

4.3 燃料等輸送船の係留索の耐力について

4.3 燃料等輸送船の係留索の耐力について

(1) 概要

燃料等輸送船（以下、「輸送船」という。）は、津波警報等発令時、原則、緊急退避するが、津波流向及び物揚場と取水口との位置関係を踏まえ、短時間に津波が襲来する場合を考慮し、係留索の耐力について評価を実施する。

係留索については、船舶の大きさから一定の算式によって計算される数値（艀装数）に応じた仕様（強度、本数）を有するものを備えることが、日本海事協会（NK）の鋼船規則において定められている。

本書では、輸送船が備えている係留索の係留力及び津波による流圧力を石油会社国際海事評議会 OCIMF (Oil Companies International Maritime Forum) 刊行“Mooring Equipment Guidelines”の手法を用いて算出し、耐力評価を行う。なお、同書は船舶の係留方法・係留設備に関わる要求事項を規定するものであり、流圧力の評価については大型タンカーを主たる適用対象とするものであるが、輸送船は大型タンカーと同じ1軸船であり、水線下の形状が類似しているため、同評価を輸送船に適用することは可能と考える。

(2) 評価

a. 輸送船, 係留索, 係船柱

輸送船, 係留索, 係船柱の仕様を表 4.3-1 に, 配置を図 4.3-1 に示す。

表 4.3-1 輸送船, 係留索, 係船柱の仕様

	項目	仕様
輸送船	総トン数	約 5,000 トン
	載貨重量トン	約 3,000 トン
	喫水	約 5m
	全長	100.0m (垂線間長 : 94.4m)
	型幅	16.5m
	形状	(図 4.3-1 参照)
係留索	直径	60mm (ノミナル値)
	素材種別	Polyethylene Rope Grade 1
	破断荷重	279kN (キロニュートン) = 28.5tonf
	係船機ブレーキ力	28.5tonf × 0.7 ≒ 20.0tonf
係船柱	ビット数, 位置	(図 4.3-1 参照)
	係留状態	(図 4.3-1 参照)
	強度	25t, 50t

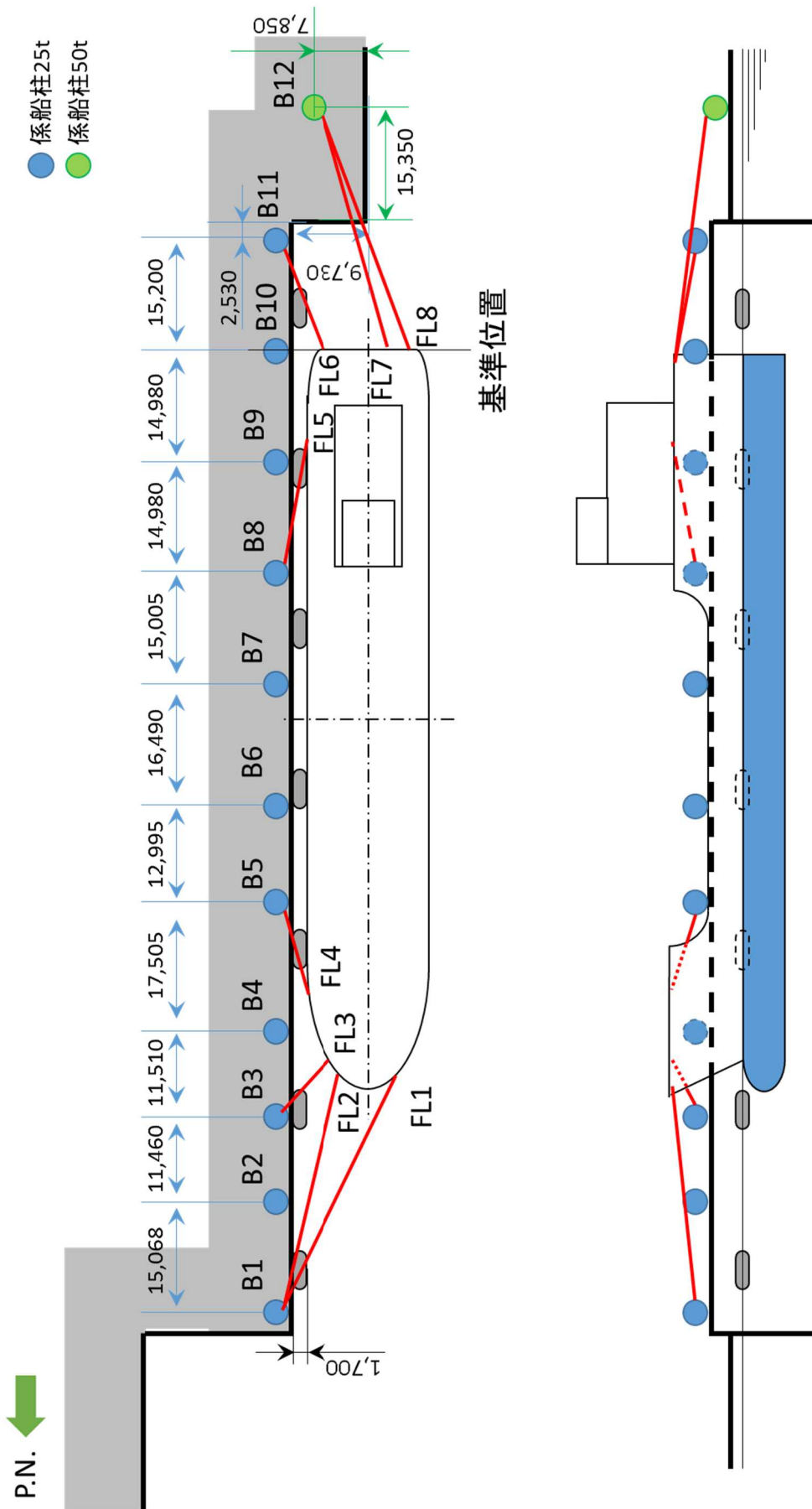


図 4.3-1 輸送船, 係留索, 係船柱の配置

b. 津波条件（流向，水位，流速）

襲来までに時間的余裕がなく，輸送船を離岸できない可能性がある基準津波 3 を評価条件とする。

基準津波 3 による物揚場近傍の流向は，図 4.3-2 に例示するとおり物揚場に対する接線方向の成分が支配的となる。これに対し，輸送船は物揚場（コンクリート製）と平行して接岸されることから，評価は輸送船の船首及び船尾方向の流圧力に対する係留索の耐力について実施する。

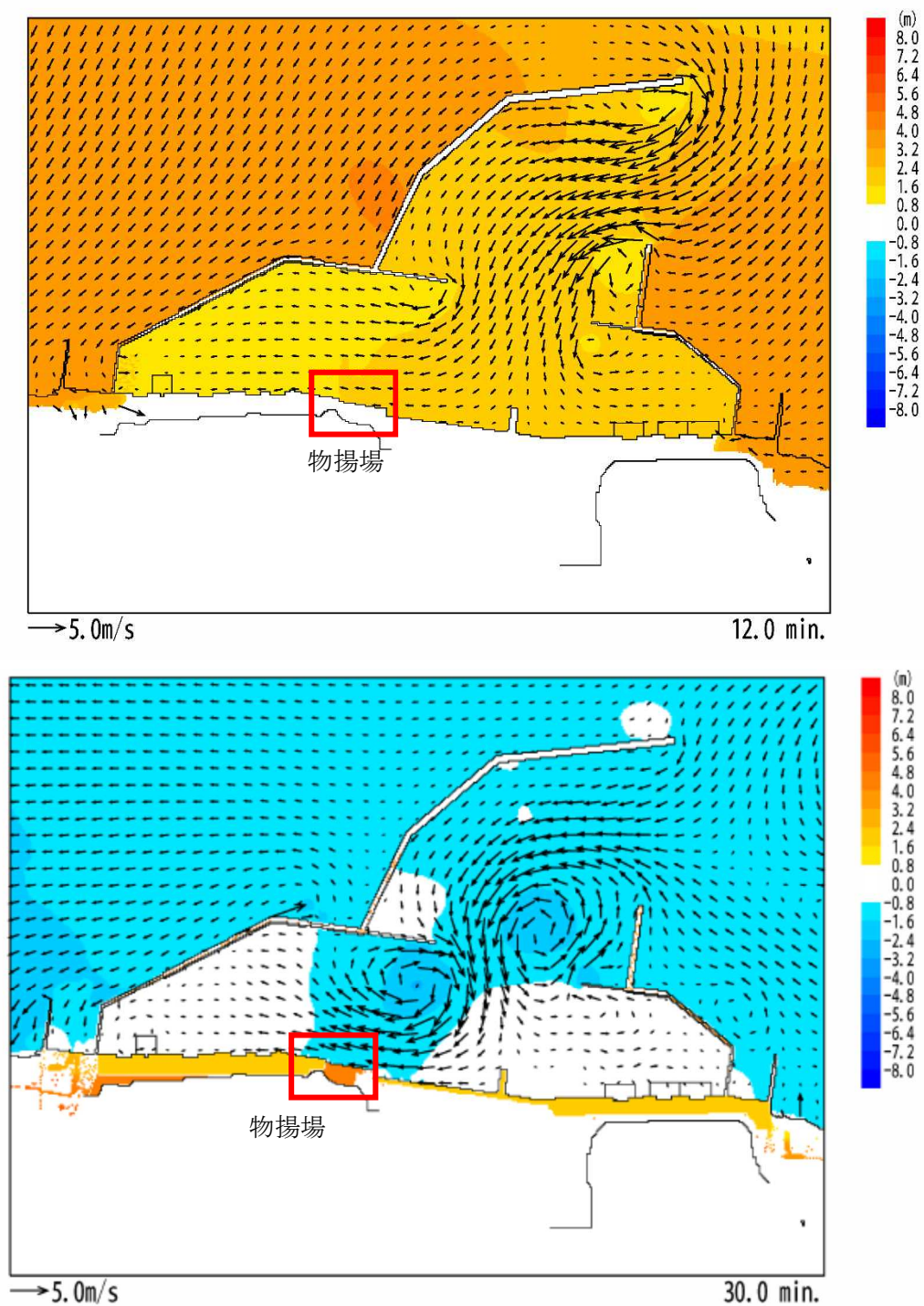


図 4.3-2 基準津波 3 の流向

一方、基準津波3の物揚場位置における水位及び接線方向成分の流速は、図4.3-3-1のとおりとなる。

図4.3-3-1に示すとおり地震発生後15分で第一波の最高点に達する。その後、引き波が発生し、流速は地震発生後30分に最大の3.2m/sに達する。

緊急退避時間との関係から、津波が最大流速に到達する前に輸送船は退避できると考えられるものの、今回は係留により対応することを仮定し、最大流速3.2m/sで生じる流圧力に対する係留力を評価する。

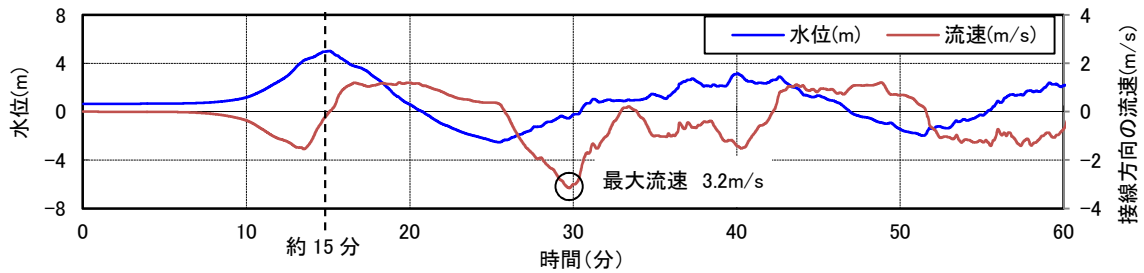


図4.3-3-1 基準津波3の水位・流速（物揚場前面）

なお、地震等により防波堤の損傷を想定した場合（防波堤なしの条件）でも、接線方向成分の流速は、図4.3-3-2に示すとおり防波堤健全時（図4.3-3-1）よりも小さいため、流速条件は健全状態における流速に包含される。

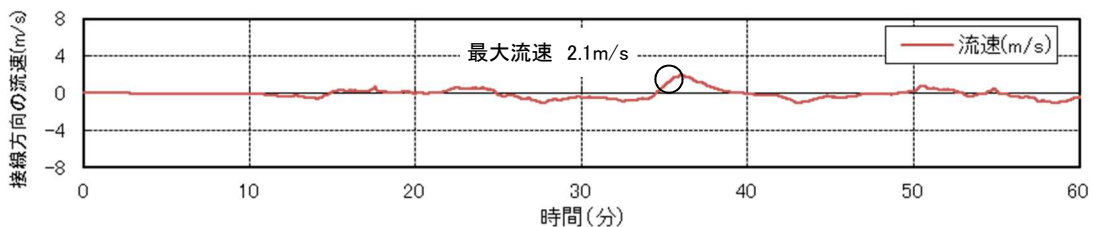
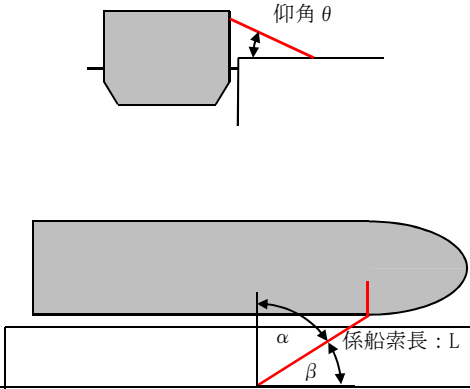


図4.3-3-2 防波堤損傷時における基準津波3の流速（物揚場前面）

c. 係留力

係留力の計算方法を表 4.3-2 に、計算結果を表 4.3-3、図 4.3-4 及び図 4.3-5 に示す。

表 4.3-2 係留力の計算方法¹⁾

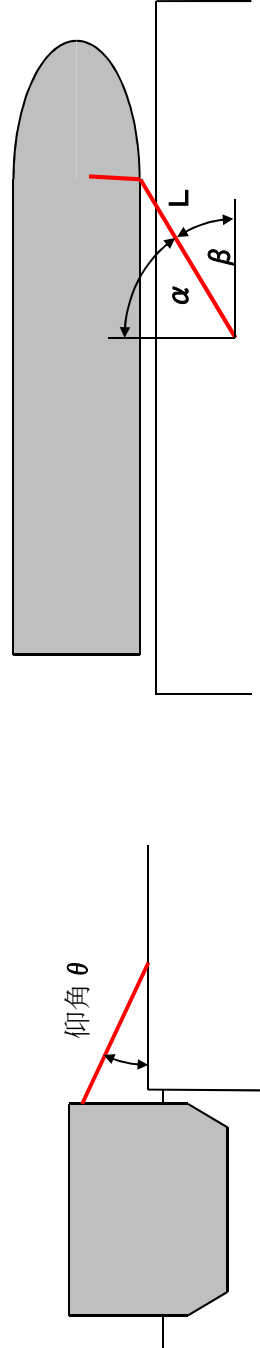
<p>【各索の係留力計算式】</p> $R_x = T \times ((\cos^2 \beta \times \cos \theta^2) / L) \times (L_c / (\cos \beta_c \times \cos \theta_c))$	
<p> R_x : 前後係留力 (tonf) (前方は添字 f, 後方は添字 a) T : 係留索 1 本に掛けることができる最大張力 (tonf) β : 係留索水平角 (物揚場平行線となす角度) (deg) θ : 係留索の仰角 (deg) L : 係留索の長さ (船外+船内) (m) β_c : 各グループ*で最も負荷の大きい係留索の係留索水平角 (物揚場平行線となす角度) (deg) θ_c : 各グループ*で最も負荷の大きい係留索の仰角 (deg) L_c : 各グループ*で最も負荷の大きい係留索の長さ (船外+船内) (m) 注記* : 係留索の機能別グループ (前方係留力または後方係留力) </p>	

参考文献

1) 日本タンカー協会 : 係留設備に関する指針 第 2 版, pp. 167, 2002.

表 4.3-3 係留力 (図 4.3-1) の計算結果

フェア リーダー	索種類	係船柱	係船索長さ[m]		係留角		索張力 T [tonf]	係留力 前後 [tonf]	Bitt Performance [tonf]			
			船外		θ	β			Bitt Load	合計	係船柱強度	
FL1	Line1	B1	36.9		5.1	-24.3	20.0	-6.91	7.31	15.96	25	
FL2	Line2	B1	34.2		5.5	-10.4	20.0	-8.60	8.65			
FL3	Line3	B3	10.5		18.1	-31.8	20.0	-16.16	20.00	20.00	25	
								-31.67				
FL4	Line4	B5	13.7		13.7	11.9	20.0	19.01	20.00	20.00	25	
								19.01				
FL5	Line5	B8	25.0		6.8	7.3	20.0	-19.70	20.00	20.00	25	
								-19.70				
FL6	Line6	B11	16.6		10.3	21.0	20.0	18.37	20.00	20.00	25	
FL7	Line7	B12	34.8		8.2	15.9	20.0	10.56	10.90	21.39	50	
FL8	Line8	B12	35.8		8.0	21.0	20.0	9.70	10.49			
								38.62				
								前後(+) 計				
								57.63				
								前後(-) 計				
								-51.37				



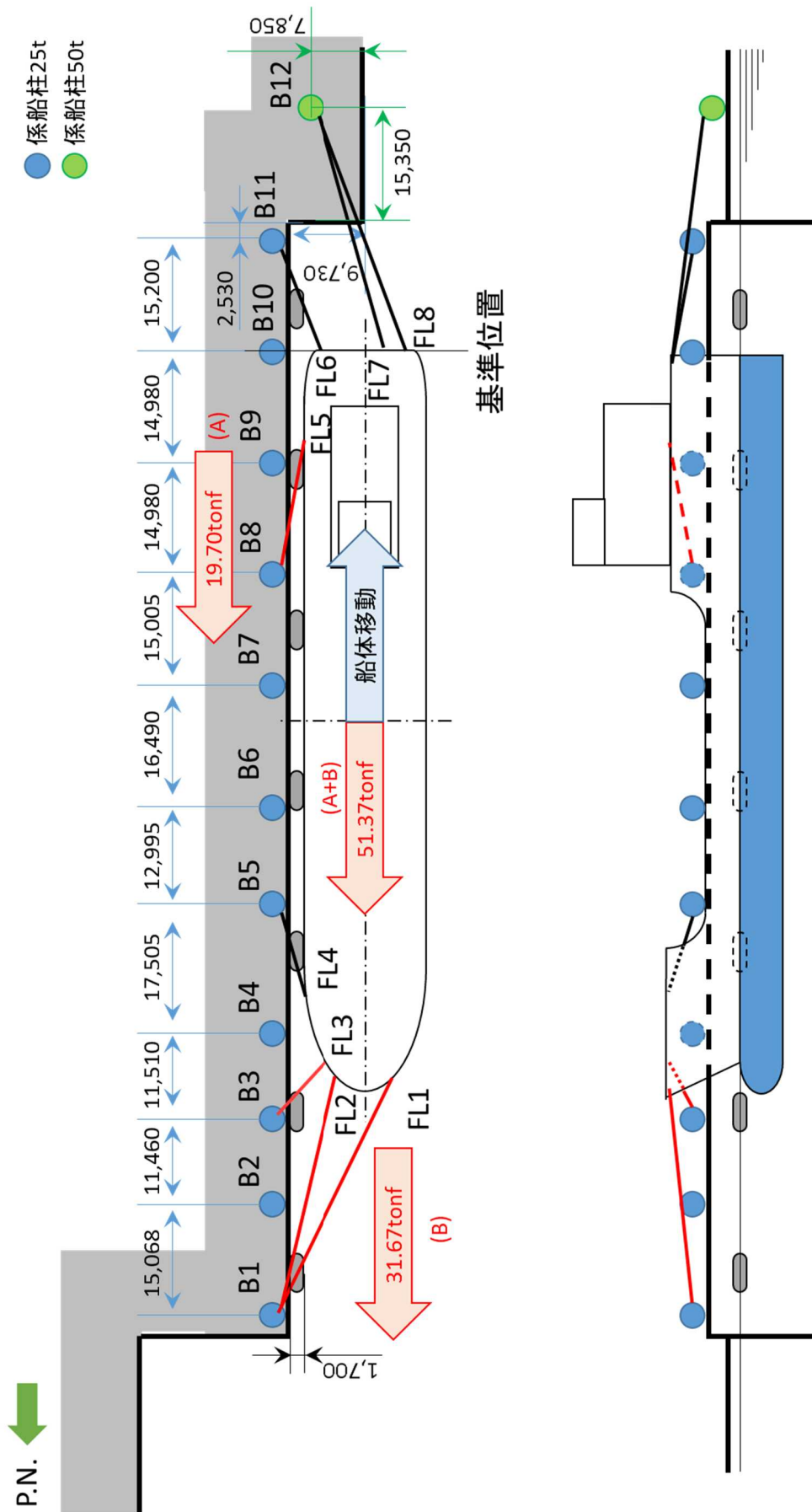


図 4.3-4 船尾方向への移動に対する船首方向係留力

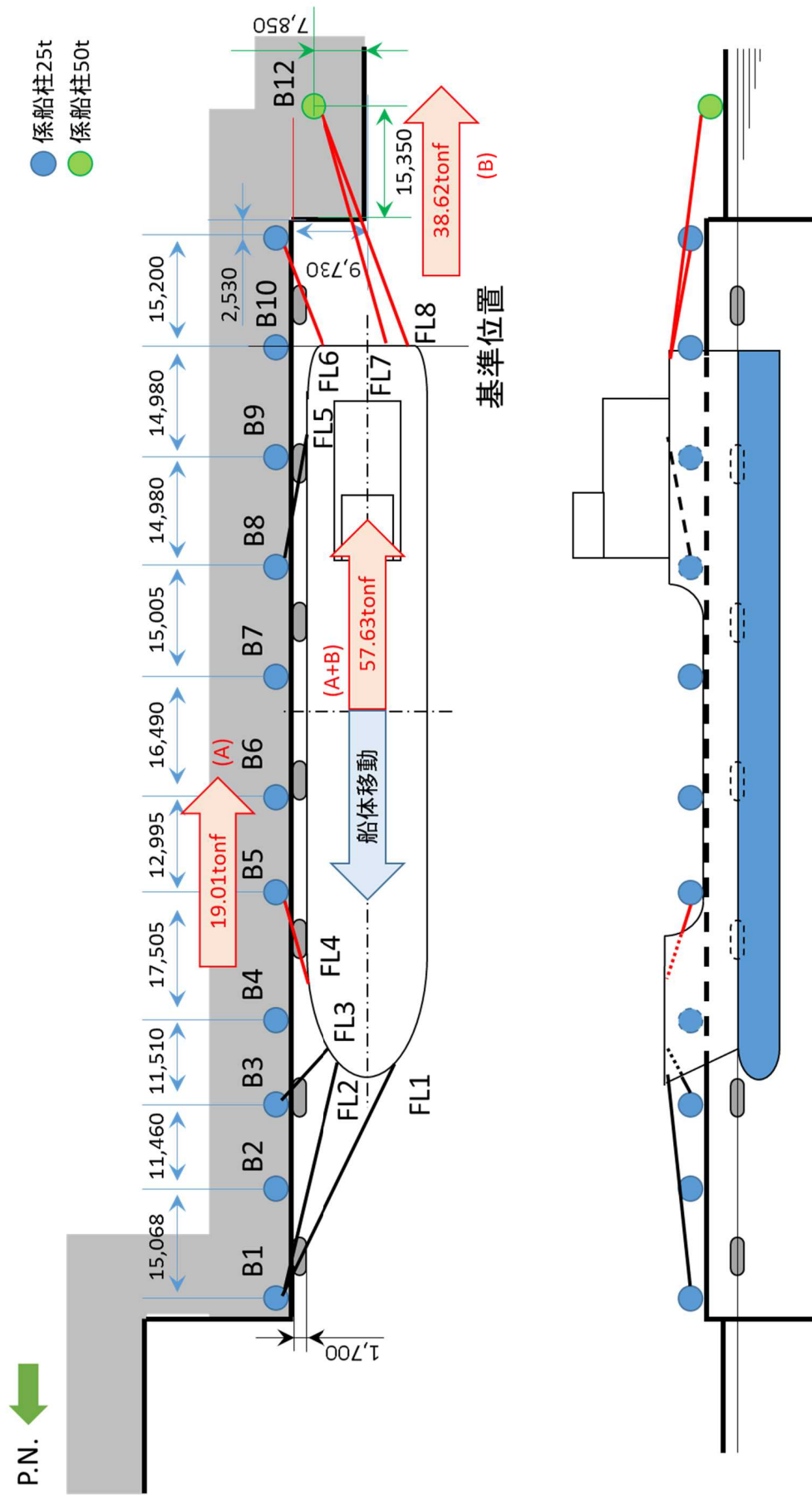


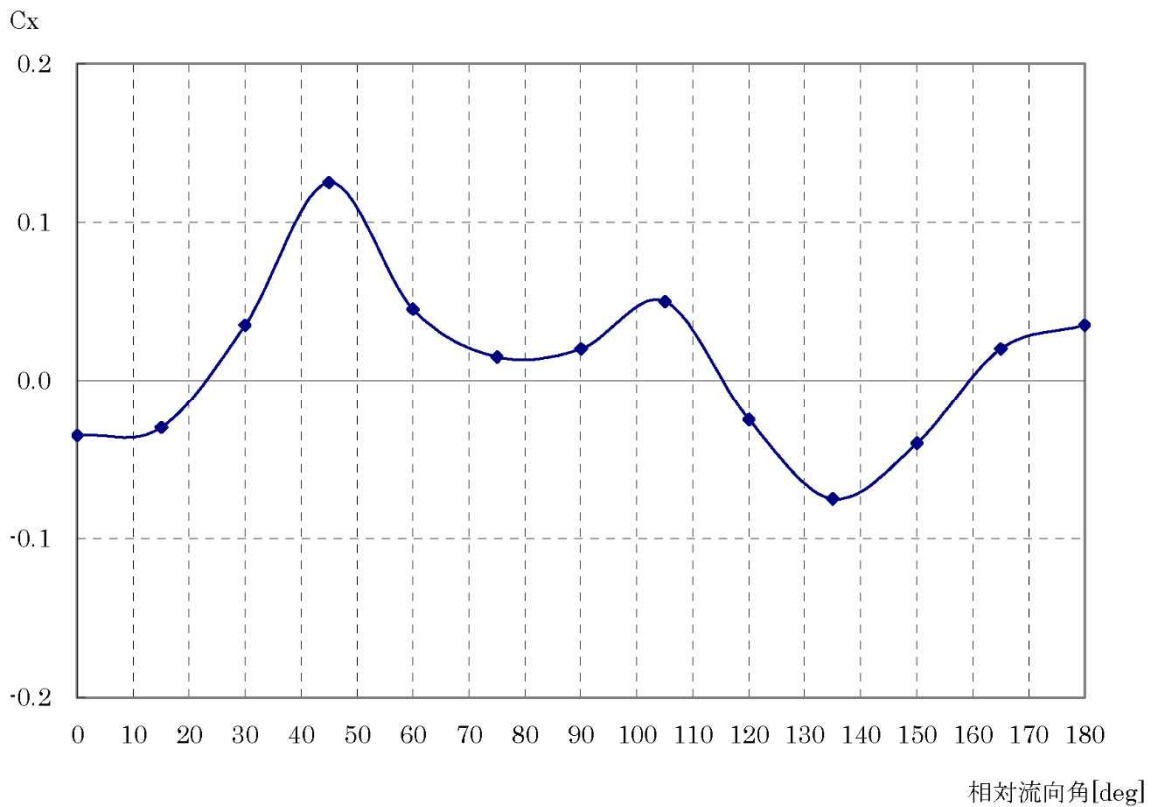
図 4.3-5 船首方向への移動に対する船尾方向係留力

d. 流圧力

流圧力の計算方法を表 4.3-4 に、係留力との比較結果を図 4.3-6 に示す。

表 4.3-4 流圧力の計算方法¹⁾

<p>【流圧力計算式】</p> $F_{Xc} = 1/2 \times C_{Xc} \times \rho_c \times V_c^2 \times L_{PP} \times d$	<p>F_{Xc} : 縦方向流圧力 (kgf)</p> <p>C_{Xc} : 縦方向流圧力係数</p> <p>V_c : 流速 (m/s)</p> <p>L_{PP} : 垂線間長 (m)</p> <p>d : 喫水 (m)</p> <p>ρ_c : 水密度 (kgf・sec²/m⁴) (=104.7kgf・sec²/m⁴)</p>
---	--



参考文献

1) OCIMF : Mooring Equipment Guidelines 3rd Edition, pp.178, pp.187, pp.202, 2008.

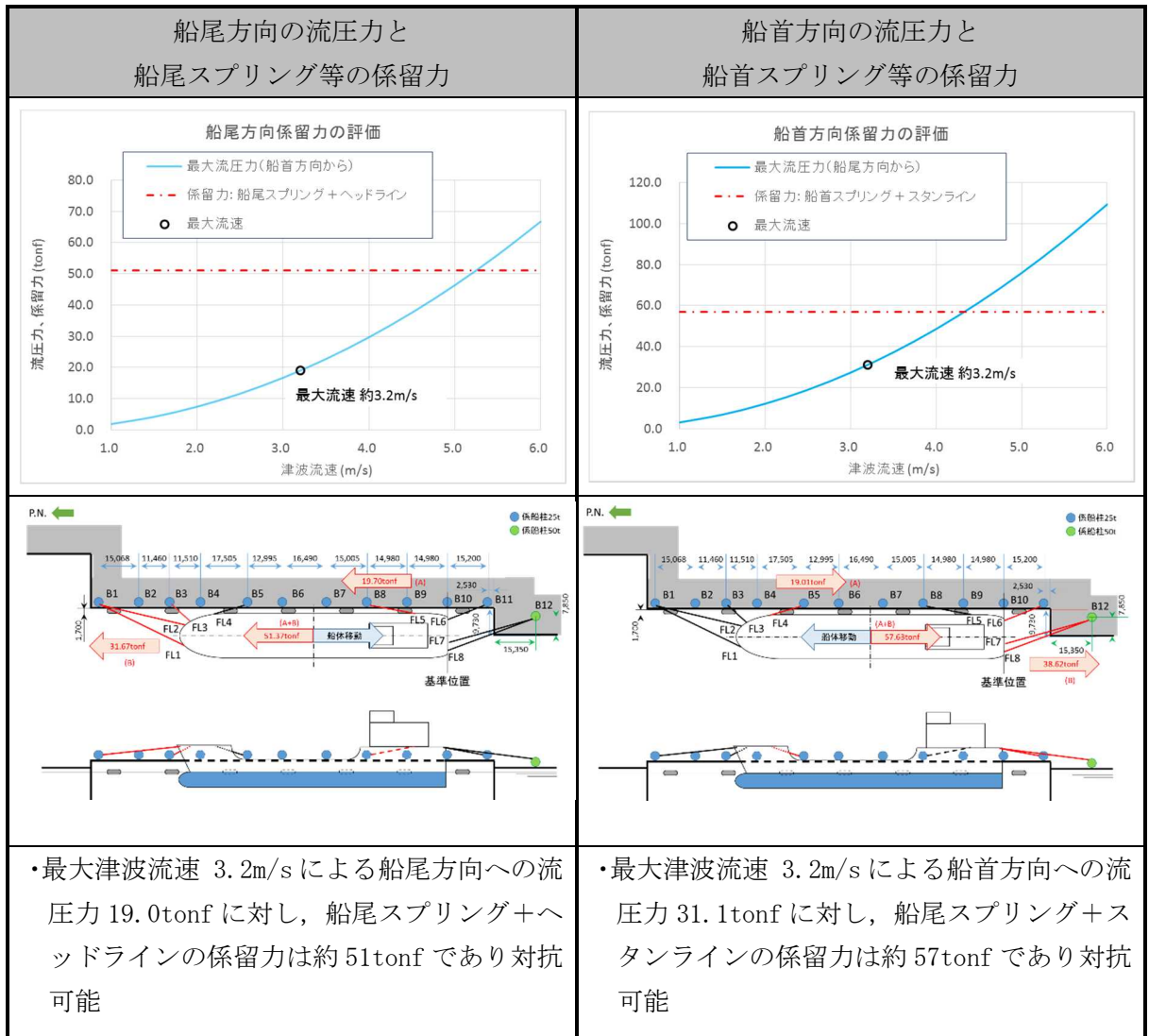


図 4.3-6 流圧力と係留力の比較

e. LLW輸送船の評価

LLW輸送船は物揚場での荷役作業のため、燃料等輸送船同様、係留期間中に短時間で襲来する津波の影響を受けることが想定される。緊急退避が困難な場合の係留索の耐力評価については燃料等輸送船と同じであるが、以下に示すようにLLW輸送船及び係留設備に係る仕様については燃料等輸送船のものに対して同等以上であることが確認できることから、当該船舶の評価は、結果を含めて燃料等輸送船の評価に包含されるものとする。

LLW輸送船及び係留索の仕様を表 4.3-5 に示す。

表 4.3-5 LLW輸送船及び係留索の仕様

項 目		仕 様		係留索耐力評価 に係る影響
		LLW輸送船	燃料等輸送船	
輸送船	総トン数	約 4,600 トン	約 5,000 トン	評価に関係なし
	積荷重量トン	約 3,000 トン	約 3,000 トン	評価に関係なし
	喫水	約 5m	約 5m	影響なし
	全長	99.95m	100.0m	影響なし
	型幅	16.5m	16.5m	影響なし
	船殻構造	二重構造	二重構造	評価に関係なし
	船底構造	二重構造	二重構造	評価に関係なし
係留索	船型	船首楼・ 船尾楼付平甲板船	船首楼・ 船尾楼付平甲板船	影響なし
	直径	60mm	60mm	影響なし
	素材種別	ポリプロピレン/ ポリエステル混紡	ポリエステル	評価に関係なし
	破断荷重	348kN	279kN	影響なし

(3) 結論

津波(最大流速 3.2m/s:図 4.3-3 参照)による流圧力に対し、係留力(約 51tonf, 約 57tonf)が上回ることを確認した。

したがって、津波に対し、燃料等輸送船が係留によって対応すると仮定した場合においても係留力により物揚場に留まり続けることができる。また、LLW輸送船についても同様である。

燃料等輸送船の漂流物影響について

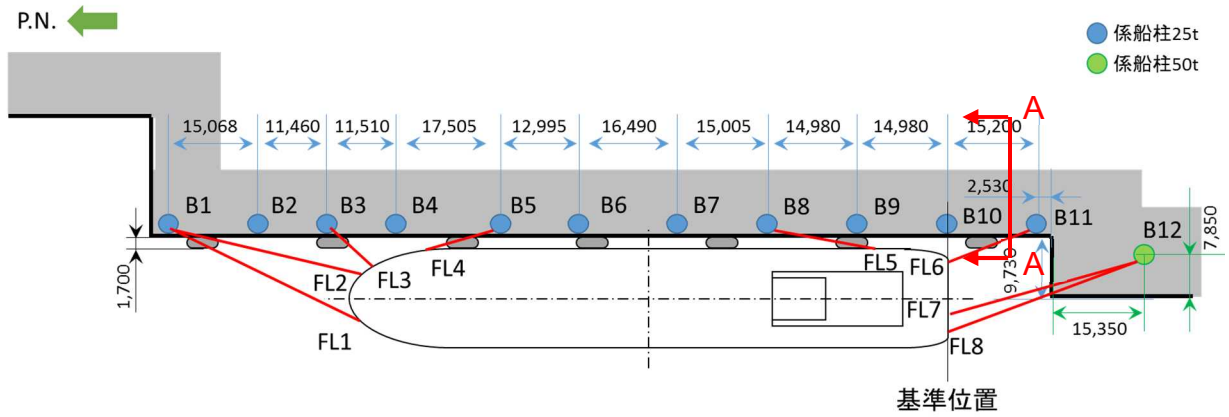
(1) 概要

「補足 4.2 (1) d. 通水性に与える影響の評価」に示しているように、燃料等輸送船は襲来までに時間的な余裕がある基準津波に対しては緊急退避が可能と考えられるが、時間的な余裕がない津波（津波警報等発令から 12 分程度で到達する基準津波 3）に対しては、津波発生時に「荷役」行程中であった場合、津波襲来時には離岸のための荷役作業（干渉回避）中となり緊急退避ができない可能性がある。そのため、「補足 4.3 燃料等輸送船の係留索の耐力について」で到達が早い津波に対しては係留により漂流物化しないことを確認している。

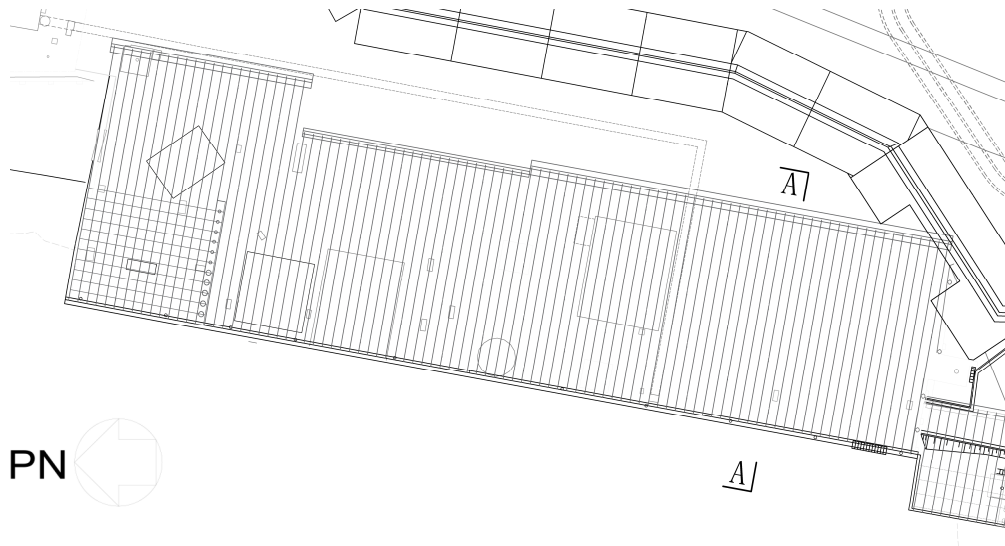
本参考資料では、係留時における基準地震動 S_s に対する燃料等輸送船の漂流物影響について検討を行った。

(2) 物揚場の設備構成

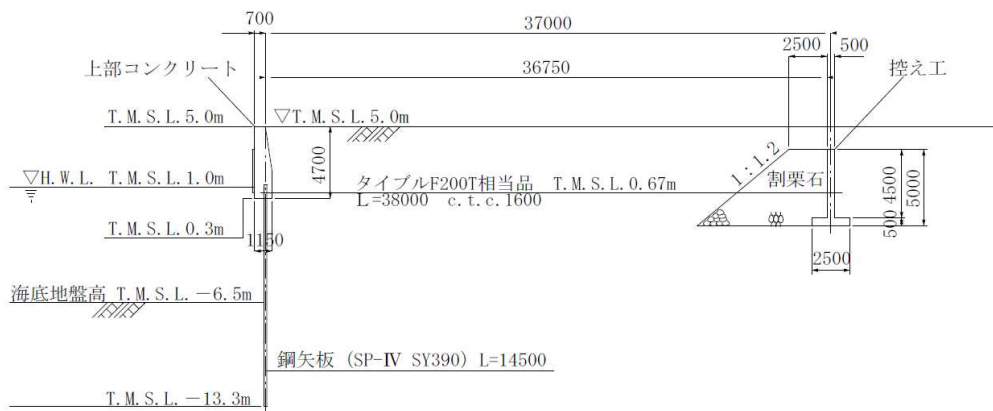
柏崎刈羽原子力発電所の物揚場における係船柱は 50t 係船柱と 25t 係船柱があり、コンクリート基礎又は鋼矢板式護岸の上部コンクリートに取り付けられている。図 4.3-参 1-1 に係船柱の配置と燃料等輸送船の係留イメージ図とそのコンクリート基礎を示す。



(1) 係船柱の配置と燃料等輸送船の係留イメージ

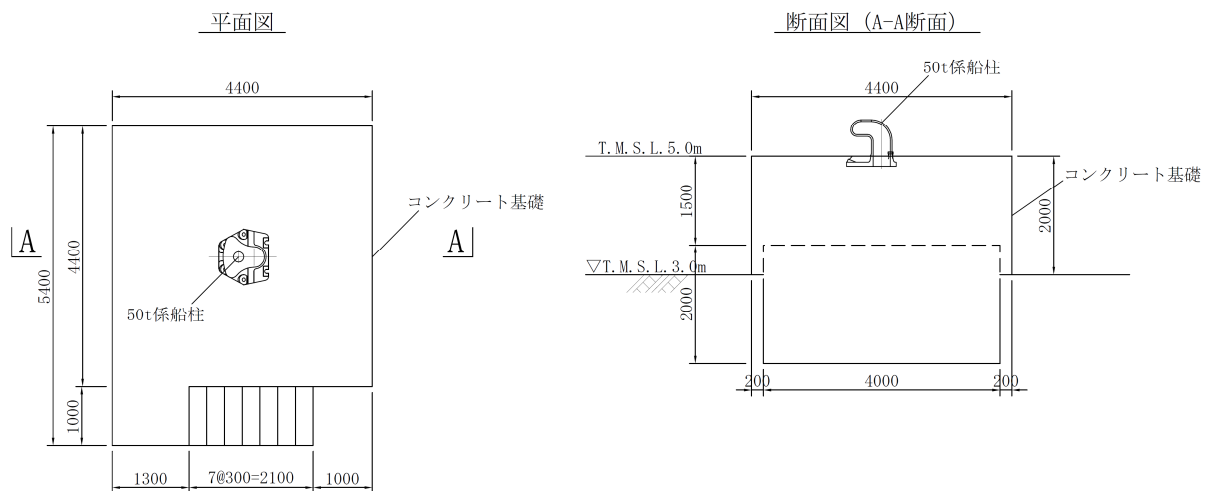


(2) 物揚場平面図



(3) 物揚場断面図 (A-A 断面)

図 4.3-参 1-1 係船柱とその基礎について



(4) 50t 係船柱コンクリート基礎図

図 4.3-参 1-1 係船柱とその基礎について

(3) 燃料等輸送船の漂流物影響

燃料等輸送船は、襲来までに時間的な余裕がある基準津波 1, 2 に対しては緊急退避が可能と整理しており、時間的な余裕がない津波（津波警報等発令から 12 分程度で到達する基準津波 3）に対しても、津波発生時に「荷役」行程中でない場合であれば、緊急退避が可能と整理している。

ここでは緊急退避ができない可能性があるとして整理している、津波発生時に「荷役」行程中であった場合の時間的な余裕がない津波（津波警報等発令から 12 分程度で到達する基準津波 3）について、燃料等輸送船の漂流物影響について検討を行う。検討に際しては係船柱の設置されている物揚場は、基準地震動 S_s が発生した場合、地震による周辺地盤の変状等が想定されるため、保守的に係船柱の係留機能が維持できなくなった場合についての燃料等輸送船の漂流物影響について検討を行う。

係船柱の係留機能が維持できなくなった場合に、燃料等輸送船が緊急退避するためには、以下の対応が必要となる。

- ① 航行可能状態にするための係船索の取り外し
- ② 係船索取り外し後の緊急退避

①については、係船索は船内からの切断が可能となっているため、係船柱からの取り外しができなかった場合でも、切断により対応が可能となっている。

②については、キャスクの荷役の際、物揚場は立入制限区域となっているため、乗組員は上陸できず、常に船内に待機している状態となっており、操舵に必要な人員が常に船内に確保されているため、対応が可能となっている。

①及び②の検討結果より、燃料等輸送船は万が一係船柱の係留機能が失われた場合を想定したとしても、上記対応により緊急退避が可能であり漂流物とならない。

なお、津波襲来直後すぐに緊急退避出来ない場合であっても、図 4.3-参 1-3 に示す物

揚場前面の海上の軌跡シミュレーションにおいて、6号及び7号機側に向かう流れにはならないことから、6号及び7号機の海水貯留堰に到達することはない、①及び②を実施後緊急退避が可能である。（軌跡シミュレーションの評価条件及び、初期配置は表4.3-参1-1及び図4.3-参1-2、**流向・流速・軌跡シミュレーションの検討結果詳細については、補足4.2 参考資料1(e)に示す。**）

表 4.3-参 1-1 軌跡シミュレーションの評価条件（燃料等輸送船）

項目		評価条件	備考
評価時間		地震発生から240分間	—
基準津波		基準津波3	○緊急退避ができない可能性があるとして整理している、基準津波3について実施
地形モデル	斜面崩壊・地盤変状	健全状態	○荒浜側護岸部の沈下について、影響評価として確認する。
	荒浜側防潮堤	健全状態	○損傷状態について、影響評価として確認する。
	防波堤	健全状態	○損傷状態について、影響評価として確認する。

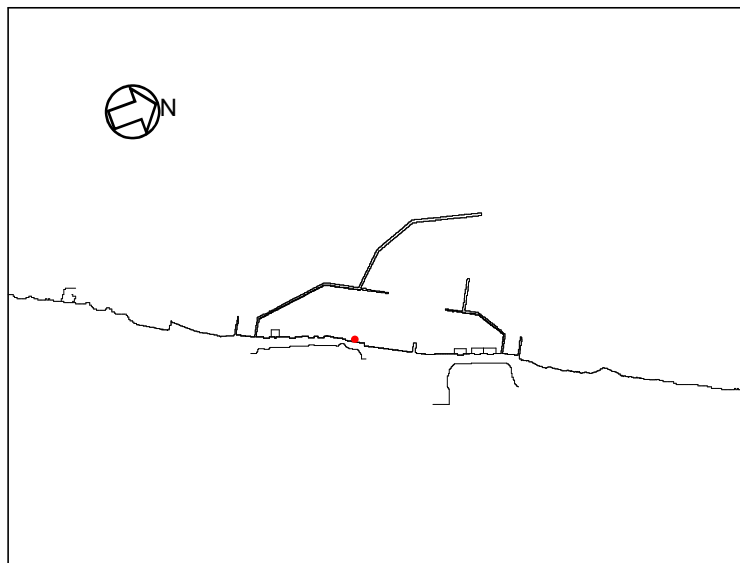


図 4.3-参 1-2 軌跡シミュレーションの初期配置（燃料等輸送船）

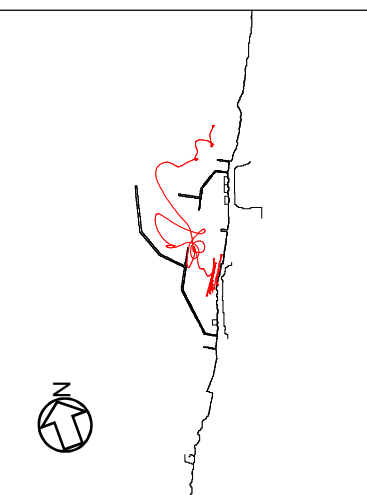

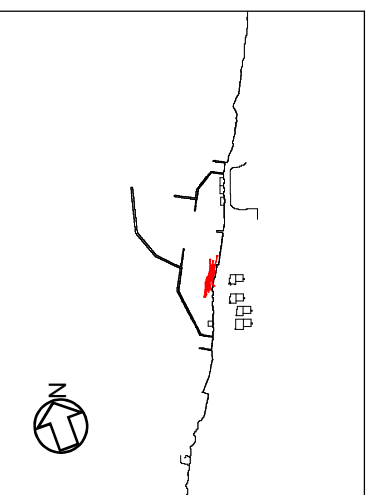
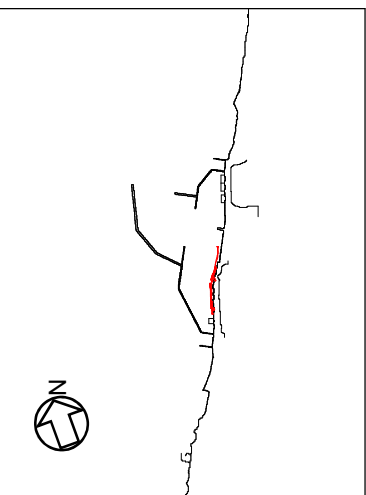
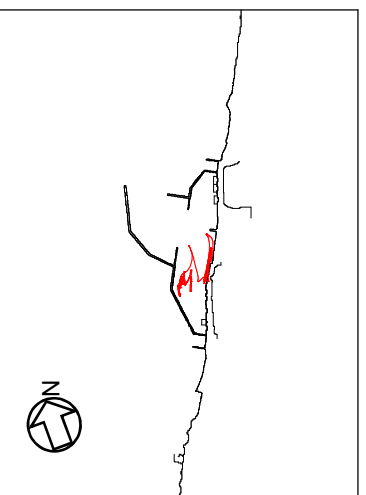
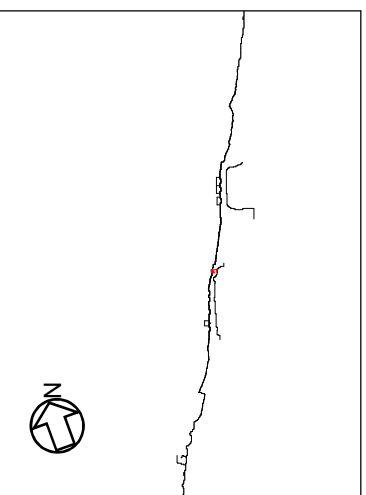
基準津波 3			
基本 ケース		1m 沈 降	
荒浜側 防潮堤 なし		2m 沈 降	
護岸部 2m 沈下		なし	
防波堤損傷			

図 4.3-1-3 基準津波 3 軌跡シミュレーションの結果 (燃料等輸送船)

(4) 物揚場を構成する部材の漂流物影響

物揚場の護岸形式は鋼矢板式護岸であり，鋼矢板，上部コンクリート，タイ材及び控え工により構成される。これらの部材で構成される物揚場は(3)に記載のように基準地震動 S_s に対して健全性が確保できず，損傷することが想定される。

また，物揚場にはクレーンが設置されているが，上記の鋼矢板，上部コンクリート，タイ材及び控え工も含め，これらの設備の主要材料が鉄筋及びコンクリートとなるため，補足 4.2 の表 4.2-13 に示すように，重量（比重）により沈降するため，漂流物とならない。

なお，物揚場を包含している補足 4.2 の荒浜側海岸線については，仮に物揚場の施設・設備が海域に流出した場合でも，補足 4.2 の図 4.2-15 に示すよう海底標高の差異により 6, 7 号機取水口に到達することはないため，滑動による漂流物化有無を評価する対象範囲外としている。

4.4 燃料等輸送船の喫水と津波高さの関係について

4.4 燃料等輸送船の喫水と津波高さの関係について

(1) はじめに

燃料等輸送船は、津波警報等発令時、原則、緊急退避するが、津波の襲来までに時間的な余裕がなく緊急退避が困難な場合について、燃料等輸送船の喫水と津波高さとの関係に基づき、寄せ波に対して物揚場に乗り上げることのないこと、引き波に対して座礁及び転覆するおそれのないことを確認する。また、緊急退避が可能であった場合についても、退避中に引き波により、座礁及び転覆するおそれのないことを確認する。

(2) 確認条件

燃料等輸送船は、津波警報等発令時、原則、緊急退避する。輸送行程（「物揚場への接岸」～「荷役」～「物揚場からの離岸」）において、燃料等輸送船と輸送物の干渉がない「荷役」以外の行程においては、津波警報等の発令から数分程度で緊急退避が可能であるが、燃料等輸送船と輸送物が干渉し得る「荷役」行程では、緊急退避に15～30分程度を要する場合がある。

柏崎刈羽原子力発電所で襲来が想定される津波の到達時間と緊急退避に要する時間との関係を示すと図4.4-1のとおりとなる。

これを踏まえ、以下の3ケースを確認ケースとする。なお、図4.4-1より、40分程度の時間があれば緊急退避が十分可能であることから、確認の範囲は津波警報等の発令後、40分の期間とした。

ケース1：寄せ波による物揚場への乗り上げ評価

緊急退避できずに基準津波3の寄せ波第一波（*1）を受ける

注記*1：最高水位 T.M.S.L. +4.08m（発生時刻：地震後約15分）

ケース2：引き波による座礁及び転覆評価（緊急退避不能時）

緊急退避できずに基準津波3の引き波第一波（*2～3）を受ける

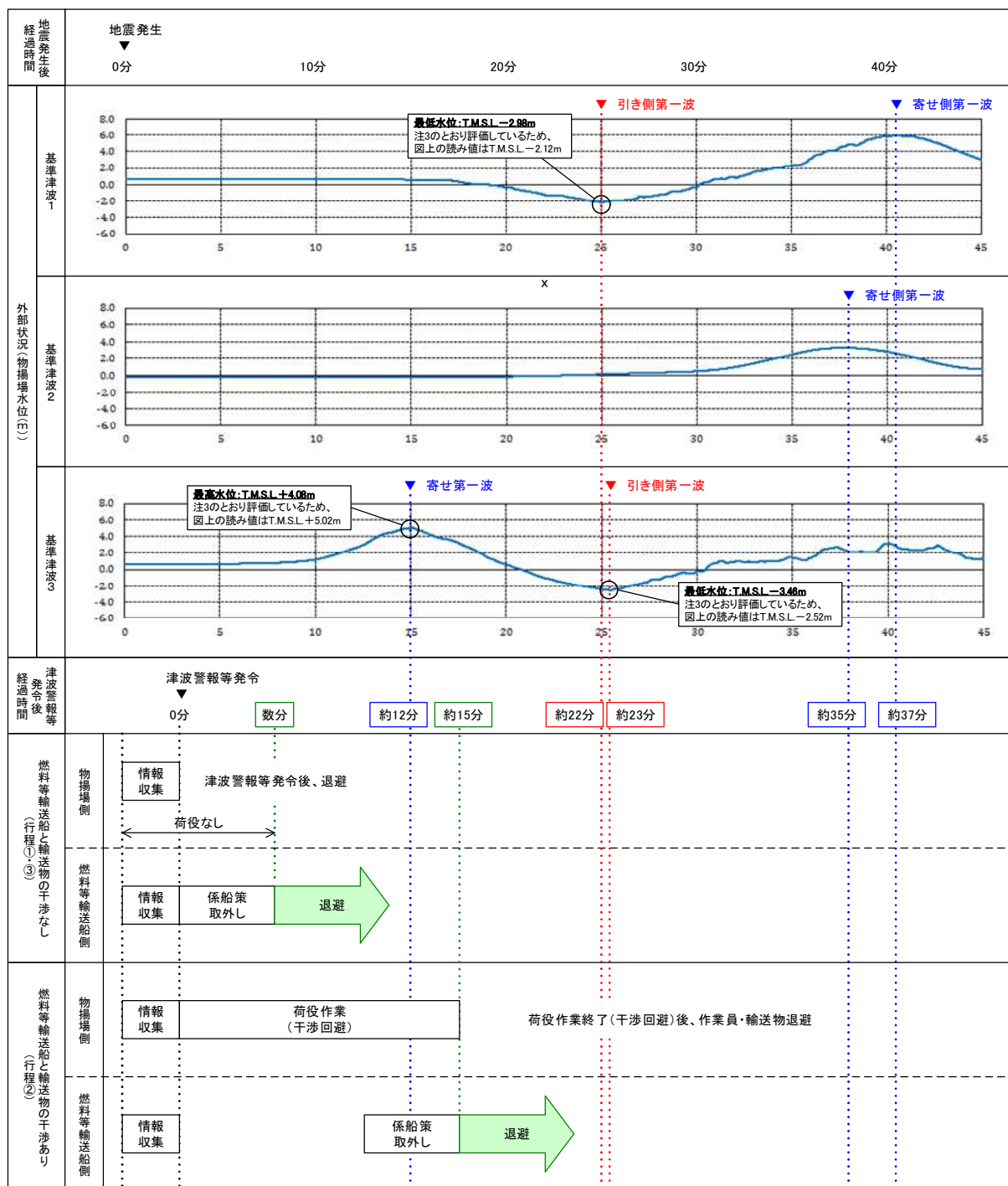
注記*2：最低水位 T.M.S.L. -3.46m（発生時刻：地震後約26分）

注記*3：基準津波1の引き波第一波は本ケースに包含される

ケース3：引き波による座礁及び転覆評価（退避中）

緊急退避中に基準津波3の引き波第一波（*4）を受ける

注記*4：ケース2と同条件



注1：津波警報等発令後経過時間は、地震発生の3分後(気象庁HPに記載の発表目標時間)に津波警報等が発令するものとして記載
 注2：津波の到達時間は、引き側及び寄せ側ともピークの到達時間を記載
 注3：本図の津波水位は、それぞれ以下の数値を予め含めて評価した結果を示している
 ・基準津波1：期望平均満潮位(T.M.S.L.+0.49m)、潮位のバラつき(上昇側0.16m)、地殻変動量(0.21m)
 ・基準津波2：期望平均干潮位(T.M.S.L.+0.03m)、潮位のバラつき(下降側0.15m)、地殻変動量(0.20m)
 ・基準津波3：期望平均満潮位(T.M.S.L.+0.49m)、潮位のバラつき(上昇側0.16m)、地殻変動量(0.29m)
 注4：燃料等輸送船の退避とは、物揚場から離岸することを示す
 注5：行程①は「物揚場への接岸」、行程②は「荷役」、行程③は「物揚場からの離岸」を示す

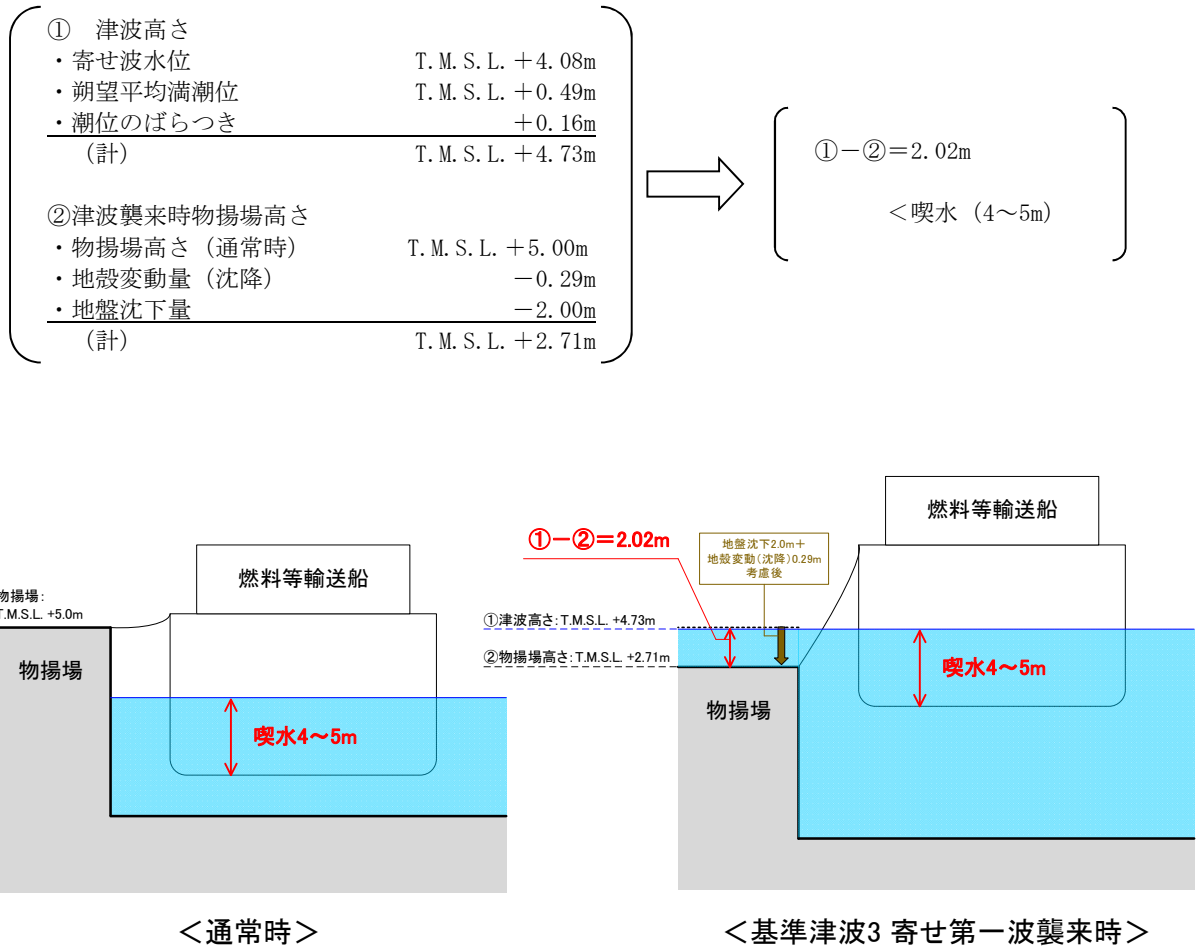
図 4.4-1 津波の到達と燃料等輸送船の緊急退避に要する時間

(3) 確認結果

a. ケース 1：寄せ波による物揚場への乗り上げ評価

寄せ波による津波高さと喫水の関係を図 4.4-2 に示す。

これより、燃料等輸送船は物揚場に乗り上げることはないことを確認した。



(備考)

- 津波の原因となる地震による地殻変動 (0.29m 沈降) を考慮した。
- 地盤変状について、基準地震動による地盤沈下を保守的に評価した値 (2.0m 沈下) を考慮しても、燃料等輸送船は物揚場に乗り上げることはない。
- なお、燃料等輸送船の喫水は、積荷、バラスト水等で変動するが、積荷なしでも過去の実績よりおよそ 4m 以上である。

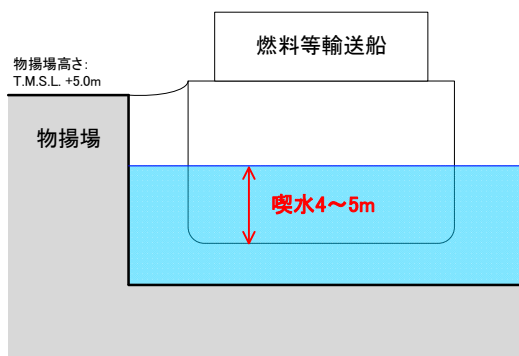
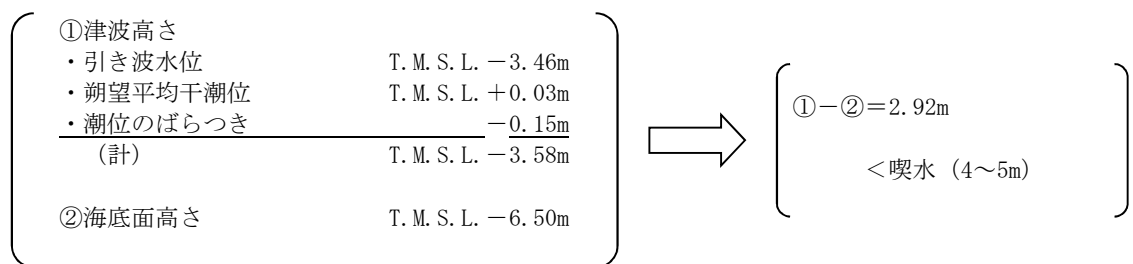
図 4.4-2 寄せ波による津波高さと喫水の関係

b. ケース 2：引き波による座礁及び転覆評価（緊急退避不能時）

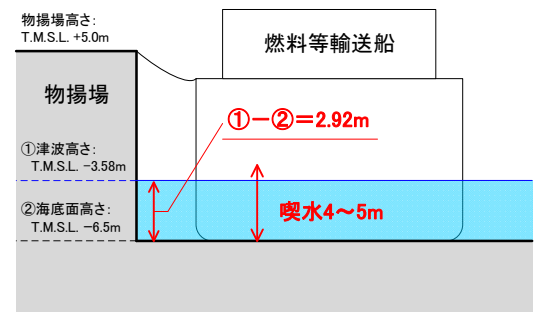
引き波による津波高さと喫水の関係を図 4.4-3 に示す。

これより、燃料等輸送船は引き波のピークの際には一時的に着底し得ることが示されるが、この場合も、以下の理由より座礁及び転覆することはない（漂流物とならない）。

- 一時的な着底があったとしても、輸送船は二重船殻構造等、十分な船体強度を有しており、水位回復後に退避が可能である。
- また、着底後の引き波による流圧力、あるいは水位回復時の寄せ波による流圧力に対する転覆の可能性については、輸送船の重量及び扁平な断面形状より、その可能性はない。なお、転覆の可能性に関わる具体的な評価を別紙に示す。



<通常時>



<基準津波3 引き第一波襲来時>

(備考)

○津波の原因となる地震による地殻変動及び地盤変状は、海底との距離が大きくなる方向に寄与するため、保守的に考慮していない。

図 4.4-3 引き波による津波高さと喫水の関係

c. ケース 3：引き波による座礁及び転覆評価（退避中）

柏崎刈羽原子力発電所の港湾内の海底面高さは、港湾内ではほぼ一定であるため、本ケースにおける引き波高さと喫水との関係はケース 2 における図 4.4-3 と同等である。

したがって、図より燃料等輸送船は、退避中、引き波のピークの際には一時的に着底し得ることが示されるが、この場合も、前述と同様、輸送船の船体強度、重量及び形状より、離岸後の輸送船は、座礁及び転覆することなく、退避可能（漂流物とならない）と判断できる。

d. 結論

朔望平均満潮位・干潮位等の保守的な条件を考慮した場合でも、燃料等輸送船は、津波高さと喫水高さの関係から寄せ波により物揚場に乗り上げることはなく、また、緊急退避ができない場合及び退避中に引き波により一時的に着底した場合でも、座礁及び転覆しない（漂流物とならない）ことを確認した。

(4) LLW輸送船の評価

LLW輸送船については、その船体仕様が以下に示すように燃料等輸送船とほぼ同じ仕様であることから、その評価及び結果についても燃料等輸送船の評価結果及び結論に包含される。

項目	仕様		各評価結果への影響			
	LLW輸送船	燃料等輸送船	乗上げ	座礁	転覆	
船体	全長	99.95m	100.0m	—	—	—
	全幅	16.5m	16.5m	—	—	同等
	喫水	5.4m	5m	保守側	—	同等
	船殻構造	二重構造	二重構造	—	同等	同等
	船底構造	二重構造	二重構造	—	同等	同等
	船型	船首楼・ 船尾楼付 平甲板船	船首楼・ 船尾楼付 平甲板船	—	同等	同等

以上の船体仕様比較結果より、LLW輸送船の物揚場への乗り上げ、港湾内での座礁、転覆の評価については、燃料等輸送船と同等の評価結果が想定されることから、燃料等輸送船の評価結果に包含されるものとする。

燃料等輸送船の着底時の転覆の可能性について

本別紙では、燃料等輸送船が物揚場における停泊時及び港湾内で緊急退避中に引き波により着底することを想定し、その際の転覆の可能性について評価する。

1. 評価条件

(1) 燃料等輸送船の仕様・形状

燃料等輸送船の仕様を表1に、外形図を図1及び図2に示す。転覆評価では、排水量について少ない方が保守的な評価となるため、空荷状態で評価を行った。

表1 燃料等輸送船の仕様

項目	仕様
排水量	満載状態：約7,000トン (空荷状態：4,000トン)
載貨重量トン	約3,000トン
喫水	約5m
全長	100.0m (垂線間長：94.4m)
型幅	16.5m

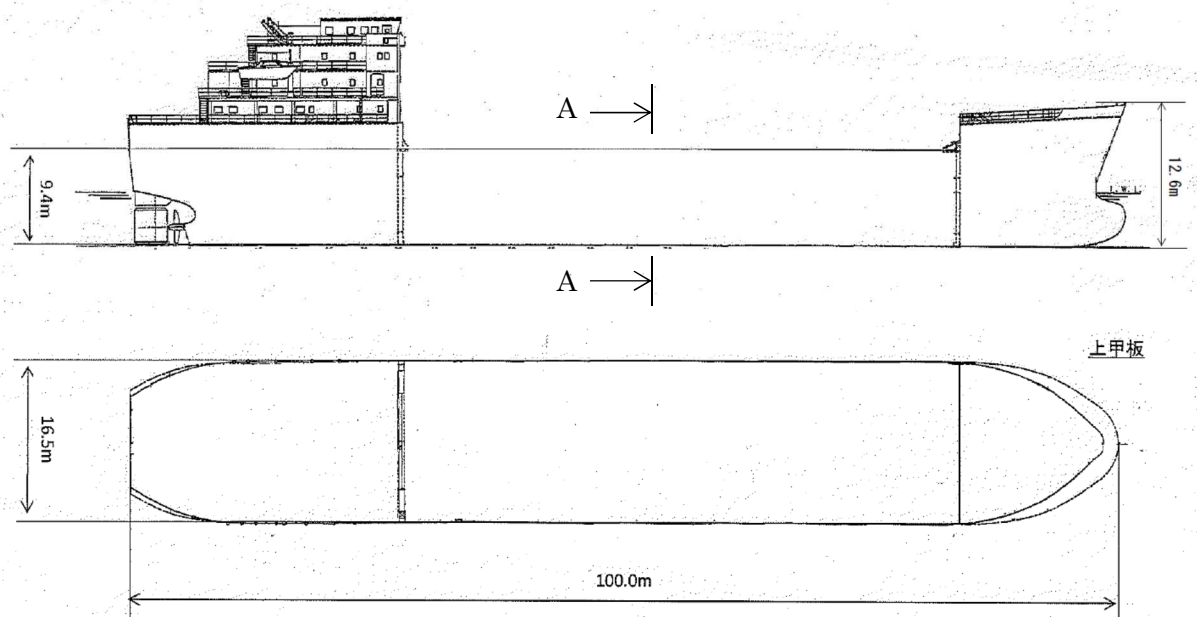


図1 燃料等輸送船外形図

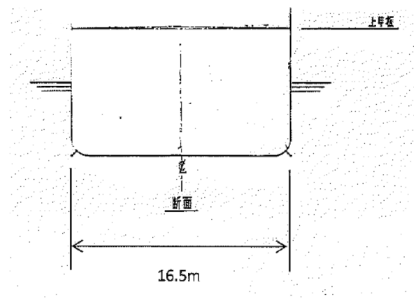


図2 燃料等輸送船外形図 (A-A 矢視)

(2) 転覆モード

小型の船舶の場合、丸型やV型の船底を有しているものがある。このような船舶の場合、図3に示すとおり引き波により着底した際には傾きが発生し、この状態で津波による流圧力を受けると転覆する可能性が考えられる。

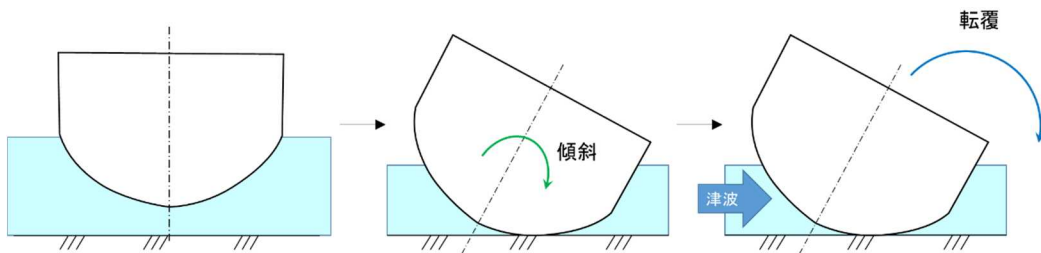


図3 丸型の船底を有する船舶の着底状態

一方、燃料等輸送船は一般のタンカーなどと同様に図2で示したとおり、断面形状が扁平であり船底が平底型である。このため、引き波により着底した場合にも傾くことなく安定していると考えられるが、ここでは保守的に、図4に示すように燃料等輸送船が津波を受けた際に船底の端部が海底に引っ掛かり、船底端部周りに回転する状況を想定し、転覆可能性の評価を行うものとする。

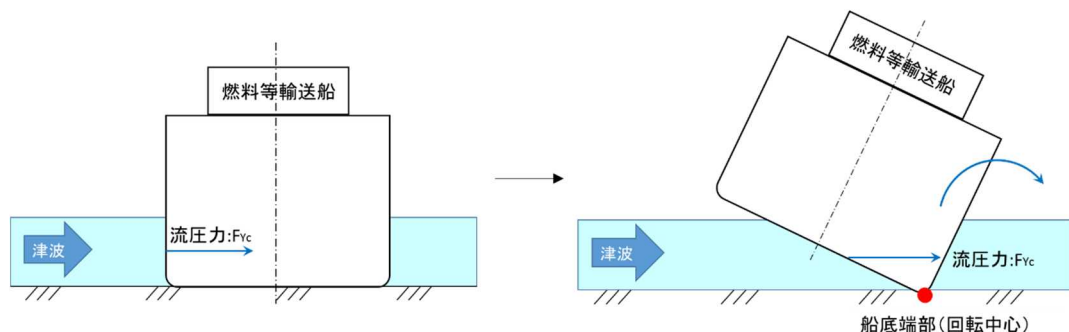


図4 想定転覆モード

2. 転覆評価

図4の転覆モードにおいて燃料等輸送船に働く力とモーメントを図5に示す。

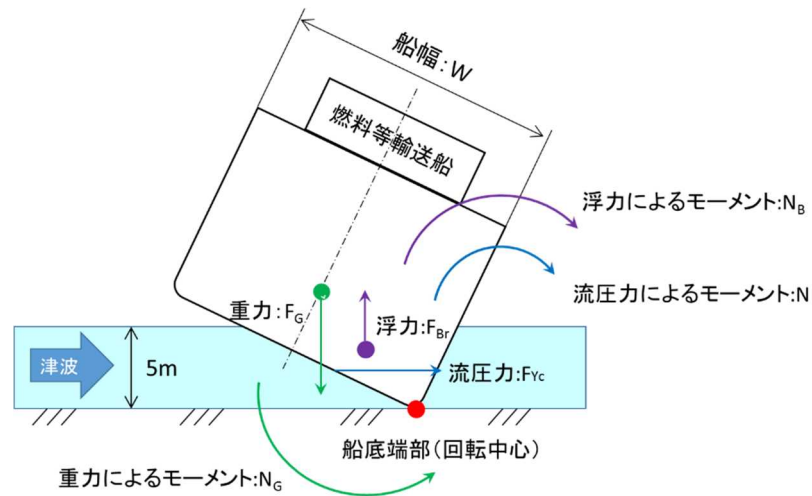


図5 燃料等輸送船に働く力とモーメント

津波を受けると流圧力 F_{Yc} によるモーメント N が発生し、船底端部を中心に燃料等輸送船を回転させる。また、浮力 F_{Br} によるモーメント N_B も流圧力によるモーメント N と同じ方向に発生する。一方、重力 F_G によるモーメント N_G がこれらのモーメントと逆方向に発生し燃料等輸送船の傾きを戻す。この際、流圧力及び浮力によるモーメントにより傾きが増大し、重心位置が回転中心の鉛直線上を超える場合には転覆する。

重心位置が回転中心の鉛直線上にあるときの傾きは約 48° であるため、ここでは傾きを 24° と仮定し、流圧力によるモーメント N と浮力によるモーメント N_B の和と重力によるモーメント N_G とのモーメントの釣り合いから転覆しないことを確認する。

重力によるモーメント N_G は次式のとおりとなる。

$$\begin{aligned} N_G &= F_G \times X(\text{GR}) \\ &= 4000 \times 4.5 \\ &= 18000 (\text{tonf} \cdot \text{m}) \end{aligned}$$

N_G : 重力によるモーメント (tonf・m)

F_G : 燃料等輸送船 (空荷状態) の重量 (tonf) (=4000)

$X(\text{GR})$: 重心と回転中心の水平方向距離 (m) (≈ 4.5)

次に流圧力によるモーメント N は次式にて計算できる。

$$N = F_{Yc} \times W \div 2$$

$$= F_{Yc} \times d \div 2$$

N : 流圧力によるモーメント (tonf・m)

F_{Yc} : 流圧力 (tonf)

W : 水位 (m)

d : 喫水 (m) (=5)

ここで、流圧力は受圧面積が最大ときに最も大きくなり、かつ、流圧力によるモーメントは流圧力の作用点と回転中心との距離が最大ときに最も大きくなるため、本評価における水位は喫水と同等とした。

また、横方向の流圧力 F_{Yc} を表 2 に示す方法で計算する。

表 2 横方向流圧力の計算方法¹⁾

<p>【流圧力計算式】</p> $F_{Yc} = 1/2 \times C_{Yc} \times \rho_c \times V_c^2 \times L_{PP} \times d$	<p>F_{Yc} : 横方向流圧力 (kgf)</p> <p>C_{Yc} : 横方向流圧力係数</p> <p>V_c : 流速 (m/s)</p> <p>L_{PP} : 垂線間長 (m) (=94.4)</p> <p>d : 喫水 (m) (=5)</p> <p>ρ_c : 水密度 (kgf・sec²/m⁴) (=104.7kgf・sec²/m⁴)</p>
---	--

このとき、流速は図 6-1 に示す早く襲来する津波の最大流速 3.2m/s を適用し、横方向流圧力係数を図 7 より 10 と仮定する。

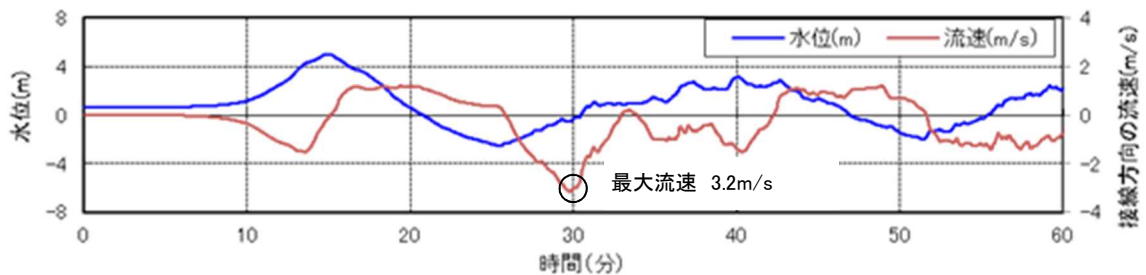


図 6-1 基準津波 3 の水位・流速 (物揚場前面)

なお、地震等により防波堤が損傷した場合でも、流速は図 6-2 に示すとおり防波堤健全時

(図 6-1) よりも小さいため、流速条件は防波堤健全時における流速に包含される。

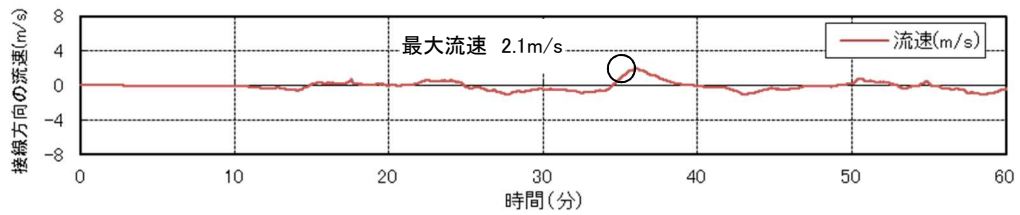


図 6-2 防波堤損傷時における基準津波 3 の流速 (物揚場前面)

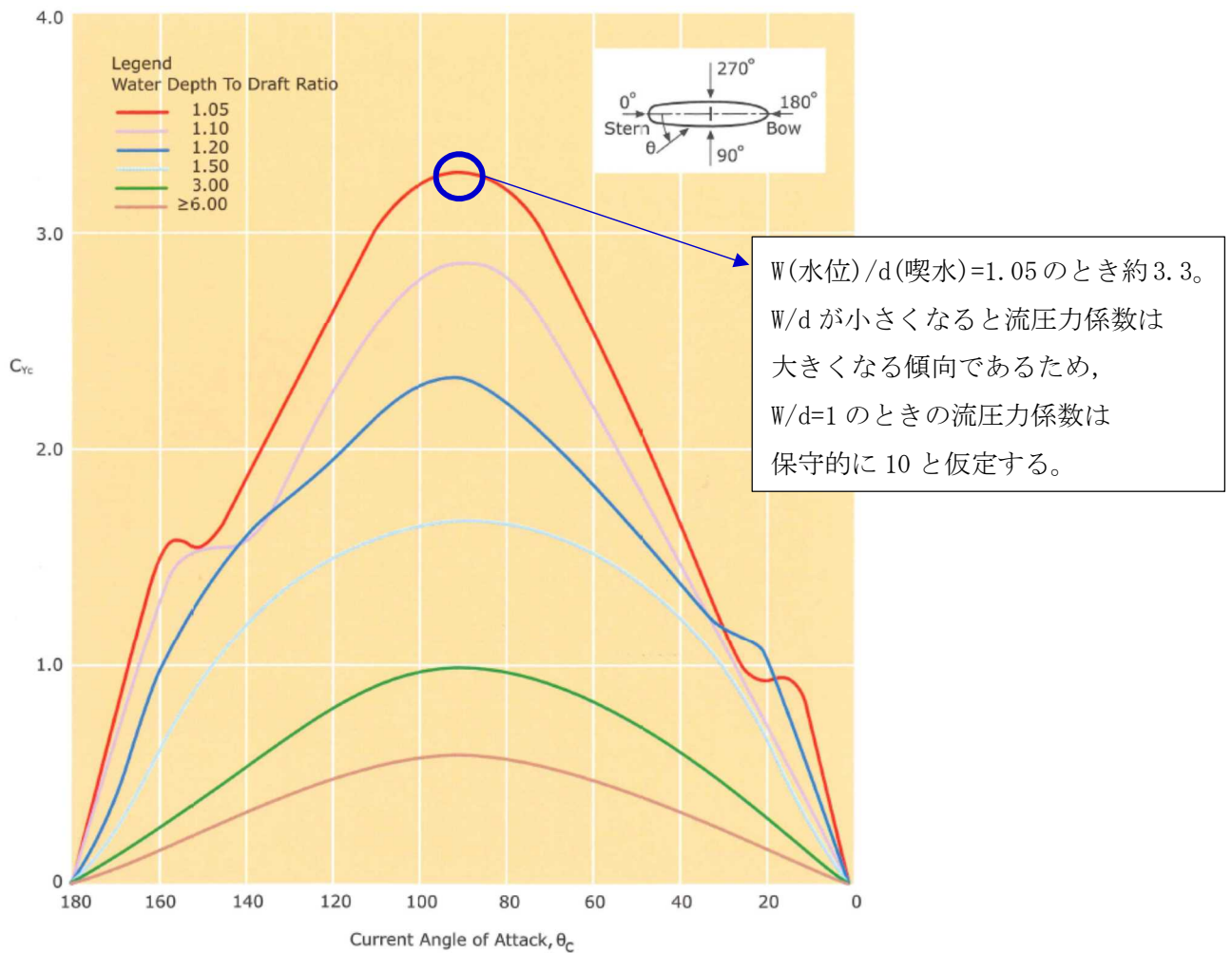


図 7 横方向の流圧力係数¹⁾

参考文献

1) OCIMF : Mooring Equipment Guidelines 3rd Edition, pp.178, pp.190, pp.202, 2008.

上記の表 2 により F_{Yc} は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} F_{Yc} &= 1 \div 2 \times 10 \times 104.7 \times 3.2^2 \times 94.4 \times 5 \\ &\doteq 2531000 \text{ (kgf)} \\ &= 2531 \text{ (tonf)} \end{aligned}$$

従って、流圧力によるモーメントは以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} N &= F_{Yc} \times d \div 2 \\ &= 2531 \times 5 \div 2 \\ &\doteq 6328 \text{ (tonf} \cdot \text{m)} \end{aligned}$$

最後に浮力によるモーメント N_B は次式にて評価する。

$$\begin{aligned} N_B &= F_{Br} \times X(BR) \\ &= 1700 \times 3.0 \\ &\doteq 5100 \text{ (tonf} \cdot \text{m)} \end{aligned}$$

N_B : 浮力によるモーメント (tonf·m)
 F_{Br} : 傾いた際の燃料等輸送船の浮力 (tonf) ($\doteq 1700$)
 $X(BR)$: 浮心と回転中心の水平方向距離 (m) ($\doteq 3.0$)

以上の結果をまとめると、以下に示すとおり重力によるモーメント N_G は流圧力によるモーメントと浮力によるモーメントの和より大きくなるため、燃料等輸送船は転覆することはない。

$$\begin{aligned} N + N_B &= 6328 + 5100 \\ &= 11428 \text{ (tonf} \cdot \text{m)} < N_G = 18000 \text{ (tonf} \cdot \text{m)} \end{aligned}$$

3. 結論

燃料等輸送船は着底後に津波による流圧力を受けてもその形状から通常の状態であれば転覆することはない。また、保守的に船底の一部が固定されるような状態を想定した場合であっても転覆しないことを確認した。

4.5 浚渫船の係留可能な限界流速について

4.5 浚渫船の係留可能な限界流速について

1. 概要

浚渫作業関連船舶は、港湾内入口付近の海域で浚渫作業を実施する。作業関連船舶の内、自航式の船は曳舟と揚錨船のみであり、作業中に基準津波が発生した場合は基本的に全ての船舶が浚渫船に係船しているため、自航式船舶を除き緊急退避することは困難と考えられる。荒天時や夜間・休日においては、土運船や曳舟及び揚錨船は、基本、湾内の揚陸棧橋に係留して基準津波に対して漂流防止策を採るが、浚渫船は港湾入口付近で錨泊状態であり、津波が来襲しても緊急退避はやはり困難となる。以上のことから、浚渫関連船舶はアンカーによる錨泊状態で津波を迎えることになる。

本資料では、浚渫船を中心とした浚渫作業関連船舶の基準津波に対する漂流限界流速と必要な把駐力について評価する。この際、運用上考えられる船舶の係船状態を考慮し、津波の影響を最も受けると考えられる組合せを代表として評価する。

なお、錨泊時の係船状態やアンカーの組合せについては、現場での安全性や作業性を考慮し変更する可能性があるが、その際は漂流物化させないために必要な仕様のアンカーを再選定することとする。

2. 評価

(1) 浚渫船、係船する船舶及び係船設備の仕様と錨泊状態

津波の影響を最も受けると考えられる浚渫船と係船する船舶の組合せには、浚渫作業終了時における土運船、曳舟及び揚錨船の係船状態が該当する。各船舶の仕様を表 4.5-1 に、設備の仕様、また錨泊概要の例を表 4.5-2 に、浚渫作業関連船舶の外形図を図 4.5-1～図 4.5-4 に、錨泊概要を図 4.5-5 及び図 4.5-6 に示す。

表 4.5-1 浚渫作業関連船舶の仕様

項目		仕様
浚渫船（新造）*	全長	50.00m
	幅	21.00m
	喫水（計画）	2.00m
土運船	全長	31.50m
	幅	11.00m
	喫水（計画）	2.66m
曳舟	全長	26.6m
	幅	7.15m
	喫水（計画）	3.0m
揚錨船	全長	11.5m
	幅	3.8m
	喫水（計画）	1.7m

注記*：新造船が就航予定であり、既存船よりも大きいため保守側の評価として採用。

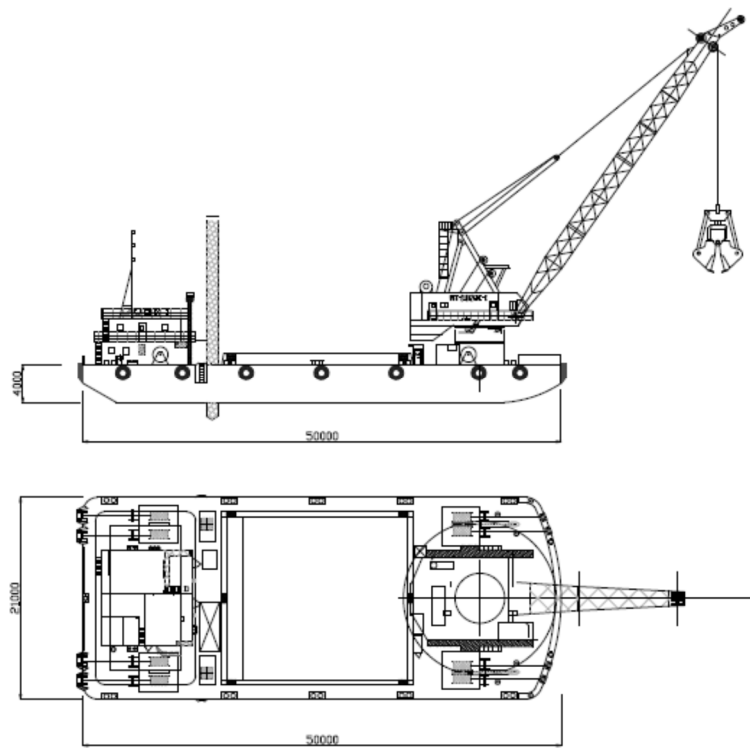


図 4.5-1 浚渫船（新造）の外形図

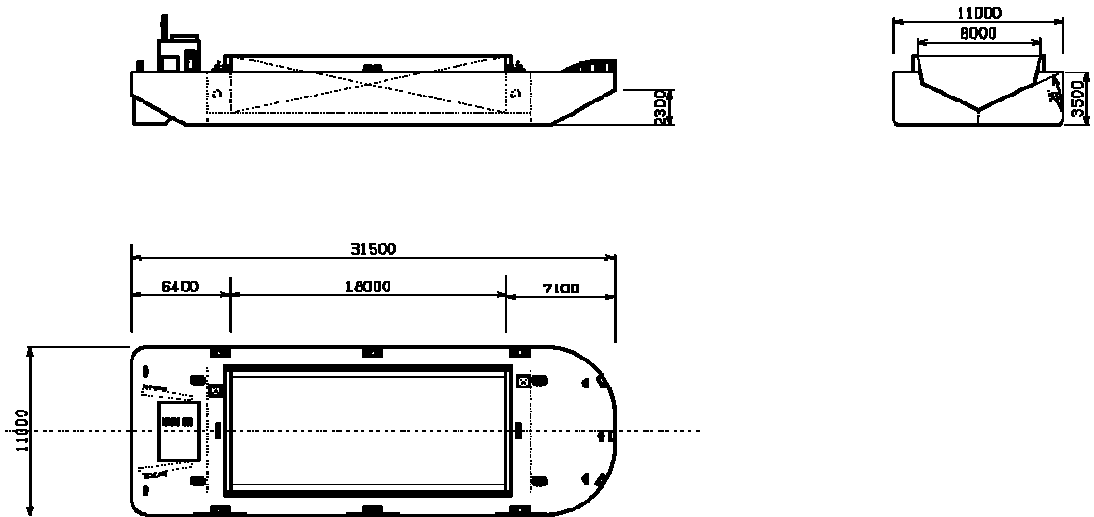


図 4.5-2 土運船の外形図

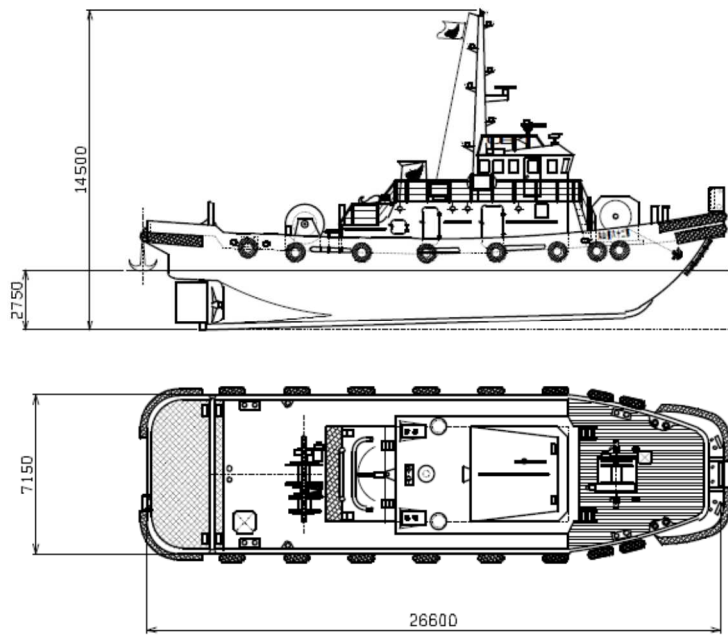


図 4.5-3 曳舟の外形図

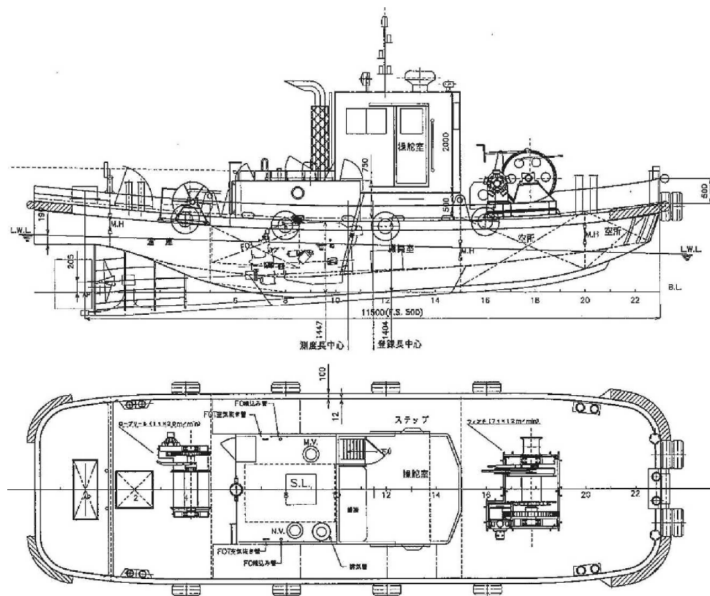


図 4.5-4 揚錨船の外形図

表 4.5-2 係留設備の仕様及び錨泊状況の例

項目		仕様
アンカー	型式	高把駐力ストックレスアンカー
	質量・数量	2.27t×4基 (平時作業中に常に投錨)
		2.72t×2基 (地震発生時に投錨)
係船ロープ	種類	ワイヤーロープ φ36mm
		チェーン φ38mm
錨泊概要	錨泊予定範囲	図 4.5-5 参照
	錨泊状態	図 4.5-6 参照



図 4.5-5 浚渫作業関連船 錨泊予定範囲

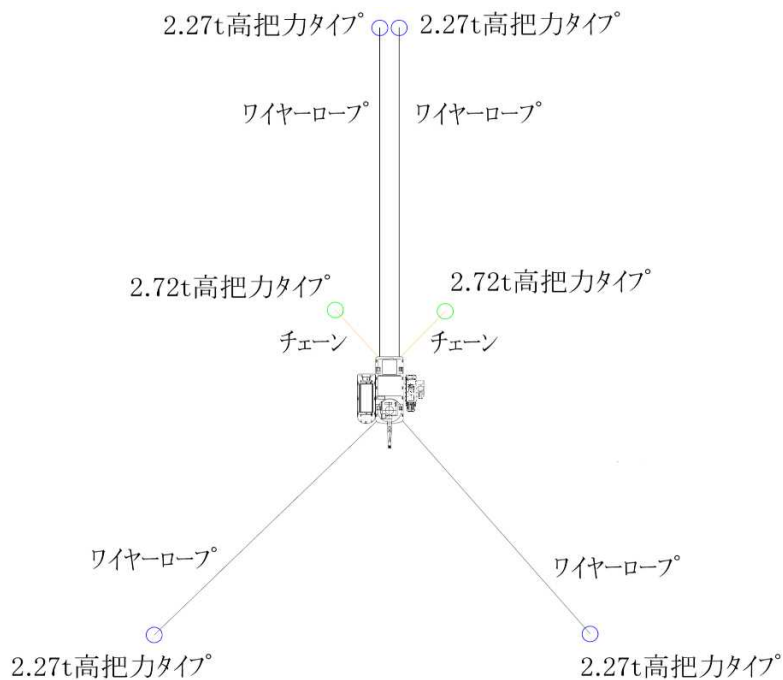


図 4.5-6 浚渫作業関連船舶 錨泊状態 (例)

(2) 漂流限界流速の評価

津波の影響を最も受けると考えられる浚渫船と係船する船舶の組合せに対して、基準津波による流向圧力が働いた場合に、浚渫船備え付けのアンカーで流されずに耐えられる限界流速について評価する。

評価において考慮する荷重は、津波流速を船体の喫水範囲に受けて生じる流向圧力とアンカーによる把駐力とする。流向圧力については、最も保守的になる船体側面への垂直方向流れを想定し、各船舶の流向圧力係数を考慮する。

●高把駐カストックレスアンカーの把駐力

高把駐カストックレスアンカーの把駐力は、次の式で算定できる²⁾。なお、係留ロープにワイヤーロープを使用するアンカーは、海底との摩擦力による係駐力には期待しない。チェーンを使用するアンカーについても保守的に期待しないこととする。

$$\begin{aligned} P_1 &= \omega_{a1} \times \lambda_a \\ &= 2.27 \times 7 \\ &= 15.89 \quad [\text{t}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_2 &= \omega_{a2} \times \lambda_a \\ &= 2.72 \times 7 \\ &= 19.04 \quad [\text{t}] \end{aligned}$$

P : アンカー1基あたりの把駐力[ton]

ω_a : 高把駐カストックレスアンカーの質量[ton]

λ_a : 高把駐カストックレスアンカーの把駐力係数 (=7)²⁾

高把駐カストックレスアンカーは P_1 が 4 基、 P_2 が 2 基と、全部で 6 基設置されるため、把駐力合計は次の通り。

$$\begin{aligned} P &= P_1 \times 4 + P_2 \times 2 = 15.89 \times 4 + 19.04 \times 2 \\ &= 101.64 \quad [\text{t}] \end{aligned}$$

● 流向圧力係数の算定

基準津波による流向圧力を船体側面に垂直に受けるものと保守的に考えて、流向圧力係数を図 4.5-7 のグラフから線形補間によって算定する。

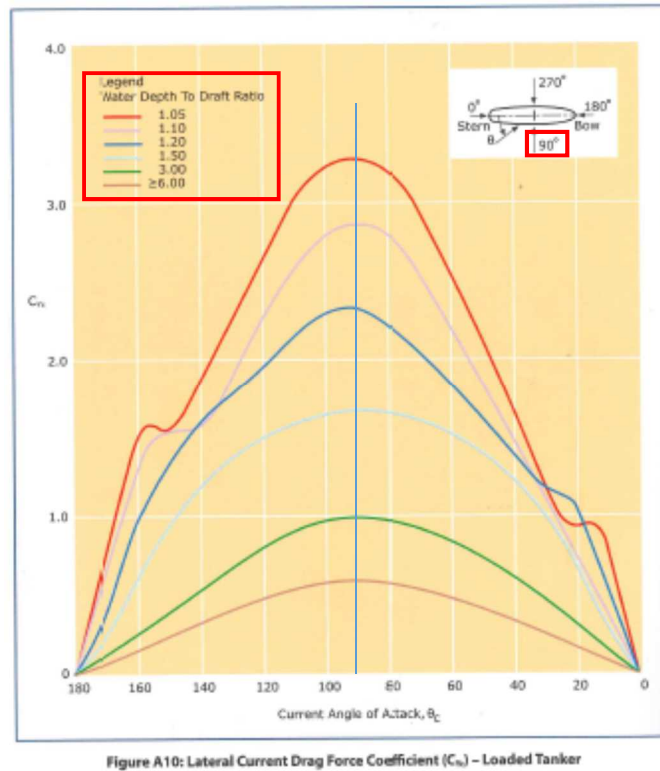


図 4.5-7 横方向流向圧力係数 $[C_{yc}]^3)$

この算定において、土運船及び浚渫船については船体断面形状がタンカーと同様の箱形状であることにより図 4.5-7 の流向圧力係数の適用は可能と判断する。

表 4.5-3 各船舶 横方向流圧力係数

項目	参照値	曳き船	土運船	参照値	浚渫船	投錨船	参照値
水深と喫水の比率 WD/T	1.50	2.20	2.50	3.00	3.30	3.90	6.00
船体長手軸に対する 流向角度 θ (船尾0° 反時計回り正)	0° ~90° Max流向圧力係数	1.67	1.36	1.22	1.00	0.96	0.88
	90° ~180° Max流向圧力係数						

● 漂流限界流速の算定

流向圧力は、基準津波の流向が船体側面に垂直に当たるものと想定する。次の式によって流向圧力が算定できるが、ここでは流向圧力と浚渫船に備え付けの高把駐カストックレスアンカー把駐力が同値となった時を漂流開始時点として、その時の速度を漂流限界速度として以下の式により算定する。

$$F_{YC} = 1/2 \cdot C_{YC} \cdot \rho_0 \cdot V_L^2 \cdot L_{BP} \cdot T \quad 3)$$

F_{YC} : 流向圧力 [tonf]

C_{YC} : 横方向流向圧力係数

ρ_0 : 海水密度 [kgf・sec²/m⁴] (104.7×10⁻³[tonf・sec²/m⁴])

V_L : 漂流限界流速 [m/s]

L_{BP} : 船舶の垂線間長 [m]

T : 喫水 [m]

なお、計算に当たっては保守的に各船舶の流向圧力係数と受圧面積との積の和が最大となる方向からの流れを想定して流速を算定する。具体的には図 4.5-8 に示す船の短軸方向への流れを想定する。

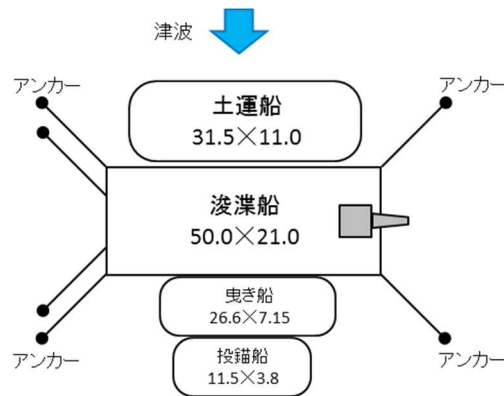


図 4.5-8 浚渫船との係船パターン (代表)

$$\begin{aligned} V_L &= \sqrt{(2F_{YC} \div (C_{YC} \cdot \rho_0 \cdot L_{BP} \cdot T))} \\ &= \sqrt{(2 \times 101.64 \div (104.7 \times 10^{-3} \times (1.22 \times 31.5 \times 2.66 \\ &\quad + 0.96 \times (50.0 - 31.5) \times 2.0 + 1.36 \times 26.6 \times (3.0 - 2.66))))} \\ &= 3.597 \dots \\ &\approx 3.5 \text{ [m/s]} \end{aligned}$$

3. 結論

以上の算定結果より、浚渫作業関連船舶が港湾入口付近で浚渫作業を実施している際に、船舶群が基準津波による流向圧力を受けた場合、設定するアンカーによる把駐力が 101t 以上あれば、把駐力を超えて漂流に至る限界流速は 3.5m/s 以上となる。

【参考文献】

- 1) 鋼船規則 C 編 船体構造及び船体艤装 (日本海事協会) 27.1.3 アンカー
- 2) 操船通論 本田啓之輔 (成山堂書店) p.114 表 4.7, p.115 (1)
- 3) Mooring Equipment Guidelines 3rd Edition (MEG3) (OCIMF) p.190, p.202

4.6 漂流物の衝突荷重算定式の適用性について

4.6 漂流物の衝突荷重算定式の適用性について

(1) 衝突荷重算定式記載の規格・基準類

耐津波設計に係る工認審査ガイドにおいて挙げられている参考規格・基準類のうち、漂流物の衝突荷重又は衝突エネルギーについて記載されているものは、①「道路橋示方書・同解説 I 共通編（平成 14 年 3 月）」¹⁾と②「津波漂流物対策施設設計ガイドライン平成 26 年 3 月」²⁾である。これに加え、先行電力にて審査実績のある③「FEMA（2012）」⁹⁾も衝突荷重の算定式として挙げられる。②は、鋼管杭等の支柱の変形及びワイヤーロープの伸びにより衝突エネルギーを吸収する考え方であり、弾性設計には適さないと考えられるため、①及び③を漂流物の衝突荷重として採用することが適切と考えられる。

① 道路橋示方書・同解説 I 共通編（(社)日本道路協会，平成 14 年 3 月）¹⁾

○ 適用範囲・考え方：

橋（橋脚）に自動車，流木あるいは船舶等が衝突する場合の衝突荷重を算定する式である。

○ 算定式：

$$\text{衝突力 } P = 0.1 \times W \times v$$

ここに、P：衝突力(kN)

W：流送物の重量(kN)

v：表面流速(m/s)

② 津波漂流物対策施設設計ガイドライン（沿岸技術研究センター，寒地港湾技術研究センター，平成 26 年）²⁾

○ 適用範囲・考え方：

「漁港・漁場の施設の設計の手引き（全国漁港漁場協会 2003 年版）」の接岸エネルギーの算定方法に準じて設定されたものであり、漁船の他，車両・流木・コンテナにも適用されるが，支柱及び漂流物補足スクリーンの変形でエネルギーを吸収させることにより漂流物の進入を防ぐための津波漂流物対策施設の設計に適用される式である。

○ 算定式：

$$\text{船舶の衝突エネルギー } E = E_0 = W \times V^2 / (2g)$$

(船の回転により衝突エネルギーが消費される (1/4 点衝突) 場合 $E = E' = W \times V^2 / (4g)$)

$$\text{ここに, } W = W_0 + W' = W_0 + (\pi/4) \times D^2 L \gamma_w$$

W : 仮想重量 (kN)

W_0 : 排水トン数 (kN)

W' : 付加重量 (kN)

D : 喫水 (m)

L : 横付けの場合は船の長さ, 縦付けの場合は船の幅 (m)

γ_w : 海水の単位体積重量 (kN/m³)

g : 重力加速度

③ FEMA (2012) ⁹⁾

○ 適用範囲・考え方：

非減衰系の振動方程式に基づき導出した荷重算定式を提案。適用にあたっては、個別の漂流物に対して軸剛性を適切に定める必要がある。

○ 算定式：

$$F_i = 1.3 u_{\max} \sqrt{(k m_d (1+c))}$$

F_i : 衝突力

c : 付加質量係数

u_{\max} : 漂流物を運ぶ流体の最大流速

m_d : 漂流物の質量

k : 漂流物の有効軸剛性

(2) 漂流物の衝突荷重算定式の適用事例

安藤ら(2006)³⁾によれば、南海地震津波による被害を想定して高知港を対象に、平面二次元津波数値シミュレーション結果に基づいた被害予測手法の検討を行い、特に漂流物の衝突による建造物の被害、道路交通網等アクセス手段の途絶について検討を行い、港湾全体における脆弱性評価手法を検討している。この中で荷役設備・海岸施設の漂流物による被害を検討するに当たって漂流物の衝突力を算定しており、船舶に対しては道路橋示方書を採用している。

表-1 各施設の許容漂流速度

		選 定 式	対象施設		
			クレーン	水門	倉庫
車両		陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究 ⁴⁾	4.8 m/s	1.5 m/s	1.5 m/s
コンテナ	20ft	陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究 ⁴⁾	4.9 m/s	1.5 m/s	1.5 m/s
	40ft	陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究 ⁴⁾	4.7 m/s	1.5 m/s	1.5 m/s
船舶	小型	衝突荷重 (道路橋示方書)	5.0m/s超	5.0m/s超	5.0m/s超
	大型	衝突荷重 (道路橋示方書)	5.0m/s超	1.8 m/s	1.8 m/s
木材		陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究 ⁴⁾	5.0m/s超	1.7 m/s	1.7 m/s

(3) 漂流物による衝突力評価式に関する既往の研究論文

道路橋示方書等の基準類以外でも、漂流物による衝突力評価に対する研究が複数存在している。以下に、これらの研究概要を例示するが、木材やコンテナ等を対象とした事例が多く、船舶の衝突を考慮した事例は少ない。

○ 適用範囲・考え方：

「平成 23 年度建築基準整備促進事業 40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」（東京大学生産技術研究所（2011）⁴⁾）では、「漂流物の衝突による建築物への影響の評価については、研究途上の段階であり、また、被害調査においても、被害をもたらした漂流物の詳細な情報を得ることは難しいため、既往の知見の検証は困難であった」としている。また、津波による漂流物が建築物に衝突する際の衝突力に関する研究を以下に示しているが、「対象としている漂流物は(a), (b), (d)が流木, (c), (d)がコンテナである。」としている。

○ 算定式(a)：

(a) 松富の評価式⁵⁾

津波による円柱形上の流木が縦向きに衝突する場合の衝突力を次式のとおり提案している。

$$F_m = 1.6 C_{MA} [v_{A0} / (gD)^{0.5}]^{1.2} (\sigma_f / \gamma L)^{0.4} \times \gamma D^2 L$$

ここに、 C_{MA} ：見かけの質量係数

（段波・サージでは 1.7，定常流では 1.9）

v_{A0} ：流木の衝突速度， D ：流木の直径

L ：流木の長さ

σ_f ：流木の降伏応力

γ ：流木の単位体積重量

g ：重力加速度

○ 算定式(b) :

(b) 池野らの評価式⁶⁾

円柱以外にも角柱，球の形状をした木材による衝突力を次式のとおり提案している。

$$F_H = S \times C_{MA} \times (V_H / (g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25}))^{2.5} \times g M$$

ここに， F_H ：漂流物の衝突力(kN)

S ：係数(5.0)

C_{MA} ：見かけの質量数

(円柱横向き：2.0 (2次元)，1.5 (3次元)，

角柱横向き：2.0～4.0 (2次元)，1.5 (3次元)，

円柱縦向き：2.0程度，球：0.8程度)

V_H ：漂流物移動速度(m/s)

D ：漂流物の代表高さ(m)

L ：漂流物の代表長さ(m)

M ：漂流物の質量(t)

g ：重力加速度

○ 算定式(c) :

(c) 水谷らの評価式⁷⁾

津波により漂流するコンテナの衝突力を次式のとおり提案している。

$$F_m = 2 \rho_w \eta_m B_c V_x^2 + W V_x / (g dt)$$

ここに， F_m ：漂流衝突力(kN)

dt ：衝突時間(s)

η_m ：最大遡上水位(m)

ρ_w ：水の密度(t/m³)

B_c ：コンテナ幅(m)

V_x ：コンテナの漂流速度(m/s)

W ：コンテナ重量(kN)

g ：重力加速度

○ 算定式(d) :

(d) 有川らの評価式⁸⁾

コンクリート構造物に鋼構造物（コンテナ等）が漂流衝突する際の衝突力を次式のとおり提案している。

$$F = \gamma_p X^{2/5} (5/4 \times m)^{3/5} v^{6/5}$$

$$X = 4 \times \sqrt{a} \div (3\pi \times (k_1 + k_2)), \quad k = (1 - \nu^2) / (\pi E),$$

$$m = (m_1 \times m_2) \div (m_1 + m_2)$$

ここに、a : 衝突面半径の 1/2

(コンテナ衝突面の縦横長さの平均の 1/4)

E : ヤング率 (コンクリート板)

ν : ポアソン比

m : 質量(t)

v : 衝突速度(m/s)

γ_p : 塑性によるエネルギー減衰効果(0.25)

m や k の添え字は衝突体と被衝突体を示す。

(4) まとめ

既往の知見によると、さまざまな衝突力算定式が提案されており、柏崎刈羽原子力発電所ではこれらの知見及び基準津波の特徴、発電所のサイト特性に加え、衝突評価対象物（被衝突体）の設置場所並びに検討対象漂流物（衝突物）の種類及び衝突形態を踏まえた上で適切な衝突荷重算定式を採用することとする。（詳細については「補足 4.7 漂流物衝突を考慮した津波防護施設的设计について」に記載）

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，平成 14 年 3 月。
- 2) 沿岸技術研究センター，寒地港湾技術研究センター：津波漂流物対策施設設計ガイドライン，平成 26 年 3 月。
- 3) 安藤誠，小田勝也，岡本修，熊谷兼太郎：地震津波に対する脆弱性評価手法の検討，沿岸技術研究センター論文集，No. 6，pp. 5-8，2006。
- 4) 東京大学生産技術研究所：平成 23 年度建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書その 2，平成 23 年 10 月。
- 5) 松富英夫：流木衝突力の実用的な評価式と変化特性，土木学会論文集，No. 621，II-47，pp. 111-127，1999. 5。
- 6) 池野正明，田中寛好：陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第 50 巻，pp. 721-725，2003。
- 7) 水谷法美，高木祐介，白石和睦，宮島正悟，富田孝史：エプロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 741-745，2005。
- 8) 有川太郎，大坪大輔，中野史丈，下迫健一郎，石川信隆：遡上津波によるコンテナ漂流力に関する大規模実験，海岸工学論文集，第 54 巻，pp. 846-850，2007。
- 9) Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis Second Edition, FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY , 2012.