

剥離抵抗性・水分感受性に着目したアスファルト混合物の影響評価

日大生産工(院) ○藤永 知弘 ワールド開発工業(株) 宮坂 大裕
日大生産工 加納 陽輔 日大生産工 秋葉 正一

1. はじめに

多くの構造物が大規模更新時期を迎えるなか、舗装の構造的劣化を加速させる一因として潜在的な剥離の進行が指摘されている。これは、アスファルト混合物（以下、混合物）が雨水や地中水に曝されることで、水分が骨材・アスファルト界面に介在し、アスファルトの結合力や骨材把握力を消失させながら剥離が進行し、混合物の耐久性低下、さらに舗装としての甚大な破損につながるものである。特に近年では、排水性舗装の基層用混合物、高速道路や空港滑走路等の重要・重交通路線をはじめ、ODA等の海外工事においても、剥離を伴う破損事例が数多く報告されており^{1),2)}、剥離の調査・評価法に加え、材料および工法の両側面から対策が急がれる。

アスファルト混合物の剥離は、親水性の骨材表面に水分が吸着することで、アスファルトの付着力が低下する骨材・アスファルト界面の"接着破壊"であり³⁾、それらの界面にはアンカー効果による機械的接合力や分子間力が作用していると考えられる。これを踏まえ、本研究では、まず骨材・アスファルト界面に作用する剥離の影響因子に着目し、国内外12種類の骨材を対象に物理・化学的性状を把握した。次に、アスファルトを被膜した各種骨材の剥離抵抗性を確認したうえで、特徴的な4種の骨材を配合した混合物を対象に各種力学試験より剥離抵抗性を評価した。

2. 使用材料

アスファルトには St.As.60/80（以下、ストアス）を使用し、骨材は日本国内で生産された6種類および海外で生産された6種類の合計12種類を供した。蛍光 X線成分分析による、二酸化ケイ素（SiO₂）含有分から推察した岩石の分類と基本性状を表-1に示す。

3. 骨材・ストアス接着の物理・化学的評価

2つの物体の界面がどのように接着されるかに関しては、従来、種々の説が唱えられており、例えば三刀⁴⁾によればアンカー効果、分子間力、化学結合、静電気、拡散、酸塩基相互作用などにより説明されている。本研究では骨材・アスファルト界面の接着に対し、アンカー効果と分子間力に着目して評価した。

(1) アンカー効果

骨材表面はアスファルトとの界面を形成し、テクスチャが細かい場合（表面積が大きい場合）、アンカー効果が大きくなる可能性があるなど、接着への直接的な影響が考えられる。ここでは、レーザ顕微鏡（OLYMPUS LEXT OLS4100）を用いて ISO25178-2 に示される三次元表面性状を測定し、各骨材の展開界面面積率 S_{dr} を把握した。表面性状パラメータを表-2に示す。

(2) 分子間力

a) 表面自由エネルギーの理論

2つの物体の界面には分子間力が作用していることから、接着剤や塗料等の開発では、これに着目した性能評価⁵⁾がなされており、

表-1 骨材の成分および性状一覧

サンプルID	Gr1	Gr2	Gr3	An1	An2	Di1	Di2	Ba1	Ba2	Sa1	Sa2	Li1
産地	岐阜県	ブルンジ②	スリランカ	長野県	佐賀県	カンボジア①	カンボジア②	ブルンジ①	ベトナム	茨城県	栃木県	栃木県
岩種	花崗岩	花崗岩	花崗岩	安山岩	安山岩	閃緑岩	閃緑岩	玄武岩	玄武岩	硬質砂岩	硬質砂岩	石灰岩
SiO ₂ (%)	71.1	98.5	75.0	57.9	56.4	57.2	57.2	51.5	50.2	71.2	88.3	0.4
CaO(%)	2.0	0.0	2.5	7.3	8.0	6.7	9.2	10.8	9.1	1.2	0.3	98.7
かさ密度 (g/cm ³)	2.603	2.592	2.877	2.634	2.628	2.760	2.747	2.899	2.827	2.641	2.630	2.692
表乾密度 (g/cm ³)	2.631	2.609	2.892	2.658	2.653	2.772	2.759	2.926	2.800	2.666	2.653	2.697
見掛密度 (g/cm ³)	2.679	2.673	2.920	2.722	2.719	2.794	2.780	2.978	2.809	2.707	2.692	2.730
吸水率 (%)	1.10	0.66	0.52	1.24	1.28	0.45	0.43	0.90	0.34	0.92	0.88	0.52
すり減り減量 (%)	14.2	46.4	35.0	14.1	13.4	11.8	12.1	22.6	12.9	20.3	8.4	24.8

Study on Asphalt Mixture Focusing on Stripping Resistance and Moisture Sensitivity

Tomohiro FUJINAGA, Tomohiro MIYASAKA, Yousuke KANOU and Syouchi AKIBA

表-2 表面性状パラメータ

Sample ID	Sq (μm)		A ₁ (μm ²)		A ₀ (μm ²)		Sdr (%)	
	二乗平均平方根高さ		展開面積		投影面積		展開界面面積率	
	Ave.	σ _{n-1}	Ave.	σ _{n-1}	Ave.	σ _{n-1}	Ave.	σ _{n-1}
Gr1	17.0	4.5	662627	7429	483086	304	37.2	1.5
Gr2	18.6	4.5	707327	75665	481332	1845	47.0	15.7
Gr3	24.9	1.0	925949	127585	483199	623	91.6	26.7
An1	18.4	5.2	913573	93048	484606	406	88.6	19.4
An2	12.7	0.6	918357	23570	483495	1140	89.9	5.1
Di1	11.6	4.0	1017631	40493	482503	1876	110.9	8.5
Di2	12.9	2.2	965450	66312	483614	350	99.6	13.8
Ba1	14.4	7.5	866764	122784	483905	444	79.1	25.2
Ba2	13.4	4.5	826625	35530	483204	406	71.1	7.5
Sa1	12.5	2.9	992235	58048	484022	563	105.0	11.8
Sa2	10.2	2.7	807399	79394	483685	865	66.9	16.1
Li1	8.4	2.4	783669	128057	484402	1489	61.8	25.9

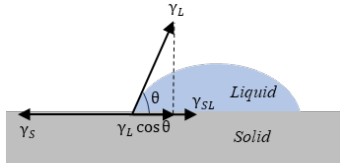


図-1 Young 式の模式図

表-3 試料の作製条件およびプローブ

供試体の作成方法																					
ストアス	表面温度60℃程度に加熱したアルミプレート上に溶融したストアスを滴下して気泡のない表面を作成する																				
骨材	#100, #800, #1500のダイヤモンドブレードで研磨したものをスライドガラスに固定する																				
表面自由エネルギー																					
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>γ_L (mJ/m²)</th> <th>γ_L^{LW} (mJ/m²)</th> <th>γ⁺ (mJ/m²)</th> <th>γ⁻ (mJ/m²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>蒸留水 (H₂O) CAS #7732-18-5</td> <td>72.80</td> <td>21.80</td> <td>25.50</td> <td>25.50</td> </tr> <tr> <td>ホルムアミド (CH₃NO) CAS #75-12-7</td> <td>58.00</td> <td>39.00</td> <td>2.28</td> <td>39.60</td> </tr> <tr> <td>ジヨードメタン (CH₂I₂) CAS #75-11-6</td> <td>50.80</td> <td>50.80</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> </tr> </tbody> </table>		γ _L (mJ/m ²)	γ _L ^{LW} (mJ/m ²)	γ ⁺ (mJ/m ²)	γ ⁻ (mJ/m ²)	蒸留水 (H ₂ O) CAS #7732-18-5	72.80	21.80	25.50	25.50	ホルムアミド (CH ₃ NO) CAS #75-12-7	58.00	39.00	2.28	39.60	ジヨードメタン (CH ₂ I ₂) CAS #75-11-6	50.80	50.80	0.00	0.00
	γ _L (mJ/m ²)	γ _L ^{LW} (mJ/m ²)	γ ⁺ (mJ/m ²)	γ ⁻ (mJ/m ²)																	
蒸留水 (H ₂ O) CAS #7732-18-5	72.80	21.80	25.50	25.50																	
ホルムアミド (CH ₃ NO) CAS #75-12-7	58.00	39.00	2.28	39.60																	
ジヨードメタン (CH ₂ I ₂) CAS #75-11-6	50.80	50.80	0.00	0.00																	

表-4 SFE 各成分および接着エネルギー

	γ (mJ/m ²)	γ ^{LW} (mJ/m ²)	γ ⁺ (mJ/m ²)	γ ⁻ (mJ/m ²)	W _A ^{AB} (mJ/m ²)	W _A ^{AB} *(S _{dr} /100+1)
ストアス	33.08	32.07	0.16	1.60	—	—
Gr1	42.60	39.46	0.17	14.54	75.24	103.2
Gr2	42.98	35.77	0.94	13.84	73.17	107.6
Gr3	37.90	31.73	1.01	9.41	68.80	131.8
An1	47.23	40.55	0.40	27.90	77.95	147.0
An2	41.32	37.70	0.15	21.83	74.26	141.0
Di1	43.05	38.38	0.23	23.74	75.28	158.8
Di2	41.33	35.82	0.61	12.43	72.58	144.9
Ba1	43.65	36.64	0.86	14.28	73.93	132.4
Ba2	43.82	34.66	1.04	20.15	72.85	124.6
Sa1	43.02	39.96	0.16	14.66	75.67	155.1
Sa2	45.73	39.96	0.33	25.19	77.07	128.6
Li1	41.28	37.28	0.29	13.78	73.49	118.9

近年、アスファルト系材料に対しても適用事例⁶⁾が見られる。分子間力の評価に際しては、一般的に表面自由エネルギー (以下, SFE) の概念⁴⁾が適用されるが、骨材などの固体の SFE を直接測定する方法はなく、固体・液体間の相互作用である接触角 θ (図-1) を測定することで間接的に求められる。また、SFE における分子間力の成分分けには、いくつかの理論が提案されており、本研究では酸塩基理論⁷⁾に基づいて SFE を算出した。なお、ここでは紙面の都合上、その途中式を割愛するが、固体 (S)・液体 (L) 間の接着エネルギー W_A^{SL} は式(1)のとおり表すことができる。

表-5 骨材の剥離試験結果

サンプル ID	試験時間	剥離面積率 (%)				
		便覧剥離法		RBT法		
		24hr	48hr	6hr	24hr	48hr
Gr1	53	90	60	90	100	
Gr2	33	43	58	80	90	
Gr3	33	43	60	77	90	
An1	50	90	33	72	80	
An2	23	35	10	62	73	
Di1	37	50	37	75	87	
Di2	27	43	22	65	80	
Ba1	28	38	37	70	80	
Ba2	32	45	52	75	90	
Sa1	32	40	8	58	72	
Sa2	28	40	33	77	80	
Li1	23	32	62	80	90	

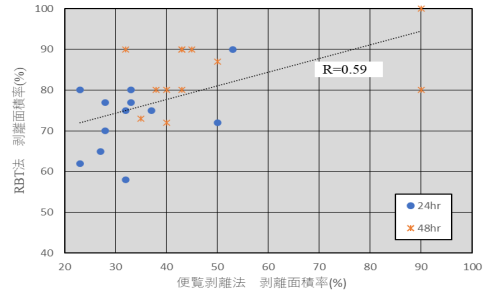


図-2 便覧剥離法と RBT 法の関係

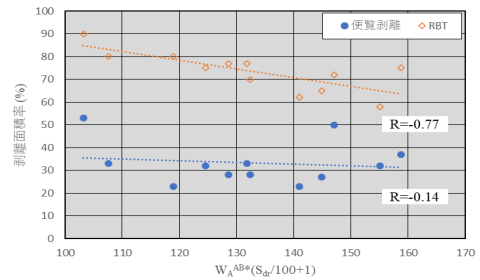


図-3 接着エネルギーと剥離試験の関係

$$W_A^{SL} = \gamma_L(1 + \cos \theta) = 2\sqrt{\gamma_S^{LW}\gamma_L^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_S^+\gamma_L^-} + 2\sqrt{\gamma_S^-\gamma_L^+} \quad (1)$$

ここで γ^{LW} : Lifshitz-van der Waals 力成分, γ^+ , γ^- : 酸塩基成分である。上記3成分が既知である3種類の液体をプローブとして個体・液体間の接触角 θ をそれぞれ測定し、これらの三元一次方程式の解は個体の3成分となる。骨材 (A)・ストアス (B) 間の接着エネルギー W_A^{AB} は骨材の表面積に比例すると考え、展開界面面積率 S_{dr} を乗じた接着エネルギー W_A^{AB}*(S_{dr}/100+1) として計算した。

b) 接触角の測定及び SFE の解析

接触角計を用いて骨材およびストアスとプローブ界面の接触角を測定した。試料の作製条件および使用したプローブは表-3に示すとおりである。接触角より算出した SFE 成分および接着エネルギーを表-4に示す。

4. 骨材および混合物の剥離抵抗性評価

各種骨材に対するストアスの剥離抵抗性および混合物の水分感受性に基づく剥離抵抗性を評価した。混合物の評価に際しては、流動に伴う剥離と曲げ・引張力に対する剥離を考慮して各試験法を選定した。

(1)ストアス被覆骨材の剥離抵抗性試験

骨材の剥離抵抗性は、舗装調査・試験法便覧 A017 に準ずる試験（以下、便覧剥離）と Rolling Bottle Test（以下、RBT. EN12697-11）により評価した。試験結果を表-5 に示す。図-2 の通り、両者の結果は相関係数が 0.59 となり、相関性が認められる。なお、RBT 法では骨材同士の衝突を伴い、試験後には丸みを帯びた骨材が見られることから、すり減り抵抗性が低い骨材に対しては剥離と同時に摩耗が生じる可能性に留意が必要である。

接着エネルギーと骨材の剥離試験との関係性を、図-3 に整理した。ここでは、48 時間の剥離率が 100% に達したため、24 時間後の剥離率を評価した。これより、RBT 法の結果に対して接着エネルギーとの高い相関性が認められた。他方、便覧剥離では試験温度がストアスの軟化点を上回るため、常温下の剥離とは異なる影響因子により相関が低下したと考えられる。

(2)混合物の剥離抵抗性評価

a) 混合物の配合

混合物の配合設計は、Superpave 法に準拠した。なお、各配合において細骨材および石粉は共通する素材を使用し、合成粒度が同一となるよう粗骨材の配合比率を調整した。配合試験の結果は表-6 に示すとおりであり、混合物試験は特徴的な 4 種の国産骨材で実施した。

b) Hamburg Wheel Tracking 試験 (HWT)

混合物の流動を伴う剥離抵抗性を HWT (AASHTO T324-17) により評価した。試験条件を表-7、試験結果を表-8 に示す。ここで、混合物の剥離が始まる変曲点を SIP (Stripping Inflection Point) とし、それ以前を塑性変形(わだち掘れ)とそれ以降を湿潤損傷として区別した。図-4 のように、試験後の M-Gr1 および M-Li1 には剥離が観察され、接着エネルギーと各混合物の DS に整合が認められた。ただし、M-Li1 に関しては繰返し輪荷重による骨材の摩耗や破損が見られたことから、RBT 法と同様に剥離とすり減りの同時進行に留意を要する。なお、SIP は試験後の剥離状態と異なる

表-6 アスコンの配合試験

サンプルID		M-Gr1	M-An1	M-Sa1	M-Li1
粗骨材	産地	岐阜県	長野県	茨城県	栃木県
	岩種	花崗岩	安山岩	硬質砂岩	石灰岩
	CAA (%)	48	47	47	49
配合率 (%)	6号砕石	37.0	33.0	33.0	40.4
	7号砕石	18.0	22.0	22.0	15.0
	砕砂	17.2			
	粗目砂 S ₁₀ :68.6%	24.0			
	石灰岩石粉	3.8			3.4
	ストアス	5.3	5.5	5.2	5.0
2.36mm通過率 (%)		45.9	45.5	45.2	48.4
0.075mm通過率 (%)		4.8			
旋回回数 (回)	N _{mi}	9			
	N _{des}	125			
	N _{max}	205			
空隙率 (%)	N _{mi}	11.5	11.5	11.5	11.7
	N _{des}	4.0	4.0	4.0	4.0
	N _{max}	3.0	3.2	3.1	3.3
骨材間隙率 (%)		14.6	15.6	14.2	14.8
飽和度 (%)		73.3	73.0	72.0	72.5
ファイラー・アスファルト比		1.0	0.9	1.1	1.0

表-7 HWT 試験条件

転圧方法	Superpave Gyrotory Compactor
供試体寸法	Φ=150mm, t=60mm
空隙率	7%
試験温度	60 °C
載荷速度	705N, 52pass/min

表-8 HWT 試験結果

サンプルID	M-Gr1	M-An1	M-Sa1	M-Li1
SIP (pass)	1242	1017	1075	1192
DS (Pass/mm)	1105	1206	1370	1086
W _A ^{AB} *(S ₁₀ /100+1)	103.2	147.0	155.1	118.9
目視観察結果	剥離:多	剥離:少	剥離:少	剥離:多、細粒化

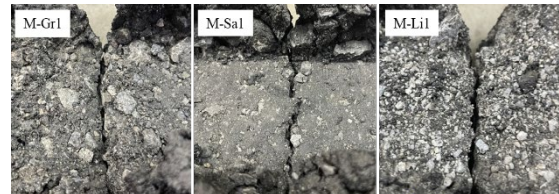


図-4 HWT 試験後の供試体表面

傾向となり、ストアスの場合は塑性変形の進行が早く、DS の低い混合物では流動と剥離が同時進行した可能性を考える。既往文献⁸⁾では、バインダグレードに応じて試験温度を変化させる手法が提案されており、剥離評価の条件設定に一考を要する。

c) Indirect Tensile Strength 試験 (IDT)

混合物の水分感受性が間接引張荷重によるひび割れ抵抗性に及ぼす影響を IDT (AASHTO T283-14) より TSR (Tensile Strength Ratio) を求めて評価した。供試体の養生条件および試験条件を表-9、試験結果を表-10 に示す。これ以降、試験結果は剥離促進前に dry、剥離促進後に condition を付している。試験結果より M-Sa1 と M-Li1 の TSR が高く剥離抵抗性が高いと判断できる一方、図-5 のように M-Gr1 の破断面には剥離が顕著で、かつ TSR も低い。しかし、M-An1 の TSR は骨材性状と異なる傾向を示し、引張力に対

する剥離には流動を伴う剥離とは異なる混合物としての因子が影響する可能性がある。

d) Illinois Flexibility Index Test (I-FIT)

混合物の水分感受性が曲げ応力によるひび割れ抵抗性に及ぼす影響を I-FIT (AASHTO TP124-20) より評価した。変位-荷重曲線の例を図-6、試験条件および試験結果を表-11、表-12に示す。試験結果はIDTと同傾向であり、かつ図-7に示す破断面の剥離と接着エネルギーに相関に見られたことから、接着エネルギーは引張力に対する水分感受性の差異に係る可能性を示唆する。

5. まとめ

本研究では、アスファルトと骨材の界面に着目して国内外 12 種類の骨材に対する各種性状試験を実施し、被膜骨材および混合物に生じる剥離との関係性を評価した。各検討より得られた知見を以下に取りまとめる。

- 接着エネルギーと RBT 法との相関は、骨材の剥離抵抗性を SFE 測定によって評価できる可能性を示唆する。
- HWT では DS と試験後供試体表面の剥離状態に整合が見られた一方、SIP は異なる傾向となった。
- TSR および $Gf_{condition}/Gf_{dry}$ は DS、接着エネルギーと傾向が異なるものの、いずれも剥離状態と概ね整合することから曲げ・引張力に対する剥離には混合物としての他の因子が影響することを示唆する。

今後も素材の性状と混合物の剥離抵抗性に関するデータを蓄積し、剥離のメカニズム解明と剥離抑制の対策を検討する。

REFERENCES

- 1) 河村直哉ほか：空港舗装の既設アスファルト混合物に対するはく離抵抗性評価方法の適用検討，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.72，No.3，I_87-I_93，2016
- 2) （独）国際協力機構：開発途上国における舗装の施工監理/管理のあり方に関する調査（基礎研究）報告書，2016
- 3) Asphalt Institute：Moisture Sensitivity, MS-24, 2007
- 4) 三刀基郷：接着の基礎，溶接学会誌，第 81 巻，pp.23-27，2012
- 5) 川崎祥子ほか：表面特性の異なるプラスチック素材への水系塗料の付着に関する研究，大日本塗料株式会社，DNT 技報，No.10，pp.12-17，2010
- 6) Jianming Wei, Yuzhen Zhang：Application of Sessile Drop Method to Determine Surface Free Energy of

表-9 IDT 試験条件

促進剥離処理	①	飽和度70~80%になるように水中で真空引き
	②	供試体と水10mlをプラ袋に入れ密封する
	③	-18℃で16時間養生する
	④	60℃で24時間養生する
転圧方法	Superpave Gyrotory Compactor	
供試体寸法	Φ=150mm t=95mm	
空隙率	7%	
試験温度	25℃	
載荷速度	50mm/min	

表-10 IDT 試験結果

サンプルID	M-Gr1	M-An1	M-Sal	M-Li1
TS _{dry} (MPa)	0.51	0.51	0.62	0.59
TS _{condition} (MPa)	0.34	0.32	0.49	0.51
TSR	0.7	0.6	0.8	0.9
W _A ^{AB} *(S _g /100+1)	103.2	147.0	155.1	118.9
目視観察結果	剥離:多	剥離:中	剥離:なし	剥離:少

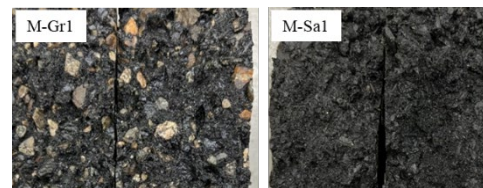


図-5 IDT 試験後の破断面（剥離促進）

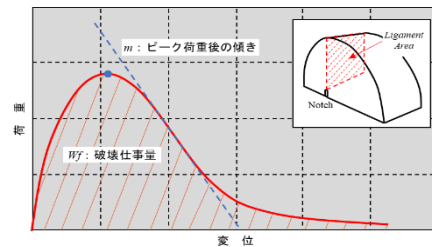


図-6 I-FIT 変位-荷重曲線の例

表-11 I-FIT 試験条件

転圧方法	Superpave Gyrotory Compactor
供試体寸法	Φ=150mm t=50mm ノッチ(L=15mm,t=2.25mm)
空隙率	7%
試験温度	25℃
載荷速度	50mm/min

表-12 I-FIT 試験結果

サンプルID	M-Gr1	M-An1	M-Sal	M-Li1
Gf _{dry} (J/m ²)	2026.1	1756.5	2031.8	1948.2
Gf _{condition} (J/m ²)	492.4	574.9	1156.4	1539.8
Gf _{condition} /Gf _{dry}	0.2	0.3	0.6	0.8
W _A ^{AB} *(S _g /100+1)	103.2	147.0	155.1	118.9
目視観察結果	剥離:多	剥離:多	剥離:なし	剥離:なし

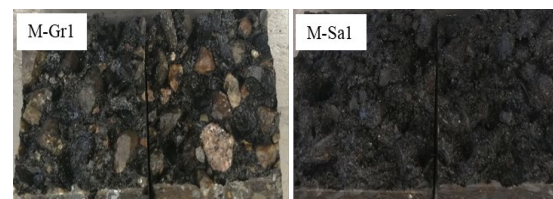


図-7 I-FIT 試験後の破断面（剥離促進）

- 7) Robert J. Good, Carel J. van Oss：The Modern Theory of Contact Angles and the Hydrogen Bond Components of Surface Energies, Modern Approaches to Wettability, Springer, pp.1-27, 1992
- 8) 吳悦樵ほか：改質アスファルト混合物の新たな耐水性評価法，土木学会論文集 E1，Vol.78，No.2,I_75-I_83,2023