# ー軸繰返し圧縮・引張載荷実験に基づく アスファルト混合物のスティフネス変化

前川亮太<sup>1</sup>·和地敬<sup>2</sup>·姫野賢治<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 中央大学大学院理工学研究科(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)
E-mail: maekawa@civil.chuo-u.ac.jp
<sup>2</sup>中日本高速道路株式会社 静岡保全・サービスセンター(〒422-8046 静岡市駿河区中島 235-1)
<sup>3</sup>フェロー会員 中央大学理工学部都市環境学科(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

繰返し載荷を受けるアスファルト混合物の疲労挙動は,載荷エネルギーの大きさ,載荷速度,載荷休止時間等の 様々な因子の影響を受けると考えられており,その挙動予測が困難である.本研究では,ストレートアスファルト 混合物および改質Ⅱ型アスファルト混合物を対象に,疲労挙動のうちスティフネスの変化に着目し,初期または早 期の繰返し載荷時におけるスティフネスの変化傾向の分析を通じて,終期の疲労挙動の予測を試みた.その結果, 載荷ひずみ量が一定以上であれば,載荷早期のスティフネス変化傾向から,破壊到達載荷回数を予測できる可能性 があることなどが確認できた.

Key Words : asphalt concrete, stiffness, push-pull fatigue test, straight asphalt, modified asphalt

### 1. 本研究の背景

舗装を安全に維持管理するには、疲労の進行に応じた アスファルト混合物の挙動を適切に把握することが重要 である.しかし、アスファルト混合物の疲労現象は、数 多くの要因から影響を受けると考えられており、その代 表的な要因として、バインダや骨材などの材料特性の違 い、載荷エネルギーの大きさ、載荷速度、載荷休止期間 および温度などが挙げられる<sup>1233</sup>.これら多くの要因によ り、アスファルト混合物の疲労挙動は複雑であり、定量 的な挙動の評価が困難とされている.

既往の研究では、疲労挙動を示す代表的な物理量のひとつとしてスティフネスが挙げられており<sup>244</sup>、繰り返し載荷時におけるアスファルト混合物は、疲労破壊状態が近づくにつれてスティフネスが低下することが確認されている<sup>5)</sup>.特にひずみ制御の繰返し載荷時では、スティフネスが図-1のように3段階に変化することが確認されている<sup>6)</sup>.図-1のうち、疲労ダメージによってスティフネスが緩やかに低下する Phase II について、スティフネスの変化と破壊到達載荷回数の関係が明らかにされてきたところである<sup>260</sup>.

本研究では、既往の研究で明らかにされていなかった、 載荷初期または早期のアスファルト混合物のスティフネ ス(図-1における Phase I)と、疲労を蓄積した終期のステ



ィフネスとの関係の解明を試みた.このことにより,早期のアスファルト混合物のスティフネスを基に終期のスティフネスの予測が期待でき,ひいては実際の舗装におけるライフサイクル予測等,舗装の維持管理実務の充実 に資すると考えた.

また,既往の研究では新規のストレートアスファルト (以下, StAs という)混合物のみを対象としていたが,本研 究では,重交通道路や重荷重舗装において一般的に利用 されている改質アスファルトを研究の対象に加えている. また,実際の舗装が紫外線等により劣化することを考慮 し,熱劣化させたバインダを用いた混合物を検討対象に 加え,劣化によるスティフネスの変化を検証している.

## 2. 本研究の目的

本研究の目的は、一軸圧縮・引張載荷実験に基づいて、 以下の3点を実現することである.

- 1) 初期または早期のアスファルト混合物のスティフネ ス変化傾向に基づく、破壊到達載荷回数の予測
- 2) StAs および改質 II 型の2 種類のバインダがスティフネ スの変化に与える影響の把握

3) StAs の劣化がスティフネスの変化に与える影響の把握

# 3. 室内試験

今回の研究で用いた試験条件を表-1に示すとともに、 試験内容、供試体、載荷条件について以下に詳しく述べ る.

表─1 試験条件	
供試体寸法	直径75mm,高さ120mmの円筒形
バインダの種類	StAs(60/80), 改質Ⅱ型
制御モード	ひずみ制御
ひずみ振幅	20µ~260µ
載荷波形	正弦波,5Hz
試験温度	10°C

### (1) 一軸圧縮·引張載荷試験

本研究ではアスファルト混合物供試体に繰返し荷重を 与えるにあたり、一軸圧縮・引張載荷試験機を用いた(写 真-1). 繰返し載荷実験は、供試体に曲げ荷重を載荷させ る形態が一般的であるが<sup>7</sup>,曲げ荷重載荷と比べた場合の 一軸圧縮・引張荷重載荷の利点として、理論上の最大応 力の発生箇所が線ではなく面となることが挙げられる. このことから、一軸圧縮・引張荷重載荷試験を適用する ことにより、供試体中の骨材配置などの局所的な条件の 差違が、混合物のスティフネスや破壊到達載荷回数とい った供試体全体を評価する試験結果に及ぼす影響が小さ くなることが期待できた.

## (2) アスファルト混合物供試体

供試体寸法は試験装置の仕様により直径 7.5cm 高さ 12cm の円筒形とした.供試体の作製方法として、300× 300×100mm に転圧されたアスファルト混合物1体から 直径 7.5cm 高さ 12cm の円筒形供試体 6 本をコア採取し、



写真-1 一軸E縮・引張載荷試験装置

供試体間の寸法のばらつきが可能な限り小さくなるよう 表面を研磨する方法を採用した.

載荷治具および供試体を写真-2に示す。供試体の上面 および下面に載荷治具を接着させることにより、一軸方 向の引張荷重の載荷を可能としている.

供試体に生じるひずみは、供試体の円周上に 120°間隔 で設置した3機のひずみ計により測定した. 各ひずみ計 は上下方向に 80mm の離隔で並んだ 2 点が供試体に接し ており、試験中の離隔を常時計測測定することによりひ ずみを算出する計器であり、 今回の各実験では供試体の 鉛直方向の中央に設置した.従って今回のひずみ計から 得られるひずみ量は、高さ 12cm のうち中央部 8cm 間に おける平均ひずみを示している. なお, 以降に示すひず みおよびスティフネスは、供試体ごと3機のひずみ計に よる値の平均値を基に算出している.

試験温度は、予備実験において荷重の制御がより安定 していた10℃とした.

供試体はストレートアスファルト(60/80)を用いた最大 骨材粒径 13mm の密粒度アスファルト混合物とし、アス ファルト量は5.8%,骨材粒度は中央粒度とした.



写真-2供試体と各種装置



## 4. 載荷試験の結果

## (1)破壊に至る載荷回数

劣化させていない新規の StAs 混合物および改質Ⅱ型混 合物について、ひずみ制御により繰返し載荷試験を行っ た.制御したひずみ振幅と破壊到達載荷回数の関係を図 -2 に示す.図-2 では、供試体1体の試験結果をひとつの プロットとして表している.

ひずみ制御下では載荷回数が大きくなっても供試体の 破断には至らないケースが多いため,混合物の破壊の定 義は既往の文献を参考に設定した<sup>2)8)</sup>.具体的には,供試 体のスティフネスが載荷初期のスティフネスに対して 50%に低下した時点を破壊とし,その時の載荷回数を破 壊到達載荷回数とした.なお載荷初期とは,試験機の載 荷が安定する載荷 500 回の時点とした.

また, 概ね載荷回数 100 万回を限度として, 所定載荷 回数内で試験が終了しない供試体については, 既往の研 究<sup>2) 9</sup>で示されている式(1)および式(2)から破壊到達載荷 回数を推定した.

$$y = 0.24x^{-0.997} \tag{1}$$

$$y = \frac{|S_2 - S_1|}{(N_2 - N_1)S_{0i}} + \frac{|W_2 - W_1|}{(N_2 - N_1)W_0} \cdot \frac{C_i(S_0 - S_{0i})}{S_{0i}} \quad (2)$$

ここに、y: Phase II の任意の区間( $N_1 \sim N_2$ )でのスティフネ スの変化率、x: 破壊到達載荷回数、 $S_0 \sim S_2$ : 図-3 に示す スティフネス(Pa)、 $W_0$ 、 $W_1$ ,  $W_2$ : 載荷 1 回目、 $N_1$ 回目、  $N_2$ 回目における 1 周期あたりの散逸エネルギ(J/m<sup>3</sup>)、*Ci*: 載荷回数に応じた係数である.式(1)は、最大骨材粒径 13mmの密粒度アスファルト混合物が 10°C で繰返し載荷 を受ける時の、スティフネス変化率と破壊到達載荷回数 の関係式であり、バインダの種類によらず適用可能であ



ることが既往の研究<sup>9</sup>で示されている.載荷回数が概ね 100万回を超過する供試体については,測定されたスティ フネス変化率を用いて,式(1)より破壊到達載荷回数を推 定した.

図-2から、StAsと改質Ⅱ型のバインダ種類の違いにより破壊到達載荷回数に差が見られる. 同一ひずみ振幅で比較すると改質Ⅱ混合物は、StAs混合物と比べてひずみ振幅が概ね100µ以上では破壊到達載荷回数が大きく、疲労寿命が長いことが確認された.

一方でひずみ振幅が概ね100µ以下では、前述の推定式 によって破壊到達載荷回数を算出した供試体が多いため 一概には評価できないが、結果的にはバインダ種類によ る差が小さかった.

#### (2) スティフネス変化の評価方法

前述のとおり、ひずみ制御の繰返し載荷を受けるアスファルト混合物のスティフネスは、図-1のように3つの段階(Phase I から PhaseIII)に変化するとされている.図-1は本研究で得られた StAs 混合物におけるスティフネス変化の一例であったが、改質II型混合物においても同様に、Phase I から PhaseIIIの変化が見られた.改質II型混合物におけるスティフネス変化の一例を図-4に示す.



図−4 改質Ⅱ型混合物のスティフネスの変化例

前述のとおり本研究では、Phase I のスティフネス変化 の傾向と、終局的な疲労性状(破壊到達載荷回数)の関係に ついて分析する. 図-1 および図-4 はそれぞれ StAs 混合 物および改質 II 型混合物のスティフネス変化を示した図 であるが、Phase I のスティフネス変化を拡大して示した 図をそれぞれ図-5(StAs 混合物)および図-6(改質 II 型混合 物)に示す. 図-5 および図-6 はいずれも制御したひずみ が同一(170μ)の結果であり、StAs 混合物と改質 II 型混合 物との間で初期スティフネスに大きな差は見られず、 Phase I から Phase II に遷移する際の載荷回数も同程度で ある. 一方でスティフネスの減少速度は StAs の方が大き



いことが確認できる.

図-5 Phase I を拡大したスティフネス変化例(StAs 混合物)



図-6 Phase I を拡大したスティフネスの変化例(改質II型)

他の制御ひずみ値による試験結果全般について Phase I のスティフネス変化を分析した.具体的には下記の 3 つの観点から分析を行った.

- 1) 初期スティフネスに対する, Phase I 終了時のスティフ ネスの割合(以下, スティフネス比という)
- 2) Phase I 終了時(Phase II への遷移時)の載荷回数
- Phase I でのスティフネス低下速度(スティフネス曲線の傾き)

スティフネスの変化は図-1および図-4にみられるよう に3段階(Phase I ~Ⅲ)を得ることが明らかになっている が、既往の研究では Phase I と Phase II の遷移点を明確に 特定する定義はない. そこで、Phase II ではスティフネス 変化が直線的にほぼ一定となることに着目して、スティ フネス変化曲線の曲率(式(3))から遷移点の特定を行った.

$$C = \frac{d^2 S}{dN^2} \tag{3}$$

ここに, *C*:スティフネス変化曲線の曲率, *S*:スティフ ネス, *N*:載荷回数である.

図-7 は載荷10,000 回目までの C の算出結果の一例である. C は載荷初期において比較的高い値を示しているが, 載荷1,000 回以降は10<sup>7</sup>以下の値となっている.



図-7  $d^2S/dN^2$  と載荷回数の例(StAs 混合物)



図-8  $d^2S/dN^2$  と載荷回数の例(StAs 混合物)

図-7 と同一の供試体について、破壊までの全ての載荷 回数における C の算出結果を図-8 に示す.図-8 では載荷 10,000 回以降も C が 10<sup>7</sup>以下の値となっていた.他の供 試体についても同様に、10,000 回以内の一定載荷後は C の値が大きくても 10<sup>7</sup> 以下の値となっていたことから、 本研究では C が 10<sup>7</sup> を下回った時を Phase I の終了(Phase II への遷移)と設定した.

この設定に基づき,以下に前述の 1)~3)の観点からの 分析結果を示す.



図-9 スティフネス比

# (3) 初期スティフネスに対する Phase I 終了時のスティ フネスの割合(スティフネス比)

上記の手法で Phase I の終了載荷回数を算出した結果 を踏まえて、Phase I 終了時の載荷回時スティフネスを初 期スティフネスで除した値(スティフネス比)を算出した. なお初期とは、試験機の載荷が安定する載荷 500 回の時 点とした.結果を図-9 に示す.

図-9より StAs 混合物および改質Ⅱ型混合物ともに, 概ね 100µ以下の小さいひずみ振幅であればスティフネス比が大きい(初期スティフネスに対して Phase I の間のスティフネス減少割合が小さい)ことが確認できた.

同時に、概ね100µ以上の大きいひずみ振幅であればス ティフネス比が小さい(初期スティフネスに対して Phase Iの間のスティフネス減少割合が大きい)ことが確認で きた.さらに、ひずみ振幅が概ね100µ以上の場合は、StAs 混合物と改質II型混合物との間にスティフネス比に比較 的大きい違いが見られ、250µであればスティフネス比は StAs 混合物で0.75 程度、改質II型混合物で0.85 程度とな った.

ひずみ振幅が概ね 100µ以上の場合に, StAs と改質Ⅱ型 とで差が確認できたことは,図-2 で述べた破壊到達載荷 回数に関する傾向と同様であったことから,図-2 と図-9 を結びつけ,ひずみ振幅が 100µ以上であれば Phase I ス ティフネス比から破壊到達載回数を推定し得る可能性が あると考え, Phase I スティフネス比と破壊到達載荷回数 の関係を分析した.その結果を図-10 に示す.

図-10より, Phase I のスティフネス比が概ね 0.95 より 大きい場合(すなわち図-9 においてひずみ振幅が 100µ以 下であった場合)は、スティフネス比から破壊到達載荷回 数を推定することは困難であるが、Phase I のスティフネ ス比が概ね 0.95 より小さい場合(すなわち図-9 において ひずみ振幅が 100µより大きい場合)は、StAs 混合物と改 質 II 型混合物それぞれで破壊到達載荷回数に一定の傾向 が確認でき、Phase I スティフネス比を使用した破壊到達 載荷回数の予測ができる可能性があることが確認できた.



図-10 Phase I スティフネス比と破壊到達載荷回数の関係

#### (4) Phase I 終了時 (Phase II への遷移時) の載荷回数

次に Phase I から Phase II への遷移に要した載荷回数の 分析を行った. その結果を図-11 に示す.

図-11 より、StAs 混合物と改質Ⅱ型混合物の場合とも に、ひずみ振幅 30µから 250µの広範囲にわたって、Phase Iから Phase II への遷移に要した載荷回数はひずみ振幅 によらず一様に 3,000 回以下となった.ひずみ振幅 20µに 関してはばらつきが大きいが、Phase II への遷移に 7,000 回以上の載荷を要した試験結果が確認された.

# (5) Phase I でのスティフネス低下速度(スティフネス 曲線の傾き)

次にスティフネス低下速度(スティフネス曲線の傾き) に関する分析を行った. Phase I における1回載荷あたり のスティフネス変化とひずみ振幅の関係を図-12 に示す. 図-12 より, StAs 混合物と改質 II 型混合物を比較すると, 概ね 100μ以下であればばらつきが大きく両者の差違が確 認できないが, 100μ以上であれば1回載荷あたりのステ ィフネス変化に差違が確認できる.



図-11 Phase I 載荷回数



図-12 Phase I 1回載荷あたりのスティフネスの変化

以上がPhase I に関する3つの観点からの分析結果である. 次に Phase II におけるスティフネス変化について, StAs 混合物と改質 II 型混合物の比較分析を示す.

# (6) Phase II におけるスティフネス変化

Phase II スティフネス比に関して、破壊に至った混合物 に対して検討を行った.破壊に至らなかった混合物(図-2 において推定値を用いているもの)については、Phase II の 終了が明確ではなかったことから、本項の分析対象とは していない.

Phase II スティフネス比の定義を、Phase II 終了時のスティフネスを Phase II 開始時のスティフネスで除した値とした. 検討結果を図-13 に示す.

図-13 より両バインダ種においてひずみ振幅が大きくなるに従い、スティフネス比が大きくなる(Phase II でのスティフネス低下が小さくなる)傾向が確認できた. これは 図-9 と合わせて考えると、ひずみ振幅が大きい場合は既 に Phase I において大きなスティフネス低下が発生して いるため、Phase II でのスティフネス低下が小さくなった ものと考えられる.

また、StAs と改質II型の比較については、図-9 で述べた Phase I の傾向とは逆に、StAs 混合物の方が高いスティフネス比を示した. StAs 混合物の方が Phase I において大きなスティフネス低下が発生しているため、Phase II でのスティフネス低下が小さくなったものと考えられる.

次にPhase II における1回載荷あたりのスティフネスの 変化を図−14 に示す.1回載荷あたりのスティフネスの変 化は破壊に至らなかった供試体でも測定することが可能 であるため、図−14 では図−13 とは異なり、試験を行った 全ての供試体について示している.

図−14よりPhase II において概ね100µ以上のひずみ振幅 について, StAs 混合物と改質 II 型混合物において1回載 荷あたりの変化に差が生ずる.



図-14 Phase II載荷1回あたりのスティフネス変化

換言すれば、StAs 混合物に比べて改質Ⅱ型混合物は、 比較的大きいひずみ振幅であってもスティフネス低下の 進行を抑制することが可能であることが確認できた.

#### (7) バインダの熱劣化による影響の検証

StAs 混合物を対象に, バインダの劣化が疲労に伴うス ティフネス変化に及ぼす影響を検証するため, StAs を対 象に熱劣化をしたバインダを用いて混合物供試体を作成 し,同様の載荷試験を行った.供試体作成方法は, StAs と骨材を練り混ぜ後にバットに敷きならし,120℃の恒温 槽に24時間または48時間養生した後,未劣化のものと 同様の密度となるよう締固めおよび成形した.

StAs熱劣化混合物についてはひずみ振幅120μにおいて試 験を行った.未劣化,24時間劣化,48時間劣化それぞれ 供試体2体ずつを試験している.以下に,試験結果を未 劣化の供試体のものと比較する形で示す.

Phase I のスティフネス比の結果を図-15 に示す. 未劣 化の混合物と比較して劣化バインダによる混合物は, Phase I におけるスティフネスの低下比率が大きくなった.









次に Phase I から Phase II への遷移時の載荷回数につい て図-16 に示す.一見したところ 48 時間劣化による混合 物が高い載荷回数であるように見受けられるが,図-11 のとおり他のひずみ振幅による結果と照らし合わせて考 えると,一定量のばらつきが見られることから,熱劣化 による差違と考えることは妥当ではない.図-11 による結 果も踏まえて,本研究の結果からはバインダ種およびバ インダの劣化状況によらず,Phase I の載荷回数が 3,000 回以下で終了する可能性があると言える.なお,破壊到 達載荷回数については,熱劣化供試体とストアスの未劣 化を比較して顕著な違いは確認できなかった.

## 5. 結論

本研究では、一軸圧縮・引張載荷実験に基づいて、初 期または早期(Phase I)のアスファルト混合物のスティフ ネス変化傾向を中心に分析をすることにより、破壊到達 載荷回数の予測をはじめ、バインダの違いがスティフネ スの変化傾向に及ぼす影響を検証した.本研究で得られ た知見は以下のとおりである.

 破壊到達載荷回数について同一ひずみ振幅で比較す ると、ひずみ振幅が概ね100µ以上では改質Ⅱ混合物が StAs 混合物と比べて破壊到達載荷回数が大きく,疲労 寿命が長いことが確認された.

- 2) Phase I のスティフネス比が概ね 0.95 より小さい場合 (ひずみ振幅が 100µより大きい場合)は、StAs 混合物と 改質Ⅱ型混合物それぞれついてひずみ振幅に対する破 壊到達載荷回数に一定の傾向が確認でき、Phase I ステ ィフネス比を使用した破壊到達載荷回数の予測ができ る可能性があることが確認できた.
- 3) Phase I から Phase II への遷移に要した載荷回数につい て、ひずみ振幅 30µから 250µの広範囲にわたって、バ インダ種類およびひずみ振幅によらず載荷回数が一様 に 3,000 回以下であることが確認できた.
- 4) Phase Ⅱにおいて StAs 混合物に比べて改質Ⅱ型混合物 は、比較的大きいひずみ振幅であってもスティフネス 低下の進行を抑制することが可能であることが確認で きた.
- 5) バインダの熱劣化により、 Phase I におけるスティフ ネスの低下比率が大きくなるが、 Phase II への遷移に要 する載荷回数への影響は小さいことが確認できた.

今後は劣化に関する検証を一層進めるとともに、本研 究で得られたスティフネス変化が発生するメカニズムの 解明に取り組んでいく所存である.具体的には、載荷回 数の増加に応じて発生すると考えられているマイクロク ラックがスティフネス変化に及ぼす影響の把握に主眼を 置き、アスファルト混合物の微視的な形状変化観測や、 破壊力学を用いた解析などにより、より有益な成果を得 たいと考えている.

#### 参考文献

- Olard F., Di Benedetto. H: The "DBN" Model a Thermo-Visco-Elasto-Plastic Approach for Pavement Behavior Modeling, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists 2005.
- 2) 向後憲一,姫野賢治:載荷波形および休止時間の違いがア スファルト混合物の疲労挙動に及ぼす影響,土木学会舗装 工学論文集第12巻,pp83-89,2007.12.
- D. Shields, M. Zeng, and R. Kwok: Nonlinear Viscoelastic Behavior of Asphalt Concrete in Stress Relaxation, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol.67, 2006.
- Di Benedetto. H, B. Delaporte, and C. Sauzeat: Three-Dimensional Linear Behavior of Bituminous Materials, ASCE International Journal of Geomechanics, vol.7 number2, pp.149-157, 2007.
- 5) 前川亮太,渡邉将紀,姫野賢治,松井邦人,小澤良明:一 軸繰返し圧縮・引張載荷実験に基づくアスファルト混合物 のひずみ特性,土木学会舗装工学論文集第14巻,pp101-107, 2009.12.

- 6) Di Benedetto, H., de La Roche, C., Baaj, H., Pronk, A., and Lundstrom, R. : Fatigue of Bituminous Mixtures, RILEM TC 182-PEB Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, Materials and Structures, Vol.37, pp.202-216, Apr., 2004.
- 7) 日本道路協会:舗装調査・試験法便覧第3分冊, pp.[3]166-[3]175
- 8) P. Ullidtz: Pavement Analysis, pp.179, 1987.
- 68 向後憲一:載荷条件の違いに着目したアスファルト混合物の疲労挙動に関する研究,学位論文, pp92-93, 2009.3.

# CHARACTERIZATION OF ASPHALT MIXTURE STIFFNESS ON PUSH-PULL FATIGUE TEST

## Ryota MAEKAWA, Takashi WACHI and Kenji HIMENO

There are many aspects that affect the behavior of asphalt mixture under the condition of repeated loadings. Some examples of the aspects are loading intensity, loading rate, rest time and so on. Because of them, it has been thought quite difficult to evaluate the behavior of asphalt mixture under fatigue damaged conditions. In order to investigate it, strain-controlled push-pull fatigue tests were carried out for dense graded asphalt mixtures with straight asphalt and modified asphalt. Based on the investigations of stiffness variations, it was made clear that the number of load applications to failure might be predicted from stiffness variations in the beginning of loadings.