

貯蔵船係留用防舷材の供用限界年数等に関する検討

大村厚夫*・山本修司**・岡田 理***・佐藤勇二****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査役

** (一財) 沿岸技術研究センター 参与

*** (一財) 沿岸技術研究センター 主任研究員

**** 前 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 備蓄企画部エンジニアリングチーム サブリーダー

白島及び上五島の両洋上国家石油備蓄基地における貯蔵船係留用大型ゴム防舷材は、供用開始から24~31年経過しており、一般的なゴム防舷材の更新時期とされる20~30年程度を超過しつつあり、経年劣化による取替を検討すべき時期に来ている。本検討では、実機防舷材及び促進老化した縮尺モデルの圧縮試験・物性試験及びハイブリッドシミュレーション試験等を行い、防舷材の供用限界年数を推定した。本業務は平成25年度~29年度に亘って実施した。

キーワード：海上貯油施設，貯蔵船係留用ゴム防舷材，取替基準，劣化予測，供用限界年数

1. はじめに

両洋上国家石油備蓄基地は、防波堤によって囲まれた泊地に原油タンクとなる貯蔵船を継続的に係留する特殊な施設である。この係留システムに採用されている定反力型の中空円筒型ゴム防舷材は、外力エネルギーによって生じる船体動揺を吸収して、貯蔵船と係留施設の損傷を防止すると同時に、貯蔵船を所定位置に保持する重要な設備である。

このため、ゴムの“硬化”による最大反力の超過やゴムの“軟化”による貯蔵船水平変位の超過は、供用期間中の重要な監視項目であり、維持管理の一貫として圧縮試験が実施されている。なお、貯蔵船の動揺による作用は、「数値シミュレーションにより算定された防舷材最大反力の1.5倍とすること」とする技術基準¹⁾を順守して係留ドルフィンが設計されている。

表-1 洋上備蓄基地の概要

	上五島備蓄基地	白島備蓄基地
面積	陸域：約26ha 海域：約40ha	陸域：約14ha 海域：約60ha
備蓄方式	洋上タンク方式	洋上タンク方式
備蓄容量	約88万k ^{リットル} ×5隻	約70万k ^{リットル} ×8隻
貯蔵船	L390m×B97m×H27.6m	L397m×B82m×H25.4m
防舷材	横係留3000H：8基/隻 縦係留2250H：4基/隻	横係留2500H：12基/隻 縦係留2500H：4基/隻
完成	1989年オイルイン	1997年オイルイン

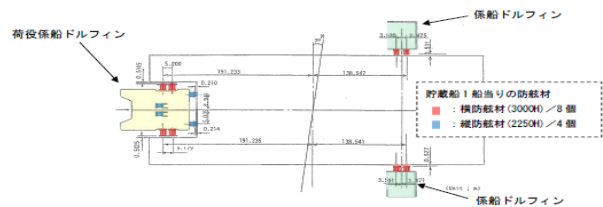


図-1 上五島備蓄基地係留システムのイメージ



図-2 白島備蓄基地係留システムのイメージ

2. 係留用防舷材

2.1 中空円筒型ゴム防舷材の特徴

貯蔵船の係留に使用されている防舷材は、定反力型ゴム防舷材で、最大歪み35%以下の変形範囲内で使用することが設計で規定されている。なお、備蓄基地建設時の設計では、防舷材性能の経年変化を「1.0~1.05」、トータルの変動幅を「0.80(軟化側)~1.15(硬化側)」と見込んでいた。

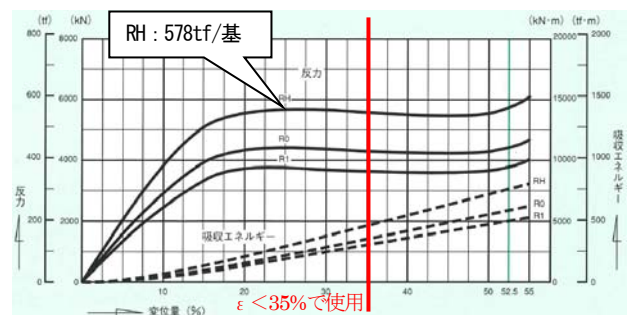


図-3 中空円筒型防舷材の性能曲線

表-2 係留用防舷材の設計変動幅の内訳

項目	設計変動幅	備考
製造誤差 (組合わせ後の係留点毎)	0.95~1.05	個別製造誤差は±10%
動的特性	1.0	
繰返し性状	0.9~1.0	
温度特性	0.95~1.04	15°C~40°Cの設定
経年変化	1.0~1.05	
TOTAL	0.80~1.15	1.05×1.04×1.05

2.2 設計変動幅を超過した防舷材のリスク³⁾

防舷材の硬化係数(=経年変化後の反力・歪み関係/納入時の反力-歪み関係)を、変動幅0.7~1.25で変化させた場合の係留シミュレーションにおいて、防舷材最大反力と硬化係数との関係は、1次関数となることを事前に確認している。このことから、防舷材の“経年変化”が硬化側の1.05倍を超過した場合には、防舷材反力が当初設計反力を上回り、「当初設計で確保されていた数値シミュレーションの不確定要因に対する1.5倍割増し分」の余裕代が低下することとなる。

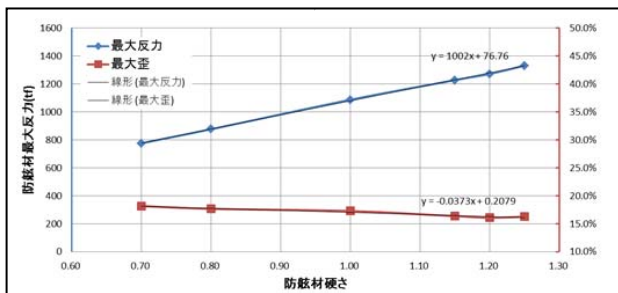


図-4 最大反力-硬化係数関係(上五島係留点II・半載)

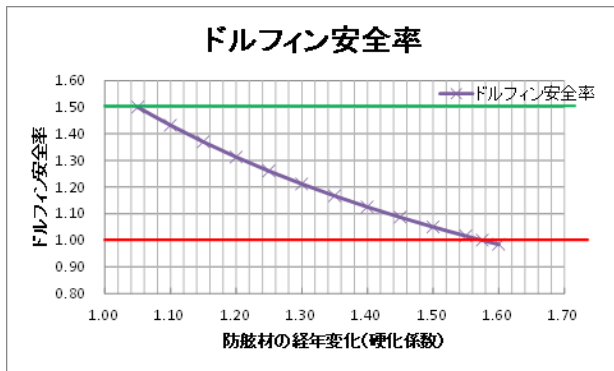


図-5 防舷材の経年変化と係留ドルフィン安全率

表-3 経年変化と設計安全率の関係

防舷材の変動幅			合計変動幅	ドルフィン安全率
経年変化	製造誤差	温度特性		
1.05	1.05	1.04	1.147	1.50
1.10	1.05	1.04	1.201	1.43
1.20	1.05	1.04	1.310	1.31
1.30	1.05	1.04	1.420	1.21
1.40	1.05	1.04	1.529	1.13
1.50	1.05	1.04	1.638	1.05
1.575	1.05	1.04	1.720	1.00

3. 検討内容

3.1 検討内容と検討フロー

既往の実機防舷材の圧縮試験において、最大反力の増大傾向が実測されたため、この硬化傾向の実測と原因の分析、FEM 解析による再現、ハイブリッド(HB)シミュレーションによる作用漸増過程の最大反力の確認を行った。以下に主要試験項目と硬化係数による「防舷材の供用限界年数」の推定フローを示す。

表-4 主要試験項目一覧表

主要試験項目	数量
1. 実機防舷材の圧縮試験 セル型 2500H (白島) セル型 3000H (上五島) セル型 2250H (上五島)	全 15 基
2. 実機防舷材の解体ゴムシート試験: 破断伸び・引張強さ・モジュラス、硬度	実機解体 2ブロック
3. FEM 解析: 解体ゴムのパラメータで特性を再現	3タイプ
4. 100H 縮尺モデルの促進老化試験: 圧縮試験, 事前圧縮 (10・15・40%歪み) の硬化確認	48 試験体
5. ハイブリッドシミュレーション試験: 200H 縮尺モデルを促進老化して、漸増する風・波を作用	8 試験体

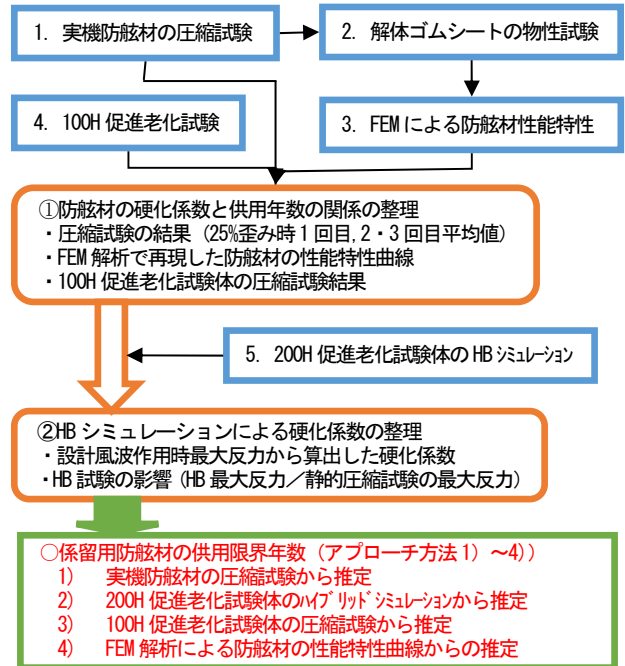


図-6 供用限界年数の算定フロー

3.2 実機防舷材の圧縮試験結果³⁾⁴⁾

実機防舷材は、25%歪みで最大反力を示し、45%歪み付近まで定反力が継続する特性を保持している。また、連続した3回を1セットとする圧縮試験において、実機防舷材の1回目の反力値は、前回の圧縮試験からの放置期間で変化することが新たに判明した。

一方、2・3回目の反力の平均値は、放置期間の影響が小さく、ゴムの経年変化による硬化傾向を安定的に捉えていることが確認された。これを踏まえ、

硬化係数=実機反力/初期反力、 $\epsilon=25\%$ 、 23°C で整理し、硬化係数を「経年変化の硬化係数の限界値=1.575」以下の範囲に抑えることを、防舷材供用期間中の必要条件の目安と想定した。

なお、1回目反力は2・3回目反力平均値の1.3倍程度と大きくなるため、この発現の有・無をハイブリッドシミュレーション試験で模擬して確認した。

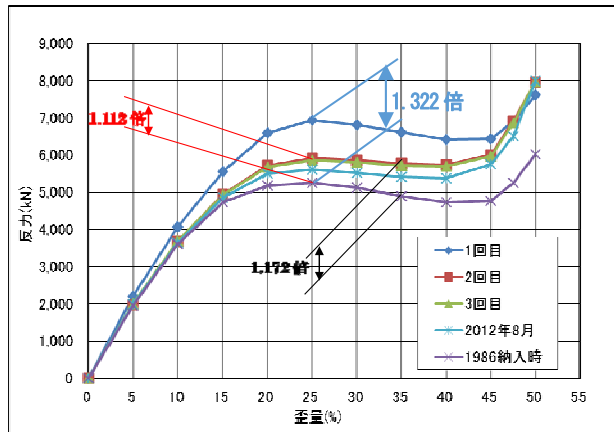


図-7 3000Hの圧縮試験結果(2014年4月)の例

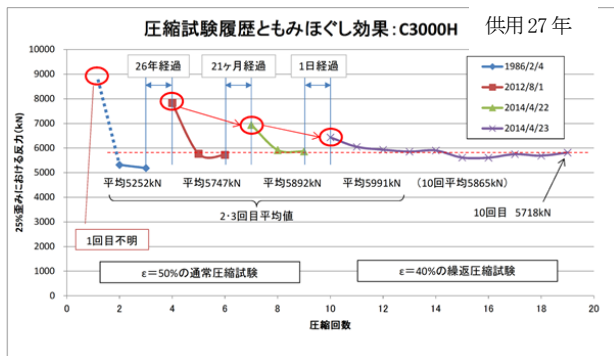


図-8 圧縮試験履歴の25%歪み反力への影響の例

3.3 実機防舷材の解体ゴムシートの試験結果

実機防舷材の中空円筒部は肉厚が500mmあるため、表面と内部とで経年劣化の程度に差があることが想定された。これを確認するため、実機防舷材からブロック状にゴムを切り出し、これを深さ毎にスライスしたダンベル型試験体で物性試験を実施した。

表-5 防舷材ゴムの材質基準

試験項目		基準値	
物理試験	老化前	引張強さ	15.7 N/mm ² 以上
		伸び	300 %以上
		硬さ	84 度以下
		圧縮永久ひずみ	30 %以下
	老化後	引張強さ	老化前値の80%以上
		硬さ	老化前値の+8度以内

引張強さは、外皮表面付近に低下が見られるが、本体ゴム内での低下はほとんど見られなかった。一方、破断伸びは、外皮部分の低下がきわめて大きく、本体ゴムにおいても当初の350%から250%以下まで大きく低下している。また、本体ゴム硬度は10程度の増加、100%モジュラスでは3割程度の増加が見られた。

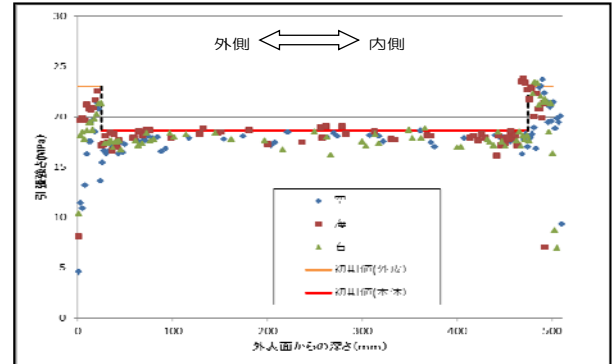


図-9 3000H(供用27年)の引張強さの深さ方向分布

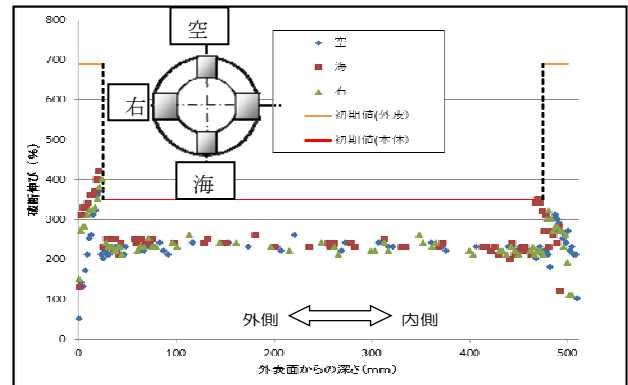


図-10 3000Hの破断伸びの深さ方向分布

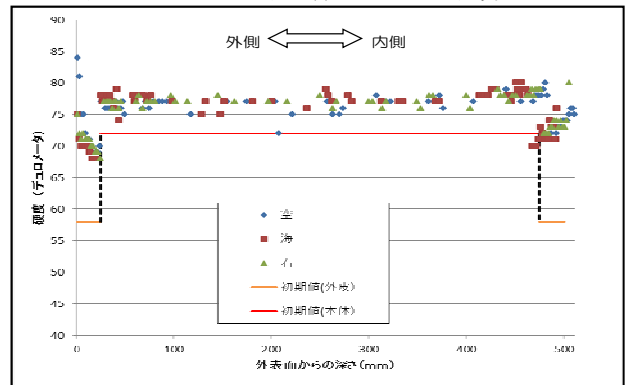


図-11 3000Hの硬度の深さ方向分布

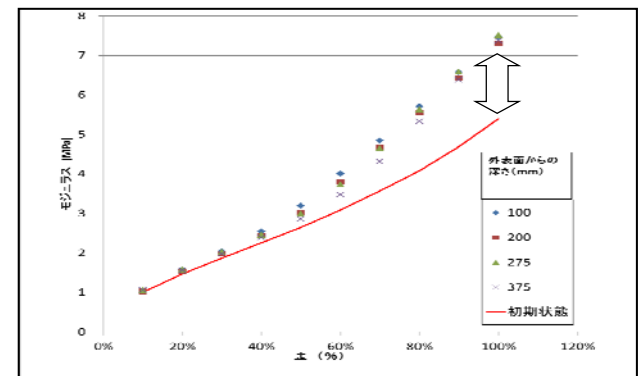


図-12 3000Hの深さ別引張特性(0~100%モジュラス)

4. 防舷材の供用限界年数の検討²⁾

4.1 ハイブリッドシミュレーションによる方法

(1) ハイブリッドシミュレーション

台風時に漸増する風・波浪の長時間作用による防舷材の繰返し特性・クリープ現象を反映した複雑な挙動を再現するために、数値計算と200H縮尺モデルの圧縮試験機を組合せた試験方法である。促進老化年数0年～70年の縮尺モデルを試験機に組込むことにより、経年劣化した防舷材の载荷回数に依存するヒステリシス曲線の影響を“係留シミュレーション”で考慮することが可能になる。

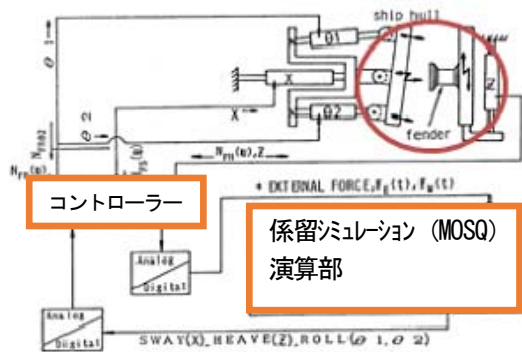


図-13 ハイブリッドシミュレーション試験機の構成

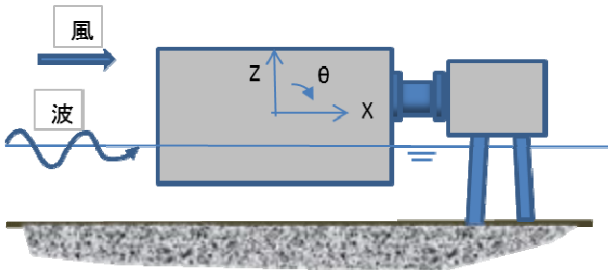


図-14 ハイブリッドシミュレーションモデルのイメージ

(2) ハイブリッドシミュレーションの検討条件

作用の漸増過程では1ステップあたり1時間として、台風接近時を模して5時間までのステップで風速・波高を漸増させ、5～8時間を設計相当外力の作用ステップとする方法を採用した。

表-6 ハイブリッドシミュレーションにおける作用漸増ステップ

時間 (h)	風速 (m/s)	波高 (m)	周期 (s)	潮流 (ノット)	備考
0～1	20	0.4	10	0.257	
1～2	25	0.5	10	0.257	
2～3	30	0.55	10	0.257	
3～4	35	0.60	10	0.257	
4～5	40	0.65	10	0.257	
5～6	44	0.68	10	0.257	空載の条件
6～7	48	0.76	10	0.257	
7～8	51	0.83	10	0.257	半載の条件

(3) ハイブリッドシミュレーションの実施結果

促進老化させた200Hを使用してハイブリッドシミュレーションを行い、暴風時の最大反力を求め、硬化係数を算出した。

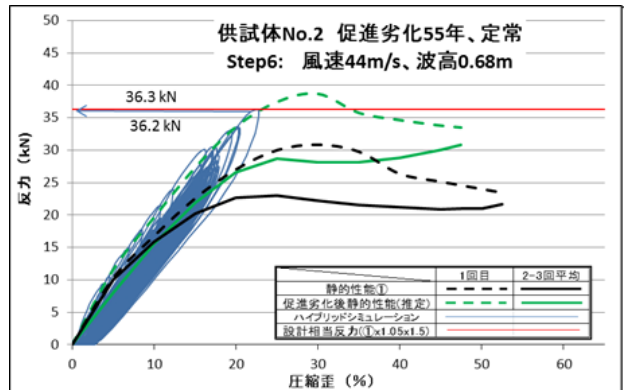


図-15 HBシミュレーションの反力軌跡

表-7 HBシミュレーションの結果とHBの影響

換算年数	①圧縮試験による硬化係数	②HBシミュレーションによる硬化係数	HBの影響 ②/①
0年	1.0000	1.1341	1.134
20年	1.0793	1.4106	1.307
40年	1.1478	1.5318	1.335
55年	1.1844	1.5701	1.326
70年	1.2211	1.6010	1.311

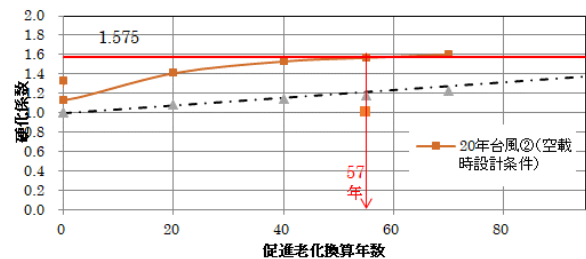


図-16 硬化係数と促進老化換算年数の関係

4.2 実機防舷材の圧縮試験による方法

(1) 実機防舷材圧縮試験による硬化係数

平成29年度までに圧縮試験を行った実機防舷材は、全部で13基あり、納品時を除いて19回の試験結果がある。25%歪み時の2・3回目反力平均値から算出した硬化係数と供用年数の関係を示す。なお、同一防舷材の試験値については、線で結んで示している。

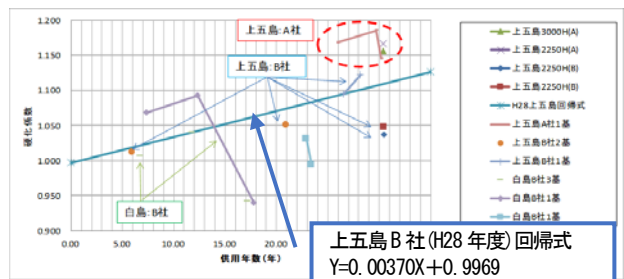


図-17 供用年数と硬化係数の関係

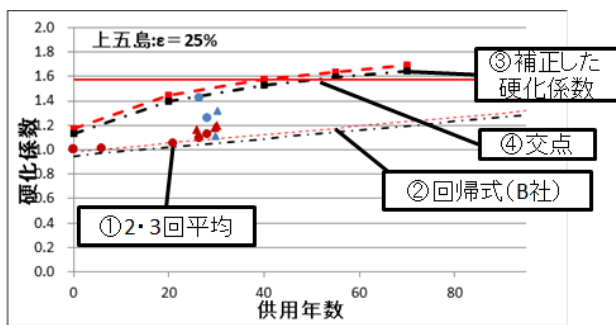
実機防舷材の硬化係数には、A社とB社に差異が見られた。また、B社防舷材の硬化係数と比較すると、上五島備蓄基地防舷材>白島備蓄基地防舷材となっている。

(2) 上五島 3000H (B社) の経年劣化

上五島 3000H(B社) の硬化係数と供用年数の関係を以下に示す。この結果、回帰式中央値及び99%上限値は以下の様になった。

- ・回帰式中央値： $Y=0.00368X+0.997$
- ・99%信頼区間上限値： $Y=(0.00368X+0.997)+0.0328$

HB シミュレーションの結果から、圧縮試験 1 回目に相当する高い反力が実測されることが判明したため、“HB の影響”を掛けて再計算した結果が上方の補正プロットである。この結果、上五島 3000H(B社) 防舷材の供用限界年数は、回帰式中央値で 51 年、信頼区間 99%上限値で 41 年となった。



防舷材	係数	実験試験結果		回帰式・HB影響	
		2-3回平均の硬化係数 (35%)	1回目の反力係数 (35%)	99%上限(1)×ハイブリッド効果③	回帰式(2)×ハイブリッド効果④
上五島3000H(A社)					
上五島3000H(B社)					
99%上限					
回帰式					

図-18 上五島 3000H (B社) の硬化係数の経年変化

4.3 100H 縮尺モデルの促進老化による方法

促進老化 (80°Cの熱処理) した 100H 縮尺モデルを使用し、静的圧縮試験を実施した。促進老化日数は、0 日~350 日 (温度換算年数で 0 年~170 年) までの 7 ケースとした。

表-8 促進老化した 100H の硬化係数 (23°C換算)

換算年数	圧縮試験ピーク反力 (3 体平均) KN		硬化係数 = 熱老化後/熱老化前	
	圧縮 1 回目	圧縮 2・3 回目	圧縮 1 回目	圧縮 2・3 回目
17	6.93	5.34		
	8.35	6.22	1.20	1.16
34	6.97	5.34		
	9.13	6.60	1.31	1.24
68	7.02	5.38		
	10.53	7.13	1.50	1.33

上段：熱老化前試験値, 下段：熱老化処理後試験値

促進老化 210 日 (換算年数 102 年) では、1 回目の圧縮過程で急激な亀裂拡大により大破する「一発破壊」が発生した。このことから換算年数 68 年 (23°C) を超過すると「一発破壊」の危険性が高くなり、その目安とな

る硬化係数は圧縮 1 回目で 1.50 程度、圧縮 2・3 回目平均値で 1.33 程度と想定された。



図-19 破壊状況の例

4.4 FEM 解析による方法⁴⁾

促進老化させたゴムシートによる応力~歪み特性と深さ方向の劣化分布から、想定年数毎に FEM の入力パラメータを設定し、3000H モデルの性能特性を作成した。FEM 解析では、載荷荷重の増加過程で破断歪みを超過した要素グループを順次モデルから除去して、繰返し計算を行った。この結果、換算年数 60 年のモデルでは、20% 歪み超過時の要素破断が顕著になり、計算反力が大きく低下する現象が見られた。

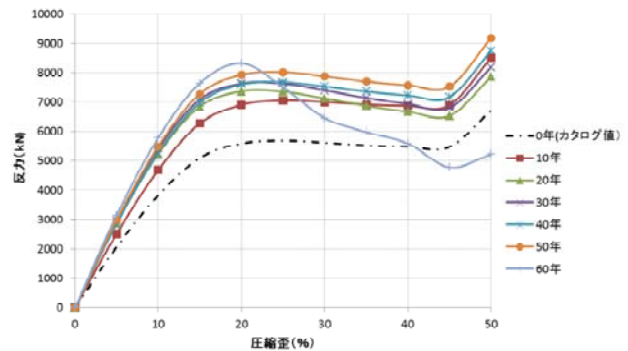


図-20 FEM 解析で作成した年数別性能特性 (3000H)

5. 係留用防舷材の供用限界年数

係留用防舷材の供用限界年数は、経年変化による「硬化係数の限界値として“1.575” (係留ドルフィン) の安定性に対する安全率 1.0) 」を設定し、硬化係数の回帰式 (中央値と 99% 上限値) との交点を求める方法を、アプローチ方法 1) と 2) に適用し、供用限界年数を算定した。

その他に「一発破壊」の危険性の観点から、アプローチ方法 3) と 4) を考慮した。

例えば、アプローチ方法 1) においては、圧縮試験による硬化係数に HB の影響を掛け合わせ、回帰式の 99% 上限値及び中央値が 1.575 となる年数を、取替開始及び取替完了年数と想定した。この結果、B 社製では供用 41 年で取替開始、51 年で取替完了を取替基準とした。

以下にアプローチ方法 1) ~4) による供用限界年数の推定結果を一覧表で示す。

表-9 検討結果一覧

条件 アプローチの方法	対象備蓄基地	調査した防舷材	供用限界の決め方	前提条件	供用限界年数 (標準温度23℃)	日除けカバー対策を考慮した場合	備考	
1) 実機回収試験	上五島	3000H (B社)	25%歪み硬化係数*HB影響 < 1.575	回帰式中央値	51年	64年	・実機防舷材経年変化の実測にB社ハイブリッドシミュレーションの影響を考慮。(1回目反力に漸近する最大反力が発生する影響を係数で考慮) ・2250Hドット縦係留は日陰環境にあり、カバー付に近い硬化状態と判断し3000Hにて推定 ・カバーは平成30年度の設置を想定。	
				信頼区間99%上限値	41年	47年		
		3000H・2250H (A社)	25%歪み硬化係数*HB影響 < 1.575	回帰式中央値	34年	36年		・実機防舷材経年変化の実測にハイブリッドシミュレーションの影響を考慮。(1回目反力に漸近する最大反力が発生する影響を係数で考慮。ただしB社材によるシミュレーションである。) ・カバーは平成30年度の設置を想定。
				信頼区間99%上限値	27年	28年		
	A・B社	25%歪み硬化係数*HB影響 < 1.575	回帰式中央値	49年	60年	・白島備蓄基地防舷材については、これまでのところ硬化傾向が顕在化していない。白島・上五島の全防舷材の圧縮試験結果を使用した。 ・カバー付の推定値を使用。		
			信頼区間99%上限値	21年	21年			
2) 200Hハイブリッドシミュレーション	上五島・白島共通	200H	25%歪み硬化係数 < 1.575 シミュレーション最大反力 < 19,620kN(ドルフィン設計荷重)	貯蔵船空載+20年確率暴風時のハイブリッドシミュレーション	57年		・最大反力を硬化係数に換算	
係留点の最大反力					50年		・シミュレーション結果を実物大反力に換算	
3) 100H促進老化試験体の圧縮試験	上五島・白島共通	100H	試験体の一発破壊	静的圧縮試験	58年		・静的圧縮の一発破壊の直前の促進劣化時間を日向の温度で修正したものの。	
4) FEM解析による防舷材の性能特性の予測	上五島・白島共通	B社	本体ゴムの破断による計算の発散	破断した要素の層を除去、ゴムの粘性を無視	50年		50年以上は要素破断多発により計算不能 文献4)	

上記の整理結果から、上五島備蓄基地の係留用防舷材の取替基準として、以下を基本事項とした。

- ① 係留システム全体の安全性確保の観点から、供用50年程度までに防舷材の取替を完了する。
- ② 防舷材の「一発破壊」の観点から、供用58年程度を超過する使用を回避する。
- ③ 上記の年数は、防舷材に日除けカバーを早期に設置することによって、延命化することができる。



図-21 日除けカバー設置状況 (白島備蓄基地)

6. 新設防舷材の評価方法の追加提案

貯蔵船係留用防舷材では、供用期間が50年程度と長いため、取替時に調達する新規防舷材の要求仕様に、以下の項目を追加することを提案した。

1) 係留用防舷材特性の変動幅

ゴム防舷材の性能の経年劣化について、科学的根拠に基づいた推定を実施すること。

- ・方法1: 実機回収試験による実測値からの予測
- ・方法2: 材料あるいは縮尺モデルの熱促進老化による経年変化の推定

2) ゴムの特性基準

ゴム材料の老化後の伸びについては、防舷材の長期間の使用を想定し、熱促進老化における23℃換算の55年相当において、老化後伸びが老化前の80%以上であることを条件に追加する。

7. 謝辞

本稿は、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構発注の平成25～29年度調査業務の成果を取りまとめたものである。検討にあたっては、「貯蔵船係留用防舷材の取替基準検討委員会 (委員長: 上田茂鳥取大学名誉教授)」の委員及び関係者から貴重なご意見、ご指導を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局監修, (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 昭和55年9月
- 2) 上田茂: 浮体橋に使用する係留用ゴムフェンダーの特性: 海洋工学シンポジウム, 平成10年7月
- 3) 海上貯油施設における係留用防舷材の取替基準の検討: 沿岸技術研究センター論文集, No. 14 (2014)
- 4) 秋山 齊: 長期供用された中空円筒型ゴム防舷材の劣化に関する研究, 2018年1月, 大阪大学大学院工学研究科博士学位論文

本資料は資源エネルギー庁から委託を受けた独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構から一般財団法人沿岸技術研究センターが委託を受けて作成したものであり、各当事者共有の研究成果及びその成果に帰属する技術的知識、ならびに各当事者それぞれに帰属する機密事項を含んでおりますので、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構の同意なく第三者に公開または開示することはできません。
©2018 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構