

アスファルト混合物の温度および変位速度に 対する強度特性試験

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND SHEARING SPEED ON STRENGTH CHARACTERISTIC OF ASPHALT MIXTURE

山崎智弘¹・横井敦²・澤田豊³

Tomohiro YAMASAKI, Atsushi YOKOI, Yutaka SAWADA

¹正会員 博(環境) 東洋建設株式会社 名古屋支店 (〒460-0003 名古屋市中区錦1-17-13)

²東洋建設株式会社 名古屋支店 (〒460-0003 名古屋市中区錦1-17-13)

³正会員 博(農) 東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

Asphalt mixtures are used for a waste repository as impermeable materials. Sand mastic, gravel mastic, and asphalt mat are selected as the purpose of use. In this study, several experiments were conducted in order to discuss the material characterization of the asphalt mixture. As a result of the experiments, it was revealed that sands and gravels sank into the asphalt under the high temperature. The degree of the material separation was influenced by the temperature, the thickness, and the blending quantity of the straight asphalt. In addition, the creep was generated at the layer where the sand content rate was extremely low. It was found that the compressive strength of the asphalt mixture became small under the high temperature or the low-speed shearing.

Key Words : Asphalt mixture, Sand mastic, Strength characteristic, Temperature, Shearing speed

1. はじめに

廃棄物最終処分場や港湾施設等に使用される瀝青材料(アスファルト混合物)は、用途によりサンドマスチック、グラベルマスチック、アスファルトマットが選定される。アスファルトマットは、使用目的により摩擦増大マットと洗掘防止マットに分けられる。ここでは摩擦増大マットを対象とする。

サンドマスチックの材料配合はストレートアスファルト：石灰石粉：砂の重量比で16～20：18～25：55～66¹⁾、遮水用としては20：30：50²⁾である。また遮水用のグラベルマスチックの配合はストレートアスファルト：石灰石粉：砂：粗骨材(碎石7号)：粗骨材(碎石6号)＝15：25：20：20：20²⁾である。サンドマスチックやグラベルマスチックにおけるストレートアスファルトの体積比率は約3～4割を占める。摩擦増大マットの配合は、アスファルト：石灰石粉：砂：粗骨材(碎石6号および7号)＝10～14：14～25：20～50：30～50^{1,3)}である。

これらの配合は流動性試験、比重試験、曲げ試験、圧縮試験により要求性能が確保できるように品質試験を実施し決定する。このうち曲げ試験、圧縮試験は載荷速度20mm/min、温度はサンドマスチックで10℃、グラベルマスチックで15℃、アスファルトマットで20℃の試験条件下で行われる^{1,2,3)}。

サンドマスチックやグラベルマスチックの施工においては、アスファルト合材工場で各材料を140～180℃に加熱した状態で所定量練り混ぜ、運搬時は加熱保温・再攪拌しながら、または施工場所で再加熱・再攪拌した後に打設される。打設時の温度を低くすると流動性が悪くなるため、打設する箇所の条件(気温・水温・打設範囲など)を踏まえて110～160℃に温度調整して流動性が良い状態で打設する。その後、打設した材料が環境温度まで冷却する間に高比重の砂や骨材がストレートアスファルト内を沈降する挙動が想定される。よって、材料分離の発生有無を確認するための試験を実施した。

サンドマスチックやグラベルマスチックは高温で流動化する材料であるため、材料温度が試験温度以上になると品質試験で得られた強度より弱くなることが懸念される。さらにサンドマスチックやグラベルマスチックは自重や上載荷重などの拘束圧により変形するため、地盤の圧密沈下などにより構造物に生じた隙間に追従する遮水材の用途としても使用される。この変形追従速度は品質試験での載荷速度より遅い挙動が想定され^{4,5,6)}、このときの材料強度についての知見がない。以上よりこれらアスファルト混合物の温度と変位速度が品質試験条件と異なる場合の材料特性を把握するための強度試験を実施した。

またサンドマスチックを施工する捨石面の勾配は

1:3より緩くすることが望ましい¹⁾。しかしサンドマスチックを斜面部へ適用する場合、施工時の流動性やその後の変形追随性のため、斜面下端に流れ落ちることが懸念される。よって、造成・維持可能な施工厚さの確認のため、大型水槽を用いた流動性試験を実施した。

さらにサンドマスチックは深層混合処理(CDM)や鋼材やコンクリートや遮水シートなど異材質の接続部の遮水材としても使用される^{8,9)}。異材質上に高温の流動性の良いサンドマスチックを打設した場合の接合面での透水係数は一部の材料を除き0cm/sと報告^{4,10)}されている。ここでは一度環境温度に冷却されたサンドマスチック上に遮水シートを敷設し、上載荷重を載荷した状態のサンドマスチックと遮水シートの界面透水性について模擬試験を実施した。

2. 方法

(1) 材料分離試験

サンドマスチックおよびグラベルマスチックの配合を表-1に、石灰石粉および砂、碎石の粒度分布を表-2に示す(後述試験の配合と粒度分布も併記)。供試体は、各材料を140℃で混練後、供試体製作容器(L16×B4×H4cm)および木製容器(内寸L20×B10×H15, 30, 50cm, 内面クラフトテープ貼)に投入し作成した(写真-1参照)。恒温室(15℃または25℃)にて1週間静置した後、供試体内部を切断し砂の含有割合を目視および比重試験(舗装調査・試験法便覧¹¹⁾)にて測定した。

(2) 圧縮試験

試験は、「サンドマスチック(標準配合)」と材料分離する上層を模擬した「サンドマスチック(砂なし配合)」と「グラベルマスチック」(配合は表-1参照)を対象とした。供試体は、140℃で混練しサミット缶(φ5×H10cm)に投入し作成した。常温に冷却後、冷蔵庫にて保管した。一軸圧縮試験(JIS A1216)および三軸圧縮試験(JGS 0521)は、供試体を室温20℃に馴染ませた後、脱型し実施した(写真-2参照)。いずれの試験も室温20℃、載荷速度1mm/minとした。三軸圧縮試験ではセル水内の水温を20℃、側圧を49.1, 147.2, 245.3kN/m²とした。

(3) 内部せん断試験

a) 定荷重試験(サンドマスチック・グラベルマスチック)
供試体は、硬質アルミ製容器(L27.8×B17.0×H9.0cm)を二つ合わせた容器内に140℃で混練した「サンドマスチック(標準配合)」「サンドマスチック(砂なし配合)」および「グラベルマスチック」を充填して作成した。供試体を室温15℃環境下で馴染ませ、下部容器を固定し、上部容器に水平定荷重122.5Nを載荷することで容器内のマスチック内部にせん断面を設けた試験を実施した(写真-3参

表-1 アスファルト混合物の配合

材料	重量比(%)						
	サンドマスチック					グラベルマスチック※3	アスファルトマット※4
ストリートアスファルト(針入度60/80)	15%	17%	19%	20%	40%	15%	6.8%
ブローンアスファルト(針入度10/20)							3.7%
石灰石粉(0.074mm未満)	32%	31%	30%	30%	60%	25%	25.3%
砂(0.074~2.5mm)	53%	52%	51%	50%	0%	20%	24.2%
碎石7号(2.5~5mm)						20%	20%
碎石6号(5~13mm)						20%	
碎石5号(13~20mm)							20%
材料分離試験	○	○	○	○	○	○	
圧縮試験				○	○	○	
内部せん断試験					○		○
施工時の流動性試験				○			
界面透水試験				○			

※1: サンドマスチック(標準配合)文献2)参照。 ※2: サンドマスチック(砂なし配合)

※3: 文献2)参照。 ※4: 文献3)参照

表-2 石灰石粉・砂・骨材の粒度分布

(a) サンドマスチック・グラベルマスチック

	石灰石粉	砂	碎石7号	碎石6号
見掛け密度(g/cm ³)	2.656	2.710	2.709	2.698
ふるい19.0(mm)				100.0
ふるい13.2				96.2
ふるい9.5		100.0	100.0	53.5
通過4.75		99.4	80.6	1.6
通過2.36		86.3	1.4	0.3
通過1.18		68.3	0.9	
重量0.6	100.0	46.7		
0.3	99.8	26.7		
%0.15	92.9	12.6		
0.075	80.6	4.4		

(b) アスファルトマット

	石灰石粉	砂	碎石7号	碎石5号
見掛け密度(g/cm ³)	2.714	2.707	2.694	2.693
ふるい26.5(mm)				100.0
ふるい19.0				94.1
ふるい13.2			100.0	108.0
通過4.75		100.0	90.1	0.8
通過2.36		95.9	10.9	
通過0.6	100.0	79.6	2.0	
0.3	99.0	47.2		
%0.15	94.6	6.8		
0.075	82.9	0.9		



写真-1 材料分離試験容器 (サンドマスチック投入後)



写真-2 圧縮試験 (左: 一軸圧縮試験, 右: 三軸圧縮試験)

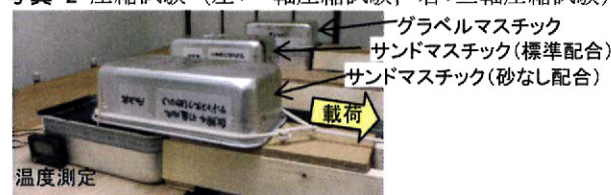


写真-3 定荷重内部せん断試験 (サンドマスチック・グラベルマスチック)

照)。載荷時間は30時間とした。

b) 定荷重試験(アスファルトマット)

アスファルトマット(摩擦増大マット)の供試体(L20×B10×H8cm)はワイヤーロープや補強材や吊り金具は内蔵せずに作成した(配合は表-1参照)。

供試体を室温20℃環境下で馴染ませ、アスファルトマットの下部5.5cm部をせん断力反力部とし、上部2cm部をせん断力載荷部とし、中央部の0.5cm厚における内部変形を測定した（図-1参照）。試験ではまず鉛直荷重405kN/m²を載荷し、鉛直変位がほぼ収束した2時間40分後にせん断荷重111kN/m²を載荷し、時間経過に伴う変位量を測定した。鉛直荷重およびせん断荷重は、時間経過において一定値を載荷し続けた（写真-4参照）。

c) 定変位速度試験（サンドマスチック）

供試体は、サンドマスチック（標準配合）を140℃で混練しサミット缶（φ10×H20cm）に高さ4.3cm分を投入し作成した。供試体を室温25℃環境下で馴染ませ脱型した後、図-1に示す試験装置（ただしせん断箱はφ10cm、上下H2.5cm）を用いて実施した。せん断箱下部は鋼製スパーサーを用いて高さ調整し、せん断面を供試体の上から2.5cmとした。温度25℃、鉛直荷重150kN/m²とし、載荷速度0.61, 1.15, 1.50mm/minにおけるひずみに対するせん断抵抗応力を測定した（写真-5参照）。

(4) 施工時の流動性試験

試験水槽（L360×B120×H90cm）は、鋼製型枠にて作成し、水槽内に1.0mの水平部および1:3勾配部（H50cm、下地は砕石を敷き表面をモルタル被覆）を設け、海水（H80cm）を注水した（図-2参照）。サンドマスチック（標準配合）は、2009.1/20にクッカー車にて運搬し、法肩部より30cm水平部側に2回に分けて直接打設した。1回目は温度160℃にて0.32m³を打設した。出来形計測および水層内の水換えを実施した後、2回目は温度140℃にて0.23m³を打設した。各打設前の水温は10℃であった。打設から2/6までの18日間は外気温にて、その後3/4までの約1ヶ月間はブルーシートで水槽を覆い練炭にて外気温を上げ、出来形形状の経時変化を測定した。

(5) 界面透水試験

供試体は、供試体作成用モールド（φ10cm×H8cm）にサンドマスチック（標準配合）を140℃にて投入し、常温に冷却後、中央部で半円状2個に切断した。2種類の遮水シート（LLDPE、t=3mm、幅6cm×高さ7cm、シート表面に同質ポリエチレンをちりめん状に塗布した凸加工の有無各1枚）をそれぞれ半円状のサンドマスチック2個で挟み、25℃環境下にて1週間静置した後、透水試験（舗装調査・試験法便覧¹¹⁾）を実施した（写真-6参照）。上載荷重に相当する試験時の側圧は100kN/m²とし、透水圧は80kN/m²として96時間実施した。

3. 結果

(1) 材料分離試験

供試体温度が投入時の温度140℃から外気温20℃

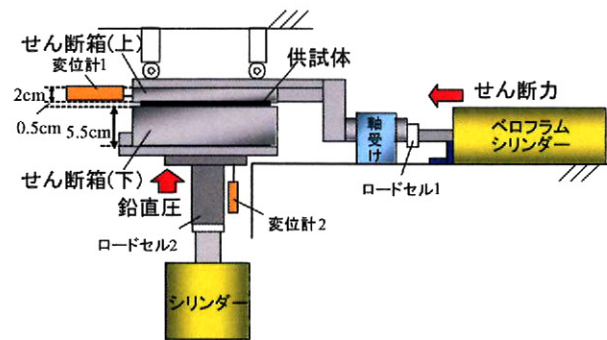


図-1 試験装置図

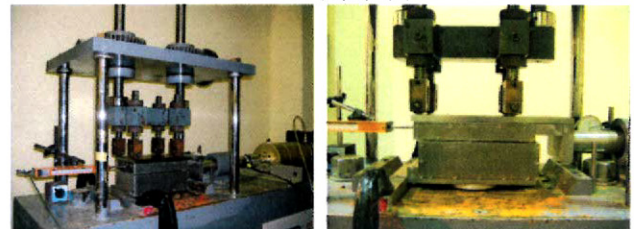


写真-4 定荷重内部せん断試験（アスファルトマット、左：全景、右：試験後）

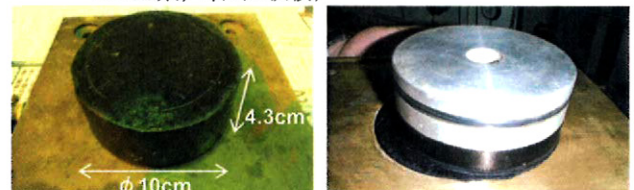


写真-5 定変位速度内部せん断試験（サンドマスチック、左：供試体形状、右：試験後にせん断箱上を取り外した状態）

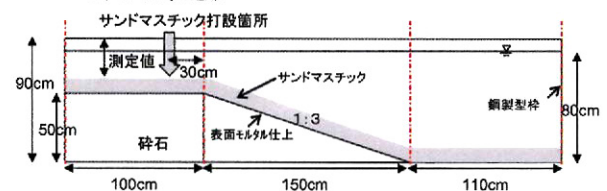


図-2 試験水槽断面図



写真-6 透水試験（左：供試体切断と遮水シート、右：透水試験に用いた供試体、下：試験状況）

と同等となるまでにおよそ7時間を要した。サンドマスチック（標準配合）の供試体の切断面を写真-7に、比重試験の結果を図-3に示す。全ての配合において、H=4cmの供試体では砂および砕石の沈降は明確ではなかった。サンドマスチックにおけるスト

レートアスファルト配合率が19%および20%での打設厚が15cm以上の供試体では、上層部ほど砂の含有量が少ない傾向が確認された。H=50cmの供試体では表層部の比重は1.75~1.9, 下層部は2.15であった。一方、容器側面近傍部やストレートアスファルト配合率が15%および17%の供試体では、この傾向が僅かであった。また養生温度の影響は確認できなかった。またグラベルマスチックはサンドマスチックより材料分離傾向が顕著であった。

(2) 圧縮試験

試験結果を表-3および図-4に示す。側圧をかけた三軸圧縮試験の圧縮強度は、一軸圧縮試験より若干大きかった。サンドマスチックの基準値 q_u は1,000 kN/m²以上(温度10℃, 載荷速度20mm/min)であるが、サンドマスチック(標準配合)の圧縮強度 q_u は基準値の約1/10以下であり、サンドマスチック(砂なし配合)は同約1/100以下であった。サンドマスチック(標準配合)およびグラベルマスチックは側圧の増加に伴い強度増加したが、サンドマスチック(砂なし配合)は側圧の影響はほとんどなかった。

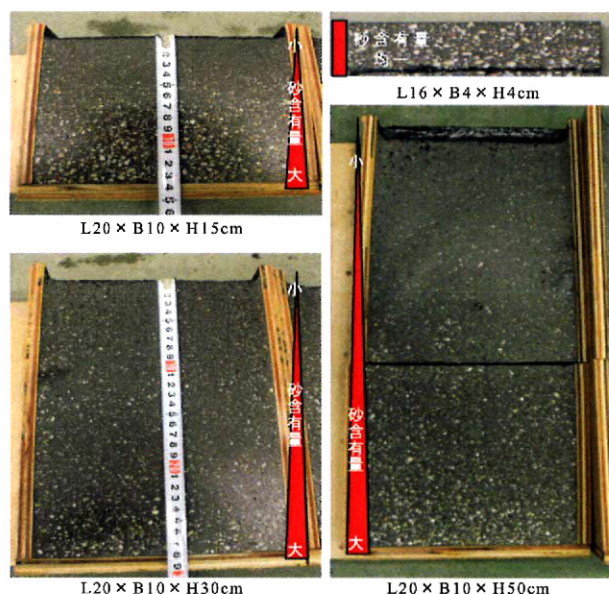


写真-7 サンドマスチックの切断面(標準配合, ストレートアスファルト配合率20%, 打設温度140℃, 養生温度25℃)

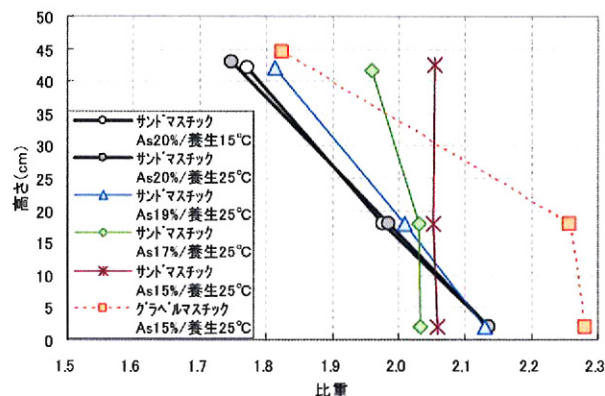


図-3 比重試験結果 (H=50cmの供試体)

(3) 内部せん断試験

a) 定荷重試験(サンドマスチック・グラベルマスチック)

サンドマスチックおよびグラベルマスチックの定荷重内部せん断試験の結果を図-5に示す。本試験では変位に伴いせん断面積が小さくなるためせん断応力は大きくなる。サンドマスチック(標準配合)では5mm, グラベルマスチックでは3mmで変位が収束した。しかしサンドマスチック(砂なし配合)は最大4mm/h程度のクリープ現象が継続して発生し、30時間では収束しなかった。

b) 定荷重試験(アスファルトマット)

アスファルトマットの定荷重内部せん断試験の結果を図-6に示す。鉛直荷重載荷開始後、せん断荷重載荷以前の鉛直変位はすみやかに2.5mm程度圧縮した。水平変位量は鉛直方向の圧縮に伴う膨張によりせん断力の載荷と逆方向(負値)に若干変位した。せん断荷重載荷以降の変位速度は初期には大きかったものの、次第に緩やかになった。試験装置のストロークの都合により60時間で試験を終了させた。

c) 定変位速度試験(サンドマスチック)

サンドマスチック(標準配合)の定変位速度内部せん断試験の結果を図-7に示す。載荷速度が遅いほどせん断抵抗応力は小さくなった。

表-3 圧縮試験結果(20℃, 1mm/min, 軸ひずみ15%時)

	一軸圧縮試験	三軸圧縮試験(側圧147.2kN/m ²)		
	圧縮強度 q_u (kN/m ²)	圧縮強度 q_u (kN/m ²)	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)
サンドマスチック(標準配合)	88.9	104	38.7	4.0
サンドマスチック(砂なし配合)	8.8	9.5	4.32	0.15
グラベルマスチック	121.4	157	46.3	8.3

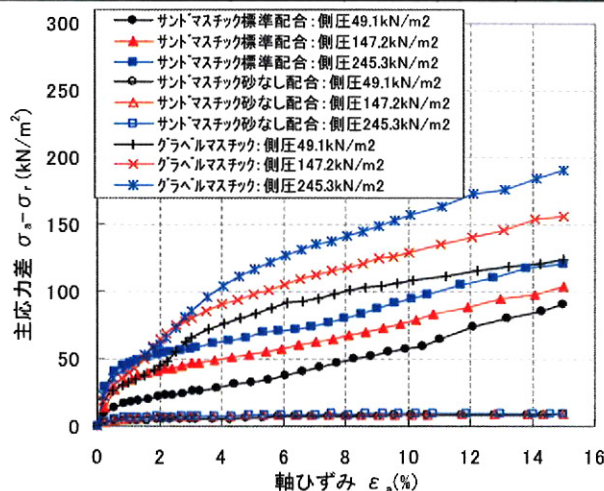


図-4 三軸圧縮試験結果

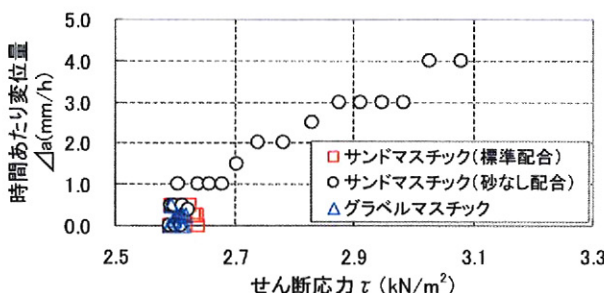


図-5 定荷重内部せん断試験結果

(4) 施工時の流動性試験

サンドマスチックの出来形の経時変化を図-8に、法肩部の出来形を写真-8に示す。1/20の打設後から2/6までの水温は6.0～14.0℃であり、2/6～3/4までは最大20℃であった。計測の結果、1:3勾配部における1回目および2回目のサンドマスチック施工厚さはそれぞれ約3cmであり、打設した残量は法下部へ

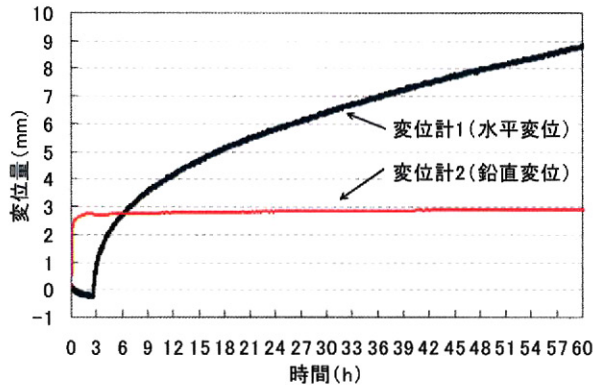


図-6 定荷重内部せん断試験結果 (アスファルトマット)

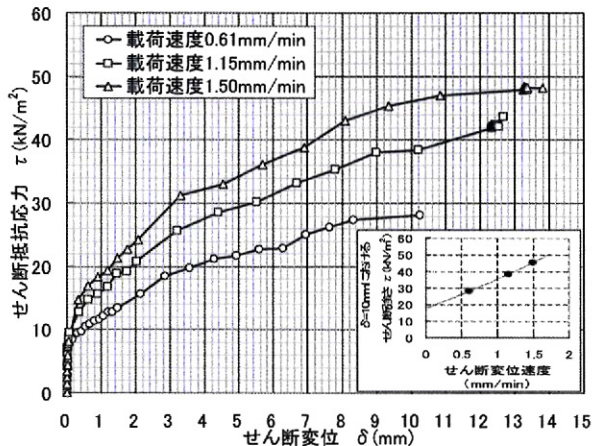


図-7 定変位速度内部せん断試験結果 (サンドマスチック)

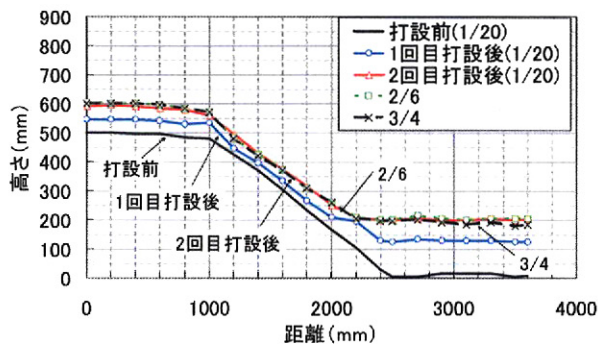


図-8 サンドマスチックの経時変形



写真-8 法肩部の出来形

流れ落ちていた。また1:3勾配部の出来形厚さ6cm程度のサンドマスチックは、計測期間を通じて有意な変形は認められなかった。

(5) 界面透水試験

透水試験の結果、「シート表面の凸加工あり」および「同なし」のいずれの遮水シートを用いた供試体においても界面からの透水はなかった。

4. 考察

(1) 材料分離試験

比重は、ストレートアスファルト1.0程度に対して、その他材料は2.7程度である。ストレートアスファルト配合率が19%以上および打設厚が15cm以上のサンドマスチックやグラベルマスチックでは、高温の流動性の良い状態において比重の重たい材料が沈降し、上層の比重が小さくなり、材料分離することが確認できた。骨材の沈降挙動は温度25℃以下においてはストレートアスファルトとの粘性抵抗の影響により収束すると考えられる。また打設する側面に構造物がある場合は摩擦抵抗により流動性が低下するため材料分離の程度は比較的小さくなると考えられる。

(2) 圧縮試験

試験温度を20℃、荷重速度を1mm/minとした結果、サンドマスチックの強度は1/10以下に低下することが確認された。また材料分離により砂含有率が小さい層ではさらに強度低下し、φ材よりc材に近い材料特性となることが示唆された。

(3) 内部せん断試験

a) 定荷重試験 (サンドマスチック・グラベルマスチック)

「サンドマスチック (標準配合)」および「グラベルマスチック」は、含有している砂もしくは砕石が相互に緩衝することにより変位が収束すると考えられる。一方、砂が含まれない「サンドマスチック (砂なし配合)」では、温度15℃、せん断応力 $\tau = 2.6 \sim 3.1 \text{ kN/m}^2$ 程度で、最大4mm/h程度の変位 (クリープ現象) が発生する可能性があり、高温・高荷重ほど変位速度は大きくなると考えられる。また低温でも高荷重の場合、低荷重でも高温となる場合についても変位する可能性が考えられる。

b) 定荷重試験 (アスファルトマット)

試験温度20℃、鉛直荷重405kN/m²、水平荷重111kN/m²におけるアスファルトマットの時間経過に伴う変位量を双曲線にて近似すると式(1)となる。

$$\delta = \frac{T}{0.0699T + 2.5464} \quad (1)$$

ここに、 δ : 水平変位 (mm)、 T : 時間 (h) とし、 T を ∞ にとると δ の漸近値は14.3mmとなる。よって厚さ8cmの摩擦増大マットでは、骨材が干渉するま

で15mm程度の水平変形が発生する可能性がある。

c) 定変位速度試験(サンドマスチック)

試験温度25℃、鉛直荷重150kN/m²におけるひずみ10%でのせん断強さを直線近似すると、変位速度1mm/minにおけるせん断強さは約35kN/m²となり、0mm/minに近い速度条件では約17kN/m²となる。変位速度が遅いほど強度低下することが確認できた。

(4) 施工時の流動性試験

1:3勾配部の下地材が比較的起伏のない箇所にサンドマスチックを打設する場合は、1打設あたりの出来形厚さが3cm程度ずつ確保できることが確認できた。ただし、勾配部の設計厚が比較的厚い場合は、自重により変形が発生する可能性があるため、必要に応じ砕石やアスファルトマットなどで打設形状を拘束することが望ましいと考えられる。

(5) 界面透水試験

サンドマスチック上に敷設する遮水シートは温度25℃および上載圧100kN/m²程度でサンドマスチックと密着し、室内試験では、界面長5cm程度で遮水構造体として一体化すると評価できた。遮水シート表面に施した凸加工の有無については、遮水に対する優劣は確認できなかった。

5. 結論

アスファルト混合物は、自体の不透水性や異質材接続部への適用など、環境負荷のない⁷⁾遮水材として優れた機能を保有している。

しかし本試験にて、サンドマスチックやグラベルマスチックは材料分離の特性を有し、材料分離の程度は「打設厚」「ストレートアスファルト配合量」に影響されることが確認された。その他材料分離の程度に影響を与える条件としては、「材料温度」と「打設箇所の環境温度」による「打設温度の低下時間」や「側壁の影響」が挙げられる。

またサンドマスチックの圧縮強度は、品質試験条件下での基準値と比較して、温度が高いほど、また変位速度が遅いほど小さくなる傾向があることが確認できた。さらに砂含有が少ない層では温度条件によっては僅かな荷重で変位（クリープ現象）が発生する可能性が示唆できた。したがって、これらのアスファルト混合物を強度材料として設計・施工する場合は、品質試験条件下での強度試験値ではなく、施工する環境条件に応じた強度設定を行う必要がある。より定量的な評価は、骨材の性状・配合・環境温度など多くのパラメータが影響するため、施工事象ごとに個別に検討する必要があるとともに、今後の後続研究がなされることに期待する。

一方、アスファルトマット（摩擦増大マット、t=8cm）についても応力条件によっては1.5cm程度の圧縮変形やせん断変形する可能性がある。

また斜面部へのサンドマスチック打設厚は流動性を考慮して計画する必要がある。さらに打設後に環境温度まで冷えたサンドマスチックにおいても夏場の温度と上載荷重により遮水シートと密着することを確認した。

謝辞：本試験の実施にあたり平野正浩氏（愛知県）および蔵之内栄二氏（中部電力㈱）に監修をいただいた。和田文明氏、小崎幸孝氏（㈱NIPPO）には試験遂行の御教示、御尽力をいただいた。供試体の作成には㈱NIPPO中部試験所、日本海上工事㈱千葉工作所、前田道路㈱衣浦合材工場、日本道路㈱中部支店津島試験場の御協力をいただいた。試験は㈱NIPPO中部試験所、㈱地質技研の御協力をいただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修、(社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、pp.451-456, 2007.7.
- 2) 海洋アスファルト工法研究会：アスファルトマスチック技術マニュアル、p.19, 2010.
- 3) 海洋アスファルト工法研究会：アスファルトマット技術マニュアル、p.19, 2010.
- 4) 上杉忠男、中川純一、鶴飼亮行、石本健治、土屋美和、中野浩：異種材料を組み合わせた廃棄物埋立護岸の遮水構造の実験的検討、海洋開発論文集、**21**, pp.837-842, 2005.
- 5) 中野浩、伊坂健二、伊藤隆彦、和木多克、野々田充：軟弱な捨石マウンド上に水中打設されたアスファルトマスチック層の変形追従・遮水性に関する実験的検討、土木学会年次学術講演会講演概要集第7部、**58**, pp.289-290, 2003.
- 6) 星野太、和木多克、中野浩、伊藤隆彦、野々田充：アスファルトマスチックの変形追従性の実験的検討、土木学会年次学術講演会講演概要集第7部、**58**, pp.313-314, 2003.
- 7) 伊藤隆彦、伊坂健二、野々田充、中野浩、和木多克：水中打設したアスファルトマスチックと各種接合部の透水性に関する実験的検討、土木学会年次学術講演会講演概要集第7部、**58**, pp.317-318, 2003.
- 8) (財)港湾空間高度化環境研究センター：管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル（改訂版）、2008.8.
- 9) (社)日本埋立浚渫協会：廃棄物海面処分場の施工要領（案）（改訂版）、2009.3.
- 10) 野々田充、中野浩、和木多克、伊藤隆彦：アスファルトマスチックの界面透水性の実験的検討、土木学会年次学術講演会講演概要集第7部、**58**, pp.315-316, 2003.
- 11) (社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧、H19.6.