

アスファルト舗装におけるリサイクル技術の開発と ライフサイクル評価に関する研究

新田 弘之*

Study on Development and Life Cycle Evaluation of Asphalt Pavement Recycling Technology

Hiroyuki NITTA*

要旨

道路舗装においては、昭和 60 年代から舗装資材のリサイクルが一般に行われるようになり、現在ではリサイクル率は 99%に至っている。しかし、リサイクルが繰り返し行われることによる舗装資材の性能低下が懸念され、これに加え近年施工量が増加している排水性舗装に使用されるポーラスアスファルト混合物のリサイクル技術が確立されておらず、リサイクルの障害となりつつある。また、道路以外から持ち込まれる廃棄物資材の適用性の判断方法が確立しておらず、利用期待の増大に応えるリサイクル技術も確立されていない。さらに、これら舗装のリサイクルがライフサイクルの視点から環境負荷軽減に役立っているかが確認されていないことなど、舗装のリサイクルには新たな技術的課題や評価の必要性が明らかになっており、これらへの早期の対応が求められている。

そこで研究では、舗装資材の新たなリサイクル技術の開発および道路以外からの廃棄物の舗装資材としてのリサイクル技術の開発、およびそれらのリサイクル技術の有効性を評価するためのライフサイクルにおける環境負荷評価を行ったので報告する。

キーワード：アスファルト、再生用添加剤、再生舗装、再生ポーラスアスファルト、LCA、環境負荷、温室効果ガス、熔融スラグ、廃タイヤ、廃プラスチック

Synopsis

In Japan, asphalt pavement has generally been recycled since 1980s. However, the recycling of asphalt pavement now faces new problems. The problems are the decline of the repetitively recycled asphalt properties, the incompleteness of recycling method for porous asphalt, and the unestablishment of use to pavement of waste materials, etc. This Report is divided into discussions of three types of research. The first is research to develop recycling technology for pavement materials. The second is developing technology to recycled waste from sources other than road pavement. The life cycle environment impacts of these recycling technologies were also evaluated.

Key Words: Asphalt, Rejuvenator, Recycled pavement, Recycled porous asphalt, LCA, Environmental impacts, Green house gas, Molten slag, Scrap tire, waste plastic

* 独立行政法人土木研究所 つくば中央研究所 材料地盤研究グループ 新材料チーム 主任研究員

アスファルト舗装におけるリサイクル技術の開発と ライフサイクル評価に関する研究

目 次

1. 序論	1
1. 1 研究の背景	1
1. 2 研究の目的	2
1. 3 本論文の構成	2
2. ストレートアスファルト混合物の再生利用方法の高度化に関する研究	4
2. 1 概要	4
2. 2 実験	4
2. 3 STEP1:繰り返し再生のアスファルト性状への影響の把握	6
2. 4 STEP2:再生用添加剤種類の繰り返し再生への影響の把握	10
2. 5 繰り返し再生を考慮した再生用添加剤の利用	12
2. 6 まとめ	14
3. ポーラスアスファルト混合物の再生利用方法の開発	16
3. 1 概要	16
3. 2 STEP1:再生ポーラスアスファルト混合物の配合設計の課題抽出と改善策の検討	16
3. 3 STEP2:アスファルトモルタルによる再生ポーラスアスファルトの配合設計の開発	23
3. 4 まとめ	30
4. 廃棄物再生資材の舗装への利用方法の開発	32
4. 1 概要	32
4. 2 廃棄物再生資材の舗装への利用について	32
4. 3 研究方法	32
4. 4 室内試験の結果	34
4. 5 試験施工による施工性、耐久性の確認	39
4. 6 まとめ	40
5. 再生舗装のライフサイクル評価	42
5. 1 概要	42
5. 2 舗装再生工法のライフサイクル評価	42
5. 3 廃タイヤ、廃プラスチック利用再生舗装のライフサイクル評価	50
5. 4 ゴミ溶融スラグ利用舗装のライフサイクル評価	56
5. 5 まとめ	61
6. 結論	63
6. 1 はじめに	63
6. 2 本論文により得られた結果	63
6. 3 今後の課題と期待	64

1. 序論

1.1 研究の背景

道路舗装においては、リサイクルへの取り組みが古くから行われ、マニュアル類¹⁾がはじめて発刊された昭和60年代頃から舗装資材のリサイクルが広く行われるようになった。その後、「資源の有効な利用促進に関する法律（平成3年）」や「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律（平成12年）」などをはじめとした法整備も進み、現在ではアスファルトコンクリート塊（アスコン塊）のリサイクル率は99%²⁾に至っている。

アスコン塊は破碎・分級して再生骨材とした後、再生路盤材や再生アスファルト混合物に使用されるのが一般的である。アスコン塊から製造した再生骨材は「骨材」という名称が付いているが、実際は粗骨材の周りにアスファルトモルタルが付着したままのものである。これを再生アスファルト混合物にする場合は、骨材粒度の配合だけでなく、アスファルトの再生も同時に行うように配合設計を行う³⁾。一方、路盤材として使用する場合は、骨材とみなして、アスファルトは無視して使用する。このため、再生アスファルト混合物ではアスファルトと骨材を有効にリサイクルしているが、再生路盤材では骨材のみのリサイクルであり、アスファルトは道路内に廃棄していると考えられることもできる。再生アスファルト混合物に利用されるのは全体の約60%であり、残りは路盤材である²⁾ため、上記の考え方をすればアスファルトのリサイクルも60%であると考えることができる。これには、アスコン塊の受け入れ先である中間処理工場の地理的な配置も要因の一つとなっており、必ずしも技術的な理由ばかりではないが、いずれにしてもアスコン塊のリサイクルの質を向上させることが必要と考えられる。

アスコン塊のリサイクルが古くから行われているのは、前述の通りであるが、最近ではアスコン塊の質が変化しており、高いリサイクル率の維持に影響を及ぼすことが懸念されている⁴⁾。この原因の一つに、リサイクルが古くから行われていることにより、二度目のリサイクル、三度目のリサイクルと回数が進んでいることが挙げられる⁵⁾。現在のリサイクル技術は、一度目のリサイクルを確認して作成されている³⁾が、二度目以降についてはまだ確認が十分とはいえず、リサイクル時に用いる材料や配合法をさらに高度化する必要がある。また、もう一つの原因に、アスファルトの強化のために使用される熱可塑性エラストマーの使用が増加してきていることが挙げ

られる。熱可塑性エラストマーを添加したアスファルトのことはポリマー改質アスファルトと呼ばれ、道路のわだち掘れ防止のために使用されることが多く、最近では排水性舗装に用いるポーラスアスファルト混合物にも使用されている。この熱可塑性エラストマーの中でも特に使用量が多いのがSBS（スチレン・ブタジエン・スチレンブロック共重合体）である⁶⁾。ポーラスアスファルト混合物に用いられるときには、SBSが10%近く添加されている⁷⁾。この混合物が舗装発生材になる頃には非常に硬化していることもあり、再生が困難とみなされることがある。SBSは高価な材料でもあり、これを多く含むポーラスアスファルト混合物は特に有効にリサイクルすることが望まれるが、現状ではリサイクル方法が確立しておらず、早急な対応が必要となっている。

一方、舗装分野においては、舗装発生材のリサイクルだけでなく、他の産業からの廃棄物を再生した資材の利用先として期待される機会が非常に多い⁸⁾。古くは、高炉スラグのリサイクル⁹⁾があり、現在では一般的な材料として扱われるようになってきている。現在もスラグ類（一般焼却灰溶融スラグ、下水汚泥焼却灰溶融スラグ、産業廃棄物溶融スラグ、非鉄金属スラグなど）を舗装資材として利用してほしいという要望は多く、様々な報告がある^{10)~22)}。また、スラグ類だけでなく、廃タイヤや廃プラスチック、廃ガラス、石炭灰など、その種類は多い²³⁾。しかし、これらの廃棄物は、いずれも舗装資材としての経験が少なく、施工性、耐久性、供用性などが十分に分からないことが多い。また、舗装資材はほぼ100%再利用されていることから、これらの廃棄物再生資材もリサイクル時のことを考慮した上で利用しなければならない。現在でも、廃棄物再生資材を利用した後に、トラブルが発生することもあり、利用する際には事前に十分に検討しておく必要がある。

リサイクルは環境負荷軽減のために行っていることである。これまで述べたような舗装資材のリサイクル、廃棄物再生資材のリサイクルを行うとき、リサイクルをして資源を有効活用するというだけでなく、全体を通して環境負荷低減に役立っているかの評価も重要である。舗装の部分だけを見て環境負荷が小さいからといって、環境負荷の大きい資材などを多用したり、加工に多大なエネルギーを要していたりしてはリサイクルをしている意味がない。こういった評価にはLCA（ライフサイクルアセスメント）の手法が有効であるが、建設に関したLCA図書²⁴⁾²⁵⁾はあるものの、舗装に関しては情報が少なく利用できる原単位も極めて限られている。また廃棄物再生資材についての解析事例は皆無である。真の意味で環境

負荷を低減させるリサイクルを進めていくべきであり、このためにもこれらの舗装再生技術のライフサイクルの視点に立った環境負荷の評価が必要である。

1.2 研究の目的

前述までのように、舗装のリサイクルは古くから取り組み、ある程度の利用法は確立している。しかし、繰り返し再生の問題、ポーラスアスファルト舗装の再生の問題、廃棄物再生資材の有効活用の問題等、新たな問題が発生してきている。これらの問題の一つ一つを解決して行かなくてはならないのは言うまでもないが、リサイクルということだけに捕らわれずに、全体を通して環境負荷を低減させる方向に進まなくてはならない。このために、ライフサイクル評価は重要であり、リサイクルの実施者にも利用できる評価法にして行かなくてはならない。

本研究の最終目標は、「新たな問題に対応した舗装のリサイクル技術の開発とリサイクル技術のライフサイクル評価」を行うことにある。リサイクル技術の開発では、性状の安定しない廃材等を使用して如何に定常的に安定した再生製品を製造できるようにするのか、またリサイクル技術の評価にあたってはそれらの技術は本当に環境負荷を低減させているのか、といったことを実現させるには、長い期間と多くの研究者による努力が必要と思われる。本研究ではその最終目標に近づくために、以下の目標を設定して研究を行った。

1. ストレートアスファルト混合物の繰り返し再生に対応した利用技術を開発する。
2. ポーラスアスファルト混合物の再生利用方法を開発する。
3. 廃棄物再生資材の舗装への利用方法を開発する。
4. 1～3で開発した舗装リサイクル技術のライフサイクル評価を行う。

1.3 本論文の構成

本論文は全六章からなる。各章の主な内容は以下に示す。

1.「序論」では、舗装発生材のリサイクルの現状、舗装の高耐久化や高性能化に用いられるアスファルト改質剤使用に起因する諸問題について述べた上で、再生用添加剤および再生アスファルトの新たな評価法の必要性を示した。また、道路以外からの廃棄物資材の舗装での利用の現状と、これら廃棄物再生資材を利用する際の評価

法の必要性を示した。さらに、これらのリサイクルの現状を踏まえ、環境負荷をより低減させていくためのライフサイクル評価の必要性を明確にし、本論文の目的を示した。

2.「ストレートアスファルト混合物の再利用方法の高度化に関する研究」では、一般的に使用されるストレートアスファルトについて、種々の再生用添加剤を用いて繰り返し再生したときの性状変化を明らかにし、繰り返し再生に適した再生用添加剤の選定を行った。まず、アスファルトの酸化による硬化が再生アスファルトの性状へ与える影響を検討し、その上で再生用添加剤の種類による影響の把握を行い、繰り返し再生に適した再生用添加剤とその使用法を示した。

3.「ポーラスアスファルト混合物の再生利用方法の開発」では、近年の施工量が増大している排水性舗装に用いられるポーラスアスファルト混合物のリサイクル時の新しい配合設計方法として、アスファルト混合物による方法とアスファルトモルタルによる方法の2つを提案した。まず、アスファルト混合物については、広範囲な温度域で試験可能な方法として圧裂試験を選定し、その有効性を示した。また、アスファルトモルタルについては、アスファルト物性とアスファルトモルタル物性の関係を示した上で、アスファルトモルタルを用いた配合設計法を作成し、その有効性を検討した。

4.「廃棄物再生資材の舗装への利用方法の開発」では、道路以外からの利用期待が増大する廃棄物資材として、ゴミ熔融スラグを取り上げ、舗装資材へのリサイクル技術の開発を行った。まず、舗装用の粗骨材および細骨材の代替として考えられる徐冷スラグおよび水砕スラグに対し、求められる性状を示した上で、アスファルト混合物としての利用方法、路盤材料としての利用方法を検討し、各種の物性の確認を行った。さらに、実際に熔融スラグを用いて試験施工を行い、施工性、供用性、周辺環境への影響の確認などを行った。

5.「再生舗装のライフサイクル評価」では、2.～4.で開発した舗装リサイクル技術の環境負荷評価を行った。まず、再生舗装について環境負荷の算定を行った。再生舗装には、通常行われるプラント再生工法とより環境負荷が小さいと言われている路上再生工法を取り上げた。また、道路以外からの廃棄物資材を利用した舗装についてライフサイクル評価を行った。

6.「結論」では、本研究の成果を総括し、今後の展望について述べた。

参考文献

- 1) 日本道路協会:舗装廃材再生利用技術指針(案)、(社)日本道路協会、1984
- 2) 国土交通省:平成 17 年度建設副産物実態調査結果について、2006.12.8
- 3) 日本道路協会:舗装再生便覧、(社)日本道路協会、2004.2
- 4) 国土交通省土木研究所:改質アスファルトを含む舗装発生材の再生利用の現状、土木研究所資料、第 3806 号、2001.1
- 5) 吉兼亨:再々生への取組み、アスファルト、Vol.38、No.184、pp.29-36、1995
- 6) 中島滋夫:アスファルトの改質材 SBS について、改質アスファルト、第 26 号、pp.6-11、2006.1
- 7) 森久保道生:改質アスファルトの製造における品質の確保と評価、改質アスファルト、第 27 号、pp.19-29、2006.8
- 8) 建設省土木研究所:公共事業における試験施工のための他産業再生資材試験評価マニュアル案、土木研究所資料、第 366 号、1999.9
- 9) 日本道路協会:アスファルト舗装要綱(昭和 53 年版)、(社)日本道路協会、1978.6
- 10) 根本久美子、原雄:骨材としての溶融スラグ、第9回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp.436-439、1998.10
- 11) 中村裕子、玉信一、百瀬英雄、明石哲夫、平岡英伸、藪田和哉:灰溶融スラグの道路用路盤材適性評価、第9回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp.433-435、1998.10
- 12) 泊瀬川まこと、山田鉄雄、浅野耕司:都市ゴミ焼却灰溶融スラグの路盤材への適用、第 22 回日本道路会議論文集、pp.660-661、1997.10
- 13) 猪熊明、高野明雄、吉村栄司、貫井武:焼却灰溶融スラグの道路路盤材への適用の検討、舗装、Vol.35、No.11、pp.4-9、2000.11
- 14) 大井健一郎、金子隆行:大宮市における溶融スラグのアスファルト混合物への利用、舗装、Vol.32、No.4、pp.13-18、1997
- 15) 黒田智、下田哲也:溶融スラグのアスファルト混合物用細骨材への再利用に関する検討、第 22 回日本道路会議論文集、pp.656-657、1997
- 16) 佐沢昌樹、佐武健士:都市ゴミ溶融スラグ入りアスファルト混合物の実路への適用、第 22 回日本道路会議論文集、pp.658-659、1997
- 17) 福満雅之、鈴木哲雄:ごみ焼却灰溶融スラグのアスファルト混合物へ利用、道路建設、No.578、pp.33-43、1996.8
- 18) 増田隆司:溶融スラグの再資源化技術、汚泥研究年報、pp.54-59、1988
- 19) 大嶋吉雄、増田隆司:下水汚泥の溶融システム 下水汚泥溶融スラグの有効利用、下水道協会誌、Vol.26、No.307、pp.21-29、1989.12
- 20) F. Iso, K. Saeki, S. Komine, T. Nazuka, T. Mase : Recovery of Incinerated Municipal Solid Wastes. Ash Melting and Utilization of Molten Slag for Road Construction as Aggregates, Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan, Vol.7, No.285, pp.107-110, 2000.3
- 21) 海野一彦:溶融スラグ入りアスファルト混合物の利用について、都市清掃、Vol.60、No.277、pp.216-219、2007.5
- 22) 加納陽輔、秋葉正一、栗谷川裕造、栗栖一之:非鉄金属スラグのアスファルト混合物用細骨材としての利用について、土木学会舗装工学論文集、第 12 巻、pp.115-122、2007.12
- 23) Y.Huang, R. N. Bird, O. Heidrich : A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements, Resources Conservation and Recycling, Vol.52, No.1, pp.58-73, 2007.11
- 24) 土木学会地球環境委員会:建設業の環境パフォーマンス評価とライフサイクルアセスメント、pp.110-113、2000.10
- 25) 井村秀文:建設の LCA、2001.6

2. ストレートアスファルト混合物の再生利用方法の高度化に関する研究

2.1 概要

ストレートアスファルト混合物は、最も一般的なアスファルト混合物であり、全体の8割以上を占めている。従って、舗装発生材（アスコン塊）もそのほとんどは、ストレートアスファルト混合物であり、再生アスファルト混合物もほとんどこれが使用される。再生アスファルト混合物は、古くなったアスファルトに新しいアスファルトや再生用添加剤を添加して製造される。こうした製造方法は古くから行われており、本格的に行われるようになって20年以上経過している。このため、再生が1回だけでなく、2回、3回と繰り返されている可能性がある。これについては、アスファルト混合物製造プラントでも、アスコン塊に含まれるアスファルト（旧アスファルト）の性状変化を感じており¹⁾、繰り返し再生が要因の1つと考えられる。現在の再生技術は、主に1回目の再生について確認して作成されたものであり、2回目以降の再生については、あまり検討されていない。

そこで、2. では、STEP1 として繰り返し再生による性状変化を室内試験により確認し、STEP2 として数種類の再生用添加剤を用いて繰り返し再生を行い、再生用添加剤種類の影響を確認し、これらの結果に基づき、くり返し再生利用のための再生用添加剤の利用方法について考察した。

2.2 実験

実際に供用したアスファルト舗装から、劣化や再生の履歴が明らかものを入手することは非常に困難である。このため、室内において、再生と促進劣化試験を繰り返すことにより、劣化・再生履歴が明らかなアスファルトを作製した。アスファルトの劣化と再生のイメージを図-2.1に示す。図のように劣化によって低下した性状を再生により元に戻すという作業を繰り返した。

検討する内容としては、以下の2段階で行った。

STEP1:繰り返し再生のアスファルト性状への影響の把握

STEP2:再生用添加剤種類の繰り返し再生の把握

これらの検討を通して、繰り返し再生を考慮した再生方法の提案を行った。

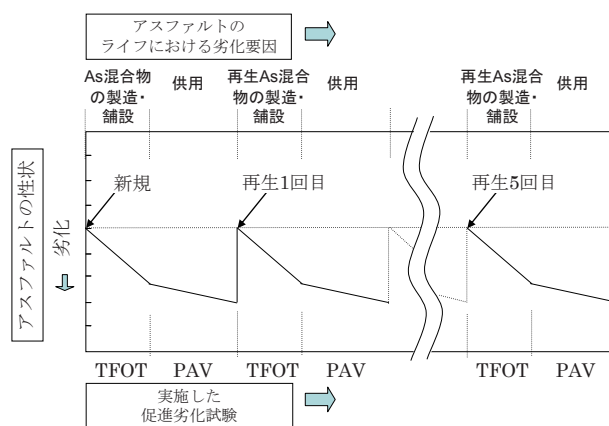


図-2.1 劣化と再生のイメージ

2.2.1 アスファルトの促進劣化と再生方法

(1) アスファルトの促進劣化方法

アスファルトの促進劣化方法は、表-2.1に示すように、薄膜加熱試験²⁾（以下、TFOT）と加圧劣化容器を用いた舗装用バインダの促進劣化試験²⁾（以下、PAV）を用いた。TFOTは、アスファルト混合物の製造・施工時に受ける高温下での劣化をシミュレートするものであり、またPAVは、供用中の劣化をシミュレートするためのものである。これまでの研究で、これらの劣化試験の組み合わせにより、供用10年程度の促進劣化が行えることが確認されている³⁾。

なお、本検討においては、「舗装再生便覧⁴⁾」で示されているアスファルトの再生利用限度である針入度20の状態を作るために、PAVの劣化時間を標準よりも長くして行う実験も行った。事前に劣化時間の検討を行った結果、使用したアスファルトでは、劣化時間を65～70時間に変更することで、針入度20の状態まで劣化が進むことが分かった。これに従い、本検討では、通常の条件の他にPAVの劣化時間を65～70時間にした試験パターンも実施した。

表-2.1 促進劣化試験の概要

項目	概要	備考
薄膜加熱試験 A046 (TFOT: Thin Film Oven Test)	薄膜加熱用皿に試料を50g（膜厚約3.2mm）入れ、163℃で5時間加熱する。	—
加圧劣化容器を用いた舗装用バインダの促進劣化試験 A059 (PAV: Pressure Aging Vessel test)	薄膜加熱用皿に試料を50g（膜厚約3.2mm）入れ、空気で2.1MPaに加圧し、100℃で20時間加圧加熱する。	本研究では、針入度を20にさせるため、劣化時間を65～70時間に変更したものも行った。

(2) アスファルトの再生方法

促進劣化試験 (TFOT+PAV) 後のアスファルトは、「舗装再生便覧⁴⁾」に従って再生した。再生方法として2通りの方法が示されており、新規アスファルトだけで再生する方法 (再生方法 A) と再生用添加剤を用いて再生する方法 (再生方法 B) の両方を行った。再生方法の概要を表-2.2に示す。

再生方法 A は、劣化したアスファルトの性状と新アスファルトの性状の組み合わせにより、両者の配合率が決まるため、予め配合率を決めることができない。試験の結果、新アスファルトの配合率が概ね 60%程度となった。一方、再生方法 B は、新アスファルトの添加率を任意に決めることができるため、再生骨材の配合率を高くすることができる。このため、本研究においては、再生骨材の配合率が比較的高い場合である 60%程度を想定して、新アスファルトの配合率が40%となるように再生を行った。

2.2.2 アスファルトの性状測定

試験項目は、物理性状試験として、針入度試験²⁾、軟化点試験²⁾、DSR 試験²⁾化学性状試験として、アスファルト組成成分の分析、カルボニル基の測定を行った。

(1) アスファルト組成成分の分析

アスファルト組成成分の分析には、薄層クロマトグラフ法 (以下、TLC-FID 法) を用いた。測定のイメージを図-2.2に、また、使用した溶媒などの条件を表-2.3に示す。この TLC-FID 法は、棒状の薄層吸着層上でアスファルトを飽和分、芳香族分などの4つの成分に分離する操作 (TLC の操作) と、それぞれの成分を水素炎で燃焼させ発生するイオン電流から濃度を求める操作 (FID 検出の操作) を組み合わせた分析方法である。

(2) カルボニル基の測定

アスファルトの酸化劣化の指標となる酸素含有官能基 (カルボニル基) に関する挙動を FT-IR (フーリエ変換赤外吸光度計) を用い、測定した。具体的には、アスファルトの赤外吸光度を計測し、劣化の影響を受けないとされる C=C 伸縮振動に帰属する 1600cm⁻¹ 付近のピークとカルボニル基伸縮振動に帰属する 1700cm⁻¹ 付近のピークの比からカルボニル指数 (以下、CI) を求めた。FT-IR の測定条件等を表-2.4に示す。

表-2.2 再生方法の概要

	概要	備考
再生方法 A	劣化したアスファルトに新アスファルトを加え、針入度 50 になるように調整する。	新アスファルトの添加率は、一つだけ。
再生方法 B	劣化したアスファルトに再生用添加剤を加え、針入度 50 になるように調整する。その後、必要量の新アスファルトを加える。	新アスファルトの添加率は、自由に設定できる。

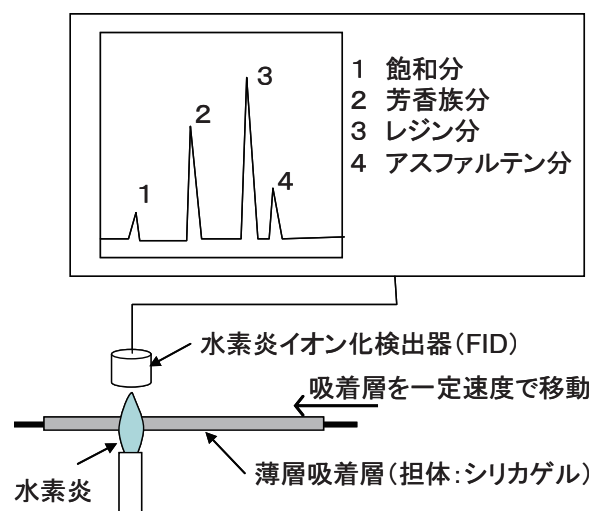


図-2.2 TLC-FID 法での測定イメージ

表-2.3 TLC-FID 法の概要

	概 要
吸着層	棒状薄層吸着層 (担体: シリカゲル)
検出器	水素炎イオン化検出器 (FID 検出器。有機成分を水素炎中で燃焼させ、発生イオン電流を検出。)
操作方法	吸着層上にアスファルトをスポットした後、ヘキサン (展開距離 10cm) → トルエン (展開距離 5cm) → ジクロロメタン+メタノール混液 (95:5) (展開距離 2cm) の順で展開し、4 成分に分離する。乾燥後、それぞれの濃度を FID 検出器で測定し、それぞれの濃度比を求める。

表-2.4 FT-IR の条件等

	条件等
セル	KB r 液体用セル (0.1mm スペーサー)
溶媒	クロロホルム (アスファルト濃度 0.03mg/ℓ)
カルボニル指数 (Carbonyl Index: CI)	$CI = \frac{\log(I_{01} / I_1)}{\log(I_{02} / I_2)}$ I_1, I_2 : それぞれ 1700cm ⁻¹ と 1600cm ⁻¹ 付近のピークスペクトルの透過率 I_{01}, I_{02} : それぞれ上記波数に対応するバックグラウンドの透過率

2.2.3 繰り返し再生のアスファルト性状への影響の把握

STEP1 では、繰り返し再生のアスファルト性状への影響把握のために、劣化と再生を行う 4 つの試験パターンで比較検討を行った。概要を表-2.5 に示す。アスファルトは、ストレートアスファルト（以下、StAs）2 種類と改質アスファルト（以下、改質 As）1 種類、再生用添加剤は 1 種類とし、いずれも繰り返し再生の回数は 5 回とした。促進劣化は表-2.1 の通りとして、パターン④だけは、劣化後に針入度が 20 となるように、PAV 劣化時間を 70h で行った。また、再生方法はパターン①だけ再生方法 A とした。

2.2.4 再生用添加剤種類の繰り返し再生への影響の把握

STEP2 では、再生用添加剤種類の繰り返し再生への影響の把握を行った。方法としては、アスファルト 1 種類と再生用添加剤 9 種類を使用し、再生方法 B により再生し、繰り返し再生の回数は 2 回として実験を行った。アスファルトはストレートアスファルト 60/80 を使用し、スタート時の新規のものと、再生時に添加したものは同じものを用いた。使用した再生用添加剤を表-2.6 に示す。再生用添加剤は、いずれも国内に流通しているもので、実際にプラントで使用されているものを使用した。また、⑤と⑨はアスファルト系と呼ばれるもので、低粘度のアスファルトを主体にしたものであり、その他はオイル系と呼ばれるもので、潤滑油に近い成分のものである。

2.3 STEP1: 繰り返し再生のアスファルト性状への影響の把握

2.3.1 劣化と再生の繰り返しにおける性状変化

劣化と再生を繰り返し行ったアスファルトの性状を図-2.3 に示す。ここで 0 回目とはバージンのアスファルトを原アスファルトにした試験結果のことであり、以降 1 回目などの回数は再生の回数を示し、そこでの原アスファルトは針入度を 50 に調整した再生アスファルトのことである。4 つの試験パターンの全てのデータを載せているが、いずれの場合でも原アスファルト→TFOT→PAV の順で針入度が低下しており、軟化点が上昇している。これを再生することによりいずれの場合も針入度が上昇し、軟化点が低下している。

再生では、針入度 50 を指標として配合率を決めたので、1 回目以降の再生アスファルトの針入度は 50 となっている。しかし、軟化点は再生回数が増えると若干高くな

表-2.5 試験パターンの概要 (STEP1)

パターン	バージンアスファルト	再生時に添加する材料	備考
①	StAs60/80*	StAs60/80 (再生方法 A)	—
②	StAs40/60*	再生用添加剤+StAs40/60 (再生方法 B)	—
③	改質 As II 型**	再生用添加剤+StAs40/60 (再生方法 B)	—
④	StAs40/60	再生用添加剤+StAs40/60 (再生方法 B)	PAV 劣化時間 70h

*StAs40/60 および StAs60/80: 針入度 40~60 あるいは 60~80 のグレードのストレートアスファルト

**改質 As II 型: ストレートアスファルトに熱可塑性エラストマーを添加した改質アスファルト

表-2.6 使用した再生用添加剤の基本性状 (STEP2)

再生用添加剤	60℃粘度 mm ² /s	引火点 ℃	密度 g/cm ³	薄膜加熱後 粘度比
①	81	256	0.911	未測定
②	91	232	0.9658	1.22
③	210	276	0.998	1.14
④	101	248	0.9813	1.24
⑤	1091	272	0.9754	1.25
⑥	91	234	0.9558	1.13
⑦	98	240	0.948	1.12
⑧	87	235	1.014	1.21
⑨	526	327	0.978	1.1

る傾向があり、特に試験パターン④ではその傾向が顕著であった。

TFOT および PAV を行うことで、アスファルトの組成がどのように変化したかを測定した。再生 0 回目の組成分析結果を図-2.4 に示す。ここでは、試験パターン②と④の結果を示したが、どちらの場合も、芳香族分とレジン分には、特徴的な変化が見られ、TFOT→PAV と劣化操作を進めることにより芳香族分が減少し、レジン分が増加する傾向にあった。飽和分およびアスファルテン分には特徴的な変化はみられなかった。

なお、「舗装調査・試験法便覧」²⁾に掲載されているアスファルトの組成分析試験方法 (JPI-5S-22) (以下、JPI 法) では、劣化により芳香族分が減少し、アスファルテン分が増加する傾向が見られることが報告されている⁵⁾が、今回行った TLC-FID 法では、アスファルテン分ではなくレジン分が主に変化した。これは、両者の分析方法が大きく異なるためと考えられ、使用した溶媒や吸着層が異なること、また JPI 法は各成分の重量比で表すのに対し TLC-FID 法では各成分の水素の量の比で表すことなどが、影響していると考えられた。従って、ここで示す TLC-FID 法は、JPI 法での結果とは単純に比較できない。

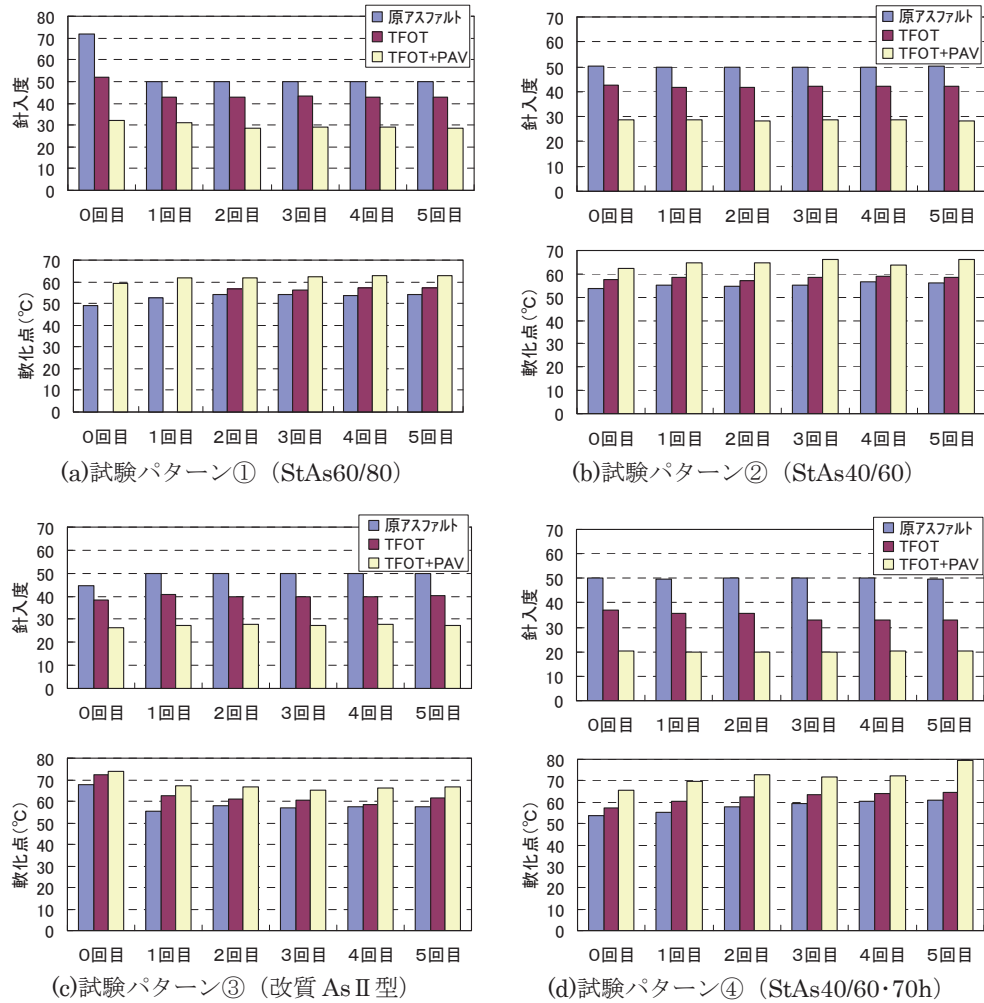


図-2.3 劣化と再生を繰り返し行ったアスファルトの性状

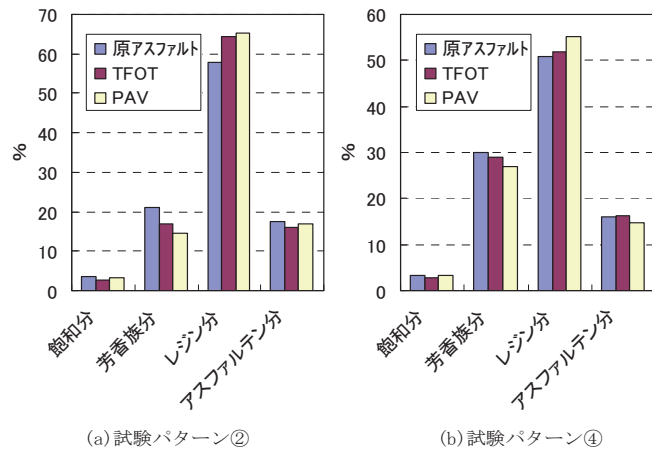


図-2.4 促進劣化後のアスファルトの組成
(TLC-FID 法)

2.3.2 再生後のアスファルトの性状

アスファルトの再生においては、バージンのアスファルトの性状と同じにすることを前提として行われている。しかし、先にも述べたとおり、通常の配合設計時に考慮するのは針入度だけであり、その他の性状はチェックしていない。2.3.1 で見られたように再生回数が増す毎に軟化点の上昇がみられることが分かったため、ここでは再生後のアスファルトの性状に注目して特徴の把握を行った。

(1) 物理性状

針入度、軟化点試験の結果および針入度・軟化点から求めた針入度指数 (PI) を図-2.5 に示す。この PI は、アスファルトの感温性を示す指標であり、マイナス側になるほど温度に対して敏感、プラス側になるほど温度変化に対して鈍感となる。PI は以下の式から求めた。

$$\frac{\log 800 - \log(25^\circ\text{C 針入度})}{\text{軟化点} - 25^\circ\text{C}} = \frac{20 - PI}{10 + PI} \times \frac{1}{50} \quad \text{式(2.1)}$$

$$PI = \frac{20(\text{軟化点} - 25^\circ\text{C}) - 500\{\log 800 - \log(25^\circ\text{C 針入度})\}}{(\text{軟化点} - 25^\circ\text{C}) + 50\{\log 800 - \log(25^\circ\text{C 針入度})\}} \quad \text{式(2.2)}$$

針入度は、50 を目標に再生したので、1 回目以降は全て 50 を示した。

軟化点は、StAs では再生回数が増えると大きくなる傾向が見られ、特に旧アスファルトの針入度を 20 まで低下させて、強く劣化させた試験パターン④ (StAs40/60・70h) ではその傾向が顕著であった。この試験パターン④では、再生後の軟化点が高い値を示し、StAs40/60 の軟化点範囲である 47.0～55.0℃ (JIS K 2207) を再生 1 回目から超えた。

試験パターン①では、再生する際の新アスファルト量が 60% 程度あり、軟化点が多少大きくなっているが、その変化量はわずかであった。

試験パターン③では、0 回目のアスファルトを改質 As II 型、再生で添加したアスファルトを StAs としたため、1 回目の軟化点の低下が大きい、2 回目以降はあまり変化がなかった。特に 3 回目以降の変化はあまりなく、再生回数が増えることにより、改質 As 成分の減少による軟化点の低下が、再生が進むことによる軟化点の上昇により相殺されたためと考えられた。

PI については、StAs では全ての試験パターンについて増加が認められた。特に、試験パターン④ (StAs40/60・70h) でその傾向が顕著であり、再生回数が増えると感温性が鈍くなる傾向を示した。PI は、StAs においては、マイナスの値を示すことが一般的であるが、試験パターン①以

外は、再生を繰り返すとプラスの値を示しており、再生アスファルトが一般的な StAs の性状を示していないことが分かった。

以上より、針入度だけを指標として、再生を繰り返した場合、軟化点が上昇していくことが分かり、再生アスファルトの性状が変化してしまうことが分かった。また、その軟化点の変化は通常の StAs でみられる性状と異なる範囲まで変化してしまう可能性があることが分かった。

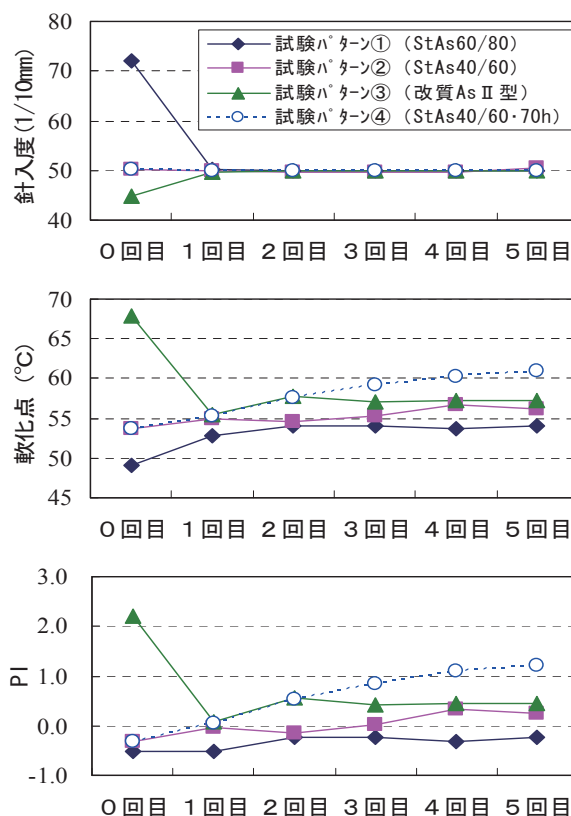


図-2.5 再生後のアスファルトの性状

(2) 化学性状

物理性状の検討から、再生を繰り返すことによって、再生アスファルトの性状が変化していることが分かった。この原因として、アスファルトの組成が繰り返しの再生により変化していることが考えられたので、アスファルトの組成成分の分析を行った。分析結果を図-2.6 に示す。

いずれの場合も飽和分・アスファルテン分には特徴的な変化はなかった。しかし、芳香族分の減少とレジジン分の増加が見られるものもあり、特に試験パターン④ (StAs40/60・70h) ではこの傾向が明確だった。ここで、今回用いた再生用添加剤の組成の分析結果を図-2.7 に示す。アスファルテン分はなく、飽和分・芳香族分・レジジン分からなるものであることが分かる。特にアスファルトとは異なり、芳香族分とレジジン分がほぼ同じ量含ま

れ、旧アスファルトにこれを加えることにより、劣化によって失われた芳香族分を補うものとなっていることが分かる。しかし、このように芳香族分が多いものに加えても、繰り返し再生を行った場合は、劣化により減少した芳香族分を補いきれず、再生した後も不足したものとなってしまったものと考えられた。そして、この組成の

変化が PI の増加などへ影響を与えているものと考えられた。

以上より、繰り返し再生を行ったアスファルトの性状がバージンのアスファルトと異なるのは、アスファルトの組成が十分に補充できていないことが原因と考えられた。

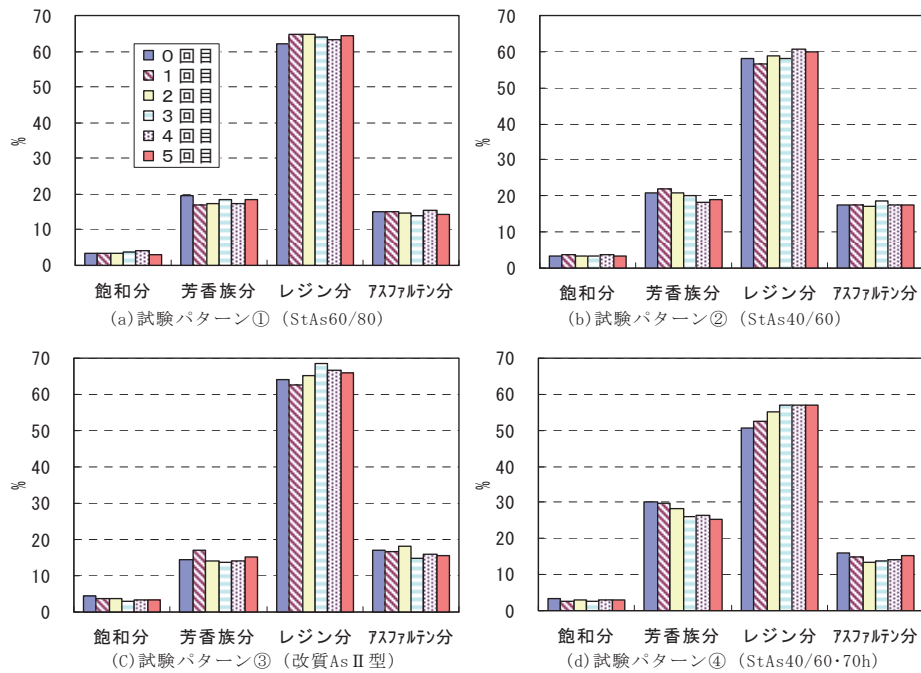


図-2.6 再生後*のアスファルトの組成 (TLC-FID 法)

*0回目は、バージンのアスファルト

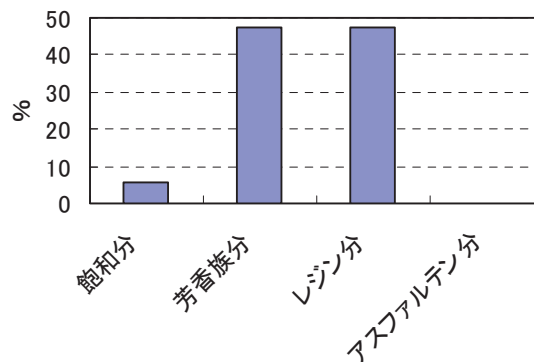


図-2.7 再生用添加剤の組成 (TLC-FID 法)

2.4 STEP2:再生用添加剤種類の繰り返し再生への影響の把握

2.4.1 再生用添加剤の添加量

本検討に用いた再生用添加剤は9種類であり、オイル系およびアスファルト系と呼ばれるものである。それぞれ性状が異なるため、再生時の添加量も異なる。再生用添加剤の添加量を表-2.7に示す。再生1回目と2回目で添加量が違うのは、PAV後の旧アスファルトの針入度が各回で多少異なるためである。添加量と動粘度の関係を図-2.8に示す。ここでも再生前後の針入度は各回で多少異なっているため、その影響もありばらつきはあるが、概ね粘度が高いものほど添加量が多くなっている。

表-2.7 再生用添加剤の添加量
(旧アスファルトに対する外割添加量)

再生用 添加剤	再生1回目添加量 %	再生2回目添加量 %
①	15.4	13.3
②	16.0	14.3
③	19.2	18.5
④	17.5	15.8
⑤	26.0	22.2
⑥	15.9	14.4
⑦	17.2	16.5
⑧	16.1	14.6
⑨	22.8	22.7

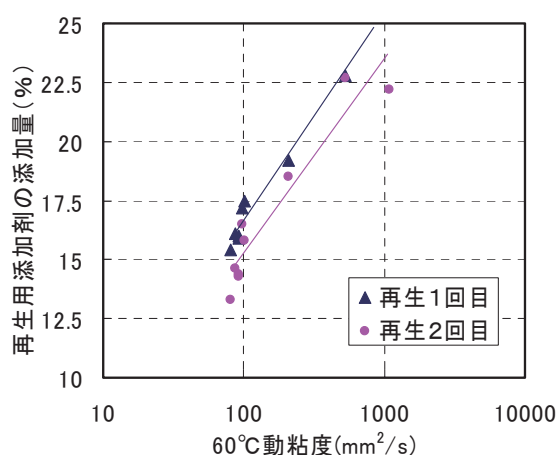


図-2.8 再生用添加剤の動粘度と添加量

2.4.2 再生アスファルトの物理性状

9種類の再生用添加剤を用いて2回劣化と再生を繰り返したときの、針入度と軟化点を図-2.9、2.10に示す。本研究では、針入度級 60-80 の再生アスファルトとなるように調整しているため、針入度は概ね 70 を示している。また、促進劣化後も ± 2 程度で大きな差は見られなかった。これに対して軟化点では、規格値である 44~52℃の範囲には入っているものの、かなりのばらつきが見られ、

再生1回目よりも再生2回目のばらつきが大きくなっている。原アスファルトの軟化点の変動係数は、再生1回目で 1.9%であったのが再生2回目では 2.9%となっており、このことからばらつきが大きくなっていることが分かる。

従って、再生用添加剤で再生を行い、針入度をあわせていても、再生用添加剤の種類によって、再生アスファルトの性状は異なるようになると考えられた。

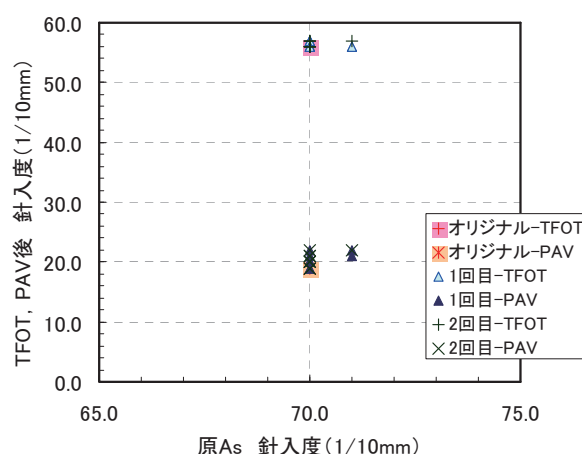


図-2.9 針入度の変化

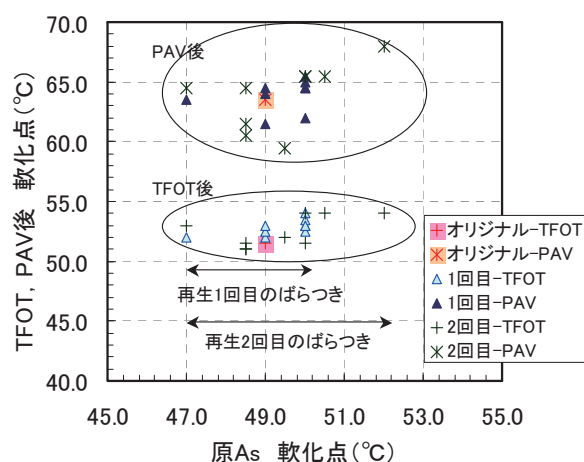


図-2.10 軟化点の変化

このことをさらに確認するために、DSRを用いて粘弾性状を測定した。針入度と比較したものを図-2.11、2.12に示す。まず、複素弾性率 G^* では、オリジナルのアスファルトの G^* が再生アスファルトの G^* よりも大きくなっていることが分かる。一方、エネルギーの貯蔵・損失程度を示す損失正接 $\tan\delta$ は、オリジナルアスファルトと再生アスファルトの間で大きな差は見られない。このことから、オリジナルアスファルトと再生アスファルトで針入度が同じであっても粘弾性状は異なることが確認され、同じ針入度であっても再生アスファルトの方が低い弾性率を示した。

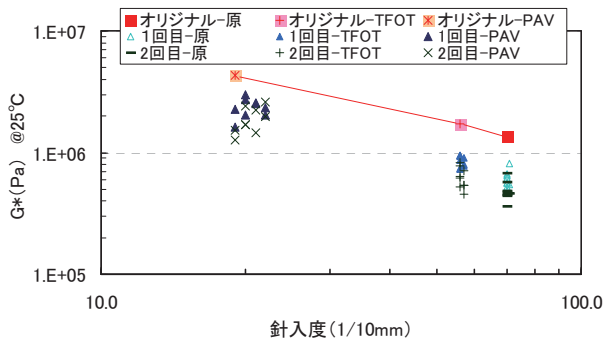


図-2.11 複素弾性率 G^* と針入度の関係

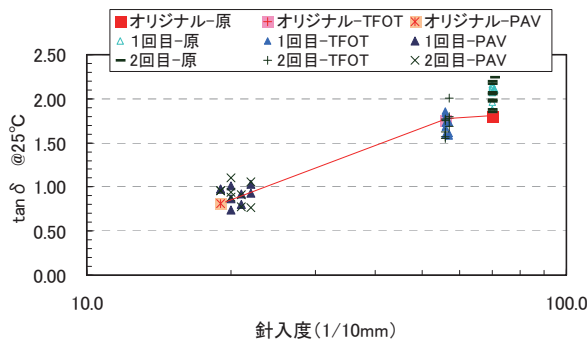


図-2.12 損失正接 $\tan \delta$ と針入度の関係

さらに、60°Cにおける DSR の結果と針入度の関係を図-2.13に示す。DSR の結果は、アスファルト混合物の流動性と関係が深いと言われている $G^*/\sin \delta$ を示している。グラフでは、再生をしていないオリジナルのアスファルトのプロットが上の位置に来ている。再生したものはオリジナルよりも全て低い位置に来ており、特に再生の2回目はさらに低い位置にプロットされている。これは、再生添加剤の配合の際に、同じ針入度等級になるように調整しているが、耐流動性を考慮すると、再生アスファルトはオリジナルよりも劣る可能性を示しているといえる。

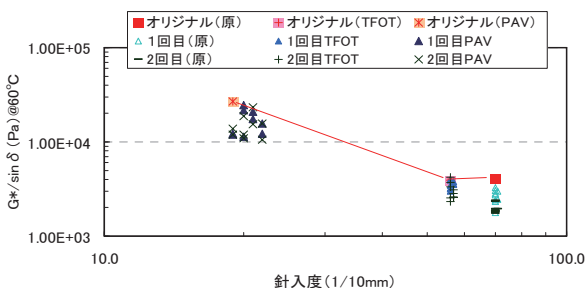


図-2.13 針入度と $G^*/\sin \delta$ (at 60°C) の関係

再生混合物では、ひび割れ抵抗性を懸念して、疲労試験などが行われることがあるが、これまでのところ再生混合物は新規混合物と同等程度の疲労抵抗性を持つとの

報告が多い^{6)~8)}。一方、アスファルト性状のひび割れ抵抗性に関する試験項目としては、伸度試験があり、これまでも伸度の検討事例は多い^{9)~13)}。再生アスファルトでは伸度が低下するとの報告もあるため^{9)~13)}、これを確認した。伸度はいずれの再生アスファルトでも100cm以上を示し、規格値に適合するものであった。さらに、再生アスファルトの差を見るために、伸度の測定条件を15°Cから10°Cに変更して測定を行った。結果を図-2.14に示す。ほとんどの再生アスファルトで基本アスファルトの伸度を上回っており、今回用いた再生用添加剤では、伸度については新規のものと同様かそれ以上の性状が得られることを確認した。

つづいて、低温でのひび割れ抵抗性を確認するために、フラース脆化点を測定した。結果を図-2.15に示す。全ての再生アスファルトで、基本アスファルトよりも脆化点が低くなっており、低温ひび割れに対しても新規以上の性状が得られることを確認した。

これらの結果より、以前は再生アスファルトにおいてひび割れが懸念されていたが、現在は改善され、あまり問題のない性状となっている。その代わりに、耐流動性は損なわれている。

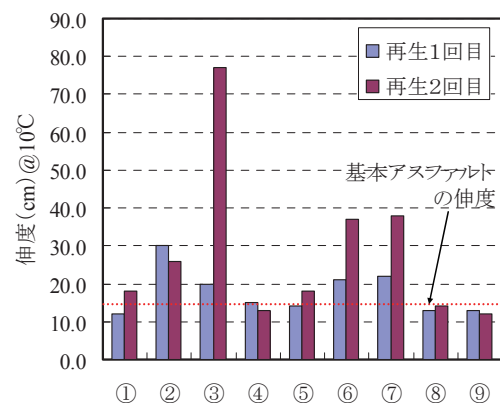


図-2.14 伸度の結果

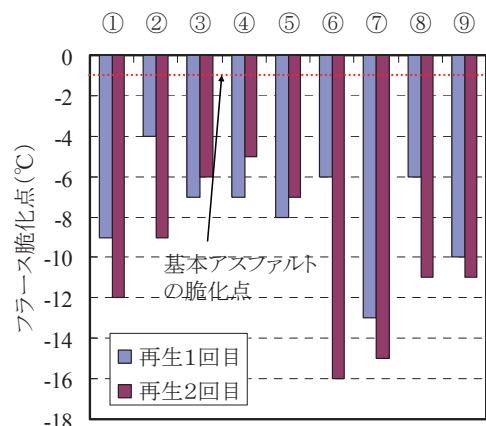


図-2.15 フラース脆化点の結果

2.4.3 再生アスファルトの化学性状

劣化における化学的変化を見るために、FT-IR を用いてカルボニル基の変化を測定した。再生 1 回目のカルボニル指数 (Carbonyl Index : CI) の変化を図-2.16 に、再生 2 回目のカルボニル指数の変化を図-2.17 に示す。いずれの図でも原アスファルトにおいては、オリジナルアスファルトと比べて再生アスファルトの CI が大きくなっているのが分かる。原アスファルトにおいては、針入度は同程度であり、見た目の性状は近いものの CI は大きく異なっていた。これより再生によって見掛けの性状は回復したように見えるが、化学的にはかなり異なるためと考えられた。再生 2 回目ではその差はさらに大きくなっていることから、再生してもカルボニル基が蓄積していることが分かる。このことから、劣化が進んだアスファルトを再生用添加剤で見掛け上軟化させても化学成分は異なっており、高い配合率では希釈効果も期待できないため、元のアスファルトとは大きく異なる性状を示したものと考えられる。

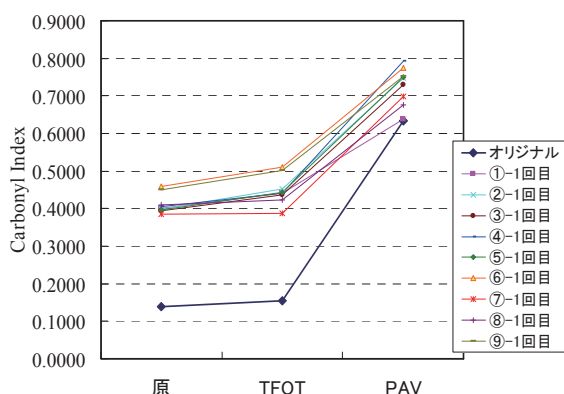


図-2.16 カルボニル指数の変化 (再生 1 回目)

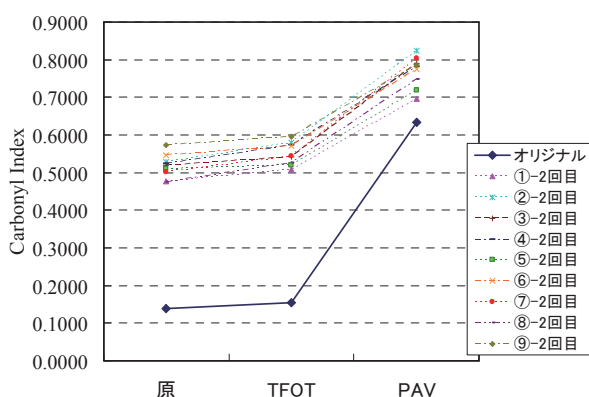


図-2.17 カルボニル指数 (CI) の変化
(再生 2 回目)

図-2.18 に芳香族分 (TLC-FID 法) と CI の関係を示す。カルボニル指数が増大すると芳香族分が減少する傾向が

見られた。これは酸化の過程で芳香族成分が他の成分に変化することによるものと考えられる。芳香族分はアスファルトの組成の中でも比較的分子量の小さいオイル成分であり、柔軟性を持たせる働きがあるため、ある程度の比率があることが望ましいが、再生を行っても、元のアスファルトのレベルにまでは戻っていない。

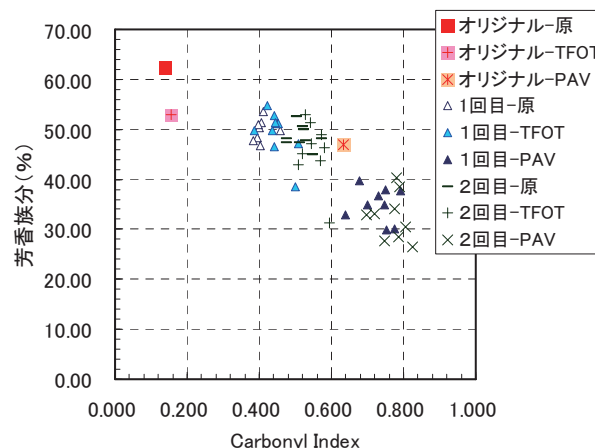


図-2.18 カルボニル指数 (CI) と芳香族分の関係

2.5 繰り返し再生を考慮した再生用添加剤の利用

上記までで、繰り返し再生した場合の性状の変化、再生用添加剤の種類による影響を把握した。ここでは、再生用添加剤の利用の最適化に向けた検討を行う。再生を繰り返した場合の再生アスファルトの構成を図-2.19 に示す。図は、毎回同じ配合率で再生を行った場合をイメージしている。再生を繰り返すことで、劣化の進んだアスファルトや再生用添加剤が蓄積していくことになるため、これを考慮した再生が必要と考えられる。

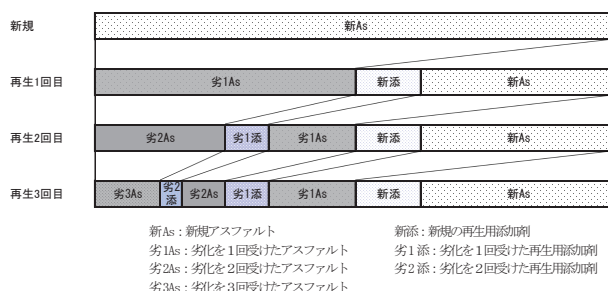


図-2.19 再生を繰り返した再生アスファルト
の構成

針入度のような足し合わせで表現できると性状について、繰り返し再生した場合の性状を式で表す。アスファルトのある性状値 S について、再生を 1 回行った場合について以下に示す。

再生1回目：

$$S_{RA1} = \frac{R}{1+r} S_{AS1} + \frac{rR}{1+r} S_{REJ0} + (1-R) S_{AS0} \quad \text{式(2.3)}$$

ここに、 S_{RA1} ：再生1回目のアスファルトの性状値

S_{AS0} ：新規のアスファルトの性状値

S_{AS1} ：劣化1回目のアスファルトの性状値

S_{REJ0} ：新規の再生用添加剤の性状値

r ：再生用添加剤の配合率（アスファルトに対する外割で表した率）

R ：再生アスファルト配合率（再生アスファルト全体に対する劣化アスファルトと再生用添加剤の率）

再生2回目：

$$S_{RA2} = \frac{R}{1+r} \left[\frac{R}{1+r} S_{AS2} + \frac{rR}{1+r} S_{REJ1} + (1-R) S_{AS1} \right] + \frac{rR}{1+r} S_{REJ0} + (1-R) S_{AS0} \quad \text{式(2.4)}$$

ここに、 S_{RA2} ：再生2回目のアスファルトの性状値

S_{AS2} ：劣化2回目のアスファルトの性状値

S_{REJ1} ：劣化1回目の再生用添加剤の性状値

ただし、ここでは再生用添加剤の添加量が2回目以降も1回目と同じとしている。ここで、式(2.3)でも式(2.4)でも最後の2項が同じであり、式(2.4)では劣化の次元が一つ進んだ、同じ構成の項があることから、これを T_n で置き換えると、どの再生の次元でも以下のように示せる。

再生n回目：

$$S_{RAn} = \left(\frac{R}{1+r} \right)^n S_{ASn} + \left(\frac{R}{1+r} \right)^n T_{n-1} + \left(\frac{R}{1+r} \right)^{n-1} T_{n-2} + \dots + \frac{R}{1+r} T_0 \quad \text{式(2.5)}$$

$$\text{ここに、} T_n = r S_{REJn} + \frac{1-R}{R} (1+r) S_{ASn} \quad \text{式(2.6)}$$

これらの式を利用して、物理性状および化学性状から、繰り返し再生利用の適正化について検討を行う。

2.5.1 物理性状からの添加量の決定

再生用添加剤の添加量の決定は、これまで針入度を指標として行ってきた。しかし、その結果、図-2.13 にも見られるように供用性と関係の深い指標である $G^*/\sin\delta$ が小さくなる傾向を示した。これについては、これまで検討された^{14)~16)}ように、 $G^*/\sin\delta$ などを指標として、添加量を求めれば対応できる。

再生用添加剤①を例にとって計算を行う。式(2.3)を利用するが、弾性率の一種である $G^*/\sin\delta$ は対数的に変化

するため、 $S=\log(G^*/\sin\delta)$ として計算した。結果を表-2.8 に示す。 $G^*/\sin\delta$ を元に求めた添加量は、針入度試験を元に配合を決めた場合よりも少なくなり、再生アスファルトの $G^*/\sin\delta$ の値は、オリジナルアスファルトの値とほぼ同じになるようにすることができた。しかし、一つの物理性状から添加量は求められるものの、他の物理性状はその都度確認しなければならず、他の指標の確認も必要と考えられた。

表-2.8 針入度および $G^*/\sin\delta$ を指標として配合した場合の比較（再生用添加剤①）

	$G^*/\sin\delta(\text{kPa})$	備考
基本材料の性状		
オリジナルアスファルトの $G^*/\sin\delta$	4.10E+03	
劣化後の $G^*/\sin\delta$	2.69E+04	
再生用添加剤の $G^*/\sin\delta$	3.13E-04	計算値
再生アスファルトの性状		
針入度試験を元にした配合	添加量 15.4%	2.84E+03
$G^*/\sin\delta$ を元にした配合	添加量 11.5%	4.09E+03 計算値

2.5.2 化学性状からの適切な繰り返し再生条件の検討

物理性状から、再生用添加剤の添加量の決定方法の改善はできた。しかし、繰り返し再生を行った場合の様々なアスファルト性状の変化は予想がつかない。アスファルトの性状は化学性状と関係が深いと見られ、アスファルトは酸化されるため、これを考慮することで、繰り返し再生に適した利用法の方角性が得られる可能性がある。CIは、2.4.3でも示したとおり、劣化の指標として有効であり、従来からアスファルト性状との関係が深いとされてきた芳香族成分との関係も見られた。そこで、このCIを用いて、繰り返し再生の最適化について考察することにした。

9種類の再生用添加剤の平均的な値を求めるため、図-2.16、2.17 に示した結果および再生用添加剤の結果を平均したものを表-2.9 に示す。ここで、CはCIを示すことにする。ここでは、劣化回数2回目までのデータしかないなので、 $n \rightarrow \infty$ のとき $C \rightarrow 1$ で、Cは1に漸近するものとし、近似式を作成した。横軸を $1/(n+a)$ として、aを変化させ、相関係数の最も大きくなったときの式を近似式とした。図-2.19、2.20 は、 $a=0.1785$ のときの図で、最も相関係数が大きくなったので、これをそれぞれの近似式とした。これらの近似式と式(2.5)、(2.6)を用いれば、どの劣化回数においても再生アスファルトのCIが推測できる。表-2.10にこれらの式から推測したCIを示す。

表-2.9 アスファルト等の各状態での CI の平均値

劣化回数	アスファルト	再生用添加剤	再生アスファルト	再生アスファルト (PAV劣化後) C_{RAn}^P
n	C_{ASn}	C_{REJn}	C_{RAn}	C_{RAn}
0	0.138	0.218	—	—
1	0.663	0.574	0.411	0.729
2	0.705*	—	0.517	0.769

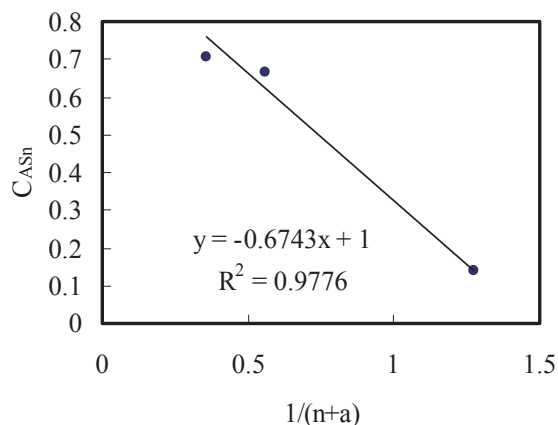
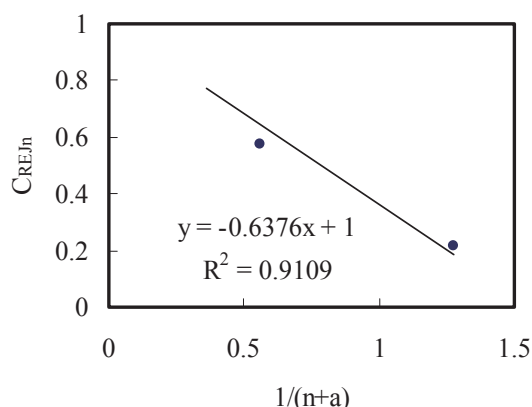
* C_{RA2} , C_{AS0} , C_{AS1} , C_{REJ0} から求めた計算値図-2.19 C_{ASn} の近似式の作成図-2.20 C_{REJn} の近似式の作成

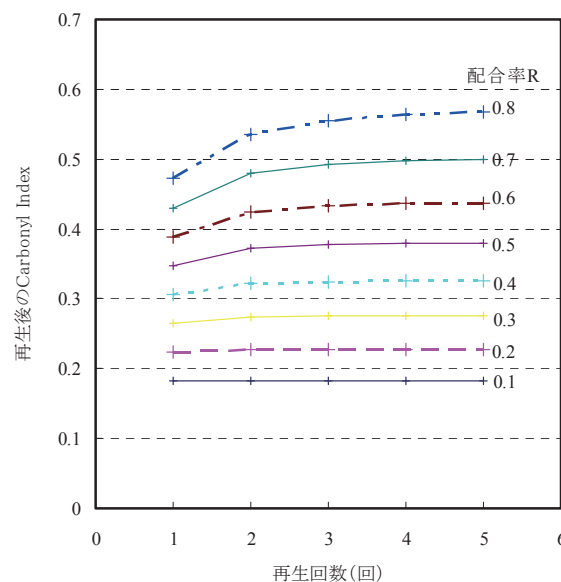
表-2.10 CI の推測値

n	C_{ASn}	C_{REJn}	T_n
0	0.141	0.190	0.077
1	0.622	0.644	0.303
2	0.758	0.772	0.367
3	0.822	0.832	0.397
4	0.859	0.867	0.414
5	0.883	0.890	0.426

式(2.5)で、 $r=0.1846$ (平均値) として、配合率 R を変化させたときの再生アスファルトの CI を求めた。図-2.21 に結果を示す。新規アスファルトの CI は 0.138 であるので、どの配合率でもこれを上回ってしまうが、 $R=0.1\sim0.3$ では、 CI の増加はほとんどみられない。本検

討では、アスファルトは全て針入度 20 まで劣化させており、使用可能な下限界値で実験を行っている。従って、高度に劣化が進んだ状態での繰り返し再生について検討しているが、再生配合率が 30% くらいまでなら、繰り返し再生しても性状の変動は少なく抑えることができると考えられる。 $R=0.4$ でもまだ変化は比較的小さいようであるが、 $R=0.6$ では、2 回目以降大きくなっており、再生されたアスファルトの質はかなり変化しているものと考えられる。

以上より、針入度 20 程度まで劣化の進んだアスファルトを繰り返し再生する場合、配合率は 30% までがよく、配合率 60% では繰り返し再生が進むとアスファルトの質が大きく異なってくる可能性があるかと推測された。

図-2.21 配合率を変化させたときの再生アスファルトの CI の変化 (推測値)

2.6 まとめ

室内での促進劣化試験をもとに、再生を繰り返したアスファルトの性状を調査した結果、以下のことが分かった。

- (1) 針入度を指標に回復させた場合でも、再生の繰り返し回数が増えると再生アスファルトの軟化点、 PI などの性状が変化していく。
- (2) $StAs$ を再生した場合でも、強く劣化したアスファルトの再生では、軟化点や PI などで一般的性状範囲を超えてしまうことがあることが確認された。
- (3) 再生アスファルトの性状が変化していく原因として組成の変化が考えられ、特に芳香族分の不足が原因

と考えられた。

- (4) 芳香族分の減少と PI の増大には関係が認められ、アスファルト組成成分の物理性状への影響が明らかとなった。
- (5) 再生アスファルト性状には再生用添加剤種類の影響が見られ、繰り返し再生回数が増すと、元のアスファルト性状との違いが大きくなる。
- (6) 強く劣化したアスファルトでは、再生して針入度を回復させても、60℃での $G^*/\sin\delta$ が小さいものがあり、耐流動性が劣る可能性がある。
- (7) 強く劣化したアスファルトでは、再生しても CI や芳香族分などの化学性状が回復せず、繰り返し再生により性状のずれが大きくなる。
- (8) 耐流動性を改善させる配合設計方法としては、60℃の $G^*/\sin\delta$ を指標とすることで対応できる。
- (9) 化学性状の変動が少ない状態で繰り返し再生していくには、10～30%程度の配合率で使用していくのが良く、60%以上では変動が大きすぎてリサイクルに影響があるものと考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省土木研究所：改質アスファルトを含む舗装発生材の再生利用の現状、土木研究所資料、第3806号、2001.1
- 2) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧、(社)日本道路協会、2007.6
- 3) 遠西智次、新田弘之、坂本浩行、片脇清：アスファルトバインダの劣化試験方法に関する研究、舗装、Vol.30、No.6、pp.3-7、1995
- 4) 日本道路協会：舗装再生便覧、(社)日本道路協会、2004.2
- 5) 雑賀義夫、川野敏行：再生アスファルト混合物に関する一考察、道路建設、No.406、1981.11
- 6) 山田優：再生アスファルト混合物の性質と供用性に関する一研究、土木学会論文集、No.348、pp.51-60、1984.8
- 7) 坂上浩則、原富男、丸山暉彦：再生合材の疲労耐久性について、土木学会年次学術講演会講演概要集第5部、Vol.41st、pp.9-10、1986.11
- 8) 八谷好高、高橋修、松崎和博、坪川将丈、郝培文：再生用添加剤が再生アスファルトの性能に及ぼす影響に関する実験的研究、土木学会論文集、No.753、pp.127-136、2004.2
- 9) 飯島尚、小島逸平、寺島憲一：再生加熱アスファルト混合物の一般的性状、第15回日本道路会議一般論文集、pp.375-376、1983
- 10) 野村健一郎、轟栄次：再生用添加剤の評価に関する2、3の検討、第15回日本道路会議一般論文集、pp.317-318、1983
- 11) 高橋光彦、鈴木秀輔、野村健一郎：アスファルトの再生用添加剤に関する一検討、土木学会年次学術講演会講演概要集第5部、Vol.54th、pp.34-35、1999.8
- 12) 木村慎、池田拓哉、寺田剛：促進劣化による再生アスファルト混合物の評価、土木技術資料、Vol.40、No.12、pp.38-43、1998.12
- 13) 山田優、山端一浩：再生アスファルトのリサイクルビリティー指数に関する研究、建設用原材料、Vol.5、No.1、pp.23-26、1995.10
- 14) J. Shen, S. Amirkhanian, J. A. Miller : Effects of Rejuvenating Agents on Superpave Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.19, No.5, pp.376-384, 2007.5
- 15) 沈菊男、野村健一郎、木下庄次：SHRP の評価試験を応用した再生用添加剤添加量の決定手法の提案、土木学会舗装工学論文集、第7巻、pp.28-1~28-8、2002.12
- 16) H. R. Soleymani, H. U. Bahia, A. T. Bergan : Time-Temperature Dependency of Blended and Rejuvenated Asphalt Binders, Asphalt Paving Technology, Vol.68, pp.129-152, 1999

3. ポーラスアスファルト混合物の再生利用方法の開発

3.1 概要

アスファルト混合物には、広く一般に用いられるストレートアスファルト系の混合物と、高耐久、高性能、特殊機能を持たせた改質アスファルト系の混合物がある。ストレートアスファルトの再生については、2. のように繰り返し再生を考慮した再生を提案した。3. では改質アスファルト系の混合物の中でも再生技術が未確立なポーラスアスファルト混合物について検討を行った。

ポーラスアスファルト混合物は、主に排水性舗装に用いられるもので、騒音低減効果や雨天時の走行性の向上効果を有することから、平成 10 年頃から本格的に施工されるようになり、施工ストックは年々増加している。初期に施工された排水性舗装は、更新の時期を迎えており、今後更新されるものは増加していく傾向にあると予想される。このため、ポーラスアスファルト混合物の再生利用法の確立が急がれており、多くの研究や試験施工が行われている^{1)~5)}。再生利用の一つに再生ポーラスアスファルト混合物への利用があり、これまでもその配合設計法は、いくつか提案されている^{1)~4), 6)}。その一つであるカンタブロ試験による配合設計法では、ポーラスアスファルト混合物には高い性能が求められるのにもかかわらず、混合物性状の一面しか捉えられていない可能性がある。また、抽出回収による配合設計法では、改質アスファルトを抽出回収すると性状が変化することがあるという問題がある⁷⁾とともに、抽出回収には溶剤を必要とし、環境への影響もあることなど課題がある。これらのことから、ポーラスアスファルト混合物の再生利用は、まだ最適化されていないのが現状である。

3. では、ポーラスアスファルト混合物から再生ポーラスアスファルト混合物を製造する際に必要となる配合設計方法の確立を目的として、製造・施工時や供用時の温度域での性状を考慮しながら、比較的簡便な配合設計方法の開発を行った。なお、ここでは、2. とは異なり、ポーラスアスファルト混合物を対象としており、この混合物特有の破損である骨材飛散抵抗性などに対応するため、物理性状からアプローチを中心とした。

配合設計方法としては、2つの方法を検討した。STEP1 では、これまで提案された方法の課題抽出を行い、改善策の一つとして、圧裂試験を用いた方法について検討を行った。STEP2 では、より詳細な性状を把握でき、省力

化も期待できるアスファルトモルタルによる方法の開発を行った。

3.2 STEP1:再生ポーラスアスファルト混合物の配合設計の課題抽出と改善策の検討

再生ポーラスアスファルト混合物の配合設計方法は、これまで、いくつか提案され^{1)~5)}、これらをもとにとりまとめたものが「舗装再生便覧」⁹⁾に掲載されている。

3.2 では、まず、便覧の方法で再生ポーラスアスファルト混合物の配合設計を行い諸性状を確認し、問題点を抽出した。つづいて、配合設計の改善に向けた検討を行い、現場でも対応可能な圧裂試験を利用した配合設計について検討した。

3.2.1 方法

(1) 配合設計方法

「舗装再生便覧」⁹⁾に紹介された配合設計方法は、使用する材料（再生用添加剤、再生用高粘度改質アスファルト）により異なる。再生用添加剤を用いる配合設計 A（図-3.1）では、再生用添加剤の添加量を決定する工程があるが、再生用高粘度アスファルトを用いる配合設計 B（図-3.2）では、その工程はなく、また最適アスファルト量の決定方法も通常と異なり、カンタブロ試験を用いたものになっている。本研究では、これら 2つの方法により、再生ポーラスアスファルト混合物を作製することにした。

本研究で行った配合の概要を表-3.1 に示す。配合設計 A は再生用添加剤を用いて再生骨材の配合割合は 30、50%とし、配合設計 B は再生用高粘度改質アスファルトを用いて、再生骨材の配合割合は 50%とした。なお、配合設計 C は比較のための新規骨材での配合設計であり、再生骨材の配合割合 0%と表示した。

(2) 使用材料

再生骨材は、新潟県内の一般国道で 8 年間供用した排水性舗装からの切削材をもとに調整したものである。13~5mm の粒径に調整した後の再生骨材の一般性状を表-3.2 に示す。また、再生骨材から回収したアスファルトの性状は表-3.3 のようであった。針入度は 20 以下に低下しており、また軟化点も新規の高粘度改質アスファルトと比べて低下している。

新規アスファルトとして使用した高粘度改質アスファルトの性状を表-3.4 に示す。このアスファルトは、切削材に含まれる高粘度改質アスファルトと同じ製造メーカ

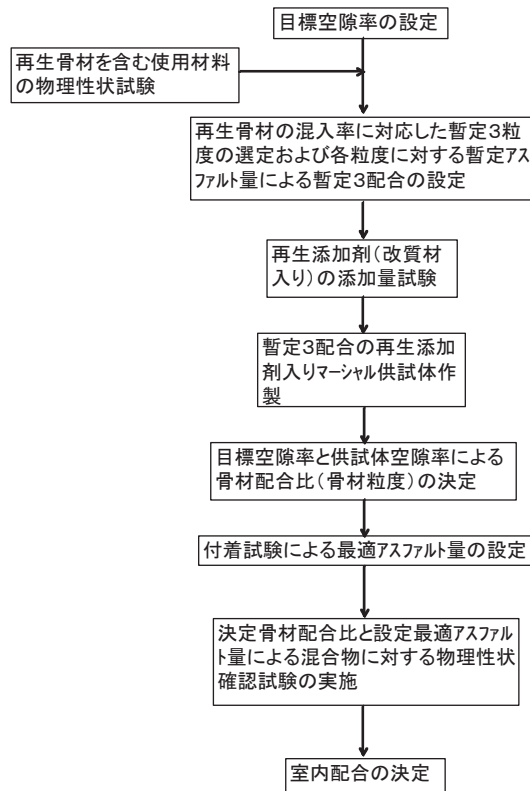


図-3.1 配合設計 A の流れ

(舗装再生便覧に紹介された方法を基に作成)

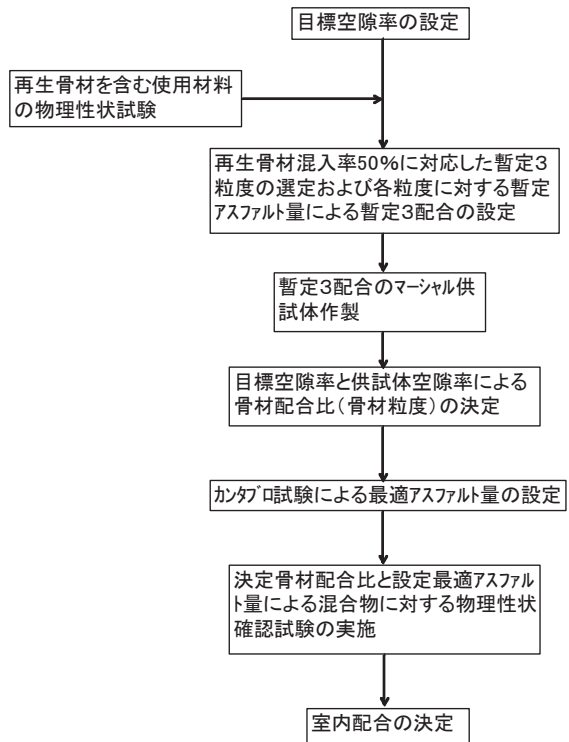


図-3.2 配合設計 B の流れ

(舗装再生便覧に紹介された方法を基に作成)

表-3.1 再生混合物および新規混合物の配合設計法の概要

	再生骨材配合割合	概 要
配合設計 A	30% 50%	再生用添加剤を用いた再生。 再生用添加剤の添加量を変えてカンタプロ試験を行い、カンタプロ損失率が15%以下になるよう添加量を決定。 付着試験によりアスファルト量を決定。
配合設計 B	50%	再生用改質アスファルトを用いた再生。 アスファルト量を変えてカンタプロ試験を行い、カンタプロ損失率の変曲点からアスファルト量を決定（変曲点のアス量+0.2%）。
配合設計 C	0%	新規。（排水性舗装技術指針（案））

表-3.2 再生骨材の性状（配合設計 A、B）

	見かけ密度※ (13-5mm)	溶剤抽出後粒度 (13-5mm)
通過重量百分率		
13.2mm	100	100
9.5mm	79.2	85.4
4.75mm	7.5	21.4
2.36mm	—	16.5
0.6mm	—	13.1
0.3mm	—	8.9
0.15mm	—	5.1
0.075mm	—	3.3
アスファルト量%	—	4.57

※見かけ粒度とは、アスファルトモルタルが付着したままの粒度

表-3.3 回収アスファルトの主な性状

針入度 1/10mm		17
軟化点℃		66.9
伸度 cm	15℃	47.0
	5℃	0.5

表-3.4 高粘度改質アスファルトの主な性状（配合設計 A、C）

針入度 1/10mm		67
軟化点℃		94
伸度 cm	15℃	100+
	4℃	70

表-3.5 使用した再生用材料

試験項目	再生用添加剤 (配合設計 A)	再生用改質 アスファルト (配合設計 B)
針入度 (1/10mm)	—	91
軟化点 (℃)	—	95.5
密度 (g/m ³)	0.951	1.025
60℃粘度 × 10 ⁴ Pa·s	67.5	10+

のもので、寒冷地用に低温性状の改善が図られたものである。さらに、再生に使用した再生用添加剤および再生用改質アスファルトには表-3.5 に示すものを用いた。

(3) 試験方法

実施した試験の方法を表-3.6 に示す。ここで、トラバース走行ホイールトラッキング試験は、ホイールトラッキング試験の条件に加え、タイヤの走行位置を左右に少しずつ変えながら走行させ、その振りをトラバース幅、横方向の移動速度をトラバース速度とした。また、据え切り試験は、供試体上でタイヤを円形に走行させ、骨材の移動による沈下量を計測した。

表-3.6 実施した主な試験

	試験項目	評価値	試験の概要
混合物試験	カンタブロ試験	カンタブロ損失率	舗装試験法便覧別冊 1-1-2 による。 試験温度 20、-20℃
	圧裂試験	圧裂強度 圧裂変位量	舗装試験法便覧 3-7-6 による。 試験温度：-10,0,5,10,15,20,60℃
	トラバース走行ホイールトラッキング試験	透水量	ホイールトラッキング試験機を用いて、走行位置を左右にずらしながら載荷。荷重 686N、走行速度 42 回/min、走行距離 230mm、トラバース速度 100mm、トラバース幅 250mm
	据え切り試験	沈下量 10mm に達するまでの走行回数	ホイールトラッキング供試体上において、半径 100mm の円周でタイヤ走行。荷重 686N、走行回転数 42 回/min、走行時間 120min、試験温度 60℃
試験バイнда	アスファルトの回収試験	—	舗装試験法便覧 3-9-7 による。
	ダイク・シ・レオ試験 (DSR 試験)	複素弾性率 位相角など	舗装試験法便覧別冊による。
	伸度試験	伸度	試験法便覧 3-5-3 による。 試験温度 4℃

3.2.2 配合設計の結果

(1) 配合設計 A

a) 再生用添加剤の添加量の決定

配合設計 A では、まず再生用添加剤の添加量を求めるため、添加量を変化させてカンタブロ試験を実施した。再生骨材の配合割合が 30%の時の結果を図-3.3 に示す。20℃でカンタブロ試験を実施したところ目標値である損失率 15%には配合割合 0%ですでに下回っており、新材と同程度のカンタブロ損失率になる添加量を求めることができなかった。そこで、新規混合物のカンタブロ損失率を目標値にしたが、新規混合物（配合設計 C）のカンタブロ損失率は 2.3%であったため、これでも新規混合物と同程度のカンタブロ損失率にするための添加量を求めることはできなかった。この原因として、新アスファルトに寒冷地用に低温性状の改善が図られたものを使用し

ただため、20℃でのカンタブロ損失率が低く、これを使用しただけで、カンタブロ損失率が低くなるためと考えられた。

そこで、-20℃でのカンタブロ試験を実施して、新規混合物と同程度の損失率を目標として配合設計を試みた。低温でのカンタブロ試験による再生用添加剤量の検討結果を図-3.4、3.5 に示す。新規混合物（配合設計 C）の損失率 12.3%を目標にしたところ、添加量を求めることができた。

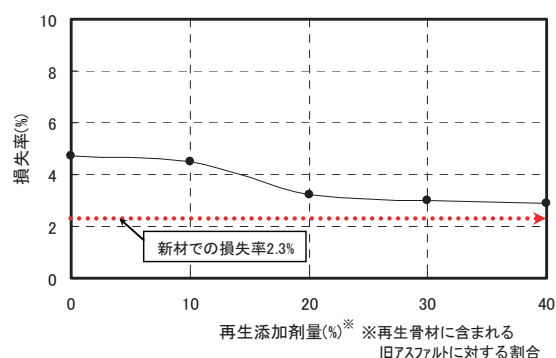


図-3.3 カンタブロ試験による再生用添加剤の添加量の検討（配合設計 A<30%>、試験温度 20℃）

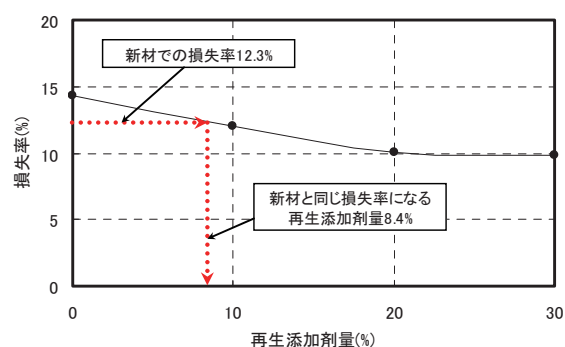


図-3.4 カンタブロ試験による再生用添加剤の添加量の検討（配合設計 A<30%>、試験温度 -20℃）

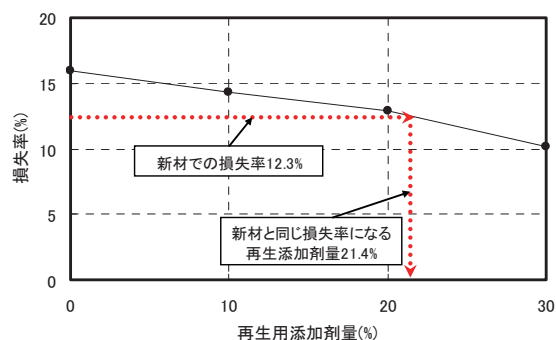


図-3.5 カンタブロ試験による再生用添加剤の添加量の検討（配合設計 A<50%>、試験温度 -20℃）

b) アスファルト量の決定

アスファルト量を決定するため、付着試験を行った。結果を図-3.6に示す。この結果、変曲点は4.6%となり、通常のポーラスアスファルト混合物では5%付近の値をとることが多いが、それと比べて若干小さい値になった。アスファルト量が不十分な場合、骨材飛散抵抗性の低下など耐久性への影響が懸念されるため、カンタブロ試験を実施し、最小アスファルト量を求めた。結果を図-3.7に示す。最小アスファルト量は4.7%となり、付着試験から求めた値を上回った。通常のポーラスアスファルトの配合設計では、カンタブロ試験から求まる変曲点を最小アスファルト量とし、付着試験から求めた変曲点を最大アスファルト量として、両者の間の値をアスファルト量に設定できるが、最大アスファルト量と最小アスファルト量の数値が逆転してしまったため、付着試験の結果が採用できなかった。これは、配合割合50%の場合でも同様の傾向であった。最小アスファルトを下回る値をアスファルト量として設定することは、耐久性を大きく損なう可能性があったため、「舗装再生便覧」に紹介された方法を参考に、配合設計Bで提案されている、カンタブロ試験から求めた変曲点+0.2%を最適アスファルト量とする方法を採用した。それぞれの結果を図-3.7に示す。

(2) 配合設計B

配合設計Bでは、再生用添加剤と改質材がブレミックされた再生用改質アスファルトを用いるため、アスファルトに関する操作は、最適アスファルト量の設定のみであり、設定方法はカンタブロ試験から求めた変曲点+0.2%の添加量とするものである。カンタブロ試験の結果を図-3.8に示す。その結果、最適アスファルト量は5.2%となった。配合設計A、Cの結果と合わせて、表-3.7に示す。なお、最適アスファルト量における新アスファルトと旧アスファルトおよび再生用添加剤の内訳も合わせて示す。

3.2.3 再生ポーラスアスファルト混合物および再生バインダの性状

(1) 混合物性状

3.2.2で配合設計した再生ポーラスアスファルト混合物について各種性状試験を行った。主な性状を表-3.8に示す。配合設計Aでは、-20℃のカンタブロ損失率を配合設計Cに合わせる形で配合設計を行ったので、同程度の値を示したが、配合設計Bでは特にカンタブロ損失率の大小に注目して配合設計を行っていないため、配合設計Cとは異なる傾向を示した。動的安定度は、いずれも

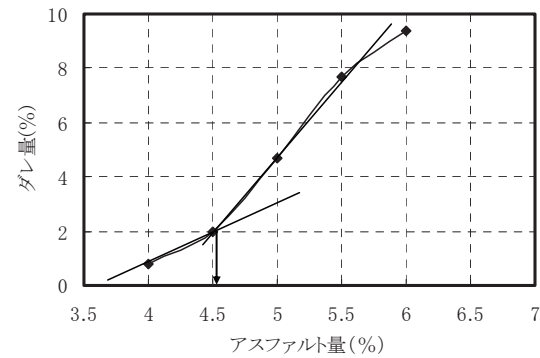


図-3.6 付着試験の結果
(配合設計 A<30%)

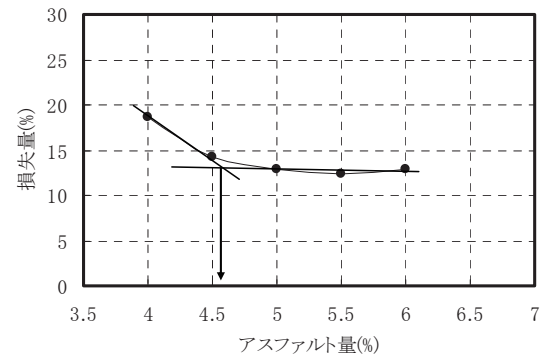


図-3.7 カンタブロ試験の結果
(配合設計 A<30%)、試験温度 -20℃

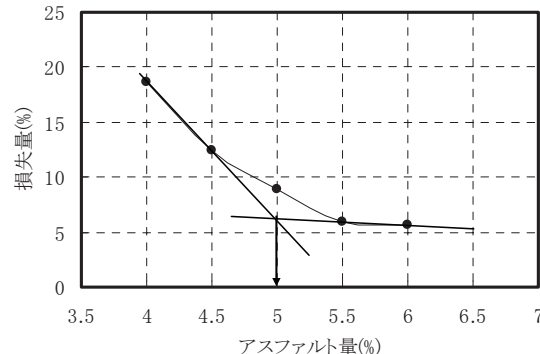


図-3.8 カンタブロ試験の結果
(配合設計 B<50%)、試験温度 20℃

表-3.7 最適アスファルト量の設定

	再生骨材 配合割合	各試験から求めた アスファルト量%		最適アスファ ルト量(%)	アスファルト内訳 (%) 新 As+旧 As+添加剤 or 新 As+ 旧 As
		付着試験 の変曲点 から	低温カン タブロ変曲 点から		
配合設計 A	30%	4.6	4.9	4.9	3.84+0.98 +0.08
	50%	5.1	5.3	5.3	3.31+1.64 +0.35
配合設計 B	50%	—	—	5.2	3.56+1.64
配合設計 C	0%	4.8	—	4.8	—

表-3.8 再生ポーラスアスファルト混合物の主な性状

項 目 〈試験温度〉		配合設計 A<30%〉	配合設計 A<50%〉	配合設計 B<50%〉	配合設計 C<0%〉
安定度(kN)		6.43	5.5	5.41	8.71
フロー値 (1/100cm)		58	59.3	70.1	71.7
カンタプロ損失率(%)	<20℃>	5.1	4.1	8	2.3
	<-20℃>	13.7	14.4	26.8	12.3
圧裂試験	圧裂強度(MPa) <20℃>	3.34	2.69	2.46	3.8
	圧裂変位量 (cm) <20℃>	0.22	0.24	0.13	0.29
	圧裂強度(MPa) <60℃>	0.0793	0.0599	0.0484	0.1042
	圧裂変位量 (cm) <60℃>	0.3	0.2	0.25	0.38
動的安定度(回/mm) <60℃>		5727	3521	3901	6867
据え切り試験 (回) <60℃>		1002	600	259	1260
回収バインダ 性状	針入度(1/10mm) <25℃>	67	75	61	82
	軟化点(℃)	88.3	86.5	82.9	88.6
	伸度 (cm) <5℃>	76	63	33	70
	G*/sinδ(Pa) <60℃>	9840	7793	7130	11102

3,000 回/mm 以上となったが、配合割合 50%のものはその中では小さい値を示した。据え切り試験でも、再生骨材の配合割合が 50%のものは小さい値を示し、特に配合設計 B の値が小さくなっており、骨材飛散抵抗性が低い可能性があることが分かった。

以上より、現在検討されている再生ポーラスアスファルト混合物の配合設計法に従って配合した場合、新規混合物と異なる性状がいくつか見られた。中でも、配合設計時に考慮されなかった高温域（60℃付近）での性状については、耐久性が劣る可能性を示す結果となった。従って、配合設計時にこれらを補う試験が必要であると考えられた。

(2) 再生バインダの性状

表-3.8 には、それぞれの混合物から回収したバインダの主な性状も示した。針入度では配合設計 B がやや小さい値を示しているが、高粘度改質アスファルト一般的な下限値である 40 よりはいずれも大きく特に問題は見られなかった。軟化点でも高粘度改質アスファルトの一般的な下限値の 80 を超えており、特に問題は見られなかった。5℃における伸度については、特に一般的な値は示されていないが、骨材飛散などの破損と関係があるものと考えられ、値の小さい配合設計 B では、混合物性状への影響が考えられた。ダイナミック・シア・レオメータ (DSR) 試験の結果は、耐流動性と相関が高いとされている $G^*/\sin\delta$ で示しているが、配合割合 50%のものが比較的值が小さく、耐久性の面で同等ではない可能性が考えられた。

DSR 試験では、載荷の周波数と測定温度を変え測定することにより、その材料特有のマスターカーブが比較的容易に作成できる。そこで、回収バインダの DSR 試験か

ら、バインダの複素弾性率および $\tan\delta$ でマスターカーブを作成した。結果を図-3.9、3.10 に示す。複素弾性率 G^* は弾性率の一種である。また、 $\tan\delta$ はひずみと応力に発生する位相のずれを位相角 δ を用いて表現したものであり、弾性的なものほど 0 に近づき、粘性的なものほど大きくなる。なお、横軸が周波数となっているが、横軸を温度にした場合でも同じような形状の図になることが知られており、右側を低温時、左側を高温時とした場合に同じよう形状の図になる。

図-3.9 より、まず特徴的なのは、再生骨材に付着していた旧アスファルトの性状である。旧アスファルトの複素弾性率は、他のバインダと比べた場合、低温側に相当する図の右側で大きく、高温側に相当する図の左側で小さい。また、改質アスファルトのマスターカーブでは、通常変曲点を示すことが多いが、この旧アスファルトでは、変曲点らしきところがない。さらに、図-3.10 より $\tan\delta$ は、図の左に行くほど大きくなっており、粘性体に近づいている。これらのマスターカーブの形状は、数値の大小はあるものの、ストレートアスファルトの場合に得られる形状に比較的似ている。このような旧アスファルトの特徴は、劣化によるものと考えられ、アスファルト成分の劣化により硬化したため図-3.9 の右側（低温側）でみられたように複素弾性率が大きくなったものと考えられた。また、改質材の劣化により、改質材としての働きが弱くなり、図-3.10 のように $\tan\delta$ が左に行く（高温側）と大きくなり、粘性的な傾向を示したものと考えられた。

次に、再生したバインダである配合設計 A および B と、新規のバインダの配合設計 C を比較する。配合設計 A では、図-3.9 の右側で新規の配合設計 C<0%>に近い値を示しているため、低温側では新規混合物と同等の再生が

行えたと見られる。配合設計 A<50%>と配合設計 A<30%>の比較では、50%の方が全体的に小さい値を示し、特に図の左側で新規のものとの差が大きくなっていることから、高温での性状が若干劣るものと考えられた。配合設計 B<50%>では、図-3.9、3.10ともに新規のものとは大きく異なる挙動を示した。複素弾性率 G^* では、図-3.9の左側で新規のものとは比べて小さい値を示し、高温性状が劣るものと考えられた。 $\tan\delta$ は、全体的に異なっているが、特に図-3.10の右側で大きく、低温性状が異なるものと考えられた。

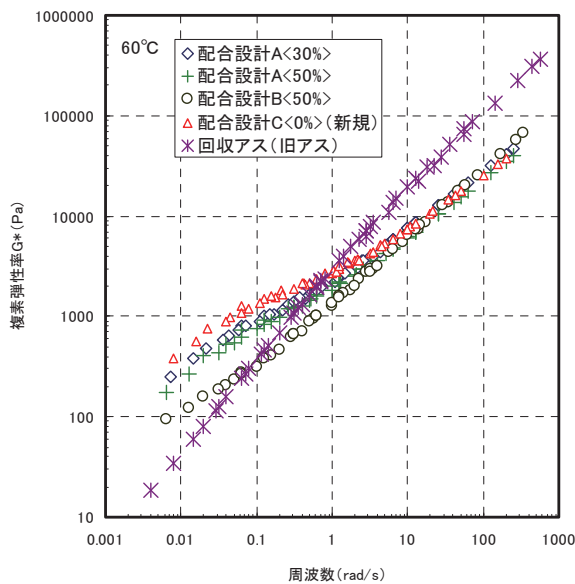


図-3.9 DSR 試験による複素弾性率のマスターカーブ

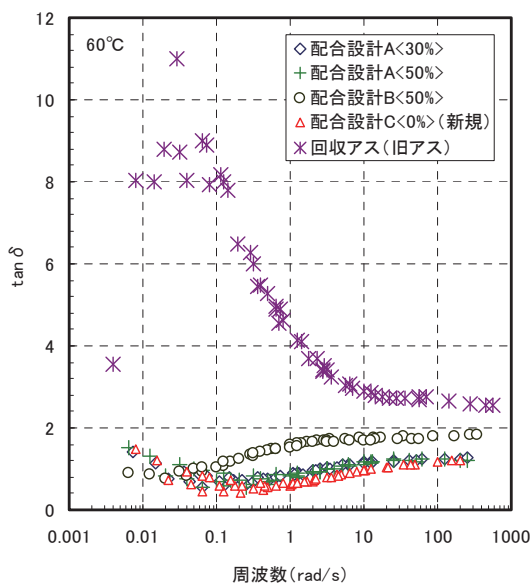


図-3.10 DSR 試験による $\tan\delta$ のマスターカーブ

3.2.4 再生ポーラスアスファルト混合物の配合設計方法の改善に向けた検討

3.2.3の結果より、3.2.2で配合設計されたものは、新規混合物と比べ、高温域（60℃付近）などで異なる性状が見られることが分かった。特に配合設計 B では、著しく性状が異なっており、配合設計時に新規混合物との性状比較の段階がないことが影響していると考えられた。従って、再生ポーラスアスファルト混合物の配合設計には新規混合物と同等であることを確保するために高温域での試験が必要であると考えられた。抽出回収したアスファルトの性状を従来のように様々な温度域で細かくチェックすることでも可能であるが、抽出回収による性状変化の問題があり、また時間を要するため、実用性が低い。

そこで、まずバインダ性状と混合物性状の比較を行い、関係を把握し、続いてより簡便な混合物試験方法による代替について検討した。

(1) バインダ性状と混合物性状の比較

バインダ性状試験としては、低温性状として5℃伸度、常温性状として針入度、高温性状として軟化点および60℃での DSR 試験を取り上げ混合物性状との比較を行った。

伸度とカンタプロ損失率の関係を見たところ、図-3.11に示すとおり、高い相関関係を示した。特に低温でのカンタプロ損失率とは、高い相関係数を示した。これより、従来からバインダの試験項目として重要視されてきた伸度は、カンタプロ試験を実施することにより、代用できる可能性があることがわかった。

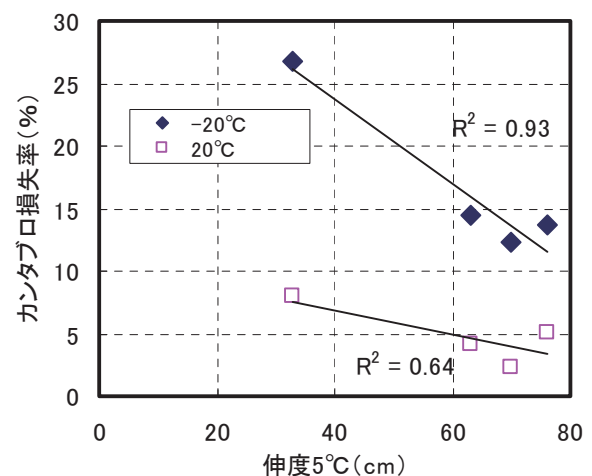


図-3.11 伸度とカンタプロ損失率

次に針入度および軟化点と動的安定度 DS および据え切り試験の 10mm 沈下までの回数の関係を図-3.12、3.13 に示す。いずれの図でも、針入度は相関が低く、試験温度の違いも影響したものと考えられたが、軟化点は比較的高い相関が高く、特に据え切り試験との相関が高くなった。さらに、DSR 試験と動的安定度および据え切り回数の関係を図-3.14、3.15 に示す。密粒度系混合物で動的安定度との相関が認められている³⁾ $G^*/\sin\delta$ は、ポーラスアスファルト混合物でも相関が非常に高くなった。また、据え切り回数との相関係数は非常に高くなり、抽出回収でバインダ試験が行えなくても、これらの試験でも代替可能と考えられた。

しかし、ホイールトラッキング試験や据え切り試験では、供試体作製のための試料量を多く必要とし、特に据え切り試験では試験機の仕様、評価方法が定まっておらず、試験機台数も少ないため、配合設計に利用するには障害が多いものと考えられる。そこで、さらに簡便な混合物試験との関係を検討した。

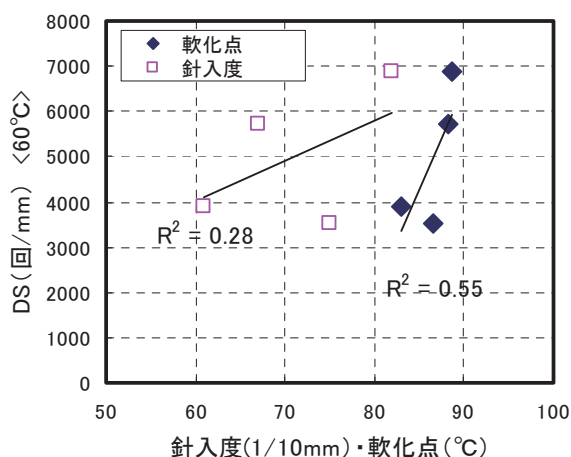


図-3.12 針入度および軟化点と動的安定度

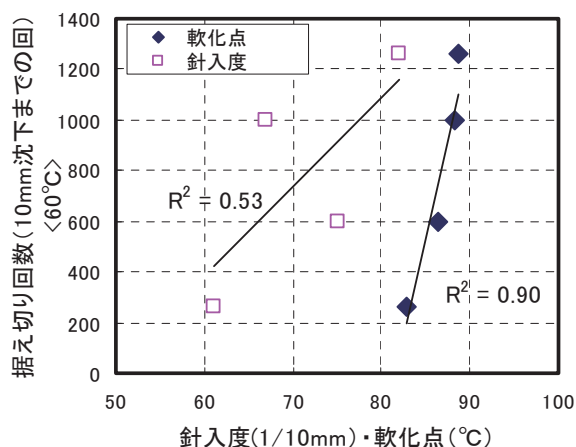


図-3.13 針入度および軟化点と据え切り回数

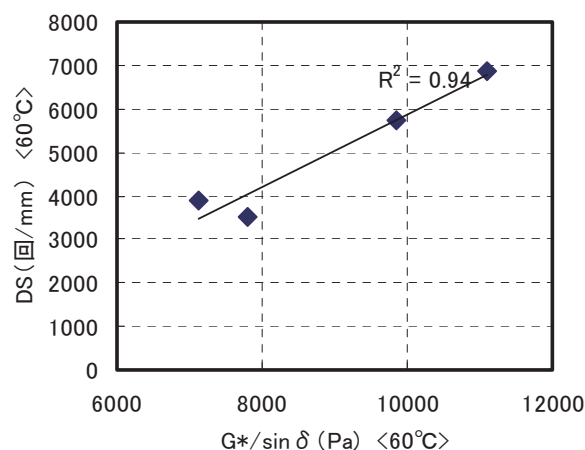


図-3.14 DSR と動的安定度

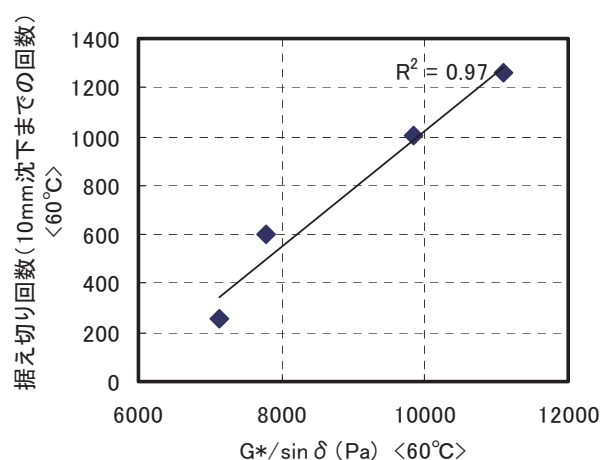


図-3.15 DSR 試験と据え切り回数

(2) 圧裂試験の配合設計用試験への適用性の検討

配合設計に用いる試験機は、汎用的な試験機で比較的簡便に行えるものである必要がある。また、3.2.3 で示されたように、高温域（60℃付近）での性状確認が必要であるので、高温域での試験が可能なことも必要条件である。ここでは、その一つの選択肢として、圧裂試験（舗装試験法便覧）を実施して、可能性を検討した。比較検討は、軟化点や $G^*/\sin\delta$ （60℃）と相関の見られた据え切り試験、伸度と相関の見られたカンタブロ試験について行った。なお、本検討では、前述した再生ポーラスアスファルト混合物に、製造メーカーの異なる改質アスファルトⅡ型3種、高粘度改質アスファルト3種によるポーラスアスファルト混合物も追加した。

図-3.16、3.17 に圧裂試験と据え切り試験の比較を行ったものを示す。いずれの試験も試験温度は60℃とした。圧裂変位量よりも圧裂強度の方が相関性が高くなった。データは少ないものの、改質アスファルトⅡ型をバインダに用いたポーラスアスファルト混合物や据え切り

回数が低かった配合設計 B<50%>（最も左のプロット）などが図の左下付近に位置しており、これらを排除するような目標設定をして配合設計することで、高温での耐久性に考慮した再生ポーラスアスファルト混合物の配合設計が行えるものと考えられた。

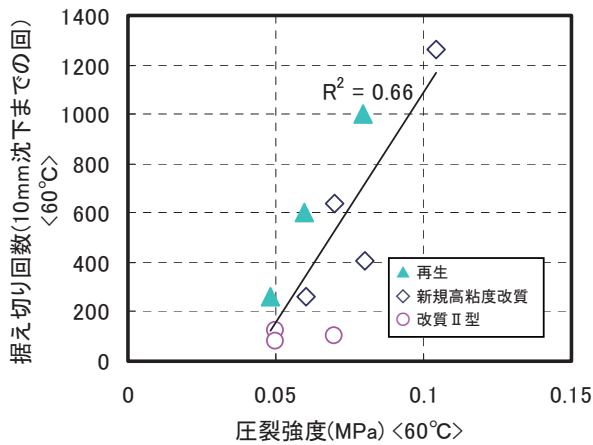


図-3.16 圧裂強度と据え切り回数

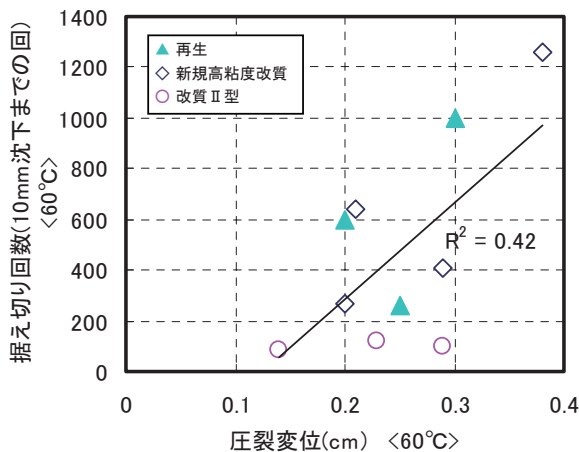


図-3.17 圧裂変位と据え切り回数

カンタブロ試験と圧裂試験の関係について図-3.18 に示す。いずれの試験も試験温度は20℃とした。カンタブロ損失率と圧裂変位量の間にも、相関関係が見られたが、図に示した圧裂強度/圧裂変位量が比較的相関関係が高くなった。カンタブロ試験については、既に再生ポーラスアスファルト混合物の配合設計に用いる方法が提案されており、これにより現状でも20℃での性状を新規混合物の性状に近くさせることは本研究の中でも確認されている。しかし、ここで示したカンタブロ試験と圧裂試験の関係から20℃付近の混合物性状評価を圧裂試験に代替することも可能と見られるため、配合設計を行う試験機器等の都合により選択できるようになるものと考えられた。

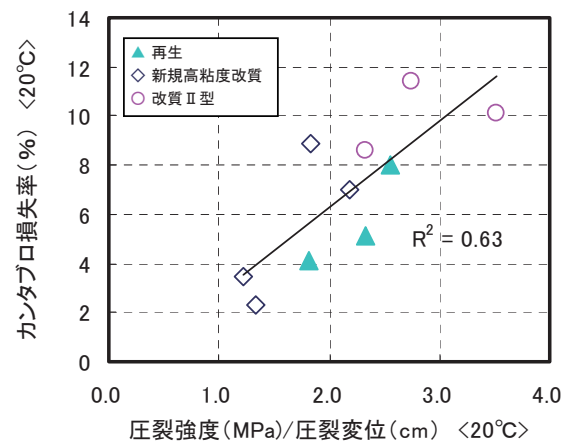


図-3.18 圧裂試験とカンタブロ試験の関係

3.3 STEP2: アスファルトモルタルによる再生ポーラスアスファルトの配合設計の開発

STEP1 においては、これまで提案されている方法の課題の抽出と、現場で対応しやすい改善策として、圧裂試験を利用した配合設計について検討を行った。STEP2 では、さらに改善し、供用時だけでなく、製造・施工時の性状も考慮でき、さらにアスファルトの抽出回収も必要としない方法として、アスファルトモルタルによる配合設計方法について検討した。

3.3.1 検討方法

(1) 検討手順

検討は、以下の手順で行った。

- ① アスファルト性状とアスモル性状の把握
- ② カンタブロ試験による再生ポーラスアスファルトの配合設計
- ③ アスモルによる再生ポーラスアスファルトの配合設計
- ④ ②と③の比較検討

(2) 使用材料

使用した材料の一覧を表-3.9 に、使用した骨材、アスファルト、再生用添加剤、改質剤の性状を表-3.10～3.13 に示す。再生骨材は2種類使用し、一つは排水性舗装の切削材を13-5mmに分級した再生骨材（再生骨材A）、もう一つはストレートアスファルトを用いた一般的な舗装の切削材を13-5mmに分級した再生骨材（再生骨材B）とした。再生用添加剤は市販されているオイルタイプのもを用いた。また、改質剤はポリマー改質アスファルトH型のプラントミックスタイプとして市販されているものを用いた。

表-3.9 使用材料

材料名	材質
6号砕石	硬質砂岩
再生骨材A	排水性舗装切削材
再生骨材B	StAs舗装切削材
細目砂	川砂
石粉	石灰岩
アスファルト	ポリマー改質アスファルトH型
再生用添加剤	オイルタイプ
改質剤	ポリマー改質アスファルトH型用改質剤

表-3.10 骨材性状

項 目	6号砕石	再生骨材A※1	再生骨材B※2	細目砂	石粉
通過質量百分率 %	19mm	100.0	100.0	—	—
	13.2mm	96.1	98.5	96.1	—
	9.5mm	56.2	75.4	77.3	—
	4.75mm	0.1	21.2	29.5	100.0
	2.36mm	—	18.1	21.0	99.5
	1.18mm	—	14.8	18.4	98.6
	0.6mm	—	12.0	13.5	51.0
	0.3mm	—	8.9	9.8	48.1
	0.15mm	—	6.1	5.5	5.4
	0.075mm	—	3.6	3.4	0.4
密度	表乾	2.658	2.504	2.571	2.618
	かさ	2.641	—	—	2.556
	見掛	2.688	—	—	2.725
吸水量%	1.16	—	—	—	2.43
すりへり減量%	10.6	—	—	—	—
安定性%	0.8	—	—	—	—
細長扁平含有量%	2.4	—	—	—	—
軟石量%	3.0	—	—	—	—
アスファルト量%	—	4.23	3.50	—	—

※1 排水性舗装の切削材を13-5mmに分級した再生骨材

※2 StAs舗装の切削材を13-5mmに分級した再生骨材

表-3.11 改質アスファルトの性状

項 目	試験値
針入度	1/10mm 66
軟化点	℃ 95
伸度	15℃ cm 97
	4℃ cm 27
密度 (15℃)	g/cm3 1.024
薄膜加熱質量変化率	% 0.01
薄膜加熱質量針入度残留率	% 83.3
タフネス	N・m 24.1
テナシティ	N・m 21.6
動粘度	180℃ cSt 366
	160℃ cSt 806
	140℃ cSt 2921
60℃粘度	Pa・s 9.73
引火点	℃ 328

表-3.12 再生用添加剤の性状

項 目	試験値
動粘度(60℃)	cSt 504
密度(15℃)	g/cm3 0.951
薄膜加熱後の粘度比	% 1.1
薄膜加熱質量変化	% -0.07
引火点	℃ 328

表-3.13 改質剤の性状

主成分	SBSブロック共重合体	
外観	エマルジョン	
全固形分	%	50
pH		10
エマルジョン密度	g/cm3	0.98
固形分密度	g/cm3	0.96

(3) 試験方法

a) アスファルトおよびアスファルトモルタル試験

「舗装調査・試験法便覧」⁸⁾には、アスモルの標準的な試験方法はなく、アスモルの試験を行う場合は、新たな試験を考案するか、他の材料試験を参考にして行う必要があった。そこで、アスモルのアスファルト含有率が高く、アスファルトの性質を強く持っていることから、アスファルトの試験を参考にアスモルの試験を行うことにした。また、アスファルトとの性状比較を容易に行うために、アスファルトの試験をアスモルと同じ項目について行った。表-3.14 にアスファルトとアスモルの試験項目を示す。

表-3.14 アスファルト及びアスファルトモルタルの試験項目と試験条件

	アスファルト	アスファルトモルタル	備考
ダイナミック・シア・レオメータ試験 (DSR)	温度	60℃	—
	周波数	0.1-100rad/s	0.1-100rad/s
	半径	25mm	25mm
	ギャップ	1mm	2mm
二重円筒回転粘度試験 (RV)	温度	165, 170, 175℃	170℃
	回転数	1~50rpm	1~50rpm
ベンディング・ビーム・レオメータ試験 (BBR)	温度	-20℃	-20℃

b) アスファルト混合物試験

アスファルト混合物性状の評価は、表-3.15 の試験により行った。なお、この他、配合設計のために、マーシャル試験や付着試験も行った。

表-3.15 アスファルト混合物の試験項目と試験条件

	試験条件	備考
カンタブロ試験	20℃, -20℃	舗装調査・試験法便覧 B010による
ホイールトラッキング試験	60℃	舗装調査・試験法便覧 B003による
圧裂試験	20℃, 60℃	舗装調査・試験法便覧 B006による
ねじり骨材飛散試験	50℃	舗装性能評価法別冊「ねじり骨材飛散値を求めるための骨材飛散試験機による測定方法」による

(4) 配合設計方法

a) カンタブロ試験による配合設計

カンタブロ試験による配合設計(以下、カンタブロ法)は、「舗装再生便覧」⁶⁾の付録-5「参考資料：再生排水性舗装用混合物の配合設計方法の例」の中にある「プラント再生工法」の配合設計方法を参考に行った。配合設計のフローを図-3.19 に示す。今回は再生用添加剤と改質剤を別々に添加したため、まず再生用添加剤量を変化させてカンタブロ試験を行い、再生用添加剤量を決定した

後、改質剤を追加して改質剤量を決定した。なお、本論文中では、再生用添加剤量は再生骨材中に含まれるアスファルト（以下、旧アスファルト）に対する％で表示し、改質剤量は旧アスファルト＋新アスファルト＋再生用添加剤に対する％で表示した。

b) アスファルトモルタルによる配合設計

アスモルによる配合設計（以下、アスモル法）は、再生用添加剤量および改質剤量の決定の部分だけをアスモル試験の結果から判断することにした。すなわち、図-3.19の⑥～⑦をカンタプロ試験の結果から決定することにした。

アスモル試験は、アスファルト試験を流用するとし、まずバージン材でのアスモル試験を行い、続いて再生アスモルを添加剤等の量を変化させて作成し、試験を行った。再生アスモルの目標性状は、バージン材の性状とした。

なお、本研究においては、DSR 等のアスファルト用の試験でアスモルの性状測定を行うことから、骨材粒径が大きなものが測定できないため、アスモルが 1.18mm 通過分の骨材およびアスファルトからなるとして、これを用いて各種の試験を行った。

3.3.2 アスファルト性状とアスファルトモルタル性状の関係の把握

(1) 概要

アスモルの性状を把握することで、ある程度アスファルト性状を評価できるかどうかを確認するために、アスファルト性状とアスモル性状の関係を把握した。試験には全てバージン材を用い、アスファルトにはポリマー改質アスファルトⅡ、H型を数種類用いた。試験項目は、DSR、BBR、RV を行った。なお、アスモルは、混合物の 1.18mm 通過分としたので、配合は混合物の配合表より 1.18mm 通過分の細骨材、石粉、アスファルトの量を求め、全体が 100%になるようにして求めた。具体的にはアスファルトに 1.18mm 通過分の細目砂を 49.26%、石粉 25.00%、アスファルト 25.74%を混合して作製した。

(2) アスファルト性状とアスファルトモルタル性状の比較

アスファルト性状とアスモル性状の比較したものを図-3.20、3.21、3.22 に示す。図-3.20 では、60℃における DSR の性状を比較しているが、高温域においてアスファルトの性状とアスモルの性状は高い相関性を示している。図-3.21 では、-20℃における BBR の性状を比較してい

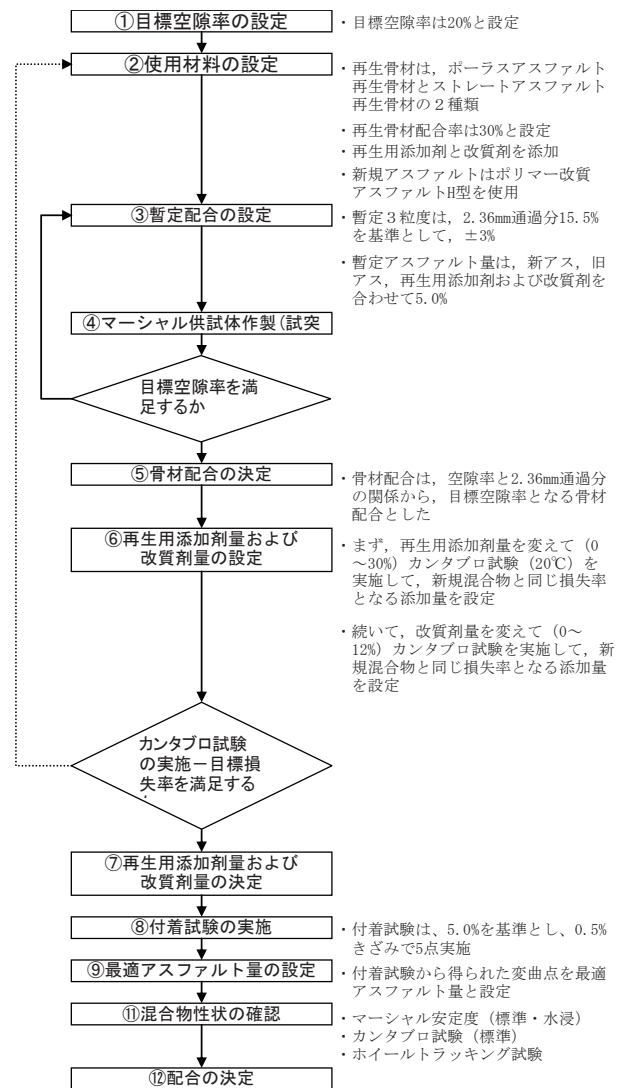


図-3.19 配合設計のフロー

るが、低温域においても高い相関性を示している。図-3.22 では、170℃における RV の性状を比較しているが、アスファルト混合物の製造・施工温度域についても高い相関性を示している。

以上より、広い温度域にわたってアスファルトとアスモルの性状にはいずれも R^2 が 0.9 以上を示す高い相関性が認められた。これより、アスモルの性状を把握することによって、配合設計を行うことができる可能性が示された。

再生混合物を配合するとき、アスファルトの性状回復を図るが、アスモル性状の把握によりアスファルト性状の把握が行えることが分かったことにより、アスファルトの性状回復をアスファルトモルタル試験の結果を目安に行うことができる可能性が示された。

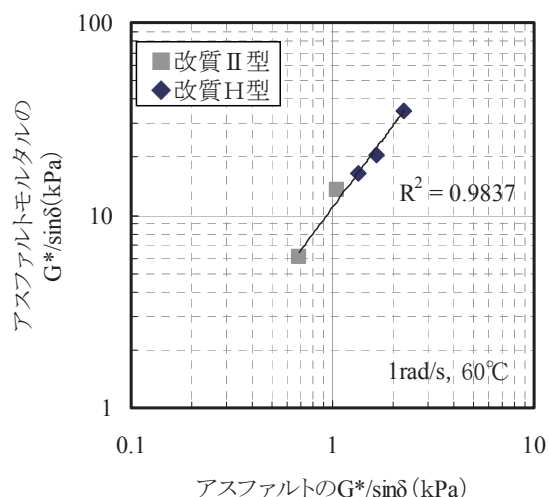


図-3.20 アスファルト性状とアスファルトモルタル性状の関係 (DSR)

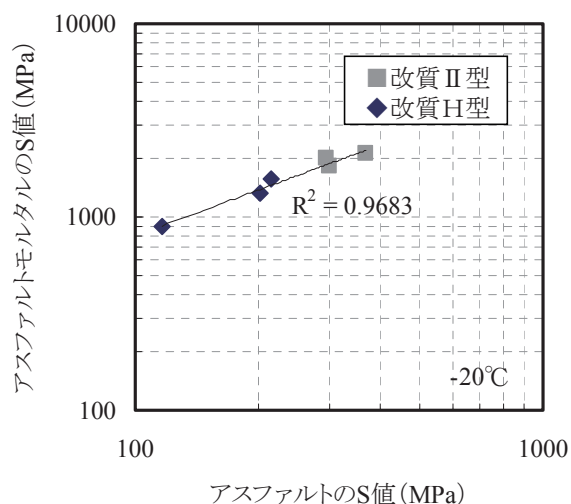


図-3.21 アスファルトとアスファルトモルタル性状の関係 (BBR)

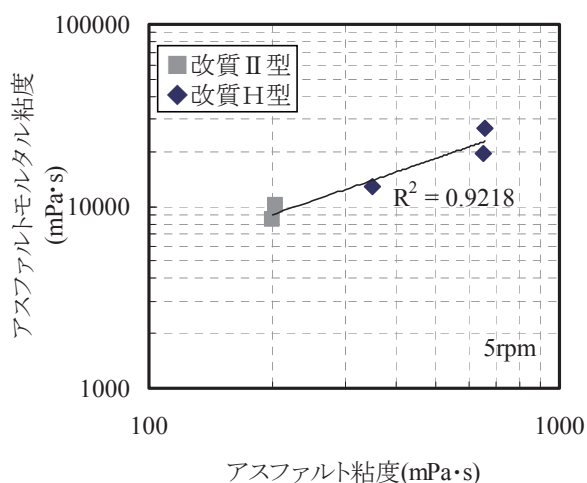


図-3.22 アスファルトとアスファルトモルタル性状の関係 (RV)

3.3.3 カンタブロ試験による再生ポーラスアスファルトの配合設計

(1) 概要

現在提案されている再生ポーラスアスファルトの配合設計の方法として、カンタブロ試験による配合設計を図-3.19のフローで行った。再生骨材は2種類とし、いずれも再生骨材配合率は30%とした。また比較用として新規の骨材を用いた配合（新規混合物）も行った。

(2) 骨材配合

骨材配合は、図-3.19の⑤のステップまでで決定した。決定した3つの配合を表-3.16に示す。

表-3.16 骨材配合

配合物種別		新規混合物 (新規骨材)	再生混合物A (再生骨材A)	再生混合物B (再生骨材B)
骨 材 配 合	6号砕石	85.0	60.5	61.5
	再生骨材	—	30.0	30.0
	細目砂	10.0	5.5	4.5
	石粉	5.0	4.0	5.0
通 過 (合 成 百 粒 分 率 %)	19mm	100.0	100.0	100.0
	13.2mm	96.7	97.2	96.4
	9mm	62.8	66.1	66.4
	4.75mm	15.1	16.0	17.5
	2.36mm	15.0	14.9	14.8
	1.18mm	14.9	13.8	13.9
	0.6mm	10.1	10.4	10.4
	0.3mm	9.8	9.3	9.1
	0.15mm	5.4	6.0	5.8
	0.075mm	4.0	4.3	4.2

(3) 再生用添加剤量及び改質剤量の設定

再生用添加剤量及び改質剤量をカンタブロ試験によって決定した。新規混合物のカンタブロ損失量は11.4%であったため、この値を目標にして配合設計を行った。添加量の水準を多くすると配合設計の労力が多大になるため、まず再生用添加剤量を決定し、その後改質剤量を決定する手順とした。図-3.23に示すように再生骨材Aでは、再生用添加剤が10%のときに目標値になったため、再生用添加剤量を10%と設定した。再生骨材Bでは2%付近で目標値となったが、2%では量が少なすぎて計量が困難であるため、5%に設定することにした。

続いて再生用添加剤量を上記で求めた値に固定して改質剤量を変化させてカンタブロ試験を行った。図-3.24に示すように、新規混合物のカンタブロ損失量を目標にすると改質剤の添加量はいずれも0%付近となった。しかし、再生骨材Aでは旧アスファルトが改質アスファルトであるが劣化により改質剤の効果が弱くなっているものと考え、また再生骨材Bでは旧アスファルトには改質剤が含まれていないため、いずれの場合も改質剤を添加

することにした。再生混合物 A では損失量 10%が下限値となり、その添加量である 3%を改質剤量とした。また、再生混合物 B ではこれと同じ損失量となる 6%を改質剤量と設定することにした。なお、これらの設定値における最適アスファルト量は、再生混合物 A では 5.3%、再生混合物 B では 5.2%であった。

(4) 決定配合の混合物性状

決定配合における混合物性状を表-3.17 に示す。2種類の再生混合物はいずれも各項目において新規混合物と同等かそれ以上の性状を示しており、概ね適当な配合が得られた。

3.3.4 アスファルトモルタルによる再生ポーラスアスファルトの配合設計

(1) 概要

アスモルによる再生ポーラスアスファルトの配合設計の方法では、図-3.19 のフローのうち、再生用添加剤量および改質剤量の決定についてのみアスモルにより行う方法に変更して行った。具体的には、次の手順とした。

- ① 再生混合物の配合に対応するアスモル配合の算出
- ② アスモルの試験により、再生用添加剤および改質剤の最適添加量を決定
- ③ 対応する再生混合物の最適配合を決定

骨材配合は表-3.16 のとおりとしたが、アスモルの配合は全体の配合から 1.18mm 通過分をアスモルとした。アスモルの試験には、高温性状として DSR、混合物製造時の性状として RV を行い、この性状で新規のアスモルと同等となるように配合を決定した。

(2) 再生混合物の配合に対応するアスファルトモルタルの配合の設定

a) 再生混合物の配合に対応する推定アスモル配合の算出
表-3.18 に、カンタプロ試験により求められた再生混合物 A と B のアスモル部分の配合の算出結果の一例を示す。まず、再生混合物中のアスモル配合の推定（推定アスモル配合）を行った。算出方法は、表-3.18 に示すそれぞれの材料について、全量に対する 1.18mm 通過分の比率（表中②）を予め求めておき、この比率を想定する再生混合物の配合（表中①）に掛け合わせ（表中③）、この合計を 100%に直し、推定アスモル配合（表中④）を求めた。

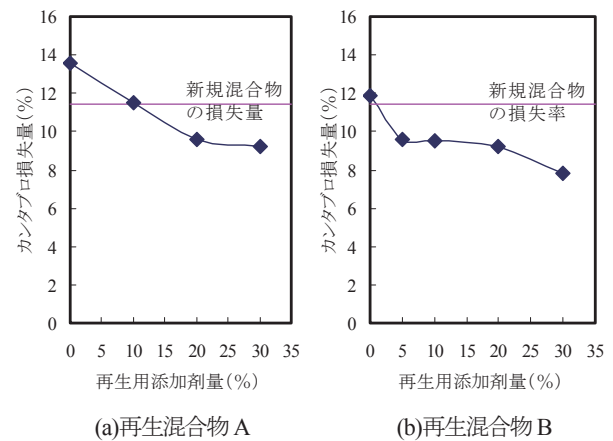


図-3.23 再生用添加剤量の設定

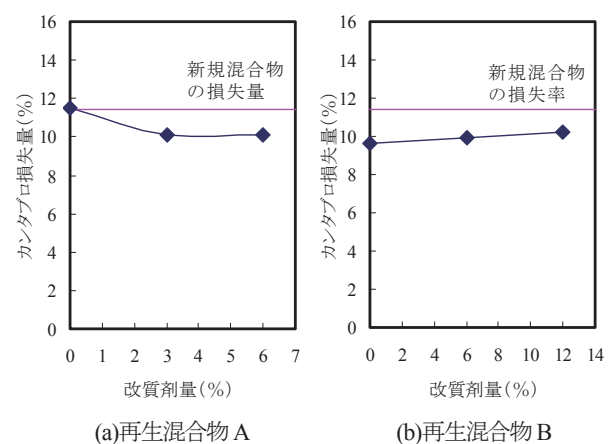


図-3.24 改質剤量の設定

表-3.17 決定配合における混合物性状
(カンタプロ法)

配合名	新規混合物	再生混合物A	再生混合物B
再生用添加剤添加量 (%)	—	10.0	5.0
改質剤添加量 (%)	—	3.0	6.0
アスファルト量 (%)	4.9	5.3	5.2
理論密度 (g/cm ³)	2.494	2.474	2.490
密度 (g/cm ³)	1.999	2.001	2.007
空隙率 (%)	19.8	19.1	19.4
安定度 (kN)	5.41	5.81	5.80
フロー (1/100cm)	36.5	28.3	31.7
残留安定度 (%)	—	98.6	94.5
カンタプロ損失率			
20℃ (%)	11.4	8.4	10.1
-20℃ (%)	24.5	21.5	19.5
強度 (MPa)	0.63	0.85	0.73
圧裂 (20℃) 変位量 (cm)	0.25	0.18	0.20
強度/変位量 (MPa/mm)	2.64	4.66	3.65
強度 (MPa)	0.07	0.15	0.16
圧裂 (60℃) 変位量 (cm)	0.18	0.20	0.19
強度/変位量 (MPa/mm)	0.38	0.74	0.87
動的安定度 (回/mm)	5,906	6,517	7,269
ねじり骨材飛散値 ^{注)} (%)	9.9	9.3	2.8

注) ねじり骨材飛散値は、30分後の値を示している。

表-3.18 アスファルトモルタルの配合例

		6号砕石	再生骨材(旧As分除く)	細目砂	石粉	アスファルト					合計
						新規As	旧As	再生用添加剤	改質剤	小計	
再生混合物A (再生用添加剤10%, 改質剤3%)	混合物配合割合 = ①	57.29	28.41	5.21	3.79	3.74	1.27	0.13	0.16	5.3	100.00
	1.18mm通過量(%) = ②	0	14.8	98.6	100	100	100	100	100	—	—
	①×② = ③	0	4.20	5.14	3.79	3.74	1.27	0.13	0.16	5.3	18.43
	推定アスモル配合 ④	0	22.79	27.89	20.56	20.29	6.89	0.71	0.87	28.76	100.00
	試験用アスモル配合 ⑤	—	57.08	14.16	—	20.29	6.89	0.71	0.87	28.76	100.00
再生混合物B (再生用添加剤5%, 改質剤6%)	混合物配合割合 = ①	57.65	28.58	4.76	3.81	3.79	1.05	0.05	0.31	5.2	100.00
	1.18mm通過量(%) = ②	0	18.4	98.6	100	100	100	100	100	—	—
	①×② = ③	0	5.26	4.69	3.81	3.79	1.05	0.05	0.31	5.20	18.96
	推定アスモル配合 ④	0	27.74	24.74	20.09	19.99	5.54	0.26	1.64	27.43	100
	試験用アスモル配合 ⑤	—	50.53	22.04	—	19.99	5.54	0.26	1.64	27.43	100.00
新規混合物	混合物配合割合 = ①	80.83	—	9.51	4.76	4.9	—	—	—	4.9	100.00
	1.18mm通過量(%) = ②	0	—	98.6	100	100	—	—	—	—	—
	①×② = ③	0	—	9.38	4.76	4.90	—	—	—	4.9	19.04
	試験用アスモル配合 ⑤	0	—	49.26	25	25.74	—	—	—	25.74	100.00

b) 5-0mm 再生骨材使用の検討

推定アスモル配合に含まれる再生骨材由来のアスモル分は、13-5mm の再生骨材の周りに付着したものであり、推定アスモル配合を正確に作製するためには、再生骨材の表面に付着しているアスモル分を削ぎ取って必要量を回収しなければならない。しかし、これは多大な労力を必要とするものが予想されたため、労力の軽減を目的として、13-5mm 再生骨材を作製する際に得られる5-0mm 再生骨材の利用を検討した。13-5mm 再生骨材のアスモル分の抽出骨材の粒度と、5-0mm 再生骨材の抽出骨材の粒度を図-3.25 に示す。この図から、5-0mm 再生骨材の抽出粒度は 0.15mm 以下で若干細かいものの両者はかなり近い粒度であることが分かったため、試験用のアスモルの作製には、5-0mm 再生骨材を使用することにした。

c) 試験用アスモルの配合の算出

5-0mm 再生骨材を使用することにしたため、試験用アスモルの配合の算出を行った。考え方としては、再生アスファルトの配合を混合物の配合に合わせるようにして不足する骨材を新規の骨材で補うようにした。なお、再生アスモルに添加する骨材は、細目砂だけを使用した。これは、5-0mm 再生骨材を使用するため、完全に同じ配合にすることが不可能なことやフィラー分がアスモルの性状に与える影響が大きいこと、配合設定の複雑化を避けることなどのためにこのようにした。

5-0mm 再生骨材のアスファルト量を測定した結果、5-0mm 再生骨材 A では 10.77%、5-0mm 再生骨材 B では 9.88%であった。試験用アスモル配合（再生骨材 A）では、旧アスファルトが 6.89%であるため、これに必要な5-0mm 再生骨材 A の量を $6.89 \div 0.1077 = 63.97\%$ として求めた。（これより表-3.18における再生骨材（旧 As 分除

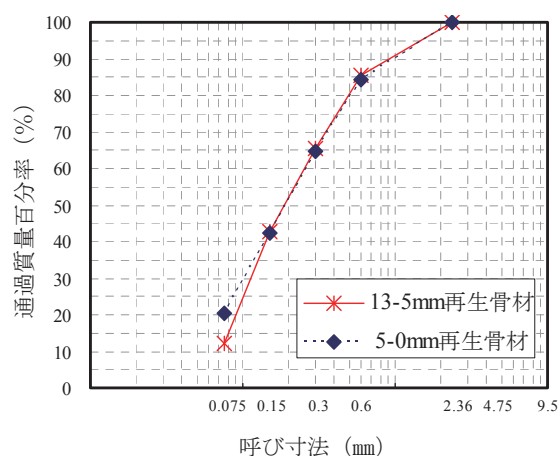


図-3.25 抽出骨材の粒度分布

く) は、 $63.97 - 6.89 = 57.08\%$ 、旧 As 6.89%となった。同様に再生骨材 B では、 $5.54 \div 0.0988 = 56.07\%$ （再生骨材 50.53% + 旧 As 5.54%）となった。

再生アスモルに添加する骨材は、細目砂だけを使用した。これは、今回はアスファルト性状の影響を強くしたいために行ったもので、フィラー分がアスモルの粘性に与える影響が大きいことを考慮した。この結果、表-3.18の⑤に示す試験用アスモル配合のようになった。

アスモル配合は、再生用添加剤量（旧アスファルトに対する量）を 0、5、10、20、30%、改質剤量（全アスファルト量に対する量）を 0、3、6%として作製した。

(3) 再生用添加剤量及び改質剤量の設定

アスモルの性状測定は、DSR および RV で行った。DSR の結果を図-3.26、3.27 に示す。DSR については、複素弾性率と損失角を用いて様々な指標で表現できるが、今回は耐流動性との関係がある $G^*/\sin\delta$ の指標を用いた。 $G^*/\sin\delta$ は、大きいほど耐流動性が高い傾向があるため、新規材料のみで作製したアスモルの値以上を目標値にした。

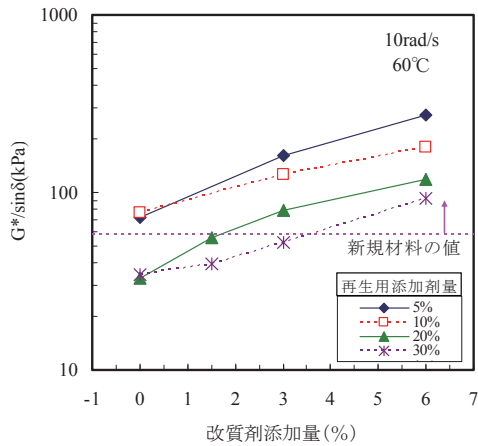


図-3.26 アスファルトモルタルのDSRの結果
(再生骨材A)

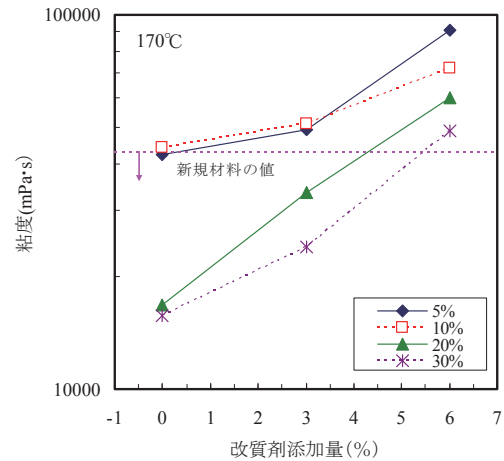


図-3.28 アスファルトモルタルのRVの結果
(再生骨材A)

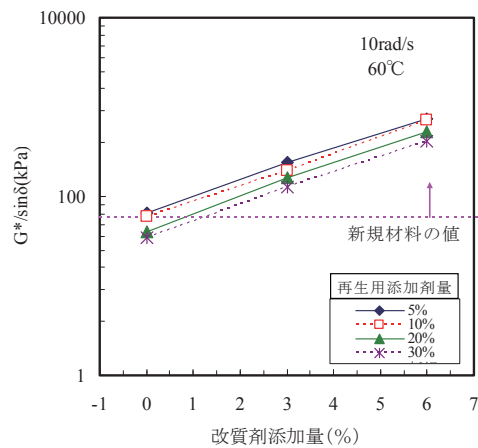


図-3.27 アスファルトモルタルのDSRの結果
(再生骨材B)

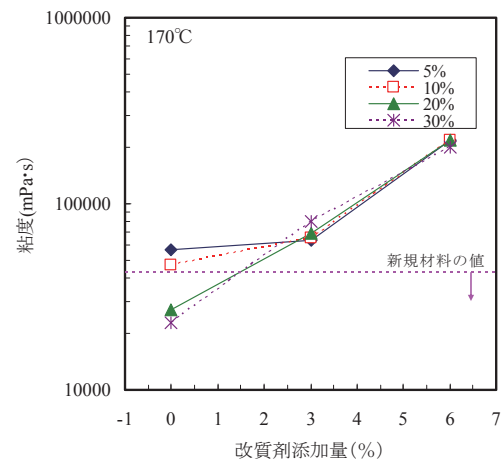


図-3.29 アスファルトモルタルのRVの結果
(再生骨材B)

RVの結果を図-3.28、3.29に示す。RVは粘度を指標として、製造、施工性の確認を目的に行った。粘度が大きすぎると製造、施工に問題が生じるものと考え、新規材料のアスモルと同程度以下を目標とした。

以上の結果から、目標範囲に入る改質剤の添加量を整理すると表-3.19のようになった。再生骨材Aでは、再生用添加剤5%で改質剤0.1%≧で目標範囲に入る結果が得られたが、より粘度が低いと予想された再生用添加剤10%では目標範囲に入る添加量が見いだせなかったため、5%での結果はイレギュラーと見なし採用せず、20%での目標範囲の最低値である改質剤1.7%を採用することとした。また、再生骨材Bでは、再生用添加剤が5、10%で目標範囲に入ることがなく、20%での目標範囲の最低値である改質剤0.7%を採用することにした。

(4) 決定配合の混合物性状

決定配合における混合物性状を表-3.20に示す。再生

表-3.19 目標値となる改質剤の添加量

	再生用 添加剤量	RV 目標値≦ 42.9Pa・s	DSR 目標値≧ 57.8kPa
再生骨材A	5%	0.1%≧	≧0%
	10%	—	≧0%
	20%	4.0%≧	≧1.7%
	30%	5.1%≧	≧3.5%
再生骨材B	5%	—	≧0%
	10%	—	≧0%
	20%	1.5%≧	≧0.7%
	30%	1.5%≧	≧1.2%

混合物Aは、いずれも各項目において新規混合物と比べて概ね同等程度を示した。一方、再生混合物Bでは、ほとんどの項目で新規混合物と同程度の値を示したが、動的安定度、ねじり飛散抵抗値が若干下回る値を示した。また、表-3.17のカンタブロ法による配合と比べても下回る値を示した。しかし、舗装計画交通量3,000台/日以上の場合の動的安定度の目標値が3,000回/mm以上⁵⁾で

あることを考えれば、今回の数値が低いとは考えられない。ねじり骨材飛散値については、一般的な目標値はないが、新規混合物と比べて若干大きい値を示している程度であり、問題ないものと考えられる。

表-3.20 決定配合における混合物性状
(アスモル法)

配合名	新規混合物	再生混合物A	再生混合物B
再生用添加剤添加量 (%)	—	20.0	20.0
改質剤添加量 (%)	—	1.7	0.7
アスファルト量 (%)	4.9	5.2	5.1
理論密度 (g/cm ³)	2.494	2.477	2.492
密度 (g/cm ³)	1.999	1.987	1.993
空隙率 (%)	19.8	19.8	20.0
安定度 (kN)	5.41	4.64	4.87
フロー (1/100cm)	36.5	25.3	26.0
残留安定度 (%)	—	—	—
カンタプロ損失率 20℃ (%)	11.4	7.7	7.2
-20℃ (%)	24.5	18.9	19.6
強度 (MPa)	0.63	0.68	0.53
圧裂 (20℃) 変位量 (cm)	0.25	0.21	0.25
強度/変位量 (MPa/mm)	2.64	3.17	2.18
強度 (MPa)	0.07	0.06	0.06
圧裂 (60℃) 変位量 (cm)	0.18	0.19	0.19
強度/変位量 (MPa/mm)	0.38	0.32	0.30
動的安定度 (回/mm)	5,906	5,250	3,635
ねじり骨材飛散値 ^(注) (%)	9.9	7.8	11.9

(注) ねじり骨材飛散値は、30分後の値を示している。

3.3.5 アスファルトモルタルによる配合設計の提案とカンタプロによる配合設計との比較

(1) アスモルによる配合設計の提案

アスモルによる配合設計は、基本的な手順は図-3.19のフローと同じである。違いは、図-3.19における⑥再生用添加剤量および改質剤量の設定の方法が、アスモル試験によるところである。本研究で提案するアスモル法における再生用添加剤量、改質剤量の設定方法をフローで表すと、図-3.30 のようになる。

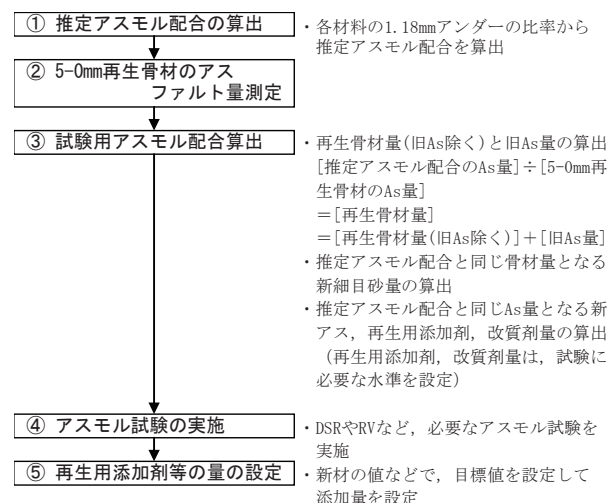


図-3.30 アスモルによる添加量の設定方法

(2) カンタプロ法とアスモル法の比較

2つの配合設計法(カンタプロ法、アスモル法)を性状、経済性、労力などの観点で得失を比較した。整理したものを表-3.21に示す。カンタプロ法は、試験機が普及しており試験が様々な機関で行えるが、混合物試験に多大な労力を必要とし、細かい添加量設定は難しいものと考えられた。これに比べてアスモル法は、幅広い温度範囲で性状を把握でき、少ない試料で試験が行え、労力も比較的掛からない。しかし、今回検討に用いたDSRは高価な試験機であり、プラントなどでの普及は難しいと考えられることから、他のバインダ試験機などでの検討も必要と考えられた。

表-3.21 カンタプロ法とアスモル法の得失

		カンタプロ法	アスモル法
性状把握	低温	○ (低温カンタプロ)	○ (BBR)
	常温	○ (カンタプロ)	○ (DSR)
	高温	×	○ (DSR)
	製造・ 施工温度	×	○ (RV)
経済性	添加量の 設定	△ (細かい設定は、多 大な労力)	○ (試験が小規模で比 較的多くの試験が行 える)
	試験器	○	×
労力		×	○ (試験が小規模で労 力も小さい)

3.4 まとめ

3. では、ポーラスアスファルト混合物の再生利用方法として、新たな配合設計方法検討を行った。方法としては、アスファルト混合物試験を用いる方法と、アスファルトモルタル試験を用いる方法の2種類を検討した。

3.2 では、混合物試験を利用したポーラスアスファルト混合物の再生手法について検討を行った。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 舗装再生便覧に紹介された再生ポーラスアスファルト混合物の配合設計法における再生用添加剤量の決定方法や最適アスファルト量の決定方法には若干の課題が見られた。カンタプロ試験を用いた再生用添加剤量の決定方法では、添加量が求まらないこともあった。また最適アスファルト量の決定方法では、現在の付着試験による方法では決定しにくい場合があり他の方法の検討が必要であると考えられた。
- (2) カンタプロ試験を用いた配合設計法による再生ポーラスアスファルト混合物の性状は、据え切り試験など60℃で行った性状試験で新規混合物と同等にならないことがあった。このため、配合設計時でも高

温域（60℃）の性状を考慮する必要があることが分かった。

- (3) カンタブロ試験を用いた配合設計法による再生ポーラスアスファルト混合物から抽出回収したバインダの性状を検討した結果、混合物で見られた傾向と同様に、高温域での性状が新規バインダの性状と異なり、特に配合設計時に耐久性に関わる項目をほとんど検討しない配合設計 B からの再生バインダは、新規バインダと著しく異なる傾向が見られた。
- (4) バインダ性状とポーラスアスファルト混合物の性状比較を行った結果、バインダの DSR 試験結果は、カンタブロ損失率や据え切り回数、動的安定度と相関性が見られた。これより、バインダの抽出回収によらずに、混合物の評価によりバインダの回復程度を決めることができるものと考えられた。
- (5) 圧裂試験の配合設計用試験としての適用性を検討した結果、圧裂試験により高温性状の評価がある程度可能なことが分かり、圧裂試験を今回用いた配合設計法に追加することで、高温性状を考慮した配合設計が行えることが分かった。また、圧裂試験とカンタブロ試験の間にも関係が見られたことから、常温や低温におけるカンタブロ試験も圧裂試験に変更して、圧裂試験のみで配合設計が行えることが分かった。

3.3 では、再生骨材を使用したポーラスアスファルトの新しい配合設計法として、アスファルトモルタルによる方法の検討を行った。その結果、次のことが分かった。

- (6) アスファルトモルタルは、多くのアスファルト試験が適用でき、それらの試験を行った結果、アスファルト性状と関係が深いことが認められた。
- (7) カンタブロ試験による配合設計において、今回は再生用添加剤量を決定してから改質剤量の決定を行ったが、再生用添加剤と改質剤のどちらを添加しても損失量が低下していくため、目標値から添加量を決定することが困難であった。
- (8) アスファルトモルタルによる配合設計において、再生混合物では 13-5mm の再生骨材を使用するが、13-5mm の再生骨材からアスファルトモルタル分を採取することは難しいため、5-0mm の再生骨材からアスファルトモルタルを採取して代用しても、配合設計上大きな問題がないことを確認した。
- (9) アスファルトモルタルにより配合設計は可能であり、カンタブロ試験によるものよりも、広い温度域で性能が確認でき、労力も少なく済むことが確認され

た。

なお、3. では、ポーラスアスファルト混合物からポーラスアスファルト混合物へ再生する場合についての配合設計法について開発研究を行い、主に物理性状に着目して開発を進めたが、2. で検討したように繰り返し再生の場合についても考えておく必要がある。再生ポーラスアスファルト混合物においては、本研究では、50%までの再生骨材混入率を検討しているが、これまでの研究により、再生骨材を特別に 13-5mm に分級しない場合、粒度の関係で最大30%程度までの再生骨材混入率になることが分かっている⁵⁾。また、供用性状からも 30%程度までが適当と見ている⁵⁾。これらのことと、2. で得た“繰り返し再生を考慮すると再生骨材混入率は30%程度が望ましい”との知見から、再生ポーラスアスファルト混合物は、現状では再生を繰り返しても過剰に劣化物質が蓄積することはないようである。しかし、ポリマー改質材の劣化など、2. の知見だけでは、分からない部分もあるので、今後さらに検討が必要である。

参考文献

- 1) 本松資朗、小澤光一、高橋光彦、向後憲一：高機能舗装のプラント再生に関する検討、舗装、Vol.38、No.7、pp.3-8、2003
- 2) 松本大二郎、川村和将、高橋光彦、大河内宝、白戸孝治：高機能舗装混合物のプラント再生に関する検討、舗装工学論文集、第9巻、pp.125-132、2004
- 3) 松本大二郎、川村和将、高橋光彦、大河内宝、白戸孝治：高機能舗装混合物のプラント再生に関する検討、土木学会舗装工学論文集、第9巻、pp.125-132、2004.12
- 4) 向後憲一、加藤義輝：排水性アスファルト混合物の再生利用技術に関する検討、土木学会舗装工学論文集、第6巻、pp.94-99、2001.12
- 5) 小長井彰祐、新田弘之、村山雅人、向後憲一：排水性舗装発生材の再生利用技術確立に向けた直轄国道試験施工の中間報告、道路、No.785、pp.42-46、2006
- 6) 日本道路協会：舗装再生便覧、(社)日本道路協会、2004.2
- 7) 新田弘之、伊藤正秀：改質アスファルトのリサイクル技術に関する検討、土木技術資料、Vol.46、No.1、pp.44-49、2004
- 8) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧、(社)日本道路協会、2007

4. 廃棄物再生資材の舗装への利用方法の開発

4.1 概要

2. および 3. では、舗装資材の再利用方法の検討を行い、今後の利用率低下をまねかないための技術開発を行った。舗装資材のリサイクルを進める一方で、他の産業廃棄物の再生資材を舗装で利用してほしいという要望は強く、特にスラグ類の利用を求める声が強い。スラグ類といっても、早くから利用されている高炉スラグをはじめ製鋼スラグ、フェロニッケルスラグ、銅スラグ、ゴミ熔融スラグ、下水汚泥スラグなど、様々なものがある。4. では、これらのうち、比較的発生が全国に分散しており、今後の利用の期待も大きいゴミ熔融スラグについて、舗装での利用方法の検討を行った。

都市ゴミは、減容化および再資源化を目的として熔融処理されることが多くなっている。この時発生する都市ゴミ焼却灰の熔融固化物が、いわゆるゴミ熔融スラグである。都市ゴミ焼却灰熔融スラグは、黒曜石のような外観のものも多く、成分は SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 が約 80% を占めるガラスのような物質である。冷却の方法により形状・性質が異なり、写真-4.1 に示すような水砕スラグや徐冷スラグと呼ばれるものが製造されている。

このように、熔融固化物は天然骨材と異なる性質も多く、通常の天然骨材と全く同様に利用できるかどうかの確認がなされていない。また、重金属などの溶出も懸念されるため、環境安全性についても検討が必要である。

これまでの研究では、水砕スラグを細骨材^{1)~6)}、または路盤材⁷⁾への利用検討例が多い。徐冷スラグについての検討例は路盤材⁸⁾への利用検討例が見られるものの少ない。また、いずれの検討例でも、再度舗装でリサイクルをした場合については検討されていない。

そこで、4. ではゴミ熔融スラグ（水砕・徐冷）の舗装での利用方法（アスファルト混合物用骨材、路盤材）の検討を行い、利用可能性を確認するとともに、再リサイクル性、環境安全性を確認した上で、試験施工を行い、施工性供用性の確認を行った。



(a) 水砕スラグ

(b) 徐冷スラグ

写真-4.1 ゴミ熔融スラグの外観

4.2 廃棄物再生資材の舗装への利用について

廃棄物再生資材を舗装へ利用する際に、確認すべき点を整理する。なお、ここでは、アスファルト舗装を念頭においている。

アスファルト混合物に用いる材料は、アスファルトと接着し効果的に強度を出せ、また製造時の加熱や長期の供用に耐えることが必要である。さらにほぼ完全にリサイクル可能でなくてはならない。

一方、路盤用骨材に用いる材料は、加熱混合などがなく、アスファルトなどの性質とは関係なく利用できるため、所定の支持力や耐久性が得られれば、幅広く材料を選択できる。

いずれの場合も、一般的な事項も含めて利用実績の少ない再生材利用については、大きく分けて以下のような項目の確認が必要と考えられる。

- ① 環境安全性
- ② 材料性状
- ③ 作業安全性
- ④ 施工性
- ⑤ 供用性
- ⑥ 舗装材料としてのリサイクル性

したがって、本検討においては、これらの項目についての所見が得られるように検討を行った。

4.3 研究方法

4.3.1 室内試験による検討

熔融スラグは、表-4.1 に示す水砕スラグ 2 種類と徐冷スラグ 1 種類を用いた。天然材料等は、表-4.2 に示すとおりである。代替対象のスラグの種類を表-4.3 に示す。

ここでは、代替対象の材料と区別するために、スラグ材料にはスラグ細骨材、スラグ粗骨材等の名称をつけている。

標準混合物の材料配合比を表-4.4に示す。スラグ材料の添加は、この標準配合を基にして細骨材あるいは粗骨材をスラグに置き換えるようにして行った。試験項目を表-4.5に示す。試験項目は、骨材試験、実用性評価試験、再リサイクル性試験の3つのカテゴリで実施した。それぞれの目的は、骨材試験は骨材としての基礎特性の把握および路盤材への適用性を目的として実施、実用性評価試験はアスファルト混合物としての基礎特性、はく離抵抗性、耐流動性、摩耗性の把握を目的として実施、再リサイクル性試験はアスファルト混合物として再利用する場合の影響把握を目的として実施した。スラグ材料の混入率は、代替対象の天然材料（細骨材または粗骨材）に対して、10、20、30、40、50%の割合とした。特にスラグはアスファルトとの付着性が通常より劣ることが予想されたため、付着改善による効果を把握するために、

はく離防止剤を入れた場合も試験を行った。

また、環境安全性の評価のために、土壤環境基準（環境庁告示46号）に示される方法で溶出試験も行った。

4.3.2 試験施工による検討

施工性、耐久性などの確認のために、スラグ骨材を用いたアスファルト舗装の試験施工を行い、重車両の走行による促進荷重試験を行った。試験は、図-4.1に示す土木研究所構内の舗装走行実験場で行った。

工区は4工区とし、粗骨材の50%をスラグ粗骨材で置き換えた“スラグ粗骨材50%工区”（全体骨材の17.5%相当）、20%置き換えた“スラグ粗骨材20%工区”（全体骨材の7.0%相当）、細骨材の50%をスラグ細骨材で置き換えた“スラグ細骨材50%工区”（全体骨材の17.5%相当）、20%置き換えた“スラグ細骨材20%工区”（全体骨材の7.0%相当）とした。さらに、比較のために天然骨材のみの標準工区を設けた。

表-4.1 溶融スラグサンプルの特徴

スラグ名	溶融方式	外 観
水砕スラグA	プラズマ式	ガラス質、細かい砂状
水砕スラグB	アーク式	ガラス質、細かい砂状
徐冷スラグ	電気抵抗式	ガラス質、石状、稜角に富んだ形、ほぼ方形

表-4.3 スラグ材料の代替対象

代替対象	名 称	スラグ種類
細骨材	スラグ細骨材A	水砕スラグA
	スラグ細骨材B	水砕スラグB
粗骨材	スラグ粗骨材	徐冷スラグ
路盤材	スラグ路盤材	徐冷スラグ

表-4.2 使用材料

材 料 名	材 質
6号砕石	硬質砂岩
7号砕石	硬質砂岩
スクリーニングス	硬質砂岩
粗目砂	川砂
細目砂	川砂
石粉	石灰岩
アスファルト	ストレートアスファルト 60/80
はく離防止剤	ホスフェート系界面活性剤

表-4.4 標準混合物の材料配合比

6号砕石	7号砕石	スクリーニングス	粗目砂	細目砂	石粉
36.0%	24.0%	18.5%	6.0%	10.5%	5.0%

表-4.5 試験項目

代替対象	試験項目※1		
	骨材試験	実用性評価試験	再リサイクル性評価試験
細骨材	比重、吸水量、粒度分布	マーシャル試験(B001)、水浸マーシャル試験(B001)、ホイールラッキング試験(B003)、ラベリング試験(B002) 混入率：10～50%※2 はく離防止剤：有無	ジャイレトリ試験(B007)後の粒度変化測定、強制劣化試験後の再生混合物の評価
粗骨材	比重、吸水量、粒度分布、すり減り減量、安定性、はく離抵抗試験	マーシャル試験(B001)、水浸マーシャル試験(B001)、ホイールラッキング試験(B003)、ラベリング試験(B002) 混入率：10～50%※3 はく離防止剤：有無	ジャイレトリ試験(B007)後の粒度変化測定、強制劣化試験後の再生混合物の評価
路盤材	ふるい分け試験(A003)、突固め試験(F007)、修正 CBR 試験(E001)、液性限界試験(F005)、塑性限界試験(F005) 混入率：10～50%		

※ 1 試験名称の後の（ ）内は、舗装調査・試験法便覧⁹⁾における試験番号を示す。

※ 2 細骨材に対して10、20、30、40、50%であり、混合物全体に対しては3.5、7.0、10.5、14.0、17.5%である。

※ 3 粗骨材に対して10、20、30、40、50%であり、混合物全体に対しては6.0、12.0、18.0、24.0、30.0%である。



図-4.1 舗装走行実験場の概要

4.4 室内試験の結果

4.4.1 環境安全性

スラグが都市ゴミから造られたものであることから、様々な有害物質を含む可能性があったため、環境安全性を調査した。環境安全性としては、雨水、地下水等と直接接する可能性のある路盤材からの水への溶出試験を評価することとした。安全性評価法は、厚生省の「一般廃棄物の溶融固化物の再利生用の実施について」(H10.3)を参考にしたが、分析項目は、念のため土壤環境基準に挙げられている項目全てとした。

表-4.6 に示すように、すべての項目で、検出されず、土壤環境基準を満足するものであった。

4.4.2 アスファルト混合物用骨材としての利用

(1) 細骨材の代替としての利用

1) 骨材試験

材料性状試験の結果を表-4.7 に示す。天然材料と比べ、比重が若干大きく、吸水率がかなり小さいことが分かる。また、粒度分布は図-4.2 のように、スラグ細骨材は粗目砂に近い粒度分布であり、特にBはほぼ同じ粒度分布であった。

2) 配合設計

配合設計の結果を表-4.8 に示す。安定度、フロー値等に若干の違いが見られたが、配合に関しては、標準的なアスファルト混合物と比べて大きな違いがないのが分かる。

表-4.6 溶出試験の結果(徐冷スラグ)

項 目	単 位	試験結果	土壤環境基準
カドミウム※	mg/L	0.001 未満	0.01 以下
全シアン	mg/L	不検出	検出されないこと
有機磷	mg/L	不検出	検出されないこと
鉛※	mg/L	0.005 未満	0.01 以下
六価クロム※	mg/L	0.05 未満	0.05 以下
砒素※	mg/L	0.005 未満	0.01 以下
総水銀※	mg/L	0.0005 未満	0.0005 以下
アルキル水銀	mg/L	不検出	検出されないこと
PCB	mg/L	不検出	検出されないこと
ジクロロメタン	mg/L	0.002 未満	0.02 以下
四塩化炭素	mg/L	0.0002 未満	0.002 以下
1,2-ジクロロエタン	mg/L	0.0004 未満	0.004 以下
1,1-ジクロロエチレン	mg/L	0.002 未満	0.02 以下
シス-1,2-ジクロロエチレン	mg/L	0.004 未満	0.04 以下
1,1,1-トリクロロエタン	mg/L	0.1 未満	1 以下
1,1,2-トリクロロエタン	mg/L	0.0006 未満	0.006 以下
トリクロロエチレン	mg/L	0.003 未満	0.03 以下
テトラクロロエチレン	mg/L	0.001 未満	0.01 以下
1,3-クロロプロペン	mg/L	0.0002 未満	0.002 以下
チウラム	mg/L	0.0006 未満	0.006 以下
シマジン	mg/L	0.0003 未満	0.003 以下
チオベンカルブ	mg/L	0.002 未満	0.02 以下
ベンゼン	mg/L	0.001 未満	0.01 以下
セレン※	mg/L	0.001 未満	0.01 以下

※は、「一般廃棄物の溶融固化物の再生利用の実施について」(H10.3、厚生省)で基準が設けられている物質。

表-4.7 材料性状試験の結果

		スラグ細骨材		天然材料	
		A	B	粗目砂	細目砂
比重	見かけ	2.729	2.636	2.699	2.691
	表乾	2.705	2.620	2.570	2.539
	かさ	2.691	2.609	2.495	2.450
吸水率 (%)		0.51	0.38	3.02	3.66

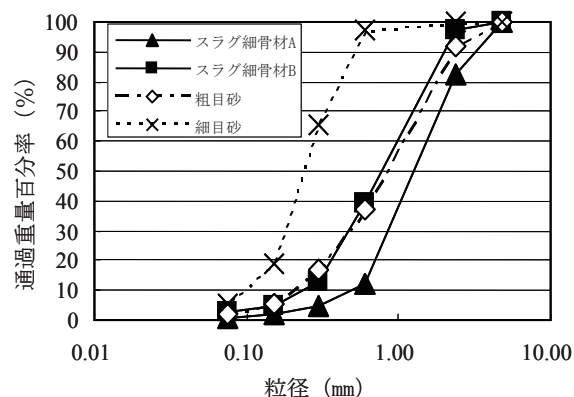


図-4.2 細骨材の粒度分布

表-4.8 配合設計の結果

			最適 As 量 (%)	密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)	飽和度 (%)	安定度 (kN)	フロー値 (1/10mm)
標準混合物			5.2	2.384	3.8	76.2	13.4	29
スラグ 細骨材A	はく離 防止剤なし	10%	5.1	2.385	3.8	75.7	13.2	32
		20%	5.1	2.390	3.8	75.9	13.2	30
		30%	5.0	2.393	3.8	75.4	12.2	30
		40%	5.1	2.387	3.8	75.8	12.6	29
		50%	5.1	2.395	3.8	75.5	11.5	29
	はく離 防止剤あり	10%	5.1	2.375	4.2	73.5	13.5	31
		20%	5.1	2.390	3.6	76.8	13.1	30
		30%	5.2	2.392	3.7	76.4	11.1	31
		40%	5.1	2.402	3.6	76.7	10.9	29
		50%	5.1	2.400	3.9	75.2	9.65	28
スラグ 細骨材B	はく離 防止剤なし	10%	5.2	2.365	4.1	75.0	13.6	28
		20%	5.2	2.372	3.6	76.0	13.4	27
		30%	5.2	2.370	4.0	76.0	12.6	26
		40%	5.2	2.378	3.6	76.5	12.6	26
		50%	5.2	2.370	3.7	75.5	11.9	25
	はく離 防止剤あり	10%	5.2	2.372	3.8	76.5	12.1	28
		20%	5.1	2.380	3.7	76.0	12.4	28
		30%	5.2	2.365	3.9	76.5	10.7	28
		40%	5.2	2.377	3.6	77.0	11.6	25
		50%	5.2	2.375	3.7	76.5	9.7	25

3) 実用性試験の結果

①マーシャル安定度試験

マーシャル安定度試験の結果を図-4.3に示す。スラグ細骨材Aの場合、混入率が高くなると安定度が若干低下するが、問題となるような性状は示していない。またははく離防止剤を添加した場合は、残留安定度は高くなっているものの、水浸後の安定度が高くならず、添加による大きな性状改善は見られなかった。

スラグ細骨材Bの場合も、混入率が高くなるほど安定度が低下し、残留安定度も低下した。しかし、はく離防止剤を添加すると、水浸安定度、残留安定度ともに大きくなり、性状改善が見られた。

②ホイールトラッキング試験

ホイールトラッキング試験の結果を図-4.4に示す。スラグ細骨材Aでは、混入率 10～30%程度で動的安定度 (DS) が若干上昇したが、40%以上では低下し、はく離防止剤を添加しても性状は改善されなかった。

スラグ細骨材Bでは、はく離防止剤を添加しない状態で混入率の影響は小さくあまり DS は変化しなかった。しかし、はく離防止剤を添加した場合、マーシャル安定度同様に性状改善が見られ、特に混入率が 20%ではく離防止剤が入った状態では DS が約 1900 回/mm と大きくなった。

③ラベリング試験

ラベリング試験の結果を図-4.5に示す。スラグ細骨材AとBでは、傾向が異なり、Aでは摩耗量が若干増える

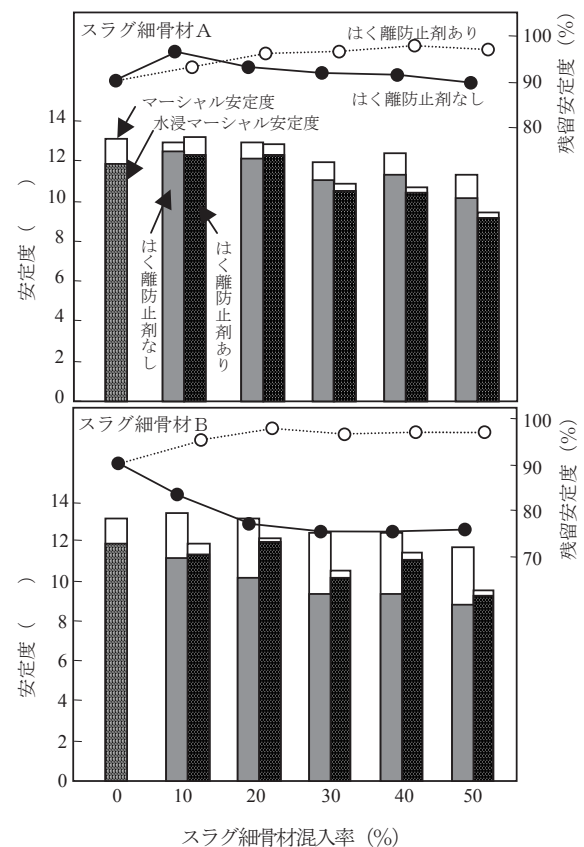


図-4.3 マーシャル安定度試験の結果

が、はく離防止剤を添加すると摩耗を抑えることができた。逆にBでは摩耗量が減るものもあるが、はく離防止剤を添加すると、摩耗量が増える傾向が見られた。

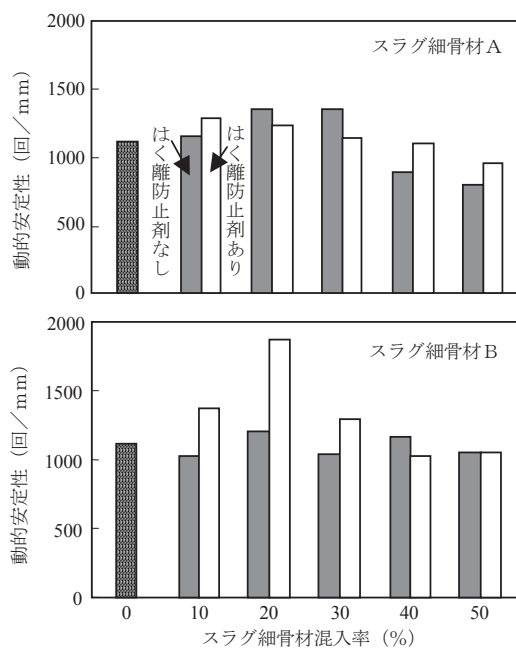


図-4.4 ホイールトラッキング試験の結果

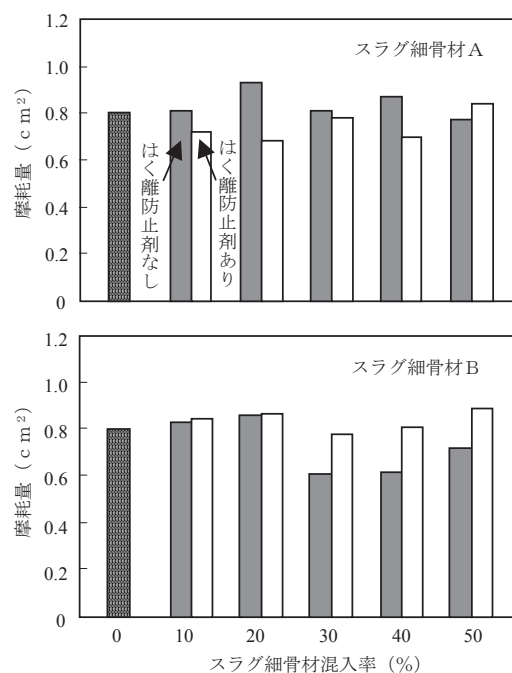


図-4.5 ラベリング試験の結果

(2) 粗骨材の代替としての利用

1) 骨材試験

材料性状試験の結果を表-4.9に示す。天然材料と比べると、吸水率が小さく、すり減り減量が多い。特にすり減り減量は、表層・基層に用いる場合の目標値（30%以下）よりも大きいことがわかる。

粒度分布は図-4.6に示すとおりであり、6号砕石とほぼ同じになっている。

また、粗骨材としての利用では、アスファルトとの付

着性が問題となると考えられたため、はく離抵抗試験（JPI-5S-27）を行った。表-4.10に結果を示す。硬質砂岩と比べると若干はく離率が多いが、はく離防止剤の使用により、はく離率が改善されているのが分かる。

表-4.9 材料性状試験の結果

		スラグ粗骨材	天然材料(6号)
比重	見かけ	2.662	2.682
	表乾	2.656	2.617
	かさ	2.653	2.579
吸水率 (%)		0.13	1.48
すり減り減量 (%)		36.4	13.8
安定性 (%)		1.9	2.3

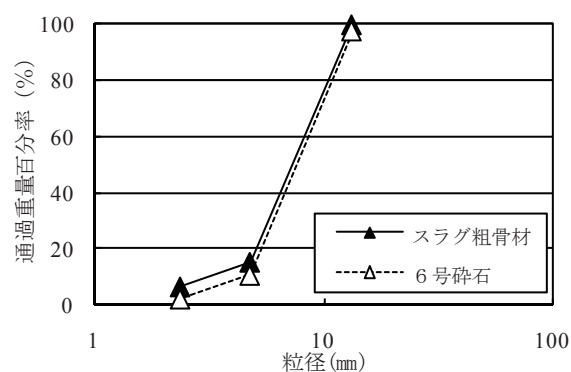


図-4.6 骨材の粒度分布

表-4.10 はく離抵抗試験の結果

材 料	はく離率 (%)
硬質砂岩	4.0
スラグ粗骨材	12.0
スラグ粗骨材+はく離防止剤	1.8

2) 配合設計

配合設計の結果を表-4.11に示す。細骨材としての利用と比べると、最適アスファルト量が幾分高くなり、フロー値などで多少の違いが見られるが、特に配合上問題は生じなかった。

3) 実用性試験の結果

① マーシャル安定度試験

マーシャル安定度試験の結果を図-4.7に示す。スラグ粗骨材の混入率が高くなるほど、安定度は低下していつている。また、はく離防止剤の添加により、残留安定度の改善が見られたが、水浸安定度は添加しない場合と比べて大きな違いはなく、はく離防止剤の添加による大きな性状改善は見られなかった。

表-4.11 配合設計の結果

			最適As量 (%)	密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)	飽和度 (%)	安定度 (kN)	フロー値 (1/10mm)
標準混合物			5.2	2.384	3.8	76.2	13.4	29
スラグ 粗骨材	はく離 防止剤なし	10%	5.5	2.370	3.8	76.7	11.8	30
		20%	5.5	2.372	3.7	77.2	11.6	29
		30%	5.5	2.371	3.7	77.2	10.65	27
		40%	5.3	2.376	3.7	77.5	10.5	29
		50%	5.3	2.375	3.6	76.5	10.4	29
	はく離 防止剤あり	10%	5.3	2.376	3.9	76.0	11.6	29
		20%	5.3	2.378	3.8	76.5	11.2	27
		30%	5.3	2.378	3.7	77.0	10.2	28
		40%	5.2	2.380	3.8	77.0	9.8	26
		50%	5.1	2.385	3.6	77.0	9.6	25

②ホイールトラッキング試験の結果

ホイールトラッキング試験の結果を図-4.8に示す。スラグ粗骨材の混入率が高くなるにつれて動的安定度は若干低下した。はく離防止剤を添加したところ、混入率が10、20%の時に動的安定度が高くなり、天然材料だけの混合物より、2倍から3倍のDSとなった。

③ラベリング試験

ラベリング試験の結果を図-4.9に示す。スラグ粗骨材混入率が増加するとともに、摩耗量は増加する傾向が見られ、はく離防止剤を添加しても、摩耗の抑制効果は見られなかった。

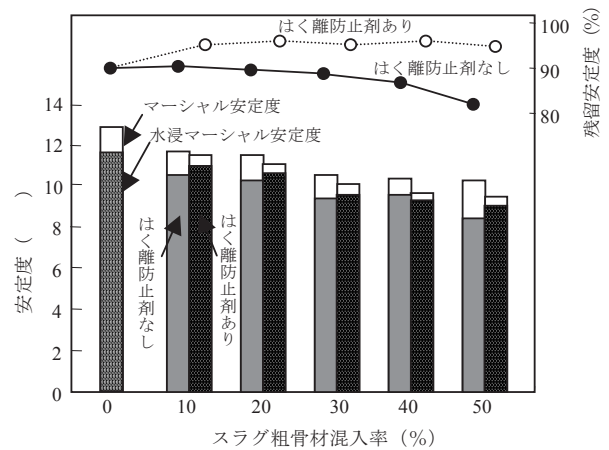


図-4.7 マーシャル安定度試験の結果

4) 再リサイクル性評価の結果

①粒度変化の確認

溶融スラグを使用したアスファルト混合物が一度供用された後、再生骨材として再度利用された場合の影響について検討を行った。

締固めによるスラグ骨材の細粒化を確認するために、ジャイレトリー試験 (B007) ⁹⁾を用いて締固め、締固め前後の粒度分布の変化を確認した。締固めの条件は、ラム圧 1380kPa、旋回角度 1.00°、旋回数 30 回とした。

図-4.10 に天然材料のみでの変化を、図-4.11、4.12 にスラグ細骨材 50% (骨材全体の 20%) 置換したもの、スラグ粗骨材 50% (骨材全体の 30%) 置換のものの変化を示す。図のように標準材料と比べ、スラグ細骨材もスラグ粗骨材も特に著しい細粒化は観察されなかった。この結果は、あくまでも室内的な検討によるものであるが、少なくとも転圧時に混合物の内部で細粒化することはないと考えられる。ただし、ロードローラーが骨材に直接あたる部分の現象は、この方法では再現できず、現場施工の結果が必要である。

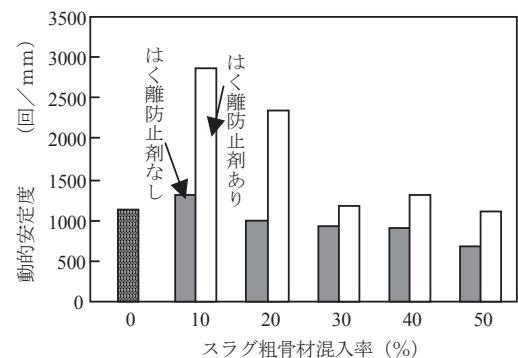


図-4.8 ホイールトラッキング試験の結果

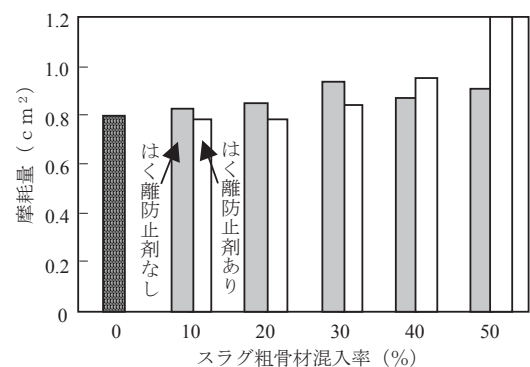


図-4.9 ラベリング試験の結果

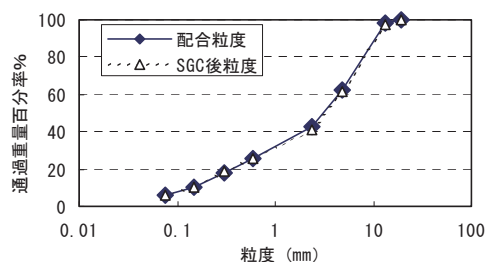
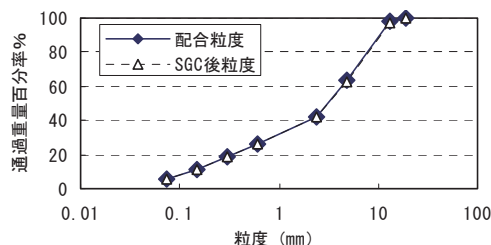
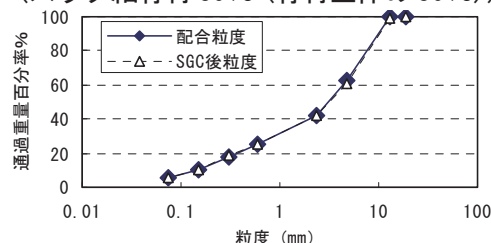
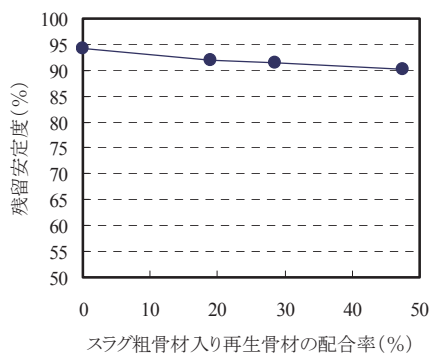
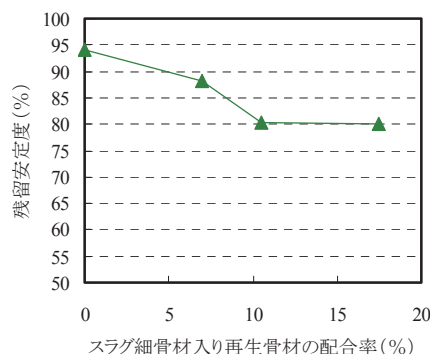


図-4.10 粒度分布の変化 (標準材料)

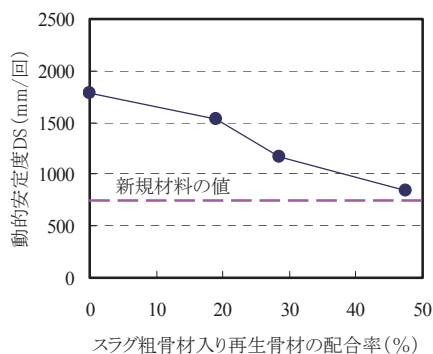
図-4.11 粒度分布の変化
(スラグ細骨材 50% (骨材全体の 50%))図-4.12 粒度分布の変化
(スラグ粗骨材 50% (骨材全体の 30%))

(a) 13-5mm 再生骨材利用

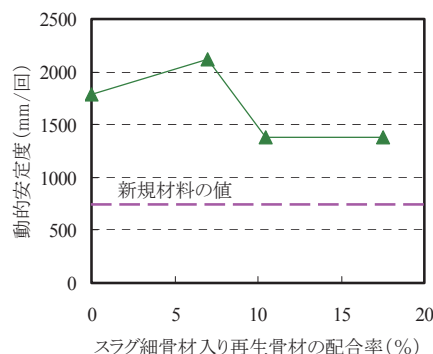


(b) 5-0mm 再生骨材利用

図-4.13 スラグ入り再生骨材を用いた再生混合物の残留安定度



(a) 13-5mm 再生骨材利用



(b) 5-0mm 再生骨材利用

図-4.14 スラグ入り再生骨材を用いた再生混合物の動的安定度

②再生混合物性状の確認

スラグ細骨材 50% (骨材全体の 20%) 置換およびスラグ粗骨材 50% (骨材全体の 30%) 置換のスラグ混合物から製造した再生骨材用いて、再生混合物を作製して性状を確認した。再生骨材の作製方法は、スラグ混合物を促進劣化させた後、パイプロプレートを用いて混合物を破碎し、これを 13-5mm、5-0mm にふるい分けて行った。促進劣化方法としては、骨材とアスファルトを混合後、締め固めない状態で 85℃の恒温槽内で 2 日間加熱する方法とした。再生混合物の作製方法は、再生骨材配合率は 100%として、通常の再生骨材とスラグを含む再生骨材の配合率を変えて行った。スラグ細骨材が含まれる再生骨材は、5-0mm の再生骨材を使用し、スラグ粗骨材が含まれる再生骨材は、13-5mm の再生骨材を使用した。アスファルトの針入度は再生添加剤で調整することとした。

水浸マーシャル安定度試験の結果を図-4.13 に示す。なお、混入率 0%は天然材料の再生骨材 100%で作製した再生混合物である。スラグ入り再生骨材を用いると、残留安定度が低下する傾向が見られたが、規定値 (75%) を下回っていない。

ホイールトラッキング試験の結果を図-4.14 に示す。

スラグ細骨材入り再生骨材使用、スラグ粗骨材入り再生骨材使用ともに、混入率の上昇により動的安定度（DS）が小さくなる傾向が見られたが、新規材料のみの結果より高い値であり、問題は見られなかった。

4.4.3 路盤材としての利用

徐冷スラグの路盤材としての利用可能性について検討した。スラグは、破碎・分級してクラッシャラン C-40 程度にしたもので、クラッシャランが適用される下層路盤用材料として検討した。粒度分布は図-4.15 に示すようになった。

表-4.12 に路盤材用に調整した徐冷スラグの試験の結果を示す。参考までに下層路盤を碎石および粒状路盤工法で行うときの規格を示した。修正 CBR はクラッシャランの規格である 20%を上回っており、問題ない値を示した。ただし、すり減り減量が 36.4%を示し、割れやすいと考えられる。これは、写真-4.1(b)にも示したように、徐冷スラグは扁平でなく稜角に富んだ形状をしているため、角が欠けやすいものと考えられた。

以上の結果から、下層路盤材として用いるには問題のない材料であると考えられる。

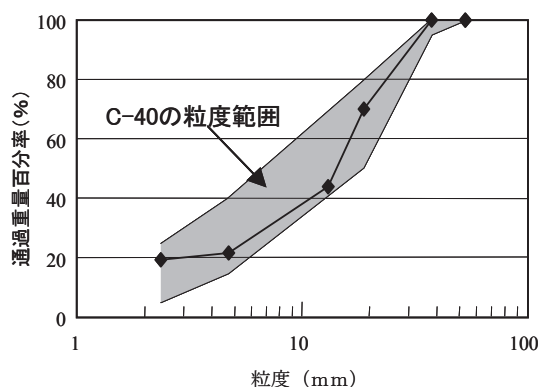


図-4.15 スラグ骨材の粒度分布

表-4.12 スラグ骨材の試験結果

項目	結果	規格
すり減り減量 (%)	36.4	40 以下
安定性 (%)	1.9	—
吸水率 (%)	0.13	—
突き固め試験	最適含水比 (%)	3.2
	湿潤密度 (g/cm ³)	2.159
	乾燥密度 (g/cm ³)	2.092
修正 CBR (%)	64.0	20 以上
塑性指数 (P I)	NP	6 以下
液性限界 (%)	NP	—
塑性限界 (%)	NP	—

4.5 試験施工による施工性、耐久性の確認

4.5.1 施工性の確認

土木研究所構内にある舗装走行実験場において、スラグ骨材を用いたアスファルト舗装の試験施工を行い、施工性、耐久性などの確認を行った。

工区は4工区とし、粗骨材の 50%をスラグ粗骨材で置き換えた“スラグ粗骨材 50%工区”（全体骨材の 17.5%相当）、20%置き換えた“スラグ粗骨材 20%工区”（全体骨材の 7.0%相当）、細骨材の 50%をスラグ細骨材で置き換えた“スラグ細骨材 50%工区”（全体骨材の 17.5%相当）、20%置き換えた“スラグ細骨材 20%工区”（全体骨材の 7.0%相当）とした。さらに、比較のために天然骨材のみの標準工区を設けた。

まず、施工性については、通常のアスファルト混合物と全く同じ方法で施工可能であり、特別な対策を必要としなかった。ただし、写真-4.2 に示すように一部に骨材の割れが確認された。転圧の際に、ロードローラなどにより割れたものと考えられ、骨材試験でのすり減り減量が大きいこととも関係していると考えられる。



写真-4.2 割れたスラグ粗骨材の様子

4.5.2 耐久性

促進荷重試験により耐久性の確認を行った。試験は、輪荷重 58.8kN の大型車を走行させて、約 35 万輪（49kN 換算輪数）まで促進荷重を行った。この荷重レベルは、比較的交通量の少ない舗装計画交通量 100～250 台/日・方向の道路の場合、15 万輪/10 年程度の荷重があることから、23 年程度に相当する。

図-4.16 に示すように、横断凹凸量は標準工区よりも概ね小さい値を示した。

図-4.4 に示したように室内試験での検討でも流動性は通常のアスファルト混合物と大きな差がなく、実大実験でもその傾向が確認された。

図-4.17 に示すように平坦性（縦断凹凸量）は標準工区と比べほとんどの工区で大きな差が認められなかった。スラグ細骨材 50%では、若干大きい値を示したが、これは施工当初から σ が大きく、これが原因でその後も大きな値になったものと考えられる。

図-4.18 に示すように回転式すべり抵抗測定器で測定したすべり摩擦係数（40km/h 相当）は、標準工区と比べてほとんど違いがなかった。

また、特に図を示していないが、全工区においてひび割れは発生しておらず、特にひび割れしやすいということとはなかった。

以上の結果から、少なくとも交通量が比較的小さい道路（舗装計画交通量 250 未満）であれば、スラグを骨材として使用しても耐久性上大きな問題はないと考えられた。

4.5.3 環境安全性

スラグ骨材を用いた工区の環境への影響を確認するために、施工約 6 ヶ月後に工区周辺の土壌を採取して、重金属量を分析した。その結果、全ての工区の周辺土壌で表-4.13 に示すような結果となり、周辺への影響は認められなかった。

4.6 まとめ

4. では、廃棄物再生資材の中でも、利用への要望が強いゴミ溶融スラグの舗装への利用の検討、特に水砕スラグは細骨材、徐冷スラグは粗骨材としての利用検討を行った。その結果、ゴミ溶融スラグでも所定の舗装用材料の基準値等を満足していれば、舗装用骨材として利用することは可能であることが分かった。ただし、すり減り易い、割れ易いなどの性質もあり、施工時に破損することもあるため、注意が必要である。

本研究で明らかとなった内容の詳細は以下のようである。

(1) アスファルト舗装用骨材としての利用

- ① 細骨材……アスファルト混合物試験では、混入率が大きくなると若干性状が悪くなる傾向が見られた。しかし、耐久性試験により大きな問題は認められず、50%程度の代替率なら影響がないと考えられた。
- ② 粗骨材……アスファルトのはく離性は若干高く、またすり減り減量は大きく、碎石の品質目標値からはずれた。アスファルト混合物での試験では、ほとんどの項目で性状が悪くなる傾向を示した。また、施工により骨材の割れなども観察された。しかし、

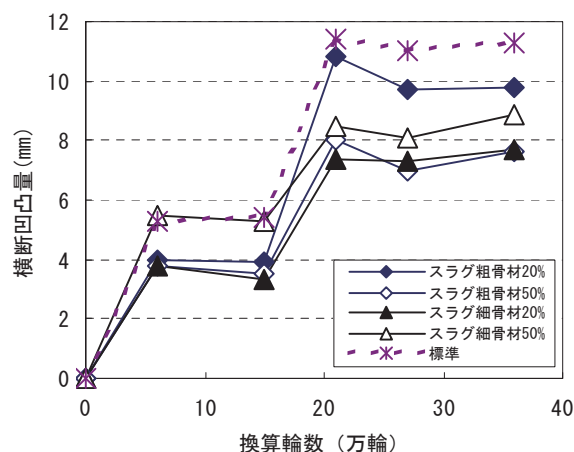


図-4.16 横断凹凸量の変化

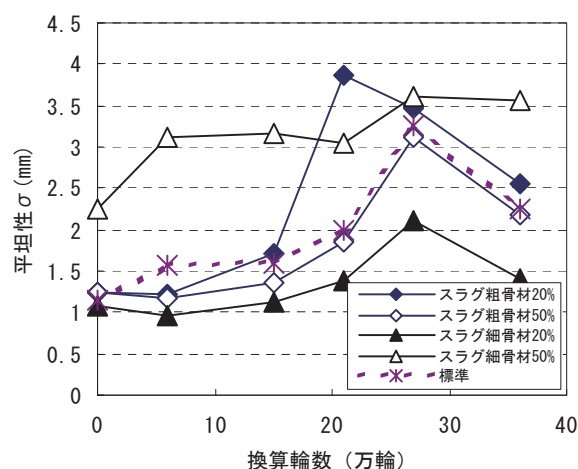


図-4.17 縦断凹凸量の変化

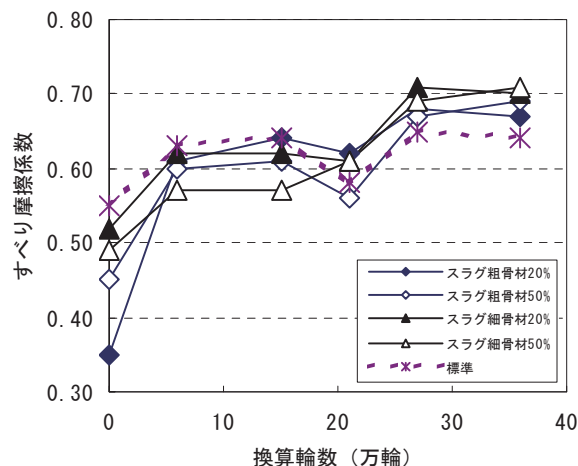


図-4.18 すべり摩擦係数の変化

表-4.13 周辺土壌の分析結果の例

分析項目	分析結果
カドミウム	<0.001 mg/L
鉛	<0.005 mg/L
六価クロム	<0.01 mg/L
ヒ素	<0.005 mg/L
総水銀	<0.0005mg/L
セレン	<0.002 mg/L

耐久性試験では大きな影響が見られず、50%程度の代替率なら影響が少ないものと考えられた。

(2) 再リサイクル性

溶融スラグが入った再生骨材を用いて再生混合物を作製しても大きな影響はないと考えられた。

(3) 路盤材用骨材としての利用

修正 CBR は比較的高い性状を示したが、扁平でなく稜角に富んだ材料であり、すり減り減量が約 36%と多かった。天然材料とは若干異なるが、下層路盤材として利用可能と考えられた。

(4) 環境安全性

溶出試験による確認を行ったものであれば、環境中で使用しても大きな問題はないと考えられた。

今後の課題としては、様々なスラグが生産されており、今回のデータが必ずしも当てはまらないケースもあるかもしれないので、柔軟な対応ができるような方法を検討する必要があるほか、より利用形態に近い形での評価方法をさらに検討する必要があると考えられた。

参考文献

- 1) 福満雅之、鈴木哲雄：ごみ焼却灰溶融スラグのアスファルト混合物への利用、道路建設、No.578、pp.33-43、1996
- 2) 黒田智、下田哲也：溶融スラグのアスファルト混合物細骨材への再利用に関する検討、第 22 回日本道路会議、pp.656-657、1997
- 3) 佐沢昌樹、佐武健士：都市ゴミ溶融スラグ入りアスファルト混合物の実路への適用、第 22 回日本道路会議、pp.658-659、1997
- 4) 田村稔、福満雅之、鈴木哲雄：ごみ焼却灰溶融スラグのアスコンへの利用、第 21 回日本道路会議、pp.634-635、1995
- 5) 片石俊幸、中沢昌作、萩原稔：溶融スラグ砂の舗装材料への利用について、第 21 回日本道路会議、pp.636-637、1995
- 6) 泉秀俊、黒田智、荒木田靖：産業副産物の道路分野への利用化提案、第 21 回日本道路会議、pp.638-639、1995
- 7) 泊瀬川孚、山田鉄雄、浅野耕司：都市ゴミ焼却灰溶融スラグの路盤材への適用、第 22 回日本道路会議、pp.660-661、1997
- 8) 猪熊明、高野明雄、吉村栄司、貫井武：焼却灰溶融スラグの道路路盤材への適用の検討、舗装、Vol.35、

No.11、pp.4-9、2000.11

- 9) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧、(社)日本道路協会、2007.6

5. 再生舗装のライフサイクル評価

5.1 概要

舗装分野においては、舗装工事から発生する舗装発生材のリサイクルだけでなく、廃棄物からの再生資材の利用など、リサイクルが多いことはこれまで述べてきたとおりである。そこで、2.、3. では、舗装発生材の新しいリサイクル技術の開発を行い、4. では、廃棄物再生資材の舗装でのリサイクル技術の開発を行った。しかし、リサイクルを考えたとき、一つの物質の流れだけで評価を行ってしまうと、全体で見たときに環境負荷を大きくしてしまっている可能性もある。このため、ライフサイクルを通して複数の環境負荷項目について評価を行うライフサイクルアセスメント (LCA) が必要となってくる。

舗装に関する LCA 解析事例は少ないものの、舗装資材のリサイクルについてのいくつかの解析事例^{1)~4)}がある。これらは、解析手法など非常に参考になるが、データが若干古く、現状にそぐわない部分があったり、原単位の求め方に不明な部分があり、条件を変えた解析ができないなどの課題がある。また、CO₂ やエネルギーの解析は見られるものの他の環境負荷量は求められておらず、総合的な判断ができない。一方、廃棄物からの再生資材を評価した事例はなく、LCA の解析手法、範囲設定など参考になるものが非常に少ない。

そこで、5. では、まず一般的に行われるプラントで製造したアスファルト混合物を用いた舗装補修工事と、環境負荷が小さいと言われる路上再生工法についての環境負荷を試算し、環境負荷を考慮した再生工法について検討した。これに加えて、廃棄物からの再生資材として、廃タイヤ、灰プラスチック、ゴミ熔融スラグを利用した舗装のライフサイクル評価を実施し、環境負荷を明らかにした。

5.2 舗装再生工法のライフサイクル評価

プラント再生工法は、路上工事の際に発生する舗装発生材を再生プラントに持ち込み、破碎・分級して再生骨材を製造した後、これを使用して再生アスファルト混合物や再生路盤材を製造・出荷して、舗装を構築するものである。現在では、ほとんどの再生工法がこの方法で行われている。一方、路上再生工法は、路上表層再生工法と路上路盤再生工法があり、路上において既設舗装を掻き取り、これに添加剤や補足材を供給しながらアスファ

ルト混合物層や路盤を構築していくものである。再生プラントが近くなくても施工でき、現場からの発生材の搬出がなく、ダンプ輸送が軽減されとのことからエネルギー消費も軽減できると言われている。しかし、CO₂ 排出量エネルギー消費量以外の環境負荷は分からず、また、施工機械の進歩もあり、現状に合った解析が必要である。

そこで、舗装再生工法の環境負荷軽減効果を確認するために、プラント再生工法、路上再生工法について環境負荷量の試算を行った。

5.2.1 試算概要および試算条件

環境負荷量の試算を行う舗装工事の設定にあたっては、試算Ⅰ：表層の再生工法に関する検討、試算Ⅱ：路盤の再生工法に関する検討を行い、骨材に新材を用いた場合とプラント再生材を用いた場合、再生骨材配合率を変えた場合、および路上表層再生工法では特殊機械を各地へ輸送した場合などの影響を検討した。

環境負荷量の試算にあたっては、舗装工事の検討範囲（資材調達から廃棄まで）を設定し、消費する資材や使用する機器等の数量について算出した。これに、資材等の環境負荷原単位を乗ずることによって、環境負荷量を算出した。なお、環境負荷原単位については、原料調達から製品まで含め積み上げ法によって求められたものを使用するとともに、原単位が見あたらないものについては文献調査やヒアリング調査などを行い適宜積み上げ法により作成した。

(1) 舗装工事の範囲の設定

舗装工事における検討範囲は図-5.1 に示すとおり設定し、環境負荷量の排出段階として材料製造、材料輸送、舗装工事、廃棄に整理することとした。

試算ケースについては、表-5.1 に示すように、試算Ⅰでは切削オーバーレイ工法と路上表層再生工法を対象とし、ケース①：新材を用いた切削オーバーレイ工法、ケース②：プラント再生材（再生材率 60%）を用いた同工法、ケース③：路上表層再生工法（リミックス工法）とした。また、試算Ⅱについては、路盤および表層の打換えと路上路盤再生工法を対象とし、ケース④：路盤を瀝青安定処理(加熱混合)に打換え、ケース⑤：路盤にプラント再生材を用いた瀝青安定処理(加熱混合)に打換え、ケース⑥：既存表層を路上路盤再生工法とした。

なお、廃棄においては、既設のアスファルト（以下、As）舗装の発生材が現状においてほぼ全て再利用されることから、廃材輸送（再生骨材製造所に輸送）のみとすることとした。

(2) 工事規模

工事規模は、道路の幅員 3.25m、2 車線、延長 200m (施工面積 1,300m²) とした。

表層の再生工法に関する検討では、既存の舗装面を 3cm 切削、5cm オーバーレイすることとした。

路盤の再生工法に関する検討では、舗装を N3 交通断面から N4 交通断面へ変更するものとした。

(3) 使用資材および機器等の数量

土木工事標準積算基準書⁵⁾等を基に、材料条件を表-5.2 に、使用機器および燃費を表-5.3 のように設定した。燃費の設定に当たっては、機材等の使用数量、日当たり施工量等を基にして算出した。

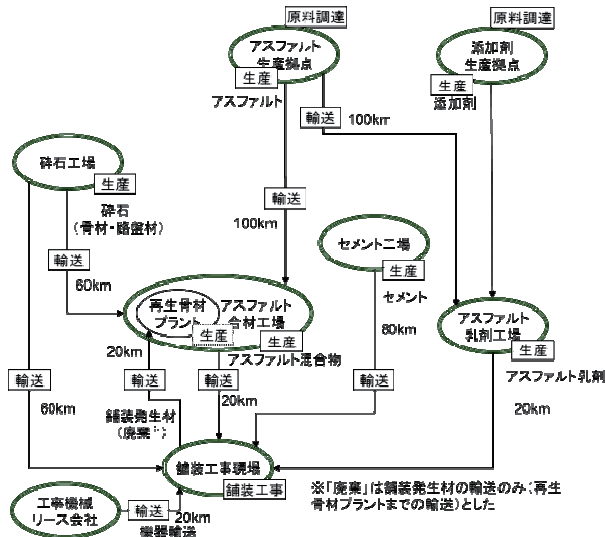


図-5.1 舗装工事における検討範囲

表-5.1 検討ケース

試算Ⅰ：表層の再生工法に関する検討

	検討ケース①	検討ケース②	検討ケース③
再生工法	新材（比較用）	フラント再生工法	路上表層再生工法
	（切削オーバーレイ）		
打換え厚	3cm切削 5cmオーバーレイ	3cm切削 5cmオーバーレイ	3cm切削 5cmオーバーレイ
再生材配合率	0%	60%	60%

試算Ⅱ：路盤の再生工法に関する検討

	検討ケース④	検討ケース⑤	検討ケース⑥
再生工法	新材（比較用）	フラント再生工法	路上路盤再生工法
	（打換え）		
打換え厚	表層切削→瀝青安定処理路盤に打換え 表層5cmオーバーレイ		10cm混合、再生路盤構築 表層5cmオーバーレイ
再生材配合率	0%	50%	100%

表-5.2 材料条件

名 称	材料条件
As混合物	基準密度: 2.35t/m ³ , ロス率: 0.07, As量: 5.5%(旧As混合物も同じ), 砕石単位体積重量: 2.7t/m ³
As乳剤	プライムコート散布量: 1.26L/m ² , 路上表層添加剤: (対旧アスファルト) 14%
瀝青安定処理路盤材 (加熱混合)	基準密度: 2.35t/m ³ , ロス率: 0.07, As量: 4.0%, 砕石単位体積重量: 2.7t/m ³
セメント・瀝青安定処理剤	セメント添加量: 2.5%, セメント比重: 3.15t/m ³ , アスファルト乳剤量: 4.7%

表-5.3 使用機器および燃費

使用機器	使用燃料	燃料消費率 ^{※1}
路面切削機	軽油	0.132 L/m ²
路面清掃車	軽油	0.039 L/m ²
アスファルトフィニッシャー	軽油	0.019-0.053 L/m ²
ロードローラ	軽油	0.015-0.030 L/m ²
タイヤローラ	軽油	0.018-0.036 L/m ²
振動ローラ	軽油	0.031 L/m ²
路面ヒータ	軽油	0.053 L/m ²
路面ヒータ(加熱用) ^{※2}	灯油	0.8-0.16 L/m ²
	LPG	1.000 kg/m ²
路面表層再生機	軽油	0.065 L/m ²
コンクリートカッター	ガソリン	0.055-0.186 L/m
スタビライザー	軽油	0.166 L/m ²
モータグレーダ	軽油	0.056 L/m ²
バックホウ	軽油	0.210 L/m ²
ダンプトラック(2t-25t)	軽油	4.90-19.72 L/h
散水車	軽油	4.720 L/h

※1: 燃料消費率は、日当たり施工量、運転日あたり燃料消費量により算出

※2: 路面ヒータ(加熱用)の燃料消費量はヒアリングにより設定

5.2.2 環境負荷原単位

原単位は基本的に積み上げ法により求めたものとした。これまでに公表されているものがある場合はそれを利用し、既存のデータベースなどが利用できる場合はそれを基に算出した。データベース等がないものは適宜ヒアリングを実施して作成した。

(1) 燃料等の原単位

電力燃料等の原単位は、JEMAI-LCA⁶⁾の値を用いた。

表-5.4 に値を示す。

(2) アスファルトの原単位

アスファルトの環境負荷原単位の算出結果を表-5.5 に示す。算出にあたっては、原油生産から輸送、精油所での精製を考慮する必要があるが、石油精製によりアスファルトだけが生産される訳ではなく、複数の製品が同時に生産される。これらの製品に環境負荷を相応に負担させるが、全てが目的物であるため、負担率を簡単に決定できない。ここでは全ての石油製品を等分の負担率にして計算することにした。

改質アスファルトⅡ型の生産に係わる環境負荷原単位の算出結果を表-5.6 に示す。算出にあたっては、主な改

質剤である SBS (スチレンブタジエンスチレン) の原単位が必要となるが、公表されているデータはない。しかし、SBS と製法に共通点の多い SBR (スチレンブタジエンゴム、合成ゴム) の原単位が公表されていたので、これを SBS の原単位として使用した。また、改質アスファルトの生産にあたってアスファルトと SBS を混合する工程が必要であったため、ヒアリング調査を行い、改質アスファルトメーカー数社のプラント運転状況の平均値をプラント消費量として環境負荷原単位を求めた。

(3) アスファルト乳剤の原単位

アスファルト乳剤の環境負荷原単位の算出結果を表-5.7 に示す。メーカーへのヒアリング等により、As 乳剤の構成する材料をアスファルト、水、塩酸、界面活性剤とし、構成比をそれぞれ 50:48:1:1、乳化機により混合する電力を 0.03 (kWh/kg) として算出した。乳剤の原料となる界面活性剤の種類は特定できず、原単位も不明なため、公表されている界面活性剤 (ヤシ油脂肪酸、アルキルベンゼンスルホン酸、グリセリン、脂肪酸石鹸)⁸⁾のうち、最も環境負荷が大きかったヤシ油脂肪酸の値を用いた。なお、As 乳剤製造に係る各種添加剤の輸送については、使用量が微量であるため省略した。

表-5.4 燃料等の環境負荷原単位

	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典
電力 kWh	9.09E+00	4.00E-01	5.17E-05	1.62E-04	1.72E-06	文献6)
ガソリン L	3.51E+01	2.47E+00	7.57E-05	7.61E-04	8.62E-05	文献6)
軽油 L	3.82E+01	2.69E+00	8.24E-05	8.29E-04	9.39E-05	文献6)
重油 L	3.91E+01	2.77E+00	1.30E-05	8.07E-04	9.50E-05	文献6)

表-5.5 アスファルトの環境負荷原単位

	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典
石油製品合計						
原油生産 kL	9.44E+02	5.24E+01	7.23E-01	1.15E-01	—	文献7)
原油輸送 kL	4.63E+02	3.15E+01	6.87E-01	8.51E-01	—	
石油製品生産 kL	2.68E+03	1.50E+02	1.43E-01	1.16E-01	—	
石油製品合計 kL	4.09E+03	2.34E+02	1.55E+00	1.08E+00	—	
アスファルト (=合計×2.2%/20.8kg)	kg	4.33E+00	2.48E-01	1.64E-03	1.14E-03	—

表-5.6 改質アスファルトⅡ型の環境負荷原単位 (輸送除く)

		エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典
改質アスファルト1tあたり							
プラント消費	A重油(L)	6.50	2.54E+02	1.80E+01	8.45E-05	5.25E-03	日本改質アスファルト協会へのヒアリング調査結果
	灯油(L)	6.50	2.48E+02	1.75E+01	5.36E-04	5.39E-03	
原材料	電力(kWh)	89.00	8.09E+02	3.56E+01	4.60E-03	1.44E-02	
	アスファルト(t)	0.95	4.11E+03	2.35E+02	1.56E+00	1.09E+00	1.53E-04
	改質剤(SBS)(t)	0.05	3.70E+02	1.50E+02	1.58E-06	6.65E-05	—
小計(1tあたり)			5.79E+03	4.57E+02	1.57E+00	1.11E+00	表-5.4より
							文献6)のSBRの値を流用
改質アスファルトII型		kg	5.79E+00	4.57E-01	1.57E-03	1.11E-03	—

(4) 砕石の原単位

砕石の環境負荷原単位の算出結果を表-5.8に示す。砕石についても公表されたデータがなく、適当な統計値も見あたらなかったため、採石工場にヒアリング調査を行い求めた。

(5) 再生骨材の原単位

再生骨材については、文献に再生骨材製造プラントにおける運転例を参考にして試算した。結果を表-5.9に示す。

(6) アスファルト混合物生産に係わる原単位

アスファルト混合物生産に関する原単位を表-5.10の下段に示す。アスファルト混合物生産における原単位については、(社)日本アスファルト合材協会より、混合物1tあたりの資源消費の統計値(電力消費量10.2kWh/t、重

油消費量9.7L/t)が公表されている¹⁰⁾。しかし、これは新規合材、再生合材、再生骨材の生産が全て混ざったものであり、これらを分離しないと使用できない。

そこで、まず、いくつかのプラントに対しヒアリングを行い、再生骨材の生産を除いた資源消費を調査したところ、重油/電力比の平均値が2.2となった。重油消費が全て合材生産に使用されたとすれば、統計値の重油消費量から合材生産分のエネルギー消費が求められ、電力消費4.4kWh/t、重油消費9.7L/tとなった。これをもとにして、さらに表-5.10に示すようにストレートアスファルト合材、改質アスファルト合材、再生合材の3つの生産割合、燃料消費率、電力消費率を設定し、それぞれの資源消費を求めたところ、表-5.10の下段の値となった。各種合材生産の環境負荷原単位は表-5.4と表-5.10から求めて使用した。

表-5.7 アスファルト乳剤の環境負荷原単位

		数量	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典
アスファルト	kg	0.5	2.16E+00	1.24E-01	8.21E-04	5.72E-04	—	表-5.4
工業用水	kg	0.48	2.73E-03	4.80E-05	6.29E-09	1.90E-08	2.67E-10	文献6)
塩酸	kg	0.01		1.08E-02	7.19E-06	4.70E-06	1.07E-06	文献6)
界面活性剤	kg	0.01		1.03E-02		7.20E-06	2.35E-07	文献6)
電力	kWh	0.03	2.73E-01	1.20E-02	1.55E-06	4.86E-06	5.16E-08	文献6)
アスファルト乳剤		kgあたり	2.44E+00	1.57E-01	8.30E-04	5.89E-04	1.36E-06	

表-5.8 砕石の環境負荷原単位(輸送除く)

		エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典
砕石3500tあたり消費量							
重機消費	軽油(L)	263.55	1.01E+04	6.51E+02	2.00E-02	2.01E-01	2.27E-02
	ガソリン(L)	232.05	8.15E+03	5.73E+02	1.76E-02	1.77E-01	2.00E-02
プラント消費	電力(kWh)	4861.50	4.42E+04	1.94E+03	2.51E-01	7.88E-01	8.36E-03
小計(3500tあたり)			6.24E+04	3.17E+03	2.89E-01	1.16E+00	5.11E-02
砕石生産 (=合計/3500t)		t	1.78E+01	9.05E-01	8.25E-05	3.33E-04	1.46E-05

表-5.9 再生骨材の環境負荷原単位

			エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典	
再生骨材66,000tあたり消費量									
重機消費	破碎	軽油 (L)	33,000	1.26E+06	8.88E+04	2.72E+00	2.74E+01	3.10E+00	文献9)
	分別	軽油 (L)	20,900	7.99E+05	5.62E+04	1.72E+00	1.73E+01	1.96E+00	
プラント消費	破碎	電力 (kWh)	214,500	1.95E+06	8.58E+04	1.10E+01	3.47E+01	3.69E-01	
	分別	電力 (kWh)	128,700	1.17E+06	5.15E+04	6.63E+00	2.08E+01	2.21E-01	
小計(66,000tあたり)				5.18E+06	2.82E+05	2.21E+01	1.00E+02	5.65E+00	
再生骨材生産 (=合計/66000t)			t	7.85E+01	4.28E+00	3.35E-04	1.52E-03	8.56E-05	

表-5.10 アスファルト混合物生産に関する燃料等の消費

	ストレートアスファルト合材	改質アスファルト合材	再生アスファルト合材
生産割合	15 %	15 %	70 %
燃料消費率 ^{※1}	100 %	115 %	110 %
電力消費率 ^{※1}	100 %	100 %	110 %
重油消費量 L/t	8.88	10.21	9.77
電力消費量 kWh/t	4.11	4.11	4.52
※1燃料消費率、電力消費率は、ストレートアスファルト合材を100%とした場合の数値			

(7) アスファルト混合物の環境負荷原単位

表-5.4、表-5.5、表-5.8、表-5.10 の値を用いてアスファルト混合物の原単位を算出した。結果を表-5.11 に示す。

(8) 再生アスファルト混合物の環境負荷原単位

表-5.4、表-5.5、表-5.8、表-5.9、表-5.10 を用いて、再生アスファルト混合物の環境負荷原単位を算出した。結果を表-5.12 に示す。

5.2.3 環境負荷量の試算結果

(1) 試算Ⅰ：表層の再生工法の違いによる環境負荷量の比較

各ケースにおける消費物質量の算出結果を表-5.13 に示す。この結果と環境負荷原単位(表-5.4～5.8)より各環境負荷量(エネルギー量、CO₂ 排出量、SO_x 排出量、NO_x 排出量、SPM 排出量)を算出した結果を表-5.14、図-5.2 に示す。これによると、SO_x、NO_x の材料製造時の排出割合が、エネルギー、CO₂、SPM に比べ大きくなる傾向が見られた。これは、アスファルトの SO_x と NO_x の原単位がガソリンや軽油等の消費燃料の原単位に比べ大きいためであると考えられる。

表-5.11 アスファルト混合物の環境負荷原単位

			エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)
混合物800tあたり							
資材	ストレートアスファルト		44.0	1.90E+05	1.09E+04	7.23E+01	5.04E+01
	骨材		756.0	1.35E+04	6.84E+02	6.22E-02	2.52E-01
輸送	アスファルト輸送(115.2km)	軽油(L)	291	1.11E+04	7.84E+02	2.40E-02	2.42E-01
	骨材輸送(57.6km)	軽油(L)	2504	9.57E+04	6.74E+03	2.06E-01	2.08E+00
製造	電力	(kWh)	3288	2.99E+04	1.32E+03	1.69E-01	5.33E-01
	重油	(L)	7104	2.78E+05	1.97E+04	9.24E-02	5.73E+00
	軽油	(L)	80	3.06E+03	2.15E+02	6.59E-03	6.63E-02
小計(800tあたり)				6.22E+05	4.03E+04	7.28E+01	5.93E+01
密粒度アスファルト合材			t	7.77E+02	5.04E+01	9.10E-02	7.41E-02

表-5.12 再生アスファルト混合物の環境負荷原単位

			エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)
混合物800tあたり							
資材	ストレートアスファルト		17.6	7.61E+04	4.36E+03	2.89E+01	2.01E+01
	骨材		302.4	5.39E+03	2.74E+02	2.49E-02	1.01E-01
輸送	再生骨材(60%)		480.0	3.77E+04	2.05E+03	1.61E-01	7.29E-01
	アスファルト輸送(115.2km)	軽油(L)	117	4.46E+03	3.14E+02	9.61E-03	9.66E-02
製造	骨材輸送(57.6km)	軽油(L)	1002	3.83E+04	2.69E+03	8.25E-02	8.30E-01
	電力	(kWh)	3616	3.29E+04	1.45E+03	1.86E-01	5.86E-01
	重油	(L)	7816	3.06E+05	2.17E+04	1.02E-01	6.31E+00
製造	軽油	(L)	80	3.06E+03	2.15E+02	6.59E-03	6.63E-02
小計(800tあたり)				5.04E+05	3.30E+04	2.95E+01	2.89E+01
再生密粒度アスファルト合材			t	6.30E+02	4.13E+01	3.69E-02	3.61E-02

表-5.13 各ケースの消費物質量

排出段階	物質量			
	ケース	①	②	③
材料製造	AS合材	163.4t	163.4t	61.1t
	アスファルト	8.9t	3.6t	3.4t
	砕石(新材)	154.5t	61.8t	57.7t
	再生骨材	—	98.0t	—
	AS乳剤	1,638.0L	1,638.0L	705.7L
材料輸送	軽油	1,187.2L	646.0L	482.0L
舗装工事	機器輸送	軽油	99L	100.0L
	施工	軽油	300.9L	295.2L
		灯油※	—	1,560.0L
		LPG※	—	1.3t
廃棄	廃材輸送	軽油	131.2L	131.2L

※灯油, LPGは路面ヒータ(加熱用)の燃料であり、環境負荷量は平均値を用いる

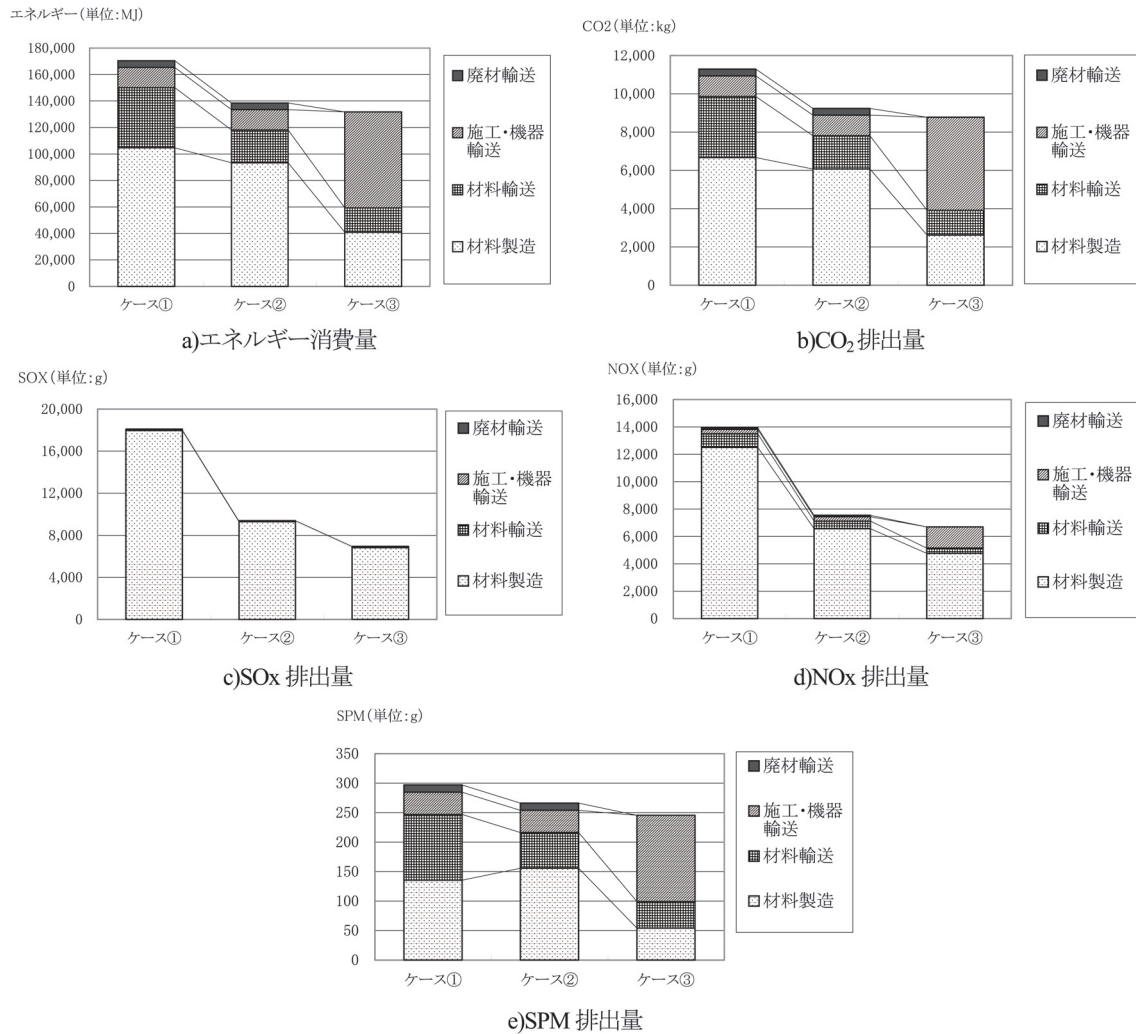


図-5.2 各環境負荷量

表-5.14 各工法による環境負荷量の算出結果

ケース①					
排出段階	エネルギー	CO ₂	SO _x	NO _x	SPM
	MJ	kg	kg	kg	kg
材料製造	1.05E+05	6.67E+03	1.80E+01	1.25E+01	1.36E-01
材料輸送	4.54E+04	3.19E+03	9.78E-02	9.85E-01	1.11E-01
舗装工事	機器輸送	3.78E+03	2.66E+02	8.16E-03	8.21E-02
	施工	1.15E+04	8.08E+02	2.48E-02	2.49E-01
廃棄	廃材輸送	5.01E+03	3.52E+02	1.08E-02	1.09E-01
合計	1.70E+05	1.13E+04	1.81E+01	1.39E+01	2.97E-01
ケース②					
排出段階	エネルギー	CO ₂	SO _x	NO _x	SPM
	MJ	kg	kg	kg	kg
材料製造	9.35E+04	6.08E+03	9.30E+00	6.58E+00	1.56E-01
材料輸送	2.47E+04	1.73E+03	5.32E-02	5.36E-01	6.07E-02
舗装工事	機器輸送	3.78E+03	2.66E+02	8.16E-03	8.21E-02
	施工	1.15E+04	8.08E+02	2.48E-02	2.49E-01
廃棄	廃材輸送	5.01E+03	3.52E+02	1.08E-02	1.09E-01
合計	1.38E+05	9.24E+03	9.40E+00	7.55E+00	2.66E-01
ケース③					
排出段階	エネルギー	CO ₂	SO _x	NO _x	SPM
	MJ	kg	kg	kg	kg
材料製造	4.09E+04	2.62E+03	6.84E+00	4.76E+00	5.42E-02
材料輸送	1.84E+04	1.29E+03	3.97E-02	4.00E-01	4.53E-02
舗装工事	機器輸送	3.82E+03	2.68E+02	8.24E-03	8.29E-02
	施工	6.86E+04	4.59E+03	5.73E-02	1.45E+00
廃棄	廃材輸送	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
合計	1.32E+05	8.77E+03	6.94E+00	6.70E+00	2.45E-01

a) 新材とプラント再生材を用いた切削オーバーレイ工法の比較

切削オーバーレイ工法において骨材に新材を用いた場合（ケース①）、およびプラント再生骨材を用いた場合（ケース②）の環境負荷量を比較した。なお、ここでは、CO₂排出量に焦点を絞り検討を行った。

ケース①と②では、舗装工事段階（施工および機器輸送）、廃材輸送段階での工程は同じとなることから環境負荷量は同量となる。そこで、これらを除いた材料製造（骨材製造、アスファルト製造、As 乳剤・添加剤等製造、As 合材製造）、および材料輸送の環境負荷量を抽出して整理した（図-5.3）。その結果、材料製造ではアスファルト製造と As 合材製造によりほぼ全てを占めている。

環境負荷量原単位を見て分かるように、再生骨材の製造の原単位が新材（碎石）の製造より大きくなっていること、再生 As 合材の製造が新材を用いた As 合材より大きくなっていることから、当初、環境負荷量の増加が予想された。

実際に、図-5.3 に示されているように、ケース②の骨材製造や、As 合材製造の CO₂ 排出量はケース①を上回っている。しかし、As 合材製造に用いるアスファルト使用量の減少分が多いことから、材料製造段階全体として CO₂ 排出量の減少が大きくなっていることが分かった。また、材料輸送が少なくなることもあり、総合的にもケース②の環境負荷量の方が小さくなったものと考えられる。

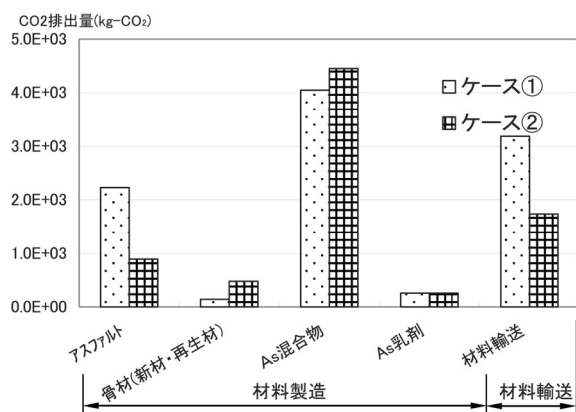


図-5.3 ケース①および②の CO₂ 排出量の比較
（「材料製造」「材料輸送」段階を抽出）

b) プラント再生工法における再生骨材配合率の違いが環境負荷量に与える影響

ケース②における再生骨材配合率が環境負荷量に与える影響について試算した。ケース②では、再生骨材の配合率を都市部での平均値である 60%としているが、地方部も含めた全国平均である 40%と今後リサイクル率が高

くなった際に想定して 80%についても試算した。

その結果、図-5.4 に示すとおり、骨材の製造段階での環境負荷量が少しずつ増加している反面、アスファルトの製造、材料輸送の減少量が多いことが分かる。骨材の製造については、新材がプラント再生骨材に入れ替わることによって、環境負荷量が若干増えた。アスファルト製造の減少については、投入するアスファルト量が減ったことによるもので、材料輸送の減少については、新材やアスファルトの輸送に係るトラックの燃料消費が減少したものである。これらのことが、全体の環境負荷量も減少した（図-5.4 右軸）要因である。なお、再生骨材率を高くするとアスファルト混合物としての品質を高めるために各種添加剤が多くなったり、再生合材製造に係る投入エネルギー量が多くなったりする可能性もあるが、今回の試算ではこれを考慮していない。

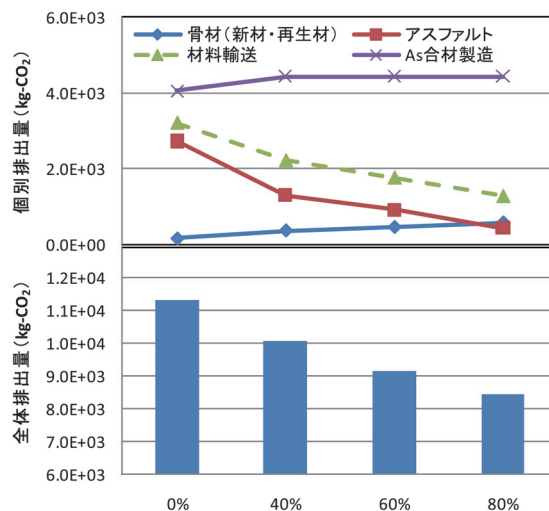


図-5.4 再生骨材混合率による環境負荷量の比較

c) 切削オーバーレイ工法と路上表層再生工法との比較

路上表層再生工法（リミックス）については、図-5.2b) CO₂ 排出量のとおり全工程での CO₂ 排出量が少ないということが試算された。しかし、施工段階における CO₂ 排出量は、切削オーバーレイ工法に比べ非常に大きいこととなった。これは、路上表層再生工法が舗装工事現場において既設舗装体のかきほぐし、新規合材との混合、舗設の工程を行うため、切削オーバーレイ工法で計上している再生骨材製造、As 合材製造も含まれていることになる。

そこで、施工段階における CO₂ 排出量に、材料製造段階の CO₂ 排出量を加えて比較した（図-5.5）。その結果、路上表層再生工法の方が CO₂ 排出量は依然として多いままであった。これは、路上表層再生工法が舗装工事現場で用いる路面ヒータの加熱用燃料の消費量が多いことが

原因である。また、再生骨材や再生 As 合材をプラントで一括して製造すると効率が良いことが関係しているものと推察される。ただし、前述したとおり、路上表層再生工法の全体の CO₂ 排出量は、材料輸送が小さく、廃材輸送量がないこともあって環境負荷が小さい値となる。

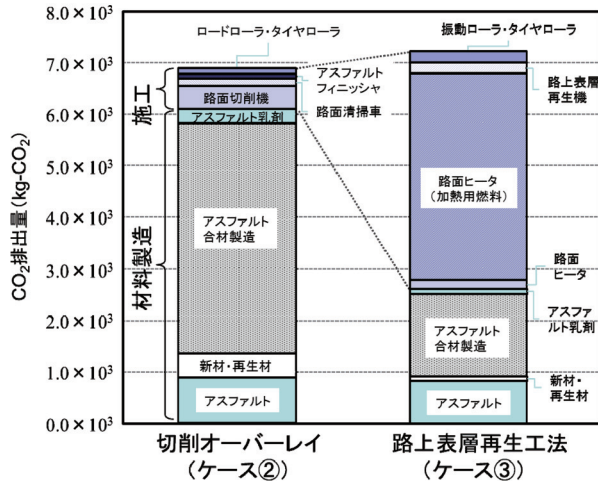


図-5.5 ケース②および③の CO₂ 排出量の比較
 (「材料製造」、「施工」を抽出)

次に、路上表層再生機が全国的に見て台数が非常に少なく、施工する際には非常に遠方にまで輸送されるという実態がある。したがって、輸送距離による環境負荷量への影響を検討した。算出には路上表層再生機の輸送を陸送として、輸送には、25t ダンプトラック（燃料：軽油、燃費：19.720L/h）を用いることとし、時速を 25km/h、輸送距離を 500km、1,000km として算出した。具体的には、輸送に係る軽油消費量のみが距離に比例して基本ケース（20km）から 25 倍、50 倍とした。試算結果を図-5.6 に示す。なお、路面ヒータ（加熱用）の燃料消費量については、近年、効率の良いものが開発されていることから、燃費が最小のケースも試算した。

その結果、燃料消費平均値において、ケース①と同程

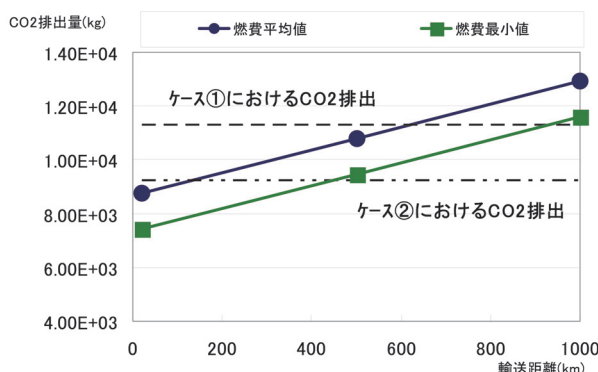


図-5.6 路上表層再生機の輸送距離による比較
 度になるのは約 600km であり、ケース②では約 150km

となった。このことから、路上表層再生工法でも機械等の輸送によって環境負荷は大きくなることが分かった。ただし、燃料消費最低値のグラフを見ると、ケース①とは約 900km、ケース②とは約 500km で交差しており、このことから、燃料消費の少ないタイプであれば、多少輸送距離が長くなっても環境負荷が小さい可能性が高いことも分かった。

(2) 試算Ⅱ：路盤の修繕工法の違いによる環境負荷量の比較

舗装体を路盤から打換える時の環境負荷量を比較した。ここで、舗装断面は図-5.7 に示すように N3 交通断面から N4 交通断面に変更することとした。具体的には、T_A を 15 から 19 にする（T_A 4 増加）こととし、ケース④、⑤では既設アスコン層を撤去後、瀝青安定処理（加熱混合とし、⑤では再生材率 50%とする）に打換え、As 混合物層（5cm）を舗設する。ケース⑥は、既設 As 混合物層、および既設路盤の一部を路上路盤再生工法（セメント・安定処理）により路盤を構築し、As 混合物層を舗設する（表-5.1）。

5cm	アスコン	撤去	アスコン	5cm
15cm	粒調碎石		瀝青安定処理(加熱混合)	5cm
20cm	クラッシャーラン		粒調碎石	15cm
			クラッシャーラン	20cm

a) ケース④、⑤の工事内容

5cm	アスコン	路上再生	アスコン	5cm
15cm	粒調碎石		セメント・瀝青安定処理	10cm
20cm	クラッシャーラン		粒調碎石	10cm
			クラッシャーラン	20cm

b) ケース⑥の工事内容

図-5.7 ケース④、⑤、⑥の工事ケース
 (舗装断面)

この試算条件に従って、ケース④、⑤の消費物質質量（表-5.15）と、環境負荷原単位（表-5.4）により環境負荷量を算出した。なお、セメントの製造にかかるエネルギー量の原単位においては明確なデータが見つからなかったことから、統合化は行わず、ここでは CO₂ 排出量のみ算出した（表-5.16）。

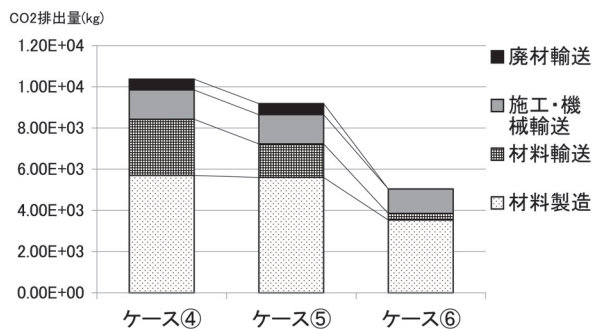
ここで、表層のアスファルト混合物部分については、各ケースとも共通であることから、省いて整理した（図-5.8）。その結果、ケース⑤（プラント再生骨材を用いた路盤の打換え工法）はケース④（新材を用いた打換え）の約 90% となり、ケース⑥（路上路盤再生工法）は約 50% となった。

表-5.15 消費物質質

排出段階	物質	物質質量		
		ケース④	⑤	⑥
材料製造	AS合材(表層)	152.75t	152.75t	152.75t
	アスファルト	8.40t	8.40t	8.40t
	碎石	144.35t	144.35t	144.35t
	瀝青安定処理路盤材(加熱混合)	152.75t	152.8t	—
	アスファルト	6.11t	3.1t	—
	碎石	146.64t	73.3t	—
	再生骨材	—	76.4t	—
	セメント	—	—	3.3t
	瀝青剤	—	—	6.2t
	水	—	—	1.3t
材料輸送	軽油	2,115.6L	1,951.6L	1,219.5L
工事	機器輸送	軽油	101.2L	108.6L
	施工	軽油	546.1L	410.6L
廃棄	ガソリン	0.4L	0.4L	0.4L
	廃材輸送	軽油	196.8L	—

表-5.16 ケース④、⑤、⑥の各排出段階での CO₂ 排出量

排出段階		ケース④	ケース⑤	ケース⑥
材料製造		1.20E+04	1.19E+04	9.79E+03
材料輸送		5.68E+03	4.58E+03	3.27E+03
舗装工事	機械輸送	2.72E+02	2.72E+02	2.92E+02
	施工	1.56E+03	1.56E+03	1.10E+03
廃棄		5.28E+02	5.28E+02	0

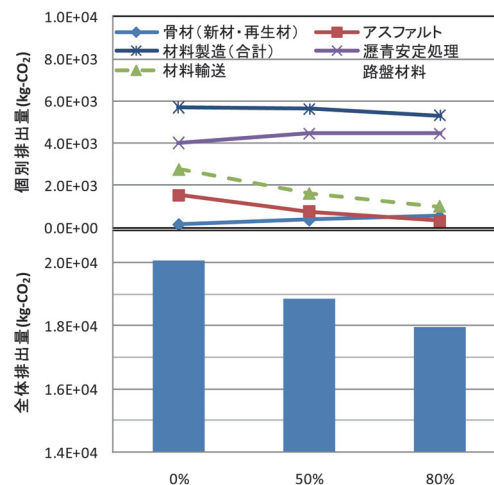
図-5.8 ケース④、⑤、⑥の CO₂ 排出量の内訳(表層を除く)

a) 新材と再生材による打換え工法の比較

瀝青安定処理路盤材の再生骨材率の変化による CO₂ 排出量を検討した。具体的にはケース⑤の再生骨材率を 80%にした場合も加えて試算した(図-5.9)。その結果、5.2.3(1)b)と同様、骨材(新材・再生骨材)の製造が増えている一方で、アスファルト使用量が減少していることにより、材料製造時の CO₂ 排出量も減少している。また、材料輸送が小さくなっていることで全体の環境負荷量も減少するところが示唆された。

b) 打換えと路上路盤再生工法の比較

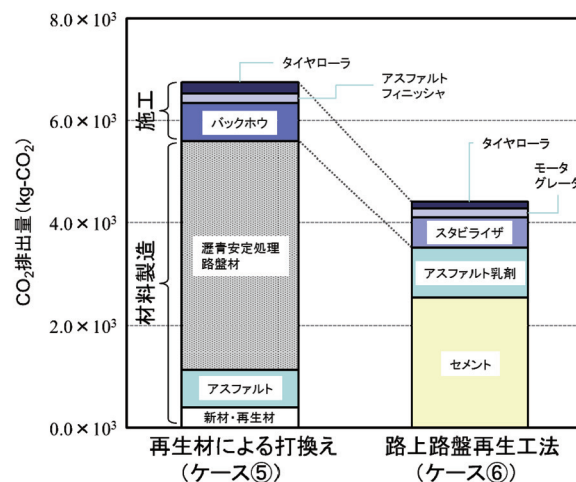
路上表層再生工法は、舗装工事現場において既設のアスファルト混合物層および路盤のかきほぐし、添加剤混合により再生路盤を構築するため、打換え工法で計上している材料製造分も含まれていることとなる。そこで、

図-5.9 再生骨材率による CO₂ 排出量の変化

舗装工事における CO₂ 排出量に材料製造を加えて比較した(図-5.10)。

その結果、ケース⑤では瀝青安定処理(加熱混合)の製造、ケース⑥ではセメントの製造に係る CO₂ 排出量が多くなったが、全体としてケース⑥はケース⑤の6割程度となった。

さらに、ケース⑥には廃材輸送はなく、また、材料輸送に係る CO₂ 排出量も少なくなることによって、図-5.8で示した通り総合的にも環境負荷の小さい工法であることが試算された。

図-5.10 打換えと路上路盤再生工法の CO₂ 排出量の比較(「材料製造」、「施工段階」を抜粋)

5.3 廃タイヤ、廃プラスチック利用再生舗装のライフサイクル評価

舗装には廃棄物からの再生資材の利用が検討されることが多く、廃タイヤ、廃プラスチックなどについても検討が行われている¹¹⁾¹²⁾。廃タイヤについては、アスファ

ルトの改質材としての利用が有力と見られ、添加量や性状などが概略把握されている。また廃プラスチックについては、アスファルト混合物用の骨材としての検討がある。

そこで、これらの廃棄物をアスファルト混合物に利用した場合についてライフサイクル評価を行った。

5.3.1 LCA 評価条件の設定

(1) 評価手順

LCA 評価は、以下のような手順で行った。

- ①評価モデルの設定（モデル空間の設定、舗装資材の需要量の算定等）
- ②資源需要量の算定、原単位補充
- ③環境負荷の算定

(2) 評価モデルの設定

a) 評価モデル

評価モデルは、廃タイヤ、廃プラスチックともに、舗装に利用しない場合は、電力としてエネルギー回収するサーマルリカバリーが行われるものとし、これと廃タイヤ、廃プラスチック利用舗装を比較することとした。

モデル都市空間の条件は、都市部での利用を想定し、表-5.17に示すように14の政令指定都市の平均値を用いることとした。

評価対象範囲は図-5.11に示すとおり、道路舗装事業に関連する原材料生産、資材製造、資材輸送、舗装工事と、これに加えて廃タイヤ、廃プラスチックがサーマルリカバリーされた場合の発電に関するものとした。ただし、廃タイヤ・廃プラスチックは、再生利用の有無に関わらず、集積場に集められるものとし、その一次加工及び輸送は評価対象範囲外とした。なお、耐用期間を超えた舗装材は、ほぼ100%再利用されることから最終処分場への廃棄については評価対象としなかった。

舗装に用いられる材料の平均的な輸送距離を設定するために、各資材の生産拠点の配置、分散状態を調査し、それらの配置を図-5.12のように設定した。この結果、各材料の輸送距離は、表-5.18に示すとおりとなった。

表-5.17 モデル都市空間

	設定条件
人口	150万人
対象面積	570km ²
道路率	3.1%
道路面積	17.67km ²

備考1) 道路率% = 250.32km^2 (道路面積合計) ÷ 8006.87km^2 (都市面積合計)

備考2) 道路面積km² = 570km^2 (対象面積) × 3.1% (道路率)

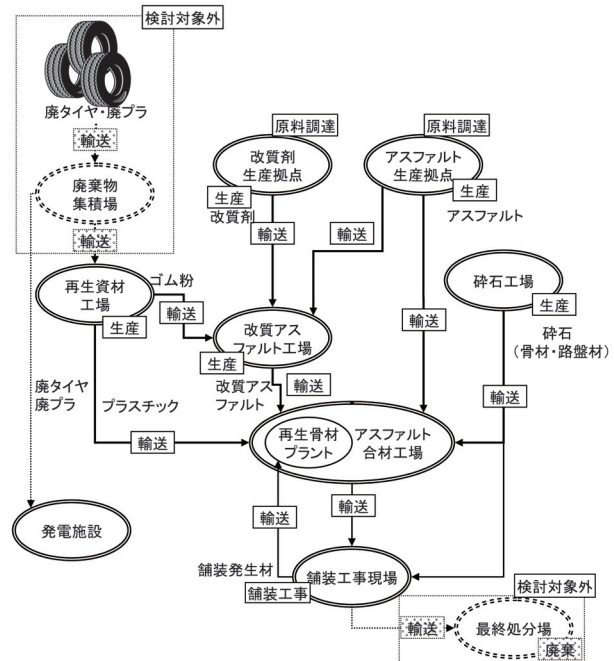


図-5.11 評価対象範囲

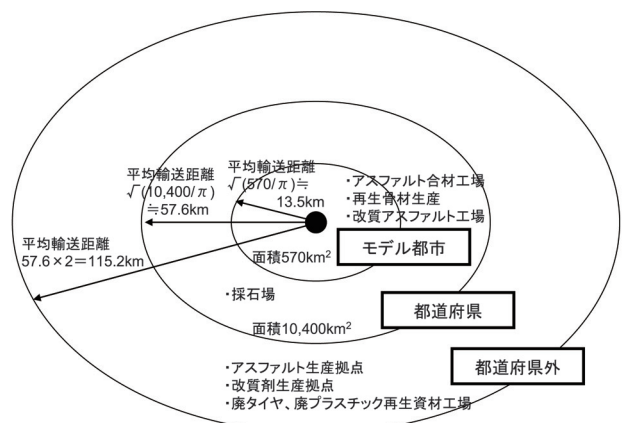


図-5.12 各種資材の生産地の配置と輸送距離の設定

表-5.18 材料輸送距離の設定値

経路	輸送距離
アスファルト合材工場 → モデル都市	13.5km
再生骨材(モデル都市内生産)	13.5km
改質アスファルト工場 → アスファルト合材工場(モデル都市)	13.5km
採石場 → アスファルト合材工場(モデル都市)	57.6km
アスファルト生産拠点(製油所) → アスファルト合材工場(モデル都市)	115.2km
アスファルト生産拠点(製油所) → 改質アスファルト工場	115.2km
改質剤工場 → 改質アスファルト工場	115.2km
廃タイヤ再生資材(ゴム粉)工場 → 改質アスファルト工場	115.2km
廃プラスチック再生資材(骨材)工場 → アスファルト合材工場(モデル都市)	115.2km

b) 検討ケースの設定

検討ケースとしては、文献調査やヒアリング調査の結果、廃タイヤも廃プラスチックもアスファルト混合物への利用の可能性が高く、特に廃タイヤはアスファルトの添加剤としての利用、廃プラスチックは混合物の代替利用の可能性が高いものと考えられた。また添加量も求められており、廃タイヤではアスファルトに対して 15%の添加量で改質アスファルトⅡ型と同等の性状、廃プラスチックでは、骨材に対して 10%を上限にして添加が可能と報告されている¹¹⁾¹²⁾。そこで、検討ケースは表-5.19のように設定した。

また、廃タイヤ、廃プラスチックは、現在のリサイクル状況では、エネルギー回収するサーマルリカバリーが多いため¹³⁾¹⁴⁾、舗装に利用しない場合は、全てサーマルリカバリーにより発電に利用され、都市内に供給されるものとした。また、舗装に使用する場合は、都市内全体で見れば、廃タイヤ、廃プラスチック発電で発電される電力量と同じ量の公共電力が必要となるため、これも設定した。

表-5.19 検討ケース

	ケース1 (比較用)	ケース2 (比較用)	ケース3	ケース4	ケース5
舗装部分	密粒度アスファルト混合物 13(ストレートアスファルト)	密粒度アスファルト混合物 13(改質アスファルトⅡ型)	密粒度アスファルト混合物 13(コゝム粉15%アスファルト)	密粒度アスファルト混合物 13(プラ骨材5%)	密粒度アスファルト混合物 13(プラ骨材10%)
	粗粒度アスファルト混合物 20(ストレートアスファルト)	粗粒度アスファルト混合物 20(改質アスファルトⅡ型)	粗粒度アスファルト混合物 20(コゝム粉15%アスファルト)	粗粒度アスファルト混合物 20(プラ骨材5%)	粗粒度アスファルト混合物 20(プラ骨材10%)
電力	廃プラスチック発電	廃タイヤ発電	公共電力	公共発電+廃プラスチック発電	公共電力

(3) 基本資材の需要量の設定

a) 舗装資材の需要量

再生資材の利用は混合物への利用に絞った。ストレートアスファルト使用の混合物の耐用年数は5年、改質アスファルト使用の混合物の耐用年数はこの6倍とした。アスファルト混合物層の厚さは10cmとした。この条件とモデル空間都市の条件(表-5.12)から舗装資材の需要量を算出すると、表-5.20のようになった。なお、耐用年数6倍の設定は、ストレートアスファルトと改質アスファルトは同じ交通条件下では使用しないことから、単純に耐用年数を割り出すことができないものの、比較検討のため同じ交通条件で使用したと仮定して計算することにした。「舗装の構造に関する技術基準・同解説」¹⁵⁾

を参考にして、改質アスファルト混合物(改質アスファルトⅡ型)の動的安定度がストレートアスファルトのそれと比べて6倍程度以上が見込めることからそのように設定した。

表-5.20 舗装資材の需要量

混合物種	項目	設定値	単位	備考
ストレートアスファルト混合物	年間舗装面積	3,534,000	m ² /年	道路面積÷耐用年数
	アスコン需要量	353,400	m ³ /年	年間舗装面積×アスコン層厚
改質アスファルト混合物	年間舗装面積	589,000	m ² /年	道路面積÷耐用年数
	アスコン需要量	58,900	m ³ /年	年間舗装面積×アスコン層厚

b) 基本資材の需要量

前項で得られた舗装資材の需要量(表-5.20)をもとに、必要な基本資材量を算出した。表層、基層はそれぞれ5cmとした。算出結果を表-5.21、5.22に示す。

表-5.21 各種基本資材のモデル都市内での需要量(表層)

	単位	ケース1 ストレートアスファルト混合物	ケース2 改質アスファルト混合物
需要量(容積)	m ³ /yr	176,700	29,450
表層材密度	t/m ³	2.37	2.37
需要量(質量)	t/yr	418,779	69,797
アスファルト	t/yr	21,832	3,457
改質剤	t/yr	0	182
粗骨材	t/yr	226,260	37,710
細骨材・石粉	t/yr	170,687	28,448
備考(配合) (ストアス混合物) (改質混合物)			
バインダー配合率(対骨材)	質量%	5.5	5.5
改質剤配合率(対アスファルト)	質量%	0.0	5.0
空隙率	容積%	4.0	4.0
粗骨材	質量%	57.0	57.0
細骨材・石粉	質量%	43.0	43.0

表-5.22 各種基本資材のモデル都市内での需要量(基層)

	単位	ケース1 ストレートアスファルト混合物	ケース2 改質アスファルト混合物
需要量(容積)	m ³ /yr	176,700	29,450
表層材密度	t/m ³	2.36	2.36
需要量(質量)	t/yr	417,012	69,502
アスファルト	t/yr	19,858	3,144
改質剤	t/yr	0	165
粗骨材	t/yr	285,951	47,659
細骨材・石粉	t/yr	111,203	18,534
備考(配合) (ストアス混合物) (改質混合物)			
バインダー配合率(対骨材)	質量%	5.0	5.0
改質剤配合率(対アスファルト)	質量%	0.0	5.0
空隙率	容積%	5.0	5.0
粗骨材	質量%	72.0	72.0
細骨材・石粉	質量%	28.0	28.0

c) トラック輸送量と燃料消費量

トラックの燃費については経済産業省告示第 66 号「貨物輸送事業者に行わせる貨物の輸送に係わるエネルギー消費量の算定方法」より 0.0575L/t・km とした。算出結果を表-5. 23 に示す。

表-5. 23 トラック輸送量と燃料消費量
(基本資材)

輸送量(行き先)	単位	ケース1 ストレートアスファルト混合物	ケース2 改質アスファルト混合物	輸送距離 (設定値)
アスファルト(プラント)	t	41,690	0	115 km
アスファルト(改質アス工場)	t	0	6,601	115 km
改質剤(改質アス工場)	t	0	347	115 km
改質アス(プラント)	t	0	6,948	13.5 km
砕石(プラント)	t	794,101	132,350	57.6 km
アスファルト合材(現場)	t	835,791	139,299	13.5 km
軽油消費量				
アスファルト(プラント)	L	276,153	0	
アスファルト(改質アス工場)	L	0	43,724	
改質剤(改質アス工場)	L	0	2,301	
改質アス(プラント)	L	0	5,394	
砕石(プラント)	L	2,630,063	438,344	
アスファルト合材(現場)	L	648,783	108,130	
合計	L	3,554,999	597,893	

(4) 廃タイヤ、廃プラスチックの需要量の設定

a) 廃タイヤ、廃プラスチック舗装の需要量

廃タイヤ、廃プラスチックの再生資材を使用した舗装をモデル都市内で利用したときの各資材の需要量を算出した結果を表-5. 24、5. 25 に示す。なお、廃タイヤ利用混合物は、ヒアリング調査より改質アスファルトⅡ型相当の性状が見込めるということで改質アスファルトⅡ型と同じ耐用年数に、廃プラスチック利用混合物は、通常のスレートアスファルト利用の舗装と同じ程度の耐久性であると仮定して耐用年数も同じに設定した。

表-5. 24 再生資材等のモデル都市内での需要量
(表層)

	単位	ケース3 廃タイヤ利用混合物(アスファルトにゴム)	ケース4 廃プラ利用混合物(骨材の代替5%)	ケース5 廃プラ利用混合物(骨材の代替)
需要量(容積)	m ³ /yr	29,450	176,700	176,700
表層材密度	t/m ³	2.38	2.22	2.16
需要量(質量)	t/yr	70,091	392,274	381,672
アスファルト	t/yr	3,106	19,966	20,078
粗骨材	t/yr	37,869	186,073	165,258
細骨材・石粉	t/yr	28,568	156,098	156,126
ゴム粉(廃タイヤ)	t/yr	548	0	0
プラ骨材(廃プラ)	t/yr	0	10,038	20,078
備考 (配合)				
バインダー配合率	質量%	5.5	5.4	5.6
空隙率	容積%	4.0	4.0	4.0
粗骨材	質量%	57.0	50.0	45.7
細骨材・石粉	質量%	43.0	41.9	43.2
ゴム粉(対アスファルト)	質量%	15.0	0.0	0.0
プラ骨材	質量%	0.0	2.7	5.6

表-5. 25 再生資材等のモデル都市内での需要量
(基層)

	単位	ケース3 廃タイヤ利用混合物(アスファルトにゴム)	ケース4 廃プラ利用混合物(骨材の代替5%)	ケース5 廃プラ利用混合物(骨材の代替)
需要量(容積)	m ³ /yr	29,450	176,700	176,700
表層材密度	t/m ³	2.37	2.19	2.15
需要量(質量)	t/yr	69,797	386,973	379,905
アスファルト	t/yr	2,812	18,055	18,250
粗骨材	t/yr	47,860	239,514	221,405
細骨材・石粉	t/yr	18,612	101,111	138,390
ゴム粉(廃タイヤ)	t/yr	499	0	0
プラ骨材(廃プラ)	t/yr	0	9,866	19,950
備考 (配合)				
		(ストアス混合物)	(改質混合物)	(改質混合物)
バインダー配合率	質量%	5.0	4.9	5.0
空隙率	容積%	5.0	5.0	5.0
粗骨材	質量%	72.0	65.0	61.2
細骨材・石粉	質量%	28.0	27.4	38.2
ゴム粉(対アスファルト)	質量%	15.0	0.0	0.0
プラ骨材	質量%	0.0	2.7	5.5

b) トラック輸送量と燃料消費量

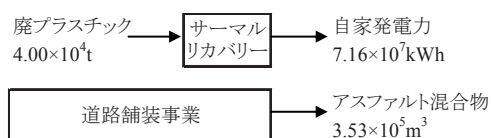
(3)c) と同様に各ケースの燃料消費量を算出した。結果を表-5. 26 に示す。

表-5. 26 トラック輸送量と燃料消費量
(再生資材利用)

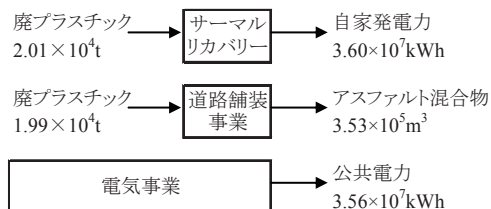
輸送量(行き先)	単位	ケース3 廃タイヤ利用混合物(アスファルトにゴム)	ケース4 廃プラ利用混合物(骨材の代替5%)	ケース5 廃プラ利用混合物(骨材の代替)	輸送距離 (設定値)
アスファルト(プラント)	t	0	38,021	38,328	115 km
アスファルト(改質アス工場)	t	5,918	0	0	115 km
ゴム粉(改質アス工場)	t	1,047	0	0	115 km
ゴム粉入りアス(プラント)	t	6,964	0	0	13.5 km
砕石(プラント)	t	132,910	682,796	681,179	57.6 km
プラ骨材(プラント)	t	0	19,904	40,028	115 km
アスファルト合材(現場)	t	139,888	779,247	761,577	13.5 km
軽油消費量					
アスファルト(プラント)	L	0	251,852	253,883	
アスファルト(改質アス工場)	L	39,198	0	0	
ゴム粉(改質アス工場)	L	6,933	0	0	
ゴム粉入りアス(プラント)	L	5,406	0	0	
砕石(プラント)	L	440,197	2,261,421	2,256,066	
プラ骨材(プラント)	L	0	131,841	265,148	
アスファルト合材(現場)	L	108,588	604,890	591,174	
合計	L	600,322	3,250,006	3,366,272	

(5) 検討ケースにおける発電量の設定

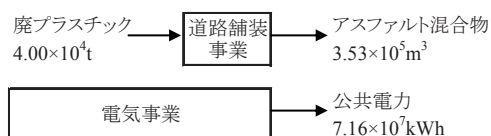
本検討では、廃タイヤ、廃プラスチックを舗装に利用しない場合、全て発電に利用するとした。使用する廃タイヤ、廃プラスチック量は表-5. 24、5. 25 の通りであるので、これと廃タイヤ質量当たりの発電量¹⁶⁾ 2.18×103kWh/t、廃プラスチック質量当たりの発電量¹⁷⁾ 1.79×103kWh/t から、これら廃棄物から発電できる電力量が求められる。廃タイヤ、廃プラスチックを舗装に使用する場合、都市内全体で見れば、同じ電力量を公共電力から都市内へ供給しなければならない。従って、比較対象毎に電力量を等しく設定した場合、図-5. 13、5. 14 のようになった。



a) ケース1(廃プラは、全て発電用に使用したした場合)

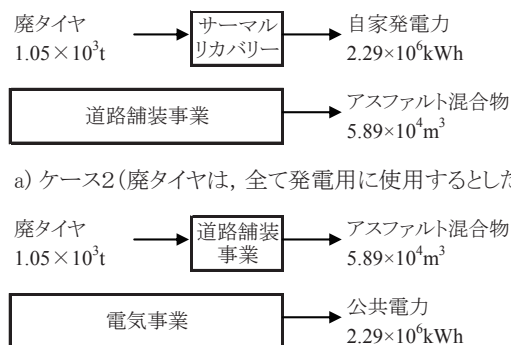


b) ケース4(アスファルト混合物に廃プラを5%使用した場合)



c) ケース5(アスファルト混合物に廃プラを10%使用した場合)

図-5.13 ストレートアスファルト舗装利用の場合



b) ケース3(アスファルト混合物に廃タイヤを使用した場合)

図-5.14 改質アスファルト舗装利用の場合

5.3.2 環境負荷原単位の作成

ここでは、5.2.2 で示した原単位以外のものを示す。

(1) 廃タイヤ再生資材(ゴム粉)に係わる原単位

廃タイヤ再生資材の環境負荷原単位の算出結果を表-5.27 に示す。廃タイヤからゴム粉を生産するプロセスは、「ビートワイヤ除去」、「切断」、「破碎」、「粉砕」の4つの工程からなる。公表されたデータが見あたらなかったため、ヒアリング調査を行い、製造に係る電力・燃料消費量について聴取することができた1工場のデータから求めた。2t あたりビートワイヤ除去 11kWh、切断 11kWh、破碎 75kWh、粉砕 75kWh であったので、質量当たりの消費電力を $(11\text{kWh}+11\text{kWh}+75\text{kWh}+75\text{kWh}) \div 2\text{t}=0.086\text{kWh/t}$ として計算した。

表-5.27 ゴム粉の生産に関する環境負荷原単位

	数量	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM 排出量 (kg-SPM)
電力消費(kWh/kg)	0.086	7.80E-01	3.00E-02	4.45E-06	1.39E-05	1.48E-07

(2) 廃プラスチック骨材の生産に係わる原単位

廃プラスチック骨材については、再生プラスチックペレットの生産と同様の工程で生産されるものと仮定し、「再生 PO ペレット」として公表されているデータを流用した。再生 PO ペレットの生産に関する環境負荷原単位の値を表-5.28 に示す。

表-5.28 再生 PO ペレットの生産に関する環境負荷原単位

	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM 排出量 (kg-SPM)	出典
再生 PO ペレット(kg)	7.14E+00	5.90E-01	1.78E-05	1.86E-04	1.62E-05	文献 6)

(3) 舗装工に係わる原単位

舗装工(表層、基層の施工)で使用する重機は、国土交通省「土木工事標準積算基準書」を基に、アスファルトフィニッシャー(ホイール型 2.4~6.0m)、ロードローラ、タイヤローラを各1台とした。ただし、舗装は2層として計上した。

- ・ 1日の燃料(軽油)消費量=65+35+41=141 (L)
- ・ 1層 1000m²あたりの施工日数=1/2.300=0.43 日
- ・ 1層 1000m²あたりの燃料(軽油)消費量
=141×0.43=60.6 (L/1000m²)
- ・ 2層 1000m²あたりの燃料(軽油)消費量
=60.6×2=121.2 (L/1000m²)

これらより、舗装工に係わる軽油消費原単位は0.1212 (L/m²) となることから、環境負荷原単位は表-5.29 のようになった。

表-5.29 舗装工に関する環境負荷原単位

	数量	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM 排出量 (kg-SPM)
軽油(L/m ²)	0.1212	4.63E+00	3.26E-01	9.99E-06	1.00E-04	1.14E-05

(4) 廃棄物発電に係わる原単位

廃タイヤ、廃プラスチックによる発電に係わる原単位に関するデータは、様々な文献¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾に分散していたので、これらを収集して、表-5.30、5.31 のように設定した。ただし、廃タイヤ発電に関しては、エネルギー量、CO₂ 排出量以外の情報が得られなかったため、これら二つのみとなっている。

表-5.30 廃タイヤ発電に関する環境負荷原単位

	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典
廃タイヤ発電 (t当たり)	3.32E+04 ^{※1}	1.77E+03 ^{※2}	—	—	—	※1 文献18) ※2 文献17)

表-5.31 廃プラスチック発電に関する環境負荷原単位

	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典
廃プラ発電 (t当たり)	2.93E+04 ^{※1}	2.83E+03 ^{※2}	1.40E+01 ^{※2}	1.63E+00 ^{※2}	—	※1 文献18) ※2 文献19)

5.3.3 廃タイヤ、廃プラスチック利用舗装の環境負荷量の算定

上記までの調査を基に、廃ゴム、廃プラスチックを舗装に使用した場合の環境負荷量を算定した。結果を表-5.32に示す。この表を基にエネルギー消費量およびCO₂排出量について図示すると図-5.15、5.16のようになった。なお、通常材舗装である、ケース1とケース2はアスファルトの違いだけであるが、使用条件や寿命の設定などを簡略化して設定しているため、実際に異なることも予想される。このため、直接の比較は行わない。

まず、廃プラスチック利用舗装の結果を考察する。骨材の一部を廃プラスチックに置き換えたケース4、5は、ストレートアスファルトタイプ利用であることからケース1と比較する。図-5.15、5.16より、舗装部分（材料、舗装工、輸送）だけで見ると廃プラスチックを利用することによりエネルギー消費、CO₂排出量ともに増大している。しかし、トータルで見ると、サーマルリカバリーによる発電の負荷が大きくなり、廃プラスチックを舗装に利用した方が都市全体では環境負荷が小さくなっている。

続いて、廃ゴム利用舗装の結果を考察する。廃ゴム（ゴム粉）使用のケース3では、改質アスファルトタイプの利用であるため、ケース2と比較すると、図-5.15、5.16より、舗装部分だけを見ても、改質アスファルトを利用するよりゴム粉を利用したほうがトータルのエネルギー消費、CO₂排出量が若干減少している。これは、改質アスファルトに用いられる改質剤（SBS）の原単位（表-5.5）が大きいのにに対し、ゴム粉はリサイクル品のため原料の調達などが環境負荷として含まれず、原単位（表-5.27）が小さいためと考えられる。サーマルリカバリーによる発電まで考慮すると、環境負荷低減効果はさらに大きくなった。

これらの結果より、廃タイヤ、廃プラスチックを利用した舗装では、舗装だけを見ると環境負荷が増大している場合もあるが、舗装以外での利用まで考慮するとト

表-5.32 環境負荷の算定結果

		エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)
ケース1	材料計	5.16E+08	3.30E+07	6.88E+04	5.45E+04	7.23E+02
	舗装工	1.64E+07	1.15E+06	3.53E+01	3.55E+02	4.02E+01
	輸送(軽油)	1.36E+08	9.56E+06	2.93E+02	2.95E+03	3.34E+02
	自家発電	1.17E+09	1.13E+08	5.60E+03	6.53E+04	0.00E+00
	公共電力	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
ケース2	材料計	7.95E+07	5.69E+06	5.79E+03	5.48E+03	2.10E+02
	舗装工	2.73E+06	1.92E+05	5.88E+00	5.92E+01	6.70E+00
	輸送(軽油)	2.29E+07	1.61E+06	4.93E+01	4.96E+02	5.61E+01
	自家発電	3.49E+07	1.86E+06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	公共電力	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
ケース3	材料計	7.77E+07	5.11E+06	5.17E+03	4.86E+03	1.39E+02
	舗装工	2.73E+06	1.92E+05	5.88E+00	5.92E+01	6.70E+00
	輸送(軽油)	2.29E+07	1.61E+06	4.95E+01	4.98E+02	5.64E+01
	自家発電	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	公共電力	2.08E+07	9.16E+05	1.18E+02	3.71E+02	3.94E+00
ケース4	材料計	6.40E+08	4.37E+07	6.31E+04	5.40E+04	1.04E+03
	舗装工	1.64E+07	1.15E+06	3.53E+01	3.55E+02	4.02E+01
	輸送(軽油)	1.24E+08	8.74E+06	2.68E+02	2.69E+03	3.05E+02
	自家発電	5.89E+08	5.69E+07	2.81E+03	3.28E+04	0.00E+00
	公共電力	3.24E+08	1.42E+07	1.84E+03	5.77E+03	6.12E+01
ケース5	材料計	7.85E+08	5.57E+07	6.40E+04	5.81E+04	1.37E+03
	舗装工	1.64E+07	1.15E+06	3.53E+01	3.55E+02	4.02E+01
	輸送(軽油)	1.29E+08	9.06E+06	2.77E+02	2.79E+03	3.16E+02
	自家発電	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	公共電力	6.51E+08	2.86E+07	3.70E+03	1.16E+04	1.23E+02

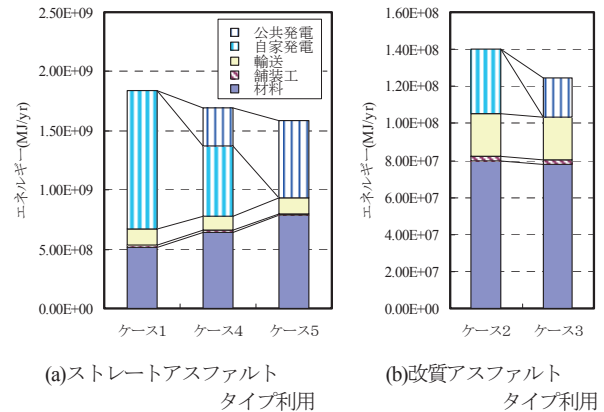
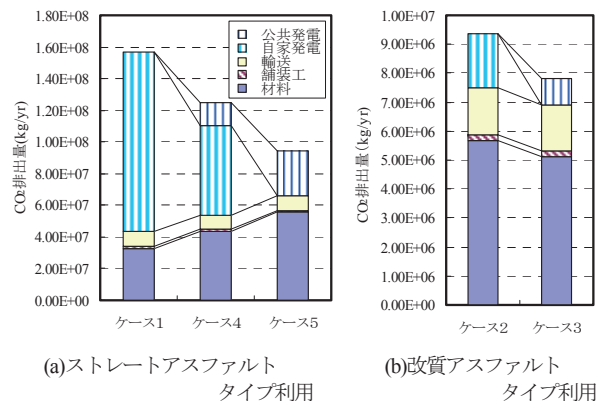


図-5.15 エネルギー消費量の算出結果

図-5.16 CO₂排出量の算出結果

タルでは、環境負荷が減少する可能性が示された。
 なお、これらの結果は、本検討の前提条件である廃プラスチック利用舗装はストレートアスファルトを用いた舗装と同じ耐久性、廃ゴム（ゴム粉）利用舗装は改質アスファルトⅡ型を用いた舗装と同じ耐久性があり、同様にリサイクル可能と仮定した場合であり、舗装に利用しない場合には、サーマルリカバリーに使用するとした場合に得られる結果である。

5.4 ゴミ溶融スラグ利用舗装のライフサイクル評価

最終処分場の逼迫を背景として、都市ゴミ焼却灰よりも一層の減容化を目的として、全国で溶融処理が行われるようになってきている。この溶融処理によりゴミ溶融スラグが発生し、このスラグを舗装用の骨材として利用する検討を4. で行った。しかし、溶融処理には膨大なエネルギーを必要としているため、再資源化を主目的として溶融処理を行った場合、環境負荷を増大させている可能性がある。ゴミの溶融処理には、ゴミ焼却灰を溶融する灰溶融とゴミを直接溶融する直接溶融がある。最近では直接溶融する施設が増加してきているが、2005年の時点で、灰溶融施設が約6割を占めている²⁰⁾。

そこで、5.4 では灰溶融によるゴミ溶融スラグを利用した舗装のライフサイクル評価を行うこととし、焼却灰を利用せず最終処分する場合と、焼却灰を灰溶融し、舗装に利用する場合に分けて検討を行った。

5.4.1 LCA 評価条件の設定

(1) 評価手順

LCA 評価は、以下のような手順で行った。

- ①評価モデルの設定（モデル空間の設定、舗装資材の需要量の算定等）
- ②資源需要量の算定、原単位補充
- ③環境負荷の算定

(2) 評価モデルの設定

a) 評価モデル

モデル都市空間の条件は、5.3 と同様に表-5.12 に示すように設定した。

評価対象範囲は図-5.17 に示すとおり、都市ゴミの焼却処理までは舗装利用の有無に関係なく行われるものとし、評価対象外とした。なお、耐用期間を超えた舗装材は、ほぼ 100%再利用されており、ゴミ溶融スラグ利用舗装も同様であると仮定して最終処分場への廃棄については評価対象としなかった。

資材の平均的な輸送距離を設定するために、各資材の生産拠点の配置を図-5.18 のように設定した。この結果、各材料の輸送距離は、表-5.33 に示すとおりとなった。

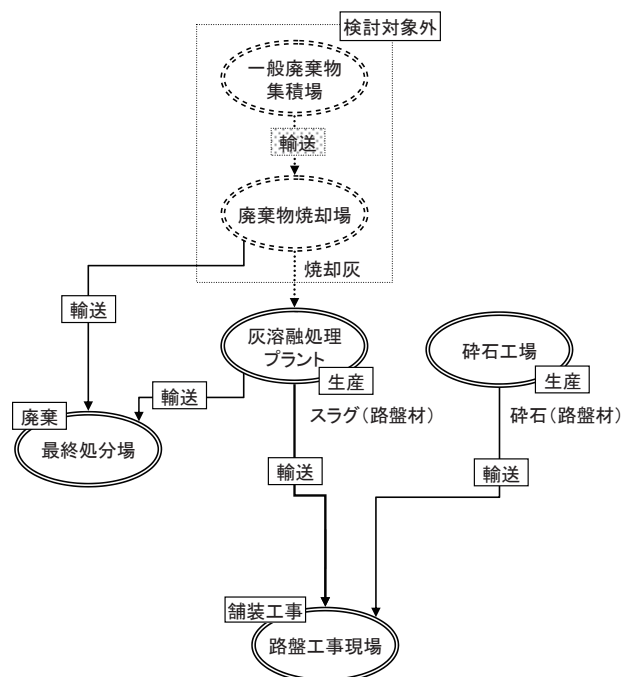


図-5.17 評価対象範囲

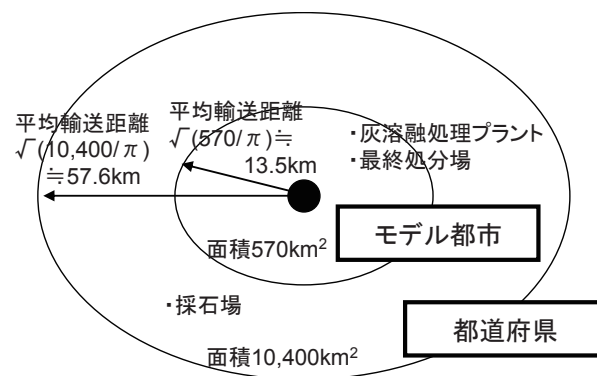


図-5.18 各種資材の生産地の配置と輸送距離の設定

表-5.33 材料輸送距離の設定値

経 路	輸送距離
砕石（路盤材） → モデル都市	57.6km
ゴミ溶融スラグ → モデル都市	13.5km
焼却灰 → 最終処分場（モデル都市）	13.5km
溶融飛灰 → 最終処分場（モデル都市）	13.5km

b) 検討ケースの設定

検討ケースは表-5.34 のように設定した。検討ケースとしては、生産されたゴミ溶融スラグは全て路盤材として利用するものとして、不足する分に砕石を利用するように設定した。灰溶融処理に関しては、大きく分けて電気式と燃料式の二つがあり、その中でも電気式（プラズマ式）、燃料式（表面溶融式）が特に多い²⁰⁾ため、この二つのタイプの溶融処理について試算した。

表-5.34 検討ケース

	ケース1 (比較用)	ケース2	ケース3
溶融処理	溶融処理なし 焼却灰は全て最終処分	溶融処理(電気式) 溶融飛灰は最終処分	溶融処理(燃料式) 溶融飛灰を最終処分
路盤	全て砕石	ゴミ溶融スラグの生産分を全て路盤材 残りを砕石	ゴミ溶融スラグの生産分を全て路盤材 残りを砕石

(3) 資源の需要量・スラグの生産量等の算定

a) 舗装資材の需要量

再生資材の利用は路盤材への利用に絞った。路盤の厚さは下層路盤 15cm 上層路盤 15cm とした。舗装の耐用年数は 10 年とし、10 年に一度路盤の打換えを行うものとした。この条件とモデル空間都市の条件（表-5.17）から舗装資材の需要量を算出すると、表-5.35 のようになった。

表-5.35 舗装資材の需要量

項目	設定値	単位	備考
年間舗装面積	1,767,000	m ² /年	道路面積 ÷ 耐用年数
路盤材需要量	530,100	m ³ /年	年間舗装面積 × 路盤厚

b) ゴミ溶融スラグの生産量

ゴミ溶融スラグの生産量は、一般廃棄物の排出量などに関係することから統計値などを用いて表-5.36 のように設定した。

表-5.36 ゴミ溶融スラグの生産量

廃棄物の排出量	5,161 万トン	循環型社会白書（平成 17 年度版） ²⁰⁾ より
廃棄物の排出原単位	1,107 g/人・日	人口 1 億 2776 万人（平成 17 年 1 月 1 日）より
焼却処分量	4,202 万トン	循環型社会白書（平成 17 年度版） ²⁰⁾ より
廃棄物の焼却処分原単位	901 g/人・日	人口 1 億 2776 万人（平成 17 年 1 月 1 日）より
その他の中間処理量	658 万トン	循環型社会白書（平成 17 年度版） ²⁰⁾ より
中間処理後資源化量	350 万トン	循環型社会白書（平成 17 年度版） ²⁰⁾ より
溶融スラグ密度	2.7 t/m ³	「スラグの有効活用マニュアル」 ²²⁾ より

c) 灰溶融炉の用役等原単位

灰溶融炉では灰を投入して、用水や薬剤として、消石灰、アンモニア水、キレート剤、セメントなどを用いスラグを製造している。溶融処理の用役等の原単位をメーカーヒアリングから表-5.37、5.38 に示す値とした。

表-5.37 電気式（プラズマ）溶融炉の用役等原単位

電力	契約電力	3,500 kWh
	電力量	800 kWh/灰t
灯油		20 L/灰t
薬剤	消石灰	12 kg/灰t
	アンモニア水	1.7 kg/灰t
	キレート剤	1.3 kg/灰t
	セメント	7.3 kg/灰t
用水		2.5 m ³ /灰t
排ガス量		5,000 Nm ³ /灰t
排水		1.0 m ³ /灰t
飛灰		90 kg/灰t
スラグ		0.9 t/灰t

メーカーヒアリング値

表-5.38 燃料式（表面溶融）溶融炉の用役等原単位

灯油		250 L/灰t
電力	契約電力	1,100 kWh
	電力量	250 kWh/灰t
薬剤	消石灰	5 kg/灰t
	キレート剤	1 kg/灰t
	セメント	13 kg/灰t
用水		2.5 m ³ /灰t
排ガス量		8,000 Nm ³ /灰t
排水		1.0 m ³ /灰t
飛灰		110 kg/灰t
スラグ		0.9 t/灰t

メーカーヒアリング値

d) フロー

設定により、焼却灰、ゴミ溶融スラグ、砕石などの量を求め、フローにしたものを図-5.19、5.20、5.21 に示す。図-5.19 は焼却灰を全て最終処分し、路盤材は全て砕石とした場合で、図-5.20、5.21 はゴミ焼却灰は全て溶融処理を行い、ゴミ溶融スラグは全て路盤材に利用する場合である。

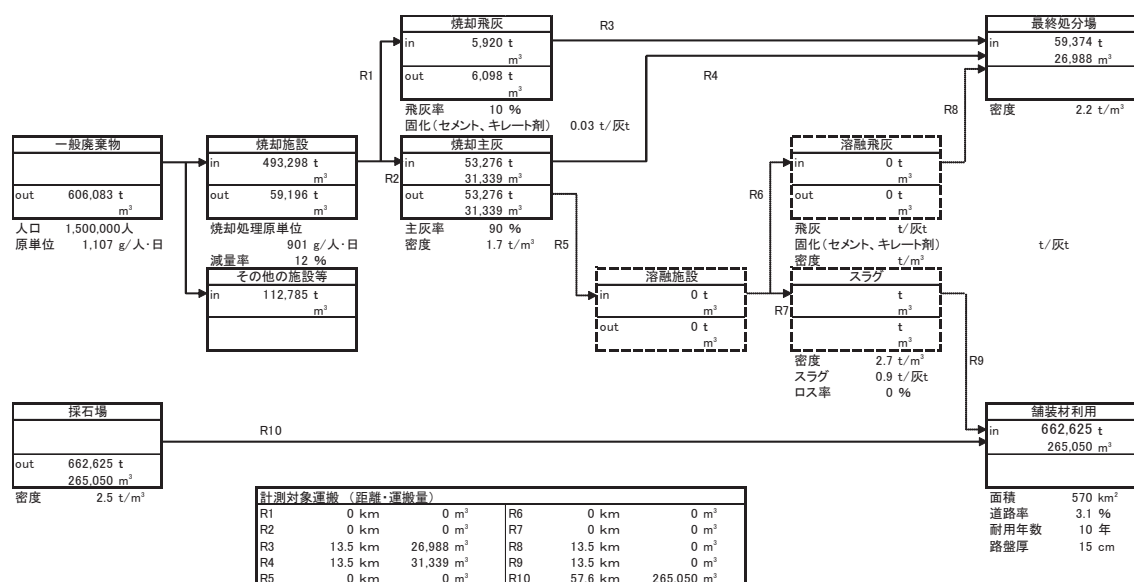


図-5.19 ケース1におけるフロー

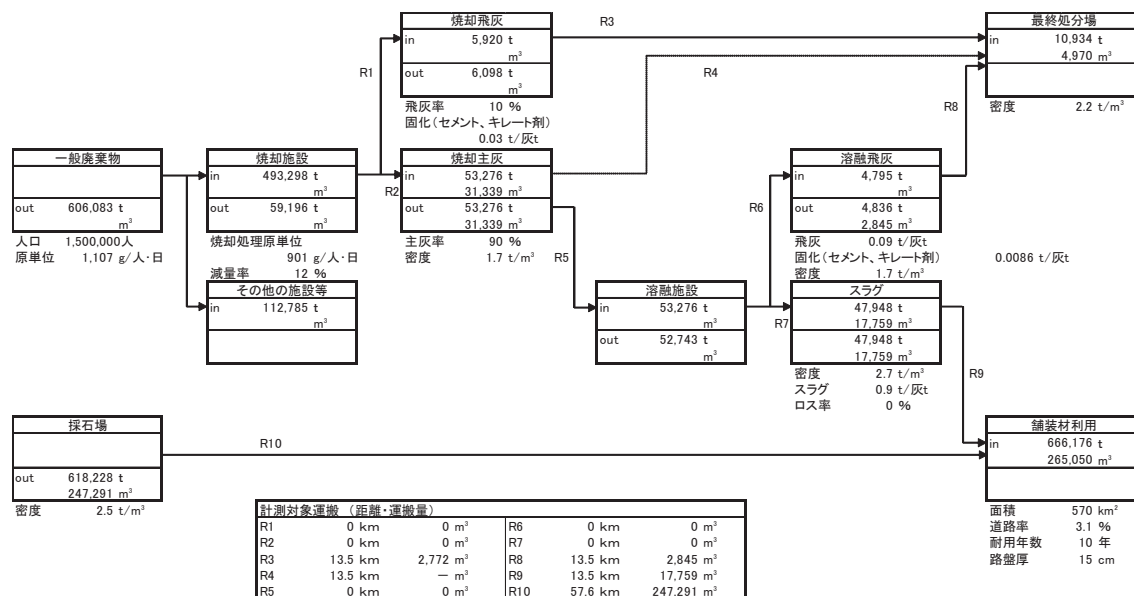


図-5.20 ケース2におけるフロー

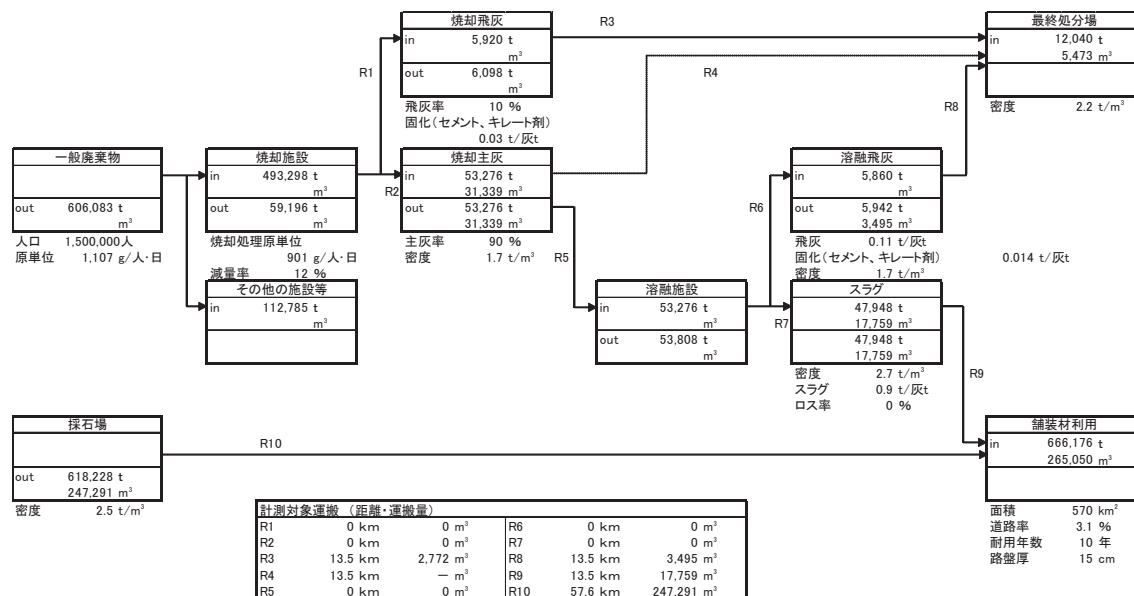


図-5.21 ケース3におけるフロー

e) 資材の需要量

前項のフローに示した各資材の量を整理して表-5.39に示す。

表-5.39 各種基本資材のモデル都市内での需要量

	単位	ケース1 通常材路盤	ケース2 スラグ(電気溶融)+通常材	ケース3 スラグ(燃料式)+通常材
需要量(容積)	m ³ /yr	530,100	530,100	530,100
通常材(碎石)	m ³ /yr	530,100	512,341	512,341
スラグ	m ³ /yr	0	17,759	17,759
碎石密度	t/m ³	2.5	2.5	2.5
スラグ密度	t/m ³	2.7	2.7	2.7
碎石需要量(質量)	t/yr	1,325,250	1,280,853	1,280,853
スラグ需要量(質量)	t/yr	0	47,949	47,949

f) トラック輸送量と燃料消費量

トラックの燃費については経済産業省告示第66号「貨物輸送事業者に行わせる貨物の輸送に係わるエネルギー消費量の算定方法」より0.0575L/t・kmとした。算出結果を表-5.40に示す。

表-5.40 トラック輸送量と燃料消費量

輸送量(行き先)	単位	ケース1 通常材路盤	ケース2 スラグ(電気溶融)+通常材	ケース3 スラグ(燃料式)+通常材	輸送距離 (設定値)
碎石(現場)	t	1,325,250	1,280,853	1,280,853	57.6 km
スラグ(現場)	t	0	47,949	47,949	13.5 km
灰(最終処分場)	t	59,374	10,934	12,040	13.5 km
軽油消費量					
碎石(現場)	L	4,389,228	4,242,183	4,242,183	
スラグ(現場)	L	0	37,221	37,221	
灰(最終処分場)	L	46,089	8,488	9,346	
合計	L	4,435,317	4,287,892	4,288,750	

g) 溶融処理における資源消費量

溶融処理における資源消費量については、処理灰量と用役等の原単位から求めた。なお、環境負荷原単位に産業連関表から求めた原単位を用いた項目があるため、消費量を円で表している項目もある。

表-5.41 溶融処理における資源消費量

	単位	ケース1 通常材路盤	ケース2 スラグ(電気溶融)+通常材	ケース3 スラグ(燃料式)+通常材	備考
電力量	kWh	—	42,620,904	58,603,600	
灯油	L	—	1,065,523	13,319,033	
消石灰	kg	—	639,314	266,381	
アンモニア水	千円	—	4,076	0	単価45円/kgで計算
キレート剤	kg	—	69,259	53,276	
セメント	千円	—	3,345	5,956	単価8.6円/kgで計算
用水	千円	—	42,088	42,088	単価316円/m ³ で計算
排水	千円	—	9,057	9,057	単価170円/m ³ で計算
電力量(冷却設備)	kWh	—	47,949	47,949	

h) 舗装工事に係わる燃料消費量

路盤工(不陸整正、下層路盤施工、上層路盤施工)で使用する重機は、国土交通省「土木工事標準積算基準書」を基に、モータグレーダ、ロードローラ、タイヤローラを各1台とし、これらの施工量も基準書を基に表-5.42

のとおり設定した。さらに、各機材の規格と燃料消費量についても、基準書を基に表-5.43のとおり設定した。

表-5.42 日施工量

	単位	数量
不陸整正	m ²	1,580
路盤工	m ²	1,110

表-5.43 各機材と燃料消費量

	規格	燃料消費量
モータグレーダ運転	3.1m	54 L/運転1日
ロードローラ運転	排ガス対策型・マカダム両輪駆動 10~12t	30 L/運転1日
タイヤローラ運転	排ガス対策型 8~20t	36 L/運転1日

これらの設定に基づき、1台当たりの必要日数を算出すると、下記のようになり、この日数から燃料消費量は表-5.44のとおりとなった。

- 路盤工(不陸整正)
1台当たりの必要日数 = 1,800,000m² ÷ 1,580m²/日 = 1,140 日
- 路盤工(下層路盤、上層路盤工)
1台当たりの必要日数 = 1,800,000m² ÷ 1,110m²/日 = 1,622 日

表-5.44 路盤工における燃料消費量(軽油)

軽油消費量	単位	ケース1 通常材路盤	ケース2 スラグ(電気溶融)+通常材	ケース3 スラグ(燃料式)+通常材	備考
モータグレーダ	L	236,736	236,736	236,736	
ロードローラ	L	131,520	131,520	131,520	
タイヤローラ	L	157,824	157,824	157,824	
合計	L	526,080	526,080	526,080	

i) 最終処分に伴う燃料消費

最終処分では、最終処分場で使用する重機の燃料消費量を文献²³⁾等から表-5.45、5.46のように設定した。

表-5.45 最終処分場での重機原単位

重機	台数	稼働時間
ブルドーザ	36台/灰千t	8時間

「廃棄物埋め立て処分場の建設と管理」(田中信壽著)

表-5.46 ブルドーザの消費燃料

重機	燃料	燃料消費率 (L/kWh)	機関出力 (kW)	燃料消費 (L/h)
ブルドーザ(15t)	軽油	0.188	100	18.8

これら数値から灰t当たりの燃料消費量を求めると以下になった。

$$\begin{aligned} & \text{灰t当たりの燃料消費量} \\ & = 36 \text{ 台/灰千t} \div 1000 \times 8 \text{ h} \times 18.8 \text{ L/h} \cdot \text{台} \\ & = 5.4144 \text{ L/灰t} \end{aligned}$$

5.4.2 環境負荷原単位の作成

(1) 溶融処理用役等の原単位

溶融処理の用役等の環境負荷原単位は、JEMAI-LCA の値を用いたが、これにないものは、国立環境研究所から公表されている産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）²⁴⁾より求めた数値を用いた。表-5.47 に値を示す。

(2) 最終処分場の原単位

最終処分場の原単位は、文献²⁵⁾を参考に設定した。表-5.48 に値を示す。なお、文献では海面処分場と内陸処分場それぞれについて原単位が報告されているが、国内における最終処分場は、山間および平地に設置されているものが98%程度であった¹⁸⁾ため、内陸処分場の数値を用いた。

5.4.3 ゴミ溶融スラグ利用舗装の環境負荷量の算定

上記までの調査を基に、ゴミ溶融スラグを舗装に使用した場合の環境負荷量を算定した。結果を表-5.49 に示す。この表を基にエネルギー消費量およびCO₂排出量について図示すると図-5.22、5.23 のようになった。

ケース1とケース2、3を比較すると、エネルギー量、CO₂排出量ともにスラグ製造にかかる部分が極めて大きく、最終処分量が減ることによる減少量よりはるかに大きいために、全体の環境負荷量が大きくなった。特にケース3では、スラグ製造によるエネルギー量、CO₂排出量がケース2と比べて2倍以上あり、燃料式によるスラグ製造の環境負荷の高さが示された。

ただし、最終処分場の評価に当たっては、文献を参考に算出しているが、土地の改変による影響や、景観への影響、さらには新規建設の難しさなどが評価されていないので、これらの評価が行えるようになれば、また違う評価になる可能性もある。

表-5.47 溶融処理に用いる資材の環境負荷原単位

	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典
消石灰	kg 3.89E+00	8.59E-01	1.55E-04	2.72E-04	5.00E-06	文献6)
アンモニア水	千円 6.34E+02	3.77E+01	9.60E-03	4.51E-02	3.50E-03	文献24)
キレート剤	kg 0.00E+00	3.44E+00	3.34E-03	4.67E-03	5.05E-04	文献6)
セメント	千円 5.51E+02	1.11E+02	1.88E-02	1.85E-01	7.00E-03	文献24)
用水	千円 3.77E+01	2.22E+00	1.63E-03	2.46E-03	2.70E-04	文献24)
排水	千円 9.09E+01	5.99E+00	1.43E-02	6.22E-03	1.27E-03	文献24)

表-5.48 最終処分における環境負荷原単位

	エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)	出典
建設時	m ³ 2.49E+02	2.55E+01	4.80E-02	5.48E-02	—	文献25)
運用時	m ³ 1.15E+02	1.17E+01	1.16E-02	3.74E-02	—	

表-5.49 算出結果

		エネルギー量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	SO _x 排出量 (kg-SO _x)	NO _x 排出量 (kg-NO _x)	SPM排出量 (kg-SPM)
ケース1	砕石	2.36E+07	1.20E+06	1.09E+02	4.41E+02	1.93E+01
	スラグ	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	路盤工	2.01E+07	1.42E+06	4.33E+01	4.36E+02	4.94E+01
	最終処分	2.21E+07	1.87E+06	1.64E+03	2.75E+03	3.02E+01
ケース2	砕石	2.28E+07	1.16E+06	1.06E+02	4.26E+02	1.87E+01
	スラグ	4.36E+08	2.13E+07	2.90E+03	9.12E+03	2.75E+02
	路盤工	2.01E+07	1.42E+06	4.33E+01	4.36E+02	4.94E+01
	最終処分	4.07E+06	3.44E+05	3.01E+02	5.07E+02	5.56E+00
ケース3	砕石	2.28E+07	1.16E+06	1.06E+02	4.26E+02	1.87E+01
	スラグ	1.03E+09	5.93E+07	4.36E+03	2.04E+04	1.48E+03
	路盤工	2.01E+07	1.42E+06	4.33E+01	4.36E+02	4.94E+01
	最終処分	3.13E+06	2.83E+05	3.29E+02	5.29E+02	2.78E+00

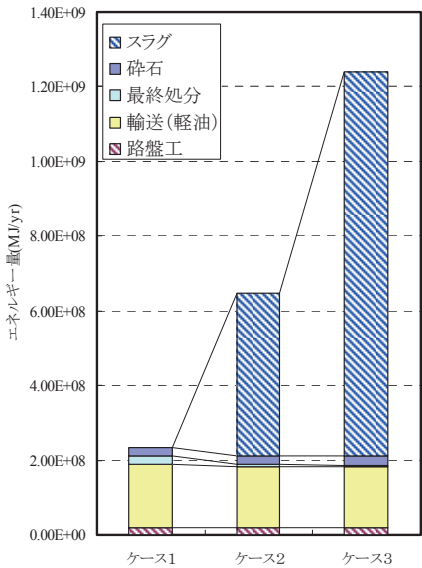


図-5.22 エネルギー量の算出結果

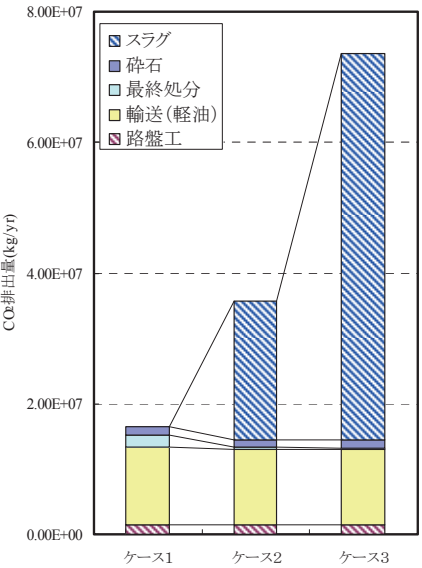


図-5.23 CO₂排出量算出結果

5.5 まとめ

5. では、舗装リサイクル技術について、ライフサイクル評価を行い、環境負荷低減効果の比較検討などを行った。

5.2 では、舗装再生工法の中の3つの工法（プラント再生工法、路上表層再生工法、路上路盤再生工法）についてライフサイクル評価を行った。ここで得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 舗装に関する環境負荷原単位は、アスファルトははじめとしてほとんど整備されていない。本研究では、統計値の収集やヒアリングなどの実施により LCA 解析を行う際に必要な多くの原単位を積み上げ法により作成した。
- (2) 新材とプラント再生材を用いた切削オーバーレイ工法の比較において、プラント再生工法では、骨材製造および As 合材製造に係る環境負荷量は若干大きくなるものの、用いる As 量および骨材輸送量が少ないことから、トータルでの環境負荷量は小さくなることが明らかになった。
- (3) プラント再生材を用いた切削オーバーレイ工法と路上表層再生工法の比較において、路上表層再生工法は、As 合材の製造および施工時の CO₂ 排出量が多い。しかし、材料輸送が小さく、廃材輸送量が少ないことから全体の CO₂ 排出量が小さくなることが明らかになった。
- (4) 切削オーバーレイ工法および路上表層再生工法のどちらにおいても環境負荷物質の排出量は、材料製造が7割程度と大部分を占め、材料製造の中では As 合材製造とアスファルトの製造にかかる CO₂ 排出量が多い。
- (5) 環境負荷量が小さい路上表層再生工法でも、路上表層再生機の輸送距離によって環境負荷量が多くなる場合がある。
- (6) 路盤の打換えにおいて、再生材（再生材率 50%）を用いた瀝青安定処理路盤（加熱混合）は、新材を用いた場合より 1 割程度 CO₂ 排出量は少なくなり、路上路盤再生工法（セメント・瀝青安定処理）では 5 割削減される。

5.3 では、廃タイヤ、廃プラスチック利用の舗装の環境負荷を評価することを目的に、国内の平均的な都市内で利用した場合を想定し、LCA 評価を行った。ここで得られた主な知見をまとめると次のとおりである。

- (7) 廃タイヤ、廃プラスチックなどの再生資材の原単位

はほとんど整備されていない。これらについては、統計的なデータも不足しているため、本研究では生産方法の聞き取り調査などから原単位を作成した。

- (8) 廃プラスチックをアスファルト混合物層へ利用する場合は、舗装に関する部分では環境負荷は増大するが、舗装以外での利用まで考慮すると、トータルでは環境負荷が減少する可能性が示された。
- (9) 廃ゴムは改質アスファルトと同程度の性能が得られれば、わずかではあるが環境負荷を低減させられる可能性が認められた。

5.4 では、ゴミ溶融スラグ利用の舗装のライフサイクル評価を行うことを目的に、国内の平均的な都市内で利用した場合を想定し、LCA 評価を行った。本研究では、処理施設の多い灰溶融炉について検討を行い、灰をそのまま最終処分する場合と、灰溶融を行って舗装に利用する場合について解析した。ここで得られた主な知見をまとめると次のとおりである。

- (10) ゴミ溶融処理に関する原単位はほとんど整備されていない。本研究では、生産方法の聞き取り調査などから原単位を作成した。
- (11) ゴミ溶融スラグを路盤材へ利用する場合、スラグ製造の環境負荷が大きく、最終処分量の減少分を見込んでも通常材の2倍以上となった。
- (12) 溶融方式は、電気式（プラズマ）の方が燃料式（表面溶融）よりも環境負荷が小さいことがわかった。

今後の課題としては以下のことが考えられる。

- (1) 使用する機械やプラントの製造に関する環境負荷量については、考慮していないことから、今後はこれを試算する必要がある。
- (2) 環境負荷原単位が不明なものは、ヒアリングなどで補充して作成したが、できるだけ平均的な値が得られるように、統計値の充実が必要である。
- (3) ライフサイクル評価は、耐久性の設定で評価が変わるが、廃棄物再生資材では長期供用の実データがなく、不明な点が多い。従って、各種の長期供用データも必要である。
- (4) 廃プラ、廃ゴムを利用した舗装がリサイクル不可能な場合は、環境負荷が増大するため、舗装としてのリサイクルの可否の確認が必要である。
- (5) 今回、ゴミ溶融スラグについては灰溶融炉について解析を行ったが、近年ガス化溶融炉の施設数も増加傾向にあり、ガス化溶融炉も含めた評価が今後は必要である。

- (6) 今回、できるだけ最終処分場の環境負荷を考慮するようにしたが、土地改変、景観、新設の難しさなどは、配慮されておらず、今後、これらの観点からの評価も必要である。

参考文献

- 1) 伊藤義人、梅田健貴、岩田厚司：橋梁のライフサイクル環境負荷および建設副産物発生量に関する研究、構造工学論文集 A、Vol.47A、No.3、pp.1109-1118、2001.3
- 2) 天野耕二、牧田和也：舗装発生材のリサイクルによる二酸化炭素排出と建設コストの低減効果について、環境システム研究、Vol.26、pp.253-259、1998
- 3) 田井文夫、長谷川淳也：CO₂ 排出量に着目した舗装技術の方向に関する調査研究、アスファルト、Vol.43 No.204、pp.43-51、2000
- 4) 寺田剛、坂本浩行、片脇清：エネルギー消費量および CO₂ 排出量から算定した省資源・省エネ舗装、舗装、Vol.30、No.2、pp.4-9、1995.2
- 5) 国土交通省：平成 19 年度土木工事標準積算基準書(河川・道路編)
- 6) 産業環境管理協会：JEMAI-LCA Pro ver.2.1.2、(財)産業環境管理協会、CD-ROM、2005.11
- 7) 石油連盟：石油製品の LCI データの概要、2003.1
- 8) 日本石鹼洗剤工業会：ヤシ油脂肪酸の LCI データの概要、2003.1
- 9) 建設物価調査会：建設副産物の再生・処理の積算、(財)建設物価調査会、1995
- 10) 日本アスファルト合材協会：アスファルト合材統計年報 平成 17 年度、(社)日本アスファルト合材協会、2006.8
- 11) 例えば、帆苅浩三：日本におけるアスファルトラバーの開発と普及への取り組み、アスファルト合材、No.79、pp.40-45、2006
- 12) 例えば、山田優、稲葉慶成：廃プラスチックのアスファルト混合物用材料としての利用、舗装、Vol.29、No.7、pp.17-22、1994.7
- 13) 日本自動車タイヤ協会：タイヤリサイクルハンドブック、p.25、2007
- 14) プラスチック処理促進協会：プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況、p.3、2007.12
- 15) 日本道路協会編：舗装の構造に関する技術基準・同解説、(社)日本道路協会、p.59、2002.7
- 16) ブリヂストン：社会・環境報告書 2005、p.66、2005.7
- 17) プラスチック処理促進協会：プラスチック製容器包装の処理に関するエコ効率分析 2006 年度、p.102、2006.9
- 18) 資源エネルギー庁：総合エネルギー統計 2006 年度、2008.5
- 19) 環境省、経済産業省：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル、p.II-62、2008.5
- 20) 日本産業機械工業会エコスラグ利用普及センター：循環社会の輪をつなぐごみと下水の溶融スラグ(エコスラグ)有効利用の課題とデータ集(2005 年度版)、(社)日本産業機械工業会エコスラグ利用普及センター、2005.12
- 21) 環境省：循環型社会白書(平成 17 年版)、2005
- 22) 廃棄物研究財団：スラグの有効利用マニュアル、(財)廃棄物研究財団、1999.11
- 23) 田中信壽：廃棄物埋立処分場の建設と管理、技報堂出版、2000.2
- 24) 国立環境研究所：環境負荷原単位データブック(3EID)、
<http://www-cger.nies.go.jp/publication/D031/index.htm>
- 25) 土木学会：広域最終処分場計画調査 廃棄物海面埋立環境保全調査報告書(平成 14 年度版)、(社)土木学会、2003

6. 結論

6.1 はじめに

道路舗装においては、昭和 60 年代には一般的なリサイクル方法が示され、現在では全国で日常的に行われている。しかし、繰り返し再生や、改質材利用の増大による舗装発生材品質の変化が見られ、今後も持続的にリサイクルを行って行くには、新たな対応が必要となっている。これに加えて、廃棄物再生資材の舗装分野での有効利用が強く求められ、これにも早急の対応が迫られている。また、リサイクルを進めるにあたっては、リサイクルをすることばかりに捕らわれすぎると、活動全体では環境負荷を増大させていることにもなりかねないため、ライフサイクルの視点から環境負荷軽減を評価することも必要である。

本論文では、アスファルト舗装のリサイクルの中でも未解決である繰り返し再生の問題、ポーラスアスファルト混合物の再生の問題、道路以外からの廃棄物の舗装における利用の問題に対し、それぞれのリサイクル技術の開発を行うとともに、これらのリサイクル技術について LCA を行い環境負荷低減効果を示した。

以下に本研究から得られた結果を要約するとともに、今後の課題を述べて本論文の結論とする。

6.2 本論文により得られた結果

2. では、ストレートアスファルト混合物の繰り返し再生利用したときの、再生アスファルト性状の変化、再生用添加剤種類の影響を明らかにした上で、繰り返し再生を考慮した再生利用方法を提案した。ストレートアスファルトは、繰り返し再生すると、針入度では同じ性状に戻したつもりでも再生の度に徐々に性状が変化し、特に劣化が進んだアスファルトの再生においては、針入度以外の指標や化学成分で大きく異なることが分かった。また、一般に流通している再生用添加剤を用いて同様の再生を行った場合に、再生後のアスファルト性状には違いがあることを明らかにし、強く劣化したアスファルトを元の性状に良く戻すことのできる再生用添加剤は見当たらないことを示した。これらを考慮して繰り返し再生を行う際の方法を、カルボニル指数により検討した結果、持続的に繰り返し再生を行って行くには、再生配合率 30%程度までで行うのがよいことを見出し、これを提案した。

3. では、ポーラスアスファルト混合物からポーラスアスファルト混合物への再生利用方法について、アスファルト混合物による方法とアスファルトモルタルによる方法の 2 つの方法の開発を行った。これまでにアスファルト混合物による方法（カンタブロ試験）による方法が提案されていたが、1 つの温度だけで添加剤の添加量を求めるこの方法の問題点を明らかにした上で、複数の温度で測定可能な圧裂試験による方法を提案した。圧裂試験による方法は、ポーラスアスファルト混合物の性能の中でも最も注目すべき耐骨材飛散性にもある程度対応でき有効であることを示した。一方、アスファルト混合物での試験は大がかりになりがちであり、また施工性など高温の性能について評価する方法がないため、これを解決する方法としてアスファルトモルタルによる方法の開発を行った。アスファルトモルタルの性状試験は、定まった試験法はこれまで示されたことはなく、アスファルトの試験の中から利用できそうなものを流用して実施し、アスファルト性状とアスファルトモルタル性状には極めて高い相関性があることを示した。これに基づきアスファルトモルタルによる配合設計法の開発を行い、これを提案した。アスファルトモルタルによる方法では、ポーラスアスファルト混合物に求められる様々な供用性能に対し、細かく対応できるばかりか、アスファルト混合物の試験では対応できない施工性能についても対応でき、有効であることを示した。これら 2 つの方法は、圧裂試験がプラントあるいは試験所で対応できる方法、アスファルトモルタルが研究所レベルでないと対応できない方法であるため、再生ポーラスアスファルト混合物の適用場所などを考慮して 2 つの方法を選択するとよいと考えられた。

4. では、道路以外からの再生資材の中でも、資源の有効利用として期待の大きいゴミ溶融スラグを例にとり、リサイクル技術の開発を行った。その結果、アスファルト混合物用の細骨材、粗骨材などへの利用については、舗装用骨材の基準等を満足していれば、舗装用骨材として利用可能であるが、すり減りし易い、割れ易い、アスファルトとの接着性が劣るなどの性質があるため、細骨材あるいは粗骨材の 50%程度を上限として利用することが良いことを示した。また、路盤材としては、すり減り減量が大きい傾向があるものの、下層路盤材としての利用は可能であることを示した。環境安全性については、素材として溶出等の安全性を確認したものであれば、使用しても問題ないことを確認した。これらの確認の上で、試験施工と促進載荷試験を行い、少なくとも舗装計画交通量 250 未満の交通量が少ない道路であれば適用可能で

あることを確認した。これにより、ゴミ溶融スラグの舗装への利用が可能になるとともに、舗装用に再生資材の利用検討する際のチェック項目などを明らかにした。

5. では、2. ～4. で開発したリサイクル技術をはじめとした、様々な舗装リサイクル技術の環境負荷低減効果を明らかにするため、ライフサイクル評価を行った。ライフサイクル評価にあたっては、舗装資材での事例はこれまで少なく、さらに道路以外の再生資材を舗装に利用したものの事例はまったく見あたらなかったため、まず必要となる環境負荷原単位をヒアリングなどからデータ収集することにより作成し、これを明らかにした。2.、3. で開発した舗装資材のリサイクル技術では、アスファルトプラントなどの製造時の環境負荷が若干増加するものの、資材を新たに製造する時の環境負荷が大幅に削減されるため、全体の環境負荷を小さくすることができることを明らかにした。これに加えて、これまで環境負荷が小さいとされていた路上再生技術についても解析を行い、燃料消費量の少ない施工機械を選ばないと環境負荷低減効果があまりないことを明らかにし、燃料消費量の少ない施工機械を選んだ上で、機械の輸送距離を短くすることで、環境負荷を大幅に減らせることを明らかにした。さらに4. で開発した道路以外の再生資材であるゴミ溶融スラグ、これに加えて廃タイヤや廃プラスチックを用いた舗装のライフサイクル評価を行い、それぞれの技術の環境負荷低減効果を確認した。廃タイヤ利用舗装のライフサイクル評価では、廃タイヤを舗装に利用して、舗装の耐久性向上が期待できる技術もあることから、環境負荷低減効果が高く評価された。廃プラスチック利用舗装のライフサイクル評価では、通常舗装と同程度の耐久性である場合、舗装にかかる環境負荷は増大するが、廃プラスチックを舗装に利用しなかった場合にサーマルリカバリーするとした場合に、この負荷が増大するため、社会全体の環境負荷は減少することを明らかにした。ゴミ溶融スラグについては、灰溶融炉に限定した場合、灰溶融に係る環境負荷が非常に大きいため、輸送距離の短縮や、最終処分量の大幅な縮小を考慮しても、全体の環境負荷が大きいことを示した。

上記のように、本研究により、現在行われている舗装資材のリサイクルを将来的に妨げる可能性のある要因について対応する技術を示すことができ、さらにこれらのリサイクル技術の環境負荷低減効果についても明らかにできたばかりか、今後同様に環境負荷について検討する際の検討方法と検討の際に非常に有用となるデータも示すことができた。

6.3 今後の課題と期待

舗装のリサイクルは、既に当たり前の技術のように捉えられているが、今後もこれを持続していくには課題があるため、本論文においてこれを解決する技術を開発し、より環境負荷の小さいリサイクル方法選択への方向性も示すことができた。今後は、本研究で開発し方法や解析結果を活用してより環境負荷の小さい舗装技術が普及し、浸透していくことを期待する。

しかし、一方では課題は残されており、よりよい舗装リサイクル技術を進めていくには、なおも努力が必要と言わざるを得ない。以下に今後の課題を示す。

2. では、再生材配合率を 30%程度までにすべきと結論づけたが、全国平均的には 30%台であり少し抑える程度と見られるものの、関東地方に限って言えば 50%を超しており、これを 30%に抑えると舗装発生材の発生量と再生混合物の供給量といった需給のバランスが崩れるおそれがある。今回、市販の再生用添加剤を使用して検討を行ったが、まだ改善の余地はあると見られ、新たな再生用の添加剤量を検討することにより、もう少し高い配合率に対応できるものと考えられる。また、4. では、廃棄物再生資材の舗装への利用を検討したが、廃棄物再生資材は品質のばらつきが非常に大きいものと予想される。実際、廃棄物再生資材の品質が問題になり供用中の舗装の破損が発生する例もあり、ばらつきのチェック方法、ばらつきを考慮した利用方法なども必要である。

5. では、舗装分野でのライフサイクル評価を行ったが、今回は大気に係わる項目を中心としたものになっており、他の環境負荷の解析は十分とはいえない。環境は様々な項目を総合的に判断する必要があるため、他の項目を充実させることが必要である。また、舗装分野においてはライフサイクル評価に必要なデータが非常に少なく、解析に多大な労力を必要とする。今回扱った技術の他にも検討が必要な技術は無数にあり、データベースの充実を図る必要がある。

舗装リサイクルは、新たな段階に来ている。本研究の成果は、この新たな段階に対応する第一歩に過ぎないかもしれないが、上記の課題も含め、舗装リサイクルの様々な課題を克服し、最適化に向けて多くの研究者の努力が注がれることを期待したいと思う。