



中温化アスファルト混合物による 加熱貯蔵サイロの貯蔵期間の延長を目指 した実験的検討

大林道路(株) 技術研究所

//

ニチレキグループ(株) 技術研究所

//

小林

上地

鷹本

浦沢

靖明

俊孝

丈裕

和希

1 はじめに

我が国の令和5年度の建設業における年間実労働時間は1978時間と、全産業の1726時間と比べて約250時間多い¹⁾。労働が長時間に及ぶことから、建設業を希望する若者が減少し、業界全体の人手不足が課題となっている。近年では、建設業における長時間労働の是正の取組みとして、国土交通省を主体とした施工時期の平準化や、ICTの全面的な活用による働き方改革が推進されている²⁾。

アスファルトプラント(以下、合材工場)における長時間労働の是正対策についても様々な取組みが行われ始めている中で、筆者らは加熱貯蔵サイロ(以下、サイロ)に着目した。サイロはアスファルト混合物を一定期間貯蔵するための設備であり、活用方法の工夫により出荷能力の向上や、合材工場職員の労働時間短縮、他工事との出荷調整の容易化など様々なメリットが期待できる。

しかしながら、サイロはアスファルト混合物を高温で貯蔵するため、長期間貯蔵した場合にはアスファルトの熱劣化などの影響により、混合物性状の変化や塊の発生などが懸念される。このため、サイロの貯蔵可能期間は明確に設定されていないものの、合材工場では2日以内には出荷していることが多いようである。このような現況を踏まえると、サイロの貯蔵期間を現行よりも延長できた場合、生産性や利便性がさらに向上し、長時間労働の是正にもつながるはずである。

そこで筆者らは、貯蔵温度の低減によるアプローチから、サイロによるアスファルト混合物の貯蔵期間の延長を目指した。貯蔵温度を通常より約30℃低く設定することを目的として、バインダにはプレミックスタイプの中温化アスファルトの適用を試みた。

本稿では、室内および実機レベルでのサイロ貯蔵による劣化の進行を、バインダおよび混合物性状の評価および試験施工により検証した結果について報告する。

2 サイロ貯蔵期間を延長することによるメリット

本検討では、中温化技術により製造温度およびサイロ貯蔵時の温度を低減し、混合物の熱劣化を抑え、貯蔵期間の延長を図った。サイロ貯蔵期間の延長を図ることで、下記のメリットが期待できる。

① 生産性の向上

サイロ貯蔵期間の延長により、混合物の計画的な製造が可能となり、生産性の向上を図れる。

② 4週8休の実現

例えば、サイロ貯蔵期間が3日以上であれば、金曜日製造のアスファルト混合物で、土曜日と日曜日の出荷に対応できるため、合材工場職員の4週8休を実現しやすい。

③ 環境配慮

中温化技術により製造温度およびサイロの貯蔵

温度を低減可能となれば、エネルギー消費量やCO₂排出量の削減が期待できる。

④ アスファルト混合物のロス軽減

急な工事工程の変更などにより、これまでは貯蔵期間を過ぎた混合物は廃棄されていたが、サイロ貯蔵期間の延長によって廃棄する混合物を削減できる。

3 温度低減が貯蔵時の混合物劣化に与える影響

3-1 室内の乾燥炉貯蔵による検討

(1) 検討内容

サイロでの長期貯蔵を検証する前段階として、室内の乾燥炉を用い、混合物の劣化が各種性状に与える影響を検討した。混合物の製造条件および乾燥炉による貯蔵条件を表-1に示す。再生密粒度アスファルト混合物(13)(以下、通常再生)と中温化再生密粒度アスファルト混合物(13)(以下、中温化再生)を製造し、ペール缶(18L)に混合物を9割ほど充填後、蓋を閉じ乾燥炉内で加熱貯蔵することで疑似サイロとした。貯蔵時の乾燥炉の温度は、通常再生を165℃、中温化再生を125℃と設定した。

表-1 混合物の製造条件および乾燥炉の貯蔵条件

項 目		通常再生	中温化再生
混合物製造条件	目標製造温度	165 ± 5℃	135 ± 5℃
	締固め温度	145 ± 3℃	110 ± 3℃
	貯蔵期間	7日間	7日間
乾燥炉貯蔵条件	貯蔵目標温度	165 ± 5℃	125 ± 5℃
	ペール缶容量	18L	
	混合物貯蔵量	9割充填	
	サンプリング回数(日)	0、1、3、7	0、1、3、7

(2) 使用材料

本検討で使用したアスファルトの性状を表-2に、混合物の合成粒度を表-3に示す。中温化再生は、通常再生と比較して混合および締固め温度を30℃程度低減できる。骨材配合割合はともに同一とし、再生骨材配合率は50%とした。配合設計方法は、設計針入度への調整を「再生用添加剤」で行う方法とした。

表-2 アスファルトの性状

試験項目		ストレートアスファルト 60/80	中温化アスファルト
針入度(25℃)	1/10mm	72	63
軟化点	℃	48.0	48.5
伸度(15℃)	cm	100+	100+
密度(15℃)	g/cm ³	1.035	1.029

表-3 混合物の合成粒度

ふるい目	通常再生	中温化再生	中央粒度
26.5mm	100.0	100.0	100.0
19.0mm	100.0	100.0	100.0
13.2mm	98.3	98.3	97.5
4.75mm	59.7	59.7	62.5
2.36mm	40.4	40.4	42.5
0.6mm	24.5	24.5	24.0
0.3mm	14.9	14.9	15.5
0.15mm	9.5	9.5	11.0
0.075mm	6.7	6.7	6.0
最適アスファルト量	5.6%	5.7%	—

(3) 評価項目

混合物を乾燥炉に長期間貯蔵した場合には、アスファルトが劣化により硬くなることが想定されるため、貯蔵期間ごとに混合物から回収したアスファルト(以下、回収アス)の物理性状および化学性状を評価した。また、この影響が混合物の締固め特性に影響を及ぼすかについても評価した。評価項目を表-4に示す。

表-4 評価項目

項 目	評価指標	試験方法	備 考
回収アスファルトの物理性状	$ G^* \sin \delta$	DSR 試験	舗装調査・試験法便覧 A062 温度: 25℃ 試料直径: 8mm 試料厚さ: 2mm 載荷周波数: 10rad/s
	針入度	針入度試験	舗装調査・試験法便覧 A041
回収アスファルトの化学性状	分子量	GPC 分析	劣化時のバインダの分子量分布の違いを把握する目的で測定
混合物性能	締固め度	密度試験	舗装調査・試験法便覧 B008

(4) 検討結果

① $|G^*|\sin \delta$ (DSR試験)

回収アスのDSR試験の結果を図-1に示す。評価項目には、疲労ひび割れと相関のある $|G^*|\sin \delta$ を適用した。中温化再生の $|G^*|\sin \delta$ の増加は、通常再生と比較して緩やかであり、貯蔵温度を低減したことで、劣化が抑制されたといえる。さらに、既往³⁾

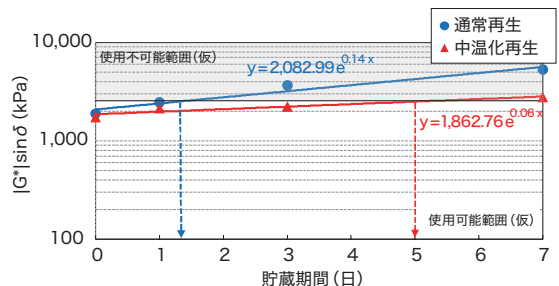


図-1 貯蔵期間と $|G^*|\sin \delta$ の関係

の文献では、 $|G^*|\sin \delta$ が2,000kPaを超えると疲労ひび割れ発生率が増加傾向に転じ、3,000kPaで急激に増加することが示されている。そこで、この中央値2,500kPaに達する貯蔵期間を仮に使用上限値とすると、通常再生は1.3日、中温化再生は5日であり、貯蔵期間を3.7日延長できる可能性がある。

なお、この結果を基に、通常再生の貯蔵可能日数を1.3日と仮定し、以後の評価でも通常再生の貯蔵1.3日と同性状となる貯蔵日数を中温化再生の貯蔵可能日数として、通常再生に対する貯蔵の延長可能期間を算出した。

② 針入度

回収アスの針入度試験の結果を図-2に示す。貯蔵期間ごとの針入度を比較すると、中温化再生は、通常再生と比較し針入度の低下が緩やかであり、劣化が抑制されていた。また、中温化再生の貯蔵可能日数を算出すると3.5日となり、貯蔵期間を2.3日延長できる可能性がある。

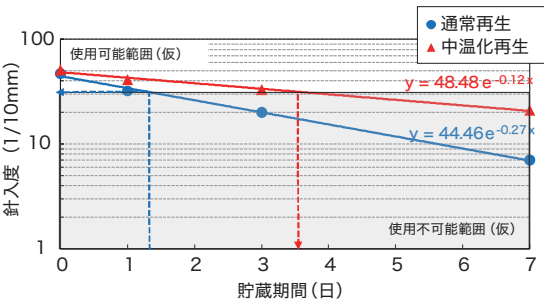


図-2 貯蔵期間と針入度の関係

③ 平均分子量 (GPC 分析)

回収アスのGPC分析から得られた通常再生および中温化再生の分子量分布を図-3に示す。いずれも貯蔵期間が進むにつれ分子量10,000付近のピークが増大した。これは、アスファルトの高分子化に起因するものと考えられる。一方、中温化再生については、通常再生と比較してピークの増大が小さく、劣化による分子量の増加が抑制されていた。

また、貯蔵日数と分子量の関係を図-4に示す。

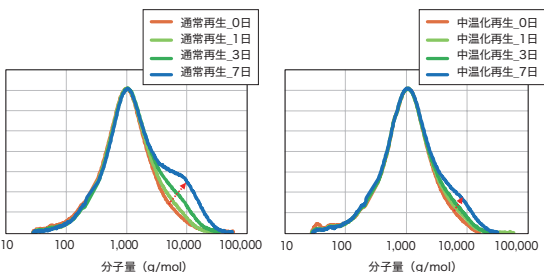


図-3 通常再生および中温化再生の分子量分布

中温化再生は、貯蔵期間を3日延長できる可能性がある。

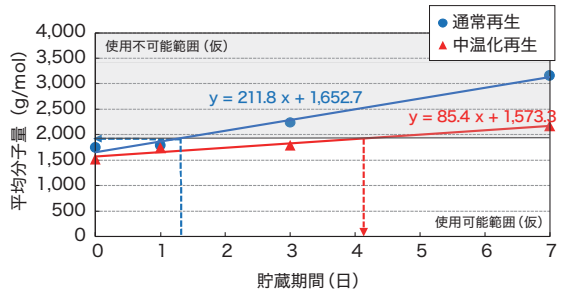


図-4 貯蔵期間と平均分子量の関係

④ 混合物の締固め度 (密度試験)

貯蔵0日目 (製造直後) の混合物の密度を基準密度とし算出した締固め度を図-5に示す。中温化再生は、通常再生と比較し、締固め度が低下するまでの貯蔵期間が長くなった。この結果から、混合物性状においても、通常再生の使用可能な日数を1.3日と仮定した場合、貯蔵期間を2日延長できる可能性が伺える。

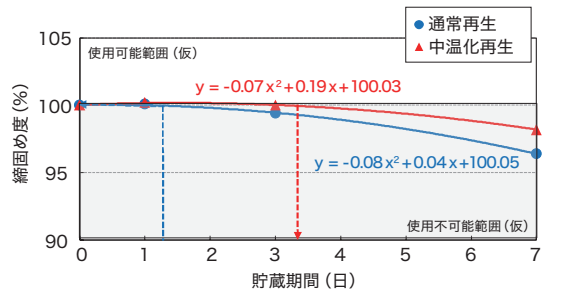


図-5 貯蔵期間と締固め度の関係

3-2 サイロ貯蔵による検討

(1) 検討内容

前述の室内検討結果を踏まえ、実際に合材出荷を行っているサイロによる長期貯蔵を検討した。混合物の製造条件およびサイロ貯蔵条件を表-5に示す。

表-5 混合物製造条件およびサイロの貯蔵条件

項 目		通常再生	中温化再生
混合物製造条件	目標製造温度※	165 ± 5℃	135 ± 5℃
	締固め温度	142 ± 3℃	110 ± 3℃
サイロ貯蔵条件	貯蔵期間	3日間	5日間
	貯蔵目標温度	155 ± 5℃	125 ± 5℃
	最大容量	30t	
	混合物貯蔵量	30t	
	サイロ劣化防止装置	液体シールゲート	
	不活性ガスの使用	あり	
	サンプリング日数 (日)	0, 1, 2, 3	0, 1, 2, 3, 5
	試料採取のサンプリング条件	12時間経過以降の混合物については0.5t混合物を廃棄後にサンプリング採取	

※運搬およびサイロでの温度低下を考慮して貯蔵目標温度から10℃上げて製造

サイロの貯蔵目標温度は、通常再生は155℃、中温化再生は125℃とした。なお、使用したサイロは、出口のゲートを水で満たすことで空気の侵入を防ぎ、混合物の劣化を抑制する液体シールゲートを搭載したものである。

(2) 評価項目

3-1 (3) 表-4に加え、表-6に示す混合物性能を評価項目とした。具体的には、耐流動性をホイールトラッキング試験、ひび割れ抵抗性を圧裂試験、疲労抵抗性を曲げ疲労試験で評価した。

表-6 各種評価試験の概要

項目	評価指標	試験方法	備考
耐流動性	動的安定度	ホイールトラッキング試験	舗装調査・試験法便覧 B003
ひび割れ抵抗性	圧裂係数 圧裂強度	圧裂試験	舗装調査・試験法便覧 B006 圧裂係数：20℃ 圧裂強度：-10℃
疲労抵抗性	疲労破壊時の回数	曲げ疲労試験	舗装調査・試験法便覧 B018T 試験条件：0℃、5Hz、400μ

(3) 検討結果

中温化再生は、本検討における最長貯蔵期間である5日経過後でも混合物に塊など見られず、問題なくサイロから排出できることを確認した。

なお、評価用の混合物は、原則として少量ずつサイロから採取したが、サイロ貯蔵3日目のみ試験施工時に合材トラックから採取した。この採取方法の違いによる混合物の劣化度合いの違いが、検討結果に影響した可能性があるため、いずれの混合物も3日目のデータを省いて評価した（よって、図中の白抜き○、△は参考値扱い）。

① $|G^*|\sin \delta$ (DSR試験)

回収アスの $|G^*|\sin \delta$ を図-6に示す。室内検討と同様に $|G^*|\sin \delta$ が2,500kPaに達する貯蔵期間を使用上限値と仮定し、貯蔵期間を近似式から算出した。通常再生は2.9日、中温化再生は7.2日であり、貯蔵期間を4.3日延長できる可能性が示唆された。

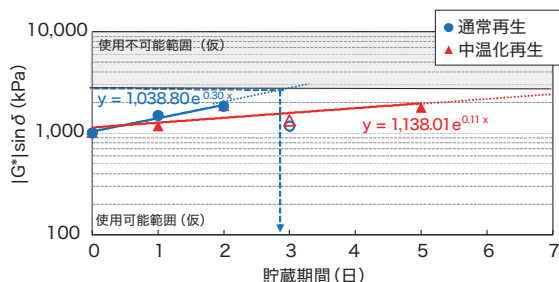


図-6 貯蔵期間と $|G^*|\sin \delta$ の関係

また、両混合物とも乾燥炉（室内検討）に比べてサイロの貯蔵期間が延長しており、これは貯蔵する混合物量が多いため、酸素との接触面積が減少して劣化が抑制されたものと推察される。なお、この結果を基に、後述では通常再生の貯蔵可能日数を2.9日と仮定して評価した。

② 針入度

回収アスの針入度試験の結果を図-7に示す。乾燥炉の結果と同様に、中温化再生は、通常再生と比較し針入度の低下は緩やかであり、劣化が抑制されている傾向が伺えた。また、中温化再生の貯蔵日数を試算すると9.7日であり、通常再生と比較して貯蔵期間が6.8日延長可能といえる。

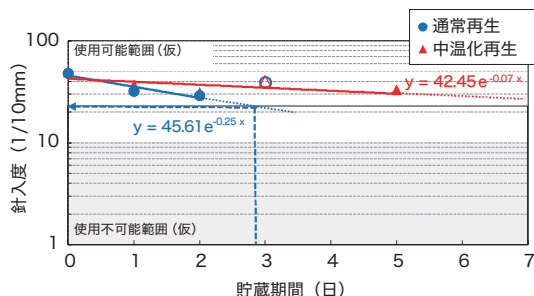


図-7 貯蔵期間と針入度の関係

③ 平均分子量 (GPC試験)

回収アスのGPC試験の結果を図-8に示す。通常再生、中温化再生の平均分子量は、ともに2,000前後で推移しており、バインダによる差は認められなかった。

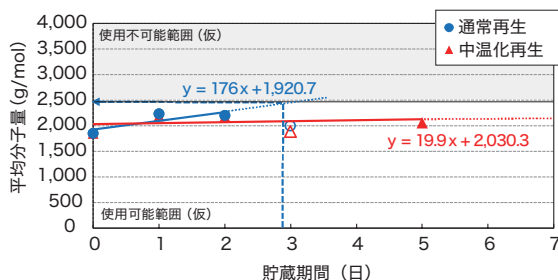
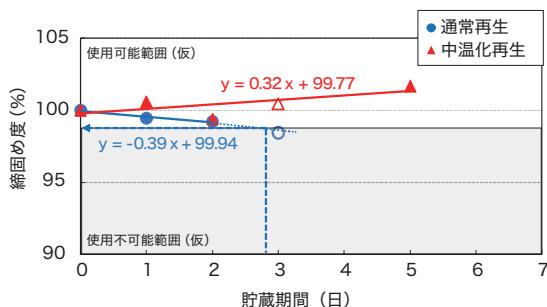


図-8 貯蔵期間と平均分子量の関係

④ 混合物の締固め度 (密度試験)

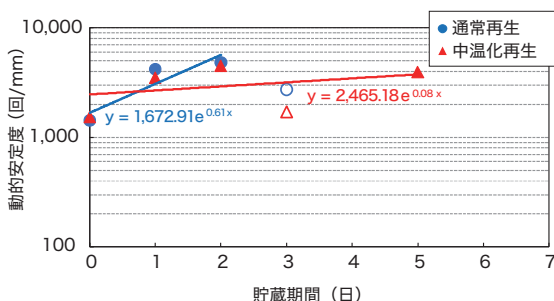
混合物の締固め度を図-9に示す。締固め度は、室内検討時と同様にサイロ貯蔵0日目の混合物の密度を基準密度とし算出した。通常再生については貯蔵期間が進むごとに低下する一方で、中温化再生は貯蔵5日目まで締固め度の低下は認められなかった。これは、中温化再生の貯蔵温度を低減したことで、混合物の劣化が抑制されたことが起因していると推察される。



図－9 貯蔵期間と締固め度の関係

⑤ 混合物の動的安定度 (ホイールトラッキング試験)

混合物の動的安定度を図－10に示す。サイロ貯蔵における動的安定度の変化は、貯蔵0日と1日で差が認められるものの、それ以降は大きな差がなく、貯蔵延長による耐流動性への影響は小さいと推察される。

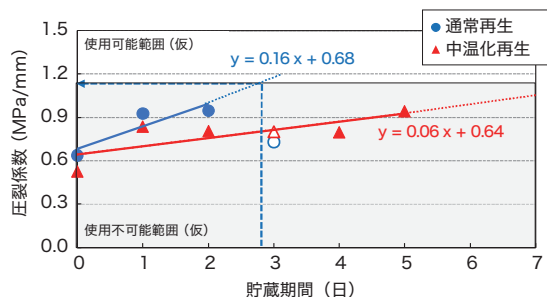


図－10 貯蔵期間との動的安定度の関係

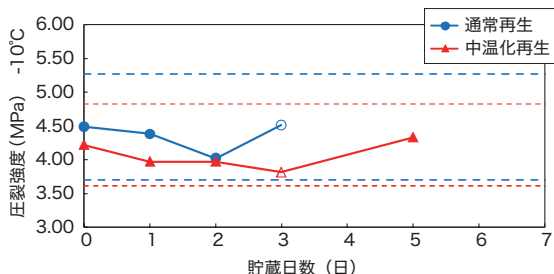
⑥ 混合物の圧裂係数 (圧裂試験)

混合物の圧裂係数を図－11に示す。中温化再生の貯蔵可能日数は8.6日となり、貯蔵期間を5.7日延長できる可能性が示唆された。

また、舗装施工管理要領⁴⁾のサイロ貯蔵性確認結果を図－12に示す。破線は、貯蔵0日目の混合物の圧裂強度 (-10℃) の平均値 $\pm 2 \times \sigma$ であり、貯蔵後の結果がこの範囲内なら、その期間まで貯蔵可能と判断する。中温化再生は貯蔵5日目まで貯蔵可能であった。



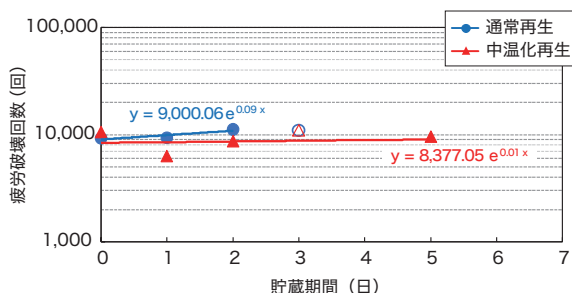
図－11 貯蔵期間と圧裂係数の関係



図－12 貯蔵期間と圧裂強度 (-10℃) の関係

⑦ 混合物の疲労破壊回数 (曲げ疲労試験)

混合物の曲げ疲労試験の結果を図－13に示す。疲労破壊回数の変化は、通常再生および中温化再生ともに、大きな変化はなく、疲労破壊回数は10,000程度で推移していた。



図－13 貯蔵期間と疲労破壊回数の関係

3-3 小結

各評価項目における通常再生と中温化再生の貯蔵日数を表－7に示す。なお、混合物性状が同程度であった動的安定度と疲労破壊回数は表記を省略した。

表－7 通常再生および中温化再生の貯蔵可能日数

項 目		貯蔵可能日数（日）		中温化再生による 貯蔵延長日数
		通 常 再 生	中温化 再 生	
乾燥炉	$ G^* \sin \delta$	1.3	5	3.7
	針入度	1.3	3.5	2.2
	平均分子量	1.3	4.2	2.9
	締固め度	1.3	3.3	2
サイロ	$ G^* \sin \delta$	2.9	7.2	4.3
	針入度	2.9	9.7	6.8
	平均分子量	2.9	－(未算出)	－
	締固め度	2.9	－(未算出)	－
	圧裂係数	2.9	8.6	5.7

室内の乾燥炉貯蔵およびサイロ貯蔵の結果から、混合物の貯蔵温度を低減することで、劣化を抑制できる可能性を検証できた。また、中温化再生による貯蔵延長日数を評価項目ごとに比較すると、乾燥炉では2～3.7日、サイロでは4.3～6.8日となり、実機で長くなる傾向が得られた。サイロ貯蔵では、混合物の貯蔵量が多くなることで酸素との接触面積が少ないことが要因として考えられる。

4 長期貯蔵した中温化混合物の施工性に関する検証

4-1 検証内容

サイロに長期貯蔵した中温化再生の施工性に問題がないことを検証するため、合材工場構内にて試験施工を実施した。試験施工では、中温化再生のサイロ貯蔵0日目および3日目を舗設した。検証内容を表-8に示す。

表-8 検証内容

項目	条件
規模	延長15m×幅員4m×厚さ5cm(1工区あたり)
施工内容	サイロ貯蔵3日目の中温化再生：7.5t サイロ貯蔵0日目の中温化再生：7.5t（比較）
施工時の目標温度	出荷：145±5℃、敷きならし：135±5℃ 初期転圧：125±5℃
作業性の確認	スコップ、レーキワーク
締固め度	切取り供試体

4-2 検証結果

サイロ貯蔵3日目の中温化再生の試験施工状況と、転圧後の路面（貯蔵0日目、3日目）を写真-1に示す。

サイロ貯蔵3日目の中温化再生は、サイロ貯蔵0日目と同様のつや・粘りがあり塊も見られず、作業員への聞き取り調査では、スコップやレーキによる作業性も変わらないとの評価であった。また、現場採取コアの締固め度は、サイロ貯蔵0日目が97.8%、サイロ貯蔵3日目で97.3%と締固め度も同程度であった。

これらの結果から、サイロ貯蔵3日目の中温化再生は、サイロ貯蔵0日目と遜色なく施工できる混合物であることが検証された。なお、サイロ貯蔵3日目の中温化再生は一般的な通常再生と比べても混合物の状態、施工性、転圧後の路面状況のいずれもが同程度であり良好であった。

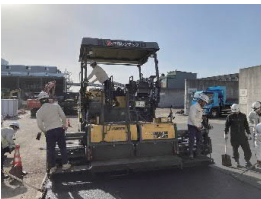
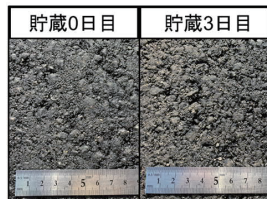


写真-1 試験施工状況と転圧後の路面状態



5 サイロ貯蔵時の電力量・CO₂排出量の試算

サイロ貯蔵の検討において、通常再生および中温化再生の電力消費量を測定し、貯蔵温度を30℃低減した中温化再生のCO₂排出量の削減効果を試算した。1日当たりのサイロ貯蔵時の電力消費量とCO₂排出量を図-14に示す。

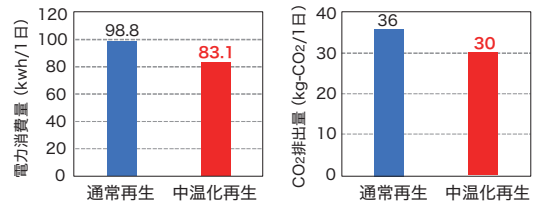


図-14 サイロ貯蔵時の電力消費量とCO₂排出量

中温化再生によりサイロ貯蔵温度を30℃低減したことで、1日当たりの電力消費量とCO₂排出量について約16%の削減効果が見込めると試算できた。

6 まとめ

再生密粒度アスファルト混合物(13)のサイロ貯蔵について、本検討により得られた知見を以下に示す。

- (1) 中温化技術の適用により製造温度およびサイロ貯蔵時の温度を30℃低減することで、混合物の熱劣化を抑制できるため、サイロ貯蔵期間を3日以上と通常と比較して延長できる可能性が高い。
- (2) 中温化技術を適用しサイロ貯蔵温度を30℃低減することで、サイロ貯蔵3日目の合材も良好に施工できる。
- (3) サイロ貯蔵温度を30℃低減することで、サイロ貯蔵1日当たりの電力量とCO₂排出量を16%削減できる。

7 おわりに

現在の建設業は、人手不足や長時間労働など様々な課題があり、いかに改善していくかが重要な局面となっている。本稿で紹介したような方法によりサイロの貯蔵期間の延長を図ることで、生産性の向上や、合材工場職員の労働時間短縮、環境配慮など様々な効果が期待できる。

今後もサイロの貯蔵性に関する検討を継続的にを行い知見を増やしていくことで、本技術の実用性を向上させていく所存である。

【参考文献】

- 1) (一)日本建設業連合会：建設業の現状
<https://www.nikkenren.com/publication/handbook/chart6-4/index.html> (2024.11.21閲覧)
- 2) 国土交通省：令和6年版国土交通白書、2024
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r05/hakusho/r06/pdf/np205000.pdf> (2024.11.21閲覧)
- 3) 土木学会：舗装工学ライブラリー 13a アスファルトの特性と評価、pp.140-141、2015.10.
- 4) ㈱高速道路総合技術研究所：舗装施工管理要領、令和5年7月版、Ⅲ 5-7、2023.7.