5 浮体式洋上風力発電施設の損傷時復原性基準合理化に関する検討

海洋先端技術系 * 中條 俊樹,羽田 絢,藤原 敏文 構造安全評価系 山田 安平,小森山祐輔,越智 宏 特別研究主幹 井上 俊司

1. はじめに

浮体式洋上風力発電施設は、一般的な船舶や海洋構造物と 同様に損傷時復原性に関する基準を満たす必要があり、各種 安全ガイドラインや船級規則に満たすべき要件が記述され ている.例えば「浮体式洋上風力発電施設技術基準安全ガイ ドライン」¹⁾によれば、水線面上方 5m、水線面下 3m の範囲 や係留索取付け部において、1 区画浸水に対応する措置を求 められている.一方、IEC61400-3-2の発効予定のドラフトに は、損傷時復原性の確保を不要とする旨の記載がある.損傷 時復原性の確保が不要となれば、浮体構造の簡素化や施工性 の向上につながる可能性があり、浮体式洋上風力発電の経済 性向上も期待できる.今後、国内基準も IEC の動きに追随す ることも考えられることから、IEC の記載を満たすために必 要な要件について検討した.

2. 検討方法の概要

2.1 IEC ドラフトの概要

IEC TS IEC61400-3-2 ED.1 によれば、常時有人でない浮体 式洋上風力発電施設(以下,浮体とも呼称する)において損 傷時復原性を考慮しなくても差し支えない条件とは,

- ① 人命の安全が損なわれず、大規模な海洋環境への悪影響、ウィンドファーム内の他の浮体式洋上風力発電施設や他の隣接する施設への衝突が存在しないこと
- ② 復原性の喪失とそれに伴う構造全損の結合確率(PT)が、 構造の健全性の評価に用いられる安全レベルに対応す る損傷確率(PS)を超えないこと

を共に満たすことである.上記①は沈没や転覆等の重大事故 による影響が、人命や環境、周辺施設へ及ばないことを要求 しており、②は損傷時復原性が確保されていない場合に、そ れに関係する事象に対する浮体施設の健全性が、一般的な構 造の健全性を下回らないことを要求していると解釈できる. 本検討では、対象の風力発電施設の事故事象を浮体周辺の航 行船舶との衝突と設定し、②に示される復原性の喪失とそれ に伴う構造全損の結合確率(PT)の計算方法を提示する.

2.2 検討の流れ

損傷時復原性の確保を不要とするためには、対象となる事 故事象を船舶との衝突とすると、衝突の発生確率(P1)と衝突

により全損(転覆・沈没)に至る確率(P2)の結合確率(PT)を 求め,目標損傷確率(PS)を超えていないことを示す必要があ る.ここで,目標損傷確率については国際標準や安全基準を 考慮し,年間10⁻⁴を提案する.

	表 - 1	長 − 1 海洋構造物の目標損傷確率の提示例			
船級	•	• 10 ⁻⁴ /年 (class 1: 人命の損失や他浮体との			
規則 2)		衝突, 環境破壊につながらないもの)			
	•	10 ⁻⁵ /年 (class 2: 受容できない重大事象に			
		つながるもの)			
国際	•	$5 imes 10^{-4}$ 相当 (L2: Medium Exposure			
標準 ³⁾		Level)			

検討の流れを図 -1に示す.まず,浮体設置を想定する海 域周辺の航行船舶を調査し,隻数,航速,排水量等を求める. 次に浮体との衝突確率を計算し,目標損傷確率と比較する. ここで目標損傷確率を下回る場合,以降の検討は不要となり 損傷時復原性の確保が不要と考えられる.

衝突確率が目標損傷確率を上回る場合には、衝突影響を評価する必要がある.ここでは、水槽模型試験、機構解析、FEM 解析による方法を示す.



図 - 1 衝突確率・衝突影響を考慮した検討の流れ

2.3 航行船舶との衝突確率の計算

周辺を航行する船舶が浮体に衝突する事象の発生回数は、

浮体に向かって航行する単位時間あたりの船舶数N₆[隻/単位 いて設定した.まず,浮体との距離を閾値として,衝突の危 時間]が推定できたとき、それらのうちで浮体を避航するこ とに失敗するものが一定の割合 Pcであったと仮定すると、単 位時間あたりの浮体への衝突頻度λ[隻/単位時間]は,式 (2.1)により推定できる.

$$\lambda = N_G \times P_C \tag{2.1}$$

ここで、船舶と固定物体との衝突確率として一般的に用いら れる値を用い、 $P_{c}=10^{-3.7} \Rightarrow 2.0 \times 10^{-4} \ b \ t \ a^{4}$.

船舶の接近頻度の計算法を以下に示す.船舶は本来定めら れた航路内を航行し、そこを外れることはないが、何らかの 原因により航路を外れ、浮体に接近する確率が、正規分布に 従い発生するものと仮定する.この概念を図-2に示す.正 規分布の確率密度関数は、式(2.2)により表される.



$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}$$
(2.2)

ここで、 $\sigma^{2}[m^{2}]$ 、 $\mu[m]$ はそれぞれ個船が取り得る位置(浮体 との距離)の分散と平均である.

μは, AIS データの分析から求められる, 想定する浮体位 置と航行船舶の個船ごとの最接近距離である.よって、標準 偏差 σ を別途定めることができれば、個船ごとの浮体への許 容できない範囲内(例えば浮体幅 D+船幅 B)への接近頻度を 求めることができ,全隻数を積分することで浮体周辺海域に おける船舶の浮体への許容できない範囲内への接近頻度が 計算可能となる.

浮体からのある位置μ[m] (AIS データから求めた個船ごと の浮体との距離)を通航する任意の船舶(i)が, 浮体に衝突す る領域(浮体幅 D+船幅 B)に接近する頻度は、式(2.3)で L=0.5×(D+B)とすることにより推定できる.なお、σについ ては福島沖のウィンドファーム周辺の航行船舶データを用

険があると考えられる浮体近傍の一定距離(例えば0.1海里) 内へ接近した船舶隻数を求めた.次に、その隻数が式(2.2) に従い本来航路を外れた結果得られた数値と仮定し、式 (2.3)で L=閾値として積分した結果求められた接近隻数が, AIS データより計測された接近隻数に合致するよう σ を調整 した. さらに、閾値を変化させた感度解析を実施し、おおよ その平均値としてσ=700mとした.

$$n_{gi} = \int_{-L}^{L} f(x_i) dx$$

= $\int_{-L}^{L} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\left(-\frac{(x_i - \mu_i)^2}{2\sigma^2}\right)} dx$ (2.3)

浮体に向かって航行する船舶の1年間における1隻当たり の衝突頻度λ_i[隻/年]が推定できれば、同様に推定された海 域を通航する全船舶N隻分を総和することにより、想定海域 を通航する船舶が1年あたりに浮体と衝突する確率は、式 (2.4)により推定できる.

$$P1(1) \approx \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \times t = \sum_{i=1}^{N} (n_{gi} \times P_C) \times 1$$
(2.4)

ここで、tは1年間の衝突確率を考え、1である.また、発生 頻度が1よりも十分に小さいものと仮定している5.

2.4 航行船舶との衝突影響の計算

衝突により浮体に生ずる影響には構造変形、浮体変位、係 留張力の増大等が考えられるが、損傷時復原性の確保のため の防水隔壁の設置が考慮されていない場合,船体外板に生ず る破口は直接沈没・転覆につながる可能性が高い. そのため, 本検討においては破口が生じたことを全損と考えた. ここで は、PTの要素である全損確率 P2を求めるために、衝突解析 の結果を用いた構造全損の閾値として全損限界曲線の概念 を導入した.

全損限界曲線の設定には、衝突影響の評価手法として有効 と考えられる水槽模型試験,機構解析による全体挙動の解 析, FEM 解析による詳細な構造解析による解析結果を用いた 例を後述し、本節では全損限界曲線の作成の流れを示す.

衝突船の運動エネルギーは、衝突後の浮体と衝突船の運動 エネルギー, 浮体と衝突船の変形エネルギー, 係留系のエネ ルギー等に変換される. 衝突現象は係留索に影響が及ぶまで に至らない短時間での現象と考え、係留系のエネルギーは無 視できるとし,運動エネルギーと変形エネルギーのみを運動 量保存則を用いて整理すると、衝突船の有する衝突前の運動 エネルギーに対し、衝突において衝突船と浮体で分担すべき 変形エネルギーが式(2.5)のように求められる 6)7).

$$E_S = \frac{1}{2} V_B^2 \left(\frac{M_A M_B}{M_A + M_B} \right) \tag{2.5}$$

ここで、 M_A : 浮体の質量(付加水質量を含む), M_B : 衝突船の 質量(付加水質量を含む), V_B : 衝突船の衝突直前の衝突方 向の速度, E_s : 衝突船と浮体の両方で,船体運動以外で吸収 するべき変形エネルギー(歪エネルギーと摩擦エネルギー 等)である. E_s は,運動量保存則および運動エネルギー保存 則から導き出される値であり,衝突船と浮体の形状,排水量 および衝突速度が決まると定まる物理量である.

浮体排水量を 10000ton と仮定し, 衝突船の排水量を変化 させた場合の衝突前の衝突船の運動エネルギーに対する変 形エネルギーの比率の変化を図 - 3 に示す.



図 - 3 排水量 10000ton のセミサブ型浮体に対する衝突における 運動エネルギーと変形エネルギーの比率

衝突により生じる変形エネルギーは、浮体と衝突船の変形 により吸収されるが、その比率は浮体および衝突船の排水量 や構造,材料により変化する.本検討においては、浮体に防 水隔壁等の損傷時復原性を確保する手段の搭載を考慮して いないため、外板への破口発生が全損へ直接つながると考え た. そこで、浮体に破口発生せずに変形で吸収できる最大の エネルギーを発生させる衝突船の船速と排水量を全損限界 と定義する. さらに、別途実施する衝突解析結果から、浮体 に破口の生じる変形エネルギーの大きさが求められたとす る. 浮体と衝突船の変形エネルギーの比率を仮定すると、両 者の合計と図 - 3 の運動エネルギーと変形エネルギーの比 率から、衝突船の有する衝突前の運動エネルギーEoが求めら れる. 運動エネルギーの定義から, 式(2.6)のように破口の生 じる衝突船の船速 Verを求めることができる. なお,本検討に おいては後述する FEM 解析結果を用い、浮体と衝突船の変形 エネルギーの比率を7:3とした。

$$V_{cr} = \sqrt{\frac{2E_0}{M_B}} \tag{2.6}$$

式(2.6)より図 - 4の全損限界曲線が得られる.浮体周辺 の航行船舶データから排水量と航速を調査し、曲線よりも上 方(大型・高速側)の船舶との衝突は全損、下方(小型・低 速側)の船舶との衝突は安全と判断することができる.



3. 検討事例

3.1 検討対象

浮体設置位置,浮体構造等を仮定し,本検討における提案 手法に基づき試解析を実施した.設置位置および周辺の航跡 図を図 - 5 に示す.



図 - 5 浮体設置海域,解析領域および周辺の航跡

3.2 衝突確率

AIS データに基づく浮体設置位置近傍の航行データに対 し、浮体位置を通り主要航路と直交する南北方向の直線(仮 想ゲート)を設定し、仮想ゲートを通過した船舶との距離を 浮体との距離とした. 2018 年 1 月 1 日から 2018 年 12 月 18 日にかけての通行隻数は 4386 隻であった. 衝突確率は式 (3.1)の通り求められた. なお、本検討は浮体の設置前に損傷 時復原性確保の要不要を判定するものであり、AIS データは 浮体の設置されていない状態でのデータを用いることを想 定している. 浮体設置による航路への影響は、式(2.2)内の σ を福島沖ウィンドファームの周辺航行船舶データを用い て設定していることで考慮されている.

$$P1(t=1) = \sum_{i=1}^{4386} P1_i(1) \approx 7.5 \times 10^{-5}$$
(3.1)

(27)

セッション2

至る確率(P2)を求める必要はないが,水槽模型試験を用いた 式(3.2)により求めた. 検討事例を示す.

水槽模型試験の目的は、衝突発生前後のエネルギー収支を 導出し, 浮体形状や波浪等による衝突現象への影響を定量的 に評価することである. 浮体模型はスパー型と図 - 10 に示 すセミサブ型を対象とした.船舶は浮体排水量と同程度のバ ラ積み船を想定した.ただし、模型船の排水量はウェイト搭 載量を変えることで変化させた. 模型作成の際に想定した浮 体と衝突船の概要を表 - 2に示す.計測は、浮体および船 体運動,係留張力,船首部荷重,被衝突部(浮体コラム)荷 重に対して実施した. 浮体の係留系は2 浮体で共通の仕様と した. 図 - 6 に試験時の様子を示す. なお, 模型縮尺は 1/100 であり、試験は当所海洋構造物試験水槽において実施した.

表 - 2 想定浮体および衝突船の主寸法

Item	SPAR	Semi-sub	Ship
Column Dia. [m]	12.0	12.0	
L _{PP} [m]			100.0
Displacement [ton]	9000	10300	8.0/10.0/12.0×10 ³



図 - 6 水槽試験の様子

図-7に試験より得られたエネルギー収支を示す. 衝突前 後 0.5s 間の平均変位・速度を用いエネルギーを導出した. そ の結果,次のような知見を得た.

浮体の種類によって衝突後のエネルギー収支は、大きく変 化した.スパー型は衝突後に6割のエネルギーが残るのに対 し、セミサブ型では3割程度しか残らなかった.スパー型は セミサブ型よりもピッチ方向の復原力が小さいために、ある 程度の荷重が作用した時点で大きなピッチ運動が発生し,船 舶と浮体が衝突を終了するのに対して、セミサブ型の場合は 復原力が大きく、小さなピッチ運動しか示さないため、両者 間でより高い荷重が作用し、その一部が浮体に設置した緩衝 材で吸収されたためと考えられる.

衝突後のエネルギーの内訳は、船舶および浮体の運動エネ ルギーが主要であり、係留のエネルギーは3%未満である.復

原性能の高い係留に変更した場合,この割合は増加するが, 上記検討結果から、衝突確率が目標損傷確率を下回ってい 一般的なカテナリー係留を想定する場合は無視できる程度 るため、2.2 節に示す通り衝突により全損(転覆・沈没)に であると考えられる. なお、ここでは係留のエネルギーE4は



図 - 7 水槽試験より得られたエネルギー収支

$$E_k = \frac{1}{2}kx^2 \tag{3.2}$$

ここで, k は係留系の荷重-変位曲線から求めたバネ定数, x は水平変位である.

3.4 機構解析による衝突影響評価結果

同様に、機構解析ソフトウェアを用いた全体挙動解析によ る検討事例を示す.機構解析の目的は、衝突発生前後の全体 挙動を再現すること、試験では再現が困難な、浮体と船舶の オフセット距離や角度等の影響を評価することである.

解析結果の時系列応答を図 - 8 に示す.条件は初速が 0.23m/s で,正面衝突の状態である.対応する模型試験の結 果と合わせて,船体・浮体の X 方向(衝突方向)挙動および 衝撃荷重を比較した.衝撃荷重が最大となった時間を t=0s と し、衝突後 2s までを図示した. ただし、浮体挙動については 衝突後 15s まで示した図も記載した.数値計算においては, 試験と異なり複数回の再衝突が確認できるが、基本的な応答 は正しくとらえられている.また,船舶の応答や荷重の変動 も概ね精度よく再現できている.



図 - 8 浮体および船舶の応答の水槽試験結果および機構解析結果

浮体と衝突船のオフセット距離の影響を浮体内部に設置 したばね・ダンパ系のばねエネルギーを用いて評価した.衝 突位置とコラム中心からの距離を変えた計算を実施したが, 図 -9に示す通り,衝突位置の変化によりばねエネルギーは 大きく減少した.

模型試験では試験期間や水槽仕様等により試験条件に制 約を受け、十分な数の試行を実施できないことがあるが、機 構解析による挙動解析の有用性が確認された.



図 - 9 浮体と衝突船のオフセット影響(模型スケール)

3.5 FEM による衝突影響評価結果

船舶衝突による浮体の被害度(破口発生有無)を評価する ために,汎用動的非線形構造解析ソフト(LS-DYNA,米国LSTC 社製)を用いて浮体と衝突船の衝突シミュレーション解析を 実施した.衝突船船首および浮体の被衝突コラムを弾塑性体 でモデル化し,陽解法を用いた時刻歴シミュレーション解析 を実施した.材料構成則として,相当塑性歪-相当応力の多 直線近似モデルを用い,破断歪みおよび歪速度依存性を考慮 した.海水影響は付加水質量にて考慮した.

衝突船の速度,浮体のコラム外板板厚,係留モデルの有無, 係留モデルとして用いたばね要素のばね定数を変化させた シリーズ FE 解析を行い,浮体に破口が発生する際の衝突船 速度(限界衝突速度),構造破壊に使用されたエネルギー(衝 突限界エネルギー)を推定した.衝突は風車支持コラムと船 首部の正面からの衝突を想定した.計算対象となる船舶およ びセミサブ型浮体は3.3および3.4における想定実機と同等 としたが,浮体については,衝突時に浮体への影響が大きい と想定されるデッキ無しの状態を本モデルでは採用した.

図 - 10 および図 - 11 に衝突船の船速 12knot における結 果を示す. 浮体コラムと衝突船のステムおよびバウとの接触 箇所にミーゼス応力の発生が確認でき,バウとの接触箇所に 初期破口が生じた.本検討では,船速と浮体コラム外板板厚 を変えてシリーズ解析を実施したが,今次設計した浮体の 10000tonの衝突船に対する限界衝突速度は,約1.5knot であ ることが推定された.

また、今次モデルにおいて、構造破壊で吸収しなければな

らない変形エネルギー(E_s)のうち,浮体で吸収したエネルギーは全てのケースでほぼ約70%であることが定量的に示された.この割合は、衝突船および浮体の剛性・強度・構造様式等によって変化することが予想され、より普遍的な値を導くには上記パラメータを変えた更なる検討が必要である.しかし、船舶と浮体の詳細な衝突シミュレーション計算を実施した例は極めて少なく、今回の定量的データは貴重な知見であると考えられる.



図 - 10 衝突時の浮体の変形と応力コンター(衝突船速 12knot)



図 - 11 構造破壊等で吸収される変形エネルギー(E_s)の時刻歴
 (衝突船速 12knot, 〇・口は破口発生を表す)

3.6 目標損傷確率との比較結果

以上より,今回の試解析における P1 は7.5×10⁻⁵となった. P2 については、コラム内のデッキを考慮しない等、構造強度 は耐衝突性が高くないこともあり、周辺航行船舶の AIS デー タより求めた排水量と船速が全損限界曲線をすべて上回っ たため、1 となった. P1 と P2 の積で表される PT は7.5×10⁻⁵ となり PS(10⁻⁴)を下回った.これは、本検討対象においては 衝突確率が低いため、浮体の衝突影響が大きい場合でも、損 傷時復原性を不要としても差し支えないことを示している.

4. まとめ

浮体式風力発電施設の衝突による損傷時復原性を考慮す る際,確率論的手法に基づき全損に至る確率を計算し,目標 損傷確率と比較するための検討手順をまとめると共に,浮体 設置海域や浮体構造等を仮定して試解析を実施した.まず, 衝突の発生確率(P1)と衝突により全損(転覆・沈没)に至る 確率(P2)の結合確率(PT)を求め,目標損傷確率(PS)と比較す る方法を提示し,P1 および P2 を求める方法を合わせて示し た.次に,仮想の浮体に対し上記手法に基づく試解析を実施 し,その有効性を示した.

謝辞

本研究は,国土交通省海事局の受託研究により実施しました.関係各位に深く感謝申し上げます.

本研究における AIS データの解析には当所海洋リスク評価 系の伊藤博子氏,三宅里奈氏にご尽力いただいた.ここに深 く感謝申し上げます.

参考文献

1) 国土交通省海事局, 浮体式洋上風力発電施設技術基準安 全ガイドライン, 2014

2) DNVGL-ST-0119 Floating wind turbine structures, 2018
3) ISO 19904-1:2006, Petroleum and Natural Gas Industries - Floating Offshore Structures - Part 1-Monohulls, semi-submarsibles and spars, 2006

4) 藤井弥平他,海上交通工学,海文堂出版, 1981

5)新井充他,実践・安全工学シリーズ2「プロセス安全の基礎」,化学工業日報,2012

6) V. U. Minorsky, An Analysis of Ship Collisions with Reference to Protection of Nuclear Power Plants, Journal of SHIP RESEARCH, 3(2), 1959

7) Y. Yamada, H. Endo & P. T. Pederson, Effect of Buffer Bow Structure in Ship-Ship Collision, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 18, 2018