

船舶衝突防護工の設計の一考察

建設省工本研究所 基礎研究室 矢作 枢
大志万 和也

まえがき

近年、海洋開発に対して急激にその関心が高まり、土木工事においても、海上橋梁、各種シーバースや港湾構造物、作業台などがかなりの実績もあり、又 本州四国連絡橋の一部着工、東京湾、伊勢湾、大阪湾などの大型沿岸橋梁工事のプロジェクトが数多く出てきた。これらの橋梁は、いずれも船舶の航行の繁雑な地域での架橋であり、その橋脚へ船舶が衝突する危険性は、橋梁の径向が飛躍的に大きくなり橋脚、橋台がかならず地上部にもうけないがぎりにならない。船舶の衝突の原因としては、操船ミスや、不案内などによる橋脚、橋台識別の遅れなどの外に、暴風時のような異常時の操船不能によるものが考えられる。前者は、事前の広報活動の周知徹底、識別標識の開発等で衝突の危険性はかなり低めることはできると思われる。後者についても、異常時の事前予知とそれに対する避難方法が適切に行なわれれば、やはり衝突する確率を低めることは可能であろう。したがって、その衝突する恐れは0とはなり得ない。したがって、本稿では、確率論的な議論や経済比較論を無視し、その前段階ともいうべき、衝突を前提とした考え方で進めている。

船舶衝突防護工の型式は (a) くい・ジャケット式 (b) 浮遊式 (c) 盛工式の3種類を考え、本稿では、(a)、(b)のみの検討手順をのべ試算は、東京湾の工質条件で行なった。

1 検討手順

1-1 くい・ジャケット式船舶衝突防止工(防衝工)

図-1に示すように、まず最初に地盤の塑性域を考慮したくい本当りの抵抗力を決め、これに上部工(ジャケット)の剛性を加味し、防衝工の抵抗力を求める。次に、防衝工の抵抗力から、船舶と上部工の吸収エネルギーを求める。一方、くいの破断回転角を適当に仮定すると、防衝工の抵抗力から、これの吸収エネルギーが求められ、前2者と加え合わせると吸収エネルギーの合計が求まることになる。最後に、船舶の衝突エネルギーと吸収エネルギーの合計を比較することによって、特定の防衝工に対して許容し得る船型と衝突速度が得られる。ここで上部工(ジャケット)は大きな水平変位に対して回転することが当然考えられる。したがって、安全側に考え回転による吸収エネルギーは無視した。

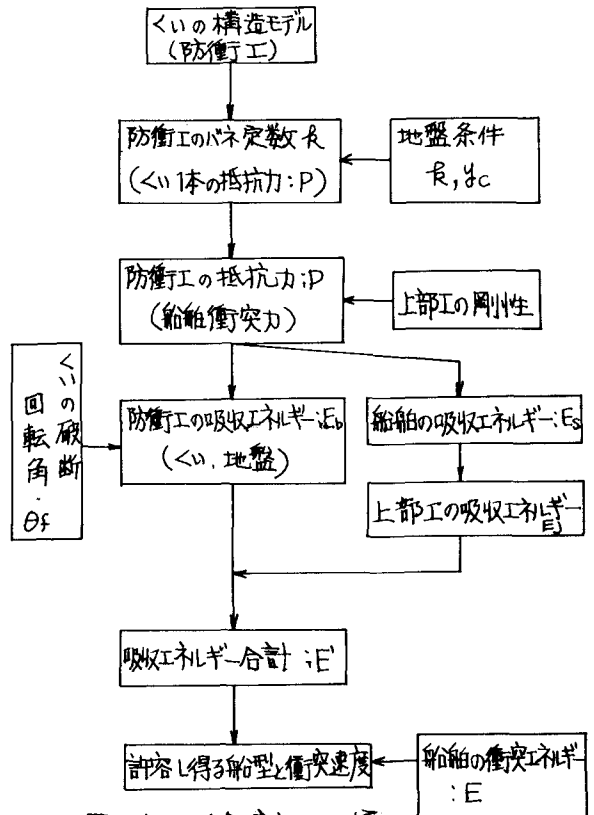


図-1 検討手順

1-2 設計の考え方

i) 地盤条件 地盤の反力-変位関係は弾塑性

的であるとする。

ii) くいの本の抵抗力 くいの頭が固定されているくいに水平外力 P が増加しながら作用した場合、くいに生じる応力状態は次のように推移すると思われる。まず、くいの地上突出高が0の場合を考えると;

a) くいの頭固定であるから、応力の最大値はくいの頭で生じ、くいの頭応力が降伏応力に到達するまでこの状態を続ける。

b) くいの頭応力が降伏応力に到達した後は、くいはそのくいの頭において塑性モーメント(降伏応力 $\times$ 塑性断面係数)を受け、地中部のある一處に生じている最大応力が降伏応力に到達するまで、この状態を続ける。

c) その後は、くいの頭が曲げ破断するまで、地中部の降伏応力が地中部最大応力の生じた位置から上下どちらの方向にも伝達していくと考えられる。

これらのことを図示すると図-2のとおりである。

次に、地上突出長があるくいを考えてみると、地中部の応力が降伏応力に到達するまでは突出長0の場合と基本的に同様であり、その後において、降伏応力はすぐに地面(海底面)位置に生じることになる。このことは地中部の最大応力が海底面から浅い位置において生じると考えられるからである。海底面で降伏応力に到達するとくいは破断するまで、外力の増加なしでその地上部を回転させられる。作用外力 P は地中部のくいに生ずる最大応力が降伏応力に到達した後、ほとんど増加せずにたがって、くいの本の抵抗力はこのときの作用外力 P とする。

くいのエネルギー吸収量 E_p は、もしくいが破断するくいの頭変位 δ が分かるなら、 $E_p = P \cdot \delta$ と与えられる。

iii) 上部工の剛性

上部工はジャケット構造とし、その剛性には防衛工法線方向の水平部材のみが寄与するものとし、水平部材は一応、くいと同等法の鋼管で構成されていると考えられる。たとえば、防衛工の横断面が図-3のようであるとするならば水平部材の断面2次モーメント I は、

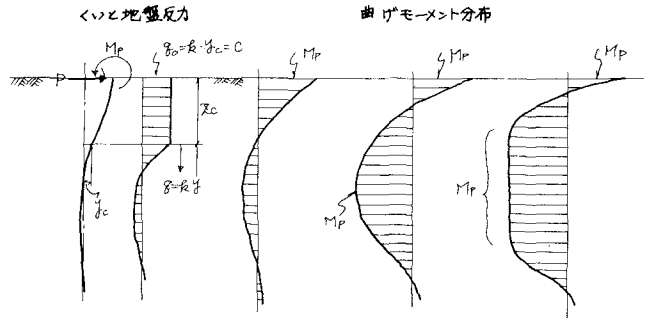
$$I = \sum_{k=1}^n (A \cdot l^3)$$

ここに

A : 鋼管の断面積(cm^2)

l : ϕ から鋼管までの距離(m)

n : 水平部材数



① くいの頭応力が降伏応力に到達するまで ② 地中部の応力が降伏応力に到達するまで ③ くいの塑性域が拡大する

図-2 外力の増大に応じた曲げモーメント分布 ($l = 0 \text{ m}$)

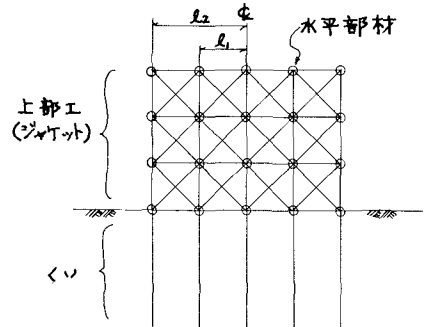
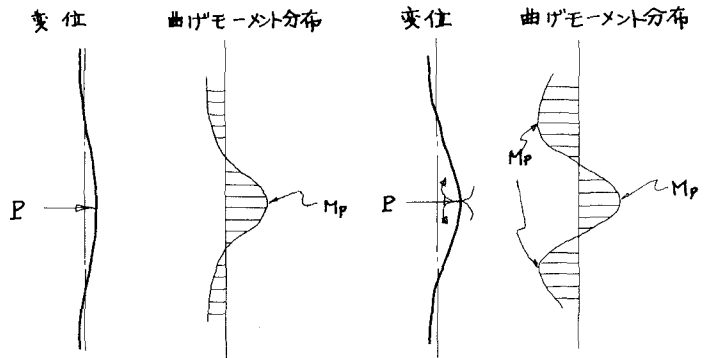


図-3 防衛工断面図



① 衝突点において上部工が降伏応力に到達するまで

② 衝突点以外においても上部工が降伏応力に到達するまで

図-4 防衛工の抵抗力

曲げ剛性は上記の I と E (ヤング係数) より $E \cdot I$ と与えられる。

Ⅳ) 防衛工の抵抗力

防衛工は実際には有限長であるが、抵抗力の計算においてはこれを無限長の弾性床上の梁として取り扱う。防衛工に外力が増加しながら作用する場合の挙動は

α) 衝突点において上部工(ジャケット)が降伏点に到達するまでは普通に集中荷重が作用する場合と同様である。

β) 衝突点において上部工が降伏点に到達した後、衝突点で分割して考えると、一般の地上突出長の小さい頭に降伏モーメントが作用しているくらいと同様になる。

γ) その後は、衝突点からある距離だけ離れた所で上部工に降伏点が生じる。

くいの一本の抵抗力とは異なり、防衛工の抵抗力 P は上記 β) のときの作用力とする。そのとき衝突点における変位は、ii) の δ と一致する必要がある。

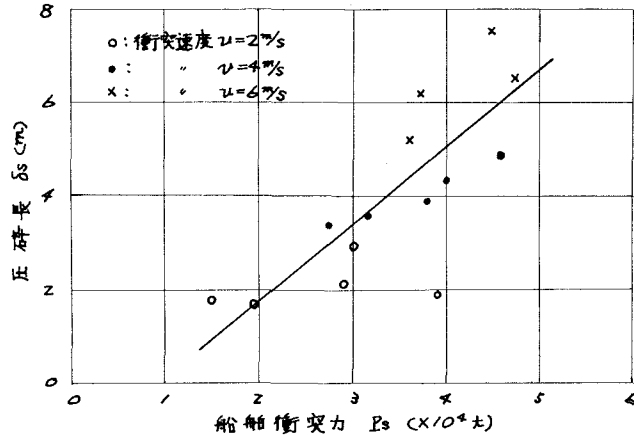


図-5 船舶衝突力と圧砕長

Ⅴ) くいの破断回転角

くいの破断回転角が分かる

と、くい頭の水平変位をもとめることができ、いま衝突点を考えているとすれば、防衛工の抵抗力 P より防衛工の吸収エネルギーがもとまる。しかしながら、くいの破断回転角について実験資料をほとんど見出すことができない。したがって計算では $\theta_f = 15^\circ \sim 45^\circ$ までは試算を行なっている。

Ⅵ) 防衛工の吸収エネルギー

防衛工の吸収エネルギー E_b は、衝突点のくい頭が破断するまでのくいと地盤の吸収エネルギーとすると、くい頭破断する水平変位 δ が分かれば次式によりもとめられる。 $E_b = P \cdot \delta$

水平変位 δ については、Ⅳ) で θ_f が仮定されているから、地上突出長の有無の構造形に対して次のように考えられる。

α) 地上突出高 0 の場合。地中部のくいの形状は、くい頭が破断するほど変位をすると、くいの各部は塑性域にはいっており、また地盤も塑性域であるから、その反力は等分布となり、これらのことから力テナリーをなすと考えうる。

β) 地上突出長がある場合。地中において最大応力が降伏点に到達した後、直ちにそれは海底面に伝達し、それに塑性ヒンジが生じる。したがってくい頭の水平変位は f_m のくいが θ_f だけ傾斜したくい頭の水平変位である。

Ⅶ) 船舶の吸収エネルギー

防衛工の抵抗力 P は反作用として船舶の方にも作用し、すなわち、これが船舶衝突力となる。船舶の吸収エネルギー E_s は船舶衝突力 P に船舶圧砕長さ δ_s の 1/3 を乗じたものと与えられる。 P と δ_s の関係は「本田公団：海中基礎への船舶衝突力に関する調査委託(その1)」より抜粋すると図-5のとおりである。船舶衝突力 P_s と圧砕長さ δ_s の関係を图中的直線が代表するとして、 δ_s は P_s からもとめられる。この関係図は最大衝突力に対する圧砕長さの関係であり、最大衝突力より小さい衝突力と圧砕長さの関係は大体放物線によって表わされる。したがって、

船舶の吸収エネルギー： $E_s =$

$$\frac{2}{3} \cdot R_s \cdot \delta s / 3 = \frac{2}{3} q \cdot R_s \cdot \delta s$$

VIII) 上部工(ジャケット)

の吸収エネルギー： E_j

上部工の吸収エネルギーについては船舶の吸収エネルギーと同値($E_j = E_s$)又は $E_j = 0$ の場合を想定する。

IX) 吸収エネルギー： E'

吸収エネルギーの合計は、防衛工(くい、地盤)の吸収エネルギー E_b 、船舶の吸収エネルギー E_s および上部工の吸収エネルギー E_j の和で与えられる。

$$E' = E_b + E_s + E_j < E: \text{衝突エネルギー}$$

X) 許容し得る船型と衝突速度

ある定められた防衛工の吸収エネルギー合計より小さくなる衝突エネルギーをもつ船型と衝突速度の組合せが、許容し得るものとなる。したがって、船型を選び、満足する衝突速度を選び、満足する衝突速度をもとめる。

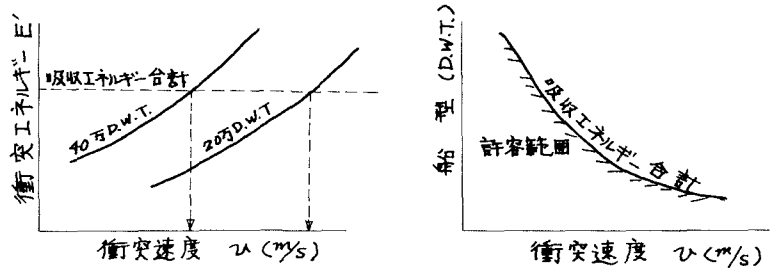
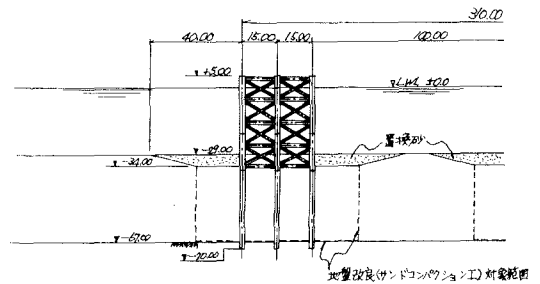


図-6



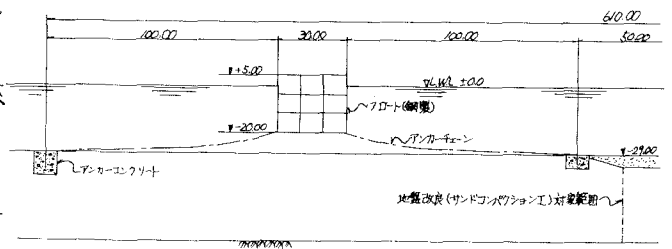
a) 杭・ジャケット形式

1-3 浮遊式船舶衝突防止工

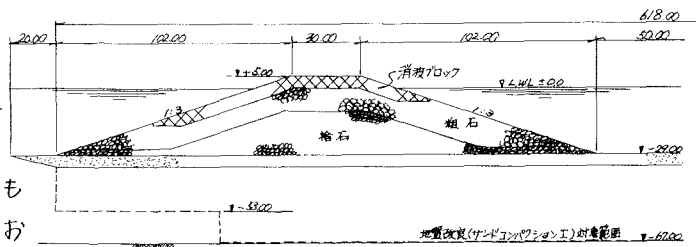
浮遊式防衛工を通常の船舶と類似する鋼製ポンツーンにけい留鎖が取り付けられそれにアンカーとしてコンクリートブロックが設けられている構造とした場合、船舶衝突に抵抗する要素には次のようなものが考えられる。

- ① けい留鎖の歪エネルギー
- ② けい留鎖の運動および流体抵抗エネルギー
- ③ アンカーの滑動抵抗および流体抵抗エネルギー
- ④ ポンツーンの流体抵抗エネルギー
- ⑤ 船舶破損による吸収エネルギー
- ⑥ 船舶+ポンツーンの運動エネルギー
- ⑦ ポンツーン破損による吸収エネルギー
- ⑧ その他

以上の中で、②は質量および体積が小さいものとして、③は滑動が生じないものとして、および④と⑥は、はけい留鎖がないものと考え、これのみによる衝突後の船舶とポンツーンの停止距離が数百〜数キロメートルと概略計算される(試算設計結果)ことなどから、これら②、



b) フローティング形式



c) 盛土形式

図-7 概略図

③④および⑥は安全側の要因と考えられるものとする。したがって、浮遊式防衛工の計算には次の抵抗要素のみ考慮に入れる。

- ① けい留鎖の歪エネルギー
- ⑤ 船舶破損による吸収エネルギー
- ⑦ ポンツーンによる吸収エネルギー

結局このことは、前記のくい・ジャケット形式と主要な点は同一である。すなわち、けい留鎖の引張抵抗が弾性床の反力であり、防衛工が弾性床上の梁であると考えられる。バネ定数は衝突点におけるけい留鎖の引張抵抗と変位から求められ、これとポンツーンの剛性を考え合えると、ポンツーンが降伏点に達した時の船舶衝突力をもとめる。次に衝突点におけるけい留鎖が破断するまでのそれによる吸収エネルギーが船舶衝突力とけい留鎖破断変位を乗じることによりもとまり、それが船舶衝突エネルギーと対応すればよいことになる。

2 試算結果

試算は、東京湾横断道路(木更津-川崎)の川崎側人工島周辺の地盤を想定し、行なった。計算過程の詳細はここでは、省くが、三方式の概略図は図-7のとおりである。これら試算結果の工事量を列記すると以下のとおりになる。

- a) くい・ジャケット方式では単位長さ当り、くいに、30t、ジャケットに120t、合金鋼材が150t必要となり工量としては、地盤改良1250m、置換砂900m必要となる。
- b) 浮遊方式では、浮遊式防衛工鋼材に110t、アンカー用コンクリート250m³、必要となる。
- c) 盛土形式では、土工として、盛土8,000m³、消殺ブロック1,100m³、置換砂2540m³、地盤改良4,100m必要となる。

これら、3形式とも概算工事費を算出するとほぼ同程度となる。図-7の形状で許容し得る船型とそのときの衝突速度を算出したのが図-8以下に示す。対象船舶に20万、D・W・Tと40万D・W・Tとを選が防衛工等の吸収エネルギーの合計と等しくなる衝突エネルギーに対応した衝突速度を出すと次のとおりである。

- a) くい・ジャケット方式、くいの破断角 $\theta_f = 15^\circ$ と仮定した場合 -----

くいの破断角 $\theta_f = 15^\circ$ と仮定した場合 -----

- b) 浮遊方式 -----

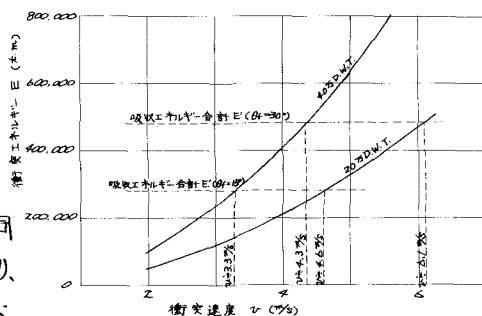


図-8 衝突速度をもとめるための関係図

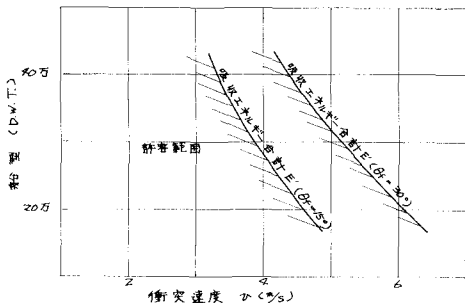


図-9 許容し得る衝突速度と船型

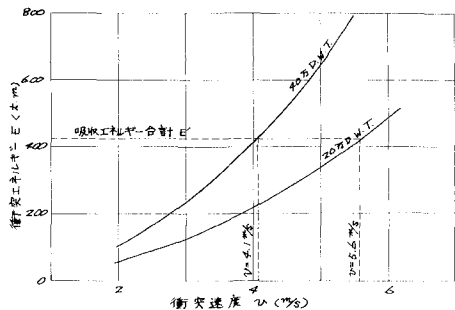


図-10 衝突速度をもとめるための関係図

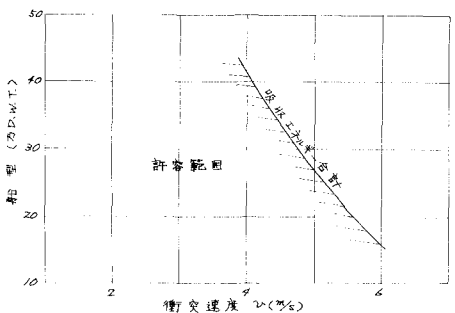


図-11 許容し得る衝突速度と船型

- 20万D・W・T..... $v = 4.6 \text{ m/s}$
- 40万D・W・T..... $v = 3.3 \text{ m/s}$
- 20万D・W・T..... $v = 6.1 \text{ m/s}$
- 40万D・W・T..... $v = 4.3 \text{ m/s}$
- 20万D・W・T..... $v = 5.6 \text{ m/s}$

$$40万DWT \cdots \cdots \nu = 4.1\%$$

これらの値から、吸収エネルギーと一致する船型と衝突速度を出した。図中ハッチングの部分は、船型と衝突速度の許容範囲である。

3. 考察

これら方式に対する安定性について概略検討してみると、常時についてはいずれも大きな問題はないと思われる。地震時については、盛工形式で水中における軟弱地盤上の盛工の振動に対する不安がある。暴風時については、くいジャケット方式も、浮遊方式もくり返し応力に対する疲労破壊の問題がある。しかし、それら構造物に防波機能をもたせた場合でも荷重の大きさが船舶衝突時に対して決定的に小さいので問題はないと思われる。船舶衝突時に対しては、くい・ジャケット方式も、フローティング方式も、防衛工が衝突時にかに挙動するが不明な点が多いことに対する不安が残る。また盛工方式では、盛工に船舶がはい上がりさせることが基本であるが、切断するように通過することに対する不安がある。施工性についていえば前2者は、保守時に防錆、防食に対して維持が困難であろう。また、ジャケット相互、フローティング相互の水中接合の問題が残る。それに対して後者はいったん出来れば、泥下対策以外、維持、管理が容易であろう。しかし、施工中の海水汚濁防止が困難である。

あとがき

以上、3方式による船舶の本体構造物への衝突防止工についての試算結果を述べたが、設置対象地盤によっても異なるが、いずれにせよ、20万tonクラスの大型タンカーの衝突を防止するためには、橋梁本体と同等もしくは、それ以上の規模のものが要求されることになる。したがって、まえがきに述べたように、通常航行時はもちろん、暴風雨など異常時でも船舶の衝突防止用の各種の方法を、駆使し、構造物による船舶衝突防止工の限界を認識し、ソフトな面から衝突の危険率を下げるよう工夫する必要がある。