実測接岸速度の特性と 船舶接岸用防舷材設計への適用

山瀬 晴義¹・上田 茂²・岡田 達彦³・荒井 章之⁴・清水 謙太郎⁵

¹ 正会員 工博 株式会社ブリヂストン インフラ資材販売促進部(〒244-8510 横浜市戸塚区柏尾町 1)

yamase-s@bridgestone.co.jp

² フェロー会員 工博 いであ株式会社 技術顧問(〒224-0025 横浜市都筑区早渕 2-2-2)

Ued21010@ideacon.co.jp

³ 中部地方整備局 清水港湾事務所 田子の浦港事務所(〒417-0015 富士市鈴川町 1-2)

okada-t852a@pa.cbr.mlit.go.jp

⁴ 株式会社ブリヂストン インフラ資材開発部(〒244-8510 横浜市戸塚区柏尾町 1)

arai.akiyuki@bridgestone.co.jp

⁵ 株式会社ブリヂストン インフラ資材開発部(〒244-8510 横浜市戸塚区柏尾町 1)

shimizu.kentaro@bridgestone.co.jp

本研究においては、著者が測定したわが国の主要コンテナバース2港および東南アジアの主要コンテナバース1港の接岸速度、他の機関等が測定したわが国の主要1港およびバルクバース1港の接岸速度を統計的に解析し、接岸速度と船型(DWT)、風向・風速、波浪の有無、タグボートまたはスラスター使用及びその員数との関係を分析した。接岸速度の統計的性質に基づいて、船舶接岸用防舷材の信頼性設計への適用を検討し、船舶接岸用係留施設の所要の安全水準に対する設計用値について明らかにする。

Key Words : ship's berthing speed, reliability-based design, fender design

1. はじめに

港湾は海陸輸送の結節点で、貨物の輸送の転換が行われる場である。これは入港船舶が係留施設に接岸・係留することから始まる。船舶は港内に入港後次第に速度を落とし、数十cm/sの速度で係留施設前面に接近し、さらに減速して係留施設法線にほぼ平行になるようにして接岸する。500トン以下の小型船は、船首または船尾からスプリングラインをとり、本船主機を用いて船舶を係留施設に接岸させる。しかしながらこの方法では接岸速度が数十cm/sになることもある。これに対し、大型船の場合は本船主機を用いず、タグボートまたはスラスターを用いて、本船が係留施設前面でバース法線に平行になるようにして一旦停止し、次いで本船をバース法線に平行に保ちながら接岸速度が数cm/s以下になるよう慎重に接岸操船し、緩やかに接岸させる。接岸速度は船舶接岸エネルギー算定において最も影響が大きいので、係留施設の防衝工システムの設計において設計接岸速度の決定は最重要課題である。接岸速度に関する情報は限られていて、しかも実測値が極めて少ない。最も古い情報はBaker¹⁾の図で、経験的なデータに基づいて作成され、船

型および港湾の遮蔽度、操船の困難度に応じて接岸速度が図示されている。Brolsma²⁾も同様の図を提案していて、大型船ほど、また港湾の遮蔽度が高いほど接岸速度が小さいとしている。スペイン基準やイギリスの基準はBrolsma²⁾の提案を反映しているが、この図は経験に基づいて作成されていること、また当時には存在しない船型についての実効性および安全性が課題であった。

わが国においては、港湾建設局、港湾技術研究所に

図-1 Brolsma²⁾の提案と各国基準の接岸速度³⁾

おいて、在来船、コンテナ船、自動車運搬船、フェリー、大型タンカーなどについて接岸速度が測定されており、港湾の技術上の基準・同解説⁴⁾に記述がある。それによると接岸速度は10～15cm/s以下ではあるが、フェリーの船軸方向接岸速度は15cm/sを越えるものもある。しかしながら、既設の係留施設に用いられてきた設計接岸速度は、接岸速度の統計的性質を考慮したものではなく、また所要の安全水準を満たすように選定されたものではなかった。船舶接岸用防舷材の設計に関して上記のJ3の接岸速度を用いて、上田ら^{5),6)}によるモンテカルロシミュレーションを用いた研究、長尾、岡田、上田⁷⁾による一次信頼性理論(FORM)による研究などがなされている。上田ら^{5),6)}や、長尾ら⁷⁾が用いたコンテナ船の接岸速度(以下J3)の平均値と標準偏差は、それぞれ7.85cm/s, 3.48cm/sであるが、30,000DWT級船舶に限れば、それぞれ6.04cm/s, 1.86cm/sである。また大型タンカー⁸⁾についてはそれぞれ、4.41cm/s, 2.08cm/sで、大型船の接岸速度が小型船に比べて小さいことがわかる。また測定値の変動係数は約0.5である。大型船の接岸速度の平均値が小さいのは、計画対象船舶に対して前述した慎重な接岸操船がなされている結果であるといえる。すなわち大型タンカーバースの多くでは設計接岸速度の1/3～1/2の目標接岸速度を設定して、超音波式または光波式の接岸速度計の指示値を注視しながら慎重な接岸操船を行っている⁹⁾。以上のことから、本研究では、我が国および東南アジアの諸港で接岸速度を測定し、接岸速度と船型(DWT)、風向・風速、波浪の有無、タグボートまたはスラスター使用及びその員数との関係を分析する。そして接岸速度の統計的性質に基づいて、船舶接岸用防舷材の信頼性設計への適用を検討し、船舶接岸用係留施設の所要の安全水準に対する設計用値について明らかにする。

2. 接岸速度の測定法

接岸速度の測定はコンテナバースで行った。日本の2バースと東南アジアの1バースであるがいずれも湾奥もしくは島嶼に囲まれたよく遮蔽された港湾である。接岸速度は図-2に示すようにレーザー変位計2台をガントリークレーンの脚等に設置して、船舶の接岸時に電源をon-offして測定した。得られる値は船舶の船首側および船尾側の距離で、これを図-3のように図示して時刻と距

図-2 レーザー距離計による接岸速度測定

図-3 接岸速度の求め方

離の関係図を求めその勾配を接岸速度とした。

以上のようにして接岸速度を求めたが、以下にその特性、風、タグボートまたはスラスター使用、波浪、港区などと接岸速度の特性について述べる。

3. コンテナ船の接岸速度の特性

(1) 接岸速度を測定したコンテナ船の船型

図-4は接岸速度を測定したコンテナ船の船型である。Japan Port No.1（以下J1）では10万DWT以上の大型船が数多く入港しているが、Japan Port No.2（以下J2）およびEast South Asia Port（以下EA）では7万DWT以下の船舶が多い。

(2) 接岸速度の確率分布

コンテナバースごとの全船舶の接岸速度の分布を図-5-1から5-3に示す。図には全船舶の接岸速度の平均値および標準偏差に基づいて算出した理論対数正規分布および理論正規分布をそれぞれ実線および破線で示している。また接岸速度を10mm/sで区分した度数を図示した。

図-5から接岸速度分布は対数正規分布に従うといえる。図-6はこれらをまとめて図示したものである。同図にはJ3の分布も図示した。J2、EAならびにJ3の分布形状はほぼ同等である。J2とJ3は同一港区のもので、接岸速度は

表-1 接岸速度の特性値の比較

mm/s	J1	EA	J2	J3
平均値	46.1	91.3	80.8	78.5
標準偏差	28.5	42.1	43.2	34.8
変動係数	0.62	0.46	0.53	0.44

表-2 J1の接岸操船におけるタグボート支援

コンテナ船のGT	タグボートの大きさと数	
	スラスターの有無	
	なし	あり
～5,000	1(小型or中型)	1(小型or中型)
5,000～20,000	2(小型or中型)	1～2(小型or中型)
20,000～75,000	2(中型or大型)	1～2(中型or大型)
75,000～90,000	2(大型)	1～2(大型)
90,000～	その都度決定	その都度決定

大型タグ 3,000HP以上
 中型タグ 1,900～3,000HP
 小型タグ 1,000～1,900HP

同等の特性を有している。

表-1はJ1, EA, J2, J3の接岸速度の特性値を比較して示したものである。J1が平均値、標準偏差ともに明らかに小さい。この港区においては表-2に示すように船型に応じて支援タグボート隻数を定めている。その際スラスターの使用はタグボート1隻に相当するとみなし、前述したように慎重な接岸操船がなされている。J1では係留施設前面で一旦停止するよう操船しているが、他は設計接岸速度をイメージして操船しているように見える。

図-5-1 接岸速度の確率分布(J1)

図-5-2 接岸速度の確率分(EA)

図-5-3 接岸速度の確率分布(J2)

図-6 接岸速度の確率分布(J1,EA,J2,J3)

(3) 接岸速度と船型(DWT)の関係

図-7-1~7-3はJ1, EA, J2の接岸速度とDWTの関係を図示したものである。図には一回帰線を併記している。回帰式は、接岸速度がDWTに対して多少の関係を示すように見えるが相関性は強くない。J1およびJ2については大型船の接岸速度がやや小さいことが回帰式に影響している。これに対してJ2は100,000DWT級の接岸速度

図-7-1 接岸速度とDWTの関係(J1)

図-7-2 接岸速度とDWTの関係(J2)

図-7-3 接岸速度とDWTの関係(EA)

図-7-4 接岸速度とDWTの関係(J3)

はかなり小さいが、100,000DWT 級以下の船舶の接岸速度は大きい。J2 と J3 は同一港区であり、ほぼ同等の傾向である。一方、EA も 100,000DWT 級バースであるが、船型にかかわらず接岸速度が他港に比べて大きい。

以上のことから次のことが考えられる。

- ① 計画対象船舶の接岸操船は慎重になされ、接岸速度は小さく抑えられている。
- ② 計画対象船舶以下の船級の船舶の接岸速度はやや大きい。ただし、ほとんどの場合設置防舷材の設計吸収エネルギーを超えない範囲と考えられる。
- ③ 接岸速度は港区によって特徴がある。同一港区の接岸速度は同等の特性を有する。
- ④ 通常の接岸操船では平均値 8~9cm/s, 変動係数 0.5 で、対数正規分布に従うとみなされる。

(4) コンテナ船の接岸速度に対する風の影響

図-8-1と8-2は、J1とJ2の接岸速度と法線直角方向の風速との関係を示したものである。J1は10m/s, J2は5m/sの接岸時の風速制限があるが、すべてその範囲で接岸操船がなされている。横軸は風速で正号は岸壁方向に、負号は海方向に吹く風である。図中に一回帰線を図示して

図-8-1 接岸速度に対する風の影響 (J1)

図-8-2 接岸速度に対する風の影響 (J2)

いるがその勾配は小さい。したがって、制限風速以下では、接岸操船に与える風の影響はないといえる。また、後述するバルクバースにおいても風速が接岸速度に及ぼす影響は小さいとされている。

(5) コンテナ船の接岸速度に対するタグボートおよびスラスター使用の影響

J1, EA, J2 における 10,000DWT 級以上の船舶の接岸操船にはタグボートおよびスラスターが用いられている。

図-9 接岸速度と船型(DWT)及び操船支援の関係

図-9 は接岸速度と船型 (DWT) および接岸支援との関係である。また、図-10-1 および 10-2 は EA および J2 の接岸速度とタグボートおよびスラスター使用 (以下、操船支援という) との関係である。

図-9 をみると、EA では船型に応じて操船支援を増強 (図中の●と DWT の関係) しているのに対し、J2 では 30,000DWT 級以上の船舶に対してほぼ同等の船舶支援 (図中の▲と DWT の関係) である。また、EA および J2 のいずれに対しても、操船支援と接岸速度の関係は一樣である。つまり、船型に応じた操船支援によ

図-10-1 操船支援と接岸速度の確率分布 (J2)

図-10-2 操船支援と接岸速度の確率分布 (EA)

り目標接岸速度以下の接岸操船が実行されているといえる。

図-10-1 の EA をみると船型にかかわらずすべての船舶でタグボートを 1 ないし 2 隻配置し、さらに 10,000DWT 以上の船舶ではスラスターを 1 基使用していて、中には 2 基使用するものもある。いま、タグボート 2 隻およびス

ラスター1基使用(図中の□)をみると、この操船支援は多くの船型の船舶で行われているものの、接岸速度は同一船型に対してばらつきがあり、全船型に対してほぼ同一の範囲で分布している。このことは図-10-2のJ2でも同様で、たとえばタグボート1隻およびスラスタ2基(図中の×)でもEAと同様の傾向がみられる。また、EAおよびJ2ともに操船支援を増強しても必ずしも接岸速度が減少するという傾向は見られない。

図-10-1および10-2には、EAとJ2の操船支援と接岸速度の確率分布を図示した。操船支援にかかわらず接岸速度の確率分布はほぼ同一である。なおJ1では先に表-2に示した船型に応じた操船支援の詳細が定められていて、接岸操船に対する理念が明確である。

4. 接岸速度に及ぼす波浪の影響

ここまで述べた事例はいずれも湾奥のよく遮蔽された港湾におけるコンテナ船の接岸速度の測定事例で、接岸時の波浪は無視できるものである。

図-12-1 船首側の波高と接岸速度

図-12-2 船尾側の波高と接岸速度

近年、国交省が行った接岸速度調査¹⁰⁾にバルクバースの接岸速度と波浪影響が示されている。このバースの入港船型は50,000DWT~300,000DWTで、接岸時には船型に応じてタグボートの支援隻数が規定されている。したがって、接岸操船の理念が明確である。すなわち、10万DWT以下では、タグボート3隻、10万~20万DWTではタグボート4隻、30万DWT以上でタグボート5隻を配置するものである。

図-11は接岸速度の頻度分布と理論分布曲線であるが、対数正規分布に従うことがわかる。

図-12-1と12-2は接岸速度と波高との関係である。波高は目視であるが、近傍の波高観測記録の有義波高と概ね一致している。図には波高1mまでの記録が示されている。これは制限波高以下であると考えられるが、高波高時にはむしろ接岸速度が低減している。風速についても同様の傾向が見られる。以上のことから、このバルクバースにおいては明確な操船理念のもとに接岸操船が適切に行われていることから、制限風速および制限波高以下では、接岸速度に対する影響はないと言える。

5. 測定結果の設計への適用

(1) 船舶質量係数、仮想質量係数、偏心率の特性

表-4は、防舷材係数(Z)、船舶質量係数(DT/DWT)、接岸速度(Vb)、仮想質量係数(Cm)、偏心率(Ce)の特性値である。載貨重量トン数(DWT)は定数とする。接岸速度の変動係数は大きい、他の要因の変動係数はきわめて小さい。接岸速度の確率分布は対数正規分布に従うことはすでに述べたが、その他の変数は正規分布に従うとみなしてよい。

表-4 接岸エネルギー算出に係わる変数の特性値

	Z	DT	Vb(J1)	Vb(EA)	Vb(J2)	Vb(J3)	Cm	Ce
平均値	0.997	1.385	0.046	0.091	0.081	0.078	1.857	0.532
標準偏差	0.031	0.121	0.028	0.042	0.043	0.035	0.073	0.017
変動係数	0.031	0.087	0.617	0.461	0.535	0.443	0.039	0.032

図-12 Cmの頻度分布と確率分布

(2) 部分安全係数の算出

ここでは、接岸速度(Vb)のみ変数(Case-1)、上記の要

因すべてを変数 (Case-2) として防舷材の設計用値を求めた。長尾ら⁷⁾は各要因を DWT の関数としたが、本研究では、計測した接岸速度は DWT との相関が小さいと判断し独立変数とした。表-5 は 35,000DWT コンテナ船について一次ガウス近似法により算出した部分安全係数と設計用値である。接岸速度(Vb)のみ変数 (Case-1) と、上記の要因すべてを変数 (Case-2) として求めた防舷材の設計用値との差異は2%程度である。

表-5 部分安全係数の計算例(J1, EA, J2, J3)

J1	部分安全係数				設計用値	EA	部分安全係数				設計用値
	Case-1	Case-2	Case-1	Case-2			Case-1	Case-2	Case-1	Case-2	
v (Z)	1.00	1.00	0.997	0.995	v (Z)	1.00	1.00	0.997	0.994		
v (DT)	1.00	1.02	1.385	1.406	v (DT)	1.00	1.02	1.385	1.412		
v (Vb)	3.20	3.18	0.147	0.147	v (Vb)	2.53	2.51	0.231	0.189		
v (Cm)	1.00	1.00	1.857	1.863	v (Cm)	1.00	1.00	1.857	1.865		
v (Ce)	1.00	1.00	0.532	0.533	v (Ce)	1.00	1.00	0.532	0.533		
B = 2.33 pf=0.01 522kNm 528kNm											
J2	部分安全係数				設計用値	J3	部分安全係数				設計用値
	Case-1	Case-2	Case-1	Case-2			Case-1	Case-2	Case-1	Case-2	
v (Z)	1.00	1.00	0.997	0.995	v (Z)	1.00	1.00	0.997	0.994		
v (DT)	1.00	1.02	1.385	1.408	v (DT)	1.00	1.02	1.385	1.413		
v (Vb)	2.84	2.82	0.229	0.228	v (Vb)	2.45	2.44	0.193	0.191		
v (Cm)	1.00	1.00	1.857	1.864	v (Cm)	1.00	1.00	1.857	1.865		
v (Ce)	1.00	1.00	0.532	0.533	v (Ce)	1.00	1.00	0.532	0.533		
B = 2.33 pf=0.01 1262kNm 1278kNm											
B = 2.33 pf=0.01 1277kNm 1296kNm											

6. 結論

- ① 船舶接岸エネルギー算定において、船舶接岸速度は対数正規分布に、質量係数、仮想質量係数、偏心係数は正規分布に従うといえる。
- ② 接岸速度は港区によって特徴がある。同一港区においては接岸速度の特性はほぼ一致する。
- ③ 接岸速度とDWTの相関性は強くない。また、操船制限条件以下では、接岸速度と風速および波高の相関性も強くない。操船支援方法にかかわらず接岸速度の確率分布はほぼ同一である。接岸速度は操船方針の影響を強く受けるためである。
- ④ 通常の操船では平均値8~9cm/s、変動係数0.5程度で、対数正規分布に従うとみなされる。
- ⑤ 質量係数、仮想質量係数、偏心係数の変動係数は極めて小さく、定数とみなしても実用上支障ない。

CHARACTERISTICS OF MEASURED BERTHING VELOCITY AND THE APPLICATION FOR FENDER DESIGN OF BERTHING SHIP

Seigi YAMSE, Shigeru UEDA, Tatsuhiko OKADA, Akiyuki ARAI
and Kentaro SHIMIZU

Ship's berthing speed were measured at several major container berths in Japan and in South Asia. Analysis was made on the characteristics of berthing speed with tug boat assistance, thruster use, wind speed, wave height and so on. It is found that the berthing speed is mostly dominated by the berthing manner. Berthing speed obeys log-normal distribution while other three factors obey normal distribution. And coefficient of variance of those three factors are considerably small than that of berthing speed, therefore one can determine partial safety factor only for the berthing speed against the target safety index while the partial safety factor of the other three factors to be 1.0. Under controlled berthing operation average of berthing speed may be 8 to 9cm/s and coefficient of variance may be 0.5.

謝辞

本研究に際し、接岸速度測定にご協力いただいたバース管理者、貴重な資料のご提供をいただいた国土交通省の皆様へ厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Baker, A.L.L : The Impact of Ships when berthing, *Proc. Int'l Navig. Congr. (PIANC), Rome, Sect II, Quest.2* pp.111-142, 1953.
- 2) Broisma, J.U. : On Fender Design and Berthing Velocities, *Proc. Int'l Navig. Congr., Sect II, Subject 4*, pp.87-100, 1977.
- 3) Ueda, S. Seigii Yamase, Tatsuhiko Okada, : Reliability Design of Fender Systems for Berthing Ship, *Proc. Int'l Navig. Congr., Paper No.79*, 11p., 2010.
- 4) 運輸省港湾局監修：港湾の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1999.
- 5) Ueda, S., T. Hirano, S. Shirashi, T. Yamamoto, and S. Yamase: Statistical Design Method of Fenders for Berthing Ship, *Proc. of the 12th ISOPE, Vol.III*, pp.554-551, 2002.
- 6) Ueda, S., T. Hirano, S. Shirashi, T. Yamamoto, and S. Yamase: Reliability Design Method Of Fender For Berthing Ship, *Proc. of the 30th PIANC*, pp.692-707, 2002.
- 7) 長尾 毅，岡田達彦，上田茂：FORMに基づく防舷材の信頼性設計法に関する研究，第28回海洋開発シンポジウム，pp.671-676，2003.
- 8) 上田茂：大型タンカーの接岸力に関する研究．，港研報告，第20巻，第2号，pp.169-209，1981.
- 9) 堀井修身，上田茂，市川健：原油タンカーバース調査，港湾技研資料，No.201，126p.1975.
- 10) 青田徹，金正富雄，藤木祐二：大型船舶の接岸速度に関する調査，沿岸技術研究センター論文集，No.12，pp.53-56，2012.
- 11) 星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計，208p.，鹿島出版会，1986.