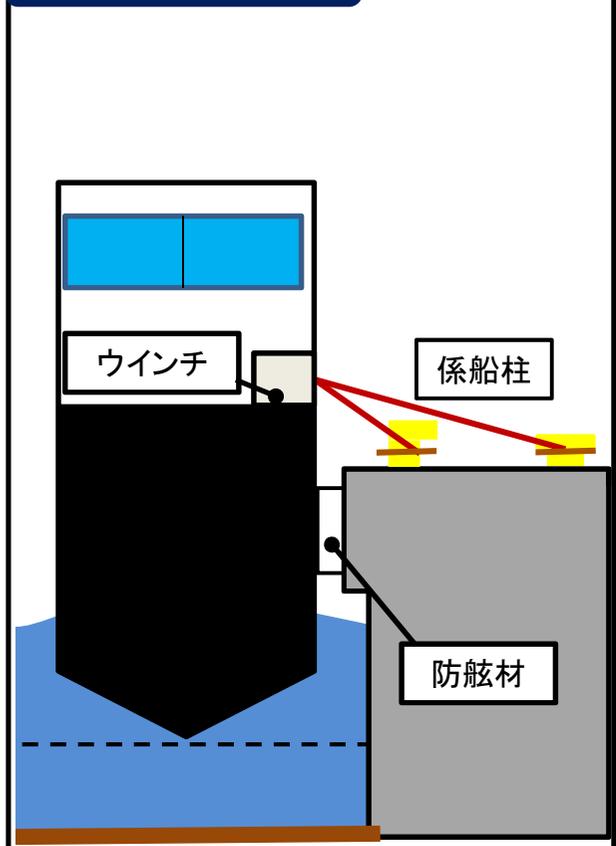
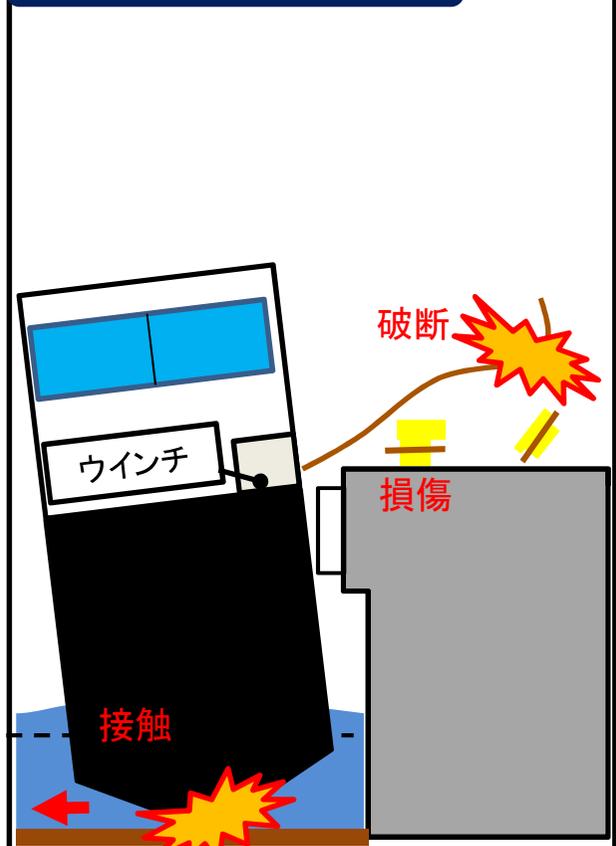
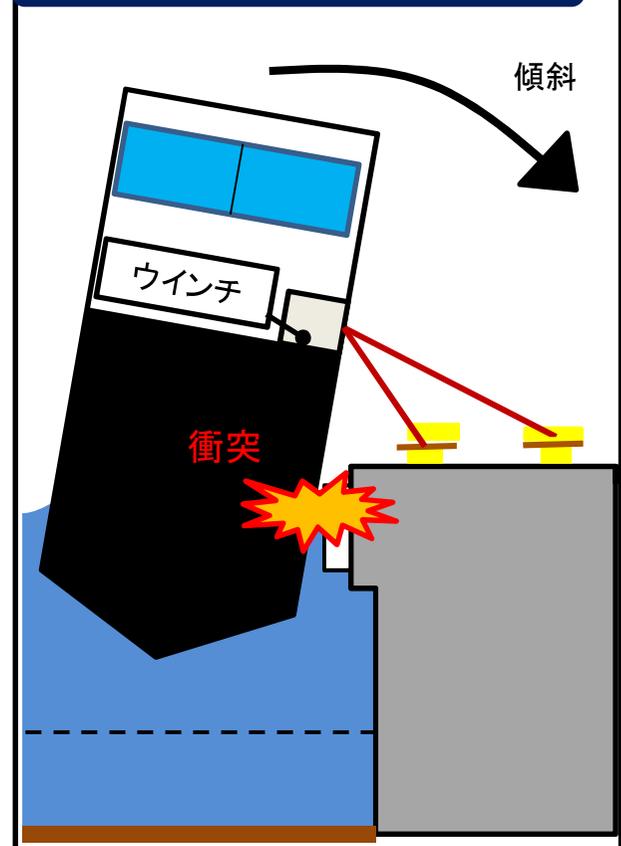


津波が係留船舶に及ぼす影響に関する 数値シミュレーション結果

	課題	要因
沖合退避	沖合退避行動の遅れ	▶ 沖合退避判断や情報伝達の遅れ
		▶ 綱取り業者・タグ業者の到着の遅れ
		▶ 荷役用輸送配管の切り離し作業による離岸の遅れ
		▶ 入船係留による沖合退避の遅れ
		▶ 引波発生に伴う操船性の悪化や海底乗揚げ等による遅れ
		▶ 航路混雑や漂流物による沖合退避の遅れ
		▶ 防波堤天端高の不足等で津波高が減衰しないことによる遅れ
係留避泊	係留強化の遅れ	▶ 係留強化判断や情報伝達の遅れ
		▶ 津波外力の係留索強度への影響が不明確
	係留索・係船柱の破断・損傷による船舶漂流	▶ 津波外力の係船柱強度への影響が不明確
		▶ 改正SOLAS条約に対する係船柱設計基準の対応
	岸壁等の港湾施設の損傷	▶ 津波外力が係留船舶と防舷材に作用する影響が不明確
		▶ 耐震強化岸壁等の設計基準に津波外力が未考慮
船員・乗客等の陸上退避	▶ 船員・乗客等の逃げ遅れ	
	▶ 高所等逃げ場の不足	
衝突 乗揚げによる被害	船舶漂流・岸壁乗揚げによる背後地への被害	▶ 防波堤天端高の不足等で津波高が減衰しないことによる遅れ(再掲)
		▶ 漂流船舶の衝突、船舶の乗揚げに関する検討が不十分
	衝突船舶の沈没等による航路・泊地閉塞	▶ 資機材確保の遅れ及び復旧の遅れ
		▶ 被害情報等の把握の遅延
	石油化学コンビナート等への船舶衝突等による火災・油流出	▶ 防波堤天端高の不足等で津波高が減衰しないことによる遅れ(再掲)
		▶ 複合災害・巨大災害の発生に対する検討が不十分
	迅速な復旧に向けた事前対策	
複合災害・巨大災害への備え		

通常時の係留状態	引き波発生時のイメージ	津波来襲時(高水位)のイメージ
		
<p>(参考) 津波来襲に備えた係留強化方法</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 係留索の多重巻き ・ 係船柱の増設による係留強化 等 	<p>引き波発生時に想定される事象</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 船底が海底面に接触する恐れ ・ 係留索が破断する恐れ ・ 係船柱が損傷する恐れ <p>⇒ 引き波を想定した安全照査が必要</p>	<p>津波来襲時に想定される事象</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 船体が傾斜し岸壁等に衝突する恐れ ・ 係留索が破断する恐れ ・ 係船柱が損傷する恐れ ・ 船舶が乗揚げする恐れ

津波来襲を想定した係留強化に関する次回までの検討の方向性（案）

第1回委員会資料より抜粋

問題意識

船舶側の意思決定支援への貢献

- 津波外力に対する係留索や岸壁（係船柱、防舷材等）の耐力を明らかにすることにより、津波警報発令時等における船舶側の意思決定支援（沖合避泊 or 係留避泊）に寄与する。

改正SOLAS条約への対応

- 2024年導入予定の係留索のIMO新基準に対して、係船柱等の安全性解析が必要。



第2回委員会までの検討の方向性

- 津波高さ、船舶規模別に係留索、係船柱、防舷材の強度との比較を行い、数値シミュレーションにより、破断・損壊する限界津波高さ等を明らかにする。
- 一般的な係留方法（係留索の種類・本数、係船柱の種類・場所等）を設定し、数値シミュレーションにより、岸壁等に作用する最大牽引力を明らかにする。

津波来襲時に係留索張力を増加させる要因

津波による流れ

- 津波流速が大きいほど係留索張力も増加

津波による流れ

津波の岸壁越流
水塊の押し流れ

実水位

水位変化

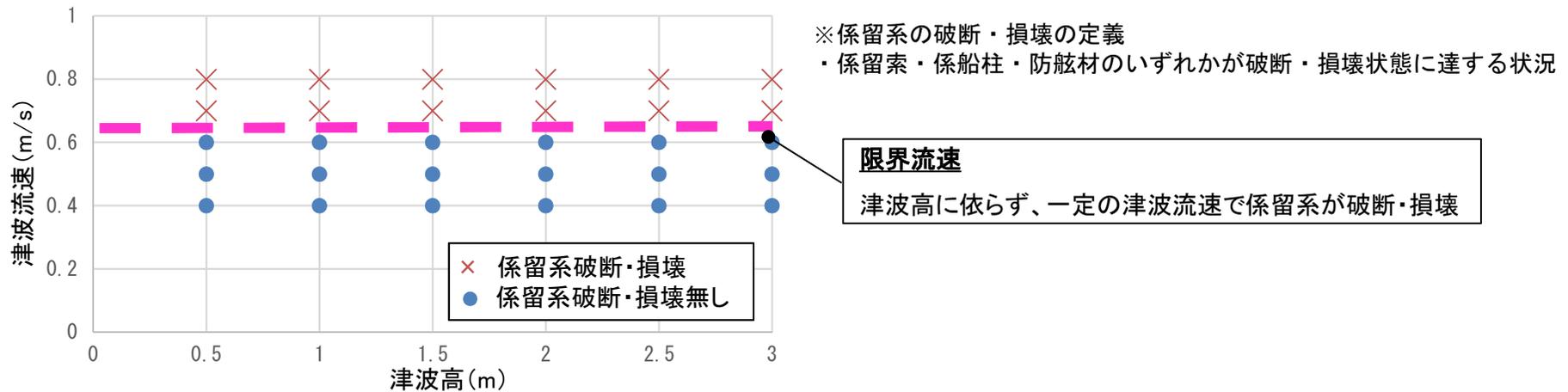
- 津波水位上昇により、船体位置も上昇し、係留索張力が増加
- 水位上昇の速度が早いと、船体動揺が激しくなり、係留索張力も増加

加えて、津波の引き波時も危険な状態になる

津波高・津波流速が船舶に作用する影響に関する分析

津波高・津波流速が係留船舶に与える影響に関する分析

- 津波高・津波流速が係留系(係留索・係船柱・防舷材)の破断・損壊に与える影響を把握するため、5万DWTのコンテナ船を対象に、異なる津波高及び津波流速を与えたところ、**津波高に依らず、一定の津波流速を超えた段階で係留系が破断・損壊状態※に達することが判明した。**
- 以後、係留索・係船柱・防舷材のいずれかが最初に破断・損壊状態に達する津波流速を限界流速と定義する。



異なる津波高・津波流速における係留系破断・損壊判定

数値シミュレーションの前提条件(対象船型)

- 5種類の船種を対象に、計9種類の船型を対象に解析を実施

船種	船型				岸壁水深
	トン数	全長	型幅	満載喫水	
コンテナ船 (4船型)	1万DWT (0.9万GT)	138m	22.2m	7.9m	8.7m
	5万DWT (4.4万GT)	269m	32.3m	12.8m	14.1m
	10万DWT (8.8万GT)	338m	45.3m	14.6m	16.1m
	16.5万DWT (14.5万GT)	378m	52.0m	16.2m	17.8m
貨物船 (2船型)	7万DWT (3.7万GT)	250m	43m	12.7m	14.0m
	15万DWT (7.9万GT)	282m	44.3m	17.7m	20.0m
RORO船	1.5万GT	171m	30.3m	7.6m	8.4m
自動車船	6.0万GT	201m	33.3m	10.2m	12.0m
クルーズ船	16万GT	345m	41.0m	9.1m	10.0m

シミュレーションの前提条件(係留索・係船柱・防舷材・係留方法)

係留索・係船柱・防舷材の破断・損壊条件等

■ 係留索・係船柱・防舷材の破断・損壊条件等は以下の通り設定

項目	破断・損壊条件	出典根拠
係留索	係留索張力が切断強度に達した場合、破断と判定	メーカーカタログ記載のナイロンロープ強伸度曲線を使用し、切断強度を設定
係船柱	標準牽引力に安全率 [※] を考慮した値を超えた場合、損壊と判定	「港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成30年)」の標準牽引力を使用
防舷材	限界圧縮率以上圧縮した場合、防舷材が限界に達すると判定	メーカーカタログの防舷材の復元力特性値を使用し、限界圧縮率を設定

※安全率

現行基準の係船柱は、設計牽引力に対して実質的な安全余裕を有している。例えば、鋼材の場合、許容応力度設計法で担保されていた余裕代(降伏応力度/許容応力度=1.7程度)が担保されていることから、本検討では、この実質的な安全率を1.7と仮定している。また、標準牽引力×安全率を、現行基準の係船柱の強度(設定耐力)と仮定している。

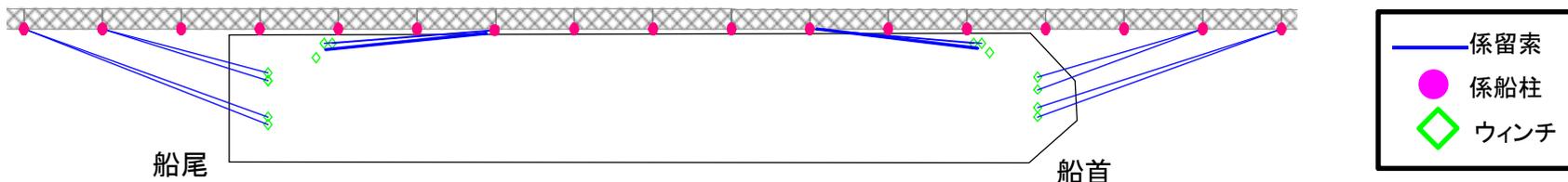
係留方法

■ (一社)日本船長協会へのヒアリングに基づき、対象船舶の船種に応じて、以下の通り係留方法を設定

船種:コンテナ船、RORO船、自動車船、クルーズ船

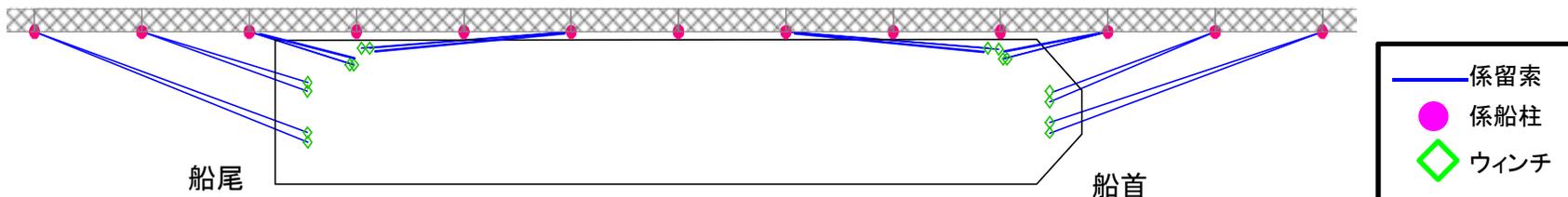
※ (一社)日本船長協会へのヒアリング結果に基づき設定

4本(スターンライン)-2本(スプリングライン)-2本(スプリングライン)-4本(ヘッドライン)



船種:貨物船

4本(スターンライン)-2本(ブレストライン)-2本(スプリングライン)-2本(スプリングライン)-2本(ブレストライン)-4本(ヘッドライン)



(参考)船舶の係留索の名称 ※港湾空港技術研究所資料No.1190より港湾局作成



シミュレーションの前提条件(津波外力)

津波外力の設定の考え方

- 津波外力は、津波高(水位)と水深方向に一定の津波流速(X・Yの2方向)の時系列を独立して与え、津波外力を流圧力として入力。

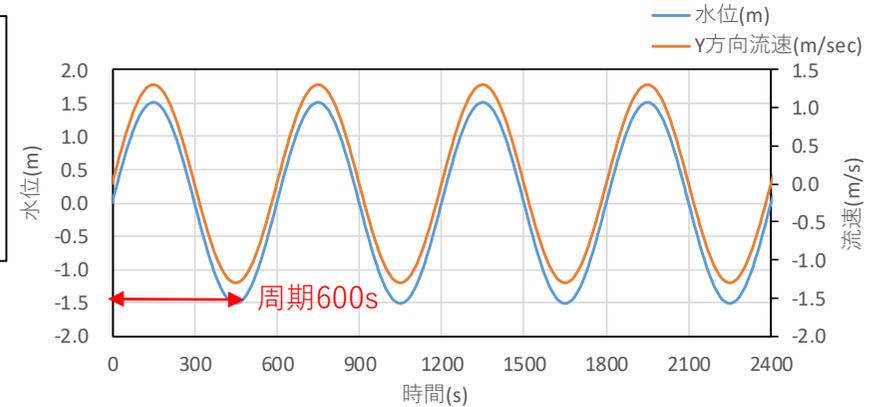
入力外力

※津波高は、対象船舶が海面への着底・乗揚げが発生しない範囲とする。

津波高: 0.1m刻みで変化させ設定(0.5m~)
 津波流速: 以下計算式より、各流速に相当する流速を設定

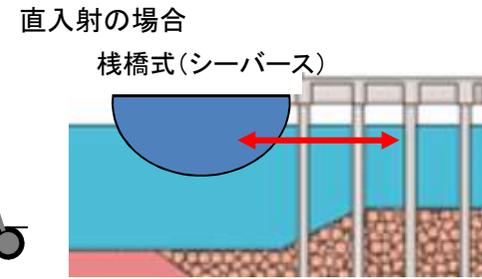
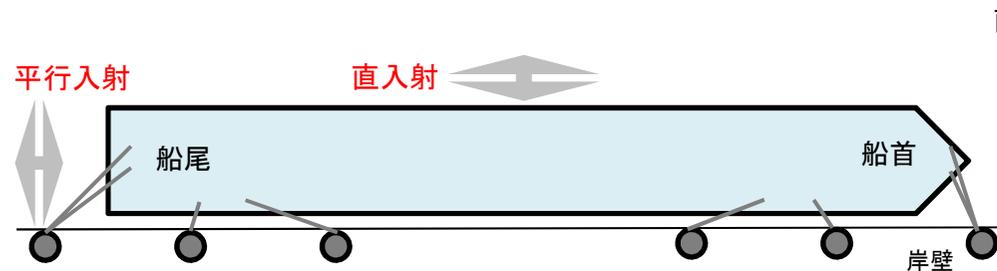
$$v(\text{津波流速}) = \sqrt{g(\text{重力加速度})/h(\text{水深}) * \eta(\text{津波高})}$$

 ※海底への着底・係留施設への乗揚げが発生しない範囲とする
 周期: 各津波流速を最大値とする周期600秒のsin波の時刻歴データ

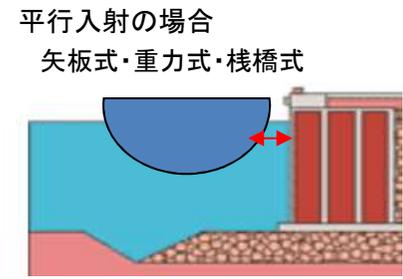


津波外力の来襲方向の設定

- 津波来襲方向: 係留施設法線方向の「平行入射」と法線直行方向の「直入射」の2パターン
 - 係留施設の構造: 直入射の流れが透過する構造(栈橋式シーバース)
 直入射の流れが遮断され、極めて津波流速が小さくなる構造(矢板式・重力式・栈橋式等)
- 直入射は栈橋式(シーバース)のみとし、平行入射は両形式の係留施設を対象とする。
 平行入射は船体への流体力が大きくなる船尾側から入射させる。



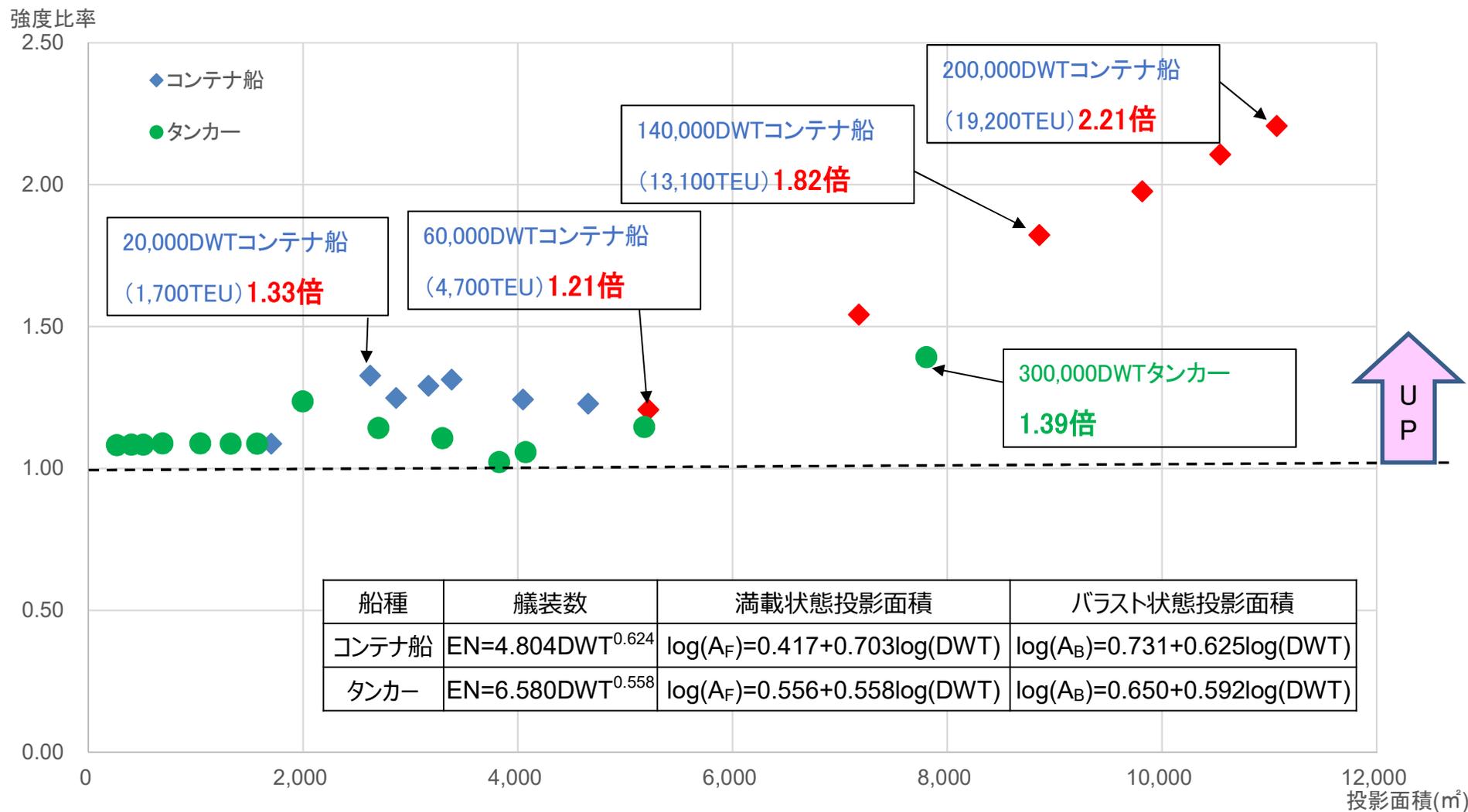
津波が透過するため
津波流速が大きい



岸壁の影響により
津波流速は小さい

2024年のSOLAS条約改正に伴う係留索破断強度の新旧比較

- 2024年のSOLAS条約改正に伴う新規則の適用により、係留索強度の強化が予定されているところ。
- 同条約改正前後の係留索破断強度を比較すると、投影面積の大きいコンテナ船では現行基準の2倍を超える状況。



艙装数¹⁾：港湾技研資料No.348「船舶の主要寸法と力学的諸量の関係」（昭和55年）

投影面積²⁾：「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（平成30年）P.870 式（2.3.11）

シミュレーション結果【係留索強度:現行強度、係船柱強度:現行強度】

船種	トン数	係留系	平行入射	直入射	解析結果
			限界流速(m/s)	限界流速(m/s)	
コンテナ船	0.9万GT (1万DWT)	係留索	2.8	0.6	【平行入射の場合】 8.8万GT(10万DWT)以外の船型において、係留索が先に限界状態を迎える。 【直入射の場合】 全ての船型において、係留索または防舷材が先に限界状態を迎える。
		係船柱	3.0以上	0.7	
		防舷材	-	0.6	
	4.4万GT (5万DWT)	係留索	1.9	0.7	
		係船柱	2.1	0.8	
		防舷材	-	0.4	
	8.8万GT (10万DWT)	係留索	0.5	0.5	
		係船柱	0.5	0.7	
		防舷材	-	0.4未満	
	14.5万GT (16.5DWT)	係留索	0.4	0.5	
		係船柱	0.7	0.7	
		防舷材	-	0.5	
貨物船	3.7万GT (7万DWT)	係留索	1.5	0.5	【平行入射の場合】 全ての船型において、係船柱が先に限界状態を迎える。 【直入射の場合】 3.7万GT(7万DWT級)では係留索・係船柱が同時に限界状態、7.9万GT(15万DWT級)では防舷材が先に限界状態を迎える。
		係船柱	1.3	0.5	
		防舷材	-	0.7	
	7.9万GT (15万DWT)	係留索	0.6	0.4	
		係船柱	0.5	0.4	
		防舷材	-	0.4未満	
RORO船	1.5万GT	係留索	3.0以上	0.8	【平行入射の場合】 3.0m/s以上の津波流速で限界状態を迎える。 【直入射の場合】 係留索・係船柱が同時に限界状態を迎える。
		係船柱	3.0以上	0.8	
		防舷材	-	0.9	
自動車運搬船	6.0万GT	係留索	2.3	0.5	【平行入射・直入射共に】 係留索が先に限界状態を迎える。
		係船柱	3.0以上	0.6	
		防舷材	-	0.9	
クルーズ船	16万GT	係留索	1.6	0.7	【平行入射の場合】 係留索が先に限界状態を迎える。 【直入射の場合】 防舷材が先に限界状態となる
		係船柱	3.0以上	1.1	
		防舷材	-	0.4	

シミュレーション結果【係留索強度:現行強度、係船柱強度:現行強度の一律2倍】

船種	トン数	係留設備	平行入射	直入射	解析結果
			限界流速(m/s)	限界流速(m/s)	
コンテナ船	0.9万GT (1万DWT)	係留索	2.8	0.6	【平行入射の場合】 全ての船型において、係留索が先に限界状態を迎える。 【直入射の場合】 全ての船型において、係留索または防舷材が先に限界状態を迎える。
		係船柱	3.0以上	※	
		防舷材	-	0.6	
	4.4万GT (5万DWT)	係留索	1.9	0.7	
		係船柱	3.0以上	1.1	
		防舷材	-	0.4	
	8.8万GT (10万DWT)	係留索	0.5	0.5	
		係船柱	2.0	1.2	
		防舷材	-	0.4未滿	
	14.5万GT(16.5DWT)	係留索	0.4	0.5	
		係船柱	※	0.8	
		防舷材	-	0.5	
貨物船	3.7万GT (7万DWT)	係留索	1.5	0.5	【平行入射の場合】 全ての船型において、係留索が先に限界状態を迎える。 【直入射の場合】 7万DWTは係留索が先に限界状態を迎え、15万DWTは防舷材が先に限界状態を迎える。
		係船柱	3.0以上	1.1	
		防舷材	-	0.7	
	7.9万GT (15万DWT)	係留索	0.6	0.4	
		係船柱	2.1	0.7	
		防舷材	-	0.4未滿	
RORO船	1.5万GT	係留索	3.0以上	0.8	【平行入射の場合】 3.0m/s以上の津波流速で限界状態を迎える。 【直入射の場合】 係留索が先に限界状態を迎える。
		係船柱	3.0以上	1.3	
		防舷材	-	0.9	
自動車運搬船	6.0万GT	係留索	2.3	0.5	【平行入射・直入射】 係留索が先に限界状態を迎える。
		係船柱	3.0以上	1.1	
		防舷材	-	0.9	
クルーズ船	16万GT	係留索	1.6	0.7	【平行入射の場合】 係留索が先に限界状態を迎える。 【直入射の場合】 防舷材が先に限界状態を迎える。
		係船柱	3.0以上	※	
		防舷材	-	0.4	

※係留索の伸び率100%の時の張力が係船柱の設計耐力より小さいため評価できない

シミュレーション結果【係留索強度:現行強度の一律2倍、係船柱強度:現行強度】

船種	トン数	係留設備	平行入射	直入射	解析結果
			限界流速(m/s)	限界流速(m/s)	
コンテナ船	0.9万GT (1万DWT)	係留索	3.0以上	0.8	【平行入射の場合】 全ての船型において、係船柱が先に限界状態を迎える。 【直入射の場合】 0.9万GT(1万DWT)は係船柱が先に限界状態を迎え、4.4万GT(5万DWT)及び8.8万GT(10万DWT)は防舷材が先に限界状態を迎える。14.5万GT(16.5万DWT)は係船柱・防舷材が同時に限界状態を迎える。
		係船柱	1.7	0.4	
		防舷材	-	0.5	
	4.4万GT (5万DWT)	係留索	3.0以上	0.9	
		係船柱	0.7	0.5	
		防舷材	-	0.4	
	8.8万GT (10万DWT)	係留索	1.0	0.6	
		係船柱	0.4未満	0.4	
		防舷材	-	0.4未満	
	14.5万GT(16.5DWT)	係留索	0.7	0.7	
係船柱		0.4未満	0.4		
防舷材		-	0.4		
貨物船	3.7万GT (7万DWT)	係留索	2.7	0.7	【平行入射・直入射の場合】 共に係船柱が先に限界状態を迎える。
		係船柱	0.6	0.4未満	
		防舷材	-	0.9	
	7.9万GT (15万DWT)	係留索	1.4	0.5	
		係船柱	0.4未満	0.4未満	
防舷材	-	0.5			
RORO船	1.5万GT	係留索	3.0以上	1.1	【平行入射の場合】 3.0m/s以上の津波流速で限界状態を迎える。 【直入射の場合】 係船柱が先に限界状態を迎える。
		係船柱	3.0以上	0.5	
		防舷材	-	1.0	
自動車運搬船	6.0万GT	係留索	3.0以上	0.8	【平行入射・直入射の場合】 係船柱が先に限界状態を迎える。
		係船柱	1.5	0.4	
		防舷材	-	1.0	
クルーズ船	16万GT	係留索	3.0以上	0.8	【平行入射の場合】 係船柱が先に限界状態を迎える。 【直入射の場合】 防舷材が先に限界状態を迎える。
		係船柱	1.4	0.6	
		防舷材	-	0.4	

シミュレーション結果【係留索強度：現行強度の一律2倍、係船柱強度：現行基準の一律2倍】

船種	トン数	係留設備	平行入射	直入射	解析結果
			限界流速(m/s)	限界流速(m/s)	
コンテナ船	0.9万GT (1万DWT)	係留索	3.0以上	0.8	【平行入射の場合】 0.9万GT(1万DWT)及び4.4万GT(5万DWT)は、係留索・係船柱は3.0m/s以上の津波流速で限界状態を迎え、8.8万GT(10万DWT)及び14.5万GT(16.5万DWT)は係留索が先に限界状態を迎える。 【直入射の場合】 全ての船型において、防舷材が先に限界状態を迎える。
		係船柱	3.0以上	1.3	
		防舷材	-	0.5	
	4.4万GT (5万DWT)	係留索	3.0以上	0.9	
		係船柱	3.0以上	1.0	
		防舷材	-	0.4	
	8.8万GT (10万DWT)	係留索	1.0	0.6	
		係船柱	1.4	0.7	
		防舷材	-	0.4未満	
	14.5万GT(16.5DWT)	係留索	0.7	0.7	
係船柱		1.4	0.8		
防舷材		-	0.4		
貨物船	3.7万GT (7万DWT)	係留索	2.7	0.7	【平行入射の場合】 3.7万GT(7万DWT)は係留索が先に限界状態を迎え、7.9万GT(15万DWT)は係船柱が先に限界状態を迎える。 【直入射の場合】 7.9万GT(15万DWT)において、全ての係留系が同時に限界状態を迎える。
		係船柱	3.0以上	0.6	
		防舷材	-	0.9	
	7.9万GT (15万DWT)	係留索	1.4	0.5	
		係船柱	1.2	0.5	
		防舷材	-	0.5	
RORO船	1.5万GT	係留索	3.0以上	1.1	【平行入射の場合】 3.0m以上の津波流速で限界状態を迎える。 【直入射の場合】 舷材が先に限界状態を迎える。
		係船柱	3.0以上	1.1	
		防舷材	-	1.0	
自動車運搬船	6.0万GT	係留索	3.0以上	0.8	【平行入射の場合】 3.0m/s以上の津波流速で限界状態を迎える。 【直入射の場合】 係留索が先に限界状態を迎える。
		係船柱	3.0以上	0.9	
		防舷材	-	1.0	
クルーズ船	16万GT	係留索	3.0以上	0.8	【平行入射の場合】 3.0m/s以上の津波流速で限界状態を迎える。 【直入射の場合】 防舷材が先に限界状態を迎える。
		係船柱	3.0以上	1.4	
		防舷材	-	0.4	

数値シミュレーションの結果概要

数値シミュレーションの結果、以下の特徴が確認された。

津波外力が係留系に与える影響の特徴

- ① 係留索破断は水位の上昇では発生せず、**津波流速に大きく依存**。
- ② **岸壁直行方向**に津波が作用する場合、**押し波よりも引き波時の方が危険**。
- ③ **岸壁平行方向**に津波が作用する場合、岸壁直行方向に作用する場合と比較し、**限界流速が大きくなる**。
- ④ 同程度の総トン数の船舶であっても、水面下の投影面積の大きさにより限界流速が異なり、**投影面積が大きい船舶ほど限界流速が小さくなる**。
- ⑤ **総トン数が大きくなるほど**、船体にかかる流圧力が大きくなるため、係留索が破断しやすく、安全に係留できる**限界流速が小さくなる**。
- ⑥ 岸壁直行方向に津波が作用する場合、**総トン数の大きい船舶では防舷材が破断**する。

⇒津波流速、船種、船型を考慮し、ふ頭ごとのリスク分析を行った上で、適切な係留位置の検討が必要

※限界流速の定義：係留系（係留索・係船柱・防舷材）のいずれかが設計応力を超える津波流速

解析対象船舶の係留索強度を一様に2倍に設定したシミュレーション結果

- ① 解析対象船舶の係留索強度を一様に2倍に設定したところ、係船柱が損壊する割合や津波流速3.0m/s以上で係留系が破断・損壊しない割合が改善された。

⇒SOLAS条約改正に伴い、船型によっては2倍以上の係留索強度になることが想定されていることから、

今後、各船種や船型に応じた係留索強度の増加率を詳細に確認するとともに、同条約改正までに既存の係船柱の安全照査を行った上で、津波外力を考慮した係留系の設計体系を構築し、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の改訂へ反映