

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

安達 昭宏¹・中川 耕三²・北澤 健二³・山本 修司⁴

¹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
(〒651-0082 兵庫県神戸市中央区小野浜町7-30)

E-mail: adachi-a86s4@mlit.go.jp

²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
(〒651-0082 兵庫県神戸市中央区小野浜町7-30)

E-mail: nakagawa-k86s5@mlit.go.jp

³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
(〒651-0082 兵庫県神戸市中央区小野浜町7-30)

E-mail: kitazawa-k86s3@mlit.go.jp

⁴正会員 一般財団法人 沿岸技術研究センター (〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2)

E-mail: s_yamamoto@cdit.or.jp

摩擦増大用アスファルトマットは、防波堤などの重力式構造物の底面に設置して滑動抵抗力を増大することで、工費と工期の縮減に寄与する材料である。しかしながら、供用中は不可視部分となるため調査が難しく、今後の設計耐用期間の評価が難しい。本研究は、海水中におけるアスファルトマットの物性変化の有無を調査するため、昭和44年から、供試体を海水中に浸漬して試験を行っており、今回暴露開始から50年経過した試験を実施したものである。その結果、供試体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水中で50年以上の長期耐久性があることを確認した。

Key Words : friction-increasing asphaltmat, durability, coefficient of friction, exposure in seawater

1. はじめに

摩擦増大用アスファルトマット（以下、アスファルトマット）は、防波堤ケーソン等の重力式構造物の底面に設置し、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り、これまで、240 万 m²以上の施工実績がある。その滑動抵抗力増大（安全率向上）の効果は、2011 年の東日本大震災時の津波に対しても、防波堤の安定を保ったことで確認されている¹⁾。

アスファルトマットは、昭和 38 年に、有田港（現和歌山下津港）防波堤にわが国で初めて採用された。一般に、ケーソンと捨石の設計摩擦係数は 0.6 であるが、アスファルトマットを採用することで、摩擦係数を 0.7 としケーソン幅を縮小し、全体で約 10 %の工費削減に寄与した²⁾。しかし、ケーソン設置後の供用中は不可視部分となるため、調査や設計耐用期間の検討が難しく³⁾、その長期的な耐久性の評価に課題があった。そこで、海水中におけるアスファルトマットの物性変化の有無を調査するため、各機関で耐久性に関する試験が行われてきた⁴⁾⁵⁾。筆者らにおいても昭和 44 年から、水中に浸漬した供試体を定期的に引き揚げ、物理的性状試験を行って

きた。調査開始から 30 年経過時の研究結果は、浜田ら⁶⁾によって報告されており、30 年以上の耐久性を有することが確認されている。本研究は、暴露開始から 50 年が経過した供試体の物理的性状試験及び摩擦試験を実施して性状を確認し、これまでの結果と共に、アスファルトマットの海水中での長期耐久性を評価するものである。

2. 試験概要

各種試験用に成型した供試体を、通水性を有するコンクリート製の蓋付き箱（写真-1）に保管し、和歌山下津



写真-1 供試体を保管するコンクリート製箱

港本港区に昭和44年（1969年）に沈設して海中暴露を開始した。

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年経過時に供試体を引き揚げて，供試体の目視観察と物理的性状試験を行った。また，30年，50年経過時は摩擦試験も実施した。

(1) 試験項目及び条件

試験に先立ち，供試体の寸法をノギスにて 0.1 mm まで測定した。試験は 0～30 年経過時と同様の試験項目と条件，方法で行った。試験項目及び条件を表-1 に示す。物理的性状試験（曲げ，圧縮，せん断，引張）の試験温度等の条件は，参考文献 7) 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している。

物理的性状試験では，測定した最大荷重と最大荷重時の変位量から歪みとスチフネスを算出し，また，針入度・軟化点試験の結果から針入度指数を算出する。

(2) 試験方法

a) 比重試験

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，式(1)により算出する。

$$\text{比重} = \frac{\text{空中重量}}{\text{空中重量} - \text{水中重量}} = \frac{\text{空中重量}}{\text{水の単位体積重量} \times \text{体積}} \quad (1)$$

(水中置換法)

b) 曲げ試験

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 100mm）にセットし，所定の変位速度（20mm/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する。曲げ試験状況を写真-2 に示す。

c) 圧縮試験

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）で載荷して，最大荷重と最大

荷重時の変位量を測定する。

d) せん断試験

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する。

e) 引張試験

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する。

f) 針入度・軟化点試験

アスファルトの回収は，300 mm×300 mm×厚 40 mm の供試体から，アブソン抽出法⁸⁾により行う。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。ここで，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(2)，(3)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。

$$\text{針入度指数}(PI) = \frac{30}{1 + 50A} - 10 \quad (2)$$

但し，

$$A = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{\text{軟化点}(^{\circ}\text{C}) - 25} \quad (3)$$

P_{25} : 針入度(25℃)

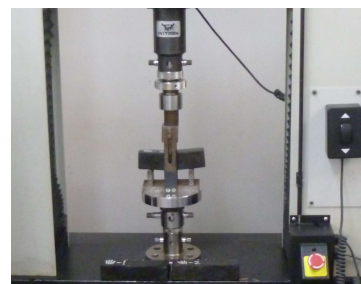


写真-2 曲げ試験状況

表-1 試験項目及び条件

試験項目	試験条件				
	供試体寸法 (mm)	個数	温度 (℃)	変位速度 (mm/min)	その他
比重試験	40×40×160	3	20	—	
曲げ試験	40×40×160	3	20	20	スパン: 100 mm
圧縮試験	40×40×160	3	20	20	加圧面積: 40 mm×40 mm
せん断試験	40×40×160	3	10	10	加圧面積: 40 mm×40 mm
引張試験	40×40×170	3	10	10	供試体中央部断面; 40 mm×40 mm
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（環球法）
摩擦試験	150×150×40 (300×300×厚 40 から切出し)	6 回	15	60	試験環境: 水中 上載荷重: 294 kN/m ² (30 tf/m ²)

g) 摩擦試験

摩擦試験は防波堤ケーソンにおける上下の位置を勘案し、コンクリート(上側)とアスファルトマット(下側)、アスファルトマット(上側)と碎石(下側)の2ケースの境界面について、各3回行う。試験装置を写真-3に示す。碎石板、コンクリート板は30年経過時と同一のものを使用した。アスファルトマットは300 mm×300 mmの供試体から150 mm×150 mmに切り出した。

構造物の滑動に対する安定性に用いられる摩擦係数は静摩擦係数であるから、本研究における摩擦係数は、静摩擦係数とする。また、アスファルトマットの摩擦試験には純粋な摩擦抵抗の外に、ほぞ効果によるせん断抵抗、弾塑性変形による抵抗、付着抵抗の成分が含まれるが、ここでは、これまでと同様に静摩擦係数として表記する。

試験手順を以下に示す。

- ・下側供試体(アスファルトマットまたは碎石板)を試験装置内の水槽に設置し、その上に上側供試体(コンクリート板またはアスファルトマット)を載せ、上載荷重 392 kN/m² (40 tf/m²) をかける。なお、アスファルトマットは、試験前に所定の温度(15℃)に養生しておく。
- ・載荷開始から1時間後に上載荷重を 294 kN/m² (30 tf/m²) にし、上側供試体(コンクリート板またはアスファルトマット)を変位(60 mm/min)させ、その時の水平荷重及び変位量を記録する。
- ・水平荷重の最大値と載荷時の上載荷重から静摩擦係数を式(4)により算出する。

$$\text{静摩擦係数} = \frac{\text{水平荷重 (最大値)}}{\text{載荷時の上載荷重}} \quad (4)$$

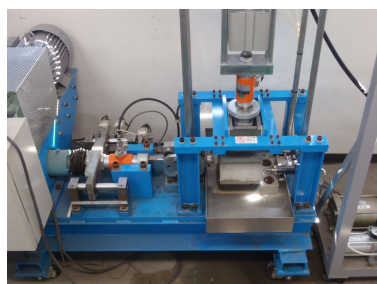


写真-3 摩擦試験装置

(3) 摩擦試験機の相関性の確認

本研究において使用する試験機は、25 年経過以降の物理的性状試験及び針入度・軟化点試験については、同じ試験機を使用している。しかし、摩擦試験に使用する試験機(以下、新試験機)は、30 年経過時に使用した試験機(以下、旧試験機)とは異なっており、新旧試験機の相関性を確認する必要がある。

そこで、新試験機を使用して、旧試験機で行った摩擦試験時と同様の物理的性状を有するアスファルト合材を用いて、同一試験条件で摩擦試験を行った。試験は、コンクリート板とアスファルトマット間、アスファルトマットと碎石板間について、水平荷重の載荷速度と水平荷重をかけるまでの鉛直荷重の上載時間を変化させて行った。試験結果を図-1に示す。新旧試験機の結果は、ほぼ 1:1 の関係であり、両者に相関性があることを確認した。

3. 試験結果及び長期耐久性評価

(1) 試験結果

今回の試験結果と0年～30年経過時の試験結果一覧を表-2に示す。また、比重試験結果を図-2に、物理的性状試験(曲げ、圧縮、せん断、引張)の強さの結果を図-3～図-6に、針入度・軟化点試験及び針入度指数の結果を図-7～図-9に、摩擦試験の結果を図-10、図-11に示す。

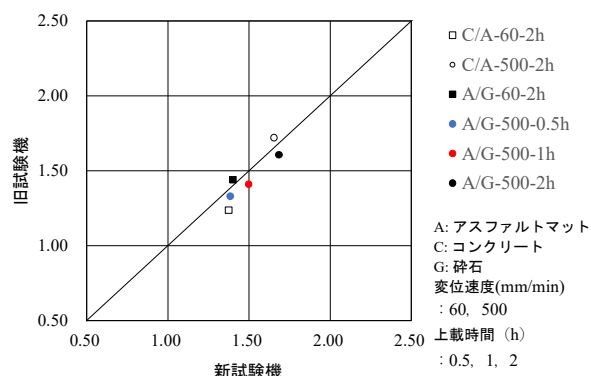


図-1 新旧試験機を使用した摩擦試験結果

表-2 試験結果一覧(上段: 50年経過時(平均値), 下段: 0～30年間の測定値)

項目	試験結果				項目	試験結果	項目		試験結果
	強さ (N/mm ²)	変位量 (mm)	歪み (%)	スチフネス (N/mm ²)					
曲げ試験	4.5	3.7	8.9	50.3	比重試験	2.36	摩擦試験	コンクリート板/ アスファルトマット	1.11
	3.4～5.9	2.8～5.0	5.7～17.9	22.9～89.5		2.32～2.40		アスファルトマット /碎石板	1.15～1.21
圧縮試験	4.5	4.4	11.0	41.0	針入度試験	23			1.41
	4.2～7.7	2.8～5.9	7.0～13.8	31.9～87.8		21～35			1.23～1.43
せん断試験	2.7	2.7	6.5	41.0	軟化点試験	70.5			
	2.4～4.3	1.4～3.8	3.4～9.5	25.3～126.5		65.0～75.5			
引張試験	1.8	5.9	14.9	11.9	針入度指数	1.1			
	1.1～2.8	1.0～9.3	2.5～23.3	11.0～108.0		0.7～1.7			

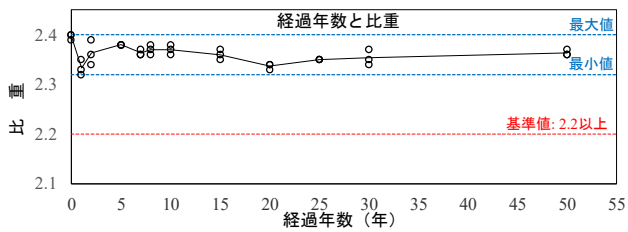


図-2 比重試験

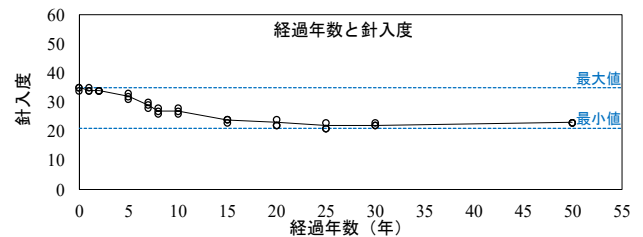


図-7 針入度試験

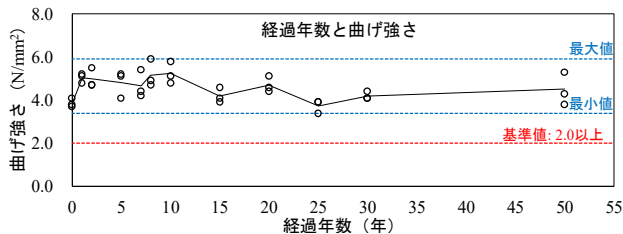


図-3 曲げ試験

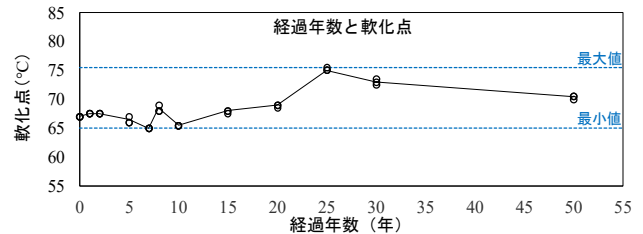


図-8 軟化点試験

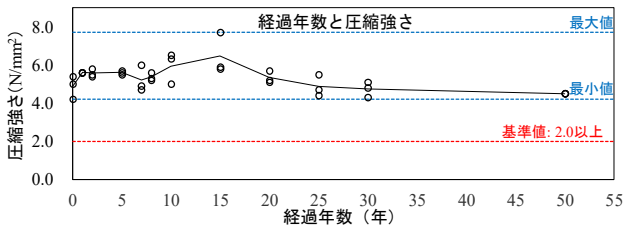


図-4 圧縮試験

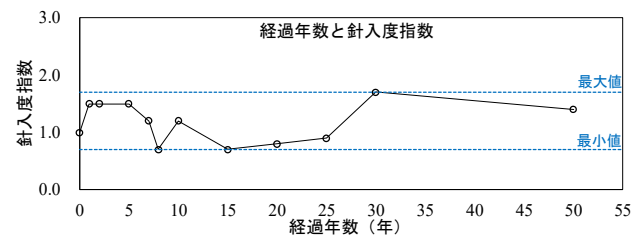


図-9 針入度指数

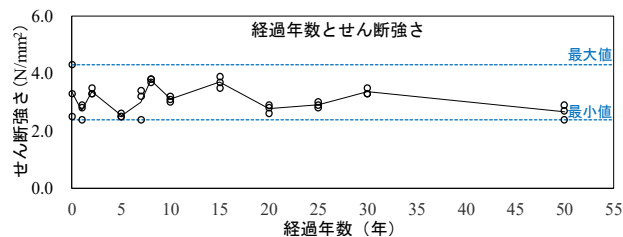


図-5 せん断試験

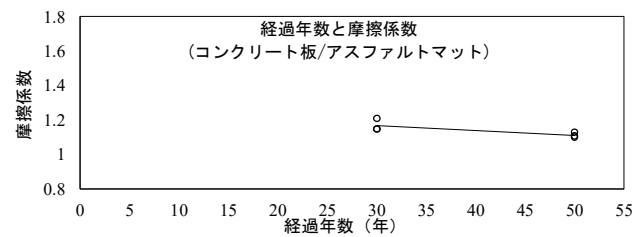


図-10 摩擦試験 (コンクリート板/アスファルトマット)

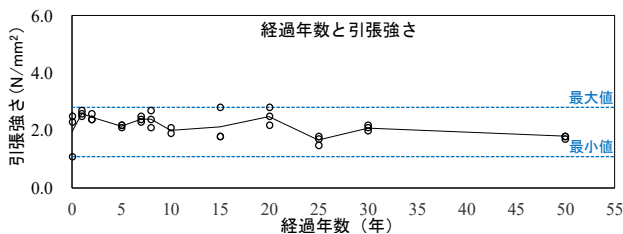


図-6 引張試験

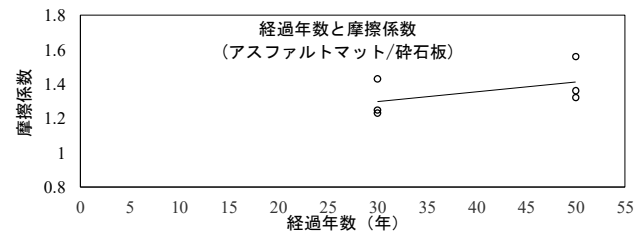


図-11 摩擦試験 (アスファルトマット/砕石板)

図中の最小値，最大値は，0～30年経過時の最小値と最大値である。また，基準値は，「港湾の施設の技術上の基準・同解説」¹⁰⁾（以下，港湾の技術基準）に定められた，摩擦増大用アスファルトマットの判定基準値である。

a) 供試体外観

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。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を写真-4に示す。



写真-4 取り出した供試体

b) 比重及び物理的性状試験

比重試験及び物理的性状試験（曲げ・圧縮・せん断・引張）の結果は、全ての項目において、0～30年間の試験の最小値と最大値の範囲であった。また、比重・曲げ強さ・圧縮強さの各試験結果は、港湾の技術基準の判定基準値を満足していた。

曲げ試験のスチフネスの結果を図-12に示す。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¹⁾、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、他の試験（圧縮、せん断、引張）においても同様であった。

c) 針入度・軟化点試験

針入度・軟化点試験結果は、0～30年の試験の最小値と最大値の範囲であった。

針入度は初期値の35（平均値、以下同じ）から、経年とともに小さくなる傾向を見せ、20年以降は21～24の範囲で安定している。今回の結果は23であり、20年以降と同様の値であった。

軟化点試験の結果は70.5℃であった。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と考えられる。

d) 摩擦試験

摩擦試験は、30年経過時と今回の2回行っている。

コンクリート板とアスファルトマット間のケースは、30年経過時の静摩擦係数 μ ：1.17に対して、今回は μ ：1.11であり、ほぼ同等の値であった。試験状況を写真-5に示す。

アスファルトマットと砕石板間のケースは、30年経過時の μ ：1.30に対して、今回は μ ：1.41であった。今回の方が若干大きな値となっているが、アスファルトマットと砕石板間のケースは、既往試験でもばらつきが大きいことを考慮すれば、試験誤差の範囲であり、同等の結果であったと考えられる。

(2) 長期耐久性の評価

今回引き揚げた供試体は、多少の変形のみでひび割れ等は無く、外観上は問題がない状態であった。

比重試験の結果は、2.35前後で安定し、また、物理的

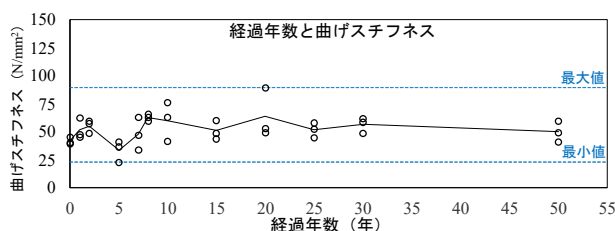


図-12 曲げスチフネス

性状試験の結果は、0～30年間の試験の最小値と最大値の範囲に収まっていた。また、歪みやスチフネスに経年的な変化は認められなかった。

針入度は暴露開始から減少傾向（20年以降は安定）であり、軟化点はばらつきはあるが、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¹⁾。本試験の針入度指数は0～30年で0.7～1.7の範囲にあり、今回は1.1であった。このことから、アスファルトマット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。

摩擦増大用アスファルトマットにとって重要な機能を評価する指標である摩擦係数は30年経過時と同等の値であり、低下の傾向は見られなかった。これまで行われた各ケースの静摩擦係数は、すべて1.10以上の結果で、港湾の技術基準に示された静止摩擦係数の特性値「摩擦増大マットと捨石」の0.75を十分に上回る値であった。また、同特性値の「捨石と捨石」の0.80を大きく上回っているため、波浪等によってケーソンが滑動する場合は、アスファルトマットの上面、下面ではなく、捨石間で滑動する。これらのことから、アスファルトマットは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。

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。アスファルトマット供試体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、無空隙かつひび割れが発生しない合材であるため、アスファルトマット内部に海水が侵入することはないと思われる。

また、寒冷地における長期耐久性試験において、20年経過後に物理的性状や摩擦係数の経年変化が小さく、十分な耐久性を保持していること²⁾、30年経過後に摩擦係数を測定し、沈設初期の性状をほぼ維持していること¹⁾が報告されており、今回の試験結果と同様な結果が示されている。

今回の試験結果は、これまでの30年間の結果と同等

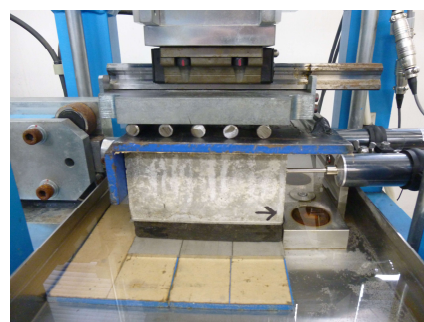


写真-5 摩擦試験状況

（コンクリート板とアスファルトマット間）

であり、有意な変化は見られなかったことから、海中暴露したアスファルトマットは、50年経過後も摩擦増大用マットとしての機能を十分に保持しており、50年以上の長期耐久性を有していると評価された。

4. おわりに

防波堤ケーソン等の下面に設置されたアスファルトマットは、供用中は不可視部分となり、調査や性状の確認ができない。そこで、昭和44年から、海水中に暴露した供試体を使用して試験を行い、物性変化の有無を確認してきた。結果は、50年経過後も性状に有意な変化は見られず、アスファルトマットの長期耐久性が確認された。本研究の結果と海水中という供用環境を考慮すれば、今後の経年による劣化の進行も遅いものと考えられる。したがって、供用中の防波堤ケーソン等の改良設計や移設時の設計においても建設時の物理的性状や摩擦係数を用いることが可能と考えられた。

最後に、本研究では、コンクリート製の箱に保管した供試体を使用した。ケーソン下面等で供用されるアスファルトマットには、ケーソン本体の自重や波浪によって、常に荷重が作用している。供用中のケーソンから採取したアスファルトマットを使用した研究は、片岡ら（17年経過）⁴⁾、井元ら（7年経過）⁵⁾によって報告され、海中暴露した供試体と同様に耐久性が確認されている。今後は、さらに長期間供用したアスファルトマットの耐久性の確認が待たれるところである。

謝辞：本研究を実施するにあたり、福手勤教授（元東洋大学）、宮田正史港湾施設研究室長及び坪川将丈空港施設研究室長（国土技術政策総合研究所）、伊豆太特別研究主幹及び川端雄一郎主任研究官（港湾空港技術研究所）から有益なご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 山本芳生, 山本修司, 宮田正史, 竹信正寛: 港湾施設の改良設計に係る課題・問題点の整理, 沿岸技術研究センター論文集, No.16, pp.5-12, 2016.
- 4) 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.
- 5) 井元忠博, 窪内篤: 寒冷海域における摩擦増大用アスファルトマットの耐久性, 北海道開発土木研究所月報, No.605, pp.16-25, 2003.
- 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) 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.
- 8) 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.
- 9) 財団法人沿岸技術研究センター: 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」, pp.1, 2015.
- 10) 社団法人日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), pp.493, 2018.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 上久保勝美, 関口浩二, 山本泰司: 寒冷海域における摩擦増大用アスファルトマットの耐久性について, 北海道開発局第56回(平成24年度)国土交通省北海道開発技術研究発表会, 2013.

(Received March 16, 2020)

(Accepted July 27, 2020)

DURABILITY EVALUATION OF FRICTION-INCREASING ASPHALT MATS EXPOSED IN SEAWATER FOR 50 YEARS

Akihiro ADACHI, Kozo NAKAGAWA, Kenji KITAZAWA, Shuji YAMAMOTO

Friction-increasing asphalt mats are installed on the base of gravity structures such as breakwaters to increase slip resistance, thereby helping to reduce the costs and time required for construction. However, asphalt mats are difficult to inspect because they are not visible during service, and future evaluations of service life of the design are challenging. In this study, an experiment in which specimens are immersed in seawater has been ongoing since 1969 to examine whether the physical properties of asphalt mats change in seawater. Tests were conducted 50 years after the start of exposure. Results confirmed that the specimens did not age, and friction-increasing asphalt mats have long-term durability of more than 50 years in seawater.