

鋼床版上における SMA 舗装の損傷に関する検討

阪神高速道路(株) 技術部 技術開発課 閑上 直浩
(財)阪神高速道路管理技術センター 企画研究部 調査研究課 久利 良夫
(財)阪神高速道路管理技術センター 企画研究部 調査研究課 丹波 寛夫

要 旨

阪神高速道路の舗装路面には、ポットホールやひび割れをはじめとする損傷が発生している。特に、鋼床版上の基層に SMA を用いた箇所では、施工後比較的早期の損傷が生じている。このため、まず橋面舗装の損傷実態や SMA 適用箇所での損傷発生状況について検討を行った。この結果、橋面舗装では、鋼床版上の舗装が、コンクリート床版上と比較して約 4 倍の損傷発生率であることがわかった。また、SMA では、混合物の局所的な塑性変形やずれが多く生じている。そこで、SMA での損傷発生原因を把握するため、鋼板と混合物との接着や輪荷重載荷時の鋼床版の挙動が混合物に与える影響について検討した。これより、グースアスファルト混合物は SMA と比較して接着強度が大きいこと、SMA はグースアスファルト混合物より低い温度において鋼床版との境界面ですべりが生じていることがわかった。

キーワード: 鋼床版舗装, SMA, 損傷, 接着力, 曲げ試験, 内部ひずみ

はじめに

阪神高速道路は、供用延長の約 85%が橋梁構造物であることから、舗装資産のほとんどが橋面舗装である。

橋面舗装には、快適で安全な車両通行の確保に加えて橋梁床版の保護の役割がある。特に、都市内高速道路の橋面舗装は、一般の橋梁と比較して交通量も極めて多く、渋滞の発生率も高い。このため、舗装の耐久性を確保する目的から、ポリマー改質 II 型のバインダを用いた混合物を主に使用してきた。また、3号神戸線の震災復旧工事に排水性舗装を適用した後、2002年5月の舗装設計基準の改訂では排水性舗装を標準とした。現在では、全舗装面積の約 50%を排水性舗装が占めて

いる。さらに、鋼床版舗装の基層には、グースアスファルト混合物(以下、グース)と比較すると流動抵抗性があり経済性が優位と考えられる砕石マスタック混合物(以下、SMA)を試験的に用い、施工実績を伸ばしてきた。

しかし、最初の試験施工から 15 年程度を経過した頃から、鋼床版舗装の基層に SMA を用いた箇所で、施工後、比較的早期の損傷が見られるようになった。この損傷は、局所的な大きなわだち掘れやひび割れ、ずれを伴うといった特徴的なものもあり、鋼床版と基層の SMA との接着や SMA の混合物性状にも影響を受けていると考えられる。

一方、鋼床版上のアスファルト舗装は、アスファルト混合物と鋼板との剛性差が大きく、またア

スファルト混合物に発生するひずみは温度や載荷時間によって大きく異なると考えられ、これが鋼床版舗装の損傷発生に影響を及ぼしていると考えられる。

本報告は、SMA を基層に用いた鋼床版舗装の損傷実態とともに、SMA 適用箇所の損傷発生要因と考えられる鋼床版との接着性状ならびに鋼床版の挙動による SMA への影響について、現時点での検討結果を述べるものである。

1. 舗装の損傷状況

1-1 損傷状況

阪神高速道路の舗装点検は、各々の橋梁の径間内にある車線単位で管理しており、その数は全体で 32,126 車線となっている。現在の排水性舗装は、全車線の 46.8%にあたる 15,039 車線、密粒 As 舗装は 23.1%の 7,416 車線、密粒ギャップ As 舗装は 23.9%の 7,691 車線である。

表-1 は、日常点検の結果をもとに、現在の舗装資産に対して発生している損傷の状況を示したものである。なお、損傷状況は、2009 年 5 月 17 日現在（以下、現在）の舗装の設備資産に対してとりまとめたものである。これより、阪神高速道路全体では、約 7.4%の舗装に損傷が生じている。この中で、排水性舗装を見ると約 6.4%の損傷が生じているが、密粒 As 舗装や密粒ギャップ As

舗装（以下、密粒系 As 舗装）と比較すると損傷の発生率は低い。橋梁の構造別では、鋼床版舗装の損傷発生率が、コンクリート床版舗装の約 4 倍と非常に高いことが分かる。また、土工部では、排水性舗装の損傷発生率が、密粒系 As 舗装の約 1/2 という状況である。

次に、舗装路面に発生している損傷形態別での発生割合を舗装種別ごとにとりまとめたものが図-1 である。発生している損傷は、はく離（ポットホールを含む）が全体の 60%近くを占めており、次にひび割れ、わだち掘れ、平坦性の損傷となっている。これらの 4 種類の損傷が全損傷数の 88%近くを占めている。また、排水性舗装は、密粒系 As 舗装に比べ、はく離の発生率は低いが、わだち掘れが 2 倍程度多くなっている。排水性舗装のわだち掘れは、車輪の走行位置に沿って長く凹凸が続くものではなく、局所的に大きく側方へ塑性変形したものが多い。これは、舗装端部の基層面での滞水もしくは端部から床版面に浸透した雨水が原因で、表基層間や基層と鋼床版間での接着が低下し、発生したものと推察される。

1-2 鋼床版上 SMA 適用箇所での損傷状況

鋼床版上の基層への SMA の適用は、グースより流動抵抗性が得られ、経済性が優位と考えられたことから増加してきた。阪神高速道路の SMA 設計施工要領(案)¹⁾は、1992 年の試験施工を経て、

表-1 舗装の損傷発生率

| | | 排水性舗装 | 密粒度As舗装 | 密粒度ギャップAs舗装 | その他の舗装 | 全ての舗装 |
|----------|-----------|--------|---------|-------------|--------|--------|
| コンクリート床版 | 車線数 | 12,504 | 5,697 | 5,757 | 960 | 24,918 |
| | 損傷発生車線数 | 577 | 316 | 314 | 50 | 1,257 |
| | 損傷発生割合(%) | 4.6% | 5.5% | 5.5% | 5.2% | 5.0% |
| 鋼床版 | 車線数 | 1,915 | 1,153 | 1,289 | 174 | 4,531 |
| | 損傷発生車線数 | 342 | 239 | 274 | 29 | 884 |
| | 損傷発生割合(%) | 17.9% | 20.7% | 21.3% | 16.7% | 19.5% |
| 土工部 | 車線数 | 620 | 566 | 645 | 846 | 2,677 |
| | 損傷発生車線数 | 41 | 87 | 80 | 27 | 235 |
| | 損傷発生割合(%) | 6.6% | 15.4% | 12.4% | 3.2% | 8.8% |
| 全体 | 車線数 | 15,039 | 7,416 | 7,691 | 1,980 | 32,126 |
| | 損傷発生車線数 | 960 | 642 | 668 | 106 | 2,376 |
| | 損傷発生割合(%) | 6.4% | 8.7% | 8.7% | 5.4% | 7.4% |

2009年5月17日時点の舗装設備にて集計
ただし、舗装の供用期間（古さ）は考慮していない

2001年5月に制定された。制定当時は、SMAの技術がまだ十分に確立されていなかったことから、試験的な位置付けで施工を行ってきた。しかし、適用当初から15年程度経過した頃から、鋼床版上でグースからSMAに打ち替えた区間で、施工後、比較的早期の損傷が見られるようになった。図-2は、SMA適用箇所の損傷を形態別に示したものである。これより、ポットホール、ひび割れ、わだち掘れが多くを占めていることがわかる。ひび割れ、わだち掘れは、写真-1に示すような損傷発生状況が多く見られる。これは、一般的に見られるひび割れやわだち掘れとは異なっており、混合物のずれに伴う損傷であると推察できる。また、このような損傷発生箇所での調査を行ったところ、鋼床版とSMAとの間でずれが発生してい

ることが確認されている。

SMAを基層に用いた箇所で発生している損傷は、図-3に示すように、その全損傷数の約60%が舗装施工後1~2年の早期に損傷が生じている。図-4は損傷の発生を月別に集計したものである。これより、7月から9月にかけて損傷が多く発生している。損傷程度も第三者への影響もしくは機能低下による道路構造物の安全性から緊急に対策が必要なSランクや機能低下があり対策が必要なAランクといったものが多い。この時期は、梅雨等の影響によるポットホールの発生や雨水の影響と気温の上昇に伴うSMAと鋼床版との接着力の低下²⁾に起因するずれが生じていると推察される。図-5は、SMAで発生した損傷を対象に、形態別に舗装施工後初めて損傷が発生するまでの

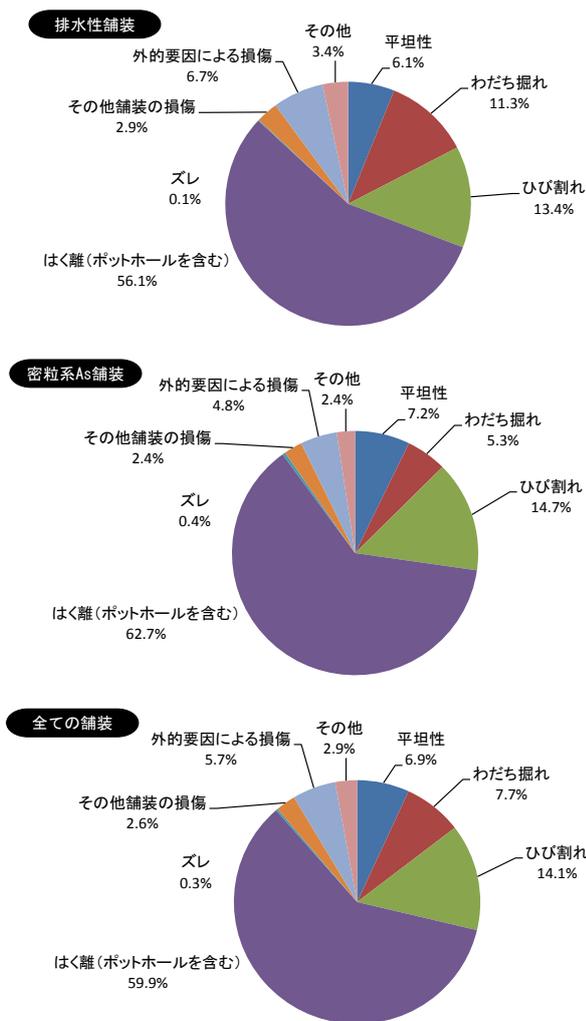


図-1 舗装種別ごとの損傷形態



ずれを伴うひび割れ 局部的なわだち掘れ

写真-1 SMAの損傷発生状況

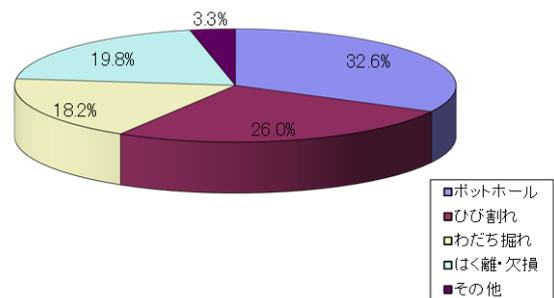


図-2 SMA箇所の損傷形態

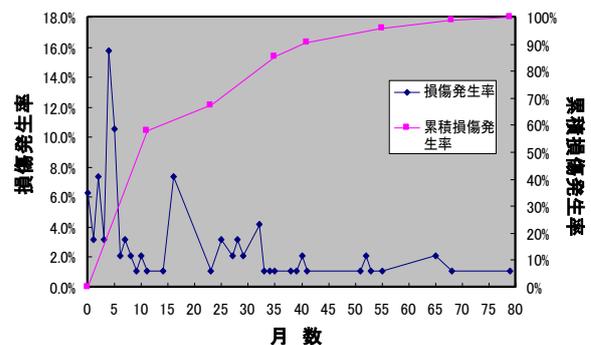


図-3 損傷発生までの供用月数

期間を示したものである。これより、ポットホールやはく離は1年～2年以内の早期に、ひび割れは供用3年～4年後に多く生じている。これまでに実施した SMA の締固め度と透水係数との関係からは、締固め度が低い場合には、十分に水密性が確保できない結果となっている。このため、床版端部や鋼床版添接部などでは、十分な締め固めが困難であると考えられることから、水密性が得られないような箇所から雨水等が浸入し、ポットホールやはく離が生じたと推察される。また、ひび割れは、交通荷重の繰り返しにより生じ、特に鋼床版部では特有の縦ひび割れも見られる。そして、ひび割れはその後の進行が非常に早い。これは、ひび割れが発生すると雨水等が舗装体内に浸入し、その影響で鋼床版と SMA との接着が切れ、ずれが生じるためであると考えられる。

2. 鋼床版と SMA 混合物との接着性状

鋼床版上の SMA 施工箇所が発生している損傷は、損傷発生状況から基層の SMA が鋼床版上においてずれが生じ、各種の損傷に至っている場合が多いと推察される。このため、鋼床版に適用した SMA とグースの引張接着強度ならびにせん断接着強度の確認を室内試験にて行った。

2-1 試験方法と試験条件

試験に用いた混合物は、阪神高速道路にて標準的に使用している SMA とグースの2種類である。また、混合物と鋼板との接着面は図-6 に示すように SMA は接着剤と防水層、グースは接着剤である。このため、SMA と鋼板との接着の場合には、防水層を含めて評価を行う。

引張接着強度、せん断接着強度は、道路橋床版防水便覧³⁾に記載されている引張接着試験ならびにせん断試験に準じて実施した。橋面舗装上の基層温度は、過去の測定結果から、夏においては、基層の1日の平均温度は40℃前後であるが55℃程度に達することもある。また、鋼床版での接着強度は温度に大きく影響を受ける²⁾。これらのこ

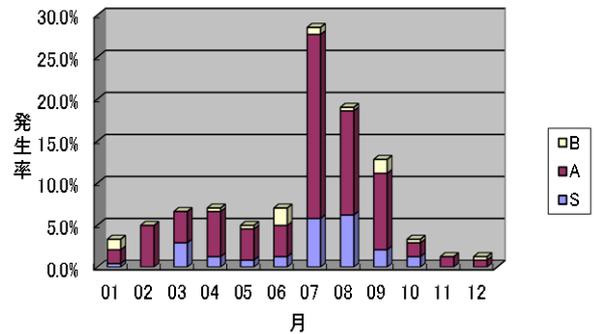


図-4 損傷発生 の月別集計

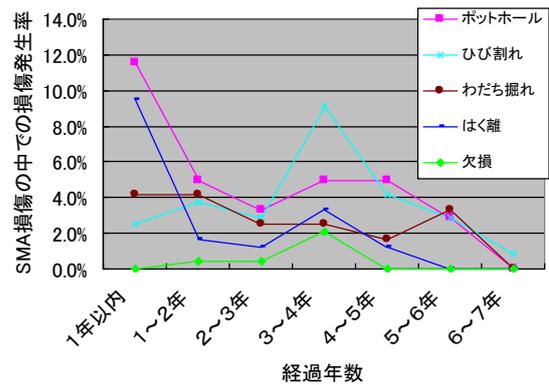


図-5 損傷形態別による損傷発生までの期間

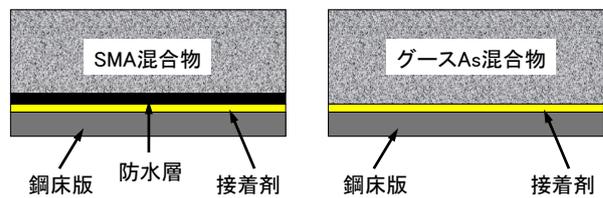


図-6 SMA とグース As の供試体断面

表-2 接着試験の条件

| | |
|---------------|---------------------------------|
| 1. 試験温度 | 0℃, 20℃, 30℃, 40℃ |
| 2. 床版の錆状況 | (1)ショットブラスト処理 (2)錆を発生(30%程度) |
| 3. SMAの締固め度 | 96%, 100% |
| 4. 鋼床版無機ジンの有無 | |

とから、試験温度は、試験が実施できる温度を考慮し、0℃、20℃、30℃、40℃とした。一方、実路では舗装を撤去すると鋼床版に錆が発生していることもあることから、これを模擬し30%程度の錆を発生させた鋼板も準備した。なお、試験条件は表-2 のとおりである。また、30℃のみでは

あるが、最大骨材粒径 5mm の骨材を使用した SMA との比較も行った。

2-2 室内試験結果

図-7 は、引張接着試験の結果である。これより、SMA は温度の上昇に伴い、引張接着強度は低下する。SMA、グースとも、錆の有無による大きな差は見られなかった。SMA は、締固め度 100%と 96%とでは、差は見られなかった。試験温度 20℃以上では、グースは SMA より引張接着強度が大きい、0℃ではグースが低くなる。この原因については現時点では明らかとなっていない。無機ジンクの有無による差は SMA では見られなかったが、グースでは無機ジンクがある場合には、引張接着強度に低下が見られた。一方、最大骨材粒径 5mm の骨材を使用した SMA は、30℃において最大骨材粒径 13mm の SMA とほぼ同程度の引張接着強度であった。

次に、図-8 はせん断接着試験の結果である。せん断接着強度は、SMA、グースとも、温度が上昇するに従い低下する。グースのせん断接着強度は、SMA より全ての温度において大きい。錆の有無による比較では、SMA は錆があるとせん断接着強度がやや高くなり、グースは低くなる傾向を示す結果となった。これは SMA が転圧、グースが流し込みと締め固め方法の違いによることが一つの要因と考えられる。さらに、今回の錆は、30%程度発生させたものであるが、その状況は鋼板上に薄く浮き錆が生じている程度である。これ

が鋼板に深く入り込んだような錆や鋼板上に舗装を設置した後に錆を進行させたような状況となると接着強度にも影響を及ぼすと考えられることから、今後の検討が必要と考えている。また、無機ジンクがある場合には、グースはせん断接着強度が低く、錆がある場合と同程度となる。一方、最大骨材粒径 5mm の骨材を使用した SMA は、30℃においてはグースと同程度のせん断接着強度であった。

3. 鋼床版上の SMA 舗装の変形挙動

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縦ひび割れは、舗装が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）は正曲げ状態においても表面からのひび割れが生じ、それは粘弾性理論からたとえ圧縮ひずみが生じていても、引張応力が生じている可能性があることを指摘している⁴⁾。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、タイヤ直上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ている⁵⁾。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

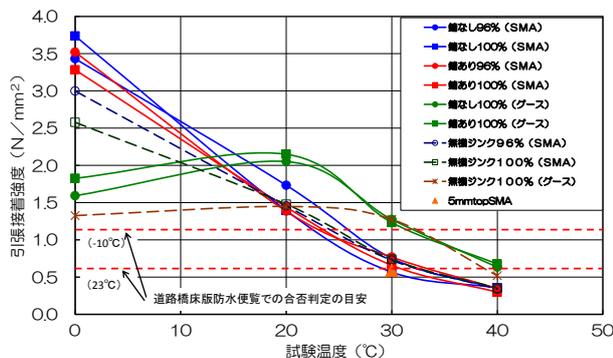


図-7 引張接着試験の結果

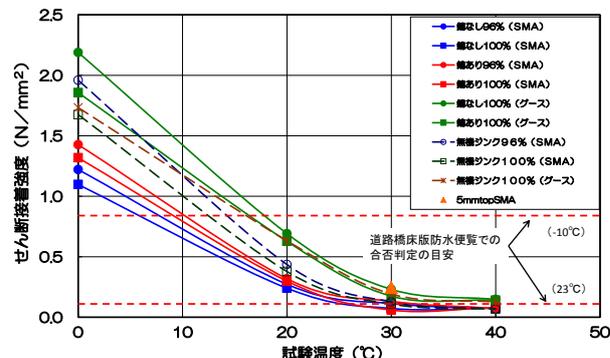


図-8 せん断接着試験の結果

劣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、静的荷重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⁶⁾。このため、As 混合物にごく短時間に発生するひずみの変化を確認することで鋼板上の As 混合物のひずみ挙動を検討することとした。

3-1 正曲げ試験方法

供試体は図-9 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。供試体に使用した鋼板は、長さ 400mm、幅 100mm、厚さ 12mm のものである。表基層の組み合わせは、表層に密粒 As 混合物、基層にグースを設置した供試体(以下、グース供試体)および表層に密粒 As 混合物、基層に SMA を設置した供試体(以下、SMA 供試体)を作製した。使用した As 混合物の性状を表-3 に示す。

正曲げ試験は、図-9 に示すように、スパンを 300mm とし、中央に長さ 50mm で載荷板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。載荷する荷重は、粘弾性である As 混合物に破壊が生じない線形領域とした。そして、これまでの研究結果から、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。目標とする最大荷重までの載荷時間を 0.05 秒(正弦波への周波数換算で 10Hz) で設定した。

3-2 正曲げ試験結果

グース供試体ならびに SMA 供試体の正曲げ試験結果を図-10、図-11 に示す。

これより、SMA 供試体の場合、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。鋼板と As 混合物が完全に接着した供試体では中立軸が

鋼板内に位置するため As 混合物内には圧縮ひずみのみが生じるはずである。このことから、グース供試体は 20℃では、ほぼ弾性理論に沿った挙動を示しているが、As 混合物に発生するひずみ分布から、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接着が十分でなく、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、SMA 供試体は、鋼板のひずみが最大となった後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グース供試体よりも大きくなった。

試験温度が 60℃では、SMA 供試体はグース供試体と同様、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。

SMA 供試体は、20℃から基層下面に引張ひず

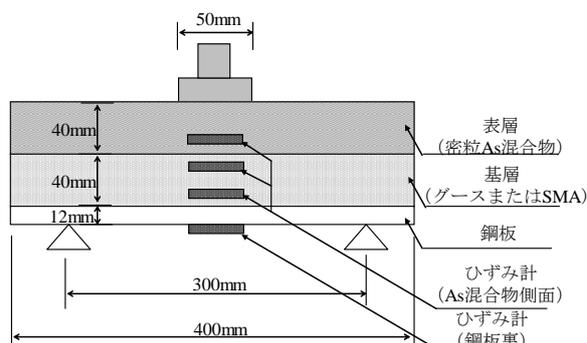
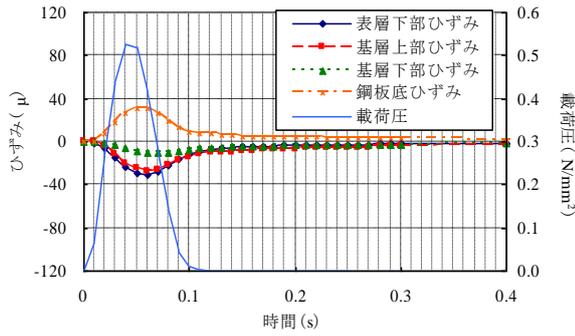


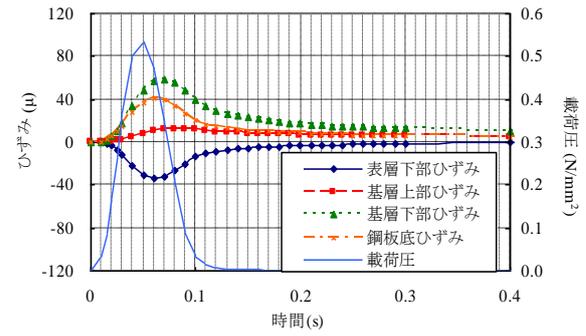
図-9 正曲げ試験概要図

表-3 As 混合物性状表

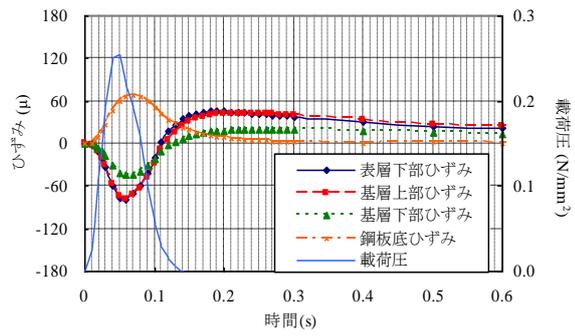
| 項目 | | 密粒 | SMA | グース |
|-----------------|--------------------|-------|------|-------------------------|
| 合成 粒度 | ふる い 目 mm | 19 | 100 | 100 |
| | | 13.2 | 98.9 | 98.3 |
| | | 4.75 | 63.7 | 41.9 |
| | | 2.36 | 42.4 | 29.7 |
| | | 0.6 | 24.7 | 20.5 |
| | | 0.3 | 15.4 | 16.6 |
| | | 0.15 | 8.6 | 13.3 |
| | | 0.075 | 5.5 | 10.3 |
| As量 (%) | | 5.4 | 6.7 | 8.3 |
| As種類 | | 改質Ⅱ型 | 改質Ⅱ型 | St. As20/40 +T. L. A |
| 空隙率 (%) | | 3.7 | 2.5 | - |
| 動的安定度 (回/mm) | | 5727 | 2520 | 534 |



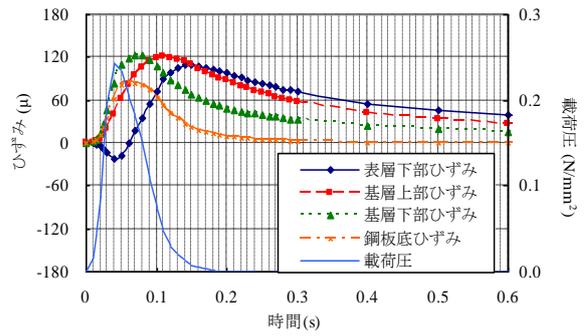
20°C



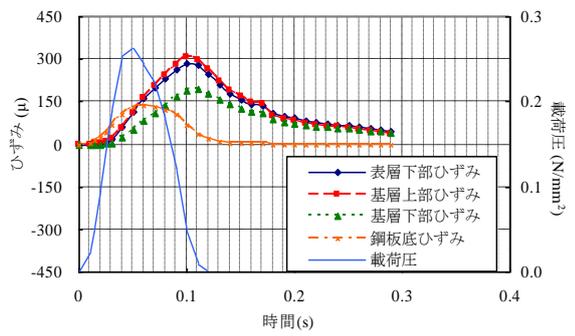
20°C



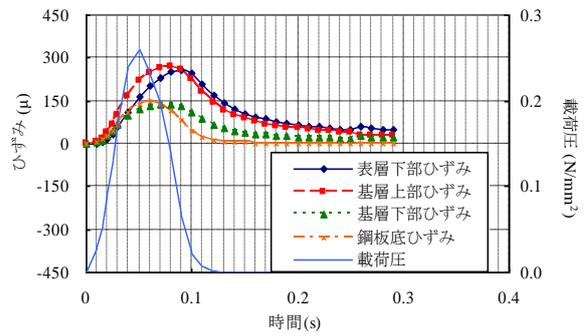
40°C



40°C



60°C



60°C

図-10 基層グース供試体ひずみ-時間関係 (10Hz)

図-11 基層 SMA 供試体ひずみ-時間関係 (10Hz)

みが発生していた。実路での損傷形態は、前述したように、鋼床版と基層の 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。今回の試験結果は、この実路での損傷発生原因の一つを表していると考えられる。

このため、鋼床版上に SMA を使用する場合は、混合物性状や防水材の防水性のみならず、SMA と鋼床版の接着性能に着目する必要があることが確認できた。

4. まとめ

鋼床版舗装の基層に SMA を用いた箇所で、施工後、比較的早期の損傷が見られることから、その損傷状況ならびに鋼床版上での SMA 混合物の性状、変形挙動について検討を行った。この結果をまとめると、次のとおりになる。

- 1) 日常点検結果から阪神高速道路の鋼床版舗装はコンクリート床版上の舗装と比較して、約4倍の損傷発生率であることがわかった。
- 2) 鋼板にグースならびに SMA を設置した供試

体による接着試験から、引張接着力、せん断接着力ともにグースの方が SMA より大きいことがわかった。しかし、最大骨材粒径 5mm の骨材を使用した SMA は、30℃のみでの試験結果であるが、せん断接着強度がグースと同等であった。これは、鋼床版との接着面積やアスファルト量(アスモル量)が多いことが理由として考えられる。

このことから、SMA においても使用する骨材径や配合を見直すことにより、せん断接着力を向上させることが可能であることが示された。

- 3) グースならびに SMA を基層に設置した複合供試体による正曲げ試験の結果、SMA はグースより低い温度において鋼板との境界面ですべりが生じていることがわかった。同時に、鋼板が曲げ戻されるときに混合物内部に発生している引張ひずみが増大することが示された。

これらの結果は、今後、鋼床版上での SMA の早期損傷の発生原因の究明に役立っていくものと考えられる。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：砕石マスチック混合物による鋼床版舗装設計施工要領(案), 2001.5.
- 2) 岡本信人, 橋本修治：鋼床版舗装における SMA の適用に関する検討, 土木学会第 56 回年次学術講演会概要集, V-076, 2001.10.
- 3) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧, 2007.3
- 4) 内田喜太郎, 西澤辰男, 姫野賢治, 野村健一郎：鋼床版舗装の縦ひび割れに関する研究, 第 4 回舗装工学講演会論文集, pp.103-110, 1999.12.
- 5) 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, 第 10 回舗装工学講演会論文集, pp.23-30, 2005.12.
- 6) 久利良夫, 佐藤彰紀, 閉上直浩, 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, 第 14 回舗装工学講演会論文集, pp.109-116, 2009.12.

STUDY ON DETERIORATION OF STONE MASTIC ASPHALT PAVEMENT ON ORTHOTROPIC STEEL DECKS

Naohiro KANJO, Yoshio HISARI, Yoshio TAMBA

Pavement surface damage on the Hanshin Expressway tends to occur earlier than normal at locations where stone mastic asphalt (SMA) is used in the binder course on orthotropic steel decks. Results of bridge pavement inspection and SMA pavement damage examination suggested that pavement damage incidence was four times higher in orthotropic steel deck bridges than in reinforced concrete slab bridges, and that local plastic deformation or dislocation of the mixture was frequently caused in SMA pavement. In order to identify the causes, bonding of the mixture to the steel plates and influence of the behavior of orthotropic steel decks on the mixture under wheel load were examined. It was revealed that SMA mixture started to slip at the interface with the orthotropic steel decks at lower temperatures as compared to conventional mastic asphalt mixture which was found to have higher bonding strength.

閉上 直浩



阪神高速道路株式会社
技術部 技術開発課
Naohiro KANJO

久利 良夫



(財)阪神高速道路管理技術センター
企画研究部 調査研究課
Yoshio HISARI

丹波 寛夫



(財)阪神高速道路管理技術センター
企画研究部 調査研究課
Yoshio TAMBA