

## 2. 機械式フォームド方式を用いた中温化アスファルト混合物の 敷均し温度に関する技術検証

### Examination of Before Initial Rolling Temperature for Warm Mix Asphalt Mixture using Mechanical Foamed Method

技術支援課 田村 哲也、○上野 真誉

#### 1. はじめに

東京都では、2050年までに二酸化炭素排出量を実質ゼロにすることを目指す「ゼロエミッション東京戦略」を2019年12月に発表、都内温室効果ガス排出量を2030年までに50%削減（2000年比）する等の「ゼロエミッション東京戦略2020 Update & Report」を2021年3月に策定する等の取組を強化している。

また、東京都建設局（以下、「当局」という。）では、CO<sub>2</sub>排出抑制技術として、加熱アスファルト混合物の中温化技術に着目し、実用化に向けた検討を進めてきた。その結果、2022年6月に機械式フォームド方式による中温化混合物（新材）を、2023年6月に機械式フォームド方式による中温化混合物（再生材）をアスファルト混合物事前審査制度における審査対象混合物（以下、「事前審査混合物」という。）として承認を受けることができた。

中温化混合物の製造は、材料による方法（添加剤（プラントミックス）や中温化アスファルト（プレミックス））と装置による方法（機械式フォームド方式）に大別されるが、いずれの方法であっても一般的な加熱アスファルト混合物（以下、「加熱混合物」という。）より低い温度で製造、出荷することができる。これは、中温化混合物が、加熱混合物より低い温度でも締固めることができるという特性によるものである。

そのような特性がある中温化混合物であるが、東京都の公共工事における適用基準は、現状、加熱混合物と同一である。そのため、中温化混合物を適用した場合でも敷均し温度は、東京都土木工事標準仕様書（令

和4年4月版）に規定されている「混合物の敷均し温度は110℃以上」である。そのため、加熱混合物と比べ低い温度で出荷する中温化混合物では、天候等の条件によっては、施工が困難な状況となる可能性がある。

そこで、当所では2021年度から中温化混合物を適用した場合、敷均し温度を何度まで低減することが可能か検討を開始した。

本稿は、機械式フォームド方式を用いた中温化混合物の敷均し温度に関する調査結果を報告するものである。

#### 2. 試験概要

##### (1) 試験手順

試験は、加熱混合物と中温化混合物で締固め度を比較する方法で行った。

試験手順は、図-1に示すとおりである。

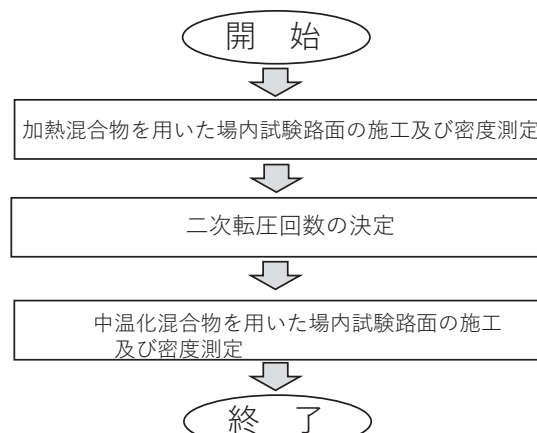


図-1 試験手順

1) 加熱混合物を用いた場内試験路面の施工及び密度測定

加熱混合物を用い、二次転圧回数を変化させた場合の締固め度の変化を確認する。

## 2) 中温化混合物使用時における二次転圧回数の決定

加熱混合物使用時における締固め度が100%に最も近い二次転圧回数を確認し、中温化混合物を用いた場合の二次転圧回数を検討し、決定する。

## 3) 中温化混合物を用いた場内試験路面の施工及び密度測定

敷均し温度を4条件変化させ、2)で決まった二次転圧回数で施工する。各条件での締固め度を確認する。

なお、1)、3)における密度試験は、(公社)日本道路協会の「舗装調査・試験法便覧」の「密粒度アスファルト混合物等の密度試験方法」により実施した。

### (2) 対象混合物

今回試験に用いた混合物を表-1に示す。

本試験では、都道の舗装工事で一般的に用いられる密粒度アスファルト混合物を対象とした。なお、今回用いた混合物は実現場を模した形で試験するため、いずれも事前審査混合物である。

表-1 対象混合物

分類	合材名
加熱	密粒度アスファルト混合物(13)【75】
中温化	密粒度アスファルト混合物(13)【75】中温化

表中の分類は、混合物の製造方法を示す。合材名は、事前審査混合物として登録されている名称を示したものである。したがって、加熱混合物で用いた混合物の認定混合物記号はV-06A(T)、中温化混合物は、Vw-06A(T)である。

### (3) 出荷プラント

加熱混合物、中温化混合物を事前審査混合物として出荷可能であった埼玉県戸田市川岸一丁目地内の戸田アスコン株式会社より出荷した。

### (4) 試験場所

本試験は、埼玉県さいたま市西区三橋六丁目地内の株式会社NIPPO総合技術センター内駐車スペース内で行なった。出荷プラントとの距離は20km程度である。

### (5) 使用機械

本試験で用いた機械を表-2に示す。

本試験は、都道での実施工を模して行うことを目的に行なったものである。そのため、使用する機械も実施工で用いられる大型のものを使用した。

表-2 使用機械

区分	使用機械
敷均し	アスファルトフィニッシャー (2.0~4.5m)
初期転圧	マカダムローラ (10t) 転圧幅2.1m
二次転圧	タイヤローラ (10~15t) 転圧幅2.2m

## 3. 加熱混合物を用いた場内試験路面の施工及び密度測定

### (1) 加熱混合物を用いた場内試験路面の施工

#### 1) 場内試験路面の規模

今回施工した場内試験路面の模式図を図-2に示す。

また、写真-1に場内試験路面の施工状況を示す。

場内試験路面は、総幅5m×総延長40m×厚さ5cm(面積200m<sup>2</sup>)とした。なお、基面はアスファルト舗装面とした。この基面にディストリビュータでアスファルト乳剤を散布し、施工した。図-2中の条件①~④は、条件を変化させて施工した場内試験路面の模式図であり、Nはニュートラルゾーンを示し、転圧機械(マカダムローラやタイヤローラ)が往復するのに滞留や切り回しするのに用いた範囲である。このNの範囲は密度測定の範囲外としている。なお、左側を起点側とし、右側を終点側とした。

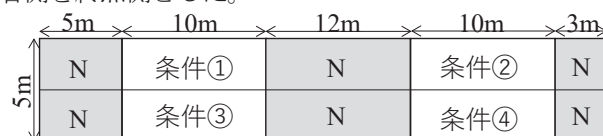


図-2 場内試験路面の規模



写真-1 場内試験路面施工状況

## 2) 場内試験路面の施工条件

場内試験路面の各施工段階の加熱混合物の温度は、表-3のとおりである。また、条件①～④における二次転圧の回数は、表-4のとおりである。

表-3 各施工段階の加熱混合物の温度

区分	温度 (°C)
出荷	165±10
敷均し	150±10
初期転圧	140±10
二次転圧	110±10

表-4 条件①～④の転圧回数

供試体	初期転圧 (往復)	二次転圧 (往復)
条件①	2.5	2.5
条件②		4.5
条件③		6.5
条件④		8.5

なお、転圧時一部のみが過転圧とならないようローラの位置を適切に管理した。

## (2) 場内試験路面施工時の温度測定結果

場内試験路面施工時の温度測定結果を表-5に示す。

なお、加熱混合物による場内試験路面の施工は、2023年9月27日に実施した。

表-5 施工時の温度測定結果

区分	条件①	条件②	条件③	条件④
敷均し温度 (°C)	151	150	151	152
初期転圧温度 (°C)	140	142	144	141
二次転圧温度 (°C)	112	110	114	115

測定の結果、いずれの条件も目標温度内で施工することができたことが確認された。

## (3) 場内試験路面からのコア採取

条件①から④におけるコア採取位置を図-3に示す。

図-2と同様に、左側が起点側、右側が終点側である。コアは、条件ごとの縁界とならない位置を考慮した。

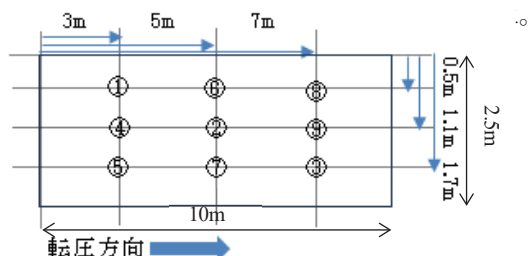


図-3 コア採取位置

## (4) 加熱混合物の密度（締固め度）測定

加熱混合物の密度測定結果及び締固め度計算結果を

表-6から表-9に示す。

締固め度の結果から、「平均値±1σ」の範囲内から外れる値は棄却した。棄却した値は表中灰色に着色している。なお、少数点以下の処理によって、表中の着色が一致しないものがあることを記載しておく。

表-6 条件①の締固め度

採取位置	厚さ (cm)	かさ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)	締固め度標準偏差σ	締固め度 (%) 棄却後平均値
1	4.9	2.297	96.4	-	-
2	5.2	2.301	96.5		
3	5.1	2.325	97.5		
4	5.0	2.292	96.1		
5	5.0	2.300	96.5		
6	5.1	2.330	97.7		
7	5.2	2.324	97.5		
8	5.2	2.320	97.3		
9	5.2	2.305	96.7		
平均値	5.1	2.310	96.9	0.55	96.7

表-7 条件②の締固め度

採取位置	厚さ (cm)	かさ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)	締固め度標準偏差σ	締固め度 (%) 棄却後平均値
1	4.9	2.278	95.6	-	-
2	5.0	2.322	97.4		
3	5.2	2.337	98.0		
4	5.0	2.302	96.6		
5	5.1	2.312	97.0		
6	5.1	2.308	96.8		
7	5.2	2.329	97.7		
8	5.1	2.326	97.6		
9	5.2	2.327	97.6		
平均値	5.1	2.316	97.1	0.69	97.2

表-8 条件③の締固め度

採取位置	厚さ (cm)	かさ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)	締固め度標準偏差σ	締固め度 (%) 棄却後平均値
1	4.9	2.298	96.4	-	-
2	5.1	2.327	97.6		
3	5.0	2.349	98.5		
4	4.9	2.327	97.6		
5	5.0	2.325	97.5		
6	4.9	2.326	97.6		
7	4.9	2.335	97.9		
8	4.9	2.337	98.0		
9	4.8	2.340	98.2		
平均値	4.9	2.329	97.7	0.56	97.8

表-9 条件④の締固め度

採取位置	厚さ (cm)	かさ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)	締固め度標準偏差σ	締固め度 (%) 棄却後平均値
1	4.9	2.344	98.3	-	-
2	5.0	2.346	98.4		
3	5.1	2.353	98.7		
4	4.9	2.335	97.9		
5	5.1	2.351	98.6		
6	5.1	2.324	97.5		
7	5.0	2.356	98.8		
8	5.0	2.357	98.9		
9	5.1	2.345	98.4		
平均値	5.0	2.346	98.4	0.42	98.5

表-10に各二次転圧回数と締固め度の関係を示す。

表-10 二次転圧回数と締固め度

二次転圧回数 (往復)	2.5	4.5	6.5	8.5
締固め度 (%)	96.7	97.2	97.8	98.5

図-4 に表-6 から表-9 における「平均値±1σ」の範囲内にある値の二次転圧回数と締固め度の関係を示す。

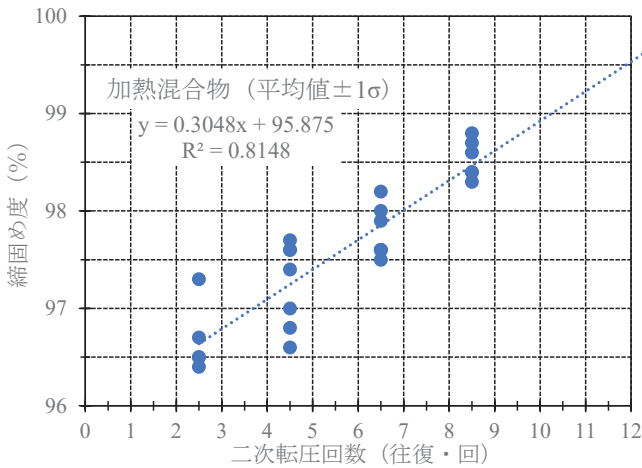


図-4 二次転圧回数と締固め度の関係

加熱混合物における場内試験路面の施工結果から、二次転圧回数が増えるごとに締固め度が上昇する傾向を確認した。また、同一条件下でも締固め度にばらつきが発生することを確認した。

#### 4. 中温化混合物使用時における二次転圧回数の決定

加熱混合物使用時における二次転圧回数と締固め度の関係から二次転圧回数 8.5 往復時の締固め度が 98.5%であった。図-4 から締固め度を 100%とするためには、14 往復させる必要があることが推測される。

しかし、近似直線における締固め度 100%箇所は外挿の範囲になること。また、二次転圧回数を 14 往復させるためには施工時間が 2 倍近くになり、混合物が冷えてしまい転圧を行っても締め固まらない可能性が高い懸念がある。

そのため、本検討では、中温化混合物使用時における二次転圧回数は、加熱混合物使用時に締固め度が最大となった 8.5 往復とすることにした。

#### 5. 中温化混合物を用いた場内試験路面の施工及び密度測定

##### (1) 中温化混合物を用いた場内試験路面の施工

##### 1) 場内試験路面の規模

場内試験路面の規模は、加熱混合物と同条件とした。

図-5 に場内試験路面の規模を示す。加熱混合物と条件を区別するため、中温化混合物を用いたものは、条

件①' から条件④' と表現することとした。

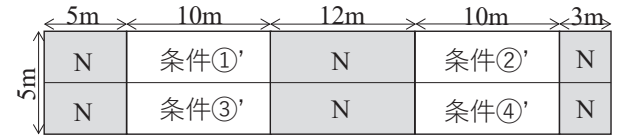


図-5 供試体の規模

##### 2) 場内試験路面の施工条件

中温化混合物は、表-3 に示した温度から-30℃で製造・出荷した。また、敷均しから二次転圧の施工条件を表-11 に示す。なお、東京都土木工事標準仕様書における「混合物の敷均し温度は 110℃以上としなければならない」という規定は 110℃以上で敷均しを始めるということではなく、110℃以上で敷均し終えるということを意味する。敷均しが完了すると初期転圧が開始される。そのため、本検討では実際に初期転圧を開始する温度を 4 条件設定し、この温度が変化した場合に締固め度に与える影響を調査した。

表-11 施工条件

区分	温度 (°C)	転圧回数 (往復)
出荷	135±10	—
敷均し	120±10	—
初期転圧	80,90,100,110±10	2.5
二次転圧	60,70,80,90±10	8.5

##### 3) 場内試験路面施工時の温度測定結果

表-12 に場内試験路面施工時の温度測定結果を示す。

表-12 供試体作製時の温度測定結果

区分	条件①'	条件②'	条件③'	条件④'
敷均し温度(°C)	130	129	130	130
初期転圧開始温度(°C)	115	104	95	84
二次転圧開始温度(°C)	88	83	78	69

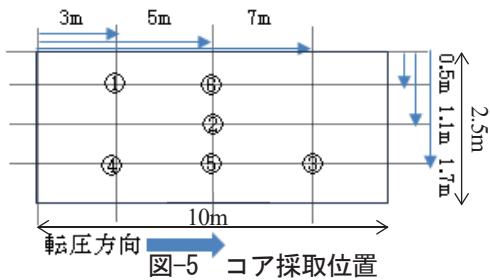
中温化混合物の現着温度が 140℃程度であったことから、場内試験路面施工時には、運搬に用いたダンプトラックの荷台でしばし混合物の温度を低下させる時間を設けた。また、いずれの条件も表-11 の施工条件を満足した。なお、中温化混合物による場内試験路面の施工は、2023 年 10 月 24 日に実施した。

##### (2) 場内試験路面からのコア採取

各条件におけるコア採取位置を図-5 に示す。

加熱混合物の際は、コアの密度測定でばらつきがどの程度発現するか推測できなかったため 9 個コアを採

取したが、そこまで大きなばらつきではなかったことから、中温化混合物では、6個のコアを採取することとした。なお、図-5の向きは、図-3と同じである。また、コアの採取は、2023年10月25日に実施した。



### (3) 中温化混合物の密度（締固め度）測定

中温化混合物の密度測定結果及び締固め度計算結果を表-13から表-16に示す。

表-13 条件①'の締固め度

初期転圧開始温度 (°C)	採取位置	厚さ (cm)	かさ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)
115	1	6.1	2.357	98.7
	2	5.7	2.326	97.4
	3	6.0	2.318	97.0
	4	5.7	2.329	97.5
	5	5.7	2.327	97.4
	6	5.8	2.317	97.0
	平均値	5.8	2.329	97.5

表-14 条件②'の締固め度

初期転圧開始温度 (°C)	採取位置	厚さ (cm)	かさ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)
104	1	6.0	2.342	98.0
	2	5.8	2.312	96.8
	3	5.6	2.320	97.1
	4	6.0	2.331	97.6
	5	5.8	2.322	97.2
	6	5.9	2.355	98.6
	平均値	5.9	2.330	97.6

表-15 条件③'の締固め度

初期転圧開始温度 (°C)	採取位置	厚さ (cm)	かさ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)
95	1	6.0	2.296	96.1
	2	5.9	2.301	96.3
	3	6.0	2.317	97.0
	4	6.0	2.291	95.9
	5	6.0	2.316	96.9
	6	5.7	2.276	95.3
	平均値	5.9	2.300	95.7

表-16 条件④'の締固め度

初期転圧開始温度 (°C)	採取位置	厚さ (cm)	かさ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	締固め度 (%)
84	1	5.5	2.273	95.1
	2	6.0	2.306	96.5
	3	6.1	2.302	96.4
	4	5.6	2.276	95.3
	5	6.0	2.290	95.9
	6	6.1	2.275	95.2
	平均値	5.9	2.287	95.7

表-17に各初期転圧温度と締固め度の関係を示す。

表-17 初期転圧開始温度と締固め度

初期転圧開始温度 (°C)	84	95	104	115
締固め度 (%)	95.7	95.7	97.6	97.5

図-6に表-13から表-16における初期転圧開始温度と締固め度の関係を示す。

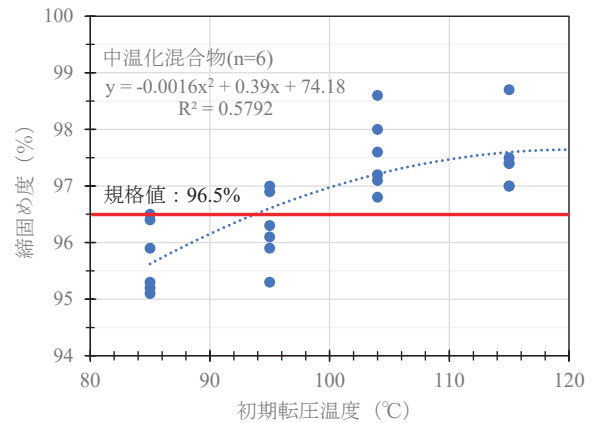


図-6 初期転圧開始温度と締固め度の関係

図-6に追記した規格値は、土木工事施工管理基準(当局)におけるアスファルト混合物の締固め度の規格値(96.5%)である。初期転圧開始温度ごとの締固め度(平均値)を見比べた場合、初期転圧開始温度 84°Cと 95°Cの締固め度では、個別の締固め度においてはやや95°Cの方が締固め度が高くなるものの、締固め度の平均値は同じ数値を示した。初期転圧開始温度 104°Cと 115°Cでも同様である。

このことから、初期転圧温度が高い方が締固め度が高まる傾向を示すが、比例的に締固め度が高まる傾向を示すわけではないことが推察される。また、規格値との比較では、条件②' (初期転圧開始温度 104°C) では、個々のコアで締固め度 96.5%を下回るものは確認されなかったが、条件③' (初期転圧開始温度 95°C) では、6個中4個で締固め度 96.5%を下回った。

このことから、条件②'と条件③'の間に閾値があるも

のと推測される。

## 6. まとめ

本検討により得られた知見を以下に3点示す。

①加熱混合物について、締固め度100%を目標として試験施工を実施した。結果、二次転圧回数を増加させることで締固め度が上昇することを確認することができた。また、本検討では、初期転圧回数2.5往復、二次転圧回数8.5往復の締固め度98.5%が最大であった。これは、当該試験施工のローラ転圧は、前進・後進のみで実施し、前進・後進する際に転圧する箇所でも可能な限りラップする箇所が発生しないように注意して施工したためと考えられる。

②中温化混合物について、初期転圧開始温度100℃以上を2工区、100℃以下を2工区の合計4工区分試験路面を施工した。その結果、初期転圧開始温度が100℃以上で目標締固め度96.5%以上が得られた。

③中温化混合物で場内試験路面の施工を行った結果、締固め度は、初期転圧温度に対し、比例的に増加する訳ではないことを確認した。

## 7. おわりに

本検討では、中温化混合物を用いた場合、敷均し温

度をどの程度まで低減可能か調査した。その結果、敷均し温度の規格値を100℃程度まで低減しても所定の締固め度を満たすことを確認することができた。

既に国土交通省の土木工事共通仕様書においては、中温化混合物（加熱アスファルト安定処理混合物）を使用した場合には、「混合物の種類によって敷均しが困難な場合や、中温化技術により施工性を改善した混合物を使用する場合、締固め効果の高いローラを使用する場合などは、設計図書に関して監督職員と協議の上、所定の締固めが得られる範囲で、混合物の適切な温度を決定するものとする。<sup>2)</sup>」と規定されている。当局においても、中温化混合物を用いた場合の敷均し温度について、本検討結果等を参考に別途改定等の検討をする必要があると考えられる。

また、本調査は、「機械式フォームド方式」を用いた場合の敷均し温度について、検討したものである。そのため、今後、中温化剤や中温化アスファルトを用いた場合や機械式フォームド方式でも更に技術の進展が行われた場合等には、敷均し温度の下限値も100℃程度までではなく、更に低減可能とする等の検討が必要になることが予測される。今後も中温化技術について、業界等の動向を踏まえ、適宜調査を継続していく予定である。

## 参 考 文 献

- 1) (一社)日本道路建設業協会、(一社)日本アスファルト合材協会 (2024) : 低炭素(中温化)アスファルト舗装の手引き, p.5
- 2) 国土交通省関東地方整備局 (2024) : 関東地方整備局土木工事共通仕様書令和6年度版, p.3-86