

平成30年4月12日

日本原子力発電㈱

漂流物に係る検討について（コメント回答）

平成30年4月6日に実施したヒアリングにおけるコメントについて回答を以下に示す。

コメント①

- ・ Haehnel and Daly の式の引用及び適用について再検討すること。

コメント②

- ・ 電力中央研究所の実験における車両の軸剛性の同定において、付加質量が含まれていることの詳細を示すこと。

コメント③

- ・ FEMA の算定式における係数 1.3 の扱いについて、再検討すること。

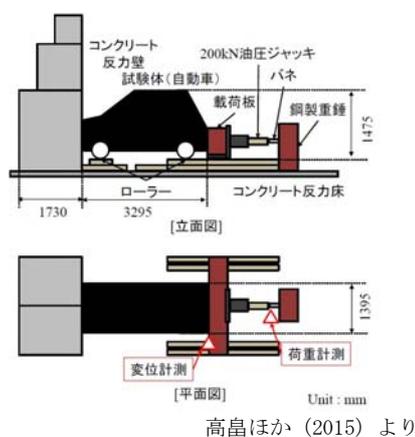
1. コメント回答① (Haehnel and Daly の式の引用及び適用について再検討すること。)
 各種基準類の漂流物荷重算定式を表-1 に示す。

表-1 各種基準類の漂流物荷重算定式の整理

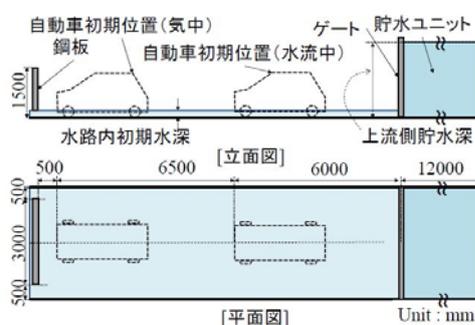
	出典	種類	概要及び算定式	算定式の適用性が確認された範囲 (実験条件等)
①	FEMA (2012)	流木 コンテナ	漂流物による漂流荷重を正確に評価するのは困難としながら、一例として算定式を示している。 $F_i = 1.3u_{max}\sqrt{km_d(1+c)}$ F_i : 衝突力, c : 付加質量係数, u_{max} : 漂流物を運ぶ流体の最大流速, m_d, k : 漂流物の質量と有効軸剛性	「運動方程式に基づく衝突力方程式」 非減衰系の振動方程式に基づいており、衝突体及び被衝突体の両方とも完全弾性体で、かつ衝突時のエネルギー減衰が一切考慮されていない前提条件での算定式であることから、衝突時に塑性変形を伴う漂流物の荷重算定では、個別の漂流物に対して、実現象を再現するような軸剛性を適切に定める必要がある。 FEMA の原形式は、 $F = v\sqrt{km}$ (Haehnel and Daly ^{*1}) であり、表面流速 (津波流速) ではなく漂流流速を用いて漂流物荷重を算定する式となっている。漂流物が地表面を転がるような場合は、衝突流速を 50% として良い可能性があるとの記載がある。
②	Haehnel and Daly (2004)	車両	$F = v\sqrt{k(m_1 + Cm_f)}$ F : 衝突力, v : 漂流物の速度, k : 漂流物の有効軸剛性, C : 付加質量係数 m_1 : 漂流物の質量, m_f : 漂流物により押し退けられた流体の質量 $F = v\sqrt{km}$ F : 衝突力, v : 漂流物の速度, m, k : 漂流物の質量と有効軸剛性	FEMA の原形式であり、表面流速 (津波流速) ではなく漂流流速を用いて漂流物荷重を算定する式である。 原論文では、付加質量係数 C を含めた式として $F = v\sqrt{k(m_1 + Cm_f)}$ が記載されているが、漂流物により除かれる流体の質量 m_f の算定は難しく、FEMA (2012) ではこれを漂流物の質量とした形で算定式が示されている。原論文には、付加質量係数 C の影響を除いた式として $F = v\sqrt{km}$ が示されている。 $F = v\sqrt{km}$ は、電力中央研究所 (2015) ^{*2} 及び高島ら (2015) ^{*3} おいて実験における実現象を再現する車両の有効軸剛性を同定するのに用いられている式である。高島ら (2015) ^{*3} の車両の軸剛性の同定では、付加質量の影響を含む衝突荷重を測定し、その荷重を $F = v\sqrt{km}$ で再現するように軸剛性 k を求めている。故に、付加質量の影響を含む軸剛性 k になっている。

2. コメント回答②（電力中央研究所の実験における車両の軸剛性の同定において、付加質量が含まれていることの詳細を示すこと。）

Haehnel and Daly (2004) に記載されている $F = v\sqrt{km}$ は、電力中央研究所 (2015) ^{※2} 及び高島ら^{※3} が実験における実現象を再現する車両 (全長 3295mm, 全幅 1395mm, 全高 1475mm) の有効軸剛性を同定するのに用いられている式である。車両の有効軸剛性は、実際の自動車を用いた静的載荷実験及び衝突実験 (気中衝突実験, 水流中衝突実験) を実施し、構造形式や破壊過程に基づいた軸剛性を取得している。水流中衝突実験では、付加質量の影響を含む衝突荷重を測定し、その荷重を $F = v\sqrt{km}$ で再現するように軸剛性 k を求めている。静的載荷試験の実験装置を図-1 に、衝突実験の概略図を図-2 に、図-3 に、車両の水流中衝突実験状況を示す。



高島ほか (2015) より



高島ほか (2015) より

図-1 静的載荷実験の実験装置

図-2 衝突実験の概略図



図-3 車両の水流中衝突実験状況

水流中衝突実験における衝突力の時系列変化を図-4に示す。水流中衝突実験では、衝突直後から衝突力が緩やかに増加し始め、0.07秒付近において急増し、その後0.09秒付近において極大荷重となっている。図-5に水流中衝突実験後の車両の残留変形の様子を示す。水流中衝突実験において、衝突直後はバンパー等が荷重に抵抗可能であったが、0.07秒付近でこれらの抵抗力が低下・喪失したため、以降では、メンバーにより荷重に抵抗し、最終的に座屈により荷重が低下したと推測されている。したがって、図-6に示すように、バンパー等により荷重に抵抗する1次及び2次、メンバーにより荷重に抵抗する3次の3つの剛性域で、軸剛性がモデル化できると考えられるとされている。

3次軸剛性 k_3 は以下の手順により算出されている。①図-4より2次軸剛性域の最大荷重とその後が発生する極大荷重を(図-6における f_2 と f_3)を読み取る、②車両質量と衝突速度より衝突直前の運動エネルギーを算出する、③吸収エネルギー(図-6における多角形O-A-B-C-Dで囲まれる領域の面積)を3次軸剛性で表し、運動エネルギーと等価として軸剛性を定める。

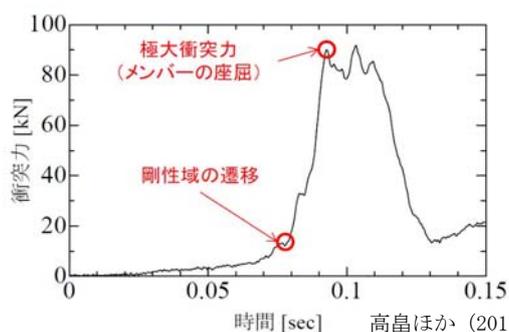


図-4 水流中衝突実験における衝突力の時系列変化 高島ほか (2015) より



図-5 車両の残留変形の様子 高島ほか (2015) より

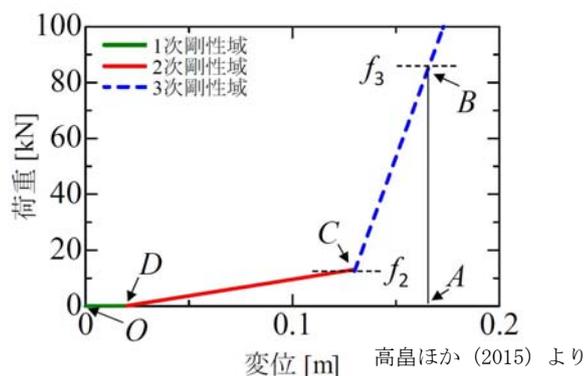


図-6 車両の軸剛性モデル

多部材による複雑な構造体である自動車の場合には、3段階に軸剛性が変化（図-7）することが実験結果から示されており、適切な軸剛性を選択することによって、合理的かつ適切に衝突力を推定できるとされている。

ここで、軸剛性の同定においては、Haehnel and Daly (2004) に記載がある $F = v\sqrt{km}$ により同定している。

なお、軸剛性の同定に用いている荷重は、静的载荷試験、気中及び水流中衝突実験によって得られたものを用いており、水流中衝突実験では付加質量の影響を含む衝突荷重を測定している。

このように求められた付加質量の影響を含む3段階の軸剛性のうち、最も軸剛性が大きい3次剛性 k_3 (2.04×10^6 N/m) を用いるものとする。

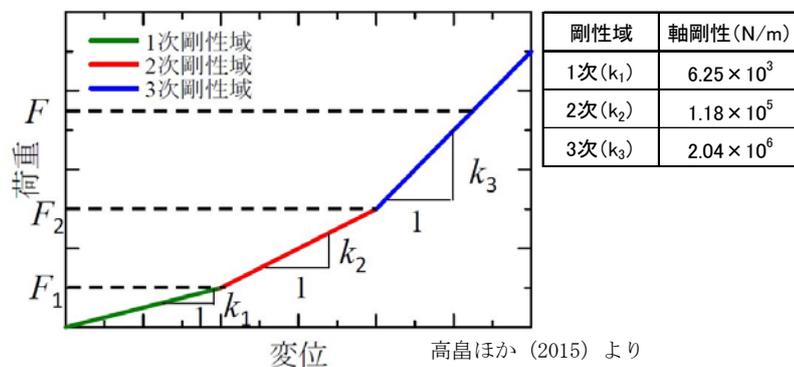


図-7 荷重-変位関係の例

3. コメント回答③ (FEMA の算定式における係数 1.3 の扱いについて、再検討すること。)

FEMA (2012) における係数 1.3 は、ASCE (American Society of Civil Engineers) による設備の重要度に応じた安全係数であり、重要施設として指定されているビル・構造物に対する係数となっている。

東海第二発電所における津波防護施設の設計においては、係数 1.3 を考慮し、FEMA (2012) により車両の漂流物荷重を算定する。

漂流物荷重算定時に用いる付加質量係数 C は、FEMA (2012) においては図-8 に示す通りとなっており、流木 (Lumber or Wood Log) の場合は縦断方向の衝突では 0、40ft コンテナの場合には縦断方向の衝突では 0.2、横断方向の衝突では 1.0 とされており、車両の付加質量係数 C は記載がない。

高島ら (2015) ^{※3} では、水流中衝突実験では付加質量の影響を含む衝突荷重を測定し、その荷重を $F = v\sqrt{km}$ で再現するように軸剛性 k を求めている。

縦断方向の付加質量係数 C は、0.2 及び 0.3 があるが、気中の有効軸剛性と付加質量を分離するために、気中の有効軸剛性が最も保守側の値となるように 0.2 を用いるものとする。よって、付加質量係数 C は、車両の正面衝突を仮定する場合には 0.2、側面衝突を仮定する場合には 1.0 を考慮する。

付加質量と気中状態での有効軸剛性の分離は、FEMA (2012) $F_i = 1.3u_{max}\sqrt{km_d(1+c)}$ の係数 1.3 倍をする以前の、 $F_i = \sqrt{km_d(1+c)}$ から求めるものとする。

高島ら (2015) ^{※3} での車両の有効軸剛性 k (2.04×10^6 N/m) から付加質量を分離した気中状態での軸剛性 k' を算出した。

ここで、 $k=k'(1+C)$ であり、 $C=0.2$ とすると、 $k=k'(1+0.2) = 1.2k'$ となる。

次に、 $k' = 1/1.2 \times k = 1/1.2 \times 2.04 \times 10^6$ N/m = 1.7×10^6 N/m となる。

以上から、付加質量を考慮しない気中状態での有効軸剛性 $k = 1.7 \times 10^6$ N/m が得られる。

Type of Debris	Mass (m_d) in kg	Hydrodynamic	
		Mass Coeffit. (c)	Debris Stiffness (k_d) in N/m
Lumber or Wood Log – oriented longitudinally	450	0	2.4×10^6 *
20-ft Standard Shipping Container – oriented longitudinally	2200 (empty)	0.30	85×10^6 **
20-ft Standard Shipping Container – oriented transverse to flow	2200 (empty)	1.00	80×10^6 **
20-ft Heavy Shipping Container – oriented longitudinally	2400 (empty)	0.30	93×10^6 **
20-ft Heavy Shipping Container – oriented transverse to flow	2400 (empty)	1.00	87×10^6 **
40-ft Standard Shipping Container – oriented longitudinally	3800 (empty)	0.20	60×10^6
40-ft Standard Shipping Container – oriented transverse to flow	3800 (empty)	1.00	40×10^6

* Haehnal and Daly, 2002; ** Peterson and Naito, 2012

図-8 FEMA (2012) における流木及びコンテナの付加質量

表-2 に検討対象物の FEMA (2012) $F_i = 1.3u_{max}\sqrt{km_d(1+c)}$ による漂流物荷重の一覧を示す。ここでは、係数 1.3 及び FEMA (2012) における側面からの付加質量係数 $C=1.0$ を用いて FEMA 式における最大の荷重を算定した。

漂流物荷重の算定に用いる流速は、基準津波時 11 m/s, T.P.+24m 津波時は 15 m/s とした。

表-3 に船舶、流木及び車両の漂流物荷重一覧を示す。船舶は道路橋示方書式により漂流物荷重を算定した。流木は、FEMA (2012) $F_i = 1.3u_{max}\sqrt{km_d(1+c)}$ により係数 1.3 を考慮し、FEMA (2012) に記載されている流木の軸剛性 2.4×10^6 N/m を用い、付加質量係数 $C=0$ として算定した。

算出の結果、漂流物荷重は、車両の正面衝突の場合は 732kN, 側面衝突の場合に最大の 944kN となる。車両の漂流物荷重は、正面及び側面の幅で作用することから、各漂流物荷重を車両の幅で除したものを設計用漂流物荷重として設定する。

設計漂流物荷重は、正面衝突の場合 563kN/m, 側面衝突の場合 295kN/m である。

表-2 車両の漂流物荷重の一覧 (FEMA (2012))

	漂流物荷重 (kN)		設計漂流物荷重 (kN/m)	
	係数1.3, 付加質量考慮			
	正面	側面 C=1.0	正面 W=1.3m	側面 L=3.2m
基準津波時 11m/s	537	630	413	197
T.P.+24m津波時 15m/s	732	944	563	295

表-3 漂流物荷重一覧

種類	質量 (t)	適用式	漂流物荷重 (kN)	
			基準津波時 (流速11 m/s)	T.P.+24 m津波時 (流速15 m/s)
船舶	15	道路橋示方書	147	221
流木	0.08	FEMA	198	270
車両	0.69	FEMA (正面)	537	732
		FEMA (側面)	630	944

- ※1 : Haehnel R. R and Daly F. D. : Maximum Impact Force of Woody Debris on Floodplain Structures. Journal of Hydraulic Engineering, 130, No. 2, 2004, pp. 112-120.
- ※2 : 大規模水理実験による津波フラジリティ評価手法の高度化（その2）－津波漂流物の衝突力評価手法の適用性検証－研究報告○15003, 電力中央研究所報告書（2015）
- ※3 : 高畠ら : 津波漂流物の衝突力推定における軸剛性モデル, 土木学会論文集 B2（海岸工学）（2015）
- ※4 : 原子力発電所における津波漂流物の影響評価技術－現状調査とその適用に関する考察－研究報告○16010, 電力中央研究所報告書（2017）

以上