

投稿論文(和文)

PAPERS

表面しゃ水壁型ダム用アスファルト混合物の 流動防止材の研究

貝沼憲男¹・篠原俊彦²・伊藤隆彦³

¹正会員 東京電力(株)電力技術研究所主管研究員 (〒230 横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

²正会員 東京電力(株)電力技術研究所主任研究員 (〒230 横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

³正会員 工修 大成ロテック㈱技術研究所部長 (〒365 埼玉県鴻巣市大字上谷1456)

表面アスファルトしゃ水壁型フィルダムに使用されるしゃ水用アスファルト混合物にはしゃ水性、たわみ性、斜面安定性、耐久性などが要求される。このうち、主として斜面安定性を得るために、これまでしゃ水用アスファルト混合物にはアスベストが添加されてきた。ところが、アスベストは発ガン性物質であることが確認されたことから、これに代わる材料の開発が急がれている。本研究では、市販されている数種類のアスベスト代替品を対象として、斜面安定性、たわみ性、耐久性などに関する実験的検討を行い、ロックウールおよび植物性繊維がしゃ水用アスファルト混合物に用いるアスベストの代替品として使用可能なことを確認した。

Key Words: *impermeable asphaltic membrane mixture, slope stability, flexibility, durability*

1. はじめに

表面アスファルトしゃ水壁型フィルダムは、1930年代からドイツを中心としたヨーロッパ各地で施工されるようになり、我国においても1960年代から本格的に採用され、最近では堤高90m級のものも施工されるようになってきた¹⁾²⁾。当該ダムに使用されるしゃ水用アスファルト混合物にはアスファルトコンクリートとアスファルトマスチックがあり、これらには、1)しゃ水性、2)たわみ性、3)斜面安定性、4)耐久性などが要求される。1), 2)および4)を満たすためには一般にアスファルト量を多く使用する傾向となるが、3)を満たすためには逆にアスファルト使用量を制限する必要がある。前記の要求事項全てを満たすアスファルト混合物を製造する際、主として斜面における流動を抑制するため、これまでアスベストが一般的に使用されている。

アスベストは耐熱性に優れ、引張強さが強いなどの特長と大量に入手可能な天然資源であることから石綿スレート、断熱ボード等の建材、ブレーキ等の摩擦材など種々の分野で使用されている。しかし、当該物質が発ガン性物質であることから特定化学物質の一つに指定され、人体ならびに環境への配慮などから近年この使用が制限される傾向にある。

本論文は、このような背景から当該混合物の流動防止材として使用されてきたアスベストの代替品を選定することを目的として以下の検討を行い、得られた結果について述べたものである。

① 文献³⁾調査などから選定したアスベスト代替品の中から、アスファルトマスチックでの流動防止効果が大きく、かつ取扱いが容易な流動防止材の選定。

② ①で選定した流動防止材の耐熱性・せん断抵抗性の評価および流動防止メカニズムの解明。

③ ①で選定した流動防止材を添加したアスファルトコンクリートの斜面安定性、たわみ性等の性状に基づく流動防止材としての使用可能性の評価。

2. アスベスト代替品を添加したアスファルトマスチックの斜面安定性

(1) アスベスト代替品の性状

文献調査などから形状、比表面積、吸油量、耐熱性、安全性などを考慮して選定した8種類のアスベスト代替品およびアスベスト(材料名:クリソタイル)の性状を表-1に示す。

(2) アスベスト代替品を添加したアスファルトマスチックの斜面安定性

表-1に示す9種類の材料を添加したアスファルトマスチックの斜面安定性を評価するため、スロープフロー試験⁴⁾を行った。スロープフロー試験とは、斜面上に塗布した供試体を一定雰囲気温度中に一定時間放置し、このとき供試体が斜面上を流下する長さを測定する試験である。試験条件を表-2に示す。試験温度は我国において表面アスファルトしゃ水壁がさらされる高温側の温度条

表一 アスベストおよびアスベスト代替品の性状（製造者のパンフレットからの引用）

項目	材料名 Asbestos	ボラスト ナイト Wollastonite	アタパル ジャイト Attapulgitite	ロック ウール Rockwool	炭素繊維 Carbon fibres	シリカ フューム Silica -fume	シリカ Silica	植物性 繊維 Cellulose fibres	アラミド 繊維 Aramid fibres
繊維径 (μm)	1~2	10~20	0.14	5	13	平均 粒子径 0.012	平均 粒子径 0.016	45	12.1
繊維長 (μm)	600	400	-	1500	700	-	-	1100	2000
比表面積 (m^2/g)	20~30	-	210	-	0.1	200±15	170~220	-	8~10
吸油量 ($\text{ml}/100\text{g}$)	112	25~30	115	-	0	190	180~200	-	-
比重	2.7	2.9	2.36	2.7	1.65	2.2	1.95	1.58	1.44
耐熱性($^{\circ}\text{C}$)	1500	融点 1540	1000以上で 溶解	1000	310	1700以上 で溶解	1600で 溶解	200	430で 炭化
材質	含水珪酸 マグネシウム	珪酸カルシウム	マグネシウム アルミニウム シケート(含水)	Ca-Mg-Al 珪酸塩 (非晶質)	ビッチ系 炭素	二酸化 珪素	珪酸塩 (含水)	α -セルロース	芳香族 ポリアミド

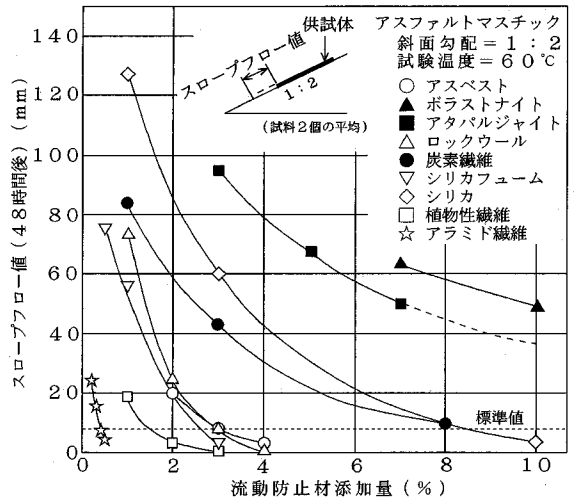
表二 アスファルトマスチックのスロープフロー試験条件

雰囲気温度 ($^{\circ}\text{C}$)	斜面勾配	放置時間 (時間)	供試体寸法 (cm)
60	1:2	48	9×30×0.2

件を、また、斜面勾配は既往の実ダムの一般的な勾配を考慮して設定した。なお、本試験に際し、アスファルトマスチックの混合し易さ、供試体の作製し易さについても併せて評価した。

各材料の添加量とスロープフロー値の関係は図一に示すように、添加量を増加するとスロープフロー値は小さくなり、斜面安定性は向上する。しかし、添加量を増加するとアスファルトマスチックの粘度も増加するため、アスファルトマスチックの混合および供試体の作製は困難となる。また、既往実績^{9)~11)}によればアスファルトマスチックのアスベスト添加量は3%程度であることから、本研究での各材料の添加量は最大10%、スロープフロー値の標準値はアスベスト添加量3%のアスファルトマスチックのスロープフロー値、すなわち8mm以下とした。アスベストを除く8種類の材料の最大添加量とこのときのアスファルトマスチックのスロープフロー値および混合し易さと供試体の作製し易さを表一に示す。

表一からスロープフロー値の標準値を満足し、標準値を満たす添加量でのアスファルトマスチックの混合し易さおよび供試体の作製し易さがともに良好な材料は、ロックウール（人造鉱物繊維）、植物性繊維（セルロース繊維）およびアラミド繊維の3種類である。ただし、アラミド繊維を添加したアスファルトマスチックは、極少量の添加量の変化で斜面安定性が大きく変化することから、施工時の品質管理が困難であると考えられたので、これを除く2種類および比較対象としてアスベストの計3種類を流動防止材として選定した。なお、これら3種類の流動防止材は、シリカ、シリカフューム等が粉末状



図一 流動防止材添加量とスロープフロー値の関係

であるのに対して全て繊維状構造である。

3. 選定した流動防止材の流動防止メカニズム

アスファルト混合物として製造される際、流動防止材は200 $^{\circ}\text{C}$ を超える高温にさらされることによる熱劣化およびミキサの羽根や骨材から受けるせん断力により切断される恐れがある。これらが選定した流動防止材の流動防止機能に及ぼす影響を確認するため、混合温度を変えて作製したアスファルトマスチックのスロープフロー試験および粉砕機により強制的に切断した流動防止材を添加したアスファルトマスチックのスロープフロー試験を行った。試験内容を表一に示す。

表一三 最大添加量とこの時のアスファルトマスチックのスロープフロー値およびスロープフロー標準値を満たす添加量での混合し易さならびに供試体の作製のし易さ

流動防止添加材の種類	最大添加量 (%)	最大添加量でのスロープフロー値 (mm) *1)	スロープフロー標準値を満たす添加量での混合および供試体作製の難易度		備考
			混合のし易さ*2)	供試体作製のし易さ*3)	
ボラストナイト	10.0	49	-	-	最大添加量においてもスロープフロー標準値を満たさない。
アタパールジャイト	7.0	50	-	-	最大添加量においてもスロープフロー標準値を満たさない。
ロックウール	4.0	0	良好	良好	スロープフロー標準値を満たす添加量 3% では混合および供試体の作製は良好であるが、4% となるといずれも多少困難となる。
炭素繊維	8.0	9	-	-	最大添加量においてもスロープフロー標準値を満たさない。
シリカフューム	3.0	3	不良	不良	スロープフロー標準値を満たす添加量 2.8% で混合および供試体作製を実施したが、共に不良である。
シリカ	10.0	3	不良	不良	スロープフロー標準値を満たす添加量 8% で混合および供試体作製を実施したが、共に不良である。
植物性繊維	3.0	0	良好	良好	スロープフロー標準値を満たす添加量 2% では混合および供試体の作製は良好であるが、3% となるといずれも困難となる。
アラミド繊維	0.5	4	良好	良好	スロープフロー標準値を満たす添加量 0.4% では混合および供試体作製は良好であるが、0.5% とするといずれも困難となる。

*1) 試験数量 n=2個の平均

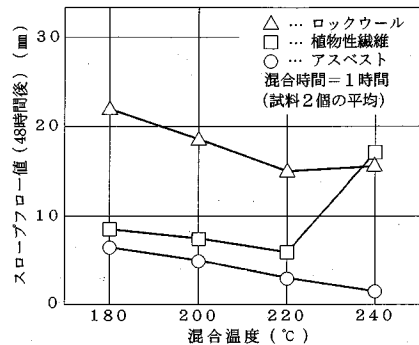
*2) 混合のし易さは、アスベスト添加混合物とほぼ同等の温度(210℃程度)で均一に混合できるかで判定。

*3) 供試体作製のし易さは、ゴムレーキでの塗布が引きずりを起こすことなく容易にできるかで判定。

表一四 流動防止材の熱劣化および繊維の切断が流動防止機能に及ぼす影響に関する試験

試験項目	試験内容
熱劣化に関する試験	<ul style="list-style-type: none"> 供試体作製条件 混合温度=180, 200, 220, 240℃ 混合時間=1時間 スロープフロー試験 表一 2 と同じ 試験数量 n=2
繊維切断に関する試験	<ul style="list-style-type: none"> 粉碎装置 奈良機械製作所 自由粉碎機 M-4 粉碎条件 粉碎回転数=4000, 4500, 5000, 5500rpm 最外周速度=66.7, 75, 83.3, 91.7m/sec 供試体作製条件 混合温度=180℃ 混合時間=1時間 スロープフロー試験 表一 2 と同じ 試験数量 n=2

(1) 熱劣化が流動防止材の流動防止機能に及ぼす影響
混合温度および添加する流動防止材の種類を変えて作製したアスファルトマスチックのスロープフロー試験結果を図一 2 に示す。ロックウールまたはアスベストを添加したアスファルトマスチックのスロープフロー値は、混合温度が高くなるにしたがって小さくなる傾向を示した。これは、混合温度が高くなるにしたがい、混合時の熱によりアスファルト中の軽質分の蒸発量が増え、アスファルトの硬化が進行したためと考えられる。しかし、



図一 二 アスファルトマスチックの混合温度とスロープフロー値の関係

植物性繊維を添加したアスファルトマスチックのスロープフロー値は、混合温度を 240℃とした時の方が 220℃とした時よりも大きくなった。これは、混合時の熱により植物性繊維が劣化、変質し、これに伴う当該物質の流動防止機能の低下が、混合時の熱によるアスファルトの硬化を卓越したためと考えられる。

(2) 繊維切断が流動防止材の流動防止機能に及ぼす影響

アスベストを除く 2 種類の流動防止材を粉碎機により強制的に切断し、これらを添加したアスファルトマス

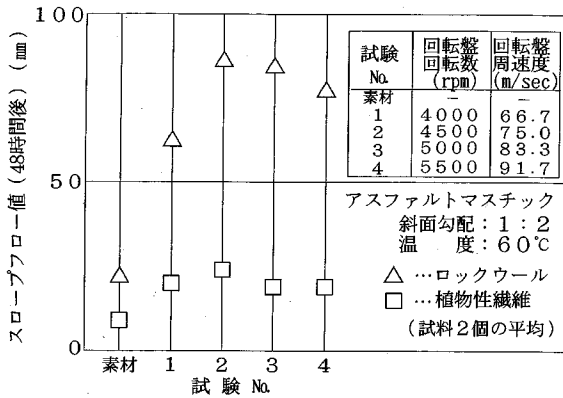


図-3 繊維の切断がスロープフロー値に与える影響

表-5 流動防止材単体の吸水率試験と熱劣化試験および流動防止材混入フィラーのフロー試験

試験項目	試験内容
吸水率試験	<ul style="list-style-type: none"> 霧囲気湿度=60%RH 霧囲気温度=20℃ 放置時間=20日 試験数量 n=2
熱劣化試験	<ul style="list-style-type: none"> 加熱状態=空气中, サラダ油中 加熱温度=160, 180, 200, 220, 240℃ 加熱時間=24時間 試験項目: 加熱減量測定(空气中加熱のみ), 目視観察, 顕微鏡写真撮影 試験数量 n=2
流動防止材混入フィラーのフロー試験 ¹¹⁾	<ul style="list-style-type: none"> 流動防止材混入フィラー配合: (各流動防止材:石灰石粉)= (3.35%:96.65%), (0%:100%) 試験数量 n=2

チックを用いて行ったスロープフロー試験の結果を図-3に示す。粉碎に使用した奈良機械製作所の自由粉碎機 M-4 は、ピンを取り付けた回転盤とこのピンに噛み合うようにピンを取り付けた固定盤および回転盤の外側に取り付けられた粉碎輪から構成され、ピン同志ならびにピンと粉碎輪から受けるせん断力により流動防止材を切断するものである。切断された流動防止材を添加した試料のスロープフロー値はいずれも、切断しない流動防止材を添加した試料のスロープフロー値よりも大きくなった。これは、切断により流動防止材の流動防止機能が低下したためと考えられる。ただし、低下する度合いはロックウールの方が植物性繊維よりも大きい。

(3) 流動防止メカニズム

熱劣化および繊維切断が流動防止材の流動防止機能に及ぼす影響は、流動防止材の種類により異なることが判った。すなわち、ロックウールは主として繊維切断により流動防止機能が低下し、植物性繊維は主として熱劣化により流動防止機能が低下する。一般に、流動防止材が流動を防止するメカニズムとしては次の3つが考えら

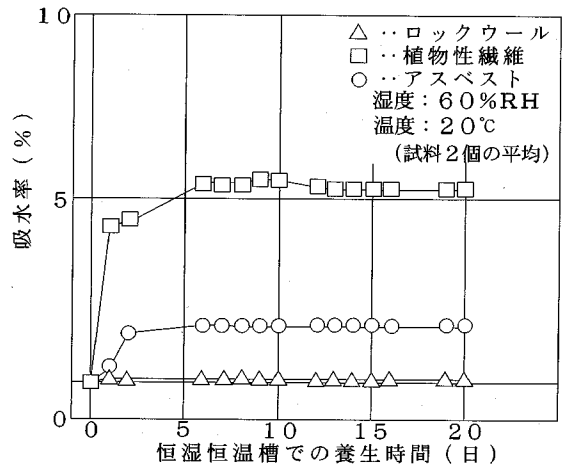


図-4 流動防止材単体の吸水試験結果

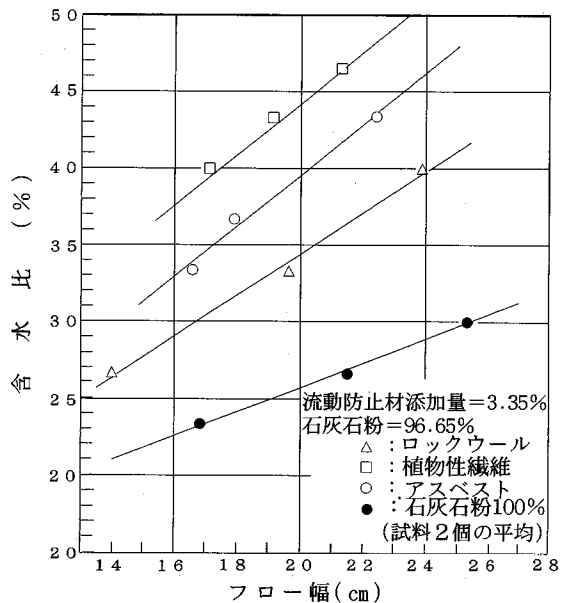
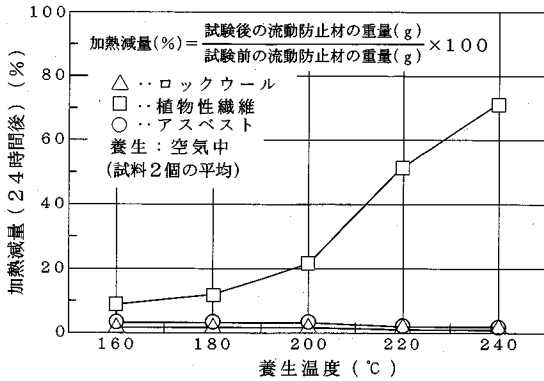


図-5 流動防止材混入フィラーのフロー試験結果

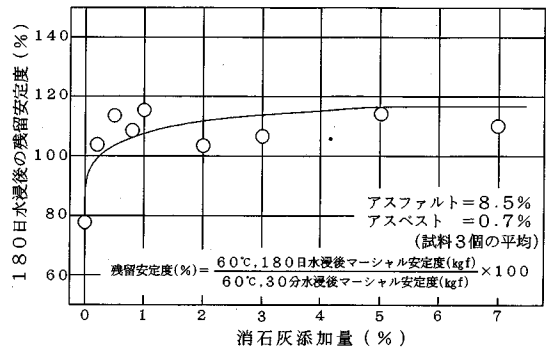
れる。

- ① 繊維同志の絡み合いで流動を防止する
- ② アスファルトを吸収して混合物の見掛けの粘度を高めて流動を防止する
- ③ ①と②を兼ね備えて流動を防止する

選定した3種類の流動防止材の流動防止メカニズムがこのうちどれに相当するかを推定するため、流動防止材単体を対象として、アスファルトの吸収に関連する吸水率試験^{9),10)}および熱劣化試験を、また、石粉の一部を流動防止材で置換した試料を対象として、アスファルトの吸収に関連する石粉のフロー試験¹¹⁾を行った。試験内容を表-5に示す。



図一六 流動防止材単体の加熱減量試験結果



図一七 消石灰添加量と残留安定度の関係

表一六 アスファルトコンクリートの配合 (重量%)

材 料	6号 砕石 13-5mm	7号 砕石 5-2.5mm	スクリー ニングス 2.5-0mm	細砂 2.5-0mm	石灰 石粉	消石灰	流動 防止材	アスファルト (60/80)
アスベスト	16.4	22.0	36.6	5.5	9.8	0.5	0.7	8.5
ロックウール	16.4	22.0	36.6	5.5	9.5	0.8	0.7	8.5
植物性繊維	16.4	22.0	36.6	5.5	10.46	0.4	0.14	8.5

吸水率試験の結果を図一四に示す。ロックウールはほとんど吸水しないが、アスベストおよび植物性繊維はそれぞれ1.5%、5.3%程度吸水した。石粉のフロー試験結果を図一五に示す。同一のフロー幅となる含水比は植物性繊維で置換した試料が最も大きく、以下アスベストで置換した試料、ロックウールで置換した試料の順になっている。

流動防止材を恒温の空气中で24時間養生した後に測定した加熱減量を図一六に示す。アスベストおよびロックウールの加熱減量は養生する温度を240°Cまで上昇させても3%以下であったが、植物性繊維の加熱減量は養生する温度が上昇するとともに増加し、180°Cで約10%、200°Cで約20%、220°Cで約50%、240°Cに至っては約70%となった。

また、加熱減量測定に併せて実施した流動防止材の色ならびに繊維形状の変化を目視および顕微鏡写真により観察した。この結果、アスベストおよびロックウールは240°Cの空气中またはサラダ油中で24時間養生しても色、繊維形状ともほとんど変化は見られなかったが、植物性繊維は温度を上昇させると灰色から褐色、褐色から黒色へと変色した。しかし、サラダ油中で養生した場合の変色度合いは、空气中で養生した場合より約40°C高温側にシフトしていた。また、植物性繊維の顕微鏡写真によれば、空气中で養生した場合は、200°C程度から繊維が黒色を呈し、240°Cに至ってはほとんど繊維の先端が失われていたが、サラダ油中で養生した場合は、温度を240°Cまで上昇させても繊維形状の変化はほとんど認められな

かった。

以上から、各流動防止材の特長を整理するとつぎのようである。すなわち、ロックウールは、①繊維切断により流動防止機能が低下する。②加熱による色および繊維形状の変化はほとんど認められない。③アスファルトの吸収に関連する吸水率はほとんどなく、また同一のフロー幅となるフロー試験における含水比も検討した添加材の中で最も小さい。植物性繊維は、①繊維の熱劣化により流動防止機能が低下する。②繊維切断による流動防止機能の低下はロックウールに比較すると少ない。③空气中で加熱すると色および繊維形状の変化が認められるが、サラダ油中における変色度合いは空气中より40°C程度高温側にシフトし、また形状の変化は認められない。④吸水率が大きく、同一のフロー幅となるフロー試験における含水比は3者のうちで最も大きい。アスベストは、①加熱による色および繊維形状の変化はほとんど認められない。②吸水率およびフロー試験における含水比は上記2者の中間的な値である。

これらのことから、ロックウールはアスファルトをほとんど吸収しないが、植物性繊維およびアスベストはアスファルトを吸収すると考えられる。従って、流動防止メカニズムは、ロックウールが主として繊維の絡み合いによって機能しているのに対して、アスベストおよび植物性繊維は繊維の絡み合いの他にアスファルトを吸収して混合物の見掛けの粘度を高めて流動を防止するメカニズムも兼ね備えていると考えられる。

表-7 選定した流動防止材を添加したアスファルトコンクリートの試験

要求性能	試験項目	試験条件
斜面安定性	スロープフロー試験 ⁴⁾	温度=60°C, 勾配=1:2, 時間=48時間, 供試体寸法=9×30×5cm, 試験数量 n=3
	三軸圧縮試験 ⁴⁾	温度=5°C、側圧=0, 1, 3, 7kgf/cm ² , ひずみ速度=8×10 ⁻⁵ 1/sec, 供試体寸法=φ10×h20cm, 試験数量 n=3
たわみ性	曲げ試験 ⁴⁾	地震時: 温度=-15°C, ひずみ速度=1×10 ⁻² 1/sec 湛水時: 温度=5°C, ひずみ速度=5×10 ⁻⁵ 1/sec 供試体寸法=4×4×30cm(3点載荷, スパン=20cm), 試験数量 n=3
耐久性	長期水浸安定度試験 ⁴⁾ (水浸マーシャル安定度試験)	水浸温度=60°C, 水浸期間=最大6ヶ月, 試験数量 n=3
	凍結融解試験 ⁴⁾ 後 曲げ試験	凍結融解温度=-20~20°C(最大200サイクル, 5時間/サイクル), 曲げ試験=上記曲げ試験と同じ, 試験数量 n=3
	紫外線照射試験 ⁴⁾ 後 曲げ試験 および 回収アスファルトの 物理試験	照射期間=最大2160時間 曲げ試験=上記曲げ試験と同じ, 試験数量 n=3 試験試料=照射表面から1cmと1cm以深より回収(「アスファルト混合物からのアスファルト回収方法(JPI-5S-31)」に準拠)したアスファルト2種類 針入度, 軟化点および伸度試験(JIS K 2207に準拠), 60°C粘度試験 ^{1,5)}
	繰返し曲げ試験 ¹⁵⁾	温度=-15, 5°C, 波形=sin波, 周波数=2Hz, ひずみ振幅: 600, 750, 900μ(-15°C), 600, 1000, 1500μ(5°C), 供試体寸法=4×4×40cm(4点載荷, スパン=30cm, 載荷点間隔=10cm), 試験数量 n=3
施工性	実規模設備による 試験練り および 試験舗装	・試験練り: ドライ混合時間=15sec, ウェット混合時間=45sec, 混合温度=180±10°C、混合したアスファルトコンクリートにて上記の条件によりスロープフロー試験を実施 ・試験舗装: 堤頂長=13m, 斜面長=30m, 斜面勾配=1:2の規模の模擬斜面において、表-13に示す実舗設用機械を用いて表-14に示す条件で試験舗装を実施

4. 選定した流動防止材を添加したアスファルトコンクリートの性状

表面しゃ水壁に使用されるしゃ水用アスファルトコンクリートには、前述のようにしゃ水性、たわみ性、斜面安定性、耐久性、施工性などが要求される。従って、アスファルトマスタックのスロープフロー試験結果から選定したロックウールあるいは植物性繊維を添加したアスファルトコンクリートは、これらの要求事項に対して、これまで一般的に使用されてきたアスベストを添加したものと同等の性状を有する必要がある。そこで、これらの要求性能を評価する試験を行った。

(1) 配合

アスファルトコンクリートへのアスベスト添加量は、斜面安定性、たわみ性、施工性などから決定され、既往実績^{5)~8)}によれば、0.7%程度であることから、本研究ではアスベスト添加量を0.7%とした。

また、表面しゃ水壁に使用されるしゃ水用アスファルトコンクリートには、流動防止材の他に、長期水浸安定性を高めるために消石灰などを添加する場合がある。しかし、この消石灰添加量を多くすると、アスファルトコンクリートは脆くなる¹²⁾。アスベスト添加アスファルトコンクリートの消石灰添加量と水浸180日における残留安定度の関係を図-7に示す。これからアスベスト添加アスファルトコンクリートの消石灰添加量は、残留安定度が100%以上を確保する0.5%とした。

ロックウール添加アスファルトコンクリートおよび植物性繊維添加アスファルトコンクリートの流動防止材および消石灰の添加量は、アスベスト添加アスファルトコンクリートと同等の斜面安定性、たわみ性、長期水浸安定性などを有するように決定した。この結果、ロックウール添加アスファルトコンクリートの流動防止材添加量は0.7%、消石灰添加量は0.8%、植物性繊維添加アスファルトコンクリートの流動防止材添加量は0.14%、消石灰添加量は0.4%とした。

本研究で使用したアスファルトコンクリートの配合を表-6に示す。

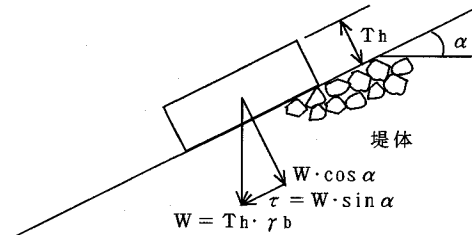
(2) 流動防止材を添加したアスファルトコンクリートの性状

前述の配合で製造したアスファルトコンクリートが表面しゃ水壁に要求される性能を有するかを評価するため、表-7に示す試験を行った。なお、曲げ試験のひずみ速度は、八汐ダムをモデルとして湛水時・水位変動時を想定した2次元FEM解析および地震時を想定した2次元動的応答解析によりしゃ水壁に発生する最大ひずみを求め、これらの値とこれらが生じる時間から設定した。この結果、湛水時・水位変動時にしゃ水壁に発生するひずみはダム底部のカットオフ近傍で最大となり、ひずみ速度は10⁻⁷~10⁻⁹1/sec、地震時にしゃ水壁に発生するひずみはダム頂部から堤高の1/5~1/6下がった位置で最大となり、ひずみ速度は10⁻³1/sec程度となるが、アスファルトコンクリートの降伏ひずみは一般にひずみ速

表一八 スロープフロー試験結果 (1/100 mm)

流動防止材	ロックウール	植物性繊維	アスベスト
スロープフロー値	160	131	241

(試験数量 n = 3個の平均値)



図一八 シャ水壁の斜面勾配のせん断に対する安定性

表一九 三軸圧縮試験結果およびこれから求めた抵抗力ならびにすべり力

流動防止材	ロックウール	植物性繊維	アスベスト
内部摩擦角(度)	26.6	32.0	26.3
粘着力(kgf/cm ²)	13.8	11.5	13.7
すべり力(kgf/cm ²)	0.0103	0.0103	0.0103
抵抗力(kgf/cm ²)	0.0241	0.0244	0.0239

(試験数量 n = 3個の平均値)

度が早くなると小さくなることから、安全側の値として表一七に示す値を設定した。曲げ試験の温度は、アスファルトコンクリートの降伏ひずみは一般に温度が低下すると小さくなることから、最大ひずみが発生する位置においてシャ水壁がさらされる低温側の温度から設定した。すなわち、湛水時・水位変動時は水深100級のダム湖の一般的な湖底の水温を、地震時は当該地点で予想される最低気温を考慮して表一七に示す値を設定した¹⁴⁾。

a) 斜面安定性

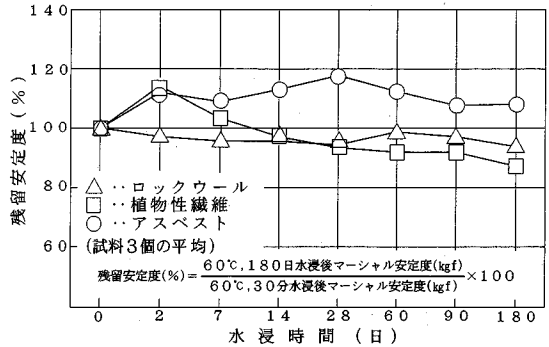
スロープフロー試験結果を表一八に示す。ロックウールあるいは植物性繊維を添加したアスファルトコンクリートのスロープフロー値は、アスベストを添加したものよりも小さくなっている。

また、図一八に示すように、斜面に設けられた舗装体微小部分の斜面勾配のせん断に対する安定性は式(1)により検討できる。三軸圧縮試験により求めた3種類のアスファルトコンクリートの内部摩擦角と粘着力ならびにこれから算出したすべり力と抵抗力は表一九に示すとおりであり、いずれの流動防止材を添加したアスファルトコンクリートもすべりに対する安定性を十分有している。なお、シャ水壁の舗装厚さ、舗装体密度および勾配は、既往の実ダムの一般的な構造から、それぞれ10 cm、

表一〇 曲げ試験結果と解析値との比較

試験条件	試験結果(降伏ひずみ)(%)			解析値 ¹⁴⁾ 最大発生ひずみ(%)
	ロックウール	植物性繊維	アスベスト	
湛水時	3.06	3.85	3.89	1.1
地震時	0.23	0.24	0.23	0.095

(試験数量 n = 3個の平均値)



図一九 長期水浸安定度試験結果

0.0023 kg/cm²、および1:2 (=26.6度)とした。

$$\tau_f = W \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi + C_c > \tau = W \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

ここで、 τ_f : 抵抗力 (kgf/cm²)

W: シャ水壁微小部分の自重により下向きに作用する力 = $T_h \cdot \gamma_b$ (kgf/cm²)

T_h : 舗装厚さ (cm)

γ_b : 舗装体密度 (kg/cm³)

α : 斜面勾配 (度)

ϕ : 舗装体の内部摩擦角 (度)

C_c : 同上有効粘着力 (三軸圧縮試験により求めた粘着力 $C \times 1/1000$) (kgf/cm²)

τ : すべり力 (kgf/cm²)

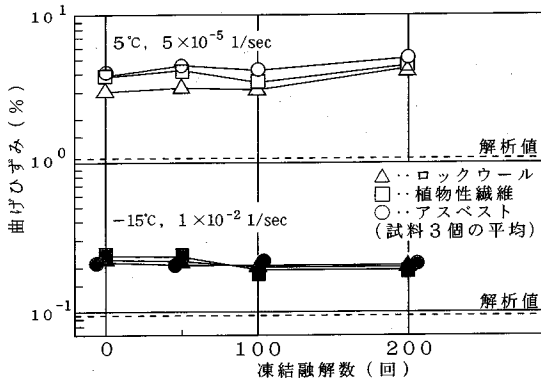
b) たわみ性

曲げ試験結果を表一〇に示す。曲げひずみは、いずれの流動防止材を添加したアスファルトコンクリートも同等の値を示しており、また、参考として示した八汐ダムにおける解析値¹⁴⁾を十分に上回った値となっている。

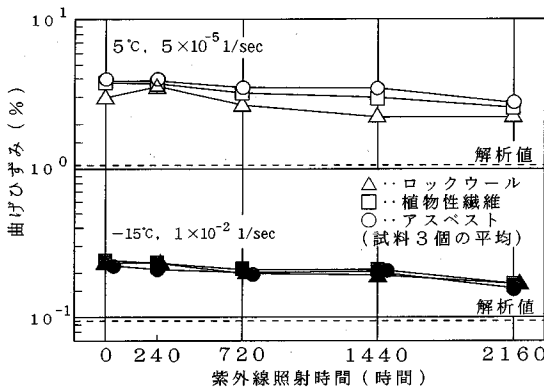
c) 長期耐久性

長期水浸マーシャル安定度試験結果を図一九に示す。いずれの流動防止材を添加したアスファルトコンクリートも水浸180日後における残留安定度は100%程度を確保している。

凍結融解作用に対する抵抗性を評価するため、ASTM C666-84に準拠した装置を用いて凍結融解試験を実施した。これは、供試体の周囲を水で満たし、この水をブライン(不凍液)で凍結および融解させて供試体に凍結融解作用を与えるものである。この際の凍結融解温度お



図一10 凍結融解後試料の曲げ試験結果



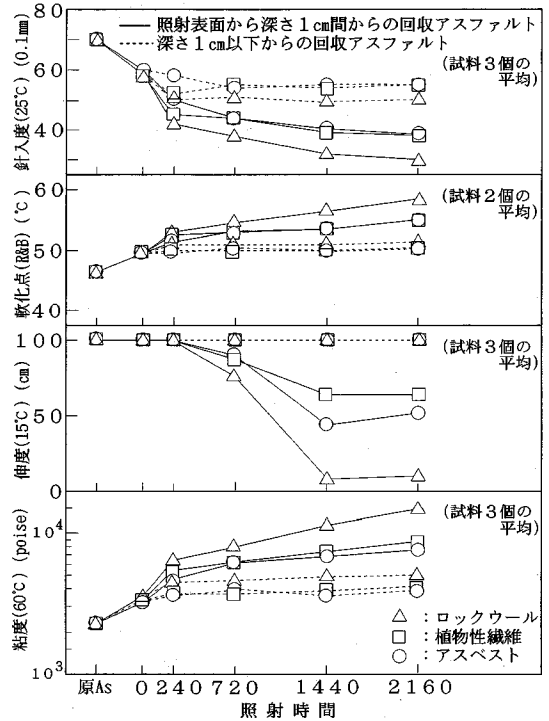
図一11 紫外線照射後試料の曲げ試験結果

よびサイクル数は、3種類のアスファルトコンクリートの相対的な性状比較をするため、それぞれ $-20\sim 20^{\circ}\text{C}$ 、最大200サイクルを設定した。

凍結融解試験後に実施した曲げ試験結果を図一10に示す。凍結融解回数200サイクル後の曲げひずみは、いずれの流動防止材を添加したアスファルトコンクリートもほぼ同等の値となっており、また、この値は八汐ダムにおける解析値を十分上回っている。

気象作用に対する抵抗性を評価するため、紫外線照射試験を行った。人工光源としてサンシャインカーボンアーク、紫外線カーボンアーク、キセノンアークがあるが、いずれもスペクトル分布は太陽光線とは異なっているため、耐久性の相対的な比較に用いることは可能であるが、絶対的な評価法はまだ定まっていない。本研究では、2種類の代替材添加アスファルトコンクリートとアスベスト添加アスファルトコンクリートの相対的な性状比較を行うため、最大2160時間までサンシャインカーボンアーク式の促進試験を実施した。

紫外線照射試験後に実施した曲げ試験結果を図一11



図一12 紫外線照射試験後試料から回収したアスファルトの物理試験結果

に示す。連続2160時間照射後の曲げひずみは、いずれの流動防止材を添加したアスファルトコンクリートもほぼ同等の値となっており、また、この値は八汐ダムにおける解析値を十分上回っている。

連続2160時間照射後のアスファルトコンクリートから回収したアスファルトの針入度、軟化点、伸度および粘度測定結果を図一12に示す。いずれの流動防止材を添加したアスファルトコンクリートから回収したアスファルトも、照射表面から深さ1cmまでからのものは大きく変化していたが、それ以深からのものはほとんど変化していなかった。また、各照射時間経過後のアスファルトコンクリートの表面状況も、いずれの流動防止材を添加したアスファルトコンクリートも同様であった。

地震などの繰返し荷重に対する耐久性を評価するため、試験温度を -15°C と 5°C の2点でひずみ振幅を $600\mu\sim 1500\mu$ で数点変化させた繰返し曲げ試験を行った。繰返し曲げ試験において、一定のひずみ量をアスファルトコンクリートに繰返し載荷した場合、その複素弾性率は載荷回数が増加するとともに低下する傾向を示し、ある回数になると急激に低下することが明らかにされており、このときの載荷回数を降伏回数としている¹⁵⁾。3種類のアスファルトコンクリートについて、ひずみ振幅とこの降伏回数の関係を整理した結果は図一13に示すとお

表-11 繰返し曲げ試験結果

場所	条件			降伏回数		
	ひずみ振幅 (%)	周波数 (Hz)	温度 (°C)	ロックウール	植物性繊維	アスベスト
水上部	0.05	2	-15	15,280,000	18,160,000	3,862,000
水中部	0.05	2	5	202,000	130,000	186,000

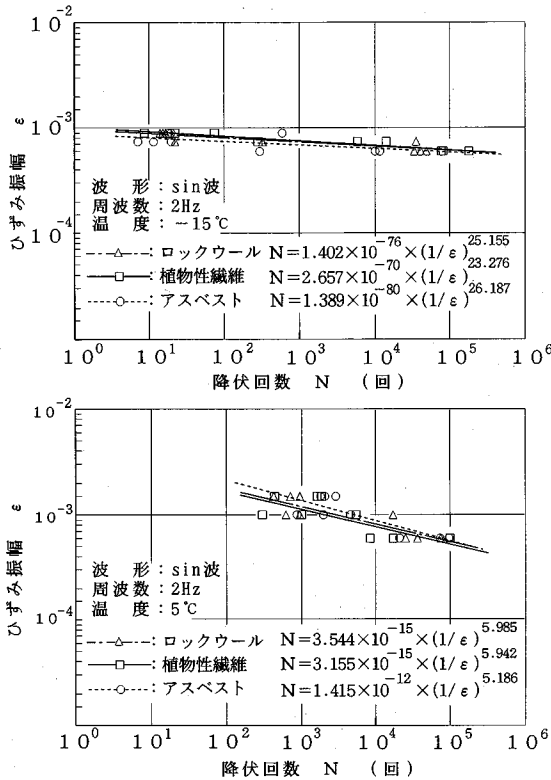


図-13 繰返し曲げ試験結果

りであり、いずれの流動防止材を添加したアスファルトコンクリートも繰返し荷重に対して同等の耐久性を有している。また、参考までに本試験結果から既往地震動(1978年宮城県沖地震の際に得られた開北橋 TR 波: 最大加速度 287 gal, 最大変位 0.86 cm)の最大振幅に対する水上部および水中部の降伏回数を求めた結果を表-11に示す。このことから、いずれの流動防止材を添加したアスファルトコンクリートも開北橋級の地震動に対して十分な耐久性があると判断される。

d) シャ水性

凍結融解試験および紫外線照射試験終了後のアスファルトコンクリートで実施した透水試験の結果、いずれの流動防止材を添加したアスファルトコンクリートも透水係数は $1 \times 10^{-9} \text{cm/sec}$ 以下を示しており、長期供用後もシャ水性を維持すると判断される。

表-12 実プラントで製造したアスファルトコンクリートのスロープフロー試験結果

(1/100mm)

製造箇所	ロックウール	植物性繊維	アスベスト
実プラント	123	125	172

(試験数量 $n = 3$ 個の平均値)

表-13 施工機一覧

機 械	仕 様
ウインチ ポータル	重量=90ton, スキップ容量=3.0m ³ 巻上速度: ・Asフィニッシャ=0~22m/min ・ダンプ車=0~120m/min ・ローラ=0~30m/min
ダンプ車	重量=4.7ton, ホッパ容量=4m ³
アスファルト フィニッシャ	フェーゲル社製S-1804型(ノハ [®] 9-コンパ [®] ク ジョンスクラフト [®] 7°), 重量=22.0ton 舗設幅=3.9m, ホッパ容量=4.0m ³
ローラ用 ウインチ車	重量=9.0ton, 巻上速度=0~30m/min
ローラ	ボマーグ社製BW-75SH, 重量=1.1ton 起振力=4ton, ローラ幅=75cm

e) 施工性

実プラントで混合した場合の流動防止材の流動防止機能を確認するため、実プラントでの一般的なシャ水用アスファルトコンクリートの混合条件、すなわち、ドライ混合 15 秒、ウェット混合 45 秒、混合温度 $180 \pm 10^\circ\text{C}$ で混合したアスファルトコンクリートのスロープフロー試験結果を表-12に示す。この結果と表-8に示した試験室で混合したアスファルトコンクリートのスロープフロー試験結果とを比較すると、いずれの流動防止材を添加したアスファルトコンクリートのスロープフロー値も実プラントで混合したものの方が試験室で混合したものよりも小さくなっている。このことから、一般的な条件で混合する限りにおいては流動防止材の流動防止機能は低下しないことが確認された。

また、前述の実プラントでの一般的な混合条件で製造したアスファルトコンクリートを使用して、堤頂長 13 m, 斜面長 30 m, 斜面勾配 1 : 2 の模擬斜面で表-13に示す実舗設用機械を用いて表-14に示す条件で試験施工を行い、施工性を確認した。その結果、いずれの流動防止材を添加したアスファルトコンクリートも敷きならし時にひきずりなどは見られず、また転圧作業も良好であった。なお、試験施工に用いた 3 種類のアスファルト

表-14 試験施工条件

項	目	条 件	備 考
混 合	温 度	180±10℃	ドライ混合=15秒 ウェット混合=45秒
	温 度	150℃以上	縦引き、舗装厚=5cm
敷き ならし	速 度	1 m/分	舗設幅=3.9m
	タ ン パ	1000rpm	ハイパワーコンパク
	パ ー ク	4000rpm	ションスクリード
	ア プ レ ッ ッ ャ	50kgf/cm ²	設定条件
転 圧	温 度	120℃以上	
	回 数	5回	

表-15 アスファルトコンクリートの性状

特性	添加材	ロック ウール	植物性 繊維	アスベスト
密度	g/cm ³	2.327	2.352	2.350
バインダー容積	%	19.2	19.4	19.4
空隙率	%	1.8	0.9	0.9
骨材間隙率	%	21.0	20.2	20.3
飽和度	%	91.4	96.0	95.6
透水係数	cm/sec	1×10 ⁻⁶ 以下	1×10 ⁻⁶ 以下	1×10 ⁻⁶ 以下
曲げ	① %	1.987	2.258	3.089
ひずみ	②	0.143	0.168	0.168

〔注〕曲げひずみ①は5℃、5×10⁻⁶1/sec、②は-15℃、1×10⁻²1/secの試験条件での値。

コンクリートの性状は表-15 に示すように、いずれも透水係数は1×10⁻⁶cm/sec以下であり、曲げひずみは八沙ダムにおける解析値を十分上回っていた。

5. 結 論

本研究で明らかにした事項を列記すると、以下のとおりである。

1) 植物性繊維は、アスファルト混合物を製造する際に混合時の熱等による熱的損傷を受けると、その流動防止機能が低下する恐れがある。

2) ロックウールは、アスファルト混合物を製造する際にミキサの羽根や骨材から受けるせん断力による繊維切断のため、その流動防止機能が低下する恐れがある。

3) ロックウールの流動防止メカニズムは、主として繊維の絡み合いによるものと考えられる。

4) アスベストおよび植物性繊維の流動防止メカニズムは、上記の他にアスファルトを吸収して混合物の見掛けの粘度を高めて流動に抵抗する機能も兼ね備えているものと考えられる。

5) ロックウールあるいは植物性繊維を添加したアスファルトコンクリートのしゃ水性、たわみ性、斜面安定性、耐久性は、アスベストを添加したものとほぼ同等である。

6) 一般的な実プラントでの混合条件、すなわち、ドライ混合15秒、ウェット混合45秒、混合温度180±10℃

でアスファルトコンクリートを混合する限り、ロックウールあるいは植物性繊維の流動防止機能はアスベストと同様、低下しない。

7) ロックウールあるいは植物性繊維を添加したアスファルトコンクリートの実舗設機械での施工性は、いずれも良好である。

以上から、ロックウールおよび植物性繊維は、表面しゃ水壁に使用されるしゃ水用アスファルトコンクリートの流動防止材の代替品として使用可能と考えられる。なお、両者のアスファルトマシチックへの使用可否については今後更に検討を進めていく必要がある。

謝辞：本研究を遂行するに際し、終始ご指導を賜りました北海道大学名誉教授 菅原照雄博士に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 電力土木技術協会：最新フィルダム工学，山海堂，pp.161-163，1981年3月。
- 2) Strabag Bau-Ag：Asphalt-Wasserbau-Arbeiten aus den Jahren 1979-1981 AuBendichtungen-I，11 Folge Heft 1，pp.135-161。
- 3) 環境庁大気保全局企画課：アスベスト代替品のすべて，日本環境衛生センター，1989年6月。
- 4) 沢田敏男，中島保治：水利アスファルト工学，土地改良新聞社，pp.31-46，1968年6月。
- 5) 横田潤，大長昭雄：多々良木ダムの設計と施工，発電水力，No.125，pp.53-71，1973年7月。
- 6) 長尾新：双葉ダムアスファルトフェーシングの設計施工，農業土木学会誌，第45巻第11号，pp.45-49，1977年11月。
- 7) 水工アスファルト研究会：水工アスファルト—現場技術者のための材料・設計・施工—，鹿島出版会，pp.221-263，1976年11月。
- 8) 渡辺光基：大津岐ダムの設計と施工，フィルタイプダムの施工技術，日本ダム協会，pp.62-85，1970年4月。
- 9) 小谷昇：図解土木講座 アスファルト混合物の知識，技報堂出版，p.26，1976年6月。
- 10) 松野三朗，南雲貞夫，三浦裕二，山之口浩：アスファルト舗装に関する試験，建設図書，p.16，1983年9月。
- 11) 日本道路協会：舗装試験法便覧，pp.300-304，1989年11月。
- 12) 建設省道路局国道一課，土木研究所，各地方建設局，北海道開発局：アスファルト混合物のはく離現象に関する調査研究(II)，第26回建設省技術研究会報告(昭和47年)，(財)土木研究センター，pp.281-310，1972年。
- 13) 日本道路協会：舗装試験法便覧，pp.398-407，1989年11月。
- 14) Kiyoshi ISHII and Minoru KAMIJYO：Design for asphaltic concrete facing of Sabigawa Upper dam，Sixteenth Congress on Large Dams，Vol.2 Question 61 Transactions，pp.327-358，1988。

- 15) 笠原篤, 菅原照雄: 繰返し載荷過程におけるアスファルト混合物の動的性状の変化について, 土木学会論文報告

集, No.235, pp.87-98, 1975年3月.

(1994.1.10 受付)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON SLOPE STABILIZING ADDITIVES FOR IMPERMEABLE ASPHALTIC MEMBRANE MIXTURE OF FILL-TYPE DAM

Norio KAINUMA, Toshihiko SHINOHARA and Takahiko ITO

The asphalt mixture for the impermeable membrane of fill-type dam has to possess such properties as impermeability, flexibility, slope stability and durability. Asbestos fibres have been mainly used to obtain slope stability of this mixture. Because asbestos fibres were proved to be the carcinogenic substance, other kinds of slope flow reducing additives which substitute for asbestos fibres are now urgently required. For this reason, we carried out an experimental study on slope stability, flexibility and durability etc. of asphalt concrete containing some kinds of slope stabilizing additives on the market. From this study, we confirmed that rockwool and cellulose fibres were effective for reducing slope flow as substitutes for asbestos fibres.