

アスファルト

238

第65巻 第238号 令和4年12月発行

石油アスファルト需給動向と将来展望について	コスモ石油マーケティング株式会社	1
特集・舗装の長寿命化・高耐久化		
超重交通に対応する長寿命舗装技術の導入促進について	白尾仁知・上田章紘・皆方忠雄	4
首都高速道路における舗装設計施工要領の改訂概要について	須田郁慧	8
舗装の長寿命化および低炭素化に寄与する最新のポリマー改質アスファルト	浦沢和希・後藤洋平・上野貞治・黄木秀実	12
道路橋コンクリート床版防水における高浸透型防水材料および改質グースの適用	菊池玲児 川上篤史	19
表基層エポキシ混合物による橋面舗装の補修工事	児玉 健	27
植物由来樹脂を用いた床版防水機能を有する樹脂防水一体型アスファルト舗装	設楽直柔・平戸利明・吉武 美智男	35
特集・新しい再生技術		
廃PET素材を原料とした高耐久アスファルト改質材の開発	柏木啓孝・猪股賢大・垣内宏樹・白井英治	40
繰返し再生による再生混合物性状と高温時ひび割れ抵抗性評価法について	川上篤史・掛札 さくら・新田弘之・川島陽子・藪 雅行・山本富業	46
再生用添加剤の組成および添加方法の違いによる混合物性状の向上効果	末原俊史・安藤政浩・川上篤史・川島陽子・亀山修一	54
<アスファルト舗装技術研究グループ・第70回報告>		63
PIARCによるケーススタディ集から読み解く		64
舗装再生やリサイクル材の舗装適用に関する海外の現状		78
アスファルト混合物の配合試験法に関する調査報告		93
<連載>アスファルト・舗装研究 vol.11	日本大学工学部土木工学科構造・道路工学研究室	93
<統計資料>石油アスファルト需給実績		97

ASPHALT

一般社団法人 日本アスファルト協会
THE JAPAN ASPHALT ASSOCIATION

平素は当協会並びに機関紙「アスファルト」をご愛顧賜りまして誠にありがとうございます。

当協会は「アスファルト利用技術の向上に関する事業を行い、アスファルトに関連する産業の健全な発展に寄与する事」を目的とし、その観点から「**投稿原稿**」を募集しております。研究者の皆様、技術者の皆様に限らず幅広い方からの投稿を賜り、アスファルト利用技術の深化を側面から支援して参りたいと存じますので、よろしくお願い申し上げます。

なお、ご投稿頂ける場合は巻末に記載の問い合わせ先までご一報頂ければ幸甚でございます。

一般社団法人日本アスファルト協会

石油アスファルト需給動向と将来展望について

(Supply and Demand Trends and Future Outlook for Petroleum Asphalt)

コスモ石油マーケティング株式会社 販売部総括グループ

近年、石油産業を巡る環境は新型コロナウイルス感染拡大や脱炭素関連の取り組みをはじめ、ウクライナ危機等に伴い大きく変化を続けている。今回、このような変化に伴うアスファルトの需給に及ぼす影響について述べさせていただきたい。

1. 石油産業を取り巻く環境

1.1 原油価格の動向

原油価格は、石油製品のコスト、ひいては様々な製品価格に大きく影響を与えるものである。道路舗装に用いられるストレートアスファルト（以下「ストアス」）も原油精製により生産される石油製品のひとつであるため、原油価格の動向はアスファルト関係者にとっても大いに関心をひくものである。

原油価格の決定要素は多岐にわたる。表－1に示すように、大きくは下記のとおり、①需給バランス、②特殊要因、③投機的要素にわけられる。

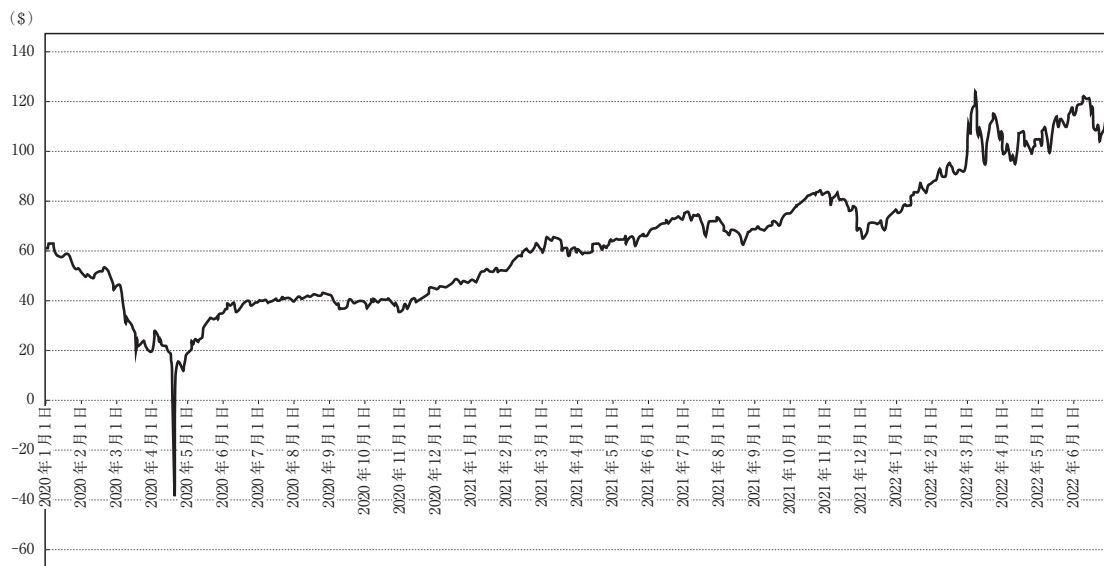
①②③の要素が複雑に影響され、原油価格は決定するが、原油価格の動向を見通すことは非常に難しい。一方、①需給バランスが中長期的な価格を決定するベースであることから、原油価格推移は需給バランス

表－1 原油価格の決定要素

原油価格決定要素	項目例
①需給バランス	・中長期的な原油需給動向、在庫状況 ・各地域の原油生産コスト ・原油在庫水準やOPEC余剰生産量規模 ・OPEC／非OPECの生産動向 等
②特殊要因	地政学リスク (戦争、政情不安、天災／異常気象等)
③投機的要素	米国株価や米原油在庫発表等

から概ね読み解くことができる。

図－1に示すように、2022年1月初旬に60\$台であったドバイ原油は、コロナ禍による需要減退からの経済活動再開に伴って、世界的に需要回復基調にあること、また多くの産油国に増産余力が限られていたこと、中国が国内エネルギー供給を石炭から石油製品やLNGへ急激にシフトしたことによって上昇。2022年2



図－1 WTI先物価格推移（各種資料を基に当社で作成）

月時点で米国のテキサス西部で生産される原油の先物商品である WTI 先物価格は、90\$ 台まで上昇した。

その後ロシアによるウクライナ侵攻を受け、エネルギー供給への緊張が一気に高まったことで価格は急騰し、WTI 先物価格は 2022 年 6 月には 2008 年以來となる 120\$ 台となった。

今後の見通しについても同様に、コロナ禍からの経済回復の加速による需要回復、ロシアによるウクライナ侵攻の懸念に伴うロシア産原油・LNG 供給の途絶といった地政学リスク、加えて脱炭素の世界的な流れを受けた原油や石炭など化石燃料の採掘に対する投資縮小による供給減少懸念など、今後さらに原油価格が押し上げられる材料がいくつも存在し、予測は非常に難しいものである。引き続き原油価格に大きく影響を与える 3 要素を踏まえながら、価格動向を注視していく必要がある。

1.2 石油製品需給にかかる動向

石油連盟発行の「今日の石油産業 2021」によると、石油製品需要は 1999 年度のピーク時に比べ、2020 年度は 38% 減となっている。要因としては、少子高齢化や人口減少といった社会構造に変化が生じたこと、カーボンニュートラルによる脱炭素を目指した産業、電気自動車など民生用の燃料転換の進展が進んだことが主に挙げられる。この流れは引き続き継続すると見込んでいる。

一方で、石油製品の需要が減ることで、各石油メーカーは精製する原油量を需要に合わせて減少させることとなる。現に、石油産業全体で生産設備、流通設備、販売施設等を含め、石油製品の生産・供給にかかる大きな合理化を進めてきた。一方で、合理化により、製油所の安定的な稼働が困難となり、原油製造拠点を集約する必要がでてくることとなる。

合理化の一環で、化石エネルギー原料の有効利用を促進するための措置として「エネルギー供給構造高度化法」が 2009 年 7 月に制定された。高度化法においては 3 次まで告知期間が定められており、各石油メーカーは下記告知に基づいて各対応を行った。

(1) 第 1 次告知 (2010 年 4 月～2014 年 3 月)

「重質油分解装置」の装備率向上を義務づけ（装備率：13%）。

(2) 第 2 次告知 (2014 年 4 月～2017 年 3 月)

「残油処理装置」の装備率の向上を義務付け（装備率：50%）。

(3) 第 3 次告知 (2017 年 4 月～2022 年 3 月)

重質油分解装置等（FCC、RFCC、コーカー、直接脱硫装置）の有効活用・重質油分解能力の向上を促すため、同装置への減圧残渣油の通油量増加を図る

1.3 アスファルト供給に関連するトピックス

当法律の対応結果、石油メーカー各社はガソリン等の油種を効率的に精製できるように進めた。

2. アスファルトの需給動向

2.1 需要

ストレートアスファルト（以下ストアス）は、主にアスファルト合材の原料として使用されている。1990 年度に約 7,680 万トンあったアスファルト合材の製造量は、2020 年度は 4,144 万トンと約 46% 減少している。また、ストアスの需要は 444 万トンから 145 万トンに減少している。これは、老朽化した道路から撤去した骨材を利用する再生合材の製造比率が増加しており、新しいストアスの添加量を抑えることができるためである。再生合材の製造比率は、1990 年度の 8% から、2020 年度で 73% に上っているが、2010 年度以降の再生合材製造比率が横ばいであることから、今後も極端に増えることはないと見ている（図-2）。

今後のストアスの需要について、国土交通省が進めている国土強靱化計画が継続することから、2025 年度までは底堅い需要が想定される。

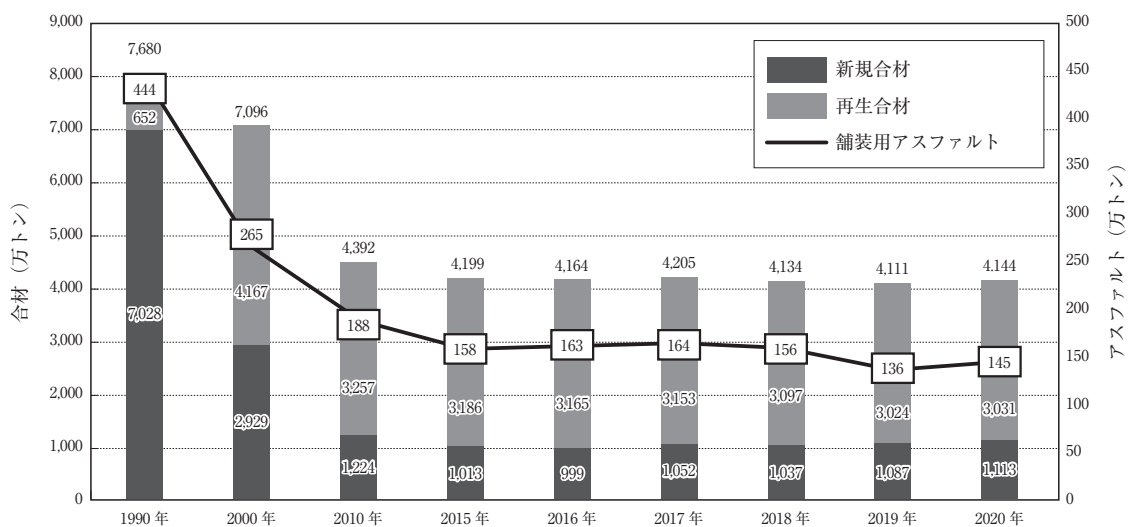
2.2 生産

「2.1 需要」で述べたとおり、石油製品全体の需要減少およびストアスの需要の減少によって、石油メーカーの生産数量も減少している。加えて、「エネルギー供給構造高度化法」による原油精製の最適化（重質油分解能力の向上を促すため、同装置への減圧残渣油の通油量増加）により、ストアスの生産量を落とし、ガソリンなどの生産にシフトすることが可能な状況となっている。

その中、各石油メーカーは、目的生産物としてストアスの安定的生産・供給を行う姿勢に変わりはなく、今後も同様の供給体制を継続するものと思われる。ただし、各石油メーカーの製油所、出荷基地における維持コスト等や、輸送会社のストアス運搬費用の上昇等、流通における各種対応は各石油メーカーのみで対応できる問題ではなく、需要家・消費者の理解も必要となっているのが現状である。

2.3 輸入

ストアスの輸入は、これまでと同様に主に韓国から行っているが、新型コロナウイルスによる韓国国内で



出典：一般社団法人アスファルト合材協会HP, 他各種資料を元に当社作成

図－2 合材需要とアスファルト需要の推移

の製油所稼働減少、IMO規制に対応したストアス留分分解装置の新設、他国の輸入増加による日本国内への輸出货量減少と課題があり、日本国内の流通においてメインとして考えることには課題がある。

3. まとめ

石油製品の需給、価格は今後も様々な要素の影響を受けて、不規則に変化していくものと予想される。ただし、世界的なカーボンニュートラルへの潮流は変わ

ることなく、ストアスの供給においても不安要素は付きまとう。一方で国土交通省による国土強靱化計画等、ストアスの安定供給に関わる社会的意義は今後も変わらない。

日本国内における経済発展のため、政府、各石油メーカー、日本アスファルト協会、消費者である道路会社や建材メーカーなどが一体となって、ストアス安定供給への課題解決に努めていくことが必要と考える。

超重交通に対応する長寿命舗装技術の導入促進について

(Promoting the Introduction of Long-Life Pavement Technology for Super-Heavy Traffic Roads)

白尾 仁知*・上田 章紘**・皆方 忠雄***

物流上重要な道路輸送網を指定する「重要物流道路制度」が創設され、道路管理者が道路構造等の観点から支障がないと認めて指定した区間に限定して、道路を通行する車両の制限値が引き上げられ、舗装技術には今まで以上の耐久性や長寿命化が求められている。本報告では「超重交通に対応する長寿命舗装技術」の現場導入に向けた要求性能（リクワイアメント）設定の考え方、新技術の公募および現場実証の実施に向けた取り組み状況について報告する。

1. はじめに

「舗装の構造に関する技術基準」（以下、「技術基準」）は2001年6月に定められた。従前の舗装構造は材料や工法、出来形を発注者が規定する仕様規定であったが、技術基準が策定されて以降、舗装に求める性能が明確になり、その指標として、疲労破壊輪数や塑性変形輪数などの性能指標が定まり性能規定化に至った。背景には、2001年3月に政府の方針として『規制改革推進3か年計画』が策定され、技術規格の性能規定化が政府の方針として打ち出されたことにある¹⁾。以降、順次、性能規定化への対応が図られ、技術基準に明示の無い材料・工法であっても導入できる体系となっている²⁾。一方で、開発が進む様々な材料・工法に対し、性能保持を確認する方法が明示されるにはいまだ至っておらず、新技術を導入する場合、性能を満足するかどうか、新材料・新工法ごと個別に検討する必要がある、現場への導入が促進されていないという課題がある²⁾。

2. 道路分野における新技術導入促進方針について

2020年4月に国土交通省道路局が決定した「新技術導入促進方針」では、良い技術は活用するという方針の下、これまで新技術の活用が十分でなかった異業種、他分野、新材料等も含め、新技術の開発や導入が促進されるように取り組むことが提示された。この取り組みの中では、さらなる性能規定化の促進として、性能

を確認する方法の明示や公共工事の調達時においても、性能に応じ新技術の導入を可能とすることに必要なプロセス（一般化・標準化）を技術基準類（各種技術基準、共通仕様書、設計要領）に明確に位置付けることとされており²⁾、舗装においては、技術基準だけでなく舗装性能評価法などの要綱・指針等も対象に含まれる。

なお、「新技術導入促進方針」では、上述の技術基準類の改訂に向けて、新技術導入に必要な検討を支援する第三者機関（導入促進機関）を公募・選定し、新技術導入に向けた体制の強化としている。（一財）国土技術研究センター（以下、「JICE」）は2020年度新技術導入促進計画に掲載されている技術テーマである「超重交通に対応する長寿命舗装技術」の導入促進機関に選定されている。

3. 超重交通に対応する長寿命舗装技術導入促進の背景・必要性

はじめに、超重交通に対応する長寿命舗装技術の導入促進の背景として、重要物流道路制度の概要や舗装の修繕工事の外部不経済などについて説明する。

3.1 重要物流道路制度の創設による輪荷重の引き上げ

2018年3月の道路法の改正により「重要物流道路制度」が創設され、重要物流道路に係る特別の構造基準が規定された。これにより、国際海上コンテナを運搬

*しらお よしと も （一財）国土技術研究センター道路政策グループ・研究員

**うえだ あきひろ （一財）国土技術研究センター道路政策グループ・上席主任研究員

***みなかた ただお （一財）国土技術研究センター道路政策グループ・首席研究員

するセミトレーラ連結車が特別の許可なく道路を通行することができる環境が整いつつある³⁾。

このため、道路管理者が道路構造等の観点から支障がないと認めて指定した区間に限定して、道路を通行する車両の制限値を図-2のとおり引き上げることに
より、一定の要件を満たす国際海上コンテナ車(40ft
背高)の特殊車両通行許可が不要となっている³⁾。

また、車両制限令においては、道路を通行する車両の輪荷重の規定値は5t以下となっているが、重要物流道路など、道路管理者が指定した道路を通行する国際海上コンテナ車の輪荷重の規定値は、5.75t以下に引き上げられている。

3.2 超重量交通の舗装構造への影響

輪荷重“5t以下”から“5.75t以下”への引き上げは、舗装構造に与える影響が大きい。交通荷重が舗装に与えるダメージは輪荷重と標準荷重の比の4乗に比例して指数関数的に増加するため、図-3のとおり、一般的に舗装へのダメージは走行する車両の輪荷重による影響が大きい。

また、国土交通省の過去のデータによると、図-4のとおり、大型車交通量が多いほど、舗装の損傷度合いを示すひび割れ率が大きくなり、早期に損傷していることから、大型車交通量によって舗装損傷が早く進行することが分かっている。

3.3 修繕工事の外部不経済

国際海上コンテナ車などの物流が集中する道路においては、大規模な修繕のために長期間にわたる交通規制を行った場合、交通への影響が甚大となる。よって、打換えの少ない長寿命の舗装技術の導入が必要となっている。また修繕工事で打換える層が下層へ及ぶほど、施工期間が増加し、規制時間は増大となることから、短時間で施工が求められる。

4. 超重交通に対応する長寿命舗装技術の導入促進方法

こうした背景から重要物流道路などの大型車交通量が多い道路においては、超重交通に対応する長寿命舗装技術を導入し、効率的・効果的に舗装を管理していくことが必要となっている。しかし、2章のとおり、新技術の導入には技術基準類へ位置付けられることが求められるため、導入促進機関が求める性能を定め、それに応じる技術を公募し、性能の評価および性能の確認方法を整理し技術基準類へ反映することによって、新技術の導入が進むことを目指している。



図-1 国際海上コンテナ車(40ft背高)³⁾

	総重量(t)	車高(m)	車長(m)
高速自動車国道 ・その他	20 重さ指定道路25 ^{※1}	3.8 高さ指定道路4.1	12

※1 車両長さおよび軸距に応じた制限あり

重要物流道路
(道路構造等の観点から支障のない区間)

	総重量(t)	車高(m)	車長(m)
国際海上コンテナ車 (40ft背高) 特殊車両通行許可 不要区間	44 ^{※2}	4.1 ^{※3}	16.5

※2 車両の車軸の数および軸距に応じた制限あり

このほか、軸重(11.5t)、輪荷重(5.75t)の制限あり

※3 現行の規定(高さ指定道路)により指定

図-2 車両の一般的制限値の引き上げ³⁾

■舗装へのダメージは、輪荷重の4乗で影響

→20トン車の場合、その輪荷重は乗用車の20倍であるが、
舗装へのダメージは16万倍

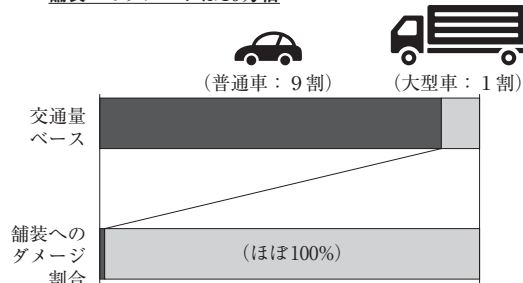


図-3 舗装構造への超重交通の影響⁴⁾

■アスファルト舗装では大型車交通量が多いほど
損傷が早く進行

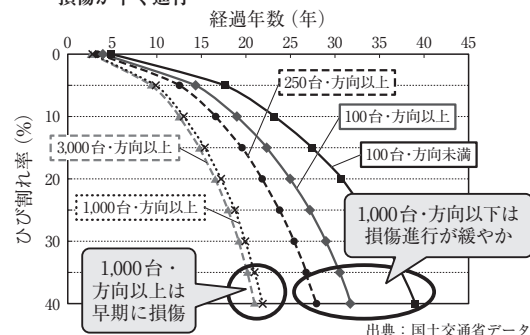


図-4 大型車交通量と舗装損傷の関係⁴⁾

4.1 技術公募の実施

図－5のとおり、JICEでは、2020年度の新技术導入促進機関への選定後、まずは3章で述べた超重交通に対応する長寿命舗装技術に関する背景・必要性について調査を行い、要求性能（以下、「リクワイヤメント」）の検討を含めた技術公募要領の作成を行った。なお、新技术の導入促進に必要な助言を得るため、当該技術分野に精通する専門家等で構成されている技術検討委員会を立ち上げ、検討を行っている。

2021年7月～9月の2ヶ月間において、技術公募を実施した。技術公募を行うに当たって、表－1のとおり公募技術のリクワイヤメントの整理・評価基準を定

めた。リクワイヤメントを満たすか否かの舗装設計結果や根拠資料などの「技術確認書」の提出だけでなく、実道において試験施工から概ね3年間の検証を実施する区間の概ね3年間の劣化状況から予測する「施工25年後の舗装状態推定結果」の2つの資料を総合的に勘案して評価することとしている。なお、現場実証を行う技術はリクワイヤメントを満足しているか「技術確認書」により選定している。

現場実証箇所は、国土交通省の地方整備局より、重要物流道路に指定され、大型車交通量の多い箇所を5箇所提供いただき、応募者はその5箇所から、1技術につき、1つの箇所を選択するように公募を実施した。

4.2 要求性能（リクワイヤメント）の考え方

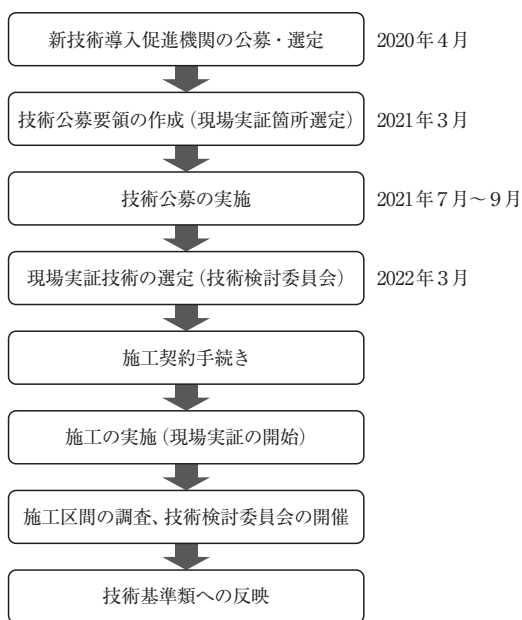
技術公募において定めたリクワイヤメントの設定の考え方を詳述する。

(1) 耐久性

2001年に定められた技術基準が規定している輪荷重は5tであるが、国際海上コンテナ車（40ft背高）が通行することを想定して、輪荷重5.75tの車両が通行することを条件とした。またその評価方法として、舗装点検要領において定めている、判定区分Ⅲ（修繕段階）にあたる指標値としてひび割れ率40%、わだち掘れ量40mm⁵⁾に至るまでの年数を25年とすることを求めた。この年数は、舗装点検要領における使用目標年数を指し、25年間は交通規制を伴う補修を行わないこととした。

(2) 短時間施工

重要物流道路のように物流が集中する道路においては、大規模な修繕工事による長時間の交通規制は、交通への影響が甚大となる。応募技術の施工時間と従来技術による施工を1回実施する場合の施工時間、もしくは使用目標年数の平均値が一般的に13年程度である



図－5 新技术の導入促進に向けたフロー

表－1 リクワイヤメント（要求性能）一覧

①耐久性	
輪荷重5.75tを想定して嵩上げ無しで舗装の耐久性を向上させる技術	使用目標年数を25年とした供用性（交通規制を伴う補修を行わず、かつ、ひび割れ率40%、わだち掘れ量40mmに達しない）を示す、混合物性状、舗装構造設計結果（舗装断面、使用材料、T _A 等）、耐用年数、使用材料の劣化特性等の根拠により評価する。また、概ね3年間の劣化状況から予測する「施工25年後の舗装状態推定結果」により評価する。
②短時間での施工	
従来と同等もしくは少ない時間で施工・交通開放が可能である技術（日々交通開放）	既存の技術と同等以上を示す書類により評価する。
③LCC抑制	
従来技術と比較してLCCが同等もしくは抑制される技術	LCC（建設費用を耐用年数で除した値）は、既存の舗装と同等以上を示す書類により評価する。
④再生利用	
再生利用が可能である技術	再生利用は、提案する材料が将来再生利用できることを示す書類により評価する。

というライフサイクルを考慮し、従来技術による施工を当初と13年後の2回実施する場合の総施工時間を、1年あたりに換算した施工時間で比較することとした。

(3) LCC（ライフサイクルコスト）抑制

維持管理コストの縮減を図るため、従来技術よりもライフサイクルコストの低減が図られる技術を求めることとした。応募技術の耐用年数は、応募者が設定し、従来技術は、当初と13年後に施工することとして、耐用年数を26年に設定、これらの建設費用を1年あたりに換算したライフサイクルコストを比較することとした。

(4) 再生利用

「建設リサイクル法」により、一定規模以上の工事においては、「特定建設資材廃棄物」の分別解体等および再資源化等を義務付けられていることから、本技術公募においても、提案する材料が将来、再生利用でできることを求めた。

5. 現場実証選定技術について

応募者からの「技術確認書」を確認し、応募者と意見交換を経て、技術検討委員会において審議の結果、表-2のとおり、13件の応募技術が現場実証技術として選定されている。

選定された技術は、今回の公募で求めたリクワイヤメントを満足するように、舗装性能評価法を応用し、輪荷重5.75tを想定した新たな技術基準類の改定に向けた証明方法を提示していただいた。

選定された13件の技術は、技術の優位性、対象現場への適用性、制約条件等を確認するために、現場実証を行うとしており、2022年度中に各技術50mの施工を予定している。

6. おわりに

超重交通に対応する長寿命舗装技術は、今回の技術公募では13件の技術が現場実証に進むことと

なった。今後、施工区間の供用性を追跡調査し、各応募者の技術が要求性能を満足するか確認していくことになる。舗装構造計算結果のとおりリクワイヤメントを満足する技術は、その設計方法や照査方法が技術基準類の改訂の基礎資料となる。また、舗装の長寿命化は、工事に伴うCO₂排出量の削減にもつながり、カーボンニュートラル社会への貢献も期待される。

JICEは、道路舗装技術に関する導入促進機関として、民間企業が開発した最先端の新技術を公共工事で活用できるよう、技術基準類への迅速な追加や改訂のための支援を行っていく。新技術の導入に関して相談があれば、気軽にJICEに問い合わせいただきたい。

表-2 現場実証選定技術一覧⁶⁾

No.	応募者	技術名称
1	東京舗装工業株式会社	半たわみ性舗装を用いたコンボジット舗装 NEO
2	鹿島道路株式会社	AKD 舗装
3	前田道路株式会社	表層・基層および上層路盤の耐久性向上による長寿命舗装
4	東亜道路工業株式会社	重荷重が作用する超重交通に対応する高耐久アスファルト舗装
5	大林道路株式会社	タフアスコン
6	日本道路株式会社	高耐久エポキシアスファルト混合物を使用した長寿命舗装技術
7	ニチレキ株式会社	革新的改質アスファルトを用いた経験的力学設計による長寿命舗装
8	世紀東急工業株式会社	高耐久アスファルト混合物ストロングファルト
9	東亜道路工業株式会社	遮水型排水性舗装工法を活用した高耐久排水性アスファルト舗装
10	日本道路株式会社	高耐久エポキシアスファルト混合物を使用した長寿命舗装技術（排水性）
11	ニチレキ株式会社	革新的改質アスファルトを用いた経験的力学設計による長寿命舗装（排水性）
12	株式会社 NIPPO	エポキシアスファルト混合物高剛性アスファルト混合物
13	大成ロテック株式会社	高弾性なアスファルト混合物を表基層に用いた舗装構造

— 参考文献 —

- 1) 福田敬大, 牧野浩志, 星隈順一, 片岡正次郎: 技術基準の性能規定化の動向を踏まえた道路構造物分野の新技術導入に関する政策研究. 国総研資料第1181号, 2021.12, P2.
- 2) 国土交通省道路局: 道路分野における新技術導入促進方針 2020.4, P4.
- 3) 国土交通省道路局: 重要物流道路指定制度の概要
- 4) 国土交通省道路局: これからの舗装マネジメント, 社会資本整備審議会道路分科会第6回道路技術小委員会
- 5) 国土交通省道路局 国道・防災課: 舗装点検要領, 2017.3
- 6) (一財) 国土技術研究センター HP
https://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/roadtech/choujumyou-hosou/senteikeka_choujukoutu.pdf

首都高速道路における舗装設計施工要領の改訂概要について

(Overview of Revised Pavement Design and Construction Specifications for the Metropolitan Expressway)

須田 郁 慧*

首都高速道路では、重交通及び周辺環境への配慮などから2015年に社内規格である舗装設計施工要領で使用目標年数を規定し、高耐久の舗装材料を積極的に取り入れるなどしてきた。その後も確実に舗装の使用目標年数を達成できるよう、新たな材料開発や品質規格を規定するなど、適宜要領の改訂を行ってきた。本稿では、現場で発生した損傷事例の要因分析などから積上げた知見を基に、2021年10月に改訂した要領の内容について紹介する。

1. はじめに

交通量の多い首都高速道路では、交通規制で渋滞が発生することによる経済損失が大きく、また、建物が近接していることから、交通騒音や工事騒音による周辺環境への負荷が大きい。2015年4月に社内規格である舗装設計施工要領（以下、要領と称す）を大きく改訂し、舗装の打換えサイクルの目標期間（以下、使用目標年数と称す）（表層15年、基層・中間層30年、路盤60年）を設定することで、使用目標年数の長期化と標準化を目指すと同時に、路面が損傷するリスクを減らすため、ポットホール等ができていく高耐久の舗装材料を積極的に取り入れている。その後、2019年には使用目標年数が確実に達成されるよう、TLAを用いない改質グースアスファルト混合物の採用、改質アスファルトを用いた新たなアスファルト塗膜防水材料や成形目地材の採用等、適宜改訂を行ってきた。2021年10月には、現場で発生した損傷事例などから得られた新たな知見とともに、これまで規定した規格の更なる確実性を達成するため、要領の改訂を実施した。本稿では、2021年に実施した主な改訂内容について紹介する。

2. RC床版部の施工に関する遵守事項

首都高速道路におけるRC床版上の舗装構成は、床版上に改質アスファルト塗膜系防水材料を用いた防水層を施工し、基層に厚さ50mmの密粒度アスファルト混合物（13）、表層に厚さ30mmの小粒径ポーラスアスファルト混合物（5）を舗設する仕様を標準としている。現

地状況等により基層厚さが20～30mm程度と基層の標準厚さ（50mm）より薄い施工箇所において、基層混合物と改質アスファルト塗膜系防水材料による防水層の接着不良が要因と考えられる舗装の損傷が発生した（写真－1）。室内検証実験の結果、基層混合物の層厚が30mm以下と薄く、敷き均し温度がメーカー推奨温度より低い場合や下地温度が低い場合それぞれで強度が低下する（図－1）ことが確認された。さらに、これらの要因が重なると接着強度が著しく低下することが明らかとなった。そこで、施工時の注意事項について、防水材料を基層混合物に浸透させて一体化させる観点から①基層厚を30mm以上として管理すること、②メーカー推奨の敷き均し温度以上にて施工することの2点を遵守することを要領に明記した。また、防水層で散布する硅砂の散布量が過剰であることで接着性能を低



写真－1 基層厚 30mm以下の場所での損傷事例

*すだ いくえ 首都高速道路株式会社 技術部技術推進課

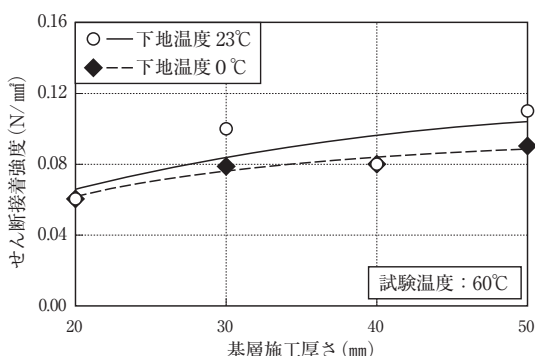
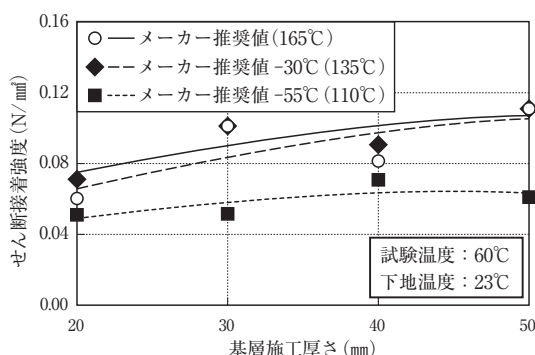


図-1 基層厚さとせん断接着強度の関係

下させる傾向も確認されているため、現場にて珪砂を均一に散布することにも十分留意する必要がある。寒さの厳しい冬期に打換える場合等、現場立会時における温度管理の徹底を改めて周知することで、より品質の高い舗装の舗装を実現することとした。

3. 鋼床版上の表層単独施工部における舗装構成

鋼床版上の舗装打換えで既設基層のゲースアスファルト混合物をそのままに、表層だけ打換える場合は、既設ゲースアスファルト混合物上に改質防水層（カットバック抑制型防水用接着剤+改質アスファルト塗膜

系防水材料）を施工し、小粒径ポーラスアスファルト混合物（5）を舗設する仕様としていた。しかし、施工箇所にて表層の小粒径ポーラスアスファルト混合物の下部が防水層との一体化によりアスファトリッチの状態になることで、塑性変形抵抗性の低下に起因すると推測される流動が確認された。これを改善するため、既設ゲースアスファルト上の改質防水層をなくし、タイヤ付着抑制型アスファルト乳剤であるタックコート（PKM-T）1層を舗装用接着剤として施工した後、小粒径ポーラスアスファルトを舗設する仕様（図-2）に変更することとした。なお、この仕様は既設ゲースアスファルトが健全であることが前提条件となるため、既設ゲースアスファルトがひび割れている場合や、流動して著しい変形が確認された際は、十分な防水性を有していないものとし、基層から打換えるもしくは表層に密粒度アスファルト混合物（13）を採用する等の対策が必要となることに留意する必要がある。

4. 流動が著しい箇所かつコンクリート系舗装の採用困難部における舗装構成

鋼床版部で、大型車の運転手がブレーキを踏むことにより制動荷重がかかる下り勾配部、交通量が多く日常的に渋滞の発生する箇所および前方に信号機や停止線のある箇所等、流動が著しい箇所については、ゲースアスファルトの流動が原因で損傷が発生する事象がある。このような流動が著しい箇所は、基層へのゲースアスファルトの採用が困難であり、コンクリート系舗装の採用が望ましいが、施工に長時間交通規制を伴うことから、コンクリート系舗装の採用ができない箇所がある。その場合は、鋼床版上に改質アスファルト塗膜系防水材料を用いた防水層を施工した上で、基層に厚さ50mmの密粒度アスファルト混合物（13）、表層に厚さ30mmの小粒径ポーラスアスファルト混合物（5）を舗設する仕様としていた。この舗装構成の施工箇所において、冬場の施工時の下地（鋼床版+改質アス

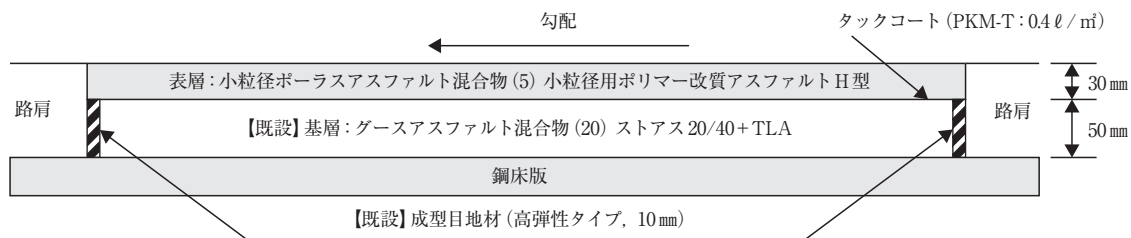


図-2 鋼床版上の表層単独施工部における舗装構成

ファルト塗膜系防水層) 温度が5℃程度と低く、かつ基層混合物の締固め温度がメーカー推奨温度より30～50℃も低いことが要因となり、基層混合物と改質アスファルト塗膜系防水材の接着不良に起因する損傷が発生した。この事象に対し、室内試験による検証の結果、本仕様を採用する際、5℃以下の外気温の場合の施工を避けるとともに、舗設の温度管理を徹底する等の遵守事項を新たに要領に規定した。これに加え、少しでも鋼床版への防水性能を高めるため、表層のアスファルト混合物にも密粒度アスファルト混合物(13)を採用することとした。

5. 温度低減効果の高い中温化技術の採用

土工部の湧水部では上層路盤上に合計層厚400mmのアスファルト混合物を4層で舗設する仕様(図-3)を採用している。首都高速道路にて採用していた従来の中温化技術(温度低減効果30℃)にて施工した箇所において、施工後の早期わだち掘れが発生する事例が報告された。この要因としては、施工総厚が400mmと厚く、混合物の内部温度が十分に下がっていないことが影響していると推定された。この事象を受け、次工程への移行や交通解放時の舗設温度を50℃程度低下させるため、従来よりも温度低減効果が高い中温化技術を新たに採用することとした。

6. 段差修正材の品質規格の規定

橋梁構造物の連続する首都高速道路において、段差による騒音・振動を低減するために、ジョイント部の

後打ちコンクリートと舗装混合物との段差修正材(写真-2)が、これまで広く採用されていた。この段差修正材は、試験的かつ経験的に採用されている材料であったため、これまでは品質規格を設けていなかった。そこで、関東圏内で実績の多い段差修正材を室内試験にて施工性・耐久性を評価する品質比較検証を実施し、新たに首都高独自の品質規格を設定した(表-1)。

性能試験として、硬化時間の測定、湿潤状態における引張試験、線膨張係数の測定及び首都高独自に定めた実厚低速ホイールトラッキング試験¹⁾を実施することで、段差修正材の性能を評価している。

この規格は国内で初の規格となるため、今後の使用実績を基に、運用上の課題や現場での不備等がないよう確認していくとともに、現場での長期耐久性に関する知見について引き続き検証していく。



写真-2 段差修正材の施工状況

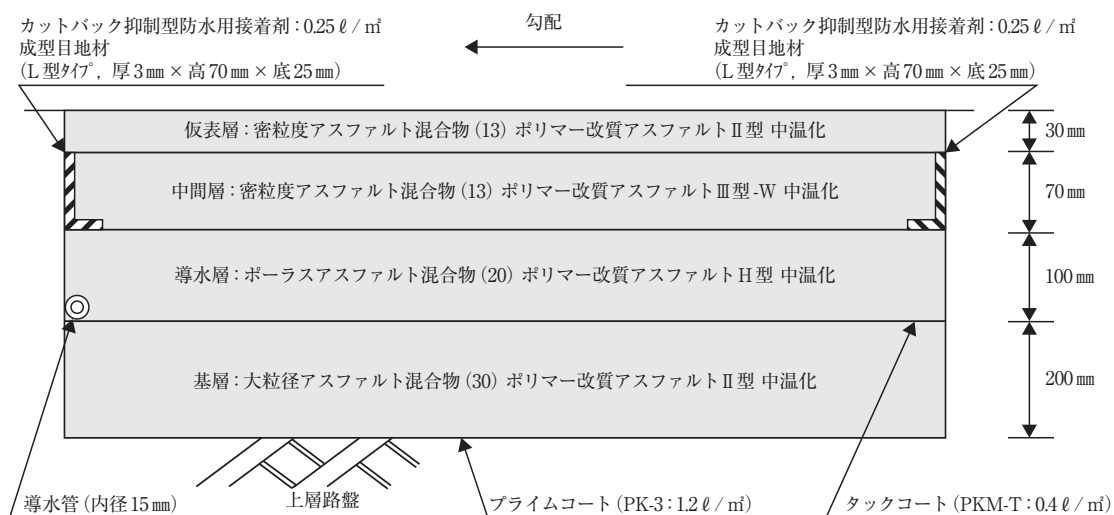


図-3 湧水部(反転排水性舗装部)の舗装構成

表－１ 段差修正材の品質規格

要求性能		評価項目	品質規格	試験方法
作業性		硬化時間（10℃）	分 60 以下	硬化時間の測定 ¹⁾
耐久性	湿潤状態における接着性	湿潤状態における引張接着強度（23℃）	MPa 0.6 以上	湿潤状態における引張接着試験 ¹⁾
	膨張・収縮への追従性	線膨張係数（-10～60℃）	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 13 以上 33 以下	線膨張係数の測定 ¹⁾
	塑性変形抵抗性	実厚低速DS	回／mm 1,000 以上	実厚低速ホイールトラッキング試験 ¹⁾

7. PCM 舗装および SFRC 舗装の性能および施工

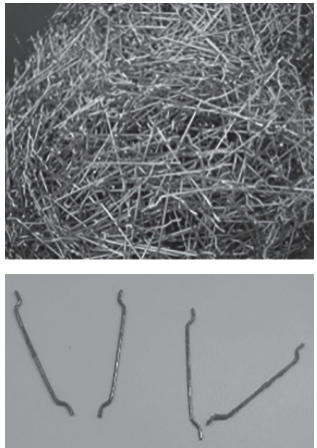
舗装設計施工要領では、コンクリート床版上のかぶり厚さの回復を目的に、2015年にPCM（ポリマーセメントモルタル）舗装の性能と施工について規定した。PCM舗装は、大型車の交通量が非常に多い首都高速道路において、度重なる舗装打ち換えによりRC床版のかぶりが削られて耐久性が低下した箇所に適用されており、規定後約10,000㎡施工されている。PCM舗装の使用繊維については、これまでビニロン繊維と鋼繊維の両方が選択できる仕様となっていたが、打設後のひび割れ発生及び進展抑制効果の検証結果より、表－2に示す鋼繊維を基本材料として採用することとした。鋼繊維はフック付きの繊維長さ30mmのものを使用している。

SFRC舗装に関しては、閉断面リブ（トラフリブ）構造の鋼床版の疲労亀裂対策として採用されてきた工法である。この度、PCM舗装とともに床版上面増厚工法として、これまで実施してきた実績も含めて設計施工に必要な内容として、その性能と品質確保のための施工管理について明記した。

8. おわりに

首都高速道路では、非常に厳しい重交通環境の中、舗装の使用目標年数を確実に達成できるよう、社内規格である舗装設計施工要領を定期的に改訂している。本稿では、現場での損傷事例から得られた知見を基に、2021年に改訂した主な内容について紹介した。今後も新たな高耐久材料の開発や施工の効率化等、お客様の

表－２ PCM 舗装で使用する鋼繊維の規格

名称	鋼繊維
材質	JIS G 3532（鉄線）に適合したもの
形状	両端フック型
寸法（直径）	0.6 mm
寸法（公称長）	30 mm
質量または密度	67mg／本（許容差±15%）
引張強度	600N／mm以上
摘要	土木学会規準 「コンクリート用鋼繊維」
写真	

走行安全性の向上や工事規制による渋滞の低減などを目標に現場の声を聞きながら技術開発を推進していく所存である。

舗装の長寿命化および低炭素化に寄与する 最新のポリマー改質アスファルト

(New Polymer Modified Asphalts for Life Prolongation and Low Carbonization)

浦 沢 和 希*・後 藤 洋 平**・上 野 貞 治***・黄 木 秀 実****

舗装点検要領において、舗装の構造的および機能的な健全性の向上は、修繕間隔を延ばし、舗装の長寿命化に寄与するとされている。また、脱炭素社会の構築に向け、舗装業界も含めた全産業に低炭素化（CO₂排出量の削減）が求められる時代となってきた。

本稿では、舗装の長寿命化や低炭素化について、ライフサイクルを考慮した工事費用およびCO₂排出量が削減できるという観点で、社会貢献に資する最新のポリマー改質アスファルトについて紹介する。

1. はじめに

平成28年10月、点検・診断・措置・記録を基本としたメンテナンスサイクルの構築を目的に舗装点検要領が策定された。この要領において、舗装の修繕は、「構造的な健全性」や「走行性・快適性などの機能的な健全性」の回復を目的としており、長寿命化によって修繕間隔を延ばすことがライフサイクルの長期化につながる。

一方、昨今では環境への配慮が強く求められており、我が国は、脱炭素社会の構築に向けて、2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラルを目指すことを宣言した¹⁾。この実現に向けては、舗装業界も含めた全産業において、低炭素化（CO₂排出量の削減）が急務となっている。

これらの課題について、舗装材料として使用されるポリマー改質アスファルトは、ひび割れやわだち掘れの抑制による舗装の長寿命化、および中温化改質アスファルトによる舗装工事におけるCO₂排出量の抑制で貢献してきている。

本稿では、最新の技術を用いたポリマー改質アスファルトによる長寿命化や低炭素化について紹介する。

2. 舗装の長寿命化

舗装の主な損傷には、「ひび割れの発生」「わだち掘れの増加」「平坦性の悪化」が挙げられる。舗装の長寿命化には、長期間これらの損傷を生じさせないことが重要となる。

舗装設計便覧では、舗装の設計期間は「疲労破壊によりひび割れが生じるまでの期間」、路面の設計期間は「塑性変形抵抗性や平坦性などの性能が管理目標値を保持する期間」と定義されている²⁾。

つまり、舗装のひび割れ抵抗性やわだち掘れ抵抗性を向上させることは、「舗装」および「路面」の設計期間を延ばすために効果的であり、舗装の長寿命化に大きく寄与する。

舗装の長寿命化には、一般的にポリマー改質アスファルト（以下、改質アス）を用いたアスファルト混合物が採用される。そこで、筆者らは、一般的な改質アスと比較して、ひび割れやわだち掘れの抵抗性に優れる材料を開発し、更なる舗装の長寿命化を試みた。

以下に、その性能およびライフサイクルを考慮した工事費用の試算結果について解説する。

2.1 ひび割れ抵抗性に優れる改質アスファルト

ひび割れ抵抗性に優れる改質アス（以下、開発品A）

*うらさわ かずき ニチレキ株式会社 技術研究所

**ごとう ようへい ニチレキ株式会社 技術研究所 主任

***うえの さだはる ニチレキ株式会社 技術研究所 上席研究員

****おうき ひでみ ニチレキ株式会社 技術研究所 所長

は、ひび割れが発生した既設アスファルト舗装のオーバーレイ等に用いられ、下記の特徴がある。

- ①従来の改質アスより高い「疲労抵抗性」を有する。
- ②従来の改質アスと比較して「ひび割れ抵抗性」に優れるため、高いリフレクションクラック抑制効果を発揮する。
- ③わだち掘れ抑制に一般的に用いられているポリマー改質アスファルトⅡ型（以下、改質Ⅱ型）と同程度の「塑性変形抵抗性」を有する。

(1) 評価方法

疲労抵抗性は曲げ疲労試験、ひび割れ抵抗性はひび割れ貫通試験、塑性変形抵抗性はホイールトラッキング試験（以下、WT試験）により評価した。それぞれの試験条件を表－1～3に示す。

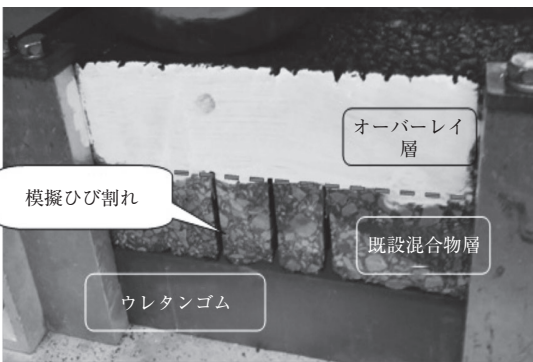
ここで、ひび割れ貫通試験は、池田ら³⁾が考案した試験条件を参考に、ひび割れが生じているアスファルト混合物上へのオーバーレイ（以下、OL）あるいは切削OLにより、OL層に局部的な曲げ変形が生じるケースを模擬した。具体的には、写真－1に示すように、ひび割れを模擬したスリットを入れた既設混合物の上に、評価の対象となるアスファルト混合物を舗設し、WT試験輪による走行負荷を与え、リフレクションクラックが混合物上面まで達する時間を評価値とした⁴⁾。

(2) 評価結果

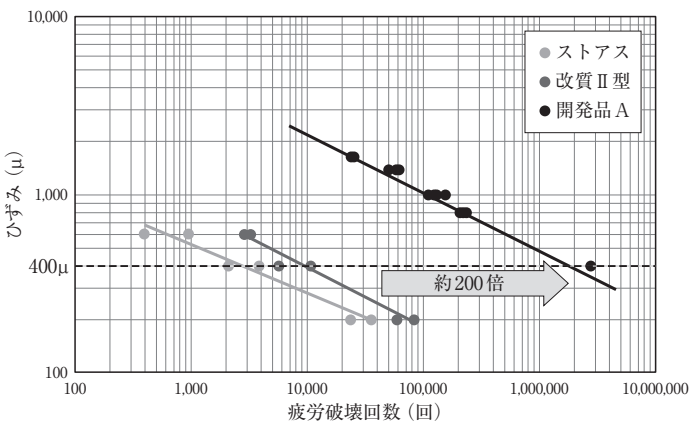
①疲労抵抗性

曲げ疲労試験結果を図－1に示す。

開発品Aの疲労破壊回数は、全てのひずみにおいて、ストレートアスファルト60-80（以下、ストアス）および改質Ⅱ型より大きく、400μの条件では改質Ⅱ型の約200倍となる。



写真－1 ひび割れ貫通試験状況



図－1 曲げ疲労試験結果

表－1 曲げ疲労試験

項目	条件
载荷方法	両端固定2点载荷
供試体寸法	4×4×40cm
スパン	30cm
試験方法	ひずみ制御
試験温度	15℃
载荷周波数	5 Hz
試験ひずみ	200～1,600μ
試験槽	水冷方式
载荷波形	サイン波

表－2 ひび割れ貫通試験

項 目		条 件
供試体寸法 (cm)		幅29×奥行8
OL層	バインダ	任意
	厚さ (cm)	5
	混合物種	密粒度アスコン (13)
既設表層	バインダ	ストアス60-80
	厚さ (cm)	5
	混合物種	密粒度アスコン (13)
クラック幅		3 mm
タックコート		PKM-T
ウレタン硬度		30°
試験温度		15℃
試験荷重		686N
走行速度		42回／分

表－3 WT試験

項目	条件
上载荷重	686N
接地圧	0.63MPa
走行方式	クランク式
走行速度	42回/分
走行回数	2,520回
試験温度	60℃

②ひび割れ抵抗性

ひび割れ貫通試験結果を図-2に示す。開発品Aにおけるリフレクションクラックが混合物上面までに達する時間は、ストアスの約30倍、改質Ⅱ型の約6.4倍である。

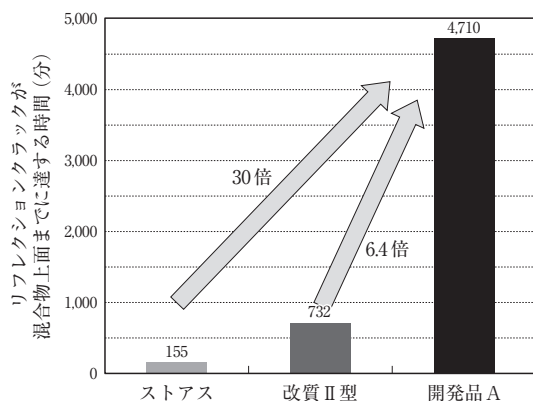


図-2 ひび割れ貫通試験結果

③塑性変形抵抗性

WT試験結果を図-3に示す。開発品Aの動的安定度は7,000回/mmであり、改質Ⅱ型と同等以上の値が得られる。

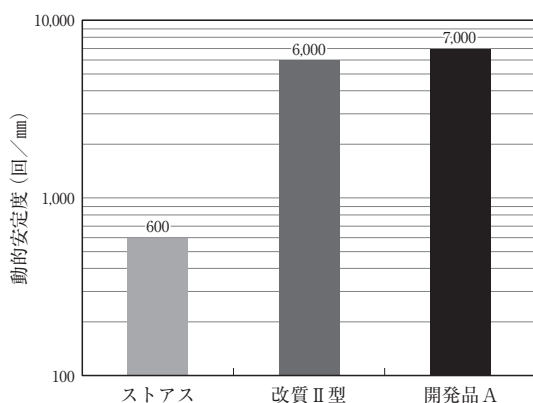


図-3 WT試験結果

④まとめ

開発品Aは、高いひび割れ抵抗性および改質Ⅱ型と同等以上の塑性変形抵抗性を有するため、重交通路線においても十分に舗装の長寿命化に寄与できる。

(3) ライフサイクルを考慮した工事費の試算

図-4に示す補修断面（表層50mmの切削OL）を想定し、ライフサイクルを考慮した工事費（以下、更新

費）を試算した。設計条件を表-4に示す。

設計期間は、式(1)より算出することができる⁵⁾。等値換算係数として独自に試算した値（改質Ⅱ型：1.05、開発品A：1.70）を用いた場合⁶⁾、ストアスの10年と比較して、改質Ⅱ型で11年、開発品Aで21年となる。

$$T_A = \frac{3.84N^{0.16}}{CBR^{0.3}} \quad \text{式(1)}$$

ここで、

T_A ：等値換算厚 (cm)

N ：疲労破壊輪数 (回)

CBR ：路床の設計CBR

補修前		補修後		
50 mm	既設表層	ストアス	改質Ⅱ型	開発品A
50 mm	既設基層	既設基層	既設基層	既設基層
	路盤	路盤	路盤	路盤
	路床	路床	路床	路床

図-4 想定した補修断面

表-4 設計条件

項目	条件
交通量区分	N6
信頼度	90%
設計CBR	6%
疲労破壊輪数	7,000,000回/10年

これらの設計期間を用いて試算した更新費を図-5に示す。なお、試算条件は、以下のとおりとした。

- 各混合物の使用目標年数（補修サイクル）は「設計期間+5年」とした。
- 混合物や機械損料などの設計単価は、平成28年建設物価（千葉）を引用した。
- 更新費の比較は、1000㎡・50年における総建設費用とした。
- 廃材処理費は、コストに含まないこととした。

50年における開発品Aの累積の更新費を試算すると、ストアスの約16%、改質Ⅱ型の約27%の削減とな

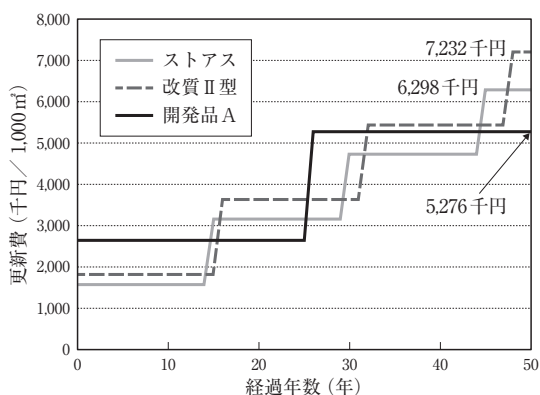


図-5 供用期間と累積の更新費の関係

る。年あたりの更新費は、ストアスで105.0千円、改質Ⅱ型で113.0千円、開発品Aで101.5千円となる。

このように、ストアスや改質Ⅱ型の代わりに、開発品Aを同厚で表層に用いることで、工事回数を減らし、累積の更新費が縮減される。また、維持管理費や道路利用者費用の抑制も期待できるため、ライフサイクルコスト（以下、LCC）は有利になると考えられる。

2.2 わだち掘れ抵抗性に優れる改質アスファルト

わだち掘れ抵抗性に優れる改質アス（以下、開発品B）は、重荷重車両が頻繁に走行する道路で使用されており、下記の特徴がある。

- ①改質Ⅱ型と比較して、高い「塑性変形抵抗性」を発揮する。
- ②低温時においても改質Ⅱ型と同等の「たわみ追従性」を有する。

(1) 評価方法

塑性変形抵抗性はWT試験、たわみ追従性は曲げ試験により評価した。試験条件を表-5、6に示す。

(2) 評価結果

①塑性変形抵抗性

WT試験結果を図-6に示す。開発品Bの動的安定度は、いずれの試験条件においても、改質Ⅱ型より大きく、その差は試験条件が苛酷なほど顕著となる。

②たわみ追従性

曲げ試験結果を図-7に示す。開発品Bの破断ひずみは改質Ⅱ型と同等以上である。

③まとめ

開発品Bは、苛酷な条件下でも優れた塑性変形抵抗性を有し、改質Ⅱ型と同等以上のたわみ追従性を示すことから、特に重荷重車両が通行する舗装の長寿命化が期待できる。

表-5 WT試験

項目	標準条件	条件①	条件②
上乗荷重 (N)	686	686	1,225
接地圧 (MPa)	0.63	0.63	0.9
走行速度 (回/分)	42	10.5	10.5
試験温度 (℃)	60	60	60
想定箇所	大型車両が頻繁に走行する路線	大型車両が頻繁に走行し渋滞が発生する路線	重荷重車両が低速走行する空港や港湾

表-6 曲げ試験

項目	条件
供試体寸法 (mm)	長さ300×幅100×厚さ50
荷重速度 (mm/min)	50
試験温度 (℃)	-10

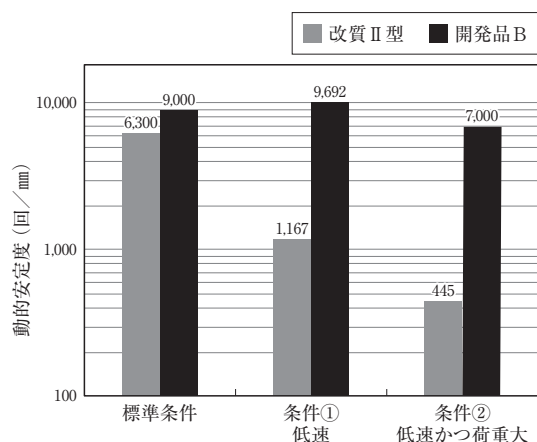


図-6 WT試験結果

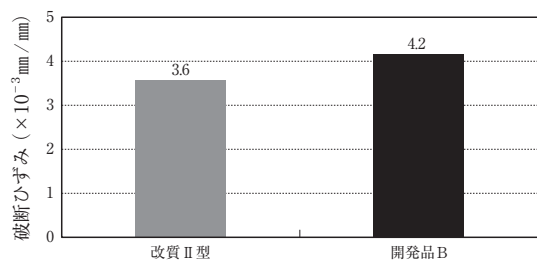


図-7 曲げ試験結果

(3) 更新費の試算

土木研究所から提案されている式(2)に基づき算出した設計期間⁷⁾は、改質Ⅱ型で8年、開発品Bで12年である。算出条件は表-7に示すとおりである。

$$DS = 0.679 (Y \cdot T \cdot W \cdot V \cdot Ct/D) \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

表-7 算出条件

	改質Ⅱ型	開発品B	適用した値
DS : 動的安定度 (回/mm)	6,300	9,000	標準条件における動的安定度
D : わだち掘れ量 (mm)	40	40	一般的な管理基準値: 40
T : 大型車交通量 (台/日)	3,000	3,000	N7交通の舗装計画交通量: 3000
W : 輪荷重補正係数	3	3	重い車両が非常に多い: 3.0
V : 走行速度補正係数	0.9	0.9	交差点部: 0.9
Ct : 温度補正係数	0.015	0.015	関東: 15×10^{-3}

算出した設計期間を用いて、更新費を試算した。なお、試算条件は2.1(3)と同様とした。

図-8に示すとおり、50年における開発品Bの累積の更新費を試算すると、改質Ⅱ型の約14%の削減となる。年あたりの更新費は、改質Ⅱ型で139.1千円、開発品Bで122.4千円となる。

このように、ストアスや改質Ⅱ型の代わりに、開発品Bを同厚で表層に用いることで、工事回数を減らし、累積の更新費が削減される。また、維持管理費や道路利用者費用の抑制も期待できるため、LCCの削減に繋がると考えられる。

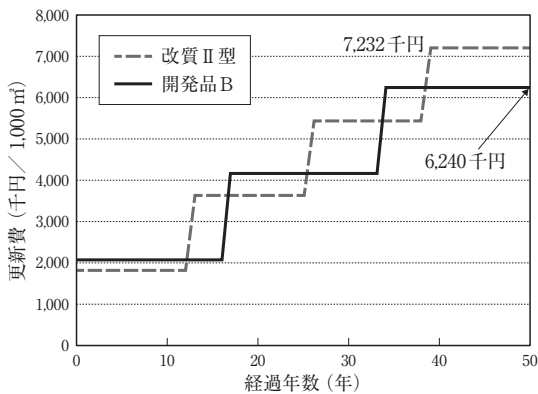


図-8 供用期間と累積の更新費の関係

3. 舗装の低炭素化

アスファルト舗装工事におけるCO₂の排出段階は、①アスファルト混合物の製造段階、②施工段階、③供用後の維持・修繕段階、④解体処分段階に分類できる⁸⁾。このうち、②～④の段階におけるCO₂排出量は、舗装の長寿命化(ライフサイクルの長期化)に伴う、工事回数の減少により削減できる。

また、①アスファルト混合物の製造段階におけるCO₂排出量は、合材プラントでアスファルトおよび骨材を加熱するための燃料(重油)消費が大半を占めて

おり、この削減には、重油消費量を抑制する必要がある。一般的に、その抑制手法としては、特殊添加剤の効果により、通常の加熱アスファルト混合物と比較して、製造温度および施工温度を30℃程度低減させる「中温化アスファルト混合物」の適用が挙げられる。

そこで、①アスファルト混合物の製造段階でのCO₂排出量の削減を目的に、ひび割れやわだち掘れ抵抗性に優れた開発品A、Bの製造温度を30～50℃低減できる改質アス(以下、開発品C、D)を開発した。

以下に、その性能とライフサイクルを考慮したトータルのCO₂排出量を表すライフサイクルカーボン(以下、LCCarbon)の試算結果について解説する。

3.1 開発品Cの性能

マーシャル供試体における突固め温度と締固め度の関係を図-9、曲げ疲労試験結果を図-10、WT試験結果を図-11に示す。なお、曲げ疲労試験とWT試験の試験条件は2.1(1)と同条件とし、開発品Cの締固め温度は120℃(開発品Aの50℃低減)とした。

開発品Cは、突固め温度120℃において、開発品Aと同程度の締固め度が得られる。また、疲労抵抗性および塑性変形抵抗性についても、開発品Aと同等の性能を示す。

以上のことから、開発品Cは、CO₂排出量を少なく抑え、開発品Aと同等の耐久性を確保できる。

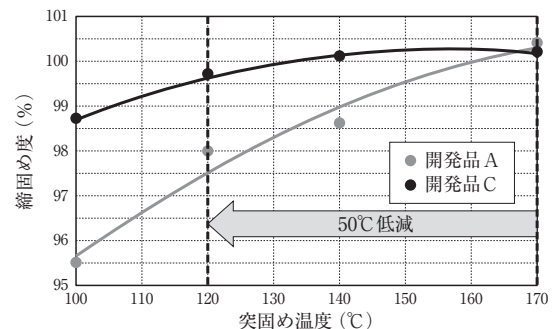
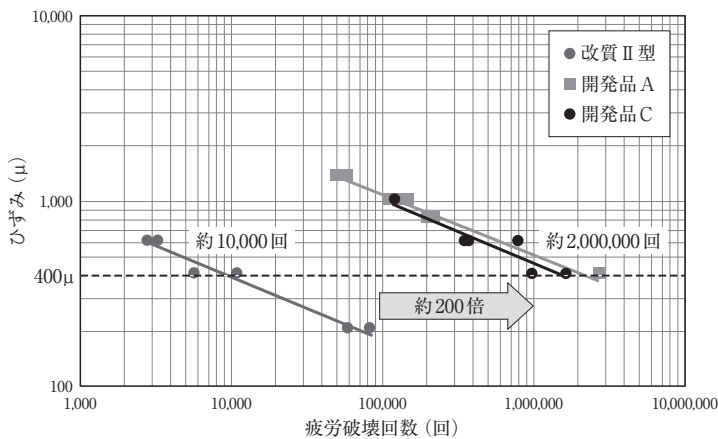
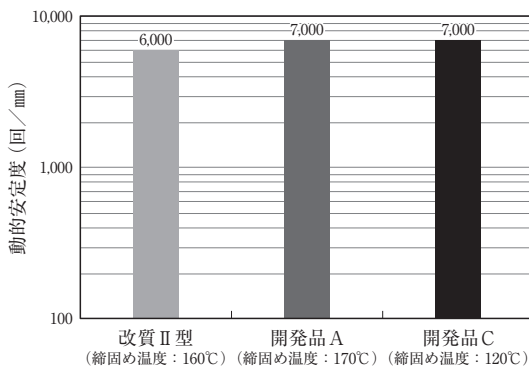


図-9 突固め温度と締固め度の関係



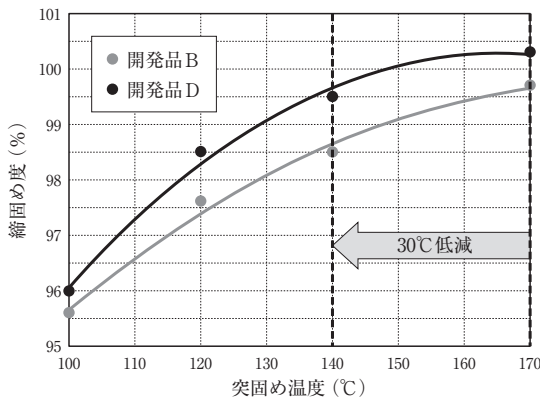
図－10 曲げ疲労試験結果



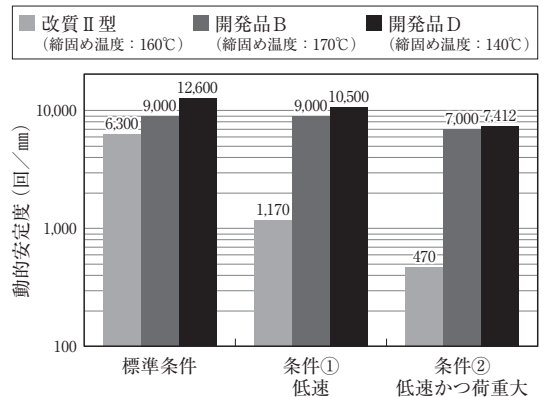
図－11 WT試験結果

3.2 開発品Dの性能

マーシャル供試体における突固め温度と締固め度の関係を図－12、WT試験結果を図－13に示す。なお、WT試験条件は表－5と同条件とし、開発品Dの締固め温度は140℃（開発品Bの30℃低減）とした。



図－12 突固め温度と締固め度の関係



図－13 WT試験結果

開発品Dは、突固め温度140℃においても、開発品Bと同程度の締固め度が得られる。また、塑性変形抵抗性は、いずれの試験条件においても開発品Bと同等以上となる。

以上のことから、開発品Dは、CO₂排出量を抑制し、開発品Bと同等の耐久性を発揮できる。

3.3 LCCarbon

「混合物の製造温度低減」により削減されるCO₂排出量から、混合物製造および工事にかかるLCCarbonを算出した。なお、補修断面は、2.1(3)および2.2(3)と同様に、表層50mmの切削OLを想定した。

(1) 製造時のCO₂排出量

アスファルト混合物の製造温度とCO₂削減量の関係⁹⁾は図－14に示すとおりであり、1トンあたりのCO₂排出量は、改質Ⅱ型で19.8kg-CO₂/t、開発品Cで16.3kg-CO₂/t、開発品Dで18.0kg-CO₂/tとなる。つまり、混合物の製造温度低減により、改質Ⅱ型と比較して、開発品Cでは約21%、開発品Dでは約9%のCO₂排出量の削減効果が見込める。

(2) LCCarbonの試算

2.1(3)および2.2(3)と同様に算出した設計期間は、開発品Cで21年、開発品Dで16年となる。なお、各混合物の使用目標年数（補修サイクル）は「設計期間＋5年」とし、1,000㎡・50年におけるCO₂総排出量を比較した。

開発品C、DのLCCarbon算出結果を図－15、16に示す。CO₂総排出量は、改質Ⅱ型と比較して、開発品C

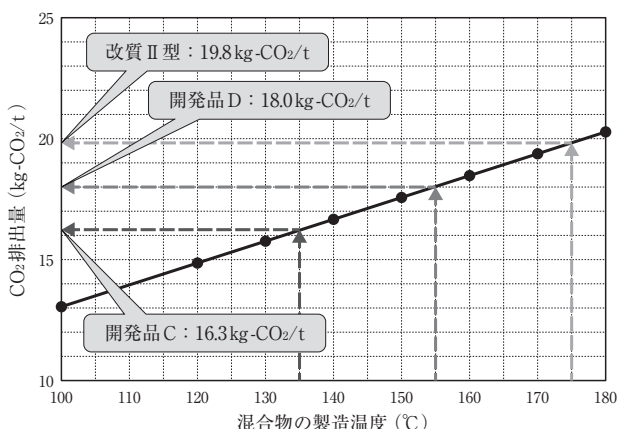


図-14 製造温度と二酸化炭素排出量の関係

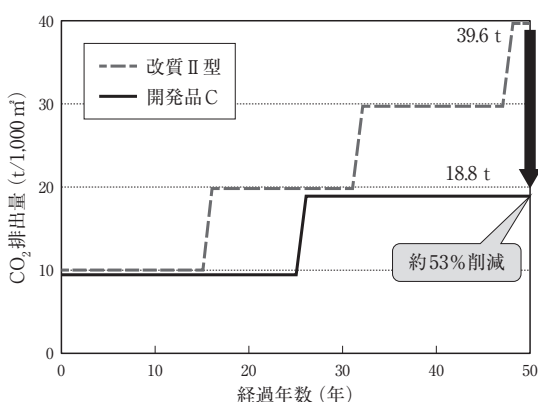


図-15 開発品CのLCCarbon

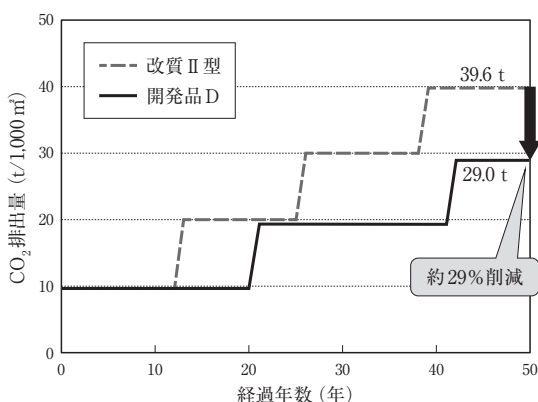


図-16 開発品DのLCCarbon

で約53%，開発品Dで約29%削減される。この削減率は、我が国の掲げる削減目標である「2030年度において46%削減（2013年度比）」にも貢献できる。

4. おわりに

本稿では、ひび割れやわだち掘れ抵抗性に優れた改質アスによる舗装の長寿命化および低炭素化への効果を紹介した。開発品Aは重交通路線、開発品Bは重荷重車両が頻繁に通行する路線に適しており、それらの長寿命化に寄与する。また、開発品C、Dは、舗装の長寿命化と低炭素化を同時に実現できる最新の材料であり、従来の改質アスとは一線を画している。これらは、社会的な課題であるメンテナンスサイクルの構築や脱炭素社会の実現にも貢献できる技術である。

今後は、カーボンニュートラルの実現のために、舗装業界も、より一層に環境へ配慮した技術が必要となる時代となる。道路事業者の方々には、インシヤルコストは割高となるが、LCCやLCCarbonを削減できる技術の採択を適材適所でご検討いただければ幸いである。

参考文献

- 1) 環境省：脱炭素ポータル，環境省HP，https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/road-to-carbon-neutral/
- 2) (公社)日本道路協会：舗装設計便覧，平成18年2月，p26
- 3) 池田拓哉：室内試験によるひび割れ防止材の評価方法 試験方法を定めるまでの過程，道路建設，vol.487，1998.8，p61
- 4) 齋藤夏実，後藤洋平，越智友紀：ひび割れ貫通試験によるアスファルト混合物の評価方法に関する一検討，土木学会全国大会第75回年次学術講演会，2020
- 5) (公社)日本道路協会：舗装設計便覧，平成18年2月，p76
- 6) 飯高裕之，上野貞治，後藤洋平：ポリマー改質アスファルトの等値換算係数に関する一考察，土木学会全国大会第75回年次学術講演会，2020
- 7) (公社)日本道路協会：舗装設計便覧，平成18年2月，p41
- 8) (公社)日本道路協会：環境に配慮した舗装技術に関するガイドブック，2009.6，p68
- 9) (公社)日本道路協会：環境に配慮した舗装技術に関するガイドブック，2009.6，p72

道路橋コンクリート床版防水における 高浸透型防水材料および改質グースの適用

(Application of high-penetration Waterproofing Materials and Modified Guss Asphalt Mixture for
Waterproofing of Concrete Bridge Decks)

菊 池 玲 児*・川 上 篤 史**

道路橋は道路交通網に必須の設備であり、一般道路に比べ長期供用性が必要である。近年、道路橋コンクリート床版に生じる損傷形態は多岐にわたっており、中でも舗装下における床版の「土砂化」が顕在化している。その要因は床版面への雨水や塩分の浸入であると考えられており、その浸入防止対策が必要と考える。また、コンクリート床版にグースアスファルト混合物を適用した場合、材料の熱によって発生するブリスタリングの課題が残っている。その課題解決のために実施している共同研究から、高浸透型防水材料と改質グースを適用した工法のブリスタリング抑制効果、防水性能および耐久性等の評価結果を報告する。

1. はじめに

道路橋は道路交通網に必須の設備であり代替路の確保が難いため、長期供用性が求められている。近年、道路橋コンクリート床版（以下、Co床版）に生じる損傷形態は「疲労」だけでなく多岐にわたっており、中でも舗装下の床版上面の「土砂化」が顕在化している。その要因は床版面への雨水や塩分の浸入であると考えられており、その浸入防止対策が重要である。また、Co床版に改質グースを適用する事例も増えてきているが、Co床版の状態によってブリスタリングが発生する可能性も懸念されている。

本課題の対策としては「防水」を確実に実施するとともに、床版を補強することが有効であると考えられる。NIPPOと土木研究所は、「防水性を高めたCo床版用橋面舗装の実用化に関する研究」を行っており、水密性・耐久性の高い舗装と高浸透型防水材料（以下、浸透防水材料）を適用することで、防水性に優れた橋面舗装技術を開発している。本報では、改質グースと浸透防水材料の性状およびそれらを適用した舗装構造（以下、開発工法）のブリスタリング抑制効果、防水性能および耐久性等の検討結果を報告する。

2. Co床版におけるブリスタリング

ブリスタリングとは、主に舗装や防水層によって閉じこめられた水分が舗装時の熱や日射熱によって気化し、その蒸気が貫通孔や貫通ひび割れを発生させたり、上層のアスファルト混合物を押し上げたりする現象である。Co床版上に設置した床版防水層やグースアスファルト混合物（以下、グース混合物）や碎石マスチックアスファルト混合物の場合に多くの事例が見られる。

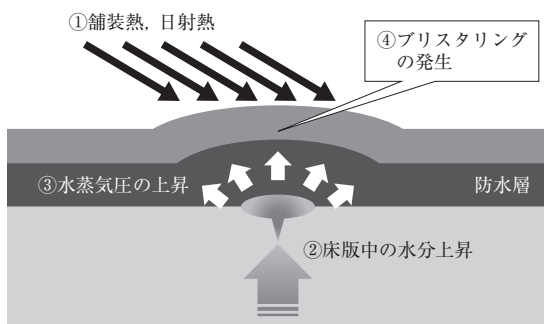
下地のコンクリートは表面が乾燥していても、版内部は水分を保有している場合がある。その水分が日射熱により気化して膨張し、水蒸気圧がCo床版と防水層との接着力を上回ることによって発生すると考えられる。また、グース混合物や碎石マスチックアスファルト混合物は、本来アスファルトとフィラーが多くほとんど空隙がないため、下地面に水分があると高温の舗設作業中にもブリスタリングが発生する（図-1）。

3. 開発コンセプト

課題解決に向けた舗装面からの対策として防水を確実に行うこととし、浸透防水材料によるCo床版上面の補強や水密性・耐久性の高い舗装材料を併用することが良いのではないかと考え、共同研究を行っている。

*きくち れいじ 株式会社NIPPO 総合技術部 研究第二グループ 主任研究員

**かわかみ あつし 国立研究開発法人土木研究所 道路技術研究グループ 舗装チーム 主任研究員



図－１ プリスタリング発生概略図

開発工法のコンセプトは、防水性能の確保をはじめ長寿命化に資することを念頭に以下のとおり設定している。

①耐久性向上

- ：レベリング層に求められる耐久性確保（動的安定度1,000回/mm以上）
- ：プリスタリングの発生抑制
- ：床版補強または劣化抑制機能の追加

②作業環境改善，省エネルギー

- ：臭気の低減
- ：混合物温度の低減

③防水性向上

- ：施工継目，舗装端部の止水性向上

④施工性維持

- ：汎用機械による施工
- ：従来どおりの施工性の確保

4. 浸透防水材によるプリスタリング抑制効果の検証

4.1 浸透防水材の概要

浸透防水材は複合防水工法に用いられている一次防水層であり，高い防水効果に加えて剛性の回復やひび割れの抑制といった補修効果を有し，Co床版の延命に大きな効果が期待できる材料である¹⁾。写真－1に示す主剤と硬化剤からなる2液性の材料で，硬化剤の混合割合によって硬化時間を調整することが可能である。浸透防水材の性状を表－1に示す。特徴のひとつとして低温下（5℃）においても低い粘性を保持できる材料である。速硬化性に優れ，20～30分程度の短時間で次工程に移ることが可能である。

4.2 プリスタリング抑制の概要

現場における防水層引張接着試験は，「点」での評価となるため，Co床版全面に対する空隙等の存在を見つけることは困難である。そのようなことから，空隙や

ひび割れ等の無い下地を整えて防水を施工することが重要であると考える。

浸透防水材はCo床版の上面から塗布することで，版上面の細孔および微細なひび割れ，更には内部のひび割れにまで浸透・接着し，Co床版上面の強度を高めることが可能である。この特徴を利用して水分蒸発の抑制や層間接着力を高め，プリスタリングの抑制を試みた。

なお，浸透防水材の適正塗布量は材料が床版下面から漏出せず，かつ高い浸透深さが得られる量となる0.35 kg/m²とされていること²⁾から本検討においてもこの塗布量を採用した。

4.3 プリスタリング抑制効果の検証

現道レベルのようなプリスタリングの再現は難しいため，室内製造規模の供試体を用いて評価を行った。防水層として，一般的な床版防水に広く適用されている塗膜系防水材とシート系防水材を用いた。さらに，その結果を受けてグース混合物への適用も試みた。



写真－1 浸透型防水材（左：主剤，右：硬化剤）

表－1 浸透防水材の代表性状

項 目	試験方法	試験条件	単 位	試験値
粘 度	JIS K 6833	20℃	MPa・s	23
		5℃	MPa・s	39
可使時間	温度上昇法	20℃	分	11
硬化時間	ドライイングレコーダ法	20℃	時間	0.3
圧縮強さ	JIS K 7208	20℃ 7日	N/mm ²	48.4
圧縮弾性率	JIS K 7208	20℃ 7日	N/mm ²	1,365
曲げ強さ	JIS K 7203	20℃ 7日	N/mm ²	39.3
引張強さ	JIS K 7113	20℃ 7日	N/mm ²	21.8
引張せん断接着強さ	JIS K 6850	20℃ 7日	N/mm ²	17.4

4. 3. 1 一般的な床版防水材

(1) 評価方法

Co床版の温度は昼間に上昇し、夜間に冷却する繰り返りであるため、NEXCO 試験法「膨れ抵抗性試験」を参考に、60℃（4時間）と23℃（2時間以上）の温冷繰り返し負荷を6サイクル実施した。温冷繰り返し負荷後、目視によりプリスタリング発生の有無を確認するとともに、サーモカメラにより供試体表面を撮影することで評価した。供試体の作製方法および温冷繰り返し試験条件を図-2に示す。

(2) 評価結果

膨れが発生している箇所は周囲よりも温度が低い箇所として写し出されるため、その箇所をプリスタリング発生箇所（点線囲い）と判定した。評価結果を表-2に示す。シート系においては「発生多数」から「2箇所」に、塗膜系においては「発生8箇所」から「発生無し」となり、浸透防水材を塗布することでプリスタリングの発生を抑制できることを確認した。

4. 3. 2 グース混合物

近年、グース混合物の高い防水性と転圧不要という施工性から、Co床版に改質グースの適用が検討されている。そこで、前述の浸透防水材のプリスタリング抑制効果を利用することで、グース施工中に発生するプリスタリングを抑制できると考え、その適用性を検討した。

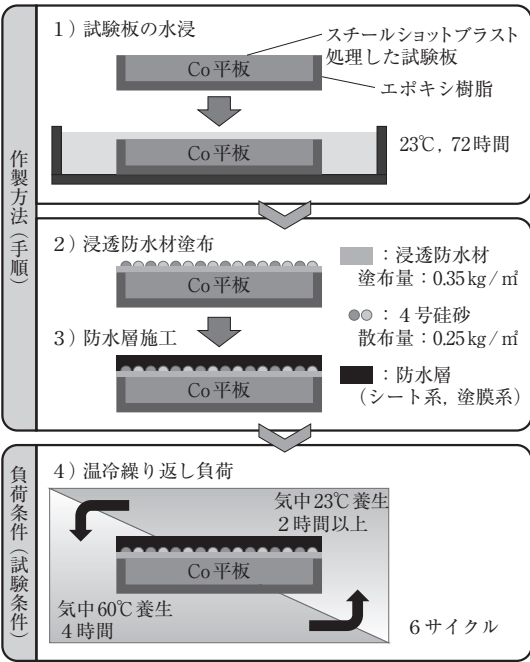


図-2 供試体作製方法および試験条件

(1) 評価方法

Co平板をスチールショットブラスト工法にて研掃処理を実施後、防水層施工面以外をエポキシ樹脂で封かんし、恒温水（23℃）に72時間全水浸させた。次に、表面を乾燥後、塗布量を変化させて浸透

表-2 温（60℃）冷（23℃）繰り返し試験熱画像と6サイクル実施後の画像

	サーモカメラの画像		可視画像	
	浸透防水材：有	浸透防水材：無	浸透防水材：有	浸透防水材：無
シート系				
塗膜系				

防水材を塗布した。硬化後、各Co平板を型枠に設置し、厚さ4cmにて、流動性が等しくなるように調整した温度240℃、220℃、200℃のグース混合物を流し込み、プリスタリング発生の有無を観察した。

(2) 評価結果

その結果を表-3、写真-2に示す。

○塗布量が多くなるにつれ、発生個数および発生速度は減少する。

○混合物温度が200℃の場合、発生は確認できない。

○同一塗布量の場合、2度塗りすることで、発生は更に抑制できる。

○珪砂を散布しないことで、発生は更に抑制できる。

以上のことから、Co床版上面に浸透防水材を塗布することでグース施工中に発生するプリスタリングを抑制することが可能であり、Co床版におけるグース適用の可能性を検証することができた。

表-3 プリスタリング発生個数

グースの温度	珪砂散布	浸透防水材 塗布量 (kg/m ²)				Co床版用 接着剤 0.2 ℓ / m ²
		0.35 (1度塗り)	0.50 (1度塗り)	0.70 (1度塗り)	0.25 (2度塗り) = 0.50	
240℃	有り 0.25 kg/m ²	直ちに 7	約2分後 6	約5分後 3	約5分後 4	直ちに 10以上
	無し	約3～ 5分後 3	約8～ 10分後 2	0	0	
220℃	有り 0.25 kg/m ²	直ちに 2	約5分後 1	0	0	直ちに 7
	無し	0	0	0	0	
200℃	有り 0.25 kg/m ²	0	0	0	0	直ちに 4
	無し	0	0	0	0	

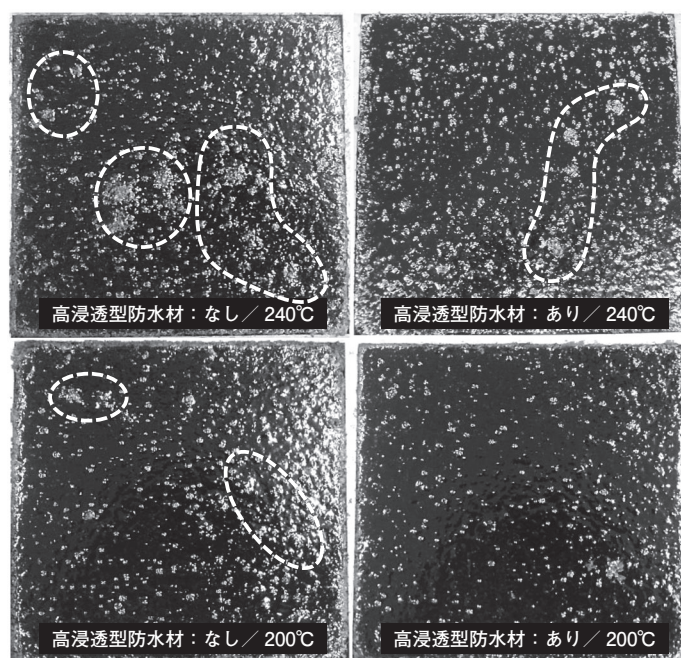


写真-2 プリスタリング発生状況

表-4 バインダの代表性状

項 目		試験値	目標性状
針入度 (25℃)	1/10mm	30	20～40
針入度 (60℃)	1/10mm	147	80～180
軟化点 (R&B)	℃	106.0	80.0以上
引火点 (COC)	℃	330	260以上
薄膜加熱質量変化率	%	-0.03	0.6以下
薄膜加熱後の針入度残留率	%	86.7	65.0以上
曲げ仕事量 (-10℃)	× 10 ⁻³ MPa	1.320	750以上
曲げスティフネス (-10℃)	MPa	41	80以下
G*/sin δ	kPa	25	15以上
密 度 (15℃)	g/cm ³	1.021	報告

5. 改質グースアスファルト混合物

改質グースは、従来使用していたトリニダッドレイク・アスファルト（以下、TLA）に替わりポリマー改質材を用いた混合物である。わだち掘れ抵抗性（耐流動性）とひび割れ抵抗性（疲労耐久性）を向上させ、製造・舗設時の臭気を大幅に低減させた舗装材である。さらに、混合物温度は190℃程度であり、従来のTLAを用いたグースアスファルト混合物（以下、TLAグース）より約50℃低くすることが可能である。製造・施工はTLAグースと同等であり、材料をアスファルトプラントで混合後、アスファルトクッカ車に積込む。高温で混練しマッシュ状とした混合物を高温時の流動性を利用して流し込み、グースフィニッシャやコテ等で仕上げる。ほかに特殊な機械を必要としない。

5.1 バインダの性状

バインダ性状を表-4に示す。本バインダはわだち掘れ抵抗性および疲労ひび割れ抵抗性の向上を目的として開発した専用品バインダである。

5.2 混合物の性状

改質グースの混合物温度は $190 \pm 10^{\circ}\text{C}$ を標準としている。TLAグースと改質グースとの混合物性状比較結果を表-5に示す。動的安定度は1,969回/mmであり、目標とした1,000回/mm以上を確保している。特に疲労ひび割れ抵抗性の一指標である曲げ疲労破壊回数(0℃, 500μ, 5 Hz)は480,000回と大きく改善している。その他の項目はTLAグースと同等である。

表-5 混合物性状比較

項目		目標値	改質グース	TLAグース
混合物温度	℃	190 ± 10	190	240
リュエル流動性	秒	3~20	12.5	15
動的安定度	回/mm	$\geq 1,000$	1,969	330
貫入量	mm	1~6	1.6	2.2
曲げ破断ひずみ	$\times 10^{-3}$	≥ 8.0	8.6	8.2
曲げ疲労破壊回数 (0℃, 500μ, 5Hz)	回	-	480,000	8,000

5.3 臭気

5.3.1 評価方法

臭気評価方法は、環境省告示79号「臭気指数及び臭気排出強度の算定の方法(平成28年8月19日)」の中の「三点比較式臭袋法(排出口試料の判定試験)」に準拠した。表-6および図-3に示す採取装置および測定方法により臭気採取口から発生した臭気をサンプリングバッグに採取し、臭気判定士のもとで臭気濃度、臭気指数を測定した。また同時にニオイセンサにて臭気レベルを測定した。

5.3.2 評価結果

評価結果を表-7に示す。改質グースはTLAグースと比較して、測定した項目すべてにおいて大きく低減していることを確認した。特に、濃度は大幅に薄く、臭気レベルは約半減している。

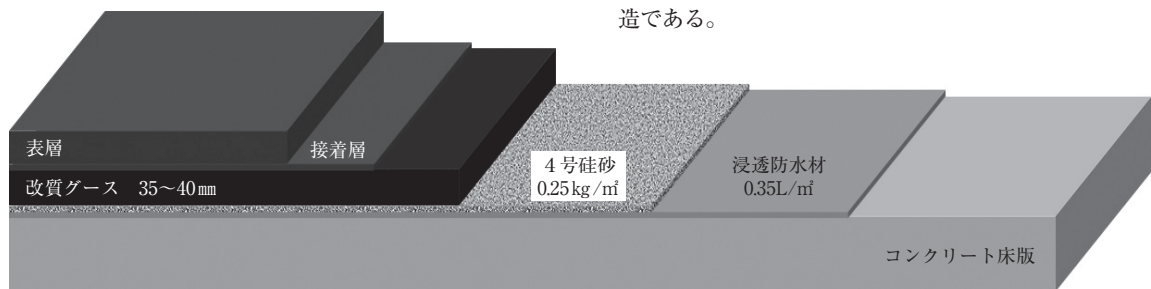


図-4 開発工法の構成図

表-6 臭気採取装置の仕様

項目	仕様
サイズ	内寸:幅23×奥行23×高さ34cm
空気取入口中央の高さ	高さ:8cm 直径:7cm
臭気採取口中央の高さ	高さ:34cm 直径:1.4cm
ニオイセンサの高さ	高さ:29cm 直径:1.4cm

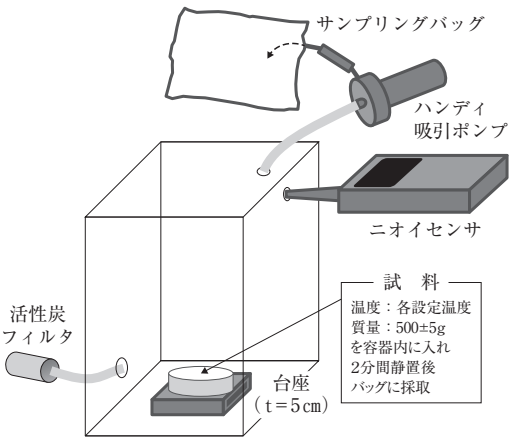


図-3 臭気採取装置および測定方法

表-7 臭気の評価結果

項目	改質グース	TLAグース
臭気濃度※1	730	13,030
臭気指数※2	29	41
臭気レベル(ピーク値)※3	546	1,320

※1: 臭いを人間の嗅覚で感じられなくなるまで無臭空気で薄めたときの希釈倍数
※2: 臭気指数 = $10 \times \log(\text{臭気濃度})$
※3: 無単位で臭いの強弱を表す

6. 開発工法(浸透防水材+改質グース)の防水性能および耐久性

6.1 開発工法の概要

開発工法は、図-4に示すようにCo床版面に浸透防水材0.35kg/m²を塗布し、硬化前に4号珪砂0.25kg/m²を散布する。硬化固着後、改質グースを直接舗設する構造である。

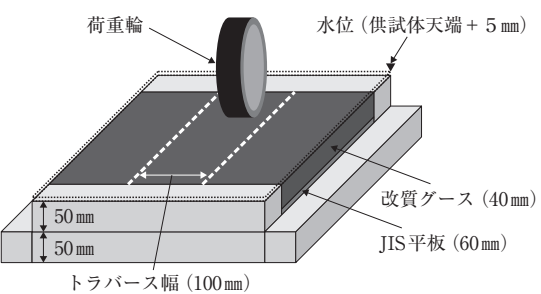
6.2 防水性能

工法の防水基本性能を表－8に示す。開発工法はCo床版防水に求められる規格値³⁾を全項目で満足している。

表－8 防水基本性能

項 目		試験温度	単位	試験値	規格値
防水性試験Ⅱ		23℃	—	漏水なし	漏水なし
引張接着試験		23℃	N/mm ²	1.39	0.6以上
		－10℃	N/mm ²	2.51	1.2以上
水浸引張接着試験		23℃	%	89	50%以上
せん断試験	強度	23℃	N/mm ²	0.54	0.15以上
		－10℃	N/mm ²	3.41	0.8以上
	変位量	23℃	mm	1.6	1.0以上
		－10℃	mm	1.3	0.5以上
耐薬品性試験		23℃	—	異常なし	異常なし

0mmであった。また、荷重輪の走行・非走行位置からそれぞれ採取した70mm角の供試体を用いて実施した23℃における引張接着強度は、試験輪の走行・非走行箇所とともに基準値³⁾を満足しており、本試験条件においては付着疲労耐久性を有することを確認した。



図－5 付着疲労試験概略

6.3 耐久性

床版と防水層（浸透防水材、改質グース）との付着性能は舗装全体の耐久性に影響があると考えられるため、供用後の床版上改質グースの付着疲労耐久性を検討した。

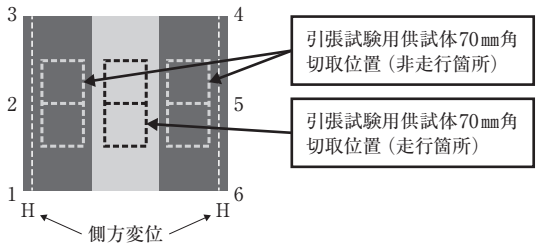
6.3.1 評価方法

評価方法は、水浸ホイールトラッキング試験機を用いた既往の検討事例⁴⁾を参考に、表－9に示す試験条件および図－5に示す試験方法にて試験を実施した。試験後、型枠にて拘束していない方向への側方変位量と荷重輪の走行箇所と非走行箇所の引張接着強度を測定した。変位量の測定位置と引張接着試験体採取位置を図－6に示す。

比較対象としてCo床版防水層の接着層に用いられているアスファルト系プライマを評価した。

6.3.2 評価結果

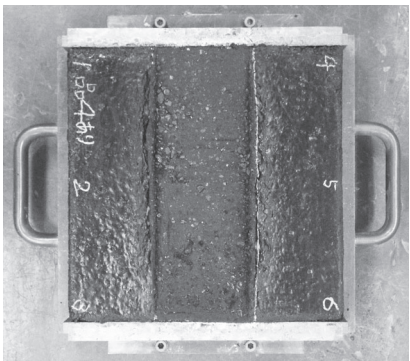
評価結果を表－10、写真－3に示す。側方変位量はアスファルト系プライマが6mmに対し、浸透防水材は



図－6 評価試験位置および試験体採取位置

表－10 付着疲労試験結果

項 目	浸透防水材		As系プライマ
	負荷後	負荷前	負荷後
側方変位量 (6点平均値) mm	0	—	6
引張接着強度 (走行箇所) N/㎡	1.5	1.4 φ 100mm 供試体	1.5
引張接着強度 (非走行箇所) N/㎡	1.2		0.8



写真－3 試験後供試体

表－9 付着疲労試験条件

項 目	負荷条件
養生方法	60℃、気中、12時間 60℃、水中、1時間
走行速度	42回±1回/分
走行距離	230±10mm
トラバース速度	100mm/分
トラバース幅	100mm
走行時間	6時間
水 位	供試体天端+5mm

7. 実大規模によるブリスタリング抑制効果の検証

前章までにCo床版における改質グースの施工を模した室内検討を実施し、浸透防水材のブリスタリング抑制効果と改質グースの耐久性および開発工法の防水性能を確認した。本章では、実大規模によるブリスタリング抑制効果について検証した。

7.1 検証方法

検証方法は、実際のCo床版を模した模擬Co床版を構築し、その面に浸透防水材の塗布、改質グースの舗設を行ない、改質グース施工中に発生するブリスタリングの発生状況を確認することとした。その際、Co床版面に切削機による床版損傷の有無を再現している。

7.2 ブリスタリング抑制効果

検証結果を図-7、写真-4に示す。アスファルト系プライマに比べ、浸透防水材を塗布した面はブリスタリングの発生数が少なくなることを確認した。

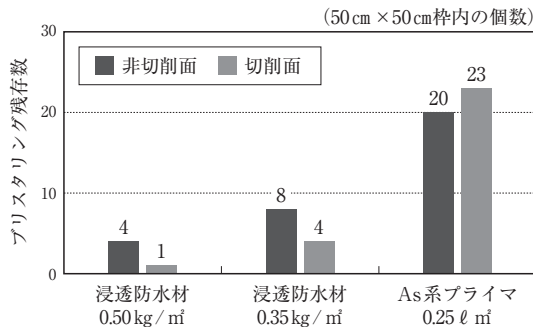


図-7 ブリスタリング残存数

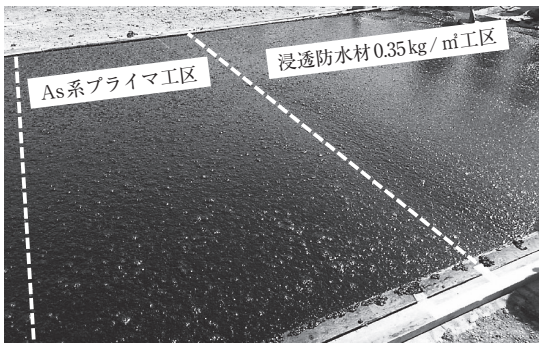


写真-4 改質グース施工面

8. 試験施工による評価

これまでの検討により、開発工法は高耐久な橋梁レベリング層用混合物としての性能やCo床版に必要な防水性能を有することを確認した。本研究ではコンクリート床版橋面舗装への開発工法の適用に着目し、土木研

究所舗装走行実験場において試験施工を実施し、その効果と施工性および長期耐久性の評価を行っている。

舗装構成は、下から浸透防水材 (0.35L/m²)、4号硅砂 (0.25 kg/m²)、改質グース (厚さ40mm) および改質密粒度アスファルト混合物 (13) (厚さ60mm) とした。

8.1 施工状況

施工状況を写真-5～写真-7に示す。



写真-7 改質グース施工状況



写真-5 切削・表面処理完了



写真-6 浸透防水材塗布完了

施工状況としては、混合物190℃付近の流動性は良好であり、敷きならしやすさなど作業性に問題はなかった。また、現場の横断勾配が6％であるが勾配下方へのダレも少ないことから、順調に進めることが可能であった。

8.2 荷重車による促進載荷試験

無人走行荷重車を4台同時に走行させることで実証実験を実施している。実証実験における追跡調査項目は、MRP測定装置による「わだち掘れ量」,「平坦性」および目視観察による「ひび割れ率」とした。荷重車の条件を表－11に示す。累積49kN換算輪数は2022年8月末で約45万輪である。夏季の舗装体温度が高くなる時期での走行であったが、舗装面に大きな変状は見受けられず健全な状態を保っている。

表－11 荷重車の条件

車両総重量	33 t (323.4kN)
前軸荷重	7 t (68.6kN)
後軸荷重	13 t (127.4kN) × 2 軸
車両台数	4 台
49kN換算輪数	年間 40 万輪 (10 万輪／季節)

9. まとめ

道路橋コンクリート床版の耐久性確保のためには床版防水の重要性が認識されている。NIPPOと土木研究所では共同研究「防水性を高めたCo床版用橋面舗装の実用化に関する研究」を行っており、本報では改質グースと浸透防水材を適用した舗装構造のプリスタリング抑制効果、防水性能および耐久性等の検討結果の一部を紹介した。

防水性・耐久性に優れた橋面舗装技術に関する検討結果をまとめると次のとおりである。

○Co床版上面に浸透防水材を塗布することで、改

質グース施工中に舗装熱に起因するプリスタリング抑制効果が期待できる。

- 浸透防水材と改質グースを適用したCo床版防水工法は橋梁レベリング層用混合物としての性能やCo床版に必要な防水性能を有していることを確認した。
- 温度や臭気の低減など作業環境改善を図ることとこれまでどおりの施工性を維持することが可能である。

10. おわりに

現在、土木研究所舗装走行実験場において実施した試験施工路面の長期耐久性を評価しているところである。併せて舗装端部や施工打継目に適した水密性・耐久性の高い目地構造の検討とその評価手法の検討も行っており、水密性・耐久性の高い混合物、浸透防水材および目地構造の3点に着目したCo床版防水技術の確立を行い、コンクリート橋面舗装への適用を検討していく所存である。

参考文献

- 1) 前島ほか、高浸透型防水材によるRC床版の耐疲労抵抗性向上効果、第14回北陸道路舗装会議、2018
- 2) 蒲和也ほか、コンクリート床版の高浸透型防水材料の開発、第31回日本道路会議、2015
- 3) 社団法人 日本道路協会 道路橋床版防水便覧（平成19年3月版）p35、表-4.2.2 基本照査試験の目的および合否判定の目安
- 4) 竹林ほか、床版とアスファルト舗装の付着疲労抵抗性に関する室内試験方法の検討、第33回日本道路会議、2019

表基層エポキシ混合物による橋面舗装の補修工事

(A Rehabilitation Work at a Steel-Deck Bridge Using Epoxy Asphalt Mixture)

児 玉 健*

道路橋は、一般道路に比べ代替ルートが少ないため交通が集中しやすく、通行止め等の規制を伴う大規模な床版補修工事や更新を行うことは難しい。したがって舗装の高耐久化は、橋梁の構造を含むメンテナンスサイクルの長期化に有効となる。橋梁の部分補修に伴う舗装工事は小規模となることが多く、従来から使用されているグースアスファルト混合物を防水層として使用する場合、混合物製造上の制約(特殊材料)と施工要件(特殊機械)より不経済となる場合がある。今回使用したエポキシ樹脂とアスファルトの混合バインダを使用した加熱アスファルト混合物(以下、エポキシ混合物)は、高い耐流動性を有しており、たわみ追従性・疲労抵抗性にも優れている。また、アスファルトプラントにおける混合物の製造は一般混合物と同様な手法で行うことができ、一般編成での施工も可能である。本文は、実橋において表基層にエポキシ混合物を用いた補修事例を紹介するものである。

1. はじめに

高度成長期以降に大量に整備された社会資本の老朽化が進み、維持管理・更新の「山」が到来する時期を迎えている。そのなかで、道路橋は約73万橋存在し、建設後50年以上経過する橋は、2033年(令和15年)時点では約63%¹⁾と予想され、効率的な維持管理と更新が喫緊の課題となっている。道路橋は、一般道路に比べ代替ルートが少ないため交通が集中しやすく、通行止め等の規制を伴う大規模な床版補修工事や更新を行うことは難しい。したがって舗装の高耐久化は橋梁の構造を含むメンテナンスサイクルの長期化に有効となる。

道路橋を通行する車両の荷重や橋のたわみ等の作用により舗装は損傷し雨水、融雪剤等が侵入することで、床版部材の劣化が進行して重大な損傷に繋がる恐れがある。この対策として、舗装(特に床版に面する層)に高い水密性、耐水性とたわみ追従性を付与することが重要と考える。鋼橋は、床版構造そのものがすべて鋼材で構成されているため、舗装から鋼床版面に水分や塩化物イオンが到達すると床版そのものが腐食し大きな損傷に発展することが懸念される。したがって、鋼床版舗装の基層には防水効果の高いグースアスファルト混合物(以下、グース混合物)が用いられる。鋼床版

舗装の補修を行う場合にグース舗装を適用する場合、以下の課題がある。

- ・低針入度・改質アスファルトやTLAが必要となる。
- ・特殊な運搬車(グースクッカ)と敷均し機械(グースフィニッシャ)が必要となる。
- ・部分補修などの小規模な施工においては材料ロスなどにより不経済となる。

このような課題に対応するため、一般的な製造設備、施工機械で施工できる、エポキシ混合物が有用となる。

本文は、エポキシ混合物の概要および若戸大橋の表層および基層に用いた事例と供用5年までの状況を報告するものである。

2. エポキシ混合物の概要

2.1 エポキシ混合物とは

エポキシ混合物とは、バインダに石油アスファルトとエポキシ樹脂を複合して使用したものである。混合物の製造はアスファルトプラントで行い、ダンプトラックで運搬したのち、一般的な機械編成で施工が可能である。エポキシ樹脂は写真-1に示すような固化した主剤と硬化剤からなる。

*こだま けん 日本道路株式会社 九州支店 九州技術センター 所長



写真-1 固形エポキシ樹脂 左：主材 右：硬化剤

混合物の製造は袋詰めされた材料をプラントミックスで投入する。熱硬化性であるため、混合物の性能の諸性能を発揮するためには可使時間に留意する必要がある。過去の研究成果²⁾より、プラント練落しから初期転圧開始までの可使時間を3時間としている。

2.2 エポキシ混合物の性能

エポキシ混合物の性能を以下にまとめる。本文では、基層用混合物をエボグース、表層用混合物をエポアスコンと称する。

2.2.1 耐流動性

一般的なグース混合物ならびにポリマー改質アスファルトⅡ型を使用した密粒度アスファルト混合物（以下、密粒改質Ⅱ型）とエポキシ混合物のホイールトラッキング試験で得られた動的安定度（DS）を表-1に示す。エボグース、エポアスコンともに比較対象混合物よりも優れた耐流動性を示す。

表-1 舗装種別の動的安定度³⁾

分類	基層		表層	
混合物	エボグース	グース混合物	エポアスコン	密粒改質Ⅱ型
DS回/mm	10,000～15,000程度	300～400程度	15,000以上	5,000～8,000程度

2.2.2 たわみ追従性

鋼床版上の舗装では、床版自体のたわみが大きいことに加えて局所的な変形が生じやすいため、高いたわみ追従性が要求される。図-1は、曲げ試験⁴⁾で得られた表層および基層混合物の曲げ破断ひずみを比較したものである。エボグースおよびエポアスコンは、グース混合物には及ばないものの、たわみ追従性が高い混合物であることがわかる。

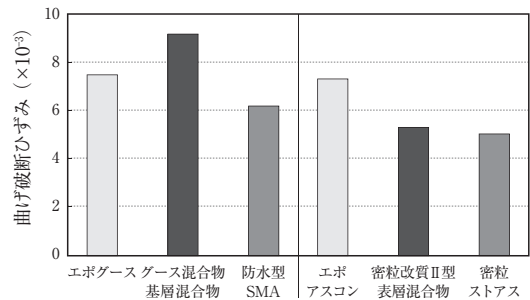


図-1 各混合物の曲げ破断ひずみ

2.2.3 水密性

鋼床版上の基層の性能で最も重要視される性能のひとつが水密性である。エボグースは表-9に示すように緻密な粒度構成とバインダリッチの混合物であるため、高い防水性能を示す。ただし、表-2に示すように加圧条件下（150kPa・24h）において完全に不透水ではないため、塗膜防水などの防水層を併用するのが望ましいと考えられる。

表-2 各混合物の透水係数⁵⁾

混合物	エボグース	グース混合物
透水係数cm/sec	4.56×10^{-8}	0（透水なし）

2.2.4 施工時の充填性

鋼床版の施工基盤は高力ボルトなどの突出があることから、これまで、流し込みタイプのグース混合物が多く用いられてきた。エボグースは転圧系の混合物であるものの、写真-2のとおりボルト周りにしっかりと混合物を充填することができる。

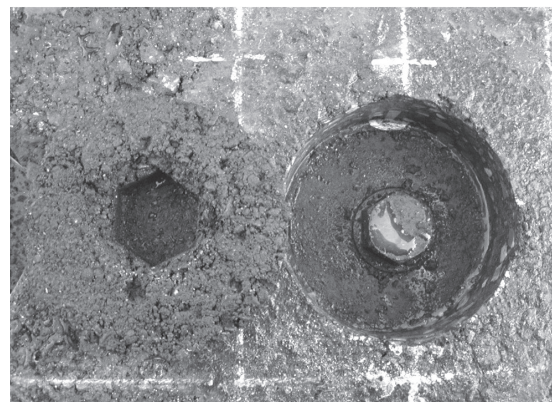


写真-2 ボルト周りの充填

2.2.5 施工基盤との接着性

床版および舗装の供用性を長期的に維持するためには、床版面と基層の接着性を確保することが重要である。コンクリート床版防水層と舗装間の引張り接着試験⁶⁾による接着強度は図-2に示すとおり、エポグースはグース混合物と同程度の接着力を持つ。

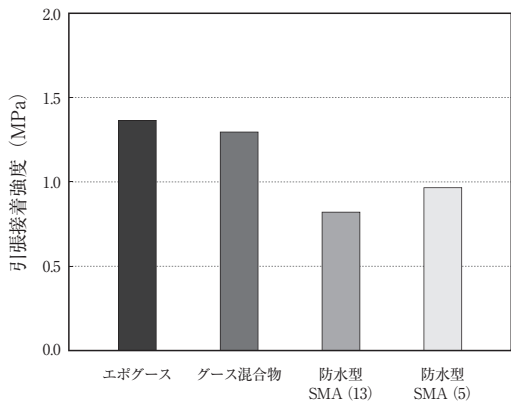


図-2 各混合物の鋼床版との接着力

2.2.6 その他の耐久性

表層混合物として適用する場合、すえ切り抵抗性⁷⁾、耐油性⁸⁾についても長期供用性を維持するために要求される性能である。エポアスコンは一般的な表層混合物と比較して良好な耐久性を備えている。

表-3 各混合物のすえ切り抵抗性と耐油性

混合物	密粒度アスコン (13)			半たわみ性混合物
	エポアスコン	改質Ⅱ型使用	改質Ⅲ型使用	
すえ切損失量 %	0.30	0.76	0.55	0.30
油浸残留率 %	95.7	28.5	—	—

3. エポキシ混合物の鋼床版舗装への適用性

3.1 鋼床版舗装補修の課題

防水層あるいは舗装体の寿命に伴う舗装補修は、比較的、大規模となることが多く、部分的な破損や橋梁部材の交換などに付随する場合、小規模な補修になるケースが多い。鋼床版舗装の基層に用いられているグース混合物は、特殊な材料(低針入度・改質アスファルトやTLA)と機械編成(グースクッカ・グースフィニッシャ)が必要である。また、混合物の製造には制約があり(表-4参照)、施工規模の違いによっては諸々のロスに繋がりがやすい。グースクッカの攪拌能力は最低3t~4t程度必要となり、施工面積40㎡相当となる。また、アスファルトローリによるアスファルトの最低供給量は混合物換算で50t~55tにあたり、施工面積600㎡相当となる。したがって、小規模補修においては材料のロスが生じやすく、不経済になるばかりでなく、環境負荷の要因ともなるため、混合物製造量と施工面積について十分留意する必要がある。

表-4 混合物の製造に依存する施工規模の目安

混合物製造条件	混合物製造量 t	施工厚 mm	施工面積 ㎡
グースクッカの攪拌能力	3~4	35	35~45
アスファルト(ローリ)の最低供給量	50~55	35	600~650

3.2 鋼床版基層への適用

鋼床版補修の基層に適用する場合、耐流動性、たわみ追従性、防水性、接着性などの性能が要求される。表-5は鋼床版用基層混合物の要求性能と一般値を示したものである。エポグースは熱硬化性の樹脂をバインダに混入しているため、耐流動性を示す動的安定

表-5 鋼床版用基層混合物の要求性能と一般値

項目		グースアスファルト混合物	硬化性アスファルト混合物	鋼床版用アスファルト混合物の要求性能
混合物性能	耐流動性(動的安定度)	300~500回/mm程度載荷速度が遅い場合には流動変形が大きい	10,000回/mm程度	グース: 300回/mm以上 ⁹⁾ 硬化性: 5,000回/mm以上 ⁹⁾
	たわみ追従性(曲げ破断ひずみ)	優れている	グースアスファルト混合物とほぼ同等	グース: 8×10^{-3} 以上 ⁹⁾ 硬化性: 5×10^{-3} 以上 ⁹⁾
	防水性(透水係数)	非常に優れている(不透水)	1×10^{-7} 以下で不透水に近い	1×10^{-6} cm/s以下 ¹⁰⁾
	接着性(接着強度)	優れている	グースアスファルト混合物と同等以上	0.6MPa以上(23℃) ¹¹⁾ 1.2MPa以上(-10℃) ¹¹⁾
施工性	施工機械	特殊な施工機械を要する	一般的な機械で施工可能	—
	施工量	640㎡/日	1,000㎡/日	—
	その他	小規模補修に向向き	小規模補修可能	—

度がグース混合物よりも大きくなる。そのほか、たわみ追従性、防水性、接着性もグース混合物と同程度の性能を持っている。施工に関しては、一般的な製造が可能であり、材料ロスも極力減らせる。よって、小規模での鋼床版用基層混合物にも適している。

3.3 鋼床版表層への適用

表層混合物については、耐流動性、たわみ追従性が要求される。表-6に示すとおり、エポアスコンは、密粒改質Ⅱ型と同等以上の性能を保有しているため、舗装の長寿命化が期待できる。

表-6 表層混合物の要求性能と一般値

項 目		表層混合物		鋼床版用アスファルト混合物の要求性能
		密粒改質Ⅱ型	エポアスコン	
混合物性能	耐流動性 (動的安定度)	5,000～8,000回／mm程度	15,000回／mm以上	改質：850回／mm以上 ³⁾ 硬化性：5,000回／mm以上 ³⁾
	たわみ追従性 (曲げ破断ひずみ)	6～7×10 ⁻³ 程度	7～8×10 ⁻³ 程度	改質：6×10 ⁻³ 以上 ³⁾ 硬化性：5×10 ⁻³ 以上 ³⁾

4. 施工事例

4.1 工事概要

工事の対象となった若戸大橋は、北九州市を横断する国道199号（門司区～八幡西区）のうち、洞海湾に架設された我が国最初の長大吊橋（全長627m、最大支間長367mの鋼橋）である。1962年に供用開始され、1990年の4車線化拡幅を経て現在に至る。



写真-3 若戸大橋

本工事は、橋梁径間部の固定支点アンカーボルトの取替えと単純トラス部の伸縮装置補修に伴う舗装の部分打換えならびに、老朽化した舗装の打換えを対象としたものである。工事は2期にわたって行われてお

り、1期目は2017年4月、2期目は2020年8月に完工している。それぞれの舗装補修の概要を図-3および表-7に示す。

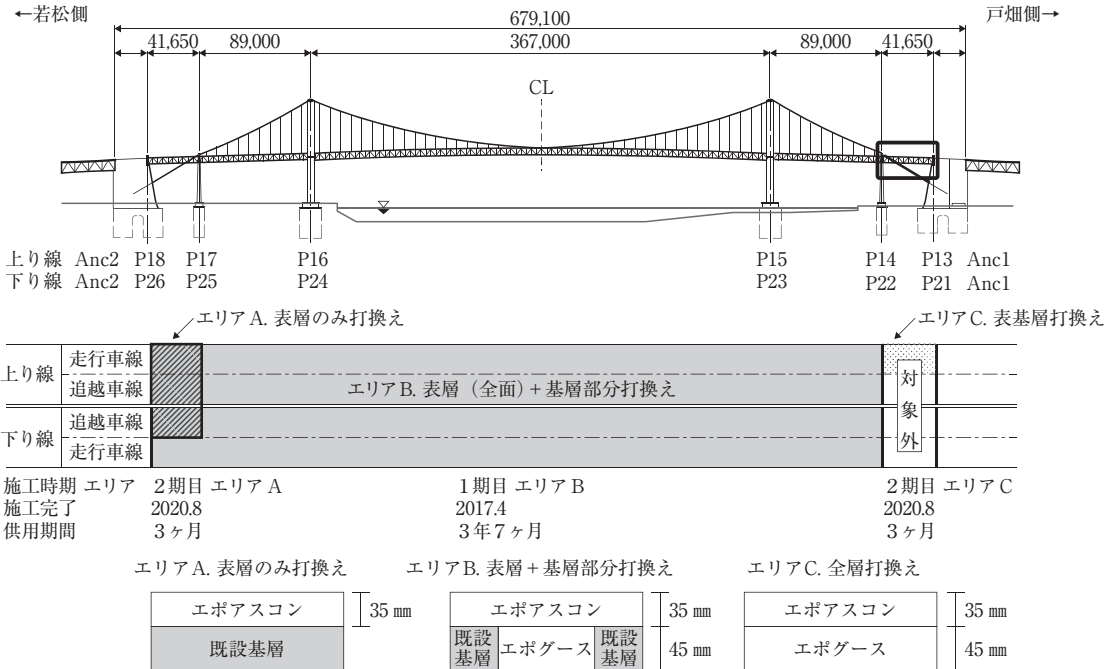


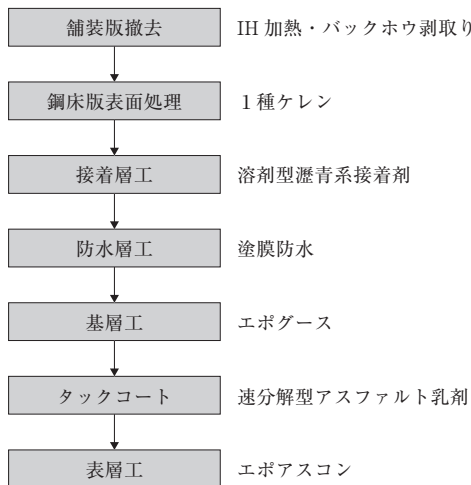
図-3 施工概要

表－７ 施工概要

	施工完了	車 線		径 間	施工内容	施工規模
1期目	2017.4	上り車線	走行	P14～P17	B	表層
			追越	〃	B	7,360㎡
		下り車線	走行	P22～P25	B	基層
			追越	P22～P25	B	620㎡
2期目	2020.8	上り車線	走行	～ P14	C	表層
			走行	P25～P26	B	680㎡
		下り車線	追越	〃	A	基層
			追越	〃	A	210㎡
施工内容	A 表層のみ打換え t=35mm B 表層＋基層部分打換え 表層35mm, 基層40mm C 表・基層全層打換え 表層35mm, 基層40mm					

4.2 施工手順

舗装版の撤去から表層施工までの施工手順を図－4に示す。基層にグース混合物を適用する場合と異なる点として、エボグースは転圧系の混合物であり、完全に不透水ではないため、瀝青系の塗膜防水を併用する。



図－4 施工手順

4.3 施工概要

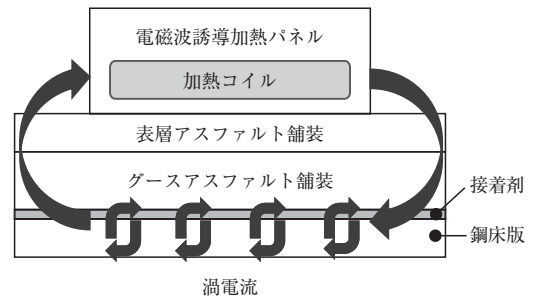
各工種の施工概要を述べる。

4.3.1 舗装版撤去

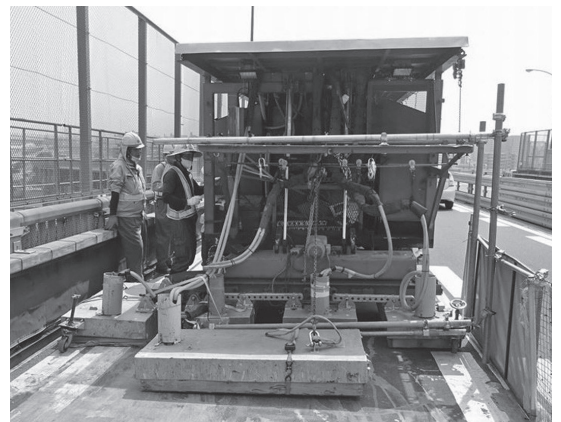
全層（表層＋基層）打換え部の舗装版の撤去に用いたIH式舗装撤去工法の概要を図－5に示す。本工法は電磁誘導加熱技術を利用して、鋼床版と基層混合物界面の接着層を軟化させ、効率的に鋼床版上の舗装を撤去する工法である。

本工事の全層打換え部については、表層面をIH加熱機で加熱したのちバックホウで剥取り作業を行った。

140㎡の剥ぎ取り作業は、加熱・ほぐしが2時間程度、剥取り・積込みが3時間程度、その他清掃を含めて合計6時間程度の所要時間となった。なお、径間部の固定支点アンカーボルトの取替えならびに単純トラス部の伸縮装置補修に伴う部分打換え部の舗装版の撤去は、対象範囲をカッター切断したのち、エアブレーカを用いて行った。一般工法（切削、剥取り、はつり）を適用した場合、1.5倍～2倍程度の時間を要するため、IH加熱による撤去の有意性が十分に確認された。



図－5 IH式舗装撤去方法



写真－4 IH式加熱機

表－8 IH式舗装撤去工のタイムスケジュール

内 容	時間(時)								
	9	10	11	12	13	14	15	16	17
IH式加熱			■	■	■				
舗装版ほぐし			■	■	■	■			
舗装版撤去				■	■	■	■	■	
付着残存物撤去							■	■	■

4.3.2 鋼床版表面処理

舗装版剥取り後の鋼床版の状態は写真－5に示すとおり、さびの発生が多く見られた。ASTMD610引用の標準図⁹⁾より、さびの発生量が10%以上に相当するため、清掃は遠心バキュームブラスト機を用いて1種ケレンを行った。ショットブラストの投射密度は100～120kg/m²程度とした。



写真－5 舗装剥取り後の
床版



写真－6 表面処理後の
床版

4.3.3 接着層

接着層は溶剤型の瀝青系接着剤を0.4 ℓ/m²塗布した。



写真－7 接着剤塗布



写真－8 接着剤塗布後の
床版

4.3.4 防水層

防水処理として、アスファルト加熱型の塗膜系床版防水を施工した。塗膜系防水は、速乾性の接着剤を0.25 ℓ/m²塗布したのち、塗膜防水材料を1.2～1.5kg/m²塗布している。塗布後は、舗装施工機械車輪への付着を防止する防水材料品質確保のために珪砂を1 kg/m²程度散布している。部分打換え箇所における路肩部側面には瀝青系シートを貼付け、舗装切断面には瀝青系成形目地を施した。



写真－9 防水材塗布



写真－10 防水材塗布後の
床版



写真－11 路肩防水処理



写真－12 舗装切断部
防水処理

4.3.5 基層工 エポグース

エポグースの混合物粒度は、鋼床版上のボルトなどの突起物を考慮して最大粒径を5 mmとし、締固めが良好とされるSHRP適用の0.45乗粒度を目標とする。石油アスファルトはポリマー改質アスファルトH型を用い、バインダ全量の20%をエポキシ樹脂で置き換える。室内配合設計におけるOBC（最適バインダ量）の決定は、一般的なマーシャル突固めでは現場の締固めを再現できないことが分かっているため、ジャイレトリ試験機により行っている¹²⁾。表－9に配合一覧、混合物の目標性能と物理性状を示す。

エポグースは、熱可塑性樹脂との複合バインダを使用するため、可使時間（3時間）に留意する必要がある。プラント練落しから初期転圧開始までの所要時間

表－9 エポグースの配合、目標性能と物理性状

配合率 %	材料の種類	7号碎石	砕砂	中目砂	石粉	エポキシ樹脂	アスファルト	計
	室内配合率	45.9	21.6	21.6	10.9	－	－	100
	AS含み	42.8	20.2	20.2	10.4	1.3	5.4	100
粒度 %	ふるい目	13.2mm	4.75mm	2.36mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm	0.075mm
	合成粒度	100	95.9	55.7	30.9	20.6	13.4	9.6
	目標粒度 SHRP0.45	100	95～100	55～70	23～35	15～25	10～18	8～12
項目	密度 g/cm ³	空隙率 %	飽和度 %	安定度 kN	フロー値 1/100cm	動的安定度 回/mm	曲げひずみ	透水係数 cm/sec
物理性状	2.393	2.4	88.6	23	48	10.500	7.45 × 10 ⁻³	不透水
品質目標	－	2～3	75～90	19.6以上	80以下	5,000以上	5 × 10 ⁻³ 以上	1 × 10 ⁻⁶ 以下

は、現場までの運搬時間1時間を含めて2時間程度であり、充分可使時間以内での施工ができた。

施工機械編成を表-10に示す。プラントで練落しされた混合物はダンプトラックで運搬し、アスファルトフィニッシャーによる敷均しを行った。初期転圧はコンバインドローラ3t、二次転圧はタイヤローラ3t、仕上転圧はタイヤローラ10tを用いて行った。

表-10 エポグース施工使用機材一覧

施工内容	使用機材	諸元
混合物運搬	ダンプトラック	10t
混合物敷均し	アスファルトフィニッシャー	ホイール2.0～4.5m
初期転圧	コンバインドローラ	3t
二次転圧	タイヤローラ	3t
仕上転圧	タイヤローラ	10t

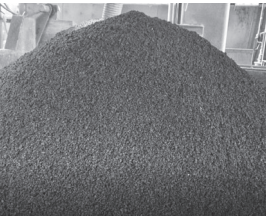


写真-13 練落し混合物

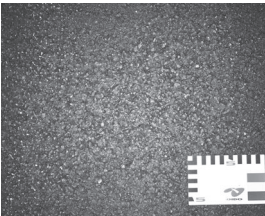


写真-14 基層仕上げ面

4.3.6 タックコート

舗装施工機械車輪への付着防止と、養生時間の短縮を目的に速分解型アスファルト乳剤を0.4ℓ/㎡散布した。

4.3.7 表層工 エポアスコン

エポアスコンの混合物粒度は、仕上げ厚35mmを考慮して最大粒径を13mmとし、密粒度アスコン13mmとした。石油アスファルトはポリマー改質アスファルトH

型を用い、バインダ全量の15%をエポキシ樹脂で置き換える。室内配合設計は、ベース混合物のマーシャル配合試験で得られたOAC（最適アスファルト量）にエポキシ樹脂を加え、諸性状を確認したのち、OBCを決定する。表-11に配合一覧、混合物の目標性能と物理性状を示す。施工はエポグースと同様に、表-10に示した一般の舗設編成で行った。敷均しから転圧完了まで1時間程度で終了し、仕上がりは良好であった。

5. 供用性の評価

1期目区間の供用は5年7ヶ月、2期目区間の供用は2年である。路面性状自動測定装置により、舗装路



図-15 路面性状測定



写真-16 路面の状況

表-11 エポアスコンの配合、目標性能と物理性状

配合率 %	材料の種類	6号碎石	7号碎石	砕砂	中目砂	石粉	エポキシ樹脂	アスファルト	計
	室内配合率	33.0	25.0	18.0	18.0	6.0	—	—	100
	AS含み	31.0	23.4	16.9	16.9	5.6	0.9	5.3	100
粒度 %	ふるい目	19.0mm	13.2mm	4.75mm	2.36mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm	0.075mm
	合成粒度	100	99.1	66.1	42.4	26.6	16.5	7.9	5.9
	目標粒度 SHRP0.45乗	100	95～100	55～70	35～50	18～30	10～21	6～16	4～8

項目	密度 g/cm ³	空隙率 %	飽和度 %	安定度 kN	フロー値 1/100cm	動的安定度 回/mm	曲げひずみ
物理性状	2.405	2.9	83.2	31.53	39	21,000	7.26 × 10 ⁻³
品質目標	—	2～4		19.6以上	80以下	15,000以上	5 × 10 ⁻³ 以上

面の性状（ひび割れ・わだち掘れ・平たん性）を測定した。

路面性状測定結果を表－12に示す。

P22～P26の一部に微細なひび割れが発生しているが、構造的なものではないと判断する。わだち掘れ量は2mm～4mm程度であり、大きな塑性流動はみられない。また、平たん性については、1.6mm～2.6mmである。

現在の路面は、耐久性が確保されており良好な状態を維持しており、十分な性能が確保されていることが確認された。今後も継続して経過観察を行い、供用性を評価する。

6. まとめ

若戸大橋にて2期にわたり、エポキシ混合物を表基層に用いた橋面舗装の補修を実施した。

全層打換え部の舗装版の撤去については、IH式舗装撤去工法を適用し、作業効率および環境負荷低減（騒音抑制）に有効性があることを確認した。基層には、グース混合物の代替えとなるエポグースを、表層には一般の表層混合物よりも高耐久に期待が持てるエポアスコンを使用しており、現在、良好な路面を維持している。

鋼床版舗装の基層には、従来、グース混合物が用いられてきたが、小規模の補修においては、混合物の製造条件に制約があるため、材料ロスが生じる場合がある。また、施工においても特殊な機械が必要となるため不経済となる場合が多い。

エポグースは、グース混合物と同等な性能を持ち、一般的な製造と施工が可能であることから、グース混

合物の代替利用をすることで、これからのメンテナンスサイクルの長期化に大きく寄与できるものとする。

— 参考文献 —

1) 国土交通白書 令和2年版, 老朽化インフラの増加 (2020)
2) 三村典正他：固形エポキシ樹脂を用いたエポキシ混合物の開発, 第24回日本道路会議論文集, 9010, 2001年
3) 舗装調査・試験法便覧 B003 ホイールトラッキング試験方法 (2019.3)
4) 舗装調査・試験法便覧 B005 曲げ試験方法 (2019.3)
5) 舗装調査・試験法便覧 B017T アスファルト混合物の加圧透水試験方法 (2019.3)
6) 舗装調査・試験法便覧 C007 コンクリート床版と舗装間の引張接着力試験方法 (2019.3)
7) 舗装調査・試験法便覧 B021 ねじりによる骨材飛散試験方法 (2019.3)
8) 舗装調査・試験法便覧 B001 マーシャル安定度試験方法 (2019.3)
油浸残留率 = 24時間浸漬した供試体の安定度 ÷ 油浸していない供試体の安定度 × 100%
9) 本州四国連絡橋公団：橋面舗装基準 (1983.4)
10) 名古屋高速道路公社：舗装設計基準 (2012.6)
11) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧 (2007.3)
12) 野田悦郎他：固形型エポキシ添加アスファルト混合物の締固め特性の検討 日本道路会議論文集, 2011

表－12 路面性状測定結果一覧

項目	供用	上り車線			下り車線			平均値
		場所	走行	追越	場所	走行	追越	
C ひび割れ率 (%)	2年0ヶ月	P13～P14	0.0	－	P21～P22	－	－	0.0
	5年7ヶ月	P14～P17	0.0	0.0	P22～P25	0.1	0.1	0.1
	2年0ヶ月	P17～P18	0.0	0.0	P25～P26	－	0.4	0.1
D わだち掘れ量 (mm)	2年0ヶ月	P13～P14	2.5	－	P21～P22	－	－	2.5
	5年7ヶ月	P14～P17	3.6	3.1	P22～P25	3.4	3.1	3.3
	2年0ヶ月	P17～P18	2.9	2.8	P25～P26	－	2.5	2.7
σ 平たん性 (mm)	2年0ヶ月	P13～P14	1.81	－	P21～P22	－	－	1.81
	5年7ヶ月	P14～P17	2.21	1.91	P22～P25	1.62	1.60	1.84
	2年0ヶ月	P17～P18	2.61	2.40	P25～P26	－	1.98	2.33
維持管理指数 MCI ^{○)}	2年0ヶ月	P13～P14	8.9	－	P21～P22	－	－	8.9
	5年7ヶ月	P14～P17	8.7	8.8	P22～P25	8.1	8.1	8.2
	2年0ヶ月	P17～P18	8.8	8.8	P25～P26	－	7.8	8.0

○) $MCI=10-1.48C^{0.3}-0.29D^{0.7}-0.47\sigma^{0.2}$
ここに、C=ひび割れ率(%), D=わだち掘れ量(mm), σ=平たん性(mm)

植物由来樹脂を用いた床版防水機能を有する 樹脂防水一体型アスファルト舗装

(Resin-Integrated Asphalt Pavement for Bridge Deck Slab with Waterproofing
Performance Utilizing Plant-Based Resin)

設 楽 直 柔*・平 戸 利 明**・吉 武 美 智 男***

高度経済成長期以降に整備された橋梁の老朽化が進行し、今後、建設後50年以上経過する橋梁の割合が加速度的に増加することが問題視されている。このような背景の中、限りある予算・人員で適切に老朽化対策を実施し、橋梁の長寿命化を図る必要がある。そこで、橋面舗装の長寿命化に寄与する新たな技術の一つとして、植物由来樹脂を用いた床版防水機能を有する樹脂防水一体型アスファルト舗装を開発した。

1. はじめに

広域な道路ネットワークを形成するうえで橋梁は必要不可欠であるため、橋面舗装の修繕工事による交通規制は非常に大きな経済損失となるばかりか、通行止め等となった場合には地域を孤立させることにもなる。橋梁の床版は交通荷重の影響を受け、そこに水が介在することで疲労耐久性が著しく低下することが報告されている¹⁾。従って、床版の長寿命化を図るためには適切な橋面防水を施すことが重要となる。

一般的な床版防水工法として、アスファルト系材料を含浸したシートを床版に貼る方法（シート系床版防水層）やアスファルト系材料を床版に塗布する方法（塗膜系床版防水層）がある。最近ではより耐久性、防水性に優れた防水工法として樹脂系材料を用いた方法（複合床版防水層）も開発されている。また、別途防水工事を必要としないため交通規制時間の短縮、さらに基層内部での滞水を抑制することができる「防水機能を有したアスファルト混合物」を用いる方法があり、これまではグースアスファルト混合物（以下、グース）が用いられてきた。グースの防水性能は優れているものの特殊な施工機械が必要であるため、適用箇所が限定されていた。そこで、グースと同程度に防水性能の高いアスファルト混合物（以下、混合物）を現場にて構築

し、床版、防水材、混合物を一体化させる工法を開発した。本報では、防水性能を有する橋面舗装「樹脂防水一体型アスファルト舗装」（以下、RA工法）の性能評価結果ならびに実施工について述べる。

2. RA工法の概要

RA工法は、接着防水材として植物系熱可塑性樹脂を2.0 kg/m²床版上に塗布し、混合物の舗設および転圧時に混合物下面に充填させることで、グースと同等の防水性の高い混合物を現場で構築するため、一般的な機械編成で施工可能である。接着防水材として使用する植物系熱可塑性樹脂は、軟化点80℃程度であるため、舗設時の熱で容易に液化し、混合物内部へと充填・浸透する。

図-1にRA工法の舗装断面を示す。RA工法は、床版の種類によらず適用可能である。



図-1 RA工法の舗装断面

*したら なおなり 東亜道路工業株式会社 技術部 技術研究所 主任研究員

**ひらと としあき 東亜道路工業株式会社 技術部 技術研究所 室長

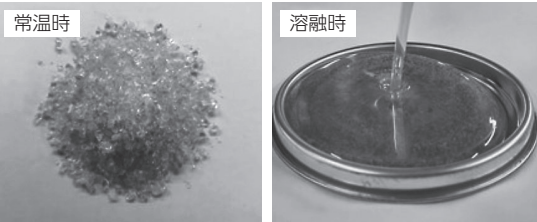
***よしたけ みちお 東亜道路工業株式会社 技術部 技術研究所 所長

3. RA 工法の特長

- RA 工法の特長を以下に示す。
- 床板・防水材・アスファルト混合物を一体化し基層全体で防水層を形成
 - 層として防水するため床板のひび割れに対しても追従し防水性能を持続
 - 低温から高温まで高い防水性と接着性
 - 一般的なアスファルト混合物の機械編成で施工可能
 - 接着防水材は植物系熱可塑性樹脂を使用しており、カーボンニュートラルへの貢献
 - 基層に剛性の高い混合物を使用することで、床版補強効果が得られる（鋼床版の場合）

4. RA 工法の施工方法

RA 工法を施工する床版は、あらかじめ下地処理を実施する。その後、床版と接着防水材の付着を高める目的でプライマーを塗布し、直後に硅砂を散布する。プライマーの硬化を確認後、接着防水材を塗工する。接着防水材の温度が外気温まで低下した後、基層混合物を施工する。なお、写真－1 に示すように、接着防水材は、180℃以上の温度で施工に適した流動性を示し、また、80℃以下では粘着性を示さないため、施工機械が走行しても、接着防水層が乱されることはなく、安定した品質の確保が可能である。さらに、熱可塑性を有するためリサイクル時に有利であり、同種の材料についてアスファルト混合物の改質材として利用している。



写真－1 植物系熱可塑性樹脂の外観

5. RA 工法に用いる材料

適用目的別で整理したRA 工法の構成を表－1 に示す。RA 工法は、床版の防水を目的とする工法と鋼床版の疲労対策を目的とする工法があり、基層用混合物に使用する改質アスファルト（PMA）および混合物の粒度がそれぞれ異なる。

5.1 プライマーおよび硅砂

RA 工法に使用するプライマーは、床版との接着性に優れ、供用温度で強度低下しない、2 液反応硬化型のエポキシ系プライマーを選定した。プライマー上に散布する硅砂は、プライマーと接着防水材とのアンカー効果を目的とし、単一粒度の5号硅砂を選定した。

5.2 接着防水材

接着防水材として使用する樹脂は、バイオマス度80%の植物系熱可塑性樹脂である。この接着防水材は、低温から高温まで高い接着力を有しているため、季節を問わず舗装と床版を強固に接着することができる。

5.3 アスファルト混合物

基層混合物には、適用する床版の種類に応じて、PMA を選択する。混合物の粒度は、防水を目的とした場合は、最大粒径13mmの密粒度アスファルト混合物とし、鋼床版の疲労対策を目的とした場合は、最大粒径13mmの碎石マスチックアスファルト混合物（SMA）を標準とする。表層用混合物は、要求される性能に応じた混合物を選定することが可能である。

6. 性能評価結果

6.1 耐流動性

RA 工法の耐流動性の評価を目的とし、ホイールトラッキング試験（以下、WT 試験）を実施した結果を図－2 に示す。比較として硬質アスファルトを用いたグースおよび塗膜防水工を施工した後、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（13）で作製した供試体についても試験を実施した。

試験結果から防水を目的としたRA 工法の動的安定

表－1 適用目的別RA 工法の構成

目 的	鋼床版の防水	コンクリート床版の防水	鋼床版の疲労対策
表 層	要求性能に応じて選択	要求性能に応じて選択	要求性能に応じて選択
基 層	密粒度アスファルト混合物（13） 高たわみ性バインダー	密粒度アスファルト混合物（13） 改質Ⅲ型－W	SMA（13） 高剛性バインダー
防水層	植物系熱可塑性樹脂	植物系熱可塑性樹脂	植物系熱可塑性樹脂
	エポキシ系接着剤＋硅砂	エポキシ系接着剤＋硅砂	エポキシ系接着剤＋硅砂
床版種	鋼床版	コンクリート床版	鋼床版

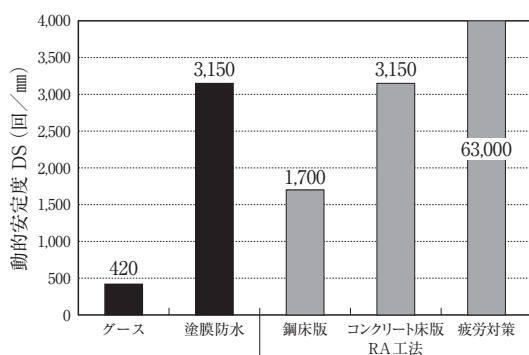


図-2 各工法のWT試験結果

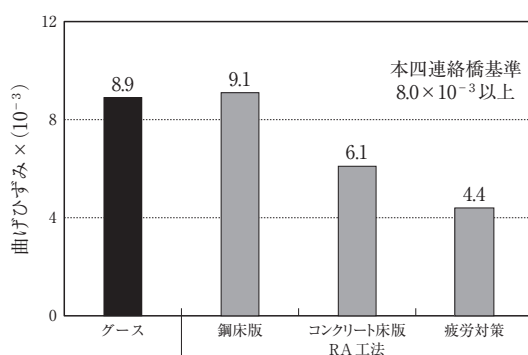


図-3 曲げひずみ

度(以下、DS)は、グースよりも高い値を示し、耐流動性に優れた混合物であることがわかる。また、疲労対策を目的として高剛性バインダーを用いたRA工法のDSは、63,000(回/mm)以上となり、高い耐流動性を示す。

6.2 曲げ特性

RA工法の曲げ特性の評価を目的とし、試験温度-10℃における曲げ試験を実施した結果を図-3および図-4に示す。上記同様に、比較としてグースについても試験を実施した。

試験結果から鋼床版の防水を目的としたRA工法の曲げひずみは、本州四国連絡橋橋面舗装基準(案)の 8.0×10^{-3} 以上を満足し、グースと同等の値となっていることがわかる。また、疲労対策を目的としたRA工法の曲げひずみは、鋼床版の補強効果を得ることを目的としている工法であるためひずみは小さいが、曲げ強度は他の混合物と比較し大きな値となっていることがわかる。

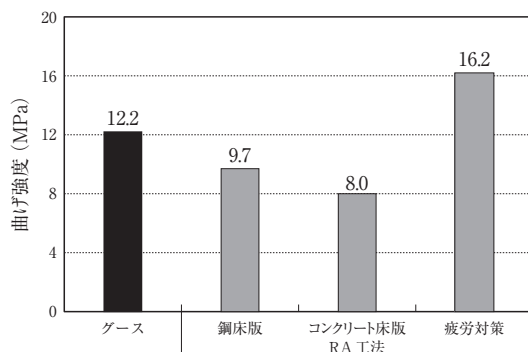


図-4 曲げ強度

6.3 接着防水材の充填性²⁾

接着防水材の充填性を図-5に示す方法により評価した。充填性の確認を行った結果を写真-2に示す。

ブラックライトを照射することで基層混合物底面から約20mm程度が発光し、接着防水材が混合物底面の空隙を充填し、さらに混合物内部に浸透していることがわかる。

6.4 空隙率の算出結果³⁾

RA工法の供試体を図-6に示す方法で作製し、空

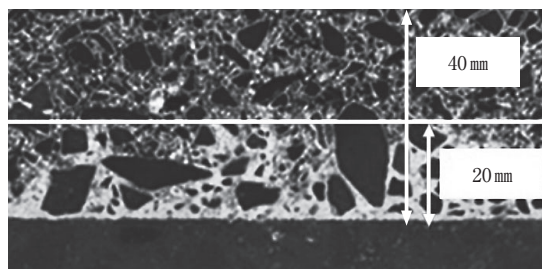


写真-2 接着防水材の充填状況

隙率を評価した。空隙率を算出した結果を図-7に示す。なお、接着防水材が基層混合物内に浸透し、アスファルト相当量に変化することから、空隙率の算出に必要な最大密度は、『舗装調査・試験法便覧 G027』に準拠し測定した。

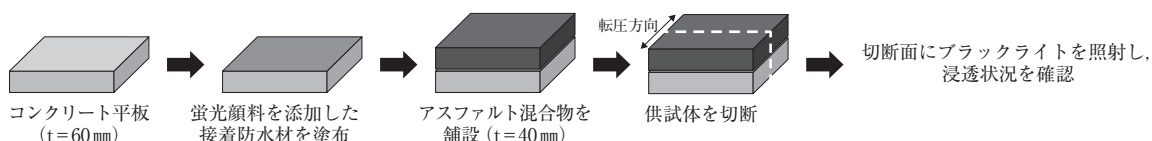


図-5 供試体の作製方法(充填性の確認)

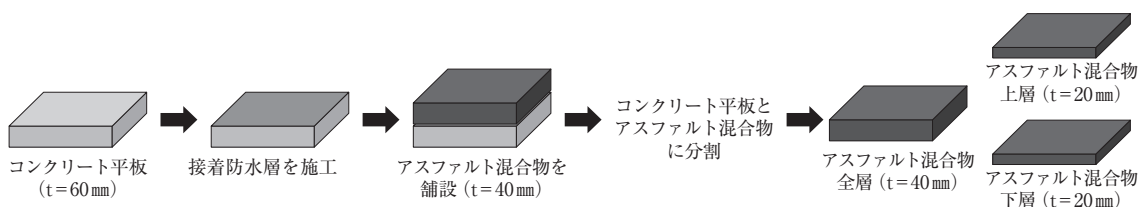


図-6 供試体の作製方法（空隙率の確認）

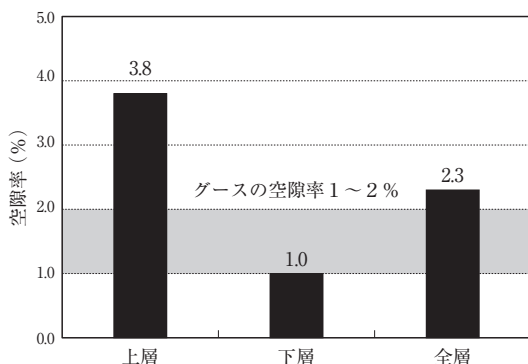


図-7 空隙率の算出結果

空隙率の算出結果から、接着防水材が充填されている底面から約20mm（下層）の空隙率は1%程度、全層では2.3%となっており、グースと同等の空隙率となっていることがわかる。

6.5 透水係数の評価³⁾

RA工法の供試体を図-8に示す方法で作製し、透水係数を評価した。混合物下部10mmは、接着防水材が充填され不透水であることから、透水係数の評価は、混合物上部30mmを対象とした。なお、透水係数の評価は、『舗装調査・試験法便覧 B017T』に準拠し実施した。

試験の結果、RA工法の透水係数は、不透水の目安である 1.0×10^{-7} (cm/s) 以下となり、接着防水材が下面より20mm以上浸透し、基層の半分以上で不透水層が形成されていることを確認した。

6.6 耐水性の評価⁴⁾

橋面舗装は、雨水などが浸入し舗装内部に滞水することで、ポットホール・砂利化などの損傷が発生する。

砂利化を再現し、損傷対策効果を評価することを目的に水浸WT試験を実施した。なお、試験温度、試験時間は、『舗装調査・試験法便覧 B004』に準拠し、水位は、模擬床版上端から30mmとした。また、砂利化を促進させることを目的に、舗装上面から深さ30mmで十字にカッター目地を施工した。

試験結果を写真-3に示す。アスファルト塗膜防水を施工した供試体は、試験終了後、砂利化が発生していたのに対し、RA工法の供試体は砂利化せず、耐水性に優れていることがわかる。

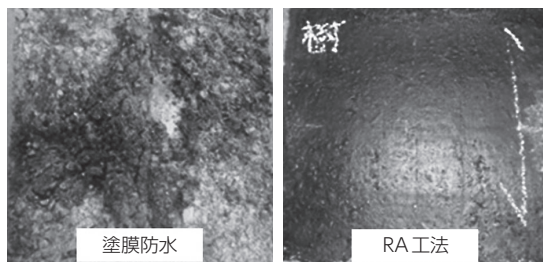


写真-3 床版上の舗装の損傷対策効果

6.7 疲労対策効果⁵⁾

鋼床版の疲労対策効果を実物大供試体により評価した結果を図-9に示す。累積損傷度は、大型車交通量、実橋の路面温度データ、室内での載荷実験を基にFEM解析を行い推定した各混合物の弾性係数および輪荷重走行試験と実交通路線での疲労損傷度が等価となるように解析した等価軸数を用いて算出した。なお、疲労対策に使用するバインダーは、混合物の剛性を向上させるため、主材であるPMAに添加材として植物

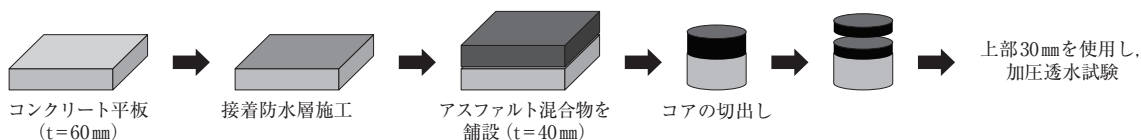


図-8 供試体の作製方法（透水係数の確認）

系熱可塑性樹脂を添加した高剛性バインダーを使用している。

実物大供試体による走行試験の結果、高剛性バインダーを使用した混合物は、グースと比較し、累積損傷度を1/3程度に低減させることができ、床版の長寿命化が期待できる。

7. 施工実績およびコスト比較

RA工法を適用した橋梁は、全国の一般道、高速道路含め5橋（施工面積約6,500㎡）となっており、開発以降、着実に施工実績を伸ばしている。すでに施工から2年以上経過している路線もあるが概ね良好な結果となっている。

単位面積あたりの施工単価を比較した結果を図-10に示す。グース代替として適用した場合、施工単価は高くなるが、特殊な施工機械を必要としないため汎用性は高く、また施工温度を抑えられるため臭気の問題が改善される。

8. まとめ

植物系熱可塑性樹脂を使用した床版防水工法について以下にまとめる。

- ①基層混合物を舗設することで接着防水材が溶融し、床版と基層混合物を一体化させるとともに、一般的な施工機械編成で、グースと同等の水密性を有した混合物を現地で構築することができる工法を開発した。
- ②接着防水材に使用する植物系樹脂は、熱可塑性樹脂であるため、従来と同様の方法でリサイクルが可能である。
- ③水密性および耐水性に優れた混合物であるため、橋面舗装の砂利化などの損傷対策効果を期待することができる。
- ④基層混合物に高剛性バインダーを使用することで鋼床版の疲労対策効果を期待することができる。
- ⑤施工単価は従来工法と比較し高くなるが、特殊な施工機械を必要としないため、汎用性が高くまた施工温度を抑えられるため臭気の問題が改善される。

本開発技術が、交通規制条件の厳しい橋面舗装の長寿命化に貢献できることを期待するものである。

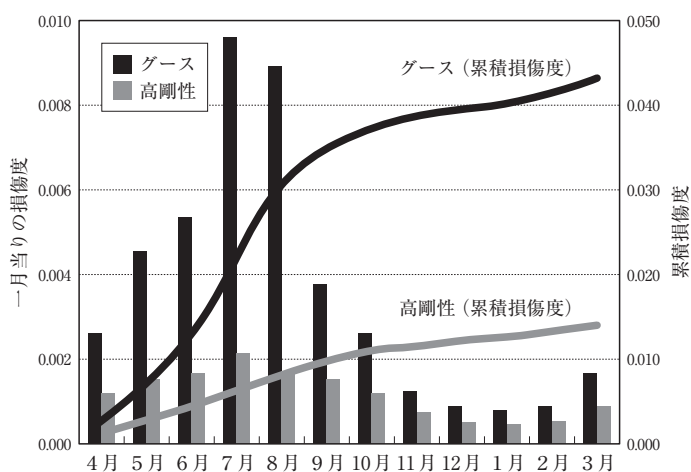


図-9 鋼床版の疲労対策効果

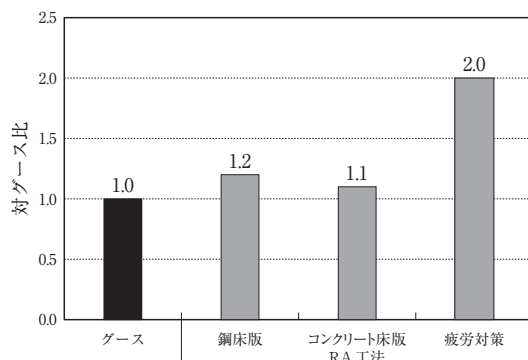


図-10 コスト比較（対グース比）

参考文献

- 1) 松井繁之, 移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.9, No.2, pp.627-632, 1987
- 2) 川上篤史, グースアスファルト代替工法の開発, 防水ジャーナル 6月号, 2021
- 3) 麻上淳平, 床版防水機能を有する樹脂防水一体型アスファルト舗装の空隙率と透水性状に関する検討, 舗装工学論文集第27巻, 2022
- 4) 鈴木拓人, 橋面アスファルト舗装の砂利化と床版防水の接着性能に関する一検討, 第77回年次学術講演会概要集, 2022
- 5) 稲荷優太郎, 高剛性アスファルト舗装による鋼床版疲労対策概要, 建設機械施工 Vol.72, 2020
- 6) 麻上淳平, 阿武隈大橋における鋼床版補強用アスファルト混合物の施工事例, 第34回日本道路会議, 2021.11

廃PET素材を原料とした高耐久アスファルト改質材の開発

(A Novel Asphalt Modifier Derived from Waste Polyethylene Terephthalate that Enables Highly Durable Asphalt Pavement)

柏木 啓孝*・猪股 賢大**・垣内 宏樹***・白井 英治****

近年廃プラスチックの増加、流出に伴う環境汚染が社会問題となっており、有効な廃プラリサイクル手法のひとつとしてアスファルト舗装への適用が注目されている。本検討では主要廃プラのひとつであるものの、極めて高い融点によりアスファルト舗装への適用方法が限られていたポリエチレンテレフタレート（PET）に着目し、PET分子構造の化学変換に基づく手法により、廃PETのリサイクルと優れた耐流動性・耐水性向上効果を両立する新規アスファルト改質材を開発した経緯を紹介する。

1. はじめに

昨今、廃プラスチック（廃プラ）の増加および流出に伴う環境汚染は深刻な社会問題となっており¹⁾、効果的な廃プラリサイクル技術の開発が望まれている。

アスファルト舗装材料としての廃プラの適用は、近年世界的に注目を浴びているリサイクル手法のひとつであり²⁾、とりわけ欧米諸国において基礎検討および試験施工が精力的に行われている³⁾。アスファルト舗装へ適用される廃プラの種類としては、表-1に示すようにポリエチレン（PE）、ポリプロピレン（PP）、ポリエチレンテレフタレート（PET）、ポリスチレン（PS）、ポリ塩化ビニル（PVC）など多岐にわたっており、適切な添加条件設定によりアスファルト舗装の性能を向上させることも知られている⁴⁾。そのため、舗装の高耐久化と環境問題の解決を両立させ得る次世代の技術として期待されているが、特に高いレベルの耐久性が求められる道路への適用は現状難しく、さらなる開発の余地がある。

このような背景から筆者らは、廃

プラを活用しつつアスファルト舗装に優れた耐久性をも付与できる改質材の研究開発に取り組んでいる。本報では廃プラ適用に関する研究の一例を紹介するとともに、今回筆者らが新たに開発した、廃PETを原料としたアスファルト改質材の特長について述べる。

2. 既往研究

前述のようにプラスチックはその用途に合わせて多種多様な高分子化合物（ポリマー）が使い分けられており、プラスチックの種類によってアスファルト混合物中での振る舞いは異なる。加えて、既往研究によれば廃プラを粉砕して粉末状、あるいはペレット状と

表-1 アスファルト舗装への適用検討が為されている廃プラ種

廃プラの種類	主な用途	融点（℃）
ポリエチレンテレフタレート（PET）	ペットボトル、食品包装	250℃以上
低密度ポリエチレン（LDPE）	ビニール袋	110～120℃
高密度ポリエチレン（HDPE）	玩具、シャンプーボトル	130℃程度
ポリプロピレン（PP）	コンテナ、プラスチック部品	160～165℃
ポリスチレン（PS）	CD/DVD ケース	230℃*
ポリ塩化ビニル（PVC）	建築資材、ビニール床材	100～260℃

* Wunsch, J.R. (2000). Polystyrene - Synthesis, Production and Applications

*かしわざ ひろたか 花王株式会社 テクノケミカル研究所

**いのまた けんた 花王株式会社 ケミカル事業ユニット エコインフラ

***かきうち ひろき 花王株式会社 テクノケミカル研究所

****しらい えいじ 花王株式会社 テクノケミカル研究所

いった取り扱いが容易な形状に加工してアスファルト混合物に添加する手法が一般的であるため^{5,6,7)}、添加剤としての性質はポリマーの熱物性(表-1)に大きく影響される。例えば、比較的低い融点を有するLDPEは、一般的な混合物製造温度で速やかに熔融可能という特徴を活かして骨材コーティング材、アスファルト改質材、あるいはアスファルト代替バインダーとしての検討が精力的に行われているが^{3,4)}、PETのような極めて高い融点(約260℃)を有するポリマーに関しては、混合物製造プロセスではほぼ熔融しないため、主としてフィラーあるいは骨材代替成分としての適用に限られている^{2,3)}。また、いずれの廃プラ種に関しても、高耐久舗装の実現という観点においてはさらなる性能向上が望まれている。

3. 本検討内容

3.1 開発コンセプト

前章において紹介した既存の廃プラ適用手法に対し、筆者らは異なるアプローチで廃プラリサイクル改質材の開発に取り組んだ。具体的には、ポリマーの分子構造に化学変換を施すことで、ポリマーの熱物性や材料親和性(骨材・アスファルトとの親和性)をアスファルト混合物にとって最適な状態となるようにコントロールする手法である。前述の先行研究例のように、物理的加工を施した廃プラをアスファルト混合物へ添加する手法がマテリアルリサイクルに位置づけられるのに対し、本検討のように化学反応による廃プラの分子構造の変換を伴う手法はケミカルリサイクル

に分類される。とりわけ本検討では、以下に述べる三つの理由により廃PETの活用にはフォーカスした。すなわち、①既存の適用法では高い融点がボトルネックとなり、骨材・アスファルトと効果的に相互作用できずPETの改質効果が制限されていた点、②PETは化学変換が容易なエステル基を有しており、分子構造をコントロールしやすい点、③過去に筆者らは高耐久化アスファルト改質材としてポリエステル系樹脂を開発しており⁸⁾、同様の分子構造を有するPETへの応用が可能な点、である。

3.2 廃PETリサイクル改質材の合成検討

上記コンセプトに基づいて、廃PETリサイクル改質材の合成検討を行った。具体的にはPET、およびアスファルト親和性を向上させるための疎水的な分子構造を有する特定のアルコールモノマー・カルボン酸モノマーを共存させた状態で加熱反応を行い、エステル交換反応によるPET分子鎖の切断、およびモノマー由来の疎水的な分子構造の導入を試みた。本化学反応の模式図を図-1に示す。

種々反応条件やモノマー成分の最適化検討の結果得られた廃PETリサイクル改質材(PEs-A)の組成および物性を表-2および表-3にそれぞれ示す。PEs-Aの軟化点は100℃程度であり、化学反応前の廃PETと比較して大幅に熔融温度が低下していることが確認された。反応前の廃PET(左)およびPEs-A(右)の外観を写真-1に示す。また写真-2は、写真-1と同じサンプルを180℃恒温槽で加熱した際の様子を撮影したものである。

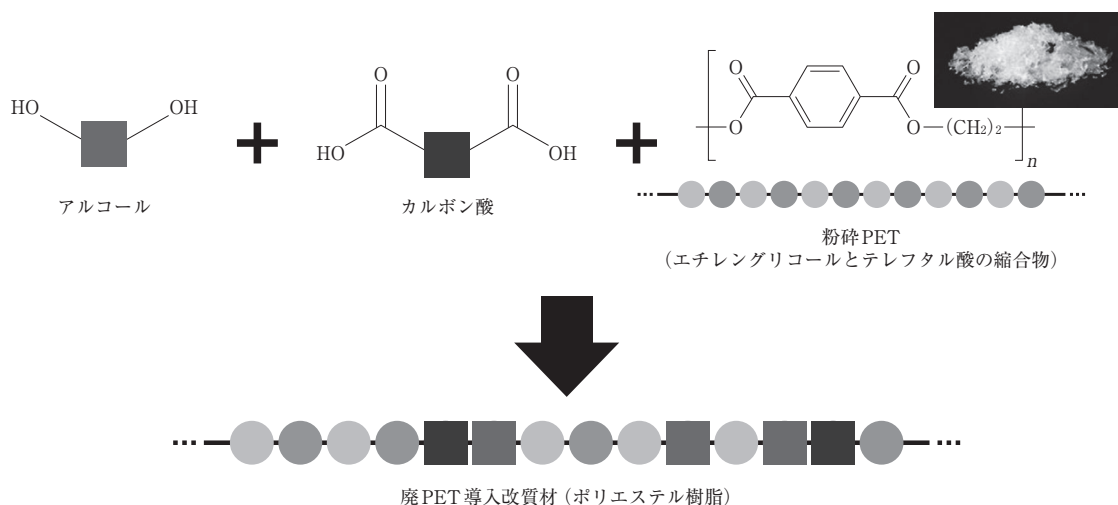


図-1 廃PETと疎水成分(アルコール・カルボン酸)との化学反応模式図(廃PETのケミカルリサイクル)

表-2 PEs-Aの原料組成

	PEs-A
廃PET (wt%)	40
特殊アルコール (wt%)	39
特殊カルボン酸 (wt%)	21

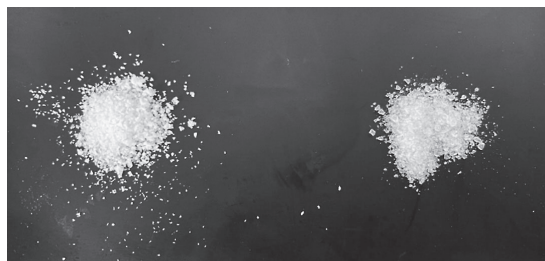


写真-1 反応前の廃PET (左)／PEs-A (右) 外観

反応前の廃PETは180℃で全く溶解せず粉末状のままであったが、PEs-Aは加熱により完全に溶解し、粉末残留分は確認されなかった。この結果から、本開発品は改質アスファルト混合物の製造温度で速やかに溶解分散できることが確認できた。

3.3 開発品のアスファルト溶解分散性について

次に、PEs-Aをアスファルトに溶解させて得られたバインダーについて評価を行った。ベースアスファルトはポリマー改質アスファルトⅡ型（改質Ⅱ型）とし、PEs-Aをアスファルトに対し20wt%添加し、180℃にて30分間攪拌混合した際のバインダー外観を写真-3に示す。なお比較条件として、反応前の廃PETを同比率で添加して得られたバインダーの外観を写真-4に示す。PEs-A添加条件では目視で均一なバインダーが得られたのに対し、反応前の廃PETを添加した条件では、PETが全く溶解せずバインダー中央部に偏って存在し



写真-3 PEs-A添加 As バインダー外観

表-3 PEs-Aの諸物性

	PEs-A
外観	白色～淡黄色粉末
軟化点 (℃)	102.1
ガラス転移点 (℃)	57.7

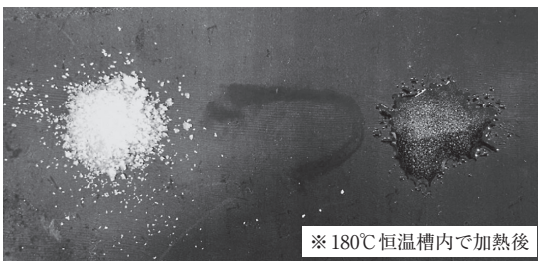


写真-2 反応前の廃PET (左)／PEs-A (右) 外観

た不均一なバインダーが得られた。したがって、PET自身は改質アスファルト混合物の製造温度においてアスファルトに溶解・分散しない一方で、PET分子構造の変換を伴った本手法では溶解・分散が可能となることが判明した。

3.4 アスファルト混合物としての評価結果

これまでの実験結果より、PET分子構造の化学変換を伴う本手法により得られたPEs-Aは、廃PETを主原料としつつも、改質アスファルト混合物の製造温度においてバインダー成分として機能するため、従来のリサイクルPET系添加剤とは異なる改質効果を呈することが示唆された。そこで、改質Ⅱ型の密粒度アスファルト混合物（13）においてPEs-Aの性能評価を試みた。なお、アスファルト混合物の作製については、骨材とアスファルトを180℃で均一になるまで混合した後、常温のPEs-Aをアスファルトに対し20wt%（混

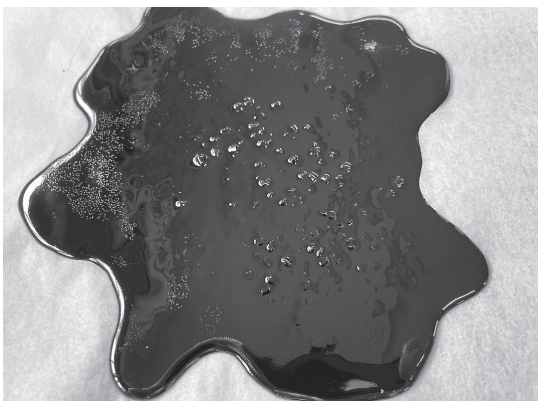


写真-4 反応前廃PET添加 As バインダー外観

合物に対し約1 wt%) 添加し、再度170～180℃にて混合を行い作製した。マーシャル試験およびホイールトラッキング (WT) 試験の結果を表-4に示す。PEs-Aを添加した混合物は著しい安定度の向上が確認された。耐流動性に関しては、より明確な差異を検証すべく表-5に示すような低速重荷重条件での再評価を実施することとした。加えて混合物の耐水性も評価するため、水浸条件での低速重荷重WT試験も追加で実施した。なお、低速重荷重WTによる耐流動性・耐水性評価は、試験開始後1時間経過時点における供試体変形量にて行った。試験結果を表-6に示す。

表-4 マーシャル試験・WT試験結果 (60℃)

	PEs-A 無	PEs-A 有
供試体空隙率 (%)	3.7	3.9
安定度 (kN)	14.4	37.6
フロー値 (1/100 cm)	27	22
動的安定度 (回/mm)	6,300	31,500

表-5 基本WT条件と低速重荷重WT条件の比較表

	基本条件	低速重荷重条件
荷重	686 N	1716 N
往復速度	21 回/分	15 回/分
ホイール	ゴム輪	鉄輪

表-6 低速重荷重条件でのWT評価結果 (60℃)

	PEs-A 無	PEs-A 有
気中 変形量 (mm)	5.4	1.3
水浸 変形量 (mm)	17.3	1.9

低速重荷重条件での評価ではPEs-Aの添加による耐流動性向上、および耐水性向上効果が明確に現れる結果となった。また、気中条件と比較して水浸条件での供試体変形抑制効果が極めて高いことも判明した。PEs-A無添加混合物で作製した供試体、およびPEs-A添加混合物で作製した供試体に関してそれぞれの水浸WT試験後の外観を写真-5および写真-6に示す。PEs-Aの添加により供試体の変形とアスファルト被膜の剥離が大幅に抑制されていることが確認できた。3.2項で述べたようにPEs-Aはアスファルト親和性向上のための疎水的な化学構造を有している一方で、骨材表面と親和しやすいエステル構造も含むため、骨材・アスファルト双方と効率的に親和し、骨材界面に形成されるアスファルト被膜の接着力を向上させた結果と考えられる。

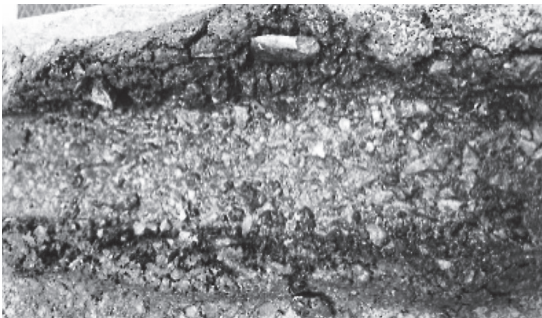


写真-5 PEs-A 無添加 水浸 WT 試験後供試体外観



写真-6 PEs-A 添加 水浸 WT 試験後供試体外観

4. 施工事例

施工事例は地方自治体公道であり、大型車両の通行量が多く舗装の劣化が顕著であった現場である。本現場 (施工面積276㎡、厚さ50mm) への適用によりリサイクルされた廃PET量を500mlペットボトルに換算した場合、4,290本となる。経過観察状況として施工から1年3か月が経過した時点での現場外観を写真-7に示すが、わだち掘れ・ひび割れ等の欠陥は見られず良好な路面状態を維持できている。引き続き供用性の確認を行い、本改質材の実用性を検証していく。



写真-7 PEs-A 適用現場供用1年3か月時点の外観

5. 様々な廃PET素材の適用性検討

最後に本手法の汎用性に関する検討状況について述べる。極めて多種多様なPET製品が普及している現状を鑑みると、本手法は様々な形態の廃PETに対しても幅広く適用できる手法であることが望ましいと考えられる。例えば、産業用フィルム端材由来の廃PETは、添加剤の混入により再利用が難しく焼却処分せざるを得ない場合があり、より効果的なりサイクル手法の開発が求められる。また、生態系へ甚大な悪影響をもたらすことで知られる海洋プラスチック問題に関しては、排出量の削減や新たなリサイクル手法の開発等による解決が喫緊の課題となっている。

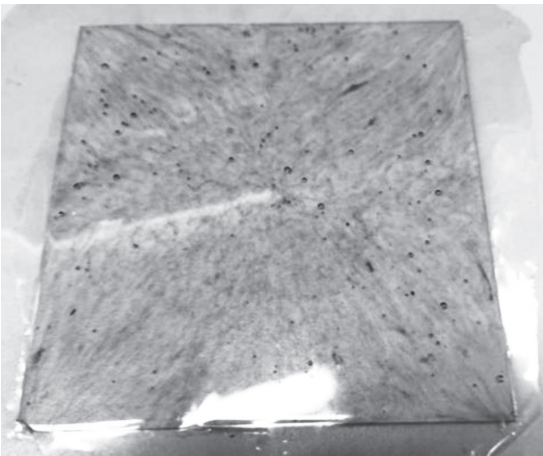
このような背景のもと筆者らは地方自治体と連携し、回収した海洋プラスチック（写真－8）を原料としてアスファルト改質材を合成する検討を行った。写真－9は回収プラスチックからPET成分を分別し、洗浄を行った後のサンプルであるが、不純物の影響で不均一な外観をしており、他用途への再利用が難しいことが示唆された。対して、写真－9のサンプルを原料としPEs-Aと同様の合成プロセスにより得られた廃PETリサイクル改質材（PEs-B）の外観を写真－10に、物性を表－7に示すが、本結果よりある程度不純物を含む廃PETを原料として用いた場合でもPEs-Aと同様の熱物性を有する改質材が得られることが判明した。PEs-Bを添加したアスファルト混合物に対し、3.4項と同条件で低速重荷重WT試験を実施したところ、PEs-Aと同等の性能が得られることも確認しており、本手法はある程度汚染された廃PETに対しても十分有効であることが示唆された。引き続き、フィルム端材など様々なPET製品に関しても検討を進めていく所存である。

6. おわりに

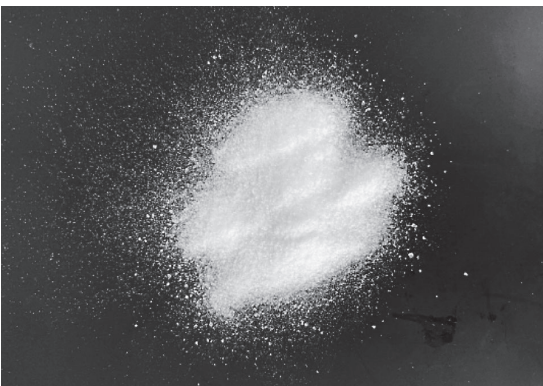
本研究では環境に配慮した舗装技術開発の一環として、アスファルト改質材への廃PETアップサイクルについて検討を行った。化学反応により廃PETの分子構造をコントロールすることで、低い熔融温度かつ良好なアスファルト親和性を有するリサイクル改質材を開発した。本改質材を適用したアスファルト混合物では、耐水性・耐流動性といった舗装性能の向上が確認され、従来の廃PET適用事例と比較して優れた舗装耐久性を付与できることが示唆された。したがって本手法は、有用な廃プラリサイクル手段のひとつとなり得る。引き続き現場での適用および経過観察を継続し、実用性の評価を進めていく。



写真－8 回収した海洋プラスチック



写真－9 廃PET分を選別・洗浄後得られたサンプル



写真－10 海洋廃PETリサイクル改質材 外観

表－7 PEs-Bの諸物性

	PEs-B
外観	白色～淡黄色粉末
軟化点 (℃)	100.6
ガラス転移点 (℃)	56.1

- 1) Geyer, R., Jambeck, J. R. and Law, K. L.: Production, use, and fate of all plastics ever made, *Science Advances*, Vol.3, No.7, 2017.
- 2) Ma, Y., Zhou, H., Jiang, X., Polaczyk, P., Xiao, R., Zhang, M., Huang, B.: The utilization of waste plastics in asphalt pavements: A review, *Cleaner Materials*, 2, 2021.
- 3) Willis, R., Yin, F. and Moraes, R.: Recycled plastics in asphalt pavement part A: State of the knowledge, National Asphalt Pavement Association, NAPA – IS – 142, 2020.
- 4) Willis, R., Yin, F. and Moraes, R.: Recycled plastics in asphalt pavement part B: Literature Review, National Asphalt Pavement Association, NAPA – IS – 142, 2020.
- 5) Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M. and Shafigh, P.: Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt, *Materials & Design*, Vol.32, No.10, pp.4844-4849, 2011.
- 6) Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M. and Ahmadinia, E.: Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt, *Construction and Building Materials*, Vol.36, pp.984-989, 2012.
- 7) Rahman, W. and Wahab, A.: Green pavement using recycled polyethylene terephthalate (PET) as partial fine aggregate replacement in modified asphalt, *Procedia Engineering*, Vol.53, pp.124-128, 2013.
- 8) 柏木啓孝, 橋本良一, 福利憲廣: ユニークなアスファルト改質効果を持つ新規ポリマー添加剤の開発, 日本道路会議, 2019. [Kashiwagi, H., Hashimoto, R. and Fukuri, N.: Development of a novel polymer additive with unique asphalt modification characteristics, *The 34th Japan Road Conference*, 2019.]

繰り返し再生による再生混合物性状と 高温時ひび割れ抵抗性評価法について

(Properties of Recycled Asphalt Mixture by Repeated Recycling and Evaluation Method for Crack Resistance at High Temperatures)

川 上 篤 史*・掛 札 さくら**・新 田 弘 之***
川 島 陽 子****・藪 雅 行*****・山 本 富 業*****

我が国のアスファルト舗装の再生は40年以上行われており、今後も永続的に進めていくためには繰り返し再生による影響を明らかにすることが重要である。筆者らは、アスファルトおよび混合物の繰り返し劣化・再生試験により、再生用添加剤の成分組成や再生骨材配合率によって性状変化に差があることを明らかにした。本稿では、さらに実際の再生骨材を用いて検証を進め、ひび割れが生じにくくなる条件等整理したので報告する。

1. はじめに

我が国の加熱アスファルト混合物（以下、混合物）の出荷量¹⁾のうち約75%は再生混合物であり、再生骨材配合率（以下、R率）も全国平均で50%と年々増加傾向にある。一方、アスファルト舗装の再生は40年以上も行われており、場所によって数回繰り返し再生されていると考えられる。今後も舗装再生を永続的に進めていくためには、再生骨材の繰り返し再生による再生混合物への影響を明らかにすることが重要である。

土木研究所では、過去よりアスファルト舗装の繰り返し再生による影響解明等に関する研究を行っており^{2, 3, 4)}、筆者らもこれまでに、アスファルトおよび混合物を室内で劣化・再生し、再生用添加剤（以下、添加剤）の成分組成やR率によって影響度合いに差があることを確認した⁵⁾。さらに、これら影響に対して定量的に評価可能な試験法を提案した⁶⁾。

本稿では、これら繰り返し劣化・再生試験結果について概説するとともに、新たに行った実際の再生骨材を用いた検証等の結果⁷⁾について紹介する。なお、本

実験は日本アスファルト合材協会との共同研究により行ったものである。試験条件や試験結果の詳細は、既報^{5, 6, 7)}を参照いただきたい。

2. アスファルトおよび混合物の繰り返し再生^{5, 6)}

2.1 研究方法

筆者らはこれまでに、アスファルトおよび混合物を室内において繰り返し劣化・再生し、その性状変化を把握した。劣化アスファルトの再生には、再生用添加剤の成分組成に着目し、飽和分と芳香族分の成分割合が異なる添加剤を用いた。また、再生混合物中のR率を変化させて、その影響も分析した。

(1) 試験手順

繰り返し劣化・再生による性状変化の把握にあたっては、まず初めに、添加剤の差異による影響を最大限にするため、アスファルトバインダのみ劣化・再生させた（R率100%での再生（以下、100%再生））。100%再生の具体的な手順として、表-1に示す新規アスファルト（ORG）を薄膜加熱試験（TFOT）および加

* かわかみ あつし 国立研究開発法人 土木研究所 道路技術研究グループ 舗装チーム 主任研究員

** かけふだ さくら 国立研究開発法人 土木研究所 道路技術研究グループ 舗装チーム 交流研究員

*** につた ひろゆき 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 上席研究員

**** かわしま ようこ 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 主任研究員

***** やぶ まさゆき 国立研究開発法人 土木研究所 道路技術研究グループ 舗装チーム 上席研究員

***** やまもと とみなり 一般社団法人 日本アスファルト合材協会 技術部会 部会長

圧劣化試験（PAV）により針入度20程度に劣化させ、この劣化アスファルトを添加剤により針入度70に調整した。添加剤は、表－2に示すように飽和分と芳香族分の成分割合が異なる5種類のものを用いた。劣化時間は、TFOTは5時間、PAVは針入度20になるまでの時間とした。100%再生では繰り返し回数を5回とし、混合物はこの再生アスファルトを新規骨材に被膜させて作製した。

一方、R率による影響把握では、R率30、60、80%の混合物を作製しこれを繰り返し劣化・再生した。新規混合物を製造した後、熱風循環乾燥炉による方法で劣化させて再生骨材とした。劣化時間は針入度20程度になるよう事前に検討し設定した。再生混合物は、針入度が70になるよう添加剤を加えるとともに、新規骨材および新規アスファルトの添加量を調整して作製した。添加剤は100%再生に用いた5種類の中から成分組成の異なる2種類（添加剤AおよびC）を用いた。混合物性状試験には、ORGと劣化・再生を1、3、5、7回繰り返し（以下、n回繰り返し再生したものを再生n）混合物を用いて行った。なお、混合物の骨材配合は密粒度アスファルト混合物（13）で、最適アスファルト量は5.5%である。

表－1 舗装用石油アスファルト60～80の性状

密度（g/cm ³ ）	1.039
針入度（1/10mm）	70
軟化点（℃）	46.5
伸度15℃（cm）	100+

表－2 再生用添加剤の性状

		添加剤 A	添加剤 B	添加剤 C	添加剤 D	添加剤 E
密度 (g/cm ³)		0.975	1.013	0.909	0.948	0.863
組成 (%)	飽和分	5.7	4.9	49.9	49.8	99.9
	芳香族分	88.1	91.1	47.7	47.4	0.1
	レジン分	6.1	3.7	2.5	2.1	0.0
	アスファ ルテン分	0.1	0.2	0.0	0.6	0.0
PCA 対応		準拠	準拠	準拠	準拠	—

(2) 試験方法

繰り返し再生を行ったアスファルトおよび混合物性状の変化を把握するため、表－3に示す各種性状試験により評価した。試験方法は、試験法便覧⁸⁾に記載があるものは、基本的にそれらに従って実施した。なお、本稿では紙面の関係から一部を紹介する。

圧裂試験では、試験温度0、60℃により圧裂強度比

を求めた。また、後述するように、繰り返し劣化・再生により再生アスファルトの高温時の接着力が低下する傾向が得られたため、供試体温度60℃にてカンタプロ試験（高温カンタプロ試験）を行った。表－4に試験条件を示す。この高温カンタプロ損失率は、舗装の表面縦ひび割れを模した疲労試験とされるホイールトラッキング疲労試験のひび割れ率と高い相関があり、簡易にひび割れ抵抗性を評価できる可能性があることを確認している⁹⁾。

表－3 主な試験項目

実施している主な試験項目		関連性状・性能等
材料性状試験	針入度試験	アスファルトの硬さ
	軟化点試験	軟化温度
	伸度試験	延性、ひび割れ
	組成分析試験	組成の変化
	赤外分光分析	酸化劣化度
	DSR試験	動的粘弾性状
混合物性状試験	圧裂試験	劣化度、耐ひび割れ
	曲げ疲労試験	曲げ疲労抵抗性（低温）
	小型曲げ試験	脆化点、たわみ性
	高温カンタプロ試験	耐ひび割れ（高温）
	ホイールトラッキング試験	耐流動性
舗装全層	促進載荷試験	疲労破壊輪数

表－4 高温カンタプロ試験条件

供試体温度（℃）	60
ロサンゼルス試験機内温度（℃）	30
ドラム回転数	毎分30回転で300回転

2.2 研究結果

(1) アスファルト性状（100%再生）

a) 針入度・軟化点・伸度

図－1に繰り返し劣化・再生したアスファルトの針入度、軟化点、伸度の試験結果を示す。針入度（図－1（上））は、再生アスファルトの目標針入度を70としたことから、再生後の針入度は70となる。ただし、添加剤Eに関しては、劣化5および再生5において促進劣化させても針入度が下がらず、再生の際に添加剤を加えても均一に混ぜることが困難となるなど、正確な針入度調整ができなかった。

次に、軟化点（図－1（中））は、針入度70に再生させても添加剤の種類によって上昇する傾向がみられた。飽和分の多い添加剤C、D、Eで顕著となり、特に劣化3以降で大きくなった。一方、芳香族分の

多い添加剤 A, B は微増しているが ORG に比較的近い値となっていた。これより、芳香族分の多い添加剤は、軟化点の回復効果が高いことが示された。

伸度 (図 - 1 (下)) は、添加剤 B は再生 3 回まで、添加剤 A は再生 2 回までである程度回復した。それに対し添加剤 C, D, E は再生 2 回以降ほとんど回復しなかった。軟化点と同様、芳香族分の多い添加剤は伸度も比較的回復しやすいことがわかった。なお、添加剤 B による再生 1 以外は、「舗装再生便覧¹⁰⁾」に示されている伸度 100 cm に回復していなかったが、100% 再生では新規アスファルトを全く添加しておらず、実際の再生に比べて非常に厳しい条件であったことによると考えられる。

b) 組成成分分析

図 - 2 に組成成分の分析結果を示す。いずれも劣化時には芳香族分が減少し、レジン分が増加する傾向が見られた。添加剤 A, B では、再生回数が進んでも再生後の組成比の変化が小さく、再生 5 でも芳香族分が 40% 以上となった。これは、芳香族分が多い添加剤による再生では、劣化により減少した芳香族分が添加剤により補われることによるものと考えられた。また、飽和分の多い添加剤 C, D, E では、再生時に足される芳香族分の量が少ないため、劣化・再生が繰り返されるうちに芳香族分が減少し、飽和分が増加した。特に添加剤 E は、再生時に飽和分しか足されることがないため、繰り返し劣化・再

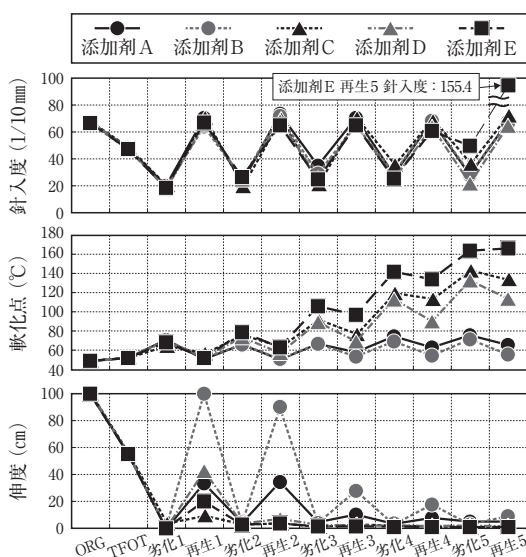
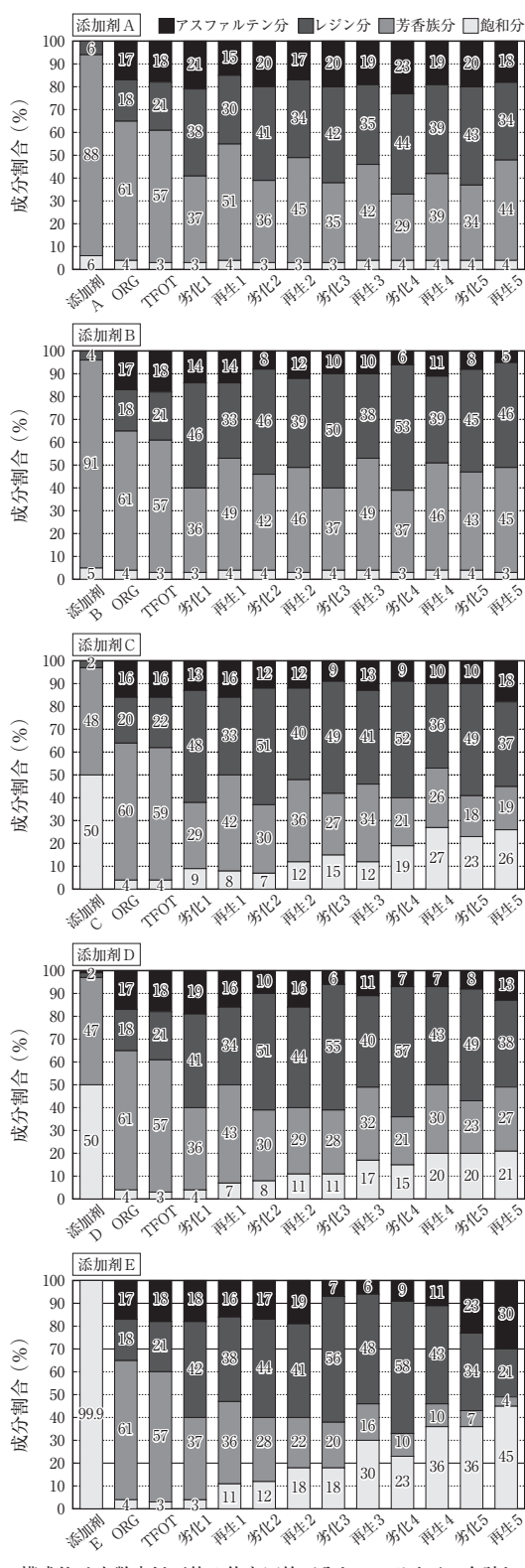


図 - 1 繰り返し劣化・再生アスファルトの針入度 (上)・軟化点 (中)・伸度 (下)



※構成比は小数点以下第 1 位を四捨五入しているため、合計しても 100 にならないものもある。

図 - 2 劣化・再生アスファルトの 4 成分組成

生に伴う芳香族分の減少と飽和分の増加が著しく、再生5では、芳香族分がほとんどない状態となっており、飽和分が45%を占める組成となった。

以上より、アスファルトの組成成分分析において飽和分の多い添加剤は、芳香族分の多い添加剤と比較して、再生時に芳香族分の供給が少ないので、再生アスファルトの芳香族分が減少しやすい傾向を示した。特に再生回数が進むと新規アスファルトの性状と大きく異なる組成になることが明らかになった。

(2) 混合物性状試験 (100, 80, 60, 30% 再生)

a) 圧裂試験

図-3に圧裂強度比を示す。いずれのケースも繰り返し再生が進むにつれ圧裂強度比は減少した。その傾向はR率が高くなるほど、添加剤AよりCのほうが顕著になった。一方、添加剤Aによる100%再生を除く再生混合物と30%再生CはORGと差異が小さかった。

圧裂強度比は値が大きいとわだち掘れが大きく、小さいとひび割れが発生しやすいとされている⁸⁾。また、過去の調査結果¹¹⁾によれば、圧裂強度比が20程度まで低下すると多くの舗装でひび割れが発生していた。図より、圧裂強度比20以下は添加剤Aでは100%再生5、添加剤Cでは100%再生1以降、80%再生3以降、60%再生7となることから、添加剤は芳香族分が多いAより飽和分が多いCで、R率が高いほどひび割れ抵抗性の低下が懸念される。

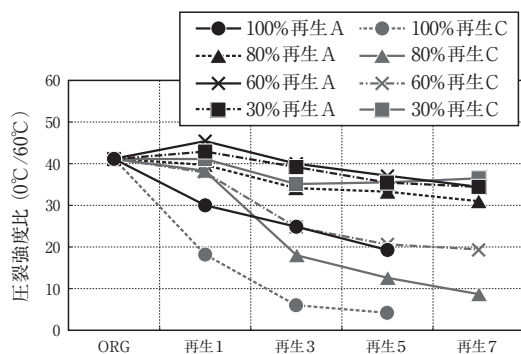


図-3 圧裂強度比

b) 高温カンタブロ試験

図-4に高温カンタブロ損失率を示す。添加剤Aによる100%再生の混合物および添加剤Cによる60, 80, 100%再生の混合物は、繰り返し再生が進むにつれて損失率が高くなった。特に、100%再生3Cは損

失率44%, 同5Cは98%となり、顕著な値となった。したがって、飽和分の多い添加剤Cにより再生された混合物でR率が高いものは、実道においても高温時のひび割れ抵抗性が低下する可能性があり、芳香族分の多い添加剤で再生された混合物やR率が低い混合物は高温時のひび割れが抑えられる可能性があることが示唆された。

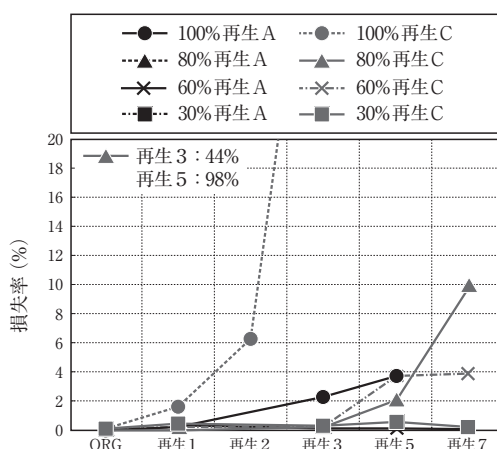


図-4 高温カンタブロ試験結果

c) 高温時ひび割れ抵抗性の評価方法

圧裂強度比は値が小さいとひび割れが発生しやすいとされ、高温カンタブロ試験も高温時のひび割れ抵抗性の評価に用いることができる可能性があることから、両試験の関係を整理しその適用可能性について検討した。

関係性の整理については、高温カンタブロ損失率と圧裂強度比を累乗関数で近似式を算出した。両指標のプロットデータを図-5に示す。図より、圧裂

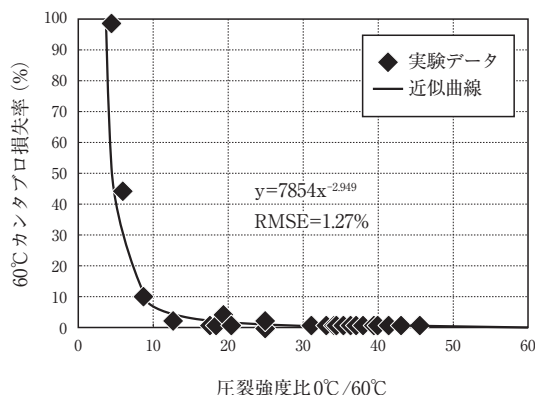


図-5 高温カンタブロ試験と圧裂強度比結果

強度比20程度以下から損失率が上昇しはじめ、圧裂強度比10付近で損失率が顕著に上昇していることが確認できる。したがって、再生混合物の高温時のひび割れ抵抗性は、この圧裂強度比や高温カンタブロ損失率の指標値を用いることによって定量的に評価することが可能であることが明らかになった。

3. 実際の再生骨材を用いた検討⁷⁾

3.1 研究方法

前述のアスファルトおよび混合物の繰り返し劣化・再生試験により、再生混合物の性状は添加剤の成分組成およびR率により異なり、その性状は高温カンタブロ損失率等で評価できる可能性が示唆された。本稿では、実際の再生骨材を用いた再生混合物を製造し、前述の得られた傾向を検証した。

(1) 試験手順

図－6に試験手順を示す。再生骨材は、8つの地域のアスファルト混合所（a～h）から採取した。これらはいずれも旧アスファルト（以下、旧As）針入度20付近以上のものを選定した。再生混合物の製造には、この再生骨材をそのまま使用した場合と、この再生骨材を熱風循環乾燥炉（110℃）で旧As針入度20未満に劣化させた2パターンについて使用した。再生混合物の製造には、表－5に示す成分組成の異なる4種類の添

加剤を使用した。表－6に、使用した各地域の再生骨材の旧As針入度、それらを室内劣化させた後の針入度、および再生に用いた添加剤量を示す。再生混合物の設計針入度は70、骨材配合は密粒度アスファルト混合物（13）とし、R率は0、30、60、80%とした。新アスファルトは、各アスファルト混合所で使用しているストレートアスファルト60～80を使用した。突固め回数は両面各50回である。

(2) 混合物試験方法

再生混合物を製造した後、再生混合物のひび割れ評価方法を検証するため、圧裂試験により圧裂強度比、高温カンタブロ試験により損失率を求めた。

3.2 研究結果

(1) 圧裂強度比

前述の室内での繰り返し劣化・再生回数の増加にともない、圧裂強度比は減少し、その傾向はR率が高く、芳香族分系よりも飽和分系の添加剤を使用した再生混合物で顕著であった。

図－7および図－8に得られた圧裂強度比を示す。なお、本文中や図に示す凡例において、例えば、地域aの針入度21の再生骨材を添加剤Fで再生した再生混合物を「F21a」と表記する。

室内
での繰

表－5 再生用添加剤の成分組成

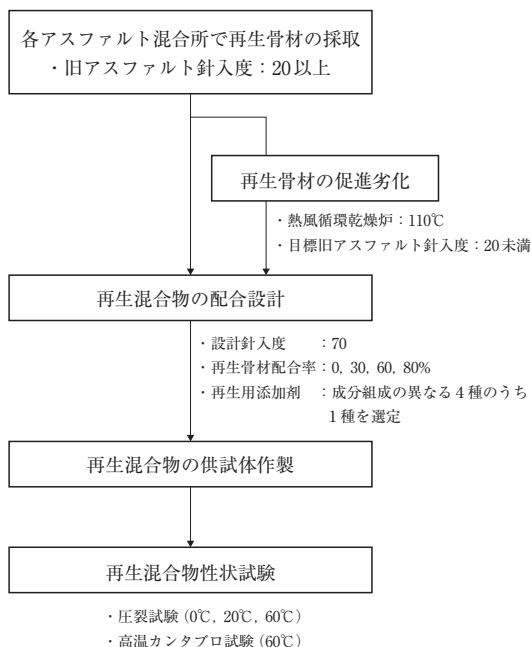
		添加剤F	添加剤G	添加剤H	添加剤J
組成 (%)	飽和分	5.6	54.5	58.9	78.3
	芳香族分	86.4	39.8	38.7	19.8
	レジン分	8.0	5.7	2.3	1.9
	アスファルテン分	0.0	0.0	0.0	0.0

分析方法：JPI-5S-77-2019

表－6 旧アスファルト針入度と使用した添加剤

地域	再生用 添加剤	旧アスファルト 針入度20以上		旧アスファルト 針入度20未満	
		針入度 (1/10mm)	添加剤量 (%)※	針入度 (1/10mm)	添加剤量 (%)※
a	添加剤 F	21	16.6	15	18.0
b		23	22.5	11	27.5
c	添加剤 G	24	9.8	16	16.5
d		27	9.6	15	20.6
e	添加剤 H	20	20.0	15	26.5
f		22	18.0	15	21.9
g	添加剤 J	20	10.9	15	12.4
h		25	12.0	14	21.5

※旧アスファルト量に対する添加剤量（内割）



図－6 実験手順

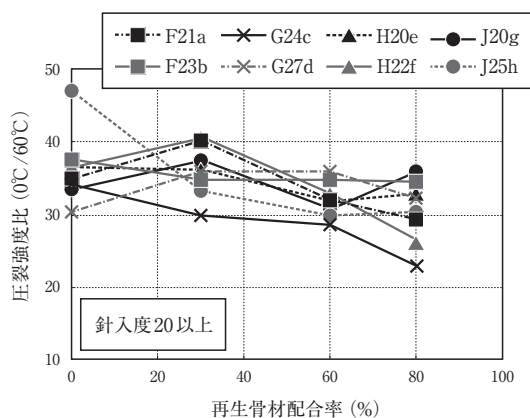


図-7 圧裂強度比(旧As針入度20以上)

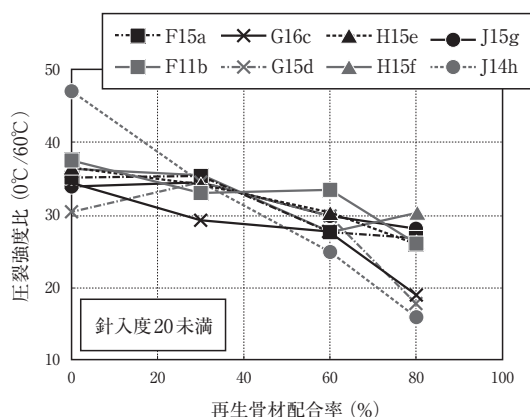


図-8 圧裂強度比(旧As針入度20未満)

り返し劣化・再生試験と同様に、R率が高くなるほど、圧裂強度比は低下する傾向となった。旧As針入度20未満かつ添加剤G、Jの再生混合物でその傾向はより顕著であり、特に、G16c、G15dおよびJ14hのR率80%で圧裂強度比が20以下となった。これらは、他の再生混合物に比べてひび割れが生じやすいと考えられた。

(2) 高温カンタブロ損失率

図-9～図-12に添加剤ごとの高温カンタブロ損失率を示す。全ての添加剤において、旧As針入度20未満の再生混合物で損失率が高くなる傾向となった。また、R率に着目すると、R率が高いほど損失率が高くなる傾向にあり、その傾向は芳香族分が多い添加剤Fよりも飽和分が比較的多い添加剤G、H、Jでより顕著であった。特に、飽和分が最も多い添加剤Jを用いた再生混合物(J14h)では、R率80%で損失率が最も高い値(6.9%)を示した(図-12)。

(3) 圧裂強度比と高温カンタブロ損失率の関係

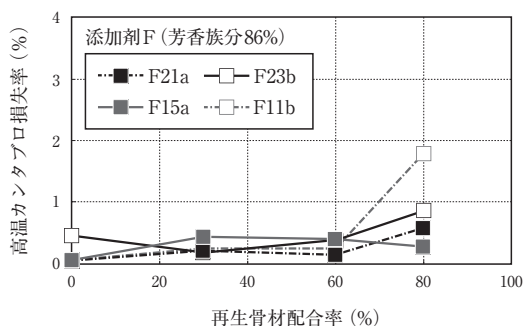


図-9 高温カンタブロ損失率(添加剤F)

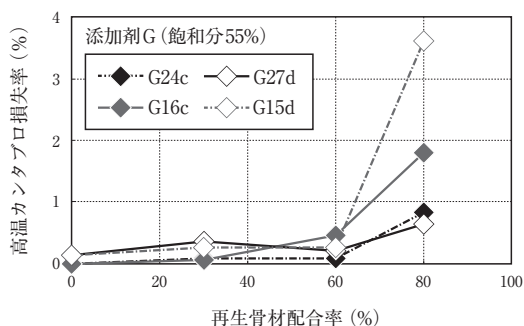


図-10 高温カンタブロ損失率(添加剤G)

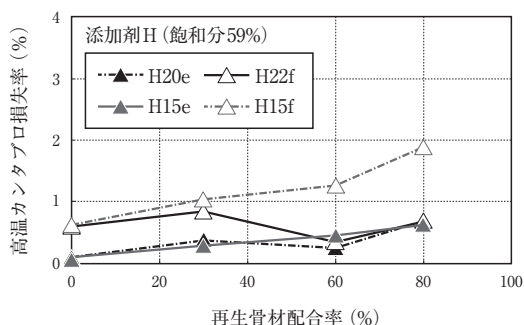


図-11 高温カンタブロ損失率(添加剤H)

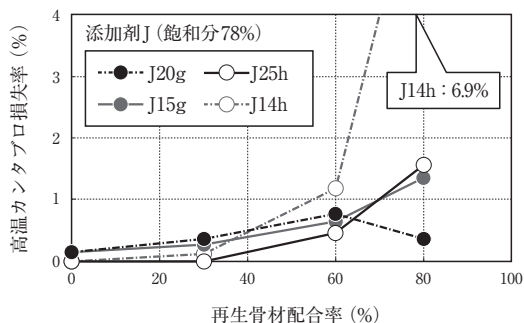


図-12 高温カンタブロ損失率(添加剤J)

図-13に圧裂強度比と高温カンタブロ損失率の関係を示す。

図より、R率0%（新規混合物）では、圧裂強度比が30以上であり、高温カンタブロ損失率も低いことが分かる。旧As針入度20以上の再生混合物は、圧裂強度比が20以上で、高温カンタブロ損失率がR率0%よりもやや高い値を示していた。一方、旧As針入度20未満の再生混合物では、一部の再生混合物で圧裂強度比が20以下となり、それにともない高温カンタブロ損失率も大きくなっていた。

図中には、本試験で得られた高温カンタブロ損失率と圧裂強度比の近似式および前述の室内で繰り返し劣化・再生した混合物から得られた近似式を示している。どちらも圧裂強度比20以下で高温カンタブロ損失率が増加していることが分かる。なお、両者の近似式に差が生じた理由として、本試験で用いた再生混合物は全国のアスファルト混合所で実際に使用されている再生骨材から作製したものであるのに対し、室内で劣化・再生した再生混合物は全て同じ材料を用い、室内実験で同じ条件で作製されたものであるため、前者は改質材等が含まれている可能性があること、また、両者の再生骨材の形状や旧Asと添加剤、新アスファルトの相溶性が異なっているためであると考えられる。

（4）高温時のひび割れ抵抗性の評価

前述の二つの近似式の曲線から、ひび割れが生じやすいとされている圧裂強度20となる高温カンタブロ損失率の値を求め、それを高温時のひび割れが生じにくい範囲（以下、範囲）として表-7にまとめた。ここでは、「ひび割れが生じにくい」と評価した範囲を白色

（範囲内）、「ひび割れが生じやすい」とした範囲を濃色（範囲外）で示している。

表-8および表-9に圧裂強度比および高温カンタブロ損失率の試験結果の値、およびそれらの値を表-7の分類により色分けしたものを示す。表より、旧As針入度20以上の再生混合物は、圧裂強度比は全て範囲内となり、飽和分を多く含む添加剤を用いたJ25h（R率80%）の高温カンタブロ損失率のみが範囲外となった。また、旧As針入度20未満の再生混合物では、芳香族分より飽和分が多い添加剤を使用し、R率が高い再生混合物で範囲外となる傾向になった。ただし、R率30%以下の再生混合物は全て範囲内となった。加えて

表-7 高温時のひび割れ生じにくい範囲

生じにくい ← 高温時のひび割れ → 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

表-8 再生混合物性状（旧As針入度20以上）

針入度20度以上								
R率 (%)	高温カンタブロ損失率 (%)				圧裂強度比 (0℃/60℃)			
	0	30	60	80	0	30	60	80
F21a	0.05	0.21	0.13	0.58	35.4	40.2	31.6	29.7
F23b	0.46	0.17	0.39	0.88	37.5	34.7	34.8	34.7
G24c	0.04	0.07	0.07	0.83	34.1	30.1	28.5	22.9
G27d	0.14	0.37	0.20	0.65	30.5	36.0	36.1	32.3
H20e	0.09	0.37	0.24	0.68	37.4	36.1	32.1	33.0
H22f	0.62	0.83	0.31	0.69	36.7	40.7	32.9	26.3
J20g	0.13	0.37	0.78	0.39	33.7	37.5	30.8	35.8
J25h	0.01	0.04	0.47	1.56	47.1	33.5	29.8	30.2

表-9 再生混合物性状（旧As針入度20未満）

針入度20度未満								
R率 (%)	高温カンタブロ損失率 (%)				圧裂強度比 (0℃/60℃)			
	0	30	60	80	0	30	60	80
F15a	0.05	0.44	0.38	0.27	35.4	35.1	27.5	26.6
F11b	0.46	0.23	0.25	1.77	37.5	33.0	33.5	26.1
G16c	0.04	0.07	0.45	1.78	34.1	29.3	27.6	18.9
G15d	0.14	0.27	0.26	3.57	30.5	34.5	29.7	17.8
H15e	0.09	0.28	0.42	0.62	37.4	34.1	30.4	26.1
H15f	0.62	1.03	1.28	1.86	36.7	35.4	27.8	30.2
J15g	0.13	0.30	0.65	1.38	33.7	34.2	29.8	28.1
J14h	0.01	0.09	1.16	6.92	47.1	34.5	24.9	16.0

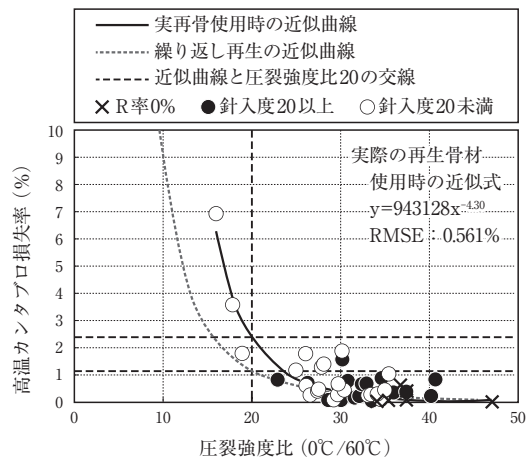


図-13 圧裂強度比と高温カンタブロ損失率

添加剤の種類や発生材の地域によっては、R率60%以上でも範囲内に収まる再生混合物があった。

3.3 再生混合物ひび割れ抵抗性の考え方

前節では、再生混合物の高温時のひび割れが生じにくい範囲を提案した。これによれば、旧As針入度20以上の再生混合物はほぼ全て、針入度20未満の再生混合物は、低いR率（30%以下）で範囲内となった。

針入度20未満で高いR率（60%）の再生混合物に関しては、芳香族分を多く含む添加剤を使用した場合や、低いR率ほど範囲内になる傾向は得られたが、添加剤と発生材の地域の組み合わせによっては、飽和分が比較区的多い添加剤を使用した場合や、R率80%でも範囲内に収まった。

今後も舗装の再生を永続的に進めていくためには、提示した高温時のひび割れ抵抗性の評価等を通じた再生混合物の品質を評価することにより、各再生骨材に対応した適切な添加剤やR率を求める必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究によって、繰り返し再生によるアスファルトおよび混合物の性状は再生用添加剤や再生骨材配合率によって差異があることを明らかにするとともに、高温カンタブロ損失率等によって再生混合物の高温時のひび割れ抵抗性が評価可能であることを提案した。

今回は、全国のアスファルト混合所で実際に使用されている再生骨材を用いて、繰り返し再生試験で得られた添加剤やR率の影響について検証した。その結果、実際の再生骨材を用いた再生混合物でも、室内の繰り返し再生と同様に、圧裂強度比と高温カンタブロ損失率は高い相関があり、再生混合物のひび割れ抵抗性の評価方法として適用できる可能性があることを確認した。また、圧裂強度比と高温カンタブロ損失率の近似式から、高温時のひび割れが生じにくい範囲を提案した。

今後は、実道での評価を行い、今回提案した高温時のひび割れが生じにくい範囲の値を精査していく必要があると考えられる。

— 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 令和3年度－2021－，2022.
- 2) 坂本浩行：再生用添加剤，アスファルト，Vol. 27，No. 141，pp. 39-46，1984.
- 3) 安崎裕，片倉弘美，高木信幸：再生加熱アスファルト混合物の供用性評価，土木技術資料，Vol. 31，No.9，pp.48-53. 1989.
- 4) 加納孝志，新田弘之，佐々木巖，川上篤史：飽和成分の多い再生用添加剤で繰り返し再生した再生混合物と再生アスファルトの性状に関する一検討，土木学会論文集E1（舗装工学），Vol.71，No.3（舗装工学論文集第20巻），I_65-I_71，2015.
- 5) 新田弘之，田湯文将，川島陽子，川上篤史：繰り返し再生したアスファルトの性状における再生用添加剤の組成の影響，土木学会論文集E1（舗装工学），2019年75巻1号p.59-67，2019.
- 6) 川上篤史，新田弘之，藪雅行，掛札さくら，川島陽子：繰り返し再生したアスファルト混合物への再生用添加剤と再生骨材配合率の影響，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_251-I_259，2020.
- 7) 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の高温時のひび割れ抵抗性の評価方法，土木学会論文集E1（舗装工学），Vol.77，No.2（舗装工学論文集第26巻），p. I_11-I_19，2021.
- 8) 公益社団法人 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，2019.
- 9) 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.
- 10) 公益社団法人 日本道路協会：舗装再生便覧（平成22年版），2010.
- 11) 建設省関東技術事務所：昭和56年度試験道路における試験調査報告書，建設省，1982.

再生用添加剤の組成および添加方法の違いによる 混合物性状の向上効果

(Composition and Addition Method of Additive for Regeneration Effect on Mixture)

末 原 俊 史*・安 藤 政 浩**・川 上 篤 史***
川 島 陽 子****・亀 山 修 一*****

再生アスファルト混合物（以下、再生混合物）は、リサイクルの繰り返しにより再生骨材中のアスファルトの劣化進行に伴う品質低下のため、持続的な再生利用が困難になるおそれがある。

既往の試験方法では、再生骨材の劣化程度や配合率が再生混合物の品質に及ぼす影響を明確に示した事例は少ない。このため、本研究では海外の試験方法およびその改良により、再生骨材の劣化程度や配合率が再生混合物に及ぼす影響を検証した。また、同試験方法を用いて再生用添加剤の種類の違いによる影響や、添加後に養生期間を延長した場合に再生混合物の品質に及ぼす影響を検証した。

1. はじめに

わが国では、1980年代前半にアスファルト混合物（以下、混合物）のリサイクルが始まり、図-1より混合物の製造量に占める再生混合物の割合は1998年には50%を超え、現在では70%以上にも及んでいる¹⁾。

このように繰り返し再生利用することによって再生骨材に含まれるアスファルトの劣化が進行し、針入度が低下する傾向がある²⁾。加えて、改質アスファルトの普及によって²⁾、改質アスファルト由来の再生骨材が増えたことも再生骨材の針入度低下を助長している。

このため、今後は針入度の規格値（20以上）を満たさない再生骨材が増加し、持続的な再生利用が困難になるおそれがある。

舗装再生の設計図書である舗装再生便覧には配合設計の目標値として圧裂係数が記載されているが、圧裂係数は混合物のスティフネス（剛性）を表す指標であり、ひび割れ抵抗性などの関係は明らかにされていない。さらに、再生混合物の力学性状は再生骨材の劣化程度や配合率に影響を受けると考えられ、これまで疲労抵抗性の低下を検討した研究³⁾が報告されているものの、再生混合物の力学性状には未解明部分が多く、未だ評価方法は確立されていない。

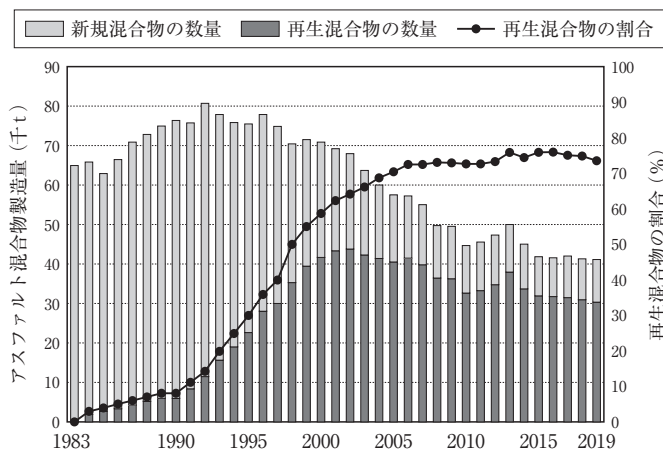


図-1 再生混合物の製造割合の推移¹⁾

*すえはら としふみ 株式会社NIPPO 総合技術部 技術研究所 研究第二グループ

**あんど う まさひろ グリーン・コンサルタント株式会社

***かわかみ あつし 国立研究開発法人 土木研究所 道路技術研究グループ 舗装チーム

****かわしま ようこ 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

*****かめやま しゅういち 北海道科学大学 工学部 都市環境学科

再生骨材の低針入度化はリサイクルを持続する上で重要な課題であり、この解決には再生混合物の力学性状を適切に評価する方法を確立するとともに、品質を向上する技術が求められる。

そこで、本研究では再生混合物の力学性状を適切に評価するため、海外の試験方法およびその改良により、再生骨材の劣化程度や配合率が再生混合物に及ぼす影響を検証した。また、再生混合物の品質向上を目的に、再生用添加剤の種類や再生骨材内部への浸透状態に着目し、これらの違いが混合物性状に及ぼす影響を実機工場の製造と実路での試験舗装において検証した。

2. 再生骨材の作製

再生骨材の品質のバラツキを極力小さくするため、室内で混合物を促進劣化させて再生骨材を作製した。具体的には舗装調査・試験法便覧（以下、試験法便覧）B020に基づき、ポリマー改質アスファルトⅡ型（以下、改質Ⅱ型）を使用した密粒度混合物（13）7.5kgを金属製バット（36cm×24cm）に敷きならし、110℃の乾燥で加熱することで促進劣化させた。促進劣化時間（乾燥炉の加熱時間）を変えることで、劣化程度が異なる3種類の再生骨材を作製した。

回収アスファルトの針入度、それを針入度70まで回復するための再生用添加剤の添加量を表-1に、再生用添加剤の性状を表-2に、これらを使用した再生混合物の配合を表-3に示す。

3. 再生混合物の力学性状の評価

3.1 従来の評価方法（圧裂試験）

舗装再生便覧では、一般地域で用いる再生混合物の設計圧裂係数を20℃において0.60～0.90（MPa/mm）としている。

再生混合物の新しい評価手法の検討に先立ち、従来の評価手法である圧裂係数を用いて評価を試みた。

改質Ⅱ型ベースの再生骨材を用いた再生混合物の圧裂係数は図-2に示すとおりであり、いずれも設計圧裂係数を満足している。また、再生骨材配合率が大きくなると圧裂係数が増加する傾向が見られるが、針入度が低い再生骨材は圧裂係数が低い傾向にある。

表-1 再生骨材の針入度と再生用添加剤の添加量

アスファルト種類	目標針入度（1/10mm）	促進劣化時間（時間）	回収アス針入度（1/10mm）	再生用添加剤量*（%）
改質Ⅱ型	25～30程度	48	27	10.6
	20前後	96	20	12.7
	10～15程度	288	14	23.3

※再生用添加剤量は目標針入度：70の添加量

表-2 再生用添加剤の性状

項目	性状値	項目	性状値
動粘度（60℃）（mm ² /s）	82.71	飽和分（mass%）	83.2
引火点（℃）	260	芳香族分（mass%）	13.5
薄膜加熱後の粘度比	1.05	レジン分（mass%）	1.6
薄膜加熱質量変化率（%）	-1.37	アスファルテン分（mass%）	0.0
密度（15℃）（g/cm ³ ）	0.925		

表-3 再生混合物の配合（改質Ⅱ型再生骨材）

種 類		Pen=14			Pen=20			Pen=27		
再生骨材配合率		30%	50%	70%	30%	50%	70%	30%	50%	70%
配合割合 (%)	再生骨材	30.0	50.0	70.0	30.0	50.0	70.0	30.0	50.0	70.0
	6号碎石	26.5	19.5	12.0	27.5	21.0	14.5	28.0	21.5	15.0
	7号碎石	14.5	10.0	6.5	15.0	11.0	7.5	13.0	8.5	4.0
	粗砂	26.0	19.0	11.5	24.0	16.5	8.0	26.0	18.5	10.5
	石粉	3.0	1.5	－	3.5	1.5	－	3.0	1.5	－
	最適アス量※	6.00	5.90	5.80	5.90	5.80	5.70	5.80	5.70	5.60
	新アス (60/80)	4.00	2.56	1.12	3.98	2.60	1.21	3.96	2.63	1.28
	旧アス	1.62	2.71	3.80	1.70	2.84	3.98	1.67	2.78	3.90
	再生用添加剤	0.38	0.63	0.88	0.22	0.36	0.51	0.17	0.29	0.42

※最適アス量は各配合で配合設計を行い求めたもの

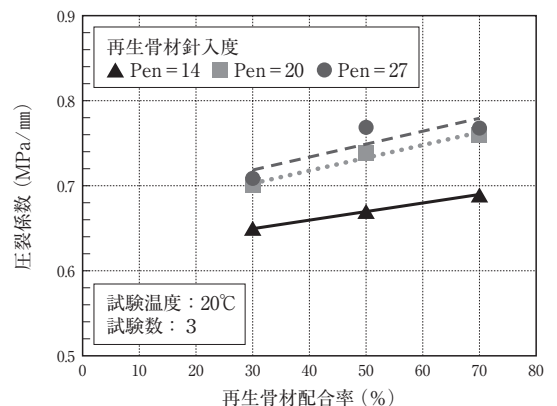


図-2 再生混合物の圧裂係数

既往の研究によると、再生骨材配合率の増加と再生骨材の針入度低下によって再生アスファルト舗装のひび割れが増加することが明らかになっている⁴⁾。

しかしながら、本研究の結果では再生骨材の配合率と劣化程度は様の傾向を示していない。また、針入度の低い再生骨材を使用した再生混合物は圧裂係数が低下しているため、既往の研究結果とも異なる傾向を示している。このため、圧裂係数によって再生骨材の針入度の影響を評価することは困難であると考えられる。

また、わが国では再生混合物の評価指標としてはマーシャル安定度の基準値と設計圧裂係数がある。前者は60℃、後者は20℃における試験から得られる値であるが、アスファルトの粘弾性性状は温度によって大きく変化する。

図-3は再生アスファルトの温度と針入度の関係を確認した結果である。改質Ⅱ型を室内で熱劣化させて

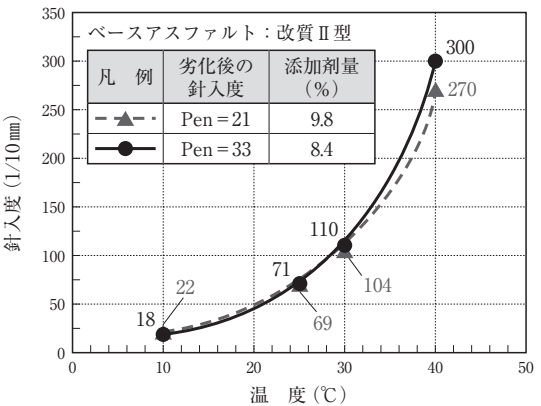


図-3 再生アスファルトの温度と針入度の関係

針入度を21 (Pen = 21) と33 (Pen = 33) にした後にそれぞれ再生用添加剤を添加して針入度を70に調整し、温度別に針入度を測定した。この結果、再生用添加剤によって25℃の針入度を同値に調整しても劣化が進行したアスファルト (Pen = 21) は、高温では硬質化し、低温では逆に軟質化する傾向にあることが分かる。

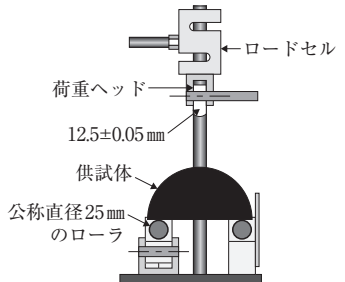
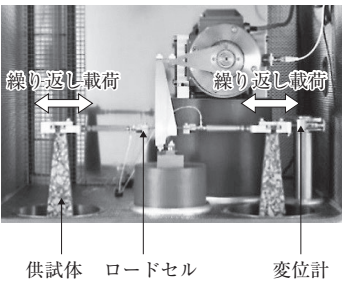
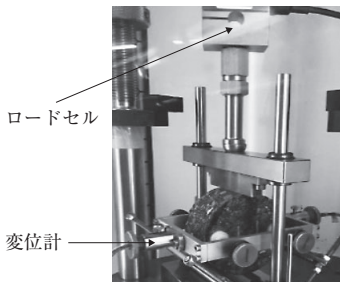
したがって、再生混合物の力学性状を評価するには様々な温度域で試験を行う必要があるため、本研究では表-4に示すとおり、常温域 (25℃)、高温域 (40℃)、低温域 (10℃) の3つの温度域において再生混合物の評価試験を実施した。

常温域における評価は、米国イリノイ州で用いられている再生混合物の評価方法を参考とした。

ここでは、25℃で実施する「Semi-circular bending beam test: AASHTO TP 124-18⁵⁾」(以下、SCB試験) から求まる柔軟性指数 (FI) によってひび割れ抵抗性を評価していることから⁶⁾、この方法を採用しひび割れ抵抗性を評価した。

アスファルト舗装のひび割れのひとつに、路面の車輪走行位置付近の縦方向に発生するトップダウン型のひび割れ (わだち割れ) がある。これは、発生する時季が主に夏季と考えられており、劣化した混合物の場合は、40～50℃においてひび割れの進行が大きいとの報告がある⁷⁾。このため、再生混合物は高温域で硬質化している懸念があることから、40℃における疲労抵抗性を確認した。

表-4 評価試験方法

評価項目	ひび割れ抵抗性	高温域の疲労抵抗性	低温域の疲労抵抗性
試験略称	SCB試験	2点繰り返し曲げ試験	NAT-SCB試験
試験名称	Semi-circular bending beam test	Two-point Bending Test on Trapezoidal Shaped Specimens	Nottingham Asphalt Tester (NAT) と SCB試験の組合せ
試験方法	AASHTO TP 124-18	BS EN12697-24	BS EN 12697-23
試験条件	試験温度 25℃	試験温度 40℃	試験温度 10℃
	载荷速度 50 mm/分	载荷速度 25Hz	载荷速度 2Hz
	制御方法 荷重制御	制御方法 ひずみ制御	制御方法 荷重制御
試験概要		ひずみ量 500μ	荷重 1600N
		波形 正弦波	波形 ハーバーサイン
			

混合物の疲労抵抗性の評価方法には試験法便覧 B018T の曲げ疲労試験が用いられるが、試験機の構造上、高温では試験を行うことができない。そこで、本研究では高温域（40℃）における疲労抵抗性の評価が可能であり、フランスで広く用いられている 2 点繰り返し曲げ試験（Two- point Bending Test on Trapezoidal Shaped Specimens: BS EN12697-249）⁸⁾ を適用した。

混合物の疲労抵抗性の評価には曲げ疲労試験が広く用いられる。しかし、図-3 に示すとおり、再生骨材の針入度が低下するほど再生アスファルトは低温域では軟質化し、それに伴って再生混合物のスティフネスが低下すると考えられる。混合物のスティフネスが小さい場合は、ひずみ制御方式の曲げ疲労試験を適用すると応力負荷が軽減されるため、疲労破壊回数が増加する現象が起きる場合がある⁹⁾。

そこで、本研究では応力制御方式による繰り返し載荷試験ができる Nottingham Asphalt Tester を使用した Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) 試験 (BS EN 12697-24)¹⁰⁾ と、曲げと引張の破断作用をもたらす SCB 試験を組み合わせた試験（以下、NAT-SCB 試験）を考案し、再生混合物の低温域における疲労抵抗性を評価した。

3.2 常温域における評価方法

SCB 試験は曲げ破断と引張破断を複合した破壊作用を評価する試験であり、表-4 に示す載荷装置と試験条件で行う。評価は SCB 試験の変位-荷重曲線から、式(1)を用いて柔軟性指数 (FI) を求める。

$$FI = \frac{G_f}{m} \quad (1)$$

$$G_f = \frac{W_0}{A_{lig}} \quad (2)$$

ここに、 G_f : 破壊エネルギー、 A_{lig} : 供試体の破断面積、 W_0 : 破壊仕事量、 m : ピーク荷重後の傾きとする。 W_0 は破断までの荷重-変位曲線の面積、 m は降伏点と下部変曲点の変位中央値における接線の傾きである (図-4 参照)。

再生骨材配合率と柔軟性指数 (FI) の関係を図-5 に示す。再生骨材の針入度が低いものは柔軟性指数 (FI) が小さく、再生骨材配合率の増加に伴い柔軟性指数 (FI) の一様な低下傾向が認められた。

3.3 高温域における評価方法

高温域の疲労抵抗性を評価する試験として実施した 2 点繰り返し曲げ試験結果を図-6 に示す。再生骨材配合率が 10% 増加すると疲労破壊回数は約 5 % 低下し、再生骨材の針入度が 20 から 14 になると疲労破壊

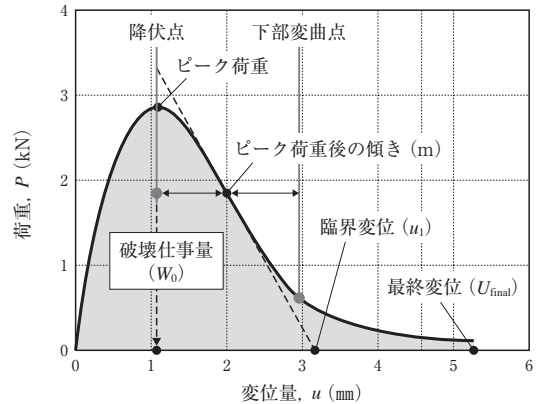


図-4 SCB 試験の変位-荷重曲線

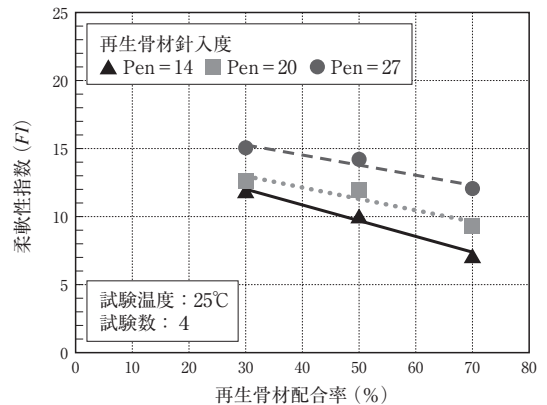


図-5 再生骨材配合率と柔軟性指数 (FI) の関係

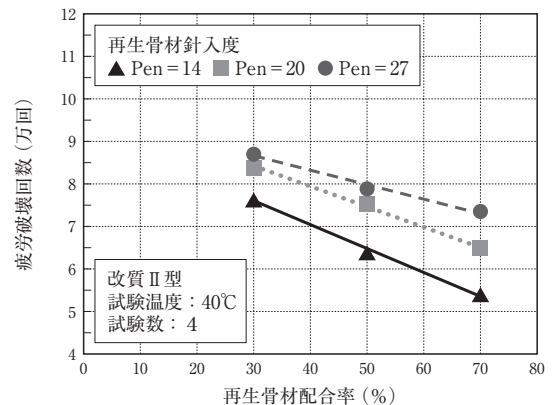


図-6 高温域における再生混合物の疲労特性

回数は10～15%低下した。

この試験から得られた再生混合物のスティフネスを図-7に示す。再生骨材配合率が同じ場合、再生混合物のスティフネスが大きいもののほど疲労破壊回数が低下する傾向が見られた。このことは、再生用添加剤を添加して針入度を70に調整したことで常温域（25℃）の硬さは同等となったが、高温域（40℃）では脆性が改善されずに疲労抵抗性が低下したと考えられる。

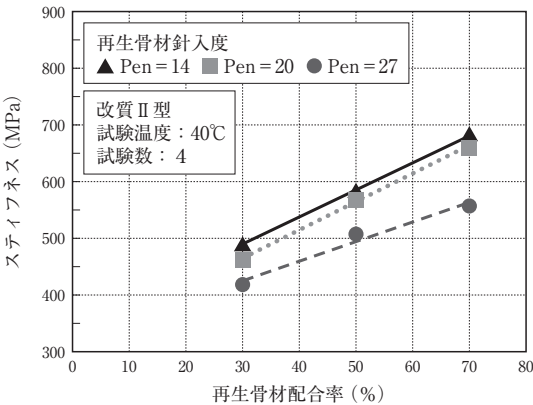


図-7 高温域における再生混合物のスティフネス

3.4 低温域における評価方法

検討の初めに、高温域における検討で用いたものと同じ再生混合物に対して、表-5に示す試験条件でB018T曲げ疲労試験を行った。この結果は図-8に示すとおりであり、再生骨材配合率が増加すると疲労破

表-5 B018T曲げ疲労試験の試験条件

試験温度	荷重速度	ひずみ量	波形
10℃	5Hz	400μ	正弦波

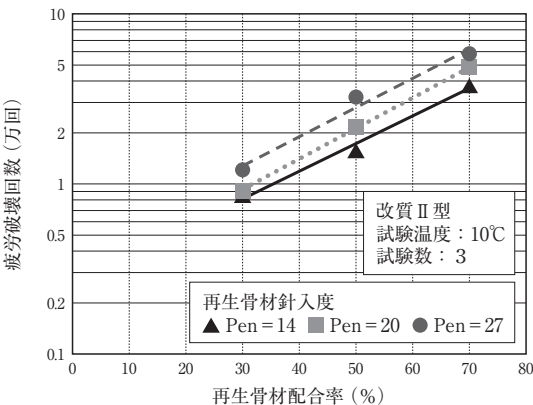


図-8 B018T曲げ疲労試験の結果

壊回数も増加する傾向が認められた。しかし、実路の破損状況は配合率の増加に伴いひび割れ発生率が増加する傾向があり¹¹⁾、この結果は実路の破損状況とは異なると言える。

このようにB018T曲げ疲労試験では、再生骨材の配合率が再生混合物に及ぼす影響を適切に評価することが難しいと判断されたため、本研究ではNAT-SCB試験により、再生混合物の低温域における疲労特性を評価した。

NAT-SCB試験により10℃における疲労抵抗性を確認した結果は図-9に示すとおりであり、再生骨材の配合率や針入度の低下に伴い一様の低下が認められた。

具体には再生骨材配合率が10%増加すると疲労破壊回数は約20%低下し、再生骨材の針入度が20から14になると疲労破壊回数が20～50%低下した。

また、NAT-SCB試験から得られたスティフネスの結果(図-10)は、図-9の疲労破壊回数の結果と同様の傾向を示していることから、疲労抵抗性の低下に

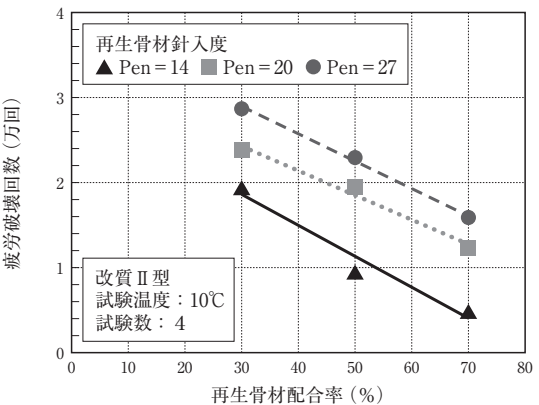


図-9 低温域における再生混合物の疲労特性

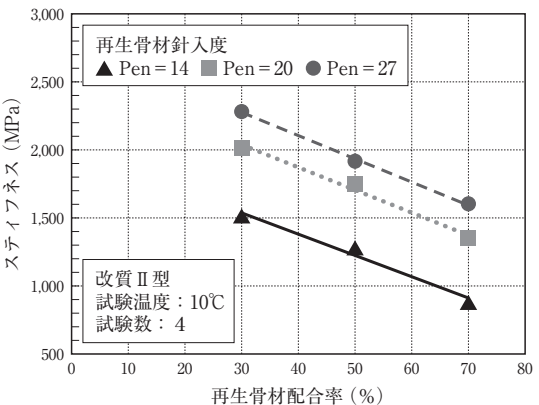


図-10 低温域における再生混合物のスティフネス

はスティフネスの低下が影響したものと考えられる。

4. 再生混合物の製造方法の改良

4.1 再生用添加剤の事前添加方式

実機工場における再生混合物の製造方法は、再生用添加剤を再生骨材に直接添加している（以下、標準添加方式）が、再生用添加剤の浸透状態は時間経過とともに変化することが推測される。

そこで、本研究では実機工場の再生骨材を使用し、再生用添加剤を添加した後に養生時間を変えて再生混合物を製造することで、再生用添加剤の浸透状態の影響を確認した。

再生骨材加熱後に再生用添加剤を添加し、サージビン内で養生する方法では再生混合物の熱劣化が懸念されることから、常温で再生用添加剤を添加して養生を行い、その後、再生混合物を製造する方法（以下、事前添加方式）を採用した。標準添加方式と事前添加方式の違いを図-11に示す。

標準添加方式では再生骨材を加熱した後に再生用添加剤を添加して（以下、加熱後添加）製造するのに対し、事前添加方式では、常温状態の再生骨材に再生用添加剤を添加して20℃で養生した後に加熱し、再生混合物を製造する（以下、加熱前添加）。

しかし、実機工場では入荷する再生骨材の性状は日々変化するため、再生用添加剤の添加量を微調整できるように全添加量の約3割を加熱後添加とし、加熱前添加と加熱後添加を併用する方法とした（表-6）。

実機工場で採取した再生骨材の性状と再生混合物の配合を表-7、表-8に示す。さらに再生用添加剤は、その組成が混合物性状に影響を及ぼすことが既往の研究に示されていることから、本研究では表-9に示す組成の異なる3種の再生用添加剤を使用し、常温域（25℃）ではSCB試験、高温域（40℃）では2点繰り返し曲げ試験、低温域（10℃）ではNAT-SCB試験を行った。

4.2 事前添加方式の効果

SCB試験の結果を図-12に示す。養生期間（養生温度20℃）が長くなると各再生用添

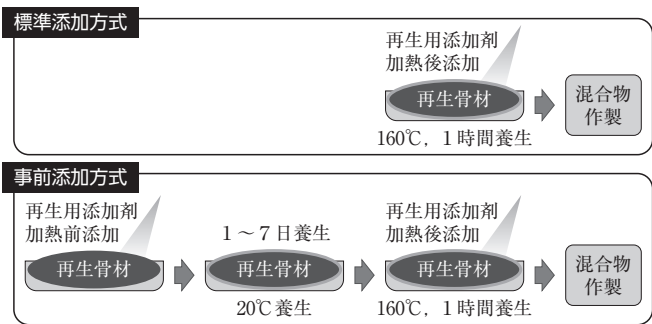


図-11 標準添加方式と事前添加方式

表-6 添加方式と養生条件

添加方式		添加温度	添加量 (%)	養生期間
標準添加方式	加熱後添加※2	160℃	19.6	1 時間
	加熱前添加※1	20℃	15.6	1 日, 3 日, 7 日
事前添加方式	加熱後添加※2	160℃	4.0	1 時間

※1 加熱前添加：再生骨材を加熱前に添加剤を添加する方法
※2 加熱後添加：再生骨材を加熱後に添加剤を添加する方法

表-7 再生骨材性状

項 目	性状値
通過質量百分率 (%)	13.2 mm 100.0
	4.75 69.3
	2.36 50.7
	0.6 31.5
	0.3 23.5
	0.15 16.0
	0.075 10.1
アスファルト量 (%)	4.84
針入度 (1/10 mm)	12
軟化点 (℃)	73.5

表-8 混合物配合

項 目	配合 (%)
再生骨材	49.7
6 号 砕 石	17.9
7 号 砕 石	8.5
スクリーニングス	6.6
粗砂	13.2
石粉	0.9
最適アス量	5.80
新アス (ストアス 60/80)	2.71
旧アス	2.58
再生用添加剤	0.51

表-9 再生用添加剤の性状と添加量

項 目			添加剤 A	添加剤 B	添加剤 C
動粘度 (60℃) (mm ² /s)			83.1	481.0	88.5
引火点 (℃)			274	326	268
薄膜加熱後の粘度比			1.08	1.10	1.06
薄膜加熱質量変化率 (%)			− 0.76	− 0.05	− 0.68
密度 (15℃) (g/cm ³)			0.928	0.974	0.908
飽和分 (mass%)			33.9	23.9	78.6
芳香族分 (mass%)			65.0	73.1	14.8
レジン分 (mass%)			1.0	2.8	5.0
アスファルテン分 (mass%)			0.1	0.2	0.9
添加量 (%)	標準添加方式	加熱後添加	19.7	28.8	24.2
	事前添加方式	加熱前添加	15.7	24.8	20.2
		加熱後添加	4.0	4.0	4.0

※添加量：針入度 70 となる再生用添加剤量

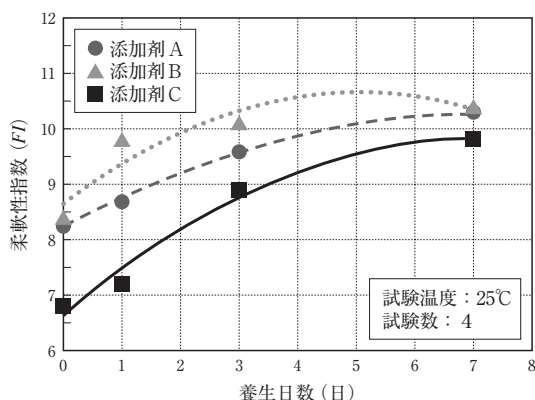


図-12 養生日数と柔軟性指数 (FI) の関係

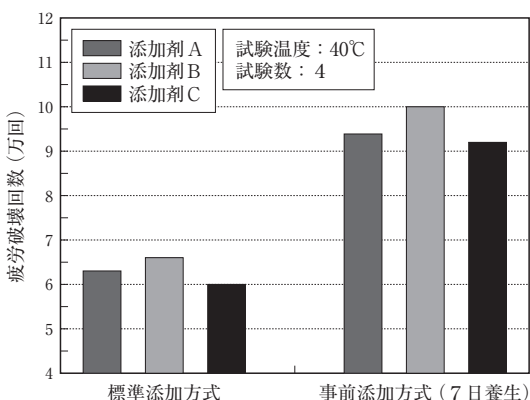


図-13 高温域の疲労抵抗性

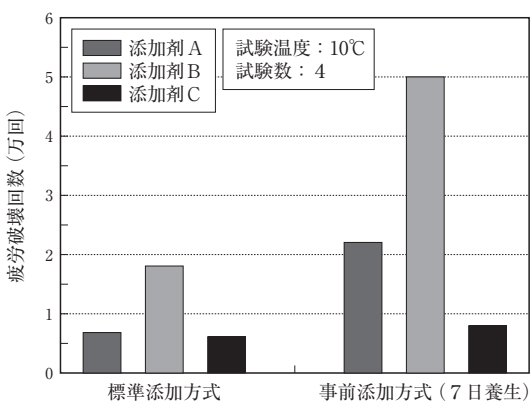


図-14 低温域の疲労抵抗性

加剤ともに柔軟性指数 (FI) は増加し、養生日数が3日では柔軟性指数 (FI) は標準添加方式よりも約30%増加することでひび割れ抵抗性が向上することが分かる。また、再生用添加剤の種類で比較すると、向上効果は添加剤B, A, Cの順序で優れ、養生日数が3日以降は柔軟性指数 (FI) の増加は少ないことから、養生期間は3日以上必要であることが分かる。

2点繰り返し曲げ試験 (高温域) と NAT-SCB 試験 (低温域) の結果は図-13および図-14に示すとおりであり、事前添加方式の疲労破壊回数は標準添加方式よりも約40～50%増加した。

3章において、再生骨材配合率が50%で再生骨材 (改質II型) の針入度が20から14に低下すると、疲労抵抗性は約20～50%低下 (図-6, 図-9) したが、事前添加方式を適用すると疲労破壊回数は約40～50%以上向上することから、針入度が低く劣化が進んだ再生骨材の品質を向上させる方法として非常に有効である。

再生用添加剤の種類に関しては、2点繰り返し曲げ試験 (高温域) では種類が変わっても破壊回数に大差がない。しかし、低温域の NAT-SCB 試験では添加剤Bが最も疲労抵抗性に優れ、添加剤BとCでは破壊回数が大きく異なる結果であった。この結果が再生用添加剤の成分の影響と仮定すれば、芳香族分の多い再生用添加剤が混合物性状の向上に優れると考えられる。

5. 実路における検証

前項の室内試験結果より、事前添加方式は再生混合物の疲労抵抗性を向上させることが確認できたことから、実機工場で製造した再生混合物の力学性状を確認するとともに、試験舗装を実施して施工性を確認した。

株式会社NIPPOの御殿場合材工場において、図-15に示す標準添加方式と事前添加方式 (7日養生) の2パターンで再生混合物 (配合は表-8参照) を製造した。再生混合物の試験舗装は実路 (芦ノ湖スカイライン) において実施した。試験舗装の概要を表-10に、使用した再生骨材と施工後の舗装路面の状況を図-16に示

表-10 試験舗装の概要

項 目		標準添加方式	事前添加方式
延長	(m)	40	40
幅員	(m)	3.6	3.6
舗装厚	(mm)	50	50
再生用添加剤量 (%)	加熱前	—	15.6
	加熱後	19.6	4.0
混合物種類	再生密粒度混合物 (13)		
再生骨材配合率	(%)	50	
混合物製造温度	(℃)	170	
初期転圧温度	(℃)	140	
二次転圧温度	(℃)	100	

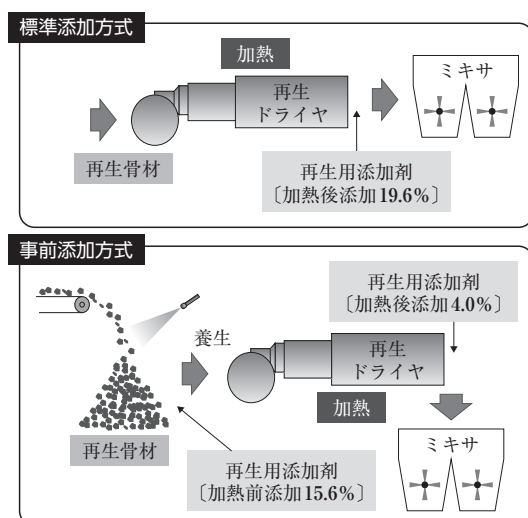


図-15 実機工場における添加方式の違い

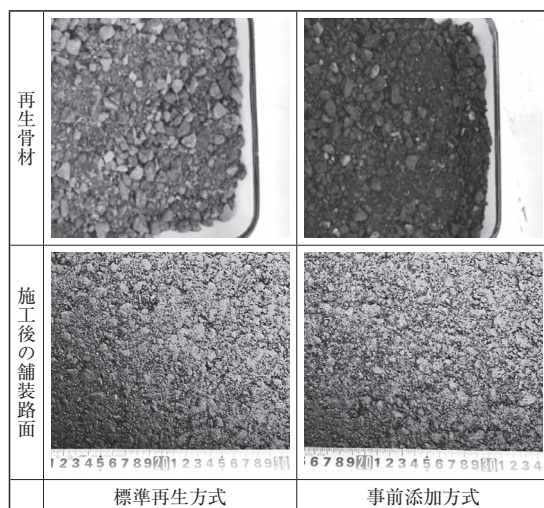


図-16 再生骨材および試験舗装後の舗装路面

す。事前添加方式は、再生用添加剤の影響で標準添加方式よりも黒色に変色しているが、施工性、転圧時の落ち着き、施工後の舗装表面はほぼ同等であった。

また、実機工場で製造した再生混合物のSCB試験結果は図-17に示すとおりであり、室内検証と同様に事前添加方式は標準方式と比較して柔軟性指数 (FI) が30%程度向上する効果が認められた。

また、温度条件を変えた2種の疲労試験の結果は図-18、図-19に示すとおりであり、事前添加方式にすることで高温域と低温域ともに標準添加方式と比較して疲労抵抗性が50%程度向上することが確認された。

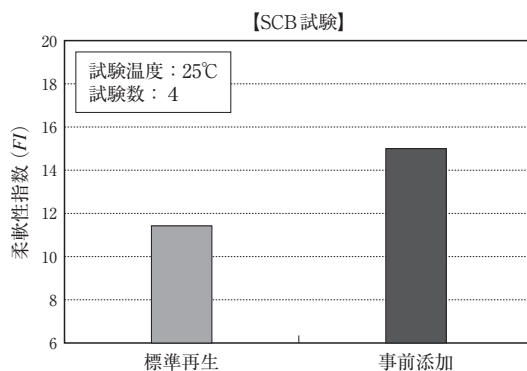


図-17 事前添加による柔軟性指数 (FI) の向上効果

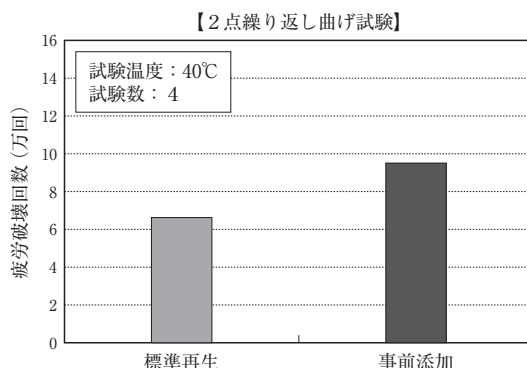


図-18 事前添加による高温域の疲労抵抗性向上効果

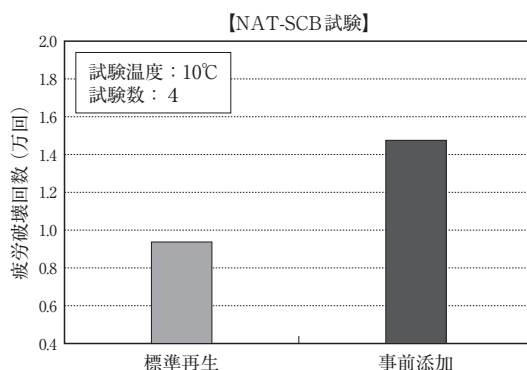


図-19 事前添加による低温域の疲労抵抗性向上効果

6. 結論

本研究では再生混合物の力学性状を評価するため、海外の試験方法およびその改良により、再生骨材の劣化程度や配合率、再生用添加剤の種類が再生混合物の力学性状に及ぼす影響を明らかにした。さらに、再生用添加剤の浸透性を高めるための再生混合物の製造方法を開発し、その効果を室内配合、実機工場製造、現場（実路）施工において検証した。

本研究で得られた結論を以下に示す。

①常温域（25℃）における再生混合物のひび割れ抵抗性を評価するためにSCB試験を用いた。室内で加熱劣化させて作製した再生骨材について、劣化程度と配合率を変化させて柔軟性指数（*FI*）を求めたところ、再生骨材の熱劣化が大きく、再生骨材配合率が増加するほど柔軟性指数（*FI*）すなわち、ひび割れ抵抗性が低下することが分かった。

②再生混合物の高温域（40℃）における疲労抵抗性評価には2点繰返し曲げ試験、低温域（10℃）における疲労抵抗性評価にはNAT-SCB試験を用いた。その結果、高温域では再生骨材配合率が10%増加すると疲労破壊回数は約5%低下し、再生骨材の針入度が20から14になると疲労破壊回数は10～15%低下すること、低温域では再生骨材配合率が10%増加すると疲労破壊回数は約20%低下し、再生骨材の針入度が20から14になると疲労破壊回数が約20～50%低下することが分かった。

さらに、再生骨材の針入度が低い場合は、再生骨材の配合率を低下することで再生混合物の疲労抵抗性を担保できる可能性が示された。

③再生用添加剤の浸透性を高めるために、常温状態の再生骨材に再生用添加剤を添加し、一定期間養生した後に加熱して再生混合物を製造する事前添加方式を考案した。実機工場で事前添加方式によって製造した再生混合物は、従来の標準添加方式と比べ、常温域におけるひび割れ抵抗性は約20%以上、高温域と低温域における疲労抵抗性は約40～50%向上することを明らかにした。さらに、実路で試験舗装を実施し、施工性や舗装表面は標準添加方式と同等であるが、ひび割れ抵抗性は標準添加方式よりも約20%向上することを確認した。

7. おわりに

半世紀にわたるリサイクルにより、規格外の再生骨材の増加が懸念される中、今後も再生事業を継続するには、低針入度再生骨材の活用は不可欠であり、再生混合物の具体的な品質向上方法が必要となる。本研究は適切な再生用添加剤を用い、添加後の養生期間を確保することで再生混合物の品質を約30～50%高める効果を見出したものであり、今後の低針入度再生骨材を活用する一助になることを期待する。今後は、実路

における耐久性や長期的な供用性などを検証し、再生混合物の評価方法の確立と品質向上を目指したい。

— 参考文献 —

- 1) 日本アスファルト合材協会：アスファルト合材統計年報（2019）
- 2) 新田弘之，佐々木巖，西崎到，川上篤史，久保和幸：アスファルト・コンクリート塊の持続的なリサイクル土木技術資料53-4（2011）
- 3) 高橋修，平澤佑太：品質基準を下回る再生骨材を使用した再生アスコンの性能評価に関する一検討 土学会論文集E1（舗装工学），Vol.74，No.3（2018）
- 4) 中村俊行，久保和幸，東嶋奈緒子：アスファルト発生材の再生限界に関する試験調査，第20回日本道路会議，779（1993）
- 5) Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using the Flexibility Index Test. AASHTO TP 124-18
- 6) Imad L. Al-Qadi, Hansen Ozer, John Lambros：Testing Protocols to Ensure Performance of High Asphalt Binder Replacement Mixes Using RAP and RAS, Research Report No.FHWA-ICT-15-017
- 7) 吉田武，寺田剛，新田弘之：舗装の機能的破損に関する研究，平成14年度土木研究所成果報告書（2002）
- 8) Two-point Bending Test on Trapezoidal Shaped Specimens, BS EN 12697-249
- 9) 横山実玲，志賀義伸，森俊八：特殊弾力性アスファルトを用いた薄層SMAの適用性，第33回日本道路会議（2019）
- 10) Bituminous Mixtures -Test methods for hot mix asphalt Part 24:Resistance to fatigue, BS EN 12967-24：2012
- 11) 安崎裕，片倉弘美，高木信幸：再生加熱アスファルト混合物の供用性評価，土木技術資料31-9（1989）

問い合わせ先

〒331-0052 埼玉県さいたま市西区三橋6-70
株式会社NIPPO 総合技術部 技術研究所
研究第二グループ 末原 俊史
TEL：048-624-0755 FAX：048-624-0797
E-mail：suehara_toshihumi@nippo-c.jp

PIARCによるケーススタディ集から読み解く舗装再生やリサイクル材の舗装適用に関する海外の現状

アスファルト混合物の配合試験法に関する調査報告

アスファルト舗装技術研究グループは、アスファルト舗装に関わる様々な機関に所属する若手技術者や研究者で構成されています。研究グループでは、国際会議の投稿論文の輪読を中心に、海外の舗装技術の動向について調査する班と、テーマを決めて様々な舗装技術や試験法についてその詳細や変遷を調査する班に分かれて活動をしています。班活動を中心に年に6回ほど意見交換をしながら、情報共有や議論を重ねて本稿のような報告書を取りまとめています。

研究グループの調査対象として、DXやカーボンニュートラルに関連したものなど、いわゆる流行りの技術について取り上げることもあります。が、「なぜこの条件で試験をするのか」「なぜこの試験法・技術が汎用的になったのか」という視点で、現行の試験法や舗装技術を取り上げることもあります。私たちが日頃の業務や研究で当たり前のように用いている現行の手

法は、先人たちの経験や知見によって確立されたものです。その成り立ちや変遷を知ることが、現行試験法の妥当性について理解するだけでなく、今後私たちが新たな舗装技術や評価指標を確立していく上での考え方を学ぶことになると思っています。

本稿では、海外動向に関する報告としては、PIARCが発刊した舗装技術のケーススタディ集を題材としております。各国で舗装再生を適用する背景やリサイクル材活用法について、選定したケーススタディを精読して抄訳整理を行いました。また、配合設計に関わる各種試験法をテーマとして、マーシャル安定度試験が汎用的な手法になった経緯や、特殊な混合物の配合設計、海外の配合設計法についての調査報告をまとめております。

(研究グループ代表幹事：川島 陽子)

アスファルト舗装技術研究グループ名簿

川島 陽子 (国研) 土木研究所材料資源研究グループ

安藤 秀行* 出光興産(株)アスファルト技術課
 安藤 良樹 ニチレキ(株)技術研究所
 掛札さくら (国研) 土木研究所道路技術研究グループ
 金澤 裕貴 (国研) 土木研究所材料資源研究グループ
 木村 航 日本道路(株)技術研究所
 熊坂 理紗 大成ロテック(株)技術研究所
 小池千絵美 世紀東急工業(株)製造管理部関東製品試験所
 小早川尚之 ENEOS(株)中央技術研究所
 佐藤 慎輔 (株)高速道路総合技術研究所道路研究部
 澤山 拓 出光興産(株)アスファルト技術課
 新堀 詩織 大林道路(株)技術研究所
 園田 涼 東亜道路工業(株)技術研究所
 高橋 伸武 日進化成(株)技術研究所

野本 真兵 前田道路(株)技術研究所
 碓 真悠 ニチレキ(株)道路エンジニアリング部
 濱野 悠弥 日本道路(株)技術研究所
 平松 大銘 日本道路(株)技術研究所
 廣田 哲人 世紀東急工業(株)技術研究所
 福田 嘉子 (一社) 日本道路建設業協会道路試験所
 福山 菜美 (国研) 土木研究所材料資源研究グループ
 藤井 洋志 日本道路(株)技術研究所
 細野 裕貴 昭和瀝青工業(株)技術センター
 室井 和也* (国研) 土木研究所道路技術研究グループ
 好見 絵里 鹿島道路(株)技術研究所
 綿谷 成恭 出光興産(株)アスファルト技術課

*) 班長 (2022年9月現在)

PIARCによるケーススタディ集から読み解く 舗装再生やリサイクル材の舗装適用に関する海外の現状

安藤 秀行 安藤 良樹 木村 航 掛札 さくら 熊坂 理紗
新堀 詩織 澤山 拓 高橋 伸武 野本 真兵 裕 真悠
濱野 悠弥 平松 大銘 綿谷 成恭

はじめに

アスファルト舗装技術研究グループ海外文献班では、海外のアスファルト技術に関する最新技術やニーズの調査を目的に、国際会議などで公表された論文を読み込み、その紹介を行っている。グループメンバーは主に舗装に携わる若手技術者から構成され、調査した内容の整理と投稿原稿の作成過程で若手技術者同士が議論を交わし、自らの知識や読解力、情報収集した内容に関する発信スキルのレベルアップを目指している。今年度は、世界道路協会（World Road Association、通称PIARC）によって2022年に発行されたケーススタディ集『Use of Recycled Materials In Pavements. A PIARC Case Studies Collection（Technical Committee 4.1 Pavement）』に記載の技術検討事例22報について精読した。

1. PIARCと紹介文献の概要

PIARCは、道路と道路交通分野における国際的協力の推進、発展を目的とした、道路交通分野で最も歴史のある非営利団体の国際機関であり、世界120か国以上が加盟している。PIARC活動の中心に位置づけられている技術委員会には、日本からも多くの土木技術者や専門家が参加しており、日本もアジア地域においてPIARC活動をリードし続けている。

本稿で紹介するケーススタディ集では、リサイクル材の舗装への適用に関する世界各国の検討事例が紹介されている。ケーススタディ投稿国を図-1に示す。欧州を中心に、アメリカや南米、アフリカやアジアなど様々な国から事例が投稿されており、日本からも再生用添加剤と旧アスの混合における均一性に関する検討と、繰り返し再

生した再生アスファルト混合物に関する検討の2報が掲載されている。各国を代表する技術検討がPIARCの技術委員会の査読を経て掲載されていることから、当該ケーススタディ集は技術的に価値が高い文献であると考えられる。また文献ではアスファルトの舗装再生に関するケーススタディが多く、海外の舗装再生の事情についても知ることができる。国内では、舗装再生便覧が改訂される予定であり、今後舗装再生への関心や技術検討が更に深まっていくものと推察されることから、紹介する意義があると考えた。

今年度は、表-1に示すアスファルト舗装に関するケーススタディについて網羅的に読み、それぞれ以下に示す3つの観点でまとめた。

- 舗装再生や再生骨材の適用研究を行う背景
- 各国の再生アスファルトの適用条件について
- リサイクル材の活用に関する技術例

本稿が読者にとって、世界各国の舗装再生やリサイクル材の活用に関する理解の助けや、これらに興味を持つきっかけとなれば幸甚である。

本稿で紹介するケーススタディ集は、PIARCの無料



図-1 ケーススタディの投稿国

表－１ 海外文献班で選定したケーススタディ

事例番号	投稿国	論文名（原題）	論文名（訳題）
3.1	コートジボワール	Preliminary Studies For The Akoupe - Kotobi - Bongouanou Road Project	アクーブ、コトビ、ボングアヌーの道路プロジェクト予備調査
3.2	フランス	The MURE Project	MURE 計画
3.3	フランス	Recytral - Recycling With Bio - Emulison	レシタールーバイオエマルジョンによる再生
3.4	ポルトガル	Cold In-Place Stabilization With Foamed Bitumen: Rehabilitation Works In The Regional Road ER361 Between Amiais De Cima And Alcanena	フォームドアスファルトを用いた常温原位安定処理：地方道路ER361（ポルトガル Amiais De Cima～Alcanena）の修繕
4.1	フランス	BioRePavation Project : Bio-Recycling of Old Asphalt Layers	Bio Re Pavation 計画：古くなったアスファルト舗装のバイオ再生
4.2	スペイン	Recycling Half-Warm Mix With Total Tax of RAP in Plant. A-1 Highway Autovía de Arlanzón, Burgos.	プラントにて再生骨材を用いた中温化アスファルトの再利用。ブルゴス州アルランソンでの高速道路A-1線での実験
4.3	ポーランド	Pavement With Increased Amount of Reclaimed Asphalt National Road No.78, Naglowice	再生骨材の量が増えた国道78号線、ナグロヴィツェ
4.4	アメリカ	Cold In-Place And Central-Plant Recycling of Asphalt Pavements In Virginia	バージニア州におけるアスファルト舗装の常温式路上再生方式および中央プラントリサイクル方式
4.5	スウェーデン	Reclaimed Asphalt In Wearing Courses	摩耗層における再生アスファルト混合物
4.6	南アフリカ	Sustainable Road Rehabilitation Solution Using Reclaimed Asphalt: Camps Bay Drive Case Study	再生アスファルトを用いた持続可能な道路改修ソリューション：キャンパス・ベイ・ドライブの事例
4.7	ブラジル	Cold Recycled Asphalt Mixture With Emulsified Asphalt-Recycling Agent	乳化アスファルトリサイクル剤を含む常温リサイクルアスファルト混合物
4.8	ギリシャ	Field Performance of Cold in Depth Recycled Heavy Duty Pavements.	重交通道路における常温路上再生工法の現場性能
4.9	アルゼンチン	Recycling And Reuse of Asphalt Mixes : Camino Del Buen Ayre Highway Project	アスファルト合材のリサイクルと再利用：Camino Del Buen Ayre 高速道路の計画
4.10	ノルウェー	The Info Center For Recycling of Asphalt	アスファルトリサイクル情報センター
4.11	ノルウェー	Experiences With RAP As Aggregates In Polymer Modified Asphalt Wearing Courses.	再生骨材のポリマー改質アスファルト表層混合物への適用に関する検討
4.14	チェコ	Use of Crumb Rubber Modified Bitumen In Asphalt Layers	アスファルト層におけるクラムラバー改質アスファルトの適用
4.15	アメリカ	Laboratory And Field Evaluation of Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). In Hot Climate: Case Study From Phoenix, Arizona	高温気候における再生アスファルト舗装を含むアスファルト混合物の室内および現場評価：アリゾナ州フェニックスの事例研究
4.16	スイス	High Modulus Asphalt Incorporating High Percentage of Reclaimed Asphalt And Produced According To Warm Mix Asphalt Technology	高い割合で再生骨材を使用し、中温化技術によって製造された高モジュラスアスファルト混合物
6.1	ベルギー	Cold Recycling of Asphalt In A Base Layer	基層でのアスファルトの常温リサイクル
7.1	イタリア	Recycling Practices For Airport Pavement Construction	空港舗装工事におけるリサイクルの実践
7.2	アメリカ	Economical Concrete With Recycled Concrete Aggregate Provides Broader Sustainability Benefits In Texas	再生コンクリート骨材を使った経済的なコンクリートがもたらす持続可能性における利点
7.3	オーストラリア	Government Strategies To Encourage The Use of Recycled Material In Australia	オーストラリアにおけるリサイクル材の利用を促進する政府戦略

会員登録を行うことで、下記のURLから無償でダウンロードすることができる。

(<https://www.piarc.org/en/order-library/37076-en-Use%20of%20Recycled%20Materials%20in%20Pavements%20-%20Case%20studies>)

また、本文中に示す図や表は、原文から引用しており、翻訳のために一部改変している。

2. 舗装再生や再生骨材の適用研究を行う背景

2.1 日本における適用研究背景

日本では、戦後の急速な経済成長を支える基幹的な社会資本として道路の整備が促進され、1956年には2万kmに満たなかった舗装道路も、1980年代には簡易舗装を含めて延長が50万km以上になった¹⁾。国内の道路延長の増大に伴い、維持修繕の際に発生する舗装発生材の適切な処分地の確保が年々困難になってき

たことから、舗装再生技術の開発が社会的に要請されるようになった。このような背景から、(社)日本道路協会は、舗装発生材を再利用する場合の技術指針として1984年に「舗装廃材再生利用技術指針(案)²⁾」を作成した³⁾。このころから、日本でのアスファルト混合物の再生利用が本格的に始まった。その後、1991年には「再生資源の利用の促進に関する法律」が施行され、舗装発生材も建築副産物として再資源化の要請がされた。2000年には「国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律(グリーン購入法)」により特定調達品目として再生骨材等の利用が示されることで、舗装の再生利用を促進する取り組みは年々推進されるようになった。再生骨材の活用によって、新規アスファルトおよび新規骨材の使用量削減、舗装工事の低コスト化が期

待できるため、広く使用され、また積極的な利用も推進されている。さらに、再生骨材の適用に関する技術開発はさらに発展しており、新たな再生技術についても多く報告されている。

2.2 海外における適用研究背景

海外でも再生骨材の舗装への適用が行われているが、再生骨材が利用されるようになった背景は日本とは異なるものと考えられた。そこで、本節では、前節表-1に示すPIARCケーススタディに記載されている研究の背景に着目して整理を行った。表-1に、文献から読み取れた舗装再生や再生骨材適用の研究を行う背景の一覧を示す。再生骨材の使用がどのような点に貢献するのかに着目すると、「CO₂削減」および「資源の有効活用」の2つに大別された。

表-1 ケーススタディから読み取れた舗装再生や再生骨材適用の研究を行う背景

事例番号	投稿国	論文名(原題)	貢献対象	舗装再生やリサイクル材適用の研究を行う背景
3.3	フランス	Recytral - Recycling With Bio - Emulsion	CO ₂ 削減 資源活用	地球環境を改善するために制定された持続可能・環境条約(2009-2017)およびエネルギー転換法を遵守するため。
3.4	ポルトガル	Cold In-Place Stabilization With Foamed Bitumen: Rehabilitation Works In The Regional Road ER361 Between Amiais De Cima And Alcanena	CO ₂ 削減 資源活用	フォームドアスファルトを使った常温現位置再生工法を採用することで、環境負荷の低減(砕石などの原材料や化石燃料に頼ったアスファルトプラントでの生産を必要としない)ができるため。
4.1	フランス	BioRePavation Project : Bio-Recycling of Old Asphalt Layers	資源活用	植物素材を用いた代替アスファルト等を使用してアスファルト舗装の再利用化を図ることで、再生可能資源を増やし、環境への負担を低減するため。
4.5	スウェーデン	Reclaimed Asphalt In Wearing Courses	CO ₂ 削減	2017年にスウェーデンの国会が制定した法令のターゲット「2045年に温室効果ガスを実質ゼロにする」を達成するため。
4.6	南アフリカ	Sustainable Road Rehabilitation Solution Using Reclaimed Asphalt: Camps Bay Drive Case Study	資源活用	ケープタウン市が大量に備蓄している高品質な骨材および旧アスファルトからなる再生骨材を有効活用するため。
4.10	ノルウェー	The Info Center For Recycling of Asphalt	CO ₂ 削減 資源活用	再生骨材の発生量や使用量、貯蔵量などを集計する統計センターを2001年に設立し、再生骨材の再利用促進によって環境税の回避し、最終的には発生する全再生骨材の80%を舗装に再利用できるようにするため。
4.11	ノルウェー	Experiences With RAP As Aggregates In Polymer Modified Asphalt Wearing Courses.	CO ₂ 削減	再生骨材の適用範囲を改質アスファルト混合物にも広げることで、ノルウェーが掲げる目標である「2030年までに、道路の建設・保全にかかる温室効果ガス排出量を1990年比で50%低減」に貢献するため。
4.15	アメリカ	Laboratory And Field Evaluation of Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). In Hot Climate: Case Study From Phoenix, Arizona	資源活用	再生骨材の再利用による新規骨材と新アスファルトの節約、それに伴うコストやエネルギー消費量削減のため。
4.16	スイス	High Modulus Asphalt Incorporating High Percentage of Reclaimed Asphalt And Produced According To Warm Mix Asphalt Technology	CO ₂ 削減	製造温度の低下や再生骨材の高含有化を進めることで、エネルギー消費や環境負荷の少ないアスファルト混合物の製造につながると考えているため。
7.2	アメリカ	Economical Concrete With Recycled Concrete Aggregate Provides Broader Sustainability Benefits In Texas	CO ₂ 削減 資源活用	コンクリート舗装由来の骨材を使って新たに舗装することで、大幅なコスト削減および、新材使用量の低減につながるため。
7.3	オーストラリア	Government Strategies To Encourage The Use Of Recycled Material In Australia	CO ₂ 削減 資源活用	再生骨材の利用は、採取・輸送コストの削減と環境負荷の低減に貢献するため。

(1) CO₂削減について

CO₂削減を目的とした舗装再生の適用については、特にEU加盟国の報告において述べられていた。EU各国では、国同士が締結した条約や、自治体が施行する法令など、具体的な数値目標があり、これらの達成に向けて様々な分野で取り組みが行われている傾向があった。ここでは、スウェーデンとノルウェーを例に挙げる。

①スウェーデン

スウェーデンは2045年に温室効果ガスを実質ゼロにするといった気候に関する法令を制定した。これを受けて、スウェーデンの道路局は、再生合材を利用することでその目標の一助になるとした。ケーススタディでは、表層に再生骨材を使うための規格の暫定案見直しについて紹介している。

②ノルウェー

ノルウェーでは、2001年に環境税の回避を目的に、道路管理者とアスファルト生産者が「アスファルトリサイクル情報センター」という機関を設立した。この機関の主な活動は、再生アスファルト舗装材料の回収と再生利用を促進すること、およびノルウェー国内の再生アスファルト舗装材料の再生率を把握することである。ケーススタディは、この機関についての紹介である。

(2) 資源の有効活用について

ケーススタディから読み取れた舗装再生やリサイクル材適用の研究を行う背景として、CO₂削減の他に、「資源の有効活用」があった。以下に例を記す。

①アメリカ

再生骨材を適用することで、新規アスファルトや新規骨材の消費量を削減し、コスト削減やエネルギー消費量削減を目的としていた。

②南アフリカ

大量備蓄されている再生骨材が高品質の材料であるとして、有効活用のために再生骨材を適用していることが読み取れた。おそらく、南アフリカは舗装の再生利用が始まっていない、もしくは始まって年月が経っておらず再生骨材の繰り返し利用による劣化が生じていないと考えられる。そのため、ケーススタディでは、旧アスファルトの劣化が進行していない再生骨材を有効に活用することを目的としていると推測される。

③フランス

フランスでは、高品質な舗装再生を実現するため、舗装再生時に使用する再生用添加剤や新規アスファ

ルトの代替として、植物由来の原料を用いた材料開発を行っていた。ケーススタディでは、これらを適用した再生混合物の試験結果を報告している。

2.3 まとめ

文献から読み取れた舗装の再生利用の背景をまとめると、CO₂削減、もしくは資源の有効活用の2つに分類できた。

CO₂削減を研究背景とする国は、特にEU諸国が多かった。これらの国々では、日本よりも具体的かつ定量的な目標を掲げているように読み取れた。

一方、資源の有効活用については、その目的や背景が、日本と非常に似ていると感じた。特にアメリカのような資源が豊富な国においても、骨材やアスファルトなどの節約や有効活用を目指した検討例があり、意外であった。こういった国々では、自国の資源の豊富さに関わらず、脱石油の推進によるアスファルトの供給減少や、良質な骨材の枯渇に備える意識が高いのかもしれない。

現在日本の舗装分野で促進されている資源の有効活用に加え、世界全体の課題であるCO₂削減への取り組みに注目していきたい。

—— 参考文献 ——

- 1) 国土交通省HP：道路統計年報2022 道路の状況「表1-2 道路状況の推移(その2)」, <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/2020/nenpo02.html> (参照日：2022年10月4日)
- 2) (社)日本道路協会：舗装廃材再生利用技術指針(案), 1984.
- 3) (社)日本道路協会：プラント再生舗装技術指針, 1992.

3. 各国の再生アスファルトの適用条件について

3.1 日本の再生アスファルト適用条件

日本におけるアスファルトコンクリート再生骨材(以下、再生骨材)は、舗装発生材を破碎・分級したものであり、表層や基層、路盤材料の素材として使用されている¹⁾。再生骨材が再生加熱アスファルト混合物製造数量に占める配合率は、2020年時点で、関東では60%、全国では50%を超えて使用されている²⁾。また再生アスファルト混合物への再生骨材の配合率には、上限は設けられていない。

再生加熱アスファルト混合物に使用する再生骨材の品質は、表-1に示す値が標準とされている。また、

再生骨材を用いたアスファルト混合物の配合設計においても、新アスファルトまたは再生用添加剤を用いて、再生アスファルトの針入度を設計針入度へと調整する方法と、再生アスファルト混合物の圧裂係数を設計圧裂係数へと調整する方法がとられており、再生骨材に付着したアスファルトの性状が重要となっている。

表－１ 再生骨材の品質³⁾

旧アスファルトの含有率	%	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
骨材の微粒分量	%	5以下

3.2 海外の再生アスファルト適用条件

PIARCのケーススタディ集で紹介されている各国の再生アスファルト混合物に関する研究や規格から、海外での適用条件について紹介する。今回のケーススタディ集で紹介されている文献によると、再生アスファルト混合物に用いる再生骨材の配合率が制限されている国が多くみられた。また、再生骨材の規格については、通常の骨材と同等に取り扱う国や再生骨材特有の条件を規定している国など様々であった。

本節では、上記のような適用条件の記載がある5つの事例を取り上げた。表－2では事例に記載されている各国のケーススタディ集で紹介されている再生骨材の配合率および適用層を示す。これらの内容をふまえて、文献に記載されている再生骨材の適用条件を紹介する。

表－2 海外の再生アスファルト混合物適用例

国 名	再生骨材配合率 (%)	適用層
ポーランド	20-50	表層
スウェーデン	50	表層
アルゼンチン	20	基層
ノルウェー	10以下 (ポリマー改質アスファルト混合物に対して)	表層
アメリカ (アリゾナ州)	15, 25	－

(1) ポーランド

ポーランドでは、再生骨材の最適配合率を20～50%の間で設計している。その理由として、アスファルト混合物中の再生骨材の使用は、均質な再生骨材が使用できるかどうかによって制限されているからである。再生骨材の品質は、主に供用年数や再生使用回数

が影響している。再生骨材の使用によって、アスファルト混合物の剛性が高まり、塑性変形抵抗性を改善する一方、耐ひび割れや疲労抵抗性、低温特性が低下する恐れがある。そのため、十分な試験を行った上で再生骨材の品質を確認し、配合率を検証する必要がある。

ポーランドでは、十分な空隙率を確保した混合物を設計するために、フィラーや細骨材が多い再生骨材について最大配合率50%という制限を設けている。均質な再生骨材を使用すれば、生産安定性を維持しながら、この最大配合率である50%を適用できる。

(2) スウェーデン

2017年まで、スウェーデン国家道路管理局は、表層に使用できる再生骨材の配合率を20%未満に制限していたが、2017年からは温室効果ガスの削減や廃棄物の再利用の観点により、20%の制限が解除された。その結果、ほとんどのアスファルト混合物では再生骨材や旧アスファルトの有無に関わらず、同じ試験項目が適用できるようになった。しかし、ポーラスアスファルト混合物やポリマー改質アスファルトを使用した混合物の場合は、追加の試験条件を必要としているため、その内容を紹介する。

再生骨材については、表層に使用する場合、スパイクタイヤによる摩耗抵抗性が規定されている。また、重交通道路の場合、碎石マスチックアスファルト混合物では、スパイクタイヤに対する摩耗抵抗性に適合するように追加要件が規定されている。

旧アスファルトについては、軟化点が65.0℃以下であるように規定されている。また硬化した旧アスファルトの柔らかさを補うために新アスファルトを使用する場合、新アスファルトは目標とする軟化点よりも1クラス以上軟らかいものを使用してはならない。要するに、目標とする軟化点と同等の新アスファルトで旧アスファルトの柔らかさを補うよう追加条件が規定されている。

このようにスウェーデンでは、再生骨材と再生アスファルトを使用する際は、混合物や使用アスファルトの種類によって、条件や制限が追加されることがある。

(3) アルゼンチン

2012～2016年にブエノスアイレスの北に位置する高速道路の修繕工事が行われた。混合物の総量は約24,000 tであり、アルゼンチンで行われた最も重要なリサイクル工事であった。工事の手順を以下に記す。

- 既存の表層（6cm）と基層（16cm）を切削する。
- 新規の基層には、切削された表層から得られた再

生骨材を20%の配合率で使用した再生アスファルト混合物を18cm舗設する。

- 中間層には、ポリマー改質アスファルトを使用した混合物を9cm舗設する。
- 新規の表層には、ポリマー改質アスファルトを使用した碎石マシチックアスファルト混合物を舗設する。

また、基層に舗設した再生アスファルト混合物における設計仕様は下記のとおりである。

- 図-1に示すような混合物粒度を決定する。
- 再生骨材の粒度とアスファルト性状を確認する。
- 旧アスファルトと新アスファルトの配合を決める。
- 再生骨材を使用したアスファルト混合物を作製し、表-3に示すような各種試験をする。(設計パラメータは新しい骨材で作製する混合物と同じである)

アルゼンチンではこのような方法によって再生アスファルト混合物の配合設計が行われ、高速道路の基層に使用されていた。

(4) ノルウェー

ノルウェーでは、再生骨材を表層や基層、路盤へ適用することは一般的であるが、ポリマー改質アスファルト混合物への適用は進んでいなかった。

一方、再生骨材の利用促進はCO₂排出量削減が期待でき、ノルウェーが掲げる環境目標の達成に大きく貢献する可能性があることから、再生骨材をポリマー改質アスファルト混合物へ適用する検討が行われた。その結果、ノルウェーでは改質アスファルト混合物に対して、再生骨材を10%まで混合可能となった。

なお、検討詳細については4章に記載している。

(5) アメリカ アリゾナ州

現状、アメリカ合衆国アリゾナ州では、アスファルト混合物に対する再生骨材配合率が15%以下である。さらに、アリゾナ州のフェニックス市においては、かつては再生骨材をアスファルト混合物に使用することが許可されておらず、再生骨材は道路の粉塵制御などにのみ用いられてきた。

しかし、ここで紹介するケーススタディにより、フェニックス市では

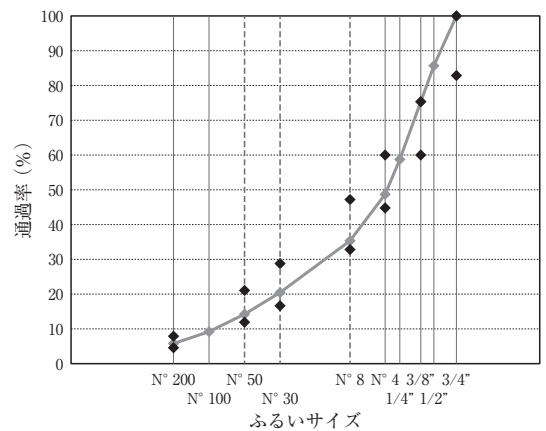


図-1 再生アスファルト混合物の粒度曲線

表-3 再生アスファルト混合物の設計パラメータ

パラメーター		要求性能
マーシャル設計	安定度	> 10kN
	安定度/フロー	2.5 ~ 4 kN/mm
	空隙率	3 ~ 5 %
残留安定度 (a/AASHTO T283)		> 80%
ホイールトラッキング試験性能 (a/UNE 12697-22-B)		WTS ≤ 0, 10; PRD ≤ 8 %

多くの舗装補修工事において、再生骨材配合率を15%として用いることを検討することとなった。再生骨材配合率を変えたアスファルト混合物を作製し(0, 15, 25%), 試験室および現場での性能を評価していた。全体的な実験プロセスを図-2に示す。ここでは試験結果について割愛するが、このような実験プロセスに

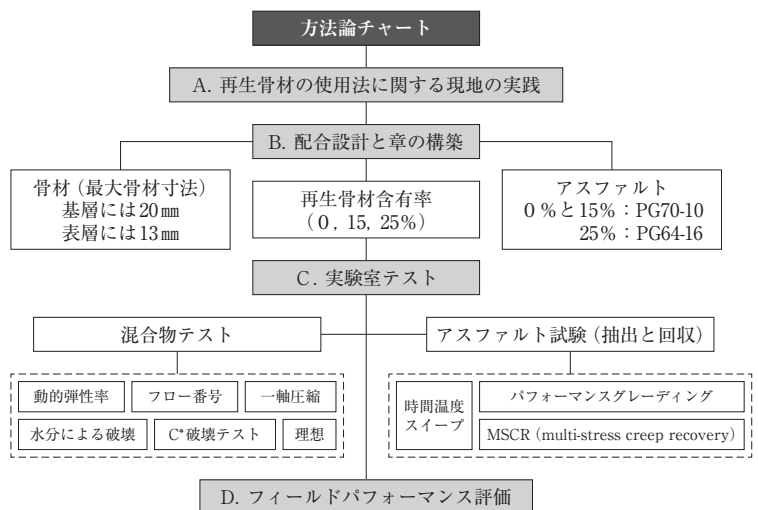


図-2 実験プロセス

よって、フェニックス市のような暑い気候の地域でも15%、25%の再生骨材配合率であれば混合物や舗装の性能に影響を与えないことが確認された。

3.3 まとめ

日本と海外における再生アスファルトの適用条件について述べた。再生骨材の使用は、日本では配合率に制限がなく50%以上配合されることが多いが、海外では配合率が制限されている国が多く見られた。その理由として、新規のアスファルト混合物と比較しポテンシャルが発揮できないことが理由の1つとして挙げられており、ほとんどの国では上限30%までであった。その代わりに、再生骨材を新規骨材と同等に取り扱っている国もあり、日本とは異なる部分がみられた。

海外での再生骨材配合率は日本より低い国がほとんどであったが、現状よりも高配合率を求めて研究されている論文が多くあった。このように、世界的に再生骨材の高配合率化が進み、環境問題へ向けた研究が盛んに行われ、再生アスファルトの技術が発展していくことを期待している。

—— 参考文献 ——

- 1) (社)日本道路協会：舗装再生便覧－平成22年版，p10, 2010.
- 2) (社)日本アスファルト合材協会：アスファルト合材，No.140, p31, 2021.10.
- 3) (社)日本道路協会：舗装再生便覧－平成22年版，p11, 2020.

4. リサイクル材の活用に関する技術例

再生骨材を始めとしたリサイクル材の舗装への適用、および技術開発が各国で行われる背景には、その国が掲げる環境負荷低減の目標達成や、限りある資材（骨材やアスファルト）の使用量削減、建設廃材の有効活用などがあることがわかった。特に舗装再生に着目すると、再生骨材の最大配合率や、再生アスファルト混合物の適用層は国によって千差万別であり、日本と比して再生骨材の利用が厳しく制限されている国も少なくない。

このような状況を変えるため、再生骨材やリサイクル材の利用促進を目指した技術検討例や、検討結果をもって舗装の規格見直しが行なわれている例が、文献に記載されていた。

本章では、再生骨材や他産業廃材などのリサイクル材の使用に関する技術例6つを、詳細に紹介する。

再生骨材のポリマー改質 アスファルト表層混合物への 適用に関する検討

原題：*EXPERIENCES WITH RAP AS
AGGREGATES IN POLYMER MODIFIED
ASPHALT WEARING COURSES
(NORWAY)*

キーワード：再生，改質，ひび割れ

(1) はじめに

ノルウェーでは、再生骨材を表層や基層、路盤へ適用することは一般的であるが、ポリマー改質アスファルト混合物への適用は進んでいない。再生骨材の利用によって改質アスファルト混合物の性能が低下してしまわないか、発注者が恐れているからである。

一方、再生骨材の利用促進はCO₂排出量削減に大きく貢献する可能性がある。ノルウェーは2030年までに、道路の建設・保全にかかる温室効果ガス排出量を1990年比で50%低減することを掲げており、特に道路建設では最低でも40%の削減が必須としている。この目標達成のために、ノルウェーでは非営利団体“The info center for recycling asphalt”の協力のもと、再生骨材の改質アスファルト混合物への適用検討が行われた。

本文献では、再生骨材の配合率および混合条件を変えて改質アスファルト混合物を製造し、実道路にて施工し、室内・室外評価を実施している。また使用する再生骨材については、改質アスファルト混合物由来の再生骨材と、ストアス混合物由来の再生骨材のそれぞれについて検証している。

(2) 再生骨材および改質アスファルト混合物の条件

○再生骨材の旧アスファルトの由来

改質由来：PMB 65-105/80（針入度65～105，軟化点80℃以上）

ストアス由来：針入度70～100

○新しく施工した改質アスファルト混合物の条件

混合物種：AC16（最大粒径16mm）

新アスファルト：PMB 65-105/80

再生用添加剤：不使用

(3) アスファルトおよび混合物試験

混合物は、空隙率、ホイールトラッキング試験（以下WT試験）によるわだち量、カンタブロ損失率で評価した。

混合物から抽出・回収したアスファルトは、針入度、軟化点、繰返しクリープ試験（Multi-Stress Creep Recovery Test, 以下MSCRT）、ダイナミックシアレオメータ（以下DSR）試験、ベンディングビームレオメータ（以下BBR）試験で評価した。

(4) 試験結果および考察

○改質由来の再生骨材の適用結果

実施工では、再生骨材配合率を0～30%の範囲で変えて混合物を施工した。施工した混合物に関する試験結果を表－1に示す。空隙率とわだち量では、再生骨材配合率による差は見られなかった。一方、回収アスファルトに対する試験では、再生骨材配合率の増加に伴って $G^*/\sin \delta$ が増加し、MSCRTにおける弾性回復率が低下した。また再生骨材配合率が10%を超えると、BBR試験における臨界温度（m値が0.300になる温度）が高温側へシフトしてマイナス20℃を超え、低温ひび割れ抵抗性の低下が示唆された。再生骨材配合率の増加とともに、混合物が硬く、剛性的な性質を示すようになり、ポリマー改質アスファルトによる弾性的な効果や低温域での性能が低下したと考えられる。以上より、改質由来の再生骨材を改質アスファルト混合物に適用する場合、再生骨材配合率が10%以下であれば性能に悪影響を与えない可能性があるとしている。

○ストアス由来の再生骨材の適用結果

ストアス由来再生骨材を用いた施工についても、再生骨材配合率を変えて施工が行われた。施工面からの切取り供試体に対するWT試験等の混合物試験では、改質由来再生骨材を使用した施工と同様に、再生骨材配合率によらず性状差は確認されなかった。しかし回収アスファルトに対する試験では、再生骨材配合率が0～10%では試験結果に差が見られなかったものの、15%以上になると違いが表れたという。これは再生骨材に付着した非改質由来の旧アスの増加により、ポリマー改質効果が薄れてしま

うためと考察していた。以上より、ストアス由来の再生骨材を使う場合、その配合率上限は15%未満が好ましいとしている。

(5) まとめ

本報告では、改質由来およびストアス由来の再生骨材を用いて、再生骨材配合率を変えて改質アスファルト混合物を作製・施工し、現場試験ならびに室内試験によって性能を確認した。混合物試験では、再生骨材の由来が改質・ストアスによらず、特筆すべき差は見られなかった。一方、施工したアスファルト混合物から回収されたアスファルトの性状は、どちらの再生骨材を用いた場合でも、再生骨材配合率の増加によって低温ひび割れ抵抗性や弾性回復性などに変化が見られた。これらの検討結果から、改質アスファルト混合物に再生骨材を用いる場合、ポリマー改質効果を低下させないための再生骨材配合率の上限は、改質由来再生骨材を使用時は10%以下、ストアス由来再生骨材使用時は15%未満となった。本研究結果を踏まえ、ノルウェーでは改質アスファルト混合物に対して再生骨材を10%まで配合することが許されるようになった。

(6) 翻訳者コメント

日本では再生アスファルト混合物が広く普及しており、また舗装再生に関する技術報告も多くなされているものの、国内の舗装再生に関する規格では新アスファルトにストアスの使用を想定しており、再生改質アスファルト混合物に関する公的規格は存在しない。しかしながら、新規骨材の枯渇や再生骨材の排出量増加に対応するため、今後、日本でも再生骨材を使った改質アスファルト混合物を利用が推奨される可能性があると考ええる。ただし、改質アスファルト混合物は重交通道路等に用いられることから、性能の低下は許されない。したがって、本文献にあるように、再生骨材を“骨材”として利用し、舗装性能に影響のない量で配合していくことは、有力な選択肢の1つであると言えるだろう。

表－1 改質由来再生骨材を用いたアスファルト混合物の評価結果

再生骨材 配合率 (%)	混合物試験			回収アスに対するバインダ試験		
	コアの空隙 (%)	わだち量, 室内作成 (%)	わだち量, 現場コア (%)	$G^*/\sin \delta$, 20℃ (kPa)	BBR 臨界温度 (℃)	MSCRT 弾性回復 (%)
0	3.3	4.0	3.5	3,280	－20.5	94
10	3.0	3.8	6.1	4,420	－20.0	91
20	2.8	4.5	5.8	4,930	－19.0	88
30	2.8	5.2	5.5	5,044	－19.5	82

高い割合で再生骨材を使用し、 中温化技術によって製造された 高モジュラスアスファルト混合物 (スイス)

原題：**HIGH MODULUS ASPHALT
INCORPORATING HIGH PERCENTAGE
OF RECLAIMED ASPHALT AND
PRODUCED ACCORDING TO WARM MIX
ASPHALT TECHNOLOGY**

キーワード：高モジュラスアスファルト、ウォームミックスアスファルト、フォームド技術

(1) 本研究の背景と使用材料

本研究では、高モジュラスアスファルト混合物 (Enrobé à module élevé, 以下、EME) をスイスの道路網に普及させることを視野に、製造された混合物について種々の試験を行った。

スイスの連邦道路局 (the Federal Roads Office, FEDRO) は、高割合で再生骨材を使用したフォームド技術による中温化アスファルト混合物 (Warm Mix Asphalt, 以下 WMA) の利用を検討している。EME として、基層のうち表層に近い部分に使用され、耐わだち掘れ性が高いとされる AC EME 22 C1 が本研究の焦点となった。EME に関する主な特性・要求事項はスイス規格 SN 640 431-1-NA に記載されている。実際の試験では 50% の再生骨材を含み 160℃ で混合した “C1” と、“C1” を中温化製造した WMA である “C1W” が評価された (表-2)。

表-2 試験に使用されたアスファルト混合物

	混合温度 (℃)	再生骨材割合 (%)
C1	160	50
C1W	115～120	50

(2) 試験

様々なパラメータの影響を深く分析するために、針入度や軟化点といった通常の試験に加えて、より広範な試験を実施した。以下では “C1” と “C1W” の WT 試験、スティフネスおよび疲労試験の結果について述べる。

(3) 結果と考察

○ WT 試験 (EN 12697-22)

図-1 に結果を示す。“C1” と “C1W” の両方が高い耐わだち掘れ性を示し、わだち掘れ深さの規格で

ある 30,000 サイクル後において 5.0% 以下を満足していた。

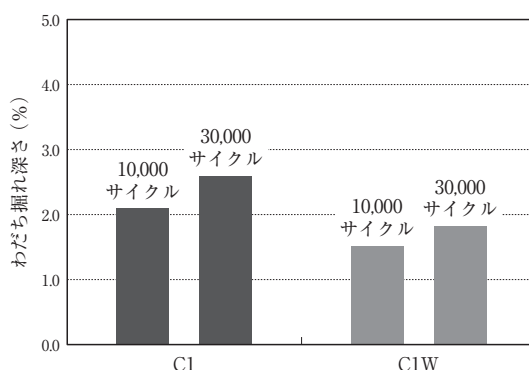


図-1 わだち掘れ深さ分析 (WT 試験: EN 12697-22)

○ 2 点曲げスティフネスおよび疲労試験

表-3 に結果を示す。中温化で製造した “C1W” の空隙率は、160℃ 混合で製造した “C1” と同等であった。またどちらの混合物も、スティフネス (複素弾性率) および疲労抵抗性はスイス規格を上回り、十分な性能を持つことが確認された。

表-3 スティフネスと疲労試験 (2PB-TR) の要点 : EN 12697-25/26

	C1	C1W
平均空隙率 (%)	3.4	4.1
複素弾性率 E^* (MPa), 15℃, 10Hz		
測定値	15,427	18,237
規格値 (SN 640 431-1-NA)	11,000	11,000
疲労抵抗性 ϵ_6 (μm/m)		
測定値	127 ± 10	138 ± 10
規格値 (SN 640 431-1-NA)	100	100

(4) まとめ

以上の試験を含む種々の検証により、再生骨材を多く配合した EME の高い品質が確認された。中温化製造に関しては、空隙率や疲労抵抗性などについても、通常温度で製造した EME と同等の性能を示しており、再生骨材割合の高い混合物をプラントで製造できる可能性が示唆された。

本研究の成果は、高モジュラスアスファルト混合物の普及だけでなく、最終的には製造温度の低下や再生骨材の高含有化によるエネルギー消費量削減や低環境負荷のアスファルトの使用にもつながるはずである。

(5) 翻訳者コメント

日本の舗装業界でも、2050年カーボンニュートラルに向け、再生アスファルト混合物の使用や中温化技術の重要性はますます高まってきている。実際の道路網への普及にあたっては、いかに耐久性を高め、長寿命化できるかがポイントとなるであろう。

レシタールーバイオエマルジョンによる再生（フランス）

原題：RECYTAL-RECYCLING WITH BIO-EMULSION (FRANCE)

キーワード：植物性原料、常温路上再生工法、乳剤

(1) はじめに

常温での路上表層再生を可能とする植物由来の乳剤 Recytal® についての報告であった。アスファルト乳剤を用いた常温での路上表層再生が報告される中で、アスファルトを必要としない、再生可能な植物由来の原料を用いた乳剤として開発された。本報告では Recytal® の性状、および実施工実績について述べられている。

(2) Recytal® とは

フランスの道路会社 Eiffage Route が開発した植物由来の乳剤である（写真－1）。製紙産業で生産される木材由来の物質を主原料としており、食用利用と競合しない点が特徴である。具体的には、重量比50%が針葉樹のトール油より作られており、その他の成分は水、界面活性剤、塩酸から構成されている。



写真－1 Recytal®

(3) 乳剤の性状

Recytal® のアスファルト乳剤としての性状確認のため、欧州の規格に対応する以下の実験を行った。

○残滓ふるい分け (0.160 mm)

○貯蔵安定性試験後の残滓ふるい分け試験 (0.500 mm)

アスファルト乳剤中に存在する大きい粒子の検出

○流動粘度測定

40℃で一定の区間を流動する時間の測定

○pH測定

○粒度分析

Recytal® および一般的なアスファルト乳剤の性状を表－4に示す。Recytal® は欧州のアスファルト乳剤の規格（EN 13808）を満たし、粒度を除いて従来のアスファルト乳剤と同等の性状を示すことが確認された。また本報告とは別に、再生骨材配合率100%の再生アスファルト混合物の試験も行われており、従来品を使用した混合物と比較した際、同等の性質を示し実装可能な製品であることが示唆されている。

表－4 従来アスファルト乳剤と Recytal® の性状比較

	測定法規格	従来乳剤	Recytal®	欧州基準 (EN 13808)
水の割合	－	39.4%	45.0%	37.0%～47.0%
ふるい分け残滓 (0.500et) 0.160 mm	NF EN 1429	0.0%	0.0%	≤ 0.1%
貯蔵安定性試験 7日間 (0.500 mm)	NF EN 1429	0.0%	0.0%	≤ 0.2%
カチオン性アスファルト 破断指数	NF EN 13075-1	180	177	≥ 170
流動粘度	NF EN 12846-1	30s	32s	15s～70s
pH	NF EN 12850	2.5	2.0	－
粒度分析	－	7.7μm	2.0μm	－



写真－2 Recytal® を用いた路上表層再生の例（右端のローリーから乳剤を散布）

(4) まとめ

常温路上表層再生への適応を目的とした植物性の乳剤 Recytal® は、アスファルトを原料とする従来の乳剤と同等の性状を示している。この植物由来の乳剤を用いた路上表層再生には、以下の4点がメリットとして挙げられる。

- ①作業中に発生する廃棄物の削減
- ②骨材の再利用
- ③循環型社会の促進
- ④温室効果ガスおよびエネルギー消費量の削減

上記の利点が評価され、フランスとスペインの計8つの自治体では、Recytal®を用いた試験施工が既に計97,000㎡行われている。

(5) 翻訳者コメント

路上表層再生工法は日本において、プラント再生工法と比べて適用例が限られている舗装の再生方法であるが、近年のカーボンニュートラルへの意識の変革に伴い、今後の発展が期待される手法であると感じた。また舗装再生に限らず、植物由来の再生可能材料の舗装への利用は日本でも見られるが、いずれも使用例が限定的であり、広く社会実装ができる利用法は確立されていない。再生舗装用の添加剤としての利用は、今後広く社会実装が可能な用途であると考えます。

BIOREPAVATION PROJECT : 古くなったアスファルト舗装の バイオ再生 (フランス)

原題: *BIOREPAVATION PROJECT: BIO-
RECYCLING OF OLD ASPHALT LAYERS
(FRANCE)*

キーワード: 再生, バイオ, 添加剤

(1) はじめに

「BioRePavation Project」は、植物素材などを用いた代替アスファルトを使用し、経年劣化したアスファルト舗装を従来の舗装と同等の性能で再利用することを目的としている。また、アスファルト舗装の再利用化を図ることで、再生可能資源を増やし、環境への負担の低減を目指している。

この計画の達成に向けて、BioRePavationを進める協会は、3つの革新的なバイオ材料を用いたアスファルト舗装に加速耐久試験を実施し、評価を行った。

(2) 検討に用いた植物由来の舗装材料

検討に用いられたバイオ材料の概要を以下に記す。

① SYLVAROAD™ RP1000

松の木を使用した植物由来の添加剤。再生アスファルト混合物の再生骨材配合率を70%、さらには理論上100%まで高められるとのことであった。

② エポキシ化大豆メチル

新アスファルトと再生骨材の相溶性を向上する植物由来の添加剤。

③ Biophalt®

舗装再生の際の新アスファルトの完全代替となる植物由来のアスファルト。

(3) 試験・評価方法

前述のバイオ材料を用いたアスファルト舗装を実際に施工し(写真-3)、フランス西部にある都市ナントの近くにあるグスタヴ・エッフェル大学が保有する加速耐久試験(写真-4)によって評価を行った。評価方法は次のとおりである。

- ・舗装が疲労破壊に至るまでに要する交通量の測定
- ・革新的な非破壊法によるアスファルトの物理化学的な変化の調査



写真-3 再生骨材を用いたバイオベース層の施工



写真-4 グスタヴ・エッフェル大学が保有する加速耐久試験機

(4) 結果および考察

30ヶ月にわたる試験と調査によって、試験施工の目的が全て達成され、今後、アメリカやヨーロッパの

仕様への実装に向けた重要な結果が得られた。以下に、結果の一部を記載する。

- 室内での総合的な実験による評価において、旧アスファルト、新アスファルト、バイオ材料の間に物理化学的な相互作用が確認され、バイオ材料は経年劣化したアスファルトの物理的特性を回復させることがわかった。また、この特性は高温領域と低温領域で同様の作用があると考えられる。
- バイオ材料を使用して製造された代替アスファルト混合物は、実験室での試験において、優れた耐久性を示した。わだちと疲労破壊に対する耐久性においては、一般的な材料よりも優れた結果となった。

(5) まとめ

バイオ材料を用いた革新的なアスファルト混合物は、BioRePavation プロジェクト内での評価によって、従来のアスファルト混合物よりも優れる結果を示した。本検討における再生技術は、再生不可能な資源の消費を削減し、再生可能資源を増やすことで環境への負荷を低減できる可能性を示唆している。今後は、再生骨材配合率を更に高め、バイオ材料を用いたアスファルト混合物に対する加速耐久試験の実施と、環境負荷の評価を計画している。

(6) 翻訳者まとめ

植物由来の添加剤やアスファルトという日本でも取り組みが始まった分野であるが、海外での取り組みを見ると持続生産可能な材料や再生骨材の使用による環境負荷低減の観点から注目されるべき手法であると感じた。再生舗装用の添加剤またはアスファルトとしての利用は、今後広く取り込まれるものであると考える。

**アスファルト層における
クラムラバー改質アスファルトの適用
(チェコ共和国)**

原題：*USE OF CRUMB RUBBER MODIFIED
BITUMEN IN ASPHALT LAYERS (THE
CZECH REPUBLIC)*

キーワード：Rubber Granules, クラムラバー改質アスファルト (CRMB)

(1) はじめに

この研究は、Rubber Granules (以下、RG) で改質したクラムラバー改質アスファルト (以下、CRMB) を用いて試験施工を行った報告である。

1990年代後半、チェコはRGをアスファルト混合物へ導入するために、まずは混合時に骨材へRGを添加するプラントミックスで使い始めたが、これらの混合物の耐久性は要求性能を満足しなかった。

2006年、アスファルトにRGを入れて改質アスファルトとしてから使用するプレミックスで製造した混合物のさらなる発展と適用が始まった。

(2) CRMBの特徴

CRMBの特徴は以下のとおりである。

- 高動粘度 (リフレクションクラックに対する抵抗性)
- 高軟化点
- 低針入度
- 高柔軟性 (高温・低温の影響に対する抵抗性)
- 硬化 (劣化) に対する高い抵抗性

(3) CRMB混合物の製造、施工

写真-5に、代表的なRG (最大粒径1.25 mm) を示す。RGは使用済みの自動車やトラックのタイヤから作られ、機械切削または極低温破碎による生産が最も多い。

CRMBを使うときには下記が推奨されている。

- 供給では、すぐに使用できる状態 (最低温度170℃) で運搬する。
- 混合物プラントへ納入するまでの時間は、48時間を超えないようにする。

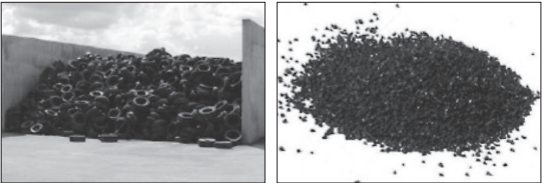


写真-5 RGの原料となる廃タイヤおよびRGのベレット (最大粒径1.25 mm)

表-5 CRMBの性能特性

特 性	試験法	単位	CRMB 25/55-60N	CRMB 25/55-60V
針入度 (25℃)	ČSN EN 1426	0.1 mm	25/55	25/55
軟化点	ČSN EN 1427	℃	≥ 60	≥ 60
粘度 (150℃)	ČSN EN 13302	Pa・s	0.4-1.5	
粘度 (175℃)	ČSN EN 13302	Pa・s		1.5-4.0

(4) チェコにおけるCRMB混合物を用いた施工事例

CRMB混合物を用いた最初の試験施工は、REIMO社によって2007年にCemosice村とSolopisky村で行われた。2008年11月には延長1.2 kmの表層を排水

性CRMB混合物で施工し、その箇所は交通量の多いMichelska通り（4車線のうち半分）であった。2017年からは、約80か所の道路でCRMBを用いた3種類の規格の道路で修繕や再構築され、CRMBを用いたアスファルトはSMAなどさまざまな混合物に適用された。

CRMBを適用した排水性混合物の表層は、交通騒音を大きく減少させ、CRMB技術は主に基層（ひび割れの伝搬に対する抵抗性を高めるアスファルト層の役割）として使用された。現在もCRMBや再生材料を用いたアスファルト混合物の可能性について試験中である。

(5) 翻訳者コメント

日本でも廃タイヤを破碎したゴムチップとウレタン樹脂を使った舗装が歩行者系道路用舗装材やスポーツ施設用表層材としての利用や、アスファルトラバーと呼ばれるゴム粉をアスファルトと混合したアスファルトが開発されている。

今後の研究報告に注目し、廃ゴムの活用について自身も検討していきたい。

広範な持続可能性に資する
再生コンクリート骨材を用いる
経済的なコンクリートの利点

原題：ECONOMICAL CONCRETE WITH
RECYCLED CONCRETE AGGREGATE
PROVIDES BROADER SUSTAINABILITY
BENEFITS IN TEXAS (USA)

キーワード：再生、コンクリート

(1) はじめに

アメリカテキサス州では、1990年代、適切な骨材供

給源の不足と新規材料のコスト増に悩んでいた。また、連続鉄筋コンクリート舗装（Continuously Reinforced Concrete Pavement, 以下CRCP）の設計において、新規骨材の性能にも問題を抱えていた。コンクリート舗装由来の骨材を使った新たな舗装は、大幅なコスト削減と、新材使用量の低減につながる。そこで、テキサス州の運輸省（Texas Department of Transportation, 以下TxDOT）は、再生コンクリート骨材（Recycled Concrete Aggregate, 以下RCA）を使う方法を検討した。

(2) 施工方法

CRCPにおけるRCAのよりよい活用方法を検討するため、TxDOTは1999年Houston中心部にあるI-10nの5.8-miセグメントの打ち替えに組み込んだ。既設舗装は1968年に舗設しており、27年間超大型車が通行していた。打ち替えにおいて新規骨材は使用せず、骨材にすべてRCAを用いることは、初の試みであった。試験施工の目的としては、RCAの使用による、生コンと硬化後のコンクリートへの影響、およびRCA使用CRCPコンクリートの性能の評価である。また施工に際し、RCAの性状を評価するため一般的な骨材との比較を行った（表－6）。

フィニッシャの作業員によれば、RCA舗装と従来舗装では仕上げ作業にほとんど違いがないことが報告された。一方、施工中に強度が変動するため、RCAの配合を調整する必要が生じた。さらに、不安定なコンクリートや舗設中の打設は、混合物中の再生細骨材の割合を増やすことにつながってしまうことから、TxDOTは、1999年に、RCAの細骨材中比率を最大20%までとした（現行方式では一般的に、RCA細骨材の上限は30%である）。

表－6 RCA材料性能

材 料	性 能	試験方法	RCA 試験結果	砂利または珪砂の代表値
粗骨材	比重	ASTM C127	2.45～2.48	～2.6
	モルタル量	－	～30%	n/a
	吸水率	ASTM C127	3.9～4.1%	<2%
	ナトリウム損失量	ASTM C88	1～9%	1～2%
	マグネシウム損失量	ASTM C88	1～4%	2～6%
	ロサンゼルスすり減り減量	ASTM C131	32～38%	最大<20%
	温度係数	－	16～26με/℃	－
	凍結融解損失	Tex-433C	11.5%	－（～9%）
	ASR反応	ASTM C1260	0.023%	不定
細骨材	比重	ASTM C128	2.37	～2.6
	吸水率	ASTM C128	7.9%	～1%
	角張り度	NAA 試験	38.6%	34.5%

(3) 施工後の評価

RCAを含んだコンクリートの性能を確認するため、施工直後にコアを15本採取し評価を行った(表-7)。RCAはTxDOTの仕様を満足しており、コアの岩石分析より、新しい珪砂や川砂利と旧モルタル、旧モルタルと新モルタルはよく結合していると分かった。

RCAを用いた試験施工は、1990年代半ばに施工されて以降、非常に良好な性能を維持している。2011年と2016年に測定した国際ラフネス係数(International Roughness Index, 以下IRI)の結果を表-8に示す。5年経過しても、IRIは113~120in/mi(1.78~1.89mm/m)に収まっており、TxDOTにおけるIRIの管理基準値119in/mi(1.88mm/m)から見ても良好な状態といえる。

(4) まとめ

RCAを使用することにより、未使用の新規骨材の採取量や廃材処分量が減らせるため、温室効果ガスの発生を抑制できる。また、石灰石を運搬する場合と比較して、骨材の価格を1tあたり2ドル下げられ、廃棄量の節約も加味すると、1tあたり2ドルのコスト削減が可能になった。これは総合的に約140万ドルのコスト削減に相当する。RCAは経済面、環境面の両方の観点から高いパフォーマンスを発揮する。

(5) 翻訳者コメント

本技術例は、コンクリート廃材を原料の一部に用いたコンクリートに関してのものであるが、海外のコン

表-7 RCA利用コンクリートの評価

	評価方法	平均値	値 幅
圧縮強度	—	4,615 lb/in ²	4,260 ~ 5,270 lb/in ²
間接引っ張り強度	—	486 lb/in ²	415 ~ 535 lb/in ²
弾性率	—	2.58×10^6 lb/in ²	—
熱膨張係数	Tex-428-A	—	4.7 ~ 5.3 μ E/°F
Cl含有量	Tex-617J	1,436 ppm	—
S含有量	Tex-620J	0.04 lb/yd ³	—
密度	—	2.24	2.19 ~ 2.36
吸水率	ASTM C642	10.86%	—
透過性	ASTM C1202	466 Coulomb	366 ~ 628 Coulomb

表-8 CRCP性能2011~2016(出展:TxDOT)

年 度	損傷箇所	パンチ アウト数	PCC パッチ数	平均IRI値 (in/mi)
2011	9	4	1	115 (1.82mm/m)
2012	1	3	3	119 (1.88mm/m)
2013	1	0	0	119 (1.88mm/m)
2014	3	4	5	113 (1.78mm/m)
2015	2	7	1	120 (1.89mm/m)
2016	8	5	1	116 (1.83mm/m)

クリート業界においてもアスファルト混合物と同様に、新規材料の調達が課題となっていることがわかった。コンクリート廃材を、アスファルト混合物の骨材としても利用することができれば、環境面でも経済面でも利点が生じるのではないかと考える。アスファルトだけでなく、新骨材の代替となるような他産業廃材の技術検討についても注目していきたい。

アスファルト混合物の配合試験法に関する調査報告

室井和也

佐藤慎輔

福山菜美

金澤裕貴

園田涼

細野祐貴

小池千絵美

廣田哲人

好見絵里

小早川尚之

福田嘉子

はじめに

アスファルト混合物の配合設計とは、所定の骨材配合に対して、最も適正なアスファルト量を得るための作業である。現在、最も広く用いられている配合試験法としてマーシャル安定度試験によるものがあるが、どのようにしてマーシャル安定度試験が普及したのだろうか。アスファルト舗装技術研究グループでは、今回の疑問に対して調査を行うことにした。調査を行うにあたって、研究グループのなかでは海外の試験方法や過去行われていた試験方法、特殊な合材の配合試験方法について関心が高いことが分かった。そのため、マーシャル安定度試験のほかにも、排水性舗装や再生アスファルト混合物など比較的近年に配合試験方法が確立されたものや、海外の配合試験方法にも目を向けて幅広く調査を行った。調査結果について今後の展望も踏まえて報告する。

本稿は4章構成となっており、1章ではマーシャル安定度試験に着目し、普及する以前の配合設計方法や、課題について説明する。2章では排水性舗装に着目し、密粒度アスファルトとの違いに触れながら、排水性舗装独特のアスファルト量の決定方法について説明する。また、排水性舗装に類似した舗装や、排水性舗装黎明期の海外調査についても紹介する。3章では再生アスファルト混合物に着目し、社会情勢に応じてまとめられてきたいくつかの指針や便覧から配合設計についての基準や既定の変遷について読み解いていく。4章では供用後の耐久性を考慮し、レオロジー理論を取り入れた配合設計として、アメリカのSHRPの研究成果であるSUPERPAVEについて紹介する。なお本稿中の図表には、紙面上で読みやすくするため引用元の図表を一部加工し文字を大きくしているものがある。

1. マーシャル安定度試験による配合設計

マーシャル安定度試験は現在最も普及している配

合試験方法であるが、国内にこの試験が導入される以前に行われていた試験法に関しては、若手中心の調査メンバーの中では耳なじみの無いものばかりであった。本章ではマーシャル安定度試験を中心に、マーシャル安定度試験導入以前に使用されていた安定度試験、マーシャル安定度試験が普及するに至った経緯や課題について紹介する。

1.1 マーシャル安定度試験導入以前

昭和25年に道路工法叢書の第6集として最初のアスファルト舗装要綱が発刊された。この要綱はアメリカのアスファルト・インスティテュートのハンドブックを原典としたものである。混合物設計の基本的事項として、安定性、耐久性、施工性、耐水性、すべり抵抗性などの要素がこの当時から盛り込まれており、アスファルト混合物に対する考え方は現在と大きく違っていないことがわかる。この舗装要綱が発刊された当時、マーシャル安定度試験は普及しておらず、安定度の試験方法として3種類の試験方法による比較設計を推奨していた。以下に各種安定度試験方法を紹介する¹⁾。

(1) ハバード試験

ハバード試験は舗装から切り取ったコア、またはアスファルト混合物を締固めて円筒形の供試体を作製し、図-1に示すように、型枠の底に供試体直径より小さい刃のついたリングを取り付けて、その刃によってせん断で混合物を切るときの最大荷重をもって安定度を表すものである。粗骨材を含む一般的なアスファルト混合物の場合は直径15cm、昭和初期の頃まで盛んに使用されていたシート・アスファルト混合物のように粗骨材を含まない混合物の場合は直径5cmの供試体を使用する。

(2) 貫入試験

図-2のように直径15cm、厚さ7.5cmの円筒形供試体に、直径7.5cmのプランジャーを上面より貫入させて、その時の最大荷重を持って安定度を表す。

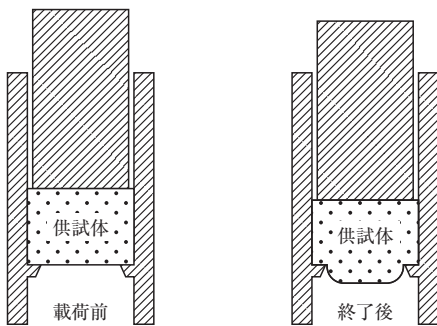


図-1 ハバード試験²⁾

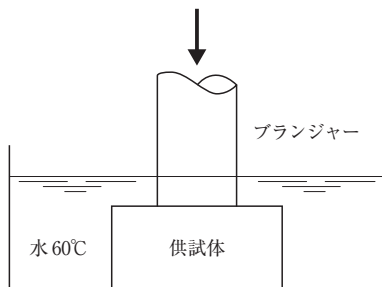


図-2 貫入試験²⁾

(3) 三軸圧縮試験

三軸圧縮試験は円筒型の供試体(径10cm, 高さ20cm)について室温で行う。供試体をゴム膜で包み図-3に示す試験機にはめ込む。供試体と試験筒の間に水を満たし、ヘッドを通じて供試体に垂直荷重をかける。この荷重によって生じる側方圧力を圧力計で読み、垂直荷重-側方圧力の関係をプロットし、内部摩擦角 ψ と単位凝集力(粘着力) C を求める。この ψ と C については図-4のような関係があり、安定領域に入る混合物は、舗装として十分な安定度を持つものと判定している。

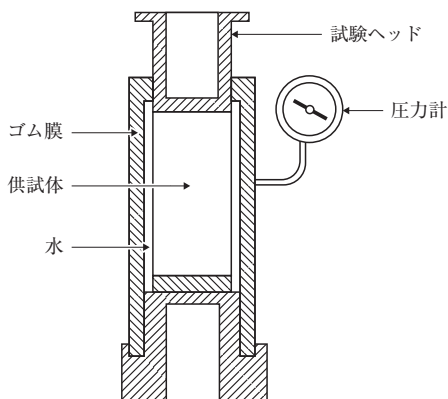


図-3 三軸試験²⁾

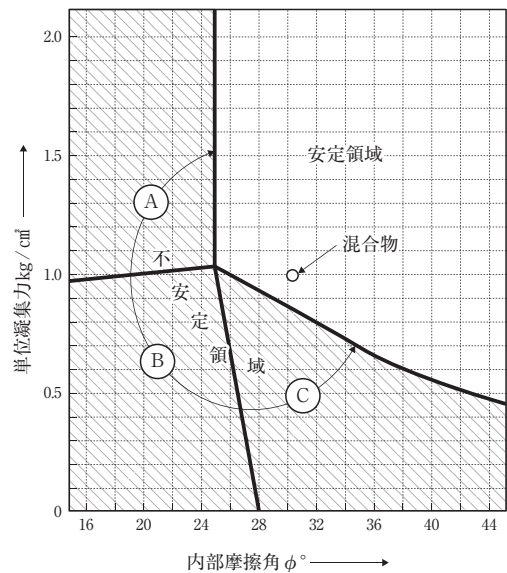


図-4 三軸試験による安定領域²⁾

る。不安定領域のAに入るものは摩擦力が不足、Cに入るものは凝集力が不足、Bの部分に入るものはそのいずれもが不足する混合物とされる。

1.2 マーシャル安定度試験の導入

(1) アスファルト舗装要綱(昭和36年版)

昭和25年に発刊されたアスファルト舗装要綱は、昭和36年に大幅に改訂された。改訂前の舗装要綱はアスファルト・インスティテュートのハンドブックを原典としたものであったが、この舗装要綱は国内のアスファルト舗装技術が進歩・発展したことを受けて、国内での研究結果や知見に基づいて作成された。また、混合物の配合設計にマーシャル安定度試験が採用されており、以来アスファルト舗装の各現場に急速に広まり、現在に至っている。

(2) マーシャル安定度試験方法³⁾

マーシャル安定度試験は、米国のB.Marshallにより考案され、初めは飛行場の加熱アスファルト混合物の配合設計に用いられていたものが、道路用に転用された。試験の基準値を満たす混合物を実際に供用し、その結果から基準値の変更を繰り返して確立された方法という点ではこれまでの安定度試験と同じである。しかし、試験装置・試験方法共に他の試験と比較して簡易であることから、小規模な施工現場が全国的に分散する舗装工事と相性が良かったこともあり、広く利用されるようになった試験である。

マーシャル安定度試験は、原則として骨材の最大

粒径が25mm以下の加熱アスファルト混合物に対して実施する。供試体は直径101.6mm、厚さ約63.5mmの円筒形である。この供試体の側面を円弧形の2枚の载荷ヘッドによりはさみ、既定の温度（60℃）、既定の速度（50mm/min）により直径方向に荷重を加える。このとき、供試体が破壊するまでに示す最大荷重を安定度、それに対応する変形量をフロー値として記録する。図-5にマーシャル安定度試験载荷装置の例を、図-6に安定度とフロー値の関係を示す。

(3) 配合設計手順

マーシャル安定度試験を用いたアスファルト混合物の配合設計手順は図-7に示すとおりである。

マーシャル安定度試験を用いた配合設計では、安定度、フロー値、空隙率、飽和度のマーシャル特性値が求められる。これら各特性値の基準範囲を満足するアスファルト量を求め、その中央値をとって設計アスファルト量としている。一例として、図-8に密粒度

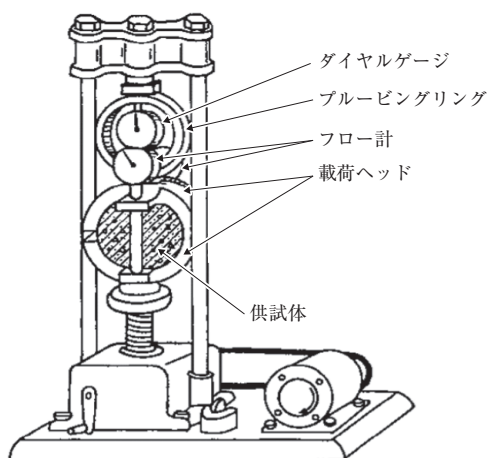


図-5 マーシャル安定度試験载荷装置の例³⁾

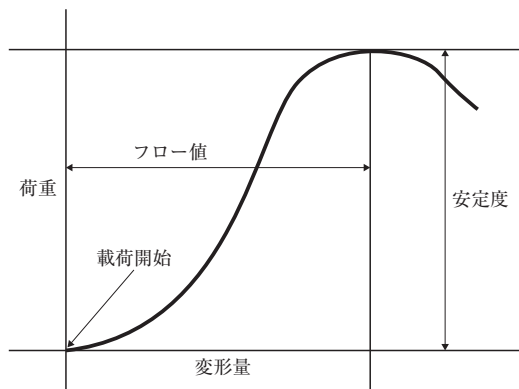


図-6 安定度とフロー値の関係³⁾

アスファルト混合物の場合のマーシャル安定度試験基準値の共通範囲と設計アスファルト量の考え方を示す。

加熱アスファルトの配合設計においてマーシャル安定度試験が普及した当初ではアスファルト量を安定度と密度の最高点および、空隙率、飽和度の目標値から求める方法が採用されていた。しかし、安定度の値にばらつきがあり、アスファルト舗装要綱(昭和42年版)から上記の方法に改訂された。改訂後の方法ではアスファルト量は、多くの場合において空隙率と飽和度の基準範囲から求め、安定度、フロー値はアスファルト量の決定に直接関与することがなくなっている。

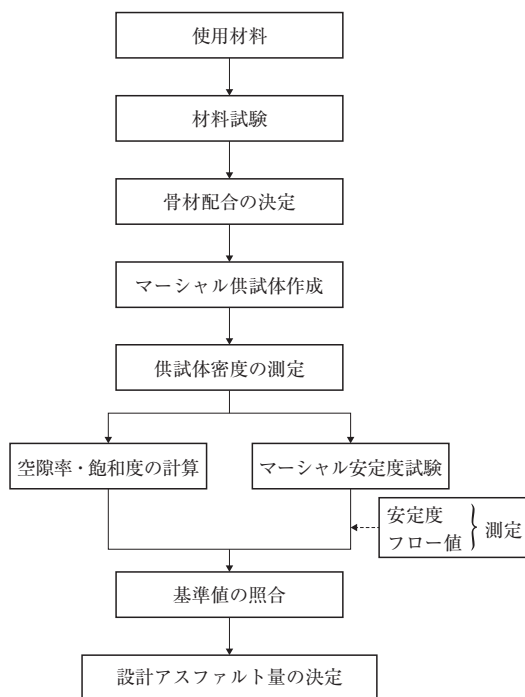


図-7 配合設計手順

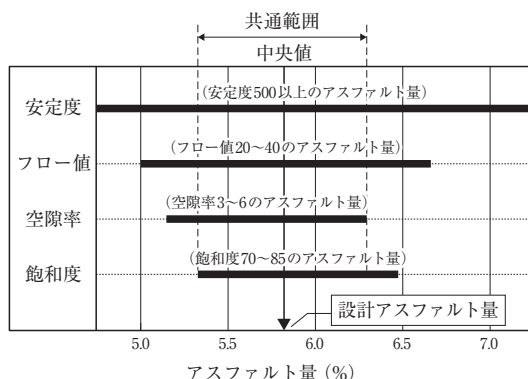


図-8 基準値の共通範囲と設計アスファルト量

(4) マーシャル安定度試験の課題

アスファルトは高温で変形しやすく、安定度はこのような変形に対する抵抗性を表すものであるため、一般に60℃で測定が行われている。マーシャル安定度試験は一種の三軸試験と考えられるが、論理的に解釈することは困難とされている。したがって安定度に対しては過去の経験から得られた基準値を使用している。このような経験をもとに発展してきた方法であるため、特殊な材料を用いた混合物のような知見のない材料については適応が難しいとされている。また、過去の経験からアスファルト量を求める試験であるため、わだち掘れの対策など、力学的な性状に対する評価は難しい。このようなマーシャル安定度試験によって解決できない配合設計上の問題は別途試験を行うことで解決が図られている。

2. 排水性舗装における配合設計

2.1 排水性舗装の導入経緯

国内においての排水性舗装の最初の適用事例は、1987年に騒音対策として環状7号線で排水性舗装の試験施工したものであり、試験施工の対象とした開粒度アスファルト混合物は、「すべり止め舗装」として用いていたゴム入りアスファルトを使用した混合物や、当時西ドイツで採用していた植物性繊維を輸入して添加したストレートアスファルトを使用した混合物であった⁴⁾。

高速道路においての最初の適用事例は、雨天時の走行安全性の向上を目的に、1989年に試験施工したもので、上記の環状7号線での実績や欧米での事例を参考に、植物性繊維を混合した改質アスファルトⅡ型を用いた排水性混合物が採用された。しかし、既存材料を組合わせたアスファルトでは十分な耐久性や要求性能を満足できないことが分かり、新たなアスファルトの開発が望まれた⁵⁾。1990年には、使用するアスファルトの種類も多くなり、材質的にもタフネス・テナシティが高く、骨材把握力の強いものが利用され始めた。1992年には、日本道路公団試験所から排水性舗装の配合設計法として、最大アスファルト量を求める「ダレ試験」と最小アスファルト量を求める「カンタプロ試験」による配合設計法が提案された⁵⁾。1996年には、「排水性舗装技術指針（案）」が社団法人日本道路協会より発行され、これを取り込んだ「舗装施工便覧（平成18年版）」より、排水性舗装用混合物は「ポーラスアスファルト混合物」と呼ばれ、一般的なアスファルト混合物に分類されている。

2.2 ポーラスアスファルト混合物の配合設計法^{6,7)}

一般的な加熱アスファルト混合物ではマーシャル安定度試験により設計アスファルト量を決定している。しかし、ポーラスアスファルト混合物は粒度が粗く、目標とする空隙率が大きいいため、マーシャル安定度試験を用いた配合設計方法では、設計アスファルト量を定めることは困難である。また、マーシャル安定度試験およびホイールトラッキング試験において、アスファルト量を変化させて、試験した結果も報告されており、ポーラスアスファルト混合物はアスファルト量を変化させても試験結果に差が見られなかった⁸⁾。そのため、ポーラスアスファルト混合物の配合設計法として「ダレ試験」と「カンタプロ試験」が提案され、これらを基に設計アスファルト量を決定することとされている。

密粒度アスファルト混合物との違いを踏まえながら、ポーラスアスファルト混合物の特徴や配合設計法の詳細について述べる。

(1) ポーラスアスファルト混合物

ポーラスアスファルト混合物は、空隙率の高い開粒度のアスファルト混合物の一種で、骨材の最大粒径が20mmもしくは13mmであり、ポリマー改質アスファルトH型を使用した混合物である。目標とする空隙率は20%程度とされ、主に表層（路面）に用いられる。ポーラスアスファルト混合物は高い空隙率を持つため、アスファルトに強い接着力が求められる。また、空隙が多いため水や空気、紫外線の影響を受けやすく、アスファルトの劣化を鑑みて、骨材を覆っているアスファルトの膜厚を厚くする必要がある。

(2) 配合設計法

図-9にポーラスアスファルト混合物の配合設計手順を示す。ポーラスアスファルト混合物の配合設計時の最適アスファルト量を決定するためには、通常のアスファルト混合物の配合設計で使われるマーシャル安定度試験は使用せず、ダレ試験で最適（最大）アスファルト量を求める。カンタプロ試験は、供試体作製時にアスファルトの滲み出しが観察された場合には、カンタプロ試験から求めた最小アスファルトとダレ試験から求めたアスファルト量の範囲から設定する。

(3) ダレ試験

ポーラスアスファルト混合物が、高温度で静的に保持する最大アスファルト量を求めることを目的として利用されている。ダレ試験は、各骨材をあらかじめ求めた配合割合に従って計量し、所定の温度まで加熱する。混合器に移して空練りし、アスファルトを加え、

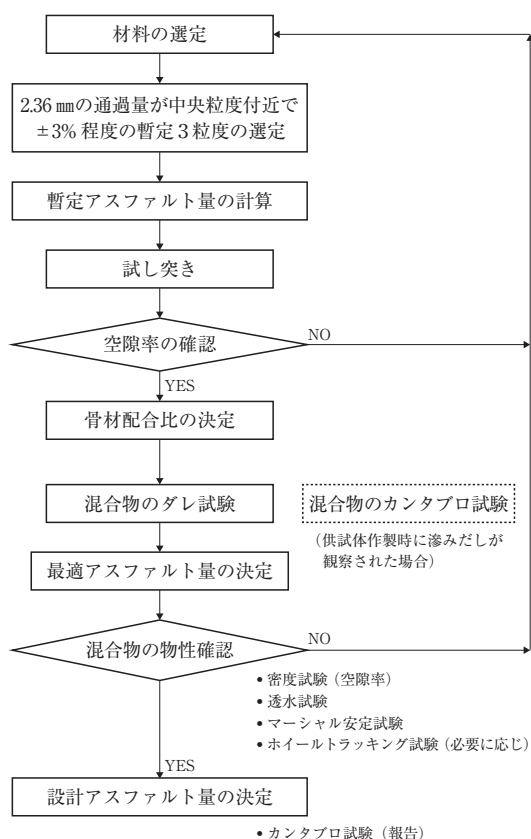


図-9 ポーラスアスファルト混合物の配合設計手順

骨材が十分に被膜されるまですばやく混合する。試験試料は、約2kgが目安である。その後、質量を測った受け皿に均一に混合物を敷均した後、合わせた質量を測定する。乾燥機で保温後、受け皿を反転させるなどして、アスファルト混合物を取り去った後、受け皿と受け皿に付着したアスファルトモルタルの質量を測定する。これらの質量からダレ量を求めることができる。

最大アスファルト量を求める方法は、まず、上記試験のアスファルト量を4.0～6.0%の範囲で0.5%毎に設定する。次に、それぞれアスファルトモルタルのダレ量を測定し、アスファルト量とダレ量の関係曲線から変曲点を求めてこれを最大アスファルト量とする。なお、上記の範囲で、変曲点が明確にならない場合は、4.0%以下または6.0%以上のアスファルト量について、変曲点が明確になるまで0.5%毎に試験を追加する(図-10)。

(4) カンタブロ試験

アスファルト混合物の骨材飛散抵抗性を評価することを主目的としているが、ポーラスアスファルト混合

物の最小アスファルト量を求めることを目的として適用する場合もある。カンタブロ試験は、マーシャル安定度試験に準拠した供試体を作製し、 -20°C ～ 20°C で設定した試験温度で20時間養生する。その後ロサンゼルス試験機のドラムに入れ、所定の回数まで回転させる。試験前後の供試体質量から損失率を求め、骨材飛散抵抗性を報告することとしている。なお、試験温度は通常 20°C で実施するが、積雪寒冷地で適用する場合には、 0°C や -20°C で実施することがある。

最小アスファルト量を求める方法は、一般的にアスファルト量を4.0～6.0%の範囲で0.5%毎に設定したポーラスアスファルト混合物について、それぞれ損失率を測定し、アスファルト量と損失率の関係曲線から変曲点を求めてこれを最小アスファルト量とする。なお、上記の範囲で、変曲点が明確にならない場合は、4.0%以下または6.0%以上のアスファルト量について、変曲点が明確になるまで0.5%毎に試験を追加する(図-11)。

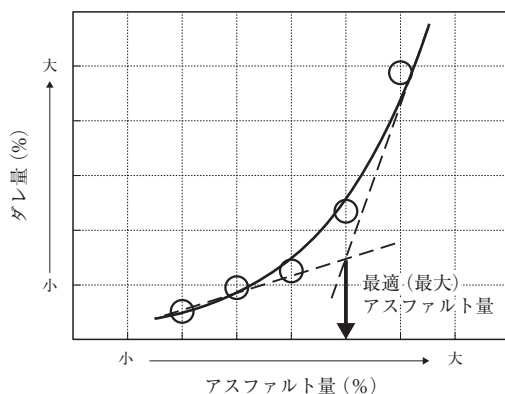


図-10 最適アスファルト量の決定手法

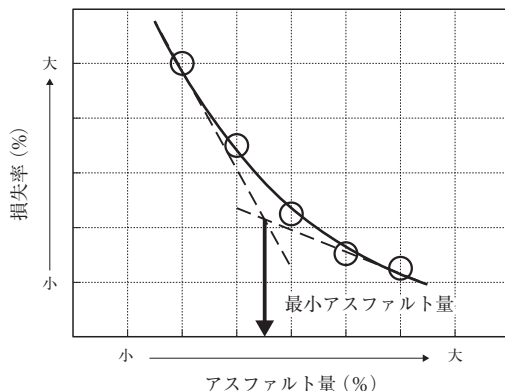


図-11 最小アスファルト量の決定手法

2.3 排水性舗装に類似した混合物

(1) 透水性舗装⁶⁾

排水性舗装とよく似た舗装で透水性舗装が挙げられる。これらの言葉の意味合いとしては似ているが、構造としては全く異なるものである。図-12にそれぞれの構造を示す。

排水性舗装は、雨水を不透水性の層以深に通さず、路肩に排水する構造に対し、透水性舗装は雨水を路盤以下へ浸透させている。どちらも車両走行時の水はねの防止効果を持つ。高速道路等では、表層より下の層へ水を浸入させないため排水性舗装が適用されており、透水性舗装は下水・河川への雨水流出抑制効果を有しているため、河川施設等への負荷の懸念がある箇所に適用されている。

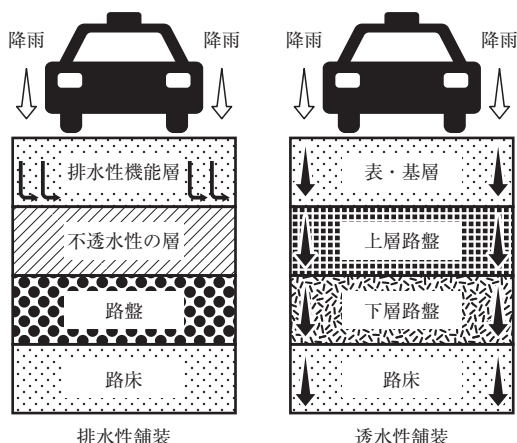


図-12 舗装構造の例

(2) 小粒径ポーラスアスファルト混合物⁹⁾

小粒径ポーラスアスファルト混合物（以下、小粒径ポーラス）は首都高速道路（以下、首都高）で使用されている混合物である。

首都高は、トンネル部以外では雨天時の視認性向上やハイドロプレーニング現象の対策、車両走行時の騒音低減を目的として約20年間ポーラスアスファルト混合物を使用してきたが、ポットホールの緊急補修回数の増加に伴い、ポーラスアスファルト混合物が有する優れた機能に加え、補修しやすい混合物の開発に取り組み、小粒径ポーラスアスファルト混合物が誕生した。

小粒径ポーラスアスファルト混合物は、骨材の最大粒径が5mmであり、小粒径ポーラスアスファルト混合物用のアスファルト（小粒径用ポリマー改質アスファ

ルトH型）を用いる。最大粒径を13mmから5mmにすることで、基層との層間付着面積が増加し、接着強度が増加、層間剥離抵抗性が向上している。

2.4 欧州・米国における排水性舗装の配合設計や評価方法^{10, 11, 12)}

排水性舗装に関する欧州・米国調査は、高速道路調査会・舗装研究委員会が欧州（1991、1994年度）およびアメリカ（1992年度）を対象に現地へ赴き海外の排水性舗装の現状を調査したほか、文献調査も併せて実施し、報告書としてまとめたものである。この調査の目的は、排水性舗装を日本で適用するための情報を収集することであり、調査団を結成し、欧州各国、アメリカ各州の調査にあたった。

ポーラスアスファルト混合物の歴史は1930年代にアメリカのオレゴン州で行われたのが最も古く、当初はシールコートを混合式で行うという発想のもと行われていたが、施工が多くなるにつれて独立したひとつの工法となった。ポーラスアスファルト混合物は当時、州によって混合式シールコート、アスファルト摩擦層、ポップコーンミックスなどと呼ばれていた。

ポーラスアスファルト混合物が実際に用いられ始めたのは1960年代であり1970年代に施工が多くなった。欧州では1970年代に試験を開始した国もあるが、その多くは1980年代前半に試験をはじめ、後半に施工が行われるようになった。

配合設計に関しては、気候や気温の観点から日本よりも設計に対して厳しい条件の国も存在した。また、北欧を除く欧米諸国では、1970年代前半からスパイクタイヤがほぼ全面的に制約されており、耐摩耗性の評価を考慮した観点においては、欧米を参考にするのは難しいと考えられた。

(1) 排水性舗装の目的

欧州では、各国ともに騒音の低減を主目的とし、走行安全性を副次的効果と位置付けている。アメリカにおいても走行安全性、騒音低減を目的として施工されている。

(2) アスファルトの種類と添加剤

欧州は改質アスファルトを用いる国が多いのに対し、米国ではストレートアスファルトが主流となっている。欧州が使用している改質アスファルトは、ゴム粉改質とポリマー改質、高粘度改質アスファルトなど様々である。

(3) アスファルト量の決定方法

アスファルト量の決定方法は各国で異なるが、欧州

では、ダレ試験、粗骨材の空隙算出、ジャイレトリでの締固めによる空隙率の評価、カンタプロ試験のいずれか、もしくは複数で決定している。

アメリカのFHWA（Federal Highway Administration／米国運輸省連邦道路局）はポーラスアスファルト混合物をOGFC（Open Graded Friction Courses／開粒度摩擦層）といった名称で呼んでおり、アスファルト量は骨材の表面容量係数（オイル法）を求め、骨材重量に対するアスファルト量を算出して決定する。また、同じアメリカでもジョージア州交通運輸局試験法GDT-114では、3つの方法（オイル法、改良マーシャル法、パイレックス・ボウル法）で求めたアスファルト量を平均して最適アスファルト量を決定している。

(4) 混合物の性状確認試験

アメリカでは、49℃で4日間水浸後の残留強度を求め、50%以上を規定としている。

スペインでは、アメリカと同条件で水浸したマーシャル供試体でカンタプロすりへり試験を行い、混合物の耐水性を求めている。また、オランダではホイールトラッキング試験、動的曲げ試験などが行われている。

(5) 舗装の施工厚さについて

1930年代のアメリカのオレゴン州においては施工厚1.9cm、最大粒径12.5mm、1940～1950年代の西部の州ではプラントミックスシールコートが用いられ、その施工厚は1.6～1.9cmであった。FHWAでは1.9cmを推奨している。欧州では、施工厚2.5～5cm、最大粒径

11～16mmが主流である。なお、排水能力や騒音低減能力の観点から、施工厚5cmが標準のオランダ以外は施工厚4cmを標準としている。

欧州と比較してアメリカが薄層で施工されている理由は、プラントミックスシールコートが、凹凸の大きい路面の平坦性を改善し、ハイドロプレーニング現象を抑えて、すべり抵抗性の高い路面になることがわかったためである。

今回紹介した各国の違いについて、表－1に総括した。

2.5 排水性舗装の現在

排水性舗装は1989年から日本で使用され始め、他の混合物とは異なる排水性能を求められた。要求性能に応じたポーラスアスファルト混合物の導入に伴いアスファルトの開発が進められ、混合物試験のダレ試験やカンタプロ試験が提案され現在に至る。またその他の混合物でも紹介した小粒径ポーラスや東日本高速道路(株)・中日本高速道路(株)・西日本高速道路(株)で使用されている不透水層を併せ持つ高機能Ⅱ型用混合物、凍結抑制機能を有した混合物等、時代のニーズに伴い排水性舗装は多様化している。

3. 再生アスファルト混合物における配合設計

維持修繕工事にともなって発生する産業廃棄物としてのアスファルトコンクリート塊（以下、アスコン塊）の適正な処理や有効活用という観点から、再生利用技術は発展してきた。再生利用技術については、社会情

表－1 各国の排水性舗装の違いについて

項 目	アメリカ	フランス	オランダ	ドイツ (西ドイツ)	ベルギー
名 称	Open graded friction course	Porous asphalt	Porous asphalt	Drain asphalt/open graded asphalt	Porous asphalt
目 的	当初は下層シール 現在はすべり抵抗改善	高速道路；走行安全性、 わだち対策、乗り心地 市街地；走行安全性、騒 音対策、水はね防止	走行安全性、混雑緩和、 騒音対策	騒音対策（市街地）、 水はね防止	走行安全性、騒音対策
施工厚さ	16～19mmが標準 （スクリードひきずり、 キックアウト）	40mmが一般的	40～50mm	40mm	25mm or 40mm
アスファ ルト量	St.As.：6.0～7.0% （対骨材）	改質As：4.5～5% （ファイバー0.3～0.5% 添加の場合；5～5.6%）	St.As.：4.5% （ファイバー or ロック ウール0.2～0.3%添加）	改質；6.0～7.5% （アーボセル0.3～0.5% 添加）	改質；4～5% St.As.：4～5% リサイクルゴム；5.5～ 6.5%
空隙率	最小15% （20%の意見もある）	20% （連続空隙率；15～18%）	20%	18%以上 （両面25回突き）	22%（16～28%）
アスファ ルト量 決定方法	FHWAの推奨法 $A = (2k + 4.0) \times 2.65 / S$ A=対骨材As% $K = 4.75nn$ 以上の表面係数 $S = 2.36mm$ 以上の比重 （その他修正式や目視調 整の州あり）	ジャイレトリによる締固 め；空隙率、連続空隙率 の評価 Duriez試験（剥離抵抗性） ダレ試験 カンタプロ試験	空隙率に着目して マーシャル試験	記載なし	粗骨材の空隙算出 マーシャル空隙とカン タプロ減量を求める ダレないAs量、交通荷 重による空隙変化の少 ないAs量を選定

勢に応じていくつかの指針や便覧にまとめられてきており、本章では、再生アスファルト混合物の配合設計についての基準や既定の変遷について、それらの図書から読み解いていく。

3.1 舗装廃材再生利用技術指針 (案)¹³⁾

1984年に発刊された「舗装廃材再生利用技術指針 (案)」における再生利用方法は表－2のように分類されている。

混合所で製造する再生アスファルト混合物の配合設計は、再生アスファルト混合物を主体として再生用添加剤や補足材料を加える場合と、新しい材料を主体として再生アスファルト混合物を補足的に使用する場合があるが、いずれの場合も通常の加熱アスファルト混合物の品質に適合するように配合設計を行う。また、再生アスファルトの針入度が設計針入度に適合するように再生骨材の品質を調整する方法が規定され

表－2 アスファルト混合物の再生利用方法

再生 利用 方法	路盤に 係るもの	混合所で製造した再生路盤材または再生加熱アスファルト混合物による方法
		路上再生路盤工法による方法
	表層・基層 に係るもの	混合所で製造した再生加熱アスファルト混合物による方法
		路上表層再生工法による方法

注) このほか簡易な舗装の表層・基層に係るものについては、混合所で再生常温アスファルト混合物を製造して利用する方法や、可搬式の簡易な装置を利用した現場再生方式等がある。

ている。再生アスファルト混合物の配合設計手順を図－13に示す。

3.2 路上表層再生工法技術指針 (案)¹⁴⁾

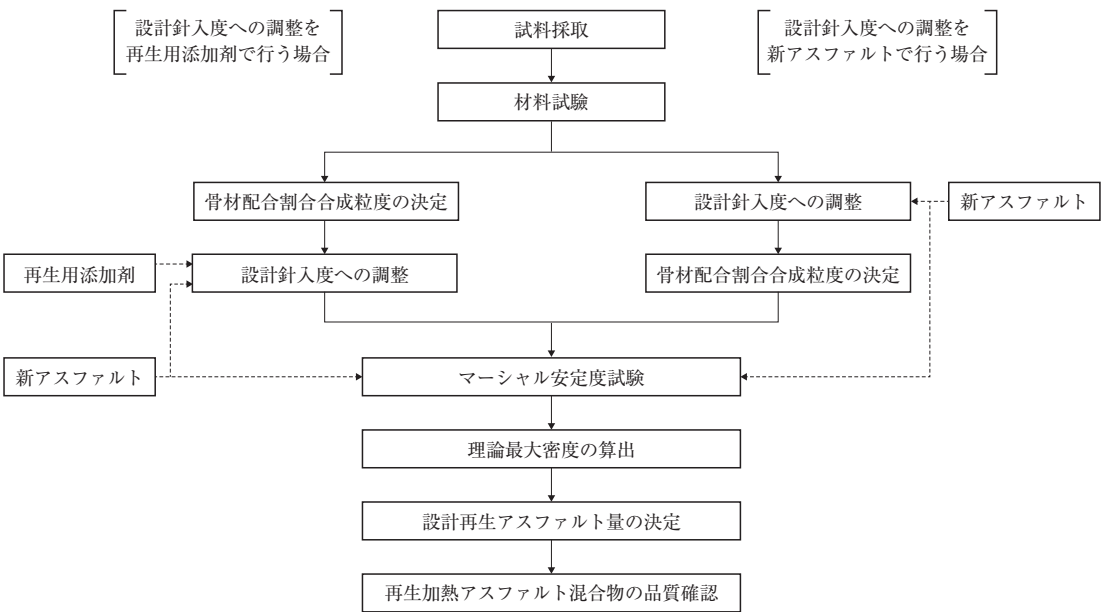
アスファルト混合物の再生利用方法には、混合所においてだけでなく、路上において既設舗装を再生する方法もある。1988年に発刊された「路上表層再生工法技術指針 (案)」には、路上表層再生工法のリミックス方式とリベープ方式のそれぞれについて配合設計の手順が記載されている。いずれも設計針入度へ調整する方法である。

3.3 再生資源の利用の促進に関する法律

1991年には「再生資源の利用の促進に関する法律」が施行され、舗装発生材の再資源化が要請されるようになった。これを受けて1992年に「舗装廃材再生利用技術指針 (案)」の全面的な見直しがなされ、「プラント再生舗装技術指針」が発刊された。この指針では再生アスファルト混合物を重交通路線の表層へ適用することが認められ、出荷量が急激に増大した。また、再生アスファルト混合物のみでのマーシャル安定度試験から推定針入度を求める方法が記載されているほか、再生アスファルト混合物の配合率が10%以下となる配合設計は、新材のみの混合物と同様の配合設計を行ってよいこととなった¹⁵⁾。

3.4 舗装再生便覧^{16, 17)}

舗装に関する再生利用技術について、具体的かつ網



図－13 再生アスファルト混合物の配合設計手順 (設計針入度へ調整を行う場合)

羅的に記したのが、2004年に発刊された「舗装再生便覧」である。発刊の背景には、2000年「循環型社会形成推進基本法」や2001年「舗装の構造に関する技術基準」の制定があった。本書にはプラント再生舗装工法における設計針入度への調整について、「一般に再生骨材を主体とする場合は再生用添加剤で、新しい材料を主体とする場合は新アスファルトで行っている場合が多い」との記述がある。また、路上再生路盤工法においては、フォームドアスファルトを使用する場合についても記載されている。

舗装再生便覧は2010年に改訂され、改質アスファルト由来の再生アスファルト混合物や他産業再生資材についての記述が追加された。1998年頃には再生アスファルト混合物の出荷割合が全体の50%を超えており、アスファルト混合物の繰り返し再生の増加が懸念されていたことを受けての改訂であった。

アスコン塊は再資源化率も高く、最終処分量の減少に大きく寄与している。しかしながら上述したように改質アスファルト由来の再生アスファルト混合物や繰り返し再生されたアスファルト混合物の増加に伴い、再生骨材の品質規格である針入度20を下回る材料が多くみられるようになった。そこで、低針入度化したアスファルト発生材に対して、素材としてではなくアス

ファルト混合物としての評価を行うことでアスファルト発生材の有効利用を図った。このため、改訂された舗装再生便覧からは配合設計にあたって、これまでの設計針入度への調整以外に、設計圧裂係数への調整を行う方法が示されており、どちらの方法を用いてもよいとされている。設計圧裂係数への調整を行う場合の再生アスファルト混合物の配合設計手順を図-14に示す。

他産業資材としては、溶融スラグ、ガラス、廃タイヤ、木材チップ、貝殻、フェロニッケルスラグが挙げられている。これらは骨材の代わりや舗装用材料としての利用が想定されている。いずれも環境安全性、品質、経済性、供給量が重要であり、それぞれについて基準が細かく記載されている。

また、舗装再生便覧発刊の時点ではポーラスアスファルト混合物の再生利用技術が確立されていないものの、平成16年から平成17年にかけて行われた国道の試験舗装の事例を取り上げている。この事例の配合設計では、旧アスファルトの再生方法として、再生アスファルトを使用する方法、改質剤入りの再生用添加剤を使用する方法、再生用添加剤と改質剤を使用する方法の3例が挙げられている。ここでは再生の程度の指標として、新規ポーラスアスファルト混合物と同等のカンタブロ損失率を得ることを目標としている。

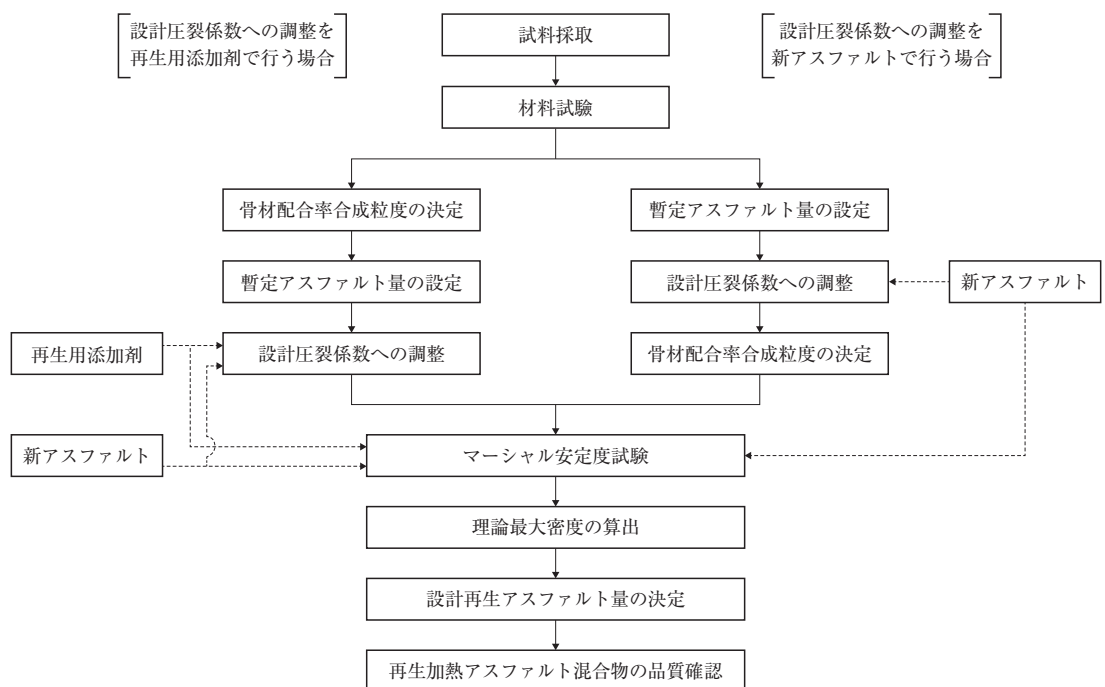


図-14 再生アスファルト混合物の配合設計手順（設計圧裂係数へ調整を行う場合）

3.5 今後の再生技術に求められるもの

「建設リサイクル推進計画」は1997年に策定されて以来、概ね5年に一度見直しが行なわれ、2020年には「建設リサイクル推進計画2020」が策定された。ここでは新規施策として、「廃プラスチックの分別・リサイクルの促進」、「リサイクル原則化ルール」の改定、「建設発生土のトレーサビリティシステム等の活用」に取り組むことが掲げられ、維持・安定期に入ってきた建設副産物のリサイクルについて、今後は「質」の向上を重視するものとしている。

4. SUPERPAVE

わが国のマーシャル安定度試験を用いた現行の配合設計は経験に基づく簡便的な手法であるが、1章でも述べているとおり、供用後の耐久性は考慮されていないなどの課題がある。そこで4章では、供用後の耐久性を考慮しレオロジー理論を取り入れた配合設計として、アメリカのSHRPの研究成果であるSUPERPAVEについて紹介する。

4.1 SUPERPAVEが誕生した背景

SUPERPAVE (Superior PERforming Asphalt PAVements) は、アメリカのSHRP (Strategic Highway Research Program：新道路研究計画) の研究成果の一つとして開発され、1995年に公表されたアスファルト舗装の材料規格や試験方法、配合設計法の総称である。

SUPERPAVEが開発されるに至った背景として、以下のことが挙げられる。

○オイルショック (1973年)

景気低迷により公表事業の予算が減少したことで、1970年代後半に道路品質が低下した。

○自動車の最大積載量の引き上げ (1982年)

1982年に自動車の最大積載量が73,280ポンド (約33.2t) から80,000ポンド (約36.3t) に引き上げられたことで、舗装の負担が40～50%増加したと考えられる¹⁸⁾。

○ラジアルタイヤの普及

ラジアルタイヤの普及により、タイヤの接地圧が増加し、舗装に対する負荷が高まることとなった¹⁸⁾。

○再生骨材の使用

アスファルト再生骨材の使用が始まったことで、混合物の供用性が低下した。

上記の結果、財政難からくるメンテナンスの対応不足や道路産業の研究への投資不足もあり、アメリカの

道路施設の荒廃がさらに進むこととなった。このことが社会的に大きく問題化したため、アメリカ連邦政府は対応策の検討を重ね、積極的かつ効率的な研究投資を行い、新しい技術と材料の開発に力を注ぐことが必要だという結論に達した。これを受けて1987年10月に発足した研究プロジェクトがSHRPである。

SHAPは5年間という期限内に、定められた研究課題を総合的かつ集中的に国家的な規模で行うことが基本の方針として組み込まれており、道路の耐久性向上と維持管理技術の革新を図るために特別な予算が割り当てられた計画となった。また、SHAPは研究すべき課題として以下の4項目を挙げた。

- (1) アスファルト
- (2) 舗装の長期供用性
- (3) コンクリート構造物
- (4) 道路管理

4項目のうち、(1)アスファルトと(2)舗装の長期供用性についての研究成果が、SUPERPAVEである。

SUPERPAVEの基本的な思想は、供用性を中心にしてアスファルトから混合物までの材料規格を設定し評価することにある。

4.2 SUPERPAVEの概要

SUPERPAVEではアスファルトの品質を損なう要因として、劣化、永久変形、低温ひび割れ、疲労ひび割れ、水分への反応、接着力、これら6つの損傷形態を問題視した。

アスファルト舗装は、高温時にはわだち掘れ、低温時にはひび割れ等の温度に起因した損傷が起こることから、適用地域の環境を考慮してアスファルトを選択すべきとし、SUPERPAVEでは舗装体の最高、最低供用温度から試験条件を定めた。さらにレオロジー理論を適用した理論的な試験方法を実施するとともに、促進劣化方法を併用することで、長期耐久性に対応した仕様となっている¹⁹⁾。

(1) 配合設計手順²⁰⁾

SUPERPAVEの配合設計はバージンおよび再生密粒混合物、また新設の表基層および路盤あるいはオーバーレイの混合物に適用可能である。

図-15に配合設計の手順を示す。この配合設計では、対象となる路線の交通量に応じて、設計LEVEL 1～3を選択する。表-3に設計LEVELと交通量を示す。LEVEL 1は混合物の容積配合を決定するまで、LEVEL 2, 3は容積配合に加え、舗装の性能予測に伴う各種試験が必要である。

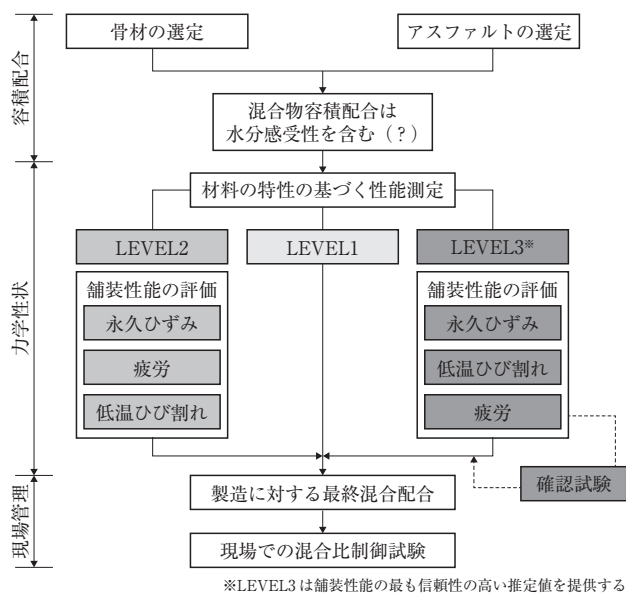


図-15 SUPERPAVEの配合設計の手順

表-3 アスファルト混合物の再生利用方法

設計LEVEL	設計交通量80kN換算軸数
1	$\leq 10^6$
2	$\leq 10^7$
3	$> 10^7$

(2) アスファルト仕様^{20, 21)}

SHRPのアスファルト仕様は、アスファルトの力学性状と供用性状が考慮されており、PG (Performance Grade) と呼ばれるグレードに分類される。PGはアスファルトが使用される地域の舗装体の最高、最低温度により細かく設定されており、規格の一部を表-4に示す。

またアスファルト仕様における評価試験は、レオロジー的測定と劣化試験を組み合わせることによって、実際の供用状態を意識した評価を行っている。評価試験のフローを図-16に示す。

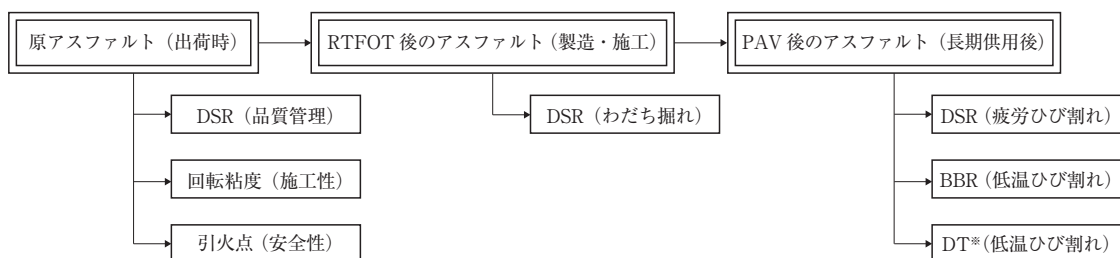
表-4 SHRP アスファルト仕様

パフォーマンスグレード	PG58					PG64					
	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40
7日間平均舗装体設計最高温度 ℃	< 58					< 64					
舗装体設計最低温度 ℃	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40	> -10	> -16	> -22	> -28	> -34	> -40
原アスファルト											
引火点 最低温度℃						230					
粘度 ≤ 3Pa・s						135					
ダイナミックシア G*/sinδ ≥ 1.00kPa 25mm プレート、ギャップ 1mm 周波数 10rad/s、試験温度 ℃	58					64					
回転薄膜加熱試験 (RTFOT) 残渣											
最大質量損失 %						1.00					
ダイナミックシア G*/sinδ ≥ 2.20kPa 25mm プレート、ギャップ 1mm 周波数 10rad/s、試験温度 ℃	58					64					
加圧劣化試験 (PAV) 残渣											
PAV 試験温度 ℃						100					
ダイナミックシア G* sinδ ≤ 5,000kPa 8mm プレート、ギャップ 2mm 周波数 10rad/s、試験温度 ℃	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
クリープスティフネス S ≤ 300MPa m-値 ≥ 0.300 載荷時間 60s、試験温度 ℃	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
ダイレクトテンション 破断ひずみ ≥ 1.0% 載荷速度 1.0mm/min 試験温度 ℃	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

※1) $G^*/\sin\delta$, $G^*\sin\delta$ は、ダイナミックシアレオメータ (DSR) によって測定される動的粘弾性状を示す値の一種

※2) Sは、ペンディングビームレオメータ (BBR) によって測定されるクリープスティフネス

※3) m 値は BBR によって測定される S の傾き



※ BBR において、 $m \geq 0.30$ 、 $300\text{MPa} \leq S \leq 600\text{MPa}$ の場合について行う

図－16 アスファルト評価試験のフロー

(3) 締固め^{20, 21)}

SUPERPAVE 法は、設計プロセスで作製する供試体の締固めにジャイレトリコンパクタを用いる。装置の概要と動作の原理を図－17に示す。任意の旋回数で供試体の締固めを行い設計パラメータの値を求める。設計パラメータとして、空隙率、骨材間隙率、飽和度が採用されており、これらの規定値に基づき骨材粒度および設計アスファルト量を設定する。

ジャイレトリコンパクタを採用した理由は、骨材の配向や深さ方向の密度分布が現場の実際の転圧機械

と最も良く一致したからだと言われている。

4.3 SUPERPAVEで用いられる評価試験

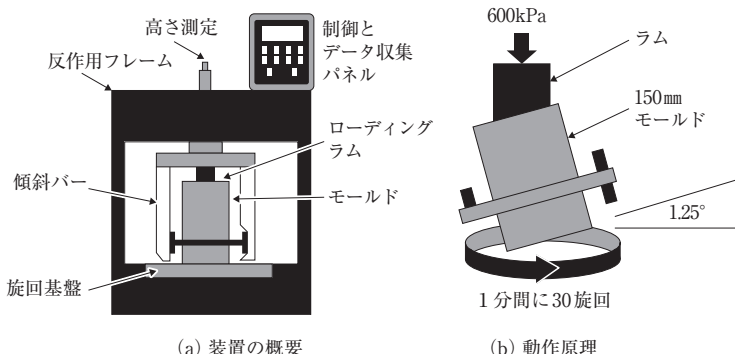
SHRPの成果の一つとして、アスファルトに関する試験機および試験法の確立が挙げられる。表－5に確立された試験を示す。これらの試験は、アスファルト舗装技術に大きな影響を与えており、わが国においても現在のところ配合設計に組み込まれてはいないが、試験法便覧に記載されるなど、研究開発機関などでの活用が見られる。この節ではSUPERPAVEで用いられる評価試験の中でも、日本で活用が見られるものについて紹介する。

(1) アスファルトの促進劣化

○加圧劣化試験

加圧劣化試験（以下、PAV）はSUPERPAVEの『アスファルト仕様』の中で規定された、舗設後の長期供用におけるアスファルトの劣化性状を室内で再現するために行う試験である。試験装置を写真－1に、装置概要を図－18に示す。長期供用後の劣化を再現することから、プラントでの製造から敷均しまでの劣化状態を再現するRTFOT（回転薄膜加熱試験）やTFOT（薄膜加熱試験）後の試料に対してPAVを実施する。

TFOT、PAVはともにアスファルトの促進劣化試験だが、一方のみを試験すればよいというものではない。既存研究より、加熱劣化と加圧劣化では異なる化学反応が起きていると考えられている。図－19は、TFOTとPAVによる化学的な変化について時間を追って分析した例である。



図－17 SHRPのジャイレトリコンパクタ²¹⁾

表－5 SHRPの研究により確立された試験

試験装置	測定項目	評価目的
アスファルトの促進劣化	RTFOT	-
	PAV（加圧劣化）	-
アスファルトの性能評価	BBR（ベンディングビームレオメータ）	曲げクリープスティープネス
	DSR（ダイナミックシアレオメータ）	動的粘弾性
	DTT（ダイレクトテンション）	破断応力 破断ひずみ

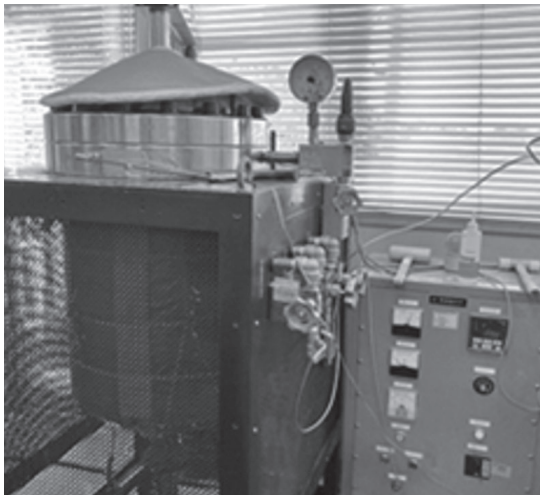
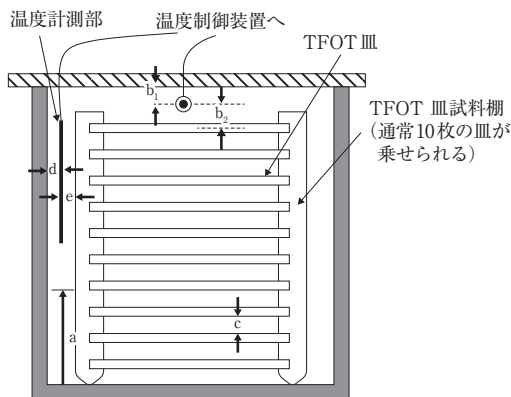


写真-1 PAV装置例



- aは、試料棚の水平を確保するために測定するもので、試料棚の支持部から皿の底面までの距離がどの部分でも $\pm 0.05\text{mm}$ 以内とする。
- 温度計測部とPAV内壁の空間： $b_1 \geq 10\text{mm}$
- 温度計測部とアスファルト試料表面の空間： $b_2 \geq 10\text{mm}$
- 皿と皿の距離： $c \geq 12\text{mm}$
- 温度計測部と内壁の空間： $d \geq 10\text{mm}$
- 温度計測部と飼料糧の空間： $e \geq 5\text{mm}$

図-18 PAVの概要²²⁾

TFOTおよびPAVによる劣化も、酸化度合いを示すカルボニル基は同様の増加傾向を示した。しかし平均分子量は、TFOTによる劣化では非常に大きくなっていくのに対し、PAVによる劣化ではそれほど変化しなかった。この結果より、加熱と加圧では劣化のメカニズムが異なると考えられることから、目的に応じた劣化試験の使い分けが必要である⁵⁾。

(2) アスファルトの性状評価

○ベンディングビームレオメータ試験

ベンディングビームレオメータ試験（以下、BBR）は、アスファルトの曲げクリープスティフネスを測定しており、アスファルトのひび割れ抵抗性を評価する。試験装置を写真-2に、装置概要を図-20に示す。

SUPERPAVEでは、長期供用後のアスファルト舗装の低温におけるひび割れ抵抗性を評価するために、PAV後のアスファルトにBBR試験を実施している⁵⁾。

○ダイナミックシアレオメータ試験

わが国ではアスファルトの性状評価として、主に針入度や軟化点などを用いているが、SUPERPAVEではダイナミックシアレオメータ試験（以下、DSR）



写真-2 BBR装置

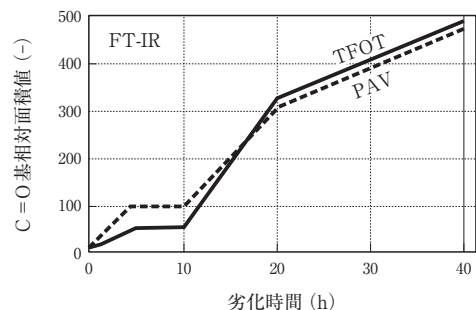
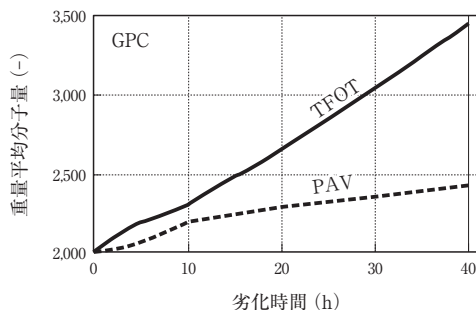


図-19 劣化試験による化学性状の経時変化²²⁾

が用いられている。DSRはアスファルトの動的粘弾性を測定することで、混合物の永久変形および疲労ひび割れ抵抗性の評価が可能である。DSRの試験装置を写真-3に、試験概要を図-21に示す。

DSR試験は、2枚の平行円盤（プレート）の間にアスファルトを挟み、回転方向に一定の載荷周波数で振動を与えて応力やひずみを計測するものである。試験で得られるパラメータを表-6に、また動的粘弾性の概念について図-22に示す。

SUPERPAVEでは載荷周波数を10rad/sとして試験

を実施しており、これは実道の走行速度を80～100km/hで想定している。図-23の（a）に示すように、載荷周波数はアスファルトの粘弾性状に大きく影響しており、供用状態に近い粘弾性状を再現するには、適応場所ごとの走行速度に合わせて載荷周波数を変える必要

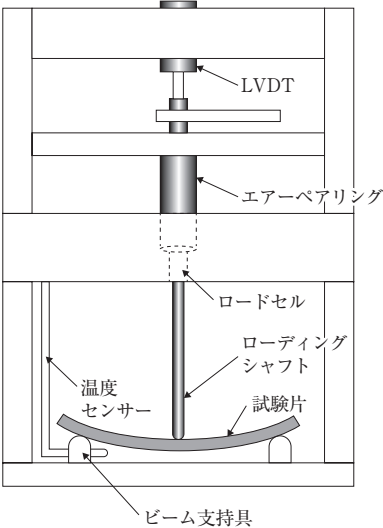


図-20 BBRの装置概要²²⁾



写真-3 DSR試験装置

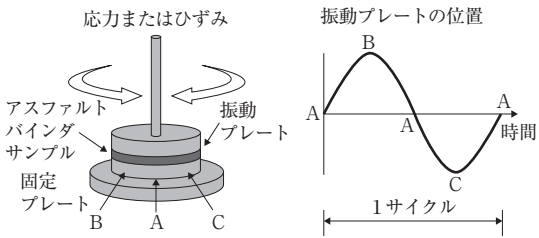


図-21 DSRの試験概要²²⁾

表-6 DSRで得られる試験パラメータ

パラメータ	性質
G^* (複素弾性率)	硬さや粘さの指標 貯蔵弾性率と損失弾性率の緩和
δ (位相角)	0° に近づく：弾性的 90° に近づく：粘性的
$G^* \sin \delta$	疲労ひび割れに対する評価指標
$G^* / \sin \delta$	永久変形に対する評価指標

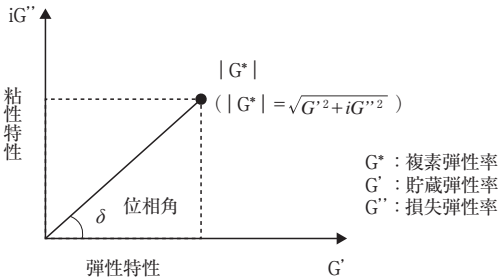


図-22 動的粘弾性の概念図

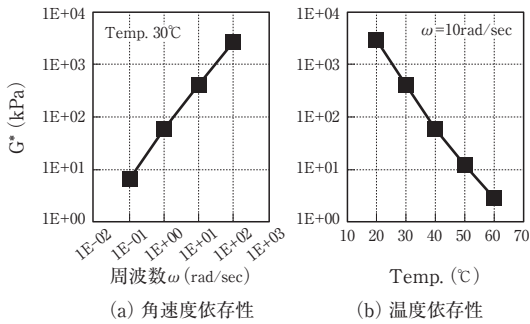


図-23 StAs60/80の周波数および温度と複素弾性率の関係²²⁾

がある。しかし、載荷周波数を小さくする効果（試験温度一定）と温度を高くする効果（周波数一定）には同様の効果が得られるため、SUPERPAVEでは走行速度の違いに対して試験温度を変えることで対応している⁵⁾。

4.4 国内でのSUPERPAVEの現状

現在、日本では配合設計およびアスファルトの品質規格などにSUPERPAVEを導入する動きは見られない。しかし、試験法便覧にはSUPERPAVEで用いられる評価試験方法が記載されており、近年ではアスファルトメーカーを中心にDSR試験の論文が多くみられることから、研究開発機関においてはSUPERPAVEで開発された試験法の部分的な活用が見られる。

昨今では、再生合材の高品質化や舗装の長寿命化が求められることから、配合設計時に供用後の耐久性を考慮するSUPERPAVEは非常に興味深い。

おわりに

本稿では、戦後から現在にかけて広く普及したマーシャル安定度試験、排水性舗装や再生アスファルト混合物に用いられる配合試験、海外で生まれたSUPERPAVEに着目して調査を行った。調査メンバーの中にも普段業務として配合試験を行うものもいるが、その試験が普及するまでの経緯や、海外の試験法については知らないことばかりで、今回の調査によって配合試験に関する理解を深め、知見を得ることができた。また、現在の各種アスファルト混合物の配合設計は最適といえるか、もっと良い配合設計方法が存在するのではないか、という疑問が新たに芽生えたことも事実である。理論的な回答は出ていないものの、これまでの知見から最大公約数的に答えを求める配合設計方法が国内では最も普及しているが、そこに技術者が介入する余地は多分にあると考えられる。日本の道路事情がより良くなるためにも、配合設計を含めた舗装に関する技術の発展を期待するとともに、本稿が若手技術者の配合設計に対する理解の一助となれば幸いである。

— 参考文献 —

- 1) (社) 日本道路協会：道路工法叢書第6集アスファルト舗装要綱, pp.100-101,1
- 2) 南雲貞夫, 阿部頼政：アスファルト混合物試験－配合設計法の推移と将来－, アスファルト, Vol.18, No.100, pp.38-44, 1975
- 3) (公社) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧（平成31年版）〔第3分冊〕, B001
- 4) 達下, 森, 阿部, : 舗装, Vol.23, No.11, pp5, 1988
- 5) (公財) 高速道路調査会：高速道路の舗装技術史－未来の技術者のための参考書－, pp2-276, 2022
- 6) (社) 日本道路協会：舗装施工便覧, 2006.2
- 7) (公社) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧, 第3分冊, 2019.3
- 8) (社) 日本アスファルト協会：アスファルト, Vol.36, No.177, pp48-53, 1993
- 9) 首都高速道路株式会社：舗装設計施工要領, 2019.6
- 10) (財) 高速道路調査会・舗装研究委員会 欧州道路調査団：排水性舗装に関する欧州調査報告書, 1991.3
- 11) (財) 高速道路調査会 舗装研究委員会・米国道調査団：排水性舗装に関する米国調査報告書, 1992.3
- 12) 排水性舗装欧州技術調査団：排水性舗装欧州技術調査団報告書, 1994.9
- 13) (社) 日本道路協会：舗装廃材再生利用技術指針（案）, 1984.
- 14) (社) 日本道路協会：路上表層再生工法技術指針（案）, 1988.
- 15) (社) 日本道路協会：プラント再生舗装技術指針, 1992.
- 16) (社) 日本道路協会：舗装再生便覧, 2004
- 17) (社) 日本道路協会：舗装再生便覧（改訂）, 2010.
- 18) P. B. McGennis, R. M. Anderson, T. W. Kennedy, M. Solaimanian. : Background of SUPERPAVE Asphalt Mixture Design & Analysis, FHWA-SA-95-003, 1994
- 19) 片脇清士：舗装用バインダーに関する試験方法について, アスファルト 181, 第37巻, 1994 (社) 日本アスファルト協会
- 20) ペーブテックス研究会：SHRP Asphalt Technology Conference, Oct. 24-28, 1994, Reno, Nevada, USA 報告書
- 21) COMINSKY R. J. : The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays, SHRP-A-407 National Research Council 1994
- 22) (公社) 日本道路協会：舗装調査・試験法便（平成31年版）〔第2分冊〕, 第Ⅲ章試験編, 2019



日本大学工学部土木工学科 構造・道路工学研究室

2020年度に日本大学工学部に設立された構造・道路工学研究室を紹介させていただきます。当研究室はコンクリート工学を専門とする岩城教授と、舗装工学を専門とする前島専任講師の教員2名体制で活動しています。本稿では当研究室の活動の中でも、道路や舗装に関連する研究活動や研究施設について紹介させていただきます。

1. はじめに

日本大学工学部(写真-1)は福島県郡山市にキャンパスを構え、LOHAS (Lifestyles of Health and Sustainability, 健康的で持続可能な生活様式) 工学をスローガンに教育と研究に取り組んでいます。

当研究室は日本大学工学部土木工学科内において2020年度に設立した新たな研究室です。コンクリート構造物の維持管理を専門とする岩城一郎教授と、舗装工学を専門とする前島拓専任講師の教員2名体制で活動しています。それ以前は、岩城一郎教授と子田康弘教授(専門:コンクリート構造物の力学性能評価)の2名体制の下で『コンクリート工学研究室』としての活動をしてきました。

本稿の著者である前島拓専任講師も同研究室のOBであり、学生時代はコンクリート床版の研究に従事していました。卒業後は株式会社NIPPOに就職して舗装

分野に足を踏み入れ、2019年4月に日本大学工学部土木工学科に着任、『道路工学研究室』を立ち上げます。

その後、2020年度に子田先生が教授昇任と同時に独立することとなり、岩城教授と前島専任講師で新たに『構造・道路工学研究室』を立ち上げました。その体制は、教員2名に加えて、秘書1名、分析員1名、客員研究員6名、社会人ドクター2名、博士後期の大学院生1名(中国からの留学生)、博士前期の大学院生4名、学部4年生19名の計36名という大所帯です。

研究は実験的アプローチを基本に、要素レベルではなく実構造物のスケールを意識することをモットーとし、コンクリート構造物の長寿命化を目指した研究を行っています。道路舗装関連の研究は緒に就いたばかりではありますが、アスファルト舗装やコンクリート舗装の長寿命化やメンテナンス精度の向上を目指した研究にも取り組んでいます。

今回は、当研究室で取り組んでいるアスファルト関連の研究内容や教育活動、および研究施設について紹介させていただきます。

2. 研究の紹介

2.1 橋面アスファルト舗装の疲労損傷機構に関する研究

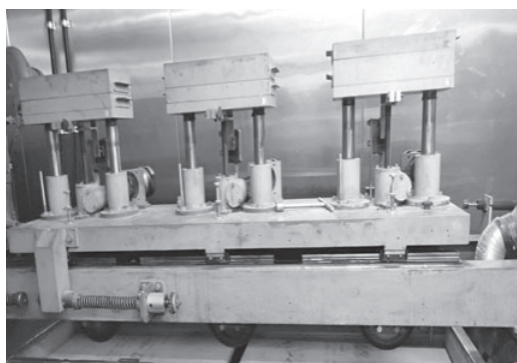
当研究室では、道路橋を構成する床版・防水層・アスファルト舗装を三位一体として捉えて、各部材の相互依存性を含めた疲労損傷機構を解明することや、こ



写真-1 日本大学工学部

れに立脚した維持管理手法を確立することが重要と考えています。例えば、橋梁のアスファルト舗装面にポットホールや土砂の噴出が生じている箇所で舗装を剥がすと、その直下にある床版コンクリートが砂利化（あるいは土砂化）しているケースが多く報告されています¹⁾。床版コンクリートの砂利化やアスファルト舗装のポットホールの発生要因については種々の検討が成されていますが、これらの研究の多くは『床版コンクリート』あるいは『アスファルト舗装』をターゲットにしたものがほとんどであり、床版上にアスファルト舗装が敷設された状態での疲労損傷過程や、床版の砂利化がアスファルト舗装の劣化に及ぼす影響についてはあまり検討されていません。

当研究室ではこれまでに、水浸ホイールトラッキング試験装置（写真－２）を用いて、床版コンクリート上層部の劣化がその直上にあるアスファルト舗装の疲労抵抗性に及ぼす影響について検討を進めてきました²⁾。当初は、アスファルト舗装版の浮き上がり防止治具（写真－３）の開発や、環境温度や模擬損傷の条



写真－２ 水浸WT試験装置
(ニチレキ株式会社技術研究所)

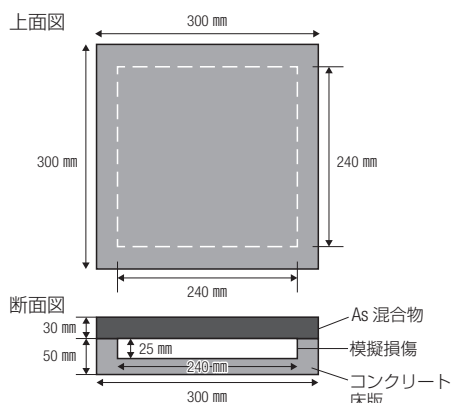


写真－３ 浮上り防止治具外観

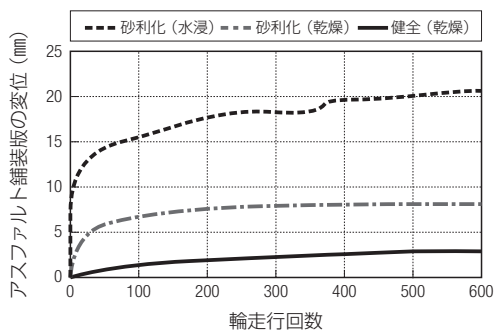
件について苦慮しながら橋面アスファルト舗装の損傷状態を再現し得る試験方法について検討を重ねました。供試体は、図－１に示すように、床版の砂利化を模擬したコンクリート版上にアスファルト混合物を敷設したオリジナル供試体を用いました。図－２に示すように、床版コンクリートに砂利化が生じた場合は橋面舗装の損傷が促進され、特にコンクリート版上に水が介在する場合には、著しく損傷が進行することが示されました。また、砂利化直上においては、輪荷重載荷によって舗装版に曲げひび割れが生じ、このひび割れが上面側に進展するという破壊形態が示され、床版上面に介在する細粒分と水が噴出するという実道路橋で見られる土砂の噴出現象も確認されました。

2.2 アスファルト舗装の非破壊検査に関する研究

近年、超音波や弾性波を応用した非破壊検査技術が開発されており、様々な分野で活躍の場を広げています。この種の非破壊検査装置は、舗装分野においても積極的に取り入れていく必要があると考えています。しかし、アスファルト混合物は温度によって弾性



図－１ 供試体概要



図－２ 舗装版の変位と走行回数の関係

特性が大きく変化するため、非破壊試験においてはアスファルト混合物の温度変化に伴う弾性特性を考慮しなければなりません。当研究室では、アスファルト舗装の非破壊検査技術向上を目指して、アスファルト混合物の温度変化に伴う弾性特性について検討を進めています。一例として、超音波パルス試験装置（写真－４）を用いて、アスファルト混合物の温度変化に伴う弾性波速度を整理した結果を図－３に示します³⁾。密粒度とポーラスで比較すると一目瞭然ですが、混合物の種類や空隙率によって弾性波速度が大きく異なります。この種の評価方法はFWDをはじめとする既存技術の高度化にもつながると考えており、アスファルト舗装の構造調査の高度化を目指して研究を進めています。

3. 研究施設の紹介

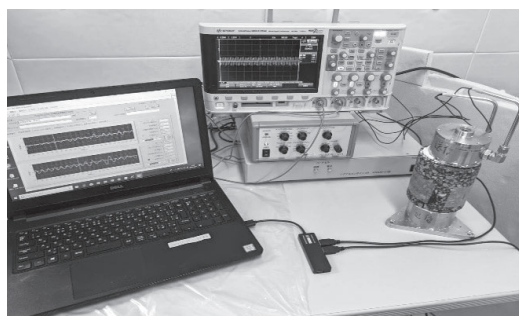
3.1 輪荷重走行試験装置

輪荷重走行試験装置（写真－５）は、橋梁上を走行する車の荷重状態を再現できる試験装置です。当研究室ではこれまでに、塩害やアルカリシリカ反応により劣化したRC床版の耐疲労性や、疲労損傷を受けたRC

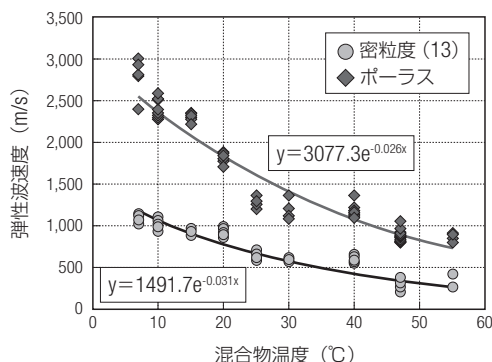
床版の補修・補強工法について検討してきました。得られた成果は土木学会論文賞を受賞するなど学術的にも高い評価を受けています⁴⁾。本試験装置は主に床版の疲労試験に使用されてきましたが、当研究室では現在『コンクリート舗装』の疲労試験が可能となるように大幅な改造を進めています。将来的にはアスファルト舗装の疲労試験も視野に入れており、型に嵌らない自由な発想を持ちながら新たな研究分野に挑戦していきたいと考えています。

3.2 LOHASの橋

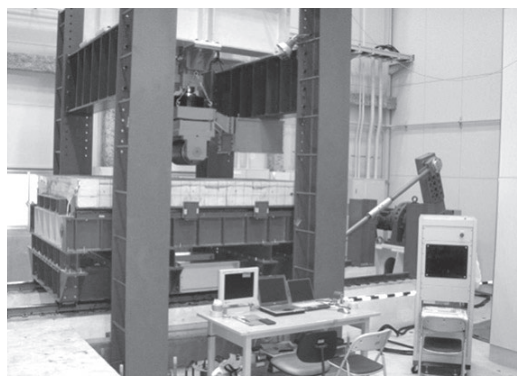
LOHASの橋（写真－６）は、日本大学構内に実物大の橋梁を再現した実験設備です。実際の橋梁と同じ条件下で実験を行うことにより現状に近い挙動を再現することができ、精度の高い実測データが得られます。当研究室ではこれまでに、材料や配合、施工法を変えた床版の耐久性評価や、塩害や凍害、アルカリシリカ反応といった東北地方で問題となる劣化に対する耐久性試験をしてきました⁵⁾。その中で得られた高耐久仕様コンクリートは、復興道路や復興支援道路の床版に実装されています。今後は、床版のみならず、床版防水や橋面舗装を含めた高耐久化の実現に向けて、実験研究を進めていく予定です。



写真－４ 超音波パルス試験装置



図－３ 弾性波速度と混合物温度の関係



写真－５ 輪荷重走行試験装置



図－６ LOHASの橋

4. 教育活動, 社会活動

国内の大学を見渡してみると『舗装研究室』はとても少ない状況です。私の知る限り、ここ数年で新たに発足した舗装研究室は金沢工業大学の高橋先生の研究室と当研究室のみと思われます。舗装研究室の減少により、大学の講義で舗装やアスファルトを学ぶ機会も少なくなり、舗装業界としては危機的な状況といえます。このような中で、舗装やアスファルトの魅力をいかにして伝えるかを真剣に考えています。

日本大学工学部土木工学科には、著者が担当する『道路工学』という講義科目があります。この講義は『アスファルト』や『舗装』に特化した内容としていますが、選択必修科目であり、必ずしも全員が受講するわけではありません。そこで、本学科3年生の必修科目である『材料実験』という講義に目を付けました。本講義では基本的にセメントコンクリートのフレッシュ性状や強度特性を実習するものでしたが、2020年度からは実際のアスファルト混合物を使い、大学構内にアスファルト舗装を施工するという実習を取り入れています(写真-7)。学生たちの反応も上々で、普段触れることの少ない『アスファルト』という材料に興味・関心を持ってもらいながら、実践的な授業を行うことでその魅力に気付いて欲しい、そう願って教育活動を行っています。

また、大学生のみならず、小学生や中学生を対象とした『アスファルトの魅力発信活動』も精力的に行っています(写真-8)。参加してくれた児童は、アスファルトってこんなに伸びるんだ!と興味を持ってくれました。

この取り組みは、学生や児童に楽しんでもらいながらも舗装やアスファルトの魅力を伝えることができる、私の活力にもなっています。



写真-7 アスファルト実習の様子

5. おわりに

当研究室はコンクリート構造物と舗装構造物の両者を本格的に扱う数少ない研究室です。多岐に渡る研究テーマを掲げている研究室だからこそ、我々にしかできないこと、我々がやらなければならないことがあると考えています。

とはいえ、苦手な分野も沢山あります。多くの方と手を取り合い、連携しながら、より良い研究ができるように、より良い社会が実現できるように、研究と教育を進めていきたいと考えています。

最後に、本誌をご覧になるまで、日本大学工学部に舗装関連の研究室があることをご存じなかった方も多いと思います。アスファルト関連の研究をスタートさせてからわずか3年の当研究室を『アスファルト誌』で紹介させていただけたことに感謝申し上げます。

— 参考文献 —

- 1) 三田村ら：積雪寒冷地における既設RC床版の延命手法について、構造工学論文集, Vol.56A, pp.1239-1248, 2010.
- 2) 前島ら：床版コンクリート上層部の劣化が橋面アスファルト舗装の早期破壊に及ぼす影響, 土木学会論文集E1(舗装工学), Vol.77, No.2(舗装工学論文集第26巻), I_59-I_66, 2021.
- 3) 斎藤ら：局所振動試験によるアスファルト舗装の損傷度評価に関する実験的検討, 第34回日本道路会議, 3157, 2021.
- 4) 前島ら：アルカリシリカ反応が道路橋RC床版の耐疲労性に及ぼす影響, 土木学会論文集E2, Vol.72, No.2, pp.126-145, 2016.
- 5) 前島ら：ASRを受けた実物大鋼主桁上RC床版の膨張収縮挙動および劣化性状に関する実験的検討, コンクリート工学会年次論文集, Vol.40, No.1, pp.861-866, 2018.



写真-8 小学生対象のアスファルト体験

<統計資料>

石油アスファルト需給実績

(単位：千 t)

項目 年度	供 給					需 要					
	期初 在庫	生産	対前年 度比	輸入	合計	販売 (内需)	対前年 度比	輸出	小計	期末 在庫	合計
26 年 度	215	3,200	88.8	77	3,491	2,032	97.0	45	2,032	168	2,199
27 年 度	168	3,188	100.2	76	3,432	1,897	94.5	29	1,897	217	2,114
28 年 度	217	3,185	99.6	88	3,490	1,874	99.0	114	1,874	217	2,091
29 年 度	185	2,990	93.9	99	3,274	1,776	95.3	70	1,776	216	1,992
30 年 度	216	2,794	93.5	57	3,067	1,997	112.5	75	1,997	178	2,176
元 年 度	178	2,684	96.0	24	2,886	1,752	89.5	40	1,752	215	1,967
2 年 度	216	2,226	82.9	7	2,449	1,904	108.6	18	1,904	155	2,058
3. 4 月	155	161	93.7	3	319	139	101.7	6	139	167	306
5 月	167	101	62.4	1	270	110	79.3	6	110	150	259
6 月	150	179	100.6	0	328	121	78.2	3	121	161	282
4～6 月	155	441	86.2	4	600	370	86.0	15	370	161	531
7 月	161	162	83.3	2	325	126	89.2	0	126	162	288
8 月	162	182	104.3	2	346	120	86.0	0	120	198	319
9 月	198	202	125.6	2	403	171	113.2	0	171	213	384
7～9 月	161	546	103.1	6	714	417	96.5	0	417	213	630
10 月	213	196	139.8	2	411	169	107.9	0	169	204	373
11 月	204	171	84.3	2	377	159	86.8	0	159	204	363
12 月	204	207	104.3	1	412	145	81.3	0	145	210	355
10～12 月	213	574	106.0	5	793	473	91.3	0	473	210	683
1 月	210	219	109.6	1	430	151	95.9	0	151	214	366
2 月	214	213	101.0	1	428	165	93.4	0	165	201	366
3 月	201	203	87.9	1	406	169	84.7	0	169	192	361
1～3 月	210	635	99.0	3	848	485	90.9	0	485	192	677
3 年 度	155	2,197	98.7	18	2,370	1,745	91.2	15	1,745	192	1,937
4. 4 月	192	205	127.0	1	398	104	74.8	0	104	234	338
5 月	234	178	176.1	1	413	113	103.2	0	113	230	343
6 月	230	171	95.6	0	401	134	110.2	4	134	199	333
4～6 月	192	554	125.5	2	748	351	94.8	4	351	199	550
7 月	199	201	123.8	1	401	0	82.5	0	0	233	233
8 月	233	188	103.2	1	422	118	98.2	4	118	214	333
9 月	214	208	102.8	0	422	169	98.9	3	169	194	363
7～9 月	199	596	109.2	2	798	287	98.6	7	287	194	482

出典：石油連盟（石油アスファルト統計月報）より引用

一般社団法人 日本アスファルト協会会員

社	名	住	所	電	話
---	---	---	---	---	---

(令和4年11月1日現在)

[メーカー]

E N E O S 株 式 会 社	(100-8162)	千代田区大手町1-1-2	03 (6257) 7231
出 光 興 産 株 式 会 社	(100-8321)	千代田区大手町1-2-1	03 (6807) 6577
コスモ石油マーケティング株式会社	(105-8528)	港区芝浦1-1-1	03 (3798) 3131

[ディーラー] ※エリア毎に五十音順

● 東北

カ メ イ 株 式 会 社	(980-0803)	仙台市青葉区国分町3-1-18	022 (264) 6111
---------------	------------	-----------------	----------------

● 関東

株 式 会 社 ア ス カ	(106-0032)	港区六本木3-4-33	03 (3587) 1500
出光エナジーソリューション株式会社	(162-0824)	新宿区揚場町1-18	03 (5206) 7340
伊藤忠エネクス株式会社	(100-6027)	千代田区霞が関3-2-5	03 (4233) 8072
コ ス モ エ ネ ル ギ ー ソリューションズ株式会社	(103-0007)	中央区日本橋浜町3-3-2 トルナーレ日本橋浜町9階	03 (5642) 8772
株式会社ジェイエック	(103-0028)	中央区八重洲1-2-1	03 (3272) 3471
竹 中 産 業 株 式 会 社	(101-0044)	千代田区鍛冶町1-5-5	03 (3251) 0185
東新エナジー株式会社	(104-0033)	中央区新川2-1-7	03 (3537) 3082
日 東 商 事 株 式 会 社	(102-0083)	千代田区麴町1-7-2	03 (6261) 0150
富 士 興 産 株 式 会 社	(101-0042)	千代田区神田東松下町13	03 (6859) 2050
丸 紅 エ ネ ル ギ ー 株 式 会 社	(102-0071)	千代田区富士見1-8-19 (住友不動産千代田富士見ビル)	03 (6261) 8820
三菱商事エネルギー株式会社	(100-0004)	千代田区大手町1-1-3	03 (4362) 4200
ユ ニ 石 油 株 式 会 社	(107-0051)	港区元赤坂1-7-8	03 (3796) 6616

一般社団法人 日本アスファルト協会会員

社 名	住 所	電 話
-----	-----	-----

● 近畿・中国

三 徳 商 事 株 式 会 社	(532-0033) 大阪市淀川区新高4-4-10	06 (6394) 1551
昭 和 瀝 青 工 業 株 式 会 社	(670-0935) 姫路市北条口4-26	079 (226) 2611
千 代 田 瀝 青 株 式 会 社	(530-0044) 大阪市北区東天満2-10-17	06 (6358) 5531
富 士 商 株 式 会 社	(756-8501) 山陽小野田市稲荷町10-23	0836 (81) 1111
横 田 瀝 青 興 業 株 式 会 社	(672-8064) 姫路市飾磨区細江995	079 (233) 0555

● 四国・九州

今 別 府 産 業 株 式 会 社	(890-0072) 鹿児島市新栄町15-7	099 (256) 4111
三 協 商 事 株 式 会 社	(770-8518) 徳島市万代町5-8-3	088 (653) 5131
西 岡 商 事 株 式 会 社	(764-0018) 仲多度郡多度津町東港町11-1	0877 (33) 1001
平和石油株式会社高松支店	(760-0065) 高松市朝日町4-17-1	087 (811) 6231

編集顧問	編集委員
中村俊行	委 員 長 : 三 船 善 和
編集長	泉 秀 俊 遠 藤 桂 加 納 孝 志 竹 井 利 公
新田弘之	永 田 佳 文 橋 本 喜 正 姫 野 賢 治 町 田 功
	松本大二郎 山 本 富 業 吉 武 美 智 男 吉 中 保

アスファルト 第238号

令和4年12月発行

一般社団法人 日本アスファルト協会

〒100-8162 東京都千代田区大手町1-1-2

ENEOS 株式会社

産業エネルギー部 コークス・アスファルトグループ

TEL 03-6257-7232

機関誌「アスファルト」に関するお問い合わせ

コスモ石油マーケティング株式会社

販売部総括グループ

アスファルト担当者

TEL 03-3798-3131

印刷所 キュービシステム株式会社

〒101-0052 東京都千代田区神田小川町1-7

神田小川町ハイツ 204 TEL 03-5577-7199

Vol.65 No.238 DECEMBER 2022

Published by **THE JAPAN ASPHALT ASSOCIATION**

一般社団法人 日本アスファルト協会 ホームページ <http://www.askyo.jp/>

