空気式防舷材の速度ファクター算出および適用に関する研究

榊原 繁樹*・山田周**

A Study on Velocity Factor Determination Test of Pneumatic Fenders and its Application

Shigeki SAKAKIBARA and Shuu YAMADA

Abstract

The pneumatic fender roles an energy absorber and spacer purpose for safe ship berthing and mooring in the usage of ship-to-jetty in harbor basin and ship-to-ship oil and gases transfer operations at offshore. In this paper, the velocity factor in performance and its determination procedures are demonstrated by conducting dynamic and static compression tests based on the guideline: 2002 of PIANC. The scale modeling in velocity factor has been clarified for the pneumatic fenders by the compression tests, and the property of the velocity factor has been investigated.

Keywords : Port equipment, Pneumatic fender, Velocity factor, Dynamic compression, Ship berthing

キーワード: 港湾施設, 空気式防舷材, 速度ファクター, 動的圧縮, 船舶接岸

1. 緒言

空気式防舷材は内部に充填された空気の圧縮弾性により性能を発揮する防舷材で、船舶の接岸エネルギーや係留力に対するエネルギー吸収材であると共に、洋上における 2 船体間荷役においては適切な 2 船体間距離を維持するためのスペーサーとして用いられている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。基本構造は外層ゴム、補強タイヤコード層および内層ゴムからなり、当該コード層は所定の耐圧力や圧縮性能を維持するように設計されている。空気式防舷材には浮遊型と岸壁固定型の 2 種類がある。浮遊型空気式防舷材については、国際規格 ISO17357 に材料、性能（反力、吸収エネルギーおよび耐圧力）、寸法、表示方法および検査方法などに関する規定が示されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。一方防舷材の設計に関する PIANC ガイドラインで防舷材の圧縮性能に関する規定が改定され、従来の反力やエネルギー性能の評価を静的圧縮試験（2～8cm/min の一定速度圧縮）から実際の船舶の接岸を模した動的圧縮試験（初期速度 0.15m/s を基準）による評価に変更さ

れた。さらに温度影響を考慮することが追加された⁽¹⁾。ただし洋上 2 船体間荷役で使用する場合、当該空気式防舷材は主に 2 船体間距離を適切に維持することを目的としていることから従来と同様に静的圧縮時を基準性能としている。また温度影響は初期内圧（初内圧）を規定圧に設定することで無視できることが示されている。

上述のように洋上 2 船体間荷役で使用する場合を除き、空気式防舷材の圧縮性能評価が動的圧縮により行なわれることが PIANC ガイドラインに規定されたが、当該動的試験評価方法の具体的な詳細手順や実物サイズへの適用方法などが詳述されていない。

そこで本研究では浮遊型および岸壁固定型空気式防舷材についての当該 PIANC ガイドラインに基づく動的性能評価指標である速度ファクターの算出および実物サイズへの適用方法につき、空気式防舷材の静的および動的圧縮試験を実施して検討した。

* 正会員 横浜ゴム株式会社 工業資材技術部 (〒254-8601 神奈川県平塚市追分 2-1)

** 非会員 横浜ゴム株式会社 工業資材技術部 (〒254-8601 神奈川県平塚市追分 2-1)

2. 試験方法と手順

2.1 空気式防舷材の基本構造と性能

2.1.1 浮遊型空気式防舷材の構造

Fig. 1 に示すように浮遊型空気式防舷材の構造は国際規格 ISO17357 に規定されており⁽⁵⁾、外層ゴム、補強タイヤコード層および内層ゴムからなり、当該防舷材内部には所定の圧力を有する空気が充填され（初内圧）、その性能を発揮する。

Fig. 2 に示すように空気式防舷材が圧縮されるとき、内圧 (p) が漸増的に上昇し、反力 (R) および吸収エネルギー (E) は式 (1)–(3) の関係式で与えられる。

$$p = p(x) = (1 + p_0) \left(\frac{V_0}{V} \right)^n - 1, V = V(x) \quad (1)$$

$$R(x) = p(x) \cdot A(x) \quad (2)$$

$$E(x) = \int R(x) dx \quad (3)$$

ここに p , R , E : 内圧、反力および吸収エネルギー、 A : 接触面積、 V : 内部体積、 p_0 , V_0 : 初内圧と初期体積、 n : ポリトロプ指数、 x : 圧縮量である。式 (1)–(3) より空気式防舷材の性能は圧縮量 x における内圧と接触面積から得られることがわかる。

Fig.1 Basic construction of the floating type pneumatic fender

Fig.2 Performance of the floating type pneumatic fenders

2.1.2 岸壁固定型空気式防舷材の構造

Fig. 3 に示すように岸壁固定型空気式防舷材は浮遊型と同様に、外層ゴム、補強タイヤコード層および内層ゴムからなる中空円筒形状で、両端にフランジ部を有して岸壁および受衝板に本体を固定する構造となっている。そして防舷材内部に所定の空気圧が保持され（初内圧）、その性能を発揮することは浮遊型と同様である。

Fig.3 Basic construction of the fixed type pneumatic fender

2.2 速度ファクターの定義

PIANC ガイドラインに基づく空気式防舷材の性能評価方法は当該ガイドライン Appendix B に基本的な事項は記載されている⁽¹⁾。基準となる性能は初期圧縮速度 0.15m/s で Sin 波または線形的に減速する動的圧縮方法で与えられるとし、基準性能に対する他の初期圧縮速度 0.001, 0.05, 0.10, 0.20, 0.25, 0.30m/s で圧縮する場合の反力および吸収エネルギーに関する動的性能評価指標として速度ファクターが式 (4), (5) のように定義されている。

$$VF_{ra} = R_v / R_{RPD} \quad (4)$$

$$VF_{ea} = E_v / E_{RPD} \quad (5)$$

ここに VF_{ra} , VF_{ea} : 反力および吸収エネルギーに関する速度ファクター、 R_{RPD} , E_{RPD} : 基準初期圧縮速度 0.15m/s における反力および吸収エネルギー値、 R_v , E_v : 他の初期圧縮速度における反力および吸収エネルギー値である。

2.3 相似則

当該 PIANC ガイドラインには、式 (4), (5) で定義される速度ファクターの算出は実機サイズもしくは防

舷材高さ（または直径）0.1m 以上のモデルサイズで行なうことが規定されている。ただしモデルサイズで行なう場合、実機サイズと同一のゴム材料を用いてモデル化されることと規定されている。そこで Fig. 4 に相似則と速度ファクターの関係をまとめる。静的圧縮は圧縮速度 0.001m/s の一定速度圧縮を、また動的圧縮とは初期圧縮速度 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30m/s で試験体を圧縮する場合を示す。実機サイズでは浮遊型空気式防舷材の場合概ね 500mmD x 1000mm L ~ 4500mmD x 12000mmL までのサイズがあり性能に関する相似則の保存を確認しておくことは重要である。

Fig. 4 Correlation between scale factor and velocity factor in model-size fenders and full-size ones

式(1)-(3)に示す反力・吸収エネルギー性能に関する理論式および数多くの圧縮試験結果から、浮遊型空気式防舷材の相似則は式(6)のように与えられる。

$$R_f = R_m \cdot (D_f / D_m)^2 \cdot \left(\frac{L_f}{D_f} / \frac{L_m}{D_m} \right) \cdot (C_{raf} / C_{ram}),$$

$$E_f = E_m \cdot (D_f / D_m)^3 \cdot \left(\frac{L_f}{D_f} / \frac{L_m}{D_m} \right) \cdot (C_{eaf} / C_{eam}) \quad (6)$$

ここに R_f , R_m , E_f , E_m , D_f , D_m , L_f , L_m : 実機およびモデルサイズでの反力、吸収エネルギー、防舷材直径および長さで、 C_{raf} , C_{ram} , C_{eaf} , C_{eam} : 実機およびモデルサイズでの反力および吸収エネルギーに関する本体構造係数である。

まず静的圧縮時の性能に関する相似則が各種サイズで保存されているかを調べる。ここに式(6)を参照して規格化性能を式(7)のように設定し、Fig. 5 に各種サイズから求めた規格化性能をまとめる。

$$R_n = R \cdot (1/D)^2 \cdot (D/L) \cdot (1/C_{ra}),$$

$$E_n = E \cdot (1/D)^3 \cdot (D/L) \cdot (1/C_{ea}) \quad (7)$$

ここに R_n , E_n : 規格化反力および吸収エネルギー、

R , E : 各サイズ的设计静的圧縮性能（反力および吸収エネルギー）、 D , L : 防舷材直径および長さで、 C_{ra} , C_{ea} : 反力および吸収エネルギーに関する本体構造係数である。全ての実機サイズおよびモデルサイズ 200mmD x 400mmL においても同一の規格化性能を有することがわかる。このことから静的圧縮時の性能に関する相似則が確保されているといえる。

岸壁固定型空気式防舷材の場合概ね 450mmH x 600mmD ($H/D=3/4$) ~ 3200mmH x 3200mmD ($H/D=1/1$) までのサイズがあるが、浮遊型空気式防舷材の場合と同様に式(6), (7)に準じた静的圧縮時の性能に関する相似則が確保されている。

Fig.5 Normalized performance of several sizes pneumatic fenders at 50kPa (600mmD x 1200mmL, 700mmD x 1500mm L, 2000mmD x 3500mmL, 3300mmD x 6500mmL, 4500mmD x 9000mmL, 200mmD x 400mmL)

2.4 試験方法

2.4.1 試験機および計測方法

静的および動的圧縮試験を行なうために Fig. 6 に示す 400kN アクチュエーター圧縮試験機を用いた。計測項目は圧縮量、反力、内圧である。また加速度計を加圧板に取り付け高速圧縮時の慣性力の効果を修正した。

動的圧縮試験は Sin 波で規定の圧縮量までに減速する動的圧縮とした。試験は初内圧が回復するまでの間隔を置き（約 5 分間）、同一試験を 2 回行い平均化した。そして式(4), (5)に基づき速度ファクターを算出した。

2.4.2 試験体

試験に用いた空気防舷材の実機サイズとモデルサイズ、初期圧縮速度、初内圧および規定の圧縮量を Table 1, 2 にまとめる。

Fig. 6 Test apparatus for compression test of pneumatic fenders

Table 1 Test conditions for determination of velocity factors of the floating type pneumatic fenders

Size	dia.(mm) x length(mm)	Full-size fenders		Model-size
		Φ600x1200L	Φ700x1500L	Φ200x400L
Initial deflection velocity (m/s)		0.001, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.60	0.001, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.70	0.001, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20
Initial internal pressure (kPa)		50, 80		
Rated deflection (%)		60		

Table 2 Test conditions for determination of velocity factors of the fixed type pneumatic fenders

Size	height(mm) x dia.(mm)	Full-size fenders		Model-size
		600Hx600Φ	600Hx800Φ	200Hx200Φ
Initial deflection velocity (m/s)		0.001, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.60	0.001, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.60	0.001, 0.03, 0.05, 0.08, 0.10
Initial internal pressure (kPa)		80, 120		100
Rated deflection (%)		65	60	65

3. 試験結果と速度ファクターの相似則確認

3.1 試験状況

Table 1, 2 に示した試験条件に基づき速度ファクター算出のための動的圧縮試験を Fig. 7 に示すように実施した。

3.2 実機サイズでの試験結果

一例として Table 1 に示す実機サイズの動的圧縮試験の内 600mmD x 1200mmL-P50 の静的圧縮 $V_0=0.001\text{m/s}$ および初期圧縮速度 $V_0=0.15\text{m/s}$ の場合の反力、速度、圧縮変位および吸収エネルギーの時系列結果および圧縮変位に対する反力、速度および吸収エネルギーを Fig. 8, 9 に示す。静的圧縮に比べ動的圧縮時の方が反力および吸収エネルギーの圧縮

変位に対する増加割合が若干増加していることがわかる。また基準初期圧縮速度 $V_0=0.15\text{m/s}$ を狙った実験が実際には $V_0=0.16\text{m/s}$ 程度となったが、歪み速度で約 $V_s=2\%/s$ の違いであるためこの場合の試験性能を基準とした。ここに歪み速度は式(8)により求められる。

$$V_s = V / D \times 100 \quad (8)$$

ここに V_s : 歪み速度(%/s)、 V : 初期圧縮速度(m/s)、 D : 防舷材直径(固定型の場合 H : 高さ)である。

Fig. 7 Situation of velocity factor determination test for the floating type pneumatic fender

3.3 相似則の確認

速度ファクターに関する相似則を確認するために、Table 1 に示す浮遊型空気式防舷材についての各実機サイズおよびモデルサイズの静的および歪み速度 $V_s=100\%/s$ ($V_0=0.6, 0.7, 0.2\text{m/s}$) の場合の動的圧縮試験結果を式(7)の規格化性能に換算して比較した。Fig. 10 に示すように、Fig. 5 の設計性能での比較と同様に静的および動的試験において各サイズでほぼ同一の規格化性能を有することがわかった。このことから速度ファクターに関する相似則が保存されていることが確認された。また岸壁固定型空気式防舷材についても同様に性能に関する相似則の保存を確認した。

(a) Performance in time series

(b) Performance in deflection

Fig.8 Test results of 600mmD x 1200mmL -P50 pneumatic fender at 0.001m/s compression velocity

(a) Performance in time series

(b) Performance in deflection

Fig.9 Test results of 600mmD x 1200mmL -P50 pneumatic fender at 0.15m/s compression velocity

(a) at $V_0=0.001\text{m/s}$ (b) at $V_0=0.6\text{m/s}$, 0.7m/s and 0.2m/s (Strain ratio=100%/s)

Fig.10 Confirmation on scale factor by test results for 600mmD x 1200mmL, 700mmD x 1500mmL and 200mmD x 400mmL -P50 pneumatic fenders

4. 速度ファクターの算出と適用

4.1 速度ファクターの算出

4.1.1 浮遊型空気式防舷材の場合

式(4), (5)に基づき実機サイズの初内圧 50kPa, 80kPa の浮遊型空気式防舷材の反力および吸収エネルギーに関する速度ファクターを Fig. 11 にまとめる。合わせて Fig. 11 にはモデルサイズの初内圧 50kPa の速度ファクターを同一歪み速度 $V_s=25\%/s$ を基準性能として追記した。

Fig. 11 に示すように実機サイズおよびモデルサイズさらには初内圧の違いがあっても、速度ファクターの挙動は歪み速度に対して類似していることがわかる。そこで実機サイズの速度ファクターを平均して、基準速度ファクターを歪み速度に対して Table 3 のように設定した。そして Table 3 の基準速度ファクターを用いて Fig. 12 に示すように反力および吸収エネルギーに関する当該速度ファクターの近似関数を歪み速度に対して算定した。Fig. 12 内の丸印は基準速度ファクターである。

Fig.11 Test results on velocity factors for 600mmD x 1200mmL, 700mmD x 1500mmL and 200mmD x 400mmL floating type pneumatic fenders

Fig. 12 Velocity factors of the floating pneumatic fenders

Table3 Velocity factors of the floating pneumatic fenders

Vs(%/s)	VF ra	VF ea
0.209	0.829	0.889
8.329	0.988	0.993
16.51	0.998	0.997
25.15	1.000	1.000
33.48	1.006	1.003
41.57	1.008	1.005
49.46	1.011	1.009
109.4	1.018	1.019

4. 1. 2 岸壁固定型空気式防舷材の場合

式 (4), (5) に基づき実機サイズの初内圧 80kPa, 120kPa の岸壁固定型空気式防舷材の反力および吸収エネルギーに関する速度ファクターを Fig. 13 にまとめる。合わせて Fig. 13 にはモデルサイズの初内圧 100kPa の速度ファクターを同一歪み速度 $V_s=27\%/s$ を基準性能として追記した。

Fig. 13 に示すように、浮遊型空気式防舷材と同様に、実機サイズおよびモデルサイズさらには初内圧の違いがあっても速度ファクターの挙動は歪み速度に対して類似していることがわかる。そこで浮遊型空気式防舷材と同様に、基準速度ファクターおよび歪み速度に対する近似関数を Table 4 および Fig. 14 のように設定・算出した。

Fig.13 Test results on velocity factors for 600mmH x 600mmD, 600mmH x 800mmD and 200mmH x 200mmD fixed type pneumatic fenders

(a) for reaction force

(b) for energy absorption

Fig. 14 Velocity factors of the fixed type pneumatic fenders

Table 4 Velocity factors of the fixed type pneumatic fenders

Vs(%/s)	VF_ra	VF_ea
0.225	0.710	0.806
8.807	0.953	0.974
17.49	0.988	0.993
26.80	1.000	1.000
35.54	1.008	1.006
43.86	1.011	1.009
52.64	1.015	1.013
105.2	1.027	1.029

4.2 各種サイズ防舷材への適用

Table 3, Fig. 12 および Table 4, Fig. 14 に示した空気式防舷材の基準速度ファクターの実物サイズへの適用方法を検討する。そこで一例として具体的に浮遊型空気式防舷材 4500mm (直径) x L (長さ) を用いて示す。

基準性能は各サイズ共に初期圧縮速度 $V_0=0.15\text{m/s}$ で与えられることから、式 (8) に示す歪み速度では防舷材サイズにより異なる。そこで Table 5 に示すようにまず初期圧縮速度 0.001, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 4.5m/s での歪み速度を求める。次に当該歪み速度から Fig. 12 に示した近似関数を用いて、速度ファクターの仮データ (VF_{rat} , VF_{eat}) を求める。そして基準性能は初期圧縮速度 $V_0=0.15\text{m/s}$

で与える必要があるため、歪み速度 $V_s=3.33\%/s$ での速度ファクター ($VF_{rat}=0.932$, $VF_{eat}=0.956$) により当該仮速度ファクターを規格化する。具体的には式 (9) に示すように基準近似関数に傾きを合わせて、歪み速度 $V_s=3.33\%/s$ (基準歪み速度 ε_{RPD}) で速度ファクターが 1 となる新たな反力および吸収エネルギーの近似関数を空気式防舷材 4500mm (直径) x L 用に設定して速度ファクターを算出する。

$$y = \alpha \cdot \ln(\varepsilon / \varepsilon_{RPD}) + 1$$

$$= \alpha \cdot \ln(\varepsilon) + 1 - \alpha \cdot \ln(\varepsilon_{RPD})$$

$$= \alpha \cdot \ln(\varepsilon) + \beta \quad (9)$$

ここに y : 速度ファクターの近似関数、 α : 近似関数の傾き、 ε : 歪み速度、 ε_{RPD} : 基準歪み速度、 β : 近似関数の切片である。

これらの手順は Table 5, Fig. 15 に示す。図中には Fig. 12 での基準速度ファクターおよび近似関数も併記するが、四角印で空気式防舷材 4500mm x L の基準速度ファクターおよび当該速度ファクターの近似関数を示している。

5. 結語

本研究では浮遊型および岸壁固定型空気式防舷材についての PIANC ガイドラインに基づく動的性能評価指標である速度ファクター算出および実物サイズへの適用方法につき、空気式防舷材の静的および動的圧縮試験を実施して検討した。得られた主な結論を要約すると以下ようになる。

- ① PIANC ガイドラインに基づく浮遊型および岸壁固定型空気式防舷材の反力および吸収エネルギーに関する速度ファクターの特性について歪み速度に対して算出して検討した。これにより当該速度ファクターは歪み速度に対して対数近似関数で増加することがわかった。
- ② 静的および動的な圧縮試験結果に基づき空気式防舷材の実物サイズおよびモデルサイズでの静的および動的性能における相似則の保存が確認された。
- ③ 空気式防舷材についての PIANC ガイドラインに基づく動的性能評価指標である速度ファクター算出のための具体的な詳細手順を確立した。

Table 5 Velocity factors of the 4500mmD x L floating pneumatic fenders

Velocity(m/s)	Vs(%/s)	VF _{rat}	VF _{eat}
0.001	0.022	0.774	0.851
0.050	1.111	0.897	0.933
0.100	2.222	0.919	0.947
0.150	3.333	0.932	0.956
0.200	4.444	0.941	0.962
0.250	5.556	0.948	0.967
0.300	6.667	0.954	0.970
4.500	100	1.039	1.027

Normalized by VF_{rat},
VF_{eat} at V_s=3.33%/s

dia(m)	VF _{ra}	VF _{ea}
4.5	0.842	0.895
	0.965	0.977
	0.987	0.991
	1.000	1.000
	1.009	1.006
	1.016	1.011
	1.022	1.015
	1.107	1.071

(a) for reaction force

(b) for energy absorption

Fig.15 Velocity factors for the 4500mmD x L floating type pneumatic fenders

洋上2船体間荷役で使用する場合を除き、空気式防舷材の圧縮性能評価が動的圧縮により行なわれることがPIANCガイドラインに規定されたが、当該動的試験評価方法の具体的な詳細手順や実物サイズへの適用方法などが詳述されていないことから旧PIANCガイドラインでの規定が流用されているのが現状である。本研究が空気式防舷材の反力・吸収エネルギー性能に関する理解の一助となり、また岸壁および洋上2船体間荷役での安全運用への知見となることを希望する。

参考文献

- (1) PIANC(Permanent International Association of Navigation Congresses) : “Guidelines for the Design of Fenders Systems”, Report of WG33 of the Maritime Navigation Commission, 2002.
- (2) OCIMF : “Ship to Ship Transfer Guide (Petroleum)”, 4th Edition, 2005.
- (3) OCIMF, SIGTTO : “Ship to Ship Transfer Guide (Liquefied Gases)”, 2nd Edition, 1995.
- (4) SIGTTO : “LNG Ship to Ship Transfer Guidelines”, 1st Edition, 2011.
- (5) ISO17357 : “Ships and Marine-Technology, High-Pressure Floating Pneumatic Rubber Fenders”, International Standard, 2002.
- (6) Sakakibara, S. and Wan, M. : “Prototype Test of Floating Pneumatic Rubber Fenders based on ISO17357”, Proc. of ISOPE, 13th, pp. 427-434, 2003.

質疑応答

津金正典（東海大学）：

PIANC でフェンダーの動的性能評価の指標として速度ファクターが導入された理由・経緯を教えてください。定反力型フェンダーにも速度ファクター算出が要求されるのでしょうか。

榊原繁樹：

海外のあるフェンダーメーカーからの提案で従来の静的圧縮試験と船舶の接岸時を模した動的圧縮試験でのフェンダー性能変化が指摘され、これに伴いPIANCで新たなワーキンググループWG33が立ち上がり様々な議論が行なわれた。その後これを反映した当該ガイドラインの改定が2002年に行なわれました。本研究では空気式防舷材の速度ファクターに関する検討を行ないましたが、当該ガイドラインのAppendix Aには、同様に、定反力型フェンダーに関する性能評価方法（速度ファクターを含む）が示されています。