

船舶の接岸と浮体構造物の係留に係わる研究に携わって

上田 茂

鳥取大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 土木工学コース

Shigeru UEDA

Department of Management of Social Systems and Civil Engineering

Civil Engineering Course, Graduate School of Engineering

Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan

E-mail: ueda@cv.tottori-u.ac.jp

Abstract: This article is the summary of the author's works during his professional career at the Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport and the Tottori University. His works are developed into the design of offshore structures such as deep water terminal and floating structures, berthing and mooring ship, characteristics of fender, tranquility of harbour and wharf operation efficiency, refuge ship in harbour, earthquake resistance of port and offshore structures, reliability design and so on.

Key Words: Berthing ship, Mooring ship, Tranquility of harbour, Wharf operation efficiency, Floating structures, Numerical simulation, Reliability design

1. はじめに

地球はその全表面積の 70%が海洋で覆われる“水の惑星”です。“母なる海”といわれますが、人類は海から生まれ育まれてきました。水産、工業、居住、交通、通商、資源開発、廃棄物処理などの場として人類は常に海との係わりをもってきました。人類が海洋の空間や鉱物資源、生物資源、エネルギー資源などを利用しようとする行為を海洋開発といいます。その水深は海洋レクリエーションでは2~10m, 港湾施設では20~40mですが、石油開発では100~1,000m, マンガン団塊採取では6,000m以上の大水深になります。海洋開発には各種の海洋構造物が用いられます。これらは埋立式、杭式、浮体式などに大別されますが、目的及び水深に応じて選定されます。筆者は、主として杭式構造物と浮体式構造物に係わる研究に係わってきました。大型原油タンカーの接岸と係留、杭式シーバースの地震応答解析、係留船舶の動揺解析法の開発とその応用、船舶の許容動揺量と港湾荷役稼働率、船舶の荒天時港内避泊、浮体式石油備蓄基地施設の貯蔵船の係留、浮防波堤の建設、大水深波浪観測ブイの係留、船舶接岸用防舷材の信頼性設計、港湾施設の耐震性検討など、係わった研究課題は社会的要請に応えたもので、多くの方々のご協力とご支援によって一定の成果を挙げることができたものと確信しています。

2. ゴム防舷材との出会い

最初の任地神戸では、第二の黒船と言われたコンテナ船の受入施設として、30,000DWT級コンテナ埠頭の建設が開始されていました。ケーソン岸壁、ガントリークレーン基礎及び軌条、岸壁上の送油及び給水配管、防舷材の設計などを担当しました。防舷材は船舶接岸エネルギーを吸収し接岸力を和らげる目的で用いられる緩衝材で、もともと船舶が装備し接岸時に係留施設と船舶の間に挿入していましたが、今では係留施設に設置されます。かつては木材が主でしたが、昭和20年代後半からゴム素材が用いられるようになりました。ゴムは弾性に富む素材ですが、形状を工夫し大型化され、高性能エネルギー吸収能力を持つものが開発されました。当時、各メーカーが最新の商品を売込みに来ていましたが、その中にセル型ゴム防舷材がありました。このゴム防舷材は変形の初期には変位復元力特性が線形ですが、変形が20%から55%では復元力がほぼ一定で、かつ除荷時に大きなヒステリシスを有します。後に、大型浮体構造物の係留に活用されることになり、筆者は生涯お付き合いすることになりました。1971年4月、2年間の神戸勤務ののち、久里浜の港湾技術研究所勤務に転勤し、海洋構造研究室に配属されました。当時東京湾では原油配分基地構想が検討されていて、500,000DWTタンカー用係留施設の構造設計に関する研究に携わることになりました。大型タン

カーの接岸と係留の研究においてゴム防舷材と再会しました。そして、石油備蓄基地施設の貯蔵船、浮体構造物、浮体橋梁、メガフロートなどの係留系の要として活用されることになるのです。船舶の接岸と浮体橋梁の研究が縁で、ノルウェー科学技術大学のブラットランド (E.Bratteland) 教授との交流が始まり、同校と鳥取大学との間に国際交流協定が結ばれ留学生を迎えました。

3. 船舶接岸用防衝工の設計法の研究

船舶接岸防衝工の設計は、船舶の接岸エネルギーを一組の防衝工で吸収するように行われます。船舶の接岸エネルギーは、船舶質量、付加質量、接岸速度、仮想質量係数、偏心係数、柔軟性係数、バースの形状係数などの要因の関数で与えられます。通常、柔軟性係数およびバースの形状係数は1.0とされるので、最初の4つの要因が支配的ですが、中でも、接岸速度と付加質量は重要です。20万トンタンカーが就航した当初、洋上のシーバースの杭式ドルフィンが損傷する事例が多く見られたことから、現地観測と模型実験を行って検討しました。多くは防衝工の設計に起因することが判りました。船舶接岸時付加質量の算定式を提案し、また、接岸速度の測定値に基づく設計接岸速度示し設計法を確立しました。これらは「港湾の施設の技術上の基準」に反映されています。

この研究は、のちに岡田氏、山瀬氏らとともに、船舶接岸用防舷材の信頼性設計法の確立に向けて展開されました。自ら接岸速度を測定するとともに、計測事例の収集を行い、その確率分布特性を明らかにして、モンテカルロシミュレーションによって破壊確率を算定し、またレベル1信頼性設計法における部分安全係数を算出しました。この研究に関して、PIANC (国際航路協会) のWG委員を永らく務めてきました。

4. 船舶と大型浮体構造物の係留に関する研究

接岸操船の観測を兼ねて冬季鹿島港に頻繁に赴き、係留中の船舶の動揺を観測しました。初めて巨大船の長周期動揺を目の当たりにしました。300m余の巨大船が波と風的作用を受けて楕円状の軌道を描いて前後左右に数mも動揺し、係留索が切断しドルフィンに幾度となく衝突しました。

「港湾は天然または人工により外界の波を遮蔽し船舶を安全に係留し、荷役が円滑に行える機能を有する」とされています。古くは天然の良港である港が栄えました。しかし、輸送の効率化のため船舶が大型化するにつれ、水深の大きい水域に立

地する必要から、島嶼や防波堤などによって遮蔽されていない水域や、港口に近い水域に係留施設が設置され、係留船舶が波の影響を直接受けるようになりました。このことから、防舷材の設計に係留船舶の動揺を考慮する必要が認識されました。

1975年から1年間、連合王国水理研究所 (HRS:Wallingford) に在外研究員として滞在しました。HRSではヨーロッパの他の研究機関と同様、もっぱら水理模型実験によって現象を再現し設計に反映する手法が主流でした。それでも、数値解析法を開発する兆しはありました。帰国直後、関西空港の浮体案と洋上石油備蓄基地施設の計画が持ち上がり、検討メンバーの一員に加えられました。早速、係留船舶の動揺解析法を開発し、同時に大型浮体への適用を試み、プロジェクトの実現可能性を検討しました。開発した解析手法は模型実験によって検証し補正しました。模型実験では相似側の適用、係留系特性の再現などに注意を払いました。従来、浮体構造物はチェーン係留されていましたが、これらのプロジェクトではシーバースのドルフィンに用いられている大型ゴム防舷材を用いるものでした。そこで、繰り返し圧縮特性、温度特性、衝撃特性など、従来船舶の接岸では考慮されていなかった特性に係わる膨大な試験がなされました。大型浮体の係留設計は世界で始めてのことで慎重になされました。自然現象の再現期間、部材の安全率などに関して議論を積み重ねました。結局、洋上石油備蓄基地施設が国家備蓄として事業決定され、長崎県上五島及び福岡県北九州市白島に建設されることになりました。およそ400m×100m×30mの鋼製の貯蔵船をドルフィンとゴム防舷材 (フェンダー) で係留するものです。10年の検討期間と5年の建設期間を経て完成し、およそ20年を経過しました。先般10年振りに現地を訪れてみて、筆者にとってはこの業務に関する研究が原点であり骨格であったことを改めて意識し、感慨を新たにしました。係留系のゴム防舷材は、既往の実績を越える20年以上の供用期間に入ります。係留系に起因する施設の機能障害と災害は避けなければなりません。今後モニタリングを行い、適切に維持管理することが重要です。この事業の成功は、多くの浮体構造物の実現を可能にしました。オリアナ号 (別府港)、ぷかり棧橋 (横浜)、青函連絡船摩周丸 (函館港)、南極観測船ふじ (名古屋港) と宗谷 (東京港) の係留など、数々のプロジェクトが実現しました。さらに、メガフロート、夢舞大橋 (浮体橋) へと発展しました。当時、浮体橋梁はアメリカ合衆国ワシントン

湖とフッドカナルにあわせて3橋、ノルウェーのベルグソイスンドとノルドホルランドの2橋が既設もしくは建設中でしたが、アメリカのものはケーブル係留、ノルウェーのものはフレキシブルパイプによる係留でした。ドルフィンとゴム防舷材(フェンダー)による係留は、わが国固有の技術として注目されました。

5. 港内静穏度の研究

港湾は海陸輸送の結節点です。したがって、円滑な荷役は、港湾の最も重要な機能の一つです。港湾の稼働率は本来係留船舶の動揺に基づく荷役の可否で判定されるものです。日本海側の港湾は冬季の風浪に妨げられ、この季節の港湾の稼働率が著しく低かったことから、防波堤の整備により港内の静穏度を高める努力がなされてきました。その整備水準を定めるため、概ね10,000GT級の船舶の荷役実態調査が行われ、有義波高50cm以下が静穏度の目標値とされてきました。以来、静穏度の検討は、もっぱら港内波高計算や港内回折実験の結果を基に、波高レベルで評価されてきました。ところが、船舶の大型化に伴い係留船舶の長周期動揺による支障が顕在化してきました。海外では、ケープタウンのダンカンベイソン、ロスアンゼルス港などが係留船舶の動揺に悩まされていましたが、わが国でも苫小牧港、鹿島港、仙台南港など主に太平洋側に新たに開発された港湾において、船舶動揺による係留索切断や荷役障害が問題になりました。この問題に対しても、先に開発した係留船舶の動揺解析法は有効でした。多くのシミュレーションを行い、港内回折波実験において係留船舶の動揺を測定し、係留船舶の動揺に基づく港内静穏度の検討方法を確立しました。また、同時に船種、船型別に許容荷役動揺量を提示しました。同時に係留船舶の動揺を考慮した防舷材の設計法を提案しました。これらも「港湾の施設の技術上の基準」に反映されています。この問題の解決の最も効果的なものは防波堤の整備ですが、大型船の航行のため開口部を広くとらねばならないことから、十分な静穏度は得られません。港口幅と静穏度の関係などを提示し港口幅縮小の効果を示しましたが、操船の難易度と港内静穏度とは相反することから容易には合意されません。

6. 港内避泊の検討

港湾機能の今一つの重要な機能は船舶の安全係留です。小型船は船溜まりに係留し荒天時は港内に避難します。しかしながら、大型船(概ね

1,000GT以上)に対しては台風等荒天時には港外退避勧告が発令され、船舶は港外に避難し錨泊しなければなりません。昭和25年、横浜港の港内船舶に多大の被害をもたらしたキティ台風以後この措置が取られました。現在は入港船舶数が減少してはいますが、昭和40年代には港外避難泊地が十分確保できないことから、東京湾における港内避泊の検討がなされました。係留船舶の動揺計算法はこの検討においても有効でした。一方、名古屋港では、伊勢湾海難防止協会が独自に検討を行い、防舷材などの能力が大きいバースに船舶をシフトするなどの措置がとられました。

作業船の港内避泊も重要課題でした。沖縄宮古島の平良港では、防波堤建設のためのケーソンをFD(フローティングドック)で製作していましたが、台風時期になると、台風の直撃を避けて、製作中のケーソン抱いたまま石垣島や沖縄本島に曳航して避難していました。台風のたびに概ね2週間ほど工事を中断することが避けられませんでした。沖縄総合開発事務所からの検討依頼を受け、直径100mm長さ約200mのナイロンロープを16本張り巡らして係留するシステムを提案しました。港内避泊を実施した直後、中心気圧940hPaの大型台風が宮古島を直撃しました。台風通過時は事務所との電話連絡がつかず気が気ではありませんでしたが、台風一過の翌日やっと事務所長と連絡が付き、『FDが前後左右に約30m旋回しながら動揺したものの、ロープを切断することなく無事凌いだ』と聞かされ安堵しました。確信をもって実行したことでありますが、万一、FDが流出するなどの被害があれば、直接及び間接的に甚大な損害をもたらすことになり、業務上過失が問われ、補償が求められます。ある意味で命がけでした。

7. 港湾構造物及び海洋構造物の耐震性検討

鹿島港シーバースの荷役ドルフィンに強震計を設置して地震観測を行いました。この地域は小規模ではありますが地震が頻繁に発生する箇所なので、短期間に相当数の記録が得られるものと考えました。当時は記録紙に波形を記録するものでしたので、起動加速度の設定値を5galにして観測を始めました。設置後間もなく伊豆大島沖の地震がありました。ところが、なんと記録紙は地震発生前に完全に巻き上がっていたとみられ、地震記録は得られていません。波浪による防波堤の振動がドルフィンに伝達し起動したものと考えられました。また自由振動実験も行いました。港湾建設会社の協力を得て、タグボートのフックとドルフ

イン上の係船柱の間にワイヤロープを掛けて、タグボートでドルフィンを引き、フックを瞬時に外して自由振動させたのですが、何回か繰り返すうちにフックに亀裂が入ってしまいました。翌日、タグボートを保有する会社の東京支店長に謝罪したのですが、逆に激励されました。取得データから、実在の杭構造物の固有周期と減衰定数が明らかになりました。

兵庫県南部地震により神戸港の港湾施設が甚大な被災を受けたことから、港湾施設の耐震性強化が図られ重要港湾に耐震バースが整備されてきました。また、「港湾の施設の技術上の基準」が改定され、構造物の耐震性は安全性のみならず機能性も重視することとされ、地震作用を受けた後の構造物の変形を算出することとされました。山陰地方には、鳥取、境、浜田の重要港湾にそれぞれ1バース耐震岸壁が整備されていますが、新基準に基づいて作用地震波とその増幅特性を求め施設の耐震性を判定しました。これらは、大学院生の野村、清水、笹口、小森の各氏が修士論文として取りまとめました。兵庫県南部地震により被災した神戸港高松埠頭に関して石田氏が、また須磨土取棧橋に関して鈴木氏が、それぞれ博士学位論文課題として検討し結果を取りまとめました。

8. おわりに

光陰矢のごとき16年間でした。この間、1,000人余の学生に出会うことが出来ました。すべての学生諸君がその能力を存分に発揮し、技術者として活躍されていることを嬉しく思います。博士課程には7名の方々が在籍されましたが、そのうち5名が学位を取得されました。当初は資金を募り実験施設の整備を図りましたが適わず、実験には港湾技術研究所や民間の施設を利用させていただきました。この間、専門分野はもとより、土木分野以外の多くの方々とも交流の機会を得ました。暖かい激励や研究資金などのご支援を戴きました。深く感謝致します。

国の研究機関と大学に在籍しましたが、前者は大型研究施設が整備されていること、現場の情報及びデータの入手が容易であること、特定専門分野の研究者の層が厚いことなどが、また後者は国や民間などからの人材と研究資金を受け入れる体制と柔軟な運用が可能なが特徴であると言えます。双方の利点を生かし共同し、また民間研究機関との研究交流が促進されることが望まれます。

参考文献

- [1] 上田 茂：大型タンカーの接岸力に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第20巻, 第2号, pp.169-209, 1981.
- [2] 上田 茂, 小熊康文：荒天時の係岸避泊の限界条件と係船付帯設備の設計手順について 海岸工学論文集, 第31巻, pp.456-460, 1981.
- [3] Ueda S. and Shiraiishi S.: Observation and Analysis of Earthquake Response of a Coupled Pile Offshore Platform, 14th OTC 4208, pp.511-531, 1982.
- [4] 上田 茂：係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究, 港湾技研資料, No.504, 372p, 1984.
- [5] 白石 悟, 上田 茂：港湾構造物及び海洋構造物の安全性照査に関する検討—作用荷重の変動係数と荷重係数の算定—, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第2号, pp.493-576. 1987.
- [6] UEDA S.: Motions of Moored Ships and Their Effect on Wharf Operation Efficiency, Report of the PHRI, Vol.26, No.5, pp.319-373, 1987.
- [7] 上田 茂, 大井栄二郎：港湾の係留施設における防衝工の設計について, 港湾技研資料, No.596, 127p., 1987.
- [8] UEDA S. and Shiraiishi S.: The Allowable Ship Motions for Cargo Handling at Wharves, Report of the PHRI, Vol.27, No.4, pp.3-61, 1988.
- [9] 上田 茂, 白石 悟, 丸山忠明, 上藪 晃, 高崎 守, 山瀬晴義：浮体橋に使用する係留用ゴムフェンダーの特性, 第14回海洋工学シンポジウム, pp359-364, 1998.
- [10] Ueda S., Hirano T., Shiraiishi S., Yamamoto S. and Yamase S: Statistical Design Method of Fender for Berthing Ship. Proc. of the 12th ISOPE, Vol.3, pp.545-551, 2002.
- [11] 上田 茂, 岡田達彦, 長尾 毅：信頼性理論による船舶接岸用防舷材の性能設計に関する研究, 海岸工学論文集, 第51巻, pp847-850, 2004.
- [12] Yamase S., Ueda S. : Reliability Design Method of Fender Systems for Very Large Container Vessels, 17th ISOPE, Vol.4, pp.3699-3705, 2007.
- [13] 日下 理, 福田 功, 上田 茂, 白石 悟, 菅野高弘：海中ケーブルと防舷材の複合係留による浮体橋の波浪中動揺特性と地震応答解析, 構造工学論文集, Vol.53A, pp578-588, 2007.

(受理 平成21年10月30日)