

論文

耐震を目的としたアスファルト遮水壁材料の開発

中村 吉男¹ 島崎 勝² 成田 国朝³ 奥村 哲夫³ 大根 義男³

Improvement of Asphalt Mixture against Earthquake as Facing Material

Yoshio NAKAMURA Masaru SHIMAZAKI Kunitomo NARITA

Tetsuo OKUMURA Yoshio OHNE

中規模地震により被災し損傷したアスファルト表面遮水壁を補修するため、感温性が低く、低温域での変形性能が高い特殊改質アスファルトを開発した。本論文では、特殊改質アスファルトの基本性状を明らかにし、これを用いた混合物の力学特性を、従来から使用されてきた水密アスファルト混合物と比較して議論した。そして、低温域での変形追従性、応力緩和性や疲労に対する抵抗性等の改善効果より、耐震を目的としたアスファルト遮水壁材料としての有効性を確認した。

キーワード: アスファルト遮水壁, 改質アスファルト, 低温亀裂, 繰り返し载荷, 疲労破壊

1. はじめに

我が国において、アスファルト混合物が水利構造物に適用されたのは、1957年の長浦干拓堤防¹⁾での試験施工が始まりであるとされ、以来、アスファルト混合物は、数多くのダムや貯水池で表面遮水壁用あるいは止水壁用材料として使用されてきた。アスファルト混合物の遮水材料としての供用性は高く、アスファルト自身が持つ防水性、水密性などから漏水に対して補修が行われた事例は報告されるに至っていない²⁾。しかし、永年の供用によりブリスタリング、スロープフローおよび雪氷による剥離摩耗、紫外線等の劣化により保護層の補修が行われた事例^{3, 4)}や、施工継目の開き、盛土の不同沈下、地震動によりアスファルト遮水壁に亀裂が生じた事例も散見されている⁵⁻⁷⁾。

1996年3月6日、山梨県の河口湖付近を震源とするM=5.8の地震が発生し、震源から約15km離れたアスファルト表面遮水壁型のアースダムが被災した⁷⁾。この地震により、堤体部にはダムの健全度を損なうような被害は何ら発見されなかったが、堤体を覆う斜面および池敷の舗装部に数多くの亀裂が発生し、全面的な補修を必要とした。そして、補修材料としてさらに大

きな地震動にも耐え得る柔軟性に富むアスファルト混合物の開発が求められた。

アスファルト混合物は、アスファルトの有する粘性的な性質により、セメント系混合物等と比較してたわみみや応力緩和性に富み、変形の追従性に優れるという特長を持っている。しかし、変形速度や温度により力学特性が変化する、いわゆる速度依存性や温度依存性を有する材料であるため、温度が低く载荷速度が上昇すると変形性能が低下し、冬期あるいは寒冷地における地震の発生は、遮水壁が最も損傷を受けやすい条件を与える。したがって、耐震を目的としたアスファルト混合物の開発においては、低温域での変形性能の改善が最も重要な課題として提起される。

本研究では、まずアスファルトの粘弾性や感温性に着目して、低温域での変形性能を改善した特殊改質アスファルトを開発し、アスファルト単体の低温クリープ性能を評価するBBR試験により改善効果を吟味した。次に、この特殊改質アスファルトを用いた混合物と、一般に使用される水密アスファルト混合物の曲げや引張・圧縮による変形性能および低温域でのひび割れ抵抗性や疲労特性について比較議論を行い、アスファル

¹ 株式会社アイコ 専務取締役

² 大成ロテック株式会社 生産技術本部技術研究所 課長

³ 愛知工業大学 工学部都市環境学科土木工学専攻 教授

ト遮水壁の建設や補強工事への適用性を検討した。

2. 開発したアスファルトの概要

2.1 アスファルトバインダーの基本性状

アスファルトは温度により液体から固体まで相変態を伴う材料である。温度による硬軟の変化は、一般に感温性として評価され、感温性の高いアスファルトは夏場の高温で流動しやすく、冬場には脆くなりやすいとされている。このため、供用面から感温性の低い材料が求められるが、反面、混合物製造時のアスファルトと骨材の混合や混合物の敷き均し・転圧等の施工性に対しては、高温時に粘度が低下しやすい感温性の高い材料ほど扱いやすい。一方、アスファルト混合物の破壊形態は、温度やひずみ速度に依存し、同一配合材料においても、脆性破壊、延性破壊、流動を伴う展性破壊へと変化する。延性破壊や展性破壊を呈する温度およびひずみ速度の領域では、変形性能が高く基盤等の変形に追従しうるが、温度が低く、変形速度が大きくなり脆性破壊を呈する領域では、変形に対する追従性はそれほど期待できない。したがって、地震等の変形速度の大きな外力が、低温域で作用した場合、アスファルト混合物は最も損傷を受けやすい条件となり、耐震性に優れたアスファルトの開発において、低温域での変形性能の改善が着目すべき重要な課題として挙げられる。

開発した特殊改質アスファルト（以下 SfAs と呼ぶ）は、アスファルトの改質で広く使用されている熱可塑性エラストマーの一種であるスチレン・ブタジエン・スチレンブロック共重合体（SBS）を主要な改質材として使用した。SBS は、アスファルト中のマルテン分を吸着することで膨潤するため、比較的少ない添加量でアスファルト中にゴムの連続的なネットワークを形成し、広い温度域で高い改質効果を付与するものである。このため、現在普及している道路舗装用の改質アスファルトでは、高温時の耐流動性（わだちの軽減）の改良や、寒冷地の温度応力によるひび割れ防止対策を目的として、要求性能に応じた SBS の適正な添加量が研究されている。SfAs は、この SBS の添加量を増すことで感温性を低下させ、低温域での卓越した変形性の保持と応力緩和性の向上、および供用高温域（60℃

表-1 アスファルトの基本性状

項目	単位	SfAs	StAs60/80
針入度	1/10mm	177	69
軟化点	℃	84.0	48.0
引火点	℃	321	316
60℃粘度	Pa·s	11,300	208
曲げひずみ (-10℃)	($\times 10^{-3}$)	384	49
PI	—	9.3	-0.95

程度)での流動変形に対する抵抗性など、相反する条件を満たす改善を意図したものである。ただし、アスファルト量が多い水密アスファルト混合物は、通常の舗装用アスファルト混合物に比べて施工性が低く、改質材の増加によりさらに施工の低下が懸念されるため、SBS の他に数種類の特種添加材を選定し、適正な添加量を決定した。

SfAs の基本性状を表-1 に示す⁸⁾。SfAs は、水密アスファルト混合物に一般に使用されるストレートアスファルト 60/80（以下 StAs60/80 と呼ぶ）と比較して、針入度が大きく、軟化点が高い。これを針入度と軟化点から算出される針入度指数 (PI)⁹⁾ で表すと、SfAs が PI = 9.3、StAs60/80 が PI = -0.95 となる。ストレートアスファルトの PI は、一般に -2.0 ~ 2.0 の範囲といわれており、マイナス側にあるほど感温性が高く、温度変化に対して敏感であり、逆にプラス側ほど感温性が低く、温度に鈍感であると評価される。したがって、SfAs は StAs60/80 と比較して、感温性が極めて低いといえる。一方、SfAs の 60℃粘度が StAs60/80 と比較して非常に高いことも特長の一つである。60℃粘度は、アスファルト舗装の供用温度上限付近（日本では夏期に舗装表面温度が 60℃程度になる）におけるアスファルトのコンシステンシーを表す工学指標の一つであり、SfAs が StAs60/80 と比較して塑性流動に対する変形抵抗性が高いことを示している。さらに、SfAs の -10℃における曲げひずみは、StAs60/80 と比較して 8 倍程度大きく、低温域におけるたわみ性が極めて高いことがわかる。

2.2 低温時における特殊改質アスファルトの特性

SfAs の低温域における応力緩和性を評価するため BBR 試験 (Bending Beam Rheometer test)¹⁰⁾ を実施した。BBR 試験はアスファルトの低温域における粘弾性 (ク

リープ)の特性を測定するためのものであり、低温ひび割れの判断材料を与える。試験方法の詳細は SHRP (Strategic Highway Research Program) で規格化されており、127 mm×12.7 mm×6.35 mm の梁状に成形した供試体を 100 mm 間隔の支持具に載せ、三点曲げ試験として梁中央に一定荷重 (980 mN) を 4 分間載荷し、時間に対する変形量を測定する。BBR 試験の結果は、硬さの指標である S -値と、変形速度の指標である m -値により評価される。すなわち、 S -値とは荷重 (σ) とたわみ量 (γ) から求められるスティフネス (弾性率: $S(t) = \sigma / \gamma(t)$) である。また、 m -値は時間に対して S -値をプロットした対数紙上での曲線の傾き ($m(t) = |d \log S(t) / d \log t|$) であり、弾性体は $S(t) = \text{const}$ であるので $m(t) = 0$ 、粘性体の γ は $\sigma = \text{const}$ において時間の一次関数で表されるので $m(t) = 1$ となる。従って、 S -値が小さいことは温度低下に伴い発生する温度応力が小さく、また m -値が大きいことは発生した温度応力を緩和する能力が高いことを示し、低温亀裂の発生の抑制効果を判断する指標となる。

図-1 は、試験開始 60 秒後の S -値、 m -値と試験温度の関係を示したものである。いずれのアスファルトにおいても、温度が低下すると S -値は増加し、逆に m -値は低下する。ここで、SfAs の S -値～温度の関係曲線を温度軸に沿って約 10°C 高温側に平行移動すると、StAs60/80 の曲線にほぼ重なる。このことは、SfAs は StAs60/80 の持つ性質を、より低温域で有していること

を意味する。同様の傾向は m -値にも見られ、SfAs は低温域で StAs60/80 と同等の大きさの m -値を示し、低温性状が向上していることがわかる。

3. 特殊改質アスファルト混合物の力学特性

3.1 試験材料

SfAs を用いたアスファルト混合物の低温時の変形能力を評価するため、StAs60/80 混合物との比較試験を行った。試験に使用したアスファルト混合物の配合は、一般に使用される水密アスファルト混合物の実績から表-2 に示す通りとし、SfAs と StAs60/80 による同一配合の二種類の混合物を作製した。

3.2 単純曲げ試験

たわみに対する抵抗性を評価するため、表-3 に示す試験仕様で単純曲げ試験を行った。

図-2 は、載荷速度の最も大きい 50 mm/min の試験において、試験温度と曲げ強度の関係を示したものである。同図に示すように、アスファルト混合物の試験温度と曲げ強度の関係は、山形の曲線を呈し、ピーク時の温度を脆化点と呼んでいる¹¹⁾。菅原らは、配合を種々変化させたアスファルト混合物の曲げ試験からアスファルト混合物の破壊形態を考察し、脆化点より低い温度においては脆性的な破壊を、高温側では延性的な破壊を呈することを見いだした^{12, 13)}。SfAs 混合物の脆化点は、StAs60/80 混合物の 5°C と比較して 15°C 以上低い結果となっており、StAs60/80 混合物が脆性破壊を呈する温度領域 5°C～-10°C において、SfAs 混合物

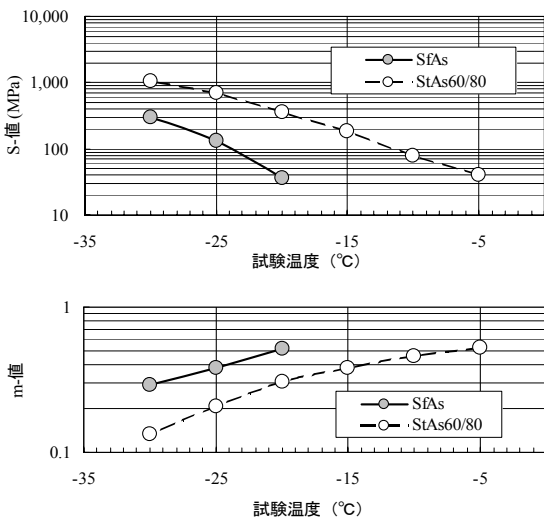


図-1 BBR 試験結果

表-2 アスファルト混合物の配合

アスファルト量 (%)	植物繊維 (%)	骨材の配合比率 (重量%)				
		6号 碎石	7号 碎石	粗砂	細砂	石粉
8.5	0.15	24.0	16.5	37.5	8.0	14.0

注) 植物繊維はアーホゼル ZZ8/1 を使用し、添加量は混合物を 100 とした時の外添加百分率を示す。

表-3 単純曲げ試験の仕様

項目	仕様
供試体寸法 (mm)	50×50×300
試験温度 (°C)	-30～15(5°C 毎)
載荷速度 (mm/min)	0.05, 0.5, 5.0, 50

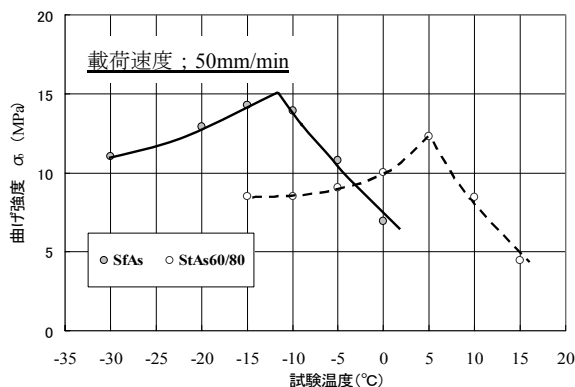


図-2 試験温度と曲げ強度の関係

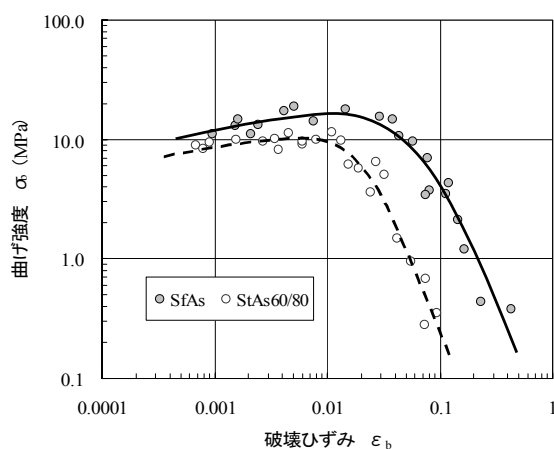


図-3 曲げ強度と破壊時のひずみの関係

表-4 一軸圧縮試験結果

試験温度 °C	種類	破壊応力 σ_{cf} (MPa)	破壊ひずみ ε_{cf}	静的弾性係数 E_{cf} (MPa)
5	①StAs	17.19	0.0116	1,482
	②SfAs	6.49	0.0851	76
	②/①	0.38	7.34	0.05
0	①StAs	24.42	0.0089	2,744
	②SfAs	8.47	0.0679	125
	②/①	0.35	7.63	0.05
-5	①StAs	32.59	0.0062	5,256
	②SfAs	12.01	0.0398	302
	②/①	0.37	6.42	0.06

は延性破壊の様相を示している。

一方、図-3 は、応力～ひずみ曲線において、最大応力に達する点を破壊とみなし、破壊点の曲げ強度とひずみの関係を示したものである。一般に、この関係において描かれる曲線は、破壊包絡線¹⁴⁻¹⁷⁾と呼ばれ、そ

の形状は、混合物の配合（骨材およびバインダーの量）やバインダーの性状等に支配されるといわれている。SfAs 混合物の破壊包絡線は、St60/80 混合物の破壊包絡線の上側に位置し、応力レベルに関わらず、同じ曲げ強度において StAs60/80 混合物より大きな破壊ひずみを示し、高いたわみ性を有していることがわかる。

3.3 一軸圧縮試験

圧縮変形に対する抵抗性を調べるために一軸圧縮試験を実施した。供試体は寸法 60 mm×60 mm×150 mm の切出し六面カット、試験温度は-5、0、5°C の3条件、荷重速度は 0.01 (1/sec) とした。試験結果を表-4 に整理した。①StAs60/80 混合物と②SfAs 混合物の試験値の比率(②/①)で比較してみると、試験温度にほとんど関係なく、破壊応力 σ_{cf} で約 0.4 倍、破壊ひずみ ε_{cf} で約 7.1 倍、静的弾性係数 E_{cf} ($= \sigma_{cf} / \varepsilon_{cf}$) で約 0.05 倍を示しており、両者の変形能力にはオーダー的な違いがあることがわかる。すなわち、この温度範囲における圧縮変形は、SfAs 混合物が延性的であるのに対し、St60/80 混合物は脆性的であり、図-2 の-3°C以上に見られる関係にあるものと考えられる。

3.4 単軸引張試験¹⁸⁾

引張変形に対する抵抗性を評価するために単軸引張試験を実施した。単軸引張試験は一軸圧縮試験と直接対比される最も明瞭な力学試験であるが、一方では供試体の端部処理が結果の良否を左右するため、引張試験の中でも技術的に難しい試験方法である。

本研究では、固定部での応力集中を避けるため、供試体は図-4 のようなダンベル形状とし、配合試験により定めた基準密度となるよう計量・調整した試料を2層に分けて型枠に敷均し、小型タンパで締め固めて作製した。供試体端部は硫黄モルタルを用いて固定枠に取り付け、養生槽で1日養生(温度0°C)した後、ひずみ速度 $\dot{\varepsilon} \approx 3 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-1}$ 1/sec の範囲で定変位速度による引張荷重を行った。荷重の制御は電気油圧サーボシステムで行い、荷重は容量 29.4 kN のロードセル、軸方向の変位量は供試体凹部(最小断面)側面に取付けた非接触型変位計(分解能: 0.001 mm)を用いて計測した。

図-6 は SfAs 混合物の応力～ひずみ曲線であり、同一条件 ($\dot{\varepsilon} \approx 1 \times 10^{-2}$ 1/sec) で行った3つの供試体は類

似した関係を得ている。また、図-5 に示したように、供試体は最小断面部のほぼ中央で破断していることが分かる。これより、供試体端部での応力集中は無視し得るものと判断されるが、供試体のどの範囲まで応力、ひずみの一様性が保たれるかを確認するために、FEM解析を行った。

解析は、図-8 (a) に示すように供試体の対称性から1/4 断面について行い、平面応力問題として扱った。試験で得た応力～ひずみ曲線は、図-6 に示したように非線形を呈するので、相当応力～相当塑性ひずみの関係を $\bar{\sigma} = c(a + \bar{\epsilon}^p)^n$ とする n 乗硬化則で近似し、降伏関数として Mises の条件を用いた等方硬化則に基づく弾塑性解析¹⁹⁾を行った。

図-7 は No.3 供試体について、試験値を実線で、解析値を○印で表し、比較したものである。両者はかなり良く一致しており、解析による応力～ひずみ関係の再現性は良好であると思われる。図-8 (b) は、引張軸ひずみ 6.16×10^{-3} 時点の、供試体内の軸方向応力 σ_y とひずみ ϵ_y の分布を示したものである。ここで、 ϵ_y は供試体の中心軸上において等間隔の区間を考え、各区間の相対変位量を区間長で除して計算した値である。これらの数値を見ると、最小断面区間の 75 mm の約 8 割に相当する 60 mm 以内の区間で応力、ひずみとも一様性が保持されていることが分かる。図-8 (c) は、この時点における主応力の分布状況を描いたものである。最小断面内の引張主応力は引張試験の軸方向応力と一致し、相直交する主応力はほぼゼロの値を示している。

図-9 は、試験温度 0℃、载荷速度 $\dot{\epsilon} \approx 1 \times 10^{-2} 1/\text{sec}$ で行った単軸引張試験と一軸圧縮試験の応力～ひずみ曲線を、圧縮を正、引張を負として、同一図上に整理したものである。StAs60/80 混合物はほぼ線形の応力～ひずみ関係を呈し、ピーク強度に達した後、強度が著しく低下する脆性的な挙動を示す。これに対し、SfAs 混合物は延性材料としての挙動が明瞭であり、降伏点を超えても応力が低下せずに塑性変形が進行するなど、変形性能に大きな違いが認められる。また、図-10 は、単軸引張試験における载荷速度と破壊ひずみの関係を整理したものである。SfAs 混合物の破壊ひずみは、载荷速度に関わらず、StAs60/80 混合物に比べ 10 倍以上の大きさを示し、引張変形に対する抵抗性が高いこと

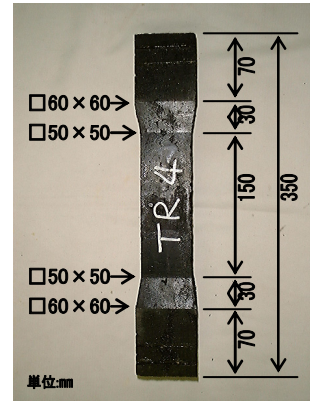


図-4 供試体形状



図-5 供試体破断状況

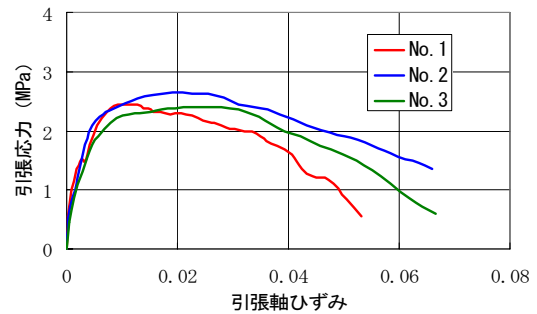


図-6 応力～ひずみ曲線(試験)

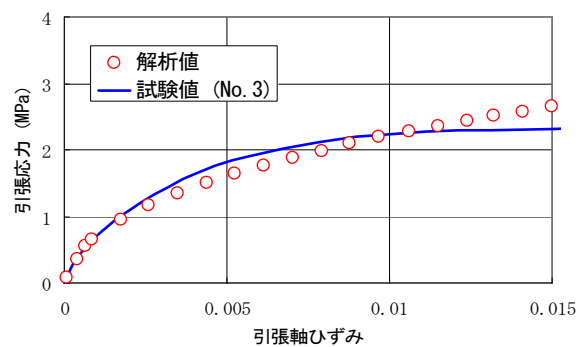


図-7 試験値と解析値の比較

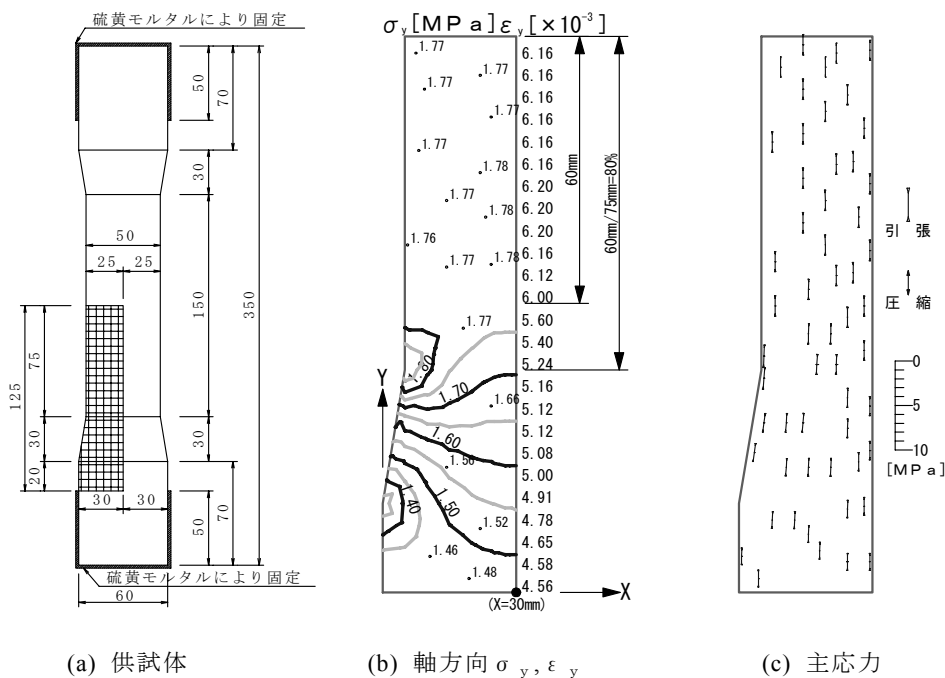


図-8 単軸引張試験

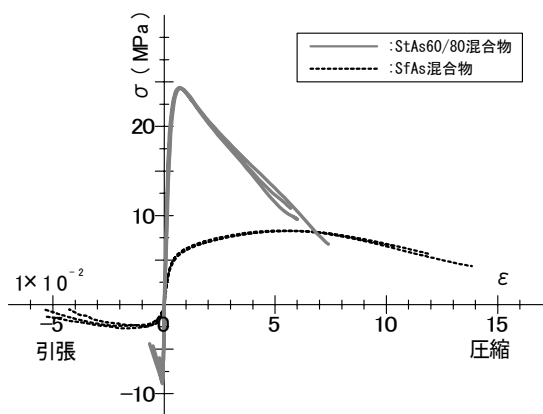


図-9 応力～ひずみ曲線の比較

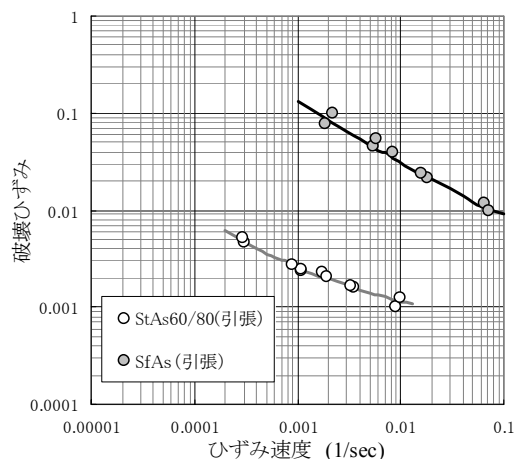


図-10 載荷速度と破壊ひずみの関係

がわかる。

3.5 低温亀裂試験

アスファルト舗装では、一般に、コンクリート舗装に不可欠である目地は設けない²⁰⁾。これは、アスファルト混合物は粘弾性体であり、舗装体の温度変化により発生する内部応力が時間の経過とともに消失する応力緩和性状が備わっているからである。しかし、応力の緩和能力は、硬いアスファルトほど乏しく、このため低温にさらされる寒冷地の舗装や、老化の進んだ舗装では温度変化に伴い発生する応力（以下温度応力と

称する）に起因するひび割れが発生しやすい。したがって、温度応力によるひび割れ抵抗性を評価することは、アスファルト混合物における低温性状の改善効果を判断する上での指標となり得る。

低温域でのひび割れ抵抗性および供用後のひび割れ抵抗性を評価するため、本研究で実施した低温亀裂試験は、25×25×250 mm の供試体の両端をインバール製フレームに固定して温度変化（開始温度 10℃、温度勾配-3℃/時間）を与え、フレームのひずみを測定して供試体に発生する応力を算出するものである²¹⁾。この

試験における温度と供試体に発生する応力の関係は、図-11 の概念図における曲線部と直線部で説明される。曲線部は、アスファルトの持つ粘性効果が発揮され、供試体応力が逐次緩和される温度領域である。そして、温度がさらに低下すると、粘性効果が消失して弾性的な挙動が現れるため、温度変化に対する応力の発生割合は直線的に変化し、やがて破断に至る。本文では、曲線部から直線部へ移行する温度を応力緩和限界点、破断に至る温度を破断点と呼び、これらを低温亀裂の評価指標とする。

低温亀裂試験は、供用劣化による影響を取り入れるために、米国 SHRP 試験法の一つである PAV (Pressure Aging Vessel)²²⁾ を適用し、酸素および熱により混合物を劣化促進させた試料と、無処理の劣化させない試料について行った。試験結果は図-12 に示すように、劣化促進させない試料では、StAs60/80 混合物の破断点は -28°C であるのに対し、SfAs 混合物は約 -40°C でも破断に至っていない。また、劣化促進させた試料の応力緩和限界点は、SfAs 混合物で -28°C 、StAs60/80 混合物で -16°C であり、両者とも劣化促進させない試料と比較して 2°C ほど高い。しかし、両混合物の応力緩和限界点は 10°C 以上の差があり、SfAs 混合物が低温域の温度緩和能力に相対的に優れていることが確認された。

次に、温度応力の蓄積に伴う疲労ひび割れ破壊を再現するために、一定の温度勾配の下で温度の上昇と降下を繰り返す、繰り返し低温亀裂試験を行った。この試験では、温度勾配を $\pm 10^{\circ}\text{C}/\text{時間}$ とし、試験温度範囲は、一般にアスファルト混合物に温度ひび割れが発生すると言われていた温度²³⁾ を参考に、 -10°C ~ -25°C とした。図-13 は繰り返しサイクル数と温度応力の関係を示したものである。SfAs 混合物の温度応力は 15 サイクル程度から安定し、その後 50 サイクルまで発生応力の低下は認められない。これに対し、StAs60/80 混合物は 2 サイクルで温度応力がピークを示し、5 サイクルで破断した。このように、SfAs 混合物は、繰り返し温度応力による疲労ひび割れに対しても抵抗性が極めて高いことが実証された。

3.6 スロープフロー試験

水密アスファルト混合物は、その要求機能から道路舗装用のアスファルト混合物に比べてアスファルト量

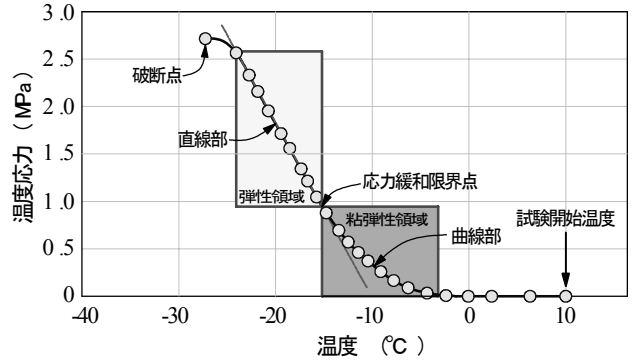


図-11 低温亀裂試験の概念図

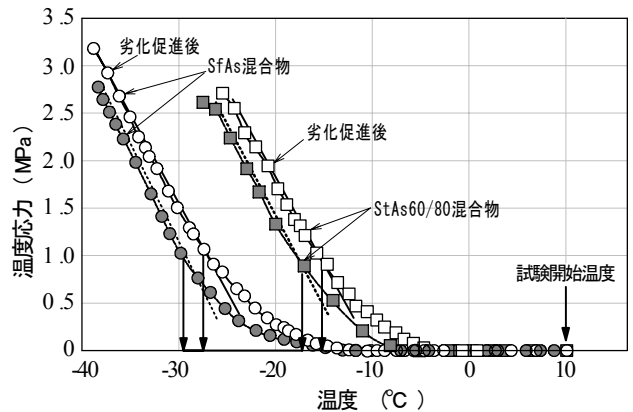


図-12 低温亀裂試験

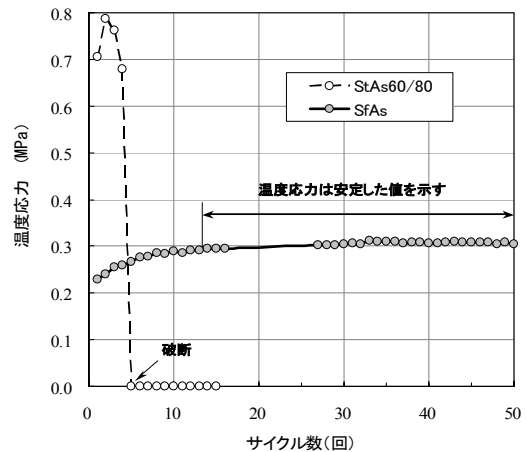


図-13 繰り返し低温亀裂試験

が多い。このため、夏期高温時において、自重による斜面下方への流動（ダレ現象）が生じ、場合によってはダイレイタシー現象により密度を減じて骨材とアスファルトが分離し、水密性が損なわれることがある。この現象に対する抵抗性を調べるため、一般にスロープフロー試験が実施される。この試験は、夏期の舗装

表-5 スロープフロー試験結果

種類	24 時間後フロー値	48 時間後フロー値
SfAs	68	68
StAs60/80	191	191

表面温度を想定して試験温度を 60°C に設定し、斜面勾配 1:2.5 (約 22°) の架台にアスファルト混合物の供試体 ($90 \times 250 \times 50 \text{ mm}$) を設置し斜面下方への供試体のフロー値 ($1/100 \text{ mm}$) を測定するものである。

試験結果は表-5 に示すように、SfAs 混合物は StAs60/80 混合物に比べて $1/3$ 程度のフロー値であり、供用高温域において塑性流動に対する抵抗性が高く、斜面安定性に優れていることがわかる。

3.7 繰り返し载荷試験

地震時には堤体斜面内に繰り返し荷重が作用し、亀裂発生やすべり破壊等の被害が懸念される。この種の繰り返し作用に対し、水密アスファルト混合物がいかなる挙動を示すかを調べるために、前述の単軸引張試験機を用い、ひずみ制御で正弦波の繰り返し载荷を行った。試験温度は、地震によりアスファルト表面遮水壁に亀裂が生じたアースダムの被災時の温度を参考に 0°C とし、载荷速度 (振動数) は、このダムの地震応答解析²⁴⁾ により得られた一次固有周期 ($1 \sim 2 \text{ Hz}$) を参考に 1 Hz , 2 Hz , 4 Hz の 3 種類とした。

図-14 は、破壊回数 (N_f) がほぼ等しい試験結果を選定して、StAs60/80 混合物と SfAs 混合物の繰り返し応力～ひずみ曲線を比較したものである。ここで、破壊回数は、一定のひずみ振幅で繰り返し载荷した際、供試体が破断した繰り返し回数で、疲労寿命に相当する。図に示した試験は振動数 $f=2 \text{ Hz}$ の例であり、付加したひずみの片振幅 (ε) と破壊回数 (N_f) は、StAs60/80 混合物において $\varepsilon=5.86 \times 10^{-4}$, $N_f=22$, SfAs 混合物において $\varepsilon=6.90 \times 10^{-3}$, $N_f=24$ であり、付加したひずみの片振幅には約 10 の差がある。

図-15 と図-16 は、この試験結果における軸応力、ひずみの時刻歴と代表的なサイクルにおける履歴曲線を示したものである。SfAs 混合物の軸応力のピーク値 (σ_p) は、载荷回数の増加に伴い減少し、かつループで囲まれる面積 (ΔW) および履歴曲線において引張時の最大ひずみが生じる点と原点との傾きから求めた

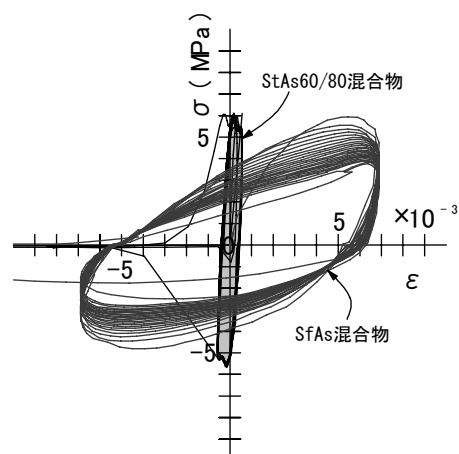


図-14 繰り返し応力～ひずみ曲線

動的弾性率 (E_d) は徐々に小さくなる。これに対し、StAs60/80 混合物の軸応力のピーク値は载荷回数による低下がほとんどなく、ループ形状も破壊に至るまで変化なく推移しており応力緩和等の破壊に対する予兆的な現象もなく破壊に至る。このように、両混合物の繰り返し载荷に伴う損傷過程は、かなり相違することが予想される。

材料の損傷は、弾性率や応力のピーク値の低下となって現れる。また、ループで囲まれる面積は、一般に消費エネルギー (ΔW) と呼ばれ、材料のエネルギーの吸収能を表すので、やはりこの値が低下することは損傷の進行を表すこととなる。特に、アスファルト混合物のように、骨材と結合材 (アスファルト) から成る材料の破壊は、両者の剥離を契機としマイクロクラックが形成され、これらが徐々に進展して連続したクラックに発達し生じるものと解釈されている。Piau²⁵⁾, Lefevre²⁶⁾ は、繰り返し载荷に伴う動的弾性率の変化を損傷の過程と関連づけ図-17のように説明している。すなわち、(a) 図は载荷に伴う履歴曲線の変化、(b) 図は载荷回数 N と初期弾性率 E_{d1} に対する動的弾性率 E_{dN} の変化 (E_{dN}/E_{d1}) を表している。これによると、初期段階 (Phase I) は骨材とアスファルトの剥離 (マイクロクラック) が生じる段階であり、第二段階 (Phase II) では、マイクロクラックが亀裂 (マクロクラック) に発達し、この亀裂が連続して最終段階 (Phase III) の破壊に至るとしている。図-18 は、図-15, 16 に示した試験結果より、繰り返し载荷に伴う各種物性値の変化を整理したものである。

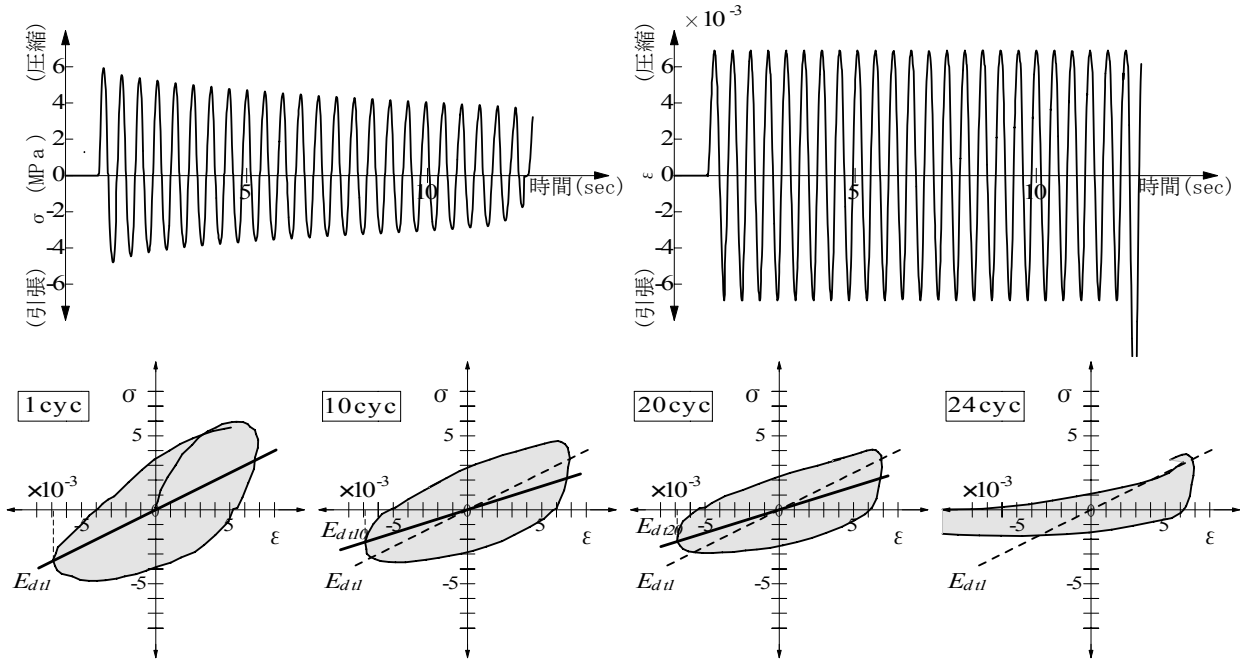


図-15 SfAs 混合物の繰返し載荷試験の一例 (0°C, $f=2\text{Hz}$, 軸ひずみ $\epsilon=6.90 \times 10^{-3}$)

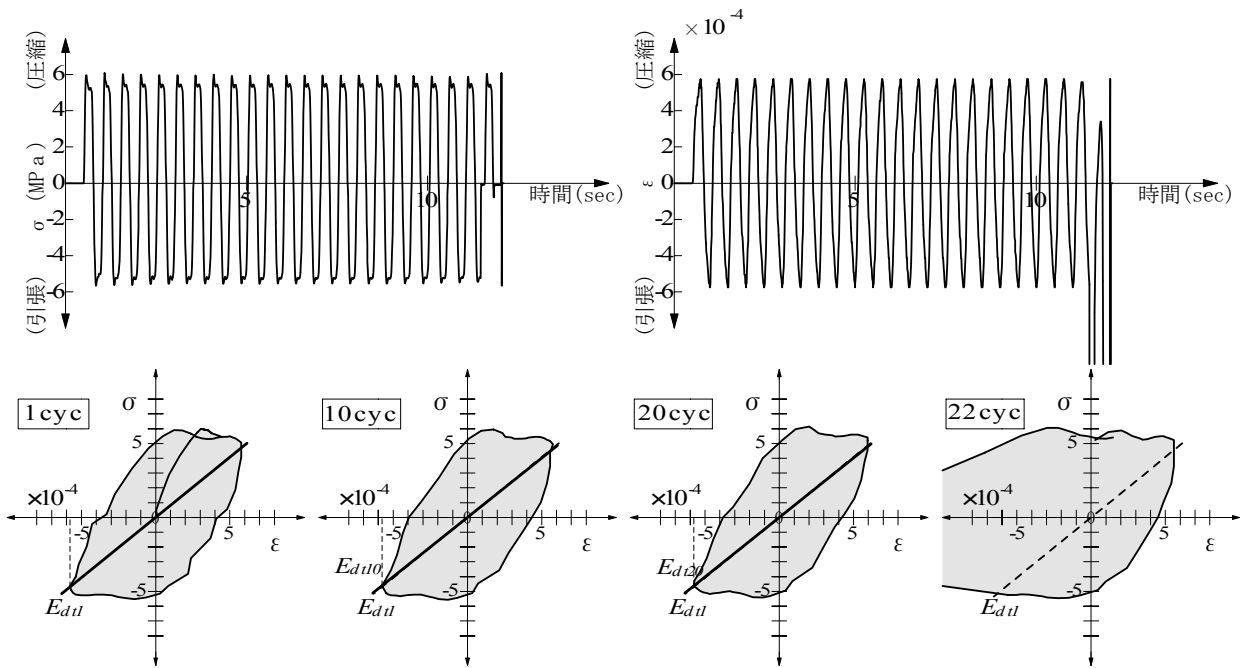


図-16 StAs60/80 混合物の繰返し載荷試験の一例 (0°C, $f=2\text{Hz}$, 軸ひずみ $\epsilon=5.86 \times 10^{-4}$)

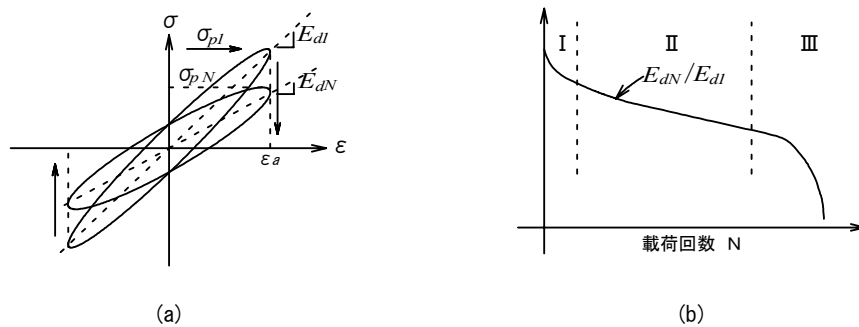


図-17 繰返し載荷における動的弾性係数の変化

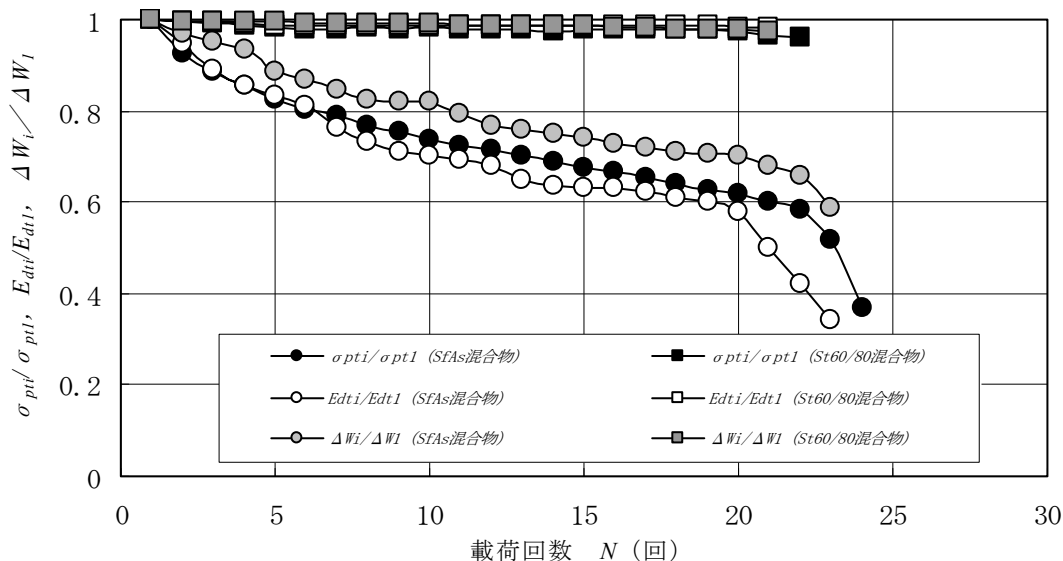


図-18 繰り返し载荷における動的物性値の変化

図に示した物性値は、各サイクルで得られる引張側のピーク応力 (σ_{pti})、動的弾性率 (E_{dti})、消費エネルギー (Δw_i) であり、これらを 1 サイクル目の値で除し正規化している。図によると、SfAs 混合物の各物性値の変化は、Piau 等が指摘している I ~ III の過程を経て破壊に至っているが、StAs60/80 混合物の物性値は破壊に至るまで顕著な変化は認められない。このことは、SfAs 混合物は、繰り返し载荷に伴い供試体内部で亀裂の進展が徐々に生じ、これが物性値の低下となって現れるものと想定される。一方、物性値の変化が顕著に現れない StAs60/80 混合物は、急激な亀裂の進展により破壊に至ると解釈される。一般に、クラックの進展に対する抵抗性（進みにくさ）は破壊靱性と呼ばれ、SfAs 混合物は、StAs60/80 混合物が急激な亀裂の進展を伴う脆性的な破壊を呈する条件下においても、アスファルト混合物特有の靱性を有した延性的な破壊現象を示すと考えられる。

図-19 は一連の試験において、SfAs 混合物の各サイクルにおける引張応力のピーク値 σ_{pt} と载荷回数 N の関係を示したものである。縦軸は 1 サイクル目のピーク値 σ_{pt1} を 1 サイクル目の σ_{ptl} で除して正規化し、横軸は 1 サイクル後の载荷回数 ($N_i - 1$) を破壊時の载荷回数 ($N_f - 1$) で除して正規化している。図より、载荷による破壊時の応力低下割合は、 $\sigma_{pti} / \sigma_{ptl} = 0.2 \sim 0.7$ の範囲にあり、条件により異なるが、概略 $(N_i - 1) / (N_f - 1)$

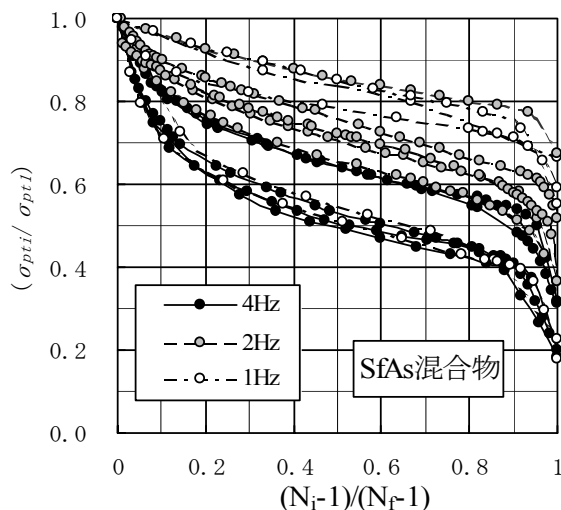


図-19 载荷に伴う応力の低下 (SfAs)

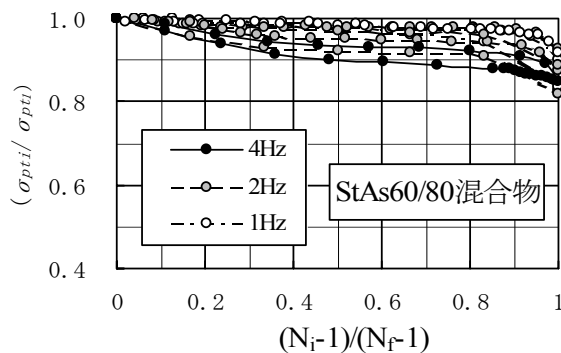


図-20 载荷に伴う応力の低下 (StAs60/80)

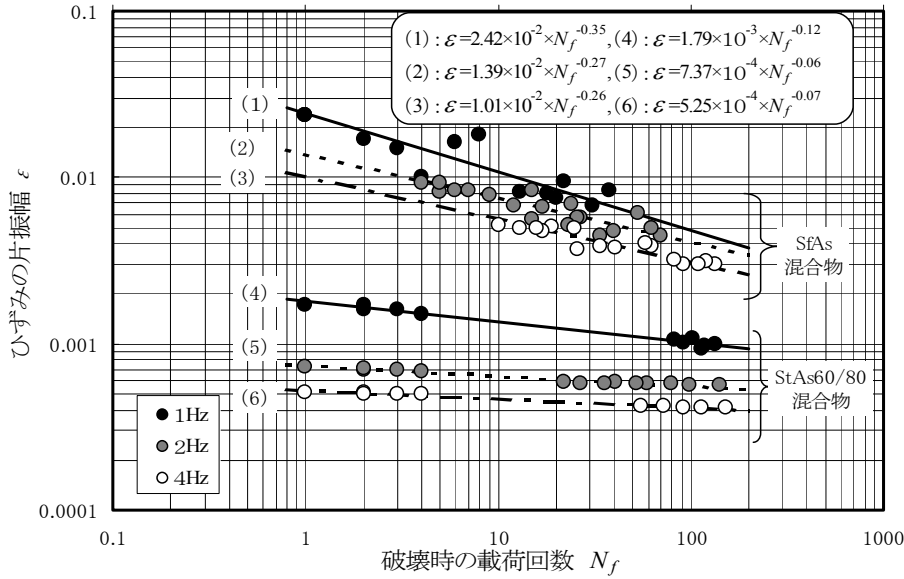


図-21 ひずみ片振幅と破壊回数の関係

= 0.1, 0.9 で変曲点が認められ, Piau 等が述べる骨材とアスファルトの剥離, 亀裂の進展, 破断等の破壊形態がうかがわれる。一方, StAs60/80 混合物の場合は図-20 に示すとおり, 破壊に至るまでの応力低下は小さく, 僅かな応力低下で破壊に至る脆性的な崩壊を呈する。

図-21 は繰り返し载荷試験におけるひずみ片振幅 ϵ と N_f の関係を示したものである。 $\epsilon \sim N_f$ 関係は両対数紙上で直線関係にあり, $\epsilon = A \times N_f^B$ の形で近似され, 疲労曲線の一つと見なし得る。SfAs 混合物と StAs60/80 混合物を比較すると, SfAs 混合物は 6~9 倍変形能が高く, 従来の水密アスファルト混合物に比べ, ひずみが繰り返し载荷される疲労現象に対し, 抵抗性が高いものと判断される。

4. 結論

本研究で得られた成果と知見をまとめると, 以下のよう整理される。

- (1) StAs60/80 に SBS 等の数種の添加剤を加えた感温性の低い特殊改質アスファルト (SfAs) を開発し, その基本性状を検証したところ, 針入度や曲げひずみが大きく改良され, 低温域での変形性能が改善された。加えて, 60 度粘度も高く, 供用高温域での塑性流動による変形抵抗性も向上することが判明した。
- (2) SfAs および StAs60/80 を用いたアスファルト混合

物に対し, 種々の力学試験を実施したところ, SfAs 混合物は広い温度域において圧縮・引張変形に対する追従性を有し, 応力緩和性に富むことが判明した。また, 繰り返し载荷に対する抵抗性が高く, さらに, 一般に変形追従性の改善に伴って機能低下が懸念される斜面での塑性流動 (スロープフロー) に対しても, 安定性が向上することが知れた。

以上のように, 耐震性を考慮し, 低温域での変形追従性や応力緩和性などの変形性の改善を目的に開発した SfAs を用いたアスファルト遮水混合物は, 従来から使用されてきた水密アスファルト混合物の変形性能に比べ高い変形追従性, 応力緩和性を有しており, アスファルト遮水壁の建設や補強・補修工事への適用性が高いものと考えられる。

参考文献

- 1) 水工アスファルト研究会編: 水工アスファルト, p. 1, 鹿島出版会, 1976
- 2) 菅原照雄: アスファルトしゃ水壁の設計, 施工ならびに材料, ダム技術, No. 87, 4-12, 1993
- 3) 小野 実, 栗島 敏, 岩金健寿: 沼原発所 沼原ダムアスファルト保護層改修工事について, 電力土木, No. 248, 89-98, 1993
- 4) 土居賢彦, 日馬謙一, 浦田道彦: アスファルト遮水壁補修技術の開発と高野山ダム遮水壁補修工事への適用, 電力土木 No.302 別刷, 1-6, 2002

- 5) 松本徳久, 安田成夫, 小川 優, 岩田充弘: アスファルト表面遮水壁型ダムの亀裂調査および亀裂の地震解析との比較, 大ダム, No. 114, 36-43, 1985
- 6) 土木学会編: 1994年ノースリッジ地震震害調査報告第7章ダム, pp. 170-198, 1997
- 7) Ohne, Y. et al.: Earthquake Damage and its Remedial Measure for Earth Dam with an Asphalt Facing, 3rd U.S.-Japan Workshop on Advanced Research on Earthquake Engineering for Dams, 2002
- 8) Nakamura, Y., Ohne, Y., Narita, K. and Okumura, T.: Improvement of Impervious Asphalt Mixture for High Ductility against Earthquake Excitation, 4th Int. Conf. on Dam Engineering, pp. 647-656, 2004
- 9) 南雲貞夫, 阿部頼政: 土木学会編新体系土木工学 27 歴青系材料, pp. 74-76, 技報堂出版
- 10) 舗装調査・試験法便覧 [第2分冊], 第III章試験編 1. 舗装用素材, 社) 日本道路協会 pp. [2] -266-274
- 11) Sugawara, T.: Mechanical Response of Bituminous Mixture under Various Loading Condition, Proc. 3rd, Internat. Conf. On the Structure Design of Asphalt Pavements, 1, 343-353, London, 1972
- 12) 菅原照雄, ほか: 舗装用アスファルト合材の流動性と脆性, 第9回日本道路会議論文集, 1969
- 13) 森吉昭博, 上島 壯, 菅原照雄: アスファルト混合物の破壊強度に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 210, 57-64, 1973
- 14) 森吉昭博, 菅原照雄: アスファルト混合物の流動を伴う領域の曲げ破壊包絡線に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 251, 107-112, 1976
- 15) 渡辺 隆, 渡辺暉彦, 元田良孝: アスファルト混合物の一軸圧縮破壊特性, 土木学会論文報告集, No. 243, 91-98, 1975
- 16) 渡辺暉彦, 渡辺 隆, 柳沢茂樹: アスファルト混合物の破壊包絡線について, 第32回土木学会年次学術講演会概要集, V-132, p. 242, 1976
- 17) 森吉昭博, 菅原照雄: 流動を伴う領域におけるアスファルト混合物のレオロジーならびに破壊挙動について, 土木学会論文報告集, No. 279, 127-135, 1978
- 18) 中村吉男, 島崎 勝, 奥村哲夫, 成田国朝, 大根義男: 遮水用アスファルト混合物の単軸引張試験の試み, 土木学会第59回学術講演会, 2004
- 19) 井上達雄, 田中喜久昭, 長岐 滋: 固体力学と相変態の解析, 大河出版, pp. 56-85, 1995
- 20) 南雲貞夫, 阿部頼政: 土木学会編新体系土木工学 27 歴青系材料, pp. 55-56, 技報堂出版
- 21) 野村建一郎, 藤澤信明: アスファルト混合物の温度応力測定試験, 舗装 27-10, pp. 29-36, 1992
- 22) 舗装調査・試験法便覧 [第2分冊], 第III章試験編 1. 舗装用素材, 社) 日本道路協会 pp. [2] -257-265
- 23) 高橋守人: 積雪寒冷地の舗装の現状と問題点, 土木技術, 54 (2), 74, 1999
- 24) Nakamura Y. et al.: Earthquake Damage and Remedial Works for an Earth Dam with Asphalt Facing, ICOLD 75th Annual Meeting Saint Petersburg, Russia, Session IV Technical policy to ensure large dams safety 4-34, 2007
- 25) Piau, J. M. : Thermomechanical modeling of the behavior of bituminous mixes: *Bulletin de Liaison du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, 163, 41-55, 1989
- 26) Lefevre et al: Asphalt material fatigue test under cyclic loading: An Interpretation based on a visco elastic Model including unilateral Damage: *Proceeding of the 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress-Barcelona2000*, I, 433-441, 2000

(2010年6月11日 受理)

A medium-scale earthquake happened to cause severe damages on the asphalt facing zone of an earth-dam; many cracks appeared on the slope surface especially near the crest and on the bottom surface of the reservoir, though the dam body itself was scarcely damaged. Due to viscous natures of bitumen, asphalt mixtures are in general highly flexible, accompanying much stress relaxation, and can follow large deformation without serious damages, as compared with cement mixtures. It is well known, however, that under low temperature in winter season and under high rate of cyclic loading during earthquake, asphalt mixtures are often to be damaged by reducing flexibility due to their temperature and strain rate dependencies. In this paper, new asphalt bitumen is developed, from view points of visco-elasticity and sensitivity to temperature, in order to improve flexibility under low temperature, and also to have sufficient resistance against flow under high temperature. Several laboratory tests are carried out to investigate mechanical properties of the asphalt mixtures made with this new bitumen, and the results are compared with those of usual straight asphalt mixtures to verify improvement of high flexibility and stress relaxation, and of high ductility under low temperature and cyclic loading conditions.

Key words : asphalt facing, modified asphalt, thermal cracking, cyclic loading, fatigue