

アスファルト安定処理混合物の疲労破壊特性試験

Fatigue failure characteristics of an asphalt-treated base course mixture

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 ○正 員 丸山 記美雄 (Kimio Maruyama)
同 上 正 員 木村 孝司 (Takashi Kimura)

1. 研究の背景と目的

北海道地域では、加熱混合により製造される瀝青安定処理路盤材(以下、アスファルト安定処理混合物という)をアスファルト混合物最下層に標準的に使用しており、その道路の延長は国道だけでも約 6,500km に及ぶ。これらの実際の道路の一部において、老朽化に伴うボトムアップ型の疲労ひびわれが発生している実態にあり、今後の進捗が懸念される。この状況に適切に対応するためには、アスファルト安定処理混合物の動的粘弾性や疲労破壊特性を詳細に把握することが重要となる。

そこで、本報告ではアスファルト安定処理混合物を対象を絞って温度やひずみレベルを変化させた室内試験を行い、アスファルト安定処理混合物の温度と疲労破壊特性や動的粘弾性状の計測を行った。また、疲労破壊特性を表す指標としての散逸エネルギーに関する計測も行った。得られたデータは、任意の温度、ひずみレベルにおけるアスファルト安定処理の動的粘弾性状と疲労破壊特性を算定する際に活用でき、今後の各種検討の基礎情報となるためここに報告する。

2. 室内試験の方法

(1) 目的と試験方法

様々な温度やひずみレベルにおけるアスファルト混合物の動的粘弾性状と疲労破壊特性を把握するために、試験温度を-10℃から+40℃の範囲で 10℃間隔 6 水準、ひずみレベル 100×10^{-6} から 500×10^{-6} の範囲で 100×10^{-6} 間隔 5 水準設定し、試験温度とひずみレベルを変化させてアスファルト安定処理混合物供試体に対して図-1 に示す装置により 4 点曲げ疲労試験を実施した。試験温度とひずみレベルの組み合わせおよび試験数量を表-1 に示す。制御方法はひずみ制御、載荷周波数は 10Hz、正弦波での両振りとした。試験温度に設定した恒温槽の中に供試体を入れて 6 時間以上養生後に 4 点曲げ疲労試験を行った。破壊回数の測定に加えて、荷重とアクチュエータ変位を 1,000Hz の測定間隔で取得し、ひずみと応力を算定して得たリサージュ曲線から、複素弾性率、貯蔵弾性率、損失弾性率、位相角、単位散逸エネルギーを算定し、これらの指標に対する評価も行った。なお、40℃の試験温度においては破壊時の変曲点が明確とならないため破壊回数の測定は行っていない。

供試体は、針入度 80-100 のストレートアスファルトをバインダに用いた。実験を行ったアスファルト安定処理混合物(0-30)は、粒度範囲の中央値を目標粒度として骨材粒度を設定した。

供試体作製時には、一層の仕上がり厚が骨材最大粒径 30mm の 2 倍以上となるよう幅 150×奥行 400×厚

80mm のブロック状供試体を 30 個作製し、ダイヤモンドカッターでブロック状供試体の中央部から上下左右 4 面カットで $50 \times 50 \times 400\text{mm}$ の供試体を 2 本切り出して必要本数である合計 60 本の角柱状供試体を作製した。

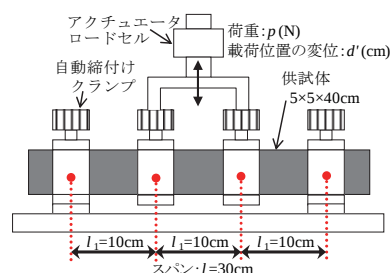


図-1 4点曲げ疲労試験装置の概要図

表-1 試験数量と試験条件

ひずみ 温度	100 $\times 10^{-6}$	200 $\times 10^{-6}$	300 $\times 10^{-6}$	400 $\times 10^{-6}$	500 $\times 10^{-6}$
-10℃			3本	3本	3本
0℃		3本	3本	3本	
+10℃	3本	3本	3本	3本	
+20℃	3本	3本	3本	3本	
+30℃		3本	3本	3本	
+40℃		3本	3本	3本	

(2) 測定データ整理方法

1,000Hz の測定間隔で測定した載荷装置の荷重とアクチュエータ変位から、式(1)によって供試体中央に発生するひずみ ε と応力 σ を算定した。

$$\sigma = 3pl_1/bh^2, \quad \varepsilon = 27hd'/5l^2 \quad (1)$$

ここで、 p : 荷重(N) b : 供試体の幅(cm)

h : 供試体の高さ(cm) l_1 : 支点と載荷点間の距離(cm)

l : スパン(cm) d' : 載荷点における変位(cm)

アスファルト混合物などの粘弾性体に振幅 σ_i 、周波数 f の正弦的に変化する応力を生じさせた場合、ひずみは振幅 ε_i 、周波数 f で δ_i だけ位相の遅れた波形となる。これらを直行する 2 軸上で整理すると図-2 に示すような楕円軌道のリサージュ曲線が得られる。このとき、外力が粘弾性体に対して 1 周期単位体積当りになす仕事の量は式(2)に示すように $w_i = \pi \cdot \sigma_i \cdot \varepsilon_i \cdot \sin \delta_i$ で与えられる。この外力からの仕事量は、粘弾性体内部の減衰要素により 1 周期あたりに散逸するエネルギーの量に一致し、これを単位散逸エネルギーと呼ぶ。得られたリサージュ曲線から、式(2)によって位相角、複素弾性率、貯蔵弾性率、損失弾性率および単位散逸エネルギーを算定している。破壊回数は既往の報告¹⁾と同様に、載荷重の変曲点から算出した。

$$\begin{aligned}
 \text{位相角} & \quad \delta_i = \sin^{-1}(B_i/A_i) \\
 \text{複素弾性率} & \quad |E_i^*| = \sigma_i / \varepsilon_i \\
 \text{貯蔵弾性率} & \quad E_i' = |E_i^*| \cos \delta_i \\
 \text{損失弾性率} & \quad E_i'' = |E_i^*| \sin \delta_i \\
 \text{単位散逸エネルギー} & \quad w_i = \pi \cdot \sigma_i \cdot \varepsilon_i \cdot \sin \delta_i
 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 δ_i : i サイクル時の位相角(rad)
 σ_i : i サイクル時の応力振幅
 ε_i : i サイクル時のひずみ振幅
 $|E_i^*|$: i サイクル時の複素弾性率(MPa)
 E_i' : i サイクル時の貯蔵弾性率(MPa)
 E_i'' : i サイクル時の損失弾性率(MPa)
 w_i : i サイクル時の単位散逸エネルギー(MJ/m³)

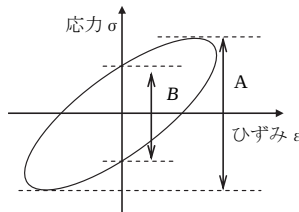


図-2 試験により得られるリサージュ曲線

3. 試験結果と考察

(1) 異なる試験温度における破壊回数

試験温度ごとの破壊回数とひずみの関係を図-3 に示す。破壊回数とひずみの関係は、両対数紙上で直線関係が成り立つが、試験温度に応じてその関係は大きくシフトし、破壊回数の対数表示で2オーダー程度の範囲に分布することがわかる。また、同一のひずみレベルの疲労破壊回数に着目すると、破壊回数は温度の高低に応じて単調に大小が変化するものではなく、図-3 においては試験温度が-10℃から+20℃の間は試験温度が高くなると疲労破壊回数が小さくなり、+20℃から+30℃の間は試験温度が高くなると破壊回数が大きくなる。+20℃の時の疲労破壊回数が最も小さい。

以上のように、疲労破壊回数はひずみや温度に応じて変わるものであり、その詳しいデータが得られたものと考ええる。

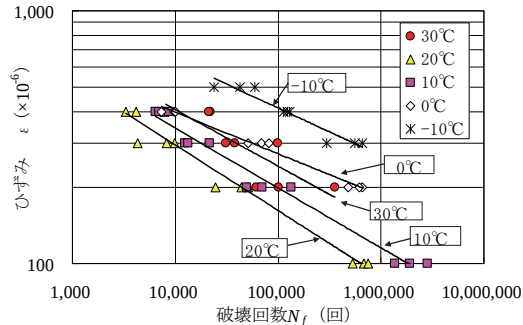


図-3 温度毎の疲労破壊回数とひずみの関係

(2) 載荷回数の増加に伴うリサージュ曲線の変化

繰返し載荷回数とリサージュ曲線の推移の状況を図-4 に示す。試験開始直後は右肩上がりの楕円形となってい

るが、繰返し載荷回数の増加に伴って応力が減少していき横に寝たループを描くようになり、更に繰返し載荷回数が増えるとひし形状になり最終的には大きく波形が乱れた状態になることが分かる。

繰返し載荷回数に対するリサージュ曲線の推移と複素弾性率、貯蔵弾性率、損失弾性率、位相角、単位散逸エネルギーの推移を対応させて示すと図-5 のようになる。複素弾性率は繰返し載荷回数の増加に伴い徐々に値が低下していくが、その後急激に値が小さくなり破壊に至る。貯蔵弾性率も複素弾性率と同様の傾向を示す。損失弾性率は繰返し載荷回数の増加に伴ってわずかに増加していく傾向にあり、その後急激に値が低下する。位相角も繰返し載荷回数の増加に伴ってわずかに値が上がっていく傾向にあるが、値が急激に増加したあと急減する傾向が分かる。

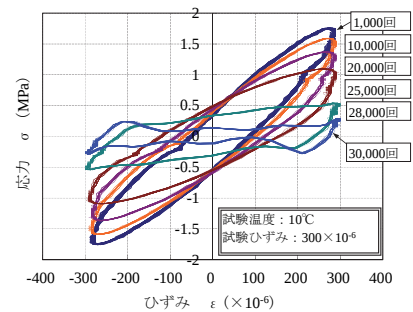
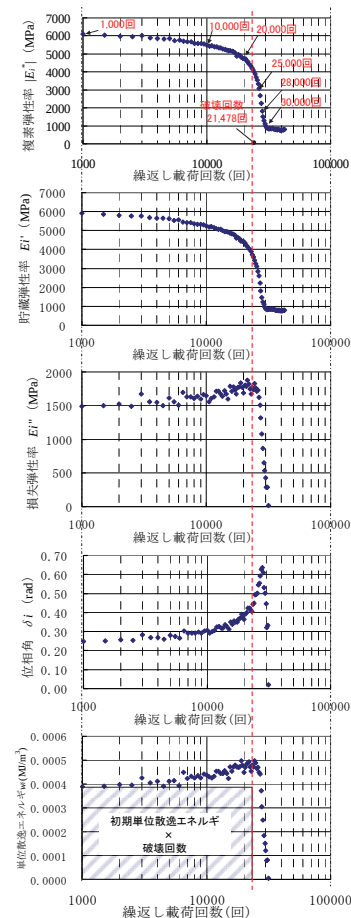


図-4 繰返し載荷回数とリサージュ曲線の推移

図-5 繰返し載荷回数と各種の物性値の測定例 (試験温度 10℃, 試験ひずみ 300×10⁻⁶ の場合)

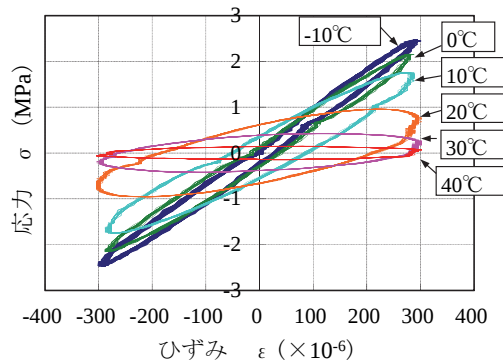


図-6 異なる試験温度におけるリサージュ曲線の違い

(3) 載荷回数の増加に伴うリサージュ曲線の変化

異なる試験温度における繰返し載荷回数が 1,000 回時のリサージュ曲線形状の違いを示すと図-6 のようになる。試験温度が高い方が楕円の傾きが小さく、楕円の幅は 20℃の時に最も広がっており、試験温度によって混合物の動的粘弾性状が変化している様子がわかる。なお、繰返し載荷回数が 10,000 回時など破壊回数以下の段階では、同様の傾向が見られるが、ここでは 1,000 回時の結果のみを示した。

(4) 試験温度と各種の弾性率の関係

横軸に試験温度、縦軸に載荷回数が 1,000 回時の複素弾性率、貯蔵弾性率、損失弾性率をとった図を図-7 に示す。前述したように、繰返し載荷回数が破壊回数以下の段階では値が若干変化するものの同様の傾向が見られるため、ここでは 1,000 回時の結果のみを示した。温度、ひずみレベルの異なるすべての実験データをプロットしてある。

アスファルト混合物の見かけの弾性係数に相当する複素弾性率は温度の上昇とともに低下し、アスファルト混合物の弾性項を表す貯蔵弾性率も複素弾性率と同様温度の上昇に伴い低下する傾向にあることがわかる。ひずみレベルの違いは、各種弾性率に大きな差を生じないようである。

一方、損失弾性率は-10℃から温度が上昇するに伴って値が増加し、20℃付近を頂点としてそれ以上の温度域では温度が高くなるに従い値が低下する傾向を示すことがわかる。

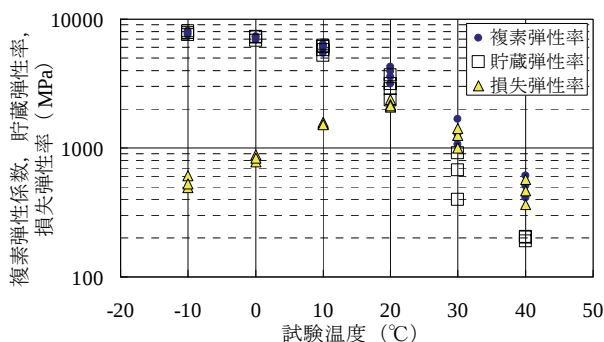


図-7 試験温度と各種弾性率との関係

(5) 試験温度と位相角の関係

試験温度と繰返し載荷回数が 1,000 回時の位相角 δ の関係を図-8 に示す。位相角 δ が 0(rad)の場合は完全弾性体であり、位相角が $\pi/2$ (rad)の場合は完全粘性体とされる。温度が-10℃の時にはほぼ弾性体に近いが、位相角は温度の上昇に伴って増加して、温度が 30℃や 40℃の時には粘性体としての性質がかなり強くなっていることが分かる。

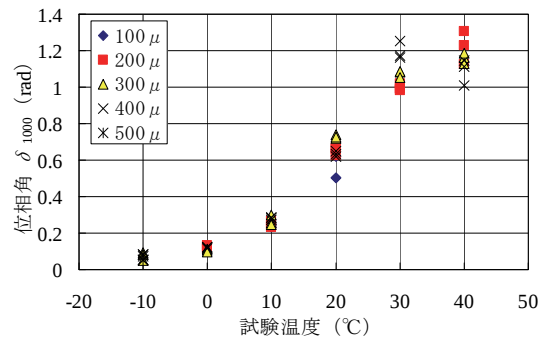


図-8 試験温度と位相角の関係

(6) 破壊回数と総散逸エネルギーおよび初期単位散逸エネルギーの関係

単位散逸エネルギーは図-5 に示したように、繰返し載荷回数の増加に伴い徐々に増加し、一定の回数を経過（図-5 では 2 万回程度）すると急激に低下し、試験供試体は破壊に至る。破壊に至るまでの単位散逸エネルギーを積分したものを総散逸エネルギーと定義すると、総散逸エネルギーと破壊回数の関係は図-9 に示すとおり両対数軸上で直線の関係であることが確認された。総散逸エネルギーと破壊回数を対数紙上でプロットすると温度、周波数、バインダの種類、制御方法によらず直線の関係が得られることが知られており^{2), 3)}、本実験においてもこのことを裏付ける結果が得られたといえる。

ここで、破壊に至るまでの単位散逸エネルギーの積分値が図-5 に斜線で示した四角形の面積におおむね等しいと扱うことができれば、総散逸エネルギーの算定は簡易になる。そこで、繰返し回数が 1,000 回のときの単位散逸エネルギーを初期単位散逸エネルギーと定義し、初期単位散逸エネルギーと破壊回数の積として算定した総散逸エネルギー（初期単位散逸エネルギー×破壊回数）と、積分によって求めた総散逸エネルギー（積分）を対比した結果を図-10 に示す。初期単位散逸エネルギーと破壊回数の積で求めた総散逸エネルギー（初期単位散逸エネルギー×破壊回数）は、積分によって求めた総散逸エネルギー（積算）と、ほぼ同じ値となっていることがわかる。このことから、積分により算定した総散逸エネルギーとして、初期単位散逸エネルギーと破壊回数の積を代用として用いても大差ないことがわかる。

次に、破壊回数と初期単位散逸エネルギーの関係を図-11 に示す。初期単位散逸エネルギーと破壊回数は両対数紙上で直線となる関係にあり、温度やひずみレベルが異なっても式(3)に示す同一の直線で表現できることが分かる。

$$w_{1000} = 0.0287 \times N_f^{-0.4277} \quad (3)$$

すなわち、疲労破壊特性の評価に散逸エネルギーの概念を取り入れることの有効性が確認され、さらに測定の容易性や利便性を考えると、繰り返し载荷回数 1000 回時の単位散逸エネルギーと破壊回数を把握することで疲労破壊性状は十分に表現可能と考えられる。

(7) 温度と初期単位散逸エネルギーの関係

温度と初期単位散逸エネルギーの関係を図-12 に示す。初期単位散逸エネルギーは各ひずみレベル毎に 20℃付近に頂点を持つ上に凸の曲線となる関係が認められる。なお、試験周波数等が変われば初期単位散逸エネルギーが最大を示す温度も変化する性質のものであり、一概に 20℃付近の時に初期単位散逸エネルギーが最大となる訳ではない点に留意する必要がある。

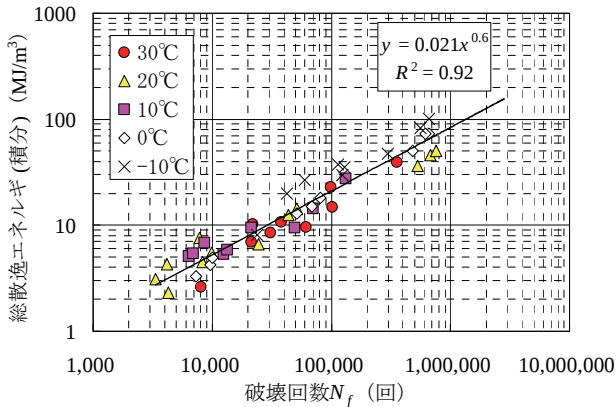


図-9 繰り返し载荷回数と総散逸エネルギーの関係

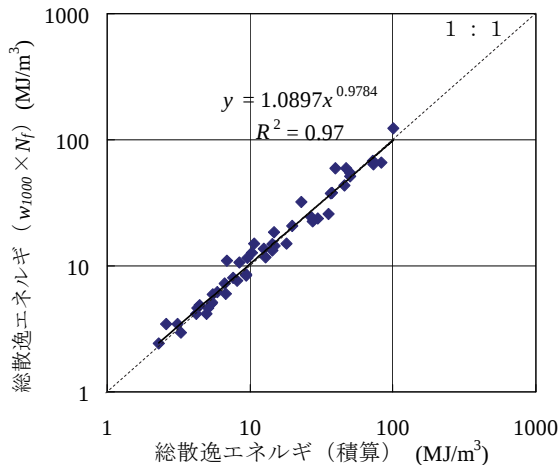


図-10 積分により算出した総散逸エネルギーと初期散逸エネルギー×破壊回数で算出した総散逸エネルギーの関係

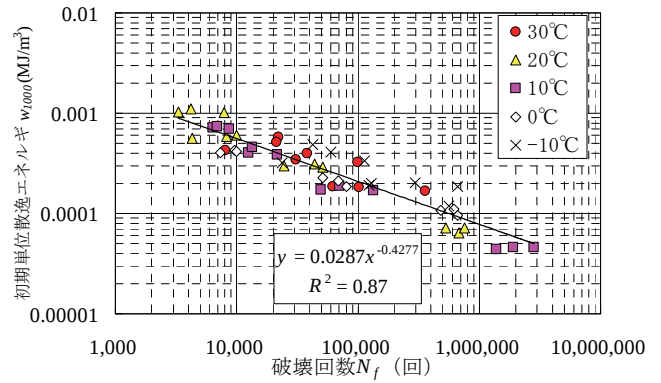


図-11 破壊回数と初期単位散逸エネルギーの関係

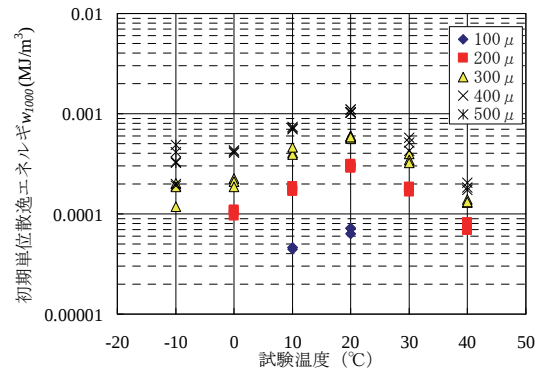


図-12 温度と初期単位散逸エネルギーの関係

4. まとめ

本研究をまとめると以下のとおりである。

- 1) 舗装の構造解析や破壊回数の予測に欠かせない入力値である、アスファルト安定処理混合物の各種の弾性率や位相角などの動的粘弾性状値を把握した。
- 2) アスファルト安定処理混合物の散逸エネルギーと疲労破壊回数の関係を把握した。
- 3) アスファルト安定処理混合物の破壊回数は温度に影響され、10Hz の载荷速度においては 20℃程度の時の破壊回数が最も小さくなる。なお、試験周波数等が変われば破壊回数が最小を示す温度も変化する性質のものである。

これらのデータは、北海道地域で広く採用されているアスファルト安定処理混合物を混合物最下層に持つ舗装構造の疲労寿命の予測を行う際の入力値として活用できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 丸山記美雄, 岳本秀人, 笠原篤: 配合の異なる混合物の疲労破壊特性に関する検討, 土木学会舗装工学論文集第9巻, pp141-148, 2004.12
- 2) Dijk W., Visser W.: The Energy Approach to Fatigue for Pavement Design, Proc. of AAPT, Vol. 46, pp38-74, 1977.
- 3) 姫野賢治・渡辺隆・丸山暉彦: 低スティフネス状態におけるアスファルト混合物の疲労破壊特性に関する研究, 土木学会論文集, No.366/ V -4, pp.143-151, 1986.2