

鋼床版舗装の合成効果に関する実験的研究

Experimental Study on the Composite Action of Asphalt for Orthotropic Steel Decks

小笠原 照夫
Teruo OGASAWARA

川田工業(株)技術開発本部技術研究室
主幹

大野 克紀
Katsunori OHNO

川田工業(株)橋梁事業部東京技術部
技術課

吉家 賢吾
Kengo YOSHIIE

川田工業(株)技術開発本部構造物試験室

This paper examines an experiment on the composite action of a deck plate and an asphalt paving. This composite action greatly influences the fatigue durability of a Deck Plate/Rib Junction. This experiment examined the influence of a thickened deck plate, asphalt-paving material, and a waterproofing layer. In order to improve the fatigue durability of a Deck Plate/Rib Junction, it is important to use very stiff asphalt paving to increase the amount of composite action of a deck plate and an asphalt paving.

Key words: asphalt paving, orthotropic steel decks, composite action

1. まえがき

鋼床版は、自重が軽く現場での工期短縮を図ることができる等の利点を有しており、長大橋や都市内高架橋の床版として多くの実績がある。しかし、比較的薄いデッキプレートと多くの縦リブと横リブで溶接にて補剛した床構造であり、複雑な応力性状を示す、溶接による欠陥や変形が生じる可能性がある等の欠点も抱えている。また、舗装を介して輪荷重を直接支持する構造であり、疲労に対する配慮が必要である。

鋼床版の疲労損傷事例は、Severn橋やWye橋¹⁾がよく知られており、わが国においても最近発見され始め、疲労損傷事例から損傷部位が整理されている²⁾。疲労は繰返し応力の変動範囲と繰返し回数に支配されるため、交通量が大きく、大型車混入率の高い路線の橋梁で、疲労損傷の発生が懸念される。

一方、鋼床版各部の疲労損傷発生メカニズムが数多くの研究から明らかにされており、疲労耐久性向上を目的とした構造ディテールの改良³⁾が行われている。

また、省力化や疲労耐久性、舗装耐久性の向上を目的とした合理化鋼床版構造(厚板デッキプレート、大型Uリブ、Uリブ支間の拡大)の研究⁴⁾も行われており、載荷板による無舗装試験体のUリブ連続縦溶接部の局部応力発生メカニズムが解明されている。この研究では、U

リブ連続縦溶接部の応力には、板曲げ応力成分が大きく作用しており、この板曲げ応力成分は舗装との合成作用により大幅に低減されることを示唆している。筆者の知る限りでは、Uリブ連続縦溶接部の疲労損傷事例は、厚さが40mm程度以下と薄い舗装の鋼床版に限られており、Uリブ連続縦溶接部の疲労耐久性を検討するには、舗装による応力低減効果、すなわち、デッキプレートと舗装の合成挙動を明らかにすることが重要であると考えられる。

本研究では、デッキプレートとアスファルト舗装の合成挙動を実験的に明らかにし、デッキプレートの厚板化の影響や舗装材料の違い、防水層の影響について検討した。

2. 供試体

供試体の形状、寸法を図1、表1に示す。供試体は各2体である。

Gシリーズは、鋼床版舗装として標準的な構造の、レベリング層にグースアスファルト混合物($t=40\text{mm}$)と、表層に改質アスファルト混合物($t=35\text{mm}$)である。鋼床版厚は標準的なデッキプレート厚である $t=12\text{mm}$ と、合理化鋼床版構造の厚板デッキプレートを想定した $t=19, 22\text{mm}$ の3種類とし、デッキプレートの厚板化の影響を比較検討する。

Sシリーズは、鋼床版舗装のレベリング層への適用が検討⁵⁾⁻⁸⁾されている砕石マスチックアスファルト混合物

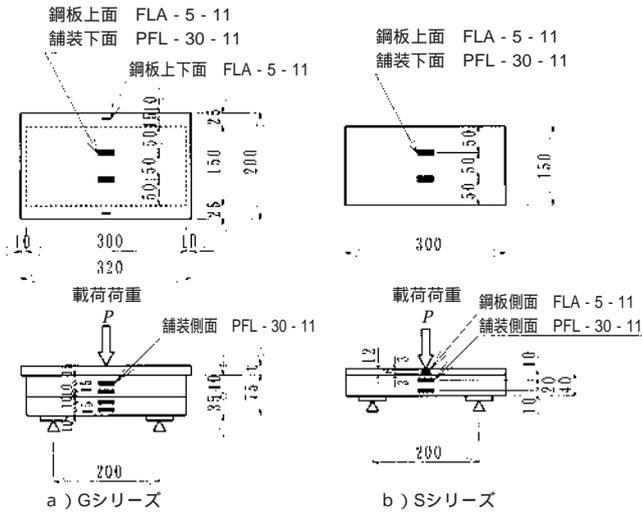


図1 供試体の形状、寸法

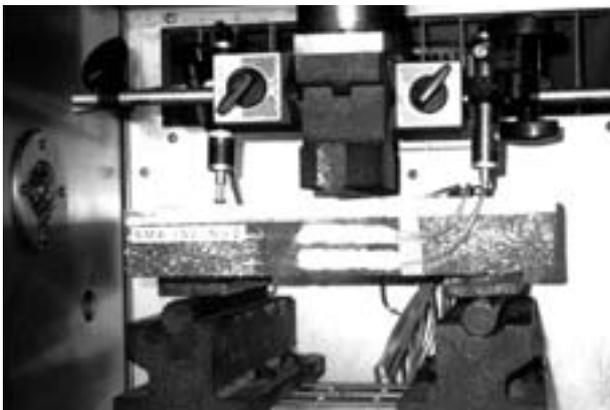


写真1 供試体

(Split Mastix Asphalt, 以下SMA)であり, 碎石の最大粒径が5mmと13mmの2種類について比較検討する。配合試験結果を表2に示す。

また, 舗装施工時に損傷を受けにくいと考えられるメタクリル系とウレタン系の塗膜系防水層について, 舗装の合成効果に与える影響を検討した。

なお, Sシリーズは, ヤードで試験施工された鋼板上のSMAを, 鋼板とともにダイヤモンドカッターで切り取ったものであり, 施工条件は実橋で施工されるものと同じである。

3. 試験方法

アスファルト混合物の力学的性状は, 温度や載荷速度により変化し, 高温時に軟らかく伸び性能に優れ, 低温時に硬く伸び性能が低下するなど, 複雑な性状を示すことが知られている。したがって, 温度と載荷速度を種々変えてその影響を調査するため, 恒温槽を用いた繰返し載荷試験を行った。

試験は, 常に舗装に引張りずみが生じるように, 舗装を下にした3点曲げとした。試験条件を図1, 表3に示す。ひずみゲージは供試体の上下面と側面に貼付しており, 貼付位置とひずみゲージの種類, ゲージ長を図1に

表1 供試体

| 供試体名称 | | 舗装構造 | 防水層 | 接着層 | 鋼板厚 (mm) |
|-------|-----------|-------------------|--------|---------|----------|
| Gシリーズ | G12-1, 2 | 基層: グース 表層: 改質 | — | アスファルト系 | 12 |
| | G19-1, 2 | " | — | " | 19 |
| | G22-1, 2 | " | — | " | 22 |
| Sシリーズ | S05-1, 2 | SMA(5) | — | " | 12 |
| | S13-1, 2 | SMA(13) | — | " | 12 |
| | S05M-1, 2 | SMA(5) | メタクリル系 | — | 12 |
| | S05U-1, 2 | " | ウレタン系 | — | 12 |

注) SMA(5)は最大碎石粒径5mm, SMA(13)は最大碎石粒径13mmの碎石マッシュアスファルト混合物。

表2 碎石マッシュ混合物の配合試験結果

| 配合名 | | SMA(5) | SMA(13) | 備考 |
|-----------------------------|--------|----------------------|----------------------|-----------------------------|
| 骨材 配合率 (%) | 6号碎石 | | 63 | |
| | 7号碎石 | 55 | 3 | |
| | 砕砂 | 21 | 16 | |
| | 細砂 | 12 | 6 | |
| | 石粉 | 12 | 12 | |
| | 合計 | 100 | 100 | |
| アスファルト量 (%) | | 7.4 | 6.5 | |
| MC添加率 (%) | | 0.5 | 0.5 | |
| 骨材 合成粒度 (通過百分率) (%) | 19.0mm | | 100 | |
| | 13.2mm | | 98.6 | |
| | 9.5mm | 100 | 79.4 | |
| | 4.75mm | 97.6 | 40.3 | |
| | 2.36mm | 45.3 | 33.1 | |
| | 600 μm | 30.6 | 22.6 | |
| | 300 μm | 21.7 | 17.8 | |
| | 150 μm | 14.1 | 13.4 | |
| 75 μm | 7.4 | 11.2 | | |
| 密度 (g/cm ³) | | 2.369 | 2.393 | |
| 理論密度 (g/cm ³) | | 2.430 | 2.454 | |
| 飽和度 (%) | | 87.2 | 85.7 | |
| VMA (%) | | 19.5 | 17.5 | |
| 安定度 (kN) | | 8.0 | 7.8 | |
| フロー値 (1/100cm) | | 37 | 37 | |
| 残留安定度 (%) | | 91.3 | 91.8 | 96時間水浸 |
| 動的安定度DS値 (回/mm) | | 2 198 | 2 200 | 目標値2 000 以上 |
| 曲げ破断ひずみ | | 6.8×10^{-3} | 6.6×10^{-3} | 6.0×10^{-3} 以上 |
| 透水係数 | | 6.5×10^{-8} | 7.4×10^{-7} | 目標値 1.0×10^{-7} 以下 |
| 引張接着強度 (N/mm ²) | | 1.9 | 1.7 | 1.4以上 |

表3 試験条件

| 供試体名称 | | 載荷荷重 P (kN) | 温度 () | 載荷速度 (Hz) |
|-------|-----------|------------------|-----------------------|------------------|
| Gシリーズ | G12-1, 2 | 10 ± 5, 20 ± 15 | - 20, - 10, ± 0, + 10 | 0.5, 2, 5, 8, 10 |
| | G19-1, 2 | 20 ± 10, 30 ± 20 | " | " |
| | G22-1, 2 | " | " | " |
| Sシリーズ | S05-1, 2 | 6 ± 4 | - 10, ± 0, + 10 | 1, 5, 10 |
| | S13-1, 2 | " | " | " |
| | S05M-1, 2 | " | " | " |
| | S05U-1, 2 | " | " | " |

示す。また, 温度は舗装の中に熱電対を埋め込み内部の温度を計測した。

供試体を恒温槽内の試験機に設置した状況を写真1に示す。

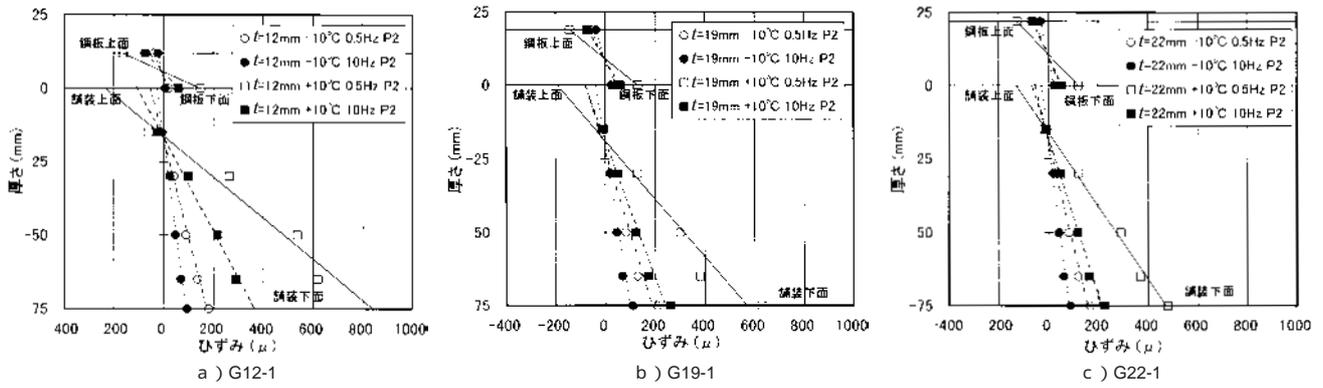


図2 厚さ方向のひずみ分布 (Gシリーズ)

4. 試験結果と考察

(1) Gシリーズ

厚さ方向のひずみ分布を図2に示す。図中の線は各載荷ケースの線形近似曲線である。舗装の厚さ方向のひずみ分布は概ね線形であり、舗装の中立軸位置は、温度や載荷速度、鋼板厚が変わってもほとんど変化しないことがわかる。また、鋼板と舗装界面の双方のひずみを直接計測することは困難であるが、本計測結果より、界面付近でひずみが不連続となる弾性合成的な挙動を示していることがわかる。この原因としては、接着層のずれ変形、もしくは鋼板付近の舗装にはバインダー単独の特性が現れ、界面付近のひずみ分布が非線形になっていることなどが考えられる。試験終了後に舗装を鋼板から剥がしてみたが、強固に接着しており、接着が切れた重ね梁として挙動していないことを確認している。

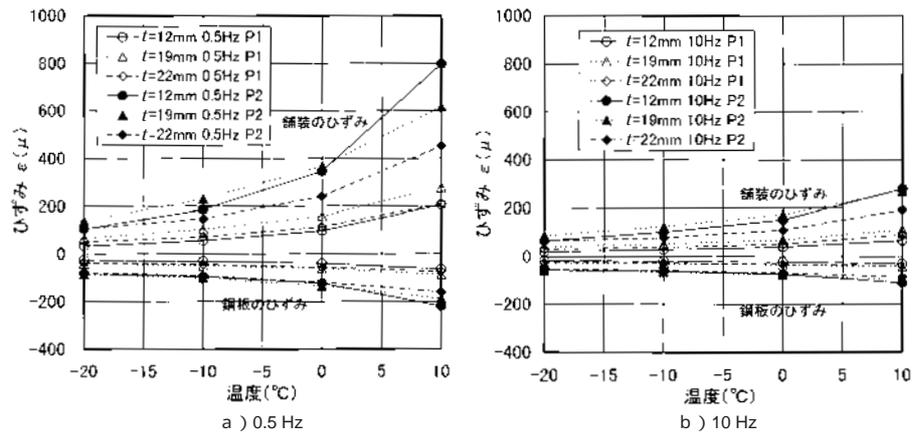


図3 温度の影響 (Gシリーズ)

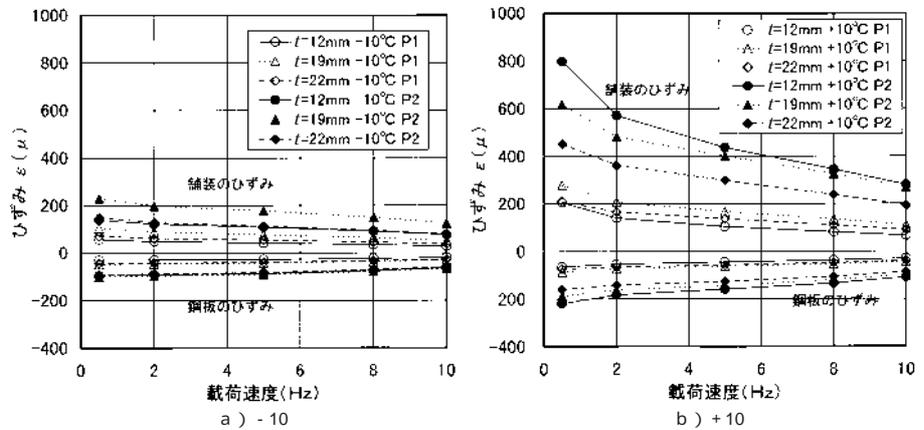


図4 載荷速度の影響 (Gシリーズ)

鋼床版舗装の課題である舗装割れは、引張ひずみの繰返しによる疲労であり、接着強度が十分あれば、引張ひずみの最大値は舗装表面に生じることがわかる。

温度の影響を図3に示す。図中のP1, P2はそれぞれ載荷荷重の小さなケースと大きなケースを示す。G19とG22の載荷荷重は同じであるが、G12の載荷荷重はG19, G22と同程度のひずみとするため

表4 鋼板単独のひずみ

| 鋼板厚 (mm) | 載荷荷重(kN) | | | |
|-------------|----------|-----|-----|-----|
| | 5 | 10 | 15 | 20 |
| $t = 12$ | 256 | — | 679 | — |
| $t = 19$ | — | 188 | — | 375 |
| $t = 22$ | — | 142 | — | 285 |

に小さくしてある。温度が高くなると舗装，鋼板のひずみは共に大きくなり，特に載荷速度の遅い方が変化が大きい。また，鋼板厚の違いに着目すると，鋼板厚の薄い方が温度の影響が著しく，舗装の影響を強く受けることがわかる。

載荷速度の影響を図4に示す。載荷速度が速くなると舗装，鋼板のひずみは共に小さくなり，特に温度の高い方が変化が大きい。また，鋼板厚の違いに着目すると，鋼板厚の薄い方が載荷速度の影響が著しく，舗装の影響を強く受けることがわかる。

舗装の合成効果による鋼板のひずみの低下率を図5に示す。鋼板単独での試験結果を表4に示しており，比率は，(Gシリーズの鋼板のひずみ) / (鋼板単独のひずみ) で整理している。温度や載荷速度の影響と同様に，温度が低く，載荷速度が遅い方の比率が大きく，舗装の合成効果が低下することがわかる。鋼板厚の違いに着目すると，合成効果は鋼板の薄い方が大きく，その差はほぼ鋼板の板厚比程度である。また，載荷荷重が大きくなると合成効果は多少小さくなることわかる。

(2) Sシリーズ

厚さ方向のひずみ分布を図6に示す。Gシリーズと比べると舗装厚は薄い，鋼板と舗装の合成挙動はほとんど同じと考えられる。SMA(5)とSMA(13)を比較すると，SMA(13)の中立軸位置が鋼板に近くなっている。これはSMA(13)の砕石の噛合せ効果が大きく，変形係数が大きくなるためと考えられる。また，Gシリーズの中立軸位置は舗装厚の1/5付近であるが，SMA(5)では1/10付近であり，鋼板と舗装界面付近のずれ変形はSシリーズの方が小さい。

防水層に着目すると，MMAではその影響はほとんどないが，ウ

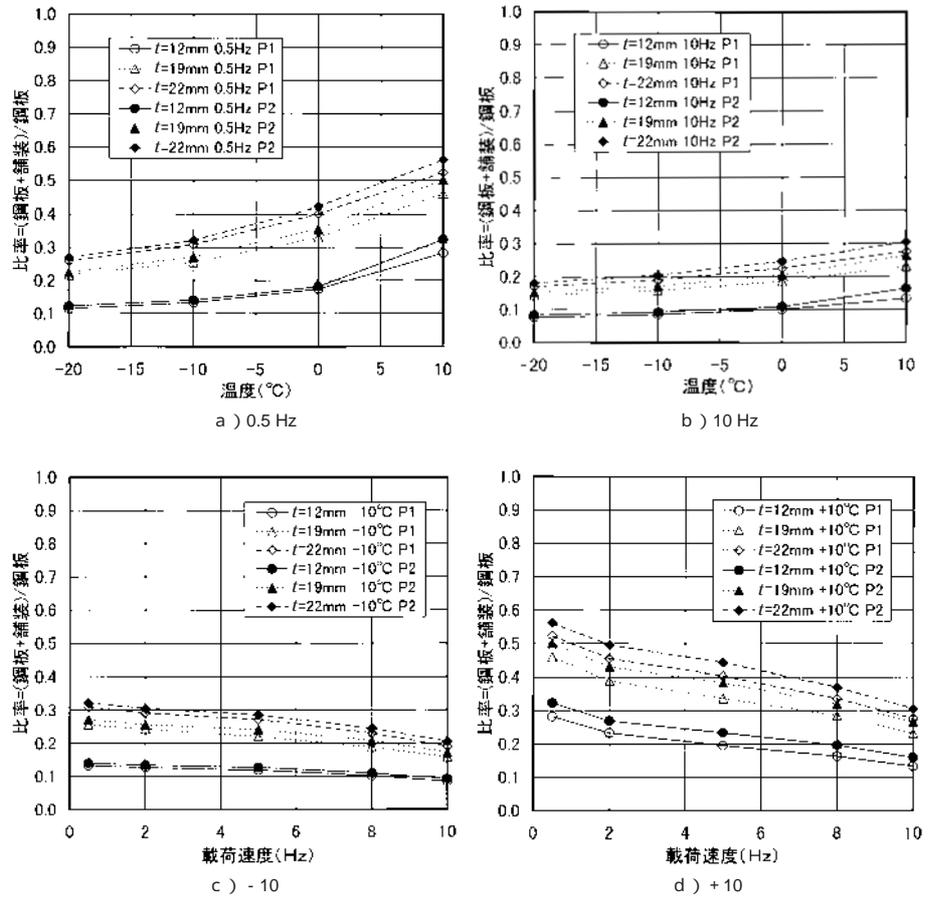


図5 合成効果 (Gシリーズ)

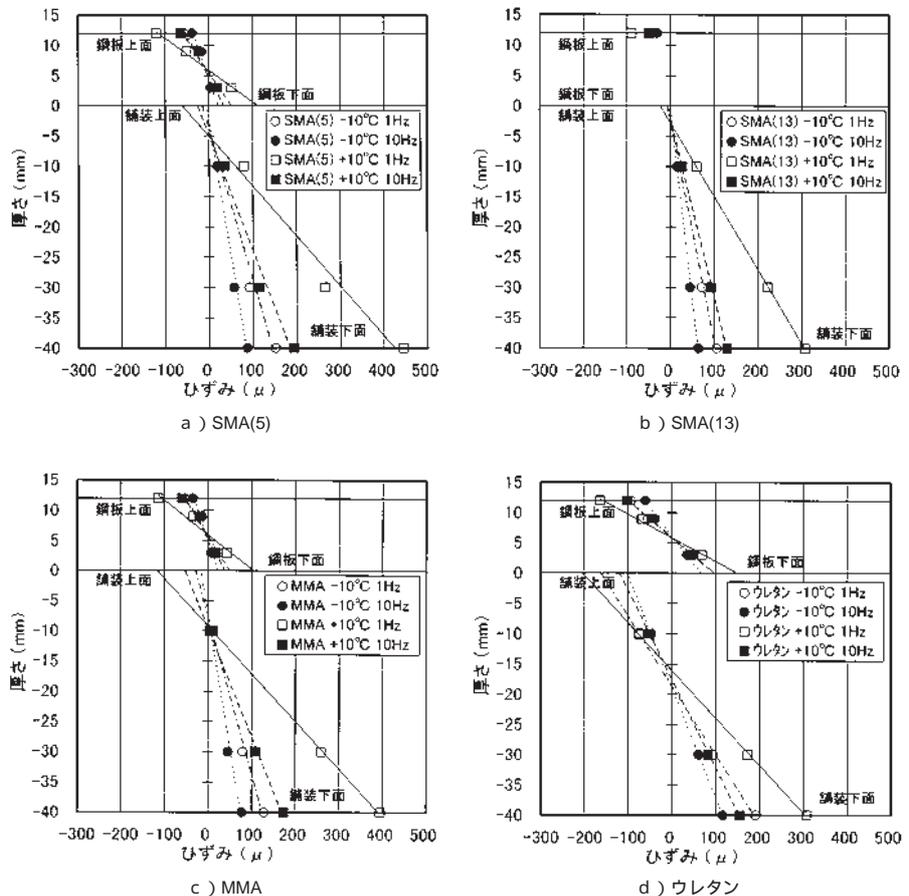


図6 厚さ方向のひずみ分布 (Sシリーズ)

レタンでは中立軸位置が舗装厚の中央付近にあり、ほとんど重ね梁のような挙動を示していることがわかる。これは、柔軟性のあるウレタン ($t=2\text{mm}$) でずれ変形が生じるためと考えられる。

温度の影響を図7に、载荷速度の影響を図8に示す。SMA(5)とSMA(13)を比較すると、SMA(13)の舗装と鋼板のひずみが小さくなっており、最大砕石粒径の大きい方が変形係数も大きくなることわかる。防水層に着目すると、MMAではその影響はほとんどないが、ウレタンでは温度や载荷速度の影響が小さく、低温時のひずみが大きく高温時のひずみが小さくなっており、舗装が低温時に伸び性能が低下することから、舗装割れが懸念される。

舗装の合成効果による鋼板のひずみの低下率を図9に示す。鋼板単独でのひずみは 255μ (载荷荷重 4kN) である。SMA(5)とSMA(13)を比較すると、SMA(13)の比率が小さくなっており、最大砕石粒径の大きい方が舗装の合成効果が大きくなることわかる。防水層に着目すると、MMAではその影響はほとんどないが、ウレタンでは全体的に比率が大きく舗装の合成効果が著しく低下することがわかる。

5. おわりに

以上より、本研究により得られた結果をまとめると以下の通りである。

デッキプレートとアスファルト舗装は、ひずみが界面付近で不連続となる弾性合成的な挙動を示す。

舗装割れの原因である引張ひずみは、接着強度が十分であれば舗装表面で最大となる。

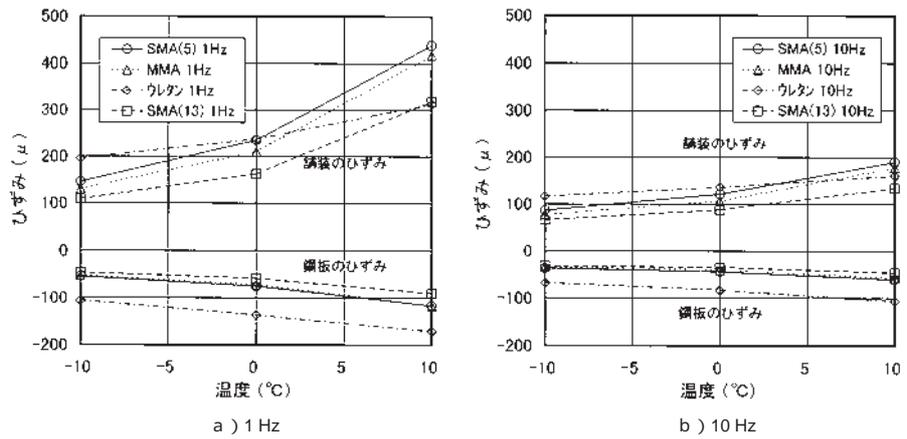


図7 温度の影響 (Sシリーズ)

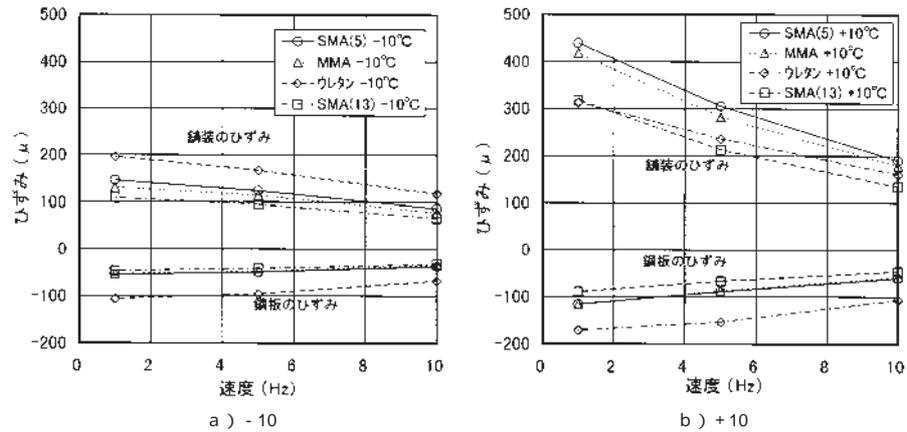


図8 载荷速度の影響 (Sシリーズ)

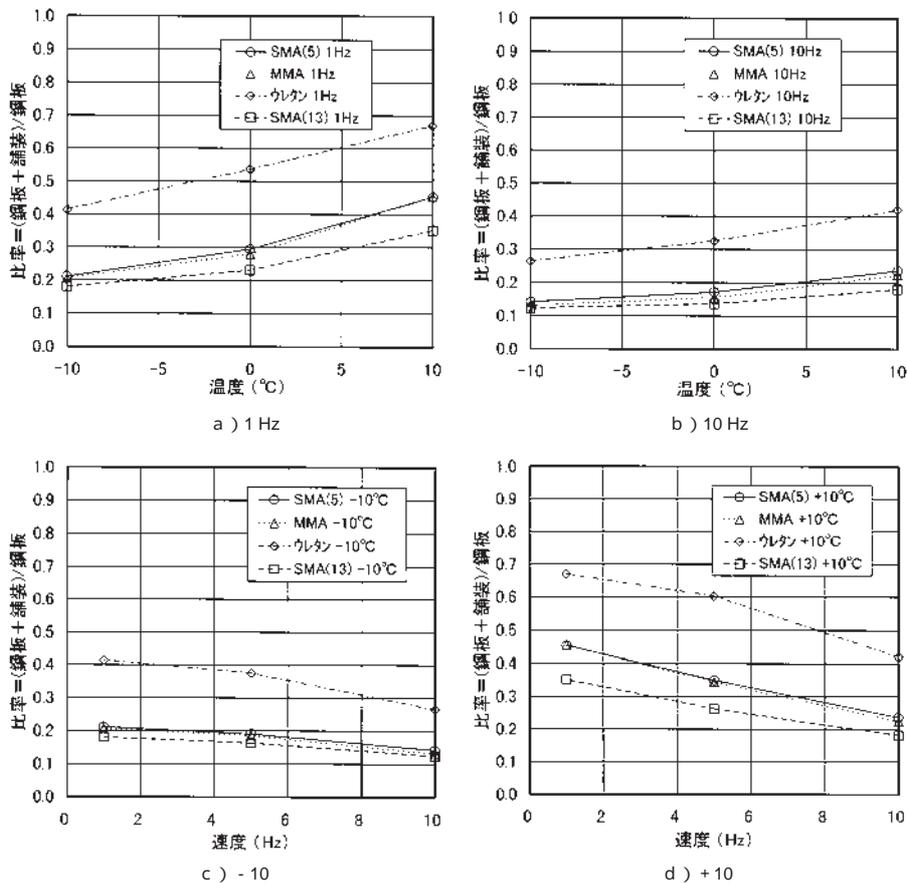


図9 合成効果 (Sシリーズ)

舗装の力学的性状は、温度や載荷速度により変化する。特に温度が高く載荷速度の遅い場合に変化が著しく、温度が低いもしくは載荷速度が速い場合には、比較的变化の程度が少ない。

デッキプレートが厚板化すると舗装の合成効果（影響）は低下するものの、デッキプレートのひずみは大幅に低減され、Uリブ連続縦溶接部の曲げ応力も大幅に低減されると考えられる。今回の実験の範囲では、厚板化による合成効果の違いは概ねデッキプレートの板厚比程度である。

砕石マスチックアスファルト混合物では、最大砕石粒径の大きい方が変形係数が大きく、舗装の合成効果も大きくなることがわかった。これは砕石の噛み合わせ効果と考えられ、変形係数はグースアスファルト混合物より砕石マスチックアスファルト混合物の方が大きいと考えられる。

デッキプレートと舗装の界面に柔軟性のある防水層を用いると、重ね梁のような挙動を示し合成効果が著しく低下する。

Uリブ連続縦溶接部の疲労耐久性には、舗装の合成効果が非常に大きく影響する。

この部位の疲労耐久性を向上させるためには、舗装を厚くすることも一つの方法であるが、死荷重が増加するため、変形係数の大きな舗装を適用したり、またデッキプレートと舗装の界面をできる限り完全合成に近づけることが効果的であると考えられる。

本実験を実施するにあたり、日本道路公団の笹井幸男氏には多大なご協力をいただきました。ここに記して深く感謝致します。

参考文献

1) M4 SEVERN CROSSING - Structural Feasibility Study -

Interim Report, Oct. 1982.

2) 土木学会：鋼床版の疲労，鋼構造シリーズ4，1990年9月．

3) 大橋治一・藤井裕司・村瀬佐太美：鋼床版の疲労を考慮したディテールの改良，橋梁と基礎，pp.31～36，1997年4月．

4) 小笠原照夫・勝俣盛・町田文孝・川瀬篤志・溝江慶久：鋼床版構造の合理化に関する検討・実験，構造工學論文集，Vol.45A, pp.1229～1240, 1999.3.

5) 笹井幸男・富田貴敏・谷口克也：東水戸道路那珂川橋・鋼床版における砕石マスチック舗装について，第23回日本道路会議論文集，pp.280～281, 1999年10月．

6) 笹井幸男・皆方忠雄・小笠原照夫：FEM解析による鋼床版SMA舗装の検討～東水戸道路那珂川橋～，第23回日本道路会議論文集，pp.278～279, 1999年10月．

7) 笹井幸男・大井正美・大野克紀：鋼床版SMA舗装の挙動調査～東水戸道路那珂川橋～，第23回日本道路会議論文集，pp.276～277, 1999年10月．

8) 笹井幸男・松島保志・小笠原照夫：鋼床版舗装の塗膜系防水層の選定について，第23回日本道路会議論文集，pp.384～385, 1999年10月．

9) 笠原篤・岡川秀行・菅原照男：アスファルト混合物の動的性状とその舗装構造の力学的解析への利用，土木学会論文報告集，第254号，pp.107～117，1976年10月．

10) 亀井正博・山本正雄・鈴木智巳・神野藤保夫・山内崇賢：鋼床版Uトラフの局部強度，三菱重工技報，Vol.24, No.4, pp.340～345, 1987年7月．

11) 小笠原照夫・吉家賢吾：鋼床版舗装の合成効果に関する実験，土木学会第54回年次学術講演会講演概要集，CS - 154, pp.308～309, 1999年9月．

12) J.W.SMITH：ASPHALT PAVING FOR STEEL BRIDGE DECKS, *Asphalt Paving Tech.*, Vol.56, 1987.