

寒冷海域における重力式海洋構造物の摩擦増大用アスファルトマットの開発研究

A Study of Asphalt Mats for Gravity-type Maritime Structures

水野 雄三*・得永 道彦**・杉本 義昭*・村瀬 和史***・安田 修***

Yuzou Mizuno, Mitihiko Tokunaga, Yosiaki Sugimoto, Kazusi Murase, Osamu Yasuda

Asphalt mats with cold ocean gravity structures is an economic construction method because the coefficients of friction can be increased. However, flexibility and the visco-elastic response of mats which contribute much to the sliding resistance decrease at sea water temperatures below 0°C. In summer, temperatures inside the asphalt mats rise at manufacturing yard. An investigation has been made to develop mix proportions of asphalt mats which are less sensitive to temperature, and so suitable for the wide change in temperatures in cold oceans.

Keywords: (asphalt-mat, coefficients of friction)

1. はじめに

重力式構造物は通常捨石マウンド上に直接構造物をのせるものが多く、この場合の構造物の安定性を支配する大きな要素は滑動抵抗である。構造物と基礎捨石の間にアスファルトマットを敷設した場合、堤体の滑動抵抗を大幅に増大することができ、堤体の安定性に大きく寄与するとともに、断面の縮小化につながり経済的に有効な工法となる。

アスファルトマットはアスファルトと骨材からなる複合材料であり、その挙動は温度により変化するもので、一般に感温性が高く、低温下では硬く、高温下では柔らかくなる性質を持っている。北海道のように冬期間における沿岸海域の海水温度は0℃以下になる寒冷海域では、アスファルトマットの表面が硬くなり、滑動抵抗に大きく寄与するたわみ性や粘弾性的応答が低下する。逆に、夏期にアスファルトマットを施工する場合は、アスファルトマットの内部温度は上昇することになり、マット上で直接ケーソンなどのコンクリート構造物が製作される場合や、マットの運搬、据え付け作業時などにアスファルト分がフローし材料分離の恐れが生じる。本研究はこのような寒冷海域におけるアスファルトマットの環境条件である夏期の高温下から冬期の低温下まで幅広い温度条件に対応した施工性や摩擦抵抗力などの諸性能を有する、いわゆる感温性の低いアスファルトマットの開発を行ったものである。

2. 配合決定の基本方針

アスファルトマットに必要な特性や機能は所定の摩擦係数の確保の他に、荷重作用時間の長い構造物の自重に対するクリープ性状、波力など短い時間での繰り返し荷重に対する弾性的応答性および施工性である。寒冷海域を対象としたアスファルトマットの場合は、低温下でもこのような機能が十分に発揮できる性状の確保が重要となる。このためには、まずバインダーとしてのアスファルトを感温性の低い性状にすることが必要である。そこで一次配合試験として、アスファルト配合と骨材配合を種々変えた配合について試験温度を変化させた物性・力学試験や摩擦係数試験を行ない数種類の配合を選定し、さらに二次配合試験として実施工規模での試験および配合の微調整を行い、感温性が低く、より性能の優れた配合を選定する。

表-1 各種試験の実験条件と基準値

試験名	載荷速度(変位速度)	試験温度 ℃	基準値
	mm/min		
曲げ試験	20	20	強度 20 kgf/cm ² 以上 たわみ量 3 mm以上*
圧縮試験	20	20	強度 20 kgf/cm ² 以上
密度試験	—	—	2.2 g/cm ³ 以上

* 曲げ試験のひずみの基準値は、本調査の供試体形状より換算すると、0.072 cm/cm以上とする。

3. 一次配合試験

3-1. 一次配合設計

(1) 基準強度

* 正会員 北海道開発局開発土木研究所水工部港湾研究室 (062 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

** 正会員 北海道開発局港湾部建設課

*** 正会員 社団法人寒地港湾技術研究センター

諸強度の条件としては、構造物や施工条件によって必要な強度を決定するが、本研究では「港湾調査指針」¹⁾に示されている表－１の値を用いた。

(2) アスファルト

アスファルトはストレートアスファルトとブローンアスファルトの混合タイプで、比較的温暖な地域ではその針入度は３５がほとんどである。本研究目的である寒冷海域用のアスファルトマットの場合、低温下でもひずみ量を大きくする必要があるので針入度を４０と設定し、このためにストレートアスファルト量の比率を多くした配合と高温下のフロー防止用に無機質の吸着性や増粘効果のある添加剤を混入した配合の２種類について検討する。なお、針入度４０としたのは北海道でのアスファルトマットの実績²⁾による。

(3) 骨材粒度

アスファルト混合物の配合設計は、骨材粒度配合と適正アスファルト量の設計に分けられる。骨材の粒度配合についてはアスファルトマットの強度に直接関係するもので、粒径の異なる数種類の骨材をいかなる比率で配合すればよいか決めることにある。アスファルト混合物が重力式構造物の荷重を支え下方の層に伝達できるのは、主として混合物中にある骨材の働きによるものであり、アスファルトの役割はむしろ骨材が十分に載荷能力を発揮できるように骨材相互を緊密に結び付けておく点にある。骨材の最適粒度の決定を理論的に決める方法は現在のところないが、長年にわたる経験から生まれた設計法は確立されている。例えば、最大密度を得る骨材粒度の目安として引用されるFullerの式や、舗装用アスファルト混合物の標準配合を示す「アスファルト舗装要綱」³⁾にある図解法などがある。アスファルトマットの場合も同様に、最適粒度を得る手法はなく、むしろ配合の標準値として表－２のように示されているにすぎない。表中、ダストとは砂およびフィラーのうち0.074mmふるいを通過するものをいう。ここで、試験配合に使用予定の５号、７号砕石、砂及びフィラーのふるい分け試験データをもとに、図解法からアスファルト量１２％と仮定した場合の各材料の配合比率を求めてみると、５号、７号砕石がそれぞれ１４％、砂４０％、フィラー２０％となる。東北以南における摩擦増大用のアスファルトマットの配合実績はアスファルト１０.５～１１.５％、フィラー２１～２７％、細骨材２５.９～３２.５％、粗骨材３５.１～４２.７％である。これらの配合を参考に、粗骨材が３０％、４０％、石粉が１５、２０、２５％になるように骨材の主配合を決め、残りは細骨材で調整して試験配合を定めた。

(4) 配合内訳

表－３－１、２にアスファルト、フィラーおよび骨材の試験配合の内訳を示す。試験配合の種類はアスファルトが５種類、骨材関係が９種類として、全部で４５ケースについて設定した。表－３－１に示すアスファルトの配合ケース１は、東北地方で実際に数多く施工されている配合でストレートとブローンの混合タイプで針入度は３５である。この配合ケースは、北海道の気象環境により近い地域で実績の多い配合であることから、以下の寒地向けの試験配合との比較検討を行なうことを目的としている。ケース２はストレートアスファルトとブローンアスファルトとの混合タイプで針入度は４０である。ケース３は感温性を低下させる目的で添加剤Ａをアスファルト重量比の５％をストレートアスファルトに混入し、かつブローンアスファルトと混合したタイプで、混合後の針入度は４０である。ケース４はケース３で加えた添加剤Ａをさらに５％増やし１０％とした場合で針入度は４０である。ケース５は添加剤Ａより繊維長が長い添加剤Ｂを５％混入した場合で針入度は４０である。

表－２ アスファルトマットの配合の標準値

材 料	重量比(%)摩擦増大用
アスファルト	10 ～ 14
ダ ス ト	14 ～ 25
細 骨 材	20 ～ 50
粗 骨 材	30 ～ 50

表－３－１ アスファルトの配合表

ケース番号	アスファルト (%)		添加剤 (%)		針入度 (0.1mm)	
	ストレート	ブローン	727g針量に対する割合		添加剤混入	
			A	B	前	後
1	53	47	-	-	目標	-
2	64	36	-	-	目標	-
3	68	32	5	-	-	目標
4	72	28	10	-	-	目標
5	72	28	-	5	-	目標

表－３－２ 配 合 表

種 類	As	石 粉	細骨材	粗 骨 材	
				5 号	7 号
				(20～10mm)	(5～2.5mm)
1	14%	25%	31%	15%	15%
2	11%	"	34%	15%	15%
3	14%	"	21%	20%	20%
4	11%	"	24%	20%	20%
5	14%	15%	31%	20%	20%
6	11%	"	34%	20%	20%
7	14%	"	41%	15%	15%
8	11%	"	44%	15%	15%
9	14%	20%	26%	20%	20%

3-2. 試験項目と数量

試験項目は表－４に示すように、力学・物性試験（圧縮、曲げ試験、密度、およびバインダーとしてのアスファルトの針入度軟化点）、摩擦係数試験である。配合の詳細検討にあたっては温度、載荷速度の条件を変えた試験も行なっている。なお、針入度については５種類の温度条件で試験を行ない、温度特性も求めた。各試験数量は針入度、軟化点試験が５ケース、合材としての曲げ・圧縮・密度試験が４５ケースで、それぞれ１ケース当たりの供試体数は３試料とした。

3-3. 試験結果

(1) 針入度試験

感温性の低下を目標とした添加剤入りの配合についてその性状を確認するために、アスファルトの試験温度と針入度の関係を見ると、図－１に示すとおりである。一般に針入度の対数と試験温度の関係は直線で表わせることが知られており、その勾配が小さいほど（針入度指数 $P I$ が大きいほど）感温性が小さくなる。図中に示すケース３、４、５の添加剤入りの配合の方が、高温時における感温性が低下している。

(2) 曲げ試験

曲げ試験結果を図－２－１、２に示す。曲げ強度の基準値である 20 Kg/cm^2 (20°C) を全ケースが上回っており、針入度４０の場合、アスファルト量が１４％より１１％の方が大きく、これに添加剤を入れると僅かではあるが大きくなる傾向がある。また、アスファルト量が同じなら d/A (d : フィラー量、 A : アスファルト量) の大きい方が強度は多少大きくなる傾向が見られる。曲げひずみは強度と逆の傾向になり、針入度が４０でアスファルト量の多い１４％の方が大きく、かつ添加剤入りの方が若干大きめとなる傾向がある。針入度が３５でアスファルト量が１１％の場合、一部基準値を下回っている配合がある。

(3) 圧縮試験

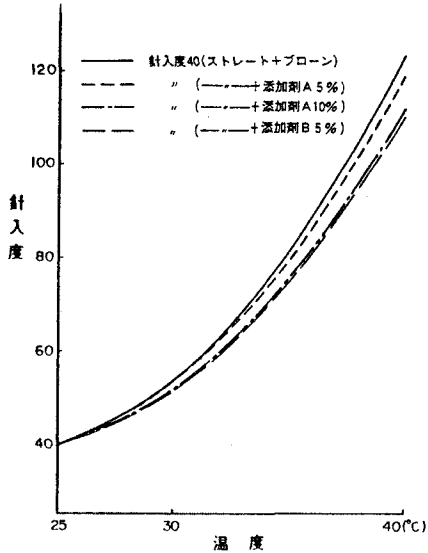
圧縮強度は図－２－３に示すとおり、アスファルト量が少ない１１％の方が大きく、基準値である 20 Kg/cm^2 (20°C) を全ケースが上回っている。アスファルト量が１４％の方は添加剤を混入すると多少大きめになるものの、添加剤Ｂを５％混入したケース以外は基準値を下回っている。

(4) 密度試験

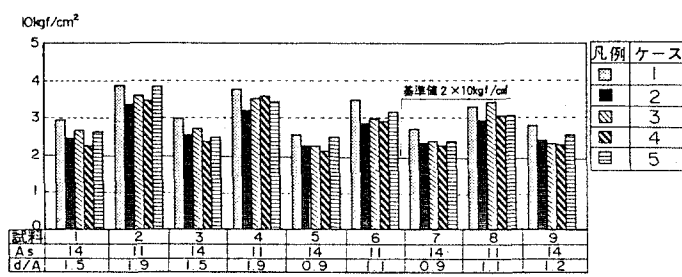
アスファルト量が１１％の場合基準値を上回るが、１４％になると基準値ぎりぎりか逆に下回るケースが多くなった。

表－４ 各種試験項目

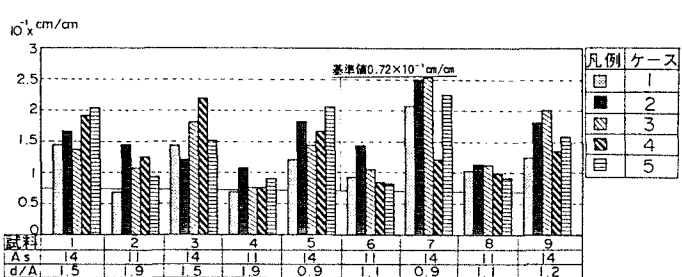
試験名	載荷速度 (変位速度)		試験温度 ℃	載荷重 t/mf
	cm/s	mm/min		
針入度試験	—	—	0, 10, 20, 25, 30, 40	—
軟化点試験	—	—	—	—
曲げ試験	0.008, 0.033	4.8, 20	10, 20	—
圧縮試験	0.08, 0.033	48, 20	10, 20	—
密度試験	—	—	—	—
摩擦係数試験	0.85	—	0.20	10, 50



図－１ アスファルト温度と針入度



図－２－１ 曲げ強度試験結果



図－２－２ 曲げひずみ試験結果

3-4. 1 次選定

以上の配合試験結果から第１次選択として強度や密度の基準値を満足し、かつ寒冷地域向きとしてひずみ性に優れている配合として「１－８」、「２－４」、「５－３」の配合を選択した。ここで、「１－８」とはアスファルトの配合ケースが１で、骨材の配合ケースが８の場合である。このなかで寒冷地向きとして諸強度を満足し、かつひずみ特性に一番優れているものが「５－３」の配合である。

その他に、現場での配合工程を想定した施工性と添加剤が寄与する程度を把握することを目的に、アスファルトの配合ケース2（針入度40）に添加剤を混入した「6-2」、「7-8」の2ケースを加えた。「6-2」は針入度40のストレートアスファルトとブローンアスファルトの混合アスファルトに添加剤Aを5%混入した配合ケースで、「7-8」は同じく添加剤Bを5%混入した配合ケースである。これら5種類の配合について、供

試体の試験温度や載荷速度を変えた強度試験と摩擦係数試験を加えて、さらに性状の詳細確認の試験を行なう。図-3-1, 2は供試体温度が20、0℃で、載荷速度が0.48、2.0 cm/minの場合における圧縮および曲げひずみの試験結果を示したもので、5種類の配合中で一番ひずみ特性に優れているものは「5-3」の配合である。

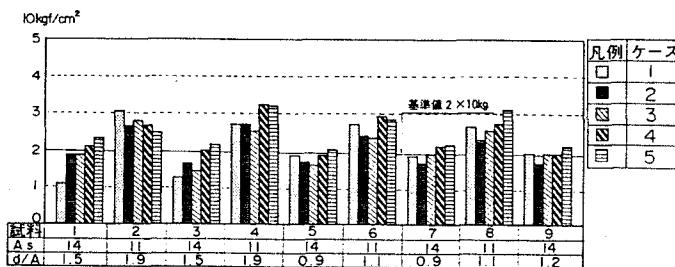


図-2-3 圧縮試験

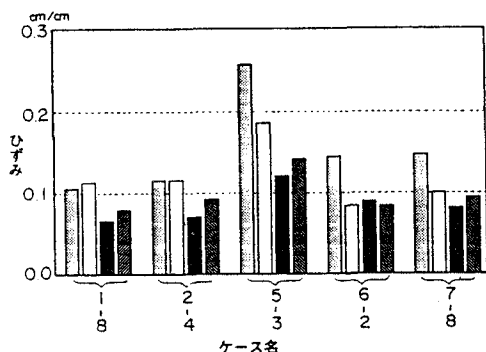


図-3-1 圧縮曲げひずみ(20℃)

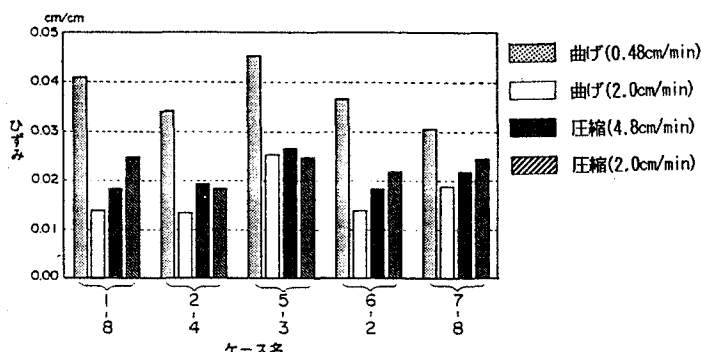


図-3-2 圧縮曲げひずみ(0℃)

図-4は各配合別の平均密度を示したものである。すべての配合で基準値は満足しているものの、「5-3」については他の試料と比べるとやや低い値を示している。図-5は供試体温度が0、20℃で、鉛直応力が10、50 t/m²における静止摩擦係数を示したもので、摩擦性能に優れている配合は「5-3」である。これら試験結果から性能的に「5-3」が一番優れているが、密度の確保に多少問題が残されている。配合「5-3」に混入している添加剤は真比重2.6であるが、見掛け比重は0.07である。したがって、アスファルト重量比に対して添加剤を5%混入しているため、同じ骨材を使用している限り合材密度は無添加配合に比べて小さくなる。合材密度の基準値である2.2g/cm³を安定して確保するためには、①比重の大きい骨材を使用するか、②アスファルト量を減じるか、③添加剤の混入量を減じるかである。①の方法は施工性、経済性に劣るため、②と③の方法でさらに合材密度の変化に対する寄与率を検討する。また、無添加配合である「2-4」はアスファルト量が11%で、強度的には十分満足されているものの、ひずみ量が若干小さいため、基準強度の範囲内でアスファルト量を多少増やした配合についても詳細検討する。

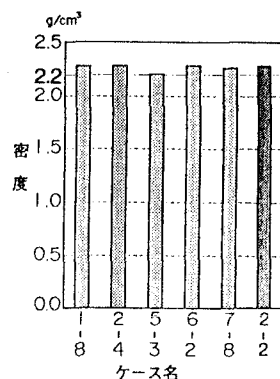


図-4 密度

4. 二次配合試験

4-1. 二次配合設計

(1) 添加配合について

アスファルト量と添加剤量を減じたもので均一性が高い配合を探し出す目的から、添加剤の混入量をアスファルト重量比5%に固定し、アスファルト量を13%と12%の2配合、およびアスファルト量13%で添加剤の混入量を3%に減じた表-5に示す計3配合とし、物性値の変化に対する寄与率と均一性を検討する。

(2) 無添加配合について

アスファルト量を11.5%から0.5%刻みで13%まで増やした表-5に示す4配合について、ひずみ特性を主に検討する。

4-2. 施工性調査と二次配合試験

選定された配合について現場レベルでの施工性について検討するため、実施工規模でアスファルトマットを製作し、クッカー車によるクッキング状況調査、マットの吊り下げ・たわみに関する現地試験、屋外暴露試験および室内試験（曲げ、圧縮、密度試験）について行なった。

4-3. 室内試験結果

ここでは各試験値を最低値で取りまとめ、より安全側から検討を加える。

(1) 曲げ試験

曲げ強度は基準値 20kgf/cm^2 (20°C 、 2.0cm/min) を添加、無添加配合に関わらずいずれも基準値を上回っている。曲げひずみについては、一次選定で無添加配合である「2-4」のケースが添加配合に比較してひずみ特性が劣っていたが、図-6-1に示すようにアスファルト量を12.5~13.0%まで増やすことによって、添加配合と同程度のひずみが得られるようになった。

(2) 圧縮試験

圧縮強度は「5-3-a」を除く全てのケースについて基準値 20kgf/cm^2 (20°C 、 2.0cm/min) を上回っている。

(3) 密度試験

添加配合の「5-3」については、一次選定で密度がやや低い値を示していたが、添加量をアスファルト量の3%とした場合、図-6-2に示す「5-3-b」、「5-3-c」のとおりに比較的安定した密度が得られるようになった。無添加配合については「2-4-b」、「2-4-d」が密度の基準値 (2.2g/cm^3) を一部下回っているケースがあり、またバラツキも多くなっている。

4-4. 暴露試験

アスファルト量13%の無添加配合「2-4-d」、添加配合で添加量5%と3%の「5-3-a」、「5-3-c」の供試体を開発土木研究所構内の空き地に1年間放置して、添加剤の有無による劣化の程度を比較試験した。試験方法は、1年経過後のアスファルト混合物をアブソン抽出法によりアスファルトを回収し、針入度試験を行なうものである。針入度試験結果は表-6に示すとおり無添加の場合30%の低下で、それに対し3%添加で20%、5%添加が12.5%の低下となり、添加剤入りの方が針入度の低下は少なくかつ添加量が多いほど低下の程度は少ない。

4-5. 施工性に関する検討

(1) 製作時

試験は第2次の7配合について、目視による合材の均一性、クッキングに要する時間やクッキング温度を調査したものである。添加剤入りの配合は無添加配合に比べクッキング温度が若干高く、また合材が均一状態となるまでの所要時間も多少長くなったケースもあったが、全体的にみた施工性に関する配合の違いによる有意な差はない。また、添加配合での合材の均一性は、添加量が3%程度であれば、無添加配合と同等の均一性を確保できる

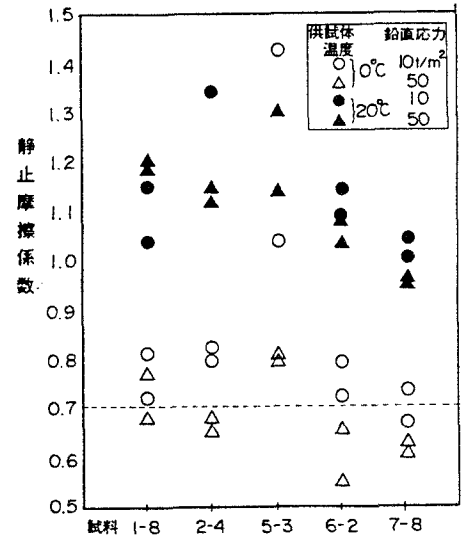


図-5 摩擦係数試験

表-5 第2次配合内訳

配合名	As (%)	添加剤 (%)	石粉 (%)	細骨材 砂 (%)	粗骨材 (%)	5号	7号	d/As
2-4-a	11.5		23.0	25.5	20.0	20.0		2.0
2-4-b	12.0		24.0	24.0	20.0	20.0		2.0
2-4-c	12.5		25.0	22.5	20.0	20.0		2.0
2-4-d	13.0		26.0	21.0	20.0	20.0		2.0
5-3-a (添加)	13.0	0.65	25.0	21.0	20.35	20.0		1.92
5-3-b (〃)	12.0	0.60	25.0	21.0	20.40	20.0		2.08
5-3-c (〃)	13.0	0.39	25.0	21.0	20.61	20.0		1.92

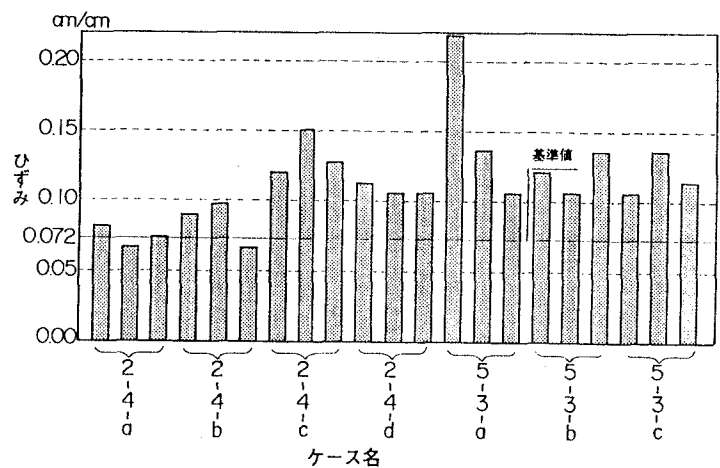


図-6-1 曲げひずみ(20°C 、 2.0cm/min)

ことが目視により確認された。

(2) 運搬時

通常のアスファルトマットよりアスファルト量および針入度が大きいため、特に夏期の高温下における吊り上げ下げ、仮置状態での変形について予測し、場合によってはその対策を講じる必要が生じるため、吊り下げおよびたわみ試験を行なった。吊り下げ試験は「5-3-a」、「5-3-c」、「2-4-d」についてクレーンで芯材と補強材（ガラスクロス、ワイヤー）入りのマット（1.0×2.0×0.08m）を30分間吊り下げた状態にして、その間におけるマットの伸び、亀裂発生の有無について観測するものである。たわみ試験はマット（芯材無しとガラスクロス入り）を片持ちばりの状態に設置して、経過時間毎のたわみ量の測定と亀裂発生の状態を観測したものである。試験当日の気温が22℃でかつ降雨であったために、マットが冷え内部温度の上昇が見込めなかったため、3配合とも吊り下げによる伸びは観測されなかった。たわみ性状は「5-3-a」の場合は初期のたわみ量が大きく、「2-4-d」、「5-3-c」については芯材の有無によらず、ほぼ同程度であった。なお、添加剤入りの場合アスファルトの軟化点が若干上昇するため、添加配合とした方がフロー防止対策には有利である。

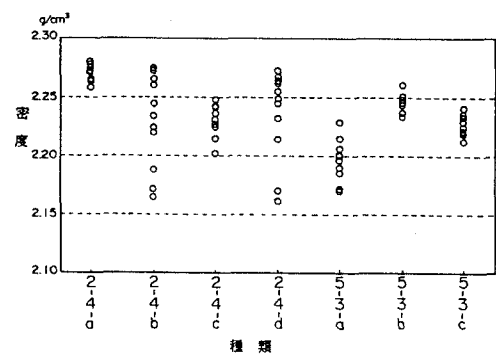


図-6-2 密度

表-6 アスファルト抽出後の針入度

	1	2	3	平均
2-4-d	27.5	28.0	27.5	28
5-3-a	35.0	36.0	35.0	35
5-3-c	32.0	32.0	32.0	32

表-7 耐久性試験用アスファルトマットの配合内訳

配合	As	添加剤	As比	石粉	細骨材	粗骨材	
	(%)	(%)	(%)	(%)	砂 (%)	5号	7号
添加配合	13.0	0.39	3.0	25.0	21.0	20.61	20.0
無添加配合	12.5	-	-	25.0	22.5	20.0	20.0

5. 最適配合の選択

施工性の検討と室内試験結果から、特に問題のない3配合「2-4-c」、「5-3-b」、「5-3-c」について、アスファルトマットに求められる摩擦増大用としての機能面からさらに検討を加える。重力式構造物上載後の摩擦係数を、特に低温時において早期に大きくするため、圧縮ひずみが大きいもの、すなわち圧縮ステイフネスが小さい方が望ましい。添加配合「5-3-b」、「5-3-c」の0℃における圧縮ステイフネスのを比べると、前者が3470 kgf/cm²で後者が2330 kgf/cm²より「5-3-c」を最適配合に選定した。それぞれの配合内訳は表-7に示すとおりである。

5. あとがき

本研究は平成元年度の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の改定にともない、摩擦増大用アスファルトマット合材の新基準にあった寒冷海域用としての最適配合を、種々試験配合についてその性状を確かめながら、選定することができた。しかし、実用化に向けては海象条件の厳しい寒冷海域における長期的な耐久性について検討を加えていく必要がある。このため、選定された2配合によるアスファルトマットを寒冷海域の環境を考慮して、北海道東海岸の太平洋側に面している落石漁港の防波堤に施工するとともに、各種試験用供試体もあわせて沈設し、耐久性試験を平成3年度を初年度として実施している。沈設した供試体は経過年数5年毎に、また防波堤下面に敷かれているマットは10年毎にそれぞれ引き揚げて、その性状の経年変化を調査解析し、今後新配合による性状の有効性と耐久性について明らかにしたいと考えている。

最後に、本研究にご協力いただいている北海道大学佐伯 浩教授、森吉昭博教授および北海道工業大学間山正一教授、北海道開発局根室港湾建設事業所の関係各位に対し紙面を借りてお礼申し上げるとともに、今後ともご協力をお願いする次第である。

参考文献

1) 財団法人 日本港湾協会：港湾調査指針、第3編第5章
2) H. Takeda, Y. Mizuno, N. Nakazawa, T. Ono, H. Saeki, (1988) : The coefficient of friction between concrete and asphalt-mat, Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Vol. III pp. 661-670
3) 財団法人 日本道路協会：アスファルト舗装要綱(昭和63年版)、付録5、pp. 191-195