

繰り返し再生を考慮した旧アスファルトの再生方法に関する研究

長岡技術科学大学大学院 交通工学研究室 岩崎 友哉

1. はじめに

建設業界において、一般的な建設工事やインフラの再構築によって発生した建設廃棄物の再資源化が推進されており、2018年時点で建設廃棄物全体の再資源化率は95%を超えている。アスファルト舗装の分野では、維持修繕工事の際に発生するアスファルトコンクリート（以下、アスコン）塊の再資源化が積極的に進められている。アスコン塊の再資源化率は、1990年代後半から急激に増加して2000年以降は98%を超えており¹⁾、他の建設廃棄物に比べて高水準で再資源化が行われている。

現在、我が国では、道路等の維持修繕工事で排出されるアスファルト廃材を回収し、アスファルト混合物に再利用する取り組みが広く普及している。近年では、アスファルト混合物の全製造量に占める再生混合物の割合が70%を超えており、再生骨材の繰り返し利用が増加している。

現行の再生骨材の利用方法として、再生骨材に再生用添加剤を浸透させることで、再生骨材に被膜している旧アスの性状を回復させて再生アスコンを製造すること一般的である。しかしながら、繰り返し再生利用や低針入度の再生骨材を考慮する場合、再生用添加剤の添加量が過剰になり、組成が著しく変化することが確認されている。旧アスの柔らかさは改善されても、骨材粒子をつなぐ粘着力は改善されずに、再生アスコンで構築した舗装は供用中にひび割れが発生しやすくなることが知られている²⁾。

本研究では、我が国で一般的に使用されているナフテン系の再生用添加剤に、再生効果を補う添加物として、改質アスで実績のある熱可塑性エラストマー（ポリマー）を加え、その再生用添加剤（以下、複合型再生用添加剤）を使用した場合の、性状回復効果を評価するとともに、複合型再生用添加剤による繰り返し再生の有効性について検討を行った。

再生用添加剤にポリマー等の改質剤を添加した場合の再生効果への影響に関する研究は海外でも行われており、既往の研究³⁾では、アロマ系オイルにポリマーをブレンドしたものを使用することによって、劣化したアスファルトバインダの再生と改質を同時に行うことができると報告されている。しかしながら、研究で使用したストレートアスファルトや再生用添加剤等の性状は一切明らかにされておらず、我が国で一般的に使用されているものとは異なる。また、本研究で対象とする、基準外再生骨材を使用した場合や繰り返し再生利用への影響に関しては検討されていない。以上のことから、本研究の目的は、基準外再生骨材に対する複合型再生用添加剤の再生効果を評価し、繰り返し再生時におけるナフテン系の再生用添加剤およびポリマーが及ぼす影響について知見を得ることである。本研究では、繰り返し再生において性状の低下が懸念されている粘結力について、Force Ductility Testを実施して複合型再生用添加剤の再生効果について評価した。

2. 評価試験要領

2.1. 試験材料

本研究では、新規のアスファルトとしてストレートアスファルト（以下、ORG）、一般的な基準外再生骨材の旧アスファルトと同程度まで加熱促進劣化させたアスファルト（以下、劣化アスファルト）、および我が国で広く普及しているナフテン系の再生用添加剤（表-1）を使用して検討を行った。

ポリマーには表-2 に示す物性の異なる 9 種類のポリマーを使用した。ポリマーa~d は SBS (スチレン-ブタジエン-スチレン・ブロック共重合体)、ポリマーe~g は SEBS (スチレン-エチレン-ブチレン-スチレン・ブロック共重合体) である。また、本研究ではアスファルトの改質用に開発された特殊なポリマーh, i についても検討を行った。

SBS は改質アスで一般的に使用されるポリマーである。SBS をストレートアスファルトに混合するとアスファルトがゴム弾性を発現するようになり、軟化点や粘度が上昇してアスコンの変形抵抗、たわみ性などが向上する。また、アスファルト中のマルテン成分 (飽和分, 芳香族分, レジン分) がポリマーに吸収され、SBS の場合は、体積が 5~7 倍に膨潤する。ポリマー混合量が少ない場合はアスファルトの中にポリマーが分散した系で存在するが、ポリマー混合量を増やしていくとポリマーが膨潤することによりポリマー体積が増加し、混合量が概ね 7%以上になると相転移を起こして SBS の中にアスファルトが分散した系となる。混合量が少ない領域では、改質アスはアスファルトの性質が強くなり、混合量が多い相転移した領域では、SBS の性質が強くなる⁴⁾。

SEBS は SBS に水素を添加したポリマーである。SBS のブタジエン部分の C=C 二重結合に水素を添加することにより、エチレンとブチレンのブロックが形成され、耐熱老化性 (熱安定性) が向上する。

ポリマーh, i は SEBS 同様水素を添加したポリマーであるが、官能基や水素結合に特殊な処理を加えることで骨材への接着力や、アスファルトとの相溶性が向上することが確認されている。ポリマーh はポリマーi と比較して分子量が多く、改質効果が顕著になると考えられる。

表-1 添加剤の組成比および性状

		添加剤 1
組成比 (%)	飽和分	79.9
	芳香族分	15.3
	レジン分	4.8
	アスファルテン分	0
動粘度 (60°C)	mm ² /s	82.6
引火点	°C	265
密度 (15°C)	g/cm ³	0.91

表-2 各ポリマーの物性

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
スチレン/ブタジエン (ブチレン) 比	30/70	35/65	45/55	40/60	20/80	30/70	47/53	30/70	38/62
密度 g/cm ³	0.94	0.94	0.95	0.95	0.89	0.91	0.94	0.91	-
硬さ ° Shore A	75	80	83	85	56	69	93	89	-
伸び 1A %	890	1150	880	1100	700	780	700	600	-

2.2. FDTによるバインダ評価方法

Force Ductility Test (以下, FDT) は AASHTO T300 や EN 13589, EN 13703 で規格化されており, バインダの変形抵抗性 (粘結性能) を評価することができる試験法である. この試験では, 伸度試験機にロードセルを取り付けて, 供試体の伸長時の荷重と変位を測定することによって, 荷重-変位曲線が得られる. 当研究室では, 評価指標として, タフネス・テナシティ試験から得られるテナシティに相当する部分の面積を FD (N・mm), 曲線の原点から最大荷重までの部分の面積を DR (N・mm) と定義して, これら二つの指標からバインダレベルでの評価が行われてきた^{4), 5)}.

既往の研究にて, DR 値はバインダの引張抵抗性を示しており, 圧裂係数と相関があるとされている⁶⁾. また, FD はバインダの粘結力を示しており, アスコンの疲労破壊抵抗性 (疲労破壊回数) と相関があるとされている^{7), 8)}. ストレートアスファルトの場合, 劣化に伴い DR は増加し, FD 値は減少することが確認されている.

3. 試験結果および考察

3.1. 高分子材料の種別による検討

本説では異なる高分子材料を用いた複合型再生用添加剤による劣化アスファルトの再生を行いポリマーによる改質効果の違いについて検討した. ポリマーの物性による影響を評価するために, ナフテン系の再生用添加剤にポリマーa~i を混練したものを使用して, 供試体を作製した. 添加剤の添加量は設計針入度 70 (1/10mm) になるように調整し, ポリマーの配合率は再生用添加剤に対して内割 5% 添加とした. また本検討では高分子材料による性状の変化を顕著にするため新規アスファルトを加えない再生骨材配合率 100% で再生アスファルトの作製を行った.

SBS の FD を図-1 に, SEBS の FD を図-2 にそれぞれ示す. なお, 比較対象として再生用添加剤のみを使用した場合の結果も図に示している. SBS の FD については, 図-1 より, ポリマーb, c のみ通常の再生アスファルトよりもわずかに大きく, ポリマーa については通常の再生アスファルトと同等で, ポリマーc については通常の再生アスファルトよりも小さいという結果となった. SEBS の FD については, 図-2 より, ポリマーi が新規アスファルトと同程度まで増加し, ポリマーe, f, h は通常の再生アスファルトよりもわずかに大きく, ポリマーg はわずかに小さいという結果となった.

SBS のスチレンブロックは物理架橋点となってポリマーのネットワークを形成する役割があり, ブタジエン (ブチレン) ブロックはゴム弾性を発現させる役割がある. このことを考慮すると, ブタジエン (ブチレン) 比率が高い (スチレン含有率が少ない) ほど, ゴム弾性によって粘結力が向上し, 疲労破壊抵抗性が上昇すると予想される. しかしながら, 本検討で最も高い FD の再生効果が確認できたポリマーi についてはこの予想と異なっており, ポリマーi の高い再生効果について明らかにする必要がある.

ポリマーi の高い再生効果についてアスファルトの成分とポリマーの相溶関係によるものと考えられる. アスファルトのマルテン成分はポリマーのブタジエン (ブチレン) ブロックと優先的に部分相溶し, アスファルテン分はポリマーのスチレンブロックと部分相溶する⁴⁾. 高い再生効果が確認できたポリマーi は本来なら相溶性が低くなる高分子量のグレードでありながら, 水素添加と官能基の改良によりアスファルトの各成分と相溶しやすいという性質を持っており, 今回のような少量の添加でも高い再生効果が発言したと考えられる.

以上より、再生用添加剤と混練するポリマーの物性によって、再生効果への影響は異なり、ナフテン系の再生用添加剤にSBSを添加した場合、ブタジエン（ブチレン）含有率が高いほど再生効果が高いことがわかった。また、アスファルトとポリマーの相溶性が良いほど、ポリマーがアスファルトの再生を阻害することなく、効果的に再生に寄与できると予想される。

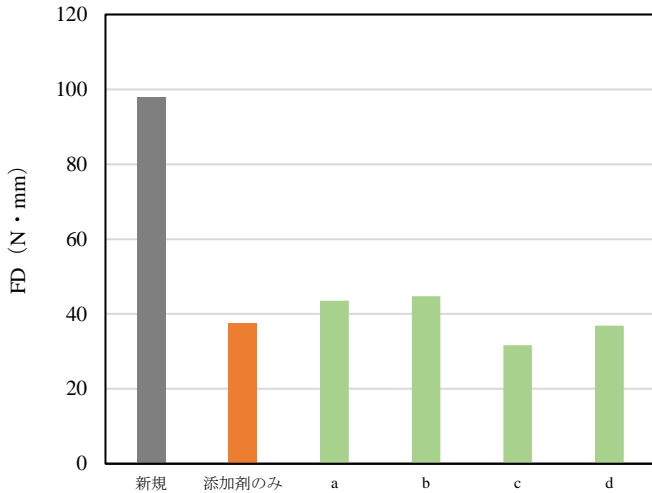


図-1 SBS FDT 試験結果 FD

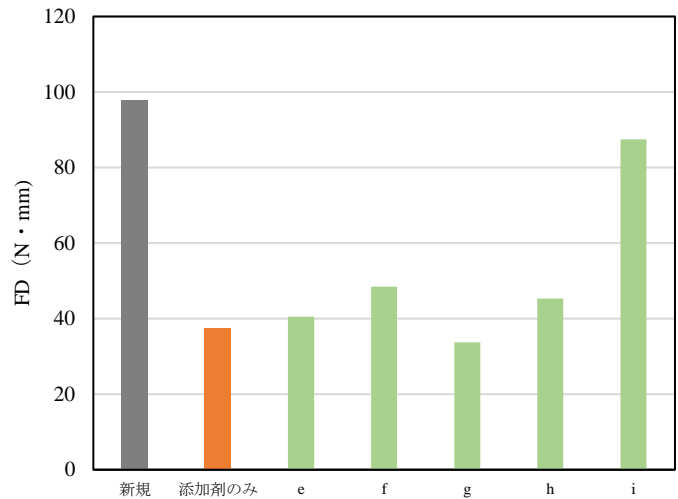


図-2 SEBS FDT 試験結果 FD

3.2. 繰返し再生を考慮した検討

本節では、再生骨材配合率 50%を基準に劣化アスファルトの繰返し劣化・再生を行った。本検討では添加剤の添加量は設計針入度 72 (1/10mm) になるように調整し、通常のナフテン系の添加剤に前節で高い再生効果が確認できたポリマー i を 3%、5%、7%加えたもの（以下、複合型再生用添加剤 3%、複合型再生用添加剤 5%、複合型再生用添加剤 7%）と加えていないもの（以下、通常の再生用添加剤）でアスファルトの再生を行い評価試験結果について比較検討した。現在、我が国では再生アスコンを作製する際、再生骨材配合率 50%が平均的に用いられており、現在の舗装の再現と今後の検討のため再生骨材配合率 50%を基準として繰返し劣化・再生を行った。

各再生後のアスファルトの性状結果として、DR、FD をそれぞれ図-3、図-4 に示す。なお、比較対象として通常の再生用添加剤のみを使用した場合の結果も図に示している。

図-3 より、通常の再生用添加剤を用いた再生アスファルトの DR は、2 回目の劣化・再生までは増加しているが、それ以降の繰返し再生に伴って減少している。これに対して、複合型再生用添加剤 3%、5%、7%を使用した再生アスファルトの DR は、それぞれ 3 回目、3 回目、4 回目の劣化・再生までは増加しているが、それ以降の繰返し再生に伴って減少している。これについては、以下のことが要因と考えられる。本研究で使用したポリマーに含まれるスチレンは、アスファルトに含まれるアスファルテンを吸着して膨張する。アスファルテンは熱劣化に伴って増加する成分の一つであり、固く脆いアスファルテンに、ポリマーに含まれるスチレンを結びつけることで架橋し、アスファルトの改質に寄与することになる。本研究で使用したポリマーは水素結合を有する SEBS に分類され、熱劣化には強いが、著しく劣化した場合は、架橋が生成されず、改質効果が失われることが知られている。

繰り返し再生に伴って増加したアスファルテンとそれを吸着した SEBS により、劣化初期は DR が増加するが、アスファルテンを過度に吸着した SEBS が熱劣化を受け、架橋を失ったことでポリマーの改質効果が弱くなり、DR が減少したためと考えられる。以上の考察から、図-3 の結果について、ポリマー配合率が高いほど、ポリマー相の影響が顕著になり、架橋が長時間維持された結果であると考察できる。

図-4 より、通常の再生用添加剤を用いた再生アスファルトの FD は、1 回目の再生時に大きく低下し、繰り返し劣化・再生に伴って徐々に低下している。複合型再生用添加剤 3%、5%を用いた再生アスファルトの FD も、繰り返し劣化・再生に伴って性状を徐々に低下しているが、FD の低下は通常の再生用添加剤を用いた再生アスファルトと比べるとわずかであり、繰り返し劣化・再生後も通常の再生用添加剤を用いた再生アスファルトの FD を上回っている。本研究で使用したポリマーは熱劣化に強く、官能基に改良を加えることでアスファルトとの相溶性や骨材との接着力が向上しており、繰り返し劣化・再生を行った場合でも高い再生効果が発現したものと考えられる。また、複合型再生用添加剤 7%を使用した再生アスファルトの FD は他の再生アスファルトで確認された傾向と異なる。これは、アスファルト相からポリマー相へと相転移が進むことで、ポリマー優位の特性が現れたためであり、ポリマーが過剰に混合されることで、アスファルト本来の物性が失われ、再生用添加剤に期待する物性回復の妨げとなったといえる。

相転移による物性回復の妨げにならない範囲でポリマーを添加した場合でも、FD の回復効果は確認でき、本検討に使用したポリマーに関しては、相転移による物性回復の妨げにならない 5%が配合率として適していると考えられる。

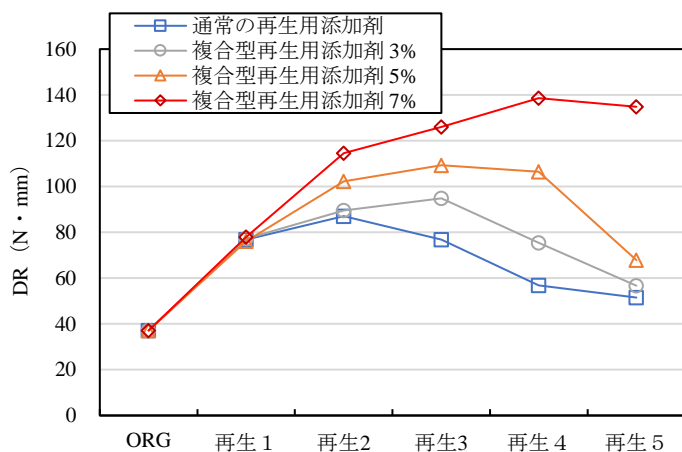


図-3 繰り返し劣化・再生 DR

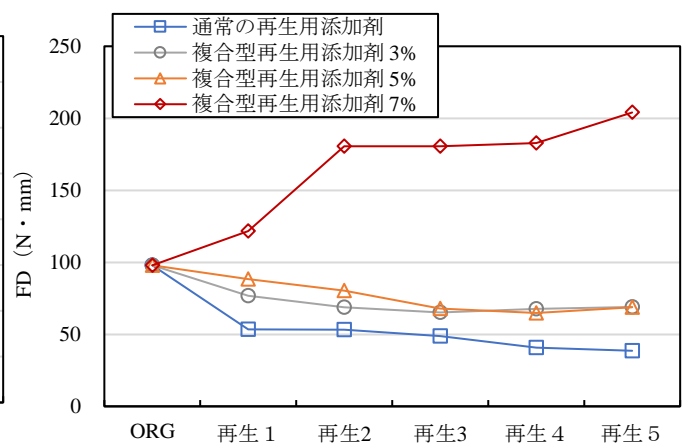


図-4 繰り返し劣化・再生 FD

4. まとめ

本研究では、旧アスファルトに対して複合型再生用添加剤を用いた、繰り返し再生を実施し、FDT により力学的性状を評価した。本研究によって得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- ① 再生用添加剤と混練するポリマーとして、分子量の多い相溶性に優れたポリマーを使用することで、

少量の添加でも高い改質効果が確認できた。これは、相溶性が優れることで、ポリマーがアスファルトの再生を阻害することなく、効果的に再生に寄与するためだと考察できる。

- ② FDT の試験結果より、ポリマー配合率が高いほど DR は大きくなり、DR が増加から減少に切り替わるまでの再生回数が多くなるという傾向が確認できた。これについて、ポリマー配合率が高いほど、ポリマー相の影響が顕著になり、架橋が長時間維持されたためだと考察できる。
- ③ 相転移による物性回復の妨げにならない範囲でポリマーを添加した場合でも、FD の回復効果は確認でき、本研究に使用したポリマーに関しては、相転移による物性回復の妨げにならない 5%が配合率として適していると考ええる。

参考文献

- 1) 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，報道・広報，https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/d11pdf/fukusanbutsu/jittaichousa/H30sensuskekka_sankou2.pdf, 2019.
- 2) 吉川晃平：再生用添加剤の違いが規格外再生骨材を使用した再生アスコンのひび割れ抵抗性に及ぼす影響，長岡技術科学修士論文，2021.
- 3) Wei Hong, Liantong Mo, Changluan Pan, Martin Riara, Mi Wei, Jizhe Zhang, Investigation of rejuvenation and modification of aged asphalt binders by using aromatic oil-SBS polymer blend, Construction and Building Materials, Vol.231, Article 117154, 2020.
- 4) (一社)日本改質アスファルト協会：ポリマー改質アスファルトとは，ポリマー改質アスファルトポケットガイド，pp.9-11, 2020.
- 5) 栗林将之：規格外再生骨材を配合したアスファルト混合物の再生方法とひび割れ抵抗性に関する研究，長岡技術科学大学修士論文，2020.
- 6) 鈴木辰徳：バインダの粘弾性を考慮した再生骨材の品質評価法についての研究，長岡技術科学大学修士論文，2014.
- 7) 本山正樹：アスファルトバインダのレオロジー特性に着目した再生用添加剤の添加量に関する研究，長岡技術科学大学修士論文，2017.
- 8) 中村健，藤井政人：新たな評価指標に基づく改質アスファルト混合物の再生方法に関する検討，舗装 Vol.46, No.4, pp.15-19, 2011.