

リサイクル燃料貯蔵株式会社		
提出日	2022年3月30日	
管理表No.	0113-13	改訂01

項目	コメント内容
津波 (第8条)	<p>津波衝突荷重の算定式 (FEMA 式) 適用の妥当性, 根拠を説明すること。</p> <p><3/9 追加コメント></p> <ul style="list-style-type: none"> • FEMA を選定した理由として、発電炉で流木に対する実績があること及びRFSの漂流物 (キャスク緩衝体) が木材であることを挙げているが、流木に適用できる算定式としては、道路橋示方書その他もある。その中から FEMA を選定した理由を説明すること。 • 浮遊する漂流物の衝突荷重 F の算定式において、k (漂流物の有効剛性) 及び c (付加質量係数) の設定根拠として、キャスク緩衝体の材質が木材であることを挙げているが、外殻のステンレス鋼を考慮すると F が大きくなると思われる。これを考慮していない理由を説明すること。

(回 答)

津波衝突荷重の算定式 (FEMA 式) における、漂流物の選定と衝突荷重の算定の考え方は以下のとおりである。

1. 漂流物の選定

「設2 補-014-02 津波漂流物評価対象の選定」に記載のとおり、浮力が重量を上回る「キャスク緩衝体」を浮遊する漂流物、浮力が重量を下回る「キャスク輸送車両」を滑動する漂流物としている。津波漂流物による衝突荷重の算定に用いる、漂流物の諸元は以下のとおりである。

表1 津波漂流物の諸元

	津波漂流物	
	浮遊する漂流物	滑動する漂流物
対象とする漂流物	キャスク緩衝体	キャスク輸送車両
漂流物の質量 (kg)	6100	44000
主な材質, 構造	外殻: ステンレス鋼 内部: 木材	車両本体 (アダプタ付属), タイヤ

2. 衝突荷重の算定の考え方

衝突荷重の算定について、浮遊する漂流物による衝突荷重は FEMA (FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY) (2012) ^{※1}に記載されている式により、滑動する漂流物による衝突荷重は FEMA (2019) ^{※2}で示される ASCE (AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS) (2016) ^{※3}に記載されている式により算定している。

FEMA (2012) には、浮遊する漂流物による衝突荷重の算定式が記載されている。この算定式は、東京電力 HD (株) 柏崎刈羽原子力発電所や日本原子力発電 (株) 東海第二発電所での流木を浮遊する漂流物とした衝突荷重の算定において実績があることから、当社でのキャスク緩衝体 (内部の材質が木材) を浮遊する漂流物とした衝突荷重の算定に用いることは妥当であると考えます。

また、FEMA (2019) で示される ASCE (2016) には、滑動する漂流物による衝突荷重が記載されている。この算定式は、東京電力 HD (株) 柏崎刈羽原子力発電所でのバキューム車を滑動する漂流物とした衝突物の算定において実績があることから、当社でのキャスク輸送車両を滑動する漂流物とした衝突荷重の算定に用いることは妥当であると考えます。

なお、衝突荷重の算定を行う式としては、他に「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）に記載されている式があり，その算定式は以下のとおりである。

$$P=0.1 W U$$

ここに

- P : 設計用衝突力 (kN)
W : 流送物（漂流物）の重量 (kN)
U : 表面流速 (m/s)

道路橋示方書に記載されている式により算定される設計用衝突力は，キャスク緩衝体で 60kN，キャスク輸送車両で 431kN となり，FEMA（2012）及び FEMA（2019）で示される ASCE（2016）に記載されている式により算定される設計用衝突力（キャスク緩衝体で 1573kN，キャスク輸送車両で 496kN）に比べて小さいことから，衝突荷重の算定を行う式としては FEMA に記載されている式を採用することで保守的な評価となっている。

※1 : Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis Second Edition (FEMA P-646 / April 2012)

※2 : Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis Third Edition (FEMA P-646 / August 2019)

※3 : Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structure (ASCE/SEI 7-16)

(1) 浮遊する漂流物の衝突荷重算定

浮遊する漂流物の衝突荷重の計算式は以下のとおりである。

$$F = 1.3u\sqrt{km(1+c)} \quad (1)$$

ここで，

- F : 設計用衝突力 (N)
u : 漂流物を運ぶ流体の最大流速 (m/s) (=10m/s)
k : 漂流物の有効剛性 (N/m) (=2.4×10⁶ N/m)
m : 漂流物の質量 (kg) (=6100kg)
c : 付加質量係数 (=0)

上記の式は，FEMA（2012）に記載されている計算式であり，ここで用いているパラメータは，それぞれ以下のとおりである。

① 係数F (=1.3)

衝突荷重の計算式の係数 1.3 は、ASCE (2016) に示され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。

② 漂流物を運ぶ流体の最大流速 u (m/s) (=10m/s)

ここで用いる流速は、津波の流速と同じ流速を採用している。

③ 漂流物の有効剛性 k (N/m) (=2.4×10⁶ N/m)

漂流物の有効剛性については、緩衝体の主な材質が木材であることから、FEMA (2012) に示される流木の漂流物荷重に用いる軸剛性 2.4×10⁶ N/m を用いている。

④ 漂流物の質量 m (kg) (=6100kg)

漂流物の質量は、浮遊する漂流物であるキャスク緩衝体の質量を採用している。

⑤ 付加質量係数 c (=0)

付加質量係数については、下表のとおり、FEMA (2012) に漂流物のタイプごとにその値が示されている。キャスク緩衝体の主な材質は木材であることから、付加質量係数として 0 を採用している。

キャスク緩衝体は、木材を厚さ 6mm のステンレス鋼板が覆う構造となっており、底面は円形で直径 3550mm、高さは上部緩衝体で 971mm、下部緩衝体で 961mm である。付加質量係数 c は表 2 に示すように、コンテナではつぶれにくさに応じて大きな値をとる設定となっている。キャスク緩衝体において、ステンレス鋼板の面外方向の剛性が、キャスク緩衝体の剛性及びつぶれにくさに寄与する度合いは木材の軸方向の剛性に比べて極めて小さいと考えられることから、ステンレス鋼板によって衝突荷重が増加することはなく、キャスク緩衝体の有効剛性及び付加質量係数は表 2 の値をそのまま用いて良いと考える。

表 2 付加質量係数 (Hydrodynamic Mass Coefficient) 及び有効剛性 (Debris Stiffness) について

Table 6-1 Mass and Stiffness of Some Waterborne Floating Debris

Type of Debris	Mass (m_d) in kg	Hydrodynamic Mass Coefft. (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

(FEMA (2012) より引用)

(2) 滑動する漂流物の衝突荷重算定

滑動する漂流物の衝突荷重の計算式は以下のとおりである。

$$F = I_{tsu} \cdot C_0 \cdot F_{ni} \quad (2)$$

$$F_{ni} = F_{ni0} \cdot u' \sqrt{k'm'} \quad (3)$$

ここで、

F : 設計用衝突力 (kN)

I_{tsu} : 重要度係数 (=1.25)

C_0 : 配向係数 (=1.0)

F_{ni} : 衝突力 (kN)

F_{ni0} : 基準とする石材・コンクリート殻 (質量 2270kg) の流速 4m/s 条件下の衝突荷重 (=36kN)

u' : 流速の比率 (基準とする石材・コンクリート殻の流速 4m/s に対する設計用流速 10m/s の比) (=10/4)

k' : 有効軸剛性の比率 (キャスク輸送車両の有効軸剛性は石材・コンクリート殻に対して小さいと想定されることから、保守的に石材・コンクリート殻と同じものとする。) (=1.0)

m' : 衝突物質量の比率 (基準とする石材・コンクリート殻の質量 2270kg に対する漂流物質量 44000kg の比) (=44000/2270)

上記の式は、FEMA (2019) で示される ASCE (2016) に記載されている計算式であり、ここで用いているパラメータは、それぞれ以下のとおりである。

① 重要度係数 I_{tsu} (=1.25)

重要度係数 I_{tsu} は、津波のリスク分類に応じて 1.0~1.25 が用いられるが、ここではその最大値である 1.25 を採用している。

② 配向係数 C_0 (=1.0)

ASCE (2016) においては、0.65 という値が示されているが、ASCE (2016) に記載されている試算例 (コンクリートガラ : 質量 2270 kg, 流速 4 m/s の条件下で衝突荷重は 36 kN) を基に、下式に示すように質量と流速を換算して求めるため、ここでは便宜的に 1.0 とする。

③ 基準とする石材・コンクリート殻 (質量 2270kg) の流速 4m/s 条件下の衝突荷重 F_{ni0} (=36kN)

ASCE (2016) において、6ft (1.83m) を超える最大浸水での衝撃力として、8000lb (36 kN) という値が示されている。また、コンクリート殻の質量についても 5000lb (2270kg) という値が示されている。

④ 流速の比率 u' (基準とする石材・コンクリート殻の流速 4m/s に対する設計用流速 10m/s の比) (=10 / 4)

流速の比率を求める基準値としては、ASCE (2016) に、13.1ft (4m/s) という値が示されている。

⑤ 有効軸剛性の比率 k' (=1.0)

キャスク輸送車両の有効軸剛性は石材・コンクリート殻に対して小さいと想定されることから、保守的に石材・コンクリート殻と同じものとする。

⑥ 衝突物質量の比率 m' (基準とする石材・コンクリート殻の質量 2270kg に対する漂流物質量 44000kg の比) (=44000/2270)

漂流物の質量は、滑動する漂流物であるキャスク輸送車両の質量を採用している。基準とする石材・コンクリート殻の質量については、ASCE (2016) に 5000lb (2270kg) という値が示されている。

滑動する漂流物の衝突荷重F

$$F = 1.25 \times 36\text{kN} \times \left(\frac{10\cancel{m/s}}{4\cancel{m/s}} \right) \times \sqrt{\frac{44000\text{kg}}{2270\text{kg}}} = 495.3\text{kN} \rightarrow 496\text{kN}$$

以上