

脆性領域におけるアスファルト混合物の破壊に関する研究

FRACTURE BEHAVIOR OF ASPHALTIC MIXTURES IN BRITTLE ZONE

森吉昭博*・新田 登**

By Akihiro MORIYOSI and Noboru NITTA

This paper describes the results of experimental research related to the strain and strength at failure of asphaltic mixtures by means of constant rate of strain flexure test, simple tension test, thermal fracture test under various loading and temperature conditions. A new method measuring fracture temperatures of asphalt due to thermal stress at low temperature (Moriyosi Breaking Point Test) and Fraass breaking point test were also conducted. In this study, it is concluded that the strain at failure is of an order of 10^{-4} cm/cm in the region of the brittle failure, and flexural strength of asphaltic mixtures around the brittle point decreases with decrease of rate of strain, and the strongest correlation is observed between thermal fracture temperatures of asphaltic mixtures and Fraass breaking point temperatures, Moriyoshi breaking point temperatures of asphalts.

Keywords: asphaltic mixture, brittle fracture, strength, strain at failure

1. ま え が き

アスファルト舗装はある温度で走行する車両のもと、または外気温の変動のもとで脆性破壊をしたり流動を伴う破壊をすることはよく知られている。一方アスファルト混合物の破壊現象も脆性破壊と流動を伴う破壊の2つに分けられ、この境界の領域は温度のみでなくひずみ速度、温度勾配にも依存しているため、この境界の領域がこれらの因子によりいかに変化するかということはアスファルト混合物の破壊の研究をするとき重要な問題となる。

最近アスファルト舗装の横断亀裂現象の解明のために力学試験だけでなく熱応力破壊試験からの検討も進められ^{1),2)}、力学試験の結果と熱応力破壊試験の結果との対応はあるとされているが、脆性領域におけるアスファルト混合物の強度やひずみに関する対応およびそれらの値について詳細には議論されていない³⁾⁻⁵⁾。このため種々の目的に利用されるアスファルト混合物に使用するアスファルトの選定からアスファルト混合物の設計に至るま

で一貫した考え方はいまだ確立されていないように思われる。

たとえば、アスファルト混合物の破壊を論ずるうえで重要な課題とされるひずみレベルについても力学試験についてはさまざまな研究が行われているが⁶⁾、このひずみレベルと熱応力破壊現象のひずみレベルとの対応についてはほとんど検討されていない⁷⁾。またアスファルト舗装が熱応力によって破壊するときの破壊時のひずみは一般にいわれているアスファルト混合物の力学試験から得られる破壊ひずみ 1×10^{-3} より小さいことが報告されている⁸⁾。このようにアスファルト混合物の破壊現象、特に脆性領域の破壊についてはいまだ不明な点が多いと考えられる。

本研究はアスファルトおよびアスファルト混合物について種々の実験を実施し、脆性領域における破壊現象、特に破壊強度、破壊時のひずみおよび破壊温度について検討した結果を報告する。

2. 実験手法および解析法

使用した種々のアスファルト混合物の配合は Table 1 に示すように温暖地でも脆性破壊することがあるので一般地域と積雪地の粒度を用いた。またこのとき使用したバインダーの主な性状は Table 2 に示す。

* 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科
(〒060 札幌市北区北13西8)

** 正会員 工博 室蘭工業大学教授 工学部土木工学科
(〒050 室蘭市水元町 27-1)

Table 1 Composition of Mixtures (%).

Sieve Opening(mm)	Asphalt Concrete TypeA	Asphalt Concrete TypeB	Asphalt Mortar
13	100	100	
10	88	93	
5	67	86	
2.5	49	60	100
1.2	34	48	
0.6	29	36	94
0.3	20	28	69
0.15	9	20	6
0.074	8	17	1
Binder Content (%)	5.8	9.0	10.0

Table 2 Properties of Asphalts and Asphaltic Mixtures.

No	Pen TR&B	Before TPOI				After TPOI				
		P.I.	Fraass B.P. (°C)	Moriyosi B.P. (°C)	Max Fracture Temp. of Mix. (°C)	Pen TR&B	P.I.	Fraass B.P. (°C)	Moriyosi B.P. (°C)	
1	34	54.0	-1.1	-4	-10	-19.0				
2*	44	50.5	0.8	-12	-23	-23.0				
3**	50	56.5	0.2	-12	-25	-26.6	30	57.1	1.2	-9
4	60	50.6	-0.6	-10	-21	-27.3	46	55.9	0.0	-13
5	69	50.5	-0.2	-12	-22	-28.5	40	57.8	0.1	-12
6	108	44.5	-0.7	-14	-25	-33.5	70	49.8	-0.4	-13
7	173	40.5	-0.4	-21	-30	-36.5	109	47.5	0.3	-19
8	235	37.5	-0.4	-21	-32	-38.4	162	42.8	0.6	-18
9	90	47.5	-0.4	-13	-24	-30.0	78	52.0	0.5	-9
10*	87	57.5	2.1	-23	-34	-29.0	62	71.5	3.2	-18
11	98	44.0	-1.2	-12	-20	-29.0	69	50.4	-0.3	-10
12	55	49.8	-1.0	-19	-19	5.9	-21.0			
13*	73	52.6	0.4	-14	-27	8.3	-26.5			
14	56	52.5	-0.5	-10	-18		32	57.8	-0.4	-9

*:Catalitic Asphalt. **:Semiblow Asphalt. *:Waxy Asphalt

アスファルト混合物の供試体の作成法は次のとおりである。

アスファルトを2ポアズ (0.2 Ns/m²) 相当の温度まで加熱し、これと加熱した骨材とをミキサで3分間混合し、それを30×30×5 cmの鋼製型枠に投入したあとの混合物が30ポアズ (3 Ns/m²) の温度になったとき、線圧18 kgf/cm (176.4 N/cm) のローラコンパクタで24回転圧し、その後45°Cに保持された恒温室でトラバース機構のあるホイールトラッキング試験機を用い荷重55.1 kgf (540.0 N)、トラバース走行速度 (30 cm/6分)、走行速度42回/分の条件でニーディング作用を1時間供試体に与え、これを室温まで冷却した後ダイヤモンドカッターで所定の寸法に六面カットして作成した。

本研究で用いた試験法は以下のとおりである。

(1) 引張試験

本試験機は容量が±500 kgf (±4 900 N)であり、電気・油圧サーボ機構により荷重制御または変形制御ができる。本研究では変位振幅が±1 mmのもとで変形制御とした。2.5×2.5×16 cmの供試体を治具にセットする場合は荷重計が常に零になるようにクロスヘッドを動かし、常温の水槽のメタノールに約20分浸したときも、また引張試験を実施する温度にメタノール温度を設定するときも熱応力が供試体に発生しないように同様の方法を採用した。実験は種々の一定変形速度のもとで行った。このときのメタノールの温度は外部循環機構をもつ水槽で±0.1°Cに制御した。

解析は脆性領域では供試体全体の変形量がきわめて少ないこと、またこのときのフレーム、荷重計および治具等の変形量が供試体の変形量に比べて大きいことも予想

されるため、これらの変形量はあらかじめ作製した校正曲線によって補正した。

短時間領域の荷重記録はデジタルオシロスコープ (DS-334 NF製) を使用し、長時間領域では一般の自動平衡型記録計を用いた。これらを用いるときはアンプ、レコーダおよび荷重計等のドリフトの補正を行った。破壊時のひずみは供試体両端間の変形量を校正曲線から破壊に至るまでの値を求め、これを供試体の元の長さで除して求めた。また低温領域ではデジタル変位計 (±0.001 mm) を用いて供試体接着治具間の種々の点で変形量を求め、この値が補正值と一致することを確認している。ここで引張強度は破壊時の荷重を供試体の元の断面積で除したものとし、引張強度と温度との関係で引張強度が極大値となる温度を脆化点温度とよぶ。

(2) 曲げ試験

本研究では両端単純支持の3点曲げ試験を実施した。使用した機械はインストロン製1185型であり、この機械の容量は±10 000 kgf (±9.8×10⁴N)、変形速度は1 000~0.005 mm/minである。使用した供試体の寸法は3.0×3.0×25 cmで、スパン長は20 cmである。変形速度の大きい場合の荷重記録はレクチグラフ (渡辺測器製WR 3101) を用い、小さい場合はインストロン付属のレコーダをそれぞれ用いた。

解析は弾性解を利用し、曲げ強度は破壊時の荷重を用いて棒状供試体下縁部において求めた⁹⁾。また曲げ強度と温度との関係で曲げ強度が極大値となる温度をここでは脆化点温度とよぶ。

(3) 熱応力破壊試験

この試験は供試体寸法2.5×2.5×26 cmのアスファルト混合物を両端固定し、周囲のメタノールの温度を低温水槽とプログラム設定器を用いて±0.1°Cに制御しながら、ある温度から一定冷却速度で混合物が破壊に至るまで実施した¹⁰⁾。この装置では荷重および温度による荷重計や治具の変形量をできるだけ少なくなるように配慮した。荷重の記録はデータログを用い5分間隔にデジタル入力し、同時に参考のためにアナログ入力も行った。

解析は荷重が最大となり、アスファルト混合物が破壊するときの温度を熱応力破壊温度とし、熱応力は測定された荷重を供試体の元の断面積で除したものとした。なお熱応力破壊強度は破壊温度における熱応力とした。

(4) フラース脆化点試験

本方法はDIN U 6に準拠したが、装置本体をメタノールの入った低温水槽に浸し、温度制御は±0.1°Cとし、1分ごとに本体を水槽から取り出し、アスファルト試料の亀裂を確認する方法を採用した。この方法は従来のものと比較して著しくばらつきが少ないことが確認されている¹¹⁾。フラース脆化点試験の破壊温度を以後フラース

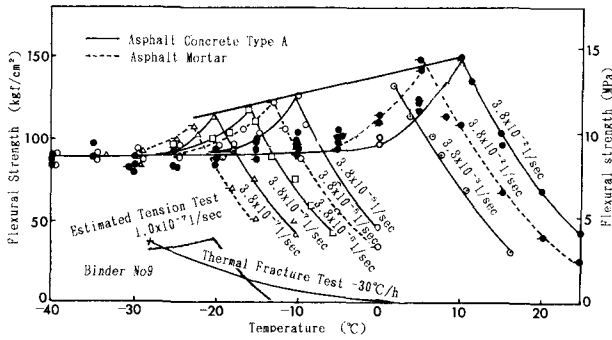


Fig. 1 Relation between Flexural Strength, Thermal Stress and Temperature.

脆化点温度とよぶ。

(5) 森吉脆化点試験

この試験はアスファルト単体の熱応力破壊温度を直接測定するために開発したものである。アスファルトを直径 14 cm, 深さ 1 cm, 厚さ 1 mm のステンレス製容器 2 個におおの 50 g (0.49 kN) ずつ取り, 約 130°C まで加熱融解し, その後徐冷し, 両試料を 45°C の恒温室に 10 分間以上保管し, 一つの試料をある温度のメタノールの低温水槽内に 1 分間浸し, その後すぐ取り出しアスファルトに亀裂があるかどうかを確認する。亀裂があれば, 別の試料を用いてこれより 1°C 低い温度で同様の作業を行い, 亀裂がない場合再度 45°C の恒温室に 10 分間以上保管し, 試料を交互に用いてさらに低い温度で同様の作業を繰り返す。両試料の破壊温度差が 3°C 以上あれば実験はやり直す。この試験の脆化点温度は両試料の高い温度とし, この温度を森吉脆化点温度とよぶ¹²⁾。

3. 実験結果および考察

(1) 曲げ強度

Fig. 1 はアスファルトコンクリートタイプ A および A

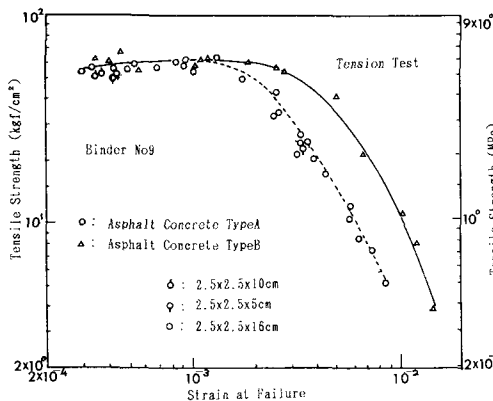


Fig. 2 Relation between Tensile Strength and Strain at Failure.

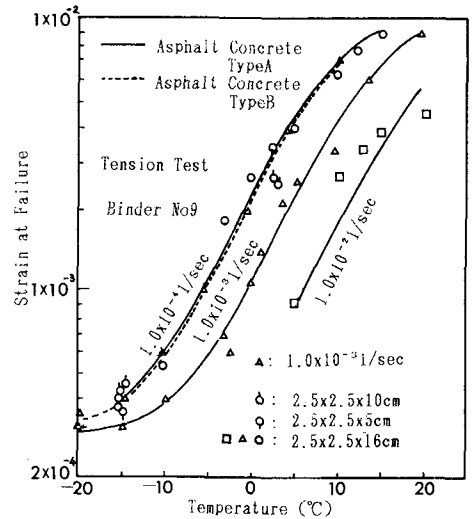


Fig. 3 Relation between Strain at Failure and Temperature.

スファルトモルタルの場合の曲げ強度と温度との関係を示す。これより両混合物はひずみ速度が遅くなるとともに, 脆化点温度より低温側の曲げ強度はほぼ一定値に近づき, 脆化点温度における曲げ強度とひずみ速度との関係は両混合物ではほとんど差がみられなかった。このように脆化点温度における曲げ強度と温度との関係がアスファルトコンクリートタイプ A とアスファルトモルタルの両混合物ではほぼ同一となるのは両混合物とも同じバインダーを使用したため脆化温度のひずみ速度依存性がほぼ同一であるためと思われる。また両混合物が高ひずみ速度領域において脆化点温度より低温側の曲げ強度の変化量が低ひずみ速度領域のそれより著しく大きいのはアスファルト混合物の破壊の進行速度がひずみ速度により異なるためと考えられる¹³⁾。またアスファルトコンクリートタイプ A とアスファルトモルタルの混合物では曲げ強度は脆化点温度においてひずみ速度が一桁変化すると, 6 kgf/cm² (0.59 MPa) 程度変化する。

(2) 引張強度および破壊時のひずみ

アスファルトコンクリートタイプ A とアスファルトコンクリートタイプ B の両混合物の引張強度と破壊時のひずみとの関係は Fig. 2 に示す。これら両混合物の破壊時のひずみの下限値は Fig. 2, Fig. 3 に示すごとく 10⁻⁴ のオーダーの小さいレベルにあることは明らかである¹⁴⁾。

アスファルトコンクリートタイプ A の混合物について供試体寸法のうち断面の大きさ (2.5×2.5 cm) が一定で長さのみを変化させ 16 cm から 10 cm および 5 cm の場合についてひずみ速度も同一として実験した結果, すべての場合 Fig. 2, Fig. 3 に示すようにほぼ同一の破壊時のひずみおよび引張強度が得られた。以上よりアス

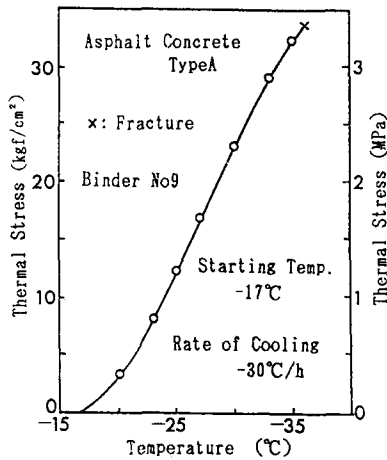


Fig. 4 Relation between Thermal Stress and Temperature.

ファルト混合物の低温領域の破壊時のひずみの値が 10^{-3} のレベルの小さな値であるとする従来の研究より破壊時のひずみが全体に著しく小さいことはきわめて確度の高いものと判断される¹⁵⁾。

(3) 熱応力破壊試験

Fig. 4 は初期温度が -17°C の場合、冷却速度が $-30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ の条件のもとで得られた熱応力と温度との関係を示す。従来の研究によると冷却速度が $-30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ で初期温度が 10°C や 20°C の場合はこれらの曲線の形も位置もほぼ同一であるが、これより低温から実験を開始するとこの曲線の位置が低温領域に移動する¹⁸⁾。この場合初期温度が -17°C で破壊温度が -35°C であり、この曲線の位置は初期温度が 10°C の場合の曲線より低温側に移動し、温度差 18°C でアスファルト混合物は破壊することになる。いまアスファルト混合物の線膨張係数が $2 \times 10^{-5} 1/^{\circ}\text{C}$ と仮定すると破壊時のひずみは 3.6×10^{-4} となる。この値は引張試験で求めたものと同じオーダーであるので力学試験および熱応力試験における破壊時のひずみは両者ほぼ同一と考えてよいと思われる。

(4) 各試験相互間の関係

Fig. 3 の破壊時のひずみ～温度曲線との関係と Fig. 5 の曲げ強度～温度曲線および引張強度～温度曲線から曲げと引張の脆化点温度は同一であるものの、低温領域での引張強度は同一ひずみ速度では曲げ強度のほぼ 6 割程度であり、引張試験で破壊時のひずみが下限値となる温度は Fig. 3, Fig. 5 より脆化点における破壊時のひずみが 1×10^{-3} 程度と思われるので脆化点温度よりほぼ 10°C 低い温度に対応していると考えられる。

Fig. 1 は熱応力破壊試験においてアスファルト混合物の線膨張係数を $2 \times 10^{-5} 1/^{\circ}\text{C}$ と仮定し、曲げ試験のひずみ速度をこの値で除すことにより冷却速度を計算し、曲げ試験のそれとほぼ同一のひずみ速度の冷却速度で実験

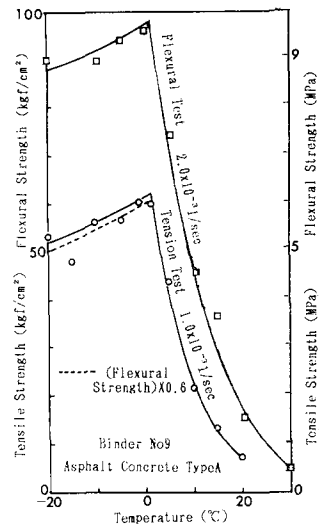


Fig. 5 Relation between Flexural Strength, Tensile Strength and Temperature.

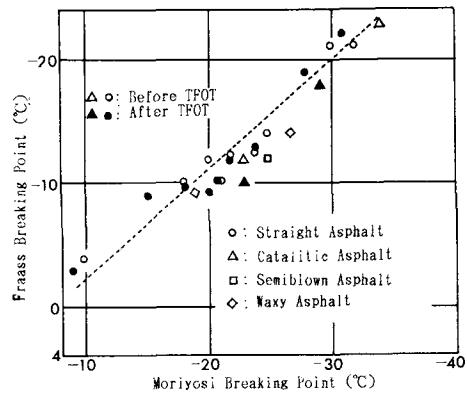


Fig. 6 Relation between Fraass Breaking Point and Moriyoosi Breaking Point.

した結果である¹⁷⁾。図中には脆化点温度における引張強度が曲げ試験と同様にひずみ速度が変化すると脆化点温度の引張強度はひずみ速度が一桁変化すると $6 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ (0.59 MPa) 変化すると仮定し、推定した引張強度と温度との関係も示す。この場合は熱応力破壊試験の破壊温度が曲げの脆化点温度よりほぼ 10°C 低い。ここで熱応力破壊強度は引張試験における破壊時のひずみが下限値となる温度相当の引張強度とほぼ同じ強度で破壊すると考えてもよいと思われる¹⁸⁾。

アスファルト混合物の熱応力試験を初期温度 10°C 、冷却速度 $-12^{\circ}\text{C}/\text{h}$ で行ったときの熱応力破壊温度とこのとき使用したアスファルト単体の力学試験から求めたフラース脆化点温度と熱応力破壊試験から求めた森吉脆化点温度との関係は Table 2 より Fig. 6 に示すようになる。ここで使用したアスファルトはストレートアスファ

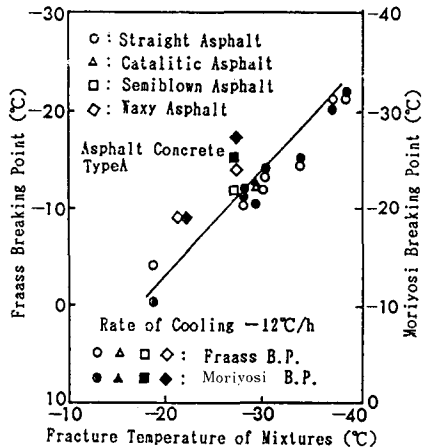


Fig.7 Relation between Fraass Breaking Point, Moriyoosi Breaking Point and Fracture Temperature of Mixtures.

ルトから触媒アスファルト、セミブローンアスファルトおよびワックス入りアスファルトと多岐にわたっているが、いずれの場合もフラース脆化点温度と森吉脆化点温度との間には密接な関係がみられる。同一ひずみ速度のもとで力学試験においてはアスファルト単体とアスファルト混合物の脆化点温度はほぼ 10°C の差があることは著者がすでに報告している¹⁹⁾。

Fig.7においてもアスファルト単体の脆化点温度とアスファルト混合物のそれとはほぼ 10°C の差があり、ワックス入りアスファルトを除くと力学試験の結果とほぼ同じ結果が得られている。このように種々のアスファルトにおいてもフラース脆化点温度と森吉脆化点温度とはほぼ対応関係にあることから、いずれのアスファルトもアスファルト単体の脆化点温度より冷却速度 $-12^{\circ}\text{C}/\text{h}$ の場合のアスファルト混合物の熱応力破壊温度を推定することが可能であるように思われる。

4. ま と め

以上で得られた結論をまとめると次のようである。

(1) アスファルト混合物の脆化点温度における曲げ強度はひずみ速度が遅くなるに伴い小さくなる。

(2) 脆性領域の引張強度は同一ひずみ速度のもとでは曲げ強度の6割程度であり、温度低下とともに一定値に近づく傾向にある。

(3) アスファルト混合物の引張試験の破壊時のひずみの下限値は 10^{-4} の小さなレベルにあり、この値はアスファルト混合物の線膨張係数を $2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ とすると熱応力破壊試験の破壊時のひずみのレベルとほぼ同一である。

(4) 熱応力破壊強度は同一のひずみ速度のもとでは

引張試験で求められた下限値のひずみ相当の温度における引張強度とほぼ対応しているように思われる。

(5) どのアスファルトも力学試験から求めたフラース脆化点温度と熱応力破壊試験から求めた森吉脆化点温度とは対応関係にあるように思われる。

(6) アスファルト混合物の熱応力破壊温度はアスファルトの脆化点温度に依存しているように思われる。

(7) アスファルト混合物の脆性領域における破壊はその領域のアスファルトの性質に依存しているように思われる。

以上よりアスファルトおよびアスファルト混合物の脆性領域における力学試験および熱応力破壊試験間の相互の関係が明らかにされたが、アスファルトの性状とアスファルト混合物のそれとの対応、熱疲労破壊とこれら実験結果との対応、現地の舗装体の横断亀裂の発生メカニズムの解明とそのアスファルト混合物の役割等いまだ解明されていないことが多い。

著者らはこれらの点について現在検討中なのでいずれ機会をみて発表する予定である。

この研究においては電気工学科の深井一郎教授、Songkla UniversityのPichai氏をはじめ上島 壮、高橋 将各氏にはご討議をいただいた。ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 森吉昭博・水沢 隆：アスファルト混合物の熱応力試験に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，1987年8月。
- 2) Sugawara, T. and Moriyoosi, A. : Thermal Fracture of Bituminous Mixtures, Paving in Cold Areas Mini-Workshop Canada/Japan, Vol. 2, pp. 289-320, 1984.
- 3) 菅原照雄・上島 壮・森吉昭博：アスファルト混合物の低温領域における破壊時のレオロジー挙動，土木学会論文報告集，第234号，pp. 131-141, 1975年2月。
- 4) 森吉昭博・上島 壮・菅原照雄：アスファルト混合物の破壊強度に関する研究，土木学会論文報告集，第210号，pp. 77-84, 1973年2月。
- 5) 上島 壮・森吉昭博・菅原照雄：アスファルト混合物の破壊時のひずみに関する研究，土木学会論文報告集，第221号，pp. 73-80, 1974年1月。
- 6) Pell, P. S. and McCarthy, P. F. : Amplitude Effect on Stiffness of Butumen and Bituminous Mixes Under Dynamic Conditions, Rheologia Acta, Vol. 2, No. 2, 1962.
- 7) Dallas N. Little and Barry L. Richey : A Mixture Design Procedure Based on the Failure Envelope Concept, PAAPT, Vol. 52, 1983.
- 8) 2) ibid
- 9) 4) ibid
- 10) 1) ibid
- 11) 森吉昭博・高橋 将・張 肖寧：低温領域におけるアスファルトの亀裂試験法，石油学会誌，Vol. 30, No. 4,

- 1987年.
- 12) 11) ibid
- 13) 森吉昭博・鈴木邦明・張 肖寧・高橋 将：アスファルト混合物の低温低速領域における力学性状について，土木学会北海道支部論文報告集，第42号，pp.549～552，1987年.
- 14) 7) ibid
- 15) Factors involved in the Design of Asphaltic Pavement
- Surfaces, NCHRP, Report 39, HRB
- 16) 1) ibid
- 17) 15) ibid
- 18) Non-Traffic Load Associated Cracking of Asphalt Pavements, PAAAPT, Vol. 35, pp.296～300, 1966.
- 19) 3) ibid
- (1987.8.17・受付)
-