

1 等

# 路盤の高耐久化に向けたハイモデュラスアスファルト混合物の適用検討

(株)NIPPO 総合技術部 技術研究所

//

//

(株)高速道路総合技術研究所 舗装研究室

白井 悠  
渡邊 真一  
尾本 志展  
田中 敏弘

## 1 はじめに

舗装における路盤は、表層および基層に均一な支持基盤を与えると同時に、上層から伝えられた交通荷重を分散して路床に伝達する重要な役割を担っている。

しかし、近年、高速道路においては、長期供用に伴い路盤の損傷が顕在化してきており、供用後約20年を経過した箇所を対象に実施した「解体新書プロジェクト」によるアスファルト舗装の開削調査により、その損傷実態が明らかとなっている<sup>1)</sup>。

その調査結果によれば、下層路盤では、わだち掘れや細粒分が路面に噴出しているポンピングの発生箇所において、交通荷重による永久変形や雨水の浸透や滞水による脆弱化がみられている。また、上層路盤のアスファルト安定処理路盤では、アスファルト混合物層の厚さが20cm程度と比較的薄い箇所や上述したような下層路盤の損傷箇所において、これまで高速道路では想定されていなかった底面から上方へ向かって進展する疲労ひび割れの発生が初めて確認されている。

こうした路盤の損傷に対しては、表層から所定の深さまで路盤を打ち替えることが必要となる。しかし、現状ではこうした路盤からの厚層打ち換

えは、修繕に伴う費用や交通規制時間の確保などの観点から、その実施は困難なことが多い。このため、今後も路盤の損傷がますます増えていくことを想定すると、路盤の性能が長期にわたり維持されるように、修繕する際に路盤の高耐久化を同時に図っていくことが喫緊の課題であるといえる。

そこで、筆者らは、前述した路盤の損傷実態を踏まえ、路盤の高耐久化を図るためには、アスファルト安定処理路盤に替わる上層路盤材料として、疲労抵抗性に優れ、脆弱化した下層路盤に対しても作用荷重が軽減できるような剛性の高い荷重分散性の大きなアスファルト混合物（以下、混合物）を使用することが有効であると考えた。

これに該当する混合物として、1990年代にフランスで開発され<sup>2)</sup>、現在では欧州をはじめ多くの国で広く使われているハイモデュラスアスファルト混合物（High Modulus Asphalt）（以下、HiMA）が挙げられる<sup>3),4)</sup>。このHiMAは、バインダーとして低針入度のアスファルトを使用し、アスファルト量を多く、かつ空隙率を小さくすることで、スティフネスや疲労抵抗性、はく離抵抗性や水密性などの耐水性を高めた混合物である。

そこで、本研究では、このHiMAに着目し、海外での配合や規格を参考にしながら、わが国の

実情に合ったバインダーを選定して、HiMAの上層路盤への適用を検討した。本研究では、最初に、上述した4つの混合物性状について、わが国で表基層や路盤に使用されている一般的な混合物と併せて検討を行った。次に、その試験結果をもとに、多層弾性理論による構造解析を行い、舗装体における荷重分散性能や疲労抵抗性能について検討した。最後に、構内試験施工を行い、HiMAの品質や施工性を確認するとともに、FWD試験やひずみ測定により構造的な評価を行った。

本論文は、これらの一連の検討結果について報告するものである。

## 2 HiMAの混合物性状の検討

### (1) HiMAのバインダーと配合

海外では、バインダーとして、低針入度アスファルトを使用している。しかし、低針入度アスファルトは、わが国では汎用性に欠け価格面でも課題がある。そこで、本検討では、HiMAのバインダーは、経済性を考慮してストレートアスファルト60/80（以下、ストアス60/80）に安価な硬質特殊添加剤を加えたものを用いることにした。

HiMAの配合は海外の事例<sup>5)</sup>を参考に定めた。すなわち、最大粒径は20mmとし、粒度はわが

表-1 検討に用いた混合物の種類と粒度および配合

混合物の種類	HiMA (20)	密粒 (13)	粗粒 (20)	As処理(30)	大粒径(30)
バインダーの種類	添加剤入りストアス60/80	ストアス60/80	ストアス60/80	ストアス60/80	ストアス60/80
通過質量百分率 (%)	31.5mm	100.0	100.0	100.0	100.0
	26.5mm	100.0	100.0	100.0	96.0
	19.0mm	98.2	100.0	98.7	75.6
	13.2mm	75.4	99.2	82.4	58.2
	4.75mm	48.0	62.9	44.9	41.6
	2.36mm	32.1	43.1	27.2	28.1
	0.6mm	19.4	23.8	15.9	14.9
	0.3mm	13.2	15.5	10.3	10.4
	0.15mm	8.6	9.7	6.3	7.2
	0.075mm	6.3	6.7	4.5	5.2
アスファルト量 (%)	5.3	5.7	5.3	3.8	4.5
理論最大密度 (g/m <sup>3</sup> )	2,524	2,479	2,508	2,577	2,532
基準密度 (g/m <sup>3</sup> )	2,456	2,395	2,406	2,443	2,429
空隙率 (%)	2.7	3.4	4.1	5.2	4.1
骨材空隙率 (%)	15.3	16.6	16.4	14.1	14.6
飽和度 (%)	82.4	79.5	75.1	63.2	72.3
マーシャル安定度 (kN)	13.1	11.8	8.5	10.2	9.5

国の粗粒度アスファルト混合物（20）（以下、粗粒（20））の中央粒度に近く、0.075mm通過質量百分率は粗粒（20）よりも2~3%多いものとなっている。設計アスファルト量は、空隙率3.0%を目標に設定した。また、最大粒径20mmのHiMA（以下、HiMA（20））の比較対象として、わが国で表基層や路盤に一般的に用いられている4種類の混合物（ストアス60/80使用）についても検討を行った。表-1に、検討したHiMA（20）と4種類の混合物の粒度と配合を示す。

### (2) 試験項目と評価基準値

HiMA（20）の混合物性状は、スティフネス、疲労抵抗性、はく離抵抗性や水密性などの耐水性について検討した。

HiMAは、冒頭で述べたように多くの国で実績があり、また基準化されている。そこで、本検討では、スティフネスと疲労抵抗性については、海外の基準値をもとに、これらの性能を評価した。その適用にあたっては、わが国で実施可能な試験法を用いている国の基準値を採用し、スティフネスはイギリス<sup>6)</sup>、疲労破壊回数はポーランド<sup>6)</sup>の基準値を準用した。

また、はく離抵抗性と水密性などの耐水性に関しては、設計要領第一集舗装保全編（東日本高速道路(株)・中日本高速道路(株)・西日本高速道路(株)（以下、NEXCO））<sup>7)</sup>に示されている水浸ホイールトラッキング試験と加圧透水試験により測定される、はく離率と透水係数の基準値を用いて評価した。

本検討に用いた評価基準値の一覧を表-2に示す。なお、ポーランドでは疲労試験での載荷周波数は10Hzとしている。しかし、本検討では試

表-2 本検討に用いたHiMAの評価基準値

項目	試験方法	要求	適用国または機関
スティフネス (20℃, 125ms)	NATによるITSM試験	5,500MPa以上	イギリス
疲労破壊回数※ (10℃, 10Hz, 130μ)	4点式繰返し曲げ試験機による疲労試験	1 × 10 <sup>6</sup> 回以上	ポーランド
はく離率 (60℃, 6時間)	水浸ホイールトラッキング試験	5.0%以下	NEXCO
透水係数 (150kPa, 10分)	加圧透水試験	1 × 10 <sup>-2</sup> cm/s以下	NEXCO

※本検討では、載荷周波数は5Hzとした。

験装置の制約から、後述するように載荷周波数は5 Hzとしているため、疲労破壊回数の評価基準値は表-2に示す値をそのまま準用している。

### (3) スティフネスの検討

混合物のスティフネスは、写真-1に示す Nottingham Asphalt Tester (以下、NAT) を使用した、Indirect Tensile Stiffness Modulus (以下、ITSM) 試験方法により測定した。この試験法は BS EN12697<sup>8)</sup> に準拠したもので、円柱供試体を用いて、繰返し間接引張試験によりスティフネスを測定するものである。試験条件は、①試験温度:20℃、②荷重載荷モード:ハーバーサイン波、③荷重載荷時間:125 ms (8 Hz)、④最大横方向変位:5 μm とした。なお、スティフネス算出に用いるポアソン比は0.35と仮定した。

測定結果を図-1に示す。図-1より、HiMA (20) のスティフネスは8,200 MPaとなっており、

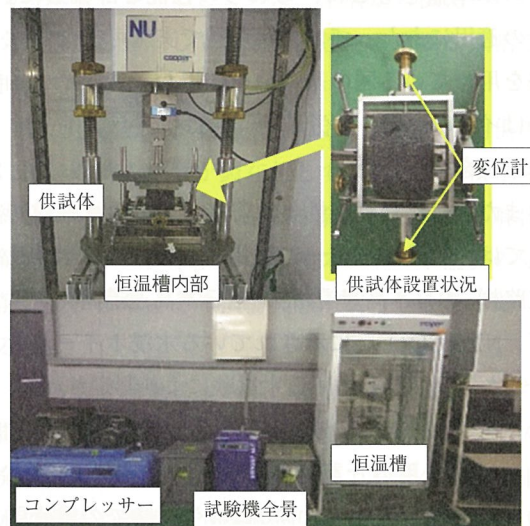


写真-1 NAT 試験機

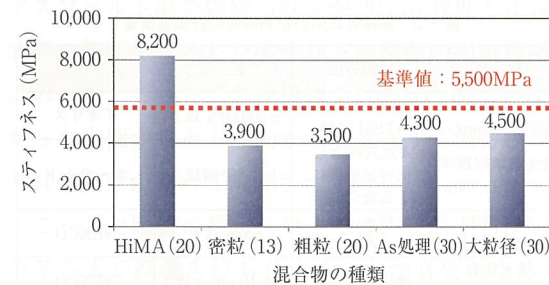


図-1 各混合物のスティフネス

他のいずれの混合物よりも高い値を示し、As 処理 (30) と比較すると1.9倍大きい結果となっている。また、HiMA (20) は、他の混合物と異なり、表-2に示した海外の基準値 (≥ 5,500 MPa) を満足していることがわかる。これは、バインダーに用いた硬質特殊添加剤の効果によるものであるといえる。

### (4) 疲労破壊回数の検討

本検討は、写真-2に示す4点式繰返し曲げ試験機によるひずみ制御方式の疲労試験を実施して行った。試験方法は、舗装調査・試験法便覧((公社)日本道路協会)<sup>9)</sup> B018 Tに準拠し、混合物の疲労破壊回数 (以下、破壊回数) を測定した。試験条件は、①試験温度:10℃、②載荷周波数:5 Hz、③載荷波形:正弦波、④ひずみ:比較対象の混合物は200 μ、300 μ、400 μの3水準、HiMA (20) は130 μを加えた4水準とした。

結果は表-3、図-2に示すとおりである。表

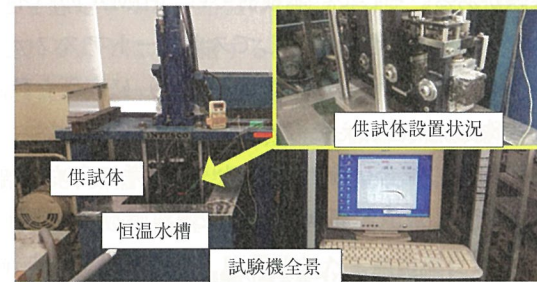


写真-2 4点式繰返し曲げ疲労試験機

表-3 繰返し曲げ疲労試験結果

混合物の種類	HiMA (20)	密粒 (13)	粗粒 (20)	As処理 (30)	大粒径 (30)	
バインダーの種類	添加剤入 ストアス 60/80	ストアス 60/80	ストアス 60/80	ストアス 60/80	ストアス 60/80	
疲労破壊回数 (回)	ひずみ 400 μ	13,400	10,900	7,100	700	6,700
		9,300	11,000	8,100	800	4,400
		11,200	10,300	5,600	900	6,100
	平均	11,300	10,700	6,900	800	5,700
	ひずみ 300 μ	28,200	27,200	28,400	4,700	19,200
		36,300	22,300	-	2,700	-
		21,100	18,545	-	7,800	-
	平均	28,500	22,700	28,400	5,100	19,200
	ひずみ 200 μ	170,600	105,600	125,400	68,000	82,700
		143,400	142,200	141,200	63,000	150,700
		245,600	141,900	91,100	44,800	76,700
	平均	186,500	129,900	119,200	58,600	103,400
ひずみ 130 μ	3,027,400					
	2,699,100					
	2,525,300					
平均	2,750,600					

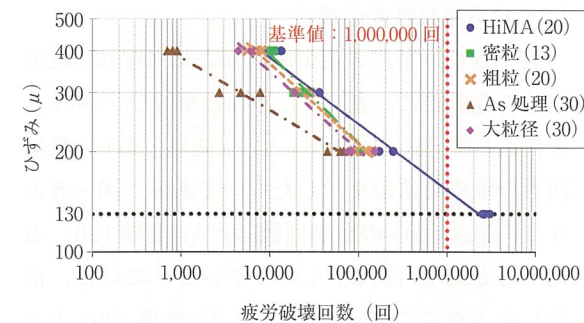


図-2 各混合物の疲労破壊回数

-3より、HiMA (20) と他の混合物を比較すると、HiMA (20) の方が疲労抵抗性に優れ、ひずみ200 μでは破壊回数は平均でAs 処理(30)より約3倍、密粒(13)より約1.4倍、粗粒(20)より約1.6倍、大粒径(30)より約1.8倍大きい結果となっている。また、図-2より、ひずみ130 μの場合の破壊回数をみると、HiMA (20) は100万回を超え、表-2に示した海外の基準値を満足する結果となっている。

### (5) 耐水性の検討

混合物の耐水性は、水浸ホイールトラッキング試験 (以下、水浸 WT 試験) によるはく離率、および加圧透水試験機による透水係数を測定することで検討した。

水浸 WT 試験の条件は、NEXCO 試験方法 244-2005<sup>10)</sup> に準拠し、①温度:60℃、②試験時間:6時間、③養生方法:60℃気乾状態で12時間、その後、水浸1時間、④試験水位:模擬路盤上端より+5 mmとした。また、加圧透水試験の条件は、舗装調査・試験法便覧 B017 Tに準拠し、①加圧時間:24時間、②水圧:150 kPa、③測定時間:10分、④供試体:マーシャル供試体、として行った。

結果を表-4に示す。表-4より、はく離率はHiMA (20) では表-1に示した基準値 (≤ 5%)

表-4 耐水性試験結果

混合物の種類	HiMA (20)	密粒 (13)	粗粒 (20)	As処理 (30)	大粒径 (30)
はく離率 (%)	4.8	13.7	26.0	38.9	30.9
基準値	5.0 以下				
透水係数 (cm/s)	0	0	予備加圧段階で多量の漏水が発生し、測定打ち切り		
基準値	1 × 10 <sup>7</sup> 以下				

を満足し、その他の混合物は基準値を超える13.7~38.9%となった。また、透水係数は、HiMA (20) と密粒 (13) では表-1に示した基準値 (≤ 1 × 10<sup>-7</sup> cm/s) を満足したが、他の3つの混合物では水密性が不十分で、本試験では計測不能であった。

以上のことから、HiMA (20) は、他の混合物よりも十分な耐水性を有していることが確認できた。

## 3 構造解析による HiMA の適用効果の検討

### (1) 解析の概要

本検討では、HiMA (20) を上層路盤へ用いた場合の荷重分散性や、疲労抵抗性に対する適用効果を確認するために、多層弾性解析ソフト「GAMES」を用いて構造解析を行った。本解析では、図-3に示す舗装断面 (交通量区分 N6、設計 CBR20%、設計期間10年、信頼度90%) を対象に、輪荷重 (49 kN) が載荷した時の上層路盤下面の最大引張りひずみ (以下、ε<sub>t</sub>) と下層路盤上面の最大圧縮ひずみ (以下、ε<sub>c</sub>) を算出した。これらひずみの計算は、上層路盤にHiMA (20) とAs 処理 (30) を用いた場合の2ケースについて行った。



図-3 計算条件

計算条件は図-3に示すとおりで、混合物のスティフネスは表基層の密粒 (13) と粗粒 (20)、および上層路盤のHiMA (20) とAs 処理 (30) では室内試験での実測値、下層路盤の弾性係数は舗装設計便覧 ((公社)日本道路協会)<sup>11)</sup> より一般的な値 (200 MPa)、路床の弾性係数は CBR20% に相当する値 (200 MPa) を用いた。なお、荷重分散

性能の検討にあたっては、脆弱化した下層路盤に HiMA を適用した場合の荷重作用による負荷軽減の程度を確認するために、下層路盤の弾性係数の値を 100 から 250 MPa まで変化させた時の  $\epsilon_z$  も算出した。

### (2) 荷重分散性能の検討

下層路盤の弾性係数が 200 MPa の場合の解析結果を表-5 に示す。表-5 より、HiMA (20) は As 処理(30)よりもスティフネスが大きいことから、両ひずみともに小さくなる結果となっている。

表-5 下層路盤の弾性係数が 200MPa の場合の解析結果

混合物の種類	① HiMA (20)	② As 処理 (30)
バインダーの種類	添加剤入 ストアス 60/80	ストアス 60/80
上層路盤下面の $\epsilon_r$ ( $\mu$ )	102	139
下層路盤上面の $\epsilon_z$ ( $\mu$ )	346	414

次に、下層路盤の弾性係数を変化させた時の、弾性係数と  $\epsilon_z$  との関係を図-4 に示す。図-4 より、上層路盤が As 処理 (30) の場合、下層路盤の弾性係数が 200 MPa で下層路盤が健全とみなせる場合をみると、 $\epsilon_z$  は 414  $\mu$  となっている。これに対し、下層路盤が脆弱化し弾性係数が 150 MPa まで低下したと想定すると、 $\epsilon_z$  は 492  $\mu$  まで増大する結果となっている。一方、この場合、上層路盤に HiMA (20) を用いていれば、 $\epsilon_z$  は 411  $\mu$  にまで軽減されることがわかる。

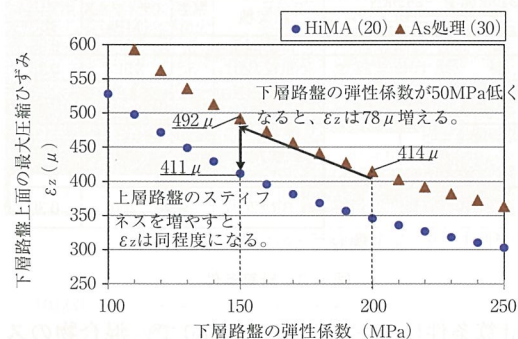


図-4 下層路盤の弾性係数と上面の最大圧縮ひずみの関係

以上のことから、限られた条件下での試算ではあるが、HiMA (20) は As 処理 (30) よりも荷重分散性が大きく、下層路盤が脆弱化していても下層路盤への荷重作用による負荷を軽減できる可能性を有していることが確認できた。

### (3) 疲労抵抗性能の検討

図-5 は、前述の疲労試験により得られた疲労曲線の近似式に、表-5 に示した解析ひずみの  $\epsilon_r$  を代入して、HiMA (20) と As 処理 (30) の破壊回数を求めた結果を示したものである。図-5 より、HiMA (20) の破壊回数は、As 処理 (30) と比べると約 13 倍大きくなっている。これは、前述したように、HiMA (20) は As 処理 (30) よりも疲労抵抗性に優れ、なおかつスティフネスが大きいため発生ひずみも小さくなり、これにより破壊回数に大きな差が現れてくるものと考えられる。

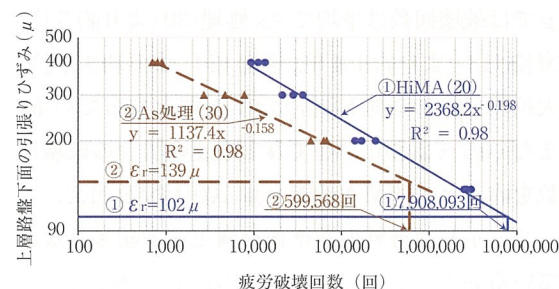


図-5 構造解析で算出された疲労破壊回数

以上のことから、本検討においても、限られた条件下での試算ではあるが、HiMA (20) を上層路盤に適用することで、疲労抵抗性が増大し、As 処理 (30) よりも疲労ひび割れの発生を抑制することが期待できるものといえる。

## 4 構内試験施工

### (1) 試験施工の概要

本試験施工は、HiMA (20) の品質や施工性と HiMA (20) を上層路盤へ適用した場合の構造評価を行うために実施した。舗装断面は、図-6 に示すように、NEXCO の最小舗装厚の断面とし、上層路盤に HiMA (20) と As 処理 (30) を用いた 2 工区を施工した。上層路盤の施工時には、両工区とも、上層路盤下面の水平引張りひずみ (以下、下面ひずみ) を計測するために、ひずみ計 (株東京測器研究所製の KM-100 HB) を設置した。

HiMA (20) の品質はプラントで製造されたマーシャル密度で、施工性は作業性と締固め度により評価した。構造評価は、上層路盤施工後と舗装後

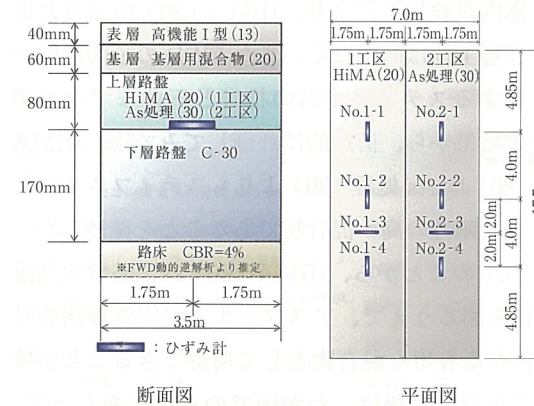


図-6 試験施工の概略

に FWD で荷重 (49 kN) を載荷し、動的逆解析によるスティフネスの推定値と下面ひずみの実測値をもとに行った。

### (2) 試験施工の状況

写真-3 に、HiMA (20) の施工状況とひずみ計の設置状況を示す。HiMA (20) の施工は、通常の舗装と同様な機械編成とし、敷きならしはアスファルトフィニッシャー、初期転圧はタンデムローラ、二次転圧はタイヤローラを用いて行った。施工日は平成 28 年 11 月 7 日～10 日で、上層路盤舗装時の最高気温は 10.3℃であった。比較的寒い時期の施工であったが、HiMA (20) の施工性は比較工区の As 処理(30)と同程度であり、良好な結果であった。



写真-3 施工状況

### (3) 試験施工の結果

試験施工で得られた結果をまとめると、表-6 に示すとおりである。以下に、それぞれの結果について述べる。

表-6 試験施工の結果

項目	試験施工時	
	1 工区 HiMA (20)	2 工区 As 処理 (30)
マーシャル密度 (g/m <sup>3</sup> )	2,456	2,443
試験施工時	2,439	2,417
試験施工		
締固め度 (%)	97.6 ~ 100.6	98.2 ~ 100.2
スティフネス (MPa) ※1 (平均値)	5,980 ~ 7,850 (6,940)	4,110 ~ 6,050 (5,110)
実測ひずみ ( $\mu$ ) ※2 (平均値)	166 ~ 169 (168)	167 ~ 228 (193)
実測ひずみより求めた 疲労破壊回数 (回)	636,200	75,100
試験時路面温度 (℃)	16.7 ~ 22.2	15.1 ~ 22.2

※1 上層路盤面で FWD 試験を行い、動的逆解析により求めた値  
※2 表層面で FWD による荷重 (49kN) を載荷した時のひずみ計の実測値

### 1) 混合物の品質

プラントで製造した HiMA (20) のマーシャル密度は、表-6 に示すとおり室内配合と同程度となっている。このため、混合物の品質は問題ない結果であった。

### 2) 施工性

施工後に現場切取りコアを採取し、切取りコアの締固め度を測定した。締固め度は表-6 に示すとおり 97.6～100.6% であり、作業性も良好であったことから、施工性は問題ない結果であった。

### 3) FWD での動的逆解析による推定スティフネス

表-6 に示したスティフネスは、上層路盤面での FWD による測定たわみ量をもとに、動的逆解析ソフト「Wave BALM」により 3 層モデル (路床、下層路盤、上層路盤) で解析して推定した結果を示している。これより、HiMA (20) のスティフネスは、室内試験結果よりやや小さいものの、As 処理 (30) より約 1.4 倍程度大きな値が得られている。したがって、試験施工からも、HiMA (20) はスティフネスの大きな剛性の高い混合物であることを確認できた。

### 4) 上層路盤下面の引張りひずみ

HiMA (20) の下面ひずみは、表-6 に示したように、As 処理 (30) よりも平均で 25  $\mu$  小

い結果であった。また、海外でも HiMA の下面ひずみを計測した事例があり、その結果によれば、HiMA の方が従来の混合物より 6～13  $\mu$  程度低減したと報告されている<sup>12)</sup>。混合物の配合や舗装構成ならびに測定時の温度など条件が異なるため厳密な比較は行えないが、その報告を参考にすると、本試験施工で得られた HiMA (20) による下面ひずみの低減量は概ね妥当な値であるといえる。したがって、HiMA (20) を用いることで、実際の舗装体においても、下面ひずみを低減できることが確認できた。

また、実測ひずみの結果を図-5に示す疲労曲線に適用すると、HiMA (20) は As 処理 (30) より破壊回数は約8倍程度大きくなる結果であった。

以上のことから、下面ひずみの測定結果からも、HiMA (20) は剛性が高い混合物であり、疲労ひび割れの発生を抑制することが期待できることを確認できた。

## 5 まとめ

近年、高速道路において、路盤の損傷が顕在化してきているなか、路盤の高耐久化を図るために、アスファルト安定処理路盤材に替わる新たな材料として、海外で実績のある HiMA (20) について各種検討を行った。検討では、わが国の実情を踏まえ、HiMA (20) のバインダーとして、ストアス 60/80 に安価な硬質特殊添加材を加えたものを用いた。その結果、以下のような知見が得られた。

- ① 検討した HiMA (20) は、スティフネス、疲労抵抗性、耐水性ともに、比較対象とした国内の一般混合物より優れており、スティフネスおよび疲労抵抗性は海外の基準値を満足する結果であった。
- ② 構造解析により、限定した試算ではあるが、HiMA (20) は As 処理 (30) より荷重分散性能が高く、脆弱化した下層路盤に対しても荷重作用の負荷を軽減できることや、疲労ひび割れの発生を抑制することが期待できることがわかった。

- ③ 構内試験施工により、HiMA (20) の品質および施工性は問題なく、また FWD の動的逆解析によるスティフネスの推定と下面ひずみの測定結果から、構造的に評価してみても、HiMA (20) は As 処理 (30) よりもスティフネスの大きな剛性の高い混合物であることを確認した。

以上のことから、HiMA (20) は、路盤の高耐久化を図るうえで、アスファルト安定処理路盤材に替わる有用な混合物として期待できることが確認できた。今後は、わが国での適用にあたって、HiMA (20) のスティフネスや疲労抵抗性などに対する要求性能を改めて検討していくとともに、これらの性能とバインダー性状や配合との関係を明らかにし、混合物の更なる性能向上を図っていく予定である。

### 【参考文献】

- 1) 高橋ほか：高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクト，舗装工学論文集第20巻，pp.L93～104，2015。
- 2) Jean- Francois Corte : Development and Uses of Hard - Grade Asphalt and of High - Modulus Asphalt Mixes in France, TRANSPORTATION RESEARCH CIRCULAR No.503, 2001.
- 3) D.Sybilski (IBDiM) ほか：Laboratory and field implementation of high modulus asphalt concrete. Requirements for HMAC mix design and pavement design, SPENS, 2009.
- 4) M.NKGAPHEL ほか：Construction of a high modulus asphalt (HiMA) trial section ethekwiwi : South Africa's First Practical Experience with Design, Manufacturing and paving of HiMA, Abstracts of the 31<sup>st</sup> Southern African Transport Conference, 2012.
- 5) M. McHale ほか：Evaluation of EME2 type mixtures incorporating softer grade binders - Phase I progress report, Transport Research Laboratory, 2012.
- 6) Laszio Petho ほか：High Modulus High Fatigue Resistance Asphalt (EME2) Technology Transfer, Austroads Ltd, 2014.
- 7) 東日本高速道路(株)・中日本高速道路(株)・西日本高速道路(株)：設計要領第一集 舗装保全編 2016.
- 8) British Standards Institution : Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part26, 2004.
- 9) (公社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧〔第3分冊〕, 2007.
- 10) 東日本高速道路(株)・中日本高速道路(株)・西日本高速道路(株)：NEXCO 試験方法 第2編 アスファルト舗装関係試験方法, 2016.
- 11) (公社)日本道路協会：舗装設計便覧, 2006.
- 12) Hyun Jong Lee ほか：Performance evaluation of high modulus asphalt mixtures for long life asphalt pavements, Construction and Building Materials 21, 2007.