

## 鋼床版用薄層舗装の開発

新田弘之\* 伊藤正秀\*\* 宮下知治\*\*\*

### 1. はじめに

都市や地域の連携による効率的な暮らしの向上が期待されており、これを実現する技術の一つとして低コストの長大橋建設技術が求められている。このための方策の一つとしては、橋面舗装による死荷重を軽減する方法が考えられる。鋼橋における橋面舗装は、表層に密粒度アスファルト、基層にグースアスファルトを用いた二層構造で施工が行われることが一般的であり、この橋面舗装を軽量化するためには、厚さを薄くする、軽量材料を使用などが考えられる。本研究では、橋面舗装の厚さを薄くする方法に着目して、これまで二層で行っていた舗装を一層で行う方法について検討を行った。

橋面舗装は、図-1に示すように、基層には水密性やたわみ追従性、表層にはすべり抵抗性及耐流動性などが必要である。舗装を一層にする場合、これらの性能を一種類のアスファルト混合物（以下、混合物）で満足しなければならない。これまでの検討<sup>1)</sup>によりこれに対して有望な混合物とし

て、通常より粗骨材とフィラーの量が多い碎石マッシュアスファルト（以下、SMA）の可能性を見いだしている。

一方、橋面上で舗装を施工する場合、混合物の締固め不足を引き起こしやすい。その原因として図-2に示すように放熱のための急激な温度低下が影響していると考えられる。この混合物の温度低下は、鋼床版との付着力を低下させる可能性もある。さらには、舗装端部において締固め温度の低下、転圧が困難などの理由で水密性が不十分になる可能性もある。

そこで、鋼床版用の薄層舗装の開発にあたっては、橋面での施工を十分に考慮し、温度低下を考慮したSMA混合物配合の検討、温度低下が懸念される場合の対策、橋面との接着性向上技術や端部の処理方法などの検討を行った。

### 2. 薄層化橋梁舗装用SMA混合物の配合

SMA混合物は、骨材配合により様々な性質を示すため、薄層化橋面舗装に適した骨材配合の検討を行った。

SMAの骨材配合は、2.36mmふるい通過分の率

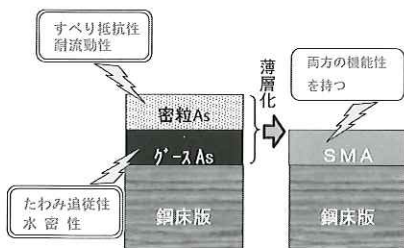


図-1 橋面薄層舗装のイメージ

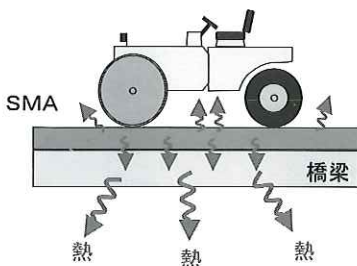


図-2 鋼床版の放熱のイメージ

表-1 検討したSMA混合物の配合

| 骨材          | 2.36mm フリーの通過質量百分率 |       |       |       |       |
|-------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
|             | 20.0%              | 22.5% | 25.0% | 27.5% | 30.0% |
| 6号碎石        | 68.0               | 66.0  | 64.0  | 61.0  | 59.0  |
| 7号碎石        | 12.0               | 11.5  | 11.0  | 11.0  | 10.0  |
| 細砂          | 4.5                | 5.5   | 6.5   | 8.5   | 9.5   |
| 砕砂          | 4.5                | 5.5   | 6.5   | 8.5   | 9.5   |
| 石粉          | 11.0               | 11.5  | 12.0  | 11.0  | 12.0  |
| フリ目<br>(mm) | 合 成 粒 度            |       |       |       |       |
| 19.0        | 100.0              | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| 13.2        | 97.8               | 97.8  | 97.9  | 98.0  | 98.1  |
| 9.5         | 82.7               | 83.2  | 83.7  | 84.5  | 85.0  |
| 4.75        | 37.2               | 39.0  | 40.9  | 43.6  | 45.6  |
| 2.36        | 20.3               | 22.6  | 24.8  | 27.4  | 30.0  |
| 0.60        | 16.7               | 18.4  | 20.1  | 21.7  | 23.9  |
| 0.30        | 13.8               | 15.0  | 16.0  | 16.3  | 17.9  |
| 0.15        | 11.5               | 12.1  | 12.8  | 12.2  | 13.4  |
| 0.075       | 8.5                | 8.8   | 9.2   | 8.6   | 9.5   |

を20.0、22.5、25.0、27.5、30.0%の5種類検討を行った。骨材の配合率を決めるに当たっては、まず使用する粗骨材である6号砕石と7号砕石が最も密なる配合比率を骨材のみの試験により求め、その粗骨材配合率における細骨材の配合比率をアスファルト混合物の密度測定によって求めた。これらにより求めた骨材の配合率及び合成粒度の一覧を表-1に示す。

表-1の配合でのSMAの混合物性状の試験結果

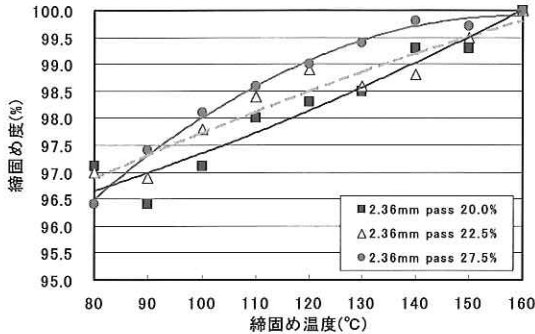


図-3 締固め温度の低下による締固め度の変化

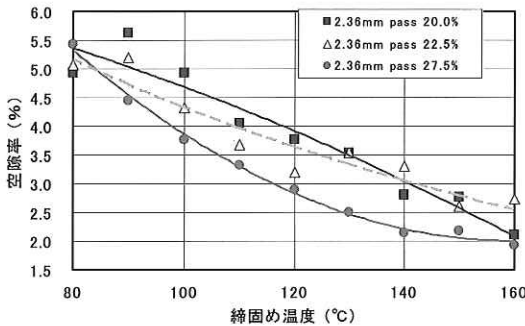


図-4 締固め温度の低下による空隙率の変化

表-2 混合物性状試験の結果

| 236mm pass                  | 20.0%               | 22.5%               | 25.0%               | 27.5%               | 30.0%               | 目標値                   |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| 項目                          | 試験値                 |                     |                     |                     |                     |                       |
| アスファルト量 (%)                 | 6.9                 | 6.6                 | 6.4                 | 6.3                 | 6.2                 |                       |
| 密度 (g/cm <sup>3</sup> )     | 2.358               | 2.371               | 2.380               | 2.384               | 2.397               |                       |
| 理論最大密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.421               | 2.432               | 2.439               | 2.443               | 2.448               |                       |
| 空隙率 (%)                     | 2.6                 | 2.5                 | 2.4                 | 2.4                 | 2.1                 |                       |
| 骨材空隙率 (%)                   | 18.3                | 17.6                | 17.2                | 16.9                | 16.5                |                       |
| 飽和度 (%)                     | 85.8                | 85.8                | 85.9                | 85.7                | 87.4                |                       |
| 安定度 (kN)                    | 8.1                 | 8.8                 | 9.0                 | 10.3                | 9.9                 |                       |
| フロー値 (1/100cm)              | 33                  | 35                  | 37                  | 50                  | 49                  |                       |
| 残留安定度 (%)                   | 96.4                | 94.6                | 85.5                | 85.4                | 94.9                | 75%以上                 |
| 動的安定度 (回/mm)                | 6300                | 7800                | 7000                | 6300                | 3900                | 3000以上                |
| 透水係数 (cm/sec)               | 不透水                 | 不透水                 | 不透水                 | 不透水                 | 不透水                 | 1×10 <sup>-7</sup> 以下 |
| 破断ひずみ                       | 62×10 <sup>-3</sup> | 62×10 <sup>-3</sup> | 58×10 <sup>-3</sup> | 65×10 <sup>-3</sup> | 62×10 <sup>-3</sup> | 6×10 <sup>-3</sup> 以上 |
| すべり抵抗値 60km/h               | 0.38                | 0.33                | 0.34                | 0.38                | 0.36                | 0.4以上                 |

を表-2に示す。ここで、目標値は本四公団の基準値<sup>2)</sup>や舗装の耐久性を考慮して決めた。表に示すように、すべり抵抗値は若干低いものの全ての配合でおおよそ目標値を満足した。従って、目標通りに施工ができれば、どの配合も適用の可能性はあるが、橋面舗装では施工上の問題があるため、これを考慮して選定することにした。

### 3. 施工を考慮した混合物の選定

#### 3.1 締固め温度の低下による影響<sup>3)</sup>

橋面上では、図-2で示したように通常の舗装よりも放熱しやすいため、施工温度の低下につながり、締固め不足などによる機能低下が懸念される。そこで、締固め温度を変えてマーシャル試験供試体を作成し、締固め温度低下による影響を検討した。検討には、2.36mm通過分20.0%、22.5%、27.5%の3種類を用いた。

図-3、4に示すように、締固め温度が低下することにより、締固め度の低下、空隙率の増大が見られた。また、影響の度合いは混合物によって異なり、粒度の粗い2.36mm通過分20.0%のSMA混合物は特に締固め温度の低下の影響が大きかった。空隙率の増大は、水密性の低下につながるため、異なる空隙率のSMA混合物を作製し、加圧透水試験(0.5MPa)により透水係数を調べた。結果を図-5に示す。図のように空隙率3.8%以下であれば不透水となることが分かった。従って、SMAの選定に当たっては、締固めやすいものがよく、また空隙率が3.8%以下(4cmの場合)になるように施工することがよいことが分かった。

#### 3.2 締固め温度の低下への対策<sup>4)</sup>

締固め温度が低下すると空隙率の増大につながり、水密性が確保できない問題があることが分かった。このため、温度が低下しても締固めが可能な中温化技術について検討を行った。

表-3に中温化剤を添加しない場合と添加した

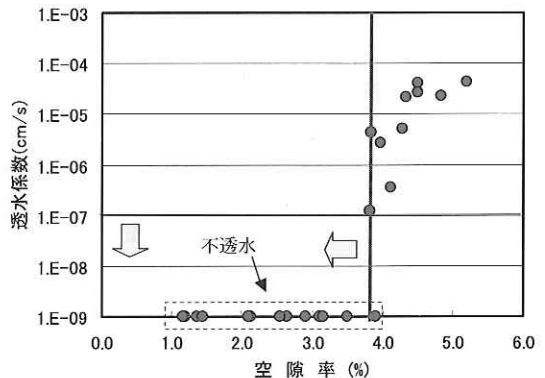


図-5 空隙率と透水係数

表-3 水密性を確保するのに必要な締固め温度

|               |       | 締固め温度 (°C) |     |       |       |     |
|---------------|-------|------------|-----|-------|-------|-----|
|               |       | 80         | 100 | 120   | 140   | 160 |
| 2.36mm<br>通過分 | 20.0% |            | ←   | ..... | ..... | →   |
|               | 22.5% |            | ←   | ..... | ..... | →   |
|               | 27.5% |            | ←   | ..... | ..... | →   |

→ 中温化剤なしで水密性確保が可能  
 ←..... 中温化剤により水密性確保が可能

場合における水密性が確保できる締固め温度についてまとめた。粒度の粗いSMA混合物は中温化剤を添加することで、締固め温度が100℃程度まで低下しても水密性が得られるようになり、施工性が非常に向上することが分かる。

#### 4. 舗装厚さの変化に関する検討

##### 4.1 舗装厚さの変動要因

ボルトや溶接跡など局所的な舗装厚さの変動が発生すると破損や機能低下の原因になる。鋼床版上の突起物について表-4にまとめた。高力ボルトの場合、最大で21mmの高さがあり、ボルトを使用した橋梁には薄層化舗装は困難であることが予想される。表の中で最も大きな凸部となる溶接余盛りは、ビード幅によるが、5mm程度を見ておけば良いと考えられる。また、舗装の厚さの合格判定値は、設計厚さより-7mmまで（個々の測定値の場合）とするのが一般的であるため、溶接による鋼床版の場合、12mmまでの厚さ変動に耐えられる舗装とする必要がある。

##### 4.2 舗装厚さによる水密性の変化

舗装厚さの変動の影響について検討を行った。舗装厚さを2.0～4.0cm変化させて締固め温度155℃で供試体を作製し、加圧透水試験より、それぞれの厚さで不透水となる空隙率を求めた。結果を図-6に示す。図より、舗装厚さが薄くなるほど不透水とするためには空隙率を小さくする必要がある。仮に空隙率3%となるように施工が行われた場合、今回のデータの最下限で見ると、最低でも3.4cmの舗装厚を確保する必要があることが分かる。

##### 4.3 局所的な舗装厚不足の影響

鋼床版上ではボルトのような突起物がある場合があり、薄層化舗装を施工した場合、局所的にかぶり厚さが薄くなり、耐久性や水密性に影響が出る可能性がある。このため、ボルトを想定して、かぶり厚さが変わるように舗装を施工し、耐久性、水密性への影響を見た。水密性を検討した結果を図-7に示す。混合物の粒度によって異なり、粒度が粗い2.36mm通過分20.0%のSMA混合物で

表-4 鋼床版上の突起物

|         |               | 高さ                           |
|---------|---------------|------------------------------|
| ボルト     | 高力ボルト<br>+ 座金 | 呼びM20 17.5mm                 |
|         |               | 呼びM22 20mm                   |
|         |               | 呼びM24 21mm                   |
| 溶接      | 溶接余盛り         | ビード幅B<15のとき h ≤ 3            |
|         |               | ビード幅15 ≤ B < 25のとき h ≤ 4     |
|         |               | ビード幅25 ≤ Bのとき h ≤ (4/25) × B |
| リブ間平坦性  |               | ≤ 2mm                        |
| 吊りピース残部 |               | ≤ 5mm                        |

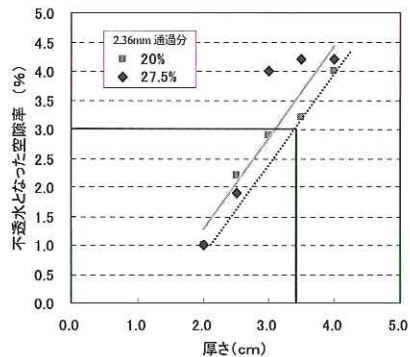


図-6 不透水となる空隙率の厚さによる違い

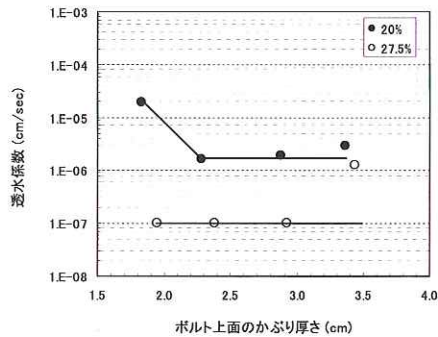


図-7 ボルト上のかぶり厚による透水係数の違い

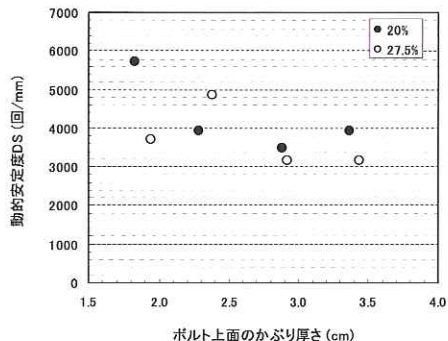


図-8 ボルト上のかぶり厚による動的安定度の違い

は、ボルトの影響が大きく、水密性を確保することは難しい。特に2.3cm以下では透水係数が非常に大きくなった。これに対し、2.36mm通過分27.5%のSMA混合物では、ボルトの影響はあまり見られず、ボルトのような局所的な厚さ不足の影響は比較的小さかった。また、図-8に示すように耐流動性については、いずれも目標値(3000)以上となり、問題のない範囲であった。

5. 接着性の検討

車両の走行により舗装は繰返しせん断を受けることから、接着層の繰返しせん断に対する抵抗性について検討した。繰返しせん断による試験は、特に標準的な試験方法がなかったため、図-9に示すように150mmφの鋼板上に表-5に示す各種接着層(接着剤、接着剤+防水材)を設け、その上に締固め温度を変えてSMA混合物を舗設したものを供試体とし、100kPaの応力で繰返しせん断試験を行った。結果を図-10~12に示す。

締固め温度が低くなると一様に破壊回数が減少し、接着性が悪くなることが分かる。本試験で通常橋面舗装に用いられるグースアスファルトの結果と比較すると、鋼板上に接着層だけを施し、SMA混合物を舗設したものは、適正な施工温度

表-5 試験に用いた接着層

| No. | 接着層     | 概要   |
|-----|---------|--|
| 1   | 接着剤のみ   | 一般的に鋼床版上で用いられる接着剤を施したものの。                  |
| 2   | シート系防水材 | 1.の接着剤の上に一般的に床版上で用いられるシート系の防水材を施したものの。     |
| 3   | 塗膜系防水材1 | 1.の接着剤の上に一般的に床版上で用いられるアスファルト系塗膜防水材を施したものの。 |
| 4   | 塗膜系防水材2 | 1.の接着剤の上に延性を強化したアスファルト系塗膜防水材を施したものの。       |
| 5   | 塗膜系防水材3 | 1.の接着剤の上に弾性を強化したアスファルト系塗膜防水材を施したものの。       |

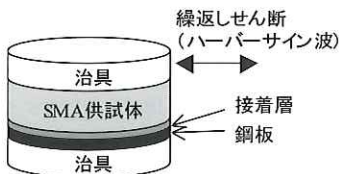


図-9 繰返しせん断試験の概要

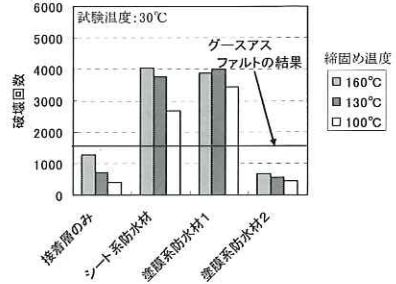


図-10 繰返しせん断試験における破壊回数(20%)

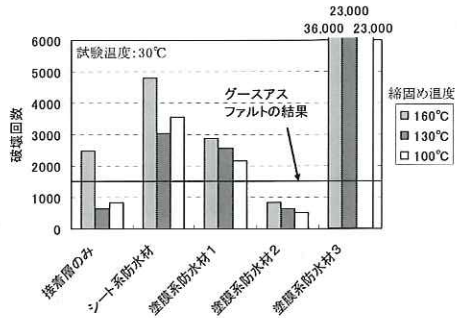


図-11 繰返しせん断試験における破壊回数(27.5%)

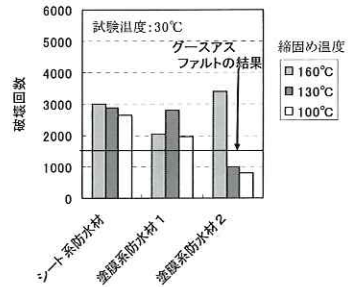


図-12 繰返しせん断試験における破壊回数(27.5%, 中温化)

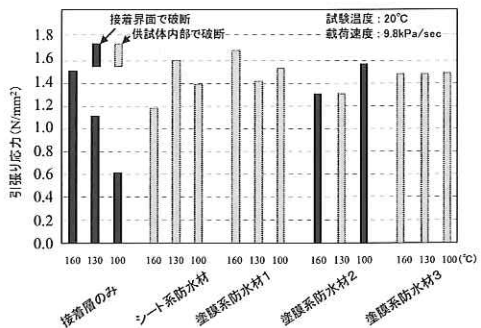


図-13 引張り試験による破断応力(27.5%)

でもグースアスファルトと同程度の破壊回数を得ることが難しいことが分かる。また、塗膜系防水材2も接着力が小さかった。塗膜系防水材3は非常に接着性がよく、他の防水材の10倍程度の抵抗

性が見られた。

混合物の違いでは、粒度の粗い2.36mm通過分20%の混合物は、防水材の効果が大きくなった。これは、粒度が粗いため、粗骨材と防水材がかみ合い機械的な強度も増したためと考えられた。中温化剤の影響では、図-12に示すように破壊回数の向上は見られず、接着性の向上には寄与しないと考えられた。これは、防水材も混合物の温度により多少溶融し、接着しているが、中温化剤を用いても防水材側の溶融にはつながらないためと考えられた。

繰返しせん断試験の破壊回数の比較的大きかった2.36mm通過分27.5%の混合物について、引張り試験の結果を図-13に示す。せん断による破壊回数が小さかった供試体では、やはり鋼板とアスファルト混合物の接着界面から破断するものが多かったが、せん断による破断回数が大きいものは、接着界面ではほとんど破壊しなかった。

以上より、グースアスファルト並の接着力を確保するためには、通常用いられる接着剤のみでは難しく、防水材のような多少厚みのある材料を利用して機械的な組み合わせによる接着力の強化を行うことが有効であることが分かった。また、中温化を行った場合、SMA混合物の性状は向上するが、接着力は向上しないため、中温化剤を利用した場合でも敷均し温度、初期転圧温度は下げないようにするべきであることが分かった。

## 6. 舗装端部の防水対策

舗装端部においては、図-14に示すように粗骨材が壁面に直接当たるため、空隙が生じやすい。このため、形成目地材を施す場合が多いが、その防水効果について確認を行った。形成目地材を施した場合と施さない場合について、締固め温度を変えて試験を行った。結果を図-15、16に示す。

図より、形成目地材を施さない場合は、全く防水性はないことが分かる。形成目地材を施した場合、締固め温度により透水係数が異なり、締固め温度の高い方が高い防水性を得られることが分かる。これは、形成目地材が混合物の温度により溶融し、骨材間を充填し機能を発現するためであり、温度が低いとこれが不十分になるためである。

舗装端部においては、車両の走行がないため、混合物に要求する防水性と比べて多少小さくてよいと考えられる。仮に $1 \times 10^{-4}$ cm/s程度必要だとすれば、舗装端部の混合物温度は120℃以上必要となる。

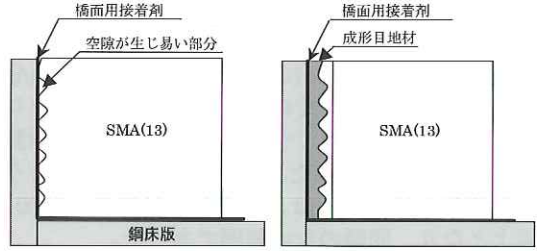


図-14 舗装端部の防水対策

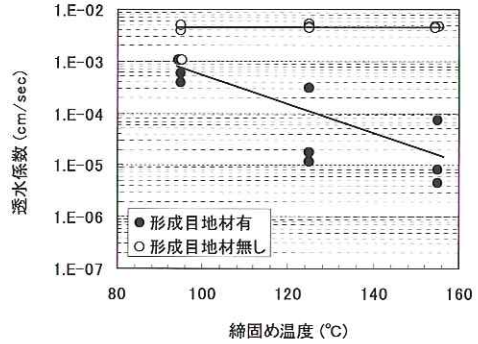


図-15 形成目地材の防水性 (20.0%)

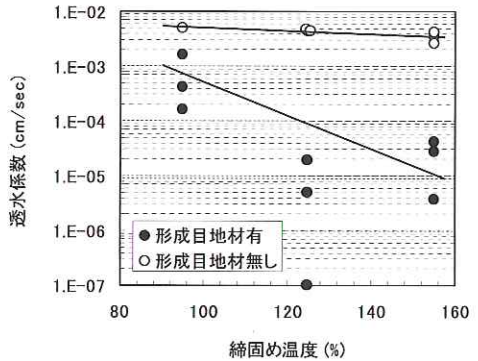


図-16 形成目地材の防水性 (27.5%)

## 7. 経済性に関する検討

### 7.1 舗装の低コスト化

表-6に検討した構造の直接工事費を示す。なお、本検討では、防水材の一部に市販されていない配合のものも用いている。これについては単価が分からないので、現在市販されている防水材の単価についてのみ計上している。

比較は、現在鋼床版で通常用いられるグースアスファルトを基層、表層を密粒度混合物とした場合とした。ケース1では防水材は用いず、接着層のみの場合とした。この場合、従来の構造の1/2以下の直接工事費となる。しかし、5. の繰返しせん断試験による検討で示したとおり、この構造でグースアスファルト並の接着性を出すのは難し

表-6 薄層化舗装の直接工事費

|            | 比較<br>(従来型)                  | ケース1<br>(防水層なし)        | ケース2<br>(塗膜防水材料)           | ケース3<br>(シート防水材料)           |
|------------|------------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 構造         | 密粒度<br>グーンス<br>アスファルト<br>接着層 | SMA<br>接着層             | SMA<br>防水層<br>(塗膜系)<br>接着層 | SMA<br>防水層<br>(シート系)<br>接着層 |
| 合計<br>(直工) | 約5,500円/m <sup>2</sup>       | 約2,300円/m <sup>2</sup> | 約4,500円/m <sup>2</sup>     | 約4,800円/m <sup>2</sup>      |

く、気温が高く、非常に厳しい施工管理下でない  
と実現性が低い。

ケース2と3は、防水材料を設けた場合であるが、  
通常市販されている防水材料でも十分な接着性が得  
られており、通常と比べて700~1,000円/m<sup>2</sup>程度  
コストが少なく、明石海峡大橋で試算すると59~  
84百万円程度コストを抑えることができると考え  
られる。

### 7.2 死荷重の軽減

4.2の検討により、最薄部で3.4cmを確保する必  
要があり、また4.1の検討により最厚部から-1.2cm  
まで厚さが変動する可能性があることが分かった。  
従って、十分な防水性を確保するためには、4.6cm  
を設計厚さにする必要がある。従って、4.6cmの  
舗装厚とした場合の舗装の死荷重の軽減量を計算  
すると、約47%の軽減となる。これを明石海峡大  
橋で試算した場合、舗装の重量は17千トンから  
9千トンになり-8千トンの死荷重軽減が可能と  
なることが分かった。

### 8. まとめ

以上の結果をまとめると以下のようなものである。

- ・ SMA混合物は、薄層化橋面舗装用混合物とし  
て適しており、温度低下の影響を受けにくかつ  
た2.36mmふるい通過分が27.5%の配合のもの  
が有効であった。

- ・ 水密性は、空隙率と厚さの影響を受けるため、  
この両方を考慮して決定する必要がある。
- ・ SMA混合物は締固め温度の低下により機能が  
発現できない場合があるため、必要に応じて中  
温化剤の利用などの対策を行う。
- ・ SMA混合物は厚さが不足すると機能が発現で  
きないので、最低厚さを3.4cm以上とし、床版  
上の不陸、舗装施工精度を考慮すると、設定厚  
さは4.6cm以上の厚さとする必要がある。
- ・ 接着剤のみでは必要な接着強度が得られない場  
合があるため、防水材料を用いることが有効であ  
る。
- ・ 舗装端部は、必ず予め形成目地材を施し、高い  
混合物温度で溶融する必要がある。
- ・ 舗装工のコストは、防水材料を使用しないと1/2  
以下、防水材料を使用すると700~1,000円/m<sup>2</sup>程  
度コストを低減できる。
- ・ 薄層化により舗装の死荷重は47%程度軽減でき  
る。  
今後は、試験施工などによる確認が必要である  
とともに、死荷重軽減による橋梁構造の簡素化に  
より、橋梁建設コストの低コスト化の程度を試算  
する必要がある。また、本研究で得られた知見は、  
一般橋梁舗装の下層にSMA混合物を導入する際  
にも役立つ知見が多いため、今後は一般橋梁用へ  
も応用していきたい。

### 参考文献

- 1) 新田弘之、吉田 武：鋼床版橋面舗装の薄層化技術  
の開発、舗装、vol.37(5)、2002.5
- 2) 本州四国連絡橋公団：橋面舗装基準、1987.6
- 3) 宮下知治、吉田 武、新田弘之：鋼床版に用いるア  
スファルト混合物の温度低下に関する検討、土木学  
会関東支部技術研究発表会、第30回、2003.3
- 4) 宮下知治、新田弘之、吉田 武：SMAの締固め温  
度低下に関する検討、土木学会第58回年次学術講演  
会、V-637、2003.9

新田弘之\*



独立行政法人土木研究所材  
料地盤研究グループ新材料  
チーム 主任研究員 (前基礎  
道路技術研究グループ舗装  
チーム 主任研究員)  
Hiroyuki NITTA

伊藤正秀\*\*



独立行政法人土木研究所基  
礎道路技術研究グループ舗  
装チーム 上席研究員  
Masahide ITO

宮下知治\*\*\*



(株)福田道路技術研究所 (元  
独立行政法人土木研究所基  
礎道路技術研究グループ舗  
装チーム 交流研究員)  
Tomoji MIYASHITA