

# 薄層改質アスファルト混合物の性能確認

三田村 文寛<sup>1</sup>・小宮 正俊<sup>2</sup>

<sup>1</sup>福井県雪対策・建設技術研究所（〒918-8108福井県福井市春日3丁目303番）

<sup>2</sup>日本道路株式会社 関西支店 大阪試験所（〒569-0045 大阪府高槻市西大樋町2-1）

表層の構造的な破損状態の回復を目的とした薄層舗装の開発に取り組んだ。7号碎石を最大粒径とし、Fullerの最大密度曲線を中心に骨材の2.36mmふるい目通過量を変化させ、4種類の骨材配合を定め、マーシャル安定度試験による配合設計で最適アスファルト量を求めた。アスファルト改質剤は架橋ポリエチレンの廃材から得られる再生パラフィンを用いた。4種類の骨材配合に改質剤の添加量を変化させ、数通りの配合で疲労破壊抵抗性及び塑性変形抵抗性を室内試験等で検討した。その結果、骨材配合C,Dと再生パラフィン添加率7%の配合で前述の性能を満足した。現道での施工で、平坦性及びすべり抵抗性を検討した結果、性能を満足した。

キーワード 舗装補修費削減、薄層改質アスファルト混合物、性能確認、配合設計方法

## 1. はじめに

道路管理延長の増加と公共事業費削減の中、アスファルト舗装の維持補修費についてもコスト削減が求められている。表層が構造的な破損状態で、かつ路盤以下が健全な場合、オーバーレイ工による補修が多い。福井県管理の道路では、40～50mm厚のオーバーレイ工を行っている。しかし、舗装後の隣接地との出入りの関係上、既設舗装の切削工事が必要な場合が多く、工事費の増加を招いている。そこで上述の半分(20～25mm)の舗装(以下では薄層舗装と称する)厚のオーバーレイ工を実現すれば、既設舗装の切削は不要になり、大幅なコスト削減が実現すると考えられる。従前の薄層舗装はあくまでも表面処理の一種であり、舗装のひび割れ等の修繕や、すべり抵抗性の回復等に用いられている。著者らは構造的な破損状態にある表層を、従前の舗装材と同等に構造的に回復させる薄層舗装(以下では薄層改質アスファルト混合物と称する)の開発に取り組んだ。従前の骨材粒度の見直しと改質アスファルトによる薄層改質アスファルト混合物で、従前の舗装材と同等の性能を実現することが目的である。

本論では、1)粒度の検討、2)最適アスファルト量の決定、3)性能確認の手順で検討を進め、薄層改質アスファルト混合物の開発を行う。

## 2. 骨材粒度

薄層改質アスファルト混合物の厚さは、20～25mmであるので、最大粒径は7号碎石の4.75～5.0mmを採る。薄層

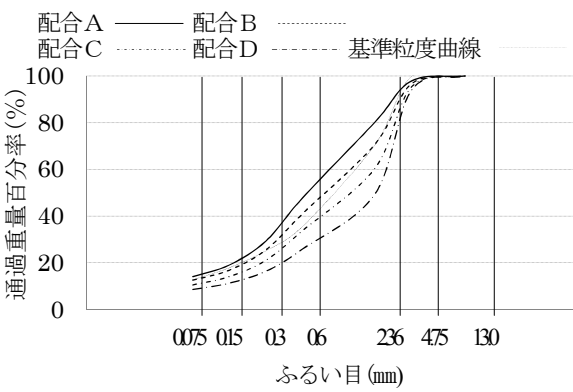


図-1 最大密度曲線と各骨材配合の粒度

表-1 骨材の配合比と合成粒度

| 骨材配合 |         | 配合 A  | 配合 B  | 配合 C  | 配合 D  |
|------|---------|-------|-------|-------|-------|
| 骨材種別 | 7号碎石    | 20.0  | 32.0  | 45.0  | 59.0  |
|      | 砕砂      | 54.0  | 45.5  | 36.0  | 26.0  |
|      | 細砂      | 11.0  | 9.0   | 7.5   | 5.5   |
|      | 石粉      | 15.0  | 13.5  | 11.5  | 9.5   |
| 合成粒度 | 13.0mm  | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
|      | 4.75mm  | 98.0  | 96.8  | 95.5  | 94.1  |
|      | 2.36mm  | 80.3  | 70.8  | 60.5  | 49.4  |
|      | 0.60mm  | 47.8  | 41.0  | 33.8  | 25.9  |
|      | 0.30mm  | 29.3  | 25.5  | 21.1  | 16.4  |
|      | 0.15mm  | 19.0  | 16.8  | 14.1  | 11.3  |
|      | 0.075mm | 14.0  | 12.5  | 10.5  | 8.6   |

改質アスファルト混合物で従前の舗装材と同等の疲労破壊抵抗性を発現するために、曲げ強度が最大になる骨材粒度を求める。密度が最大になる時に曲げ強度

が最大になると考えて、Fullerの最大密度説により、(1)式のFullerの最大密度曲線から基準粒度曲線を求めた(図-1参照)。

$$P=100\cdot(d/D)^{0.5}=100\cdot(d/4.75)^{0.5} \quad (1)$$

ここで、 $P$ ：骨材の通過重量百分率(%),  $d$ ：ふるい目(mm),  $D$ ：最大粒径(mm)である。

アスファルト混合物は骨材をアスファルトで結合するので、骨材の密度が最大になってもアスファルト混合物の密度が最大になるとは限らないこと、及び疲労破壊抵抗性以外の性能も考慮しなければならないことから、性状に大きな影響を及ぼす2.36mm通過量を10%程度、基準粒度曲線を変化させて、骨材配合を検討し、表-1の通り4種類の骨材配合を選定した。各合成粒度を表-1、図-1に示す。

### 3. 最適アスファルト量

アスファルト混合物の最適アスファルト量は、一般的にマーシャル安定度試験の各物性値の基準を全て満足するアスファルト量の範囲の中央値を最適アスファルト量にする。しかし薄層改質アスファルト混合物におけるマーシャル安定度試験の各物性値の基準はないので、薄層改質アスファルト混合物の最適アスファルト量の求め方を検討し配合設計方法を確立する。従前と同じくマーシャル安定度試験の物性値を用いることとするが、最適アスファルト量の決定方法を以下で検討する。

Fullerの最大密度説より、薄層改質アスファルト混合物の曲げ強度が最大になるのは、アスファルト量は、密度が最大になる点(最大密度点)であると考えられる。また、骨材はアスファルトより比重が大きいので、最大密度点は骨材間隙率が最小になる点(最小骨材間隙率点)と一致すると考えられるが、現実には一致しない。原因は、骨材はアスファルトを吸収すること及び骨材形状が不均

一であるため、骨材のかみ合わせによって、アスファルト膜厚が不均一なことである。アスファルト量が最大密度点と最小骨材間隙点の間では、膜厚は最大密度点で最大となり、最小骨材間隙点で最小となる。膜厚が小さいと曲げに対しては不利になり、膜厚が大きいと塑性変形に不利になると考えられる。

よって、両方の性能を満足するために、最適アスファルト量は、最大密度点のアスファルト量と最小骨材間隙率点のアスファルト量の平均値を採ることとし、配合設計方法とする。以下、性能確認により実証を行う。マーシャル物性値及び最適アスファルト量は表-2に示す。

### 4. 性能確認

#### (1) 方法

性能確認は、舗装の構造に関する技術基準(平成13年6月29日付け国土交通省局長通達)(以下では「技術基準」と称する)の必須の性能指標である塑性変形輪数、疲労破壊輪数及び平坦性と車両の走行の安全性に関わるすべり抵抗性について、従前の舗装材を対照に性能確認を行う。塑性変形抵抗性の指標である塑性変形輪数は、従前の舗装材の半分の厚さであるので、薄層改質アスファルト混合物が2倍の数値が発現できるか否かを確認する。従前の舗装材で性能の良いものは1,000回/mm程度を発現するので、目標値は2,000回/mmとした。疲労破壊抵抗性の指標である疲労破壊輪数は、舗装全体に関することなので、舗装全体で同等であるか確認する。平坦性とすべり抵抗性は路面性能の表面に関することなので、舗装面で性能が同等であるか確認する。施工条件によって数値がばらつくので、基準値を満足すれば同等であると考ええる。

#### (2) 塑性変形輪数

表-1の骨材配合で、薄層改質アスファルト混合物を作製する。アスファルト改質剤は電線被覆管の廃材である架橋ポリエチレンを熱分解して得たパラフィン系炭化水素(以下では再生パラフィンと称する)を用いる。再生パラフィンのアスファルト(再生パラフィンを含む)に対する添加率は0.3,5,7%と変化させる。塑性変形輪数は、「B003ホイールトラッキング試験方法<sup>1)</sup>」で求める動的安定度で評価する。試験結果は図-2に示す。塑性変形輪数と動的安定度は同じ単位なので、上述の通り動的安定度の目標値は2,000回/mmとする。

骨材配合Aと骨材配合Bは、再生パラフィンの添加率に関わらず目標値を満足できない。骨材配合Cは再生パラフィンの添加率7%の配合で目標値を満足する。配合Dは再生パラフィン添加率1%以上で目標値を満足するが、相対的に動的安定度が大きいので、耐流動性用舗装材として用いることとし、目標値は6,000回/mm以上とした。再生パラフィンの添加率5%以上の配合で目標値

表-2 各骨材配合の最適アスファルト量

| 骨材配合                   | 配合A   | 配合B   | 配合C   | 配合D   |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 最大密度点のAs量(%)           | 7.5   | 6.8   | 6.7   | 6.5   |
| 密度(g/cm <sup>3</sup> ) | 2.357 | 2.386 | 2.401 | 2.398 |
| 骨材間隙率(%)               | 20.2  | 18.8  | 18.7  | 18.4  |
| 安定度(kN)                | 11.3  | 11.7  | 11.6  | 10.8  |
| フロー値(F)(1/100cm)       | 46    | 46    | 48    | 43    |
| S/F(kN/m)              | 2,457 | 2,543 | 2,417 | 2,512 |
| 最小骨材間隙率点のAs量(%)        | 6.5   | 6.1   | 6.0   | 5.9   |
| 密度(g/cm <sup>3</sup> ) | 2.346 | 2.378 | 2.383 | 2.382 |
| 骨材間隙率(%)               | 19.7  | 18.4  | 18.4  | 18.3  |
| 安定度(S)(kN)             | 10.6  | 12.5  | 11.3  | 10.6  |
| フロー値(F)(1/100cm)       | 37    | 39    | 39    | 42    |
| S/F(kN/m)              | 2,864 | 3,205 | 2,897 | 2,523 |
| 最適アスファルト量              | 7.0   | 6.5   | 6.4   | 6.2   |

(注)As=アスファルト

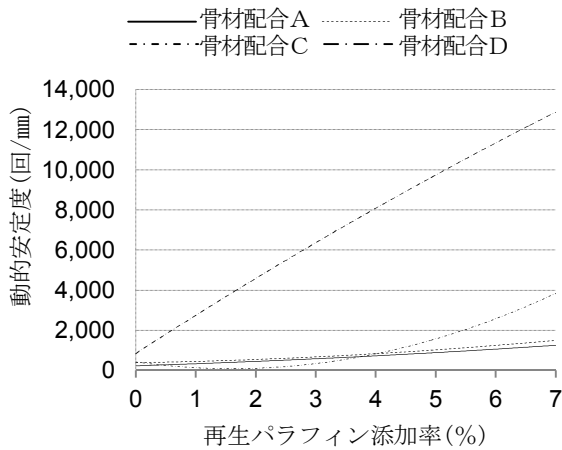


図-2 各骨材配合の動的安定度

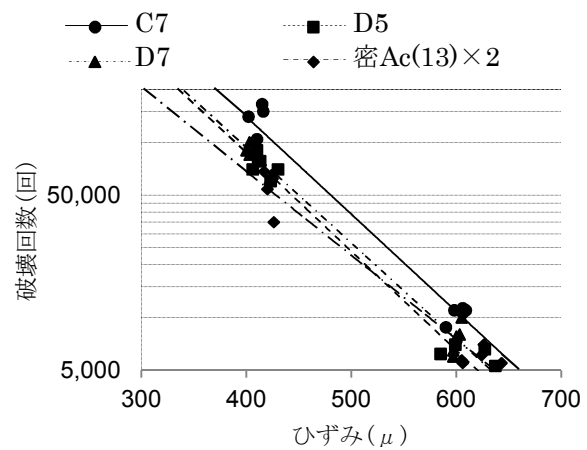


図-3 曲げ疲労試験の破壊回数

表-3 曲げ疲労試験の混合物の配合

| 粒 度               | 設計アスファルト量(%) | 再生パラフィン添加率(%) |
|-------------------|--------------|---------------|
| 骨材配合 C(表-1 参照,C7) | 6.4          | 7             |
| 骨材配合 D( " ,D5)    | 6.2          | 5             |
| 骨材配合 D( " ,D7)    | 6.2          | 7             |
| 密粒度(13)           | 5.9          | 0             |

表-4 曲げ疲労試験の混合物の配合

| 項 目   | 試験条件          |
|-------|---------------|
| 载荷方法  | 両端固定2点载荷      |
| 供試体寸法 | 幅4×厚さ4×長さ40cm |
| スパン   | 30cm          |
| 試験方法  | ひずみ制御         |
| 試験温度  | 5℃            |
| 载荷周波数 | 5Hz           |
| 载荷波形  | サイン波          |
| ひずみ   | 400, 600μ     |

を満足した。

以上、塑性変形輪数は、骨材配合Cで再生パラフィンの添加率7%、骨材配合Dで再生パラフィンの添加率5%,7%の配合において目標の性能を満足した。

### (3) 疲労破壊輪数

#### a) 確認の手順

疲労破壊輪数は次の手順で確認する。1)曲げ疲労試験で2倍以上の破壊回数を確認する。2)仮想断面を用いて、従前の舗装材を用いた切削オーバーレイ工と薄層改質アスファルト混合物を用いたオーバーレイ工とで、シミュレーションを行い、薄層で疲労破壊輪数が同等以上であることを確認する。

#### b) 曲げ疲労試験による破壊回数

試験方法は、「018T アスファルトの曲げ疲労試験方法<sup>1)</sup>」である。薄層改質アスファルト混合物の配合は、

表-5 舗装構造条件

|       | 例1             | 例2             |
|-------|----------------|----------------|
| 交通量区分 | N <sub>6</sub> | N <sub>4</sub> |
| 信頼度   | 90%            | 75%            |
| 設計期間  | 10年            | 10年            |
| 設計CBR | 8              | 4              |

表-6 弾性係数とポアソン比

| 舗装材          | 弾性係数  | ポアソン比 |
|--------------|-------|-------|
| 薄層改質As混合物    | 7,500 | 0.35  |
| 密粒度As混合物(13) | 6,600 | 0.35  |
| 粗粒度As混合物     | 6,000 | 0.35  |
| 既設密粒度As混合物   | 964   | 0.35  |
| 粒度調整碎石       | 300   | 0.35  |
| クラッシャーラン     | 200   | 0.35  |
| 路床材          | 60    | 0.4   |

塑性変形輪数の目標値を満足した配合を用い、対照は、密粒度アスファルト混合物の最大粒度13mm(以後密粒度アスファルト混合物(13)と称する)とする(表-3 参照)。試験条件は表-4である。試験結果を図-3に示す。密粒度アスファルト混合物(13)の破壊回数は2倍値を示す。骨材配合CとDの再生パラフィン添加率7%の配合で従前の舗装材の2倍以上の数値を確認した。

#### c) 仮想断面による疲労破壊輪数の比較

舗装構造設計条件を表-5の通り定め、仮想断面を設定した。表層の舗装材の弾性係数は曲げ疲労試験で求めた値を用いた。薄層改質アスファルト混合物については、配合C7、D5、D7の各弾性係数7,618MPa、7,377MPa、7,640MPaの平均値をまとめて7,500MPaとした。基層以下の舗装材の弾性係数とポアソン比は設計便覧<sup>2)</sup>を参考にした。既設の表層の残存等値換算係数<sup>3)</sup>は0.5と仮定し、弾性係数は図-4に示す関係<sup>4)</sup>から求めた。計算に用いる各層の弾性係数とポアソン比は表-6に示す。仮想の舗装断面を図-5に2例示す。網かけは新設部分を示す。

疲労破壊輪数はアスファルト混合物層と路床の疲労破壊輪数の小さい方の値をとる。疲労破壊輪数の算定に必要なひずみの計算は GAMES<sup>5)</sup>を用いる。

アスファルト混合物層の疲労破壊輪数は舗装設計便覧の暫定破壊基準式(2)式参照)により求めた。図-5 に設定した仮定の舗装断面に図-6 に示す交通荷重を载荷して疲労破壊輪数を算定する。

$$N_{fi} = \beta_{ai} \cdot (C) \cdot (6.167 \times 10^{-5} \cdot \varepsilon t^{3.2918 \cdot 2} \cdot E^{-0.8548 \cdot 3}) \quad (2)$$

$$C = 10^M \quad (3)$$

$$M = 4.84 \cdot [VFA/100 \cdot 0.69] \quad (4)$$

$$\beta_{a1} = Ka \cdot \beta_{a1}' \quad (5)$$

$$\beta_{a1}' = 5.229 \times 10^4 \quad (6)$$

$$\beta_{a2} = 1.314 \quad (7)$$

$$\beta_{a3} = 3.018 \quad (8)$$

ここで  $N_{fi}$  : 疲労破壊輪数,  $C$  : アスファルト混合物層の最下層に使用する混合物の容積特性に関するパラメータ,  $VFA$  : 飽和度(%),  $\varepsilon t$  : アスファルト混合物層下面に引張りひずみ( $\mu$ ),  $E$  : アスファルト混合物層の弾性係数(MPa),  $Ka$  : アスファルト混合物層の厚さによるひび割れ伝搬速度に対する補正係数  $\beta_{a1}$ ,  $\beta_{a2}$ ,  $\beta_{a3}$  : 我が国の経験による AI 破壊基準に対する補正係数である。疲労破壊輪数の計算結果を表-7 に示す。例 1.2 と薄層オーバーレイ工の疲労破壊輪数が大きくなった。

薄層改質アスファルト混合物配合C7, D7Iは, 曲げ疲労試験で従前舗装材の2倍以上の破壊回数を確認した。仮想断面でのシミュレーションでは, 薄層改質アスファルト混合物を用いたオーバーレイ工と従前の舗装材を用いた切削オーバーレイ工とで疲労破壊輪数を比較した。従前の舗装材と同等以上の疲労破壊輪数を確認した。

よって, 薄層改質アスファルト混合物は薄層で同等以上の疲労破壊輪数を確認した。

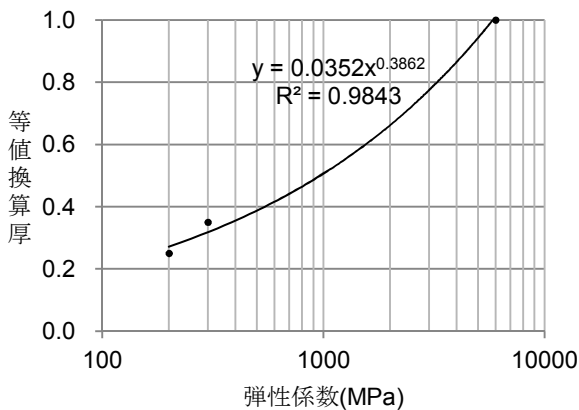


図-4 等値換算厚と弾性係数

切削オーバーレイ工

(単位 : MPa,cm)

|                |      |
|----------------|------|
| 密粒度 As 混合物(13) | t=5  |
| 粗粒度 As 混合物     | t=5  |
| 粒度調整碎石         | t=15 |
| クラッシャーラン       | t=20 |
| 路床材            |      |

薄層オーバーレイ工

(単位 : MPa,cm)

|              |      |
|--------------|------|
| 薄層改質 As 混合物  | t=25 |
| 既設密粒度 As 混合物 | t=5  |
| 粗粒度 As 混合物   | t=5  |
| 粒度調整碎石       | t=15 |
| クラッシャーラン     | t=20 |
| 路床材          |      |

(a)例1

打換え工

(単位 : MPa,cm)

|                |      |
|----------------|------|
| 密粒度 As 混合物(13) | t=5  |
| 粒度調整碎石         | t=16 |
| クラッシャーラン       | t=22 |
| 路床材            |      |

薄層オーバーレイ工

(単位 : MPa,cm)

|              |      |
|--------------|------|
| 薄層改質 As 混合物  | t=25 |
| 既設密粒度 As 混合物 | t=5  |
| 粒度調整碎石       | t=16 |
| クラッシャーラン     | t=22 |
| 路床材          |      |

(b)例2

図-5 仮定の舗装断面

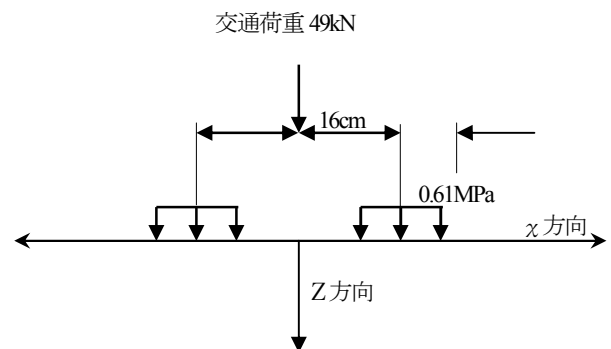


図-6 交通荷重

表-7 疲労破壊輪数の計算結果

(a)例1

| 工 法                                     | 切削オーバーレイ工   | 薄層オーバーレイ工     |
|-----------------------------------------|-------------|---------------|
| As混合物層の厚さ(cm)                           | 10.0        | 12.5          |
| $Ka$                                    | 0.38        | 0.51          |
| $VFA(\%)$                               | 76.3        | 76.5          |
| $M$                                     | 0.35        | 0.36          |
| $C$                                     | 2.24        | 2.31          |
| $H(\text{MPa})$                         | 964         | 964           |
| $\varepsilon X$ : As混合物のX方向ひずみ( $\mu$ ) | 1.9335E-04  | 1.7448E-04    |
| $\varepsilon Z$ : As混合物のZ方向ひずみ( $\mu$ ) | 5.2966E-04  | 4.7925E-04    |
| As混合物層の疲労破壊輪数(輪)                        | 647,910,255 | 2,632,772,801 |
| 路床の疲労破壊輪数(輪)                            | 2,994,508   | 4,321,028     |
| 疲労破壊輪数(輪)                               | 2,994,508   | 4,321,028     |

(b)例2

| 工 法                                     | 表層打換え工     | 薄層オーバーレイ工   |
|-----------------------------------------|------------|-------------|
| As混合物層の厚さ(cm)                           | 5.0        | 7.5         |
| $Ka$                                    | 0.22       | 0.29        |
| $VFA(\%)$                               | 77.5       | 77.5        |
| $M$                                     | 0.41       | 0.41        |
| $C$                                     | 2.58       | 2.58        |
| $H(\text{MPa})$                         | 6,600      | 964         |
| $\varepsilon X$ : As混合物のX方向ひずみ( $\mu$ ) | 2.2145E-04 | 3.3635E-04  |
| $\varepsilon Z$ : As混合物のZ方向ひずみ( $\mu$ ) | 6.9907E-04 | 6.1994E-04  |
| As混合物層の疲労破壊輪数(輪)                        | 1,678,812  | 632,772,801 |
| 路床の疲労破壊輪数(輪)                            | 1,082,446  | 1,681,512   |
| 疲労破壊輪数(輪)                               | 1,082,446  | 1,681,512   |

#### (4) 平たん性

薄層改質アスファルト混合物を製造し、現道で施工を行い、平たん性を測定した(図-7参照)。平たん性は多少の粒度の差及び改質剤の添加量は影響はないと考えられるので配合D7で代表した。測定方法は「S028舗装路面の平たん性測定方法<sup>1)</sup>」による。結果を表-8に示す。従前の舗装材と同等の平たん性を確認した。

#### (5) すべり抵抗性

平たん性と同じく、現道で施工を行い、すべり抵抗性を測定した(図-5参照)。すべり抵抗性についても多少の粒度の差及び改質剤の添加量は影響はないと考えられるので、配合D7で代表できる。測定方法は、「S021-1振り子式スキッドレジスタンステストによるすべり抵抗測定方法<sup>1)</sup>」による。結果を表-9に示す。従前の舗装材と同等のすべり抵抗性を確認した。「技術基準」には基準値が示されていないので旧日本道路公団の出来高基準を用いた<sup>6)</sup>。従前の舗装材と同等の平たん性を確認した。

No.0 No.1 No.2 No.3 No.4 No.5 No.6 No.7 +10.0

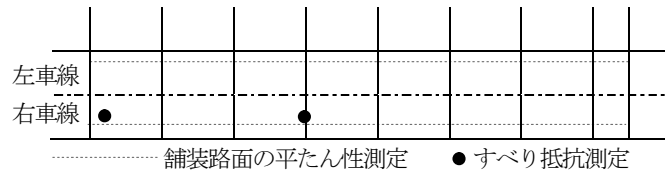


図-7 測定位置図

表-8 平たん性

| 測線  | 計算値(mm) | 基準値(mm) |
|-----|---------|---------|
| 左車線 | 1.67    | 2.4以下   |
| 右車線 | 1.84    |         |

表-9 すべり抵抗性

| 測点   | 計算値(BPN) | 基準値(BPN) |
|------|----------|----------|
| No.0 | 73       | 60以上     |
| No.3 | 72       |          |

## 5. まとめ

半分の厚さで従前の舗装材と同等に構造的に回復させる薄層改質アスファルト混合物の開発に取り組んだ。骨材粒度の検討を行い、4種類の骨材配合を定めた。各骨材配合の最適アスファルト量を求めて、「技術基準」の必須の性能である疲労破壊輪数、塑性変形輪数及び平たん性と走行の安全性に関わるすべり抵抗性の確認を行った。

その結果、骨材配合CとDで改質剤である再生パラフィンがアスファルト(改質剤を含む)の7%の添加量による配合で、従前の舗装材と同等以上の性能を確認した。

コストは、従前の4cm厚の切削オーバーレイ工において、直接工事費で約2割削減の約1,100円/m<sup>2</sup>、製造から施工までの二酸化炭素排出量は、約5割削減の約550kg-CO<sub>2</sub>/100 m<sup>2</sup>となる。

これまでの研究で得た知見は次のとおりである。

- 1) 本論の薄層改質アスファルト混合物においては、フィラーの最大密度曲線に近い骨材配合が疲労破壊抵抗性は大きくなった。
- 2) マーシャル安定度試験の最大密度点と最小骨材間隙率点のアスファルト量を最適アスファルト量にする方法で配合設計が可能になった。
- 3) 骨材配合Cでは、アスファルト(改質剤を含む)に対してアスファルト改質剤である再生パラフィン添加率7%の配合で従前の舗装材の2倍以上の塑性変形輪数を確認した。骨材配合Dでは再生パラフィン添加率5%以上の配合で塑性変形輪数6,000回/mm以上を確認した。
- 4) 骨材配合CとDで再生パラフィン7%の配合で曲げ疲労試験における破壊回数は従前の舗装材の2倍以上を確認

した。

5) 骨材配合Dで再生パラフィン7%の配合で従前の舗装材と同等以上の平坦性及びすべり抵抗性を確認した。

**謝辞：**本研究を進めるに当たり，多大な御指導と御協力をいただいた日本道路株式会社の 青木部長，古川所長，日広開発株式会社，米村課長他関係各位に感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 舗装調査・試験法便覧(平成 19 年 6 月，(社)日本道路協会)[第 1 分冊]pp92-97，pp147-156，[第 3 分冊]pp39-56，pp166-175
- 2) 舗装設計便覧(平成 18 年 2 月，(社)日本道路協会)p132，p138
- 3) 舗装設計施工指針(平成 18 年版，(社)日本道路協会)p83
- 4) 活用しよう！FWD(財)道路保全技術センター)pp.24-26
- 5) 舗装工学ライブラリー3 多層弾性理論による舗装構造解析入門—GAMES を利用して—(土木学会)
- 6) 舗装性能評価法(平成 18 年 1 月，(社)日本道路協会)p62-64