

津波による船舶被害の評価手法の提案

河田 恵昭*・新名 恭仁**・原田 賢治***・鈴木 進吾****

東海・東南海・南海地震によって発生する津波は臨海工業地帯を襲い、航行中或いは停泊中の船舶が被害を受け、さらに港湾域で甚大な二次災害を引き起こす可能性がある。しかし現時点では被害の定量化はもとより、被害評価手法の確立もなされていない。そこで本研究では、被害の定量化、ひいては被害の軽減に繋げることを目的とし、船舶・港湾・津波の諸条件に基づいた大型船舶の評価手法を提案し、さらに本評価手法に基づきモデル港での大型船舶の被災危険度の評価を行った。その結果、モデル港では多くの船舶が座礁する危険を孕んでおり、早急に対策を講じる必要があることがわかった。また、この成果は漁港などの小型船舶にも適用可能である。

1. 序 論

地震調査研究推進本部の長期評価によると、南海トラフで発生が危惧されている東海・東南海・南海地震の発生確率は今後 30 年以内に 40~50%と言われており、この地震による津波被害が予想される各自治体において対策が検討されている。内陸への津波氾濫を抑止する被害防止策や、氾濫した津波への被害軽減策は十分とは言えないものの、整備が進みつつある状況だと言える。

一方、沿岸海域を含む港湾部における津波対策は、その被害評価手法が明らかでないために、遅々として進んでいないのが現状である。臨海工業地帯の港湾部では工業施設に加え、工業資材の運搬船舶への津波被害が発生する。1983 年日本海中部地震による津波では、秋田土崎港に係留中のタンカーの索が切断され、港湾内を漂流し、最終的には座礁したという報告がある(首藤, 2002)。また、船舶は座礁・乗り上げ等により被害を受ける対象であると同時に、座礁した船舶からオイルが海面に流出したり、漂流した船舶が沿岸部の燃料貯蔵タンクや化学コンビナート等の建造物を破壊したりすることにより甚大な二次被害を生じさせる加害の主体にもなり得る。

そこで本研究では、被災時に周辺への被害が特に大きいと考えられる大型船舶に焦点を当てて、(1) 引き波による座礁、(2) 押し波による乗り上げ、(3) 津波の流れと水位の上昇による係留索の切断、についての被害評価手法を開発する。また、最悪の事態を引き起こすと考えられる東海・東南海・南海地震同時発生を想定した津波伝播計算の結果を用いて、堺泉北港をモデル港として被害予測を行う。

2. 船舶被害の評価

本研究では、漁船等の過去の被災事例より、被災可能性が高いと推定される座礁・岸壁への乗り上げ・係留索

切断の 3 つの被害モードについて、外力を最大津波高・最大引き波高・最大流速とした、各被害モードの発生限界を船舶・港湾・津波の条件から判定する被害評価手法の提案を行う。

(1) 船舶のモデル化

a) 船舶諸元

被害の評価を行うにあたり、船舶の諸元(喫水・全長等)が必要となる。本研究では、赤倉ら(1998)の統計解析の手法とデータを用い、船舶諸元を目的変数 Y 、トン数を説明変数 X として、次式の関数系により回帰分析を行い、船舶諸元のモデル化を行った。

$$Y = \alpha X^\beta \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 α 、 β は船種によって変化する回帰係数である。本研究では X は一般に用いられているデータ形式として、貨物船・コンテナ船・タンカー・Ro/Ro 船については重量トン数、自動車専用船・ガス運搬船・旅客船・フェリーについては総トン数を用いたが、これらは相互に換算可能である。以下トン数と言う場合、この船種ごとに対応する説明変数を表すものとする。この方法によって、 Y として排水トン Δ ・全長 L ・垂線間長 L_{pp} ・型幅 B ・型深 D ・満載喫水 d_f が求められる。

b) 係留状況のモデル化

次に、係留施設に係留されている船舶の係留状況のモデル化を行う。係留の側面図及び平面図を図-1 に示す。係留索の最低必要本数及び索一本あたりの最低必要破断加重は、船舶の様々な諸元より艀装数を算出し、この値に応じて鋼船規則(1981)の艀装数表より設定される。船舶規模が大きいほど艀装数も大きくなり、装備すべき索の必要本数と破断荷重も増える。しかし、艀装数の統計的データは存在せず、また艀装数を算定するのに必要な諸元データ(甲板室の幅と合計高さ、満載喫水線より上側の側面積)も無い。そこで、甲板室を考慮に入れないことで艀装数は小さくなるので、危険側を想定するとの立場から、艀装数算定式を以下のように簡略化した。

$$N_{\min} = \Delta^{2/3} + 2B(D - d_f) + L_{pp}(D - d_f)/10 \dots (2)$$

ここで、 $N_{\min}$: 最小艀装数である。この最小艀装数を用い

* フェロー 工 博 京都大学教授 防災研究所
** 修(工) アジア航測株式会社 総合研究所 研究部
*** 正 会 員 博(工) COE 研究員 京都大学防災研究所
**** 学生会員 修(工) 京都大学大学院情報学研究所社会情報学専攻

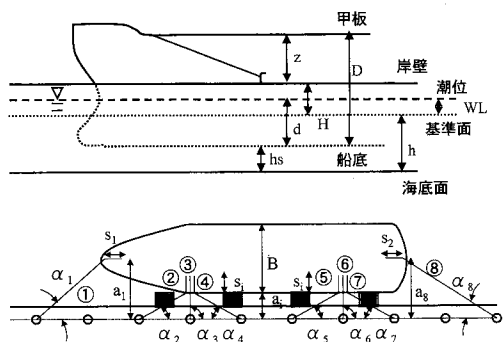


図-1 係留側面図(上)及び平面図(下)

て鋼船規則(1981)の艦装数表より船舶が装備すべき係留索の本数 n' と破断加重 T_{max} を導き出した。また、索本数については、通常艦装数から求められた必要本数の5割増し程度を装備するので、実際の索本数 n は $n=1.5n'$ とし、小数点以下は切り捨てとした。

図-1の係留索①(ヘッドライン)及び⑧(スターンライン)はホーサー(繊維ロープ)を使用する場合が多いので、本研究でもホーサーとし、それ以外の索はワイヤーロープとした。また本研究の係留モデルではアンカーは使用しないものとした。索の張り方は船体中央から左右対称とし、先に求まった索必要本数が奇数の場合には1を加える。索を取り付ける優先順位は、1位)①・⑧、2位)②・⑦、3位)④・⑤、4位)③・⑥とし、 $n>8$ の場合は再び1位から増やしていくものと仮定する。

係留索を巻き込むムアリングウインチ、岸壁で索をつないで船体を係止するためのビット、係留索を船外に導くフェアリーダーをモデル化した位置関係図を図-2に示す。ムアリングウインチからフェアリーダーまでの距離を s_i 、フェアリーダーからビット面までの距離を a_i 、索と岸壁がなす角を α_i 、索と水平面がなす角を β_i とし、索の張り方は船体中央から左右対称として、ヘッドラインとスターンラインについては α 、 β とも最大 45° とした。添え字 i は索番号である。

ロープが弛むことなく直線に張っており、ムアリングウインチとフェアリーダーの高低差がなく、初期状態での張力を0と仮定すれば、ロープの全長は次のように求められる。

$$L_i = l_i + s_i = \sqrt{c_i^2 + z^2} + s_i \quad (3)$$

ここに、 l_i :ビットからフェアリーダーまでの鉛直距離、 s_i :ビットからフェアリーダーまでの直線距離であり、

$$z = D - H - (d - WL) \quad (4)$$

である。ここに、 H :岸壁高さ、 d :喫水、 WL :潮位である。また、

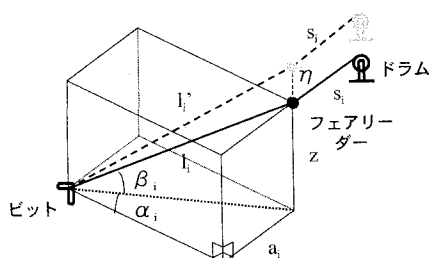


図-2 係留関係器具配置図

$$c_i = a_i / \sin \alpha_i \quad (5)$$

である。船体側面とビットの距離 a_i は、

$$\left. \begin{aligned} a_i &= 2.0 & (i=2\sim 7) \\ a_i &= B/2 + 2.0 & (i=1, 8) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

と仮定する。またムアリングウインチとフェアリーダー間の距離 s_i は、

$$s_i = B/4 \quad (7)$$

と仮定する。ここでは a_i と s_i をこのように仮定したが、この値を多少変化しても係留状況にそれほど影響はない。

(2) 座礁の評価

本研究において、座礁が発生するのは船底が海底に接触する場合であると定義する。無論船底が海底に接触しただけで必ずしも被害が生じるわけではないが、防災という観点から座礁の定義を被害が生じやすくなる危険側に設定した。また、潮位が低く、喫水が深いほど船底と海底の距離(以下、余裕水深と言う)が近いので、座礁の危険性は高い。そこで津波来襲前の水深、最低潮位、船舶の満載喫水値を用いて余裕水深を算出し、余裕水深を超える引き波が来襲すれば座礁被害が起こるとすると、座礁が生じる限界津波引き波高は以下のように表される。

$$\eta_c = d_f - h - LWL \quad (8)$$

ここに、 η_c :限界津波引き波高($\eta_c < 0$)、 LWL :最低潮位である。船舶の座礁評価結果の一例として $LWL=0.0$ mでの水深12m岸壁におけるタンカー、自動車専用船、ガス運搬船、フェリーの限界引き波高曲線を図-3に示す。図中に想定津波の最大津波引き波高で水平線を引くと、この水平線より下側になる船舶は十分な余裕水深が無く、座礁すると考えられる。

(3) 乗り上げの評価

本研究では乗り上げが生じるのは、船底が岸壁の高さを越えるときであると定義する。潮位が高く、喫水が浅いほど船底と岸壁上面の距離が近いので、乗り上げの危険性は高くなる。そこで岸壁高さ、朔望平均満潮位、船舶の軽荷喫水値を用いて乗り上げの評価を行った。軽荷喫水値については統計データが存在しないため、以下の

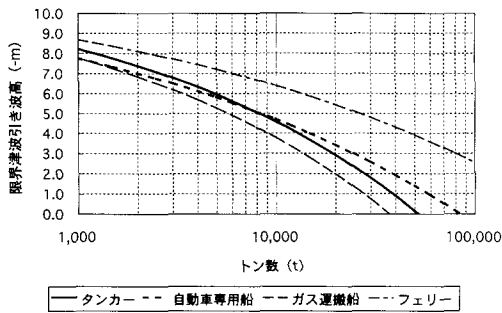


図-3 座礁の発生限界津波引き波高曲線

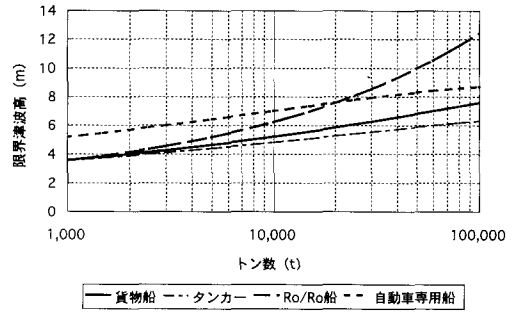


図-4 乗り上げの発生限界津波高曲線

式で軽荷喫水値を推定した。

$$d_e = d_f - DWT / (L \cdot B \cdot \gamma_w) \quad (9)$$

ここに、 d_e ：軽荷喫水， DWT ：重量トン数， γ_w ：海水の単位体積当たり重量である。これは、船舶が方形であるとして、満載時の貨物重量による船体の沈降量を満載喫水値から差し引いて軽荷喫水値としたものである。以上より、乗り上げの評価式は以下になる。

$$\eta_c = H + d_e - HWL \quad (10)$$

ここに、 η_c ：限界津波高， HWL ：朔望平均満潮位，である。この限界津波高を超える押し波が来襲すれば、船舶は岸壁に乗り上げる。一例として $H=3.55$ m， $HWL=2.10$ m での貨物船、タンカー、Ro/Ro 船、自動車専用船の限界津波高曲線を図-4 に示す。グラフによると、この例では津波高が少なくとも 3.5 m 以上にならないと 1,000 t 以上の船舶の乗り上げ被害は生じないと評価することができる。

(4) 係留索切断の評価

係留索切断については、船首方向からの流れによる切断と水位の上昇による切断の 2 つにわけて評価を行った。

a) 水位の上昇による切断の評価

岸壁高さ、潮位、船舶の喫水、型深の位置関係から算定された係留索の全長を用い、外力を津波高として船体の上昇による索の伸びを評価し、設定した最大伸び率を超えれば破断に至るとすると、係留索切断の限界水位上昇は以下になる。

$$\eta_c = \sqrt{\{(1 + \varepsilon_{\max}) \sqrt{C_i^2 + z^2 + \varepsilon_{\max} \cdot S_i^2} - C_i\}^2 - z^2} \quad (11)$$

ここに、 η_c ：限界津波高， $\varepsilon_{\max}$ ：最大伸び率である。ホーサーの最大伸び率は 0.3，ワイヤーロープは 0.025 とした。索 1 本 1 本について喫水 d ，潮位 WL ，角度 α ， β 等のパラメータを変えながら式 (11) での評価を行った。限界津波高を超える押し波が来襲すれば、係留索は切断される。この評価式を用いれば、ワイヤーロープはわずか数 10 cm の水位上昇で切断される可能性があるとい

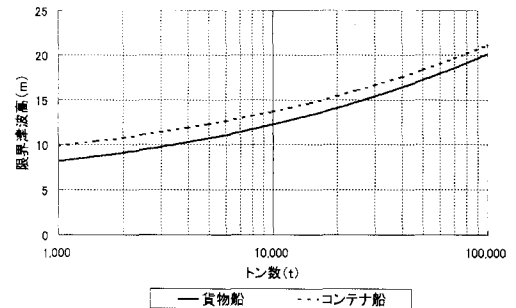


図-5 係留索切断の発生限界津波高曲線

う結果になった。実際には初期状態での索の弛みや自重、初期張力等を考慮に入れればならず、現実的な数字とは少し離れていると考えられるが、ワイヤーロープが水位の上昇で切断されやすいことは明白である。ではここで、ワイヤーロープが全て切断され、ホーサーのみで船体を係留している状態で、さらに最も危険側である $\alpha=45^\circ$ ， $\beta=45^\circ$ ， $d=d_e$ の場合を考える。一例として $H=3.55$ m， $HWL=2.10$ m での貨物船及びコンテナ船の限界津波高曲線を図-5 に示す。グラフによると、この例では津波高が 7.0 m にならないと 1,000 t 以上の船舶の全ての係留索が切断されて漂流する可能性が生じないと評価できる。

b) 船首方向からの流れによる切断の評価

デンニーの (12) 式 (日本小型船舶工業会，1996) を用いて船舶の浸水面積を求め、外力を津波の最大流速として、船首方向からの流圧力を示すフルードの式を簡略化した (13) 式 (港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999) より流圧力を算定する。索 1 本 1 本にかかる張力を算出し、破断荷重と比較することで係留索の破断の評価を行った。

$$S = 1.7L \cdot d + \nabla / d \quad (12)$$

$$R_f = 0.0014 S \cdot V^2 \quad (13)$$

ここに、 S ：浸水面積， ∇ ：型排水容積， R_f ：流圧力， V ：流速である。また、型排水容積 ∇ は、次式で示される。

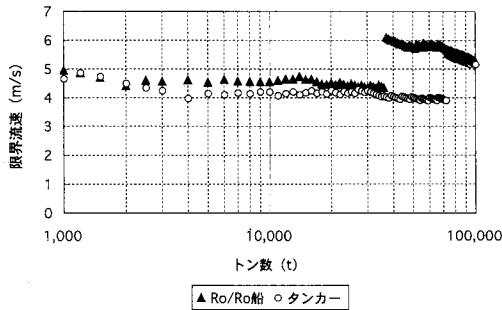


図-6 係留索切断の発生限界流速曲線

$$V = \Delta / \gamma_w \dots\dots\dots (14)$$

前項の結果より、ワイヤーロープは水位の上昇により切断されやすいことがわかっているの、ここではホーサーのみで船体が係留されている場合の船首方向からの津波の流れによる係留索切断の評価式を次式に示す。

$$V_c = \sqrt{\frac{\lambda \cdot T_{\max} \cdot \cos \alpha \cos \beta}{0.0014(1.7L \cdot d + \Delta / (d \cdot \gamma_w))}} \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 V_c ：限界流速である。 λ は実際に流れによる流圧力を受け持つ本数であり、 $\lambda=1(2 < n \leq 8)$ 、 $\lambda=2(8 < n \leq 16)$ である。この限界流速を超える流速になれば、係留索は切断される。ここでは、最も危険側となる $\alpha=45^\circ$ 、 $\beta=45^\circ$ のときの限界流速曲線を図-6に示す。このグラフによると、1,000 t以上の船舶については津波の流速が3.9 m/s以上になれば係留索が切断され漂流する可能性が生じると評価することができる。

3. 被害予測

(1) 津波伝播計算

2.において提案した評価手法に基づいた被害予測を行うにあたり、本研究で外力とした最大津波高・最大引き波高・最大流速を求めるために大阪湾での津波伝播計算を行った。計算は非線形長波理論を用い、リーブフロッグ法により差分化を行った。計算諸元を表-1に示す。また初期波形としては、中央防災会議で作成された地殻変動量データを用いた。

(2) 被害予測のモデル港

被害予測は堺泉北港を対象とした。堺泉北港の2002年度の入港隻数は23,590隻で全国第12位であり、そのうち約40%が原油やLNG・LPG、その他引火性の液体等のような危険物を運搬する船舶であるため、ひとたび船舶が被害を受けるとこれらの危険物による重大な二次被害につながる危険性がある。また前節の津波伝播計算の結果、堺泉北港では岸壁付近の最大津波高が2.4 m、最大引き波高が-2.4 m、岸壁付近の最大流速が1.6 m/sと予想され、いずれも大阪湾内では大きな値となっている。

表-1 津波伝播計算の計算諸元

領域	大領域	中領域	小領域	最小領域
空間格子間隔	1350 m	450 m	150 m	50 m
計算時間間隔	0.5 秒			
基礎式	非線形長波方程式			
沖側境界条件	透過	水位・流量接続		
再現時間	6 時間			

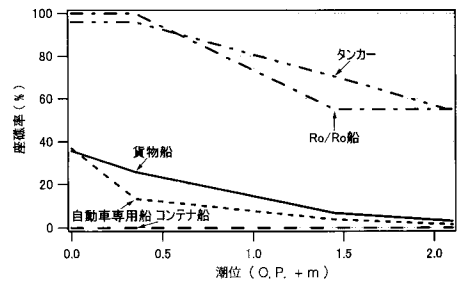


図-7 座礁率

そのため、堺泉北港を被害予測のモデル港に選定した。

(3) 岸壁ごとの被害推定

2002年度に実際に堺泉北港に入港した1,000 t以上の船舶について、本研究で提案した被害発生限界式に基づいて被害予測を行った結果、乗り上げ被害は津波高3.5 m、係留索切断被害は流速が3.9 m/sまたは津波高が7.0 mを超えると生じる可能性がある。さらに、津波伝播計算の結果を各地点の外力として用いると、乗り上げ被害と係留索切断被害は生じる可能性が低い、座礁の危険性が非常に高いことがわかった。堺泉北第5区に入港した1,000 t以上の4種類の船舶及び第4区の係留能力50,000 t以上の岸壁に停泊したタンカーの被害予測図を図-7に示す。横軸は津波が押し寄せたときの潮位、縦軸は座礁率（年間入港隻数のうちどれだけの割合の船舶に座礁の危険性があるか）を表している。図のように、Ro/Ro船、タンカーは干潮位で95%以上、満潮位でも50%以上の座礁率となった。

(4) 座礁安全エリアマップ

以上より堺泉北港においては座礁被害が卓越する可能性が高いことが示されたので、次に座礁評価式(8)及び津波伝播計算の結果を用い、船舶がどこまで避難すれば座礁に対して安全かを示すマップの作成を8つの船種ごとに行った。一例として貨物船の安全マップを図-8に示す。

現行の各都道府県の地域防災計画では、「津波来襲時、船舶はなるべく水深が深く広い場所へ避難すること」とのみ記載されている場合が多い。実際にこのマップを大阪府港湾局に提示したところ、水深・津波引き波高・船

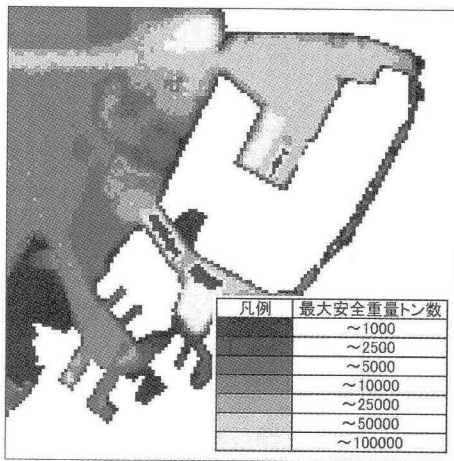


図-8 座礁安全エリアマップ

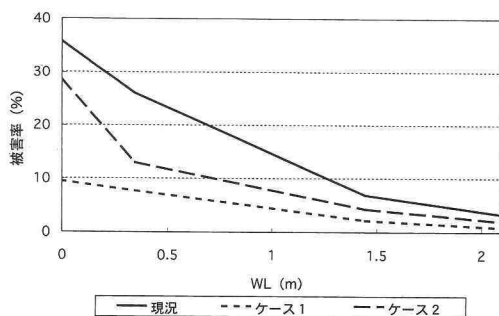


図-9 水深を深くした場合の座礁率の推定

船規模を考慮して作成されたマップは斬新であり、今後実用化につながるとの高い評価を得た。

(5) 船舶被害の対策試算

このような被害の軽減の最も直接的な手段としては、岸壁の水深を深くすることが考えられる。ここで実際に堺泉北第5区の全岸壁を掘り下げた場合の座礁率の推定を2ケース検討する。ケース1は、水深を現行より1m深くした場合である。ケース2は、岸壁の水深の基準を入港船舶の満載喫水の1.1倍から1.2倍に変えたものである。一例として貨物船における現行、ケース1、ケース2の座礁率を比較したものを図-9に示す。対策は港湾の条件を考慮して、経済性などとともに決定しなければならないが、このように本手法を対策の効果を試算す

るために利用することができる。

他にも、ハード対策としては津波防波堤の設置により津波引き波高を抑えること、ソフト対策としては入港喫水制限を厳しくすることや避難体制の向上などが挙げられる。これらの対策を検討するにも、本手法による安全マップや定量的手法を適用することが可能である。

4. 結 論

本研究の結論をまとめると以下の通りである。

- 1) 座礁についての評価式を提案し、現在入港している船舶は余裕水深が少なく、津波引き波高がそれほど大きくなくても被害が生じることがわかった。
- 2) 岸壁への乗り上げの評価式を提案し、大型船舶は喫水が大きく、かなりの津波高にならないと被害が生じないことがわかった。
- 3) 流れによる係留索切断及び水位上昇による係留索切断の評価手法を提案し、かなりの流速あるいは水位の上昇がなければ全ての係留索が切断され船舶が漂流しないことがわかった。
- 4) 座礁の評価式を用いることで、津波来襲時に船舶がどこまで避難すれば安全かを示したマップが船種ごとに作成でき、被害軽減のための情報となる。

謝辞：本研究は文部科学省の大都市大震災軽減化特別プロジェクト（代表：河田恵昭）による研究助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 財団法人 日本海事協会 (1981): 平成3年鋼船規則集, pp. 215-217.
- 東京タンカー株式会社 海務部編 (1993): ロープ類の知識, 成山堂出版.
- 日本小型船舶工業会 (1996): 通信教育造船科講座 船舶計算.
- 赤倉康寛・高橋宏直・中本 隆 (1998): 統計解析等による対象船舶の諸元, 港技研資料 No. 910, pp. 4-19.
- 赤倉康寛・高橋宏直 (1998): 信頼度を与条件とした船舶諸元, 港技研資料 No. 911, pp. 4-12.
- 港湾の施設の技術上の基準・同解説検討委員会 (1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上・下), 社団法人 日本港湾協会, pp. 57-58, p. 646.
- 造船テキスト研究会 (2001): 商船設計の基礎知識, 成山堂出版.
- 首藤信夫 (2002): 防災情報新聞「東南海自身・南海地震による津波災害とその対策」より抜粋.