



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	アスファルト舗装における低温き裂の要因について
Author(s)	天野, 隆明; 高橋, 守人; 笠原, 彰彦 他
Citation	石油学会誌, 41(2), 98-106
Issue Date	1998-03-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40052
Type	journal article
File Information	moriyoshi_JJPI41_98.pdf



[一般論文]

アスファルト舗装における低温き裂の要因について

天野 隆明^{†1)}, 高橋 守人^{†2)}, 笠原 彰彦^{†1)}, 森吉 昭博^{†1)*}^{†1)} 北海道大学工学部, 060-8628 札幌市北区北13条西8丁目^{†2)} 北海道開発局土木研究所, 062-0931 札幌市豊平区平岸1-3

(平成9年6月13日受理)

アスファルト舗装には様々な破壊現象があり、種々の研究が行われている。しかし、わだち掘れ現象以外のき裂現象で寒冷地に多く見られる外気温の低下により舗装体が収縮して横断方向に破壊する、いわゆる低温き裂に関する研究は多いが、主要な因子と現地との対応がとれていない。この理由は、低温き裂の発生原因が材料の性状、施工の条件、アスファルト舗装の構造の形式、環境条件など多岐にわたり、これら各々の条件がアスファルト混合物の性状を著しく変化させているためと考えられる。

本研究は、寒冷地に多く見られるアスファルト舗装の低温き裂現象と使用アスファルトの性状およびその舗装構造について検討した。アスファルト舗装構造では複雑な材質の組合せを有する舗装構成と低温き裂との対応を求めるため、現場調査、室内実験および数値解析シミュレーションを行った。

検討の結果、アスファルト舗装の低温き裂現象は、応力よりもひずみが支配的であり、アスファルト舗装は応力緩和現象を伴いながらあるひずみレベルを超えると破壊することが確認された。

1. 緒 言

アスファルト舗装には様々な破壊現象があり、種々の研究が行われている。このうち寒冷地に多く見られる外気温の低下により舗装体が収縮して横断方向に破壊する、いわゆる低温き裂に関する研究は多いが、主要な因子と現地との対応がとれていない。この理由は、低温き裂の発生原因が材料の性状、施工の条件、アスファルト舗装構造の性状、環境条件などの多岐にわたっている。そのため、これら各々の条件がアスファルト舗装の低温き裂の発生を著しく複雑に変化させていると考えられる¹⁾。

一般に、低温き裂の研究はアスファルトおよびアスファルト混合物の性状に関する研究が多い。しかし、現地調査の結果によると、アスファルト舗装の低温き裂はアスファルト混合物以外の性質、特にアスファルト単体の低温領域における性状や舗装の構造の厚さおよびその性状などが著しく影響していると報告されている²⁾。

一方、低温き裂の存在するアスファルト舗装上にアスファルト混合物を舗装した場合(3層系)、低温き裂の直上や全くき裂の存在しない箇所のオーバーレイ層にも低温き裂が生じることが多い。特に、この前者のき裂のことをリフレクションクラックと言う。リフレクションクラックの原因は、通常走行車両のために生ずる引張応力や熱応力の引張応力により発生するとされている³⁾。しかし、寒冷地のオーバーレイ層の低温き裂は、秋に施工して冬経過後の春に多く見られる。また、横断方向にき裂(低温き裂)が発生したいずれの箇所のオーバーレイ層においても、アスファルト層内部の碎石がき裂部で破断している。また著者らは、オーバーレイをした箇所におけるき裂の発生が旧舗装体のき裂の有無に依存しないことを確認している。すなわち、旧舗装体にき裂が存在してもオーバーレイ層に発生

しなかったり、き裂が存在しない箇所のオーバーレイ層に発生したりすることを確認している。これらより、寒冷地のオーバーレイ層の低温き裂はオーバーレイ層のアスファルト混合物がぜい性領域で破断したものと断定でき、熱応力による損傷である可能性が極めて高い。したがって、リフレクションクラックを含めたオーバーレイ層の低温き裂は、アスファルト混合物の応力緩和性状やアスファルトおよび混合物の破壊性状と密接に関係していると推定される。

本研究では寒冷地の低温き裂現象について、使用アスファルトの性状とき裂生成との関係を求めるため、低温き裂が生じたアスファルト舗装よりアスファルト混合物を採取した。また、採取したアスファルト混合物よりアスファルトの回収を行い、低温き裂の本数とアスファルトの材質との関係について検討した。アスファルト舗装構造においては、各種性状を有する複雑な舗装構成とき裂の発生との対応を検討した。この検討に当たっては現場調査、室内実験ならびに数値解析のシミュレーションを行った。

2. 実験手法および解析方法

低温き裂の本数とアスファルト層の材質との関係、およびアスファルト舗装の構成とそのアスファルト層の材質との対応を検討するため、種々のアスファルト混合物とアスファルト単体に対して以下の実験を行った。また、それらの実験結果を検証するため粘弾性理論を用いた有限要素法による数値解析シミュレーションを行った。

2.1. アスファルト混合物の物性測定

低温き裂発生の原因をアスファルト混合物の性状から把握するため、緩和弾性率と圧裂強度を測定した。

2.1.1. 応力緩和試験

アスファルト混合物は、荷重が載荷されると内部の応力を吸収する、いわゆる応力緩和現象⁴⁾を示す。これまでの研究では、

* 連絡先

低温領域における応力緩和現象と破壊現象とを関連させた報文は存在しない。本研究では、低温き裂の発生にこの応力緩和現象がいかに寄与するかを検討するためにアスファルト混合物の応力緩和試験を行った。この試験は、供試体にある変形を瞬間的に与え、その後の時間変化に伴う荷重の変化を測定するものである。この試験には一軸引張試験機を用いた。この試験機に2.5×2.5×15 cmのアスファルト混合物の棒状供試体を設置し、応力-時間曲線を求めた(応力緩和曲線)。さらに、実験温度を変化させ各温度毎の応力-時間曲線を求め、この得られた応力-時間曲線に対して時間-温度換算則を適用し各温度毎の曲線を重ね合わせると、短時間から長時間までの応力緩和曲線が求められ、緩和弾性率が得られる。

現地で低温き裂が多い箇所や少ない箇所から採取した表層や基層用の舗装用混合物に対してこの実験と線膨張係数の測定を行い、各種アスファルト混合物における低温き裂の本数とこれらの応力緩和性状との関連について検討した。

2.1.2. 圧裂試験

通常、圧裂強度の測定は、加熱混合物の耐流動性やひび割れ性状を求めるために行われる⁵⁾。したがって、この試験における試験温度は通常-10～60℃の範囲で行われる。著者らの研究によると^{6),7)}、アスファルト混合物の-25℃、50 mm/minの圧裂強度がそれに用いたアスファルト単体のぜい性領域の曲げ強度とほぼ同一値となり、この結果は混合物の空げき率や転圧時の機種などに依存することが明らかにされている。そこで、低温き裂が多い箇所や少ない箇所から採取した舗装用混合物に対して圧裂試験を行い、各種混合物における低温き裂の本数と圧裂強度との関連について検討した。

2.2. アスファルトの物性測定

寒冷地において低温き裂対策のアスファルト舗装を施工する場合、針入度の大きいアスファルトを用いることがある。この場合、アスファルトの性状は針入度と軟化点の二つで決定される。そのため、寒冷地においては針入度級 80/100 や 100/120 の大きな針入度級のアスファルトが使用されている。しかし、同一規格で施工された舗装構造の同一路線、かつ同一針入度級のアスファルトを用いても低温き裂の本数が異なっている箇所が数多く存在する⁸⁾。しかも、それらは互いに隣接した地点であり、かつ舗装体表面温度は両地点で冬期でもほぼ同一であった。

このような現象を解明するに当たり、低温き裂の発生本数が異なる箇所からアスファルト混合物のコアを採取し、そのコアからアスファルトを回収した。その回収アスファルトを用いて針入度試験、フラースゼイ化点試験および曲げ試験^{9),10)}を実施し、き裂の対応関係について検討した。

2.2.1. 回収試験

アスファルトの回収は、現場の表層および基層の採取コア(直径 10 cm)から JIS R 5210 に準拠¹¹⁾し、ソックスレー抽出法¹²⁾により行った。

2.2.2. 針入度試験

針入度試験は、2.2.1.で回収されたアスファルトに対し JIS K 2207 に準拠¹³⁾し、行った。

2.2.3. フラースゼイ化点試験

フラースゼイ化点試験は JIS K 2207 に準拠¹⁴⁾した。森吉ら¹⁵⁾

によると、従来の方法である空冷式かつ市販鋼板を用いた方法より、メタノール水溶液による冷却かつ特殊鋼板を用いた方法の方がフラースゼイ化点の精度向上につながることが確かめられている。本研究では、メタノール水溶液による冷却かつ特殊鋼板を用いた方法とした。なお、実験には厚さ 0.1 mm の特殊鋼板を使用した。以上の方法によって求められたアスファルトの破壊温度をフラースゼイ化点(以後、FBP と呼ぶ)とした。実験用供試体の数は各アスファルトとも 5 個ずつとした。なお、本研究で求められた FBP はメタノール水溶液による冷却のため、従来から行われていた空冷式の実験結果より 2～3℃ 高めであるが精度の良い結果を得ている。

2.2.4. 曲げ試験

本試験機に用いた試験機はフラースゼイ化点試験機を改良したもので、FBP より低い温度領域におけるアスファルト単体の曲げ強度および破壊時のひずみを高精度で測定できる¹⁶⁾。その精度は、それぞれ ± 0.01 MPa、 $\pm 100 \times 10^{-6}$ である。この試験の供試体は、前述の FBP 試験時の供試体と同様である。試験は、FBP と FBP より 10～12℃ 低い温度範囲において、2℃ 刻みで行った。本試験が FBP 試験と最も異なる点は、一定温度かつアスファルトの破壊まで行われることである。本実験より、低温のアスファルトの破壊性状と現場における低温き裂の本数との関連性について検討した。

2.3. 数値解析のシミュレーション

実際のアスファルト舗装体におけるアスファルト層の構成は、オーバーレイなしの場合は表層と基層の2層系であり、オーバーレイありの場合はオーバーレイ層、表層および基層の合計3層系である。これらの各層が種々の異なる性状を有すると、舗装体としての性状は複雑となる。このような複雑な系において舗装体内部に発生する熱応力およびひずみを求めるためには、計算機による数値解析シミュレーションが最適である。ここでは粘弾性理論に基づいた有限要素法による手法を用いた¹⁷⁾。

本研究で用いたプログラムの特徴は、粘弾性解析であること、境界条件ならびに各種材料定数を任意に設定できることである。粘弾性解析は、混合物の応力緩和性状を実測により得たもので行った。応力緩和性状は、現場採取した混合物の応力緩和試験で求めた。したがって、同一性状の混合物に温度分布が生じた時、その温度分布に対応した弾性係数が得られ、より実際に即した挙動を表している。また、各種材料定数を任意に設定できることで、構造が複雑な系となる場合にも対応可能である。以上より、複雑な系をなす構造における熱応力およびひずみが実際の挙動に近い値として得られる。また、計算値と現地採取から得たアスファルト単体の破壊性状を考慮して、アスファルト舗装の横断き裂現象の原因についても検討した。

本研究の数値解析シミュレーションに用いた外気温を Fig. 1 に、モデルおよび境界条件などを Fig. 2 に示す。モデルは横 250 cm、深さ 150 cm の大きさとし、1 cm 間隔の三角形要素による解析である。境界条件は、深さ方向ではローラー支持かつ断熱であり、底面では固定かつ 3℃ で一定とした。

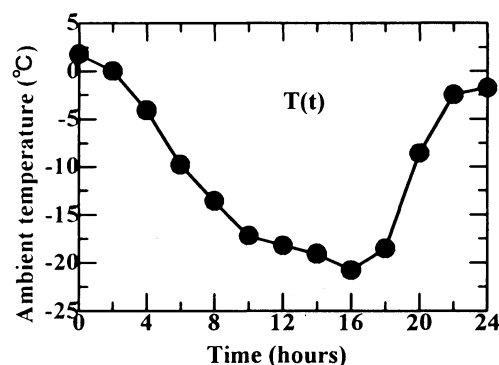


Fig. 1 Ambient Temperature ($T(t)$) Calculated from Simulation

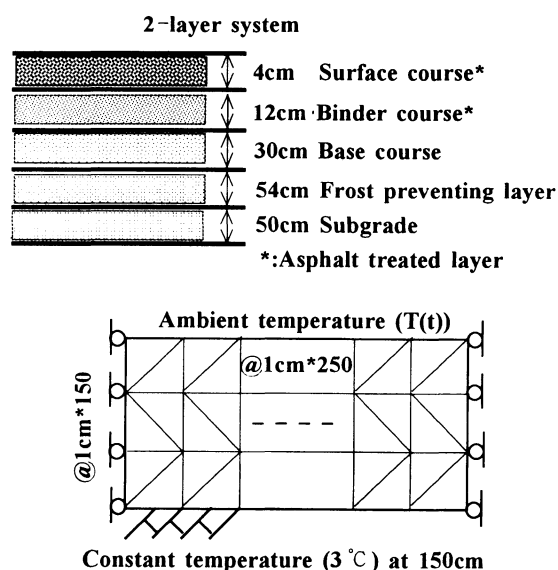


Fig. 2 Pavement Section and Boundary Condition Used in Simulation

3. 調査区間および使用材料

3.1. 調査地点の選定

本研究の調査は北海道の道東地域に位置する各地の国道で行った。各調査地区の選定に当たっては、外気温が著しく異なるような山間部、海岸部および内陸平野部を選定した。さらに7地区において、同一路線で互いに隣接し、低温き裂の本数が異なり、かつオーバーレイしていない2~3地点ずつを選定した。また、上と同様の低温き裂が存在していたと推定される舗装上にアスファルト層のオーバーレイをした2箇所ずつの5地点を選定した。

3.2. 供試体の採取

各地点では、試験用供試体の採取、低温き裂本数の調査および冬の舗装表面温度測定を同時に行った。試験用供試体は、採取した直径10cmのコアと開削により採取した30×30cmのブロックから所定の寸法に切り出した。コアは、低温き裂が

Table 1 Properties of Recovered Asphalt without Overlay (7 sites)

Location		Penetration [100 g, 5 sec, 25°C]	Construction year	Fracture frequency [number/km]
Site A	A1	83	1981	8.5
	A2	119	1981	11.5
Site B	B1	46	1973	28.6
	B2	51	1977	7.0
Site C	C1	34	—	22.4
	C2	43	—	48.2
Site D	D1	65	—	45.0
	D2	58	—	24.0
Site E	E1	54	—	35.0
	E2	58	—	17.5
Site F	F1	66	1985	16.7
	F2	67	1985	40.1
Site G	G1	29	1973	11.9
	G2	44	1967	70.0

Table 2 Properties of Recovered Asphalt with Overlay (5 sites)

Location		Penetration [100 g, 5 sec, 25°C]	Construction year	Fracture frequency [number/km]
Site H	H1	56	—	6.7
	H2	47	—	17.0
Site I	I1	50	—	1.0
	I2	52	—	13.3
Site J	J1	52	—	31.9
	J2	43	—	24.6
Site K	K1	66	1992	22.4
	K2	43	1986	14.3
Site L	L1	39	—	2.8
	L2	65	—	16.8

10 m以上離れて存在している箇所、かつき裂から4 m以上離れた箇所において車線中央部で走行方向に50 cm間隔で5本採取した。

3.3. 低温き裂の調査

オーバーレイの有無に関係なく低温き裂の本数の調査は、コア採取地点の前後それぞれ500 mにわたる合計1 kmの区間を対象に行った。この対象区間における低温き裂の本数は、ウォーキングメジャーでキロポストからの距離を測定しながら低温き裂発生箇所の位置、その形状および長さを記録した。1 km当たりの低温き裂の本数は道路の横断方向に全幅にわたり生じているものは1、半分のものは0.5、それ未満のものは0.25とし、合計して求めた¹⁸⁾。各地点でオーバーレイのない箇所(2層系)での低温き裂調査と採取した供試体の概要をTable 1に示す。また、オーバーレイした箇所(3層系)の概要をTable 2に示す。

3.4. 試験用供試体

3.4.1. 応力緩和試験用供試体

応力緩和試験用には、現地より採取した30×30×10 cmのブロック、および室内で作成した30×30×5 cmのブロックから2.5×15×2.5 cmの6面カットに切り出した供試体を用いた。

Table 3 Properties of Original Asphalt

Penetration [100 g, 5 sec, 25°C]	90
Softening point [°C]	47.5
Penetration index	-0.4
Specific gravity	1.029

Table 4 Gradation of Mixture

Sieve size [mm]	Throughput [%]
13	100.0
10	88.4
5	67.0
2.5	48.5
1.2	34.4
0.6	28.5
0.3	17.7
0.15	8.9
0.074	7.2
Asphalt content (%)	5.8

供試体は、Table 1 の地区とは異なる足寄地区より採取したブロックから表層や基層のほぼ中央部よりそれぞれ切り出した。同一地区より低温き裂の本数の異なるブロックから供試体を前記の寸法で切り出し、低温き裂の本数が4.0本/kmの区間より採取した国道の表層の供試体の名称をKSS、58.0本/kmの区間より採取した国道の表層の供試体の名称をKSLとする。なお、き裂の本数の異なる箇所各基層は同一性状であった。よって、その一方を代表値としこの供試体の名称をKBSとする。

また、室内にて作成した供試体（以下、これをAC6と呼ぶ）に用いたアスファルトの性状ならびにアスファルト混合物の配合をそれぞれ Tables 3, 4 に示す。

3.4.2. 圧裂試験用供試体

圧裂試験用の供試体（直径10cm）は、コアカッターを用い現場より採取した。採取箇所の構造を Fig. 2 に示す。各箇所のアスファルト層は2層から5層であった。そこで、圧裂試験用の供試体は各層毎に切断したものをを用いた。また、切断された1層の厚さが4cm以上のものについては、さらに2層あるいは3層にスライスして供試体とした。

3.4.3. 使用アスファルトの性状

本研究で用いたアスファルトは、市販のアスファルトと現場の供試体より回収したアスファルトの2種類である。

室内で作成した混合物に用いたアスファルトの性状ならびにその混合物の配合を Tables 3, 4 に示す。ここで用いたアスファルトおよびアスファルト混合物は、一般に舗装用混合物に使用されているアスファルトおよびアスファルト混合物とほぼ同一である。

4. 試験結果および考察

アスファルト混合物の試験結果、アスファルト単体の試験結果および数値解析シミュレーションの結果を以下に示す。

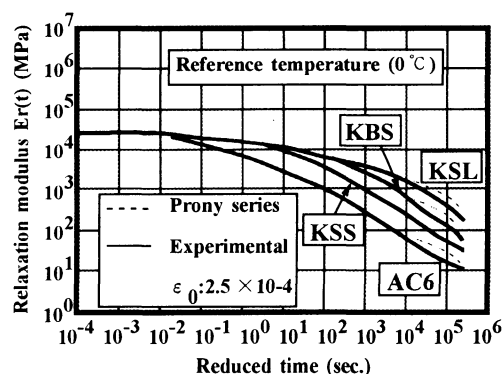


Fig. 3 Relaxation Modulus of Various Asphaltic Mixtures

Table 5 The Relation between Fracture Frequency and Results of Various Tests

Test method	A coefficient of correlation	
	Surface course	Binder course
Split strength	0.1 (n=15)	0.1 (n=15)
Penetration	0.4 (n=15)	0.4 (n=15)
Fraass breaking point	0.5 (n=15)	0.5 (n=15)
Fracture strain ^{a)}	0.7 ^{b)} (n=15)	—

a) Bending test for asphalt.

b) Fracture strain at daily average temperature (January, 1996) for various sites.

4.1. アスファルト混合物の物性試験結果

4.1.1. 各種混合物の緩和弾性率

室内で作成および低温き裂の本数の異なる地点から採取したそれぞれのアスファルト混合物の応力緩和性状について検討した。

Fig. 3 は、各種混合物の応力緩和性状について基準温度0°Cに換算した結果を示す¹⁹⁾。縦軸は緩和弾性率を、横軸は時間をそれぞれ表している。緩和弾性率はある時間における応力を初期ひずみ量で除した値と定義する。

Fig. 3 によると、各種混合物間の応力緩和性状は10²秒以上の時間領域において著しく異なる。図中の長時間載荷領域で緩和弾性率が小さいことは、アスファルト混合物の応力緩和が進みやすく、このため破壊ひずみが大きくなることを意味している。ここで、混合物の応力緩和性状の優れている順は、表層用室内作成供試体（AC6）、国道表層き裂少（KSS）、国道基層（KBS）、国道表層き裂多（KSL）である。表層材の応力緩和性状に着目すると、優れている順はAC6、KSS、KSLである。したがって、アスファルト混合物の応力緩和性状は低温き裂の発生とも密接な関係にある。なお、Fig. 3 には実験から得られた緩和弾性率と Prony series で近似したものを併記してある。両者は緩和時間が10⁴（約3時間）以上で異なっているにすぎない。すなわち、数値解析シミュレーションで緩和弾性率を用いる際、タイムステップは2時間であることから Prony series で置き換えられる。数値解析シミュレーションでは Prony series で緩和弾性率を求めている。

Table 6 Relation between Fracture Frequency and Split Tensile Strength of Surface Course at Various Sites

Site	Split tensile strength [MPa]	
	Severe spot ^{a)}	Little spot ^{a)}
Site A	4.0	4.7
Site B	5.7	4.7
Site C	5.3	5.0
Site D	4.8	4.9
Site E	4.6	4.9
Site F	5.4	5.7
Site G	4.2	4.4

a) This means the relative fracture frequency at the each same site in Table 1.

4.1.2. 圧裂試験結果

Table 5 は、圧裂試験、針入度試験、フラスゼ化点試験および曲げ試験の結果と低温き裂の本数が1次相関関係にあると仮定した場合の相関係数を求めた結果である。この結果は気象条件が異なる地区を含んだ低温き裂の本数と各種試験結果との関係を表している。また、各地区毎の結果を Table 6 に示した。これは、同一外気温における低温き裂の本数と圧裂強度との関係を表している。

一般に、低温き裂はアスファルト混合物の限界強度を越すような熱応力が作用したときに生じるとされている。したがって、圧裂強度を同一地点内で比較すると、低温き裂の本数が多い箇所が小さい傾向にある。

Table 6 と Table 1 によると、各地区毎のアスファルト混合物の圧裂強度が同一地区内でき裂の本数に逆比例しているのは、7 地区中 5 地区である。しかもこれらの圧裂強度の差は小さい。これより、気象条件別の圧裂強度と低温き裂の本数との関係は明確ではない。また Table 5 によると、低温き裂の本数と圧裂強度との相関係数は 0.1 である。したがって、異なる気象条件下では、低温き裂の本数と圧裂強度との関係は一次的に求まらない。

4.2. アスファルト単体の試験結果

4.2.1. 針入度試験の結果

Table 5 によると、低温き裂の本数と針入度との相関係数は 0.4 である。したがって、相関係数が 0.4 であり、両者を一次的に関連づけるには不十分である。これは、針入度試験の温度が 25℃ と、実際に低温き裂が発生する温度よりかなり高い温度でアスファルトの性状を評価しているためである。すなわち、低温き裂の発生とアスファルトの性状を関連づけるには、実際に低温き裂が発生するであろう温度領域でアスファルトの性状を評価する必要があることを示している。

4.2.2. FBP 試験の結果

Table 5 より、低温き裂の本数と FBP との相関係数は 0.5 である。針入度の結果に比べ、相関係数が若干大きくなり関連性が高くなっている。これは、より低温の評価方法を用いれば、低温き裂の本数をアスファルトの性状と関連づけられる可能性があることを示している。

森吉ら²⁰⁾は、アスファルト混合物の熱応力による繰り返し熱疲労破壊を考慮した室内実験と現場実験から、低温き裂の本

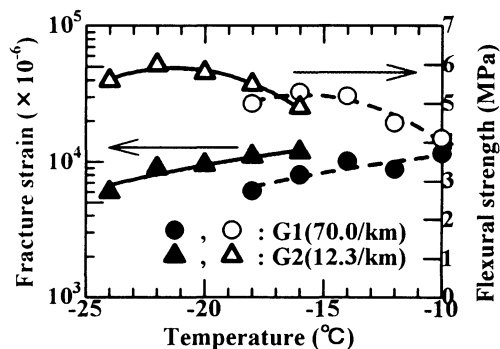


Fig. 4 Relation between Temperature, Fracture Strain and Flexural Strength

数は FBP よりも著しく低い混合物のぜい化点以下の時間数に依存するという結果を導いている。このことから、熱応力による破壊、すなわち低温き裂の本数とアスファルトの性状との関連を検討する際には、FBP 以下の温度領域の性状に注目すべきである。

4.2.3. 曲げ試験の結果

著者ら²¹⁾は、この試験方法が針入度級の違いや同一針入度級でのメーカーの違いを把握できることを報告している。この方法ではアスファルトの低温性状を曲げ強度や破壊時のひずみとして質的に把握できる。また、アスファルト単体とアスファルト混合物の破壊性状は、曲げ試験、引張試験および熱応力試験において互いに密接な関係があると報告されている²²⁾。したがって、このような結果を踏まえ、アスファルト舗装のオーバーレイ有無の箇所における低温き裂の本数とアスファルトの低温性状との関係について検討した。

(a) アスファルト舗装のオーバーレイなしの地点 (表層 1 層、基層 1 層の 2 層系)

オーバーレイなしの地点における結果の一例として、G 地点における回収アスファルトの破壊性状を Fig. 4 に示す。Fig. 4 は縦軸に曲げ強度および破壊時のひずみ、横軸に試験時の温度を表している。両箇所の年最低気温および舗装表面付近の年最低路温は同一であり、それぞれ -23℃ および -18℃ であった。

試験温度 -18℃ における曲げ強度および破壊時のひずみと低温き裂の本数を検討すると、それぞれの関係はともになんまり対応している。また、破壊時のひずみ値が異なるのは、FBP より低い温度領域においてもアスファルトは応力緩和現象を示すため、個々のアスファルトの応力緩和性状の違いによるものである。一方、舗装体の温度は外気温の変動に追従する。たとえば、-10℃ であった舗装体の温度が外気温の低下により -15℃ まで低下したとする。-15℃ では曲げ強度と低温き裂本数の関係は対応していない。しかし、破壊時のひずみの大きさは対応している。

ここで、アスファルト舗装に発生する低温き裂の主な原因を考察すると以下ようになる。一般に低温き裂の発生は、最低温度に達したときの熱応力あるいは最低温度までの温度の繰り返し履歴による熱疲労であると言われている²³⁾。熱疲労の観点から熱応力よりも破壊時のひずみの方がいずれの温度領域にお

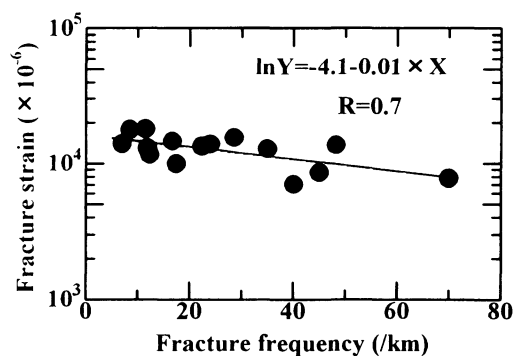
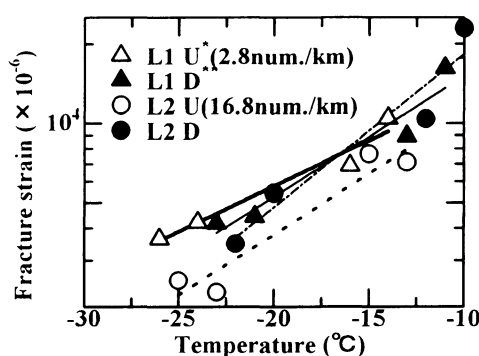


Fig. 5 Relation between Fracture Strain and Fracture Frequency



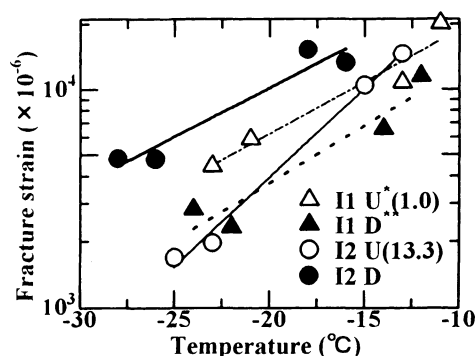
*: Overlay layer, **: Old surface course.

Fig. 6 Relation between Fracture Strain and Temperature at Site L

いても低温き裂の発生との関係を矛盾なく説明できることを考慮すると、低温き裂の発生に支配的な因子は破壊時のひずみである。室内実験におけるアスファルト混合物の低温での引張強度は著しくばらついていたことや、圧裂強度の差が破壊時のひずみほど顕著でないこと、さらに屋外の観察において、低温き裂の形状はほぼ直線的であり、破壊強度が異なる種々の碎石などの影響をほとんど受けないことなどから、アスファルト舗装の低温き裂の主な原因は、低温領域において使用したアスファルト単体の低温性状のうち曲げ強度よりむしろ破壊時のひずみにあると考えられる。

Fig. 5 は、外気温の異なる環境における低温き裂の本数と破壊時のひずみの関係をまとめた。ここでの破壊時のひずみは以下のように求めた。各地点における実験温度-破壊時のひずみの関係を一次式にて近似する。この近似式より各地区の最寒月である 1 月の平均気温値に対応する破壊時のひずみを求める。このひずみ値をその地点の破壊時のひずみとした。**Fig. 5** によると、破壊時のひずみは低温き裂の本数が多くなるほど小さくなっている。低温き裂の本数と破壊時のひずみとの 1 次相関係数は 0.7 であった。

以上のことより、アスファルトの低温性状、特に破壊時のひずみが低温き裂の本数にかなり大きく関与していると考えられる。また、これは各地域の最寒月の平均気温とも相関がある



*: Overlay layer, **: Old surface course.

Fig. 7 Relation between Fracture Strain and Temperature at Site I

ことから、各地点において低温き裂を防止するための適切なアスファルトの選定が可能になると考えられる。

(b) アスファルト舗装のオーバーレイありの地点 (表層 2 層, 基層 1 層の 3 層系)

Figs. 6, 7 は、オーバーレイを施工した I 地区および L 地区における回収アスファルトの曲げ試験の結果を、破壊時のひずみで整理した。

Fig. 6 より、L 地区の両地点におけるアスファルトの性状を旧舗装体の表層 (D** および D) 同士で、またオーバーレイ層 (U* および U) 同士でそれぞれ比較する。表層では破壊時のひずみの差は小さく、オーバーレイ層では差が大きい。すなわち、**Fig. 6** は旧舗装体の表層 (D** および D) の性状がほぼ同一で、かつオーバーレイ層 (U* および U) の性状のみが異なった場合の結果と言える。低温き裂と破壊時のひずみの関係をオーバーレイ層で比較すると、同一試験温度では破壊時のひずみが大きい方 (U*) が低温き裂の本数が少ないという対応関係にある。

Fig. 7 において、I 地区の両地点における旧舗装体のアスファルト舗装の表層 (D** および D) 同士で、またオーバーレイ層 (U* および U) 同士でそれぞれ比較すると、それぞれの破壊時のひずみに差がある。すなわち、**Fig. 7** は旧舗装体の表層 (D** と D) の性状が異なる場合を示した結果と言える。低温き裂と破壊時のひずみの関係を表層とオーバーレイ層でそれぞれ比較すると、表層では低温き裂の少ない (D**) 方が破壊時のひずみは小さくなっている。しかし、同一試験温度では破壊時のひずみが大きい方 (U*) が低温き裂の本数が少ないという対応関係にある。

以上 **Figs. 6, 7** の結果から、オーバーレイ層の低温き裂は、旧アスファルト舗装体に低温き裂が存在しないと仮定した場合でもオーバーレイ層のアスファルトの性状が密接な関係にあると推定される。旧アスファルト舗装体に低温き裂が存在する場合については数値解析シミュレーションを用いて現在検討中である。

4.3. 数値解析シミュレーション

以上の結果より、アスファルト単体の観点から、低温き裂の

Table 7 Type of Pavement Structure (2-layer system)

	Type 1	Type 2	Type 3
Surface course	AC6	KSS	KSL
Binder course	KBS	KBS	KBS
Time at 300×10^{-6} [h]	8.6	8.3	8.4
Stress at 300×10^{-6} [MPa]	0.88	0.92	1.01

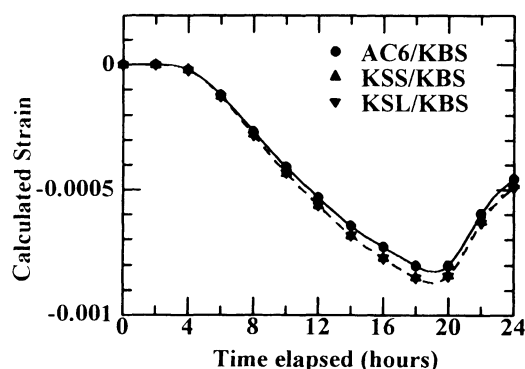


Fig. 8 Calculated Strain of Surface Course at Surface for Various Structures (2-layer system)

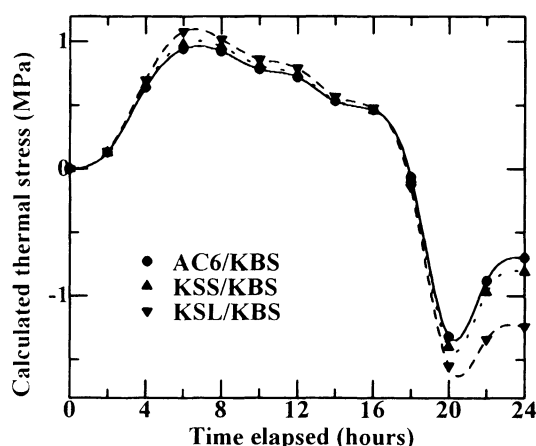


Fig. 9 Calculated Thermal Stress of Surface Course at Surface for Various Structures (2-layer system)

本数はアスファルトの破壊時のひずみに依存することが分かった。またアスファルト混合物の観点から、混合物の応力緩和性状の優劣が低温き裂に関係していることも分かった。しかし、低温き裂が発生する時の応力あるいはひずみがどの程度の値となるかは未だ検討されていない。特に、アスファルト層が2層系、3層系となり、かつ複雑な材料性状を有する舗装構造での検討は行われていない。このような条件での実験は困難であることから、数値解析シミュレーションで検討した。さらに、アスファルト単体と混合物の性状の関連性についても検討を加えた。

4.3.1. オーバーレイなしの地点（アスファルト層2層系）

現場切取り供試体において基層の性状は同一であるが表層の

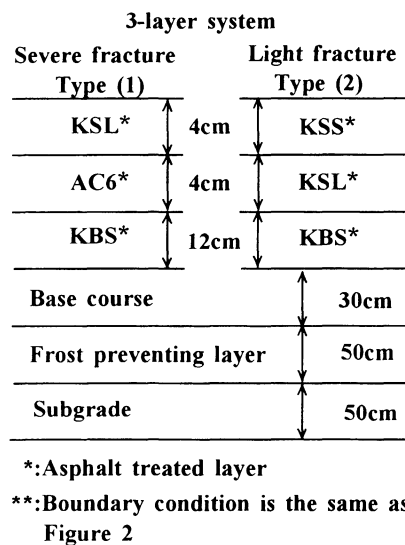


Fig. 10 Pavement Sections (3-layer system) with Various Mixtures Used for Computer Simulation

性状が異なるため、低温き裂が異なる場合のアスファルト層2層系の数値解析シミュレーションを行った。モデルとして Fig. 2 と Table 7 のような舗装構造 (Type 1, Type 2, Type 3) を境界条件とし、表層として応力緩和の一番良い AC6、次いで KSS、および KSL なるアスファルト混合物が使用された (Table 7 参照) と仮定した。

この2層系の外気温は Fig. 1 に示す。

Figs. 8, 9 は数値解析シミュレーションの結果における熱ひずみおよび熱応力について示した。なお、Figs. 8, 9 中のプロットはモデルの表面中央部における値である。

一般に、アスファルト混合物は低温領域で 300×10^{-6} のひずみで破壊することが実験で確認されている²⁴⁾。そこで、Fig. 8 より熱ひずみが 300×10^{-6} となる時間を各舗装構造毎で求め、その時間に対応した熱応力を Fig. 9 より求めた。その結果を Table 7 に示す。これより 300×10^{-6} に達する時間は Type 1, Type 2, Type 3 の三つの構造ともほぼ同一であるが、そのひずみに達する応力は応力緩和の著しい混合物である AC6 が一番小さくなり、先に述べたアスファルト混合物の緩和性状と密接な関係にあることは明白である。

4.3.2. オーバーレイありの地点（アスファルト層3層系）

Fig. 7 の曲げ試験の結果によると、地区 I での低温き裂の少ない地点の表層 (D**) と多い地点のオーバーレイ層 (U) の破壊時のひずみは -18°C 以下で類似している。これに対し、前者のオーバーレイ層 (U*) と後者の表層 (D) の破壊時のひずみは大きい。このようなアスファルトの性状がある特定のアスファルト混合物の応力緩和性状に置き換えられると仮定する。すなわち、応力緩和性状が優れひずみが相対的に大きい混合物は AC6、応力緩和性状が劣りひずみも相対的に小さい混合物は KSL、それらの中間の混合物は KSS に置き換えられると考えられる。このようにアスファルトの低温性状と混合物の応力緩和性状を対応づけると、地点 I のアスファルト舗装の構成は Fig. 10 のようなアスファルト層からなる2種類の3層系

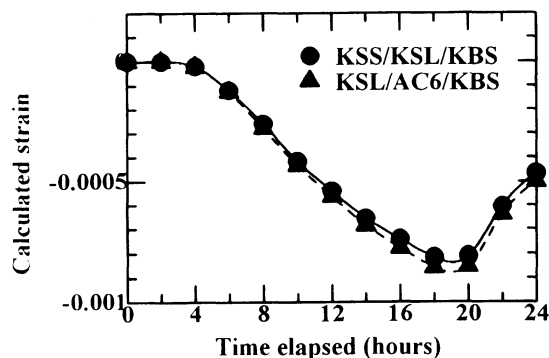


Fig. 11 Calculated Strain of Surface Course at Surface for Various Structures (3-layer system)

の舗装構造 (Type 1, Type 2) と推定できる。このような材料性状を有する構造に Fig. 2 のモデルの境界条件を適用し、数値解析シミュレーションを行った。

外気温の変化に伴うオーバーレイ層の表面の熱ひずみの結果を Fig. 11 に、また熱応力の結果を Fig. 12 にそれぞれ示す。なお、ここで示した値は表面中央部の値を代表値として示している。両図とも先に示した2層系の結果とほぼ同じである。これより、アスファルトの低温性状と低温き裂の関係で得られた結果、すなわち低温き裂はその構造における最も上の層のアスファルトの性状に影響されると考えられる。

4.3.3. アスファルト混合物とアスファルト単体の性状の関係

上記より、3層系の舗装の低温き裂の発生を軽減するには、その地点の外気温を考慮してオーバーレイ層の混合物として応力緩和性状の良い混合物を用いれば効果があることが分かった。しかし、その性状を知ることは容易ではない。そこで、混合物の性状とアスファルト単体の性状との関連づけができれば、実際の材料を品質管理する際には極めて便利である。

森吉ら²⁹⁾は、アスファルト単体と混合物の性状は関連性があると報告しており、その地点の外気温でのアスファルト単体の破壊時のひずみ、強度が分かれば、その地点におけるアスファルト混合物の力学性状が推定できる。これより、アスファルト単体の低温性状からそのアスファルトを用いた混合物の性状を類推すると、各地点の2層系あるいは3層系の舗装体の低温き裂を防止することが可能になると考えられる。

5. 結 語

以上、本論文はアスファルト舗装に発生する低温き裂と使用アスファルトの性状との関係を求め、低温き裂の本数とこれら材質との関係について検討した。また、2層系あるいは3層系のアスファルト舗装構造については、舗装構成とアスファルト層の複雑な性状の組合せおよび外気温の変化との対応を求めるため、現場調査、室内実験ならびに数値解析のシミュレーションを行って検討した。これらの検討の結果、以下の知見を得た。

- 1) アスファルト舗装の低温き裂は、アスファルト混合物が応力緩和現象を伴いながらあるひずみレベルを超えると生ず

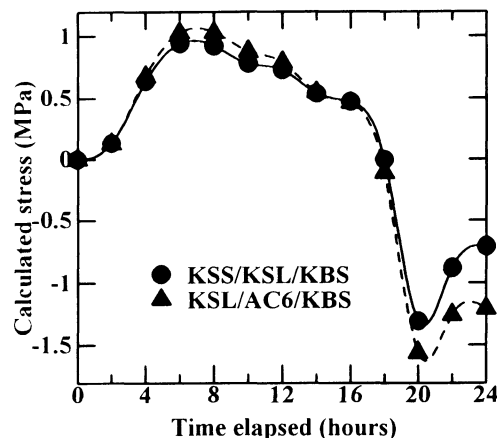


Fig. 12 Calculated Thermal Stress of Surface Course at Surface for Various Structures (3-layer system)

る。

- 2) 低温き裂現象は、熱応力よりも熱ひずみの因子の方が支配的である。
- 3) アスファルト層が3層系の低温き裂を低減するには、その施工箇所の外気温に応じたひずみを有するアスファルトを表層に用いると効果がある。
- 4) アスファルト単体の低温性状とアスファルト舗装の低温き裂現象とは密接な関係にある。

References

- 1) Fred, N., "National Cooperative Highway Research Program Report 37," (1967).
- 2) Amano, T., Tokumitsu, K., Ogasawara, A., Kasahara, A., Moriyoshi, A., *Sekiyu Gakkaishi*, **39**, (5), 378 (1996).
- 3) Molenaar, A. A. A., *RILEM* 2, (1993).
- 4) Okazaki, T., Master's Thesis, Hokkaido Univ., 1976.
- 5) Japan Road Association, "Manual for Test Method of Pavement," Maruzen, Tokyo (1988), p. 568.
日本道路協会, "舗装試験法便覧," 丸善, 東京(1988), p. 568.
- 6) Tokumitsu, K., Moriyoshi, A., Kawamura, K., Kasahara, A., *Sekiyu Gakkaishi*, **38**, (3), 296 (1995).
- 7) Nitta, N., *Sekiyu Gakkaishi*, **16**, (6), 256 (1973).
- 8) Amano, T., Tokumitsu, K., Moriyoshi, A., Proc. of the 6th Workshop on Paving in Cold Areas, Vol. 2, 1996, p. 237.
- 9) Kawamura, Kazuyuki, Kawamura, Kazumasa, Moriyoshi, A., *Sekiyu Gakkaishi*, **37**, (3), 311 (1994).
- 10) Amano, T., Tokumitsu, K., Moriyoshi, A., Proc. of the 6th Workshop on Paving in Cold Areas, 1996.
- 11) Japan Road Association, "Manual for Test Method of Pavement," Maruzen, Tokyo (1988), p. 609.
日本道路協会, "舗装試験法便覧," 丸善, 東京(1988), p. 609.
- 12) Japan Road Association, "Manual for Test Method of Pavement," Maruzen, Tokyo (1988), p. 619.
日本道路協会, "舗装試験法便覧," 丸善, 東京(1988), p. 619.
- 13) Japan Road Association, "Manual for Test Method of Pavement," Maruzen, Tokyo (1988), p. 316.
日本道路協会, "舗装試験法便覧," 丸善, 東京(1988), p. 316.
- 14) Japan Road Association, "Manual for Test Method of

- Pavement,” Maruzen, Tokyo (1988), p. 418.
日本道路協会, “舗装試験法便覧,” 丸善, 東京 (1988), p. 418.
- 15) Moriyoshi, A., Gotho, E., *Sekiyu Gakkaishi*, **35**, (2), 208 (1992).
 - 16) Moriyoshi, A., Kawamura, K., *Sekiyu Gakkaishi*, **35**, (4), 353 (1992).
 - 17) Amano, T., Moriyoshi, A., Kagami, S., Kasahara, A., Proc. of JSCE, (564), Vol. 9, (1997), p. 23.
 - 18) Fromm, H. J., Phang, W. A., *P. A. A. P. T.*, **41**, 383 (1972).
 - 19) Krokosky, E. M., Chen, J. P., Proc. Assn. Asphalt Paving Tech., Vol. 28, (1964), p. 406.
 - 20) Moriyoshi, A., Fujiwara, M., Proc. of JSCE, (396), Vol. 9, (1988), p. 129.
 - 21) Amano, T., Tokumitsu, K., Moriyoshi, A., Proc. of the 6th Workshop on Paving in Cold Areas, 1996.
 - 22) Tokumitsu, K., Moriyoshi, A., Amano, T., Kasahara, A., *Sekiyu Gakkaishi*, **40**, (3), 220 (1997).
 - 23) Moriyoshi, A., Fujiwara, M., Proc. of JSCE, (396), Vol. 9, (1988), p. 129.
 - 24) Moriyoshi, A., Nitta, N., Proc. of JSCE, (390), Vol.8, (1988), p. 219.
 - 25) Moriyoshi, A., Amano, T., Kasahara, A., Tokumitsu, K., 5th International Rilem Symposium, Lyon, 1997.

Summary

Research on Low Temperature Fracturing of Asphalt Pavement

Takaaki AMANO^{†1)}, Morito TAKAHASHI^{†2)}, Akihiko KASAHARA^{†1)}, and Akihiro MORIYOSHI^{†1)}

^{†1)} Faculty of Engineering, Hokkaido University, Nishi 8, Kita 13, Kita-ku, Sapporo 060-8628

^{†2)} Civil Engineering Research Institute, Hokkaido Development Bureau, Hiragishi 1-3, Toyohira-ku, Sapporo 062-0931

Various failures occur in asphalt pavements, and researches on these failures were carried out. Most of them were on rutting or fracturing phenomenon, but research on low temperature fracturing, which is very important in cold regions, have been insufficient, as of now. This is mainly due to the fact that circumstances make it extremely difficult to research, including factors, such as material properties, construction conditions, particular kind of structure involved in asphalt pavement, and the prevailing environment.

Recently, the authors investigated the relation between low temperature cracking in asphalt pavement in cold regions, such as Hokkaido, and pavement structure with varying prop-

erties of asphalt mixture. These researches were carried out in construction fields, and the laboratory, performing simulation analysis of finite element method using visco-elastic program of hybrid type.

The authors arrived at the following conclusions in this study: the low temperature fractures in asphalt pavements in cold region depends mainly upon the strain, more so than on the stress, in asphaltic mixture. The low temperature fracture may occur when strain in the asphalt pavement reaches a critical value accompanying relaxation of stress in asphaltic mixture.

Keywords

Asphalt, Pavement, Fracture strain, Viscoelastic analysis, Relaxation modulus