

平成30年1月23日
日本原子力発電(株)

漂流物荷重について

1. 各種基準類における漂流物荷重算定式について

「耐津波設計に係る工認審査ガイド」に記載されている参考規格・基準類のうち、漂流物による漂流荷重又は衝突エネルギーについての記載があるのは、「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）」（以下「道路橋示方書」という）及び「津波漂流物対策設計ガイドライン（案）（財）沿岸技術研究センター，（（社）寒地港湾技術研究センター，平成21年）」である。

（1）道路橋示方書の式について

国土交通省が定める道路橋示方書・同解説では、次式により算出する。

$$\text{漂流荷重 } P = 0.1 \times W \times v$$

ここで、 P ：漂流荷重（kN）

W ：流送物の重量（kN）

v ：表面流速（m/s）

また、船舶による漂流荷重の算出に関しては、（財）沿岸技術研究センター及び国土交通省国土技術政策総合研究所による研究においても、道路橋示方書に示される算定式の船舶の漂流荷重算定への適用性が検討されている。

（2）津波漂流物対策設計ガイドライン（案）の式について

「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る。支柱及び漂流物捕捉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、漂流物の侵入

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を示している。

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

※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）の場合：

$$E = E' = W \times v^2 / 4g$$

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

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）

しかしながら，当該式は，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被衝突物の衝突エネルギーを吸収する考え方に基づくものであり，被衝突物が防潮堤のように弾性設計する対象である場合の使用には適合していない。

2. 漂流物荷重算定式に関するその他既往の研究論文

既往の研究論文等についても調査を行った。主な文献調査結果について第1表に示す。

漂流物荷重算定式は，対象となる漂流物の種類やその仕様が異なり，運動量理論に基づく推定式や実験に基づく推定式などがある。

第1表 各種基準類の漂流物荷重算定式の整理

	出典	種類	概要	算定式	算定式の適用性が確認された範囲（実験条件等）
①	松富ほか（1999）	流木	津波による流木の漂流荷重を提案している。本式は円柱形状の流木が縦向きに衝突する場合の漂流荷重算定式である。	$F_m/(\gamma D^2 L) = (1.2 \sim 1.5) C_{MA} \{v_{A0}/(gD)^{0.5}\}^{1.2} (\sigma_y/\gamma L)^{0.4}$ $F_m: \text{衝突力}, \gamma: \text{流木の単位体積重量}, D: \text{木材の直径}, L: \text{木材の長さ},$ $g: \text{重力加速度}, C_{MA}: \text{見かけの質量係数(水の緩衝機能も加味)},$ $v_{A0}: \text{衝突速度}, \sigma_y: \text{木材の降伏応力}$	「実験に基づく推定式」 ・見かけの質量係数に関する水路実験 （実験：高さ0.5m, 幅0.3m, 長さ11.0m） 流木の直径：4.8cm～12cm, 流木の重量：305～8615gf ・衝突荷重に関する空中での実験
②	池野・田中（2003）	流木	円柱以外にも角柱，球の形状をした木材による漂流荷重を提案している。	$F_H/(gM) = S \cdot C_{MA} \cdot \{V_H/(g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25})\}^{2.5}$ $F_H: \text{衝突力}, g: \text{重力加速度}, M: \text{漂流物の重量}, S: \text{係数 (=5.0)},$ $C_{MA}: \text{付加質量係数}, V_H: \text{漂流物移動速度},$ $D: \text{漂流物の直径 (角柱の場合は正方形断面辺長)}, L: \text{漂流物の長さ}$	「実験に基づく推定式」 （縮尺1/100の模型実験） 漂流物の形状：円柱，角柱，球 漂流物重量：0.588N～29.792N
③	道路橋示方書（2002）	流木等	橋（橋脚）に自動車，流木あるいは船舶等による漂流荷重を定めている。	$P = 0.1Wv$ $P: \text{衝突力}, W: \text{流送物の重量}, v: \text{表面流速}$	新規制基準に基づく審査において適用された実績がある。
④	FEMA（2012）	流木・コンテナ（車両）	漂流物による漂流荷重を正確に評価するのは困難としながら，一例として算定式を示している。	$F_i = 1.3u_{max}\sqrt{km_d(1+c)}$ $F_i: \text{衝突力}, c: \text{付加質量係数}, u_{max}: \text{漂流物を運ぶ流体の最大流速},$ $m_d, k: \text{漂流物の質量と有効軸剛性}$	「運動方程式に基づく衝突力方程式」
⑤	水谷ほか（2005）	コンテナ	漂流するコンテナの漂流荷重を提案している。	$F_m = 2\rho_w\eta_m B_c V_x^2 + \left(\frac{WV_x}{gdt}\right), V_x \cong C_x = 2\sqrt{g\eta_m}$ $F_m: \text{衝突力}, g: \text{重力加速度}, W: \text{コンテナの重量}, B_c: \text{コンテナ幅},$ $\rho_w: \text{遡上波の最大水位}, dt: \text{衝突時間}, \rho_w: \text{水の密度},$ $V_x: \text{コンテナの漂流速度}, C_x: \text{津波の遡上流速}$	「実験に基づく推定式」 （縮尺1/75の模型実験） 使用コンテナ：長さを20ftと40ft コンテナ重量：0.2N～1.3N程度 遡上流速：1.0m/s以下 材質：アクリル
⑥	有川ほか（2007, 2010）	流木・コンテナ（コンクリート）	鋼製構造物（コンテナ等）による漂流荷重を提案している。	$F = \gamma_p x^{\frac{2}{5}} \left(\frac{5}{4} \tilde{m}\right)^{\frac{3}{5}} v^{\frac{6}{5}}, x = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi} \frac{1}{k_1+k_2}, k = \frac{(1-v^2)}{\pi E}, \tilde{m} = \frac{m_1 m_2}{m_1+m_2}$ $a: \text{衝突面半径の} 1/2 \text{ (ここではコンテナ衝突面の縦横長さの平均の} 1/4),$ $E: \text{コンクリートのヤング係数}, v: \text{ポアソン比}, m: \text{質量}, v: \text{衝突速度},$ $\gamma_p: \text{塑性によるエネルギー減衰効果}, \text{添字} 1,2 \text{ は衝突体と被衝突体を表す}$	「実験に基づく推定式」 （縮尺1/5の模型実験） 使用コンテナ：長さ1.21m, 高さ0.52m, 幅0.49m 衝突速度：1.0～2.5m/s程度，材質：鋼製

3. 東海第二発電所における津波漂流物と漂流物荷重算定式の選定

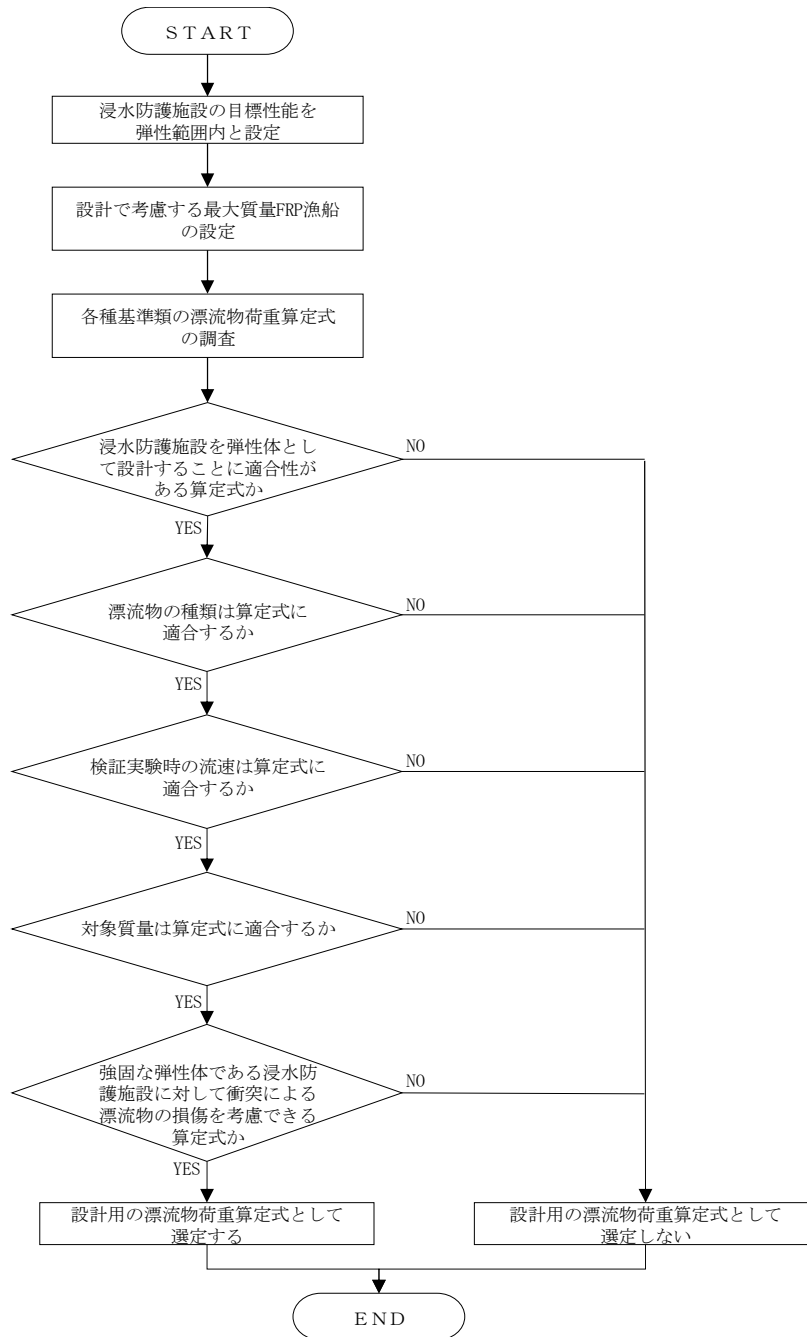
東海第二発電所において、津波により敷地外から発電所に到来する可能性がある漂流物の調査の結果、最大質量のものは排水トン数 15t の漁船であり、その材質はFRP^{※1}である（以下、「漁船」という）。従って、強固な弾性体として設計する浸水防護施設に対しては、漁船の方が圧壊するという漂流物側の損傷モードを考慮することとなる。一方、基準津波の流速は、津波シミュレーション結果から、防潮堤前面の沖合約 500m の範囲で最大約 7.1m/s となることから、保守的に 10m/s と設定する。

以上より、最大質量の漂流物の漁船（排水トン数 15t）に対する漂流物荷重算定式を選定する。なお、橋梁橋脚への漂流物対策として防衝工の設計に用いられる式（被衝突側の塑性変形で衝突エネルギーを吸収する設計式）については、被衝突側の浸水防護施設を弾性範囲で設計する前提であることから、選定の対象外とする。

※1 プラスチック（合成樹脂）にガラス繊維などの繊維を加えて強度を高めた繊維強化プラスチック。軽量で、耐熱性・耐候性・耐薬品性・断熱性に優れ、様々な形状に成型できるため、船舶の船体、航空機の機材、浴槽などに広く用いられている。「Fiber Reinforced Plastics」の略文字。

4. 最大質量の漂流物と想定される漁船の漂流物荷重算定式の選定

各種漂流物荷重算定式について、東海第二発電所で想定される最大漂流物（漁船、排水トン数15t）への適用性を考慮し、第1図のフローに基づいて算定式の選定を行った。



第1図 最大の漂流物と想定される漁船の漂流物荷重算定式の選定フロー

5. 選定された漂流物荷重算定式

第1図に示した選定フローに基づき、各算定式の東海第二発電所への適用性について検討した。

選定フローを実施した結果、漁船の衝突荷重算定式としてフローの最後まで残り、選定された式は道路橋示方書の式となった。

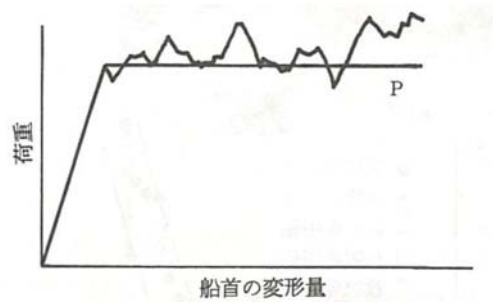
6. 漁船の圧壊を考慮した荷重の算定

漁船による荷重については、衝突体の圧壊による上限を有することが一般的に知られている。

漁船は、強固な弾性体として設計する浸水防護施設に対して座屈強度が小さいことから、漁船の側が圧壊していくこととなり、圧壊が進むのに伴い衝突エネルギーが減少しつつ圧壊荷重が上限となって圧壊は終了する。これと同時に、被衝突側の強固な弾性体にその圧壊荷重（最大荷重）が作用する。

「構造物の衝突と設計法（（社）土木学会，1994）」によれば、第2図に示すように、剛性及び強度が大きい海洋構造物に対する船舶の圧壊荷重と変形量との関係が示されている。

船舶の衝突初期は、船首が傾斜しているため接触面が小さく、圧壊が進むに従って荷重（反力）はほぼ直線的に増加するが、船舶の破壊が進み、船首の傾斜部が全部破壊し、船体の全面が海洋構造物に接触すると、その後の荷重はほぼ一定値に達する。この時の荷重は、船首側からの圧壊による座屈荷重とほぼ同等とみることができるとされている。



第2図 荷重と変形量の関係図（（社）土木学会，1994）

漁船の圧壊荷重は，座屈強度に基づき以下の式により算定する。

$$P_c = 2Dt \cos \theta \sigma_c$$

$$\sigma_c = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \leq \sigma_y$$

P_c : 船首圧壊荷重

D : 船の深さ

t : 船側外板厚

2θ : 船首部先端角度

σ_c : 船首部側板の座屈強度

k : 座屈係数 = $(b/a + a/b)^2$

E : ヤング率

ν : ポアソン比

σ_y : 降伏点応力

σ_y : 横肋骨心距 = $450 + 2L$,

b : 縦肋骨心距 = $550 + 2L$

L : 全長 = $10^{0.805} \times G.T^{0.357}$

$G.T$: 総トン数

7. まとめ

漂流物荷重算定式について、各種基準類の代表的なものについて調査し、この中で東海第二発電所における適用範囲、適用条件（漂流物の種類、流速、質量等）を踏まえ選定フローを実施した結果、道路橋示方書の式が選定された。

一方、漂流物の漁船については、被衝突体となる浸水防護施設に対して座屈強度が小さいため、衝突の過程で漁船の損傷が先行することが想定される。そこで、道路橋示方書の式では、漂流物の圧壊による荷重の上限として、漁船の圧壊荷重を土木学会の式により算定した。算定結果を第2表に示す。

第2表 道路橋示方書の式による漂流物荷重と土木学会の式による圧壊荷重

	漂流物	流速	荷重
道路橋示方書の式に基づく漂流物荷重	漁船 排水トン数15t	流速10m/s (基準津波時)	148kN
土木学会の式に基づく船舶の圧壊荷重	漁船 排水トン数15t	—	34kN

以上より、東海第二発電所における漁船（排水トン数15t）に対し、土木学会の式による漁船の圧壊荷重を考慮した上で、道路橋示方書の式による漂流物荷重を適用するものとする。

(参考資料)

表 漂流物荷重算定式に関する既往の研究論文

既往の算定式	内 容
<p>① 松富の算定式</p> <p>[1] 松富英夫：流木衝突力の実用的な算定式と変化特性，土木学会論文集，No. 621，pp. 111-127，1999. 5</p>	<p>津波による流木の荷重を次式で提案している。本式は，円柱形状の流木が縦向きに衝突する場合の荷重算定式である。</p> $\frac{F_m}{\gamma D^2 L} = 1.6 C_{MA} \left\{ \frac{v_{A0}}{(gD)^{0.5}} \right\}^{1.2} \left(\frac{\sigma_f}{\gamma L} \right)^{0.4}$ <p>ここで，F_m：衝突力 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</p> <p>【東海第二発電所への適用性評価】 流木の実験により漂流物荷重算定式を提案した文献。重量24kgf～253kgfの木材，流速0.5m/s～2.5m/s，衝突角を変えた衝突実験であり，東海第二地点における漂流物の流速条件とは異なるため，適用性が確認されていない式と判断した。</p>
<p>② 池野らの算定式</p> <p>[2] 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</p>	<p>円柱以外にも角柱，球の形状をした木材による荷重を次式で提案している。</p> $\frac{F_H}{gM} = S \cdot C_{MA} \left\{ \frac{V_H}{(g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25})} \right\}^{2.5}$ <p>ここで，F_H：衝突力 S：係数（5.0） C_{MA}：付加質量係数（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：段波波速 D：漂流物の代表高さ L：漂流物の代表長さ M：漂流物の質量 g：重力加速度</p> <p>【東海第二発電所への適用性評価】 円柱，角柱，球形状の木材を用いた衝突実験により衝突力算定式を提案した文献。木材（最大重量304kgfを想定）を陸上構造物の約80m手前に設置し，津波による衝突力を確認した実験であり，東海第二地点における漂流物の質量条件とは異なるため，適用性が確認されていない式と判断した。</p>
<p>③ 道路橋示方書の算定式</p> <p>[3] 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通，pp65-67，2002. 3</p>	<p>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力を定めている。</p> $P = 0.1Wv$ <p>ここで，P：漂流物荷重 W：流速物の重量 v：表面流速</p> <p>【東海第二発電所への適用性評価】 東海第二地点における漂流物荷重算定式の選定フローを実施した結果，当該式が選定された。</p>

表 漂流物荷重算定式に関する既往の研究論文

既往の算定式	内 容															
<p>④ FEMA の算定式</p> <p>[4] FEMA, Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis, FEMA P646,</p>	<p>漂流物荷重を正確に評価するのは困難としながら、以下の式（流木、コンテナ対象）を一例として示している。</p> $F_i = C_m u_{\max} \sqrt{km}$ <p>ここで、F_i：衝突力 C_m：付加質量係数（2.0 を推奨） u_{\max}：最大流速 m：漂流物の質量 k：漂流物の有効剛性</p> <p>漂流物の質量・有効剛性は主要な漂流物について表3.1の通り概略値が与えられているが、それ以外の漂流物については設計において評価することとしている。</p> <p style="text-align: center;">表 3.1 漂流物の質量と有効剛性</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>漂流物</th> <th>質量 m [kg]</th> <th>有効剛性 k [N/m]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>材木・丸太</td> <td>450</td> <td>2.4×10^6</td> </tr> <tr> <td>40ft コンテナ</td> <td>3,800（空載）</td> <td>6.5×10^8</td> </tr> <tr> <td>20ft コンテナ</td> <td>2,200（空載）</td> <td>1.5×10^9</td> </tr> <tr> <td>20ft 重量コンテナ</td> <td>2,400（空載）</td> <td>1.7×10^9</td> </tr> </tbody> </table> <p>【東海第二発電所への適用性評価】 流木及びコンテナの質量と軸剛性値を考慮した運動方程式から導出される衝突力推定式であり、漂流物の特性値として、重量及び有効剛性を設定する。木材、丸太及びコンテナが示されており東海第二地点における漂流物の条件とは異なるため、適用性はないものと判断した。</p>	漂流物	質量 m [kg]	有効剛性 k [N/m]	材木・丸太	450	2.4×10^6	40ft コンテナ	3,800（空載）	6.5×10^8	20ft コンテナ	2,200（空載）	1.5×10^9	20ft 重量コンテナ	2,400（空載）	1.7×10^9
漂流物	質量 m [kg]	有効剛性 k [N/m]														
材木・丸太	450	2.4×10^6														
40ft コンテナ	3,800（空載）	6.5×10^8														
20ft コンテナ	2,200（空載）	1.5×10^9														
20ft 重量コンテナ	2,400（空載）	1.7×10^9														
<p>⑤ 水谷らの算定式</p> <p>[5] 水谷法美ら：エブ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</p>	<p>津波により漂流するコンテナの衝突力を次式の通り提案している。</p> $F_m = 2\rho_w \eta_m B_c V_x^2 + \frac{WV_x}{gdt}$ <p>ここで、F_m：漂流衝突力 dt：衝突時間 m：最大遡上水位 w：水の密度 B_c：コンテナ幅 V_x：コンテナの漂流速度 W：コンテナ重量 g：重力加速度</p> <p>【東海第二発電所への適用性評価】 コンテナの衝突実験により漂流物荷重算定式を提案した文献。重量0.2N～1.3Nのコンテナ（材質：アクリル），流速1.0m/s以下，コンテナ長さや遡上水位を変えた実験であり，東海第二地点における漂流物の条件とは異なるため，適用性はないものと判断した。</p>															

表 漂流物荷重算定式に関する既往の研究論文

既往の算定式	内 容
<p>⑥ 有川らの算定式</p> <p>[6] 有川太郎ら：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</p> <p>[7] 有川太郎ら：津波による漂流木のコンクリート壁面破壊に関する大規模実験，土木学会論文集B2，Vol.66，No.1，pp.781-785，2010</p>	<p>コンクリート構造物に鋼製構造物（コンテナ等）が漂流物荷重を次式で提案している。</p> $F = \gamma_p \chi^{2/5} \left(\frac{5}{4} \tilde{m} \right)^{3/5} v^{6/5}$ $\chi = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi} \frac{1}{k_1 + k_2}, \quad k = \frac{1-v^2}{\pi E}, \quad \tilde{m} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ <p>ここで、F：衝突力 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（コンクリート版） v：ポアソン比 m：質量 v：衝突速度 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。 また，有川ら[5]は，松富[1]にならい，上式において$m = C_{MA} m$（C_{MA}：サージタイプの1.7）とすることで，流木のコンクリートに対する衝突力を評価できるとしている。</p> <p>【東海第二発電所への適用性評価】 コンテナ及び流木の衝突実験により漂流物荷重算定式を提案した文献。コンテナは質量62kg（材質：鋼製），流速2.5m/s以下で，木材は質量90kg及び131kgの木材，流速2.0m/s及び4.0m/s，衝突角度を変えた実験であり，東海第二地点における漂流物の条件とは異なるため，適用性はないものと判断した。</p>