

アスファルト舗装の疲労寿命予測手法に関する検討

寒地土木研究所 寒地道路保全チーム ○丸山 記美雄
 安倍 隆二
 熊谷 政行

本研究の目的は、アスファルト舗装の疲労寿命を理論的な計算に基づいて予測する手法について、その妥当性を検証した上で、手法の確立を図ろうとするものである。

現地調査と室内試験を行った結果、アスファルト混合物層最下層に使用する混合物の配合によって疲労ひび割れの発生状況が異なることと、配合が異なる混合物の疲労破壊回数には統計的に有意な差があることを確認し、アスファルト混合物の疲労破壊規準式を作成した。また、実測データを用いた層構造解析とマイナー則を用いて理論的に算定した疲労寿命と、実際の疲労寿命の差異を比較した結果、理論的な計算に基づく疲労寿命予測手法の妥当性が確認できた。さらに、この計算を効率的にするため、疲労寿命計算システムを試作した。

キーワード：疲労ひび割れ、疲労破壊、理論的設計法、曲げ疲労試験

1. はじめに

舗装の構造的な疲労破壊は、舗装の理論的な設計法を構築する上での重要課題である。現在、疲労破壊の発生を力学的な理論に基づいて計算する手法は紹介されているが、計算により求まる疲労寿命が実際の供用道路における疲労ひび割れ発生時期と比べどの程度の精度をもつのか、検証事例がなく判然としないのが実情である。

そこで、本研究では、供用中の道路における疲労ひび割れ発生状況とアスファルト混合物の疲労破壊特性との関連を明らかにし、疲労ひび割れの発生時期を力学的な

理論に基づいて算定する手法の妥当性を検討した上で、手法の確立を図ることを目的としている。検討手法としては、国道36号苫小牧市美々に1990年に構築した、図-1に示す舗装厚や材料が異なる8種類の舗装区間(A, B, C, D, T1-1, T1-2, T2-1, T2-2断面、通称：美々新試験道路)において、ひび割れの発生状況を定期的な路面調査と適宜実施した開削調査によって観測するとともに、現道から切取採取した配合の異なるアスファルト混合物供試体に対して曲げ疲労試験を実施し、混合物の疲労破壊特性を把握した。その上で、現道で実測している交通量や温度データを用いて、層構造解析によって累積ダメージと疲労破壊時期を算出し、実際の疲労破壊時期と比較した。



図-1 美々新試験道路の舗装断面および疲労破壊状況

2. 現道における疲労ひび割れ発生状況調査

(1) 現道における調査方法

美々新試験道路において、路面のひび割れ調査と開削調査によって疲労ひび割れの発生状況を調べた。路面のひび割れ調査は、美々新試験道路が構築されて以降、毎年5月と10月に定期的に行っている。また、開削調査は供用開始後14.1年経過時に実施した。車線全幅3.5m縦断方向2.0mの範囲でカッターを用いて混合物層を幅45cm縦断方向40cmのブロック状に切断して採取し、切断面と混合物層底面に発生している疲労ひび割れ状況を目視確認およびスケッチした。

(2) 疲労ひび割れ発生状況

路面のひび割れ調査結果を図-1に示してある。アスフ

ルト混合物層最下層がアスファルト安定処理混合物であるT1-1、A、T2-1断面で供用後10.6年、B断面で供用後13.3年、粗粒度混合物であるT1-2断面で供用後15.8年経過時点で疲労ひび割れが発生したことが確認された。一方、混合物層最下層が密粒混合物であるT2-2断面は、B断面やT2-1断面と同じ混合物層厚ながら疲労ひび割れが発生しておらず、使用する混合物によって疲労ひび割れの発生年数が異なる事が確認された。

開削調査対象であるT1-1、T1-2、T2-2各々の舗装断面から採取したブロック状供試体の底面のひび割れ発生状況をスケッチした結果を図-2に示す。図-2より、混合物層最下層の混合物がアスファルト安定処理混合物であるT1-1断面の底面には内側車輪通過位置（Inner Wheel Path、以下、IWP部）と外側車輪通過位置（Outer Wheel Path、以下、OWP部）を中心に車道幅員全幅に渡ってひび割れが発生しており、開削範囲における混合物層底面のひ

断面名称	混合物層最下層混合物種	混合物層底面のひび割れ状況 (混合物層の底面のひび割れ状況を底面側から表面側に向かって見た場合の図)	開削断面のひび割れ率 (上段数値：表面、下段数値：底面)
T1-1	アスファルト安定処理混合物		表面：13% 底面：92%
T1-2	粗粒度アスファルト混合物		表面：0% 底面：3%
T2-2	密粒度アスファルト混合物		表面：0% 底面：0%

図-2 採取供試体のひび割れ発生状況

ひび割れ率は92%と非常に高いことが確認された。なお、T1-1断面の表面に見られるひび割れ率は13%であり、表面と混合物層底面ではひび割れ率が異なっている。一方、混合物層最下層の混合物が粗粒度アスファルト混合物であるT1-2断面の底面にはひび割れ率にして3%の僅かなひび割れが確認できるが、表面にはひび割れは認められない。最下層の混合物が密粒度アスファルト混合物であるT2-2断面は、混合物層底面と表面の両方に全くひび割れが認められない。混合物層の最下層に使用した混合物の種類によって底面に発生するひび割れの発生量に明確な差があることが確認された。

3. 混合物の曲げ疲労破壊特性の検討

(1) 曲げ疲労試験の目的と方法

美々新試験道路における疲労ひび割れがアスファルト安定処理混合物を使用している断面で顕著に発生している状況を踏まえ、アスファルト安定処理混合物、粗粒度アスファルト混合物、密粒度アスファルト混合物の疲労破壊特性の差異に関する基礎的データの取得と混合物の疲労破壊特性の定式化を目的に、現場切取供試体に対して4点曲げ試験装置によるひずみ制御方式の繰返し曲げ疲労試験を行った。試験装置の概要を図-3に示す。

混合物層下面がアスファルト安定処理混合物であるT1-1断面、粗粒度アスファルト混合物であるT1-2断面、密粒度アスファルト混合物であるT2-2断面の各々の断面の車輪通過位置中央（Between Wheel Path、以下、BWP部）から現場採取したブロック状供試体(45×40×12cmまたは45×40×15cm)を、カッタ切断して5×5×40cmの曲げ疲労試験用供試体を作成した。作成した供試体の建設時の配合と、回収試験等により求めたアスファルト量および空隙率等の実測値データを表-1に示す。

開削調査により採取したブロックから得られる供試体本数は、各々の断面毎に20本と限られたため、試験条件と数量は表-2に示す通り、疲労破壊回数の差とばらつきを統計的に検定するために 300×10^6 のひずみで10本の試験を、疲労破壊規準を検討するため、この試験に加えて 200×10^6 と 400×10^6 のひずみで5本ずつの試験を実施した。

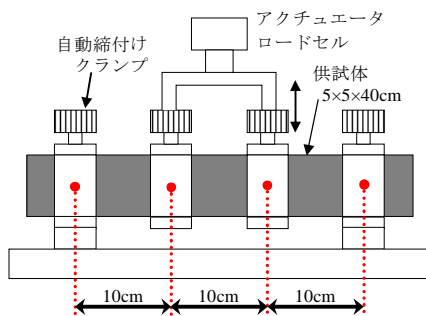


図-3 4点曲げ疲労試験概要図

表-1 現場採取供試体の配合

混合物種類	区分	最大粒径(mm)	アスファルト量(%)	アスファルト容積率 V_b (%)	空隙率 V_v (%)	飽和度VFA(%)
安定処理(0-30)	配合値	30	4.0	9.5	7.5	55.9
	実測値	30	4.3	10.5	5.8	64.4
粗粒度(20)	配合値	20	5.0	11.9	5.5	68.3
	実測値	20	5.5	13.5	2.5	84.4
密粒度(13F)	配合値	13	6.3	15.0	3.4	81.6
	実測値	13	6.3	15.5	2.1	88.1

表-2 試験条件と試験数量

試験温度	10℃		
荷重周波数	10Hz, サイン波		
ひずみ($\times 10^6$)	200	300	400
	試験数量	5本	10本
養生時間	6時間以上		
制御方法	ひずみ制御		

(2) 曲げ疲労試験結果と考察

現場採取供試体10本に対する 300×10^6 のひずみでの疲労破壊回数の度数分布を図-4に示す。混合物ごとに値の分布域が異なっており、また、疲労破壊回数はある程度ばらつくことがわかる。図-4で見られる混合物による破壊回数の差が統計的に有意と言えるか把握するため、破壊回数の平均値の差の検定（Welchのt検定）を実施した結果を表-3に示す。有意水準1%でアスファルト安定処理混合物と粗粒度アスファルト混合物、粗粒度アスファルト混合物と密粒度アスファルト混合物、アスファルト安定処理混合物と密粒度アスファルト混合物の母平均には差がないとはいえないことから、各々のアスファルト混合物の破壊回数には統計的に有意な差があると判断される。その差は破壊回数の平均値で表-4に示すとおり、アスファルト安定処理混合物を1とすると、粗粒度アスファルト混合物は4.3、密粒度アスファルト混合物は7.9であり、アスファルト安定処理混合物の疲労破壊回数が最も少ない。美々新試験道路での実道における開削調査によって、混合物層の最下層がアスファルト安定処理混合物の断面には疲労ひび割れが発生し、粗粒度アスファルト混合物の最下面に若干の疲労ひび割れが確認でき、密粒度アスファルト混合物の断面には一切発生していない状況が確認されているが、室内試験による疲労破壊回数の差と符合している。

また、混合物の疲労破壊回数のばらつきに関して正規分布と対数正規分布への適合度の検定を行った結果、3混合物すべてが正規分布に従うとも対数正規分布に従うともいえる結果が得られた。その変動係数は20~60%程度であった。

混合物の骨材間隙に占めるアスファルト容積率を表す飽和度（VFA）と破壊回数の関係について整理を行った結果を図-5に示す。図-5より、飽和度と疲労破壊回数の間には相関性が認められ、飽和度が高くなると破壊回数が大きくなる関係にある。また、破壊回数 N_f を従属変数とし、飽和度VFA、曲げスティフネス S_{max} 、ひずみ ϵ を

独立変数とした重回帰分析を行った結果、混合物配合から破壊回数を予測する式(1) (以下、破壊規準式)を得た。式(1)によって、**図-6**に示すようにアスファルト安定処理混合物、粗粒度アスファルト混合物、密粒度アスファルト混合物など、任意の混合物の破壊回数とひずみの関係を推定することが可能となる。

$$\log N_f = 6.123 \log VFA - 4.594 \log \varepsilon - 0.7000 \log S_{mix} + 7.551 \quad (1)$$

ここで、 N_f : 混合物層の曲げ疲労破壊回数 (回)

VFA : 混合物の飽和度, S_{mix} : 曲げスティフネス(MPa)

ε : 曲げ疲労試験時のひずみ($\times 10^{-6}$)

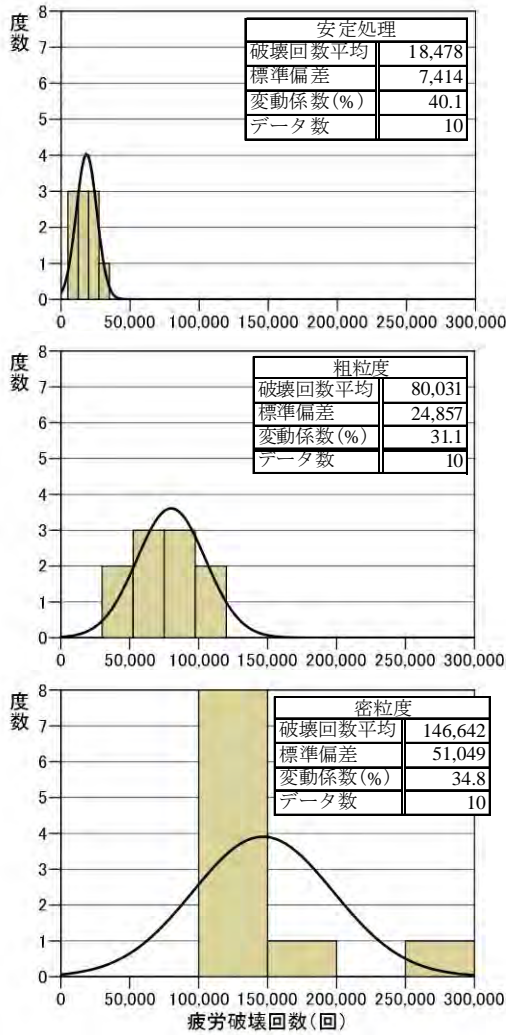


図-4 現場採取供試体の疲労破壊回数の頻度分布

表-3 平均値の差の検定結果

検定手法	母平均の差の検定 (両側) t検定(Welch), 有意水準 $\alpha=1\%$
安定処理と粗粒度の差	$p=1.49 \times 10^{-3} < \alpha=0.01$ 差がないとはいえない
粗粒度と密粒度の差	$p=2.61 \times 10^{-3} < \alpha=0.01$ 差がないとはいえない
安定処理と密粒度の差	$p=2.01 \times 10^{-3} < \alpha=0.01$ 差がないとはいえない

p: 有意確率, a: 有意水準

表-4 破壊回数平均値の比較(ひずみ 300×10^{-6})

混合物種	現場採取供試体	
	破壊回数	比率
安定処理	18,478	1
粗粒度	80,031	4.3
密粒度	146,642	7.9

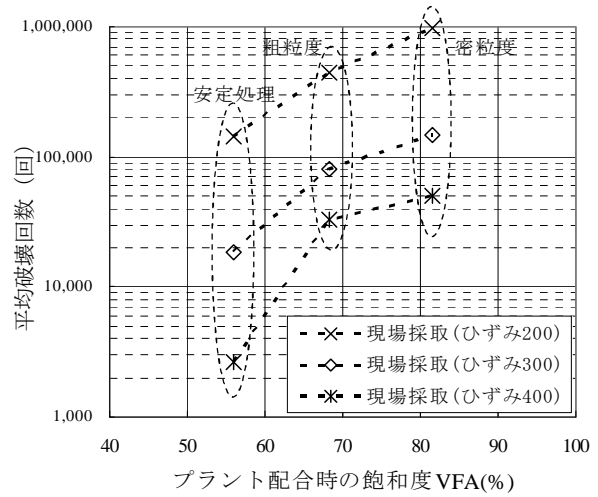


図-5 破壊回数と混合物の飽和度との関係

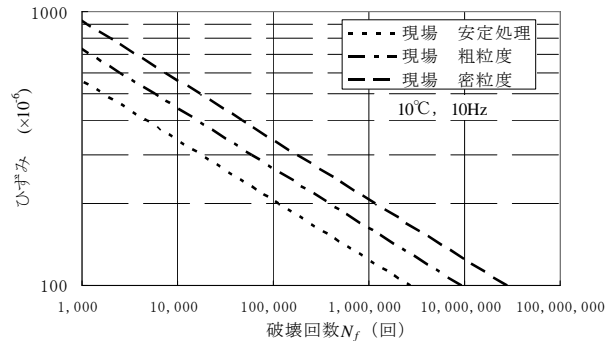


図-6 重回帰分析による混合物の疲労破壊曲線

4. 疲労寿命予測手法に関する検討

(1) 疲労寿命予測手法の概要

疲労寿命予測計算は**図-7**に示す手順に従って実施した。その際、走行位置分布、49kN換算輪数、月平均温度などは現道における実測データに基づいて設定しており、その一例として、走行位置分布を**表-5**に示す。その上で、様々な温度における混合物層底面の横断方向引張ひずみを、**図-8**に示す舗装体モデルに対して多層弾性解析プログラムGAMES Ver.23を使用して算定した。さらに、室内試験結果を基に作成した破壊規準式: 式(1)とマイナ一則を利用して疲労破壊年数を算定し、美々新試験道路での疲労ひび割れ発生時期と比較した。

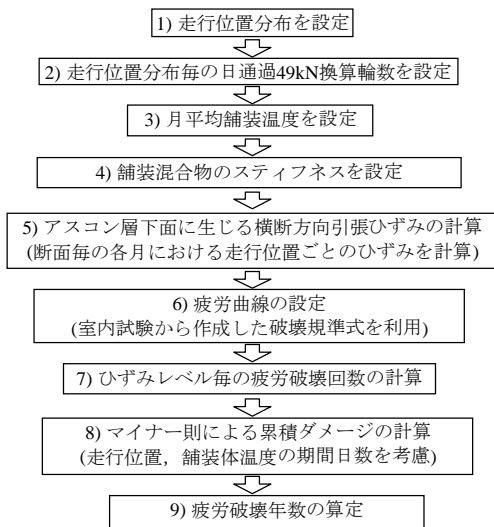


図-7 疲労寿命予測の手順

表-5 横断方向の車両走行位置分布

走行位置分布中心からの距離(cm)	走行頻度 (%)	通過49kN換算輪数
-95~-	0	0
-95~-85	0	0
-85~-75	0	0
-75~-65	0	0
-65~-55	1	23
-55~-45	2	48
-45~-35	4	96
-35~-25	8	192
-25~-15	12	288
-15~-5	15	360
-5~+5	16	384
+5~+15	15	360
+15~+25	12	288
+25~+35	8	192
+35~+45	4	96
+45~+55	2	48
+55~+65	1	23
+65~+75	0	0
+75~+85	0	0
+85~+95	0	0
+95~	0	0
計	100	2398

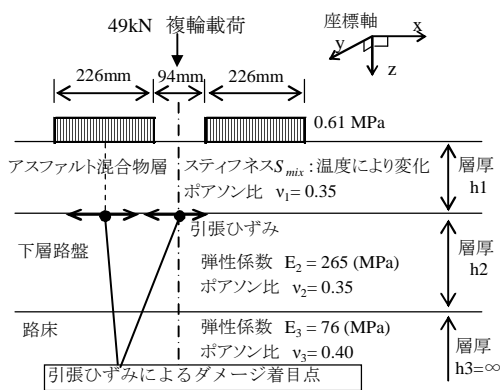


図-8 解析に用いた舗装体モデル

(2) 疲労寿命予測結果

供用開始時点を超算点として経時的な累積ダメージを各断面について算出した結果を図-9に示す。A断面とT1-1断面がまず最初に約5年経過時点で累積ダメージが1となり、混合物層底面に疲労ひび割れが発生すると算定さ

れた。累積ダメージが1となるまでの年数算出結果と、美々新試験道路において実際に路面に疲労ひび割れの発生が観測された時点の経過年数を表-6に示す。疲労破壊年数の計算値が小さい断面ほど実際に路面に疲労ひび割れの発生が観測されている傾向にあり、観測値と計算値との差は約4年~+6年であることが分かる。仮に、疲労破壊年数が曲げ疲労試験同様に変動係数40%程度の正規分布に従うと仮定した場合の平均±σの範囲も表-6に示してある。A断面とT1-1断面については、平均±σの範囲内に観測された疲労破壊年数が入っていないが、B断面とT2-1断面およびT1-2断面では平均±σの範囲内に収まっており平均値に近い値をとっている。

以上の事から、本手法のように現地の様々な環境条件や材料の特性値を適正に把握して力学的な手法に反映すれば、平均±σの範囲内もしくは約3年~+6年の誤差範囲で疲労破壊年数を推定することが可能であることが実証できた。舗装の疲労破壊現象が確率的な事象であり、観測値と計算値の差はある程度発生することを踏まえれば、本手法は概ね妥当な手法と評価できる。

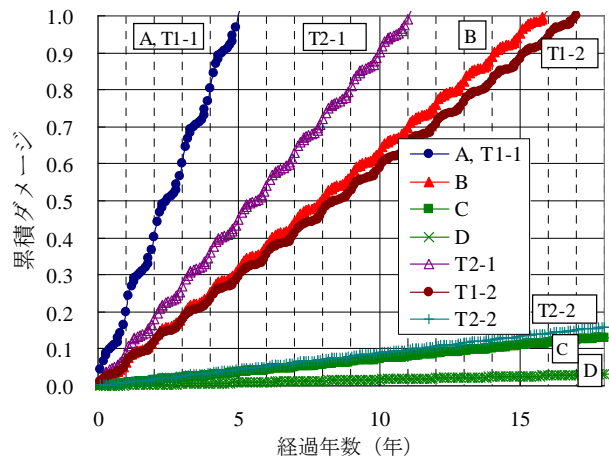


図-9 累積ダメージの経年変化

表-6 計算値と実際の疲労破壊年数の比較

断面	疲労破壊年数 (年)		平均値との差 (年)
	マイナー則による計算値 (平均-σ) ~ 平均値 ~ (平均+σ)	試験道路における観測値	
A	3.1 ~ 5.2 ~ 7.3	10.6	5.4
T1-1	3.1 ~ 5.2 ~ 7.3	10.6	5.4
T2-1	7.1 ~ 11.9 ~ 16.7	10.6	-1.3
B	10.1 ~ 16.8 ~ 23.5	13.3	-3.5
T1-2	10.8 ~ 18 ~ 25.2	15.8	-2.2
T2-2	71.4 ~ 119 ~ 166.6	-	-
C	86.9 ~ 144.9 ~ 202.9	-	-
D	375 ~ 625 ~ 875	-	-

5. 疲労寿命計算システムの作成

上述した疲労破壊寿命の計算を効率的に実施し技術者の労力を軽減するために、疲労寿命計算システム (任意

断面の疲労寿命予測システム)を試作した。任意に舗装厚、材料、温度条件を設定した舗装構造の疲労寿命を計算するシステムであり、図-10にシステムの計算フローを示す。

図-11に任意断の疲労寿命予測システムの起動画面を示す。最初に、この画面において、舗装の層数、各層の材料条件や温度によるスティフネス変化などの入力条件を設定する。続いて、輪荷重や走行位置分布などの交通条件や使用する破壊規準式の設定などを行い、自動計算を開始すると、ダメージ計算が実行され、破壊年数が算出される。なお、疲労寿命の予測には、上述した破壊規準式：式(1)の他、舗装設計便覧に示された破壊規準式や繰り返し曲げ試験等の室内試験結果を用いて規準式を独自に設定することも可能とするなど柔軟性を持たせてある。

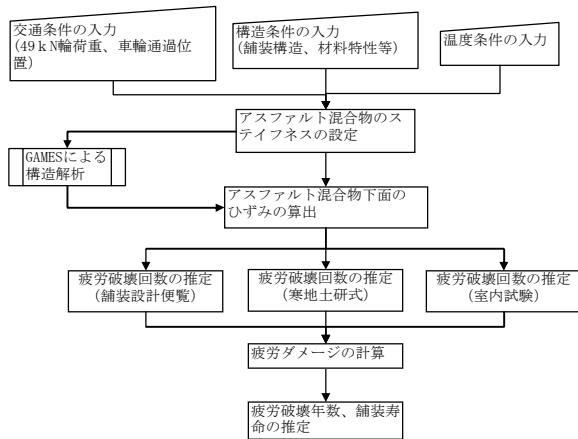


図-10 任意断面の疲労寿命予測システムの流れ

6. まとめ

本研究をまとめると以下のとおりである。

- (1) 現道における調査と室内での曲げ疲労試験から、アスファルト混合物層最下層に使用する混合物の配合によって疲労ひび割れの発生年数が異なることを確認し、混合物の配合を考慮した疲労破壊規準式を提示した。
- (2) 疲労破壊年数の計算値が小さい断面ほど実際に路面に疲労ひび割れの発生が観測されている傾向にあり、平均±σの範囲内もしくは約3年～+6年の誤差範囲での疲労破壊年数の算定は可能であり、舗装の疲労破壊現象が確率的な事象である面を踏まえれば疲労ひび割れの発生予測手法として概ね妥当なものと評価できた。
- (3) 4点曲げ疲労試験から得られる破壊規準式と層構造解析と各種の現地データを適切に組み合わせることで、舗装の疲労寿命はある程度理論的に推定が可能であることが実証された。
- (4) 疲労寿命予測の計算を効率的にするため、疲労寿命計算システムを作成した。

アスファルト舗装の疲労寿命を理論的に算定できることにより、従来よりも経済的な舗装設計や新技術・新材料の適用が可能となり、コスト縮減や耐久性向上に寄与するものと考えられる。ただし、舗装構造を設計する場合に考慮すべき項目としては、疲労ひび割れに対する抵抗性だけでなく、低温ひび割れに対する抵抗性、わだち掘れに対する抵抗性、凍結融解期の支持力低下を適正に評価する必要性もあり、これらを考慮に入れた総合的な舗装構造設計手法を開発すべく、引き続き研究を進めているところである。

