共同研究報告書

整理番号第６４１号

# カーボンニュートラルに向けた
# 新たな舗装材料開発に関する共同研究

令和８年９月

国立研究開発法人土木研究所
先端材料資源研究センター材料資源研究グループ
道路技術研究グループ　舗装チーム
花王株式会社
ハリマ化成株式会社
世紀東急工業株式会社
前田道路株式会社
東亜道路工業株式会社
ニチレキ株式会社

Copyright© (2026） by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means、 nor transmitted、 nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共同研究報告書
第６４１号令和８年９月

# カーボンニュートラルに向けた新たな舗装材料開発に関する共同研究報告書

**要旨**

近年、カーボンニュートラルの実現に向けた取り組みが活発化している。今後、産業構造の大きな変化が予想される中で、石油精製量は減少し、それに伴いアスファルトの生産量も減少すると見込まれる。さらに、国内のアスファルト製造プラントは減少傾向にあり、供給量の約 3 割を輸入に依存している現状がある。このため、アスファルトの安定供給が困難となった場合に備え、代替となる舗装材料の確保が必要である。

現在、アスファルトや、その添加剤（改質材や再生用添加剤など）は、石油由来の原料から製造されているが、非石油由来の原料でも製造できるようになれば、代替品検討の幅が広がるものと考えられる。特に近年は、SDGs 達成やカーボンニュートラル実現に向け、植物由来材料の利用が注目されている。国内外では、植物由来樹脂を用いた再生用添加剤や舗装材料の開発が進められているものの、実用化には至っていない。

本共同研究では、上記を踏まえて、カーボンニュートラルに向けた新たな舗装材料の適用性を明らかにすることを目的として、実用化に向け各種検討を実施した。

本報告書は、本共同研究で実施した各種検討結果を報告するものである。

キーワード：カーボンニュートラル、アスファルト代替舗装材料、ライフサイクル $CO_2$

# カーボンニュートラルに向けた新たな舗装材料開発に関する共同研究報告書

## 目　次


1編　共通編 ..... 1-1
１．はじめに ..... 1-1
２．研究概要 ..... 1-2
２．１　研究体制 ..... 1-2
２．２　開発技術の概要 ..... 1-4
３．アスファルト代替材料を用いた舗装のライフサイクル $CO_2$ 算定 ..... 1-6
３．１　目的 ..... 1-6
３．２　$LCCO_2$ 低減効果の確認方法 ..... 1-6
３．３　$LCCO_2$ 算定条件の設定 ..... 1-6
３．４　一般的なアスファルトを用いた舗装の $LCCO_2$ ..... 1-9
３．５　As 代替材料を用いた舗装の $LCCO_2$ ..... 1-12
３．６　As 舗装に対する As 代替舗装の $LCCO_2$ 低減割合 ..... 1-12
３．７　まとめ ..... 1-12
参考文献 ..... 1-13
2編　花王株式会社 ..... 2-1
１．はじめに ..... 2-1
１．１　研究の背景・目的 ..... 2-1
１．２　研究内容 ..... 2-1
２．アスファルト代替材料について ..... 2-4
２．１　廃 PET 改質材 ..... 2-4
２．２　バインダ性状 ..... 2-5
２．３　アスファルト混合物性状 ..... 2-7
３．試験施工 ..... 2-13
３．１　試験施工について ..... 2-13
３．２　追跡調査 ..... 2-13
４．まとめ ..... 2-16
４．１　概要 ..... 2-16

４．２　$LCCO_2$算出条件 ..... 2-17
４．３　舗装のライフサイクル算出結果 ..... 2-18
４．４　$LCCO_2$算出結果 ..... 2-19
3編　ハリマ化成株式会社..... 3-1
１．はじめに ..... 3-1
２．植物由来原料を用いたアスファルト再生用添加剤 ..... 3-2
２．１　再生用添加剤の液物性 ..... 3-2
２．２　アスファルトバインダ性状 ..... 3-4
２．３　アスファルト混合物性状 ..... 3-7
２．４　再生用添加剤の$LCCO_2$算定..... 3-14
２．５　まとめ ..... 3-16
２．６　今後の予定 ..... 3-16
３．植物由来原料を用いたアスファルト代替材料 ..... 3-17
３．１　概要 ..... 3-17
３．２　実験方法 ..... 3-17
３．３　結果と考察 ..... 3-17
３．４　まとめ ..... 3-19
３．５　今後の予定 ..... 3-19
４．結言 ..... 3-20
５．参考文献 ..... 3-20
4編　世紀東急工業株式会社..... 4-1
１．はじめに ..... 4-1
１．１　研究の目的 ..... 4-1
１．２　研究内容 ..... 4-1
２．アスファルト代替材料について ..... 4-2
２．１　バインダの概要 ..... 4-2
２．２　バインダ基礎性状 ..... 4-2
２．３　アスファルト混合物性状 ..... 4-3
３．試験施工および供用性評価 ..... 4-5
３．１　製造方法および施工方法の検討 ..... 4-5
３．２　混合物の供用性評価 ..... 4-7

４．その他の評価 ..... 4-14
４．１　耐候性評価 ..... 4-14
４．２　ひび割れ評価 ..... 4-18
４．３　再生利用の確認 ..... 4-21
５．まとめ ..... 4-24
参考文献 ..... 4-24
5編　前田道路株式会社..... 5-1
１．研究目的 ..... 5-1
２．水硬化型加熱アスファルト混合物の概要 ..... 5-1
３．検討内容 ..... 5-1
３．１　素材の検討 ..... 5-1
３．２　耐候性の確認 ..... 5-2
３．３　プラント製造の検討 ..... 5-2
３．４　混合物性状の確認 ..... 5-3
３．５　供用性の確認 ..... 5-3
３．６　$LCCO_2$の試算 ..... 5-3
４．検討結果 ..... 5-3
４．１　素材の検討 ..... 5-3
４．２　耐候性の検討 ..... 5-5
４．３　プラント製造の検討 ..... 5-11
４．４　混合物性状 ..... 5-12
４．５　土木研究所舗装走行実験場での供用性確認 ..... 5-13
４．６　$LCCO_2$の試算 ..... 5-17
５．まとめ ..... 5-26
６．今後の課題 ..... 5-26
6編　東亜道路工業株式会社..... 6-1
１．　研究概要 ..... 6-1
１．１ 目的 ..... 6-2
１．２ 研究期間 ..... 6-2
１．３ 検討手順 ..... 6-2
２．　設計方法および配合設計方法の検討 ..... 6-3

２．１ 植物由来樹脂の性状評価の結果 ..... 6-3
２．２ 植物由来樹脂を用いた混合物性状評価の結果 ..... 6-4
３． 施工性・耐久性に関する検討 ..... 6-6
３．１ 目的 ..... 6-6
３．２ 施工概要 ..... 6-7
３．３ 施工基盤の調査結果 ..... 6-8
３．４ 使用材料 ..... 6-9
３．５ 施工状況及び施工結果 ..... 6-13
３．６ 追跡調査 ..... 6-16
３．７ 施工性・耐久性評価に関する考察 ..... 6-20
４． 再生技術の可能性の検討 ..... 6-21
４．１ 検討概要 ..... 6-21
４．２ 屋外暴露試験 ..... 6-21
４．３ 再生技術の可能性の検討 ..... 6-29
４．４ 再生技術の可能性に関する考察 ..... 6-35
５． ライフサイクル $CO_2$ の試算 ..... 6-35
５．１ 試 算の概要 ..... 6-35
５．２ 二酸化炭素固定を考慮しない試算 ..... 6-36
５．３ 二酸化炭素固定を考慮した $LCCO_2$ の試算 ..... 6-38
５．４ $LCCO_2$ 試算のまとめ ..... 6-41
7編 ニチレキ株式会社 ..... 7-1
１．はじめに ..... 7-1
２．植物系再生混合物の構成 ..... 7-2
２．１ 植物系バインダの構成 ..... 7-2
２．２ 植物系再生混合物の構成 ..... 7-3
３ 使用材料 ..... 7-4
３．１ 植物系バインダ ..... 7-4
３．２ 新骨材・再生骨材の性状 ..... 7-5
３．３ 再生用添加剤の性状 ..... 7-6
３．４ ストアスの性状 ..... 7-7
４．研究フロー ..... 7-8

５．再生混合物の配合設計 ..... 7-9
６．植物系バインダの選定 ..... 7-11
６．１　目的 ..... 7-11
６．２　バインダの評価 ..... 7-11
６．３　混合物の評価 ..... 7-17
７．植物系再生バインダ④の性能 ..... 7-25
７．１　目的 ..... 7-25
７．２　バインダの評価 ..... 7-25
７．３　混合物の評価 ..... 7-30
８．植物系再生バインダ④の供用に伴う劣化特性 ..... 7-39
８．１　促進劣化試験による評価 ..... 7-39
８．２　屋外暴露試験による評価 ..... 7-46
９．環境負荷の評価 ..... 7-48
９．１　目的 ..... 7-48
９．２　環境負荷の算出 ..... 7-48
１０．まとめ ..... 7-51
１１．今後の予定 ..... 7-51
参考文献 ..... 7-51

# 1編　共通編

## 1．はじめに

2050年カーボンニュートラルの政府方針を受け、国土交通省でも「国土交通グリーンチャレンジ」が発表されるなど、カーボンニュートラル実現に向けた取り組みが活発化している。

石油産業において、石油精製量は減少する見込みであり、それに伴いアスファルトの生産量も減少することが予想される。今後も安定的に舗装の維持更新が続けられるようにするためには、アスファルトの代替材料の検討が必要である。

近年、国内外で植物由来のアスファルト代替材料やアスファルト再生用添加剤の開発が報告されており、海外では適用事例も増えてきている。国内では実用化には至っておらず、また、日本の舗装は高いリサイクル率を誇り、再生混合物の使用が中心となっているため再生技術に適した材料が必要であると考えられる。

そこで、土木研究所と花王株式会社、ハリマ化成株式会社、世紀東急工業株式会社、前田道路株式会社、東亜道路工業株式会社、ニチレキ株式会社は、令和4年度より「カーボンニュートラルに向けた新たな舗装材料の開発に関する共同研究」を開始した。本報告では、植物由来材料を用いたアスファルト代替材料およびアスファルト再生用添加剤の実用化に向けた技術開発および室内試験や屋外暴露試験による性能評価、実大規模の走行試験、ライフサイクル$CO_2$に着目した環境負荷軽減効果の評価等を行ったので報告する。

## ２．研究概要

### ２．１　研究体制

共同研究は、2022 年 4 月～2024 年 3 月までの期間で実施した。本共同研究の参加者を**表 1.2.1** に示す。

なお、本共同研究は土木研究所と民間企業 6 者の各々と実施したものであるが、検討結果は本共同研究報告書にまとめて報告することとする。

**表 1.2.1**　研究体制

| 機関 | 氏名 | 所属・役職 | 参加期間 |
|---|---|---|---|
| (国研)土木研究所 | 新田　弘之※1 | 材料資源研究グループ　上席研究員(先端材料・高度化) | R4.4.1～R5.3.31 |
| | 百武　壮※2 | 材料資源研究グループ　上席研究員(特命事項担当) | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 佐々木　巌 | 材料資源研究グループ　総括主任研究員 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 川島　陽子※3 | 材料資源研究グループ　主任研究員 | R4.4.1～R5.3.31 |
| | 藪　雅行※4 | 道路技術研究グループ（舗装）　上席研究員 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 田中　俊輔 | 道路技術研究グループ（舗装）　主任研究員 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 新堀　詩織 | 道路技術研究グループ（舗装）　交流研究員 | R5.4.1～R6.3.31 |
| 花王(株) | 白井　英二 | テクノケミカル研究所室長 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 橋本　良一 | テクノケミカル研究所上席主任研究員 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 秋野　雄亮 | テクノケミカル研究所主任研究員 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 垣内　宏樹 | テクノケミカル研究所主任研究員 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 柏木　啓孝 | テクノケミカル研究所研究員 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 猪股　賢大 | 機能材料事業部エコインフラ | R4.4.1～R6.3.31 |
| ハリマ化成(株) | 高谷　竜成 | パインケミカル開発室　研究チーム　研究員 | R4.4.1～R6.3.31 |
| 日本大学 | 加納　陽輔 | 生産工学部土木工学科　准教授 | R4.4.1～R6.3.31 |
| 世紀東急工業(株) | 板東　芳博 | 技術研究所　所長 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 源藤　勉 | 技術研究所　次長 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 村井　宏美 | 技術研究所　主任研究員 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 木内　浩暉 | 技術研究所　研究員 | R4.4.1～R5.3.31 |
| | ミミ　サン | 技術研究所　研究員 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 堤　丈瑠 | 技術研究所　研究員 | R5.4.1～R6.3.31 |
| 前田道路(株) | 畠山　慶吾 | 技術研究所　課長代理 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 牧野　幹 | 技術研究所　研究員 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 小林　翔汰 | 技術研究所　研究員 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 外尾　祐太 | 技術研究所　研究員 | |
| 東亜道路工業(株) | 平戸　利明 | 技術研究所　第 2 研究室長 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 石松　莞爾 | 技術研究所　研究員 | R4.4.1～R5.3.31 |
| | 望月　大輝 | 技術研究所　研究員 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 清水凌太郎 | 技術研究所　研究員 | R4.4.1～R6.3.31 |
| ニチレキ(株) | 上野　貞治 | 技術研究所　上席研究員 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 田中　伸介 | 技術研究所　研究開発２課・３課　課長 | R4.4.1～R6.3.31 |
| | 藤川　遼太 | 技術研究所　研究員 | R4.4.1～R6.3.31 |

※1　現　国立研究開発法人土木研究所　材料資源研究グループ長

※2　現　国立研究開発法人土木研究所　材料資源研究グループ　上席研究員（先端材料・高度化）

※3　現　国立研究開発法人土木研究所　企画部研究企画課　副参事

※4　現　国立研究開発法人土木研究所　理事

**表 1.2.2**　共同研究参加者の主な役割分担

| 機関 | 氏名 | 主な役割 |
|---|---|---|
| (国研)土木研究所 | 新田　弘之 | 研究課題の企画及び試験結果の分析に関する総括 |
| | 百武　壮 | 研究課題の企画及び試験結果の分析並びに報告書の作成に関する総括 |
| | 佐々木　厳 | 研究課題の企画及び試験結果の分析並びに報告書の作成 |
| | 川島　陽子 | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |
| | 藪　雅行 | 研究課題の企画及び試験結果の分析に関する総括 |
| | 田中　俊輔 | 研究課題の企画及び試験結果の分析並びに報告書の作成 |
| | 新堀　詩織 | 研究課題の試験結果の分析並びに報告書の作成 |
| 花王(株) | 白井　英二 | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |
| | 橋本　良一 | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |
| | 秋野　雄亮 | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |
| | 垣内　宏樹 | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |
| | 柏木　啓孝 | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |
| | 猪股　賢大 | 研究課題の企画及び試験結果の分析に関する総括 |
| ハリマ化成(株) | 高谷　竜成 | 研究課題の企画及び試験結果の分析に関する総括 |
| 日本大学 | 加納　陽輔 | 研究課題の企画及び試験結果の分析に関する総括 |
| 世紀東急工業(株) | 板東　芳博 | 研究課題の企画及び試験結果の分析に関する総括 |
| | 源藤　勉 | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |
| | 村井　宏美 | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |
| | 木内　浩暉 | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |
| | ミミ　サン | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |
| | 堤　丈瑠 | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |
| 前田道路(株) | 畠山　慶吾 | 研究課題の企画及び試験結果の分析に関する総括 |
| | 牧野　幹 | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |
| | 小林　翔汰 | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |
| | 外尾　祐太 | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |
| 東亜道路工業(株) | 平戸　利明 | 研究課題の企画及び試験結果の分析に関する総括 |
| | 石松　莞爾 | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |
| | 望月　大輝 | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |
| | 清水凌太郎 | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |
| ニチレキ(株) | 上野　貞治 | 研究課題の企画及び試験結果の分析に関する総括 |
| | 田中　伸介 | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |
| | 藤川　遼太 | 研究課題の企画及び試験結果の分析 |

## ２．２　開発技術の概要

本研究では、アスファルトや改質材、再生用添加剤の代替となり得る新たな舗装材料の実用化に向けて検討している。**表 1.2.3** に開発技術の概要を示す。

**表 1.2.3**　開発技術の概要

| 開発者 | 開発技術 | 使用材料 | 概要 |
|---|---|---|---|
| 花王(株) | 廃 PET を原料としたポリエステル樹脂によるアスファルト改質材 | リサイクル材 | 廃 PET 由来のポリエステル樹脂によりアスファルトと骨材の親和性や吸着力を強化し、半たわみ性舗装並みの耐久性を実現できる改質材 |
| ハリマ化成(株) | 植物由来ロジン(松脂)および脂肪酸を用いたアスファルト代替バインダ、再生用添加剤 | 植物由来材料 | 松材からパルプを製造する際に副生する粗トール油を精留したロジン、脂肪酸各化合物の組み合わせ及び変性により設計した舗装材料 |
| 世紀東急工業(株) | 天然アスファルト、植物性油脂および廃プラスチックを用いた代替材料 | 天然アスファルト<br>植物由来材料<br>リサイクル材 | 天然アスファルト、植物性油脂、および廃プラスチック材料によるアスファルトの代替となる舗装材料 |
| 前田道路(株) | 植物由来原料を使用した水硬化型の加熱アスファルト混合物 | 植物由来材料 | アスファルトの一部に植物由来の原料を置き換えて使用する技術をベースとして、$CO_2$排出原単位の低い原料を用いた混合物 |
| 東亜道路工業(株) | 植物由来樹脂を用いたアスファルト代替バインダ | 植物由来材料 | 植物油を主原料とした樹脂を用いた改質材の技術や知見を生かした 100%アスファルトの代替となるバインダ |
| ニチレキ(株) | 植物由来素材を用いたアスファルト代替バインダ | 天然アスファルト<br>植物由来材料 | 植物由来の油や樹脂、天然アスファルト由来の成分を組み合わせストレートアスファルト同等の性能を有するバインダ |

花王(株)の開発技術はリサイクルが難しい廃 PET を原料に化学変性した材料を改質材とし、半たわみ性舗装程度の耐久性を有するアスファルト混合物の技術である。

ハリマ化成(株)の開発技術は松材からパルプを製造する際に副生する粗トール油を精留したロジンを利用した再生用添加剤や、ロジンや脂肪酸各化合物を組み合わせ、変性により設計したアスファルトの代替バインダである。

世紀東急工業(株)は天然アスファルトや市販の植物由来油脂を混合したアスファルトの代替バインダである。再生混合物については、これらの代替バインダとリサイクル材を添加することで適用可能である。

前田道路(株)の開発技術は植物由来原料を用いた水硬化型の加熱アスファルト混合物をベースとし、従来よりも $CO_2$ 排出原単位の小さい原料への置換を図った、カーボンニュートラルに資するアスファルト混合物である。

東亜道路工業(株)の開発技術は植物由来樹脂を使用し、ストレートアスファルトや改質アスファルト相当に粘弾性状が調整されたバインダを製造可能な技術であり、100%アスファルトの代替となるバインダである。

ニチレキ(株)の開発技術は植物由来の油や樹脂などの成分を組み合わせ、ストレートアスファルト相当の性状を有するバインダを製造し、再生混合物における新アスファルトを代替するバインダである。

## ３．アスファルト代替材料を用いた舗装のライフサイクル $CO_2$ 算定

### ３．１　目的

ライフサイクル $CO_2$ 排出量（以下、$LCCO_2$）の算定は、各社が開発したアスファルト代替材料を用いた舗装（以下、As 代替舗装）の $LCCO_2$ 低減効果を確認するために行う。

### ３．２　$LCCO_2$ 低減効果の確認方法

$LCCO_2$ 低減効果の確認では、As 代替舗装と、一般的なバインダであるストレートアスファルトやポリマー改質アスファルトを用いた舗装（以下、As 舗装）の $LCCO_2$ を算定し、As 舗装に対する As 代替舗装の $LCCO_2$ 低減割合を求める．**図 1.3.1** に $LCCO_2$ 低減効果の確認フローを示す。

### ３．３　$LCCO_2$ 算定条件の設定

$LCCO_2$ 算定条件は、ISO14040[1] や「カーボンフットプリント　ガイドライン[2]」を参考に設定した。設定した条件を以下に示す。

#### ３．３．１　算定対象と舗装の設計条件

**表 1.3.1** に舗装の設計条件を示す。施工場所は、土木研究所舗装走行実験場とした。算定対象は、交通量区分 $N_4$ または $N_6$ で車両が支障なく通行可能な 5,300$m^2$ の舗装（表層～路盤）とした。なお、設計期間は 20 年（信頼度 90%）とし、設計 CBR は 4 とした。

#### ３．３．２　算定範囲

評価期間は、「新規建設」から供用 100 年とする。また、算定範囲とするライフサイクル段階は、**図 1.3.2** に示すように「資材調達・材料製造」から「供用」までとした。ここで、「資材調達・材料製造」は砕石等の採取やアスファルト混合所（以下、合材工場）におけるアスファルト混合物（以下、混合物）の製造・輸送を指し、「新規建設」は、舗装の建設（路床の不陸整正～表層の施工)、「供用」は供用中の修繕工事を指す。

#### ３．３．３　修繕サイクル

供用中の修繕工事では、表層のみの切削オーバーレイ（以下、表層切削 OL）と路盤以上の打換え（以下、打換え）を繰返し交互に行うとした。表層切削 OL は新規建設から路面の設計期間が経過した時点で行い、打換えは新規建設から路面の設計期間の 2 倍が経過した時点で行うものとした。なお、修繕工事は全面で行うこととし、路面の設計期間は、理論的設計方法や文献調査によって求めるとした。

#### ３．３．４　施工内容

**表 1.3.2** にライフサイクルの各段階における施工内容と、日当たり施工量および $CO_2$ 排出量を示す。これら条件は、「舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック[3]」（以下、算定ガイドブック）や「令和 5 年度 作業日当り標準作業量[4]」を基に設定した。

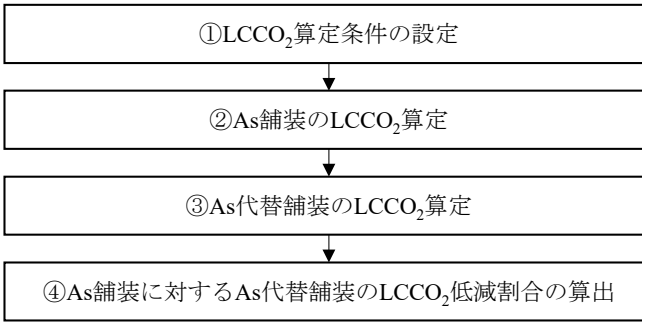



**表 1.3.1　設計条件**

| 項目 | 条件 |
|---|---|
| 施工場所 | 土木研究所舗装走行実験場 |
| 施工面積 | 5,300m$^2$ |
| 交通量区分 | $N_4$または$N_6$ |
| 設計期間 | 20年（信頼度90%） |
| 設計CBR | 4 |

**図 1.3.1　$CO_2$ 排出量低減効果の確認フロー**

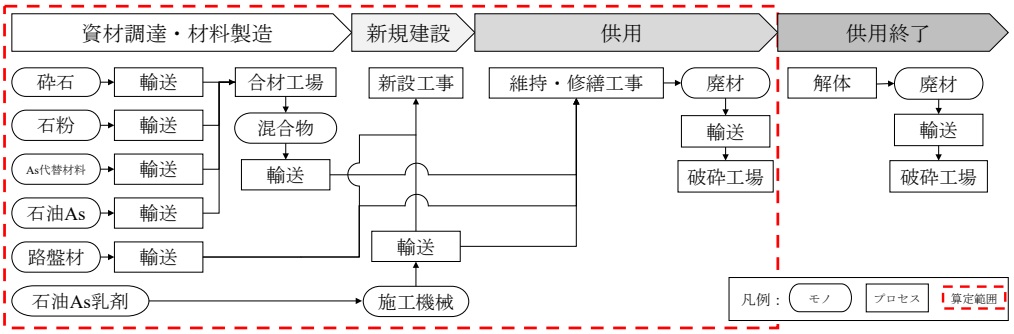



**図 1.3.2　算定範囲とするライフサイクル段階**

**表 1.3.2　施工内容の設定一覧**

| ライフサイクル段階 | | 工種 | 使用機械 | 日当たり施工量 (m$^2$) | 日当たり $CO_2$排出量 (kg-$CO_2$/日) |
|---|---|---|---|---|---|
| 新規建設 | | 不陸整正工 | モーターグレーダ，ロードローラ，タイヤローラ | 1,580 | 542.73 |
| | | 下層路盤工<br>上層路盤工 | モーターグレーダ，ロードローラ，タイヤローラ | 1,110 | 542.73 |
| | | 表層工 | ロードローラ，タイヤローラ，アスファルトフィニッシャ | 2,300 | 487.36 |
| 供用中 | 表層切削OL | 舗装切削工 | 路面切削機 | 1,150 | 733.58 |
| | | 表層工 | ロードローラ，タイヤローラ，アスファルトフィニッシャ | 2,300 | 487.36 |
| | 打換え | 舗装撤去工 | バックホウ | 310 | 279.89 |
| | | 下層路盤工<br>上層路盤工 | モーターグレーダ，ロードローラ，タイヤローラ | 1,110 | 542.73 |
| | | 表層工 | ロードローラ，タイヤローラ，アスファルトフィニッシャ | 2,300 | 487.36 |

### ３．３．５　資機材の輸送距離

**表 1.3.3** に設定した資機材輸送距離を示す。また、As 代替材料の輸送距離は、製造場所から施工場所への輸送距離等を参考に、個別に設定するものとした。なお、資材・廃材の輸送は片道、施工機械の輸送は往復で計算し、積載量は最大積載量の 90%とした。

### ３．３．６　材料数量の算出条件

**表 1.3.4** に材料数量の算出で用いる、各材料の密度とロス率を示す．材料密度とロス率は、算定ガイドブック [1)] の試算例を参考に設定した。

表 1.3.3　資機材の輸送距離

| 資機材名称 | 発 | 着 | 距離（km） | 時速（km/h） | 運搬に用いる車両 | 運搬1回当たりの$CO_2$排出量（kg-$CO_2$/回） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 石油アスファルト | 製造拠点 | アスファルト混合物の製造工場 | 240 | - | ローリー車 | 【改良トンキロ法で計算】運搬総質量（t）×輸送距離（km）×運搬トンキロあたり燃料消費量（L/t/km） |
| 砕石，砂，石粉 | | | 20 | - | ダンプトラック | |
| アスファルト混合物 | アスファルト混合物の製造工場 | 施工場所 | 20 | 20 | ダンプトラック（10t積） | 50.28 |
| 石油アスファルト乳剤 | 製造拠点 | 施工場所 | 40 | 40 | ディストリビュータ（タンク容量2～3t） | 31.01 |
| 路盤材 | 製造拠点 | 施工場所 | 20 | 20 | ダンプトラック（10t積） | 50.28 |
| 廃材 | 施工場所 | 破砕工場 | 20 | 20 | ダンプトラック（10t積） | 50.28 |
| 施工機械 | 施工機械拠点 | 施工場所 | 40 | 40 | セミトレーラ（25t積） | 75.42 |

### ３．３．７　インベントリ分析

ここでインベントリ分析とは、各工事で発生する施工や輸送等の活動量に$CO_2$排出原単位を乗じたものの総和を求める段階のことをいう。活動量は、前述の条件を用いて、各工事における材料・資機材使用数量や輸送回数から求めた。一般的な資機材および施工の$CO_2$排出原単位は、算定ガイドブック[1)]に示されている値を用いた。算定ガイドブックに記載のない資機材は、他のデータベースから$CO_2$排出原単位を引用した。なお、As 代替材料の$CO_2$排出量は、**表 1.3.5** の考え方に基づいて求めることとした。

表 1.3.4　材料密度とロス率

| 名称 | 材料密度（$kg/m^3$） | ロス率（%） |
|---|---|---|
| 粒度調整砕石（M-30） | 1.58 | 27.0 |
| クラッシャラン（C-40） | 1.57 | 27.0 |
| アスファルト混合物 | 2.35 | 7.0 |
| アスファルト乳剤 | 1,000L/$m^3$ | 0.0 |

### ３．３．８　$LCCO_2$の算定

$LCCO_2$を、評価期間終了後の残存供用期間を考慮した、評価期間 1 年あたりの$CO_2$排出量として算定した。まず、舗装のライフサイクルにおける、新規建設と供用中の修繕で発生する$CO_2$排出量をインベントリ分析で求め、評価期間終了時の累計$CO_2$排出量（$CCO_2E$: Cumulative $CO_2$ Emissions）を算出した。次に、評価期間終了後の残存供用年数を考慮した評価期間として、評価期間中で最後に修繕工事を実施した年に表層の供用期間を加えた純供用可能期間（NSL：Net Service Life）を求めた。そして、評価期間 1 年あたりの平均$CO_2$排出量である$LCCO_2$を、$CCO_2E$を NSL で除して算定した。NSL、$CCO_2E$および$LCCO_2$の算出式を**式 1.3.1**～**式 1.3.3** に示す。

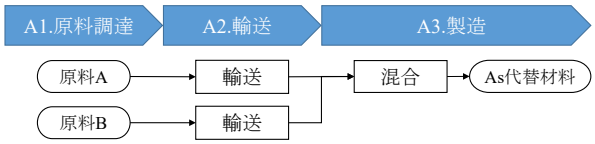
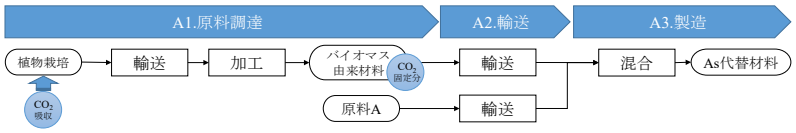
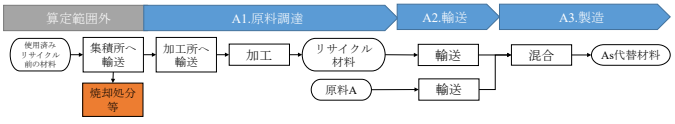
$$NSL = nl + uy \qquad \text{式（1.3.1）}$$

$$CCO_2E = \sum_{i=1}^{100} CO_2E_k \qquad \text{式（1.3.2）}$$

$$LCCO_2 = \frac{CCO_2E}{NSL} \qquad \text{式（1.3.3）}$$

ここで、$nl$：評価期間中で最後に修繕工事を実施する年、$uy$：路面の設計期間、$CO_2E_k$：供用年数 $k$ 年ときの工事で発生する$CO_2$排出量である。

表 1.3.5　As 代替材料の $CO_2$ 排出量の算出方法

<table>
<tr><th colspan="2">項目</th><th>条件</th></tr>
<tr><td colspan="2">対象製品</td><td>As代替材料1tまたは1m$^3$</td></tr>
<tr><td colspan="2">対象とする<br>ライフサイクル<br>ステージ</td><td>A1.原料調達 からA2.輸送，A3.製造まで.<br>※国外活動も含む.<br><br>例）As代替材料のライフサイクルステージとプロセス<br>
</td></tr>
<tr><td colspan="2">参照する規格</td><td>ISO 14067:2018 を参照したCFPガイドライン<br>（経済産業省・環境省）[2)]</td></tr>
<tr><td colspan="2">活動量データの<br>収集方法</td><td>一次データ（実測値）や業界団体等が公表している二次データ</td></tr>
<tr><td colspan="2">$CO_2$排出原単位</td><td>$CO_2$排出原単位データベース等<br>※使用するデータベース等の指定はしない.</td></tr>
<tr><td colspan="2">収集が難しい<br>データ</td><td>正確な活動量や輸送距離の算出が困難な場合，<br>代表値や仮定で設定する.</td></tr>
<tr><td colspan="2">配分について</td><td>・ 同一プロセスから複数の生成物が得られるケース等では，プロセスの細分化やシステムの拡張を行い，配分を回避することが望ましい.<br>・配分が回避できない場合は，同一プロセスで発生する$CO_2$を生成物の物理的パラメータ（質量，熱量等）や経済的価値を基に割り当てる.<br>・なお，生成物であって，目的生成物ではない廃棄物等には，プロセスで発生する$CO_2$を割り当てない.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">As代替材料の$CO_2$排出量</td><td>バイオマス<br>由来材料を<br>原料として<br>用いた場合</td><td>・バイオマス由来材料の原料が大気から吸収した$CO_2$相当量を，A1.原料調達 の$CO_2$排出量から控除する.<br>※バイオマスが持続可能な方法で栽培されている場合に限る.<br>※控除した$CO_2$相当量は報告する.<br><br>例）バイオマス材料の原料調達プロセス<br>
</td></tr>
<tr><td>リサイクル<br>材料を<br>原料として<br>用いた場合</td><td>・リサイクル材料の$CO_2$排出量算出範囲は，「リサイクル前の材料のライフサイクル終了後から（集積所から加工所への輸送）」とする.<br>・リサイクル前の材料の廃棄（焼却処分など）回避による$CO_2$排出量削減効果は，原料調達の$CO_2$排出量から控除しない.<br>※付加価値として，LC$CO_2$算定と別に記載することは可.<br><br>例）リサイクル材料の原料調達プロセス<br>
</td></tr>
</table>

### ３．４　一般的なアスファルトを用いた舗装の $LCCO_2$

一般的なアスファルトを、ストレートアスファルト（以下、ストアス）とポリマー改質アスファルトⅡ型（以下、改質Ⅱ型）として、舗装の $LCCO_2$ を算定した。ストアスを用いた舗装（以下、ストアス舗装）は、交通量区分 $N_4$ で供用し、改質Ⅱ型を用いた舗装（以下、改質Ⅱ型舗装）は、交通量区分 $N_6$ で供用することとした。

#### ３．４．１　舗装構成の設定

**表 1.3.6** と**図 1.3.3** に As 舗装の設計条件および舗装構成を示す．舗装構成は、茨城県土木部道路建設の「道路計画・設計マニュアル（令和 4 年 4 月）[3)]」を参考に設定した。

#### ３．４．２　修繕サイクルの設定

「**３．３．３　修繕サイクルの設定**」に従って、修繕サイクルを設定した。**表 1.3.7** にストアス舗装と改質Ⅱ型舗装の修繕サイクルを示す．路面の設計期間は、ストアス舗装と改質Ⅱ型舗装のどちらも 10 年とした。

#### ３．４．３　インベントリ分析結果

ストアス舗装と改質II型舗装のライフサイクルの各段階（新規建設、表層切削 OL、打換え）における $CO_2$ 排出量を求めた。**表 1.3.8**、**表 1.3.9** にストアス舗装と改質II型舗装の新規建設、表層切削 OL、打換えの 1 回あたり $CO_2$ 排出量（$m^2$ あたり）を示す。

**表 1.3.6**　As 舗装の設計条件

| 設計条件等 | ①ストアス舗装 | ②改質Ⅱ型舗装 |
|---|---|---|
| 舗装の設計期間 | 20年 | 20年 |
| 交通量区分 | $N_4$ | $N_6$ |
| 舗装計画交通量（台/日・方向） | 100以上250未満 | 1,000以上3,000未満 |
| 疲労破壊輪数 | 150,000回/10年 | 7,000,000回/10年 |
| 信頼度 | 90% | 90% |
| 設計CBR | 4 | 4 |
| 目標$T_A$ | 20 | 36 |
| 設計$T_A$ | 20.25 | 36.00 |

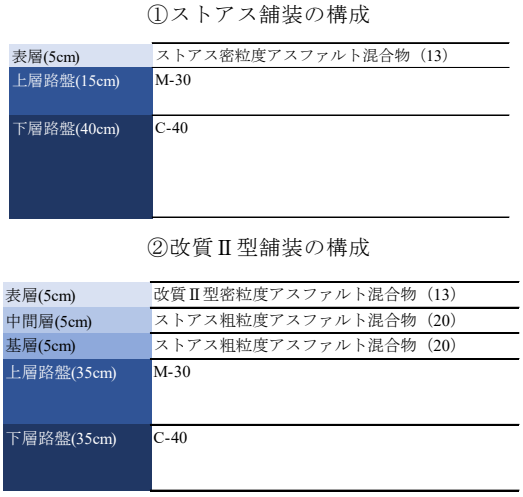



**図 1.3.3　As 舗装の舗装構成**

**表 1.3.7**　ストアス舗装と改質Ⅱ型舗装の修繕サイクル

| 供用年数 | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 工事内容 | 新規建設 | 表層切削OL | 打換え | 表層切削OL | 打換え | 表層切削OL |

| 供用年数 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| 工事内容 | 打換え | 表層切削OL | 打換え | 表層切削OL | 打換え |

**表 1.3.8　施工の $CO_2$ 排出量（ストアス舗装）**

（kg-$CO_2$/m$^2$）

| 項目 | | 新規建設 | 表層切削OL | 打換え |
|---|---|---|---|---|
| 資材調達材料製造 | 製造 | 15.88 | 7.12 | 15.88 |
| | 輸送 | 6.86 | 0.71 | 6.86 |
| 施工機械 | 運転 | 1.53 | 0.85 | 2.11 |
| | 輸送 | 0.13 | 0.13 | 0.15 |
| 廃材輸送 | | - | 0.65 | 3.36 |
| 合計 | | 24.40 | 9.46 | 28.36 |

**表 1.3.9　施工の $CO_2$ 排出量（改質Ⅱ型舗装）**

（kg-$CO_2$/m$^2$）

| 項目 | | 新規建設 | 表層切削OL | 打換え |
|---|---|---|---|---|
| 資材調達材料製造 | 製造 | 35.24 | 10.04 | 35.24 |
| | 輸送 | 9.96 | 0.71 | 9.96 |
| 施工機械 | 運転 | 1.96 | 0.85 | 2.53 |
| | 輸送 | 0.15 | 0.13 | 0.18 |
| 廃材輸送 | | - | 0.65 | 4.76 |
| 合計 | | 47.31 | 12.38 | 52.67 |

### ３．４．４　As 舗装の $LCCO_2$ の算定結果

「３．３．８　$LCCO_2$ の算定」の方法で As 舗装の $LCCO_2$ を算定した。**表 1.3.10**、**表 1.3.11** にストアス舗装と改質Ⅱ型舗装の $LCCO_2$ を示す。評価期間 100 年の $LCCO_2$（m$^2$ あたり）は、ストアス舗装で 1.94kg-$CO_2$、改質Ⅱ型舗装で 3.39kg-$CO_2$ であった。

**表 1.3.10　ストアス舗装の $LCCO_2$**

（kg-$CO_2$/m$^2$）

| 供用年数 | 工事内容 | ①各工事の $CO_2$ 排出量 | ②$CCO_2E$ | ③NSL | ④$LCCO_2$ ※単位/年 |
|---|---|---|---|---|---|
| 式 | | | Σ① | $nl+uy$（10年） | ②/③ |
| 0 | 新規建設 | 24.40 | 24.40 | | |
| 10 | 表層切削OL | 9.46 | 33.86 | | |
| 20 | 打換え | 28.36 | 62.22 | | |
| 30 | 表層切削OL | 9.46 | 71.68 | | |
| 40 | 打換え | 28.36 | 100.04 | | |
| 50 | 表層切削OL | 9.46 | 109.50 | | |
| 60 | 打換え | 28.36 | 137.86 | | |
| 70 | 表層切削OL | 9.46 | 147.32 | | |
| 80 | 打換え | 28.36 | 175.68 | | |
| 90 | 表層切削OL | 9.46 | 185.14 | | |
| 100 | 打換え | 28.36 | 213.50 | 110 | 1.94 |

**表 1.3.11　改質Ⅱ型舗装の $LCCO_2$**

（kg-$CO_2$/m$^2$）

| 供用年数 | 工事内容 | ①各工事の $CO_2$ 排出量 | ②$CCO_2E$ | ③NSL | ④$LCCO_2$ ※単位/年 |
|---|---|---|---|---|---|
| 式 | | | Σ① | $nl+uy$（10年） | ②/③ |
| 0 | 新規建設 | 47.31 | 47.31 | | |
| 10 | 表層切削OL | 12.38 | 59.69 | | |
| 20 | 打換え | 52.67 | 112.36 | | |
| 30 | 表層切削OL | 12.38 | 124.74 | | |
| 40 | 打換え | 52.67 | 177.41 | | |
| 50 | 表層切削OL | 12.38 | 189.79 | | |
| 60 | 打換え | 52.67 | 242.46 | | |
| 70 | 表層切削OL | 12.38 | 254.84 | | |
| 80 | 打換え | 52.67 | 307.51 | | |
| 90 | 表層切削OL | 12.38 | 319.89 | | |
| 100 | 打換え | 52.67 | 372.56 | 110 | 3.39 |

### ３．５　As 代替材料を用いた舗装の $LCCO_2$

各社が開発した As 代替舗装の舗装構成や修繕サイクルを設定し、$LCCO_2$ を算定した。

#### ３．５．１　As 代替材料の概要

As 代替材料の概要は、**表 1.2.2** に示すとおりである。今回開発した As 代替材料は、バインダと再生用添加剤に分類できる。また、バインダとして用いる As 代替材料の中には、ストアス相当の性能を持つものと、改質II型相当の性能を持つものがある．As 代替材料の素材としては、廃プラスチックや、植物由来材料、天然アスファルト等が使用されている。

#### ３．５．２　舗装構成の設定

As 代替舗装の舗装構成は各社で設定した。設計条件は、As 代替バインダの性能がストアス相当の場合は、ストアス舗装と同条件、As 代替バインダの性能が改質Ⅱ型相当の場合は、改質Ⅱ型舗装と同条件とした。なお、路面の供用期間の設定は各社で行った。

#### ３．５．３　修繕サイクル

各者が設定した路面の供用期間から、「**３．３．３　修繕サイクルの設定**」に従って、修繕サイクルを設定した。

#### ３．５．４　As 代替舗装の $LCCO_2$ 算定

舗装構成や修繕サイクルを基にインベントリ分析を行い、「**３．３．８　$LCCO_2$ の算定**」の方法で As 代替舗装の $LCCO_2$ を算定した。**詳細な算定結果は、各社の報告書に示す。**

### ３．６　As 舗装に対する As 代替舗装の $LCCO_2$ 低減割合

As 舗装に対する各社 As 代替舗装の $LCCO_2$ 低減割合を求めた。ストアス相当の性能を持つ As 代替舗装は、ストアス舗装と比較し、改質Ⅱ型相当の性能を持つ As 代替材料は、改質Ⅱ型舗装と比較した。**表 1.3.13** に、As 代舗装の $LCCO_2$ 低減割合（全者平均）を示す。As 代替舗装の $LCCO_2$ 低減割合は、ストアス相当の As 代替舗装で平均 18%、改質Ⅱ型相当配合で平均 35%であった。

**表 1.3.13**　As 代替舗装の $LCCO_2$ 低減割合

| | $LCCO_2$低減割合（平均） |
|---|---|
| ストアス相当 | 18% |
| 改質Ⅱ型相当 | 35% |

### ３．７　まとめ

- 舗装の $LCCO_2$ 算定条件および、As 代替材料の $CO_2$ 排出原単位算出方法を設定することで、多様な材料を用いた舗装の $LCCO_2$ 算定を公平に行った。
- As 代替舗装の $LCCO_2$ を算定した結果、As 舗装より $LCCO_2$ が小さくなる傾向にあった。

**参考文献**


1) 公益社団法人日本道路協会：舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブックー$CO_2$排出量低減値および最大流量比の算定例ー、2014.
2) 経済産業省、環境省：カーボンフットプリント　ガイドライン、https://www.env.go.jp/content/000124385.pdf
3) 茨城県土木部道路建設課：道路計画・設計マニュアル、https://www.pref.ibaraki.jp/doboku/doken/manual/documents/dorokeikaku_sekkei_manual0.pdf

# 2編　花王株式会社

## １．はじめに

### １．１　研究の背景・目的

近年、気候変動が一因と考えられる異常気象が世界各地で発生している。我が国においても、甚大な豪雨・台風災害や猛暑が頻発しており、大きな影響を受けている。こうした事象を背景に、わが国では2050年までに、気候変動の要因とされる温室効果ガスの排出量を全体としてゼロにする「脱炭素社会（以下、カーボンニュートラル）の実現」を目指すことを宣言した。

インフラ分野におけるカーボンニュートラルの実現に向けて、建設段階と維持管理段階のそれぞれにおいて「材料・機械・施工方法」を総合的に考える必要がある。現在の取り組みとして、建設機械の脱炭素化としては動力源を電動・水素・バイオマスに転換した革新的建設機械の導入普及を目指している。施工方法については、ICT 施工による建設現場の生産性向上・作業時間短縮による $CO_2$ 縮減に取り組んでいる。材料については、カーボンニュートラルに向けた取り組みが活発化していることを背景に、アスファルト生産量も減少することが見込まれ、アスファルトを代替する舗装材料が必要になると考えられる。

現在､アスファルトや石油由来製品を代替する新素材･新技術の開発が進みつつあるが、多様な舗装材料の適用性及びカーボンニュートラルへの貢献度を定量的に評価する手法の確立が求められている。

本共同研究では､廃棄プラスチック､特に使用済のポリエチレンテレフタレート(廃 PET)をリサイクル材として活用したアスファルト改質材（以下、廃 PET 改質材）の舗装材料としての適用性について、アスファルトバインダ及びアスファルト混合物に使用した場合の性状について評価し、その結果を基に、$LCCO_2$ について試算し、現行の舗装技術と比較検討を行った。

### １．２　研究内容

廃 PET 改質材を用いたアスファルト混合物、現行の高耐久舗装技術であるポリマー改質アスファルトⅡ型を用いた密粒度アスファルト混合物と半たわみ性舗装について、各種試験を行い施工時に発生する $CO_2$ 排出量及びライフサイクルにおける $CO_2$ について検討を行った。

#### １．２．１　対象としたアスファルト混合物

既存のアスファルト混合物で特に重交通で耐久性が求められる箇所に適用する半たわみ性舗装用混合物、それと同程度の耐流動性が期待できる環境配慮型アスファルト混合物 A 配合､汎用的に使用され耐久性の向上が期待できる改質Ⅱ型密粒度アスファルト混合物と、それと同程度の耐流動性が期待できる環境配慮型アスファルト混合物 B 配合を評価の対象とした。**表 2.1.1** に今回対象としたアスファルト混合物の概要を示す。

### １．２．２　試験の流れ

今回使用する廃 PET 改質材の基本性状について試験を行い、その後、それを添加したアスファルトバインダの性状試験を実施した。その後、各配合におけるアスファルト混合物の物性を、耐流動性、ひび割れ抵抗性、耐水性に着目し評価を行った。また、土木研究所舗装走行実験施設にアスファルト混合物を施工し、走行荷重を加えた際の耐久性についても確認を行った。**図 2.1.1** に試験のフローを示す。

**表 2.1.1**　対象としたアスファルト混合物の概要

| 名称 | 半たわみ性<br>舗装用混合物 | 環境配慮型高耐久<br>アスファルト混合物<br>配合 A | 改質Ⅱ型<br>密粒度アスコン | 環境配慮型高耐久<br>アスファルト混合物<br>配合 B |
|---|---|---|---|---|
| 粒度 | 開粒度アスファルト<br>混合物 | 密粒度アスコン<br>（20） | 密粒度アスコン<br>（20） | 密粒度アスコン<br>（20） |
| 骨材 | 新材 | 新材 | 新材 | 再生骨材混入率<br>50％ |
| アスファル<br>ト種類 | ストレート<br>アスファルト 60-80 | ポリマー改質<br>アスファルトⅡ型 | ポリマー改質<br>アスファルトⅡ型 | ストレート<br>アスファルト 80-<br>100 |
| 添加材　等 | セメントミルク | 廃 PET 改質材 A | - | 廃 PET 改質材 B |
| 添加量 | 空隙 22％に充填 | 混合物 1t に対し<br>10kg 添加 | - | 混合物 1t に対し<br>6kg 添加 |

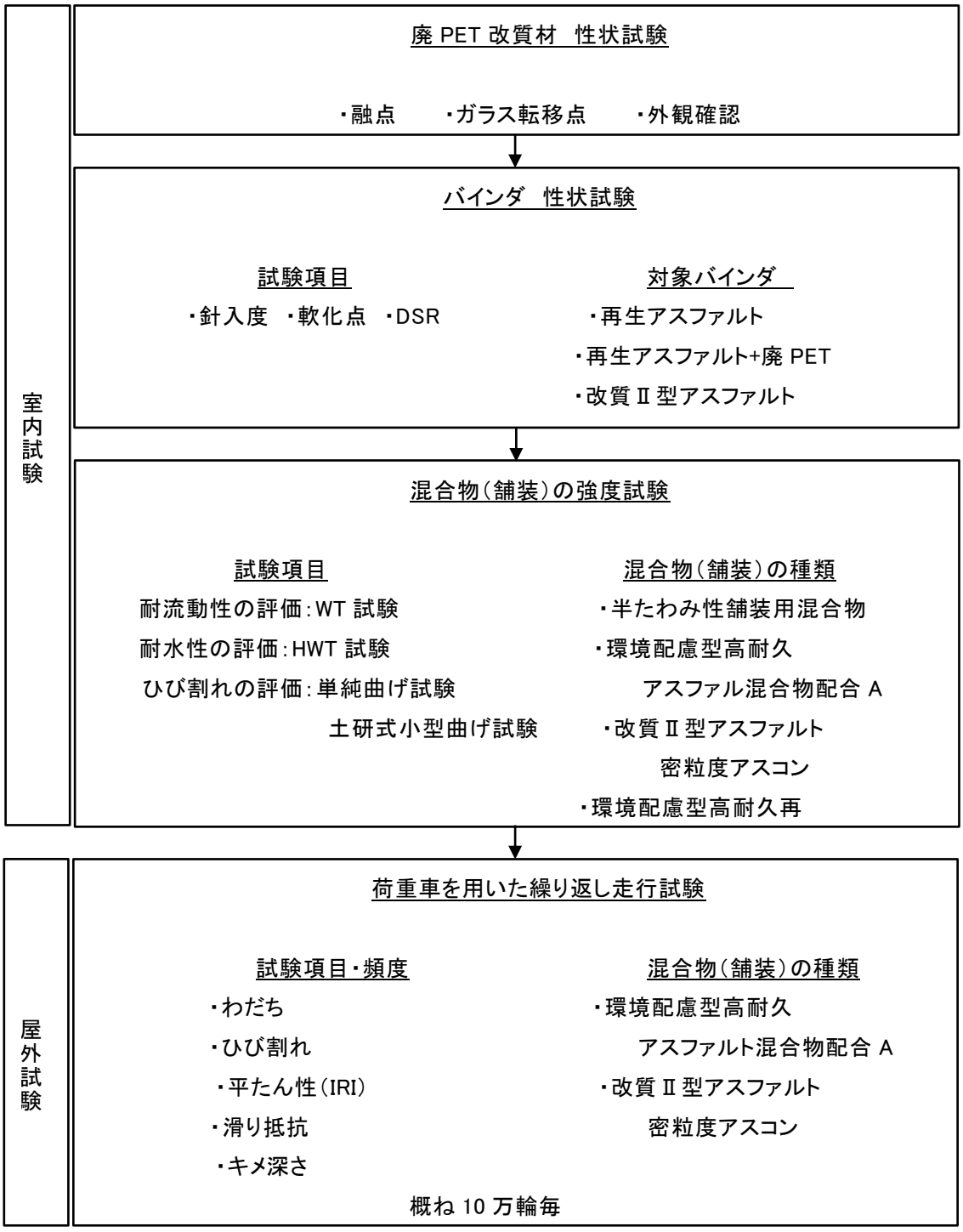

室内試験
廃 PET 改質材　性状試験
・融点　・ガラス転移点　・外観確認
バインダ　性状試験
試験項目
・針入度　・軟化点　・DSR
対象バインダ
・再生アスファルト
・再生アスファルト+廃 PET
・改質Ⅱ型アスファルト
混合物(舗装)の強度試験
試験項目
耐流動性の評価:WT 試験
耐水性の評価:HWT 試験
ひび割れの評価:単純曲げ試験
土研式小型曲げ試験
混合物(舗装)の種類
・半たわみ性舗装用混合物
・環境配慮型高耐久
アスファル混合物配合 A
・改質Ⅱ型アスファルト
密粒度アスコン
・環境配慮型高耐久再
屋外試験
荷重車を用いた繰り返し走行試験
試験項目・頻度
・わだち
・ひび割れ
・平たん性(IRI)
・滑り抵抗
・キメ深さ
概ね 10 万輪毎
混合物(舗装)の種類
・環境配慮型高耐久
アスファルト混合物配合 A
・改質Ⅱ型アスファルト
密粒度アスコン

図 2.1.1　試験のフロー

## ２．アスファルト代替材料について

### ２．１　廃 PET 改質材

#### ２．１．１　概要

今回検討するアスファルト代替材料は、アスファルト改質材の原料の一部に水平リサイクルが困難な材料または、従来焼却処分していた廃 PET を用いたものである。環境貢献に対しては、アスファルト混合物の耐久性を向上させることによるライフサイクル $CO_2$ の排出量削減に加え、廃 PET の処分に要する $CO_2$ の削減効果が期待できる材料である。**図 2.2.1** に廃 PET 改質材の製造から舗装への適用に至るフローを示す。




**図 2.2.1**　廃 PET 改質材の製造から舗装への適用に至るフロー

#### ２．１．２　基本性状

今回の検討において、2 種の廃 PET 改質材について検討を行った。廃 PET 改質材 A は環境配慮型高耐久アスファルト混合物 A 配合に、廃 PET 改質材 B は環境配慮型高耐久アスファルト B 配合に適用した。廃 PET 改質材の基本物性を**表 2.2.1** に示す。

**表 2.2.1**　廃 PET 改質材の基本物性

| | 廃 PET 改質材 A | 廃 PET 改質材 B |
|---|---|---|
| 融点（℃） | 100.1 | 105.3 |
| ガラス転移点（℃） | 56.2 | 60.1 |
| 密度（$g/cm^3$） | 1.231 | 1.215 |

### ２．１．３　特徴

廃 PET 改質材は、改質材重量の約 40%に廃 PET を導入したケミカルリサイクル製品であり、PET 元来の親水的な分子構造に、アスファルトと良く親和するような疎水的な構造を分子レベルで導入することで、親水的な骨材、疎水的なアスファルトの双方に効果的に相互作用し、舗装の耐久性（主に耐流動性、耐水性）向上に寄与するものである。

また、一般に廃 PET をケミカルリサイクルする場合は**図 2.2.2** に示すケミカルリサイクルの黒色実線にある工程を経る。これに対し、本製品は青色破線で示す通り、廃 PET の骨格を活用するため、モノマーから同様の添加剤を合成するよりも少ないエネルギーで合成が可能となっている。本製品の $CO_2$ 排出原単位は、3.27kg-$CO_2$/kg である。




**図 2.2.2**　ケミカルリサイクル工程図

## ２．２　バインダ性状

### ２．２．１　概要

廃 PET を添加したバインダの性状を室内試験にて確認を行った。対象としたのは、ポリマー改質アスファルトⅡ型とそれに廃 PET 改質材 A を添加したもの、再生密粒度アスコンを想定したアスファルトとそれに廃 PET 改質材 B を添加したバインダの合計 4 種で**表 2.2.2** に対象としたバインダを示す。

**表 2.2.2**　対象としたバインダ

| 呼称 | ポリマー改質アスファルトⅡ型 | 配合 A | 再生アスファルト | 配合 B |
|---|---|---|---|---|
| バインダ名 | 改質アスファルトⅡ型 | | 改質アスファルトⅡ型、ストアス 80/100 | |
| 改質材 | - | 廃 PET 改質剤 A | - | 廃 PET 改質剤 A |
| 添加量 | - | 10kg/t | - | 6kg/t |

### ２．２．２　実験手順

4 種のバインダについて、軟化点試験、針入度試験、DSR 試験を実施した。再生アスファルトを使用するバインダは、ポリマー改質アスファルトⅡ型の針入度を約 20 程度まで熱劣化させたものにストレートアスファルト 80/100 を混合し針入度を 50 程度に調整したものを使用した。今回の調整は、新 As：劣化 As を 57：43 の比率とした。

軟化点試験は舗装・調査試験法便覧　A042 軟化点試験方法（環球法）に、針入度試験は舗装・調査試験法便覧　A041 針入度試験方法に、ダイナクックシアレオメータ（DSR）試験は舗装・調査試験法便覧　A062 ダイナミックシアレオメータ試験方法に準拠して行った。試験項目と試験法を**表 2.2.3** に示す。

**表 2.2.3**　試験項目

| 試験項目 | 試験法 |
|---|---|
| 軟化点試験 | 舗装・調査試験法便覧　A042 軟化点試験方法（環球法） |
| 針入度試験 | 舗装・調査試験法便覧　A041 針入度試験方法 |
| DSR 試験 | 舗装・調査試験法便覧　A062 ダイナミックシアレオメータ試験方法 |

### ２．２．３　実験結果

針入度試験、軟化点試験、DSR 試験から算出する|G*|sinδ の結果を**表 2.2.4** に示す。廃 PET 改質材を添加したバインダ（配合 A、配合 B）は無添加のバインダに比べ針入度の低下、軟化点の上昇が確認されたが、アスファルトの性状としては規格の範囲内であり無添加のベースバインダと大きな性状の変化はなかった。DSR 試験から求められる|G*|sin δ からは、廃 PET 改質材（ポリマー）の添加により若干ではあるが弾性体性状へ変化する傾向が確認できた。

今後は、耐候性を確認するため劣化させたバインダについての検討を進めていく。

**表 2.2.4**　バインダ性状試験結果一覧

| 呼称 | ポリマー改質<br>アスファルトⅡ型 | 配合A | 再生アスファルト | 配合B |
|---|---|---|---|---|
| 針入度（1/10mm） | 57 | 53 | 49 | 43 |
| 軟化点（℃） | 58.5 | 60 | 52.5 | 53 |
| 複素弾性率<br>｜G*｜sinδ(kPa) | 868.8 | 999.2 | 1113.4 | 1214.0 |

## ２．３　アスファルト混合物性状

### ２．３．１　概要

本検討では、耐流動性を有するポリマー改質アスファルトⅡ型を用いた密粒度混合物や半たわみ性舗装を対象としている。そのため、密粒度アスファルト混合物の粒度については最大粒径を 20mm とした。混合物の概要については前述の**表 2.1.1** の通りである。

アスファルト混合物の性状試験は、耐流動性を評価するホイールトラッキング（WT）試験、耐水性を評価するハンブルグホイールトラッキング（HWT）試験、たわみ追従性を評価するため曲げ試験と土木研究所から公開されている小型曲げ試験で性状の確認を行った。

### ２．３．２　実験方法

WT 試験、HWT 試験、曲げ試験、小型曲げ試験を実施した。小型曲げ試験は、試験の準備及び試験が簡便で多くの数量を実施できるため、様々な温度領域におけるたわみ追従性を確認することを目的に実施した。試験項目及び試験法を**表 2.2.5** に示す。

**表 2.2.5**　試験項目

| 試験項目 | 試験法 | 備考 |
|---|---|---|
| WT 試験 | 舗装･調査試験法便覧 B003 ホイールトラッキング試験方法 | 気中 60℃ |
| HWT 試験 | AASHTOT324-17 を参考に一部独自設定 | 水浸 60℃、載荷速度 52 回/分 |
| 曲げ試験 | 舗装・調査試験法便覧 B005 曲げ試験方法 | -10、20℃ |
| 小型曲げ試験 | 土木研究所小型供試体を用いた曲げ試験方法 | -10、-5、0、5、10、20℃ |

### ２．３．３　実験結果

#### （１）　WT 試験結果

**図 2.2.3** に WT 試験結果を示す。動的安定度は、いずれの混合物においても DS=6,000 回/mm 以上の結果となり、耐流動性を有する混合物であることが確認できた。ただ、いずれの混合物も、$d_{45}$ -$d_{60}$ 変位量の差が 0.02mm 以下と非常に微量な変位量であるため、これらの結果から優位性を判断するのは難しいと考えられる。

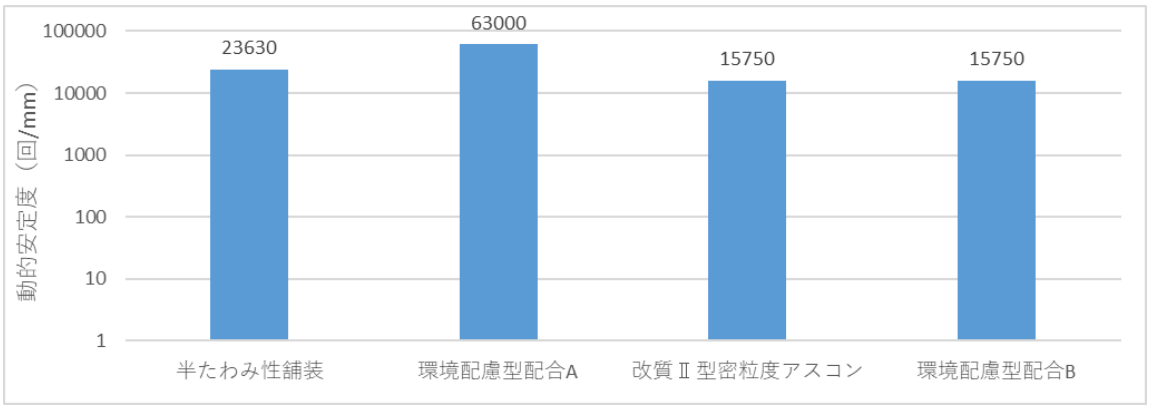



**図 2.2.3**　WT 試験結果

### （２） HWT 試験結果

本試験では廃 PET 改質材添加の効果を確認するため、環境配慮型高耐久アスファルト混合物配合 B の廃 PET 改質材未添加（再生密粒度アスコン）についても試験を実施した。

HWT 試験は、道路に使用するアスファルト混合物の耐流動性及びアスファルト舗装の水の影響による剥離抵抗性（耐水性）を評価する試験である。AASHTO T324 に準拠し、剥離開始点（SIP：Stripping Infection Point）を走行回数-変位量が急激に増加する変曲点までのサイクル数、剥離寿命を変位量が 12.5mm 達した際のサイクル数として評価を行った。**表 2.2.6** と**図 2.2.4** に HWT 試験結果を示す。

HWT 試験による耐水性評価の結果、廃 PET 改質材を添加した配合 A、配合 B ともに無添加のアスファルト混合物に比べ耐水性が向上することが確認された。前述のアスファルト性状試験、軟化点試験結果から、廃 PET 改質材を添加したバインダの軟化点は無添加のバインダと比べ大きく温度上昇しないという結果より、廃 PET 改質材が骨材とアスファルトの接着を化学的に強固にしたことによる効果が反映したと考えられる。また、半たわみ性舗装は高い耐流動性を発現する舗装体であるが、水浸条件においては、アスファルト混合物中のアスファルト-セメント間に水が浸入するため、そこを起点に変形が進み変形量が大きくなったと推察される。

**表 2.2.6　HWT 試験結果一覧**

| | 供試体剥離（有無） | SIP（往復） | SIP時変形量（mm） | 2000往復時変形量（mm） | 5000往復時変形量（mm） | 10000往復時変形量（mm） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 半たわみ性舗装 | 有 | 2000 | 1.40 | 1.40 | 18（4000往復時） | 測定不可 |
| 配合A | 無 | - | - | 0.62 | 1.43 | 2.15 |
| 改質Ⅱ型密粒 | 有 | 4700 | 2.50 | 1.12 | 3.21 | 8.69 |
| 配合B | 無 | - | - | 1.39 | 1.98 | 2.65 |
| 再生密粒 | 有 | 3800 | 4.00 | 2.40 | 7.87 | 21.28 |

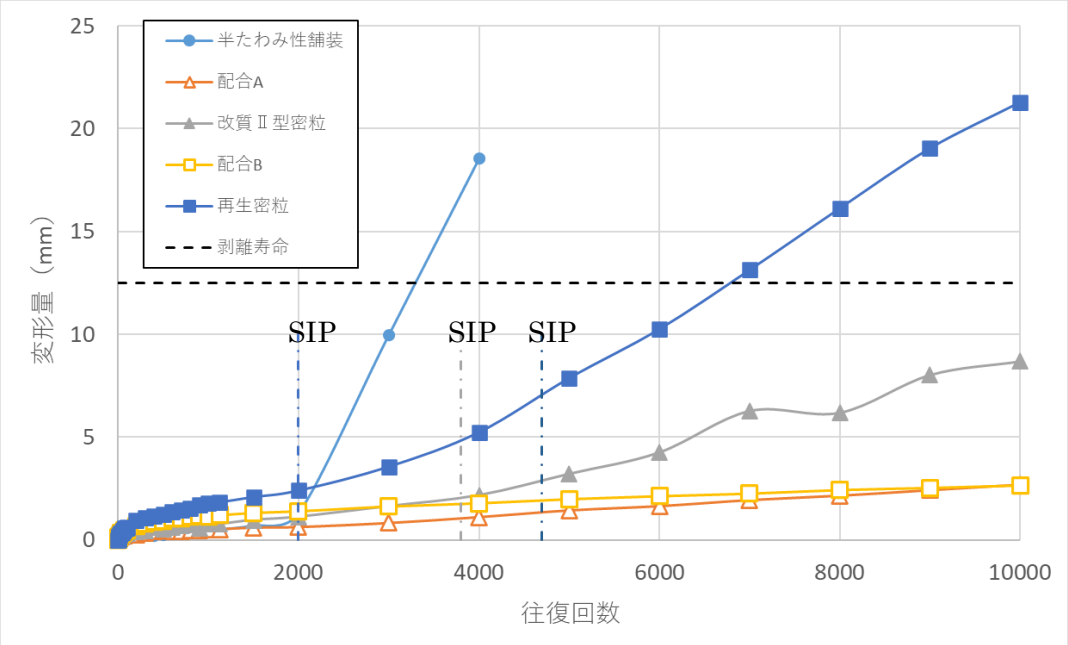



図 2.2.4　HWT 試験結果（走行回数-変形量推移）

**（３）曲げ試験結果**

試験温度 20℃の曲げ試験結果を**図 2.2.5** に示す。配合 A は無添加の改質Ⅱ型密粒度アスコンに比べ曲げ強度が向上し、ひずみは微小な低下が確認された。配合 B は無添加の再生密粒度アスコンに比べ若干曲げ強度・ひずみが低下したが、大きく性状を変化させることはなかった。また、改質Ⅱ型密粒度アスコンと比較すると、曲げ強度は向上しひずみはほぼ同等の結果となった。半たわみ性舗装は、その特性上、他のアスコンと比較すると曲げ強度は小さく、ひずみ量が大きくなることが確認された。

試験温度-10℃の曲げ試験結果を**図 2.2.6** に示す。試験温度 20℃と同様の傾向であるが配合 B の曲げ強度が低下する結果であった。配合 B を除くすべての配合で曲げ強度が向上していることから、廃 PET 改質材の有無による影響ではなく、作製した供試体の骨材の配置等によるものと考えられる。引き続き、試験数を増やし試験精度を高めていく。

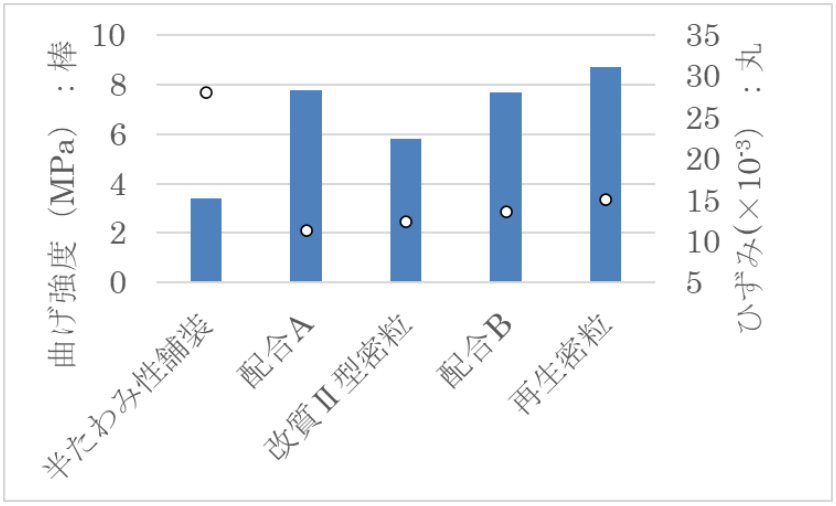



**図 2.2.5**　曲げ試験結果（試験温度 20℃）

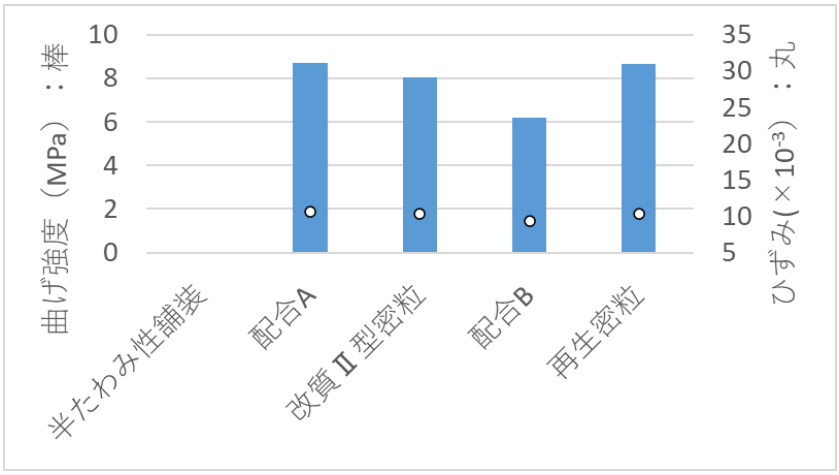



**図 2.2.6**　曲げ試験結果（試験温度-10℃）

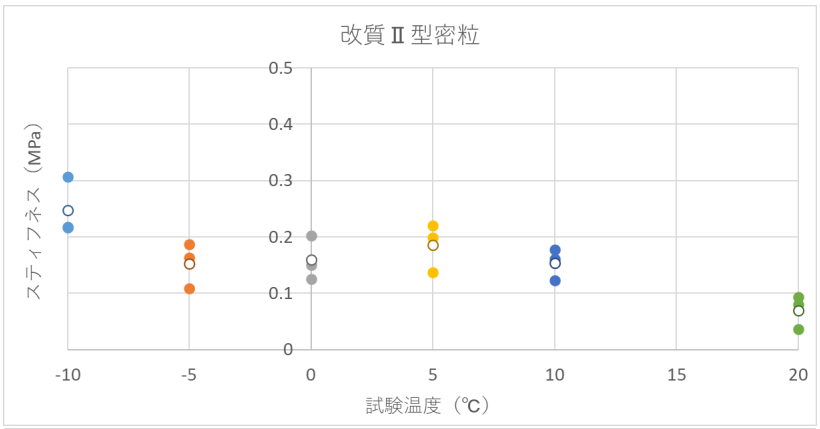
### （４）　小型曲げ試験結果

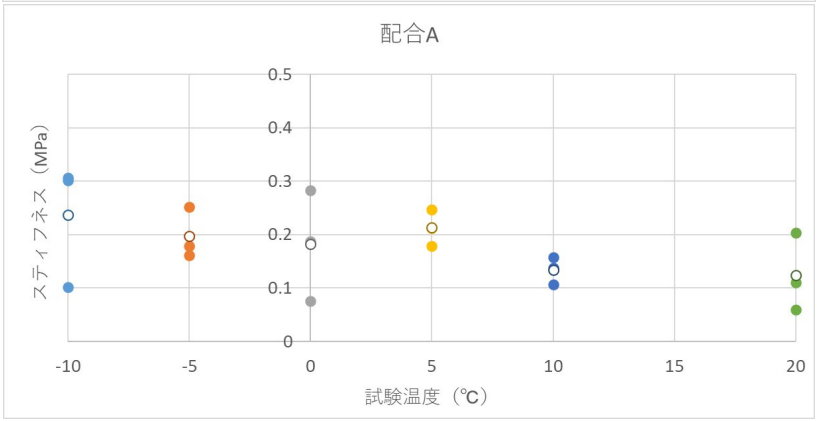
小型曲げ試験は、小型の供試体を使用するなど試験の特性上、供試体毎に破断時曲げ強度やその際のひずみがバラつく傾向がある。供試体のバラつきの影響を考慮し、各配合の特性を把握するため、今回は曲げ強度やひずみの絶対値ではなく、測定される破断時曲げ強度とひずみからスティフネスを算出した。**図 2.2.7** に各配合のスティフネスの変化を示す。

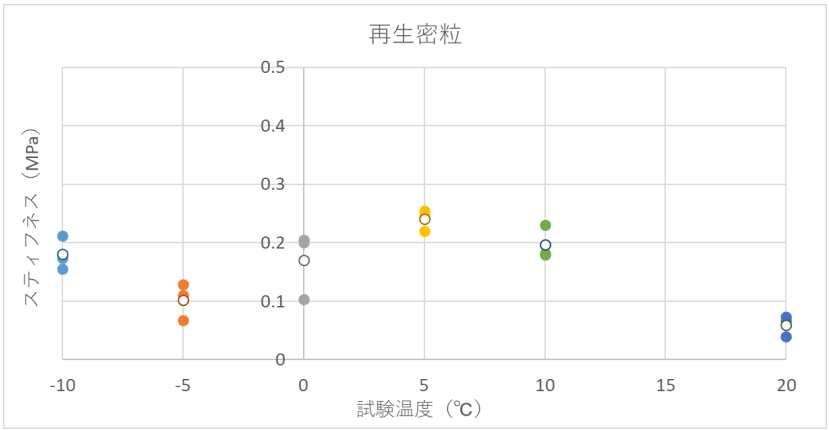
アスファルト混合物の脆化点を確認するため、温度-スティフネスの関係よりその近似曲線の変曲点を見出すことを試みたが、各試験温度においてスティフネスのバラつき及び試験温度の変化によるスティフネスのピークを確認することができなかった。

原因は、小型曲げ試験供試体の断面寸法が 25mm×25mm に対し、今回の配合が最大粒径 20mm の耐流動用アスファルト混合物であり、供試体に含まれる粗骨材の位置の影響を受けたためと考えられる。

今後は、粗骨材の影響を考慮して最大粒径 13mm の混合物、若しくは粗骨材を含まないアスファルトモルタル等の供試体を用いた試験を行い、廃 PET 改質材を添加したアスファルト混合物の脆化点の確認を進めていく。



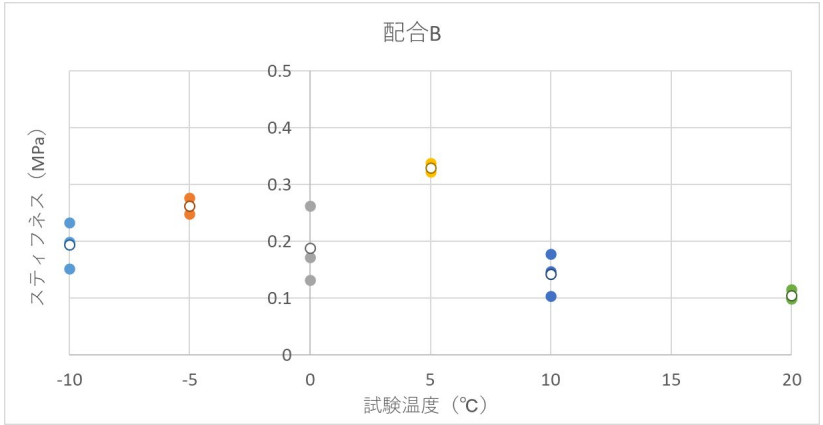




図 2.2.7　各配合の破断時のスティフネス

## ２．４　室内試験まとめ

室内試験の結果から以下のことが確認された。

～バインダ性状～

廃 PET 改質材を添加したバインダは、添加前のアスファルトに比べて大きな性状の変化はない。

～混合物性状～

廃 PET 改質材を添加したアスファルト混合物は、耐流動性、耐水性が向上し、ひび割れへの影響がないことが確認できた。

小型曲げ試験では、アスファルト混合物の脆化点を見出すことができなかった。

## ３．試験施工

### ３．１　試験施工について

廃 PET 改質材を添加したアスファルト混合物の耐久性の向上を確認するため、土木研究所　走行試験場にて配合 A と改質Ⅱ型密粒度アスファルト混合物を施工し、荷重車による促進載荷試験を実施した後、適宜追跡調査を行った。舗装構成を**表 2.3.1** に示す。

**表 2.3.1**　走行試験場舗装構成

| 断面 | 材料 | 厚さ |
|---|---|---|
| 表層 | 改質Ⅱ型密粒度アスコン | 5cm |
| 基層 | 改質Ⅱ型密粒度アスコン | 5cm |
| 上層路盤 | M-30 | 25cm |
| 下層路盤 | C-40 | 30cm |
| 路床 | 山砂 | 37cm |
| 路床 | 購入土 | - |

### ３．２　追跡調査

#### ３．３．１　調査内容

追跡調査項目及び測定方法を**表 2.3.2** に使用した機械を**表 2.3.3** に示す。調査の頻度は荷重車走行 10 万輪毎実施した。各測定箇所を**図 3.3.1** に示す。また、40 万輪走行後に FWD 測定車を用いて、各工区のたわみ量の測定を行った。測定位置を**図 3.3.2** に示す。

**表 2.3.2**　追跡調査項目と測定方法

| 項目 | 測定方法 | 規格（舗装調査・試験法便覧） |
|---|---|---|
| わだち掘れ量 | MRP | S030 舗装路面のわだち掘れ量測定方法 |
| クラック率 | 目視 | S029 舗装路面のひび割れ測定方法 |
| 平坦性（若しくは IRI） | MRP | S028 舗装路面の平たん性測定方法<br>S032 路面の IRI 測定方法 |
| 色調変化 | 色彩色差計 | S024 色彩色差計を用いた明度測定方法 |
| 路面テクスチャ | CT メーター | S022-3 回転式きめ深さ測定装置を用いた舗装路面のきめ深さ測定方法 |
| 滑り抵抗値 | DFT | S021 回転式すべり抵抗測定器による動的摩擦係数の測定方法 |
| たわみ量 | FWD | S047 フォーリングウェイトデフレクトメータ（FWD）によるたわみ量測定方法 |

表 2.3.3　使用した測定装置

| 測定器/メーカー/型式/計測値 | 外観 |
|---|---|
| マルチロードプロファイラ<br>（株）クマタカエンジニアリング<br>MRP-3000<br>平たん性(mm)、IRI（mm/m）<br>わだち掘れ量(mm) |  |
| 色彩色差計<br>KONICA MINOLTA<br>CR-410<br>明度（L＊） |  |
| CT メーター<br>日邦産業（株）<br>CT メーター<br>きめ深さ(mm) |  |
| DF テスター<br>日邦産業（株）<br>DF テスター<br>動的摩擦係数(μ) |  |

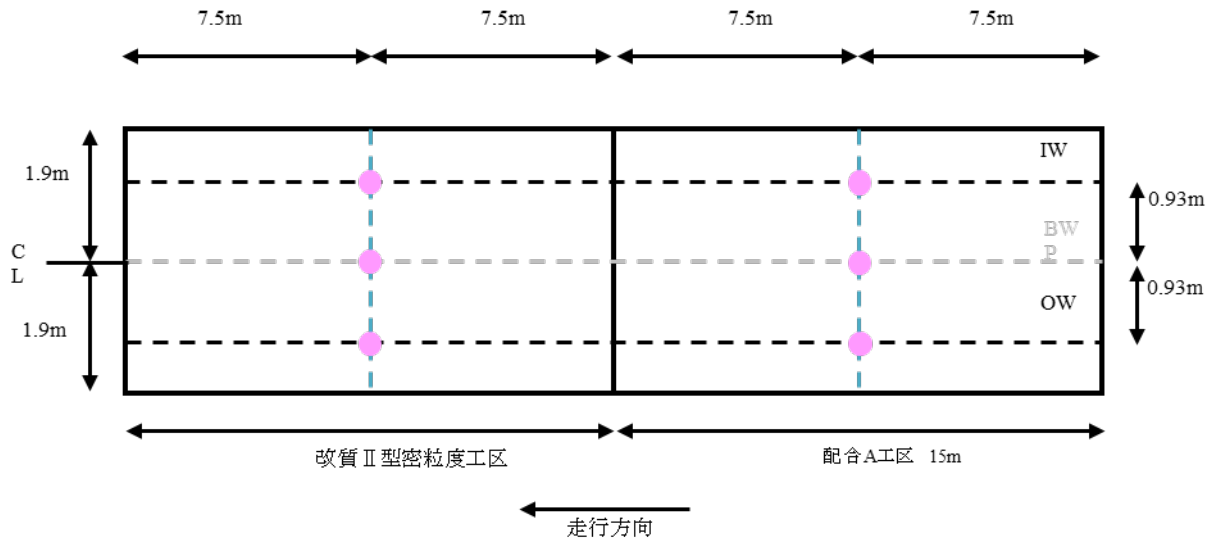



**図 3.3.1**　測定位置平面図

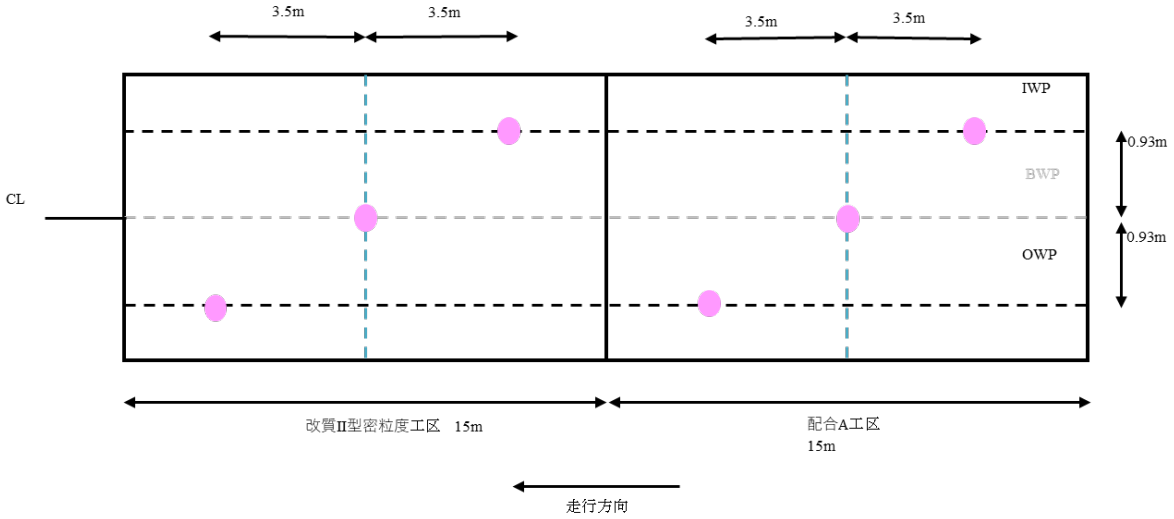



**図 3.3.2**　たわみ量測定位置

### ３．３．２　調査結果

40 万輪走行後までの追跡調査の結果、各測定項目に顕著な差は確認できなかった。わだち掘れ量の測定結果を**図 3.3.3** に示す。引き続き、経過観察を行っていく。

FWD によるたわみ量の測定結果を**図 3.3.4** に示す。同様の舗装構成で表層のみが異なる配合であるが、配合 A は改質Ⅱ型密粒度アスコンに比べ $D_0$ たわみ量が約 10%低減することが確認された。引き続き、追跡調査を実施する。

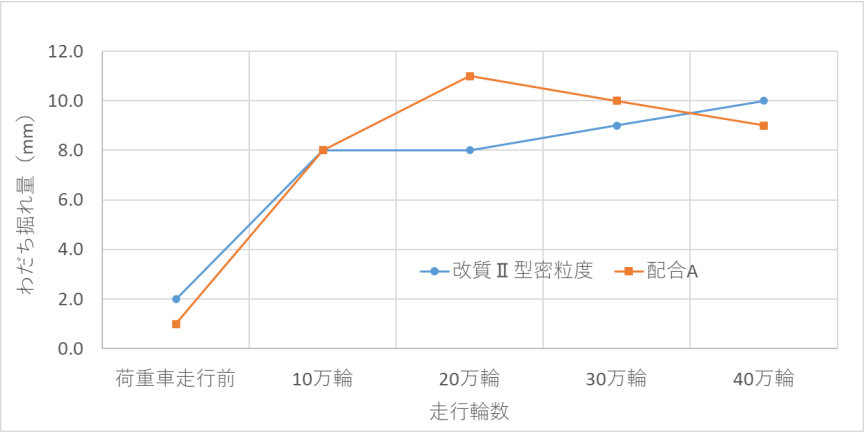



図 3.3.3　わだち掘れ量の推移

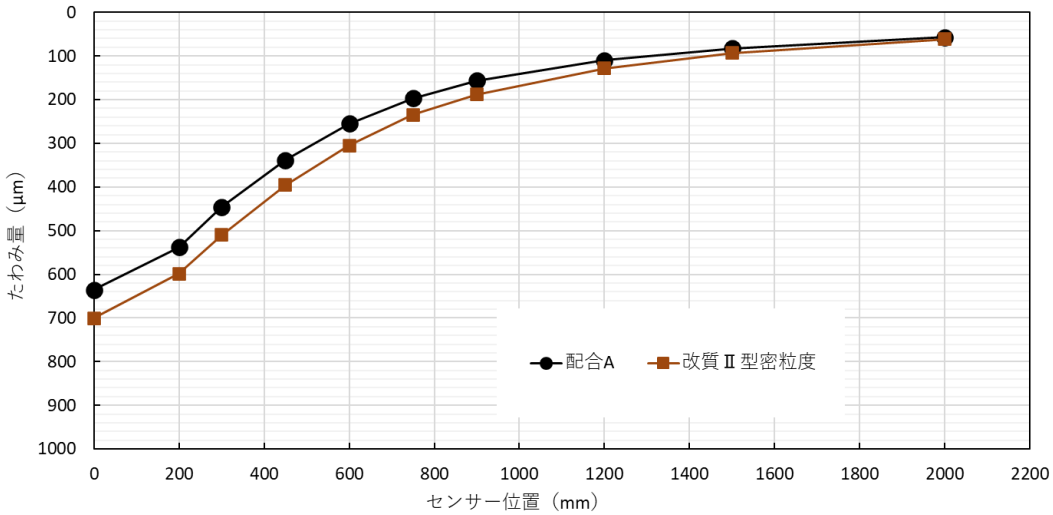



図 3.3.4　たわみ量測定結果

## ４．まとめ

### ４．１　概要

**表 2.4.1** の土木研究所から示された $LCCO_2$ の算定方針に基づき、$LCCO_2$ の算定を行った。本検討では、**表 2.4.2** に示す舗装構成で $N_6$ 交通量を想定し舗装のライフサイクルを検討した。

表 2.4.1　$LCCO_2$ 算定方針

| | |
|---|---|
| 算定目的 | LCCO2削減効果を公平に評価できる仕組みの検討のために，<br>As代替材料をアスファルト合材に使用したときの，<br>CO2排出量低減効果を知ること． |
| 対象 | 5300m2のN6交通量またはN4交通量で<br>ライフサイクル100年の舗装体（表層～路盤） |
| 対象とするライフサイクルステージ |  |
| 参照規格/<br>基本方針 | ・CFPガイドラインを参照する．<br>・As代替材料の算定範囲は，共同研究内で統一する．<br>（算定根拠は別途明示する）<br>活動量データ：1次データ（実測値，実測値の配分）の取得を基本とする．ただし，運搬距離など取得が困難な場合はシナリオも使用する．<br>CO2排出量原単位：基本的には，ガイドブックの原単位を使用する．ガイドブックにない原単位は，1次データを入手して算定する．1次データの入手が難しい場合は，2次データベースを利用する．・一致する項目がない場合には，類似の項目を使用する．・複数該当する場合には，排出係数のより大きなものを使用し，安全側に立った算定とする． |

表 2.4.2　検討した舗装断面

| | 比較断面 | | 配合A | | 配合B | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 断面 | 材料 | 厚さ | 材料 | 厚さ | 材料 | 厚さ |
| 表層 | 改質Ⅱ型密粒度アスコン | 5cm | 配合A | 5cm | 配合B | 5cm |
| 中間層 | ストアス粗粒 | 5cm | ストアス粗粒 | 5cm | ストアス粗粒 | 5cm |
| 基層 | ストアス粗粒 | 5cm | ストアス粗粒 | 5cm | ストアス粗粒 | 5cm |
| 上層路盤 | M-30 | 35cm | M-30 | 35cm | M-30 | 35cm |
| 下層路盤 | C-40 | 35cm | C-40 | 35cm | C-40 | 35cm |

## ４．２　$LCCO_2$ 算出条件

### ４．２．１　配合 A

$LCCO_2$ 算出にあたり、まず路面の設計期間を試算した。土木研究所から示された試算条件を**表 2.4.3** に示す。2 章で実施したアスファルト混合物の室内試験において、舗装の耐久性を供用年数として試算可能な WT 試験の DS 値及び、走行試験場に施工した 2 種の舗装の FDW によるたわみ量測定結果を基に舗装の設計期間を計算した。

WT 試験から算出される DS 値は、改質Ⅱ型密粒度アスコンで 15,750 回/mm、配合 A で 63,000 回/mm であった。改質Ⅱ型密粒度アスコンの路面の設計期間 10 年とすると、配合 A は約 4 倍の期間（40 年）の供用が可能と想定される。

走行試験場での FDW によるたわみ量の測定は、$LCCO_2$ の算出条件の舗装断面とは異なるが、表層の違いによるたわみ量の差については同様の傾向であると推察し、$LCCO_2$ 算出

条件である舗装断面においてもたわみ量が 10%低減するとし、たわみ量 $D_0$ と累積 49kN 換算輪数の関係式（2.4.1）より舗装の設計期間を試算した。

**表 2.4.3**　試算条件

| 項　　目 | 条　件 |
|---|---|
| 路面の設計期間 | 10 年 |
| 信頼性 | 90% |
| ＣＢＲ | 4 |
| 目標ＴＡ | 36cm |

$$D_0 = 5898N^{-0.1926} \qquad \cdots \text{式（2.4.1）}$$

### ４．２．２　配合Ｂ

配合 B は混合物の室内試験結果から、改質Ⅱ型密粒度アスコンとほぼ同等の性状であることが確認された。$LCCO_2$ の算出については、設計期間は同等（10 年で補修、20 年で修繕）とし、各材料の $CO_2$ 排出原単位を用いて $LCCO_2$ を算出した。

### ４．３　舗装の供用可能年数

**表 2.4.4** に 40 万輪走行後の $D_0$ たわみ量から算出した疲労破壊輪数を示す。配合 A は改質Ⅱ型密粒度アスコンに比べ、約 1.1 倍の疲労破壊輪数となり、舗装の修繕（アスコン層の打ち換え）が 20 年から 22 年に延びる結果となった。また、表層については、DS 値から供用期間 40 年で補修を行うサイクルとなっている。その結果、22 年サイクルでの修繕（途中の補修はなし）という舗装の設計期間を算出した。

配合 B は先に示した通り、改質Ⅱ型密粒度アスコンと同様の設計期間（10 年で補修、20 年で修繕）とした。

**表 2.4.4**　疲労破壊輪数（40 万輪考慮）

| 改質Ⅱ型密粒度 | 配合A |
|---|---|
| 463,636 | 505,784 |

## ４．４　$LCCO_2$ 算出結果

土木研究所から示された $LCCO_2$ 算出シートを活用し算出した結果を、**図 2.4.1** に示す。また、廃 PET を有効活用できたことによる素材の $CO_2$ 削減量を**表 2.4.5** に示す。

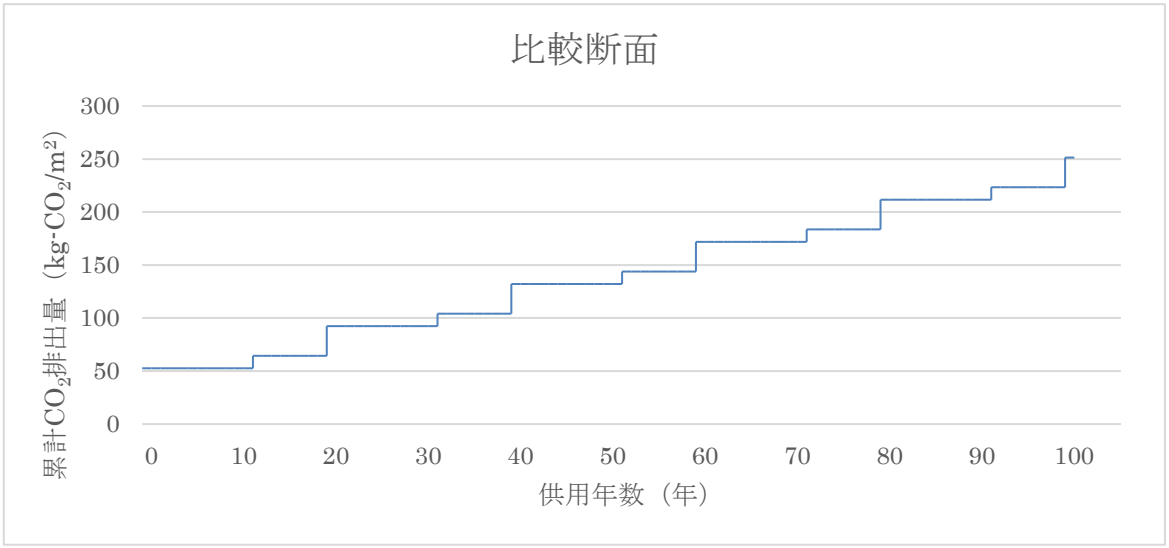
配合 A は、比較断面と比較すると 5,300m²、100 年期間において $LCCO_2$ を約 26%削減するという結果となった。これは、表層の補修頻度を低減しアスコン層の修繕時期までライフサイクルを延命できたこと、また、本試算条件で使用した廃 PET 量は約 12,000kg となり、焼却・埋立した際に発生 $CO_2$ 量は 34,500kg を回避できたことが要因である。

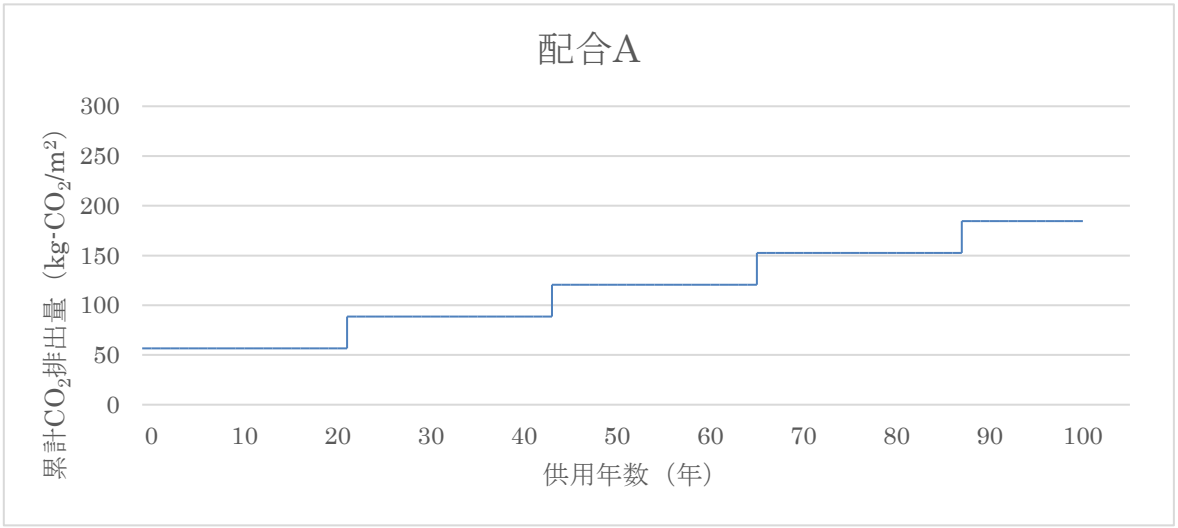
配合 B は、比較断面と比較すると $LCCO_2$ を約 10%削減するという結果となった。配合 B は表層材料に再生骨材を 50%配合しており新たに採取する材料を減じたことと、廃 PET 改質材に使用した廃 PET 量 16,440kg を焼却・埋立処理を回避し、それに関わる $CO_2$ 排出量 45,540kg を削減できたためである。

今回の検討は、表層一層のみに廃 PET 改質材を添加したアスファルト混合物を適用した場合の $LCCO_2$ を試算したが、さらなる $LCCO_2$ 削減のためにアスコン層全層に廃 PET 改質材を添加したアスファルト混合物を適用することも効果的かと考えられる。

**表 2.4.5**　廃 PET の有効活用による $CO_2$ 削減量

| | 廃 PET 改質材<br>添加量<br>kg/m² | 廃 PET 使用量<br>kg/m² | 廃 PET 改質材<br>kg<br>(5300m²あたり) | 工事頻度<br>回<br>(100 年あたり) | 廃 PET 使用量<br>kg<br>(100 年あたり) | 焼却埋立処分で排出する CO² 量<br>Kg |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 配合 A | 1.175 | 0.470 | 2,491 | 5 | 12.455 | 34,500 |
| 配合 B | 0.705 | 0.282 | 1,495 | 11 | 16,441 | 45,540 |



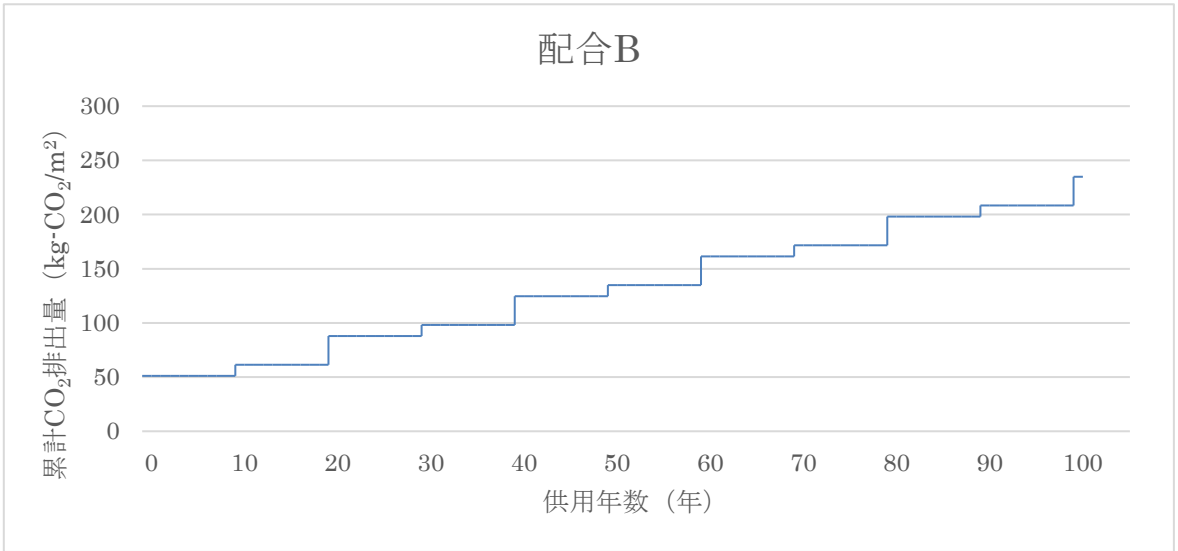




**図 2.4.1　各舗装断面の $LCCO_2$**

# 3編　ハリマ化成株式会社

## １．はじめに

持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals、 SDGs）は、21 世紀の世界的な課題に対処し、持続可能な未来を築くための枠組みとして 2015 年に国連で採択され、我が国においても様々な産業分野で取り組みが進められている。アスファルト舗装分野ではリサイクル技術の開発が盛んに取り組まれ、1970 年代にはアスファルト混合物の再生利用がはじまっており、現在では出荷量の 7 割以上を再生アスファルト混合物が占めるまでになっている [1)]。近年ではカーボンニュートラルへの取り組みとして非石油由来の原料を活用した各種添加剤やアスファルト代替材料の研究・開発が行われている。しかし、植物由来の原料を使用した舗装材料の適用性について、国内外において実用化した例 [2)] が限られていることから、知見が少ないのが現状である。そこで、ハリマ化成と日本大学と土木研究所で共同研究を実施し、植物由来原料を使用した新たな再生用添加剤の開発を行った。また、植物由来原料を使用した新たなアスファルト代替材料の開発も行った。再生用添加剤に関しては、開発した再生用添加剤の液物性が標準性状を満足するかを確認し、繰り返し劣化・再生試験により劣化したアスファルトバインダへの再生性能を評価した。また、再生アスファルト混合物を作製し、その性状についても評価を実施した。さらに道路サイクル全体の低炭素化への貢献度を示すためにライフサイクル $CO_2$（$LCCO_2$）を算定した。アスファルト代替材料に関しては、開発した材料のバインダ性状、混合物性状の評価を実施した。

## ２．植物由来原料を用いたアスファルト再生用添加剤

### ２．１　再生用添加剤の液物性

#### ２．１．１　概要

本研究で新規に開発した再生用添加剤は、原料として植物由来原料を使用している。開発した植物系再生用添加剤（以下、植物系 A）の液物性が再生用添加剤の標準性状を満足するかを確認した。

#### ２．１．２　実験方法

植物系 A の性状試験として、引火点、動粘度、薄膜重量変化率、薄膜加熱後の粘度比、密度をそれぞれ測定した。各試験は基本的に試験法便覧[3]に記載があるものはそれに従って実施し、成分分析においては石油学会規格 JPI-5S-77-2019[4]に準拠して試験を実施した。また、比較のため、組成の異なる 2 種類の石油系再生用添加剤（以下石油系 A、B）も同様に測定と分析を行った。

#### ２．１．３　結果と考察

各再生用添加剤の引火点、動粘度、薄膜重量変化率、薄膜加熱後の粘度比、密度の分析結果を**表 3.2.1** に示す。植物系は、再生便覧[5]に記載されている再生用添加剤の標準的性状を概ね満足していた。また、TLC-FID 法による成分分析結果を**表 3.2.2** に示す、石油系 A は組成分のうち、芳香族分が多く、石油系 B は飽和分の多い再生用添加剤である。これに対して、植物系 A は芳香族分が比較的多く、さらに、石油系 A、B と比較してレジン分の含有量も多いことが明らかとなった。

**表 3.2.1**　再生用添加剤の液物性

| 測定項目 | 標準的性状 | 植物系A | 石油系A | 石油系B |
|---|---|---|---|---|
| 引火点(℃) | 250以上 | 266 | 264 | 312 |
| 動粘度($mm^2/s$,60℃) | 80-1000 | 120 | 87 | 465 |
| 薄膜加熱質量変化率(%) | ±3以内 | -1.5 | -0.67 | 0.02 |
| 薄膜加熱後の粘度比(60℃) | 2以下 | 1.39 | 1.07 | 1.2 |
| 密度($g/cm^3$,15℃) | 0.95以上が好ましい | 0.95 | 0.91 | 0.97 |

**表 3.2.2** 再生用添加剤の各成分の割合

| | 組成(%) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 飽和分 | 芳香族分 | レジン分 | アスファルテン分 |
| 植物系A | 0.0 | 59.3 | 33.9 | 6.8 |
| 石油系A | 78.7 | 14.8 | 5.0 | 0.9 |
| 石油系B | 6.5 | 84.0 | 9.5 | 0.0 |

### ２．１．４　結論

植物系 A は再生用添加剤の標準的性状を概ね満足しており、石油系 A、B と比較してレジン分の含有量が多いことが明らかとなった。

## ２．２　アスファルトバインダ性状

### ２．２．１　概要

繰り返し劣化・再生試験により植物系 A のアスファルトバインダへの再生性能を評価した。

### ２．２．２　実験方法

室内での促進劣化試験によるアスファルトの劣化と再生用添加剤を加えてアスファルトを再生する操作を繰り返し、劣化・再生の各段階における各種性状を測定した。**図 3.2.1** に実験手順を示す。新規ストレートアスファルト 60/80 を薄膜加熱試験（TFOT）および加圧劣化試験（PAV）によって劣化させた。なお、PAV の時間について、1 回目は 54 時間、2 回目以降は 80 時間で行った。この劣化アスファルトに対して再生用添加剤を加えて目標針入度 70 として再生した。以後、同様に劣化と再生を繰り返し行い、性状測定を行った。性状測定は針入度試験、軟化点試験、および伸度試験を行った。各試験は試験法便覧 [3] に従って実施した。また、比較のため、石油系 A、B および他社特許を模倣した植物系再生用添加剤（以下植物系 B）による繰り返し再生試験および性状試験も併せて行った。繰り返し劣化・再生回数は最大で 4 回とした。

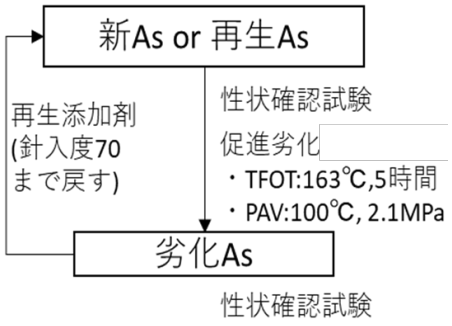



**図 3.2.1 繰り返し試験の実験手**

### ２．２．３　結果と考察

#### (1)　添加量と針入度

**表 3.2.3** に針入度 70 まで繰り返し再生させた際の再生用添加剤の添加率を示す。植物系 A は石油系 A、B よりも添加量が少なかった。植物系 B は石油系 A、B よりも最初は添加量が少なかったものの、再生回数が増えるにつれて添加量が増加し、再生 4 回目には石油系 B と同等となった。一方で植物系 A は再生回数が増えても添加量が変化せず、添加量は少ない値を示した。

**図 3.2.2** に繰り返し試験時の針入度の変化を示す。植物系 A は石油系 A、B、植物系 B よりも劣化時に針入度低下を抑制した。一方で植物系 B は植物系 A、石油系 A、B よりも劣化時に針入度が大きく低下した。

以上より、植物系 A は石油系 A、B、植物系 B よりも劣化時の針入度低下を抑制し、低添加率で針入度が回復する。一方で植物系 B は最も劣化時に針入度が低下しやすく、最初は低添加率だが、再生回数が増加するにつれて再生に必要な添加量が増える。よって、植物系 A は石油系 A、B、植物系 B と比較して、耐劣化性、低添加率の点で優位性があることがわかった。

表 3.2.3 繰り返し再生時の再生用添加剤の添加量

| | 添加率(%) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 |
| 石油系A | 14.0 | 14.4 | 16.2 | - |
| 石油系B | 15.8 | 14.0 | 13.5 | 15.7 |
| 植物系A | 9.3 | 8.8 | 9.2 | 9.3 |
| 植物系B | 9.1 | 9.4 | 11.6 | 16.1 |

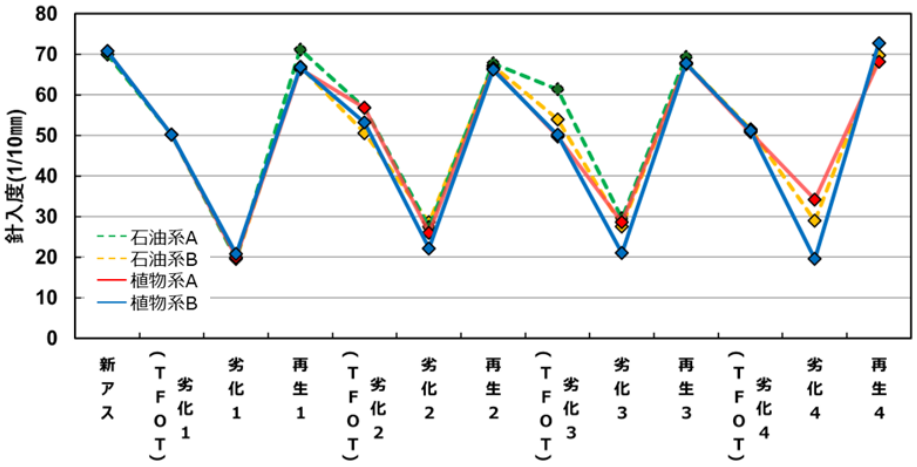



図 3.2.2 繰り返し試験時の針入度

（２） 軟化点

図 3.2.3 に繰り返し試験時の軟化点の変化を示す。植物系 A 以外では、劣化により軟化点が大きく増加し、再生することで軟化点が低下するが、劣化・再生回数が増えると軟化点が増加する傾向が顕著にみられた。また、石油系 A では劣化 3 回目で軟化点が大きく増加した。一方で植物系 A は再生回数が増加しても劣化時の軟化点の上昇を抑制することができており、劣化 4 回目でも劣化 1 回目とほとんど差は見られない。植物系 B は劣化時に軟化点が大きく上昇するが、再生時には大きく回復する傾向が見られた。

以上より、植物系 A は石油系 A、B、植物系 B よりも劣化時の軟化点の上昇を抑制し、再生時の軟化点も低く、3 回目以降ではその効果が顕著に表れている。よって、植物系 A は石油系 A、B、植物系 B と比較して、耐劣化性及び軟化点回復の点で優位性があることがわかった。

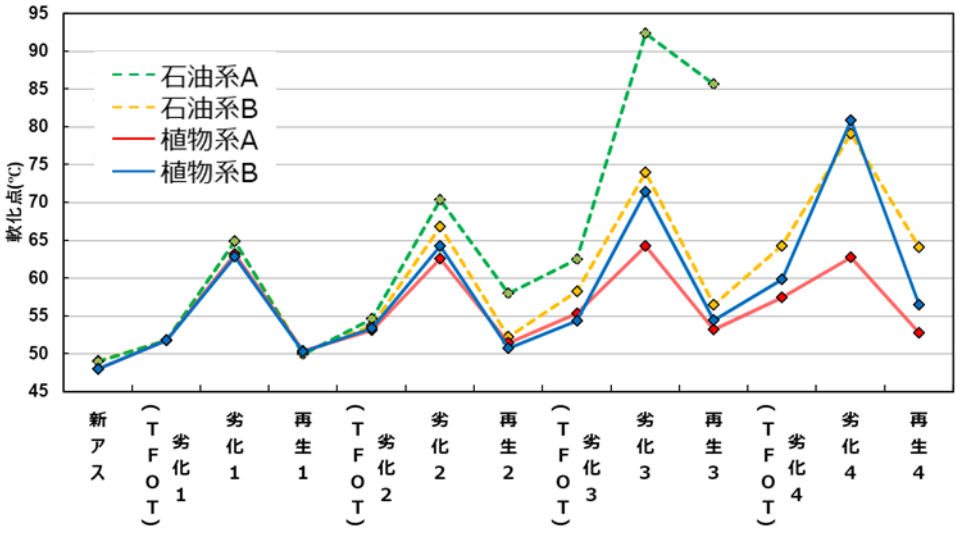



図 3.2.3 繰り返し試験時の軟化点

### （３）伸度

図 3.2.4 に繰り返し試験時の伸度の変化を示す。以上より、植物系 A は石油系 A、B、植物系 B よりも TFOT 劣化時の伸度の低下を抑制する。また、植物系 A、B ともに石油系 A、B よりも伸度が回復する。よって、植物系 A は石油系 A、B、植物系 B と比較して、耐劣化性の優位性があり、石油系 A、B と比較して伸度回復の優位性があることがわかった。

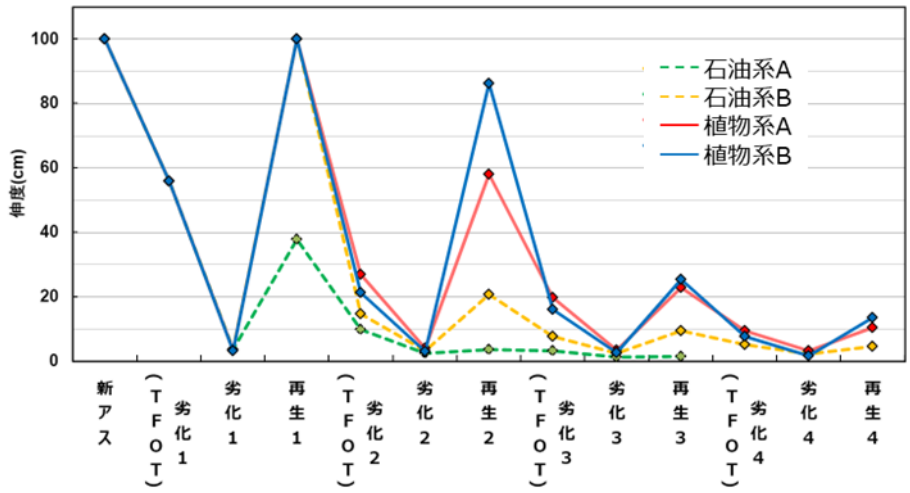



図 3.2.4 繰り返し試験時の伸度

## ２．２．４　結論

植物系 A は石油系 A、B、植物系 B よりも劣化時の針入度低下、軟化点向上、針入度低下を抑制し、低添加率で針入度、軟化点、伸度が回復する。よって植物系 A は石油系 A、B、植物系 B と比較してアスファルトバインダへの耐劣化性、再生効果に優位性があることが明らかとなった。

## ２．３　アスファルト混合物性状

### ２．３．１　概要

植物系 A を用いた再生アスファルト混合物を作製し、その性状について確認した。

### ２．３．２　実験方法

再生アスファルト混合物を作製するにあたり、実供用したアスファルト舗装材から製造した再生骨材（RAP)、新規密粒度アスファルト混合物を 110℃で 120h 促進劣化させた再生骨材（AGI）をそれぞれ使用した。RAP のアスファルトの針入度は 21、AGI のアスファルトの針入度は 20 であった。再生骨材配合率は 40%、80%として再生アスファルト混合物をそれぞれ作製した。混合物の配合比を**表 3.2.4** に示す。最大粒径 13mm の密粒度アスファルト混合物で、アスファルト量は**表 3.2.5** の値とした。作製した供試体は性状を確認するため、各種物性試験（密度試験、マーシャル安定度試験)、圧裂試験、ホイールトラッキング試験、SCB 試験を行った。各試験は試験法便覧 [3)] に従って実施した。また、比較のために石油系 A、B、植物系 B についても同様の実験を行った。

**表 3.2.4** 再生アスファルト混合物の配合比

| | 骨材配合比(%) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6号砕石 | 7号砕石 | 砕砂 | 粗砂 | 石粉 | R13-5 | R5-0 | AGI |
| RAP 40%配合 | 20.5 | 12.0 | 25.7 | 0.0 | 1.8 | 28.0 | 12.0 | - |
| RAP 80%配合 | 0.0 | 9.5 | 10.0 | 0.0 | 0.5 | 61.5 | 18.5 | - |
| AGI 40%配合 | 21.0 | 13.0 | 24.0 | 0.0 | 2.0 | - | - | 40.0 |
| AGI 80%配合 | 7.0 | 6.0 | 6.0 | 0.0 | 1.0 | - | - | 80.0 |

## ２．３．３　結果と考察

### （１）　基本物性

**表 3.2.5** に再生アスファルト混合物の基本物性を示す。植物系 A を使用して作製した再生アスファルト混合物は、いずれの規格値も満足することを確認した。また、石油系 A、B、植物系 B も規格値を満足しており、添加剤による大きな差異は見られなかった。

表 3.2.5 再生アスファルト混合物のマーシャル特性値

| | 再生骨材率 (%) | 添加剤種類 | 最適アス量 (%) | 密度 (g/cm$^3$) | 空隙率 (%) | 飽和度 (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 規格 | - | - | 5.0-7.0 | - | 3.0-6.0 | 70-85 |
| 新規 | - | - | 5.4 | 2.414 | 3.4 | 78.7 |
| RAP | 40% | 石油系A | 5.4 | 2.389 | 3.8 | 76.3 |
| | | 石油系B | 5.4 | 2.392 | 3.8 | 76.7 |
| | | 植物系A | 5.4 | 2.395 | 3.7 | 77.3 |
| | | 植物系B | 5.4 | 2.402 | 3.4 | 78.7 |
| | 80% | 石油系A | 5.1 | 2.427 | 3.5 | 77.2 |
| | | 石油系B | 5.1 | 2.437 | 3.3 | 79.1 |
| | | 植物系A | 5.1 | 2.434 | 3.4 | 78.1 |
| | | 植物系B | 5.1 | 2.436 | 3.3 | 78.5 |
| AGI | 40% | 石油系A | 5.5 | 2.373 | 4.1 | 77.0 |
| | | 石油系B | 5.6 | 2.375 | 3.8 | 75.6 |
| | | 植物系A | 5.4 | 2.372 | 4.3 | 74.3 |
| | | 植物系B | 5.4 | 2.371 | 4.4 | 73.8 |
| | 80% | 石油系A | 5.3 | 2.393 | 4.0 | 76.8 |
| | | 石油系B | 5.3 | 2.401 | 3.7 | 75.5 |
| | | 植物系A | 5.1 | 2.399 | 4.1 | 74.1 |
| | | 植物系B | 5.3 | 2.386 | 4.4 | 74.1 |

### （２）　圧裂試験

**図 3.2.5** に再生アスファルト混合物（RAP）の圧裂強度を示す。試験温度 0℃、20℃では、植物系 A、B は石油系 A、B よりも圧裂強度が高い結果となった。

**図 3.2.6** に再生アスファルト混合物（RAP） の圧裂係数、圧裂強度比を示す。今回作製した供試体は石油系 B の再生骨材比率 40%を除いていずれも圧裂係数の目標値である 0.4～0.6MPa/mm の範囲外となった。また、石油系 A は他と比較して圧裂強度が低かった。

**図 3.2.7** に再生アスファルト混合物（AGI）の圧裂強度を示す。添加剤によっての圧裂強度の差は RAP 使用時よりも見られなかった。

**図 3.2.8** に再生アスファルト混合物（AGI）の圧裂係数、圧裂強度比を示す。RAP 使用時と異なり、植物系 A の再生骨材比率 40%で圧裂係数が目標値である 0.4～0.6MPa/mm の範囲内となった。また、圧裂強度比も高く、はく離耐性が高いことがわかった。

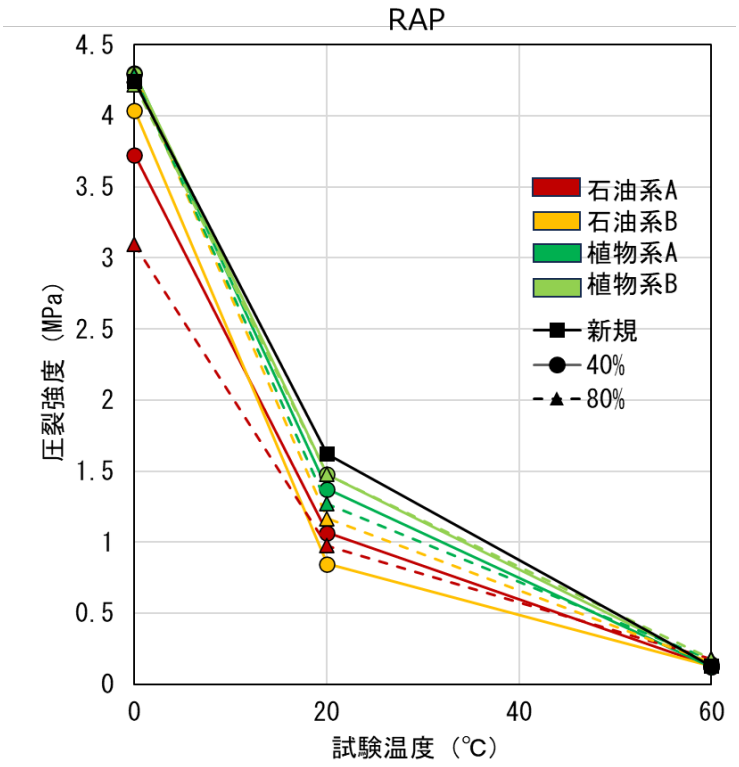



図 3.2.5 再生アスファルト混合物(RAP) の圧裂強度

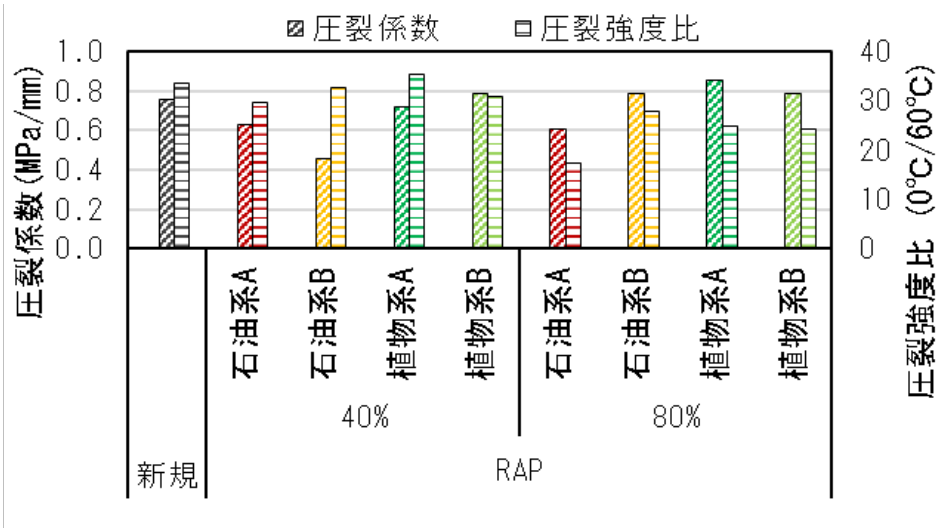



図 3.2.6 再生アスファルト混合物（RAP） の圧裂係数、圧裂強

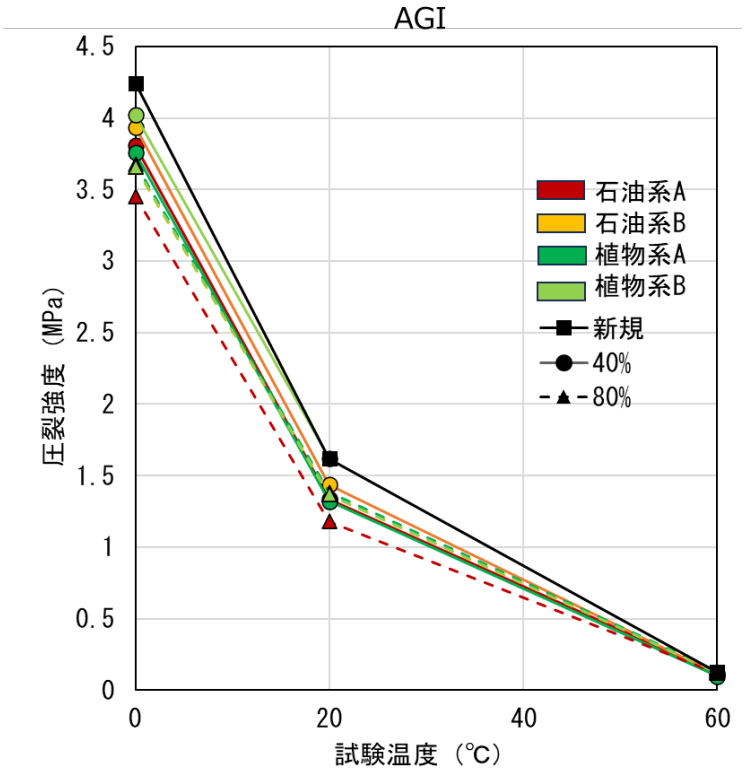



図 3.2.7 再生アスファルト混合物(AGI) の圧裂強

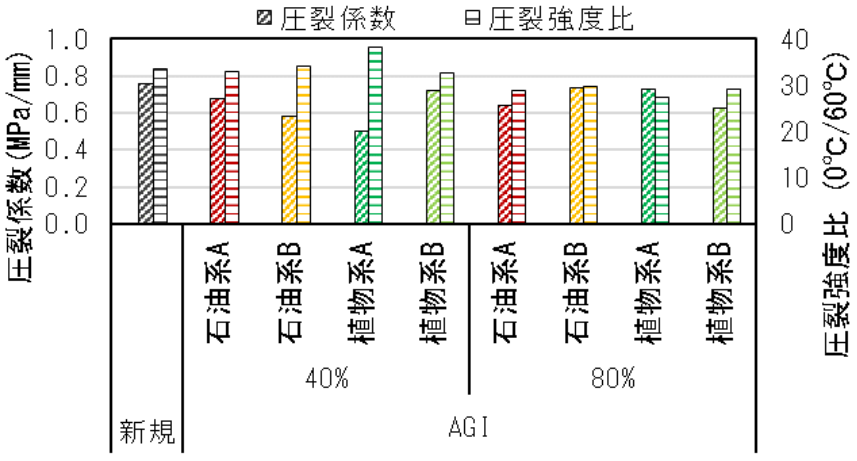



図 3.2.8 再生アスファルト混合物(AGI) の圧裂係数、圧裂強度

### （３）　ホイールトラッキング試験

図 3.2.9 に再生アスファルト混合物（RAP、AGI）の動的安定度（DS 値）を示す。再生骨材の種類、再生骨材配合率に依らず、植物系 A、B は石油系 A、B よりも動的安定度（DS 値）が高く、耐流動性があることがわかった。

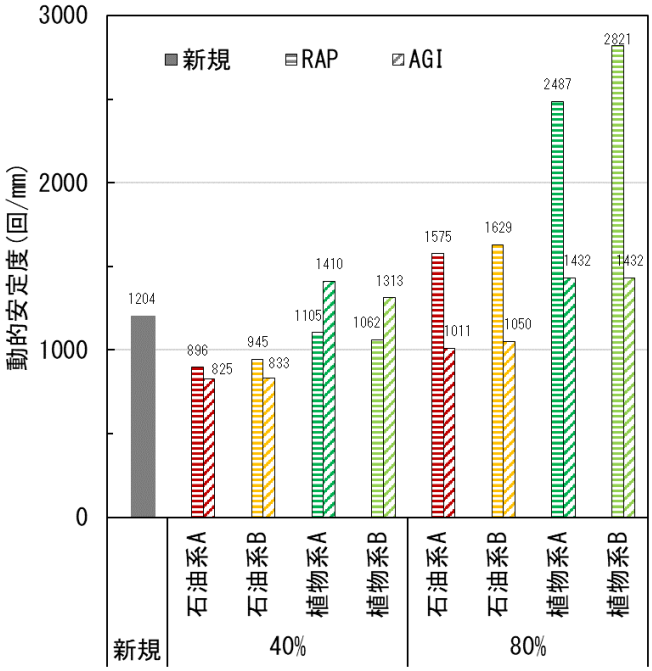



図 3.2.9 再生アスファルト混合物(RAP、AGI）の動的安

### （４）　半円型供試体曲げ（SCB）試験

図 3.2.10 に再生アスファルト混合物（RAP）の破壊エネルギーを示す。再生骨材配合率が高くなると、破壊エネルギーのピークが低温側にシフトした。植物系 A の再生骨材配合率 40%では、25℃で最大値を示し、他よりも新規に近いひび割れ抵抗性を示すことがわかった。

図 3.2.11 に再生アスファルト混合物（AGI）の破壊エネルギーを示す。RAP と同様に再生骨材配合率が高くなると、破壊エネルギーのピークが低温側にシフトした。RAP と異なり、石油系 B 以外の再生骨材配合率 40%では、25℃で最大値を示した。

図 3.2.12 に再生アスファルト混合物（RAP、AGI）の 25℃での破壊エネルギーを示す。RAP､AGI ともに､すべての添加剤で再生骨材率が増加すると破壊エネルギーが低下した。RAP、AGI ともに再生骨材配合率 40%では、植物系が高い傾向が見られた。また、植物系 A は RAP の再生骨材配合 40%で破壊エネルギーが最も高く、ひび割れ抵抗性が高いことがわかった。

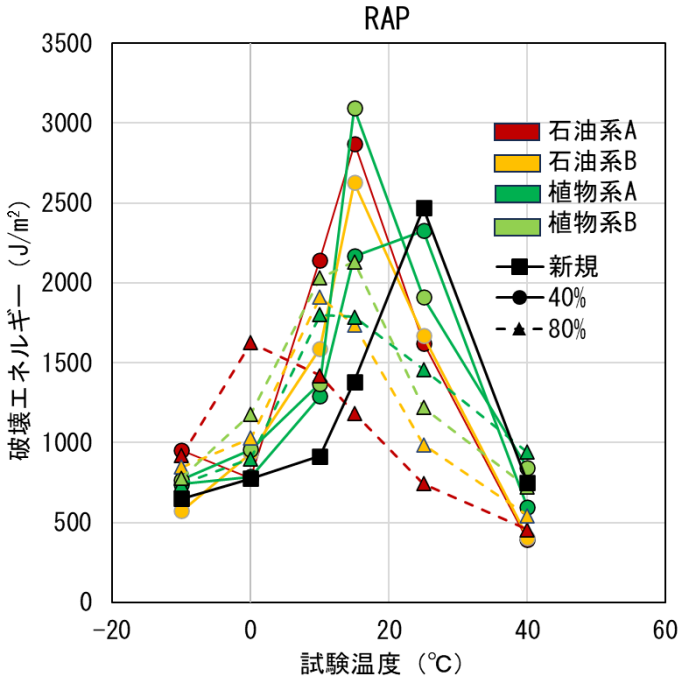



図 3.2.10 再生アスファルト混合物(RAP) の破壊エネルギー

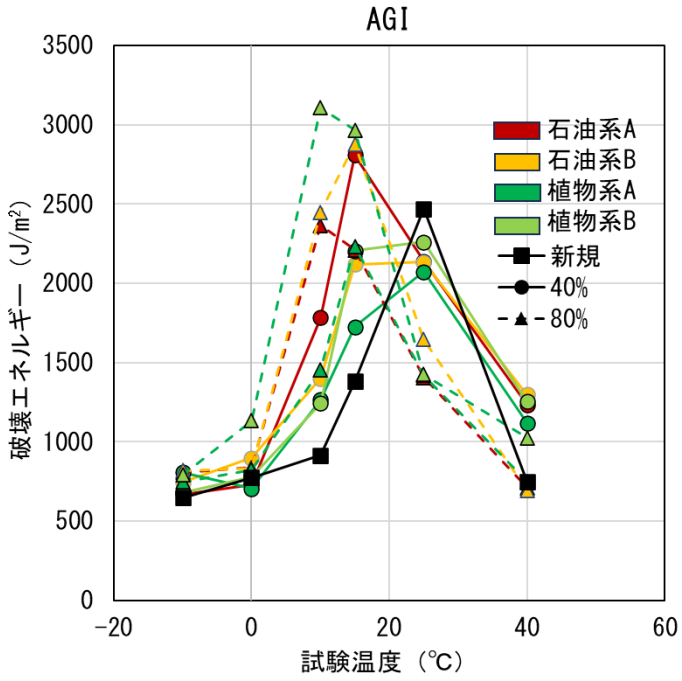



図 3.2.11 再生アスファルト混合物(AGI) の破壊エネルギー

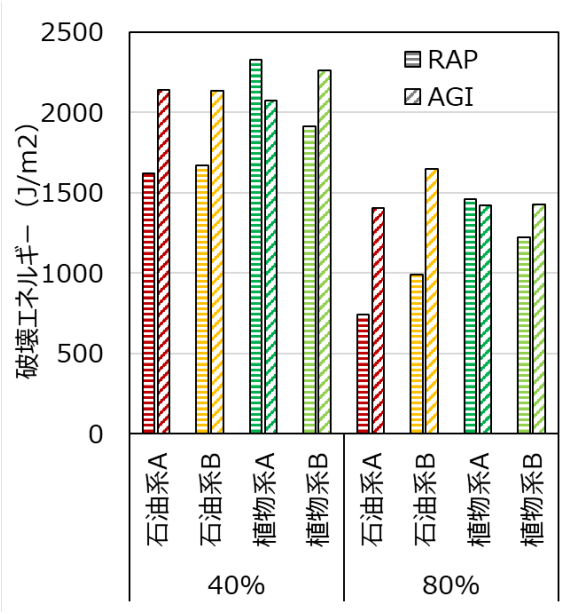



図 3.2.12 再生アスファルト混合物（RAP、AGI）の破壊エネルギー

## ２．３．４　結論

植物系 A を使用した再生アスファルト混合物の性状は石油系 A、B と比較して耐流動性、ひび割れ抵抗性が高く、同等以上の物理性状を有することが明らかになった。植物系 B でも植物系 A と類似の傾向が見られた。

## ２．４　再生用添加剤の $LCCO_2$ 算定

### ２．４．１　概要

道路サイクル全体の低炭素化への貢献度を示すことを目的とし、開発した植物系 A を再生用添加剤として使用した際のライフサイクル $CO_2$（$LCCO_2$）を算定した。

### ２．４．２　算定方法

国立研究開発法人 土木研究所が提案した算定方法により $LCCO_2$（1 年当たり・$1m^2$ 当たり・建設から 100 年まで）を算定した。比較として石油系 A、石油系 B についても同様に算定を行った。また、植物系 A の植物が生育中に吸収する $CO_2$ を加味していないものについても同様に算定を行った。

### ２．４．３　結果と考察

**図 3.2.13** に再生骨材配合率 40%での $LCCO_2$ を示す。植物系 A は石油系 A、B よりも $LCCO_2$ が小さい結果となった。植物系 A は植物が生育中に吸収する $CO_2$ を加味しているため低い。加味しない場合では、石油系 A、B よりも大きいことから、植物原料による $LCCO_2$ の低減効果は大きいことがわかった。

**図 3.2.14** に再生骨材配合率 80%での $LCCO_2$ を示す。再生骨材配合率 40%と同様に植物系 A は石油系 A、B よりも $LCCO_2$ が小さい結果となった。再生骨材配合率が増加すると、再生用添加剤の添加率も増加するため、40%よりも $LCCO_2$ の低減効果がより顕著に見られた。

**表 3.2.6** に植物系 A を使用した際の $LCCO_2$ 低減率を示す。再生骨材配合率 40%では、石油系 A、B に対して 1.5%低減することができた。再生骨材配合率 80%では、石油系 A に対して 3.1%、石油系に対して 3.6%低減することができた。

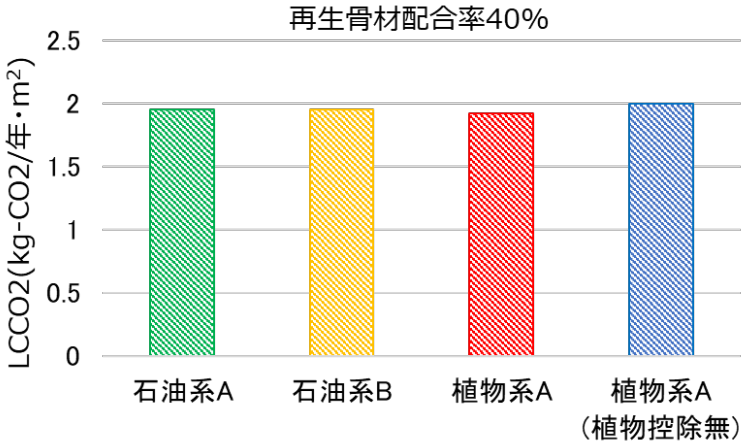



図 3.2.13 再生骨材配合率 40%での $LCCO_2$

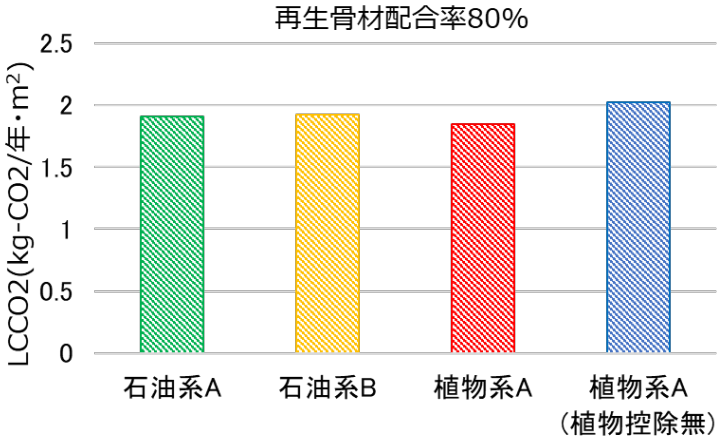



図 3.2.14 再生骨材配合率 80%での $LCCO_2$

表 3.2.6 植物系 A を使用した際の $LCCO_2$ 低減率

| | 再生骨材配合率(%) | 植物系Aを使用した際のLCCO2低減率(%) |
|---|---|---|
| 石油系A | 40 | 1.5 |
| | 80 | 3.1 |
| 石油系B | 40 | 1.5 |
| | 80 | 3.6 |

### ２．４．４　結論

再生骨材配合率 40%、80%ともに植物系 A は石油系 A、B よりも $LCCO_2$ が小さい結果となった。植物由来原料を使用した再生用添加剤を使用したことによる $LCCO_2$ の低減効果は大きいことがわかった。

## ２．５　まとめ

植物由来原料を使用した再生用添加剤（植物系 A）を開発し、液物性評価及び劣化したアスファルトの繰り返し再生試験による評価を行った。その結果、開発した植物系 A の液物性は標準性状を満たし、植物系 A は石油系 A、B、他社特許を模倣した植物系再生用添加剤（植物系 B）と比較してアスファルトバインダへの耐劣化性、再生効果に優位性があることが明らかとなった。また、植物系 A を使用した再生アスファルト混合物の性状についても十分な物理性状を有し、石油系 A、B と比較して耐流動性、ひび割れ抵抗性が高いことが明らかとなった。さらに $LCCO_2$ 算定結果より、植物系 A を使用することによる $LCCO_2$ の低減効果が確認できた。今回の繰り返し再生試験の結果により、舗装の長寿命化の可能性も示唆されており、更なる $LCCO_2$ の低減も期待できると考える。

## ２．６　今後の予定

今回の検討では、バインダ性状・基本的な混合物性状の評価を中心に行った。今後は施工試験に向けて舗装材料としての評価も進める。また、開発した植物系 A の改良も行い、今後も継続して植物系再生用添加剤の性能把握、開発に努めていく。

# ３． 植物由来原料を用いたアスファルト代替材料

## ３．１　概要

本研究で新規に開発したアスファルト代替材料は、原料として植物由来原料を使用している。開発した植物系アスファルト代替材料（以下、植物系 C）のバインダ性状・混合物性状を確認した。

## ３．２　実験方法

作製した混合物は最大粒径 13mm の密粒度混合物で、バインダ量は**表 3.3.1** の値とした。作製した供試体は性状を確認するため、各種物性試験（バインダ試験（針入度、軟化点伸度）、密度試験、マーシャル安定度試験）、圧裂試験、ホイールトラッキング試験を行った。各試験は試験法便覧 [3] に従って実施した。比較として新規ストレートアスファルト 60/80（以下、ストアス）についても同様に実験を行った。

## ３．３　結果と考察

### ３．３．１　基本物性

**表 3.3.1** にバインダ物性と混合物のマーシャル特性値を示す。植物系 C はストアスと同等のバインダ物性とマーシャル特性値を示し、アスファルト混合物の規格を満足した。

表 3.3.1 バインダ物性と混合物のマーシャル特性

| | バインダ物性 | | | マーシャル特性値 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 針入度 (1/10mm) | 軟化点 (℃) | 伸度 (cm) | 最適バインダ量 (%) | 密度 (g/cm$^3$) | 空隙率 (%) | 飽和度 (%) | 安定度 (kN) |
| ストアス | 71 | 47.5 | 100+ | 5.4 | 2.398 | 4.0 | 75.5 | 9.72 |
| 植物系C | 68 | 44.2 | 100+ | 5.1 | 2.387 | 4.0 | 74.4 | 8.47 |
| 規格値 | 60-80 | 44.0-52.0 | 100以上 | 5.0-7.0 | - | 3.0-6.0 | 70-85 | 7.35以上 |

### ３．３．２　水浸マーシャル安定度試験

図 3.3.1 に混合物の水浸マーシャル安定度を示す。水浸養生前の植物系 C はストアスとほぼ同等であったが、水浸養生後の安定度が低く、残留安定度も低い値となった。以上より、植物系 C は耐水性が低いことがわかった。

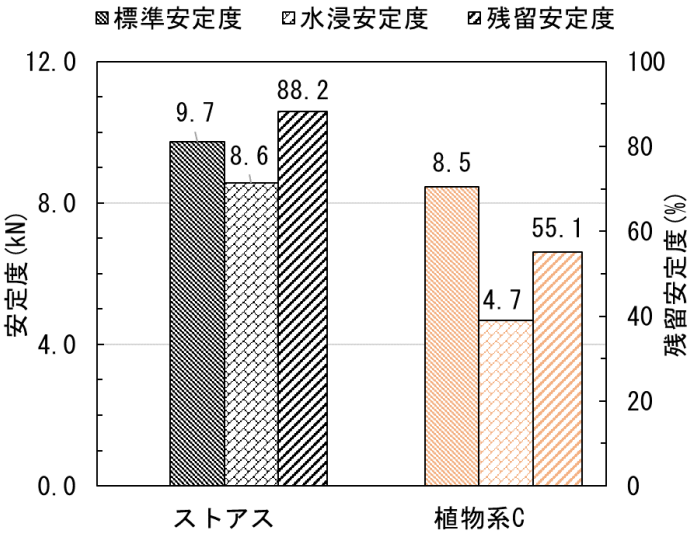



図 3.3.1　混合物の水浸マーシャル安定度

### ３．３．３　圧裂試験

図 3.3.2 に混合物の圧裂強度を示す。植物系 C はストアスよりも試験温度 20℃での圧裂強度が高く、ストアスの試験温度 0℃と同等となった。

図 3.3.3 に混合物の圧裂強度比を示す。植物系 C とストアスは同等の圧裂強度比であった。

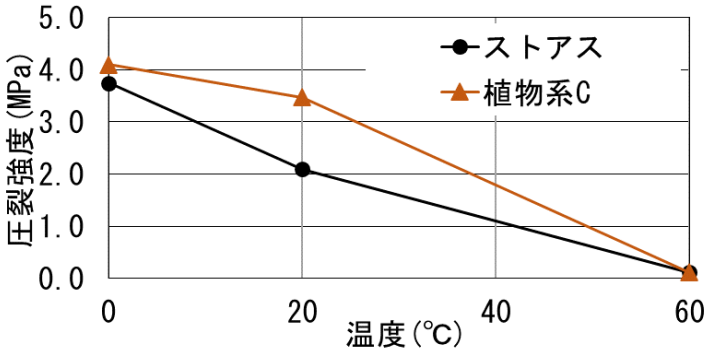



図 3.3.2　混合物の圧裂強度

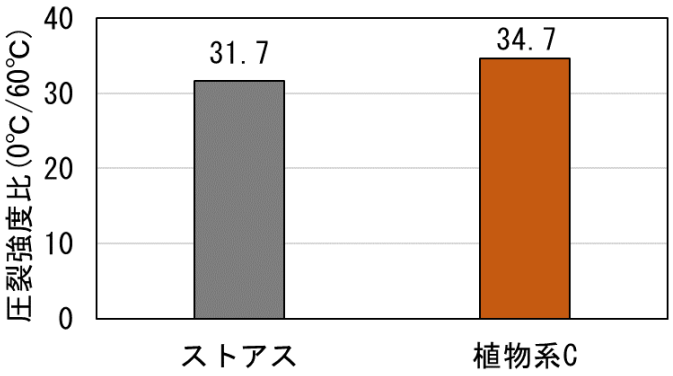



図 3.3.3　混合物の圧裂強度

### ３．３．４　ホイールトラッキング試験

図 3.3.4 に混合物の動的安定度（DS 値）を示す。植物系 C はストアスよりも動的安定度（DS 値）が低い。よって耐流動性が低く、温度変化による性状の変化が大きい可能性が考えられる。

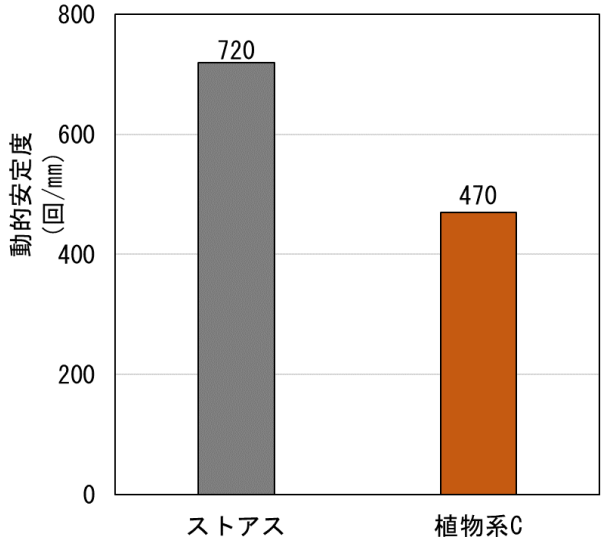



図 3.3.4　混合物の動的安定度

## ３．２　まとめ

開発した植物由来原料のアスファルト代替材料（植物系 C）は基本的な混合物の規格は満足している結果となった。しかし、ストアスよりも耐水性、耐流動性が低い結果となった。

## ３．３　今後の予定

開発した植物由来原料のアスファルト代替材料（植物系 C）はストアスよりも高温域では低粘度となるため、混合温度を中温化できる可能性がある。そのため、混合温度を下げて混合物の作製・評価を行い、中温化の可能性を見極めていく。中温化が可能となれば、植物原料の使用に加え、更なる $CO_2$ 低減効果が期待できる。再生用添加剤と同様に $LCCO_2$

の算定も行い、効果を確認する。また、開発した植物系 C の改良も行い、今後も継続して植物系アスファルト代替材料の性能把握、開発に努めていく。

## ４．結言

今回の検討では、植物由来原料を使用した再生用添加剤（植物系 A）、植物由来原料を使用したアスファルト代替材料（植物系 C）を開発し、その評価を行った。

植物系 A は再生用添加剤の標準的な性状、再生アスファルト混合物の性状を満足するだけでなく、劣化したアスファルトバインダへの耐劣化性・再生効果および再生アスファルト混合物にした際の耐流動性、ひび割れ抵抗性に優位性があることが明らかとなった。また、再生用添加剤（植物系 A）に関しては $LCCO_2$ の算定により、$CO_2$ の低減効果も見られた。舗装の長寿命化の可能性も示唆されており、更なる $LCCO_2$ の低減も期待できると考える。

植物系 C はストレートアスファルト対比で耐水性、耐流動性が低い結果となったが、基本的な混合物の性状を満足していた。また、混合温度を中温化できる可能性がある。中温化が可能となれば、植物原料の使用に加え、更なる $LCCO_2$ の低減も期待できると考える。

今後も継続して植物原料を使用した再生用添加剤､アスファルト代替材料の性能把握、開発に努め、施工試験に向けた舗装材料としての評価を進める。最終的には実際の舗装に使用できるような材料の開発を目指す。

## ５．参考文献


1） 一般社団法人 日本アスファルト合材協会：アスファルト合材統計年報、2022

2） Amir Tabaković、“Is this the end of the roadfor bio‐inspired road construction materials?”、RILEM Technical Letters、 Vol7、 79-87、 2022.

3） 公益社団法人日本道路協会、「舗装調査・試験法便覧」、2019.

4） 石油学会規格、「 JPI-5S-77-2019 TLC/FID 法によるアスファルト組成分析試験方法」

5） 公益社団法人日本道路協会、「舗装再生便覧（令和 6 年版）」、2024.

# 4 編　世紀東急工業株式会社

## １．　はじめに

### １．１　研究の目的

近年、国内のアスファルト製造量は減少してきており、地域によっては石油アスファルトの不足から舗装工事の不調も発生している。しかし、原油アスファルトの生産量が縮小する一方で、道路維持修繕に対する需要の極端な減少は見込まれず、今後の石油アスファルト等の調達難が懸念される。また、道路の施工過程において SDGs に貢献できる課題を抽出すると、温室効果ガス排出量を削減できる製品の開発および再生利用可能性の向上が挙げられる。

以上のことから、本研究では、石油アスファルトに替わるものとして、温室効果ガス排出量の削減に寄与し、再生利用の可能性を向上させる材料を用いて、非石油系の代替材料を開発することとした。

そこで、国立研究開発法人土木研究所と世紀東急工業（株）は令和 4 年 9 月より共同研究「カーボンニュートラルに向けた新たな舗装材料開発に関する基礎研究（令和 4～5 年度)」を実施し、将来的に石油アスファルトの一部または全部を置き換えられる材料を目指し、基礎検討を実施した。

本報告書は、該当技術に係る材料開発、各種室内試験性状、試験施工および再生利用の評価などを行い、その検討結果をとりまとめたものである。

### １．２　研究内容

アスファルト代替材料として、天然アスファルト由来のギルソナイト、植物由来のオイル系材料および廃プラチック材料を使用した混合物の適用性を検討する。

また、上記混合物の再生利用への適用性も検討する。

## ２．アスファルト代替材料について

### ２．１　バインダの概要

アスファルトに代わる舗装材料（以下、代替バインダ）に使用する素材としては、天然アスファルト由来のギルソナイト、植物由来のオイル系材料および廃プラチック材料である。

また、代替バインダの使用方法は、加熱した骨材に廃プラスチック材料を混合した後、オイル系材料およびギルソナイトをそれぞれ常温でミキサーに投入し、180℃で混合している。代替バインダの配合を**表 4.2.1**、代替バインダの概要を**図 4.2.1** に示す。

**表 4.2.1**　代替バインダの配合

| | オイル系材料 | ギルソナイト | 廃プラスチック材料 |
|---|---|---|---|
| 配合割合（%） | 60 | 40 | 0.3（対混合物） |

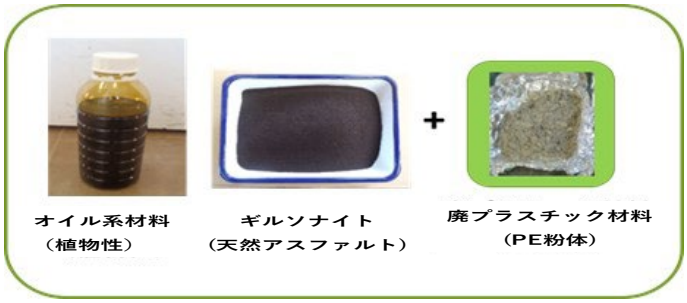



**図 4.2.1**　代替バインダの概要

### ２．２　バインダ基礎性状

代替バインダおよびストレートアスファルト 60/80（以下、ストアス 60/80）の性状を**表 4.2.2** に示す。なお、代替バインダに使用している廃プラスチック材料は液体にならないため、オイル材料にギルソナイトのみを溶解した状態で以下の代替バインダの性状試験に使用した。

**表 4.2.2　バインダ性状**

| 試験項目 | 代替バインダ（ギルソナイト+オイル） | ストアス 60/80 | ストアス 60/80 の規格値 |
|---|---|---|---|
| 針入度（1/10mm） | 測定不能 | 65 | 60 を超え 80 以下 |
| 軟化点（℃） | 34.5 | 47.2 | 44.0～52.0 |
| 伸度（cm） | 26.5 | 150 超 | 100 以上 |
| 引火点（℃） | 322 | 364 | 260 以上 |
| 薄膜加熱質量変化率（%） | -0.33 | 0.01 | 0.6 以下 |
| 薄膜加熱後針入度（1/10mm） | 測定不能 | 43 | - |
| 針入度残留率（%） | - | 66 | 55 以上 |
| 蒸発質量変化率（%） | -0.087 | -0.004 | - |

## ２．３　アスファルト混合物性状

代替バインダを用いた混合物（以下、代替混合物）およびストアス 60/80 を用いた混合物（以下、ストアス混合物）の混合物配合割合および合成粒度を**表 4.2.3**～**表 4.2.4** に、混合物性状を**表 4.2.5** に示す。ここで、代替混合物に使用している代替バインダはギルソナイト、オイル系材料および廃プラスチック材料である。代替混合物とストアス混合物共に、新規混合物および再生混合物それぞれの基本性状を確認した。

その結果、マーシャル安定度はほぼ同程度の値であるが、動的安定度は代替混合物において良好な値が得られた。また、代替混合物の曲げ強度はストアス混合物と比較して小さい傾向がみられたが、破断ひずみは 2 倍程度の値となった。

**表 4.2.3　混合物の配合割合**

| 配合割合（%） | 6 号 | 7 号 | 砕砂 | 細砂 | 石粉 | As 再生骨材 | 合計 | 代替バインダ | ストアス 60/80 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 密粒度アスコン | 33.0 | 21.0 | 30.0 | 10.0 | 6.0 | ― | 100.0 | 5.0% | 5.5% |
| 再生密粒度アスコン（R50%） | 23.0 | 10.0 | 8.0 | 5.0 | 4.0 | 50.0 | 100.0 | 4.5% | 5.3% |

**表 4.2.4**　合成粒度

| ふるい目 (mm) / 項目 | 通過質量百分率（%） | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 19 | 13.2 | 4.75 | **2.36** | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0.075 |
| 密粒度アスコン | 100 | 99.2 | 65.2 | **43.2** | 27 | 17.3 | 9 | 5.8 |
| 再生密粒度アスコン 50% | 100 | 98.6 | 65 | **42.6** | 26 | 17.2 | 9.3 | 5.7 |
| 粒度範囲 | 100 | 95-100 | 55-70 | **35-50** | 18-30 | 10-21 | 6-16 | 4-8 |

**表 4.2.5**　混合物の基本性状

| 評価項目 | 代替混合物（新規） | ストアス混合物（新規） | 代替混合物（再生） | ストアス混合物（再生） |
|---|---|---|---|---|
| バインダ量（%） | 5.0 | 5.5 | 4.5 | 5.3 |
| 密度（$g/cm^3$） | 2.370 | 2.398 | 2.409 | 2.386 |
| マーシャル安定度(kN) | 13.8 | 12.6 | 15.3 | 10.5 |
| フロー値（1/100cm） | 25 | 29 | 29 | 30 |
| 残留安定度（%） | 89.2 | 89.2 | 91.7 | - |
| 動的安定度 DS(回/mm) | 3、150 | 423 | 15、000 | - |
| 曲げ強度（MPa） | 2.35 | 7.53 | 7.64 | - |
| 破断時のひずみ（$\times 10^{-3}$） | 7.1 | 3.9 | 8.7 | - |

## ３．　試験施工および供用性評価

### ３．１　製造方法および施工方法の検討

世紀東急工業（株）佐倉混合所で製造方法および施工方法の検討を行った。混合物の配合割合および合成粒度を**表 4.3.1**、**表 4.3.2** に示す。

**表 4.3.1**　代替混合物の配合割合

| 配合割合（%） | 6 号 | 7 号 | 砕砂 | 細砂 | 石粉 | As 再生骨材 | 合計 | 代替バインダ量（%） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 密粒度アスコン | 37.0 | 18.0 | 26.0 | 13.0 | 6.0 | ― | 100.0 | 5.0 |
| 再生密粒度アスコン（R60%） | 28.0 | 0.0 | 0.0 | 12.0 | 0.0 | 60.0 | 100.0 | 4.5 |

**表 4.3.2**　合成粒度

| ふるい目（mm）／項目 | 通過質量百分率（%） | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 19 | 13.2 | 4.75 | **2.36** | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0.075 |
| 密粒度アスコン | 100 | 98.7 | 65.6 | **43.2** | 26.7 | 16.5 | 8.8 | 6.5 |
| 再生密粒度アスコン（R60%） | 100 | 97.0 | 59.1 | **44.3** | 29.9 | 17.5 | 9.0 | 6.1 |
| 粒度範囲 | 100 | 95-100 | 55-70 | **35-50** | 18-30 | 10-21 | 6-16 | 4-8 |

### ３．１．１　製造方法の検討

#### （１）　試験練り概要

- 日　時：2023 年 7 月 24 日（月）10:00～
- 場　所：世紀東急工業（株）佐倉混合所
- 混合物の種類：2 種類
  - 代替混合物（新規密粒 13mm）
  - 代替混合物（再生密粒 13mm（R60%））
- 製造方法：以下の順序で混合する（代替バインダは全て手動投入）
-

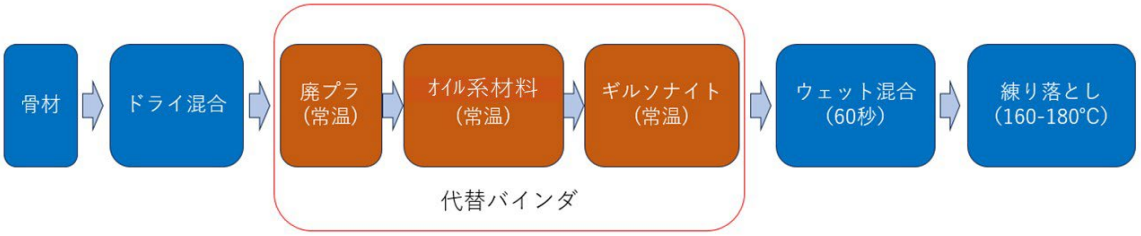



**図 4.3.1**　製造手順



**写真 4.3.1**　オイルの手動投入状況



**写真 4.3.2**　ギルソナイトの手動投入状況

**（２）　製造結果**

試験練りを実施し、設定した製造方法での混合状態を確認した。その結果、練り落とし混合物は混合ムラなどなく、良好な結果を得られた。また、練り落とし温度は 175℃程度であり、目標値 175～185℃に対して満足した。

### ３．１．２　施工方法の検討

**（１）　試験施工の概要**

- 日　時：2023 年 7 月 24 日（月）12:00～
- 場　所：佐倉混合所の材料置き場
- 混合物の種類：1 種類
  - 代替混合物（新規密粒 13mm）
- 施工機械　：アスファルトフィニッシャ、マカダムローラ、タイヤローラ、プレート

**（２）　施工結果**

施工方法および施工性を確認するために、代替混合物（新規）の試験施工を行った。試験施工の結果を**表 4.3.3**、施工状況を**写真 4.3.3～4.3.6** に示す。施工時の温度は目標を確保でき、機械による混合物の敷きならしおよび転圧の施工性は良好であり、一般的な舗装と同様に問題なく施工できることを確認した。また、施工の際に、作業員より、スコップやレーキで代替混合物を取り扱った時の感覚が一般的なアスファルト混合物より若干軽いとの評価があった。なお、切り取り採取したコアの締固め度は 99.4%であり、目標とする締固め度を満足することを確認した。

**表 4.3.3**　試験施工の結果

| 項目 | 目標 | 試験施工 |
|---|---|---|
| 混合温度（℃） | 175～185 | 175 |
| 敷きならし温度（℃） | 160 以上 | 165 |
| 初期転圧温度（℃） | 150 以上 | 155 |
| 二次転圧温度（℃） | 110 以上 | 130 |



写真 4.3.3　敷き均し状況



写真 4.3.4　初期転圧状況



写真 4.3.5　二次転圧状況



写真 4.3.6　試験施工終了

## ３．２　混合物の供用性評価

### ３．２．１　供用性評価へ向けた走行実験場での評価（新規混合物）

長期供用性を評価するため、代替混合物（新規）を用いて、走行実験場で施工を行った。評価内容としては荷重車走行前後でのわだち掘れ等の変化量を調査する。

#### （１）　施工概要

- 日時：2023 年 7 月 31 日（月）9:30～
- 場所：土木研究所走行実験場（施工幅員 3.5m×延長 15m）
- 合材出荷場所：世紀東急工業（株）佐倉混合所
- 混合物の種類：1 種類
    - ➢ 代替混合物（新規密粒 13mm）
- 施工機械：切削機、アスファルトフィニッシャ、マカダムローラ、タイヤローラ、プレート

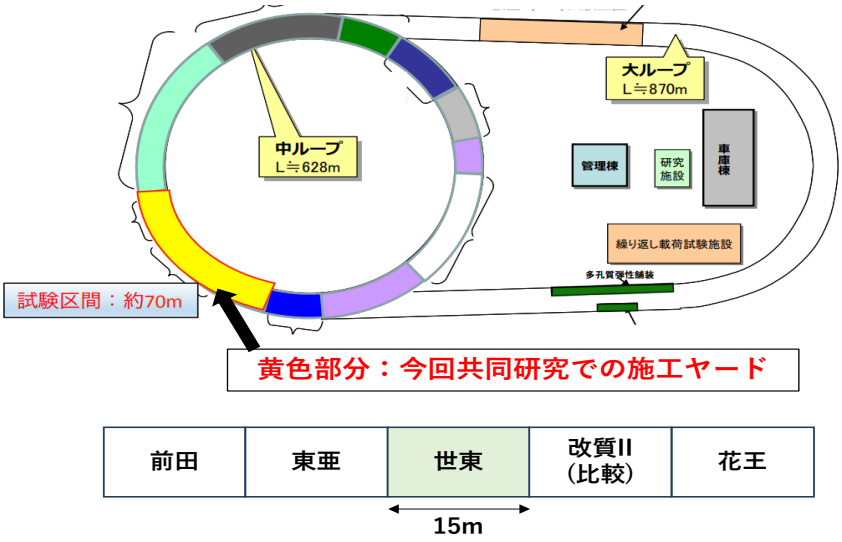



図 4.3.2　施工場所

### （２）　施工結果

アスファルトフィニッシャでの敷きならしおよび転圧は、試験施工と同様の施工性を得られた。施工目標温度および施工状況を**表 4.3.4**、**写真 4.3.6**～**4.3.11** に示す。

表 4.3.4　施工温度

| 項目 | 目標 | 走行実験場での施工 |
|---|---|---|
| 混合温度（℃） | 175～185 | 160～175 |
| 敷きならし温度（℃） | 160 以上 | 165 |
| 初期転圧温度（℃） | 150 以上 | 150 |
| 二次転圧温度（℃） | 110 以上 | 120 |



**写真 4.3.6**　切削状況



**写真 4.3.7**　乳剤散布状況



**写真 4.3.8**　敷均し状況



**写真 4.3.9**　一次転圧状況



**写真 4.3.10**　二次転圧状況



**写真 4.3.11**　完成

### （３） 出荷混合物の確認

出荷プラントにおける混合物の性状確認および走行実験場での施工後の品質確認を行った。代替混合物（新規）の性状試験結果を**表 4.3.5** に示す。表の通り、代替混合物（新規）の密度は室内混合よりプラント混合の方が高くなる傾向がみられたがマーシャル安定度については大きな差はなかった。また、走行実験場での現場コアの締固め度は 99.0%であり、十分な締固め度を得られた。

**表 4.3.5** マーシャル試験結果

| 種類 | | 密度 (g/cm³) | マーシャル安定度 (kN) | フロー値 (1/100cm) | 締固め度 (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 配合設計（室内） | 配合確認 | 2.369 | 11.9 | 21 | - |
| 試験施工 | 出荷確認 | 2.418 | 12.1 | 24 | - |
| | 現場コア | 2.428 | - | - | 100.4% |
| 土研走行路 | 出荷確認 | 2.382 | 9.2 | 24 | - |
| | 現場コア | 2.404 | - | - | 99.0% |

### （４） 路面の供用性評価結果

荷重車走行前後の路面性状を**表 4.3.6** に示す。表の通り、すべり抵抗値（BPN）と動的摩擦係数（μ60）は施工直後から 30 万輪までの値はほぼ同程度であった。マルチロードプラファイラ（MRP-3000）を用いたわだち掘れ量は、施工直後から 30 万輪走行後までは大きな変化が見られていない。また、施工直後から 30 万輪走行後の状況を**写真 4.3.12** に示す。写真のように表面の色は白っぽく変化したが大きなダメージはない。ただし、10 万輪走行後から表面の一部で微細なひびが見られているため、引き続き経過観察をする。

また、30 万輪でひび割れ率が 0%であったため、$N_4$ 交通で 20 年間問題なく供用できることを確認できた。

**表 4.3.6** 路面性状

| 調査時期 | | 2023 年 7 月 | 2023 年 10 月 | 2023 年 11 月 | 2024 年 4 月 |
|---|---|---|---|---|---|
| 項目 | | 荷重車走行前 | 10 万輪走行後 | 20 万輪走行後 | 30 万輪走後 |
| わだち掘れ量（mm） | | 3 | 3 | 5 | 4 |
| ひび割れ率（%） | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| すべり抵抗値（BPN） | 中（BWP） | 88 | 79 | 79 | 80 |
| | 左（OWP） | 88 | 76 | 74 | 78 |
| 動的摩擦係数（μ60） | 中（BWP） | 0.47 | 0.45 | 0.45 | 0.49 |
| | 左（OWP） | 0.47 | 0.43 | 0.49 | 0.49 |




**写真 4.3.12**　施工直後から 30 万輪走行後

### ３．２．２　供用性評価へ向けた構内道路での評価

一般的な長期供用性の評価をするため、土木研究所の構内道路で施工を行った。施工に使用した代替混合物（再生）の性状を**表 4.3.7** に示す。

ここで、代替混合物①（再生）と代替混合物②（再生）は、産地等の異なる植物由来のオイル系材料を使用している。表に示す通り、①と②の混合物性状は同程度と言える。さらに、代替混合物②（再生）に使用しているオイル系材料は安価であるため、材料費を削減できる。

そこで、2 種類のオイル系材料を用いて、構内道路にて供用性を評価した。

**表 4.3.7**　代替混合物（再生）

| | 代替混合物①（再生） | 代替混合物②（再生） |
|---|---|---|
| バインダ量（%） | 4.5 | 4.5 |
| 転圧回数（回） | 各 50 | |
| 密度（g/cm$^3$） | 2.409 | 2.412 |
| マーシャル安定度（kN） | 15.3 | 16.6 |
| フロー値（1/100cm） | 29 | 30 |
| 残留安定度（%） | 91.7 | 90.7 |
| 動的安定度 DS（回/mm） | 15,000 | 12,600 |
| 曲げ強度（MPa） | 7.64 | 5.46 |
| 破断時のひずみ（×10$^{-3}$） | 8.7 | 5.2 |

### （１）　施工概要

- 日時：2023 年 10 月 27 日（金）
- 目的：一般的な長期供用性評価
- 場所：土木研究所構内道路（幅員 3.05m×延長 20m×3 工区）
- 合材出荷場所：世紀東急工業（株）佐倉混合所
- 混合物の種類：3 種類（R60%）
    - 代替混合物①（再生密粒 13mm）
    - 代替混合物②（再生密粒 13mm）
    - ストアス混合物（再生密粒 13mm）
- 施工機械：切削機、アスファルトフィニッシャ、マカダムローラ、タイヤローラ、プレート




図 4.3.3　施工場所

### （２）　施工結果

代替混合物①と②（再生）による敷均しおよび転圧は、一般的なアスファルト混合物と変わらずにできた。ただし、代替混合物②（再生）は混合物到着時にドライ気味となる点や施工する時に煙および匂いを伴い、施工近所からのクレーム等があると想像されることから、適用は留意する必要がある。施工状況は**写真 4.3.13**～**写真 4.3.18** に、施工温度は**表 4.3.8** に示す。



**写真 4.3.13**　切削状況



**写真 4.3.14**　乳剤散布状況




**写真 4.3.15**　敷均し状況



**写真 4.3.16** 一次転圧状況
【代替混合物①（再生）】



**写真 4.3.17**　二次転圧状況
【代替混合物②（再生）】



**写真 4.3.18**　完成状況

**表 4.3.8**　施工温度

| 項目 | 目標 | 試験施工 | 代替混合物①（再生） | 代替混合物②（再生） | ストアス混合物（再生） |
|---|---|---|---|---|---|
| 混合温度（℃） | 175～185 | 175 | 180 | 180 | 180 |
| 敷きならし温度（℃） | 160 以上 | 165 | 168 | 187 | 185 |
| 初期転圧温度（℃） | 150 以上 | 155 | 150 | 160 | 161 |
| 二次転圧温度（℃） | 110 以上 | 130 | 120 | 130 | 132 |

### （３）　出荷混合物の確認

混合物の性状試験を行い配合設計時と比較した。その結果、**表 4.3.9** に示す通りプラント出荷時の混合物は密度が高くなる傾向がみられたがマーシャル安定度については大きな差はなかった。また、3 種類の再生混合物の締固め度も良好であった。

表 4.3.9　マーシャル試験結果

| 種類 | | 密度（g/cm³） | マーシャル安定度（kN） | フロー値（1/100cm） | 締固め度（%） |
|---|---|---|---|---|---|
| 代替混合物①（再生） | 室内確認 | 2.374 | 15.6 | 21 | - |
| | 出荷確認 | 2.397 | 13.7 | 25 | - |
| | 現場コア | 2.390 | - | - | 100.7% |
| 代替混合物②（再生） | 室内確認 | 2.342 | 12.9 | 21 | - |
| | 出荷確認 | 2.417 | 11.7 | 30 | - |
| | 現場コア | 2.439 | - | - | 102.7% |
| ストアス混合物（再生） | 出荷確認 | 2.385 | 10.5 | 30 | - |
| | 現場コア | 2.422 | - | - | 102.0% |

### （４）　路面供用性の評価結果

供用性を評価するため、表 4.3.10 に示す通り、路面性状を測定した。施工直後から 6 ヶ月後のすべり抵抗値（BPN）と動的摩擦係数（μ60）は良好な結果であった。また、横断形状の値もほぼ同程度である。

なお、6 ヶ月後の追跡調査により、代替混合物②（再生）の工区は、クラック（リフレクションクラック）が発生していることを発見した。

表 4.3.10　路面性状

| 調査時期 | | 2023 年 10 月（施工直後） | | | 2024 年 4 月（6 ヶ月後） | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 項目 | | 代替混合物① | 代替混合物② | ｽﾄｱｽ混合物 | 代替混合物① | 代替混合物② | ｽﾄｱｽ混合物 |
| わだち掘れ量（mm） | | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 |
| ひび割れ率（%） | | 0 | 0 | 0 | 0 | 有り | 0 |
| すべり抵抗値（BPN） | 中（BWP） | 79 | 78 | 76 | 81 | 80 | 83 |
| | 左（OWP） | 79 | 78 | 76 | 84 | 85 | 75 |
| 動的摩擦係数（μ60） | 中（BWP） | 0.41 | 0.4 | 0.35 | 0.52 | 0.49 | 0.49 |
| | 左（OWP） | 0.41 | 0.4 | 0.35 | 0.54 | 0.47 | 0.47 |

## ４．　その他の評価

### ４．１　耐候性評価 [1)、2)]

#### ４．１．１　評価内容

代替混合物の耐候性を確認するため、供試体の暴露前後の性状変化を確認した。評価概要を**表 4.4.1** および**図 4.4.1** に示す。評価項目は表に示すように、小型曲げ試験による脆化点の変化、回収バインダの針入度、軟化点の変化および色調の変化である。**表 4.4.2** に小型曲げ試験の概要を示す。これまでに暴露前の性状確認を実施した。**写真 4.4.1** に暴露前後の状況を示す。

**表 4.4.1**　評価概要

| | 内容 | | |
|---|---|---|---|
| 混合物 | ストアス混合物 | 代替混合物（新規） | 代替混合物（再生） |
| 暴露期間（年） | 2023 年 3 月～0、1、3、5 年間 | | |
| 測定内容 | 小型曲げ試験による性状（曲げ応力、ひずみ、脆化点等） | | |
| | 舗装表面から回収したバインダ性状（針入度、軟化点、伸度など） | | |
| 設置場所 | 土木研究所沖縄暴露試験場　　沖縄県国頭郡大宜味村 | | |

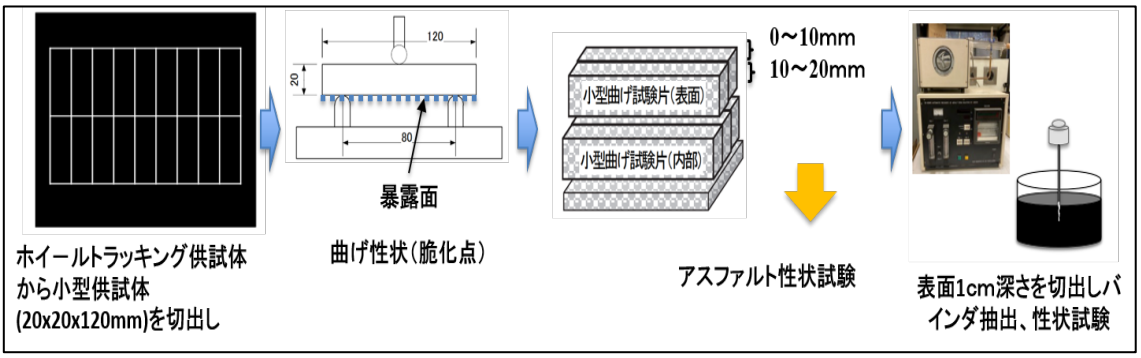



**図 4.4.1**　暴露試験前後の評価概要

**表 4.4.2**　小型曲げ試験の概要

| | |
|---|---|
| 暴露時間 | 0 日 |
| 混合物の種類 | ストアス混合物（新規）、代替混合物（新規）、代替混合物（再生） |
| 試験温度 | -38～15℃ |
| 載荷速度 | 10mm/min |
| 支点間距離 | 80mm |
| 原点補正 | 有 |
| 供試体寸法 | 厚さ：20mm　長さ：120mm　幅：20mm |
| 供試体採取位置 | 表層：混合物表面から 0～20mm　内部：混合物表面から 20～40mm |

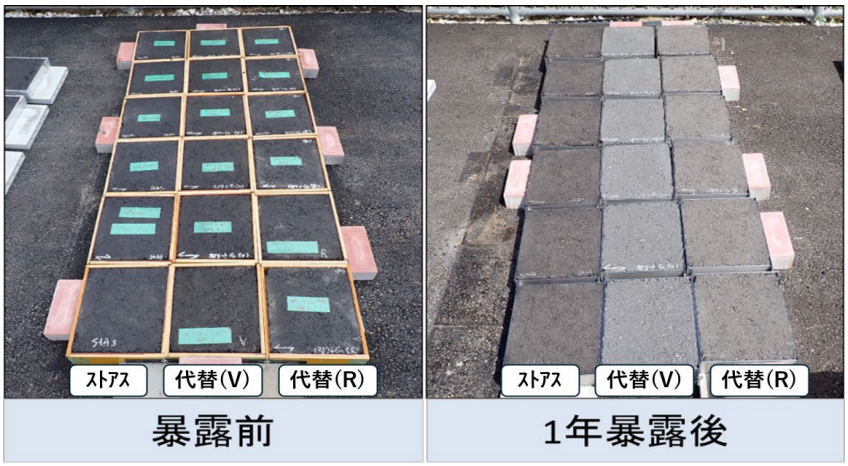



写真 4.4.1　暴露前後の状況

## ４．１．２　暴露前の性状

### （１）　小型曲げ試験

試験の結果を図 4.4.2～4.4.5、表 4.4.3 に示す。曲げ強度および曲げ破断ひずみのそれぞれから脆化点を確認した。

その結果、ストアス混合物（新規）の脆化点は 0℃付近となった。また、代替混合物（新規）の脆化点は約－38℃以下、代替混合物（再生）は－30℃付近が脆化点であることが分かった。なお、供試体の表面と内部でこの傾向に違いはなかった。

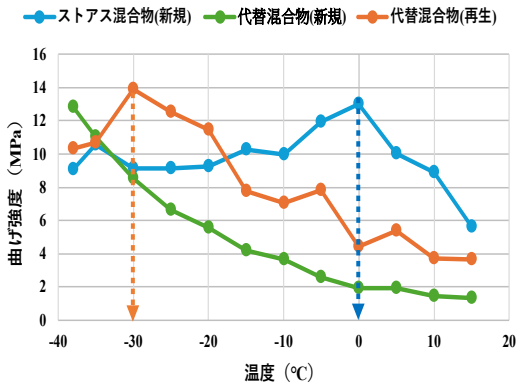



図 4.4.2　曲げ応力(表面)

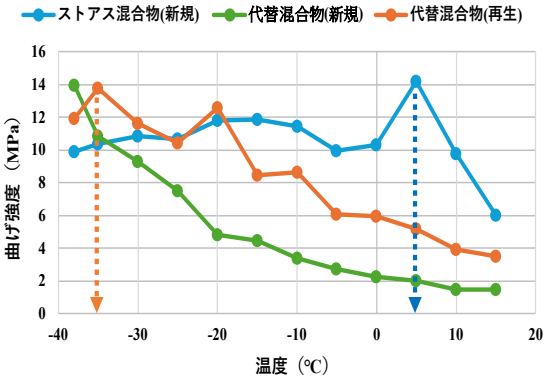



図 4.4.3　曲げ応力(内部)

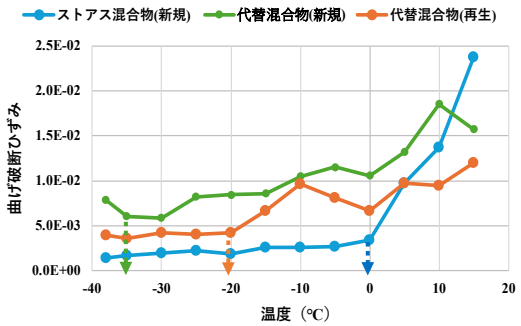



図 4.4.4　破断ひずみ(表面)

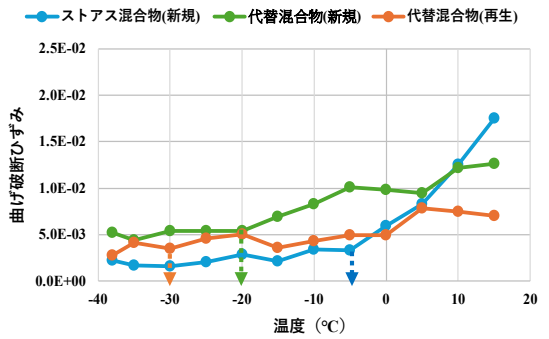



図 4.4.5　破断ひずみ(内部)

**表 4.4.3**　各混合物の脆化点

| 脆化点（℃） | | ストアス混合物（新規） | | 代替混合物（新規） | | 代替混合物（再生） | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 曲げ強度 | ひずみ | 曲げ強度 | ひずみ | 曲げ強度 | ひずみ |
| 暴露前 | 表面 | 0 | -5 | -38 以下 | -35 | -30 | -30 |
| | 内部 | 5 | 0 | -38 以下 | -30 | -35 | -20 |

**（２）　回収したバインダの性状**

3 種類の混合物の供試体から回収したバインダを使用して、針入度および軟化点試験を実施した。試験結果を**表 4.4.4** と**図 4.4.6** に示す。

試験の結果より、代替混合物（新規）から回収したバインダはストアス混合物（新規）から回収したバインダと比較すると、極めて柔らかく、針入度が測定できなかった。軟化点は、ストアス混合物（新規）に比べ 10℃ほど高い値を示した。また、同じ傾向であるが代替混合物（再生）から回収したバインダは、ストアス混合物（新規）に比べ針入度と軟化点がともに高い値となった。軟化点については代替混合物（新規）から抽出した代替バインダよりわずかに高い傾向を示した。また、混合物表面からの供試体採取位置によって大きな差は見られなかった。

これらの試験結果から、代替バインダはアスファルトと性状や挙動が異なるため、既存のアスファルトの性状試験では評価しきれないことを確認した。

**表 4.4.4**　暴露前の針入度および軟化点

| 混合物の種類 | 供試体表面からの採取位置（mm） | 針入度（1/10mm） | 軟化点（℃） |
|---|---|---|---|
| ストアス混合物（新規） | 0～20 | 50 | 49.3 |
| 代替混合物（新規） | 0～20 | 測定不能 | 62.7 |
| | 20～40 | 測定不能 | 59.7 |
| 代替混合物（再生） | 0～20 | 63 | 66.5 |
| | 20～40 | 63 | 67.6 |

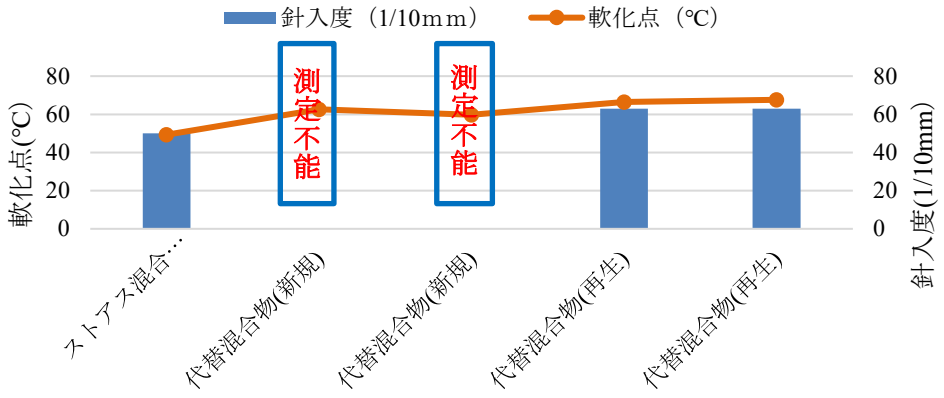



**図 4.4.6**　暴露前の針入度および軟化点

暴露前の性状試験結果を以下にまとめる。

- 代替混合物（再生）の脆化点はストアス混合物（新規）よりかなり低温（-20～-35℃）であることを確認した。
- 代替混合物（新規）の曲げ強度から求めた脆化点は約-38℃以下であり、代替混合物（再生）よりも低い温度だと想定できる。
- 全ての混合物において、暴露前の性状は供試体の採取位置（表面と内部）によって大きな違いはなかった。

## ４．２　ひび割れ評価

### ４．２．１　高温時のひび割れ抵抗性の評価（混合物の性状評価）[3)]

代替バインダは、一般的に使用されているアスファルトのバインダ性状試験で評価しきれないため、混合物の性状を評価した。そこで、再生混合物や再生用添加剤の評価に用いる圧裂試験および高温カンタブロ試験を実施した。

試験の結果を**図 4.4.7～図 4.4.8** に示す。カンタブロ試験の結果から、低温条件（0℃）における代替混合物はストアス混合物より損失量が少ない結果であり、低温性状が良好であることを確認した。しかし、常温条件（20℃）および高温条件（60℃）での代替混合物（新規）は、損失量が高い値となった。また、ストアス混合物は、高温条件（60℃）では変形するが損失は見られなかった。

一方、圧裂試験の結果から、代替混合物の圧裂強度は 60℃から 0℃までの範囲では温度条件の違いによって大きな差は見られなかった。また、低温条件（0℃）では、ストアス混合物に比べ代替混合物の圧裂強度が小さい傾向がみられた。

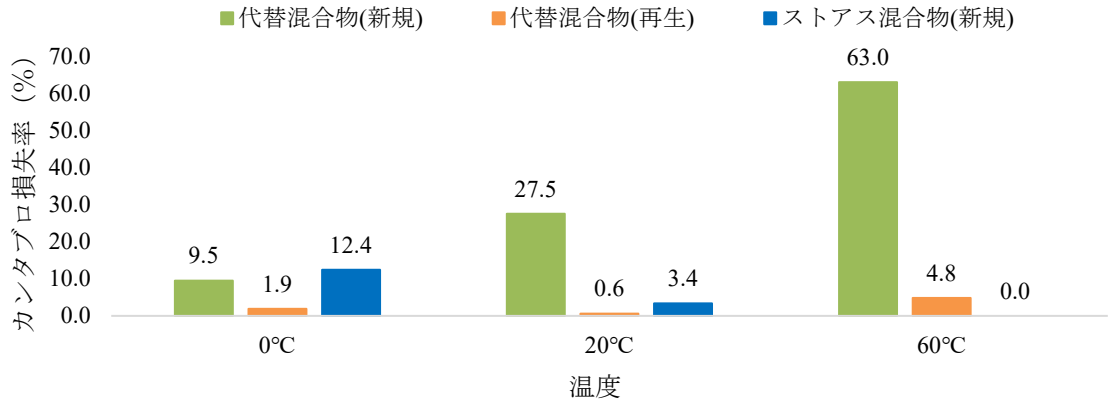



**図 4.4.7**　カンタブロ試験結果

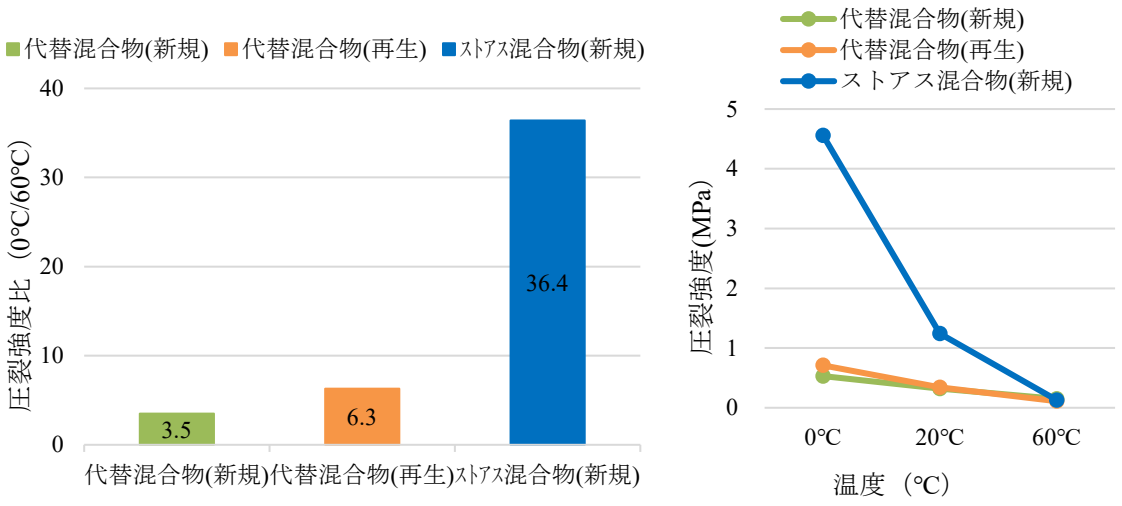



**図 4.4.8**　圧裂試験結果

次に、圧裂強度比および高温カンタブロ損失率の結果を**表 4.4.5** と**図 4.4.9** に示す。また、土木研究所で提案している、再生混合物の高温時におけるひび割れが生じにくい範囲を**表 4.4.6** に示す。これより、高温時のひび割れ抵抗性を評価すると、代替混合物は高温時のひび割れが生じやすい範囲に相当するといえる。

圧裂強度比においては、代替混合物の脆化点が低いため、0℃と 60℃での圧裂強度には大きな差がなく、圧裂強度比は小さい値となる。このことから、アスファルトの特性に応じた評価方法では評価がしきれないと考えられる。

高温カンタブロ損失率より、60℃での骨材飛散抵抗性が低いことが確認できた。供試体の端部に片くずれが見られることからも、この評価は適正と考えられ、高温ひび割れが課題である可能性がある。

以上のことから、代替混合物は高温ひび割れ抵抗性に課題がある可能性がある。

**表 4.4.5**　圧裂強度比と高温カンタブロ損失率の結果

| | 代替混合物（新規） | 代替混合物（再生） | ストアス混合物（新規） |
|---|---|---|---|
| 圧裂強度比（0℃/60℃） | 3.5 | 6.3 | 36.4 |
| 高温カンタブロ損失率（60℃） | 63.0% | 4.8% | 0.0% |

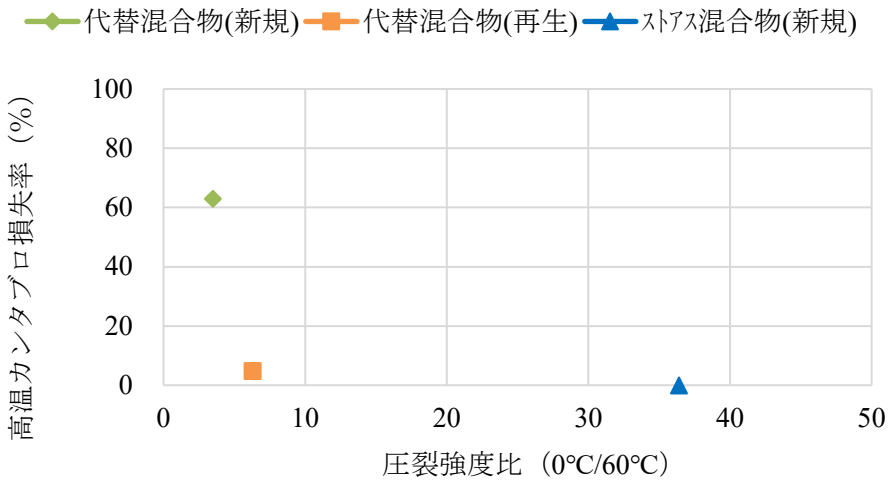



**図 4.4.9**　圧裂強度比と高温カンタブロ損失率

**表 4.4.6**　高温時のひび割れが生じにくい範囲

| 高温時のひび割れ：生じにくい ← → 生じやすい | 範囲内 | 範囲外 | |
|---|---|---|---|
| 圧裂強度比 | 20以上 | 20未満 | |
| 高温カンタブロ損失率(%) | 1.14未満 | 2.40 未満 1.14以上 | 2.40以上 |

結果を以下にまとめる

- 高温カンタブロ損失率より、60℃の骨材飛散抵抗性が低いことが確認できた。供試体の端部に片くずれが見られるため、この評価は適正であり、高温ひび割れが課題と言える。
- 圧裂強度比は、代替混合物の脆化点が低いため 0℃の圧裂強度の値が小さく、60℃の値と差がないことから小さい値が得られた。アスファルトの特性に応じた評価方法には代替混合物該当しなかったと考えられる。

### ４．２．２　曲げ疲労試験

代替混合物の疲労抵抗性を評価するため、曲げ疲労試験を実施した。試験条件を**表 4.4.7** に示す。

試験の結果、代替混合物はストアス混合物より良好な値を得られた。試験の結果を**表 4.4.8** と**図 4.4.10** に示す。なお、代替混合物（再生）はひずみ 600μ で破断しないため、ひずみ 900μ でも追加試験を実施した。ストアス混合物はひずみ 600μ の疲労破壊回数の値が小さいため、追加試験を実施していない。

**表 4.4.7**　試験条件の設定

| 項目 | 試験条件 |
|---|---|
| 混合物の種類 | ストアス混合物（新規）、代替混合物（新規）、代替混合物（再生） |
| 載荷方法 | 両端固定 2 点載荷 |
| 供試体寸法 | 40mm×40mm×400mm |
| スバン長 | 300mm |
| 試験方法 | ひずみ制御 |
| 試験温度 | 20℃ |
| 載荷周波数 | 5Hz |
| 載荷波形 | サイン波 |
| ひずみ | 600μ、900μ |

**表 4.4.8**　曲げ疲労試験の結果

| 破壊回数 | 代替混合物（新規） | 代替混合物（再生） | ストアス混合物（新規） |
|---|---|---|---|
| 20℃/600μ | 302,882 | 破壊せず | 8 ,662 |
| 20℃/900μ | 49 ,764 | 61 ,993 | 未実施 |

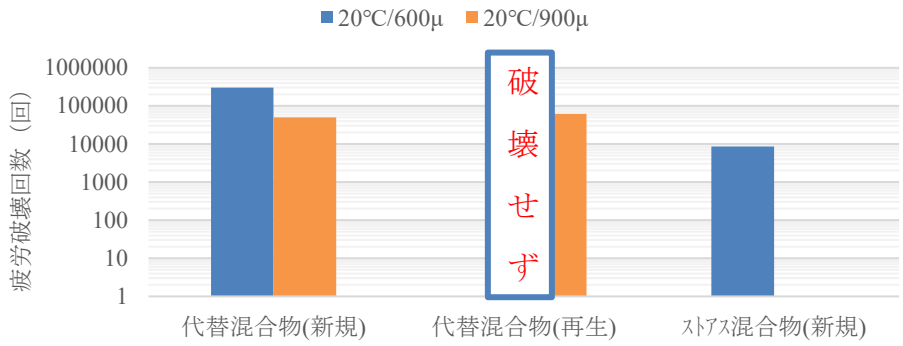



**図 4.4.10　曲疲労試験結果**

## ４．３　再生利用の確認

### ４．３．１　再生骨材の製造[4)]

再生骨材を作るにあたって、室内で熱風循環乾燥炉にて混合物を促進劣化させて製造した。代替混合物の劣化時間や劣化方法は、ストアス混合物検討結果より針入度が 20 になる条件で設定した。

### ４．３．２　代替混合物の再生骨材での性状

設定した条件で代替混合物を劣化させて再生骨材（以下、代替再生骨材）を製造し、性状を確認した。

その結果、代替再生骨材のバインダ分がトリクロロエチレンに溶けないため、バインダの回収ができず、針入度等のバインダ試験ができないことを確認した。

アスファルト再生骨材の規格値および試験条件を**表 4.4.9** と **4.4.10** に、代替再生骨材の圧裂試験結果を**表 4.4.11** に示す。圧裂試験の結果、代替再生骨材の性状はアスファルト再生骨材の品質規格値を満足しなかった。なお、代替再生骨材の圧裂係数はアスファルト再生骨材の規格値を満足するが、値が小さいため舗装再生便覧の針入度と圧裂係数の関係として紹介されている一般的な範囲から外れている。

これにより、代替再生骨材はアスファルト再生骨材とは性状、挙動が異なるため、既存の配合設計方法、規格値を用いることは困難と言える。

**表 4.4.9　アスファルト再生骨材の品質規格値**

| 項目 | | | 目標値 |
|---|---|---|---|
| 旧アスファルトの含有量 | | % | 3.8以上 |
| 旧アスファルトの性状 | 針入度 | 1/10mm | 20以上 |
| | 圧裂係数 | MPa/mm | 1.70以下 |

**表 4.4.10**　アスファルト再生骨材の圧裂試験方法（条件）

| 項目 | | 旧再生便覧 | 新再生便覧（2024.3～） |
|---|---|---|---|
| 供試体作製条件 | 供試体厚さ | 63.5mm | 50mm |
| | 再生骨材の粒度 | 13～0mm | （13～5：5～0＝1：1）mm |
| | 試料の養生 | 165℃/3 時間 | 165～175℃/2 時間 |
| | 突き固め回数 | 両面各 75 回 | 両面各 50 回 |
| | 締固め温度 | 165℃ | 165℃ |
| 試験条件 | 載荷速度 | 50mm/min | 50mm/min |
| | 試験温度 | 20℃/5hr 以上養生 | 25℃/5hr 以上養生 |
| | 変位測定箇所 | 指定なし | 供試体近傍 |

**表 4.4.11**　代替再生骨材の圧裂係数

| 試験条件 | | | 試験結果 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 準拠 | 骨材粒度 | 温度/締固め回数 | 密度（g/cm³） | 圧裂係数（MPa/mm） | 空隙率（%） |
| 旧再生便覧 | 代替 R13-0 | 20℃/75 回 | 2.385 | 2.189 | 4% |
| 新再生便覧 | 代替 R13-5:R5-0＝1：1 | 25℃/50 回 | 2.079 | 0.364 | 16% |
| | | 25℃/75 回 | 2.097 | 0.376 | 15% |
| 規格値 | | - | - | 1.7 以下 | 9%以下 |

### ４．３．３　代替再生骨材を用いた混合物の性状結果

代替再生骨材の性状は**表 4.4.12** に示す通り、アスファルト再生骨材の品質規格を満足しなかった。また、代替再生骨材は一般的な再生混合物の配合設計に用いる旧アスファルト含有量および粒度が測定不可能であるため、旧アスファルト含有量を 0%と仮定し、粒度には暫定的に製造時の粒度を用いて配合を検討した。検討した配合を**表 4.4.13**、混合物性状を**表 4.4.14** に示す。

表の通り、代替再生骨材を用いた混合物（以下、代替再生混合物）のいずれの配合もマーシャル安定度は規格値を満足した。しかし、②の代替再生骨材と代替バインダを使用する配合は、マーシャル安定度試験後に供試体が崩壊してバサバサになり、形が完全に残らないことを確認した。 また、空隙率および飽和度は一般的な再生密粒度混合物より低く、基準値を満足しなかった。

以上のことから、代替再生骨材はアスファルト再生骨材とは性状、挙動が異なるため、今回の材料に適した方法で配合設計を行う必要がある。

表 4.4.12　代替再生骨材の性状

| 種類 | | 結果 | 規格値 |
|---|---|---|---|
| 旧アスファルト含有量（%） | | 測定不可能 | 3.8 以上 |
| 圧裂係数（25℃） | 旧再生便覧 | 2.189 | 1.7 以下 |
| MPa/mm | 新再生便覧 | 0.364 | 1.7 以下 |
| 最大比重（g/cm$^3$） | | 2.483 | - |
| 粒度 | | 測定不可能 | - |

表 4.4.13　代替再生骨材の利用の検討（再生密粒度混合物）

| 種類 | 再生率(%) | 再生骨材 | 再生バインダ内訳 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 旧アス | 旧代替アス | 再生用添加剤 | ｽﾄｱｽ60/80 | 代替ﾊﾞｲﾝﾀﾞ |
| ① | 50 | 代替再生骨材 | － | － | － | ○ | － |
| ② | | | － | － | － | － | ○ |
| ③ | | ｱｽﾌｧﾙﾄ再生骨材：代替再生骨材（1：1） | ○ | － | ○ | ○ | － |
| ④ | | | ○ | － | ○ | － | ○ |

表 4.4.14　代替再生混合物の性状

| 種類 | バインダ量 | 密度（g/cm$^3$） | マーシャル安定度（kN） | フロー値（1/100cm） | 空隙率（%） | 飽和度（%） | 目視観察 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ① | 4.2 | 2.294 | 8.84 | 28 | 4.2 | 69 | ○ |
| | 4.7 | 2.323 | 8.85 | 28 | 2.3 | 82 | |
| | 5.2 | 2.362 | 8.84 | 30 | 1.1 | 91 | |
| ② | 4.2 | 2.307 | 10.55 | 28 | 3.8 | 71 | ×（崩壊） |
| | 4.7 | 2.319 | 10.03 | 29 | 2.7 | 79 | |
| | 5.2 | 2.317 | 9.93 | 38 | 2.1 | 85 | |
| ③ | 4.2 | 2.323 | 11.22 | 26 | 4.8 | 66 | ○ |
| | 4.7 | 2.358 | 10.63 | 27 | 2.7 | 80 | |
| | 5.2 | 2.378 | 10.48 | 29 | 1.2 | 91 | |
| ④ | 4.2 | 2.313 | 11.84 | 22 | 5.3 | 64 | △ |
| | 4.7 | 2.345 | 12.18 | 29 | 3.4 | 76 | |
| | 5.2 | 2.348 | 11.69 | 30 | 2.5 | 82 | |
| 再生密粒 13 の規格値 | | | 4.9 以上 | 20～40 | 3～6 | 70～85 | - |

### ４．３．４　再生利用の検討まとめ

- 熱風乾燥炉を使用した劣化方法により製造した代替再生骨材はバインダがトリクロロエチレンに溶けないため骨材粒度、旧代替バインダ量の測定が不可能であった。
- 代替再生骨材はアスファルトと性状、挙動が異なるため、アスファルト再生

骨材の品質規格を適用できないことが確認できた。

- 代替再生骨材を用いる配合設計を行う際には、独自の方法で実施する必要がある。

## ５．まとめ

以下に本開発のまとめを示す。

- 代替混合物はストアス混合物と比較して、同等以上の混合物性状を得られた。
- 代替混合物は一般的なアスファルト混合物と同様の施工性を得られた。
- 走行実験場での調査結果から代替混合物（新規）は、$N_4$ 交通の供用性を 20 年間問題なく供用できることを確認できた。
- 代替混合物の脆化点から、低温ひび割れ抵抗性に優れ、高温カンタブロ試験から高温ひび割れ抵抗性に課題がある可能性がある。
- 代替再生骨材はアスファルトと挙動が異なるため、アスファルト再生骨材の品質規格を適用できないことが確認された。そのため、代替再生骨材に適した方法で配合設計を行う必要がある。

## 参考文献


1) 佐々木厳、西崎到、川島陽子、新田弘之：アスファルト表層材供用 2.5 年後の曲げ性状変化における表面深さと再生方法の影響、土木学会第 72 回年次学術講演会、V-042、2017、（平成 29 年）
2) 佐々木厳、新田弘之：促進紫外線劣化試験における舗装表面のアスファルト劣化性状、土木学会論文集 E1（舗装工学）、Vol、76、No2（舗装工学論文集第 25 巻）I_211-I216、2020
3) 掛札さくら、川上篤史、藪雅行、新田弘之、山本富業：再生アスファルト混合物評価方法としてのカンタブロ損失率と圧裂強度比の関係、舗装 pp.24-29、2022.9
4) 五傳木一、寺田剛、久保和幸 : アスファルト混合物の室内熱劣化方法の検討、 第 31 回日本道路会議（2017）

# 5編　前田道路株式会社

## １．研究目的

2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて、各機関や企業での取り組みが活発化している。当社では、これまで植物由来材料を用いた水硬化型加熱アスファルト混合物を開発し、加熱アスファルト混合物の製造温度の低減を図ってきた。水硬化型加熱アスファルト混合物の製造温度の低減以外にも、素材の面から検討することで、さらなる $CO_2$ 排出量の低減が期待できる。また、持続可能な社会の実現のためには、リサイクル材を用いる再生アスファルト混合物に適用できることが重要である。

本共同研究は、カーボンニュートラルに向けた新たな舗装材料として、水硬化型混合物について素材の面から検討し、より効果的な材料を選定するとともに、再生技術への適用性を明らかにすることを目的とする。

## ２．水硬化型加熱アスファルト混合物の概要

水硬化型加熱アスファルト混合物（以下、水硬化型混合物）は添加材として、特殊潤滑油（植物由来）と反応補助材を使用する。この特殊潤滑油と反応補助材は、水を加えることで化学反応を起こし硬化する特徴がある。また、特殊潤滑油はアスファルトよりも粘度が低いため、通常の加熱アスファルト混合物よりも低い温度で施工することができる。

## ３．検討内容

本研究では、$CO_2$ 排出原単位の低い素材の検討および耐候性の検討、供用性を検討するとともに、$LCCO_2$ の低減効果を評価する。なお、本研究ではリサイクルの観点からアスファルトコンクリート再生骨材（以下、再生骨材）を使用した、再生水硬化型混合物（再生骨材配合率 50%）として検討を行う。

### ３．１　素材の検討

素材の検討では、水硬化型混合物に使用する素材について調査し、特殊潤滑油や反応補助材に代替する $CO_2$ 排出原単位の低い素材を選定し、性状を確認する。検討材料を**表 5.3.1**、評価方法および目標値を**表 5.3.2** に示す。特殊潤滑油 B および C は廃食油由来のリサイクル品であり、反応補助材②および③は副産物を一部、または全てに使用した素材である。

**表 5.3.1**　検討材料

| | |
|---|---|
| 特殊潤滑油 | 特殊潤滑油 A |
| | 特殊潤滑油 B |
| | 特殊潤滑油 C |
| 反応補助材 | 反応補助材① |
| | 反応補助材② |
| | 反応補助材③ |

**表 5.3.2** 評価方法および目標値

| 項目 | 評価方法 | 評価項目 | 目標値 |
|---|---|---|---|
| 温度低減効果 | プラント製造による評価 | 製造温度 | 40℃以上低減 |
| 施工性の改善効果 | 締固め度の算出 | 締固め度が 100%の時の温度 | 90℃以下 |
| 可使時間の確保（添加材の検討） | 締固め度の算出 | 製造後の締固め度が 99%以上 | 再生密粒度アスファルト混合物と同程度以上 |
| 初期強度の確保（早期交通開放） | ホイールトラッキング試験 | 動的安定度 | 500 回/mm 以上（養生 1 時間後の強度） |

### ３．２　耐候性の確認

再生水硬化型混合物の耐候性について評価するため、バインダおよびアスファルト混合物を土木研究所沖縄暴露場に暴露して検証を行う。**表 5.3.3** に評価方法を示す。

**表 5.3.3**　耐候性試験の評価方法

| 項目 | 評価方法 | 評価項目 | 目標 |
|---|---|---|---|
| 耐候性（バインダ） | 暴露後の供試体による DSR 試験 | 動的粘弾性状 | 再生密粒度アスファルト混合物と同程度以上 |
| 耐候性（混合物） | 暴露後の供試体による小型曲げ試験 | 曲げ破断ひずみ | 再生密粒度アスファルト混合物と同程度以上 |

### ３．３　プラント製造の検討

骨材を**表 5.3.4** に示す温度条件で加熱し、再生水硬化型混合物を製造する。再生アスファルト混合物（以下、再生混合物）はプラントでは通常、新規骨材を 170℃程度、再生骨材を 160℃程度で熱する。しかし、水硬化型混合物は水と反応する混合物のため、骨材の残留水分をできるだけ減らす必要がある。再生骨材と再生用添加剤のなじみを考慮し、再生骨材の加熱温度は 150℃とし、新規骨材の加熱温度を 110℃程度まで低減可能か検討する。再生水硬化型混合物の製造温度と通常の再生混合物の製造温度を比較し、温度低減度合から $CO_2$ 排出量をどの程度低減できるのかを確認する。

**表 5.3.4**　骨材の加熱温度

| | |
|---|---|
| 再生骨材の加熱温度（℃） | 150 |
| 新規骨材の加熱温度（℃） | 110 |

### ３．４　混合物性状の確認

選定した素材を用いた再生水硬化型混合物について**表 5.3.5** に示す混合物性状を確認する。

**表 5.3.5**　混合物性状試験項目

| 項目 | 評価方法 | 評価項目 | 目標 |
|---|---|---|---|
| 安定性<br>塑性変形抵抗性 | マーシャル安定度試験<br>ホイールトラッキング試験 | マーシャル安定度<br>動的安定度 | 4.9 kN 以上<br>500 回/mm 以上<br>（養生 1 週間後の強度） |
| ひび割れ抵抗性 | 曲げ試験 | 曲げ破断ひずみ | 再生密粒度アスファルト混合物と同程度以上 |
| 耐水性 | 水浸ホイールトラッキング試験 | 剥離率 | 再生密粒度アスファルト混合物と同程度以下 |

### ３．５　供用性の確認

土木研究所舗装走行実験場内へ施工を行い荷重車による促進載荷を行い大型車に対する供用性を確認する。

### ３．６　$LCCO_2$ の試算

土木研究所より提示された条件で $LCCO_2$ を試算し、$CO_2$ の低減効果を評価する。標準工区ではストレートアスファルトを用いた密粒度アスファルト混合物(以下､ストアス密粒)が設定されているため、比較対象はストアス密粒としている。土木研究所より提示された算出シートに混合物に使用する材料、路面の設計期間等を入力し $LCCO_2$ を試算した。今回は $N_4$ 交通量区分にて試算をした。路面の設計期間の算定は疲労破壊輪数から算出する方法と、動的安定度から算出する方法を比較し、路面の設計期間が短い方を使用する。

## ４．検討結果

### ４．１　素材の検討

水硬化型混合物に使用する特殊潤滑油および反応補助材について検討を行った。暫定配合として暴露用配合、またより $CO_2$ 排出原単位を下げるための施工用配合を検討した。

#### ４．１．１　検討材料

特殊潤滑油 A は現在水硬化型混合物で使用している添加材である。**表 5.4.1** に示すとおり $CO_2$ 排出原単位が高く、また、融点が低いため高温時には揮発して特有の臭いが発生する。そのため代替の特殊潤滑油として特殊潤滑油 B と特殊潤滑油 C の検討を行った。

検討の結果、特殊潤滑油 B および C は再生水硬化型混合物作製時に臭いの発生が抑えられた。また、特殊潤滑油 B、C は廃食油を回収しリサイクルされた素材のため、カーボンニュートラルに貢献できる材料であると考えられる。

本検討で使用する反応補助材を**表 5.4.2** に示す。現状使用している反応補助材①は $CO_2$ 排出原単位が非常に高く、カーボンニュートラルを目指す本検討において一番のネックとなっている。そこで $CO_2$ 排出原単位を下げることができる材料として反応補助材②及び反応補助材③の検討を行った。反応補助材②、③は副産物を使用したものであり、反応補助材①と比較し $CO_2$ 排出原単位が低い素材であるため、再生水硬化型混合物の $CO_2$ 排出原単位を下げることができる。

これらの特殊潤滑油、および反応補助材を組み合わせて混合物試験を行い、配合検討を行う。

**表 5.4.1**　検討する特殊潤滑油

| 名称 | 融点<br>(℃) | $CO_2$ 排出原単位<br>(kg-$CO_2$/t) ※ |
|---|---|---|
| 特殊潤滑油 A | 7 | 608.0 |
| 特殊潤滑油 B | 20～25 | 166.3 |
| 特殊潤滑油 C | 60～70 | 166.3 |

※植物が固定した $CO_2$ は含まない

**表 5.4.2**　検討する反応補助材

| 名称 | $CO_2$ 排出原単位<br>(kg-$CO_2$/t) |
|---|---|
| 反応補助材① | 900 程度 |
| 反応補助材② | 518.03 |
| 反応補助材③ | 40.36 |

### ４．１．２　暴露供試体用配合

$CO_2$ 排出原単位の高い反応補助材①に代わる反応補助材②と反応補助材③を使用した水硬化型混合物を作製し、供試体作製から温度 60℃で 1 時間養生した供試体の動的安定度（以下、初期 DS）から使用する反応補助材を決定した。反応補助材③のみでは強度発現しなかったため、反応補助材①と反応補助材③を 20:80 で混合し使用した。

**表 5.4.3** に試験結果を示す。この結果より、特殊潤滑油 A、特殊潤滑油 B は反応補助材②、特殊潤滑油 C は反応補助材①③を混合したもので暴露試験用の暫定配合を決定した。反応補助材の種類および割合は暫定であるが、水硬化型混合物の劣化性状は反応補助材の量による影響は少ないと考えるため、この配合で暴露供試体を作製し、土木研究所沖縄暴露場にて屋外暴露試験を行った。

表 5.4.3　混合物の試験結果

| 特殊潤滑油 | 反応補助材 | 初期 DS （回/mm） |
|---|---|---|
| A | ② | 1, 470 |
| | ①③ | 400 |
| B | ② | 1 ,660 |
| | ①③ | 250 |
| C | ② | 31 ,500 |
| | ①③ | 1 ,050 |

### ４．１．３　施工用配合の検討

施工用配合では暴露供試体配合よりさらに $CO_2$ 排出原単位を下げられる配合を検討した。反応補助材①と反応補助材③の添加率を変化させて強度を満足しつつ $CO_2$ 排出原単位が低くなる配合を検討した。また、特殊潤滑油 C に関してはプラントでの製造及び硬化反応の制御しづらさから施工用の検討からは除外した。

検討の結果を**表 5.4.4** に示す。配合 No.2 を施工用配合に決定した。

表 5.4.4　施工用配合の検討

| 配合 No. | 反応補助材 | 比率 | 初期 DS （回/mm） |
|---|---|---|---|
| 1 | ② | － | 570 |
| 2 | ①③ | ①:③=65:25 | 1 ,110 |
| 3 | ①③ | ①:③=55:45 | 290 |
| 4 | ①③ | ①:③=48:52 | 550 |
| 5 | ①③ | ①:③=38:62 | 950 |

### ４．２　耐候性の検討

再生水硬化型混合物の耐候性を確認するため、バインダおよび混合物の評価を行った。

### ４．２．１　実施概要

土木研究所沖縄暴露場に供試体を設置し屋外暴露を行った。実施概要を**表 5.4.5** に、供試体の設置状況を**写真 5.4.1～5.4.3** に示す.

表 5.4.5　実施概要

| | |
|---|---|
| 供試体設置日 | 2023 年 6 月 8、9 日 |
| 暴露期間 | 0.5、1、3、5 年 |
| 混合物 | 再生水硬化型混合物（特殊潤滑油 A、B、C)、再生密粒 |
| 供試体 | WT 供試体（30cm×30cm)、薄膜バインダ供試体 |
| 試験項目 | WT 供試体→曲げ試験　バインダ→DSR |





**写真 5.4.1** 設置状況全景　**写真 5.4.2** バインダ設置状況　**写真 5.4.3** 混合物設置状況

### ４．２．２　薄膜バインダの DSR 試験

一般にバインダは、紫外線劣化すると硬くなり、ひび割れが生じやすくなる。そのため暴露後のバインダを採取して DSR 試験を行った。評価は DSR 試験から求められるバインダの動的粘弾性状のうち、硬さやひび割れ抵抗性と関係が深いとされる以下の①②③の項目に着目し行い、水硬化型混合物に使用したバインダと再生密粒度アスファルト混合物(13)（以下、再生密粒）に使用した再生アスファルト（以下、再生 As）について評価した。薄膜バインダの初期状態と暴露 6 ヶ月後の状況を**写真 5.4.4～5.4.7** に示す。再生 As 及び特殊潤滑油 A 配合は 6 ヶ月経過後にひび割れが見られたが、特殊潤滑油 B、C 配合はひび割れが見られず良好な耐候性が確認された。

①|G*|（複素弾性率の絶対値）：物質の硬さを表す
②tanδ（損失正接）　　：物質の硬さを表す
③|G*|sinδ　　：疲労ひび割れと相関が高い

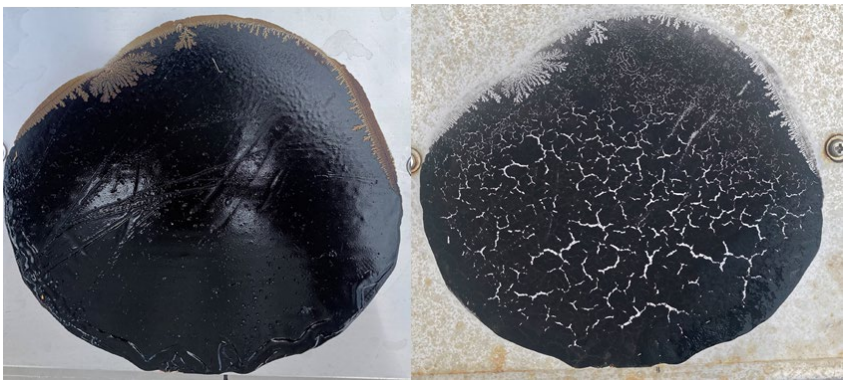


**写真 5.4.4**　特殊潤滑油 A の暴露前（左）と 6 ヶ月暴露後（右）状況

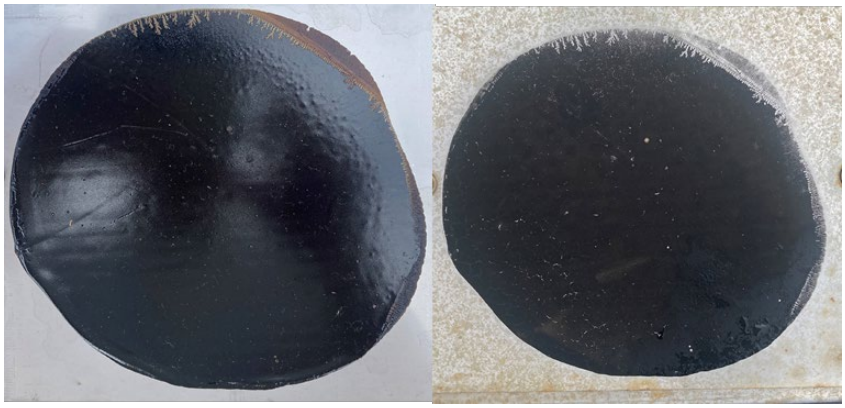


**写真 5.4.5**　特殊潤滑油 B の暴露前（左）と 6 ヶ月暴露後（右）状況

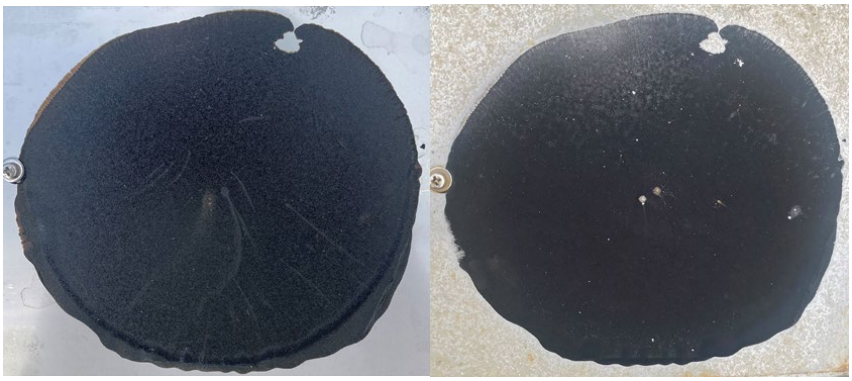


**写真 5.4.6**　特殊潤滑油 C の暴露前（左）と 6 ヶ月暴露後（右）状況

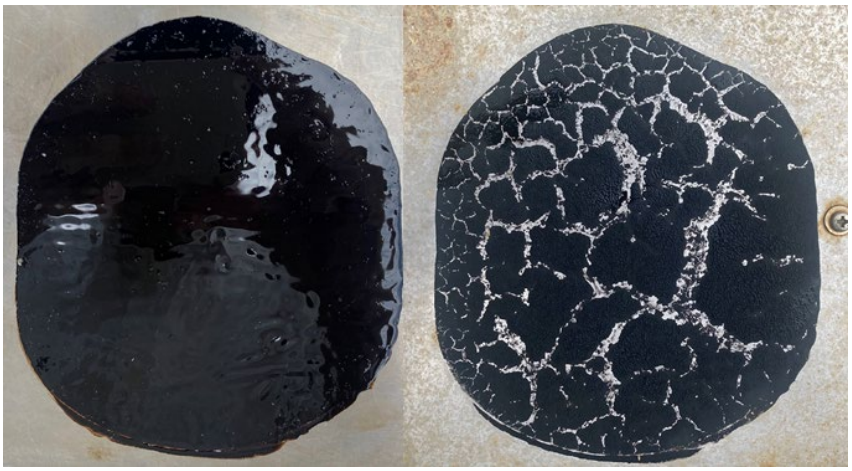


**写真 5.4.7**　再生 As の暴露前（左）と 6 ヶ月暴露後（右）状況

① |G*|（**複素弾性率の絶対値**）

DSR 試験による初期値と 6 ヶ月暴露後の|G*|と温度の関係結果を**図 5.4.1～5.4.4** に示す。なお、角周波数 10rad/s の時の条件を抜粋したものである。数値が高くなる程バインダが硬いことを示しているが、6 ヶ月暴露後の水硬化型混合物バインダと再生 As に大きな変化の違いは見られなかった。

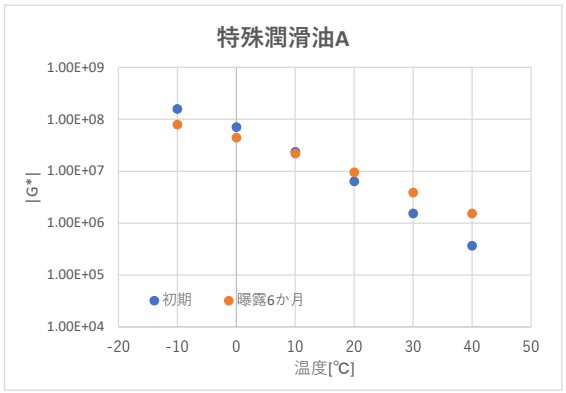



図 5.4.1　特殊潤滑油 A の|G*|と温度の関係

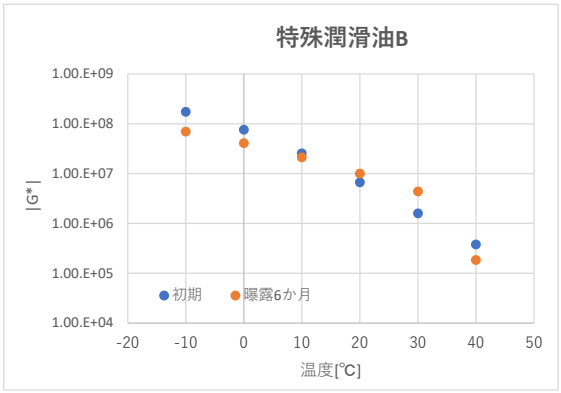



図 5.4.2　特殊潤滑油 B の|G*|と温度の関係

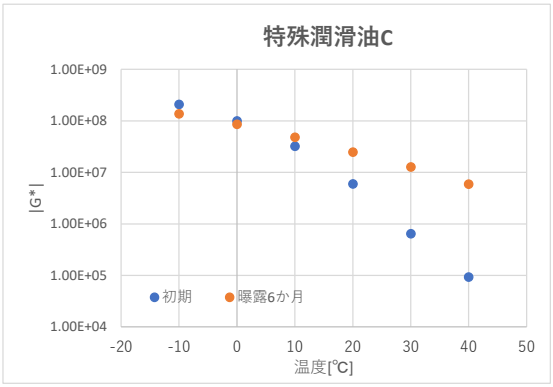



図 5.4.3　特殊潤滑油 C の|G*|と温度の関係

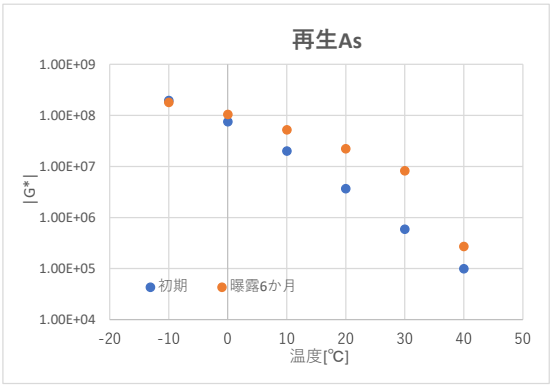



図 5.4.4 再生 As の|G*|と温度の関係

② tanδ（**損失正接**）

DSR 試験による初期値と 6 ヶ月暴露後の tanδ と温度の関係結果を**図 5.4.5～5.4.8** に示す。tanδ は数値が高いほど粘りがあり、低下するにつれ脆くなることを示している。水硬化型混合物バインダ、再生 As 共に暴露後に数値が各温度域で下がり脆くなっている傾向に大きな違いは見られなかった。

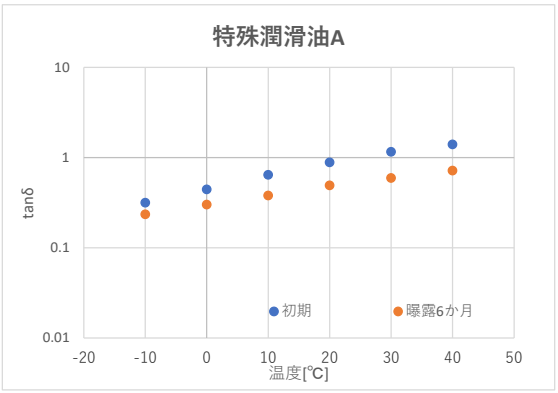



図 5.4.5 特殊潤滑油 A の tanδ と温度の関係

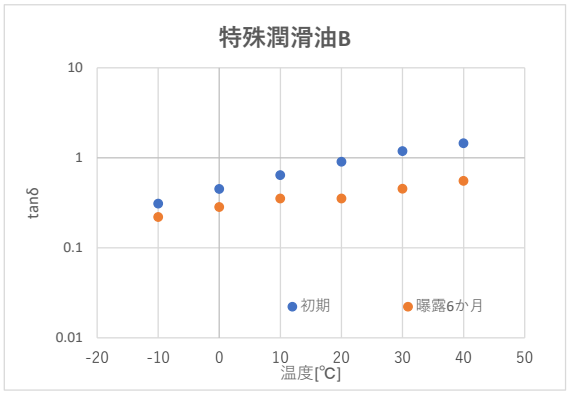



図 5.4.6 特殊潤滑油 B の tanδ と温度の関係

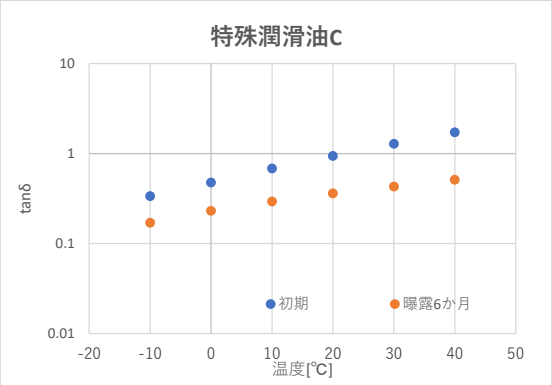



図 5.4.7　特殊潤滑油 C の tanδ と温度の関係

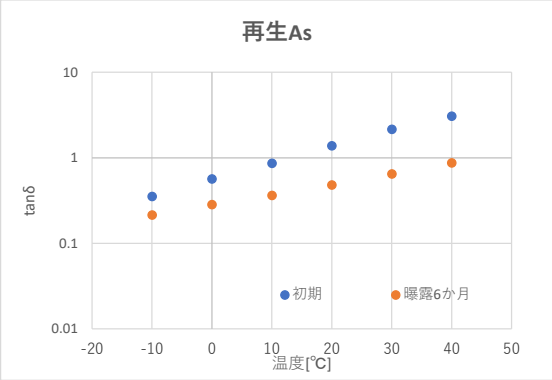



図 5.4.8　再生 As の tanδ と温度の関係

③　|G*|sinδ

DSR 試験による初期値と 6 ヶ月暴露後の|G*|sinδ と温度の関係結果を図 5.4.9～5.4.12 に示す。数値が低いほどひび割れ抵抗性が高く、高い数値を示す程ひび割れ抵抗性が低くなる。水硬化型混合物バインダは暴露後の低温域での結果が再生 As に比べ低くなる傾向があり、高温域では暴露することでひび割れ抵抗性が低くなる傾向は水硬化型混合物バインダと再生 As は同じであった。

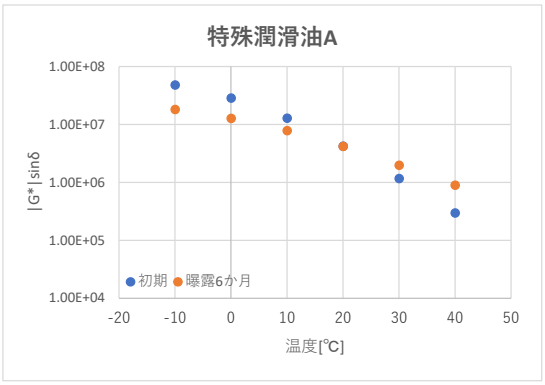



図 5.4.9　特殊潤滑油 A の|G*|sinδ と温度の関係

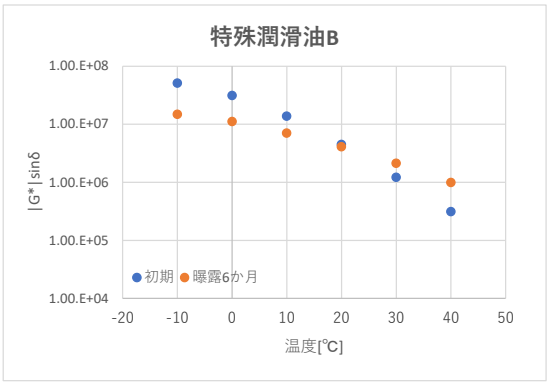



図 5.4.10　特殊潤滑油 B の|G*|sinδ と温度の関係

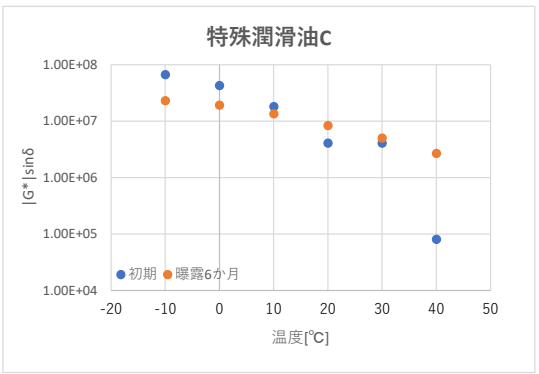



図 5.4.11　特殊潤滑油 C の|G*|sinδ と温度の関係

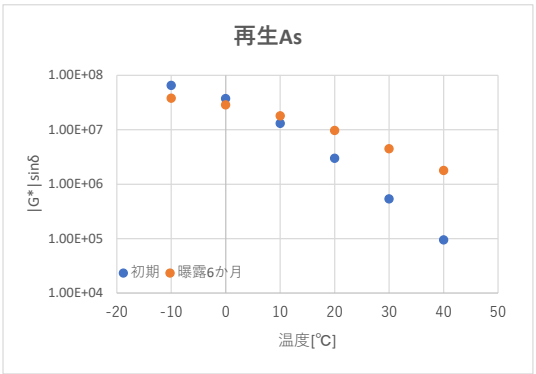



図 5.4.12　再生 As の|G*|sinδ と温度の関係

### ４．２．３　混合物での評価（小型曲げ試験）

曲げ試験の試験条件を**表 5.4.11** に示す。混合物の初期状態と暴露 6 ヶ月後の状況を**写真 5.4.8** に示す。暴露状況の写真は上から再生密粒、特殊潤滑油 A、B、C の順である。混合物の見た目はどの配合も暴露 6 ヶ月では大きな変化は見られなかった。

曲げ試験結果を**図 5.4.13～5.4.16** に示す。暴露 6 ヶ月後の曲げ試験結果はどの特殊潤滑油を使用した混合物も比較用の再生密粒と同様に曲げ破断ひずみが暴露により低下した。引き続き経時変化を見ていきたい。

**表 5.4.11**　曲げ試験の条件

| | |
|---|---|
| 供試体寸法 | 長さ 8cnm×幅 2cm×厚さ 2cm |
| 供試体切出し方法 | 供試体より暴露した上面 2cm を使用 |
| 曲げ試験の載荷方向 | 暴露面に引張応力が発生するように設置 |
| 載荷速度 | 1mm/min |
| 試験温度 | -10～30℃ |

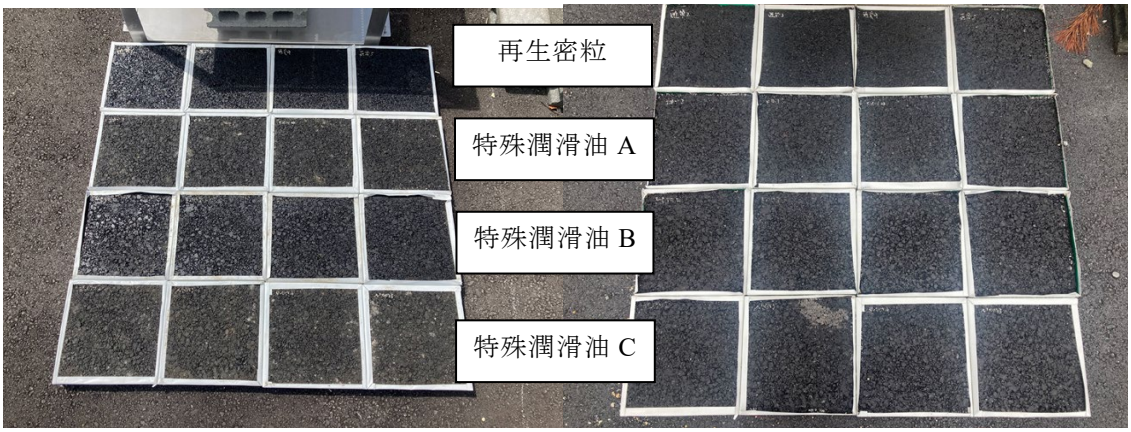



**写真 5.4.8**　暴露前（左）と 6 ヶ月暴露後（右）の混合物状況

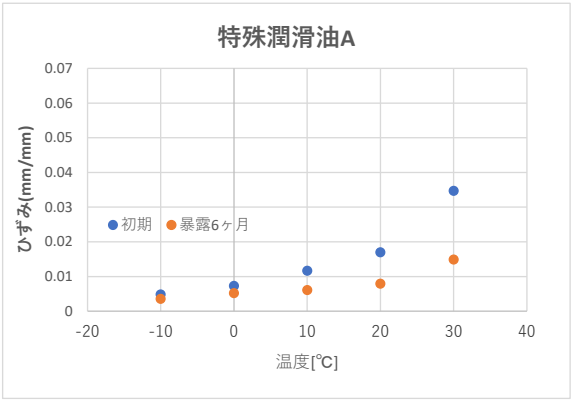



**図 5.4.13**　特殊潤滑油 A の曲げ試験結果

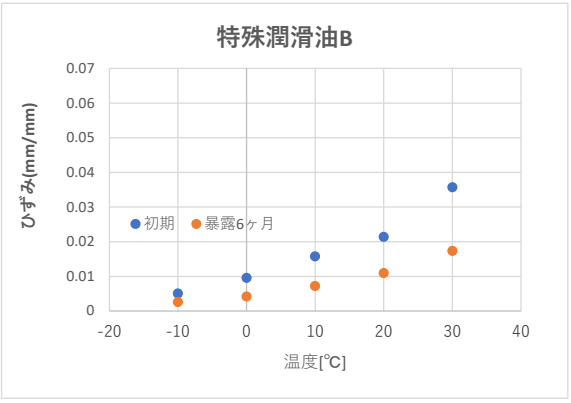



**図 5.4.14**　特殊潤滑油 B の曲げ試験結果

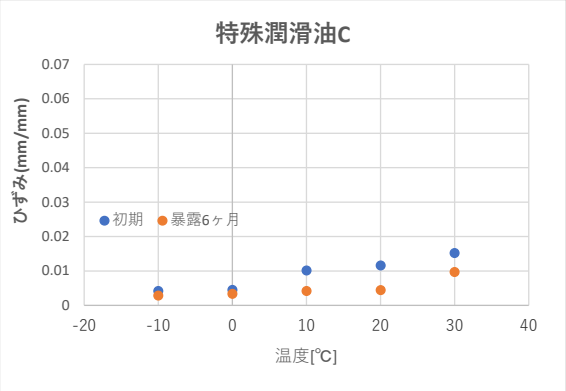



図 5.4.15　特殊潤滑油 C の曲げ試験結果

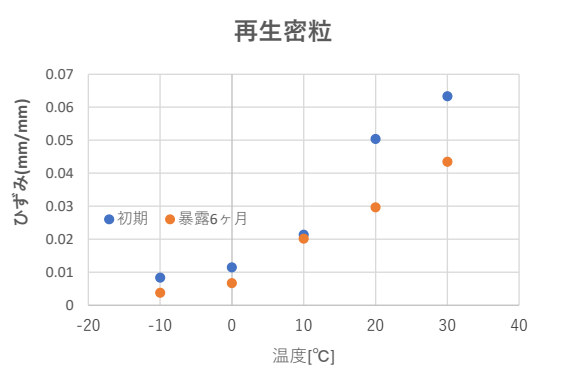



図 5.4.16　再生密粒の曲げ試験結果

## ４．３　プラント製造の検討

水硬化型混合物は製造時に水分が残っていると早期に硬化してしまうため、製造からの可使時間の検討を行った。なお、骨材の加熱は新規骨材が 110℃、再生骨材は 150℃で行った。製造時からの水硬化型混合物の可使時間の評価結果を**図 5.4.17** に示す。検討の結果、製造から 6 時間経過後も 99%以上の締固め度が得られている。このことから、骨材加熱温度は問題ないことが確認できた。次に、製造温度を低減したことによる燃料消費量の削減効果を計算した。プラント製造時の重油消費量の計算は**図 5.4.18** に示す中温化（低炭素）アスファルト舗装の手引きを参考に求めた。再生密粒製造時と再生水硬化型混合物製造時の骨材加熱温度と重油消費量を**表 5.4.12** に示す。再生水硬化型混合物の製造温度を 130℃にするため、新規骨材の加熱温度を 60℃、再生骨材の加熱温度を 10℃下げることで、製造時に消費する重油消費量を 21.8%低減することができた。

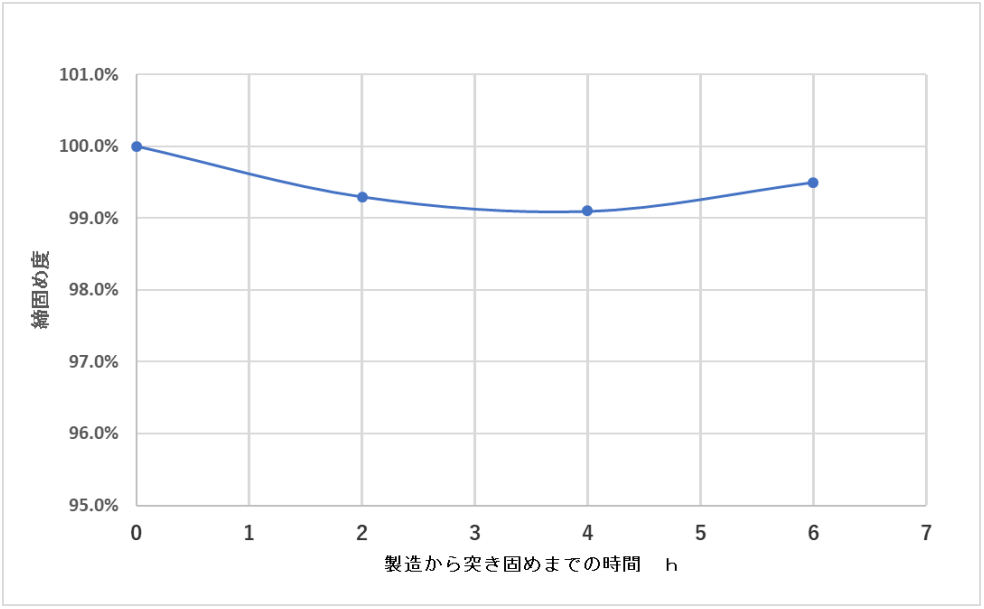



図 5.4.17　製造からの可使時間

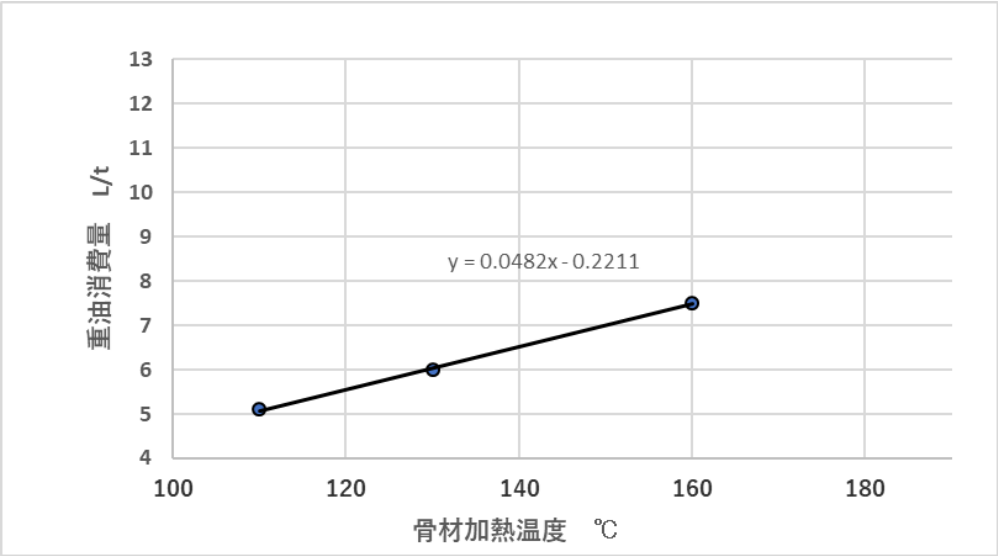



**図 5.4.18** 骨材加熱温度と燃料消費量の関係

**表 5.4.12** 骨材加熱温度

| | 再生骨材<br>加熱温度<br>（℃） | 新規骨材<br>加熱温度<br>（℃） | 重油消費量（L）<br>※ | 削減率<br>（%） |
|---|---|---|---|---|
| 再生密粒 | 160 | 170 | 6,185.52 | - |
| 再生水硬化型混合物 | 150 | 110 | 4,835.92 | 21.8 |

※重油消費量は合材製造 800t あたり

### ４．４　混合物性状

再生水硬化型混合物および比較混合物として通常の再生密粒の混合物性状を**表 5.4.13** に示す。再生水硬化型混合物は概ね再生密粒と同等の混合物性状を有しているが、曲げ破断ひずみにおいては再生密粒より劣る試験結果が得られた。

**表 5.4.13**　再生水硬化型混合物と通常再生密粒の混合物性状の比較

| 試験項目 | 評価項目 | 再生水硬化型混合物 | 通常再生密粒 | 備考 |
|---|---|---|---|---|
| マーシャル安定度試験 | マーシャル安定度（60℃）　（kN） | 11.5 | 9.4 | 養生 1 週間後に試験 |
| ホイールトラッキング試験 | 動的安定度（DS）（60℃）　（回/mm） | 21, 000 | 1, 050 | |
| 水浸マーシャル安定度試験 | 残留安定度（%） | 132.2 | 91.4 | |
| 水浸ホイールトラッキング試験 | 剥離率（%） | 1.8 | 1.0 | |
| 曲げ試験 | 曲げ強度（-10℃）（MPa） | 6.72 | 7.66 | |
| | 曲げ破断ひずみ（-10℃）（mm/mm） | $3.84\times10^{-3}$ | $8.91\times10^{-3}$ | |

## ４．５　土木研究所舗装走行実験場での供用性確認

土木研究所内の舗装走行実験場に再生水硬化型混合物と比較混合物として密粒度アスファルト混合物（13）改質Ⅱ型（以下、改質密粒）を施工し、供用性の確認を行った。

### ４．５．１　試験概要

本研究において、再生水硬化型混合物の比較対象は通常の再生密粒としているが、走行実験場で評価するには DS が低く早期のわだち掘れが懸念されることから、現場比較用は改質密粒とした。**表 5.4.14** に施工する混合物の種類、**図 5.4.19**、**5.4.20** に平面図および断面図を示す。なお、本検討では冬季施工となったため、再生水硬化型混合物の出荷温度は当日の気温と運搬距離を考慮し 140℃を目標として出荷した。

**表 5.4.14**　施工混合物の種類

| | 配合 | | 目標温度（℃） | |
|---|---|---|---|---|
| | 混合物種類 | バインダ | 出荷 | 初期転圧 |
| 表層 | 再生水硬化型混合物 | ストレートアスファルト+特殊潤滑油 B | 140 | 90 以上 |
| | 密粒度アスコン（13） | 改質Ⅱ型 | 175 | 155 |
| 基層 | 粗粒度アスコン（20） | 改質Ⅱ型 | 175 | 155 |

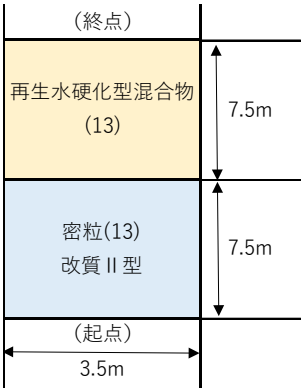



**図 5.4.19**　平面図

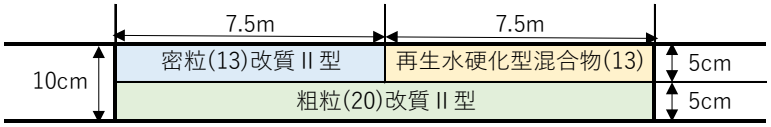



**図 5.4.20**　断面図

### ４．５．２　施工状況

施工時の再生水硬化型混合物の温度管理結果を**表 5.4.15** に示す。施工状況を**写真 5.4.9～5.4.12** に示す。出荷温度、初期転圧温度はともに目標温度を満足した。

再生水硬化型混合物の施工では終点の施工に時間を要したが、概ね施工は問題なく完了した。

**表 5.4.15**　再生水硬化型混合物の温度管理

| | 出荷 | 到着 | 敷きならし | 初期転圧 |
|---|---|---|---|---|
| 温度（℃） | 143 | 132 | 105 | 98 |



**写真 5.4.9**　再生水硬化型混合物の荷下ろし状況



**写真 5.4.10**　施工完了



**写真 5.4.11** 改質密粒（左）、
再生水硬化型混合物（右）



**写真 5.4.12**　再生水硬化型混合物表面

### ４．５．３　現場計測データ

施工後の調査は、FWD によるたわみ量測定と MRP によるわだち掘れ量の測定を行った。FWD によるたわみ量測定の結果を**表 5.4.16** に示す。また、**図 5.4.21** に FWD、MRP 試験の測点、MRP によるわだち掘れ量の測定結果を**表 5.4.17**、横断形状の測定結果を**図 5.4.22～5.4.27** に示す。なお、FWD によるたわみ量は温度を 20℃、荷重を 49kN に補正した値である。10 万輪走行時点ではたわみ量の変化はどちらも無く、わだち掘れ量は再生水硬化型混合物と改質密粒に大きな差はなかった。

**表 5.4.16**　FWD による $D_0$ たわみ量の結果

| 項目 | | 再生水硬化型混合物 | | 改質密粒 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | BWP | OWP | BWP | OWP |
| $D_0$ (μm) | 初期値 | 561 | 587 | 484 | 583 |
| | 10 万輪走行後 | 637 | 521 | 456 | 588 |

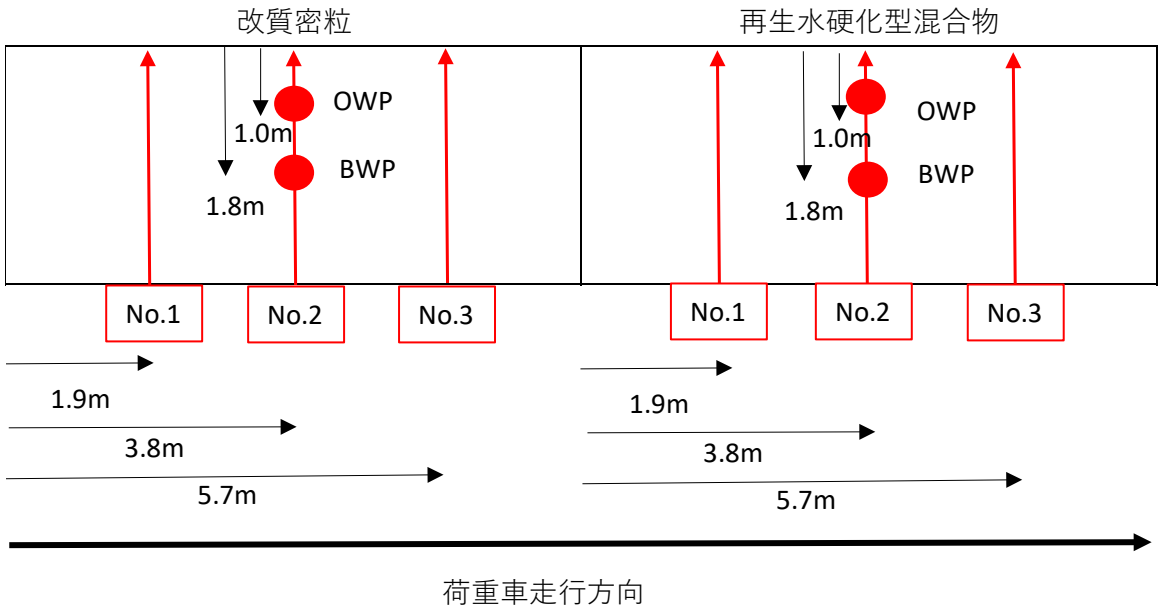



図 5.4.21　測点

表 5.4.17　わだち掘れ量の測定結果

| | | 再生水硬化型混合物 | | | 改質密粒 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | No.1 | No.2 | No.3 | No.1 | No.2 | No.3 |
| わだち掘れ量（mm） | 10 万輪走行後 | 1.2 | 2.5 | 2.6 | 1.8 | 1.9 | 1.3 |

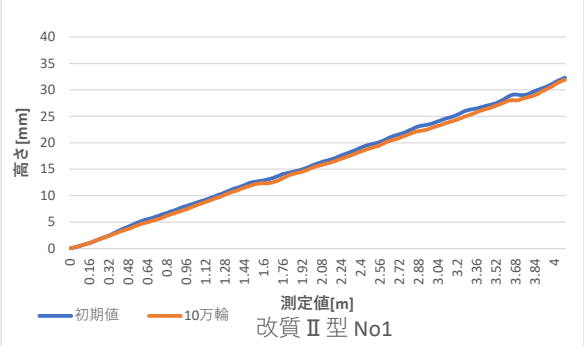



図 5.4.22　MRP 測定　改質Ⅱ型 No.1

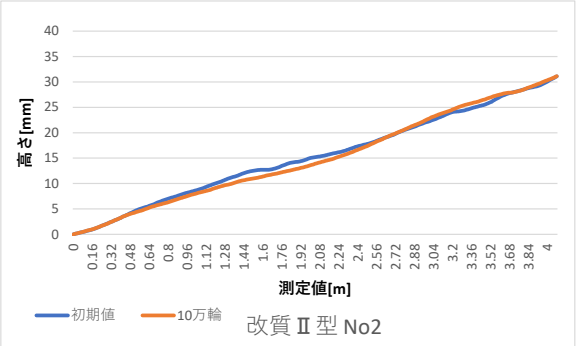



図 5.4.23　MRP 測定　改質Ⅱ型 No.2

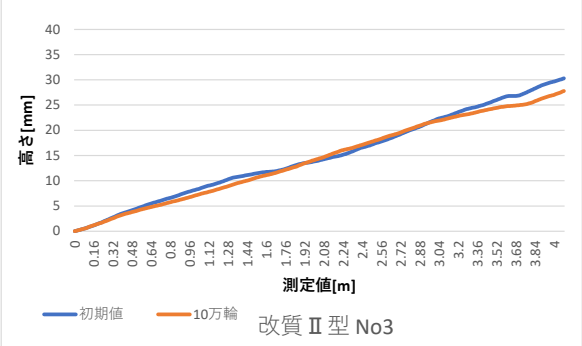



図 5.4.24　MRP 測定　改質Ⅱ型 No.3

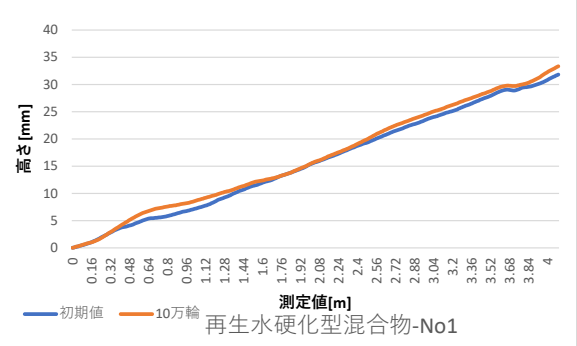



図 5.4.25　MRP 測定　再生水硬化型混合物 No.1

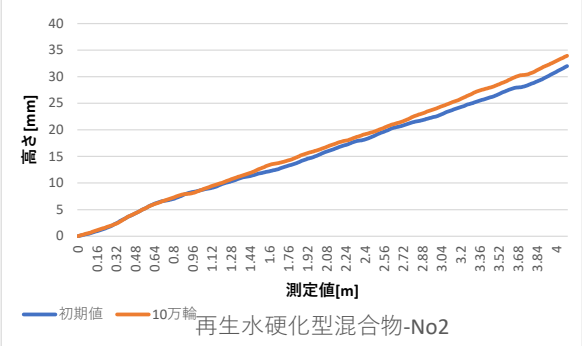



図 5.4.26 MRP 測定　再生水硬化型混合物 No.2

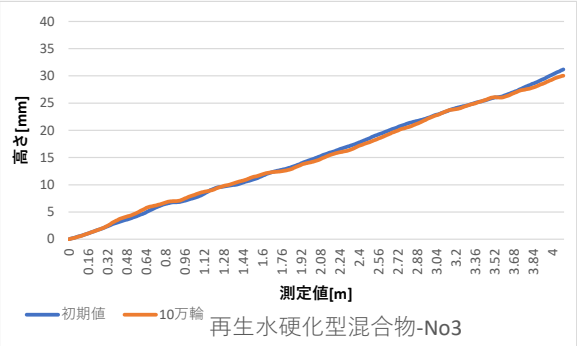



図 5.4.27MRP 測定　再生水硬化型混合物 No.3

## ４．６　$LCCO_2$ の試算

土木研究所より提示された算出シートに混合物に使用する材料、路面の設計期間等を入力し $LCCO_2$ を試算した。標準工区ではストアス密粒が設定されているため、比較対象はストアス密粒としている。また、今回は $N_4$ 交通量区分にて試算をした。路面の設計期間の算定は疲労破壊輪数から算出する方法と、動的安定度から算出する方法を比較し、路面の設計期間が短い方を使用する。今回疲労破壊輪数の算出で評価した舗装断面を**表 5.4.18** に示す。

**表 5.4.18**　舗装断面

| 項目 | 工法・材料 | 舗装断面（cm） |
|---|---|---|
| 表層 | 再生水硬化型混合物<br>密粒度アスコン | 5 |
| 上層路盤 | 粒度調整砕石 M-30 | 15 |
| 下層路盤 | 切込砕石 C-40 | 40 |

### ４．６．１　動的安定度による路面の設計期間の試算

ここでは、アスファルト混合物の室内試験で得られたホイールトラッキング試験の結果から動的安定度～わだち掘れ量～供用期間の関係を示す式を使用してわだち掘れ量を算出し、設定したわだち掘れ量に到達するまでの年数を試算して路面の設計期間を算出する。わだち掘れ量は、舗装調査・試験法便覧に示されている式（B003・4）から試算する。

試算条件を**表 5.4.19** に示す。わだち掘れによる破壊は、わだち掘れ量が 40mm に到達する年数を破壊とみなし、路面の設計期間とした。

$$D = 0.679 \times \frac{Y \times L \times W \times V \times T}{DS} \quad （式 B003・4）$$

D:わだち掘れ量（mm）
Y:供用期間（日）
L:日大型交通量（台/日・車線）
W:輪荷重補正係数
V:走行速度補正係数
T:温度補正係数
DS:動的安定度（回/mm）

**表 5.4.19**　試算条件

| 設定項目 | 設定条件 | 備考 |
|---|---|---|
| 供用期間（日） | 3,650 | 10 年 |
| 日大型車交通量（台/日・車線） | 250 | $N_4$ 交通量区分 |
| 輪荷重補正係数 | 3.0 | 重い車両が非常に多い |
| 走行速度補正係数 | 0.4 | 一般部 |
| 温度補正係数（$\times 10^{-3}$） | 15 | 関東近辺を参照 |
| 動的安定度（回/mm） | 室内試験結果 | |

#### （１）　路面の設計期間の試算

**表 5.4.20** に式 B003・4 で試算した路面の設計期間の結果を示す。わだち掘れ量からの試算ではストアス密粒は 18 年、再生水硬化型混合物は 753 年と試算された。

**表 5.4.20**　路面の設計期間の試算結果

| 混合物 | 動的安定度（回/mm） | 10 年でのわだち掘れ量（mm） | 40mm に到達する年数（年） |
|---|---|---|---|
| ストアス密粒 | 500 | 22.3 | 18 |
| 再生水硬化型混合物 | 21,000 | 0.5 | 753 |

### ４．６．２　疲労破壊輪数による路面の設計期間の試算

再生水硬化型混合物の路面の設計期間の算出を行い、$LCCO_2$の算定を行う。まず、レジリエントモジュラス試験により弾性係数を算出し、その後舗装構造解析プログラム「GAMES」を使用しひずみを求めた後、暫定破壊規準式により疲労破壊輪数を算出して、路面の設計期間を求めた。路面の設計期間の算定フローを**図 5.4.28** に示す。

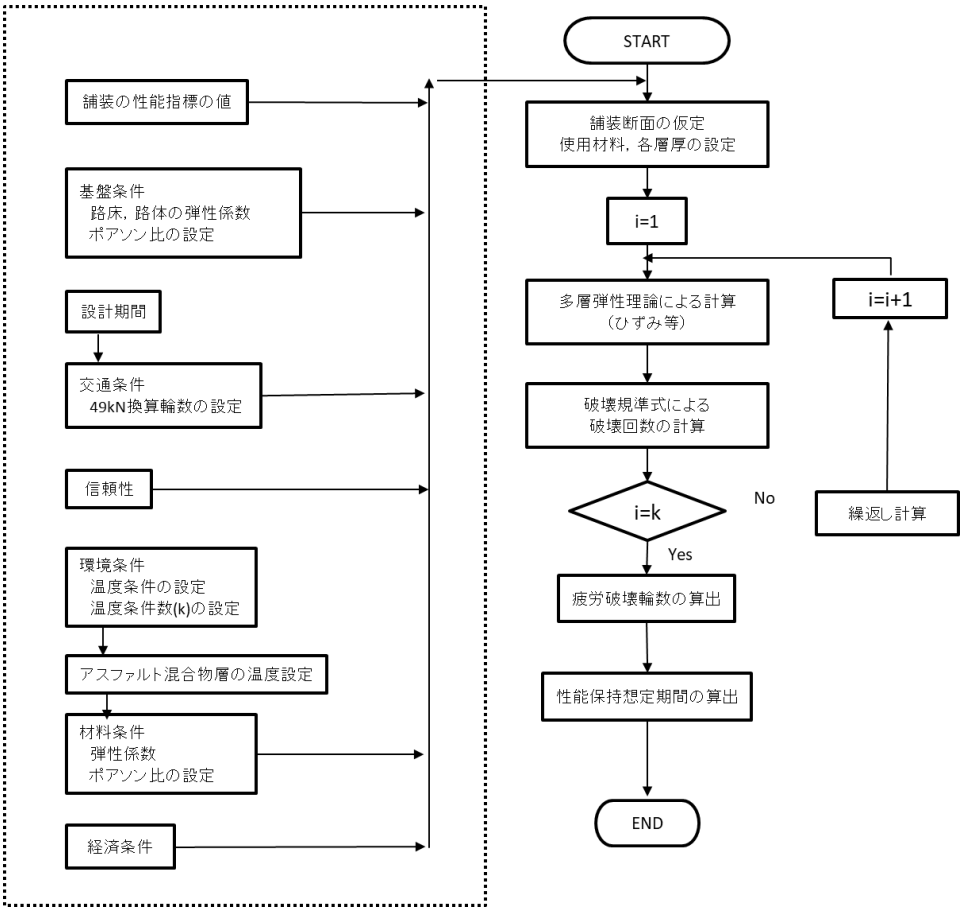



**図 5.4.28**　路面の設計期間の算定フロー図

#### （ア）　弾性係数の試算

レジリエントモジュラス試験にて再生水硬化型混合物と比較対象のストアス密粒の弾性係数を試算した。**表 5.4.21** に試験条件、**表 5.4.22**、**図 5.4.29** にレジリエントモジュラス試験で求めた温度毎の弾性係数を示す。

表 5.4.21　試験条件

| 項目 | 試験条件 |
|---|---|
| 荷重波形 | ハーバーサイン波 |
| 載荷周波数 | 1Hz（載荷 0.1 秒、休止 0.9 秒） |
| 載荷荷重 | 圧裂引張強度の 50% |
| 試験温度 | 5℃、25℃、40℃ |

表 5.4.22　レジリエントモジュラス試験の結果

| | 全復元レジリエントモジュラス　（MPa） | | |
|---|---|---|---|
| | 5℃ | 25℃ | 40℃ |
| 再生水硬化型混合物 | 10,517 | 4,049 | 1,783 |
| ストアス密粒 | 17,896 | 4,758 | 856 |

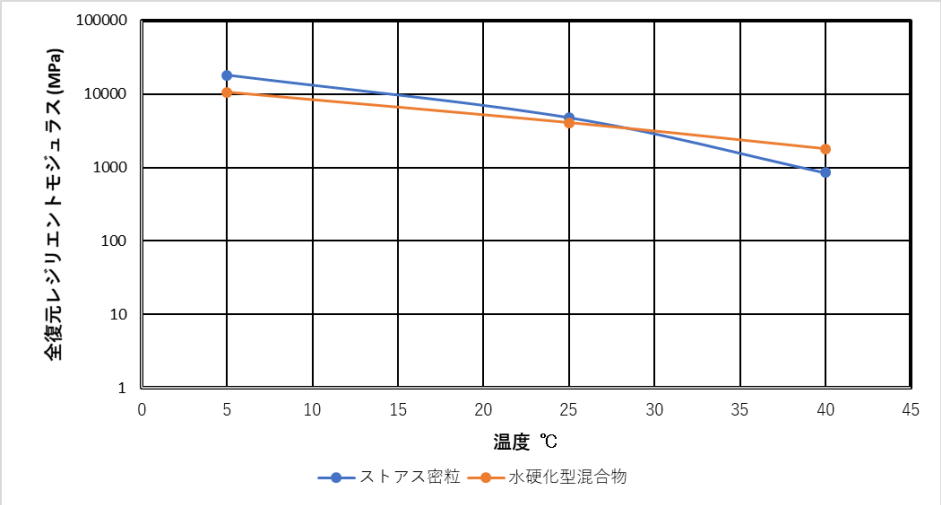



図 5.4.29 レジリエントモジュラス試験の結果

**（イ）　理論的設計方法による試算**

路面の設計期間を設定するために、多層弾性理論にもとづく舗装構造解析プログラム「GAMES」を使用しストアス密粒と再生水硬化型混合物の疲労破壊輪数を算出した。疲労破壊輪数の算出には舗装設計便覧に示されている気温とアスファルト混合物層の温度の関係式（5.3.3)、アスファルト混合物層の暫定破壊規準式式（5.3.4）および式（5.3.7）を使用した。再生水硬化型混合物に関してもストアス密粒と同様の破壊規準式式（5.3.4）を元に算出した。路床の破壊規準式は式（5.3.5）を使用した。**表 5.4.23～5.4.25** に構造設計条件を、**表 5.4.26** にストアス密粒、再生水硬化型混合物のアスファルト混合物層構造設計結果を、**表 5.4.27** に路床の構造設計結果を示す。

算出した結果、再生水硬化型混合物、ストアス密粒ともにアスファルト混合物層で破壊する結果が得られた。それぞれ疲労破壊輪数は再生水硬化型混合物が 224、034 回、ストアス密粒が 159、048 回であり、再生水硬化型混合物が優位となる結果が得られた。

$$Mp = Ma\left[1 + \frac{2.54}{z+10.16}\right] - \frac{25.4}{9(z+10.16)} + \frac{10}{3} \qquad \text{式（5.3.3）}$$

$$N_{fa} = \beta_{a1} \cdot C \cdot (6.167\times10^{-5} \cdot \varepsilon_t^{-3.291\beta_{a2}E^{-0.854\beta_{a3}}}) \qquad \text{式（5.3.4）}$$

$$N_{fa.d} = 1\Big/\left(\frac{1}{12}\sum_{i=1}^{12}\frac{1}{N_{fa.i}}\right) \qquad \text{式（5.3.7）}$$

$$N_{fs} = \beta_{s1} \cdot (1.365\times10^{-9} \cdot \varepsilon_z^{-4.477\beta_{s2}}) \qquad \text{式（5.3.5）}$$

**表 5.4.23**　設計条件

| 項目 | | 設定した設計条件 |
|---|---|---|
| 設定された舗装の目標 | 舗装の設計期間　（年） | 10 |
| | 舗装の計画交通量 | $N_4$ |
| | 疲労破壊輪数　（回） | 150,000 |
| | 信頼度　（%） | 90 |
| 基盤条件 | 路床土の弾性係数とポアソン比 | **表 5.4.25**～**表 5.4.27** 参照 |
| 環境条件 | 気温 | |
| 材料条件 | 舗装各層の弾性係数とポアソン比 | |

**表 5.4.24** 再生水硬化型混合物の設計条件

| 月 | 月平均気温（℃） | 表層（5cm）平均気温（℃） | 弾性係数（MPa） | | | | ポアソン比 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 表層 | 上層路盤 | 下層路盤 | 路床 | 舗装各層 | 路床 |
| 1 月 | 5 | 9 | 8,915 | 300 | 200 | 40 | 0.35 | 0.4 |
| 2 月 | 5 | 9 | 8,915 | | | | | |
| 3 月 | 8 | 12 | 7,635 | | | | | |
| 4 月 | 14 | 19 | 5,438 | | | | | |
| 5 月 | 18 | 24 | 4,242 | | | | | |
| 6 月 | 21 | 28 | 3,485 | | | | | |
| 7 月 | 25 | 32 | 2,665 | | | | | |
| 8 月 | 26 | 34 | 2,493 | | | | | |
| 9 月 | 23 | 30 | 3,048 | | | | | |
| 10 月 | 17 | 23 | 4,521 | | | | | |
| 11 月 | 12 | 17 | 6,117 | | | | | |
| 12 月 | 7 | 11 | 8,048 | | | | | |

**表 5.4.25** ストアス密粒の設計条件

| 月 | 月平均気温（℃） | 表層（5cm）平均温度（℃） | 弾性係数（MPa） | | | | ポアソン比 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 表層 | 上層路盤 | 下層路盤 | 路床 | 舗装各層 | 路床 |
| 1 月 | 5 | 9 | 14,555 | 300 | 200 | 40 | 0.35 | 0.4 |
| 2 月 | 5 | 9 | 14,555 | | | | | |
| 3 月 | 8 | 12 | 11,916 | | | | | |
| 4 月 | 14 | 19 | 7,472 | | | | | |
| 5 月 | 18 | 24 | 5,127 | | | | | |
| 6 月 | 21 | 28 | 3,693 | | | | | |
| 7 月 | 25 | 32 | 2,213 | | | | | |
| 8 月 | 26 | 34 | 1,920 | | | | | |
| 9 月 | 23 | 30 | 2,891 | | | | | |
| 10 月 | 17 | 23 | 5,667 | | | | | |
| 11 月 | 12 | 17 | 8,829 | | | | | |
| 12 月 | 7 | 11 | 12,765 | | | | | |

表 5.4.26　アスファルト混合物層の構造設計結果

| 舗装断面 No. | 月 | アスファルト混合物層の破壊回数 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 引張りひずみ $\varepsilon_t$ | $N_{fa}$ | $N_{fa.d}$ | $N_{fa.d/\gamma R}$ |
| ストアス密粒 | 1 月 | 1.878E-04 | 3.155E+05 | 636,194 | 159,048 |
| | 2 月 | 1.878E-04 | 3.155E+05 | | |
| | 3 月 | 2.038E-04 | 3.711E+05 | | |
| | 4 月 | 2.404E-04 | 6.048E+05 | | |
| | 5 月 | 2.666E-04 | 1.021E+06 | | |
| | 6 月 | 2.843E-04 | 1.803E+06 | | |
| | 7 月 | 2.966E-04 | 5.612E+06 | | |
| | 8 月 | 2.959E-04 | 8.180E+06 | | |
| | 9 月 | 2.929E-04 | 2.978E+06 | | |
| | 10 月 | 2.601E-04 | 8.775E+05 | | |
| | 11 月 | 2.276E-04 | 4.984E+05 | | |
| | 12 月 | 1.983E-04 | 3.499E+05 | | |
| 再生水硬化型混合物 | 1 月 | 2.269E-04 | 4.717E+05 | 896,136 | 224,034 |
| | 2 月 | 2.269E-04 | 4.717E+05 | | |
| | 3 月 | 2.388E-04 | 5.635E+05 | | |
| | 4 月 | 2.628E-04 | 8.923E+05 | | |
| | 5 月 | 2.775E-04 | 1.338E+06 | | |
| | 6 月 | 2.867E-04 | 1.929E+06 | | |
| | 7 月 | 2.947E-04 | 3.420E+06 | | |
| | 8 月 | 2.958E-04 | 4.000E+06 | | |
| | 9 月 | 2.914E-04 | 2.540E+06 | | |
| | 10 月 | 2.741E-04 | 1.199E+06 | | |
| | 11 月 | 2.549E-04 | 7.521E+05 | | |
| | 12 月 | 2.348E-04 | 5.293E+05 | | |

**表 5.4.27　路床の構造設計結果**

| 舗装断面 No. | 月 | 路床の破壊回数 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 引張りひずみ $\varepsilon_t$ | $N_{fa}$ | $N_{fa.d}$ | $N_{fa.d/\gamma R}$ |
| ストアス密粒 | 1 月 | -3.570E-04 | 1.272E+07 | 10,171,690 | 2,542,923 |
| | 2 月 | -3.570E-04 | 1.272E+07 | | |
| | 3 月 | -3.628E-04 | 1.200E+07 | | |
| | 4 月 | -3.747E-04 | 1.066E+07 | | |
| | 5 月 | -3.833E-04 | 9.803E+06 | | |
| | 6 月 | -3.905E-04 | 9.153E+06 | | |
| | 7 月 | -4.022E-04 | 8.214E+06 | | |
| | 8 月 | -4.057E-04 | 7.963E+06 | | |
| | 9 月 | -3.960E-04 | 8.697E+06 | | |
| | 10 月 | -3.810E-04 | 1.002E+07 | | |
| | 11 月 | -3.706E-04 | 1.109E+07 | | |
| | 12 月 | -3.608E-04 | 1.223E+07 | | |
| 再生水硬化型混合物 | 1 月 | -3.704E-04 | 1.112E+07 | 9,714,304 | 2,428,576 |
| | 2 月 | -3.704E-04 | 1.112E+07 | | |
| | 3 月 | -3.742E-04 | 1.071E+07 | | |
| | 4 月 | -3.820E-04 | 9.928E+06 | | |
| | 5 月 | -3.875E-04 | 9.420E+06 | | |
| | 6 月 | -3.918E-04 | 9.043E+06 | | |
| | 7 月 | -3.979E-04 | 8.548E+06 | | |
| | 8 月 | -3.994E-04 | 8.428E+06 | | |
| | 9 月 | -3.948E-04 | 8.793E+06 | | |
| | 10 月 | -3.861E-04 | 9.547E+06 | | |
| | 11 月 | -3.793E-04 | 1.018E+07 | | |
| | 12 月 | -3.729E-04 | 1.084E+07 | | |

**（ウ） 路面の設計期間の算定**

**表 5.4.26** より算出した疲労破壊輪数を元に路面の設計期間の算定をした。**表 5.4.28** に N4 交通量区分時の 10～15 年の 1 年毎の疲労破壊輪数を示す。**表 5.4.29** よりストアス密粒の路面の設計期間は 10.6 年、再生水硬化型混合物は 14.9 年となる。比較のストアス密粒の路面の設計期間を 10 年とすると、再生水硬化型混合物の路面の設計期間は 14 年となる。

**表 5.4.28** $N_4$ 交通量区分の疲労破壊輪数

| 舗装の設計期間（年） | 疲労破壊輪数（回） |
|---|---|
| 10 | 150,000 |
| 11 | 165,000 |
| 12 | 180,000 |
| 13 | 195,000 |
| 14 | 210,000 |
| 15 | 225,000 |

**表 5.4.29** 路面の設計期間の算定

| | 疲労破壊輪数（回） | 路面の設計期間（年） | ストアス密粒を 10 年とした場合の路面の設計期間（年） |
|---|---|---|---|
| ストアス密粒 | 159,048 | 10.6 | 10 |
| 再生水硬化型混合物 | 224,034 | 14.9 | 14 |

**４．６．３ $LCCO_2$ の試算**

土木研究所が作成した $LCCO_2$ 試算シートを用いて再生水硬化型混合物とストアス密粒の $LCCO_2$ を算出した。$LCCO_2$ は施工面積 5300m$^2$ の $N_4$ 交通でライフサイクル 100 年の期間を評価した。評価は資材調達から建設、修繕を含めた範囲で行い、路面の設計期間経過で表層の切削オーバーレイ、次の路面の設計期間経過で舗装全層の打ち換えを繰り返す。

路面の設計期間は、動的安定度による試算と疲労破壊輪数によるによる試算を比較すると、疲労破壊輪数による試算のほうが短く、早く破壊に至ると想定されることから、疲労破壊輪数による試算から求めた路面の設計期間を $LCCO_2$ の試算に使用する。

**表 5.4.30** に再生水硬化型混合物とストアス密粒の $LCCO_2$ 試算結果を示す。ストアス密粒と比較し再生水硬化型混合物は材料原単位で 8.5%、$LCCO_2$ は 34.4%削減できる試算となった。

表 5.4.30　$LCCO_2$ 算定結果

| | 材料の $CO_2$ 原単位（kg-$CO_2$/t） | $LCCO_2$（kg-$CO_2$・年/$m^2$） | 材料原単位削減率（%） | $LCCO_2$ 削減率（%） |
|---|---|---|---|---|
| ストアス密粒 | 56.34 | 1.92 | － | － |
| 再生水硬化型混合物 | 51.54 | 1.26 | 8.5 | 34.4 |

## ５．まとめ

本共同研究は、カーボンニュートラルに向けた新たな舗装材料として、水硬化型混合物について素材の面から検討し、より効果的な材料を選定するとともに、$LCCO_2$ 削減効果を明らかにした。得られた結果は以下のとおりである。

・再生水硬化型混合物に使用する特殊潤滑油は廃食油由来のリサイクル品を使用し、反応補助材は現在使用しているものと比較し $CO_2$ 排出原単位の低い材料を選定した。
・暴露試験により、水硬化型混合物バインダは通常再生密粒と同等の耐候性を有していることが確認された。
・再生水硬化型混合物は通常加熱再生密粒と概ね同等の混合物性状を有しているが、曲げ破断ひずみにおいては劣る結果となった。
・舗装走行実験場での荷重車による促進載荷実験では、10 万輪経過時点でわだち掘れは無く比較の改質密粒と同程度の供用性が得られている。
・再生水硬化型混合物は $LCCO_2$ において、路面の設計期間と材料の $CO_2$ 排出原単位がストアス密粒より優れていることが試算でき、材料の原単位で 8.4%削減、$LCCO_2$ は 34.4%削減することができ、カーボンニュートラルに貢献できる材料であることを確認した。

## ６．今後の課題

本共同研究で得られた水硬化型混合物についての今後の課題は以下のとおりである。

・再生水硬化型混合物の混合物性状の中で、曲げ破断ひずみにおいて通常再生密粒に劣る部分がある。ひび割れ抵抗性、疲労抵抗性について検討を引き続き行う。
・水硬化型混合物は専用のアスファルトフィニッシャを使用するが、施工において端部を人力で施工する部分はローラの入るタイミングや散水のタイミングなど、施工時の課題を検討していく。

# 6編　東亜道路工業株式会社

## １．研究概要

近年、カーボンニュートラル実現に向けた取り組みが活発化しており、今後産業構造が大きく変化することが予想される中で、石油精製量は今後減少する見込みであり、これに伴いアスファルトの生産量も減少することが見込まれる。また、製油所の統廃合によりアスファルト生産拠点が減少傾向にあることや、3 割近くを輸入に依存している状況であることから、アスファルトの安定した供給が困難となった場合に、アスファルトの代替となる舗装材料が必要となる。

現在、アスファルトや、その添加剤（改質材や再生用添加剤など）は、石油由来の原料から製造されているが、非石油由来の原料でも製造できるようになれば、代替材料の検討幅が広がるものと考えられる。特に近年では、SDGs の達成やカーボンニュートラル実現を目指すために植物由来材料の利用が着目されている。植物由来材料は原材料の成長過程で光合成により二酸化炭素を吸収しており、これを舗装材料として使用することで副次的に炭素を固定化することができる。国内外において植物由来樹脂を用いた再生用添加剤や舗装材料の開発が進みつつあるが、実用化には至っていない。

このような背景から、土木研究所 iMaRRC および舗装チームと東亜道路工業の共同研究として「カーボンニュートラルに向けた新たな舗装材料開発に関する基礎研究」（令和 4 年 9 月 1 日～令和 6 年 3 月 31 日）を実施してきた。

東亜道路工業は、アスファルト代替の可能性のある材料として植物由来樹脂を開発してきた。本材料は高いバイオマス度（80%以上）を有しており、アスファルトの改質材や防水材への利用として実用段階へ発展させたが、アスファルト混合物のバインダの 100%代替については開発段階である。本共同研究では、100%アスファルト代替技術の確立を目的として植物由来樹脂を用いた設計方法、配合設計方法の提案を目的とした実験および調査を進めてきた。また舗装走行実験場を活用した実大舗装促進載荷試験では、100%アスファルト代替技術による混合物の施工性を確認するとともに耐久性評価を行った。さらに植物由来樹脂を用いた舗装を現行のアスファルト舗装のリサイクル環境に合流させることを最終的な目的として屋外暴露試験を行い促進劣化特性について検証した。

本報告書は、これら共同研究の一連の成果を取りまとめたものである。

## １．１　目的

本研究では、100%アスファルト代替技術の確立を目的とする。以下に研究項目を示す。

・100%アスファルト代替舗装用バインダの材料特性の把握、配合設計方法の検討
・実大規模の施工による施工性・耐久性評価
・植物由来の素材に関する再生技術の可能性の検討

## １．２　研究期間

2022 年 10 月から 2024 年 3 月

## １．３　検討手順

本検討の手順を**図 6.1.1** に示す。

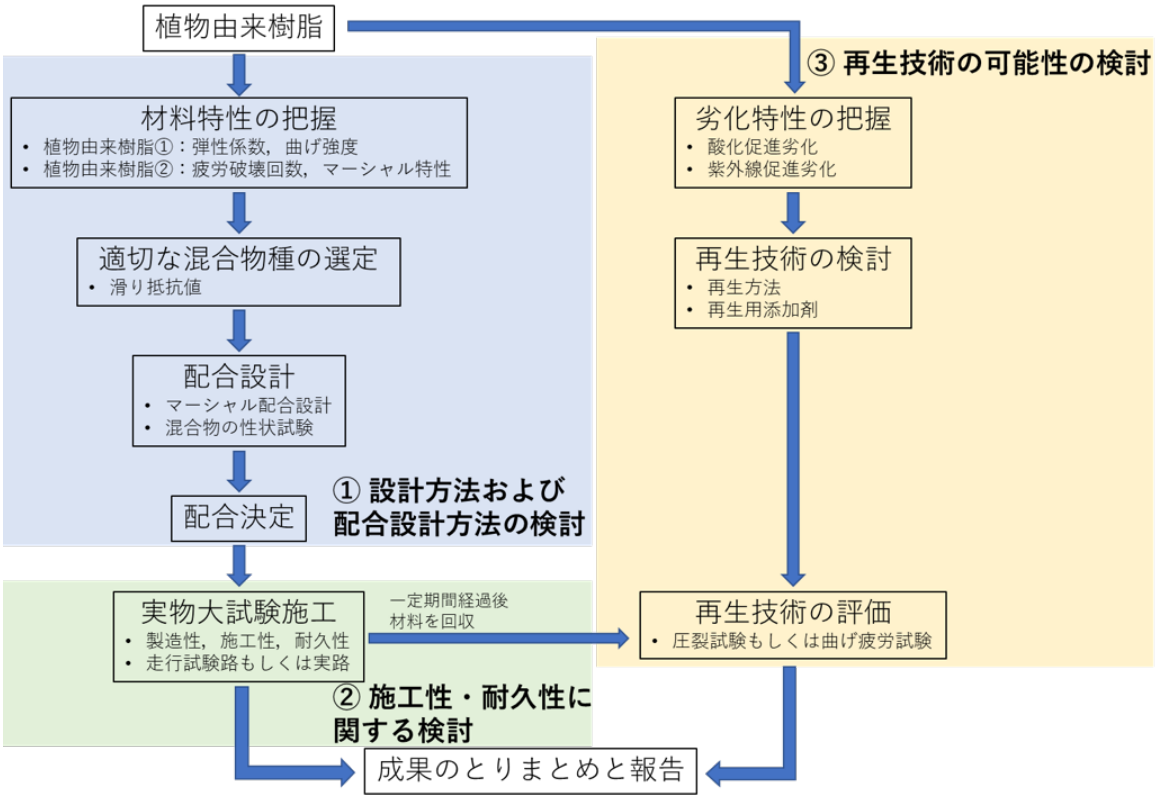



**図 6.1.1**　共同研究の検討フロー

## ２． 設計方法および配合設計方法の検討

検討する植物由来樹脂は、硬くコンクリートのような混合物性状が期待できる植物由来樹脂①、あるいは粘性と弾性を併せ持つ粘弾性に優れたアスファルトのような植物由来樹脂②、③に調整可能な材料である。本研究では適用する交通条件に応じて、これらの材料を配合させてバインダ性状や混合物性状を調整することとした。**表 6.2.1** に各種舗装の概要と提案技術の位置づけを示す。

**表 6.2.1**　提案技術の位置づけ

| 項目 | アスファルト舗装 | コンクリート舗装 | 提案技術 | |
|---|---|---|---|---|
| | | | ① | ②、③ |
| 施工 | 一般的なアスファルト混合物 | 鋼製型枠による流し込み | 一般的なアスファルト舗装と同様 | |
| 横目地 | なし | 8m<br>5m（鉄網なし） | 5m 程度 | なし |
| 施工後の養生期間 | 路面温度が 50℃以下となるまでの時間 | 5～10℃　2 日以上<br>10℃以上　1 日以上 | 路面温度が 50℃以下となるまでの時間 | |
| リサイクル性 | リサイクル方法が確立されている | リサイクル方法が確立されている | 熱可塑性のため可能性あり | |

### ２．１　植物由来樹脂の性状評価の結果

検討する植物由来樹脂のバインダ性状をストレートアスファルト 60/80（以下、ストアス）の代表値と併せて**表 6.2.2** に示す。植物由来樹脂①は低針入度・高軟化点であり、伸度が 0 であることから非常に硬い性状であることが分かる。一方、植物由来樹脂②および③は、植物由来樹脂①と比較して柔らかい性状（高針入度・低軟化点）となっている。また、伸度が十分に大きい値である。

**表 6.2.2**　植物由来樹脂のバインダ性状

| 項目 | | ストアス | 植物由来樹脂 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | ① | ② | ③ |
| 針入度 | 1/10mm | 61 | 6 | 120 | 55 |
| 軟化点 | ℃ | 48 | 97.5 | 49.0 | 51.0 |
| 伸度 | cm | 100+ | 0 | 100+ | 100+ |

## ２．２　植物由来樹脂を用いた混合物性状評価の結果

### （１）　一般的な混合物性状

**表 6.2.3** に植物由来樹脂を用いた密粒度混合物（13）における代表的な混合物性状を示す。配合設計はマーシャル配合設計によりバインダ量を求めた。突き固め回数は両面 50 回とし、配合設計時の混合・締固め温度は作業性を考慮し設定した。

植物由来樹脂①混合物はバインダの硬い性状を反映しており、マーシャル安定度試験による安定度およびホイールトラッキング試験（以下、WT 試験）による動的安定度は、ストアス混合物と比較して非常に高い数値となる。一方、植物由来樹脂②および③を使用した混合物は、ストアス混合物に比較的近い結果となっており、バインダ性状での試験結果と一致している。

**表 6.2.3**　植物由来樹脂を使用した混合物性状

| 項目 | | ストアス | 植物由来樹脂 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | ① | ② | ③ |
| バインダ量 | % | 5.3 | 5.1 | 5.1 | 5.1 |
| マーシャル安定度 | kN | 12.5 | 36.1 | 8.9 | 10.3 |
| フロー値 | 1/100cm | 28 | 20 | 31 | 31 |
| 残留安定度 | % | 90 | 72.4 | 97.0 | 95.0 |
| 動的安定度 | 回/mm | 417 | 63,000 | 583 | 1,750 |

曲げ試験結果を**表 6.2.4** に示す。ここでは、植物由来樹脂②、③のみの評価とした。植物由来樹脂②、③の最大荷重は、ストアスよりも大きく、曲げ破断ひずみは同程度となった。

**表 6.2.4**　曲げ試験結果

| バインダ | 温度<br>[℃] | 曲げ強度<br>[MPa] | 曲げ破断ひずみ |
|---|---|---|---|
| ストアス | -10 | 11.03 | $3.5\times10^{-3}$ |
| 植物由来樹脂② | -10 | 14.29 | $4.8\times10^{-3}$ |
| 植物由来樹脂③ | -10 | 13.03 | $4.1\times10^{-3}$ |

### （２）　曲げ疲労試験の結果

植物由来樹脂を用いた混合物の疲労抵抗性を評価するため、曲げ疲労試験を実施した。曲げ疲労試験条件を**表 6.2.5**、試験結果を**表 6.2.6** に示す。ストアスを用いた混合物の破壊回数が植物由来樹脂②と③の混合物のそれぞれの破壊回数の中間値となっており、アスファルトの性状を起点として混合物の疲労抵抗性を調整できるといえる。

**表 6.2.5**　曲げ疲労試験条件

| 項目 | 内容 |
|---|---|
| 供試体寸法 | 40×40×400mm |
| 載荷方法 | 両端固定 2 点載荷 |
| 載荷周波数 | 5Hz |
| ひずみ | 400μ |
| 試験温度 | 20℃ |

**表 6.2.6**　曲げ疲労試験における疲労破壊回数

| バインダ | 疲労破壊回数　（回） | | | 平均疲労破壊回数（回） |
|---|---|---|---|---|
| ストアス | 6,998 | 8,051 | 9,380 | 8,143 |
| 植物由来樹脂② | 10,359 | 7,747 | 12,581 | 10,200 |
| 植物由来樹脂③ | 5,479 | 4,586 | 5,238 | 5,100 |

### （３）　温度応力試験の結果

アスファルトの特徴の一つである応力緩和性能を植物由来樹脂について評価するため、温度応力試験を実施した。**表 6.2.7** に温度応力試験の条件を示す。植物由来樹脂を用いた混合物の温度応力が生じる温度はバインダの種類によって大きく異なる。硬質な植物由来樹脂①は熱的安定性が高く、開始温度 40℃で試験を行った。これより軟質な植物由来樹脂②、③は開始温度 40℃では試験中に過度な変形が生じるため実施が実施できず、開始温度を 30℃とした。

**図 6.2.1　温度応力試験結果**

## ２．３　設計方法および配合設計方法の検討まとめ

設計方法および配合設計方法を検討した結果、得られた知見を以下にまとめる。

- 提案した植物由来樹脂は材料の比率で針入度等の性状を調整することができる。
- アスファルトと同様のマーシャル配合設計を適用し最適バインダ量を決定した。

に各混合物の温度応力試験の結果を示す。植物由来樹脂①混合物は非常に硬い性状であり、応力緩和が期待できないことから、コンクリート舗装と同様に一定間隔に目地を導入する必要がある。植物由来樹脂②混合物は、ストアス混合物とほぼ同様の温度応力応答を示していることから、通常のアスファルト混合物と同様の設計方法が適用できると考えら

れる。植物由来樹脂③混合物では、植物由来樹脂②混合物よりも応力の発生が高温側にシフトしているが、0℃以上ではおおむね応力を緩和できていることから、通常のアスファルト混合物の設計方法が適用できると考えられる。

表 6.2.7　温度応力試験の条件

| 項目 | 内容 |
|---|---|
| 供試体寸法 | 50×50×250mm |
| 温度勾配 | -10℃/h |
| 開始温度 | ストアス、植物由来樹脂②、③：30℃<br>植物由来樹脂①：40℃ |

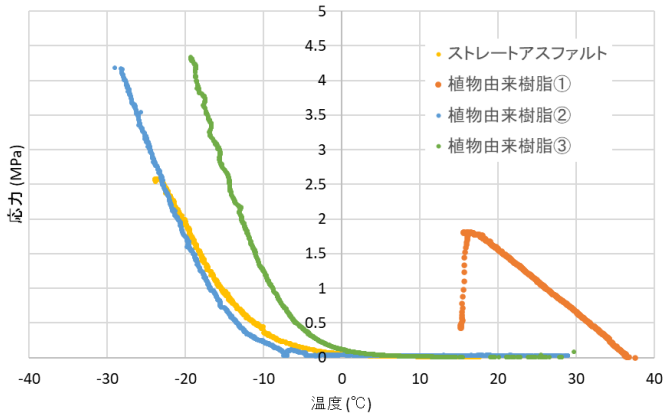



図 6.2.1　温度応力試験結果

## ２．４　設計方法および配合設計方法の検討まとめ

設計方法および配合設計方法を検討した結果、得られた知見を以下にまとめる。

- 提案した植物由来樹脂は材料の比率で針入度等の性状を調整することができる。
- アスファルトと同様のマーシャル配合設計を適用し最適バインダ量を決定した。

# ３．施工性・耐久性に関する検討

## ３．１　目的

2 章にて、植物由来樹脂について室内性状を評価し、アスファルトと同様の混合物性状が期待できることを確認した。本章では実大規模の施工を行い、植物由来樹脂を用いた混合物の施工性および耐久性を評価することとした。

## ３．２　施工概要

**表 6.3.1** と**図 6.3.1** に施工概要と舗装構成を示す。植物由来樹脂を用いた混合物を適用するにあたり、一般的なアスファルト混合物と同様な構造設計方法で構築した場合の耐久性について未知であったため、本試験施工では、表層のみに適用した場合と表基層に適用した場合の 2 つの構成で評価することとした。なお、表層および基層はいずれも密粒度混合物（13）とした。

**表 6.3.1　施工概要**

| 項目 | 内容 |
|---|---|
| 実施日 | 令和 5 年 8 月 3 日 |
| 実施場所 | 土木研究所舗装走行実験場内 |
| 出荷プラント | 県南共同アスコン |
| 出荷混合物 | 密粒度混合物(13)、バインダ量 5.0% |
| 出荷数量 | 4t(基層)、8t(表層) |
| 施工規模 | 延長 15m×幅員 3.5m×舗装厚 5cm |

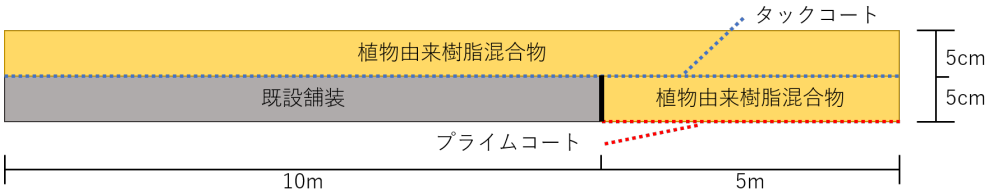



**図 6.3.1　舗装構成**

## ３．３　施工基盤の調査結果

既設舗装について FWD による調査を行った。既設舗装の断面構成を**図 6.3.3** に示す。載荷点直下（$D_0$）のたわみ量を**図 6.3.2** に示す。20℃補正後の各地点のたわみ量は 0.7mm 程度だった。本施工では表層および一部基層を切削し植物由来樹脂を用いた混合物を舗設した。

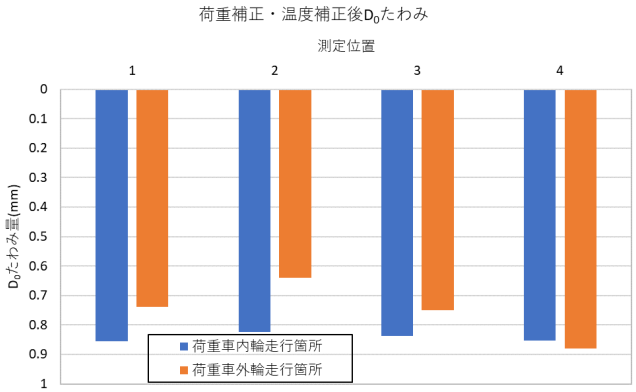



**図 6.3.2**　FWD による載荷点直下 $D_0$ たわみ量（測定間隔：5m）

| | |
|---|---|
| 表層：密粒（13）　改質 II 型 | 5cm |
| 基層：密粒（13）　改質 II 型 | 5cm |
| 上層路盤：M-30 | 20cm |
| 下層路盤：C-40 | 40cm |
| 既設路床（CBR3） | ― |

**図 6.3.3**　既設舗装の構成

## ３．４　使用材料

### （１）　評価した植物由来樹脂

走行試験場で使用する混合物は、改質Ⅱ型と同程度の耐流動性が要求されたことから、動的安定度 3,000 回/mm 以上を目安に、植物由来樹脂①と③の中間となるように配合調整した。使用した植物由来樹脂④の代表的な性状を**表 6.3.2** に示す。

**表 6.3.2**　植物由来樹脂④

| 項目 | | 植物由来樹脂④ |
|---|---|---|
| 針入度 | 1/10mm | 22 |
| 軟化点 | ℃ | 67.0 |
| 伸度 | cm | 25 |

### （２）　混合物の使用材料および配合

混合物の種類は密粒度混合物（13）とし、バインダ量は通常出荷している最適アスファルト量を中心にマーシャル配合設計により決定した。**表 6.3.3**、**表 6.3.4**、**図 6.3.4** に試験施工に用いた各材料の概要を示す。

**表 6.3.3**　使用材料および産地

| 材料名 | 材質 | 製造会社 | 産地 |
|---|---|---|---|
| 6 号砕石 | 硬質砂岩 | 東京石灰工業株式会社 | 茨城県石岡市染谷 |
| 7 号砕石 | 硬質砂岩 | 東京石灰工業株式会社 | 茨城県石岡市染谷 |
| 砕砂 | 硬質砂岩 | 八幡砕石工業株式会社 | 茨城県笠間市下郷 |
| 細目砂 | 陸砂 | 石津建材株式会社 | 千葉県香取市大根 |
| 石粉 | 石灰岩 | 大竹工業株式会社 | 栃木県佐野市山菅町 |
| 植物由来樹脂 | ― | 東亜道路工業株式会社 | ― |

**表 6.3.4**　常温骨材配合

| 材料名 | | 6 号砕石 | 7 号砕石 | 砕砂 | 細目砂 | 石粉 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 配合率 | % | 39.0 | 15.0 | 25.0 | 16.0 | 5.0 |

表 6.3.5　骨材配合及び各骨材粒度

| 項目 | | 通過質量百分率 % | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 材料名 | 配合率 % | 19.0 mm | 13.2 mm | 4.75 mm | 2.36 mm | 0.6 mm | 0.3 mm | 0.15 mm | 0.075 mm |
| 6 号砕石 | 39.0 | 100.0 | 95.6 | 5.1 | 1.0 | — | — | — | — |
| 7 号砕石 | 15.0 | 100.0 | 100.0 | 96.7 | 4.0 | 0.7 | — | — | — |
| 砕 砂 | 25.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 88.4 | 34.4 | 18.0 | 8.4 | 3.2 |
| 細目砂 | 16.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 98.1 | 88.1 | 33.1 | 4.4 | 1.3 |
| 石 粉 | 5.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 98.0 | 82.0 |
| 合成粒度 | | 100.0 | 98.3 | 62.5 | 43.8 | 27.8 | 14.8 | 7.7 | 5.1 |
| 目標粒度 | | 100.0 | 97.5 | 62.5 | 42.5 | 24.0 | 15.5 | 11.0 | 6.0 |

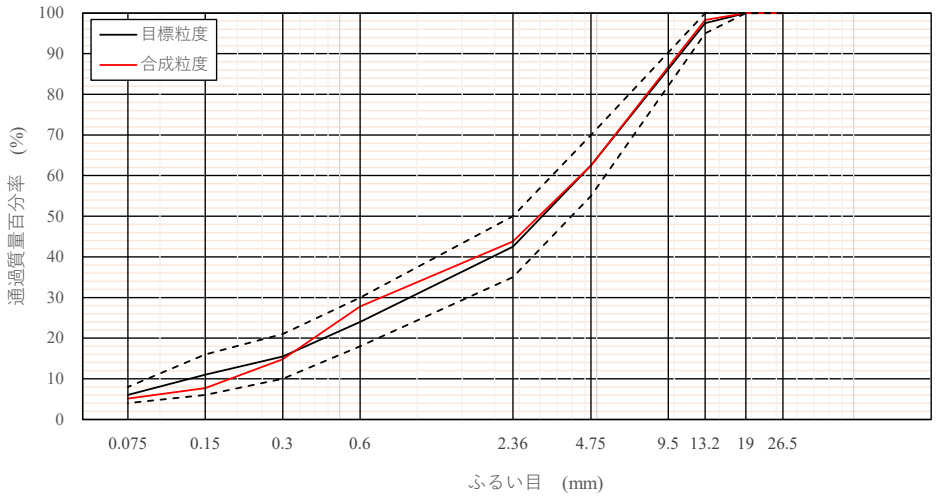


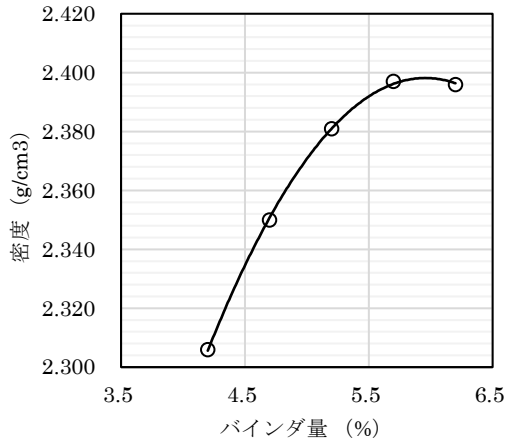

図 6.3.4　合成粒度

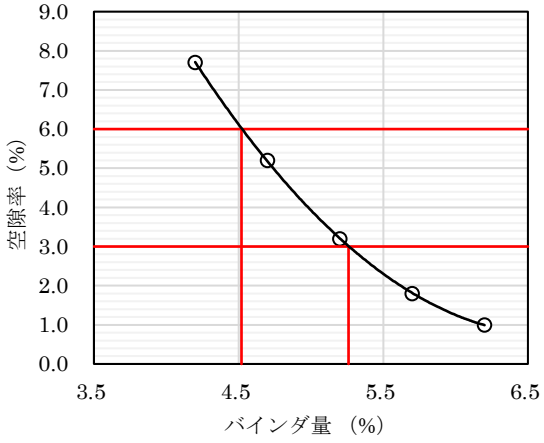
### （３）　配合試験結果

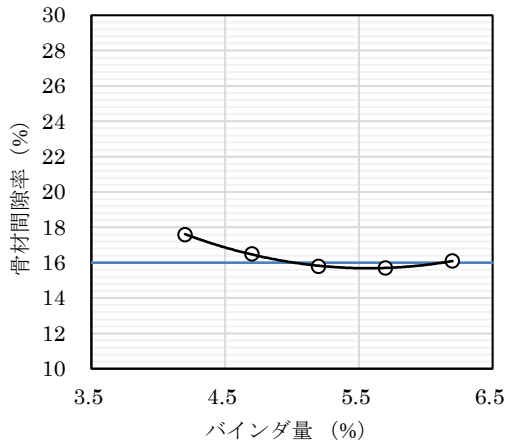
**表 6.3.6、図 6.3.5** に配合試験結果を示す。マーシャル安定度試験結果から得られたバインダの共通範囲の中央値 5.0%を最適バインダ量とした。また、**表 6.3.7** に混合物の試験結果を示す。

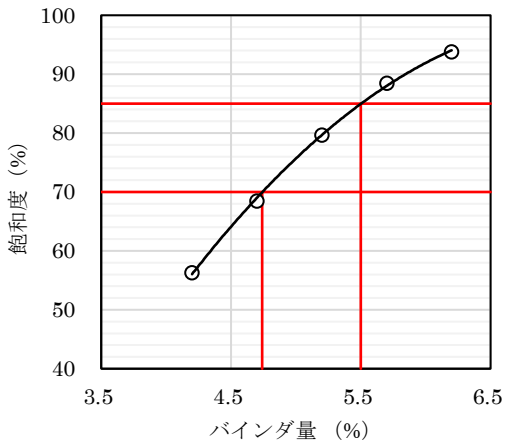
**表 6.3.6　マーシャル安定度試験結果**

| バインダ量<br>% | 密度<br>g/cm³ | 理論密度<br>g/cm³ | 空隙率<br>% | 飽和度<br>% | 安定度<br>kN | フロー値<br>1/100cm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 4.2 | 2.306 | 2.499 | 7.7 | 56.3 | 10.5 | 23 |
| 4.7 | 2.350 | 2.479 | 5.2 | 68.5 | 14.0 | 29 |
| 5.2 | 2.381 | 2.459 | 3.2 | 79.7 | 16.3 | 34 |
| 5.7 | 2.397 | 2.440 | 1.8 | 88.5 | 16.5 | 38 |
| 6.2 | 2.396 | 2.421 | 1.0 | 93.8 | 15.2 | 37 |
| 基準値 | － | － | 3～6 | 70～85 | 4.9 以上 | 20～40 |



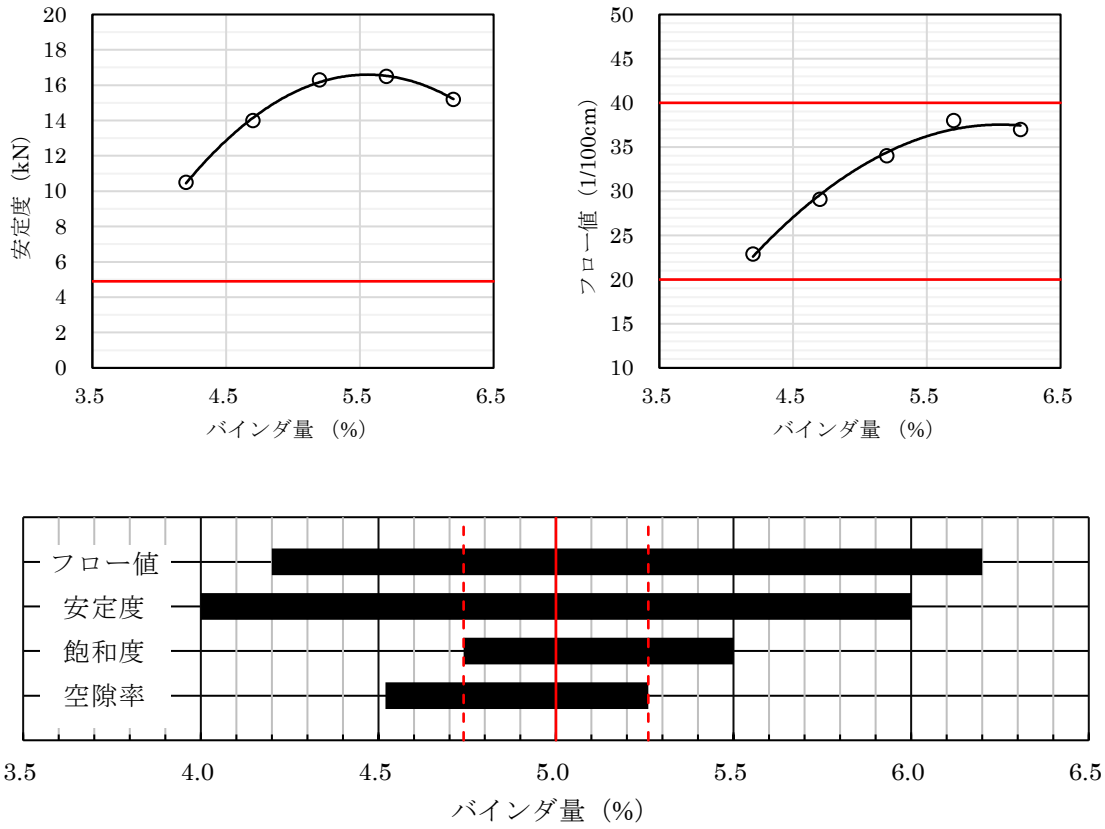



**図 6.3.5** 植物由来樹脂の混合物の配合試験結果

**表 6.3.7** 植物由来樹脂を用いた混合物性状の試験結果

| 項目 | 試験値 |
|---|---|
| バインダ量 % | 5.0 |
| 密度 g/cm$^3$ | 2.368 |
| 理論最大密度 g/cm$^3$ | 2.459 |
| 空隙率 % | 3.9 |
| 突き固め回数 | 両面 50 回 |
| 安定度 kN | 15.8 |
| フロー値 1/100cm | 30 |
| 動的安定度 回/mm | 7,875 |

## ３．５　施工状況及び施工結果

### ３．５．１ 製造方法

植物由来樹脂は、**図 6.3.6** に示すような常温で固形の状態に加工し、プラントで投入した。間接加熱により溶解を促進させるため、骨材温度を 220℃、WET 混合時間を通常の 2 倍程度を目標に設定した（**表 6.3.8**）。



**図 6.3.6**　バインダ形状

**表 6.3.8**　製造条件

| 項目 | | 数値 |
|---|---|---|
| 1 バッチの混合量 | トン | 2 |
| 混合時間 | Dry　秒 | 8 |
| | Wet　秒 | 90　（全バインダ投入後） |
| 骨材加熱温度 | ℃ | 220±10 |
| 目標排出温度 | ℃ | 170±10 |

### ３．５．２ 施工条件

施工機械および施工条件は一般的なアスファルト混合物と同様とした。

**表 6.3.9**　施工機械

| 機械名 | 仕様 | 数量 | 備考 |
|---|---|---|---|
| ダンプトラック | 10t | 2 台 | 運搬 |
| アスファルトフィニッシャ | 6.0m | 1 台 | 敷きならし |
| マガダムローラ | R2 | 1 台 | 初転圧 |
| タイヤローラ | 10t | 1 台 | 二次転圧 |
| コンバインドローラ | 4t | 1 台 | 仕上げ転圧 |

**表 6.3.10　施工条件**

| 項目 | | 設定値 |
|---|---|---|
| 敷きならし温度 | | 160℃以上 |
| 初転圧 | 温度 | 150℃以上 |
| | 回数 | 5 回 |
| 二次転圧 | 温度 | 110℃程度 |
| | 回数 | 2 回 |

### ３．５．３ 施工結果

#### （１）　施工温度について

製造時の骨材温度が 201℃付近のとき、練落とし温度が 170℃前後となり、概ね目標値となった（**表 6.3.11**）。本条件において、常温で投入した植物由来樹脂の混合ムラも見られず、良好な練り上がり状態であった.

施工時についても、現場到着、敷きならし、初転圧は目標とする温度で施工することができた。二次転圧については、タイヤローラへの混合物の付着を懸念し、目標値よりも下げて転圧を行った。

**表 6.3.11　温度管理結果**

| 項目 | 基層工 | 表層工 | 目標値 |
|---|---|---|---|
| 現場到着 | 168.7℃ | 171.0℃ | 170±10℃ |
| 敷きならし | 167.3℃ | 162.4℃ | 160℃以上 |
| 初転圧 | 161.8℃ | 151.3℃ | 150℃以上 |
| 二次転圧 | 97.8℃ | 104.4℃ | 110℃程度 |

#### （２）　施工性について

施工状況を**写真 6.3.1**、施工完了後の外観を**写真 6.3.2** に示す。

出荷から舗設に至るまで、通常のアスファルト混合物と同様に取り扱うことができた。施工時間もアスファルト混合物と同等であった。夏場ではあるが温度によるひび割れは発生しておらず、施工延長 15m までは目地を入れずに施工可能であることを確認した。




**写真 6.3.1**　施工状況



**写真 6.3.2**　施工完了後外観

### （３）　品質試験の結果

施工箇所から採取したコアの密度を**表 6.3.12** に示す。いずれのコアも締固め度は 98%以上であり二次転圧温度を下げた影響はなかった。

表 6.3.12　品質試験の結果

| | 密度<br>g/cm$^3$ | 締固め度<br>% |
|---|---|---|
| 1 | 2.340 | 98.6 |
| 2 | 2.337 | 98.5 |
| 3 | 2.352 | 99.1 |

## ３．６　追跡調査

### ３．６．１ 概要

植物由来樹脂を用いた舗装の耐久性を評価するため、**表 6.3.13** に示す内容の試験を実施した。調査位置を**図 6.3.7** に示す。

表 6.3.13　植物由来樹脂混合物の調査概要

| 項目 | 内容 |
|---|---|
| 評価方法 | ひび割れ　：目視による観察<br>わだち掘れ　：MRP による横断形状の測定<br>すべり抵抗性　：DF テスタによる動摩擦係数の測定<br>色調　：色彩色差計による *L*a*b** 色空間の測定 |
| 測定時期 | 10 万換算輪ごと |

縦断方向　：外側車輪通過位置（OWP）、内側車輪通過位置（IWP）、非車輪通過位置（BWP）

横断方向　：①～⑦の 7 測線

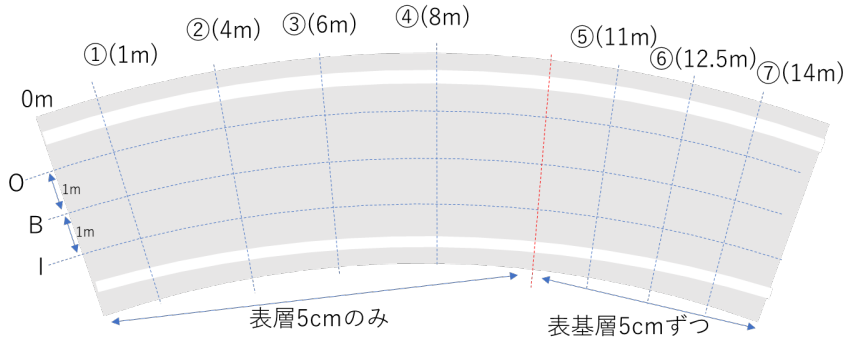



図 6.3.7　測線の概要

## ３．６．２ 測定結果

### （１） ひび割れの評価

ひび割れ状況に関する調査結果を**表 6.3.14** に示す。また、**図 6.3.8** と**写真 6.3.3** にひび割れ発生箇所と発生したひび割れの状況を示す。

30 万輪走行後の調査で、舗装構成が変化する測線④、⑤の間、OWP に亀甲状ひび割れが発生していた。これは舗装構成の違いに起因する舗装の支持力の違いによるものと考えられる。

**表 6.3.14** ひび割れの評価

| 調査時期 | 走行数 | ひび割れ状況 |
|---|---|---|
| 令和 5 年 8 月 | 0 | なし |
| 令和 5 年 11 月 | 10 万輪 | なし |
| 令和 6 年 1 月 | 20 万輪 | なし |
| 令和 6 年 3 月 | 30 万輪 | 発生 （**写真 6.3.3**） |



**写真 6.3.3** 発生していたひび割れ

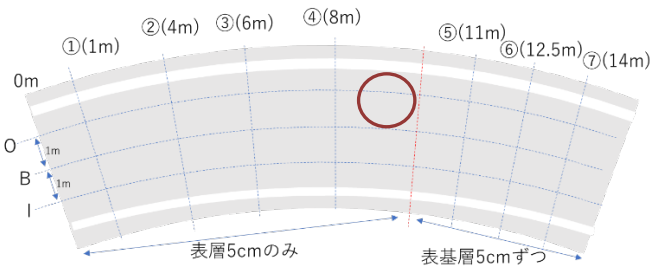



**図 6.3.8** ひび割れ発生箇所

### （２）　わだち掘れ量の評価

車輪走行位置に発生するわだち掘れ量を評価することを目的とし、MRP を用いて横断形状を測定した。**図 6.3.9** に測定結果、図 6.3.10 にわだち掘れ量の推移を示す。いずれの測線も、30 万輪走行後においても横断形状に変化はなく、わだち掘れは見られなかった。

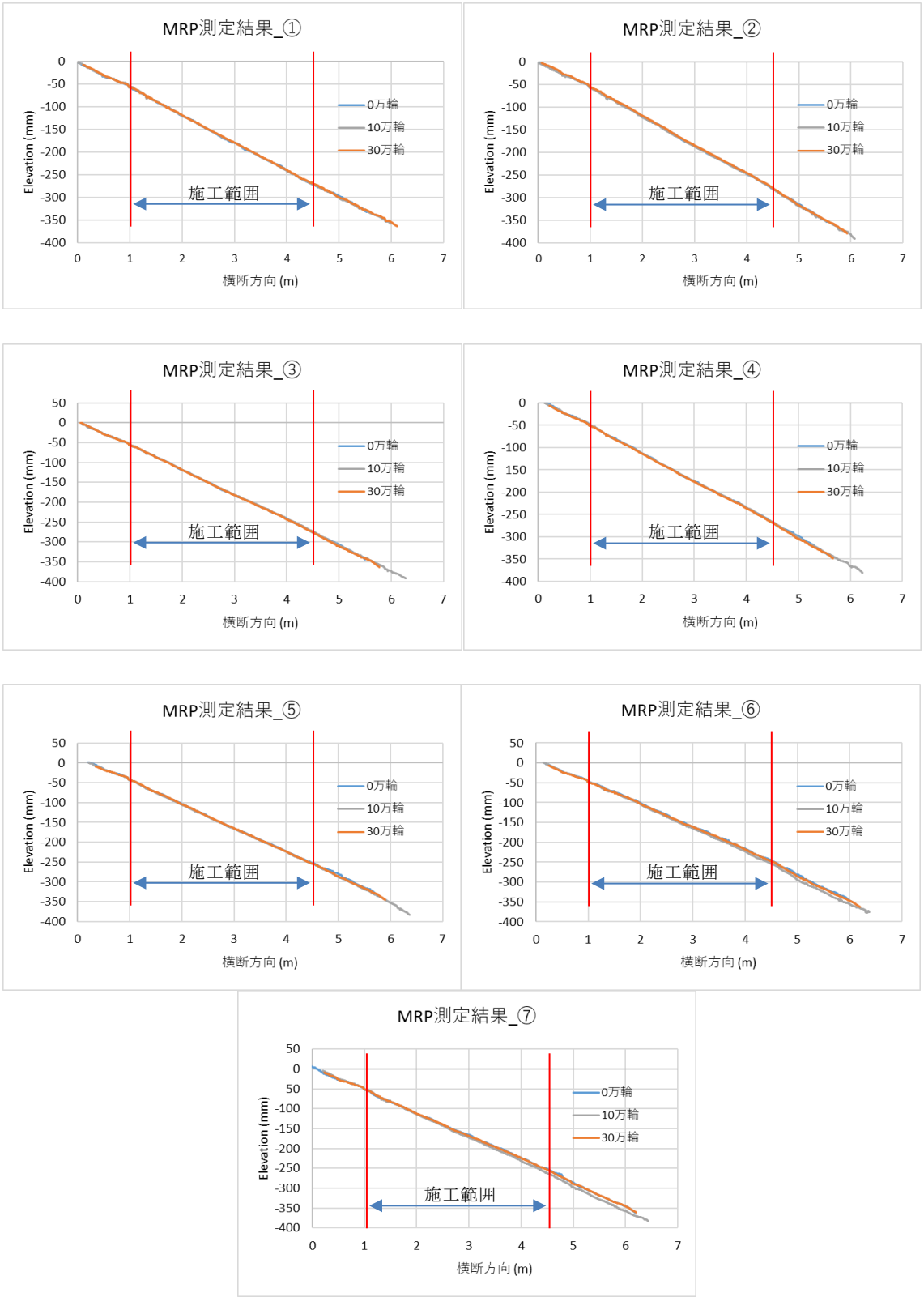



**図 6.3.9**　横断方向の MRP 測定結果

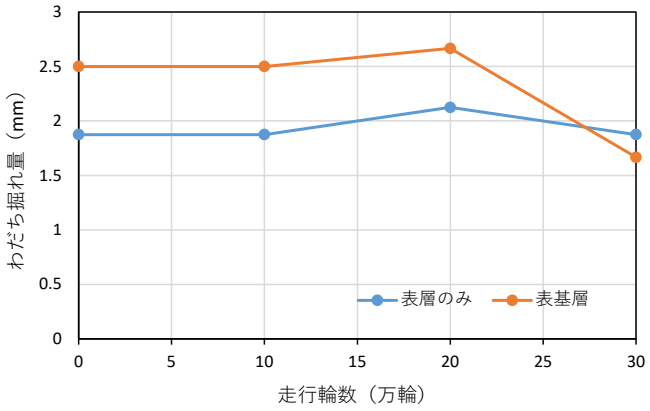



図 6.3.10　わだち掘れ量の推移

### （３）　すべり抵抗性

植物由来樹脂を用いた舗装のすべり抵抗性を評価することを目的とし、DF テスタを用いて動的摩擦係数を測定した。**図 6.3.11** に測定結果を示す。なお、測定は、⑥-O、 B、 I（**図 6.3.7** 参照）の位置で実施した。

植物由来樹脂舗装では、動的摩擦係数は施工直後が最も低く、その後徐々に高くなる傾向を示した。これは表面のバインダの被膜が剥がれて骨材表面が露出したことや、バインダの硬化などが原因と考えられる。

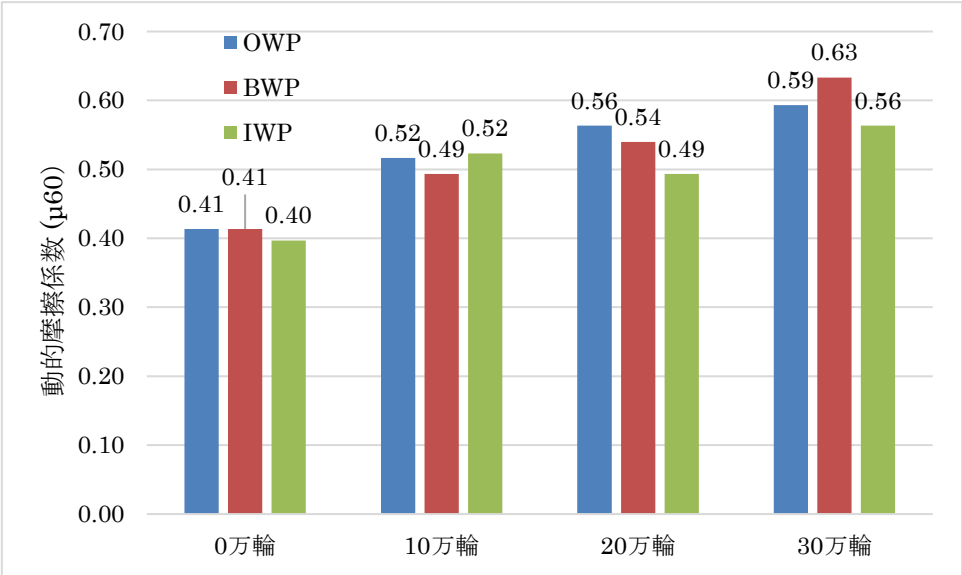



図 6.3.11　動的摩擦係数の測定結果

### （４）　色調の評価

色調の変化を把握することを目的とし、色彩色差計を用いて色空間を測定した。$L^*a^*b^*$色空間では $L^*$が明度を表し、$a^*b^*$が色彩と彩度を表す。$+a^*$が赤方向、$-a^*$は緑方向、$+b^*$が黄方向、$-b^*$ が青方向を示し、数値が大きくなると色鮮やか、小さいとくすんだ色と判断する。測定結果を**表 6.3.15** に示す。なお、測定は、①、③及び⑥の BWP で実施した。

彩度を示す *a**および *b**は低い状態で推移しており、施工当初より色味が少ない灰色を維持していることを示している。明度を示す *L**が若干上昇しており、骨材色が強くなっている。

**表 6.3.15　色調の評価**

| 項目 | *L** | *a** | *b** |
|---|---|---|---|
| 初期値 | 38.11 | 0.98 | 3.48 |
| 10 万輪 | 39.82 | 1.08 | 4.49 |
| 20 万輪 | 40.55 | 0.84 | 4.26 |
| 30 万輪 | 41.73 | 1.17 | 4.97 |

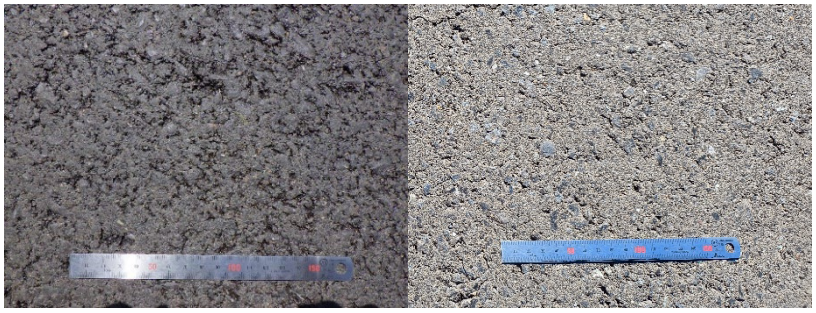


**写真 6.3.4**　施工直後（左）と 30 万輪経過後（右）の色調

### ３．７　施工性・耐久性評価に関するまとめ

植物由来樹脂を用いた混合物の実大規模の施工を行った結果、得られた知見を以下にまとめる。

【施工性】

- アスファルト混合物よりも WET 混合時間が長くなるが、プラントでの製造性について問題ないことを確認した。
- 舗装は密粒度混合物（13）、バインダ量はマーシャル配合設計にて得られた 5.0%で施工した。今回設定した条件および通常の機械編成で概ね目標とした締固め度が得られた。

【耐久性】

- 促進載荷試験 10 万輪毎に測定を行った。MRP を用いた横断形状測定結果について、30 万輪経過時点でわだち掘れは見られなかった。
- 動的摩擦係数について初期値は 0.4 程度、走行することにより 0.5 以上の値となった。
- 30 万輪走行後の調査でひび割れが発生していた。基層の材料が変化する境界部でひび割れが生じていたことから植物由来樹脂の混合物は下層の支持力の変化点に留意する必要がある。

## ４． 再生技術の可能性の検討

### ４．１　検討概要

暴露試験を実施し、植物由来樹脂の劣化を観察するとともに、得られた知見を基に再生技術の検討を行うこととした。

### ４．２　屋外暴露試験

土木研究所所有の沖縄暴露

試験場にバインダおよび混合物をそれぞれ設置した。供試体は設定した期間で回収し、屋外ばく露による性状変化を評価した。供試体の設置は 2023 年 3 月上旬に行い、**表 6.4.1** に示す回収時期により供試体を回収し、各評価試験を実施した。

**表 6.4.1　暴露供試体回収時期**

| 回収予定 | 2023.3 | 2023.6<br>3 ヶ月後 | 2023.9<br>6 ヶ月後 | 2024.3<br>1 年後 | 2025.3<br>2 年後 | 2026.3<br>3 年後 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| バインダ | 設置 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 混合物 | | ― | ― | ○ | ○ | ― |

### ４．２．１ 暴露試験に用いた供試体の概要

暴露試験場で評価した供試体の内容を**表 6.4.2** に示す。回収した供試体については**表 6.4.3** に示す試験を行った。設置状況を**図 6.4.1** に示す。混合物は形状の保護のために周囲をアルミ製の枠で囲った。バインダはステンレス板に塗布し、板を釘で固定した（**図 6.4.2**）。

**表 6.4.2**　暴露試験供試体内容

| 供試体形状 | ストアス<br>60/80 | 改質 II 型 | 植物由来樹脂① | 植物由来樹脂② | 植物由来樹脂③ |
|---|---|---|---|---|---|
| バインダ | 約 1mm 厚（20cm×20cm） | | | | |
| 混合物 | ホイールトラッキング供試体×4 | | | | |
| | ラベリング供試体×1 | | | | |

**表 6.4.3**　暴露試験 性状確認試験内容

| 項目 | 試験内容 | 着目点 |
|---|---|---|
| バインダ | DSR<br>（ダイナッミクシアレオメータ） | 粘弾性状の変化 |
| | FT-IR（フーリエ変換赤外分光法） | 酸化劣化 |
| 混合物 | 曲げ試験 | 低温特性の変化 |
| | 温度応力試験 | 応力緩和性能の変化 |
| | 圧裂試験 | 常温特性の変化 |
| | 曲げ疲労試験 | 疲労抵抗性の変化 |

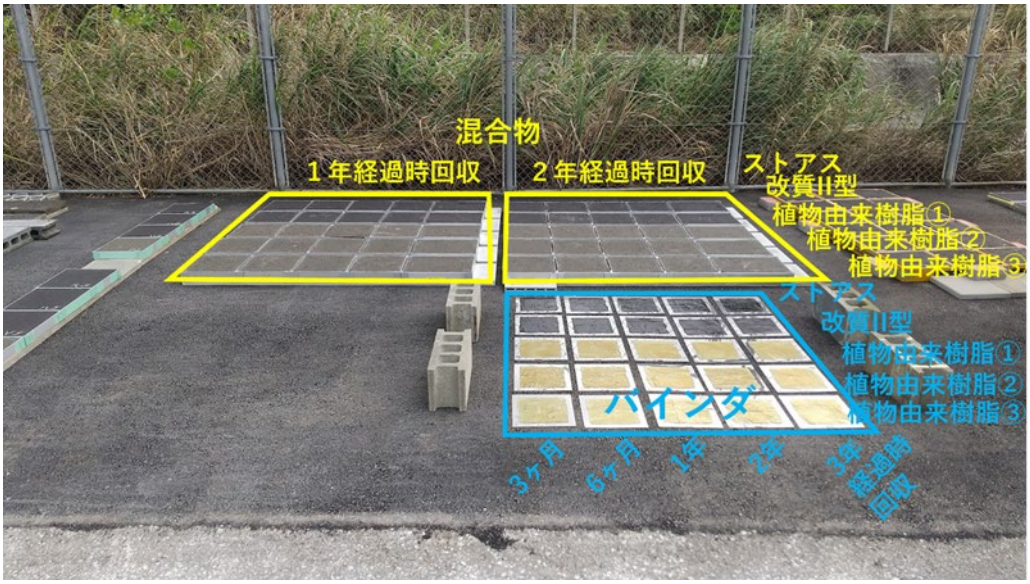



図 6.4.1　供試体設置状況

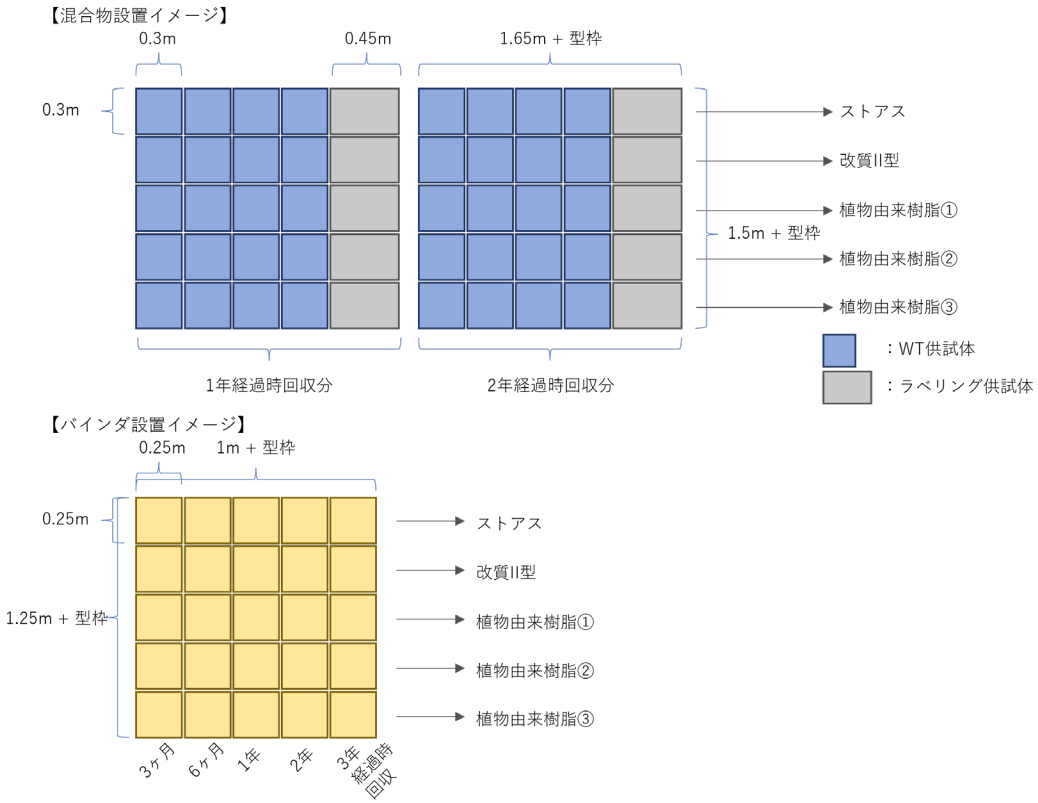



図 6.4.2　暴露試験供試体の設置図

### ４．２．２ 暴露バインダの経過観察

本研究の期間では、3 ヶ月、6 ヶ月後および 12 ヶ月後のバインダを回収し、評価した。

所定の暴露期間が経過したバインダを**図 6.4.3** に示す。**写真 6.4.1** に示す通り、3 ヶ月時点で植物由来樹脂②および③には付着物があり、12 ヶ月経過時点でも粘着性が確認された。一方、ストアスと改質Ⅱ型には付着物は観察されなかった。これは、アスファルトでは早期に粘着性がなくなったことが原因と考えられる。

供試体を設置した舗装にはごくわずかな傾斜（写真中の下方向）があり、植物由来樹脂②と③は時間経過で鉄板の縁まで流動していた。植物由来樹脂①はアスファルトと同様に 6 ヶ月暴露時点から表面に細かなき裂が観測された（**写真 6.4.2**）。

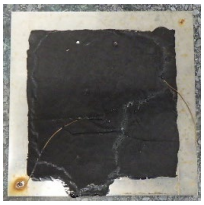
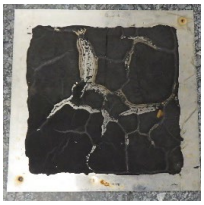
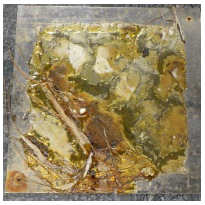
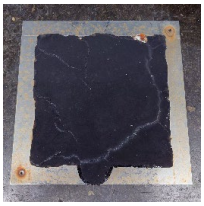
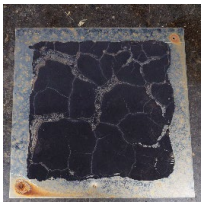
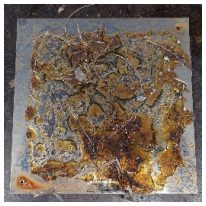
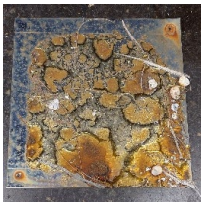
| 期間 | ストアス | 改質 II 型 | 植物由来樹脂 ① | 植物由来樹脂 ② | 植物由来樹脂 ③ |
|---|---|---|---|---|---|
| 3 ヶ月 |  |  |  |  |  |
| 6 ヶ月 |  |  |  |  |  |
| 12 ヶ月 |  |  |  |  |  |

**図 6.4.3**　屋外暴露後に回収した各バインダ

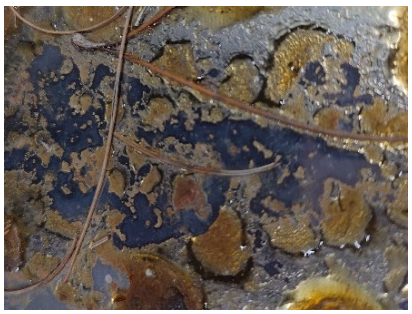


**写真 6.4.1**　植物由来樹脂②（12 ヶ月暴露）の拡大写真

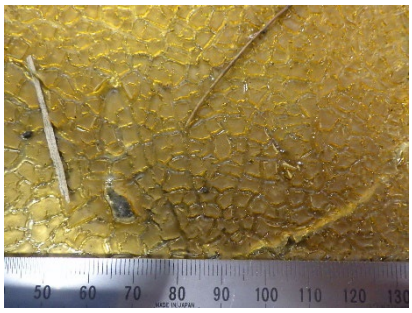


**写真 6.4.2**　植物由来樹脂①（6 ヶ月暴露）の拡大写真

### ４．２．３ 暴露バインダの性状試験

回収したバインダの試験結果を示す。

#### （１）　赤外分光分析

回収したバインダの赤外分光分析の試験結果を**図 6.4.4～図 6.4.8** に示す。ここでは材料の酸化劣化について把握することを目的とし、カルボニル基を示す 1700cm$^{-1}$ 付近のピークに着目した。

ストアス、改質 II 型は 3 ヶ月後から暴露後回収供試体のスペクトルで 1700cm$^{-1}$ 付近のピークが出現していた。植物由来樹脂①、②、③は 1700cm$^{-1}$ 付近に材料由来のピークが存在し、明確な変化が見られなかった。

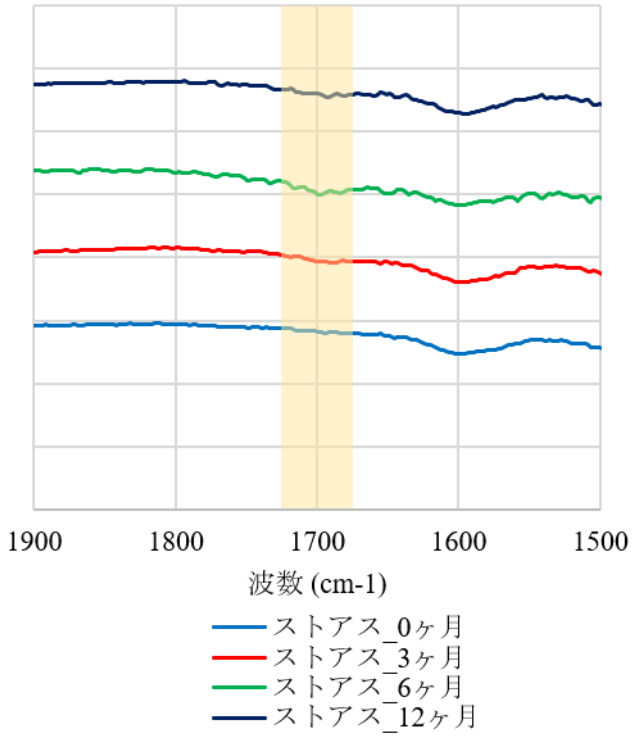



**図 6.4.4**　ストアスの IR スペクトル

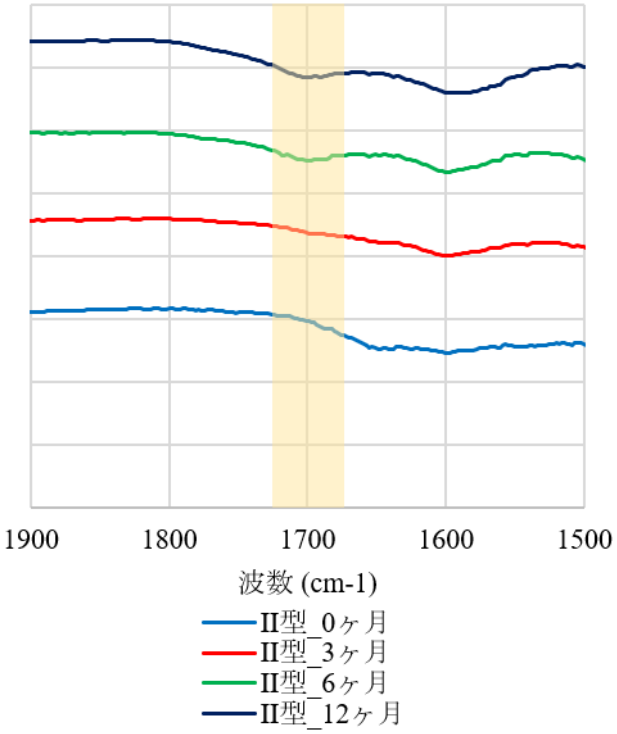



**図 6.4.5**　改質 II 型の IR スペクトル

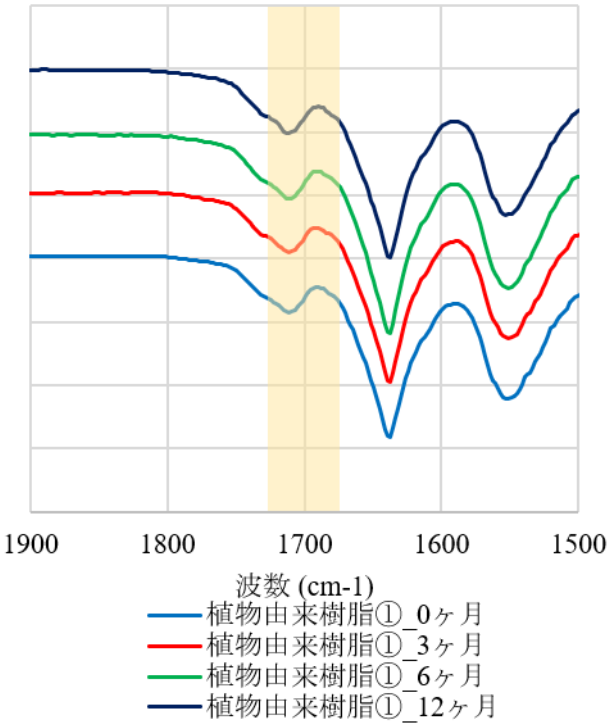



**図 6.4.6**　植物由来樹脂①の IR スペクトル

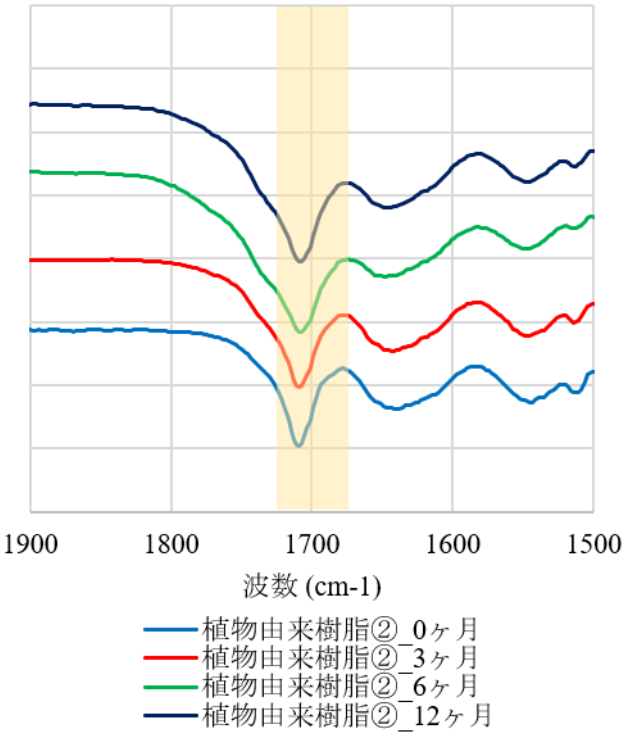



**図 6.4.7**　植物由来樹脂②の IR スペクトル

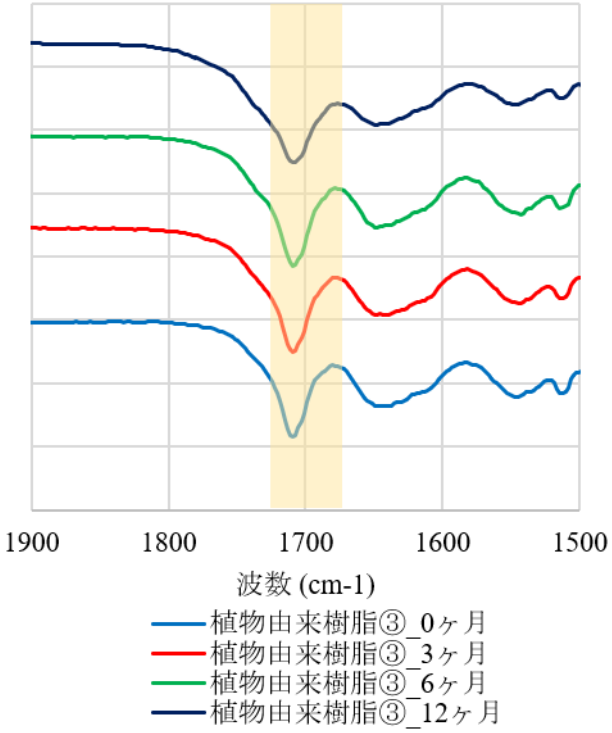



**図 6.4.8**　植物由来樹脂③の IR スペクトル

（２）　DSR 測定

**図 6.4.9～図 6.4.13** に複素弾性率 G*の性状の変化を示す。アスファルトは暴露 3 ヶ月以降での複素弾性率の変化が小さい。植物由来樹脂①は大きな変化は見られなかった。植物由来樹脂②、③は、3 ヶ月以降でも、複素弾性率の変化が見られた。

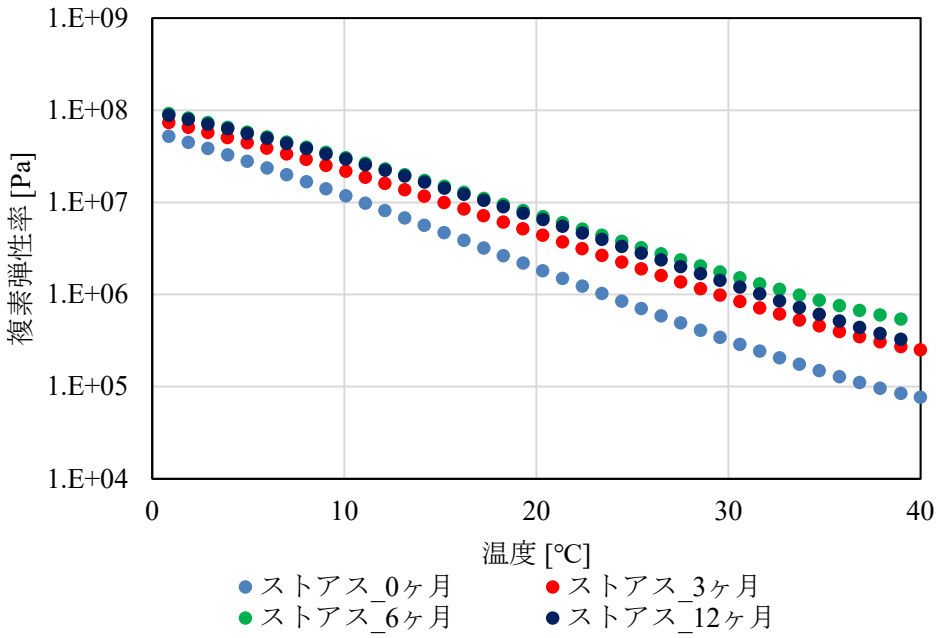



**図 6.4.9**　ストアスの複素弾性率

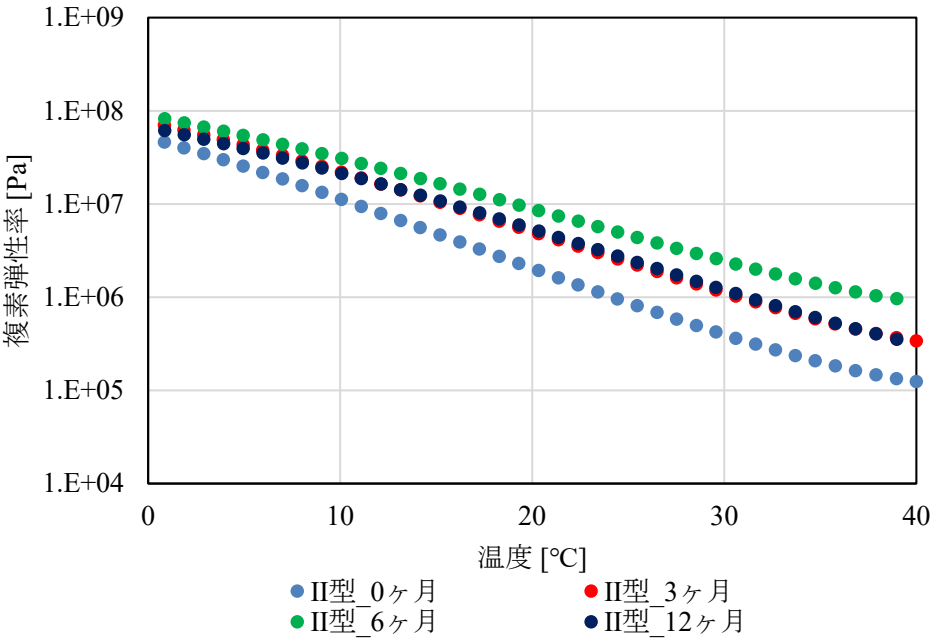



**図 6.4.10**　改質 II 型の複素弾性率

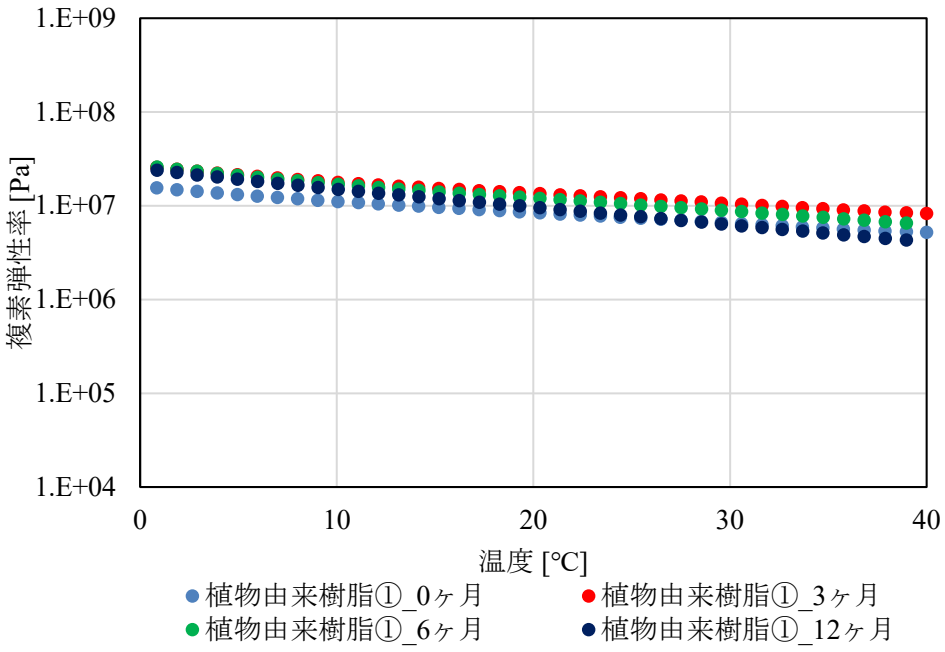



図 6.4.11　植物由来樹脂①の複素弾性率

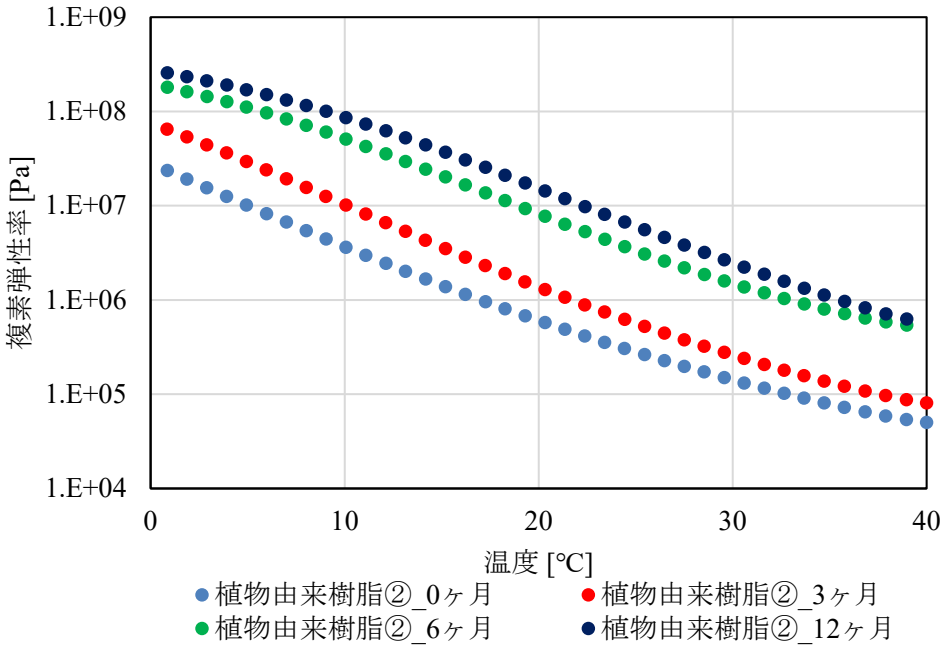



図 6.4.12　植物由来樹脂②の複素弾性率

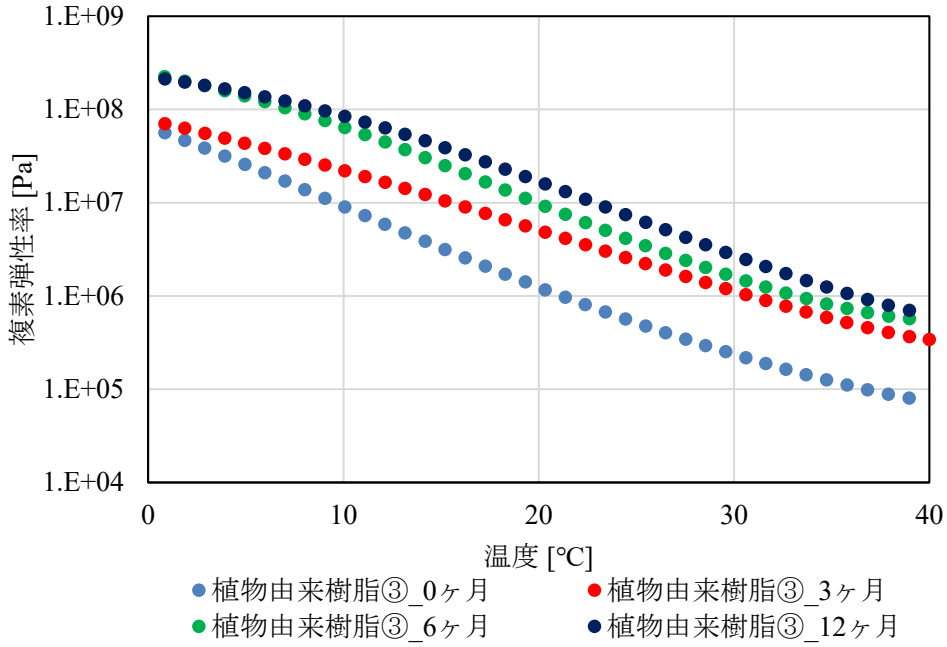



**図 6.4.13**　植物由来樹脂③の複素弾性率

### ４．３　再生技術の可能性の検討

植物由来樹脂を用いた混合物が再生骨材として混入した際、再生アスファルト混合物の性状に与える影響について検討することを目的とし、室内試験による評価を実施した。

#### ４．３．１ 再生骨材の作製方法

評価に使用する再生骨材は、植物由来樹脂②とストアスを用いて密粒度混合物（13）をそれぞれ製造した後、平バットに広げて 110℃で 72 時間養生して作製した（「舗装調査・試験法便覧 B020」（平成 31 年度 3 月）に準拠）。骨材配合と合成粒度を**表 6.4.4** と**図 6.4.14** に示す。

表 6.4.4　骨材配合及び合成粒度

| 項目 | | 密粒度混合物（13） | |
|---|---|---|---|
| 配合比率（%） | 6 号砕石 | 39.0 | |
| | 7 号砕石 | 16.0 | |
| | 砕砂 | 16.0 | |
| | 粗目砂 | 15.0 | |
| | 細目砂 | 8.0 | |
| | 石粉 | 6.0 | |
| | 計 | 100 | |
| - | ふるい目 | 合成粒度 | 粒度範囲 |
| 通過質量百分率（%） | 19.0 mm | 100 | 100 |
| | 13.2 mm | 97.8 | 90～100 |
| | 4.75 mm | 62.2 | 55～70 |
| | 2.36 mm | 42.1 | 35～50 |
| | 0.6 mm | 25.4 | 18～30 |
| | 0.3 mm | 14.7 | 10～21 |
| | 0.15 mm | 8.4 | 6～16 |
| | 0.075 mm | 5.8 | 4～8 |

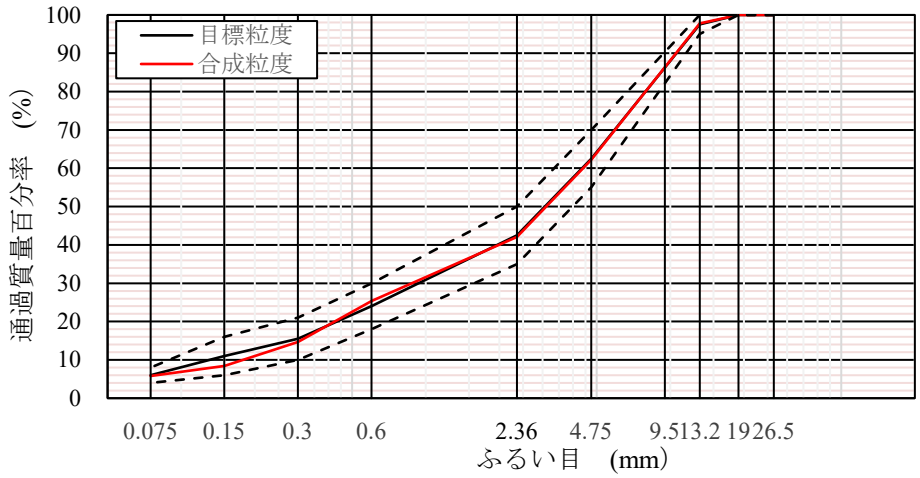



図 6.4.14　合成粒度

### ４．３．２ 抽出アスファルトの針入度調整

通常の再生骨材への混入を考慮し、ストアスの劣化混合物と植物由来樹脂の劣化混合物を 50：50 で混ぜ合わせて抽出したバインダ（以下、50：50）は針入度が 38 であり、ストアスの劣化混合物のみから抽出したバインダの針入度 25 と比較して大きかった。市販の

再生用添加剤を加えて針入度を回復させた結果、ストアスのみの劣化バインダは 7.4%、50:50 のバインダは 3.8%となり、それぞれの針入度が 50 まで回復した（**図 6.4.15**、**表 6.4.5**）。

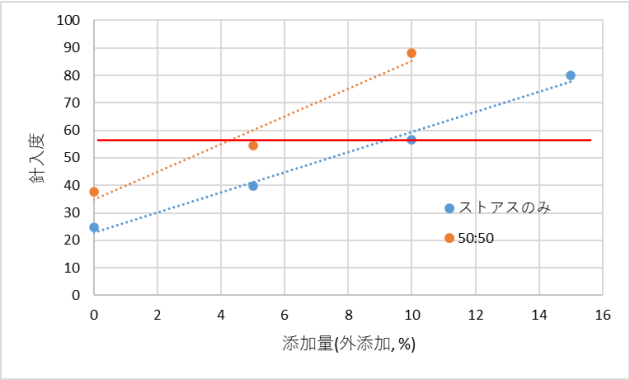



**図 6.4.15**　抽出バインダの針入度回復

**表 6.4.5**　抽出バインダの針入度が 50 に回復する再生用添加剤量

| 項目 | 初期針入度（1/10mm） | 再生用添加剤量（%） |
|---|---|---|
| 劣化ストアス | 25 | 7.4 |
| 劣化ストアス＋劣化植物由来樹脂混合物（50:50） | 38 | 3.8 |

### ４．３．３ 再生混合物の配合設計

上記で決定した再生用添加剤量により、再生混合物の配合設計を行った（**表 6.4.6**、**図 6.4.16**）。

**表 6.4.6**　骨材配合及び合成粒度

| 項目 | | 再生密粒度混合物（13） | |
|---|---|---|---|
| 配合率（%） | ストアス使用劣化混合物 | 30.0 | |
| | 植物由来樹脂②使用劣化混合物 | 30.0 | |
| | 6 号砕石 | 13.6 | |
| | 7 号砕石 | 8.0 | |
| | 砕砂 | 12.0 | |
| | 細目砂 | 3.6 | |
| | 石粉 | 2.8 | |
| - | ふるい目 | 合成粒度 | 粒度範囲 |
| 通過質量百分率（%） | 19.0 mm | 100 | 100 |
| | 13.2 mm | 95.7 | 95~100 |
| | 4.75 mm | 61.0 | 55~70 |
| | 2.36 mm | 41.6 | 35~50 |
| | 0.6 mm | 25.0 | 18~30 |
| | 0.3 mm | 15.4 | 10~21 |
| | 0.15 mm | 8.9 | 6~16 |
| | 0.075 mm | 6.1 | 4~8 |

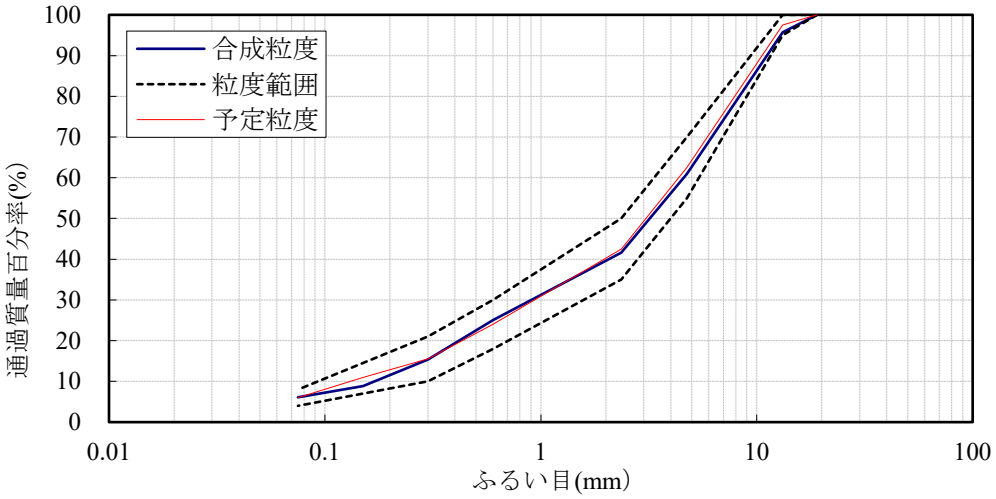


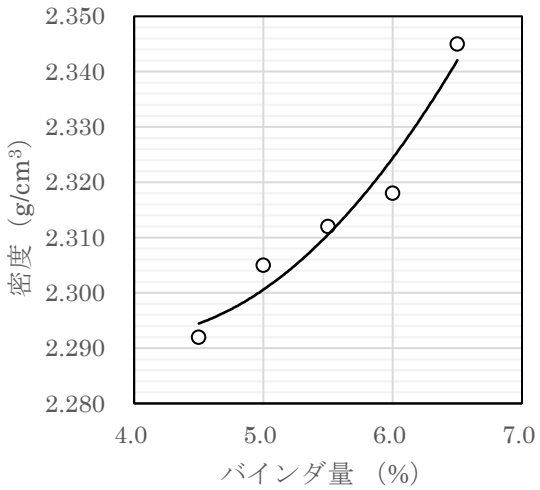

**図 6.4.16**　合成粒度

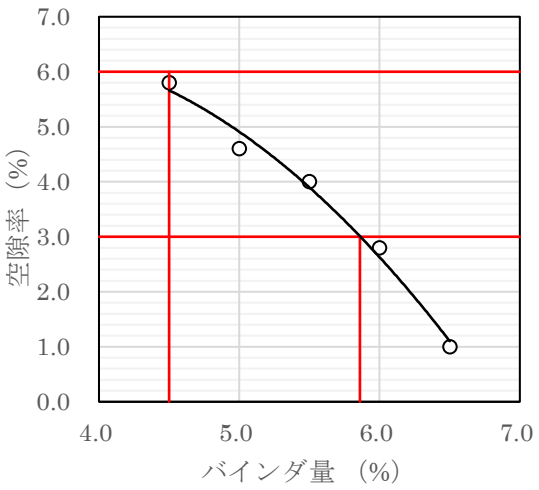
### ４．３．４ 配合試験結果

マーシャル安定度試験結果を示す（**表 6.4.7、図 6.4.17**）。マーシャル供試体の作製にあたっては、混合温度は 170℃、突固め温度は 160℃で行い、突固め回数は両面 50 回で行った。再生骨材配合率 60%（50 : 50）の再生密粒度混合物（13）の最適アスファルト量は 5.5%となった。

**表 6.4.7　マーシャル安定度試験結果**

| バインダ量（%） | | | | 密度 | 理論密度 | 空隙率 | 飽和度 | 安定度 | フロー値 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 合計 | 旧 As | 新 As | 再生用添加剤 | g/cm³ | g/cm³ | % | % | kN | 1/100cm |
| 4.5 | 3.24 | 1.16 | 0.097 | 2.292 | 2.432 | 5.8 | 63 | 11.4 | 36 |
| 5.0 | 3.24 | 1.66 | 0.097 | 2.305 | 2.416 | 4.6 | 71 | 13.6 | 36 |
| 5.5 | 3.24 | 2.16 | 0.097 | 2.312 | 2.400 | 3.7 | 77 | 13.9 | 38 |
| 6.0 | 3.24 | 2.66 | 0.097 | 2.318 | 2.384 | 2.8 | 83 | 15.5 | 38 |
| 6.5 | 3.24 | 3.16 | 0.097 | 2.345 | 2.368 | 1.0 | 94 | 14.4 | 41 |



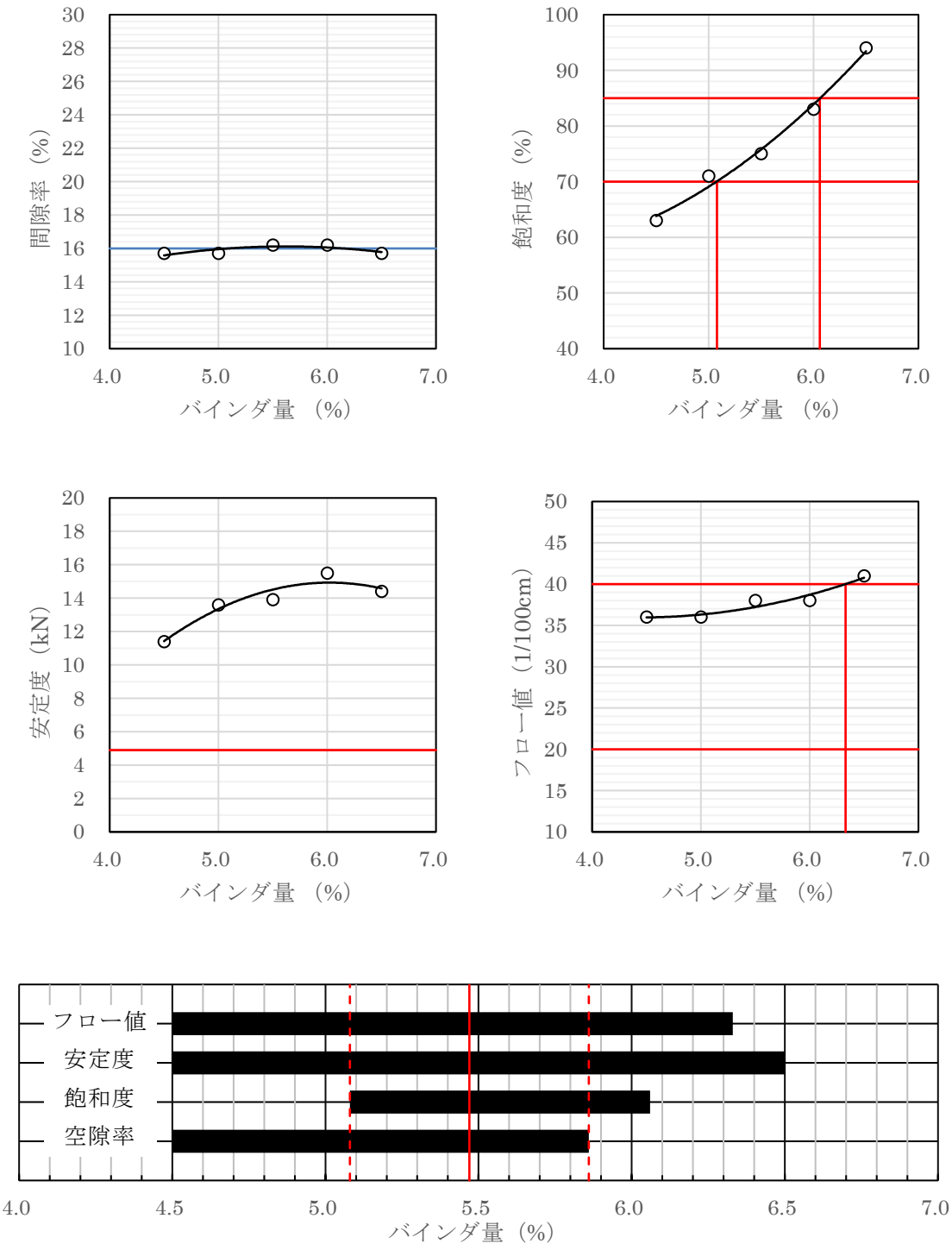



**図 6.4.17**　植物由来樹脂劣化混合物を含む再生密粒度混合物（13）の配合試験結果

### 4.4　再生技術の可能性に関するまとめ

得られた知見を以下にまとめる。

【劣化特性の把握】

- ステンレス板上の植物由来樹脂②、③を目視観察した結果、粘性および流動性が見られた。
- DSR 試験の結果から、植物由来樹脂の複素弾性率は、アスファルトと比べて増加傾向にあった。
- 赤外分光分析から、植物由来樹脂①、②、③のカルボニル基を示すピークに顕著な変化は見られなかった。

【再生技術の検討】

- 植物由来樹脂を用いた混合物の再生骨材が通常のアスファルト混合物に混入した場合を想定し、室内劣化させた混合物からバインダ抽出を行った結果、回収バインダの針入度はアスファルトよりも高いことが示された。
- 劣化した植物由来樹脂混合物が半分を占める再生骨材の配合率を 60%とした再生密粒度混合物（13）について一般的な再生加熱アスファルト混合物の配合設計を行った結果、フロー値が高くなる傾向にあるものの、最適バインダ量において再生密粒度混合物のマーシャル特性を満足することを確認した。

## ５．ライフサイクル $CO_2$ の試算

### ５．１　試算の概要

植物由来樹脂を用いた As 代替舗装のライフサイクルにおける二酸化炭素排出量($LCCO_2$)を算出した。すなわち特定の舗装構成を設定し、使用するバインダの条件を変更し、建設・補修・修繕で二酸化炭素排出量を計算、積算することで $LCCO_2$ を計算した。想定した舗装の構成について**表 6.5.1** に示す。基層から表層まで植物由来樹脂を用いた混合物で施工した[全層バインダ置き換え]、表層のみを植物由来樹脂の混合物に置き換えた[表層バインダ置き換え]の 2 種類を想定した。

表 6.5.1　$LCCO_2$ の試算条件（舗装構成）

| 項目 | | 交通量区分 $N_6$（比較構成） | 全層バインダ置き換え | 表層バインダ置き換え |
|---|---|---|---|---|
| 施工面積　($m^2$) | | 5300 | | |
| 表層の性能保持期間（年） | | 10 | | |
| | | 上記年数ごとに補修（表層切削 OL）と修繕（路盤以上の打ち換え）を交互に行う | | |
| 表層 | 密粒（13）、50mm | 改質 II 型 | 植物由来樹脂 | 植物由来樹脂 |
| 中間層 | 粗粒（20）、50mm | ストアス | 植物由来樹脂 | ストアス |
| 基層 | 粗粒（20）、50mm | ストアス | 植物由来樹脂 | ストアス |
| 上層路盤、350mm | | M-30 | | |
| 下層路盤、350mm | | C-40 | | |
| その他 | | アスファルト乳剤や各工事での機械燃料を計上 | | |

## ５．２　二酸化炭素固定を考慮しない試算

まずバインダの二酸化炭素排出量原単位をそのまま適用した場合の結果を算出した。算出に用いたバインダの二酸化炭素排出量原単位は**表 6.5.2** に示す。

植物由来樹脂は、原料の製造にかかる二酸化炭素排出量と使用する比率を掛けた値の合計と混合に使用したエネルギーを足し合わせた値となっている。アスファルトバインダ 2 種については公益社団法人 日本道路協会 舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブックに記載の値を引用した。植物由来樹脂の二酸化炭素原単位はストレートアスファルトの 19 倍弱、ポリマー改質アスファルト 4 倍程度となっている。

表 6.5.2　バインダの二酸化炭素排出量原単位

| バインダ | 二酸化炭排出量原単位（$kg\text{-}CO_2/t$） |
|---|---|
| 植物由来樹脂 | 1,840.1 |
| ストレートアスファルト | 107.56 |
| 改質 II 型 | 488.82 |

### ５．２．１ 試算結果

二酸化炭素排出量の試算結果について、各段階の $CO_2$ 排出量を**図 6.5.1**、**図 6.5.2**、**図 6.5.3** 積算した $LCCO_2$ のグラフを**図 6.5.4** に示す。施工や輸送での $CO_2$ 排出量は同じ値だが､バインダを植物由来樹脂に置き換えるにしたがって材料調達の項目で排出量が増加し、累計二酸化炭素排出量は比較構成に対して、表層置き換えで約 1.3 倍、全層置き換えで約 1.6 倍となった。

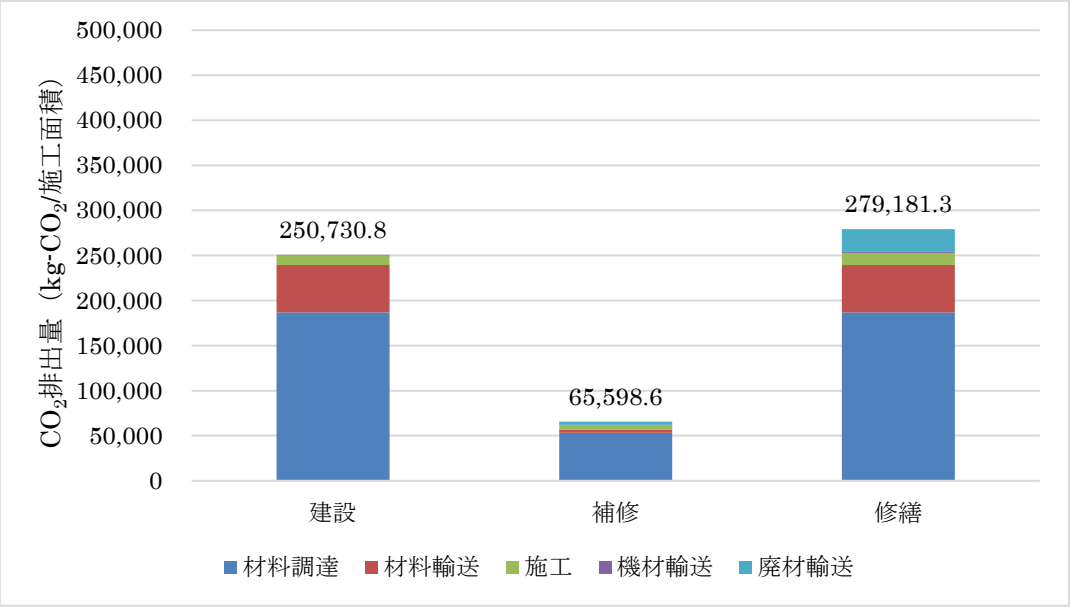



図 6.5.1　各段階の $CO_2$ 排出量　（比較構成）

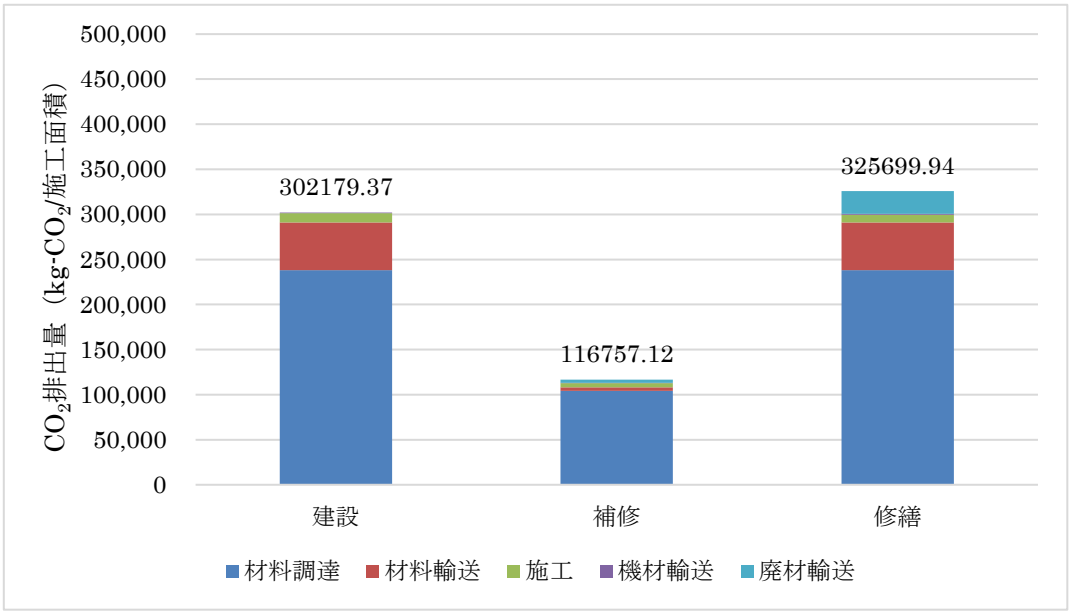



図 6.5.2　各段階の $CO_2$ 排出量　（表層バインダ置き換え）

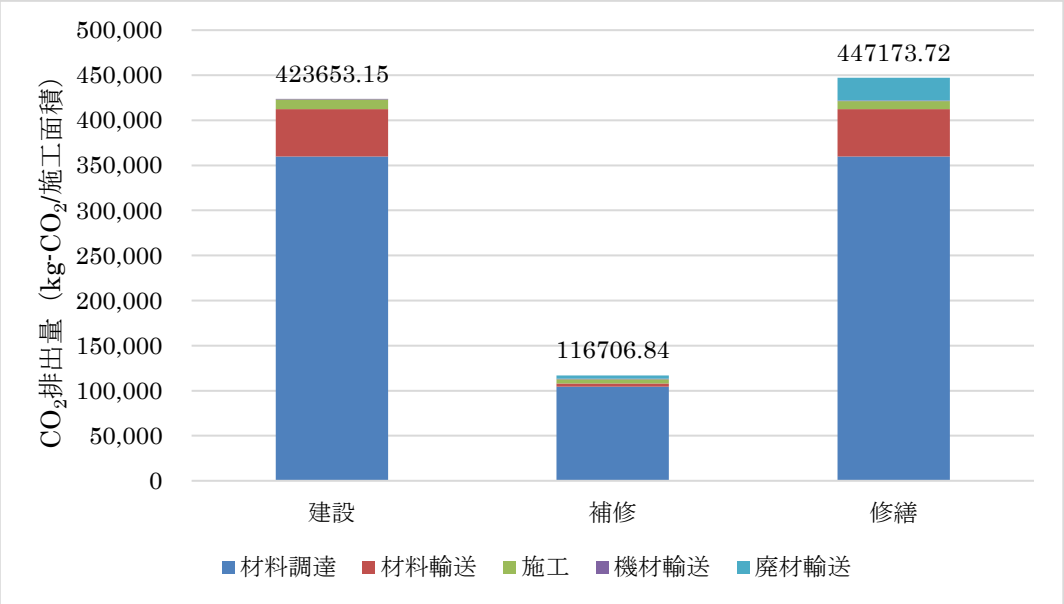



図 6.5.3　各段階の $CO_2$ 排出量　（全層バインダ置き換え）

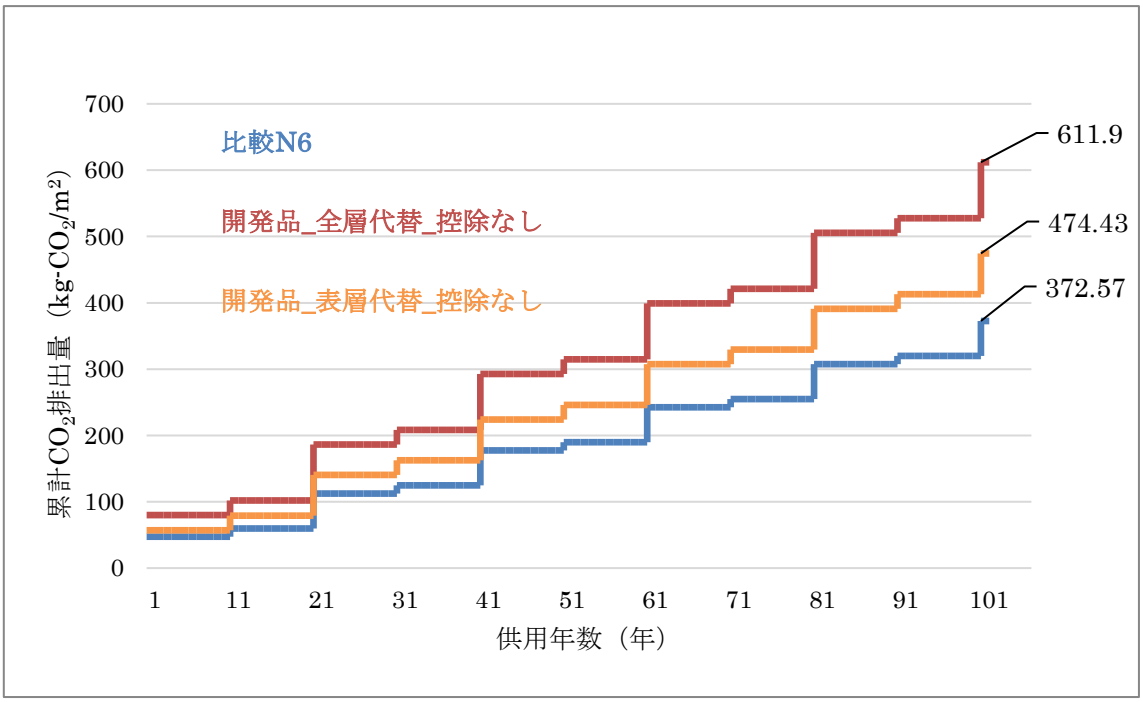



図 6.5.4　条件ごとの累計二酸化炭素排出量

## ５．３　二酸化炭素固定を考慮した $LCCO_2$ の試算

植物由来樹脂はその名前の通り原料として植物由来材料を含んでいる。すなわち樹脂中には、原料植物が成長する過程で吸収した二酸化炭素由来の炭素が固定されていると考えられる。そこで植物由来樹脂の炭素固定量を概算し、二酸化炭素排出量原単位から控除し再計算した。

### ５．３．１ 炭素固定量の概算

植物由来樹脂の含有炭素量の重量比を JIS K0132 エネルギー分散型蛍光 X 線分析（SEM-EDX 法）により求めた結果 84.6%となった（**図 6.5.5**、**表 6.5.3**）。この分析結果はホウ素よりも軽い原子を検出できないため、本来含まれているはずの水素原子を含んでいない。従って水素原子の含有量については他の類似する有機化合物の構造から推定した。

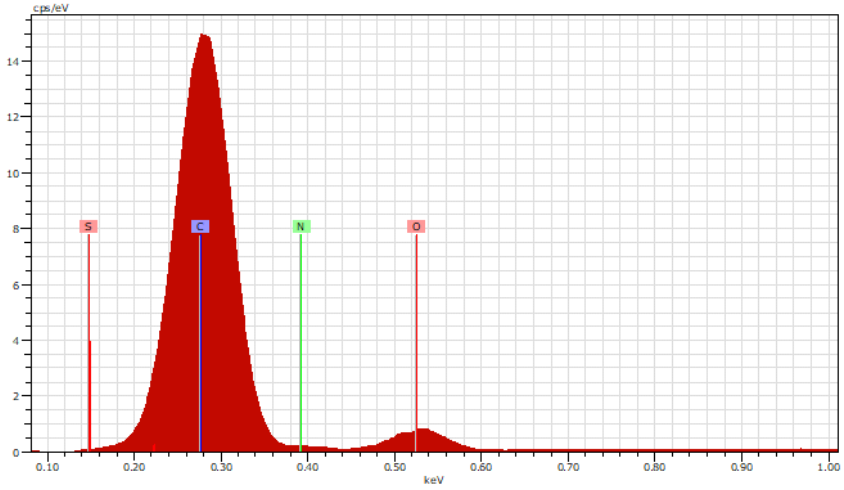



**図 6.5.5**　植物由来樹脂の元素分析結果

**表 6.5.3**　植物由来樹脂の元素重量比

| 元素 | 炭素 | 酸素 | 硫黄 | 窒素 |
|---|---|---|---|---|
| 重量比　（%） | 84.61 | 8.64 | 0.00 | 6.75 |

植物由来樹脂の想定される分子構造から、水素重量比を 10%と仮定した。これを考慮すると植物由来樹脂に含まれる炭素の重量における割合は式（6.5.1）より 76.1%となる。

$$84.61 \times \frac{100 - 10}{100} = 76.1\ (\%) \quad \cdots \text{式（6.5.1）}$$

この炭素の分二酸化炭素が固定できていることになるので、バインダ全体に貯蔵されている二酸化炭素は式（6.5.2）より 2790.3 kg-$CO_2$/t と想定される。

$$1000 \times 0.761 \times \frac{44\ \text{（二酸化炭素の分子量）}}{12\ \text{（炭素の原子量）}} = 2790.3 \quad \cdots \text{式（6.5.2）}$$

植物由来樹脂のバイオマス度は計算すると 81.9%となる。このバイオマス度を想定した 2790.3 kg-$CO_2$/t にかけ合わせることで物由来樹脂の二酸化炭素固定量 2285.3 kg-$CO_2$/t を算出した。製造にかかる原単位 1840.1 kg-$CO_2$/t から控除した結果、控除後の二酸化炭素原単位は-445 kg-$CO_2$/t となった。

### ５．３．２ 試算結果

二酸化炭素固定分の控除を考慮した試算結果について**図 6.5.6～図 6.5.8** に示す。植物由来樹脂の原単位が控除によってマイナスとなったため、材料調達にかかわる二酸化炭素排出量が大幅に減少した。

累計での面積当たり二酸化炭素排出量についても通常のアスファルトバインダを用いた場合よりも 2～3 割ほど少なくなった。

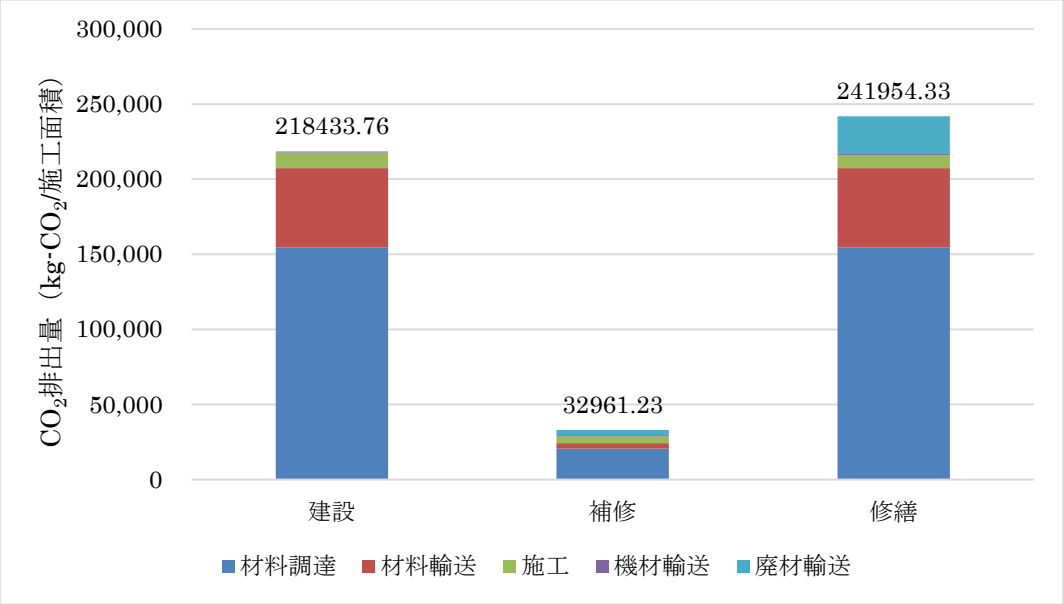



**図 6.5.6**　各段階の $CO_2$ 排出量　（表層バインダ置き換え･控除あり）

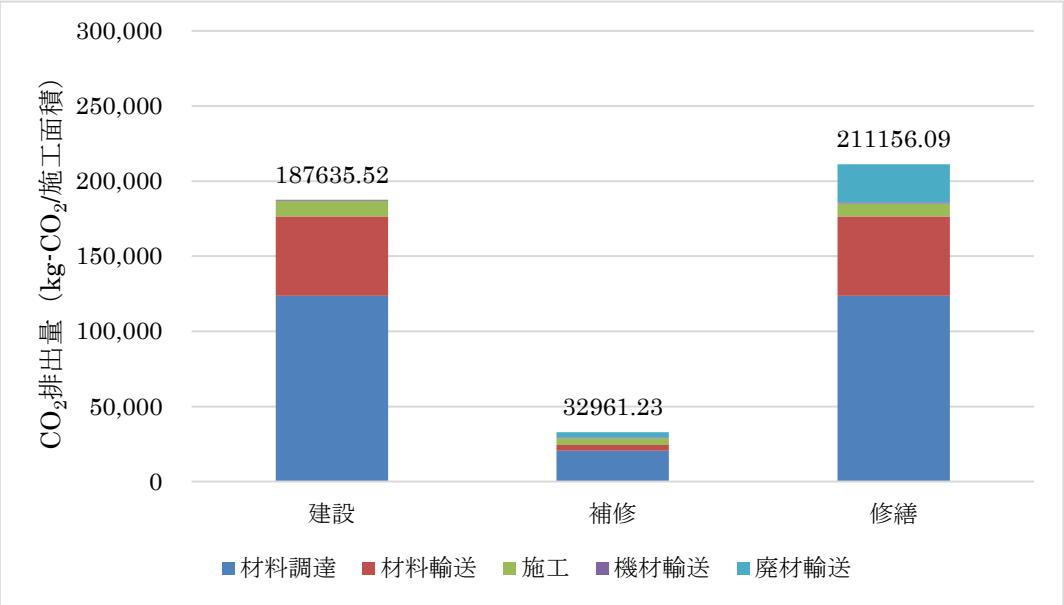



**図 6.5.7**　各段階の $CO_2$ 排出量　（全層バインダ置き換え･控除あり）

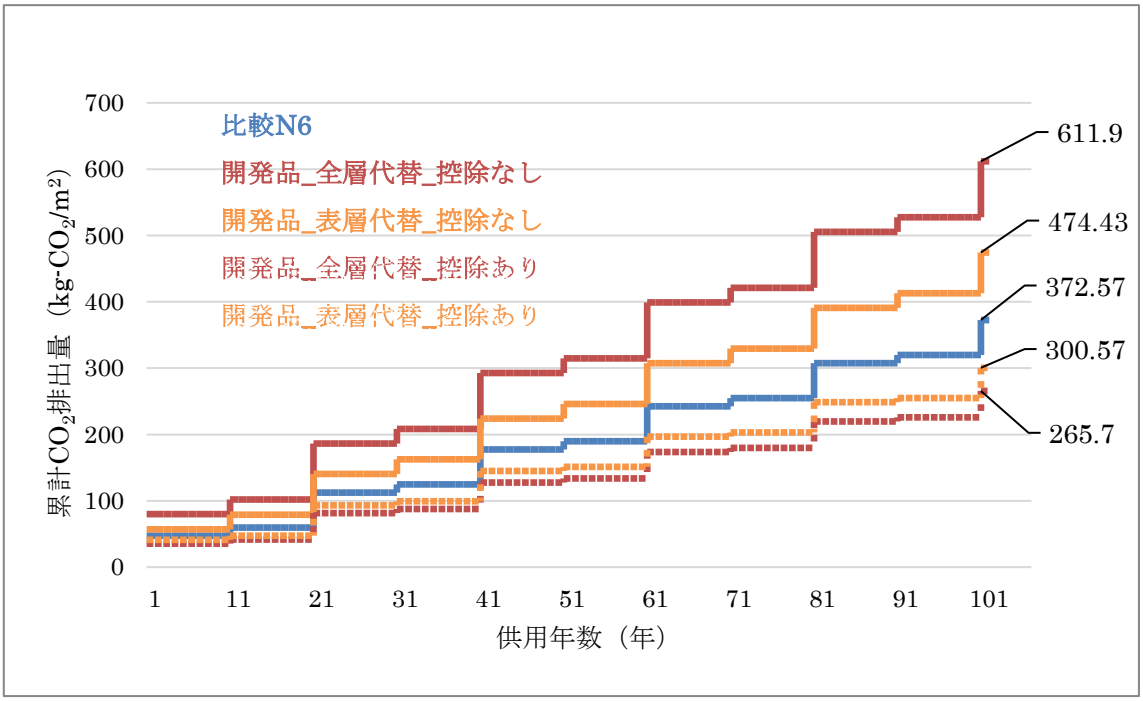



図 6.5.8　二酸化炭素固定を考慮した供用年数ごとの二酸化炭素排出量

## ５．４　$LCCO_2$ 試算のまとめ

使用するバインダを変更して交通区分 $N_6$ を想定した舗装構成の $LCCO_2$ を試算した結果、製造にかかる原単位の差から、植物由来樹脂で置き換えた舗装の二酸化炭素排出量は従来の舗装よりも高くなることが分かった。

一方で、植物由来樹脂について推定した二酸化炭素固定量とバイオマス度から二酸化単排出量原単位に対して控除した場合は値がマイナスとなり、ライフサイクルにおける二酸化炭素排出量が従来の舗装よりも少なくなった。

ただし、控除の計算の根拠は非破壊の分析によるものであるため、植物由来樹脂に対して元素分析を行うことでより正確な比較ができるようになる。

## ６．まとめ

本研究により得られた知見を以下にまとめる。

【設計方法および配合設計方法の検討】

- 提案した植物由来樹脂は材料の比率で針入度等の性状を調整することができる。
- アスファルトと同様のマーシャル配合設計を適用し最適バインダ量を決定した。

【施工性・耐久性評価に関する検討】

- WET 混合時間が長くなったが、プラントにおける製造は問題なく行えた。また目標の密度となる混合物を一般的な施工機械を用いて構築できることを確認した。
- 実大舗装促進載荷試験では、30 万輪走行後の調査でひび割れが発生していた。基層の材料が変化する境界部でひび割れが生じていたことから植物由来樹脂の混合物は下層の支持力の変化点に留意する必要がある。
- 30 万輪走行時点でわだち掘れは発生しなかった。
- 動的摩擦係数については走行車の走行回数の増加に従って高くなった。
- 色彩色差計の測定および目視による観察では舗装の色が白く変化していった。

【再生技術の可能性の検討】

- 植物由来樹脂について屋外暴露を行った結果、複素弾性率はアスファルトと比べて大きく増加した。
- 鉄板上の植物由来樹脂の粘性および流動性がアスファルトと比較して失われにくいことがわかった。
- 回収した試料について性状を試験した結果、赤外分光分析によるカルボニル基の観察では植物由来樹脂①は変化がなかったが、その他のバインダは酸化劣化の兆候が見られた
- 劣化した植物由来樹脂混合物が半分を占める再生骨材の配合率を 60%とした再生密粒度混合物について一般的な再生加熱アスファルト混合物の配合設計を行った結果、フロー値が高くなる傾向にあるものの、最適バインダ量において再生密粒度混合物のマーシャル特性を満足することを確認した。

## ７．今後の課題

室内試験および実大舗装促進載荷試験により、本技術の基本性能を確認した。一方、耐久性・耐候性については長期供用下でのデータ取得が今後の課題である。現段階では、適用交通量を限定することで実道への適用が可能と判断される。今後は、技術の改良・高度化を図り、適用可能な舗装条件の拡大に向けた検討を進める。

# 7編　ニチレキ株式会社

## １．はじめに

現在、カーボンニュートラル実現に向けた取り組みが活発化しており、今後、産業体系が大きく変化することが予想される。このような背景から、石油精製量は減少する可能性があり、これに伴いアスファルトの生産量も減少することが懸念される。更に、アスファルトの国内プラントが減少傾向にあることや、舗装で使用するアスファルトの 3 割近くを輸入に頼っている状態であることから、アスファルトの安定した供給が困難となった場合には、その代替となる舗装材料が必要となる。

舗装業界では、国内外において植物由来の材料を用いた再生用添加剤[1)]や舗装材料[2)]の開発が進みつつある。しかし、植物由来の材料は、他産業においても大きく注目されており、今後、素材の確保が難航することが懸念される。そのため、アスファルトをすべて植物由来の材料に置き換えることは現実的ではない。そこで、適用する舗装材料として、再生骨材に含まれる旧アスファルト（以下、旧アス）を有効に活用でき、バインダ添加量が少なくてすむ再生混合物に着目した。再生混合物に加える新アスファルト（以下、新アス）および再生用添加剤の代替として植物由来の材料を使用することで、新たに加える石油由来の材料を代替できると考えた。

本報告では、植物由来の材料を用いた石油アスファルト代替バインダ（以下、植物系バインダ）を開発し、再生混合物に適用した結果について述べる。

## ２．植物系再生混合物の構成

### ２．１　植物系バインダの構成

植物系バインダは、図 7.2.1 のとおり、植物由来のオイル（以下、植物油）および植物由来の樹脂（以下、植物樹脂）を原材料としている。本報告書では、これに再生骨材中の旧アスを含めて「植物系再生バインダ」と称す。なお、植物系バインダの針入度は、植物油と植物樹脂の配合比率によって自由に調整できる。

また、再生骨材配合率（以下、再生率）によって、再生バインダ中に占める旧アスの割合が変化するため、再生率に応じて植物系バインダの植物油と植物樹脂の配合比率を変えることで植物系再生バインダの針入度を 50（1/10mm）程度に調整する。

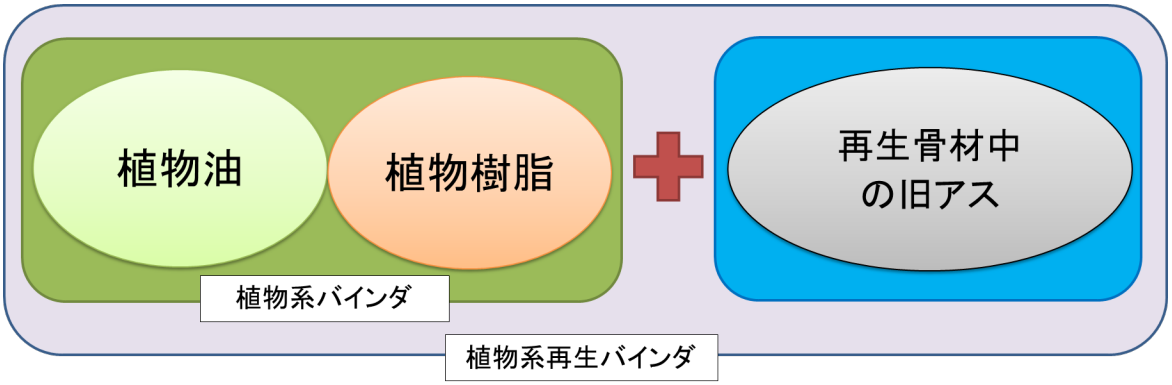



図 7.2.1　植物系再生バインダの構成

## ２．２　植物系再生混合物の構成

図 7.2.2 のとおり、従来の再生混合物（以下、石油系再生混合物）の「再生用添加剤」および「ストレートアスファルト（以下、ストアス）」を「植物系バインダ」に置き換えた再生混合物を本報告書では「植物系再生混合物」と称す。

なお、比較混合物として、ストアス混合物および石油系再生混合物も併せて評価する。

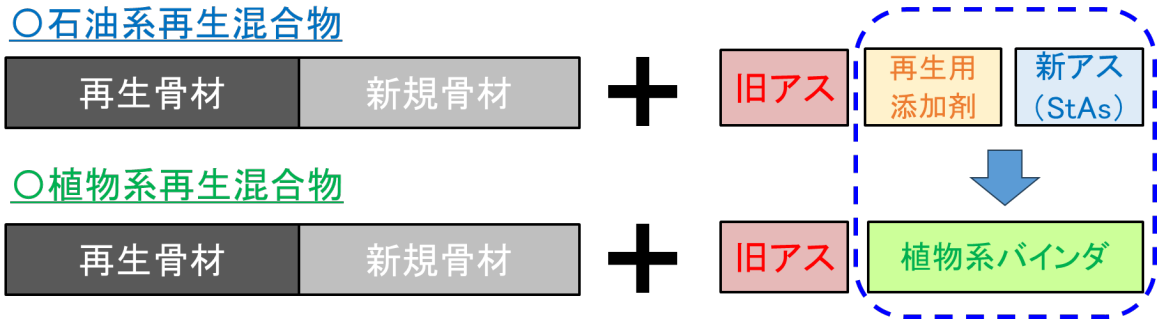



図 7.2.2　植物系再生混合物の構成

## ３　使用材料

### ３．１　植物系バインダ

本研究にて使用した植物油および植物樹脂の性状を**表 7.3.1**、植物系バインダの構成を**表 7.3.2** に示す。植物系バインダは、2 種類の植物油と 2 種類の植物樹脂をそれぞれ組み合わせた計 4 種類を試作し、その針入度グレードが 50（1/10mm）程度となるように調整する。

**表 7.3.1**　植物油および植物樹脂の性状

| | 名称 | 軟化点（℃） | 粘度（mPa・s） |
|---|---|---|---|
| 植物油 | 植物油① | ― | 65.6（20℃） |
| | 植物油② | ― | 82.0（20℃） |
| 植物樹脂 | 植物樹脂① | 125 | 1470（180℃） |
| | 植物樹脂② | 160 | ― |

**表 7.3.2**　植物系バインダの構成

| 名称 | 植物油 | 植物樹脂 |
|---|---|---|
| **植物系①** | 植物油① | 植物樹脂① |
| **植物系②** | | 植物樹脂② |
| **植物系③** | 植物油② | 植物樹脂① |
| **植物系④** | | 植物樹脂② |

## ３．２　新骨材・再生骨材の性状

新骨材および再生骨材の性状を**表 7.3.3**、再生骨材（13-0）の粒度分布を**図 7.3.1** に示す。

**表 7.3.3**　新骨材および再生骨材の性状

| 項目＼骨材の種類 | | 新骨材 | | | 再生骨材 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 6号砕石 | 粗目砂 | 石粉 | 13-0 |
| 通過質量百分率（%） | 19.0mm | 100 | | | |
| | 13.2mm | 97.1 | | | 100 |
| | 4.75mm | 3.8 | 100 | | 71.9 |
| | 2.36mm | 0.5 | 91.1 | | 51.3 |
| | 600μm | 0.5 | 38.6 | | 29.5 |
| | 300μm | 0.5 | 17.2 | 100 | 21.4 |
| | 150μm | 0.4 | 6.1 | 99.1 | 14.5 |
| | 75μm | 0.4 | 1.6 | 88.9 | 9.8 |
| 密度（g/cm$^3$） | 見掛け | 2.691 | 2.659 | 2.71 | - |
| | 表乾 | 2.66 | 2.6 | - | - |
| | かさ | 2.563 | 2.563 | - | - |
| 最大密度 | g/cm$^3$ | | | | 2.516 |
| 吸水率 | % | 0.69 | 1.41 | - | |
| 旧アスファルト含有量 | % | - | - | - | 5.59 |
| 旧アスファルト針入度 | 1/10mm | - | - | - | 23 |

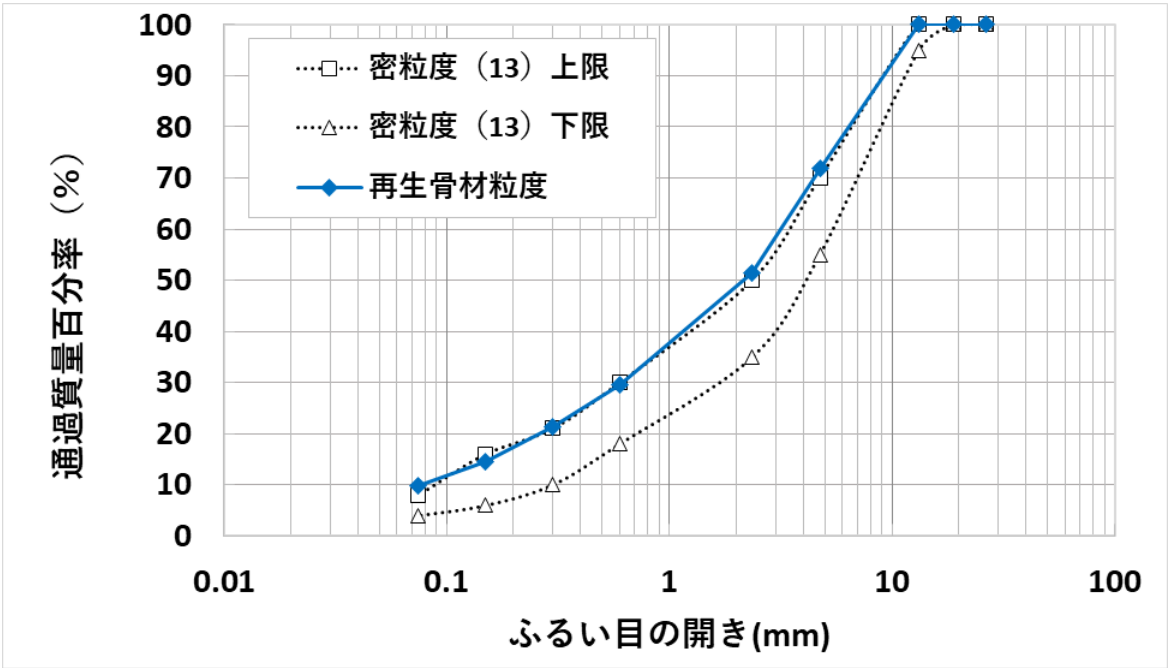



**図 7.3.1**　再生骨材の粒度

### ３．３　再生用添加剤の性状

再生用添加剤の性状は**表 7.3.4** に示すとおりであり、「舗装再生便覧（令和 6 年）**表－2.3.5**」に適合した再生用添加剤である。

**表 7.3.4**　再生用添加剤の性状

| 試験項目 | | 試験値 |
|---|---|---|
| 動粘度（60°C）　$mm^2/s$ | | 150.4 |
| 引火点　°C | | 306 |
| 薄膜加熱試験 | 質量変化率　% | -0.33 |
| | 粘度比（60°C） | 1.02 |
| 密度（15°C）　$g/cm^3$ | | 0.899 |
| 四成分比（%） | 飽和分 | 79.0 |
| | 芳香族分 | 19.9 |
| | レジン分 | 0.6 |
| | アスファルテン分 | 0.5 |

## ３．４　ストアスの性状

本研究にて、石油系再生混合物の新アスおよびストアス混合物に用いたストアスの性状は、**表 7.3.5** に示すとおりであり、「JIS K2207：2006」に適合したストアスである。

**表 7.3.5**　ストアスの性状

| 項目 | | StAs | 規格 |
|---|---|---|---|
| 針入度 | 1/10mm | 69 | 60-80 |
| 軟化点 | ℃ | 47.5 | 44.0-52.0 |
| 伸度（15℃） | cm | 100+ | 100以上 |
| トルエン可溶分 | % | 100 | 99.0以上 |
| 引火点 | ℃ | 355 | 260以上 |
| 薄膜加熱質量変化率 | % | +0.09 | 0.6以下 |
| 薄膜加熱針入度残留率 | % | 73.4 | 55以上 |
| 蒸発後の針入度比 | % | 98 | 110以下 |
| 密度（15℃） | g/cm³ | 1.038 | 1.000以上 |

## ４．研究フロー

研究フローを**図 7.4.1** に示す。

本検討では、全体像のうち、「植物系バインダの再生混合物への適用」から「植物系再生混合物の環境負荷の評価」まで実施した。

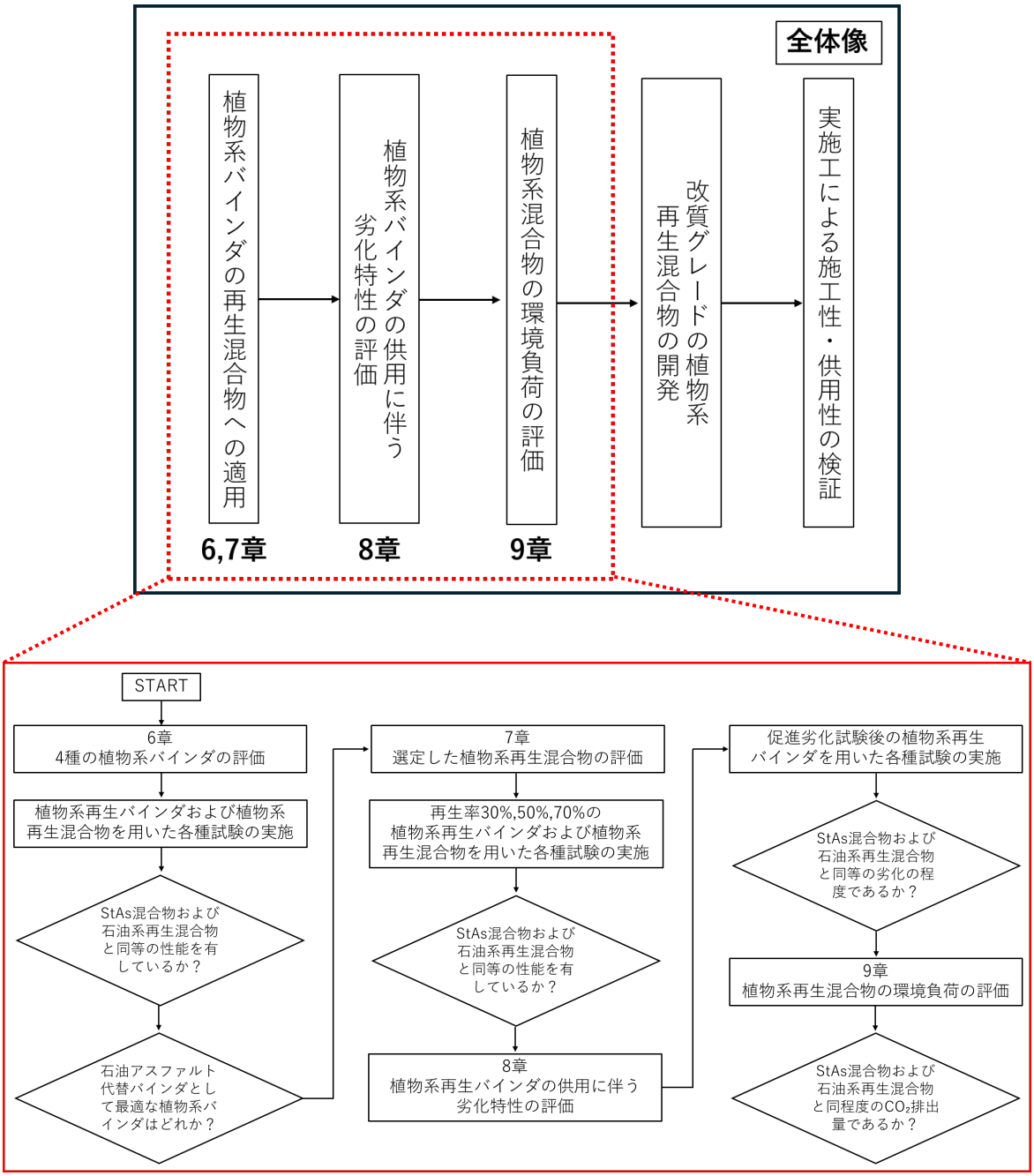



**図 7.4.1　検討フロー**

## ５．再生混合物の配合設計

再生率 30%、50%、70%の再生混合物およびストアス混合物の配合を**表 7.5.1**、合成粒度を
**図 7.5.1** に示す。

再生混合物の再生バインダ量は、「舗装再生便覧（令和 6 年版）」[3] に準じて決定した。また、植物系再生バインダに占める旧アスの割合が変化するため、再生率に応じて植物系バインダの植物油と植物樹脂の配合比率を変えることで、植物系再生バインダの針入度を 50 付近に調整した。

**表 7.5.1**　各混合物の配合

| | ふるい目 (mm) | 再生率（%） | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 (StAs混合物) | 30 | | 50 | | 70 | | |
| 通過質量百分率（%） | 19.0 | 100 | 100 | | 100 | | 100 | | |
| | 13.2 | 99.9 | 98.9 | | 99.6 | | 99.4 | | |
| | 4.75 | 62.3 | 55.0 | | 59.1 | | 60.1 | | |
| | 2.36 | 42.7 | 45.0 | | 45.5 | | 44.3 | | |
| | 0.600 | 22.4 | 23.2 | | 23.9 | | 24.5 | | |
| | 0.300 | 14.0 | 14.6 | | 15.6 | | 17.0 | | |
| | 0.150 | 9.6 | 9.2 | | 9.8 | | 11.2 | | |
| | 0.075 | 7.2 | 6.2 | | 6.0 | | 7.5 | | |
| 設計針入度 1/10mm | | (69) | 50 | | | | | | |
| 旧アス量 % | | ― | 1.69 | | 2.79 | | 3.86 | | |
| 石油系再生混合物 | 新アス量 % | 5.60 | 4.12 | ― | 2.96 | ― | 1.77 | ― | |
| | 再生用添加剤量 % | ― | 0.09 | ― | 0.15 | ― | 0.27 | ― | |
| 植物系再生混合物 | 植物系バインダ量 % | ― | ― | 4.21 | ― | 3.11 | ― | 2.04 | |
| 全バインダ量 % | | 5.60 | 5.90 | | | | | | |

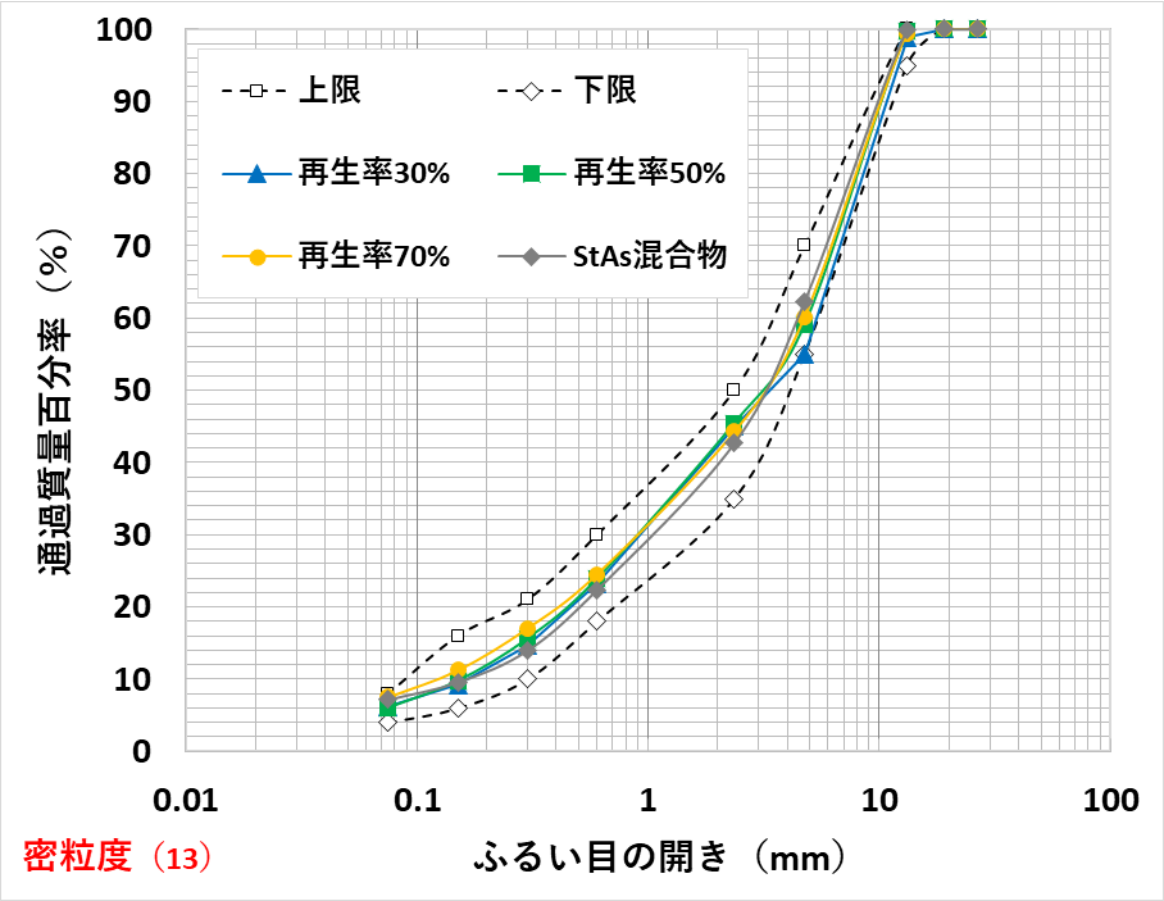



図 7.5.1　各混合物の合成粒度

## ６．植物系バインダの選定

### ６．１　目的

本検討の目的は、**表 7.3.2** に示す 4 種類の植物系バインダから、再生用バインダとして最適な性能を示す 1 種を選定することである。

### ６．２　バインダの評価

#### ６．２．１　試料の調整

本検討では、再生率を 50%に固定し、候補となる植物系再生バインダを評価した。なお、植物系再生バインダ中の旧アスと植物系バインダの配合比率は、**表 7.5.1** に示すとおりである。

なお、**図 7.6.1** に示すとおり、植物系バインダの植物油および植物樹脂の配合比率を変えることにより、植物系再生バインダの針入度を 50（1/10mm）程度に調整した。

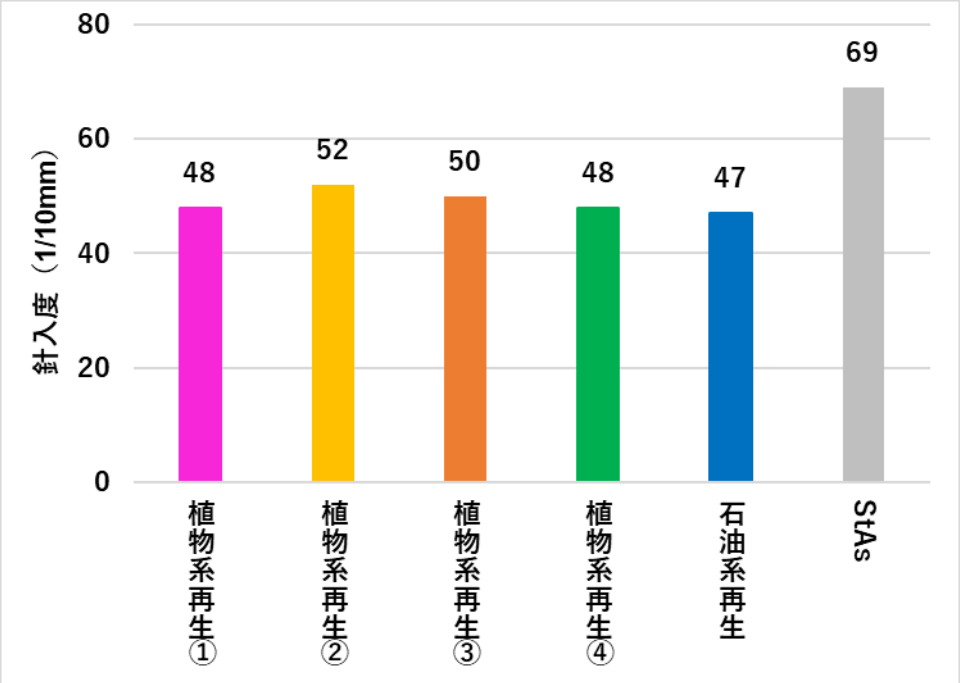



図 7.6.1　各バインダの針入度

### ６．２．２　評価方法

4 種の植物系再生バインダの性能を把握するため、バインダ試験を実施した。バインダ試験の項目は**表 7.6.1** に示すとおりである。

**表 7.6.1**　バインダ試験の項目

| 評価項目 | 試験方法 |
|---|---|
| 軟化点　℃ | 舗装調査・試験法便覧（平成31年版）A042 |
| 粘度　mPa・s | 舗装調査・試験法便覧（平成31年版）A052 |
| 位相角（20℃, 10rad/s）　° | 参考文献[4]に準拠 |
| 4 成分　% | 石油学会規格 JPI-5S-77-2019 |

### ６．２．３　評価結果

#### （１）　軟化点

各バインダの軟化点を**図 7.6.2** に示す。

植物系再生バインダの軟化点は、同じ針入度に調整した石油系再生バインダと比較して、5℃前後低い結果であった。

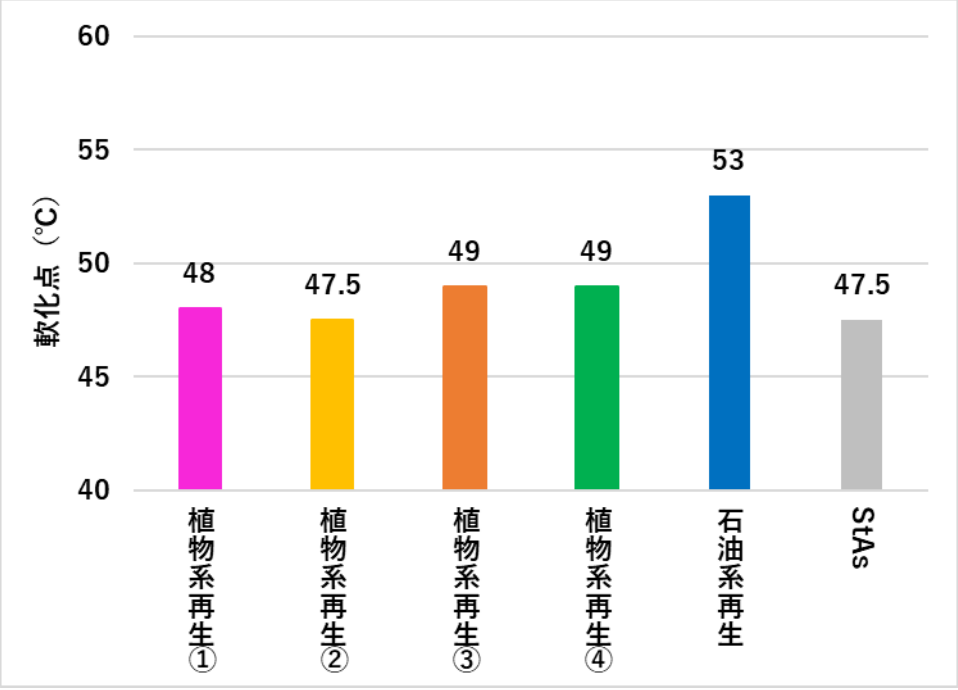



**図 7.6.2**　各バインダの軟化点

（２）　粘度

各バインダの粘度を図 7.6.3 に示す。

植物系再生バインダの粘度は、同じ針入度に調整した石油系再生バインダと比較して、やや低い値を示した。

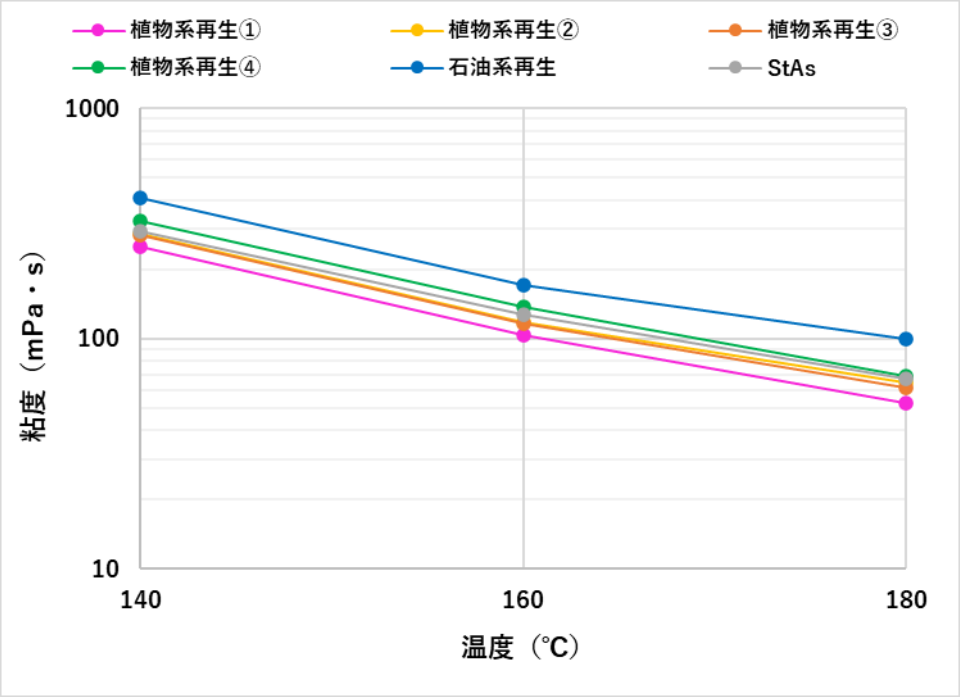



図 7.6.3　各バインダの粘度

### （３）　位相角

DSR 試験によって得られる位相角は、材料の弾性と粘性のバランスを表す指標であり、アスファルトなどの粘弾性材料の特性を評価することができる。位相角は 0°から 90°の範囲内で表され、0°に近いほど材料は弾性的であり、90°に近いほど粘性的であることを意味する。そのため、位相角を測定することで、植物系再生バインダの粘弾性を評価できる。本検討では、DSR 試験を用いて植物系再生バインダの位相角を測定し、その粘弾性を評価した。

各バインダの位相角を**図 7.6.4** に示す。

植物系再生バインダの位相角は、同じ針入度に調整した石油系再生バインダと比較して大きく、より粘性が高い傾向を示した。

また、植物系再生バインダの位相角は、ストアスと同程度であることから、植物系バインダは、再生骨材中の旧アスをよりストアスに近い特性に回復できると考えられる。

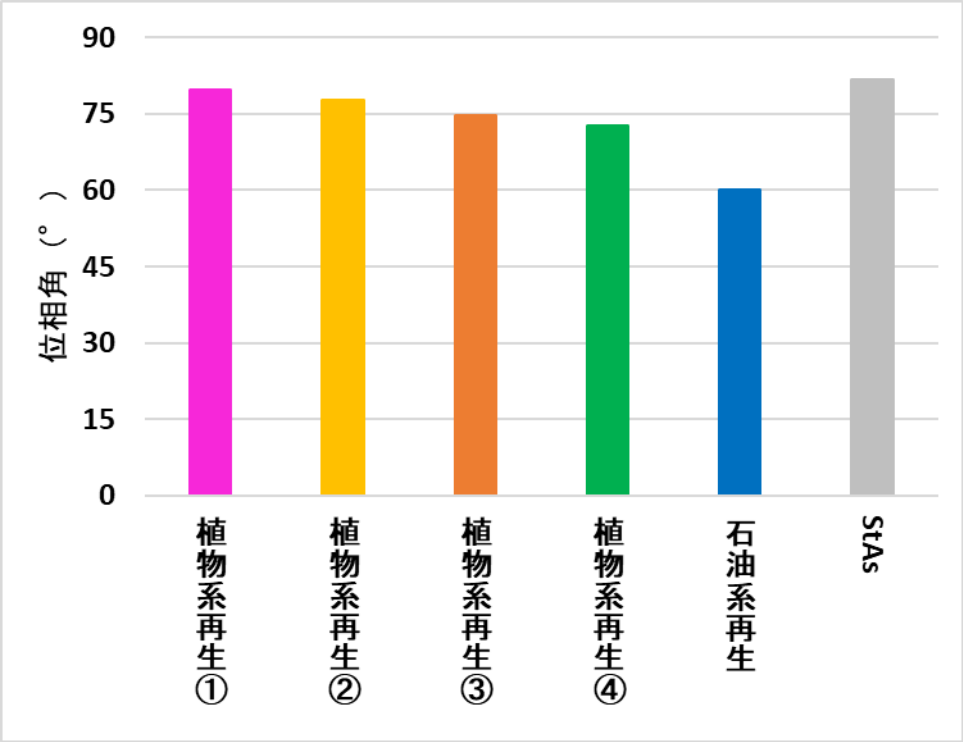



図 7.6.4　各バインダの位相角

（４）　４成分

各バインダの４成分を図 7.6.5 に示す。

植物系再生バインダの４成分の分析結果から、レジンが約 80%を占めていることが確認された。これは、図 7.6.6 に示すとおり、植物系バインダ成分において、レジン分が 100%であることに起因していると考えられる。

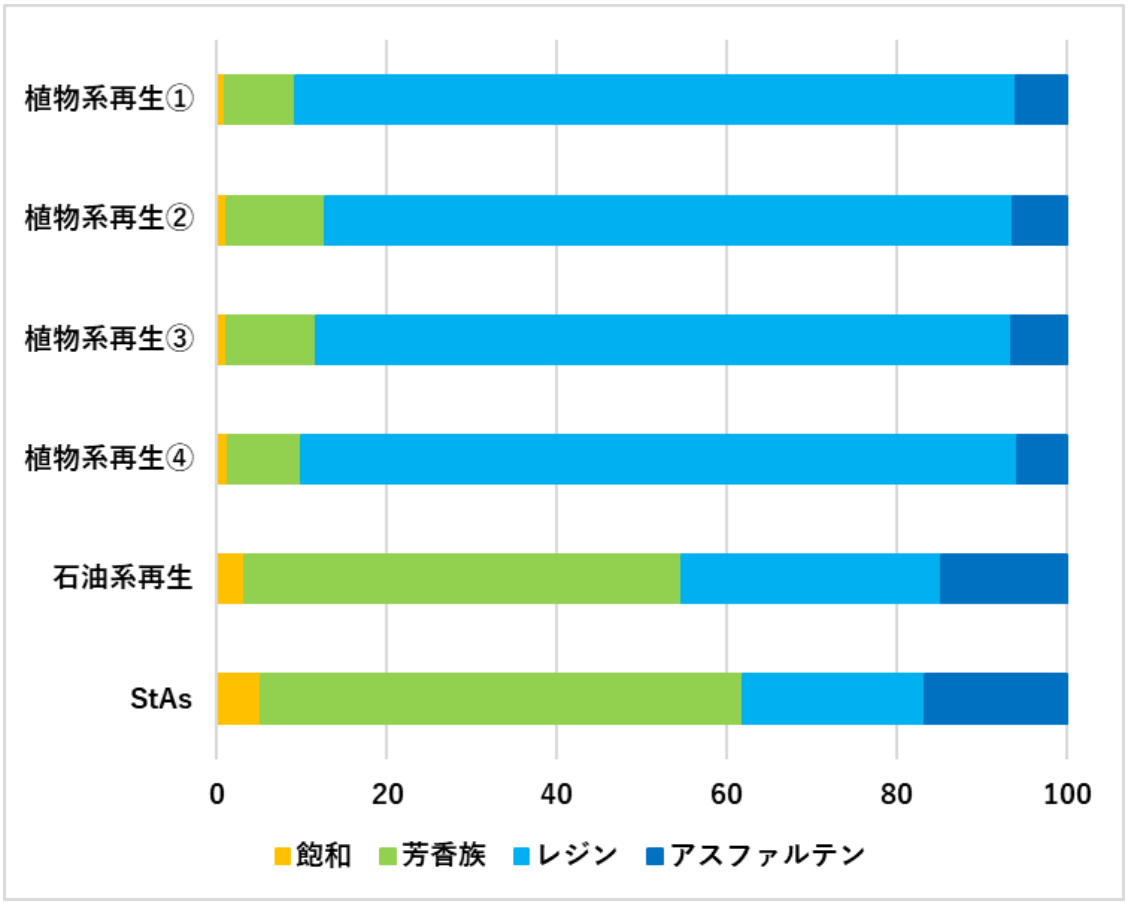



図 7.6.5　各バインダの４成分

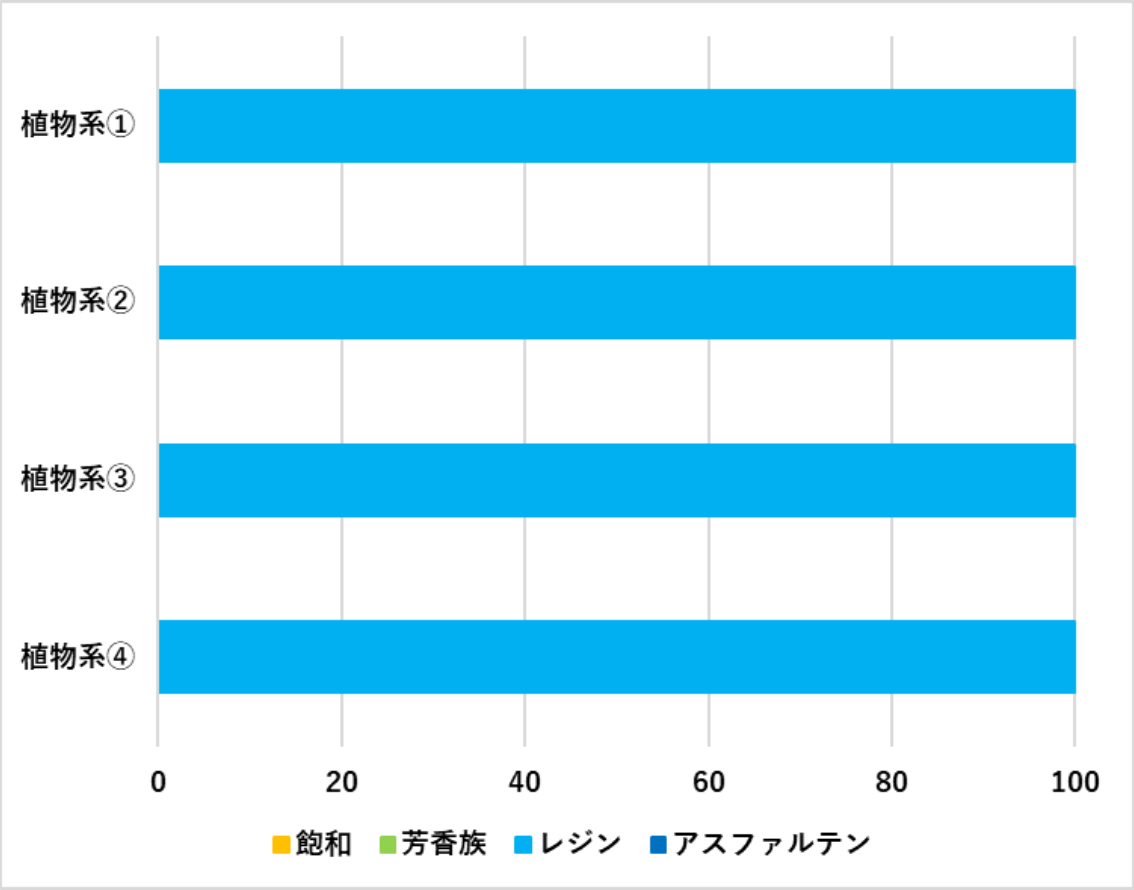



図 7.6.6　植物系バインダの 4 成分

## ６．３　混合物の評価

### ６．３．１　評価方法

4 種の植物系再生混合物を用いて各種試験を実施し、その性能を評価した。混合物性能の項目を**表 7.6.2** に示す。なお、本検討で作製した再生混合物の再生率は 50%とし、ストアス混合物および石油系再生混合物と比較した。

**表 7.6.2**　混合物性能の項目

| 評価方法 | 評価項目 | 試験方法 |
|---|---|---|
| WT試験（60°C） | 塑性変形抵抗性 | 舗装調査・試験法便覧（平成31年版）B003 |
| 小型曲げ試験<br>（-10～25°C） | 脆化点 | 参考文献[5]に準拠 |
| | たわみ追従性 | |
| 水浸WT試験（60°C） | 剥離抵抗性 | 舗装調査・試験法便覧（平成31年版）B004 |
| ラベリング試験（-10°C） | 耐摩耗性 | 舗装調査・試験法便覧（平成31年版）B002 |
| 疲労試験（15°C, 5Hz） | 疲労抵抗性 | 舗装調査・試験法便覧（平成31年版）B005 |

## ６．３．２　評価結果

### （１）　WT 試験

各混合物の WT 試験結果を図 7.6.7 に示す。

・各混合物の DS を比較すると、以下のとおりであった。

石油系再生≒植物系再生①、②、④＞植物系再生③＞ストアス

・植物系再生混合物の塑性変形抵抗性は、いずれもストアス混合物より高く、植物系再生混合物③を除き、石油系再生混合物と同程度であった。

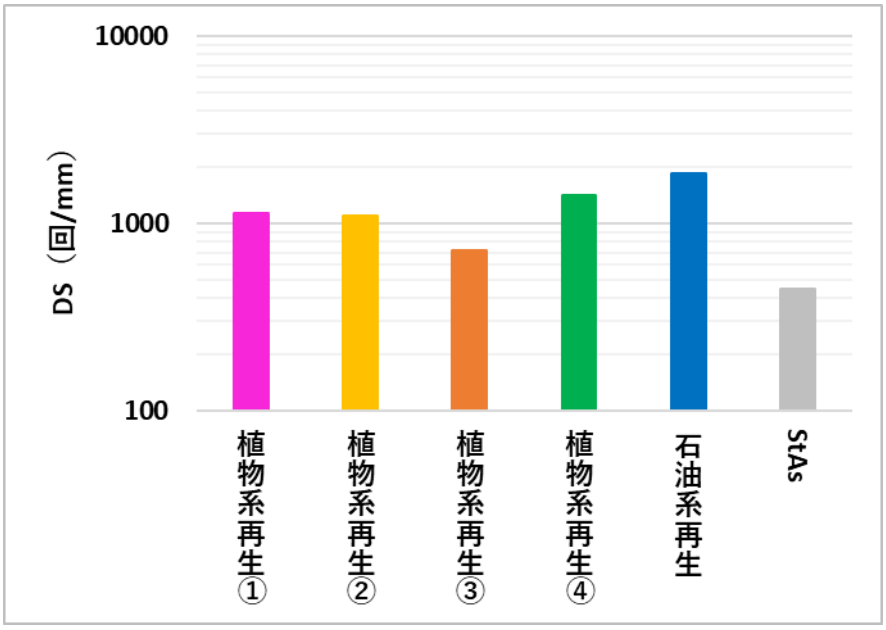



図 7.6.7　各混合物の WT 試験結果

### （２）　小型曲げ試験

小型曲げ試験によって曲げ応力および曲げひずみを測定し、脆化点およびたわみ追従性を評価した。各混合物の曲げ応力を**図 7.6.8**、曲げひずみを**図 7.6.9** に示す。

脆化点

・各混合物の脆化点を比較すると、以下のとおりであった。
　植物系再生①～③＞植物系再生④＝石油系再生＝ストアス
・植物系再生混合物④の脆化点は、石油系再生およびストアスと同程度（15℃）であったが、植物系再生混合物①～③の脆化点は 20℃を示した。

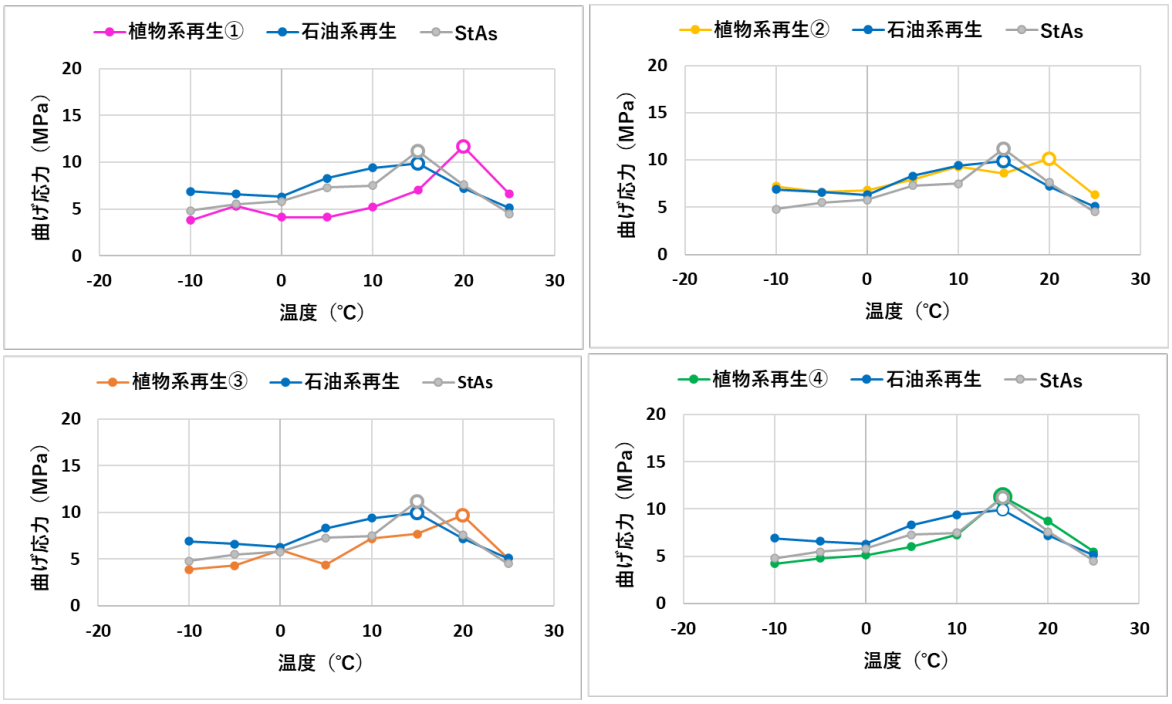



**図 7.6.8**　各混合物の曲げ応力

たわみ追従性

・各混合物のたわみ追従性を比較すると、以下のとおりであった。

低温領域（-10～10℃）：植物系再生①～④≒石油系再生≒ストアス

常温領域（15～25℃）：石油系再生≒ストアス＞植物系再生①～④

・植物系再生混合物の曲げひずみは、石油系材料と比較して、低温領域（-10～10℃）では同程度であったが、常温領域（15～25℃）において低い値を示した。

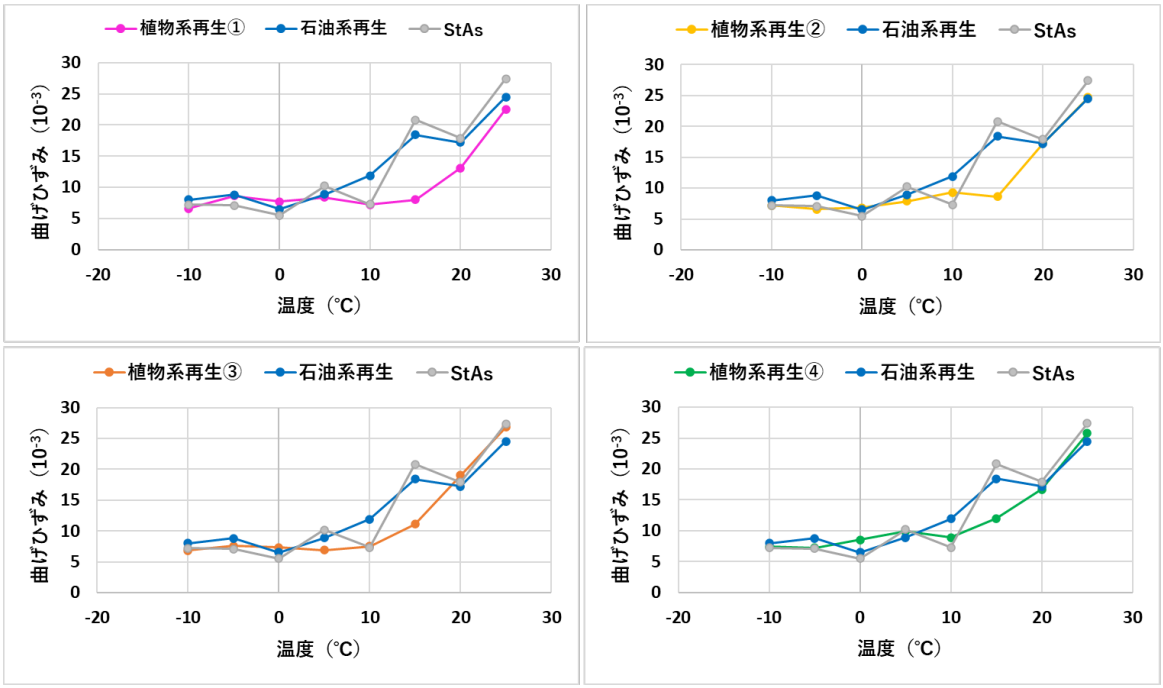



図 7.6.9　各混合物の曲げひずみ

### （３）　水浸 WT 試験

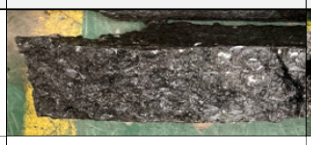
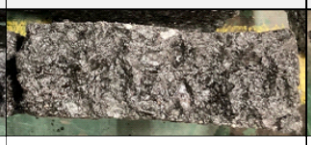
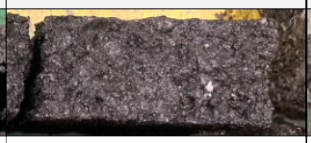
各混合物の水浸 WT 試験結果を**表 7.6.3** に示す。

・各混合物の剥離率を比較すると以下のとおりであった。

　植物系再生①～④≒石油系再生＞ストアス

・植物系再生混合物の剥離抵抗性は、ストアス混合物より高く、石油系再生混合物と同程度であった。

**表 7.6.3** 各混合物の水浸 WT 試験結果

| | 植物系再生① | 植物系再生② | 植物系再生③ |
|---|---|---|---|
| 試験後の供試体状況 |  |  |  |
| 剥離率（%） | 5 | 4 | 5 |
| | 植物系再生④ | 石油系再生 | StAs |
| 試験後の供試体状況 |  |  |  |
| 剥離率（%） | 3 | 3 | 11 |

（４）　ラベリング試験

各混合物のラベリング試験結果を**図 7.6.10** に示す。

・各混合物のすり減り量を比較すると以下のとおりであった。

　植物系再生①＞植物系再生②～④≒ストアス＞石油系再生

・植物系再生混合物②～④の耐摩耗性は、ストアス混合物と同程度であり、石油系再生混合物より高い結果であった。また、植物系再生混合物①の耐摩耗性は、ストアス混合物および石油系再生混合物よりも高いことがわかった。

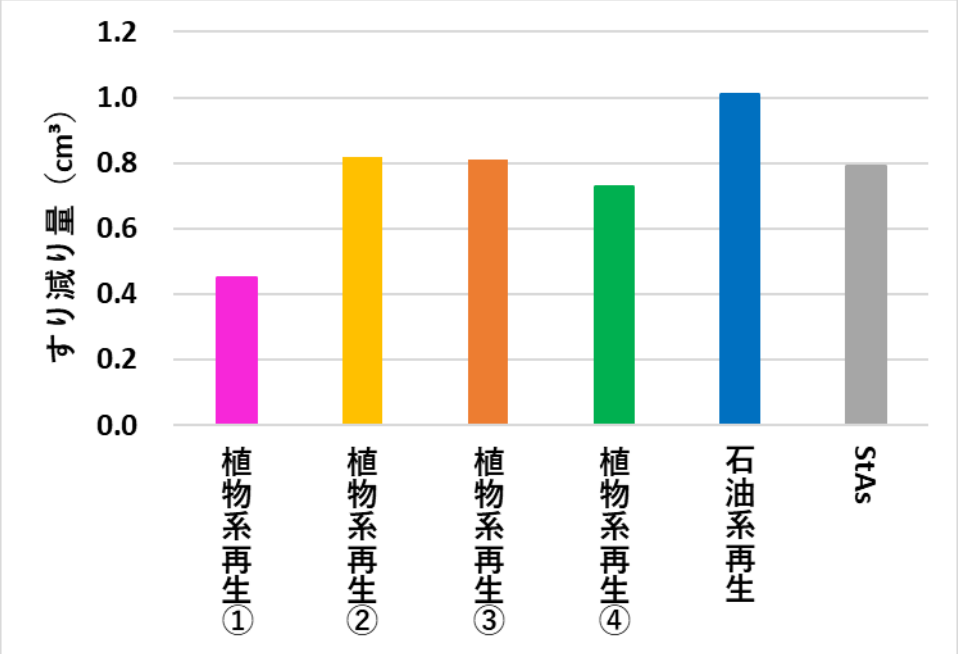



**図 7.6.10**　各混合物のラベリング試験結果

### （５）　疲労抵抗性

各混合物の疲労試験結果を図 7.6.11 に示す。

・各混合物の疲労抵抗性を比較すると、以下のとおりであった。

　　石油系再生＞植物系再生③、④＞植物系再生①、②≒ストアス

・植物系再生混合物①、②の疲労抵抗性は、ストアス混合物と同程度であった。また、植物系再生混合物③、④の疲労抵抗性は、ストアス混合物よりも高いことがわかった。

・植物系再生混合物の疲労抵抗性は、いずれも石油系再生混合物より低い結果であった。

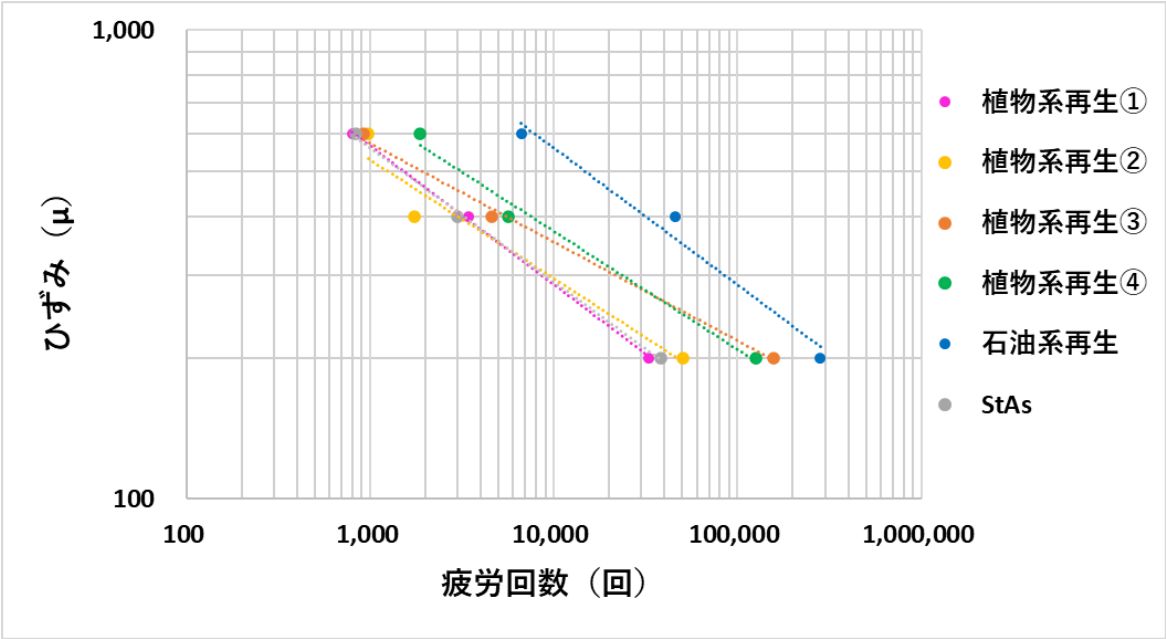



図 7.6.11　各混合物の疲労試験結果

### ６．３．３　他の混合物との比較

植物系再生混合物とストアス混合物の比較結果を**表 7.6.4**、植物系再生混合物と石油系再生混合物の比較結果を**表 7.6.5** に示す。

植物系再生混合物の性能は、ストアス混合物と同等以上であり、石油系再生混合物と比較すると低い性能を示す項目もあった。

その中でも、植物系再生混合物④は、石油系再生混合物とほとんどの評価で遜色ない性能が得られており、舗装に必要な性能をバランスよく具備していることが示された。

以上の結果から、植物系バインダ④を石油アスファルト代替バインダとして選定した。

**表 7.6.4**　植物系再生混合物とストアス混合物の比較結果

| | 植物系再生① | 植物系再生② | 植物系再生③ | 植物系再生④ |
|---|---|---|---|---|
| 塑性変形抵抗性 | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ |
| 脆化点 | × | × | × | ○ |
| たわみ追従性 | △ | △ | △ | △ |
| 剥離抵抗性 | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ |
| 耐摩耗性 | ◎ | ○ | ○ | ○ |
| 疲労抵抗性 | ○ | ○ | ◎ | ◎ |

◎：ストアス混合物より優れる、○：同程度、△：やや劣る、×：劣る

**表 7.6.5**　植物系再生混合物と石油系再生混合物の比較結果

| | 植物系再生① | 植物系再生② | 植物系再生③ | 植物系再生④ |
|---|---|---|---|---|
| 塑性変形抵抗性 | ○ | ○ | △ | ○ |
| 脆化点 | △ | △ | △ | ○ |
| たわみ追従性 | △ | △ | △ | △ |
| 剥離抵抗性 | △ | △ | △ | ○ |
| 耐摩耗性 | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ |
| 疲労抵抗性 | × | × | × | × |

◎：石油系再生混合物より優れる、○：同程度、△：やや劣る、×：劣る

## ７．植物系再生バインダ④の性能

### ７．１　目的

本検討の目的は、前項にて選定した植物系バインダ④を用いて作製した植物系再生混合物④の適用範囲（再生率）を評価することである。

### ７．２　バインダの評価

#### ７．２．１　評価方法

植物系再生バインダ④に対し、再生率を変化させた際の特徴を把握するため、再生率30%と 70%の再生バインダを調整し、種々の試験を実施した。バインダ性能の評価は**表** 7.6.1 と同様の試験を実施し、ストアスおよび同じ再生率の石油系再生バインダとの比較を行った。

#### ７．２．２　試料の調整

６．２．１と同様の手順にて、再生率 30%、70%の植物系再生バインダ④を針入度 50（1/10mm）程度に調整した。各バインダの針入度は**図** 7.7.1 に示すとおりである。

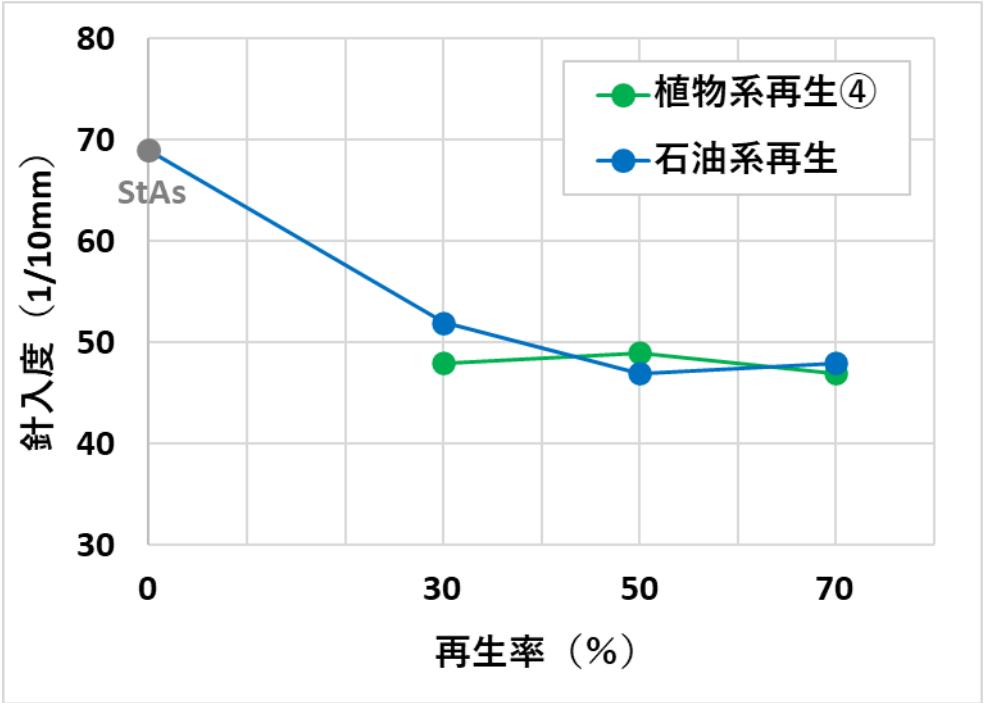



**図** 7.7.1 各バインダの針入度

### ７．２．３　評価結果

#### （１）　軟化点

各バインダの軟化点を図 7.7.2 に示す。

植物系再生バインダ④の再生率の変化に伴う軟化点の変化は、石油系再生バインダと同程度であった。

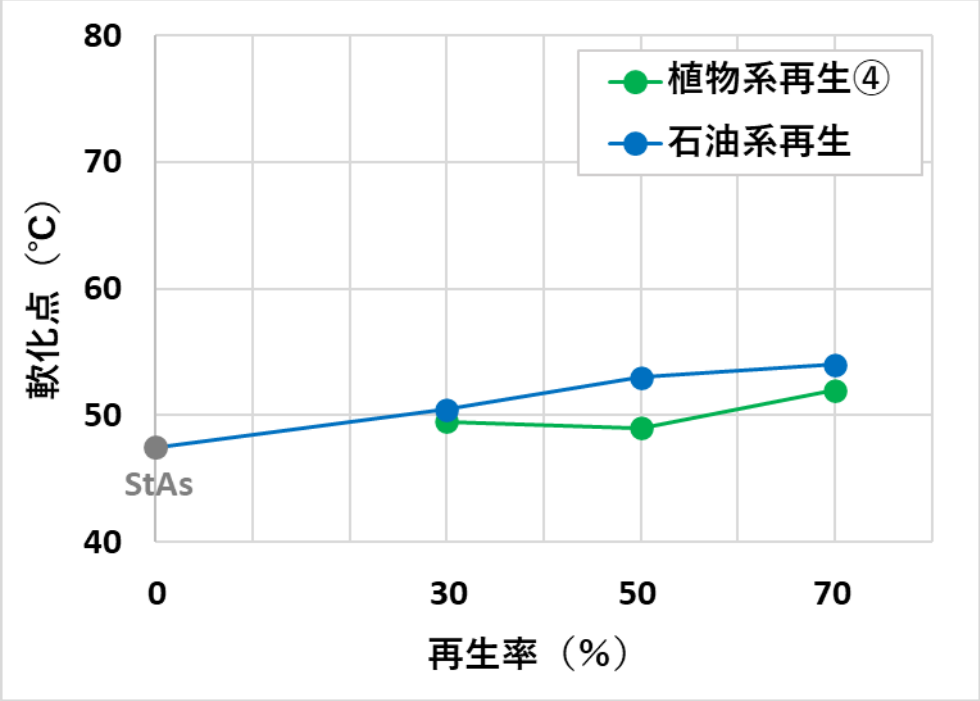



図 7.7.2　各バインダの軟化点

（２）　粘度

各バインダの粘度を図 7.7.3 に示す。

植物系再生バインダ④の再生率の変化に伴う粘度の変化は、軟化点と同様に石油系再生バインダと同程度であった。

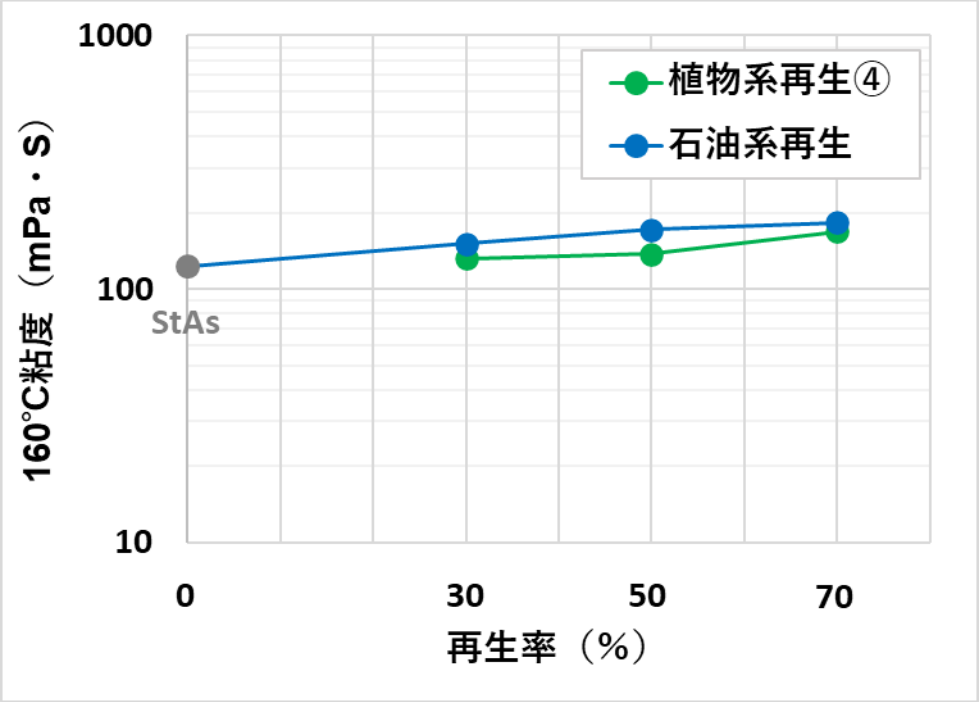



図 7.7.3　各バインダの粘度（160℃）

（３）　位相角

各バインダの位相角を図 7.7.4 に示す。

植物系再生バインダ④の位相角は、いずれの再生率においても石油系再生バインダより大きく、より粘性が高い傾向を示した。したがって、植物系バインダは、再生骨材中の旧アスをより軟らかく回復できると考えられる。

また、再生率を高めるに伴って、位相角は小さく、より弾性が高い傾向を示した。

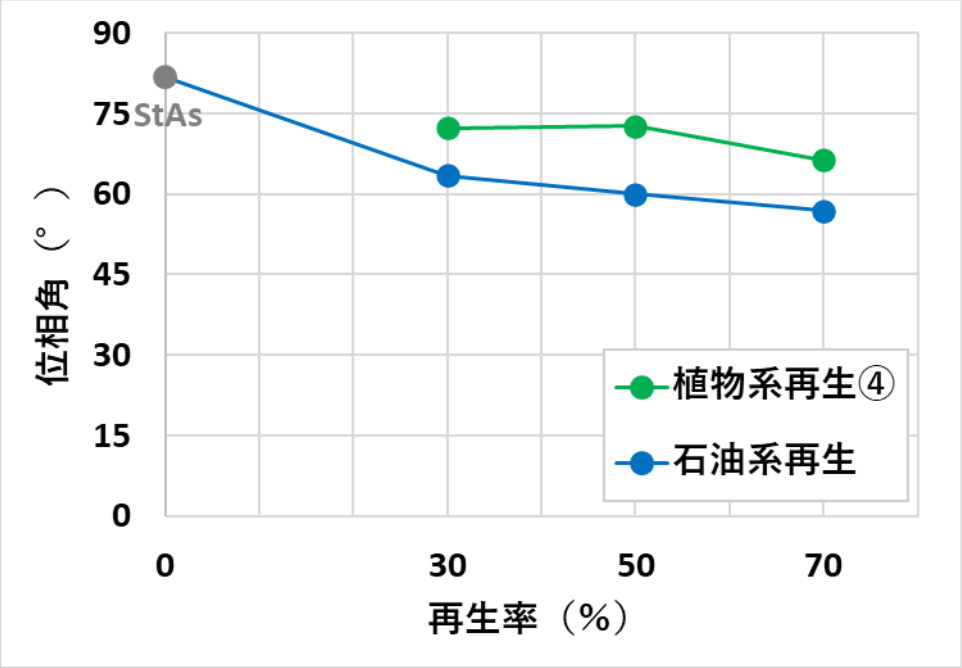



図 7.7.4　各バインダの位相角

（４）　４成分分析

各バインダの４成分を図 7.7.5 に示す。

植物系再生バインダ④の４成分の分析結果では、図 7.6.6 に示すとおり、再生バインダ中の植物系バインダ④に由来するレジン分が大部分を占める結果であった。また、再生率を高めるに伴って、再生バインダにおける旧アスの割合が増えるため、レジン分が減少し、他の成分が増加した。

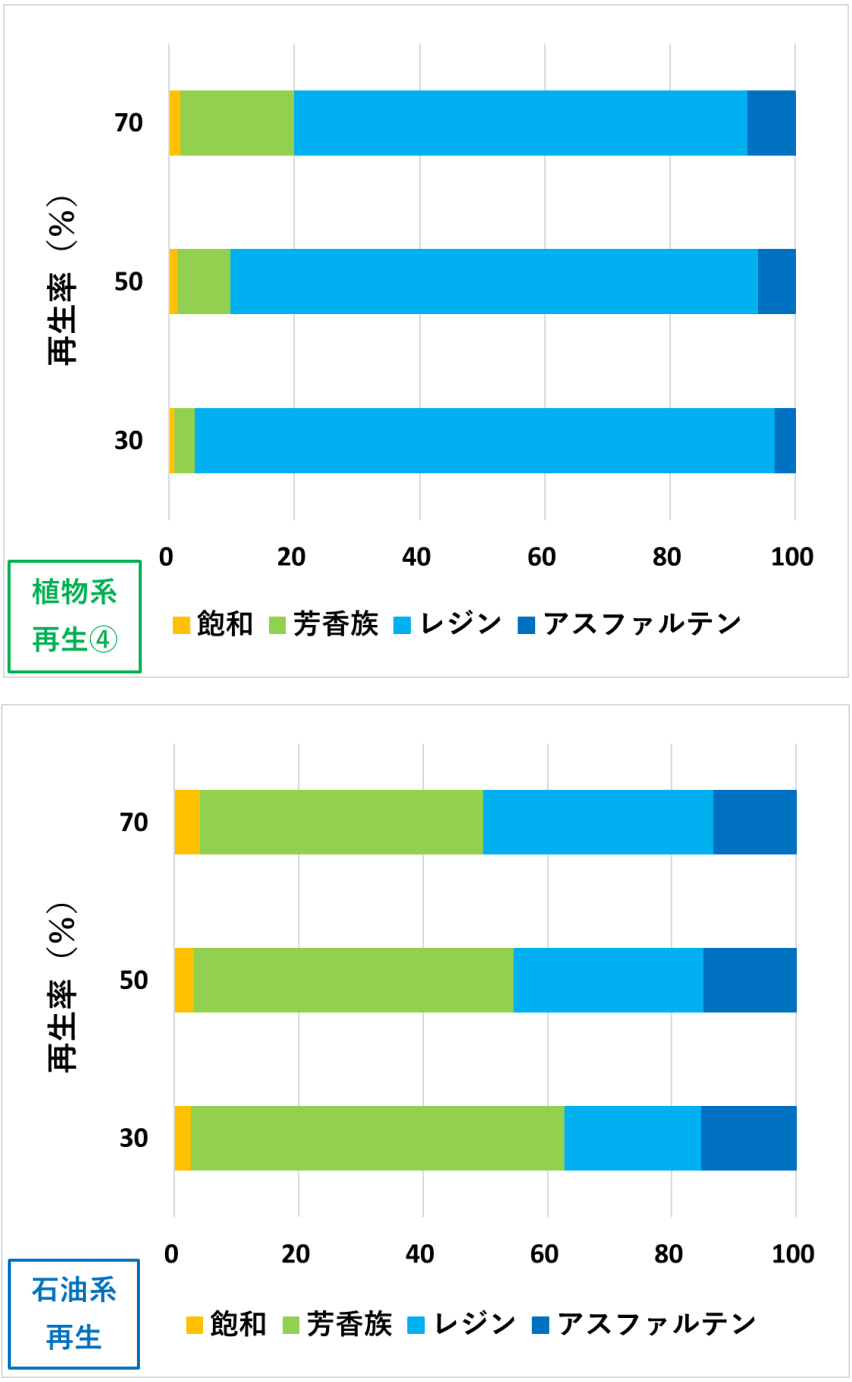



図 7.7.5　各バインダの４成分

## ７．３　混合物の評価

### ７．３．１　評価方法

植物系再生混合物④に対し、再生率を変化させた際の特徴を把握するため、再生率30%と 70%の再生混合物を作製し、種々の試験を実施した。混合物試験の項目を**表 7.7.1**に示す。なお、ストアス混合物および同じ再生率の石油系再生混合物との比較を行った。

**表 7.7.1**　混合物試験の項目

| 評価方法 | 評価項目 | 試験方法 |
|---|---|---|
| WT試験（60°C） | 塑性変形抵抗性 | 舗装調査・試験法便覧（平成31年版）B003 |
| 小型曲げ試験<br>（-10～25°C） | 脆化点 | 参考文献[5]に準拠 |
| | たわみ追従性 | |
| 水浸WT試験（60°C） | 剥離抵抗性 | 舗装調査・試験法便覧（平成31年版）B004 |
| ラベリング試験（-10°C） | 耐摩耗性 | 舗装調査・試験法便覧（平成31年版）B002 |
| 疲労試験（15°C, 5Hz） | 疲労抵抗性 | 舗装調査・試験法便覧（平成31年版）B005 |
| 高温カンタブロ試験<br>（供試体温度：60°C, 室温：30°C） | 高温時の<br>ひび割れ抵抗性 | 参考文献[6]に準拠 |

## ７．３．２　評価結果

### （１）　WT 試験

各混合物の WT 試験結果を図 7.7.6 に示す。

・各混合物の DS を比較すると、以下のとおりであった。

石油系再生≒植物系再生④＞ストアス

・植物系再生混合物④の塑性変形抵抗性は、ストアス混合物より高く、石油系再生混合物と同程度であった。また、再生率を高めるに伴って、塑性変形抵抗性が向上する傾向を示した。

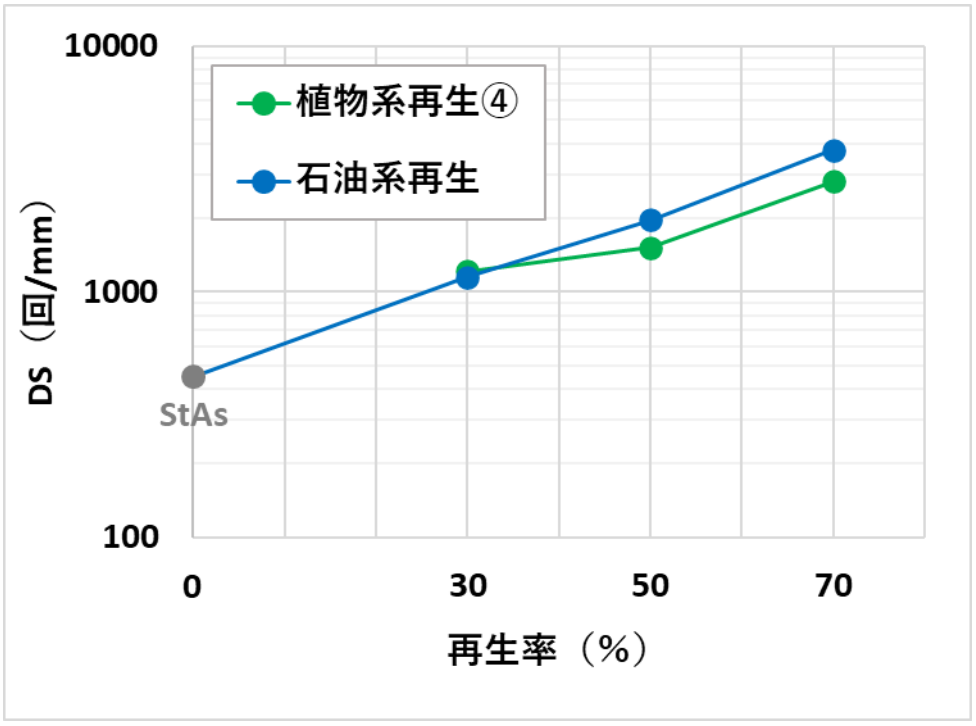



図 7.7.6　各混合物の WT 試験結果

### （２）　小型曲げ試験

小型曲げ試験によって曲げ応力および曲げひずみを測定し、脆化点およびたわみ追従性を評価した。各混合物の曲げ応力を**図 7.7.7**、曲げひずみを**図 7.7.8** および**図 7.7.9** に示す。

脆化点

・各混合物の脆化点を比較すると、以下のとおりであった。なお、「再生率○%」を「R○」と略記する。

R30、R50 植物系再生④≒石油系再生≒ストアス＞R70 植物系再生④

・R70 植物系再生混合物④の脆化点は 10℃であり、ストアス混合物および同じ再生率の石油系再生混合物と比較して低い値であった。また、R50、R70 植物系再生混合物④の脆化点は、同じ再生率の石油系再生混合物およびストアス混合物と同程度であった。

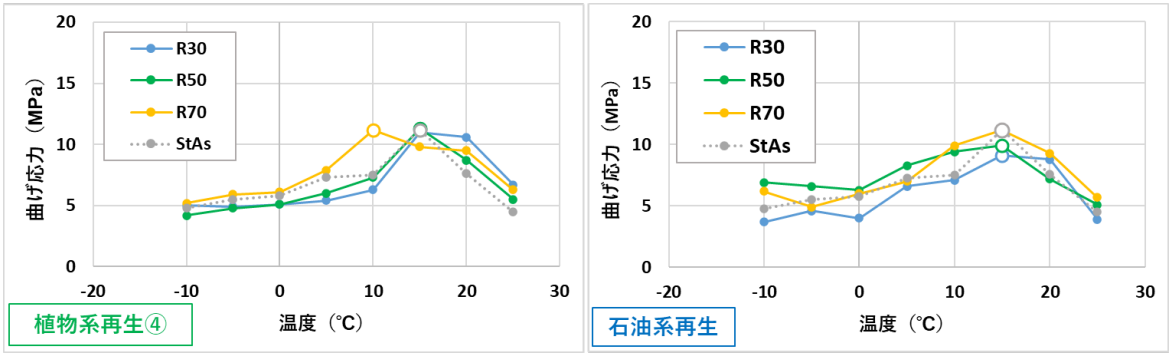



**図 7.7.7**　各混合物の曲げ応力

たわみ追従性

・各混合物のたわみ追従性を比較すると、以下のとおりであった。

植物系再生④≒石油系再生≒ストアス

・６．３．２（２）で示した再生 50%の結果では、植物系再生混合物のひずみ（15℃前後）が小さい傾向にも見えたが、再生 30%と再生 70%の結果を踏まえて、全体的に見ると、ストアス混合物および石油系再生混合物と概ね同等のたわみ追従性を有していると考えられる。

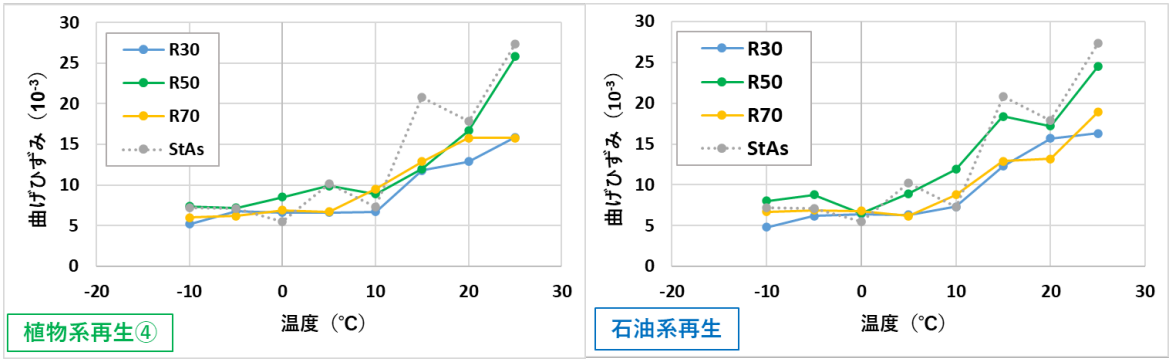



図 7.7.8　各混合物の曲げひずみ（同混合物の再生率ごとの比較）

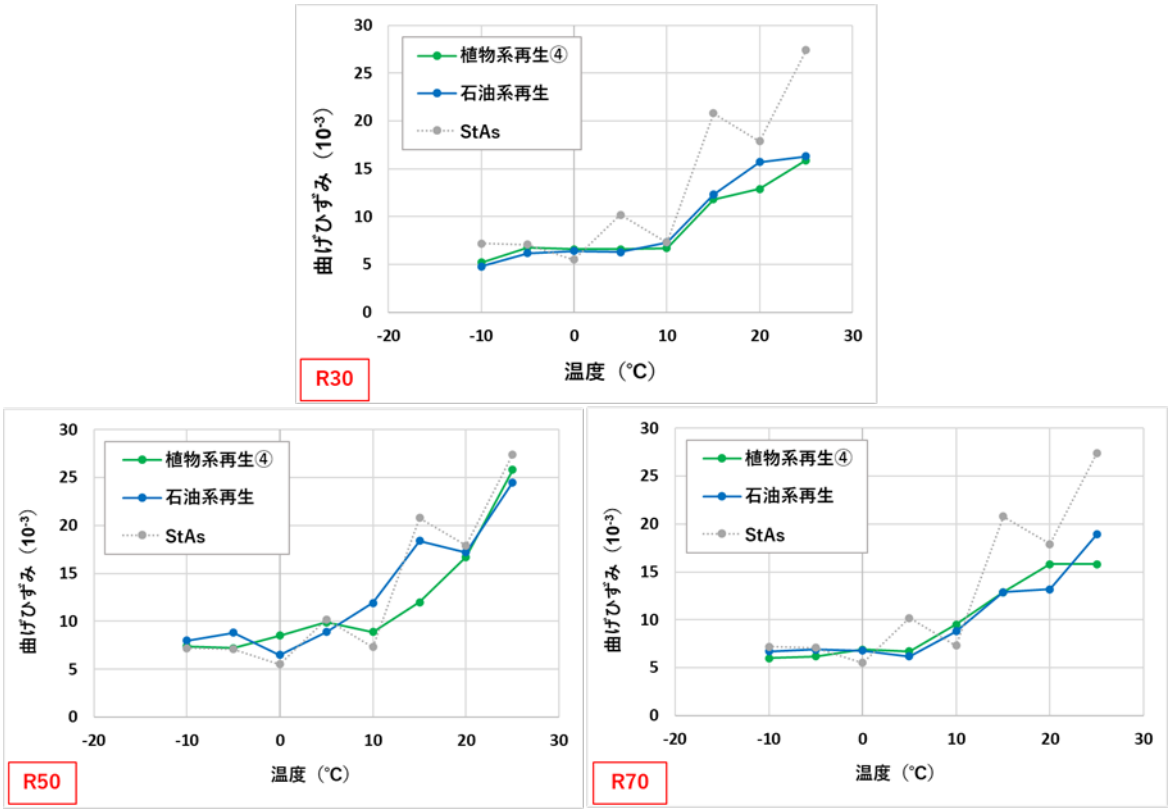



図 7.7.9　各混合物の曲げひずみ（植物系再生混合物④と石油系再生混合物の比較）

### （３）　水浸 WT 試験

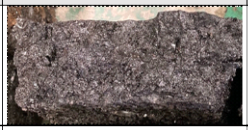
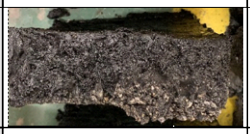
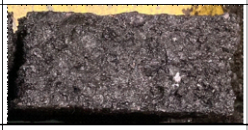
各混合物の水浸 WT 試験結果を**表 7.7.2** に示す。

・各混合物の剥離率を比較すると、以下のとおりであった。

植物系再生④≒石油系再生＜ストアス

・植物系再生混合物④の剥離抵抗性は、ストアス混合物より高く、石油系再生混合物と同程度であった。また、再生率によらず、優れた結果が得られた。

**表 7.7.2** 各混合物の水浸 WT 試験結果

| | 再生率（%） | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0（StAs混合物） | 30 | 50 | 70 |
| 植物系再生④ | |  |  |  |
| 剥離率（%） | | 1 | 3 | 3 |
| 石油系再生 |  |  |  |  |
| 剥離率（%） | 11 | 4 | 3 | 4 |

（４）　ラベリング試験

各混合物のラベリング試験結果を図 7.7.10 に示す。

・各混合物のすり減り量を比較すると、以下のとおりであった。

　植物系再生④＜ストアス＜石油系再生

・植物系再生混合物④の耐摩耗性は、ストアス混合物および石油系再生混合物より高い結果であった。また、再生率を高めるに伴って、耐摩耗性が向上する傾向を示した。

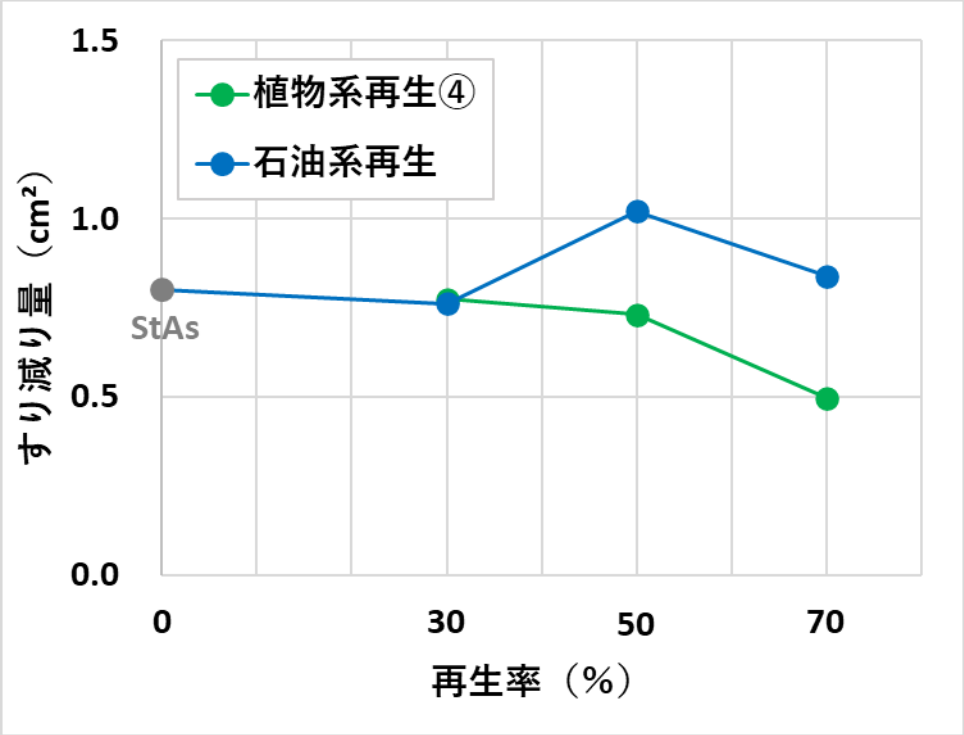



図 7.7.10　各混合物のラベリング試験結果

（５）　疲労試験

各混合物の疲労試験結果を図 7.7.11、図 7.7.12 に示す。

・各混合物の疲労抵抗性を比較すると、以下のとおりであった。

　石油系再生＞植物系再生④＞ストアス

・植物系再生混合物④の疲労抵抗性は、ストアス混合物より高く、石油系再生混合物より低い結果であった。また、再生率を高めるに伴って、疲労抵抗性が向上する傾向を示した。

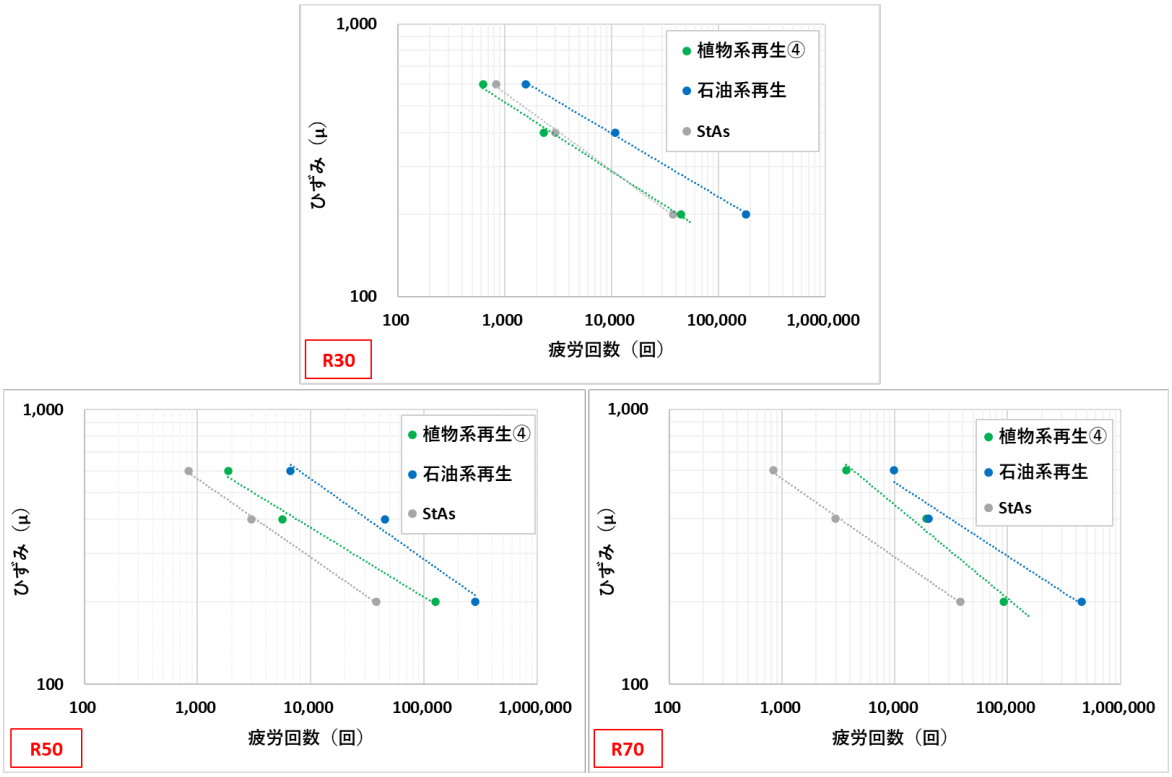



図 7.7.11　各混合物の疲労試験結果（植物系再生混合物④と石油系再生混合物の比較）

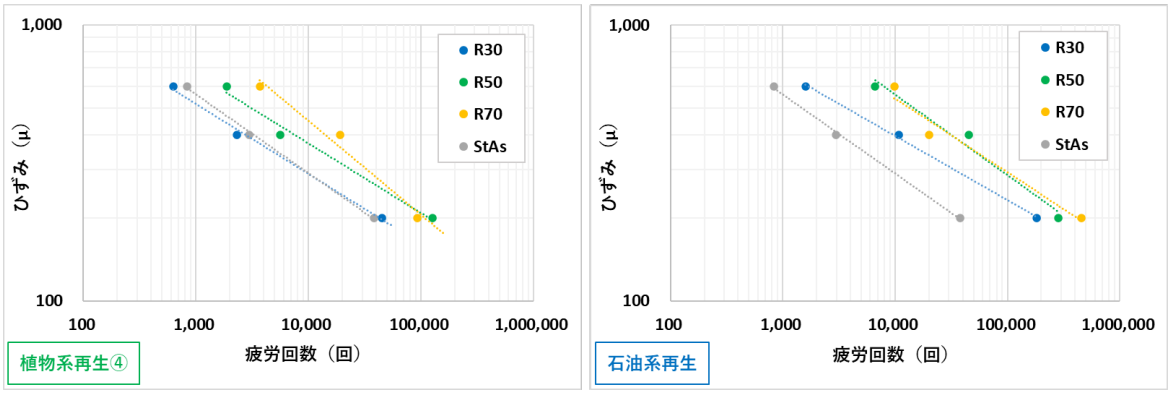



図 7.7.12　各混合物の疲労試験結果（同混合物の再生率ごとの比較）

### （６）高温カンタブロ試験

各混合物の高温カンタブロ試験結果を**図 7.7.13** に示す。

・各混合物の損失率を比較すると、以下のとおりであった。

　ストアス＞植物系再生④≒石油系再生

・植物系再生混合物④の高温時のひび割れ抵抗性は、ストアス混合物より低く、石油系再生混合物と同程度であった。また、再生率を高めるに伴って、損失率は増加する傾向が見られた。したがって、植物系再生混合物④は、石油系再生混合物と同様に再生率を高めるほど高温時のひび割れが発生するリスクも高まる可能性が示唆された。

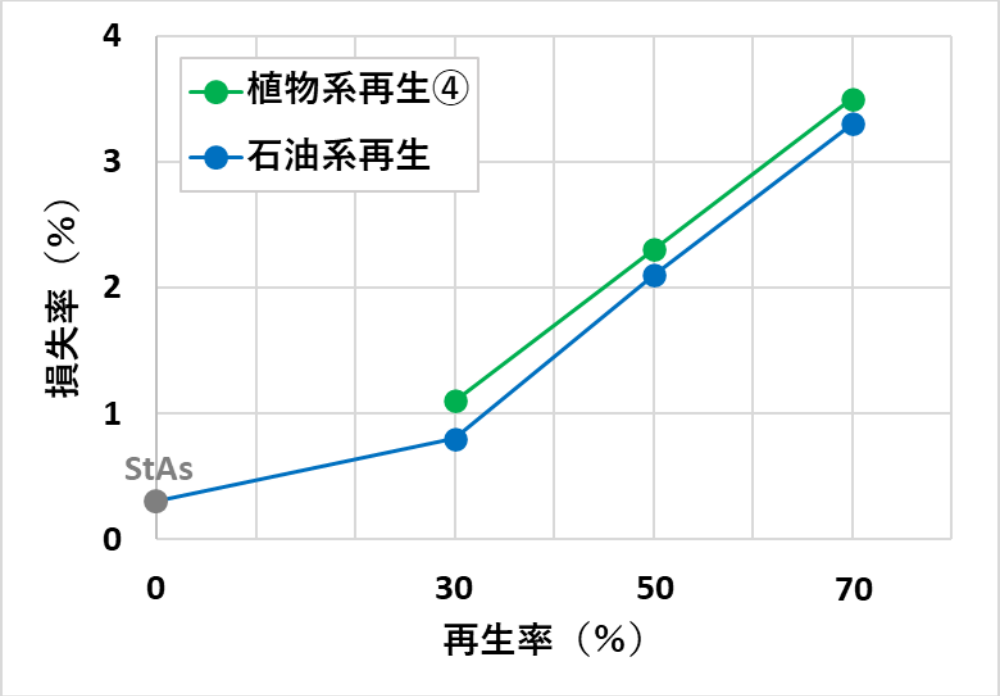



**図 7.7.13**　各混合物の高温カンタブロ試験結果

### ７．３．３　他の混合物との比較

植物系再生混合物④とストアス混合物の比較結果を**表 7.7.3**、植物系再生混合物④と石油系再生混合物の比較結果を**表 7.7.4** に示す。

植物系再生混合物④の性能は、再生率によらず、ストアス混合物および石油系再生混合物と遜色ないことから、舗装に必要な性能を具備していることが示唆された。

**表 7.7.3**　植物系再生混合物④とストアス混合物の比較結果

| | 再生率（%） | | |
|---|---|---|---|
| | 30 | 50 | 70 |
| 塑性変形抵抗性 | ◎ | ◎ | ◎ |
| 脆化点 | ○ | ○ | ◎ |
| たわみ追従性 | ○ | ○ | ○ |
| 剥離抵抗性 | ◎ | ◎ | ◎ |
| 耐摩耗性 | ○ | ○ | ◎ |
| 疲労抵抗性 | ○ | ◎ | ◎ |
| 高温時のひび割れ抵抗性 | × | × | × |

◎：ストアス混合物より優れる、○：同程度、△：やや劣る、×：劣る

**表 7.7.4**　植物系再生混合物④と石油系再生混合物の比較結果

| | 再生率（%） | | |
|---|---|---|---|
| | 30 | 50 | 70 |
| 塑性変形抵抗性 | ○ | ○ | ○ |
| 脆化点 | ○ | ○ | ◎ |
| たわみ追従性 | ○ | ○ | ○ |
| 剥離抵抗性 | ○ | ○ | ○ |
| 耐摩耗性 | ○ | ◎ | ◎ |
| 疲労抵抗性 | × | × | × |
| 高温時のひび割れ抵抗性 | ○ | ○ | ○ |

◎：石油系再生混合物より優れる、○：同程度、△：やや劣る、×：劣る

８．植物系再生バインダ④の供用に伴う劣化特性

## ８．１　促進劣化試験による評価

### ８．１．１　目的

本検討の目的は、促進劣化試験により、植物系再生バインダ④の供用に伴う劣化特性を評価することである。

### ８．１．２　劣化条件

劣化条件を**図 7.8.1** に示す。SUPERPAVE の評価フロー[7] に準拠し、薄膜加熱試験（以下、TFOT）（舗装調査・試験法便覧（平成 31 年版）A046）および加圧劣化試験（以下、PAV）（舗装調査・試験法便覧（平成 31 年版）A059）を行い、劣化後のバインダを調整した。

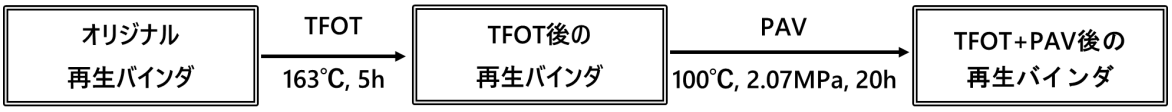



**図 7.8.1**　劣化条件

### ８．１．３　評価方法

劣化前後の植物系再生バインダ④の性状を比較し、その劣化の度合いによって供用性を評価した。バインダ試験の項目は**表 7.8.1** に示すとおりであり、ストアスおよび同じ再生率の石油系再生バインダと比較した。

**表 7.8.1**　バインダ試験の項目

| 評価項目 | 試験方法 |
|---|---|
| 針入度（25℃）　1/10mm | 舗装調査・試験法便覧（平成31年版）A041 |
| 軟化点　℃ | 舗装調査・試験法便覧（平成31年版）A042 |
| 粘度（160℃）　mPa・s | 舗装調査・試験法便覧（平成31年版）A052 |
| 位相角（20℃, 10rad/s）　° | 参考文献[4]に準拠 |
| ４成分　% | 石油学会規格 JPI-5S-77-2019 |

## ８．１．４　評価結果

### （１）　針入度

劣化前後の針入度を図 7.8.2 に示す。

いずれのバインダにおいても、劣化により針入度は低くなる傾向を示した。また、植物系再生バインダ④の劣化前後における針入度の変化は、石油系再生バインダに比べ小さい傾向を示した。

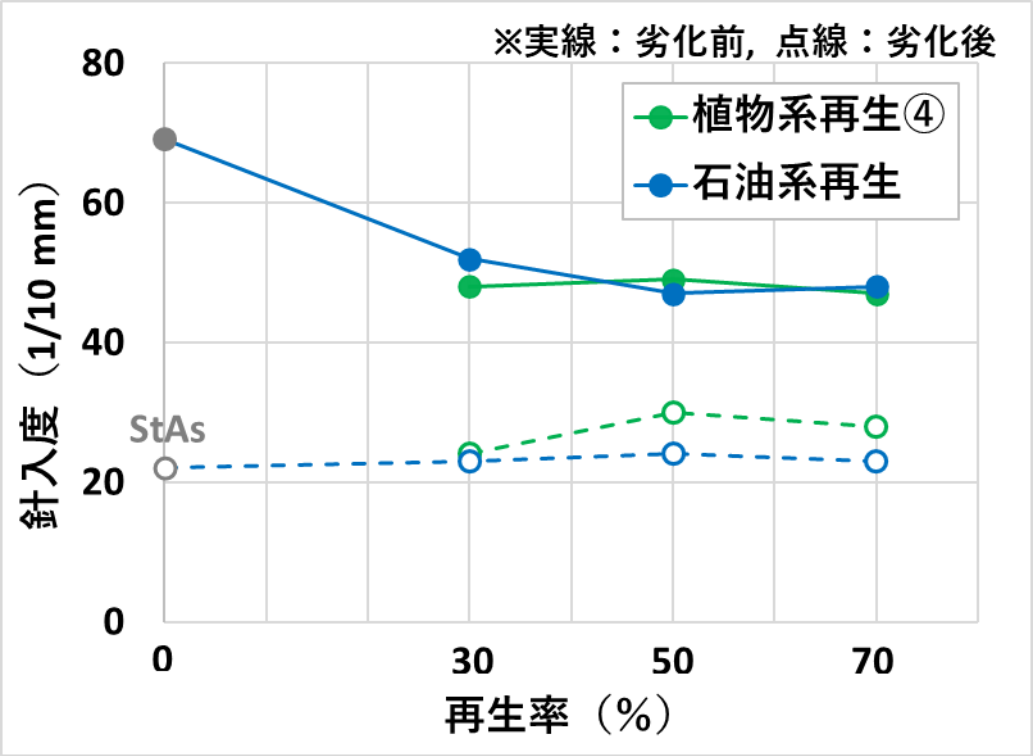



図 7.8.2　劣化前後の針入度

（２）　軟化点

劣化前後の軟化点を図 7.8.3 に示す。

いずれのバインダにおいても、劣化により軟化点は高くなる傾向を示した。また、植物系再生バインダ④の劣化前後における軟化点の変化は、石油系再生バインダに比べ小さい傾向を示した。

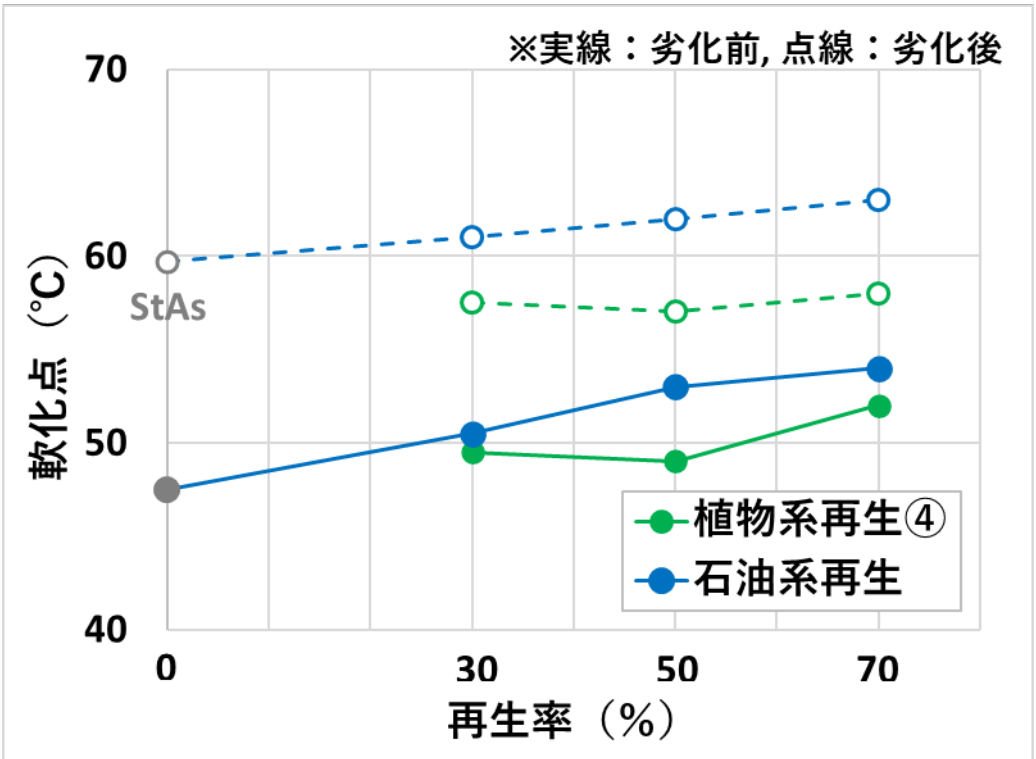



図 7.8.3　劣化前後の軟化点

（３）　粘度

劣化前後の粘度を図 7.8.4 に示す。

いずれのバインダにおいても、劣化により粘度は高くなる傾向を示した。また、植物系再生バインダ④の粘度の変化は、石油系再生バインダと同程度であった。

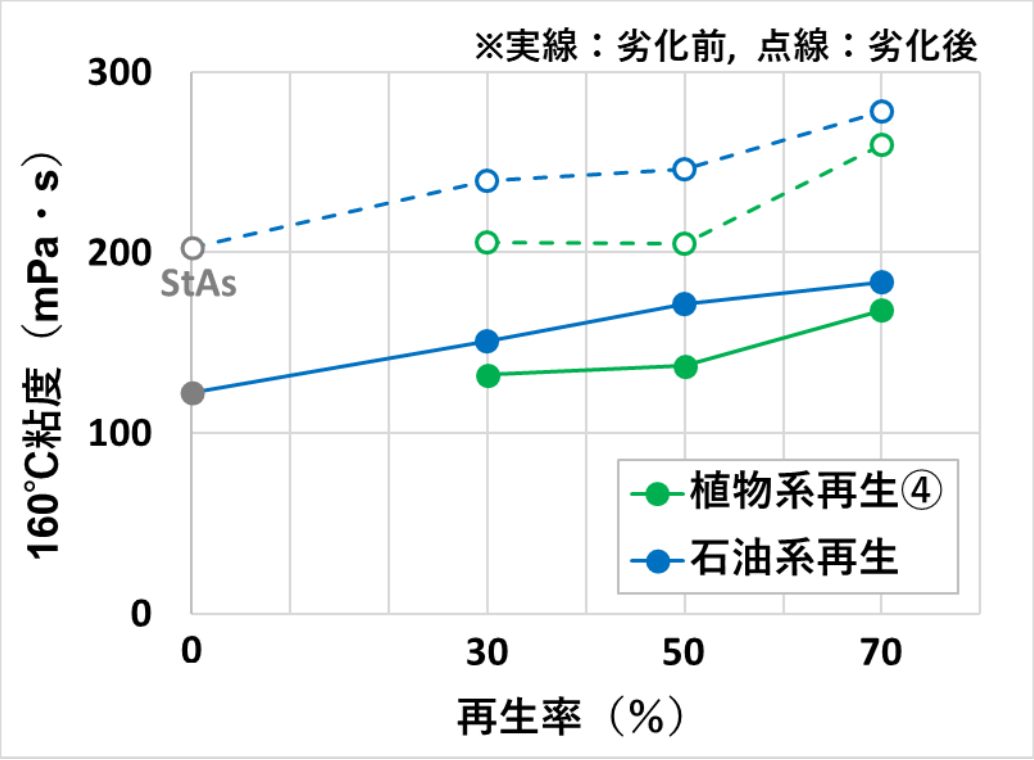



図 7.8.4　劣化前後の粘度（160℃）

（４）　位相角

劣化前後の位相角を図 7.8.5 に示す。

いずれのバインダにおいても、劣化により位相角は小さくなる傾向を示した。また、植物系再生バインダ④の劣化後の位相角は、劣化後の石油系再生バインダより大きいことから、より粘性が高い結果であった。

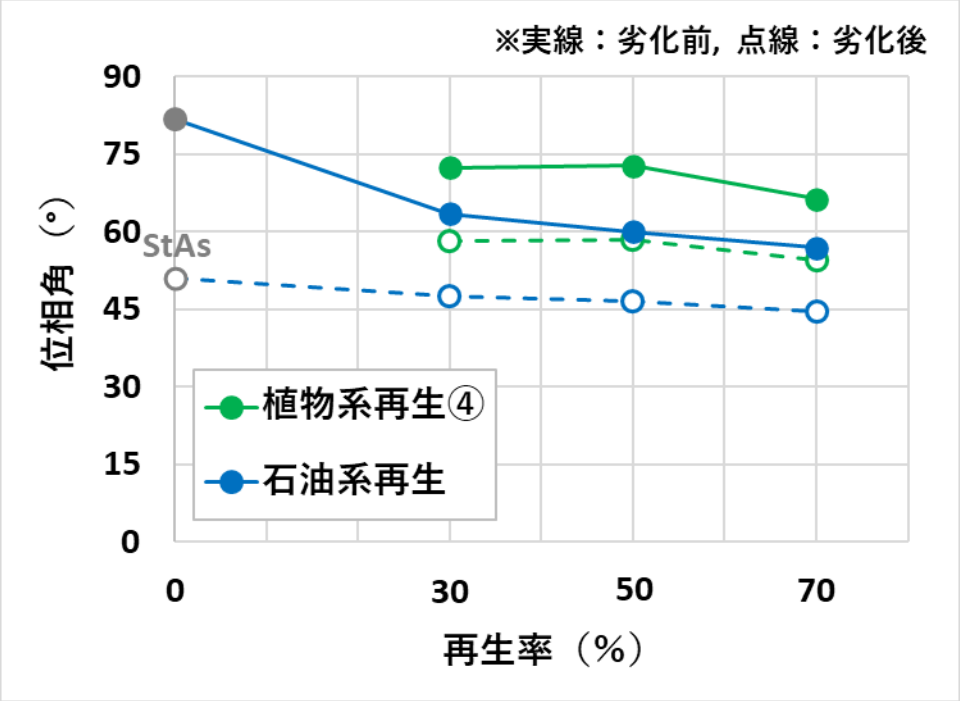



図 7.8.5　劣化前後の位相角

（５）　４成分

各バインダの劣化試験前後の４成分を図 7.8.6 に示す。

各バインダの４成分は、いずれも芳香族分およびアスファルテン分が減少し、レジン分が増加する傾向を示した。

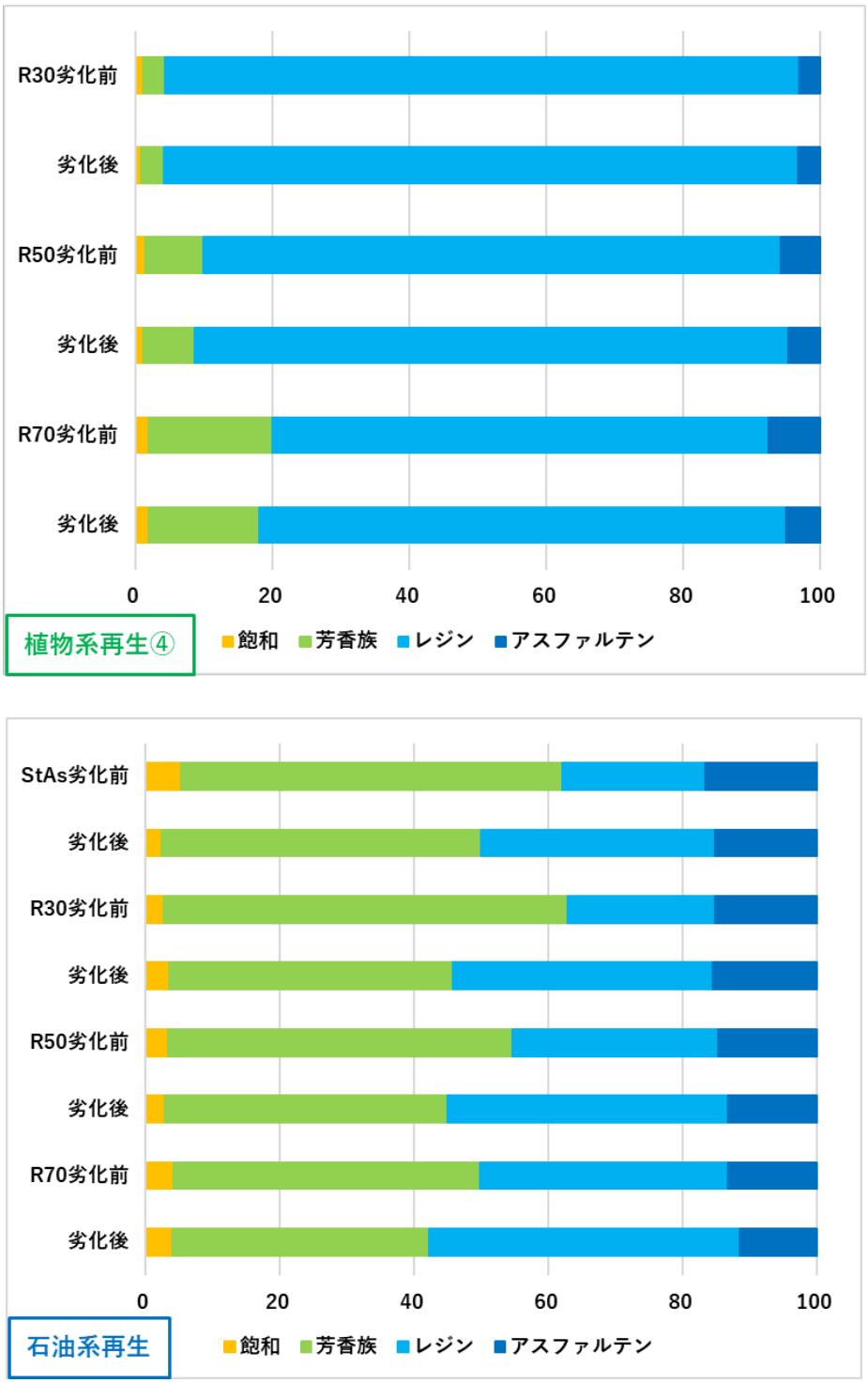



図 7.8.6　劣化試験前後の４成分

### ８．１．５　まとめ

促進劣化試験前後の各性状の変化の度合いは、植物系再生バインダ④に比べ、ストアスおよび石油系再生バインダの方が大きいため、その供用性は、ストアス混合物および石油系再生混合物と同等以上であると考えられる。

## ８．２　屋外暴露試験による評価

2022 年 3 月より、沖縄建設材料耐久性試験施設およびニチレキの技術研究所にて 2 年間の屋外暴露試験を実施している。沖縄での暴露状況を**写真** 7.8.1、栃木での WT 供試体の暴露状況を**写真** 7.8.2、薄膜バインダの暴露状況を**写真** 7.8.3 に示す。

なお、暴露供試体の概要および実施試験は**表** 7.8.2 に示すとおりである。

2023 年 3 月に 1 年暴露後の薄膜バインダおよび一部の WT 供試体を回収済である。試験の結果は、土木研究所とニチレキの新たな共同研究として「カーボンニュートラルに資するアスファルト代替舗装材料の研究開発」にて報告する。

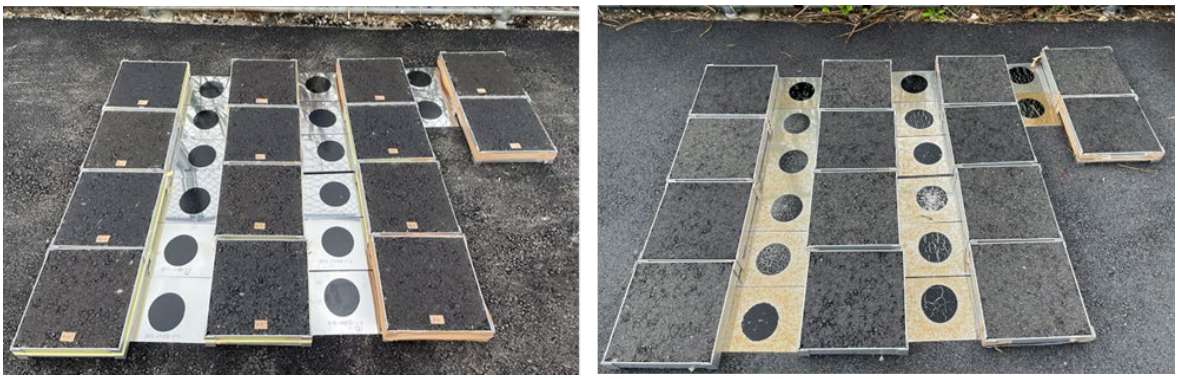


**写真** 7.8.1　沖縄の WT 供試体と薄膜バインダの暴露状況
（左：暴露直後、右：暴露 1 年後）

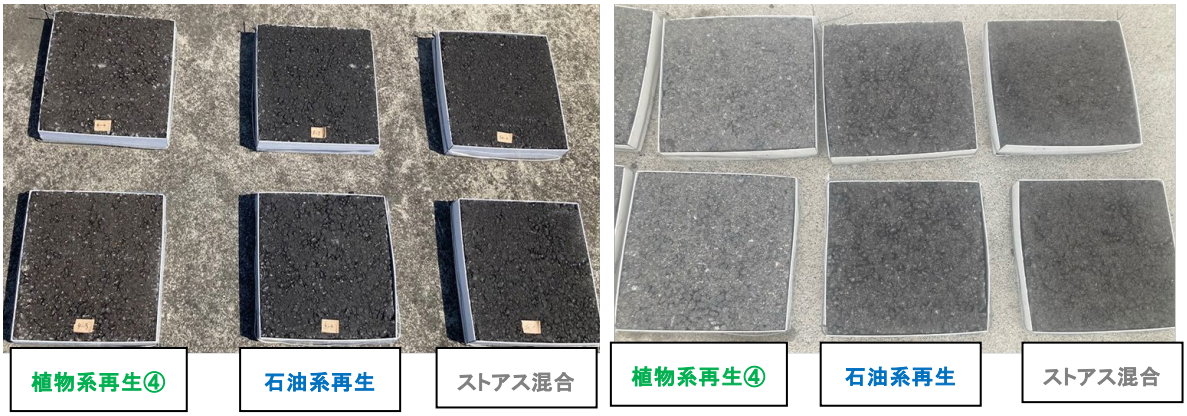



**写真** 7.8.2　栃木の WT 供試体の暴露状況
（左：暴露直後、右：暴露 1 年後）

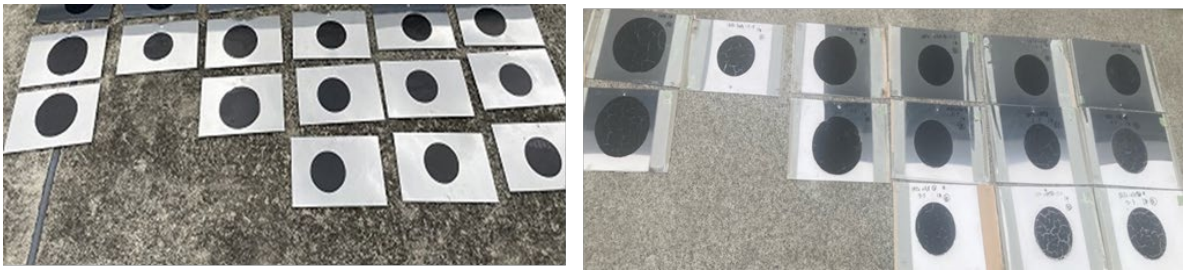


**写真** 7.8.3　栃木の薄膜バインダの暴露状況
（左：暴露直後、右：暴露 1 年後）

**表 7.8.2**　暴露供試体の概要および実施試験

| | 薄膜バインダ | WT供試体 |
|---|---|---|
| 暴露種 | 植物系再生①～④，石油系再生，StAs | |
| 再生率 | 30%, 50%, 70% | 50% |
| 実施試験 | ・GPC分析（分子量分布）<br>・イアトロスキャン（4成分分析） | ・小型曲げ試験 |

## ９．環境負荷の評価

### ９．１　目的

本検討の目的は、植物系再生混合物④の環境負荷を評価することである。

### ９．２　環境負荷の算出

#### ９．２．１　算出方法

植物系再生混合物④の環境負荷は、本共同研究で指定された「$LCCO_2$計算シート」に基づいて算出した。

本検討の結果、植物系再生混合物④の性能は、ストアス混合物と同等以上であることが示唆された。そのため、ストアス混合物と同程度の供用期間を十分に確保できると考え、路面の設計期間はストアス混合物と同じく 10 年に設定した。また、施工方法および補修、修繕期間についてもストアス混合物と同条件とした。

なお、植物系材料は成長時に大気中の $CO_2$を吸収するため、一般的に $CO_2$排出原単位は小さくなると考えられる。しかし、本共同研究では、成長時に吸収される $CO_2$を $LCCO_2$に含めない試算方法を採用している。したがって、吸収 $CO_2$を含める場合と含めない場合の 2 つの方法で環境負荷を算出した。

#### ９．２．２　各材料の $CO_2$排出原単位

各材料の $CO_2$ 排出原単位を表 7.9.1 に示す。

吸収 $CO_2$ を $LCCO_2$ に含めた場合、植物系バインダ④の $CO_2$排出原単位はマイナスとなり、ストアスおよび再生骨材と比べて小さな値となった。一方、吸収 $CO_2$を考慮しない場合の $CO_2$ 排出原単位は、ストアスおよび再生骨材と比べて大きな値となった。

なお、試算に用いた植物系バインダ④の原単位は、各素材メーカーにヒアリングした原単位に、当社において生産に必要と想定されるエネルギーを加算して算出したものであり、第三者機関による検証をした数値ではない。

表 7.9.1　各材料の $CO_2$原単位

| | 植物系バインダ④ | | | | | | StAs | 再生骨材 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 再生率(%) | 30 | | 50 | | 70 | | ― | ― |
| 吸収$CO_2$ | ○ | × | ○ | × | ○ | × | ― | ― |
| $CO_2$原単位 ($kg\text{-}CO_2/t$) | -665.31 | 764.21 | -637.20 | 743.10 | -604.13 | 718.39 | 107.56 | 2.24 |

○：吸収 $CO_2$を含める場合、×：吸収 $CO_2$を含めない場合

### ９．２．３　評価結果

#### （１）　吸収 $CO_2$ を含める換算

各混合物の再生率と $CO_2$排出量の関係を**図 7.9.1** に示す。

植物系再生混合物④の $CO_2$排出量は、いずれもストアス混合物および石油系再生混合物よりも少ない結果であった。また、再生率を高めるに伴って、$CO_2$排出原単位がマイナスである植物系再生バインダの使用量が減少するため、全体の $CO_2$排出量は増加する傾向が見られた。

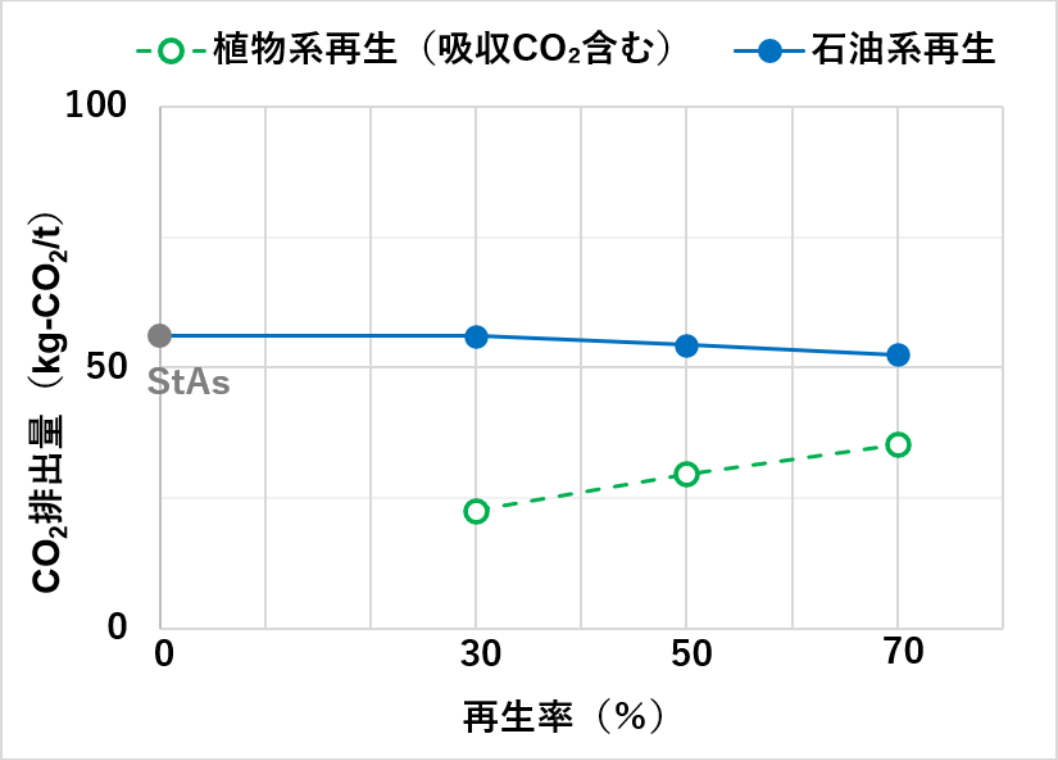



**図 7.9.1**　各混合物の再生率と $CO_2$排出量の関係（吸収 $CO_2$を含める算定）

### （２）　吸収 $CO_2$ を含めない換算

各混合物の再生率と $CO_2$排出量の関係を**図 7.9.2** に示す。

植物系再生混合物④の $CO_2$排出量は、いずれもストアス混合物および石油系再生混合物よりも多い結果であった。また、再生率を高めるに伴って、$CO_2$排出原単位が大きい植物系再生バインダの使用量が減少し、再生骨材の使用量が増加するため、全体の $CO_2$排出量は増加する傾向が見られた。

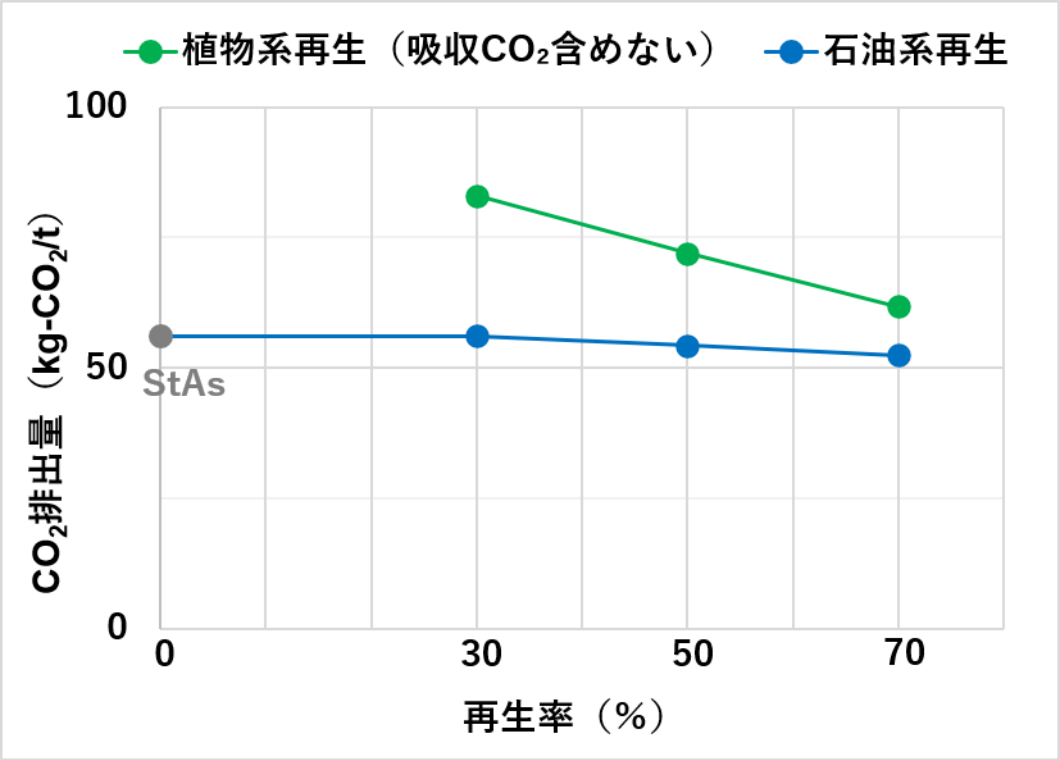



**図 7.9.2**　各混合物の再生率と $CO_2$排出量の関係（吸収 $CO_2$を含めない算定）

## １０．まとめ

本研究により得られた知見は下記のとおりである。

・4 種類の植物系バインダのうち、植物系バインダ④を用いた再生混合物が最も優れた性能を示した。

・植物系再生混合物④の性能は、再生率 30～70%の範囲でストアス混合物および石油系再生混合物と遜色ないことから、植物系バインダ④は石油アスファルト代替バインダとして適用できる可能性が高い。

・促進劣化試験後の植物系再生バインダ④の劣化の度合いは、ストアスおよび石油系再生バインダより小さいため、植物系再生混合物④の供用性は、ストアス混合物および石油系再生混合物と同等以上と考えられる。

## １１．今後の予定

### １１．１　耐候性の評価

８．２のとおり、2023 年 3 月より、植物系再生混合物の屋外暴露試験を実施している。今後、暴露供試体を回収したのち、各種試験を実施し、植物系再生バインダおよび植物系再生混合物の耐候性を検証し、この技術の適用性を見極めていく。

### １１．２　改質グレードの開発

2024 年 6 月より土木研究所とニチレキの新たな共同研究として「カーボンニュートラルに資するアスファルト代替舗装材料の研究開発」が始動するため、その研究にて改質 II 型相当の開発を目指す。また、実施工により、本研究において開発した植物系再生混合物④と併せて施工性および供用性等を調査する。

-以 上-

## 参考文献


1) 小林靖明，滝井陵太，東本 崇：植物由来の再生用添加剤を使用した再生アスファルト混合物の検討，第 35 回日本道路会議，3157，2023.
2) 濵野悠弥，藤井洋志，遠藤桂：石油代替バインダを用いた加熱混合物の適用性検討，第 28 回舗装工学講演会講演集，Vol. 28，PL2023-007，2023.
3) 日本道路協会：舗装再生便覧，pp38，2024.
4) 佐々木厳，山口勝之，西崎到：屋外暴露試験によるストレートアスファルトの紫外線劣化，土木学会第 59 回年次学術講演会， 5-543， 2004.
5) 佐々木厳，新田弘之：促進紫外線劣化試験における舗装表面のアスファルト劣化性状，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.76，No.2（舗装工学論文集第 25 巻）I_211-I_216，2020.
6) 田湯文将，新田弘之，川上篤史，川島陽子：アスファルト混合物の疲労破壊抵抗性に関する評価方法の検討，第 33 回日本道路会議，3055，2019.
7) 塚越徹：SUPERPAVE 法によるわが国のアスファルトの評価，アスファルト，Vol. 39，No. 190， pp10-17，1997.