

# 再生骨材のすりもみ処理による 舗装発生材の利用拡大への取り組み

日本道路株式会社 関西支店 関西技術センター	池田 茜
日本道路株式会社 北関東支店 北関東技術センター	森 剛二
日本道路株式会社 生産技術本部 技術部	浅井 友章
日本道路株式会社 生産技術本部 技術部	長谷川淳也

## 1. はじめに

2050年のカーボンニュートラルを見据え、2021年、国土交通省は「環境行動計画<sup>1)</sup>」を策定した。当計画には、建設リサイクル分野においても循環経済の実現に向け、質を重視するリサイクルの推進が掲げられており、舗装発生材に関しても水平リサイクルの需要が高まっている。

舗装発生材の再生資源化率は99.5%<sup>2)</sup>であり、再資源化率は建設廃棄物の中では高水準である。しかし、舗装発生材の全てがアスファルト混合物に水平リサイクルされておらず、舗装発生材をリサイクルした再生骨材（以下、再生骨材）は約7割<sup>2)</sup>のみ再生アスファルト混合物として利用されている。残りの約3割<sup>2)</sup>は再生路盤材として利用されているのが現状である。舗装発生材の全てがアスファルト混合物に用いることができない要因の一例として、繰返し再生により再生骨材に残存しているアスファルトバインダの性状劣化<sup>3)</sup>が挙げられている。よって、舗装発生材はアスファルト混合物として水平リサイクルすることが困難な状況となっており、舗装発生材の滞留が全国のアスファルト合材工場で生じているのが現状である<sup>4)</sup>。

新規骨材の需給不足<sup>5)</sup>と舗装発生材の余剰問題を鑑み、再生骨材の新たな活用方法として、新規骨材と同等の品質を満たす骨材（以下、すりもみ骨材）の製造技術を開発した。本論はすりもみ骨材の製造方法や、すりもみ骨材の品質、すりもみ骨材を用いたアスファルト混合物の性状、および現場の適用事例について報告を行う。

## 2. 開発の目標

再生骨材の有効利用の検討として、過去にポリマー改質アスファルトH型を用いた排水性舗装廃材の再活用に関する取り組み<sup>6)</sup>が行われている。排水性舗装廃材の品質は確認されているが、排水性舗装の適用箇所や舗装発生材の保管方法などの課題を有し、普及に至っていないのが現状である。本検討は、既往の技術<sup>6)、7)</sup>を参考にし、より実用的かつ、環境負荷低減を実現するため、以下の目標を設定し、開発を行った。

- 1) 再生骨材から新規骨材と同等の品質を確保できる骨材を製造する。（旧アスファルト量1%以下<sup>\*</sup>）
- 2) すりもみ骨材の製造過程で発生する環境負荷を抑える。（材料の運搬、製造エネルギー、消費、廃水、廃材を出さない等によりゼロエミッションを図る。）
- 3) アスファルトプラントの敷地面積の大小によらず設置可能な設備とする。

※混合物として用いた場合の品質および製造設備の負荷を考慮し、目標値を設定した。

### 3. すりもみ骨材の製造

すりもみ骨材の製造にあたり、数種類の整粒機や粉砕機を含めて予備試験を行った。すりもみ骨材のアスファルト残留量や形状の品質面、製品歩留りや電力量を含めたコスト面を総合的に評価した結果、目標2)の観点から、乾式すりもみ方式を用いた製造機（以下、すりもみ製造機）を選定した。

#### (1) すりもみ製造プラント

すりもみ製造機の仕様を表-1に、すりもみ製造プラントの全景とすりもみ製造機の写真を写真-1に示す。すりもみ製造プラントは投入ホッパーとすりもみ製造機、振動ふるい、集塵機から構成される。再生骨材の需給バランスに合わせた設置を可能にするため、すりもみ製造プラントは可搬式であり、各機器の取付位置が変更可能なベルトコンベヤで接続されているため、レイアウト変更が可能である。よって、敷地面積の小さいプラントでも設置可能なサイズ（約400m<sup>2</sup>、バスケットボールコート1面分）とした。

#### (2) すりもみ製造機

すりもみ製造機の概要<sup>8)</sup>を図-1に示す。製造機は偏心ローター式である。シェルの中にエッジのついた円筒部（以下、ローター）が偏心して配置されている。ローターとシェルは反対に回転して骨材をすりもむ構造となっている。再生骨材に付着しているアスファルト量（以下、旧As量）は再生骨材の投入量と、ローターとシェルの回転数などを変更し、調整が可能である。

#### (3) 製造手順

すりもみ骨材の製造方法を図-2に示す。本検討では再生骨材13-5mmを原料とした。ホッパーに投入した再生骨材13-5mmはベルトコンベヤですりもみ製造機へ連続的に投入される。すりもみ製造機で擦り揉まれた骨材は振動ふるいと集塵機を用いて、13-5mm（以下、すりもみ13-5mm）と5-0.075mm（以下、す

表-1 すりもみ製造装置の仕様

製造方式	乾式すりもみ方式
処理能力 [t/h]	30
面積 [m <sup>2</sup> ]	390 (30m × 13m)
動力*	電気式

※グリーン電力使用



(a) プラント全景



(b) すりもみ製造機の外観

写真-1 すりもみ製造プラント

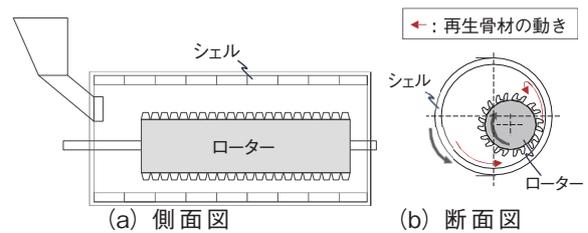


図-1 すりもみ製造機概要<sup>8)</sup>

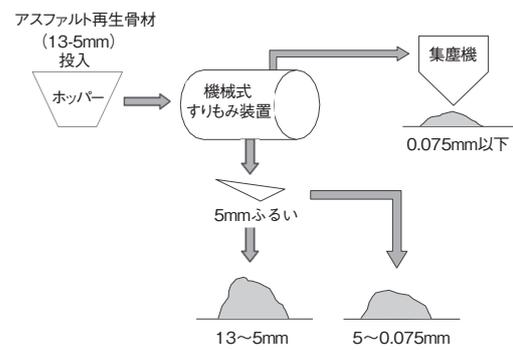


図-2 すりもみ骨材製造方法

りもみ 5-0mm)、0.075mm 以下 (以下、ダスト) の 3 種類に分類される。製造後のすりもみ骨材の外観を写真-2 に示す。

4. すりもみ骨材の品質確認

(1) すりもみ骨材の製造 (旧 As 量)

再生骨材 13-5mm (旧 As 量 2.6%) を用いて製造したすりもみ 13-5mm を写真-3 に示す。すりもみ 13-5mm の旧 As 量は 0.6% であった。すりもみ製造機の設定によって、目標の旧 As 量 1.0% 以下で製造可能であった。

すりもみ骨材の各粒度比率と旧 As 量を表-2 に示す。すりもみ骨材は 13-5mm が約 50%、5-0mm が約 35%、ダストは約 15% の割合で製造され、各々の旧 As 量は、13-5mm は 1% 以下、5-0mm は約 2.5%、ダストは約 10% と最も多く旧 As 量を含んでいる。これは、再生骨材 13-5mm を擦り揉むことによって、取り除かれたアスファルト分は細粒分へ移行していることがわかる。



写真-2 すりもみ骨材



写真-3 再生骨材とすりもみ骨材の外観

表-2 すりもみ骨材の比率と旧 As 量

粒径 (mm)	比率 [%]	旧 As 量 [%]
13-5	50	0.90
5-2.5	17	1.64
2.5-1.0	8	2.45
1.0-0.05	10	2.66
ダスト	15	10.00

(2) すりもみ 13-5mm の性状

a) 骨材粒度

すりもみ 13-5mm の粒度曲線を図-3 に示す。すりもみ 13-5mm は新規骨材の 6 号碎石に比べて、13.2mm 通過百分率が約 20% 多く、最大粒径は 9.5mm となっており、粒度が細かくなっている。これは骨材同士のすりもみ作用によって原石部分が擦り減ったためである。

b) 骨材性状

すりもみ 13-5mm の骨材性状の試験結果を表-3 に示す。すりもみ 13-5mm の最大粒径は約 10mm、細長・偏平は新規骨材 6 号碎石の約 1/2 であった。単位体積質量(実績率)は、6 号碎石に比べて約 2% 大きい値を示した。これはすりもみ作用により細長・偏平が改善され、球形に近づいたためと考えられる。吸水率やすりへり減量、安定性は 6 号碎石と同等の値を示し、目標値を満足する結果を得た。軟石量は、目標値を満足することができなかった。理由として、すりもみ骨材の軟石として判断された部分(ひっかき跡が残った部分)は、すりもみ 13-5mm に残存しているアスファルトの被膜であり、軟石と判断した。すりもみ 13-5mm の残存アスファルトがない原石表面で試験を行った場合、ひっかき跡は有さず、軟石ではなかった。今後、適切な評価方法を検討する。

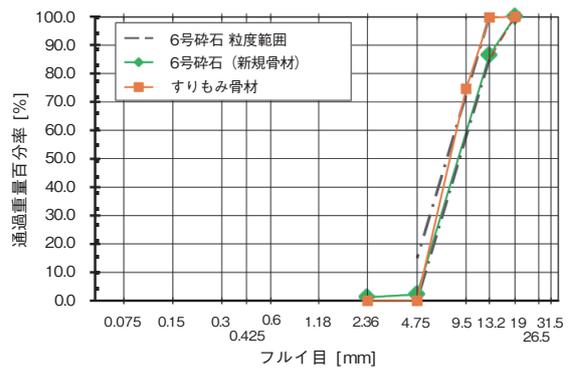


図-3 すりもみ 13-5mm の粒度曲線

表-3 すりもみ骨材 13-5mm の性状結果

項目	すりもみ骨材	新規骨材 6号砕石	目標値
最大骨材粒径 [mm]	10	13	-
細長・扁平石片 [%]	0.2	2.6	10.0 以下
単位体積質量 (実績率) [%]	60	58	57 ~ 61
軟石量 [%]	23.2	2.3	5.0 以下
表乾比密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	2.605	2.630	2.450 以上
見かけ比密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	2.637	2.670	-
最大密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	2.641	-	-
吸水率 [%]	0.76	0.70	3.0 以下
すりへり減量 [%]	13.7	13.5	30 以下
安定性 [%]	9.6	-	12 以下

### 5. すりもみ骨材を用いたアスファルト混合物の性状

すりもみ 13-5mm、すりもみ 5-0mm、ダストを用いたアスファルト混合物の性状の確認を行った。

#### (1) すりもみ 13-5mm を用いたアスファルト混合物

6号砕石をすりもみ 13-5mm に置換したアスファルト混合物の性状を確認した。試験結果を表-4 に示す。検討は密粒度アスファルト混合物(13) (以下、密粒アスコン)と半たわみ性舗装用アスファルト混合物 (13) (以下、半たわみ用アスコン)、透水性アスファルト混合物 (13) (以下、透水アスコン) の3種類である。

##### a) 密粒アスコン

密粒アスコンは6号砕石の使用割合が40%程度であり、一般的な舗装材料であるため、検討対象とした。試験結果(表-4)より、すりもみ骨材を用いた密粒アスコン(以下、すりもみ密粒アスコン)は、動的安定度が1,500回/mm、圧裂強度比が28.3%を有しており、6号砕石を用いた密粒アスコン(以下、新規密粒アスコン)と同等以上の耐流動性とひび割れ抵抗性を示した。すえ切り抵抗性の評価指標であるねじり骨材飛散率は新規密粒アスコンに比べて、すりもみ密粒アスコンの方が良好な値を示した。

##### b) 半たわみ用アスコン

半たわみ用アスコンは6号砕石の使用率が60~90%程度と多く、すりもみ 13-5mm の使用率

表-4 混合物性状試験結果

	密粒アスコン			開粒アスコン		透水アスコン	
	新規骨材	すりもみ骨材	目標値	新規骨材	すりもみ骨材	すりもみ骨材	目標値
OAC [%]	5.3	5.1	-	3.5	3.5	改質II型	-
密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	2.383	2.394	-	1.978	1.967	2.170	-
空隙率 [%]	3.8	3.9	3~6	22.2	23.0	13.5	-
連続空隙率 [%]	-	-	-	20.3	21.3	9.0	-
飽和度 [%]	76.2	75.2	70~85				
安定度 [kN]	12.1	13.1	4.9 以上	4.6	4.6	8.4	3.4 以上
フロー値 [l/100cm]	29	31	20~40	24	27	26	-
動的安定度 [回/mm]	834	1,500	500~1,000			4846	-
残留安定度 [%]	90.0	93.5	75 以上			90.8	75 以上
ねじり骨材飛散率 [%]	57.6	15.9	-				
圧裂強度比	-	28.3	20~40				
カンタブロ損失率 [%] (20℃)				37.7	68.4	13.8	20 以下

を上げられるため、検討対象とした。また、半たわみ用アスコンにすりもみ骨材を用いることで、空隙率の確保が期待され、セメントミルクの注入を容易に行えることを想定し、検討対象とした。空隙率（22%程度）を目標とした。試験結果（表-4）より、すりもみ13-5mmを用いた半たわみ用アスコン（以下、すりもみ半たわみ用アスコン）は空隙率23%と6号砕石を用いた半たわみ用アスコン（以下、新規半たわみ用アスコン）と同等であった。よって、すりもみ半たわみ用アスコンは球形に近い骨材を用いることで適切なセメントミルクの注入量を確保することができ、半たわみ性舗装の良好な品質が期待できる。ただし、すりもみ半たわみ用アスコンは新規半たわみ用アスコンに比べ、カンタプロ損失率が約2倍大きい値であった。配合に関して、すりもみ半たわみ用アスコンは新規半たわみ用アスコンより新アスファルト量が少なく、骨材のかみ合わせが小さいため、骨材の飛散が多く生じたと推測される。

#### c) 透水アスコン

透水アスコンは6号砕石の使用率が多く、すりもみ13-5mmを用いることでリサイクル率の向上が図れるため、検討を実施した。すりもみ13-5mmを用いた透水アスコン（以下、すりもみ透水アスコン）は駐車場や構内での適用を想定し、空隙率13%程度を目標とした。アスファルトは改質アスファルトⅡ型を使用した。動的安定度は約5,000回/mmとなり、一般的な改質アスファルトⅡ型を使用した混合物と同等の結果を得た。カンタプロ損失率は約14%であり、骨材の飛散も少なく、目標値20%以下を満足することができた。

#### (2) すりもみ5-0mmとダストを用いたアスファルト混合物

すりもみ骨材を製造する際に発生するすりもみ5-0mmとダストの活用を検討するため、砕石マッシュ混合物（5）（以下、新規SMA（5））の適用を検討した。7号砕石と砂、石粉で構成される骨材配合のうち、約半分をすりもみ骨材に置き換え、室内で混合物性状の確認を行った。混合物性状の試験結果を表-5に示す。すりもみ5-0mmとダストには旧As量が3%程度含まれている為、すりもみ骨材に含まれる旧As量を加味し、配合設計を行った結果、ろ紙の付着具合より旧Asの溶解があまりみられなかったため、旧As量を加味せず配合設計を行った。よって、すりもみSMA（5）の最適アスファルト（以下、OAC）は新規SMA（5）に比べ、0.7%小さい値であった。性状試験結果（表-5）より、空隙率や安定度は目標値を満足していたが、今後はすりもみ5-0mmやダストに含まれる旧As量の性状も含め、今後検討を行う。

表-5 SMA(5)の混合物性状試験結果

	SMA(5)	すりもみ SMA(5)	目標値
OAC [%]	5.8	5.1	5.5 ~ 6.5
密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	2.35	2.288	
空隙率 [%]	3.8	4.4	3 ~ 7
安定度 [kN]	11.05	12.4	4.9 以上
フロー値 [1/100cm]	34	25	

#### 6. すりもみ骨材を使用したアスファルト混合物の試験施工

すりもみ13-5mmを用いた密粒アスコンと半たわみ用アスコンの試験施工を実施した。両混合物で使用したすりもみ13-5mmは新規骨材用のドライヤを通して、ホットビンに貯蔵した。加えて、すりもみ13-5mmの旧As量はバラツキを考慮して調整し、約1.5%とした。密粒アスコンは6号砕石をすりもみ13-5mmに40%置換えた。半たわみ用アスコンは6号砕石と7号砕石をすりもみ13-5mmに91%置換えた。

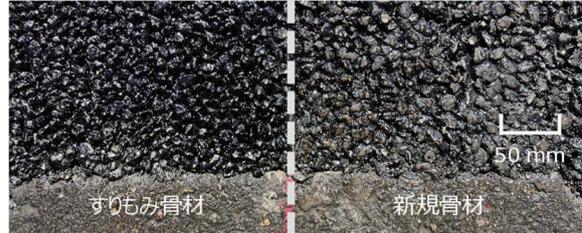
試験施工を実施した結果、両混合物ともに良好な施工性を確認することができた。施工状況を写真

－ 4 に、半たわみ用アスコンの路面写真を写真－ 5 に示す。半たわみ用アスコンの連続空隙率を表－ 6 に示す。室内で作製したマーシャル供試体と現場施工後の抜き取りコアにて確認を行った結果、両混合物ともに空隙率は 24 ～ 25% を示し、施工性は良好であった。

半たわみ用アスコンの供用半年後の追跡調査の結果を表－ 7 に示す。半たわみ用アスコンとすりもみ半たわみ用アスコンは、ほぼ同様の値を示しており、供用性に関して問題なかった。



写真－ 4 施工状況



写真－ 5 半たわみ用アスコンの写真

表－ 6 半たわみ用アスコンの連続空隙率

項 目		新規骨材	すりもみ骨材
連続空隙率 [%]	マーシャル供試体	23.8	25.0
	抜き取りコア	24.1	25.1

表－ 7 半たわみ用アスコンの追跡調査の結果

項 目		新規骨材	すりもみ骨材
すべり抵抗性 (BPN)	施工直後	52	54
	6ヶ月後	65	63
わだち掘れ量 [mm]	施工直後	－	－
	6ヶ月後	0～3	0～2
耐油性	施工直後	－	－
	6ヶ月後	良好*	良好*
ひび割れ	施工直後	－	－
	6ヶ月後	良好*	良好*

※油による路面の汚れは見られるが、損傷は見られない。

## 7. CO<sub>2</sub> 排出量の検討

すりもみ骨材の CO<sub>2</sub> 排出量について試算<sup>9)</sup>を行った。試算結果を表－ 8 に示す。6号碎石と比較して、再生骨材の製造を含めたすりもみ骨材の製造時の CO<sub>2</sub> 排出量は新規骨材に比べて、40% 削減が見込まれる。かつ、輸送を加味した場合、プラント施設内で製造を行うため、運搬が不要であり、骨材 1t あたりの CO<sub>2</sub> 排出量は 63% の削減が見込まれる。

表－ 8 CO<sub>2</sub> 排出量の試算結果

項目	材料	新規骨材 (6号碎石)	すりもみ骨材	差異 [kg-CO <sub>2</sub> /t]	差異 [%]
		[kg-CO <sub>2</sub> /t]	[kg-CO <sub>2</sub> /t]		
素材	(原料)	7.98	(2.24)	- 3.23	- 40%
	(製造)		(2.51)		
輸送 (L=20km)		4.82	0	- 4.82	- 100%
合計		12.8	4.75	- 8.05	- 63%

※処理能力 30 t/h とした場合

## 8. まとめ

本検討では、舗装発生材の永続リサイクルを最終目標として、再生骨材のすりもみ製造装置を開発した。得られた知見を以下に示す。

- すりもみ製造装置は必要面積が小さく可搬式とし、場所によらず設置できた。
- すりもみ骨材 13-5mm を用いた混合物は、新規骨材混合物と同等の品質が確保でき、舗装としての利用が可能であった。
- 乾式のすりもみ方式を採用することによって、CO<sub>2</sub> 排出量の削減等の製造過程での環境負荷を抑制することができた。

今後の課題を以下に示す。

- すりもみ骨材 13-5mm を用いた施工現場での長期供用性を確認する必要がある。
- すりもみ条件の設定において、解析シミュレーションを用いコスト抑制と効率化を図る。
- すりもみ骨材を用いた場合の配合設計に関して、室内配合をプラント配合に修正する際の最適アスファルト量の決定方法などを確立する必要がある。
- すりもみ骨材 5-0mm やダストを活用した新技術の開発が必要である。

最後に、すりもみ骨材 5-0mm とダストを含め、すりもみ骨材の全てを有効利用できた時、舗装発生材の新しい永続リサイクルの一つの手法となることを期待している。

---

### 【参考文献】

- 1) 国土交通省：環境行動計画，2021.
- 2) 国土交通省：平成 30 年度建設副産物実態調査結果 参考資料，2018.
- 3) Heukelom, W. and Klomp, A. J. G. : Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements during and after Construction, Proc. of Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, pp.635-652, 1962.
- 4) 国立研究開発法人 土木研究所：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，pp.14-17, 2024.
- 5) 山田優：舗装用骨材資源の有効利用について，骨材資源，No.163, 2009.
- 6) 藤森章記，佐野正典，鹿嶋久義，荒木誠：排水性舗装発生材中の粗骨材を再活用した再生排水性舗装の性状，土木学会第 63 回年次学術講演会，V-049, 2008.
- 7) 石倉武，最首貞典，助清満昭，友澤史紀：高品質再生骨材製造技術の開発，コンクリート工学，Vol.37, No.7, pp.16-23, 1999.
- 8) 信太秀臣：破砕研磨装置及びこの装置を用いた汚染土壌などの処理方法，新六精機株式会社，JP4970756, 2007.
- 9) 公社) 日本道路協会：舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック－CO<sub>2</sub> 排出量低減値および最大流出量比の算定例－，2014.