

# 載荷波形および休止時間の違いが アスファルト混合物の疲労挙動に及ぼす影響

向後 憲一<sup>1</sup>・姫野 賢治<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 中央大学大学院 理工学研究科 (〒112-8551 東京都文京区春日一丁目13-27)

<sup>2</sup>フェロー 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日一丁目13-27)

載荷波形と載荷休止時間の異なる疲労試験を行い、載荷波形や休止時間の違いがアスファルト混合物の疲労挙動に及ぼす影響について検討した。密粒度アスファルト混合物(13)を用いて、5種類の載荷波形(正弦波, 三角波, 二山波, 正弦波+休止1s, 正弦波+休止10s)で4点曲げ疲労試験を行い、その結果をエネルギーアプローチおよびENTPEの疲労ダメージアプローチにより解析して以下の知見を得た。1)載荷波形の違いによりアスファルト混合物が受ける疲労ダメージには違いがあり破壊回数に差がある。2)載荷休止時間の違いにより破壊回数にかなりの差がある。3)ENTPEの方法で求めたスティフネスの変化率と破壊回数には直線的な関係があり、載荷波形や休止時間の違いにかかわらずその関係はほぼ一定である。

**Key Words :** *fatigue, crack, asphalt mixture, dissipated energy, damage approach*

## 1. 序論

### (1) 検討の背景

繰返し交通荷重による疲労ひび割れは、アスファルト舗装の主要な破損形態の一つであり、疲労ひび割れに対する抵抗性は、アスファルト舗装の設計において留意すべき必須の性能である<sup>1)</sup>。

アスファルト混合物の疲労に影響を及ぼす要因には、荷重要因、環境要因、混合物要因などがある。また荷重要因には、荷重レベル、載荷波形、載荷時間(周波数、休止時間の有無)などが、環境要因には、温度、水、供用中の材料の変化などが、混合物要因には、混合物の配合、バインダや骨材の性状などがある<sup>2)</sup>。

このうち、本検討でとりあげた載荷波形と載荷の休止時間について、既往の室内実験研究の多くは正弦波の連続載荷を採用している。しかしながら、実際の交通荷重は正弦波が連続して作用するわけではなく、より複雑な載荷波形が不連続かつ不規則に作用するので、載荷波形や載荷休止時間の違いがアスファルト混合物の疲労挙動に及ぼす影響を把握することは、実路におけるアスファルト混合物の疲労挙動をよりよく理解し、アスファルト舗装のひび割れ抵抗性の改善のための方策を検討するうえで有用であると考えられる。

### (2) 本検討の目的

本検討は、アスファルト混合物の室内疲労試験において、載荷波形の違いや載荷休止時間の有無が疲労寿命に及ぼす影響を確認するとともに、実験結果の解析から、載荷条件の違いにかかわらずアスファルト混合物の疲労ダメージを統一的に表現し得る指標を見出すことを目的とする。

### (3) 検討の概要

4点曲げ疲労試験装置を用いて、載荷波形および載荷休止時間の異なる疲労試験を行った。

次に、実験結果から各載荷波形における散逸エネルギーを求め、破壊に至るまでの総散逸エネルギーや散逸エネルギーの変化率と破壊回数の関係について調べた。さらに、フランスのENTPE (Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat) で開発された疲労ダメージの解析手法<sup>3) 4)</sup>を用いて、スティフネスの変化率(散逸エネルギーの変化による供試体の温度変化や混合物のチキソトロピーなどの影響を補正した疲労ダメージの指標)と破壊回数の関係についても検討した。

表-1 密粒度アスファルト混合物(13)の配合と粒度

配合	6号砕石	37.5
	7号砕石	20.0
	粗 砂	32.7
	細 砂	6.5
	石 粉	3.3
%	13.2 mm	100
	4.75	62.5
	2.36	42.5
	600 μm	24.1
	300	15.1
%	150	9.3
	75	6.0
ストアス60/80 %		5.8

表-2 密粒度アスファルト混合物(13)の性状

密度	g/cm <sup>3</sup>	2.363
空隙率	%	4.0
VMA	%	17.2
VFA	%	76.7
安定度	kN	8.7
フロー	1/100cm	27

表-3 疲労試験装置の仕様

	4点曲げ 疲労試験装置	push-pull型一軸 疲労試験装置
制御方式	油圧サーボ	油圧サーボ
制御モード	変位, 荷重	変位, 荷重
最大動的荷重	10kN	20kN
変位制御最小値	0.002mm	0.002mm
荷重制御最小値	5N	10N
载荷波形	正弦波, 三角波, 矩形波, 外部入力	正弦波, 三角波, 矩形波, 外部入力
周波数範囲	0.01~10Hz	0.01~10Hz
供試体寸法	40×40×400mm または 50×50×400mm	円筒形 直径 75mm 高さ 120mm
温度制御範囲	-10~70°C 水槽	-10~70°C 空気槽

## 2. 実験方法

### (1) 使用材料および配合

本検討に使用した密粒度アスファルト混合物(13)の配合を表-1に、その性状を表-2に示す。バインダはストレートアスファルト 60/80とし、バインダ量は5.8% (OAC)とした。

### (2) 試験方法および試験条件

#### a) 4点曲げ疲労試験

4点曲げ疲労試験装置の仕様を表-3に、試験条件を表-4に、载荷波形を図-1に示す。

供試体は、密粒度アスファルト混合物(13)を所定の密

表-4 試験条件

試験区分	室内作製供試体
供試体寸法	40×40×400mm
スパン	300mm
载荷方式	4点曲げ
制御モード	変位制御
载荷波形	正弦波, 三角波, 二山波 正弦波+休止 1s 正弦波+休止10s
周波数	正弦波, 三角波 →5Hz 二山波 →2.5Hz 正弦波+休止 1s →载荷0.2s+休止 1s 正弦波+休止10s →载荷0.2s+休止10s
試験温度	10°C (水浸)

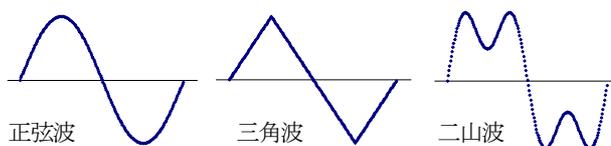


図-1 载荷波形



写真-1 push-pull型疲労試験装置

度となるよう40×300×400mmの大きさに成型し、40×40×400mm (×5本)に切断したものである。

三角波, 二山波, 正弦波+休止1s, 正弦波+休止10sは、任意波形作成ソフトウェアO105 ((株)エヌエフ回路設計ブロック)を用いて作成しMULTIFUNCTION SYNTHESIZER WF1943A ((株)エヌエフ回路設計ブロック)を介して疲労試験装置に入力した。制御モードは変位制御とし、変位振幅は供試体の上下面に生ずるひずみ振幅が200~400 μm/m (初期の応力振幅で1.8~3.6MPa程度)となる範囲とした。

なお、破壊回数は応力振幅が急激に低下し始めた時の载荷回数とした。

#### b) push-pull型一軸疲労試験装置による位相角の測定

散逸エネルギーの計算に用いる位相角は、push-pull型一軸疲労試験装置<sup>9)</sup>(表-3, 写真-1)により測定したステイフネスと位相角の関係から推定した。

push-pull型一軸疲労試験の供試体は、混合物を所定の

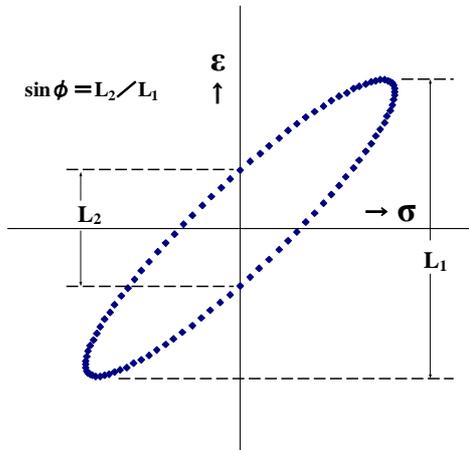


図-2 位相角の算出

密度となるよう300×300×100mmに成型し、その中央部分を円筒形（水平方向に直径75mm×高さ120mm×3本）に切断した後、上下面が平行となるよう研磨したものをを用いた。位相角の測定は、変位制御で行った。変位振幅は、供試体に生ずるひずみ振幅が50 μm/mとなるよう制御し、試験温度は-10～50°Cの範囲で変化させた。

アスファルト混合物などの粘弾性体に周期的な外力を加えると、測定される応力波形はひずみ波形よりも進んだ位相をもち、横軸を応力、縦軸をひずみとしてプロットすると図-2に示すようなヒステリシスループを描く（本検討では応力およびひずみの測定間隔を0.002sとした）。位相角（φ）は、図-2からL<sub>1</sub>およびL<sub>2</sub>を読み取り、(1)式により求めた。

$$\sin \phi = L_2 / L_1 \quad (1)$$

### 3. 実験結果

#### (1) 载荷波形の影響

载荷波形の異なる4点曲げ疲労試験の結果は、図-3に示すとおりである。

载荷波形の違いにより破壊回数に差が見られる。二山波の破壊回数は、正弦波の破壊回数と比べて小さく、ひずみレベルにかかわらず約1/2程度である。また、三角波の破壊回数は、正弦波の破壊回数と比べ高ひずみレベル（400 μm/m）では大きい傾向にあるが、低ひずみレベル（200 μm/m）ではほぼ同等である。

#### (2) 休止時間の影響

载荷休止時間の異なる4点曲げ疲労試験の結果は、図-4に示すとおりである。

休止時間の有無により破壊回数に差が見られる。同じひずみレベルで比較すると、休止時間を含む载荷波形で

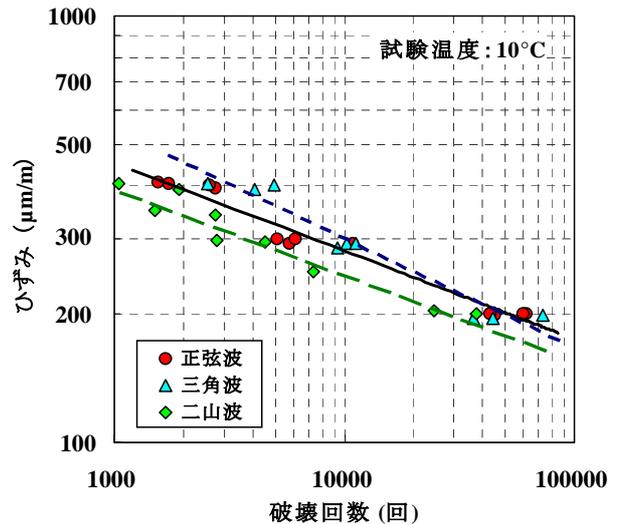


図-3 疲労試験結果（载荷波形の違い）

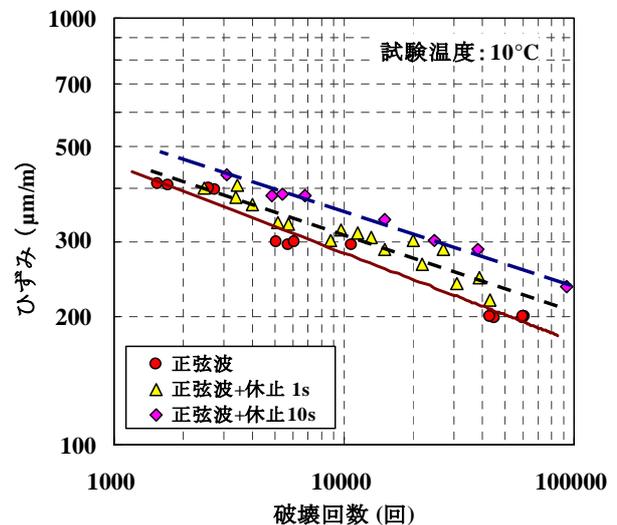


図-4 疲労試験結果（休止時間の違い）

は休止時間のない連続载荷よりも破壊回数が大きく、休止時間が長いほど破壊回数は大きい傾向にある。

### 4. 散逸エネルギーと疲労破壊特性

散逸エネルギーは、push-pull型一軸疲労試験装置を用いて測定したスティフネスと位相角の関係（図-5）から位相角を推定し、以下により求めた。

载荷波形が正弦波の場合、供試体に加えられた外力により、供試体内部に(2)式の応力と位相角φだけ遅れた(3)式のひずみが生じたとき、供試体内部の粘性要素により一周単位体積当たり散逸されるエネルギーは(4)式で表される。

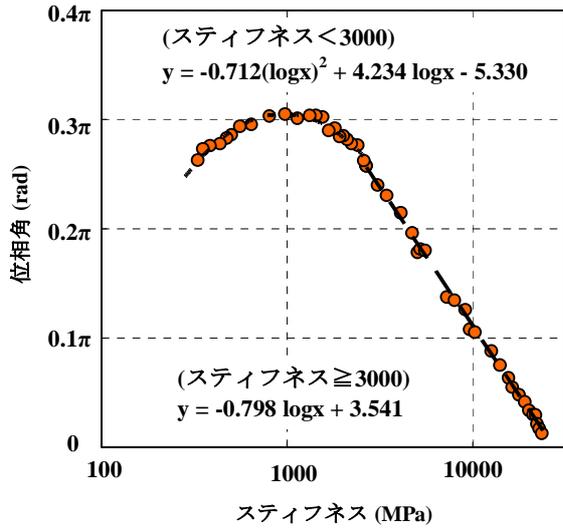


図-5 スティフネスと位相角の関係 (測定温度: -10~50°C)

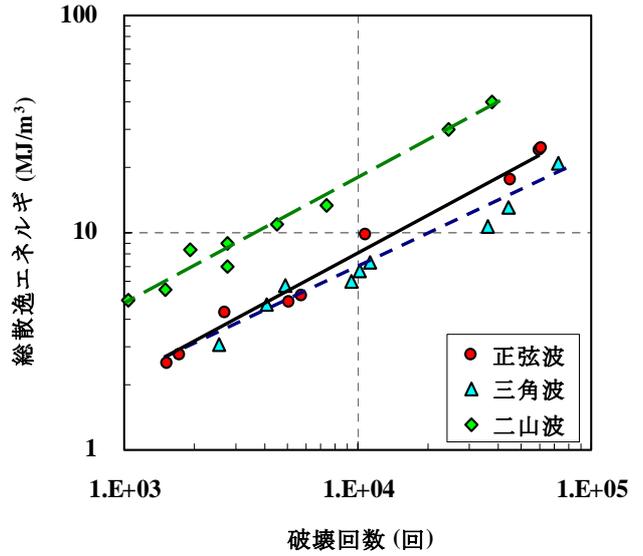


図-6 総散逸エネルギーと破壊回数との関係

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin \omega t \quad (2)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} w_0 &= \int \sigma d\varepsilon = \int_0^{2\pi} \sigma \frac{d\varepsilon}{dt} dt \\ &= \sigma_0 \varepsilon_0 \omega \int_0^{2\pi} (\sin \omega t)(\cos(\omega t - \phi)) dt \\ &= \pi \sigma_0 \varepsilon_0 \sin \phi \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_0$ および $\varepsilon_0$ は、それぞれ応力振幅およびひずみ振幅を表す。

三角波の場合、応力は(5)式を $\sigma(t+2\pi) = \sigma(t)$ によって周期的に拡張した関数として表され、これをフーリエ級数展開すると(6)式となる。また、位相角 $\phi$ だけ遅れたひずみは(7)式となる。これより、正弦波と同様に三角波における一周単位体積当たりの散逸エネルギーは(8)式のように表され、これを数値積分により求めた。

$$\sigma(t) = \sigma_0 \left( \frac{2}{\pi} |t| - 1 \right) \quad (-\pi \leq t \leq \pi) \quad (5)$$

$$\sigma(t) = -\frac{8\sigma_0}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos((2n+1)t)}{(2n+1)^2} \quad (6)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{8\varepsilon_0}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos((2n+1)(t-\phi))}{(2n+1)^2} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} w_0 &= -\frac{64}{\pi^4} \sigma_0 \varepsilon_0 \int_{-\pi}^{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos((2n+1)t)}{(2n+1)^2} \\ &\quad \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin((2n+1)(t-\phi))}{2n+1} dt \end{aligned} \quad (8)$$

同様に二山波による散逸エネルギーは、(11)式で表される。

$$\sigma(t) = \sigma_0 \left( \sin \omega t + \frac{\sin 3\omega t}{2} \right) \quad (9)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \left( \sin(\omega t - \phi) + \frac{\sin 3(\omega t - \phi)}{2} \right) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} w_0 &= \sigma_0 \varepsilon_0 \omega \int_0^{2\pi} \left( \sin \omega t + \frac{\sin 3\omega t}{2} \right) \\ &\quad \cdot \left( \cos(\omega t - \phi) + \frac{3}{2} \cos(3\omega t - 3\phi) \right) dt \\ &= \pi \sigma_0 \varepsilon_0 \left( \sin \phi + \frac{3}{4} \sin 3\phi \right) \end{aligned} \quad (11)$$

図-6は、供試体が破壊するまでの総散逸エネルギーと破壊回数との関係を示している。これらは、既往の研究<sup>6) 7)</sup>でも確認されているとおり両対数紙上で概ね直線関係にあるが、載荷波形が異なる場合 (例えば、正弦波と二山波に見られるように) 直線の位置が異なる。この理由は

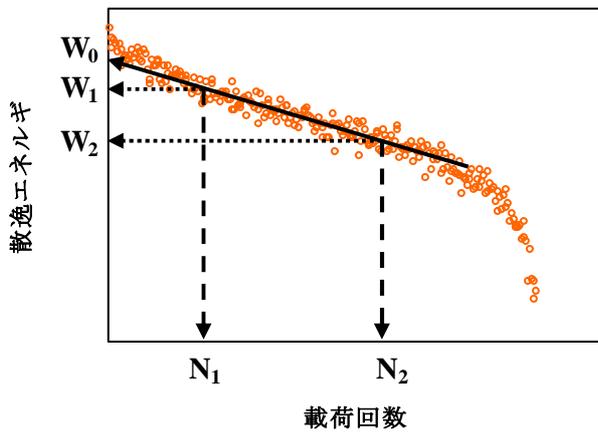


図-7 散逸エネルギーの変化率

明らかではないが、Kimらの研究<sup>8)</sup>に示されるように、散逸エネルギーの全てが疲労ダメージに関連するのではなく、その一部のみが疲労ダメージに影響を及ぼすとすれば、全散逸エネルギーのうち疲労ダメージに影響を及ぼすものの比率は载荷波形により差があり、その比率は正弦波よりも二山波の方が小さく、正弦波と三角波はほぼ同程度であるものと推察される。

次に、Ghuzlan, Carpenterらにより疲労ダメージの指標として提案されている散逸エネルギー比 (DER)<sup>9, 10, 11)</sup>を参考に、散逸エネルギーの変化率を以下により求め、破壊回数との関係を検討した。

変位制御の疲労試験において、散逸エネルギーは载荷回数の増加に伴って徐々に低下し、破壊回数付近から急激に低下する(図-7)。散逸エネルギーの変化率は、図-7に示すように散逸エネルギーが直線的に低下する区間の勾配から(12)式により求めた。

$$\text{散逸エネルギー変化率} = \frac{|W_2 - W_1|}{(N_2 - N_1)W_0} \quad (12)$$

図-8(a)および(b)は、散逸エネルギーの変化率と破壊回数の関係を示している。なお図-8(b)には、本検討の結果に加え、既報<sup>9)</sup>のpush-pull型一軸疲労試験の結果も示している。同じ载荷方式(4点曲げ)で連続载荷の場合、散逸エネルギーの変化率と破壊回数には直線的な関係があり、载荷波形が違っててもその関係はほぼ一定である(図-8(a))。しかし、休止時間を含む载荷や载荷方式が異なる場合(push-pull型一軸疲労試験)には、その傾向が異なる(図-8(b))。

## 5. 疲労ダメージアプローチ (ENTPEの方法)<sup>3), 4)</sup>

次に、ENTPEで開発された疲労ダメージの解析手法(DGCBアプローチ)を用いて、スティフネスの変化率と破壊回数の関係について検討した。

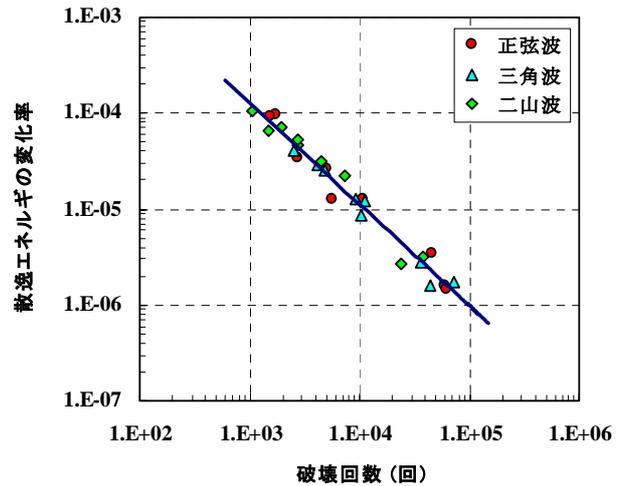


図-8(a) 散逸エネルギーの変化率と破壊回数の関係

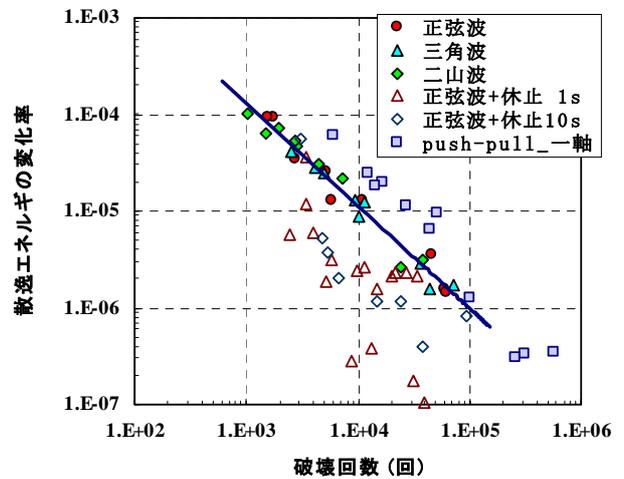


図-8(b) 散逸エネルギーの変化率と破壊回数の関係

変位制御の疲労試験において、スティフネスの変化は次の3段階に分けられる(図-9)。

**Phase I** : 疲労ダメージによるマイクロクラックの生成に加え、散逸エネルギーによる供試体の温度上昇や混合物のチキソトロピーなどの影響でスティフネスは急激に低下する。

**Phase II** : 散逸エネルギーやチキソトロピーの影響が低下し、主として疲労ダメージによりスティフネスは緩やかに低下する。

**Phase III** : マクロクラックの伝播によりスティフネスは急激に低下し、やがて供試体は破壊する。

なお、チキソトロピーという用語にはいくつかの定義があるが、ここではBauerら<sup>12)</sup>による次の定義を用いている。

「あるシステムのレオロジー特性の大きさの低下が、明確な時間依存性を伴って可逆的かつ等温的に起こるとき、そのシステムはチキソトロピックであるという。」

ENTPEの方法において疲労ダメージの指標として用い

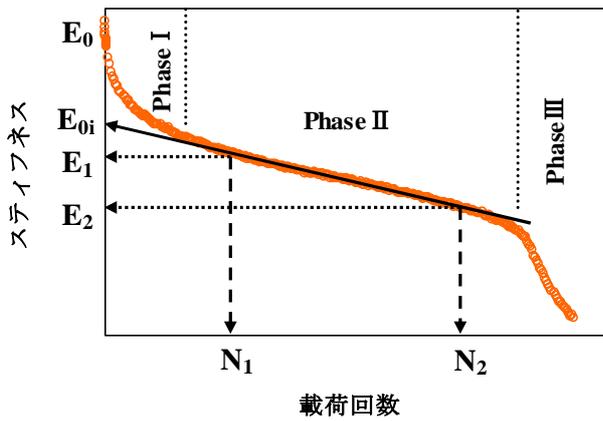


図-9 スティフネスの変化率

るスティフネスの変化率  $a_F$  は、疲労ダメージの影響が卓越するPhase IIの任意の区間 ( $N_1 \sim N_2$ ) でのスティフネスと散逸エネルギーの変化率から(13)式により求める。

$$a_F = \frac{|E_2 - E_1|}{(N_2 - N_1)E_{0i}} + \frac{|W_2 - W_1|}{(N_2 - N_1)W_0} \cdot \frac{C_i(E_0 - E_{0i})}{E_{0i}} \quad (13)$$

ここで、右辺第2項は散逸エネルギーの変化による供試体の温度変化や混合物のチキソトロピーの影響に関する補正項であり、係数 $C_i$ は区間 ( $N_1 \sim N_2$ ) の载荷回数に応じて2/3~5/6とする。

図-10は、スティフネスの変化率と破壊回数の関係を示している。両者には直線的な関係があり、载荷波形の違い、休止時間の有無および载荷方式の違いにかかわらずその傾向はほぼ一定である。また、その回帰式は $x$ の指数が約-1であり、 $xy \approx 0.24$ とみなせば、本検討の試験条件（密粒度アスファルト混合物(13)、10°C）では、载荷波形、休止時間および载荷方式にかかわらず、疲労ダメージによるスティフネスの低下率が約24%に達すると供試体は破壊するものと考えられる。

図-11は、スティフネスの変化率を载荷1回当たりの疲労ダメージの指標として、正弦波の連続载荷におけるスティフネスの変化率を1とした場合の各载荷波形の変化率の比を示している。これより、载荷波形の違いにより载荷1回当たりの疲労ダメージには差があり、二山波は正弦波の約2倍のダメージを与える。また、载荷の休止時間に疲労ダメージは回復する。本検討の試験条件では、休止時間1sで正弦波载荷1回の疲労ダメージの40~50%が、休止時間10sで70~80%程度の疲労ダメージが回復すると考えられる。

## 6. 結論

本検討により得られた知見をまとめると以下のとおりである。

1) 载荷波形の違いによりアスファルト混合物が受ける疲

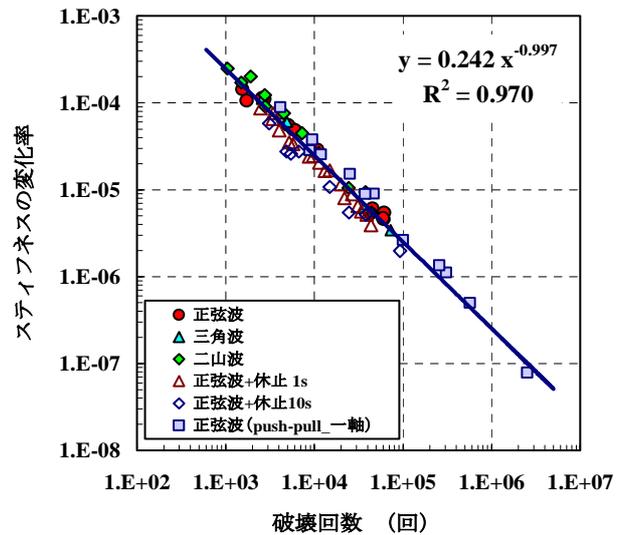


図-10 スティフネスの変化率と破壊回数の関係

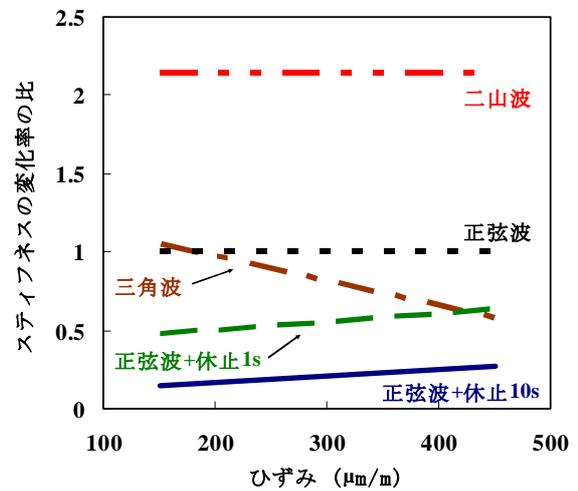


図-11 スティフネスの変化率の比

労ダメージの違いがあり破壊回数に差がある。

- 2) 载荷の休止時間の違いにより破壊回数にかなりの差があり、休止時間のヒーリングの影響が認められる。
- 3) 供試体が破壊するまでの総散逸エネルギーと破壊回数には直線的な関係があるが、载荷波形が異なると直線の位置は異なる。
- 4) 連続的な载荷条件で、散逸エネルギーの変化率と破壊回数には直線的な関係があり、载荷波形が違ってその関係はほぼ一定である。しかし休止時間を含む载荷や载荷方式が異なる場合には、その傾向が異なる。
- 5) ENTPeの方法で求めたスティフネスの変化率と破壊回数には直線的な関係があり、载荷波形の違い、休止時間の有無、载荷方式の違いにかかわらずその傾向はほぼ一定である。

## 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：舗装設計施工指針, 2006.
- 2) Deacon J.A. and Monismith C.L. : Laboratory Flexural-Fatigue Testing of Asphalt-Concrete with Emphasis on Compound-Loading Tests, Highway Research Record, No.158, pp.1-31, 1967.
- 3) Di Benedetto H., de La Roche C., Baaj H., Pronk A., and Lundström R. : Fatigue of Bituminous Mixtures, RILEM TC 182-PEB 'Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials', Materials and Structures, Vol.37, pp.202-216, Apr., 2004.
- 4) Baaj H., Di Benedetto H., Chaverot P. : Effect of Binder Characteristics on Fatigue of Asphalt Pavement Using an Intrinsic Damage Approach, International Journal of Road Materials and Pavement Design, Hermes Lavoisier, Paris, France, Vol.6, No.2, pp.147-174, 2005.
- 5) 向後憲一, 姫野賢治 : アスファルト混合物の一軸疲労試験, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集(投稿中) .
- 6) Van Dijk W. : Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.44, pp.38-74, 1975.
- 7) 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.
- 8) Kim J., Roque R. and Birgisson B. : Interpreting Dissipated Energy from Complex Modulus Data, International Journal of Road Materials and Pavement Design, Hermes Lavoisier, Paris, France, Vol.7, No.2, pp.223-245, 2006.
- 9) Ghuzlan K. A. and Carpenter S.H. : Energy-Derived, Damage Failure Criterion for Fatigue Testing, Journal of Transportation Research Record, No.1723, pp.141-149, 2000.
- 10) Carpenter S.H. and Ghuzlan K. A. : Fatigue Endurance Limit for Highway and Airport Pavements, Journal of Transportation Research Record, No.1832, pp.131-138, 2003.
- 11) Shen S, Airey G.D. and Carpenter S.H. : A Dissipated Energy Approach to Fatigue Evaluation, International Journal of Road Materials and Pavement Design, Hermes Lavoisier, Paris, France, Vol.7, No.1, pp.47-69, 2006.
- 12) Bauer W.H. and Collins E.A., : Thixotropy and Dilatancy, Ch.8 in Rheology : Theory and Applications, Eirich F.R., Vol.4, Academic Press, New York, 1967.

## THE EFFECTS OF DIFFERENT WAVE PATTERN AND REST PERIOD IN REPEATED LOAD ON THE FATIGUE BEHAVIOR OF THE ASPHALT MIXTURE

Kenichi KOGO and Kenji HIMENO

The four point bending fatigue tests were carried out for dense graded asphalt mixtures under various wave patterns in repeated loading: sinusoidal, triangular, twin peaks, sinusoidal with one second rest period, sinusoidal with ten second rest period. Analyzing the results using classical fatigue analysis, energy approach and ENTPE fatigue damage approach, it was found 1) that the fatigue damage subjected in asphalt mixtures differs significantly depending on the wave patterns of repeated loading, giving much difference in the number of load applications to failure, 2) that the number of load applications to failure is depending considerably on the rest period 3) that there are linear relations between the rate of stiffness change and the number of load applications to failure, showing approximately constant relations even if loading wave pattern and rest period are different.