鋼床版上アスファルト舗装のひずみ挙動に関する研究

久利良夫¹•鎌田 修²•坂本康文³•丹波寬夫⁴•吉田信之⁵

 ¹正会員 博(工) 阪神高速道路管理技術センター 企画研究部 (〒541-0054 大阪市中央区南本町 4-5-7) E-mail: hisari@tech-center.or.jp
²正会員 博(工) 鹿島道路株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)
³正会員 鹿島道路株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)
⁴正会員 修(工) 阪神高速道路管理技術センター 企画研究部 (〒541-0054 大阪市中央区南本町 4-5-7)
⁵正会員 Ph.D 神戸大学准教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

鋼床版上のアスファルト舗装に関しては、負曲げが作用する縦桁上だけでなく、正曲げ状態である縦リブ や主桁ウェブ間(以下、ウェブ間)でも橋軸方向にひび割れが発生する事例がある。アスファルト混合物と 鋼板は剛性差が大きく、また粘弾性的特性も大きく異なるために、アスファルト混合物に発生するひずみは 舗装構造や温度、載荷時間によって大きく異なると考えられる。そこで、本研究では、室内で鋼板とアスフ ァルト混合物の複合体に動的な載荷を与え、アスファルト混合物に発生するひずみの時間変化を計測した。 その結果、舗装構造や試験温度、載荷時間によっては正曲げ状態であってもアスファルト混合物に引張ひず みが発生する状況が多く存在することが確認できた。

Key Words : asphalt mixture, steel plate deck, strain, dynamic bending test

1. はじめに

鋼床版上のアスファルト舗装において、橋軸方向に発 生するひび割れは、負曲げ状態となる縦桁上だけでなく、 正曲げ状態となるウェブ間でも発生している. このウェ ブ間のひび割れについて、内田らは繰返し載荷した室内 曲げ試験で、アスファルト混合物(以下, As 混合物)の 正曲げ状態で表面に発生する応力は、弾性成分は圧縮ひ ずみによって圧縮応力となるが、粘性成分には引張応力 が生じる場合があり、粘弾性の理論上は粘性係数が高い と弾性成分と粘性成分の和である全体の応力も時間によ っては引張となることを指摘した ¹⁾. また、小林らは帯 板要素と角柱要素を接着要素で結合した SLPE(Strip -Link-Prism Element) モデルによって舗装表面ひずみを計 算した. その結果、タイヤ直下のひずみは圧縮ひずみで あるが、散逸エネルギー基準に基づいた疲労度からウェ ブ間の疲労度が大きいことを明らかにした²⁾. このよう に、鋼板上のAs混合物は、正曲げ状態では圧縮ひずみが 発生するものの、疲労破壊する可能性があることが確認 されている.

一方,著者らはAs混合物の鋼床版へのひずみ抑制性能 についての研究を行っている.その中で,静的載荷にお ける正曲げ状態においても,試験温度が60℃のような高 温の場合や,静的な荷重載荷の時間が長くなるような状 態では As 混合物に引張ひずみが発生する場合があるこ とを確認した³⁾.これは静的載荷を模擬した線形弾性 FEM においても鋼板と As 混合物の剛性差や付着性によ っては引張ひずみが生じる可能性を解析上も確認してい る.

しかし、鋼板上のAs 混合物のひずみ挙動には、温度や 載荷時間のみならず、弾性挙動をする鋼板と粘弾性挙動 をするAs 混合物の変形挙動の違い、舗装構造等にも影響 されると考えられるが、それらについてはまだ十分に研 究がなされていない、そこで、本研究では、鋼板とAs 混 合物の種類の組み合わせを変えた複合供試体を作製し、 試験温度を変化させて載荷時間の異なるハーバーサイン 波で動的に荷重を載荷して曲げ試験(以下、動曲げ試験) を実施し、このときAs 混合物に発生するひずみの時間変 化を確認することで鋼版上のAs 混合物のひずみ挙動を 検討することとした.

2. 動曲げ試験方法

(1) 作製供試体

本研究で使用した曲げ供試体は、実道の橋面舗装を模擬した厚さとした. 鋼板は、長さ400mm、幅100mm、厚さ12mmのものを使用した. 供試体は図-1 に示すように、鋼板上にAs 混合物層を1層40mmで表層および基層

の2層で設置した.表基層の組み合わせは、表層に密粒 度As混合物、基層にグースAs混合物を設置した供試体 および表層に密粒度As混合物、基層にSMAを設置した 供試体を作製した.グースAs混合物を設置した供試体は、 鋼板とグースAs混合物間にプライマーを塗布し、SMA を設置した供試体は鋼板とSMA間にプライマーおよび 塗膜防水材を設置した.また、基層と表層間にはゴム入 り乳剤を塗布した.使用したAs混合物の性状を表-1に 示す.

供試体作製の際は,幅100mmの鋼板の両側に同じ厚さ の幅25mmの鋼板を設置し、プライマーおよび塗膜防水材 は幅100mmの鋼板のみに設置した.その状態で基層を舗 設し、翌日以降に基層上面にゴム入り乳剤を塗布し、表 層を舗設した.

表層まで設置した後,型枠からAs混合物と鋼板の複合 体を取り出し,幅25mmの鋼板を撤去し、ダイヤモンド カッターでAs混合物の両側を25mm切り落として鋼板と 同じ100mmに幅を整形した.その後,切断し骨材が露出 している側面をサンドペーパーで磨いて,ひずみゲージ のすべりがないようにした⁴.

(2) 動曲げ試験条件

動曲げ試験は、図-1 に示すように、スパンを概ね縦リ ブウェブ間に等しい 300mm とし、中央に長さ 50mm で載 荷版を設置して荷重を載荷した. 試験機は Instron8802 油 圧型疲労試験機を使用した. 試験温度は 20℃, 40℃, 60℃ とした.

(3) 測定項目

図-1に示すようにひずみゲージを設置した. 鋼板底面 にはひずみゲージを鋼板の中心に1枚貼付した. As 混合 物側面のスパン中央部については,基層下面から1cmの 位置,基層上面から1cmの位置,表層下面から1cmの位 置の合計3箇所について前後2枚ずつひずみゲージを貼 付して計測し,計測値は平均値を用いることとした.

As 混合物側面に図-1 のようにひずみゲージを設置した場合,供試体が曲がる方向とひずみゲージが変形しやすい方向が一致しないため,測定結果に影響がでる可能性がある.しかし,本研究では,As 混合物が線形粘弾性領域の範囲で非破壊試験を実施し,また本研究を実施するに際しては,図-1に示すひずみゲージの設置方法で得られた結果でも十分に考察が可能であると判断した.ひずみは1/1000秒単位で測定した.

(4) 荷重載荷条件

荷重載荷は応力制御とし,正曲げ方向にのみ載荷荷重 がかかるようにした.載荷する荷重は,As混合物が破壊 を生じるまでに十分に余裕がある線形領域にある範囲と



図-1 動曲げ試験概要図

表--1 As 混合物性状表

項目			密粒	SMA	グース
合		19	100	100	100
	Ś	13.2	98.9	98.3	98.7
成	る	4.75	63.7	41.9	73.2
	い	2.36	42.4	29.7	53.2
粒	目	0.6	24.7	20.5	42.9
		0.3	15.4	16.6	24.6
度	mm	0.15	8.6	13.3	29.2
		0.075	5.5	10.3	24.2
As量(%)			5.4	6.7	8.3
As種類			改質Ⅱ型	改質Ⅱ型	St.As20/4 0
空隙率(%)			3.7	2.5	-
動的安定度 (mm/回)			5727	2520	534

した. 既存の研究結果³⁾から, 20℃では目標載荷圧の最 大値を 0.55N/mm², 40℃および 60℃では目標載荷圧を 0.275N/mm²とした.

荷重載荷はハーバーサイン波で実施した.1波長のハー バーサイン波の目標載荷時間を0.025秒(以下「0.025秒 載荷」と記す),0.05秒(以下「0.05秒載荷」と記す), 0.1秒(以下「0.1秒載荷」と記す)の3段階で設定した.

休止時間は、事前にひずみの変動がなくなるまでの十 分な時間を測定して設定した.主に試験温度に影響を受 けたが、概ね2~5分程度とした.

上記のハーバーサイン波と休止時間の組み合わせを10 回繰り返して載荷した.得られた結果は、すべての試験 で2回から10回までは概ね同程度の値が得られたが、測 定値は得られる結果が特に安定していた6回から10回ま での結果の平均値を用いることとした.

また,載荷荷重と時間との関係に供試体間で若干の違いが生じたが,ほぼ同程度での計測が可能であり,供試体間の実測値を平均しても個々の値と大きな変化が見られる程度ではなかった.

4. 複合体動曲げ試験結果

各舗装構造、試験温度および載荷時間での試験結果を

示す. 試験結果は, 各測定結果に対して 3 本の供試体に ついて試験を実施していることから, その平均値を図示 することとした. また, 荷重載荷により, ロードセルが 荷重載荷を計測し始めた時間を 0 として試験の時間を計 測した.

(1) 基層グース As 混合物の動曲げ試験結果

基層にグース As 混合物を設置した供試体の各試験温度, 載荷時間ごとの動曲げ試験結果を図-2から図-4に示す.

試験温度が20℃では、鋼板のみに引張ひずみが発生し、 As 混合物内は圧縮ひずみが発生した. As 混合物の圧縮ひ ずみは供試体上部ほど大きい値を示した. これより、20℃ においては、グース As 混合物と鋼板は付着が確保された 合成版として弾性理論に沿って載荷荷重に対応している ことがわかる.

試験温度が40℃では、載荷荷重が最大となった直後に 鋼板の引張ひずみ、As 混合物の圧縮ひずみは最大となった。

この傾向は20℃の場合と同様であるが、40℃の場合に は、鋼板の引張ひずみが回復する過程においてAs混合物 のひずみは圧縮ひずみから引張ひずみへ移行した.そし て、鋼板のひずみの回復が概ね緩やかになる頃にAs混合 物の引張ひずみは最大となった.また、鋼板から離れる ほど引張ひずみが大きくなることも確認できた.

試験温度が 60℃では、荷重の載荷とともに As 混合物 には引張ひずみが発生した.引張ひずみが発生すること 自体は既存の研究から室内試験、線形弾性 FEM でも確認 がされている³⁾.しかし、60℃でも 40℃と同様に動的載 荷の場合、As 混合物の引張ひずみは、鋼板のひずみの回



図-2 基層グース供試体ひずみ-時間関係(20℃)



図-3 基層グース供試体ひずみ-時間関係(40°C)



図-4 基層グース供試体ひずみ-時間関係(60°C)

復が概ね緩やかになる頃に最大となり、鋼板から離れる ほど大きくなることが確認できた.

(2) 基層 SMA 供試体の動曲げ試験結果

基層に SMA を設置した供試体の動曲げ試験結果を図 -5 から図-7 に示す.

基層に SMA を設置した場合, 試験温度が 20℃におい ては, 表層には圧縮ひずみが生じたものの, 基層には引 張ひずみが発生した. 荷重載荷の時間が長いほど発生す る引張ひずみは大きくなった. As 混合物に発生するひず み分布から, SMA を基層に設置した供試体でも 20℃では, ほぼ弾性理論に沿った挙動を示しているが, 今回使用し た塗膜防水材と SMA の組み合わせでは鋼板との付着が 十分でなく, 鋼板界面ですべりが生じ, As 混合物と鋼板 が重ね梁のような挙動を示していることがわかる.

試験温度が40℃では、鋼板のひずみが最大となった後



図-5 基層 SMA 供試体ひずみー時間関係(20°C)

に基層の下部の引張ひずみが最大となる. その後遅れて 基層上部,表層下部の順で引張ひずみが最大となった. 発生する引張ひずみは基層にグース As 混合物を設置し た供試体よりも大きくなった.

試験温度が 60℃では、基層にグース As 混合物を設置 した供試体と同様、荷重載荷するとともに As 混合物の測 定箇所すべてで引張ひずみが発生した.引張ひずみの最 大値も同程度であった.

基層に SMA を設置した供試体は, 20℃から基層下面に 引張ひずみが発生していた.実道での損傷形態を調査す ると,鋼板と基層の SMA との間でずれを伴うひび割れや 局所的なわだち掘れが多く発生していることを確認して おり,それも早期に生じている⁵⁾.今回の試験結果は, この実道での損傷発生原因の一つを表していると考えら れる.鋼床版上に SMA を使用する場合は,防水材の防水 性のみならず, SMA と鋼床版の付着性能に着目する必要



図-6 基層 SMA 供試体ひずみ-時間関係(40°C)

があることが確認できた.

5. 試験結果に与える要因調査

基層にグース As 混合物を設置した供試体に引張ひず みが発生するのは、As 混合物と鋼板との付着が原因であ るよりも As 混合物の粘弾性的な特性など他の要因が影 響している可能性がある.そこで、基層にグース As 混合 物を設置した供試体について、線形弾性 FEM と実測値と の比較、各温度における As 混合物の粘弾性特性、ひずみ の伝達状況を調査することとした.

(1)線形弾性 FEM と動曲げ試験結果の比較

3次元線形弾性 FEM を使用して、動曲げ試験をモデル 化し、試験結果との比較を実施した.解析ソフトは MIDAS/FEA を使用した.解析に使用する材料定数,鋼板 とAs 混合物の境界条件は既存の研究のものを使用した³.



図-7 基層 SMA 供試体ひずみ-時間関係(60°C)

図-8に結果の比較を示す.本研究では動曲げ試験により動的なひずみを測定しているため、実測値と解析値の比較は、動的解析を実施した上で、ひずみ波形も含めて結果を比較するのが望ましい.しかし、これらの手法については現在検討中であることから、今回は静的な線形弾性FEMを実施しした.このため図-8での比較は、FEMは荷重載荷時のひずみを示しており、試験実測値はひずみのピーク値を示している.ただし、40℃のAs混合物については、圧縮と引張の両方のひずみが出ていることから、図-3に示す圧縮ひずみのピークを示している.

20℃では、FEM と実測値の整合性がよいことが確認で きる.また、40℃においても概ね整合が取れていること がわかる.つまり、40℃においては、鋼板の引張ひずみ が最大となる頃に発生する As 混合物に発生する圧縮ひ ずみについては、線形弾性 FEM でも実測値と整合がとれ るが、鋼板の引張ひずみが回復する際に発生する As 混合 物の引張ひずみについては再現できないことがわかる. 60℃においては、As 混合物に引張ひずみが発生するという点については、FEM と実測値で一致したが、値には差が見られた.FEM における As 混合物と鋼板の境界条件の設定等の解析条件によるものも原因と考えられるが、



図-8 線形弾性 FEM と動曲げ試験実測値の比較

40℃の場合と同様に鋼板の引張ひずみが回復する際に発生するひずみの影響もあると考えられる.

(2) 各温度における As 混合物の粘弾性特性

密粒度 As 混合物とグース As 混合物の各温度,載荷時 間における位相差を一軸圧縮試験⁴により求めた.通常, 位相差は連続した正弦波を与えて応力とひずみの差を測 定するが,本研究では,As 混合物に複合体動曲げ試験と 同様のハーバーサイン波で載荷し,載荷荷重が最大とな るまでの時間を $\pi/2(rad)$ として,ひずみが最大となるまで の時間をラジアン単位に換算して求めた.

結果を図-9 に示す. 全体的に 40℃での位相差が最も 大きくなり, As 混合物の粘弾性挙動は 40℃の場合が最も 大きくなると考えられる. 60℃では載荷時間を長くする と位相差が小さくなっているが、これは弾性挙動が支配 的なのではなく、粘性挙動が小さくなっていること考え られ、流体に近づく挙動を示していると考えられる.

(3) 複合体の曲げひずみ伝達時間差

動曲げ試験において、載荷荷重が最大となってから鋼板の引張ひずみおよびAs混合物の圧縮ひずみが最大となるまでの時間差をまとめた結果を図-10に示す.60℃に関しては、As混合物の圧縮ひずみが発生せずに引張ひずみのみが発生したので、鋼板のみについて結果を示した.

20℃では、載荷時間を変化させても鋼板の引張ひずみ が最大となる時間と As 混合物の圧縮ひずみが最大とな る時間が、ほぼ同程度か鋼板の方が若干早い傾向が見ら れたが、As 混合物が版として一体となって載荷荷重に対 応している傾向が見られる.

40℃では、0.025 秒載荷は20℃と同様な傾向が得られて いるが、0.05 秒載荷、0.1 秒載荷は、ひずみが最大となる 時間に差が生じており、供試体下部ほど遅くなる傾向が 見られた.これは、40℃ではAs 混合物の位相差が大きく なり、粘性的挙動が20℃よりも大きくなることが一因と



図-9 As 混合物の位相差



図-10 ひずみ最大値までの時間差

考えられる.また,40℃では,載荷時間が長くなる程, As 混合物は 20℃の場合と異なり一体となって載荷荷重 に対応するのではなく,ひずみの発生が時間差を生じて 供試体下部に伝達する結果となった.

60℃での鋼板のひずみは、20℃と同程度の時間差となった. 図-3 と図-4 の結果からも鋼板や As 混合物のひずみは 60℃の方が早く回復していることが確認できる. これは、図-9 の As 混合物の位相差の計測結果からも、 40℃と比較すると粘性的挙動が少なくなったためと考えられる. しかし、As 混合物の引張ひずみは、40℃の場合 と同様に鋼板のひずみがほぼ回復した頃に最大となった.

6. 試験結果の考察

基層にグース As 混合物を設置した供試体の試験結果

を考察すると、20℃では鋼板とAs 混合物でひずみが最大 となる時間に差は生じているものの、弾性理論でAs 混合 物に発生するひずみが予測できる.

しかし、40℃での 鋼板ひずみが回復する頃に発生する As 混合物の引張ひずみは弾性理論では説明できず、 As 混合物の粘弾性的挙動と鋼板の弾性的挙動の差が要因と なっていると考えられる.特に、As 混合物と鋼板のエネ ルギー貯蔵および損失の差が要因となったことが考えら れる.

As 混合物は粘弾性体挙動によるエネルギー損失から, 圧縮ひずみが回復する際には少ないエネルギーでひずみ が回復する.一方で鋼板は,弾性体として回復する際も 同じエネルギーを外部に放出してひずみが回復する.つ まり,As 混合物は鋼板より,正曲げ状態を回復するより も多くのエネルギーを与えられるために,As 混合物は正 曲げで生じた圧縮ひずみを回復する以上に鋼板によって 下方からエネルギーを与えられることとなる.

また、荷重載荷時間が長くなるほどAs 混合物内で発生 する圧縮ひずみのピークに時間差が生じる傾向があり、 さらに鋼板の引張ひずみとの時間差も大きくなる結果か ら、鋼板の引張ひずみを回復する際には、As 混合物の圧 縮ひずみが、既に表面から段階的に回復していることも 一因であると考えられる. つまり、鋼板の引張ひずみが 回復するよりも先に圧縮ひずみを回復した表面側の As 混合物は、鋼板が復元する動きにより、正曲げとは逆方 向の曲げ挙動を強いられることとなる. 鋼板から離れる ほどAs 混合物の圧縮ひずみのピークが早く、鋼板の引張 ひずみが回復する際に発生する As 混合物の引張ひずみ が大きくなっている. 同じ現象が実道でも起きているな らば、このような状態ではひび割れは底面よりも表面か ら発生しやすいこととなる.

60℃では、線形弾性 FEM でも鋼板との剛性差が影響し、 As 混合物に引張ひずみが発生することが確認されていた. しかし、As 混合物に発生する引張ひずみの最大値は鋼板 のひずみがほぼ回復した頃であり、線形弾性 FEM で得ら れた値より大きくなっている.

載荷荷重に対する鋼板の最大ひずみの時間差は40℃の 場合と比較して小さくなっており、As 混合物の位相差も 小さくなる傾向がある.単なる弾性体であれば、変形で 貯蔵したエネルギーを放出して元の形に戻るのみである が、実測値は明らかに弾性的挙動とは異なっており、ま た粘弾性挙動の影響が大きいともいえない.ただし、粘 弾性体のように As 混合物が正曲げ挙動で与えられるエ ネルギーを弾性体のように貯蔵できないことは曲げ試験 結果からわかる.このあたりは流動体としての挙動を考 慮する必要があるかもしれない.

挙動の影響要因は 40℃の場合と差はあるものの, As 混合物に発生する引張ひずみは供試体表面側ほど大きく なっており、60℃でもひび割れは表面から発生すること もあることとなる.

7.まとめ

本研究では、試験温度を変化させて As 混合物と鋼板と の複合供試体に正曲げ状態で動的なハーバーサイン波形 の荷重を載荷し、As 混合物に発生するひずみの時間変化 を調べた.その結果以下の事項が明らかとなった.

- SMA を基層に設置した供試体については、40℃、 60℃のみでなく弾性挙動に近い 20℃の正曲げ状態に おいても SMA 下面に引張ひずみが発生した.これは、 今回試験した構造では SMA と鋼板の付着が十分で ないことが原因であり、鋼床版上の SMA が早期に損 傷している⁵⁾一因であると考えられ、今後の対応策 の方向性を検討する上で重要な知見である.
- 2) グース As 混合物を基層に設置した供試体について 40℃では、鋼板のひずみが回復する際に As 混合物の ひずみが圧縮から引張へと変化し、鋼板から離れる 方が発生する引張ひずみが大きくなった.これには As 混合物と鋼板の粘弾性挙動の差が影響していると 考えられるが、正曲げ状態でも表面から縦ひび割れ が発生する一因である可能性がある.
- 3) グース As 混合物を基層に設置した供試体について 60℃では、As 混合物の粘性挙動は40℃と比較して小 さくなるが、鋼板の引張ひずみが回復する際に、As 混合物表面側に大きな引張ひずみが発生する. この 結果も表面から縦ひび割れが発生する一因である可 能性がある.

以上,本研究で動曲げ試験を実施した範囲では,正曲 げ状態であるのにもかかわらず As 混合物に引張ひずみ が発生する状況が多く見られた.本研究で実施した動曲 げ試験は、室内供試体であり、特に側面の拘束がないこ とは実道と大きく異なる点である.しかし、本研究でAs 混合物に発生した引張ひずみは、そのような要因よりも 鋼床版上の As 舗装特有の問題に起因するものであると 考えられる.それは、As 混合物と鋼板との剛性差のみな らず、As 混合物と鋼板の付着状況、弾性体としての鋼板 の挙動と粘弾性体としての As 混合物の挙動の差等が要 因となっていると考えられる.

鋼床版上の As 舗装はコンクリート床版上の舗装より も損傷の発生率が約 5 倍程度高くなっている⁵⁾. 損傷が 多い実態の要因について,本研究で得られた知見も考慮 して今後の鋼床版舗装の使用材料や構造を検討する必要 がある.

【参考文献】

- 内田喜太郎,西澤辰男,姫野賢治,野村健一郎:鋼床版舗装のひび割れに関する研究,舗装工学論文集第4巻, pp.103-110,1999.
- 小林隆志,西澤辰男,梶川康男:鋼床版舗装の表面縦ひび 割れ発生に及ぼすタイヤ荷重の影響,舗装工学論文集第10 巻, pp.23-30, 2005.
- 3) 久利良夫,佐藤彰紀,閑上直浩,鎌田修,芳賀潤一:鋼床版ひずみに対するアスファルト混合物の影響に関する研究, 舗装工学論文集第14巻,pp.109-116,2009.
- 4) 久利良夫,佐藤彰紀,鎌田修,芳賀潤一,児玉孝喜:高温 域を考慮したアスファルト混合物のスティフネス測定に関 する研究,舗装工学論文集第13巻,pp.39-46,2008.
- 5) 久利良夫, 十名正和: 阪神高速道路における舗装損傷に関 する考察, 舗装, Vol.42No.9, pp.8-13, 2007.

A STUDY OF THE STRAIN BEHAVIOR OF ASPHALT PAVEMENT

ON STEEL DECK PLATE

Yoshio HISARI, Osamu KAMADA, Yasufumi SAKAMOTO, Yoshio TAMBA and Nobuyuki YOSHIDA

The crack of asphalt pavement on steel deck plate occurs not only on stringer but also on center of U-rib. On the center of U-rib, asphalt pavement is imposed on positive bend. The strain of asphalt pavement is compression by the theory of composition structure. But it is thought that the strain occurred in asphalt pavement on steel deck is influenced by temperature, loading time, difference of stiffness and viscoelastic property between asphalt mixture and steel, etc. In this study, positive bending test used asphalt mixture and steel composition specimens is performed by dynamic loading. By this study, it is found that there are many cases tensile strain occurs in asphalt pavement though asphalt mixture is deformed to positive bend.