

# 津波漂流物による衝突力ハザードの 算定方法について

吉田 郁政<sup>1</sup>・武内 大記<sup>2</sup>・大森 政則<sup>3</sup>・藤井 直樹<sup>3</sup>・柳沢 賢<sup>4</sup>

<sup>1</sup>武蔵工業大学教授 都市基盤工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

E-mail: iyoshida@sc.musashi-tech.ac.jp

<sup>2</sup>武蔵工業大学元修士学生 都市基盤工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

<sup>3</sup>東電設計株式会社 土木本部 社会基盤推進部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

<sup>4</sup>東京電力株式会社 原子力設備管理部 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町1-1-3)

津波による構造物の被害はその波力による構造物の損傷のみならず、船舶、車両、流木、コンテナなどが漂流物となって各種構造物に衝突し損傷する被害が指摘されている。そこで、本研究では津波漂流物による陸上構造物に対する確率的安全性評価を行うことを目的として、津波による漂流物の衝突力とその超過確率の関係を表す津波衝突力ハザードの提案、及びその評価法とモデル港湾における計算例を示した。提案方法では、津波の規模とその発生頻度の関係、対象構造物や漂流物候補の位置関係、漂流物の大きさ、数量などを反映して、衝突力とその超過確率の関係を評価することができる。

**Key Words :** *tsunami, probabilistic safety assessment, tsunami hazard curve, floating object, collision probability, collision force hazard*

## 1. はじめに

2004年12月26日、インドネシア・スマトラ島西方沖でマグニチュード9.0の大地震が発生し、その地震による津波によってインドネシア、スリランカなどインド洋沿岸地域に津波が発生し、各国に多くの被害がもたらされた。この地震・津波による死者・行方不明者総数は22万人以上<sup>1)</sup>であり、被害は人命のみならず家屋や構造物にも大きなダメージを与えた。大きな津波被害が生じた理由として、スマトラ沖地震が観測史上まれに見る規模であることに加え、津波による波力のみならず車や船舶などの漂流物による二次被害的な構造物の被害も挙げられる。このように漂流物が津波とともに陸上域を漂流して施設や建物を破壊する被害の発生が懸念され、漂流物の影響を考慮して安全対策を行うことが望ましい。

漂流物に関する研究としては、流木を対象とした衝突力に関する検討<sup>2)</sup>、エプロン上におけるコンテナの漂流特性と衝突力に関する検討<sup>3)</sup>、船舶等の漂流物が津波と共に陸上に乗り上げた場合の検討<sup>4)</sup>はあるが、津波と共に乗り上げた漂流物が陸上構造物へ衝突する頻度(確率)評価まで行った例はない。

本研究では、津波漂流物による陸上構造物の安全性を評価することを目的として、確率的安全性評価(PSA, Probabilistic Safety Assessment)の立場から津波時の漂流物

による衝突力とその確率の関係を把握し、その評価手法に関する基本的検討を行なう。構造物の損傷確率を算定するには、衝突力の大きさとその頻度に関する作用側の検討と、構造物自体の衝突に対する強さに関する耐力側の検討が必要となる。下記項目のうち(a)から(c)が作用側の、(d)(e)が耐力側の検討となる。

- (a)津波の規模と頻度に関するハザード評価
- (b)漂流物の衝突確率
- (c)衝突力の確率的評価(衝突力ハザード曲線)
- (d)衝突に対する構造物の限界状態関数の構築
- (e)損傷度曲線の算定(不確定要因の評価)
- (f)損傷確率評価

本研究ではこのうち(b)(c)について、すなわち衝突力ハザードの算定法について述べる。なお、(a)に関する津波ハザード(津波高さと超過確率の関係)については算定例が既に報告されており<sup>5)</sup>、ここではその成果を用いる。

## 2. 津波による漂流物の衝突力ハザードの評価法

衝突力ハザードを衝突力とその超過確率の関係と定義し、その算定法について条件付衝突確率の算定と衝突力ハザードの算定に分けて示す。

### (1) 条件付衝突確率の算定

漂流物の候補としては船舶、車両、その他の資材などが考えられる。これらのうち代表的漂流物を数種類想定して対象構造物との位置関係、数量に関する統計モデルを設定する。車両に関しては道路や駐車場などの領域にランダムに存在すると仮定して一様分布などを用いてモデル化する。一様分布の場合は規定された領域内のどこにあるかは全て等確率と仮定することに相当する。船舶に関しては係留点で考慮し、そこに船舶が停泊している平均頻度を仮定する。

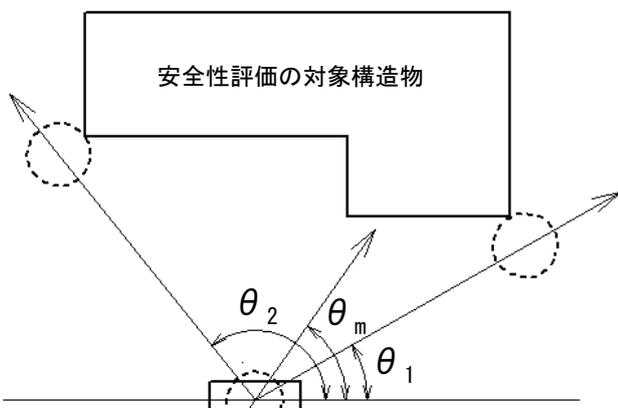
まず、対象物が確定的に1個存在し、それが漂流した場合の条件付衝突確率の算定式について述べる。図-1に示すように、 $\theta_m$ ：漂流物の進行角度（漂流する方向）の平均値、 $\theta_1$ ：衝突する場合の角度の下限、 $\theta_2$ ：衝突する場合の角度の上限、 $\sigma$ ：進行角度の標準偏差、とする。車両などの漂流物は形状をそのままモデル化することは大変煩雑となるので単純な円で表すこととする。津波による漂流の進行角度は不確定性を考慮し、正規分布でモデル化する。対象構造物に対する漂流物の位置を固定すると求めるべき条件付衝突確率  $p_0$  は次式で表される。

$$p_0 = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\theta - \theta_m}{\sigma}\right)^2\right\} d\theta \quad (1)$$

さらに車両のように道路や駐車場に分布すると仮定する場合には、さらに位置  $x$  についても積分することによってその条件付衝突確率を算定することができる。

$$p_0 = \int \int_{\theta_1(x)}^{\theta_2(x)} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\theta - \theta_m}{\sigma}\right)^2\right\} d\theta f(x) dx \quad (2)$$

ここで、 $f(x)$ は漂流物候補が場所 $x$ に存在する確率密度関数である。



$\theta_m$ ：津波の入射角度  
 $\theta_1$ ：衝突する場合の角度の下限  
 $\theta_2$ ：衝突する場合の角度の上限  
 漂流物を円で表現

図-1 漂流物の衝突の考え方

以上は漂流物が確定的に1個存在する場合であるが、次に平均 $m$ 個の漂流物が存在する場合について述べる。条件付衝突確率を考慮すると一回の津波で平均 $mp_0$ 回衝突することになり、ポアソン分布を仮定すると少なくとも1個以上の漂流物が衝突する確率 $p_c$ は以下のように求めることができる。

$$p_c = 1.0 - \exp(-mp_0) \quad (3)$$

なお、漂流物同士の衝突の影響は考慮していない。

### (2) 衝突力ハザードの算定

条件付衝突確率及び、津波ハザードと衝突力-津波高さ関係から、衝突力-確率関係である衝突力ハザードを求める。津波ハザードは、津波高ささとある期間内に発生する超過確率で表されており、両方とも津波高さを用いて表されているため、衝突力に対する超過確率を容易に求めることができる。図-2に算定手順の概要を示す。

- 1) 津波ハザードの A と同じ津波高さ  $h$  の時の衝突力  $f$  を求める。
- 2) 津波ハザードの A の時（衝突力  $f$ ）に対応する平均発生回数  $g(f)$  に条件付衝突確率  $p_c$  (式(3)参照) を乗じて、津波によってある期間内に漂流物が衝突する平均回数を算定する。ポアソン分布を仮定して超過確率  $p_f$  を算定する。
- 3) 1)で求めた衝突力と 2)で求めた超過確率  $p_f$  より衝突力ハザードの A' をプロットする。

以上の手順を繰り返すことで衝突力ハザードを求めることができる。

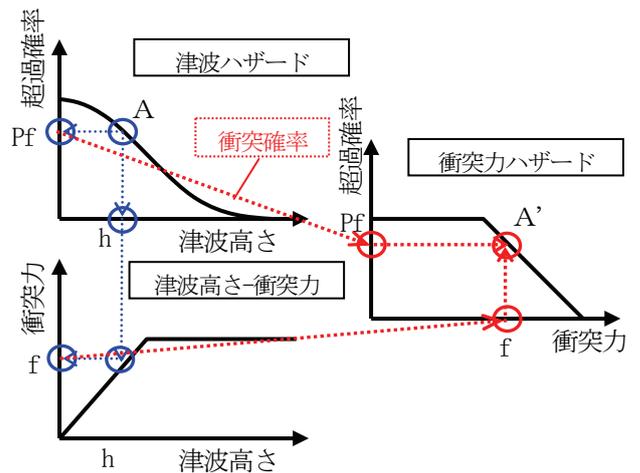


図-2 衝突力ハザード算定概念図

漂流物の種類が1個であれば上記のように比較的単純に算定することができるが、複数の場合には手順がやや複雑となる。図-3に示すように漂流物が3種類ある場

合を例として説明する。各漂流物について  $f$  以上の衝突力が生じるために必要な津波高さを算定し、波高が低い順、すなわち、その衝突力  $f$  に対応する年平均発生回数  $g(f)$  が高い順に並べて漂流物 1, 2, 3 と番号をつける。ここで、 $j$  番目の漂流物の条件付衝突確率を  $p_{cj}$ 、その漂流物が衝突したときに  $f$  以上の衝突力を生じさせる津波の年平均発生回数を  $g_{cj}(f)$  とする。漂流物 1 が衝突することによって  $f$  以上の衝突力を生じさせる事象の年平均発生回数は  $p_{c1}g_{c1}(f)$  である。漂流物 2 が衝突することによる寄与は漂流物 1 が衝突しない場合に限られるため  $(1-p_{c1})p_{c2}g_{c2}(f)$  となり、同様にして漂流物 3 が衝突することによる寄与は漂流物 1, 2 が衝突しない場合に限られるため  $(1-p_{c1})(1-p_{c2})p_{c3}g_{c3}(f)$  となる。以上により、衝突力  $f$  に対応する平均衝突回数  $g(f)$  は以下の式となる。

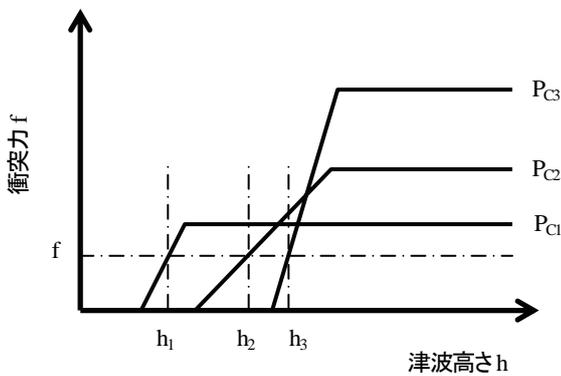
$$g(f) = p_{c1}g_{c1}(f) + (1-p_{c1})p_{c2}g_{c2}(f) + (1-p_{c1})(1-p_{c2})p_{c3}g_{c3}(f) \quad (4)$$

以上を一般化し  $n$  種類の漂流物を想定する場合について考えると衝突力  $f$  に対応する平均発生回数  $g(f)$  は以下の式で与えられる。

$$g_f(f) = p_{c1}g_{f1}(f) + \sum_{i=2}^n (p_{ci}g_{fi}(f)) \prod_{j=1}^{i-1} (1-p_{cj}) \quad (5)$$

ポアソン分布を仮定するとその超過確率  $P_f(f)$  は平均発生回数  $g(f)$  より以下の式で求められる。

$$P_f = 1.0 - \exp(-g_f(f)) \quad (6)$$



$h_1, h_2, h_3$ : 各漂流物の衝突力  $f$  が生じる津波高さ  
 $P_{c1}, P_{c2}, P_{c3}$ : 各漂流物の衝突確率

図-3 衝突力-津波高さ関係

### 3. 衝突力のモデル化

力積は運動量の差分であることから衝突力  $f$  と漂流物の速度  $v$  には以下の関係がある。

$$f = mvc / \Delta t \quad (7)$$

ここで、 $m$  は漂流物の重さ、 $\Delta t$  は接触時間であり、衝突後の速度は 0 と仮定した。 $c$  は波も漂流物と一体化して衝突力に寄与することによる補正係数である。 $c / \Delta t$  は津波の周期や漂流物、対象構造物の剛性、等に依存し決めることが困難なパラメタであるが、本論文ではこれまでの実験結果<sup>6)</sup>を参考に定めた数値 ( $c / \Delta t = 21$ ) を用いることとし、このパラメタをどのように決めるかについては今後の課題としたい。津波高さと流速の関係については、水谷ら(2005)<sup>2)</sup>が実験結果より次式の結果を得ている。本検討においても同様の式を用いた。

$$v = 2\sqrt{gh} \quad (8)$$

漂流物の陸上部での漂流速度は、波の陸上部速度と必ずしも一致しないがこうした誤差は上記の補正係数  $c$  に含まれるとしており、これも今後検討する必要がある。

### 4. 衝突力ハザードの試算

#### (1) 対象施設のレイアウトと条件付衝突確率の算定

衝突力ハザードの試算に用いたレイアウトを図-4 に示す。護岸の高さは 3.5m とし、陸上構造物は護岸から 50m の位置とし、その大きさについて 10m×10m (大規模構造物) と 2m×2m (小規模構造物) の 2 種類を考える。漂流する対象物として、船舶、クレーン、トラック、普通車両を想定する。船舶は図-4 に示した位置に停泊しているものとし、クレーンは図中の道路①に領域に存在し、トラック及び普通車両は①、②の領域に存在するものと仮定する。それぞれの漂流物の情報を表-1 に示す。漂流物は漂流時にある程度回転すると考えられるが、その形状をモデル化して回転を考慮することは困難であり、また全体の計算精度から考えても意味があるとは考えられない。そこで、前述のように漂流物を円としてモデル化し、直径を長手方向の構造物長の 70% と仮定した。

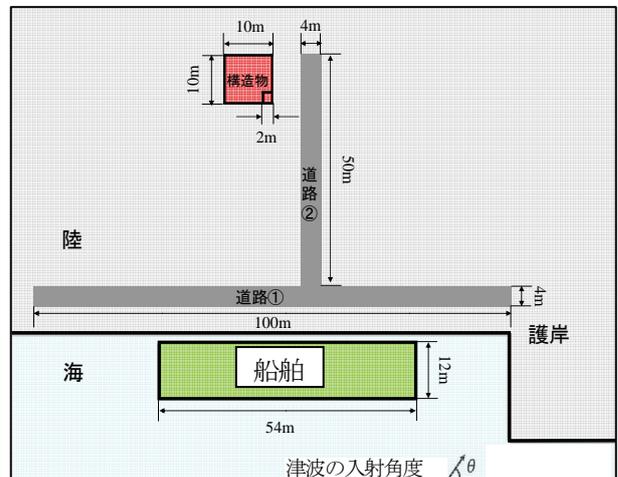


図-4 試算のためのレイアウト

表-1 漂流物の諸元

|       | 重量 (t) | 長辺 (m) | 円の直径 (m) | 平均台数 (台/日) |
|-------|--------|--------|----------|------------|
| 船舶満載時 | 2410   | 54     | 38       | 0.05       |
| 船舶軽荷時 | 1280   | 54     | 38       | 0.05       |
| クレーン  | 30     | 13     | 9        | 0.5        |
| トラック  | 10     | 10     | 7        | 1.0        |
| 普通車両  | 1.5    | 6      | 4        | 1.0        |

以上の条件より津波進行角度が0度から180度の場合について、式(3)を用いて条件付衝突確率の算定を行った。図-5.6に対象構造物に対する船舶、トラックの条件付衝突確率を例として示す。対象構造物の大きさの違いによる衝突確率への影響はトラックに対してはやや見られるものの、船舶に対しては小さい。また、衝突確率にはレイアウトの影響が現れており、船舶では津波入射角度90°付近が衝突確率が高く、トラックでは道路がL字型になっていることを反映して津波入射角120°の時が衝突確率が高くなっている。

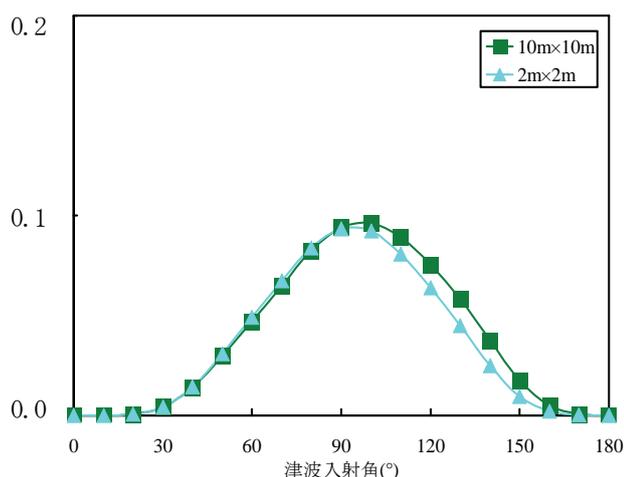


図-5 船舶の衝突確率

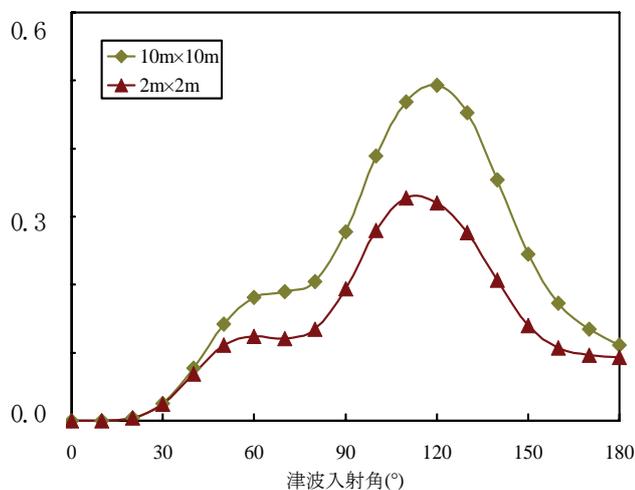


図-6 トラックの衝突確率

## (2) 検討に用いる津波ハザード曲線

津波ハザード曲線は津波高さと超過確率の関係で表される。津波ハザードを算定する際に考慮する不確定要素として、地震断層の位置、地震の規模、破壊開始点および破壊、断層の不均質性などが挙げられる。さらにこうしたモデル化の考え方自体にも不確定性があり、それを考慮する方法としてロジックツリーがある。モデル化の不確定性を統計的処理することによって、多数の評価モデル(多数のハザード曲線)が得られる。安中らによって岩手県山田湾における津波ハザード曲線が算定されており<sup>9)</sup>、本研究ではそのロジックツリー解析の結果得られた平均曲線を用いた。図-7に検討に用いるハザード曲線を示す。縦軸は年超過確率となっており1年間にある一定以上の津波が発生する確率を表している。

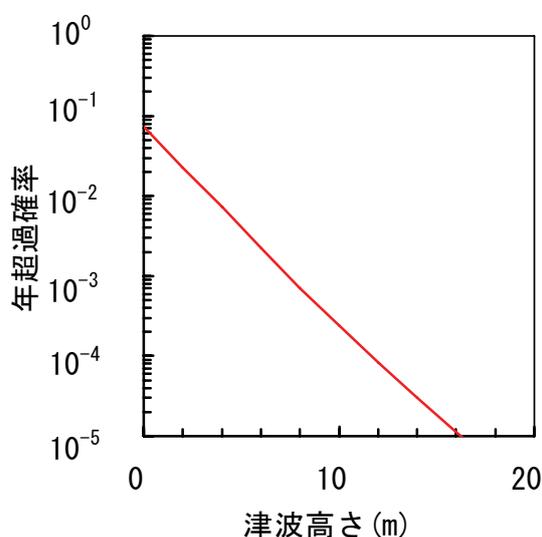


図-7 津波ハザード曲線

## (3) 津波高さと衝突力の関係

漂流物ごとに漂流が始まる最小津波高さを設定する。想定した施設の護岸の高さは3.5mであり、普通自動車の車体が浮く冠水水位は0.5mとの報告がある<sup>7)</sup>ことから普通車両では3.5+0.5=4.0mから漂流が始まると仮定する。トラック、クレーンも同様にタイヤが隠れるくらい水深で流れ出すとし、また船舶についても喫水深さからそれぞれ表-2に示すように仮定した。

表-2 各漂流物の漂流開始の津波高さ

|       | 護岸高さ (m) | 喫水深さ (m) (漂流深さ) | 漂流開始津波高さ (m) |
|-------|----------|-----------------|--------------|
| 船舶満載時 | 3.5      | 4.5             | 8.0          |
| 船舶軽荷時 |          | 2.5             | 6.0          |
| クレーン  |          | 1.5             | 5.0          |
| トラック  |          | 1.0             | 4.5          |
| 普通車両  |          | 0.5             | 4.0          |

しかし、表-2に示した漂流開始高さ未満でも漂流物が流れ出す可能性も考えられるため、護岸高さ3.5mを考慮して津波高さ3.5mから2次曲線でそれぞれの漂流物の最小津波高さまでの衝突力を仮定した。図-8に船舶、図-9にはクレーン、トラック、車両の津波高さと衝突力の関係を示す。

なお、衝突の角度・漂流物の形状・陸上構造物の形状等により、漂流物が持つ運動エネルギーの損失量は変わるものと考えられるが、ここでは衝突により運動エネルギーがゼロとなる全面衝突を仮定した。

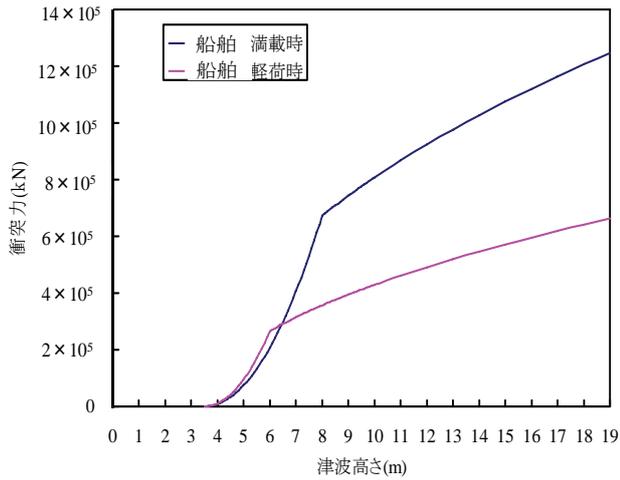


図-8 津波高さと衝突力 船舶

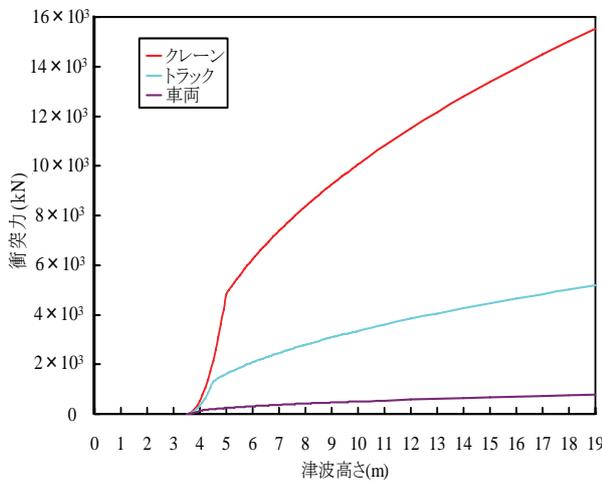


図-9 津波高さと衝突力  
クレーン、トラック、普通車両

#### (4) 衝突力ハザード（衝突力-確率関係）の算定

漂流物の条件付衝突確率、津波ハザード曲線、漂流物の津波高さと衝突力の関係より衝突力ハザードを算定する。津波入射角に関しては平均 120°、標準偏差 10°と仮定した。津波入射角の平均値を場所の関数とするものも考えられるが、今回のモデルでは比較的狭い範囲を対象としていること、また、単純化したモデルを用いた津波

衝突力ハザードの試算を目的としていることから場所に寄らず一定とした。

図-10に対象構造物 10m×10m に対する衝突力ハザードと各漂流物による寄与度を示す。図中、「全体」は表-1, 2 に示した全ての漂流物を考慮した場合の衝突力ハザードを、「トラック」はトラックだけが存在し他の漂流物が全く存在しない場合の衝突力ハザードを示しており「全体」に対する寄与分を見ることができる。衝突力が 10<sup>3</sup>kN 以下の領域では普通車両、トラックによってハザードが決まっており、10<sup>3</sup>kN から 10<sup>4</sup>kN まではトラックが支配的であり、それ以上大きくなると船舶によって決まっていることがわかる。

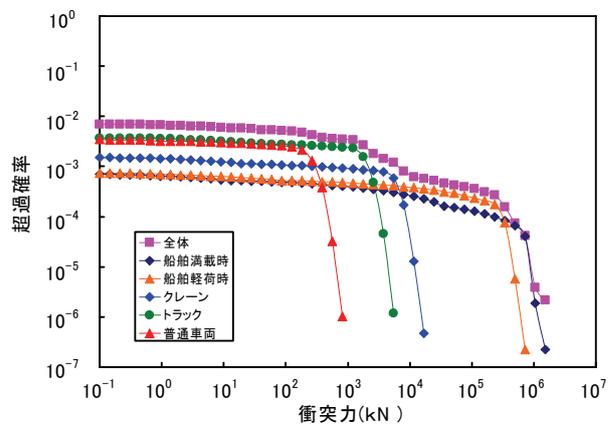


図-10 衝突力ハザードと各漂流物による寄与度

## 5. おわりに

本研究では、津波漂流物による陸上構造物の安全性を評価することを目的として、確率的安全性評価 (PSA, Probabilistic Safety Assessment) の立場から、津波時の漂流物による衝突力とその超過確率の関係を把握し、その評価手法に関する基本的検討を行なった。評価のための一通りの枠組みを構築することができたと考えており、数値計算例に示したように衝突力のレベルごとにどのような漂流物が危険となるかをその超過確率ともに示すことができた。しかし、津波高さと衝撃力の関係・衝突により失われる運動エネルギーの量・漂流開始水深等の評価モデルの高度化については今後の課題としたい。

### 参考文献

- 1) 日本赤十字社：スマトラ沖地震・津波災害での活動，  
<http://www.jrc.or.jp/pickup/sumatra/index.html>, 2006.12.
- 2) 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.
- 3) 水谷法美, 高木祐介, 宮島正悟, 富田孝史, 白石和睦 :  
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.
- 4) 藤井直樹, 大森政則, 池谷毅, 朝倉良介, 武田智吉, 柳  
沢賢 : 港湾における津波漂流物の数値解析, 海岸工学論  
文集, 第 52 巻, pp.296-300, 2005.
- 5) 安中正, 佐竹健治, 榊山勉, 柳沢賢, 首藤伸夫 : 確率論  
的津波ハザード解析の方法, 第 12 回日本地震工学シンポ  
ジウム, pp.158-161, 2006.
- 6) 池谷毅, 稲垣聡, 朝倉良介, 福山貴子, 藤井直樹, 大森  
政則, 武田智吉, 柳沢賢 : 津波による漂流物の衝突力の  
実験と評価方法の提案, 海洋開発論文集, 第 53 巻,  
pp.276-280, 2005.
- 7) 須賀堯三 : 利根川の洪水, pp.108-109, 山海堂, 1995.
- (2007. 4. 6 受付)

## A METHOD FOR ESTIMATION OF COLLISION HAZARD OF TSUNAMI FLOATING OBJECTS

Ikumasa YOSHIDA, Taiki TAKEUCHI ,  
Masanori OHMORI, Naoki FUJII and Ken YANAGISAWA

When a tsunami occurs, it is considered that not only the tsunami wave force but also floating objects such as vehicles or ships may cause serious damage to various structures in coastal area. Authors propose collision force hazard and its estimation procedure in order to establish a method of PSA (Probabilistic Safety Assessment) for tsunami floating object. Collision force hazard analysis with a hypothetical layout and conditions are carried out for the demonstration. Many factors, such as relation between frequency and tsunami magnitude, spacial relationship of floating objects and a structure, size of them and so on, can be reflected to the proposed collision hazard.