

海外炭フライアッシュの道路用フィラーへの適用性

Applicability of Fly Ash Produced from Imported Coals as Filler in Asphalt Mixtures for Roads

北海道電力㈱ ○正 員 村田 浩一 (Koichi Murata)
北海道電力㈱ 正 員 横辻 幸 (Osamu Yokotsuji)
北電総合設計㈱ 正 員 岡島 尚司 (Naoji Okajima)
北海道工業大学 正 員 笠原 篤 (Atsushi Kasahara)

1. はじめに

アスファルト混合物中のフィラーは、骨材間隙の充填や混合物の耐久性・耐摩耗性を向上させるなどの役割を担っており、一般的に石灰石粉（以下、石粉という）が使用されている。しかしながら、石粉は製造に相当の労力を要する有限鉱物であるため、環境保全の観点から、産業副産物であり、かつ発生量がフィラー消費量と近い水準にあるフライアッシュの有効利用が期待されている。我が国においても過去に多くの適用研究が実施されており、フライアッシュの使用は特に問題とはならないとの結論が得られている。しかしながら、これらの研究は、品質の安定した国内炭フライアッシュを対象としたものがほとんどであり、石炭火力燃料として品質変動の大きな海外炭を使用している現状では、フライアッシュの品質変動による配合への影響など未解明な部分も多く、本格的な利用には至っていない。

本報告は、海外炭フライアッシュの道路用アスファルト混合物フィラーへの適用を目的として、道路用混合物の要求性能のうち特に重要となる供用時のわだち掘れに対する抵抗性（以下、わだち掘れ抵抗性という）および低温時のひび割れ抵抗性（以下、低温ひび割れ抵抗性という）に関する検討結果をまとめたものである。

2. 検討概要

アスファルト舗装分野における現行の配合設計手法は、石粉の使用を前提とした経験則に基づくものであり、フライアッシュの適用性評価にあたってそのまま用いることは困難であると考えられる。また、舗装分野においても材料規定から性能規定への移行が進められており、力学評価による要求性能の照査が求められつつある。

このような背景から、本報告ではフライアッシュを使用する場合の配合設計手法の確立も視野に入れ、わだち掘れ抵抗性や低温ひび割れ抵抗性などの混合物性状を力学的に評価可能な SHRP 試験^{1),2)}を導入し、石粉を使用したアスファルト混合物との比較や混合物性状に影響を与えるフィラーの品質要因に関する検討を実施した。

(1) 使用材料

試験で使用したフィラーは、北海道電力㈱苫東厚真火力発電所 2 号機から発生するフライアッシュの中から、粒度分布や粒子形状などを評価するうえでの代用特性と考えられる充填率（＝密かさ比重／真比重）およびブレン比表面積を指標に選定した 3 種類のフライアッシュと比較検討用の石粉 1 種類である。なお、密かさ比重の算出法は長瀧らの方法³⁾に準拠し、落下回数を 1,000 回としたときの値とした。表-1 に使用したフィラーの物

表-1 フィラーの物理性状

フィラー種別 物理性状		石 粉	フライアッシュ		
			A	B	C
通過重量 百分率 (%)	600 μm	100.0	100.0	100.0	100.0
	150 μm	94.0	99.0	98.0	99.0
	75 μm	85.0	95.0	93.0	97.0
比 重 (g/cm³)		2.70	2.19	2.17	2.16
充填率 (%)		60.4	65.3	63.8	58.7
ブレン比表面積 (cm²/g)		—	2,600	3,350	3,000

理性状を示す

アスファルトは積雪寒冷地域で使用されることの多い針入度 80~100 のストレートアスファルトを使用し、骨材は虻田郡京極町産の 6~7 号の安山岩砕石および砕砂、岩内郡岩内町産の細目砂（海砂）を使用した。

(2) 検討手順

本報告では、図-1 に示す手順で検討を実施した。最初に、フィラーの品質変動による配合への影響をより直接的に評価するために、骨材を含まないフィラービチューメン（アスファルト+フィラー）に着目し試験を実施し、フィラーアスファルト比（以下、F/A という）を決定した。続いて、現行の配合設計手法に基づき最適アスファルト量を求め、各種混合物試験によりわだち掘れ抵抗性および低温ひび割れ抵抗性について検討を実施した。以下に、詳細を示す。

①フィラーアスファルト比の決定

SHRP バインダー試験のうち、中温域（5~85℃）のレオロジー特性を評価可能な DSR 試験をフィラービチューメンに適用し、フィラーごとに F/A を決定する。

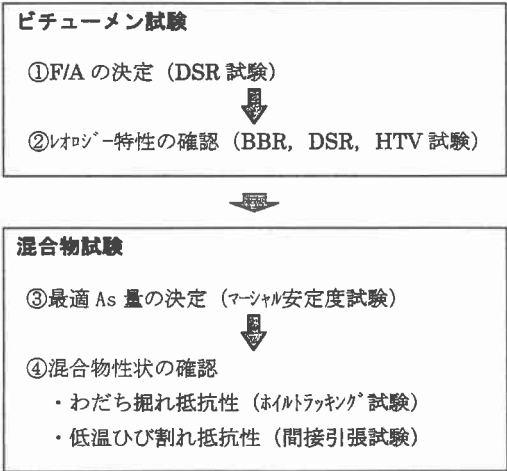


図-1 検討手順

②レオロジー特性の確認

①で決定した F/A を用いて、DSR 試験のほか、低温域 (-40～25℃) のレオロジー特性を評価可能な BBR 試験、高温域 (60～200℃) のレオロジー特性を評価可能な HTV 試験を実施し、幅広い温度域で各フィラービチューメンのレオロジー特性を比較する。

③最適アスファルト量の決定

現行の配合設計手法に基づき、密度測定およびマーシャル安定度試験から、最適アスファルト量を決定する。

④混合物性状の確認

わだち掘れ抵抗性および低温ひび割れ抵抗性について、それぞれホイールトラッキング試験、間接引張試験⁴⁾を実施し、各アスファルト混合物の比較を行う。

3. F/A の決定

(1) 試験概要

初めに、現在北海道で道路用混合物として多く使用されている密粒度アスコン 13F⁵⁾の配合において標準とされている F/A (重量比) =1.70 の石粉使用フィラービチューメン (以下、石粉ビチューメンという) のレオロジー特性を測定し目標値とする。フライアッシュ使用フィラービチューメン (以下、フライアッシュビチューメンという) の F/A は目標値と同値が得られる F/A とした。

F/A 決定の指標となるレオロジー特性は、DSR 試験により求められる $G^*/\sin \delta$ (G^* :複素弾性率、 δ :位相角) とした。なお、SHRP 研究により $G^*/\sin \delta$ はわだち掘れ抵抗性と密接な関係にあるとされている。試験温度は、北海道の夏期の路面温度を想定した 60℃とした。

試験用の試料は、ミキサーによりアスファルトを攪拌しながら、およそ 5 分間でフィラーを投入し、投入完了後 10 分間攪拌を継続し作製した。なお、混合温度はアスファルトの熱劣化の影響を抑制するため 135℃とした。

(2) 試験結果および考察

図-2 に F/A (重量比) と $G^*/\sin \delta$ の関係を示す。図より、フライアッシュビチューメンの F/A (重量比) と $G^*/\sin \delta$ の間には線形的な相関が認められる。このことから、フライアッシュビチューメンの F/A は、石粉ビチューメンの 60℃時の $G^*/\sin \delta = 8.25\text{kPa}$ と同値となる F/A を近似線から求めた。

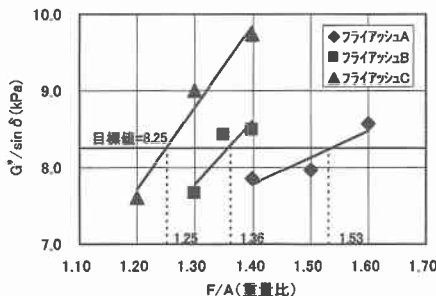


図-2 F/A (重量比) と $G^*/\sin \delta$ の関係

求められた F/A とフィラーの物理性状の関係を調べた結果、図-3 に示すように充填率と F/A (容積比) の間に相関が認められた。図より、石粉、フライアッシュのフィラー種別に係らず充填率の大きなフィラーを使用すると一定の $G^*/\sin \delta$ が得られる F/A (容積比) が大きくなることがわかる。すなわち、充填率の小さなフィラー

ほど少量の添加で $G^*/\sin \delta$ を大きくできるということになる。

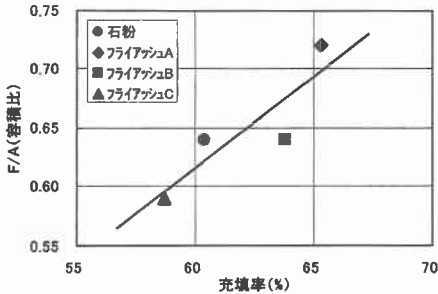


図-3 充填率と F/A (容積比) の関係

4. レオロジー特性の確認

(1) 試験概要

前章で求められた F/A を用いて、石粉ビチューメンとフライアッシュビチューメンのレオロジー特性を比較した。なお、フィラービチューメンの低温域、中温域、高温域におけるレオロジー特性は、それぞれ BBR 試験により求められるスティフネス (弾性体の弾性率に相当)、DSR 試験により求められる $G^*/\sin \delta$ 、HTV 試験により求められる動粘度 (=絶対粘度/比重) で評価した。

(2) 試験結果および考察

低温域および中温域のレオロジー特性を図-4、5 に示す。図より、各フィラービチューメンのスティフネス、 $G^*/\sin \delta$ に顕著な差異は認められない。このことから低温域、中温域といった温度領域においては、同程度のレオロジー特性が得られているものと判断される。

一方、高温域においては図-6 に示すように各フィラービチューメンの動粘度に差異が生じており、かつフライアッシュビチューメンの動粘度は石粉ビチューメンよ

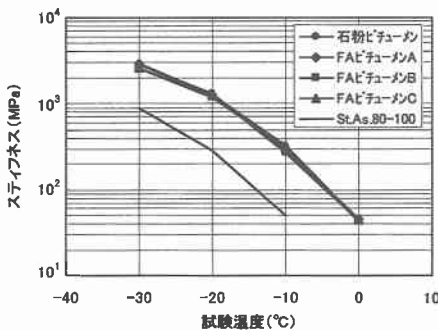


図-4 低温域のレオロジー特性比較

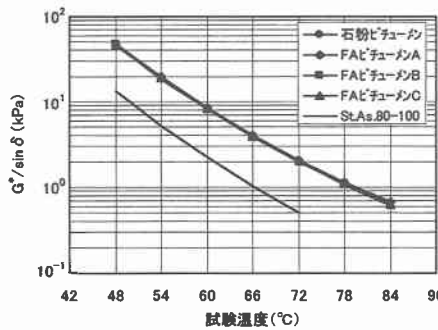


図-5 中温域のレオロジー特性比較

り大きくなる傾向にある。骨材との混合温度の目安である 160℃、転圧温度の目安である 140℃時の石粉ビチューメンと同程度の動粘度を得るためには、フライアッシュビチューメンはそれぞれ 5～15℃程度温度を上昇させる必要がある。このことからフライアッシュの使用により混合温度や転圧温度にも影響を及ぼす可能性があるため、今後検討を要するものと考えられる。

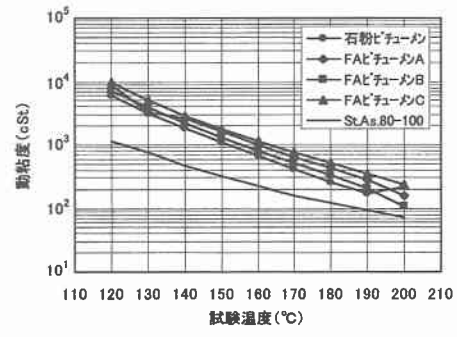


図-6 高温域のレオロジー特性比較

5. 最適アスファルト量の決定

(1) 試験概要

最適アスファルト量は、ビチューメン試験で決定した F/A を用いて、現行の配合設計手法に基づいて求めた。すなわち、マーシャル安定度試験により求まる安定度およびフロー値、密度測定により求まる空隙率および飽和度の各基準値を満足するアスファルト量の中央値を最適アスファルト量とした

配合設計は、北海道開発局による手引き 5)に基づいて実施した。なお、供試体は 152±5℃で手練り混合し、141±5℃でランマにより突き固めた。

(2) 試験結果および考察

試験結果を表-2 に示す。表は、混合物性状ごとに求められたアスファルト量の上限值および下限値をまとめたものであり、表中の網掛けは各フィラーにおけるアスファルト量の上限值・下限値を示している。

表-2 マーシャル安定度試験結果

		アスファルト量 (%)				
		空隙率	飽和度	安定度	フロー値	最適
石 粉	上限値	6.63	6.70	—	6.44	6.29
	下限値	6.04	6.14	—	—	
フライアッシュ A	上限値	6.19	6.39	6.82	6.40	5.99
	下限値	5.65	5.78	—	5.28	
フライアッシュ B	上限値	6.56	6.65	—	6.70	6.35
	下限値	6.03	6.14	—	5.56	
フライアッシュ C	上限値	6.80	6.89	—	6.94	6.50
	下限値	6.10	6.20	—	5.30	

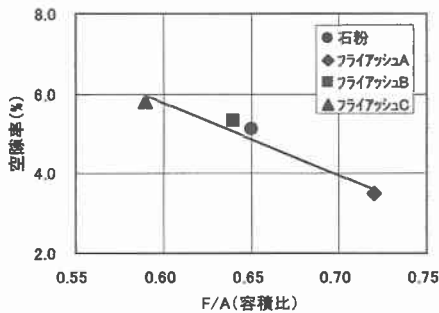
図-7 に、F/A (容積比) と混合物性状の関係の一例 (As 量 6.0%) を示す。図中の近似線は、フライアッシュ使用アスファルト混合物 (以下、フライアッシュ混合物という) のみの線形近似である。

空隙率および飽和度の図より、石粉使用のアスファルト混合物 (以下、石粉混合物という) の試験値は、ほぼ近似線上にあることがわかる。したがって、骨材間空隙の充填性能については、石粉とフライアッシュの間に大

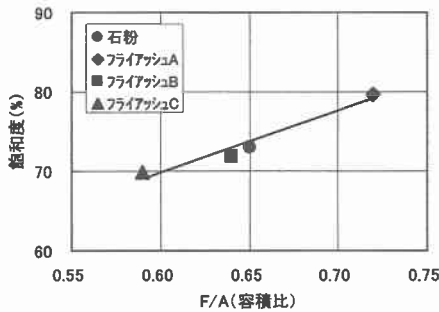
きな差はないものと判断される。

フロー値に関しても、空隙率および飽和度と同様に石粉混合物の試験値がほぼ近似線上にあり、混合物の変形性能に及ぼすフィラー種別の影響は大きくないものと判断される。

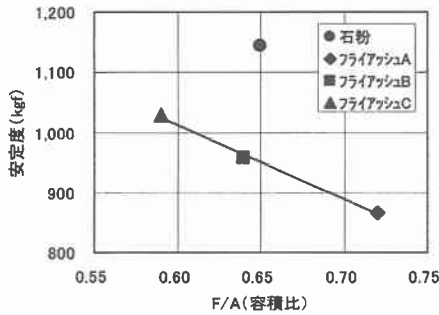
一方、安定度に関しては、石粉混合物の試験値が近似線に比べ高い位置にある。これは、石粉とフライアッシュの粒子形状の相違 (写真-1 参照) に起因する摩擦抵抗や付着性能の違い、化学的要因によるものと考えられるが、安定度の基準値である 500kgf は十分に満足する



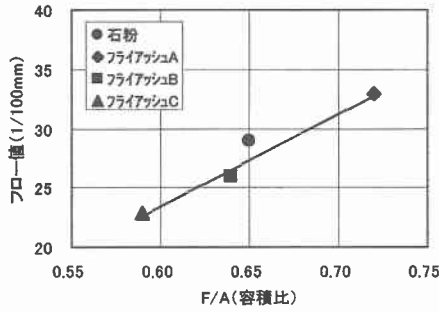
a. 空隙率



b. 飽和度



c. 安定度



d. フロー値

図-7 F/A (容積比) と混合物性状の関係

水準にあることから、特に重要な問題とはならないものと考えられる。

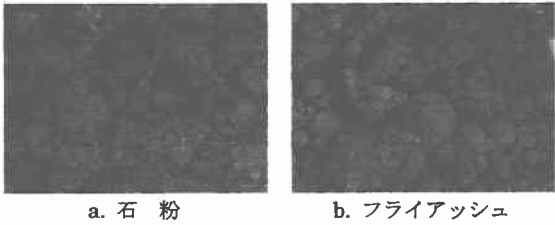


写真-1 粒子形状の違い

6. 混合物性状の確認

(1) 試験概要

石粉混合物およびフライアッシュ混合物のわだち掘れ抵抗性および低温ひび割れ抵抗性は、それぞれホイルトラッキング試験により求められる動的安定度、間接引張試験⁴⁾により求められる破壊ひずみを用いて評価した。なお、間接引張試験は再現できるひずみ速度が10⁻⁴~10⁻²/min程度であるため低温ひび割れ抵抗性を直接評価することは出来ないが、低温時の混合物性状の相対的な比較を目的として実施した。

供試体はマーシャル安定度試験と同様に152±5℃で手練り混合し、ホイルトラッキング試験用供試体はローラコンパクタ、間接引張試験用供試体はジャイレトリーコンパクタ(ラム圧=200kPa、旋回回数=15回)を用いて141±5℃で締め固めた。

(2) 試験結果および考察

表-3にホイルトラッキング試験の結果を示す。表より、フライアッシュ混合物は、石粉混合物と比較して動的安定度が20~45%程度小さくなるのがわかる。これは安定度と同様にフィラー種別による摩擦抵抗や付着性能の違い、化学的要因によるものと考えられる。また、ホイルトラッキング試験はn=3で実施しているが、動的安定度の変動係数が11.4~22.7%と非常に大きな値を示しており、データの信頼性向上のためにも、今後ホイ

表-3 ホイルトラッキング試験の結果

	動的安定度 (回/mm)	動的安定度 の比 (%)	変動係数 (%)
石 粉	162.9	100.0	20.4
フライアッシュA	132.3	81.2	22.7
フライアッシュB	88.9	54.6	11.4
フライアッシュC	102.6	63.0	18.2

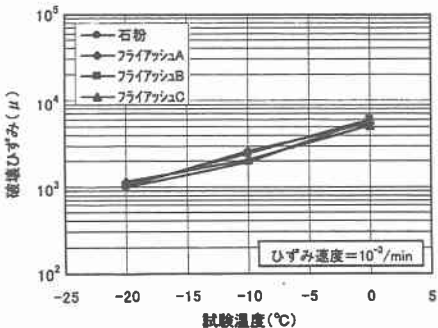


図-8 間接引張試験の結果

トラッキング試験に代る試験法の採用なども検討する必要があるものと考えられる。

間接引張試験の結果を図-8に示す。図より、石粉混合物とフライアッシュ混合物の破壊ひずみには顕著な差異は認められない。このことからフライアッシュの使用による低温ひび割れ抵抗性への影響は小さいものと推察される。

7. まとめ

本検討で得られた知見を以下に列挙する。

- ①フィラービチューメンのレオロジー特性を同等とするためのF/A(容積比)は、フィラー種別に係らず充填率と相関が認められた。
- ②低温域、中温域においては、各フィラービチューメンのレオロジー特性に顕著な差異は認められなかった。一方、高温域においては、フライアッシュビチューメンは石粉ビチューメンと比較して動粘度が大きくなる傾向にあった。
- ③空隙率、飽和度およびフロー値は、石粉混合物とフライアッシュ混合物の間に顕著な差異はなく、F/A(容積比)と相関が認められた。一方、安定度は、フライアッシュ混合物に限っては、F/A(容積比)との相関が認められたものの、石粉混合物と比較すると小さくなった。
- ④フライアッシュの使用により、混合物の動的安定度は小さくなった。
- ⑤フライアッシュを使用しても低温ひび割れ抵抗性への影響は認められなかった。

8. おわりに

本報告では、海外炭フライアッシュの道路用アスファルト混合物フィラーへの適用を目的として、道路用混合物の要求性能のうちわだち掘れ抵抗性および低温ひび割れ抵抗性に着目した検討を実施し、今後の検討に向けての貴重な基礎資料を得ることができた。

今後は、わだち掘れ抵抗性の改善検討や耐久性に関する検討、実証試験などを実施し、実用化に取り組んで行く予定である。

最後に、研究を進めるにあたり、ご協力をいただいた関係者各位に感謝の意を表します。

【参考文献】

1) 菅原 照雄: SHRPのアスファルト研究について、ペーテック研究会講演資料, 1994.
2) 新田 弘之: SHRP バインダー試験の測定原理と背景, ASPHALT, Vol.39, No.190, pp3-9, 1997.
3) 長瀬 重義, 大賀 宏行, 増田 和機, 谷 直樹: フライアッシュコンクリートの品質管理手法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集 9-1, pp223-228, 1987.
4) 中井 雅司, 浅沼 芳雄, 楠原 和典, 若本 貴宏: 水工アスファルト混合物の低温時力学的性状試験法, 電力土木 No.291, pp93-97, 2001.
5) 北海道開発局 建設部 道路建設課: 密粒度アスコン13Fの配合設定と施工に関する手引き, 北海道開発土木研究所月報 No.578, 2001.