風および潮流により生じる矩形橋脚への漂流船の 衝突確率計算手法に関する研究

久保雅義*・榊原繁樹*・長谷川芳己**・長岡忠男*

A Study on Calculation Method of Probability of Drifting-ship Collision to a Rectangular Pier due to Wind and Tides

Masayoshi KUBO, Shigeki SAKAKIBARA,
Yoshimi HASEGAWA and Tadao NAGAOKA

Abstract

In a design stage of large bridge over an important sea rout, many investigations such as observations and/or predictions of the sea traffic volume and researches on an effective support system for sailing have been considered. In the study on ship collision to piers, some considerations, namely a selection of target ship dimensions, the collision patterns, calculations of the collision energy and so on have been done. However, few researches have been carried out on the probability of drifting-ship collision to the pier on each parts of it. In practice, some large fenders as the shock absorbers have been installed on the four sides and corners around the pier, respectively. It is important and difficult to arrange the shock absorbers around the piers, safely and effectively.

In this paper, a study on calculation method of probability of drifting-ship collision to a rectangular pier due to wind and tides were carried out considering positions of the pier. And a case study for a Japanese famous large bridge was demonstrated.

1. 緒 言

現在瀬戸内海には、本州と四国を結ぶ 3 本の橋が建設されている。建設に際し、船舶交通量の動態調査・予測、適切な航行援助システムの構築など様々な観点から検討が行われている。橋脚への船舶の衝突に関する検討において、従来、対象船舶の選定、衝突の形態および衝突エネルギーの算出ならびに適切な緩衝工の選定等の検討が行われており⁽¹⁾、最近では船舶の衝突シナリオを作成して定性的および定量的な衝突の評価が行われるに至っている⁽²⁾⁽³⁾。また橋脚への衝突を、操船不能確率と橋脚への水平および鉛直・上部構造物への幾何学的衝突確率の積として算出する計算手法が提案されている⁽⁴⁾。ただし当該計算手法は、航路航行船がヒューマン・エラーなどの操船ミスにより、ある進路を持って橋脚に衝

突する場合を想定しており、船舶が機関および舵故障等により自力航行できなくなり、風および潮流により漂流して橋脚に衝突する状況は考えていない。実際の事故事例を調べると、上述の漂流事故確率がかなり高い割合となる場合がある⁽⁵⁾。また橋脚の形状や各部位への衝突確率まで計算した事例は少なく、実際、矩形形状をした橋脚の辺およびコーナ部分（頂点）につき個別に緩衝工を設置して橋脚の損傷軽減をはかる場合がある。

そこで本研究では、風および潮流により生じる矩形橋脚への漂流船の衝突確率計算手法を提案すると共に、当該計算手法の南北備讃瀬戸大橋への適用事例を紹介する。

* 正会員 神戸商船大学（〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1）

** 非会員 本州四国連絡橋公団（〒700-0031 岡山市富町2-19-12）

2. 矩形橋脚への漂流船の衝突確率計算手法

2.1 風による衝突確率

2.1.1 計算手順

機関および舵故障等した船舶が、風により漂流して矩形橋脚へ衝突する確率の計算手順を図1に示す。基本的には船舶が海域のある場所において漂流事故が発生し、風向きに沿って漂流して橋脚に衝突する場合を考える。

(1) 船舶の海域存在確率 $P_m(d, \phi)$

まず船舶通航実態調査等により航跡図を描き、調査期間内における海域通航船の存在隻数を図2に示すような各橋脚 m を中心とする方位 ($\phi = \phi(m)$) お

図1 風による衝突確率の計算手順

図2 船舶の海域存在隻数算出のための海域メッシュ (風による衝突)

よび距離 ($d=d(m)$) で仕切られる扇形メッシュ i ($i=i(m)$) 内に存在する隻数を累計し、式(1)のように海域存在確率 $P_m(d, \phi)$ を求める。

$$P_m(d, \phi) = \frac{N_i}{N_T}, \quad N_T = \sum_{i=1}^{ND} N_i \quad (1)$$

ここに、 $P_m(d, \phi)$ はメッシュ i における船舶の海域存在確率、 N_i は船舶通航実態調査期間内に橋脚 m に対するメッシュ i に存在した船舶の累計隻数、 N_T は対象海域の存在隻数の総数、 ND は海域の分割個数である。

(2) 漂流事故確率 P_p およびメッシュ i での漂流確率 $P_{mi}(d, \phi)$

次に通航船の1隻が、海域航行中に漂流する確率 P_p を設定する。これは船舶通航実態調査期間内の総航行隻数と海難審判庁裁決録などから抽出した過去に発生した漂流事故件数から式(2)のように算出する。

$$P_p = \frac{N_a}{N_s} \quad (2)$$

ここに、 P_p は1隻の通航船が海域航行中に漂流する確率、 N_a は所定の期間内に過去に発生した漂流事故件数、 N_s は船舶通航実態調査期間内の総航行隻数であるが当該漂流事故抽出の期間に合せて適宜外挿する場合がある。

以上より、1隻の通航船が海域航行中にメッシュ i の位置から漂流して橋脚 m に衝突する確率 $P_{mi}(d, \phi)$ は以下ようになる。

$$P_{mi}(d, \phi) = P_p \times P_m(d, \phi) \quad (3)$$

(3) 風の吹く確率 $P_w(\phi)$ および潮流のない確率 P_{no_tide}

一方風の吹く確率 $P_w(\phi)$ に関しては、当該海域における過去の風速および風向観測データを統計処理して、所定の風速以上の風の吹く確率を風向き (ϕ) ごとに求める。またここでは風のみにより船舶が漂流する場合を考えているため、海域に潮流のない場合の確率 P_{no_tide} を合せて設定する。

(4) 1隻の通航船が風により橋脚へ衝突する確率 $P_{wpier_1}(m, n)$

以上より、1隻の通航船が海域航行中に漂流して橋脚 m の辺または頂点 n へ衝突する確率 $P_{wpier_1}(m, n)$ は式(4)のように算出される。

$$P_{wpier_1}(m, n) = \sum_d \sum_{\phi} P_{mi}(d, \phi) \times P_w(m, n, d, \phi) \times P_w(\phi) \times P_{no_tide} \quad (4)$$

ここに、 $P_w(m, n, d, \phi)$ は風による漂流船の橋脚

m の辺または頂点 n への幾何学的衝突確率である。

(5) 1 年間の風による橋脚への衝突確率 $P_{wpier}(m, n)$

式(4)で求めた 1 隻の通航船が風により橋脚へ衝突する確率 $P_{wpier_1}(m, n)$ を用いて、1 年間に橋脚 m の辺または頂点 n へ衝突する確率 $P_{wpier}(m, n)$ は、式(5)のように算定されることになる。

$$P_{wpier}(m, n) = P_{wpier_1}(m, n) \times N_{s_year} \quad (5)$$

ここに、 N_{s_year} は 1 年間に海域を航行する総隻数である。

2.1.2 風による橋脚への幾何学的衝突確率の計算 ($P_w(m, n, d, \phi)$)

風による橋脚 m の辺または頂点 n への漂流船の幾何学的衝突確率 ($P_w(m, n, d, \phi)$) は次のように求める。

図 3 に示すように海域の任意のメッシュ i 内に存在する船舶はメッシュの中心位置に代表させる。そして漂流船は風向きに船首尾線を直角にして漂流し、橋脚 m に衝突する場合を考える。一方橋脚 m の各部位は $P1$ から $P8$ の 8 箇所に分類し、 $P1$ 、 $P3$ 、 $P5$ 、 $P7$ が橋脚の辺に、 $P2$ 、 $P4$ 、 $P6$ 、 $P8$ がコーナ部(頂点)とする。このときメッシュの方位分割幅を θ_0 、漂流船が橋脚 m の $P1$ 、 $P2$ および $P3$ をみる角度をそれぞれ θ_1 、 $2\theta_2$ および θ_3 とするとき、各部位の幾何学的衝突確率を以下のように定義する。

$$P_w(m, 1, d, \phi) = \frac{\theta_1}{\theta_0}, \quad P_w(m, 2, d, \phi) = \frac{2\theta_2}{\theta_0},$$

図 3 方位角と漂流船が橋脚をみる衝突角度 (風による衝突)

$$P_w(m, 3, d, \phi) = \frac{\theta_3}{\theta_0} \quad (6)$$

ここに、漂流船が橋脚 m の部位をみる角度 θ_1 、 $2\theta_2$ および θ_3 は風向き、海域メッシュ i と橋脚 m までの距離と方位、漂流船舶の全長(船長)および橋脚の形状により次のように幾何学的に算出することができる。図 4 に橋脚と漂流船の位置関係の詳細図を示す。

図 4 風による漂流船と橋脚との位置関係 (風による幾何学的衝突確率)

す。

(1) 方位角 θ_2 の算出

図 4 の点 O において、船舶が漂流事故を発生した場合を考える。 $\triangle OAG_1$ において、次式の関係式を得る。

$$\tan \theta_2 = \frac{s}{x}, \quad d_2^2 = x^2 + s^2 \quad (7-1)$$

ここに、 $s = L/2$ (L : 船長) である。また $\triangle OP_0A$ において、次式の関係式を得る。

$$x^2 = d^2 + c^2 - 2dc \cos \alpha \quad (7-2)$$

ここに、 $c^2 = a^2 + b^2$ (a : 橋脚半幅、 b : 橋脚半高さ) である。一方 $\triangle P_0P_1A$ において、

$$(\phi - \alpha) + \beta = 90^\circ \text{ より、}$$

$$\phi = \alpha + 90^\circ - \beta \quad (7-3)$$

をとる。ここに β は風向き方位と橋脚方位から算出される与値である。式 (7-3) で ϕ は次式にて求められる。

$$\phi = \tan^{-1} \frac{a}{b} \quad (7-4)$$

したがって式 (7-3)、(7-4) より α は次式にて求められ、式 (7-1)、(7-2) より θ_2 が得られる。

$$\alpha = \varphi + \beta - 90^\circ \quad (7-5)$$

(2) 方位角 θ_1 の算出

図 4 の $\triangle OAE$ において、次式の関係式を得る。

$$X_1^2 = y^2 - x^2 \quad (7-6)$$

また $\triangle AP_0E$ において、次式の関係式を得る。

$$X_1^2 = c^2 + (d-y)^2 - 2c(d-y)\cos\alpha \quad (7-7)$$

式 (7-6)、(7-7) を整理すると、次式を得る。

$$y = \frac{x^2 + c^2 + d^2 - 2cd\cos\alpha}{2(d-c\cos\alpha)} \quad (7-8)$$

したがって y が得られることになり、式 (7-6) より X_1 も求められる。また $\triangle AP_0E$ において、次式の関係式を得る。

$$\frac{X_1}{\sin\alpha} = \frac{d-y}{\sin\rho} \text{ より、} \\ \rho = \sin^{-1}\left(\frac{d-y}{X_1} \sin\alpha\right) \quad (7-9)$$

ここに、 $\rho = \eta + \varepsilon$ であり、 $\eta = \tan^{-1}\frac{b}{a}$ で与えられる ($\varepsilon = \rho - \eta$)。

一方、点 G_1 回りの角度について次式の関係式を得る。

$$360^\circ = \mu_1 + 90^\circ - \theta_2 + \nu + 90^\circ \text{ より、} \\ \mu_1 = 180^\circ + \theta_2 - \nu \quad (7-10)$$

ここに $\triangle G_1QA$ において、次式の関係式を得る。

$$\nu = 90^\circ - \varepsilon \quad (7-11)$$

式 (7-11) を式 (7-10) へ代入し、さらに ρ を代入すると、 μ_1 が得られる。

$$\mu_1 = 180^\circ + \theta_2 - (90^\circ - \varepsilon) = 90^\circ + \theta_2 + \varepsilon \\ = 90^\circ + \theta_2 + \rho - \eta \quad (7-12)$$

そして $\triangle OG_3G_1$ において、次式により m_1 が求められ θ_1 が得られる。

$$m_1^2 = d_2^2 + 4a^2 - 4ad_2\cos\mu_1, \\ \theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{2a}{m_1} \sin\mu_1\right) \quad (7-13)$$

(3) 方位角 θ_3 の算出

図 4 の点 A 回りの角度について、次式の関係式を得る。

$$\gamma = 180^\circ - \varphi - \rho \quad (7-14)$$

また点 G_2 回りの角度について、次式の関係式を得る。

$$360^\circ = \mu_3 + 90^\circ - \theta_2 + 180^\circ - \gamma \text{ より、}$$

$$\mu_3 = 90^\circ + \theta_2 + \gamma \quad (7-15)$$

一方 $\triangle OG_2G_4$ において、次式により m_3 が求められ θ_3 が得られる。

$$m_3^2 = d_2^2 + 4b^2 - 4bd_2\cos\mu_3, \\ \theta_3 = \sin^{-1}\left(\frac{2b}{m_3} \sin\mu_3\right) \quad (7-16)$$

同様に、橋脚各部位の幾何学的衝突確率を算定することができる。

2.2 潮流による衝突確率

2.2.1 計算手順

機関および舵故障等した船舶が、潮流により漂流して矩形橋脚へ衝突する確率の計算手順を図 5 に示す。風による場合と同様に、海域のある場所において漂流事故を発生し、流れの向きに沿って漂流して橋脚に衝突する場合を考える。

図 5 潮流による衝突確率の計算手順

(1) 船舶の海域存在確率 P_{m_w} および P_{m_e}

船舶通航実態調査等および海域の流況図を作成することにより、図 6 に示すような橋脚からみた各流れ方向に存在する隻数を累計して存在隻数 N_w および N_e を算出することができる。そして式 (8) のように潮流の流れ方向ごとに海域存在確率 (P_{m_w} および P_{m_e} 、たとえば西流および東流) を求める。

$$P_{m_w} = \frac{N_w}{N_T}, \quad P_{m_e} = \frac{N_e}{N_T} \quad (8)$$

図6 潮流域における船舶の海域存在隻数分布
(西流の場合)

- (2) 漂流事故確率 P_p および各流れ方向での漂流確率 P_{mi_w} , P_{mi_e}

通航船の1隻が海域航行中に漂流する確率 P_p は、風による漂流事故の場合と同様に求める。すると1隻の通航船が海域航行中に各流れのあるときに漂流する確率 P_{mi_w} および P_{mi_e} は以下ようになる。

$$P_{mi_w} = P_p \times P_{m_w}, \quad P_{mi_e} = P_p \times P_{m_e} \quad (9)$$

- (3) 潮流のある確率 P_{tide_w} , P_{tide_e} および風のない確率 P_{no_wind}

当該海域における過去の潮流観測データを統計処理して、潮流の存在する確率を各流れ向きごとに求める(P_{tide_w} , P_{tide_e})。またここでは潮流のみにより船舶が漂流する場合を考えているため、海域が所定の風速以下となる(風のない場合とみなす)確率 P_{no_wind} を合せて設定する。

- (4) 1隻の通航船が潮流により橋脚へ衝突する確率 $P_{tpier_1}(m, n)$

以上より、1隻の通航船が海域航行中に漂流して橋脚 m の辺または頂点 n へ衝突する確率 $P_{tpier_1}(m, n)$ は式(10)のように算出される。

$$P_{tpier_1}(m, n) = P_{no_wind} \times (P_{mi_w} \times P_{tide_w} \times P_{t_w}(m, n) + P_{mi_e} \times P_{tide_e} \times P_{t_e}(m, n)) \quad (10)$$

ここに、 $P_{t_w}(m, n)$, $P_{t_e}(m, n)$ は潮流による漂流船の橋脚 m の辺または頂点 n への幾何学的衝突確率である。

- (5) 1年間の潮流による橋脚への衝突確率 $P_{tpier}(m, n)$

式(10)を用いて、1年間に橋脚 m の辺または頂点 n へ衝突する確率 $P_{tpier}(m, n)$ は、式(11)のように算定されることになる。

$$P_{tpier}(m, n) = P_{tpier_1}(m, n) \times N_{s_year} \quad (11)$$

2.2.2 潮流による幾何学的衝突確率の計算 ($P_{t_w}(m, n)$, $P_{t_e}(m, n)$)

潮流による橋脚 m の辺または頂点 n への漂流船の幾何学的衝突確率($P_{t_w}(m, n)$, $P_{t_e}(m, n)$)は各流れ向きごとに次のように求める。

漂流船は流れに対して船首尾線を直角にして漂流するものと仮定する。すると図6に示すように、対象海域中に各橋脚に衝突する海域を各流れ向きごとに設定することができ、漂流船の橋脚に対する衝突角度が決まることになる。図7に橋脚と漂流船の位置関係の詳細図を示す。このとき漂流船の橋脚に衝突する総投影距離を B とすると、この距離 B に対する各部位の投影距離の割合から衝突確率を求める。なお各投影距離は、橋脚と漂流船の衝突角度、また漂流船舶の船長および橋脚の形状により以下のように幾何学的に算出することができる。

$$x_t = 2a \sin \alpha_t, \quad y_t = 2b \cos \alpha_t, \quad B = x_t + 2s + y_t \quad \text{より、}$$

$$P_{t_w}(m, 1) = \frac{x_t}{B}, \quad P_{t_w}(m, 2) = \frac{2s}{B},$$

$$P_{t_w}(m, 3) = \frac{y_t}{B} \quad (12)$$

ここに、 α_t : 橋脚に対する潮流方位角、 x_t : P1に対する投影距離、 y_t : P3に対する投影距離、 B : 橋脚に船舶が衝突する総投影距離である。

図7 潮流による漂流船と橋脚との位置関係
(潮流による幾何学的衝突確率)

同様に、橋脚各部位の幾何学的衝突確率を算出することができる。

3. 南北備讃瀬戸大橋についての適用事例

上述の風および潮流により生じる矩形橋脚への漂流船の衝突確率計算手法を南北備讃瀬戸大橋へ適用してみる。

3.1 船舶の衝突シナリオ

南北備讃瀬戸大橋における船舶の衝突シナリオの内、機関および舵故障等により船舶が風または潮流により漂流して矩形橋脚へ衝突するケースを以下に列挙する。

橋脚 3P: ①北航路西航船が、舵・機関の故障等により漂流し橋脚に衝突する可能性がある。

②水島航路通航船が、舵・機関の故障等により漂流し橋脚に衝突する可能性がある。

橋脚 5P: ①南航路東航船が、舵・機関の故障等により漂流し橋脚に衝突する可能性がある。

②南航路から水島航路、水島航路から南航路へ出入りする船が、舵・機関の故障等により漂流し橋脚に衝突する可能性がある。

橋脚 6P: ①南航路東航船が、舵・機関の故障等により漂流し橋脚に衝突する可能性がある。

②水島航路から南航路へ入る船が、舵・機関の故障等により漂流し橋脚に衝突する可能性がある。

③航路外を航行する小型船が、舵・機関の故障等により漂流し橋脚に衝突する可能性がある。

橋脚 7A: 橋脚 6Pと同じことが考えられる。

3.2 矩形橋脚への衝突確率計算結果

3.2.1 風による衝突確率計算について

(1) 船舶の海域存在確率 $P_m(d, \phi)$

平成11年5月18日～5月21日の3日間(72時間連続)に船舶通航実態調査を行った。図8に調査地点と各航路の位置関係および図9に調査結果内の一部の航跡図を示す。

まず船舶通航実態調査結果から、船舶の海域における存在隻数を橋脚ごとにまとめた。一例として3Pについての海域存在隻数を図10に示す。この海域存在隻数の累計に際しては、海域の水深図や島などの障害物と橋脚との遮蔽関係を考慮して、海域メッ

図8 船舶通航実態調査の調査地点と各航路の位置関係

図9 船舶通航実態調査による航跡図
(航路直航船通航状況)

図10 船舶の海域存在隻数分布
(橋脚 3P、風による衝突)

表1 存在隻数・海域存在確率 P_m ・漂流確率 P_{mi}
および風の吹く確率 P_w
(橋脚3P、距離 $d=2250m$)

方位 ϕ (deg)	船隻数	存在確率 P_m	漂流確率 P_{mi}	風確率 P_w
0	0	0	0	0.010
22.5	2	8.40E-06	5.20E-11	0.019
45	1761	7.39E-03	4.58E-08	0.010
67.5	7875	3.31E-02	2.05E-07	0.017
90	6142	2.58E-02	1.60E-07	0.004
112.5	1358	5.70E-03	3.53E-08	0.001
135	0	0	0	0.001
157.5	3	1.26E-05	7.79E-11	0.000
180	96	4.03E-04	2.49E-09	0.000
202.5	3943	1.66E-02	1.02E-07	0.000
225	6023	2.53E-02	1.56E-07	0.002
247.5	293	1.23E-03	7.61E-09	0.010
270	4287	1.80E-02	1.11E-07	0.042
292.5	3211	1.35E-02	8.34E-08	0.031
315	1462	6.14E-03	3.80E-08	0.038
337.5	38	1.60E-04	9.87E-10	0.014

(備考) 衝突事故確率: $P_p=6.19E-06$

シュごとに実態調査から算定された存在隻数に対して修正を施している。なおメッシュ分割は、方位分割については風方位に合わせて16分割とし、距離については橋脚中心から4000mまでを対象に500m間隔で分割した。したがって海域分割個数は $ND=16 \times 8=128$ ヶとなる。海域メッシュ分割は、対象船舶の大きさ(船長)や必要とされる計算精度に応じて調整される。また対象海域の存在隻数の総数は $N_T=238,225$ 隻であった。一例として表1に、橋脚3Pについての代表距離 $d=2250m$ における海域メッシュでの存在隻数および海域存在確率 P_m を示す。

(2) 漂流事故確率 P_p およびメッシュ i での漂流確率 $P_{mi}(d, \phi)$

昭和55年～昭和62年の8年間に発生した機関および舵故障による漂流事故は10件であった。一方3日間の実態調査から通航隻数は、備讃瀬戸北航路通航隻数 $n_1=750$ 隻、南航路通航隻数 $n_2=750$ 隻および水島航路通航隻数 $n_3=160$ 隻であった。以上より式(2)を用いて通航船の1隻が海域航行中に漂流する確率 P_p は式(13)のように求められ、1隻の通航船が海域航行中にメッシュ i の位置で機関故障等により漂流する確率 $P_{mi}(d, \phi)$ も式(3)を用いて算出される。同様に表1に、橋脚3Pについての代表距離 $d=2250m$ における漂流確率 P_{mi} を示す。

$$P_p = \frac{N_a}{N_s} = 6.19 \times 10^{-6}, \quad N_a = 10,$$

$$N_s = (n_1 + n_2 + n_3) \times 365 / 3 \times 8 \quad (13)$$

(3) 風の吹く確率 $P_w(\phi)$ および潮流のない確率 P_{no_tide}

図11 風速7 m/s以上の風向き別出現頻度

ここでは風による漂流を考慮する風速は7 m/s以上と設定した。図11に示すように、風速7 m/s以上の風向き別出現頻度を昭和54年～昭和58年の5年間の観測データからまとめた。また全観測中における風速7 m/s以上の風の吹く割合が $P_{w7}=0.199$ であったことより、風の吹く確率 P_w を表1のように算出した。また潮流のない確率 P_{no_tide} は1日24時間の内、東流・西流および憩流時の3種類があることから、 $P_{no_tide}=8/24=1/3$ と設定した。

(4) 風による幾何学的衝突確率 $P_{wplier}(m, n)$

幾何学的衝突確率を算出するに際しての設定条件を表2に示す。表3に一例として橋脚3Pについての代表距離 $d=2250m$ における橋脚各部位をみる角度の計算結果を示す。同様に橋脚からの距離および

表2 幾何学的衝突確率計算における設定条件

橋脚	船長(m) $L=2s$	橋脚方位 ϕ_p (deg)	橋脚形状(m)	
			2a	2b
3P	70	344	57	23
5P			59	27
6P			59	38
7A			59	75

表3 風による衝突における橋脚各部位をみる角度(deg) (橋脚3P、距離 $d=2250m$)

方位 ϕ (deg)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
0	1.39	1.80	0.15	0	0	0	0	0
22.5	1.12	1.80	0.36	0	0	0	0	0
45	0.68	1.81	0.51	0	0	0	0	0
67.5	0.13	1.81	0.59	0	0	0	0	0
90	0	0	0.57	1.81	0.37	0	0	0
112.5	0	0	0.45	1.81	0.88	0	0	0
135	0	0	0.27	1.80	1.26	0	0	0
157.5	0	0	0.05	1.79	1.45	0	0	0
180	0	0	0	0	1.39	1.80	0.15	0
202.5	0	0	0	0	1.12	1.80	0.36	0
225	0	0	0	0	0.68	1.81	0.51	0
247.5	0	0	0	0	0.13	1.81	0.59	0
270	0.37	0	0	0	0	0	0.57	1.81
292.5	0.88	0	0	0	0	0	0.45	1.81
315	1.26	0	0	0	0	0	0.27	1.80
337.5	1.45	0	0	0	0	0	0.05	1.79

(備考) メッシュの方位分割幅: $\theta_a=22.5\text{deg}$

他の橋脚についての各部位をみる角度を求め、式(6)により幾何学的衝突確率を算定した。なお方位分割幅は $\theta_0=22.5\text{deg}$ とした。

3.2.2 潮流による衝突確率計算について

(1) 船舶の海域存在確率 P_{m_w} および P_{m_e}

西流および東流最強時の流況図を作成して、橋脚から潮流に沿って対象船舶の船長の2倍の海域幅における存在隻数を抽出した。前述の図6に、西流時の存在隻数分布を一例として示す。また表4に、潮流による衝突確率計算に際して用いた設定条件および船舶の海域存在確率 P_{m_w} および P_{m_e} をまとめる。

表4 潮流による衝突確率計算

橋脚	西 流			東 流		
	N_w	ϕ_w (deg)	P_{m_w}	N_e	ϕ_e (deg)	P_{m_e}
3 P	5623	78	1.46E-07	784	242	2.04E-08
5 P	16685	67	4.33E-07	954	254	2.48E-08
6 P	1910	52	4.96E-08	160	254	4.16E-09
7 A	1828	57	4.75E-08	161	259	4.18E-09

方位 ϕ_w および ϕ_e は西流および東流の橋脚に対する入射方位角度である。

(2) 漂流事故確率 P_p および漂流確率 P_{mi_w} 、 P_{mi_e}

漂流事故確率 P_p は風による衝突で求めた値を流用した。

(3) 潮流のある確率 P_{tide_w} 、 P_{tide_e} および風のない確率 P_{no_wind}

潮流のない確率 P_{no_tide} を前述のように $P_{no_tide}=8/24=1/3$ と設定していることおよび西流および東流の2種類の潮流があることから、西流および東流のある確率はそれぞれ $P_{tide_w}=2/3 \times 1/2$ 、 $P_{tide_e}=2/3 \times 1/2$ と設定した。また風のない確率 P_{no_wind} は、風速7 m/s以上の風の吹く割合を $P_{w7}=0.199$ と設定していることから $P_{no_wind}=0.801$ とした。

(4) 潮流による幾何学的衝突確率の計算 ($P_{t-w}(m,n)$, $P_{t-e}(m,n)$)

表2に示した対象船舶と各橋脚の形状および表4の橋脚に対する潮流の入射方位角度 ϕ_w と ϕ_e を用いて、式(12)により潮流による幾何学的衝突確率を算定した。

3.2.3 衝突確率計算結果のまとめ

3日間の実態調査での通航隻数から、1年間に当該海域を航行する総隻数は $N_{s_year}=(n_1+n_2+n_3) \times 365/3=201,967$ 隻と算定した。そして式(5)および式(11)を用いて、1年間に風および潮流により生じる橋脚への衝突確率を計算した。表5に衝突形態、各橋脚および各部位ごとに1年間の衝突回数をまとめた。また表6には、その合計値のみにつき逆数をとっ

表5 衝突形態別の衝突確率計算結果
(1年間の衝突回数)

橋脚	形態	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
3 P	風	2.94E-04	2.18E-04	6.03E-05	1.99E-05	7.64E-06	1.22E-05	1.07E-04	4.83E-04
	潮流	0	0	1.87E-03	5.69E-03	4.48E-04	7.37E-04	2.37E-04	0
	合計	2.94E-04	2.18E-04	1.93E-03	5.71E-03	4.56E-04	7.49E-04	3.44E-04	4.83E-04
5 P	風	2.49E-04	2.32E-04	8.10E-05	2.43E-05	1.19E-05	2.74E-05	8.80E-05	3.23E-04
	潮流	1.62E-03	1.57E-02	6.03E-03	0	0	0	1.34E-03	0
	合計	1.87E-03	1.60E-02	6.11E-03	2.43E-05	1.19E-05	2.74E-05	1.43E-03	3.23E-04
6 P	風	4.35E-04	2.48E-04	7.98E-05	3.54E-07	7.77E-07	1.03E-05	2.09E-04	5.96E-04
	潮流	4.65E-04	1.47E-03	7.41E-04	0	0	0	2.24E-04	0
	合計	8.99E-04	1.72E-03	8.20E-04	3.54E-07	7.77E-07	1.03E-05	4.33E-04	5.96E-04
7 A	風	3.69E-04	2.02E-04	1.21E-04	1.99E-08	1.16E-08	4.16E-07	3.30E-04	4.83E-04
	潮流	2.86E-04	1.13E-03	1.16E-03	0	0	0	1.13E-04	1.05E-04
	合計	6.54E-04	1.33E-03	1.28E-03	1.99E-08	1.16E-08	4.16E-07	4.43E-04	5.89E-04

表6 衝突確率計算結果 (衝突発生年数)

橋脚	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
3 P	3.40E+03	4.58E+03	5.19E+02	1.75E+02	2.20E+03	1.34E+03	2.91E+03	2.07E+03
5 P	5.36E+02	6.26E+01	1.64E+02	4.12E+04	8.40E+04	3.65E+04	7.02E+02	3.09E+03
6 P	1.11E+03	5.82E+02	1.22E+03	2.83E+06	1.29E+06	9.73E+04	2.31E+03	1.68E+03
7 A	1.53E+03	7.52E+02	7.84E+02	5.02E+07	8.62E+07	2.41E+06	2.26E+03	1.70E+03

て、橋脚各部位に衝突する年数を算出した。

これをみると、橋脚5Pの部位P2の位置が特に高い衝突確率を示し、約63年に1回の衝突事故が発生する結果を得た。部位P2の位置は北東コーナ部にあり、風による衝突確率は低いが、潮流(西流時)時の流域における船舶の存在隻数が多かったことから、衝突確率が高い値となったものと考えられる。

4. 結 語

以上、風および潮流により生じる矩形橋脚への漂流船の衝突確率計算手法を提案すると共に、当該計算手法の南北備讃瀬戸大橋への適用事例を紹介した。本研究で得られた知見が船舶の安全な運航に寄与することを願うと共に、南北備讃瀬戸大橋の運用に役立つことを祈念するものである。また本研究の実施に当たっては、様々な方々にご支援とご教授を賜った。関係者の皆様に深く感謝します。

参 考 文 献

- (1) 岩井 聡・庄司邦昭・亀田久治：船舶の衝突に対する緩衝施設に関する研究(その2)一漂流船の衝突挙動について一、東京商船大学研究報告(自然科学), 第33号, pp.25-42, 1982.
- (2) 本州四国連絡橋公団・(株)日本海難防止協会：本州四国連絡橋航行安全調査報告書, 航行安全調査その1, 1991.
- (3) 本州四国連絡橋公団・(株)日本海難防止協会：本州四国連絡橋航行安全調査報告書, 航行安全調査その1, 1996.

- (4) O. D. Larsen : Ship Collision Risk Assessment for Bridges, IABSE Reports, Volume-Band 41, pp.113-128, 1983.
- (5) 本州四国連絡橋公団・(株)日本海難防止協会：南北備讃瀬戸大橋の緩衝工に関する調査検討報告書, pp.70-76, 1999.

質 疑 応 答

定兼廣行(神戸商船大学)：実際には、船体は船型等により、風に対して直角には漂流しませんが修正

することは可能ですか。また潮流についても、橋脚周りなど複雑な流況を考慮できるように修正することはできますか。

榊原繁樹：今回提案した幾何学的衝突確率計算等の計算手法をそのまま使用することはできないかもしれませんが、風による漂流姿勢、また複雑な潮流下での船体の漂流姿勢を設定することで、同様に計算式等を構築または修正することは可能と考えています。