

# アスファルト混合物の持続的循環を 目指した再生利用に関する共同研究

## 報告書

令和 6 年 3 月

国立研究開発法人土木研究所  
道路技術研究グループ舗装チーム  
先端材料資源研究センター  
一般社団法人日本アスファルト合材協会

Copyright © (2023) by P.W.R.I.

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

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

# アスファルト混合物の持続的循環を 目指した再生利用に関する共同研究

国立研究開発法人土木研究所  
道路技術研究グループ舗装チーム

国立研究開発法人土木研究所  
先端材料資源研究センター材料資源研究グループ

一般社団法人日本アスファルト合材協会

上席研究員	藪 雅行
主任研究員	川上 篤史
交流研究員	掛札 さくら
上席研究員	新田 弘之
主任研究員	川島 陽子
技術部会部会長	山本 富業
技術部会副部会長	五傳木 一
技術部会部会員	江向 俊文
同 上	加納 孝志
同 上	工藤 朗
同 上	小柴 朋広
同 上	児玉 健
同 上	神野 稔久
同 上	末原 俊史
同 上	立花 徳啓
同 上	東本 崇
同 上	朴 希眞
同 上	畑山 良二
同 上	人見 信男
同 上	藤村 顕司
同 上	平戸 利明
同 上	門田 誠也

## 要 旨

近年、再生混合物中のアスファルト再生骨材の配合率は、上昇傾向にあり、想定以上の再生骨材配合率化が進行している箇所もある。高い再生骨材配合率は、循環型社会の実現に寄与するという考え方もある一方で、繰り返し再生利用時の再生アスファルト性状の低下による舗装寿命が短縮する可能性も懸念されており、その場合は循環型社会の実現の阻害要因となる。また、グリーン購入法に指定された中温化技術は、地球温暖化対策等の一環で今後採用が増えることが期待されるものの、需要の多い再生混合物への適用には技術的課題が残されているためグリーン調達の実用外であり、普及しているとは言い難い。

そこで本研究では、アスファルト再生骨材配合率の混合物性状への影響を把握するとともに再生混合物への中温化技術の適用性を検討し、適切な再生骨材配合率の品質・適用範囲を明らかにした。また、再生骨材の性状判定に用いられる圧裂試験について、試験精度向上のための検討も行い、試験室で導入しやすい試験条件や判定方法を求めた。本報告書は、これまでの一連の研究成果および提案をとりまとめたものである。

キーワード：アスファルト舗装，再生利用，針入度，劣化，配合設計，再生用添加剤  
中温化技術，高温カンタプロ試験，圧裂係数，設計圧裂係数

<b>1. はじめに</b> .....	<b>1</b>
1.1. 目的 .....	1
1.2. 研究内容 .....	1
1.3. 研究実施期間 .....	1
1.4. 研究分担 .....	2
<b>2. 再生骨材配合率による混合物性状等の影響検討</b> .....	<b>3</b>
2.1. 再生混合物や再生骨材配合率の実態，再生骨材の需給バランス等の実態把握 .....	3
2.1.1. 実施内容 .....	3
2.1.2. 調査方法 .....	3
2.1.3. 調査結果 .....	3
2.1.4. まとめ .....	18
2.2. 室内における促進劣化・再生試験方法の検討 .....	19
2.2.1. 目的 .....	19
2.2.2. 試験方法 .....	19
2.2.3. 試験結果 .....	22
2.2.4. まとめ .....	28
2.3. 再生骨材配合率による再生アスファルトおよび混合物性状の影響把握 .....	30
2.3.1. 目的 .....	30
2.3.2. 評価方法 .....	30
2.3.3. 評価材料 .....	31
2.3.4. 評価項目 .....	33
2.3.5. 評価結果 .....	34
2.3.6. まとめ .....	46
2.4. 試験施工等による長期耐久性・耐候性の把握 .....	47
2.4.1. 試験施工の目的 .....	47
2.4.2. 実大供試体の施工および調査の概要 .....	47
2.4.3. 実大供試体の施工 .....	48
2.4.4. 評価方法 .....	51
2.4.5. 評価結果 .....	53
2.4.6. まとめ .....	87
<b>3. 再生混合物の中温化技術の適用に関する検討</b> .....	<b>89</b>
3.1. 再生中温化アスファルト混合物の現状把握 .....	89
3.2. 中温化によるアスファルトヒューム低減効果の把握 .....	91
3.2.1. 目的 .....	91
3.2.2. アスファルト混合物作製時の暴露量 .....	91
3.2.3. 屋内でのアスファルト混合物作製時のアスファルトヒューム暴露量 .....	95
3.2.4. 屋外でのヒューム暴露量の検証 .....	97
3.2.5. アスファルト舗装施工時のヒューム暴露量の検証 .....	99
3.2.6. まとめ .....	100
3.3. 製造・施工温度による混合物性状の影響把握 .....	101

3.3.1.	評価概要 .....	101
3.3.2.	評価方法 .....	101
3.3.3.	評価結果 .....	102
3.3.4.	まとめ .....	106
3.4.	再生中温化アスファルト混合物の検討事例の調査 .....	107
3.5.	試験施工等による長期耐久性・耐候性の把握 .....	108
3.5.1.	概要 .....	108
3.5.2.	試験概要 .....	108
3.5.3.	試験結果 .....	109
3.5.4.	まとめ .....	112
3.6.	再生混合物への中温化技術適用の実態や性状への影響に関するまとめ .....	113
<b>4.</b>	<b>再生骨材および再生アスファルト混合物の圧裂試験方法に関する検討 .....</b>	<b>114</b>
4.1.	現状の課題の整理 .....	114
4.2.	圧裂試験の改良方針 .....	114
4.3.	再生骨材を用いた圧裂試験条件の検討 .....	116
4.3.1.	試験条件の設定 .....	116
4.3.2.	再生骨材の準備 .....	116
4.3.3.	供試体条件および試験条件 .....	117
4.3.4.	試験結果 .....	118
4.3.5.	現行法との比較 .....	121
4.3.6.	供試体の作製条件の検討 .....	122
4.4.	暫定改良圧裂試験を用いた再生骨材の評価 .....	126
4.4.1.	作製機関誤差 .....	126
4.4.2.	試験機誤差 .....	128
4.4.3.	プラント再生骨材を用いた検証 .....	132
4.5.	再生骨材の圧裂係数の提案 .....	149
4.6.	再生加熱アスファルト混合物の設計圧裂係数の検討 .....	150
4.6.1.	目的 .....	150
4.6.2.	検討に用いる再生骨材 .....	150
4.6.3.	圧裂試験の方法 .....	150
4.6.4.	評価した再生混合物の概要 .....	151
4.6.5.	試験結果 .....	154
4.7.	設計圧裂係数の提案 .....	157
<b>5.</b>	<b>適切な再生骨材配合率・品質・適用範囲の明確化 .....</b>	<b>159</b>
<b>6.</b>	<b>おわりに .....</b>	<b>160</b>



1.4. 研究分担

研究項目	研究細目	研究分担		年次計画					
		土研	合材協会	28年度	29年度	30年度	31年度	32年度	33年度
①再生骨材配合率による混合物性状等の影響検討	1) 再生混合物や再生骨材配合率の実態、再生骨材の需給バランス等の把握	○	◎	→					
	2) 室内における促進劣化・再生試験方法の検討	◎	○	→					
	3) 再生骨材配合率による再生アスファルトおよび混合物性状の影響把握	○	◎		→				
	4) 試験施工等による長期耐久性・耐候性の把握	◎	○			→			
②再生混合物の中温化技術の適用に関する検討	1) 中温化混合物やアスファルト混合物プラント設備等の実態把握	○	◎	→					
	2) 中温化によるアスファルトヒューム低減効果の把握	◎	○	→					
	3) 製造・施工温度による混合物性状の影響把握	○	◎		→				
	4) アスファルト混合物プラントの課題の抽出および対応策の検討	○	◎			→			
	5) 試験施工等による長期耐久性・耐候性の把握	◎	○			→			
③適切な再生骨材配合率の品質・適用範囲の明確化	適切な再生骨材配合率の品質・適用範囲の明確化	◎	○			→			



## 2. 再生骨材配合率による混合物性状等の影響検討

### 2.1. 再生混合物や再生骨材配合率の実態，再生骨材の需給バランス等の実態把握

#### 2.1.1. 実施内容

以下の項目について日本アスファルト合材協会統計年報（昭和 48 年から令和 3 年）<sup>1)</sup>より整理した。

- (1) 再生混合物の出荷量の推移（全国，地域別，県別）
- (2) 再生骨材配合率の推移（全国，地域別，県別）
- (3) アスファルト再生骨材の需給バランスの推移（全国，地域別，県別）

#### 2.1.2. 調査方法

- (1) 再生混合物の出荷量の推移（全国，地域別，県別）

「再生混合物の出荷量の推移」は，統計資料のある昭和 51 年度以降について整理した。なお，使用したデータの出典は以下の通りである。

- ①昭和 51～54 年度：道路技術シンポジウム「舗装廃材のリサイクリング 1980」<sup>2)</sup>の p.89 の表-1，表-2 から再生アスファルト合材の製造量を使用（全国の合計値のみ）。
- ②昭和 55～58 年度：アスファルト合材 No.25（1993 年 1 月，pp.8～17）<sup>3)</sup>の統計データを使用。
- ③昭和 59 年度以降：アスファルト合材統計年報<sup>1)</sup>のデータを使用。

- (2) 再生骨材配合率の推移（全国，地域別，県別）

「再生骨材配合率の推移」は，アスファルト合材統計年報<sup>1)</sup>に“再生骨材”の使用数量の記載のある平成 6 年度以降について整理した。

- (3) 再生骨材の需給バランスの推移（全国，地域別，県別）

アスファルト再生骨材の需給バランスは，以下のように整理した。

アスファルト塊の受入量に対する余剰再生骨材の割合

$$= \frac{\text{アスファルト塊の受入量 (t)} - \text{再生骨材使用量(t)}}{\text{アスファルト塊の受入量(t)}} \times 100(\%)$$

なお，当該データは，アスファルト合材統計年報<sup>1)</sup>に“アスコン塊受入数量”の記載のある平成 8 年度以降について整理した。

#### 2.1.3. 調査結果

- (1) 再生混合物の出荷比率の推移（全国，地域別，県別）

地域別の再生混合物の出荷比率の推移を図 2.1 に，県別の再生混合物の出荷比率の推移を図 2.2～図 2.4 に示す。

各地域，各県とも再生混合物の出荷比率は横ばいもしくは微減する傾向にあるものの，全加熱アスファルト混合物に占める再生アスファルト混合物の出荷比率は 70～80%に達している。

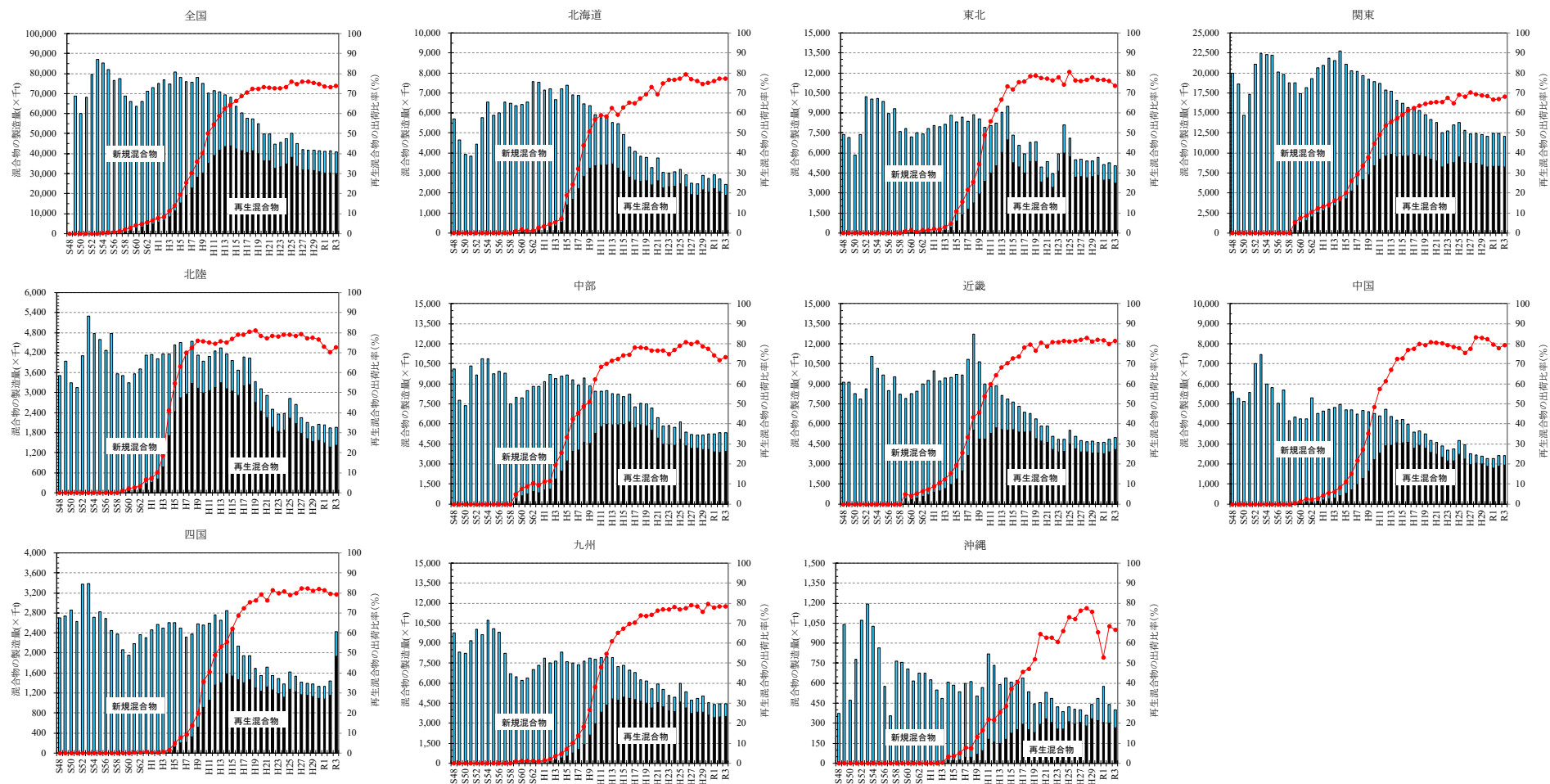


図 2.1 再生混合物の出荷比率の推移 (地域別)

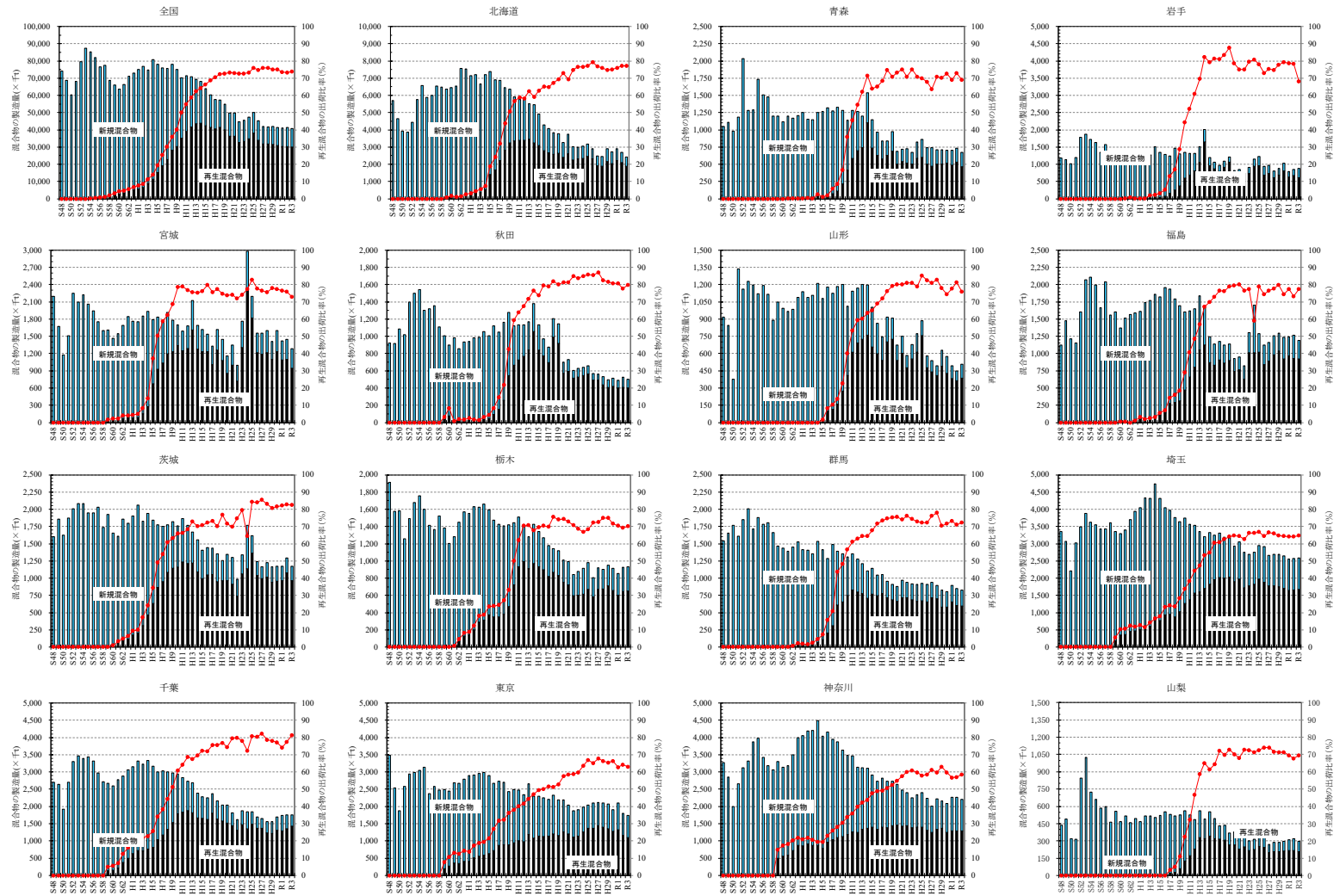


図 2.2 再生混混合物の出荷比率の推移 (1) (県別)

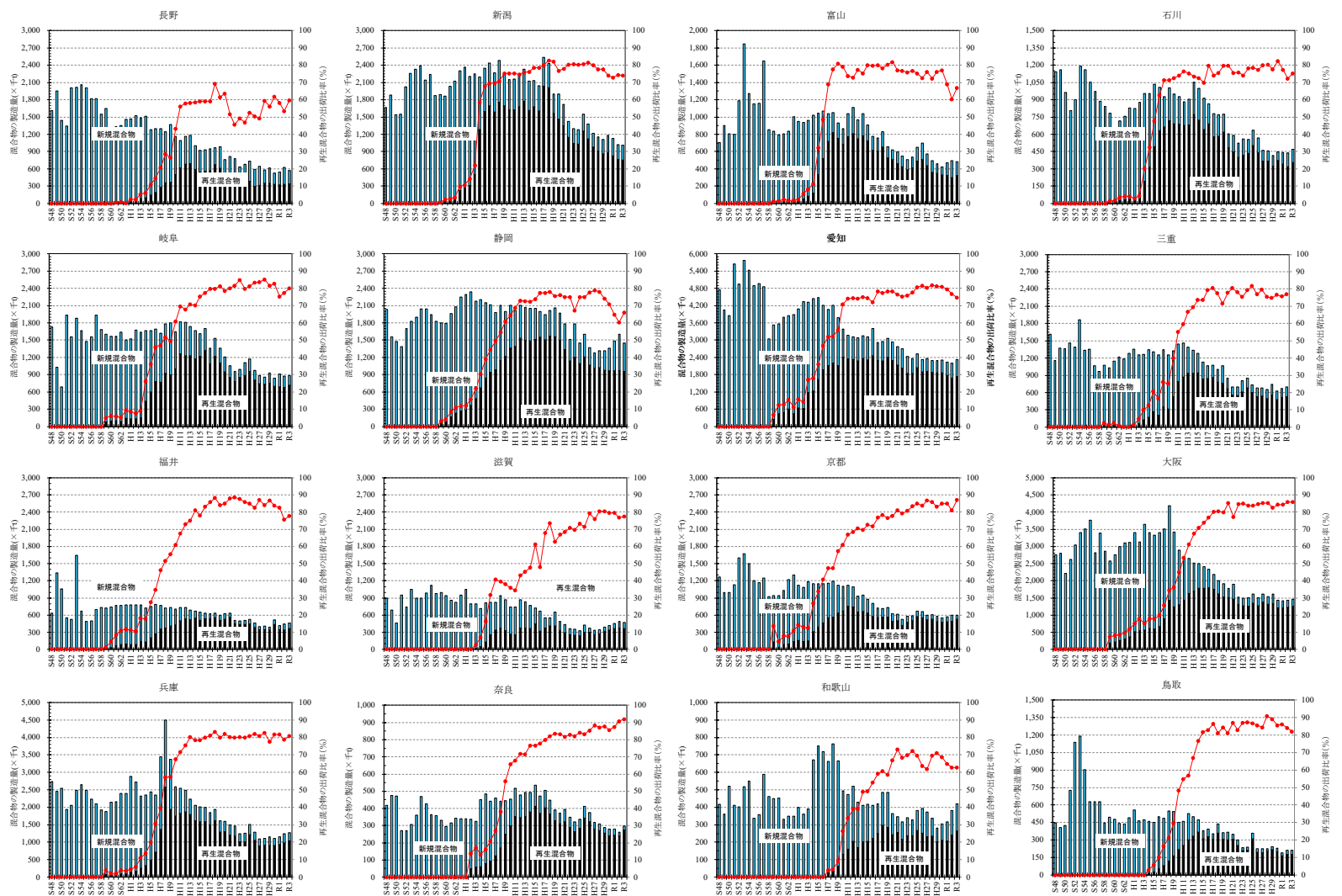


図 2.3 再生混合物の出荷比率の推移 (2) (県別)

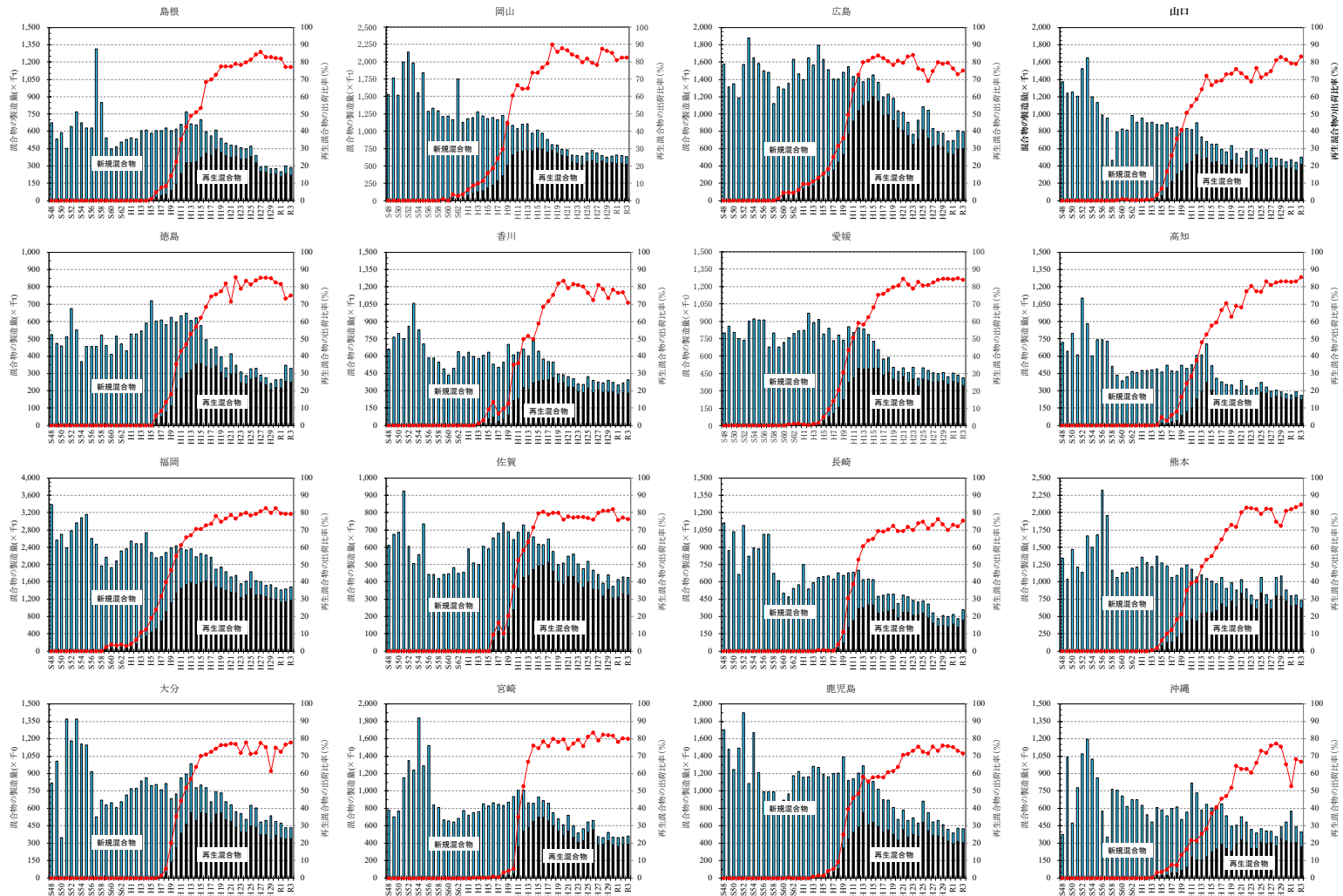


図 2.4 再生混合物の出荷比率の推移 (3) (県別)

(2) 再生骨材配合率の推移（全国，地域別，県別）

地域別の再生骨材配合率の推移を図 2.5 に，県別の再生骨材配合率の推移を図 2.6～図 2.8 に示す。

各地域，各県とも再生混合物の再生骨材配合率は増加する傾向にあり，40～70%に達している。特に，埼玉県，東京都，神奈川県での再生骨材配合率は70%以上に達している。

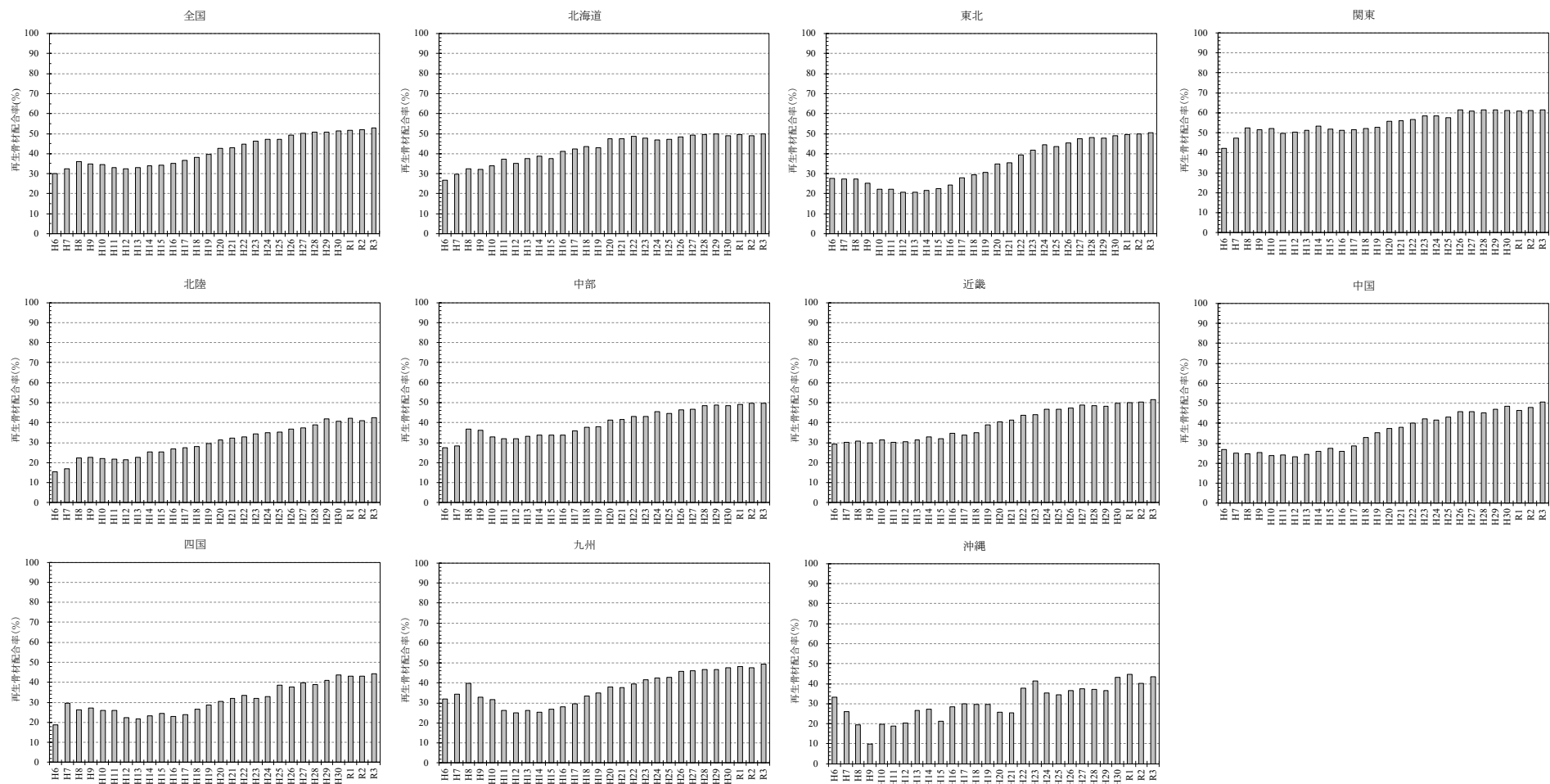


図 2.5 再生骨材配合率の推移（地域別）



図 2.6 再生骨材配合率の推移 (1) (県別)



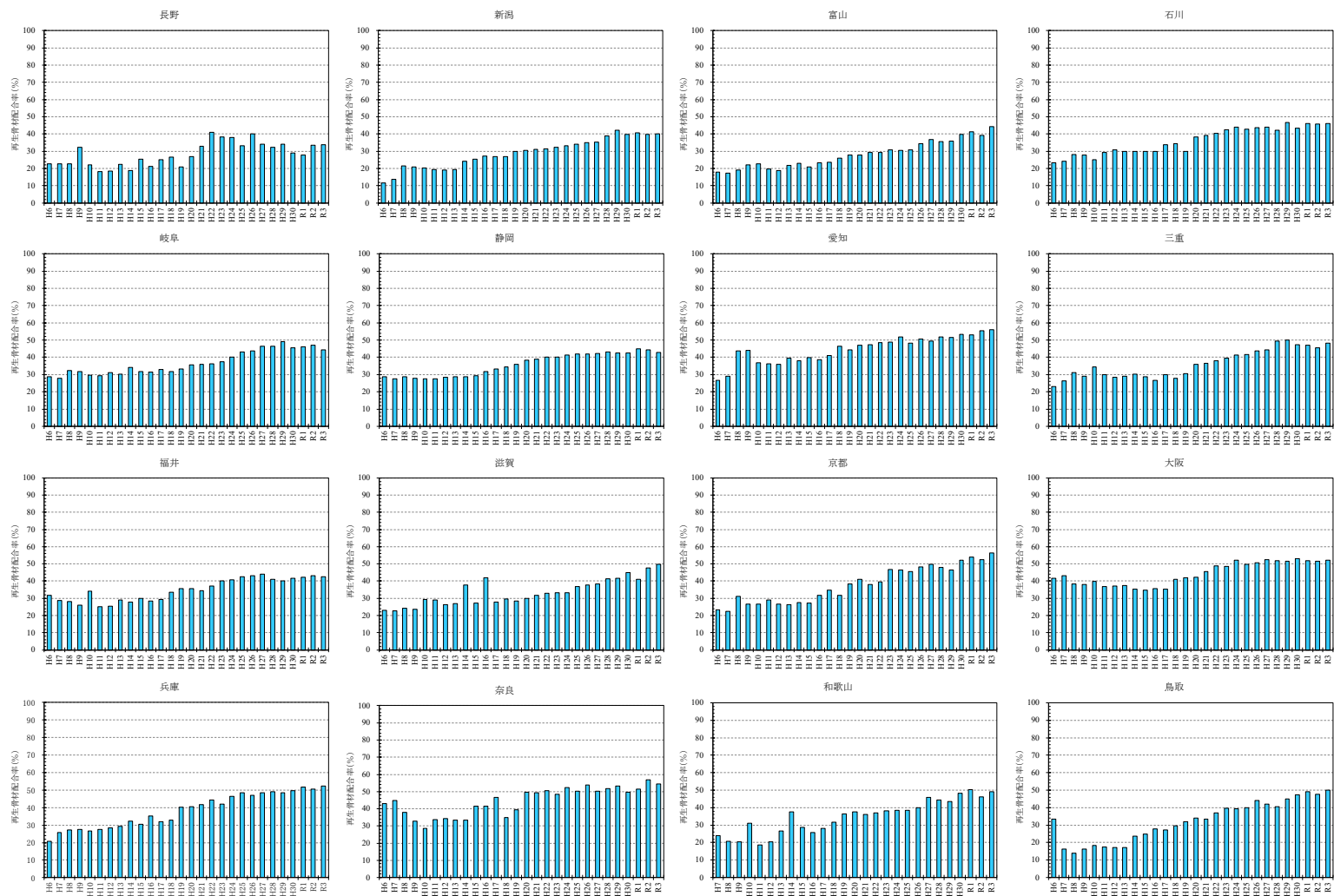


図 2.7 再生骨材配合率の推移 (2) (県別)

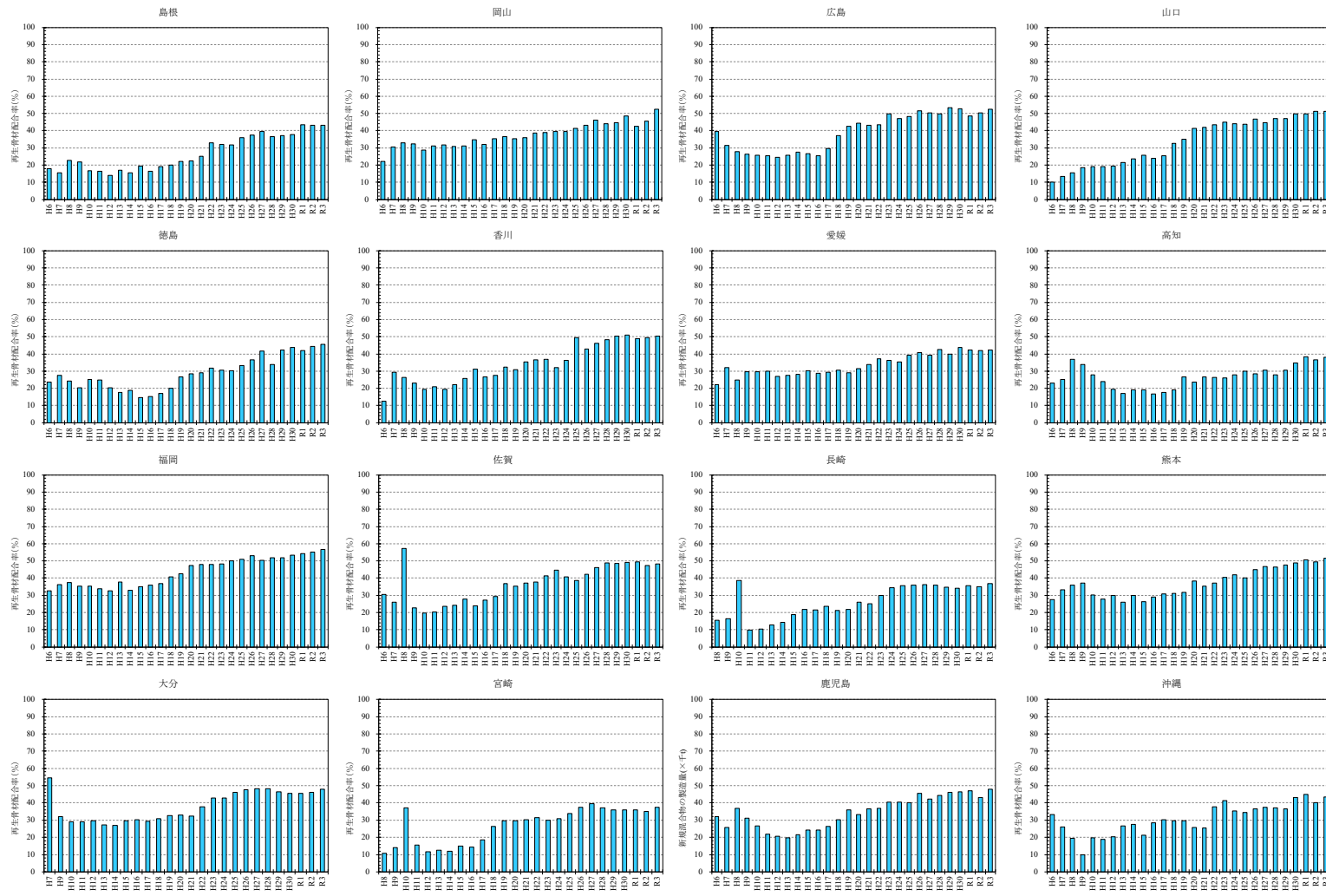


図 2.8 再生骨材配合率の推移 (3) (県別)

(3) 再生骨材の需給バランスの推移（全国，地域別，県別）

地域別の再生骨材需給バランスの推移を図 2.9 に，県別の再生骨材需給バランスの推移を図 2.10～図 2.12 に示す。

各地域，各県のアスファルト再生骨材の余剰量は低下する傾向にあるが，地域，県によってアスファルト再生骨材の需給バランスに大きな差がある。

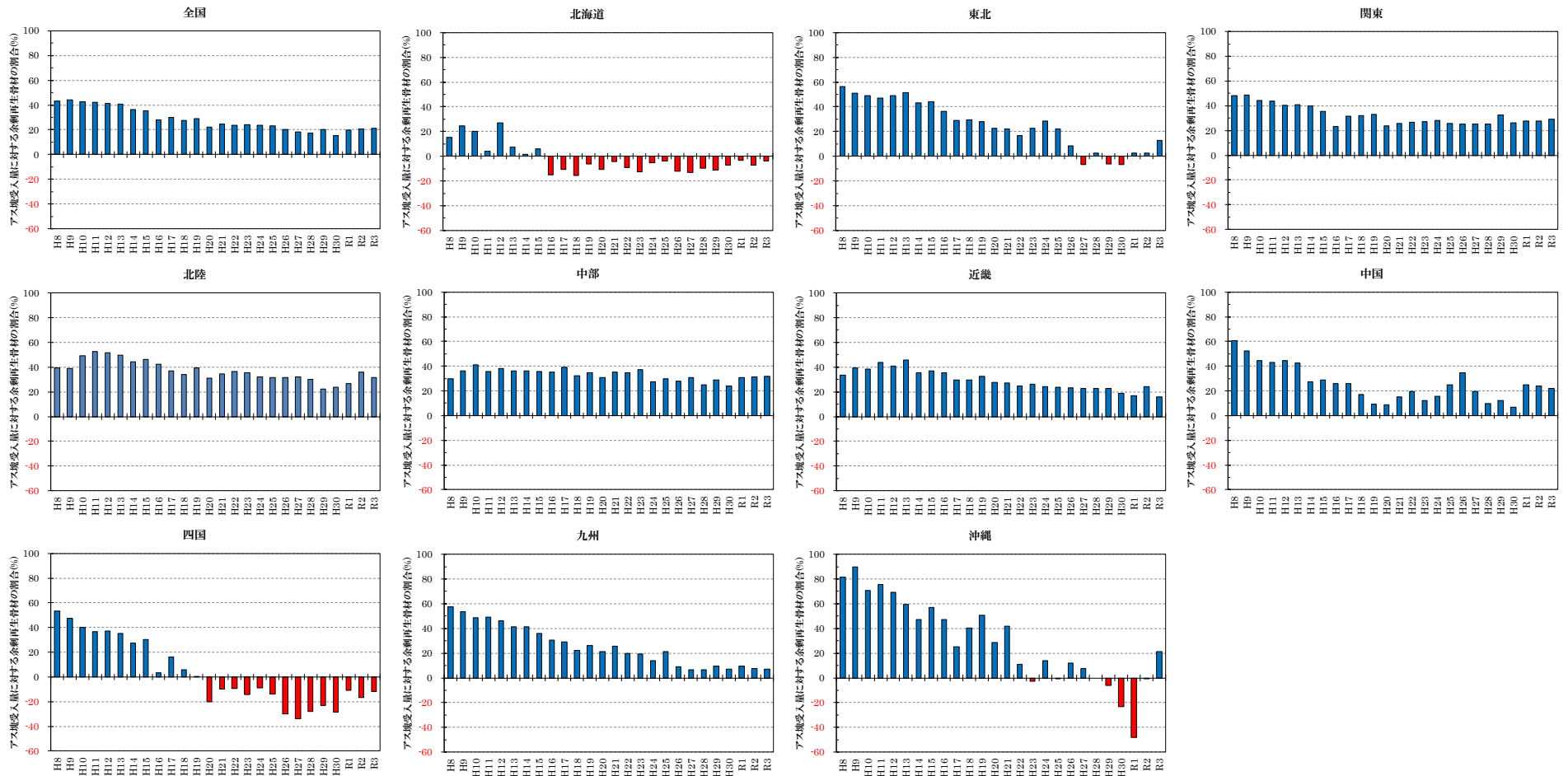


図 2.9 再生骨材の需給バランス（地域別）

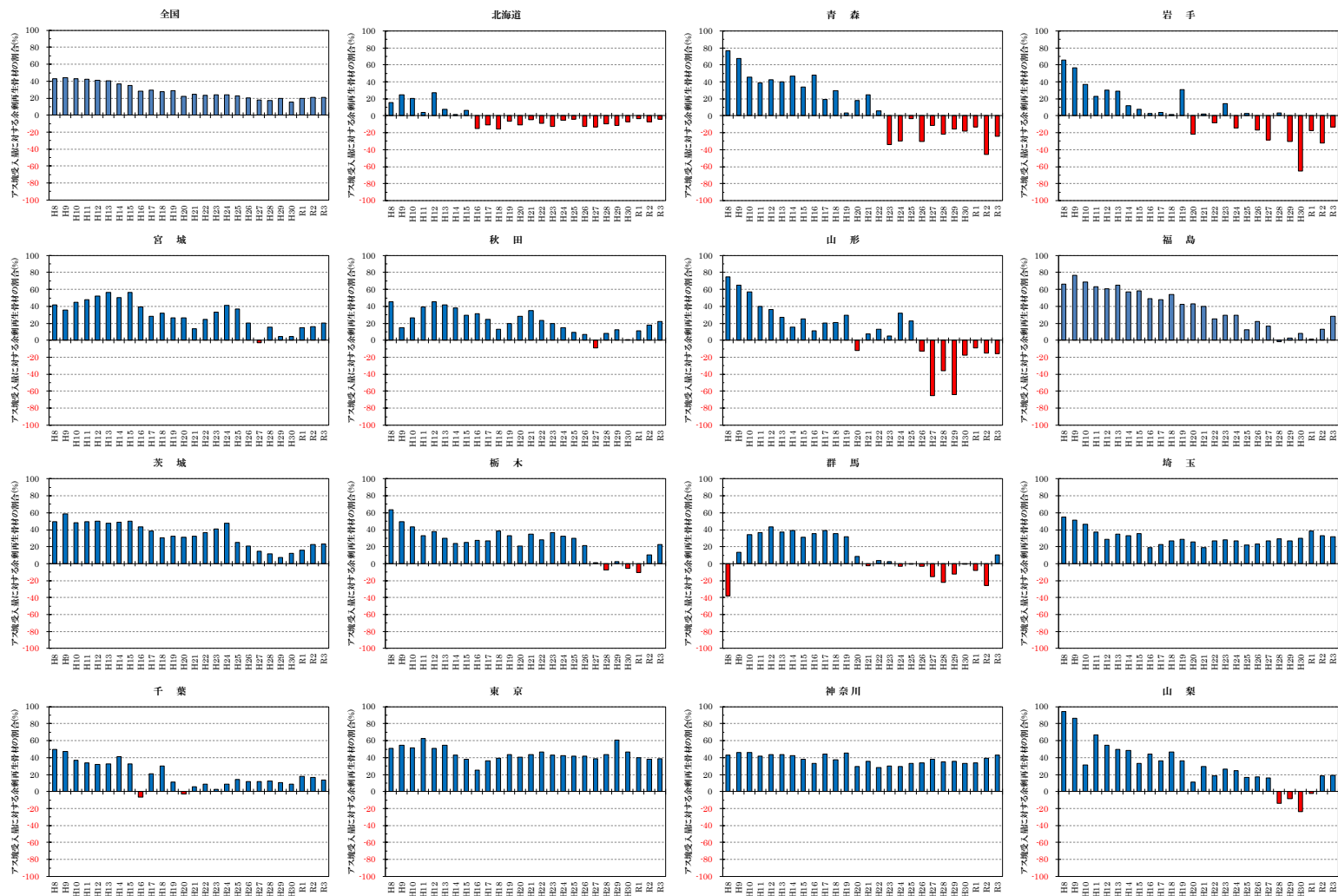


図 2.10 再生骨材の需給バランス (1) (県別)

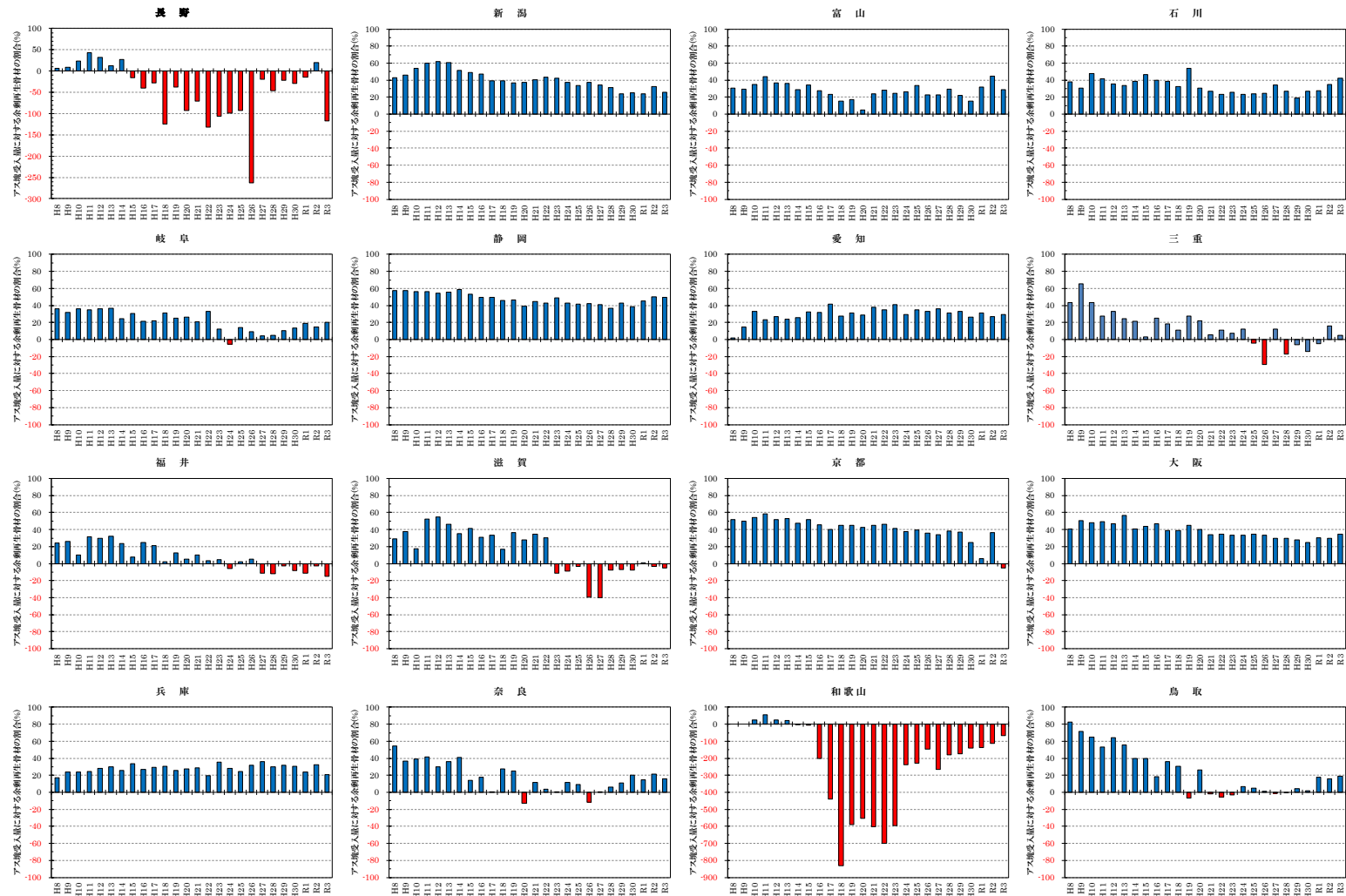


図 2.11 再生骨材の需給バランス (2) (県別)

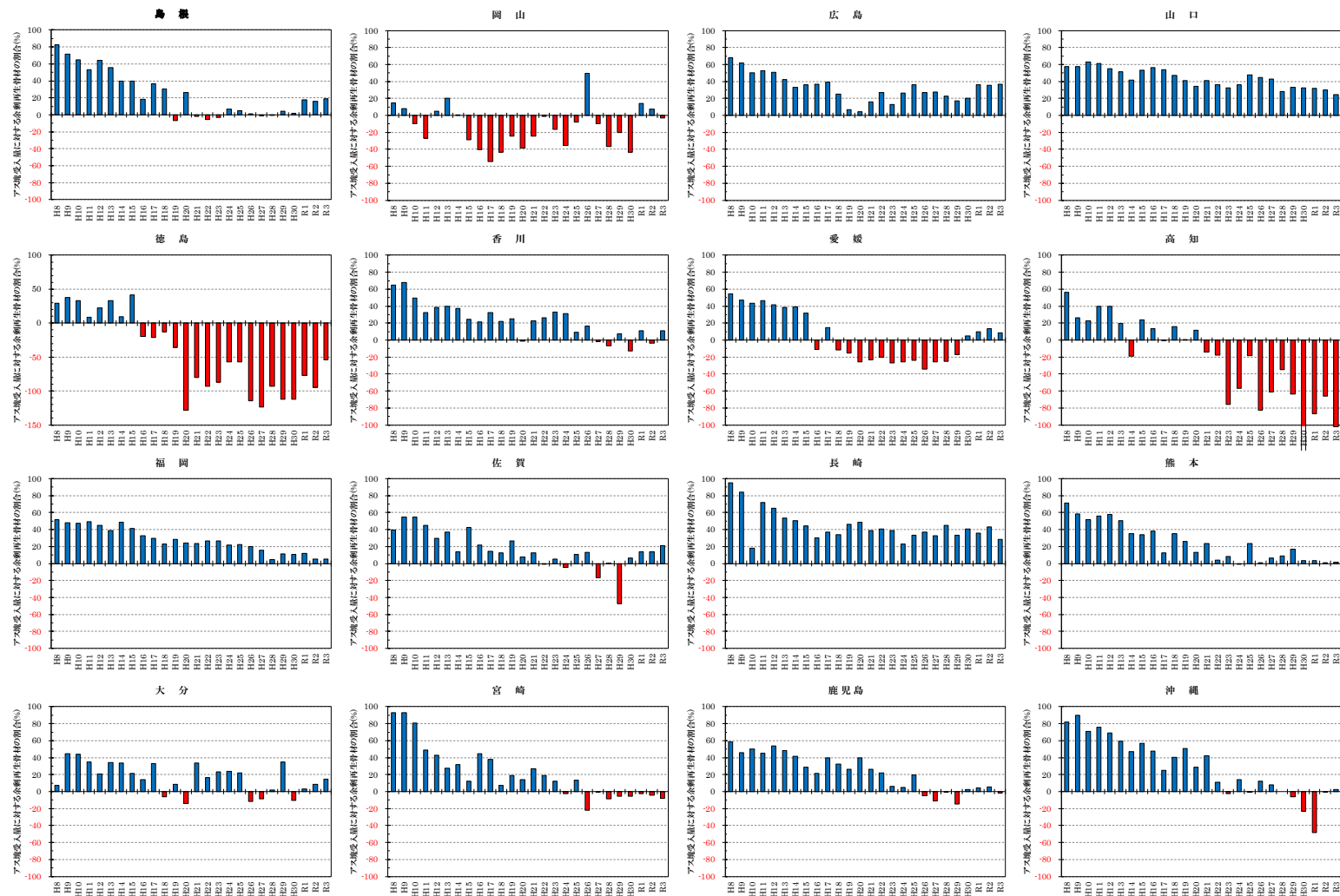


図 2.12 再生骨材の需給バランス (3) (県別)

#### 2.1.4. まとめ

得られた知見を以下に示す。

- 各地域、各県の再生混合物の出荷比率は、横ばいもしくは微減する傾向にあるものの、全加熱アスファルト混合物に占める再生アスファルト混合物の出荷比率は70～80%に達している。
- 各地域、各県の再生骨材配合率は増加する傾向にあり、40～70%に達している。特に埼玉県、東京都、神奈川県では、再生骨材配合率が70%以上に達している。
- 各地域、各県のアスファルト再生骨材の余剰量は低下する傾向にあるが、地域、県によってアスファルト再生骨材の需給バランスに大きな差がある。



## 2.2. 室内における促進劣化・再生試験方法の検討

### 2.2.1. 目的

再生の歴史は古いものの、現在の再生方法は必ずしも繰り返し再生を意識したものとはなっておらず、今後も同じ水準でリサイクルを持続していくには、繰り返し再生を前提とした再生利用方法が必要と考えられる。一方、再生混合物製造の際には再生用添加剤を使用するのが一般的であるが、その組成の違いにより再生後の性状が異なることが指摘されている。持続的なアスファルト混合物の再生利用を実現させるには、繰り返し再生した場合の再生用添加剤の組成の影響を把握し、繰り返し再生に適した再生用添加剤の品質を明確にする必要がある。

そこで組成の異なる5種類の再生用添加剤等を用いて、屋内にて繰り返し促進劣化・再生させたアスファルトおよびそれらを使用した再生混合物の性状を評価し、再生用添加剤の組成の差異による影響について検討を行った。

### 2.2.2. 試験方法

#### (1) 試験概要

繰り返し劣化・再生によるアスファルト性状変化を把握するため、室内実験において、アスファルトおよび混合物を促進劣化させた後、組成の異なる再生用添加剤等（以下、添加剤）を加えて針入度を回復させ、それを複数回繰り返した。各段階において各種性状を測定することで繰り返し再生の影響を分析した。以降、劣化や再生を  $n$  回繰り返したものを劣化  $n$ 、再生  $n$  と表す。

#### (2) アスファルトの促進劣化および再生試験方法<sup>4)</sup>

図 2.13 にアスファルトの劣化・再生試験手順を示す。まず、新規アスファルト（以下、ORG）を促進劣化試験により針入度 20 程度にし、この劣化アスファルトを、再生用添加剤を用いて針入度 70 に回復させた。

アスファルトの促進劣化は、舗装調査・試験法便覧<sup>5)</sup>A046 および A059 に示される薄膜加熱試験（以下、TFOT）および加圧劣化試験（以下、PAV）によって劣化させた。ただし、PAV においては劣化後の針入度を 20 程度とさせるために、劣化時間を ORG の針入度が 20 となった 54 時間に変更した。

本検討では、再生用添加剤の差異による影響を最大限にするため、アスファルト単体での再生にあたっては新アスファルトを全く使用しなかった。

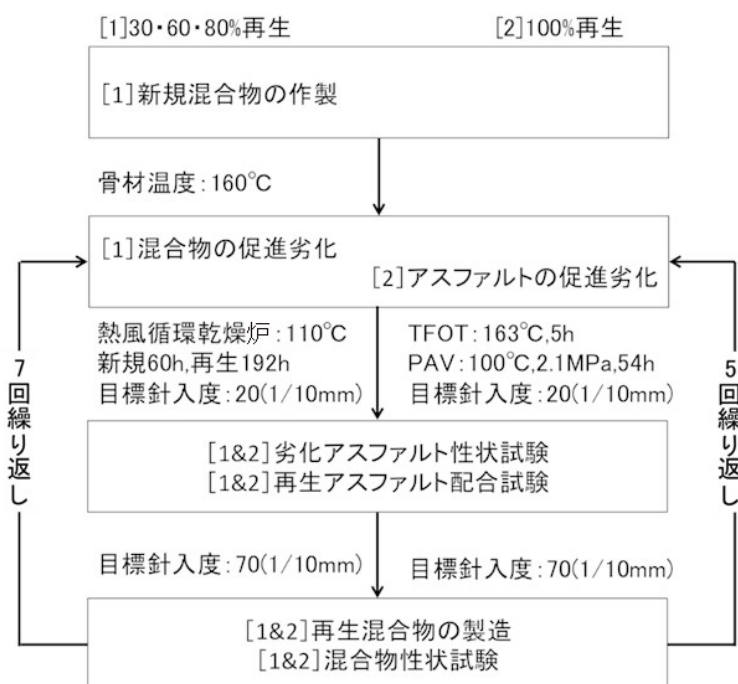


図 2.13 アスファルトの繰り返し劣化・再生試験手順<sup>4)</sup>

### (3) 再生アスファルト混合物の促進劣化および再生試験方法

アスファルト混合物の繰り返し劣化・再生試験手順は、再生骨材配合率 30%、60%、80%での再生を図 2.13 の左側、100%再生は図 2.13 の右側に示す方法で行った。

まず、30%、60%、80%再生の場合、新規アスファルト混合物を製造したのち、舗装調査・試験法便覧<sup>9)</sup>B02 に示されている熱風循環乾燥炉による方法で劣化させて、これを再生骨材とした。劣化時間は針入度が 20 になるように事前に検討して設定した。再生アスファルト混合物は、再生骨材のアスファルトを抽出・回収して針入度を測定し、針入度が 70 になるように再生用添加剤を加えるとともに、新規骨材および新規アスファルトの添加量を調整して作製した。

一方、100%再生の場合では、劣化したアスファルトを再生する際に再生用添加剤を加えていくとアスファルト量が増加する一方になるため、アスファルトのみを劣化・再生した後に再生アスファルト混合物を作製した。つまり、100%再生の再生アスファルト混合物は、促進劣化・再生したアスファルトを新規骨材に被膜して作製されたものである。

### (4) 試験材料

新規アスファルトは表 2.1 に示すストレートアスファルト 60/80 を用いた。また、5 種類の再生用添加剤（以下、添加材 A, B, C, D, E）の性状を表 2.2 に示す。添加剤 A および B は芳香族分が約 90%のものであり、添加剤 C と D は芳香族分と飽和分が約 50%ずつ含むものである。添加剤 E は、再生用添加剤として使用されているものではないが、再生用添加剤と同じ原料から製造されたオイルで、ほぼ飽和分のみのものであり、比較用として使用した。なお、添加剤 A~D

は、オイルに適用される PCA（多環芳香族成分）規制に対応したものをを用いた。

アスファルト混合物の基本配合を表 2.3 に示す。最大粒径 13mm の密粒度アスファルト混合物で、最適アスファルト量は 5.5%である。

表 2.1 ストレートアスファルト 60/80 の性状

密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.039
針入度(1/10mm)	70
軟化点(°C)	46.5
伸度 15°C(cm)	100+

表 2.2 再生用添加剤の組成

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

表 2.3 密粒度アスファルト混合物(13)の基本配合

アスファルト量 (%)	5.5	
骨材粒度 (ふるい通過質量百分率 %)	19.0mm	100
	13.2mm	96.2
	9.50mm	84.9
	4.75mm	63.4
	2.36mm	41.1
	0.600mm	26.0
	0.300mm	16.6
	0.150mm	8.9
0.075mm	5.4	
密度 (g/cm <sup>3</sup> , 15°C)	2.382	
空隙率 (%)	3.5	

#### (5) 各種性状試験方法

繰り返し劣化・再生を行ったアスファルトおよびアスファルト混合物の性状は、表 2.4 に示す各種性状試験により評価した。試験方法は舗装調査・試験法便覧<sup>5)</sup>に記載があるものは、基本的にそれらに従って実施した。それ以外の試験方法、および本検討で設定した試験条件については以下のとおりである。

##### a) 圧裂試験

アスファルト混合物の耐流動性や耐ひび割れ性を把握するため、圧裂試験を行った。試験温度は低温：0°C、常温：20°C、高温：60°Cとした。

##### b) 高温カンタブロ試験

高温カンタブロ試験は、供試体温度を 60°C、ロサンゼルス試験機の内壁温度を 30°Cにして

試験を行った。試験機温度を 30℃に加温するにあたり、写真 2.1 に示すように、ロサンゼルス試験機近傍にヒーターを設置した。高温カンタプロ試験は、予備試験により供試体温度を上げていくと新規混合物と再生混合物との性状の差が大きくなる傾向が見られたことから、全ての添加剤について性状差を把握するために実施することにした。試験条件を表 2.5 に示す。

表 2.4 各種性状試験

アスファルト性状試験	針入度試験	舗装調査・試験法便覧 A041
	軟化点試験	舗装調査・試験法便覧 A042
	伸度試験	舗装調査・試験法便覧 A043
アスファルト混合物性状試験	圧裂試験	舗装調査・試験法便覧 B006
	高温カンタプロ試験	舗装調査・試験法便覧 B010



写真 2.1 ロサンゼルス試験機

表 2.5 高温カンタプロ試験条件

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

### 2.2.3. 試験結果

#### (1) 再生アスファルトの性状<sup>⑥</sup>

図 2.14 に繰り返し劣化・再生によるアスファルトの性状変化を示す。それぞれの性状の詳細について以下に示す。

##### a) 針入度

再生アスファルトの目標針入度は 70 としているので、再生後の針入度は添加剤 E の再生 5 を除き 70 となった。添加剤 E に関しては、劣化 5 の時点で針入度が 50 程度となり、促進劣化させても針入度が下がらなくなった。また、添加剤 E の再生 5 では、加熱しても流動性が得にくく、添加剤を加えても均一に混ぜることが困難となり、安定した針入度を測定できなかったため、針入度調整を正確に実施することができなかった。

## b) 軟化点

各添加剤において、アスファルトの劣化・再生回数が増えると軟化点が増加する傾向が見られた。特に、飽和分が多い添加剤 C, D, E で再生したものは、添加材 A, B と比較して、劣化 3 以降に顕著に軟化点が増大した。これより、飽和分が多い添加剤は、軟化点が上昇しやすいことが分かった。芳香族分の多い添加剤 A, B では再生 5 であっても、軟化点が 55~65°C 程度と ORG に比較的近い値となっていることから、芳香族系はアスファルトの繰り返し再生利用に対して、軟化点の回復効果が高いことが示された。

## c) 伸度

添加剤 A, B では、再生 1 回目, 2 回目まで 100~30cm 程度まで回復が見られたが、添加剤 C, D, E では再生 2 回目以降ほとんど回復しなかった。したがって、芳香族分の多い添加剤の方が繰り返し再生時にも伸度の回復しやすい傾向であることが分かった。しかし、いずれの添加剤も舗装再生便覧<sup>7)</sup>に示されている伸度 100cm までは回復していなかった。これは本検討において、再生時に新規アスファルトを全く添加しておらず、実際の再生に比べて非常に厳しい条件であったことによると考えられた。

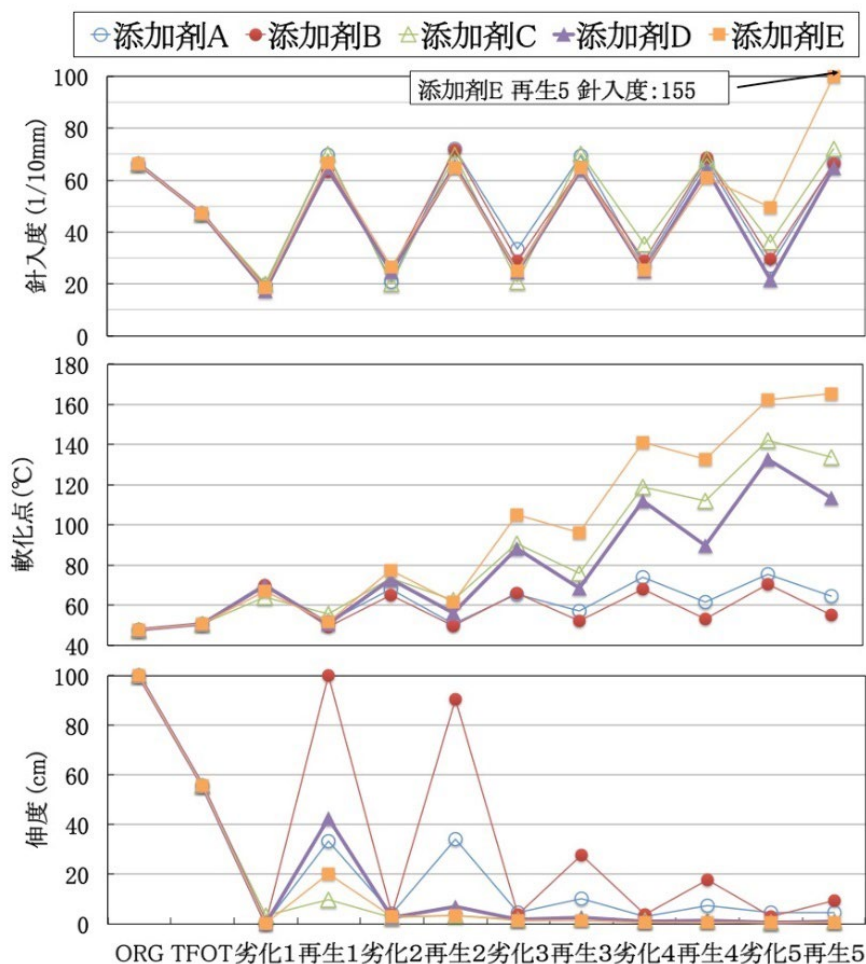


図 2.14 繰り返し劣化・再生によるアスファルトの性状変化<sup>6)</sup>

## (2) 再生アスファルト混合物の性状

### a) 圧裂試験

図 2.15~図 2.18 に新規アスファルト混合物 (図中, ORG) および添加剤 A, C, E を用いた再生アスファルト混合物における圧裂試験の結果を示す。試験は, 基本的に再生 3, 5 について実施した。再生 5 の混合物作製ができなかった添加剤 E では再生 5 を再生 4 に代えて行った。再生 5 の代わりに再生 4 の値を示している。図 2.15 より圧裂強度は, 新規アスファルト混合物では比較的高い強度であるのに対し, 再生アスファルト混合物の強度はほとんどの場合で小さくなった。添加剤 C, E では再生回数が進むほど強度が小さくなる傾向を示した。これに対し, 添加剤 A は, 新規混合物に近い値を示し, 再生が進んでも強度は小さくならなかった。

図 2.16 より圧裂変位は, 新規混合物が 0°C で小さい値, 20, 60°C で大きな値を示し, 温度に対する変化が大きいのにに対し, 再生混合物は温度に対する変化が小さかった。添加剤 C, E では特に小さな値を示し, 再生が進むとさらに小さな値になった。添加剤 A は, 再生が進んでも変化はあまりなく, 全体的に大きな値を示した。

図 2.18 より圧裂係数は, 新規混合物は低温で大きく高温で小さくなるのにに対し, 再生混合物は 0°C で新規混合物より小さく, 20°C で新規混合物と近い性状を示し, 60°C で新規混合物より同等かそれより大きい値を示した。特に添加剤 C, E は 60°C で新規混合物より大きな値を示したのに対し, 添加剤 A は新規混合物と同程度となった。

再生骨材配合率 30%, 60%, 80% および 100% の再生アスファルト混合物について, 0°C の圧裂強度を 60°C の圧裂強度で除した値である圧裂強度比を算出した。繰り返し再生回数に対する圧裂強度比の変化を図 2.18 に示す。圧裂強度比は, 値が大きいとわだち掘れが大きく, 小さいとひび割れが発生しやすいとされている。図 2.18 より, 圧裂強度比はいずれのケースにおいても, 繰り返し再生が進むにつれて減少した。その傾向は再生骨材配合率が高くなるほど, また, 添加剤 A より添加剤 C のほうが顕著であった。一方, 添加剤 A による 100% 再生を除く再生アスファルト混合物と 30% 再生 C は新規アスファルト混合物との差異が小さかった。

既往の研究より, 圧裂強度比が 20 程度まで低下すると多くの舗装でひび割れが発生し, ひび割れ率は 2~20% が多く, 最大 70% 程度発生した区間もあった。図 2.18 より, 圧裂強度比 20 以下は添加剤 A では 100% 再生 5, 添加剤 C では 100% 再生 1 以降, 80% 再生 3 以降, 60% 再生 7 となることから, 添加剤は芳香族分が多いものより飽和分が多いもの, また, 再生骨材配合率の高いもの程ひび割れ抵抗性の低下が懸念された。

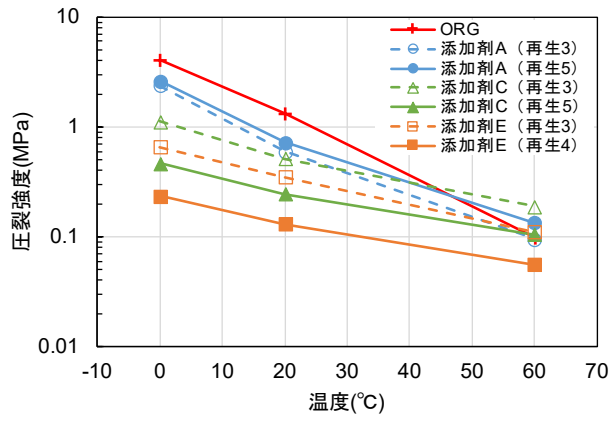


図 2.15 再生アスファルト混合物の圧裂強度 (100%再生)

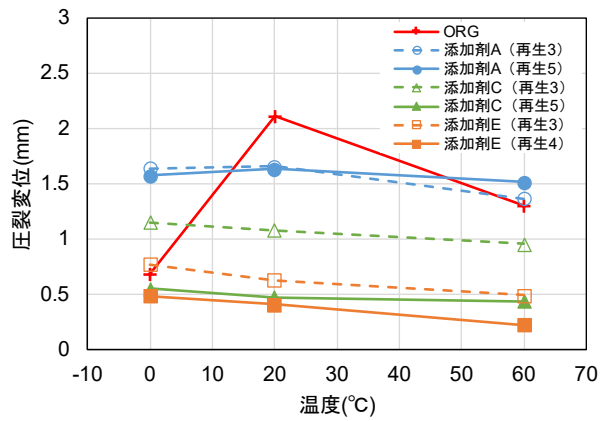


図 2.16 再生アスファルト混合物の圧裂変位 (100%再生)

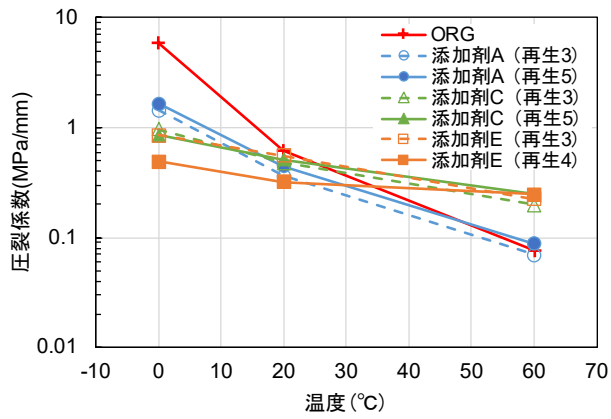


図 2.17 再生アスファルト混合物の圧裂係数 (100%再生)

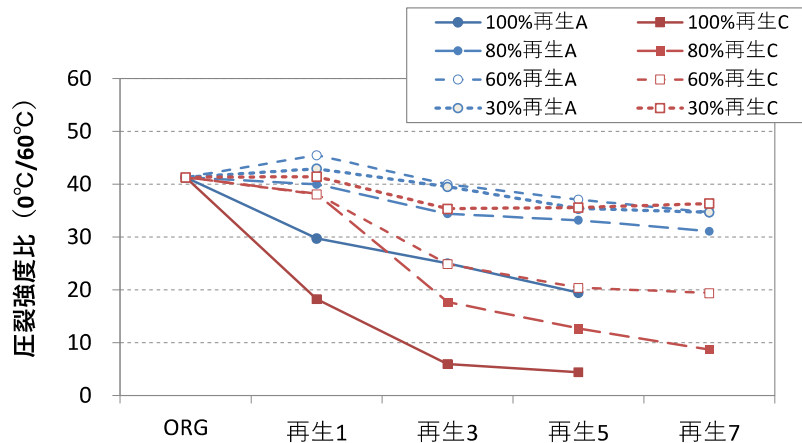


図 2.18 圧裂強度比<sup>4)</sup>

### b) 高温カンタプロ試験

写真 2.2 に高温カンタプロ試験後の供試体の状態を、図 2.19 に各再生アスファルト混合物における高温カンタプロ試験で得られたカンタプロ損失率（以下、損失率）を示す。試験は、基本的に再生 3, 5 について行うようにし、再生 5 の混合物作製ができなかった添加剤 E では再生 5 を再生 4 に代えて行った。また、添加剤 C, E は再生 3 の損失量が大きかったので、再生 1, 2 を追加した。ORG の損失率は、ほぼ 0%であった。添加剤 A, B の損失率は、再生とともに増加したものの、再生 5 でも損失率は 6%未満であった。一方、添加剤 C, D, E では、再生が進むにつれ損失率が増大し、再生 5 では約 99%となった。これらは、再生 3 と早期の段階でも損失率が 10%~70%程度となっており、損失率は、添加剤 E>添加剤 C>添加剤 D の順となった。

高温カンタプロ試験の結果より、破壊しにくいグループである新規アスファルト混合物および芳香族が多い添加剤 A, B を用いた再生アスファルト混合物と、破壊しやすいグループである飽和分が多い添加剤 C, D, E を用いた再生アスファルト混合物に分かれた。この結果は、60°Cの圧裂係数で見られた傾向と同様であった。高温カンタプロ試験の試験温度である 60°Cは、日本における夏季の路面温度に相当するものである。この温度域では、通常流動わだちを考えることが多いが、縦表面ひび割れもこの温度域で発生する可能性が指摘されている<sup>8)</sup>。この結果より、添加剤の組成や繰り返し再生の進行度合いによっては、縦表面ひび割れあるいは骨材の飛散といった損傷の発生度合いが異なる可能性があると考えられた。

図 2.20 に再生骨材配合率 30%, 60%, 80%および 100%の再生アスファルト混合物について、高温カンタプロ損失率の結果を示す。添加剤 C により再生された 60%, 80%および 100%の再生アスファルト混合物および添加剤 A により再生された 100%の再生アスファルト混合物は、繰り返し再生が進むにつれて損失率が高くなった。高温カンタプロ試験は舗装の表面縦ひび割れを模した疲労試験とされるホイールトラッキング疲労試験と高い相関が確認されている<sup>4)</sup>。したがって、飽和分の多い添加剤で再生された混合物で再生骨材配合率が高いものは、実道においても高温時にひび割れ抵抗性が低下する可能性があり、芳香族分の多い添加剤で再生された混合物や再生骨材配合率が低い混合物は、高温時のひび割れ抵抗性の低下が抑えられる可能性があることが示唆された。



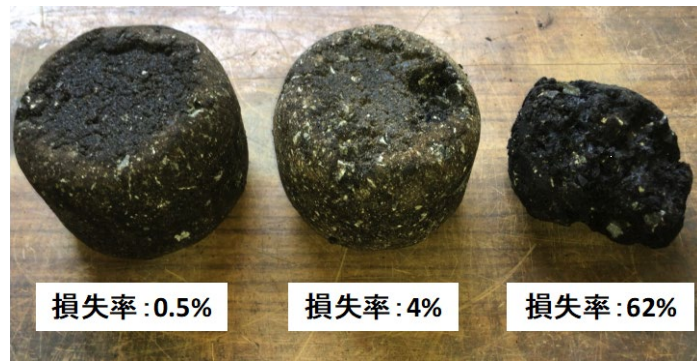


写真 2.2 高温カンタブロ試験後の供試体の状態

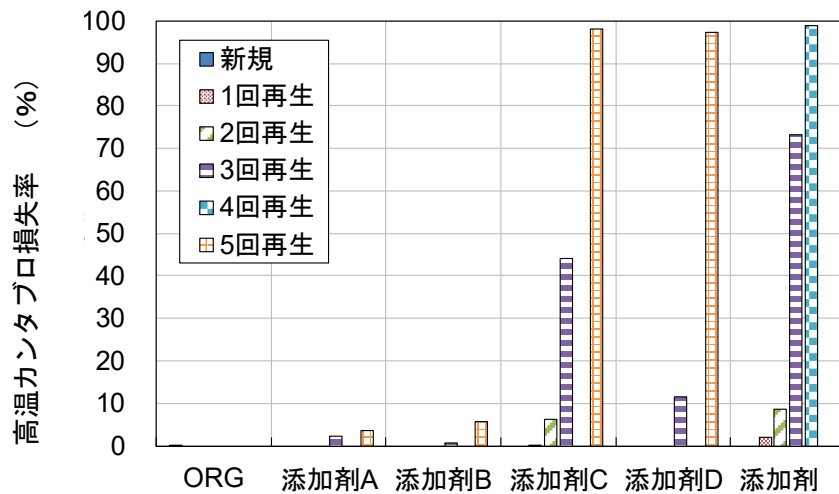


図 2.19 高温カンタブロ損失率 (100%再生) <sup>6)</sup>

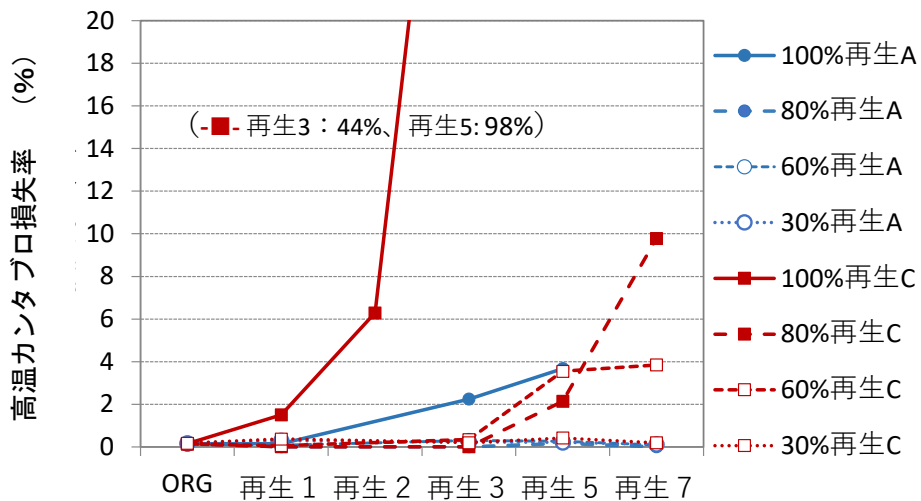


図 2.20 再生骨材配合率の異なる場合の高温カンタブロ損失率 <sup>4)</sup>

### (3) 高温時ひび割れ抵抗性の評価法の検討

圧裂試験で求められる圧裂強度比は、値が小さいとひび割れが発生しやすいとされている。また、高温カンタブロ試験もホイールトラッキング疲労試験と高い相関が確認され <sup>8)</sup>、高温時のひび割れ抵抗性の評価に用いることができる可能性がある。この両試験の関係性を整理し、その適

用可能性について検討した。

図 2.21 に圧裂強度比と高温カンタプロ損失率の関係を示す。両者の関係性が高いことが明らかになった。圧裂強度比が 20 程度から損失率が上昇し始めていることを確認することができる。また、圧裂強度比 10 付近では損失率が急激に上昇しており、図 2.18 の圧裂強度比 10 以下は添加剤 C による 100%再生 3 以降、80%再生 7 であり、これらはひび割れ率がさらに高くなる可能性があると考えられた。このことから、繰り返し再生が進むにつれて、添加剤の組成として芳香族分より飽和分が多く、再生骨材配合率が高い方が、高温時のひび割れ抵抗性が低くなる可能性があり、圧裂強度比や高温カンタプロ損失率により定量的に評価できる可能性もあることが確認できた。

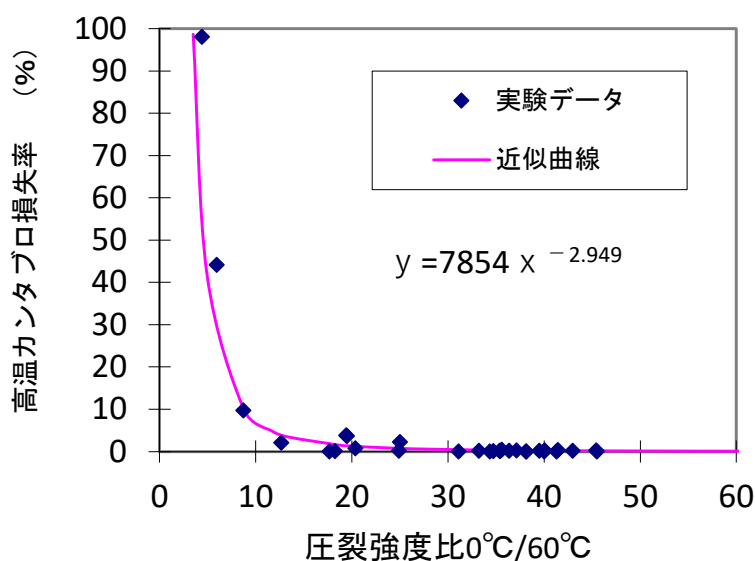


図 2.21 圧裂強度比と高温カンタプロ損失率の関係<sup>4)</sup>

#### 2.2.4. まとめ

本検討では、室内での促進劣化・再生試験方法の検討として、組成の異なる複数の再生用添加剤を用いてアスファルトおよびアスファルト混合物を繰り返し再生した場合の特性について検討した。また、繰り返し再生した再生アスファルト混合物の高温時のひび割れ抵抗性を評価するための試験方法について、その適用可能性についても検討した。

得られた知見を以下にまとめる。

- ・ 繰り返し再生すると、今回評価した再生用添加剤ではすべて軟化点が上昇する傾向が見られた。特に飽和分の多い再生用添加剤により繰り返し再生した場合、軟化点の上昇が顕著であった。
- ・ 伸度においては、再生用添加剤のみで再生した場合、新規アスファルトと同等程度まで回復させることは難しく、特に繰り返し再生が進むと、今回評価した再生用添加剤では十分に回復させることはできなかった。
- ・ 圧裂試験の結果、飽和分が多い再生用添加剤の場合、繰り返し再生すると次第に圧裂強度、圧裂変位が小さくなっていく傾向が見られた。芳香族が多い再生用添加剤の場合、新規アスファルトと比べると  $0^{\circ}\text{C}$ での性状が多少異なるものの、 $20^{\circ}\text{C}$ 、 $60^{\circ}\text{C}$ の性状はかなり近いものになった。 $60^{\circ}\text{C}$ の圧裂係数を見ると、芳香族が多い再生用添加剤で再生したものと新規アス

ファルトのものは小さかったが、飽和分が多い再生用添加剤を用いたものは大きくなった。再生用添加剤の組成の違いによる影響は、高温性状に表れやすい可能性が示唆された。

- 高温カンタブロ試験の結果、飽和分が多い再生用添加剤で繰り返し再生を行うと、損失量が大きくなる傾向が見られた。芳香族が多い再生用添加剤で繰り返し再生した場合は、損失量の増加は顕著ではなかった。
- 圧裂強度比が 20 程度を下回ると損失率が上昇し始め、圧裂強度比 10 付近では損失率が急激に上昇する傾向を確認した。このことから、繰り返し再生が進むにつれて、添加剤の組成として芳香族分より飽和分が多く、再生骨材配合率が高い方が、高温時のひび割れ抵抗性が低くなる可能性があり、圧裂強度比や高温カンタブロ損失率により定量的に評価できる可能性もあることが確認できた。

今後は、実際の再生骨材を用いた際の混合物性状の確認を行い、高温カンタブロ試験や圧裂強度比による評価方法や、妥当な値の範囲を検証し、高温時のひび割れ抵抗性評価についてさらに検討する必要があると考えられる。

## 2.3. 再生骨材配合率による再生アスファルトおよび混合物性状の影響把握

### 2.3.1. 目的

全国のアスファルト混合所で実際に使用されている再生骨材を用いて、成分組成の異なる再生用添加剤（以下、添加剤）、再生骨材配合率 0～80%で再生混合物の供試体を作製し混合物の性状を把握することを目的とした。

### 2.3.2. 評価方法<sup>9)</sup>

図 2.22 に試験手順を示す。再生骨材は、8つの地域のアスファルト混合所（a～h）で使用されているいずれも旧アスファルト針入度 20 以上のものを用いた。劣化レベルは 2 パターンとし、これらの再生骨材をそのまま使用した場合と、熱風循環乾燥炉（110℃）で針入度 20 未満に劣化させてから使用した場合について実験を行った。

混合物の配合は密粒度アスファルト混合物（13）で、再生骨材配合率は 0, 30, 60, 80%として、設計針入度は 70 となるように再生用添加剤を加えた。再生混合物の製造は、各アスファルト混合所において実施している手順に従った。また、再生アスファルトは、各再生骨材から回収した旧アスファルトに新アスファルトおよび各再生用添加剤を加えることにより作製し、アスファルト性状試験を行った。供試体の作製は、舗装調査・試験法便覧<sup>5)</sup>B001 に準拠した。なお突固め回数に関しては、後述の圧裂試験（20℃）の供試体のみ 75 回とし、それ以外の供試体（圧裂試験（0℃, 60℃）、高温カンタブロ試験）は 50 回とした。作製した再生混合物性状の評価は、圧裂試験および高温カンタブロ試験により行った。

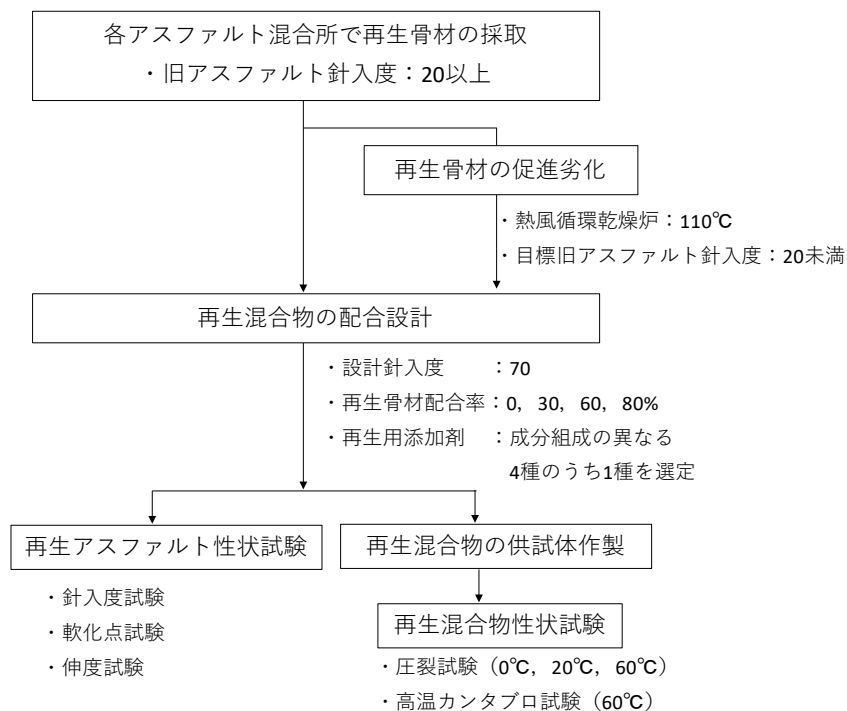


図 2.22 試験手順

### 2.3.3. 評価材料

#### (1) 再生骨材

8つの地域のアスファルト混合所で使用されている旧アスファルト針入度 20 以上の再生骨材とそれを促進劣化させた再生骨材の概要を表 2.6 に示す。

表 2.6 再生骨材の概要

地域		a	b	c	d	e	f	g	h
添加剤		A		B		C		D	
旧アスファルト 針入度 (1/10mm)	採取時	21	23	24	27	20	22	20	25
	促進劣化後	15	11	16	15	15	15	15	14

#### (2) 再生用添加剤と新アスファルトについて

表 2.7 に再生に用いた 4 種の添加剤 (A~D) の四成分組成を示す。添加剤は成分の割合が異なるように選定し、添加剤 A は芳香族分が主成分 (86%)、添加剤 B および C は飽和分が約 55~59%含まれており、添加剤 D は飽和分が主成分 (78%) である。新アスファルトは、各アスファルト混合所で使用しているストレートアスファルト 60~80 を使用した。

表 2.8 に、使用した各地域の再生骨材の旧アスファルト針入度、それらを針入度 20 未満になるように室内劣化させた後の値、再生に用いた添加剤、および添加剤量を示す。ここで、添加剤量に幅があるのは、地域ごとに再生骨材の劣化度合いや質 (再生回数や改質材の有無など) が異なったためと考えられる。

表 2.9 に各地域、各再生骨材配合率の再生アスファルトの針入度を示す。なお、地域 g の再生アスファルトは、使用した新規アスファルト (再生骨材配合率 0%) の針入度が低かったため、設計針入度よりやや低い針入度となった。

表 2.7 再生用添加剤の概要

項 目		添加剤 A	添加剤 B	添加剤 C	添加剤 D
組成 (%)	飽和分	5.6	54.5	58.9	78.3
	芳香族分	86.4	39.8	38.7	19.8
	レジン分	8.0	5.7	2.3	1.9
	アスファルテン分	0.0	0.0	0.0	0.0

表 2.8 旧アスファルト針入度と使用した添加剤

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

※旧アスファルト量に対する添加剤量(内割)

表 2.9 再生アスファルトの針入度

再生用 添加剤	地域	針入度 20 以上				針入度 20 未満			
		再生骨材配合率 (%)				再生骨材配合率 (%)			
		0	30	60	80	0	30	60	80
A	a	76	71	72	69	76	69	68	68
	b	70	68	68	68	70	64	65	72
B	c	70	68	72	68	70	73	77	68
	d	70	70	71	69	70	70	69	69
C	e	68	70	69	69	68	69	69	71
	f	69	71	68	67	69	71	68	68
D	g	55	56	60	63	55	56	60	61
	h	67	66	69	69	67	67	69	69

### 2.3.4. 評価項目

表 2.10 に評価項目を示す。

表 2.10 評価方法

項 目	再生骨材 (針入度 20 以上)			再生骨材 (針入度 20 未満)			新材 ストアス 60/80
	30%	60%	80%	30%	60%	80%	
再生骨材配合率 (%)							
間接引張試験 (60°C)	○	○	○	○	○	○	○
圧裂試験	(0, 60°C) 突固め回数 50 回	○	○	○	○	○	○
	(20°C) 突き固め回数 75 回	○	○	○	○	○	○
ホイールトラッキング疲労試験	○	○	○	○	○	○	○
高温カンタブロ試験	○	○	○	○	○	○	○
再生 As (設計針入度 70) の性状試験※	○	○	○	○	○	○	○
回収 As の性状確認※	○	○	○	○	○	○	○

※ 性状試験：針入度，軟化点，伸度

#### (1) アスファルト性状試験

再生アスファルトの性状試験は，針入度，軟化点，および伸度 (15°C) について行った。また，針入度と軟化点から，針入度指数 (以下，PI) を算出した。PI は，アスファルトの感温性を示し，値が小さいほど感温性が高く，値が大きいほど感温性が低いとされている<sup>10)</sup>。

#### (2) 圧裂試験

再生混合物の耐流動性や耐ひび割れ性を把握するため，舗装調査・試験法便覧<sup>5)</sup>B064 に従って圧裂試験を行った。試験温度は低温：0°C，常温：20°C，高温：60°Cとした。

#### (3) 高温カンタブロ試験

これまでの研究から，高温時の再生アスファルトの接着力が繰り返し劣化・再生により低下し，繰り返し再生回数が多く，再生骨材配合率が高いほど高温時のカンタブロ損失率が高くなる傾向になることがわかっている。本研究でも，供試体温度 60°Cで行う高温カンタブロ試験を実施した。なお，試験機の内壁温度はヒーターを用いて 30°Cになるように調整した。

### 2.3.5. 評価結果

#### (1) 再生アスファルトの性状

図 2.23～図 2.25 に再生アスファルトの軟化点，伸度，PI を示す。なお，本文中や凡例において，例えば地域 a の針入度 21 の再生骨材を添加剤 A で再生した再生アスファルトおよび再生混合物は「A21a」と表記している。

#### a) 軟化点

図 2.23 に再生アスファルトの軟化点を示す。新規混合物(再生骨材配合率 0%)と比較すると，旧アスファルト針入度 20 以上の場合は再生骨材配合率 60%以上で軟化点は上昇し，旧アスファルト針入度 20 未満の場合は再生骨材配合率の増加とともに軟化点は上昇する傾向にあった。特に，B24c および B16c は，再生骨材配合率 0%から 80%で軟化点は最大で 5℃上昇していた。これまでの検討と同様に，劣化アスファルトに添加剤および新アスファルトを加えて設計針入度に調整しても，新規アスファルト(再生骨材配合率 0%)よりも軟化点は高くなる場合があることが確認できた。

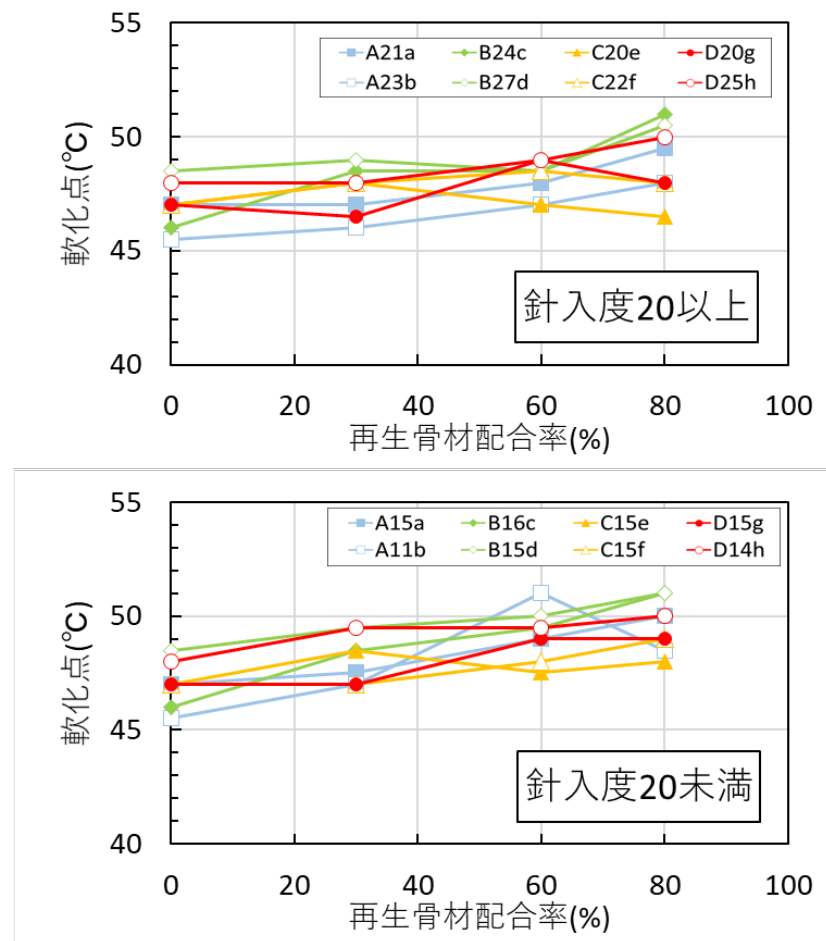


図 2.23 再生アスファルトの軟化点



b) 伸度

図 2.24 に再生アスファルトの伸度 (15°C) を示す。旧アスファルト針入度 20 以上の再生アスファルトの伸度は、D25h (再生骨材配合率 80%) のみ 60cm に低下し、他の再生アスファルトは 100cm 以上となった。

旧アスファルト針入度 20 未満のいくつかの再生アスファルトでは、再生骨材配合率が高くなるほど伸度が低下した。特に、D14h (再生骨材配合率 80%) は伸度 20cm 以下になった。

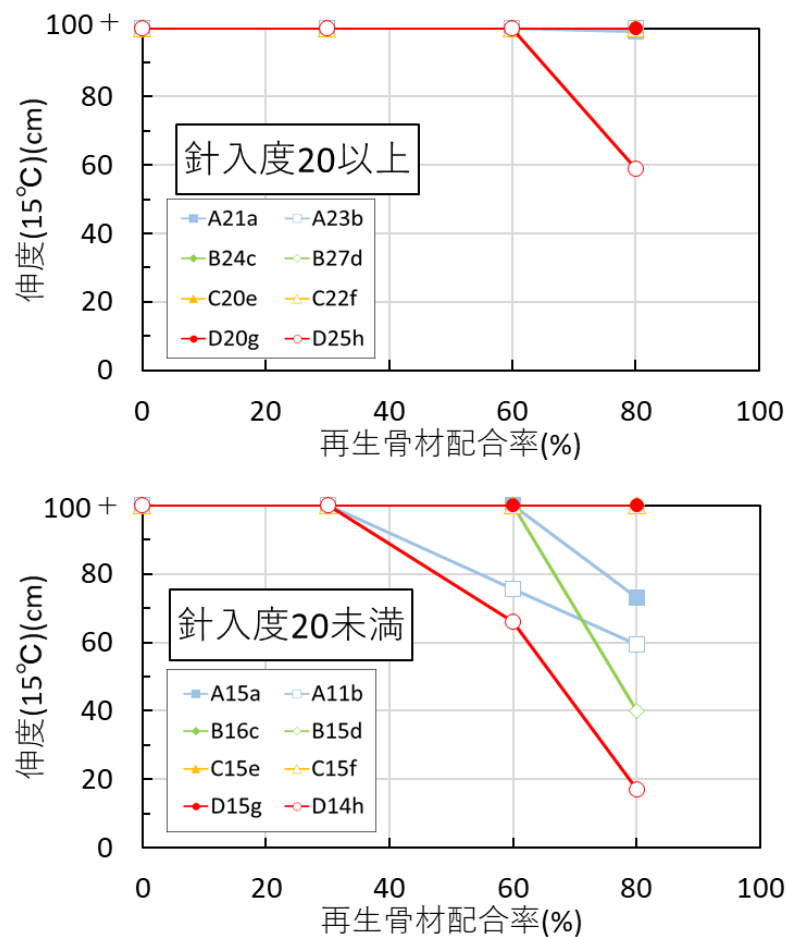


図 2.24 再生アスファルトの伸度

c) 針入度指数 (PI)

図 2.25 に再生アスファルトの PI を示す。一般的な舗装用石油アスファルトの PI は文献によって異なるが、およそ $-1.5 \sim -0.5$  または  $-2.0 \sim +2.0$  とされている。本研究で得られた PI は、それらの範囲に収まったが、再生骨材配合率が高くなるほど値は大きくなっており、感温性の低下が確認された。この PI の変化は、低温や高温時の混合物性状に影響を与えらる。なお、地域 g (D20g および D15g) は針入度が他の再生アスファルトよりも低かったため PI も低くなったが、再生骨材配合率が高くなるほど PI が大きくなる傾向は他の再生アスファルトと同じであった。

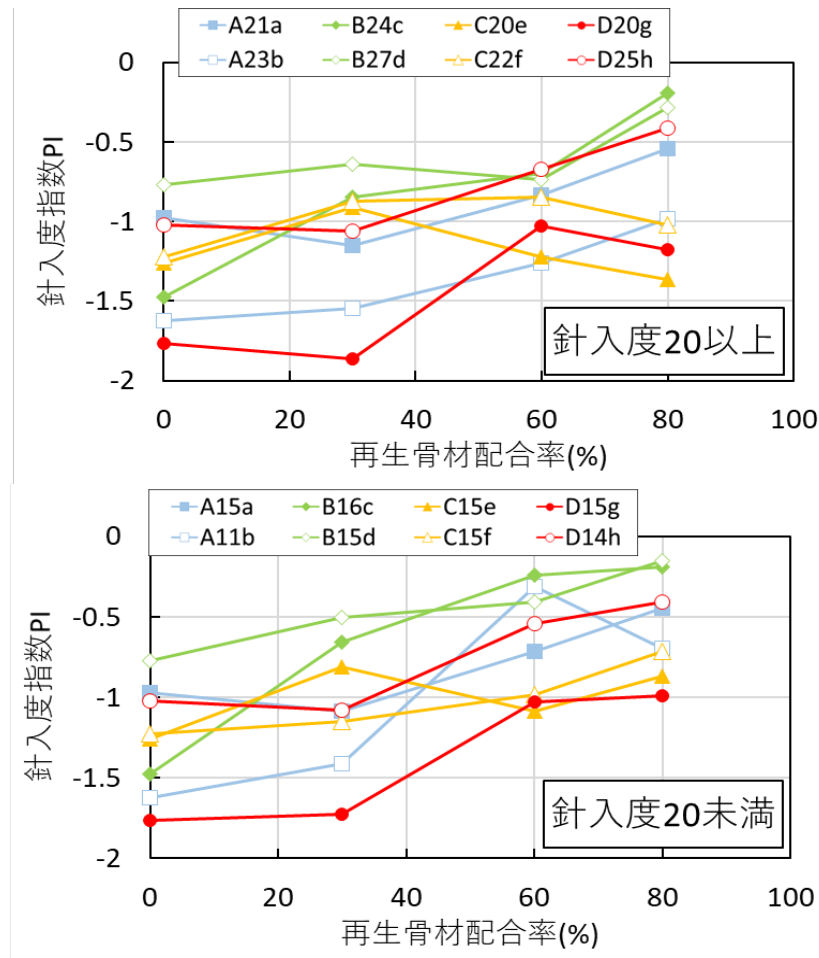


図 2.25 再生アスファルトの針入度指数 (PI)

(2) 圧裂試験の結果

a) 圧裂強度

図 2.26 に低温条件 (0°C) での圧裂強度を示す。低温においては、旧アスファルト針入度 20 以上の再生混合物は、再生骨材配合率が変化しても、添加剤の種類に関わらず、圧裂強度は横ばいとなった。一方、旧アスファルト針入度 20 未満の再生混合物は、再生骨材配合率 60%以上で圧裂強度の値が下がる再生混合物が確認された。

図 2.27 に常温条件 (20°C) での圧裂強度を示す。常温においては、再生骨材配合率の増加とともに、圧裂強度がやや低下する傾向となった。低下の度合いは、旧アスファルト針入度 20 以上の再生混合物よりも、旧アスファルト針入度 20 未満の再生混合物の方がやや大きい結果となった。特に、飽和分が比較的多い添加剤 B および D を使用した B15d および D14h で低下の度合いが大きくなった。

図 2.28 に高温条件 (60°C) での圧裂強度を示す。高温においては、旧アスファルト針入度や再生骨材配合率に関わらず、再生骨材配合率 0%と同程度の値を示したが、一部の再生混合物では、再生骨材配合率の増加とともに圧裂強度は増加した。

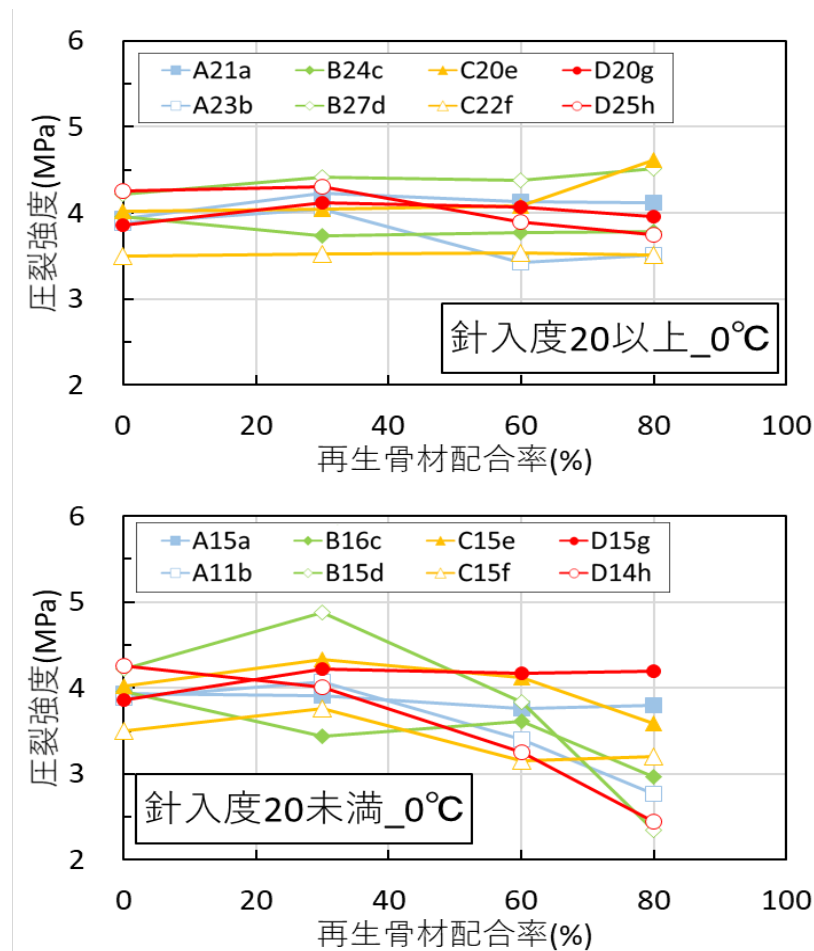


図 2.26 再生アスファルト混合物の圧裂強度 (0°C)

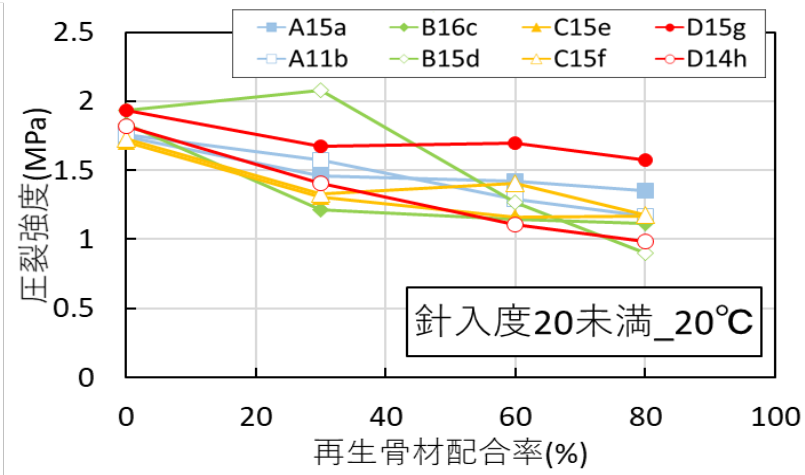
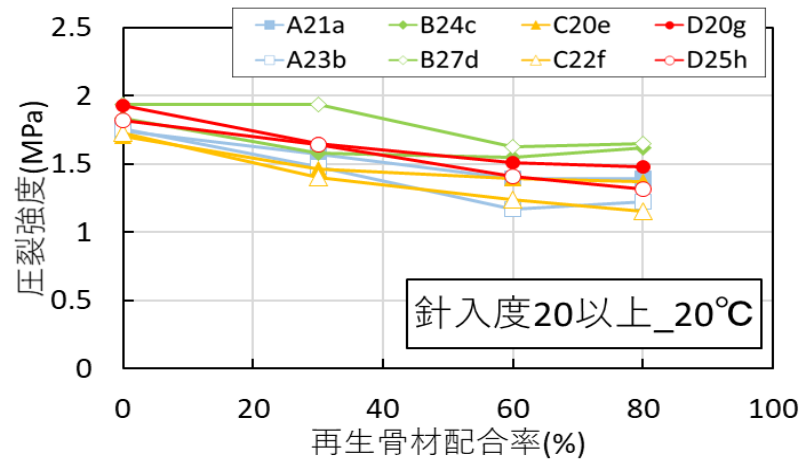


図 2.27 再生アスファルト混合物の圧裂強度 (20°C)

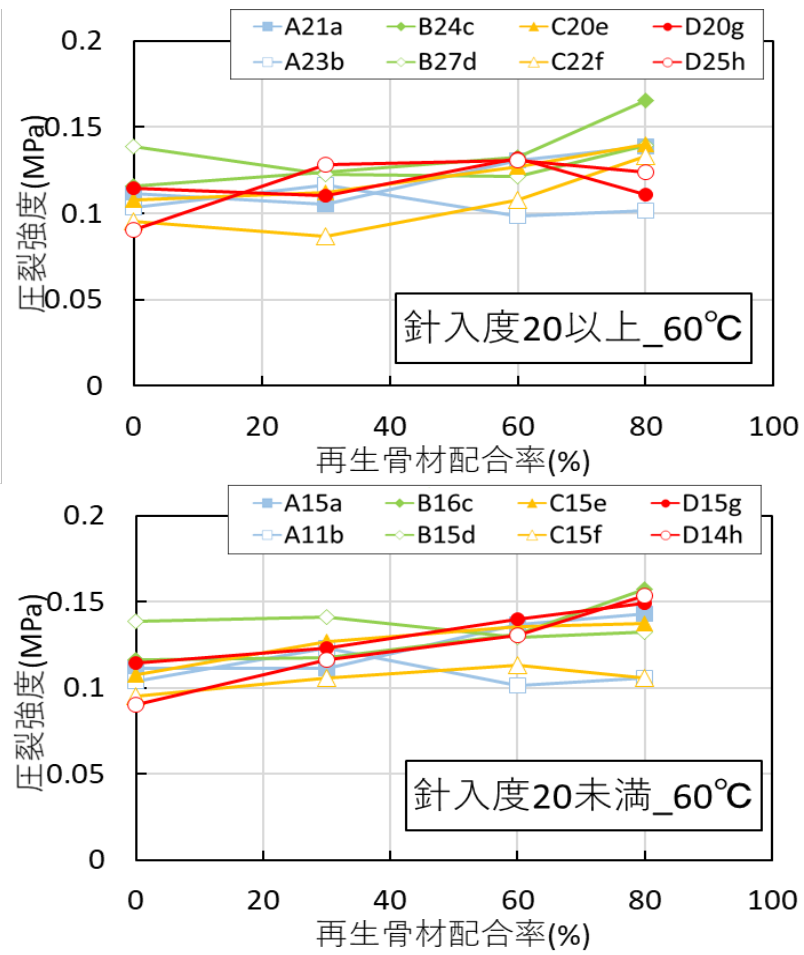


図 2.28 再生アスファルト混合物の圧裂強度 (60°C)

b) 圧裂強度比

1) 再生骨材配合率と添加剤が圧裂強度比に及ぼす影響

圧裂強度比は、0°Cの圧裂強度を60°Cの圧裂強度で除した値であり、値が大きいとわだち掘れが発生しやすく、小さいとひび割れが生じやすいとされている。過去の報告<sup>1)</sup>では、圧裂強度比が20程度まで低下すると多くの実道でひび割れが発生しており、10以下になるとひび割れ抵抗性がさらに低下すると推察される。また、前節での報告において、室内での繰り返し劣化・再生回数の増加にともなって、圧裂強度比は減少し、その傾向は再生骨材配合率が高く、芳香族分よりも飽和分が比較的多い添加剤を使用した再生混合物で顕著であった。

図 2.29 に本研究で得られた圧裂強度比を示す。本研究においても、過去の報告と同様に、再生骨材配合率が高くなるほど、圧裂強度比は低下する傾向となった。旧アスファルト針入度20未満かつ添加剤B、Dの再生混合物でその傾向は顕著であり、特に、B16c、B15dおよびD14hの再生骨材配合率80%で圧裂強度比が20以下となった。これらは、他の再生混合物に比べてひび割れが生じやすいと考えられた。

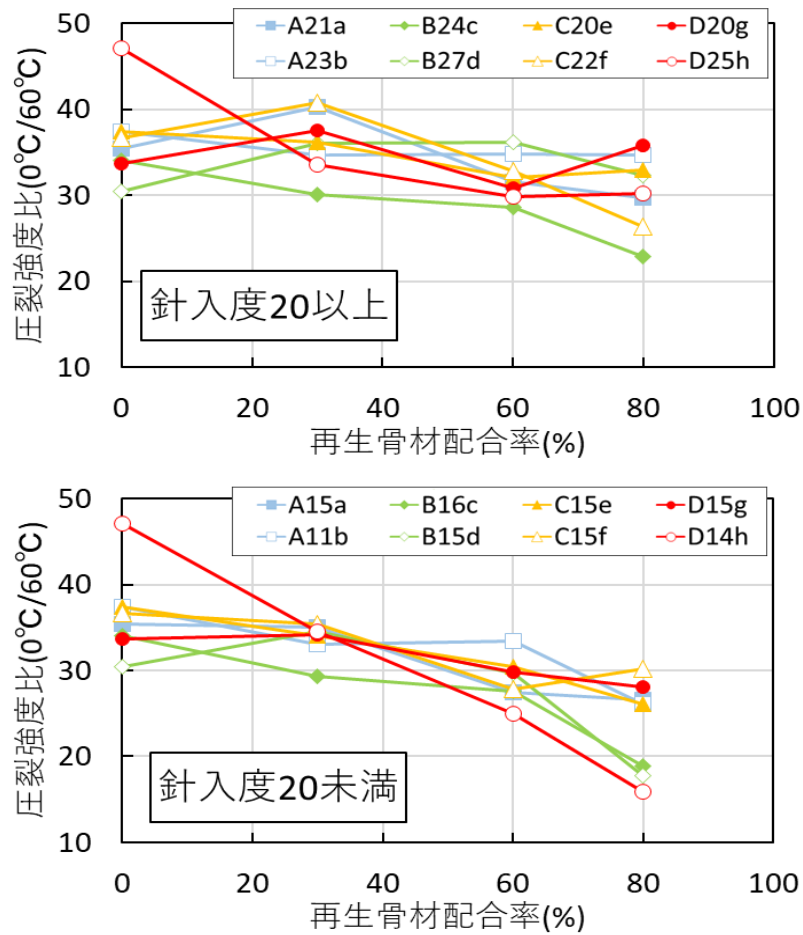


図 2.29 再生アスファルト混合物の圧裂強度比

## 2) 針入度指数 (PI) と圧裂強度比

圧裂強度比はアスファルト混合物の感温性を示すとされており、また、PIはアスファルトの感温性を示すとされている。圧裂強度比は値が小さいほど、PIは値が大きいほど感温性が低いとされている。

図 2.30 に本研究で得られた PI と圧裂強度比の関係を示す。図より、PI が大きいほど、圧裂強度比は小さくなる傾向が得られた。アスファルトの劣化の程度ごとに整理すると、旧アスファルト針入度 20 未満、旧アスファルト針入度 20 以上、再生骨材配合率 0% (新規アスファルト) の順で PI が大きい傾向が得られた。特に、ひび割れが生じやすいとされている圧裂強度比 20 未満の再生混合物は、PI が比較的大きい値となった。再生アスファルトの感温性の低さが再生混合物のひび割れの生じやすさに影響したと考えられた。

ただし、前述のとおり、一般的に舗装用アスファルトの PI はおよそ  $-1.5 \sim -0.5$  または  $-2.0 \sim +2.0$  とされている。本研究で得られた PI も概ねその範囲内であるため、PI のみでひび割れの生じやすさを評価することは困難であると考えられる。

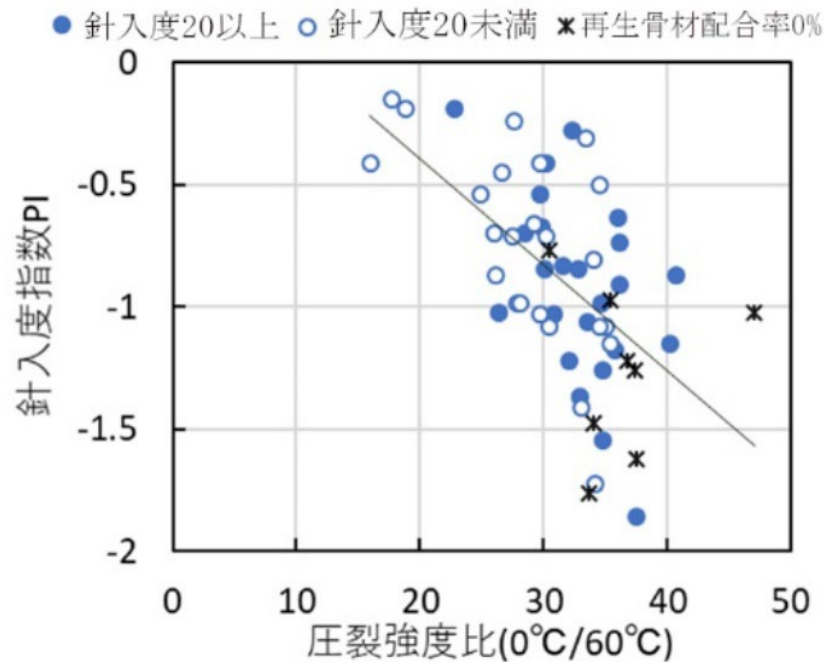


図 2.30 針入度指数と圧裂強度比

### (3) 高温カンタブロ試験の結果

高温カンタブロ試験は、ホイールトラッキング試験機を用いた疲労試験と高い相関が確認され<sup>4)</sup>、高温時のひび割れ抵抗性の評価に用いることができる可能性がある。また、前節より高温カンタブロ損失率と圧裂強度比は高い相関があり、圧裂強度比 20 以下で高温カンタブロ損失率が増加する傾向が見られた。一方、アスファルト性状の一つである伸度 (15°C) は、10cm 以下となった場合、路面のひび割れ率が増加する傾向にあるとされている。

ここでは、本研究で得られた高温カンタブロ損失率について、再生骨材配合率と添加剤がおよぼす影響、再生アスファルトの伸度との関係、および圧裂強度比との関係を確認した。なお、圧裂強度比との関係については、前述した高温カンタブロ損失率と圧裂強度比の相関が、本研究のような実再生骨材から作製した再生混合物においても適用されるのかを確認するとともに、高温カンタブロ損失率と圧裂強度比について、ひび割れ抵抗性の評価指標として適用可能か検討した。

#### a) 再生骨材配合率と添加剤が高温カンタブロ損失率におよぼす影響

図 2.31 に再生骨材配合率と高温カンタブロ損失率の関係を添加剤ごとに示す。旧アスファルト針入度に関わらず、再生骨材配合率が高くなるほど、高温カンタブロ損失率は高くなる傾向となった。特に、旧アスファルト針入度 20 未満の場合は再生骨材配合率 60%以上で値が上昇した。その傾向は芳香族分が多い添加剤 A よりも飽和分が比較的多い添加剤 B, C, D でより顕著であった。特に、飽和分が最も多い添加剤 D を用いた再生混合物 (D14h) では、再生骨材配合率 80% で損失率が最も高い値 (6.9%) となった。

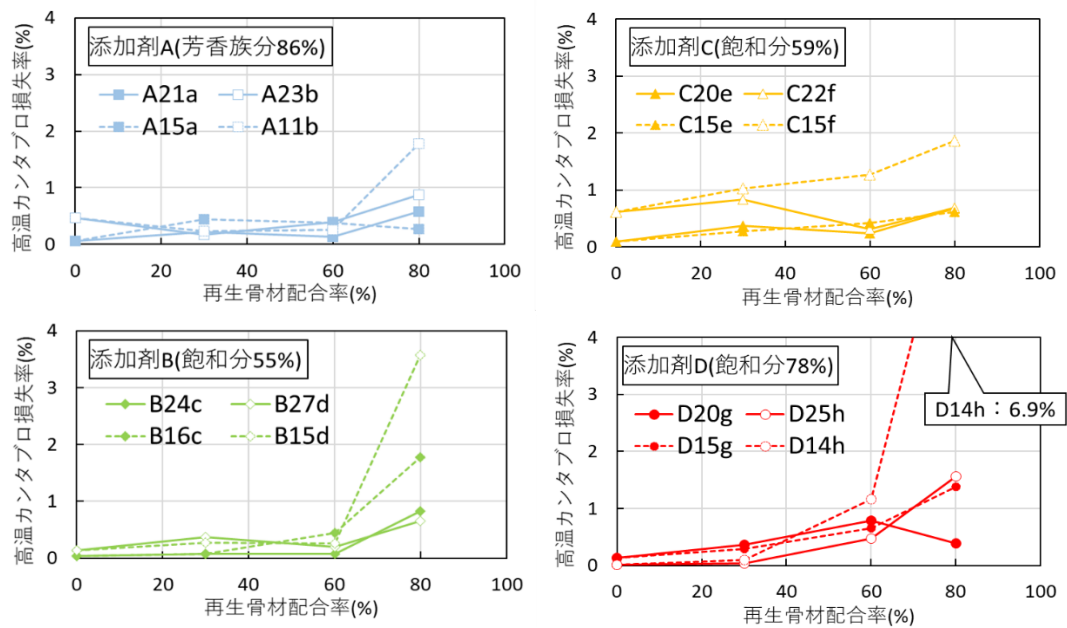


図 2.31 高温カンタブロ損失率



b) 再生アスファルトの伸度と高温カンタブロ損失率の関係

図 2.32 に再生アスファルトの伸度と高温カンタブロ損失率の関係を示す。なお、伸度 100cm 以上の再生アスファルトは、伸度 100cm の位置にプロットしている。

伸度の値が小さいほど、高温カンタブロ損失率が大きくなった。飯島らの報告<sup>12)</sup>では、伸度 10cm 以下になった場合、路面のひび割れ率が急速に増加するが、10cm 以上の場合ではひび割れはほとんど発生していなかった。

本研究では、伸度 10cm 以下の再生アスファルトは得られなかったが、伸度 60cm 以下から徐々に高温カンタブロ損失率は増加しており、伸度 10cm 以下ではさらに増加すると推察される。

図 2.24 および図 2.32 に示される伸度 100cm 未満の再生アスファルトに着目すると、これらは再生骨材配合率 60%または 80%であり、旧アスファルト針入度 20 未満の再生混合物が多く、添加剤は A, B, C または D を用いていた。これらのことから、伸度の低下は、再生骨材配合率や旧アスファルトの性状が大きく影響しており、添加剤による明らかな傾向は得られなかった。これは、60°Cで行っている高温カンタブロ試験に対し、伸度試験を行う 15°Cでは、添加剤の成分差異による影響が現れにくかったためと考えられる。添加剤が再生アスファルト（または再生混合物）におよぼす影響は、前項で述べたように高温時においてより顕著に現れると考えられる。

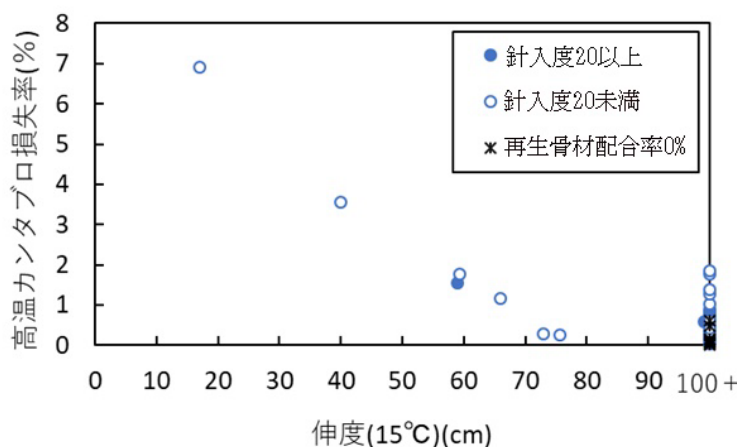


図 2.32 伸度と高温カンタブロ損失率の関係

c) 圧裂強度比との関係

図 2.33 に圧裂強度比と高温カンタブロ損失率の関係を示す。既往研究と同様に、高温カンタブロ損失率は圧裂強度比 20 以下で大きく上昇したことから、累乗関数に近似できるとし、高温カンタブロ損失率を目的変数、圧裂強度比を説明変数として近似式を算出し、その二乗平均平方根誤差 (RMSE : Root Mean Square Error) を求めた。得られた RMSE は 0.561%であり、これまでの研究と同様に高い相関を示した。

再生骨材配合率 0% (新規混合物) では、圧裂強度比が 30 以上かつ、高温カンタブロ損失率が低いことが分かる。旧アスファルト針入度 20 以上の再生混合物は、圧裂強度比が 20 以上で、高温カンタブロ損失率が再生骨材配合率 0%よりもやや高い値を示していた。旧アスファルト針入度 20 未満の再生混合物では、一部の再生混合物で圧裂強度比 20 以下となり、それにとまって高温カンタブロ損失率も大きくなっていった。

図中には、本試験で得られた高温カンタブロ損失率と圧裂強度比の近似曲線、および土木研究所が行った室内での繰り返し再生試験から得られた近似曲線を示している。どちらも圧裂強度比

20以下で高温カンタブロ損失率が増加していることが分かる。本研究の再生混合物は、全国のアスファルト混合所で実際に使用されている再生骨材から作製したものであるのに対し、既往研究の室内で劣化・再生した再生混合物は全て同じ材料を用い、室内実験で同じ条件で作製されたものである。前者は改質材などが含まれている可能性があることに対し後者は改質材を含まないこと、前者は繰り返し再生が行われているか不明なことに対し、後者は複数回繰り返し再生が行われているものが含まれていること、また、両者の再生骨材の形状や、旧アスファルトと添加剤、新アスファルトとの相溶性が異なっている。そのため、両者の近似式に差が生じたと考えられる。

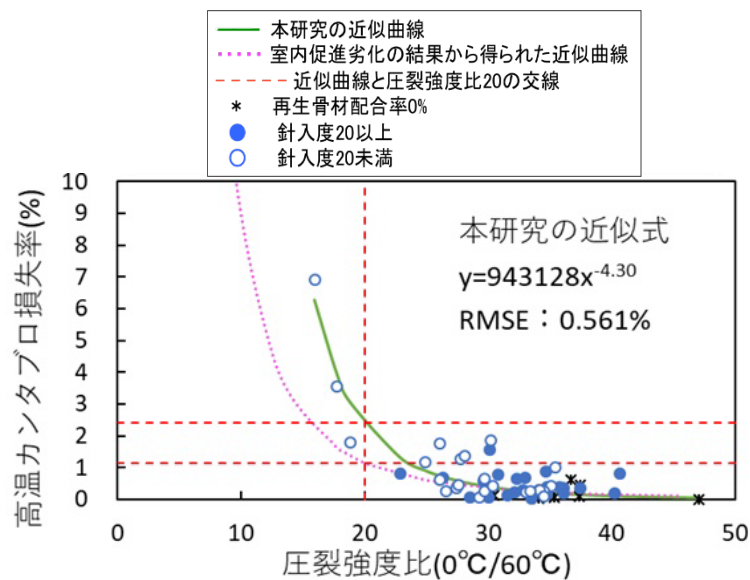


図 2.33 圧裂強度比と高温カンタブロ損失率の関係

d) 近似式から得られる高温時のひび割れ抵抗性の評価

前述のように二つの近似式は、一つは実際のアスファルト混合所で使用されている再生骨材(再生回数は不明)を用いた再生混合物、もう一つは室内で繰り返し劣化・再生した改質材を含まない再生混合物であることから、今回の評価では両方の近似式を採用し、再生混合物の高温時のひび割れ抵抗性を段階的に評価した。評価方法は、二つの近似曲線から、ひび割れが生じやすいとされている圧裂強度比 20 となる高温カンタブロ損失率の値を求め、それを高温時のひび割れが生じにくい範囲(以下、範囲)とした。表 2.11 は、それらの値を示すとともに、「ひび割れが生じにくい」と評価した範囲を白色(範囲内)、「ひび割れが生じやすい」と評価した範囲を色付き(範囲外)で示している。

表 2.12 および表 2.13 に圧裂強度比および高温カンタブロ損失率の試験結果の値、およびそれらの値を表 2.11 に記載した色分けにより整理したものを示す。これらの表より以下のことが確認された。

表 2.11 高温時のひび割れ生じやすさ

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

表 2.12 再生アスファルト混合物性状 (旧アスファルト針入度 20 以上)

試験項目	高温カンタブロ損失率 (%)				圧裂強度比 (0°C/60°C)			
	0	30	60	80	0	30	60	80
再生骨材配合率 (%)	0	30	60	80	0	30	60	80
A21a	0.05	0.21	0.13	0.58	35.4	40.2	31.6	29.7
A23b	0.46	0.17	0.39	0.88	37.5	34.7	34.8	34.7
B24c	0.04	0.07	0.07	0.83	34.1	30.1	28.5	22.9
B27d	0.14	0.37	0.250	0.65	30.5	36.0	36.1	32.3
C20e	0.09	0.37	0.24	0.68	37.4	36.1	32.1	33.0
C22f	0.62	0.83	0.31	0.69	36.7	40.7	32.9	26.3
D20g	0.13	0.37	0.78	0.39	33.7	37.5	30.8	35.8
D25h	0.01	0.04	0.47	1.56	47.1	33.5	29.8	30.2

表 2.13 再生アスファルト混合物性状 (旧アスファルト針入度 20 未満)

試験項目	高温カンタブロ損失率 (%)				圧裂強度比 (0°C/60°C)			
	0	30	60	80	0	30	60	80
再生骨材配合率 (%)	0	30	60	80	0	30	60	80
A15a	0.05	0.44	0.38	0.27	35.4	35.1	27.5	26.6
A11b	0.46	0.23	0.25	1.77	37.5	33.0	33.5	26.1
B16c	0.04	0.07	0.45	1.78	34.1	29.3	27.6	18.9
B15d	0.14	0.27	0.26	3.57	30.5	34.5	29.7	17.8
C15e	0.09	0.28	0.42	0.62	37.4	34.1	30.4	26.1
C15f	0.62	1.03	1.28	1.86	36.7	35.4	27.8	30.2
D15g	0.13	0.30	0.65	1.38	33.7	34.2	29.8	28.1
D14h	0.01	0.09	1.16	6.92	47.1	34.5	24.9	16.0

- ・ 旧アスファルト針入度 20 以上の再生混合物は、圧裂強度比については全て範囲内となり、飽和分を多く含む添加剤を用いた D25h (再生骨材配合率 80%) の高温カンタブロ損失率のみが範囲外となった。
- ・ 旧アスファルト針入度 20 未満の再生混合物では、芳香族分より飽和分が多い添加剤を使用し、再生骨材配合率が高い再生混合物で範囲外となる傾向になった。ただし、再生骨材配合率 30%以下の再生混合物は全て範囲内となった。加えて、添加剤の種類や発生材の地域によっては、再生骨材配合率 60%以上でも範囲内に収まる再生混合物があった。

なお、表 2.12 および表 2.13 より、圧裂強度比は範囲内であっても、高温カンタブロ損失率は範囲外となる場合がある。これは、先述のとおり本研究で行った高温時のひび割れ抵抗性の評価

には、今回得られた試験結果に加えて、既往研究の繰り返し再生による試験結果も反映させたためである。

### 2.3.6. まとめ

全国のアスファルト混合所で実際に使用されている再生骨材および成分の異なる添加剤を用いて、再生骨材配合率 0～80%で再生混合物を作製し、再生アスファルトの性状試験、圧裂試験、および高温カンタプロ試験を行った。ここで得られた知見を以下に示す。

- ・ 圧裂強度比は再生骨材配合率が高くなるほど減少する傾向にあった。特に、旧アスファルト針入度 20 未満の再生骨材、飽和分が比較的多い添加剤を使用した再生混合物でその傾向は顕著であり、圧裂強度比は 20 以下となった。
- ・ PI は、圧裂強度比が 20 以下の再生混合物の再生アスファルトで比較的大きな値となり、再生アスファルトの感温性が再生混合物の性状に影響することが確認された。
- ・ 高温カンタプロ損失率は、旧アスファルト針入度 20 未満の再生混合物で高くなった。その傾向は、再生骨材配合率が高く飽和分が比較的多い添加剤を使用した再生混合物においてより顕著であった。
- ・ 実際の再生骨材を用いた再生混合物でも、過去の研究結果と同様に、圧裂強度比と高温カンタプロ損失率は高い相関性があり、これらの試験が、再生混合物の高温時のひび割れ抵抗性の評価方法として適用できる可能性があることを確認した。
- ・ 圧裂強度比と高温カンタプロ損失率の近似式から、高温時のひび割れが生じにくい範囲を提案した。これらを用いることにより、適切な再生骨材配合率や添加剤の選定ができる可能性が得られた。

今後は、実路等による耐久性の検証を行うことによって、今回提案した評価方法や、範囲の値の妥当性を検証し、高温時のひび割れ抵抗性評価についてさらに検討する必要があると考えられる。

## 2.4. 試験施工等による長期耐久性・耐候性の把握

### 2.4.1. 試験施工の目的

繰り返し再生および実際の再生骨材を用いた室内試験で得られた再生アスファルト混合物（以下、再生混合物）の性状を検証することを目的として、実大供試体を用いた試験施工により各再生混合物の耐久性を調査した。

具体的には、旧アスファルト針入度の異なる再生骨材、各再生骨材配合率、組成成分の異なる再生用添加剤（以下、添加剤）を使用した再生混合物からなる工区を構築した後、荷重車による促進載荷試験を実施した。荷重車の走行により舗装に生じたわだち掘れやひび割れを調査した。また、施工時に混合物（以下、現場混合物）を採取して作製した供試体、および促進載荷試験後に現場から採取したコアを用いて各種室内試験を行い、性状を確認した。

### 2.4.2. 実大供試体の施工および調査の概要

図 2.34 に本研究のフローを示す。構築した試験工区は、路床、路盤、基層に用いる材料および舗装厚さを統一し、表層に様々な再生混合物を用いて施工した後、その上を荷重車により所定の疲労破壊輪数に達するまで走行させる促進載荷試験を行った。

また、表層施工時の混合物を用いた室内試験、促進載荷試験後の路面の破損状況、促進載荷試験後にコアを採取し、それを用いた室内試験を行った。

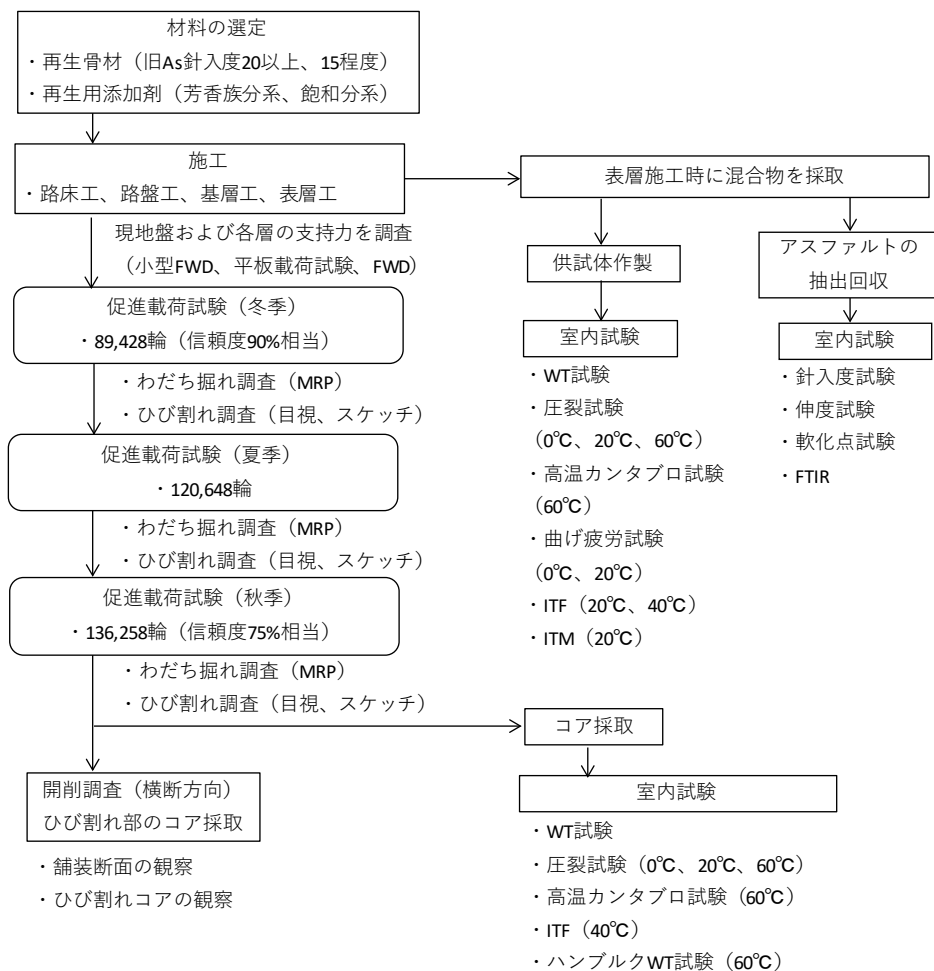


図 2.34 試験施工による再生混合物の耐久性評価フロー

### 2.4.3. 実大供試体の施工

#### (1) 施工概要

実大供試体の概要を以下に示す。また、図 2.35 および図 2.36 に試験施工箇所および工区図を示す。

- ・表層の施工 : 2021年1月17日
- ・施工場所 : 土木研究所舗装走行実験場（茨城県つくば市南原1-6）
- ・表層の舗装種 : 試験工区（合計6種）
  - ；密粒度アスファルト混合物（13）（ストレートアスファルト40～60）
  - ；再生密粒度アスファルト混合物（13）  
（再生骨材配合率，再生用添加剤，再生骨材を変えた5種）
- ：緩衝工区
  - ；密粒度アスファルト混合物（13）（ポリマー改質アスファルトII型）
- ・施工面積 : 試験工区；延長51m×幅5.5m=280.5m<sup>2</sup>  
：緩衝工区；延長8m×幅5.5m×2か所=88m<sup>2</sup>
- ・出荷プラント : 前田道路（株）土浦合材工場

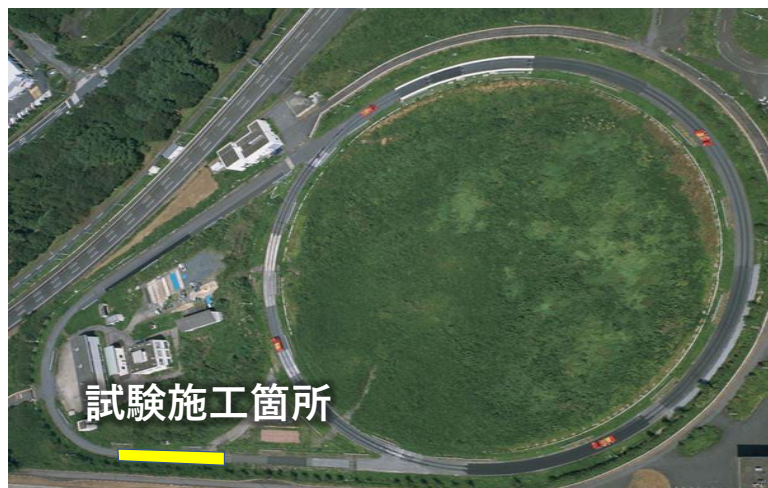


図 2.35 試験施工箇所



図 2.36 試験施工工区

(2) 使用材料

表 2.14, 表 2.15 に使用した再生混合物および添加剤の概要を示す。各再生混合物には旧アスファルト針入度が 21 または 20 未満 (14) の再生骨材を実際のアスファルト混合所から選定して用いた。使用した 2 種類の添加剤のうち, 添加剤 A は芳香族分が多く含まれており, 添加剤 B は飽和分が多く含まれている。

新規の密粒度アスファルト混合物には, ストレートアスファルト 40~60 を使用し, 新規骨材はプラントで使用しているものを用いた。

表 2.14 使用した再生骨材

使用工区	2	3~6
旧アスファルト針入度 (1/10mm)	21	14
旧アスファルト含有量 (%)	6.28	4.70

表 2.15 使用した再生用添加剤

使用工区		2~5	6
再生用添加剤		A (芳香族分)	B (飽和分系)
組成 (%)	芳香族分	73.1	14.8
	飽和分	23.9	78.6
	アスファルテン分	0.2	0.9
	レジジン	2.8	6.0

(3) 工区の概要

図 2.37, 表 2.16 に施工した工区の工区割と舗装断面図および設計条件を示す。延長 51m, 幅員 5.5m の試験工区を 6 工区に分け, 1 工区あたり延長 17m, 幅 2.75m とした。試験工区の両端には, 後述の荷重車走行時の緩衝工区 (延長 8.5m) を設けた。設計条件は, 交通量区分 N<sub>3</sub>, 設計 CBR=4 とし, T<sub>A</sub> は 15cm (必要 T<sub>A</sub> は 14cm) とした。疲労破壊輪数は, 各信頼度に対する T<sub>A</sub> の計算式から求めた。

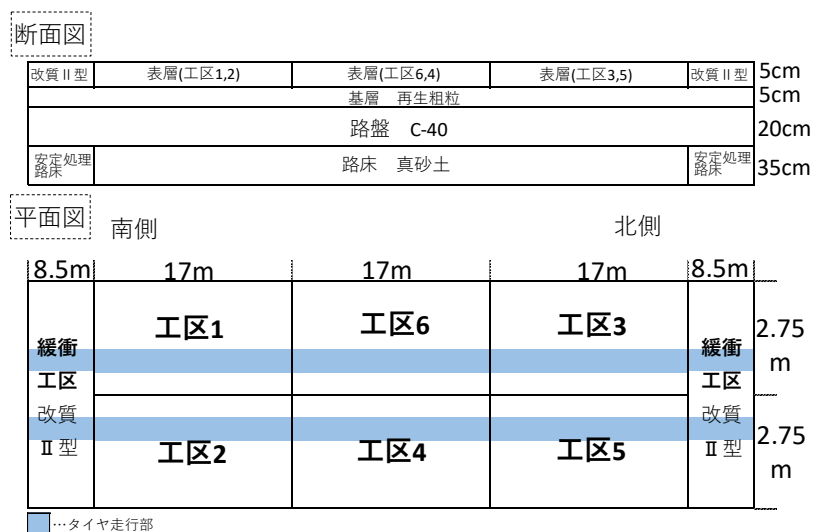


図 2.37 工区割と舗装断面図

表 2.16 設計条件

交通区分		N <sub>3</sub>
設計 CBR		4
必要 T <sub>A</sub>		15
疲労破壊輪数	信頼度 90%	67,199
	信頼度 75%	136,096

表 2.17, 表 2.18 に工区 1~6 の概要および混合物の合成粒度を示す。工区 1 は、ストレートアスファルト 40~60 を用いた密粒度混合物 (13) の新規工区である。工区 2~6 は、設計針入度 50 の再生密粒度アスファルト混合物 (13) とした。工区 2 は、一般的な再生混合物として、旧アスファルト針入度 21 の再生骨材で再生骨材配合率 60%とし、芳香族分系の添加剤を用いた。工区 3~5 は、旧アスファルト針入度 14 の再生骨材で再生骨材配合率 30, 60, 80%とし、工区 2 と同様の芳香族分系の添加剤を用いた。工区 6 は、工区 3~5 と同様に旧アスファルト針入度 14 の再生骨材であり、再生骨材配合率は 60%で、飽和分系の添加剤を用いた。

なお、構築した各層の支持力については、現地盤は小型 FWD (舗装調査・試験法便覧<sup>5)</sup> (以下、試験法便覧) S043-3), 路床と路盤は平板載荷試験 (試験法便覧 S042), 表層は FWD (試験法便覧 S047) によって測定した。各層、各工区の支持力に多少の違いはあるものの、顕著に異なる工区はなく、ほぼ均一であることを確認した (図 2.38)。

表 2.17 各工区の概要

工区	1	2	3	4	5	6	
設計針入度	50(1/10mm)						
再生骨材配合率 (%)	0	60	30	60	80	60	
旧 As 針入度 (1/10mm)	新規骨材	21	14				
再生用添加剤	—	A (芳香族分系)				B (飽和分系)	

表 2.18 各工区の混合物合成粒度と再生骨材の粒度

ふるい目の 開き (mm)	工区1	工区2	工区3	工区4	工区5	工区6	再生骨材	
	R率0%	R率60%	R率30%	R率60%	R率80%	R率60%	針入度21	針入度14
通	19	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
過	13.2	97.7	98.8	98.4	98.8	99.1	98.8	99.3
百	4.75	66.1	67.7	65.1	63.1	61.9	63.1	80.9
分	2.36	43.6	44.0	43.9	42.1	42.0	42.1	62.3
率	0.6	25.6	29.7	27.5	26.7	27.0	26.7	43.7
%	0.3	18.5	20.4	19.1	18.4	18.8	18.4	30.7
	0.15	10.5	11.2	10.8	10.8	11.5	10.8	17.5
	0.075	6.0	8.0	6.5	6.8	7.5	6.8	12.9

R 率：再生骨材配合率



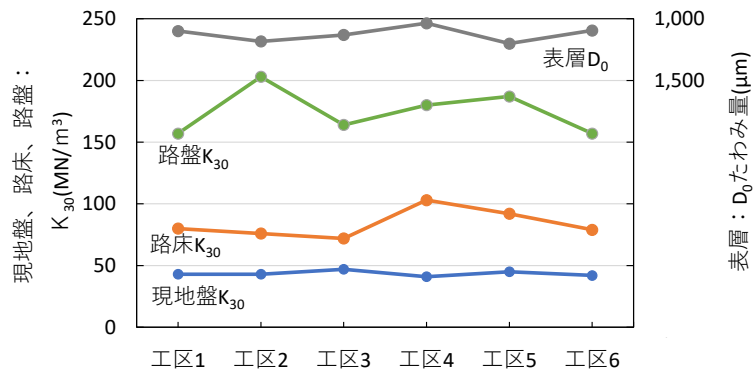


図 2.38 舗装の支持力

#### 2.4.4. 評価方法

##### (1) アスファルトおよび混合物の評価

実大供試体施工時に各工区の混合物（以下、現場混合物）を一部採取し、アスファルトの抽出回収および混合物試験の供試体作製を行い、各試験を行った。表 2.19 に試験項目を示す。なお、曲げ疲労試験の試験条件は、制御方式をひずみ制御、ひずみを 400 ( $\mu$ )、波形を正弦波、周波数を 5Hz、試験温度を 0 ( $^{\circ}$ C) とした。ここで、混合物試験の評価指標である圧裂強度比と高温カンタブロ損失率は、前述の第 2.3 節で、再生混合物の高温時のひび割れ抵抗性の評価として適用できる可能性を示した評価指標である。本節でもこれらの指標を用いて評価を行った。高温カンタブロ試験の試験条件は、供試体温度 60 $^{\circ}$ C、ロサンゼルス試験機内温度は 30 $^{\circ}$ C、ドラム回転数は 300 回転（毎分 30 回転）で行った。圧裂強度比は、0 $^{\circ}$ C の圧裂強度比を 60 $^{\circ}$ C の圧裂強度比で除した値である。

表 2.19 現場混合物を用いた試験項目と評価指標

試験項目	準拠した試験法	評価指標
針入度試験	舗装調査・試験法便覧 A041	針入度 (1/10mm)
軟化点試験	舗装調査・試験法便覧 A042	軟化点 ( $^{\circ}$ C)
伸度試験	舗装調査・試験法便覧 A043	伸度 (mm)
赤外分光法 (IR) による分析	—	カルボニルインデックス SBS の有無
ホイールトラッキング試験	舗装調査・試験法便覧 B003	動的安定度 (回/mm)
圧裂試験	舗装調査・試験法便覧 B006	・圧裂強度 (MPa) (0 $^{\circ}$ C, 20 $^{\circ}$ C, 60 $^{\circ}$ C) ・圧裂強度比 (0 $^{\circ}$ C/60 $^{\circ}$ C)
高温カンタブロ試験	舗装調査・試験法便覧 B010, (ただし、試験機内壁温度 30 $^{\circ}$ C, 供試体温度 60 $^{\circ}$ C とした)	高温カンタブロ損失率 (%)
曲げ疲労試験	舗装調査・試験法便覧 B018T	破壊回数 (回) (0 $^{\circ}$ C)
Indirect Tensile Fatigue Test (ITF)	EN 12697-24:2018	破壊回数 (回) (20 $^{\circ}$ C, 40 $^{\circ}$ C)
Indirect Tensile Modulus Test (ITM)	EN 12697-26:2018	スティフネスモデュラス (MPa) (20 $^{\circ}$ C)

## (2) 促進载荷試験

実大供試体施工後、荷重車による促進载荷試験を行った。表 2.20 および写真 2.3 に概要およびその状況を示す。走行は冬季に開始し、夏季、秋季の順で行った。走行輪数(49kN換算)は、表 2.16 に示す信頼度 90%および 75%の疲労破壊輪数相当を目安とした。

荷重車は、試験工区の横断方向中央部の左右 1m の位置(図 2.37 に示すタイヤ走行部)を 20km/h で前進・後進を繰り返しながら走行した。構築した工区の両端には、前進・後進の切り替えによる舗装への影響を考慮して緩衝工区を設けた。走行方向は、走行開始 15 日間は南方向を前方としたが、前進・後進の影響をさらに低減させるためそれ以降は 1 日毎に向きを変えて走行した。最大軸重は、冬季は路面のひび割れを確認しながら 127kN、157kN にて行い、夏季と秋季はアスファルト混合物層の流動を考慮して 98kN で行った。

表 2.20 促進载荷試験概要

季節	日数	走行輪数 (49kN換算)	累計輪数 (49kN換算)	最大軸重 (kN)	備考
冬季	15	49,159	49,159	127	信頼度 90%相当
	5	40,269	89,428	157	
夏季	20	31,220	120,648	98	
秋季	10	15,610	136,258	98	信頼度 75%相当



写真 2.3 促進载荷試験の状況

## (3) わだち掘れ量の調査

任意の走行輪数毎にわだち掘れ量を測定した。測定には、小型プロファイル測定装置(以下、MRP)を用いて、各工区の横断方向のわだち掘れ深さを測定した。測定箇所は各工区の延長方向 4.5m、8.5m、12.5m の位置で行い、工区のわだち掘れの平均を算出した。

また、生じたわだち掘れの詳細調査のため、促進载荷試験終了後に横断方向に長さ 5m×幅 10cm×深さ 10cm の開削調査を行った。

## (4) ひび割れの評価

各走行後に、路面のひび割れ状況を目視観察およびスケッチを行い、メッシュ法(試験法便覧

S029) によるひび割れ率を求めた。ただし、ひび割れの評価範囲はタイヤ走行部（わだち部）を含む幅 1m とし、延長方向は両端（工区境 1m）を除外した 15m とした。また、ひび割れの中央部と端部のコアを採取し、ひび割れの発生状況を確認した。

(5) 促進載荷試験終了後のコアの採取

促進載荷試験終了後（秋季、信頼度 75%相当）、各工区の非タイヤ走行部およびタイヤ走行部のコアを採取し、室内試験を行った。室内試験の概要を表 2.21 に示す。

表 2.21 現場コアを用いた試験項目と評価指標

試験項目	準拠した試験法	評価指標	採取位置
ホイール トラッキング試験	舗装調査・試験法便覧 B003	動的安定度 (回/mm)	非タイヤ走行部
圧裂試験	舗装調査・試験法便覧 B006	圧裂強度 (MPa) (0°C, 20°C, 60°C) 圧裂強度比 (0°C/60°C)	非タイヤ走行部
高温カンタプロ試験	舗装調査・試験法便覧 B010	高温カンタプロ損失率 (%)	非タイヤ走行部 タイヤ走行部
Indirect Tensile Fatigue Test (ITF)	EN 12697-24:2018	破壊回数 (40°C)	非タイヤ走行部
ハンブルクホイール トラッキング試験	AASHTO T324	SIP 走行回数(60°C) SIP 変形量(60°C)	非タイヤ走行部

2.4.5. 評価結果

(1) 施工性

試験舗装時における舗装面の仕上がり状況および観察結果は、表 2.22、表 2.23 に示すとおりである。

表 2.22 施工性の評価結果

項目	工区 1	工区 2	工区 3	工区 4	工区 5	工区 6
レーキ	良好	良好	良好	良好	やや重い	良好
仕上がり	良好	良好	良好	良好	やや粗い	肌理つぶれ
アスファルトの 付着状況	○	○	○	○	○	△

表 2.23 舗装面仕上がり状況および観察結果

		
<p>工区 1 (新規混合物) 初期転圧時ローラ下がり : 3~5mm 程度 二次転圧時の合材の動き : 小さい レーキ等作業観察 : 良好 施工基面仕上がり状況 : 良好</p>	<p>工区間の縦ジョイント部 先施工工区 1 ← → 後施工工区 2</p>	<p>工区 2 (再生骨材配合率 60%, 旧アスファルト針入度 21, 芳香族分系添加剤) 初期転圧時ローラ下がり : 1mm 程度 二次転圧時の合材の動き : やや大きい レーキ等作業観察 : 良好 施工基面仕上がり状況 : 良好</p>
		
<p>工区 6 (再生骨材配合率 60%, 旧アスファルト針入度 14, 飽和分系添加剤) 初期転圧時ローラ下がり : 1mm 程度 二次転圧時の合材の動き : 大きい レーキ等作業観察 : 良好 施工基面仕上がり状況 : トラッキング跡, きめ潰れあり</p>	<p>工区間の縦ジョイント部 先施工工区 6 ← → 後施工工区 4</p>	<p>工区 4 (再生骨材配合率 60%, 旧アスファルト針入度 14, 芳香族分系添加剤) 初期転圧時ローラ下がり : 1mm 程度 二次転圧時の合材の動き : やや大きい レーキ等作業観察 : 良好 施工基面仕上がり状況 : 良好</p>
		
<p>工区 3 (再生骨材配合率 30%, 旧アスファルト針入度 14, 芳香族分系添加剤) 初期転圧時ローラ下がり : 3mm 程度 二次転圧時の合材の動き : 小さい レーキ等作業観察 : 良好 施工基面仕上がり状況 : 良好</p>	<p>工区間の縦ジョイント部 先施工工区 3 ← → 後施工工区 5</p>	<p>工区 5 (再生骨材配合率 80%, 旧アスファルト針入度 14, 芳香族分系添加剤) 初期転圧時ローラ下がり : 1mm 程度 二次転圧時の合材の動き : 小さい レーキ等作業観察 : やや重い (温度低い) 施工基面仕上がり状況 : やや粗い (温度低い)</p>

## (2) 現場混合物の評価

### a) 抽出回収後のアスファルトの性状

現場混合物の抽出回収を行い、各アスファルトの性状試験を行った。表 2.24 に結果を示す。これらの結果は、混合物作製後の抽出回収されたアスファルトの性状であり、再生アスファルトの性状と異なるが、その傾向として、軟化点は混合物の再生骨材配合率が高くなるほど上昇し、伸度は再生骨材配合率が高くなるほど低くなる傾向となった。

また、赤外分光法（以下、IR）による抽出回収されたアスファルトの分析を行った。IR では、得られたカルボニル基（C=O）のピークである  $1700\text{cm}^{-1}$  付近に着目し、劣化前後でピーク高さの変化が少ない  $1600\text{cm}^{-1}$  付近のピーク高さとし、 $1700\text{cm}^{-1}$  高さの比から酸化劣化指標（カルボニルインデックス、以下  $I_{\text{CO}}$ ）を算出した。図 2.39 に各工区の  $I_{\text{CO}}$  を示す。 $I_{\text{CO}}$  は劣化の指標であり、本試験結果でも、再生骨材配合率が高いほど高い  $I_{\text{CO}}$  を示した。また、再生骨材配合率が同じで添加剤の異なる工区 4 と 6（芳香族分系と飽和分系）では、 $I_{\text{CO}}$  に大きな差は確認できなかった。

アスファルト中に SBS が含まれる場合、 $699\text{cm}^{-1}$  付近（スチレン）と  $965\text{cm}^{-1}$  付近（ブタジエン）にピークが生じる。本研究の IR で得られたピークには、全工区で SBS のピークは確認できなかった。使用した再生骨材には SBS が入っていない、または非常に少量しか含まれておらず、検出されなかったと考えられる。

表 2.24 アスファルトの性状

	工区 1	工区 2	工区 3	工区 4	工区 5	工区 6
再生骨材配合率(%)	0	60	30	60	80	60
針入度(1/10mm)	42	41	49	52	34	43
軟化点(°C)	53.0	55.9	53.1	53.6	59.5	53.2
伸度(cm)	53.3	17.2	53.6	36.3	5.4	28.1
カルボニルインデックス $I_{\text{CO}}$	0.22	0.59	0.38	0.58	0.77	0.65
SBS の有無	確認されず					

※実大供試体施工時に採取した混合物から抽出回収した後のアスファルト性状である。

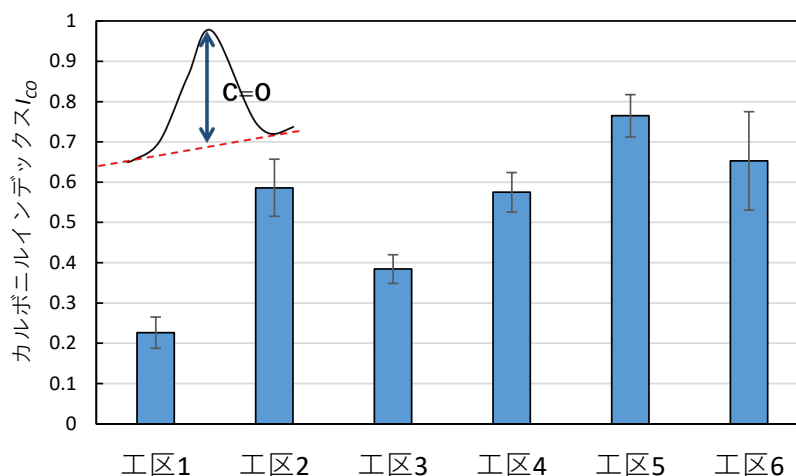


図 2.39 アスファルトのカルボニルインデックス  $I_{\text{CO}}$

b) ホイールトラッキング試験

図 2.40 に各工区の動的安定度を示す。再生骨材配合率が最も高い工区 5 (再生骨材配合率 80%) が、最も高い動的安定度となった。再生骨材配合率が高いほど、混合物の耐流動性が高くなることが知られているが、工区 3 (再生骨材配合率 30%) と工区 4 (再生骨材配合率 60%) が逆転した。この理由として、工区 3 の混合物作製中の劣化が考えられるが、詳細は不明である。

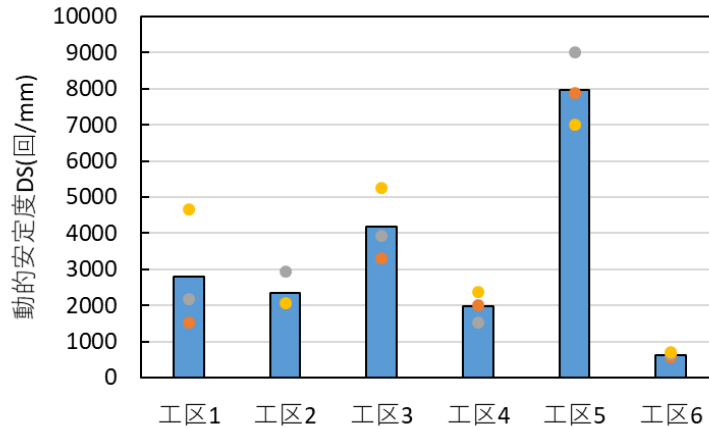


図 2.40 動的安定度

c) 圧裂試験

圧裂試験は 0°C, 20°C, 60°Cで行った。なお、作製した供試体の空隙率は 3.5~3.8%となり、ばらつきの少ない供試体が得られた。図 2.41~図 2.43 に圧裂強度の結果を示し、得られた傾向は以下に示すとおりである。

- ・新規と再生の差 (工区 1, 2) : 0°Cと 60°Cでは再生の方が圧裂強度大きく、20°Cでは新規の方が大きくなった。
- ・再生骨材配合率の差 (工区 1, 3~5) : 0°Cと 60°Cでは再生骨材配合率が高いほど圧裂強度が大きくなった。20°Cでは再生骨材配合率による傾向は得られなかった。
- ・旧アスファルト針入度の差 (工区 2, 4) : 全温度で、旧アスファルト針入度が低いと圧裂強度がわずかに低くなった。
- ・添加剤の差 (工区 4, 6) : 0°Cと 20°Cは、飽和分系と比較し、芳香族分系を添加した混合物が圧裂強度が若干高く、60°Cにおいては同程度の値であった。

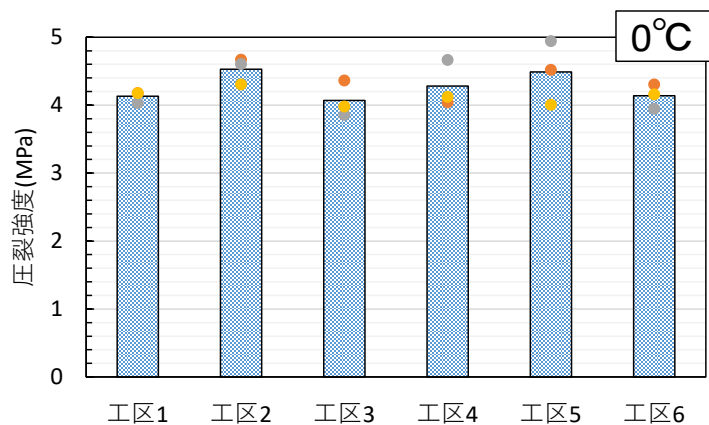


図 2.41 圧裂強度 (0°C)

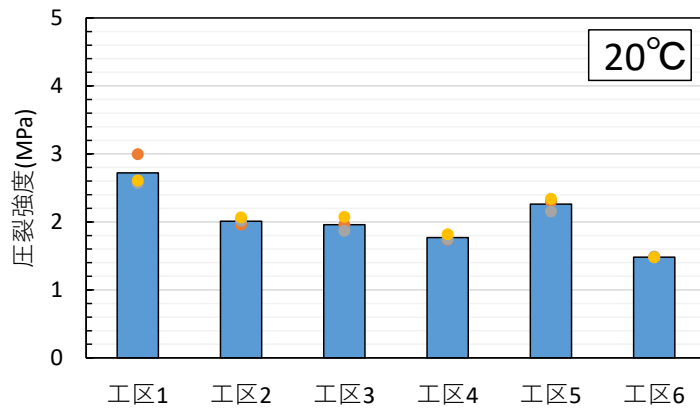


図 2.42 圧裂強度(20°C)

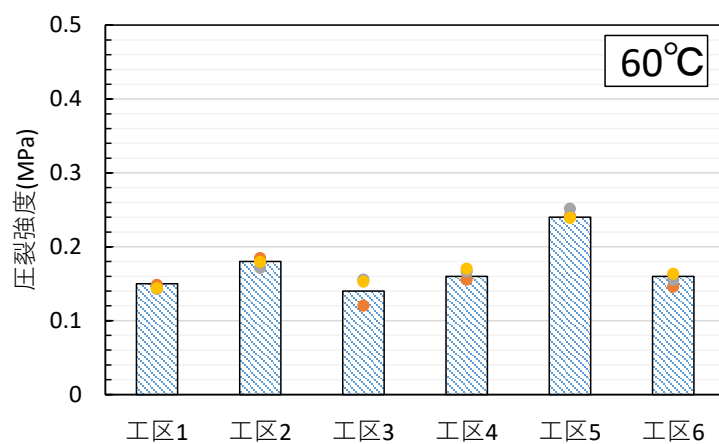


図 2.43 圧裂強度(60°C)

次に、図 2.44～図 2.46 に圧裂変位を示す。得られた傾向は以下に示すとおりである。

- 新規と再生の差（工区 1, 2）：全ての温度で、新規より再生の方がわずかに変位が大きく、その差は温度が高いほど大きくなった。
- 再生骨材配合率の差（工区 1, 3～5）：各温度で再生骨材配合率に関わらず一定の変位となった。再生骨材配合率よりも温度に影響していると考えられる（0°C ; 0.5mm 付近, 20°C ; 1.4mm 付近, 60°C ; 1mm 付近）。
- 旧アスファルト針入度の差（工区 2, 4）：再生骨材配合率と同様に、旧アスファルト針入度に関わらずほぼ変位であった。
- 添加剤の差（工区 4, 6）：0°C と 60°C では、芳香族分系よりも飽和分系の方が変位が大きく、20°C では添加剤によらずほぼ同じ変位となった。

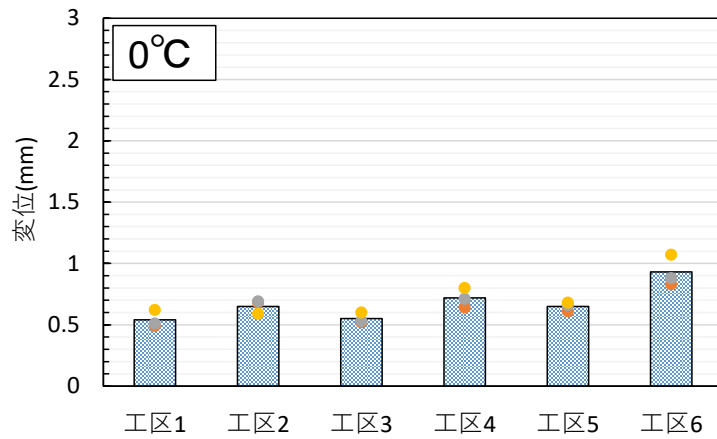


図 2.44 圧裂変位(0°C)

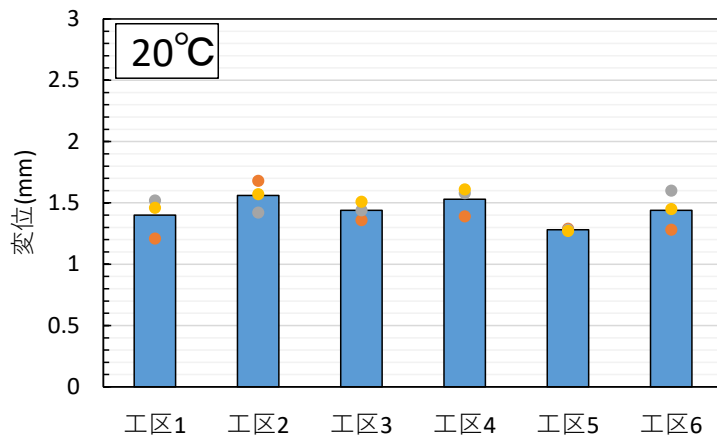


図 2.45 圧裂変位(20°C)

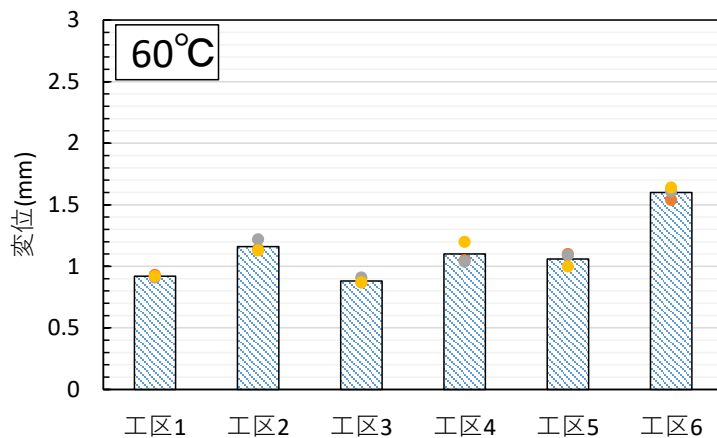


図 2.46 圧裂変位(60°C)

図 2.47～図 2.49 に圧裂係数を示す。得られた傾向は下記に示すとおりである。

- ・ 新規と再生の差 (工区 1, 2) : 0°Cと 20°Cでは, 新規の方が圧裂係数が大きく, 60°Cでは同等の値を示した。
- ・ 再生骨材配合率の差 (工区 1, 3～5) : 0°Cと 20°Cでは, 再生骨材配合率による傾向が確認で



きなかった。60℃では、再生骨材配合率 80%（工区 5）のみ圧裂係数が大きくなり、0～60%では同等の値を示した。

- ・ 旧アスファルト針入度の差（工区 2, 4）：0℃と 20℃では、旧アスファルト針入度が低いと圧裂係数が小さくなった。60℃では旧アスファルト針入度に関わらず、同程度の値を示した。
- ・ 添加剤の差（工区 4, 6）：全ての温度で飽和分系よりも芳香族分系の方が圧裂係数は大きくなった。

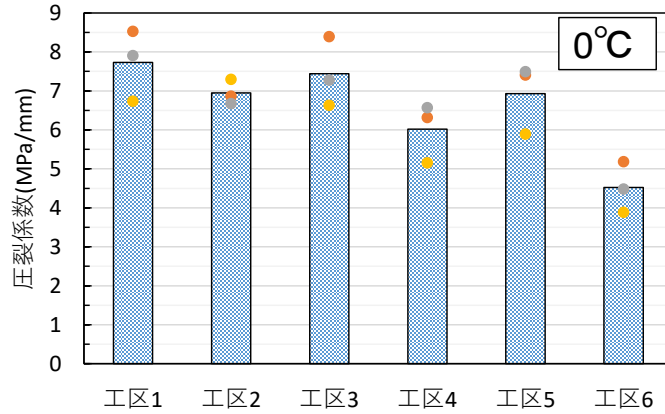


図 2.47 圧裂係数(0℃)

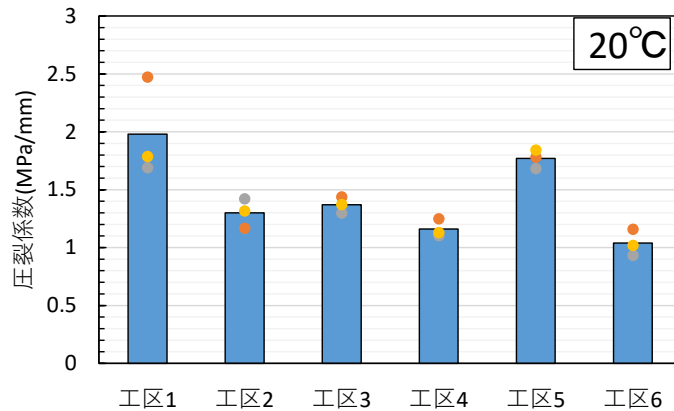


図 2.48 圧裂係数(20℃)

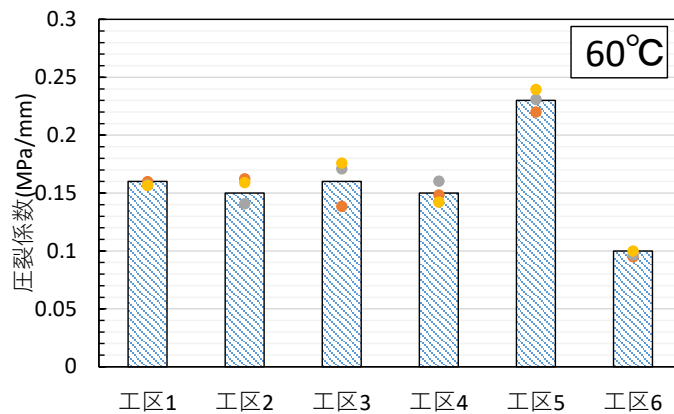


図 2.49 圧裂係数(60℃)

次に、圧裂強度比を求めた。圧裂強度比は0°Cの圧裂強度を60°Cの圧裂強度で除した値であり、アスファルト混合物の感温性を示すと考えられている。圧裂強度比が大きいとわだち掘れが発生しやすく、小さいとひび割れが生じやすいとされている。過去の報告<sup>14)</sup>では、圧裂強度比が20程度まで低下すると多くの実道でひび割れが発生しており、10以下になるとひび割れ抵抗性がさらに低下すると推察される。

図 2.50 に本研究で得られた圧裂強度比を示す。再生骨材配合率が最も高い工区 5 (再生骨材配合率 80%) が圧裂強度比 18.3 を示し、全工区で最も低い値となった。このことから、工区 5 はひび割れが生じやすいと考えられる。他の工区では再生骨材配合率が低いほど、圧裂強度比が大きくなる傾向があったが、添加剤や旧アスファルト針入度の差による傾向は得られなかった。

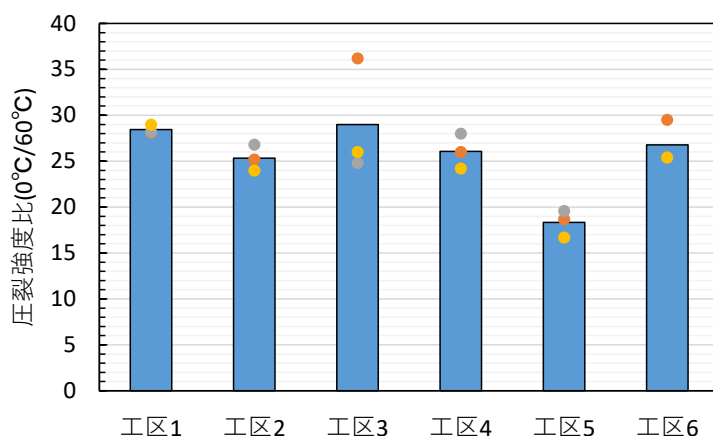


図 2.50 圧裂強度比 (0°C/60°C)

#### d) 高温カンタプロ試験

供試体温度 60°C でカンタプロ試験を行うことによって得られる高温カンタプロ損失率は、前述の圧裂強度比と合わせて、再生混合物の高温時のひび割れ抵抗性の評価として適用できる可能性がある。第 2.3 節では、室内で繰り返し劣化・再生した再生混合物、および各地域のアスファルト混合所で実際に使用されている再生骨材を用いた再生混合物の高温カンタプロ損失率を調べた結果、圧裂強度比 20 以下で高温カンタプロ損失率が増大することを確認し、これらの評価指標が再生混合物の高温時のひび割れ抵抗性の評価に適用できる可能性があることを報告している。

図 2.51 に表層施工時に採取した混合物による高温カンタプロ損失率を示す。再生骨材配合率 30~60% では、旧アスファルト針入度や添加剤によらず同程度の値 (平均 1% 以下) を示し、新規工区と比べてわずかに高い値となった。一方、再生骨材配合率 80% (工区 5) は、他工区よりも高温カンタプロ損失率が高く、平均で 2.8% を示した。

図 2.52 に表層施工時に採取した混合物による圧裂強度比と高温カンタプロ損失率の相関を示す。図中には、第 2.3 節の図 2.33 で示した室内で繰り返し劣化・再生した再生混合物および各地域のアスファルト混合所で実際に使用されている再生骨材を用いた再生混合物から得られた近似式も記す。表層施工時に採取した混合物による圧裂強度比と高温カンタプロ損失率は、各地域の再生骨材を用いた再生混合物で得られた近似式上にプロットされた。この結果と、促進載荷試験によって実際に生じたひび割れの関係については後述 (4) c) で報告する。

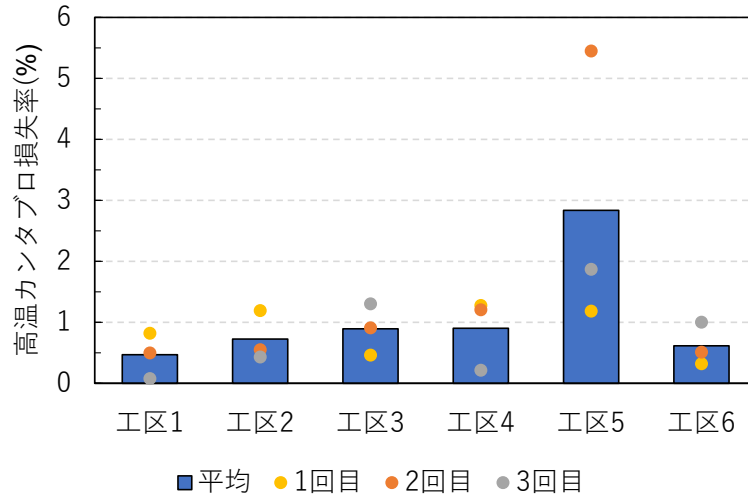


図 2.51 高温カンタプロ損失率 (60°C)

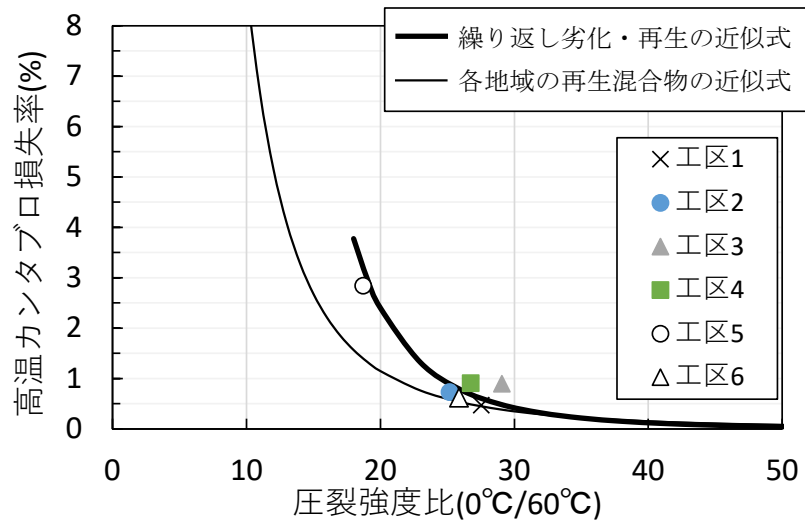


図 2.52 圧裂強度比と高温カンタプロ損失率

e) 曲げ疲労試験

表 2.25 に曲げ疲労試験の試験条件を、図 2.53 および図 2.54 に試験結果を示す。0℃と 20℃ どちらの温度でも、再生骨材配合率や旧アスファルト針入度、添加剤の差による傾向が得られなかった。これは、再生混合物のひび割れ抵抗性は高温時に低下すると考えられるため、低温や常温条件下での繰り返し曲げ疲労による破壊回数では傾向が確認できなかったと考えられる。

表 2.25 疲労試験の試験条件

制御方式	ひずみ制御
ひずみ ( $\mu$ )	400
波形	正弦波
周波数 (Hz)	5
試験温度 (°C)	0, 20

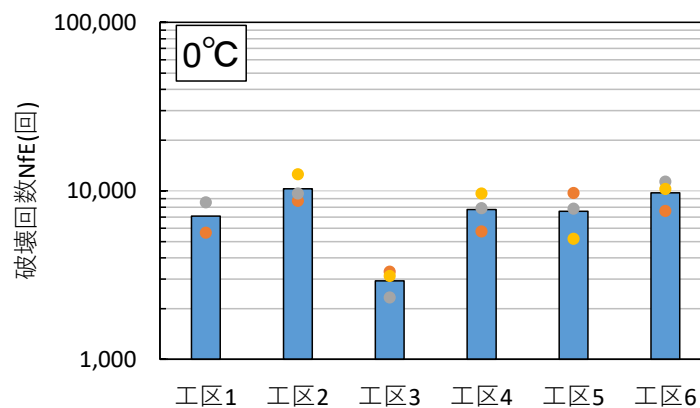


図 2.53 曲げ疲労試験における破壊回数 (0°C)

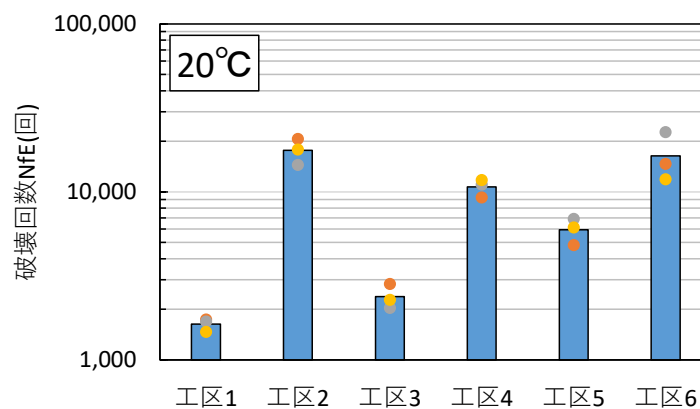


図 2.54 曲げ疲労試験における破壊回数 (20°C)

f) Indirect Tensile Fatigue Test (ITF)

Indirect Tensile Fatigue Test (以下、ITF) はマーシャル供試体で行う繰り返し荷重による疲労試験である。供試体側面から任意の荷重を与えることにより間接引張作用を再現して、破壊回数を測定する (写真 2.4)。表 2.26 に試験条件を、図 2.55 に試験結果を示す。破壊回数 (エネルギーレイシオ) について、以下の傾向が得られた。

- ・ 試験温度の差：40℃よりも20℃の方が破壊回数が多くなった。
- ・ 新規と再生の差（工区1, 2）：新規よりも再生の方が破壊回数が多くなった。
- ・ 再生骨材配合率の差（工区1, 3～5）：再生骨材配合率が高いほど、破壊回数が大きくなった。特に、20℃における再生骨材配合率80%（工区5）は、20万回載荷後も供試体が破損しなかった。
- ・ 旧アスファルト針入度の差（工区2, 4）：旧アスファルト針入度が低いと、破壊回数は若干少なくなった。
- ・ 添加剤の差（工区4, 6）：芳香族分系の添加剤を用いた工区4の方が、飽和分系の添加材を用いた工区6よりも破壊回数が若干高い。



写真 2.4 ITF 試験状況

表 2.26 ITF の試験条件

試験温度 (°C)	荷重 (kPa)
20	350
40	150

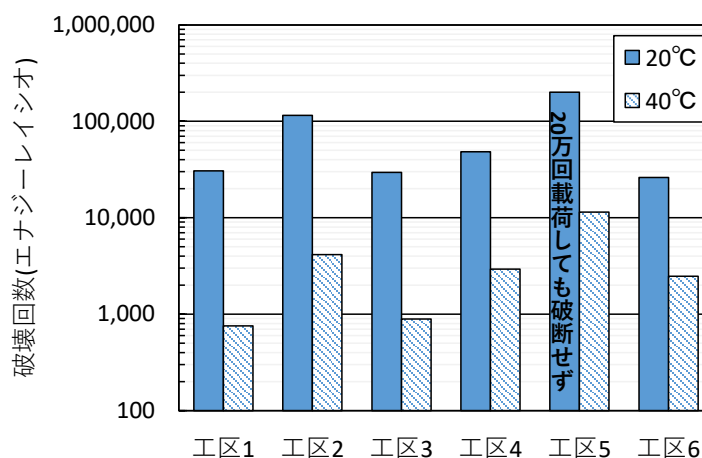


図 2.55 ITF における破壊回数 (エネルギーレイシオ)

### g) Indirect Tensile Modulus Test (ITM)

Indirect Tensile Modulus Test (以下、ITM) は、マーシャル供試体側面からハーバーサイン波の荷重を与えることにより間接引張作用を与え、アスファルト混合物のスティフネス（弾性係数）を測定する試験である。本試験では、試験温度 20℃で行い、治具は写真 2.4 に示す ITF と同様の物を用いて行った。図 2.56 に試験結果を示す。

スティフネスモデュラスは、再生骨材配合率が最も高い工区 5（再生骨材配合率 80%）が全工区で最も高い値を示した。次いで、工区 1, 3, 2, 4, 6 の順となり、本試験では再生骨材配合率の違い（工区 3, 4, 5）による傾向は得られなかった。一方、旧アスファルト針入度の比較（工区 2, 4）では、旧アスファルト針入度が低いと、スティフネスモデュラスが若干低くなる傾向が得られた。また、添加剤に芳香族分系を用いた工区 4 よりも、飽和分系を用いた工区 6 の方がスティフネスモデュラスが低くなった。

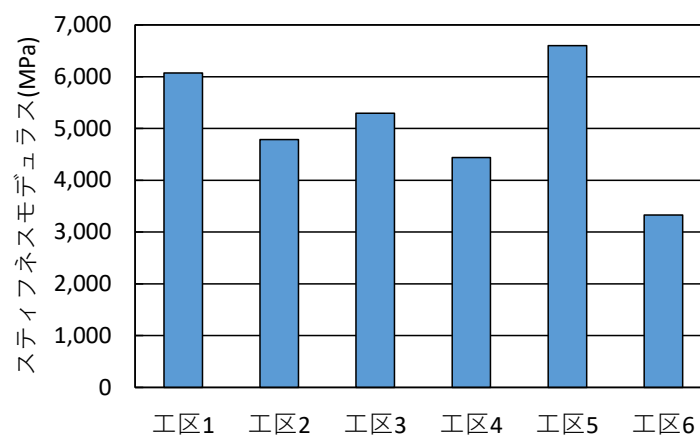


図 2.56 スティフネスモデュラス

### h) 現場混合物の評価のまとめ

実大供試体施工時に採取した現場混合物を用いて供試体を作製し、各室内試験を行った。得られた結果等を以下に示す。

- ・ 動的安定度は、再生骨材配合率 80%（工区 5）で高い値を示した。
- ・ 圧裂試験では、圧裂係数（60℃）において、再生骨材配合率 80%（工区 5）が他工区よりも高い値を示した。また、再生骨材配合率が高くなるほど圧裂強度比が低くなる傾向が得られた。
- ・ 高温カンタブロ損失率は、再生骨材配合率 30～60%は旧アスファルト針入度や添加剤によらずほぼ同じ値を示し、新規と比較しやや高い値を示した。再生骨材配合率 80%（工区 5）は最も高いカンタブロ損失率（2.8%）を示した。
- ・ 圧裂強度比と高温カンタブロ損失率との関係は、圧裂強度比 20 以下で高温カンタブロ損失率が上昇した。これは、第 2.3 節で得られた結果と同様であった。
- ・ 曲げ疲労試験では、試験温度 0℃または 20℃では混合物の種類による傾向が得られなかった。
- ・ ITF では、再生骨材配合率が高くなるほど破壊回数（エナジーレイシオ）が多くなった。
- ・ ITM では、旧アスファルト針入度が低い、または芳香族分系よりも飽和分系の添加剤の工区で、スティフネスモデュラスが若干低くなった。

### (3) 現場のわだち掘れ量の評価

促進载荷試験において、任意の走行輪数毎に MRP を用いて各工区の横断方向のわだち掘れ深さを測定した。測定は、図 2.57 に示す各工区の延長方向 4.5m, 8.5m, 12.5m の位置で行い、各工区のわだち掘れ平均量を算出した。図 2.58 に初期値を 0 としたわだち掘れ量を示す。

走行輪数の増加とともに、わだち掘れ量も増加した。走行試験全体を通して、わだち掘れが最も増加したのは再生骨材配合率が最も高い工区 5 (再生骨材配合率 80%) であった。次いで、工区 3, 2, 1, 6, 4 となった。

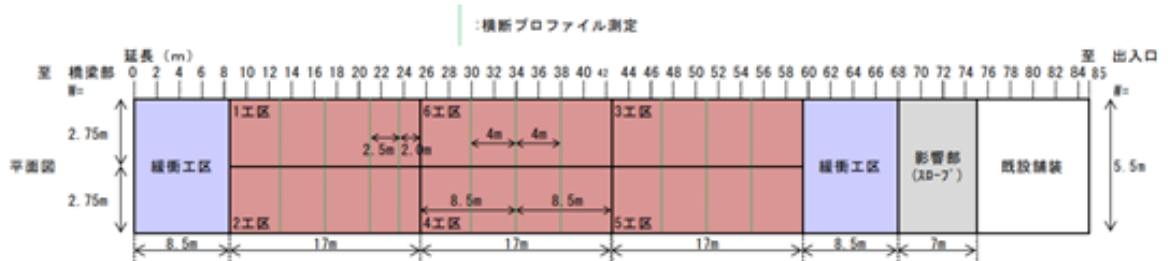


図 2.57 MRP によるわだち掘れ量測定位置

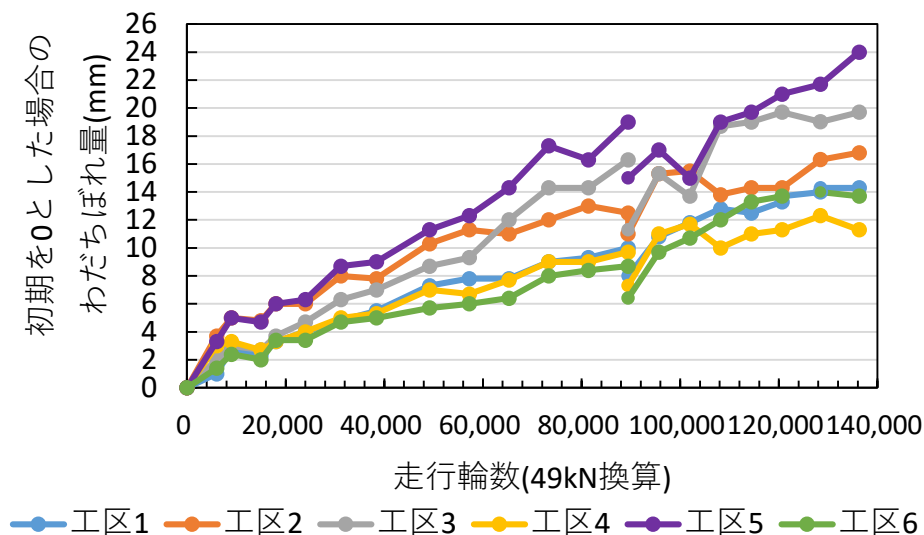


図 2.58 走行輪数毎のわだち掘れ量

また、現場混合物で作製した供試体で行ったホイールトラッキング試験の結果 (図 2.40) と、わだち掘れ量の関係を図 2.59 に示す。通常、動的安定度が小さいとわだち掘れ量は大きくなるが、本試験の結果は動的安定度の増加とともに、わだち掘れ量も増加した。

そこで、生じたわだち掘れの詳細調査のため、促進载荷試験終了後に舗装の開削調査を行った。開削は施工工区全体のほぼ中央に位置する工区 4, 6 と、わだち掘れ量が最も大きい工区 5 および隣接する工区 3 にて、横断方向に長さ 5m×幅 10cm×深さ 10cm で行った。開削位置を図 2.60 に示す。開削された舗装断面から、アスファルト混合物層 (表層および基層) の厚さを測定した。得られたアスファルト混合物層のスケッチ図を図 2.61 および図 2.62 に示す。これらスケッチ図から表層と基層の厚さはタイヤ走行部と非走行部によらず一定の値を示しており、わだち部のアスファルト混合物の流動が確認されなかった。この結果から、本促進载荷試験で生じたわだち掘れはアスファルト混合物層の流動ではなく、路盤層以下の沈下によるものだと考えられる。

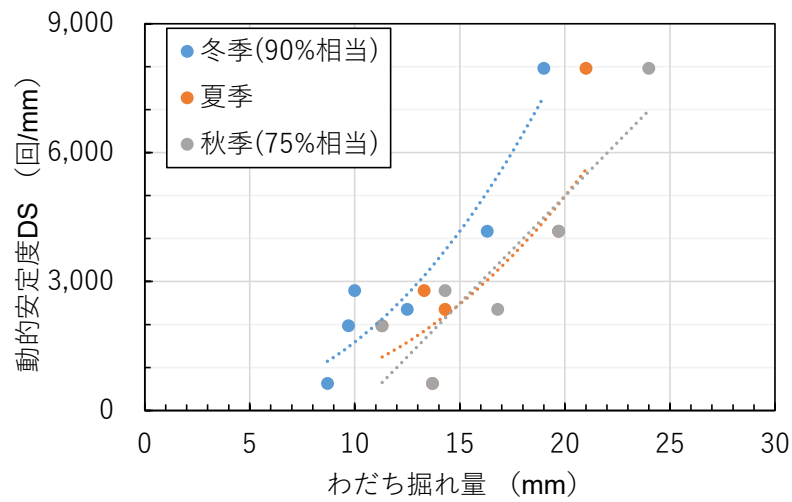


図 2.59 動的安定度とわだち掘れ量の関係

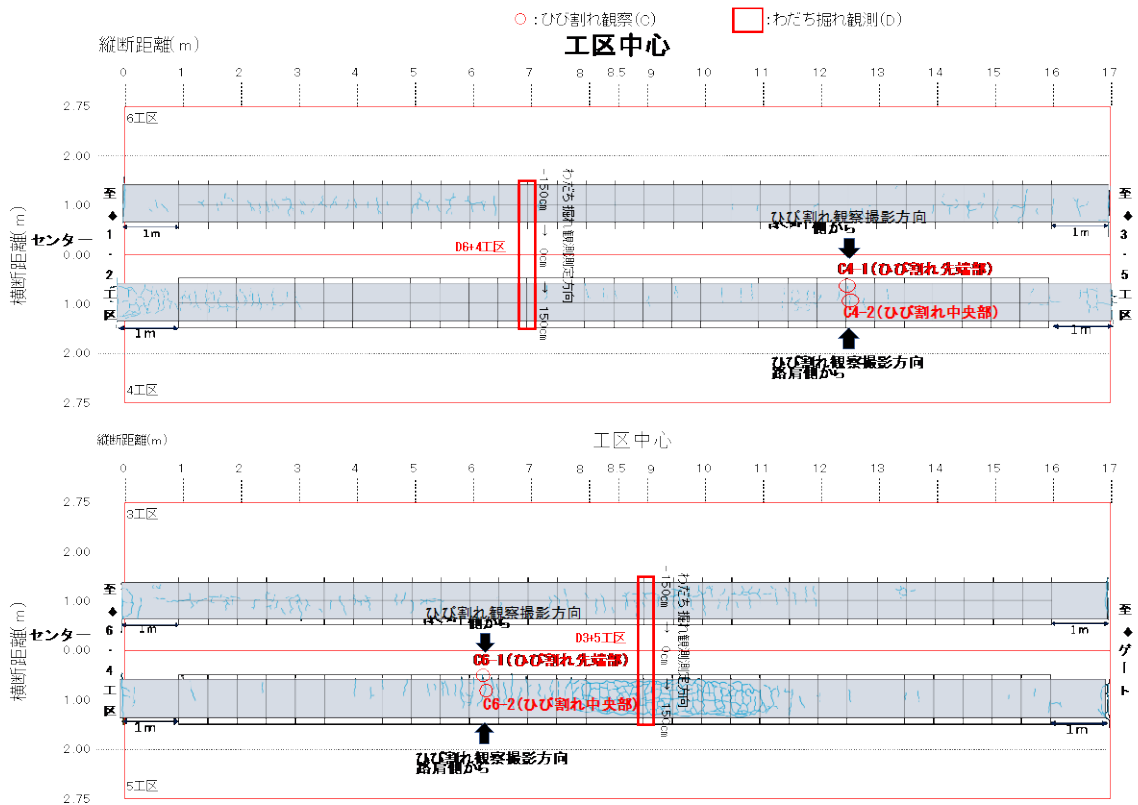


図 2.60 現場の開削調査の位置 (横断方向)



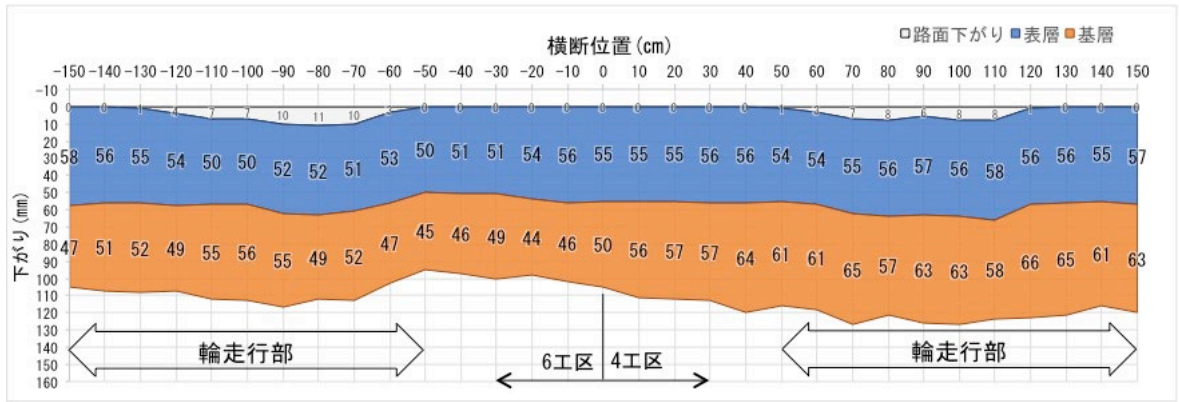


図 2.61 開削調査（横断方向）によるわだち掘れの観測（工区 6, 4）

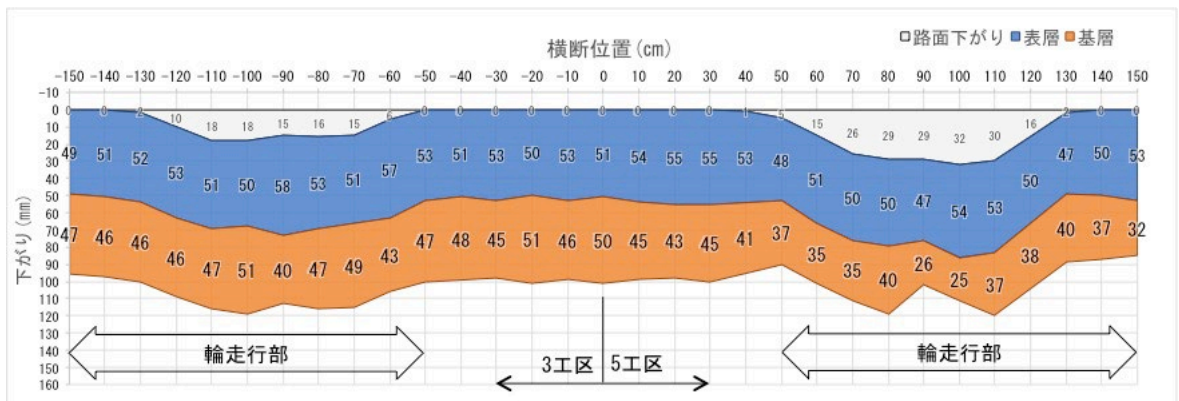


図 2.62 開削調査（横断方向）によるわだち掘れの観測（工区 3, 5）

(4) 現場のひび割れの評価

a) 季節毎のひび割れと発生状況

促進載荷試験により舗装面に生じたひび割れを季節毎に目視観察・スケッチを行い、ひび割れ率を求めた。なお、ひび割れの評価範囲はタイヤ走行部（わだち部）を含む幅1mとし、延長方向は両端（工区境1m）を除外した15mとした。図2.63～図2.67に季節毎のスケッチ図を、図2.68に走行輪数毎のひび割れ率を示す。

冬季走行後は、信頼度90%の疲労破壊輪数に達した。ひび割れが発生した工区は、工区3（再生骨材配合率30%、芳香族分系）、工区6（再生骨材配合率60%、飽和分系）および工区5（再生骨材配合率80%、芳香族分系）であった。夏季走行後では全ての工区でひび割れが生じ、そのほとんどが横断ひび割れであった。

秋季走行後（促進載荷試験終了後）は、信頼度75%の疲労破壊輪数を超え、全工区でひび割れ率が約30～50%を示した。特に、工区5（再生骨材配合率80%、芳香族分系添加剤）はひび割れ率48%となり、亀甲ひび割れも生じた。

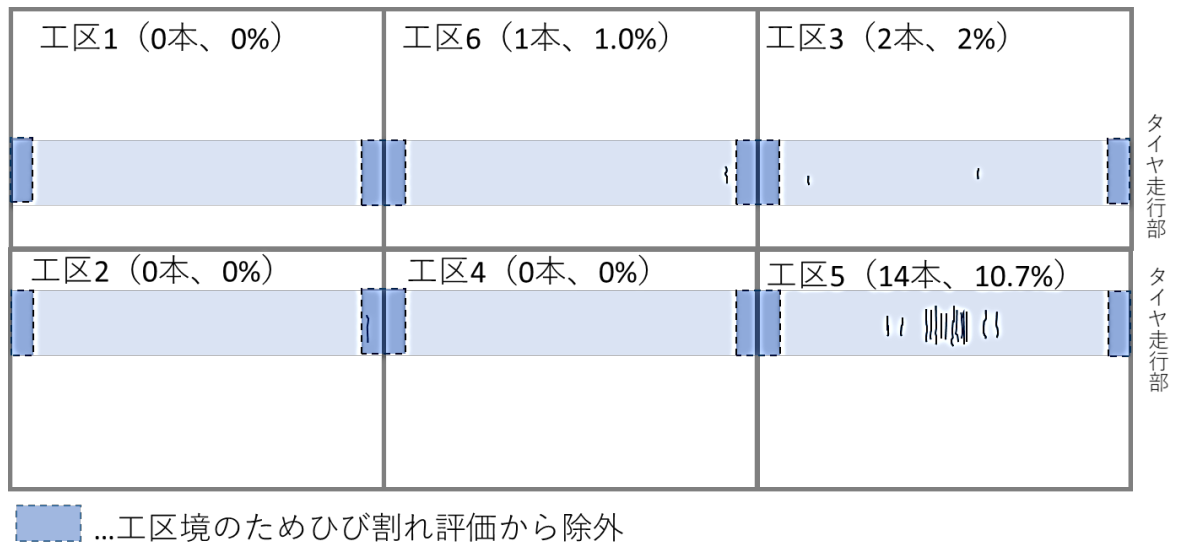


図 2.63 促進載荷試験により生じたひび割れのスケッチ（冬季（信頼度90%相当））

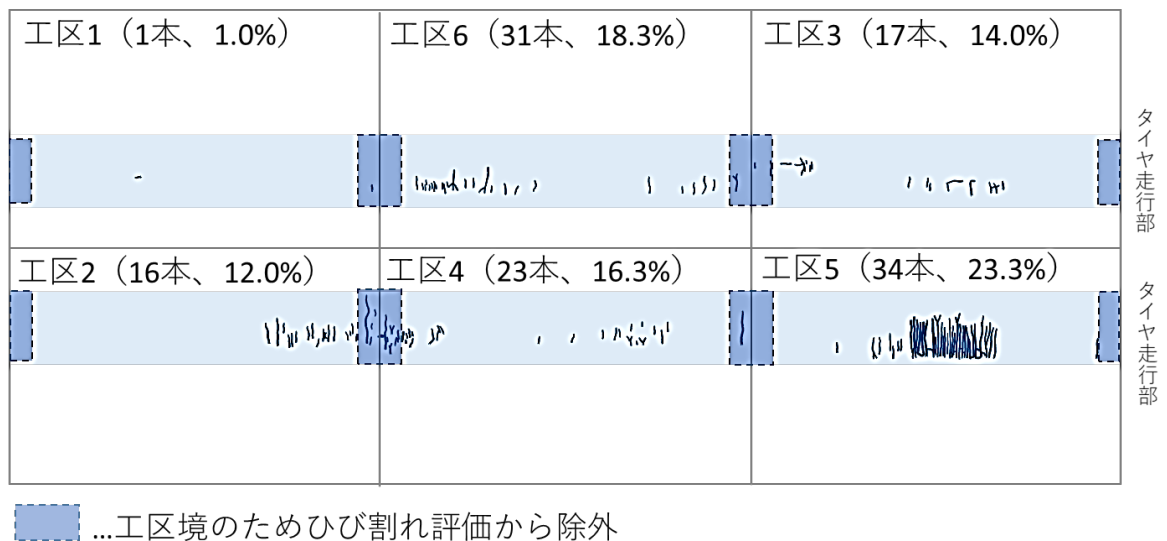


図 2.64 促進載荷試験により生じたひび割れのスケッチ（夏季）

工区1 (41本、34.3%)



工区2 (62本、35.3%)

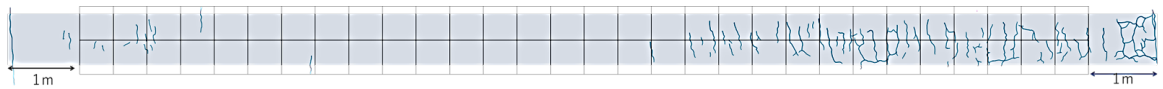
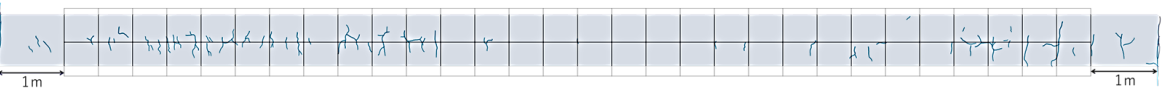


図 2.65 促進荷試験により生じたひび割れのスケッチ (工区1, 2)  
(秋季 (信頼度 75%相当))

工区6 (59本、37.0%)



工区4 (49本、30.7%)

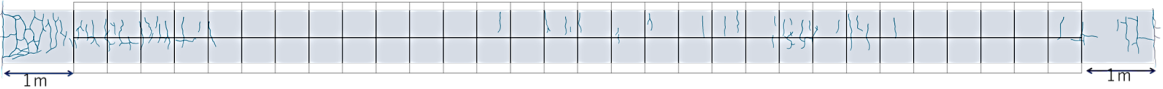
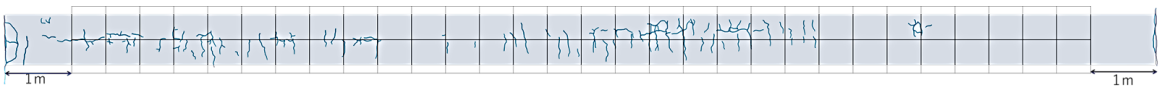


図 2.66 促進荷試験により生じたひび割れのスケッチ (工区6, 4)  
(秋季 (信頼度 75%相当))

工区3 (78本、46.7%)



工区5 (110本、48.0%)

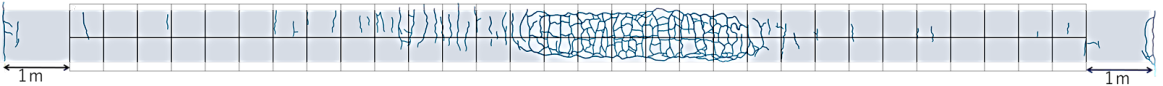


図 2.67 促進荷試験により生じたひび割れのスケッチ (工区3, 5)  
(秋季 (信頼度 75%相当))

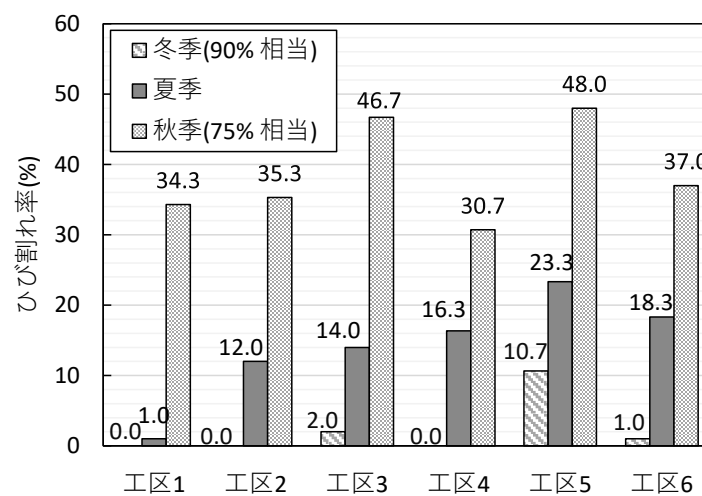


図 2.68 ひび割れ率

ここで、疲労破壊によるひび割れは、アスファルト混合物層下面から発生する縦断ひび割れが一般的である。しかし、本促進載荷試験では横断ひび割れが多かったことから、ひび割れの中央部と端部の表層・基礎のコアを採取し、コアの側面を観察してひび割れの発生状況を確認した。コアの採取位置は施工工区全体のほぼ中央に位置する工区4およびひび割れ率が最も高かった工区5で行った(図2.60)。図2.69および図2.70に採取したコアの側面を示す。どちらの工区のコアでも、中央部のコアの両側面および端部コアの片面側でひび割れは表層・基層を貫通していた。また、ひび割れの形状で下から上に広がった様なY字型の形状が確認された。これらのことから、ひび割れは基層下面から発生した疲労破壊によるものと考えられる。

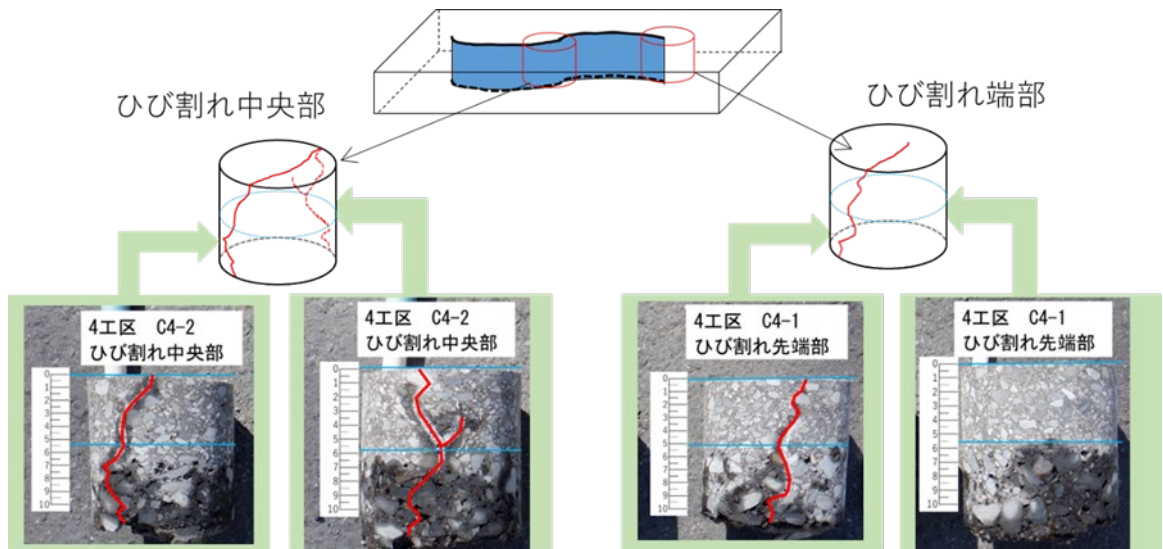


図 2.69 ひび割れ部のコア (工区4)

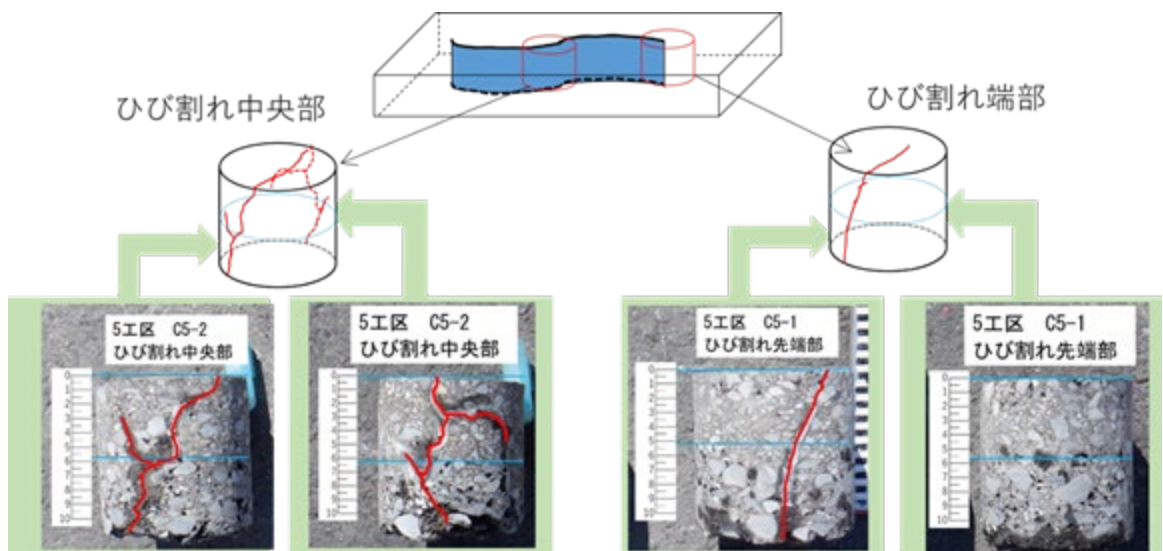


図 2.70 ひび割れ部のコア (工区5)

b) 走行輪数とひび割れ率の関係

走行輪数とひび割れ率の関係について、ひび割れ率10%、20%、30%を目安として、それに達した走行輪数(以下、ひび割れ輪数)を求めた。

各工区のひび割れ輪数を求めるため、ひび割れ率を目的変数、走行輪数を説明変数として指数

関数で近似式を算出し、その二乗平均平方根誤差 (RMSE : Root Mean Square Error) を求めた。図 2.71 にひび割れ率と走行輪数の関係、図 2.72 にひび割れ輪数を示す。その結果、得られた傾向を以下に示す。

- ・新規と再生の差 (工区 1, 2~6) : ひび割れ輪数は新規工区が全区区の中で最も多かった。
- ・再生骨材配合率の差 (工区 1, 3~5) : 再生骨材配合率が低いほど、ひび割れ輪数が多い傾向であった。
- ・旧アスファルト針入度の差 (工区 2, 4) : 旧アスファルト針入度が高い方が、ひび割れ輪数が若干多いまたは、同等であった。
- ・添加剤の差 (工区 4, 6) : 飽和分系を用いた工区 6 よりも芳香族分系を用いた工区 4 の方がひび割れ輪数が若干多い。

以上より、再生骨材配合率が低く、芳香族分系の添加剤を使用した工区ほど、ひび割れ輪数は多く、ひび割れが生じにくい結果となった。これは第 2.3 節で報告している室内試験と同様の結果であった。

なお、ひび割れ率 10%までは工区 3(再生骨材配合率 30%) よりも工区 4(再生骨材配合率 60%) の方がひび割れ輪数が少なかったが、ひび割れ率 20%および 30%では工区 4 の方がひび割れ輪数が多くなった。これは走行輪数の増加に伴って工区 5 に多くのひび割れが発生し、そのため荷重車の挙動が不安定 (振動等) となり、並行する工区 3 もひび割れが促進されたためと考えられる。

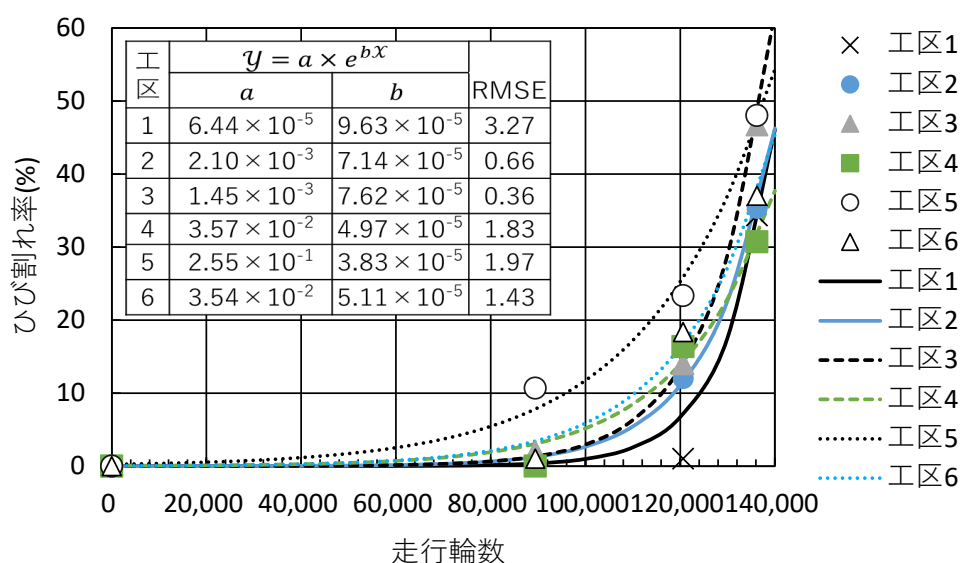


図 2.71 走行輪数毎のひび割れ率と RMSE

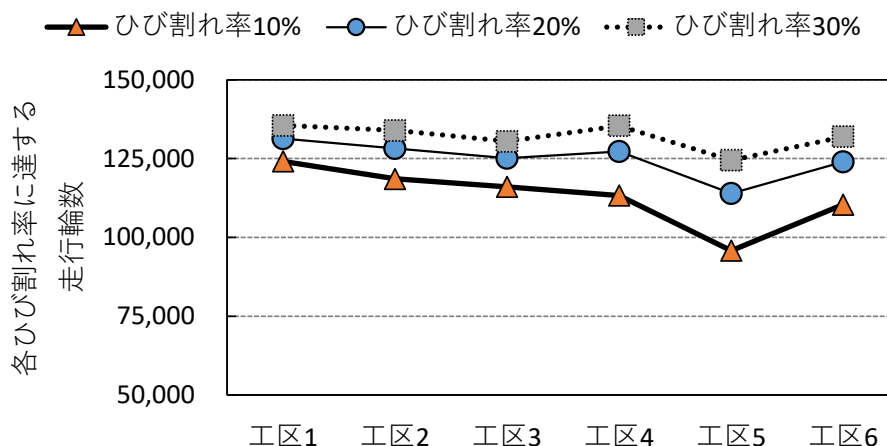


図 2.72 各ひび割れ率に達する走行輪数 (ひび割れ輪数)

### c) ひび割れ輪数と混合物試験の関係

前述 b) で得られたひび割れ輪数と前項 (2) b) ~e) で報告した混合物性状との関係を整理した。関係性の整理については、前述のように並行する工区の影響が及んでいないと考えられるひび割れ率 10%でのひび割れ輪数を対象とし、それを目的変数、各混合物試験の評価指標を説明変数として一次式で近似式を算出した。その決定係数を表 2.27 に示す。

再生アスファルト混合物のひび割れ抵抗性は高温時に低下すると考えられるため、0°Cで行った混合物試験 (圧裂強度 (0°C), 疲労回数) の決定係数は低くなった。圧裂強度 (60°C) は、高温時の再生アスファルトの硬く脆い性質を反映して決定係数もやや高い値となった。決定係数が高かった評価指標は、圧裂強度比および高温カンタブロ損失率であった。

これら指標は前述のとおり、圧裂強度比はアスファルトの混合物の感温性を示すと考えられており、また高温カンタブロ損失率は圧裂強度比 20 以下で増加することが確認されている。これらの結果から圧裂強度比と高温カンタブロ損失率は再生混合物の高温時のひび割れ抵抗性の評価に適用できる可能性があることを第 2.3 節で報告している。図 2.52 では本研究の圧裂強度比と高温カンタブロ損失率の関係を示しており、試験施工時に採取した混合物を評価した結果は、実際のアスファルト混合所の再生骨材を用いた再生混合物で得られた近似式上にプロットされた。さらに、第 2.3 節では、求めた高温カンタブロ損失率と圧裂強度比の近似式から、高温時にひび割れが生じやすいとする値 (圧裂強度比 20 以下, 高温カンタブロ損失率 1.14%または 2.40%以上) をしきい値の一案として提案している。本研究でこれらしきい値の範囲外であったのは、工区 5 のみであった。実際に、実大供試体での工区 5 は他の工区よりも早期にひび割れが生じており、促進載荷試験終了後 (秋季, 信頼度 75%相当) では、亀甲ひび割れを含むひび割れが多く発生し、ひび割れ率 48%となった。このことから、実大供試体での促進載荷試験でも、混合物のひび割れ抵抗性の評価指標として、高温カンタブロ損失率と圧裂強度比を用いることができる可能性が確認できた。

表 2.27 混合物試験結果とひび割れ輪数（10%）の決定係数

試験	評価指標	ひび割れ輪数（10%）との決定係数 R <sup>2</sup>
ホイールトラッキング試験	動的安定度 DS	0.44
圧裂試験	圧裂強度（0℃）	0.19
	圧裂強度（60℃）	0.69
	圧裂強度比（0℃/60℃）	0.76
高温カンタブロ試験	高温カンタブロ損失率	0.82
曲げ疲労試験	破壊回数（0℃）	0.0062

d) 現場のひび割れの評価まとめ

促進載荷試験により生じた路面のひび割れを評価した。結果を以下にまとめる。

- ひび割れは基層下面から発生した疲労破壊によるものと考えられる。
- 再生骨材配合率が低く、芳香族分系の添加剤を使用した工区の方が、ひび割れ輪数は多く、ひび割れが生じにくい結果となった。
- ひび割れ輪数は、圧裂強度比と高温カンタブロ損失率との決定係数が高く、これら両指標が混合物のひび割れ抵抗性の評価指標として用いることができる可能性が得られた。

(5) 促進载荷試験終了後のコアの評価

促進载荷試験終了後（秋季，信頼度 75%相当），各工区の非タイヤ走行部およびタイヤ走行部のコアを採取した。採取位置を図 2.73 に示す。それらのコアを用いて，表 2.21 に示した室内試験を行った。

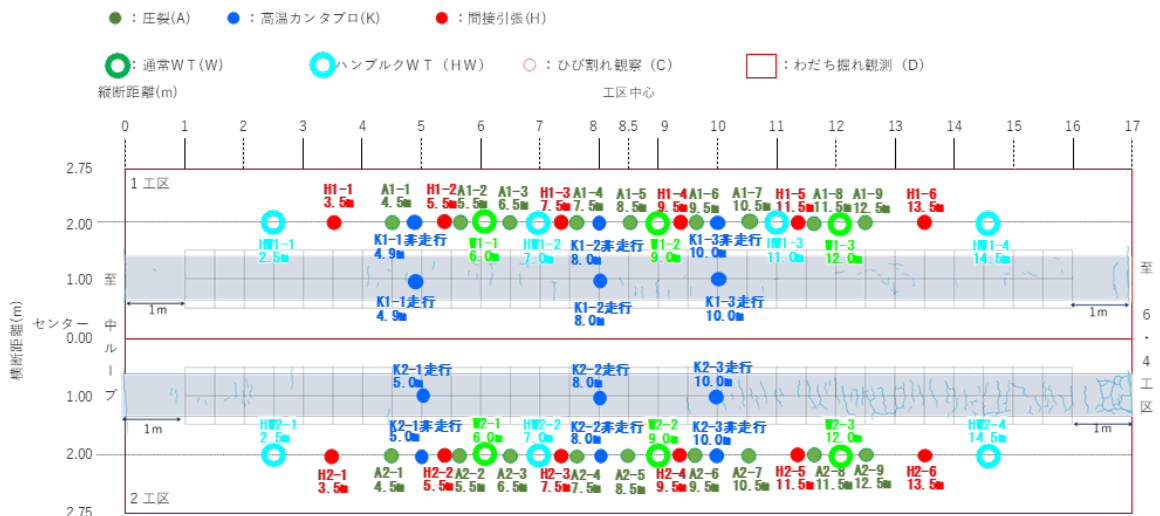


図 2.73 コアの採取位置

a) ホイールトラッキング試験

ホイールトラッキング試験は非タイヤ走行部のコアを用いた。図 2.74 に結果を示す。図中には (2) b) で報告した現場混合物で作製した供試体で行ったホイールトラッキング試験の結果も併せて示す。

現場混合物作製の供試体では，大きい順に，工区 5>3>1>2>4>6 となり，再生骨材配合率が高いほど耐流動性が高くなった。一方，現場コアの動的安定度は大きい順に，工区 1>3>5>2=4>6 となった。傾向が異なった理由として，現場コアの結果は試験毎に生じるばらつきが現場混合物作製の供試体よりも大きかったこと，現場コアは厚さが均一でないため，現場混合物作製の供試体の結果と異なると考えられる。

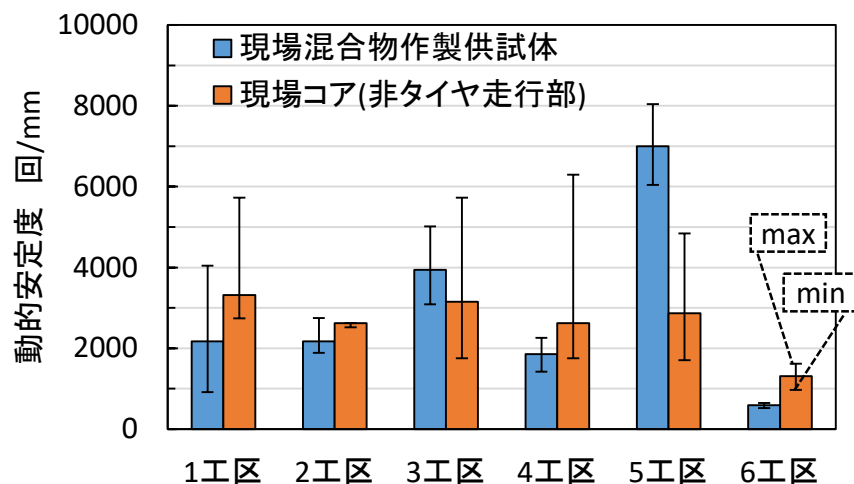


図 2.74 現場コアと現場混合物から作製した供試体の動的安定度



## b) 圧裂試験

圧裂試験は、非タイヤ走行部のコアを用いた。図 2.75～図 2.77 に圧裂強度を示す。なお、図中には (2) c) で報告した現場混合物作製の供試体で行った圧裂試験の結果も併せて示す。

圧裂強度では、以下の傾向が得られた。

- 温度に関わらず、現場コアの圧裂強度は、現場混合物で作製した供試体よりも小さくなった。
- 新規と再生の差 (工区 1, 2) : 0°C と 20°C では新規の方が再生よりも、現場コアの圧裂強度が大きく、60°C では再生の方がやや大きくなった。
- 再生骨材配合率の差 (工区 1, 3～5) : 現場混合物で作製した供試体では、0°C と 60°C において再生骨材配合率が高いほど圧裂強度が大きくなったが、現場コアでは温度に関わらず再生骨材配合率による明らかな傾向は確認できなかった。
- 旧アスファルト針入度の差 (工区 2, 4) : 現場混合物では、全ての温度で旧アスファルト針入度が低いと、圧裂強度が低下する傾向にあった。一方、現場コアでは、0°C において旧アスファルト針入度が低いとわずかに大きくなったが、20°C と 60°C では旧アスファルト針入度による差は確認できなかった。
- 添加剤の差 (工区 4, 6) : 現場コアでは、0°C と 20°C は、飽和分系よりも、芳香族分系の方が圧裂強度が高く、60°C では同程度となった。一方、現場コアでは、0°C と 60°C では添加剤による傾向は確認できなかった。

図 2.78～図 2.80 に圧裂変位を示す。得られた傾向を以下に示す。

- 全ての温度で、現場混合物で作製した供試体よりも現場コアの方が変位が大きくなった。また、現場コアは現場混合物で作製した供試体よりもばらつきが生じた。
- 新規と再生の差 (工区 1, 2) : 現場混合物で作製した供試体の結果と同様に、現場コアでも全ての温度で、新規より再生の方がわずかに変位が大きく、その差は温度が高いほど大きくなった。
- 再生骨材配合率の差 (工区 1, 3～5) : 現場混合物で作製した供試体では、変位は再生骨材配合率による傾向はみられず温度に依存していたが、現場コアでは 60°C のみ、再生骨材配合率が高くなるほど大きくなった。
- 旧アスファルト針入度の差 (工区 2, 4) : 現場混合物で作製した供試体は、旧アスファルト針入度によらず、各温度ではほぼ同等の変位を示したが、現場コアでは 0°C と 60°C において、旧アスファルト針入度が低いと変位もわずかに低くなった。20°C では旧アスファルト針入度による差はなかった。
- 添加剤の差 (工区 4, 6) : 現場混合物で作製した供試体は、0°C と 60°C では、芳香族分系よりも飽和分系の方が変位が大きく、20°C では添加剤によらずほぼ同じになったのに対して、現場コアでは、0°C において芳香族分系より飽和分系の方が大きく、20°C と 60°C では添加剤によらず同程度の値となった。

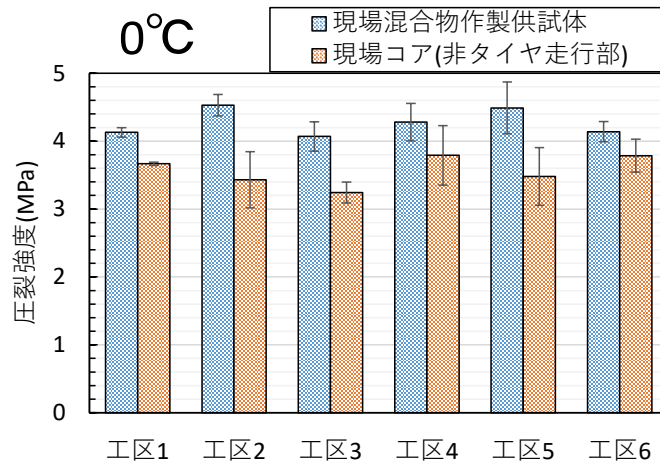


図 2.75 圧裂強度 (0°C)

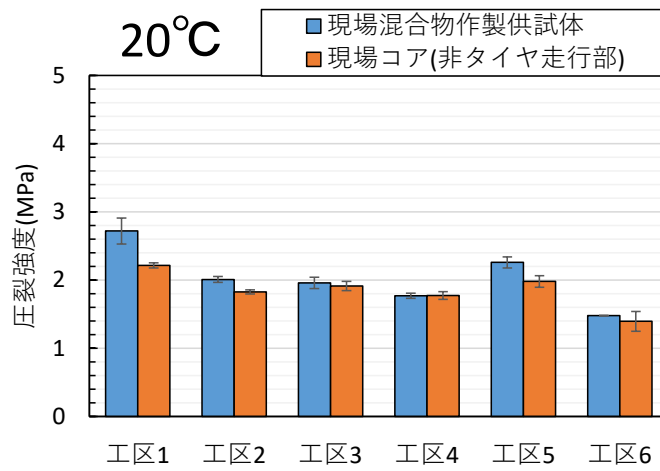


図 2.76 圧裂強度 (20°C)

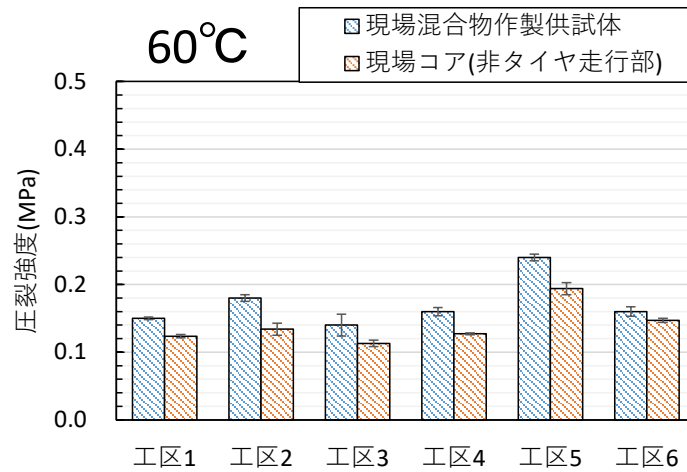


図 2.77 圧裂強度 (60°C)

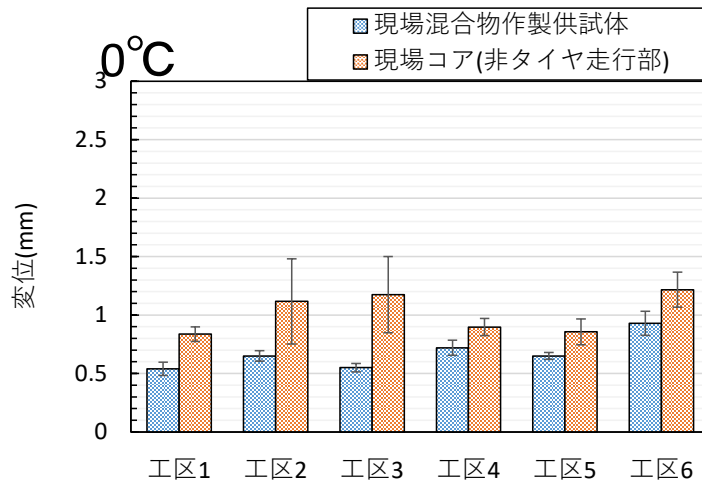


図 2.78 圧裂変位(0°C)

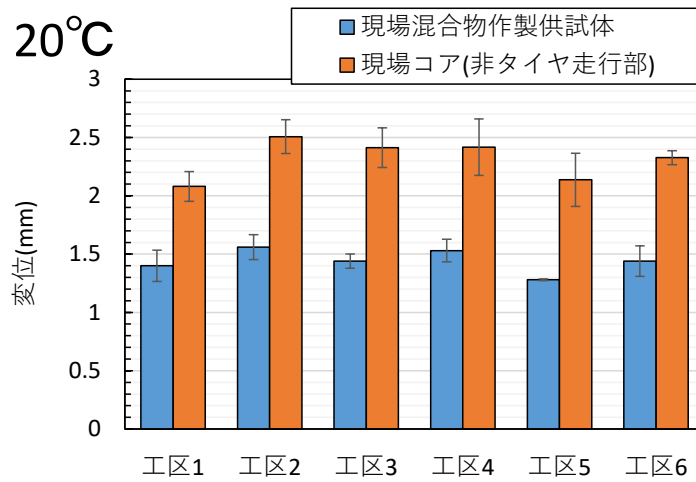


図 2.79 圧裂変位(20°C)

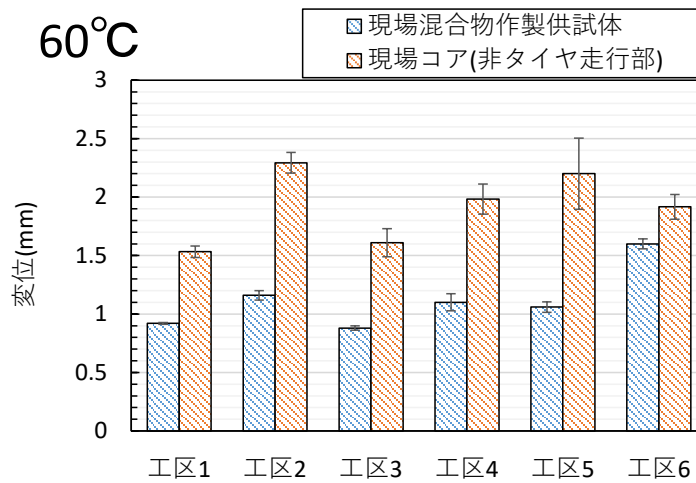


図 2.80 圧裂変位(60°C)

図 2.81～図 2.83 に圧裂係数を示す。得られた傾向を以下に示す。

- ・ 現場コアは現場混合物で作製した供試体よりも圧裂係数が小さくなった。これは、現場コアの方が圧裂強度が小さく、かつ変位が大きかったためである。この理由として、現場混合物で作製した供試体は、施工時に採取した混合物を締め固めまで乾燥機に入れて養生したため、現場コアよりも加熱時間が長かったため劣化した可能性があり、空隙率が小さいことが考えられる。
- ・ 新規と再生の差（工区 1, 2）：温度に関わらず、再生よりも新規の方が圧裂係数が大きくなった。
- ・ 再生骨材配合率の差（工区 1, 3～5）：現場混合物で作製した供試体では、60℃で再生骨材配合率 80%で圧裂係数が高くなる傾向が確認できたが、現場コアでは温度に関わらず、再生骨材配合率による傾向は確認できなかった。
- ・ 旧アスファルト針入度の差（工区 2, 4）：20℃と 60℃では、旧アスファルト針入度に関わらず同等の圧裂係数を示し、0℃においては旧アスファルト針入度が低いと圧裂係数が大きくなった。
- ・ 添加剤の差（工区 4, 6）：0℃と 20℃で飽和分系よりも芳香族分系の方が圧裂係数は大きくなったが、60℃では飽和分系の方がやや大きくなった。

以上のように、現場コアから得られた圧裂強度、圧裂変位、圧裂係数を整理したが、現場混合物で作製した供試体と比べて、再生骨材配合率や旧アスファルト針入度、添加剤による明らかな差が確認できなかった。これは、現場混合物で作製した供試体は厚さ約 63.5mm であったのに対し、現場コアは舗装厚さである約 50mm であったことに加えて、コア採取後に表層と基層をカッターで切断し整形していることなど、コアの形状が均一でなかったことや空隙率の違いなどが原因であると考えられる。

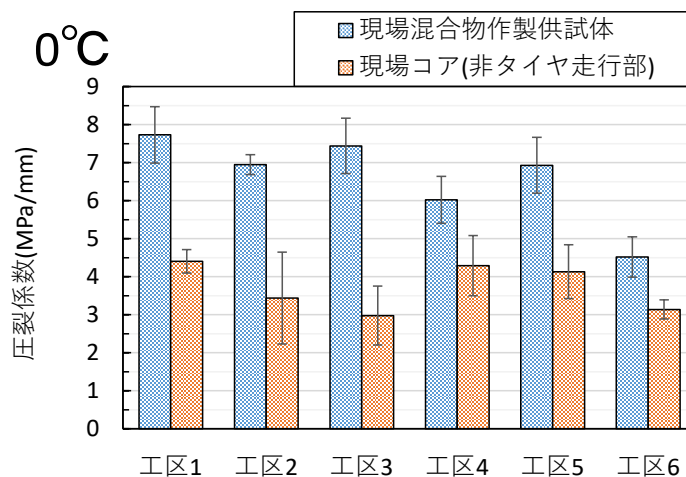


図 2.81 圧裂係数 (0°C)

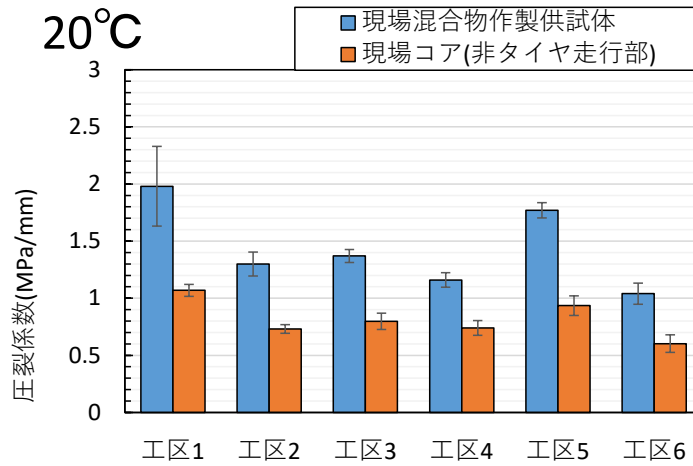


図 2.82 圧裂係数(20°C)

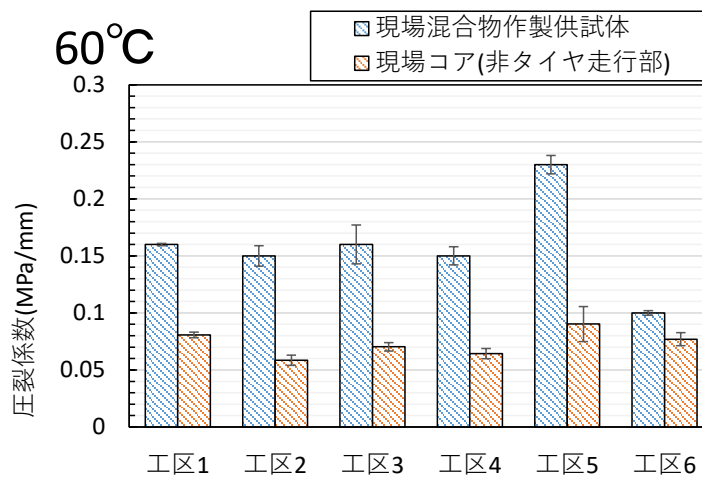


図 2.83 圧裂係数(60°C)

次に、現場混合物で作製した供試体と同様に、コアから得られた圧裂強度からも圧裂強度比を求めた。図 2.84 に圧裂強度比を示す。現場コアでも、現場混合物で作製した供試体と同様に再生骨材配合率が最も高い工区 5 (再生骨材配合率 80 %) が圧裂強度比 18.0 を示し、全工区で最も低い値となった。圧裂強度比は値が小さいほど、ひび割れが生じやすいとされる評価指標であり、実際に実大供試体での促進載荷試験では、工区 5 が最もひび割れが生じた。一方、再生骨材配合率 0~60% (工区 1, 3, 4) による差は、現場混合物で作製した供試体よりも差が小さく、その傾向は確認できなかった。旧アスファルト針入度が低いと強度比が若干高くなった。添加剤による違いは、芳香族分系よりも飽和分系の方が圧裂強度比が低い結果となった。

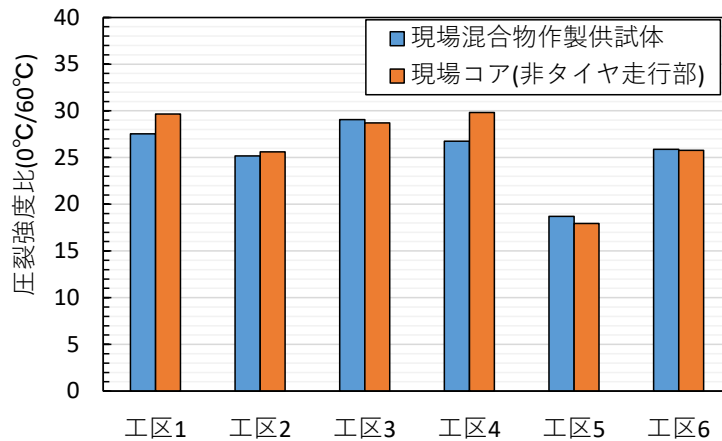


図 2.84 圧裂強度比 (0°C/60°C)

c) 高温カンタブロ試験

高温カンタブロ試験は、非タイヤ走行部とタイヤ走行部のコアを用いた。図 2.85 に結果を示す。図中には (2) d) で報告した現場混合物作製の供試体で行った結果も併せて示す。

タイヤ走行部の現場コアは非タイヤ走行部の現場コアよりも高温カンタブロ損失率が大きい傾向にあった。混合物の種類による差は、いずれの供試体においても再生骨材配合率が高く、旧アスファルト針入度が低いと高温カンタブロ損失率が大きくなる傾向が得られた。添加剤による傾向は、タイヤ走行部の現場コアにおいて、芳香族分系よりも飽和分系の方が大きくなった。

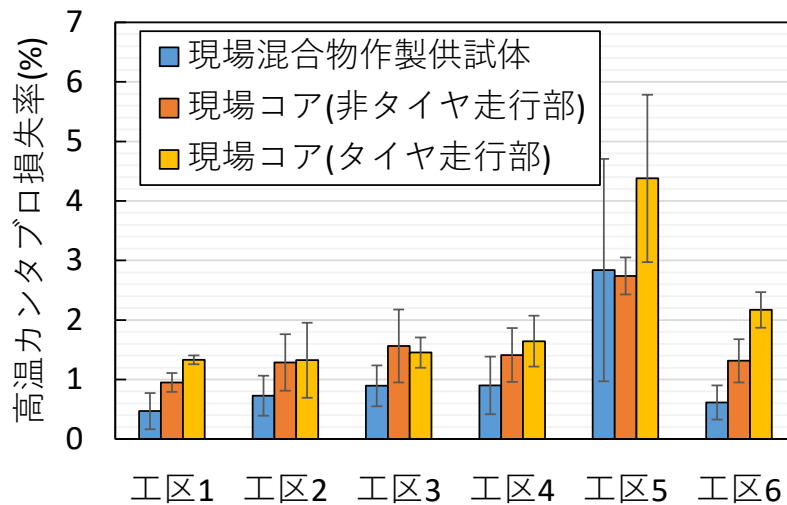


図 2.85 高温カンタブロ損失率 (60°C)

図 2.86 に本研究の現場混合物で作製した供試体と現場コア (非タイヤ走行部) で得られた圧裂強度比と高温カンタブロ損失率の相関を示す。図中には、図 2.52 で示した室内で繰り返し劣化・再生した再生混合物、および各地域のアスファルト混合所で実際に使用されている再生骨材を用いた再生混合物から得られた近似式も記す。現場コア (非タイヤ走行部) は、現場混合物で作製した供試体よりも近似式 (各地域の再生骨材) の同一線上にはならなかったが概ね曲線に沿っており、工区 5 (再生骨材配合率 80%) が圧裂強度比 20 以下で高温カンタブロ損失率が上昇したプロットとなった。前述のとおり、圧裂強度比が 20 以下になるとひび割れ抵抗性が低下す

ると考えられている。実際に、実大供試体での工区5は他の工区よりも早期にひび割れが生じており、促進載荷試験終了後（秋季、信頼度75%相当）では、亀甲ひび割れを含むひび割れが多く発生し、ひび割れ率48%となった。

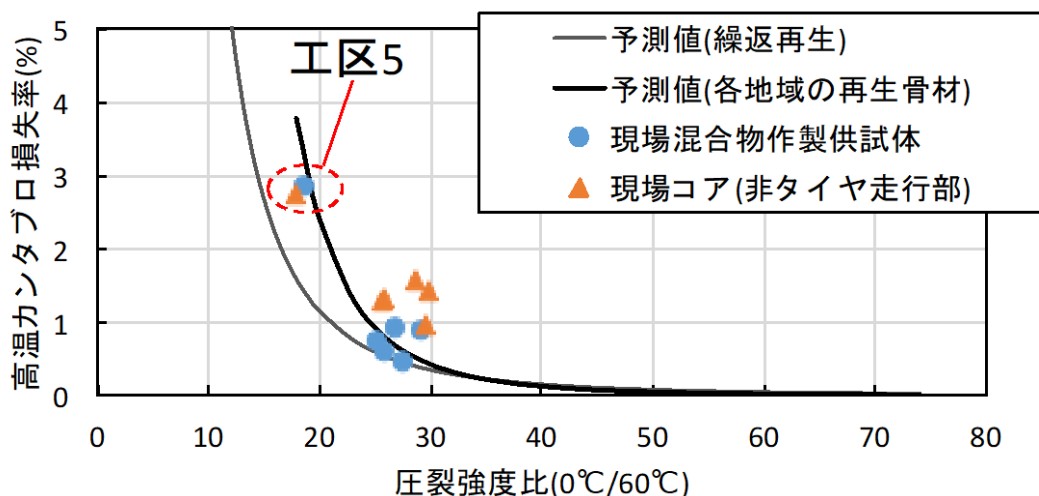


図 2.86 圧裂強度比と高温カンタブロ損失率

d) Indirect Tensile Fatigue Test (ITF)

ITFは非タイヤ走行部のコアを用いた。試験条件は試験温度40°C、荷重150kPaで行った。図2.87に結果を示す。図中には(2)f)で報告した現場混合物作製の供試体で行ったITF(40°C、150kPa)の結果も併せて示す。現場コアは、現場混合物で作製した供試体の結果よりも載荷回数が少なくなった。現場コアでは、再生骨材配合率80%の工区5は破壊回数が他の工区よりも大きい傾向にあったが、再生骨材配合率60%以下や、旧アスファルト針入度や添加剤による差は僅かであり、傾向が得られなかった。

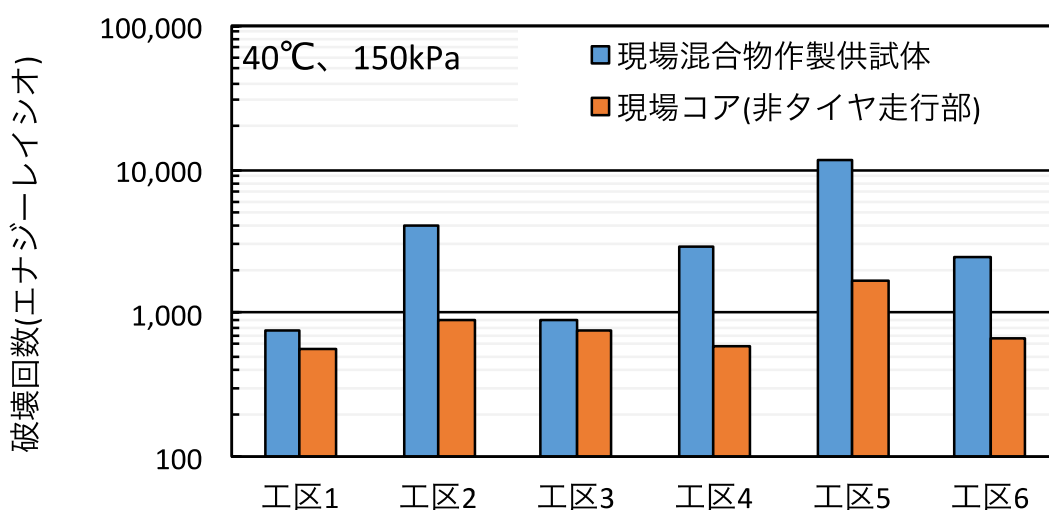


図 2.87 ITFにおける破壊回数(エネルギーレイシオ)(40°C)

e) ハンブルクホイールトラッキング試験

ハンブルクホイールトラッキング試験（以下、HWT試験）は非タイヤ走行部のコアを用いた。HWT試験は、2つの供試体の端部を切り落としダルマ型に設置した状態でホイールトラッキング試験を行い、アスファルト混合物の耐流動性やはく離抵抗性を評価する室内試験である（写真2.5、写真2.6）。HWT試験では、図2.88の例に示すような横軸走行回数、縦軸累積変形量の曲線が得られ、その変曲点をSIP（Stripping Inflection Point）と呼び、このSIPではく離が生じたとして評価している<sup>13)</sup>。本報告では、SIPを示した走行回数と変位をSIP走行回数、SIP変形量として評価した。本試験条件は、AASHTO T324に準拠し、試験温度は60℃とした。表2.28に試験条件を示す。また、図2.89に採取したコアの空隙率を示す。採取したコアは平均空隙率3.3～5.4%であった。



写真 2.5 ハンブルクホイールトラッキング試験



写真 2.6 ハンブルクホイールトラッキング試験供試体設置状況



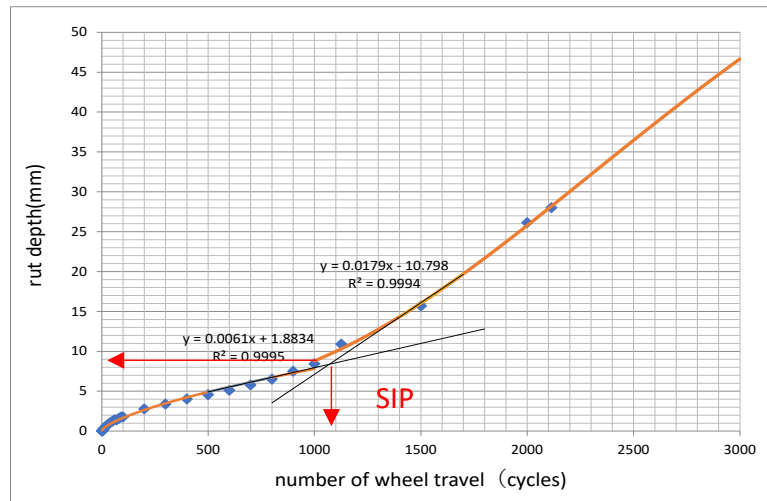


図 2.88 ハンブルクホイールトラッキング試験における SIP の例  
(縦軸：累積変形量，横軸：走行回数)

表 2.28 ハンブルクホイールトラッキング試験の試験条件

供試体	現場コア供試体 (直径 250mm)
走行輪	直径 203.2mm 幅 47mm のスチールタイヤ
荷重 (N)	705 ± 4.5
走行回数 (回/min)	50
試験温度 (°C)	60
試験条件	浸水

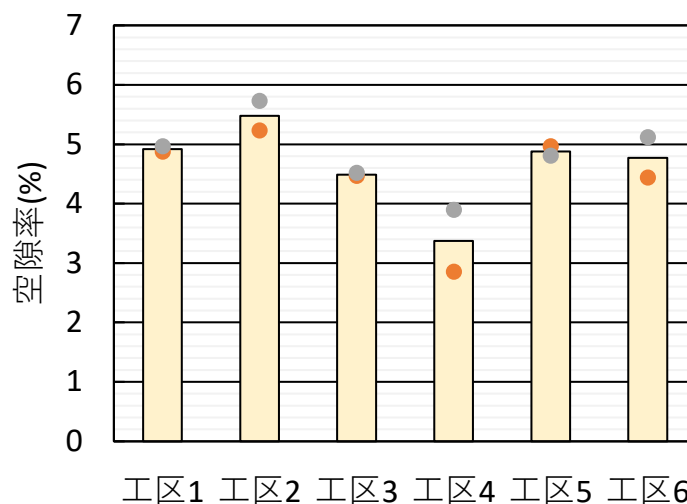


図 2.89 ハンブルクホイールトラッキング試験の供試体空隙率 (現場コア)

図 2.90, 図 2.91 に本研究の HWT 試験の結果を示す。また, 写真 2.7 に試験後の供試体を示す。一般的に, 混合物の耐流動性が高ければ累積変形量は小さく, 耐水性が優れているほど SIP 走行回数が大きい傾向にあり, 例として改質 II 型の SIP 走行回数は 10,000 回程度とされている。本研究で得られた SIP 走行回数は 1000 回~1700 回の範囲であり, 改質 II 型と比較するとその

値は小さく、本結果からは混合物の種類による有意な差は確認できなかったが、混合物の種類毎に比較すると、以下の結果が得られた。

- ・新規と再生の差（工区 1, 2）：新規よりも再生の方が SIP 走行回数が低い値となった。
- ・再生骨材配合率の差（工区 1, 3～5）：再生骨材配合率が高くなるほど、SIP 走行回数が高い傾向となった。
- ・旧アスファルト針入度の差（工区 2, 4）：針入度が低いと、SIP 走行回数が高い値となった。
- ・添加剤の差（工区 4, 6）：芳香族分系の方が飽和分系よりも SIP 走行回数が高い値となった。

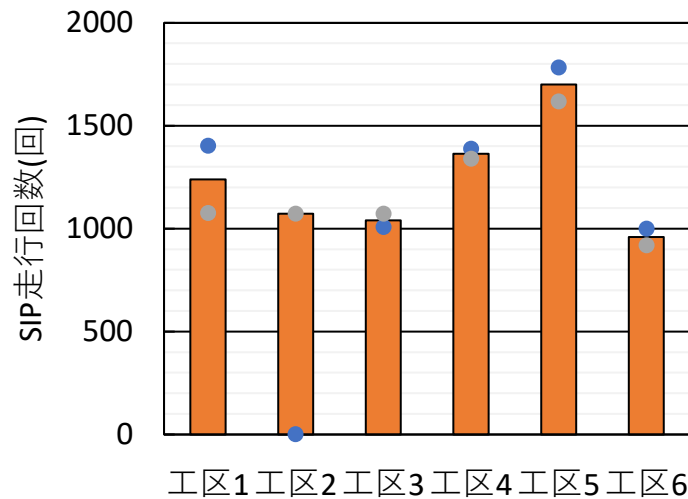


図 2.90 ハンブルクホイールトラッキング試験における SIP 走行回数

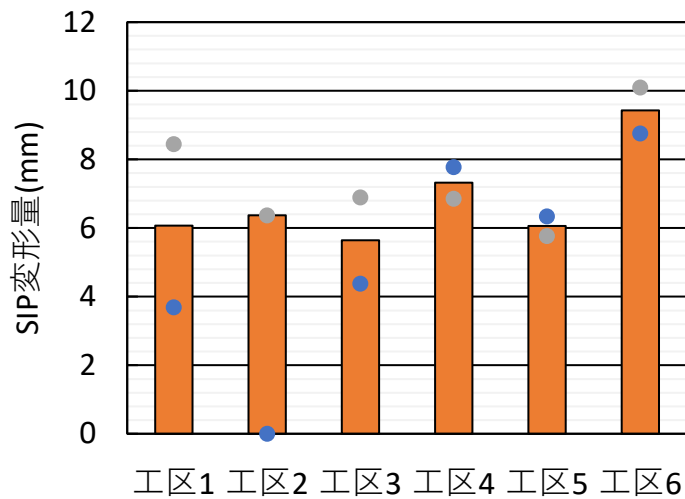


図 2.91 ハンブルクホイールトラッキング試験における SIP 変形量

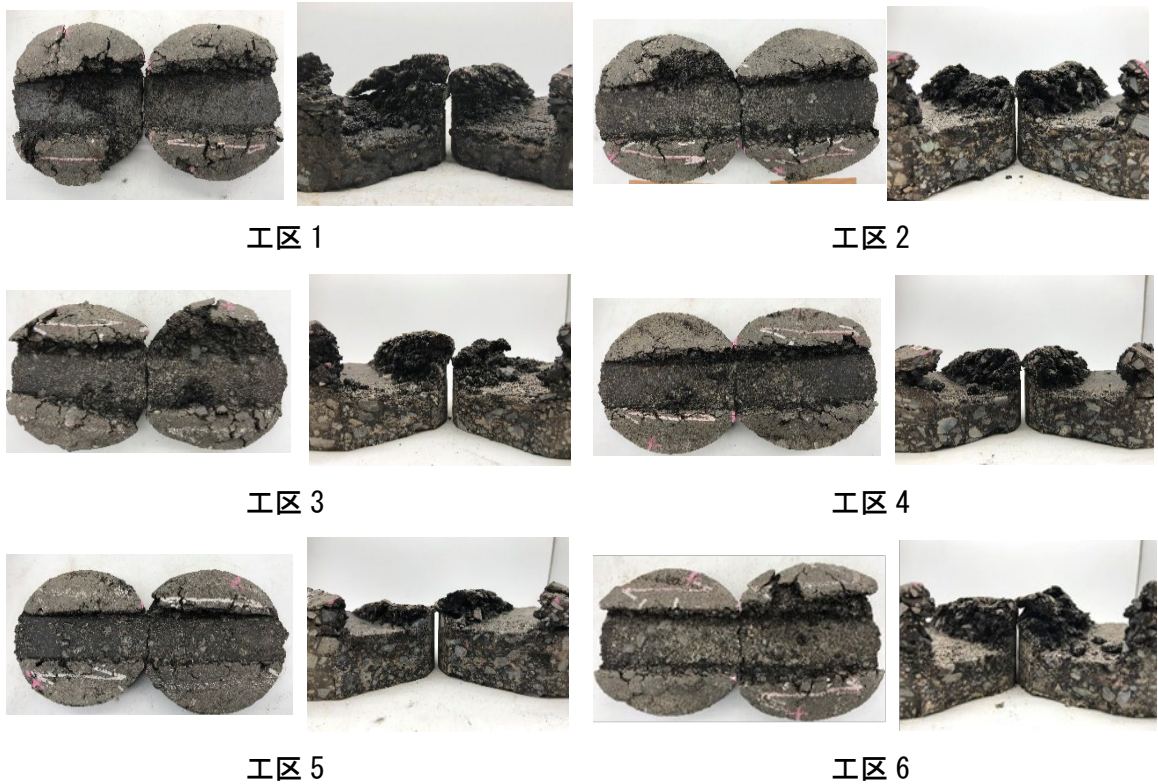


写真 2.7 ハンブルクホイールトラッキング試験後の供試体

図 2.92 に本試験の SIP を示す。工区 2（旧アスファルト針入度 21，再生骨材配合率 60%）と工区 3（旧アスファルト針入度 14，再生骨材配合率 30%）の SIP は，工区 1（新規）と比較的近い位置にあった。それらよりも再生骨材配合率が高くなると，SIP 走行回数が多くなる傾向が確認できた（工区 4，5）。また，飽和分系の添加剤を用いた工区 6 は，芳香族分系の工区 4 よりも，少ない走行回数で多くの変形が生じてはく離したことが確認できた。なお，本試験では試験温度 60℃で行ったが，海外では 40～50℃で行っている事例もある。今後，HWT 試験をそれらの温度でも行うことで，再生混合物の SIP 走行回数と SIP 変形量の関係を検討する必要がある。

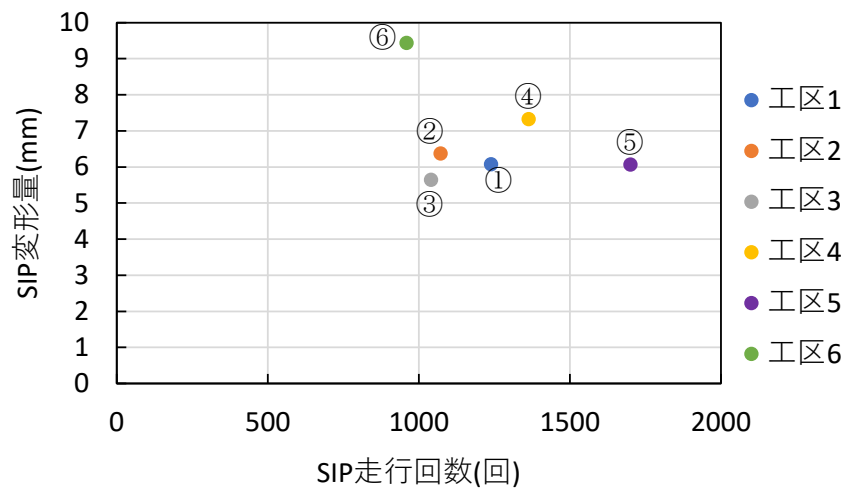


図 2.92 ハンブルクホイールトラッキング試験における SIP

#### f) 動的安定度と SIP 変形量の関係

SIP 変形量はアスファルト混合物の耐流動性を示している。そこで、SIP 変形量とホイールトラッキング試験で得られた動的安定度との関係を確認した。比較に用いた動的安定度は、本 HWT 試験と同様に現場コアで行った試験結果（(5) a) で報告）である。図 2.93 に動的安定度と SIP 変形量の関係を示す。動的安定度が小さくなるほど、SIP 変形量が大きくなる傾向が得られた。

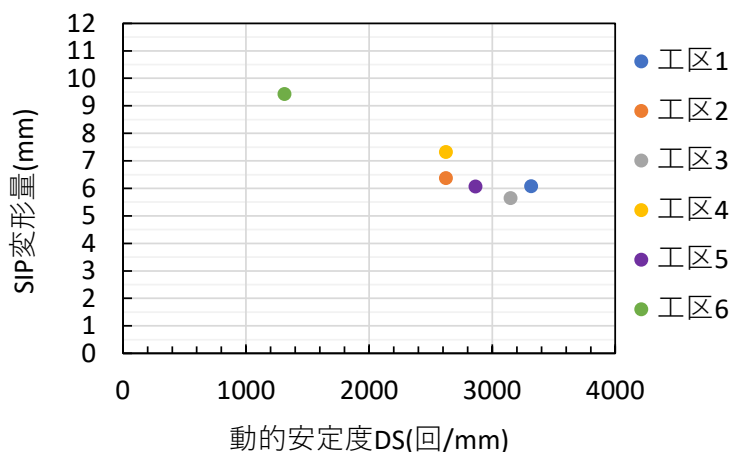


図 2.93 動的安定度と SIP 変形量の関係

#### g) コアの評価のまとめ

促進荷重試験終了後、現場コアを採取し各室内試験を行った。結果を以下に示す。なお、現場コアは厚さが約 50mm、表層と基層をカッターで切断し整形しているため形状が均一でなかったため、現場混合物から作製した供試体の室内試験と異なる場合があることに留意する必要がある。

- ・動的安定度では、混合物の種類による傾向は得られなかった。
- ・圧裂試験では、圧裂強度、変位、圧裂係数による混合物の種類による傾向は得られなかった。しかし、圧裂強度比では、現場混合物から作製した供試体と同様に、再生骨材配合率 80%（工区 5）が 20 以下を示した。
- ・高温カンタブロ試験では、再生骨材配合率が高く、旧アスファルト針入度が低いと高温カンタブロ損失率が高くなる傾向が得られた。また、タイヤ走行部のコアにおいて、芳香族分系よりも飽和分系の工区の方が高温カンタブロ損失率が高くなった。
- ・圧裂強度比と高温カンタブロ損失率の関係は、現場混合物から作製した供試体と同様に、圧裂強度比 20 以下で高温カンタブロ損失率が上昇した。これは、第 2.3 項で得られた結果と同様であった。
- ・圧裂強度比が 20 以下かつ高温カンタブロ損失率が高かった工区 5 は、ひび割れ率も高かった。両指標がひび割れ抵抗性の評価指標として適用できる可能性が、実際に生じたひび割れ、現場混合物から作製した供試体および現場コアの結果から確認できた。
- ・ITF では、再生骨材配合率 80%（工区 5）の破壊回数（エナジーレイシオ）が大きい傾向にあったが、再生骨材配合率 60%以下や旧アスファルト針入度、添加剤による傾向は得られなかった。
- ・HWT 試験の SIP では、工区 2（旧アスファルト針入度 21、再生骨材配合率 60%）と工区 3（旧アスファルト針入度 14、再生骨材配合率 30%）の SIP は、工区 1（新規）と比較的近い位置にあった。それらよりも再生骨材配合率が高くなると、SIP 走行回数が多くなる傾向が確認でき

た（工区 4, 5）。また，飽和分系の添加剤を用いた工区 6 は，芳香族分系の工区 4 よりも，少ない走行回数で多くの変形が生じてはく離したことが確認できた。

#### 2.4.6. まとめ

再生混合物の性状を把握するため，再生骨材配合率（0～80%），旧アスファルト針入度（21 と 14），添加剤（芳香族分系または飽和分系）の異なる再生混合物からなる実大供試体を構築し，荷重車による促進載荷試験を行った。促進載荷試験により生じたわだち掘れおよびひび割れの評価，および開削調査を行った。また，実大供試体施工時に混合物を採取して作製した供試体および，促進載荷試験後に採取した現場コアを用いて各室内試験を行った。実物大の走行試験により得られた知見を以下に示す。

##### ➤ 新材との比較

- 針入度 21 の旧アスファルトを含む再生骨材を 60%用いた再生混合物は，新規混合物と比較すると，ひび割れ率 20%に達するまでの走行輪数がわずかに少なかったが概ね耐久性は同等であり，既往の研究成果と同様な結果が得られた。

##### ➤ 針入度の影響

- 針入度の高い旧アスファルトを含む再生骨材を用いた再生混合物の方がひび割れ率 20%に達するまでの走行輪数が多いものの，針入度が低い旧アスファルト（針入度 14）を含む再生骨材に芳香族系の再生用添加剤を用いた再生混合物のひび割れ率 20%に達するまでの走行輪数と比較すると，その差はわずかであった。

##### ➤ 再生骨材混入率の影響

- 芳香族系の再生用添加剤を用いることで，再生骨材配合率が 60%程度までであれば，ひび割れ率 20%に達するまでの走行輪数がほぼ同等であったが，再生骨材配合率が 80%程度になると，走行輪数が少なくなる傾向がある。

##### ➤ 再生用添加剤の影響

- 飽和分系よりも芳香族分系の添加剤の方がひび割れ率 20%に達するまでの走行輪数が若干多い。
- 再生用添加剤の組成による再生効果が異なるため，混合物の性能評価を行う必要がある。

##### ➤ わだち掘れの評価結果

- わだち掘れ量について，わだち掘れ進行速度は配合条件により異なるが，最終的なわだち掘れ量に明確な傾向は見られなかった。

##### ➤ 針入度 14（針入度 20 未満）の旧アスファルトを含む再生骨材の再生加熱アスファルト混合物への適用の可能性について

- 旧アスファルト針入度 14（針入度 20 未満）の再生骨材配合率が 60%で芳香族分系の再生用添加剤を用いた再生混合物の工区（工区 4）は，新規工区に比べて，ひび割れ率 20%に達する走行輪数が少ないものの，その差はわずかであり，同等のひび割れ抵抗性を有して

いる可能性があることから、さらに様々な条件下で供用性を検証する必要があると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 一般社団法人アスファルト合材協会：アスファルト合材統計年報
- 2) 一般社団法人道路建設業協会：道路技術シンポジウム「舗装発生材のリサイクリング 1980」, p.89, 1980.
- 3) 一般社団法人アスファルト合材協会：アスファルト合材, No.25 統計データ, pp.8-17, 1993.1
- 4) 川上篤史, 新田弘之, 藪雅行, 掛札さくら, 川島陽子：繰り返し再生したアスファルト混合物への再生用添加剤と再生骨材配合率の影響, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.76, No.2 (舗装工学論文集第 25 巻), I\_251-I\_259, 2020.
- 5) 公益社団法人 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧, 2019.
- 6) 新田弘之, 田湯文将, 川島陽子, 川上篤史：繰り返し再生したアスファルトの性状における再生用添加剤の組成の影響, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.75, No.1, 59-67, 2019.
- 7) 公益社団法人 日本道路協会：舗装再生便覧 (平成 22 年版), 2010
- 8) 平戸利明, 姫野賢治, 村山雅人, 高橋将人, 高橋修：応力緩和に着目した縦表面ひび割れの発生メカニズムとその要因, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.72, I\_203-I\_210, 2016
- 9) 掛札さくら, 川上篤史, 藪雅行, 新田弘之, 山本富業：再生アスファルト混合物の高温時のひび割れ抵抗性の評価方法, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.77, No.2, 2021.
- 10) 阿部頼政：第 5 回アスファルト規格試験とその意義 (1), アスファルト, Vol.17, No.96, pp 14-19, 1974
- 11) 建設省関東地方建設局関東技術事務所：昭和 56 年度試験道路における試験調査報告書, 建設省, 1982
- 12) 飯島尚, 岩崎尚義：幕張試験舗装におけるアスファルトの老化と供用性, 土木技術資料, 第 27 巻, 3 号, pp.3-8, 1985.
- 13) AASHTO T 324-17 : Standard Method of Testing of Compacted Hot mix Asphalt(HMA)

### 3. 再生混合物の中温化技術の適用に関する検討

#### 3.1. 再生中温化アスファルト混合物の現状把握

##### (1) アンケート内容

再生中温化アスファルト混合物の現状を把握するため、日本アスファルト合材協会に加盟している全国の合材工場を対象にアンケート調査を行った。表 3.1 にアンケート内容を示す。回答数は 814 (回答率 89.9%) であった。

なお、「④再生骨材配合率」と「⑤再生骨材と新規骨材の加熱温度」から、再生中温化アスファルト混合物の出荷温度を計算 (出荷温度=新規骨材の加熱温度×新規骨材配合率+再生骨材の加熱温度×再生骨材配合率) で求めて、出荷温度が全平均値に比べて、20℃以上低い場合には CO<sub>2</sub> 排出量削減を目的としたもの、20℃未満の場合には施工性改善を目的としたものとして分類した。

表 3.1 アンケートの概要

調査対象期間	平成 28 年 4 月～平成 29 年 3 月
調査対象工場数	905 (日本アスファルト合材協会会員加盟工場)
回答工場数	814 (回答率 89.9%)
調査内容	① 再生中温化混合物の出荷実績の有無
	② 適用した中温化技術の種類
	③ 再生中温化混合物の出荷量
	④ 再生中温化混合物の再生骨材配合率
	⑤ 再生骨材と新規骨材の加熱温度
	⑥ 再生中温化混合物の製造に伴い懸念される事項

##### (2) アンケート結果

表 3.2 にアンケート集計結果を示す。再生中温化アスファルト混合物の出荷実績は 72 工場 (8.8%) であり、その出荷量の合計は約 65,000 トンであった。また、適用した中温化技術は、発泡系と滑剤系が約 96%を占めていることが分かった。また、再生中温化アスファルト混合物の再生骨材配合率は 60%以下が約 94%であった。さらに、再生中温化アスファルト混合物の使用目的は、施工性改善が約 85%であった。なお、再生中温化アスファルト混合物の製造に伴い懸念される事項としては、製造温度の低下に伴うバグフィルタの結露を挙げた工場が 4 工場 (CO<sub>2</sub> 排出量削減が目的の工場数：9 工場) あった。

表 3.2 アンケート結果

項 目		工場数	割合 (%)
出荷実績あり		72	8.8
中温化技術の種類	発泡系	33	45.8
	滑剤系	36	50.0
	粘弾性調整系	1	1.4
	その他	2	2.8
再生骨材の配合率	30%以下	30	41.7
	31~60%	38	52.7
	61%以上	1	1.4
	不明	3	4.2
目 的	施工性改善	61	84.7
	CO <sub>2</sub> 排出量削減	9	12.5
	不明	2	2.8
再生中温化混合物の出荷量 ( t )		64,595	



### 3.2. 中温化によるアスファルトヒューム低減効果の把握

#### 3.2.1. 目的

平成 23 年に国際ガン研究機関(IARC)はアスファルトの発ガン性について再評価を行い、「道路舗装におけるアスファルトおよびアスファルトヒュームの職業暴露」等について、グループ 2B(人に対して発ガン性があるかもしれない)に引き上げた。また、我が国において、平成 30 年 7 月にストレートアスファルトの安全データシート(SDS)において、アスファルトヒューム暴露の時間荷重平均(TWA)値の許容濃度が記載された。作業員の健康リスクを低減するためにも、アスファルトヒュームの排出量を抑えることが必要である。既往研究より、アスファルト混合物の製造温度を低減することで、アスファルトから発生するガス内の有機物が減少することが知られている。そのため、アスファルトヒュームの削減対策の観点から、製造・施工温度を低減可能な中温化技術の適用が有効であると考えられる。しかし、製造や施工温度をどの程度下げることによって、アスファルトヒュームの発生量が抑制できるかは明らかではなく、また、国内のアスファルトプラントや施工現場におけるヒューム発生量について十分な測定データはない。

本節では、混合温度の低減によるアスファルトヒューム発生量の抑制効果を、室内試験により検討した。また、作業員のアスファルトヒューム暴露量を把握するために、室内でアスファルト混合物を作製した時、練り落とし直後の再生アスファルト混合物近傍および混合物施工時におけるアスファルトヒューム暴露量を検討した。

#### 3.2.2. アスファルト混合物作製時の暴露量

##### (1) 試験概要

国内では、アスファルト混合物からのアスファルトヒューム発生量について十分な調査がなされていない状況にある。また、再生アスファルト混合物(以下、再生混合物)の出荷割合の多い我が国においては、新規アスファルト混合物(以下、新規混合物)に加えて再生混合物から発生するアスファルトヒューム量の調査も必要と考えられる。

本研究では、新規混合物および組成成分の異なる 2 種類の再生用添加剤(以下、添加剤)を用いた再生混合物をパグミル混合機により一定の温度下で攪拌し、混合温度とアスファルトヒューム発生量の関係を調査した。

##### (2) 試験条件

使用材料とその性状は表 3.3 に、アスファルト混合物の作製条件を表 3.4 にそれぞれ示す。アスファルトには、ストレートアスファルト 60/80 を使用した。また、添加剤には、芳香族分が多い添加剤(以下、添加剤 A)と飽和分が多い添加剤(以下、添加剤 B)の 2 種類を使用した。混合物は、新規・再生混合物ともに密粒度アスファルト混合物(13)とした。また、各混合物におけるアスファルト量は、新規混合物の最適アスファルト量である 5.7%となるように統一した。旧アスファルトの再生は、舗装再生便覧<sup>2)</sup>に記載の方法に従って実施し、再生後の針入度が 70 となるように調整した。

表 3.3 使用材料の性状表

	StAs60/80		添加剤A	添加剤B
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.037	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	0.975	0.909
針入度 (1/10mm)	70	組成 (%)	アスファ ルテン分	0.1
軟化点 (°C)	46.5		レジン分	6.1
伸度 (cm)	100+		芳香族分	88.1
			飽和分	5.7
				47.7
				49.9

表 3.4 アスファルト混合物作製条件

項目	内容	
混合物の種類	密粒度アスファルト混合物 (13) ・新規混合物 ・添加剤 A を用いた再生混合物 ・添加剤 B を用いた再生混合物	
再生骨材の配合比	%	60
アスファルト量	%	5.7
再生骨材の旧アスファルト量	%	3.03
添加剤 A の投入量 旧アスファルト比	%	18.6
添加剤 B の投入量 旧アスファルト比	%	15.0
旧アスファルトの再生後の針入度	1/10mm	70

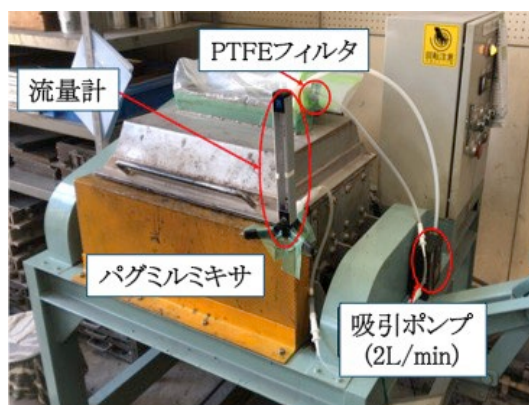


写真 3.1 ヒューム採取状況

### (3) アスファルトヒュームの採取条件

アスファルトヒュームの発生量を測定するために、写真 3.1 のパグミル混合機を使用した。パグミル混合機の投入口をできる限り塞ぎ、アスファルトヒューム採取用のフィルタと定量ポンプ

を接続した。採取条件等は表 3.5 に示すとおりである。温度条件は 3 条件とした。フィルタや吸引流量の条件は ASTM D6494-99 および NIOSH5042 を参考にした。また、吸引条件を均一に近づけ、継続的にアスファルトヒュームを発生するように、採取中も絶えず混合物を攪拌混合した。なお、アスファルトヒュームの採取時間は、混合開始直後から 15 分後から 45 分までの 30 分間とした。

表 3.5 アスファルトヒューム発生量試験条件

項目		条件
混合物の作製時の混合時間 (°C)		110,130,160
混合物作製時の混合時間 (min)		3
吸引時間 (min)		30 (混合後 15 分から 45 分まで)
吸引流量 (L/min)		2.0
吸引時の状態		混合物を攪拌状態
採取フィルタ	種類	メンブレンフィルタ
	材質	PTFE
	細孔 ( $\mu\text{m}$ )	2.0
	直径 (mm)	37.0

#### (4) アスファルトヒューム発生量の分析条件

採取用フィルタに付着した粒子状物質のうち、有機溶剤(ベンゼンもしくはトルエン)に溶解した分をアスファルトヒュームとしている。分析手順は以下の通りである。

- ① 試験前後でフィルタの重量を測定し、フィルタに付着した粒子状物質の質量を算出
- ② フィルタを試験管内に移し、有機溶剤(ベンゼンもしくはトルエン)5mL につけ込み、20 分間超音波処理
- ③ 有機溶剤を 0.45  $\mu\text{m}$  孔シリンジフィルタにてろ過
- ④ ろ過したものをアルミカップに移し、40°C、7~27kPa 下で真空吸引(トルエンの場合、80°C でさらに 30 分加温)
- ⑤ アルミカップの重量を測定し、アスファルトヒューム量としての質量を算出

#### (5) 試験結果

##### a) 混合温度の違いによるアスファルトヒューム発生量の違い

図 3.1 に各混合物におけるアスファルトヒューム量を示す。いずれの混合物においても温度が低下することで発生量が大幅に低下していることが分かった。同温度帯で比較すると、添加剤を用いた再生混合物は、新規混合物よりも発生量が多く、160°C では 2 倍程度の差が見られた。このことから、添加剤を用いた再生混合物の場合は、添加剤そのものから相当量のアスファルトヒュームが発生したのと考えられる。また、130°C において、再生用添加剤の種類によって発生量に違いが見られた。ただし、両者の差は 160°C では逆転しており、明確な差について議論するには、より詳細な検証が必要である。

##### b) 再生骨材からのアスファルトヒューム発生量の検討

再生用添加剤を含まない再生混合物から発生するアスファルトヒューム量を調査した。結果を図 3.2 に示す。なお、図 3.1 の結果に示す混合物とは異なる再生骨材を使用している点に留意する。各混合物において、有機溶剤 (トルエン) 可溶分量は 5~6mg 程度であった。図 3.1 で示したとおり、再生用添加剤を含んだ場合、新規混合物と再生混合物では発生量に 2 倍近い差があ

った。しかし、これと比較すると、再生用添加剤を含まない再生アスファルト混合物からの発生量は新規混合物とほとんど差がないと言える。そのため再生骨材、つまり旧アスファルトから発生するアスファルトヒューム量は新規混合物と同程度であることから、再生混合物からのアスファルトヒューム発生量の増大は再生用添加剤に起因しているものと推測された。

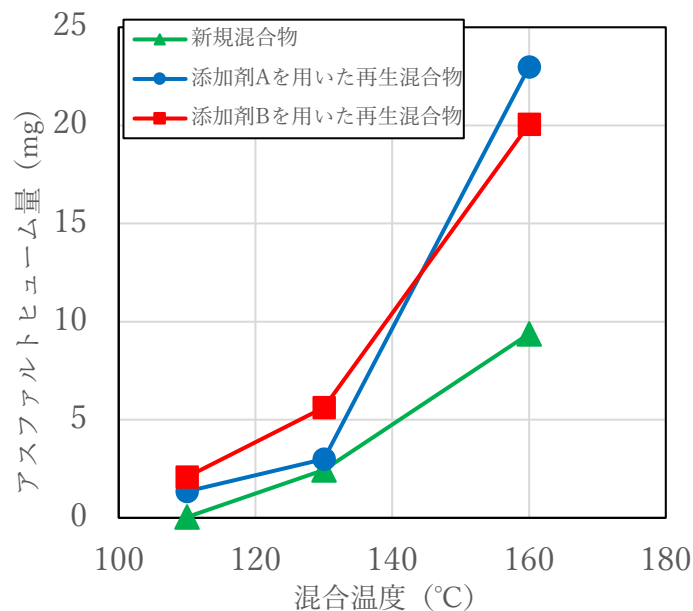


図 3.1 各混合物の温度毎のアスファルトヒューム発生量<sup>3)</sup>

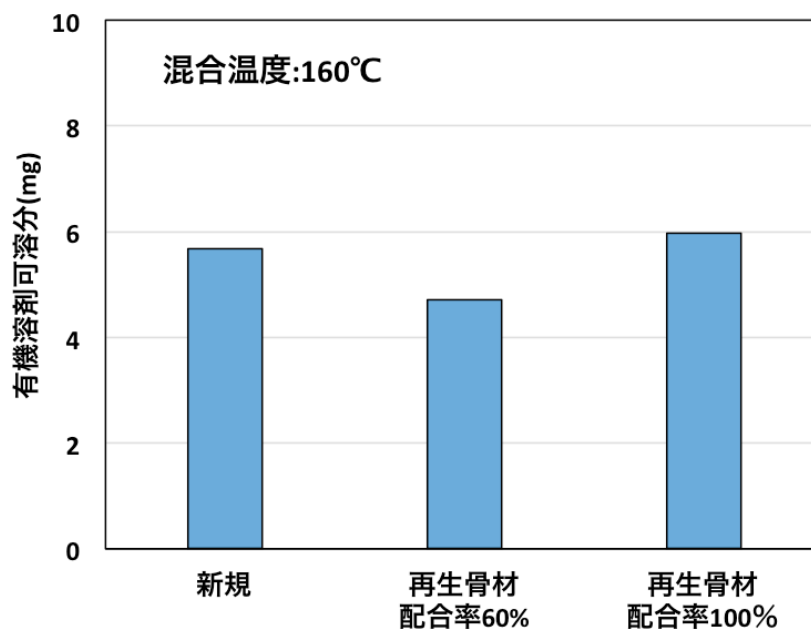


図 3.2 再生用添加剤無添加時の有機溶剤可溶分<sup>3)</sup>

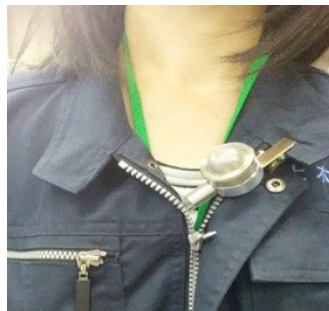
### 3.2.3. 屋内でのアスファルト混合物作製時のアスファルトヒューム暴露量

#### (1) 試験概要

屋内の作業場やプラントの試験室など、屋内で試験用のアスファルト混合物を作製する場合は、室内でアスファルトヒュームが滞留しやすく、結果的に作業員のアスファルトヒューム暴露量が多くなる恐れがある。そこで、室内にて再生混合物を作製している際の作業員のアスファルトヒューム暴露量を測定し、屋内作業における暴露量の安全性評価を行った<sup>4)</sup>。

#### (2) 試験条件

アスファルトヒューム暴露量に対する温度の影響を検討するため、混合温度を 165℃、150℃ および 135℃として、アスファルト混合物を作製した。採取対象の作業員には写真 3.2 a)に示すように、胸元近くにフィルタを取り付け、ポンプで吸引した。アスファルト混合物の供試体として、マーシャル供試体およびホイールトラッキング供試体作製中のアスファルトヒュームを採取した。なお、各作業員の作業内容は表 3.6 に示すとおりである。また、アスファルトと骨材を混合するパグミルミキサなどの試験機や供試体作製の作業台近傍にもフィルタを設置し、作業環境近傍のアスファルトヒューム量を測定した。設置したフィルタの様子を写真 3.2 b)に示す。作業員および作業環境のヒュームを採取するのに使用したフィルタの種類も併せて表 3.6 に示す。なお、各混合温度での作業時間はおよそ 5 時間であり、ヒューム採取時のポンプ流量は 4L/min とした。



a) 作業員



b) 作業環境

写真 3.2 測定状況

表 3.6 採取対象の概要

対象		内容	フィルタ種類
作業員	作業員 A	アスファルト、添加剤投入、MS 作製 等	PTFE フィルタ (TF98)
	作業員 B	骨材等の投入 転圧 等	
	作業員 C	骨材計量、運搬 備品類の清掃 等	
作業環境	パグミルミキサ	アスファルト混合物の 練り混ぜ	PTFE メンブレンフィルタ (孔径 2.0 μm)
	コンパクト	供試体の転圧	
	マーシャル (MS) 作業台	MS 供試体の作製	

### (3) 試験結果

各作業員のフィルタや、作業環境近傍に設置したフィルタに捕捉された粒子状物質に対して、3.2.2 項で示した手順で有機溶剤(トルエン)に溶解した分から、時間荷重平均(TWA)値を算出し、これをアスファルトヒューム暴露量とした。アスファルトヒューム暴露量の結果を図 3.3 に示す。混合温度の低減によるアスファルトヒューム暴露量の削減効果は認められなかった。また、作業環境については、パグミルや作業台近傍でアスファルトヒューム暴露量が多かった。これは、混合物の練り混ぜに関わる作業において、アスファルトヒュームが発生しやすいためと推察された。なお、SDS に記載されている許容濃度は  $0.5\text{mg}/\text{m}^3$  であるため、本試験のアスファルトヒューム暴露量は許容値と比べて  $1/3$  以下であり、安全上問題ないと判断された。

図 3.4 に全粒子状物質(TPM)量の TWA 値に対するアスファルトヒューム暴露量の相関を示す。作業環境については、TPM 量が増えるとアスファルトヒューム暴露量も増加する傾向にあった。一方、作業員については、TPM の TWA 値が増えても、アスファルトヒューム暴露量は横ばいに推移し、増加する傾向は見られなかった。写真 3.3 にアスファルトヒューム採取後のフィルタを示す。比較のため、作業員 B のフィルタと前項の実験で採取したフィルタを併せて示す。前項の実験では、パグミル内でアスファルト混合物を作製し、発生するアスファルトヒュームをほぼ漏れなく採取していたため、有機溶剤可溶分が多く、フィルタが黄色に変色していた。一方、本試験の作業員のフィルタは褐色であった。これは、骨材等の投入や道具類の洗浄などに起因するほこりが捕捉されていたことを表している。このため、TPM 量が多いもののアスファルトヒューム暴露量は増加しなかったものと考えられた。したがって、作業内容によっては TPM の暴露量が多くなることもあるが、必ずしもアスファルトヒューム暴露量が多いとは限らないことが示唆された。

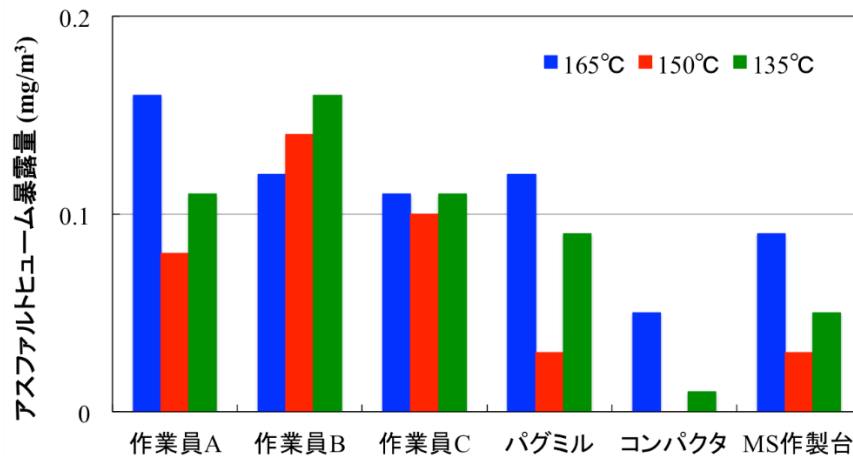


図 3.3 各混合温度でのアスファルトヒューム暴露量

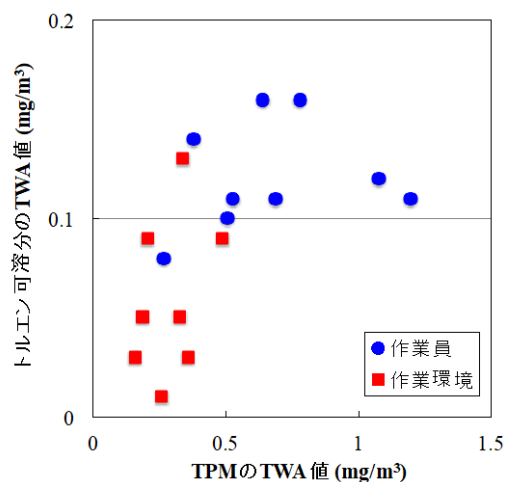
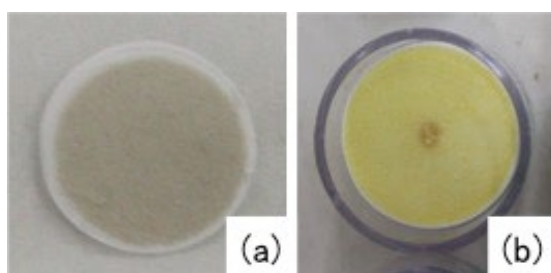


図 3.4 粒子状物質(TPM)とヒューム濃度の相関関係



a)作業員

b)3.2.2 の実験で得られたフィルタ

写真 3.3 試験後のフィルタの外観

### 3.2.4. 屋外でのヒューム暴露量の検証

#### (1) 試験概要

練り落とし直後のアスファルト混合物からのヒューム発生量を調査した。練り落としたアスファルト混合物の中心、および中心から 1m, 3m 離れた位置にフィルタを設置しヒュームを採取した。また、作業者の呼吸位置を考慮して地上から 1.5m 高さ、および、混合物近傍として 0.5m 高さの位置にもフィルタを設置した。測定時の状況を写真 3.4 に示す。試験には 4 種類のアスファルト混合物を使用し、中温化による温度の低減に伴うヒューム発生量の変化についても検証を試みた。なお、ヒュームの採取時間は、アスファルト混合物の練り落とし直後の 30 分間とし、これを 1 種類の混合物につき 2 度連続で練り落とし、計 1 時間とした。

#### (2) 試験材料

試験には 4 種類のアスファルト混合物を使用した。使用混合物の概要を表 3.7 に示す。

表 3.7 使用混合物の概要

混合物の種類	アスファルト	再生骨材配合率	練り落とし直後の温度 (実測値)
新規混合物	ストレート	-	163~166°C
中温化混合物			127~136°C
再生混合物	アスファルト 60/80	50%	171~173°C
再生中温化混合物			132~134°C

### (3) 試験条件

試験条件を表 3.8 に示す。ヒュームの採取は、アスファルト混合物の荷下ろし後 30 分間を 2 回行った。また、ヒュームの吸引地点は図 3.5 に示すように、試験位置中心を 0m、中心から 1m、3m の位置とした。また、吸引高さは作業者の呼吸器位置を考慮した 1.5m およびアスファルト混合物近傍として 0.5m とした。なお、中心については、アスファルト混合物の高さに応じて微調整した。位置および高さを変えて計 10ヶ所で実施した。ヒュームの充満を避けるため、テントの天井は出来る範囲で開放した。なお、本試験の前にブランク試験を実施し、テント内のヒューム量の初期値の確認も行った。

表 3.8 試験条件

項目		条件
吸引時間 (min)		60 (30min×2)
吸引流量 (L/min)		2.0
採取フィルタ		PTFE メンブレンフィルタ (孔径 2.0 μm)
風向き		自然風向
吸引場所	地点	中心 0m, 1m, 3m
	高さ	0.5m, 1.5m

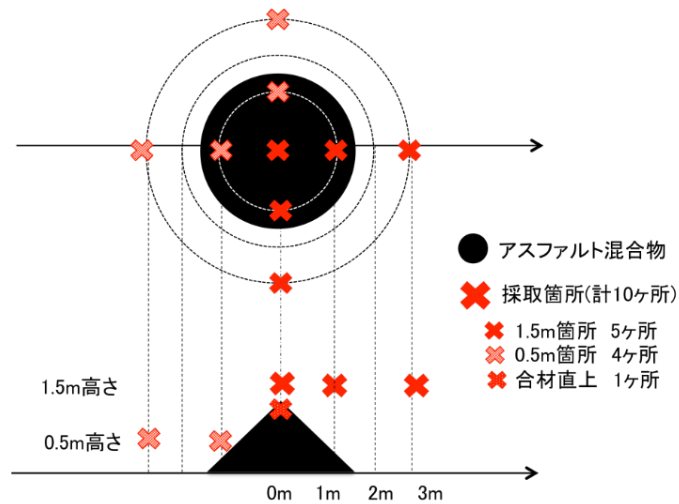


図 3.5 採取箇所 (上図：真上, 下図：正面)





写真 3.4 測定状況

#### (4) 試験結果

アスファルト混合物の種類によらず、ヒューム濃度は検出濃度以下であった。なお、フィルタには TPM が捕捉されていたので、各地点における TPM 量の平均値による TWA 値を算出した。結果を図 3.6 に示す。参考値として、屋内試験における再生混合物(165℃)で最も低い TPM 量の TWA 値も併せて示した。再生混合物がもっとも多く、中温化混合物がもっとも低く、混合温度の低減により TPM が減少したものと考えられた。また、屋内作業と比較して、同程度の温度の再生混合物であっても、練り落とし直後の TPM 量は非常に低い値であった。

今回、ヒュームは検出されず、TPM 量も非常に低いことから、ヒューム量は規定値と比較して十分低いと言える。しかし、本試験は 2L/min で 1 時間しか吸引しておらず、採取流量が少なく、計測するのに十分にヒュームを採取できなかった可能性がある。練り落とし直後のアスファルト混合物からのヒューム発生量については、さらなる検証が必要である。

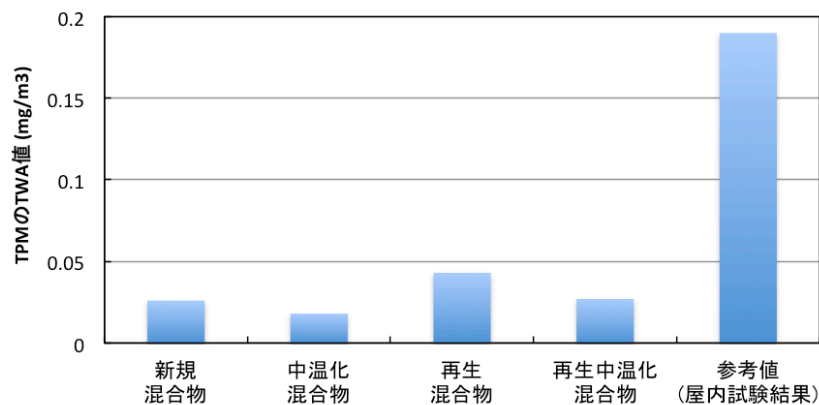


図 3.6 各混合物の平均 TPM 量から算出した TWA 値

### 3.2.5. アスファルト舗装施工時のヒューム暴露量の検証

#### (1) 試験概要

アスファルト舗装を施工中の作業員のアスファルトヒューム暴露量の調査を行った。レーキ作業員にフィルタを取り付け、アスファルト舗装(W2.2m × L90m)を施工時にアスファルトヒュームを採取した。なお、ポンプ流量は 4.0 L/min とした。正味の施工時間は 1 時間程度であったが、作業員の待機時間中やアスファルト混合物の到着を待っている間もポンプを稼働させたため、

計 3 時間吸引し続けた。

## (2) 試験結果

施工中の様子を写真 3.5 に示す。測定の結果、TPM 量は 0.01mg 程度と非常に小さく、このため、ヒューム濃度は検出濃度以下であった。今回の施工は、通常の舗装現場と比較すると規模が小さいとはいえ、アスファルト舗装施工時のヒューム暴露量は、かなり少ないものと考えられた。



写真 3.5 施工および測定状況

### 3.2.6. まとめ

混合温度を低くすることでアスファルトヒューム発生量が少なくなることを確認した。再生混合物の場合、再生用添加剤に起因すると考えられるアスファルトヒューム量も、混合温度の低減により少なくなることから、中温化技術を再生混合物に適用することで、アスファルトヒュームの発生量を抑制できることが示された。

現状の調査においては、屋内での試験室や練り落とし後のアスファルト混合物、また、小規模工事におけるアスファルト舗装の施工において、作業員のアスファルトヒューム暴露量は規定値よりも十分に小さい量であった。ただし、事例はまだ少なく、施工規模の大きい現場での計測例などを集め、アスファルトヒューム発生量の特徴を把握する必要がある。

### 3.3. 製造・施工温度による混合物性状の影響把握

#### 3.3.1. 評価概要

様々な中温化技術により作製した再生中温化混合物の性状を把握し、現行の技術であれば中温化を適用しても問題ないことを確認することを目的とした。表 3.9 に評価条件を示す。

表 3.9 再生中温化混合物の評価条件

項目	内容
評価技術	フォームドアスファルト（機械式），滑剤系添加剤，粘弾性調整系，中温化アスファルト
混合物の種類	再生密粒度アスファルト混合物（13）
統一材料	新材，再生骨材，アスファルト（40/60）
再生用添加剤	標準は芳香族系，各技術で独自設定
配合設計	骨材配合およびアスファルト量※
製造温度（℃）	中温化：145℃（20℃低減），標準：165℃
締固め温度（℃）	中温化：125℃（20℃低減），標準：145℃
再生骨材の配合率（％）	30，60
供試体の作製	評価技術毎に作製
再生アスファルトの設計針入度	50

※ 中温化技術により調整する

#### 3.3.2. 評価方法

再生中温化混合物は、通常の再生加熱アスファルト混合物を標準とし、比較することとした。表 3.10 に評価温度と評価する中温化技術の種類を示す。また、評価項目は、一般的な混合物特性を把握するため、表 3.11 に示す項目を設定した。

表 3.10 評価温度と評価する中温化技術の種類

項目		製造温度 165℃	製造温度 145℃
再生混合物	（比較用）	○	—
中温化技術を適用 した再生混合物	フォームド	—	○
	滑剤系	—	○
	粘弾性調整系	—	○
	中温化アスファルト	—	○

表 3.11 評価内容

評価項目	試験項目
マーシャル特性，耐水性	マーシャル試験（標準，水浸）
耐流動性	動的安定度（60℃）
高温粘着性	高温カンタブロ（60℃）
疲労特性	疲労抵抗性（400μ，5Hz，20℃）
ひび割れ抵抗性	圧裂試験（0℃，25℃，60℃）

### 3.3.3. 評価結果

#### (1) マーシャル特性

マーシャル試験の結果として、マーシャル安定度、フロー値および残留安定度の結果をそれぞれ図 3.7 から図 3.9 に示す。マーシャル安定度については、粘弾性調整系の中温化剤で作製した混合物で、やや高めとなったが、全体的に中温化技術による差異は小さかった。また、残留安定度についても、中温化技術による差は小さく、再生骨材配合率が高いほど、残留安定度が高い傾向が見られた。つまり、再生骨材配合率の高い方が、耐水性が高いことが示唆された。

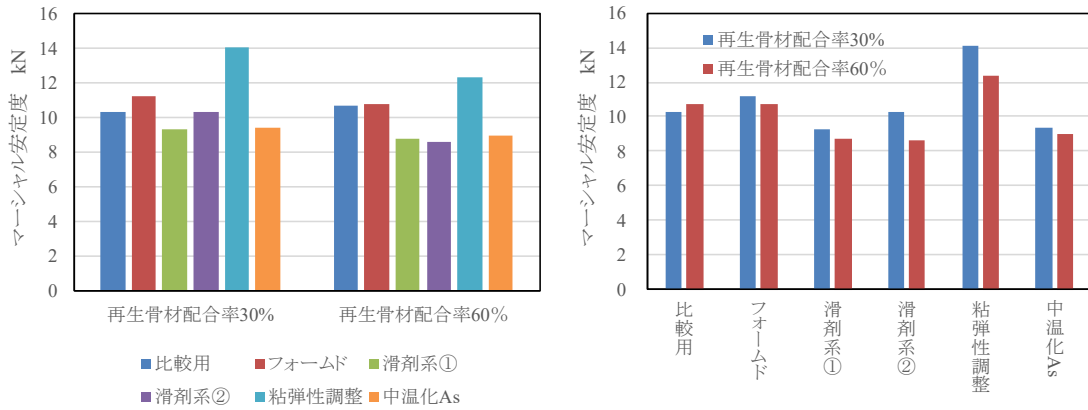


図 3.7 マーシャル安定度

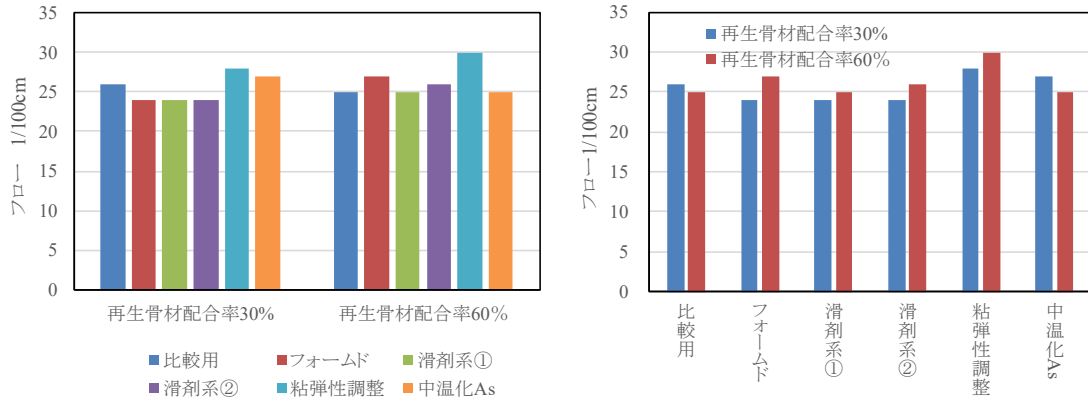


図 3.8 フロー値

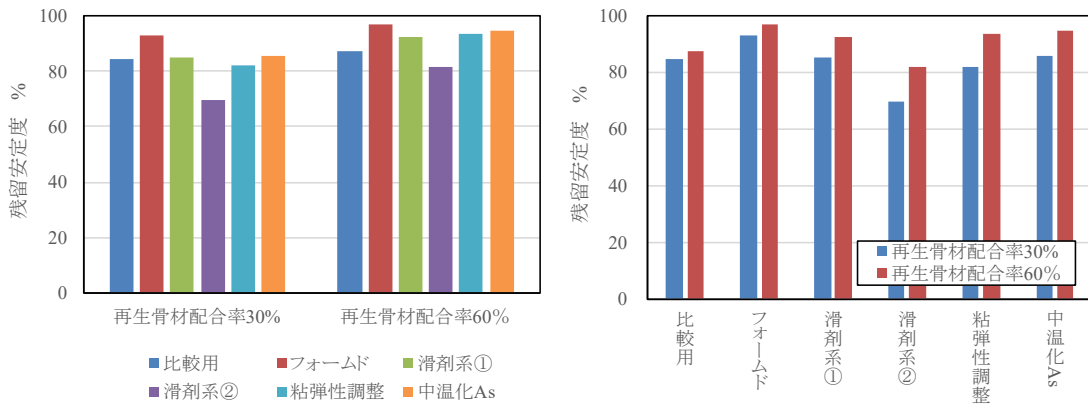


図 3.9 残留安定度

## (2) 耐流動性

ホイールトラッキング試験から得られた動的安定度の結果を図 3.10 に示す。マーシャル安定度の結果と同様に、やや粘弾性調整系を用いた再生中温化混合物の動的安定度が高かったが、概ね中温化技術の差は小さいと考えられた。また、再生骨材配合率による動的安定度の違いは、中温化技術により異なっており、一律の傾向は見られなかった。

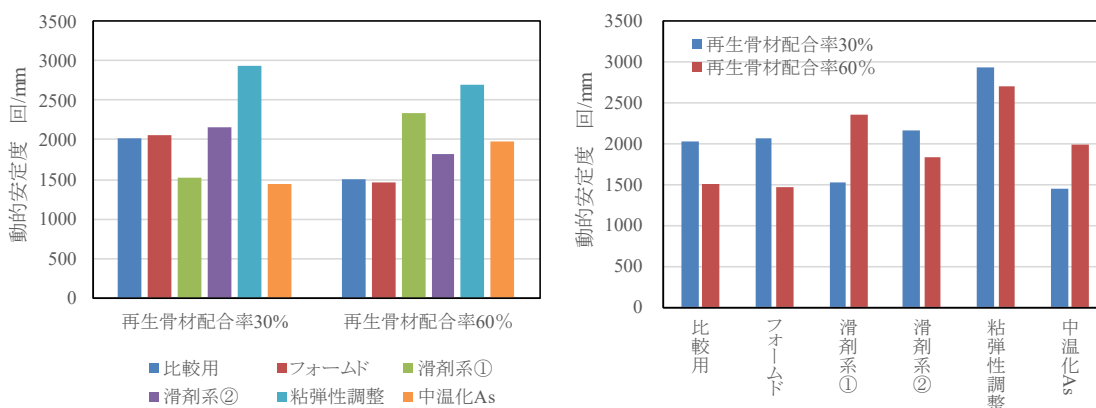


図 3.10 動的安定度

## (3) 疲労抵抗性

疲労破壊抵抗性を把握するため、曲げ疲労試験を行った。曲げ疲労試験における破壊の定義は、複素弾性率が急激に低下した時として、降伏回数を算出した。結果を図 3.11 に示す。中温化技術によって、比較用の再生混合物より降伏回数が多いものと少ないものとに分かれた。また、中温化技術によらず、再生骨材配合率が高い方が、降伏回数が多かった。また、载荷 100 回および载荷 1000 回の時の複素弾性率は図 3.12 に示す。曲げ疲労試験をひずみ制御で実施した場合、複素弾性率が大きいものほど発生する応力が大きく寿命が小さくなるとされている。中温化技術や再生骨材配合率によって、複素弾性率に差はほとんど見られなかったことから、疲労破壊による寿命の違いは小さいことが示唆された。

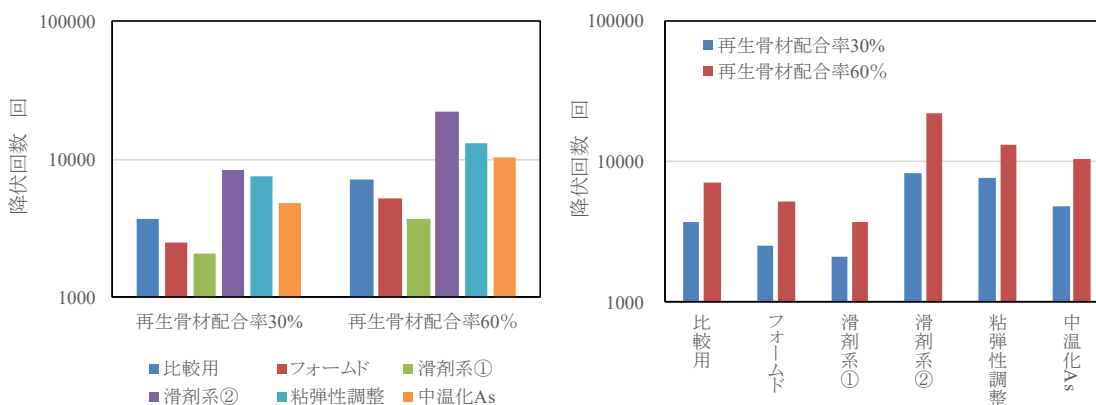
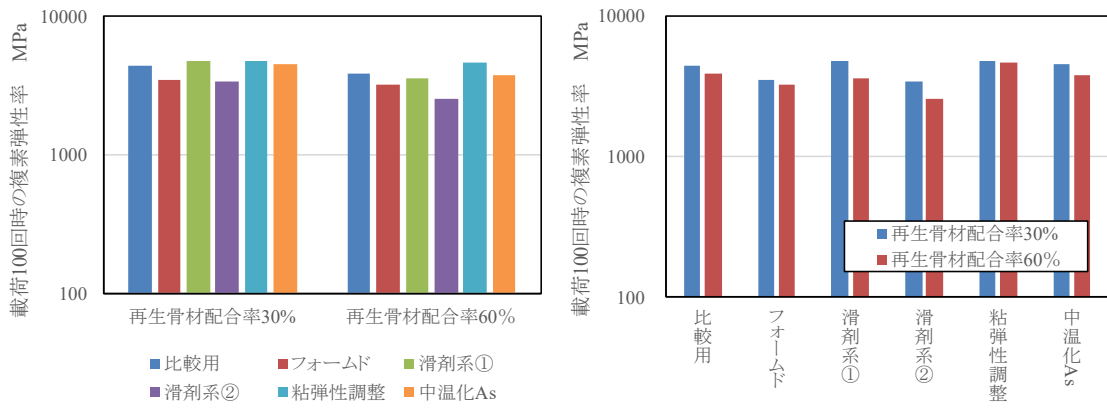
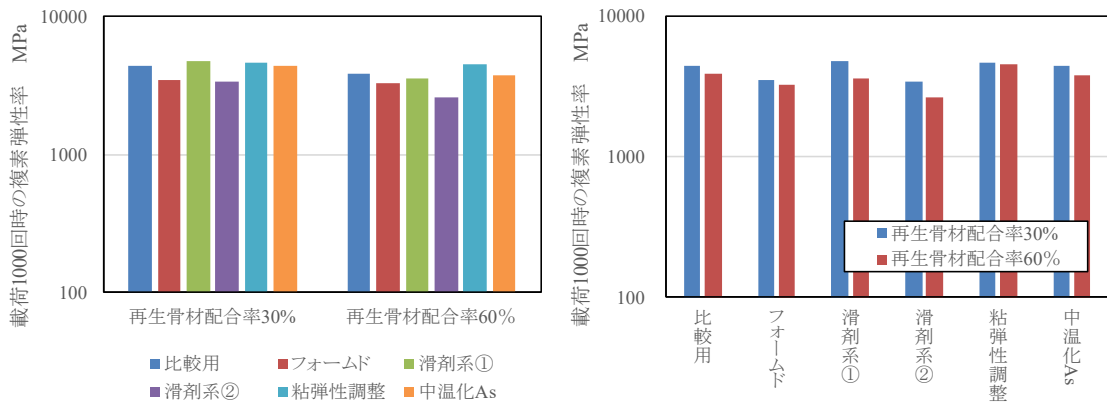


図 3.11 降伏回数



a) 載荷 100 回



b) 載荷 1000 回

図 3.12 複素弾性率

#### (4) 圧裂試験結果

常温(25℃)での圧裂試験の結果として、圧裂強度、圧裂変位および圧裂係数の結果を図 3.13 から図 3.15 に示す。圧裂強度は滑剤系①の中温化剤を使用した再生中温化混合物で若干小さかったが、他の再生中温化混合物は比較用の再生混合物とほぼ同程度の値だった。圧裂変位については、中温化技術による差はほとんど見られなかった。そのため、圧裂係数は、圧裂強度の大小関係に準じたような結果となった。

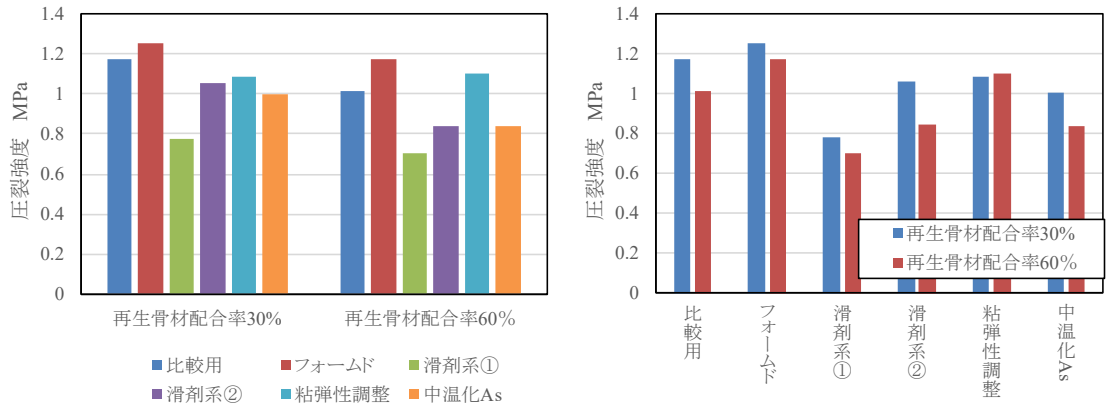


図 3.13 圧裂強度

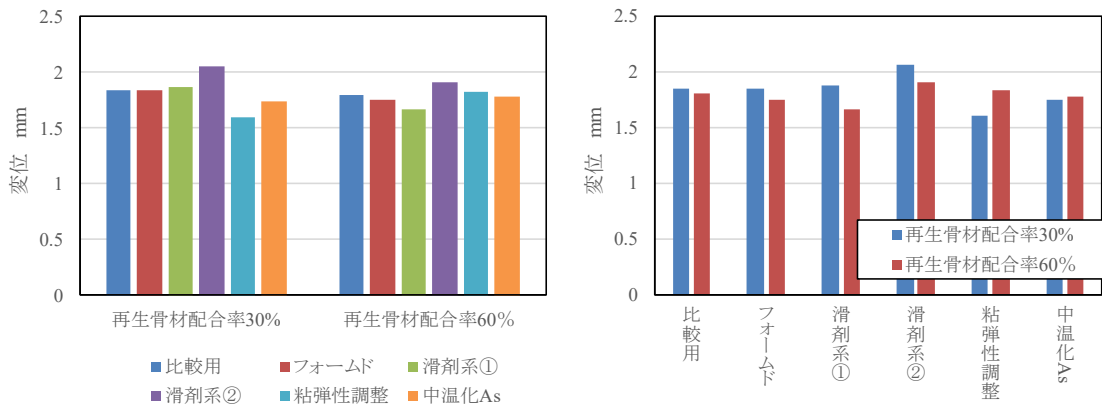


図 3.14 圧裂変位

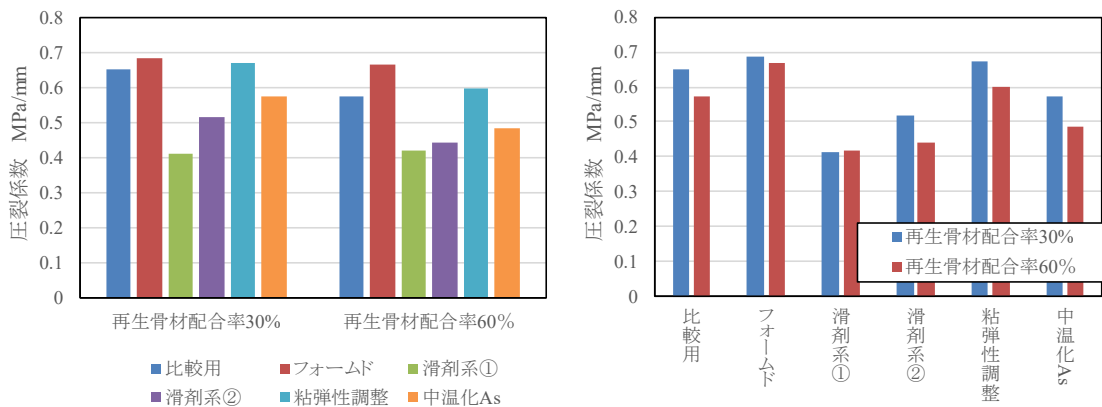


図 3.15 圧裂係数

### (5) 高温カンタブロ損失率

再生混合物の高温時のひび割れ抵抗性を検討するため、高温カンタブロ試験を行った。高温カンタブロ損失率の結果を図 3.16 に示す。比較用の再生混合物および中温化アスファルトを用いた再生中温化混合物では、高温カンタブロ損失率が高い結果となったが、他の再生中温化混合物は 2%以内に収まった。また、再生骨材配合率が高くなるほど、高温カンタブロ損失率が高い傾向が見られた。

それぞれの混合物の空隙率と高温カンタブロ損失率の関係を図 3.17 に示す。中温化技術により空隙率にばらつきが見られた。特に、再生骨材配合率が 60%の場合、空隙率が 3%を切るものや 6%以上になる場合が見られた。

高温カンタブロ損失率と圧裂強度比(0°C/60°C)の関係を図 3.18 に示す。高温カンタブロ損失率がやや高い場合もあるが、圧裂強度比は全て 20 以上であった。

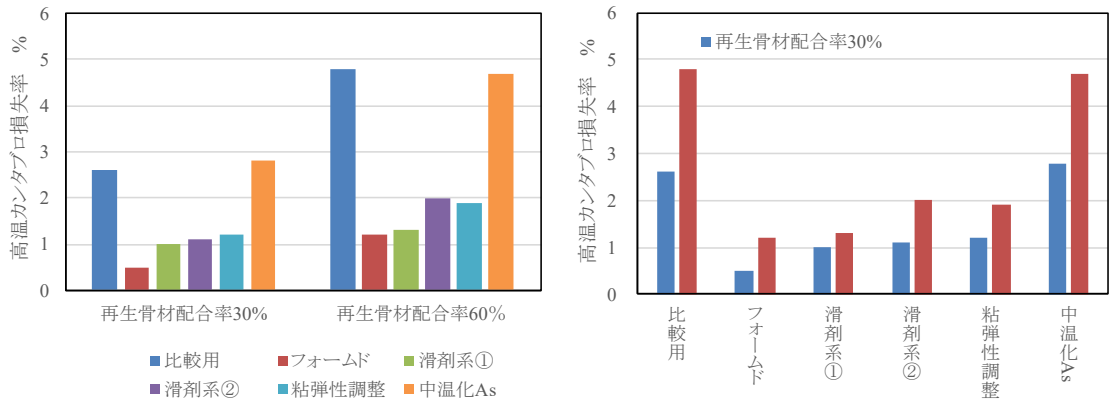
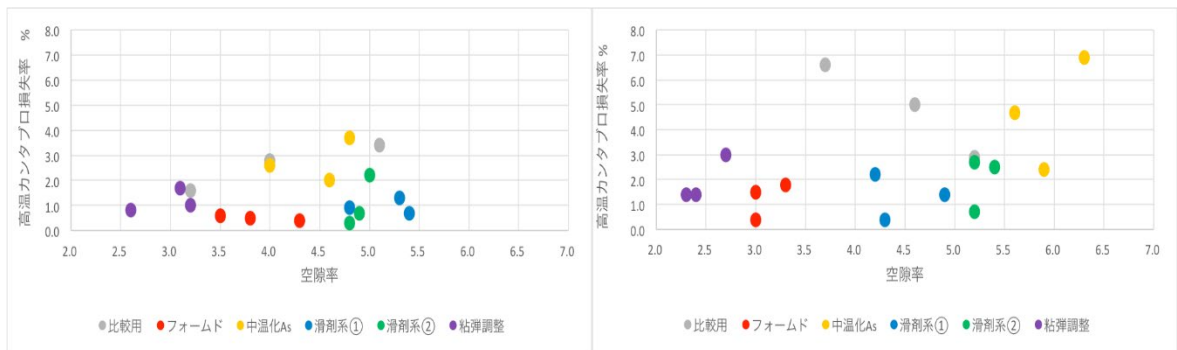
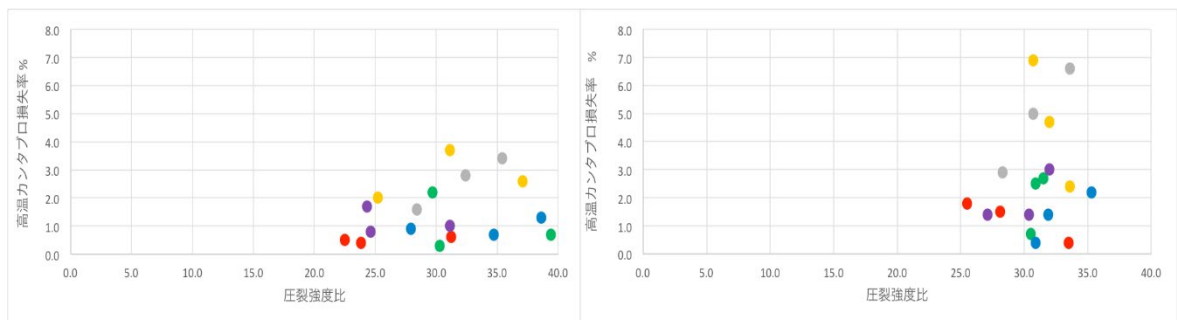


図 3.16 高温カンタブロ損失率



(左：再生骨材配合率 30%，右：再生骨材配合率 60%)

図 3.17 高温カンタブロ損失率と空隙率の関係



(左：再生骨材配合率 30%，右：再生骨材配合率 60%)

図 3.18 高温カンタブロ損失率と圧裂強度比(0°C/60 °C)の関係

### 3.3.4. まとめ

本検討により得られた知見を以下に示す。

- 中温化技術の違いにより空隙率に差が見られた。
- マーシャル安定度や動的安定度などは、粘弾性調整系で高い傾向にあったが、他の中温化技術による差はほとんど見られなかった。
- 疲労破壊抵抗性は、中温化技術による差はほとんど見られなかった。
- 滑剤系、中温化 As は圧裂強度、圧裂係数ともに標準の再生混合物より低くなる傾向にあった。
- 高温カンタブロ損失率は多くが 2%以内であったが、一部これを上回る値を示すものもあった。



### 3.4. 再生中温化アスファルト混合物の検討事例の調査

#### (1) 課題の調査

再生中温化アスファルト混合物の検討事例は(国研)科学技術振興機構が運営するJ-GLOBALを用いて、“中温化”と“再生”をキーワードとして検索してヒットした日本での検討事例と3.1にて実施したアンケート調査から再生中温化アスファルト混合物の製造に関する課題に焦点を絞り整理した。

#### (2) 調査結果

表 3.12 に文献調査の結果を示す。調査結果より、再生中温化アスファルト混合物には、様々な種類の中温化技術の適用性が検討されていることが分かった。また、製造温度の低減は20~30℃、再生骨材配合率は30~70%の範囲で検討されており、この時の混合物の性状は比較対象の混合物と同等であることが確認されている。

図 3.19 にアンケートから挙げられた課題を整理した結果を示す。

表 3.12 再生中温化アスファルト混合物の調査結果

中温化技術の種類	発泡系	滑剤系	粘弾性調整系	プレミックス	
製造温度の低減の程度 (°C)	20~30	30	30	30	
再生骨材配合率 (%)	30~70	30	30~50	30	
混合物性状	締固め度 (%)	98	99	100	95~100
	残留安定度 (%)	91	90.4	85~90	84~90
	動的安定度	比較混合物と同等			
	疲労抵抗性	—	—	比較混合物と同等以上	
課題	剥離抵抗性の低下, 連続運転時のバグフィルタの結露				

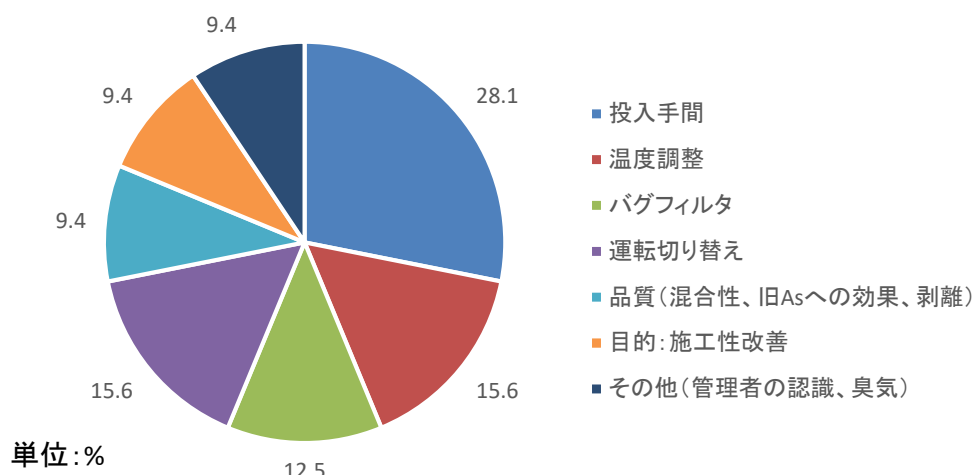


図 3.19 プラントアンケートから挙げられた課題

### 3.5. 試験施工等による長期耐久性・耐候性の把握

#### 3.5.1. 概要

本検討では、沖縄県大宜味村の暴露場にて2年間屋外暴露した試験体の曲げ性状の変化を検討し、実環境下での再生中温化アスファルト混合物の耐候性を評価した。

#### 3.5.2. 試験概要

##### (1) 試料

試験に用いたアスファルト混合物は表 3.13 に示す通り 3 種類とし、新規アスファルト混合物(以下、新規混合物)、再生アスファルト混合物(以下、再生混合物)および再生中温化アスファルト混合物(以下、再生中温化混合物)とした。いずれの混合物も密粒度(13)混合物とした。混合温度は、再生中温化混合物のみ、通常(165℃)よりも低く、150℃、135℃とした。再生混合物および再生中温化混合物の旧アス針入度やアスファルト量は表 3.14 の通りである。また、再生用添加剤には、芳香族分の多いもの(添加剤 A)および飽和分の多いもの(添加剤 B)の2種類を使用した。それぞれの再生用添加剤の密度や組成成分を表 3.15 に示す。

全ての混合物でホイールトラッキング供試体を作製し、周りをアルミ板で固定して、沖縄県大宜味村の土木研究所暴露実験施設で暴露した。暴露試験の様子を写真 3.6 に示す。暴露期間は2019年5月から2021年3月までの2年間である。

表 3.13 再生中温化アスファルト混合物の調査結果

種類	混合物配合	混合温度(℃)	再生骨材配合率(%)
新規混合物	密粒度(13)	165	-
再生混合物		165	50
再生中温化混合物		150,135	

表 3.14 再生混合物のバイнда性状調査結果

項目		性状
旧アスファルト針入度 (1/10mm)		22
再生アスファルト針入度(1/10mm)		70
再生用添加剤量 (旧アス比) (%)	再生用添加剤 A	22.5
	再生用添加剤 B	20.7
アスファルト量 (%)		5.7
旧アスファルト量 (%)		2.5

表 3.15 再生用添加剤の密度および組成成分

項目		添加剤 A	添加剤 B
密度(g/cm <sup>3</sup> )		0.95	0.9083
組成* (%)	飽和分	33.3	79.0
	芳香族分	63.6	15.1
	レジ分	2.6	4.6
	アスファルテン分	0.5	0.8

\*JPI 5S-70-2010 に準拠



写真 3.6 暴露の様子

## (2) 試験方法

実供用中において紫外線や熱による酸化劣化により、アスファルト混合物の表面の曲げ性状が変化するものと考えられる。そこで、暴露した供試体に対して、小型曲げ試験を実施した。小型曲げ試験とは、ホイールトラッキング供試体から  $20 \times 20 \times 120 \text{mm}$  に切り出した供試体で実施する曲げ試験である。低温時の脆性を把握するために用いられるが、表面の劣化度合いを評価するためにも行われている。試験条件は既往文献<sup>5)</sup>に準拠して、载荷速度  $10 \text{mm/min}$  とした。試験温度は、脆化点を得るために荷重のピーク値およびひずみの変曲点の範囲内に入るように、それぞれの試料毎に微調整した。

暴露による表面のバインダ性状の変化を検討するために、ホイールトラッキング供試体の表面  $1 \text{cm}$  を切り出し、アスファルトバインダを抽出回収して、針入度、軟化点および伸度を測定した。

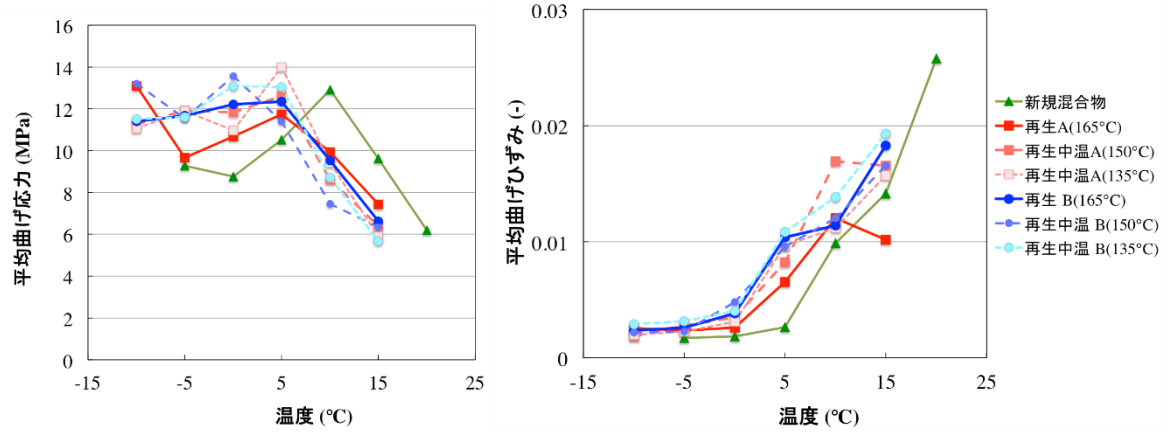
### 3.5.3. 試験結果

#### (1) 曲げ性状

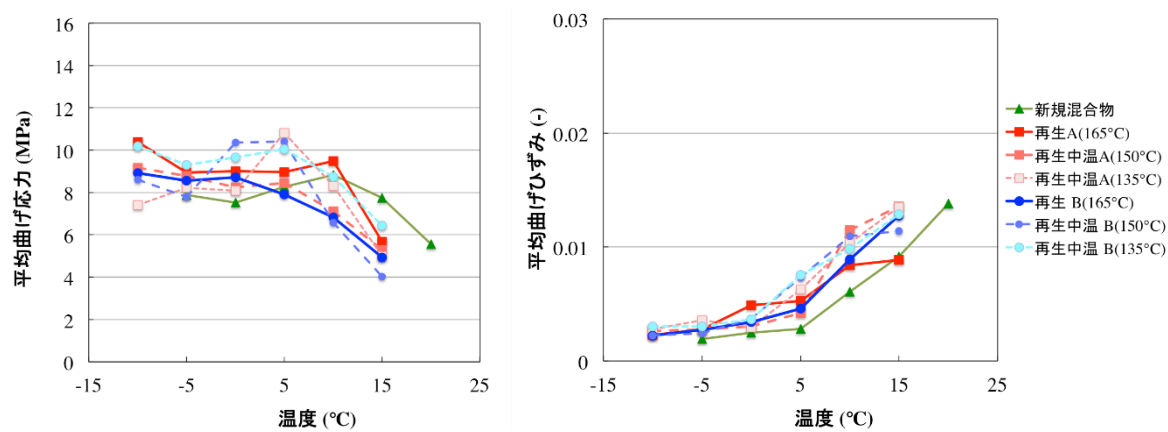
曲げ応力および曲げひずみの結果をそれぞれ図 3.20 に示す。暴露 0 年目の初期値の曲げ性状を比較すると、添加剤 A を加えた混合物(以下、 $\bigcirc\bigcirc\text{A}$  と表記)や添加剤 B を加えた混合物(以下、 $\bigcirc\bigcirc\text{B}$  と表記)のいずれも、新規混合物よりも脆化点が低温側に見られた。つまり、新規混合物よりも再生混合物の方が脆化点は低くなる傾向にあり、再生中温化混合物でも同様の傾向が確認された。

暴露 1 年後、2 年後の曲げ性状を比較すると、再生中温 A の脆化点は同程度かやや高温側に移行しており、応力は全体的に低下する傾向にあった。既往研究<sup>6)</sup>においても、表面の劣化によって、供用中の再生混合物の曲げ応力が低下したことが報告されている。また、再生中温 B も、再生中温 A と同様で、脆化点は同じか高い方にシフトした。しかし、混合温度による曲げ性状の違いはほとんど見られず、混合温度の影響は小さいものと考えられた。そのため、使用した再生用添加剤の種類によらず、同じ暴露条件であれば、再生中温化混合物も再生混合物と同様の曲げ性状を担保することが示唆された。

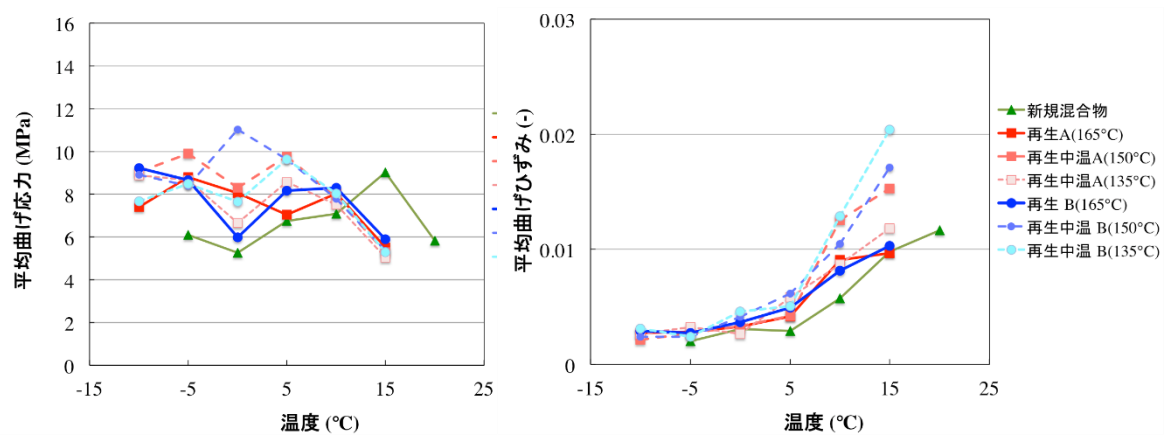
曲げひずみの変曲点から算出した脆化点の結果を図 3.21 に示す。再生中温 B( $150^\circ\text{C}$ )のみ極端に低いが、それ以外の再生中温化混合物は概ね同程度の脆化点であり、新規混合物よりも低かった。2 年間の暴露試験によって劣化が進み、徐々に脆化点が高くなったが、新規混合物よりも低い範囲に収まっていた。



a) 暴露0年目(初期値)



b) 暴露1年目



c) 暴露2年目

図 3.20 暴露した再生中温化アスファルト混合物の曲げ性状

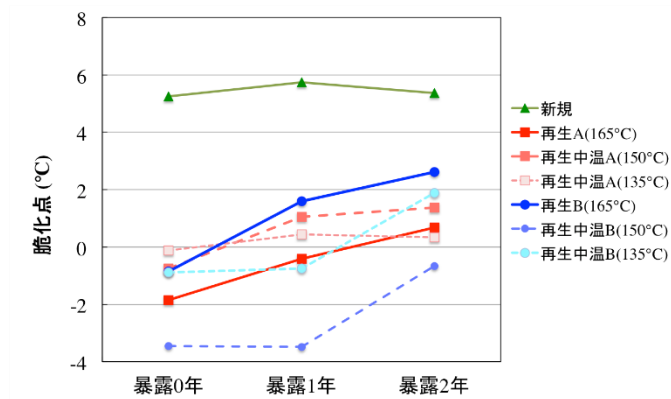


図 3.21 暴露年数に対する脆化点の変化

(2) バインダ性状

供試体の表面 1cm 深さから抽出回収したアスファルトバインダの針入度、軟化点および伸度の結果を図 3.22 から図 3.24 に示す。再生中温化混合物の場合、製造時の劣化が抑えられたため、暴露 0 年目の針入度は新規混合物より高くなった。その結果、暴露 1 年、2 年後において、表面の針入度は新規よりも高く、劣化が抑制されていたことが示された。

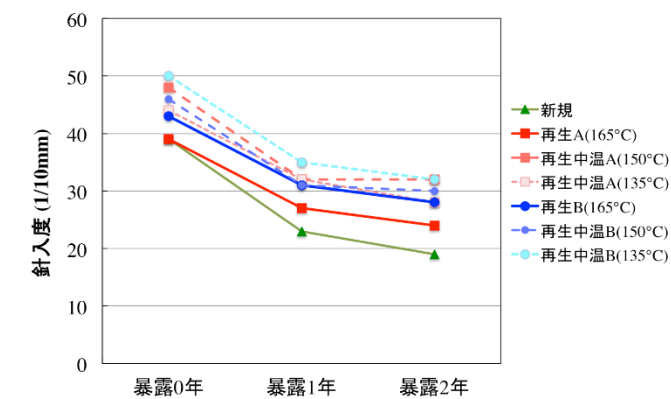


図 3.22 暴露供試体の表面から抽出回収したバインダの針入度

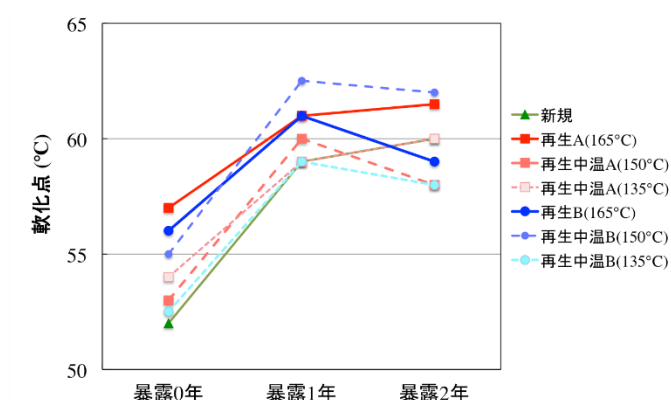


図 3.23 暴露供試体の表面から抽出回収したバインダの軟化点

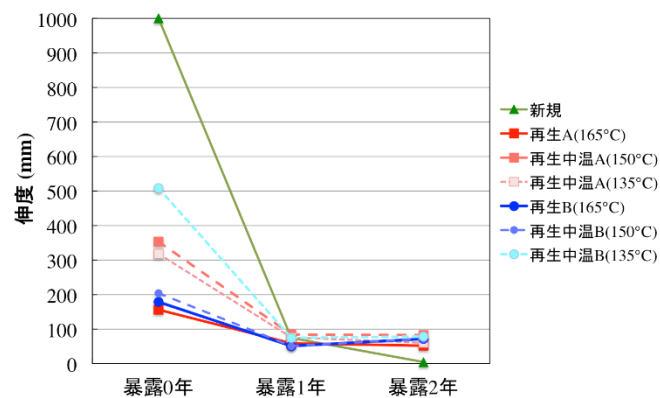


図 3.24 暴露供試体の表面から抽出回収したバインダの伸度

### 3.5.4. まとめ

2年間暴露した再生中温化混合物の曲げ性状は、通常温度で作製した再生混合物と同程度であったことから、再生混合物と同等の耐候性があることが示唆された。また、再生中温化混合物の場合、作製時の温度を低減したことで製造時における加熱劣化が抑制された。この影響により、再生中温化混合物の初期の針入度は新規混合物や再生混合物よりも高く、暴露経過後の、針入度の低下が抑制された。

### 3.6. 再生混合物への中温化技術適用の実態や性状への影響に関するまとめ

再生混合物に中温化技術を適用するにあたり、中温化技術の適用の実態把握や、アスファルトヒュームの低減効果の検討、各種性状試験を行った。得られた知見を以下に示す。

- ・ アスファルトプラントへのヒアリングの結果、再生混合物への適用実績のある中温化技術は、発泡系と滑剤系が約 95%を占めていた。また、再生中温化アスファルト混合物の再生骨材配合率は 60%以下が約 96%であり、施工性改善を目的として使用していることが多いことがわかった。再生中温化アスファルト混合物の製造における懸念事項として、製造温度の低下に伴うバグフィルタの結露が挙げられた。
- ・ 混合温度を低くすることでアスファルトヒューム発生量が少なくなることを確認した。また、再生混合物の場合、再生用添加剤に起因すると考えられるアスファルトヒューム量も、混合温度低減により少なくなることから、中温化技術を再生混合物に適用することで、アスファルトヒュームの発生量を抑制できることが示された。
- ・ 中温化技術の違いによる性状の差異はわずかであったが、高温カンタプロ損失率については、多くが 2%以内であったが、一部これを上回る値を示すものもあった。
- ・ 2 年間暴露した再生中温化アスファルト混合物の曲げ性状は、通常温度で作製した再生混合物と同程度であった。また、再生中温化混合物の場合、作製時の温度を低減したことで製造時の加熱劣化が抑制され、その結果、再生中温化混合物の初期の針入度は新規混合物や再生混合物よりも高く、暴露経過後の針入度の低下が抑制された。

#### 参考文献

- 1) Kurek, J.T. : Laboratory generation and evaluation of paving asphalt fumes ,  
Transportation Research Record, p. 35-40, 1999
- 2) 公益社団法人日本道路協会：舗装再生便覧（平成 22 年版），2010
- 3) 田湯文将，新田弘之，川島陽子：再生加熱アスファルト混合物におけるアスファルトヒュームの発生量に関する調査，土木学会年次学術講演会，Vol.74，2019
- 4) 川島陽子，田湯文将，新田弘之：アスファルトヒューム暴露量に対する安全性評価への取り組み，日本道路会議，2019
- 5) 新田弘之，川上篤史，西崎到：小型供試体による曲げ試験特性と中温化混合物の評価，土木学会学術年次講演会，Vol.67，2012.
- 6) 佐々木徹，西崎到，川島陽子，新田弘之：アスファルト表層材供用 2.5 年後の曲げ性状変化における表面深さと再生方法の影響，土木学会学術年次講演会，Vol.72，2017.

## 4. 再生骨材および再生アスファルト混合物の圧裂試験方法に関する検討

### 4.1. 現状の課題の整理

繰返し再生利用されているアスファルト混合物は、再生骨材中に含まれる旧アスファルトの針入度の低下が課題となっている。旧アスファルトの針入度が20未満になると、疲労抵抗性（ひび割れ抵抗性）が低下するため、アスファルト混合物としての利用ができない。旧アスファルトの針入度の低下は、アスファルトの繰返し再生利用による影響が考えられるが、耐流動性向上を目的とした改質アスファルトの利用促進も影響している可能性がある。改質アスファルトは高分子ポリマーをアスファルトに添加したものであり、未改質のアスファルトの針入度と比較すると一般的に低い値を示すが、未改質のアスファルトと比較するとひび割れ抵抗性は優れており、未改質のアスファルトと同様に針入度だけで再生利用不可とすることは資源の有効利用の観点から適切ではない。そこで、改質アスファルトを含む再生骨材の適正な利用方法として圧裂試験による評価方法が開発され、平成22年の舗装再生便覧に追記された。本評価方法は、改質アスファルトを含む再生骨材の適正な利用方法のみならず、抽出溶剤を必要とせず、混合物で迅速かつ簡便に評価できることから、再生混合物の品質向上に寄与するものである。さらに、再生骨材の利用有姿で評価することから、性能規定の観点からも再生骨材の評価として圧裂試験法が期待されていた。

しかしながら、再生骨材の圧裂試験では、最大荷重が高くかつ変位の取得を高精度で行う必要があるため、既存の試験機では試験機誤差が大きく適切な試験結果が得られないことが明らかとなった。この対応策として、試験機のロードセルの荷重条件や変位量の測定方法などの条件が追加されたが、抜本的な改善には至らなかった。

そこで、本共同研究にて、再生骨材の圧裂試験の試験条件や供試体の作製条件を検討し、暫定改良法を開発し、実際に運用されている再生骨材により検証した。さらに再生骨材の評価で変更となった変位測定位置を考慮した圧裂試験法による再生アスファルト混合物の設計圧裂係数の見直しを図った。

### 4.2. 圧裂試験の改良方針

再生骨材は各地域により粒度が異なり、かつ製造したタイミングにより性状が変化する。このため、ランダムに採取した再生骨材にて供試体を作製すると、粒度や供試体作製方法を統一しても、誤差が大きくなり適切な評価結果が得られない可能性がある。そこで、再生骨材の準備から供試体の作製、試験までを可能な限り統一して評価できるように考慮することとした。

図4.1に圧裂試験の検討フローを示す。本検討では、再生骨材で作製した供試体の圧裂強度が高いため、変位のばらつきが大きくなることを想定し、圧裂強度を低くするための供試体条件や試験条件について検討した。これらの検討により改善が見られない場合には、再生骨材の最大粒径を5mmとする方法についても検討することとした。



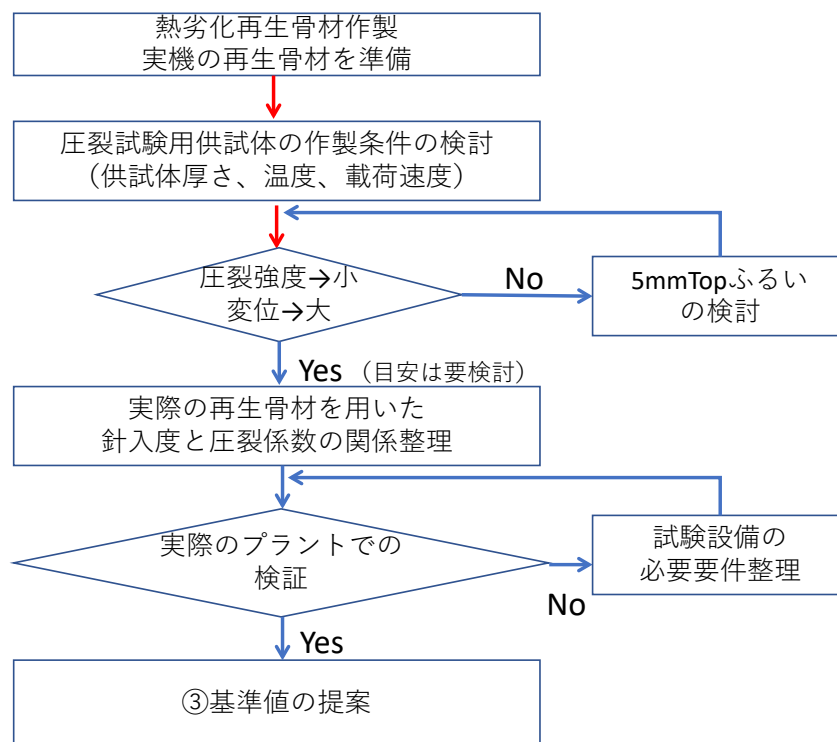


図 4.1 圧裂試験の検討フロー

### 4.3. 再生骨材を用いた圧裂試験条件の検討

#### 4.3.1. 試験条件の設定

再生骨材の圧裂試験における圧裂強度を下げるため、①供試体の厚さ、②試験温度、③载荷速度を検討した。

#### 4.3.2. 再生骨材の準備

再生骨材は、実際のプラント（株式会社 NIPPO）にて新材の密粒度アスファルト混合物（13）（ストレートアスファルト 60/80）を再生ドライヤーにて強制加熱劣化させることで、アスファルトの針入度を 30（1/10mm）以下とし、さらに低針入度とするため、室内の乾燥機で強制劣化させて所定の針入度に調整した。図 4.2 に製造フロー、表 4.1 に作製した再生骨材の性状を示す。

改質由来の再生骨材については、室内にてポリマー改質アスファルトⅡ型を用いた密粒度アスファルト混合物（13）を乾燥機（110℃）にて強制劣化し、目標となる針入度（10、15、20、25、30）に調整した。

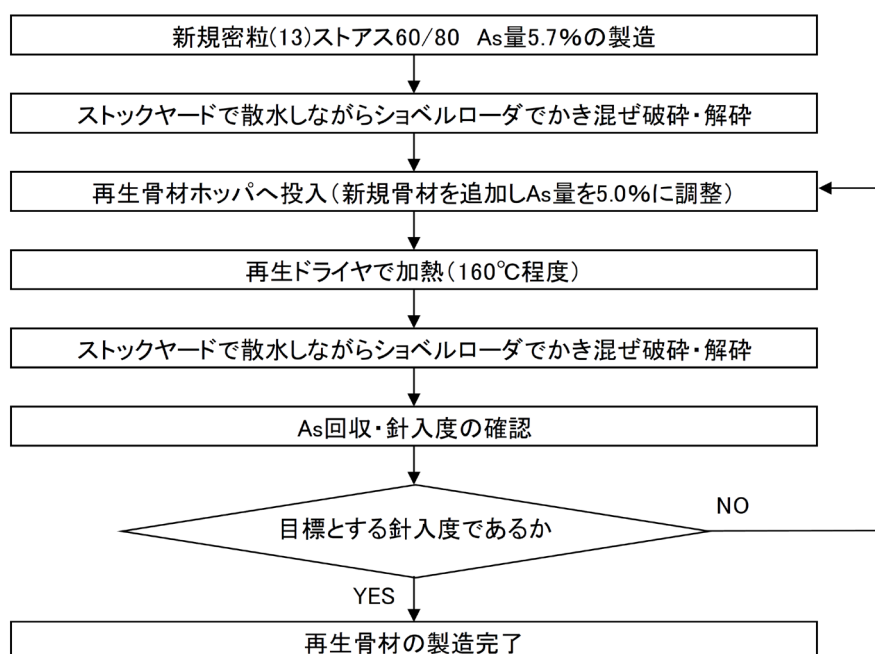


図 4.2 再生骨材の製造フロー

表 4.1 ストアス由来の再生骨材の性状

材料		新規	再生①	再生②	再生③	再生④	再生⑤
As 量	%	5.6	4.8	4.7	4.8	4.6	4.5
回収針入度	1/10mm	56	50	43	35	30	23
製造量	トン	17	13	10	8	6	5

※針入度 10 程度の再生骨材は、再生⑤を乾燥炉に入れて強制劣化させて製造した。

#### 4.3.3. 供試体条件および試験条件

圧裂係数を正確に得るためには、試験機の仕様に対し適切な強度範囲である必要がある。再生骨材はアスファルトの劣化により非常に硬くなっているため、常温付近で評価するには取得する強度を下げる必要がある。そこで、供試体の厚さを薄くする、試験温度を上げること、あるいは載荷速度を遅くする方法について検討するため、表 4.2 に示す供試体の作製条件および試験条件が圧裂試験に与える影響を評価した。試験機による影響を排除するため、試験はすべて土木研究所保有の万能試験機にて行った。

すべての条件で試験すると供試体が膨大となるため、効率を考慮し、表 4.3 に示す供試体を選定し評価することとした。供試体の締固め温度は 165℃、突固め回数は厚さ 40mm で両面 45 回、厚さ 50mm で両面 60 回、厚さ 63.5mm で両面 75 回とした。

表 4.2 再生骨材の供試体作製条件および試験条件

項目		内容
試料	再生骨材	最大粒径 13mm
作製条件	供試体の厚さ	63.5mm, 50mm, 40mm
	突固め回数	63.5mm : 両面 75 回 50mm : 両面 60 回 40mm : 両面 45 回
試験条件	試験機	土木研究所保有の万能試験機
	試験温度	20, 25, 30, 35℃
	載荷速度	20mm/min, 50mm/min

表 4.3 設定した試験水準

項目		旧 As 針入度 10 程度			旧 As 針入度 20 程度			旧 As 針入度 30 程度		
		供試体の厚さ(mm)								
載荷速度	試験温度	40	50	63.5	40	50	63.5	40	50	63.5
50mm/min.	20℃	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	25℃	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	30℃	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	35℃			○			○			○
20mm/min.	20℃	○			○			○		

※ 変位量の測定は、供試体近傍と試験機本体（時間変位）の両方で行う。

#### 4.3.4. 試験結果

図 4.3, 図 4.4 に試験結果を示す。変位および圧裂係数の図中における破線は時間変位, 実線は近傍変位を示す。

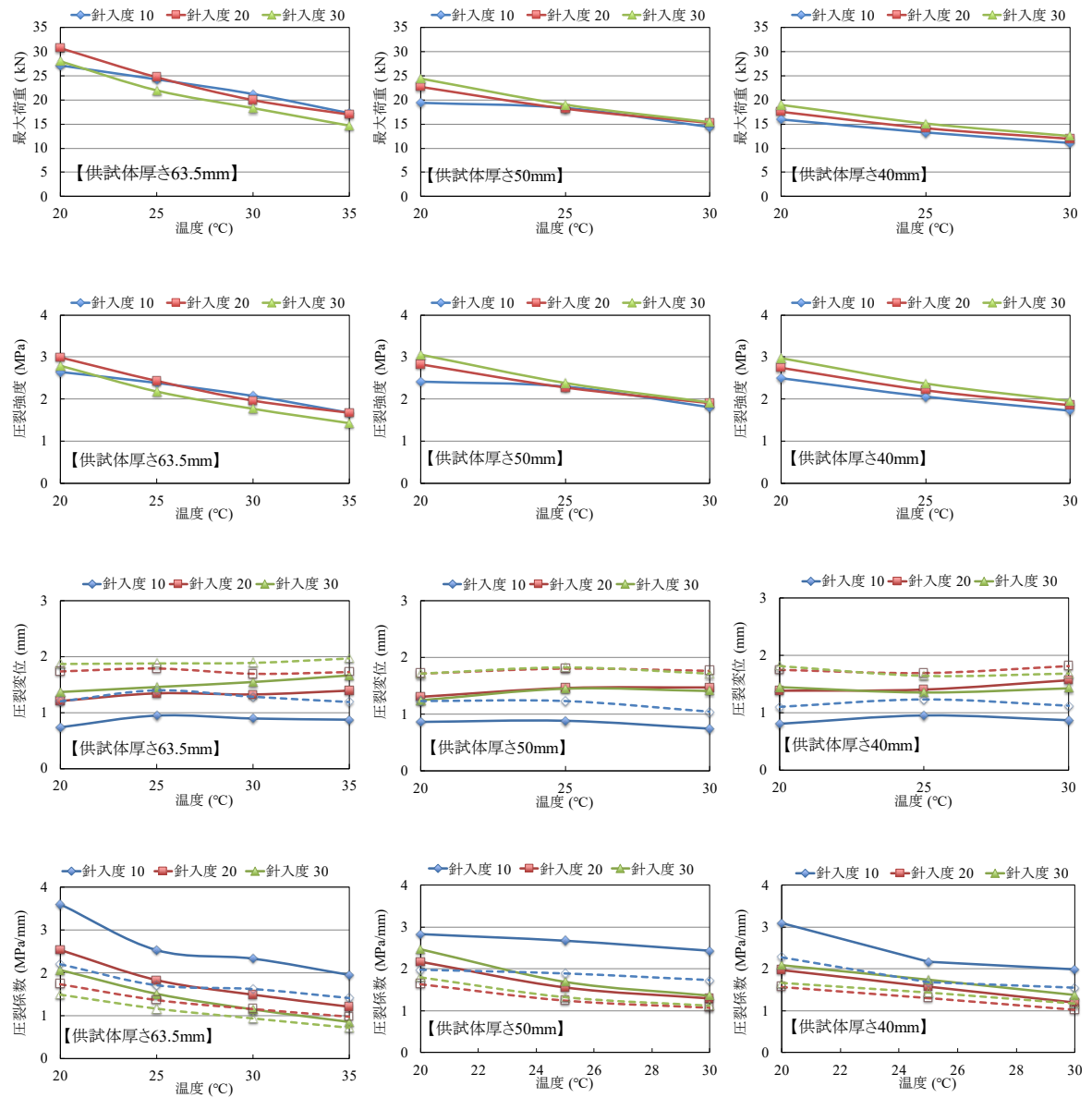


図 4.3 供試体の厚さと試験温度を変えたときの圧裂試験の結果

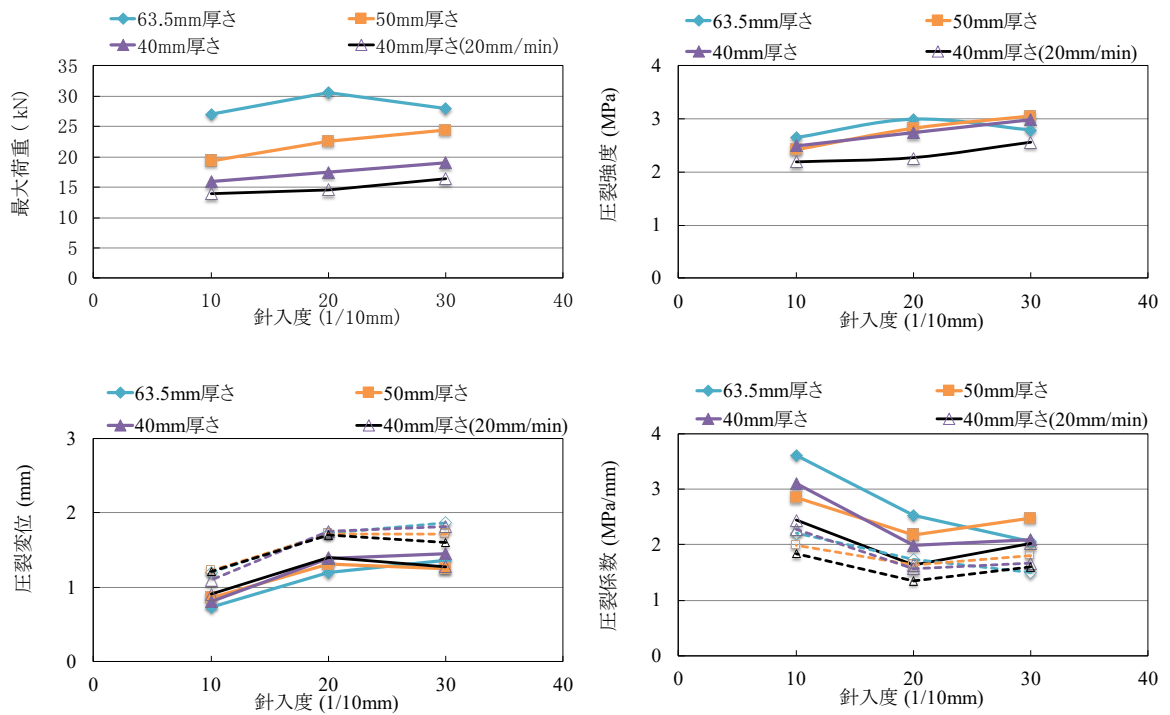


図 4.4 針入度と載荷速度を変えたときの圧裂試験の結果

本試験により得られた知見を以下に示す。

[供試体厚さ 63.5mm における結果]

- ・ 最大荷重は、温度が上昇するに従い低下する。
- ・ 針入度 20 程度あるいは 30 程度の再生骨材では、試験温度を 20℃から 25℃に上げることで最大荷重が約 20%低下する。ただし、針入度 10 程度の混合物では 10%程度となり、他と異なる。
- ・ 圧裂強度は最大荷重と同様の傾向であった。
- ・ 変位は、針入度が低いほど小さく、針入度が同じ条件では、温度が変わっても変位にあまり変化は見られない。
- ・ 近傍変位（実線）は、時間変位（破線）より 30%低下する傾向にある。
- ・ 圧裂係数は、温度が高くなると低くなり、試験温度 20℃に対して、試験温度 25℃ではおよそ 30%低下する。

[供試体厚さ 50mm における結果]

- ・ 供試体厚さ 63.5mm に比べ、最大荷重が 20℃で 13～26%、25℃で 30～40%低下する。
- ・ 変位は、針入度が低いほど小さくなる傾向にある。
- ・ 針入度が同じであれば、温度が変わっても変位はあまり変わらない。
- ・ 上記同様に、近傍変位（実線）は、時間変位（破線）より 30%低下する。
- ・ 圧裂係数は、温度が高くなると低くなり、20℃に対して、25℃の圧裂係数は約 30%低下する。ただし、針入度 10 程度のものでは 5%程度となる。

[供試体厚さ 40mm における結果]

- ・ 供試体厚さ 63.5mm に比べ、最大荷重が 20℃で 13～26%、25℃で 40%程度低下する。

- ・ 試験温度が高くなるほど、最大荷重は低下するが、低下傾向は他と比較し小さい。
- ・ 圧裂係数と変位は供試体厚さ 50mm と同様な傾向であった。

[針入度と载荷速度を変えたときの結果]

- ・ 最大荷重は針入度が低くなるにつれて低下する。
- ・ 針入度が高いほど変位が大きくなる傾向にある。ただし、針入度 20 程度の再生骨材と針入度 30 程度の再生骨材では差が小さい。
- ・ 圧裂係数は、針入度が高いほど小さくなるが、厚さ 63.5mm 以外は針入度 20 と 30 の結果が逆転している。
- ・ 载荷速度を 20mm/min に遅くすると、最大荷重が小さくなり、圧裂強度および圧裂係数が小さくなる。

[変位の測定方法による影響]

表 4.4, 図 4.5 に試験温度 20°C における針入度 20 程度の再生骨材を用いた供試体の厚さと圧裂係数の関係を示す。試験誤差はあるものの時間変位を用いた圧裂係数と近傍変位を用いた圧裂係数は大きく異なることが分かる。今回の試験においても供試体厚さ 63.5mm を用いて、時間変位により圧裂係数を算出した結果、前回設定した基準値 (1.70MPa/mm) 程度となることを確認した。

表 4.4 供試体の厚さと圧裂係数の関係

供試体の厚さ	载荷速度	最大荷重	近傍変位圧裂係数	時間変位圧裂係数
mm	mm/min.	kN	MPa/mm	MPa/mm
63.5	50	30.6	2.53	1.74
50		22.6	2.17	1.64
40		17.6	1.98	1.57

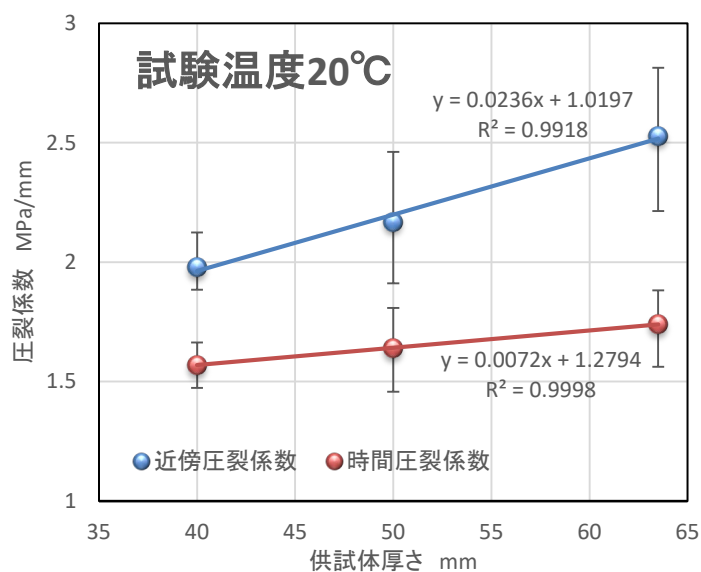


図 4.5 供試体の厚さと圧裂係数の関係

以上の検討結果より、供試体の厚さが薄いものの方が圧裂強度は低い、供試体設置時の安定性を考慮して、50mm が適していると判断した。また、試験温度は高いほど圧裂強度が低い、針入度の差異が見にくくなることから、25℃程度が適していると判断した。

#### 4.3.5. 現行法との比較

図 4.6 に供試体厚さ 50mm，試験温度 25℃，近傍変位とした改良法と現行試験方法（供試体厚さ 63.5mm，試験温度 20℃，近傍変位）との比較を示す。ここでは、供試体 5 個のうち、最大値と最小値のものを棄却した 3 個の平均値を示している。

現行法と比較し、改良法では圧裂強度が 1~2 割低下、変位が 2 割程度上昇することで、圧裂係数は針入度により異なるが、2 割程度低下することとなる。

また、今回の一部の試験結果では、針入度と圧裂係数の傾向が想定とは異なる傾向となった。この原因として、供試体の密度が影響しているものと考えられるため、供試体の作製方法について注意が必要であり、空隙率の影響を検討することとした。

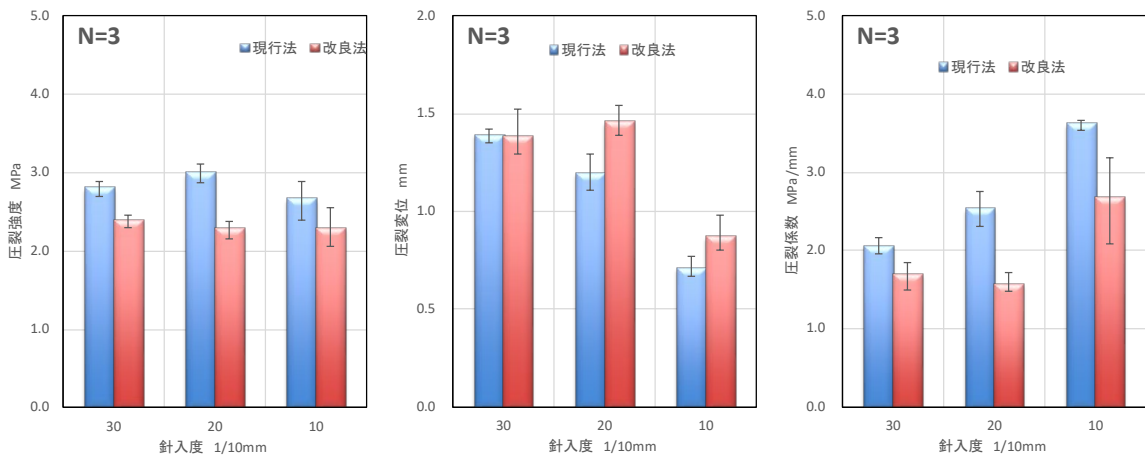


図 4.6 現行法と改良法による圧裂試験結果の違い

表 4.5 現行法と改良法（案）の比較

項目		現行法	改良法（案）
供試体の作製条件	再生骨材の粒度	13-0mm	13-0mm
	締固め温度	165℃	—
	突固め回数	両面 75 回	—
	供試体の厚さ	63.5mm	50mm
試験条件	載荷速度	50mm/min.	—
	試験温度	20℃	25℃
	変位測定位置	未指定	供試体近傍

#### 4.3.6. 供試体の作製条件の検討

##### (1) 作製条件の選定

再生骨材を用いて作製した供試体の空隙率による影響を評価するにあたり、供試体の作製条件について検討した。

再生骨材は産地や製造方法により粒度が異なる可能性が高いため、骨材粒度や空隙率をすべて合わせる方法が望ましい。しかしながら、再生骨材の粒度を合わせても、骨材密度やアスファルト量の違いがあるため統一することが難しい。

そこで、突固め回数を変化させて、①同一の空隙率に設定する方法と②空隙率が一定になるまで突き固める方法の2種類について検討することとした。再生骨材は上記で使用したものに改質由来の再生骨材を加えた。再生骨材には改質アスファルトも含まれている可能性があるため、ストレートアスファルト再生骨材と改質由来再生骨材についてそれぞれ混合・締固め温度を165℃に加えて、180℃を実施した。

表 4.6 試験方法案

項目		内容
供試体の 作製条件	再生骨材の種類	ストレートアスファルト再生骨材（ストアス再生骨材） 改質由来再生骨材（改質再生骨材）
	再生骨材の粒度	13・0mm
	締固め温度	165℃, 180℃
	突固め回数	25回, 50回, 75回, 100回
	供試体の厚さ	50mm
試験条件	載荷速度	50mm/min.
	試験温度	25℃
	変位測定位置	供試体近傍

##### (2) ストアス再生骨材による試験結果

図 4.7 に突固め回数と空隙率の関係を示す。試験結果より、劣化レベル（針入度）に応じて空隙率の差異が大きく、突固め回数を変えて各針入度で同一の空隙率にて評価することは難しいことが判明した。

図 4.8, 図 4.9 に突固め回数と圧裂係数の関係を示す。試験の結果、突固め回数が多くなるに従い、空隙率が小さくなるため圧裂係数が大きくなることが分かった。突固め回数を多くすると骨材のかみ合わせが強度に大きく影響するため、バインダ単体の性状を評価するためには骨材のかみ合わせの影響を極力なくす方が望ましいと判断した。

また、供試体の作製温度を見ると締固め温度を180℃とした場合、傾向が不安定となる。これは、供試体作製時の加熱による影響と考えられ、本試験がアスファルトの評価であることを考慮すると加熱による性状変化を極力抑える必要がある。



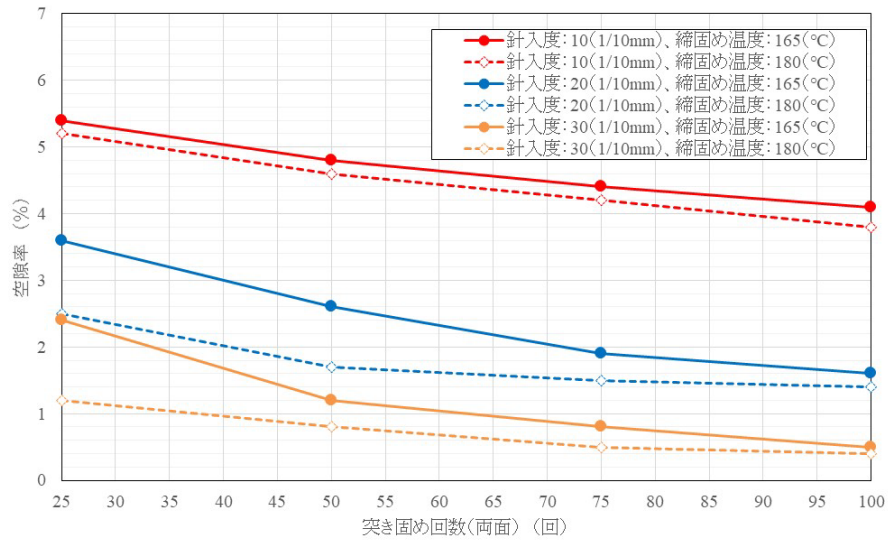


図 4.7 突固め回数と空隙率の関係

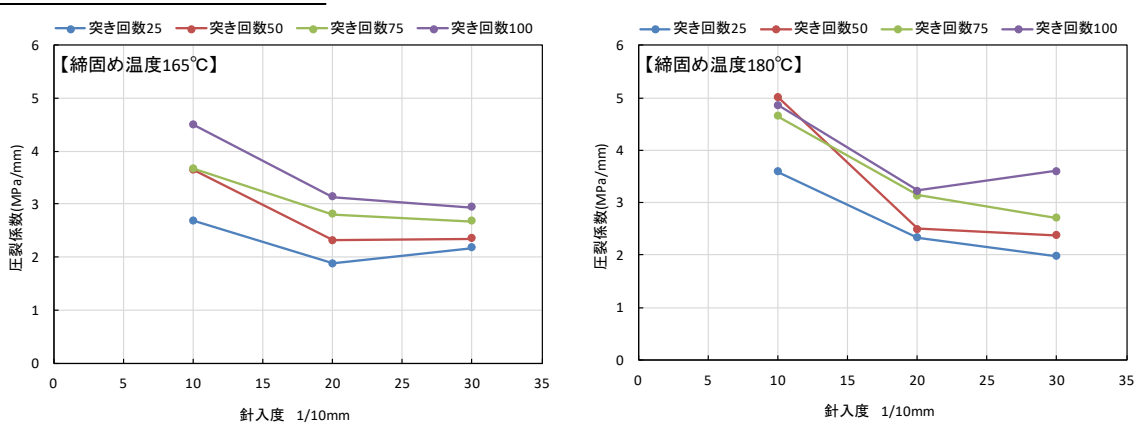


図 4.8 突固め回数と圧裂係数の関係

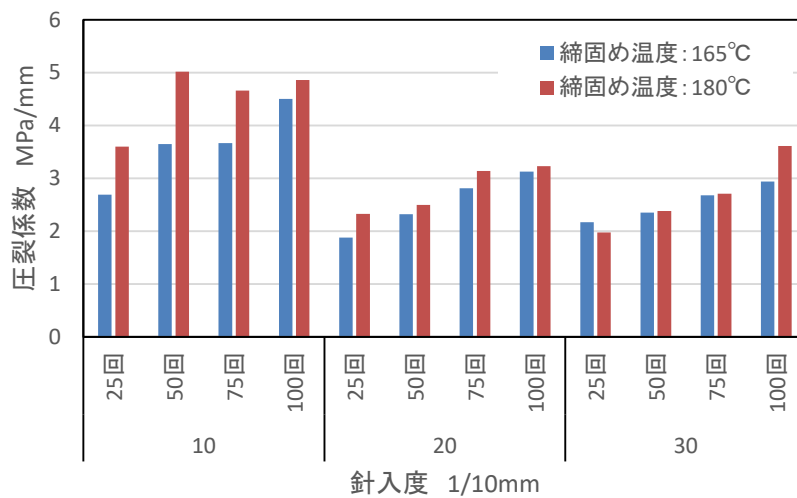


図 4.9 突固め回数と圧裂係数の関係

### (3) 改質由来の再生骨材による結果

改質由来の再生骨材については上記で得られた結果を考慮し、表 4.7 に示す条件で供試体を作製し試験を行った。試験結果を図 4.10 に示す。

過年度に行った共同研究の結果 ①と同様に、改質再生骨材とストアス再生骨材の圧裂係数に差が見られたことからすべての条件において、ストアス再生骨材と改質再生骨材を選別できることが分かった。

傾向にばらつきが見られたことから、再生骨材中のアスファルトの性状を把握するため圧裂試験後の供試体から抽出回収し針入度試験を行った。表 4.8 に試験の結果を示す。ここで示すとおり、設定値から大幅に低下しており、供試体作製時の加熱による影響と考えられる。供試体作製時の加熱による影響は当初から課題であったため、乾燥炉の設定から加熱時間まで厳密に設定する必要がある。これらの結果より、突き固め温度は過年度の結果 ①を踏まえ 165℃に設定することとした。

表 4.7 供試体の作製条件

条件	厚さ(mm)	突き固め温度(°C)	突き固め回数
①	50	165	両面 50 回
②			両面 25 回
③		180	両面 50 回

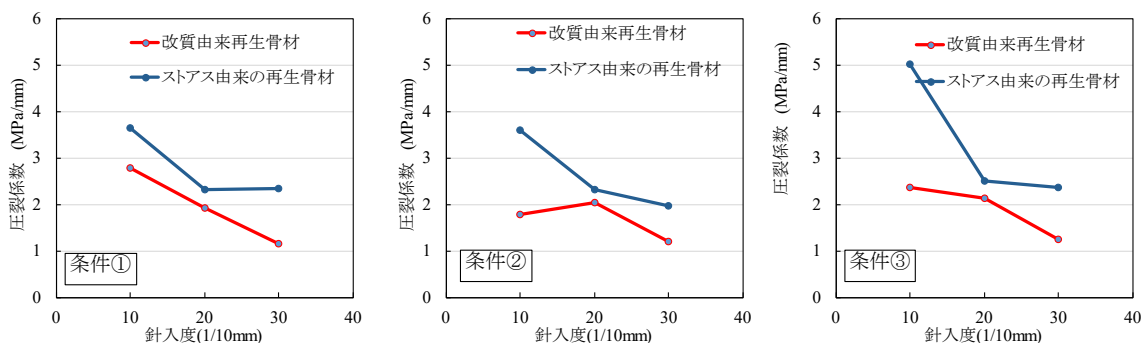


図 4.10 供試体作製条件と圧裂係数の関係

表 4.8 圧裂試験後の供試体より抽出回収したアスファルトの針入度

目標針入度 (1/10mm)	抽出回収後の針入度 (1/10mm)			
	ストアス		改質Ⅱ型	
	条件①	条件②③	条件①	条件②③
10	6	4	1	2
20	13	17	9	11
30	18	18	21	22

#### (4) 暫定改良圧裂試験方法の決定

これまでの検討結果を踏まえ、表 4.9 に決定した暫定法を示す。

表 4.9 供試体作製条件および試験方法の比較

項目		現行法	暫定法
供試体の 作製条件	再生骨材の粒度	13-0mm	13-0mm
	再生骨材の養生温度	165±2℃	165±2℃
	乾燥炉の設定	—	165~175℃※
	養生時間	3 時間	1 時間以上 2 時間以内
	締固め温度	165℃	165℃ (加熱しない)
	突固め回数	両面 75 回	両面 50 回
	供試体の厚さ	63.5mm	50mm
試験条件	載荷速度	50mm/min.	50mm/min.
	試験温度	20℃	25℃
	変位測定位置	未指定	供試体近傍

※再生骨材が 1 時間から 2 時間の間で 165℃となるように乾燥炉の温度を設定する。

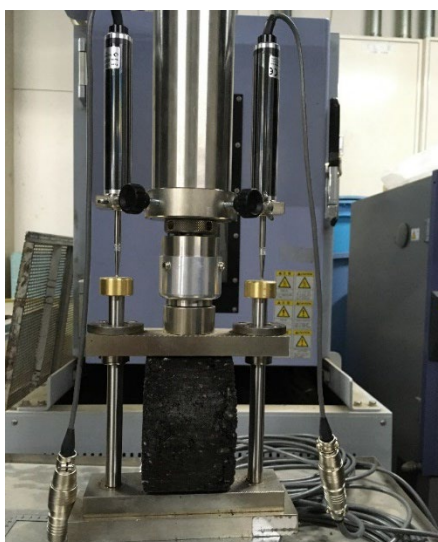


写真 4.1 供試体近傍の変位測定状況例

#### 4.4. 暫定改良圧裂試験を用いた再生骨材の評価

上記で決定した暫定方法について、日本アスファルト合材協会会員の9社にて実際のプラントで使用されている再生骨材による検証を行った。さらに、試験機関誤差や試験機誤差についても検証した。表 4.10 に検証方法を示す。

表 4.10 検証項目

検討内容	再生骨材	供試体作製	試験機
作製機関誤差	国土技術政策総合研究所構内で採取した再生骨材	日本アスファルト合材協会会員各社	土木研究所
試験機誤差	国土技術政策総合研究所構内で採取した再生骨材	日本道路建設業協会道路試験所	日本アスファルト合材協会会員各社
プラント骨材を用いた検証	各社のプラントの再生骨材 針入度 $\geq 20$ 針入度 $< 20$	日本アスファルト合材協会会員各社	土木研究所

##### 4.4.1. 作製機関誤差

同一の再生骨材を用いて各社で供試体を作製し、土木研究所保有の万能試験機により評価した。図 4.11 に試験結果を示す。ここで示す通り、同一の再生骨材を用いても空隙率が異なることが分かる。この原因として、供試体作製時の鍋の加熱やモールドの加熱が原因として挙げられた。表 4.11 に各社の乾燥炉の設定および再生骨材の養生方法を示す。各社の養生方法を考慮し、供試体の作製条件として、以下の注意項目を設けることとした。

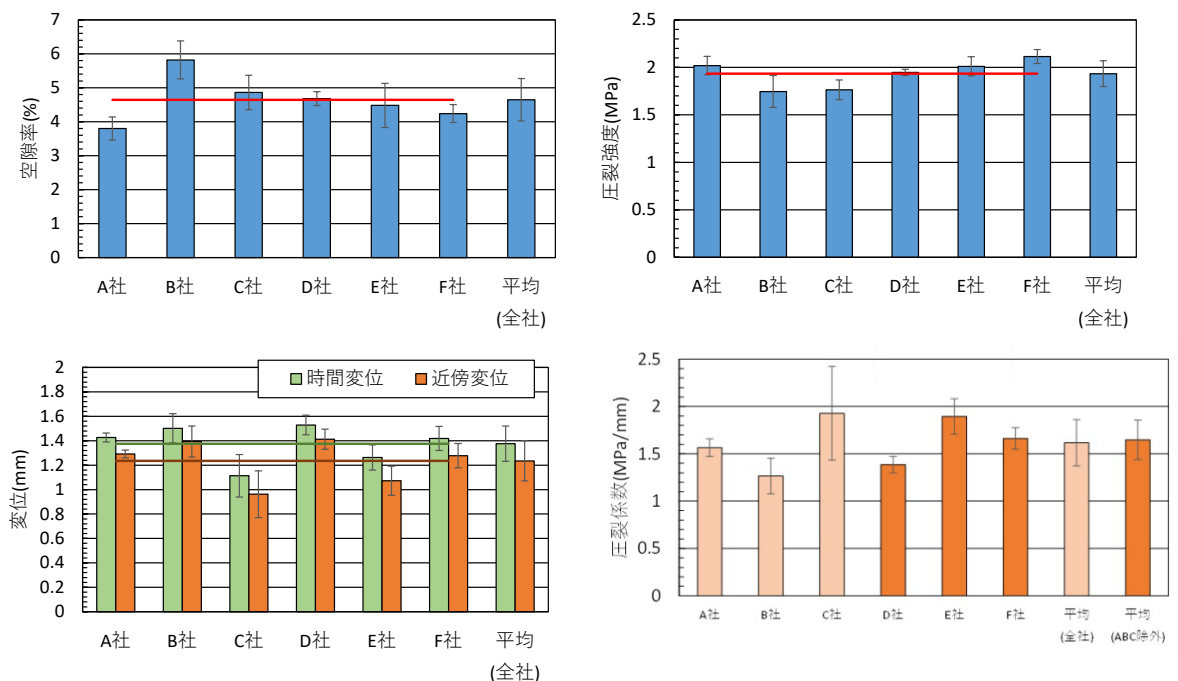


図 4.11 作製機関誤差の試験結果

表 4.11 各機関の乾燥炉の設定および再生骨材の養生方法

会社名	乾燥炉設定 °C	時間 分	方法
A	175	85	バットに広げてアルミ箔2重で覆う
B	172	90	16cm×12cm×2.5cm のバットにアルミ箔を敷き広げた上に再生骨材を入れ、表面が露出しないようアルミ箔で養生
C	175	120	バットに広げて、アルミ箔で覆う
D	165	90	バットに小分けし、アルミ箔で覆い養生
E	乾燥機設定温度： 170°Cで1時間養生 再生骨材温度が 165°C到達後は 165°Cに設定	1～1.5時間 (30分間で作 製)	内径 186mm×233mm×35mm のバット内側にクッキングシートを敷き、その上に再生骨材を均一に広げて上部はアルミ箔で覆う
F	170	90	バットに広げてアルミ箔で覆う

注意事項

- 供試体作製時には鍋による加熱を避けるため、あらかじめ再生骨材は混合しておき、乾燥炉にて加熱する。
- モールドは締固め温度にあらかじめ加熱しておく。

#### 4.4.2. 試験機誤差

##### (1) 万能試験機による検証結果 (その1)

国土技術政策総合研究所から入手した再生骨材を用いて表 4.12 の試験機による共通試験を実施した。表 4.13 に供試体の作製条件, 試験条件, 図 4.12 に試験結果を示す。

本試験に用いた再生骨材は同一のものであるが, 空隙率が 3%程度と著しく小さく, 試験時に得られた変位もばらつきが多い。この原因について調査した結果, 再生骨材が切削して取得したものであったため, 一般的な再生骨材よりも細かい粒度であり, 試料採取の際のばらつきが顕著になったことが影響したと考えられる。このことから評価する再生骨材の粒度が偏ったものとならないように十分注意する必要がある。

表 4.12 評価した試験機

項目	万能試験機	圧裂専用試験機			
		試験機メーカー	サーボモータ	ロードセル	変位
A	島津製作所製 AG-100kNXplus	ナカジマ技販	あり	50kN	近傍
B	島津製作所製 AG-X/MST/X 型	ニッケン	なし	50kN	近傍
C	島津製作所製 AG-X plus50kN	—	—	—	—
D	島津製作所製 AG-X/R	ナカジマ技販	あり	50kN	近傍
E	—	ニッケン	なし	50kN	近傍
F	島津製作所製 AGX-100kNV	岩田工業所	あり	50kN	近傍
G	島津製作所製 AG-IS100kN	フリージア・マク ロス	あり	50kN, 100kN	近傍

表 4.13 供試体作製条件および試験条件

項目	内容	
再生骨材	国土技術政策総合研究所構内切削材	
供試体の 作製条件	再生骨材の粒度	13-0mm (13-5-5-0=50:50)
	再生骨材の養生温度	165±2℃
	乾燥炉の設定	165~175℃※
	養生時間	1 時間以上 2 時間以内
	締固め温度	165℃ (加熱しない)
	突固め回数	両面 50 回
	供試体の厚さ	50mm
試験条件	载荷速度	50mm/min.
	試験温度	25℃
	変位測定位置	供試体近傍

※ 再生骨材が 1 時間から 2 時間の間で 165℃となるように乾燥炉の温度を設定する。

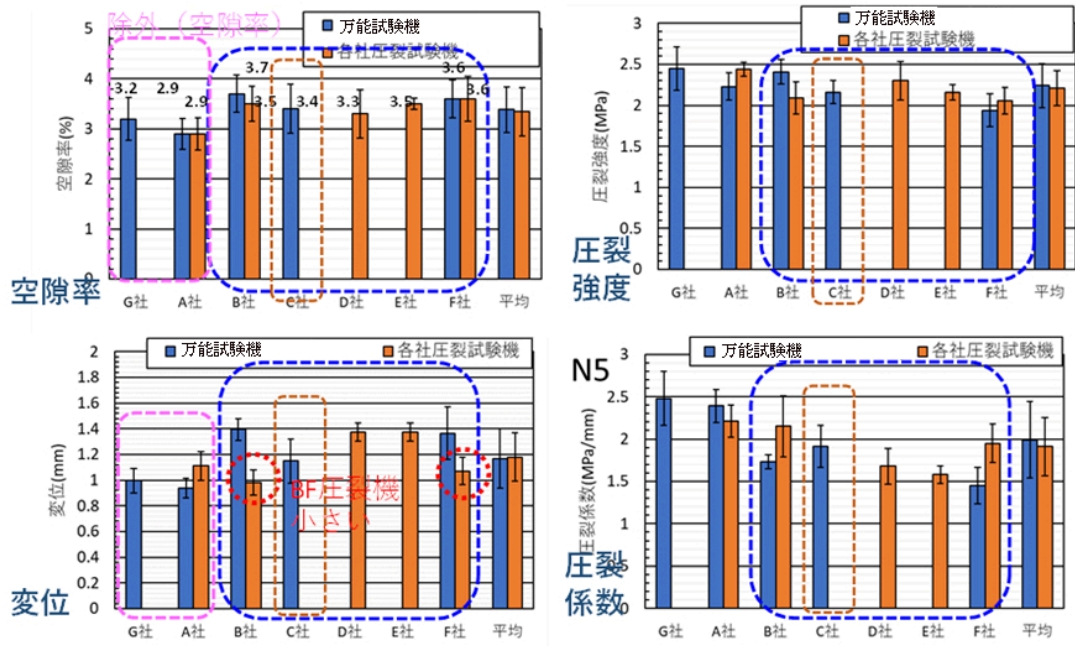


図 4.12 万能試験機と圧裂専用機による共通試験 (その1)

表 4.14 万能試験機と圧裂専用試験機の比較

項目	万能試験機			圧裂試験機			全体		
	平均	標準偏差	変動係数	平均	標準偏差	変動係数	平均	標準偏差	変動係数
最大荷重 kN	17.3	1.90	0.11	17.5	17.6	0.10	17.4	1.84	0.11
圧裂強度 MPa	2.20	0.24	0.11	2.22	0.24	0.11	2.21	0.24	0.11
近傍変位 mm	1.28	0.29	0.23	1.16	0.17	0.15	1.23	0.25	0.21
圧裂係数 MPa/mm	1.80	0.54	0.30	1.96	0.34	0.17	1.89	0.47	0.25

(2) 万能試験機と圧裂専用試験機による比較 (その2)

上記の検討結果を踏まえ、実プラントで入手した再生骨材を2種類用いて、万能試験機と圧裂専用試験機を用いた共通試験を再度行った。再生骨材は、A社とF社保有の材料とし、旧アスファルトの針入度の確認および供試体の作製はそれぞれ再生骨材の保有会社(A社、F社)が担当した。試験機は表4.12と同様であり、各保有会社により試験を行った。表4.15に供試体の作製条件および試験条件を示す。

図4.13に試験の結果を示す。各再生骨材において圧裂強度、変位はほぼ同程度であり、ほぼ同程度であること、および圧裂係数は平均に対し上下ほぼ10%の範囲内であったことから、ここで評価した万能試験機4機を基準機とすることを決定した。さらに、ここで評価した圧裂専用試験機(ニッケン、ナカジマ技販、岩田工業所、フリージア・マクロス)については万能試験機と同等の評価が可能であることを確認した。

表 4.15 供試体作製条件および試験条件

項目		内容
再生骨材		実プラントの再生骨材
供試体の 作製条件	再生骨材の粒度	13-0mm (13-5-5-0=50:50)
	再生骨材の養生温度	165±2℃
	乾燥炉の設定	165~175℃*
	養生時間	1時間以上2時間以内
	締固め温度	165℃ (加熱しない)
	突固め回数	両面50回
	供試体の厚さ	50mm
試験条件	載荷速度	50mm/min.
	試験温度	25℃
	変位測定位置	供試体近傍

※ 再生骨材が1時間から2時間の間で165℃となるように乾燥炉の温度を設定する。

※ 供試体の作製時には鍋による加熱は実施せず、あらかじめ再生骨材は混合しておき、乾燥炉にて加熱する。加熱した再生骨材はモールドに直接投入する。

※ モールドは締固め温度にあらかじめ加熱しておく。



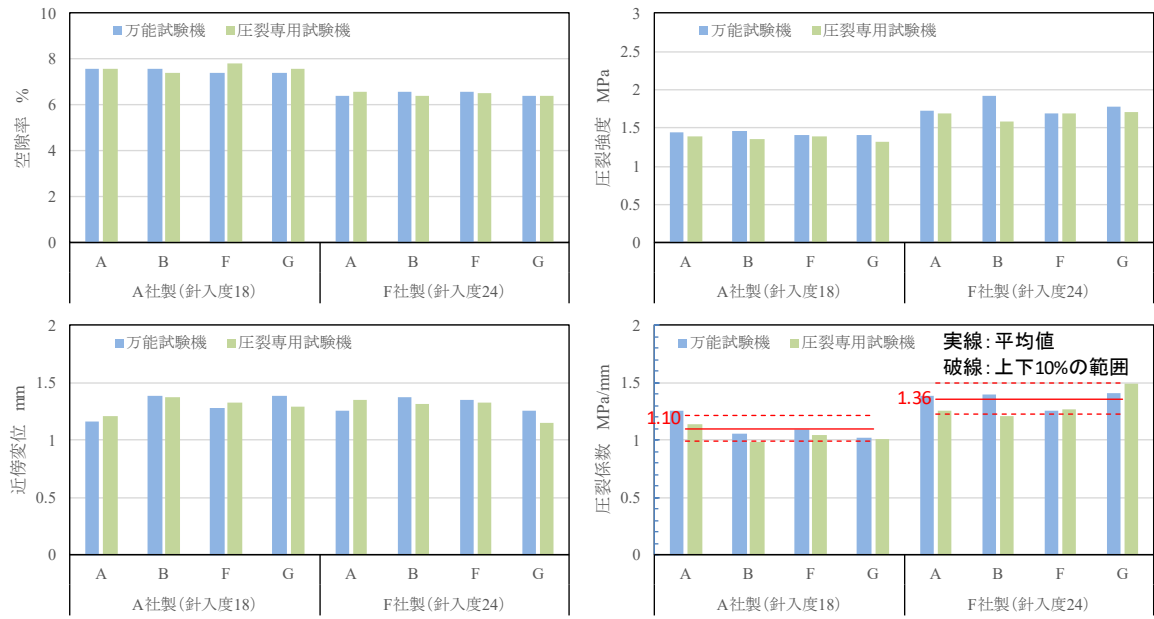


図 4.13 万能試験機と圧裂専用機による共通試験 (その2)

#### 4.4.3. プラント再生骨材を用いた検証

##### (1) 検証方法

これまでの検討結果を踏まえ、日本アスファルト合材協会会員 8 社で実際に使用している再生骨材について再生骨材の粒度および突固め回数を変化させて、圧裂係数を評価することとした。表 4.16 に評価方法を示す。再生骨材中に含まれるアスファルトの針入度は 20 以上のものと 20 未満のものを準備した。再生骨材の 13-5, 5-0 の配合比率は、①50:50, ②40:60, ③密粒度に調整の 3 種類とした。突固め回数は、両面 50 回, 75 回, 100 回に分けてそれぞれ作製した。密粒度に合わせた再生骨材の突固め回数は両面 50 回のみとした。

表 4.16 供試体作製条件および試験条件

項目		内容
再生骨材		各社プラントで使用している再生骨材 針入度 20 以上, 20 未満
供試体の 作製条件	再生骨材の粒度	13-0mm 13-5 : 5-0=①50:50, ②40:60, ③密粒度に調整 (H 社, I 社は①のみ)
	再生骨材の養生温度	165±2℃
	乾燥炉の設定	165~175℃*
	養生時間	1 時間以上 2 時間以内
	締固め温度	165℃ (加熱しない)
	突固め回数	両面 50 回, 75 回, 100 回
	供試体の厚さ	50mm
試験条件	載荷速度	50mm/min.
	試験温度	25℃
	変位測定位置	供試体近傍
試験項目		かさ密度, ノギス密度, 最大密度, 空隙率, アスファルト量, 骨材粒度

※ 再生骨材が 1 時間から 2 時間の間で 165℃となるように乾燥炉の温度を設定する。

※ 供試体作製時には鍋による加熱を避けるため、あらかじめ再生骨材は混合しておき、乾燥炉にて加熱する。

※ モールドは締固め温度にあらかじめ加熱しておく。

(2) プラント再生骨材の基礎データ

表 4.17, 図 4.14 に供試体作製条件と空隙率の関係を示す。各社の再生骨材を用いてこれまで検討した方法により供試体を作製した結果, 同一条件においても空隙率が大きく異なることが分かる。C 社 C-a と C-b の再生骨材は, 他社よりも空隙率が著しく大きい値であった。C 社以外の再生骨材にて, 再生骨材の比率を 13-5mm, 5-0mm=50:50 にすると各社粒度が近い値になることから, 13-5mm : 5-0mm の比率を 50:50 の条件で混合した再生骨材を圧裂試験に用いることとした。本結果を受けて C 社は新たに針入度 20 以上と 20 未満となる C-c の再生骨材を評価することとした。表 4.18, 図 4.15 に 13-5mm, 5-0mm=50:50 としたときの再生骨材に関する試験結果を示す。

図 4.16 に 13-5mm, 5-0mm を 50:50 に混合した時の粒度範囲を示す。ここで示す通り, 各社の骨材粒度は細粒あるいは密粒度混合物の粒度範囲に概ね適合する。

再生骨材に含まれるアスファルトに改質材が含まれているか確認するため, 赤外分光分析を行った。図 4.17 に試験結果を示す。改質材の有無の判定は, ブタジエンとスチレンの吸収スペクトルにより評価した。ただし, 再生骨材中にすべて改質材が含まれているケースはないことから, 一定程度含まれているものを改質材が含まれているものとして判定することとした。表 4.19 に判定結果を示す。

表 4.17 供試体作製条件と各社再生骨材を用いた供試体の空隙率の関係

項目	針入度 1/10mm	13-5mm : 5-0mm=50 : 50			13-5mm : 5-0mm=40 : 60			密粒度	
		両面50	両面75	両面100	両面50	両面75	両面100	両面50	13-5mm : 5-0mm
A	20以上	3.7%	2.9%	2.4%	-	-	-	-	-
	20未満	7.5%	6.0%	5.8%	7.4%	6.4%	5.5%	8.1%	67:33
B	20以上	5.3%	4.3%	3.7%	-	-	-	-	-
	20未満	6.3%	5.6%	5.1%	5.3%	5.0%	4.2%	6.6%	61:39
C-a	20未満	10.2%	8.3%	7.7%	9.0%	8.4%	6.5%	9.8%	35:65
C-b	20未満	11.5%	9.4%	8.0%	10.5%	8.9%	7.0%	9.7%	35:65
C-c	20以上	6.6%	4.9%	3.6%	-	-	-	-	-
	20未満	6.5%	4.4%	3.2%	-	-	-	-	-
D	20以上	6.5%	5.6%	4.9%	6.3%	5.2%	4.7%	7.8%	71:29
	20未満	5.5%	4.8%	4.2%	-	-	-	-	-
E	20未満	7.1%	5.2%	4.1%	-	-	-	-	-
	20以上	8.1%	7.5%	6.7%	7.8%	7.8%	7.1%	8.8%	70:30
F	20未満	8.0%	6.8%	6.7%	7.4%	6.8%	6.2%	8.8%	71:29
	20以上	7.8%	7.6%	7.0%	-	-	-	-	-
H	20未満	5.6%	5.3%	5.1%	-	-	-	-	-
	20以上	4.4%	3.8%	3.7%	-	-	-	-	-
I	20未満	7.6%	7.0%	6.5%	-	-	-	-	-
	20以上	4.8%	4.2%	4.0%	-	-	-	-	-
平均		6.8%	5.8%	5.1%	7.7%	6.9%	5.9%	8.5%	-

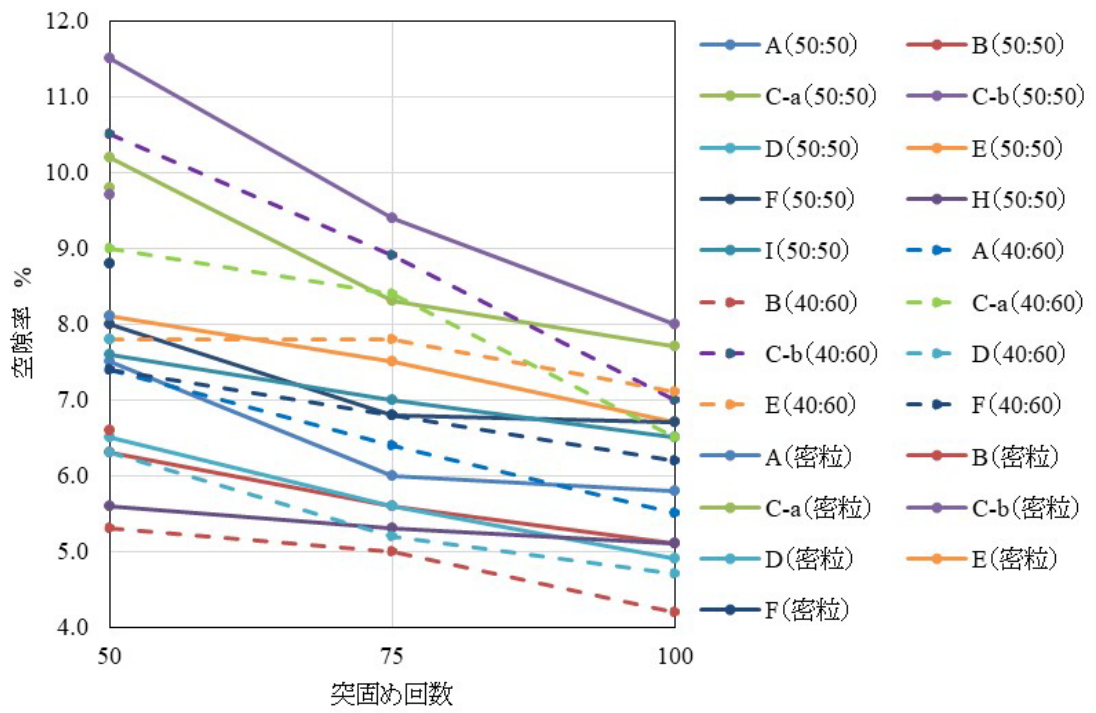


図 4.14 空隙率と突固め回数の関係

表 4.18 各社再生骨材を用いた供試体のアスファルト量，針入度，最大密度，骨材粒度の試験結果

項目		A社		B社		C社		D社		E社		F社		H社		I社	
記号		A↑	A↓	B↑	B↓	C↑	C↓	D↑	D↓	E↑	E↓	F↑	F↓	H↑	H↓	I↑	I↓
設定針入度	1/10mm	20以上	20未満	20以上	20未満	20以上	20未満	20以上	20未満	20以上	20未満	20以上	20未満	20以上	20未満	20以上	20未満
As量 %	13-5mm	3.0	3.6	4.9	2.8	3.4	3.2	3.9	3.2	4.1	4.1	3.5	2.5	2.9	2.6	2.5	3.9
	5-0mm	6.8	5.8	7.7	6.3	6.3	5.3	7.0	6.7	7.4	7.4	6.5	6.0	5.9	5.2	5.6	7.0
	50:50	4.9	4.7	6.3	4.5	4.4	4.0	5.4	5.0	5.8	5.8	5.0	4.2	4.4	3.9	4.1	5.4
針入度 1/10mm	13-5mm	21	18	21	15	25	17	27	17	20	10	20	10	-	-	-	-
	5-0mm	21	18	21	15	20	17	26	18	22	11	20	10	-	-	-	-
	50:50	21	18	21	15	22	17	27	18	21	11	20	10	23	18	23	17
最大密度 g/cm <sup>3</sup>	13-5mm	2.506	2.544	2.499	2.580	2.531	2.531	2.543	2.567	2.555	2.533	2.513	2.608	2.589	2.541	2.624	2.512
	5-0mm	2.422	2.462	2.395	2.474	2.378	2.328	2.429	2.452	2.417	2.450	2.422	2.494	2.468	2.434	2.478	2.460
	50:50	2.464	2.503	2.447	2.527	2.452	2.425	2.486	2.510	2.486	2.492	2.467	2.550	2.523	2.455	2.556	2.495
骨材粒度 %	19.0mm	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	13.2mm	98.8	100.0	97.2	100.0	100.0	100.0	99.9	100.0	100.0	96.5	99.7	99.0	99.6	100.0	99.8	99.8
	4.75mm	66.5	71.0	72.0	65.6	66.7	59.5	69.2	70.7	65.5	67.9	69.7	61.2	62.2	64.8	65.2	74.1
	2.36mm	50.2	50.9	55.2	48.4	51.0	42.9	54.8	50.7	51.6	53.3	53.1	47.3	42.2	41.2	48.5	53.8
	0.600mm	32.0	30.5	38.7	34.0	32.7	25.2	40.7	28.3	33.5	37.3	37.7	29.8	25.1	26.1	31.3	34.1
	0.300mm	23.1	20.4	23.5	25.5	17.5	17.5	28.0	21.0	21.0	24.7	25.7	21.4	21.1	15.9	21.5	24.9
	0.150mm	14.2	10.8	11.0	15.9	9.0	9.7	15.7	14.7	10.4	10.6	13.7	13.1	12.3	9.5	13.5	15.2
0.075mm	9.6	7.1	6.7	12.4	5.3	5.1	11.9	11.3	7.4	7.4	10.4	9.4	6.6	6.6	9.0	10.0	

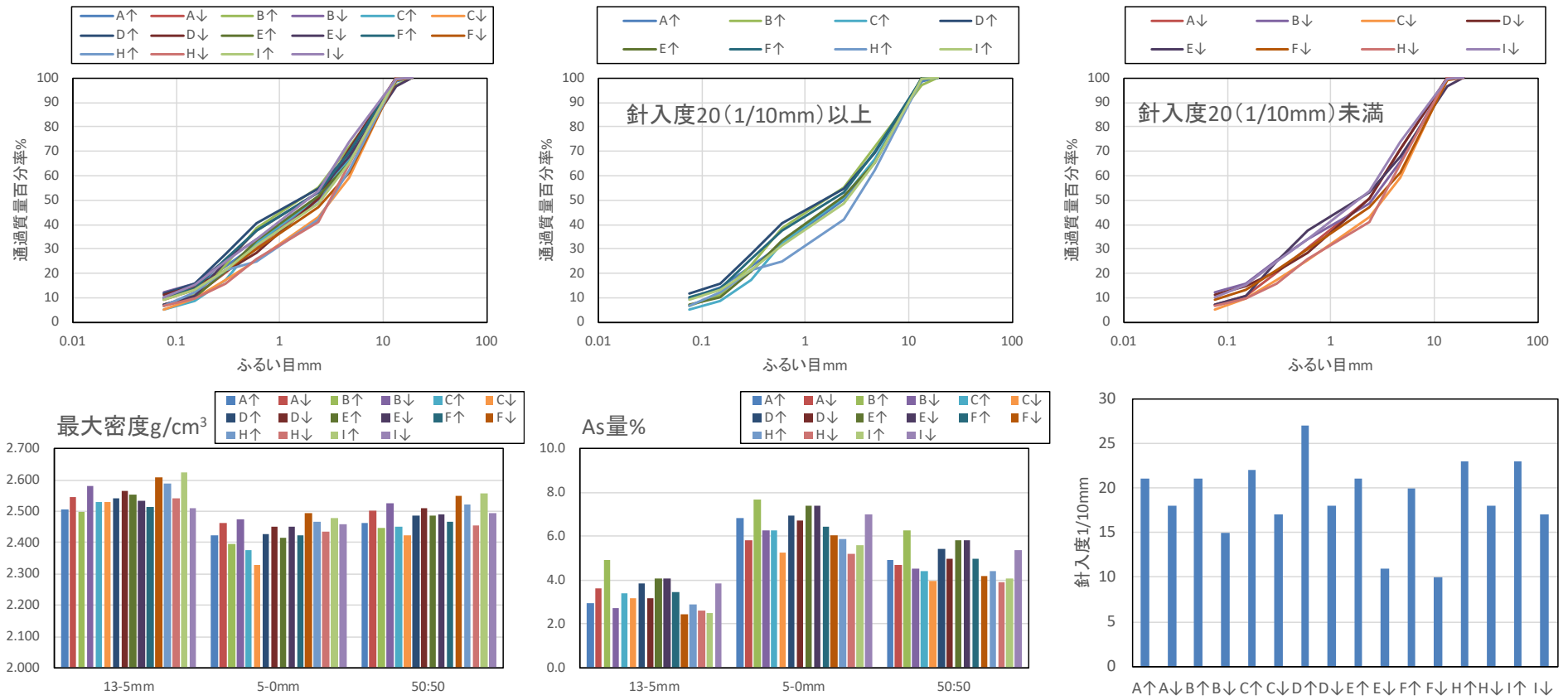
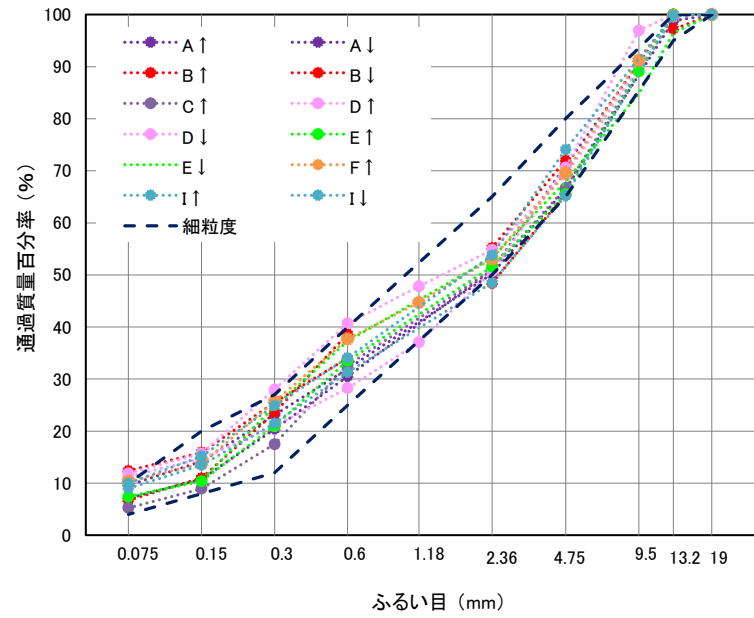
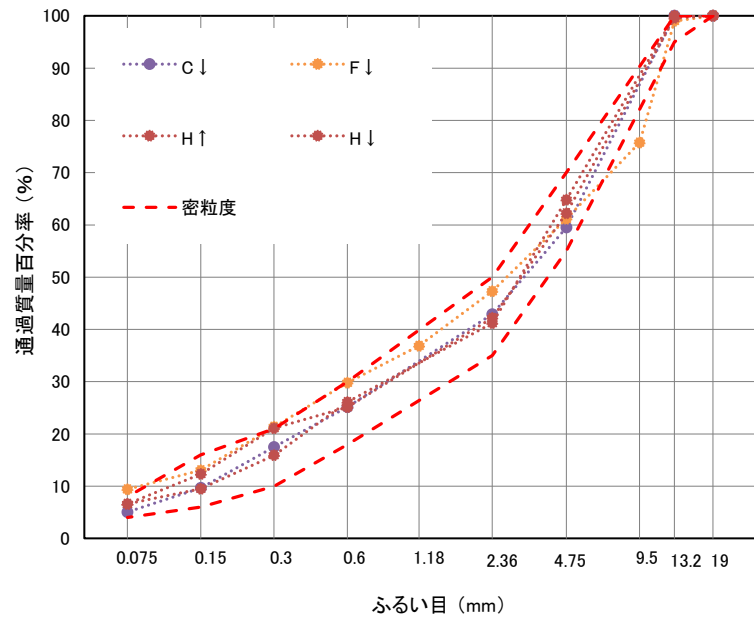


図 4.15 再生骨材の性状試験の結果



上段：密粒度の粒度範囲，下段：細粒度の粒度範囲

図 4.16 再生骨材 13-5mm, 5-0mm を 50:50 で混合した時の骨材粒度

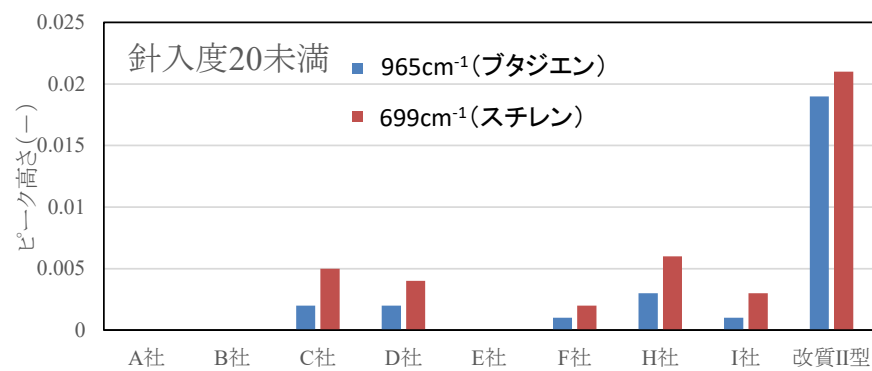
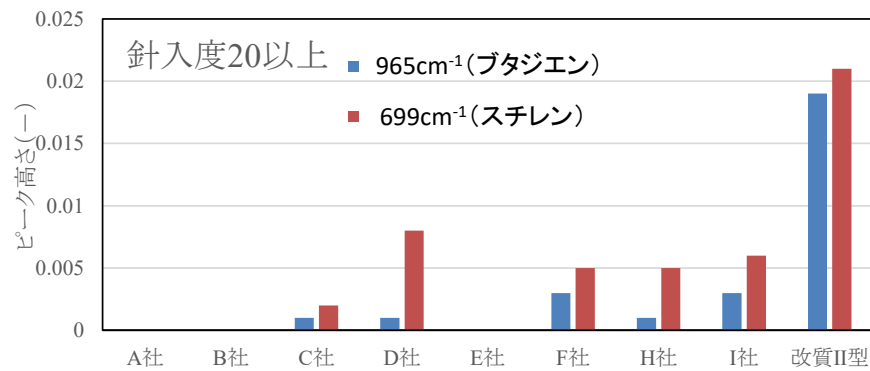


図 4.17 赤外分光分析の結果

表 4.19 改質材の有無の判定結果

性状	A		B		C		D		E		F		H		I	
	20 以上	20 未満	20 以上	20 未満	20 以上	20 未満	20 以上	20 未満	20 以上	20 未満	20 以上	20 未満	20 以上	20 未満	20 以上	20 未満
針入度 1/10mm	以上	未満	以上	未満	以上	未満	以上	未満	以上	未満	以上	未満	以上	未満	以上	未満
ピークの 有無	無し	無し	無し	無し	有り	有り	有り	有り	無し	無し	有り	有り	有り	有り	有り	有り
改質材の 有無	無し	無し	無し	無し	有り	有り	有り	有り	無し	無し	有り	無し	有り	有り	有り	無し

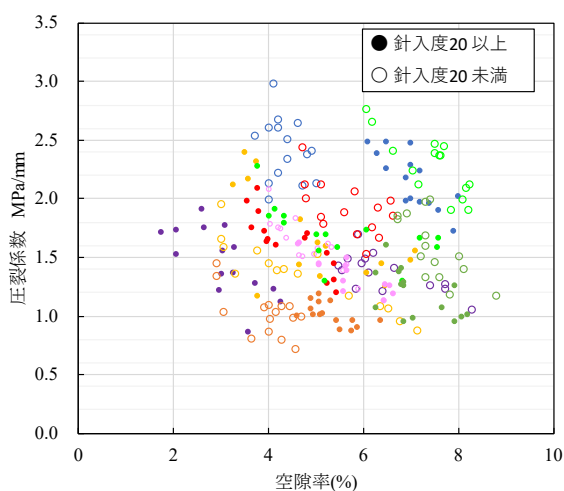


### (3) 圧裂試験の結果

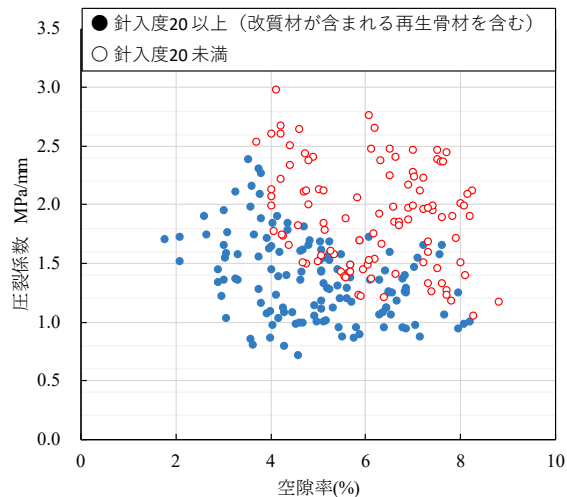
表 4.20, 図 4.18 に全データによる空隙率と圧裂係数の関係を示す。図 4.18 に示す修正後のグラフは、改質材が含まれている再生骨材を針入度 20 以上に組み入れたこと、および再試験により針入度の修正を図ったものである。ここで示す通り、針入度 20 未満の改質再生骨材を含む針入度 20 以上の再生骨材と針入度 20 未満の再生骨材を、空隙率に応じて概ね選別できることを確認した。

表 4.20 再生骨材 13-5mm, 5-0mm を 50:50 で混合した再生骨材の供試体による圧裂試験の結果

針入度 1/10mm	突固め 回数	A				B				C				D				E				F				H				I			
		空隙率 %	圧裂強度 MPa	近傍変位 mm	圧裂係数 MPa/mm	空隙率 %	圧裂強度 MPa	近傍変位 mm	圧裂係数 MPa/mm	空隙率 %	圧裂強度 MPa	近傍変位 mm	圧裂係数 MPa/mm	空隙率 %	圧裂強度 MPa	近傍変位 mm	圧裂係数 MPa/mm	空隙率 %	圧裂強度 MPa	近傍変位 mm	圧裂係数 MPa/mm	空隙率 %	圧裂強度 MPa	近傍変位 mm	圧裂係数 MPa/mm	空隙率 %	圧裂強度 MPa	近傍変位 mm	圧裂係数 MPa/mm	空隙率 %	圧裂強度 MPa	近傍変位 mm	圧裂係数 MPa/mm
20以上	両面 50回	3.6	1.41	1.64	0.86	5.2	1.84	1.20	1.53	6.5	1.51	1.21	1.25	6.4	1.44	1.28	1.13	6.8	1.87	1.45	1.29	7.9	1.56	1.25	1.25	5.8	1.46	1.52	0.96	7.2	1.79	0.91	1.97
		4.3	1.49	1.33	1.12	5.4	1.88	1.30	1.45	6.4	1.69	1.17	1.44	6.4	1.41	1.26	1.12	6.1	1.75	1.01	1.73	8.1	1.47	1.48	0.99	5.8	1.60	1.84	0.87	7.4	1.90	0.97	1.96
		3.7	1.70	1.33	1.28	5.4	1.79	1.49	1.20	7.1	1.61	1.04	1.55	6.6	1.56	1.25	1.25	7.2	1.81	1.09	1.66	8.2	1.47	1.45	1.01	5.9	1.56	1.73	0.90	8.0	1.59	0.79	2.02
		4.1	1.58	1.28	1.23	5.2	1.85	1.44	1.28	7.0	1.66	1.13	1.47	6.6	1.43	1.21	1.18	7.6	1.80	1.14	1.58	7.9	1.62	1.70	0.95	5.3	1.74	1.55	1.12	7.6	1.78	0.94	1.90
	3.0	1.85	1.19	1.55	5.4	1.97	1.50	1.31	6.1	1.69	1.24	1.36	6.5	1.55	1.23	1.26	7.6	1.91	1.15	1.66	7.7	1.61	1.50	1.07	5.2	1.63	1.61	1.01	7.9	1.63	0.95	1.72	
	3.3	1.78	1.30	1.37	3.9	2.17	1.26	1.72	5.1	2.06	1.55	1.33	5.6	1.69	1.30	1.30	5.5	1.89	1.20	1.58	6.3	1.77	1.30	1.36	5.1	1.43	1.29	1.11	6.9	1.98	0.91	2.17	
	3.1	1.95	1.12	1.77	4.2	2.15	1.34	1.60	5.2	1.64	1.03	1.59	5.6	1.69	1.40	1.21	5.2	1.86	1.44	1.29	7.1	1.68	1.72	0.98	4.6	1.65	1.66	0.99	6.9	1.81	0.92	1.97	
	3.0	1.81	1.33	1.36	4.0	2.28	1.38	1.65	4.7	1.73	1.21	1.43	5.7	1.69	1.13	1.49	5.1	1.92	1.24	1.54	6.8	1.80	1.31	1.37	5.1	1.79	1.51	1.19	7.2	1.83	0.82	2.23	
	3.3	1.82	1.15	1.58	4.8	2.19	1.32	1.66	5.1	1.68	1.04	1.62	5.7	1.70	1.23	1.38	5.0	2.01	1.20	1.68	6.9	1.73	1.38	1.25	5.4	1.63	1.71	0.95	7.0	1.81	0.91	1.99	
	2.1	2.07	1.36	1.52	4.8	2.12	1.25	1.70	4.7	1.91	1.05	1.82	5.6	1.70	1.20	1.42	5.2	2.09	1.24	1.69	6.8	1.81	1.29	1.40	6.4	1.53	1.59	0.96	7.0	1.85	0.81	2.28	
	2.6	2.04	1.07	1.91	3.6	2.28	1.15	1.98	3.6	2.25	1.04	2.16	4.7	1.83	1.13	1.62	4.3	2.26	1.23	1.85	6.5	1.89	1.18	1.60	4.9	1.66	1.57	1.06	6.3	1.93	0.81	2.38	
	3.0	1.92	1.57	1.22	4.0	2.19	1.34	1.63	3.5	2.44	1.02	2.39	4.6	1.83	1.14	1.61	4.3	2.21	1.24	1.79	6.9	1.95	1.52	1.28	5.1	1.72	1.71	1.01	6.5	1.98	0.80	2.48	
2.6	2.07	1.18	1.75	3.6	2.29	1.31	1.75	3.8	2.29	0.99	2.31	5.1	1.88	1.31	1.43	4.0	2.15	1.17	1.85	6.3	1.74	1.62	1.07	4.9	1.69	1.47	1.15	6.1	2.11	0.85	2.48		
2.1	2.11	1.22	1.73	3.8	2.34	1.12	2.09	3.3	2.32	1.10	2.11	5.1	1.86	1.29	1.44	4.1	2.22	1.17	1.90	6.9	1.79	1.89	0.95	5.0	1.44	1.43	1.01	7.0	2.08	0.84	2.47		
1.8	2.21	1.29	1.71	3.8	2.25	1.19	1.89	3.8	2.00	1.73	1.16	5.2	1.92	1.24	1.55	3.8	2.24	0.99	2.27	6.8	1.88	1.49	1.26	5.5	1.52	1.73	0.88	6.5	2.07	0.92	2.25		
20未満	両面 50回	8.3	1.15	1.08	1.06	6.3	1.89	0.98	1.93	6.4	1.13	1.05	1.08	5.3	1.93	1.22	1.58	7.8	2.16	1.13	1.91	7.6	1.73	1.30	1.33	4.0	1.59	1.62	0.98	4.4	2.46	1.05	2.34
		6.6	1.52	1.08	1.41	6.6	1.86	1.00	1.86	6.5	1.07	1.00	1.07	5.3	1.92	1.19	1.61	8.2	2.02	1.06	1.91	7.5	1.96	1.34	1.46	4.6	1.64	2.28	0.72	4.7	2.34	1.11	2.11
		7.4	1.49	1.18	1.26	5.9	1.83	1.08	1.69	7.1	1.05	1.20	0.88	5.9	1.70	1.39	1.22	8.2	2.00	0.94	2.12	8.8	1.50	1.28	1.17	4.3	1.57	1.45	1.08	5.0	2.24	1.05	2.13
		7.7	1.46	1.15	1.27	6.3	1.63	0.98	1.66	6.8	1.07	1.11	0.96	5.7	1.72	1.20	1.43	8.2	1.93	0.92	2.10	7.8	1.86	1.57	1.18	4.5	1.78	1.81	0.99	4.9	2.37	0.98	2.41
	7.7	1.41	1.15	1.23	6.6	1.69	0.85	1.98	5.7	1.19	1.02	1.17	5.6	1.77	1.28	1.38	8.1	1.93	0.97	1.99	7.4	2.13	1.07	1.99	4.7	1.63	1.64	1.00	4.8	2.36	0.99	2.38	
	6.4	1.71	1.41	1.21	6.2	1.78	1.01	1.76	4.2	1.45	1.04	1.39	4.7	1.93	1.29	1.50	7.7	2.18	0.89	2.45	7.3	1.89	1.42	1.33	2.9	1.92	1.43	1.34	4.0	2.52	1.26	2.00	
	6.2	1.57	1.02	1.54	4.7	2.02	0.83	2.44	4.3	1.41	1.01	1.40	4.7	1.95	1.29	1.51	7.5	2.15	0.90	2.39	8.0	1.80	1.19	1.51	4.0	1.42	1.63	0.87	4.4	2.59	1.03	2.51	
	6.0	1.75	1.21	1.45	5.8	1.94	0.94	2.07	5.0	1.30	0.85	1.53	5.0	1.96	1.29	1.52	7.0	2.22	0.99	2.25	7.3	1.83	1.08	1.69	4.2	1.63	1.57	1.04	4.0	2.50	1.17	2.13	
	5.9	1.82	1.07	1.70	5.1	1.73	0.97	1.78	4.0	1.44	0.99	1.45	4.6	2.07	1.13	1.83	7.6	2.23	0.94	2.37	7.2	2.14	1.42	1.51	4.0	1.81	1.65	1.10	4.2	2.49	1.12	2.22	
	5.7	1.68	1.13	1.49	6.1	1.53	1.00	1.53	4.6	1.46	1.07	1.36	5.1	1.93	1.23	1.57	7.5	2.17	0.88	2.47	8.1	1.83	1.31	1.40	3.9	1.61	1.50	1.08	4.6	2.46	0.93	2.65	
	5.8	1.75	1.42	1.23	4.8	2.02	1.01	2.00	3.3	1.65	1.21	1.36	4.3	1.98	1.14	1.74	7.6	2.30	0.97	2.37	6.7	2.16	1.16	1.86	3.6	1.65	2.04	0.81	4.2	2.61	1.00	2.61	
	5.5	1.84	1.29	1.43	5.1	2.06	0.97	2.13	3.8	1.54	0.99	1.56	4.1	2.10	1.18	1.78	7.1	2.33	1.10	2.12	7.3	2.17	1.10	1.97	4.3	1.66	2.07	0.80	4.2	2.70	1.01	2.67	
6.0	1.70	1.14	1.49	5.6	1.81	0.96	1.89	3.0	1.63	0.98	1.66	4.4	2.08	1.25	1.66	6.2	2.47	0.93	2.66	7.3	2.05	1.28	1.60	3.1	1.90	1.84	1.03	3.7	2.64	1.04	2.53		
6.1	1.56	1.14	1.37	5.1	1.92	1.04	1.84	3.1	1.81	1.14	1.59	4.2	1.98	1.13	1.75	6.6	2.41	1.00	2.41	6.9	2.07	1.10	1.88	2.9	2.02	1.39	1.45	4.0	2.74	1.05	2.61		
5.6	1.74	1.25	1.39	4.8	2.15	1.01	2.12	3.0	1.76	0.90	1.96	4.0	2.07	1.00	2.07	6.1	2.46	0.89	2.76	6.7	2.12	1.16	1.83	4.4	1.73	1.60	1.08	4.1	2.69	0.90	2.98		



(修正前)



(修正後)

図 4.18 各社の再生骨材を用いた圧裂試験による空隙率と圧裂係数の関係 (全データ)

#### (4) 基準値の考え方

再生骨材の圧裂係数はこれまで空隙率に関わらず一定の値であったが、上記のとおり空隙率に応じて変化することから、①空隙率に応じて圧裂係数の基準値を変化させる、②空隙率に範囲を設けて圧裂係数を選定する方法について検討した。図 4.19 に基準値の考え方を示す。

空隙率に応じて圧裂係数を変化させた場合、供試体の作製方法を規定することが難しいこと、および基準値が変化することで現場にて混乱が生じる可能性があることから、空隙率に上限値を設けて、圧裂係数を設定する方法を採用することとした。

一般的に空隙率が高いと圧裂係数は低下する。過度に劣化したアスファルトを含有する再生骨材を締め固めると空隙率が高くなる可能性がある。このように過度に劣化したアスファルトを含有する再生骨材により作製した空隙率の高い供試体を排除するため、空隙率に上限を設けることとした。また、空隙率が低い場合、圧裂係数が大きくなることが予想されるが、アスファルトが粘性を有していれば、圧裂係数は低くなることが考えられるため、空隙率の下限値は設定しないこととした。

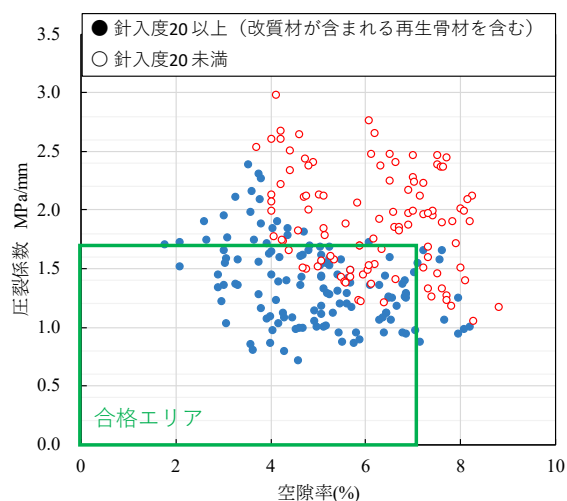
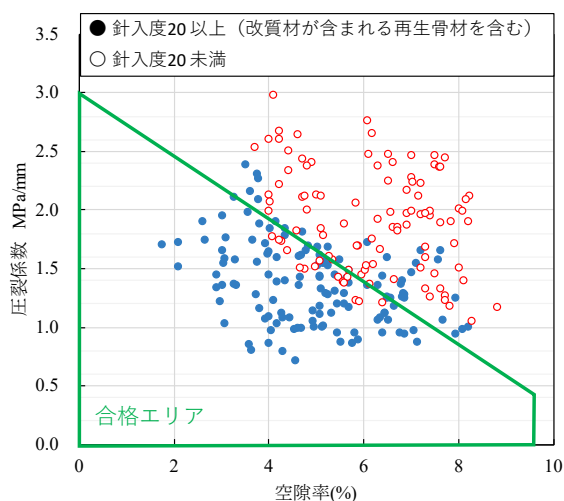


図 4.19 基準値の考え方

(5) 基準値の検討

表 4.21 に圧裂係数の基準値を 1.5 から 1.8MPa/mm に設定し、空隙率の上限値を 5~10%とした場合の針入度 20 以上と 20 未満における合格率を算出した結果を示す。圧裂係数の基準値は、針入度 20 以上のアスファルトを含む再生骨材をすべて合格させ、針入度 20 未満のアスファルトを含む再生骨材をすべて不合格とする値が望ましいが、本評価ではこの条件に合う値を設定できない。

空隙率を 5%とすると針入度 20 未満の合格率は 0 であるが、針入度 20 以上の合格率も 50%未満となる。空隙率 9%以上では合格率は変化しない。これらのことから空隙率 6%~9%、圧裂係数 1.5~1.8 MPa/mm で条件を設定することができる。さらに、針入度 20 以上で合格率 8 割以上かつ針入度 20 未満の合格率を 20%未満とした場合、圧裂係数 1.8 MPa/mm、空隙率 7%となる。針入度 20 以上で合格率 7 割以上かつ針入度 20 未満の合格率を 20%未満とした場合、圧裂係数 1.8 MPa/mm、空隙率 7%と圧裂係数 1.7 MPa/mm、空隙率 7%となる。

現場での圧裂試験による再生骨材の評価を普及させるにあたり、ストアス再生骨材の針入度 20 未満の適用を優先させることはできないため、圧裂係数 1.7 MPa/mm、空隙率 7%の条件が本検討の目的に相応しいと判断した。

表 4.21 圧裂係数の基準値の検討

空隙率	圧裂係数	MPa/mm	1.5	1.6	1.7	1.8
5%	針入度 20 以上の合格率	%	22.0	27.3	32.7	40.0
	針入度 20 未満の合格率	%	0.0	0.0	0.0	0.0
6%	針入度 20 以上の合格率	%	40.0	50.7	58.7	66.0
	針入度 20 未満の合格率	%	5.6	5.6	6.7	8.9
7%	針入度 20 以上の合格率	%	54.0	64.7	73.3	81.3
	針入度 20 未満の合格率	%	10.0	12.2	14.4	17.8
8%	針入度 20 以上の合格率	%	58.0	70.0	80.0	88.0
	針入度 20 未満の合格率	%	17.8	21.1	25.6	30.0
9%	針入度 20 以上の合格率	%	59.3	71.3	81.3	89.3
	針入度 20 未満の合格率	%	21.1	25.6	30.0	34.4
10%	針入度 20 以上の合格率	%	59.3	71.3	81.3	89.3
	針入度 20 未満の合格率	%	21.1	25.6	30.0	34.4

再生骨材はばらつきがあることから、供試体を 5 個作製し、圧裂係数の最大値と最小値を排除し 3 個の平均値を求めることとなっている。上記で決定した条件により、図 4.18 のデータについて最大値と最小値を棄却した結果を図 4.20、図 4.21 に示す。凡例の同色は同じ再生骨材を用いて突固め回数異なるものを示している。凡例中の括弧内は針入度を示す。

図 4.20 において、針入度 20 以上の再生骨材では、突固め回数を変化させることにより、すべての再生骨材で合格エリアに入ることを確認した。

図 4.21 において、針入度 20 未満では、改質材を含む再生骨材と A 社の再生骨材以外は、突き固め回数を変化させても合格エリアに入らないことを確認した。A 社の再生骨材は針入度が 18 であり、針入度でも再現精度を考慮するとわずかな差であること、針入度が 15 程度以下のものは確実に排除することができることから、本条件（圧裂係数：1.70MPa/mm 以下、空隙率 7%以下）は適切であると判断した。

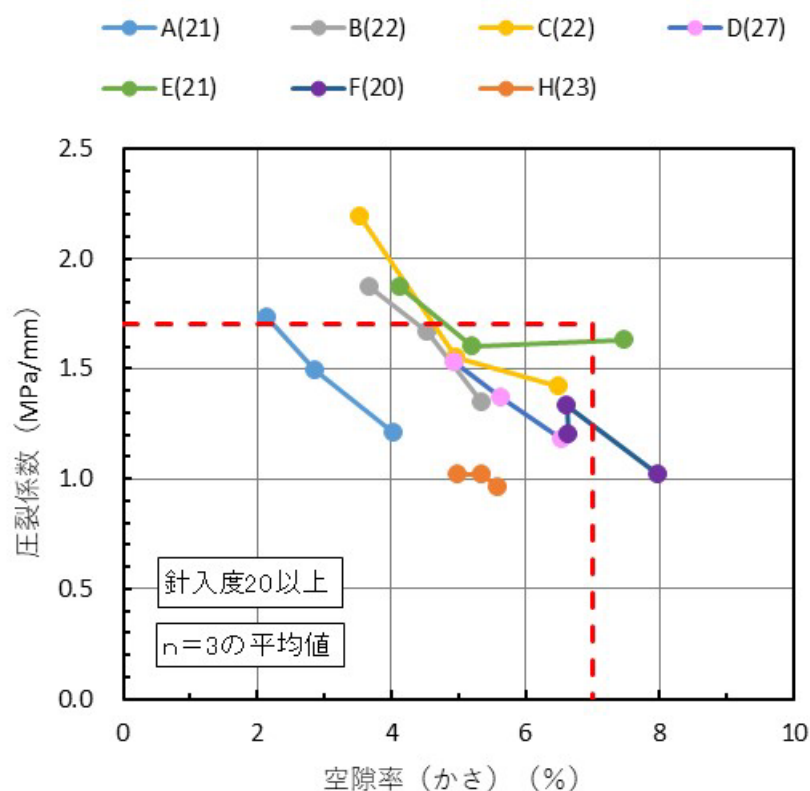


図 4.20 針入度 20 以上の再生骨材における空隙率と圧裂係数の関係 (N3)

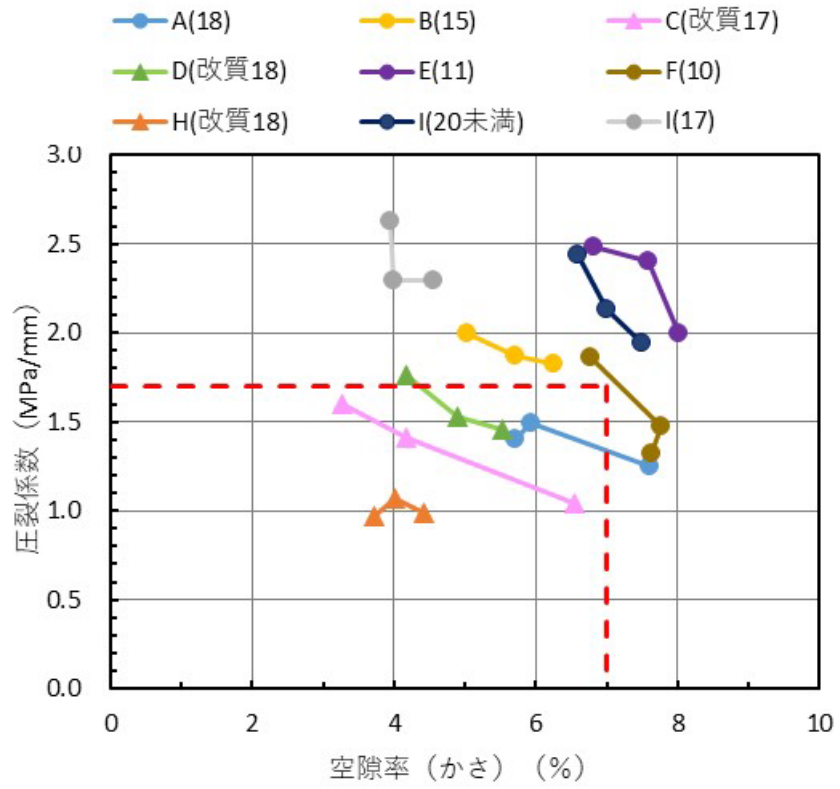


図 4.21 針入度 20 未満の再生骨材における空隙率と圧裂係数の関係 (N3)

## (6) 空隙率の設定

判定基準に用いる空隙率は、これまでかさ密度で評価してきたが、現場での作業効率を考慮すると、ノギス法による密度測定が望ましい。そこで、ノギス法とかさ密度による測定方法の影響度を検討した。

図 4.22 にかさ密度とノギス密度による空隙率の関係を示す。ここで示す通り、ノギス法の空隙率とかさ密度法による空隙率はほぼ線形の関係が得られること、およびかさ密度法に対しノギス法では2%程度空隙率が高くなることが分かる。

この関係について上記の圧裂係数の検討で用いた全データ解析と圧裂試験法（最大値と最小値をそれぞれ棄却）に基づいた解析法により検証した。図 4.23, 図 4.24 に解析結果, 表 4.22 にかさ密度法とノギス法の比較を示す。ここで示す通り、かさ密度法でもノギス法でも大きな違いが見られないことから、測定方法はどちらの方法により空隙率を測定しても良いことを確認した。

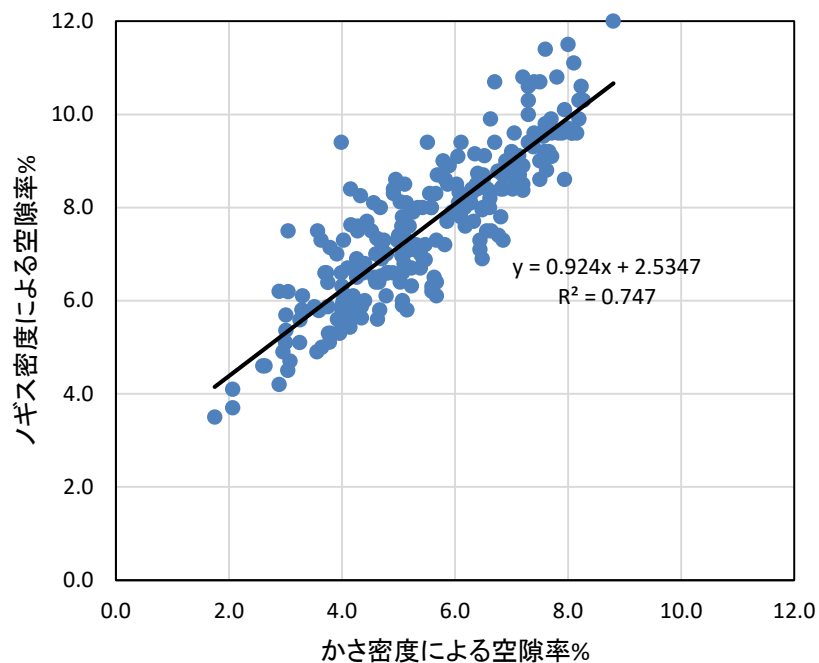
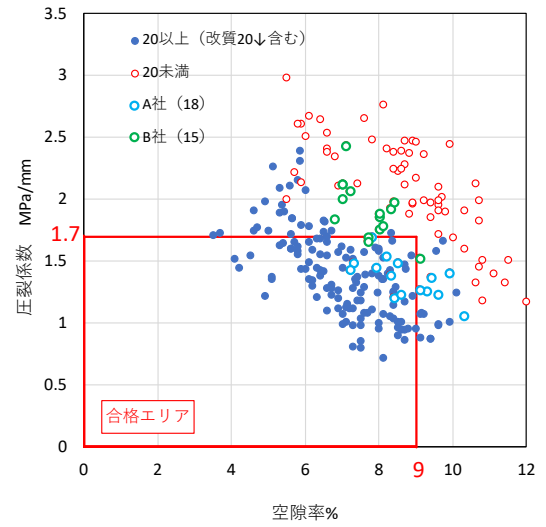
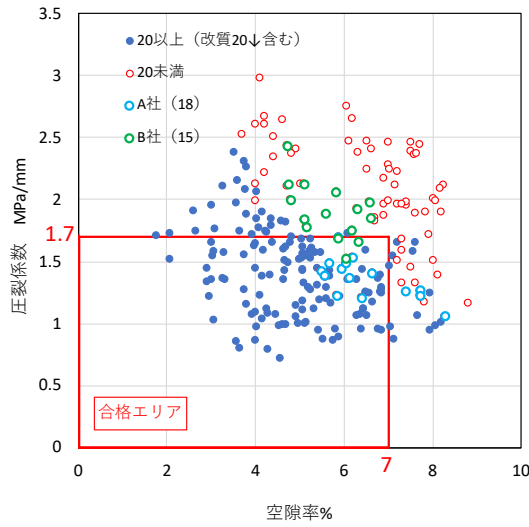
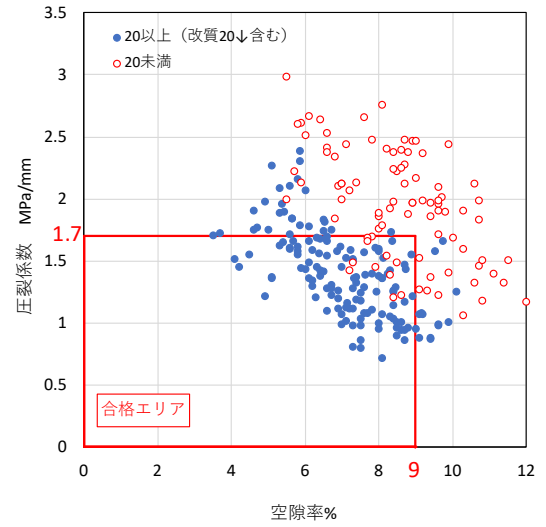
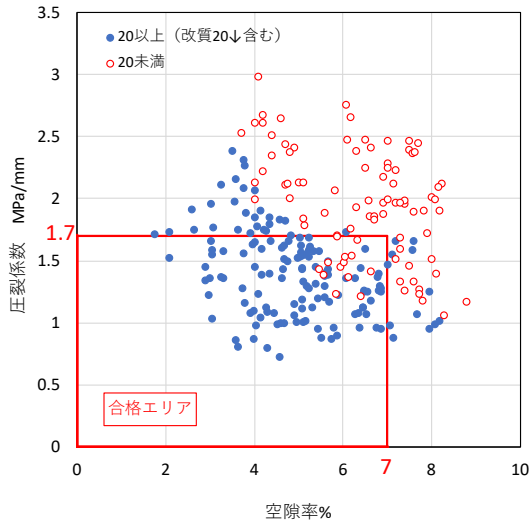


図 4.22 かさ密度とノギス密度による空隙率の関係



(かさ密度法)

(ノギス法)

図 4.23 密度測定方法の違いによるデータ解析結果 (全データ)



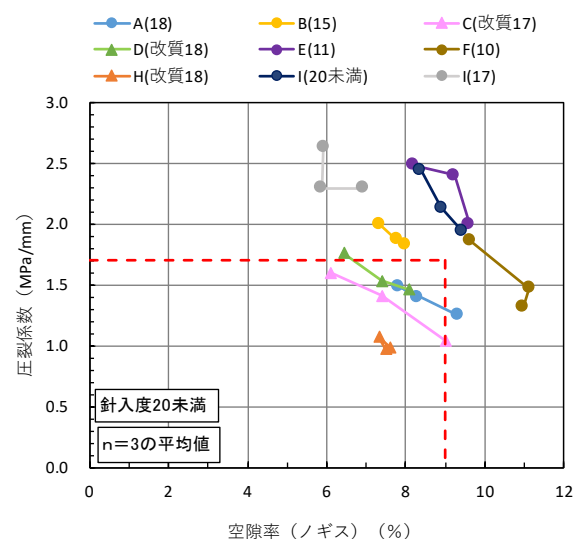
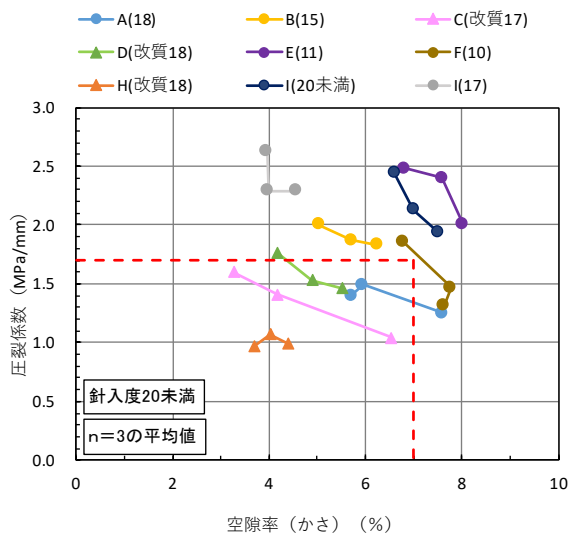
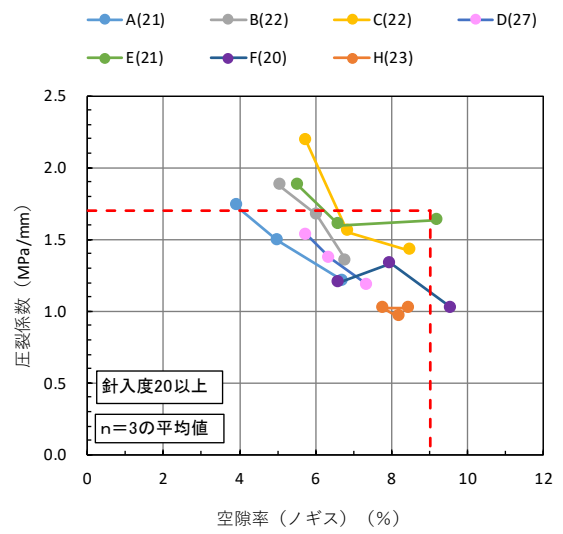
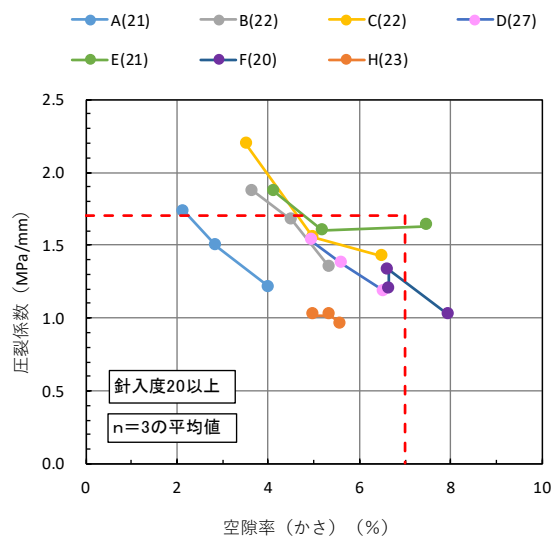


図 4.24 密度測定方法の違いによるデータ解析結果 (N3)

表 4.22 空隙率の測定方法による比較

圧裂係数 MPa/mm		1.70	1.70
密度 %		かさ密度 $\leq 7\%$	ノギス $\leq 9\%$
再生骨材に含まれるアスファルトの針入度	20 以上	合格率 : 73.3%	合格率 : 72.7%
	20 未満	合格率 : 14.4%	合格率 : 11.1%

#### 4.5. 再生骨材の圧裂係数の提案

上記の検討結果より，再生骨材の圧裂係数の基準値（案）を以下のとおりとする。

再生骨材の性状	圧裂係数（25℃）	1.70 MPa/mm 以下
---------	-----------	----------------

- 突固め回数を両面 50 回として，圧裂供試体の空隙率がかさ密度法で 7%以下（ノギス法では 9%以下）となる供試体にて評価する。
- 突固め回数を両面 50 回として供試体を作製し，そのときの空隙率がかさ密度法で 7%（ノギス法では 9%）を超える場合，突固め回数を両面 75 回あるいは両面 100 回として供試体を作製し，空隙率を調整してもよい。（いずれの条件でも所定の空隙率以下とならない場合あるいは極端に空隙率が低くなる場合は，再生骨材の粒度が適切であるか検討する。）

#### 4.6. 再生加熱アスファルト混合物の設計圧裂係数の検討

##### 4.6.1. 目的

再生骨材の圧裂試験方法において、変位の測定位置が近傍変位となったため、再生加熱アスファルト混合物の設計圧裂係数においても同様の測定方法とする。この場合、設計圧裂係数が変わる可能性があるため、本検討において検証した。

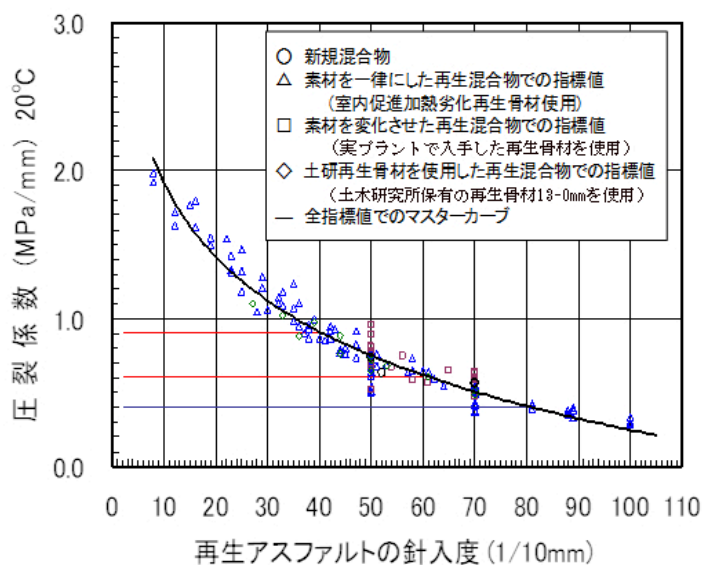


図 4.25 現行の針入度と圧裂係数の関係

##### 4.6.2. 検討に用いる再生骨材

再生骨材の圧裂試験法の検討で用いたプラントで製造した再生骨材 (表 4.1), 室内促進劣化により作製した改質再生骨材, 日本アスファルト合材協会会員各社のプラントで採取した再生骨材を用いた。

##### 4.6.3. 圧裂試験の方法

表 4.23 に圧裂試験の方法を示す。圧裂試験は土木研究所保有の万能試験機により実施した。

表 4.23 圧裂試験の方法

項目	内容	
再生骨材	プラントで製造した再生骨材 室内促進劣化により作製した改質再生骨材 各社プラントで使用している再生骨材 針入度 20 以上	
混合物の種類	再生密粒度アスコン (13)	
供試体の作製条件	再生骨材の粒度	13-0mm
	突固め回数	両面 50 回
	供試体の厚さ	63.5mm
試験条件	载荷速度	50mm/min.
	試験温度	20°C
	変位測定位置	供試体近傍

#### 4.6.4. 評価した再生混合物の概要

##### (1) 設計針入度に調整した再生混合物の配合設計

設計針入度を 40, 60, 80, 100 として再生混合物の供試体を作製した。ストアス再生骨材は 4.3.2 で述べたプラントで作製した再生骨材とした。また、改質再生骨材は室内で促進劣化させたものを用いた。新規ストアスは針入度 40-60, 60-80, 80-100 を用いた。設計針入度 60 の配合にて一般的なマーシャル法によりアスファルト量を算出し、この値で他の設計針入度の供試体を作製した。この時の混合物の種類は、再生密粒度アスコン (13) で突固め回数を 50 回とした。再生骨材の配合率は 60% に統一し、アスファルト量をストアス混合物、改質混合物それぞれで統一した。再生用添加材は芳香族系再生用添加剤とした。再生骨材の 13-5mm, 5-0mm の比はストアス再生骨材で 62:38, 改質再生骨材で 67.2 : 32.8 であった。

表 4.24 評価に用いたストアス再生骨材

材料名		再生骨材 13-5	再生骨材 5-0	13-0 相当	規格値
製造比率 (%)		62.0	38.0	100	—
通過質量百分率 (%)	19mm	100	—	100	—
	13.2mm	98.4	100	99.0	—
	4.75mm	32.8	100	58.3	—
	2.36mm	20.4	70.7	39.5	—
	0.6mm	16.6	36.7	24.2	—
	0.3mm	12.8	25.8	17.7	—
	0.15mm	9.2	17.6	12.3	—
	0.075mm	6.6	12.5	8.8	—
最大密度 (g/cm <sup>3</sup> )		2.561	2.434	2.513	—
旧アスファルト含有量 (%)		3.19	6.15	4.31	3.8 以上
旧アスファルト針入度 (1/10mm)		21	23	22	20 以上
骨材の微粒分量 (%)		1.9	1.3	1.7	5 以下

表 4.25 評価に用いた改質再生骨材

材料名		再生骨材 13-5	再生骨材 5-0	13-0 相当	規格値
製造比率 (%)		67.2	32.8	100	—
通過質量百分率 (%)	19mm	100	—	100	—
	13.2mm	97.6	—	98.4	—
	4.75mm	42.1	100	61.1	—
	2.36mm	24.2	78.2	41.9	—
	0.6mm	20.7	52.2	31.0	—
	0.3mm	16.7	35.7	22.9	—
	0.15mm	8.1	13.7	9.9	—
	0.075mm	4.1	6.9	5.0	—
最大密度 (g/cm <sup>3</sup> )		2.561	2.434	2.485	-
旧アスファルト含有量 (%)		3.75	7.16	5.80	3.8 以上
旧アスファルト針入度 (1/10mm)		19	19	19	20 以上
骨材の微粒分量 (%)		1.9	1.3	1.5	5 以下

表 4.26 評価に用いた再生用添加剤（芳香族系）の代表性状

項目		性状値	規格値
動粘度 (60℃)	mm <sup>2</sup> /s	481	80~1000
引火点	℃	326	250 以上
薄膜加熱後の粘度比 (60℃)	—	1.10	2 以下
薄膜加熱質量変化率	%	-0.05	±3 以内
密度 (15℃)	g/cm <sup>3</sup>	0.974	報告
組成分析	アスファルテン	%	0.2
	飽和分	%	23.9
	芳香族分	%	73.1
	レジン分	%	2.8
			報告

表 4.27 再生用添加剤の配合量

再生用添加剤の添加量	ストアス (%)	改質II型 (%)
設計針入度 40 (1/10mm) 相当	8.0	15.5
設計針入度 60 (1/10mm) 相当	13.7	24.0
設計針入度 80 (1/10mm) 相当	17.7	29.5
設計針入度 100 (1/10mm) 相当	20.8	34.3

(2) 各社の再生混合物の概要

各社のプラントから入手した再生骨材を用いた再生混合物は、再生用添加剤として再生 A（芳香族系）と再生 B（飽和分系）を用いて、各社で配合設計を行った。再生骨材の配合率は 30%と 60%に分担した。ここでも設計針入度は 40~100 に調整した。設計針入度 60 になる混合物で最適アスファルト量を選定し、選定したアスファルト量で他の圧裂供試体用混合物を作製した。

表 4.28 に各社で分担した再生混合物の概要、表 4.29 に混合・締固め温度と使用した新アスファルトの種類を示す。

表 4.28 再生混合物の概要

項目	密粒 (13)				密粒 (20)	
	30	30	60	60	30	60
配合率 (%)	30	30	60	60	30	60
再生用添加剤の種類	再生 A	再生 B	再生 A	再生 B	再生 A	再生 A
設計針入度 (1/10mm)	40, 60, 80, 100					
担当会社	A	D	B	F	C	E

表 4.29 混合・締固め温度および使用した新アスファルトの種類

設計針入度 1/10mm	混合温度 ℃	締固め温度 ℃	新アスファルトの針入度 1/10mm
40	155	145	40-60
60	150	140	60-80
80	145	135	80-100
100	145	135	80-100

#### 4.6.5. 試験結果

##### (1) ストアス再生骨材による検討結果

表 4.30, 図 4.26 にストアス再生骨材を用いて, 各設計針入度に合わせて作製した供試体を用いて圧裂試験を行った結果を示す。アスファルト量は, 60-80 の配合設計から得られた 5.2% に統一した。

表 4.30 ストアス再生骨材を用いた再生混合物の試験結果

作製機関	針入度 (1/10mm)	供試体 No.	直径 mm	厚さ mm	密度 g/cm <sup>3</sup>	空隙率 %	最大荷重 kN	圧裂強度 MPa	機械変位 mm	近傍変位 mm	圧裂係数 (時間変位) MPa/mm	圧裂係数 (近傍変位) MPa/mm
道路試験所	設計針入度40 実測値(37)	1	101.9	64.00	2.433	2.4	19.6	1.92	1.94	1.67	0.99	1.15
		2	101.7	64.10	2.433	2.4	19.7	1.92	1.88	1.64	1.02	1.17
		3	101.8	63.90	2.431	2.4	18.9	1.85	2.07	1.75	0.89	1.06
		4	101.7	64.10	2.427	2.6	19.1	1.87	2.00	1.70	0.94	1.10
		5	101.9	64.10	2.429	2.5	18.6	1.81	1.97	1.72	0.92	1.05
		平均	101.8	64.04	2.431	2.5	19.2	1.87	1.97	1.70	0.95	1.11
	設計針入度60 実測値(60)	1	101.8	64.00	2.433	2.3	15.3	1.50	1.90	1.67	0.79	0.90
		2	101.8	63.90	2.435	2.2	14.5	1.42	1.87	1.68	0.76	0.85
		3	101.8	63.90	2.429	2.5	14.5	1.42	2.05	1.84	0.69	0.77
		4	101.8	63.80	2.435	2.2	15.2	1.49	1.90	1.68	0.78	0.89
		5	101.9	63.90	2.435	2.2	15.3	1.50	2.08	1.86	0.72	0.81
		平均	101.8	63.90	2.433	2.3	15.0	1.47	1.96	1.75	0.75	0.84
	設計針入度80 実測値(84)	1	101.8	64.00	2.433	2.3	11.1	1.08	1.69	1.54	0.64	0.70
		2	101.9	63.70	2.439	2.0	11.6	1.14	1.65	1.48	0.69	0.77
		3	101.7	63.70	2.441	2.0	11.6	1.14	1.91	1.75	0.60	0.65
		4	101.7	64.30	2.431	2.4	11.4	1.11	1.94	1.75	0.57	0.63
		5	101.8	63.80	2.440	2.0	11.7	1.14	2.02	1.86	0.56	0.61
		平均	101.8	63.90	2.437	2.1	11.5	1.12	1.84	1.68	0.61	0.67
	設計針入度100 実測値(95)	1	101.7	63.70	2.437	2.1	10.9	1.07	1.85	1.70	0.58	0.63
		2	101.6	63.90	2.428	2.5	10.5	1.03	1.65	1.50	0.62	0.69
3		101.8	64.20	2.413	3.1	9.5	0.93	1.58	1.45	0.59	0.64	
4		101.9	63.30	2.436	2.2	10.9	1.07	1.69	1.56	0.63	0.69	
5		101.7	63.90	2.426	2.6	10.3	1.01	1.54	1.41	0.66	0.72	
平均		101.7	63.80	2.428	2.5	10.4	1.02	1.66	1.52	0.62	0.67	

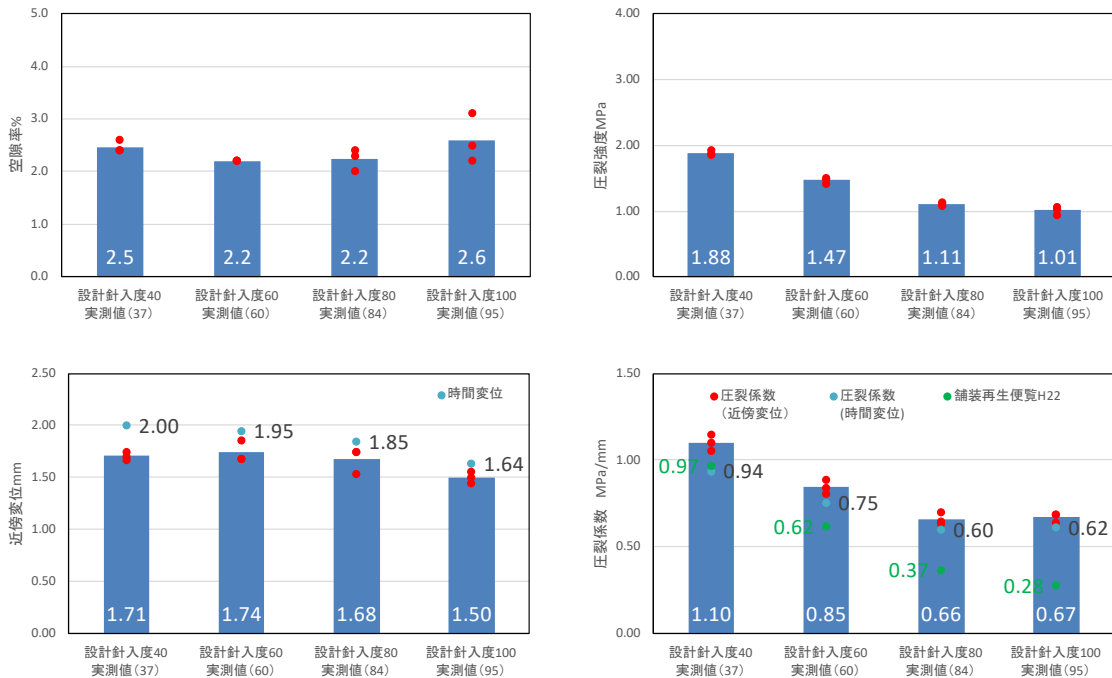


図 4.26 ストアス再生骨材を用いた再生混合物の試験結果



(2) 改質再生骨材による検討結果

表 4.31, 図 4.27 に改質再生骨材を用いて, 各設計針入度に合わせて作製した供試体を用いて圧裂試験を行った結果を示す。アスファルト量は, 60-80 の配合設計から得られた 5.2% に統一した。

表 4.31 改質再生骨材を用いた再生混合物の試験結果

作製機関	針入度 (1/10mm)	供試体 No.	直径 mm	厚さ mm	密度 g/cm <sup>3</sup>	空隙率 %	最大荷重 kN	圧裂強度 MPa	機械変位 mm	近傍変位 mm	圧裂係数 (時間変位) MPa/mm	圧裂係数 (近傍変位) MPa/mm
道路試験所	設計針入度40 実測値(38)	1	101.8	63.60	2.385	3.9	18.3	1.80	2.23	2.01	0.81	0.90
		2	101.9	63.70	2.379	4.2	17.8	1.75	1.94	1.73	0.90	1.01
		3	101.6	64.10	2.386	3.9	18.6	1.82	2.08	1.88	0.88	0.97
		4	101.7	63.90	2.382	4.1	18.0	1.76	2.12	1.90	0.83	0.93
		5	101.7	63.90	2.387	3.9	18.0	1.70	1.95	1.75	0.87	0.97
	平均	101.7	63.84	2.384	4.0	18.1	1.77	2.06	1.85	0.86	0.95	
	設計針入度60 実測値(60)	1	101.5	64.50	2.383	4.0	13.7	1.33	2.29	2.14	0.58	0.62
		2	101.8	63.90	2.380	4.1	14.2	1.39	2.01	1.85	0.69	0.75
		3	101.6	64.60	2.370	4.2	12.9	1.20	2.00	1.84	0.60	0.65
		4	101.8	64.10	2.385	3.9	14.5	1.42	1.93	1.77	0.74	0.80
		5	101.6	64.30	2.386	3.9	13.7	1.30	2.10	1.94	0.62	0.67
	平均	101.7	64.28	2.381	4.0	13.8	1.33	2.07	1.91	0.65	0.70	
	設計針入度80 実測値(82)	1	101.6	63.80	2.384	4.1	11.2	1.10	1.84	1.70	0.60	0.65
		2	101.6	63.90	2.382	4.2	11.1	1.00	1.82	1.68	0.60	0.60
		3	101.7	63.80	2.330	4.1	11.0	1.07	1.81	1.68	0.59	0.64
		4	101.7	64.10	2.384	4.1	11.0	1.07	1.82	1.68	0.59	0.64
		5	101.8	63.40	2.390	3.9	11.3	1.11	1.81	1.66	0.62	0.67
	平均	101.7	63.80	2.374	4.1	11.1	1.07	1.82	1.68	0.60	0.64	
	設計針入度100 実測値(97)	1	101.9	63.50	2.385	4.2	9.0	0.89	1.52	1.40	0.59	0.64
		2	101.6	63.60	2.383	4.3	9.2	0.90	1.97	1.86	0.46	0.48
3		101.8	63.10	2.910	3.9	10.5	1.04	1.80	1.66	0.58	0.63	
4		101.9	62.90	2.398	3.7	9.7	0.96	1.67	1.55	0.57	0.62	
5		101.6	63.70	2.391	3.9	9.5	0.93	1.72	1.59	0.54	0.58	
平均	101.8	63.36	2.493	4.0	9.6	0.94	1.74	1.61	0.55	0.59		

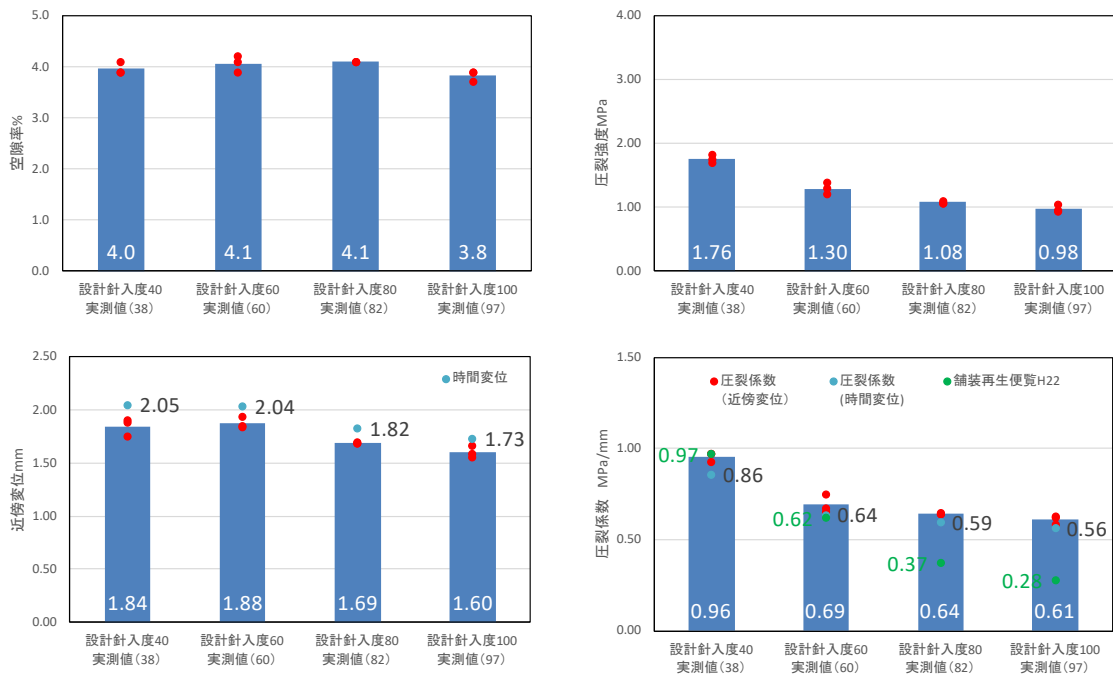


図 4.27 改質再生骨材を用いた再生混合物の試験結果

(3) 新規混合物による検討結果

表 4.32, 図 4.28 に針入度 40-60, 60-80, 80-100 を用いて作製した新規混合物を用いて圧裂試験を行った結果を示す。アスファルト量は, 60-80 の配合設計から得られた 5.4%に統一した。

表 4.32 新規混合物の試験結果

作製機関	アスファルト 針入度1/10mm	供試体 No.	直径 mm	厚さ mm	密度 g/cm <sup>3</sup>	空隙率 %	最大荷重 kN	圧裂強度 MPa	時間変位 mm	近傍変位 mm	圧裂係数 (時間変位) MPa/mm	圧裂係数 (近傍変位) MPa/mm
日本道路建設業協会 道路試験所	ストアス40/60 実測値(47)	1	102.0	64.3	2.390	4.3	19.89	1.98	2.20	1.98	0.88	1.00
		2	101.9	63.8	2.411	3.4	21.17	2.07	2.06	1.83	1.00	1.13
		3	102.1	63.7	2.412	3.4	20.47	2.00	2.13	1.90	0.94	1.05
		4	101.8	64.4	2.399	3.9	21.94	2.13	2.35	2.11	0.91	1.01
		5	101.8	64.4	2.406	3.6	20.79	2.02	2.18	1.96	0.92	1.03
		平均	101.9	64.1	2.404	3.7	20.85	2.04	2.18	1.96	0.93	1.04
	ストアス60/80 実測値(61)	1	101.7	63.9	2.409	3.4	16.38	1.60	2.04	1.83	0.79	0.87
		2	101.7	64.1	2.407	3.5	15.67	1.53	2.27	2.09	0.67	0.73
		3	101.8	63.3	2.410	3.4	16.05	1.59	2.18	2.00	0.73	0.80
		4	101.8	64.2	2.406	3.6	15.69	1.53	2.29	2.12	0.67	0.72
		5	101.9	64.2	2.396	4.0	15.64	1.52	2.39	2.21	0.64	0.69
		平均	101.8	63.9	2.406	3.6	15.89	1.55	2.23	2.05	0.70	0.76
	ストアス80/100 実測値(89)	1	101.6	64.0	2.398	4.0	11.57	1.13	2.20	2.06	0.52	0.55
		2	101.8	64.3	2.389	4.2	11.14	1.08	2.32	2.19	0.47	0.49
		3	101.8	64.0	2.394	4.0	11.11	1.09	2.19	2.04	0.50	0.53
		4	101.7	64.2	2.386	4.3	11.41	1.11	2.20	2.06	0.51	0.54
		5	101.7	64.2	2.392	4.1	12	1.17	2.21	2.06	0.53	0.57
		平均	101.7	64.1	2.392	4.1	11.45	1.12	2.22	2.08	0.51	0.54

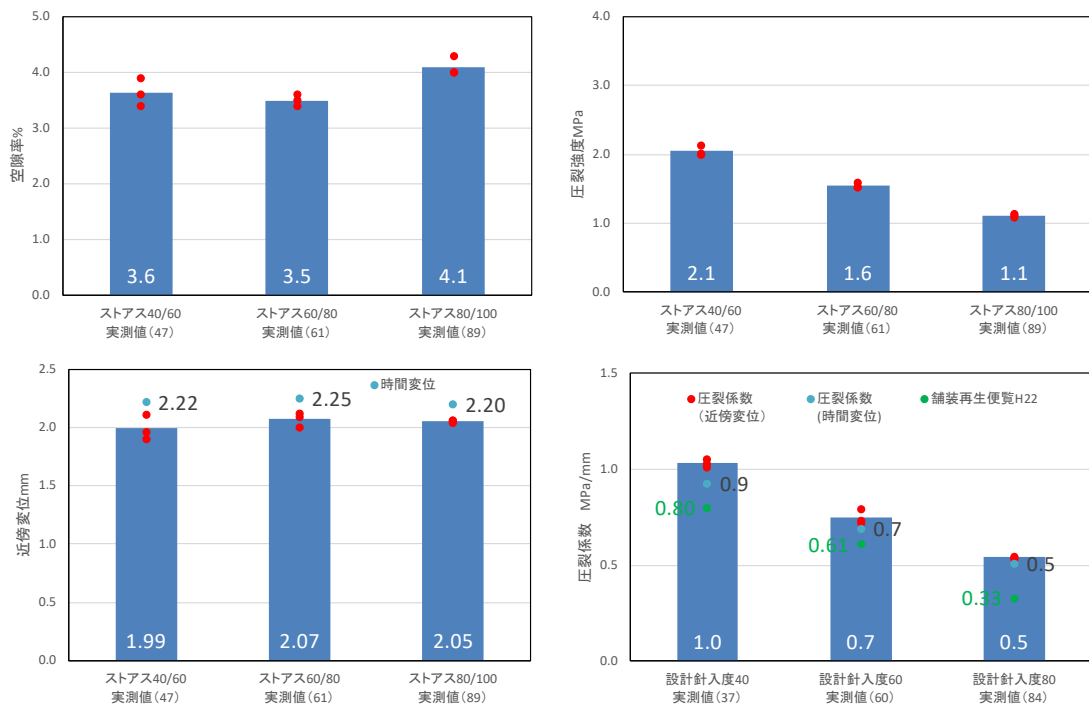


図 4.28 新規混合物の試験結果

(4) 日本アスファルト合材協会会員各社のプラントから入手した再生骨材による検討結果

図 4.29 に各社のプラントから入手した針入度 20 以上の再生骨材を用いて作製した供試体による試験結果を示す。

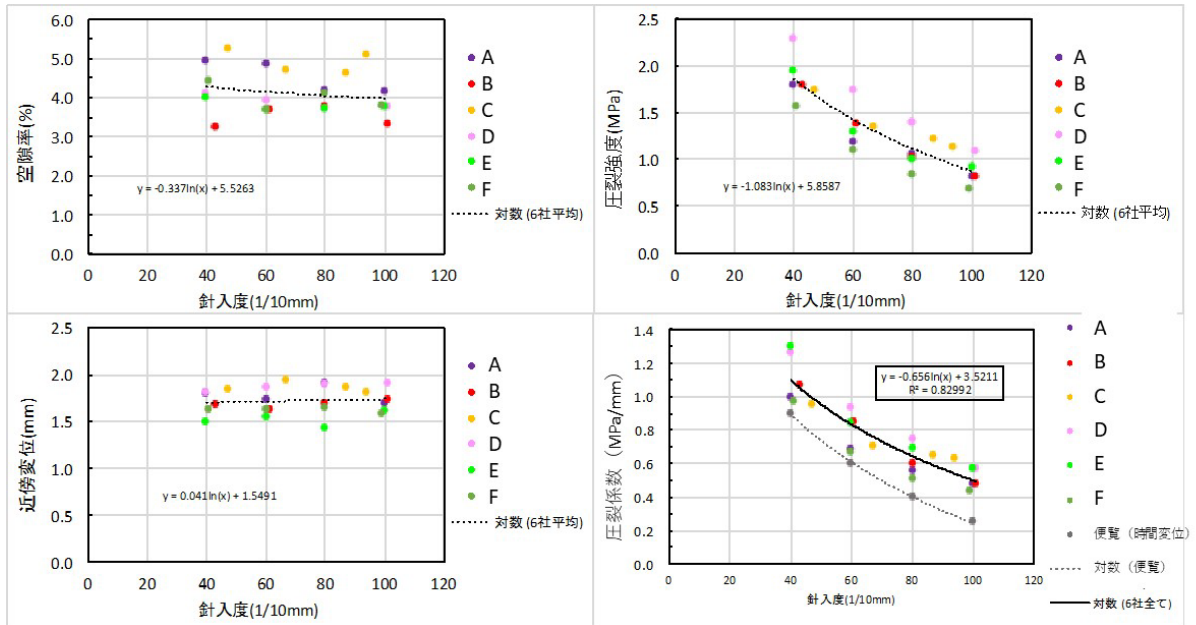


図 4.29 実プラントから入手した再生骨材を用いた再生混合物の圧裂試験の結果

(5) 設計圧裂係数の検討

図 4.30 に (1) ~ (4) で得られた結果のまとめを示す。図中で便覧と示すプロットは平成 22 年版舗装再生便覧で設計に記載される圧裂係数を表す。本検討により、新規混合物、ストアス再生骨材を用いた再生混合物 (図中 StAs)、改質再生骨材を用いた再生混合物 (図中、改質) および各社の実プラントの材料 (図中、6 社データ) を用いた再生混合物について、針入度と圧裂係数の関係は概ね同一であることを確認した。また、本検討では、変位を供試体近傍で測定したため、平成 22 年度舗装再生便覧で検討した際の時間変位よりも変位が小さな値を示したため、圧裂係数が大きくなっていることが分かる。

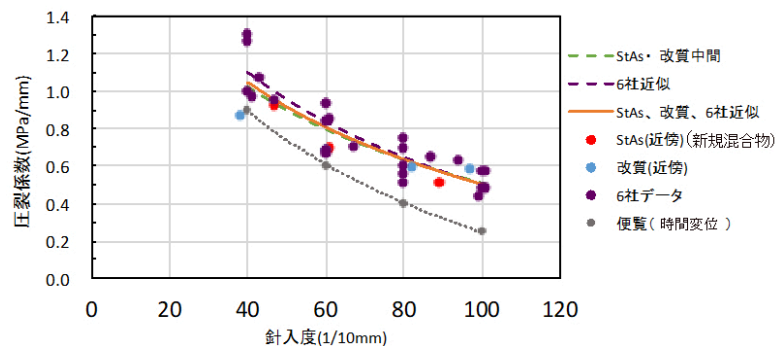


図 4.30 再生混合物における針入度と圧裂係数の関係

#### 4.7. 設計圧裂係数の提案

本検討により得られた針入度と圧裂係数の近似曲線から再生混合物の設計圧裂係数を求めた。

表 4.33 に各近似曲線における設計圧裂係数を示す。これらの結果を勘案し、設計圧裂係数案を表 4.34 に示す。

表 4.33 設計圧裂係数の検討結果

針入度 (1/10mm)		40	60	80	100
H22 舗装再生便覧 (MPa/mm)		0.9	0.6	0.4	0.25
近似式から算出 (MPa/mm)	ストアス	1.12	0.82	0.60	0.43
	改質	0.93	0.77	0.67	0.59
	ストアスー改質中間	1.02	0.80	0.63	0.51
	6社データの平均	1.10	0.84	0.65	0.50
	全データ	1.05	0.81	0.63	0.50
提案値 (MPa/mm)		1.10	0.80	0.60	0.50

表 4.34 設計圧裂係数の提案値

項目	設計圧裂係数の提案
針入度 40-60	0.80~1.10 (MPa/mm)
針入度 60-80	0.60~0.80 (MPa/mm)
針入度 80-100	0.50~0.60 (MPa/mm)

#### 参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所，社団法人日本アスファルト合材協会：アスファルト舗装の再生利用に関する共同研究，共同研究報告書第 408 号，2009.12

## 5. 適切な再生骨材配合率・品質・適用範囲の明確化

本共同研究結果により得られた結果を以下に示す。

### 1) 適切な再生骨材配合率の明確化

- 針入度 20 未満（針入度 15 程度）の旧アスファルトを含む再生骨材の配合率を 80%まで高くすると、ひび割れ抵抗性に顕著に影響を与えた。
- 新規混合物と針入度 20 未満（針入度 15 程度）の旧アスファルトを含む再生骨材を用いた再生混合物の耐久性を比較するとひび割れ抵抗性に若干差がみられたが、適切な再生用添加剤を選定することにより適用できる可能性があることが分かった。

### 2) 再生混合物の品質規格の明確化

- 本共同研究の結果より、再生混合物のひび割れ抵抗性と高温カンタブロ損失率および圧裂強度比に高い相関が見られたことから、再生混合物のひび割れ抵抗性のひとつの評価指標となり得る可能性があることが分かった。

### 3) 再生混合物の適用範囲の明確化

- ひび割れ抵抗性を有した再生混合物とするために、適切な再生骨材配合率や再生用添加剤を選定する必要がある。
- 適切な再生骨材配合率や再生用添加剤の選定には、高温時ひび割れ抵抗性の評価指標（案）として（本共同研究結果より）高温カンタブロ損失率 2.4%以下、または圧裂強度比 20 以上であることが望ましいことが示唆された。ただし、本指標値は限られた試験条件により得られた知見であるため、今後はさらに様々な試験条件（再生用添加剤、再生骨材、アスファルトの種類等）での性状や現地施工による供用性を検証する必要があると考えられる。

## 6. おわりに

令和2年11月に（公社）日本道路協会舗装委員会において「舗装委員会における今後の取り組み～新時代の舗装技術に挑戦する～」がとりまとめられた。本報告では、委員会での今後の取り組み方針として、「持続可能社会への貢献」、「異分野連携によるイノベーション」、「次世代への魅力あるビジョンの提示」の3つの柱が示され、「持続可能社会への貢献」では永続リサイクルに向けた取り組みが重要であることが位置付けられた。

本共同研究では、再生アスファルトおよび再生アスファルト混合物の性状は再生用添加剤や再生骨材配合率によって差異が生じるとともに、高温カンタブロ損失率等によって再生混合物の高温時のひび割れ抵抗性が評価可能であることを明らかにした。このように、本共同研究成果が、混合物評価によって適切な再生用添加剤や再生骨材配合率の選択が可能となり、永続的な舗装リサイクルに資することを期待する。

---

共同研究報告書  
Cooperative Research Report of PWRI  
No.590 March 2024

編集・発行 国立研究開発法人土木研究所

---

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課  
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754