

9. 中温化混合物の試験施工による適用検討

Examination of application by Experimental Construction of Temperature Reduction of Asphalt Mixture

技術支援課 峰岸順一、上野慎一郎

1. はじめに

東京都では、低炭素都市の構築に向けた取組みとして、CO₂排出削減に寄与する舗装技術のひとつである中温化技術を適用したアスファルト混合物（以下、「中温化混合物」という。）に注目して品質の検討¹⁾を進めてきたが、本編では、中温化技術を用いてCO₂排出削減と早期交通開放を目指した試験施工において中温化混合物の品質及び品質のばらつきを検証した結果を報告する。

2. 試験施工の内容

都内主要幹線の側道部（幅員 2.8m、2車線、延長 140m、面積 760m²）において図-1 に示す基層部分 30cm に中温化混合物を適用した。基層部分 30cm を 4 日間で施工後、表層を 1 日で施工した。基層部分 30cm は、3層（10cm/層）を 1 日で完了する夜間急速施工であり、交通開放までの時間を短縮するために中温化技術を適用した。冬季の施工であることと現場への運搬距離 20km、運搬時間 1 時間を考慮し、中温化混合物の混合温度は、粗粒度(20)改質 II 型 155℃、再生粗粒度(20) 140℃と通常混合物に比べ 20℃の低減とした。

3. 中温化混合物の配合

中温化剤は、粘弾性調整系のプラントミックスタイプを使用した。中温化剤の添加量を変えてマーシャル供試体を作成し、中温化剤の添加量と空隙率の関係から、空隙率が 4.5%となる中温化剤の添加量（対アスファルト量）を求めた。粗粒度(20)改質 II 型は 5.0%、再生粗粒度(20)は 5.5%となった。アスファルト量及び中

温化剤添加量は、表-1 のとおりである。

中温化混合物及び通常混合物（中温化剤の添加なし）の配合設計時の品質は、表-2 のとおりである。

表層 5cm	密粒度（ポリマー改質アスファルト II 型）
基層 3 10cm	粗粒度（ポリマー改質アスファルト II 型） 中温化
基層 2 10cm	再生粗粒度（ストレートアスファルト 40/60） 中温化
基層 1 10cm	再生粗粒度（ストレートアスファルト 40/60） 中温化

図-1 舗装構成

表-1 アスファルト量及び中温化剤添加量

	粗粒(改質 II 型)		再生粗粒度(スアス)	
	通常	中温化	通常	中温化
全アスファルト量(%)	4.7	4.7	4.7	4.7
旧アスファルト量(%)	-	-	2.35	2.35
再生用添加材量(%)	-	-	0.22	0.22
新アスファルト量(%)	4.7	4.7	2.13	2.13
中温化剤添加量(%)	-	5.0	-	5.5

表-2 配合設計時の品質

	粗粒度(改質 II 型)		再生粗粒度(スアス)		規格値
	通常	中温化	通常	中温化	
密度(g/cm ³)	2.397	2.388	2.397	2.391	2.35以上
理論最大密度(g/cm ³)	2.496	2.496	2.497	2.496	-
空隙率(%)	4.0	4.3	4.0	4.3	3~7
飽和度(%)	73.2	72.3	73.0	72.3	65~85
安定度(kN)	13.39	13.25	11.89	11.62	10.0(8.0)以上
フロー値(1/100mm)	31	32	29	36	20~40
動的安定度(回/mm)	6,300	7,000	-	-	3,000以上

安定度()内は、ストレートアスファルトを用いる場合

4. 中温化混合物の試験内容

中温化混合物については、試験施工時にプラントで

練り落とされた直後の混合物を採取しマーシャル安定度試験、圧裂試験用供試体を各 15 個作成し品質のばらつきを調べた。なお、試験施工に使用しない比較用の通常混合物については、試料採取のために製造し練り落としたものから採取した。さらに、粗粒度(20)改質Ⅱ型混合物については、通常、中温化各 15 個ホイールトラッキング試験を行い動的安定度を求めた。試験内容と数量は、表-3 のとおりである。

(1) 供試体の作成

1) マーシャル供試体

プラント練り落として試料を採取し、各混合物における混合温度と締固め温度の設定値(表-4)で供試体を作成した。突固めは、両面 75 回で行った。各温度の実測値は、表-4 に示すとおり、ほぼ、設定値どおりであった。

2) ホイールトラッキング供試体

ホイールトラッキング供試体の作成は、舗装性能評価法(平成 18 年 1 月版(社)日本道路協会)の塑性変形輪数を求めるためのホイールトラッキング試験機による動的安定度測定方法のプラントで採取後、放冷、再加熱する方法とした。再加熱の方法は、室温状態になった試料を保管箱に入れたまま、表-4 に示す最適締固め温度より 20℃低い温度として乾燥炉で 3 時間温めたあと、必要量を大なべに計量し、混合しながら最適締固め温度までコンロで再加熱した。保管温度の設定値と実測値は、表-5 に示すとおり、ほぼ、設定値どおりであった。

5. 試験結果

(1) マーシャル安定度及び圧裂試験

1) マーシャル安定度及び圧裂試験用供試体の密度

① 密度

密度試験結果は、表-6 に示すとおりである。密度は、図-2 に示すように 4 種類の混合物とも土木材料仕様書の基準値 2.35g/cm³以上を満足する結果であり、締固め度も 99.2~100.1%の範囲であった。密度の値は、中温化混合物がやや小さい値であった。密度の変動係数(図-3)は、通常混合物と中温化混合物でほぼ同程度であった。

表-3 供試体の数量

混合物種別	アスファルト種別	区別	マーシャル安定度用供試体	圧裂試験用供試体		ホイールトラッキング試験用供試体
			数量	試験温度	数量	数量
粗粒度	改質Ⅱ型	通常	15	0℃	15	15
				60℃	15	
		中温化		0℃	15	
				60℃	15	
再生粗粒度	ストアス	通常	15	0℃	15	-
				20℃	15	
				60℃	15	
		中温化		0℃	15	
				20℃	15	
				60℃	15	
計	-	-	60	-	150	30

表-4 混合温度と締固め温度

温度管理項目		粗粒度(改質Ⅱ型)		再生粗粒度(ストアス)	
		通常	中温化	通常	中温化
混合温度	設定値	175±5℃	155±5℃	160±5℃	140±5℃
	実測	176℃	157℃	162℃	143℃
締固め温度	設定値	165±5℃	145±5℃	140±5℃	120±5℃
	実測	167℃	146℃	142℃	119℃

表-5 混合温度と締固め温度

温度管理項目		粗粒度(改質Ⅱ型)	
		通常	中温化
保管温度	設定値	155±5℃	135±5℃
	実測	156℃	134℃

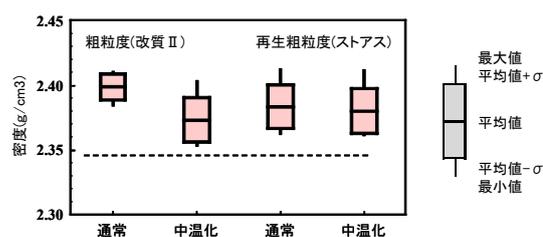


図-2 密度(マーシャル供試体及び圧裂供試体)

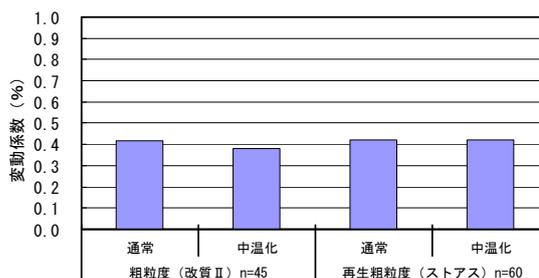


図-3 密度の変動係数

表-6 マーシャル安定度試験結果

マーシャル安定度試験		供試体の密度 (g/cm ³)	供試体の密度の変動係数	供試体の締固め度 (%)	供試体の締固め度の変動係数	安定度 (kN)	安定度の変動係数	フロー値 (1/100mm)	フロー値の変動係数	安定度/ フロー値 (S/F(kN/m))	S/Fの 変動係数
粗粒度 (改質Ⅱ)	通常	2.400 (n=45)	0.417 (n=45)	100.1 (n=45)	0.3 (n=45)	13.7 (n=15)	5.8 (n=15)	33 (n=15)	9 (n=15)	4181 (n=15)	11 (n=15)
	中温化	2.370 (n=45)	0.380 (n=45)	99.2 (n=45)	0.4 (n=45)	10.4 (n=15)	10.6 (n=15)	30 (n=15)	13 (n=15)	3478 (n=15)	11 (n=15)
再生粗粒度 (ストアス)	通常	2.381 (n=60)	0.420 (n=60)	99.3 (n=60)	0.4 (n=60)	10.8 (n=15)	9.3 (n=15)	35 (n=15)	7 (n=15)	3066 (n=15)	8 (n=15)
	中温化	2.376 (n=60)	0.421 (n=60)	99.4 (n=60)	0.5 (n=60)	8.7 (n=15)	12.6 (n=15)	31 (n=15)	13 (n=15)	2868 (n=15)	15 (n=15)

※供試体の密度および締固め度は圧裂試験用供試体の密度測定結果を含む

② 空隙率

密度試験結果から算出した混合物の空隙率は、図-4に示すとおりである。4種類の混合物とも基準値3~7%を満足する結果であった。空隙率は、粗粒度(改質Ⅱ)通常3.8%を除き、他の3混合物は4.6~5.1%の値であった。また粗粒度(改質Ⅱ)・再生粗粒度(ストアス)の通常混合物と中温化混合物の比較では、粗粒度(改質Ⅱ)は、中温化混合物の方が小さく、再生粗粒度(ストアス)は同等であった。

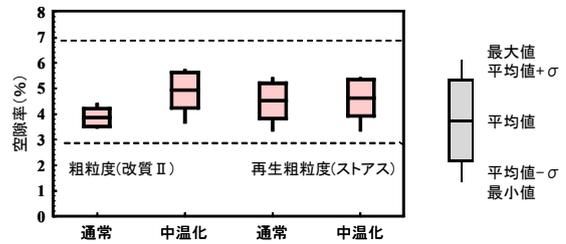


図-4 空隙率

③ 飽和度

飽和度は、図-5に示すように4混合物とも基準値65~85%の中央値75%より下限側の結果であった。中温化混合物は、再生粗粒度(ストアス)の方が通常に近い値であった。

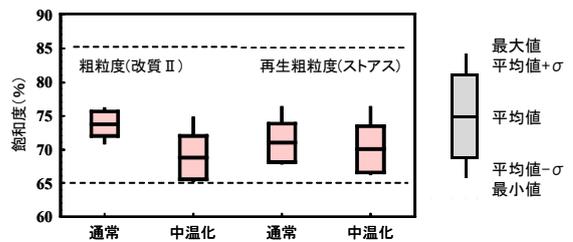


図-5 飽和度

2) マーシャル安定度試験

① マーシャル安定度

マーシャル安定度の平均値は、図-6に示すように、いずれの混合物も安定度の基準値(粗粒度(改質Ⅱ): 10.0g/cm³、再生粗粒度(ストアス): 8.0g/cm³)を満足していた。安定度は、通常混合物が大きく、中温化混合物になると低くなる傾向であった。図-7に示すマーシャル安定度の変動係数は、両混合物とも中温化混合物が大きく、ややばらつきがあった。

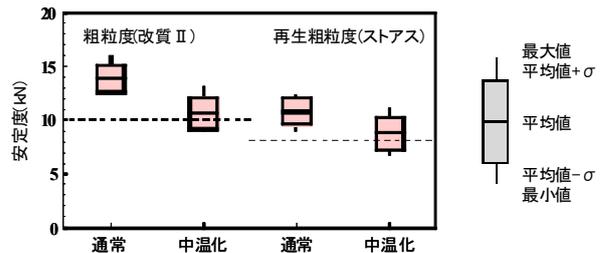


図-6 安定度

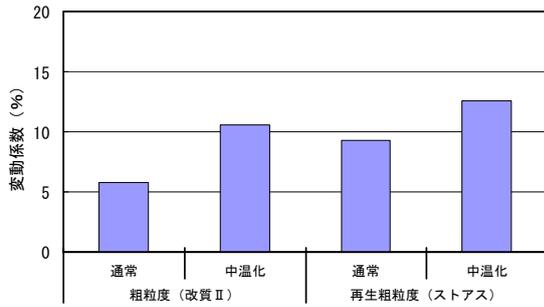


図-7 安定度の変動係数

② フロー値

フロー値は、図-8 に示すように、いずれの混合物も基準値 20~40 (1/100cm) を満足していた。フロー値は、中温化混合物が小さく、変動係数も、中温化混合物がやや大きく、ばらつきがあることがわかった。

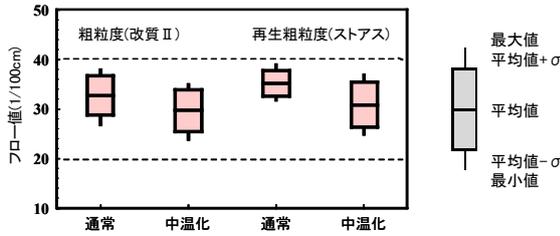


図-8 フロー値

③ S/F

通常の混合物で耐流動性を重視する場合は、安定度/フロー値=S/F は、一般地域で 2,000~4,900kN/m の値の範囲がよいとされている²⁾。S/F は、図-9 に示すように、いずれの混合物も提示値の範囲内であった。中温化混合物は、通常混合物より S/F 値が小さい傾向であった。

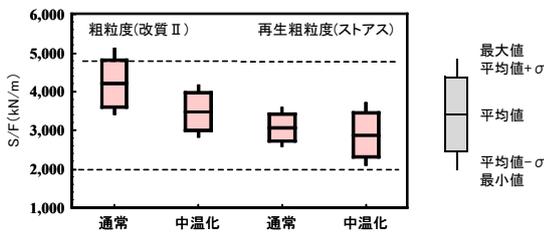


図-9 安定度/フロー値 (S/F)

3) 圧裂試験

① 圧裂強度 (試験温度 0°C、60°C)

圧裂強度の結果は、図-10 (試験温度 0°C)、図-11

(試験温度 60°C) に示すように両混合物とも中温化混合物がやや小さく、変動係数もやや小さい結果であり、ばらつきが小さいことがわかった。

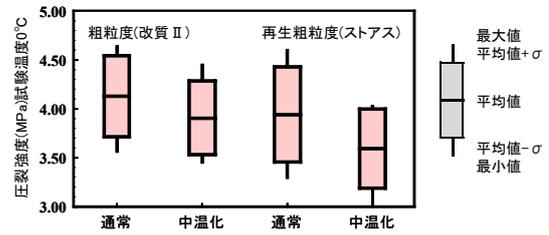


図-10 圧裂強度 (試験温度 0°C)

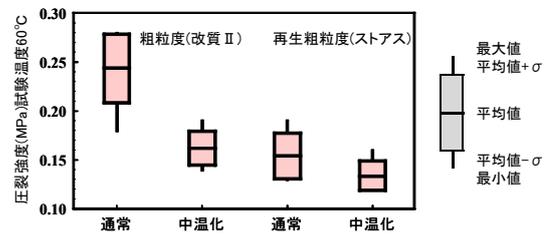


図-11 圧裂強度 (試験温度 60°C)

② 圧裂強度比 (0°C/60°C)

両混合物とも圧裂強度比 (試験温度 0°Cの圧裂強度/試験温度 60°Cの圧裂強度) は、表-7 に示すように中温化混合物がやや大きく、粗粒度 (改質II) 通常以外は、20~40 の範囲にあった。

③ 圧裂係数 (試験温度 20°C)

再生粗粒 (ストアス) 通常の圧裂係数は、表-7 に示すように 1.02MPa/mm であり、目標とする範囲(0.60~0.90MPa/mm)を上回った。再生粗粒 (ストアス) 中温化混合物の圧裂係数は、0.72MPa/mm であり、目標とする範囲内(0.60~0.90MPa/mm)であった。また、図-12 に示すように圧裂強度は中温化混合物が小さく、変動係数は、表-7 に示すように通常よりもやや小さい結果であり、ばらつきが小さいことがわかった。図-13 に破断時の変位量を示したが、両混合物は、同等であった。

通常混合物に比べて中温化混合物は、圧裂強度が最大となる変位量が同等であるが、圧裂強度は小さくなった。圧裂係数は、中温化混合物の方が通常混合物と比べて 30%程度小さくなる傾向を示した。

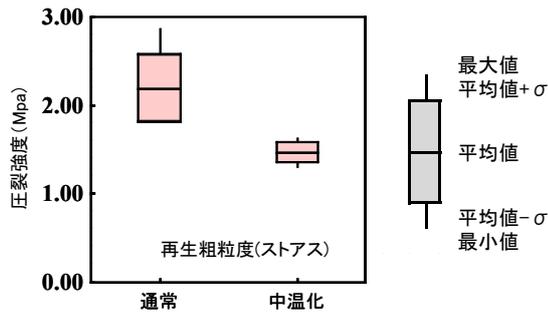


図-12 圧裂強度

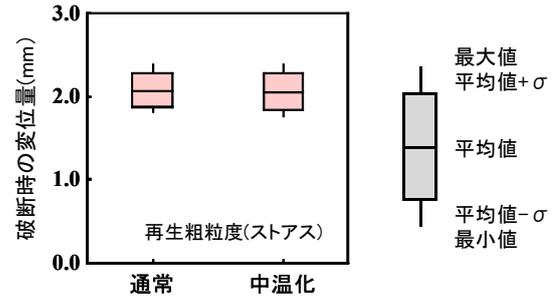


図-13 破断時の変位量

表-7 圧裂試験結果

圧裂強度試験		圧裂強度 0°C (MPa)	圧裂強度0°C の変動係数	圧裂強度 60°C (MPa)	圧裂強度 60°Cの 変動係数	圧裂強度比	圧裂係数 (MPa/mm)	圧裂係数の 変動係数
粗粒度 (改質Ⅱ)	通常	4.15 (n=15)	8.92 (n=15)	0.24 (n=15)	12.5 (n=15)	17.3	—	—
	中温化	3.88 (n=15)	8.51 (n=15)	0.16 (n=15)	6.25 (n=15)	24.2	—	—
再生粗粒度 (ストアス)	通常	3.94 (n=15)	10.41 (n=15)	0.15 (n=15)	13.33 (n=15)	26.3	1.02 (n=15)	19.61 (n=15)
	中温化	3.65 (n=15)	10.14 (n=15)	0.13 (n=15)	7.69 (n=15)	28.1	0.72 (n=15)	13.89 (n=15)

(2) ホイールトラッキング試験

1) ホイールトラッキング供試体の密度

密度試験結果は、両混合物とも土木材料仕様書の基準値 2.35g/cm³ 以上を満足する結果であり、締固め度も 99.0~100.5%の範囲であった。密度の変動係数は、通常 0.32、中温化混合物 0.17 とほぼ同程度のばらつきであった。

2) 動的安定度

通常・中温化混合物に関係なく動的安定度が全て 6000 回/mm を大きく超える結果であった (表-8、図-14)。耐流動性に関しては、ホイールトラッキング試験での評価としては良好であった。

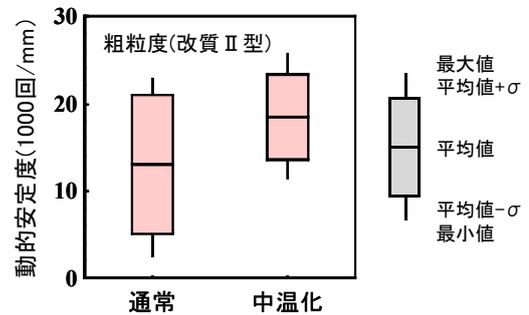


図-14 動的安定度

表-8 動的安定度試験結果

	動的安定度 (回/mm)	
	粗粒度 (改質Ⅱ) 通常	中温化
平均	12690	18550
最大値	21000	21000
最小値	6300	15750
標準偏差	10070	7170
変動係数	79.4	38.7

6. 有意差検定

中温化混合物と通常混合物における各試験結果の平均値に関する検定を行った。検定は標本数が 30 個以上では z 検定、30 個未満は F 検定により分散が等しいか否かを判定した後、t 検定を行った。これまで調査から中温化混合物は通常混合物より試験結果が小さくなる傾向があるので片側検定とした。

有意差検定を行ったその結果一覧を表-9 に示す。表-9 から、マーシャル供試体の密度について実施した z 検定、それ以外の項目について実施した F 検定と t 検定の結果において、性状の平均値に違いがあるか否か

表-9 優位差検定結果

判定する性状	混合物種類	個数	混合物分類	平均値	検定結果			
					F検定で分散が等しいか否かの判定		z検定、t検定による性状の平均値の違いがあるか否かの判定	
					P (F<=f)	判定	P (Z<=z) P (T<=t)	判定
密度(マーシャル供試体)(g/cm ³)	粗粒度(改質Ⅱ型)	45	通常	2.400	-	-	0.0	違いがある
		45	中温化	2.370				
	再生粗粒度(ストアス)	60	通常	2.381				
		60	中温化	2.376				
密度(ホイールトラック供試体)(g/cm ³)	粗粒度(改質Ⅱ型)	15	通常	2.391	0.1	等しくない	0.0	違いがある
		15	中温化	2.367				
安定度(kN)	粗粒度(改質Ⅱ型)	15	通常	13.7	16.2	等しい	0.0	違いがある
		15	中温化	10.4				
	再生粗粒度(ストアス)	15	通常	10.8				
		15	中温化	8.7				
フロー値(1/100cm)	粗粒度(改質Ⅱ型)	15	通常	33	13.2	等しい	1.6	違いがある
		15	中温化	30				
	再生粗粒度(ストアス)	15	通常	35				
		15	中温化	31				
S/F(N/m)	粗粒度(改質Ⅱ型)	15	通常	4,181	31.0	等しい	0.0	違いがある
		15	中温化	3,478				
	再生粗粒度(ストアス)	15	通常	3,066				
		15	中温化	2,868				
圧裂強度(0°C)(MPa)	粗粒度(改質Ⅱ型)	15	通常	4.15	26.5	等しい	2.1	違いがある
		15	中温化	3.88				
	再生粗粒度(ストアス)	15	通常	3.94				
		15	中温化	3.65				
圧裂強度(60°C)(MPa)	粗粒度(改質Ⅱ型)	15	通常	0.24	0.4	等しくない	0.0	違いがある
		15	中温化	0.16				
	再生粗粒度(ストアス)	15	通常	0.15				
		15	中温化	0.13				
圧裂強度(20°C)(MPa)	再生粗粒度(ストアス)	15	通常	2.07	0.0	等しくない	0.0	違いがある
15		中温化	1.47					
変位量(20°C)(mm)	再生粗粒度(ストアス)	15	通常	2.04	43.7	等しい	49.1	違いはない
15		中温化	2.04					
圧裂係数(MPa/mm)	再生粗粒度(ストアス)	15	通常	1.02	1.9	等しくない	0.0	違いがある
15		中温化	0.72					

の判定で違いがないとなったものは、再生粗粒度(ストアス)のS/Fと圧裂試験の変位量(20°C)の2性状のみであり、全体的にみて、通常の混合物と中温化混合物は性状の平均値に違いがあることが把握できた。

7. 実施工時の温度測定結果

早期交通開放を目指した工事でもあることから各施工層毎に熱電対を設置し温度測定した結果は、図-15に示すとおりである。施工時の気温は、0.3~3.1°Cであった。想定した温度範囲で施工されており、基層3層目の温度が50°Cを下回ったのは、5時40分であり、交通開放時間(6時)に間に合い、中温化混合物の効果があつたと言える。

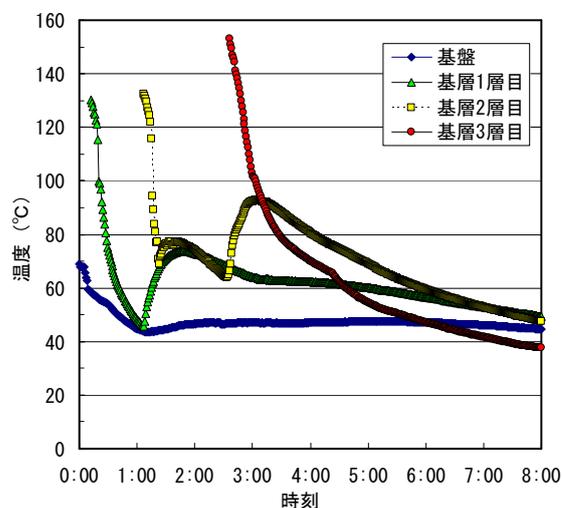


図-15 アスファルト混合物の温度変化

8. まとめ

本検討で得られた結果は、以下のとおりである。

(1) 密度

1) マーシャル供試体

密度に関しては、4種類の混合物とも規格値(2.35g/cm³)を満足する結果であった。また締固め度は、粗粒度(改質Ⅱ型)通常をのぞき、3混合物とも配合設計に記載された密度に対して低い値であった。再生混合物では、配合設計時の混合物に対し99%以上の密度が得られており中温化効果が得られていた。

2) ホイールトラッキング供試体

密度に関しては、2種類の混合物とも規格値(2.35g/cm³)を満足する結果であった。

粗粒度(改質Ⅱ型)通常は締固め度は、ほぼ配合設計に近く、また粗粒度(改質Ⅱ型)中温化は、配合設計書に記載された密度に対して99%程度の性状であった。

(2) 空隙率・飽和度

1) マーシャル供試体

空隙率に関しては、粗粒度(改質Ⅱ型)中温化をのぞき、他の3混合物は規格値の中央値5%よりやや下限側の性状であった。飽和度に関しては、4混合物とも中央値75%より下限側の性状であった。

2) ホイールトラッキング供試体

空隙率に関しては、粗粒〔改質Ⅱ型〕中温化は規格値の中央値5%よりやや上限側の性状で、粗粒度(改質Ⅱ型)通常は下限側であった。飽和度に関しては、2混合物とも中央値75%より下限側の性状であった。

密度に関しては、マーシャル供試体・ホイールトラッキング供試体とも、粗粒度(改質Ⅱ型)は、室内配合等の密度、それに伴う空隙率、飽和度と同等であった。他の3混合物は、密度が設定密度より低いため室内配合よりも空隙率が大きく、飽和度が低い値で製造されていた。

(3) マーシャル試験

1) マーシャル安定度

マーシャル安定度に関しては、粗粒度(改質Ⅱ型)が、通常、中温化混合物とも中温化剤の有無に関係なく規格値(10kN以上)は満足する結果であった。しかし、中温化剤を投入することで平均の安定度は

13.7kNから10.4kNと規格値の下限まで低下していた。

再生混合物(ストアス)は、通常・中温化混合物とも規格値(8kN以上)を満足する結果であった。粗粒度(改質Ⅱ型)同様、中温化剤を投入することで平均の安定度は10.8kNから8.7kNと規格値の下限まで低下した。

2) フロー値

フロー値に関しては、4種類の混合物とも規格値20~40(1/100mm)を満足する結果であった。通常混合物に対し、中温化剤を使用した混合物はフロー値が低くなった。

3) S/F

S/Fは、いずれの混合物とも指示値を満足したが、混合物毎では、粗粒度(改質Ⅱ型)が一番大きく、同中温化、再生粗粒度(ストアス)通常、同中温化の順にS/Fが低下する傾向がみられた。

これらの結果から、通常混合物を基準とした場合、中温化混合物では安定度およびS/Fが低下する傾向がみられた。

(3) 圧裂試験

1) 圧裂強度

圧裂強度(0℃)および(60℃)では、中温化剤を使用することによって、値が低下する傾向にあった。4混合物で、粗粒度(改質Ⅱ型)通常が17Mpaと低めの傾向を示したが、他の3混合物は24~28Mpaの範囲であった。

2) 圧裂係数

再生粗粒度(ストアス)通常は圧裂係数は、1.02MPa/mmであり、目標とする範囲(0.60~0.90MPa/mm)から外れていた。圧裂係数が目標とする範囲から外れた原因としては、破断時の変位量に比べて圧裂強度が大きかったためであった。

中温化混合物の圧裂係数は、0.72MPa/mmであり、目標とする範囲内(0.60~0.90MPa/m)であった。圧裂係数が小さくなるということは、再生混合物の配合設計の考え方からすれば、針入度が大きくなる(再生用添加剤の添加量を多くしていくときの挙動)ことを表している。通常および中温化混合物の圧裂係数における破断時の変位量は、両者とも2.04mmと同等であった。

(4) ホイールトラッキング試験(動的安定度)

通常混合物・中温化ともに動的安定度 6,000 回/mm を大きく超えており、基準値 (3,000 回/mm 以上) を満足する結果であった。

以上のことから、粗粒度 (改質Ⅱ型)・再生粗粒度 (ストアス) に中温化剤を添加し、中温化混合物とすると、混合温度が 20℃低下しても、粗粒度混合物の基準値を満足できる結果が得られた。また、再生混合物については、再生アスファルト骨材混入率を 50% (今回) にした場合でも、中温化剤を添加することにより、混合・締固め温度が低下しても混合物の品質が確保されていた。

(5) 有意差検定

マーシャル供試体の密度について実施した z 検定、それ以外の項目について実施した F 検定と t 検

定の結果において、性状の平均値に違いがあるか否かの判定で違いがないとなったものは、再生粗粒度 (ストアス) の S/F と圧裂試験の変位量 (20℃) の 2 性状のみであり、全体的にみて、通常の混合物と中温化混合物は性状の平均値に違いがあることが把握できた。

9. あとがき

中温化混合物は、通常混合物に比べて品質は、やや劣るものの、品質のばらつきは、ほぼ同程度であることを確認した。また、通常の混合物と中温化混合物は性状の平均値に違いがあることが把握できた。今後は、供用後の追跡調査の結果とあわせて、品質について検証していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 峰岸順一、上野慎一郎、橋本喜正 (2012) : 各種中温化混合物の室内試験による品質検証、平 24. 都土木技術支援・人材育成センター年報、73-84
- 2) (社) 日本道路協会 (2006) 平成 18 年 2 月 : 舗装施工便覧、103