

高速道路舗装の長寿命化に向けた 高耐久路盤用混合物の開発と施工事例

菅野 勝一・高橋 茂樹・白井 悠

高速道路における長期供用路線の損傷実態を調査した「解体新書プロジェクト」では、上層路盤底面からの疲労ひび割れや下層路盤の軟弱化が確認されている。こうした損傷の修繕には通常では路盤層からの打換えが有効であるが、実際の現場では困難な場合が多い。舗装をより長寿命化していくためには、修繕の際に路盤の高耐久化を図ることが有効であり、路盤高耐久化のための新たな材料開発として、海外で実績の多いアスファルト混合物 HiMA に着目して高耐久路盤用混合物を検討した。本検討では、高耐久路盤用混合物が我が国の一般的な混合物に対して疲労抵抗性等の耐久性に優れていることを確認した。また、実道での試験施工においても所定の性能を有することを確認したので本稿ではその内容を紹介する。

キーワード：高速道路，舗装，長寿命化，上層路盤，HiMA，疲労抵抗性，スティフネス

1. はじめに

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 20～40 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」¹⁾により、その損傷実態が明らかとなっている。調査結果によると、アスファルト混合物層の厚さが 20 cm 程度と比較的薄い箇所や下層路盤の損傷箇所において、疲労ひび割れの発生が高速道路で初めて確認されている。

こうした損傷に対しては、路盤も含めた損傷箇所までを打ち換えることが通常の施工方法であるが、交通規制時間の確保や修繕に伴う費用などの観点から、その実施は困難なことが多い。このため、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有効であるといえる。

そこで、筆者らは上層路盤に従来のアスファルト安定処理路盤に代わる、疲労抵抗性に優れ、かつ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、剛性の高いアスファルト混合物（以下、混合物）が必要であると考えた。

ここで、海外に目を向けると、これに該当する混合物として、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^{2),3)}。HiMA は、1990 年代にフランスで開発され⁴⁾、その後はイギリスをはじめ欧州各地に広まり、現在では、世界の多くの国で広く使われている。この HiMA は、

低針入度（10～40 1/10 mm 程度）のアスファルトバインダ（以下、バインダ）を使用し、バインダ量を多く、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等を高めた混合物である。そこで、基本的な考え方は海外のものを踏襲しつつ、わが国の実情に合った HiMA として高耐久路盤用混合物を検討した。

高耐久路盤用混合物の開発では、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比較しつつ室内試験により検討を行った。次に、構造解析により舗装体として下層路盤への負荷低減効果や疲労抵抗性能について検討した。そして最後に、実道適用に関する検討として試験施工を行った。本稿ではこれら結果について紹介する。

2. 高耐久路盤用混合物の検討

(1) 高耐久路盤用混合物のバインダと配合

海外の HiMA では低針入度アスファルトを使用しているが、わが国では汎用性および価格の面において課題がある。このため、高耐久路盤用混合物のバインダは、経済性、および汎用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）に硬質特殊添加剤（以下、添加剤）を加えたものを用いることとした。

高耐久路盤用混合物の配合は、海外の事例²⁾を参

考に定めた。この配合は、最大粒径は 20 mm、粒度はわが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、0.075 mm 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水密性等を確保するために空隙率が 2~3%となる量に設定した。ここで、検討に用いた高耐久路盤用混合物 (以下、高耐久路盤) とわが国で一般的に用いられている 4 種類の混合物の配合を表一に示す。

表一 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	高耐久路盤	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 + ストアス 60/80	ストアス 60/80			
通過質量百分率 (%)	31.5 mm	-	-	100.0	100.0
	26.5 mm	100.0	100.0	100.0	96.0
	19.0 mm	98.2	100.0	98.7	75.6
	13.2 mm	75.4	99.2	82.4	58.2
	4.75 mm	48.0	62.9	44.9	41.6
	2.36 mm	32.1	43.1	27.2	28.1
	0.6 mm	19.4	23.8	15.9	14.9
	0.3 mm	13.2	15.5	10.3	10.4
	0.15 mm	8.6	9.7	6.3	7.2
	0.075 mm	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
基準密度 (g/m ³)	2.456	2.395	2.406	2.443	2.429
空隙率 (%)	2.7	3.4	4.1	5.2	4.1
骨材間隙率 (%)	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

(2) 試験項目と評価基準値

高耐久路盤の検討では、ステイフネス、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試験を実施した。本検討に用いた試験項目と評価基準値の一覧を表一に示す。冒頭にも記したが、HiMA は多くの国で実績があり、また標準化されている。本検討における適用にあたっては、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た。ステイフネスはイギリス⁵⁾、疲労破壊回数はポーランド⁶⁾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)) 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。なお、ポーランドでは疲労試験での载荷周波数は 10 Hz であるが、本検討では、試験装置の制約から後述するように、载荷周波数は 5 Hz としており、試験条件が異なるものの、疲労破壊回数の評価基準値は表一に示す値をそのまま準用した。

表一 2 試験項目と評価基準値

項目	試験方法	要求	適用国または機関
ステイフネス (20℃, 124 ms)	NATによる ITSM 試験	5,500 MPa 以上	イギリス
疲労破壊回数* (10℃, 10 Hz, 130 μ)	4点式繰返し曲げ試験機による疲労試験	1×10 ⁶ 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 (150 kPa, 10分)	加圧透水試験	1×10 ⁻⁷ cm/s 以下	NEXCO

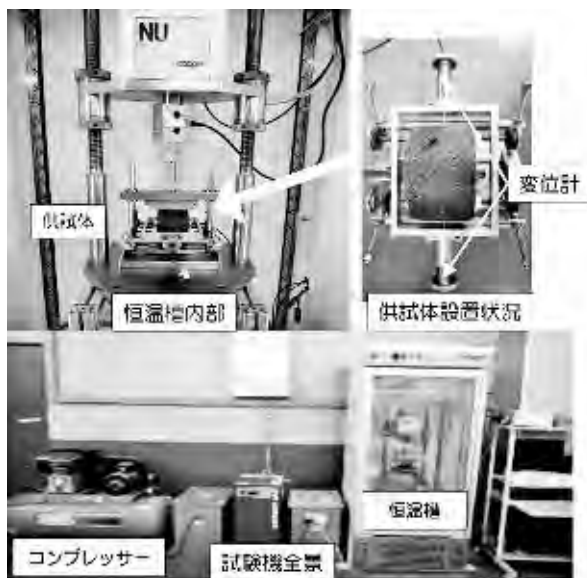
※本検討では、载荷周波数は 5 Hz とした。

(3) 混合物性状

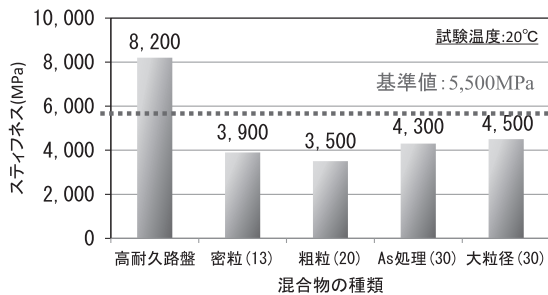
(a) ステイフネス

ステイフネスは、写真一に示す 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 EN12697⁷⁾ 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イ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荷重载荷モード：ハーバーサイン波、③荷重载荷時間：124 ms (8 Hz)、④最大横方向変位：5 μm とした。なお、ステイフネス算出に用いるポアソン比は 0.35 とした。

測定結果を図一に示す。図一より、高耐久路盤のステイフネスは 8,200 MPa となっており、他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、高耐久路盤は、他の混合物と異なり、表一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、バインダに用いた添加剤の効果によるものであるといえる。



写真一 NAT 試験機



図一 各混合物のスティフネス

(b) 疲労破壊回数

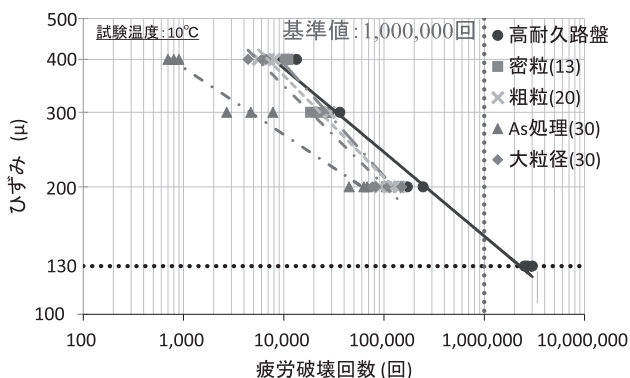
疲労破壊回数（以下、破壊回数）の検討は、舗装調査・試験法便覧（(公社)日本道路協会) B018T に準拠して実施した。試験条件は、①供試体寸法：50×50×400 mm，②試験温度：10℃，③載荷周波数：5 Hz，④載荷波形：正弦波，⑤ひずみ：200μ，300μ，400μの3水準（高耐久路盤のみ130μを加えた4水準）とした。

結果を図一2に示す。図一2より、高耐久路盤と他の混合物を比較すると、高耐久路盤が疲労抵抗性に優れることが判る。また、高耐久路盤のひずみ130μにおける破壊回数をみると1,000,000回を超え、表一2に示す海外の基準値を満足する結果となった。

(c) 耐水性

耐水性の検討は、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で評価した。水浸WT試験はNEXCO試験方法244-2005に準拠し、加圧透水試験は舗装調査・試験法便覧B017Tに準拠した。

結果を表一3に示す。表一3より高耐久路盤のはく離率は表一2に示した基準値を満足し、その他の混合物では基準値を満足しなかった。また、透水係数は高耐久路盤と密粒(13)は表一2に示した基準値を満足したが、他の混合物は水密性が不十分であった。以上より、高耐久路盤は他の混合物よりも十分な耐水性を有していることを確認した。



図二 各混合物の疲労破壊回数

表一3 耐水性試験結果

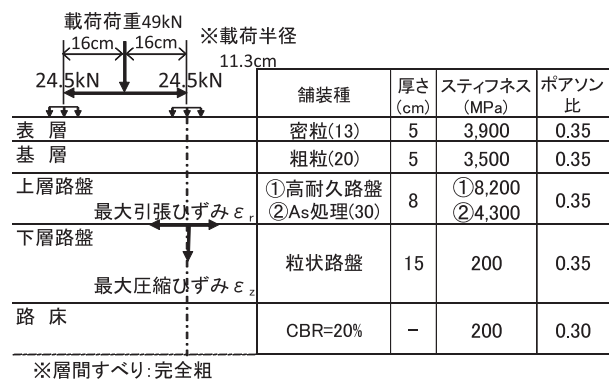
混合物の種類	高耐久路盤	密粒(13)	粗粒(20)	As処理(30)	大粒径(30)
はく離率(%)	4.8	13.7	26.0	38.9	30.9
基準値	5.0以下				
透水係数(cm/s)	0	0	予備加圧段階で多量の漏水が発生し、試験打ち切り。		
基準値	1 × 10 ⁻⁷ 以下				

3. 構造解析による高耐久路盤用混合物の適用効果

(1) 解析方法

高耐久路盤を上層路盤へ用いた場合の下層路盤への負荷低減効果や疲労抵抗性に対する適用効果を確認するため、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、図一3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ひずみ（以下、 ϵ_r ）と下層路盤上面の最大圧縮ひずみ（以下、 ϵ_z ）を算出した。この計算は上層路盤に高耐久路盤とAs処理(30)を用いたそれぞれの場合について行った。

計算条件は図一3に示すとおりで、スティフネスは表層から上層路盤ま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）の一般的な値（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、下層路盤への負荷低減効果の検討にあたっては、脆弱化した下層路盤に高耐久路盤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 ϵ_z も算出した。



図一3 計算条件

(2) 下層路盤への負荷低減効果の検討

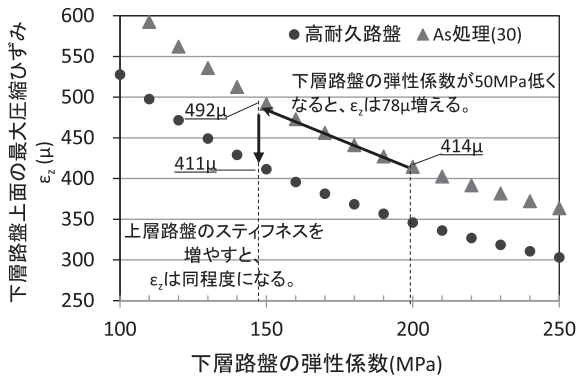
下層路盤の弾性係数が 200 MPa の場合の解析結果を表一4に示す。この様に、高耐久路盤は As 処理 (30) よりもスティフネスが大きいことから、両ひずみともに小さくなる結果となった。

次に、下層路盤の弾性係数を変化させた場合の弾性係数と ϵ_z との関係を図一4に示す。図一4より、上層路盤が As 処理 (30) で、下層路盤が健全とみなせる場合 (弾性係数 200 MPa) は、 ϵ_z は 414 μ となっている。これに対し、下層路盤が脆弱化して弾性係数が 150 MPa まで低下したと想定した場合、 ϵ_z は 492 μ まで増加する結果となった。一方、上層路盤に高耐久路盤を用いたとすると、 ϵ_z は 411 μ にまで軽減されることがわかった。

以上より、限られた条件下ではあるが、高耐久路盤は As 処理 (30) よりも下層路盤への負荷低減が期待でき、下層路盤が脆弱化している場合でも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を確認した。

表一4 下層路盤の弾性係数が 200 MPa の場合の解析結果

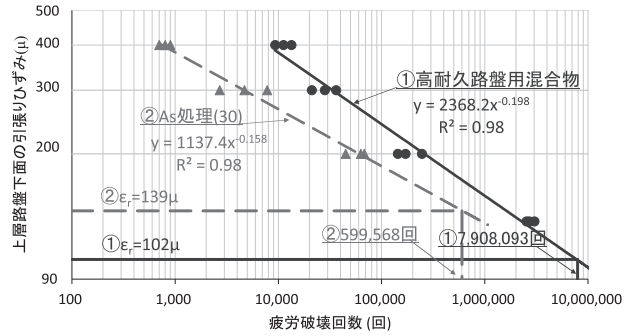
混合物の種類	①高耐久路盤	② As 処理 (30)
上層路盤下面引張ひずみ ϵ_x (μ)	102	139
下層路盤上面圧縮ひずみ ϵ_z (μ)	346	414



図一4 下層路盤の弾性係数と上面の最大圧縮ひずみの関係

(3) 疲労抵抗性能の検討

図一5は、前述の疲労試験により得られた疲労曲線の近似式に、表一4に示した解析ひずみの ϵ_r を代入して、高耐久路盤と As 処理 (30) との破壊回数を求めた結果を示している。図一5より、高耐久路盤の破壊回数は、As 処理 (30) に比べると約 13 倍大きくなっている。これは、前述したように、高耐久路盤は As 処理 (30) よりも疲労抵抗性に優れることと、スティフネスが大きく発生ひずみが小さくなることか



図一5 構造解析で算出した疲労破壊回数

ら破壊回数に差が現れたものと考え。

以上より、本検討においても、限られた条件下での試算ではあるが、高耐久路盤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考ええる。

4. 施工事例

(1) 試験施工の概要

試験施工は、NEXCO 東日本関東支社長野管理事務所管内にある上信越自動車道のの上り線、信州中野 IC ~ 小布施 PA 間の走行車線において延長 250 m で実施した。

本試験施工で用いるバインダは、ストアス 60/80 に添加剤をプラントミックスしたものを用いた。配合試験の手順は、最適バインダ量 (以下、OBC) を決めた後に、添加剤の添加量 (対アスファルト量内割り) (以下、添加量) を設定した。OBC は、合成粒度を設定した後、添加剤を添加しないストアス 60/80 でマーシャル安定度試験を実施して、所定のマーシャル基準値を満足する中央値を OBC とした。添加量は、スティフネスと平均はく離率の両方の配合目標値を満足する添加量から設定した。室内配合試験の結果を表一5に示す。

表一5 室内配合の結果 (高耐久路盤)

項目	値	目標値
最適アスファルト量 (%)	5.3	-
密度 (%)	2.405	-
空隙率 (%)	2.3	2 ~ 3
スティフネス (MPa)	10,020	5,500 以上
動的安定度 (回/mm)	6,280	1,000 以上
平均はく離率 (%)	4.2	5.0 以下
透水係数 (cm/s)	不透水	1 × 10 ⁻⁷ 以下

(2) 実機による試験練りと試験施工の実施

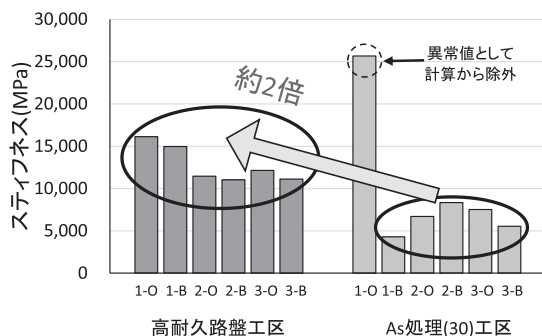
試験練りはバインダ量を OBC, OBC+0.3%, および OBC-0.3% の 3 点で実施した。また, 1×1 m の簡易試験施工を行い仕上がり面の状況を確認した。結果, OBC では混合物にガラツキが見られ, 空隙率も室内配合よりも小さくなった。一方, OBC-0.3% は, 仕上がり面にバインダの浮きは無く, 空隙率は 2.3% で基準値を満足した。これより, 設計バインダ量は OBC-0.3% の 5.0% に設定した。

本線施工に先立ち, プラント製造混合物の性状確認と施工条件を設定することを目的に構内試験舗装を実施した。混合物の性状確認では, 粒度, バインダ量, 密度等, 試験練り時と同等な性状となることを確認した。また, 本施工に使用予定の機械編成として, 敷き均しにはアスファルトフィニッシャ, 初期転圧にはマカダムローラ, 二次転圧にはタイヤローラを用いたときに所定の厚さ, 締固め度を確保するための転圧減, 転圧回数, 締固め温度について検証し, 本施工に向けて最適な施工条件を設定した。

(3) 本線試験施工

本線での試験施工の工区割りは, 高耐久路盤工区を延長 200 m, 比較工区として As 処理 (30) 工区を延長 50 m とした。本線試験施工では, 転圧時の落ちつきもよく, 施工性にも特に問題は見られなかった。また, 締固め度は両工区とも管理基準値を満足した。

ここで, 各工区の推定スティフネスの算出結果を図一6に示す。推定スティフネスは, FWD 測定から得られた時系列データを逆解析して算出した。FWD 測定は, 上層路盤面で工区ごとに 6 箇所測定し, 逆解析には Wave-BALM を用いた。解析モデルは上層路盤層, 下層路盤層, 路床の 3 層モデルとした。図一6に示すように, 高耐久路盤工区は As 処理 (30) 工区よりも, 2 倍近い推定スティフネスが得られ, 施工直後の推定スティフネスは高く, 所定の性能を有することを確認した。



図一6 構造解析で算出された疲労破壊回数

5. おわりに

本稿では, 高速道路舗装の長寿命化に向けた取り組みの一つである, 高耐久路盤用混合物とその施工事例について紹介した。本技術は, 路盤の高耐久化を図るうえで有用な混合物として期待している。今後は, 実道施工を重ねて本技術の普及を目指す予定である。

謝辞

最後に, 本線試験施工にあたり, 試験施工場所を提供して頂きました NEXCO 東日本関東支社長野管理事務所に感謝の意を表します。

JICMA

《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.I_93 ~ 104, 2015.
- 2) D.Sybilski (IBDiM) ほか: Laboratory and field implementation of high modulus asphalt concrete. Requirements for HMA mix design and pavement design. SPENS, 2009.
- 3) M.NKGAPPEL ほか: Construction of a high modulus asphalt (HiMA) trial section ethekweni: South Africa's First Practical Experience With Design, Manufacturing and paving of HiMA, Abstracts of the 31st Southern African Transport Conference, 2012.
- 4) Jean- Francois Corte: Development and Uses of Hard-Grade Asphalt and of High-Modulus Asphalt Mixes in France, TRANSPORTATION RESEARCH CIRCULAR No.503, 2001.
- 5) M. McHale ほか: Evaluation of EME2 type mixtures incorporating softer grade binders-Phase I progress report, Transport Research Laboratory, 2012.
- 6) Laszlo Petho ほか: High Modulus High Fatigue Resistance Asphalt (EME2) Technology Transfer, Austroads Ltd, 2014.
- 7) British Standards Institution: Bituminous mixtures-Test methods for hot mix asphalt-Part26, 2004.

【筆者紹介】



菅野 勝一 (かんの しょういち)
 (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部 舗装研究室
 主任研究員



高橋 茂樹 (たかはし しげき)
 (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部
 舗装研究担当部長



白井 悠 (しらい ゆう)
 (株) NIPPO 技術研究所
 主任研究員