

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

FATIGUE FAILURE CHARACTERISTICS OF ASPHALT MIXES AT LOW STIFFNESS MODULUS

姫野賢治*・渡辺 隆**・丸山暉彦***

By Kenji HIMENO, Takashi WATANABE and Teruhiko MARUYAMA

A new fatigue failure criterion of asphalt mixes which is applicable even at low stiffness modulus under high temperature or low loading speed is proposed. It is found that the dissipated energy per cycle per unit volume in asphalt mix at the instant of fatigue failure can be a rational failure criterion. Then the fatigue failure envelope based on experimental results at high and medium stiffness modulus is adjusted at the low stiffness region. And also it is found that the fatigue damages of asphalt pavement can be neglected under high temperature or low vehicle speed. The validity of the new criterion is verified by comparing with other proposed failure criteria and some field data obtained by public road administrators.

1. まえがき

日本における道路舗装は、施工が簡便かつ迅速に行え、修繕も比較的容易であることから主にアスファルト舗装が用いられており、当分はこの状態が続くものと考えられる。かつて繰り返し交通荷重による混合物の疲労現象が原因とみられるひびわれが多数発生して以来、アスファルト舗装のひびわれを防ぐために混合物層厚を比較的大きくとる設計法が採用されているが、このために混合物が流動することによるわだち掘れが顕著になり、解決の急がれる問題となっている。このように、疲労によるひびわれと流動によるわだち掘れとは相反する関係にあり、一方を防止するための対策は他方の進行を助長するような傾向がみられる。両破損形態は路面の縦断凹凸とともに舗装の供用性を規定する重要な因子であり¹⁾、また、今日のように維持修繕の比重が高まり、省資源が要求される状況下においては、両者の最適な妥協を図る舗装設計法の開発や既設舗装におけるこれらの破損の程

度の経年変化を的確に予測する手法の開発が重要であろうと考えられる。

現在、わが国の国道の維持管理指数（MCI）の低下の原因のうち、約50%はひびわれによるものとされており²⁾、また、Finn³⁾は、アメリカ合衆国で発生した舗装のひびわれの原因のほとんどはアスファルト混合物の疲労現象によるものと結論づけている。

アスファルト舗装の疲労寿命予測法の開発は、アスファルト混合物の疲労破壊特性を定量的に表現する疲労破壊規準の確立と、現実の舗装が受ける各種の外力および破壊規準とからの寿命予測モデルの構築という2つの部分から成り立っている。このうち、アスファルト混合物の疲労破壊規準については、かつて Nijboer⁴⁾が初めて混合物のSN曲線を実験的に求めて以来内部に作用する引張応力のみが問題とされてきたが、その後引張ひずみのみを扱うもの^{5), 6)}や、混合物の温度またはスティフネスをパラメーターとして取り込みながら引張ひずみによって評価するもの^{7)~9)}などが提案してきた。

著者らは、このアスファルト混合物の疲労破壊現象に着目し、引張応力と引張ひずみの両因子を取り込んだ疲労破壊規準として疲労破壊包絡線（Fatigue Failure Envelope）を提案し¹⁰⁾、そのある程度の妥当性を確認してきたが、従来より標準値として採用している5Hz

* 正会員 東京工業大学助手 工学部土木工学科
(〒152 目黒区大岡山2-12-1)

** 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科
(同上)

*** 正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 工学部建設系
(〒949-54 長岡市上富岡町字長峰1603-1)

の周波数で載荷した場合に室内曲げ疲労試験が困難で実測データのとれない 20°C 以上の高温領域では、静的な破壊包絡線^{11), 12)}からの類推によってその形状を外挿していたため、引張ひずみのみを疲労破壊規準とする場合などと同様に、スティフェネスが低下してアスファルト混合物の流動が大きくなると考えられる夏季において大きな曲げ疲労被害を示したり、予測された疲労被害が季節的に不連続に変化するなど、実際の挙動と食い違う結果の現われる場合があった。

本研究では、Van Dijk⁽³⁾がひずみ制御試験結果と応力制御試験結果の違いを説明するために導入した散逸エネルギーの概念を応用して低スティフネス時でも妥当な結果を与える新たな疲労破壊規準の提案を試みるとともに、新しい実験装置を開発して従来室内実験が困難であった20~30°Cの比較的高温状態をも含めて曲げ疲労試験を実施し、30~40°Cの温度範囲で実験中ほぼ一定であることが確認された応力とひずみの位相角の測定を行った。また、この散逸エネルギー概念を応用した疲労寿命評価を行って既往の疲労破壊包絡線を用いた予測法や他の研究者の予測法と比較し、さらに現場の実測データによってその妥当性を検証した。

2. 實驗方法

(1) 使用材料

実験に使用した混合物は密粒度アスファルト混合物（13）および粗粒度アスファルト混合物（20）である。供試体は、ホイールトラッキング試験用の30 cm × 30 cm × 5 cm の型枠で作製し、室温で1日以上養生した後にコンクリートカッターで4 cm × 4 cm × 30 cm に切り出した。Table 1 に使用材料の諸元を示す。

(2) 試驗方法

本研究で行ったひずみ制御曲げ疲労試験の概略をFig.1に示す。供試体は高温時の混合物の流動および接点での食い込みを防ぐため、底面に厚さ1.5 mmのスチール板をあてるとともに、支点および載荷点に厚さ0.2 mm、幅40 mmの銅片をはさんだ。このような措置により、30°C以下の温度範囲では曲げ疲労試験が、また、30~40°Cの温度範囲でも短時間で実施できる位相角の

Table 1 Physical Properties of the Materials.

```

(1) Binder Properties
Penetration (@25°C) : 77 (1/10 mm)
Softening Point       : 49.0 (°C)
PI                   : -0.4
Specific Gravity      : 1.020

(2) Mix Properties
Degree of Compaction: 100.1 %
Asphalt Content       : 5.9 % (Dense)
                           5.3 % (Coarse)
Maximum Theoretical : 2.464 g/cm³ (Dense)
Density              : 2.446 g/cm³ (Coarse)

```

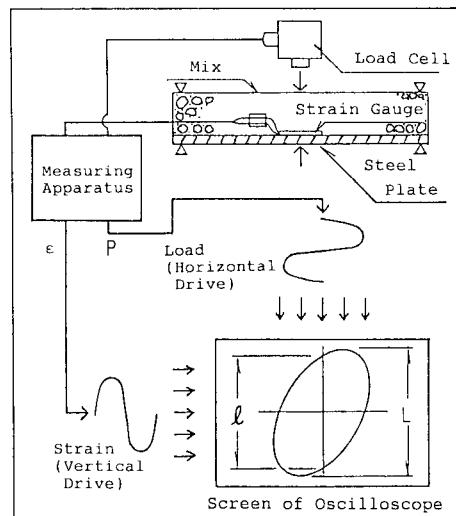


Fig. 1 Schematic Illustration of Experiments.

測定が可能となった。実験中はたわみ量および載荷点からの荷重応答だけでなく、ひずみゲージによって混合物のほぼ中央部下縁におけるひずみの変化も同時に測定した。載荷の周波数は従来どおり 5 Hz を標準としたが、参考のため、密粒度アスファルト混合物(13)について 10 Hz による載荷も行った。

一般に、アスファルト混合物などのように粘性をもつ物体に周期的な外力を加えた場合、測定された荷重波形はひずみ波形よりも進んだ位相をもつが、これらを Fig. 1 のようにオシロスコープの直交する 2 つの軸に同時に入力して画面上で橿円軌道 (Lissajous Figure) を描かせることにより、混合物とスチール板の合成の位相角 θ は

として求めることができる。鉄板の位相角は0であるという仮定のもとにこの合成の位相角 θ と合成の反力 P を重ね合わせの原理によって波形分離し、

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{P \sin \theta}{P \cos \theta - S} \right) \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここに P ・混合物とスチール板の合成の反力 [N]

θ : 混合物とスチール板の合成の位相角 [rad]

S: スチール板単体の反力 [N]

$$S = \frac{48EI}{L^3}d$$

L : はりの支間長 (0.26 m)

E ：スチール板の弾性係数 (2.1×10^5 MPa)

I : スチール板の断面二次モーメント ($1.2 \times 10^{-10} \text{ m}^4$)

d：たわみ振幅 (m)

により混合物単体としての位相角 ϕ および反力 Q を破壊に至るまで求めた。

3. 実験結果

Fig. 2, 3に、実験中の密粒度アスファルト混合物の中央部下縁における位相角 ϕ および反力 Q の変化より推定して求めた応力振幅 σ_0 の変化をそれぞれ示す。これより、従来より混合物単体で行ってきた曲げ疲労試験による結果と同様に、応力振幅 σ_0 は載荷回数とともに徐々に減々としてゆきある点より急激に低下するが、今回新たに測定を行った位相角 ϕ は多少のばらつきをみせながらもほとんど変化をしないことがわかる。供試体温度や載荷周波数を変えてこのような曲げ疲労試験を行い、混合物の初期応力振幅とひずみ振幅の比である初期スティフネス（500回載荷後のスティフネス） S_i と位相角 ϕ との関係を調べてみると **Fig. 4, 5**に示すように、各混合物ともほぼ1本の曲線で表わせることがわかる。

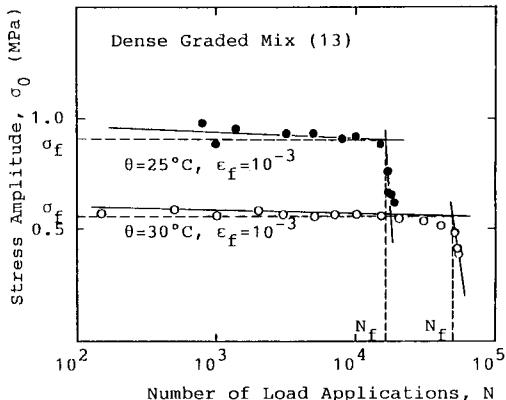


Fig.2 Change of Stress Amplitude with Number of Load Applications.

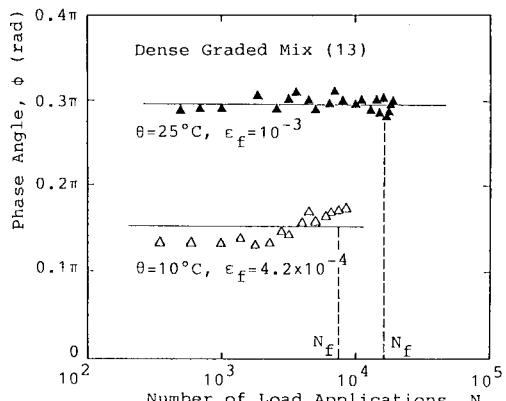


Fig. 3 Change of Phase Angle with Number of Load Applications

本研究では、この関係を

$$\phi = a_1 + a_2 \log S_i + a_3 (\log S_i)^2 \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここに, a_1 , a_2 , a_3 : スティフネスによらない定数として表わした.

4. 疲勞破壞規準

(1) 散逸エネルギーの概念

一般に、粘性をもった物体に外力が加わり、内部に周期的な応力

と、位相角 ϕ だけずれた周期的なひずみ

とが生じた場合に、外力が物体に対して 1 周期单位体積当たりになす仕事の量は、

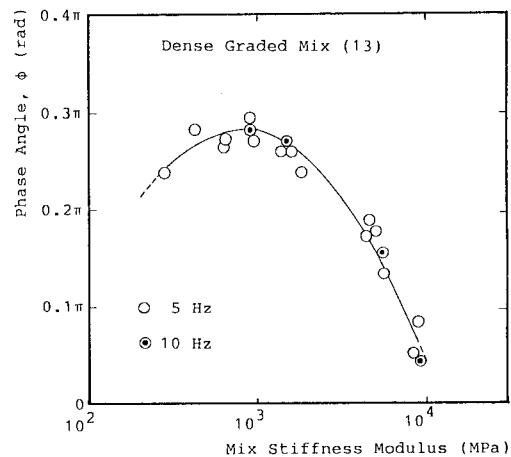


Fig. 4 Phase Angle versus Mix Stiffness Modulus (Dense Graded (13)).

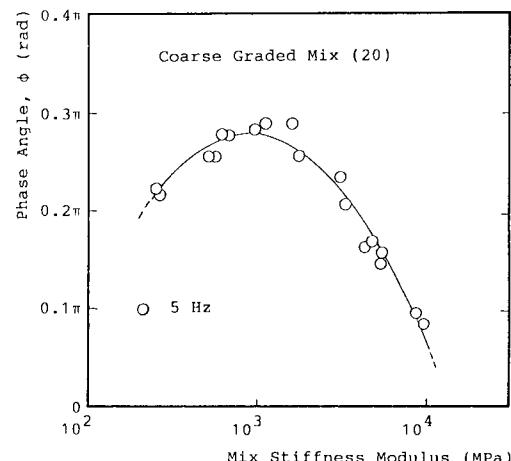


Fig. 5 Phase Angle versus Mix Stiffness Modulus
(Coarse Graded (20))

ここに、 σ_0 : 応力の振幅 [m]

ϵ_0 : ひずみの振幅

ω ：周波数 [Hz]

t : 時間 [s]

で与えられる。この外力からの仕事量は、物体内部の減衰要素により 1 周期単位体積当たりに散逸するエネルギーの量に一致するので、以後これを「単位散逸エネルギー」とよぶことにする。一般に、スティフネスの異なる材料の疲労寿命の大小を検討する場合、ひずみ制御試験結果と応力制御試験結果では逆の結果が得られるが、Van Dijk^[4] らは、アスファルト混合物の繰り返し曲げ試験中の単位散逸エネルギー w_0 を破壊に至るまで加え合わせた単位体積当たりの総散逸エネルギー

$$W_t = \sum_{n=1}^{N_t} \pi \sigma_0 \epsilon_0 \sin \phi \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

ここに、 N ：載荷回数

N_c : 破壊に至るまでの載荷回数

を求める、両者を統一的に扱った。また、この総散逸エネルギーは温度、周波数、バインダーの種類、制御方法によらず、破壊回数と両対数紙上で直線関係にあることを見出した。本研究で行った実験結果からもこの事実は確認され (Fig. 6), このことは、スティフネスの代わりにその関数である位相角 ϕ を破壊規準のパラメーターの一つとして導入することが可能であることを示すものと考えられる。

ひずみ制御の曲げ疲労試験を行った場合、Fig. 2 のように応力振幅はほぼ直線的に変化し、また、Fig. 3 のように位相角はほとんど変化しないので本研究では、総散逸エネルギーの代わりに供試体の破壊時のみの単位散逸エネルギー

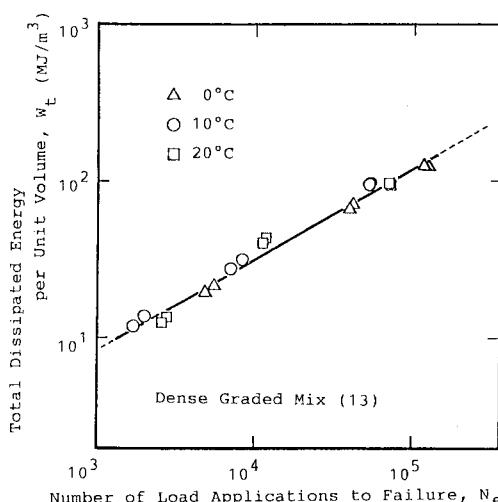


Fig. 6 Total Dissipated Energy per Unit Volume versus Number of Load Applications to Failure (Dense Graded (13)).

ここに、 σ_f : 破壊時の応力振幅 (MPa)

ϵ_s : 破壊時のひずみ振幅

を定義した。実験結果からこの破壊時の単位散逸エネルギー w_f と破壊に至るまでの載荷回数 N_f との関係を調べたところ、総散逸エネルギーと同様に強い相関が認められた (Fig. 7) ので、これをアスファルト混合物の新たな疲労破壊規準として取り上げて検討を行った。

(2) 既往の疲労破壊包絡線と同一平面への展開

著者らが従来より提案している疲労破壊包絡線と、上で提案した破壊時の単位散逸エネルギー w_r による破壊規準を比較するために、式(9)と Fig.7 とから破壊回数 N_f を破壊時の応力振幅 σ_s 、破壊時のひずみ振幅 ϵ_s のみの関数として表わすことを試みた。すなわち、Fig.7 に示したように、 w_r は破壊回数 N_f と両対数紙上で直線関係にあるので、

ここに, a_4 , a_5 :定数

と表わすことができ、式(9)と式(10)とを等値することにより

$$N_f = \left(\frac{1}{\sigma_f} \pi \sigma_f \epsilon_f \sin \phi \right)^{\frac{1}{\alpha_2}} \dots \dots \dots \quad (11)$$

を得ることができる。実験結果より、初期スティフネス S_i と破壊時スティフネス S_f の間には Fig. 8 のようにほぼ比例関係が認められるので、式(4)は破壊時スティフネスの関数として

$$\phi = a_1 + a_2 \log \frac{S_f}{g_e} + a_3 \left(\log \frac{S_f}{g_e} \right)^2 \dots \dots \dots \quad (12)$$

正の時に、 a_0 ：定数

$$S_c \equiv \sigma_c/\epsilon_c$$

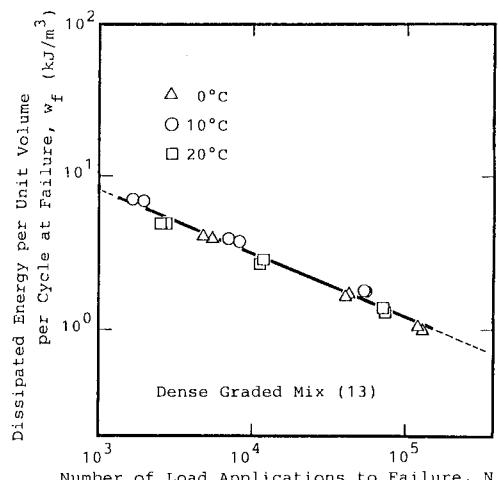


Fig. 7 Unit Dissipated Energy at Failure versus Number of Load Applications to Failure (Dense Graded (12))

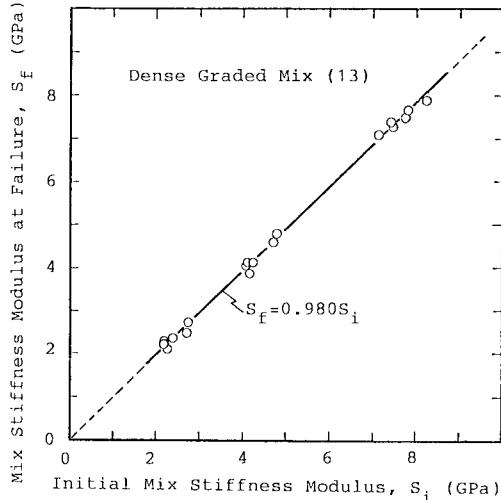


Fig. 8 Mix Stiffness Modulus at Failure versus Initial Mix Stiffness (Dense Graded (13)).

と表わすことができて、結局式(11)は N_f をパラメーターとした σ_f と ϵ_f との陰関数式となる。そこで、この関係式において N_f を変化させながら σ_f と ϵ_f との関係を求めて既往の疲労破壊包絡線と同一の平面上に描くと、密粒度アスコン(13)、粗粒度アスコン(20)につ

いてそれぞれ Fig. 9, 10 が得られた。これらの図をみると、破壊応力が大きく破壊ひずみが小さい領域（図の左上で、低温または高速載荷によりスティフェネスの大きい領域）では両破壊規準の差はほとんどみられないのに対し、従来静的な破壊包絡線からの類推で形状が決められていた逆の領域（図の右下で、高温または低速載荷によりスティフェネスの小さい領域）では同一の σ_f と ϵ_f を受けた場合でも、破壊時の疲労破壊包絡線に比べて破壊時の単位散逸エネルギーを用いた場合には曲げ疲労被害をかなり小さく評価することがわかる。

のことから、散逸エネルギーの概念による破壊規準は、従来より実験データの得られている高スティフェネス領域においては疲労破壊包絡線の示す破壊規準とほぼ一致し、実測が困難な低スティフェネス領域においては従来の疲労破壊特性を理論的に補正したものと考えることができる。また、疲労破壊包絡線は上に凸で低スティフェネス時にはほぼ鉛直な曲線群となるためひずみが寿命を規定する重要な因子であるのに対し、破壊時の単位散逸エネルギーによる破壊規準の曲線は下に凸で低スティフェネス時には水平に近づき応力が支配的な因子となっていることがわかる。なお、Table 2 に密粒度アスコン(13)、粗粒度アスコン(20)について式(12)までに現われる各 a_i の値を示す。ただし、単位は、 ϕ [rad], S_f [Pa]、

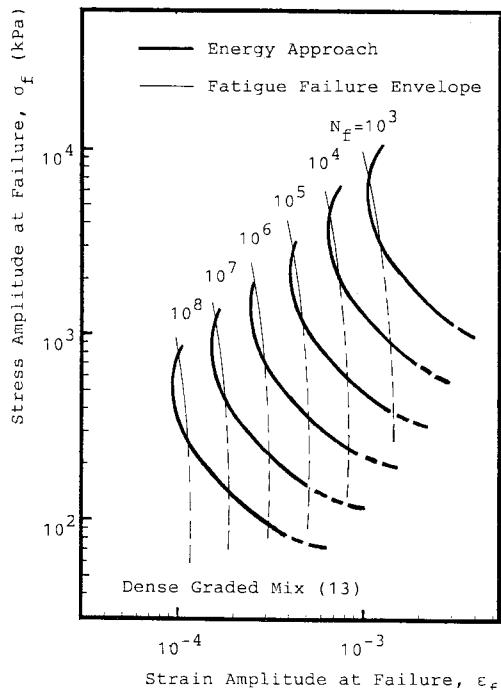


Fig. 9 Comparison of Fatigue Failure Envelope and Fatigue Failure Criterion by Energy Approach (Dense Graded (13)).

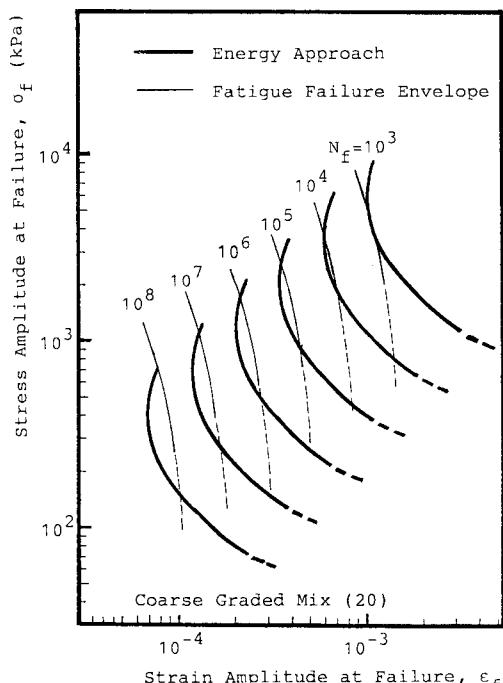


Fig. 10 Comparison of Fatigue Failure Envelope and Fatigue Failure Criterion by Energy Approach (Coarse Graded (20)).

Table 2 Table of Constants appeared in Eqs. (11) and (12).

	Dense Graded (13)	Coarse Graded (20)
a_1	-40.043	-49.781
a_2	9.209	11.308
a_3	-0.518	-0.631
a_4	149000	204000
a_5	-0.419	-0.466
a_6	0.980	0.949

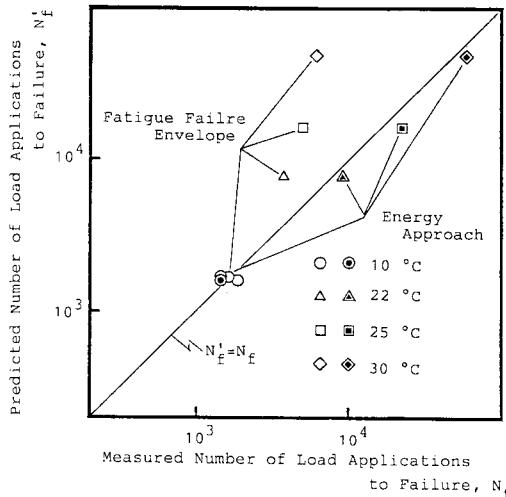


Fig. 11 Comparison of Predicted and Measured Number of Load Applications to Failure (Dense Graded (13)).

$w_f [\text{J}/\text{m}^3]$ とした。

次に、スティフネスが低下し、従来実験が不可能であった $20\sim30^\circ\text{C}$ の高温下も含めて曲げ疲労試験を実施し、実測の破壊回数と両破壊規準によって予測された破壊回数とを比較した。その結果、Fig. 11 に示すように、 10°C 程度の低温下では、両予測値とも実測値とよく対応をするのに対し、疲労破壊包絡線を破壊規準にした場合は、温度が高くなるにつれて、実測の寿命に比べて予測寿命が小さくなり、低スティフネス状態における疲労被害が過大に評価されていることがわかる。そして、これは Fig. 9, 10 において両破壊規準の表わす曲線の位置が低スティフネス時に大きく異なっている事実に対応する。

5. 補装構造への適用

以上、室内実験により破壊時の単位散逸エネルギーを用いた疲労破壊規準が誘導され、一定温度、一定荷重、一定周波数で載荷された場合には比較的妥当なものであることが検証された。以下、多くの不確定要因が含まれる現実の具体的な舗装構造に対して Fig. 12 に示すような流れ図に従って疲労寿命予測を行い、実測のひびわれ状態や他の研究者の提案する破壊規準^{7)~9), 5), 15)}を用いた場合の予測結果との比較を行った例を示す。なお、アス

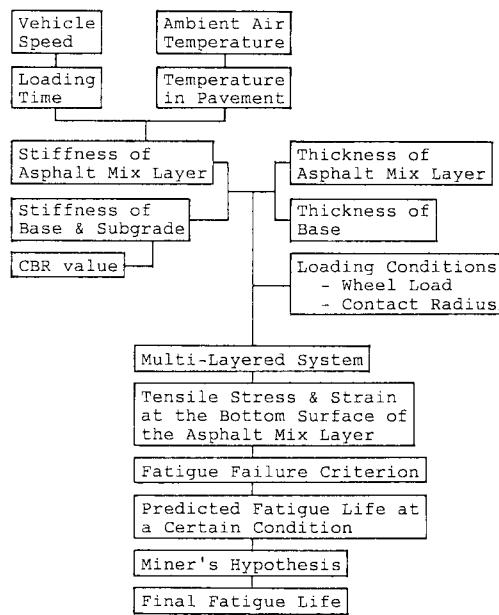


Fig. 12 Flow Chart of Fatigue Life Prediction for Asphalt Pavements.

タルト混合物のスティフネスは Van der Poel のノモグラフ¹⁷⁾および Heukelom ら⁵⁾の式により、また、粒状材の弾性係数は竹下の式¹⁸⁾により推定を行った。また、多層弹性理論による応力、ひずみの計算はパーソナルコンピュータに移植した CHEV 5 L を用いて各月ごとに実行した。最終的な寿命に換算するための疲労被害の累積には、脆性疲労破壊の仮説である Miner 則を適用したが、これは、前節の室内実験で得られた知見より、アスファルト混合物の疲労破壊は低スティフネス状態よりもむしろ高スティフネス状態で大きく進行すると考えられるためである。

(1) 名神高速道路に対する適用

Fig. 13 は、Fig. 14 に示すような名神高速道路の舗装構造の一例に対して寿命予測を行い、各種の破壊規準との比較を行ったものである。解析の条件として、輪荷重は 4 乗則により 5 tf (49 kN) に換算し、温度変化は 1 か月ごとに評価した。また、縦軸には、各条件下で求まる推定寿命の逆数をとったが、これは、5 tf の車輪が走行した場合の単位疲労被害を表わすものと考えられる。なお、Table 3 に月平均気温および Claessen ら¹⁶⁾の方針により推定したアスファルト混合物層の代表温度を示す。

この図にみられるように、AASHO 道路試験の現場データから破壊規準を作成した Kingham の場合を除いて、室内実験結果に基づいた場合はいずれも冬季の曲げ疲労被害に比べて夏季のものがかなり大きく評価される

傾向がみられる。しかしながら、実際の舗装においては夏季は疲労破壊よりも混合物の流動によるわだち掘れが顕著となり、疲労ひびわれは主に春先に問題にされるのが通常であって、この矛盾を避けるために5月から9月の疲労被害は計上しないという便法をとる設計法もある¹⁹⁾。これに対し、本疲労破壊規準によれば春先あたりの気温での疲労被害が最大に評価され、夏季の被害は事実上ゼロとなり、きわめて合理的な結果を示しているといえよう。ただし、疲労破壊包絡線およびエネルギー理論を破壊規準とした場合は応力とひずみの両パラメータを評価するために、Fig. 13の8月にみられるようにアスファルト混合物層のスティフネスが極端に小さくなると半径方向の応力状態が圧縮側に転じ、理論上疲労破壊を生じないと考えられる場合がある。しかしながら、このような場合もエネルギー理論によれば、徐々に増加する疲労被害が突然0になることもなく、比較的無理なく現象を説明できるものと考えられる。

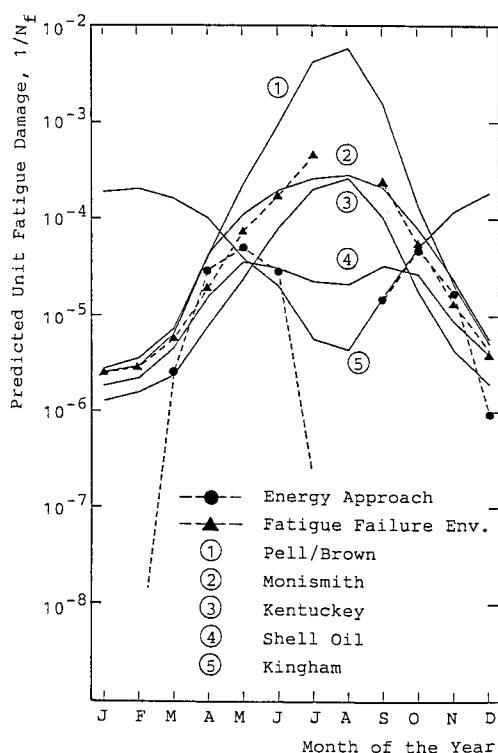


Fig. 13 Comparison of Predicted Unit Fatigue Damage for Different Criteria.

また、Fig. 15は、同じ名神高速道路のいくつかの例について実測の路面調査結果との対応を示したものであるが、面状ひびわれ、線状ひびわれの入った地点の場合には予測寿命は実測の通過輪数を下回るのにに対し、健全な路面では逆に上回っており、破壊時の単位散逸エネルギーを破壊規準とした本予測法は、妥当なものと考えられる。

(2) 国道に対する適用

Fig. 16は、建設省土木研究所資料^{20),21)}から選んだ全国11か所のオーバーレイを行っていない5層以下の舗装構造に対して破壊時の単位散逸エネルギーを疲労破壊規準とする寿命予測を行い、ひびわれ率をパラメーター

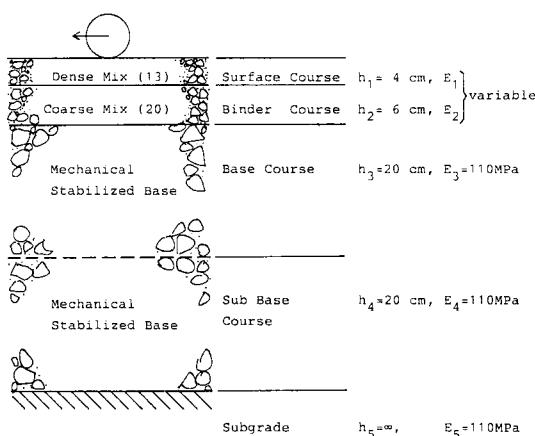


Fig. 14 Pavement Structure Applied for Prediction.

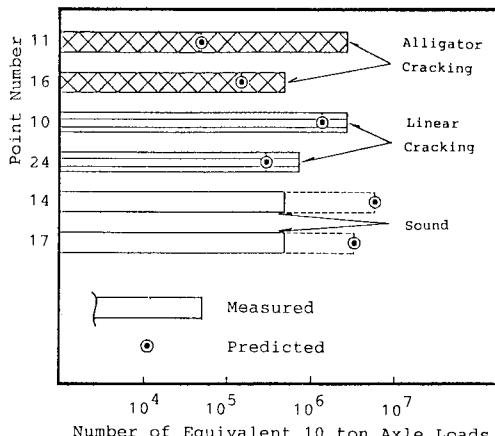


Fig. 15 Comparison of Damages by Predicted Life and Field Observation at Meishin Expressway.

Table 3 MMAT and Monthly Representative Pavement Temperatures.

Mean Monthly Temp.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Ambient Air	3.5	4.0	7.2	13.1	18.0	21.8	26.1	27.3	23.2	16.7	11.1	6.0
Surface Course	4.5	5.5	10.8	19.9	27.8	34.0	41.0	43.0	36.2	25.6	16.9	8.9
Binder Course	4.5	5.5	10.8	19.9	26.9	32.4	38.6	40.2	34.4	24.9	16.9	8.9

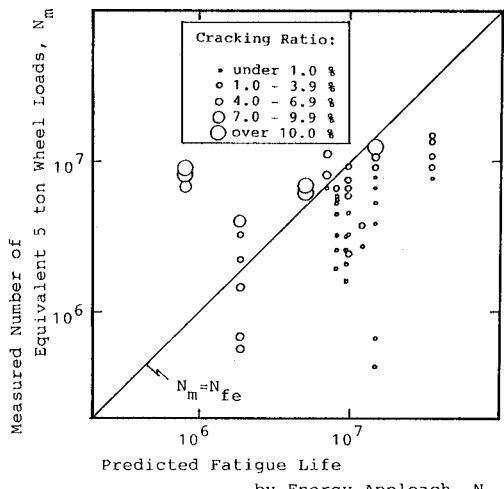


Fig. 16 Comparison of Damages by Predicted Life and Measured Number of Equivalent 5t Wheel Loads in terms of Observed Cracking Ratio.

として実測の5トン換算輪数通過回数と比較したものである。

この図によれば、実測の通過輪数が推定された疲労寿命を上回っている図の左上で観測された路面のひびわれ率は大きく、逆の実測の通過輪数が推定された疲労寿命を下回っている図の右下では観測された路面のひびわれ率は小さくなっていることがわかり、本寿命予測方法によって、実際の舗装の寿命をかなり的確に評価できることがわかる。

6. 結 論

以上より、本研究で得られた結論を要約すると以下のようになる。

(1) アスファルト混合物の疲労破壊に関して、破壊時の1サイクル単位体積当たりの散逸エネルギーは新たな破壊規準となり得る。

(2) この新たな破壊規準は従来より著者らの提案している疲労破壊包絡線と特に低スティフェネスの領域において形状が異なり、室内曲げ疲労試験が困難で静的な破壊包絡線から類推していた部分へ理論的に拡張したものと考えることができる。

(3) この破壊規準をわが国の実際の舗装構造に適用した場合、夏季の曲げ疲労被害は事実上問題にならない。また、最大の被害は春季あたりに生じ、実際に疲労破壊が問題となる時期との一致をみることができる。

(4) 破壊時の単位散逸エネルギーを破壊規準として名神高速道路および国道の疲労寿命を推定し、現実の路面性状と比較した結果、比較的よく一致することが確認された。

7. あとがき

アスファルト舗装の疲労寿命予測に散逸エネルギーの概念を導入することにより、従来理論的に問題となっていた低スティフェネス時(夏季)の疲労被害をも合理的に説明できるようになった。

しかしながら、位相角の測定はひずみゲージを用いるために誤差が大きいこと、今回の解析は通過車輪の横方向分布や気温の変動等を考慮していないこと、現場データのひびわれがすべて混合物の曲げ疲労現象によるものとは限らないこと、供試体はすべて室内で作製したものを用いたこと、また、環境条件としては気温のみを考慮したにすぎず解析結果として秋季にも大きな疲労被害が現われたことなどのいくつかの問題点を指摘することができる。今後これらを改善することにより、より合理的な評価が行えるようになると考える。

謝 辞:本研究を遂行するにあたり、地域振興整備公団の竹井邦彦(当時大学院修士課程学生)および大学院学生の藤田幸夫君(当時学部4年生)に多大な助力を受けたことを記し、感謝の意を表す次第である。

参 考 文 献

- 日本道路協会:道路維持修繕要綱,丸善株式会社,pp.65~90, 1978.
- 建設省道路局国道第一課,建設省土木研究所:舗装の維持修繕の計画に関する調査研究,第34回建設省技術研究会報告,pp.323~362, 1980.
- Finn, F. N.: Observations of Distress in Full Scale Pavements, Highway Research Board, Special Report 126, 1971.
- Nijboer, F. N.: Mechanical Properties of Asphalt Materials and Structural Design of Asphalt Roads, Highway Research Board, Vol. 33, 1954.
- Heukelom, W. and Klomp, A. J. G.: Road Design and Dynamic Loading, Proc. of AAPT, Vol. 33, 1964.
- Huang, Y. H.: Strain and Curvature as Factors for Pavement Fatigue, Proc. of 3rd ICSDAP, pp.622~629, 1972.
- Brown, S. F. and Pell, P. S.: An Experimental Investigation of the Stresses, Strains and Displacements in a Layered Pavement Structure Subjected to Dynamic Loads, Proc. of 2nd ICSDAP, pp.487~504, 1967.
- Monismith, C. L. and Epps, J. A.: Asphalt Mixture Behaviour in Repeated Flexure, Report No. 69-6, University of California, 1971.
- Kingham, R. I.: Failure Criteria Developed from AASHO Road Test Data, Proc. of 3rd ICSDAP, pp.656~669, 1972.
- 丸山暉彦・渡辺 隆・吉原一彦:アスファルト混合物の疲労破壊包絡線, 土木学会論文報告集, 第306号,

pp. 71~78, 1981年2月.

- 11) Smith, T. L. : Stress-Strain-Time-Temperature Relationships for Polymers, American Society for Testing Materials, Special Technical Publication, No. 325, pp. 60~89, 1962.
- 12) 渡辺 隆・渡辺暉彦・元田良孝：アスファルト混合物の一軸圧縮破壊特性，土木学会論文報告集，第243号，pp. 91~98, 1975年11月。
- 13) Van Dijk, W. : The Energy Approach to Fatigue for Pavement Design, Proc. of AAPT, Vol. 46, pp. 1~40, 1977.
- 14) Van Dijk, W. : Practical Fatigue Characteristics of Bituminous Mixes, Proc. of AAPT, Vol. 44, pp. 38~74, 1975.
- 15) Saithgate, H. F., Deen, R. C. and Havens, J. H. : Rational Analysis of Kentucky Pavement Design Criterion, Research Report KYHPR-60-20, Kentucky Department of Highways, 1968.
- 16) Claessen, A. I. M., Edwards, J. M., Sommer, P. M. and Ugé, P. : Asphalt Pavement Design — The Shell Method, Proc. of 4th ICSDAP, pp. 39~74, 1977.
- 17) Van der Poel : A General System Describing the Viscoelastic Properties of Bitumens and Its Relation to Routine Test Data, Journal of Applied Chemistry, Vol. 4, pp. 221~236, 1954.
- 18) 竹下春見：解説アスファルト舗装(2)，アスファルト，No. 50, pp. 7~12, 1966.
- 19) Célard, B. : Esso Road Design Technology, Proc. of 4th ICSDAP, pp. 249~268, 1977.
- 20) 建設省土木研究所舗装研究室：車両重量調査結果の解析，土木研究所資料第1723号，1981。
- 21) 建設省土木研究所舗装研究室：路面維持調査結果の解析，土木研究所資料第1751号，1982。

(1985.5.29・受付)