

アスファルト遮水壁の耐震補強への 高変形性改質アスファルトの有効性

水野孝浩¹・島崎勝²・中村吉男³

¹正会員 大成ロテック株式会社 事業本部 (〒365-0027 埼玉県鴻巣市上谷1456)

²正会員 工博 大成ロテック株式会社 事業本部 (〒365-0027 埼玉県鴻巣市上谷1456)

³正会員 株式会社アイコ (〒470-0356 愛知県豊田市八草町来姓1250)

表面遮水壁型ダムのアスファルトフェーシングは、高い変形性能を有し、堤体の変形に対する追従性に優れている。しかし、静岡県に位置するアスファルト表面遮水壁型ダムにおいて、供用開始後25年程度が経過した時点で中規模地震を被災、それが原因と考えられるクラックが発生し、全面的な補修が必要となった。補修に際しては、更に大きな地震に被災した場合にも耐え得るアスファルト表面遮水壁が必要とされた。このような背景を踏まえ、変形追従性や応力緩和性など、変形性能を改善した高変形性能改質アスファルトを開発し、当該ダムの補修工事に適用した。本文は、開発した改質アスファルトのアスファルト遮水壁の耐震補強への有効性に関する室内検討結果および補修工事への適用事例を紹介するものである。

キーワード：アスファルト遮水壁，補修工事，改質アスファルト，耐震，変形

1. はじめに

地震大国である我が国においては、アスファルト混合物が変形追従性に優れているという点から、アスファルト遮水壁工法を適用しているダムや調整池は少なくない。アスファルト遮水工法が我が国に導入されてからおよそ 40 年が経過し、当該技術の導入当初に建設されたダムや調整池は、アスファルトフェーシングやアスファルトライニングの老朽化に伴うクラック等、損傷の発生が散見されるようになった。このようなダムや調整池を中～大規模地震が襲った場合には、堤体の急速かつ大きな変形により、アスファルト表面遮水壁表層（以下、アスファルト遮水層）に遮水機能の低下を招く重大な損傷が発生する可能性がある。

本年 2011 年 3 月 11 日に太平洋三陸沖を震源として発生し、東北地方を中心に甚大な被害を及ぼした東日本大震災においてもアスファルト遮水壁が被災し、クラックが発生した地点がある¹⁾。また、1996 年 3 月には、山梨県の河口湖付近を震源とする M=5.8 の地震が発生しており、この地震によって、震源から約 15km 離れた静岡県の内面舗装型均一式フィルダムが被災した。この地震後の調査において、堤体部にはダムの健全度を損なうような顕著な被害は発見されず、アスファルト表面遮水壁にクラックが発生していることが分かった。そのため、アスフ

アルト遮水壁の全面的な補修工事が実施されることとなった。なお、その補修に際しては、大規模地震による堤体変形に追従が可能となるよう、従来よりもさらに高い変形性能を有するアスファルト遮水壁が求められた。

このような要求を踏まえ、高い変形追従性や応力緩和性を有する改質アスファルト（以下、高変形性改質アスファルト）を開発した。

本文では、開発した高変形性改質アスファルトのアスファルト遮水壁耐震補強への有効性に関する室内評価試験結果および補修工事への適用例を報告する。

2. 高変形性改質アスファルトの開発

周知の通り、アスファルトは温度依存性を有する材料であり、高温時には変形性能が高いが低温時には変形性能が低下し脆性化する。そのため、従来のアスファルト遮水層は、夏期などの高温時には変形性能が高く、地震による急速かつ大きな堤体変形にも追従しうる性状を有しているが、冬期など低温時には変形性能が低下し、特に地震挙動のような堤体の急速変形時には脆性的な挙動を示し、破壊に至ることがある。

高変形性改質アスファルトは、道路舗装用のポリマー改質アスファルトに広く使用されている熱可塑

表-1 高変形性改質アスファルトの基本性状

項目	単位	高変形性改質As	StAs60/80
針入度	1/10mm	177	69
軟化点	℃	84	48
60℃粘度	Pa・s	11,300	208
曲げひずみ (-10℃)	(×10 ⁻³)	384	49

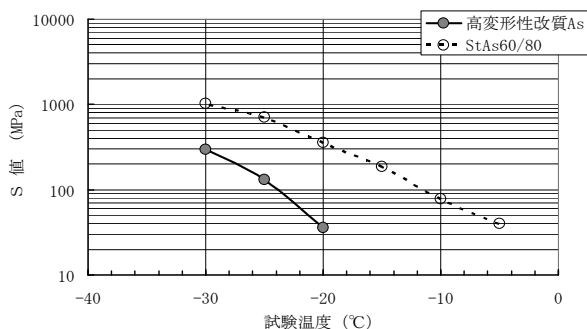


図-1 BBR試験結果 (S値)

性エラストマーの一種、スチレン・ブタジエン・スチレンブロック共重合体（以下 SBS）を主要な改質材として使用し、感温性を低下させることで高温から低温に至る広い温度領域で高い変形性能を有するよう改良したものである。

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、高い改質効果を付与する材料である。高変形性改質アスファルトは、この SBS の添加量を増加し、特殊な添加剤を併用することで、低温時の変形性能の改善と高温時の塑性流動抵抗性（斜面安定性）の両方を満足するよう改良したものである。高変形性改質アスファルトの基本性状を表-1 に示す。

高変形性改質アスファルトは、従来のアスファルト遮水混合物で一般的に使用されるストレートアスファルト60/80（以下StAs60/80）と比較して、針入度が大きく軟化点が高いため、感温性が極めて低い。また、60℃粘度がStAs60/80と比較して50倍以上高いことも特長の一つである。60℃粘度は、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るが、これが高いことで、舗装表面付近温度が60℃程度まで上昇する夏期におけるアスファルト遮水層の斜面安定性の向上が期待できる。さらに、-10℃における曲げひずみがStAs60/80と比較して8倍程度大きいことから、低温域におけるたわみ性が極めて高いことがわかる。

図-1、図-2は、Bending Beam Rheometer test

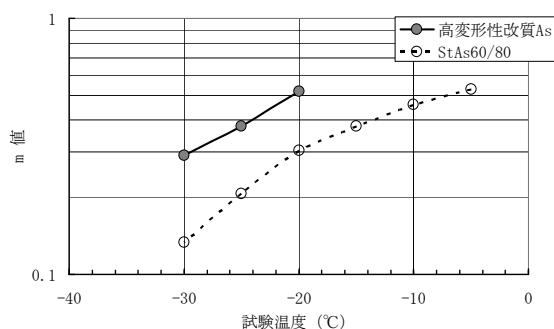


図-2 BBR試験結果 (m値)

表-2 アスファルト遮水混合物の配合

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

（以下、BBR 試験）より得られるスティフネス（S 値）およびm値である。高性能改質アスファルトはスティフネス、m値ともに StAs60/80 より10℃以上低温側で同様の値を示しており、低温域の脆性や応力緩和性が改善されていることを示している。

3. アスファルト遮水壁耐震補強への有効性

室内試験で、高変形性改質アスファルトを用いたアスファルト遮水混合物（以下高性能遮水混合物）のアスファルト遮水壁補強への有効性を評価した。評価に際し実施した室内試験と評価項目を以下に示す。なお、室内試験を実施したアスファルト遮水混合物の配合は、表-2に示すとおりである。

- ①曲げ試験：変形追従性、低温脆性
- ②低温亀裂試験：応力緩和性
- ③繰り返し載荷試験：変形追従性、応力緩和性
- ④スロープフロー試験：斜面安定性

(1) 曲げ試験

a) 試験方法

曲げ試験では、アスファルト混合物の曲げ強度および破壊ひずみを測定し、破壊応力－破壊ひずみ曲線により変形追従性を、曲げ強度－温度曲線から得られる脆化点（曲げ強度のピーク温度）により低温域の脆性を評価した。試験条件を表-3に示す。

b) 試験結果

図-3 は、曲げ試験における破壊ひずみと応力の関係を示したものである。

高性能遮水混合物の破壊ひずみは、どの破壊応力

表-3 曲げ試験の試験条件

項目	仕様
供試体寸法 (mm)	50×50×300
载荷条件	2点支持1点载荷
スパン (mm)	200
試験温度 (°C)	-30～15 (5°C毎)
载荷速度 (mm/min)	0.05, 0.5, 5.0, 50

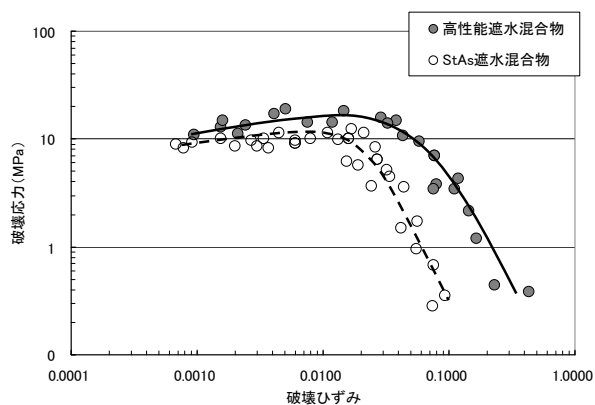


図-3 破壊応力とひずみの関係

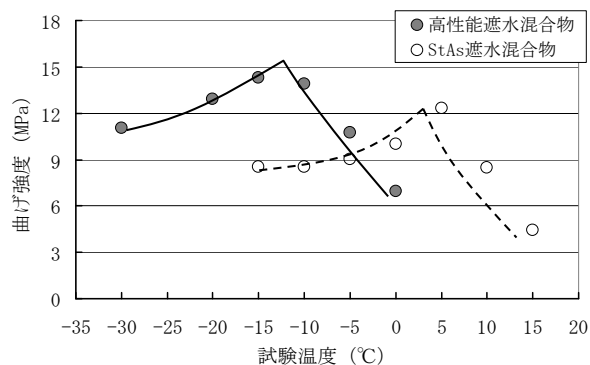


図-4 曲げ強度（载荷速度 50mm/min）

においても StAs60/80 を用いたアスファルト遮水混合物（以下 StAs 遮水混合物）よりも大きく、高い変形追従性を有していることがわかる。

図-4 は、载荷速度が最も大きい 50mm/min の試験における曲げ強度である。曲げ強度－温度曲線がピークを示す温度（脆化点）を比較すると、高性能遮水混合物の脆化点が StAs 遮水混合物のそれより 15°C 以上低く、低温脆性に優れていることがわかる。

(2) 低温亀裂試験

a) 試験方法

低温亀裂試験は、アスファルト混合物を一定温度勾配で冷却した場合の“温度変化に対する発生応力の変化”を求めるもので、主に応力緩和性を評価す

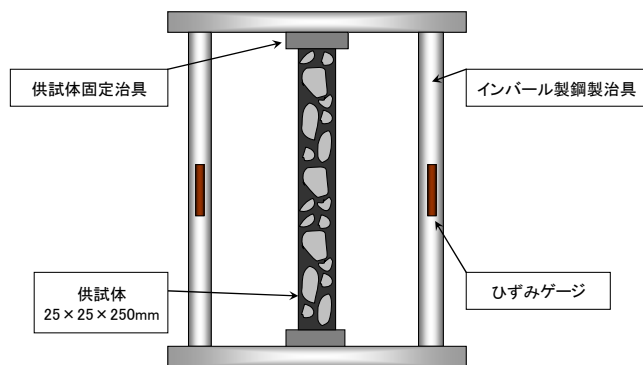


図-5 低温亀裂試験の概要図

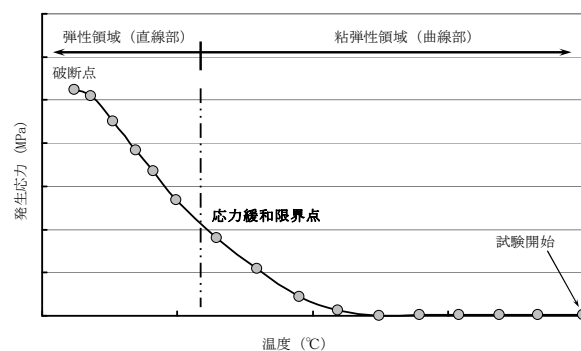


図-6 概念図

る目的で実施した。

当該試験は、インバーナル製の治具にて両端を拘束した棒状供試体（25×25×250mm）を一定の温度勾配で冷却し（本試験は開始温度 10°C，温度勾配-3°C/時間），治具側面ロッドのひずみを測定し供試体に発生する応力を算出するものである²⁾。試験の概要を図-5 に示す。この試験における温度と発生応力の関係は、図-6 の概念図における曲線部と直線部により説明できる。曲線部はアスファルト混合物が有する応力緩和性が発揮され、供試体に発生する応力が逐次緩和される温度領域である。さらに温度が低下すると、応力緩和性が消失し、弾性的な挙動が現れる。そのため、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。ここでは、温度－発生応力曲線の曲線部から直線部へ移行する温度、すなわち応力緩和性が消失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ぶ。

b) 試験結果

図-7 は、前述の試験条件で実施した低温亀裂試験の結果である。図中の矢印で示す応力緩和限界点は、高性能遮水混合物で-30°C，StAs 遮水混合物で-18°C程度である。応力緩和限界点が 10°C以上低い高性能遮水混合物は、低温時において高い応力緩和性を有していることがわかる。

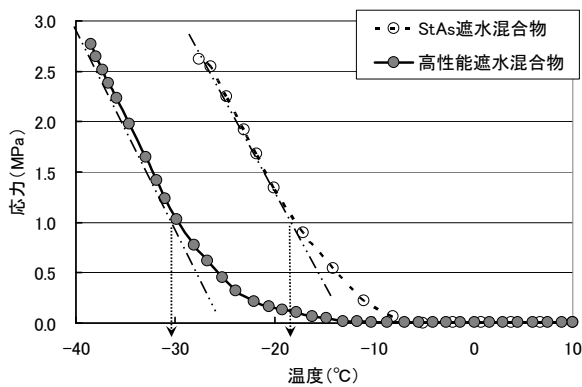


図-7 低温亀裂試験結果

(3) 繰り返し載荷試験

a) 試験方法

繰り返し載荷試験を実施し、応力とひずみの関係や破壊回数などから、地震動により繰返される変形に対する追従性や発生する応力に対する緩和性についての評価を行った。

当該試験は、単軸の直接引張・圧縮を繰り返す試験であり、供試体固定部における応力集中を避けるため、特殊型枠と電動小型タンパにて図-8に示すようなダンベル形状の供試体を作製し実施した³⁾。試験条件を表-4に示す。

b) 試験結果

図-9、図-10は、ひずみ振幅 $3 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-1}$ で実施した試験結果の中から、破壊回数がほぼ等しい結果（破壊回数：20cyc 強）を選定し、高性能遮水混合物と StAs 遮水混合物の繰り返し載荷回数 1, 10, 20 回、および破壊時の応力 (σ) ～ひずみ (ϵ) 履歴ループ曲線をそれぞれ示したものである。破壊回数が20cyc程度であった場合のひずみ振幅の大きさは、以下に示すように、高性能遮水混合物が StAs 遮水混合物の10倍以上を示している。

高性能遮水混合物： $\epsilon = 6.90 \times 10^{-3}$ 、破壊回数=24 回

StAs 遮水混合物： $\epsilon = 5.83 \times 10^{-4}$ 、破壊回数=22 回

また、高性能遮水混合物のピーク軸応力は、載荷回数の増加に伴い減少し、かつループで囲まれる面積が徐々に小さくなっているのに対し、StAs 遮水混合物のピーク軸応力は載荷回数による低下がほとんどなく、また履歴ループの形状も破壊に至るまで変化なく推移していることが読み取れる。すなわち、①高性能遮水混合物は、変形が繰り返した場合、発生する応力が徐々に小さくなる（応力が緩和する）のに対し、②StAs 遮水混合物は、変形が繰り返した際に、発生する応力がほとんど減少しない（応力

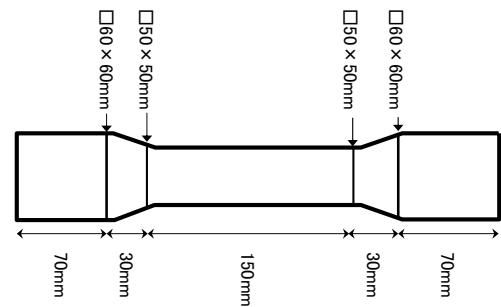


図-8 供試体の形状

表-4 試験条件

制御方法	ひずみ制御
波形	正弦波
周波数 (Hz)	1, 2, 4
試験温度 (°C)	0

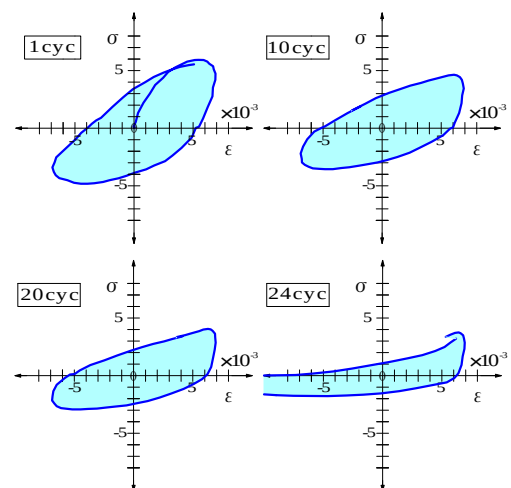


図-9 破壊回数と応力～ひずみ履歴ループ
(高性能遮水混合物)

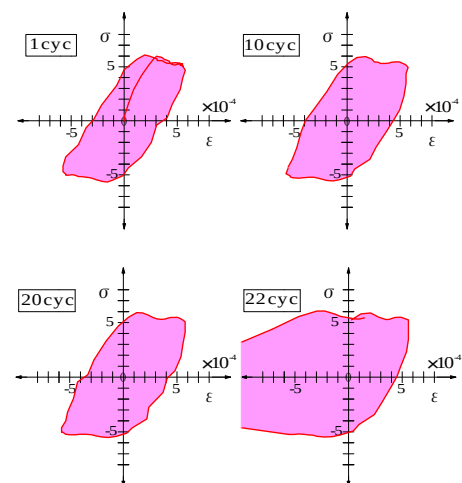


図-10 破壊回数と応力～ひずみ履歴ループ
(StAs 遮水混合物)

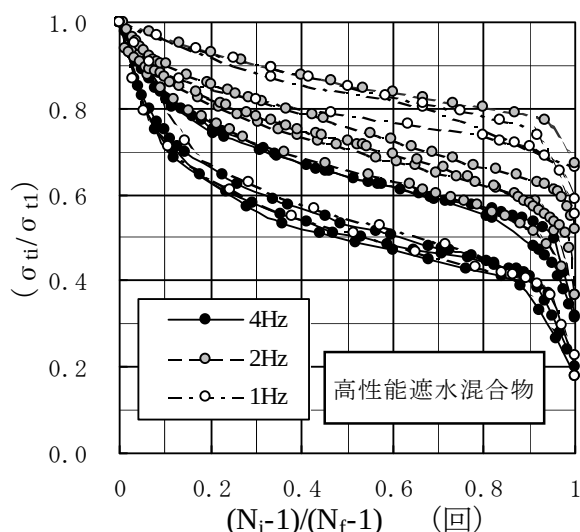


図-11 高性能遮水混合物の引張応力のピーク値と載荷回数
の関係

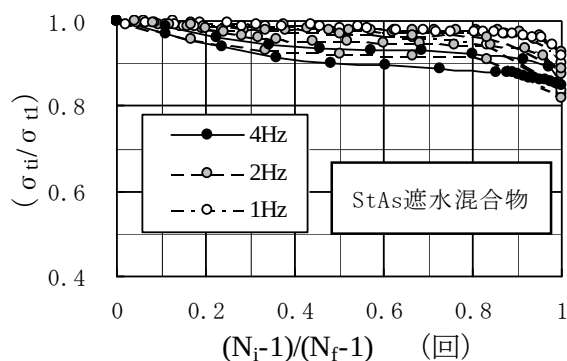


図-12 StAs 遮水混合物の引張応力のピーク値と載荷回
数の関係

が緩和しない)。

次に、図-11、図-12は、高性能遮水混合物および StAs 遮水混合物の各サイクルにおける引張応力のピーク値 (σ_{pi}) と載荷回数 N_i を破壊時の載荷回数 N_f で除して正規化している。図-11より、高性能遮水混合物の破壊時の応力低下割合は $\sigma_{pi} / \sigma_{ti} = 0.2 \sim 0.7$ である。すなわち、変形が繰り返した場合に、発生する応力が減少（応力が緩和）している。一方、図-12に示すように、StAs 遮水混合物の破壊時の応力低下割合は $\sigma_{pi} / \sigma_{ti} = 0.8 \sim 0.9$ である。すなわち、破壊に至るまでの応力の低下（応力緩和）が小さく、僅かな応力低下で破壊に至る“脆性的”な破壊形態を呈している。

以上の結果より、変形速度やひずみ量、破壊回数などの条件によって異なるものの、地震動により堤体の変形が繰り返された場合、高性能遮水混合物の許

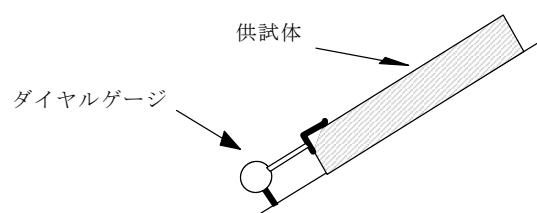


図-13 スロープフロー試験の概要図

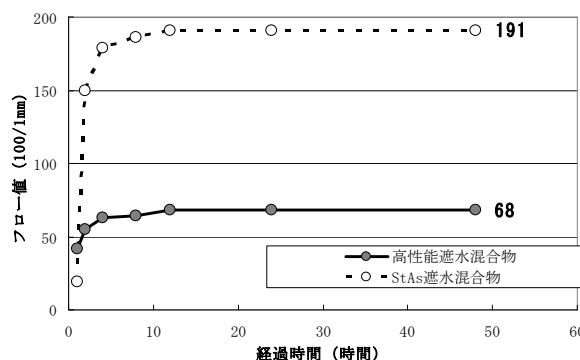


図-14 スロープフロー試験結果

容ひずみは StAs 遮水混合物と比較して大きく、また繰り返し変形に対する発生応力の低下割合（応力緩和）も大きい。一方、StAs 遮水混合物は破壊に至るまでの応力の低下（応力緩和）がほとんどみられず、僅かな応力低下で破壊に至る脆性的な破壊を呈するものと予測される。すなわち、高性能遮水混合物は StAs 遮水混合物と比較して高い変形追従性と応力緩和性を有することを示している。

(4) スロープフロー試験

a) 試験方法

夏期などの高温時にアスファルト遮水壁斜面部においては、自重によりスロープフローと呼ばれるダレ現象を生ずる場合がある。スロープフローが生ずるとダイラタンシによる空隙増大やアスファルトのはく離などが生じ、遮水性が低下する要因となる。これを踏まえ、スロープフロー試験を実施し、斜面安定性を評価した。

スロープフロー試験の概要を図-13に示す。当該試験は、概要図に示すように、供試体を所定の角度（一般に適用箇所の勾配）の架台に設置し、供用時に想定される最高温度下で一定時間経過した時の斜面下方へのフロー値（移動量）を測定するものである。本試験では、試験温度を 60°C に（夏期の舗装表面温度を想定）、架台の角度は、アスファルト遮水壁の斜面勾配と同様の 22° （1 : 2.5 勾配）とした。また、供試体の寸法は、 $90 \times 250 \times 50\text{mm}$ である。

b) 試験結果

スロープフロー試験結果を図-14 に示す。

高性能遮水混合物はStAs遮水混合物に比べて1/3程度のフロー値を示し、高温時における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。

4. アスファルト遮水壁補修工事への適用

静岡県に位置する供用後 30 年以上が経過した内面舗装型均一式フィルダム（堤高 22m，斜面勾配 1：2.5～3）において，2004～2006 年の 3 箇年で高性能遮水混合物をアスファルト遮水層に適用した補修工事を実施した^{4)～6)}．当該補修工事におけるアスファルト遮水層斜面部の主要工種は，StAs 遮水混合物による既設アスファルト遮水層を斜面用切削機で切削し，高性能遮水混合物をオーバーレイすることで耐震補強するものであった。

図-15 に当該工事の施工フロー図を，写真-1 に舗設状況を示す。

高性能遮水混合物は，StAs遮水混合物と同様の製造・施工が可能であることが開発目標のひとつであったが，本補修工事においてそれを実証することができた．また，補修後5年以上が経過している現在，供用状況は良好であり，先の東日本大震災においては，震度5程度の揺れを観測したものの，アスファルト遮水壁の被害は報告されていない。

5. まとめ

地震により被災したアスファルト遮水壁の耐震補強を目的とした補修工事に際し，変形追従性や応力緩和性などの変形性能を改善した高変形性改質アスファルトを開発し，その有効性を室内評価試験により確認し，補修工事に適用した。

以下に室内試験および補修工事により得られた知見をまとめて示す。

- ① 高性能改質アスファルトは，StAs60/80 と比較して針入度が 2.6 倍大きく，軟化点が 36℃高いため，感温性が極めて小さい。
- ② 高性能改質アスファルトは，-10℃での曲げひずみが 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大きい。
- ③ 高性能改質アスファルトは，BBR 試験によるスティフネスおよび m 値が StAs60/80 と比較して 10℃以上低温側で同様の値を示しており，低温域で脆くなりにくく，応力緩和性に優れる。

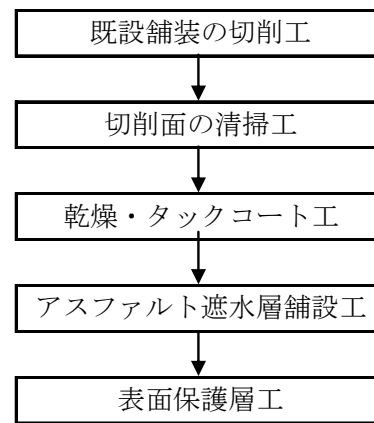


図-15 施工フロー図



写真-1 舗設状況

高性能遮水混合物の曲げ試験による破壊ひずみ

- ④ は，どの破壊応力においても StAs 遮水混合物よりも大きく，高い変形性能を有している。
- ⑤ 曲げ試験より得られる高性能遮水混合物の脆化点は，StAs 遮水混合物よりも 15℃以上低温であり，低温域でも脆くなりにくい。
- ⑥ 高性能遮水混合物は，低温亀裂試験により得られる応力緩和限界点が StAs 遮水混合物よりも 10℃以上低く，低温域での応力緩和性が大きい。
- ⑦ 高性能遮水混合物は，繰り返し载荷試験における破壊ひずみが StAs 遮水混合物の 10 倍以上を示しており，変形追従性が高い。
- ⑧ 繰り返し载荷試験において，StAs 遮水混合物が脆性的な破壊を示すのに対し，高性能遮水混合物の繰り返し変形に対する発生応力の低下割合が大きい，すなわち，応力緩和性が大きい。
- ⑨ 高性能遮水混合物は，スロープフロー試験におけるフロー値が StAs60/80 混合物の 1/3 程度であり，斜面安定性に優れる。
- ⑩ 高性能遮水混合物を補修工事に適用し，StAs

遮水混合物と同様の製造・施工が可能であることを確認した。

6. おわりに

本年3月11日に発生した東日本大震災は、東北地方をはじめ、東日本の広範囲にわたり甚大な被害を及ぼした。アスファルト表面遮水壁型のダムにおいても被害が報告されている地点がある。

本報告では、高性能改質アスファルトのStAsに対する優位性、およびアスファルト遮水壁の耐震補強への有効性を示した。本報告が、今後のアスファルト遮水壁の耐震補強に対する一助となれば幸いである。

参考文献

1) 国土交通省 ホームページ
<http://www.mlit.go.jp/>

2) 野村健一郎, 藤沢信明: 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

3) 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.

4) 亀崎茂男, 清育朗: 東富士ダムにおける表面遮水アスファルトの補修について, 第 54 回農業土木学会関東支部大会講演会, pp78-80, 2003

5) 中村吉男, 大根義男, 成田国朝, 奥村哲夫, 野村健一郎, 島崎勝, 水野孝浩: アスファルト表面遮水壁型アーサダムの地震被害と補修, 第 40 回ダム技術講演討論会, pp43-52, 2008

6) 島崎勝, 吉野友純: 急速かつ大きな堤体変形に追従可能なアスファルト表面遮水壁の施工, 日本建設機械化協会中部支部技術発表会, 2007