

アスファルト舗装の疲労寿命予測システムに関する研究

DEVELOPMENT OF A FATIGUE LIFE PREDICTION SYSTEM FOR ASPHALT PAVEMENTS

姫野 賢治*・渡辺 隆**・丸山 晃彦***

By Kenji HIMENO, Takashi WATANABE and Teruhiko MARUYAMA

A new framework for the prediction of fatigue failure life of asphalt pavements was presented. The new fatigue failure criterion based on energy dissipation theory, which was verified to be valid for wide range of mix stiffness modulus, was combined with the theoretical temperature estimation method. Traffic and environmental effects were incorporated into the new prediction system as probabilistic variables. In this system, the fatigue failure is assumed to take place at both top and bottom surfaces of the mix slab. With the method, an attempt was made to predict the fatigue failure lives for some routes of national highways in Japan, showing reasonable agreement between the predictions and the observations.

Keywords: asphalt pavement, fatigue life, numerical simulation

1. まえがき

アスファルト舗装の疲労寿命を予測するためには、アスファルト混合物の疲労破壊規準の確立、舗装構造に対して作用する外力の評価、舗装の寿命に影響を及ぼす間接的な因子の評価、さらには、具体的な舗装構造系のなかでこれらが互いにどのように影響を及ぼし合うかを記述するシステムの構築などを行う必要がある。これらのうち、アスファルト混合物の疲労破壊規準の確立および舗装の寿命に間接的な影響を及ぼす重要な外的因子である舗装内部温度の評価については過去の研究^{1)~6)}によつてある程度の解決をみることができた。本研究ではこれらの成果をふまえ、舗装の疲労寿命を合理的かつ高精度に予測するシステムを確立することを試みた。

車両の走行によりアスファルト舗装に加えられる疲労被害の程度は、その車両の輪荷重、車輪の横方向走行位置、走行速度、車輪の接地圧などによって変化し、また、同一の外力を受けた場合でもアスファルト混合物自体が

疲労破壊に関して有している強度や路盤材、路床土などの舗装構成材料の種類、あるいは環境により異なり得るものである。これは材料自体に内在する強度のみならず、主要な環境条件の1つである気象作用が、アスファルト混合物のスティフネスの変化を通じて舗装の強度に与える影響が大きいため³⁾である。かつて国内外において行われてきた舗装の寿命予測に関する理論的研究では、アスファルト混合物の破壊規準の確立を扱ったものが多く、近年になってシステムの構築に重点を置いたもののがみられるようになってきた。しかしながら、疲労破壊規準を予測システムに組み込むにあたっては、実用上の理由によって、輪荷重はすべて基準重量に換算できること、車輪走行位置、車両走行速度、アスファルト混合物の破壊強度は常に一定で変化しないこと、また、アスファルト混合物層内の温度分布も月平均大気温度のみから月別に評価でき、アスファルト混合物のスティフネスは1か月間一定で変化しないことなどの大胆な仮定をとるものが多い。これは、車両の輪荷重は各道路ごとに独特の分布をしていること^{7), 8)}、疲労被害については輪荷重換算則が必ずしも成り立たないこと⁹⁾、車輪の走行位置は一定ではなく各車線ごとに固有の分布をしていること^{10), 11)}、舗装の内部温度は大気温度のみでは決まらず、月変動と同程度に大きな時刻変動をしていること^{4)~6)}などの実際

* 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 武藏工業大学教授 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)

の現象から得られる知見とは異なっている。しかも、これらの各因子が特定の値をとったときの舗装の疲労被害関数が明らかでなく、すべての因子についての疲労被害への線形性が保証されない以上、各因子を単独に取り上げ代表化を行うことは困難であり、他の因子の変動と関連づけて評価を行う必要がある。

以上の問題を解決するため、本研究では、既設の直轄国道の残余寿命を予測する場合を例にとってこれらの各因子を確率変数としてとらえ、それぞれの固有の分布形のまま取り込んでアスファルト舗装の疲労寿命を予測するシステムを構築することを試みた。なお、アスファルト舗装の疲労破壊の形態としては、前報³⁾で検討したように、アスファルト混合物層下面からの曲げ疲労破壊だけでなく、近年特に高級舗装で注目されている舗装表面からの縦表面ひびわれも一種の疲労破壊と考えて取り上げることとした。また、提案する疲労寿命予測方法の妥当性を検証するため、日本全国から気象庁が整理しているAMEDASの時刻別気象データ（降水量全国約1200か所、その他約800か所）、建設省が定期的に実施している基準調査データ（全国159か所）^{10),11)}、および車両

重量データ（全国75か所）^{7),8)}の測定が近傍で同時に行われている15か所（Table 1, Fig.1）を選び、舗装が疲労破壊に至るまでの過程を数値的にシミュレートして現実の路面性状データと比較した。

2. アスファルト舗装の寿命に影響を及ぼす外的因子とその評価方法

アスファルト舗装の疲労寿命に影響を及ぼす外的因子は、走行車両にかかるものと自然環境にかかるものとに大別することができる。これらのうち本研究で取り上げた外的因子は、交通車両に関するものとして、輪荷重、接地圧、車輪走行位置、走行速度、交通量、また、自然環境にかかる因子としては舗装体の温度分布で

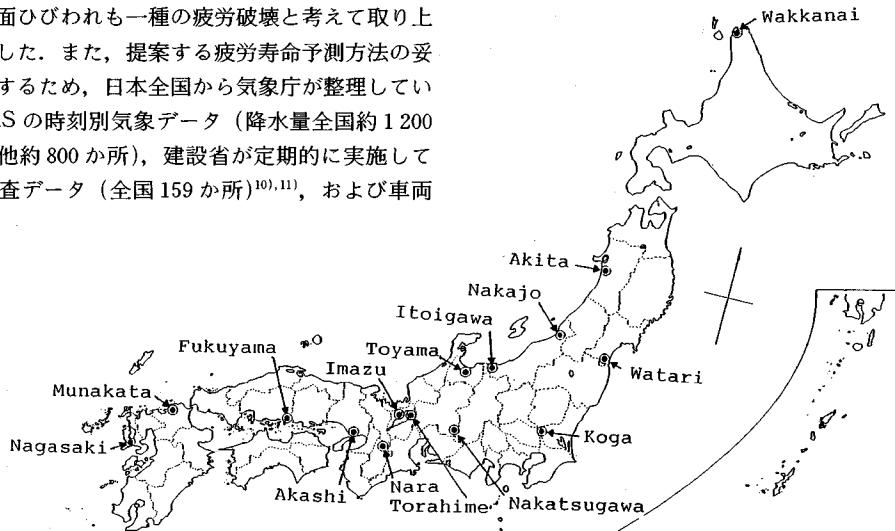


Fig. 1 The Map of the Sites for the Computational Simulation of Fatigue Failure Estimation of Asphalt Pavements.

Table 1 List of the Sites for the Computational Simulation of Fatigue Failure Estimation of Asphalt Pavements.

No.	Name of Site	Longitude	Latitude	PWRI code ^{*1}	AMEDAS code ^{*2}
1	Wakkai	141°40'	45°25'	1111	1120
2	Akita	140°05'	39°40'	2308	2305
3	Nakajo	140°50'	38°00'	2401	2402
4	Itoigawa	139°45'	36°10'	3503	3503
5	Koga	137°30'	35°30'	5308	5304
6	Nakatsugawa	137°25'	38°05'	4101	4101
7	Watari	137°50'	37°02'	4103	4103
8	Toyama	137°15'	36°40'	4207	4208
9	Imazu	136°05'	35°25'	6414	6416
10	Torahime	136°15'	35°25'	6405	6405
11	Akashi	134°50'	34°40'	6204	6203
12	Nara	135°50'	34°40'	6307	6307
13	Fukuyama	133°20'	34°30'	7224	7110
14	Munakata	130°35'	33°48'	9101	9101
15	Nagasaki	129°53'	32°45'	9418	9418

*1) PWRI : Public Works Research Institute (Doboku Kenkyu-Sho)

*2) AMEDAS: Automated Meteorological Data Acquisition System

*3) (K) : Investigation of Surface Course (Kijun Chosa)

*4) (S) : Investigation of Vehicle Load (Shaju Chosa)

あって、その他の因子は必要な場合には具体的なケースについて取り込む余地は残したもの、一般論としては検討の対象としなかった。以下、本研究で行ったこれらの因子の評価方法について述べる。

(1) 交通車両に関する因子の評価方法

a) 輪荷重 輪荷重は、Fig. 2 のようにかなりきりたった指數関数的な分布をしており、しかも時刻によってもその形状の異なることが観察される。わが国では、輪荷重が舗装に与える影響は、その大きさの 4 乗に比例するという AASHO 道路試験結果¹²⁾に基づき一般には 5 トン重 (49 kN) に換算され、分布形のまま評価されることは少ないが、この供用性全体についての法則が疲労破壊単独の場合にも成り立つ保証はない。舗装温度が時刻変動をする以上、輪荷重分布も各時刻ごとに別々に評価されることが望ましいが、本研究では、7 月と 10 月に年 2 回 24 時間ずつ調査されている日交通から求められる平均的な分布形をそのまま用いることとし、時間的、季節的に変動する時間交通量によってその度数のみが変わるものとした。なお、小型車の影響は小さいと考えられるため 2 トン重 (19.6 kN) 以下の輪荷重の影響は無視した。

b) 交通量 舗装の寿命は具体的な期間で表わす実用上の必要性が高く、また、交通量の大小によって混合物のスティフネスに影響を及ぼす車両の走行速度は変化をするために、交通量は正確に把握されなければならない。経験的に 7 月と 10 月に調査された日交通量^{7), 8)}はほぼ年平均値に一致するといわれている¹³⁾ので、これを年平均日交通量 (ADT) とみなし、文献^{14), 15)}によって交通量の月変動係数、日交通量に対する時間比を仮定した。交通量の変動に地域差を考慮しなかったのは、交通量の変動は輪荷重の分布ほどには舗装の寿命に大きな影響を及ぼさないと考えられるためである。

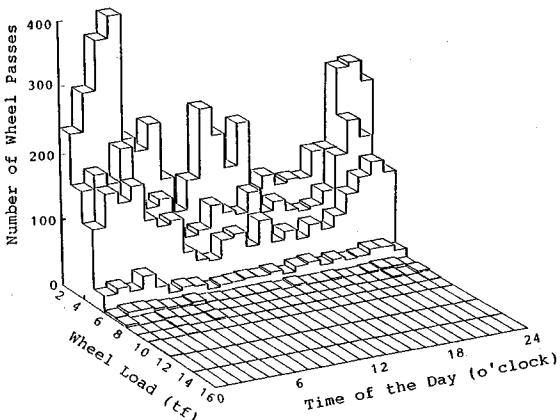


Fig. 2 An Example of Hourly Change of Wheel Load Distribution (Fukuyama, July, 1979).

c) 車両の走行速度 走行速度の分布形は、道路線形、交通量、車種構成、制限速度、交差点からの距離などによって異なるものと考えられるが、わが国の国道では車両の走行速度の定期的な定点測定は行われていない。各車が比較的自由に走行している場合の走行速度分布はかなりよく正規分布に従うことが知られており¹⁶⁾、その平均値、標準偏差は各月各時刻ごとに時間交通量のみから理論的に推定することとした^{16), 17)}。このような推定値を用いたのは、感度分析の結果、走行速度が舗装の疲労寿命に及ぼす影響は他の因子に比べて小さいことが判明したことによる。

d) 車輪走行位置 車輪が車線のどの位置を走行するかによって舗装の内部に生ずる応力やひずみの値は大きく異なるため¹⁸⁾、車輪走行位置の統計的分布は舗装の破壊を論ずる場合のきわめて重要な因子であるが、この因子を直接に取り込んだ設計法はなく、単に 1 よりも小さい補正係数を乗じた例がみられるに過ぎない^{19), 20)}。過去の研究より、中央線からの車輪の走行位置分布は、正規分布²¹⁾または非常に正規分布に近い対数正規分布^{22), 23)}に従うといわれており、車輪の走行位置の測定は、近年は自動計測システムも考案されている²⁴⁾が現在では公には定点測定は行われていないので、本研究では文献²¹⁾から分布の標準偏差は車線幅員のみによって推定できるものとした。

(2) 舗装温度に関する因子

舗装体の温度分布は、月変動のほかに時刻変動をも考慮に入れて評価されることが望ましい^{4)~6)}。このため、過去に提案した理論的な舗装温度推定方法と AMEDAS 気象データにより各地点の深さごとの舗装温度を 1 年間

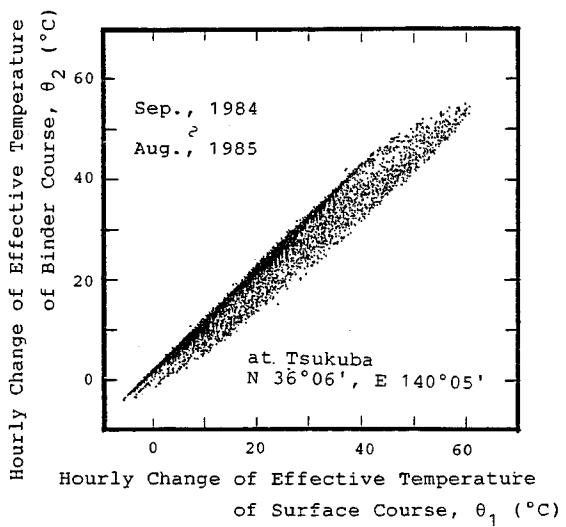


Fig. 3 Comparison of Hourly Change of Effective Temperature of Surface Course and Binder Course.

にわたって各時刻ごとに推定し、後に月別、時刻別の頻度分布を求めた。また、この結果から Asphalt Institute²⁵⁾ の方法により表層、基層の代表温度の関係を定量化し、各月の各時刻ごとに温度変動の分布を求めた。なお、舗装の表層温度と基層温度との間には、筑波での測定結果から Fig. 3 のような比較的強い相関関係が認められたので、基層の温度分布の母数は表層温度の関数と考え、

ここに、 θ_1 :表層温度 [°C]

θ_2 ：基層溫度 [°C]

a, b : 温度によらない各地点ごとに決まる定数なる関係式によって表層温度から一義的に求まる温度を平均値とし、表層温度によらない独立な分散をもつ対数正規分布とした。ただし、 a, b の値は年間の温度推定結果から回帰的に求め、また、アスファルト混合物を使用していない路盤、路床などについては、力学的性状は温度に依存しないものとして扱った。

3. アスファルト舗装の寿命に影響を及ぼす内 的因子とその評価方法

舗装の疲労寿命に影響を及ぼす内的因子には、舗装構造、構成材料、および疲労破壊が発生する深さでのアスファルト混合物の疲労破壊特性などが挙げられるが、これらは、互いに関連性をもつていると同時に、外的因子からの影響を受けることもある。以下では、これらの内的因子をどのように評価すべきかについて述べる。

(1) 舗装構造および構成材料

舗装構造にかかる因子のうち、舗装構成層各層の厚さは舗装が疲労破壊を起こすまで変動しない決定変数とみなしえると思われるが、施工厚は必ずしも設計厚に一致するとは限らないし、また同一の工区内での場所的な変動も考えられよう。しかしながら、一般に応力の分散が期待できない表層に近い層ほど施工誤差は小さいと推定されるので、解析にあたっては設計厚を用いることとした。また、アスファルト舗装構造を多層弾性体でモデル化する場合は特定の外力のもとで、路床、路盤、アスファルト混合物層の各材料について弾性係数と Poisson 比を決定することが必要であるが、本来純粋な弾性体ではないこれらの材料の弾性諸定数の決め方には種々の方法があり定説はない。本研究では、舗装工学上一般に用いられている以下の方法によった。

a) 路床土 Heukelom ら²⁶⁾が現実の舗装に起振機を設置して振動波の伝播速度から推定した路床土の動的な弾性係数は設計 CBR と比例関係にあり

ここに、 E_s ：路床土の弾性係数 [MPa]

CBR_s : 路床土の設計 CBR [%]

C_g : 定数 ($5 \leq C_g \leq 20$)

で表わされるとされる。静的な載荷の場合には、 C_g の値は動的な場合より小さくなるという報告もある²⁷⁾が、本研究では、 C_g の値を一律に10と仮定した。また、Poisson比は、粒状材料については一般に、0.5よりも小さい²⁸⁾とされるので、Claessenら¹⁹⁾に従って0.35とした。舗装の高級化に伴い、路床土の影響が表層付近までは達しにくくなっているため、このような評価方法は不適当なものではないと考えられる。

b) 路盤材 竹下²⁹⁾が種々の実測値を整理した結果によると、路床土の場合と同様に路盤材の弾性係数も修正 CBR と比例関係にあるとされるが、路盤は比較的規格値の明確な人為的に配合した粒状材料を用いて機械施工されることが普通なので、本研究では弾性係数の代表的な値として、上層路盤は 450 MPa、下層路盤は 200 MPa とし、粒度調整碎石またはクラッシャーラン以外の特殊な材料が使用された場合には別途考慮することとした。なお、Poisson 比は、路床土とアスファルト混合物の中間的な値として 0.40 を採用した。

c) アスファルト混合物 アスファルト混合物のスティフネスは、バインダーのコンシスティンシー性状、骨材の粒度、形状などの原材料の特性、骨材占有率、空隙率などの材料構成比、および、温度、載荷時間などの載荷条件によって変化する。本研究では、接地半径と載荷時間をそれぞれ竹下³⁰⁾の式、Claessen ら¹⁶⁾の方法により求め、Van der Poel³¹⁾のノモグラフとHuekelom ら²⁶⁾の式から各条件ごとに混合物のスティフネスを求めた。また、Poisson 比はスティフネスが大きいほど小さくなるという報告もある³²⁾が、Cragg ら³³⁾が詳細に実験をした範囲では、温度、応力レベルにかかわらずほぼ 0.4~0.5 の間にがあるので、本研究では一律に 0.45 を採用することとした。

ところで、Van der Poel のノモグラフは各種データから経験的に作成されており、図からの目読を要するため数値解析にはなじみにくい。このため、過去にこのノモグラフを数値化する努力が行われてきた^{34), 35)}が、重回帰式を用いるものが主で、変数の広範な変化に追随し得る高精度のものはいまだに提案されていない。本研究ではノモグラフ中に現われる曲線群の情報をすべて座標の形で読み込み、手作業で判読する場合と同様のフローでバインダーのスティフネスを推定する手法をコンピュータ上で確立した。**Fig. 4**にノモグラフから直接に読み取って求めたバインダーのスティフネスと、本研究で作成した計算システムによって推定したバインダーのスティフネスを比較した結果を示すが、非常に高い精度で両者は一致していることがわかる。

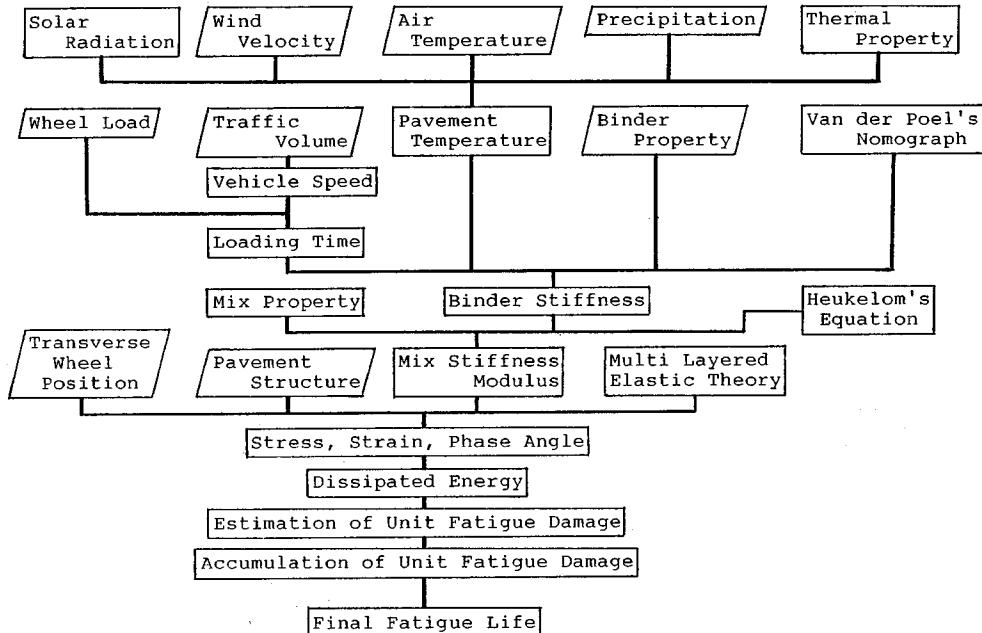


Fig.5 Flow Chart for Estimating Fatigue Damage of Asphalt Pavement.

なければならず、しかも被積分関数には多層弾性理論³⁸⁾がサブシステムとして組み込まれているので、計算時間上の問題からこれを直接に数値積分することは困難である。そこで、本研究では、輪荷重、表層のスティフネス、基層のスティフネス、載荷位置を規則的に変化させ、表層表面および基層底面において発生する主応力の各成分を多層弾性プログラム (CHEV 5 L) によってあらかじめ

格子点上で求めておき、実際の積分にあたってはこのデータから補間法により主応力の振幅を求めた。このことにより、被積分関数の計算がきわめて高速に行えるようになった。

Fig.6は、このように計算の高速化をめざした応力の計算方法の精度を確認するために、特定条件下での推定破壊回数を多層弾性プログラムによる場合と本研究の推定方法による場合とを比較した例である。応力振幅を離散的な値から求めたことによると思われる若干の誤差が認められるが、かなり良好な結果を示しているといえよう。

(2) アスファルト舗装の疲労寿命の予測結果

以下では、本研究で確立した疲労寿命の推定システムに従って実際の舗装の寿命を評価した結果について述べる。解析に用いた基準調査データ、車両重量データ、AMEDAS 気象データは、Table 1 の福山のものであり、その舗装構造は、Fig. 7 に示すとおりである。なお、AMEDAS の気象データは 1982 年のものを用いた。

a) 平均的疲労被害の季節的変動 Fig. 8 は、曲げ疲労破壊を想定し、アスファルト混合物層下面から疲労破壊が発生するとした場合の月別、時刻別の平均的な疲労被害の対数値の変動を示したものである。この図より、年間を通じて最も曲げ疲労破壊の被害が顕著なのは、春季と秋季の中、および、初夏と晩夏の早朝であり、冬季と夏季の疲労被害はきわめて小さく事実上無視し得ることがわかる²⁾。この事実は、位相角がスティフネスと

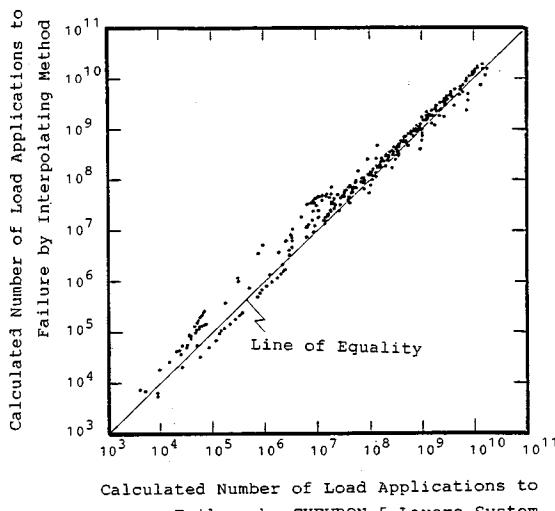


Fig.6 Comparison of Number of Load Applications to Failure by CHEVRON 5 Layers System with Interpolative Method.

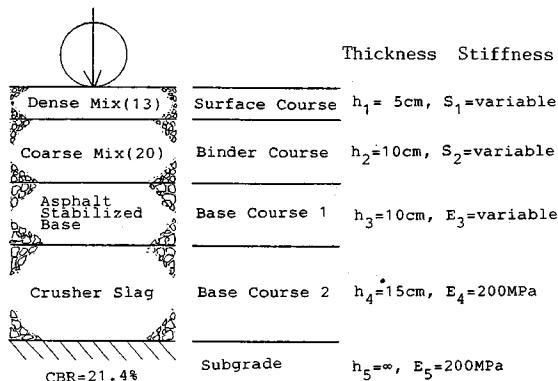


Fig. 7 Pavement Structure Model Used for Computational Simulation of Fatigue Failure Estimation of Asphalt Pavement (Fukuyama).

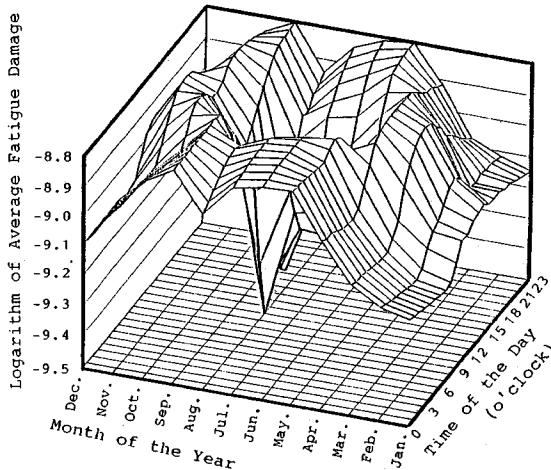


Fig. 8 A Stereogram of Monthly and Hourly Change of Fatigue Damage of Asphalt Pavement at Bottom Surface of Asphalt Layer.

の関係において極大値をもつてゐることに由来しているものと考えられる。一方、Fig. 9は、これとは逆に縦表面ひびわれを想定し、アスファルト混合物層表面から疲労破壊が起こるとした場合の平均的な疲労被害の対数値の変動を同様に図示したものである。この場合には、年間を通じて平均的な舗装温度が最も高くなる夏季の日中に最大の疲労被害が生じており、縦表面ひびわれは高温時ほど発生しやすいとする松野ら²⁰⁾の仮説を裏づける結果となっていることがわかる。

このように、具体的な舗装構造について検討した結果から、同一の疲労破壊規準によって疲労被害を評価しても、表層表面と基層底面とで温度変動や構造上の問題としての応力とひずみの変動などが同一ではないために、結果として見掛け上非常に異なった疲労被害特性が現われており、両破壊形態は厳密に区別して考える必要がある。

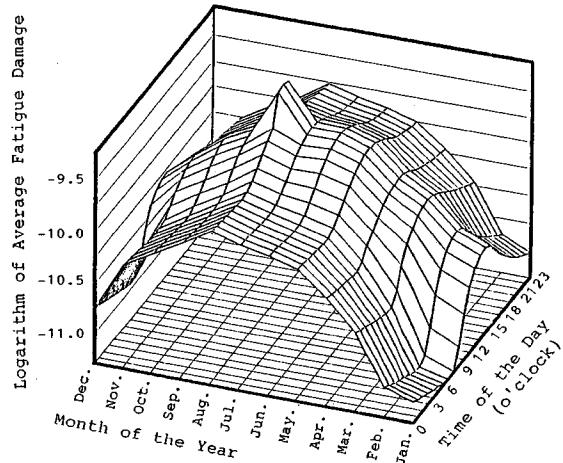


Fig. 9 A Stereogram of Monthly and Hourly Change of Fatigue Damage of Asphalt Pavement at Top Surface of Asphalt Layer.

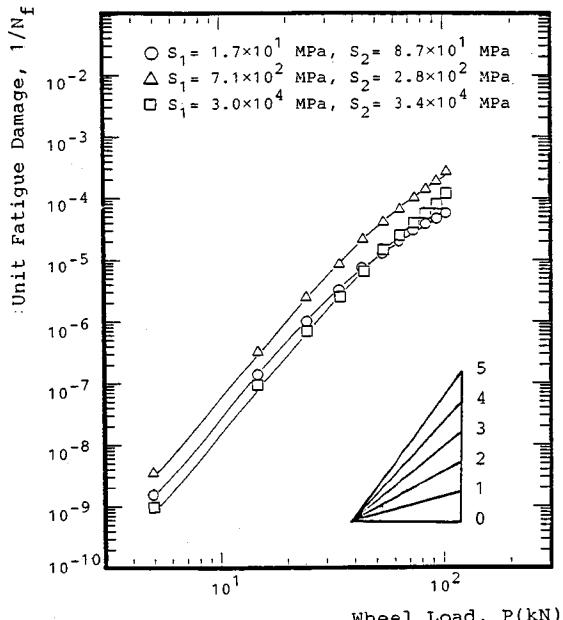


Fig. 10 Wheel Load versus Unit Fatigue Damage at Bottom Surface of Asphalt Layer.

ることがわかる。

b) 輪荷重換算乗数の検討 Fig. 10は、車輪が平均的な位置を走行するとした場合の曲げ疲労破壊について、輪荷重と単位疲労被害の関係を両対数紙上で調べたものである。これより、輪荷重の小さい範囲では曲線の勾配は比較的大きく輪荷重と疲労被害の間にはほぼ4乗則が成り立っているようであるが、輪荷重が50 kNを超えるあたりから勾配は漸減し、ほぼ2~3乗に比例していることがわかる。この傾向は、Fig. 11に示す舗装

表面からの疲労被害の場合はより顕著であり、輪荷重の小さい範囲ではこの乗数はほぼ 5 であるのに対して輪荷

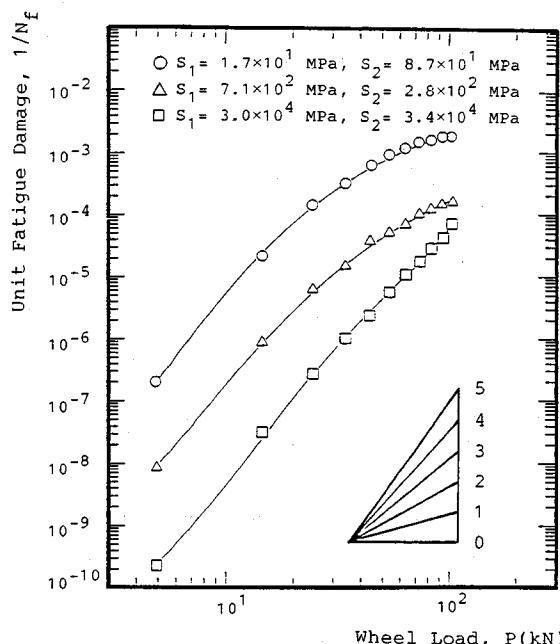


Fig. 11 Wheel Load versus Unit Fatigue Damage at Top Surface of Asphalt Layer.

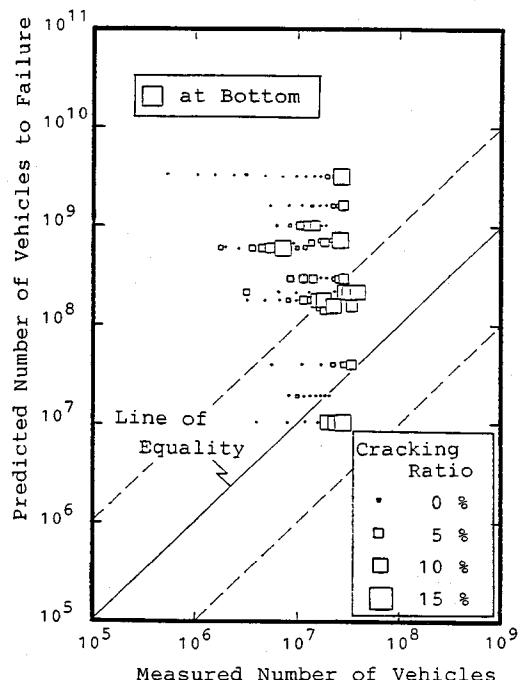


Fig. 12 Comparison of Predicted Number of Vehicles to Failure at Bottom Surface of Asphalt Mix Layer with Measured Number of Vehicles in Terms of Cracking Ratio.

重が大きくなるとスティフネスの値によってはほぼ 1 乗に比例するという結果になっていることがわかる。

このように、輪荷重の大きさとこれに対応する疲労被害の大きさは種々の因子の影響によって変化するものであり、舗装の疲労寿命を推定するにあたっては、換算係数の輪荷重やスティフネスに対する依存性を考慮を入れるか、あるいは本研究のように輪荷重を分布形のまま直接に評価することが必要であろうと考えられる。

(3) 国道の路面性状データによる予測方法の検証

Fig. 1 および Table 1 に示す 15 か所の国道の舗装について実際の供用条件を入力データとして、疲労ひびわれ破壊による寿命を推定し、本研究で提案する寿命予測手法の妥当性を検証した。舗装構造が 6 層以上の場合は適宜 5 層系または 4 層系に置き換えて解析を行った。

Fig. 12 は、従来の考え方から、アスファルト舗装の疲労破壊はすべて混合物層下面から起こると仮定して破壊に至るまでの車両の通過台数と実際の車両の通過台数を路面のひびわれ率をパラメーターとして表わしたものである。ただし、解析は車輪単位で行い、後に実測データから車両台数に換算して評価を行った。これより、実測の疲労被害の程度の方が極端に大きい箇所がみられ、曲げ疲労破壊のみでは現象を完全には説明しきれないことがわかる。これに対し、舗装表面からも疲労ひびわれは発生し得るものと考え、両ひびわれのうち、より早期に発生するものを破壊モードと考え、破壊までの車両の通過台数と実測の車両の通過台数を比較すると、Fig. 13 のように、ほとんどすべての箇所において、ほぼ推定寿命のあたりで実際にひびわれ率が急増しており、本研究で提案した疲労破壊のための一連の寿命予測システム

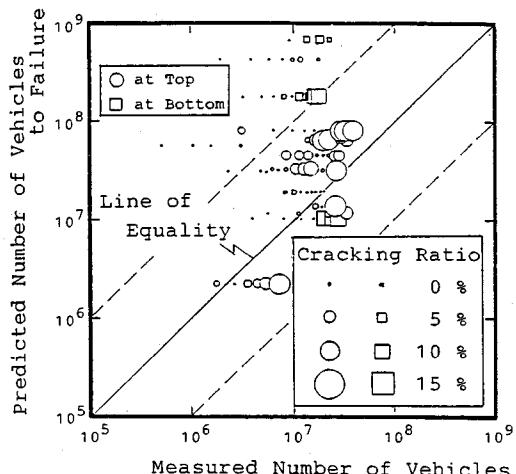


Fig. 13 Comparison of Predicted Number of Vehicles to Failure at Both Top and Bottom Surface of Asphalt Mix Layer with Measured Number of Vehicles in Terms of Cracking Ratio.

がかなり妥当なものであるといふことができる。

5. 結論

本研究を要約すると以下のとおりである。

(1) 基層の温度分布は表層温度の関数として定式化する必要があるものと考えられる。

(2) Van der Poel のノモグラフを利用し、わずかな誤差でバインダーのスティフェネスを数値的に推定するフローを確立することができた。

(3) 補間法を応用することによって、複雑な多層弹性理論を用いなくとも各舗装構造ごとに高速かつ高精度で応力振幅を定量化することができた。

(4) 年間を通じて最も曲げ疲労被害が顕著なのは、春季と秋季の日中、および、初夏と晩夏の早朝であり、冬季と夏季の疲労被害はきわめて小さく事実上無視し得ることがわかった。また、疲労被害も月変動と同程度な時刻変動をしていることが判明した。

(5) アスファルト混合物層表面から疲労破壊が起こるとした場合は夏季の日中に最大の疲労被害が生ずることがわかり、従来からの推論を裏づける結果となった。

(6) 輪荷重と単位疲労被害の間には必ずしも 4乗則が成り立つとは限らない。

(7) アスファルト混合物層の表面と底面からの両疲労ひびわれを考えて現実の舗装の寿命を推定したところ、ほとんどすべての箇所において、ほぼ推定寿命のあたりで実際のひびわれ率が急増しており、本研究で提案した疲労破壊のための一連の寿命予測システムがかなり妥当なものであることがわかった。

6. あとがき

本研究で行った解析では予測寿命が実測寿命に比べて若干大きめに評価される傾向があるが、これは今回の解析がすべてのひびわれを疲労破壊のみで説明しようとしたのに対し、実際にはこれ以外の理由でもひびわれが発生し得ることや、供用中のアスファルト混合物は過酷な自然条件のもとでバインダー性状や疲労破壊特性に変化が生じ得ることなどが原因と考えられる。今後は、ひびわれに対する原因別の寄与率やいわゆる Weathering の効果が定量化されるとともに、現場の路面性状調査も高精度で継続的かつ広範囲に実施されることが望まれる。

謝 辞：本研究を行うにあたり、東京都庁の勝呂太氏（当時東工大大学院生）には大変な助力を受けた。また、建設省道路局国際課（当時土木研究所舗装研究室）の猪股和義氏には基準データ、車重データの件でお骨折りをいただいた。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、および

公益信託ヤマハ発動機国際友好基金の交付を受けた。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 姫野賢治・渡辺 隆・丸山暉彦：低スティフェ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。
- 3) 姫野賢治・渡辺 隆・丸山暉彦：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、土木学会論文集、No. 378/V-6, pp. 41~50, 1987年2月。
- 4) 姫野賢治・渡辺 隆・勝呂 太：アスファルト舗装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。
- 5) 姫野賢治・猪股和義：アスファルト舗装の内部温度分布に関する調査研究、土木技術資料、28-6, pp. 326~331, 1986.
- 6) 姫野賢治・渡辺 隆・勝呂 太・勝地 弘：アスファルト舗装内部温度の分布特性に関する研究、東京工業大学土木工学科研究報告、No. 36, pp. 13~31, 1986.
- 7) 建設省土木研究所：車両重量調査結果の解析（データ編）、土木研究所資料第 1723 号、1981年8月。
- 8) 建設省土木研究所：車両重量調査結果の解析、土木研究所資料第 2205 号、1985年3月。
- 9) 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。
- 10) 建設省土木研究所：路面維持調査結果の解析（データ編）、土木研究所資料第 1751 号、1982年1月。
- 11) 建設省土木研究所：路面維持調査結果の解析（データ編）、土木研究所資料第 2110 号、1984年3月。
- 12) 日本セメント技術協会：AASHO 道路試験、1966.
- 13) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用、丸善、p. 76, 1983年2月。
- 14) 八十島義之助・花岡利幸：交通計画、技報堂、p. 226, 1974年7月。
- 15) 高田 弘：交通容量、交通工学シリーズ、No. 1, 1966.
- 16) 交通工学研究会：交通工学ハンドブック、技報堂、1973.
- 17) Watanabe, T. and Himeno, K. : Estimation of Fatigue Life for Asphalt Pavements, Proc. of PICA, Technical Memorandum of PWRI, No. 2136, pp. 63~82, 1984.
- 18) Matsuno, S. and Nishizawa, T. : Longitudinal Surface Cracking of Flexible Pavements, Proc. of PICA, Technical Memorandum of PWRI, No. 2136, pp. 779~796, 1984.
- 19) 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.
- 20) 牛尾俊介：アスファルト舗装のわだち掘れ予測方法に関する研究、土木学会論文報告集、第 323 号、pp. 151~163, 1982年7月。
- 21) 松野三朗・小林泰介：車両走行位置分布について、第 14

- 回日本道路会議論文集, pp. 177~178, 1981.
- 22) 笠原 篤:舗装における車両の車輪通過位置分布に関する研究, 第38回土木学会年講概要集/V-239, pp.475~476, 1983.
 - 23) 笠原 篤:舗装における車両の走行奇跡分布に関する研究, 第14回日本道路会議論文集, pp.179~180, 1981.
 - 24) 西沢辰男・梶川康男・富田弘之:車輪通過位置の自動測定システムについて, 第40回土木学会年講概要集/V-234, pp.467~468, 1985.
 - 25) Asphalt Institute: Asphalt Overlays and Pavement Rehabilitation, Manual Series No.17, 1982.
 - 26) Heukelom, W. and Klomp, J.G.: Road Design and Dynamic Loading, Proc. of AAPT, Vol. 33, pp.92~125, 1964.
 - 27) 阿部忠行:突き固めた関東ロームのCBRと弾性係数の関係, 第36回土木学会年講概要集/V-245, pp.487~488, 1981年10月.
 - 28) Yan, N.C.: Design of Functional Pavements, McGraw-Hill, Inc., p.50, 1972.
 - 29) 竹下春見:新編道路工学, 金原出版, p.2, 1961.
 - 30) 竹下春見:解説アスファルト舗装(2), アスファルト, Vol. 9, No. 50, 1966.
 - 31) Van der Poel, C.: A General System Describing the Viscoelastic Properties of Bitumens and Its Relations to Routine Test Data, Journal of Applied Chemistry, Vol. 4, pp. 221~236, 1954.
 - 32) Lytton, R.L. and Shanmugham, U.: Analysis and Design of Pavements to Resist Thermal Cracking Using Fracture Mechanicks, Proc. of 5th ICSDAP, pp.818~830, 1982.
 - 33) Cragg, R. and Pell, P.S.: The Dynamic Stiffness of Bituminous Road Materials, Proc. of AAPT, Vol. 40, pp.126~193, 1971.
 - 34) 牛尾俊介・菅原照雄:アスファルトの工学的特性(第3報), アスファルト混合物の変形特性, 特にクリープ特性について, 石油学会誌, Vol. 24, No. 4, pp. 209~217, 1981.
 - 35) Shahin, M.Y.: Design System for Minimizing Asphalt Concrete Thermal Cracking, Proc. of 4th ICSDAP, pp.920~932, 1977.
 - 36) Kobayashi, T. and Skok, E.L., Jr.: Evaluation of the Flexible Pavement on the Tomei Expressway by the Fatigue Cracking Concept, Proc. of JSCE, No. 211, pp. 89~98, 1973.
 - 37) 丸山暉彦:アスファルト舗装の寿命予測法に関する研究, 博士論文, 東京工業大学, 1980年10月.
 - 38) Burmister, D.M.: The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil System III, Journal of Applied Physics, Vol. 16, pp. 296~304, 1945.

(1986.7.29・受付)