配合の異なる混合物の疲労破壊特性に関 する検討

丸山 記美雄¹・岳本 秀人²・笠原 篤³

□正会員 独立行政法人北海道開発土木研究所(〒 062-8602札幌市豊平区平岸 1-3)

²正会員 独立行政法人北海道開発土木研究所(〒062-8602札幌市豊平区平岸1-3)

³フェロー 工博 北海道工業大学教授 工学部社会基盤工学科(〒 006-8585札幌市手稲区前田 7-15)

本研究の目的は,配合の異なる混合物の疲労破壊特性の差異やバラツキに関して検証し,疲労破壊 現象に関して検討を加えることである.

現道における疲労ひび割れ調査と室内での曲げ疲労試験結果から,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り,疲労破壊回数は正規分布に従うことや,アスコン層最下層に使用 する混合物配合によって,疲労破壊寿命が大きく異なることを実証した.

Key Words: fatigue cracking, fatigue failure, theoretical design method, fatigue failure criterion

1. **はじめに**

1948年に Hveem によって指摘され¹⁾,その後多く の研究者が発展させてきた舗装の疲労問題に関する 研究^{2)~11)}は,今日においても理論的設計法の導入 に際しての重要課題であり,様々な室内試験データ の蓄積や実道における検証を進める必要がある.

そこで,本研究では,配合の異なる混合物の疲労 破壊特性の差異やバラツキなど,アスファルト混合 物の疲労破壊現象に関して検討を加えることを目的 として,現場調査と室内試験の両面から検討を実施 した.

その結果,美々新試験道路において混合物配合の 違いが疲労ひび割れの発生時期に影響したものと推 測される結果が得られ,室内曲げ疲労試験からは, 異なる混合物の疲労破壊回数には統計的に有意な差 があり,現道の疲労ひび割れ発生状況に符合するこ とが確認され,混合物の破壊特性に関して幾つかの 知見を得たので,ここに報告する.

2. 美々新試験道路における混合物の疲労破壊

(1) 美々新試験道路の概要

美々新試験道路は舗装の構造設計手法の違いによ る長期パフォーマンスの検証¹²⁾と理論的設計法の確 立を目的として平成2年7月に一般国道36号苫小 牧市美沢に構築され,約13年が経過している.

試験道路は片側2車線の道路の内側車線部分に, 図-1に示す8つの試験断面を連続して設けている. 8断面の内4断面は日本において標準的に用いられ ている経験的設計手法であるT_A法によって設計さ れた断面(A, B, C, D断面)であり,他の4断面 は試行的に力学設計により設計された断面(T1-1, T1-2, T2-1, T2-2断面)となっている.

A, B, C, D 断面は北海道開発局で標準的に使用 されている舗装断面構成とし, T1-1, T1-2, T2-1, T2-2 断面は最下層の混合物種類を変化させ,混合 物の違いによる疲労破壊の差を検証することを目指 している.



図 -1 美々新試験道路の舗装断面と疲労破壊状況

(2) 路面調査による疲労ひび割れ発生状況

美々新試験道路において平成13年3月に写真-1のような疲労破壊によるひび割れ(以下,疲労ひ び割れ)の発生を確認した.ひび割れ率の経時変化 を図-2に示す.ひび割れが発生した断面はこの時 点でT1-1断面,A断面,T2-1断面の3つであり,ひ び割れ率は約5%前後であった.平成2年7月の供 用開始から約10年7箇月経過,累積49kN換算輪数 にして約920万輪/車線で疲労ひび割れの発生が確 認された事となる.

図 -2より,平成 13年3月に T1-1 断面,A断面, T2-1 断面に発生したひび割れはその後,徐々に進展した様子がわかる.最初は縦断方向のひび割れが 路面に現れ,やや遅れて魚の骨のように横方向のひ び割れが現れて亀甲状のひび割れとなっていく様子 が観察された.なお,平成14年3月の時点でわだ ち掘れが著しく,試験道路全区間において切削4cm + 改質型混合物によるオーバーレイ4cmの修繕が 施された.その後,平成15年10月に T1-1 断面,A 断面,T2-1 断面,B断面の4つの断面において再び ひび割れの発生を確認した.

ひび割れ発生の有無と舗装の断面構成厚の関係を 図-1において比較すると,疲労ひび割れが発生し た断面はいずれもアスコン層厚が12cm又は15cmで, アスコン層の最下層がアスファルト安定処理である





写真-1 A断面に発生した疲労ひび割れ

ことが分かる.アスコン層厚が同一厚さでもアスコ ン層最下層が粗粒度アスコンや密粒度アスコンで造 られた断面には疲労ひび割れの発生は認められてい ない点が特筆される.

交通荷重条件および環境条件は8つの断面が同一 であるため,混合物配合の違いが疲労ひび割れの発 生に影響したものと推測できる.つまり,アスファ ルト安定処理は,粗粒度アスコンや密粒度アスコン よりも疲労ひび割れが入りやすく,発生したひび割 れの進展速度が速いと推測された.

(3) 開削調査によるひび割れ発生状況

a) 開削調查方法

アスコン層下面からの疲労ひび割れの状況を確認 し,採取した供試体を室内疲労曲げ試験に用いる目 的で平成14年12月に開削調査を実施した.

開削は疲労ひび割れが発生している T1-1 断面に て車線幅 3.6m×奥行 1.5m の範囲で実施した.開削 調査位置は,表面までひび割れが到達していない部 分とした.車道全幅に対してコンクリートカッター によってアスコン層を横 45cm×奥行き 40cm×厚さ 12cm のブロック状に切断して採取し,切断面と裏 面に発生しているひび割れを目視確認した.

b) 疲労ひび割れ発生状況

車道全幅員からブロック状に採取した供試体を並 べて切断面と底面のひび割れ発生状況をスケッチし たものを図-3に示す.また,外側車輪通過位置(OWP) および内側車輪通過位置(IWP)から採取したブロッ ク状供試体の切断面と裏面のひび割れを写真-2,写 真-3に示す.

ひび割れはアスコン層底面から表面に向かって発 生しており,車輪通過位置から採取したブロック状 供試体にはひび割れが見られるが,それ以外の位置 にはひび割れが見られない.従って,これらのひび 割れは車両の載荷により発生した疲労ひび割れであ ることが確認された.

また,水平面上のひび割れ発生方向については, 車両進行方向(縦断方向)と直角方向(横断方向) の両方のひび割れが入っている事が分かる.特に, IWP部から採取したブロック状供試体においては, 横断方向のひび割れが多く見られるのに比べて,縦 断方向のひび割れがあまり見られない.路面に現れ る疲労ひび割れの観察では縦断方向のひび割れから 亀甲状のひび割れに進展したため、アスコン層下面 にも横断方向引張ひずみによって縦断方向のひび割 れが主に生じると推測していたが,採取供試体では 横断方向のひび割れが多く興味深い結果といえる.



写真-2 切取供試体の疲労ひび割れ (OWP-1供試体の側面および底面)

写真-3 切取供試体の疲労ひび割れ (IWP-1供試体の側面および底面)



ここで,図-4に示すモデルに対して順解析プロ グラム GAMES で算出したアスコン層下面の横断方向 と縦断方向のひずみ(x,y)の一例を図-5に 示す.引張りひずみの最大値はアスコン層下面の縦 断方向(y軸方向)に生じており,横断方向(x軸 方向)のひび割れが縦断方向(y軸方向)のひび割 れよりも発生しやすいことを示している.

今回採取した供試体から,縦断方向のひび割れと 横断方向のひび割れのいずれが先に入ったかは判断 できないが,疲労ひび割れの発生メカニズムに関し て,次のような仮説の提案を試みる.

アスコン層下面には車輪の載荷により,まず横断 方向のひび割れが幾つか発生する.それに伴い,連 担する梁の曲げのような状態となり,縦断方向のひ び割れが発生しやすくなる.アスコン層下面に発生 した横断方向のひび割れは載荷の影響がない非わだ ち部への進展が抑制されるため,表面までひび割れ が進展するのに時間を要するのに対し,縦断方向の ひび割れは縦断方向へ進展が容易で車両の載荷を縦 断方向のひび割れに沿って受けるため,縦ひび割れ のほうが先に路面に現れるという仮説である.



図-6 4点曲げ疲労試験概要図

表-1 試験混合物の配合

	最大	アス量	アス	空隙率
混合物種類	粒径(mm)	(%)	容積率(%)	(%)
アス安定処理(0-30)	30	4.5	10.0	8.4
粗粒度アスコン(20)	20	5.3	12.1	5.1
密粒度アスコン(13F)	13	5.4	12.6	3.6
現場切取供試体				
アス安定処理(0-30)				
上段:建設時配合值	30	4.0	9.5	7.5
下段: 実測値	30	4.4	10.3	6.7



図-7 室内作成供試体の作成方法

3. 室内試験による混合物の疲労破壊特性検討

(1) 室内試験の目的

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にのみ発生してい る状況を踏まえ,アスファルト安定処理,粗粒度ア スコン,密粒度アスコンの疲労破壊特性の差異に関 する基礎的データの取得と評価を目的に,図-6に 示す4点曲げ試験装置による繰返し曲げ疲労試験を 行った.試験は室内作成した供試体に対してと,現 場切取供試体に対しての2種類実施した.

(2) 室内試験方法

a) 室内作成供試体による試験方法

骨材やストアス 80-100 等の材料は同一の物を使 用して表 -1 の配合でアスファルト安定処理(0-30) と粗粒度アスコン(20)と密粒度アスコン(13F)の 3 混合物供試体を作成し(以下,混合物をアス安,粗 粒,密粒と称す),繰返し曲げ疲労試験を行った.

供試体は,図-7のようにまず15×8×40cmの 供試体を作成し,上下左右4面カットで5×5×40cm の供試体を2本切り出して必要本数を作成した.

表-2 試験条件と試験数量

試験区分	室内作成供試体			現場	暑採取伊	ŧ試体
試験温度	10			10		
載荷周波数	10Hz、サイン波			10Hz、	サイン	ノ波
ひずみレベル	200 µ	300 µ	400 µ	200 µ	300 µ	400 µ
試験数量	2本	20本	2本	2本	3本	2本
養生時間	6時間以上			6時間	以上	
制御方法	ひずみ制御		アンずみ	も制御		



試験条件と試験数量を表 -2 に示す.疲労破壊回 数の差とバラツキを統計的に検定するために,300 µのひずみで20本の試験を実施した.さらに,疲 労破壊規準式を作成するため,200 µと400 µのひ ずみで2本ずつの試験を実施した.破壊回数は図-8に示すように載荷重の変曲点から算出した.

b) 現場切取供試体に対する試験方法

アスコン層下面がアスファルト安定処理であるT1-1 断面の車輪の載荷の影響を受けていない部分(BWP 位置)から現場採取したブロック状供試体(45 × 40 × 12cm)を,図-9のようにカッター切断して5 × 5 × 40cmの曲げ疲労試験用供試体を作成した.試験 条件と数量を表-2 に示す.

(3) 室内試験結果および考察

a) 混合物による疲労破壊回数の差異

混合物による疲労破壊回数の差異を統計的に把握 するため,室内作成した各混合物供試体に対して300 µのひずみで20本の曲げ疲労試験を行った.疲労 破壊回数の度数分布と基本統計量を図-10に示す. 図における階級数はスタージェスの公式により算出 し,データ数 N=20 に対し5とした.混合物ごとに 疲労破壊回数の分布域が異なっていることがわかる.

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 安と粗粒,粗粒と密粒,アス安と密粒の母平均には 差があると判断され,アス安,粗粒,密粒の破壊回 数には統計的に有意な差があるといえる.その差は 破壊回数の平均値で,アス安を1とすると,粗粒は 4.3倍,密粒は7.7倍であり,アス安の疲労破壊回







図 -10 各混合物の破壊回数頻度分布 (上から、アス安、粗粒、密粒)

表-3 平均値の差の検定結果

	差の検定 (両側検定) 有意水準a=1%	差の検定 (片側検定) 有意水準a=1%
アス安定処理と	p =2.09×10 ⁻⁹ < a =0.01	p =1.31 × 10 ⁻⁹ < a =0.01
粗粒度アスコンの差	差がある	差がある
粗粒度アスコンと	p =8.36 × 10 ⁻¹⁰ < a =0.01	p =4.65 × 10 ⁻⁶ < a =0.01
密粒度アスコンの差	差がある	差がある
アス安定処理と	p =4.10 × 10 ⁻¹⁹ < a =0.01	p =2.43 × 10 ⁻¹⁹ < a =0.01
密粒度アスコンの差	差がある	差がある
		a 右音水準 n=右音確率

数が最も少ない.

実道におけるひび割れ調査結果で最下層がアス安の断面に疲労ひび割れが入り,粗粒や密粒の断面に は入っていない状況が見られるが,アスコン層最下 層混合物の疲労破壊回数の差が反映された有意な差 と考えられる.

b) 疲労破壊回数のバラツキ

疲労破壊は確率事象と位置づけられ,そのバラツ キを把握しておくことは,理論的設計法を確立する 上で重要である.そこで,破壊回数のバラツキに関 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.結果を表-4に示す.3混合物すべてが正規分 布に従うといえるが,対数正規分布に従うといえる のは安定処理と密粒の2種類であった.Pellらに よる同一条件下の回転片持ち梁の応力制御曲げ試験 結果²¹においては対数正規分布に従うと報告されて いるが,本検討においては正規分布とも判断できる 結果を得た.

また,正規分布としたときの変動係数は図-10に 示すように,10~35%程度となった.Monismithら による様々な混合物に対する4点曲げ試験(応力制 御,20)結果³⁾からは変動係数が概ね30~80%程 度,Tayebaliらの4点曲げ試験(応力制御,20)や ひずみ制御試験(20)結果⁴⁾からは99%,40%とあ るものに比べて,小さな変動係数が得られたといえ る.

c)室内試験での破壊規準式とAI規準式との比較

=300 µ での20本の試験結果に加え, =200 µ と400 µ で2本ずつの試験を実施した結果から,回 帰式により各混合物の疲労破壊規準式を式(1),式 (2),式(3)のように設定し,図-11に実線で示す. なお,疲労破壊規準式の設定にあたり,室内試験に おける載荷回数をそのまま49kN換算輪数にそのま ま置き換えて規準式として扱った.

表-4 破壊回数頻度分布の正規性検定結果

	対数止規分布への適合度検定		止規分布への適合度検定	
	判定指標	判定	判定指標	判定
アス安定処理	02 = 0.467	適合する	02 = 2.322	適合する
	2 = 5.992		2 = 5.992	
粗粒度アスコン	02 = 8.085	適合しない	o2 = 5.611	適合する
	2 = 5.992		2 = 5.992	
密粒度アスコン	02 = 1.843	適合する	o2 = 0.897	適合する
	2 = 5.992		2 = 5.992	
		o2: 自乗計	算值 2: 自乗	基準値



岱和 :N _{fa} = 10 ^{-12.36} × ^{-4.85} (1	1	J)
--	---	---	---

粗粒 :
$$N_{i} = 10^{-15.14} \times .^{-5.61}$$
 (2)

アス安: $N_{fA} = 10^{-15.13} \times f^{-5.46}$ (3)

ここで,

N_{fA}:アスファルト混合物層の許容 49kN 輪数 ,:アスコン層下面の引張ひずみ

混合物が異なっても, log - logN曲線の傾きは ほぼ同じであることがわかる.

次に,室内作成供試体のアス容積率と空隙率を, 式(4)に示すAI破壊規準式¹³⁾に代入した結果を図-11に点線で示す(10, E=8,000MPaとして算定).

$$N_{fA} = S_{A} \{ 18.4(C) (6.167 \times 10^{-5} t^{-3.291} E^{-0.854}) \}$$
(4)
 $\Box \subset \Box \subset C$

N_fA: アスファルト混合物層の許容 49kN輪数 S_A: 設定したひび割れ率による定数(0.75:5%) ,:アスコン層下面の引張ひずみ

C : C=10[™]

 $M=4.84\{V_{b}/(V_{b}+V_{v})-0.69\}$

Ⅴ,:混合物のアスファルト容積率(%)

V,:混合物の空隙率(%)

E:アスファルト混合物層の弾性係数(MPa)

室内試験の破壊規準式はAI破壊規準式よりも傾 きが小さく,混合物同士の線間隔が狭いことから若 干混合物間の破壊回数の差が小さく算定されること がわかる.

ひずみの値が 300 µ以上の領域では室内試験の破 壊規準式は AI 破壊規準式よりも破壊回数が1オー ダー程度小さく算定されるが,多層弾性理論による 設計ではアスコン層下面の引張ひずみを 50 ~ 200 µ程度として設定することが多く,このひずみ領域 では両式は破壊回数のオーダーが同じであり,実用 上の範囲において両式の差は比較的小さい.



d) 現場切取供試体の疲労破壊特性

美々新試験道路 T1-1 断面から採取した切取供試体を用いた曲げ疲労試験結果を図-12 に示す.

室内作成供試体のアス安の破壊規準よりも若干上 方に位置し,粗粒に近いものとなっている.log logN曲線の傾きは室内作成供試体のものよりも若 干大きくなっている.

表 - 1には現場切取供試体の空隙率を,回収試験 および最大比重試験により測定した結果を示してあ る.現場切取供試体の実測As容積率と空隙率は10.3% と6.7%であるが,試験道路建設時の配合設定値は 9.5%と7.5%である.このように,現場切取供試体 はAs容積率が大きくなり空隙率が小さくなる方向 に変化し,疲労破壊回数が多くなる方向に変化して いることがわかり,室内試験の結果もそれを裏づけ るものといえる.

4. 結論

本研究は、以下の様にまとめられる、

- 美々新試験道路のひび割れ実態調査から,疲労ひび割れが発生した断面はいずれもアスコン層の最下層がアスファルト安定処理であり,アスコン層厚が同一でもアスコン層最下層が粗粒度アスコンや密粒度アスコンで造られた断面には疲労ひび割れの発生は認められていない.混合物の疲労破壊特性の違いによりひび割れ発生時期に差が生じることが確認された.
- 2) アスコン層下面から発生する疲労ひび割れが, 横断方向と縦断方向の両方存在する事を示した. 順解析の結果も踏まえて,ひび割れの発生過程 に関して横断方向のひび割れが先に発生する可 能性を提示した.この仮説をとった場合,理論 的設計法を行なう場合に検討対象とするアスコ ン層下面のひずみの方向を横断方向とすべきか 縦断方向にすべきか議論が必要となる.
- 3) 同一条件下における曲げ疲労試験を実施した 結果,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り,美々新試験道路の疲 労ひび割れ発生状況に符合することを確認した. 疲労ひび割れの発生を抑制するには最下層に使 用する混合物を粗粒度アスコンや密粒度アスコ ンなどを使用することが有効な策と考えられる.

また,破壊回数の分布は変動係数 10 ~ 35%程 度の正規分布に適合した.疲労破壊時期に関し てもこの変動は含まれると考えられるため,破 壊時期予測や理論的設計法の精度検証を行なう 上で有益な知見が得られた。 5. **おわりに**

今後は,美々新試験道路において実測している交 通条件や温度条件データを基に,理論的設計法によ り累積疲労ダメージと疲労破壊年数を算出し,理論 的設計手法の妥当性に関して実証的な検討を行う予 定である.

最後に,本研究を行なうにあたり調査試験等で協 力を頂いた北海道工業大学修士課程の森本勝彦君(現 (株)ジオサーチ)に謝意を表する.

参考文献

- Hveem, F.N. and Carmny, R.M.: The factors underlying the rational design of pavements, HRB Research record, No.28, pp.101~136, 1948
- 2)Pell, P.S.: Fatigue characteristics of bitumen and bituminous mixes, Procs. of ICSDAP, pp.310 ~ 323, 1962
- 3)Monismith, C.L. and Deacon, J.A. : Fatigue of asphalt paving mixtures, Transportation Engineering Journal, ASCE, Vol.95, TE2, pp.317-346, 1969
- 4) Tayebali, A.A., Deacon J.A., Coplantz J.S., Harvey J.T. and Monismith C.L.: Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes, SHRP, SHRP-A-404, 1994
- 5) 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, pp.,1973.9
- 6) 笠原篤,菅原照雄:繰返し載荷過程におけるア スファルト混合物の動的性状の変化について,土 木学会論文報告集第235号,pp.87-98,1975.3
- 7)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.91-98,1981.2
- 8)姫野賢治・渡辺隆・丸山輝彦: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/ -4, pp.143-151,1986.2
- 9) 姫野賢治・渡辺隆・丸山輝彦: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/ -6,pp.259-268,1987.2
- 10) 桐山孝晴,中村俊行:アスファルト混合物の疲 労破壊規準について,土木学会第48回年次学術 講演会概要集 -389,pp.804-805,1993.9
- 11)皆方忠雄,七五三野茂,神谷恵三,竹田豪文: ギャップアスファルト混合物の疲労特性について, 土木学会第51回年次学術講演会概要集 -45, pp.90-91,1996.9
- 12)島多昭典,中川伸一,高橋守人:美々試験道路
 における舗装の長期パフォーマンスに関する研究, 第1回舗装工学講演会講演論文集,pp.197-204, 1996.12
- 13)(社)日本道路協会:舗装設計施工指針, pp.187-189,2001.12

STUDY ON THE FATIGUE FAILURE CHARACTERISTICS OF HOT ASPHALT MIXTURES WITH DIFFERENT MIXING PROPORTIONS OF COMPONENTS

Kimio MARUYAMA, Hideto TAKEMOTO and Atsushi KASAHARA

This study aims to examine hot asphalt mixtures in terms of 1) differences in fatigue failure characteristics with different mixing proportions of components, and 2) the distribution of the numbers of stress applications to reach of fatigue failure for hot asphalt mixtures.

Field surveys on fatigue cracking of roads in service and laboratory tests on stress fatigue confirmed that hot asphalt mixtures with different mix proportions differ to a statistically significant degree in the number of stress applications to reach fatigue failure. The life of the asphalt concrete layer is depends greatly on the mixing proportions of components of the bottom layer.