

アスファルト混合物の疲労破壊包絡線に関する研究*

丸山 暉彦** 吉原 一彦***

The Application of Failure Envelopes to the Estimation of
Asphalt Pavement Fatigue Lives

Teruhiko MARUYAMA, Kazuhiko YOSHIHARA

The problems of fatigue cracks in asphalt pavement slabs due to repetitive traffic loading have become increasingly important in the asphalt pavement design program. The relation among the stress, strain and fatigue lives of an asphalt mix is expressed by using the failure envelopes on fatigue which are independent on temperature and rate of loading. The failure envelopes on fatigue of an asphalt mix are developed in order to provide the engineer with a useful tool which is more directly applicable to the determination of pavement thickness and the estimation of its fatigue lives. Effect of traffic loading on pavement distress is also studied by using the failure envelopes and it is confirmed that the equivalent number of standard design axle load applications is proportional to the forth power of load.

1. 概 説

アスファルト舗装の耐久性は、交通荷重と舗装構造の合理的なバランスを考慮することによって、向上されると考えられている。わが国の舗装設計法も大型車交通量と路床土の設計 CBR から、舗装構成を決定する方法を経験的に採用して¹⁾、両者のバランスをはかる方法をとっている。一般に、アスファルト舗装路面の機能低下は、①ひび割れ、②平坦性悪化やわだち堀れ、③すべり抵抗の減少の3つの原因により発生する。これらのうち②、③は車の走行への悪影響としての機能低下であるが、①のひび割れは路面の本質的な破壊であり、耐久性向上にはこの防止がきわめて重要である。

これらの機能低下は、非常に多くの交通量が通過して、繰返し載荷が行なわれた後に発生する。近年、繰返し載荷に関連した研究²⁾³⁾が活発化しているのも、舗装の耐久性向上のために、本質的な課題と考えられる理由によるものであろう。

アスファルト混合物のひび割れは、繰返し引張応力や引張歪による疲労破壊と考えられ、混合物の疲労破壊特性についての研究⁴⁾⁵⁾⁶⁾が、かなり行われるようになった。

しかし、混合物の力労特性は、材料特性のみでなく、温度や載荷速度に大きく依存するので、他の構造材料よりも疲労破壊特性の検討が、さらに困難となる。それゆえ、実際の舗装設計に、疲労特性を考慮する際の方法は、まだ確立されてはおらず、現在の舗装厚設計法も AASHO 道路試験⁷⁾の成果を採り入れて、経験的に疲労破壊の影響を考慮したものと考えられる。

アスファルト混合物の疲労破壊特性を、舗装設計に応用する試みとしては、最近いくつかの提案がなされている。例えば、Krivissky⁸⁾はアスファルト層下面の引張応力を弾性理論によって求め、これを限度以下にするという設計法を提案した。また Huang⁹⁾は表層下面の引張歪に着目し、引張歪の許容限界曲線を示した。本研究では、アスファルト混合物の疲労破壊特性を疲労破壊包絡線によって示し、2層系の弾性理論によって表層下面の応力及び歪を求めて、寿命予測を行おうとするもので、過去の研究との差は、破壊包絡線を利用して材料の温度や載荷速度の依存性を消去し、さらに応力及び歪を同時に考慮して耐久性を検討することにある。

本研究では、まず、密粒混合物の曲げ疲労破壊包絡線を室内実験により求め、繰返し回数による破壊包絡線を決定した。次に東名高速道路の調査結果から、アスファルト層下面の応力及び歪を計算し、破壊包絡線と比較して、破壊に達する交通量を予測した。この結果、東名等の舗装構造は10t軸重通過の100万回程度では破壊しないものと考えられた。さらに、疲労破壊包絡線を利用し

* 原稿受付 昭和54年1月29日

** 長岡技術科学大学建設工学系

(長岡市上富岡字長峰1603-1)

*** 東京都建設局西多摩建設事務所

(青梅市河辺町6-4-1)

表1 実験に使用した密粒度アスファルトコンクリートの諸元

アスファルト		Shell	60/80	針入度		62	軟化点	48.5℃	比重		1.02
骨材配合	粒 径 mm	13	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.074		
	通過重量 百分率%	100	65	43	33	24	18	11	8		
密 粒 混 合 物		アスファルト量		5.0%		密 度		2.385~2.415g/cm³			
						空 隙 率		3.6~2.4%			
		理 論 密 度		2.474g/cm³		飽 和 度		76.2~82.9%			

て、軸重換算係数を検討し、10t軸重以上では現在利用されている4乗則が、疲労破壊からも合理的であることを示した。

2. 実験方法

(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である。アスファルト量は75回突固めマーシャル試験より求め5.0%とした。予備実験において、供試体密度の疲労寿命に与える影響がかなり大きいと認められたので、ほぼ同一の密度の供試体だけを使用した。使用した密粒混合物の諸元を表1に示す。

供試体作成は、約150°Cに加熱した骨材を計量し、150~160°Cに加熱溶解されたアスファルトと共に、ミキサーで5分間加熱混合する。これを40×40×10cmの型枠に詰め、2層にわけて簡易ローラーで転圧した。転圧の線荷重は2.5kg/cmである。締固めた試料は1日放冷後、脱型し、カッターで4×4×18cmの供試体に切断する。供試体の密度は、75回突固めマーシャル密度に相当するものが得られた。

(2) 試験装置と試験条件

載荷は、2点支持された供試体の中央に、正弦波の強制両振変位を与えるものである。両端の支持部分をヒンジとして、端部に曲げモーメントが生じないよう工夫した。スパンは16cmである。繰返し試験中には、載荷面の試料が圧密されゆるみが生じる。これは応力の出力波形が乱れるためにわかるが、ゆるむ度にその部分を締め、実験を行なった。締める度合は手で軽く締める程度である。局所的な圧密変形を避けるために、載荷面には厚さ0.2mm、幅40mmの銅片を挿入した。載荷部のRは5mmである。

実験は20°Cの恒温室内で行なった関係から、試験温度は20°Cのみであり、周波数と設定歪だけを变化させた(表2参照)。この試験では一定変形を与えた試験方法をとったが、梁の弾性理論によってたわみ量から供試体上

表2 実験条件一覧

設定歪	2.0×10 ⁻³	1.5×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	7.5×10 ⁻⁴	5.0×10 ⁻⁴
試験周波数 Hz	1	5	20		
	○	○	○	○	○

下縁の歪量を求め、定歪繰返し両振試験とみなした。試験中の測定は荷重とたわみ量である。荷重は試験機に備え付けた容量100kgのロードセルによって測定し、たわみは試験機に内蔵されている差動トランスで測定する。荷重、たわみ量ともにブラウン管オシロから読み取った。

密粒混合物のスパン16cmにおける単純梁の共振振動数を計算すると、約450Hzとなり、20Hz程度の繰返し載荷試験では共振の影響のないことを確認した。

(3) 破壊の定義

一定の繰返し歪を与えると、応力は図1のように、載荷回数が増すにつれて減少して行く。ばらつきがあるのは、載荷面が徐々にゆるむためであり、最小二乗法により直線 l_1 を求めた。供試体に細かいひび割れが入り始めると、応力は急激に低下し、直線 l_1 から外れ、別の傾きの直線 l_2 が描ける。本研究では、破壊点を2つの直線 l_1 と l_2 の交点と定義した。

3. 疲労破壊包絡線

(1) 実験結果

前章で定義した破壊点までの載荷回数を破壊回数 N_f 、この時の応力を破壊時の応力 σ_f とする。破壊時の歪は初期歪 ϵ_0 と等しく、これを ϵ_f で表わす。設定歪と試験周波数を種々に変えて、 $\log \epsilon_f$ vs. $\log N_f$ および $\log \sigma_f$ vs. $\log N_f$ の関係を示すと図2のようになる。図中の直線は試験周波数をパラメーターとしたもので、それぞれ最小二乗法で求めた。各直線を $\log \epsilon_f = A_1 + B_1 \log N_f$ 、 $\log \sigma_f = A_2 + B_2 \log N_f$ と表わした時の各係数の値を表

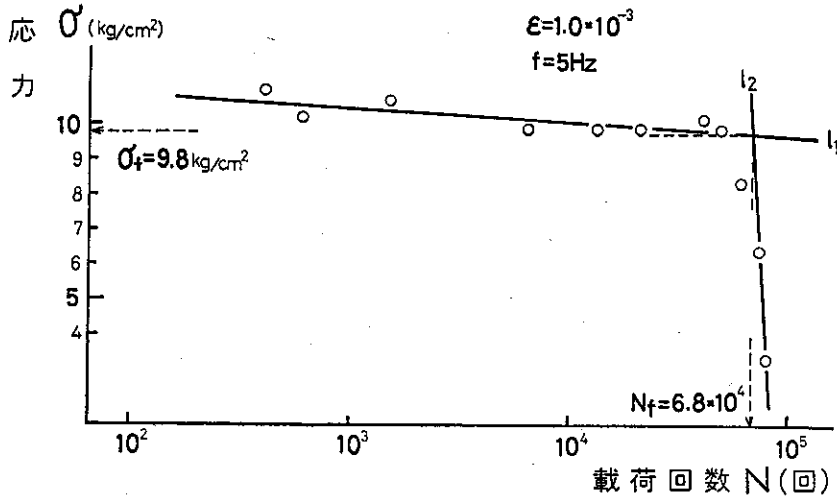


図 1 定歪疲労試験の応力測定結果 (破壊の定義)

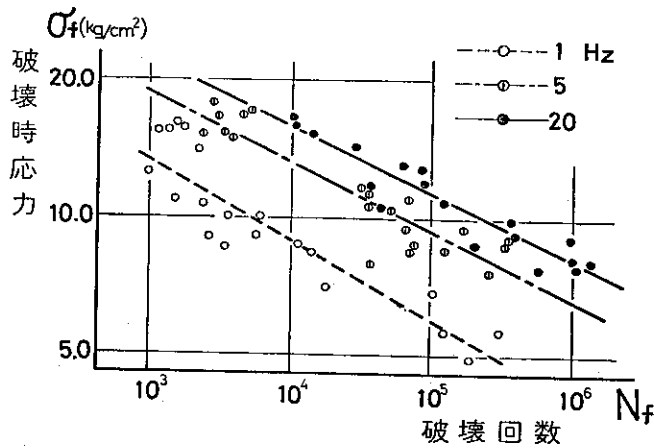
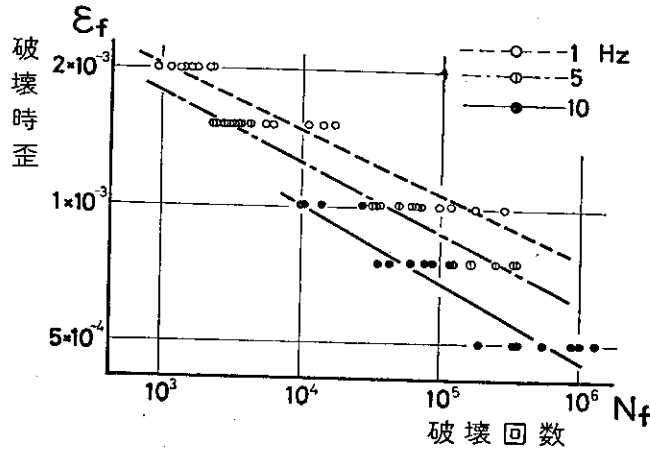


図 2 破壊時歪と破壊回数及び破壊時応力と破壊回数の関係

表3 破壊時応力あるいは破壊時歪と破壊回数との一回帰係数

周波数	A ₁	B ₁	A ₂	B ₂
1 Hz	-2.28	-0.136	1.65	-0.175
5 Hz	-2.29	-0.153	1.73	-0.151
20Hz	-2.33	-0.165	1.76	-0.142

$$\log \sigma_f = A_1 + B_1 \log N_f$$

$$\log \sigma_f = A_2 + B_2 \log N_f$$

3に示す。図2から、周波数の違いによってほぼ平行な直線が描けること、同じ寿命、すなわち N_f を一定とした場合、周波数が大きい程 σ_f は小さく、 σ_f は大きいこと等が確かめられる。

(2) 疲労破壊包絡線

図2の結果を用いて、同じ寿命のところの σ_f と ε_f を読み取れば、縦軸を σ_f 、横軸を ε_f 、パラメーターを N_f とした疲労破壊包絡線が描ける。図3に、このようにして描かれた疲労破壊包絡線と、静的曲げ試験から得られた破壊包絡線とを示す。静的な破壊包絡線については、文献(11)、(12)に詳述されているのでここでは省略するが、疲労試験に用いたのと同じ供試体に、試験温度 $-20 \sim +60^\circ\text{C}$ 、たわみ速度 $3 \sim 60\text{mm/min}$ 、スパン 16cm で、定歪速度曲げ試験を実施して得られたものである。図3から考えられることをまとめると次のようになる。

① 疲労破壊包絡線も、静的曲げ破壊包絡線と相似の

形をなす。

② 疲労破壊包絡線も、温度や載荷速度に依存しない可能性がある。本研究では温度を変えた試験を実施していないが、後に述べる考察から、このような可能性を予測した。

③ N 回疲労破壊包絡線よりも、応力や歪の値が小さければ、材料は破壊しないことになり、 N 回以上の寿命が期待できる。

④ アスファルト混合物のように、その力学的性質が温度や載荷速度に依存する物質は、ある寿命を得るための応力や歪の許容値を、一意的に定めることができないから、このような表現方法が有効であると考えられる。

以上のことから、疲労破壊包絡線を舗装の寿命予測曲線として利用することが考えられる。

(3) 載荷時間および温度の影響

図3によれば、周波数(載荷速度)が増加すると、破壊点は包絡線に沿って反時計まわりに移動し、静的破壊包絡線上の破壊点の移動と同様の傾向を示している。また、寿命の異なる包絡線が互いにはほぼ平行となっている。これは、図2の周波数ごとの直線がほぼ平行であるためである。

今回の実験温度は 20°C だけであるが、温度を変えた場合、例えば、温度を低くすると、アスファルト混合物のスティフネスが大きくなるので、 σ_f と N_f の関係は

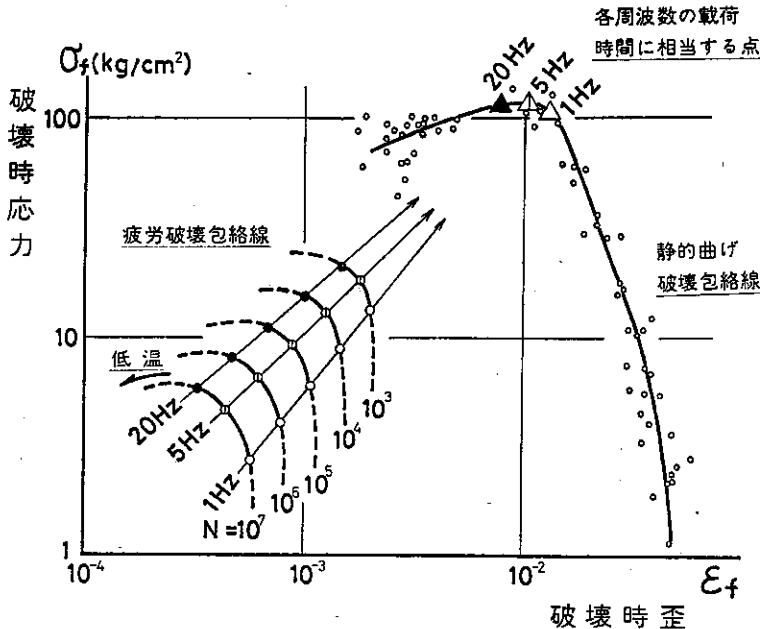


図3 疲労破壊包絡線および静的曲げ破壊包絡線

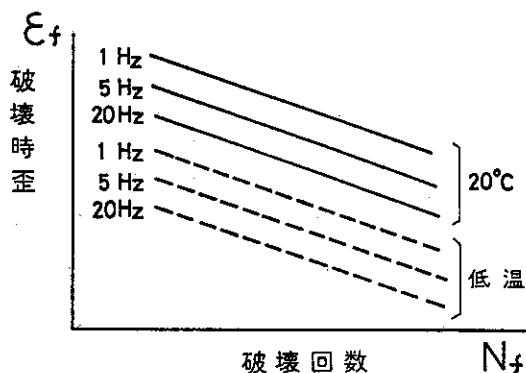


図4 温度変化が破壊時歪と破壊回数の関係に及ぼす影響

図4のように全体に下へ移動する。 σ_f と N_f の関係は反対に上に移動する。この場合、疲労破壊包絡線は図3の矢印で示したように、反時計まわりに移動すると考えられる。温度を上げた場合はこの逆である。すなわち時間温度換算則により、温度が高い→低周波数、温度が低い→高周波数という関係が、疲労破壊の場合にも成立するとすれば、温度変化による疲労破壊包絡線の変化は、周波数の変化によるものと同一であると考えられる。静的な破壊特性に時間温度換算則が成立することは、すでに確認されている¹³⁾¹⁴⁾。また、Heukelom¹⁵⁾ら¹⁶⁾は縦軸に歪、横軸に応力を取り、繰返し載荷の結果を示している。これによると、試験温度を変えてもスティフネスが20,000~200,000kg/cm²まで滑らかな曲線が描かれている。以上のことから、疲労破壊包絡線についても、温度を変化させた場合、静的破壊包絡線と同様に連続的な曲線が描けると推測した。

なお、定歪繰返し試験の場合、載荷直後の初期応力を用いて試験結果を整理している研究が多いが、本研究では舗装設計の手法とも関連づけるため、安全性を考慮して、破壊時の応力を用いてデータの解析を進める。

(4) 静的曲げ試験との対応

周波数 f Hz の疲労試験の載荷時間を $1/2\pi f$ 秒で対応させ、この載荷速度に相当する静的曲げ試験の破壊時応力、破壊時歪を、それぞれの基準温度を20°Cとするマスターカーブから求めれば、1回載荷の場合の破壊点を静的破壊包絡線上にプロットすることができる。同じ周波数 f Hz における N 回疲労破壊包絡線上の破壊点は、図3の作図結果から明らかである。このようにして20, 5, 1 Hz の載荷時間に相当する破壊点を、静的破壊包絡線上にプロットすると図3の三角印のようになる。これは、疲労破壊包絡線上の各周波数に対応する破

壊点を結ぶ直線の延長とはほぼ一致する。すなわち疲労破壊包絡線は、位置的には静的破壊包絡線を、ある線に沿ってずらしたものと考えられる。図3によると、疲労破壊包絡線は、寿命 N が10倍になると等間隔でずれているが、 $N=1$ 回に相当する静的破壊包絡線だけは、かなり離れた位置にある。この原因として

- ① 疲労試験と静的試験とでは破壊の定義が異なっている。定歪速度静的試験の破壊は、応力が最大値に達したときと定義した。
- ② 図2の $\log \epsilon_f$ vs. $\log N_f$ 、及び $\log \sigma_f$ vs. $\log N_f$ の関係において N_f が小さくなくても直線性を保つか疑問である。
- ③ 破壊時に梁の弾性理論が成立せず、計算で求めた応力や歪が実際と異なる。
- ④ 静的載荷試験の1回載荷が、繰返し載荷の正弦波の4分の1周期に対応しているとも考えられる。

等があげられる。

なお、本研究の疲労試験は両振試験であるが、交通荷重の通過によって舗装体内部に生じる応力や歪の波形は、bell shaped wave といわれる形をしており¹⁷⁾、どちらかと言えば片振試験の方に近いと思われる。しかし、両振試験と片振試験の疲労寿命の比較には、相当量のデータの蓄積が必要なので、これについては今後の課題としたい。また、車輪通過により舗装体内部に発生する応力のパルス波を、正弦波の2分の1波長として近似すれば¹⁸⁾、これによって求められる載荷時間は舗装厚によって異なるが、20Hzの疲労試験で約40km/hrの走行速度に相当する。

4. 疲労破壊包絡線の応用

(1) Burmister の層理論

前章で述べた実験結果を用いて実際の舗装の寿命予測等を行うために、舗装体内部に生じている応力、歪を計算によって求めた。実際の舗装は多層構造をなしているが、各層の正確な弾性係数を求めるのは困難であり、それらが求められても計算の労力を増すばかりである。従って本研究では、弾性係数が温度や載荷速度に依存するアスファルト層を第1層、それ以下を第2層として解析を行う。これは Burmister¹⁹⁾の層理論として知られているもののもっとも簡単な2層系の場合である。計算にあたっては

- ① 境界面は完全に粗とする。
- ② ポアソン比はすべて0.5とする。
- ③ 引張の場合も圧縮と同じ弾性係数を持つ。
- ④ 輪荷重は5tとする。

- ⑤ 載荷面形状は円とし、接地圧は等分布荷重とする。輪荷重 P と接触円半径 a cm との関係は $a = 12 + P$ を用いる²⁰⁾。

のように仮定した。本研究で用いた計算式に関しては、紙面の都合上省略するが、Burmister¹⁹⁾及び Acum, Fox ら²¹⁾の解析結果と比較して、彼らの計算結果とのずれが1%以内であることを確認した。

(2) 支持層とアスファルト層の弾性係数

東名高速道路等の追跡調査²²⁾によれば、路盤以下の層を一層とみなしたときの支持層の変形係数は、表5のように $400 \sim 5,000 \text{ kg/cm}^2$ となっている。本研究ではアスファルト層以下を半無限の単一層とみなし、その弾性係数 E_2 が 600 kg/cm^2 と 1200 kg/cm^2 の2つの場合について計算を行った。アスファルト混合物のスティフネスは、 $+60 \sim -20^\circ \text{C}$ における定歪速度曲げ試験の結果によると $30 \sim 3200 \text{ kg/cm}^2$ であった。しかし、阿部²³⁾はアスファルト層の弾性係数を $10,000 \sim 110,000 \text{ kg/cm}^2$ とし、解析し、 $63,000 \text{ kg/cm}^2$ と見積ることを提案している。これは設計温度を 10°C とした場合のシェル設計法の提案とほぼ等しいとのことである。本研究ではアスファルト層のスティフネス E_1 を $3,000 \sim 48,000 \text{ kg/cm}^2$ の間にとって計算を行なった。

以上のように、本研究で採用した E_1 , E_2 の値は現在推奨されている値よりもやや小さいが、現在までに得られている疲労破壊包絡線と比較できるものとして、このような値を選んだ。今後試験条件を拡大して、広範な弾性係数の選定をカバーできるよう実験結果を蓄積して行

きたい。

(3) 疲労破壊包絡線による層厚の決定

疲労破壊包絡線の概念によると、所定の寿命を得るためには、アスファルト混合物に発生する応力と歪の両方の面からの制約があることになる。これを実際の舗装に適用すれば、アスファルト層の下面に生じる引張応力、引張歪の値が N 回疲労破壊包絡線の内側であれば、その舗装の寿命は N 回以上あることになる。2層構造系において、下層の弾性係数 E_2 を一定とし、上層の弾性係数 E_1 と厚さ H_1 を変化させて、上層下面に生じる引張応力 σ_r と引張歪 ϵ_r を求め、疲労破壊包絡線と比較したのが図5、図6である。図中の太い曲線が疲労破壊包絡線、細い網目が計算結果で、図5は E_2 を 600 kg/cm^2 としたものの、図6は E_2 を $1,200 \text{ kg/cm}^2$ としたものである。これらの図によると、実験結果の範囲はまだ不十分であるが、アスファルト混合物の弾性係数 E_1 が変化しても、舗装体内の応力と歪の関係は、疲労破壊包絡線と同じような形で移動するだけで、ダメージ的にはそれ程差はない。例えば図5の $H_1 = 30 \text{ cm}$ の場合の疲労寿命は、 E_1 が $3,000 \sim 24,000 \text{ kg/cm}^2$ に変化しても、5t 輪荷重通過回数で約 10^7 回である。すなわちアスファルト層の弾性係数が変化しても、舗装寿命の大きさはそれ程影響されない。従って、舗装寿命に影響を及ぼす重要なファクターは、下層の弾性係数とアスファルト層の厚さであるという点で、従来の経験的な舗装設計法が基本的に正しいということを確認できる。また、これらの図を利用すると、アスファルト層以下の弾性係数がわかれ

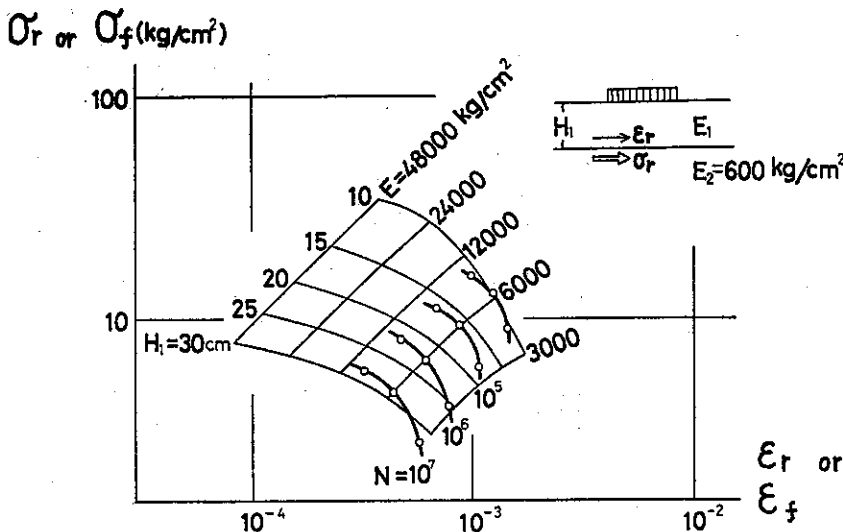


図5 アスファルト層下面に発生する応力・歪と疲労破壊包絡線（下層の弾性係数 $E_2 = 600 \text{ kg/cm}^2$ ）

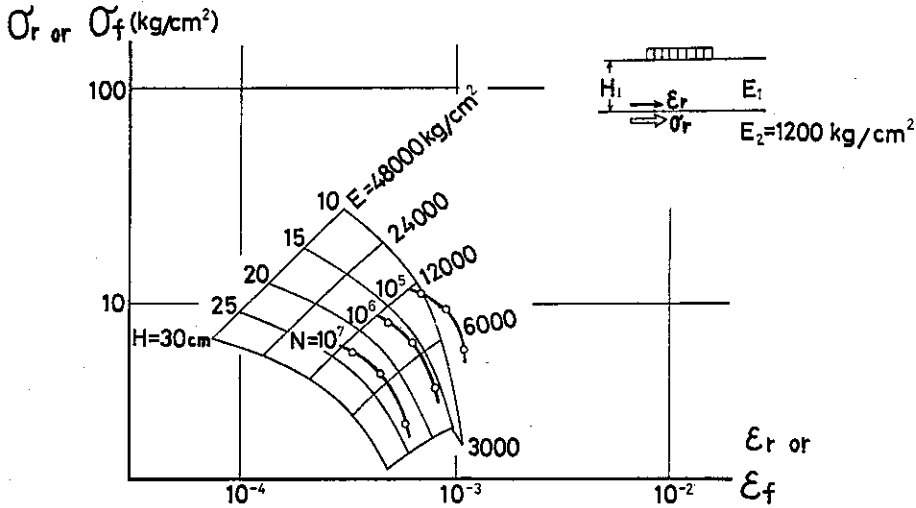


図6 アスファルト層下面に発生する応力・歪と疲労破壊包絡線（下層の弾性係数 $E_2=1200 \text{ kg/cm}^2$ ）

ば、アスファルト層の厚さからその舗装体の寿命が予測できる。逆に、所定の寿命を得たい時の層厚を決定することができる。

5. 東名高速道路舗装追跡調査との比較

(1) 東名高速道路等の破損状況

日本道路公団では東名高速道路を中心に昭和42年以来、大規模かつ組織的な舗装追跡調査を計画し、実施してきた²²⁾。本章ではこのデータをもとに、疲労破壊包絡線の検討を行う。各観測地点には路線名を冠した番号がつけられており、東名高速道路T1～17、中央道C1～3、京葉道K1の計21点がある。各地点の位置、舗装構造については、文献²²⁾を参照されたい。昭和50年における路面の破損状況は表4に示す通りで、この時点での10t軸重通過数は東名で600万～800万台、中央道で160万台、京葉道で350万台程度である。比較するに当たって破損の程度を

- A) わだち掘れ11mm以下で、ひびわれ多い
- B) わだち掘れ10mm以下で、ひびわれが少し発生
- C) わだち掘れ8mm以下で、ひびわれがない
- D) わだち掘れ15mm以上で、ひびわれがない

の4グループに大別した。

(2) 弾性係数の決定

解析に当たって、まず調査地点の各層の弾性係数を知らねばならない。測定値として存在するのは次の3種である。

- ① CBR: CBRは各地点の下部路床から下層路盤まで、修正CBRまたは現場CBRが求められている

が、CBRからその層の弾性係数を求めることは現状では信頼性が低いようである。

- ② 平板載荷試験: 平板載荷試験のK値としては、建設時に路盤、上部路床、下部路床の各層上面で測定が行われている。本研究ではアスファルト層以下を単一の層とみなして、その上面で測定された弾性係数を用いた。

- ③ ベルケルマンビーム試験: ②と同様に、建設時にアスファルト層以下を単一の層とみなしてたわみ量を測定し、弾性係数を求めている。本研究ではこれも用いる。

以上の②、③から求めた下層の弾性係数 E_2 を、アスファルト層厚と共に表5に示した。

(3) 疲労破壊包絡線との比較

前節で述べた E_2 の値を用いて計算したアスファルト層下面の応力と歪を、実験結果である疲労破壊包絡線と比較したのが図7と図8である。図7は平板載荷試験による E_2 から得られたもの、図8はベルケルマンビーム試験による E_2 から得られたもので、それぞれ前述のA、B、C、Dの4グループに分けてある。

これらの舗装に用いられているアスファルト混合物と、本研究で使用した混合物は異なるものであるから、このような比較は本来なら適当でない。しかし現在では東名等と同一の試料を用いて、室内実験を行うことも不可能であるから、現状ではこのような比較検討も意義があると考えた。図7、8から次のことがわかる。

- ① 平板載荷試験から求めた E_2 による図7をみると、各グループともあまり差はみられない。

アスファルト混合物の疲労破壊包絡線に関する研究

表4 高速道路の路面破損状況²²⁾ (ひびわれ 50年1月)
(わだち掘れ 49年12月)

ひびわれ 状況 わだち掘れ	ひびわれ なし	線状 少し	亀甲状 少し	線状 多い	亀甲状 多い
0mm	C	B		A	
5mm	T-17 C-1 T-14 T-7	K-1 C-2 T-3 T-6 T-4		C-3 T-1 T-5	
10mm	T-15 T-16	T-2			
15mm	T-11 T-13 T-10 T-12		T-9		
20mm	D				
25mm	T-8				

T : 東 名 C : 中 央 K : 京 葉

表5 東名高速道路等の下層の弾性係数及びアスファルト層の厚さ²²⁾

調 査 地 点	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
アスファルト層厚 cm	28	28	28	28	28	28	25	18	18	18	18
路 盤 厚 cm	17	17	17	17	17	17	20	37	37	37	37
路 盤 材 料	CSB	CSB	CSB	CSB	CSB	CSB	GSB	GB	GB	GB	GB
路盤面上 { 変形係数 kg/cm ²	733	817	1718	1075	901	1109	1500	CSB	CSB	CSB	CSB
	ベンケルマン 平板載荷	950	1260	1100	960	894	1011	—	1320	1550	5208
							1292	—	2003	1401	1765
調 査 地 点	T12	T13	T14	T15	T16	T17	C1	C2	C3	K1	
アスファルト層厚 cm	24	33	31	30	25	30	25	25	25	20	
路 盤 厚 cm	23	17	17	10	15	20	30	30	30	30	
路 盤 材 料	GSB	CSB	CSB	GSB	GSB	CSB	GB	GB	GB	GB	
路盤面上 { 変形係数 kg/cm ²	1630	2107	2841	1728	493	4360	CSB	GSB	GSB	CSB	
	ベンケルマン 平板載荷	1400	2570	700	2177	464	4246	1950	1526	1150	—

CSB : セメント安定処理上層路盤 GSB : 碎石上層路盤 GB : 粒度調整路盤

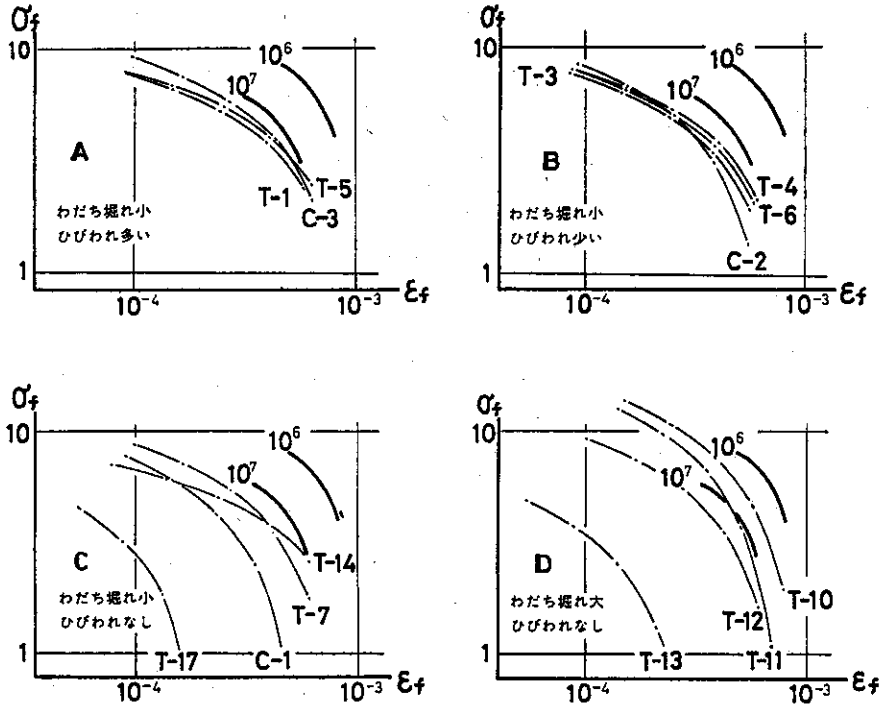


図7 高速道路のアスファルト層下面に発生する応力・歪と破壊包絡線(下層の弾性係数は平板
載荷による)

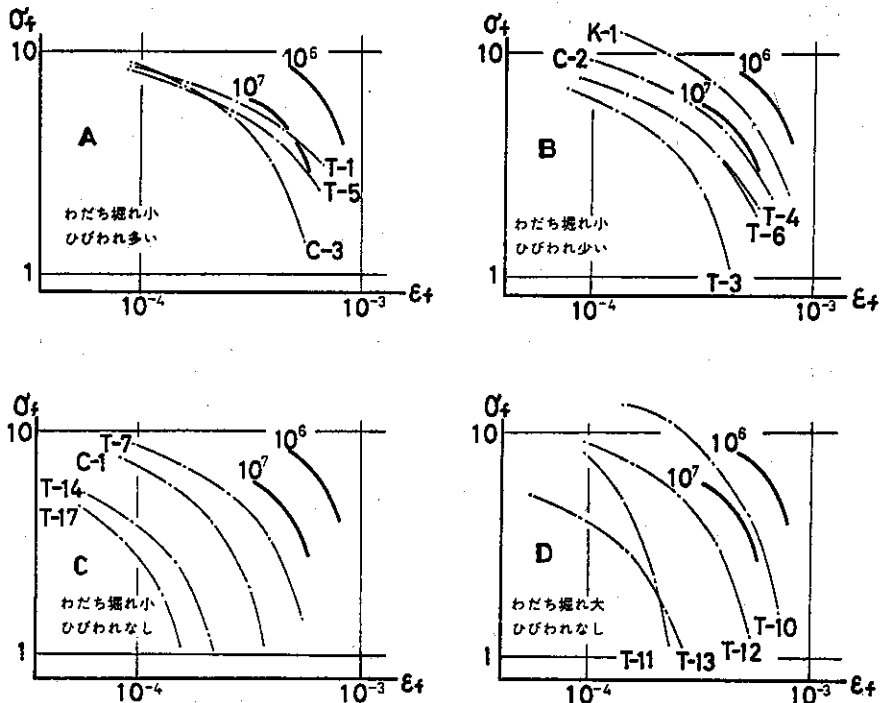


図8 高速道路のアスファルト層下面に発生する応力・歪と疲労破壊包絡線(下層の弾性係数は
ベンケルマンビームによる)

② ベンケルマンビーム試験から求めた E_2 による図 8 をみると、いく分グループ差がみられ、ひびわれを生じていないグループ程予想寿命が長いようである。

③ 予想寿命をみた場合、ほとんどの地点で 10^7 回以上の寿命が期待でき、妥当な値となっている。

予想寿命の短い地点は T10, K1 など、アスファルト層厚の薄い所で、アスファルト路盤の代りに粒調路盤を使用している箇所である。また T11 は、ベンケルマンによる E_2 と平板載荷による E_2 の値が大幅に異なるため、図 7 と図 8 の上で差が現われた。

東名高速道路のひびわれは、名神高速道路等のそれとは本質的に異なっている。名神のひびわれは、ほとんど全て図 9(a) のように、アスファルト層下面からひびわれが入っているのに対し、東名の場合はアスファルト層の厚さが大きく、図 9(b) のように表面付近からひびわれが発達している²⁴⁾。これは構造上の破壊ではなく、表面付近の温度勾配やわだち堀れ等の要素が原因となっている。これは、本研究で述べているアスファルト層下面に生じる引張応力や引張歪による破壊とは本質的に異っている。これらが A・B・C・D の 4 グループ間にあまり差がみられない理由であろう。

6. 軸重換算係数の検討

現在日本道路公団等の舗装設計では、交通条件を 10 t 換算軸数を用いて評価しようとしている。これは AASHO 道路試験の結果をもとに作成されたもので²⁵⁾、10 t 軸重換算係数 LEF (Load Equivalency Factor) は、軸重を P_{ax} t として、シングル軸に対し $LEF = (P_{ax}/10)^4$

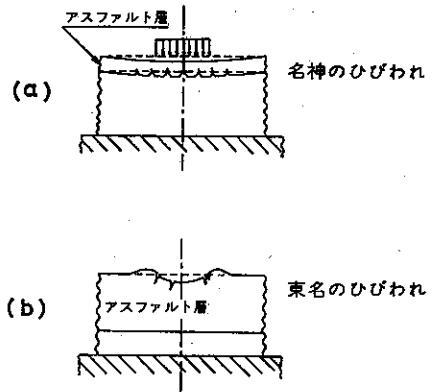


図 9 アスファルト舗装に発生するひびわれの概念図²⁴⁾

で表わされている。この式は、任意軸重 P_{ax} t 1 回の通過が、標準軸重 10 t の何回の通過に相当するかを示すものであり、舗装の受けるダメージが軸重の 4 乗に比例するとみなしている。本章では、全くの経験式であるこの 4 乗則が、疲労破壊包絡線上においても成立するか否かを検討する。

まず、下層の弾性係数 E_2 を一定として、アスファルト層の弾性係数 E_1 、厚さ H_1 、輪荷重 P を変化させた時の疲労寿命を、疲労破壊包絡線上から読み取る。ただし接地半径 a は $a = 12 + P$ より求めた。

図 10 は $E_2 = 600 \text{ kg/cm}^2$ 、 $H_1 = 30 \text{ cm}$ と一定にし、 P と E_1 を変化させた場合の例である。比較方法を表 6 にまとめた。左欄は $LEF = (P_{ax}/10)^4$ から計算したもの、右欄は疲労破壊包絡線から寿命を読み取り、輪荷重 5 t の LEF を 1 としたものである。一例として $E_1 = 6000$

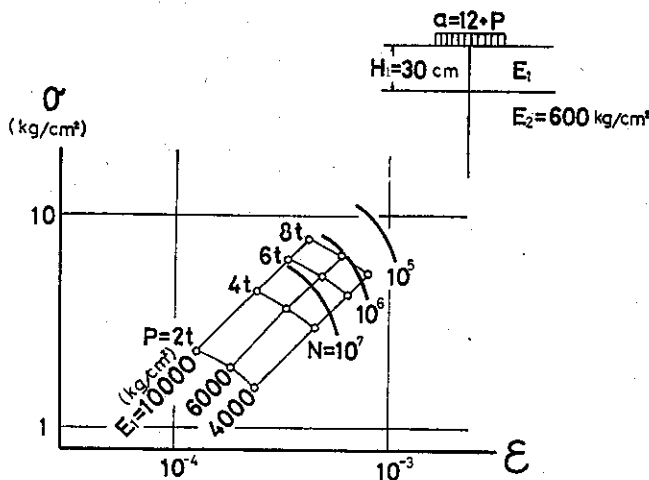


図 10 輪荷重の大きさと舗装の寿命

表6 軸重換算係数の公式と本研究による方法との比較

軸 重 P_{ax} t	LEF $(P_{ax}/10)^4$	輪 荷 重 P t	疲労破壊包絡線より求めた N_f	LEF' $(N_f)_{p=5}/N_f$
4	0.0256	2	2.95×10^6	0.00447
8	0.4096	4	4.27×10^7	0.309
10	1.0	5	1.32×10^7	1.0
12	2.074	6	5.01×10^6	2.63
16	6.554	8	1.12×10^6	11.8

$E_1=6000 \text{ kg/cm}^2$, $E_2=600 \text{ kg/cm}^2$, $H_1=30 \text{ cm}$

kg/cm^2 , $E_2=600 \text{ kg/cm}^2$, $H_1=30 \text{ cm}$ の場合の値を掲げた。

$E_2=600 \text{ kg/cm}^2$ と固定して, E_1 や H_1 を変化させた場合の LEF の比較が図11である。ただし寿命が読み取れない部分は省略した。輪重の4乗, 5乗, 6乗に比例する場合をそれぞれ直線で図中に示した。また E_1 , H_1 を固定し, E_2 を変化させた結果, 及び載荷半径と輪荷重の関係を $a=12+P$ ではなく, 図13に示したもので計算した結果とを示したのが図12である。図13は, 米国の6大タイヤ製造会社の資料をもとに作成された輪荷重と接触円半径との関係である²⁰⁾。図11, 12から次のことが

わかる。

- ① $\log \text{LEF}$ と $\log P_{ax}$ はだいたい直線関係にある。
- ② 寿命に主たる影響を及ぼす軸重の大きい所では, 層厚によって多少の違いがあるが, ほぼ4乗則が平均のようである。
- ③ LEF は軸重の小さいところでは, 軸重の5~6乗に比例し, 軸重1t程度の車が100万台通っても, 10t軸重が1回通過したことに相当し, 軽い車は設計上無視してもよいことになる。

すなわち, 疲労破壊包絡線から $\text{LEF}=(P_{ax}/10)^4$ なる経験式の正しさを確認することができた。

7. 結 論

本研究の結論を要約すると以下の通りである。

- ① アスファルト混合物に関して, 繰返し載荷試験の場合も, 静的試験から得られる破壊包絡線と形が相似で, 温度や載荷速度に依存しない疲労破壊包絡線が得られた。これを用いると, 所定の寿命を得たい時の応力や歪の許容値を知ることができる。
- ② 疲労破壊包絡線と層理論を用いて, 舗装の寿命予測を行うと, アスファルト層のスティフネスは寿命

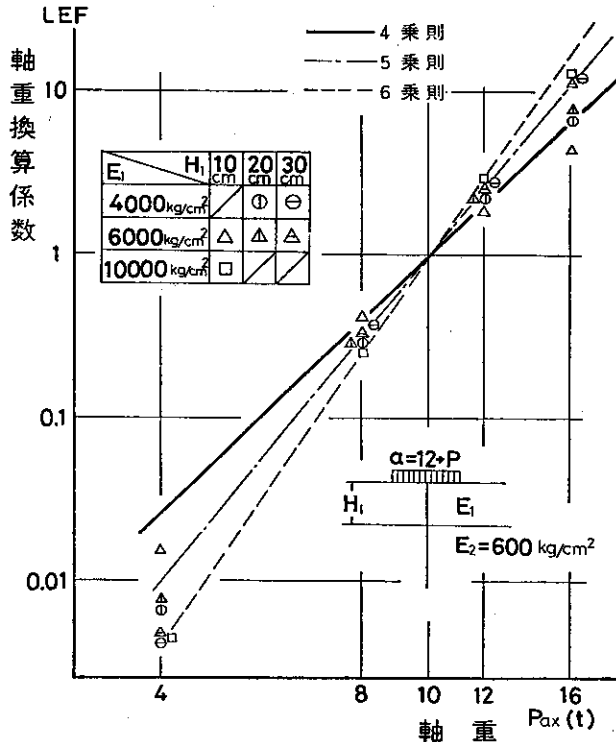


図11 軸重換算係数と軸重の関係 (下層の弾性係数は固定)

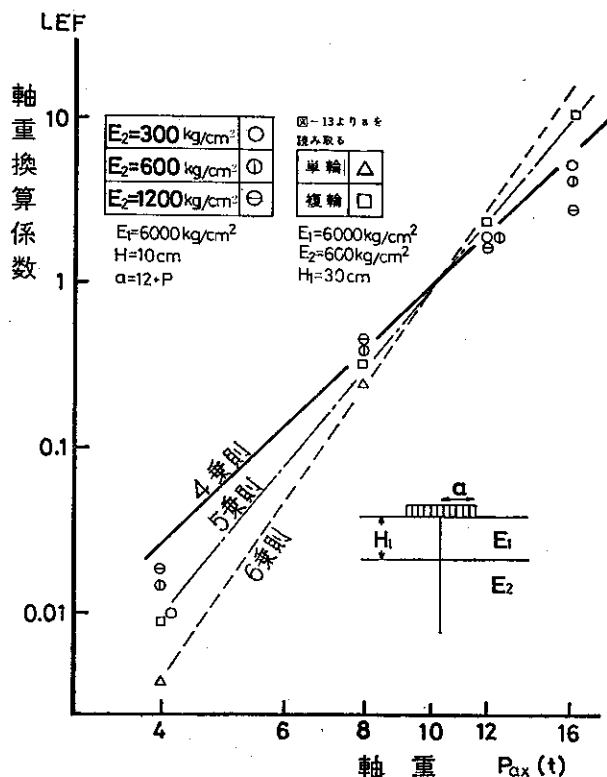


図12 軸重換算係数と軸重の関係（下層の弾性係数を変化させたもの、及び接地半径を図13から求めたもの）

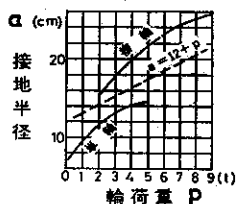


図13 輪荷重と接地半径の関係⁽³⁾

にそれ程影響せず、下層の弾性係数とアスファルト層の厚さが、もっとも影響が大きいことを確かめた。このことから、従来の経験的舗装厚設計法が基本的に正しいということを確認した。

- ③ 疲労破壊包絡線を用いて、東名高速道路等の寿命の検討を行なったが、東名のひびわれは構造的な破壊ではなく、本研究による寿命予測は適切ではなかった。しかし、現在の T_A 設計法の基本的な考え方の一つである構造的な破壊現象に対しては、本研究による方法で舗装の寿命予測が十分可能であると考えられる。

- ④ 疲労破壊包絡線によって、軸重換算係数の検討を

行い、経験式である4乗則の妥当性を示した。

すなわち、舗装のひびわれ破壊に注目した場合、材料の剝離等で破壊する場合もあるが、構造的な疲労破壊に限れば、疲労破壊包絡線が適用でき、これを用いて舗装の設計を種々論じることができる。アスファルト混合物の力学特性は、温度や載荷速度に依存するので、これまでは疲労破壊に関して、その許容応力や許容歪を定めることができず、経験的なものでしか対処できないとされていた。しかし、疲労破壊包絡線を用いれば、任意の寿命を得たい場合の、温度や載荷速度の影響を考慮した応力や歪の許容値の意味を明確にすることもできよう。

本研究は試験条件や材料に限られていたが、現時点で得られた知見がかなりの発展性を持っていると考えられたので、この段階でまとめて報告することにした。今後、試験条件を拡張して、本研究の一般性を確かめて行きたい。

最後に、本研究全般に関し東京工業大学渡辺隆教授から、ならびに4章の解析に関し東京工業大学木村孟助教授から懇切な御指導を受けた。さらに、日本道路(株)技術研究所長山下弘美氏、日本道路公団木村剛也氏から

多数の資料の提供及び有益な助言を受け、本研究を取りまとめるにあたり九州大学内田一郎教授、日本大学阿部頼政助教授から御意見をいただいた。また、シェル石油(株)から材料の援助をいただいた。ここに記して謝意を表す次第である。

なお、本研究は昭和50年度文部省科学研究費、ならびに51年度東京工業大学土木工学科研究奨励金の交付を受けて完成したものである。

参 考 文 献

- 1) 「アスファルト舗装要綱」日本道路協会 (1978)
- 2) "Factors Involved in the Design of Asphaltic Pavement Surfaces", NCHRP Report 39 (1967)
- 3) Monismith, C. L. and Salam, Y. M.: Distress Characteristics of Asphalt Concrete Mixes, Proc. AAPT 41 (1973), pp. 320-350.
- 4) Pell, P. S.: Fatigue of Asphalt Pavement Mixes, Proc. 2nd Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, (1967), pp. 577-593.
- 5) Pell, P. S. and Cooper, K. E.: The Effect of Testing and Mix Variables on the Fatigue Performance of Bituminous Materials, Proc. AAPT 44, (1975), pp. 1-37.
- 6) Kingham, R. I. and Kallas, B. F.: Laboratory Fatigue and its Relationship to Pavement Performance, Proc. 3rd Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, (1972), pp. 849-865.
- 7) 「AASHO 道路試験」日本セメント技術協会 (1966)
- 8) Krivinsky, A. M.: Design of Flexible Pavements for Major Highways, Proc. 3rd Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, (1972), pp. 455-467.
- 9) Huang, Y. H.: Strain and Curvature as Factors for Predicting Pavement Fatigue, Proc. 3rd Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, (1972), pp. 622-628.
- 10) 吉原一彦, 渡辺隆, 渡辺暉彦: アスファルト混合物の疲労破壊特性について, 土木学会第32回年次学術講演会概要集, V-190 (1977)
- 11) 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.
- 12) 森吉昭博, 菅原照雄: アスファルト混合物の流動を伴う領域の曲げ破壊包絡線に関する研究, 土木学会論文報告集, 第251号, (1976), pp. 107-112.
- 13) 渡辺隆, 渡辺暉彦, 藤田晃弘: アスファルト混合物の力学特性と構成材料の関係, 土木学会論文報告集, 第239号, (1975), pp. 107-114.
- 14) Smith, T. L.: Dependence of the Ultimate Properties of a GR-S Rubber on Strain Rate and Temperature, J. Polymer Sci, 32, (1958), pp. 99-113.
- 15) Heukelom, W. and Klomp, A. J. G.: Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction, Proc. 1st Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, (1962), pp. 667-679.
- 16) Heukelom, W. and Klomp, A. J. G.: Road Design and Dynamic Loading, Proc. AAPT 33, (1964), pp. 92-125.
- 17) 笠原篤, 菅原照雄: アスファルト混合物の動的応答に関する研究, 土木学会論文報告集, 第215号, (1973), pp. 75-83.
- 18) Barksdale, R. D.: Compressive Stress Pulse Time in Flexible Pavements for Use in Dynamic Testing, HRR 345, (1971), pp. 32-44.
- 19) Burmister, D. M.: The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems, J. Applied Physics, 16, (1945), pp. 89-95, pp. 126-127, pp. 296-302.
- 20) 竹下春見: 新編道路工学, 金原出版 (1961)
- 21) Acum, W. E. A. and Fox, L.: Computation of Load Stresses in a Three-Layer Elastic System, Geotechnique II, (1950-1951), pp. 293-300.
- 22) 「アスファルト舗装追跡調査解析結果報告書」高速道路調査会 (1976)
- 23) 阿部頼政: アスファルト舗装構造の合理的設計法に関する研究, 土木学会論文報告集, 第247号, (1976), pp. 109-122.
- 24) 「アスファルト舗装路面性状の実態調査に関する解析結果報告書」附44, 高速道路調査会 (1978)
- 25) 竹下春見: アスファルト舗装に関する対数グラフの応用, 道路, (1965.9), pp. 726-731.
- 26) 内田一郎: 新編道路舗装の設計法, 森北出版 (1976)