

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1243

March 2023

現地のケーソン式防波堤から採取した 摩擦増大用アスファルトマットの長期耐久性評価

竹信正寛・宮田正史

Evaluation of Long-Term Durability of Friction-Enhancing Asphalt Mat
taken from Caisson-type Breakwaters on-site

TAKENOBU Masahiro, MIYATA Masafumi

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

現地のケーソン式防波堤から採取した 摩擦増大用アスファルトマットの長期耐久性評価

竹信正寛*・宮田正史**

要 旨

摩擦増大用アスファルトマットは、ケーソン式防波堤の底面に敷設し、ケーソンの滑動抵抗力を増大することで、防波堤の工費と工期の縮減に寄与する材料である。日本では、1963年以降、多くのケーソン式防波堤でアスファルトマットが採用されてきた。

本稿では、アスファルトマットの長期耐久性に関して2つの方法で確認した結果を示す。一つは海中に長期間暴露された試験片による確認結果、他方は実海域のケーソン直下に敷設されているアスファルトマットを直接採取した実物片による確認結果である。

その結果、試験片と実物片の両供試体の物理特性、力学特性および摩擦係数の経年変化は生じておらず、摩擦増大用アスファルトマットは海中で50年以上の長期耐久性を有していることが確認された。

キーワード：摩擦増大用アスファルトマット，長期耐久性，摩擦係数，海中暴露，ケーソン式防波堤

* 港湾研究部 港湾施設研究室 室長
** 港湾研究部付（併 港湾局 技術企画課 技術監理室長）

Evaluation of Long-Term Durability of Friction-Enhancing Asphalt Mat taken from Caisson-type Breakwaters on-site

TAKENOBU Masahiro*
MIYATA Masafumi**

Synopsis

Friction-enhancing asphalt mat is a material that is laid under the bottom of caisson-type breakwaters. It contributes to reducing the cost and period for constructing breakwaters by increasing the sliding resistance of the caisson. In Japan, asphalt mats have been applied at many caisson-type breakwaters since 1963.

This paper shows the result of confirming the long-term durability of the asphalt mat using two methods. The first method was to confirm the long-term durability of a specimen installed under the sea for a long period of time, while the other method was to confirm the long-term durability of an in-situ piece sampled directly from an asphalt mat laid immediately under the caisson in an actual sea area.

As a result, it was found that the physical properties, mechanical properties, and friction coefficients of both the test piece and the actual mat piece showed no secular change, and the friction-enhancing asphalt mat had long-term durability of over 50 years under the sea.

Key Words: friction-enhancing asphalt mat, long-term durability, coefficient of friction,
exposure in seawater, caisson-type breakwater

* Head, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM

** Port and Harbor Department, NILIM

目 次

1. はじめに	1
2. アスファルトマットに関する基本情報	3
2.1 アスファルトマットの基本性状	3
2.2 アスファルトマットの施工方法・敷設手順	4
2.3 滑動抵抗力の増大効果および摩擦係数	4
2.4 アスファルトマットの導入効果および施工実績	4
3. 試験片を用いた長期耐久性の評価	6
3.1 和歌山港における試験片	6
3.2 試験方法の概要	6
3.3 試験結果	8
3.4 長期耐久性の評価	9
4. 実物片を用いた長期耐久性の評価	10
4.1 実物片の採取方法	10
4.2 試験結果	11
4.3 アスファルトマット塊の観察結果	12
4.4 アスファルトマット塊の残存厚さ	14
4.5 長期耐久性の評価	15
5. まとめ	15
謝辞	15
参考文献	15
付録A 摩擦増大用アスファルトマットの施工方法	17
付録B 摩擦増大用アスファルトマットの試験方法	19
付録C 本稿に用いた各種データの詳細	24

1. はじめに

ケーソン式防波堤の直下に摩擦増大マットを敷設すると、ケーソンの滑動抵抗が増すため、必要ケーソン幅が小さくなり、防波堤の建設工費と工期の縮減に繋がる場合がある(図-1)。1963年に和歌山港のケーソン式防波堤で摩擦増大マットとしてアスファルトマット(これ以降、Asマットと呼称する。)が導入され、それ以降、数多くの防波堤で採用されてきた。Asマットの導入にあたり、各種の室内および屋外試験が実施され、Asマットの配合やケーソン底面と基礎捨石の間に適用する摩擦係数が検討されたが、長期耐久性については継続的な確認が必要とされた。

本課題に対応して、Asマットの長期耐久性を評価するために、これまでに試験片や実物片を用いた長期耐久性試験が行われてきた。表-1は長期耐久性に着目した試験既往の実施記録例(出典は表中に記載)を整理したものである。

試験結果の1つ目は、試験片に基づく結果である。試験片とは、蓋付きのコンクリート製函に入れた状態で、Asマットが敷設された防波堤の近くの海中で長期間保管されてきたものである。

2つ目は、実海域のケーソン式防波堤の底面に敷設されていたAsマットを現地で直接採取した実物片に基づくものである。実物片の採取は、次ページ図-2に示す3箇所の港湾(和歌山港:敷設から57年経過,直江津港:同50年経過,高知港:同29年経過)で行った。

本稿は、2種類の長期間の試験実施記録が存在する和歌山県での記録に主に着目し、既往の試験結果に基づくAsマットの長期耐久性を評価するものである。上記の試験片と実物片を用いた各種試験により、曲げ強度や摩擦係数などに代表される各物性値に関する防波堤建設当初からの変化を確認することにより、Asマットの長期耐久性を評価する。

本稿の構成は以下の通りである。2章にAsマットに関する基本情報を、3章に試験片を用いた長期耐久性の評価を、4章に実物片を用いた長期耐久性の評価を示し、5章に得られた知見を整理しまとめた。また、更に付加的な情報として、Asマットの構造・配合・施工方法、Asマットを利用した際のコスト縮減事例やこれまでの施工実績の概略も、付録として紹介する。

なお、本稿はISOPE(2020)“Evaluation of Long-term Durability of Friction-Enhancing Asphalt Mat taken from Caisson type Breakwaters onsite²⁾”に関する論文を基に、実験データ等や参考情報の追記を行った上で日本語化、再

整理したものである。

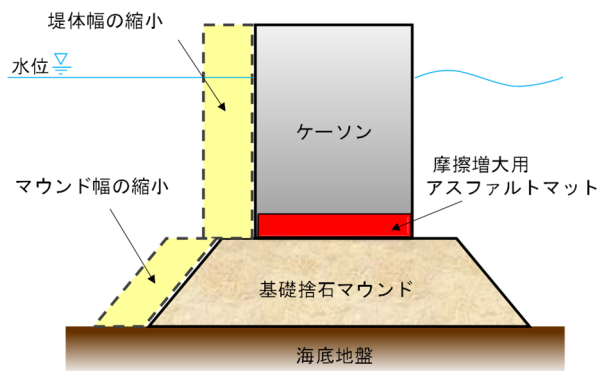


図-1 ケーソン式防波堤の底面にAsマットを敷設した場合の効果イメージ

表-1 長期耐久性に着目した試験実施記録例

都道府県	港湾名	施工開始年	長期耐久性評価			
			【試験片】		【実物片】	
			物性試験	摩擦試験	物性試験	摩擦試験
北海道	増毛港 ³⁾	1981年	試験実施経過年数 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 40	試験実施経過年数 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 16, 20, 40	7	7
	落石漁港 ³⁾	1991年	試験実施経過年数 0, 5, 7, 10, 16, 21, 30	試験実施経過年数 0, 5, 6, 10, 16, 21, 30	30	30
新潟県	直江津港 ⁴⁾	1961年	-	-	50	50
和歌山県	下津港 ^{4), 5), 6), 7), 8)}	1963年	試験実施経過年数 0, 1, 2, 5, 7, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 50	試験実施経過年数 30, 50	14, 57	14, 57
			試験実施経過年数	試験実施経過年数		
高知県	高知港 ⁴⁾	1990年	-	-	29	29
沖縄県	那覇港 ⁹⁾	1982年	試験実施経過年数	試験実施経過年数		
			-	-	16	16

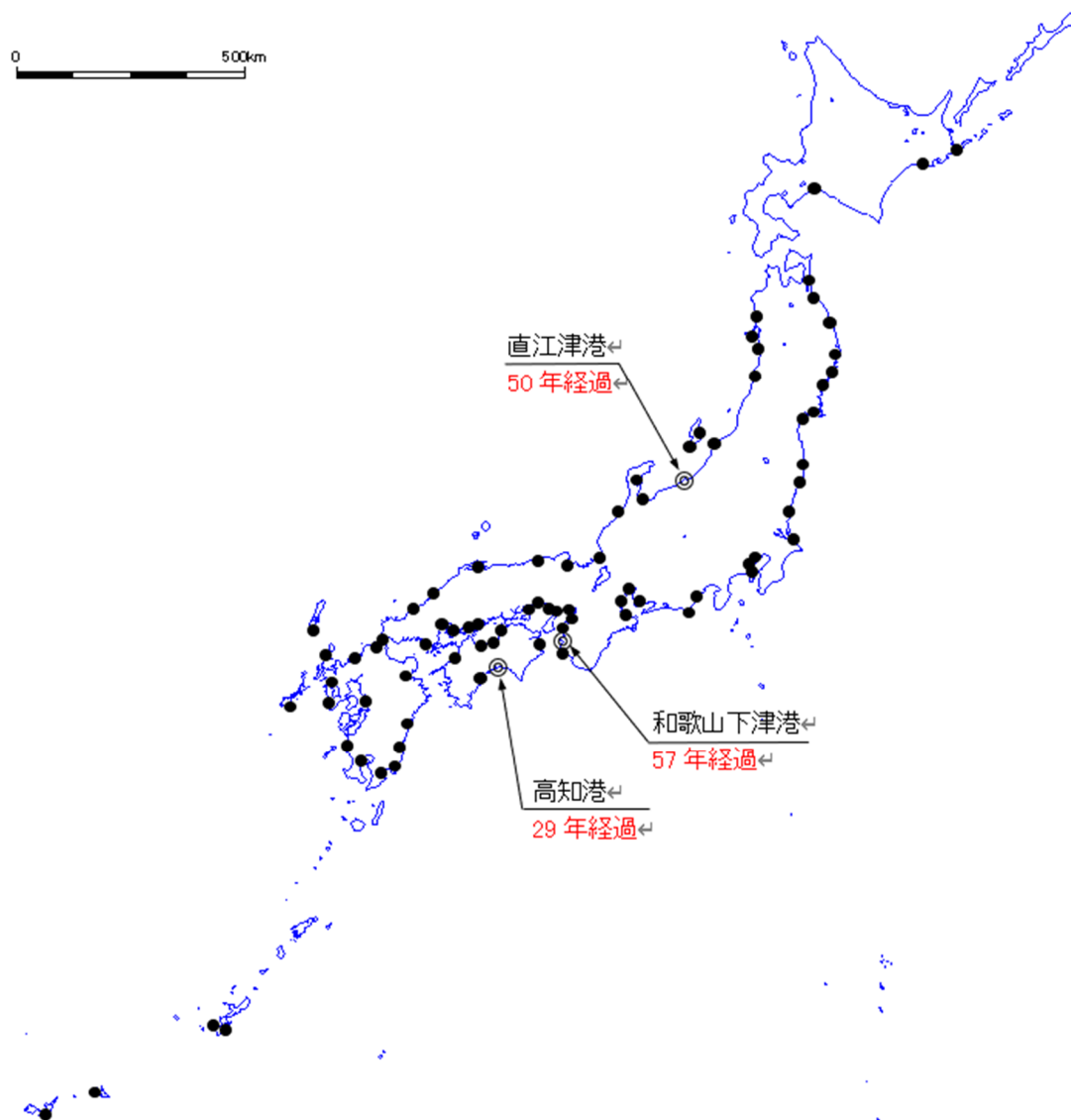


図-2 Asマットを現地防波堤から採取した港湾とAsマットが採用された主要港湾の位置図
(◎：実物片を採取した港湾、●：Asマットが採用された主要港湾)

2. アスファルトマットに関する基本情報

2.1 アスファルトマットの基本性状

Asマットは、アスファルト、フィラー（石灰石粉）、砂および碎石を混合したアスファルト合材（表-2）に、補強材、吊り上げ用のワイヤーおよびアンカーボルト取付金具を埋込んで、マット状に成形したものである（図-3）。固化前の合材の温度は180℃～220℃程度であり、陸上に設置した型枠に合材を流し込み、常温に下がると合材は固化し、マット状の部材となる。

Asマットの標準的な厚さは80mmである。この厚さは、ケーソンによる初期荷重による圧縮量（20mm）、Asマットへの基礎捨石のくい込み量（25mm）、捨石のくい込みが発生した際の最小限のAsマットの残存厚さ（30mm）、施工誤差（5mm）を考慮して決定されたものである⁴⁾。

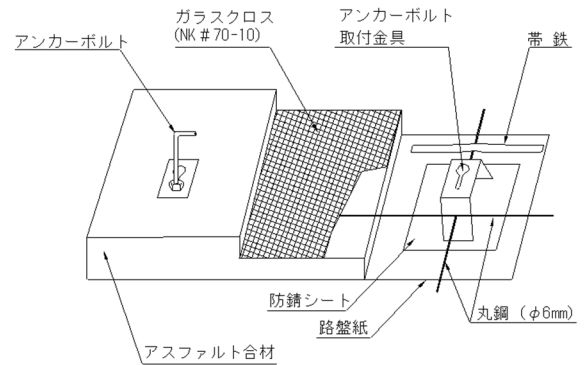
Asマットの配合は、所要の強度、たわみ性等が得られるように配合試験を行って決定される。ただし、Asマットは歴史も古く使用実績も多いため、特殊な使用条件でない場合は、表-2に示す配合が標準的に利用されている。なお、Asマットの基本性状に関する詳細な情報は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（以下、港湾基準）」¹⁰⁾を参照されたい。

表-2 アスファルトマットの配合の標準値

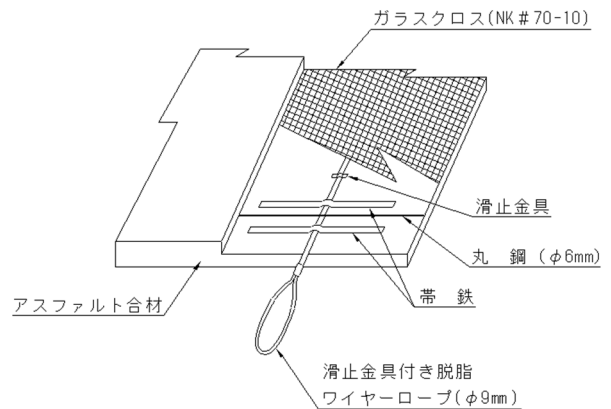
材料	重量比 (%)	備考
アスファルト	10～14	JIS K 2207石油アスファルトの規程に適合した、ストレートアスファルトまたはブローンアスファルト並びに両者を混合したもの。
ダスト	14～25	ダストとは、0.075mm以下の砂及びフィラー。 JIS A 5008舗装用石灰石粉の規程に適合したもの。
細骨材	20～50	細骨材とは、0.075～2.5mmの碎石、砂、及びフィラー。 碎石は、JIS A 5001道路用碎石の規定に適合したもの。
粗骨材	30～50	粗骨材は、2.5mm以上の碎石。 碎石は、JIS A 5001道路用碎石の規定に適合したもの。



写真-1 配合材料の例



ケーソン取付タイプ
(アンカーボルト方式)



捨石マウンド敷設タイプ

(a) アスファルトマットの構造



(b) As マットの切断面

図-3 摩擦増大用アスファルトマットの構造例

2.2 アスファルトマットの施工方法・敷設手順

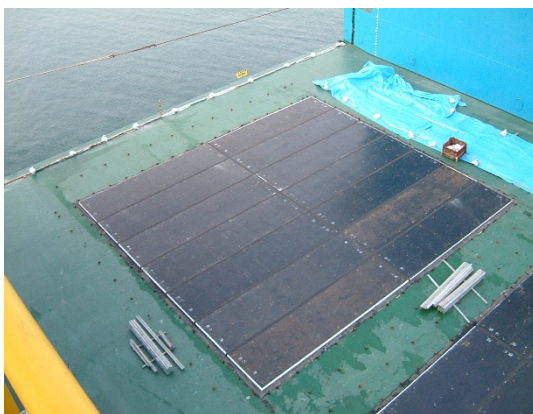
写真-2にケーソン下面に敷設されるAsマットの施工状況¹¹⁾を示す。屋外のヤードで製造されたAsマットは、船舶またはトラックにより現地まで運搬され、ケーソンを製作するヤード（陸上、FD上など）に敷設される。Asマットの敷設後に、ケーソンの底面コンクリートが直接打設される。

ケーソン底面とAsマットは、アスファルトのコンクリート表面の細部孔への食い込みや付着の効果により密着される。このため、ケーソンの完成後、ケーソンを引き揚げ海中に浮遊させても、Asマットがケーソン底面から落下することはない。ただし、施工中のAsマットの落下を確実に防止するために、図-3に示すアンカーボルト取付金具がコンクリート中に埋め込まれる。

なお、Asマットの施工方法に関するその他詳細は付録Aに記載した。



(a) ケーソン製作ヤード



(b) フローティングドック

写真-2 アスファルトマットの施工状況

2.3 滑動抵抗力の増大効果および摩擦係数

Asマットを敷設すると、図-4に示すとおり、Asマットに基礎捨石が食い込む^{12,13)}。この境界面（Asマット／捨石）では、捨石のマットへの食い込み効果のため、滑動は発生しない。実際に滑動が発生するのは、ケーソン底面のコンクリートとAsマットとの境界面（Asマット／コンクリート）である¹⁴⁾。港湾基準では、防波堤のケーソン底面で発揮される最大滑動抵抗力を算定する際の摩擦係数は、過去の実験等に基づき、コンクリートと岩盤の間では0.5、コンクリートと捨石では0.6と定められている。一方、Asマットを利用した場合には、摩擦係数を0.7～0.8にまで向上させることができるため、滑動抵抗力の増加を期待することができる。

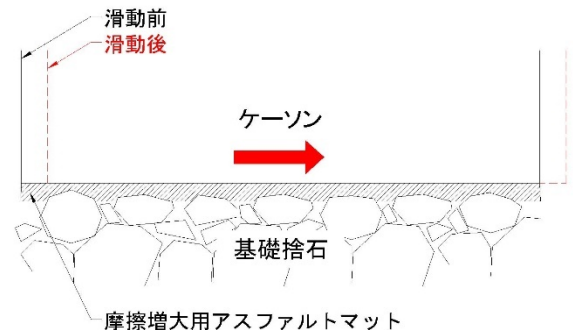


図-4 アスファルトマット敷設時のケーソン滑動状況

2.4 アスファルトマットの導入効果および施工実績

Asマットの敷設効果を、和歌山港の防波堤の事例¹¹⁾により示す。当初、ケーソンと捨石との間の摩擦係数0.6を用いたケーソン（防波堤）断面が検討されていたが、その後Asマットの敷設が検討され、摩擦係数0.7を用いたケーソン断面として設計された。その結果、ケーソンの必要幅は13.3mから11.55mへと縮小し（全ケーソン14函、延長113.5m）、さらに捨石マウンドの幅も狭くなったため、この事例では全体で約10%の工費削減が達成された。

ただし、摩擦増大マットの採用に際しては何点か注意すべき点がある。まず摩擦増大マットを敷設すると、ケーソンの滑抵抗は増加するが、ケーソン幅が小さくスリムな形状（ケーソンの高さとの比が大きくなる）になるため、基礎マウンドに作用する端し圧（ケーソン底面の端部位置で、ケーソン底面から基礎捨石に作用する圧力）が増加する。このため、摩擦増大マットの採用には、端し圧の増加に耐えることができる十分な強度を有する基礎地盤が必要である。

また、ケーソン製作時の施工手間も増え、マットの現

地での調達可否確認も必要である。さらに、防波堤の延伸途中で摩擦増大マットを用いた断面を採用すると、ケーソン幅や基礎マウンドの形状が途中で変化するため、その点にも注意が必要である。

このような点を考慮しつつ、ケーソン式防波堤の採用時には、基本設計の段階で摩擦増大マットを採用した断面と採用しない断面での比較設計を行う。更に経済性などを勘案し、摩擦増大マットの導入可否をプロジェクトごとに検討している。

上記の留意点が存在するものの、和歌山港での事例以降、数多くの防波堤でAsマットが採用され、1963年から2020年までに合計約249万m²のAsマットが利用されてきた。1.の図-2はAsマットが採用された主要な港湾（港湾法で重要港湾以上に分類される港湾）を示すが、北海道から沖縄までの幅広い気候条件下の港湾で採用されていることがわかる。

また、Asマット敷設の防波堤の被災事例については、著者らの知る限り、波浪によって被害を受けた事例の報告はない。2011年の東日本大震災時には、Asマットが敷設されたケーソン式防波堤も津波の作用を受けたが、いずれの防波堤もケーソンの滑動は確認されていないことが報告されている^{14), 15)}。

なお、日本以外でのAsマットの採用事例も数は少ないものの存在する。日本の政府開発援助（ODA）によるプロジェクトでは、インドネシアのアレン港（1977年施工）、エルサルバドルのラ・ウニオン港（2006年施工）、ベトナムのティエンサ港（2005年施工）のケーソン式防波堤でAsマットが採用されている。3つの防波堤で利用されたAsマットは合計約2.2万m²である。また、韓国政府の事業（東海港：2017年施工）の防波堤でも実績がある。

3. 試験片を用いた長期耐久性の評価

本章ではAsマットの長期耐久性の評価として、和歌山港における試験片に関する試験結果を示す。なお、以下の記載は文献7), 8)の内容に基づいて整理している。

3.1 和歌山港における試験片

和歌山港の防波堤では、Asマットの長期耐久性を継続的に確認するために、当該防波堤のAsマットと同じ配合で作成された多数の供試体（以下、試験片とよぶ）が、近隣の防波堤背後の海中で保管された（1969年から開始）。供試体は、通水性を有する蓋付きのコンクリート製函（写真-3）の中で荷重を受けない状態で、海水が常に作用する状態で暴露されている。なお、当該防波堤は、日本で最初にAsマットを採用した防波堤である。

試験片は、各種試験用にあらかじめ所定の形状に成型されている。これらの試験片は海中暴露開始後、0年（初期値）、1年、2年、5年、7年、8年、10年、15年、20年、25年、30年、50年経過時に海中から引き揚げられ、目視観察および物理的性状を把握するための試験が実施されてきた。また、30年、50年経過時はそれらの試験に加えて摩擦試験も実施された。

コンクリート製保管箱から取り出し、水洗いした後の供試体（海中暴露開始後50年間経過）を写真-4に示す。

3.2 試験方法の概要

(1)試験項目

試験項目および主要な試験条件を表-3に示す。

物理的性状試験の試験温度等の条件は、参考文献16)に

準じている。摩擦試験の試験温度（15℃）は、寒冷地を除いた我が国沿岸の水深10m付近の冬期平均海水温度を考慮して決定されている。



写真-3 試験片を保管するコンクリート製函（和歌山港）



写真-4 取り出した試験片（和歌山港）

表-3 試験項目および主要試験条件

試験項目	試験条件				
	供試体寸法 (mm)	供試体 個数	温度 (℃)	変位速度 (mm/min)	備考
比重試験	40×40×160	3	20	—	
曲げ試験	40×40×160	3	20	20	スパン;100mm
圧縮試験	40×40×160	3	20	20	加圧面積;40×40mm
せん断試験	40×40×160	3	10	10	加圧面積;40×40mm
引張試験	40×40×170	3	10	10	供試体中央部断面;40×40mm
針入度試験	抽出したアスファルト	1式	25	—	JIS K 2207
軟化点試験	〃	1式	—	—	JIS K 2207
摩擦試験	150×150×40	3* 3**	15	60	試験環境;水中 上載荷重;294kN/m ² (30tf/m ²)

(2)物理的性状試験の概要

物理的性状試験の試験項目は、比重、曲げ強度、圧縮強度、せん断強度、引張強度、針入度試験、軟化点試験である。

比重は、所定の温度（20℃）で養生した供試体の空中重量と水中重量を測定し算出する。

曲げ強度は、所定の温度（20℃）で養生した供試体を曲げ試験用アタッチメント（スパン100 mm）にセットし、所定の変位速度（20 mm/min）で1点中央載荷して、最大荷重と最大荷重時の変位量を測定して（写真-5(a)）算出する。

圧縮強度は、所定の温度（20℃）で養生した供試体を、圧縮試験用アタッチメント（加圧面積40 mm×40 mm）にセットし、所定の変位速度（20 mm/min）で載荷し、最大荷重と最大荷重時の変位量を測定し、算出する。

せん断強度は、所定の温度（10℃）で養生した供試体を、せん断試験用アタッチメント（せん断面積40 mm×40 mm×2断面）にセットし、所定の変位速度（10 mm/min）で複せん断載荷して、最大荷重と最大荷重時の変位量を測定し、算出する。

引張強度は、所定の温度（10℃）で養生した供試体を引張試験用アタッチメント（供試体中央断面40 mm×40 mm）にセットし、所定の変位速度（10 mm/min）で載荷して、最大荷重と最大荷重時の変位量を測定し、算出する。

針入度・軟化点試験については、まずアブソン抽出法¹⁸⁾によりアスファルトの回収を、300 mm×300 mm×厚さ40 mmの供試体から行う。回収されたアスファルトについて、針入度試験（JIS K 2207）、軟化点試験（JIS K 2207環球法）を行う。

写真-5(b)に、軟化点試験の状況を示す。針入度は

25℃において試験用針がアスファルトに貫入した量の0.1 mmを針入度1と表した無次元数である。また、式(1)、(2)により針入度指数(PI)を算出する。針入度指数は、アスファルトの感温性を評価する値（無次元数）である。

$$\text{針入度指数}(PI) = \frac{30}{1 + 50A} - 10 \quad (1)$$

ただし、

$$A = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{\text{軟化点}(^{\circ}\text{C}) - 25}$$

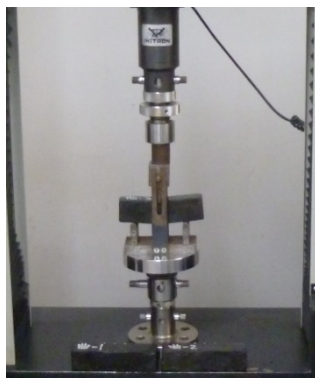
P_{25} : 針入度(25℃)

(3)摩擦試験

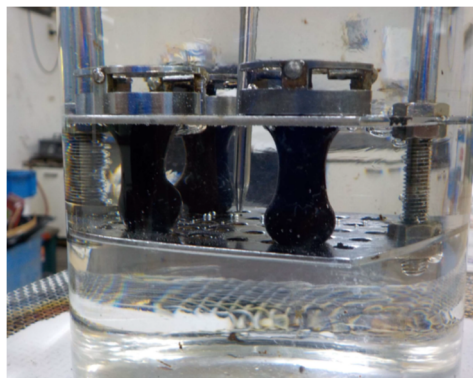
摩擦試験は、海中暴露開始後30年と50年経過時に実施された。摩擦試験では、設計で利用されるコンクリートとAsマットとの境界面での摩擦係数を計測する。試験装置を写真-5(c)に示す。Asマットの試験片のサイズは、水平方向150 mm×150 mm、厚さ40 mmである。

次に試験手順を示す。まず、Asマットの供試体を試験装置内の恒温水槽に設置し、所定の温度（15℃）に養生しておく。その後、供試体の上にコンクリート版を載せ、水温を保持したまま上載荷重392 kN/m²（40 tf/m²）をかける。載荷開始から1時間後に上載荷重を294 kN/m²（30 tf/m²）へと除荷し、除荷後すぐにコンクリート版に水平変位を変位速度60 mm/minで与える。摩擦係数は、水平荷重の最大値を供試体に作用させている鉛直荷重で除すことにより算出する。この試験で算出する摩擦係数は、静止摩擦係数に相当する。なお、コンクリート版は、30年経過時⁶⁾と50年経過時⁷⁾の試験で、同一のものが使用された。

Asマットに関する試験方法に関するその他の詳細については、付録Bに整理した。



(a) 曲げ試験



(b) 軟化点試験



(c) 摩擦試験(コンクリートとAs マット)

写真-5 試験状況

3.3 試験結果

供試体外観を目視で観察した結果、多少の変形や表面の汚れは見られたが、ひび割れ等は確認されなかった(写真-4)。また、試験片の内部に海水が浸入した痕跡もなかった。

図-5に、海中暴露開始後0年～50年経過時の各種試験結果をまとめて示す。なお、図中には、試験片による試験結果に加えて、4.にて後述する現地防波堤から採取した実物片による試験結果も示している。図中の基準値は、技術基準¹⁰⁾に定められたAsマットの材料物性に関する

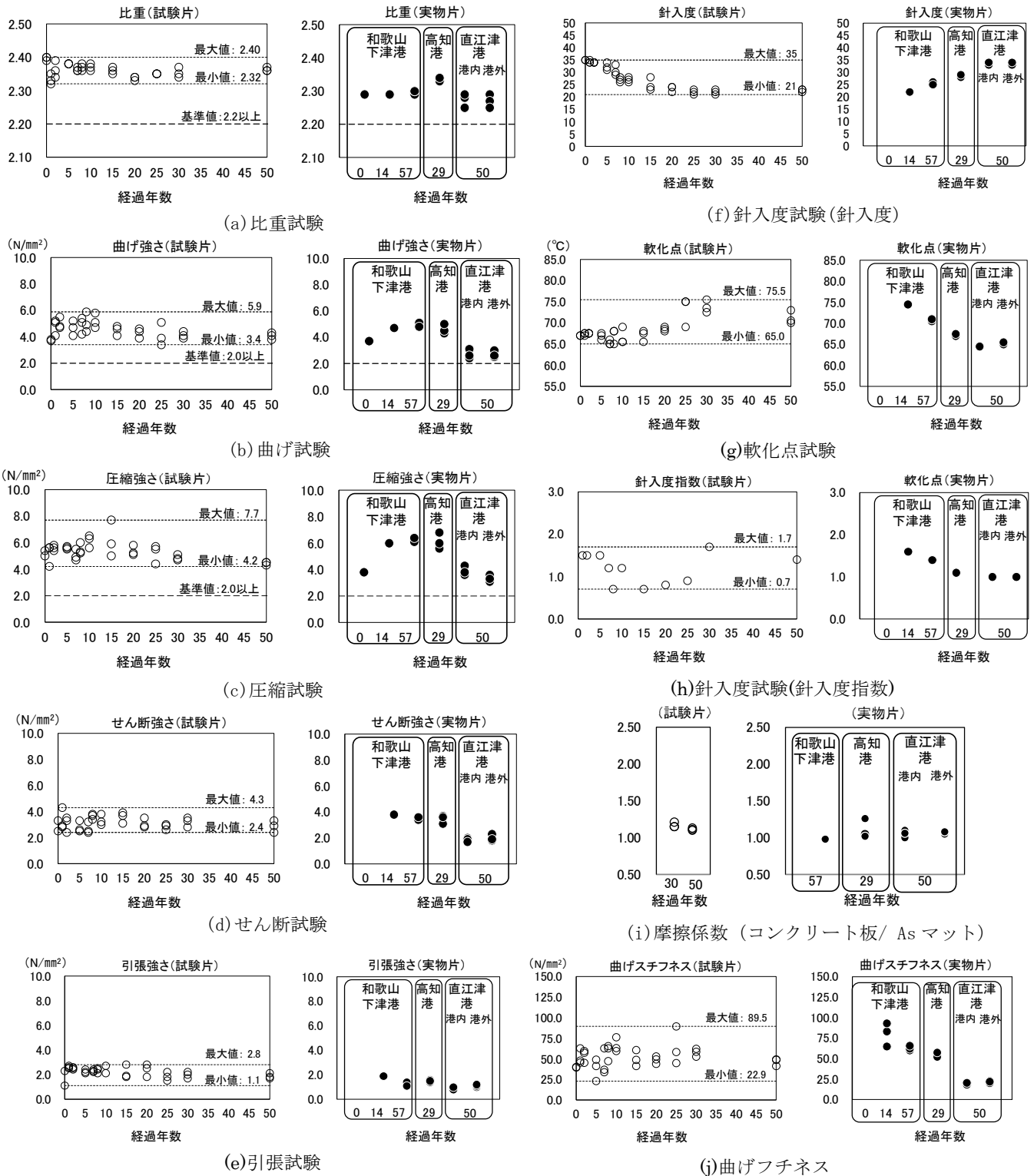


図-5 試験片(和歌山港)と実物片(和歌山港, 直江津港, 高知港)の物理的性状および摩擦係数の試験結果

る基準値である。

物理的性状試験は、全ての項目において、Asマット敷設後0～50年間の試験結果の変化は軽微であった。比重・曲げ強度・圧縮強度の値は、港湾基準の基準値を全ての供試体が満足していた。アスファルト混合物の劣化が進むと、曲げ強さの最大荷重時の歪みが小さくなり、剛性を示すスチフネスは大きくなる傾向を示すとされているが¹⁷⁾、今回の試験結果からは、歪み、スチフネスともにそのような傾向は見られず、暴露開始時と同等の値であった。また、他のせん断、引張試験結果も同様の結果であった。

針入度は、初期値の35（平均値、以下同じ）から、経過年とともに小さくなる傾向を見せるものの、20年以降は21～24の範囲で安定している。軟化点については、25年経過時をピークに下降傾向を見せているが、初期に比べると大きい値であり、20年以降は微増の傾向であった。

針入度と軟化点から算出される針入度指数は、アスファルトの感温性を示す指標である。一般に、-2～2の範囲で「粘弾性型」とされている¹⁹⁾。本試験の針入度指数は海中暴露開始後0～50年で0.7～1.7の範囲にあり、50年経過時では1.1であった。このことから、Asマット試験片中のアスファルトは、50年経過後も粘弾性体としての特性を保持していると言える。

摩擦試験は、30年経過時と50年経過時の2回行った。コンクリート版とAsマット間の摩擦係数は、30年経過時で1.17、50年経過時では1.11であった。2つのデータしかないため、摩擦係数が変化しているかは不明ではあるが、少なくとも港湾基準で規定されている摩擦係数の上限値0.8を大きく上回る摩擦係数が、50年経過後も保持されていた。

3.4 長期耐久性の評価

海中暴露開始後50年経過した試験片は、多少の変形のみでひび割れ等はなく、外観上は問題がない状態であった。比重や各種の物理的性状試験の結果も、50年間で大きな変化は認められなかった。また、港湾基準で基準値が規定されている項目については、いずれも基準値を満足する結果であった。摩擦係数についても、30年および50年を経過しても低下の傾向は見られず、現行の設計で採用されている摩擦係数の上限値である0.8をいずれも大幅に上回る結果であった。

以上のことから、和歌山港における海中暴露供試体（試験片）の試験結果からは、Asマットは50年以上の長期耐久性を有していると評価される。

4. 実物片を用いた長期耐久性の評価

本章ではAsマットの長期耐久性の評価として、Asマットを現地で直接採取した実物片に関する試験結果を示す。なお、以下の記載は文献4)の内容に基づいて整理している。

4.1 実物片の採取方法

3.で示した試験片は、海中に50年間暴露されてきたものの、ケーソン直下に敷設されたAsマットとは明らかに条件が異なる。具体的には、敷設されたAsマットは、基礎捨石の食い込みにより大きな塑性変形が発生しているほか、ケーソンの自重が常に作用している状態にある。加えて、ケーソンに作用する波力を介して、Asマットに様々な荷重レベルの変動荷重が繰り返し作用している状態にある。以上のことから、試験片によるAsマットの長期耐久性評価に加えて、実際のケーソン式防波堤の直下に敷設されているAsマットを直接採取し、そこから成形した供試体（実物片）を用いて3章で示した各種試験を実施し、その長期耐久性の評価を行った。

実物片は、1章の図-2に示した3つの港湾（和歌山港、直江津港、高知港）のケーソン式防波堤から採取した。図-6に、Asマット塊を採取した防波堤の断面図を示す。なお、3.で述べたように和歌山港では試験片が設置されているが、直江津港および高知港では、試験片は設置されていない。

現地に敷設されているAsマットの採取は、以下の手順で行った。まず、採取箇所周辺の被覆石や被覆ブロックを潜水士または起重機船のクレーンにより除去する。そして、潜水士がAsマット周辺の基礎捨石（図-6(a)のハッチングされた部分）を除去し、さらにケーソン底面のコンクリートとマットの間にスクレーパー等を挿入し、60×80cm四方程度の塊としてマットを採取する。なお、採取後は、基礎捨石、被覆石および被覆ブロックの全てを元の状態に戻す。

3箇所防波堤で採取したAsマット塊の一例を写真-6に示す。写真は、Asマットと基礎捨石との接触面を撮影したものである。実物片による供試体は、これらのAsマット塊から各試験用のサイズに合わせて切り出すことにより作製する。

写真-6に示すように、接触面には大きな凹凸が認められるが、これは一つ一つの捨石が馴染むようにAsマットにくい込んでいた痕跡である。なお、試験方法は3.に示した内容と全て同じである。

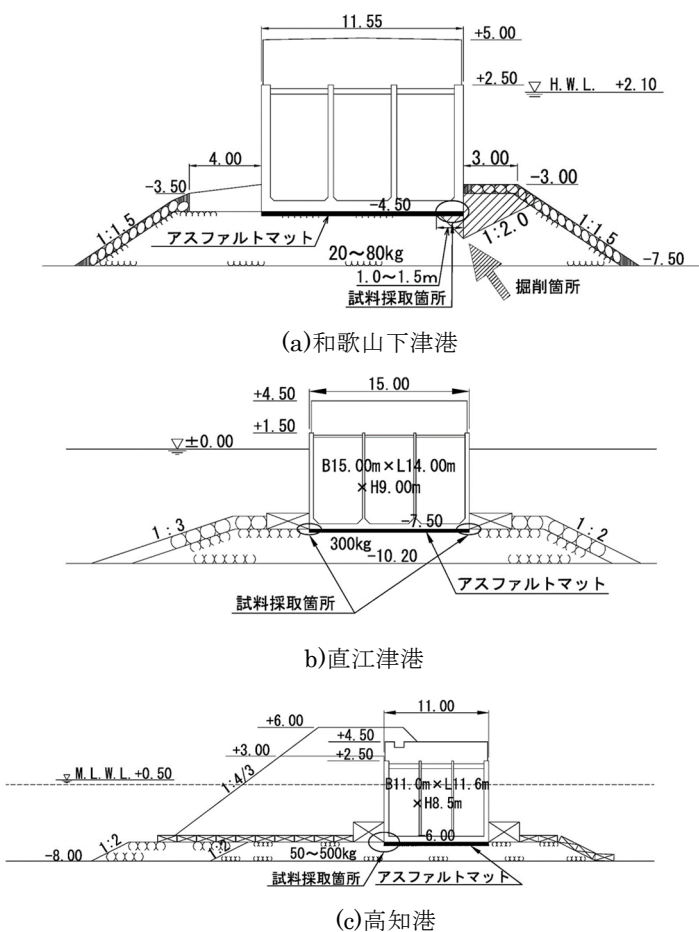


図-6 実物片を採取した防波堤の断面図



写真-6 現地防波堤の採取Asマット塊（和歌山港）

4.2 試験結果

3. の図-5に3箇所の防波堤から採取した実物片の試験結果を、試験片による結果と併記して示す。表-4に実物片による結果を示す。

和歌山港の試験片と実物片は、同一配合であることから、暴露条件は異なるものの比較することは可能である。以下では、ケーソン直下で長期間にわたって実際の荷重履歴を受けてきた実物片の試験結果の範囲と、試験片の結果の範囲に着目して比較する。また、各種基準値に対する実物片の試験結果について検討する。

なお、その他の2港については、試験片の設置もなく、さらに当初配合の記録も不明であったことから、それらの試験結果は参考的な位置づけとなる。

和歌山港での実物片の比重測定の結果は、試験片では2.32~2.4の範囲であったが、実物片では2.90~2.30であり、試験片よりもやや小さい結果となった。他の2港の実物片の比重も、2.25~2.34程度の範囲であった。試験片と実物片の比重の差の要因は不明であるが、比重を測定した試験片と実物片の体積は非常に小さく（256cm³程度）、供試体中に含まれる碎石（5号碎石：13~20mm程度）の個数によって、この程度の比重の相違は発生しうると考えられる。

Asマットの劣化が進行すると、粘弾性特性が変化し、マット部材の剛性が変化する可能性がある。和歌山港における粘弾性特性に関する各種の結果（針入度試験、軟化点試験、針入度指数）は、試験片と実物片で概ね同

表-4 実物片（和歌山港，直江津港，高知港）の物理的性状および摩擦係数の試験結果

港湾名		和歌山下津港	高知港	直江津港		
防波堤形状	ケーソン形状 L×B×H	11.55 ×8.0×7.0	11.0 ×11.6×8.5	15.0×14.0×9.0		
	上部工天端高(D.L.)	+5.0m	+4.5m	+4.5m		
	設置深度(D.L.)	-4.5m	-6.0m	D.L. -7.5m		
	マウンド厚	3.0m	2.0m	3.2m		
年情報	施工年度	1963年	1990年	1969年		
	採取年度 (経過年数)	2020年 (57年)	2019年 (29年)	2019年 (50年)		
試験結果 (実物片)	Asマット採取位置	港内側	港外側	港内側	港外側	基準値 ⁹⁾
	比重	2.30	2.33	2.27	2.27	2.2
		2.29~2.30	2.33~2.34	2.25~2.29	2.25~2.29	
	曲げ強度(N/mm ²)	5.0	4.6	2.7	2.7	2.0
		4.8~5.1	4.3~5.0	2.4~3.1	2.5~3.0	
	曲げたわみ量(mm)	3.4	3.5	5.6	5.2	3
		3.1~3.5	3.2~3.7	5.1~6.2	4.9~5.5	
	圧縮強度(N/mm ²)	6.3	6.1	3.9	3.3	2.0
		6.1~6.4	5.6~6.8	3.6~4.3	3.1~3.6	
	せん断強度(N/mm ²)	3.5	3.5	1.9	2.0	-
		3.4~3.6	3.1~3.7	1.7~2.0	1.8~2.3	
	引張強度(N/mm ²)	1.2	1.5	0.9	1.1	-
		1.1~1.4	1.4~1.6	0.8~1.0	1.0~1.2	
	針入度	25	29	34	33	-
25~26		28~29	33~34	33~34		
軟化点(℃)	71.0	67.0	64.5	65.0	-	
	70.5~71.0	67.0~67.5	64.5~64.5	65.0~65.5		
針入度指数	1.4	1.1	1.0	1.0	-	
摩擦係数 Co/Asマット	0.98	1.11	1.05	1.07	-	
	0.97~0.98	1.02~1.26	1.00~1.10	1.05~1.08		
摩擦係数 Asマット/碎石	1.19	1.64	1.39	1.44	0.75	
	1.12~1.23	1.50~1.71	1.31~1.44	1.36~1.51		

*試験結果の欄の上段は平均値，下段は最小値~最大値を表す

*針入度指数は，針入度と軟化点の平均値から算出

じ数値であり、実物片でも劣化は進行していないと考えられる。また、他の2港についても、粘弾性特性に関する各種の結果は和歌山港と類似しており、建設当時の粘弾性特性は保持されていると考えられる。

和歌山港の実物片の各種強度（曲げ強度、圧縮強度、せん断強度、引張強度）についても、試験片による50年間の試験結果の範囲内であった。また、基準値が規定されている曲げ強度および圧縮強度については、いずれも基準値を満足していた。また、他の2港の実物片の結果も、和歌山港の試験片の結果と整合的であり、基準値も満足していた。

和歌山港でのAsマットとコンクリートとの間の摩擦係数は、試験片で1.1程度、実物片で1.0程度であった。実物片の摩擦係数は、試験片に比べるとやや小さい値であるものの、基準の最大値0.8を大きく上回る結果であった。

さらに、両者の試験結果として、コンクリート版の水平変位と摩擦係数に換算した水平荷重との計測結果(3供試体分)を図-7に示す。試験片と実物片との結果を見比べると、どちらも水平変位1mm程度までの範囲で水平荷重が最大となり（最大の摩擦係数を発揮）、その後は概ね0.6~0.8程度の摩擦係数を保っており、両者の荷重・変位特性は類似していた。その他の2港の実物片の試験結果においても、摩擦係数は1.0を超えていた。以上のことから、実海域の防波堤直下で長期間にわたり荷重を受けたAsマットであっても、建設時と同程度の摩擦係数が確保されているものと考えられる。

4.3 アスファルトマット塊の観察結果

実物片の外観観察を写真-6に示すような塊の状態で行った。アスファルトマットが捨石に馴染むように大き

く塑性変形しているものの、ひび割れや破断は確認されなかった。

写真-7は、高知港で採取したAsマット塊の表面の拡大写真である。(a)はAsマット塊の上面（Asマットとケーソン底面コンクリートが接触していた面）の状況である。Asマットの上面には、Asマットが滑ったり、剥がれたりしたような痕跡や傷はなかった。さらに生物の付着も一切なかった。これは、Asマットとコンクリートとの間に海水が浸入していないためであると考えられる。建設時において、Asマット上にコンクリートを打設した時点でマットとコンクリートは密着した状態になるが、その状態が防波堤の供用開始以降も続いていたと推察される。

写真-7(b)は、Asマット塊の下面（Asマットと基礎捨石が接触していた面）の状況を示す。下面では、捨石がAsマットに直接接触していないと判断される領域では、貝殻等の付着が多く、Asマットの表面に多少の凹凸やしわ状の形態が見受けられた。一方、捨石がAsマットに直接接触していると判断される領域では、貝殻等の付着が少なく、Asマットの表面は捨石表面の形状がそのまま残存する形態であった。なお、Asマットに捨石が直接接触している箇所でも貝殻が付着しているのは、ケーソン設置後に捨石がAsマットへくい込み、Asマットと基礎捨石が馴染む状態に移行するが、最終的な状態に移行するまでに一定の期間を要したためであると考えられる。

次に、Asマット内への海水の浸入状況の観察結果を示す。Asマットは無空隙合材であるため、マット内部に海水が浸入することはないと考えられるが、実際の防波堤直下で経年的な繰り返し荷重を経たマットでも、海水の浸入がないことを確認した。写真-8に、和歌山港で採取

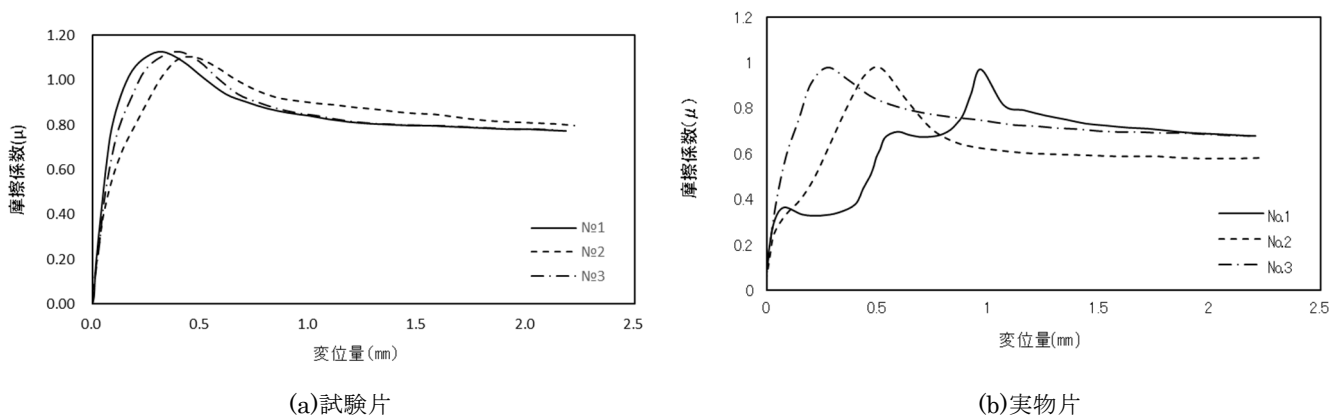
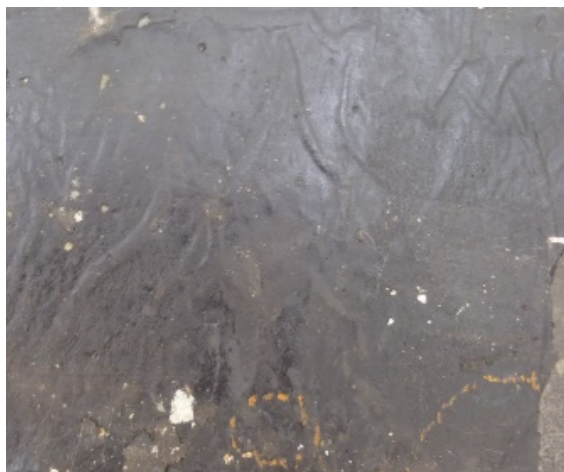


図-7 摩擦試験における水平変位と摩擦係数（水平荷重/鉛直荷重により摩擦係数に換算）の関係（和歌山港防波堤）（コンクリート/アスファルト）

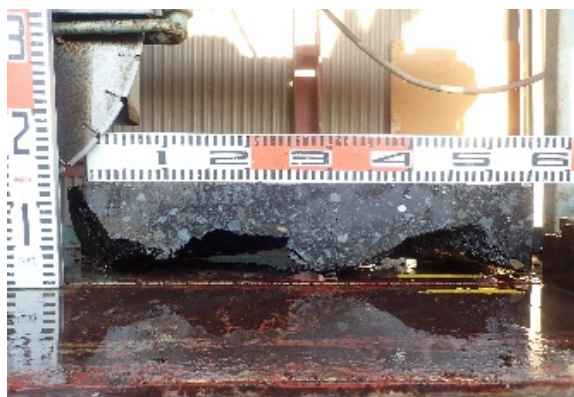


(a) As マットの上面

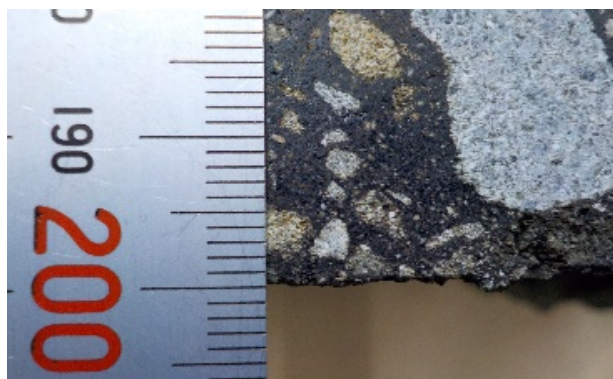


(b) As マットの下面

写真-7 Asマット塊の表面の状況 (高知港)



(a) 全体



(b) 拡大

写真-8 Asマット塊の切断面 (和歌山港)



(a) 高知港



(b) 和歌山港

写真-9 Asマット中の運搬用のワイヤー・鉄筋の状況

したAsマット塊をコンクリートカッターにより切断した後の断面を示す。写真では明瞭ではないが、観察結果によると、アスファルトの色が変わっていたのは、As切断

面上の上側面・下側面ともに、表面のごく一部(1mm以下程度)であった。Asマット内部への海水の浸入は、この変色部分のみに留まっていたと考えられる。

さらに、写真-9には、Asマット塊の中に残存していたワイヤーロープおよび鉄筋（Asマットの運搬時に利用する吊り上げ用）の切断面を示す。ロープおよび鉄筋には腐食の発生は認められず、健全な状態が保たれていたことがわかる。この結果も、マット内部に海水が浸入していないことを支持する結果である。

いと仮定すると、残存厚さの平均値は、当初厚さと同等の80mm程度になると予想される。

表-5に、ノギス計測による残存厚さの計測点数と計測値の平均値を示す。各港の残存厚さの平均値は82～94mmであり、80mmより若干大きめの値を示したが、上記の想定を裏付ける結果であった。

4.4 アスファルトマット塊の残存厚さ

Asマットへの基礎捨石が食い込む量が大きいと、捨石がケーソン底面に直接接触することにより摩擦係数が低下する可能性がある。また、Asマットの欠損・破損の要因になると想定される。このため、Asマットは厚さ80mmで製作し、ケーソン設置後の残存厚さは30mm以上であることを目安に設計されている。実際の残存厚を確認するために、Asマット塊を50mmの水平間隔でノギスを用いて計測した。また、和歌山下津港については、より詳細な厚さや形状を知るために、3Dレーザ計測を実施した(図-8)。

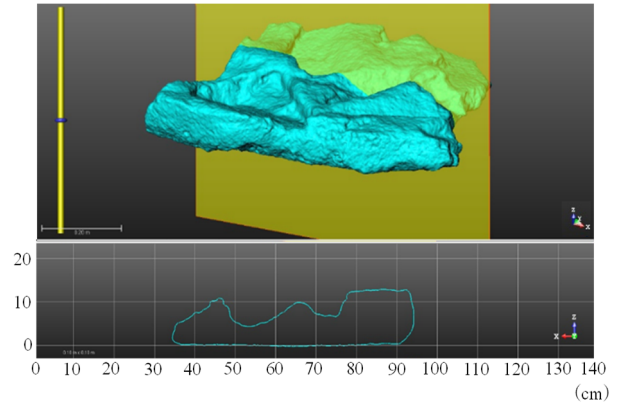


図-8 3Dレーザ計測例

図-9にAsマット塊の残存厚さの計測結果（度数分布、累積分布）を示す。これらの結果、3港湾とも残存厚さは30mmを下回ることなく、設計想定以上の厚さが確保されていた。一方、残存厚さが当初厚さ（80mm）より大きな箇所も多数存在する。これは、捨石がAsマットへ貫入した箇所はマット厚が薄くなるが、薄くなった領域の周辺は、マットの塑性変形によりマット厚さが大きくなるためである。マットの体積変化がな

表-5 Asマット塊の残存厚さの平均値

	和歌山	直江津		高知
		港内側	港外側	
測定箇所数	146	148	147	158
試料平均厚さ (mm)	91.7	88.1	81.8	94.2

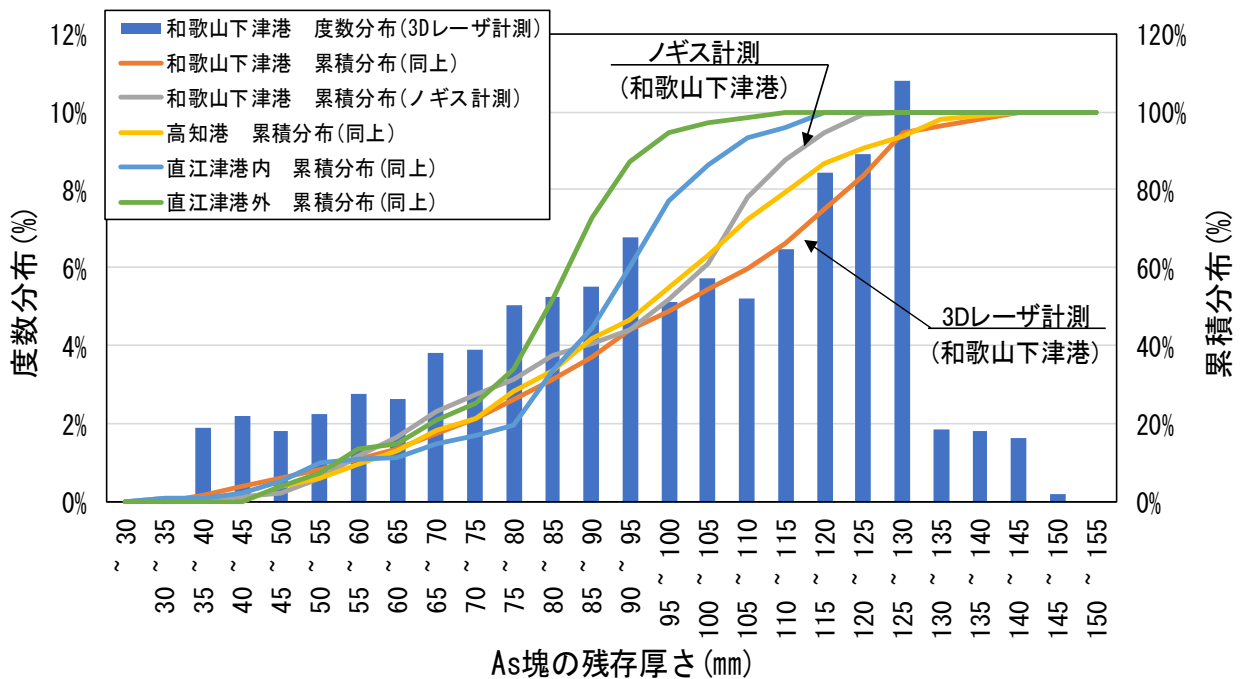


図-9 Asマット塊の残存厚さの度数分布と累積分布

4.5 長期耐久性の評価

本章では、和歌山港での試験片の試験結果に加えて、和歌山港を含む3港で現地のケーソン式防波堤の直下に敷設されていたAsマットを直接採取した実物片を用いた試験結果を示した。

この結果、採取したAsマット塊は捨石がマットに大きくくい込んで変形しているものの、ひび割れや破断はなく、マット内部への海水の浸入も認められなかった。また、和歌山港の試験片と実物片による各種の物理的性状試験の結果には、大きな相違は確認されなかった。実物片の摩擦係数についても、いずれの防波堤の結果も、現行の設計で採用されている摩擦係数の上限値である0.8を大幅に上回る結果であった。

アスファルト混合物の劣化要因としては、酸素、紫外線、熱、水等が考えられるが、Asマットは常に海水中にあり、酸素、紫外線、熱の影響はわずかである。また、無空隙の材料であり、ケーソン直下で様々な荷重履歴を経てもひび割れ等が発生していなかったため、Asマット内部に海水が侵入することがなく、当初の性状がそのまま保たれていたものと考えられる。

以上のことから、実海域の防波堤ケーソンの直下に敷設されていたAsマットは、50年以上の長期耐久性が確保されていると評価される。そして、50年経過後も摩擦増大マットとしての機能を十分に保持していると言える。

5. まとめ

本稿では、摩擦増大用アスファルトマットの長期耐久性を評価するために、これまでに実施してきた2種類の試験結果をまとめた。一つ目の試験は、和歌山港で50年間継続して行われてきた試験片を用いた試験、二つ目の試験は実海域のケーソン式防波堤（和歌山港を含む3港湾）の底面に敷設されていたAsマットを現地で直接採取した実物片を用いた試験である。

これらの供試体を用いた各種試験や採取したAsマット塊の観察結果より、防波堤の断面形状や波浪条件が異なる条件下においても、現地のAsマットの残存厚さは確保されており、かつ物理的性状及び摩擦係数も経年劣化の影響は見受けられず、現地Asマットは50年以上の長期耐久性を有していることが確認された。

なお、本稿で紹介した各種試験結果の詳細データについては、付録Cとして整理した。

(2023年2月15日受付)

謝辞

本稿は、文献2)の執筆内容を日本語化した上で追加情報を追記したものである。原典論文の共著者である国土交通省近畿地方整備局の三村正樹氏、中川耕三氏、和歌山県土整備部の山岸陽介氏、高知県高知土木事務所の野中久和氏、梅原靖司氏、一般財団法人沿岸技術研究センターの佐藤昌宏氏(所属はいずれも原典論文執筆当時)には多大なるご協力を頂いた。また、本研究を行うにあたり国土交通省北陸地方整備局、新潟県にAsマットの採取にご協力頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 加川道男: 重力式構造物の摩擦抵抗増大について, 海岸工学論文集, 第11巻, pp.217-221, 1964.
- 2) M.Miyata, M.Mimura, K.Nakagawa, Y.Yamagishi, K.Ikenaga, H.Nonaka, Y.Umehara, M.Sato, M.Takenobu: Evaluation of Long-term Durability of Friction-Enhancing Asphalt Mat taken from Caisson type Breakwaters onsite, ISOPE(International Ocean and Polar Engineering), 2020
- 3) 久保純一, 平野誠治, 水口陽介: 寒冷海域における摩擦増大用アスファルトマットの長期耐久性試験について, 第65回北海道開発技術研究発表会, 2022.
- 4) 宮田正史, 安達昭宏, 中川耕三, 山岸陽介, 池永啓一, 山中敦志, 梅原靖司, 佐藤昌宏: 実海域のケーソン式防波堤から採取した摩擦増大用アスファルトマットの長期耐久性評価, 第76回年次学術講演会, II-78, 2021.
- 5) 片岡真二, 西宏一, 矢島道夫, 三浦修: ケーソン下面に敷設した摩擦増大のためのアスファルトマットの耐久性について, 海岸工学論文集, 第30巻, pp.643-647, 1983.
- 6) 浜田敏明, 北山斉, 岡良, 中井章, 若杉利彦: 海水中における摩擦増大用アスファルトマットの長期耐久性(30年)について, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.1001-1005, 2001.
- 7) 安達昭宏, 中川耕三, 北澤健二, 山本修司: 50年間海水中暴露した摩擦増大用アスファルトマットの耐久性評価, 土木学会論文集B2(海岸工学), 2020.
- 8) 国土交通省近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所: 令和元年度港湾構造物における摩擦増大用アスファルトマットの長期耐久性能評価業務, 2019.
- 9) 沖縄開発庁沖縄総合事務局開発建設部: 沖縄県那覇港浦添第一防波堤摩擦増大用アスファルトマット耐久性調査報告書, 1998.
- 10) 国土交通省港湾局 監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 公益社団法人 日本港湾協会, pp.493, 2018.
- 11) 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書「摩擦増大用アスファルトマット(KAM)」, 一般財団法人 沿岸技

術研究センター, 2020.

- 12) 宮田正史, 長尾毅, 釣哲之, 清水庸介, 田崎邦男: 防波堤アスファルトマットの集中荷重分散効果に関する実験的研究. 海岸工学論文集, 49, pp.781-785, 2002.
- 13) 下迫健一郎, 増田慎太郎, 宮間俊一: 混成防波堤の滑動時における捨石マウンドの挙動に関する基礎実験. 海岸工学論文集, 48, pp.896-900, 2001.
- 14) 岸田哲哉, 星野太, 田崎邦男, 岩前伸幸, 秋山義信, 池谷毅.). 摩擦増大用アスファルトマットによる防波堤の津波に対する安定性に関する実験. 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 69(2), I_467-I_472, 2013.
- 15) 国土交通省港湾局: 防波堤の耐津波設計ガイドライン, 参考資料Ⅱ, pp.12, 2013.
- 16) 板倉忠三, 菅原照雄: アスファルト利用最近の開発, 石油学会誌第7巻第8号, pp.534-538, 1964.
- 17) 佐藤勝久, 八谷好高, 阿部洋一: アスファルトコンクリートの老化性状, 港湾技術研究所報告, 第27巻, pp.185-209, 1988.
- 18) 社団法人日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧, 第Ⅲ章試験編, pp.336-343, 2019.
- 19) 社団法人アスファルト同業会: アスファルト及びその応用, pp.46, 1965.応用, pp.46, 1965.