

アスファルト

第58巻 第231号 平成27年12月発行

231

特集・アスファルトの評価・試験方法

[製造・流通]

石油アスファルト需給動向と将来展望について JX日鉱日石エネルギー株式会社 1

[評価・試験]

アスファルトの評価試験 新田 弘之 5

高針入度アスファルトの活用に向けてー試験舗装使用材を用いた室内試験編ー

寺田 剛・平川 一成・佐々木 巖・荒尾 慶文・峰岸 順一 10

長期供用されたアスファルト舗装に含まれるアスファルトの性状調査結果

小林 真依・高橋 茂樹 18

再生骨材の品質管理における新しいバインダ性状評価試験の導入 中村 健 24

Nottingham Asphalt Tester (NAT) によるアスファルト混合物の評価方法について

岩間 将彦 28

X線CTおよびデジタル画像相関法を用いたアスファルト混合物内部の変形特性の把握

谷口 聡・大谷 順・佐藤 宇紘 32

アスファルト舗装材料の可視化に関する最近の試験方法 平川 一成・上地 俊孝

辻本 陽子・渡邊 真一・櫻井 博章・小林 真依 37

高速道路におけるアスファルト舗装の損傷実態と対策の着眼点 高橋 茂樹 49

[その他]

首都高速道路(株)舗装設計施工要領の改訂について 石原 陽介・蔵 治 賢太郎 53

＜アスファルト舗装技術研究グループ・第63回報告＞ 佐々木 巖 62

若手技術者によるアスファルト舗装に関する調査報告

～舗装再生技術の普及の変遷をたどる～ 63

＜連載＞アスファルト・舗装研究 vol. 4

日本大学生産工学部土木工学科 地盤工学研究室 74

＜統計資料＞石油アスファルト需給統計資料 78

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



第93回 アスファルトゼミナール開催のご案内

一般社団法人 日本アスファルト協会

拝啓 時下ますますご清栄の段、お慶び申し上げます。

当協会主催の「アスファルトゼミナール」を下記要領にて開催致します。

皆様、お誘い合わせの上ご参加くださいます様お願い申し上げます。

敬 具

記

1. 主 催 一般社団法人 日本アスファルト協会
2. 協 賛 一般社団法人 日本道路建設業協会、一般社団法人 日本アスファルト乳剤協会
一般社団法人 日本アスファルト合材協会、一般社団法人 日本改質アスファルト協会
3. 後 援 国土交通省
4. 開催月日 2016年2月25日(木)～2月26日(金)
5. 開催場所 大阪社会福祉指導センター 大ホール(5階)
〒542-0065 大阪市中央区中寺1-1-54 ☎06-6762-9471
6. 内 容 裏面「プログラム」をご覧ください。
7. 申込方法 2016年2月19日(金)までに、下記ホームページの申し込みフォームよりお申し込み下さい。
(<http://www.askyo.jp/zemi/index.html>)
折返し(3日程度)E-mailにて参加受講券をお送りいたします。
8. 申込問合せ キュービシステム株式会社 アスゼミ担当 村井まで
☎03-5256-0051 E-mail: asphalt@qbs.co.jp
9. 内容問合せ コスモ石油株式会社
製品部 製品グループ 伊藤まで ☎03-3798-3159
10. 参加費 無料
11. 参加人数 300名(締切日以前でも定員になり次第締め切らせていただきます。)
12. CPD 認定 公益社団法人土木学会の継続教育(CPD)プログラムとして認定されました。
認定番号 JSCE15-0995 6.5単位
※単位取得には2日間の参加が必須となりますのでご注意ください。
13. その他 当日の参加受付はできませんので、必ず上記方法でお申し込み下さい。



開催日

2016年2月25日(木)～2月26日(金)

開催場所

大阪社会福祉指導センター 大ホール(5階)
〒542-0065 大阪市中央区中寺1-1-54
☎06-6762-9471

会場案内図

- ・市営地下鉄谷町線「谷町六丁目」下車
④番出口より 徒歩5分
- ・市営地下鉄谷町線「谷町九丁目」下車
②番出口より 徒歩7分

プログラム

ーこれからのアスファルト舗装管理ー

第1日目 2016年2月25日(木) 13:00~17:00

(敬称略)

- | | |
|----------------------------------|---------------|
| 1. 挨拶 | 13:00 ~ 13:05 |
| 一般社団法人日本アスファルト協会
ゼミナール委員長 | 里 蘭 拓 |
| 2. 挨拶 | 13:05 ~ 13:20 |
| 一般社団法人日本アスファルト協会 顧問 | 矢 野 善 章 |
| 3. アスファルト供給体制について | 13:20 ~ 14:00 |
| 一般社団法人日本アスファルト協会 | 伊 藤 亮 介 |
| 4. アスファルト混合物の品質向上について | 14:00 ~ 14:45 |
| 一般社団法人日本アスファルト合材協会 技術部 | 平 戸 利 明 |
| (休憩 14:45 ~ 15:00) | |
| 5. 阪神高速道路のアスファルト舗装の耐久性向上に関する検討 | 15:00 ~ 16:00 |
| 阪神高速道路株式会社 技術部 技術推進室
保全技術担当課長 | 西 岡 勉 |
| 6. 舗装の維持修繕ガイドブック2013の活用 | 16:00 ~ 17:00 |
| 公益社団法人日本道路協会 舗装委員会 委員長 | 吉 兼 秀 典 |

第2日目 2016年2月26日(金) 9:00~11:40

- | | |
|-------------------------------|---------------|
| 7. 平成28年度道路予算について | 9:00 ~ 10:00 |
| 国土交通省 道路局 企画課 道路経済調査室長 | 山 本 悟 司 |
| 8. アスファルト乳剤を用いた舗装の維持修繕工法について | 10:00 ~ 10:50 |
| 一般社団法人日本アスファルト乳剤協会 | 山 本 富 業 |
| 9. 舗装の維持管理におけるポリマー改質アスファルトの役割 | 10:50 ~ 11:40 |
| 一般社団法人日本改質アスファルト協会 | 野 口 健太郎 |

石油アスファルト需給動向と将来展望について

(The Latest Trend and Future View)

JX 日鉱日石エネルギー(株) 産業燃料部 コークス・アスファルトグループ

高度化法等により、変革を迫られるわが国の石油業界において、最新のアスファルトの需給動向と今後の課題について説明する。

1. 石油産業を取り巻く環境の変化

1.1 原油価格の動向

2014年9月以降、原油価格が急落し、我々にとって身近なアスファルト価格も同様に下落したことを覚えている読者は多いはずである。具体的な価格の推移としては、国際市場での指標原油のひとつであるDB(ドバイ)原油で見えていくと、2014年7-9月平均が1バレル101ドルであったものが、10-12月平均で74ドル、2015年1-3月平均で52ドルと連続して下落した。2015年度に入り、4-6月平均は61ドルと一旦上昇したものの、7月は56ドル、8月は48ドル、9月は46ドルと再び下落基調にある。この背景には、第1の要因として原油の供給過剰が挙げられる。具体的には、米国のシェールオイルの増産、およびロシア、イラク等の増産によるものである。第2の要因として、中国を中心に今や世界の石油消費国となったアジア新興国の経済不振に伴う石油需要減退が挙げられる。

しかしながら、1973年の第4次中東戦争や1979年のイラン革命、1990年の湾岸戦争時には、原油生産設備が破壊され、供給障害を起し、その結果原油価格が高騰した過去を私たちは経験してきている。今日のイスラム国(ISIS)による中東を中心とした地政学的リスクは当面の間、継続する可能性が高い。これに加え、シリア派であるシリアへのイランによる武力援助や2015年10月以降のロシアによるシリア周辺への空爆開始によって、状況は更に複雑化するものと思われる。したがって、足元(2015年現在)の原油価格は昨年度と比較して安価ではあるものの、原油設備が破壊されることなどで、原油価格が再び上昇するリスクがあるということを我々は認識しておくべきである、と考える。

一方で、日々のニュースを通じて読者は認識しているだろうが、中東における多くの内戦によって何百万

人もの難民が欧州に流入し、欧州諸国は域内不況国(PIGS/ポルトガル・イタリア・ギリシア・スペイン)への財政支援以外にも難民対策を強いられ、欧州の財政状況はより悪化するものと思われる。また、難民流入により、欧州の社会秩序は不安定化する可能性が高い。その結果、欧州の社会経済が悪化し、それが世界経済に悪影響を与え、原油価格が下落する可能性も十分に考えられる。

つまり、我々は非常に不安定な社会情勢下にいるという認識を強く持ち、これまで以上に原油価格の動向を注視する必要があると考える。

1.2 石油元売の動向

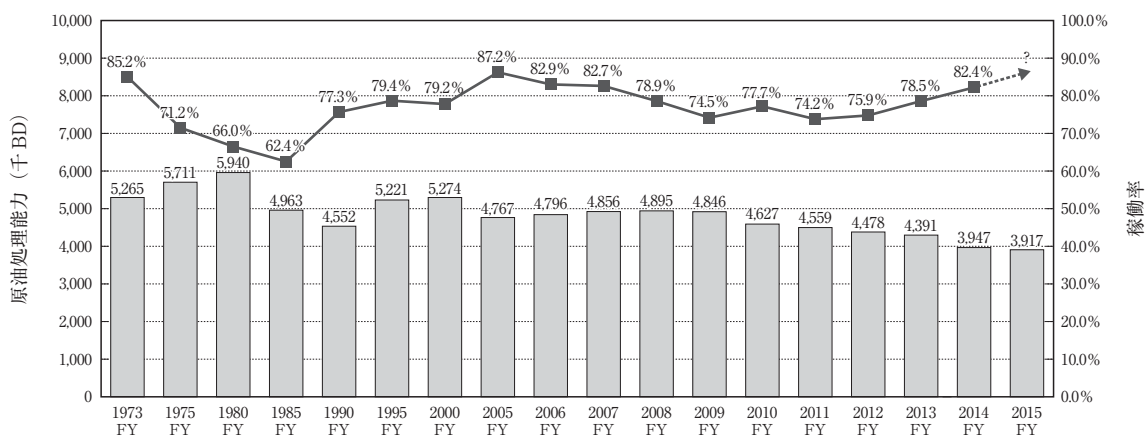
石油連盟の統計資料によると、日本国内の原油処理設備能力は、2000年度には527万BD(Barrels Day)であったが、2015年7月末現在、製油所数は23か所・391万6,700BDまで減少している(図-1参照)。

これは、燃料油内需の減退に対応するべく、石油元売各社が製油所の閉鎖や原油処理設備の一部休止等を行った結果である。

この原油処理設備能力の削減は、2009年8月に施行された「エネルギー供給構造高度化法(以下、「高度化法」と記載)」による影響が大きい。

昨年度も述べたとおり、高度化法の目的はエネルギーの効率的な利用である。経済産業省は、石油精製業者に対して「重質油分解装置の装備率(以下、「装備率」と記載。装備率の計算方法は、「重質油分解装置の能力」÷「常圧蒸留装置の能力」)の向上を義務付ける公告を行っている。これが一般的に第1次高度化法と呼ばれているものであり、具体的には装備率を2013年度末までに13%程度まで引き上げることを同省は石油元売各社に求めた。

また同省は、2014年7月31日に高度化法の新たな判断基準の公告(以下、「新基準」と記載)を行ったが、



図－１ 原油処理能力・稼働率

出所：石油連盟のデータを元に当社作成

そのポイントは次の３点である。

第１は、装備率定義の変更である。経済産業省は2009年８月に施行された高度化法（以下、「旧基準」と記載）においては、重質油分解装置を装備率計算式の分子として採用していた。しかし、旧基準達成時と比べ、石油元売各社を取り巻く環境は更に大きく変化しており、石油元売各社は石化シフトや輸出強化、総合エネルギー企業化等の多様な戦略を選択する中、重質油分解装置の装備率に固執せず、各社の成長戦略や石油精製装置構成の特性に沿った制度設計が必要であると同省は考え、残油処理装置を装備率計算式の分子とする見直しを行った。残油処理装置とは常圧蒸留残油または減圧蒸留残油を処理し、これら残油から白油を生産する装置を指す。具体的には、旧基準で対象となった「重質油熱分解装置（コークー等）、残油流動接触分解装置（RFCC）、残油水素化分解装置（H-Oil）」に加え、「重油直接脱硫装置（直脱）、流動接触分解装置（FCC）、溶剤脱砒装置（SDA）」がこれに該当する。

第２は、目標への対応方法の見直しである。装備率の改善方法は、旧基準と同様に残油処理装置の新設・増設もしくは常圧蒸留装置の削減が考えられる。しかし、新基準では対応方法の見直しが行われており、これにより石油元売各社は目標達成に向けた柔軟な対応が可能となった。具体的には、燃料油から石油化学製品や潤滑油等の非燃料油への生産シフトを可能とする生産体制の構築を認めている点と、旧基準では常圧蒸留装置の廃棄のみしか能力削減として認めていなかったが、新基準では常圧蒸留装置の公称能力削減も認める点である。また新基準では、連携および事業再編等

による設備能力の融通措置が追加されている。具体的には、Ａ社とＢ社が原料油の融通配管新設等の連携を行い、Ｂ社が常圧蒸留装置能力を削減した場合は、この削減量をＡ社とＢ社間で融通し合うことが可能となる。この具体的な事例として、コスモ石油と昭和四日市石油が2015年５月14日に発表した、四日市地区における事業提携（コスモ石油四日市製油所の常圧蒸留装置を１基停止）が挙げられる。

第３は、装備率の改善目標・取組期間・事業再編方針の提出の見直しである。上述のとおり、新基準において装備率の定義は変更されたが、この新基準装備率は現状45%程度である。経済産業省は、新基準装備率を50%程度まで向上させることを目標としている。同省は、石油元売各社全てが常圧蒸留装置の能力削減で対応した場合、日本全体の精製能力は現状の395万BDから約40万BDの能力が削減されるという試算結果を公表している。なお、個別の目標設定として、現状の装備率が45%未満の場合は改善率を13%以上、45～55%の場合は同11%以上、50%以上の場合は同9%以上としている。また、最終目標達成期限は2016年度末とし、段階的な取組も含め、可及的速やかな目標達成を促している。

また経済産業省は、2014年10月31日を提出期限として、新基準目標達成のための計画を提出するよう石油元売各社に通達した。同省は都度、新基準に関するフォローアップを実施している（表－１参照）。今後も、出光興産と昭和シェル石油の経営統合等、石油元売の業界再編に関する動きは更に深化していくものと思われる。

表－１ 残油処理装置の装備率

社名	2014年3月31日 時点の装備率	2015年9月30日 時点の装備率	2016年度までに 求められる 装備率の改善率	2015年9月30日 時点の必要な 改善率
JX 日鉱日石エネルギー	46.2%	46.2%	11%以上	+ 11.0%
出光興産	51.5%	53.5%	11%以上	+ 9.0%
コスモ石油	43.4%	43.4%	13%以上	+ 13.0%
昭和シェル石油	59.4%	59.4%	9%以上	+ 9.0%
東燃ゼネラル石油	35.9%	36.5%	13%以上	+ 12.4%
富士石油	48.3%	48.3%	11%以上	+ 11.0%
太陽石油	24.6%	24.6%	13%以上	+ 13.0%

※経済産業省発表資料を元に当社作成

2. 道路舗装用アスファルトの需要

道路舗装用ストレートアスファルト（以下、「ストアス」と記載）は、主にアスファルト合材（以下、「合材」と記載）や改質アスファルトの原料として使用されている。

2000年度に7,096万トンあった合材製造量は、公共事業の見直し等により徐々に減少し、2014年度には4,515万トン（2000年度比64%）となっている。

また、ストアスの需要は、2000年度の383万トンに対して、2014年度は170万トンと半減以下となっており、合材よりも減少幅が大きい。これは再生合材の製造比率が増加していることが主因である（図－2参照）。

2015年度上期の合材製造量は前年比93%、ストアス需要は前年比90%と、ともに前年を下回る見込みである。ストアスの生産を担う石油元売会社としては、上期に実施出来なかった工事の繰越等により、下期は需要が回復することを期待したい。

今後については、道路舗装はその殆どが公共事業であり、公共事業は国の政策により左右されるため、当

社は需要の将来見通しを論じられる立場にはないが、再生比率の更なる増加や道路舗装材料としてのセメント使用率増大等により、特殊要因がない限りストアス需要は漸減していくものと思われる。そのような中、ストアス舗装事業の一端を担う石油元売の立場としては、製造（石

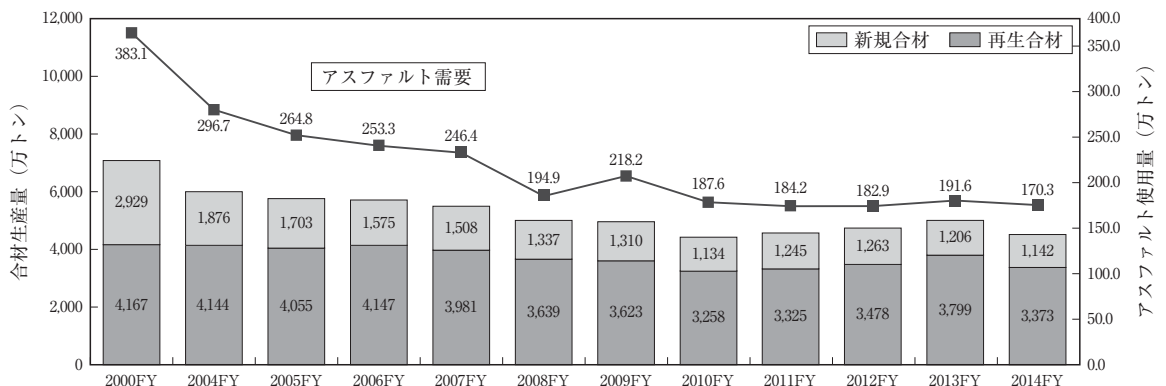
油元売）・流通・消費（道路会社）が三位一体となり、ストアス需要の維持に向けて協力し合っていくべきであると考えます。

3. アスファルトの供給体制の動向

3.1 生産

本項では、年間200万トン程度の需要規模であれば、高度化法新基準対応後においても、石油元売各社は十分に供給能力を有しているということをお伝えしたい。

まず、高度化法新基準対応で更に原油処理設備能力の削減が進むことに対して、供給を不安視する向きがある。これについては、新基準対応を全て原油処理能力の削減で行った場合には40万BDの削減が必要、という経済産業省の試算結果前提を用いたとしても、石油元売各社の供給能力に問題ないことをお伝えしたい。これはストアスの需要減退スピードに対して、原油処理能力の削減スピードが緩やかなためである。つまり、新基準対応以後の石油元売各社の増産余力は多少低下するものの、2014年度並みのストアス需要であ



図－2 合材およびアスファルト需要推移

出所：石油連盟&財務省、日本アスファルト合材協会のデータを基に当社作成

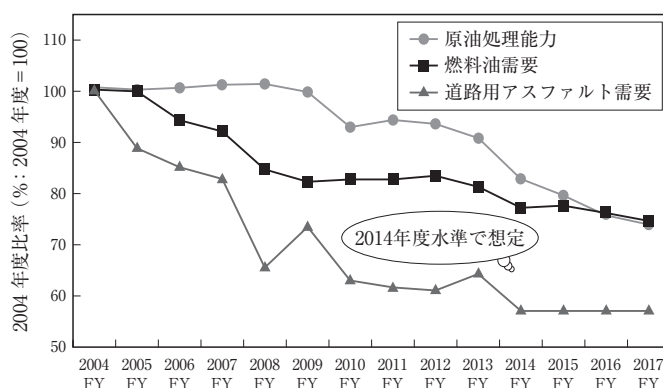
れば、石油元売各社はアスファルト生産に十分な能力を有している（図－3参照）。

しかしながら、ストアス需要が将来に亘って減少し続けた場合、明確な判断基準はないものの、石油元売各社は、高度化法対応如何に関わらず、アスファルト留分の少ない軽質原油の処理増や更なる分解装置の新設によるボトムレス化（アスファルト生産減）といった方策を取る可能性があるということをご認識頂きたい。

現状、石油元売各社は、ストアスを目的生産物と位置付け、需要に応じて生産するべく製油所を運転しているが、昨今の市況悪化や老朽化した油槽所・輸送船などの維持コスト増等により、石油元売各社への負担は確実に増加しており、近い将来、ストアス事業維持のために何らかの方策を取らなければならない局面が来るものと思われる。そういった将来を見据え、石油元売各社は国内への供給責任を果たす一方で、流通・消費者への影響を極力軽減するために、ストアスの輸出拡大等に取り組み、供給インフラの維持を図っていることをご認識頂きたい。実際、石油元売各社による輸出数量は2015年4～8月で前年比133%と大幅に増加している。

3.2 輸入

ここ数年来、商社によるタンク新設および輸入船新造により、総需要に対する輸入品の構成比が増大してきた（表－2参照）。ただし、2013年度までは年々輸入品の構成比が増大してきた一方で、2014年度はその構成比が増大しなかったことに着目したい。2015年度上期に至っては、数ポイントではあるものの、輸入品の構成比は減少している。実際に2015年4～8月の通関統計実績を見てみると、前年比72%と大幅に減少している。2015年度上期の合材需要が前年比93%であったことを踏まえると、輸入数量が大きく減少していることが読み取れる。これは、従前は日本市況が国際市況と比較して良好であったため輸入量が増加してきたが、2014年度下期以降はこの内外格差が逆転し、輸入品コストが日本市況に比べ割高になったため、輸入品の構成比が低下したと思われる。これは、前項で触れたように、石油元売が輸出拡大していることの裏返し



図－3 原油処理能力と道路用アスファルト需要の関係

出所：経済産業省、石油連盟、財務省のデータを元に当社作成

表－2 供給方法別 道路用アスファルト需要推移

(千トン)	1990FY	1995FY	2000FY	2007FY	2008FY	2009FY
元売販売	4,416	4,011	3,613	2,218	1,738	2,004
(構成比)	(100%)	(100%)	(94%)	(90%)	(89%)	(92%)
商社輸入	20	11	218	246	211	178
(構成比)	(0%)	(0%)	(6%)	(10%)	(11%)	(8%)
合計	4,436	4,022	3,831	2,464	1,949	2,182
(構成比)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)

(千トン)	2010FY	2011FY	2012FY	2013FY	2014FY	2015FY 上期
元売販売	1,672	1,588	1,485	1,415	1,266	483
(構成比)	(89%)	(86%)	(81%)	(74%)	(74%)	(76%)
商社輸入	204	254	344	501	438	149
(構成比)	(11%)	(14%)	(19%)	(26%)	(26%)	(24%)
合計	1,876	1,842	1,829	1,916	1,703	632
(構成比)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)

※経済産業省、石油連盟、財務省のデータを元に当社作成

とも言える。足元も同様の傾向は続いているが、前述のとおり、将来の原油価格を見通すことは困難であるため、引き続き注視していく必要があると考える。

4. おわりに

石油元売各社が、国内安定供給を第一に、将来に亘ってストアス供給体制を維持していく意思があることを述べてきた。読者の皆様には、ストアス供給体制の維持のために、生産・流通・消費の三位一体での更なる協力体制構築が必要であることをご認識頂きたい。

そして私たち石油元売は、今後もストアス供給という社会的な責任および役割を全うし、日本が道路先進国であり続けられるよう一層の取り組みを行っていきたい。

アスファルトの評価試験

(Test Methods for Asphalt)

新 田 弘 之*

日本でアスファルトの試験方法といえば、針入度や軟化点など、品質規格の項目がほとんどであり、その他のものと言っても20年ほど前に米国SHRPの成果である粘弾性試験などの方法が持ち込まれた以降、新たな試験方法の開発などはあまり多く行われていない。しかし、海外では新しいアスファルト試験がいくつも開発され、一部は品質規格にも導入されている。本報では、日本ではあまり行われていないアスファルトの評価試験方法の概要を紹介する。

1. はじめに

日本でアスファルトの試験方法といえば、針入度試験や軟化点試験、伸度試験、薄膜加熱試験など、その多くがとても古くから変わらず行われてきた品質規格のための試験方法である。その他のものでは、米国SHRPで開発されたDSRやBBRといった粘弾性試験や促進劣化試験であるPAVなどがあるが、いずれも20年以上前に開発されたものである。改質アスファルトの評価試験など、日本独自のものの開発も行われた¹⁾が、アスファルトの評価試験方法の開発が活発であるとは言い難い。

しかし、海外では日本ではあまり行われていないような新しいアスファルト試験がいくつも検討され、一部は品質規格にも導入されている。

そこで本報では、日本でアスファルトの規格試験として行われていない試験を対象に、評価したい供用性状毎に整理し概要を紹介するとともに、主なものについては試験方法の一部を紹介する。

2. 供用性状とアスファルト試験

針入度試験や軟化点試験などの古典的な試験は、当然海外でも行われるが、新しいアスファルト試験は、より供用性状と関係の深い方法を求めて開発が行われている。特に、ポリマー改質アスファルトの性状評価のためのものが多く見られる。表-1にEN(欧州規格)やASTM(米国材料試験協会規格)、AASHTO(米国全州道路運輸行政官協会)などに載っているも

の、現在研究段階のものなど、既に日本で試験が行えるようになっているものも含めて、主なものや目に付いたものを集めて、供用性状毎に整理して示した。なお、試験名は、規格の名称ではなく、試験機名のみなどに略している。

供用性状の項目としては、わだち掘れとの関係性を評価する高温性状、疲労クラックとの関係性を評価する常温性状、低温クラックへの関係性を評価する低温性状、製造時劣化や供用劣化を模した促進劣化試験、骨材飛散の程度を評価する試験、骨材からのアスファルトの剥離の程度を評価する試験の6つに分けた。

高温性状については、主にポリマー改質アスファルトの評価のために、様々な方法が考案されている。DSR(動的せん断レオメータ)を利用した方法が多く見られる。また、試験は常温で行うが伸度試験機を使って永久変形を評価するElastic Recovery試験も考案されている。

常温性状については、Superpaveで採用されたDSRによる方法以外あまり見られない。DSRを用いて連続的にせん断を与え疲労を評価しようという試みも行われているが、標準化はされていない。

低温性状については、伸度試験機を使ったForce Ductility試験の他、金属材料で行われるノッチ付き3点曲げ試験をアスファルトに適用した方法も考案されている。

劣化試験については、薄膜加熱試験(TFOT)とは異なり、アスファルト被膜を常に新しくさせるよう

*にった 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

に回転させるものがいくつか提案されている。特に RCAT では、供用劣化を模した 90℃で行う試験も考案されている。

骨材飛散については、バインダを主眼にしたものは少なく、特に新しいものではないが、日本でも乳剤の試験として紹介されている vialit plate 試験のほか、振

表－１ アスファルトの試験方法

	試験名 (略称)	規格等	概要
高温	Dynamic Shear Rheometer (DSR)	ASTM D7175 舗調試*A062	動的せん断載荷試験を行い、流動特性を $G^*/\sin \delta$ により判断する。
	Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)	ASTM D7405 AASHTO T-350	DSR を使って、0.1 および 3.2kPa のせん断応力で載荷 1 秒、除荷 9 秒を繰り返し、非回復クリープコンプライアンスを求める。
	Equiviscous Temperature (EVT) on low shear viscosity using DSR	CEN/TS15324	改質アスファルトの粘弾性評価のために行う。DSR を使って 0.1Hz、1℃/min で温度掃引試験を行い G^* が 2kPa となる温度を求める (EVT1)。EVT1 で周波数掃引試験を行った後、グラフを外挿して 0.0001Hz の G^* を求める (EVT)。EVT-EVT1 を評価する。
	Zero Shear Viscosity (ZSV) using a shear stress rheometer	CEN/TS15325	わだち掘れ抵抗性を評価する。60℃において一定応力でせん断試験 (ストアスで 50Pa.1h, 改質アスで 10Pa.4h) を行う。試験終了前 15 分間の平均クリープコンプライアンス J を求め、1/J を ZSV とする。
	Elastic Recovery	ASTM D6084 EN13398	改質アスファルトの永久変形抵抗性に関する変形回復力を求める。供試体 (供試体形状は伸度試験とは若干異なる) を 25℃の水槽中で 50mm/min の速度で引っ張り、200mm で停止。10 秒後中央部を切断し、30 分後の中央部の距離を測定。
常温	DSR	ASTM D7175 舗調試*A062	動的せん断載荷試験を行い、疲労特性を $G^*\sin \delta$ により判断する。
	DSR を用いた疲労試験	研究段階 ²⁾	DSR を用いて繰り返しせん断載荷を行う疲労試験
低温	DSR	ASTM D7175	低温で動的せん断載荷試験を行い、粘性と弾性を判断する。
	Bending Beam Rheometer (BBR)	ASTM D6648-01 舗調試*A060	定荷重の 3 点曲げ載荷により粘性・弾性を判断する。
	Direct Tension Test (DTT)	ASTM D6723-02 舗調試*A061	ダンベル状の供試体を引っ張り、破断時の荷重、ひずみ量を評価する。
	Tensile Test	EN 13587	改質アスファルトの引張強度を評価する。厚さ 3mm、直線部分の長さ 25mm、幅 4mm のダンベル状の供試体を引っ張り、変位-荷重曲線を記録する。
	Force Ductility	AASHTO T300 EN13589	改質アスファルトの引張特性を評価する。引張り荷重が測定できるような伸度試験機を用い (供試体形状は若干異なる)、5℃で 50mm/min の速度で 400mm まで引っ張ったときの変位-荷重を測定する。
	Three Point Bending Test (TPBT) on notched specimen	CEN/TS 15963	低温でのアスファルトの破壊タフネス温度を求める。端部をアルミニウム、中央部をアスファルトとしたビームの中央にノッチを付けてノッチ部が開くように 3 点曲げ試験を行うもの。
劣化	Rotating Flask Test (RFT)	EN12601	100g のアスファルトをロータリーエバポレータのフラスコにとり、165℃で 20rpm、150 分間加熱する。
	Rotating Cylinder Aging Test (RCAT)	EN15323	酸素または空気を送り込める回転ステンレスシリンダーによる劣化試験。短期劣化では 163℃、空気で 235 分間試験を行い、長期供用劣化では 90℃、酸素で 140 時間試験を行う。
	Pressure Aging Vessel (PAV)	ASTM D6521-03a 舗調試*A059	供用劣化を模した促進劣化試験。圧力容器で 2.10MPa、100℃で 20 時間劣化させる。
骨材飛散	Pendulum Test	EN13588	振り子式衝撃試験によりアスファルトの凝集力を評価する。
	Vialit Plate Test	EN12272 JEAAT-4	アスファルトと骨材の接着性を評価する。型枠にアスファルトを流し骨材を注入し、型枠の底面を上に乗せ、鉄球を落下させて、剥がれた骨材数で評価する。
剥離	Rolling Bottle Test	EN12697-11a	510g の単粒骨材を 16g のアスファルトで被覆し、500mL の容器に入れる。容器に水とガラス棒を入れ 60 回転/分で 6 時間回転させる。
	Boiling Water Stripping Method	EN12697-11c	200g のアスファルトが被覆した骨材を 600mL の蒸留水で 10 分沸騰させ、剥離率を求める。
	Ultrasonic Method	研究段階 ³⁾	直径 45mm、厚さ 1mm に研磨した骨材に 0.2g のアスファルトで被膜し、水中で超音波により剥離させる。
	Pneumatic Adhesion Tensile Testing Instrument (PATTI)	研究段階 ⁴⁾	ブルオフ式引張り載荷により付着力を評価。水による剥離を評価する。

*舗調試：舗装調査・試験法便覧 (社)日本道路協会, 2007 年発行)

り子式の試験などがある。

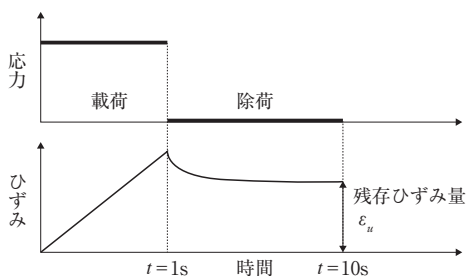
剥離については、アスファルトを被膜した骨材を水中で回転させたり、沸騰水に入れる、超音波を与えるなど、比較的簡単な装置でできるものの他、引張り試験で評価する方法も提案されている。

3. 各試験方法の概要

各試験の概要は、表－１に示したが、これらの中のいくつかについては、もう少し詳しく説明する。

3.1 MSCR（繰り返しせん断クリープリカバリ試験）

測定機器にはDSRを用い、応力制御で試験を行う。MSCR試験の測定方法は、荷重時間１秒、除荷時間９秒を１サイクルとして、繰り返し荷重を行う。図－１に１サイクルのひずみ応答の模式図を示す。このような短時間の除荷では、一定値には収束しきれないため、除荷９秒後のひずみに基づき残存ひずみを決定する。



図－１ １サイクルの応力とひずみ⁵⁾

MSCR試験から得られるパラメータである非回復クリープコンプライアンス J_{nr} は、式(1)で定義される。

$$J_{nr} = \varepsilon_u / \sigma \quad \text{..... 式(1)}$$

ここで、

ε_u : 除荷後に残存したひずみ量

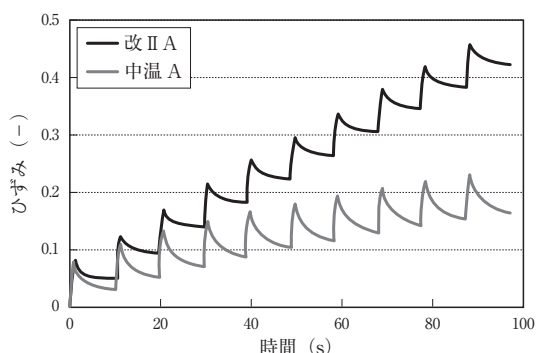
σ : せん断応力

せん断応力の条件は0.1および3.2kPaで行う。0.1kPaで10サイクル荷重を行った際のひずみの様子を図－２に示す。

3.2 DSRを用いた低せん断粘度の等粘度温度（EVT）

EVTもDSRを用いて低周波数で行う方法が考案されている。方法は２つのステップで行われる。

（ステップ１）1℃/minで温度上昇させながら周波数0.1Hzで複素粘度（ η^* ）を測定する。温度- η^* の関係から直線回帰して2kPa・sとなる温度を求めEVT1とする。



図－２ 10サイクルのひずみの変化⁵⁾

（ステップ２）ステップ１において求めたEVT1において周波数を減らしながら動的試験を行う。周波数- η^* の関係から、0.0001Hzとなる動的粘度を外挿して求め、これをEVTとする。

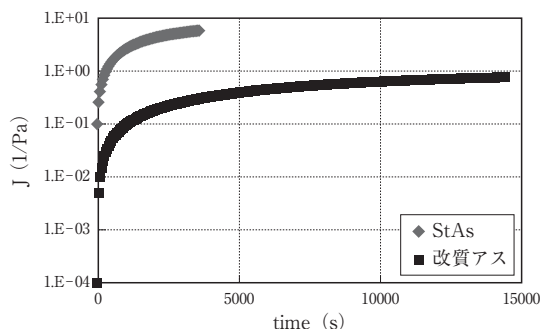
これらの２つの試験から求めた、EVT1やEVTはEVT-EVT1とすると、改質を行ったバインダほど大きな値となるとして、改質アスファルトの評価指標の一つとして提案されている。

3.3 応力せん断レオメータを用いたゼロせん断粘度（ZSV）

レオメータを使って定荷重の試験からZSVを求める。主にわだち掘れの抵抗性を評価し、60℃で試験を行う。ストレートアスファルトは50Paで１時間、改質アスファルトは10Paで４時間クリープ試験を行い、そのときのコンプライアンス J (1/Pa) を求める。試験における J の変化の様子を図－３に示す。

ZSVは、試験終了前の15分間の J の平均値から求め、式(2)のように表される。

$$\eta_i = \Delta t / \Delta J = 900 / (J_{end} - J_{15min-before-end}) \quad \text{..... 式(2)}$$



図－３ クリープコンプライアンスの時間変化

図-3はイメージであり実測値ではないが、仮に図-3からZSVを求めると、ストレートアスファルトは1200Pa、改質アスファルトは40000Pa程度になる。

3.4 エラスティック・リカバリ

改質アスファルトの永久変形抵抗性を評価するために、伸度試験機を使って変形回復力を求めるものである。すでに日本での試験例がある⁶⁾。試験機は伸度試験と同じであるが、供試体がASTM D6084では図-4a)のような形となっている。(EN13398では、伸度試験と同じ供試体を使っているようであるが、試験条件などは同じ) 25℃の水槽中で50mm/minの速度で引っ張り、200mmで停止し、10秒後中央部を切断し、30分後の中央部の距離を測定するものである。試験の様子を図-4に示す。

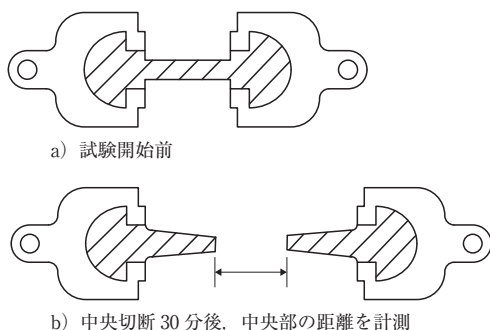


図-4 エラスティック・リカバリ試験の様子

3.5 フォース・ダクティリティ

主に改質アスファルトの低温での引張り特性を評価する。試験機は基本的には伸度試験機と同じであるが引張り荷重が測定できるようになっている。供試体形状はエラスティック・リカバリと同じものを用いる。供試体の形状を図-5に示す。5℃で90分養生した後、50mm/minの速度で400mmまで引っ張りながら変位-荷重を測定する。もし、400mmに達する前に破断した場合は、試験温度を5℃高くして試験を行う。

試験結果は、引張り強度の他、凝集エネルギーを算出する。

3.6 ノッチ付き供試体による3点曲げ試験(TPBT)

低温でのアスファルトの破壊タフネス温度を求める。端部をアルミニウム、中央部をアスファルトとしたビームの中央にノッチを付けてノッチ部が開くように3点曲げ試験を行う。

-30℃までは、酢酸カリウム溶液の液槽内で行い、0.6mm/minの定速で曲げ試験を行う。

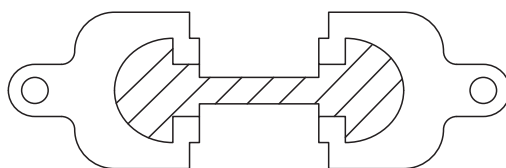


図-5 フォース・ダクティリティ供試体

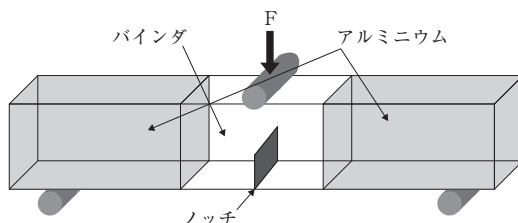


図-6 ノッチ付き供試体

3.7 RCAT

RCATは、図-7に示す回転ステンレスシリンダーを用いて空気や酸素を供給しながら行う促進劣化試験である。短期劣化 (Short Term Aging: STA), および長期供用劣化 (Long Term Aging: LTA) が行え、それぞれ試験条件は表-2のようにになっている。

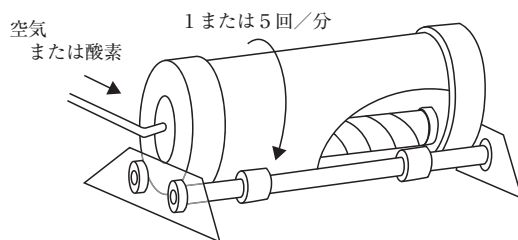


図-7 回転ステンレスシリンダー

表-2 STAおよびLTAの試験条件

RCAT	STA : RCAT163	LTA : RCAT90
サンプル	アスファルトまたはマスチック	
サンプル量	500～550g	
試験時間	235 min	140h
回転速度 (min ⁻¹)	5	1
ガス	空気	酸素
流量 (L/min)	4.0	0.075
試験温度 (℃)	163	90
気圧 (MPa)	0.1	
膜厚 (mm)	± 2.5	
性状測定	終了時	17, 65, 140h 後

3.8 Pendulum Test

Pendulum Testは、図-8に示す振り子式の衝撃試験機を用いて、アスファルトの凝集力を評価するものである。アスファルトを金属製の治具で挟み、真上から振り子を振り下ろしたときのスイング角度から凝集力を求める。温度を10℃刻みで数点変えて試験を行い、図-9のような曲線を作成して、最大凝集力 C_m とその温度 T_m を求める。

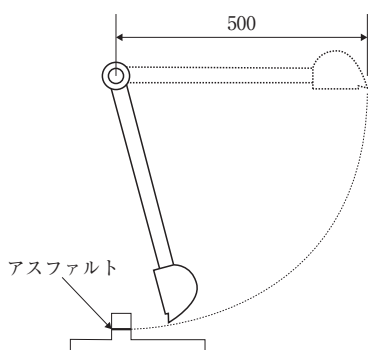


図-8 振り子式衝撃試験機

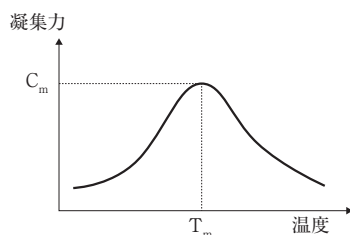


図-9 温度と凝集力

3.9 空気式引張接着性試験 (PATTI)

PATTIは、もともと金属やコンクリート、木などに塗られた塗料の引張り強さを評価する装置であり、これをアスファルトの付着性評価に適用したものである。図-10のような試験部と空気を送る装置とのセットになっている。

圧縮空気を送りながら試験を行い、剥がれたときの圧力を計測する。この圧力から25℃のプルーフ引張強度を算出する。

当初、ガラス板で接着性の評価が行われていたが、骨材表面で行うなども行われるようになってきている。また、48時間水浸後での測定や、剥がれた後の表面の状態から、界面破壊か凝集破壊かを判定することも行われている。

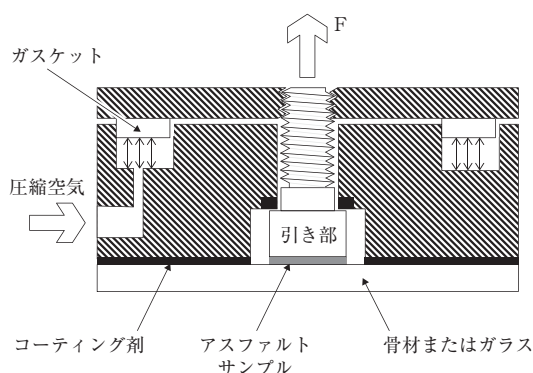


図-10 PATTI試験の概要

4. おわりに

ここでは、欧米で考案されているアスファルトの試験方法を中心にその一部を紹介した。日本ではまだ導入されていない試験方法の中には、興味深い試験方法がいくつもあり、日本でも有効性の確認が行われることが望まれる。

なお、ここに紹介した試験方法は、開発中のものも含まれ、最新の試験条件でない可能性もある。これらの試験を試される場合は、念のため最新の情報を確認してから行われることをお勧めする。

参考文献

- 1) 新田弘之他：ポリマー改質アスファルトの新しい評価方法, 石油製品討論会, vol.2012, pp84-95, 2012
- 2) H.Soenen, C.de La Roche and P. Redelius: Predict mix fatigue tests from binder fatigue properties, measured with a DSR, Eurasphalt & Eurobitume Congress, 2004.
- 3) Vuorinen, M J, and J P Valtonen, A new ultrasonic method for measuring the resistance to stripping, Eurobitume Workshop, Luxembourg, 1999
- 4) Youtcheff, J, C Williams and K Stuart, Moisture sensitivity testing of bitumen using a pneumatic adhesion test, Eurobitume Workshop, Luxembourg, 1999.
- 5) 辻本陽子他：中温化ポリマー改質アスファルトの諸性状と繰り返しクリープ特性, 舗装工学論文集, vol.71, No.3, 2015
- 6) 樫野誠他：エラストティック・リカバリー試験の有効性検討, 土木学会第61回年次学術講演会, 2010

高針入度アスファルトの活用に向けて ―試験舗装使用材を用いた室内試験編―

(Toward the Utilization of High-Penetration Asphalt
– Study on Aging and Recycling Properties in the Laboratory Tests –)

寺田 剛*・平川 一成**・佐々木 巖***・荒尾 慶文****・峰岸 順一*****

高針入度アスファルトの適用性を検証するため、(国研)土木研究所、東京都土木技術支援・人材育成センターおよび(一社)日本アスファルト合材協会の三者で平成25年8月～27年3月まで共同研究を行った。本稿では、この共同研究において行った実道での試験舗装の際に製造されたアスファルト混合物を用いて、室内での繰り返し劣化・再生特性について確認を行った結果を報告する。

1. はじめに

平成22年11月に改訂された舗装再生便覧では、再生混合物の製造において旧アスファルトの性状回復や不足するアスファルトを補うため、新アスファルトとして高針入度のアスファルト(以下、高針入度アスファルト)が追加された。しかしながら、現道での耐久性が十分に確認されていないのが現状である。

そこで、(国研)土木研究所、東京都土木技術支援・人材育成センターおよび(一社)日本アスファルト合材協会の三者で平成25年8月～27年3月まで共同研究を行い、実道での試験舗装、配合設計法の検討、再生骨材、再生アスファルトおよび再生混合物の性状確認および繰り返し劣化特性等について検討を行い、高針入度アスファルトの適用性を検証した。

実道での試験舗装、配合設計法の検討結果については、本誌¹⁾で報告している。本稿では、実道での試験舗装の際に製造されたアスファルト混合物を用いて、室内での繰り返し劣化・再生特性について確認を行ったのでその結果を報告する。

2. 試験施工に用いた材料

2.1 試験施工の概要

試験施工と配合検討については、既に本誌他で詳細に報告^{1, 2)}しているが、その概要を表-1に示す。既設の表層・基層(厚さ150mm)を打ち換えるもので、基層(厚さ100mm)には一般的な再生粗粒度アスファルト混合物(20)、表層(厚さ50mm)には表-2に示す4種類の混合物を用いた。図-1に試験施工の工区割を示す。

表-1 試験施工の概要

実施年月日	平成26年4月5日～8日(表層の施工)
実施場所	主要地方道青梅入間線(第63号) 東京都青梅市今寺二丁目～藤橋二丁目
施工規模	延長L=640m 2車線 幅員W=5.40～7.05m
舗装計画交通量	N ₅

2.2 使用材料の品質

(1) 表層混合物の使用材料

表層用混合物に使用した材料を表-3に示す。高針入度アスファルト150～200および200～300は表-4に示す性状のものを使用した。

*てらだ まさる 国立研究開発法人 土木研究所 道路技術研究グループ

**ひらかわ かずなり 元 国立研究開発法人 土木研究所 道路技術研究グループ

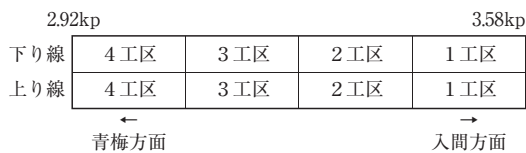
***ささき いわお 国立研究開発法人 土木研究所 先端材料資源研究センター

****あらお よしふみ 一般社団法人 日本アスファルト合材協会 技術部会

*****みねぎし じゅんいち 東京都土木技術支援・人材育成センター

表－２ 表層用混合物の種類

工区	混合物の種類	再生骨材 (%)	新材 (%)	新アスファルトの種類	再生用添加剤量 (%)
①	再生密粒度アスファルト混合物 (13)	60	40	ストレートアスファルト 40～60	旧アスファルトに対して 8.0
②		60	40	高針入度アスファルト 150～200	－
③		60	40	高針入度アスファルト 200～300	－
④	新規密粒度アスファルト混合物 (13)	－	100	ストレートアスファルト 40～60	－

図－１ 試験施工の工区割¹⁾

表－３ 表層用混合物の使用材料

材 料 名	材 質	製造会社名
砕石 6 号	硬質砂岩	菱光石灰工業(株)
砕石 7 号		
砕 砂		
細 砂	洗い砂	千葉石産(株)
石 粉	石灰岩	JFE ミネラル(株)
再生骨材	R13～5・R5～0	共同企業体 瑞穂アスコン
新アスファルト	40～60	JX 日鉱日石エネルギー(株)
	150～200	JX 日鉱日石エネルギー(株)
	200～300	昭和シェル石油(株)
再生用添加剤		富士興産(株)

表－４ 高針入度アスファルトの品質

試験項目	150～200		200～300	
	試験値	品質規格	試験値	品質規格
針入度 (25℃) 1/10mm	187	150を超え 200以下	266	200を超え 300以下
軟化点 ℃	38.0	30.0～45.0	35.5	30.0～45.0
伸度 (15℃) cm	100+	100以上	100+	100以上
トルエン可溶分 %	99.5	99.0以上	99.9	99.0以上
引火点 ℃	374	240以上	342	210以上
密度 (15℃) g/cm³	1.028	1.000以上	1.027	1.000以上

(2) 再生骨材の品質

再生骨材およびそれに含まれる旧アスファルトの品質は、表－５に示すとおりであった。試験施工の配合設計における旧アスファルトの針入度は20とし、再生骨材はR13～5とR5～0を3：1で混合したものを使用した。

表－５ 試験施工における再生骨材の品質¹⁾

項 目	骨材の種類	再生骨材 R13-0	土木材料 仕様書の品質
通過質量百分率 (%)	19.0mm	100.0	－
	13.2mm	100.0	－
	4.75mm	67.6	－
	2.36mm	46.7	－
	600μm	30.5	－
	300μm	22.5	－
	150μm	13.5	－
	75μm	8.8	－
旧アスファルトの含有量 %		467	3.8以上
最大密度 g/cm³		2.497	－
圧裂係数 MPa/mm		1.52	1.70以下
旧As針入度 1/10mm		20	20以上
軟化点 ℃		64.5	－
微粒分量 %		1.3	5以下

配合設計をはじめとした舗装工事の運用において使用材料は一定の品質をもつものと考えますが、実際には再生骨材の品質は一定ではなく、その品質の幅を確認しておくことは重要である。当該試験施工における再生混合物の製造では、工事に用いる再生混合物を出荷する時間に合わせて、使用される再生骨材を8回にわたり採取した。この試料 (R13～5とR5～0の、のべ16試料) を用いて、再生骨材とそれに含まれる旧アスファルトの品質のばらつきを試験評価した。舗装調査・試験法便覧G029を参考に、アブソン抽出器、遠心分離装置、ロータリーエバポレータ、真空乾燥器を用いてアスファルトを回収し、アスファルト量と旧アスファルトの品質試験を行った。

図－２、３に、アスファルト量の試験結果を示す。アスファルト量は、R13～5では28%程度、R5～0では6.2%程度であり、大きなばらつきはみられなかった。

図－４、５には、針入度の測定結果を示す。旧アスファルトの針入度は、試料ごとに21から33まで広範囲に分布しており、やや大きなばらつきがみられる。また、その平均値は27程度であり、粒度による相違は

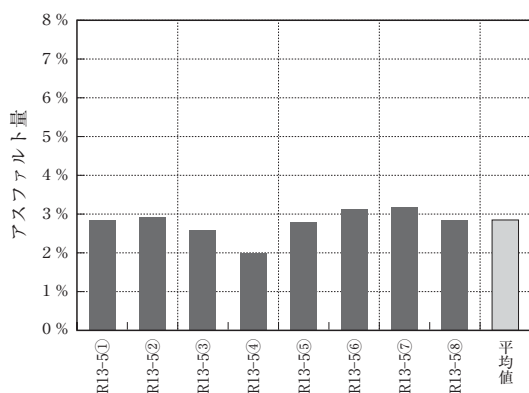


図-2 アスファルト量 (R13～5)

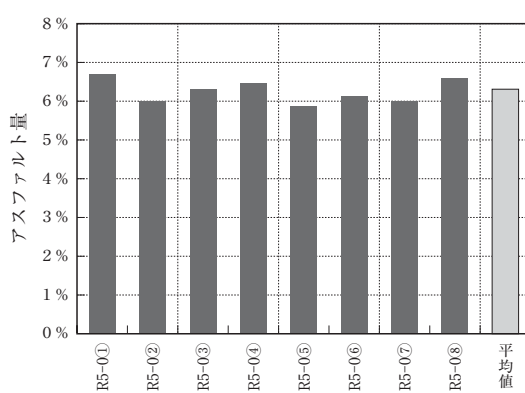


図-3 アスファルト量 (R5～0)

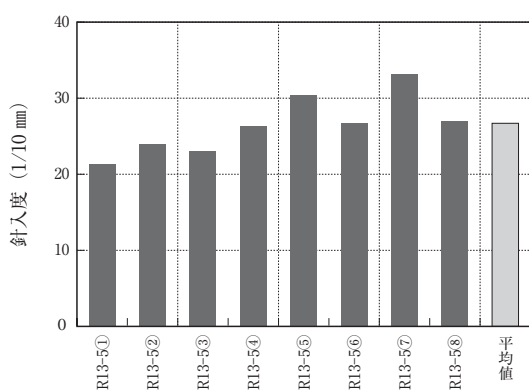


図-4 旧アスファルト針入度 (R13～5)

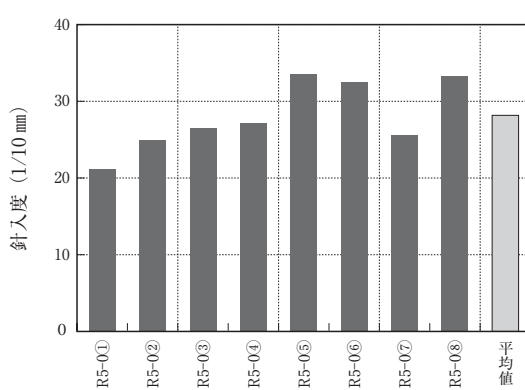


図-5 旧アスファルト針入度 (R5～0)

顕著ではなく、配合設計に用いた旧アス針入度とは異なった値であった。さらに、再生骨材試料の採取時期が後になるほど、針入度は大きくなるような傾向を示しているようにも見える。

再生骨材の原料は、様々な現場から搬入されたアスファルト・コンクリート殻であり、劣化程度が同一とは限らない。しかし、アスファルトプラントでは1 tonを超えるバッチ量が混合されるため、旧アスファルトの品質のばらつきはいくらか平均化されるものと考えられる。再生骨材の均一性と、出荷される再生アスファルト混合物の品質のばらつきについて評価確認することも有意義であろう。

2.3 表層用混合物の混合物性状

表層用混合物の出荷時の性状試験結果を図-6～図-9に示す。

マーシャル安定度は、各混合物とも規格値を満足していた。

動的安定度は、高針入度アスファルトの150～200および200～300 (②, ③工区)とも再生アスファルト40～60 (①工区)より低いが、新規アスファルト40～60 (④工区)より高くなっている。マーシャル安定度と圧裂係数は比較材の①, ④工区と同等以上であった。

曲げ強度から推定される脆化点は①, ④工区よりも②, ③工区の方が低くなっている。

これらから、高針入度アスファルト150～200および200～300を用いた場合は、新規密粒度(13)と通常再生のあいだの流動抵抗性を示した。

3. アスファルトの促進劣化と繰り返し再生

再生利用に使用する再生用添加剤の種類による長期供用性や再々生の評価予測をしておくことは重要である。現道での試験施工で使用した表-2に示すアスファルト混合物を用いて、促進劣化と再生を繰り返した場合の品質評価を、アスファルトのみの試験、アス

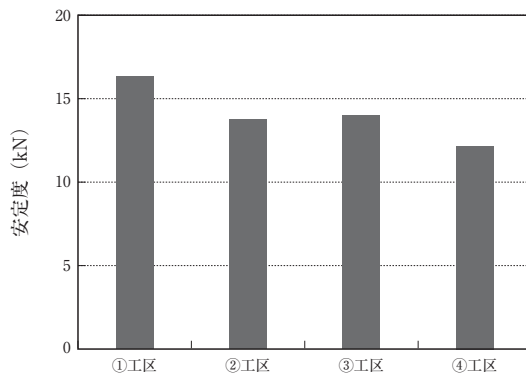


図-6 マーシャル安定度試験結果

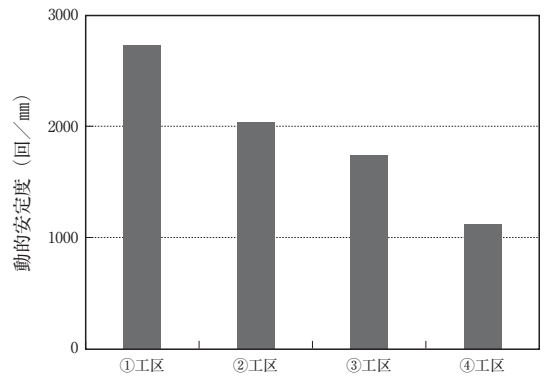


図-7 動的安定度測定結果

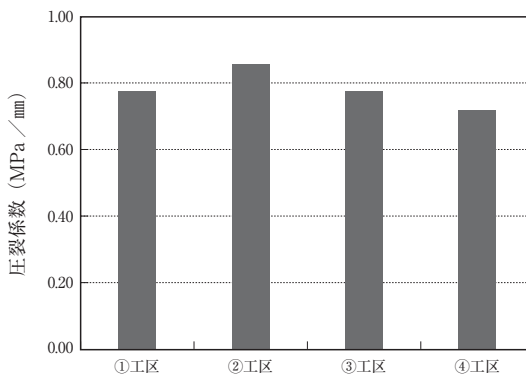


図-8 圧裂係数測定結果

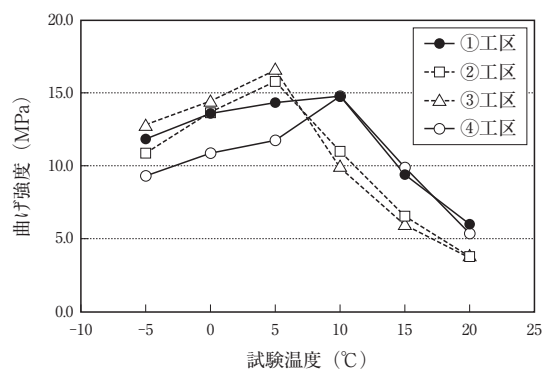


図-9 曲げ試験結果 (曲げ強度)

ファルト混合物での試験として、室内劣化検討の2通りの方法で劣化性状を確認した。本章では、工事使用混合物から抽出したアスファルトのバインダ試験としての評価検討結果を述べる。

3.1 試験方法

(1) 試験材料

試験施工に使用した練落とし混合物(表-2)からアスファルトを回収し、これを試料とした。促進劣化後の再生では、工事に使用したアスファルトおよび再生用添加剤(表-3, 4)を使用した。

(2) 室内促進劣化方法

繰り返し劣化再生の性状評価手順を図-10に示す。長期間の供用劣化を再現するためには、アスファルトの促進劣化操作を行う必要がある。促進劣化試験方法として、再生混合物製造時の劣化には薄膜加熱試験(TFOT)を用いた。長期供用後の劣化として、舗装調査・試験法便覧 A059 加圧劣化試験方法 (PAV 試験)

を参考に、圧力2.07MPa、試験温度100℃、劣化時間を48hrとした試験を行った。

(3) 再生方法

本試験施工の再生骨材配合率は、配合設計の結果から東京都の標準的な配合率である60%に統一している。このため、今回の室内試験でも同様な再生を繰り返すことを想定し、再生骨材配合率を60%に固定して試験評価を行った。

高針入度アスファルトを使用する工区②と③では、再生骨材配合率を60%に固定していることから、促進劣化後の旧アスファルトに40%の新たな高針入度アスファルトを混合したものを再生アスファルトとした。したがって、高針入度アスファルトを用いた再生では、設計針入度を満足しない場合もありうるが、今回の再生2巡目までの試験では40～60の範囲を逸脱することなかった。

再生用添加剤を使用する工区①と④では、PAV劣化

後の旧アスファルトを設計針入度50に回復させるために必要な添加剤量を図-11の要領で求め、その添加剤量と新アスファルト40～60を4割分加えて混合

したものを再生アスファルトとした。①と④は再生における使用材料は同じであるが、④は再生履歴が一巡少ないこと、新材から同じアスファルトが使用されることが異なる。

(4) 試験結果

試験施工で使用した混合物の練落とし（以下、練落とし混合物）から抽出回収したアスファルト、さらにそれを促進劣化と再生を繰り返した場合の針入度変化を図-12に示す。練落とし混合物は製造劣化を受けているため、設計針入度より小さくなっているものがある。PAV劣化後の針入度は20以下となっており、今回の試験では劣化条件が厳しい条件となっていたといえる。

再生後の針入度は、再生用添加剤を使用する①④では50であり、配合比を60%に固定し針入度調整を行わない②③では、200～300ではほぼ50であり、150～200では繰り返しとともに針入度はやや低下する傾向にあったが40を下回することはなかった。

促進劣化と再生を繰り返した場合の軟化点の変化を図-13に示す。練落とし混合物中のアスファルトの軟化点は、製造劣化を受けているものの、その値を比較すると、①の通常再生のみ大きな値を示した。劣化後の軟化点も大きくなる傾向を示した。ただし、劣化再生を経るとその傾向は低下した。

今回の試験条件では針入度20を下回る厳しい劣化操作を繰り返したものの、再生材の配合率が60%であれば再生のたびに新たな材料が加わり、長期耐久性や繰り返し再生利用が可能で

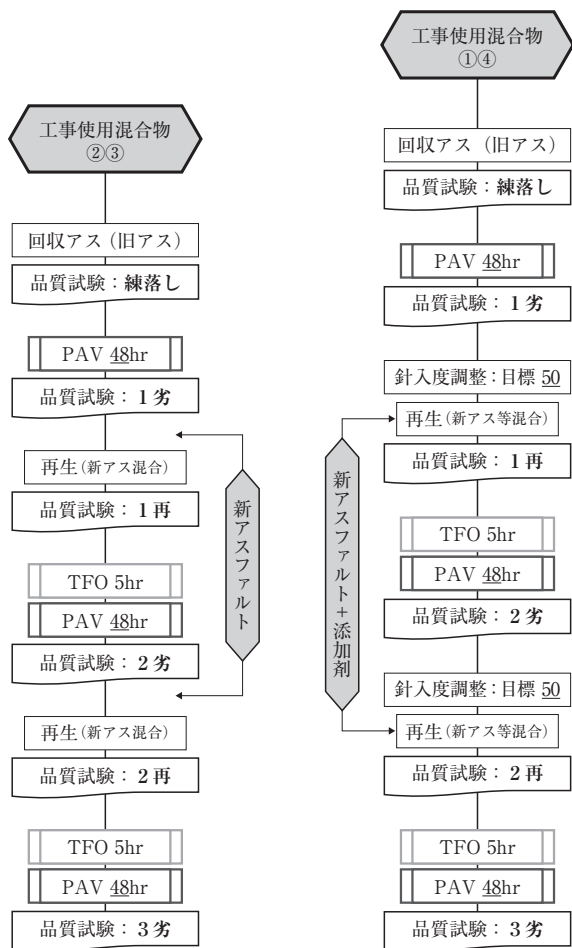


図-10 促進劣化と繰り返し再生手順

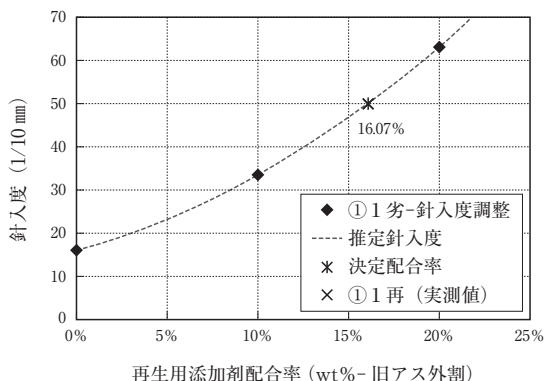


図-11 再生用添加剤の配合率決定例

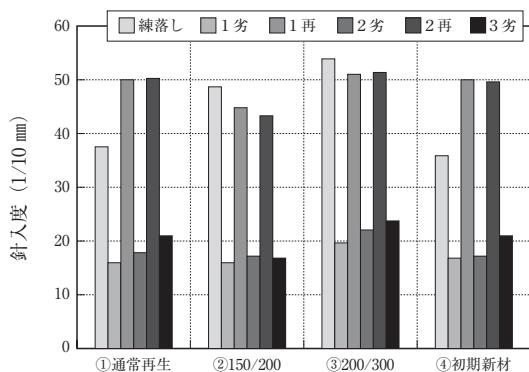


図-12 繰り返し劣化再生における針入度の変化

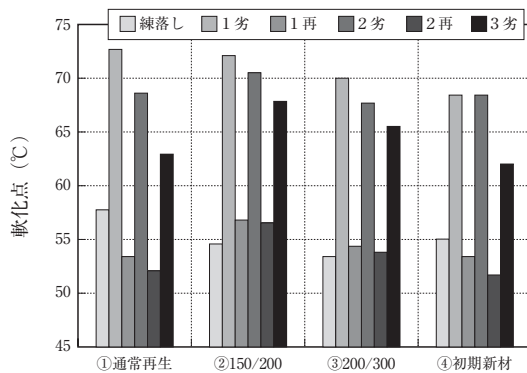


図-13 繰り返し劣化再生における軟化点の変化

あることが示唆された。高針入度アスファルトをはじめとした再生方法の違いに着目すると、初期性状や劣化レベルにはいくらか相違がみられたものの、2回再生までに大きな問題はみられなかった。

4. 混合物による促進劣化と繰り返し再生

4.1 試験方法

(1) 室内劣化方法

図-14に示す手順でアスファルト混合物出荷プラントから採取した混合物を十分にほぐし、締固め

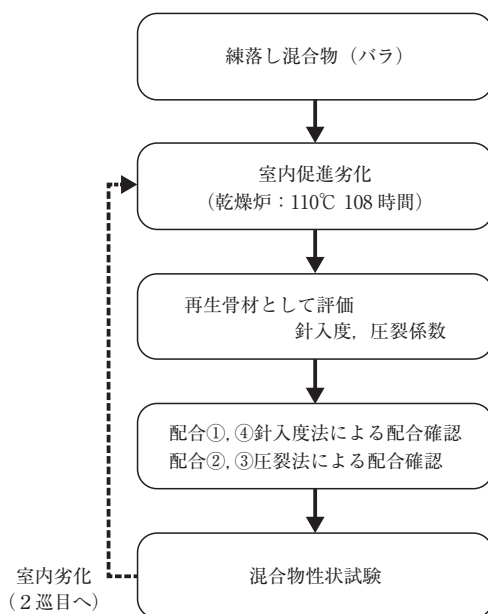


図-14 試験手順

ない状態で110℃の乾燥炉で108時間の熱劣化を行い、放冷したのち、再生骨材としての粒度、針入度、圧裂係数を評価した。

(2) 再生方法

配合①、④については針入度法を用いることとし、設計針入度への調整を再生用添加剤で行った。この時の再生骨材配合率は60%とし、設計針入度は50とした。配合②、③については圧裂法を用いることとし、設計圧裂係数への調整をそれぞれの新アスファルトで行った。すなわち配合②では高針入度アスファルト150～200、配合③では高針入度アスファルト200～300を新アスファルトとして用いている。設計圧裂係数は0.60～0.90MPa/mmとした。合成粒度は出荷時の粒度とした。再生混合物の配合確認を行ったのち、圧裂試験等により評価した。なお、本検討においては、劣化→再生のプロセスを2巡繰り返した。

4.2 試験結果

(1) 劣化後の圧裂係数

劣化再生を2巡繰り返した際の再生骨材の圧裂係数を図-15に示す。劣化2巡目における圧裂係数は配合②、③では低下しており、再生用添加剤を用いた場合の再生骨材よりも良好であった。

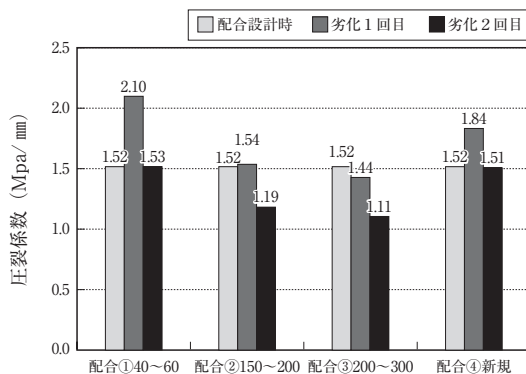


図-15 劣化後の圧裂係数 (再生骨材)

(2) 劣化後の針入度

劣化後の再生骨材の針入度を図-16に示す。本検討では劣化後の針入度の目安を20程度と見込んでいたが、配合②、③では25程度となっており、熱に対して劣化しにくい傾向が確認された。なお、本結果は前述のバインダ試験でのPAV劣化の程度が異なるため、針入度の直接比較は困難である。

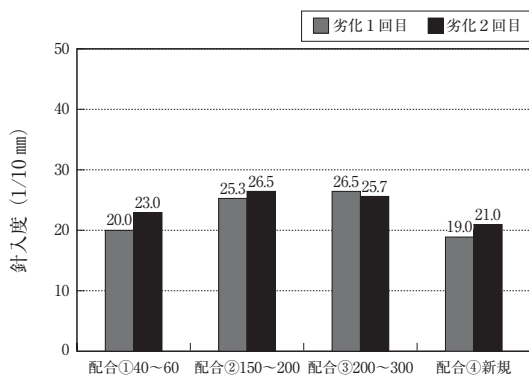


図-16 劣化後の針入度

(3) 再生骨材配合率による圧裂係数の変化

再生骨材配合率による設計圧裂係数の変化を図-17に示す。高針入度アスファルトを用いた繰り返し再生を想定した場合、高い再生骨材配合率であっても設計圧裂係数を満たす可能性が高くなることが示唆された。

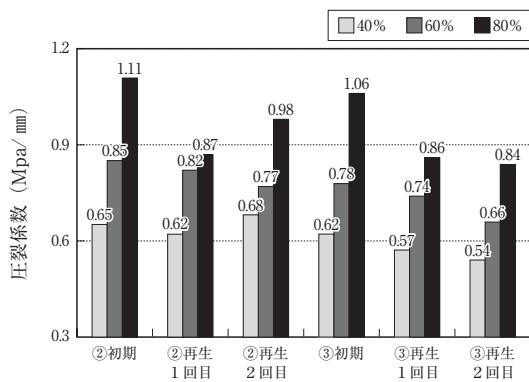


図-17 再生骨材配合率による圧裂係数

(4) 再生混合物の圧裂強度比

再生後の配合①～④の圧裂強度比を図-18に示す。配合②, ③では再生用添加剤を用いた場合と新規混合物の中間的な性状を示し、流動抵抗性やひび割れ抵抗性が従来の混合物より優れていると考えられる。

(5) 再生混合物の曲げ強度

室内再生後の配合①～④の曲げ強度を図-19～22に示す。配合②, ③では、プラント出荷時と室内再生1回目で同様の挙動を示しているが、配合①, ④では室内再生1回目ですでに脆化点や曲げ強度が低下している。このことから、高針入度アスファルトを用いた場合には、従来の再生用添加剤を用いた場合と比べ、再生後のたわみ性に優れていると考えられる。

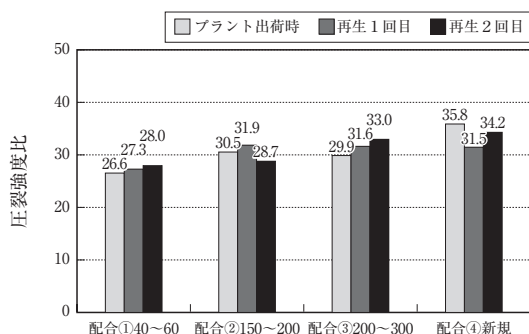


図-18 各混合物の圧裂強度比

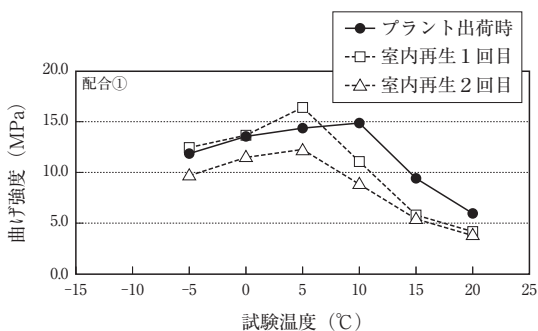


図-19 室内再生後の曲げ強度 (配合①)

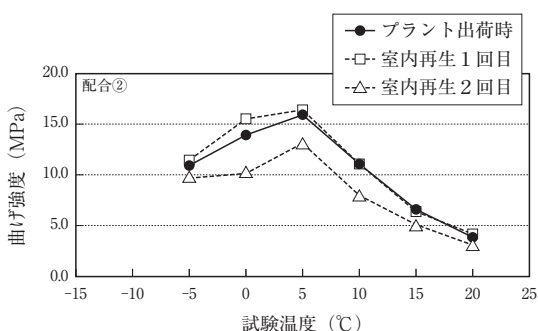


図-20 室内再生後の曲げ強度 (配合②)

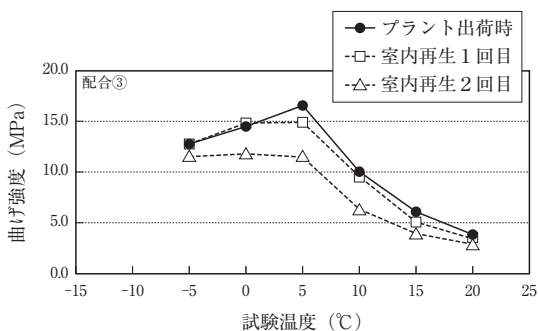


図-21 室内再生後の曲げ強度 (配合③)

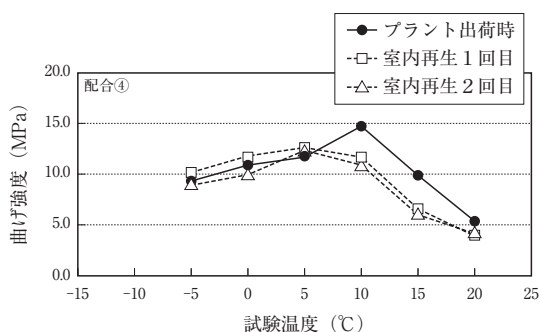


図-22 室内再生後の曲げ強度 (配合④)

5. まとめ

得られた結果は以下のとおりである。

(1) 再生骨材の品質

旧アスファルトの針入度は、試料ごとに21から33まで広範囲に分布し、再生骨材材料の採取時期によりやや大きなばらつきがみられ、配合設計に用いた針入度とは異なった値であった。

(2) バインダーレベルでの繰り返し劣化再生

再生方法の違いにより初期性状や劣化レベルに相違がみられたものの、再生アスファルトの品質には問題はみられなかった。促進劣化が厳しい条件設定であったが、再生材の配合率が60%であれば長期耐久性や繰り返し再生利用が可能であることが示唆された。

(3) 混合物レベルでの繰り返し劣化再生

高針入度アスファルトによる再生は、再生用添加剤を用いた従来の混合物と比較し、a) 再生骨材として

圧裂係数が小さくなり良好な評価となる。b) 熱に対して劣化しにくい傾向がある。c) 高い再生骨材配合率であっても設計圧裂係数を満足する可能性が高くなる。d) 流動抵抗性やひび割れ抵抗性が優れる。

なお、今回の促進劣化条件は上記バインダー試験でのPAV劣化レベルが異なるため、両者の直接的な比較は困難である。

6. あとがき

実道での試験舗装の際に製造されたアスファルト混合物を用いて室内での繰り返し劣化・再生特性について確認を行ったのでその結果を報告した。

繰り返し劣化再生の結果、混合物レベルでは、熱に対して劣化しにくく、流動抵抗性やひび割れ抵抗性が優れる結果であり、バインダーレベルでは再生材の配合率が60%であれば長期耐久性や繰り返し再生利用が可能であることが示唆された。

現在、試験施工に用いた4種類の混合物を平板や円柱供試体として、東京都土木技術支援・人材育成センターの屋上に暴露している。今後は暴露後の劣化性状の確認や試験施工の追跡調査および現場の舗装材料を一定期間供用後に採取し、混合物性状やバインダー性状を試験評価する計画である。これらから高針入度アスファルトの適用性を確認し、その成果を今後報告する予定としている。

これらの成果が高針入度アスファルトの利用促進に繋がり、再生アスファルト舗装の耐久性向上や安定した循環システムの実現に寄与すれば幸いである。

参考文献

- 1) 峰岸順一, 佐々木巖, 寺田剛, 荒尾慶文: 高針入度アスファルトの活用に向けてー現道での試験舗装編ー, 平26.アスファルト Vol.57, No.230, pp.47～55, 2014.12
- 2) 山本富業, 寺田剛, 橋本喜正: 高針入度のアスファルトの舗装への適用性に関する検討 (試験施工結果), 第13回北陸道路舗装会議, 2015.06

長期供用されたアスファルト舗装に含まれるアスファルトの性状調査結果

(Research on the Properties of Asphalt in Long-term-service Pavement)

小林 真依*・高橋 茂樹**

長期供用されたアスファルト舗装に含まれるアスファルトは、さまざまな外的要因によって劣化し、性状が変化している可能性がある。特に舗装表面では、常に紫外線や空気などにさらされており、劣化が進行しやすいとされている。一方で、基層や安定処理層の性状変化については詳しい調査報告はなされていない。そこで本研究では、舗装の深さ方向に着目し、劣化によるアスファルトの性状変化を調査した。ここでは、その一連の調査内容を紹介する。

1. はじめに

アスファルト舗装は供用により、わだち掘れやひび割れなどの破損が生じる。その破損の原因として、空気や水、交通荷重などによりアスファルトが劣化することがあげられる。

本研究では、採取した各層を施工時の記録や採取時の供用状態および損傷程度で区別し、アスファルトおよびアスファルト混合物の性状を表層からアスファルト安定処理層まで調査した。

なお、本研究は東日本高速道路株式会社の「アスファルト舗装の解体新書プロジェクト」^{1, 2)}の一環として行ったものである。

2. 目的

本研究の目的は、長期供用したアスファルト舗装か

ら抽出したアスファルトについて、深さ方向での性状を把握し、その性状変化の原因を明確にし、アスファルト舗装の劣化対策および長寿命化の方法について明らかにすることである。

3. 調査箇所の概要

調査した箇所は、東日本高速道路株式会社が管理する長野県の上信越道長野ICから須坂長野東ICまでの上下区間である。調査箇所の概要を表-1に示す。各高速道路の交通量は、およそ1.4～1.5万台/日・方向であり、大型混入率は19～22%である。供用年数は下り（121工区）が19年、上り（72工区）が17年である。使用されていたアスファルトはストレートアスファルトであった。

採取位置は車両通行部および非通行部の2種類に

表-1 調査箇所の概要

上信越道	121工区		72工区			
場所	長野IC～須坂長野東IC（下り）		須坂長野東IC～長野IC（上り）			
表層混合物	密粒度混合物		密粒度混合物			
施工年月	H5年3月（供用19年）		H7年3月（供用17年）			
試料No.	1	2	3	4	5	6
採取位置	非通行部	車両通行部	車両通行部	車両通行部	車両通行部	非通行部
状況	健全部	健全部	健全部	損傷部	軽微な損傷	軽微な損傷
表面のひび割れ	なし	なし	なし	あり 大	あり 小	あり 小

*こばやし まい 東亜道路工業株式会社 技術研究所 研究員

**たかはし しげき 株式会社高速道路総合研究所 舗装研究室長

分け、さらに各工区の表面のひび割れの有無を確認し、ひび割れが見られない箇所を健全部、ひび割れが見られるが軽度な箇所を軽微な損傷部、ひび割れの程度が大きい箇所を損傷部と分類している。

4. 試料の作製方法

4.1 試料の作製方法

既設舗装より、表層からアスファルト安定処理層までをブロック（45 cm × 45 cm × 18 cm）で採取した。さらに採取したブロックを図-1に示すように各層に分けてスライスした。その後、アブソン法（ASTM D 1856-95a）に基づいて抽出したアスファルト性状を調査した。

4.2 スライスした試料の外観写真

図-2に採取したブロックをスライスした試料の一例を示す。左より表層から安定処理層まで並んでいる。

121工区はおおむね健全な舗装であったため、すべての層において所定の形状にスライスすることができた（図-2a）。一方、健全部から損傷部まで様々な損傷程度の72工区では安定処理層の最下部が損傷部のみならず健全部を含めたすべての箇所でスライス時に破損してしまった（図-2b）。このことから、スライス時に破損してしまった72工区の安定処理層では、バインダの結合力の低下が示唆された。

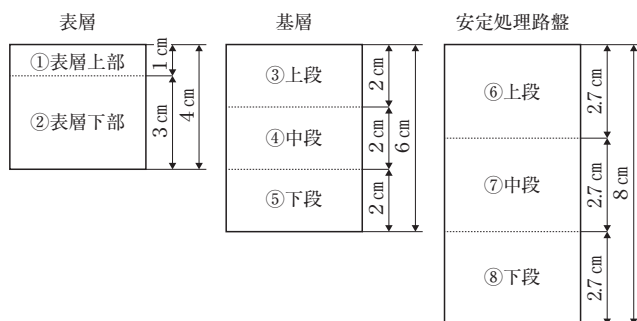


図-1 供試体のスライス寸法

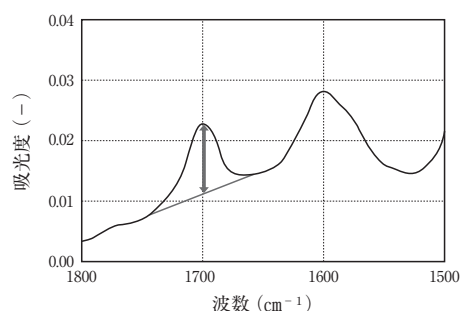
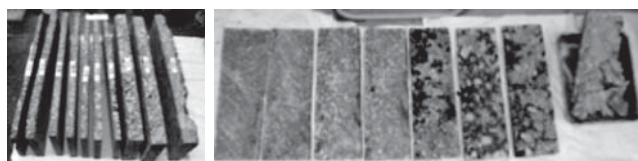


図-3 吸光度の算出方法



a: No.2 121 工区健全部
(車両通行部)

b: No.5 72 工区軽微な損傷部
(車両通行部)

図-2 ブロック供試体をスライスした時の各層の外観

5. 評価方法

アスファルト性状の調査項目は、針入度、赤外分光分析、DSR試験、組成分析とした。実道評価において、表層上部では紫外線などの影響を大きく受けると考えられるので表層上部および下部に分けている。基層および安定処理層においては各部分で明確な差が得られなかったので平均値で示している。針入度試験、赤外分光分析およびDSR試験は舗装調査・試験法便覧に準拠した。

5.1 赤外分光分析

赤外分光分析は、島津製作所製のフーリエ変換赤外分光光度計（FTIR）を用いて、溶剤を用いずにアスファルトを直接測定可能な Attenuated Total Reflection (ATR) 法により分析し、そこから吸光度を求めた。

本研究では、酸化劣化の進行によるカルボニル基の増加に着目し、カルボニル基の吸収を示す 1700 cm^{-1} の吸光度を、図-3に示す方法により算出した。

5.2 DSR試験

DSR試験は表-2に示す試験条件で複素弾性率 $|G^*|$ 、位相角 δ および $|G^*| \cdot \sin \delta$ を算出した。

$|G^*| \cdot \sin \delta$ は既往の研究で疲労ひび割れと相関があるとされており、Strategic Highway Research Program (SHRP) では PAV20 時間後のバインダによ

表-2 DSR試験条件

項目	条件
プレートタイプ	平行円盤
プレート直径	8 mm
試料厚さ	1 mm
試験温度	20, 40, 60℃
角周波数	0.1 ~ 100 rad/sec
ひずみ	0.1

るDSR試験から得られる $|G^*| \cdot \sin \delta$ が5000kPa以下となるように定められている。

5.3 組成分析

組成分析は、石油学会規格「TLC/FID法によるアスファルトの組成分析試験法」(JPI-5S-70-2010)に準じて行った。本試験により、アスファルトをアスファルテン(As)、レジン(Re)、芳香族分(Ar)、飽和分(Sa)の4成分の割合を推定した。

針入度や軟化点は、アスファルトの組成に大きく影響され、アスファルテンおよびレジンが軟化点を上昇させ、針入度を低下させる効果があり、芳香族分および飽和分は逆の効果があることが報告されている³⁾。一般に、アスファルトが劣化することで高分子側に移行すると言われており、芳香族分がレジんに、レジンがアスファルテンに変化する⁴⁾。ここでは式(1)を用いて組成変化の程度を算出し、比較検証することとした。劣化に伴い、アスファルテンおよびレジンが増加すると、式(1)の $(Ar+Sa)/(As+Re)$ 値は減少すると考えられる。

$$\text{組成変化の指標} = \frac{Ar + Sa}{As + Re} \dots\dots\dots (1)$$

6. 室内における促進劣化試験

実道より採取した試料と比較するために、一般的なストレートアスファルト60-80を室内で促進劣化させた試料を作製し、性状評価を行った。

促進劣化は回転式薄膜加熱試験(RTFOT)後の試料を加圧劣化試験(PAV)に20時間、40時間、60時間と時間を変えて行った。

表-3に室内試験の試料概要を示す。PAV20hが供用年数5~10年と想定しているとすると、PAV40hは10~20年、PAV60hでは供用15~30年に相当すると考えられる。各劣化試験は舗装調査・試験法便覧に準拠して行った。評価試験は、実路で採取した試料と同様な試験を行った。

7. 実道から採取したアスファルト性状の試験結果

7.1 針入度および赤外分光分析の結果^{5, 6, 7)}

図-4に実道より抽出したアスファルトの各工区、各層の針入度試験および赤外分光分析の結果を示す。

健全であった121工区は、アスファルト舗装が下層になるにつれて、針入度が高く、吸光度が小さくなる傾向を示した。車両通行の有無による違いはなく、ほぼ同程度の値を示している。これより、121工区のアスファルトは舗装内部よりも紫外線や空気の影響が大きい舗装表面の方が劣化が進行したものと考えられる。

一方、健全部から損傷部までさまざまな状態であった72工区から採取したアスファルトの針入度は、121工区と比較して、総じて小さく、すべての試料で安定処理層でも表層上部と同程度の針入度や吸光度であった。これは、安定処理層において、酸素や水の影響を受けてアスファルトが劣化したのではないかと考えられる。

表-3 室内試験の試料概要

表記名	試験内容
未劣化	ストレートアスファルト 60-80
RTFOT	RTFOT
PAV20h	RTFOT後にPAV20時間
PAV40h	RTFOT後にPAV40時間
PAV60h	RTFOT後にPAV60時間

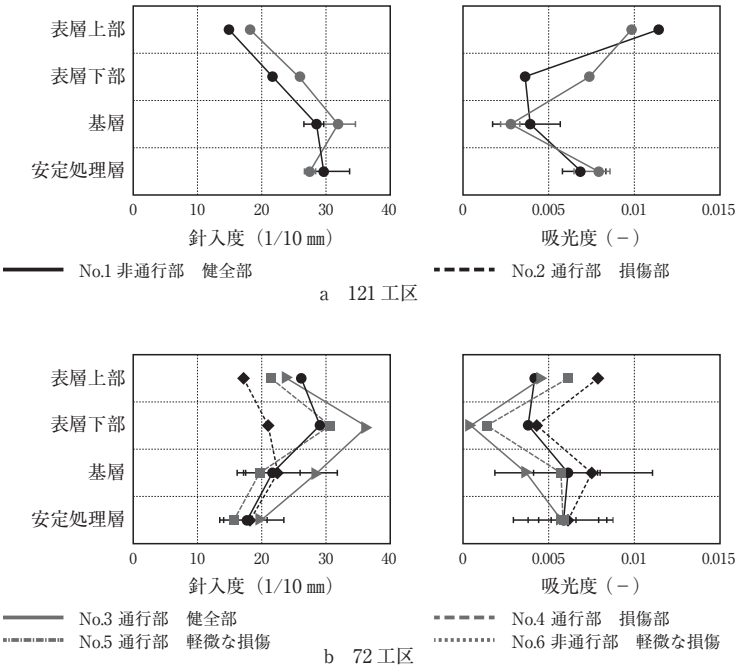


図-4 実道から抽出したアスファルトの針入度および吸光度

図-2で示したように、121工区の安定処理層はスライス時に所定の形状を保っていたが、72工区の安定処理層は形状を保てず、破損してしまった。これは、72工区の安定処理層のアスファルトは針入度が低下し、バインダの結合力が低下したため、混合物が破損してしまったのではないかと考えられる。

図-5に針入度と吸光度の関係を示す。室内試験の結果はPAV20hからPAV60hまでの試料の結果を記している。実道から採取した試料は多少ばらつきがあるものの、針入度の低下に伴い、吸光度が増加する傾向が得られた。この結果から、実道から採取したアスファルトも室内試験同様、酸化劣化によってカルボニル基が増加していることがわかった。実道においては酸化劣化のみではなく、他の要因も影響して劣化しているため、針入度および吸光度の関係に多少のばらつきが見られたと考えられる。

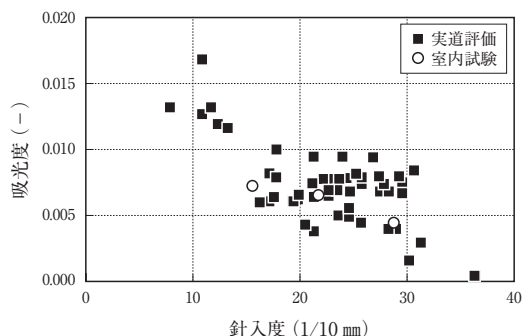


図-5 アスファルトの針入度と吸光度の関係

7.2 DSR 試験結果⁸⁾

次ページ図-6～図-8に実道から抽出したアスファルトの試験温度20℃、角周波数10rad/secでの $|G^*| \cdot \sin \delta$ 、複素弾性率 $|G^*|$ 、位相角 δ の測定結果を示す。

121工区は、表層に近づくにつれて $|G^*| \cdot \sin \delta$ が増大しているのに対し、72工区は逆に安定処理層に向かって $|G^*| \cdot \sin \delta$ が増大していることがわかった。室内での促進劣化試験において、劣化の進行とともに $|G^*| \cdot \sin \delta$ が増大していることを考えると、121工区では表層、72工区では安定処理層のアスファルトが劣化していると考えられる。

72工区No.4通行部損傷部は全層にわたって著しく高い $|G^*| \cdot \sin \delta$ になっており、損傷程度で大きな差が見られた。72工区より抽出したアスファルトの $|G^*| \cdot \sin \delta$ が5000kPa以上を示したのは、全ての安定処理層とNo.4車両通行部における損傷部の全層であった。72

工区の安定処理層は全ブロックにおいてスライスした際に、破損してしまった層であり、No.4の車両通行部における損傷部では表面にひび割れが確認された箇所である。アスファルト混合物でひび割れや破損が見られた箇所の $|G^*| \cdot \sin \delta$ が高いという傾向が見られた。

複素弾性率 $|G^*|$ を見てみると、 $|G^*| \cdot \sin \delta$ と同じ傾向を示し、劣化の進行とともに増大し、121工区では表層、72工区では安定処理層が高い値を示している。

位相角 δ は、各層で多少ばらつきはあるが、121工区および72工区で大きな差が見られず、PAV60h相当の値を示した。複素弾性率 $|G^*|$ に位相角 δ を乗じた $|G^*| \cdot \sin \delta$ は、複素弾性率 $|G^*|$ の増加によって増大するものと考えられる。これらのことからアスファルト混合物のひび割れは、20℃では、アスファルトの複素弾性率 $|G^*|$ でも評価できるものと考えられる。

図-9に25℃での針入度および $|G^*| \cdot \sin \delta$ の関係を示す。室内試験の結果はPAV20hからPAV60hまでの試料の結果を記している。実道から抽出したアスファルトは針入度が低下すると $|G^*| \cdot \sin \delta$ が増加しており、すべての層で高い相関を示している。特に、針入度が20 (1/10mm) 以下となると $|G^*| \cdot \sin \delta$ が急激に上昇している。針入度20 (1/10mm) と $|G^*| \cdot \sin \delta$ 5000 (kPa) 付近の交点に変曲点となっており、アスファルト性状についての1つの指標になりうると考えられる。

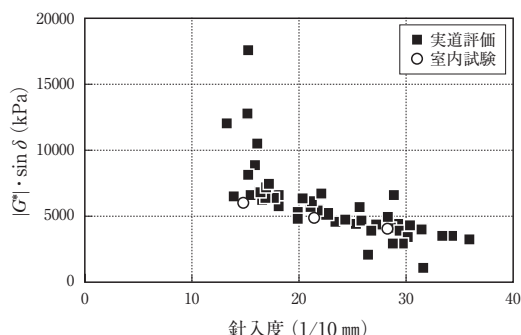
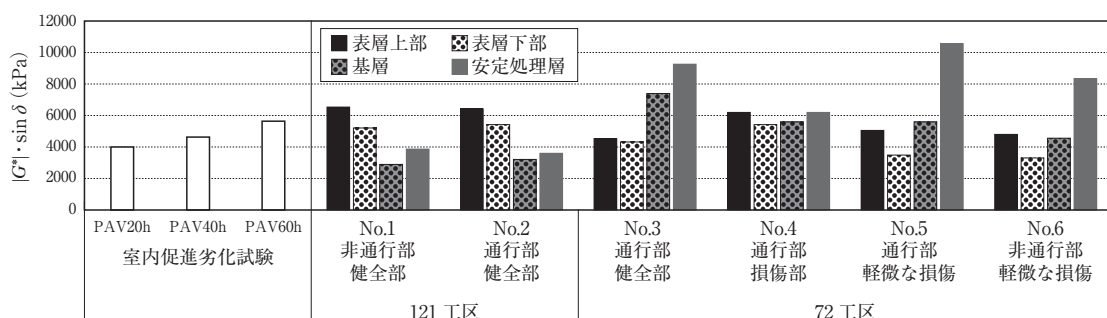


図-9 アスファルトの針入度と $|G^*| \cdot \sin \delta$ の関係

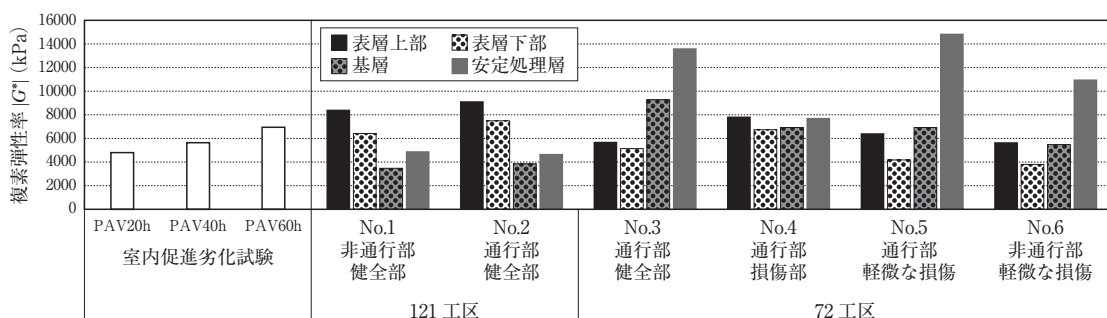
7.3 組成分析の結果⁹⁾

図-10にアスファルトの組成分析の結果を示す。室内で促進劣化させた試料を見ると、劣化の進行とともに $(Ar+Sa)/(As+Re)$ 値は低下しており、アスファルトの劣化に伴い、アスファルテン(As)およびレジン(Re)が増加していると考えられる。

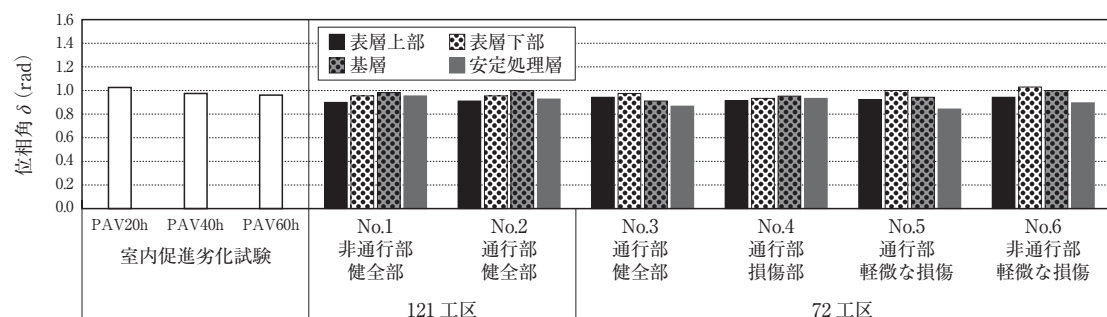
健全な121工区は、表層上部の $(Ar+Sa)/(As+Re)$



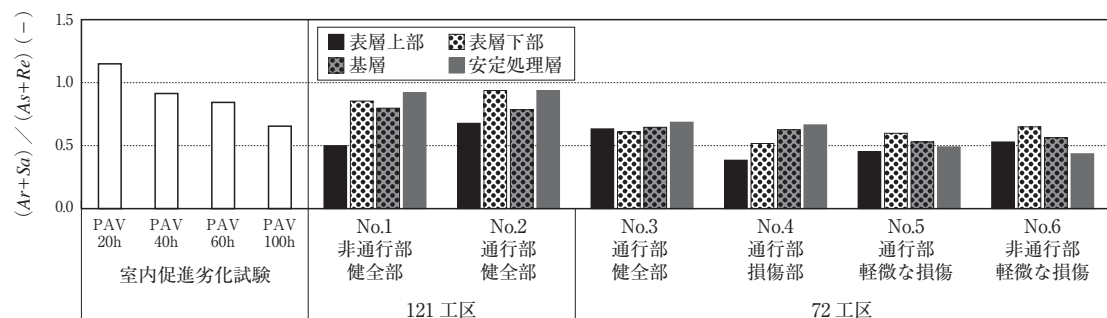
図－６ DSR 試験から得られたアスファルトの $|G^*| \cdot \sin \delta$ (20℃)



図－７ DSR 試験から得られたアスファルトの複素弾性率 $|G^*|$ (20℃)



図－８ DSR 試験から得られたアスファルトの位相角 δ (20℃)



図－１０ 実道から抽出したアスファルトの組成分析結果

値が下層と比較して、非常に小さい値となり、表層上部では劣化が進行していることがわかった。一方、72工区では、表層に限らず、全層で小さい値を示し、深層部のアスファルトまで高分子化し、組成が変化していることが分かった。

室内促進劣化させたアスファルトの結果と比較すると、121工区の表層では、PAV100hと同程度、基層および安定処理層では、PAV40hと同程度の組成変化が見られた。72工区では全層にわたってPAV100hと同程度の組成変化が見られた。

8. まとめ

調査結果から得られた知見を以下に示す。

- ①針入度および赤外分光分析の結果、酸化劣化により、針入度が低下し、カルボニル基を示す吸光度が増大する結果が得られた。しかし、実道から採取した試料において、多少のばらつきが見られたことから、実道では酸化だけでなく、他の要因で劣化が進行し、針入度と吸光度の関係にばらつきが見られたものと考えられる。
- ②DSR試験の結果、採取した混合物で破損が見られた72工区すべての安定処理層や表面にひび割れが見られたNo.4損傷部通行部の表層で高い $|G^*| \cdot \sin \delta$ の値を示した。
- ③複素弾性率 $|G^*|$ は $|G^*| \cdot \sin \delta$ と同様の傾向を示したが、位相角 δ は、各層で明確な差は見られず、全層でPAV60h相当の値であった。このことより、アスファルト混合物のひび割れは、20℃では、アスファルトの複素弾性率 $|G^*|$ でも評価できるものと考えられる。
- ④針入度と $|G^*| \cdot \sin \delta$ の関係を見てみると、表層、基層、安定処理層すべてにおいて、高い相関が見られた。特に針入度20 (1/10mm)と $|G^*| \cdot \sin \delta$ 5000 (kPa) 付近の交点に変曲点となっており、アスファルト性状についての1つの指標になりうると思われる。
- ⑤実道から採取したアスファルトの $(Ar+Sa)/(As+Re)$ は、121工区では表層上部で非常に小さい値を示し、PAV100h相当の値であった。一方、72工区では全層で小さい値を示し、全層にわたってPAV100h相当の値であった。このことから、121工区の表層上部および72工区的全層でのアスファルトはアスファルテンおよびレジンが著しく増加し、高分子化が見られ、組成が変化して

いることが考えられる。

- ⑥すべての試験において、アスファルトの劣化を示唆した箇所は一致しており、アスファルト中の成分の高分子化によるアスファルテンおよびレジンの増加、カルボニル基の増加、針入度の低下、複素弾性率 $|G^*|$ の増加による $|G^*| \cdot \sin \delta$ の増加が見られた。

9. おわりに

長期供用した高速道路の舗装について表層、基層、安定処理層を採取し、施工時の記録や採取時の供用状態、損傷程度で区別したアスファルトの性状を深さ方向に調査し、表層だけでなく安定処理層でも著しい劣化が確認された。今後は、酸化、紫外線、水などの環境劣化によるアスファルト性状への影響について検討し、劣化の抑制方法を見出して、舗装の長寿命化を目指すしたい。

— 参考文献 —

- 1) 高橋ほか：高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクトー検討の概要ー，土木学会第68回年次学術講演会，2013.9
- 2) 高橋ほか：高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクトー主な知見ー，土木学会第69回年次学術講演会，2014.9
- 3) 田中ほか：アスファルトの品質性状に影響を及ぼす化学特性に関する一考察，アスファルト，pp.37-42，Vol.41，No.198，1999.1
- 4) 笠原ほか：薄膜加熱試験によるアスファルトの熱劣化の検討，石油学会誌，pp.1043-1047，第17巻，1974.10
- 5) 平戸ほか：長期供用された高速道路で用いたアスファルトの気象劣化現象に関する調査結果，土木学会論文集E1（舗装工学），vol.70，No.3，2014.12
- 6) 小林ほか：アスファルト舗装の深さ方向におけるアスファルトの劣化に関する一検討，土木学会第69回年次学術講演会，2014.9
- 7) 小林ほか：高速道路で長期供用したアスファルトの性状変化に関する一検討，2014年石油製品討論会，2014.12
- 8) 小林ほか：DSRを用いた長期供用劣化したアスファルトの性状評価結果，土木学会第70回年次学術講演会，2015.9
- 9) 設楽ほか：長期供用したアスファルトの組成変化に関する一検討，土木学会第70回年次学術講演会，2015.9

再生骨材の品質管理における 新しいバインダ性状評価試験の導入

(Introduction of New Evaluation Test of Binder Properties in Quality Control for Recycled Aggregate)

中 村 健*

荷重測定型伸度試験および同様の試験機構を有するエラスティック・リカバリー試験について比較検討を行い、再生骨材の品質管理における新しいバインダ性状評価試験としての適用性について検討を行った。両試験は、ともに旧アスに含まれるポリマーの有無を判別でき、荷重測定型伸度試験より得られるFD値は混合物の疲労破壊抵抗性と、DR値は圧裂係数との間に高い相関性を有することが確認できた。

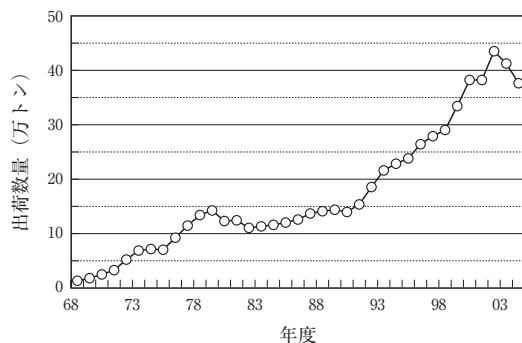
1. はじめに

加熱アスファルト混合物の低温時における性能向上と交通荷重の増加に伴う塑性流動抵抗性向上という需要を背景に、1990年代初頭から改質アスファルトの出荷量は急増し今日に至っている（図－1）。その結果、交通インフラとしての道路舗装の耐久性向上に留まらず、排水性舗装に代表される周辺環境へ配慮といった多大なる恩恵を得ることができた。しかし一方で、出荷量の増加と供用期間から推定される改質アスファルト発生材の混入量増加に対して、再生利用技術の準備が十分であったとは言い難い。

再生骨材に付着した旧アスファルト（以降、旧アス）は経年劣化によって脆化しているため、再生混合物の性能面ではひび割れ抵抗性の低下が懸念される場合が一般的である。そのため、ストレートアスファルト

（以降、ストアス）が主に使用されていた当時では、針入度試験によって旧アスの「かたさ」を規定してきたが、近年、旧アスの針入度は低下傾向にあり、規格値を下回る発生材も見受けられるようになってきた。その要因として、複数回の再生履歴を有する再生骨材の増加に加え、改質アスファルト発生材の混入率増加が考えられる。舗装再生便覧に記載されている再生骨材の品質として、これまで旧アスの針入度は20（1/10mm）以上とされてきたが、針入度を用いた評価はストアスを用いた混合物の発生材を対象としたものであり、改質アスファルト発生材への適用の可否は確認されておらず、元来針入度の低い改質アスファルトを用いた混合物の発生材においては、針入度が20（1/10mm）を下回った場合においても再生骨材への適用性が示唆されてきた。これを受け、平成22年の改訂からは圧裂係数を用いた基準が新たに加わり、改質アスファルトが用いられた低針入度の発生材に対する再生骨材への適用性が期待できるようになった。すなわち、針入度による規定を満足するほか、評価対象となる再生骨材のみで作製した圧裂試験用供試体にて圧裂係数が1.70（MPa/mm）以下であった場合でも再生骨材としての利用が可能となった。

しかしながら、再生骨材の品質管理において圧裂係数を用いるには以下の問題点があると考えている。圧裂試験の結果は骨材の骨格構造に大きく影響を受けるため精度が低く、また供試体作製時における骨材配合に規定がないため、同一バッチの再生骨材を用いた場



図－1 改質アスファルトの出荷数量推移

*なかむら たけし 長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 助教

合においても異なる試験結果が得られる。さらに針入度による規定は満足する一方で圧裂係数による規定は満足しない、もしくは逆の現象が発生するなど、針入度を用いた評価と圧裂係数を用いた評価との間には整合性がなく、本来評価すべき旧アスの性状に関しては十分に評価できているとは言い難い。

2. 新しいバインダ性状評価試験導入の必要性

針入度試験や軟化点試験といった旧来からのバインダ性状試験は、どれもアスファルト混合物の性能を直接指示するものではなく、レオロジー特性の異なるバインダ種間では相互評価を行うことが困難であった。1990年代に入り改質アスファルトの出荷量が急増して以降この問題は顕在化し、低針入度のバインダに対してそれが経年劣化に伴う脆化によるものなのか、改質効果（高粘度化）によるものなのかの判別ができず、再生骨材として使用可否の判断が困難となった。これは、粘弾性体であるバインダに対してコンシステンシーによる評価しかできていなかったためである。バインダが多様化した近年において、その種別や劣化程度にかかわらず包括的に評価可能な性状評価試験、評価指標が必要とされるようになった。このような状況を受け、これまでの研究¹⁾にてバインダのレオロジー特性に着目した性状評価試験として荷重測定型伸度試験を提案している。本試験より得られるFD値は、対象とするバインダの種類や劣化程度を問わず包括的に評価可能であり、対象バインダを用いて作製した混合物の疲労破壊抵抗性との間に高い相関性を有することが確認されている^{2, 3)}。本報告では、荷重測定型伸度試験および同様の試験機構を有するエラスティック・リカバリー試験について比較検討を行い、再生骨材の品質管理における新しいバインダ性状評価試験としての適用性について検討を行った。

3. 試験機の概要

荷重測定型伸度試験、エラスティック・リカバリー試験の概要について以下に述べる。両試験機は、ともに従来の伸度試験機をベースとしており、前者には荷重測定用ロードセルが搭載されていること、後者は用いる治具の形状が異なるという特徴がある。

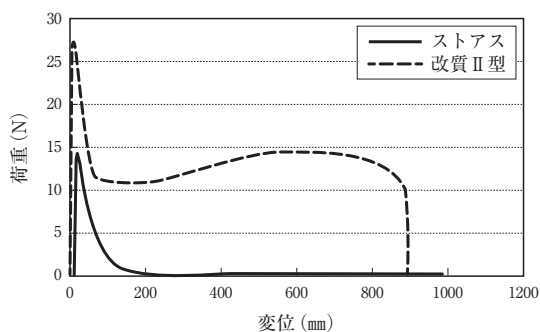
3.1 荷重測定型伸度試験

バインダの把握力・粘結力を評価する試験として、タフネス・テナシティ試験が挙げられる。この試験では、半球状の金属塊を規定温度のバインダに浸し、規

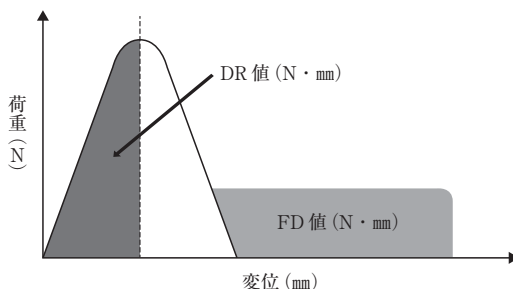
定速度で引き抜く際に要した力と変位を記録する。しかし、凝集力の高いバインダの場合、半球面より剥脱するという問題点があった。荷重測定型伸度試験は従来の伸度試験機にロードセルを搭載したもので、バインダが延伸される際の荷重と変位を求めることができ、バインダの凝集力が高い場合においても治具からの剥脱は生じない。試験方法は従来の伸度試験機試験法（舗装調査・試験法便覧 A043）に準拠し、試験温度 15℃、延伸速度は毎分 50mm、サンプリングレートは 200ms とした。試験結果として、タフネス・テナシティ試験の結果と酷似した荷重－変位曲線が得られ、データ整理においても同様に、荷重－変位曲線にて囲われた面積を荷重低下時の接線にて左右に分断し、テナシティに相当する部分を FD 値、また最大荷重値に至るまでの部分を DR 値と定義している。試験結果の一例を図－2、データ整理の模式図を図－3 に示す。

3.2 エラスティック・リカバリー試験

エラスティック・リカバリー試験は、米国にて規格化（ASTM D6084）されているバインダの弾性回復率を評価する試験である。従来の伸度試験機と比較して使用する治具の形状が異なり、図－4 に示すような矩形のスペーサーを用いる。



図－2 試験結果の一例



図－3 データ整理の模式図

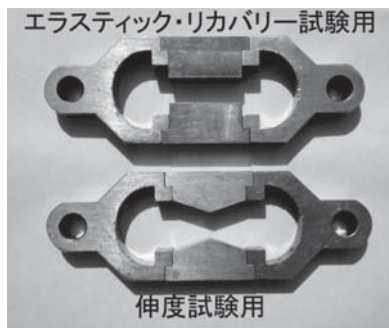


図-4 治具形状の差違

以下に試験手順を述べる。

- ①試験温度は10℃で、90分の養生の後に毎分50mmの試験速度で延伸を開始する。
 - ②変形量が100mmに達した時点で5分間ホールドし、サンプルの中央部を切断する。
 - ③1時間放置した後、切断面が接触するまで治具を移動させ、残留変形量を計測する。
- また、弾性回復率(R)は式(1)にて求められる。

$$R(\%) = \frac{E - X}{E} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

ここで

E: 初期変形量 (mm)

X: 残留変形量 (mm)

既往の研究⁴⁾では、新規のバインダを対象とした場合において、バインダ種の違いによる弾性回復率の差が確認されている。また劣化の進行に伴う弾性回復率の変化も確認されたが、ストアスと改質アスファルトでは弾性回復率のとりうる範囲が異なるため、試験対象のバインダにポリマーが含まれているかの判別手段になり得ることが考えられ、弾性回復率が35%以上であれば、概ねポリマーが含まれていると判断できる。

その一方で過度の劣化を受けたバインダでは所定の初期変形量に達する前に破断することにより測定が不可能であることも示唆されている。

4. 混合物の諸性状との比較

荷重測定型伸度試験では、タフネス-テナシティ試験の結果とよく似た荷重-変位曲線が得られる。テナシティは混合物の疲労破壊抵抗性との間に高い相関性を有していることから、FD値と混合物の疲労破壊抵抗性とを比較検討した。また、混合物の変形に対す

る抵抗性を評価している圧裂係数に対し、DR値との相関性を比較した。評価対象となるバインダにはストアス(60/80)とポリマー改質Ⅱ型を選定し、それぞれマントルヒーターと攪拌機を用いた加熱促進劣化に供し、劣化程度の異なるバインダを用意した。また、FD値については、エラスティック・リカバリー試験より得られる弾性回復率との関係について検討した。

4.1 曲げ疲労試験

曲げ疲労試験では密粒度混合物(13)および密粒度混合物(20)、砕石マスチックアスファルトを評価対象混合物とした。試験温度は15℃、载荷周波数は5Hzとし、試験ひずみは400μとした。曲げ疲労試験における破壊回数と、混合物の作製に使用したバインダのFD値との関係を図-5に示す。試験結果より、バインダのFD値は混合物の疲労破壊抵抗性との間に高い相関性を有することが確認でき、これは混合物の骨材配合やアスファルト量、バインダの種類や劣化程度に依存しないことが分かった。現状では、混合物のひび割れに関する諸性状に基準がないため、再生骨材の品質管理に係るバインダ性状評価試験では唯一の指標である針入度を参考に、ストアスを加熱促進劣化に供し、針入度を20(1/10mm)まで低下させたサンプルのFD値50(N・mm)を再生骨材への適用の可否を決める基準の一つとした。なお、改質アスファルトのなかには針入度が20(1/10mm)を下回るサンプルもあったが、そのいずれも基準値を満足する結果となった。

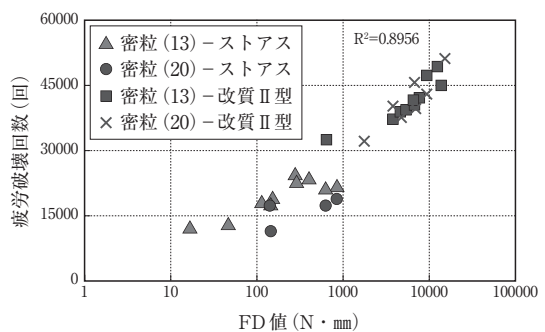


図-5 FD値と疲労破壊抵抗性との関係

4.2 圧裂試験

圧裂試験は骨材の骨格構造や粒度に大きく影響を受けるため、本来評価すべき旧アスの性状を正しく評価することは困難である。したがって、それらの影響を極力避けるため骨材配合およびアスファルト量一定のもと試験を実施した。なお、試験法および試験条件は

「アスファルトコンクリート再生骨材の圧裂係数の求め方」(再生舗装便覧付録)に準拠した。各供試体における試行回数は5回とし、その平均値を試験結果として採用した。試験結果とDR値との関係を図-6に示す。グラフではプロットのばらつきも若干みられているが、アスファルト混合物の評価試験としては妥当な精度であり、バインダの種別や劣化状況を問わず、両者は良好な相関性を有すると判断できる。また、バインダの劣化が進行するとともに圧裂係数およびDR値は上昇し、規定値である圧裂係数1.70 (MPa/mm)に相当するDR値はおおよそ1100 (N・mm)となることが分かった。

4.3 エラスティック・リカバリー試験との対応

既往の研究⁵⁾では、バインダの弾性回復率と混合物のせん断疲労破壊抵抗性との間に相関性は確認されていない。そこで、バインダ種別および劣化程度のことなるサンプルに対し荷重測定型伸度試験およびエラスティック・リカバリー試験を実施し、FD値と弾性回復率との関係を調査した。試験結果を表-1に示す。試験結果よりFD値と弾性回復率との間に明確な関係は確認できなかったが、ストアスと改質アスファルトの弾性回復率に大きな差があるため、試験対象にポリマーが含まれるかの判断は可能であると推測される。また荷重測定型伸度試験の場合、過度に劣化が進行したサンプルに対しても供試体が破断するまでの変形量が60mm程度確保できれば荷重-変位曲線に接線が引けるため指標値を算出可能であるのに対し、エラスティック・リカバリー試験では、所定の初期変形量に至る前に破断するため測定が不可能となった。

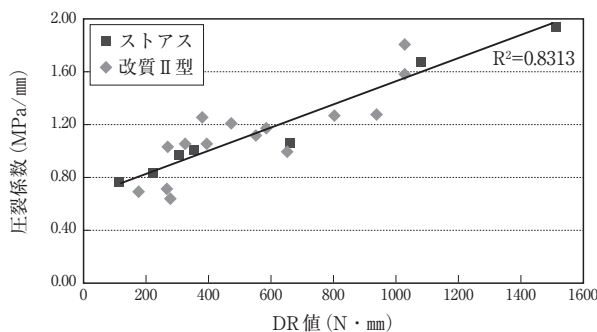


図-6 DR値と圧裂係数との関係

表-1 FD値と弾性回復率との関係

バインダ種別	ストレートアスファルト			改質アスファルト		
FD値 (N・mm)	76	124	978	1102	4736	9890
弾性回復率 (%)	測定不能	測定不能	19	54	70	66

5. まとめ

荷重測定型伸度試験より得られるFD値は混合物の疲労破壊抵抗性との間に高い相関性を有し、DR値は圧裂係数との間に高い相関性を有することが確認できた。一方、ASTMに規定されたエラスティック・リカバリー試験は試験対象のバインダにポリマーが含まれるかの判別手段となり得ると推測されるが、弾性回復率から旧アスの劣化程度を把握することは困難であり、過度に劣化の進行したサンプルに対しては所定の初期変形量を確保できず測定不能となる可能性が高い。また、荷重測定型伸度試験から得られるFD値も、ポリマーの有無によって取りうる範囲が異なり、その境界値付近ではポリマーの有無によってDR値に大きな差がみられることから、荷重測定型伸度試験においても試験対象のバインダにポリマーが含まれるかの判別は可能である。

以上より、再生骨材の品質管理基準として、発生材より抽出した旧アスに対し荷重測定型伸度試験を実施し、その試験結果が針入度20 (1/10mm)のストアスに相当するFD値50 (N・mm)以上、かつ圧裂係数1.70 (MPa/mm)に相当するDR値1100 (N・mm)以下の2点を満足することを提案する。

参考文献

- 1) 中村健:「バインダ性状試験を用いた混合物の散逸エネルギー推定およびその適用範囲に関する考察」, 第13回北陸道路舗装会議, I-1, 2015.6
- 2) 鈴木辰徳, 中村健:「バインダの粘弾性を考慮した再生骨材の品質評価法についての研究」, 第31回 土木学会関東支部新潟会研究調査発表会V-31, 72013.11
- 3) 中村健:「再生骨材の品質管理における新しいバインダ性状評価試験の導入」, 土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, V-20, 2014.3
- 4) 檜野誠, 山本幸亮, 村山雅人:「エラスティック・リカバリー試験の有効性検討」, 土木学会第61回年次学術講演会, V-086, 2006.9
- 5) 渡貫辰彦, 向後憲一, 井上武美:「排水性舗装の骨材飛散抵抗性に関する検討」, 土木学会舗装工学論文集第8巻, 2003.12

Nottingham Asphalt Tester (NAT) による アスファルト混合物の評価方法について

(Measuring the Mechanical Properties of Asphalt Mixture by Nottingham Asphalt Tester)

岩 間 将 彦*

舗装の基本的考え方が仕様規定から性能規定へと転換し、舗装設計法の自由度は大幅に高められた。また、昨今の地球環境問題を背景に、アスファルト混合物の中温化技術や再生技術など、舗装材料に対する要求は多様化している。こうした状況のなか、様々なアスファルト混合物の材料定数を検討し、舗装の断面構成に反映させることは、コスト縮減の観点でも効果的と考える。そこで本稿では、アスファルト混合物の材料定数に関して、Nottingham Asphalt Tester (NAT) を中心に、その評価方法と実務面での適用性について報告する。

1. はじめに

平成13年に定められた「舗装の構造に関する技術基準」¹⁾により、舗装の基本的考え方は仕様規定から性能規定へと転換された。これにより、舗装構成の設定が自由となり、新材料や新施工技術の採用も容易となった。一方で、アスファルト混合物の評価方法や舗装の設計法は経験に基づく方法に依存しており、理論設計法も十分には活用されていない状況にある。この要因として、設計時に設定する材料定数の確認方法が国内で確立されていないことが挙げられる。材料定数は、舗装の断面構成を決める上で重要な指標であるため、その評価方法の確立が望まれる。

そこで本稿では、アスファルト混合物の材料定数とその評価方法に関して、主にヨーロッパで使用されている Nottingham Asphalt Tester (NAT) の運用について紹介するとともに、実務面での適用性について報告する。

2. Nottingham Asphalt Tester (NAT)

1970年代後半から1980年代前半にかけて、英国ではアスファルト混合物の力学特性に関して多くの研究が実施された。その結果として、適切な配合設計法の確立とアスファルト混合物の材料定数を求めるための安価な試験装置の開発が求められた。こうした背景を踏まえ、比較的簡便な方法でアスファルト混合物の挙動を精度よく評価することを目的に、Nottingham

Asphalt Tester (NAT) は Nottingham 大学における S.F. Brown 教授らにより開発された²⁾。

NAT では、試験荷重を空気圧で載荷し、載荷に伴う供試体変位は作動トランス (LVDT) により測定する。荷重の載荷速度・時間は付属のコンピューターソフトウェアで設定し、試験は専用の恒温槽内で実施する。

基本的には一つの試験装置でアスファルト混合物の①スティフネス特性、②疲労特性、③永久変形特性が測定可能であり、現場切り取りコアなどの円柱形供試体を使用し、試験方法も簡便である。そのため、ヨーロッパでは実務から研究まで、幅広い用途でアスファルト混合物の評価手法として活用されている。



図-1 Nottingham Asphalt Tester (NAT)

*いわま まさひこ 株式会社NIPPO 総合技術部 技術研究所 研究第一グループ

3. NATによるアスファルト混合物の材料定数

3.1 スティフネス特性

スティフネスという用語は、弾性係数とほぼ同意義に扱われている。しかし、図-2に示すように、アスファルト混合物は温度・荷重・荷重速度に材料特性が依存する。そのため、アスファルト混合物の弾性係数は、スティフネスとして定義されている³⁾。

図-3は、NATによるスティフネス測定用の装置配置である。スティフネスの測定は、Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) Testと呼ばれおり、これは非破壊の間接引張り試験である。試験では、供試体に対して一定の変位を与えるための荷重を数回・荷重して、アスファルト混合物のスティフネスを測定する。この試験は英国やヨーロッパで規格化されており、以下の条件で試験が実施される⁴⁾。

- ①試験温度：20℃
- ②供試体直径：100mmまたは150mm
- ③供試体厚さ：30mm～80mm
- ④荷重・荷重時間：124ms
- ⑤最大横方向変位：7 μ m（直径150mm供試体の場合）
5 μ m（直径100mm供試体の場合）

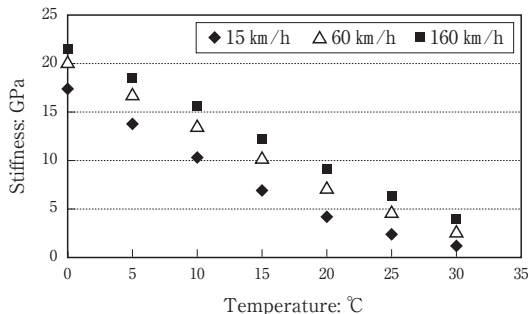


図-2 スティフネスと温度・荷重・荷重速度の関係³⁾

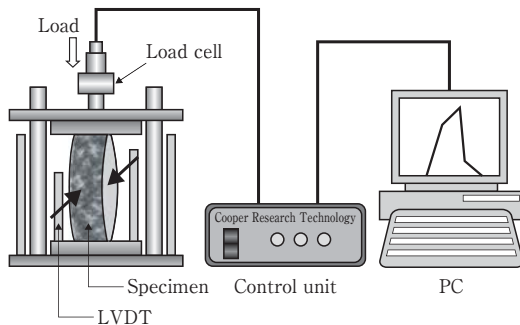


図-3 Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) 試験機⁴⁾

表-1は、筆者らにより実施したアスファルト混合物のスティフネス測定例である。このように、標準混合物と検討用混合物の比較などに活用することが可能である。

表-1 アスファルト混合物のスティフネス測定例

混合物種	密粒度アスコン (13)		再生密粒度アスコン (13)	
	標準	中温化	標準	中温化
スティフネス (MPa)	3292	3260	3108	3115
標準偏差スティフネス (MPa)	181	244	258	178

3.2 疲労特性

図-4は、NATによる疲労測定用の装置配置である。疲労測定は、Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT) と呼ばれており、これは供試体に対して一定の鉛直荷重を破壊するまで繰り返し・荷重して、アスファルト混合物の疲労特性を評価する試験である。この試験は英国規格 (BS) になっており、以下の条件で試験が実施される⁴⁾。

- ①試験温度：20℃
- ②供試体直径：100mmまたは150mm
- ③供試体厚さ：30mm～50mm
- ④荷重・荷重時間：120ms (1.33Hz 相当)
- ⑤応力範囲：50kPa～600kPa (試験者により設定)
- ⑥破壊基準：累積鉛直変位量 9mm

図-5は、既往の研究で実施されたITFTの結果である。ここでは、標準混合物 (密粒度アスファルト混合物相当) に対して2種類の温度条件で試験を実施しており、供試体の引張応力と破壊時・荷重回数が相関関係にあることがわかる。

図-6は、ITFT試験結果と二点曲げ試験 (Trapezoidal) 結果を同一グラフ上にプロットしたものである。ここでは、縦軸を引張ひずみ、横軸を破壊時・荷重回数とし、試験結果を表している。結果より、試験温度に若干の違いはあるものの、二つの試験には相関があることがわかる。

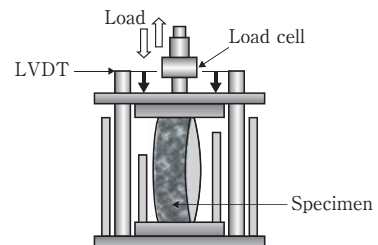


図-4 Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT) 試験機⁴⁾

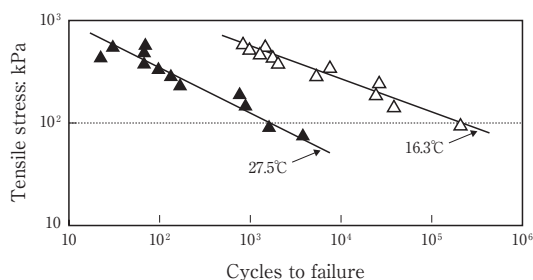


図-5 ITFT 試験データ²⁾

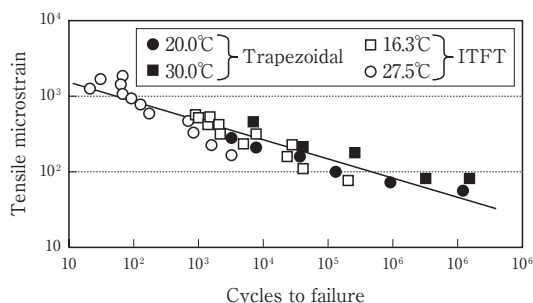


図-6 ITFT 試験と二点曲げ試験結果比較²⁾

二点曲げ試験は、アスファルト混合物の疲労特性を評価するため、主にフランスで運用されている試験である。しかし、ITFTに比べて試験時間が長いため、数時間で終了するITFTの実務コスト面での優位性が指摘されている²⁾。

3.3 永久変形特性

図-7は、NATによる永久変形特性測定用の装置配置である。永久変形特性評価はRepeated Load Axial Test (RLAT) と呼ばれており、これは供試体に対して、一定の鉛直荷重を設定回数まで繰り返し載荷（一秒載荷、一秒休止）することで、アスファルト混合物の永久変形特性を評価する試験である。この試験も英国規格 (BS) になっており、以下の条件で試験が実施される⁴⁾。

- ①試験温度：30°Cまたは40°C
- ②供試体直径：100 mmまたは150 mm
- ③試験前養生応力：10kPa
- ④試験前養生時間：600 秒
- ⑤載荷応力：100kPa
- ⑥試験時間：3600 秒

図-8は、筆者らにより実施した、RLATによるアスファルト混合物の永久変形特性測定例である。図に示すように、試験結果は載荷回数と軸ひずみのグラフ

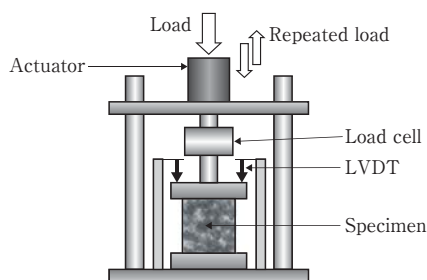


図-7 Repeated Load Axial Test (RLAT) 試験機⁴⁾

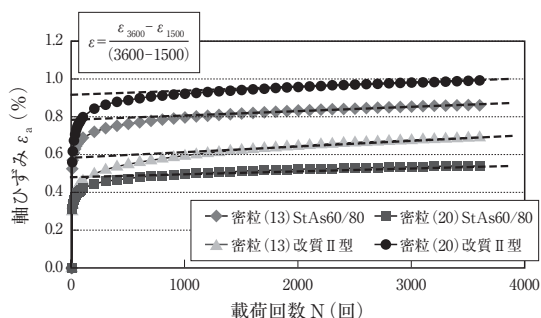


図-8 RLATの測定例

で表される。英国規格 (BS) では、対象とするアスファルト混合物の永久変形特性を3600回載荷後の軸ひずみ ε_{3600} (%) とグラフの傾きである軸ひずみ変化率 ε (%/回) で評価する。

図-9は、RLATのグラフの傾きから、軸ひずみ変化率 ε (%/回) を算出した結果である。ここでは、密粒度アスファルトコンクリート (13) (以下、密粒度アスコン) と再生密粒度アスファルトコンクリート (13) (以下、再生密粒度アスコン) を対象に、標準混合物と微細泡系中温化剤を用いた中温化混合物を評価しており、各種混合物の永久変形特性に大きな差異はないことを表している。

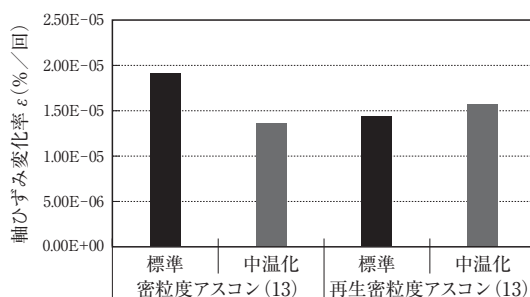


図-9 3600回載荷後の軸ひずみ変化率 ε (%)

この他にも、供試体をゴムスリーブで覆い側圧一定の条件下で実施する Confined Repeated Load Axial Test (CRLAT) や三軸セル内で実施する Triaxial Repeated Load Test (Tri-RLAT) があり、Tri-RLAT は英国式ホイールトラッキング試験との相関性が報告されている。

4. 試験結果の活用

実務面における NAT の運用として、各種アスファルト混合物の材料特性評価のほかに、理論設計法への適用やアスファルト舗装の供用性評価がある。

図-10 は、Brown により提案されている舗装設計のフローである³⁾。ここでは、アスファルト舗装の疲労ひび割れに着目した設計手順を示している。NAT によるスティフネスと疲労特性をパラメーターにすることで、材料特性を考慮した舗装の構造設計が可能となる。このフローは、わだち掘れ特性に着目しても活用することができる。そのため、このような設計フローと NAT による各種試験結果を組合せることにより、効果的な舗装断面の設計が期待できる。

図-11 は、FWD から算出したアスファルト舗装のスティフネスと NAT から算出したスティフネスの相関を表した結果である。結果より、FWD スティフネスは、NAT スティフネスと比較して、低い結果となっている。この原因として Hunter は、NAT がコア単体で試験するのに対して、FWD は損傷部を含む舗装体全体からアスコン層のスティフネスを算出するため、

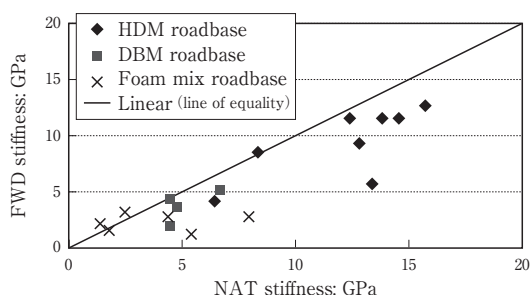


図-11 NAT-FWD スティフネス比較²⁾

FWD スティフネスが NAT スティフネスに比べて低くなることを指摘している²⁾。

そのため、英国道路庁の仕様では、NAT スティフネスに対して補正値を乗ずることにより、FWD スティフネスに置換えることを推奨している⁵⁾。

このように、舗装体の評価は FWD による方法が厳密といえるが、現場切り取りコアなどがある場合は NAT により算出した各種材料定数が、健全度評価のための判断指標となることが期待できる。

5. おわりに

本稿では、ヨーロッパで使用されている Nottingham Asphalt Tester の説明を中心に、アスファルト混合物の材料特性評価ならびに結果の活用方法について述べた。NAT は、簡単な試験から実務的な材料定数を求めることができる試験装置である。今後わが国でも、現場の諸問題の解決や理論設計法の運用に向けて、このような試験装置を活用した各種検討が望まれる。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会, 舗装の構造に関する技術基準・同解説, 2001.
- 2) Hunter, R.N. "Asphalts in Road Construction", Thomas Telford, London, 2000.
- 3) Brown, S.F. "An Introduction to Asphalt Pavement Design in the UK". Proceedings of the Institution of Civil Engineer, Transport, London, 2012.
- 4) Shell UK Oil Products Limited, "The Shell Bitumen Handbook, Fifth edition", Thomas Telford, London, 2003.
- 5) Peason, D. "Deterioration and Maintenance of Pavements", ICE Publishing, London, 2012.

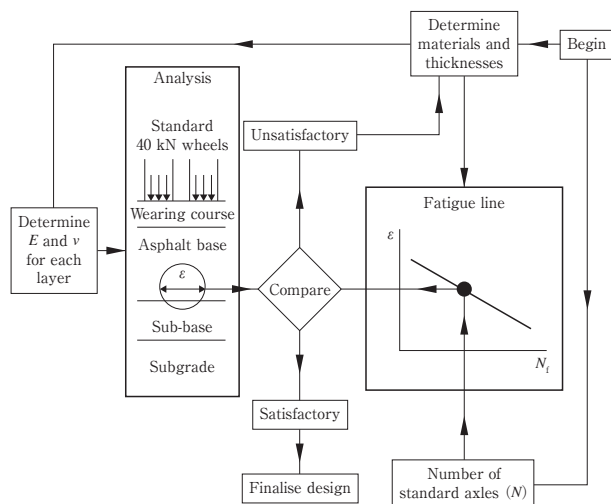


図-10 疲労ひび割れに着目した舗装構造設計チャート³⁾

X線CTおよびデジタル画像相関法を用いた アスファルト混合物内部の変形特性の把握

(Internal Physical Properties of Hot Mixed Asphalt Using X-ray CT and Digital Image Correlation)

谷 口 聡*・大 谷 順**・佐 藤 宇 紘***

本研究は、輪荷重直下のアスファルト混合物の変位特性およびひずみ特性を解明することを目的に、アスファルト混合物のホイールトラッキング試験、X線CT撮影およびデジタル画像相関法（DIC）による解析を実施し、アスファルト混合物の変位および引張ひずみといった変形特性を把握した。その結果、本試験によって耐流動性のみならず耐ひび割れ性についても確認し、ホイールトラッキング試験におけるアスファルト舗装の破損のメカニズムを解明することができた。

1. はじめに

アスファルト舗装はあらゆる荷重条件、温度条件等の影響により、様々な破損形態が存在する。特にわだち掘れとひび割れは、アスファルト舗装の破損の中では基本的な破損形態である¹⁾。アスファルト混合物の耐流動性を評価する手法として、ホイールトラッキング試験（以下、WT試験）が挙げられるが、同試験は一般的には舗装の表面の変位を評価するものである。

そこで、本研究では、供試体内部の評価を目的として、物体内部を可視化する技術の一つであるX線CTスキャナを用いて、WT試験前後のアスファルト混合物供試体を撮影するとともに、撮影画像をデジタル画像相関法（以下、DIC）によって解析することにより、アスファルト混合物の変位場、ひずみ場といった変形特性を把握するとともに、耐流動性、耐ひび割れ性の評価を行った。

スアスファルト混合物（以下、ポーラス）で、バインダをポリマー改質アスファルトH型（以下、PMA-H）としたもの（以下、W3）である。各供試体の諸元を表-1に示す。

表-1 供試体の諸元

項目		供試体番号		
		W1	W2	W3
配合率	粗骨材（%）	60.0	60.0	85.0
	細骨材（%）	34.5	34.5	10.0
	石粉（%）	5.5	5.5	5.0
アスファルト	種類	ストアス	PMA-II	PMA-H
	針入度（1/10mm）	69	62	63
	軟化点（℃）	46.5	67.0	101.0
	密度（g/cm ³ ）	1.034	1.028	1.026
	最適As量（%）	5.8	5.7	4.9
混合物	密度（g/cm ³ ）	2.395	2.375	1.982
	空隙率（%）	2.9	3.8	20.9

2. 試験概要

2.1 供試体の概要

本研究で使用した供試体は3種類であり、最大粒径13mmの密粒度アスファルト混合物（以下、密粒度）で、バインダをストレートアスファルト（以下、ストアス）としたもの（以下、W1）およびポリマー改質アスファルトII型（以下、PMA-II）としたもの（以下、W2）、並びにポーラ

アーティファクト²⁾（CT画像に現れる放射状の白線）による画像の白色化を抑制するため、両端75mmを切り落とし供試体の幅を150mm、長さ300mm、厚さ50mmとした。また、各供試体に密度の高い電気炉酸化スラグ（密度＝約3.7g/cm³）をマーキングとして挿入した。

2.2 WT試験

WT試験は『舗装調査・試験法便覧』³⁾に示される

*たにぐち さとし 土木研究所 道路技術研究グループ 主任研究員

**おおたに じゅん 熊本大学大学院 自然科学研究科 教授

***さとう たかひろ 熊本大学 工学部

方法で実施し、試験温度は60℃、接地圧は0.63MPaである。載荷回数は600回、2,400回、6,000回に設定し、それぞれの回数に到達した際にX線CT撮影を実施した。なお、W2、W3については2,400～6,000回におけるWT試験による変形量がW1に比べ小さく、後述の図-6、7等から供試体内で大きな変形がなかったものと判断し、6,000回でのX線CT撮影を実施しなかった。

2.3 CT撮影

本研究では、熊本大学所有の産業用X線CTスキャナ（TOSCANER-23200）によりCT撮影を実施した。X線管電圧を300kV、ビーム厚を1.0mm、撮影領域を直径150mm、画像再構成マトリクス数を2,048×2,048ピクセル、空間分解能を0.073×0.073×1.0mmとした。

図-1に撮影方法および座標系を示す。X線の照射は供試体の前部（y=250mm付近）、中央部（y=150mm付近）、後部（y=50mm付近）の位置においてターゲットである電気炉酸化スラグが写るように撮影を実施した。

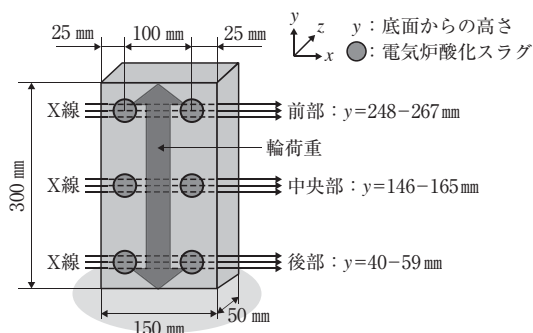


図-1 X線CT撮影方法

2.4 DIC

DICは、測定対象物のデジタル画像の輝度値を利用して、測定前後の変形量と方向を同時に求める手法である⁴⁾。具体的な解析手順は以下のとおりである⁵⁾。

- ①変形前後のデジタル画像の取得
- ②変形前の画像に節点群を定義
- ③各節点を中心に相関窓の大きさの定義
- ④相関窓が移動すると想定される範囲を検索窓として定義
- ⑤相関窓を動かしながら式(1)により相関係数を算定

$$CC(u, w) = \sum_{x, z} I_1(x, z) I_2(x+u, z+w) \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

ここに、

$CC(u, w)$ ：相関係数

$I_1(x, z)$ ：変形前の画像輝度値

$I_2(x+u, z+w)$ ：変形後の画像輝度値

u ：x方向の移動量

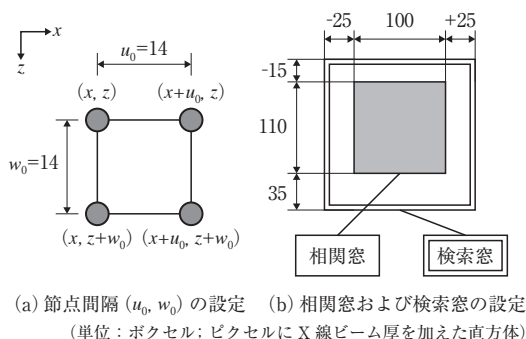
w ：z方向の移動量

⑥相関係数が最大となる位置を移動後の領域と同定し、移動量を算出

⑦4つの節点の移動量をもとにひずみを算出

実際の計算は熊本大学が保有するDICプログラム“TomoWarp”⁶⁾により行った。また、節点間隔、並びに相関窓および検索窓の大きさは図-2のとおり決定した³⁾。

なお、DICを行うに当たって、電気炉酸化スラグが映し出されている画像を抽出し、図-3に示すような画像処理を実施することにより、骨材抽出画像を作成した。



(a) 節点間隔 (u_0, w_0) の設定 (b) 相関窓および検索窓の設定
(単位：ピクセル；ピクセルにX線ビーム厚を加えた直方体)

図-2 節点間隔、相関窓、検索窓の設定

3. 試験結果

3.1 CT画像

2,400回載荷時の各供試体後部におけるCT画像を図-4に示す。なお、後部としたのは、X線CT撮影時に供試体を立てた際のぶれの影響が小さかったためである。CT画像により、W2、W3がW1よりもわだち掘れ深さが小さくなる等、表面のわだち掘れの形状が確認できるとともに、内部の骨材、空隙の状況を確認することができた。また、通常の骨材よりも白く映し出されている電気炉酸化スラグの存在を確認することができた。

3.2 変位ベクトル

W1（密粒度ストアス）後部の変位ベクトル図を図-5に、W2（密粒度PMA-II）後部の変位ベクトル図を図-6に、W3（ポーラス）後部の変位ベクトル図を図-7に示す。

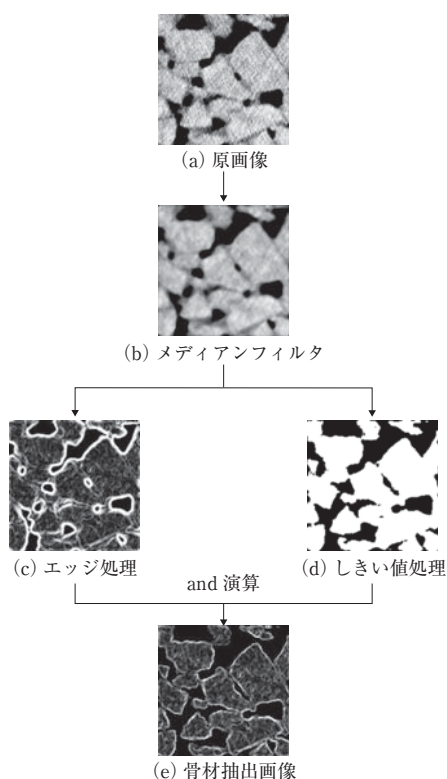


図-3 DICのための画像処理

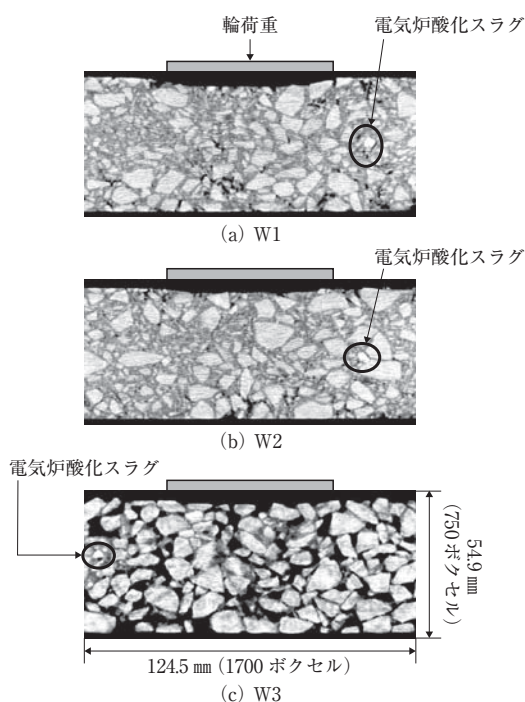


図-4 2,400回載荷時におけるCT画像

(1) W1 (密粒度ストアス)

0～600回においては、載荷位置の直下において、鉛直下方向への移動が卓越していることが確認でき、2 mm以上の変位が確認できた。また、水平方向は側方部において外側への移動が卓越しており、その大きさは1 mm程度である。全体的には載荷部直下から放射状に骨材が移動していることが確認できた。

600～2,400回においては、0～600回で見られた載荷位置の直下の鉛直方向への移動が見られなくなる一方、外側へ隆起する移動が見られた。また、変位量も0～600回に比べ小さかった。

2,400～6,000回においては、載荷部直下では40～50°の角度で外側下方向に向かうベクトルが、縁部では外側方向に向かうベクトルが卓越しているのが確認できた。

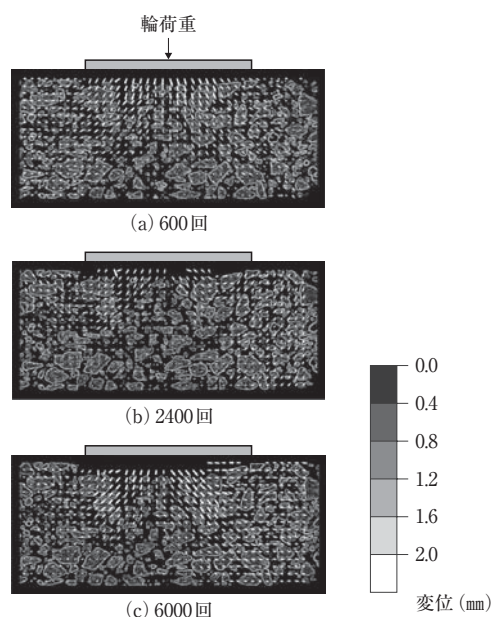


図-5 W1における変位ベクトル図

(2) W2 (密粒度PMA-II)

0～600回においては、載荷位置の直下の表面付近において、斜め下方向への移動が卓越していること、一部において斜め左下方向および斜め右下方向と水平方向において相反するベクトルの存在が確認できた。これは後述するように、表面付近で引張ひずみが大きくなった原因であると考えられる。

2,400～6,000回においては、図-6 (b)を見る限り一部を除き大きな変位は確認できなかった。

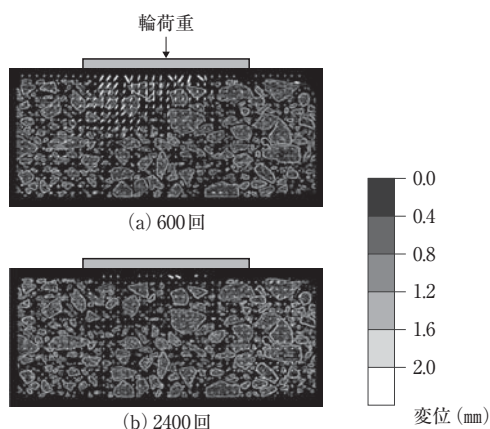


図-6 W2における変位ベクトル図

(3) W3 (ポーラス)

0～600回においては、載荷位置の直下において、鉛直下方向への移動が卓越していることが確認でき、1.2mm以上の変位が確認できた。また、側方においては水平方向へ移動するベクトルが確認できた。

2,400～6,000回においては、図-7 (b)を見る限り、W2と同様、一部を除き大きな変位は確認できなかった。

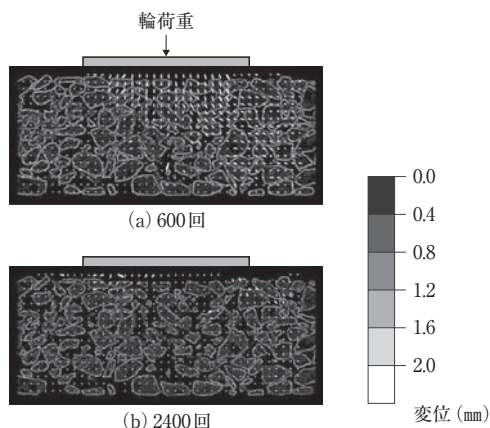


図-7 W3における変位ベクトル図

3.3 水平方向の引張ひずみ

アスファルト舗装の水平方向の引張ひずみは、縦ひび割れの原因となる。そこでW1～W3の各供試体について引張ひずみを算出した。W1 (密粒度ストアス) 後部の引張ひずみ図を図-8に、W2 (PMA-II) 後部の引張ひずみ図を図-9に、W3 (ポーラス) 後部の引張ひずみ図を図-10に示す。なお、本図においては黒

の濃度が濃いほど引張ひずみが大きく、薄いほど引張ひずみが小さくなる。また、白の部分は圧縮ひずみの発生を示す。

(1) W1 (密粒度ストアス)

載荷回数が増加するに従い、引張ひずみが大きくなる傾向が見られた。また、0～600回においては供試体の浅い部分で大きな引張りひずみが発生しているが、2,400回、6,000回と載荷回数が増えるに従い、引張りひずみの大きな部分が深いところまで達していることが確認できた。

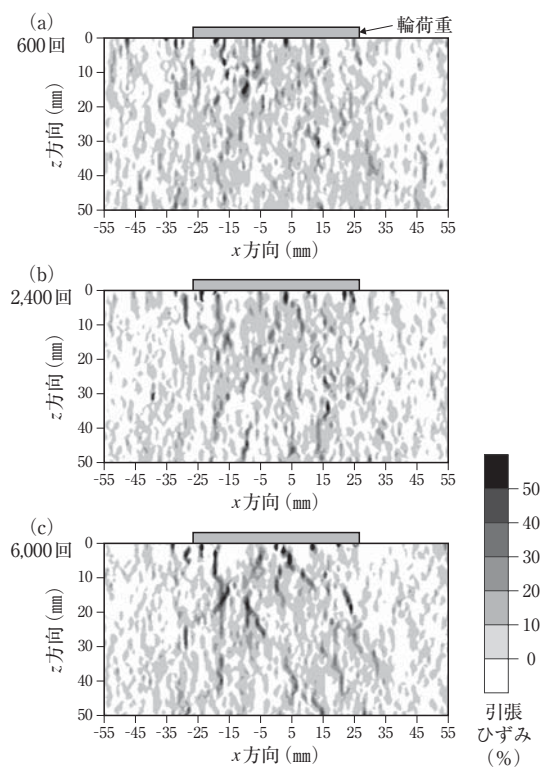


図-8 W1における引張ひずみ図

(2) W2 (密粒度PMA-II)

0～600回において、輪荷重直下でW1よりも大きな引張ひずみが確認できた。これは、W2はW1よりも「縦ひび割れ」が発生しやすいことを示している。松野¹⁾は、「わだち割れ」と呼ばれる「縦ひび割れ」の原因の一つとして「交通解放後に入るものが多い」ことを挙げているが、これを裏付ける結果となった。

600～2,400回においても、表面付近および下方で大きな引張ひずみが見られるものの、全体的な引張ひずみは0～600回に比べ小さくなった。

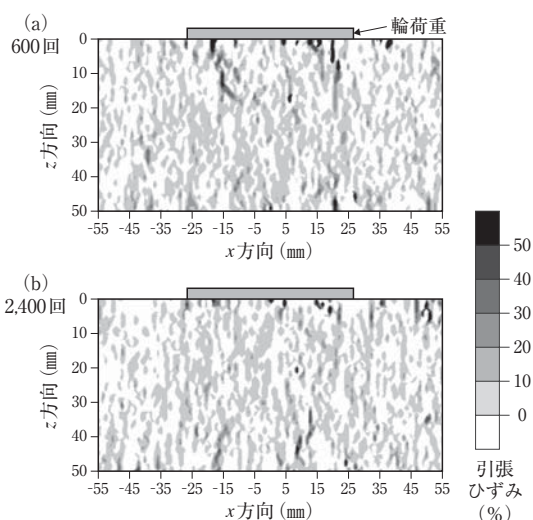


図-9 W2における引張ひずみ図

(3) W3 (ポーラス)

0～600回において密粒度とは異なり、荷重直下の深い部分で大きい引張ひずみが発生していることが確認された。Taniguchiら⁷⁾は、北海道の高速道路のポーラスアスファルト混合物を用いてX線CT撮影を行った結果、「縦ひび割れは舗装の表面からだけではなく、舗装の内部または下部から発生する」と結論づけているが、今回の試験からもこの結論が裏付けられた。

600～2,400回においては、表面付近で大きな引張ひずみが発生している箇所があるものの、全体的な引張ひずみは0～600回に比べ小さくなった。

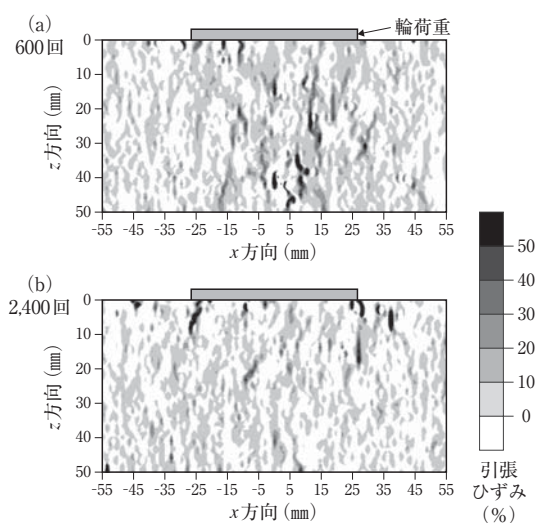


図-10 W3における引張ひずみ図

4. おわりに

本研究は輪荷重下のアスファルト混合物の変位特性およびひずみ特性を把握することを目的に、ホイールトラッキング試験、X線CT撮影、DIC解析を実施し、アスファルト混合物の変位特性およびひずみ特性を解明し、耐流動性および耐ひび割れ性といった耐久性の評価を行った。その結果、耐流動性のみならず耐ひび割れ性についても確認することができ、ホイールトラッキング試験における破損のメカニズムを解明できたものと考えられる。

なお、舗装の破損は様々な形態があることから、それぞれの破損についてX線CTの活用が期待される。また、本試験の結果は、アスファルト混合物のホイールトラッキング試験が、耐流動性のみならず、耐縦ひび割れ性についても表面にひずみゲージを貼る等により評価できることを示唆するものである。今後、縦ひび割れに対する疲労破壊規準を設定するとともに、耐流動性および耐縦ひび割れ性の両方に優れたアスファルト混合物開発が望まれる。

参考文献

- 1) 松野三朗：アスファルト舗装の破損とパフォーマンス写真集，理工図書，2011
- 2) 椋木俊文：地盤工学におけるX線CT法の適用に関する研究，熊本大学大学院博士論文，2001
- 3) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧（第3分冊），2007
- 4) 内野正和，佐川康貴，尾上幸造：デジタル画像相関法を用いたコンクリート供試体のひずみ計測，日本機械学会年次大会講演論文集（1），2006
- 5) 高野大樹，大谷順：X線CTによる地盤材料の構造の可視化，材料，材料科学学会，第62巻第10号，2013.10，pp.654～659
- 6) Hall S.A., Lenoir N., Viggiani G., Desures J. and Besulle P.: Strain Localization in Sand under Triaxial Loading: Characterization by X-ray Micro Tomography and 3D Digital Image Correlation, Proceedings of International Symposium on Computational Geomechanics (COM Geo09), 2009
- 7) Taniguchi S., Nishizaki I. and Moriyoshi A.: A study of Longitudinal Cracking in Asphalt Pavement using CT scanner, Road Materials and Pavement Design, vol. 9, issue 3, pp.549-558, 2008

アスファルト舗装材料の可視化に関する最近の試験方法

(The Report on the New Test Method for Visualization of Asphalt)

平 川 一 成 *・上 地 俊 孝 **・辻 本 陽 子 ***
渡 邊 真 一 ****・櫻 井 博 章 *****・小 林 真 依 *****

アスファルト舗装技術研究グループは、所属機関の理解と支援を受けて志の高い若手技術者が集い、アスファルト舗装に関する勉強会を重ねてきております。

研究グループでは、海外文献の輪読が活動の大きな柱になっており、今年度もISAP 2014で発表された数多くの論文を題材に読み込みました。その中で、アスファルト舗装材料への機器分析の適用性に関する論文を抽出し、研究報告として取りまとめている。

ここでは、特に日本での評価技術の進歩に寄与できると期待される5つの研究論文について取り上げる。

アスファルト舗装材料の測定技術における計測機器の進歩は目覚ましく、より学術的な探求のため、もしくは、ユーザーへの説明責任を果たすために、より高精度で信頼性の高い分析の必要性は今後も高まっていくものと想定される。

このような気運の中、本研究グループでは、アスファルト舗装材料の“可視化”に着目し、近年の国際会議（特にISAP2014を中心に）で発表された論文の中から、日本での評価技術の進歩に寄与できると期待されるものを抽出した。

本誌においては、この中から特にメンバーの興味を引いた5編について紹介する。

いずれも時代のニーズに見合った新しい測定方法であり、今後の取り組みが期待されるところである。

1. 選定した研究論文

本稿では、日本での評価技術に寄与できると期待される研究論文として、従来の測定機器を改良・進歩させることで新たな知見を得られた研究や、他分野の測定機器（たとえばX線技術やナノCTスキャン）を適用することでアスファルト舗装材料の内部構造の可視化を試みた研究、また、アスファルトの微細構造を可視化することで劣化状態の評価を考察した研究を取り上げる。

表－1 アスファルト舗装材料の可視化に関する研究論文

原題（和題）	筆者出典	所属機関の国籍
Field application of portable infrared spectroscopy to asphalt products (アスファルトの測定を目的とした携帯型赤外分光計の現場適用)	Iliya Yut ICTI2014	USA
Evolution of bubble size distribution during foam bitumen formation and decay (フォームアスファルトの生成時と崩壊時の気泡サイズ分布)	Biruk W.Hailesilassie ISAP2014	Sweden
Performance characterization of asphalt mixture using meso mechanics approach (メソ力学的手法を用いたアスファルト混合物の供用特性)	M.Woldekidan ISAP2014	Netherland
Microstructural, chemical and thermal analyses of Warm Mix Asphalt (中温化アスファルト混合物の微細構造と熱化学的分析)	IMenapace ISAP2014	USA
Micro-scale investigation of oxygen diffusion on bitumen surfaces (アスファルト表面の酸素拡散に関するマイクロスケールでの調査)	Prabir Kumar Das ISAP2014	Sweden

*ひらかわ かずなり 大成ロテック株式会社 事業統括本部 技術研究所 課長代理

**うえち としたか 大林道路株式会社 技術研究所 材料研究室

***つじもと 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 研究員

****わたなべ しんいち 株式会社NIPPO 総合技術部 技術研究所 研究第一グループ 副主任研究員

*****さくらい ひろあき 日進化成株式会社 技術研究所 技術グループ

*****こばやし まい 東亜道路工業株式会社 技術本部 技術研究所 研究員

1.1 アスファルトの測定を目的とした携帯型赤外分光計の現場適用

移動式の赤外分光計を用いて供用中のアスファルト舗装の劣化を評価する方法に関する研究論文である。

この論文では、透過法、全反射法、拡散反射法といった異なる3タイプの分光計による現場計測を行っている。

その結果、拡散反射法による分光計を用いることで屋外でも供用中の舗装に含まれるアスファルト分の劣化レベルが可視化できる可能性を見出している。

1.2 フォームドアスファルトの製造時と崩壊時の気泡サイズ分布

この論文ではX線技術を用いて、フォームドアスファルトの気泡分の発泡状態の観察を通じて、気泡の生成、崩壊プロセスの可視化に成功している。

またフォームド生成・崩壊プロセスに与える水分量や針入度の影響について検討されている。

1.3 メソ力学的手法を用いたアスファルト混合物の供用特性

メソスケールとはミクロとマクロをつなぐ中間領域である。この論文ではアスファルト混合物の初期わだ

ちがバインダの粘性とメソスケールの形状の変化であるという仮説を立てている。これに対し、力学試験中の供試体の内部変形挙動をナノCTスキャンにより観察、解析を行い、メソ力学的手法の有用性について報告されている。

1.4 中温化アスファルト混合物の微細構造と熱化学的分析

この論文で中温化アスファルトの微細な構造や組成が混合物性状に与える影響を検討するべく、異なる中温化材を添加したアスファルトについて、核磁気共鳴計測、熱重量分析、示差走査熱量測定、原子間力顕微鏡などを用いて微細構造を観察している。その結果原子間力顕微鏡の有用性を確認している。

1.5 アスファルト表面の酸素拡散に関するマイクロスケールでの調査

この論文では、前項と同様な、原子間力顕微鏡および示差走査熱量測定を用いて、長期酸化劣化によるアスファルト表面の微細構造の変化を可視化している。

原子間力顕微鏡の有用性がこの研究においても確認されている。

2. アスファルトの測定を目的とした携帯型赤外分光計の現場適用

原題：FIELD APPLICATION OF PORTABLE INFRARED SPECTROSCOPY TO ASPHALT PRODUCTS

著者：Iliya Yut (アメリカ) 所属：コネチカット大学

2.1 研究概要

SHRPでは、Renewal Project R 06 (B) として、携帯型赤外分光計 (FT-IR) によるアスファルト系材料の同定を評価している。この論文では、これらの最新の研究として、出所が既知のアスファルト製品に対するFT-IR技術の利用方法と、携帯型FT-IRにより供用中のアスファルト混合物の劣化を評価する方法について取りまとめている。

2.2 研究内容

(1) FT-IRの種類

FT-IRは、物質に赤外線を発信し、その吸収または反射エネルギーを測定するものである。FT-IRには測定方法の違いにより透過法、全反射法 (ATR法)、拡散反射法 (DR法) といった3つのタイプがある。DR法は、粉末状の粗い固体の測定に最適であり、試料の深さ方向も測定できる点でATR法と異なる。DR法、ATR法の測定概念を図-1に示す。

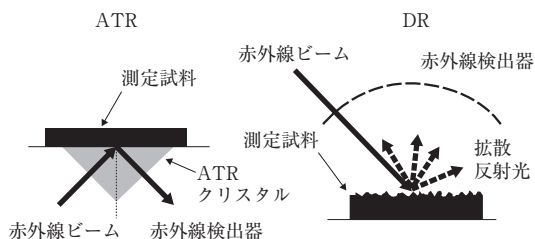


図-1 DR法とATR法の概念図

(2) 現場における試料調整方法の検討

ATR法タイプのFT-IR (以下、ATR分光計) で既設のアスファルト舗装を測定する際、なるべく誤差が少なくなる試料調整方法について検討を行った。

(3) ATR分光計による添加材濃度の定量化

調整した試料をATR分光計で測定し、混合物やバインダ中の添加材 (ポリマーや剥離防止剤など) の検出およびその定量化を試みた。

(4) ATR分光計を用いた酸化レベルの評価

アスファルトコンクリート発生材（以下、RAP）の混入率が既知の再生加熱アスファルト混合物およびそのバインダをATR分光計で測定し、酸化レベルを評価することでRAP混入率の推定を試みた。

(5) アスファルトの促進劣化試験機の開発

上記の検討結果に基づき、ATR分光計と温度制御機能付きの熱風劣化装置を組み合わせた促進劣化試験機（ATRAC）を試作した。ATRACの外観を写真-1に示す。ATRACにおいて、試料は45分間135℃の熱風で処理し、その間、5分毎にスペクトルが測定される。



写真-1 ATRACの外観

そして自動で測定時間毎のカルボニル基に由来したスペクトル面積（CA）が計算され、更に劣化指標値として $(CA - CA_0) / \text{劣化時間}$ が計算される。このATRACを用いて硬さの異なる3種類のアスファルトを測定し、劣化指標値を比較評価した。

(6) 現場における劣化レベルの評価

DRタイプのFT-IR（以下、DR分光計）とATR分光計の測定スペクトルには相関が確認されている。そこで、DR分光計を用いて現道のアスファルト舗装表面の劣化レベルについて評価を試みた。類似した気候条件下の複数の舗装を一定供用期間毎にDR分析計で測定し、バインダ種の違いによる劣化レベルを判定した。試料は、φ25mmのハンマードリルにて舗装表面から25mmの深さまでを採取し、最大粒径150μmの粉末状に調整した。

2.3 研究結果

(1) 現場における試料調整方法の検討

ATR分光計では試料が0.5gと微量であるため、粒子サイズ、材料組成の影響により加熱アスファルト混合物（以下、HMA）の測定結果にバラツキが生じたが、試料を粉碎処理することで改善した。またバインダの測定では混合物をジクロロメタン（DCM）で抽出・濾過した溶液を測定台上で揮発・除去する方法が有効であった。

(2) ATR分光計による添加材濃度の定量化

ポリマー改質アスファルト乳剤およびポリマー改質アスファルトにおいて、SBSに由来するピーク（ 965 cm^{-1} および 695 cm^{-1} ）を検出した。また、SBS濃度の定量化では、SBS濃度の違いで変化しなかったCH由来の 2920 cm^{-1} 付近の吸収強度とポリブタジエン由来の 966 cm^{-1} 付近の吸収強度の比とSBS濃度で検量線を作成することが有効であった。また異なる産地のベースアスファルトを使用しても検量線の傾きに有意な差はみられなかった。

(3) ATR分光計を用いた酸化レベルの評価

ベースアスファルトにRAPバインダを15～40%混入した混合バインダと、HMAにRAPを最大で80wt.%混入した混合物のスペクトルについて解析した。まず、測定スペクトル中の酸化物に由来する吸収帯（O-H, C=O, Si=O）を同定した。そしてRAP量を定量化するため、混合バインダであればO-H, C=O, Si=Oを、混合物であれば図-2に示すO-H, C=O, Si=Oに由来する各バンドの積分値を全バンド面積の合計で標準化したものを酸化指標 I_{OH}, I_{CO}, I_{SiO} とし、これらの酸化指標とRAP混入率を重相関分析した。その結果、混合バインダについては I_{OH}, I_{CO}, I_{SiO} の合計値がRAP混入率の推定に有効であった（ $R^2 = 0.97$, 標準誤差7%）。一方、混合物についてはRAP混入率の推定因子として I_{CO} および I_{SiO} が最も有効であったが、バインダに比べるとその決定係数 R^2 は有意に小さくなった（ $R^2 = 0.86$, 標準誤差11%）。

(4) アスファルトの促進劣化装置の開発

ATRACによる測定結果を図-3に示す。（ $CA_0 - CA$ ）の傾きは、軟らかいアスファルトAACが硬いアスファルトAAAよりも早期に酸化することを明白に示している。ATRACはSuperpaveの加圧劣化試験（PAV）に比べて短い時間で同じレベルの酸化程度を再現でき、バインダ中のポリマー量に対してより高い感度を示した。

(5) 現場における劣化レベルの評価

測定結果を図-4に示す。近似線形は、未改質のアスファルト（PG64-22）を使用した舗装のカルボニル含有量（酸化程度）が時間の経過とともに増加する傾向を示している。その一方でポリマー改質アスファルト（PG76-34-CMCR）を使用した舗装のカルボニル基の面積（CA）は、ほとんど変化しなかった。

2.4 結論

研究の結果、DR分光計を用いることでアスファル

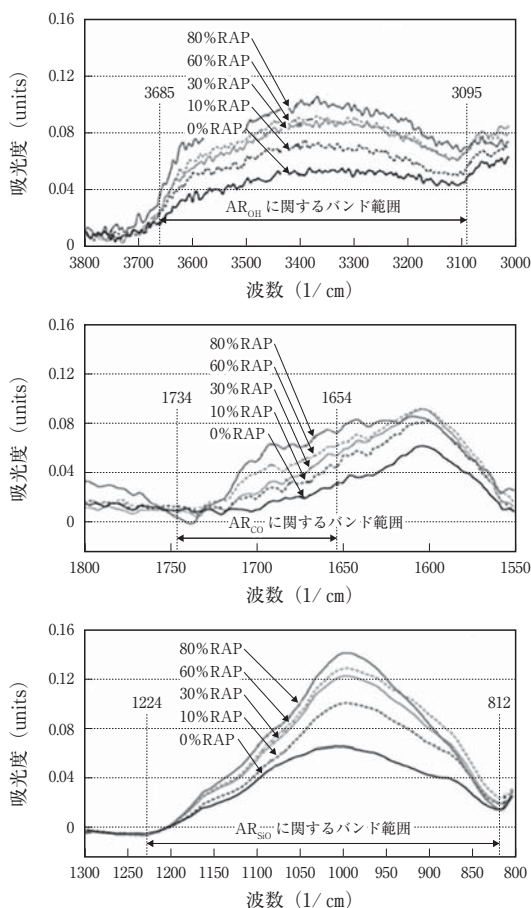


図-2 OHに由来するバンド範囲(上)
C=Oに由来するバンド範囲(中)
Si=Oに由来するバンド範囲(下)

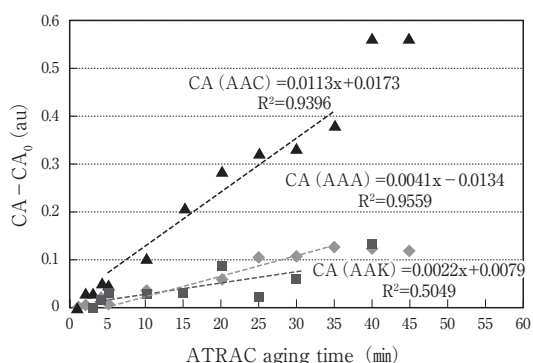


図-3 劣化時間と酸化程度の関係(ATRAC)

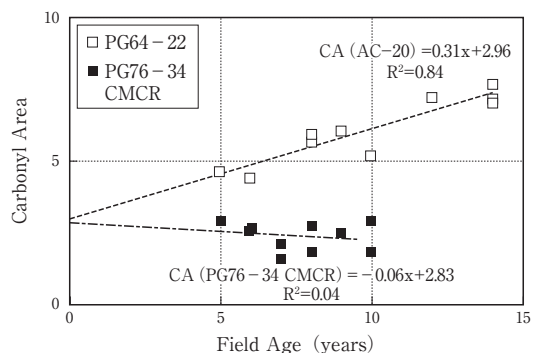


図-4 DR分光計による供用期間と酸化度との関係

2.5 翻訳者のコメント

国内でもFT-IRによるアスファルト舗装の酸化程度を評価した報文は散見されるが、それと現道での劣化レベルを結びつけた報告は少ない。また国内の研究では透過法タイプのFT-IRが一般的であるが、現地での測定・評価を鑑み、DR法タイプやATR法タイプのFT-IRを使用している点でも非常に興味深い。

3. フォームドアスファルトの生成時と崩壊時の気泡サイズ分布

原題: *EVOLUTION OF BUBBLE SIZE DISTRIBUTION DURING FOAM BITUMEN FORMATION AND DECAY*

著者: Biruk W.Hailesilassie (スウェーデン) 所属: スウェーデン王立工科大学

3.1 研究概要

本研究では、フォームドアスファルトの特性を把握するために、製造時および崩壊時の気泡の様子をX線にて観察した。その結果、気泡のサイズ分布や気泡の質に対しては、針入度や水分量の影響が大きいことが明らかとなった。

3.2 研究内容

(1) 材料

本研究では針入度の異なるアスファルトを使用した。それぞれのアスファルトの基本性状等は表-2に示す。また、水分量を1%と4%の2条件にて試験を行った。

表-2 バインダの基本性状

バインダ	発泡温度 (°C)	針入度 (/10mm)	軟化点 (°C)
A	160	80	45.3
B		51	51.1

(2) X線による観察方法

フォームドアスファルトの性能は半減期と膨張率によって評価されてきた。これらのパラメータは容量的な特徴しか捉えておらず、気泡の形態やサイズ分布等、気泡の特性との関係について不明な点が残されている。そこで本研究では、フォームドアスファルト内の気泡の形態的な特徴をX線により観察した。

X線装置の外観を図-5aに示す。X線の解像度は205 μ mである。装置のX線源と検出器の間に測定容器を設置した(図-5b)。また、測定容器中のX線視野範囲(195mm $\times$ 176mm)に対して、底面部(57.4mm $\times$ 164mm)にて気泡のサイズ分布を測定した。

3.3 研究結果

(1) 膨張率に対する水分の影響

発泡したフォームドアスファルトの高さの経時変化を図-6に示す。水分量4%の場合、軟らかいバインダAの方が硬いバインダBよりも最大膨張高さが高い。気泡内部の蒸気圧は気泡間の壁である薄いバインダ膜の張力と平衡している。この力はバインダの表面張力や粘度と直接相関がある。つまり、バインダAの方が表面張力や粘度が小さい(=膜の力が弱い)ために膨張しやすかったと考えられる。

(2) X線による発泡状態の観察

バインダBの気泡の状態を図-7に示す。生成初期の段階から気泡は多分散性であり、長時間にわたりきめの粗い状態が続く。気泡が粗いのは、気泡間の膜が破裂するためである。多分散性であるがゆえに、気泡の内側と外側で圧力が異なっており、小さいものが選択的になくなり大きいものがさらに大きくなる現象(オストワルド熟成)により小さい気泡の崩壊も起こる。表面エネルギーが小さくなるように、個々の気泡は小さくなる方向に力が働く。そのため、

粘度をあげるか、表面張力を小さくすることで、気泡を安定させて、すぐに破裂する気泡を減らすことが出来る。バインダBの気泡が早々に崩壊してしまうのは、表面張力が大きいためとも考えられる。

水分量が4%の場合でも気泡は多分散であった。次第に気泡は大きく、かつ、数が少なくなっていった。これは、気泡の過剰圧力によって気泡が合体するからである。水分が蒸発するには多くのエネルギーが必要であり、水分とアスファルトバインダの間で熱交換がなされている。そのため、水分量が増えるとバインダの温度が下がり、発泡初期であってもアスファルトバインダの粘度が高い状態にある。粘度の増加により気泡相とバインダ相の密度差による部分的に濃縮分離する現象(クリーミング効果)が生じにくくなっている。実際、図-7と図-8の発泡後期の様子を比較すると、水分量1%では気泡が図の中央に集中しているが、水分量4%では気泡が全体的に分散している。しかし、バインダの粘度が高い状態にあるにも関わらず、高水分量による過剰圧力は気泡の崩壊を誘発している。

(3) 気泡の経時変化

図-9に気泡面積と気泡数の相関を示す。累積気泡

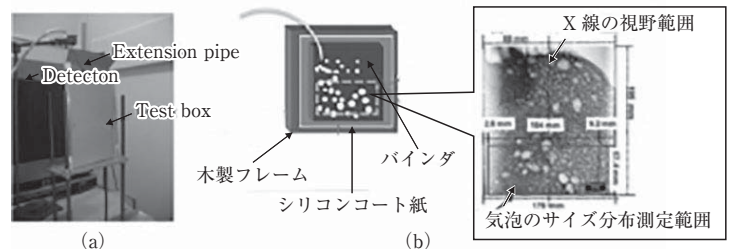


図-5 測定装置概要 (a) 外観 (b) テストボックスとX線視野範囲

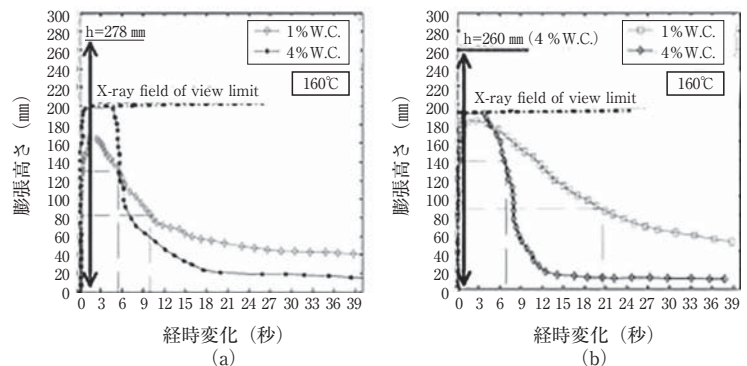


図-6 フォームドアスファルトの高さの経時変化 (a) バインダA (b) バインダB

サイズ分布から、水分量が少ないほど小さい気泡を生成する傾向にある。水分量1%のバインダAの場合、崩壊過程において、小さい気泡(0.2-10mm)の数は多

いに減少し、大きい気泡の数が増加した。一方、水分量4%の場合、気泡のサイズ分布は半減期後ではそれほど変化しない。例えば、6.9秒後の小さい気泡の数は9.6秒の時とあまり変わらない。

バインダBの場合、発泡初期における気泡のサイズ分布に対して水分量の影響はあまりない。それに関わらず、気泡の形態は異なっていた。X線画像の解析から、水分量1%のバインダAの崩壊メカニズムは主に合体や排水によって起こる。一方、バインダBは排水の影響が大きく、その結果、気泡が集中する表面と‘濡れた’底の部分とに分かれている。つまり、バインダBはクリーニング効果の影響が顕著であり、表面で気泡が崩壊することで気泡内部の気体が拡散してしまう。さらに、水分量4%では、どちらのバインダであっても、個々の気泡の合体が全体の気泡サイズ分布に影響する。

3.4 結論

本研究から次の結論が得られた。

- ①高水分量の場合、フォームドアスファルト内の気泡の崩壊メカニズムは、気泡の合体に起因する
- ②低水分量の場合、気泡の形態やサイズ分布はバインダの基本性状に依存する
- ③硬いアスファルトバインダの場合、初期の気泡面積や数は水分量にあまり影響されない。

3.5 翻訳者のコメント

直接観察によってフォームドアスファルト内の気泡の生成や崩壊プロセスを確認することに成功している。従来のパラメータによる評価よりも、実質的な気泡の生成に関わる評価が可能となっている。フォームドアスファルトの気泡生成、崩壊メカニズムの理論的な解釈や性質の理解に役立つ研究である。

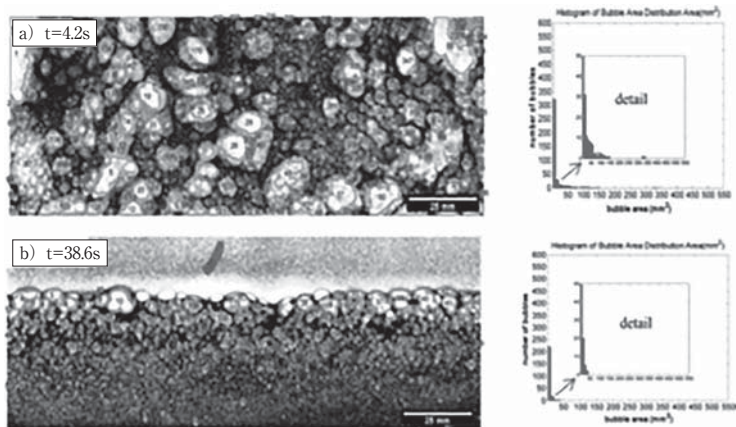


図-7 気泡のX線画像および気泡のサイズ分布 (バインダB, 水分量1%)

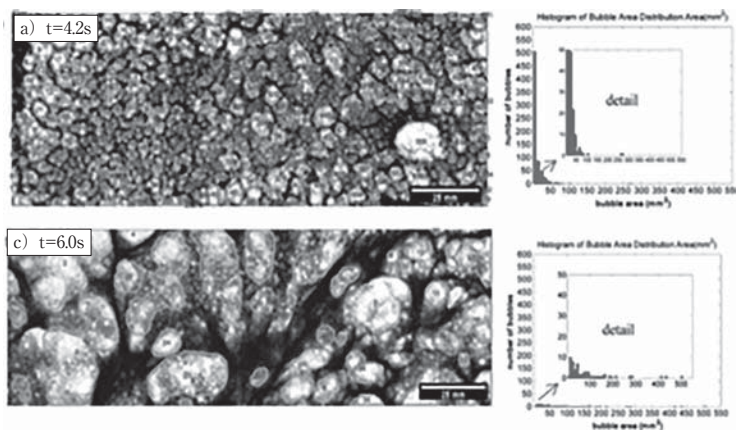


図-8 気泡のX線画像および気泡のサイズ分布 (バインダB, 水分量4%)

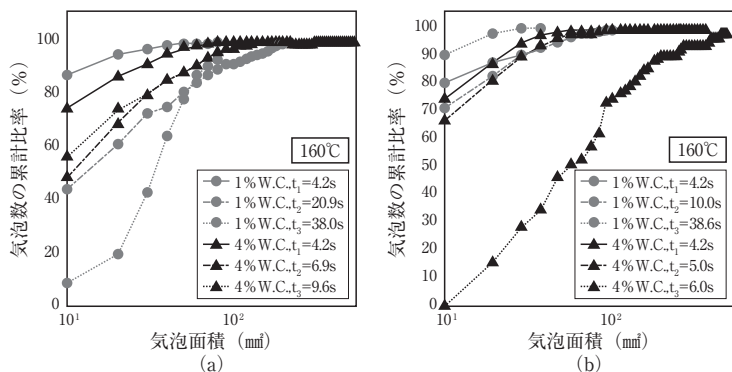


図-9 気泡の様子 ((a) バインダA, (b) バインダB%)

4. メソ力学的手法を用いたアスファルト混合物の供用特性

原題：PERFORMANCE CHARACTERIZATION OF ASPHALT MIXTURE USING MESO MECHANICS APPROACH

著者：M.Woldekidan ほか（オランダ） 所属：BAM Wegen

4.1 研究概要

力学的経験的設計方法によるアスファルト混合物の構造設計において、混合物の疲労特性が重要となる。しかし初期わだちや磨耗等、従来の設計法では扱えない損傷も存在する。そこで、より現実的な設計手法を開発するため、メソ力学的手法が着目されている。本手法は各構成材料の特性を基に複合材料の性能を表現することができるため、混合物の設計にも適している。

メソ力学を基にした設計法は、磨耗を考慮するために開発された。本手法は他の混合物の、初期わだち等の損傷を考慮した設計にも適用できると考えられる。これは初期わだちが、バインダの粘性とそれに伴うメソスケール ($10^{-3} \sim 10^{-6} \text{ m}$) の形状の変化であるという仮定に基づいている。

本研究では、メソスケールの形状と構成材料に基づいたアスファルト混合物の挙動に着目し、メソ力学的手法を用いて周波数応答を予測することを目的としている。

4.2 研究内容

実験は、アスファルト混合物を用いた繰り返し一軸試験と、アスファルトモルタルを用いたDSR試験を実施した。構成材料の物性は、メソ力学モデルの入力値として必要なものである。

(1) アスファルトモルタルを用いた実験

供試体は、砂（最大粒径0.5mm）、石粉、ストレートアスファルト（針入度70-100）から成る。モルタルを用いたDSR試験を実施するため、供試体の寸法は特別に高さ20mm、直径6mmとした（図-10）。

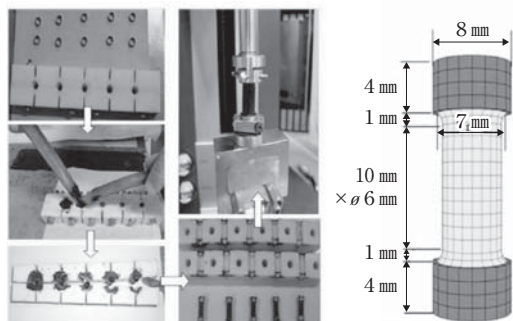


図-10 DSR試験用供試体作製状況(左)寸法(右)

その結果、測定された空隙は0.2～2.2%であった。これにより、供試体は空隙率が0.2%になる様に作製を行った。

DSR試験は試験温度を-10～30℃として実施した。試験結果は、温度時間換算則を用いて、マスターカーブを作成した。

作成した供試体は、ナノCTスキャンにより、空隙率の解析を行った（図-11）。

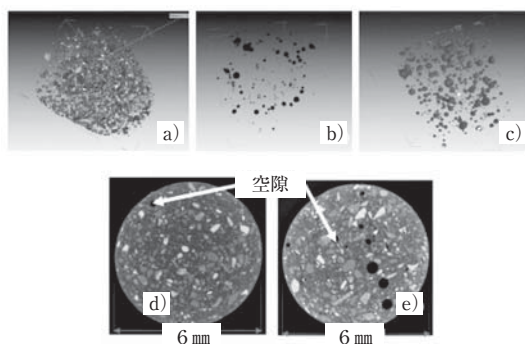


図-11 CTスキャン結果(供試体中央部)
a) 砂, b) 空隙(0.2%時), c) 空隙(2.2%時),
d)・e) 空隙および供試体の断面図

(2) アスファルト混合物を用いた実験

試験はアスファルト混合物についても実施した。なお、供試体に用いた混合物はSMA（碎石マスティックアスファルト）混合物とした。

供試体はジャイレトリコンパクターで作製し、40×40×100mmの角柱に切断した（図-12）。

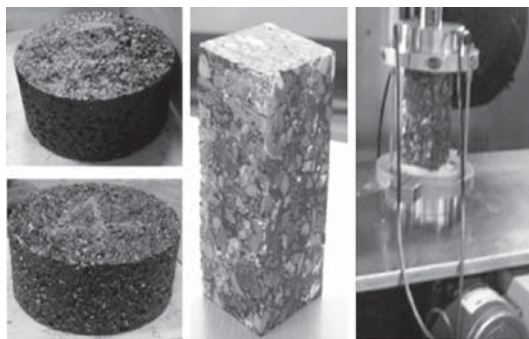


図-12 繰り返し一軸試験用供試体および設置状況

4.3 研究結果

(1) メソスケール形状

メソ力学シミュレーションにおいて、混合物のメソスケールの形状が重要となる。アスファルト混合物供試体の、4断面から得られたデジタル画像を基に、メソスケール形状を考慮したFE（有限要素）モデルの作成を行った（図-13）。

本モデルでは、骨材粒子、アスファルトモルタル連続相、空隙が再現されている。また、FEモデルは、平面ひずみと平面応力を仮定している。

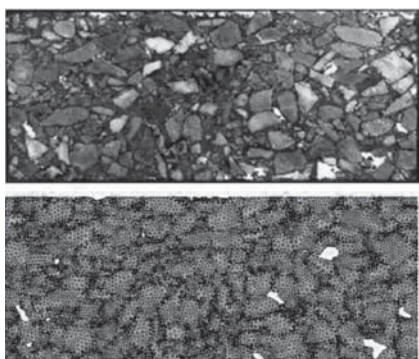


図-13 デジタル画像（上）とFEモデル（下）

(2) 構成材料の挙動

モルタルと比較した場合、骨材の変形量は無視することができる。従って骨材は剛体とみなすことにした。一方、モルタルは粘弾性体としている。

(3) FEシミュレーション

FEモデルを用いて、異なる周波数と温度における繰り返し軸試験のシミュレーションを行った。使用したモデルを図-14に示す。

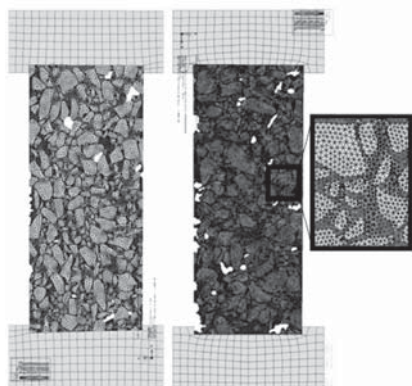


図-14 2D FEシミュレーション用モデル

平面ひずみ条件（PE）および平面応力条件（PS）でのFEシミュレーション結果と、室内での繰り返し軸試験（Lab）より得られたマスターカーブの比較を図-15に示す。

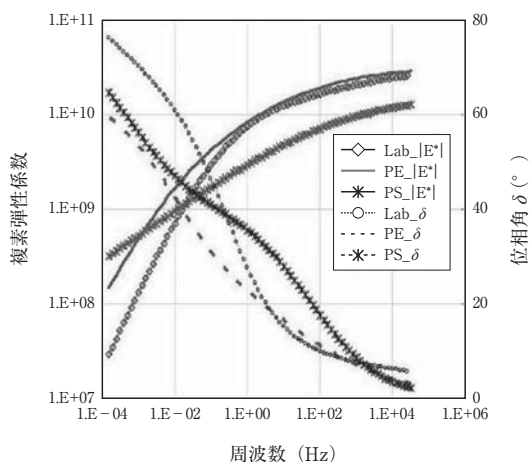


図-15 マスターカーブ：実験値とFEデータ

4.4 結論

- メソ力学的手法によるアスファルト混合物の設計手法を提案するため、FEモデルを用いたアスファルト混合物の挙動の予測を行った。
- メソスケールでは、骨材、アスファルトモルタル、空隙を異なるものとみなし、それぞれを個別にモデル化した。
- FEシミュレーションによりアスファルト混合物のマスターカーブを予測し、室内試験結果と比較を行った。
- 平面ひずみ条件によるシミュレーション結果と室内測定結果にて良好な相関が得られた。
- これらの結果は、メソ力学的手法が複合材料の挙動を予測できる可能性を示している。

4.5 翻訳者コメント

現行の理論的設計法では、アスファルト混合物は単一の弾性体としているが、本論文ではさらに骨材、モルタル、空隙と細かくモデル化し、形状も考慮している。これにより様々な損傷や挙動の予測ができる所が興味深い。実用化には各モデルやパラメータの検証が必要になると考えられる。

5. 中温化アスファルト混合物の微細構造と熱化学的分析

原題：MICROSTRUCTURAL, CHEMICAL AND THERMAL ANALYSES OF WARM MIX ASPHALT

著者：I.Menapace ほか（アメリカ） 所属：テキサス農工大学

5.1 研究概要

中温化アスファルトは性能が良く、過去20年間舗装工事に用いられている。中温化アスファルトの巨視的な性状に関する検討は多く報告されている一方、中温化剤使用時の微細な構造、組成が与える影響についてはほとんど検討されていない。

本論文では Advera[®] および Sasobit[®] 社製の中温化剤がアスファルトの構造に与える影響を評価した。

5.2 研究内容

(1) 使用材料

本研究の使用材料は、通常（未改質）バインダである PG 64-22 (Pen 60/70) とポリマー改質バインダである PG 76-22, それに Advera と Sasobit を添加したバインダの6種類とした。

(2) 調査方法

本論文では、中温化剤とアスファルト間での化学反応の有無を核磁気共鳴 (NMR) により調査した。熱化学特性を調べるために、熱重量分析 (TGA)、示差走査熱量測定 (DSC) を行った。また、中温化剤がアスファルトの構造に与える影響を評価するために、原子間力顕微鏡 (AFM) によるバインダの相構成の調査を行った。

5.3 研究結果

(1) 核磁気共鳴 (NMR：図-16)

Advera および Sasobit それぞれの中温化剤を使用した場合において、水素 (¹H)、炭素 (¹³C) および ¹³C DEPT による NMR を行った。NMR スペクトルに変化が起きていないことから、中温化剤とオリジナルバインダ間では、化学的反応が起きていないことが確認された。図-16は、¹³C DEPT における結果である。

(2) 熱重量分析 (TGA：図-17)

TGA を実施する雰囲気（窒素・空気）により重量変化の割合や変化する温度に違いはあるが、作業温度範囲における中温化剤による熱的特性への影響は示されなかった。

(3) 示差走査熱量測定 (DSC：図-18)

Sasobit 使用時には、溶解による吸熱ピークが高い値を示した。また Advera 使用時には水の蒸発による小さな吸熱ピークが確認できた。

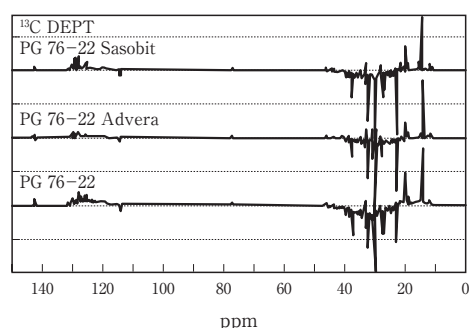


図-16 ¹³C DEPT の結果

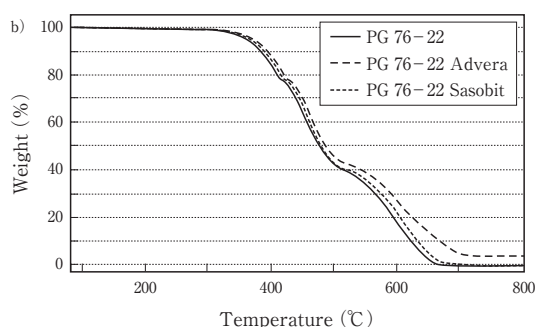


図-17 窒素下における TGA の結果

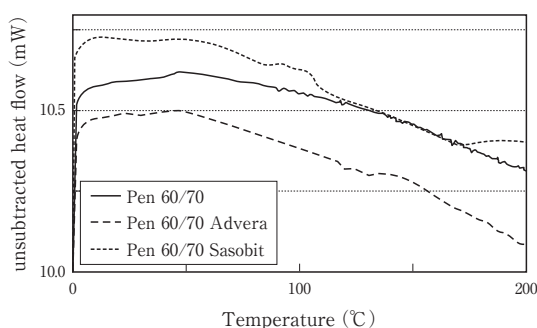
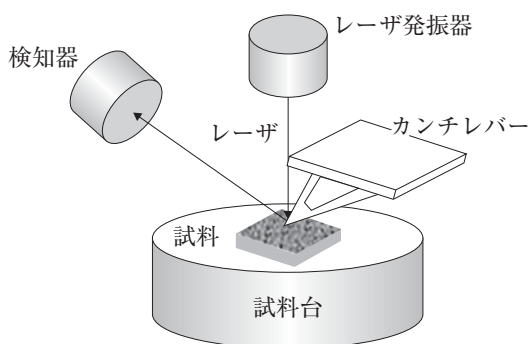


図-18 DSC の結果

(4) 原子間力顕微鏡 (AFM：図-19)

AFMは、試料表面の物性の違いを画像化することができ、表面形状像、位相像を観察する。図-19に AFM の原理を示す。

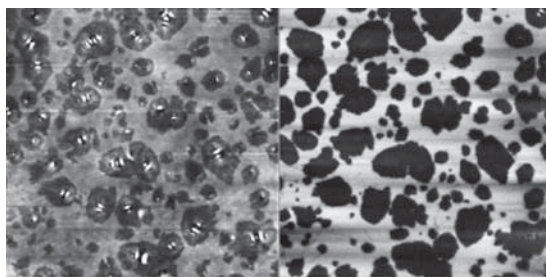
カンチレバー先端の探針と試料との間に働く微小な力（原子間力）によってカンチレバーの反りや振動が



図－19 AFMの原理
(東芝ナノアナリシス株式会社HPより)

変化し、その変化をレーザー光の反射により感度良く検出する。同時に、スキャナにより精密走査し、画像が得られる。

中温化剤を使用していないバインダのAFM画像を図－20に示す。



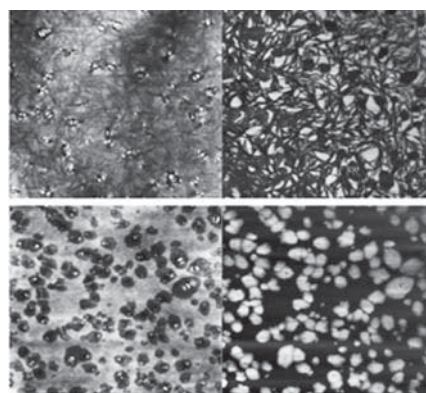
図－20 中温化剤未使用時のAFM画像

バインダには3つの相が存在することがAFMにより観測された。3つの相は、それぞれカタナ相、ペリ相およびパラ相に分類される。

- ①カタナ相；カタナ相の箇所
- ②ペリ相；黒い霧のような箇所
- ③パラ相；明るい霧のような箇所

中温化剤として、Adveraを使用した際のAFM画像を図－21に示す。

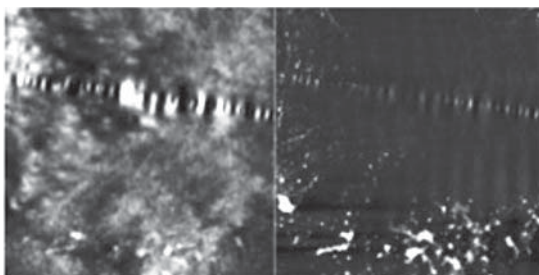
オリジナルバインダとの違いは、より小さいカタナ相、パラ相における大量の線状の模様があげられる。Adveraに含まれる水分の蒸発による相の変化が見られた。



図－21 Advera使用時のAFM画像
(上)加熱前 (下)160℃加熱後

中温化剤として、Sasobitを使用した際のAFM画像を図－22に示す。

オリジナルバインダとの違いは、より広くなったペリ相と巨大化し長くなったカタナ相があげられる。



図－22 Sasobit使用時のAFM画像

5.4 結論

NMR, TGA, DSCの調査では、中温化剤がアスファルトの微細構造に与える影響は、特には見受けられなかった。

AFMによる調査から、Advera使用時では、オリジナルバインダに比べカタナ相は小さくなり、また加熱による水分蒸発による相の変化が観測された。Sasobit使用時では、ワックス（または飽和分）がカタナ相の形成を促進させることが観測された。

5.5 翻訳者のコメント

中温化剤によるバインダの微細構造の違いをAFMにより評価することができ、AFMの有用性が示された論文であった。

6. アスファルト表面の酸素拡散に関するマイクロスケールでの調査

原題：MICRO-SCALE INVESTIGATION OF OXYGEN DIFFUSION ON BITUMEN SURFACES

著者：Prabir Kumar Das ほか（スウェーデン） 所属：スウェーデン王立工科大学

6.1 研究概要

本研究は、長期酸化劣化によるアスファルト性状の実際の変化を理解するために、原子間力顕微鏡（AFM）および示差走査熱量測定（DSC）を用いて、アスファルト表面の微細構造の変化を研究した。

6.2 研究内容

(1) 材料

使用した未劣化および未改質アスファルトの物理的、化学的特性を表-3に示す。AFM観察のために、矩形状のアルミ板状にアスファルト30mgを塗布した。その試験片を（i）光と空気両方あり、（ii）空気あり光なし、（iii）光あり空気なし、（iv）光と空気両方なしの4条件で15日間および30日間養生した。

養生後、各試料をAFM観察した後、AFMプレートから試料15mgずつ掻きとって、DSC板上に乗せて、DSC試験を行った。

表-3 使用した未劣化アスファルトの性状

物理的性質		化学的性質	
針入度 (25℃)	86 (1/10 mm)	飽和分	11 (%)
軟化点	46.4 (℃)	芳香族	55 (%)
粘度 (60℃)	96	レジン	19 (%)
動粘度 (135℃)	181	アスファルテン	15 (%)
フラース脆化点	-16 (℃)		
ワックス含有率	6.2 (%)		

(2) 測定方法

上記 i)～iv) のそれぞれの条件で養生した試料について、原子間力顕微鏡（AFM）を用いて微細構造の測定を行った。また、30日養生した試料については、示差走査熱量測定（DSC）も行った。

①原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscopy）

微細な探針で試料表面を走査し、ナノスケールの凹凸形状を三次元的に計測する手法である。本研究では、VECO Dimension 3100 deviceを用い、タッピングモードで観察を行った。探針を高周波で強制振動させ、試料表面を走査する過程で、探針が試料表面に近づくと探針の振動振幅は減少し、逆に遠ざかると増加する。この探針の振動振幅の変化をレーザーで検出し、画像にするものである。観察温度25℃、

50 μ m四方の面上を1 Hzの速度で走査した。カンチレバーのばね係数は40N/mである。

②示差走査熱量測定（Differential scanning calorimetry）

図-23にDSCの装置図を示す。一定の熱を与えながら、基準物質と試料の温度を測定して、試料の熱物性を温度差として捉え、試料の状態変化による吸熱反応や発熱反応を伴う熱量の変化を測定する。本研究ではMRTTLER TOLEDO DSC Iを用い、各暴露条件による結晶化現象の変化を観察した。-70℃から110℃までの加熱過程および110℃から-70℃までの冷却過程をそれぞれ10℃/minの速度で行った。

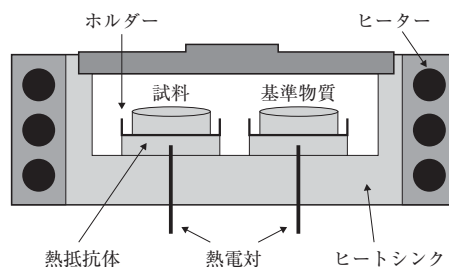


図-23 DSCの装置図（日本大学理工学研究所材料創造研究センターHPより）

6.3 研究結果

(1) AFM観察結果

過去の研究ではアスファルテン中に黒と黄色のストライプの「カタナ相」の存在が証明されている。近年では、ワックスに含まれるカタナ相の結晶特性が測定結果に直接的に関係するとされている。

図-24に本研究で用いた未劣化アスファルトのAFM画像を示す。このアスファルトは6.2%の天然ワックスを含むため（表-3）、典型的なカタナ相が見られる（図-24左）。4種類の条件下で暴露したアスファルトのAFM画像を図-25に示す。各画像の右下の数値はカタナ相の面積比率である。（i）空気および光に晒したアスファルトは15日および30日養生後ともにカタナ相が全く見られず、未劣化アスファルトと比較して、100%減少したことになる。（ii）空気のみを晒した試料から酸化によるアスファルトの微細構造

への影響を見てみると、15日暴露で38%、30日暴露で58%のカタナ相の減少が見られた。また、(iii) 光のみ暴露した試料では15日暴露で19%、30日暴露で14%の減少が見られた。(ii) 空気だけ晒した酸化試料では暴露日数の増加に伴い、カタナ相の割合が減少したが、

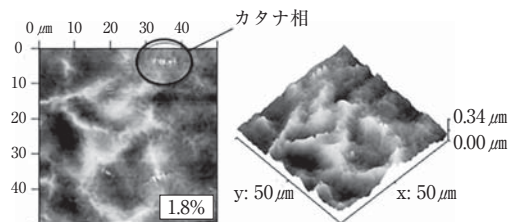
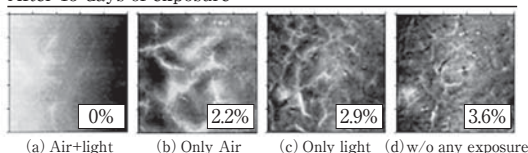


図-24 未劣化アスファルトのAFM像
左：2D形状 右：3D形状

After 15 days of exposure



After 30 days of exposure

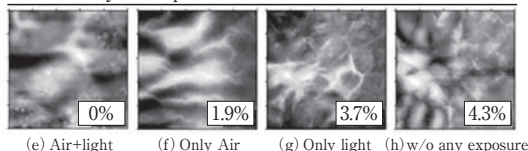


図-25 各暴露条件のAFM像

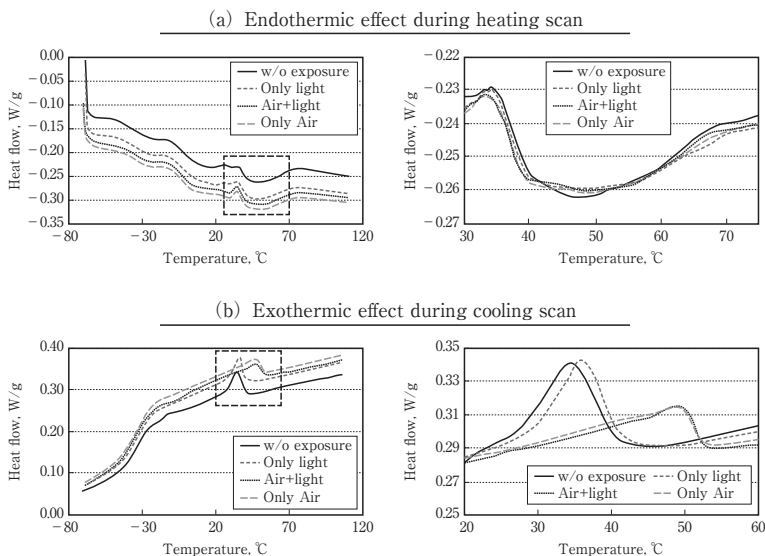


図-26 各条件の熱量解析結果

(iii) 光のみ晒した非酸化試料では暴露日数の増加に伴い、カタナ相の増加が確認された。(iii) 光のみ晒した試料と(iv) 未暴露の試料では、表面のカタナ相の割合は養生日数の増加とともに増加した。これはアスファルトの劣化によって、酸化試料(i)(ii)では試料表面へカタナ相が浮遊するのを制限する障壁となる薄膜を試料表面に形成し、非酸化試料(iii)(iv)では障壁がなく、カタナ相の割合が増加したと考えられる。

(2) DSC 測定結果

カタナ相の形成を妨げる薄膜について、試料表面の劣化に起因する結晶性分子の変化を調べるために、30日養生した試料で示差走査熱量測定(DSC)を行った。

図-26に各暴露条件の熱量解析結果を示す。図-26aは加熱走査中の吸熱反応の様子、図-26bは冷却走査中の発熱反応の様子が見て取れる。図-26aおよび(b)の右図は左図の点線で囲んだ吸熱と発熱の事象のゾーンを拡大したものである。広い吸熱ピークの下の面積がワックスの融解の吸着エンタルピーを表す。

まず、注目したのは図-26aのすべての暴露条件の曲線がほぼ同じ開始点および終了点を有しており、1つの曲線に重ね合わせることができる。これは、どの暴露条件においてもワックスの割合に変化がないことを示している。ワックスの割合はどの条件においても一定なままなので、図-26bにおいても発熱ピーク下の総面積も一定になるはずだが、冷却形状や発熱ピークの開始点および終了点が異なることを確認した。

発熱反応の開始点は結晶化プロセスの開始を示している。冷却走査中に酸化試料(i)(ii)は非酸化試料(iii)(iv)よりも結晶化の開始が早いことが言える。

6.4 翻訳者コメント

原子間力顕微鏡を用いて、アスファルトの微細構造を観察するという方針に新鮮さを感じた。アスファルトの劣化程度がアスファルト表面に顕著に現れたという結果を知り、アスファルト微細構造の観察の有効性が示されたと考えている。今後、さらなる室内劣化と現場劣化の比較についての報告に期待する。

高速道路におけるアスファルト舗装の 損傷実態と対策の着眼点

(Field Study on the Deterioration of Asphalt Pavement and Key Points for the Countermeasures)

高 橋 茂 樹*

高速道路の供用年数が伸びるに従い、アスファルト舗装の経年劣化による下層の損傷が全国で顕在化している。本稿では、近年高速道路で見られる代表的な損傷の形態を土工部と橋梁部に分けて紹介するとともに、対策を講じるに当たって重要なポイントを、現地調査で得られた知見を基に述べるものである。

1. はじめに

NEXCO 3 社が管理する高速道路は全国で約 9,000 km に達しており、そのうち供用から 30 年以上を経過した延長が約 4 割を占め、最も古い路線では供用 50 年を超える中、厳しい使用環境下での道路資産の経年劣化の進行が年々顕在化してきている。

その路面の大部分を占めるアスファルト舗装においても、近年は損傷の深層化が目立ってきており、上層路盤からの打換えを強いられる状況も珍しくない。これに伴い、単位面積当たりの補修費用の増加や打換えに必要な交通規制時間の確保が大きな課題となっているが、これらの状況は厳しさを増す一方であることから、NEXCO では、アスファルト舗装の長寿命化に対する取組みを強化しているところである。

しかしながら、高速道路のアスファルト舗装が供用期間中に実際にどのような状態に変化していくのか、未だに不明な点も多く、現地では同じような補修を繰り返してきた実態も否めない。

そこで、現地の損傷箇所において詳細な開削調査を幾つか行った結果、実道で長期間供用されたアスファルト舗装の経年変化の実態や損傷の原因となった弱点が明らかになってきた。本稿では、最近の開削調査で得られた知見の中からアスファルトに関係するものを紹介する。

2. 土工部におけるポイント

2.1 剥離損傷

表層に排水性舗装（NEXCO での呼称：高機能舗装

I 型）を採用している箇所において、雨水の浸透による基層混合物からのアスファルトの剥離が促進され、写真－1、2 に示すようなボンピングや局所的な流動・ポットホール等が発生する事象が以前より課題となっており¹⁾、現在では、これが高機能舗装 I 型でも一般的な損傷形態となっている。

これに関し NEXCO では、既設の基層混合物を事前



写真－1 ポンピングの発生例



雨水等の浸透により、剥離・土砂化した既設の基層



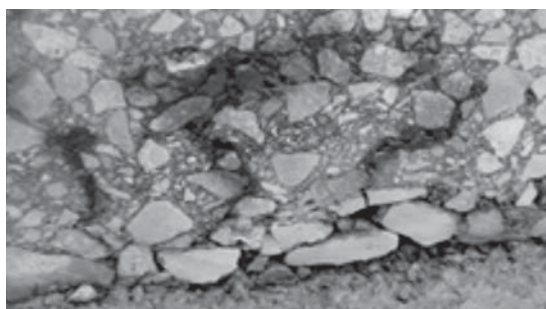
写真－2 局所的な流動(上)と基層混合物の状態(下)

*たかはし しげき 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 舗装研究室

にコア採取し、60℃の温水を用いた加圧透水試験により供試体を剥離促進させた後に圧裂試験を行うことで、表層を高機能舗装Ⅰ型にした際に既設基層混合物が耐えられるだけの耐水性を有しているかを判定する評価法を考案し²⁾、十分な耐水性が無い場合には、表層の更新に併せ基層からの切削オーバーレイを実施している。また、NEXCOの設計要領³⁾では、使用する粗骨材の剥離抵抗性に関する規定を設ける（静的剥離試験）とともに、配合試験時に基層混合物の耐水性を水浸ホイールトラッキング試験で確認し、これを満足しない場合は剥離防止剤を使用するかアスファルト種別を変更することとしている。現在は、過去の検討結果を踏まえ、基層には改質アスファルトを標準使用する方針を取っている地域も多い。

2.2 疲労破壊

アスファルト舗装の疲労ひび割れは、繰り返し交通荷重でアスコン下面に発生する引張ひずみの累積により生じるものと定義されているが、高速道路のような舗装構造では、そのようなひび割れは生じないと言われてきた。しかし、平成23年に高速道路で実施した開削調査⁴⁾では、最小舗装厚（ $t=35\text{cm}$ 、アスコン18cm）の路線において、わだち部のアスベス下面からの疲労ひび割れが発見された（写真－3）。



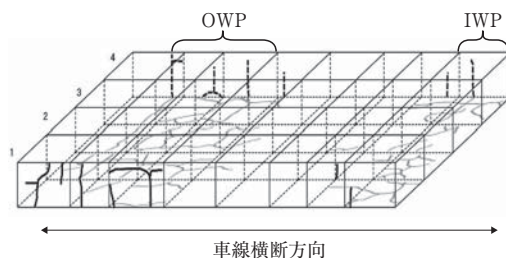
写真－3 アスベス底面から発生した疲労ひび割れ

この路線は、4車線で供用18年、断面交通量26,000台/日で大型車混入率19%という交通履歴を受けているが、図－1に濃色の実線で示すアスコン断面（側面）のひび割れと、淡色の実線で示すアスベス底面に発生しているひび割れが確認されており、現時点で構造的な寿命を迎えた段階と言える。この開削調査後に、他路線においても、アスコン厚が18～20cmと薄いIC間で同様の疲労ひび割れが見つかっており、高速道路のアスファルト舗装は、疲労寿命を意識せざるを得ない時代に入り始めたと考えている。

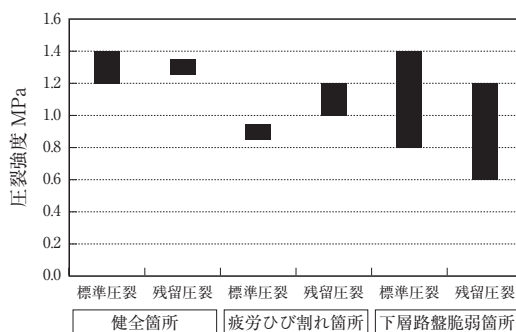
これまで、高速道路のアスベスは、あくまで安定処理路盤の位置付けで、表層や基層混合物のような詳細な検討はされてこなかったが、今回の調査ではアスベスからも試料を採取し室内試験を行った。

図－2は圧裂試験の結果で、アスコン下面からの疲労ひび割れが生じていた箇所のアスベスは、健全箇所と比べ圧裂強度が低い傾向にあり、下層路盤が永久変形や滞水により脆弱化していた箇所では、圧裂強度のバラツキが大きく、値の低い試料が見られた。

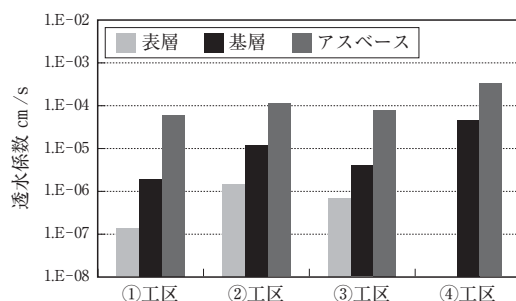
これらのアスベスは、全調査箇所の試料において、透水係数が非常に大きく（図－3）、圧裂試験後の破断



図－1 疲労ひび割れの発生状況のスケッチ



図－2 アスベス採取試料の圧裂強度（OWP）



図－3 各層採取試料の透水係数（OWP）

面を観察すると、加圧透水養生後のアスベースコアに剥離が生じているものが散見された。

各工区のアスコン採取ブロックから、曲げ試験用にアスベースの棒状供試体も成形しようとしたが、そのほとんどがマイクロクラックあるいは脆弱化により崩壊してしまった⁵⁾。これら現地のアスベースは、写真-3のように底面が緩んだ状態に見えるものが多く、また、抽出したアスファルト量が少なくなっていたと報告されている⁶⁾。

この開削調査プロジェクトで同じ箇所から採取した供試体から回収したアスファルトを分析した結果が、本誌に別報(p.18～23)で掲載されている。これによると、健全な(僅かに路面からのひび割れが表層のみに入っている程度の)箇所では、路面付近のアスファルトが劣化し、基層やアスベースのアスファルトはそれほど劣化が見られないという、一般的に認識されている傾向に合致した。一方、全層を貫通するひび割れが発生している箇所では、表層のみならず基層やアスベースから回収したアスファルトも劣化が進行していたことが報告されている。

上記の現象は、下層路盤が保有する水分の影響でもその直上にあるアスベースは水密性が低いいため剥離が進行してしまう可能性や、ひび割れから侵入した雨水や酸素の影響で深層部分のアスファルトも劣化する可能性などを示唆しているのではないかと推測するが、いずれにしても、従前はアスファルト舗装の劣化は路面から進行すると思われてきたが、今後はアスベース下面にも注目した耐久性向上策を検討する必要があるのではないかと考えている。

3. 橋梁部におけるポイント

3.1 レベリング層での滞水と剥離損傷

近年、高速道路における主要な損傷形態として、前述のように土工部では高機能舗装区間のポンピングや路面沈下が挙げられるが、橋梁部においては、防水工とレベリング層の界面での層間接着力の不良と雨水の浸入・滞水によるレベリング層の剥離脆弱化が目立っている。

近年、NEXCOでは顕在化するコンクリート床版の劣化を防止するため、高性能床版防水(グレードⅡ)を開発・導入しているが、防水層と舗装との接着不良に関しては、設計要領および施工管理要領の見直し⁷⁾により、冬季施工条件下でもレベリング層との層間接着力を発揮できることを求めており、メーカー側の製品改善が図られてきている。

また、各地での損傷実態調査とこれを踏まえた検討の結果、防水工との接着力確保には、レベリング層底面の隙間を抑制し接着面積を増加させることも重要であると考え、不連続粒度のSMAに代わり、連続粒度の新たなレベリング層用混合物(FB13)を開発し、今夏的设计要領改訂で導入したところである³⁾。

なお、雨水は舗装の施工目地や壁高欄地覆との境界からも浸入することが現地確認されており、これら目地部等の止水処理も重要になる。

しかしながら、現地でポットホールが発生した箇所の状態を見ると、写真-4に示すように、その殆どでレベリング層が滞水により湿潤状態に置かれ、繰り返し交通荷重により剥離脆弱化していることが確認されている。

この要因としては、前述の経路や舗装のひび割れによる雨水の浸透とコンクリート床版の不陸による凹部での滞水が挙げられるが、高性能防水工を施しているため、一旦水が入ると抜けずに、橋梁部の舗装(特にレベリング層)が、言わば「プール」の状態になってしまい、あたかも実道で水浸ホイールトラッキング試験を行っている様な状態になってしまうのではないかと危惧している。

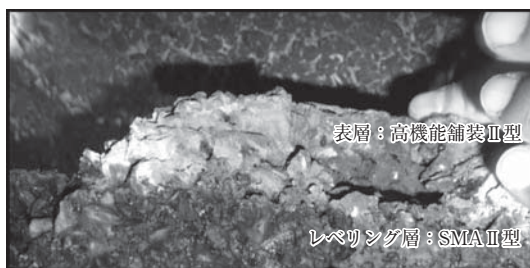


写真-4 橋梁部のポットホール箇所の状況

また、防水層を施工した橋面舗装を補修する場合、切削機による防水層の損傷が避けられない現実があり、そのため、既設防水層の再利用が難しい実態がある。NEXCOの建設工事で標準採用しているグレードⅡ規格の防水層は30年間の機能発揮を期待しているものであることから、これと接着しているレベリング層は極力長寿命化することが求められる。

そのため、一部の地域では、グレードⅡ規格の防水層を施工する際は、レベリング層には、首都高速道路で積極的に採用されている⁸⁾、改質アスファルトⅢ型-Wを用いることで、耐水性の強化を図り始めている。

3.2 改質アスファルトの施工性

このように、土工部・橋梁部ともに、剥離に起因す

る損傷が顕在化しているため、改質アスファルトを使用することが一般的になってきている。これにより混合物の剥離抵抗性を改善するだけでなく、耐流動性やひび割れ抵抗性も向上することが期待されるため、使用するメリットは大きいと考えている。

一方、ストレートアスファルトに比べれば粘度が大きいことから、混合物運搬時の保温対策や適正な温度域での施工が重要となっている。温度低下すれば急激な粘度上昇から、写真-5に示すような混合物の団塊(ダマ)が発生しやすくなり、これを見逃せば早期のポットホールにつながってしまう。

NEXCOの場合、高機能舗装やSMAに代表される不連続粒度混合物を開発導入しており、運搬・敷ならし時の材料分離がしやすく、また、アスモル分が多い配合の混合物もあることから、舗設時にダマが発生しやすい傾向にあると考えている。特に、夜間や冬季施工時の橋梁部は大気や床版面の温度が低く、アスファルト混合物の温度低下が激しい。

このような施工条件の厳しい場所では、改質アスファルトのデメリットである施工性の悪化が露呈してしまう場面もあり、その対策として施工性改善型の改質アスファルトにも注目している。高速道路で試用した施工事例の詳細は既往文献⁹⁾に譲るが、改質アス

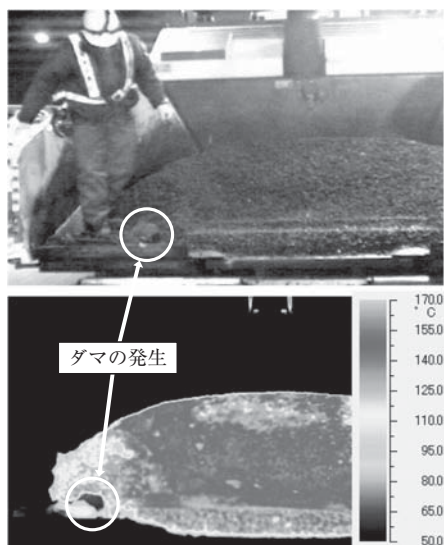


写真-5 冬季夜間施工時における団塊発生(ダマ)の例⁹⁾

ファルトの高度利用には施工性の確保による施工ムラの抑制という観点も極めて重要であると考えている。

4. おわりに

各地の高速道路で実施した現地調査からは、アスファルト舗装にとっての宿命とも言うべき「水」との関係、剥離に起因する損傷実態が浮かび上がってきた。また、実道におけるアスファルトの供用劣化の実態も明らかになってきており、これらの知見を踏まえた研究を鋭意進めるとともに、耐久性と施工性の双方を確保できる具体的な損傷対策を構築していく所存である。

— 参考文献 —

- 1) 川村和将, 高橋茂樹, 菅野勝一: JHにおける高機能舗装化に伴う下層部の耐水対策について, 舗装, pp.16-21, 2002
- 2) 東日本高速道路(株)・中日本高速道路(株)・西日本高速道路(株): NEXCO 試験方法第2編アスファルト舗装関係試験方法 試験法250, pp.53, 2015
- 3) 東日本高速道路(株)・中日本高速道路(株)・西日本高速道路(株): NEXCO 設計要領第一集舗装編, 2015
- 4) 例えば, 高橋茂樹, 吉野公朗, 早川泰史, 原田秀一, 砂金克明: 高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクト, 土木学会第68回年次学術講演会, pp.835-836, 2013
- 5) 小柳佳範, 高橋 修: 瀝青安定処理路盤材のひび割れ抵抗性の向上に関する一検討, 第13回北陸道路舗装会議, 2015
- 6) 小林真依, 平戸利明, 高橋茂樹: 長期供用されたアスファルト混合物の品質変化に関する調査結果, 第13回北陸道路舗装会議, 2015
- 7) 東日本高速道路(株)・中日本高速道路(株)・西日本高速道路(株): NEXCO 設計要領第二集橋梁建設編, pp.11-1 ~ 11-3, 2015および同構造物施工管理要領 pp.2-299 ~ 2-322, 2015
- 8) 首都高速道路(株): 舗装設計施工要領, 2015
- 9) 例えば, 野口健太郎, 瀬尾彰, 川村暢宏, 小池正己, 高橋茂樹: 施工性改善型改質アスファルトの冬期施工における効果の検証: 土木学会第69回年次学術講演会, pp.1015-1016, 2014

首都高速道路株式会社舗装設計施工要領の改訂について

(Description of Revised Pavement Design and Construction Specification of Metropolitan Expressway Co., Ltd.)

石 原 陽 介*・蔵 治 賢太郎**

平成27年4月、首都高速道路株は、「舗装設計施工要領」を改訂した。改訂内容には、表層の薄層化（4 cmから3 cm）、新たに開発した損傷対策型のバインダを使った小粒径ポーラスアスファルト混合物の採用、およびコンクリート床版上面増厚補強を兼ねたPCM舗装の採用が含まれる。本文はこれらの改訂内容について紹介するものである。

1. はじめに

首都高速道路は1日約100万台の重交通を支える都市高速道路である。お客さまに安全かつ快適に走行いただくため、誕生から50年以上、交通需要の増加、舗装技術の発展とともに舗装構成について改訂を重ねてきた。首都高速道路は交通量が多く、舗装工事のために交通規制をすると渋滞が発生し、経済的損失が生じる。また、建物が近接する路線が多いことから、工事騒音や路面騒音による周辺環境への影響が大きい。その他、少子高齢化社会による労働者不足の懸念を勘案すると、今後打換えサイクルが長く、高耐久の舗装が求められる。新要領では、首都高速道路に見られる舗装の損傷に対して高い耐久性を発揮する舗装構成を採用している。本文は、首都高速道路に見られる損傷と、新たに採用した損傷対策型の小粒径ポーラスアスファルト混合物、PCM舗装、および舗装構成について紹介するものである。

2. 首都高速道路で見られる舗装の損傷事例

一概に、首都高速道路の舗装といってもその環境は様々である。一例として、大型車の交通量が多く、日常的に渋滞する箇所や、軟弱な埋土地盤上に舗装された箇所等、舗装にとって過酷な環境が存在する半面、大型車の交通量が少なく渋滞することなく舗装が損傷しにくい箇所も存在する。以下に代表的な損傷事例とその特徴を述べる。

(1) ポットホール

高架部で排水性舗装の普及とともに多く報告されるようになった損傷である。ポットホールは層間剥離と凝集破壊の場合がある。わだち掘れやひび割れがしやすい鋼床版部で、特に雨天後や積雪後に多く発生している。水が湧いている土工、トンネル、半地下部でもしやすい。この場合、舗装を打換えるだけでは短期間でまた穴ができることから湧水対策が必要である。



写真-1 路面にできたポットホールの事例

(2) 流動わだち掘れ

動的安定度に劣るグースアスファルト舗装を基層に採用している鋼床版部のほか、日常的に渋滞している場所や転圧が不足しがちな伸縮継手前後で多く発生している。鋼床版部の場合、基層が流動して表層のポーラスアスファルト混合物が側方に引っぱられ、わだち

*いしはら ようすけ 首都高速道路株式会社 技術部 技術推進課 係長

**くらじ けんたろう 首都高速道路株式会社 東京西局 第一保全工事事務所 工事・点検長



写真-2 鋼床版部の流動わだち掘れ

の底にひび割れが入って骨材飛散が始まり、最終的にポットホールに成長する。

(3) 沈降わだち掘れ

地盤が軟弱な埋土地盤上に建設された高速湾岸線の土工部で発生している。



写真-3 高速湾岸線台場付近にできた沈降わだち掘れ

(4) ひび割れ(縦断方向)

鋼床版部で主桁腹板と輪荷重走行位置が重なっている場所で発生している。基層のグースアスファルト舗装にひび割れが入って雨水や凍結防止剤が浸入し、鋼床版が腐食した事例も多数報告されている。表層のひび割れはカッター目地を入れれば解消されるが、基層のひび割れ対策と浸水対策にはならない。



写真-4 縦断ひび割れ(左)と鋼床版上面の腐食(右)

(5) ひび割れ(横断方向)

踏掛版の前後、半地下・擁壁部の構造境、ノージョイント部などで多く発生しているが、一般に横断方向にカッター目地を入れれば解消される。



写真-5 踏掛版の前後に入った横断ひび割れ

3. 要領改訂のコンセプト

要領改訂にあたっては以下の点に留意した。

○損傷対策型舗装材料の採用

新要領では、首都高速道路で見られる損傷に対して多少単価が高くても、より長寿命・高耐久で打換えサイクルの長い舗装材料を採用することで、ライフサイクルコスト削減、舗装工事の交通規制回数の削減および、作業員を確保することにした。

○施工のしやすさ

首都高速道路では交通流への影響を最小限に留めるため、舗装は夜間、狭隘な車線規制帯内での短時間施工となる。そのため、どんなに高性能であっても出来栄が作業員の力量に左右されるような施工の難しい舗装や、養生に時間のかかる舗装は採用しないことにした。また、狭隘な規制帯内で片側を交通開放した状態で施工する機会が多いことから幅広い施工ヤードを必要とする舗装は採用しないことにした。

○騒音対策

都市内高速道路という性質上、建物との離隔が少ないため夜間の工事騒音は近隣住民への負荷となることから、既設舗装の打換え時に大きな騒音を発する材料は適さない。また、建物との離隔が小さいため、走行車両が発する路面騒音の軽減機能を有する舗装を採用することにした。

○雨天時の安全性の確保

首都高速道路は、見通しの悪い急曲線や急勾配が多く、渋滞末尾への追突事故が多いことから、雨天時における路面のすべり抵抗の確保、ハイドロプレーニン

グ現象対策、前方を走行する車両のタイヤによる水の巻き上げによるドライバーの視認性低下対策、が必要である。そのため、排水性舗装を採用することにした。

4. 主な改訂内容

4.1 表層の薄層化（4 cm→3 cm）

これまでの高架橋や土工部の舗装は、表層に4 cm厚のポーラスアスファルト混合物（13）、基層に4 cm厚の密粒度アスファルト混合物（13）を採用してきた。しかし、新要領ではこれを表層厚3 cm、基層厚5 cmに変更する。その理由を以下に示す。

○通行車両への影響

表層厚が4 cmから3 cmと薄くなることで、層間剥離によってポットホールができた場合に穴の深さが4 cmから3 cmと浅くなるため、走行車両のタイヤホイールが損傷しにくくなる。

○施工性の改善

表層だけ打換える場合、廃材量および必要な舗装材料が3/4に減少することから、規制時間内あたりの施工面積を拡大することができる。

○基層厚の統一

鋼床版上のSFRC舗装部は、従来より表層厚3 cm、基層厚5 cmのため、SFRC舗装部とグースアスファルト舗装と混在した場合でも表層のポーラスアスファルト混合物が同じ厚さとなることで、表層に浸透した雨水が適切に排水される。

○防水性能の向上

表層のポーラスアスファルト混合物の厚さが薄くなる分、その下の基層厚が厚くなるため、床版に対する防水性能とレベリング性能が向上する。

4.2 小粒径ポーラスアスファルト混合物の採用

トンネル部以外の表層を厚さ4 cm、空隙率20%、骨材の最大粒径13 mmのポーラスアスファルト混合物から厚さ3 cm、空隙率17%、最大粒径5 mmの小粒径ポーラスアスファルト混合物に変更する。これにより、基層との層間付着面積が増加することで接着強度が増加し、層間剥離抵抗性が向上する。また、専用バイング（小粒径用ポリマー改質アスファルトH型）を使用することにより従来のポーラスアスファルト混合物よりも凝集破壊抵抗性が向上する。さらに、アスファルト系防水材の直上にポーラスアスファルトを敷設する場合、骨材の最大粒径を小さくすることで、防水材との接触面積が拡大し、防水材を薄く塗布しても粗骨材の打ち抜きが生じにくくなる。小粒径ポーラスアスファ

ルト混合物に関する詳細については、昨年度の本誌57号「損傷対策型小粒径ポーラスアスファルト舗装」²⁾を参照されたい。

4.3 PCM舗装を用いた床版増厚の採用

昭和39年鋼道路橋示方書や昭和47年道路橋示方書に準じて設計されたコンクリート床版は床版厚が薄いことから、大型車交通量の多い首都高速道路では早期に損傷が生じやすい。また、舗装の打換えを繰り返すことにより、コンクリート床版上面のかぶりコンクリートが切削機によって削られて床版厚が薄くなってしまったり、上鉄筋が露出してしまったりしている事象も多く見られる。そのため、コンクリート床版上面のかぶりの復旧を兼ねた材料を基層として舗設することで、雨水や凍結防止剤などの腐食因子から既設コンクリート床版の上鉄筋を保護することが必要である。しかし、既存の工法では、床版と上面補強材が分離する事象が報告されている。そのため、低弾性で既設舗装のひずみに追従するポリマーセメントモルタルを用いたRC床版の上面増厚がPCM舗装である。PCM舗装の材料にはSFRC同様に超速硬セメントが用いられるが、既設コンクリート床版よりも曲げ靱性がある。また、その施工方法は、乾式吹付工法の技術を応用したもので、必要台数の確保が困難となってきた移動式プラント車を使わず、粉体と液体を圧送することから材料の攪拌、混合、運搬に人出がかからない（写真－6）。

なお、本舗装で上面が補強された床版は、輪荷重走行試験で高い補強効果、疲労耐久性、および防水性を発揮することを確認した。



写真－6 PCM舗装の施工風景

5. 新要領の舗装構成

これまでの要領は高架部・トンネル部のみを対象としていたが、新たに土工部の舗装構成を追加した。また、標準部の舗装構成に加え、現場環境に適した舗装工法が適用できるよう、複数の舗装構成を示した。

5.1 高架部（コンクリート床版）の舗装

高架部（コンクリート床版）の舗装構成を表-1に示す。標準部の表層は、前述の小粒径ポーラスアスファルト混合物（5）を採用し、基層に関しては密粒度アスファルト混合物（13）を採用し、バインダは、水に対する抵抗性が高く、耐流動性に優れるポリマー改質アスファルトⅢ型-Wを採用した（図-1）。床版上面被り厚不足部および、流動が著しい箇所については、基層に前述のPCM舗装を採用した（図-2）。

5.2 高架部（鋼床版）の舗装

高架部（鋼床版）の舗装構成を表-2に示す。鋼床版標準部の表層は、コンクリート

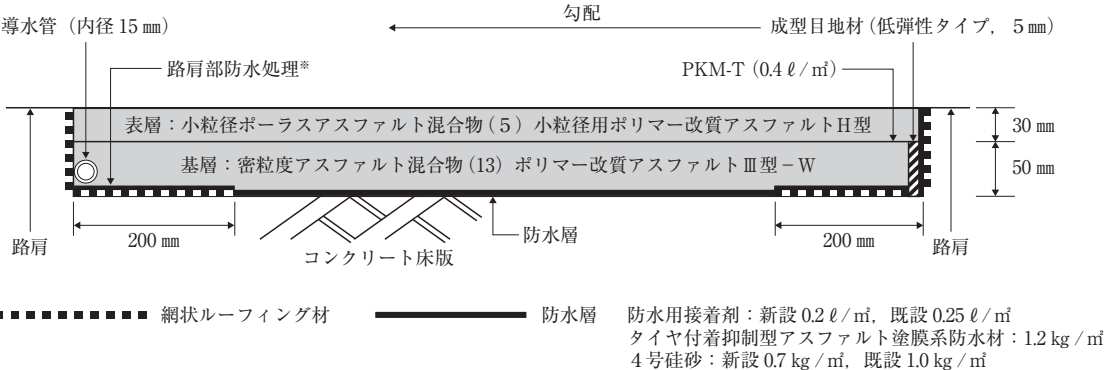
表-1 高架部（コンクリート床版）の舗装構成

番号	適用箇所	層厚（mm）	舗装構成（ ）：最大骨材粒径
C01	標準部	表層 t=30	小粒径ポーラスアスファルト混合物（5） （小粒径用ポリマー改質アスファルトH型）
		基層 t=50※1	密粒度アスファルト混合物（13） （ポリマー改質アスファルトⅢ型-W）
C11	床版上面かぶり厚不足部 流動が著しい箇所	表層 t=30 基層 t=50	標準部の表層と同一 ポリマーセメントモルタル（PCM）（5）
C21	薄層部 （総厚60mm未満）	表層 t<60※1	標準部の基層と同一※2
C31	非排水性舗装部	表層 t=30	粗粒度ギャップアスファルト混合物（13） （ポリマー改質アスファルトⅢ型-W）
		基層 t=50	標準部の基層と同一
C32	路面凍結抑制舗装部	表層 t=30	物理系凍結抑制舗装
		基層 t=50	標準部の基層と同一
C71	料金所 パーキングエリア 半たわみ性舗装部	表層 t=30	開粒度アスファルト混合物（13） （ストアス40-60）+浸透用セメントミルク
		基層 t=50	標準部の基層と同一
C72	伸縮装置前後	表層 t=30	標準部の表層と同一+浸透用セメントミルク
		基層 t=50	標準部の基層と同一
C81	仮舗装・パッチング	表層もしくは 表・基層	密粒度アスファルト混合物（13） （ポリマー改質アスファルトⅡ型）
C91	すべり止め舗装部 カラー舗装部	表面処理	樹脂系カラーすべり止め舗装
		表層 t=30	標準部の基層と同一
		基層 t=50	標準部の基層と同一
C94	半たわみ性舗装部の カラー舗装部 （ETCレーンなど）	表面処理	樹脂系カラーすべり止め舗装
		表層 t=30	開粒度アスファルト混合物（13） （ストアス40-60）+浸透用セメントミルク
		基層 t=50	標準部の基層と同一

※1：既設舗装の総厚が60～100mmの場合は表層厚30mmを固定して基層厚1層でレベリングする。60mm未満の場合はC21を採用し、100mmを超える場合は表層厚30mmを固定して中間層+基層でレベリングする。

※2：高いすべり抵抗性が要求される場合は、樹脂系カラーすべり止め舗装で表面処理する。

（2）高架部（コンクリート床版）の舗装には、必ず防水層を設置する。なお、昭和46年3月以前の基準で設計されたコンクリート床版において、基層を含めた舗装打換えをする場合には、浸透型防水材を用いた複合防水層を使用する。ただし、C11舗装系を採用する場合は基準年度に関わらずコンクリート床版上に浸透型防水材を使用する。



※路肩部防水処理
防水材1kg/m²塗布後、網状ルーフィングを敷き、再度防水材1kg/m²を塗布する。

図-1 コンクリート床版部標準部の舗装詳細

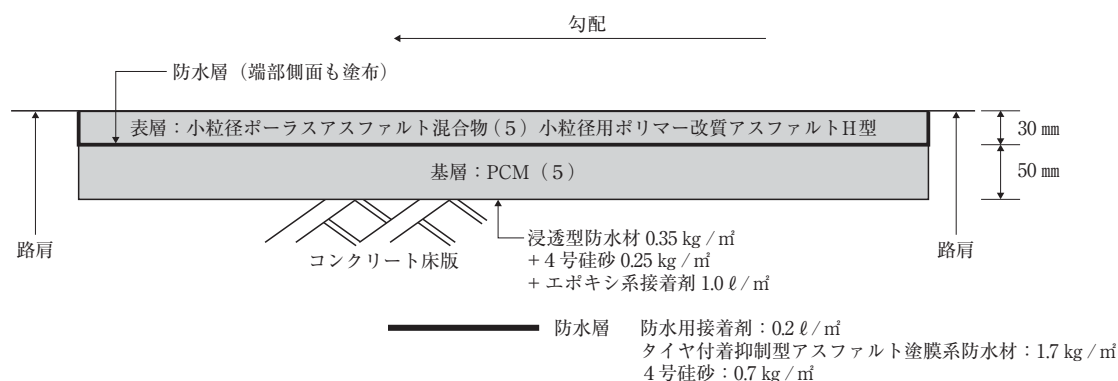


図-2 床版上面かぶり厚不足部の舗装詳細

床版と同じであるが、基層は、鋼床版面の防錆（接着力・水密性）および輪荷重によって生じる鋼床版の局部ひずみに追従する曲げ性能を期待し、グースアスファルト混合物を採用した。また、表層厚が3cmとなり、基層厚が4cmから5cmと厚くなったことからレベリング性能やボルトなどの突出に対する防錆性能が改善された反面、耐流動性に劣るグースアスファルト混合物が厚くなったことから、耐流動性を改善するため、骨材の最大粒径を13mmから20mmに変更した。

鋼床版とグースアスファルト混合物の接着剤は、これまでアスファルト・ゴム系の接着剤を鋼床版上に0.4l/m²塗布する仕様を採用してきた。しかし、アスファルト・ゴム系の接着剤は、気温の低い冬期は乾燥時間が60分以上となることもあることから、0℃における乾燥時間が30分以内で、かつ接着強度に優れ標準塗布量が、従来の約半分（0.2l/m²）である溶剤型熱可塑性エラストマー系のグース

表-2 高架部（鋼床版上）の舗装構成

番号	適用箇所	層厚 (mm)	舗装構成 () : 最大骨材粒径
S01	標準部 A (表・基層連続施工)	表層 t=30	小粒径ポーラスアスファルト混合物 (5) (小粒径用ポリマー改質アスファルト H 型)
		基層 t=50 ^{※1}	グースアスファルト混合物 (20) (ストアス 20/40+TLA)
S02	標準部 B (表層単独施工)	表層 t=30	小粒径ポーラスアスファルト混合物 (5) (小粒径用ポリマー改質アスファルト H 型)
S03	流動が著しい箇所の 表層打換え (暫定対応)	表面処理	樹脂系カラーすべり止め舗装 + 遮熱コート
		表層 t=40	密粒度アスファルト混合物 (13) (ポリマー改質アスファルト III 型 - WF)
		基層 t=40	既設舗装を継続使用
S11	鋼床版閉断面リブ部 流動が著しい箇所	表層 t=30	標準部 B の表層と同一
		基層 t=50	SFRC (13) もしくは HFRC (13)
S31	非排水性舗装部	表層 t=30	粗粒度ギャップアスファルト混合物 (13) (ポリマー改質アスファルト III 型 - WF)
		基層 t=50	標準部 A の基層と同一
S32	路面凍結抑制舗装部	表層 t=30	物理系凍結抑制舗装
		基層 t=50	標準部 A の基層と同一
S52	流動が著しい箇所で コンクリート系舗装採用 困難部	表層 t=30	標準部 A の表層と同一
		基層 t=50	密粒度アスファルト混合物 (13) (ポリマー改質アスファルト III 型 - WF)
S71	料金所 パーキングエリア 半たわみ性舗装部	表層 t=30	開粒度アスファルト混合物 (13) (ストアス 40-60) + 浸透用セメントミク
		基層 t=50	標準部 A の基層と同一
S72	伸縮装置前後	表層 t=30	標準部 A の表層と同一 + 浸透用セメントミルク
		基層 t=50	標準部 A の基層と同一
S81	仮舗装・パッチング	表・基層	密粒度アスファルト混合物 (13) (ポリマー改質アスファルト II 型)
S91	すべり止め舗装部 カラー舗装部	表面処理	樹脂系カラーすべり止め舗装
		表層 t=30	S52 の基層と同一
		基層 t=50	標準部 A の基層と同一
S94	半たわみ性舗装部の カラー舗装部 (ETC レーンなど)	表面処理	樹脂系カラーすべり止め舗装
		表層 t=30	S71 の表層と同一
		基層 t=50	標準部 A の基層と同一

※1：既設舗装の総厚が60～100mmの場合は表層厚30mmを固定して基層厚でレベリングする。

アスファルト用接着剤を採用した(図-3, 図-4)。

鋼床版閉断面リブ部については、鋼床版の疲労亀裂対策として従来から採用してきたSFRC舗装を基層に採用した(図-5)。

5.3 トンネル部の舗装

トンネル部の舗装構成を表-3に示す。これまでは、トンネル標準部の表層にバインダにストアス 40/60 を

用いた粗粒度ギャップアスファルト混合物(13)を採用してきた。この混合物は、骨材のかみ合わせにより高い耐流動性を発揮したことから、首都高速道路のトンネルの表層で長年採用されてきた。しかし、ギャップ粒度のためにバインダが劣化してくると、表面骨材が飛散しやすくなることと、層間接着力が密粒度アスファルト混合物より劣るといった欠点があ

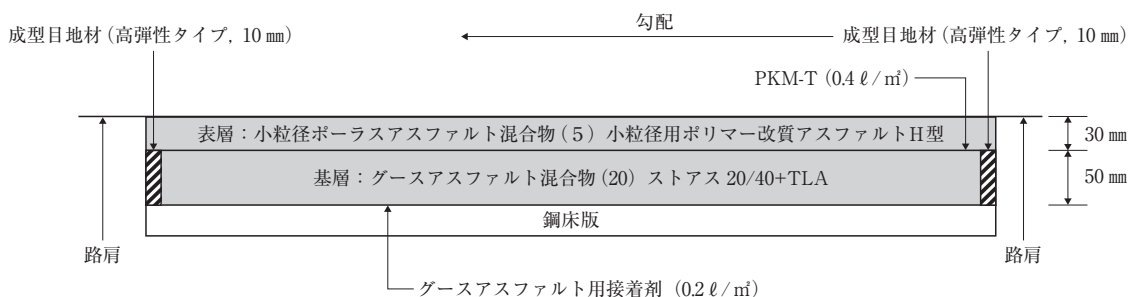


図-3 表基層打換える場合の鋼床版部標準部の舗装詳細

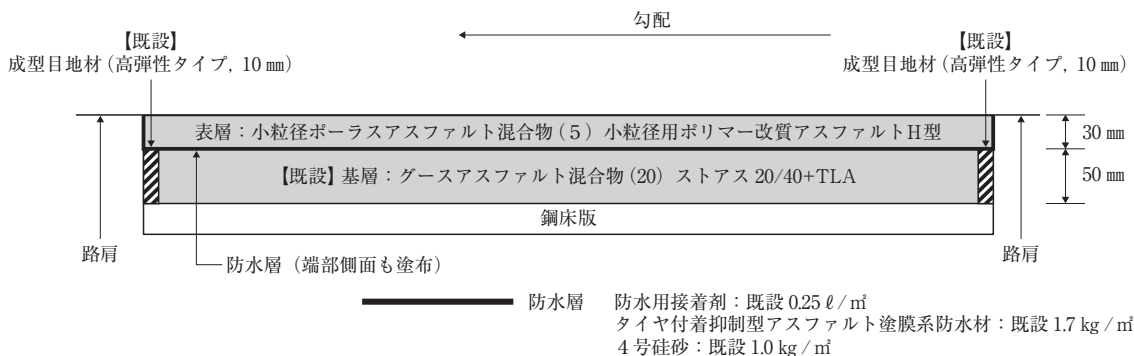


図-4 表層のみ打換える場合の鋼床版部標準部の舗装詳細

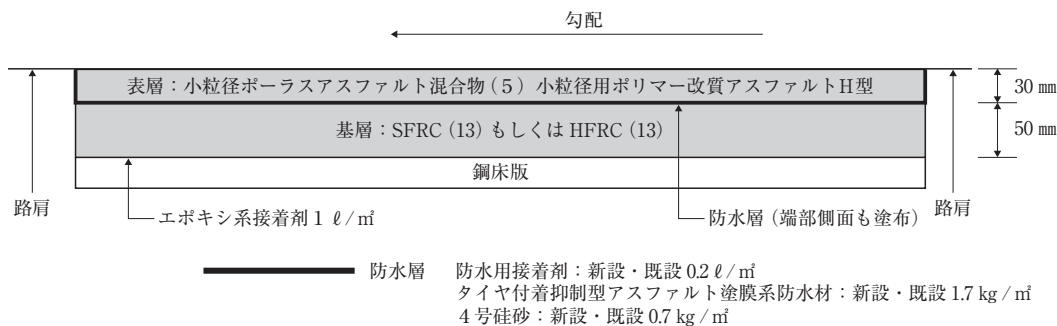


図-5 鋼床版閉断面リブ部の舗装詳細

り、下り勾配部では走行車両の制動荷重により表・基層間の付着切れが原因のコルゲーションや粗骨材の飛散が生じた。そこで、層間接着力と骨材剥離抵抗性に優れる密粒度アスファルト混合物(13)を表・基層に採用することにした。また、密粒度アスファルト混合物は粗粒度ギャップアスファルト混合物よりも耐流動性で劣ることから、バインダにはポリマー改質アスファルトⅡ型を採用した。

従来基層には、厚さ5cmの場合は、粗粒度アスファルト混合物(20)、厚さ3cmの場合は、再生密粒度アスファルト混合物(13)が採用されてきたが、新要領では密粒度アスファルト混合物(13)に統一した(図-6)。

5.4 土工部の舗装

土工部の舗装構成を表-4

に示す。土工部の舗装も、表

層に厚さ3cmの小粒径ポーラスアスファルト混合物(5)を採用した。中間層は高架部(コンクリート床版)の基層と同じバインダにポリマー改質アスファルトⅢ型-Wを用いた密粒度アスファルト混合物(13)を採用したが一般的なフィニッシャーで一度に舗設可能な最大厚である7cmを採用した。

基層には中間層と同様、高い耐流動性が要求されるが、雨水による影響を受けないことからバインダにポ

表-3 トンネル内の舗装構成

番号	適用箇所	層厚(mm)	舗装構成():最大骨材粒径
T01	標準部	表層 t=30	密粒度アスファルト混合物(13) (ポリマー改質アスファルトⅡ型)
		基層 t=50 ^{※1}	密粒度アスファルト混合物(13) (ストアス 40-60)
T21	薄層部(総厚が60mm未満)	表層 t<60 ^{※1}	標準部の表層と同一
T41	湧水部 (反転排水性舗装部)	表層 t=30	標準部の表層と同一
		基層 t=50	密粒度アスファルト混合物(13) (ポリマー改質アスファルトⅢ型-W)
		導水層 t=50以上	ポーラスアスファルト混合物(20) (ポリマー改質アスファルトⅡ型)
T51	流動が著しい箇所	表層 t=30	標準部の表層と同一
		基層 t=50	標準部の表層と同一
T71	上下線連絡路, 非常駐車帯 半たわみ性舗装部	表層 t=30	開粒度アスファルト混合物(13) (ストアス 40-60)+浸透用セメントミルク
		基層 t=50	標準部の基層と同一
T81	仮舗装・パッチング	表・基層	密粒度アスファルト混合物(13) (ストアス 40-60)
T91	すべり止め舗装部 カラー舗装部	表面処理	樹脂系カラーすべり止め舗装
		表層 t=30	標準部の表層と同一
		基層 t=50	標準部の基層と同一
T94	半たわみ性舗装部の カラー舗装部	表面処理	樹脂系カラーすべり止め舗装
		表層 t=30	開粒度アスファルト混合物(13) (ストアス 40-60)+浸透用セメントミルク
		基層 t=50	標準部の基層と同一

※1: 既設舗装の総厚が60~100mmの場合は表層厚30mmを固定して基層厚1層でレベリングする。60mm未満の場合はT21を採用し、100mmを超える場合は表層厚30mmを固定して中間層+基層でレベリングする。

リマー改質アスファルトⅡ型を採用した。「舗装の構造に関する技術基準・同解説(平成13年7月 日本道路協会)」によると、舗装設計交通量が3,000(台/日・方向)以上の場合、上層路盤にアスファルト安定処理工法を用いなければ、表層・中間層・基層を加えた厚さは20cm以上、用いれば15cm以上必要である。本舗装構成を採用する場合、表層・中間層・基層厚の合計は17cmとなることから、原則として上層路盤にはアスファルト安

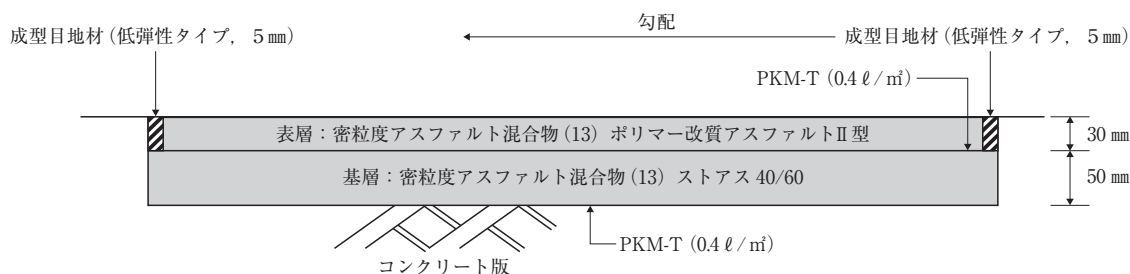


図-6 トンネル部標準部の舗装詳細

表－４ 土工部の舗装構成

番号	適用箇所	層厚 (mm)	舗装構成 (): 最大骨材粒径
G01	標準部	表層 t=30	小粒径ポーラスアスファルト混合物 (5) (小粒径用ポリマー改質アスファルト H 型)
		中間層 t=70	密粒度アスファルト混合物 (13) (ポリマー改質アスファルト III 型 - W)
		基層 t=70	密粒度アスファルト混合物 (20) (ポリマー改質アスファルト II 型)
G31	非排水性舗装部	表層 t=30	粗粒度ギャップアスファルト混合物 (13) (ポリマー改質アスファルト III 型 - W)
		中間層・基層	標準部 A の中間層・基層と同一
G41	湧水部	表層 t=30 [仮舗装 t=30]	標準部の表層と同一 (後施工想定) [仮舗装・パッチングと同一で中温化]
		中間層 t=70	標準部の中間層と同一で中温化
		導水層 t=100 (導水管 φ 50)	ポーラスアスファルト混合物 (20) (ポリマー改質アスファルト H 型中温化)
		基層 t=200	大粒径アスファルト混合物 (30) (ポリマー改質アスファルト II 型中温化)
G51	流動が著しい箇所	表層 t=30	標準部の表層と同一
		中間層 t=70	密粒度アスファルト混合物 (20) (重荷重用ポリマー改質アスファルト)
		基層 t=70	密粒度アスファルト混合物 (20) (重荷重用ポリマー改質アスファルト)
G71	料金所 パーキングエリア	表層 t=30	開粒度アスファルト混合物 (13) (ストアス 40-60)+浸透用セメントミルク
		中間層・基層	標準部の中間層・基層と同一
G81	仮舗装・パッチング	表・基層	密粒度アスファルト混合物 (13) (ポリマー改質アスファルト II 型)
G91	すべり止め舗装部 カラー舗装部	表面処理	樹脂系すべり止め薄層舗装
		表層 t=30	標準部の中間層と同一
		中間層 t=70	標準部の中間層と同一
		基層 t=70	標準部の基層と同一
G94	半たわみ性舗装部の カラー舗装部 (ETC レーンなど)	表面処理	樹脂系すべり止め薄層舗装
		表層 t=30	開粒度アスファルト混合物 (13) (ストアス 40-60)+浸透用セメントミルク
		中間層 t=70	標準部の中間層と同一
		基層 t=70	標準部の基層と同一

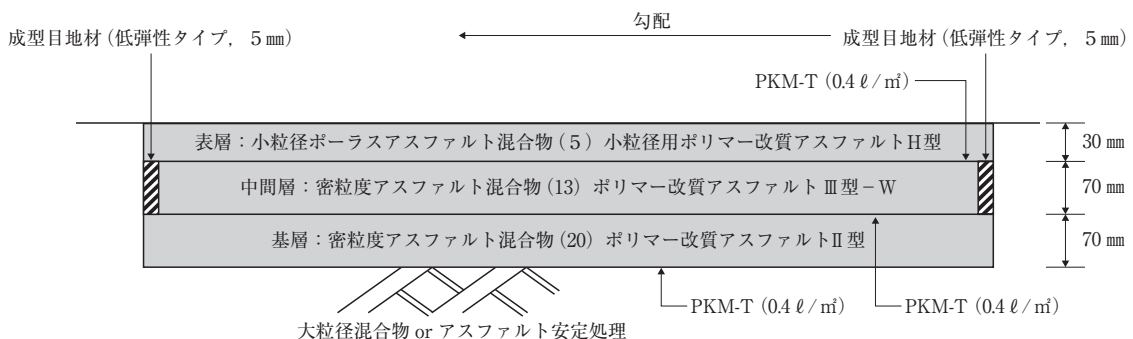
定処理層もしくはアスファルト混合物層を設ける。

中間層は水密性を重視し、骨材の最大粒径は13mmを採用したが、基層は耐流動性の改善を目的として20mmを採用した(図－7)。

湧水部の舗装詳細を図－8に示す。この舗装構成の特徴は、中間層と基層の間に厚さ10cmの導水層を設けていることである。導水層の役割は、被圧して上昇してきた湧水をこの層で解放しφ50mm程度の塩ビ製有孔管を介して排水柵の側部から自然流下させることで、導水層上の中間層や表層のひび割れから噴水することを防ぐことである。導水層に使用するポーラスアスファルト混合物は、湧水が運んできた砂等で閉塞しないよう、十分な連続空隙を確保するために骨材の最大粒径を20mmに拡大した。

6. おわりに

重交通下でも損傷が少なく耐久性が高い舗装を採用することは、維持管理工事を削減し、生活や経済活動への影響



図－7 土工部標準部の舗装詳細

「アスファルト舗装材料の可視化に関する最近の試験方法」 (本誌特集報文)

および

「若手技術者によるアスファルト舗装に関する調査報告」 ～舗装再生技術の普及の変遷をたどる～

アスファルト舗装技術研究グループは、所属機関の理解と支援を受けて志の高い若手技術者が集い、アスファルト舗装に関する勉強会を重ねてきております。

研究グループでは、海外文献の輪読が活動の大きな柱になっており、今年度もISAP2014で発表された数多くの論文を題材に読み込みました。そのなかでアスファルト材料への機器分析の適用性に関する論文を抽出選定し、「アスファルト素材の可視化に関する最近の試験方法」に関する研究報告としてまとめました。この報告については、本誌今号の特集がアスファルトの

評価・試験方法であることから、特集報文の一つとしてP37～48に掲載されております。

若手技術者が抱く素朴な疑問に関する調査結果としては、今回は舗装の再生技術とその変遷について報告します。これは、舗装分野において重要な要素となっている再生利用技術について、さまざまな切り口から資料調査し、その結果をもとに研究グループ内で議論した成果を整理したものです。

(研究グループ代表幹事：佐々木 巖)

アスファルト舗装技術研究グループ名簿

佐々木 巖 (国研) 土木研究所材料資源研究グループ

上地俊孝* 大林道路(株)技術研究所
平川一成* 大成ロテック(株)技術研究所
安藤 誠 日本道路(株)技術研究所
岩塚浩二 (株)パスコ インフラマネジメント部
神下竜三 鹿島道路(株)技術研究所
川上 聖 日本道路(株)技術研究所
菅航太郎 鹿島道路(株)技術研究所
小柴朋広 世紀東急工業(株)技術研究所
小林真依 東亜道路工業(株)技術研究所
櫻井博章 日進化成(株)技術部技術研究所
庄嶋芳卓 西日本地研(株)営業設計課
辻本陽子 (国研) 土木研究所材料資源研究グループ
永塚竜也 ニチレキ(株)道路エンジニアリング部

仲野尚弘 日進化成(株)技術部技術研究所
朴 希真 日本道路(株)技術研究所
藤田浩成 世紀東急工業(株)技術研究所
細木 渉 ニチレキ(株)技術研究所
前田昇吾 大林道路(株)技術研究所
松本健太郎 前田道路(株)技術研究所
村井宏美 世紀東急工業(株)技術研究所
山崎亮輔 日本道路(株)技術研究所
渡邊真一 (株)NIPPO 技術研究所
市岡孝夫** 前田道路(株)工務部
加納孝志** 大成ロテック(株)技術研究所
鎌田 修** 鹿島道路(株)技術研究所

*) 班長, **) アドバイザ (2015年10月現在)

若手技術者によるアスファルト舗装に関する調査報告 ～舗装再生技術の普及の変遷をたどる～

辻 本 陽 子 安 藤 誠 上 地 俊 孝 神 下 竜 三
川 上 聖 小 林 真 依 櫻 井 博 章 庄 嶋 芳 卓
仲 野 尚 弘 朴 希 真 細 木 涉 前 田 昇 吾
松 本 健太郎 村 井 宏 美 山 崎 亮 輔 渡 邊 真 一

はじめに

本稿では、若手技術者が普段感じている素朴な疑問について調査し、豆知識を織り交ぜながら解説していきます。今回は、例年の質問コーナーと趣旨を変えて、舗装の再生技術について下記の観点から調査したので、

報告致します。

- ①再生技術の基準書の変遷
- ②アスファルトコンクリート発生材の再資源化量の推移
- ③路上再生工法について
- ④他産業再生資材としてのスラグの利用

再生技術の基準書の変遷

1. 背景

現在、我が国の舗装発生材の再資源化は、ほぼ100%と非常に高い水準を維持しており、資源採取量の抑制や、廃棄物の削減に寄与しています。

我が国の再生技術に関する関連法規や基準書等の変遷を年表として表-1に示します。舗装発生材は産業廃棄物にあたります。そのため、1970年に制定された「廃棄物の処理および清掃に関する法律」(廃掃法)に従い、適正に処理しなければなりません。その後、1973年の第1次オイルショック、1978年の第2次オイルショックにより、舗装発生材の再生利用の気運が高まりました。また、全国で舗装の維持修繕工事が増えたことで、舗装発生材のプラントスペースや、処分地の確保等の問題が生じたことも、再生利用への気運がさらに高まった要因であると言えます。

このような背景から、1970年代から舗装発生材の再生利用に関する研究・技術開発が行われ、その成果をとりまとめたものとして、1984年に「舗装廃材再生利用技術指針(案)」(以下、舗装廃材再生指針)が発刊されました。

表-1 再生技術関連法規や基準書の変遷

西暦	関連法規等	基準書等
1970	廃棄物の処理および清掃に関する法律(廃掃法)	
1973	第1次オイルショック	
1978	第2次オイルショック	
1984		舗装廃材再生利用技術指針(案)
1987		路上再生路盤工法技術指針(案)
1988		路上表層再生工法技術指針(案)
1991	再生資源の利用の促進に関する法律(リサイクル法)	
1992		・アスファルト舗装要綱(改訂) ・プラント再生舗装技術指針 ・アスファルト舗装工事共通仕様書解説
1994	建設副産物対策行動計画「リサイクルプラン21」	
1996		排水性舗装技術指針(案)
2000	建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律(建設リサイクル法) 循環型社会形成推進基本法	
2001	資源の有効な利用の促進に関する法律	舗装の構造に関する技術基準
2002	建設リサイクル推進計画2002	
2004		舗装再生便覧
2010	廃棄物の処理および清掃に関する法律(改訂)	舗装再生便覧(改訂)

その後、舗装廃材再生指針の内容を発展させたものとして、1987年に「路上再生路盤工法技術指針（案）」、1988年に「路上表層再生工法技術指針（案）」、1992年に「プラント再生舗装技術指針」がそれぞれ発刊されました。加えて、2001年の「舗装の構造に関する技術基準」の通達等を背景として、技術図書類の体系化が進められたことを受けて、上記3技術指針が見直されました。そして、2004年に新たなマニュアルとして「舗装再生便覧」が発刊され、2010年には改訂版が発刊されました。

以下に、舗装発生材の再生技術に関する、これまでの整備と変遷について、各図書の概要、規格等を中心に報告します。

2. 舗装廃材再生利用技術指針（案）（1984年／S59）

2.1 発刊の経緯

舗装廃材再生指針は、1970年代から始まった舗装発生材の再生利用に関する研究・技術開発の成果として、日本道路協会舗装委員会の舗装廃材再生利用分科会によってまとめられた「現況報告書」に基づき作成されました。

2.2 構成

舗装廃材再生指針は、舗装発生材の舗装への再生利用方法を、①路盤に関わるもの、②表層・基層に関わるものとして分類しており、適用と設計、再生材の材料、配合設計方法、混合所の設備、再生材の製造方法、施工方法および品質管理・検査方法について記述されています。また、舗装廃材再生指針は、以下の方針でとりまとめられています。

- 再生材の品質は、アスファルト舗装要綱、セメントコンクリート舗装要綱および簡易舗装要綱に適合することを原則とする。
- 再生材を用いた場合の等値換算係数は、新規材料のみを用いた場合と同等に扱う。
- 再生材の適用にあたっては、原則として新規材料のみを用いた場合と同等に扱うものとするが、重交通道路の表層への適用は、長期的挙動が十分に解明されていないことから、当面は避ける。

2.3 舗装再生便覧の基準値との違い

現行の「舗装再生便覧」（2010年改訂版。以下、再生便覧（H22））との基準値の違いについて示します。

（1）アスファルトコンクリート再生骨材の品質

表－2に再生骨材の品質を示します。再生便覧（H22）の場合、再生加熱アスファルト混合物（以下、再

生アスコン）の配合設計は、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調整を行う方法と、再生アスコンの圧裂係数が設計圧裂係数に適合するように調整する方法があります。舗装廃材再生指針では、針入度のみが規定されています。

表－2 再生アスコンに用いるアスファルト
コンクリート再生骨材の品質^{1, 2, 3)}

項目	舗装廃材 再生利用 技術指針(案)	舗装再生 便覧
旧アスファルト含有量%	3.8以上	3.8以上
旧アスファルトの 性状	針入度(25℃) 1/10mm	20以上
	圧裂係数 MPa/mm	1.70以下
洗い試験で失われる量%	5以下	5以下

（2）再生用添加剤の品質

表－3に再生用添加剤の品質を示します。舗装廃材再生指針では、引火点が230℃以上となっていますが、再生便覧（H22）では250℃以上となっています。これは、消防法や再生アスコン製造時における作業の安全性を考慮したためです。

表－3 再生用添加剤の品質^{2, 3)}

項目	舗装廃材 再生利用 技術指針(案)	舗装再生便覧
動粘度(60℃) cSt	80～1,000	80～1,000
引火点℃	230以上	250以上
薄膜加熱後の粘度比(60℃)	2以下	2以下
薄膜加熱質量変化率%	±3以下	±3以下
比重	報告	報告
組成分析	報告	報告

3. 路上再生路盤工法技術指針（案）（1987年／S62）

3.1 発刊の経緯³⁾

舗装発生材の再生利用方法は、混合所において再生材を製造する方法と、破損の進んだ既設舗装を路上において再生する方法があり、後者のうち、路盤に関する工法の標準化を目標に1980年頃から検討が進められました。

1985年の日本道路会議において「舗装の路上再生利用による維持修繕工法」が指定議題となり、新設路盤と同等の性能を持つことが認められた路上再生路盤工法は、標準化の気運がますます高まりました。日

本道路協会でも施工実態を全国的に調査のうえ「現状報告書」を取りまとめました。これに基づいて技術指針の原案を作成して、関係機関の意見を聴取する一方、官民の専門家による討議が行われ、1987年に「路上再生路盤工法技術指針（案）」として取りまとめられました。

3.2 構成⁴⁾

路上再生路盤工法は破損の進んだ既設アスファルト混合物を路上で破碎し、セメントやアスファルト乳剤等の安定材と既設粒状路盤材料を混合し、締固めて安定処理した路盤をつくるものです。本工法は、以下のような基本的な考え方に基づいています。

- 対象はセメント安定処理およびセメント・瀝青安定処理とする。
- 「アスファルト舗装要綱」で上層路盤として扱うことを原則とする。
- 簡易舗装および交通区分L、A、B（旧名称。現N₃～N₅）の道路に適用する。

4. 路上表層再生工法技術指針（案）（1988年／S63）

4.1 発刊の経緯

「路上表層再生工法技術指針（案）」は、路上表層再生工法の技術の標準化を図るべく、1983年に検討を開始し、1988年にとりまとめられたものです。

4.2 構成⁵⁾

「路上表層再生工法技術指針（案）」は、アスファルト舗装要綱に準じた評価の中で、技術手法を確立し運用を図っていくこととし、以下の方針に基づいてとりまとめられています。

- 路上表層再生工法には、①既設表層の路面性状の回復および既設表層混合物の品質を改善する方式、②路面性状の回復のみを目的とする方式の2つがあり、ここでは前者を主体にとりまとめている。
- 路上表層再生工法で、品質改善された表層混合物は、アスファルト舗装要綱、廃材再生指針に規定するアスファルト混合物の品質に適合するものとする。
- 本工法は、わだち掘れ、縦断方向の凹凸、ひび割れ等の破損が、基層以下にまで及んでいる場合には適用しない。
- 本工法の詳細については、後の「路上再生工法について」をご参照ください。

5. プラント再生舗装技術指針（1992年／H4）

5.1 発刊の経緯

プラント再生舗装技術指針（以下、プラント再生指針）は1984年に発刊された舗装廃材再生指針の内容を全面的に見直し、充実を図って改訂したものです。指針の名称が“舗装廃材”から“プラント再生”に変わったのは、海外で“プラントリサイクリング”という用語が一般化してきたことが背景にあります。また、指針の記述で廃棄物を連想させる“廃材”という用語は“発生材”という用語に改められています。

5.2 構成

プラント再生指針の構成は、舗装廃材再生指針と同様の章立てとなっています。特に、舗装発生材を再生して道路舗装に利用する工法のうち、定置式のプラントを使用して基層・表層用アスファルト混合物あるいは路盤材として再生利用を図るプラント再生舗装工法に関する技術的な標準を示しています。そのため、この指針を参照するだけでも、プラント再生舗装に関する技術がわかるようになっていきます。また、付録には、再生アスコンの配合設計例や再生骨材のみでマーシャル安定度試験を行うことで、旧アスファルトの性状を判定する方法についても記載されています。

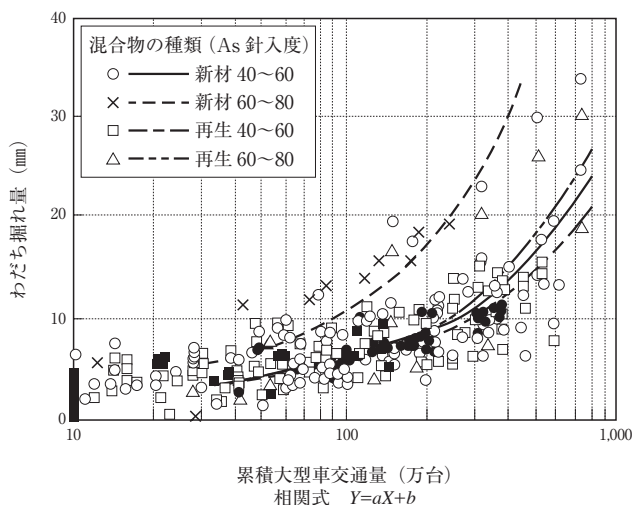
5.3 プラント再生指針の特徴^{6,7)}

プラント再生指針の特徴を以下に示します。

(1) 再生利用の促進

舗装廃材再生指針では、再生アスコンを重交通道路の表層に適用した舗装の評価に対して、十分な経験がなかったため、適用が制限されていました。建設省技術研究会にて、1982年から1984年まで「舗装廃材の再生利用に関する調査研究」を行った段階でも、「再生材による舗装が新材によるものと同等に評価できる」⁸⁾としながらも、重交通道路への再生材の適用を避けるよう明示していました。その後6～7年経過後の追跡調査を行い、試験舗装に対する供用の評価を行ったところ、以下の結果が得られました。

- 再生材工区と新材工区とで、わだち掘れ量の推移に明確な差がない（図－1）。
- 再生材工区で累積大型車交通量が500万台に達した時点で、ひび割れ率10%を越えたり、施工後3年以内に修繕した工区では、指針の基準外のものを使用していたことが認められた。
- 累積大型車交通量が500万台に達した時点でひび割れ率について、プラントタイプ別に比較したところ、ひび割れ率に差は見られなかった。



	$a \times 10^4$	b	相関係数
新材 40~60	0.02712	2.869	0.783
新材 60~80	0.06670	3.958	0.854
再生 40~60	0.02207	3.509	0.772
再生 60~80	0.02950	3.115	0.835

図－１ 表層混合物種別々わだち掘れ量(密粒)⁶⁾より抜粋

これらの結果を受けて、プラント再生指針で示す品質規定を満足する再生アスコンであれば、D交通の表層にも適用できるようになりました。

(2) 配合設計に関する記述の充実

再生アスコンの配合設計について、粒度や設計針入度に変更はありません。ただし、設計針入度の調整方法について、再生用添加剤を使用する場合と新アスファルトで調整する場合で区別しています。また、再生材配合率が10%以下のアスファルト混合物の配合設計は、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りました。

(3) 再生混合所に関する記述の見直し

プラント再生指針では、再生混合所における環境保全対策として、粉塵対策や騒音、振動対策について明記されています。集塵機や適切な外壁の設置を促されていますが、特に具体的な基準は設けられていません。

上述の改訂以外にも路盤材料の修正CBRの割増し規定の見直し、再生材の製造に関する記述の見直し、施工計画書に関する追記、管理・検査の省力化についても改訂がなされています。

6. 舗装再生便覧

(2004年／H16, 2010年／H22)

6.1 発刊の経緯⁹⁾

舗装廃材再生指針の発刊は、我が国の舗装発生材の高いリサイクル率の達成に貢献してきました。一方で、近年の舗装に関する新技術の普及、環境に対する社会の取り組みを背景として、舗装再生に関する新たな課題が生じてきました。2001年の「舗装の構造に関する技術基準・同解説」の通達を背景に、「舗装設計施工指針」が発刊され、この流れを受けて、新たな舗装再生の課題に対応するため、新たな技術参考書として「舗装再生便覧」が発刊されました。

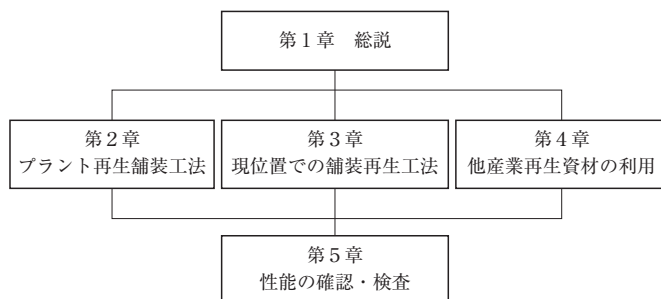
6.2 構成

舗装再生便覧は、「舗装設計施工指針」に記述された計画、設計、および施工の技術のうち、舗装の再生利用に関する事項をとりまとめており、プラント再生、路上表層再生、路上路盤再生等の各工法の材料・配合設計・施工機械・施工方法等の具体的な内容を網羅しています。

図－2に再生便覧(H22)の構成を示します。第3章において、路上路盤再生工法および路上表層再生工法を現位置での舗装再生工法として記述しています。さらに第5章の性能の確認・検査では、第2章から第4章で示した舗装技術における性能の確認と検査に関する留意点を示しています。

6.3 改訂内容

再生便覧(H16)の刊行後、環境にやさしいリサイクルや、他産業からの再生資材の利用が検討されてきました。また、1998年頃から再生アスコンの出荷割合が50%を超え、これらの再生アスコンが更新の時期を迎



図－2 再生便覧(H22)の構成¹⁰⁾

えることとなり、複数回再生され、旧アスファルトの劣化したアスファルトコンクリート発生材の増加が懸念されました。さらに、改質アスファルトを使用したアスファルト舗装発生材の増加もあり、旧アスファルトの針入度は年々低下する傾向にありました。このような状況に対応すべく、2010年に舗装再生便覧が改訂されました。主な改訂内容は以下に示すとおりです。

- ①改質アスファルト由来の再生骨材の利用を想定し、再生アスコンの配合設計法として、従前の針入度を調整する方法に加え、圧裂係数を調整する配合設計方法も可能とした。
- ②アスファルトコンクリート再生骨材および再生アスコンの圧裂係数を求めるための試験方法を示した。
- ③他産業再生資材の利用に関する記述の強化として、適応箇所の明記や採用手順および舗装における利用状況の記載、さらに、品質は製造者が責任を負うことが基本である旨を明記した。
- ④路上で舗装を再生する工法を「現位置での再生工法」として整理し、施工実績を考慮して「路上路盤再生工法」と「その他の工法」を区分した。
- ⑤旧便覧の巻末資料に示されていた各材料の品質規格などを、再生工法の場合を中心に本文に取りまとめて記述した。

6.4 圧裂係数導入の背景と根拠

アスファルト混合物の疲労破壊は、アスファルトの劣化により接着力が低下

し、引張抵抗力が減少することに起因するものと仮定した時、間接的に引張力が作用する圧裂試験を、針入度に代わる新たなアスファルト混合物の劣化度を評価できる方法として使用しました。検討結果から、再生骨材配合率の調整や、再生用添加剤または新アスファルトによる針入度の回復により、アスファルト混合物の圧裂係数が1.5MPa/mm以下であれば、引張抵抗力が回復して、必要な疲労破壊抵抗性を満足できることが見出されました。また、設計圧裂係数の最適な範囲は、再生アスファルトの針入度によって定められると考えられ、図-3に示す再生アスファルトの針入度に対応する圧裂係数の関係が明らかになりました。

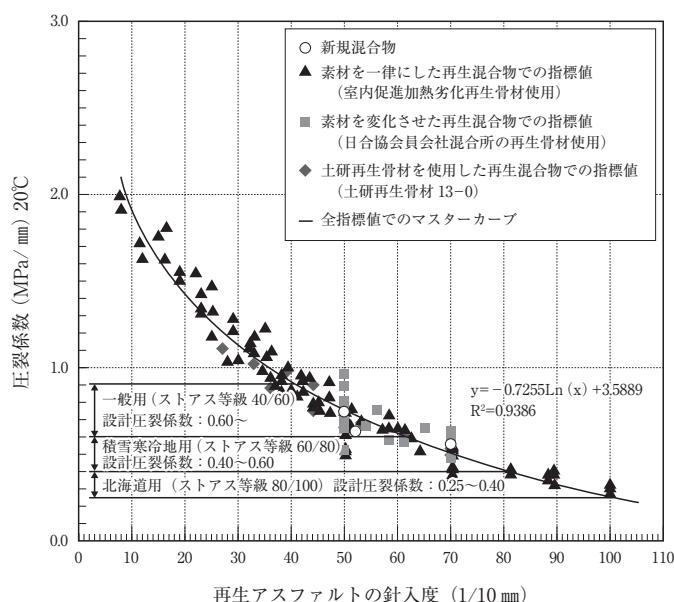


図-3 再生アスファルトの針入度に対応する圧裂係数¹¹⁾

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：舗装廃材再生利用技術指針（案），p10，1984.
- 2) (社)日本道路協会：舗装廃材再生利用技術指針（案），p11，1984.
- 3) 河野宏：舗装廃材の再生利用の現状について，土木学会論文集第390号/V-8，1988.
- 4) (社)日本道路協会：路上再生路盤工法技術指針（案），1987.
- 5) (社)日本道路協会：路上表層再生工法技術指針（案），p1-2，1988.
- 6) 久保和幸：プラント再生技術指針について，舗装，28（4），p.3-18，1993.
- 7) 舗装に関する地区講習会，社団法人 日本道路協会，1992.
- 8) 舗装廃材の再生利用に関する調査研究，建設省技術研究会，1984.
- 9) (社)日本道路協会：舗装再生便覧，2004.
- 10) (社)日本道路協会：舗装再生便覧，p.3，2010.
- 11) (独) 土木研究所，(社)日本アスファルト合材協会：アスファルト舗装の再生利用に関する共同研究，共同研究報告書第408号，p44-45，2009.

アスファルトコンクリート発生材の再資源化量の推移

1. 背景

現在、アスファルトコンクリート発生材を再生利用する技術には主に2種類あります。一つは既設舗装をその場で再生利用して新たな舗装を築造する、現位置での舗装再生工法と、もう一つはアスファルトコンクリート発生材をアスファルトプラント等の中間処理施設に持ち込んで、再生路盤材や再生アスコンとして再生させるプラント再生舗装工法です¹⁾。現状においては、後者の工法で再生利用されることが大半となっています。本章では、再生アスコンの製造数量の推移に着目し、プラント再生舗装工法でのアスファルトコンクリート発生材の再生利用について報告します。

2. 再生アスコン製造数量の推移

図-1は1973年以降の新規アスコン、再生アスコンの製造量をまとめたものです。再生アスコンに着目すると、まず、第1次オイルショックを契機に資源の再生利用の気運が高まったため、1970年代中頃からアスファルトコンクリート発生材の再生利用化のための研究が始まりました。1970年代終盤には、再生アスファルトプラントの実用化がはじまり、1980年以降、再生アスコンは徐々に製造量を伸ばしています。さらに、1992年の「プラント再生舗装技術指針」により、再生アスコンが重交通路線の表層への適用が認められ、製造量の急激な増加につながりました。現在では、全製造量のうち再生アスコンの占める割合が70%を超えてい

ます。再生アスコン製造量の増加に伴い、再生アスファルトプラント数も増加し、1997年以降、1,000基以上のプラント数を維持しています(図-2)。

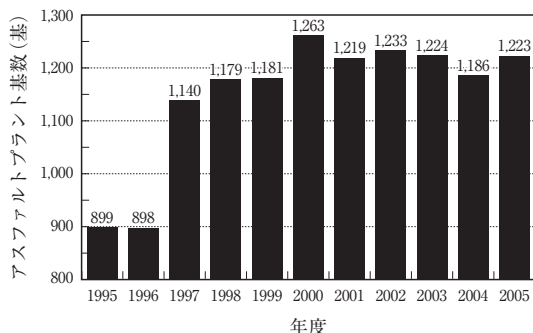


図-2 全国の再生アスファルトプラント基数

3. アスファルトコンクリート発生材の再資源化の現状

1990年頃から環境保全・保護の動きが活発となり、アスファルトコンクリート発生材等の建設廃棄物についても、再生利用・再資源化に向けた取り組みとして、多くの法律や指標が定められてきました(表-1)。

このような時勢の中で、国土交通省は1995年度から3～5年周期で、全国の建設工事から発生する建設副産物の再利用状況等に関する調査として「建設副産物実態調査」²⁾を行っています。建設副産物実態調査の中から、アスファルトコンクリート発生材の再資源化率に関する箇所を抜粋したものを表-2に示します。

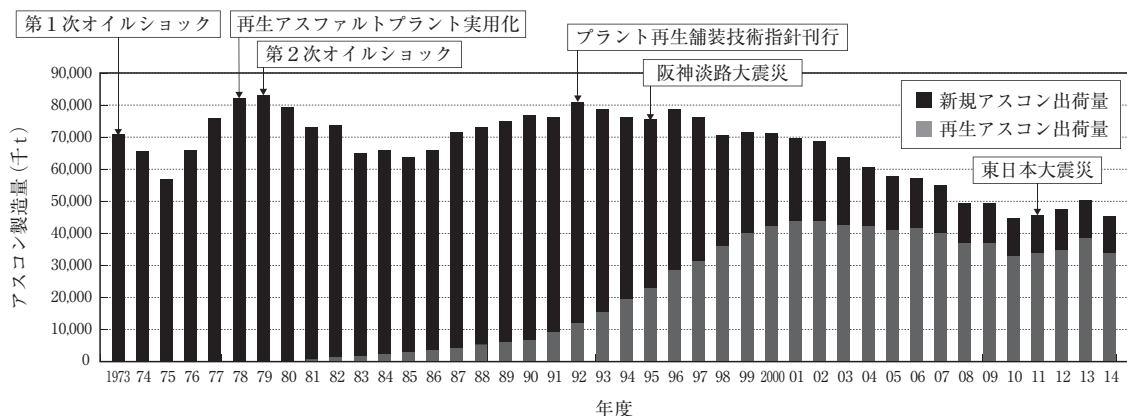


図-1 アスコン製造量推移(全国)

出典：(社)日本アスファルト材協会「アスファルト材製造数量推移(全国)」「アスファルト材統計年報」などをもとに作成

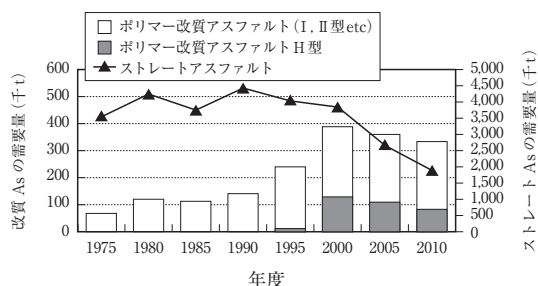
表－１ アスファルトコンクリート発生材の
再資源化に関する主な法律

1991年	資源の有効な再利用の促進に関する法律（リサイクル法）
2000年	建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律（建設リサイクル法）
2002年	建設リサイクル推進計画2002

表－２において、アスファルトコンクリート発生材排出量とは、現場からの発生材の排出量を表し、再資源化率は排出された発生材のうち、再資源化された割合を表しています。排出量は年々減少傾向にありましたが、2008年から2012年にかけて、急激な増加が見られました。地域別の排出量の比較から、特に東北地方と関東地方の排出量が際立って増加しており、東日本大震災の影響によるものと考えられます。アスファルトコンクリート発生材の再資源化率は、2000年以降で高水準を保っており、国土交通省が策定した「建設リサイクル推進計画2008」におけるアスファルトコンクリート塊の再資源化率の目標値98%以上を満たしています。また、アスファルトコンクリート発生材は、主に再生アスコンか再生路盤材に再資源化されており、2005年以降について、それぞれの数量を表－２に記載しています。近年でも約20～40%が再生路盤材に再資源化されています。再資源化では品質の水準を維持する方が望ましいため、アスファルトコンクリート発生材についても再生アスコンへの再資源化率の更なる向上が求められます。

4. 改質アスファルトを使用したアスファルトコンクリート発生材の再資源化

図－３に、ストレートアスファルトおよびポリマー改質アスファルトの需要量の推移を示します。今後、改



図－３ 各アスファルトの需要量の推移

質アスファルトの混入率の更なる増加が見込まれており、この再資源化に向けて、様々な検討や試験施工が進められています。ポリマー改質アスファルトH型を使用したポーラスアスファルト混合物が製造・施工されるようになってから、アスファルト舗装の設計期間である20年が経過するため、改質アスファルト混合物の再資源化について、更なる技術確立が必要となると考えられます。

5. まとめ

今回、再生アスコンの出荷量や、アスファルトコンクリート発生材の再資源化率の統計量から、年を追うごとに再資源化の技術や需要が高まってきていることがわかりました。我々の使える資源は有限であり、今後はさらに改質アスファルトを含む発生材やポーラスアスファルト混合物の再資源化や繰り返し再生した発生材の再生利用などが課題となります。

—— 参考文献 ——

- 1) 猿渡守：アスファルト舗装の再生技術，建設の施工企画，4月号，pp.31～35，2009.
- 2) 国土交通省：建設副産物実態調査結果，1995～2012.

表－２ アスファルトコンクリート発生材の排出量と再資源化率

	アスファルトコンクリート発生材排出量											アスファルトコンクリート発生材再資源化量	アスファルトコンクリート発生材再資源化率	再生アスコンへの再資源化量	再生路盤材への再資源化量
	北海道	東北	関東	北陸	中部	近畿	中国	四国	九州	沖縄	全国				
	千t											千t	%	千t	千t
1995	1,960	2,710	12,450	1,840	3,910	6,460	1,750	1,220	3,070	290	35,650	28,820	80.8	—	—
2000	1,954	3,105	8,570	1,551	3,337	5,656	1,788	764	3,098	258	30,081	29,628	98.5	—	—
2002	1,906	4,056	7,475	1,568	3,989	4,643	1,606	1,136	3,161	207	29,747	29,372	98.7	—	—
2005	1,459	2,364	7,787	1,793	3,751	3,428	1,644	841	2,798	200	26,065	25,692	98.6	15,100	10,600
2008	1,257	1,763	5,181	1,484	3,263	2,991	1,141	518	2,153	169	19,920	19,600	98.4	15,550	4,050
2012	1,334	4,498	7,565	1,263	3,343	3,020	1,395	628	2,557	167	25,770	25,640	99.5	16,030	9,570

出典：国土交通省「建設副産物実態調査結果」などをもとに作成

路上再生工法について

1. 路上再生工法について

路上再生工法は、路上において既設舗装材料を再生利用し、新たな舗装を構築する方法であり、表層を再構築する路上表層再生工法と路盤を再構築する路上路盤再生工法に分類されます。

2. 路上表層再生工法について

路上表層再生工法は、既設アスファルト混合物を現位置で再生でき、経済的かつ合理的に舗装の維持修繕を行うことができることから、この工法を活かした研究開発が進められ、1981年頃から本格的な工事が行われるようになりました。図-1に示すとおり、施工実績は1989年度に約220万㎡にも及びましたが、1996年度には約50万㎡、2002年度には10万㎡を下回り、2011年度以降は施工実績がほとんどありません。

近年の施工量が減少している理由として、気温や風速などの気象条件、路面形状や使用する施工機械の能力も現場に応じた施工技術が必要であること、施工には特殊な大型機械を用い、100m程度の機械構成延長が必要となるなど、施工規模が小さい場合にはコストが非常に割高となることが挙げられます。舗装発生材の再生利用の気運が高まった当時は優れた技術であったと考えられますが、再生技術が進化し、アスファルトコンクリート発生材の再生利用率が高まるにつれて衰退してしまったように感じられます。その一方で、近年、簡易な施工機械構成で行う路上表層再生工法が道路会社各社で提案されており、維持工法や環境負荷低減工法として採用されてきています。作業工程と機械編成の例を図-2に示します。

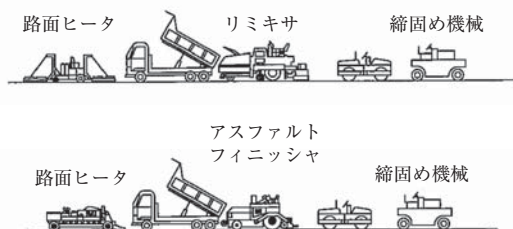


図-2 作業工程と機械編成の例²⁾

(上段：リミックス方式を簡易にした工法)
(下段：リペーブ方式を簡易にした工法)

リミックス方式とは加熱し、かきほぐした既設表層混合物に必要なに応じて再生用添加剤を加えたものと、新たなアスファルト混合物を混合して敷きならして締固める工法です。一方、リペーブ方式は加熱・かきほぐした既設表層混合物に必要なに応じて再生用添加剤を加えて混合したものを敷きならし、その上に新たなアスファルト混合物を敷きならして同時に締固める工法です。

3. 路上路盤再生工法について

路上路盤再生工法は、路盤の支持力回復や舗装構造設計における等値換算係数の増加を目的として、路上において破碎した既設アスファルト混合物層をセメントや瀝青材料などの安定材とともに混合、転圧して、新たに安定処理路盤を構築する工法です。現位置で既設舗装を破碎・混合するため、舗装発生材を再生利用でき、CO₂排出量の抑制効果もあります。打換え工法と比較すると、運搬コストが削減でき、施工速度も速く、工期短縮が図れます。路床の支持力不足による舗装破壊でなければ、舗装の構造強化を目的とした修繕に適した工法であるといえます。路上路盤再生工法は、次の二種類に大別できます。

- ①路上再生セメント・瀝青安定処理工法（等値換算係数0.65）
- ②路上再生セメント安定処理工法（等値換算係数0.55）

さらに、路上再生セメント・瀝青安定処理工法は、「路上再生セメント・アスファルト乳剤安定処理工法（CAE

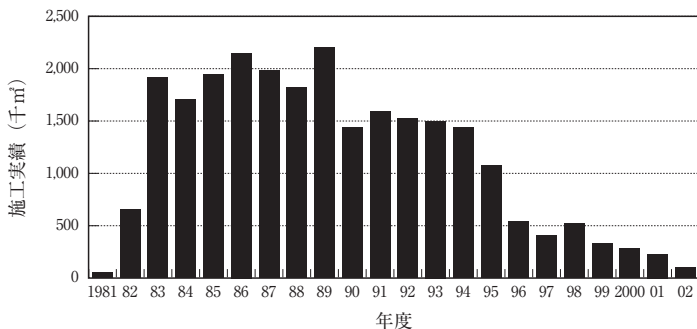


図-1 路上表層再生工法の施工実績¹⁾ (SR工法振興会)

(Cement Asphalt Emulsion) 工法)」と「路上再生セメント・フォームドアスファルト安定処理工法 (CFA (Cement Foamed Asphalt) 工法)」に大別できます。CAE工法は、安定材としてセメントとアスファルト乳剤を使用し、CFA工法はセメントと泡状のアスファルト (フォームドアスファルト) を安定材として使用します。

このフォームドアスファルトとは、制御装置内で加熱アスファルトに微量の水または水蒸気を添加することによって発生させた泡状のアスファルトであり、この発泡アスファルトの体積は元のアスファルトの10～20倍にまで瞬間的に膨張します。この状態でのアスファルトの粘性は大幅に減少するため、常温で湿潤状態の骨材との混合が可能となります。

路上路盤再生工法は、1979年頃から本格的な工事が行われ、その後の施工実績は上昇、1985年度には約340万㎡に達しました。平成に入ってから、1998年度まで毎年200万㎡以上の実績があります。路上路盤再生工法の施工実績を図-3に示します。現在も施工実績があり、農道の維持修繕工事などに採用されているようです。また、CFA工法の施工実績を図-4に示します。CFA工法の施工実績は、2000年度の約78万㎡をピークに下降気味ではあるが、現在も約15万㎡の施工量があり、まだまだ実績を伸ばしています。

4. 震災復旧で適用されたCAE工法について

東日本大震災後の復旧・復興にあたり、CAE工法が注目され適用されています。期待できる効果として、凍上被害が軽減されることや交通振動が軽減されること、地震時の破損・液状化被害が軽減されることなどがあります。

路上再生CAE工法の施工事例として、2012年10月に宮城県石巻市で、震災で発生したコンクリート発生材を再生利用して約6000㎡施工された報告があります⁵⁾。

また、中央混合方式 (プラント混合方式) を採用したCAE工法も適用されており、施工事例として、2011年10月に宮城県気仙沼市で、主骨材にスラグを使用して約1000㎡施工されています⁶⁾。この工事では仮設道路としての施工であり、CAE路盤を最上部層で供用することから、高い支持力および骨材飛散抵抗性、防塵性を有する工法として適用されました。CAE混合物は、専用の移動式混合機を用いて製造され、ダンプトラックで運搬し、アスファルトフィニッシャーで敷ならし、マカダムローラ・タイヤローラで転圧されました。施工後約2ヶ月後の現場調査では良好な状態であり、工

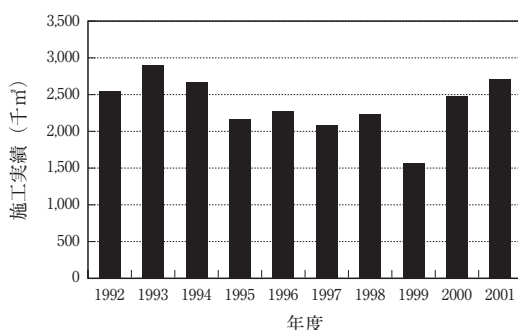


図-3 路上路盤再生工法の施工実績³⁾
(日本道路建設業協会)

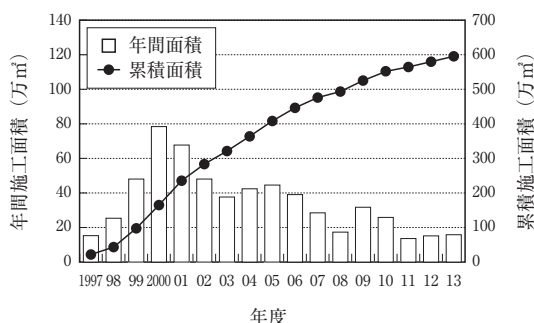


図-4 CFA工法の施工実績⁴⁾

事用車両の走行に支障は見られていないと報告されています。中央混合方式では任意の骨材が選定できるため、他産業再生資材の使用が可能であり、リサイクル性に優れているため、今後の復旧・復興工事において、災害による廃棄物の有効利用として役立つ工法でもあると期待されています。

— 参考文献 —

- 1) 「舗装再生便覧」の刊行について、日本道路協会舗装委員会環境・再生利用小委員会
- 2) 舗装再生便覧 (平成22年版)、社団法人日本道路協会、p.112
- 3) 「舗装再生便覧」の刊行について、日本道路協会舗装委員会環境・再生利用小委員会
- 4) CFA工法施工実績 (平成25年度版)、CFA工法技術研究会
- 5) 寺田剛；震災被害軽減に資する舗装 (CAE工法) 発表資料、土研 新技術ショーケース2014in 東京、2014
- 6) 谷口博、鈴木清美、齋藤啓大；中央混合方式CAE混合物の災害復興工事用仮設道路への適用、第12回北陸道路舗装会議、2013

他産業再生資材としてのスラグの利用

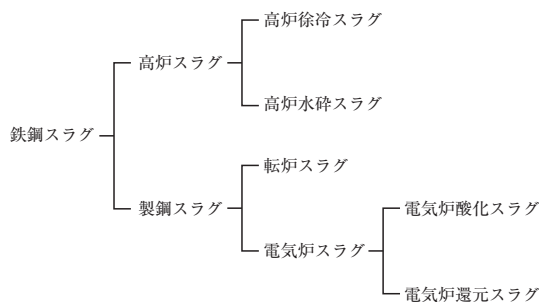
1. スラグの種類

スラグとは、鉱石から金属を還元・製錬する際などに、特定の成分が融解・分離してできたものです。スラグは本来金属製造工程にて発生するものですが、ごみなどを焼却施設で処分したときに発生する廃棄物加熱溶融起源のものもスラグ（例えば、一般廃棄物焼却灰溶融スラグ）とよばれています。スラグには、鉄鋼業や非鉄精錬業の副産物である鉄鋼スラグ、非鉄スラグ、一般廃棄物等を減容化するために溶融固化した溶融スラグ、さらにはその冷却手法によって様々な種類のスラグがあります。

その中でも鉄鋼スラグは、製造方法などにより様々な種類（図－1¹⁾ および表－1²⁾）があり、その各々が道路用材料として多量に有効利用されています。本章では鉄鋼スラグの道路用材料として利用された経緯および利用量などについて説明します。

2. 鉄鋼スラグの道路用材料としての経緯

今回、調べた中で最も古く「スラグ」が国内で舗装用の材料と用いられたのは、1925年に八幡製鉄所（福岡



図－1¹⁾ 鉄鋼スラグの種類

表－1²⁾ 鉄鋼スラグの概説

高炉スラグ	溶鉱炉（高炉）で銑鉄を製造する際に、副産物として生成するスラグ
徐冷スラグ	溶融スラグを空冷あるいは散水により徐冷処理し、主として結晶質で塊状のもの
水砕スラグ	溶融スラグを加圧水などで急激に冷却処理し、ガラス質の砂状のもの
製鋼スラグ	銑鉄やスクラップから成分を調整し、「鋼」製造の際に同時に生成するスラグ
転炉スラグ	転炉で「鋼」を製造する際に生成するスラグ
電気炉スラグ	電気炉で「鋼」を製造する際に生成するスラグ

県）³⁾ 内でした。また、高炉スラグが水と反応して固まる特性を利用した高炉スラグ路盤材は、耐久性に優れていたため、製鉄所周辺の道路に使用され、1973年には高炉スラグの約50%にあたる1,400万tが使用されました。しかし、当時は生産直後の高炉徐冷スラグを路盤材に使用したため、硫黄に起因した温泉臭が発生するなど環境上の支障をきたす黄水トラブルが発生し、1975年には900万t程度に使用量が減少しました。そこで、高炉徐冷スラグ中の硫黄を事前酸化させるエージング技術を確立し、1979年にJIS A 5015が制定されました⁴⁾。表－2⁵⁾加筆にこれまでの道路用鉄鋼スラグの規格化への経緯を示します。

表－2⁵⁾加筆 道路用鉄鋼スラグ規格化への経緯

年	制定・改正
1976	「高炉スラグ碎石路盤設計施工指針」発刊
1976	「路盤用高炉スラグ品質管理要綱」発刊
1978	「アスファルト舗装要綱」に採用
1979	「道路用スラグJIS A 5015」制定
1979 ～ 1981	建設省土木研究所、(助)土木研究所センター、鉄鋼スラグ協会の3者による製鋼スラグの道路用材への利用に関する共同研究を実施
1982	「高炉スラグ碎石路盤設計施工指針」発刊
1982	「製鋼スラグを用いたアスファルト舗装設計施工指針」発刊
1983	「加熱アスファルト混合物用製鋼スラグ品質管理要綱」発刊
1985	「製鋼スラグ路盤設計施工指針」発刊
1985	「路盤用高炉スラグ品質管理要綱」改定
1985	「道路用スラグJIS A 5015」改定
1992	「道路用鉄鋼スラグJIS A 5015」改定
2002	鉄鋼スラグ混入路盤材と鉄鋼スラグ混入アスファルト混合物がグリーン購入法における特定調達品目に指定
2013	「道路用鉄鋼スラグJIS A 5015」改定
2015	「鉄鋼スラグ路盤設計施工指針」発刊

各種基準やJISは、発刊や制定後に改定されています。そこで、主な改定点を以下に紹介します。

○ JIS A 5015 制定（1979）

- ・クラッシュランスラグ（CS-40）、粒度調整スラグ（MS-40、MS-25）および水硬性粒度調整スラグ（HMS-25）を規定
- ・高炉スラグの項目として呈色判定を規定
- ・HMS-25の一軸圧縮強度を規定

- 路盤用高炉スラグ品質管理要綱改定（1985）
 - ・エージング工程や呈色判定に係わる製品検査、また貯蔵・出荷工程の記述を充実
- JIS A 5015改定（1985）
 - ・クラッシュランスラグにCS-30が追加、粒度調整スラグにMS-40が削除
- JIS A 5015改定（1992）
 - ・スラグ路盤材に高炉スラグと製鋼スラグを単独または混合しての使用が一般化
 - ・名称を道路用鉄鋼スラグに変更
- JIS A 5015改定（2013）
 - ・環境安全品質が追加
- 鉄鋼スラグ路盤設計施工指針（2015）
 - ・「高炉スラグ砕石路盤設計施工指針」と「製鋼スラグ路盤設計施工指針」を統合
 - ・水浸膨張比の基準値を1.5%以下から1.0%以下に変更

3. 鉄鋼スラグの生産量および道路用材料としての利用量の推移

表－3⁶⁾加筆に各スラグの生産量を示します。これらのスラグは、ほぼ100%が有効利用されており、道路用材料としての利用量は、表－4⁶⁾加筆のとおりで道路用材料としての利用率は22.6%です。鉄鋼スラグのアスコン材としての利用は、高炉水砕スラグ約9万t、転炉スラグ約2万tおよび電気炉スラグ約3万tで道路用材料に占める割合の1.6%程度であり、鉄鋼ス

ラグのほとんどが路盤材料として利用されています。なお、鉄鋼スラグは道路用材料以外に、セメント用材料（利用率45%）や土木用材料（同15%）⁶⁾として利用されています。

—— 参考文献 ——

- 1) 鉄鋼スラグ路盤設計施工指針作成委員会：鉄鋼スラグ路盤設計施工指針，p4，2015.
- 2) 鉄鋼スラグ路盤設計施工指針作成委員会：鉄鋼スラグ路盤設計施工指針，pp107-109，2015.
- 3) 八幡製鐵株式会社曾社八幡製鐵所：八幡製鐵所五十年誌，p240，1950
- 4) 佐々木剛：鉄鋼スラグ製品の規格化の動向，新日鉄住金技報 第399号，p195，2014.
- 5) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグの道路用材への利用，p15，2004.
- 6) 鉄鋼スラグ協会ホームページ：
http://slg.jp/statistics/jyukyu/index_nendo.html

----- おわりに

今回は、若手技術者が普段感じている疑問として、舗装の再生技術について取り上げ、基準書の歴史的な変遷や数的な推移の観点から解説しました。十数年のうちに再生アスコンの利用量は急増し、再生工法は様々な発展を遂げています。本稿が舗装再生技術と向き合う若手技術者の一助になれば幸いです。

表－3⁶⁾加筆 鉄鋼スラグ生産量の推移（2006～2011年については生成量）

単位：万t

－	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
高炉徐冷スラグ	435.8	443.4	409.4	412.4	508.5	465.5	459.0	445.9	490.9
高炉水砕スラグ	2041.1	2100.3	1878.4	1755.1	1983.9	1950.5	2004.9	2081.1	2027.2
転炉スラグ	1026.5	1063.1	1019.5	917.4	1073.7	1035.8	1103.6	1162.0	1224.7
電気炉スラグ	360.0	350.7	301.3	233.0	273.7	276.5	272.6	277.7	283.1
合計	3863.4	3957.5	3608.6	3317.9	3839.8	3728.3	3840.1	3966.7	4025.9

表－4⁶⁾加筆 鉄鋼スラグの道路への利用量の推移

単位：万t

－	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
高炉徐冷スラグ	408.7	369.8	357.7	313.3	323.0	379.5	304.3	343.5	403.6
高炉水砕スラグ	15.0	12.4	16.4	12.1	13.8	15.6	17.4	27.3	
転炉スラグ	216.9	198.9	206.8	186.0	286.2	375.1	308.5	417.6	400.3
電気炉スラグ	111.5	109.7	113.4	101.3	97.4	98.5	107.0	100.7	106.2
合計	752.1	690.8	694.3	612.7	720.4	868.7	737.2	889.1	910.1



アスファルト・舗装 研究

日本大学生産工学部土木工学科 地盤工学研究室

1965年に日本大学理工学部から分離・設立された生産工学部において、設立当初から舗装の研究を行っている地盤工学研究室を紹介します。これまでの当研究室の舗装に関する研究は、舗装材料（路床土を含む）の力学・工学的評価やリサイクルに関するものを中心としていますが、最近では、路面下空洞の評価や景観舗装である天然石舗装に関する研究なども行っております。ここでは、当研究室のアスファルト混合物を中心とした研究内容や研究施設などを紹介させていただきます。

1. はじめに

日本大学生産工学部（写真－1）は千葉県習志野市にあり、その中で当研究室は、地盤工学および舗装工学に関する研究を行っております。生産工学部土木工学科設立当初から7年前までは、道路研究室があり、道路工学あるいは舗装工学が専門の教員が在籍しておりました。しかしながら、学科の学生定員削減や教員の定年退職などの理由から、土質工学と道路工学の研究室が合わさった地盤工学研究室になりました。当研究室の教員は3名で、地盤工学および道路工学関係の授業を行っており、舗装を中心とした卒業研究は2名の教員で指導しています。

これまで行ってきた舗装に関する研究は、アスファルト混合物、路盤材料および路床土の工学的性質や力

学特性に関するものなど基礎的な研究がほとんどです。ただし、最近では都市ゴミなどの溶融スラグや非鉄金属スラグをアスファルト混合物や路床土の補強・改良材に適用することで、それらの有効利用を目的とした研究¹⁾、メンテナンス・リサイクルに有利な天然石舗装工法の開発²⁾、舗装の健全性を考慮した路面下空洞の評価手法の開発³⁾など、環境・景観・安全に着目した研究活動も行っています。

2. アスファルト混合物に関する最近の主な研究紹介

当研究室におけるアスファルト混合物に関する研究は、10年ほど前から水を利用したアスファルト混合物の品質評価あるいは再資源化に関する研究を実施しています。具体的には、高温高压水が有機物を溶融・加水分解するという特性、あるいは熱水によりアスファルトを熱溶融させるという考えを利用して、アスファルトを骨材から分離するという研究です。

ここでは、高温高压水あるいは熱水を利用した研究成果について紹介します。

2.1 亜臨界水を用いたアスファルト抽出試験⁴⁾

アスファルト抽出試験は、合材プラントにおけるアスファルト混合物の品質管理や研究レベルでの利用において重要な試験です。代表的な試験法はソックスレー法による抽出試験ですが、有機溶剤に対する規制、改質アスファルトや再生骨材の利用促進に伴い、試験の実施が難しいあるいは試験時間がかかり面倒とい



写真－1 日本大学生産工学部

う状況にあります。

そこで、1リットルの内容積を有する容器（図-1）に500gのアスファルト混合物と360cc程度の水を入れ、350℃まで容器を加熱し、容器内の水を亜臨界状態にすることで骨材からアスファルトを分離する手法を開発しました。アスファルトは亜臨界水中に溶解した後、冷却することで元に戻りますが、元に戻ったアスファルトは再びアスファルトに付着することなく、容器内の水面に膜状と骨材間隙中で粒状の形で元に戻ります。試験後にこのアスファルトを回収することで、アスファルト量や骨材粒度を確認できます（写真-2）。

この試験法は、ストレートアスファルトはもちろんのこと、ソックスレー法では抽出のしづらい改質系のアスファルトや再生骨材中のアスファルトの抽出を容易に行うことができ、設計アスファルト量との差は±0.3%以内と高い精度を確保しています。また、試験時間も3時間程度とこれまでの試験法と比較して短時間で終了できます。

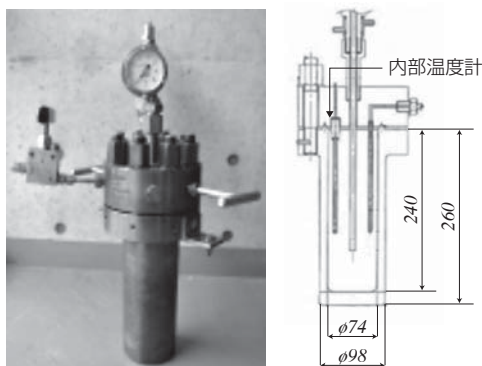


図-1 亜臨界水による抽出試験圧力容器



写真-2 回収された骨材とアスファルト

2.2 高温高圧水を用いたアスファルト混合物の剥離抵抗性評価試験⁵⁾

排水性舗装は、雨天時の走行安全性や騒音低減効果など道路交通において有用性の高い舗装です。しかしながら、表層に用いられるポーラスアスファルト混合物内に滞水する水と繰り返しの交通荷重によって表層・基層間に剥離が生じ、舗装の破損が進行します。このため、基層部分の剥離抵抗性は排水性舗装の維持管理において重要な指標となっています。

このような剥離抵抗性評価は、加圧透水式剥離促進試験によって剥離促進された供試体を用い、圧裂強度によって評価するのが一般的です。しかしながら、このような一連の評価のうち、加圧透水式剥離促進試験は長時間を要し、装置や手順が複雑といった課題があります。

そこで、図-2に示す装置を開発し、密閉容器の中で浸水させたマーシャル試験用供試体（最大3個）を110℃で15分間高温高圧養生することで、剥離促進の実現を可能としました。加圧透水式剥離促進試験（透水式試験）を利用して得られた残留圧裂強度比と本試験法（熱水式試験）を利用して得られたものは高い相関性を有している（図-3）ことから、本試験法は有用性の高い手法といえます。

2.3 熱水および高温高圧水を用いたアスファルト舗装発生材の分別再材料化技術⁶⁾

現在のアスファルト舗装発生材の再材料化技術は、混合物の種類や劣化程度の異なるものを一様に破碎・分級した再生骨材を製造するというものです。しかしながら、機械破碎に伴う再生骨材の団粒化や細粒化を避けることは難しく、再生骨材を利用したアスファルト

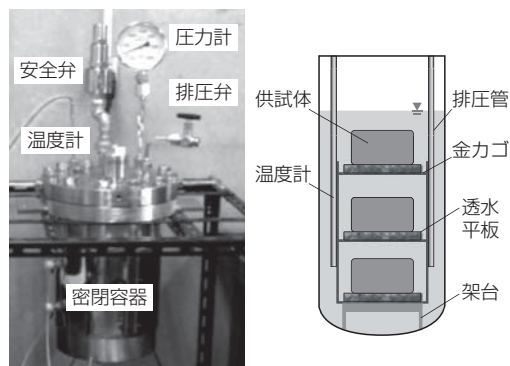


図-2 高温高圧水による剥離促進試験機

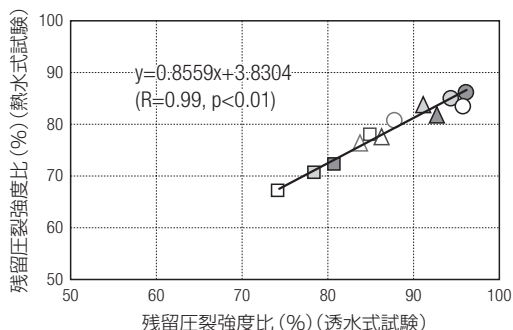


図-3 残留圧裂強度比の関係

ト混合物の品質のバラツキを回避することが難しいと考えられます。さらに、舗装材料の多様化や繰り返し再生が進めば、再生骨材を用いた混合物の品質低下が懸念されてくるのではと思われます。

そこで、本研究では舗装発生材を構成する骨材と旧アスファルトを分別回収し、骨材と旧アスファルトを元の性状にできるだけ近づけて再利用するという目的で実施しております。ここで用いる水は、1mm以上の骨材と1mm以下の微粒分を含む旧アスファルトを回収する熱水と、1mm以下の微粒分を含む旧アスファルトから、微粒分とアスファルトに分離するための高温高圧水です(図-4)。

これまでのところ、1mm以上の骨材の回収は、80℃程度の熱水を用いることで、元の骨材性状に近い状態で回収できることがわかっています(図-5)。特に、この手法は、さほど多くのエネルギーや特殊な設備投資をすることなく実用化できる可能性があると考えております。一方、高温高圧を用いて1mm以下の微粒分を含む旧アスファルトから、微粒分とアスファルト

に分離するための技術開発は現在検討中ですが、2.1で述べた垂臨界水を用いたアスファルトの抽出手法を応用することで実現可能ではと考えています。

3. 研究施設の紹介

当研究室が主に使用している実験室は、土質関係を主に行う土質実験室(13号館内)および舗装材料関係を行う道路実験室(8号館および38号館内)の3室あります。

土質実験室は土の物性値、圧密やせん断特性など力学性状を求めるためなどの一通りの試験機器があります。また、道路実験室では、アスファルト・骨材の物性や混合物の品質を調べるための機器、アスファルト混合物の供試体作成や工学および力学性状などを調べるための機器があります。

大学の研究室ですので、国内であり見かけないような珍しい装置はありません。したがって、当研究室が保有するアスファルトおよびアスファルト混合物用の試験機は、舗装試験法便覧記載の一般的なものですが、比較的高額な装置をいくつか紹介します。

3.1 3連式ホイールトラッキング試験機

舗装用混合物の標準トラッキング試験機で、同時に3供試体の試験の実施が可能です。システム構成は試験機本体、恒温室部、変位測定部、制御盤部から成り、試験機本体の性能、操作性、データの処理能力などは優れています。特に、試験結果に大きく影響するのは供試体温度ですが、この温度管理において信頼性の高いシステム構成となっています(写真-3)。

3.2 卓上型デジタル油圧サーボ試験システム

本装置は試験機本体、恒温槽、制御部、油圧ポンプ

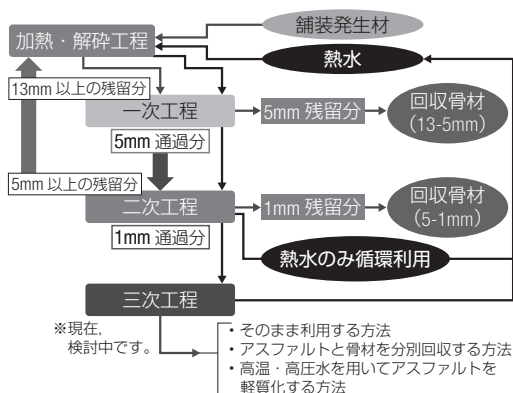


図-4 分別再材料化技術のフロー

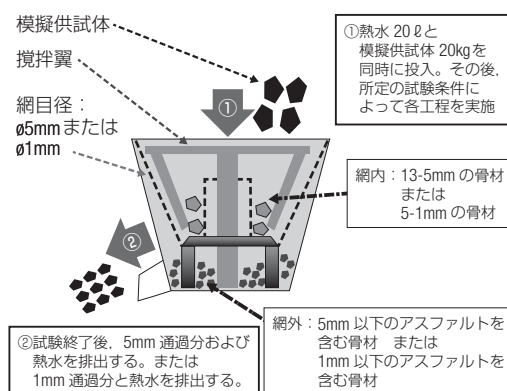


図-5 分離装置の概略



写真-3 3連式ホイールトラッキング試験機

から構成されており、各種材料試験片の曲げ・圧縮・引張に対する静的強度あるいは疲労抵抗性を精度良く評価することが可能なシステム構成となっています。また、試験機本体の性能、操作性、データの処理能力などは、他社と比べ優れていると思います。特に恒温槽が装備されており、温度管理を厳格に行わなければならない供試体および周辺温度を一定に保った状態での試験を容易に行うことが可能です（写真-4）。

3.3 ローラーコンパクター

本装置は、ホイールトラッキング試験用供試体などの作成において、アスファルト混合物を投入した所定の型枠上面に、ローラーを載荷したまま、型枠を往復移動させ、アスファルト混合物を転圧成型する装置です。装置は、荷重載荷が油圧式で、供試体型枠の往復移動が電動式クランク駆動となっております。混合物は常にローラーによるこね返し圧力を受けながら転圧されるため、実際の現場での締固めと類似した転圧ができます（写真-5）。

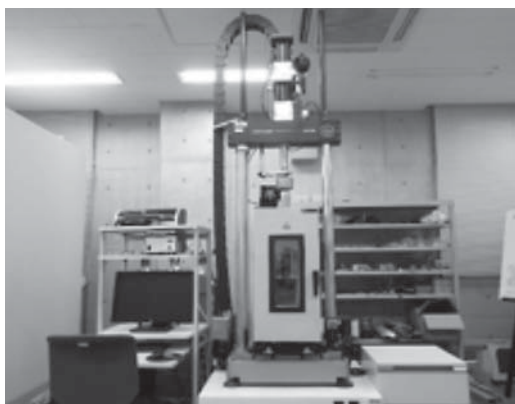


写真-4 卓上型デジタル油圧サーボ試験システム

4. おわりに

これまで紹介してきましたように、研究としては理論的なものよりも実験的なものがほとんどですが、当研究室を希望する学生は、現場志向の者が多いので、理論より現象の把握できる実験的研究を好んでいるようです。現場で活躍できる技術者の卵を作ると言う意味では、就職後の学生にとって現場に馴染め、将来実用化の可能性の高い研究を今後も続けていきたいと考えております。

— 参考文献 —

- 1) 例えば、加納 他：非鉄金属スラグの道路用骨材としての適用性に関する研究，土木学会論文集G, Vol.65, No.2, 2009
- 2) 菊池 他：メンテナンスおよびリサイクルに有利な軽交通路用自然石舗装の開発，土木学会論文集G, Vol.71, No.1, 2015
- 3) 例えば、秋葉 他：地中レーダーとFWD試験を併用した舗装診断に関する一考察，地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.2, 2015
- 4) 秋葉 他：亜臨界水を用いた環境調和型アスファルト抽出試験に関する実験的検討，舗装工学論文集, Vol.15, 2010
- 5) 加納 他：加圧熱水を用いたアスファルト混合物の剥離抵抗性評価試験の開発，舗装工学論文集, Vol.18, 2013
- 6) 小花 他：熱水すりもみ法によるアスファルト舗装発生材の分別再材料化技術の検討，土木学会第69回年次学術講演会, V-502, 2014



写真-5 ローラーコンパクター

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(%)	内需 (建設用)	対前年 度比(%)	輸出	期末 在庫	合計
19 年 度	242	4,974	(91.5)	77	5,051	3,243	(96.1)	2,323	(96.8)	171	224	3,338
20 年 度	224	4,694	(94.4)	94	5,012	2,735	(84.3)	1,882	(81.0)	181	247	2,982
21 年 度	247	4,608	(98.2)	106	4,961	2,861	(104.6)	2,302	(122.3)	101	227	3,088
22 年 度	227	4,377	(95.0)	51	4,654	2,625	(91.4)	1,796	(78.0)	40	199	2,824
23 年 度	199	3,939	(90.0)	256	4,394	2,482	(94.5)	1,739	(96.9)	0	200	2,682
24 年 度	200	3,960	(100.5)	99	4,259	2,366	(95.3)	1,565	(90.0)	59	217	2,583
25 年 度	217	3,659	(92.4)	92	3,968	2,151	(90.9)	1,455	(93.0)	15	215	2,366
26. 4 月	215	243	(102.8)	0	458	147	(111.3)	85	(113.7)	0	251	398
5 月	251	219	(92.8)	8	477	153	(97.9)	94	(99.5)	7	226	379
6 月	226	258	(86.5)	6	491	143	(90.0)	92	(87.1)	11	222	364
4～6 月	215	719	(93.4)	14	948	443	(99.1)	270	(98.6)	18	222	664
7 月	215	287	(86.5)	6	508	158	(101.0)	100	(95.1)	8	199	358
8 月	199	273	(79.7)	3	476	146	(87.5)	83	(74.3)	8	194	340
9 月	194	315	(102.1)	6	516	166	(96.8)	101	(87.4)	0	219	385
7～9 月	215	876	(89.0)	15	1,106	470	(95.0)	284	(85.4)	16	219	689
10 月	219	214	(103.9)	6	438	181	(107.5)	122	(97.6)	3	190	371
11 月	190	259	(90.6)	6	455	174	(89.3)	128	(85.0)	3	204	378
12 月	204	290	(84.4)	6	500	179	(87.8)	116	(79.7)	0	200	379
10～12 月	219	763	(91.3)	18	1,000	534	(94.2)	366	(86.9)	6	200	734
27. 1 月	200	285	(78.4)	9	494	164	(99.8)	102	(98.8)	0	200	365
2 月	200	298	(95.1)	9	506	191	(108.8)	129	(104.2)	4	184	375
3 月	184	259	(77.1)	12	455	230	(93.6)	178	(89.1)	0	168	397
1～3 月	200	842	(83.1)	30	1,071	585	(99.9)	409	(95.8)	4	168	753
26 年 度	215	3,200	(88.8)	77	3,491	2,032	(97.0)	1,329	(91.4)	45	168	2,199
27. 4 月	168	206	(87.5)	0	374	140	(99.5)	81	(94.7)	4	178	318
5 月	178	276	(129.3)	0	454	154	(104.4)	98	(105.0)	0	176	330
6 月	176	237	(94.5)	7	421	132	(97.1)	87	(95.3)	0	165	298
4～6 月	168	719	(102.7)	7	894	426	(100.4)	266	(98.5)	4	165	591
7 月	165	292	(101.8)	5	462	157	(99.3)	101	(101.5)	4	169	326
8 月	169	269	(98.3)	6	443	140	(96.4)	77	(93.2)	1	183	323
9 月	183	274	(86.8)	4	461	154	(92.6)	90*	(88.8*)	0	175	329
7～9 月	165	834	(95.3)	15	1,014	452	(96.0)	269*	(94.5*)	5	175	627

出典：生産、輸入、販売（内需）、輸出、期末在庫について、石油連盟（石油アスファルト統計月報）より引用
 内需（建設用）について、国土交通省総合政策局建設市場整備課 主要建設資材月報需要予測より引用
 *最新月は速報値もしくは予測値データ

一般社団法人 日本アスファルト協会会員

社	名	住	所	電	話
---	---	---	---	---	---

(平成27年12月1日現在)

[メーカー]

コスモ石油株式会社	(105-8528)	港区芝浦1-1-1	03 (3798)	3159
JX日鉱日石エネルギー株式会社	(100-8162)	千代田区大手町1-1-2	03 (6257)	7231
昭和シェル石油株式会社	(135-8074)	港区台場2-3-2	03 (5531)	5765

[ディーラー]

● 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
伊藤忠エネクス株式会社	(105-8430)	港区虎ノ門2-10-1	03 (6327)	8027
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
コスモ石油販売株式会社	(104-0032)	中央区八丁堀4-7-1	03 (6891)	9920
コスモアスファルトカンパニー株式会社	(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	(170-0002)	豊島区巢鴨3-39-4	03 (3915)	7151
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	(101-8322)	千代田区神田駿河台2-2	03 (3293)	4171
ユニ石油株式会社	(107-0051)	港区元赤坂1-7-8	03 (3796)	6616
リーフエナジー株式会社	(108-0073)	港区三田3-4-10	03 (6435)	4497

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 : 柿 沢 誠 伊 藤 達 也 新 田 弘 之 峰 岸 順 一 加 納 孝 志 根 本 信 行 村 山 雅 人 神 谷 恵 三 浜 田 幸 二 吉 村 啓 之 向 後 憲 一 永 田 佳 文 竹 井 利 公 姫 野 賢 治

アスファルト 第231号

平成27年12月発行

一般社団法人 日本アスファルト協会

☎ 105-8528 東京都港区芝1-1-1 浜松町ビル

コスモ石油株式会社 製品部

TEL 03-3798-3159

機関誌「アスファルト」に関するお問い合わせ

JX 日鉱日石エネルギー株式会社 産業燃料部

松村 優

TEL 03-6257-7231

印刷所 キュービシステム株式会社

☎ 101-0041 東京都千代田区神田須田町1-12-6

マルコビル4F TEL 03-5256-0051

Vol.58 No.231 DECEMBER 2015

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/>

