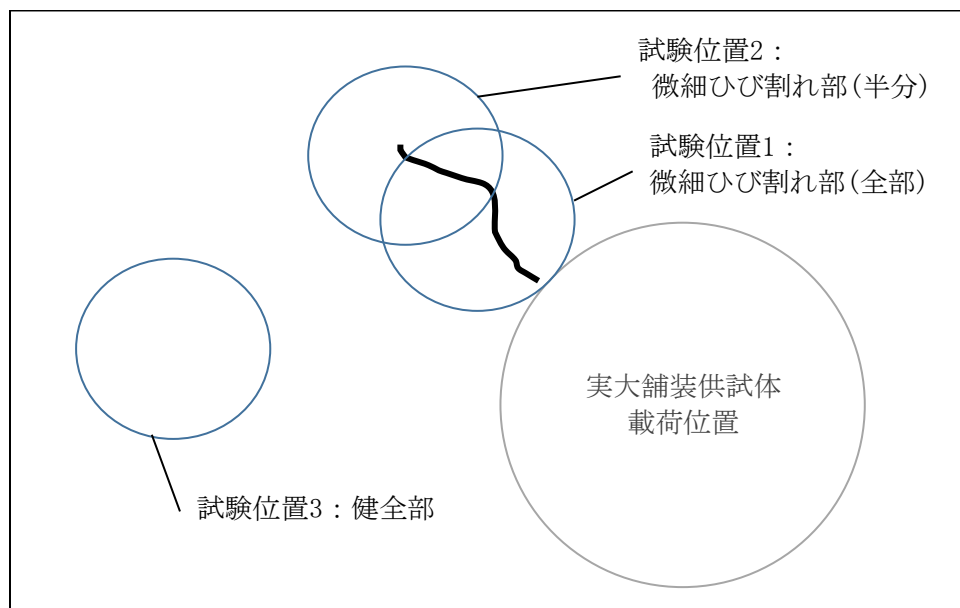


図 5.22 現場透気試験の実施箇所



写真 5.17 微細なひび割れにフォグシールを施工した状況

表 5.14 微細なひび割れが発生している舗装路面における現場透気試験結果

保護材の適用箇所	透気速度 (kPa / s)		透気係数 (m / s)		改善率 (%)
	保護材無し	保護材有り	保護材無し	保護材有り	
微細なひび割れ部	4.62	1.24	2.5E-07	6.8E-08	73.1
微細なひび割れ部 (半分)	3.33	0.46	1.8E-07	2.5E-08	86.3
健全部	0.68	0.07	3.7E-08	3.8E-09	89.8

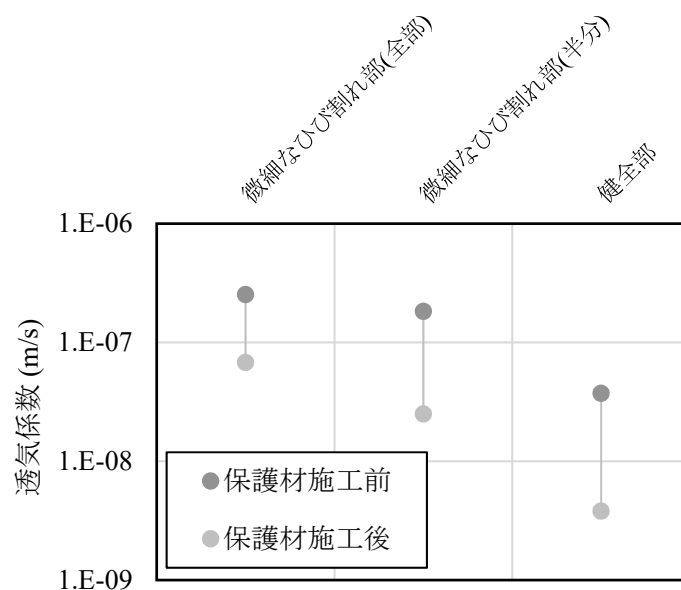


図 5.23 微細なひび割れ箇所の透気係数

5.4.4. 試験供試体での測定

密粒度アスファルト混合物とは異なる混合物についても、現場透気試験で評価できるか検討するため、室内で試験供試体を作成し現場透気試験を実施した。

(1) 試験供試体

一般的なアスファルト混合物である密粒度アスファルト混合物、粗粒度アスファルト混合物、水密性や耐久性に優れる碎石マスチックアスファルト混合物の3種類の混合物について試験供試体を作成した。供試体は「4.2.2(1) アスファルト混合物の使用材料および配合」と同じ材料を用いて、室内ミキサーにより混合し、300×300×50mmの型枠につめ、ローラーコンパクタにより締固め度が100%になるように締め固めて作製した。混合物の骨材配合比を表5.15に、混合物のマーシャル性状を表5.16に示す。また、アスファルト混合物は締固め度によって透水、透気性能が大きく異なると考えられることから、締固め度が103%、100%、97%、95%になるように供試体を作製した。アスファルトは、ストレートアスファルト(60/80)を用いた。作製した供試体を写真5.18に示す。各供試体は図5.24に示すとおり3つの区画に分け、各種試験を実施した。

表 5.15 各種混合物の配合比

材料名	密粒度アスファルト 混合物 (13)	粗粒アスファルト 混合物 (20)	SMA 混合物 (13)
5号碎石	—	19	—
6号碎石	34	30	72
7号碎石	22	20	—
粗目砂	15	12	—
細目砂	12	10	9
砕砂	11	5	7
石粉	6	4	12
バインダ	5.4	5.1	5.8
補強用繊維材	—	—	0.3

表 5.16 各種混合物のマーシャル性状

混合物名称	骨材 最大粒径 (mm)	理論密度 (g/cm ³)	基準密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)	骨材 間隙率 (%)	飽和度 (%)
密粒度アスファルト混合物	13	2.480	2.370	4.4	16.9	78.4
粗粒度アスファルト混合物	20	2.504	2.392	4.5	16.3	75.4
SMA 混合物	13	2.477	2.412	2.6	16.2	85.4

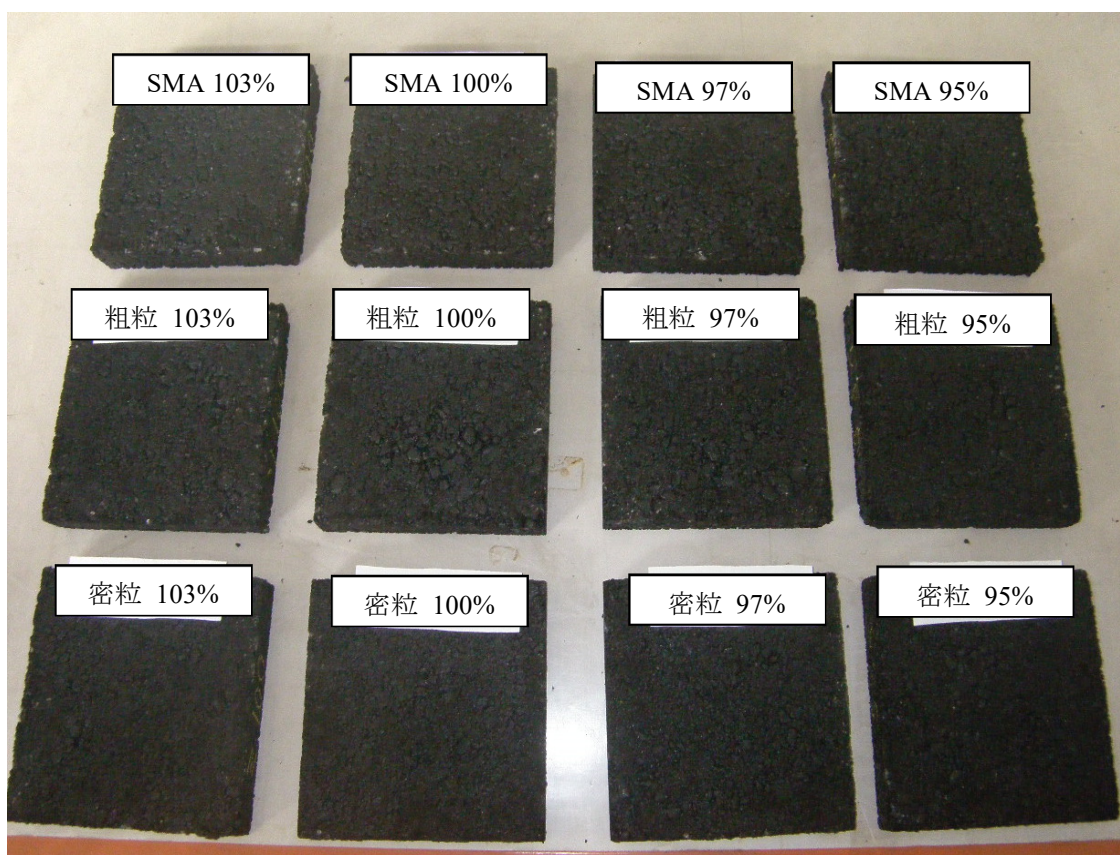


写真 5.18 作製した供試体

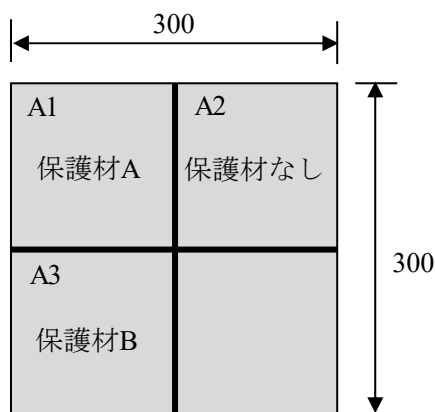


図 5.24 各種試験の実施位置

(2) 試験方法と試験結果

1) 透気係数と混合物密度の関係

現場透気試験とアスファルト混合物の密度の関係の評価するため、試験供試体の区画 A1～区画 A3 において、現場透気試験を実施し、その後、区画 A1 は保護材 A、区画 A3 は保護材 B を塗布し、再度、現場透気試験を実施した。試験の終了後、現場透気試験実施箇所より切取供試体を採取し密度測定を実施した。密度の測定方法は舗装調査・試験法便覧「B008-1 密粒度アスファルト混合物等の密度試験方法」⁵⁾に準じて行った。

試験結果一覧を表 5.17 に示す。供試体は概ね目標どおりの締固め度で作製できている。図 5.25 に密粒度アスファルト混合物(13)の締固め度と透気係数の関係を示す。締固め度が増加するのに伴い透気係数が減少する傾向が認められる。また指数関数で近似すると相関係数は 0.9 以上であり、良好な関係が認められる。fogシールを施工することで透気係数は小さくなるが、締固め度が高いときの方が、その改善効果は大きく、透気係数で $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 程度まで透気係数が小さくなっている。一方、締固め度が小さいときはfogシールにより透気係数は若干小さくなるがさほど大きな変化は認められない。これは、締固め度が低く透気係数が大きいときは、供試体に透気する大きな孔があり、fogシールでは十分に孔を塞ぐことができないことによるものと考えられる。

図 5.26 に粗粒度アスファルト混合物(20)の締固め度と透気係数の関係を示す。密粒度アスファルト混合物の場合と同様に、締固め度が増加するに伴い透気係数が減少する傾向が認められる。fogシールを施工することで透気係数は小さくなり、締固め度が高いときの方が、その改善効果は大きく、透気係数は密粒度アスファルト混合物のように 1×10^{-8} 程度には達しないもののfog

シールの有無により大きな差異が確認できた。締固め度が小さい場合は密粒度アスファルト混合物の場合と同様にフォグシールによって透気係数は大きく変わることはなかった。

図 5.27 に SMA 混合物の締固め度と透気係数の関係を示す。他の混合物と同様の方法により供試体を作成したが、目標とした締固め度よりも若干高めの締固め度である。他の混合物と同様に、締固め度が増加するに伴い透気係数が減少する傾向が認められる。また、指数関数で近似した相関係数は 0.9 以上であり、良好な関係が認められる。フォグシールを施工すると透気係数は小さくなるが、もともとの混合物が密実で透水係数が小さいためか大きくは改善していない。

混合物の種類によって、締固め度 100%に相当する空隙率は異なっていることから、締固め度を空隙率に換算し、すべての混合物を同じ図にプロットしたものを図 5.28 に示す。空隙率が小さくなるに伴い透気係数も小さくなる傾向が認められる。すべてのデータを用いて指数関数で回帰すると相関係数は 0.74, 0.84 と比較的良好である。全体的な傾向として密粒度アスファルト混合物と粗粒度アスファルト混合物は近い傾向を示しており、SMA 混合物だけが回帰直線から少し離れているように見受けられる。これは、空隙には、いろいろな大きさの空隙があることや、アスファルト混合物の場合はアスファルトに覆われることによって独立した空隙が形成されることによるものと考えられる。

SMA 混合物の結果に着目すると、他の混合物に比べて、空隙率のわずかな相違によって大きく透気係数が変化することが認められる。これは、施工時に締固め不足などが生じると、その性状が大きく変化することを示しており、SMA 混合物の施工時の密度管理は厳格に行う必要があることを示唆しているものと考えられる。

表 5.17 試験供試体の締固め度と透気係数

混合物 種類	目標 締固め度	供試体 位置	締固め度 (%)	透気係数 (m/s)	
				フォグシール 施工前	フォグシール 施工後
密粒	94	A1	94.0	4.2E-06	2.6E-06
		A2	93.2	5.1E-06	-
		A3	94.1	6.3E-06	1.7E-06
	97	A1	97.3	3.8E-07	1.0E-07
		A2	96.7	2.3E-07	-
		A3	97.1	3.7E-07	1.1E-07
	100	A1	99.6	1.6E-07	2.0E-08
		A2	99.8	5.9E-08	-
		A3	99.1	1.0E-07	2.2E-08
	103	A1	102.6	1.6E-08	7.5E-09
		A2	101.3	4.1E-08	-
		A3	101.3	1.4E-07	1.2E-08
粗粒	94	A1	94.4	5.8E-06	3.1E-06
		A2	95.6	4.8E-06	-
		A3	95.0	3.8E-06	3.3E-06
	97	A1	97.0	4.5E-07	2.5E-07
		A2	96.6	4.7E-07	-
		A3	96.9	8.8E-07	3.0E-07
	100	A1	99.4	4.1E-07	7.9E-08
		A2	99.4	1.9E-07	-
		A3	98.7	4.8E-07	7.5E-08
	103	A1	100.5	3.6E-07	4.2E-08
		A2	100.7	3.6E-07	-
		A3	100.6	6.0E-07	5.2E-08
SMA 混合物	94	A1	96.4	2.2E-06	8.7E-07
		A2	96.4	2.5E-06	-
		A3	96.6	2.3E-06	1.0E-06
	97	A1	98.4	4.9E-07	5.8E-08
		A2	98.7	5.2E-07	-
		A3	98.7	1.9E-07	1.0E-07
	100	A1	99.7	1.0E-07	3.7E-08
		A2	99.6	1.0E-07	-
		A3	99.7	5.7E-08	3.9E-08
	103	A1	101.0	8.2E-09	3.3E-09
		A2	100.6	8.0E-08	-
		A3	101.2	5.0E-09	6.1E-09

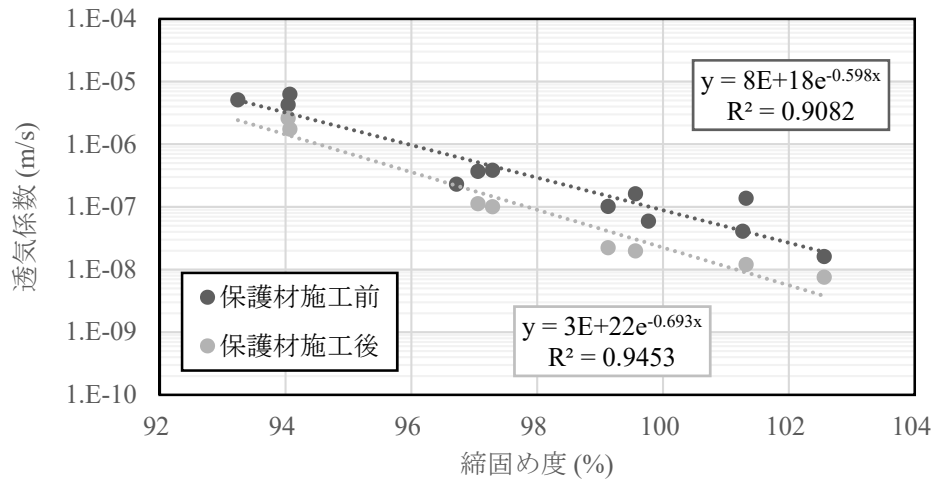


図 5.25 密粒度アスファルト混合物の締固め度と透気係数の関係

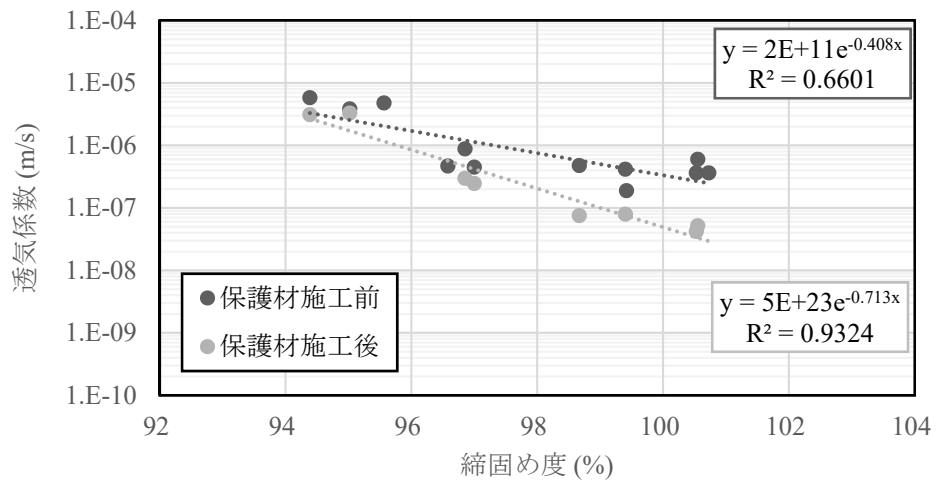


図 5.26 粗粒度アスファルト混合物の締固め度と透気係数の関係

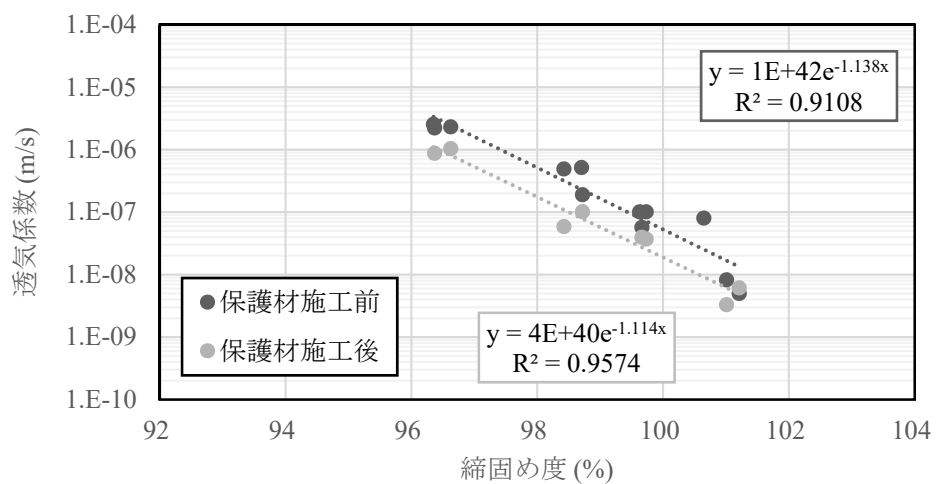


図 5.27 SMA 混合物の締固め度と透気係数の関係

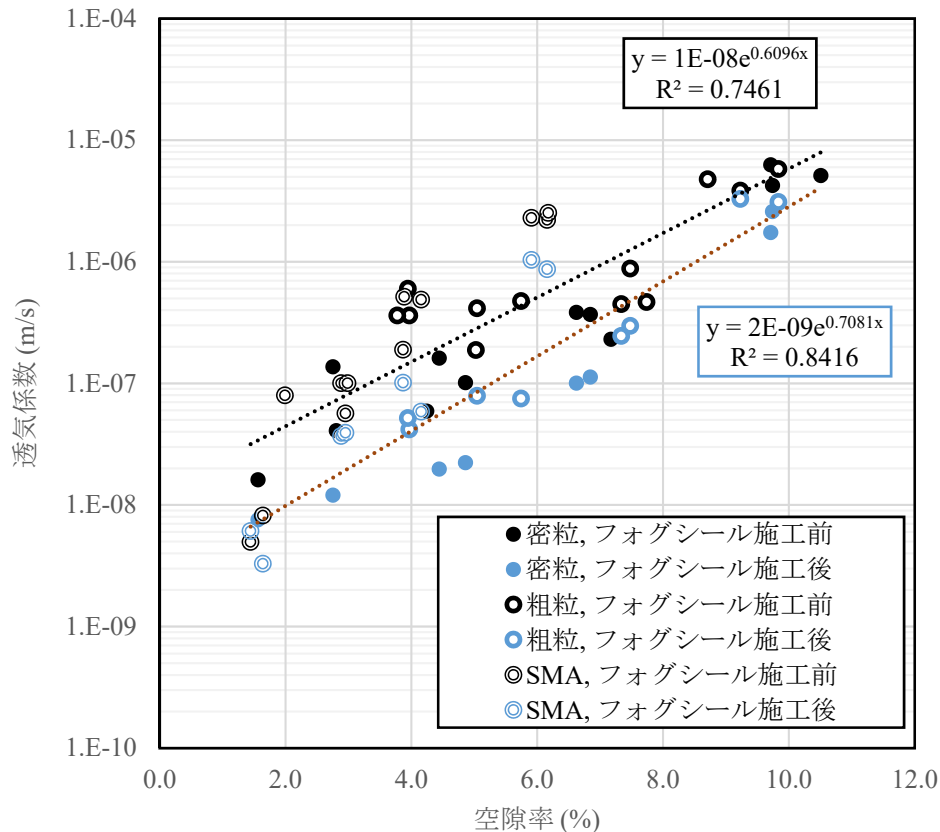


図 5.28 空隙率と透気係数の関係

2) 透気係数ときめ深さの関係

現場透気試験による透気係数とアスファルト混合物の表面の「きめ深さ」の関係性を評価するため、供試体表面の「きめ深さ」を測定した。「きめ深さ」とは舗装表面の骨材などにより形成される凹凸のことである。

きめ深さの測定は、クマタカエンジニアリング社製マルチロードプロファイラ MRP-3000（以下、MRP-3000）を用いた。舗装調査・試験法便覧⁵⁾を参考に平均プロファイル深さ MPD（Mean Profile Depth）を算出した。MRP-3000 の仕様と外観を表 5.18、写真 5.19 に示す。測定は、fogシール施工前後に、図 5.29 に示すように、区画 A1 と区画 A3 にて測定した。測定状況を写真 5.20 に示す。

試験結果を表 5.19 と図 5.30 に示す。透気係数ときめ深さ MPD の相関関係は認められない。透気係数は混合物内部の空隙の状態によるところが大きく、表面の形状については関係がないことが分かる。fogシールの施工前後を比較すると全体的にきめ深さが小さくなっている傾向が認められるが、バラツキ

が非常に大きく、fogシールによってきめ深さが小さくなるまでは言い難い。fogシールは膜厚が薄く表面のきめ深さを大きく変化させるほどのものではないと考えられる。

表 5.18 MRP-3000 の仕様

型式	MRP-3000
計測の範囲	平坦性, テクスチャ, IRI, わだち掘れ, トゥループロファイル, 歩道計測
仕様台車	3.0m 台車, 0.5m 台車
使用センサ	レーザ×2, ジャイロ
測定範囲 (高さ)	±35mm
測定分解能 (高さ)	0.03mm
測定ピッチ (距離)	0.3mm
けん引速度	最大 2 km/h
測定ユニット間通信	有線
測定ユニットサイズ	450 (W) × 220 (D) × 250 (H)
質量 (測定ユニット)	14.0 kg
使用時間	5.5 時間
バッテリー保持時間	2.0 時間
バッテリー充電時間	5.0 時間

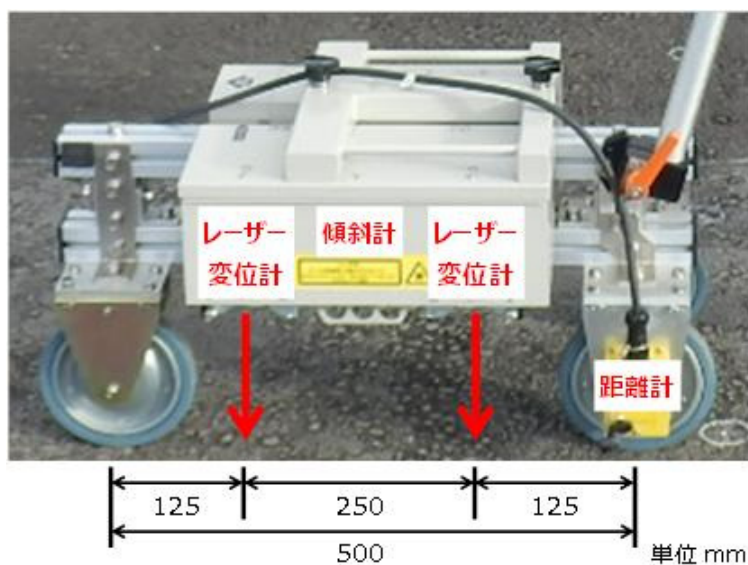


写真 5.19 MRP-3000 の外観

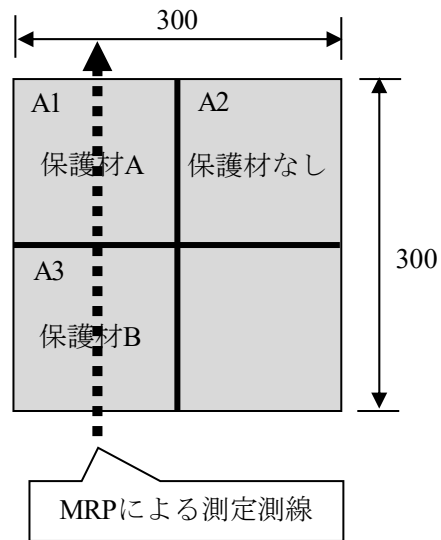


図 5.29 きめ深さの測定位置



写真 5.20 きめ深さの測定状況

表 5.19 きめ深さの測定結果

混合物種類	目標締固め度	供試体位置	きめ深さ MPD (mm)		透気係数 (m/s)	
			フォグシール施工前	フォグシール施工後	フォグシール施工前	フォグシール施工後
密粒	94	A1	0.49	0.76	4.2E-06	2.6E-06
		A2	-	-	-	-
		A3	0.51	0.49	6.3E-06	1.7E-06
	97	A1	0.50	0.31	3.8E-07	1.0E-07
		A2	-	-	-	-
		A3	0.53	0.60	3.7E-07	1.1E-07
	100	A1	0.28	0.23	1.6E-07	2.0E-08
		A2	-	-	-	-
		A3	0.40	0.24	1.0E-07	2.2E-08
	103	A1	0.31	0.33	1.6E-08	7.5E-09
		A2	-	-	-	-
		A3	0.32	0.29	1.4E-07	1.2E-08
粗粒	94	A1	0.44	0.44	5.8E-06	3.1E-06
		A2	-	-	-	-
		A3	0.75	0.56	3.8E-06	3.3E-06
	97	A1	0.61	0.25	4.5E-07	2.5E-07
		A2	-	-	-	-
		A3	0.53	0.41	8.8E-07	3.0E-07
	100	A1	0.35	0.37	4.1E-07	7.9E-08
		A2	-	-	-	-
		A3	0.51	0.61	4.8E-07	7.5E-08
	103	A1	0.43	0.48	3.6E-07	4.2E-08
		A2	-	-	-	-
		A3	0.57	0.82	6.0E-07	5.2E-08
SMA混合物	94	A1	1.16	0.69	2.2E-06	8.7E-07
		A2	-	-	-	-
		A3	1.29	1.13	2.3E-06	1.0E-06
	97	A1	0.78	0.37	4.9E-07	5.8E-08
		A2	-	-	-	-
		A3	1.07	0.77	1.9E-07	1.0E-07
	100	A1	0.56	0.70	1.0E-07	3.7E-08
		A2	-	-	-	-
		A3	0.66	0.53	5.7E-08	3.9E-08
	103	A1	0.82	0.37	8.2E-09	3.3E-09
		A2	-	-	-	-
		A3	0.49	0.46	5.0E-09	6.1E-09

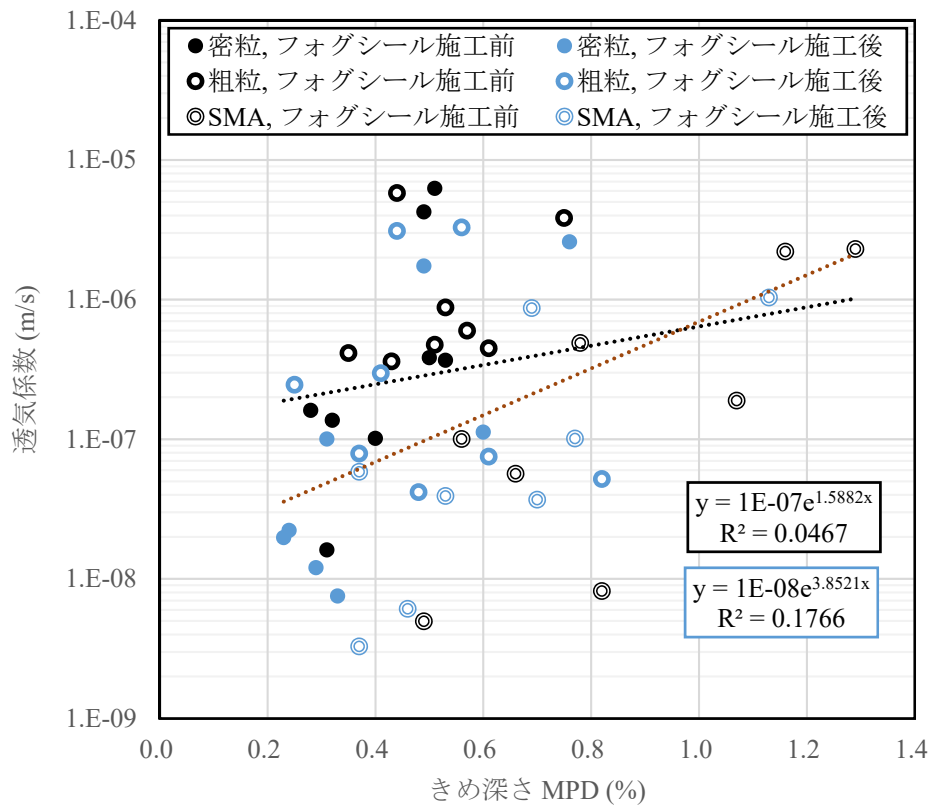


図 5.30 きめ深さ MPD と透気係数の関係

3) 透気係数と透水係数の関係

現場透気試験による透気係数とアスファルト混合物の透水係数の関係の評価するため、現場透気試験を実施した位置より切取供試体を採取し、舗装調査・試験法便覧「B017T アスファルト混合物の加圧透水試験方法」⁵⁾に準じて透水係数の測定を行った。加圧透水試験機の外観を写真 5.21 に、試験の手順を図 5.31 に示す。

現場透気試験および加圧透水試験の結果を表 5.20 に示す。区画 A1 は保護材 A を、区画 A3 は保護材 B を塗布しており、区画 A2 は保護材を塗布していない。透気係数と透水係数の関係を図 5.32、図 5.33、図 5.34、図 5.35 に示す。透水試験で不透水となった供試体については、図中に $1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ として示している。図 5.35 より保護材施工前の R2 値は 0.85 と相関性が認められるが保護材施工後の R2 値は 0.68 と低下している。これは加圧透水試験では加圧によりfogシールの膜が破損し透水係数が大きく測定されているためではないかと考えられる。



写真 5.21 加圧透水試験機の外観

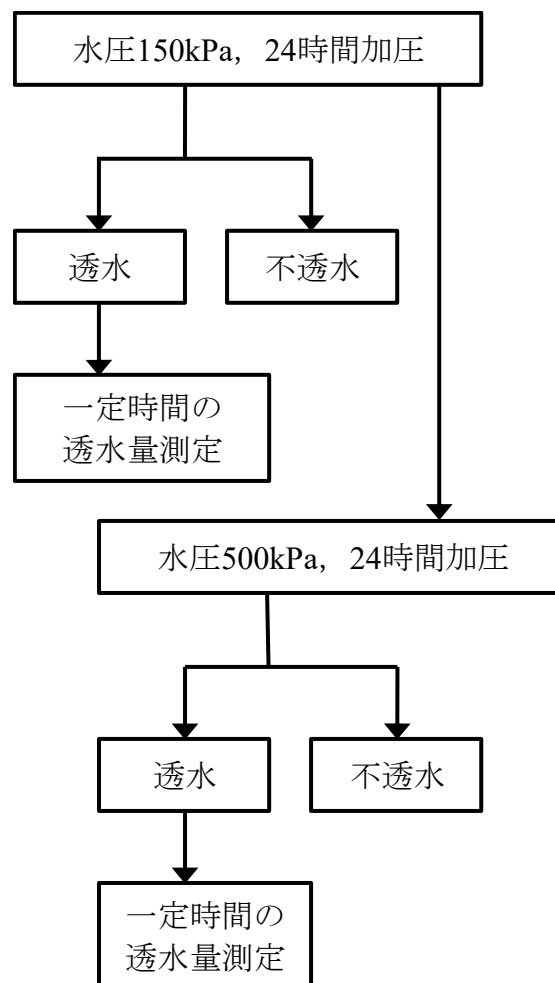
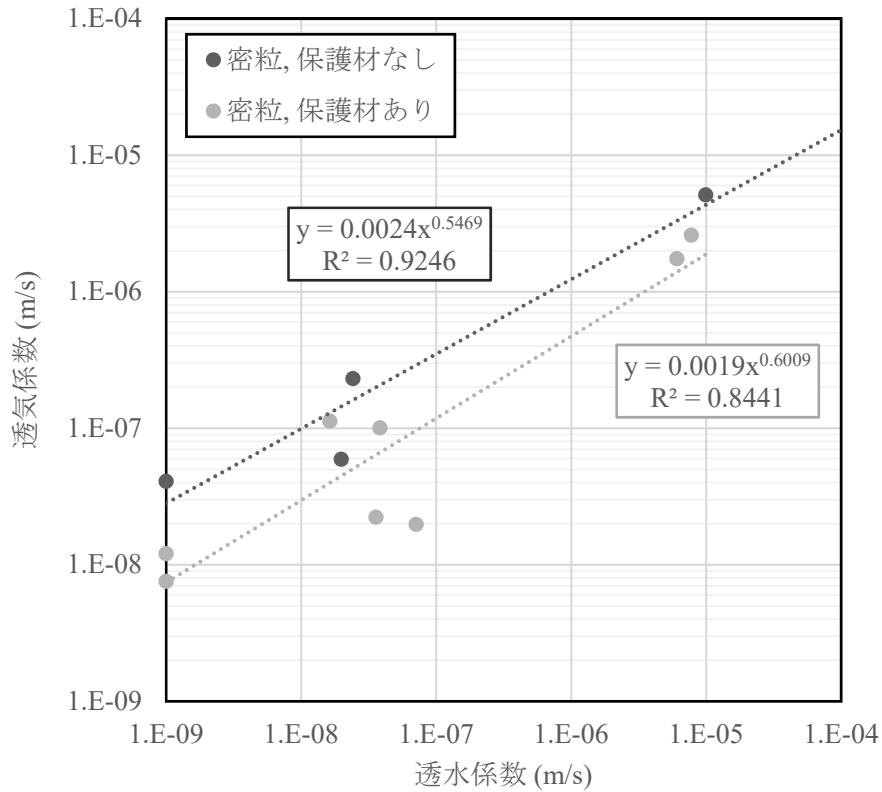


図 5.31 加圧透水試験の手順

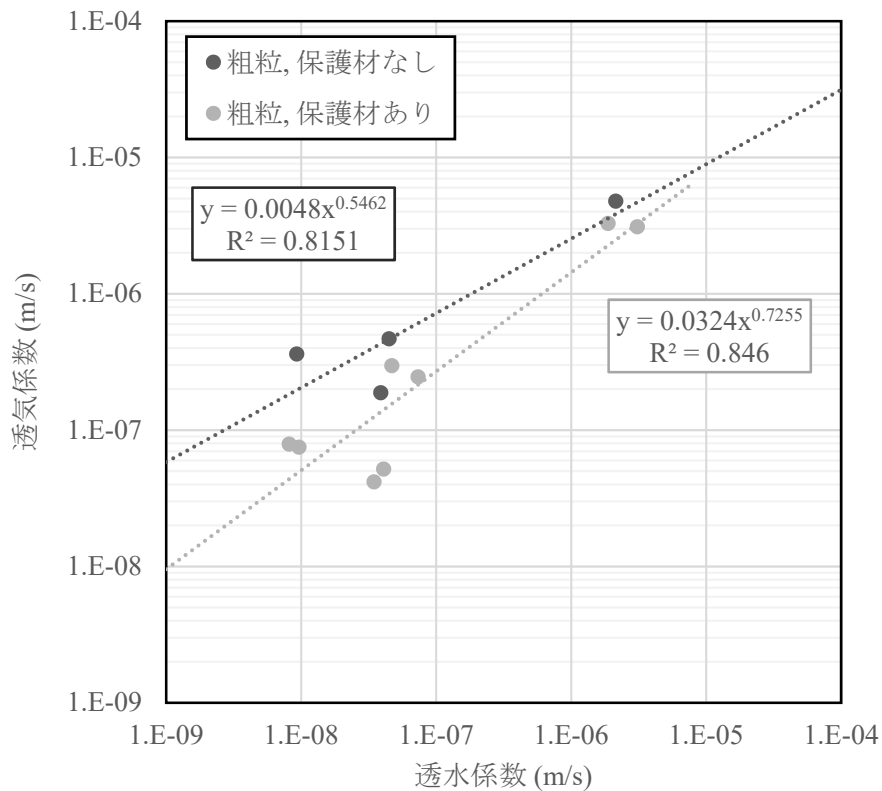
表 5.20 現場透気試験および加圧透水試験結果

混合物種類	目標締固め度	供試体位置	透水係数 (m/s)		透気係数 (cm/s)	
			保護材なし	保護材あり	保護材なし	保護材あり
密粒	94	A1	-	7.8E-06	-	2.6E-06
		A2	9.9E-06	-	5.1E-06	-
		A3	-	6.1E-06	-	1.7E-06
	97	A1	-	3.8E-08	-	1.0E-07
		A2	2.4E-08	-	2.3E-07	-
		A3	-	1.6E-08	-	1.1E-07
	100	A1	-	7.1E-08	-	2.0E-08
		A2	2.0E-08	-	5.9E-08	-
		A3	-	3.6E-08	-	2.2E-08
	103	A1	-	不透水	-	7.5E-09
		A2	不透水	-	4.1E-08	-
		A3	-	不透水	-	1.2E-08
粗粒	94	A1	-	3.1E-06	-	3.1E-06
		A2	2.1E-06	-	4.8E-06	-
		A3	-	1.9E-06	-	3.3E-06
	97	A1	-	7.3E-08	-	2.5E-07
		A2	4.5E-08	-	4.7E-07	-
		A3	-	4.7E-08	-	3.0E-07
	100	A1	-	8.2E-09	-	7.9E-08
		A2	3.9E-08	-	1.9E-07	-
		A3	-	9.6E-09	-	7.5E-08
	103	A1	-	3.5E-08	-	4.2E-08
		A2	9.3E-09	-	3.6E-07	-
		A3	-	4.1E-08	-	5.2E-08
SMA混合物	94	A1	-	5.6E-08	-	8.7E-07
		A2	8.0E-07	-	2.5E-06	-
		A3	-	4.2E-08	-	1.0E-06
	97	A1	-	1.0E-09	-	5.8E-08
		A2	2.2E-07	-	5.2E-07	-
		A3	-	不透水	-	1.0E-07
	100	A1	-	不透水	-	3.7E-08
		A2	不透水	-	1.0E-07	-
		A3	-	不透水	-	3.9E-08
	103	A1	-	不透水	-	3.3E-09
		A2	不透水	-	8.0E-08	-
		A3	-	不透水	-	6.1E-09



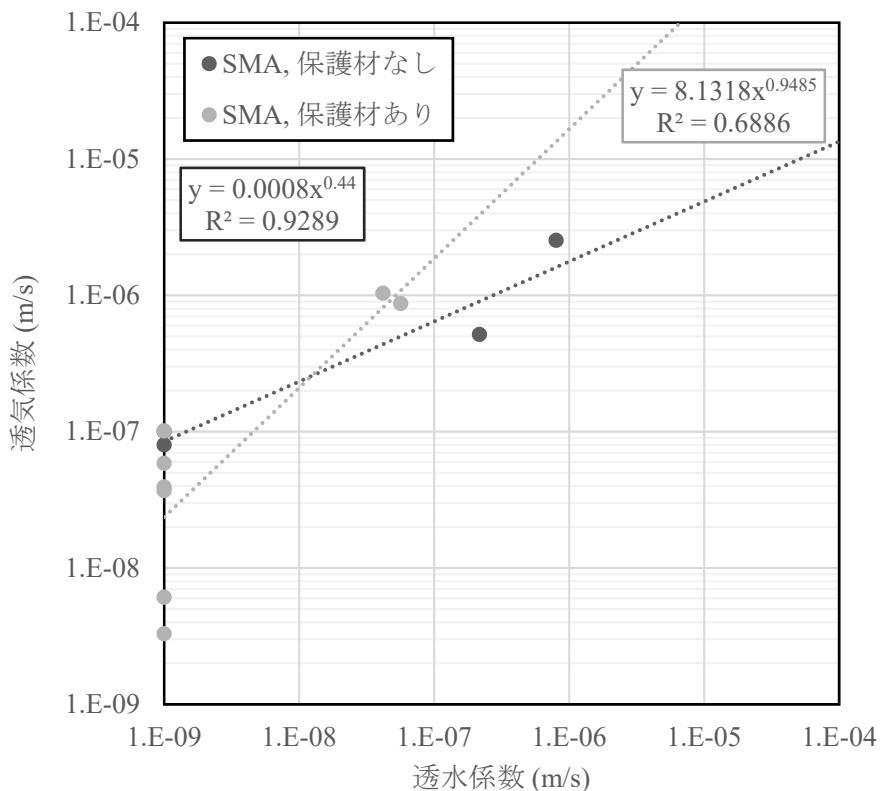
※加圧透水試験で不透水の場合は透水係数 10^{-9} (m/s)として記載

図 5.32 密粒度アスファルト混合物の透水係数と透気係数の関係



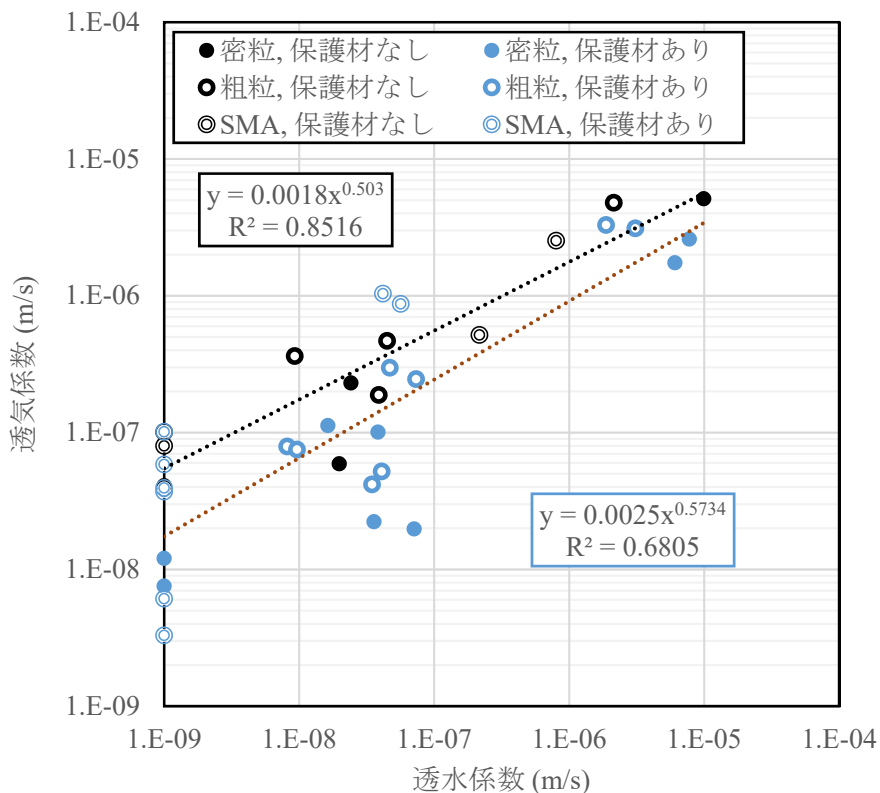
※加圧透水試験で不透水の場合は透水係数 10^{-9} (m/s)として記載

図 5.33 粗粒度アスファルト混合物の透水係数と透気係数の関係



※加圧透水試験で不透水の場合は透水係数 10^{-9} (m/s)として記載

図 5.34 SMA 混合物の透水係数と透気係数の関係



※加圧透水試験で不透水の場合は透水係数 10^{-9} (m/s)として記載

図 5.35 透水係数と透気係数の関係

参考文献

1. 渡邊一弘, 堀内智司, 久保和幸: 繰返し载荷試験装置を用いた舗装の長期の疲労蓄積に関する一考察, 土木学会舗装工学論文集, 第 19 巻, I151-I158, 2014.
2. 今井寿男, 大川秀雄, 帆苅浩三: 透気試験器の開発と排水性舗装の透水性能評価例について, 舗装, pp12-16, 2004.
3. エフティーエス(株): 透気試験器 Permer-TORR リーフレット.
4. 氏家勲, 長瀧重義: コンクリートの透気性の定量的評価に関する研究, 土木学会論文集, 第 369 号, V-9, 1988.8.
5. (公社)日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧, 2006.

6. フォグシール工法の長期供用性調査

およびライフサイクルコスト分析

6.1. 概要

本章では、フォグシールの有用性をライフサイクルコストの観点から評価するにあたり、過去にフォグシール工法が施工された道路舗装にて実施した路面性状調査等の追跡調査結果について述べる。また、水を供給する曲げ疲労試験結果に基づきフォグシール工法によるアスファルト舗装の延命効果を試算し、ライフサイクルコストの縮減効果について述べる。

6.2. 長期供用性調査

フォグシール工法の実際の道路での耐久性は、試験的な施工を行い、その後の経過観察等により効果を確認することが望ましいと考えられるが、長い年月を要するため、本研究の期間内に十分な確認を行うことは難しい。そこで、フォグシールの有用性をライフサイクルコストの観点から評価するにあたり、過去にフォグシールが施工された箇所において、追跡調査を実施し長期供用性の調査を行った。

6.2.1. 調査箇所

表 6.1 に示す 3 箇所にて追跡調査を行った。調査内容として施工履歴調査、路面性状調査および状況に応じて各種の現場試験を実施した。

表 6.1 長期供用性調査箇所一覧

調査箇所	場所	フォグシール施工年月
調査箇所 A	茨城県つくば市	平成 12 年 11 月
調査箇所 B	群馬県川場村	平成 15 年 9 月
調査箇所 C	群馬県箕郷町	平成 16 年 9 月

6.2.2. 調査方法

路面性状調査は路面性状測定車を用いた。路面性状測定車の性能仕様を表 6.2 に、測定車の外観を写真 6.1 に、路面性状測定車の測定画面を図 6.1 に示す。道路を規制することなく、一般車両と同等の速度で走行しながら、舗装のひび割れ、わだち掘れ、平坦性を、きめ深さを同時に測定することが可能な測定車である。

表 6.2 路面性状測定車仕様

車名	TOYOTA ハイエース DX
全長	6,210 mm
全幅	2,330 mm (最小 1,880mm)
全高	2,950 mm
測定条件	路面が湿潤でない
測定速度	最大 100 km/h
測定幅員	最大 5,200 mm
ひび割れ	3次元レーザーセンサーLCMS
わだち掘れ	3次元レーザーセンサーLCMS
平坦性	NCDT



写真 6.1 路面性状測定車外観

6. フォグシール工法の長期供用性調査
およびライフサイクルコスト分析

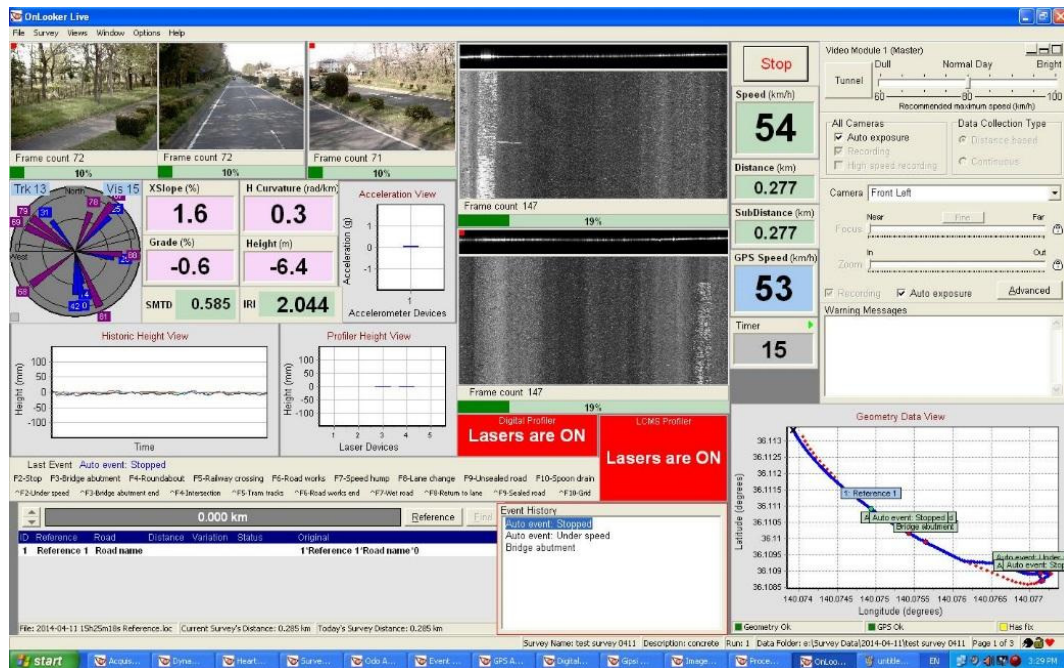


図 6.1 路面性状測定車の測定画面

6.2.3. 調査結果および考察

(1) 調査箇所 A

1) 調査箇所の状況

表 6.3 に地点 A における施工の概要を示す。この現場では、表層を舗装した直後に舗装表面が密実でなかったことから、骨材飛散が懸念され、交通解放後の骨材飛散を抑制する観点からフォグシールが施工されている。施工箇所は 3 箇所に分かれており施工面積は合計で約 200m² と小規模なものである。

写真 6.2 に施工時の状況写真を示す。施工範囲は区画線内の車道のみであり、区画線を養生しながら、エンジンスプレーヤによりフォグシール材を散布し、散布ムラ等をレーキにより整えている。

写真 6.3 に供用 2 年後、供用 14 年後の状況写真を示す。最上段の写真より、供用 2 年後は、全体的に色が黒々としており、フォグシールが十分に路面に残っている状況を確認できる。供用 14 年後においても、施工範囲外の路面とは色が異なっており、十分にフォグシールの効果が認められる。中段の写真では、フォグシールを実施していない隣接箇所も映っている。供用 2 年後の段階では、フォグシール施工箇所と色は異なるものの良好な路面を保持していたものが、供用

14年後にはひび割れによる破損が生じている。最下段の接写写真では、供用2年後には、全体的にフォグシールが残っているのが確認できる。供用14年後には、骨材上部は交通荷重などの作用により面的には残存していないが、骨材と骨材のくぼみについてはフォグシールが残っている箇所が残存していた。以上のことより、フォグシールを施工した箇所は、14年後も良好な路面を保持しており、フォグシールを行うことにより、舗装の破損の進行を遅延できているものと考えられる。

表 6.3 調査箇所 A の施工概要

施工年月	平成 12 年 11 月
施工場所	茨城県内
施工延長	40m, 10m, 10m (計 3 箇所)
施工面積	約 200 m ²
散布した路面の混合物	密粒度アスファルト混合物
施工履歴	舗設直後
施工目的	骨材剥離防止のための表面強化



写真 6.2 調査箇所 A の施工時の状況写真

6. フォグシール工法の長期供用性調査
およびライフサイクルコスト分析



写真 6.3 調査箇所 A における供用後の路面写真

2) 路面性状調査結果

路面性状調査は、路面性状測定車の3次元レーザーセンサーで計測し、ひび割れ部の抽出を行った。調査箇所Aは、3箇所で行われているが、そのうちの施工延長が40mと最も長い箇所を対象に実施した。

図6.2に路面の撮影画像を示す。路面の撮影画像は紙面の都合上、縦横比を2:1で示している。図中の路面に表示されている紫色の線は路面のひび割れを表している。施工延長40mのうち約25mがフォグシール施工後に打ち換えにより補修されている。

現存している15mの区間についてはひび割れがなく良好な路面を保持している。供用14年後であることを考慮するとフォグシールは十分に機能を発揮し舗装を延命しているものと考えられる。一方、打ち換えにより補修された区間については、非常に多くのひび割れが発生していることが確認できる。この打ち換えによる補修はいつ行われたのかは定かではないが、フォグシールの供用2年後の調査時点では補修がなされていなかったことから、その供用年数は最大でも12年であり、比較的早期に破損した区間である。この早期に破損した要因として、ひび割れは外側線側の方が進行していることや、田畑に隣接していることから、舗装の支持力不足の可能性が考えられ、このためフォグシールの延命効果が発現されなかったものと推察される。

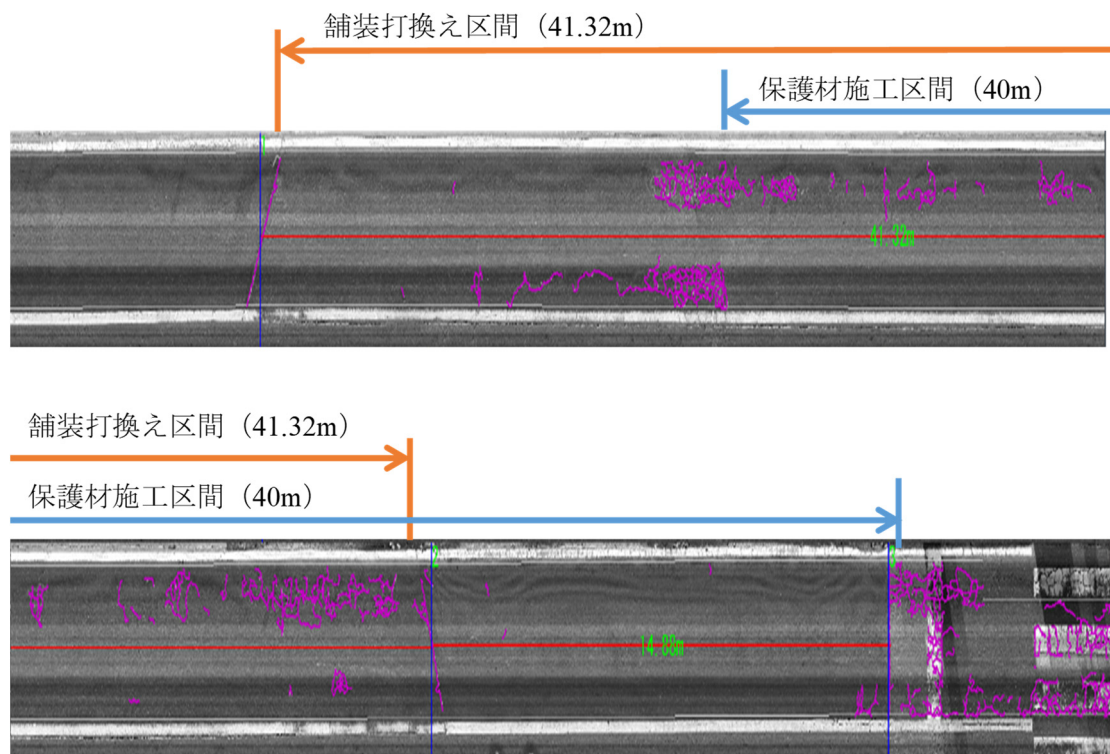


図 6.2 調査箇所 A の路面性状測定車によるひびわれ抽出結果

(2) 調査箇所 B

1) 調査箇所の状況

表 6.4 に地点 B における施工の概要を示す。本現場は舗装から 6 年後にフォグシールが施工されている。片側一車線の橋梁上の舗装である。道路管理者の移管における引き渡し条件で、舗装の美観向上を目的に行われている。

写真 6.4 に地点 B における施工時の状況を示す。施工方法は散水車等による路面の清掃後、構造物および排水施設の養生を行い専用のディストリビュータにより保護材を散布している。フォグシール材の散布過多の箇所においてはレーキ等により整えている。本現場の施工範囲は橋梁上の舗装全面であることから、フォグシール施工後に新たに区画線を施工している。施工直後の仕上がり面は新設の舗装と同様にとっても綺麗なものである。施工直後に、舗装調査・試験法便覧「S021-2 振り子式スキッドレジスタンステストによるすべり抵抗測定方法」に基づき舗装路面のすべり抵抗性を測定している。写真 6.5 に試験状況、表 6.5 に測定結果を示す。すべての測点で BPN 50 以上の値が得られており良好な結果である。

写真 6.6 に供用 2 年後、供用 11 年後の状況写真を示す。最上段の写真より、供用 2 年後は、全体的に色が黒々としており、フォグシールが十分に残っている状況が確認できる。供用 11 年後においても良好な路面を保持している。

下段の写真では、施工 2 年後において区画線に部分的な剥がれが確認できるが、保護材は確実に残っており、全体的に良好な路面を保持していた。本現場の特徴として、冬季の除雪作業により路面の相対的に高い部分が削り取られてしまうことがある。このため、施工 11 年後においては、中央の車線区画線はほとんど削り取られ無くなっている。フォグシールも区画線同様に表面部分が削り取られてほとんど残存していない。

写真 6.7 に当該現場の供用 11 年後の路面の接写写真を示す。当該現場は舗装の施工からフォグシールが施工されるまでに 6 年間供用されており、その間に生じたひび割れ箇所にフォグシール材が浸透し、更に 11 年が経過した時点にもフォグシールが残っている状況と考えられる。舗装の施工から 17 年経過していることを考えると、舗装表面は非常に良好な状態であり、フォグシールには十分な延命効果があるものと推察できる。

表 6.4 調査箇所 B の施工概要

施工年月	平成 15 年 9 月
施工場所	群馬県内
施工延長	140 m
施工面積	1,000 m ²
散布混合物	密粒度アスファルト混合物
施工履歴	舗設後 6 年経過
施工目的	管理者移管の際の引き渡し条件



写真 6.4 調査箇所 B の施工時の状況



写真 6.5 すべり抵抗性試験測定状況

表 6.5 すべり抵抗性試験結果

測点	測定位置	BPN測定値 (実測値)	路面温度 (°C)
1	非車輪通過部	53	17
	車輪通過部	50	17
2	非車輪通過部	60	17
	車輪通過部	57	17
3	非車輪通過部	58	17
	車輪通過部	52	17



写真 6.6 調査箇所 B における供用後の路面写真

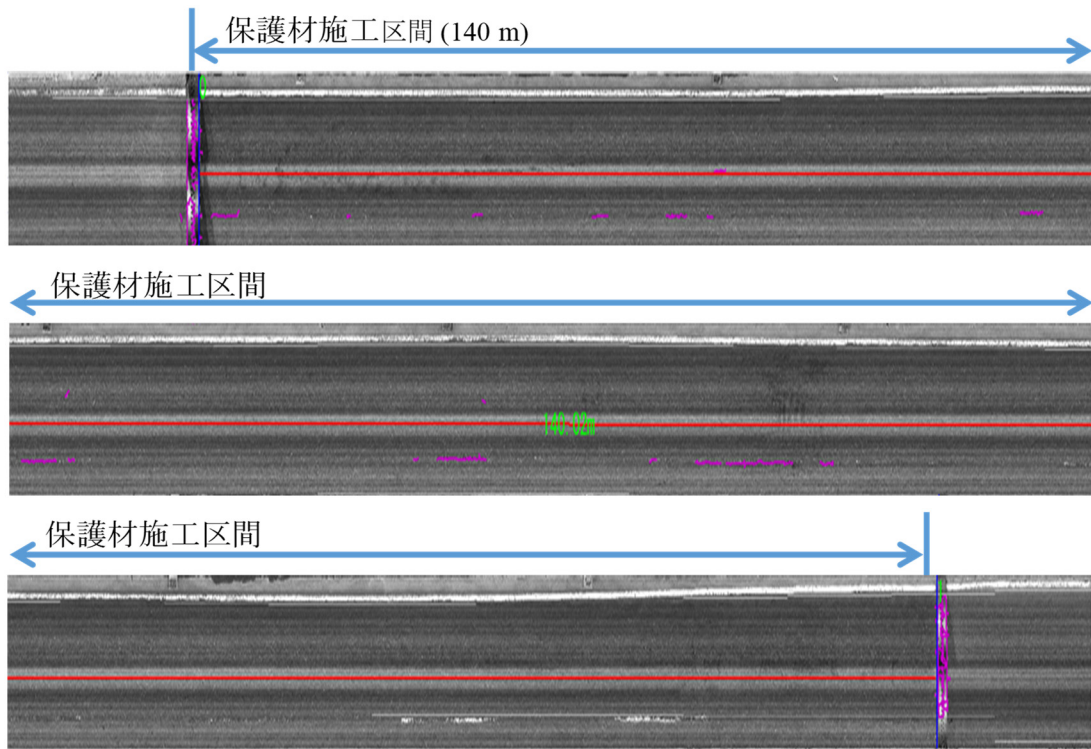


写真 6.7 供用 11 年後の表面保護材の充填状況

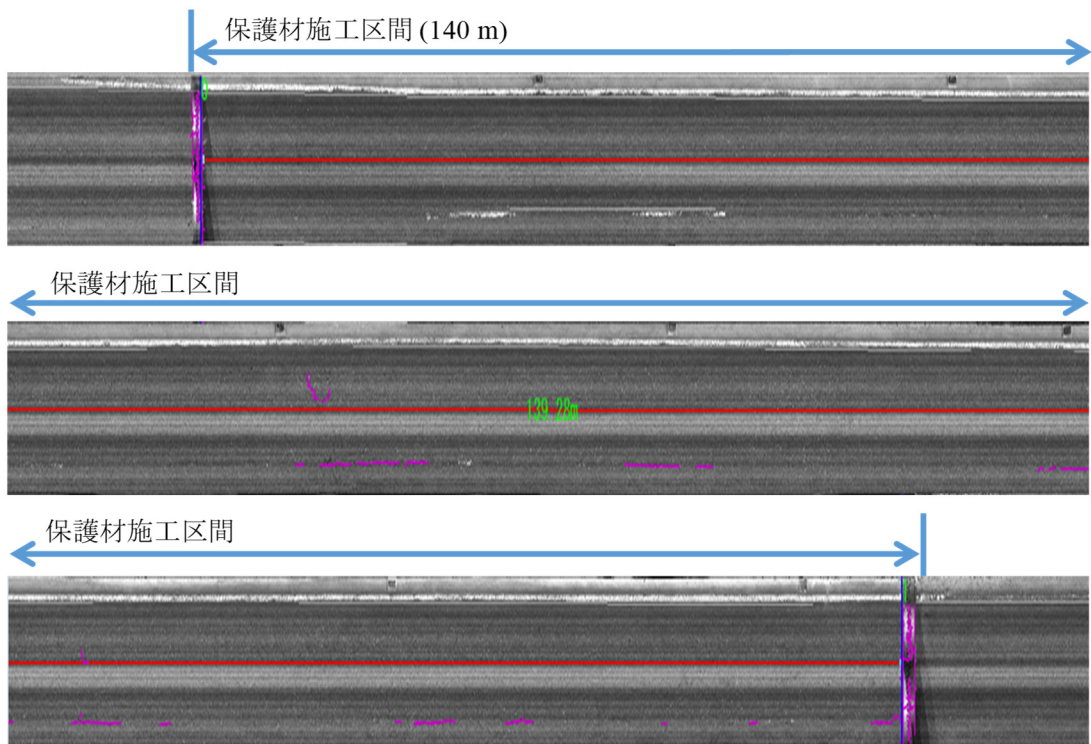
2) 路面性状調査結果

図 6.3 に路面性状測定車の 3 次元レーザーセンサーにより撮影した路面画像を示す。路面の撮影画像は紙面の都合上、縦横比を 2:1 としている。図中の路面に表示されている紫色の線は路面のひび割れを表している。

上り線，下り線ともに車輪通過位置に縦断方向のひび割れが生じているが，舗設後 17 年経過した舗装であることを考慮すれば，非常に良好な路面を保持しているものと考えられる。



(a) 上り線



(b) 下り線

図 6.3 調査箇所 B の路面性状測定車によるひびわれ抽出結果

(3) 調査箇所 C

1) 調査箇所の状況

表 6.6 に地点 C における施工の概要を示す。この現場は新設の密粒度アスファルト混合物の舗設直後に、作業車のキャタピラにより路面が荒れたために、路面の美観を改善する目的でフォグシールを施工した現場である。

写真 6.8 に施工時の状況写真を示す。施工方法は路面の清掃および区画線等の養生後、専用のディストリビュータにより保護材を散布し、散布ムラをレーキにより整えている。路面の損傷が区画線内であったことから施工範囲は区画線内の車道のみである。

写真 6.9 に供用 1 年後、供用 10 年後の状況写真を示す。上段の写真より、供用 1 年後は、とても綺麗な路面で、キャタピラによる路面の荒れは感じられない。供用 10 年後は、路面の縦断方向に筋状にフォグシールが残っているのが確認できる。これはフォグシールを散布する際のディストリビュータによる散布ムラと考えられる。図 6.4 にディストリビュータによる散布のイメージ図を示す。ディストリビュータはスプレーバによりアスファルト乳剤を放射状に散布するが、未散布箇所が生じないように散布範囲を重ねて散布する構造となっている。通常は交通開放後の通行車両のタイヤ等により馴染むことから散布痕が目立つことはないが、当該現場は、交通量が極めて少ない林道であるため、保護材が重複して散布された箇所が目立っているのではないかと考えられる。

中段の写真は、フォグシール施工箇所の起点であり、写真の下部はフォグシールを施工していない箇所を映している。供用 1 年後の写真の下部ではキャタピラにより路面が荒れている状況がみられるが、写真の上部はフォグシールにより路面の荒れを改善できているのが確認できる。供用 11 年後においてもフォグシール未散布箇所とは明らかに異なる路面が確認でき散布箇所は路面が密実な印象を受ける。下段の写真は施工箇所の終点の接写写真である。供用 11 年後においても散布箇所と未散布箇所が明確に識別でき、フォグシール散布は路面が黒々しており良好な路面を保持している。

調査箇所 C は、舗装後に一部区間だけをフォグシールを行っていることから、フォグシール施工区間に隣接する箇所とは舗装の履歴が同じである。このため散布箇所と未散布箇所の路面状態の比較を行うことができる。そこで、供用 10 年後に、MRP による MPD 測定および現場透気試験を行った。図 6.5 に試験を実施した位置図を示す。MRP による MPD 測定は 4 測線で行い、現場透気試験は散布箇所、未散布箇所のそれぞれ 10 地点で測定した。なお、MRP は「5.4.4

試験供試体での測定」に示したものを使用した。

表 6.7 に MRP による MPD の測定結果を示す。4 測線の平均で、フォグシール未散布箇所の 0.7 mm に対してフォグシール散布箇所は、0.45mm と小さなっている。写真 6.10 にフォグシールの施工境界の接写写真を示す。写真からも散布箇所と未散布箇所表面のテクスチャの違いが認められる。フォグシールを散布することにより、経年に伴うアスファルト混合物の表面のモルタル分の剥脱を抑制できているものと考えられる。

表 6.8, 図 6.6 に現場透気試験の測定結果を示す。路面にひび割れが発生していないため、フォグシールを散布していないところであっても、透気係数は 10^{-7} m/s 程度と比較的良好な値を示している。フォグシール散布箇所は 10^{-8} m/s 程度の個所が多く、フォグシールを散布していない箇所に比べて更に良好な値となっている。当該現場は交通量が少ないこともあり、供用 10 年後にもフォグシールの効果が持続しているものと考えられる。

表 6.6 調査箇所 C の施工概要

施工年月	平成 16 年 9 月
施工場所	群馬県内
施工延長	150 m
施工面積	800 m ²
散布混合物	密粒度アスファルト混合物
施工履歴	舗設直後
施工目的	路面の美観向上



写真 6.8 調査箇所 C の施工時の状況



写真 6.9 調査箇所 C における供用後の路面写真

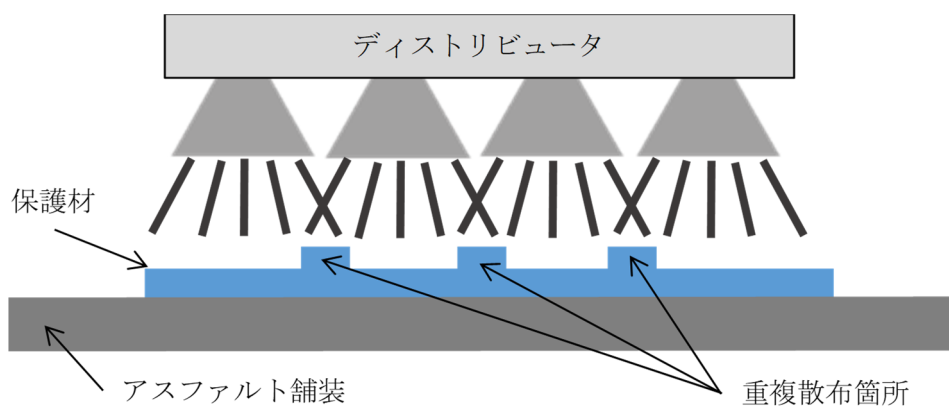


図 6.4 保護材散布ムラのイメージ

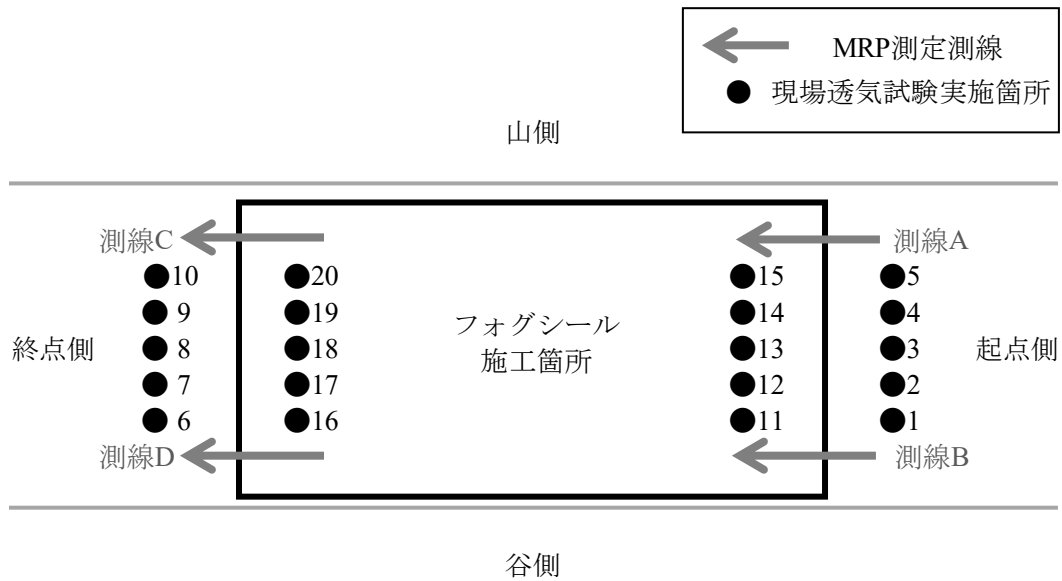


図 6.5 現場透気試験およびきめ深さ測定位置

表 6.7 きめ深さ測定結果

測線	MPD (mm)	
	保護材なし	保護材あり
測線 A	0.56	0.41
測線 B	0.74	0.35
測線 C	0.85	0.54
測線 D	0.63	0.49
平均	0.70	0.45



写真 6.10 調査箇所 C における施工境界の接写写真

表 6.8 現場透気試験結果の一覧

測点 No.	透気係数 (m/s) 保護材なし	測点 No.	透気係数 (m/s) 保護材あり
1	5.2E-08	11	1.8E-09
2	3.7E-08	12	7.8E-09
3	1.5E-07	13	6.3E-08
4	1.3E-07	14	5.2E-09
5	6.9E-08	15	6.7E-09
6	5.2E-09	16	2.7E-09
7	1.0E-08	17	6.5E-09
8	2.5E-07	18	9.3E-08
9	2.7E-07	19	3.4E-08
10	6.2E-08	20	5.2E-09

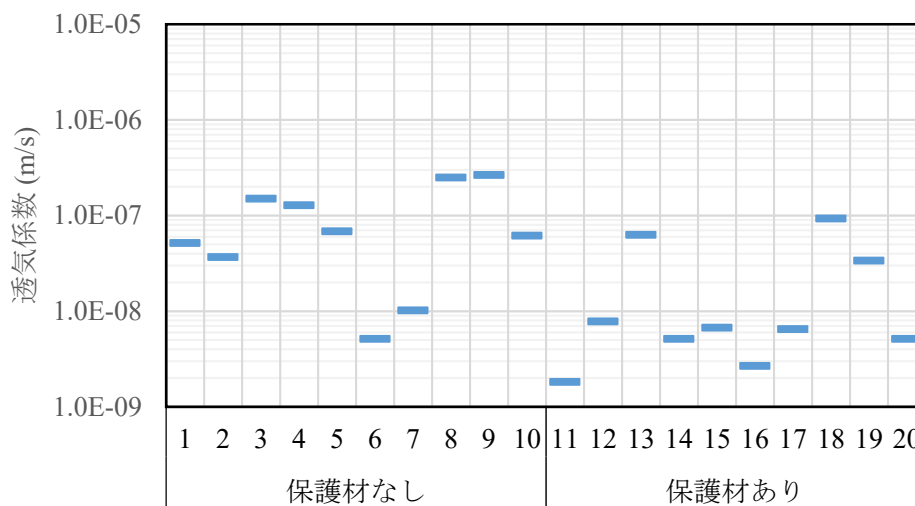


図 6.6 現場透気試験結果

2) 路面性状調査

図 6.7 に路面性状測定車の 3 次元レーザーセンサーより撮影した路面画像を示す。保護材施工区間の中間付近の谷側（画像下側）においてひび割れが発生している。この地点の状況写真を写真 6.11 に示す。当該箇所は切土部であり、のり面の沈下に起因して路面にひび割れが生じたものと考えられる。それ以外の個所については、供用 10 年であること考慮すると、良好な路面を保持しているものと考えられる。

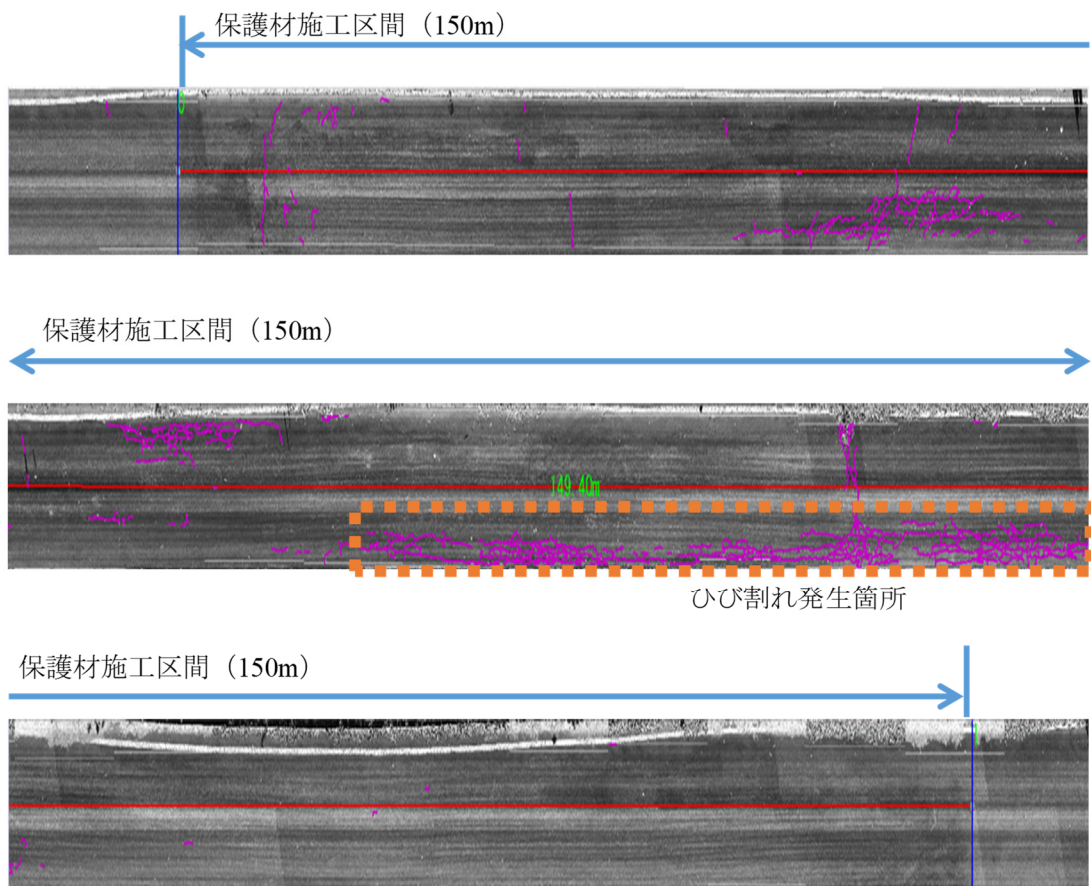


図 6.7 調査箇所 C の路面性状測定車によるひびわれ抽出結果



写真 6.11 ひび割れ発生箇所付近の状況

6.3. 水を供給する曲げ疲労試験に基づくライフサイクルコスト分析

ここでは、フォグシールの有用性を舗装のライフサイクルコストの視点から評価するため、「4.4 フォグシールがアスファルト混合物の疲労特性に与える影響」で行った試験結果に基づき、いくつかの仮定のもとフォグシールによる舗装の延命効果について試算し、その結果より舗装のライフサイクルコストを求め、フォグシールの適用によって生じるライフサイクルコストの縮減効果について述べる。

6.3.1. フォグシールによる舗装の延命効果の試算

実際の道路では、晴天と雨天が繰り返される。「4.3 水の有無がアスファルト混合物の疲労特性に与える影響」で実施した水を与えない試験結果は実路における晴天時の状態を、水を与えた試験結果は雨天時の状態を模擬していると考えられる。そこで、我が国の年間降水日数は、全国平均で 120 日¹⁾であることから、水を与える条件の試験結果と通常の水を与えない試験結果より降雨日数を考慮して実路を想定した曲線（以下、「実路想定曲線」という）を求めることを考える。

まず、水を供給する曲げ疲労試験は、それぞれの条件で供試体数を 5 本として試験を実施しているため、その試験結果より各応力値の载荷回数を読み取り平均値を求めた。図 6.8 に結果を示す。次に年間降雨日数を考慮して実路想定曲線を求めるが、载荷回数と応力の関係は非線形であることから、応力軸で按分する方法と、载荷回数軸で按分する方法が考えられる。応力軸で按分する方法では、例えば 50,000 回時点の値は、N1～N5 の平均の値(約 75%)と W1～W5 の平均の値(約 50%)を降雨日数で按分して 67%と求めた。载荷回数軸で按分する方法では、同一応力の時の载荷回数を降雨日数によって按分して求めた。疲労試験結果について、両方法で雨水影響を按分した計算結果を図 6.9 に示す。雨天であろうと晴天であろうと 30,000 回付近で微細なひび割れが生じるが、供試体が湿潤状態である場合に、はく離が進行することにより応力の低下に与える影響が大きいものと考えられ、ここでは応力軸で按分することとした。

フォグシールを適用した場合の実路想定曲線は、フォグシールを塗布し水を与えない試験結果と、フォグシールを塗布し水を与えた試験結果より算出することになるが、本研究では、水を与えない試験ではフォグシールはアスファルト混合物の疲労特性に大きく影響を与えないものと仮定し、フォグシールを塗布せずに水を与えない試験結果とフォグシールを塗布し水を与えた試験結果よ

り降雨日数で按分して算出した。図 6.10 に算出結果を示す。なお、図 6.9 に示すとおり、採用した応力軸で按分する方法は、応力軸 30%になるまでの回数を計算することが出来ないことから、ここでは応力が 60%まで低下する回数で評価した。

図 6.10 よりフォグシールを散布しない場合は载荷回数 55,000 回で 60%まで応力が低下している。これを一般的な舗装寿命の 10 年後に相当すると改定すると、フォグシールを散布した 30,000 回は供用 5 年目となる。またフォグシールを散布した舗装の寿命は 13 年と求まる。これらのことから、フォグシールを供用 5 年目に散布すると舗装の寿命を 3 年間延命化できるものと考えられる。

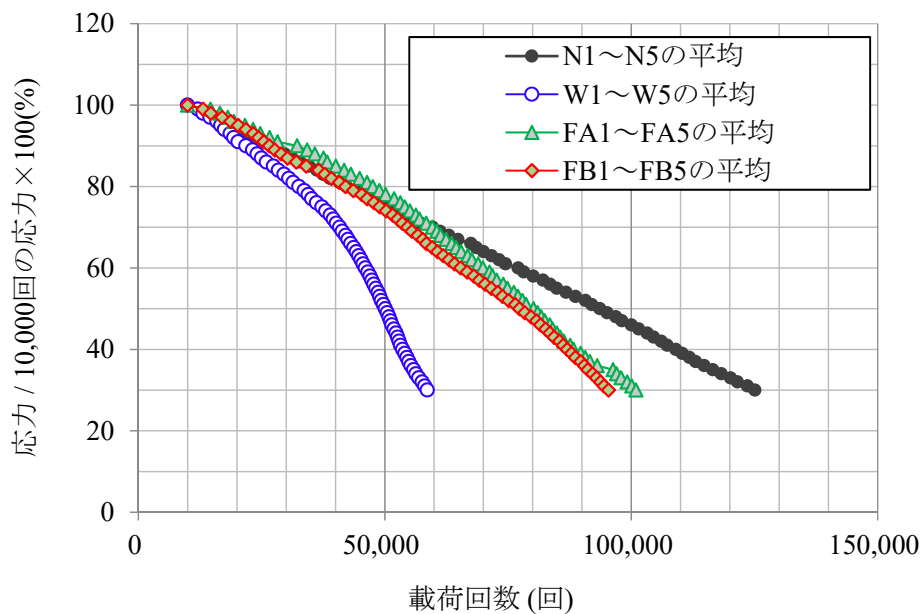


図 6.8 平均化した曲げ疲労試験結果

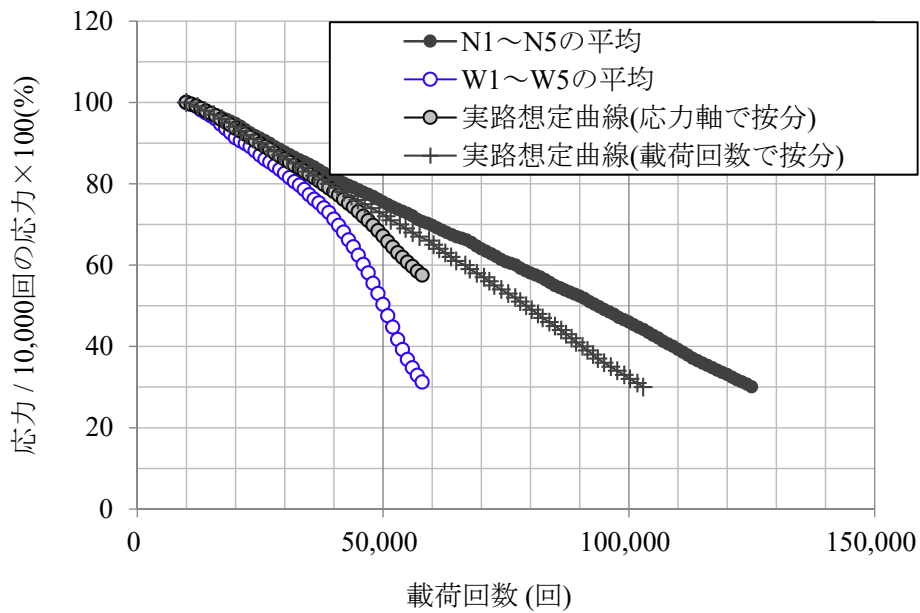


図 6.9 実路を想定した曲線の計算の方法

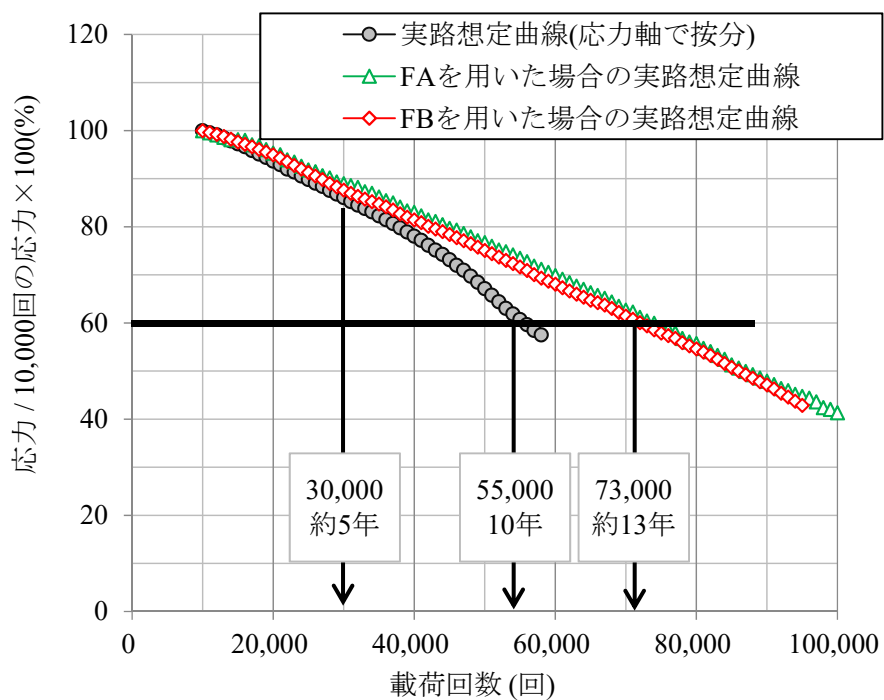


図 6.10 フォグシールによる舗装の延命効果

6.3.2. ライフサイクルコストの試算

検討期間 40 年としてライフサイクルコスト分析を行った。既往の研究^{2),3)}を参考に設定した補修シナリオを表 6.9 に示す。そのイメージ図を図 6.11 に示

す。シナリオ N は、建設（打換え）を 10 年サイクルで繰り返すものである。シナリオ A, B は、建設（打換え）から 5 年経過後にフォグシールを施工し、舗装寿命となる 13 年後に舗装版打換え工を実施するサイクルを繰り返すものとした。

各工法の施工単価は、表 6.10 に示す条件のもと積算し、表 6.11 に示すとおりに設定した。保護材 A, B の違いは材料費の単価差によるものである。

図 6.12 にライフサイクルコストの試算結果を示す。シナリオによって補修時期が異なっているため、検討期間終了時点の舗装の残存価値が異なっている。そこで比較のため、検討期間終了時の残存価値を金額に換算し累計コストより減じる必要がある。残存価値は、一サイクル当りの工事コストをサイクル年数で割り、次回補修までの年数を掛けて求めた。表 6.12 に残存価値を減じた累計のコストを示す。シナリオ N の場合は「次の補修までの年数」が 0 年であることから残存価値は 0 円となる。シナリオ A の場合は「次の補修までの年数」が 12 年であることから残存価値は $3,250 / 13 \times 12 = 3,000$ 円となる。40 年間の累計コストは、シナリオ N は 12,000 円/m² であるのに対して、フォグシール A を定期的に散布するシナリオ A では 9,750 円/m² であり、2 割程度の削減ができると試算された。

表 6.9 補修シナリオ

シナリオ	補修計画
N	舗装版打換え工→（10 年）→ 舗装版打換え工→（10 年）→ …繰り返す
A	舗装版打換え工→（5 年）→保護材 A→（8 年）→ 舗装版打換え工→（5 年）→保護材 A→（8 年）→ …繰り返す
B	舗装版打換え工→（5 年）→保護材 B→（8 年）→ 舗装版打換え工→（5 年）→保護材 B→（8 年）→ …繰り返す

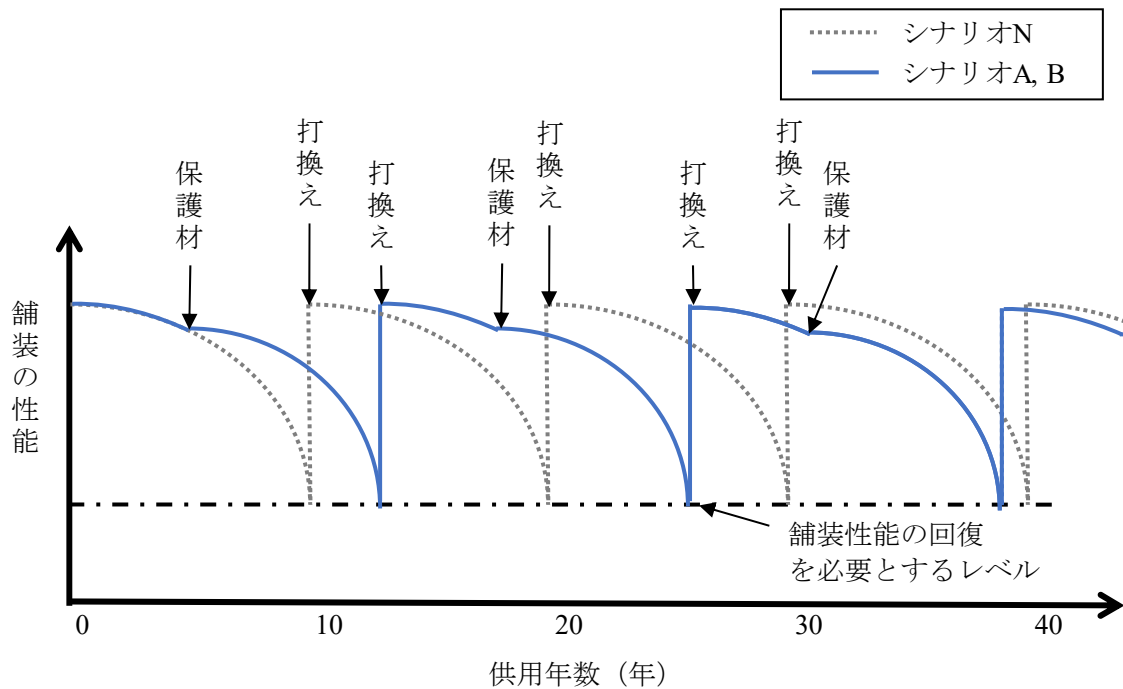


図 6.11 舗装の供用年数と性能のイメージ

表 6.10 積算条件

項目	積算条件		
	舗装版打ち換え工	フォグシール工法 保護材 A	フォグシール工法 保護材 B
施工地域	東京近郊	東京近郊	東京近郊
時間帯	昼間	昼間	昼間
アスファルト合材	密粒度アスファルト混合物(13)	-	-
日当たり施工量	150 m ² /日	1,000 m ² /日	1,000 m ² /日
舗装厚	5 cm, 1 層	-	-
瀝青材	-	保護材 A	保護材 B
瀝青材散布量	-	0.5 l / m ²	0.4 l / m ²
運搬距離	10 km 以内	-	-
備考	運搬, As 殻処分含む。5cm 剥ぎ取り後不陸整正	ディストリビュータによる機械散布 区画線等の養生無し	ディストリビュータによる機械散布 区画線等の養生無し

表 6.11 設定した施工単価

工法	工事施工単価
舗装版打換え工	3,000 円/m ²
保護材 A	250 円/m ²
保護材 B	1,100 円/m ²

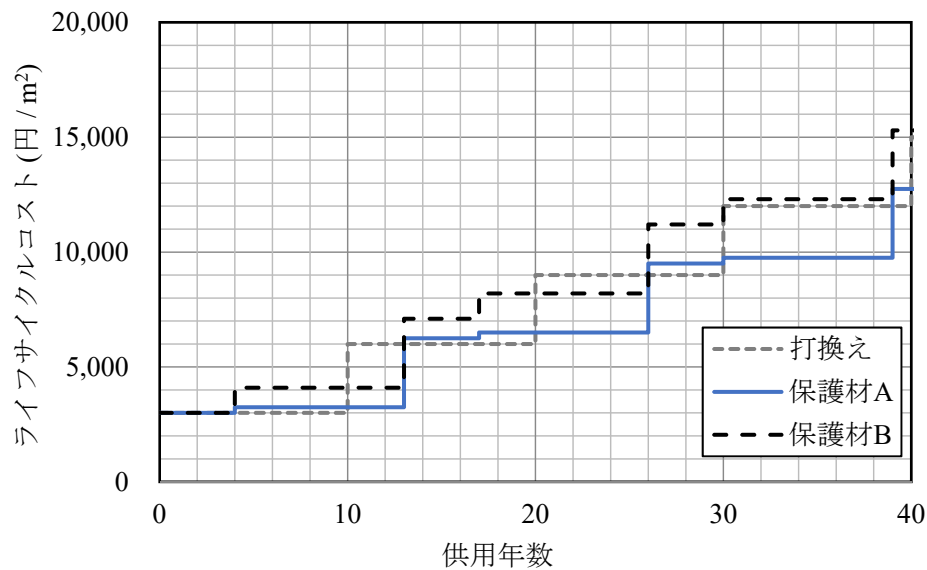


図 6.12 ライフサイクルコスト分析結果

表 6.12 ライフサイクルコスト分析結果一覧

シナリオ	① サイクル 年数	② 工事コス ト (円)	40年間供用時点				
			③ 累計コス ト (円)	④ 前回補修 からの年 数 (年)	⑤ 次の補修 までの年 数 (年)	⑥ 残存価値 (円)	⑦ 修正累計 コスト (円)
N	10	3,000	12,000	10	0	0	12,000
A	13	3,250	12,750	1	12	3,000	9,750
B	13	4,100	15,300	1	12	3,785	11,515

参考文献

1. 都道府県格付研究所：年間降水量, 2012.
2. 岳元秀人, 久保裕一：ライフサイクルコストを考慮したアスファルト舗装の構造設計に関する研究, 北海道開発土木研究所月報 610 号, 2004.
3. 北海道開発局 札幌開発建設部 道路維持課：札幌開発建設部における舗装ライフサイクルコスト算定試行結果, 舗装マネジメントシステム講演会, 2004.

7. 結論

本研究は、雨水の浸透がアスファルト混合物の疲労破壊特性に与える影響、雨水の浸透する環境下でフォグシール工法がアスファルト混合物の疲労破壊特性に与える影響を把握し、さらに、舗装の透気性能の視点よりフォグシール工法を適用すべき路面の状態、適用すべき時期を検討し、最終的には、表面処理工法のひとつであるフォグシール工法が大型車交通量の少ない道路舗装の維持管理において有用であることを明らかとすべく実施したものである。

以下に本研究で得られた結論を列挙する。

第2章では、本研究に関連する既往の研究を総括し、現状と課題について整理した。まず、アスファルト道路舗装の破壊形態を分類整理し、それらの発生原因についてまとめた。アスファルト舗装の破損要因としてひび割れが重要だが、その発生メカニズムは複雑であり未解明の課題が多い状況である。ひび割れの発生メカニズムを明らかにすることは、より良い舗装の設計施工を可能にするものと考えられた。

大型車交通量の少ない生活道路等については、アスファルトの劣化・老化に起因してひび割れが生じる。アスファルトの劣化・老化の影響因子としては、紫外線、雨水が考えられ、アスファルトの劣化・老化に関する研究やアスファルト混合物を紫外線等で劣化させ疲労破壊特性を把握する研究は行われてきているが、雨水が疲労破壊特性に与える影響に着目した研究は少なく、これを把握する意義は大きいと考えた。

交通量の少ない生活道路の効率的な維持管理を考えると、破損の主要因であるアスファルトの劣化・老化を、予防的な処置によりコントロールすることが重要であると考えられ、既往の研究においても予防的工法の重要性やアセットマネジメントに関する研究が活発に行われている。

舗装は定期的なメンテナンスを前提とした道路構造物であり、補修技術についても古くより研究開発されてきており、これまでにフォグシール、チップシール、スラリーシール、マイクロサーフェシング、カーペットコートといった各種の表面処理工法が開発されているが、これらの工法が、予防的工法として積極的に活用されているとは言い難い状況である。この理由として、表面処理工法の管理経費節減効果や効果的な活用方法などが具体的かつ十分に示されていないことにあると考えた。

舗装と同様に交通荷重の繰返し作用を受ける道路橋の床版においても、その

劣化を予測する研究や維持管理を高度化するための研究が活発に行われており、雨水によって大幅にその寿命が短縮することが明らかとなっている。舗装も同様に雨水によってその寿命が短縮するものと考えた。

これらのことより、本研究では、まず、雨水の浸透がアスファルト混合物の疲労破壊特性に与える影響を明らかにするとし、つぎに、 Fogシール工法がアスファルト混合物の疲労破壊特性を改善する効果を把握することとした。さらに、 Fogシール工法を適用すべき路面の状態、適用すべき時期を検討し、最終的には、表面処理工法のひとつである Fogシール工法の有用性を明らかにすることを目標とした。

第3章では、大型車交通量の少ない道路舗装の破損の主要因であるアスファルト混合物層の劣化・老化に対して効果的な維持修繕工法を選定するため、資料調査に基づき既存の維持修繕工法を分類し、それらの特徴を整理することによって、 Fogシール工法が比較的安価で効果も期待できることを示した。また、 Fogシール工法に用いるアスファルト乳剤には各種のものが市販されていることから、アスファルト混合物の紫外線による劣化を抑制の観点より室内試験により比較検討し、以下の結論を得た。

促進耐候性試験を実施した結果から、近年、市販されている改質アスファルト乳剤は、従来から Fogシール用とされているアスファルト乳剤 MK-2 よりも耐候性に優れていることが分かった。

耐候性試験後の試験供試体からアスファルトを抽出し性状試験を行った結果、 Fogシール等の表面処理工法を施工することによって、アスファルトの針入度の低下を抑制できることが分かった。

ねじり骨材飛散抵抗性を評価する試験を実施した結果、 Fogシール工法にはアスファルト混合物の骨材飛散を抑制する効果は認められなかった。

ひび割れ抵抗性評価試験を実施した結果、 Fogシール工法には交通荷重に対するひび割れ抵抗性を改善する効果は認められなかった。

第4章では、雨水等の水分がアスファルト混合物の疲労破壊特性へ与える影響を把握するため、水を供給しながらのアスファルト混合物の曲げ疲労破壊試験について検討した。まず、水を供給しながらのアスファルト混合物の曲げ疲労破壊試験は一般的な試験ではないことから供試体の作成方法、水の供給方法等について検討した。つぎに、水を供給する場合と供給しない場合の曲げ疲労試験を行い、水がアスファルト混合物の疲労破壊特性へ与える影響につい

て調べ、さらに、試験供試体にフログシールを塗布し水を供給した場合の曲げ疲労試験を行い、フログシールがアスファルト混合物の疲労破壊特性を改善する効果について調べた。その結果、以下の結論を得た。

アスファルト混合物の曲げ疲労試験の供試体は、スラブ状の供試体を作成し切り出して棒状に成型するが、4 側面すべてをカットする方が、ばらつきの少ない結果が得られることが分かった。

試験中に水を与える方法については、曲げ応力が生じる部分に部分的に滞水させる方法、試験器ごと水没させる方法、試験中に供試体に対して点滴で給水する方法を比較検討したが、点滴で給水する方法が、ばらつきの少ない結果が得られることが分かった。

水を供給しながら疲労試験を実施した結果、水を与えない通常の試験結果に比べて、30,000～40,000 回付近から急速に応力が小さくなっていく傾向が認められた。これは、載荷回数が 30,000～40,000 回程度で、供試体に微細なひびわれが生じ、水分が供試体内部に浸透したためと考えられた。

疲労試験結果の載荷回数軸を線形軸とし、応力軸を応力と初期応力の割合とすることで、水の有無による結果の差異を、より適正に評価できるものと考えられた。

水を供給しながらの疲労試験を 30,000 回で休止し、供試体にフログシールを施した後に再開する試験を実施した結果、フログシールを適切な時期に行いアスファルト混合物内への水の浸透を抑制することで疲労破壊特性を改善できることが分かった。

フログシールを塗布し水を供給しながらの試験は、フログシール材に 2 種類のアスファルト乳剤で実施したが、ほぼ同じ結果が得られ優劣をつけることはできなかった。

第 5 章では、実際の舗装へフログシール工法を適用することを想定し、フログシールを適用すべき場所を選定することや、フログシール施工後に性能を確認することを目的とする現場透気試験について、試験器を試作し、試験方法や測定値の評価方法について検討した。また、実際に劣化・老化しているアスファルト舗装路面、目視で確認できない微細なひび割れが発生している箇所および各種のアスファルト混合物供試体において、フログシール工法の施工前後で現場透気試験を実施した。その結果、以下の結論を得た。

現場透気試験の透気漏れ防止材について、さまざまな材質のものと比較検討した結果、ゲル状物質が透気漏れを防止し、作業性にも優れることが分かった。

現場透気試験実施中の空気の動きを確認した結果、試験器内へ流入してくる空気の70%は混合物下面から混合物を通気してくるものであった。

同一地点で複数回測定した結果、現場透気試験は再現性に優れる試験であった。

供用13年経過した路面において、 Fogシール施工前後で現場透気試験を実施した結果、施工前に透気係数で 10^{-6} m/s オーダーの個所では、 Fogシールを $0.51/\text{m}^2$ 散布することで 10^{-7} m/s オーダーに低下した。施工前に 10^{-7} m/s オーダーの個所についても Fogシールを塗布することで更に改善することができた。

微細なひび割れが発生している箇所では、現場透気試験と Fogシールの施工を実施した結果、微細なひび割れ部の透気係数は 10^{-7} m/s オーダーであり、 Fogシールを施工すると 10^{-8} m/s オーダーまで回復できた。これは微細なひび割れ部に隣接する健全部の透気係数と同等であり、 Fogシールによって微細なひび割れを塞げることが分かった。

各種のアスファルト混合物の試験供試体を作製し、混合物密度、表面のきめ深さ、透水係数と、現場透気試験から得られる透気係数を比較した結果、混合物密度と透気係数は R^2 値で $0.7\sim 0.84$ と良好な相関関係があることが確認できた。表面のきめ深さと透気係数に相関関係はなかった。透水係数と透気係数は R^2 値で 0.85 程度と良好な相関関係があることが分かった。

第6章では、過去に Fogシール工法が施工された道路舗装にて実施した路面性状調査等の追跡調査結果についてまとめた。また、水を供給する曲げ疲労試験結果に基づき Fogシール工法によるアスファルト舗装の延命効果を算出し、ライフサイクルコストの縮減効果を試算することで、以下の結論を得た。

14年間供用された箇所の現地調査を行った結果、当時の路面が残存しているところは、 Fogシールの痕跡が確認でき、 Fogシールを実施していない周辺との差異もあることから、舗装の延命に寄与しているものと考えられた。当該箇所において、14年間の供用の間に舗装が打ち換えられ、 Fogシールが残存していない部分もあったが、その打ち換えられた場所は、すでにひび割れが生じており、路盤、路床に起因して舗装が破損した可能性が考えられた。

水を供給する曲げ疲労試験結果に基づき Fogシール工法によるアスファルト舗装の延命効果を試算した結果、アスファルト舗装の寿命を10年と仮定した場合、供用5年後に Fogシールを施工することで舗装寿命を3年延ばす効果が期待できる結果となった。

この結果より、いくつかの仮定のもとライフサイクルコストを試算した結果、定期的にフォグシールを施工することで40年間のトータルコストを約2割縮減できる結果となった。

以上のとおり、大型車交通量の少ない道路舗装の維持管理において、表面処理工法の一つであるフォグシール工法は有用であり、予防的工法としてフォグシール工法を定期的に施工することで、ライフサイクルコストの縮減に寄与する可能性があることを示した。

今後、道路舗装の維持管理をより一層に効率的かつ効果的に実施していく上で、本研究がその一助になれば幸いである。

謝辞

本論文は、筆者が東亜道路工業株式会社に勤務する技術者として実務上の課題や問題を解決するため、平成 27 年 10 月から平成 31 年 3 月の期間、神戸大学大学院 工学研究科 市民工学専攻 人間安全工学講座 地盤安全工学分野に所属して、澁谷啓教授のご指導をいただき、道路舗装の維持管理に関する研究成果をとりまとめたものであります。

本研究の遂行ならびに論文の執筆にあたっては、多くの方々のご指導を賜りました。

澁谷啓教授には、本研究の遂行ならびに論文のとりまとめにあたりましてご指導頂きました。先生の的確かつ明瞭なご助言によって、目標に向かって迷うことなく研究を遂行することができました。心より感謝し、厚く御礼申し上げます。

神戸大学大学院 工学研究科 市民工学専攻 環境共生工学講座 都市保全工学分野の森川英典教授、ならびに芥川真一教授には、本論文をとりまとめるにあたり、大変ご多忙の中、示唆に富んだご指導とご助言を賜りました。心より感謝し、厚く御礼申し上げます。

神戸大学大学院 工学研究科 市民工学専攻 吉田信之准教授（平成 27 年 10 月入学時、平成 28 年 1 月逝去）には、筆者が神戸大学で学部生をしていた時よりご指導を賜り、社会人になってからもあたたかい叱咤激励を頂きました。また、筆者がこのように本論文をとりまとめる機会を与えていただくとともに本研究の遂行にあたりご指導を頂きました。心より感謝し、厚く御礼申し上げます。

神戸大学大学院 工学研究科 市民工学専攻 片岡沙都紀助教には、本研究のとりまとめにあたってご指導いただきました。神戸大学大学院 工学研究科 市民工学専攻 齋藤雅彦助教には、透気係数の算出方法についてアドバイスをいただきました。神戸大学大学院 工学研究科 市民工学専攻 白 濟民研究員には、本研究のとりまとめにあたってご指導いただきました。ここに深く感謝申し上げます。

国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 道路基盤研究室 渡邊一弘室長には、本研究の遂行にあたって、貴重な資料の提供とご助言を頂きました。心より感謝し、厚く御礼申し上げます。

東亜道路工業株式会社 吉原健一 社長（平成 27 年 10 月入学時）には、神戸大学大学院への入学の機会を与えていただくとともに、あたたかい叱咤激励を頂きました。東亜道路工業株式会社 阿部長門 技術営業部長（前技術部長）には、研究の遂行にあたって多大なるご支援を頂きました。東亜道路工業株式会社 村山雅人 九州支社長（前技術研究所長）には、研究の遂行にあたってご指導頂くとともにあたたかい叱咤激励を頂きました。心より感謝し、厚く御礼申し上げます。

東亜道路工業株式会社 堀之内悟 常務執行役員技術本部長、藤永 弥 技術部長、ならびに吉武美智男 技術研究所長には、筆者の社会人学生という立場をご理解いただき、業務上の様々な面でご配慮いただきました。東亜道路工業株式会社 技術研究所 第四研究室の皆様には、本研究の実験の準備やデータの整理などご協力いただきました。東亜道路工業株式会社の皆様には、業務上の様々な面でご配慮いただきました。ここに深く感謝申し上げます。

最後に本研究に専念できるように著者の日常を支えてくれた妻、子供たちに感謝します。

平成 31 年 1 月

塚本 真也

神戸大学博士論文

「道路舗装の維持管理に資する表面処理工法に関する研究」 全 181 頁

提出日 2018 年 1 月 24 日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ **kernel** にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当頁上に掲載されます。

© 塚本 真也

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。