

アスファルト混合物の拡張された疲労破壊規準に関する研究

AN EXTENDED FATIGUE FAILURE CRITERION FOR ASPHALT MIXES

姫野賢治*・渡辺 隆**・丸山暉彦***

By Kenji HIMENO, Takashi WATANABE and Teruhiko MARUYAMA

The fatigue failure criterion for asphalt mix based on the energy dissipation theory was presented and it was extended to cover wide range of mix stiffness modulus. A special emphasis was placed on the low stiffness range in an attempt to establish a reasonable criterion which is also valid for the top surface of mix slab. By laboratory wheel tracking fatigue tests, it was found that fatigue cracks can take place at both surfaces of the slabs, and that the predicted fatigue lives by the new criterion correspond well with the structural failure points in both cases.

Keywords: asphalt pavement, fatigue life, longitudinal surface crack, fatigue failure criterion

1. ま え が き

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し疲労破壊規準を確立する問題と、この疲労破壊規準を現実の舗装に適用し、外力の評価を含めた確かな寿命予測モデルを構築する問題の2つに分けて考える必要がある。かねてより混合物中のアスファルトの粘性成分によって散逸するエネルギーと混合物が破壊に至るまでの載荷回数との間に関数関係があることが指摘されてきた¹⁾が、かつて著者らは、混合物層下面から発生すると考えられる曲げ疲労破壊を対象として、1周期の外力について単位体積当たりの破壊時の散逸エネルギー量（破壊時単位散逸エネルギー）を定義し、繰り返し曲げ試験によってこれを規定する応力振幅、ひずみ振幅および両波形間の位相角を定量化することによって一種の疲労破壊包絡線を決定し得ることを示した²⁾⁻⁶⁾。また、この疲労破壊規準が比較的スティフネスの小さい場合の曲げ疲労破壊特性を

も合理的に表現し得ること、夏季の曲げ疲労被害は事実上無視し得るほど小さいことなどを明らかにした。

これに対して、近年、支持力が大きく、混合物層厚の大きい高級舗装で車輪走行部分に舗装表面から発生する縦表面ひびわれが問題となってきている^{7),8)}。この発生メカニズムについてはいくつかの推論が行われているにすぎないが、車輪走行位置を中心に縦方向にひびわれが発生していること、車輪の走行により混合物内部に発生するひずみ振幅は混合物が一度の載荷で破壊するほどは大きくないと推定されることなどから、曲げ疲労ひびわれ破壊とは形態を異にする一種の疲労破壊と考えることができる。また、このひびわれは主に中国、九州地方などの温暖地域によくみられること⁹⁾、高架橋の側道のように直接陽のあたらないところでは発生しにくいこと⁷⁾、基層に比べて表層のスティフネスが相対的に小さい場合には表層表面近くに最大ひずみが発生すること¹⁰⁾などから、比較的表層のスティフネスが小さい場合に発生しやすいと考えられるが、この種のひびわれの発生を予測するためには混合物の温度が極端に高い場合も疲労破壊特性を正確に記述できる必要がある。さらに、一般に室内曲げ疲労試験に基づいて作成される疲労破壊規準は、各試験条件ごとに唯一の破壊点を定義し概念的にこの点を境にアスファルト混合物を健全な状態と破壊した

* 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 武蔵工業大学教授 工学部土木工学科
(〒158 世田谷区玉堤1-28-1)

*** 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)

状態とに択一的に分類することを期待したものであり、応力状態や載荷周期が複雑に変化し発生後徐々に成長する現実のひびわれとの明確な対応づけがなされなければならない。

以上の点をふまえ、本研究では、骨材粒度、バインダーのコンシステンシー性状の異なる種々の混合物について、広いスティフネス範囲での散逸エネルギー量を定量化し、前報⁶⁾で提案した疲労破壊規準を曲げ疲労破壊だけではなく縦表面ひびわれ破壊にも適用し得るように拡張することを目的とした。また、この疲労破壊規準の適用結果が現実の舗装の破壊のどの段階に対応しているかを明確にするため、それぞれの破壊形態が卓越すると考えられる条件で室内ホイールトラック疲労試験を実施して理論的な解析を行うとともに、この疲労破壊規準の適用性を検証した。

2. 使用材料等

本研究で行った実験は、アスファルト舗装要綱¹¹⁾に示されている密粒度アスファルト混合物 (13)、粗粒度アスファルト混合物 (20) および細粒度アスファルト混合物 (13) について行った。また、使用したバインダーのコンシステンシー性状は Table 1 に示すとおりであるが、表中の改質アスファルト A, B はともにアスファルト混合物の耐流動性能を向上させることを期待した熱可塑性樹脂入りのアスファルトである。最適アスファルト量は、密粒度アスファルト混合物 (13) の場合、改質アスファルト B が 5.6 % であるほかはすべて 5.9 % であった。

3. 超低スティフネス状態での位相角の測定試験

(1) 実験方法

わが国では、舗装表面での夏季の最高温度は一般に 60°C を上回っており¹²⁾、車両の走行速度が小さい場合には混合物のスティフネスは 10 MPa 以下にも低下することが推定される。このような状態では混合物の流動や支点、載荷点の食い込みのためはり状の供試体に対して繰り返し曲げ試験を直接に実施することは困難である

ため、本研究では位相角の測定はスラブ状の供試体によった。すなわち、スラブ状のアスファルト混合物の底面中央部にひずみゲージを貼り、走行させた車輪がゲージ直上を通過し応力が最大になる瞬間に接点が閉じる電気回路を設けて、検出されるひずみが最大になる時点と回路が閉じる時点との時間差から位相角を求めた (Fig. 1)。

(2) 拡張された疲労破壊規準

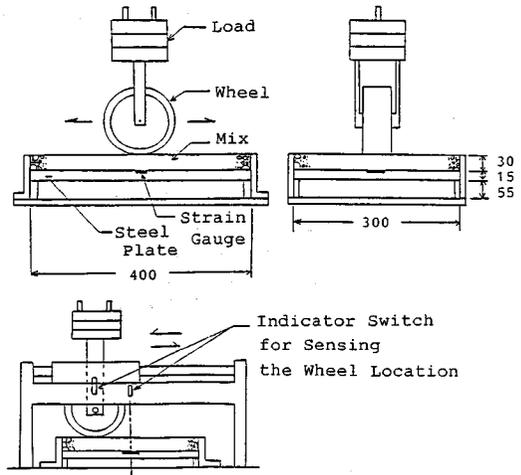


Fig. 1 Test Equipment for Measuring Phase Angle of Asphalt Mixes at Low Stiffness Modulus.

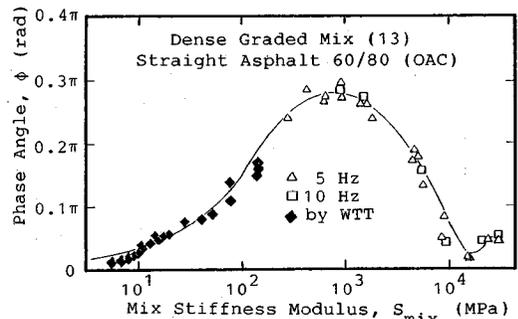


Fig. 2 Phase Angle versus Mix Stiffness Modulus (Dense Graded (13), Straight Asphalt 60/80).

Table 1 Properties of Binders Used for Laboratory Experiments.

Binder Type	Straight 20/40	Straight 60/80	Straight 150/200	Modified Type-A*	Modified Type-B**
Pen. @ 25°C, 100g, 5s [0.1mm]	32	77	188	48	54
Softening Point, R&B [°C]	62.0	49.0	40.0	60.0	58.0
Penetration Index	+0.4	-0.4	-0.3	+0.9	+0.8
Mixing Temperature [°C]	155-168	145-150	145-150	182-188	162-168
Compaction Temperature [°C]	140-150	135-140	130-138	170-175	149-154
Specific Gravity (25°C/25°C)	1.020	1.020	1.020	1.024	1.019

* Modified by Copolymer of Ethylene and Acetic Acid
 ** Modified by Denatured Polyolefine

一般に、粘弾性体の位相角は $0 \sim \pi/2$ であり、弾性体では 0 、粘性体では $\pi/2$ となる。アスファルト単体は温度の上昇とともに粘性体に近づくが、混合物の位相角はスティフネスと単調な関係になく、スティフネスがほぼ 10^3 MPa で極大値をもつことがわかった (Fig. 2)。これは、Fig. 3 に示すように混合物のスティフネスが 10^3 MPa よりも小さい場合には、Heukelom ら¹³⁾ の関係式によって求めたアスファルト単体のスティフネスは骨材の弾性係数 (約 17 GPa、砂岩¹⁴⁾) に比較してきわめて小さく、アスファルトに比べて骨材のスティフネスが極端に大きくなると骨材の弾性成分が支配的になり、再び位相角が減少するためと思われる。また、補足的に実施した繰り返し曲げ試験の結果、混合物のスティフネスがほぼ 10^4 MPa を超えると位相角は若干の増加をすることが認められたが、これはバインダーの温度がガラス転移点を下回っているためと推定される。

以上のように求めた混合物のスティフネスと位相角の関係を取り込むことにより、散逸エネルギーによる疲労破壊規準⁶⁾ をより広いスティフネス範囲に拡張することができる。

(3) 拡張された疲労破壊規準と疲労破壊包絡線との比較

アスファルト混合物が一軸応力状態にある場合には、この拡張された疲労破壊規準を著者らがかつて提案した疲労破壊包絡線¹⁵⁾ と同一の平面上に描くことができる (Fig. 4)。これより、スティフネスの低下に伴い今回新たに位相角を測定した超低スティフネス領域では疲労被害は徐々に減少を続けるが、逆に 10 GPa を超えるスティフネス状態においては曲線の凹凸が反転し、性状が急変して、一軸引張試験結果から求められる静的な破壊包絡線¹⁶⁾ と似た傾向を示すことなどが確認された。

(4) バインダー性状の違いによる疲労破壊特性の違い
以下では、針入度、添加剤の有無などのバインダーの

コンシステンシー性状が混合物の疲労破壊特性に及ぼす影響を調べるため、骨材粒度として密粒度アスファルト混合物 (13) を例にとり、Table 1 に示す各種のバインダーを用いた場合の疲労破壊規準を作成し、比較した。なお、ストレートアスファルト 60/80 についてはマーシャル試験により決定した設計アスファルト量よりも 0.5 % 少なくした混合物についても測定を行った。

Fig. 5 は密粒度アスファルト混合物 (13) について各

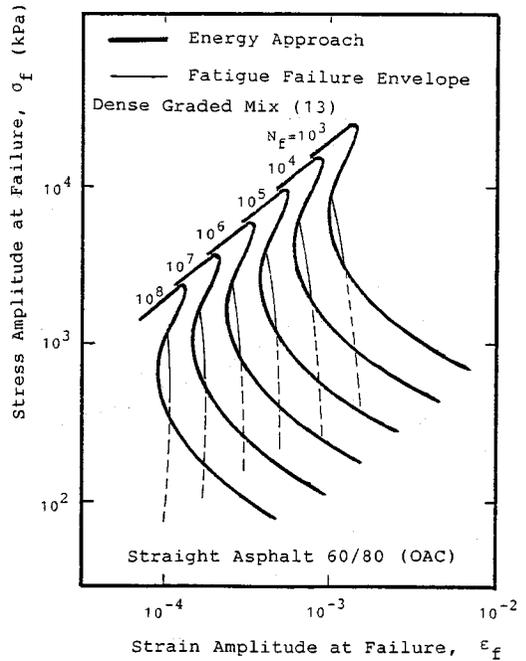


Fig. 4 Fatigue Failure Criterion by Energy Approach in Comparison with Fatigue Failure Envelope (Dense Graded (13), Straight Asphalt 60/80).

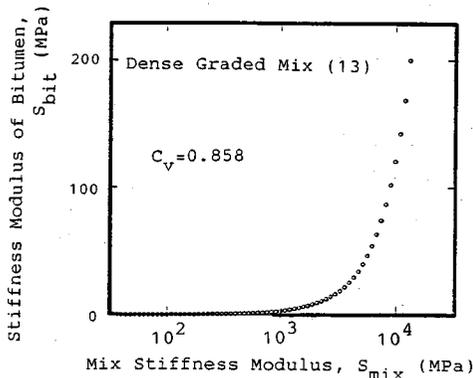


Fig. 3 Stiffness Moduli of Mix and Bitumen (Dense Graded (13), Straight Asphalt 60/80).

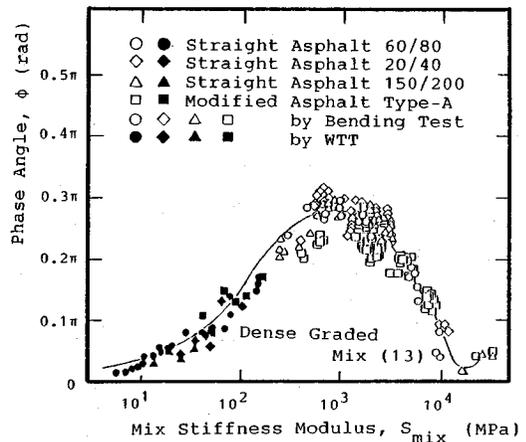


Fig. 5 Phase Angle versus Mix Stiffness Modulus (Dense Graded (13)).

種バインダーを用いた場合のスティフネスと位相角の関係を示したものであるが、これより、バインダーの違いによらずこの関係はほぼ1本の曲線で表わせることがわかる。また、疲労破壊に至る回数と破壊時の単位散逸エネルギーの関係も、両対数紙上でほぼ1本の直線で表わせることがわかった (Fig. 6)。ただし、Fig. 7に示すように、アスファルト量を設計アスファルト量よりも少なくした場合やもとの設計アスファルト量がやや小さい場合には、同一のエネルギー散逸でも破壊回数は小さいことが確認された。したがって、たとえば流動永久変形量を低減するため意識的にバインダー量を減らし骨材

同士のかみあわせ力の増加を期待することは舗装の供用性全体からみた場合には、必ずしも有効ではないと考えられる。

(5) 骨材粒度の違いによる疲労破壊特性の違い

次に、骨材粒度の違いがアスファルト混合物の疲労破壊特性に及ぼす影響を調べるために、バインダーの種類を一定とし骨材粒度を変化させた場合の疲労破壊特性の比較を行った。Figs. 8, 9は、それぞれ、粗粒度アスファルト混合物 (13) および細粒度アスファルト混合物 (13) についてスティフネスと位相角の関係を示したものである。また、Fig. 10は、以上検討した3つの混合物について単位散逸エネルギーと破壊回数の関係を重ねて示したものである。このように、バインダーの違いの場合とは異なり、これらの関係は骨材粒度に固有のものであり、たとえば細粒度アスファルト混合物 (13) は疲労破壊に関しては著しく耐久性が劣っていることなどがわかる。

以上から、疲労破壊包絡線の形状からも認められたように¹⁷⁾、アスファルト混合物の疲労破壊特性はバインダーのコンシステンシー性状には独立で、ほぼ骨材粒度で決まるということができるとであろう。しかしながら、このことは、骨材粒度が同一であればすべてのアスファルト舗装はほぼ同一の疲労寿命をもつということを示す

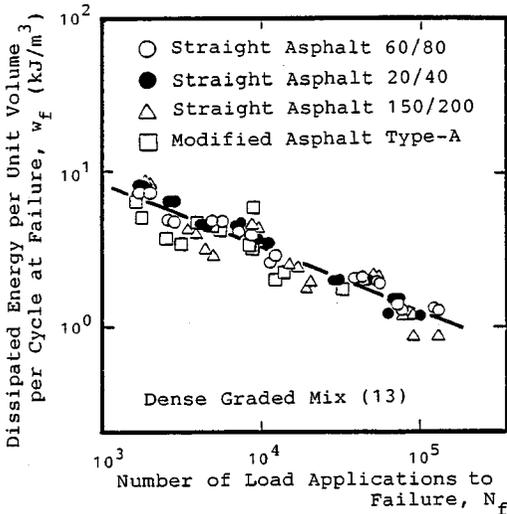


Fig. 6 Unit Dissipated Energy at Failure versus Number of Load Applications to Failure (Dense Graded (13)).

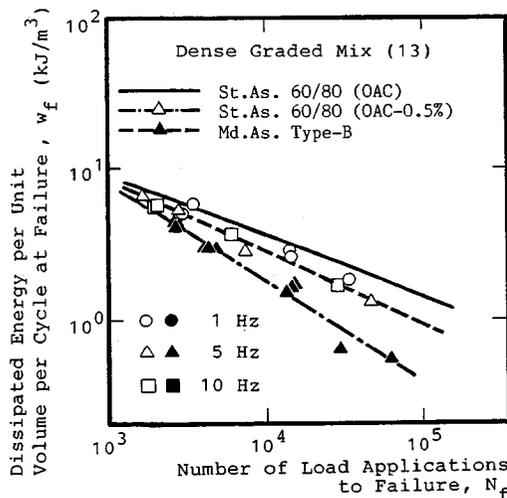


Fig. 7 Comparison of the Relationships between Unit Dissipated Energy at Failure versus Number of Load Applications to Failure (Dense Graded Mix (13)).

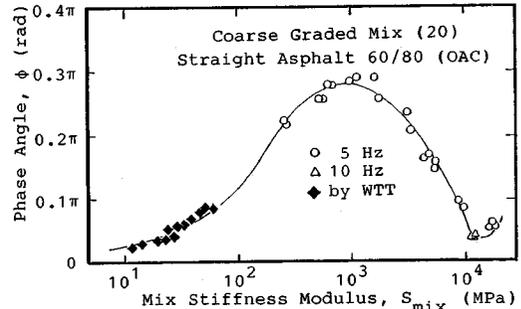


Fig. 8 Phase Angle versus Mix Stiffness Modulus (Coarse Graded (20), Straight Asphalt 60/80).

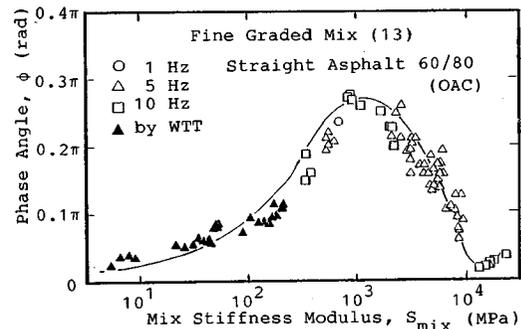


Fig. 9 Phase Angle versus Mix Stiffness Modulus (Fine Graded (13), Straight Asphalt 60/80).

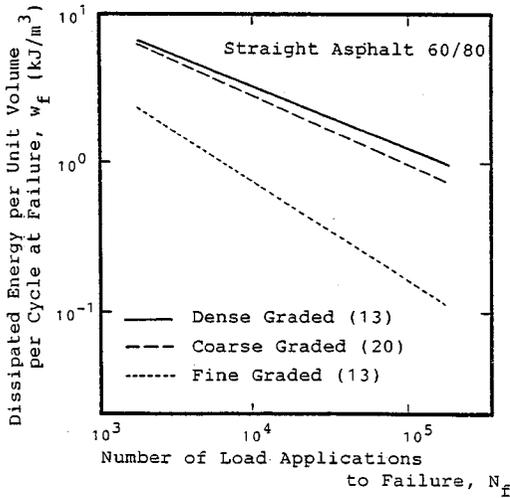


Fig. 10 Comparison of the Relationships between Unit Dissipated Energy at Failure and Number of Load Applications to Failure (Straight Asphalt 60/80).

ものではなく、最終的には実際の舗装構造に対する寿命予測を行ったうえで比較をする必要がある。これは、同一の構造で同一の環境条件下に置かれた舗装もアスファルト混合物内部に発生する応力、ひずみレベルがバインダーのコンシステンシー性状により異なるからである。

4. 高スティフネス状態でのホイールトラッキング疲労試験

(1) 実験方法

以上で、広いスティフネス範囲で成立する疲労破壊規準を提案しその特性を検討してきたが、以下では、曲げ疲労破壊現象を室内でシミュレートし、この疲労破壊規準の位置づけを明確にするためゴム支床上の供試体に対してホイールトラッキング疲労試験を実施した。実験装置は Fig. 11 に示すとおりであるが、アスファルト混合物の曲げ疲労破壊が卓越するように、15~20°C の比較的低温で実施した。支床に用いたゴムマットは、予備実

験の結果から判断して、アスファルト混合物層下面でのひずみ振幅が現場の舗装と同程度 (約 200~1000 μ) になるように弾性係数が約 25 MPa のものを選んだ。実験中は、Fig. 12 に示すように、スラブ状アスファルト混合物層の底面に車輪の走行方向と垂直方向にひずみゲージを貼り、輪荷重の通過により発生する接線ひずみ波形を多ペンレコーダで記録した。また、これと同時に、目視により供試体上下面におけるひびわれの発生、成長の過程を観察し、荷重繰り返し回数、ひずみ振幅と対応させた。

(2) 高スティフネス状態でのホイールトラッキング疲労試験におけるひびわれの発生、成長

混合物層底面に貼付したひずみゲージによって実験中のひずみ波形の変動を測定した結果、スラブ状のアスファルト混合物供試体の底面では、ほぼ片振りのひずみ波形をもつことが判明した (Fig. 13)。また、一般にひずみ振幅 ϵ_a は、Fig. 14 に示すように、ひずみゲージの位置によらず始めは徐々に増加し、ある段階で増加率が変化し、ピークを迎えた後に急激に減少することが確認された。これらひずみ振幅の増加率が急変する点ではアスファルト混合物内部に何らかの物理的な変化が生じているものと推定されるので、それぞれの点での載荷回数

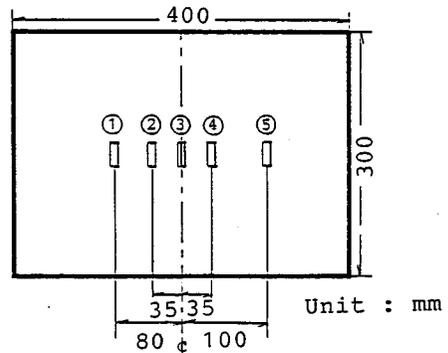


Fig. 12 Wheel Tracking Test Specimen with Strain Gauges.

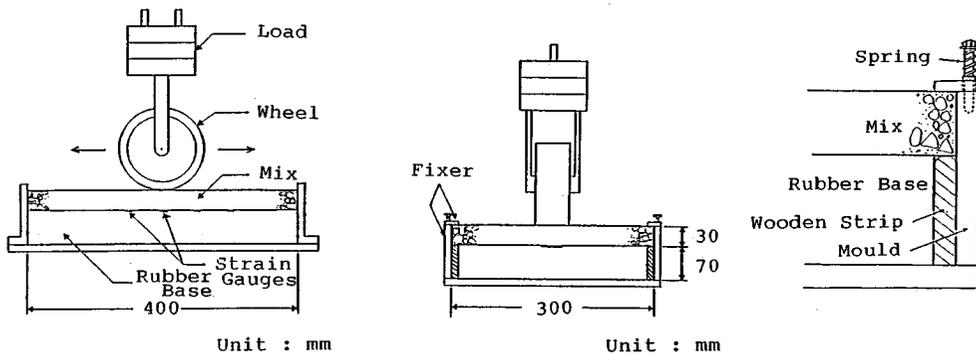


Fig. 11 Wheel Tracking Test Equipment at High Stiffness Modulus.

を N_{f1} , N_{f2} と定義して着目することとした。

実験中に、白色のペンキを塗布した供試体表面および底面を適宜観察した結果、ひびわれは、供試体底面で発生し、やがて発達して表面へと伝播していくこと、ひびわれはまず車輪走行位置付近で縦断方向に発生し、これが枝葉を延ばすような形で発達し、横断方向にも成長すること、また、縦横に延びたひびわれは、究極的には互いに結合していわゆる「アリゲータクラック」とよばれる亀甲状のひびわれを形成することなどが認められた (Fig. 15 (a)~(d)). さらに、これらのひびわれの発生、成長とひずみ振幅の変化との対応を行ったところ、載荷回数が N_{f1} を超える時点からスラブ底面にヘアークラックが発生し、載荷回数がほぼ N_{f2} の時点ではこれらのクラックが成長し一部は互いに結合して面状のクラックになり、スラブの表面にまで達することが確認された。以上のことから、Van Dijk⁽¹⁴⁾ らも述べているように、載荷回数が N_{f1} の時点はクラックの発生段階に、また、載荷回数 N_{f2} の時点はクラックが成長し、応力伝達が十分に行えなくなる程度の構造的な破壊が舗装に発生する段階にそれぞれ対応しているものと推定される。

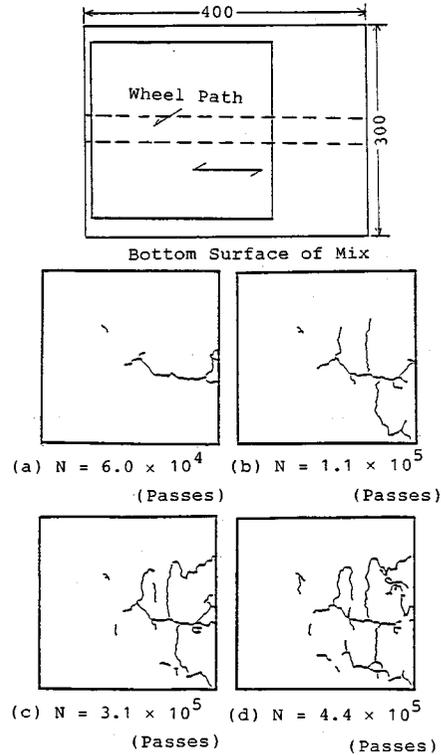


Fig. 15 An Example of Initiation and Propagation of Fatigue Failure Cracks at the Bottom Surface of Slab.

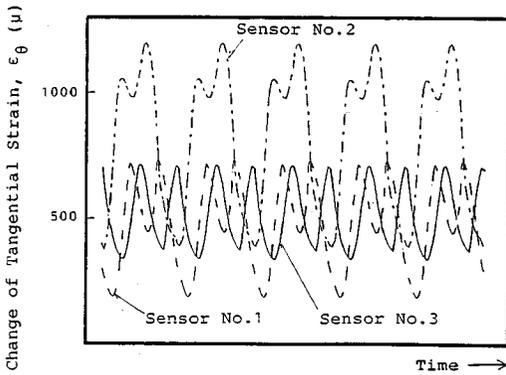


Fig. 13 Measured Strain at the Bottom Surface of Slab.

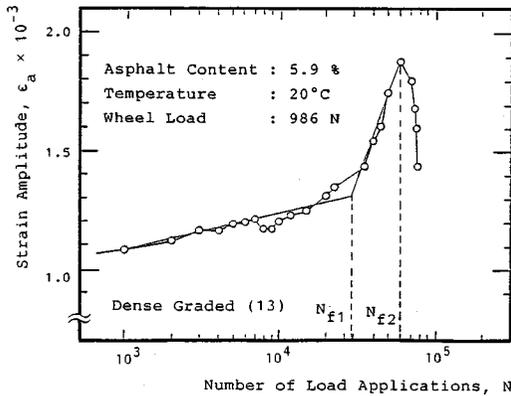


Fig. 14 Change of Measured Strain Amplitude at the Bottom Surface of Slab (at 20°C).

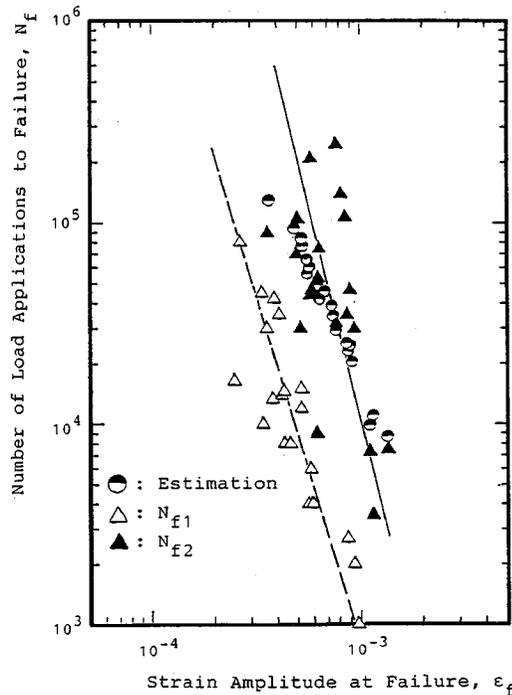


Fig. 16 Relationship between Strain Amplitude at the Bottom of Slab at Failure and Number of Wheel Passes at Failure Compared with Estimated Values (at 20°C).

なお、ひずみゲージによって測定された各破壊点におけるひずみ振幅 ϵ_r と、これらに対応する荷重回数 N_{r1} および N_{r2} との関係を両対数紙上にプロットしたところ、従来より曲げ疲労試験結果について認められていると同様に、どちらの荷重回数においてもほぼ直線関係にあることが明らかになった (Fig. 16).

(3) 拡張された疲労破壊規準と高スティフネス状態でのホイールトラッキング疲労試験結果との対応

以上のようにして行ったスラブ状のアスファルト混合物の疲労破壊試験は、かなり現実の舗装構造を忠実に再現したものと考えることができる。したがって、はり状の供試体に対する曲げ疲労破壊試験に基づいて作成された疲労破壊規準によって、このような三軸的な応力状態でひびわれが連続的に成長するスラブ状のアスファルト混合物の疲労寿命を推定すれば、その推定値が現実の舗装の破壊状態のどの段階に対応しているのか検証をすることができるものと考えられる。

三軸的な応力状態の場合、車輪が1輪通過するときバインダーの粘性成分によってアスファルト混合物層下面で単位体積当たりに散逸するエネルギー量は、荷重応力がほぼ正弦波で表わされる場合、各主応力の振幅と混合物のスティフネスを用いて、

$$w_r = \left(\sum_{i=1}^3 (\Delta\sigma_i)^2 - \nu \sum_{i \neq j} \Delta\sigma_i \Delta\sigma_j \right) \pi \sin \phi / s \dots\dots (1)$$

ここに、

$\Delta\sigma_i$: 主応力の振幅 [Pa] ($i=1, 2, 3$)

ν : アスファルト混合物のポアソン比

ϕ : アスファルト混合物の位相角 [rad]

s : アスファルト混合物のスティフネス [Pa]

と表わせるが、本研究ではひずみゲージによって車輪走行方向に直角方向のひずみ振幅 ϵ_0 (接線ひずみ) しか測定されていないため、あらかじめ混合物のスティフネスを変化させた場合の ϵ_0 と主応力の振幅 $\Delta\sigma_i$ の関係を有限要素法を用いた弾性理論によって求めておき、実測の ϵ_0 から、各実測値ごとに、寿命を推定した。なお、ここで有限要素法を用いたのは、Fig. 11 に示すようにスラブの周囲2辺がモールドに固定されており、これを解析上の境界条件に取り込むためである。

このようにして求めた破壊回数の推定値を実測の破壊時のひずみ振幅と破壊回数の関係図に重ねて示したところ、推定された破壊回数は荷重回数 N_{r2} の直線とほぼ一致していることがわかった (Fig. 16 の●印)。したがって、現実の舗装では混合物の温度や荷重条件が不規則に変化するが、拡張された疲労破壊規準をこのような舗装構造に適用した場合、この規準の表わす破壊回数はひびわれが互いに結合し、舗装が構造的に支持力を失う点 N_{r2} までの交通量を表わすということを示しているもの

と考えられる。

5. 低スティフネス状態でのホイールトラッキング疲労試験

(1) 実験方法

アスファルト舗装の縦表面ひびわれ破壊は、アスファルト混合物のスティフネスが低下した場合にタイヤの走行部に働く大きなひずみが原因で発生すると推定されており¹⁹⁾、舗装の構造的な支持力不足による曲げ疲労破壊とはその発生の機構が全く異なるものである。この疲労破壊現象をシミュレートするため、実際の舗装表面のほぼ最高温度に相当する 60°C の低スティフネス状態における鋼床上のアスファルト混合物に対して、ゴムの剛性に起因するせん断変形を取り除くためニューマティックタイヤによるホイールトラッキング疲労試験を実施した。実験中は微小な表面変形量を測定するため、計測用のカメラ (Hasselblad 社, 500 EL) によってアスファルト混合物の表面をステレオ撮影し、この結果を解析空中三角測量の技法によって解析して、混合物表面の三次元的な変形量を測定するとともに、ひびわれの発生、成長の過程を観察した²⁰⁾。すなわち、Fig. 17 に示すように、モールド上面、混合物表面にそれぞれ 12 個の基準点と 57 個の測定点を設置し、2 枚のステレオ写真上のこれらの点の器械座標をステレオコンパレータ (Karl Zeiss Jenar 社, Stecometer) によって読み取り、左右の写真に結んだ像はもとは同一の光源から発した光であるという幾何学的条件から各写真の撮影時の位置および回転角を推定して測定点の座標を計算によって求めた。この手法は、非接触で測定が行え、しかも、今回特に着目して

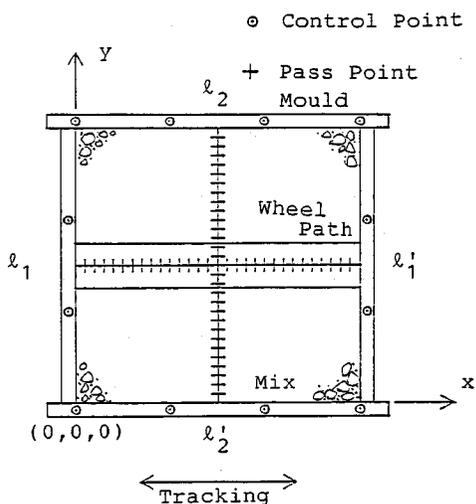


Fig. 17 Wheel Tracking Test Equipment at Low Stiffness Modulus with Control Points and Pass Points.

いる平面座標を高精度で求めることができる。

(2) 低スティフネス状態でのホイールトラッキング疲労試験におけるひびわれの発生、成長

Fig. 18は、車輪の走行方向に直角の断面 (Fig. 17の $l_2 \sim l_2'$ 断面) における横断方向の表面変位を示したものである。これより、混合物表面では幅約4 cmのタイヤ走行部分は内側へ、それ以外の部分は外側へ移動しており、このため、タイヤ走行部で大きなひずみの変化、すなわちエネルギー散逸が発生していることがわかる。松野ら¹⁸⁾、西²¹⁾、川島ら¹⁹⁾、石倉ら²²⁾らも多層弾性理論、有限要素法などの理論解析によって低スティフネス状態

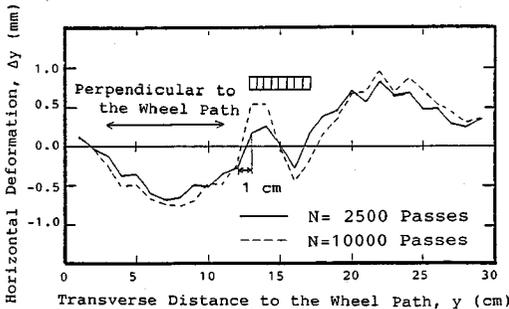


Fig. 18 Calculated Lateral Displacements by Photos.

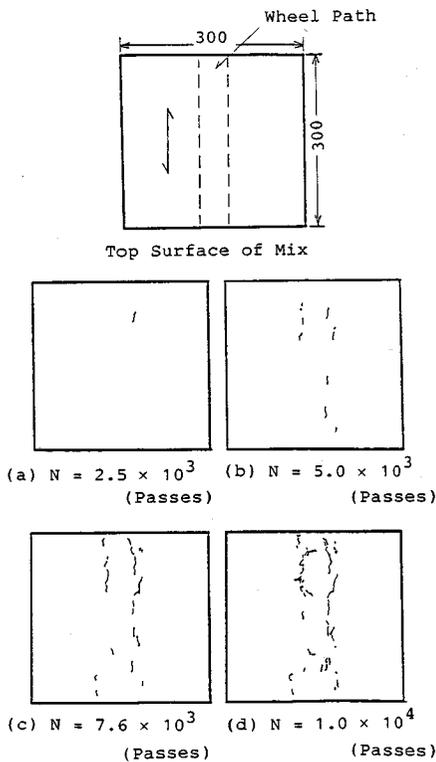


Fig. 19 An Example of Initiation and Propagation of Fatigue Failure Cracks at the Surface of Slab.

におけるアスファルト混合物では、タイヤ走行部においてきわめて大きなひずみの作用することを推定しており、今回の測定はこれらの理論的考察の1つの証左になり得るものと考えられる。

また、観察により、測定開始後約2500回の载荷でまずタイヤの接地時間が比較的長い走行の折り返し点付近で表面から微細なひびわれが発生し始め、これが後に成長して、10000回载荷後には走行部分全体で連結したひびわれとなることが認められた (Fig. 19 (a)~(d))。以上から、この種のひびわれも曲げ疲労破壊とは異なる一種の疲労破壊であると推定される。

(3) 拡張された疲労破壊規準と低スティフネス状態でのホイールトラッキング試験結果との対応

Fig. 20は、上で行ったホイールトラッキング疲労試験中のアスファルト混合物のスティフネス範囲において、Van der Poelのノモグラフ²³⁾、Heukelomらの公式¹³⁾、弾性理論などを用いて、混合物表面での推定破壊回数を比較したものである。多くの研究者による破壊規準^{24)~29)}は、現場データから作成されたKinghamのものが極端に大きな寿命を示していることを除いて走行折り返し点 (スティフネス約2.9 MPa) ではほとんどすべて1回以下の寿命を予測しており、このようなスティフネスがきわめて小さい状態における表面ひびわれの発生の解析のためには不適当であるが、本研究で提案した疲労破壊規準を適用した場合にはおよそ7500回で破壊すると推定された。縦表面ひびわれに関しては曲げ疲労試験で観察したようにひびわれの発生点、あるいは、構造的な破壊点を定義することは困難であるが、Fig. 19におけるひびわれの発生図において、ひびわれが初めて認められた载荷回数が2500から3000回の時点をひびわれの発生点、また、各ひびわれが結合し始めた8000

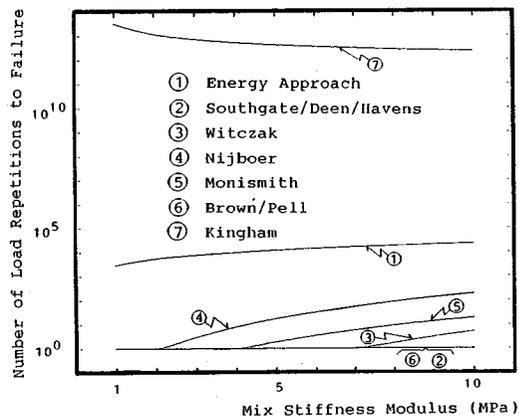


Fig. 20 Comparison of Predicted Number of Repetitions to Fatigue Failure at Surface in Wheel Tracking Test for Different Criteria.

～9000回の時点を構造的な破壊点と定めると、縦表面ひびわれ破壊の場合も、拡張された疲労破壊規準の定める破壊点はほぼ構造的な破壊に対応しているものと考えることができる。

以上より、本研究で提案する拡張された疲労破壊規準は、曲げ疲労破壊、縦表面ひびわれ破壊の区別を問わず、また、スティフネスの大小にかかわらず、アスファルト混合物に対してほぼ普遍的に適用し得る合理的な疲労破壊規準であるといえることができる。

6. 結 論

以上、本研究で得られた知見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粘性成分の大きさを代表する位相角を広いスティフネス範囲で定量化し、混合物の疲労破壊規準を拡張することができた。

(2) 骨材粒度が同一であれば、バインダーの種類によらずこの疲労破壊規準はほぼ一致する。ただし、アスファルト量が少ない場合は一般に破壊回数は小さい。

(3) 拡張された疲労破壊規準は、近年高級舗装において頻発している縦表面ひびわれにも適用し得る。

(4) 高スティフネス状態でゴム支床上の混合物に対してホイールトラッキング疲労試験を実施し、アスファルト混合物の曲げ疲労破壊現象を室内で再現することができた。

(5) この疲労試験中の混合物底面のひずみ振幅は徐々に増加し、ある点から急増して、再び減少をすることがわかった。また、それぞれの時点はヘアクラックの発生点および亀甲状のひびわれの発生点にほぼ対応していることが認められた。

(6) ひずみ振幅の急増点および減少点では、ひずみ振幅と破壊回数はいずれの場合も両対数紙上でほぼ直線関係にあることがわかった。

(7) 拡張された疲労破壊規準によってこの疲労試験による混合物の曲げ疲労破壊回数を推定したところ、ほぼ構造的な破壊点に対応していることが推定された。

(8) 低スティフネス状態で鋼床上の混合物に対してホイールトラッキング疲労試験を実施し、縦表面ひびわれ破壊現象を室内で再現することができた。

(9) この試験中の混合物表面の水平方向の微小な変形量を測定したところ、タイヤ走行部において相当大きなひずみの変化を受けていることが認められた。

(10) 拡張された疲労破壊規準により縦表面ひびわれ発生までの載荷回数を推定したところ、ほぼ線状のひびわれに成長した破壊点に対応していることがわかった。

(11) 以上から、本研究で提案した拡張された疲労破壊規準は、曲げ疲労破壊、縦表面ひびわれ破壊の区別を

問わず、また、混合物のスティフネスの大小にかかわらず、アスファルト混合物に対してほぼ普遍的に適用し得る合理的な疲労破壊規準であると考えられることができる。

7. あとがき

広いスティフネス範囲で成立するアスファルト混合物の拡張された疲労破壊規準を提案し、表層のスティフネスが下層に比べて相対的に小さい場合には表層表面からも曲げ作用によるものとは異なる別種の疲労破壊が発生し得ることを指摘した。このように、疲労破壊に限定しても、混合物のスティフネス状態によって破壊の形態は異なるため、この疲労破壊規準を現実の舗装に適用するためには温度を含めた外的因子の評価を厳密に行う必要があるものと思われる。

謝 辞：本研究を遂行するにあたり、(株)日本舗道の桜井康久氏および(株)鹿島建設の大久保憲二氏(ともに当時東工大学部4年生)には大変な助力を受けた。また、東京理科大学の内山久雄先生および(株)アジア航測の矢島儀則氏には写真計測の面でいろいろお世話いただいた。ここに感謝の意を表する次第である。

なお、本研究は、文部省科学技術研究費補助金の交付を受けた。

参 考 文 献

- 1) Van Dijk, W. : Practical Fatigue Characteristics of Bituminous Mixes, Proc. of AAPT, Vol. 44, pp. 38～74, 1975.
- 2) 渡辺 隆・姫野賢治・竹井邦彦：高温時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，第40回土木学会年講概要集/V-238, pp. 475～476, 1985.
- 3) 渡辺 隆・姫野賢治・藤田幸夫：アスファルト舗装の疲労寿命予測方法に対するエネルギー概念の適用性，第40回土木学会年講概要集/V-239, pp. 477～478, 1985.
- 4) 姫野賢治・渡辺 隆・丸山暉彦：アスファルト混合物の疲労破壊規準に関する研究，第16回日本道路会議一般論文集, pp. 311～312, 1985.
- 5) 姫野賢治・渡辺 隆・竹井邦彦・勝呂 太：散逸エネルギー理論を用いたアスファルト混合物の疲労破壊規準，東京工業大学土木工学科研究報告, No. 35, pp. 51～72, 1985年12月.
- 6) 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年2月.
- 7) Matsuno, S. and Nishizawa, T. : Longitudinal Surface Cracking of Flexible Pavements, Proc. of PICA, Technical Memorandum of PWRI, No. 2136, pp. 779～796, 1984.
- 8) 松野三郎：わだち割れ——アスファルト舗装の縦表面クラックについて，(1)，(2)，舗装, Vol. 19, No. 2～3,

- 1984.
- 9) 野上幸治・高橋哲躬：アスファルト舗装に関する試験調査法——ひびわれ測定法，アスファルト，No.147，pp.26~31，1986年4月。
 - 10) Molenaar, A. A. A. : Fatigue and Reflection Cracking due to Traffic Loads, Proc. of AAPT, Vol. 53, pp. 440~474, 1984.
 - 11) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，丸善，1975.
 - 12) 姫野賢治・渡辺 隆・勝呂 太：アスファルト舗装の内部温度の推定に関する研究，土木学会論文集，No. 366/V-4, pp. 123~132, 1986年2月。
 - 13) Heukelom, W. and Klomp, A. J. G. : Road Design and Dynamic Loading, Proc. of AAPT, Vol. 33, pp. 92~125, 1964.
 - 14) 土質工学会編：土質工学ハンドブック，技報堂，p. 1267, 1965.
 - 15) 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. 91~98, 1981年2月。
 - 16) 柳沢茂樹：アスファルト混合物の粘弾性的挙動と破壊について，修士論文，東京工業大学，1978.
 - 17) 白石泰一・渡辺 隆・尾本志展：アスファルト混合物の疲労破壊特性と舗装構造設計への適用，第36回土木学会年講概要集/V-224, pp. 445~446, 1981.
 - 18) 松野三朗：加熱アスファルト混合物の配合設計と施工に関する研究，博士論文，京都大学，1976.
 - 19) 川島義昭・福島 公・三好康夫：高速道路におけるアスファルト舗装のひびわれ——実態と発生機構に関する一考察——，昭和58年度日本道路公団試験所報告，pp. 67~79, 1984年11月。
 - 20) 姫野賢治・渡辺 隆：アスファルト混合物の流動性状について，第15回日本道路会議一般論文集，pp. 253~254, 1983.
 - 21) Nishi, M. : Structural Analysis and Design of Flexible Pavements, Doctor Thesis, Nov., 1981.
 - 22) 石倉裕明・西沢辰男・松野三朗：有限要素法によるアスファルト舗装表面ひびわりの解析，土木学会中部支部講演会概要集，1984年3月。
 - 23) Van der Poel, C. : 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.
 - 24) Southgate, H. F., Deen, R. C. and Havens, J. H. : Rational Analysis of Kentucky Pavement Design Criterion, Research Report KYHPR-60-20, 1968.
 - 25) Witczak, M. W. : Pavement Performance Model, Vol. I, Repeated Load Fracture of Pavement System, FAA-RD-75-227-I, 1976.
 - 26) Nijboer, L. W. : Betrachtungen über Berechnungen von Straßenbelägen mit besonderer Berücksichtigung des Bituminösen Unterbaus, Straße und Verkehr, Heft 46, p. 515, 1960.
 - 27) Monismith, C. L. : Asphalt Mixture Behaviour in Repeated Flexure, Report No. TE-66-6, 1966.
 - 28) 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.
 - 29) Kingham, R. I. : Failure Criteria Developed from AASHO Road Test Data, Proc. of 3rd ICSDAP, pp. 656~669, 1972.

(1986. 7. 17・受付)