

[ノート]

アスファルト混合物の引張の破壊性状とその応用

吉田 隆輝^{†1)*}, 森吉 昭博^{†2)}, 高野 伸栄^{†2)}^{†1)} 苫小牧工業高等専門学校環境都市工学科, 059-1275 北海道苫小牧市宇錦岡 443^{†2)} 北海道大学大学院工学研究科, 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目

(2000年9月4日受理)

本論文は、アスファルト混合物について引張試験を実施し、常温から -20℃ の低温までの広温度領域にわたり破壊性状を求め、その応用についても述べたものである。引張試験では供試体の寸法効果も検討した。実験の結果、引張強度と温度との間に断面寸法に関係なく高い相関関係が認められた。また、アスファルト混合物の引張の破壊性状と熱応力破壊との関係や、ひずみ速度が広範囲に変化した場合の破壊性状等がこの結果より容易に推定でき、鋼床版舗装の縦き裂の主な原因の一つであるひずみの面からこのき裂現象を考察することが可能となった。

1. 緒言

アスファルト混合物の静的破壊性状は、温度やひずみ速度等の条件により異なることは良く知られている。各種材料の力学性状を求める静的な試験方法として引張試験、せん断試験、曲げ試験、圧縮試験が一般的である。アスファルト混合物では、実験の比較的簡便な曲げ試験を用いての力学性状の研究が非常に多い¹⁾。しかし、曲げ試験から求めたアスファルト混合物の破壊時のひずみの最小値が鋼床版舗装用として -10℃ で 5000×10^{-6} 以上であることが基準化されているが²⁾、これらの基準³⁾を越えた混合物を用いた鋼床版舗装が 1 年ないし 3 年という極端に短い年数で損傷すること、また室内の 400×10^{-6} 程度のひずみレベルでの曲げ疲労試験の結果が屋外の疲労破壊回数と一致しないこと等から静的および動的破壊性状についてのこれらの値の見直しが求められている⁴⁾。

アスファルト舗装の最下面には走行荷重のもとで引張応力が生ずる。この引張応力は疲労やき裂現象の解明に非常に重要であるとされている。また、走行荷重のもとでの鋼床版舗装の表層や熱応力が予想されるような表層には大きな引張応力が生じる。このアスファルト混合物の許容応力レベルを調べるために、直接引張試験が困難なため、曲げ試験や圧裂試験で代用してきた。アスファルト混合物の引張の破壊性状を直接測定することができれば、アスファルト混合物の破壊に関する極めて重要な情報を得ることになり、これが得られると鋼床版舗装や熱応力による破壊現象の解明等の様々な応用が考えられる。

本論文は、棒状供試体の断面寸法の影響や引張試験と温度との関係、およびこれらの研究の応用についても検討した結果を報告する。

2. 使用材料と実験方法

2.1. 使用材料

本研究で用いたアスファルトは針入度 80/100 のストレートアスファルトで、その性状を Table 1 に示す。アスファルト混

合物の種類は細粒度ギャップアスファルト混合物（最大粒径 13 mm, アスファルト量: 6.9%）とし、その混合物の骨材粒度

2.2. アスファルト混合物の供試体作製法

引張試験用供試体の作製は以下の方法により行った。あらかじめ加熱した骨材とアスファルトをアスファルトミキサーを用い 152℃ の混合温度で 50 秒間混合し、その後木製型枠 (30.5 × 44.0 × 6.0 cm) に入れ転圧を行った。転圧は 140℃ の温度で、線圧 44.1 N/cm のハンドローラーを用い、転圧速度 6.4 cm/s で行った。供試体は、この転圧されたアスファルト混合物からダイヤモンドカッターで断面が 3.0 × 3.0 cm, 4.0 × 4.0 cm, 5.0 × 5.0 cm で長さが各々 24 cm の六面カットの棒状に仕上げたものである。この供試体に断面寸法が供試体と同一のもので厚さが 1.0 cm の鋼製治具をエポキシ樹脂を用い突き合わせ接着し、これをユニバーサルジョイントのついた引張治具に装着した。

2.3. 使用装置の特性

引張試験はデジタルランプジェネレーターを備えた電気-油圧サーボ制御方式の動的載荷装置を用いた。その主な機能は、最大荷重 73.5 kN, アクチュエーターの最大速度 7.3 cm/s, 最大変位振幅 ±5.0 cm, 周波数 0.001 ~ 20 Hz である。試験装置本体のほかに、本装置には試験槽、養生槽等が付属している。荷重計は 49.0 kN ロードセル（公称精度 1%）を、記録計は最大応答周波数 500 Hz を有するメモリー機能付きの X-Y レコーダーを使用した。

2.4. 実験条件および解析法

引張試験のひずみ速度は $1.7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ （変形速度: 0.24 cm/min）であり、実験温度範囲は -20 ~ +20℃ (±0.1℃) である。引張強度（以下、 σ_b と称する）、破壊時のひずみ（以下、 ϵ_b と称する）は最大荷重時において求めた。なお引張治具、荷

Table 1 Properties of Asphalt

| Pen. 25°C 100 g, 5 s | R&B [°C] | Density (15°C) [g/cm ³] |
|-------------------------|-------------|--|
| 90 | 46.0 | 1.035 |

* 連絡先

Table 2 Aggregate Grading of Asphalt Mixtures

| Sieve opening [mm] | 13.2 | 10 | 7 | 4.75 | 2.36 | 1.2 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0.075 |
|--------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Passing weight [%] | 100.0 | 92.8 | 81.7 | 73.3 | 56.3 | 53.8 | 50.9 | 37.8 | 13.5 | 10.4 |

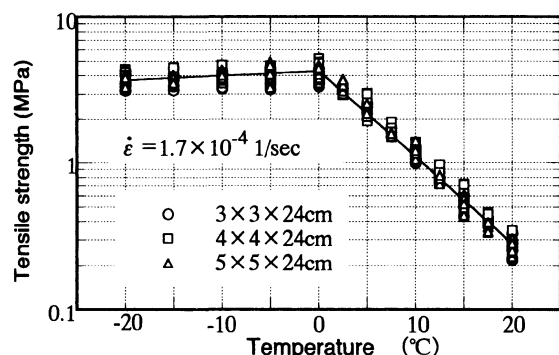


Fig. 1 Relation between Tensile Strength and Temperature

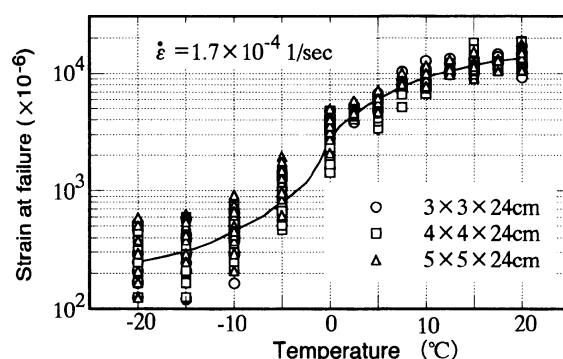


Fig. 2 Relation between Strain at Failure and Temperature

重計等による変形量を補正するために、供試体と同一寸法の鋼材の供試体について同一の温度条件であらかじめ引張試験を行い、このとき動的載荷装置全体の変形量と荷重との関係を求め、この補正曲線と最大荷重よりアスファルト混合物の供試体に生ずる変形量を求め破壊時のひずみを求めた。

3. 結果および考察

3.1. 引張試験

アスファルト混合物について引張試験を行った結果、接着面での離れや端部に破断箇所が集中しなかった。このことは本試験方法においては、端部に応力が集中しておらず、引張試験の方法および装置が正常であることを示している。

引張試験を3種類の断面の供試体を用いて行ったところ、以下のような結果が得られた。 σ_b と温度（以下、 t と称する）の関係をFig. 1に示す。 σ_b と t との関係は、断面の寸法の大きさにかかわらず+20°Cの常温側より低温側に移行するにつれ急激に増加し極大値を示し、さらに温度が低下すると σ_b はやや減少する傾向がみられた。この引張強度が極大値を示す温度を筆者らはぜい化点と称している⁹⁾。一般にアスファルト舗装ではぜい化点を境に高温側ではわだち掘れが、低温側ではき裂が主として発生するものと考えられている。このひずみ速度ではぜい化点が0°Cとなり、ぜい化点における σ_b の値は約4.3 MPaとなった。この値はTonsおよびKrokoskyが報告しているものとはほぼ同一である⁹⁾。一方、ぜい化点は供試体断面の寸法にかかわらず0°Cの一定値となり、 σ_b も断面の寸法に依存しないではほぼ一定値を示した。

σ_b と t との回帰曲線はEq. (1)で、ぜい化点より高温側と低温側の領域で求めた係数 K 、 β 、相関係数 r および供試体数 N を次に示す。

$$\sigma_b = Ke^{\beta t} \quad (1)$$

ここで K : ぜい化点での引張強度 (MPa)、この混合物の場合 $K=4.3$

ぜい化点より高温側: $\beta=-0.14$, $r=-0.99$ ($N=351$)

ぜい化点より低温側: $\beta=0.0068$, $r=0.61$ ($N=316$)

これより、ぜい化点より高温側では、相関係数が0.99と大きな値を得ることができたので、 σ_b と t の間に強い相関関係が存在すると思われる。一方、ぜい化点より低温側はぜい性破壊をするため、 σ_b のばらつきが大きくなる。そのため低温側では高温側に比べ相関係数は比較的小さくなる傾向がある。この二つの領域を一つの関数で表現するとEq. (1)のような指数関数が考えられる。

ϵ_b と t との関係をFig. 2に示す。 ϵ_b-t 曲線は、ぜい化点付近を変曲点とする緩やかなS字状の曲線として描き、ぜい化点より20°C低い-20°Cにおける ϵ_b の平均値(48個)は、 250×10^{-6} 付近の破壊時のひずみが得られ、-40°Cになると平均値はこれよりやや小さめの 200×10^{-6} 付近の値に収束するようにみられた。この 250×10^{-6} のひずみはセメントコンクリートの破壊時のひずみとほぼ同一の値である。また、正方形断面ごとの ϵ_b は同一温度ではほぼ同じ値となり、温度毎の ϵ_b の平均値を滑らかに結んだ ϵ_b-t 曲線で表すことができる。この曲線はひずみ速度の変化に伴い、曲げの破壊時のひずみ-温度曲線と同様に温度軸に沿って左右に移動することが予想される。

3.2. 実験結果の応用例

3.2.1. ぜい化点および引張強度の推定

ぜい化点はひずみ速度との間に片対数の直線関係にあるので⁷⁾、著者らはぜい化点とひずみ速度との間にEq. (2)を得ている。

$$T = \{13620 / (46.09 - \log \dot{\epsilon}) - 273.2\} \times 0.9 \quad (2)$$

ここで、 T : アスファルト混合物の任意のひずみ速度におけるぜい化点 (°C)、 $\dot{\epsilon}$: 任意のひずみ速度 (s^{-1})

このEq. (2)を用いると、任意のひずみ速度におけるぜい化点と引張強度を求めることが可能となる。筆者らは、配合やアスファルト量が異なってもEq. (2)の直線こう配は同一で定数項のみ変化するが、改質アスファルトではこのこう配が変化することを確認している⁸⁾。

一方、引張強度と温度との関係について、ひずみ速度が1け

た大きくなるとぜい化点の引張強度は 0.59 MPa 大きくなり、またひずみ速度が異なっても σ_{ba} - t 曲線はほぼ同一形状となる⁹⁾。以上の結果より、任意温度、任意のひずみ速度 ($\dot{\epsilon}_a$) におけるぜい化点 (T_a) および引張強度 (σ_{ba} : MPa) を求めることができる。

すなわち、基準ひずみ速度 ($\dot{\epsilon}_0$) のぜい化点 (T_0) における引張強度 (σ_{b0} : MPa) と β を求めると、Eq. (2) より $\dot{\epsilon}_a$ でのぜい化点 (T_a) を求め、引張強度 (σ_{ba} : MPa) は Eq. (3) より求めることができる。

$$\sigma_{ba} = \{-\log(\dot{\epsilon}_a/\dot{\epsilon}_0) \times 0.59 + \sigma_{b0}\} e^{\beta t} \quad (3)$$

ここで、

β : ぜい化点より高温および低温での定数、本研究ではぜい化点より高温側で $\beta = -0.14$ 、ぜい化点より低温側では $\beta = 0.0068$

σ_{b0} : 基準ひずみ速度 ($\dot{\epsilon}_0$) でのぜい化点 (T_0) での引張強度 (MPa)、本研究では $\sigma_{b0} = 4.3$ MPa

0.59: バインダー性状に依存して変化する定数

t : 基準ひずみ速度における温度 (°C)

t_r : 任意のひずみ速度における換算温度 (°C)

t_d : 基準ひずみ速度 ($\dot{\epsilon}_0$) のぜい化点 (T_0) と求めるひずみ速度 ($\dot{\epsilon}_a$) のぜい化点 (T_a) との差 (°C)

$T_a > T_0$ の場合 ($\dot{\epsilon}_a > \dot{\epsilon}_0$)、 $t_d = T_a - T_0$ 、 $t_r = t + t_d$

$T_a < T_0$ の場合 ($\dot{\epsilon}_a < \dot{\epsilon}_0$)、 $t_d = T_0 - T_a$ 、 $t_r = t - t_d$

ぜい化点よりも低い温度領域では、ひずみ速度が同一であれば引張強度は曲げ試験から求められる曲げ強度のほぼ 0.6 倍であるが、ぜい化点より高温側では、曲げ強度が通常弾性解を用いて求めるため、その値には精度上の問題点がある。したがって、ぜい化点より高温領域での引張強度も数式化され、任意温度の引張強度が推定できることは、大変意義があると考えられる。

3.2.2. アスファルト舗装の熱応力破壊 (横断き裂) の推定

寒冷地では、外気温の低下に伴いアスファルト舗装に横断き裂現象が生ずる。この現象に対して SHRP は室内で熱応力試験を実施し、このとき得られる破壊温度を舗装表面温度以下に抑えることにより防止できると考えている。従来、Hill らは、アスファルト混合物の熱応力破壊温度は引張試験の強度-温度曲線と熱応力試験の応力と温度との関係の両曲線の交点から求められるとしている。しかし、この考え方は両試験のひずみ速度が同一でなければならぬにもかかわらず引張試験のひずみ速度が一切考慮されていないため、この推定法では熱応力による破壊温度を求めることは不可能と考えられる。筆者らはこの現象について以下のように考察している。すなわち、外気温の一定冷却速度 ($-2^\circ\text{C}/\text{h}$) のもとで、アスファルト混合物の線膨張係数が $2.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ とすると、アスファルト舗装体に生ずる熱応力のひずみ速度は約 $1.1 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ($2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C} \times 2^\circ\text{C}/3600 \text{ s}$) になると考えた。このとき Huanyan は、一定冷却速度のもとで、応力緩和のある領域から緩和現象のほとんど存在しないであろうぜい性領域に移る温度を転移温度と呼んでいる⁹⁾。この温度は引張試験でいうところのぜい化点に相当していると考えられる。したがって、この転移点をこのひずみ速度 ($1.1 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$) について引張試験から得られたぜい化点との関係の Eq. (2) を用いると、この混合物の転移点は -19°C となる。筆者らによると熱応力破壊温度はこれより 7°C 低いことから⁷⁾、この混

合物の熱応力による破壊温度は -26°C となり、これを使用した舗装の路面温度がこれ以下になるとアスファルト舗装に横断き裂現象が生ずると考えられる。

3.2.3. 鋼床版上のアスファルト舗装に生ずる縦き裂についての考察

改質アスファルトを用いた鋼床版舗装用アスファルト混合物の 3 点曲げ試験 (供試体寸法: $5.0 \times 10 \times 30 \text{ cm}$, スパン長: 20 cm , 載荷速度: $50 \text{ mm}/\text{min}$) で、 -10°C の破壊時の曲げひずみが 5000×10^{-6} 以上あれば、鋼床版舗装の縦き裂を防ぐことができることされ、この値が基準化されている。しかし、一般に曲げ試験における最小の破壊時の曲げひずみは、供試体底面の平行度、3 点曲げ載荷点と支承部での同時載荷等で変形量の測定の精度に問題があることで知られている。一方、3 点曲げ試験で最小の破壊時の曲げひずみが 5000×10^{-6} でも、同一混合物かつ同一ひずみ速度における引張の最小の破壊時のひずみはストレートアスファルトを使用した密粒度アスファルト混合物で $(200 \sim 300) \times 10^{-6}$ であることが明らかにされている¹⁰⁾。

実際の鋼床版舗装用混合物の場合でも、大変形の曲げ作用でき裂が発生するのではなく、微小な引張 (300×10^{-6} 程度のひずみ) 作用で破壊すると考えられる¹¹⁾。鋼床版舗装の表層用混合物として、本研究の混合物を使用し、車両が $6 \text{ km}/\text{h}$ の速度でこの舗装上を走行した場合、ひずみ速度がおおむね $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ になるとすると、このときのぜい化点は Eq. (2) よりほぼ 4°C で、速度が $60 \text{ km}/\text{h}$ (ひずみ速度: 10^{-2} s^{-1}) で 9°C 程度となる。このように走行速度が速いほどひずみ速度が大きくなり、またぜい化点が高くなる。このひずみ速度の速度 ($60 \text{ km}/\text{h}$) で、ストレートアスファルトを使用した混合物の破壊時のひずみが平均しておおよそ 250×10^{-6} となるのはぜい化点より 20°C 以上低い温度であるので、この混合物の温度が -10°C 以下で破壊時のひずみに達することが予想される。3 次元弾性体の FSM のひずみ解析からアスファルト混合物の弾性係数が低温 (-10°C 以下)、短時間 (0.01 秒) で $9.8 \times 10^3 \text{ MPa}$ であり、この舗装上を車両 (20 トン) が走行する時に 300×10^{-6} 程度の引張ひずみがアスファルト舗装表面に発生すること、また走行実験でもこれに近い値が確認されている¹¹⁾。したがって、 -10°C 以下では 1 台の車両走行でもき裂が発生する可能性があると考えられる。

本研究のアスファルトを使用した場合、引張の破壊ひずみの最小値はこの値より小さいが、これは使用アスファルトや配合が異なるとぜい化点や強度および最小の破壊時のひずみの大きさも変化するためと考えられる。したがって、鋼床版舗装の縦き裂防止を考える上で、アスファルト混合物の引張時のぜい化点および破壊性状の測定や推定は疲労破壊を含めた現象解析に対して極めて重要と考えられる。

3.2.4. 引張の疲労破壊への応用

鋼床版上のアスファルト舗装や一般道路のアスファルト舗装のき裂は 1 回のオーバーロードだけでなく繰り返し走行により生ずるいわゆる疲労破壊で生ずることもあると考えられている。したがって、従来の曲げの疲労破壊試験は設定ひずみと正弦波の周波数の大きさを一定とし、種々の温度毎に実験するのが通例であった。この方法によると正弦波に 1/4 波長までのひずみ速度と載荷時間から求めたひずみ速度が全ての温度につい

て同一のひずみ速度であるが、静的破壊試験から得られる破壊強度や破壊時のひずみの何%で実験するかという破壊性状との関係を考慮していない。このためアスファルト混合物の疲労破壊試験では温度が高くなると相対的に破壊時のひずみが大きくなるため、同一周波数ではひずみ速度が変化してしまい、著しく疲労破壊回数が増加する結果となることが知られている。一方、引張の疲労破壊試験ではひずみ速度は同一でかつ静的破壊性状の何%かで正確に実験することができるため、直接引張試験の手法は大変重要であると考えられる。

最小破壊時のひずみおよびぜい化点破壊時のひずみをそれぞれ 250×10^{-6} 、 1000×10^{-6} 、ひずみ速度を $3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、周波数を f とし $1/4$ 波長までの載荷時間を $(1/2\pi f)/4$ より求める。破壊時のひずみの 0.6 倍のひずみで引張の疲労破壊試験を行うとすると、前者の周波数 f は 8.0 Hz ($\dot{\epsilon} = \epsilon/t$, $t = 1/2\pi f$ より $f = \dot{\epsilon}/2\pi\epsilon$, 上記条件を入れると $f = (1/8\pi)(\dot{\epsilon}/0.6\epsilon) = (1/8\pi)(3 \times 10^{-2}/250 \times 10^{-6} \times 0.6)$), 同様に後者の周波数 f は $(1/8\pi)(3 \times 10^{-2}/1000 \times 10^{-6} \times 0.6)$ より 2.0 Hz となる。すなわち、疲労破壊の損傷が温度により変化すること、およびひずみ速度を考慮した破壊時のひずみの設定は周波数を変化させることにより、レオロジー的に正確な引張の疲労破壊試験を室内で実施することができるようになる。

4. ま と め

アスファルト混合物の引張の破壊性状を、長さ同一の3種類の断面の棒状供試体を用いてひずみ制御方式により求め、この結果と応用例について述べ、以下のことを明らかにした。

(1) 供試体断面や試験法の違いにかかわらず、ぜい化点より高温側において引張強度と温度との間に強い指数の関係が認められた。ぜい化点より低温側では高温側に比べ相関係数は小さくなる傾向がある。この二つの領域の引張強度と温度との関係は指数関係で表現できる。

(2) 引張試験の結果を利用すると、熱応力破壊および鋼床版舗装の縦き裂現象を防止することが可能になると考えられる。

(3) アスファルト混合物の引張の破壊現象が正方形の断面形状に関係なく、広範囲なひずみ速度および温度で推定可能となり、ひずみ速度の変化に応じたぜい化点および引張強度の推定が可能となる。

(4) 任意のひずみ速度における破壊時のひずみが既知であれば、ひずみ制御もとの静的な引張の破壊性状をも考慮した動的な引張の疲労破壊試験が実施可能になる。

謝 辞

実験実施にあたって苦小牧工業高等専門学校高橋正一技官に多大な御協力を得た。また、本校卒業生森一徳、岩瀬匡博、千葉友則、工藤哲也、山田秀樹、北幸盛、布施浩司、松尾勝司、小川修、北一博、中村芳幸、佐藤公平、三上茂信の諸君に実験の協力を得た。記して深甚な謝意を表する。

References

- 1) Moriyoshi, A., Kamijima, T., Sugawara, T., *Journal of JSCE*, **210**, 57 (1973).
- 2) Kawada, N., Tajima, H., Hanno, H., Ego, H., *Hosou*, **32**, (8), 10 (1997).
- 3) Tada, H., "Koushoubanhosou no sekkei to sekou," Kajima Syuppankai, (1990), p.163-191.
多田宏行, "鋼床版舗装の設計と施工," 鹿島出版会, (1990), p.163-191.
- 4) Monismith, C. L., Brown, S. F., *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **68A**, 128 (1999).
- 5) Moriyoshi, A., Nitta, N., *Journal of JSCE*, **390**, 219 (1988).
- 6) Tons, E., Krokosky, E. M., *Proc. A. A. P. T.*, **32**, 497 (1963).
- 7) Moriyoshi, A., Mizusawa, T., *Journal of JSCE*, **384**, 137 (1987).
- 8) Moriyoshi, A., Ph. D. Thesis., A research of mechanical behavior of asphaltic mixtures, Hokkaido University, Sapporo, Japan, 1973.
- 9) Huanyan, Z., Ph. D. Thesis, Royal Institute of Technology, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1995.
- 10) Moriyoshi, A., Amano, T., Kasahara, A., *Proc. of the 5th International RILEM Symposium*, 1997, p.145.
- 11) Sumi, K., *Asufaruto (asphalt)*, **38**, 29 (1996).

Summary**Fracture Properties of Asphalt Mixture in Tension and Application**Takaki YOSHIDA ^{†1)}, Akihiro MORIYOSHI ^{†2)}, and Shin-ei TAKANO ^{†2)}^{†1)} Dept. of Civil Engineering, Tomakomai National College of Technology, Nishikioka 443, Tomakomai, Hokkaido 059-1275, JAPAN^{†2)} Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Nishi 8-chome, Kita 13-jo, Kita-ku, Sapporo 060-8628, JAPAN

This paper describes the result of tensile test for asphalt mixtures over a wide range of temperature: from the ambient temperature to the temperature as low as -20°C . This paper also describes the application of tensile test and its size effect. Based on the test results, it was evident, regardless of the cross sectional area, tensile strength and temperature were linearly related, and the transition point and tensile strength of

asphalt mixtures for unknown rate of strain can easily be estimated by three equations. Furthermore, it is considered that fractural behavior such as longitudinal crack in asphalt pavement on orthotropic steel deck bridge and transverse cracks in cold areas can be estimated based on tensile fracture properties.

Keywords

Asphalt mixture, Tensile strength, Failure strain, Tension test