

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

前川亮太¹・渡邊将紀²・姫野賢治³・松井邦人⁴・小澤良明⁵

¹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

²学生会員 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)

³フェロー 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)

⁴フェロー 東京電機大学建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

⁵正会員 センチュリテクノ(株) (〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町 2-8)

繰返し載荷を受けるアスファルト混合物の応力・ひずみの関係は、載荷エネルギーの大きさ、載荷速度、載荷休止時間等の影響を受けるとされているが、応力・ひずみ挙動のモデルについては定説がない。本研究では、繰返し載荷を受けるアスファルト混合物の応力・ひずみ挙動のモデル化の一端として、荷重および載荷振動数がアスファルト混合物のひずみに与える影響を、室内実験および粘弾性解析から分析した。その結果、載荷ごとに蓄積される塑性ひずみが圧縮方向に発生するとともに、一定の載荷回数に達するとその進行速度が急激に高まることが確認できた。ひずみ振幅、位相角については一定の載荷回数で増加傾向、ポアソン比については減少傾向となることが確認できた。加えて粘弾性解析により、載荷回数に応じた弾性・粘性係数を把握した。

Key Words : asphalt concrete, tension-compression fatigue test, plastic deformation, visco-elasticity

1. はじめに

道路や空港等で用いられるアスファルト混合物の主要な損傷形態として、交通荷重の累積による疲労ひび割れやわだち掘れなどの塑性変形が挙げられるが、これらの損傷の進行に影響を与える要因は非常に複雑である。損傷の進行をより正確に予測するためには、交通荷重によってアスファルト混合物に発生する応力とひずみの関係を定量的に把握することが重要である。

アスファルト混合物の応力・ひずみの関係は一般的に粘弾性モデルを用いて表現される¹⁾²⁾。供用中のアスファルトコンクリート舗装のように繰返し載荷を受ける場合の応力・ひずみの関係は、載荷エネルギーの大きさ、載荷速度、載荷休止時間、温度および疲労の進行度合い等の影響³⁾⁴⁾⁵⁾を受け、線形粘弾性のみならず非線形粘弾性や粘弾塑性など様々な挙動を示す⁶⁾⁷⁾とされている。しかし、種々の繰返し荷重によってアスファルト混合物に発生する応力・ひずみ挙動に関し、粘弾性挙動と塑性挙動の双方を対象に実験に基づいて定量的に示したモデルは、筆者の知る範囲で構築されていない。

本研究では、繰返し載荷を受けるアスファルト混合物の応力・ひずみ挙動のモデル化の一助とすべく、載荷重および載荷振動数がアスファルト混合物のひずみに与え

る影響を、室内実験に基づいて粘弾性と塑性それぞれの観点から分析した。

円筒供試体の長軸方向を対象に圧縮・引張の室内繰返し載荷試験を、3種類の載荷重および2種類の載荷振動数を採用して荷重制御で実施した。載荷中のひずみを測定し、載荷回数を重ねることによりアスファルト混合物の鉛直方向に累積的に発生する圧縮ひずみ（本稿では蓄積ひずみと表現）について、載荷に起因する量と混合物の自重に起因する量のそれぞれについて定量的な把握を試みた。また、載荷サイクルに対応して発生するひずみの振幅、位相角および水平方向のひずみについて分析を実施した。

2. 室内実験の概要

円筒供試体を用いて一軸繰返し載荷試験を行った。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。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、供試体間の寸法



a)二点間ひずみ計



b)貼付型ひずみゲージ

写真-1 供試体とひずみ測定装置

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。

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°C とした。

鉛直方向のひずみに着目した「試験その 1」と鉛直・水平方向のひずみの関係に着目した「試験その 2」を実施し、ひずみの測定は試験その 1 では二点間ひずみ計を、試験その 2 では貼付型ひずみゲージを用いている（写真-1）。

試験その 1 で用いた二点間ひずみ計とは、試験開始前に 80mm の離隔を有した 2 点について、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。従って以降に示す試験その 1 で示すひずみ測定値とは、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。

試験その 2 で用いた貼付型ひずみゲージとは、鉛直方向および水平方向ともに 40mm の長さを有した電気計測式のひずみゲージであり、今回の各実験では供試体の鉛直方向の中央に設置した。

表-1 試験条件一覧

	試験その 1 ※詳細は表-2	試験その 2
供試体 寸法	φ75mm×h 120mm	
供試体 配合	ストレートアスファルト(60/80), 骨材最大粒径13mm	
試験温度	10°C	
荷重 振動数	5Hzまたは10Hz	5Hz
荷重の 制御方法	3000N, 5000N, 6000N の荷重制御 (それぞれ0.68MPa, 1.13MPa, 1.36MPaの 応力制御に相当)	5000Nの荷重制御 (1.13MPaの応力 制御に相当)
荷重波形	引張・圧縮を交互に正弦波で荷重 荷重ごとの休止時間はなし	
ひずみ 測定方法	二点間ひずみ計により 鉛直方向のひずみを測定	貼付型ひずみゲージにより 鉛直・水平両方向のひ ずみを測定

表-2 試験その 1

種類	制御荷重 (N)	荷重 振動数 (Hz)	破壊到達 荷重回数	備考
type1	3,000	5.0	33万回	0.68MPaの応力制御に相当
type2	5,000	5.0	7.7万回	1.13MPaの応力制御に相当
type3	6,000	5.0	2.7万回	1.36MPaの応力制御に相当
type4	5,000	10.0	1.2万回	1.13MPaの応力制御に相当

従って以降に示す試験その 2 で示すひずみ測定値とは、鉛直方向は高さ 12cm のうち中央部 4cm 間における平均ひずみを、水平方向は高さ 6cm の位置の円周 10.05cm のうち 4cm 間における円周方向の平均ひずみを示している。試験その 1 および試験その 2 の試験条件を表-1 に示す。

3. 鉛直方向のひずみ挙動（試験その 1）

供試体が一定荷重を繰返して受けた際の鉛直方向のひずみ挙動について、試験その 1 として実験を行った。供試体種類を表-2 に示す。供試体として type1 から type4 までの 4 種類を 1 本ずつ設け、type1 から type3 については荷重振動数を一定(5.0Hz)としつつ制御荷重をそれぞれ別の値に設定した。Type4 は 5,000N の制御荷重で荷重振動数を 10.0Hz とした。4 種類いずれの供試体も破壊に至り、破壊形態はいずれも、引張応力荷重時に応力直角方向を破断面とした瞬間的な破断であった。

(1) 荷重に伴うひずみの蓄積

測定結果の例として type2(1.13MPa 応力制御, 5Hz)に関する主な荷重回数ごとの応力とひずみの関係を図-1 から図-4 に示す。図-1(荷重 100 回目)では荷重応力とひずみがともに圧縮および引張が生じない原点を中心に振動しているが、図-2(荷重 1,000 回目)以降、荷重が進むにつれてひずみの振動の中心が圧縮方向に増加する現象が確認できた。この現象は type1 から type4 の全ての供試体種類において確認できた。本稿では以降、図-2 に示すとおり、ひずみ振幅の中心の値を蓄積ひずみと表現することとし、幾つかの分析を行うこととする。

供試体種類ごとの蓄積ひずみの推移を図-5 に示す。図-5 のとおり、いずれの供試体においても荷重回数が増すにしたがって圧縮方向に蓄積ひずみが大きくなり、概ね 10,000 回の荷重を境として蓄積ひずみの進行速度が高まることが確認できた。

前述のとおり、いずれの供試体も破壊形態は引張応力荷重時の破断であったが、一方で破壊に至るまでは圧縮方向に蓄積ひずみが進行した。蓄積ひずみが圧縮方向に進行する原因については、アスファルト混合物の自重によるクリープの進行が一因であると推察される。そこで、荷重がない場合の自重による供試体の変形について、荷重実験と同一条件の 10°C における環境下で鉛直方向ひず

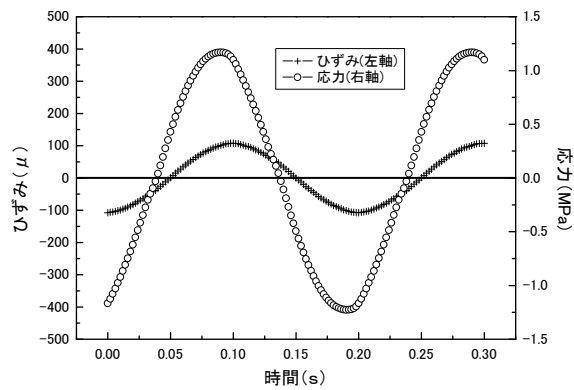


図-1 応力とひずみの関係(type2・100回目)

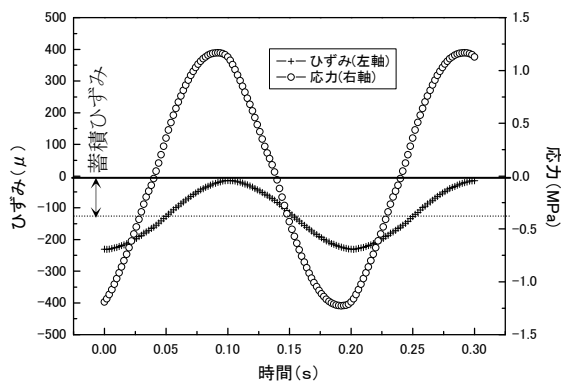


図-2 応力とひずみの関係(type2・1,000回目)

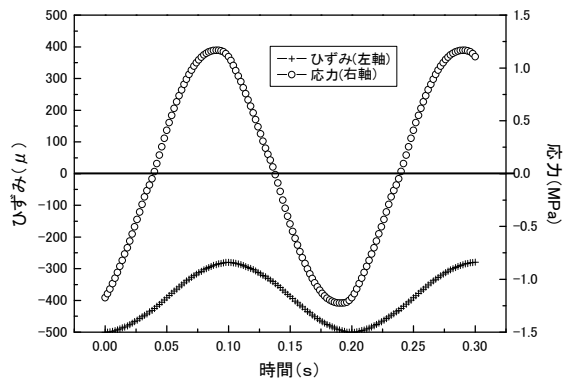
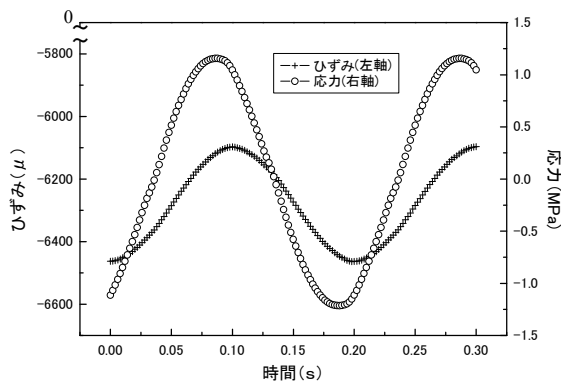


図-3 応力とひずみの関係(type2・3,000回目)



※左軸の範囲は先の3つの図とは異なる

図-4 応力とひずみの関係(type2・500,000回目)

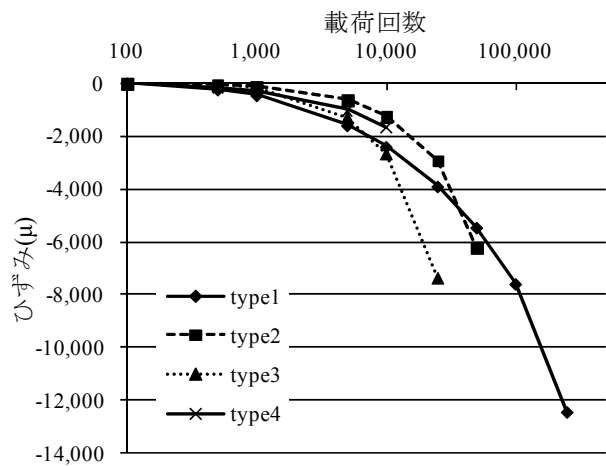


図-5 蓄積ひずみ測定結果

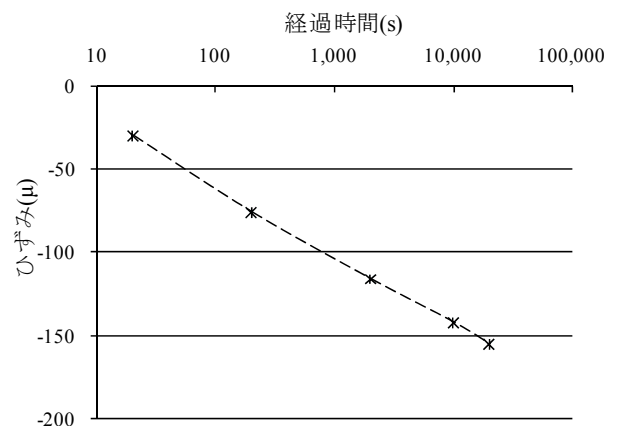


図-6 自重によるひずみの進行

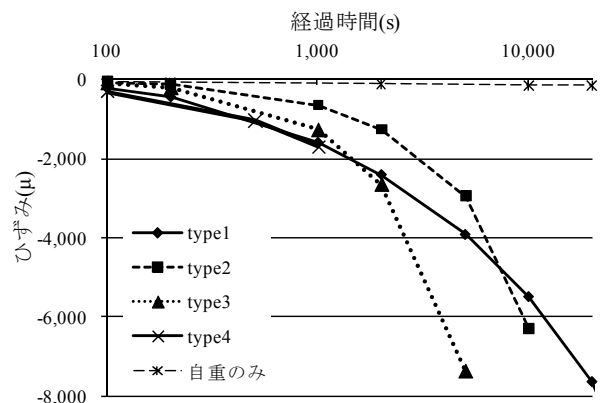


図-7 荷重による蓄積ひずみと自重によるひずみ

荷重実験を伴う蓄積ひずみと比べて自重のみにより発生するひずみは小さく、繰返し荷重に起因する圧縮方向の塑性変形が蓄積ひずみとして測定されていると考えられる。

(2) 荷重によるひずみ振幅および位相角の変化

荷重回数の増加に伴うひずみ振幅の変化を調べた。その結果を図-8に示す。

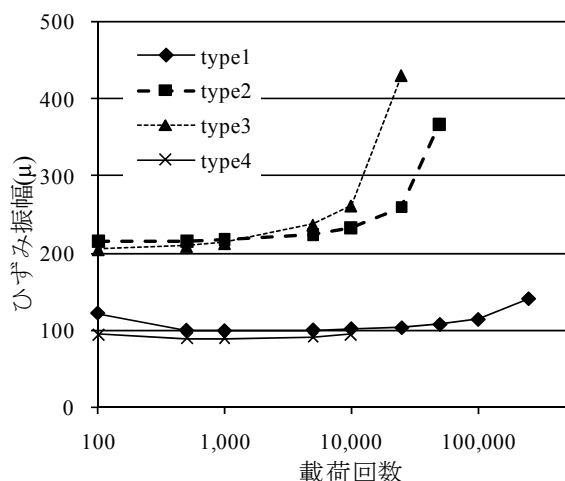


図-8 ひずみ振幅測定結果

ここで示すひずみ振幅とは载荷 1 サイクルあたりに発生するひずみの最大値と最小値の差である。応力振幅をひずみ振幅で除した値がスティフネスであることから、ここでいうひずみ振幅はアスファルト混合物のスティフネスと直接的に関係があると言える。

図-8 のとおり，type1 から type3 については载荷回数が少ない域では一定のひずみ振幅を保ち，载荷回数が一定となると急激にひずみ振幅が上昇する傾向が確認できた。ひずみ振幅の増加傾向が高まる境界としては，供試体種類ごとに type1 (3,000N の荷重制御) で概ね载荷 10 万回程度，type2 (5,000N の荷重制御) で概ね载荷 5 万回程度，type3 (6,000N の荷重制御) で概ね载荷 1 万回であった。载荷振動数が高い Type4 については载荷 1.2 万回における破壊までの間にひずみ振幅の大きな変化は確認できなかった。また，载荷回数が少ない域でのひずみ振幅は type2 および type3 に対して，制御荷重が小さい type1 と载荷振動数が高い type4 では概ね 1/2 程度となった。

既往の研究⁸⁾⁹⁾では，アスファルト混合物の内部では繰返し载荷によりマイクロクラックが生成され，载荷を重ねるとやがてマイクロクラックが伝播してスティフネスが急激に低下し破壊に至るとされている。このことから，当該実験においてひずみ振幅が急激に増加した载荷回数付近がマイクロクラックの伝搬現象に関係があるものと推察される。

次に，载荷回数の増加に伴う位相角の変化を調べた。アスファルト混合物に対して繰返し载荷されると，一般的に，測定されるひずみ波形は応力波形よりも位相が遅れるとされており，このときの応力とひずみの関係を図示すると図-9 のような楕円形状の関係(ヒステリシスループ)が得られる。位相角 ϕ は図-9 のヒステリシスループ中に図示する L_1 および L_2 を用いて式(1)のとおり求められる。

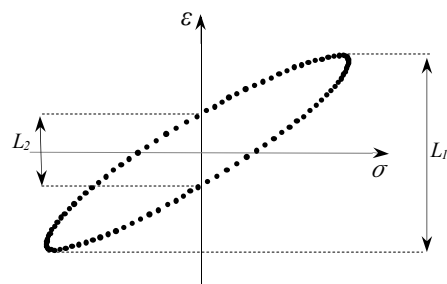


図-9 ヒステリシスループ

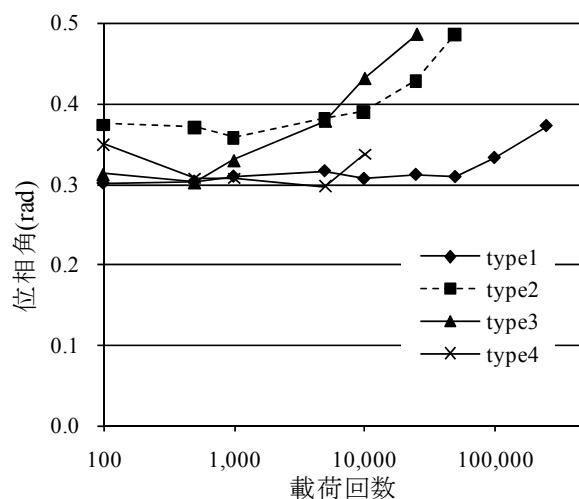


図-10 位相角測定結果

$$\sin \phi = \frac{L_2}{L_1} \quad (1)$$

载荷回数の増加に伴う位相角の測定結果を図-10 に示す。それぞれの供試体種類とも，位相角の推移としては载荷開始後一定の間は 0.30rad から 0.38rad 程度を保ち，破壊が近づくことに伴って急激に大きくなる傾向が確認できた。

図-9 に示したひずみ振幅と図-10 の位相角はともに，载荷回数が一定未満であれば変化が小さいまま推移し，破壊に近づいた一定の载荷回数以上では急激な増加に転じるという類似した傾向が見られた。

type1 から type4 におけるひずみ振幅と位相角の関係を図-11 に示す。さらにひずみ振幅と位相角について，载荷 100 回目の値を 1 とした変化の割合を図-12 に示す。図-11 および図-12 より，type1 から type4 それぞれのひずみ振幅と位相角の関係は概ね右上がりの傾向が確認できることから，ひずみ振幅の増加，すなわちスティフネスの低下と位相角の増加がほぼ同時に起こっている関係が得られた。

既往の研究⁸⁾では ひずみ制御条件下において位相角に変化がなければスティフネスも変化しないとされているが，応力制御下の当該実験においても同様の傾向が確認できた。

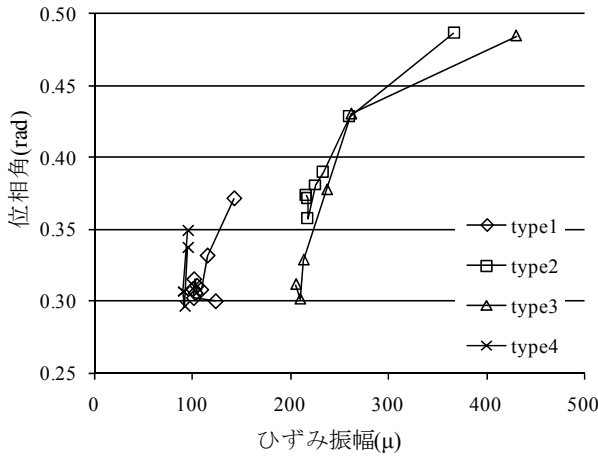


図-11 ひずみ振幅と位相角の関係

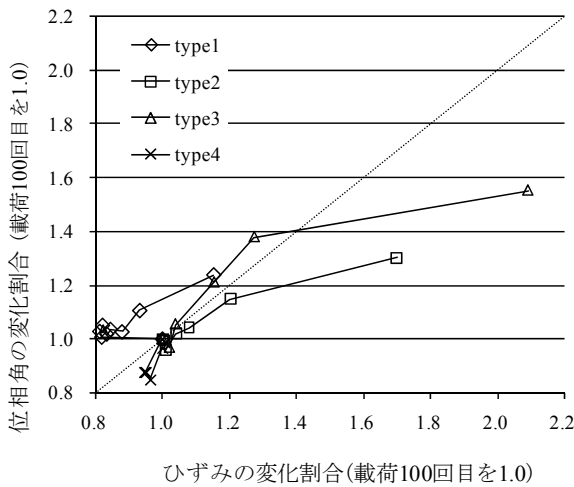


図-12 ひずみ振幅と位相角の変化割合(100回目を1とした)

(3) 粘弾性理論に基づく係数推定

以上により得られた応力・ひずみの関係を用いて、粘弾性理論に基づく応力・ひずみ挙動のモデル化を試みた。荷重 1 サイクルごとに得られる応力、ひずみおよび両者の位相差の関係が粘弾性体(フォークトモデル, 図-13)で表せるものと仮定して、その理論解を用いて実験結果と一致するようにフォークトモデルのパラメータ(弾性係数および減衰係数)の値を推定した。推定法には Gauss-Newton 法を用いた。なお今回試みたモデル化では蓄積ひずみは考慮していない。

供試体の挙動をフォークトモデルと仮定できるものとする、応力とひずみの関係は式(2)のとおりとなる。

$$\sigma(t) = \left(F \frac{d}{dt} + E \right) \varepsilon(t) \quad (2)$$

ここで、 σ : 応力、 ε : ひずみ、 E : 弾性係数、 F : 減衰係数である。供試体への慣性力および物体力を無視できるとすると $p(t)$ を荷重応力として式(3)が成り立つ。

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \beta_1 \varepsilon(t) = \beta_2 p(t) \quad (3)$$

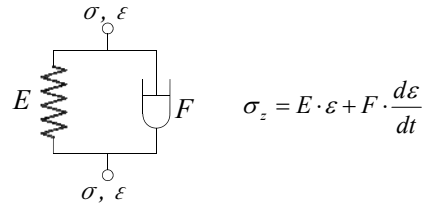


図-13 フォークトモデルの概念

ここで、 $p(t)$: 荷重応力、 $\beta_1 = E/F$ 、 $\beta_2 = 1/F$ とした。式(3)の解は式(4)となる。

$$\varepsilon(t) = C e^{-\beta_1 t} + \beta_2 \int_0^t e^{-\beta_1(t-\xi)} p(\xi) d\xi \quad (4)$$

ここで、 C : 積分定数である。 $t=0$ のとき、

$$\varepsilon(0) = C \quad (5)$$

となり、式(4)の積分項を台形積分で求めることにより、フォークトモデルに基づく理論解を求めることができる。

一方、弾性係数および粘性係数の推定にあたっては、解析ひずみ ε を時間 t と β_1 および β_2 の関数、測定ひずみ s を時間 t の関数として、評価関数 J を式(6)のとおり設ける。

$$J = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \{s(t_n) - \varepsilon(t_n, \beta_1, \beta_2)\}^2 \quad (6)$$

式(6)の評価関数が最小となるよう β_1 および β_2 を決定する。ここで N は時刻歴データの数であり、本研究では着目する荷重回数ごとに、荷重周期の 1/100 の時間刻みで 1.5 周期分のデータ (すなわち N は 151) を対象に式(6)の計算を行った。1.5 周期分とした理由は、試験装置の仕様上 1/100 周期刻みでデータを採取できる継続時間が最大 1.5 周期分であることによる。

以上のモデル化に基づいて推定した弾性係数および減衰係数の結果について、図-14 および図-15 に示す。弾性係数および減衰係数ともに、荷重回数が一定未満であれば変化が小さいまま推移するとともに、破壊に近づいた一定の荷重回数以上では減少に転じることが確認できた。一定の荷重回数を境として変化傾向が異なることに関しては前述のひずみ振幅および位相角の変化傾向と同様であることが確認できた。

また、弾性係数および減衰係数の変化が小さい荷重回数域にあっては、荷重振動数の大きい type4 が他の 3 種類と比べて弾性係数は 2 倍程度に大きく、減衰係数は 0.8 倍程度に小さいことが確認できた。同時に type4 については type1 から type3 とは異なり、一定の荷重回数を超えても減衰係数の減少がみられなかった。

4. 水平方向のひずみ挙動 (試験その 2)

荷重直角方向のひずみ挙動を検証するため、制御荷重 5,000N、荷重振動数 5Hz(試験その 1 の type2)の条件下で 3

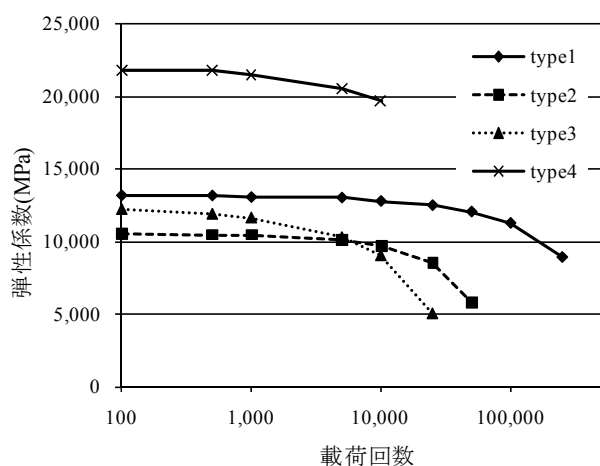


図-14 弾性係数推定結果

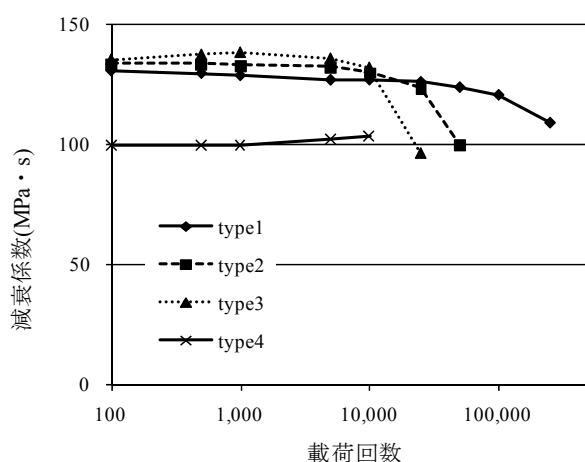


図-15 減衰係数推定結果

本の供試体について载荷回数ごとの鉛直および水平ひずみを同時に測定し、ポアソン比を算出した。3本いずれの供試体も破壊に至り、破壊形態はいずれも試験その1と同様に、引張応力载荷時に応力直角方向を破断面とした瞬間的な破断であった。ポアソン比の算出結果を図-16に示す。

繰返し载荷状況下では、引張応力载荷時と圧縮応力载荷時のそれぞれについてポアソン比の算出が可能であるため、着目する载荷回数ごとに双方を算出したところ、いずれの供試体および载荷回数においても引張時と圧縮時でポアソン比が同一であった。このため図-16に示すポアソン比は引張時・圧縮時の区別をしておらず、1周期あたりの水平ひずみの全振幅を鉛直ひずみの全振幅で除した値に負号を付すことにより、ポアソン比を算出している。

図-16に示すとおり、ポアソン比は1,000回前後の少ない载荷回数時には一定の傾向がみられなかったが、いずれの供試体においてもポアソン比は概ね0.35から0.45の範囲で変動し、一度増加傾向を示してから減少に転じる傾向が確認できた。

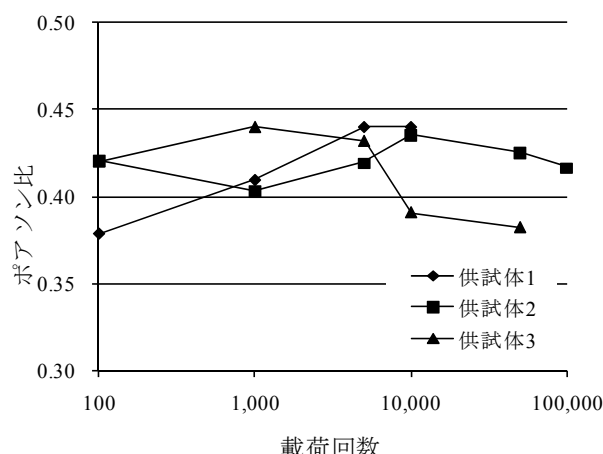


図-16 ポアソン比測定結果

5. 結論

当該研究では繰返し载荷を受けるアスファルト混合物の応力・ひずみ挙動のモデル化の一端として、荷重・応力制御条件下の一軸繰返し圧縮・引張载荷実験に基づいたひずみ特性を蓄積ひずみ、ひずみ振幅、位相角およびポアソン比の観点から分析をした。今回の実験の範囲内から得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 载荷重や振動数によらず载荷を重ねるたびに蓄積されるひずみが圧縮方向に発生し、载荷重の大きさによらず概ね载荷10,000回から進行速度が高まる。
- 2) ひずみ振幅および位相角は、ともに载荷回数が一定未満であれば変化が小さいまま推移し、破壊に近づいた一定の载荷回数以上では急激な増加に転じ、破壊に近づくにつれて位相角の増加率に対してひずみ振幅の増加率が大きくなる。
- 3) 粘弾性体(フォークトモデル)を前提とした弾性係数および粘性係数の推定の結果、弾性係数および減衰係数ともに载荷回数が一定未満であれば変化が小さいまま推移するとともに、破壊に近づいた一定の载荷回数以上では減少に転じる。
- 4) ポアソン比は概ね0.35から0.45の範囲で変動し、一度増加傾向を示してから減少に転じる傾向が確認できた。

以上を通じて蓄積ひずみ、ひずみ振幅、位相角およびポアソン比について、一定の载荷回数に至った際に変化傾向が異なる傾向がみられた。2.(2)で述べたマイクロラックの伝搬現象などをはじめとして、今後の研究において各現象のメカニズムを追求する予定である。

また、上記3)のとおり粘弾性解析によって弾性係数および粘性係数を把握した。一方の塑性変形については上記1)により、繰返し载荷に起因する圧縮方向の塑性変形が蓄積ひずみとして測定されていると考えられる。

今後は、繰返し载荷による蓄積ひずみの影響を考慮した粘弾性モデルの構築について検討を続けていく予定で

ある。

参考文献

- 1) Desai, C. S: Unified DSC Constitutive Model for Pavement Materials with Numerical Implementation, ASCE International Journal of Geomechanics, vol.7 number2, pp.83-101, 2007.
- 2) 土木学会：舗装工学，pp.73-80，pp.1995.
- 3) 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.
- 4) 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第12巻，pp.83-89，2007.12.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 向後憲一，姫野賢治：低ひずみ領域でのアスファルト混合物の疲労挙動，土木学会論文集E，Vol.64 No. 4, pp.526-532, 2008
- 9) Little, D. N., Lytton, R. L., Williams, D. and Kim, R. : An Analysis of the Mechanism of Microdamage Healing Based on the Application of Micromechanics First Principles of Fracture and Healing, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.68, pp.501-542, 1999.

CHARACTERIZATION OF ASPHALT MIXTURE STRAIN BEHAVIOR ON PUSH-PULL FATIGUE TEST

Ryota MAEKAWA, Masanori WATANABE, Kenji HIMENO,
Kunihito MATSUI and Yoshiaki OZAWA

There are many aspects affect the behavior of asphalt mixture under the condition of repeated loading, for example loading intensity, loading rate, rest time and so on. Because of them, it has never been developed that appropriate constitutive model for stress-strain relationship of asphalt mixture. In order to make the generalized model of it, investigation of asphalt mixture strain behavior on stress-controlled tension-compression fatigue test was done. As results of it, plastic compressive deformation occurred and got rapid growth according to increase of number of loading times. Amplitude of strain, phase angle and Poisson's ratio were also highly changed through the loading times.