

土 木 研 究 所 資 料

防衝工の設計に関する調査研究報告書

平成2年3月

建設省土木研究所
構造橋梁部構造研究室

Copyright © (1990) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはいらない。

防衝工の設計に関する調査研究報告書

構造研究室	室長	横山 功一
	研究員	中 神 陽 一 (*1)
	研究員	目下部 毅 明
		永 原 隆 (*2)
		金 子 学
		関 谷 光 昭

要 旨

各種湾岸道路や海岸部もしくは湾央部等の道路建設事業においては、海上部に橋梁が建設され、橋脚が航路に近接して建設される事例が多い。このような場合に、船舶が橋脚に衝突する危険性が考えられ、橋梁に対しては、船舶の衝突に関する防護措置が取られる必要がある。本報告書は、船舶の橋梁への衝突に対する防衝工の設計に関してなされた、実績調査および概略設計の成果をとりまとめ、防衝工の設計の方法、形式の選定に関する考察を行ったものである。その結果、防衝工の工費の概算方法、形式毎の設計上の問題点、および製作施工性に関する長所・短所等が明らかになった。

キーワード：船舶、衝突、防衝工、概略設計、工費、形式選定

(*1) 現在 北陸地方建設局新潟国道工事事務所調査課長

(*2) 現在 四国地方建設局富郷ダム工事事務所工務課

ま え が き

東京、名古屋、京阪神といった大都市圏では、各種湾岸道路や東京湾横断道路のように、海岸部もしくは湾中央部に道路建設が進められている。これらの事業においては、海上部に橋梁が建設され、橋脚が航路に近接して建設される事例が多い。このような場合、航行中あるいは漂流中の船舶が直接橋脚に衝突する危険性が考えられ、従ってこのような橋梁に対しては、船舶の衝突に関する防護措置が取られる必要がある。そこで本調査では、船舶の橋梁への衝突に対する防衛工の設計に関して何らかのとりまとめをめざし、4年間に渡り、実績調査、概略設計を行ってきた。本報告はその成果をとりまとめたものである。

目 次

1. 防衛工に関する既存の調査のとりまとめ	1
1.1 橋梁及び橋脚防護工への船舶衝突事故例	1
1.2 防衛工に関する検討例	5
1.3 防衛工の設計例	8
1.4 防衛工の種類と性能の概要	14
2. 防衛工の概略設計	18
2.1 概略設計の概要	18
2.2 直接形式防衛工	20
2.3 間接形式防衛工	37
2.4 バリアー形式防衛工	51
3. 防衛工の形式選定方法に関する考察	62
3.1 性能	62
3.2 経済性	65
3.3 施工および維持管理	74
3.4 設計の信頼性	76
3.5 防衛工の形式選定のためのまとめ	78
4. まとめ	84
参考文献	84

1. 防衝工に関する既存の調査のとりまとめ^{1) - 33)}

1.1 橋梁および橋脚防護工への船舶衝突事故例

船舶が橋梁もしくは、橋脚防護工へ衝突した事故例について調査した。実際には大小様々な衝突事故が発生しているものと考えられるが、ここでは橋梁側に大きなダメージを与えたものについて検討した。調査の対象としたのは以下の9橋である。(図-1.1 参照)

- (1) Severn River Railway Bridge.
- (2) San Mateo-Hayward Bridge.
- (3) Richmond-San Rafael Bridge.
- (4) Sorsund Bridge.
- (5) Outer Bridge.
- (6) Maracaibo Bridge.
- (7) Tasman Bridge.¹⁾
- (8) Tjörn Bridge.¹⁸⁾
- (9) Sunshine Skyway Bridge.

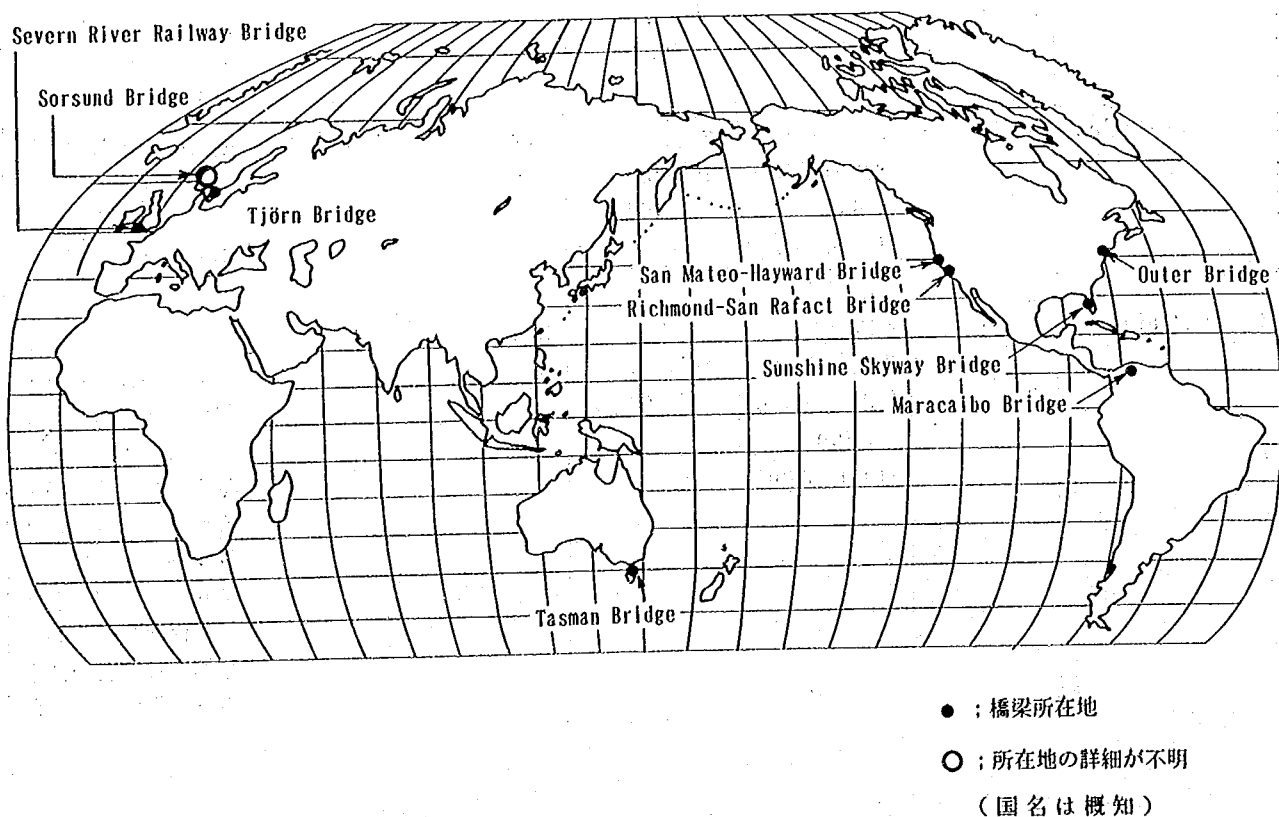


図-1.1 衝突事故発生位置図

1.1.1 船舶衝突事故事例

表-1.1 に船舶衝突の状況を、表-1.2 に事故による損害と事故後の対応を示す。

表-1.1 船舶衝突の状況

橋 名	国 (位置)	橋梁型式 (支間長)	船 種 (総トン数)	衝 突 発生時刻	衝突原因	被害状況
Severn River Railway Bridge	英 (England)	トラス (多径間トラスであるが建設年度から考えて単純桁トラスであると考えられる。) 支間 100m+52m	自航式バージ (2隻) (400~450 t 排水量)	1960-10-25 22:30	気象の悪条件と潮流	流速 3.5ノット程度の河川の流れてに流されて橋脚に激突した。この衝突によって橋脚は完全に破壊され2スパンが落橋した。衝突船は落下してきた被破壊物や積荷の油の爆発により大きな損傷を受けた。
San Mateo Hayward Bridge	米 (カリフォルニア)	可動式トラス	不明	1960-11-17	不明	防護工は完全に破壊したが橋脚に損傷はなく船舶側の被害も僅かなものであった。
Richmond-San Rafael Bridge	米 (カリフォルニア)	不明	軍艦 (米海軍所属) (排水量 1450 t)	1961-8-5 10:25	舵故障による操船不能	木製の防護工は完全に破壊したが橋脚に損傷はなく、船舶側の被害も僅かなものであった。
Sorsund Bridge	ノルウェー	コンクリート 連続桁であると推定される (中央径間スパン長100m)	貨物船 (排水量 11,200 t)	1963-9-27	操船ミス	衝突船の船首は破損し35cm程度のへこみができた。橋梁側は衝突点と基礎部。
Outer Bridge	米 (ニューヨーク)	連続トラス 支間割 (90m+115m +230m+ 115m+90m)	タンカー (排水量 12,200 t)	1963	不明	間接式のケーソン型防護工が設置されており、先ず防護工に衝突した後、橋脚に激突した。この為衝突力はかなり減殺され橋脚は小さなコンクリート片がハク落した程度で船舶側も舷側に数箇所損傷を受けた程度であった。

Maracaibo Bridge	ベネズエラ (マラカイボ湖)	吊床版形式 (張出しを 持ったタワー がゲルバー桁 を両側から支 持する形式)	タンカー (排水量 47,000 t)	1964-4-6 (夜中)	船位不確認 (電気系統 の故障によ り船の位置 の確認作業 が不能とな った。)	衝突された橋脚は指 定された航路以外の 部分であり防衝工は 設置されていなかっ た。そのため2橋脚 が崩壊し、3つの吊床 版が落橋した。船舶 側も吊床板が船首に 落ちたため、相当の 損傷を受けた。
Tasman Bridge	オースト ラリア (タスマニア)	コンクリート 桁 (航路との3 径間は連続 桁) (全長1417m 航路部上スパン 長94m)	貨物船 (排水量 11,200 t)	1975-1-5 21:28	操船ミス	航路をややはずれた 橋脚に衝突、2橋脚が 倒壊し、3スパンが落 橋。他に2橋脚、2ス パンも損傷を受け た。船舶は、落下し てきた桁に船首部を 破壊され沈没した。
Tjörn Bridge	スウェーデン (Tjörn島)	鋼パイプ アーチ (支間長 278m)	貨物船 (排水量 27,000 t)	1980-1-18 午前1時	航路が狭く 航路自体が フィヨルド に沿って 曲っており 操船が難し い上霧がか かっていた。	航路は中央径間280m のうちアーチ橋の為 十分に桁下空間を確 保できる幅50mの部 分だけであった。衝 突により主径間すべ てが落橋、船舶はこ の落下物により一部 損壊した。
Sunshine Skyway Bridge	米 (フロリダ タンパ湾)	3径間連続 トラス(下路) 支間割 (122m+244 m+122m)	貨物船 (排水量 20,000 t)	1980-5-9 7:35	調査中 (風速約40 m/sの突 風を伴う雷 雨の為視界 が不良で あったため と推定され る)	本橋は完成当初から 多くの被害歴があっ た。この事故が発生 する以前の3ヶ月間 に2件の橋脚への衝 突事故があった。今 回の事故で橋脚が1 本完全に破壊され、3 スパンが落橋した。

なお、表中の排水量とは、船舶が浮かぶ時に排除する水の重量を指す。

表-1.2 事故による損害と事故後の対応

橋 名	事故によって被った被害		事故後の対応
	死亡者・負傷者	橋梁が被った経済的損失 (日本での工費に換算)	
Severn River Railway Bridge	不明	不明	不明
Sorsund Bridge	なし	ほとんどなし	不明
Maracaibo Bridge	不明	不明(1㎡当りの工費(上部工)を10万円とし四車線とすれば、216m×10万円×20m=5億円、従って橋脚の工費を入れて、10億円程度と考えられる。)	資料収集中
Tasman Bridge	船舶乗組員・死亡5名 行方不明2名 通行中の乗用車5台墜落12名死亡	不明 (Maracaiboと同様の積算を行うと、129m×10万円×17.4m=2.2億円、従っておよそ5億円程度と考えられる。)	復旧工事は財政上の事情から全く行われていない。現在はフェリーで交通量をさばっている。
Tjörn Bridge	通行中の乗用車7台墜落 10名死亡	5000万クロネと推定される。	クリアランスを確保するため、上路アーチではなく斜張橋に架け替えた。 防衛工の必要はなくなった。
Sanshine Skyway Bridge	通行中の車が墜落し33名死亡	架け替え費用約400億円 橋脚防護システムに約7億円	PC斜張橋に架け替えた。クリアランスは20 feet、航路幅は200feet 増え、衝突の危険性を低減させた。また橋脚は1.2×10 ⁷ ポンドの衝撃に耐えるように設計されている。

1.1.2 考察

以上9件の船舶の衝突事故例を示したが、その結果次のような点が指摘できる。

- (1) 衝突原因については3件が気象・海象条件によるもの、2件が操船ミス、もう2件が故障によるものとなっている。ただし気象条件の悪化と操船ミスは密接不可分の関係であるので気象条件の悪化による操船ミスを考慮すれば、事故原因の半分は操船ミスであるとも考えられる。
- (2) 9件のうち橋梁側に何らかの防護工が設けられていたのは4橋であり、そのうちの3橋まではほとんど被害を受けていない。防衛工がありながら被害を受けたのは、防衛工が設けられていない航路外の橋脚に衝突した場合である。防衛工を設けていない他の5橋では、そのうち4橋までが落橋しており、防護工の効果は大きいと考えられる。
- (3) 9件の事故例のうち指定された航路以外の水域にある橋脚が船舶による衝突を受け被害を被った例が3例ある。水深の関係で大型船の航行するおそれがないケースは除くとしても指定航路と同様の水深を有する橋脚はたとえ指定航路をはずれても衝突の被害を受ける可能性がある。したがって指定航

路以外の水域にある橋脚にも防衝工を設置する必要性は高いといえる。

- (4) 上部構造に、直接衝突した例は上路パイプアーチ橋のTjörn 橋だけであるが下部構造に比べ剛性
がかなり小さい為、船舶の衝突に対してはほとんど抵抗力はないと考えられる。下部構造の場合は、
設計上考慮していなかった予想外の耐力がかなり大きいと予想されるのに比べ上部構造ではそのよう
な余裕はあまりない。従って桁下のクリアランスは十分に確保することが必要である。また、上部構
造自体に緩衝工を設置して船舶の衝突から守るのは不可能であろう。
- (5) 今回検討した事故例のうち、河川で生じた事故はSevern River Railway Bridge の1 例だけであ
る。しかもこの場合比較的海運が発達しており航行船舶も多い。従って今まで日本で大型の衝突事故
がおきていない要因としては大型船舶が航行するような河川が極めて少ないことが考えられる。航路
上に計画される橋梁も本四架橋や名港西大橋のようにたつぷりとスパン長をとっているものが多く、
諸外国のように80～100mというように橋脚間の航路スペースが小さい例は少ない。しかしながら小
型船舶航路部を通過が予想される規模の船舶に対しては全橋脚に何らかの防護工が必要であると考え
る。
- (6) 今回の調査例の中で船首から衝突したのは2 例、舷側から衝突したのは3 例、船首から衝突し、そ
の後回頭して舷側が他の構造物にぶつかったのが3 例となった。被害も船首から、および船首から衝
突した後に舷側に衝突した例がかなり大きい。

1.2 防衝工に関する検討例

我が国において本格的な海洋架橋の例はまだ少なく、船舶の衝突に対する検討を本格的に行ったのは本
四架橋においてである。その後、東京湾横断道路や大阪湾岸道路等のプロジェクトにおいて同様の検討が
なされている。

以下に上記の調査における検討内容について概要をまとめる。

1.2.1 本四公団で行われた防衝工に関する調査

〔1〕 昭和48年 本四航行安全調査報告書⁵⁾

主な検討項目は以下のとおりである。

(1) 工事期間中の海上交通安全法の適用について

(海上保安庁への届け出法、許可申請法、許可の附帯条件等)

(2) 工事中における緩衝工の設置について、緩衝工が有すべき条件を検討、すなわち①船の衝突エ ネルギーの吸収性が優れていること②施設規模が小さく、航路を侵害しないこと③施工性および 保守管理が容易であること。

(3) 緩衝工の形式について分類した。

(変形式緩衝工…弾性変形型、圧壊変形型
変位式緩衝工…ドルフィン型、重力型、抗力利用型)

(4) 沈鐘とチェーンから構成され沈鐘が海底上を動く際の抗力によって衝突速度を減殺するタイプ の間接緩衝工について検討した。

(5) 直接式の緩衝工について衝突力とエネルギーとの算定式を求めた。

(6) 船体の圧壊強度を求めた。

(7) 市販の防舷材の性能のテストを行った。

更に結論として、1000 t 程度の小型船では直接式の防衝工で対処できるが、1000 t 以上では間接式と併用で考えないと無理としている。

〔2〕 昭和48年、海洋基礎への船舶衝突力に関する調査委託（その2）⁷⁾

主な検討項目は以下のとおりである。

(1) 各種緩衝工形式の比較

（木材、ゴム、杭、重力式、油圧式、エア形式、角形セル、円形セル、トラス構造形式、パイプ構造、ビーム構造）

(2) 設計計算試案を提案している。内容はかなり一般的

(3) (2)の試案に基づき、円形セル型、トラス型、ブイ式の各形式について試設計を行った。

〔3〕 海中基礎の緩衝工検討（その2）¹⁴⁾

主な検討項目は以下のとおりである。

(1) 間接式防衝工のバリアー式（又はブイ式）防衝工の設計法について詳細な検討を行った。その結果、バリアー式では船速を減殺する効果は少なく方向転換を促す作用を期待する方がよいと指摘された。

〔4〕 昭和52年 本四連絡橋航行安全調査報告書¹⁵⁾

主な検討内容は以下のとおり

(1) 南備讃瀬戸大橋の緩衝工試設計例について衝突角と重量から船体の変形等について調査した。

〔5〕 昭和54年 緩衝工構造調査報告書²⁰⁾

検討項目は以下のとおり

(1) 多室型（セル型）緩衝工についての圧壊実験を行い変位～荷重曲線を求め、理論値とほぼ等しいことを確認した。

〔6〕 昭和55年 緩衝工構造調査報告書²⁶⁾

検討項目は以下のとおり

(1) 多柱式基礎について問題点を指摘した。

(2) 南備讃瀬戸大橋のセル型＋エア－型の緩衝工について紹介した。

(3) 大島大橋のトラス型緩衝工について紹介した。

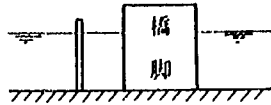
(4) 各種緩衝工施設（図－1.2 参照）について紹介し、その性能について評価した。（表－1.3 参照）

〔7〕 昭和56年 複合材型緩衝工の設計要領（案）²⁵⁾

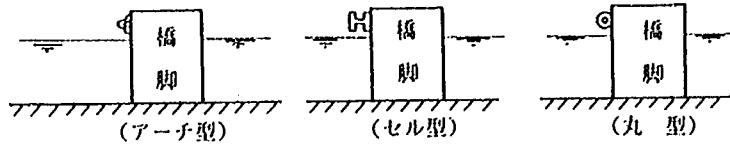
検討項目は以下のとおり

(1) セル型の緩衝工内に弾性体を充てんした複合型緩衝工について充てん部材の特性、防食、構造細目等について詳しく規定した。

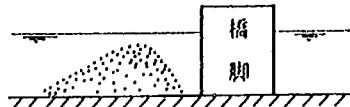
(a) ドルフィン方式



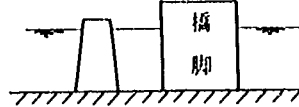
(b) 各種フェンダ方式



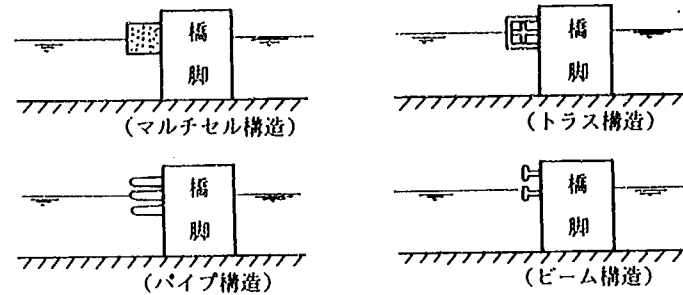
(c) 浅瀬方式



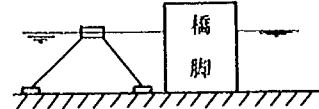
(d) 堤防方式



(e) 緩衝工方式



(f) ブイ方式



(g) 重力方式

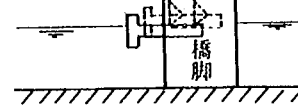


図-1.2 各種緩衝工施設

表-1.3 各種緩衝施設の特徴

要求性能 緩衝施設	衝突エネルギー の吸収性が良い	衝突時の反力 が小さい	施設の占める 水域が小さい	施設の規模が 小さい	取付けが容易 である	保守管理が容 易である
フェンダー方式	×	○	○	○	○	○
緩衝工方式	○	△	△	×	△	×
重力方式	△	×	○	×	×	×
ドルフィン方式	×	○	△	○	○	△
浅瀬方式	○	△	×	△	○	△
堤防方式	○	×	×	×	△	○
ブイ方式	△	×	×	△	△	△
バリアー方式	○	△	×	△	△	△

○；要求性能に適している。△；適さない場合がある。×；あまり適さない。

1.2.2 東京湾横断道路に関して行われた防衝工の検討

(1) 昭和56年 東京湾横断道路の構造検討²⁷⁾

検討項目は以下のとおり

(1) ロープ式、ビーム式、ゴム式の各防衛工型式について検討した。

(2) 建設費を概算したところロープ式が最もよいとの検討結果が得られた。

〔2〕 東京湾横断道路と船舶航行援助施設に関する基礎的調査（その3）²⁸⁾

検討項目は以下のとおり

(1) バリアー式緩衝工について基礎的な検討を行った。但し本四公団においても同様の検討が過去になされている。

〔3〕 東京湾横断道路と船舶航行援助施設に関する基礎的調査（その6）³²⁾

検討項目は以下のとおり

(1) ロープ式について基礎的な実験を行った。

1.2.3 大阪湾岸道路に関して行われた防衛工の検討

〔1〕 長田地区海上構造物安全対策予備検討 昭和51年¹³⁾

検討項目は以下のとおり

(1) 湾岸道路で橋脚周りの水深が浅いため、築堤式、多柱式といった沖合に新たに構造物を構築する形式が考案されている。

(2) 各種の防衛工について概算工費を算定しており、経済的な側面からも検討を実施している。

1.2.4 建設省土木研究所で行われた調査

〔1〕 船舶衝突力シミュレーションプログラム 昭和60年³³⁾

検討項目は以下のとおり

(1) 防衛工設計の際に、船舶から受ける衝突力を正確に求めるためのシミュレーションプログラムを作成した。

(2) 防衛工、船舶のモデルケースを想定し、発生衝突力、衝突エネルギー、発生変位等を求めた。

1.2.5 考察

(1) いずれのプロジェクトにおいても防衛工の設計に関する調査は、船舶航行の実態調査、レーダー対策、航路明示の方法といった諸検討の一部として行われている。これらの調査では防衛工は船舶の安全を保証する為の施設であると位置付けられる傾向が強い。

(2) 各種の防衛工についてエネルギー吸収能力や耐久性等について調査され、実験を行って変形～荷重曲線を求めた例もある。しかし想定しなければならない衝突事故の規模については結論がでていない。設置される防衛工が工事中に接触する小型船を対象としたものであるか、航路を航行する船舶を対象としたものか、または、最大規模の船舶の衝突まで考慮するか、ある程度以上の衝突に対しては止むを得ないと判断するかといった判断は、事例毎に別途の判断が必要とされる。

1.3 防衛工の設計例³⁰⁾

防衛工を設計する場合には、航路の条件や通行が予想される船舶の規模等によって想定する衝突力が大きく異ってくる。従って実際の防衛工の規模や性能も橋梁によって様々であると考えられる。以下に実際の防衛工の設計例について示す。

- (1) 本州四国連絡橋・南備讃瀬戸大橋
- (2) 天草五橋
- (3) Tasman Bridge
- (4) Brevik Bridge
- (5) Sunshine Skyway Bridge
- (6) Taranto Bridge

1.3.1 本州四国連絡橋・南備讃瀬戸大橋

5P橋脚部分にゴム製空気式フェンダーと複合材型の防衝工が試験的に取り付けられた。吸収エネルギーは複合材型で約30t・mである。(図-1.3参照)

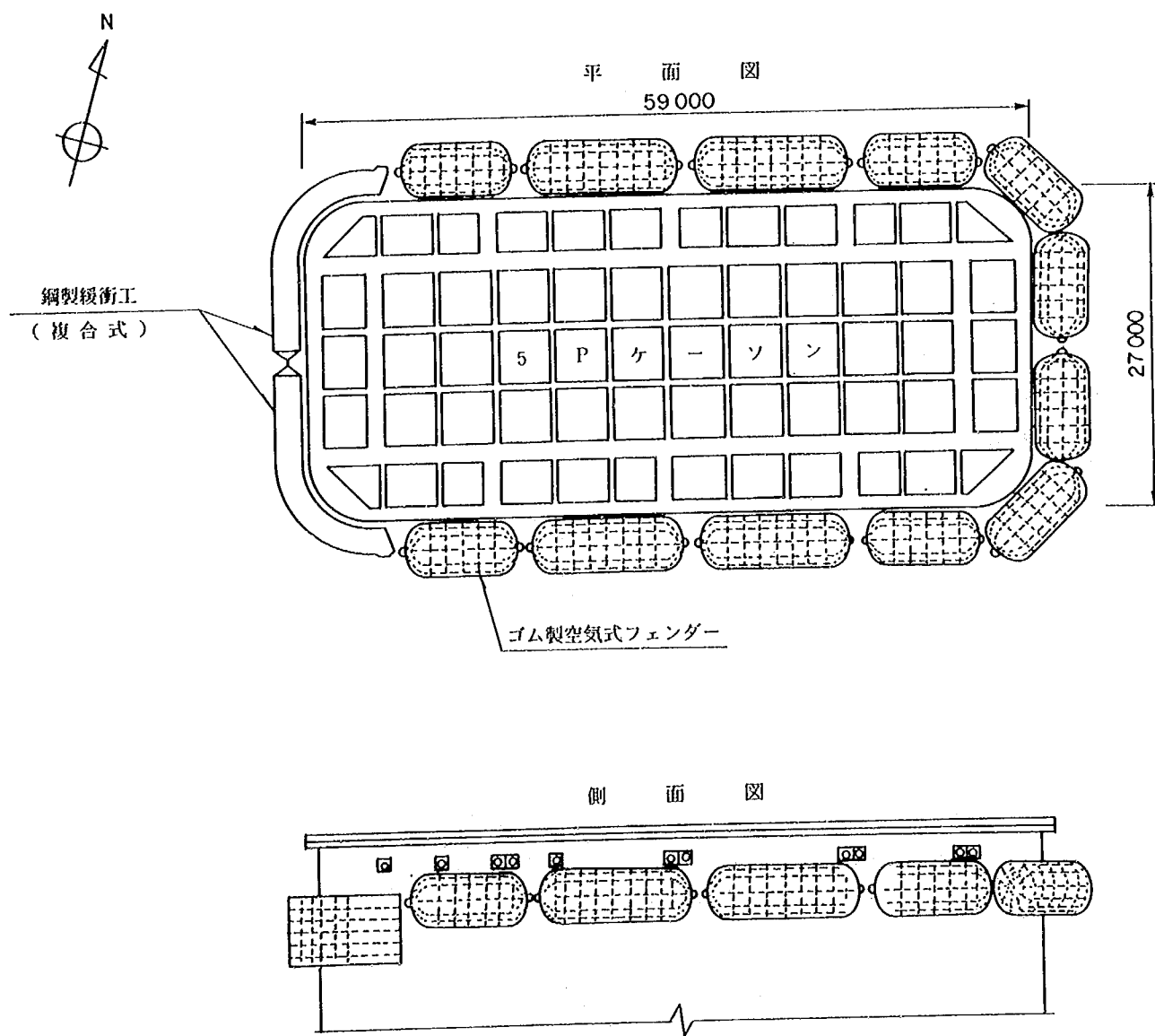


図-1.3 南備讃瀬戸大橋の防衝工

1.3.2 天草2号橋（大矢野橋）

簡単なトラス形式の防衝工が取り付けられている。吸収エネルギーはそれほど大きくないと推定され、専ら小型船対策と考えられる。（図-1.4 参照）

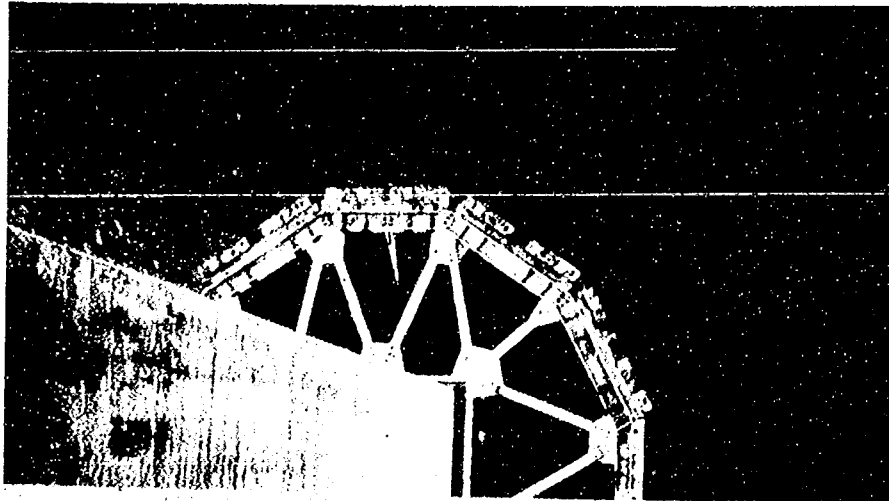


図-1.4 天草2号橋の防衝工

なお、類似なものとしては以下がある。

- ・ 鹿島大橋（広島県）
- ・ Second Narrows Railway Bridge
- ・ 名港西大橋

1. 3. 3 Tasman Bridge

合計 3 種類の防衛工が提案されている。それぞれコンクリート杭をフェンダーで連結したもの（図- 1. 5）、鋼製杭をビームで連結したもの（図- 1. 6）コンクリートアンカーと浮きブイをナイロンロープで結んだもの（図- 1. 7）

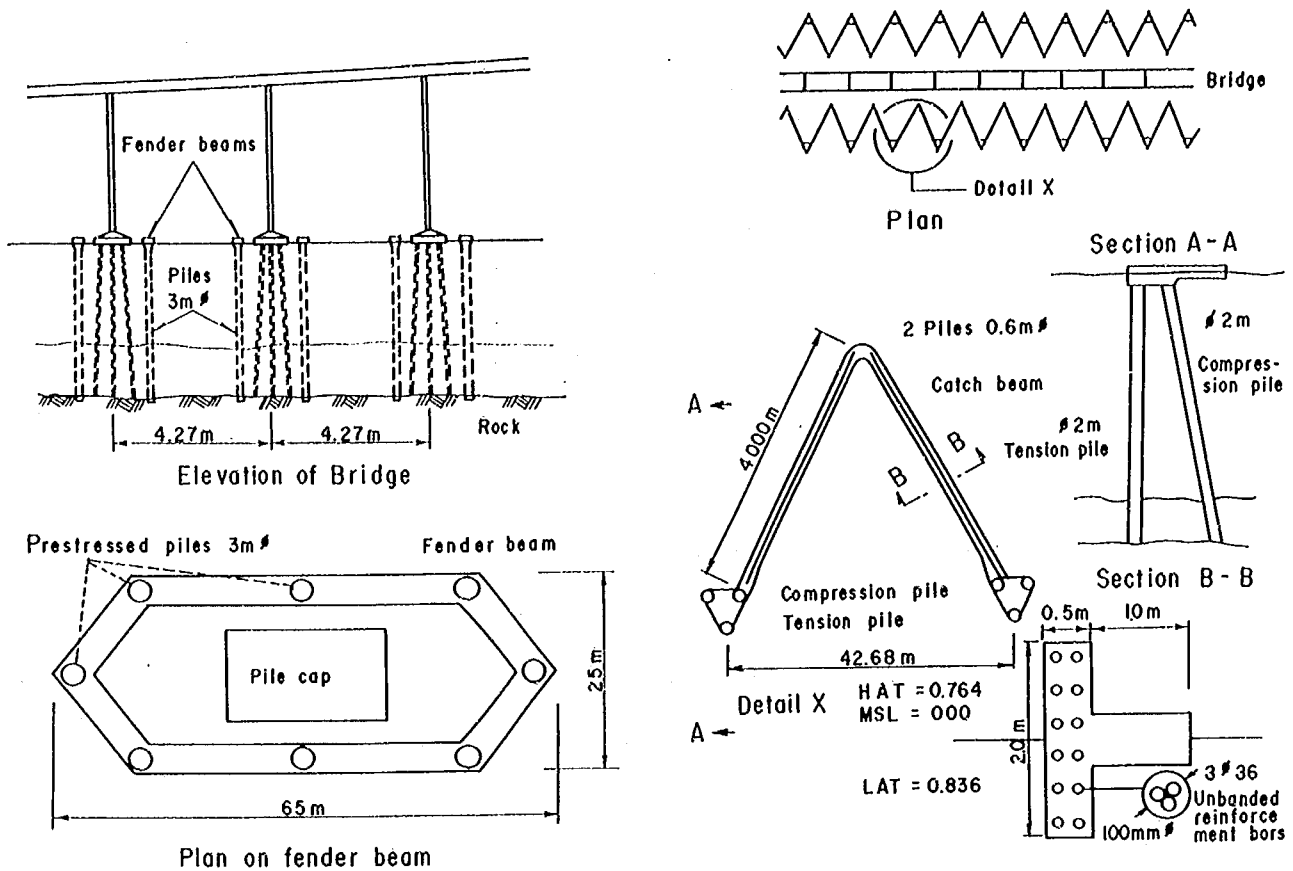


図- 1. 5 Tasman Bridgeの防衛工(案 1)

図- 1. 6 Tasman Bridgeの防衛工(案 2)

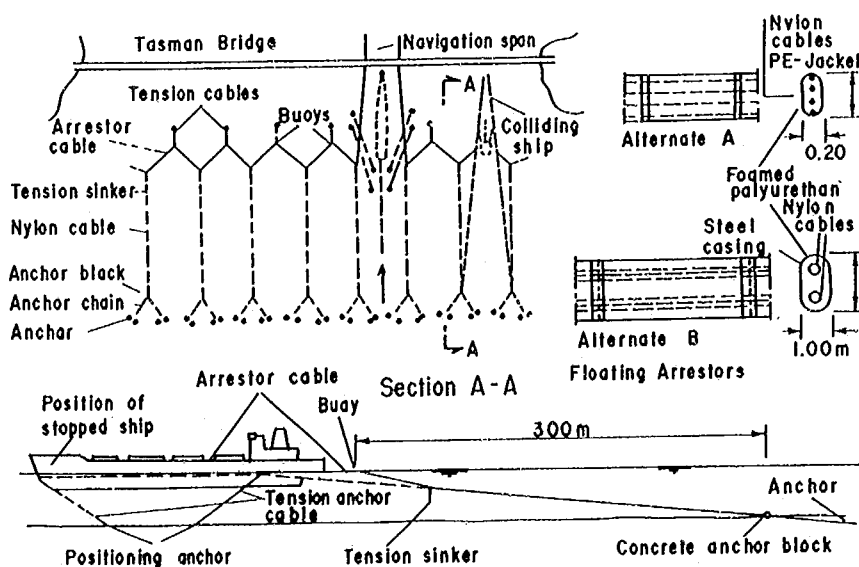


図- 1. 7 Tasman Bridgeの防衛工 (案 3)

1.3.4 Brevik Bridge

橋脚の位置が船舶の衝突する危険性の高い場所にあり数万トンの船舶が航行することから、最も効果の高い人工島式を採用している。(図-1.8 参照)

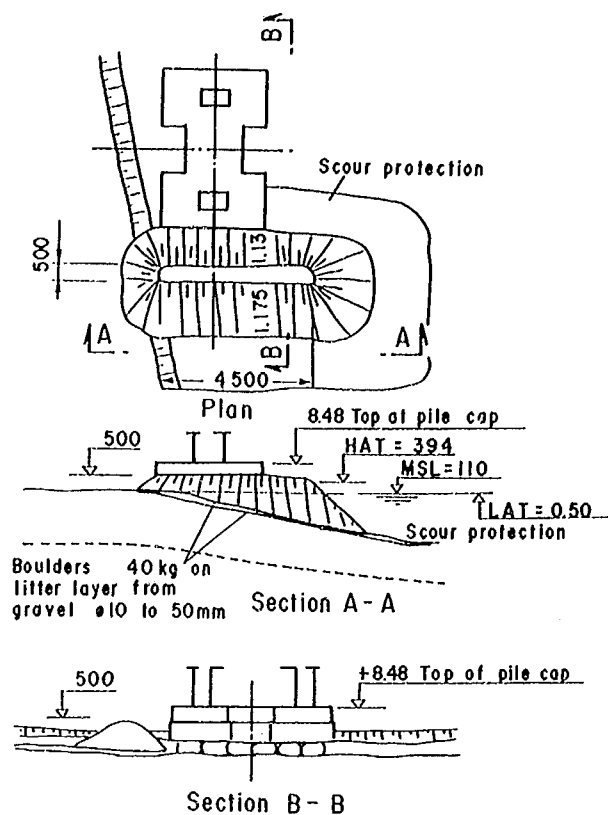


図-1.8 Brevik Bridge の防衛工

なお、類似なものとしては以下がある。

- Great Belt Bridge
- Sun Shine Skyway Bridge (人工島案)
- Orwell Bridge

1.3.5 Sun Shine Skyway Bridge (ケーソン方式案) (図-1.9 参照)

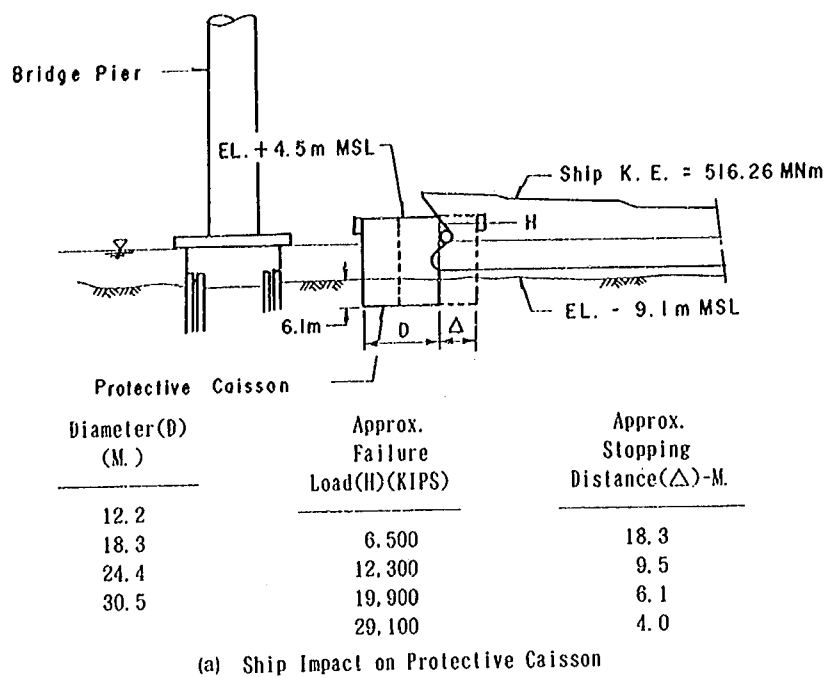


図-1.9 Sun Shine Skyway Bridge の防衛工 (ケーソン方式案)

なお、類似なものとしては、Bahrain Causeway Bridgeの防衛工がある。

1.3.6 Taranto Bridge

海底にアンカーされた浮体とアンカーそれに浮体との間に鋼製のシリンダーとピストンからなるダンパーとから構成された防護システムである。

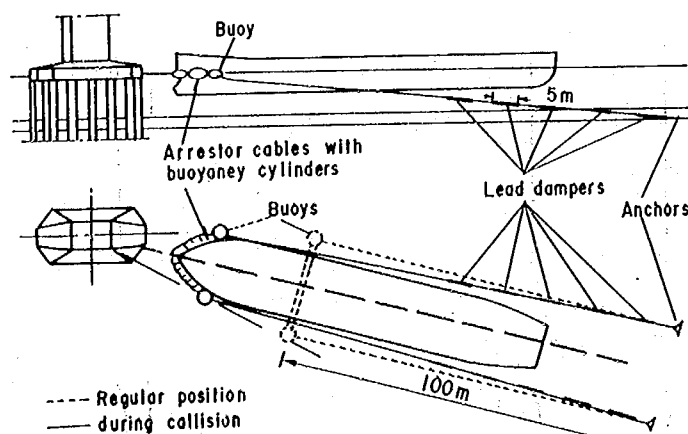


図-1.10 Taranto Bridge の防衛工

1.4 防衛工の形式

1.4.1 現在提案されている防衛工形式

様々な形式の防衛工が提案されているが、大きく分けて橋脚に直接設けられる直接式と橋脚とは独立して設置している間接式に大別される。代表的なものを以下に示す。(図-1.11, 図-1.12参照)

直接式

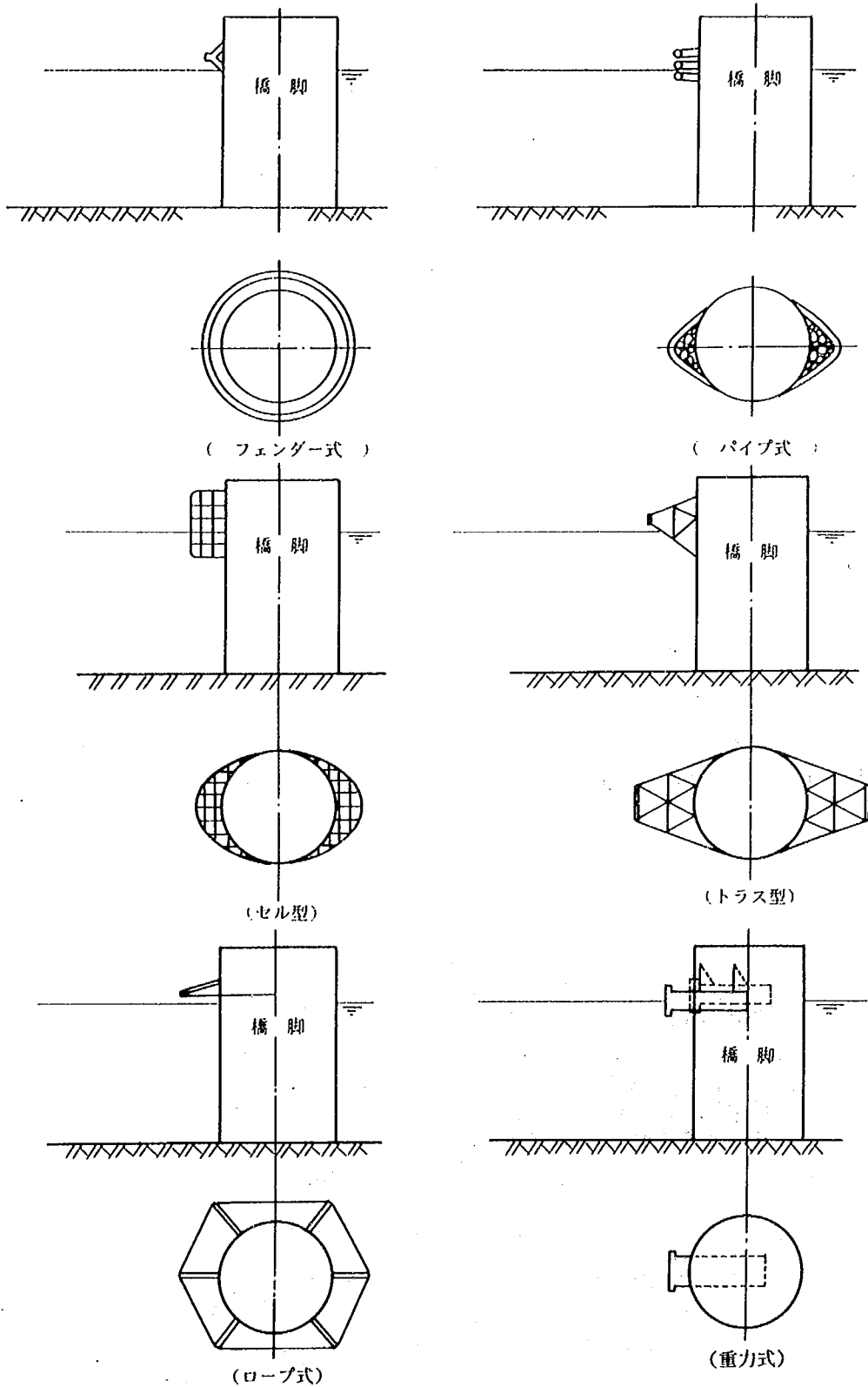


図-1.11(1) 直接形式防衛工

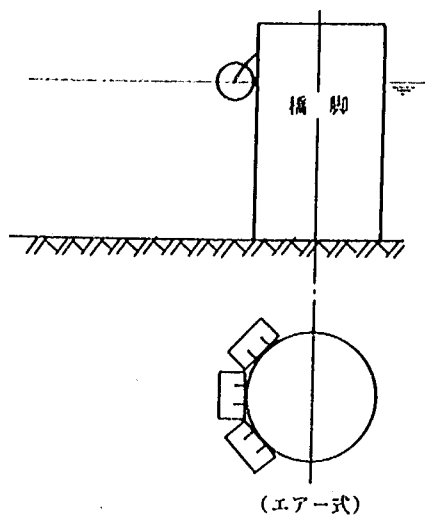


図-1.11(2) 直接形式防衛工

間 接 式

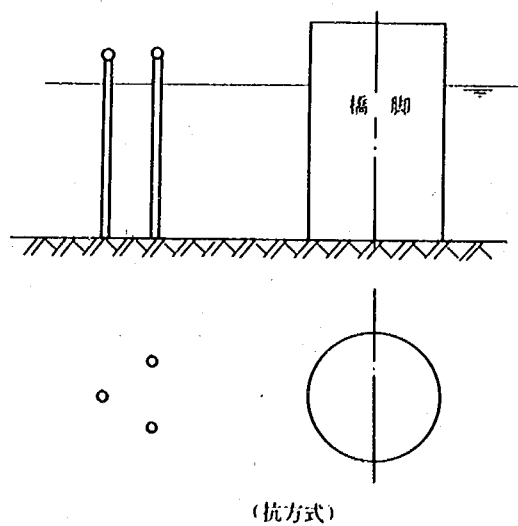
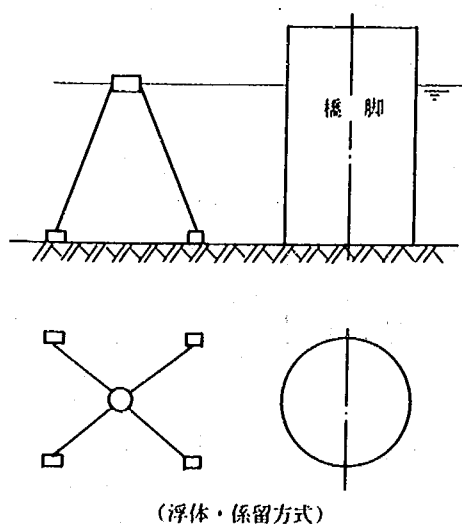
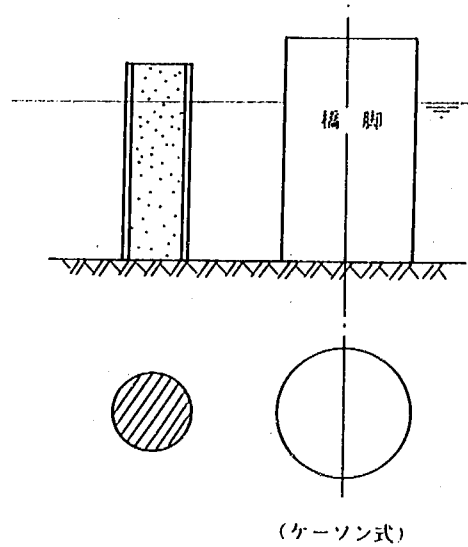
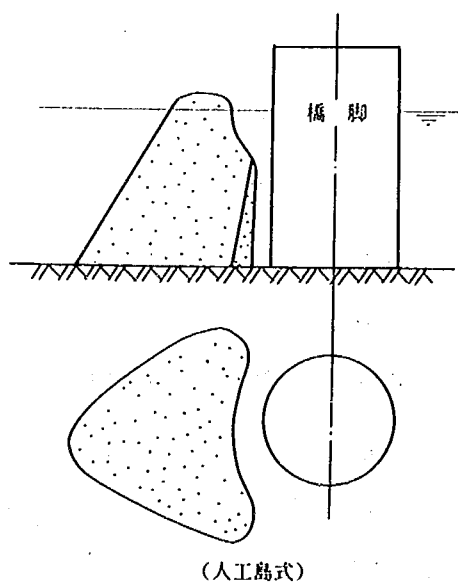


図-1.12 間接形式防衛工

1.4.2 防衛工形式選定例と橋梁周囲の条件

これまで設計された防衛工形式選定例について橋梁の周辺事情について、表-1.4に整理した。

表-1.4 防衛工形式と設計条件

橋 梁 名	防 衛 工 形 式		防衛工 規 模 ランク	水 深		航行船舶スケール		危険度 ランク
	間接式 or 直接式	名 称		水深(m)	ランク	トン数	ランク	
南備讃瀬戸大橋	直	セル型+エア型	B	約20m	B	3000 t 以上	A	A
鹿 島 大 橋	直	フェンダー	C	不明	(C)	小 型	C	C
天草 5 橋 2 号橋	直	トラス式	B	不明	(C)	フェリー (1000 t 程度)	B	B~C
Richmond-San -Rafael Bridge	直	トラス式 (木製)	B	18m	B	10万 t クラス まで航行可能	A	A
Second Nanows Railway Bridge	直	トラス式 (木製)	C	不明	(C)	2~3 万 t	A	B
Tasman Bridge	間	杭 式	A	不明	(A)	35000 t	A	A
		浮体・係留式	A	"	(A)	"	A	A
Tromso Bridge	間	杭 式	A	不明	(A)	10000 t 以上	A	A
Zarate-Brazo Largo Bridge	直	ケーソン + フェンダー	A	約30m	A	不 明	(A)	A
Trollhattan Bridge	間	杭	C	不明	(C)	小 型	C	C
Brevik Bridge	間	人工島式	A	不明	(A)	数万 t 級	A	A
Great Belt Bridge	間	人工島式	A	約15m	B	不 明	(A)	A~B
Sunshine Sky- way Bridge	間	人工島式	A	9m	B	不 明	(A)	A
	間	ケーソン式	A	9m	B	不 明	(A)	A
Orwell Bridge	間	人工島式	A	3m	C	不 明	(B)	B
Outer Bridge	間	ケーソン式	B	11m	B	1 万 t 以上	A	A~B
Bahrain Cause- way Bridge	間	ケーソン式	B	6m	C	不 明	B	B
Rio-Niteroi Bridge	間	ケーソン式	B	21m	A	不 明	(A)	A
Taranto Bridge	間	浮体・係留式	B	12m	B	15万 t クラス	A	A~B
名 港 西 大 橋	直	コンクリート ビーム式 +	B	12m	B	1 万 t	A	A~B
	間	間接トラス式	B	12m	B	1 万 t	A	A~B

1.4.3 考察

防衛工型式の選定は、航路を航行する船舶の大きさ、航路と橋脚との位置関係、航路中、橋脚周囲の水深等を総合的に判断して行う必要がある。ただこれらの項目について定量的な判断を下し、防衛工規模を合理的に決定するのは難しく、今回調査の対象となった橋梁においても独自の判断によって防衛工種、規模を決定しているようである。本調査では水深、航行船舶スケールに着目し、衝突によって生じる被害のランク付けを行った。実際に採用もしくは、提案されている防衛工と比較すると危険度の高い（Aランク）については、人工島式、ケーソン式といった間接型の防衛工型式が一般的であり、直接式を採用した場合も、トラス式・セル式といった規模の大きいものが選択されているようである。またBランクでは木製のトラス式、杭式といった型式を、Cランクではフェンダー式、簡単な木製の杭式等が一般的である。

防衛工型式の選定の自由度はかなり大きく、今回の衝突危険度ランクAに属する橋梁においても、直接型と間接型の選定はもちろん、人工島式、浮体係留式、ケーソン式と選択の巾は広い。一般には水深の大きい場合は浮体係留式、直接式、浅い場合はケーソン式もしくは人工島式が適していると考えられる。その他経済的、保守管理の容易さ等を総合的に考える必要があろう。

2. 防衝工の概略設計

2.1 概略設計の概要

2.1.1 概略設計の方針

概略設計においては、直接形式、間接形式および変位形式の防衝工に関して代表的と考えられるものを数種類選び、衝突エネルギーに着目し防衝工の形式選定の資料となることを目指した。設計条件としては、衝突エネルギーの他に、水深および地質も必要に応じて考慮することとした。

2.1.2 船舶の仮定

(1) 船舶諸元

表-2.1の5種類の規模の船舶の衝突を考えた。なお、船舶の形状は「港湾の施設の技術上の基準・同解説、第2章、船舶」に示された値によった。ただし直接形式防衝工では、別の資料を用いたため、表-2.1()内に示されるように、若干異なる値を用いた。

表-2.1 船舶の諸元

規模 (GT)	型幅 (m)	型深 (m)	喫水高 (m)
500	9.1 (10.2)	4.3 (4.0)	1.0
1000	10.5 (11.9)	5.5 (5.0)	1.4
4000	16.3 (16.5)	9.4 (7.8)	2.0
7000	19.5	11.3	2.5
10000	21.4	12.5	2.9

() 内は、直接形式で用いた値

船舶の衝突形態として、本研究では船首衝突を考えた。ここで船舶の船首部先端角度は、本四公団の緩衝工の設計要領(案)で、標準的な船首部先端角度 2θ を $35^\circ \sim 70^\circ$ で与えていることを参考とし、 $2\theta = 60^\circ$ として設計した。

(2) 船舶の圧壊荷重

船舶の沈没するほどの変形が船舶に発生しないように、防衝工がエネルギーを吸収するためには、防衝工の反力が、船舶の圧壊荷重以下である事を設計条件として課する必要がある。この荷重は「東京湾横断道路と船舶航行援助施設に関する基礎的調査(その6)報告書、S.60.2」³²⁾に示されたデータより、船舶の船首圧壊荷重は表-2.2のようになる。なお、7000GTおよび10000GTの船舶については、外挿のため精度に若干の問題があるが、今回の検討は具体的な船舶の諸元ではなく、衝突エネルギーを重視しているため、本調査では十分と考えられた。

船舶を保護するためには、防衝工の座屈荷重 P_{cr} は、

表-2.2 船舶の船首圧壊荷重

	船舶規模	船首圧壊荷重
A	500G. T	300 (t)
B	1000G. T	450
C	4000G. T	1250

これを下回ることが必要である。

$$P_{cr} \leq P \quad (P : \text{船首圧壊荷重})$$

(3) 衝突エネルギー

衝突エネルギーは、次式により求めることができる。

$$E = \frac{1}{2g} \alpha \Delta \cdot v^2 \quad \dots\dots (1)$$

表-2.3 船舶規模と衝突エネルギー

	船舶規模	衝突エネルギー
A	500 G. T	1260 (t·m)
B	1000 G. T	2510
C	4000 G. T	10050

ここに、E : 衝突エネルギー (t·m)

α : 船の付加質量係数 ($\alpha = 1.1$)

Δ : 船舶の排水量 (t)

v : 船舶の衝突速度 ($v = 13.4' = 6.69 \text{ m/s}$ とする)

g : 重力加速度 ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$)

したがって、船舶規模ごとの衝突エネルギーを計算すれば、表-2.3を得る。ここで船舶の重量は、総トン数と同じ値としたが、実際の設計では軽載時と満載時を考慮し、重量トンを用いるのが妥当と考えられる。

(4) 船舶の圧壊による吸収エネルギー

[文献32] に示されたデータより、船首の圧壊限界までに、船舶側で吸収できるエネルギーは図-2.1に示される。

これより、このときに防衛工で受け持つ吸収エネルギーは、表-2.4のようになる。

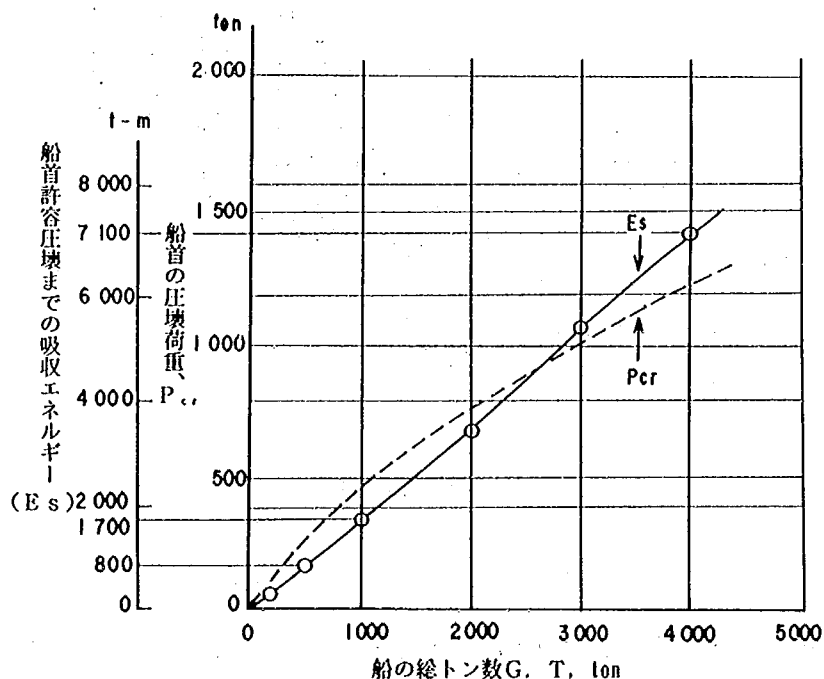


図-2.1 船舶の吸収エネルギー

表-2.4 船舶が吸収するエネルギー

(単位: t・m)

	船舶規模	衝突エネルギー E_0	船舶の圧壊による 吸収エネルギー E_1	防衛工の受持つ 衝撃エネルギー $E_2 = E_0 - E_1$
A	500 G. T	1260	800	460
B	1000 G. T	2510	1700	810
C	4000 G. T	10050	7100	2950

2.2 直接形式防衛工

2.2.1 直接形式防衛工の形式

本研究では、本四公団などで研究の進んでいる多室型防衛工および複合材型防衛工、原理が簡単で実用的と思われるビーム型防衛工を検討の対象とした。以下にそれぞれの概要を示す。

(1) 多室型防衛工

多室型防衛工は、リブ付きの鋼板で多くの室に区分けされた構造形式で、船舶の衝突に対して、リブ付きの水平板の座屈変形で衝突エネルギーを吸収する。図-2.2にその概念図を示す。

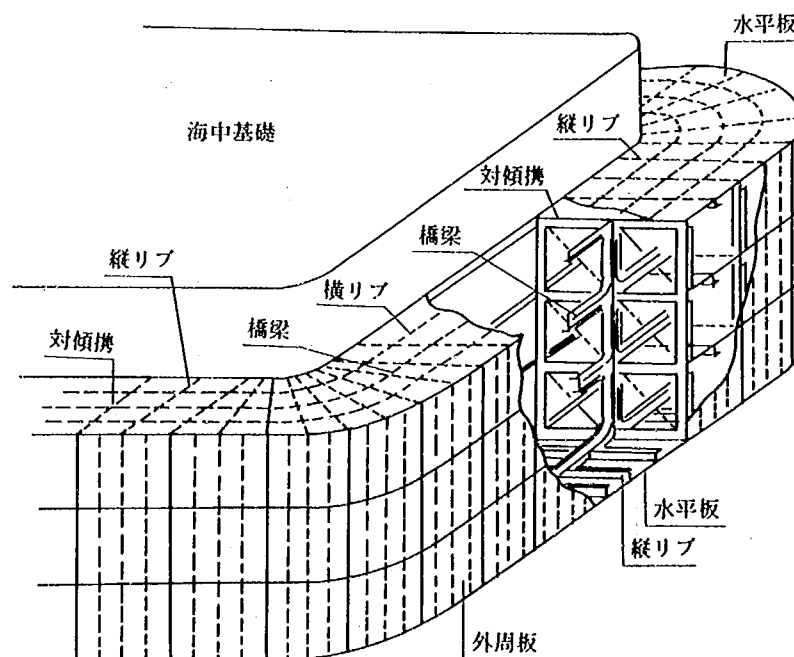


図-2.2 多室型防衛工

(2) 複合材型防衛工

複合材型防衛工は、鋼製の外郭内部に脆性破壊材料（硬質ウレタンフォームや発泡コンクリート等）を充填した構造形式で、船舶の衝突に対して、水平板の座屈変形及び充填材料の圧縮歪みで衝突エネルギーを吸収する。図-2.3にその概念を示す。

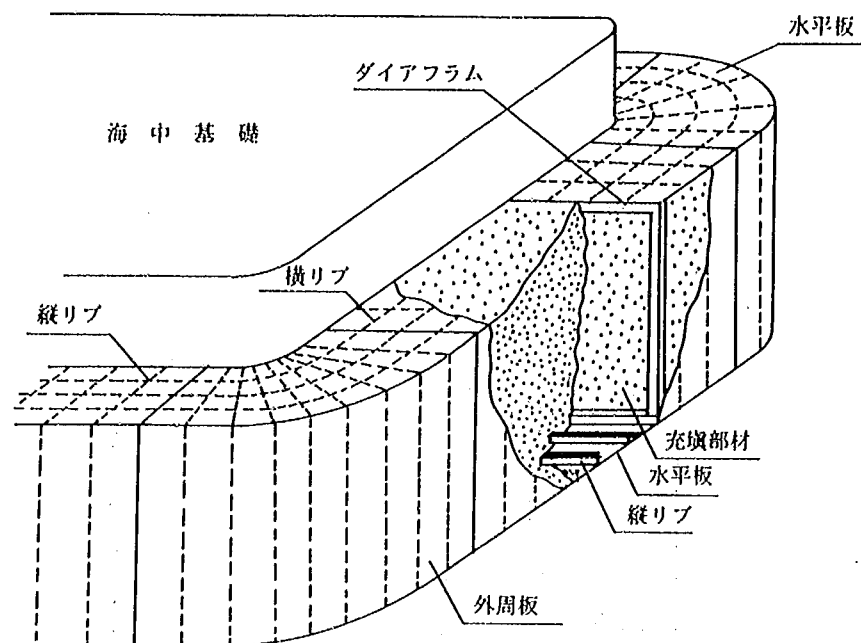


図-2.3 複合材型防衝工

(3) ビーム型防衝工

ビーム型防衝工は、橋脚の周囲に鋼製の水平梁を設置した構造形式で、船舶の衝突に対して、水平梁の曲げ変形で衝突エネルギーを吸収する。図-2.4にその概念図を示す。

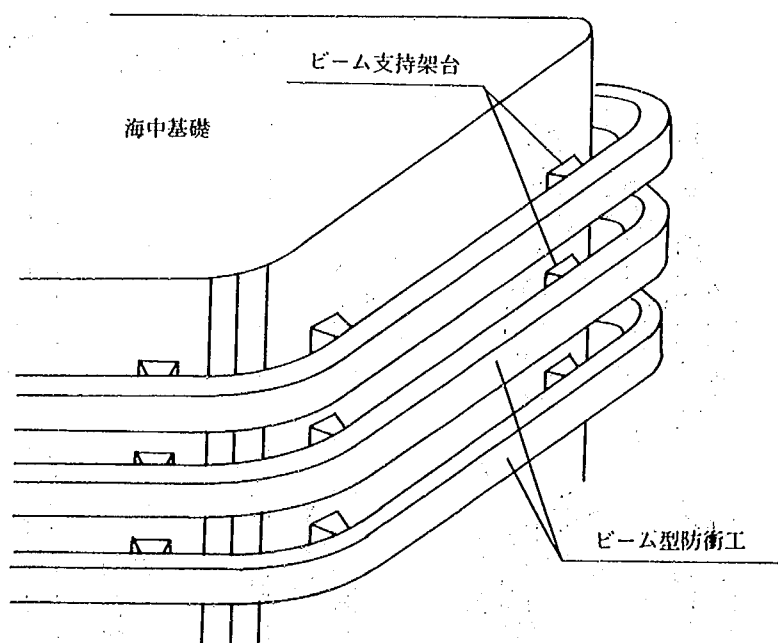
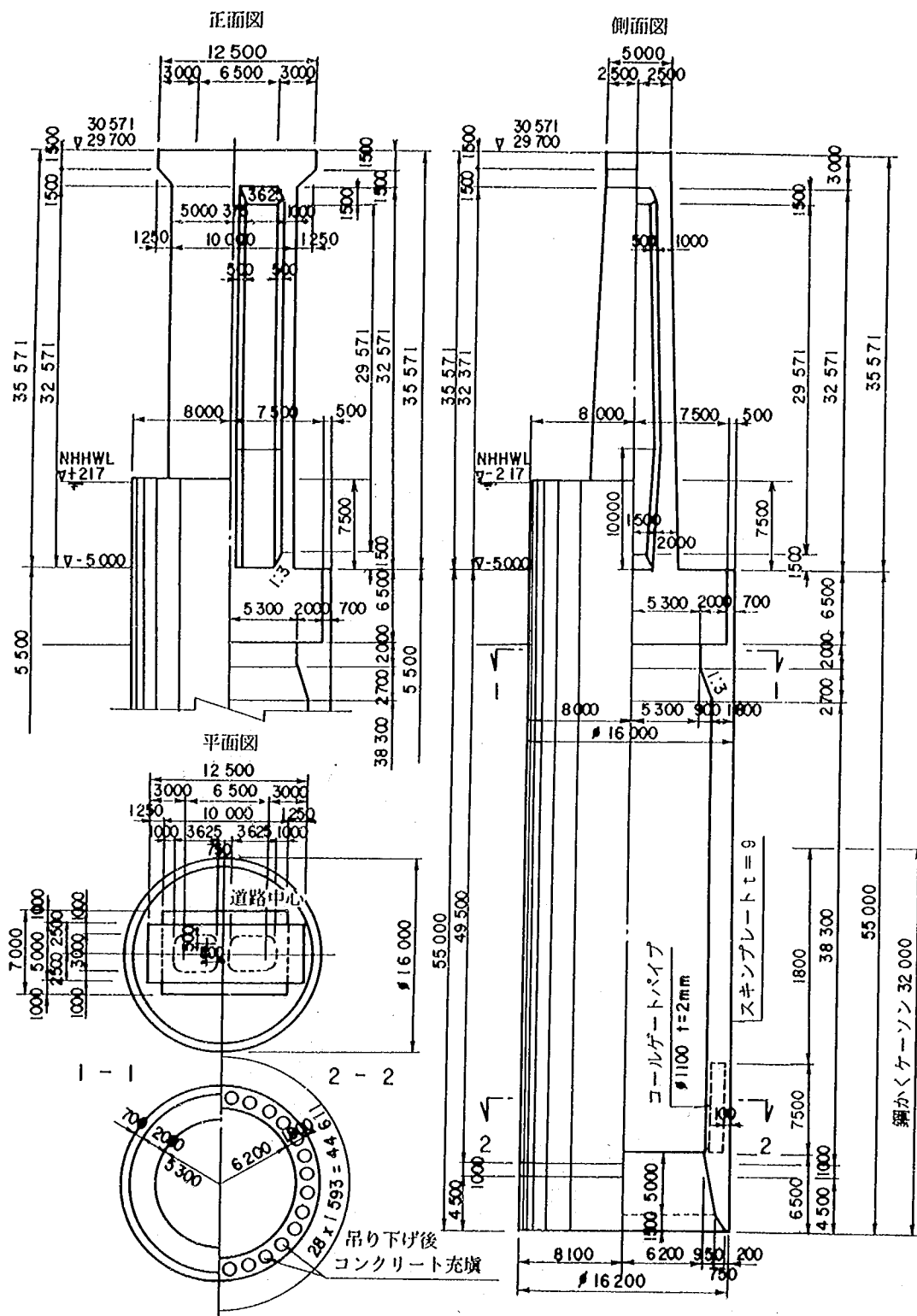


図-2.4 ビーム型防衝工

2.2.2 設計方法の概要

(1) 直接形式防衝工を設置する橋脚

直接形式防衝工は橋脚に取り付けることから、本調査では図-2.5に示す橋脚を想定して設計した。



(単位 : mm)

図-2.5 直接形式防衛工を設置する橋脚

(2) 多室型防衛工

多室型防衛工の設計は「多室型防衛工の設計要領（案）」²¹⁾によって行った。

荷重と変位の関係は、食い込み型の破壊状態を考えれば、式(2)で表される。

$$F = 2P_{cr} \tan \theta \delta \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 F ：水平板の受ける荷重

P_{cr} ：水平板の単位幅当たり座屈強度 ($P_{cr} = P_{cr}/b$)

2θ ：船舶の船首部先端角度 ($2\theta = 60^\circ$)

δ ：水平板の変形量 (船首の突入量)

したがって、吸収エネルギーは式(3)より求められる。

$$E = \frac{1}{2} F \delta, \quad \dots\dots (3)$$

δ は、防衛工の奥行き 0.9 とする

(3) 複合材型防衛工

複合材型防衛工の設計は、「複合材型緩衝工の設計要領（案）S.56.3月，本四公団」²⁰⁾によって行った。複合材型防衛工のエネルギーの吸収は、水平板の座屈変形、外周板の変形および充填材の圧縮変形によるものとした。

外周板の変形を考慮する場合の複合材型防衛工の荷重と変位の関係は式(4)により求められる。

$$F = 2P_{cr} \tan \theta \delta + \frac{8}{3} \sqrt{\sigma_f \cdot T \cdot H} \sqrt{\delta} \quad \dots\dots (4)$$

ここに、 F ：防衛工の受ける荷重

P_{cr} ：水平板の単位幅当たり座屈強度

σ_f ：充填材の圧縮強度

2θ ：船舶の船首部先端角度

T ：外周板に働く張力

H ：船首部の防衛工突入高さ（型深の $2/3$ を考えた）

δ ：防衛工の変形量（船首の突入量）

一方、外周板を無視する場合の複合材型防衛工の荷重と変位の関係は式(5)により求められる。

$$F = 2 \tan \theta (P_{cr} + \sigma_f H) \delta \quad \dots\dots (5)$$

ここで、充填材材料には、硬質ポリウレタンフォームを使用することとし、

$\sigma_f = 15 \text{ kg/cm}^2$ とした。

荷重と変位の関係をグラフで示せば、図-2.6のようになる。

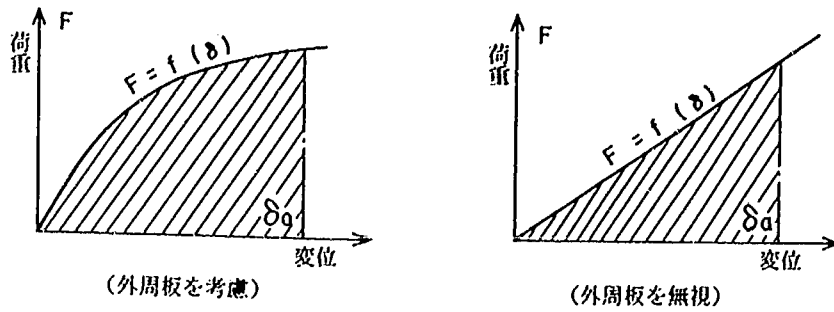


図-2.6 複合材型防衝工の変位-荷重曲線

図-2.6のグラフの斜線部の面積が吸収エネルギーである。

なお、有効変位量 δ_a は、防衝工の奥行き 75% とし、また、外周板の板厚は、耐腐食性、溶接加工性を考慮して 4.5mm 以上とした。

(4) ビーム型防衝工

ビーム型防衝工の荷重と変位の関係は、荷重が降伏荷重に達する以前は、ビームの曲げ変形を考え、荷重が降伏点に達した以後は、材料の塑性を完全塑性と仮定して、 σ_s で塑性変形が自由に増加するものとみなした。ビーム型の荷重と変位の関係をグラフで示せば、図-2.7のようになり、図の斜線部の面積が吸収エネルギーとなる。

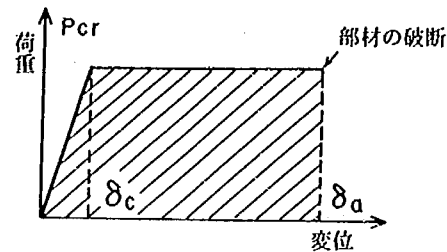


図-2.7 ビーム型防衝工の変位-荷重曲線

部材破断時の変位量 δ_a は、破断直前のビームの変形形状が、支間中央部がヒンジ化して、図-2.8に示すような3角形になるものと仮定し、さらに、支間中央における部材断面のうち、有効な断面は引張り側フランジ断面のみ（他は座屈）と仮定した。

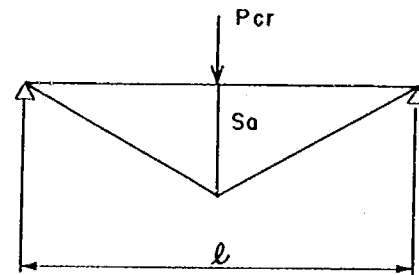


図-2.8 ビームの変形形状

支間中央部の引張りフランジは、鋼材の伸び率 18% （JIS規格のSS41の伸びの規格値 17% 以上）で破断するものとすれば、この時の残りの部材の伸び率は、

$$\epsilon = \frac{AF}{\Sigma A} \times 0.18$$

ここに、 AF ：部材の引張り側フランジの断面積

ΣA ：部材の総断面積

これより、破断直前時の変位 δ_a は、

$$\delta_s = \frac{1}{2} (1 + \varepsilon^2) - 1$$

2.2.3 直接形式防衛工の設計

(1) 多室型防衛工

1) 概略構造寸法

図-2.9のような諸元を定義し、3段階に設定した船舶規模それぞれについて、最適となるように、値を決定した。なお、深さ方向の設置高は、潮位の干満差および船舶の積荷の軽重を考慮して、(型深) $\times 1.5$ とした。

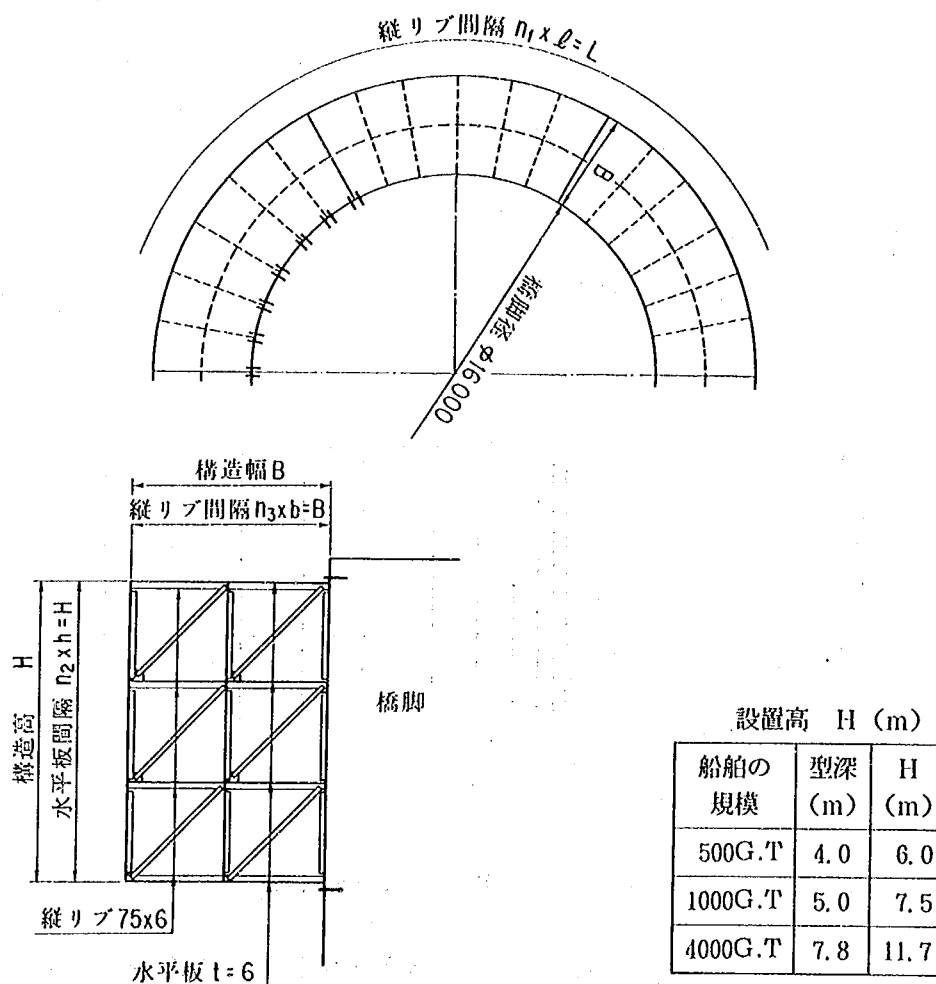


図-2.9 多室型防衛工の諸元

2) 多室型防衛工の形状寸法の決定

① 多室型防衛工の必要奥行き幅 B

多室型防衛工の吸収エネルギー E は、式(6)より、

$$E = \frac{1}{2} F \delta \quad \dots\dots (6)$$

船舶条件より E, F が与えられ, δ が求まり, 防衛工の必要奥行き幅 B は, 式(7), 表-2.5 のようになる。

$$B = \frac{1}{0.9} \delta = 2.2 E / F \quad \dots\dots (7)$$

ここに, E : 防衛工の受け持つ吸収エネルギー

F : 船舶の船首圧壊強度

表-2.5 多室型防衛工の必要奥行き

	船舶規模	E (t・m)	F (t)	B (m)
A	500 G. T	460	300	3.4
B	1000 G. T	810	450	4.0
C	4000 G. T	2950	1250	5.1

② 水平板の段数および間隔

船舶の型深より, 水平板の段数および間隔を図-2.10 および表-2.6 のように決定した。

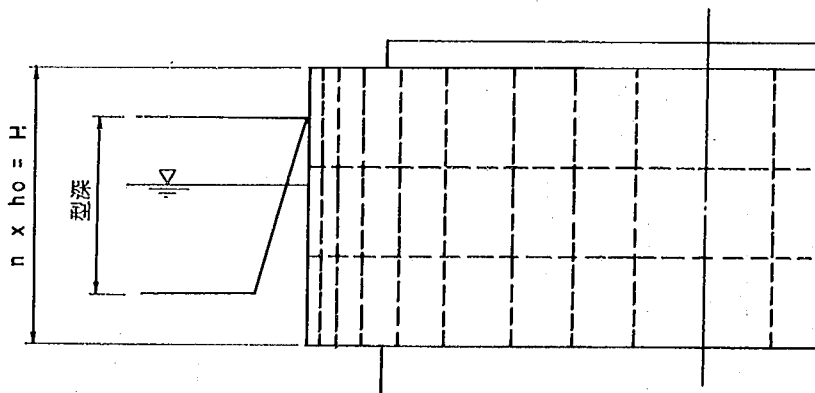


図-2.10 水平板の間隔と段数

表-2.6 水平板の段数

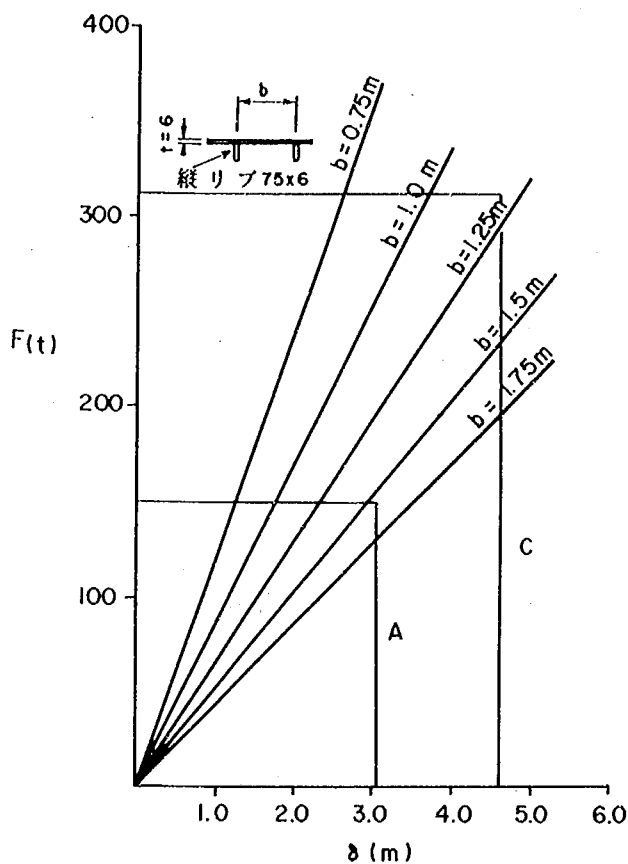
	船舶規模	H (m)	n	h o (m)	型深 (m)	衝突荷重を分担する水平板の枚数
A	500 G. T	6.0	3	2.0	4.0	2
B	1000 G. T	7.5	3	2.5	5.0	2
C	4000 G. T	11.7	6	1.95	7.8	4

③ 横リブ間隔

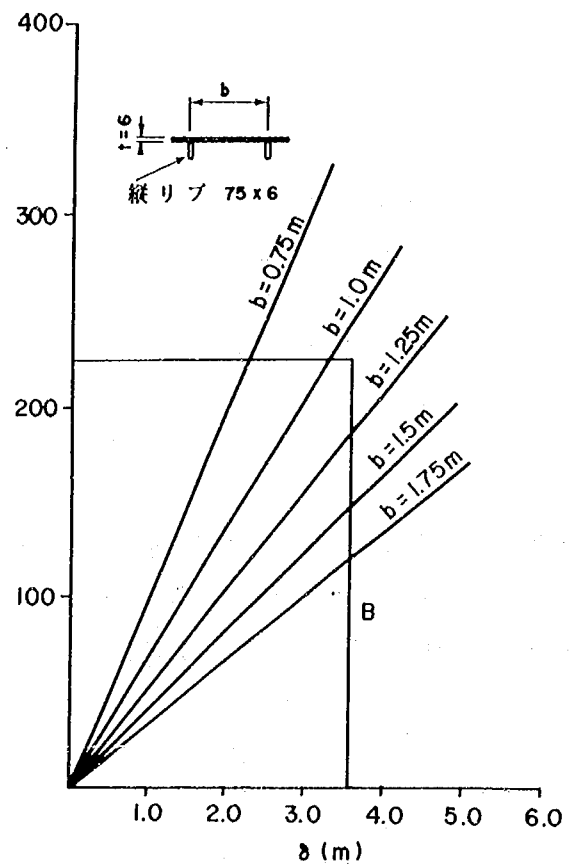
防衛工の必要奥行き幅Bをn等分して、横リブ間隔を表-2.7のように決定した。(図-2.11参照)

表-2.7 横リブ間隔

	船舶規模	B (m)	n	横リブ間隔 (m)
A	500G. T	3.4	2	1.7
B	1000G. T	4.0	2	2.0
C	4000G. T	5.1	3	1.7



(横リブ間隔 $\ell = 1.7\text{m}$)



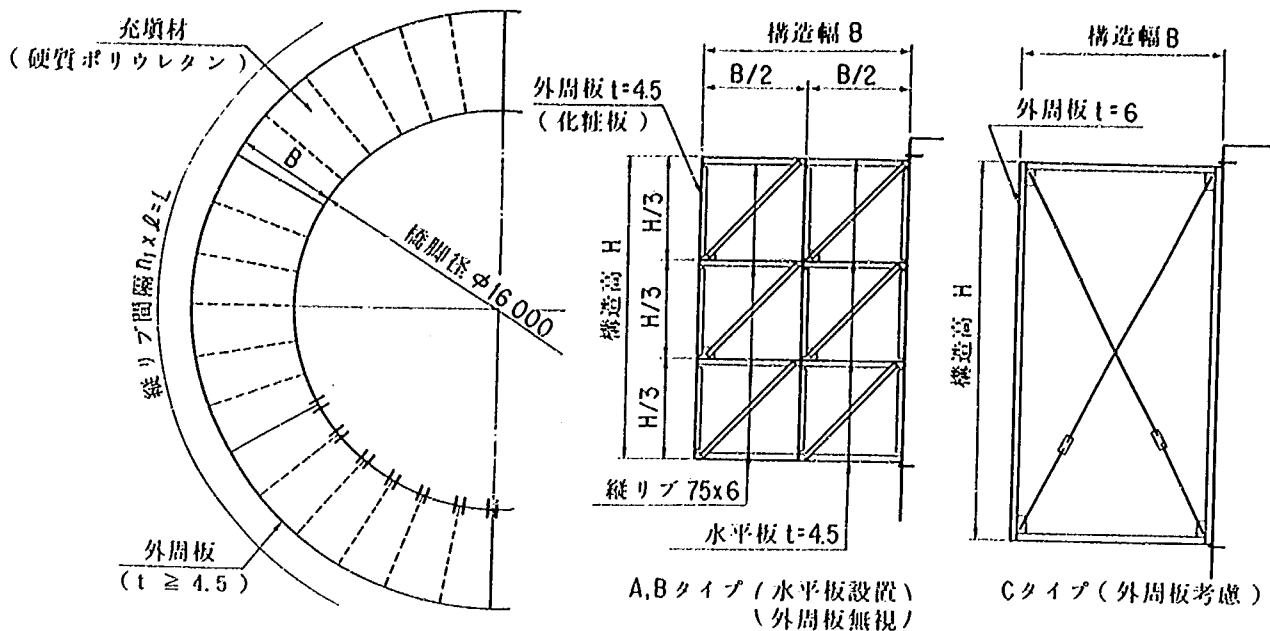
(横リブ間隔 $\ell = 2.0\text{m}$)

図-2.11 多室型防衛工の荷重～変位曲線

(2) 複合材型防衛工

1) 概略構造寸法

図-2.12のような諸元を定義し、3段階に設定した船舶規模それぞれについて、最適となるように、値を決定した。なお、深さ方向の設置高Hは、潮位の干満差および船舶の積荷の軽量を考慮して、(型深) $\times 1.5$ とする。



深さ方向の設置高Hは、潮位の干満差および船舶の積荷の軽量を考慮して、(型深) × 1.5とする。

タイプ	船舶規模	型深(m)	H(m)
A	500 G. T	4.0	6.0
B	1000 G. T	6.0	7.5
C	4000 G. T	7.8	11.7

図-2.12 複合材型防衛工の諸元

2) 外周板の張力を考慮した場合の形状寸法の検討

外周板の張力を考慮した場合の外周板の板厚を求める。水平板は設置しないものとすれば、防衛工の圧壊荷重が、船首圧壊荷重を下回るためには、式(4)より

$$F \geq \frac{8}{3} \sqrt{\sigma_f \cdot T \cdot \delta \cdot H} \quad \dots\dots (8)$$

また、防衛工の吸収エネルギーは、

$$E = \int F(\delta) d\delta = \frac{16}{9} H \sqrt{\sigma_f \cdot \sigma_y \cdot t \delta} \sqrt{\delta} \leq E_0 \quad \dots\dots (9)$$

ここに、 E_0 ：防衛工の受け持つ衝突エネルギー

$\sigma_f = 15 \text{ t/m}^2$, $\sigma_y = 24000 \text{ t/m}^2$, Hとして型深の2/3を有効と考えれば、

$$F \geq \frac{8}{3} H \sqrt{15 \times 24000 \times t \times \delta} = 1600 H \sqrt{t \delta} \quad \dots\dots (10)$$

$$E_0 \leq \frac{16}{9} H \sqrt{15 \times 24000 \times t \delta \sqrt{\delta}} = 1067 H \sqrt{t \sqrt{\delta}} \delta = \frac{2}{3} F \delta \quad \dots\dots (11)$$

上式より、 δ 、 t を求めることができ、表-2.8のようになる。

表-2.8 複合材型防衝工の変形量と外周板板厚

	船舶規模	F(t)	E_0 (tm)	型深 (m)	H(m)	δ (m)	t (mm)
A	500G.T	300	460	4.0	2.67	2.30	2.1
B	1000G.T	450	810	5.0	3.33	2.70	2.6
C	4000G.T	1250	2950	7.8	5.20	3.54	6.4

表-2.8より、A、Bタイプは外周板の必要板厚が薄すぎるため、部材の構成が難しい。したがって、Cタイプのみ外周板を考慮した構造とし、他は外周板を無視した構造とする。

Cタイプの外周板の板厚 $t = 6 \text{ mm}$ とすれば

$$F \geq 1600 H \sqrt{t \sqrt{\delta}} \text{より} \quad \delta \leq 3.76 \text{ m}$$

$$E_0 \leq 1067 H \sqrt{t \sqrt{\delta}} \delta \text{より} \quad \delta \geq 3.61 \text{ m}$$

したがって、 $3.61 \leq \delta \leq 3.76 \text{ m}$ となるように、防衝工の奥行き幅を決定する。

3) 外周板を無視した場合の形状寸法の検討

A、Bタイプについては、外周板を無視した場合の検討を行った。

① 水平板を設置しない場合

水平板を考慮しないものとすれば、防衝工の圧壊荷重が、船首圧壊荷重を下回るためには、

$$F \geq 2 \tan \theta \cdot \sigma_f \cdot H \cdot \delta$$

防衝工の吸収エネルギーは、

$$E = \frac{1}{2} F \delta = \tan \theta \cdot \sigma_f \cdot H \cdot \delta^2 \geq E_0 \quad \dots\dots (12)$$

Aタイプの場合

$$H = \frac{2}{3} \times 4.0 = 2.67 \text{ m}, F = 300 \text{ t}, E_0 = 460 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$300 \geq 2 \times 0.577 \times 15 \times 2.67 \times \delta \rightarrow \delta \leq 6.49 \text{ m}$$

$$460 \geq 0.577 \times 15 \times 2.67 \times \delta^2 \rightarrow \delta \geq 4.46 \text{ m}$$

Bタイプの場合

$$H = \frac{2}{3} \times 5.0 = 3.33 \text{ m}, F = 450 \text{ t}, E_0 = 810 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$450 \geq 2 \times 0.577 \times 15 \times 3.33 \times \delta \rightarrow \delta \leq 7.81 \text{ m}$$

$$810 \geq 0.577 \times 15 \times 3.33 \times \delta^2 \rightarrow \delta \geq 5.30 \text{ m}$$

外周板を無視し、水平板を考慮しない構造とすると、AタイプでB=6.0m、BタイプでB=7.0m程度の奥行き幅が必要となる。

② 水平板を設置する場合

水平板を設置した場合に、防衛工の圧壊荷重が船首圧壊荷重を下回るには、

$$F \geq 2 \tan \theta (P_{cr} + \sigma_f \cdot H) \delta \quad \dots\dots (13)$$

防衛工の吸収エネルギーは、

$$E = \frac{1}{2} F \delta = \tan \theta (P_{cr} + \sigma_f \cdot H) \delta^2 \geq E_0 \quad \dots\dots (14)$$

$\theta = 30^\circ$ $\sigma_f = 15 \text{ t/m}^2$ とし、 P_{cr} と δ の関係をグラフで示せば、図-2.13のようになった。

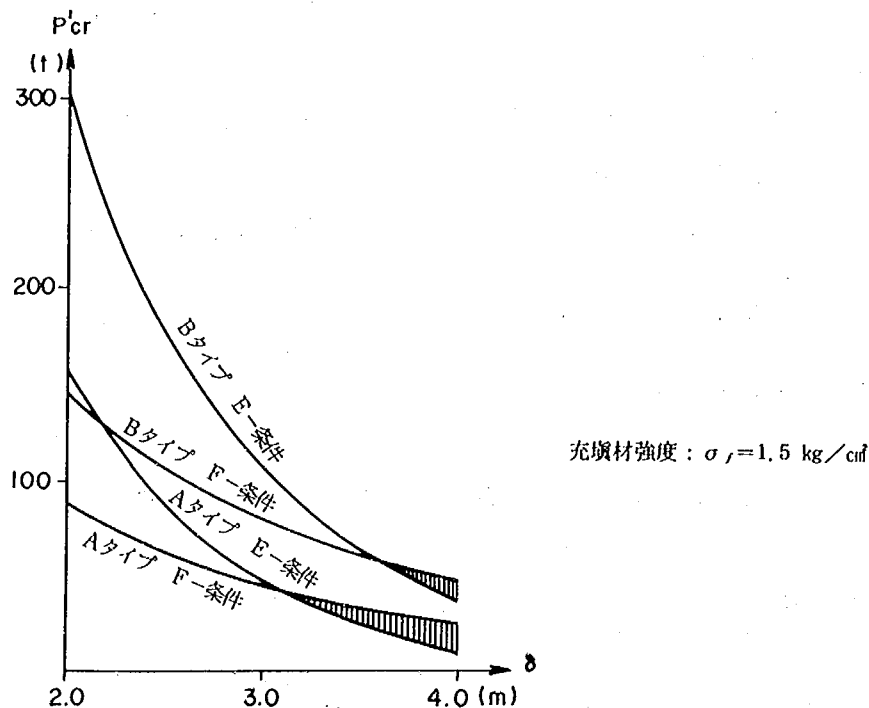


図-2.13 複合材型防衛工の水平板座屈荷重 P_{cr} と変位 δ の関係

ここで、水平板の板厚 $t = 4.5 \text{ mm}$ とすると、

イ. 縦リブの間隔

周辺単純支持板としての水平板の座屈応力度は、

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu)^2} \left(\frac{t}{b}\right)^2 K = 14.1 \times 10^7 \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

となり、縦リブ間隔 b と σ_{cr} との関係は表-2.9に示すようになる。

表-2.9 縦リブ間隔と座屈応力度

縦リブ間隔 b (m)	1.0	1.5	2.0	2.5
座屈応力度 σ_{cr} (t/m ²)	2855	1269	714	457

ロ. 縦リブの単純支持柱としての座屈応力度

水平板の有効幅 $b_e = 40t = 40 \times 0.0045 = 0.18\text{m}$

縦リブ断面 75×6

$$A_L = 0.00045\text{m}^2$$

$$I_L = 2.11 \times 10^{-7}\text{m}^4$$

図-2.14に示す柱としての断面諸元

$$A_e = b_e t + A_L = 0.00126\text{m}^2$$

$$I_e = I_L + \frac{b_e t A_L h^2}{b_e t + A_L} = 6.18 \times 10^{-7}\text{m}^4$$

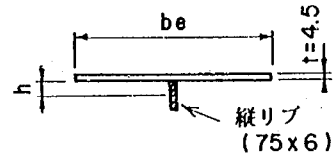


図-2.14 縦リブの有効幅

縦リブの単純支持柱としての座屈応力度は、

$$\sigma_{cr} L = \frac{\pi^2 E I_e}{\ell^2 A_e} = \frac{20.7 \times 10^7 \times I_e}{\ell^2 A_e}$$

横リブ間隔として、 $\ell = 2.1\text{m}$, 2.5m を考える。

$$\ell = 2.1\text{m} \text{ のとき, } \sigma_{cr} L = 23020\text{ t/m}^2$$

$$\ell = 2.5\text{m} \text{ のとき, } \sigma_{cr} L = 16240\text{ t/m}^2$$

補鋼材付水平板としての座屈荷重は、

$$P_{cr} = \sigma_{cr} (b_e + A_L) + (\sigma_{cr} L - \sigma_{cr}) A_e$$

であり、衝突荷重を分担する水平板の枚数を2枚とすれば、単位幅当たりの座屈荷重 P_{cr} は、式(15)より表-2.10となる。

$$P'_{cr} = \frac{2}{b} \times P_{cr} \quad \dots\dots (15)$$

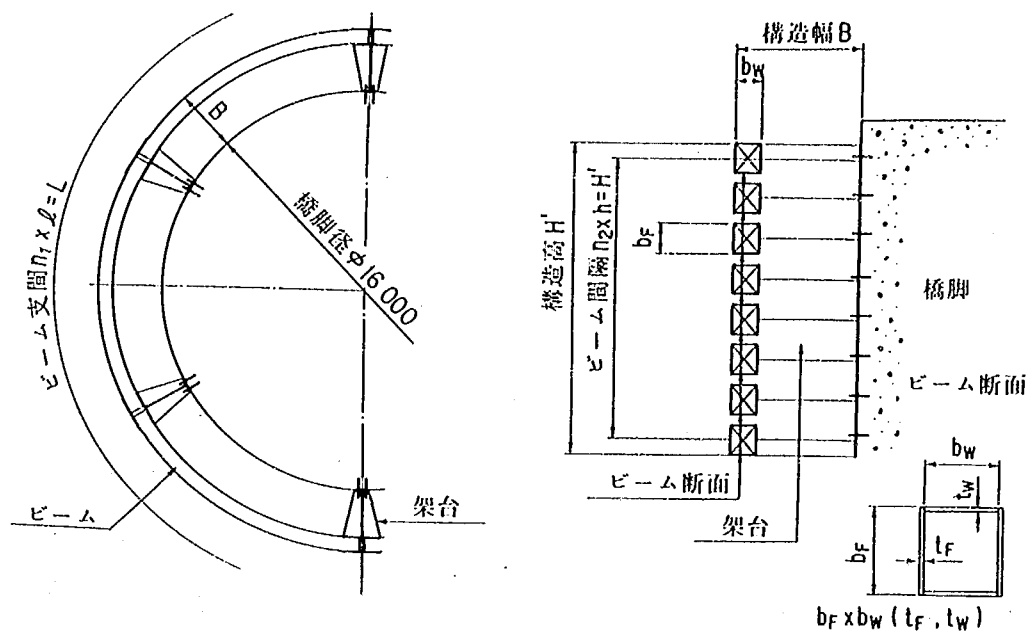
表-2.10 縦リブ間隔と単位長さあたりの座屈荷重

		b=1.0	b=1.5	b=2.0	b=2.5
Per (t/m)	$\ell=2.1$	79.0	48.7	34.8	27.0
	$\ell=2.5$	62.0	37.3	26.3	20.2

(3) ビーム型防衝工

1) 概略構造寸法

図-2.15のような諸元を定義し、3段階に設定した船舶規模それぞれについて、最適となるように、値を決定した。



船舶規模	型深(m)	設置高H(m)
500G. T	4.0	6.0
1000G. T	5.0	7.5
4000G. T	7.8	11.7

図-2.15 ビーム型防衝工の諸元

2) ビーム型防衝工の形状寸法の決定

① ビーム型防衝工の必要変形量

ビーム型防衝工の荷重～変位曲線において、弾性域の吸収エネルギーは微細なので無視すれば、ビーム型の吸収エネルギーは、次式で与えられる。

$$E = F \delta_s$$

船舶条件より、防衝工の受け持つ吸収エネルギーE、船舶の船首許容圧壊強度の90%程度Fが与えられているため、 δ_s は表-2.11のように求まる。

表-2.11 ビーム型防衛工の必要変形量

	船舶規模	E (t m)	F (t)	δ_s (m)
A	500G.T	460	270	1.70
B	1000G.T	810	410	2.00
C	4000G.T	2950	1130	2.60

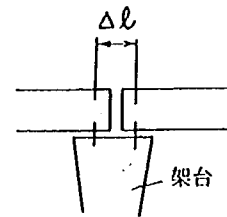
② ビームの支間長の決定

橋脚を6等分した場合と、4等分した場合について考える。梁高をhとすれば、橋脚と梁中心との離れHは、

$$H = \delta_s + \frac{h}{2} + \alpha \quad (\alpha : \text{余裕しろ } \alpha = 0.10 \text{ m})$$

ビームの支間長 ℓ は

$$\ell = \frac{\pi (D + 2H)}{n} - \Delta \ell$$



ここに、D : 橋脚径 (D=16.0m)

n : 分割数

$\Delta \ell$: 図-2.16に示す寸法 ($\Delta \ell \approx 0.6\text{m}$)

図-2.16 $\Delta \ell$

梁高をh=0.5m, 0.8m, 1.0mとしたときの支間長は、表-2.12のようになる。

表-2.12 ビーム支間長

	船舶規模	分割数	梁高h(m)	H(m)	ℓ (m)
A	500G.T	6	0.5	2.05	9.9
			0.8	2.20	10.1
B-1	1000G.T	6	0.5	2.35	10.2
			0.8	2.50	10.4
B-2		4	0.8	2.50	15.9
			1.0	2.60	16.1
C	4000G.T	4	0.8	3.10	16.8
			1.0	3.20	17.0

③ 引張りフランジの断面積

$$\delta_s = \frac{1}{2} \sqrt{(1 + \varepsilon)^2 - 1}$$

$$\varepsilon = \frac{AF}{\Sigma A} \times 0.18$$

上式より、 δ_s および ℓ が与えられれば、梁断面の引張りフランジと全断面との比 $AF/\Sigma A$ が定まる。

梁断面として、図-2.17のような箱断面を考えると、以下の式より引張りフランジの断面積 $b t_f$ が求められる。

$$\frac{AF}{\Sigma A} = \frac{b t_f}{2b t_f + 2h t_w}$$

$$\therefore b t_f = \frac{AF/\Sigma A}{1-2(AF/\Sigma A)} 2h t_w$$

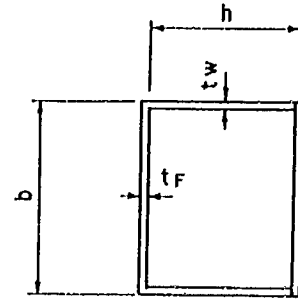


図-2.17 梁断面

④ 梁の断面形状の決定

a, 梁の断面諸元

$$I = 2b t_f \times \left(\frac{h}{2} \right)^2 + \frac{1}{b} t_w h^3 = \left(\frac{1}{2} b t_f + \frac{1}{b} t_w h \right) h^2$$

$$Z = I / (h/2) = \left(b t_f + \frac{1}{3} t_w h \right) h$$

b, 梁の降伏荷重

$$P_{cr} = \frac{4}{\ell} \sigma_y Z$$

梁部材の材質 S S 41 材とすれば、 $\sigma_y = 24000 \text{ t/m}^2$ であり、 P_{cr} は表-2.13 のようになる。これより、 P_{cr} が船首圧壊荷重の 90% となるように、図-2.18 を用いて梁断面を決定する。

表-2.13 梁の降伏荷重

	δ_s (m)	h (m)	ℓ (m)	ε	$AF/\Sigma A$	$b t_f$	P_{cr}
A	1.70	0.5	9.9	0.0573	0.318	$0.874 t_w$	$270 = 5045 t_w n$
		0.8	10.1	0.0551	0.306	$1.262 t_w$	$270 = 11622 t_w n$
B-1	2.00	0.5	10.2	0.0741	0.412	$2.341 t_w$	$410 = 11800 t_w n$
		0.8	10.4	0.0714	0.397	$3.083 t_w$	$410 = 24498 t_w n$
B-2	2.00	0.8	15.9	0.0312	0.173	$0.423 t_w$	$410 = 3330 t_w n$
		1.0	16.1	0.0304	0.169	$0.511 t_w$	$410 = 5033 t_w n$
C	2.60	0.8	16.8	0.0468	0.260	$0.867 t_w$	$1130 = 5181 t_w n$
		1.0	17.0	0.0457	0.254	$1.033 t_w$	$1130 = 7714 t_w n$

n は、衝突荷重を分担する梁の本数を示す。

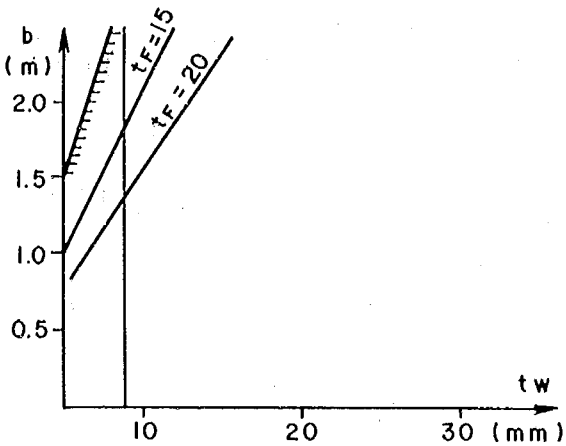
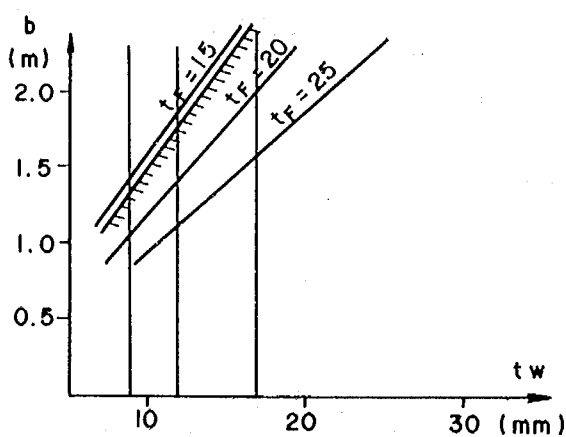
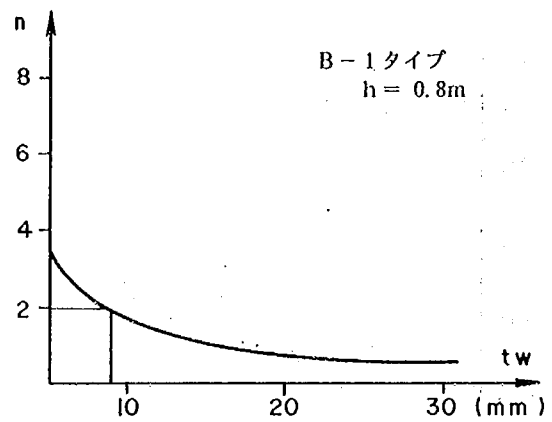
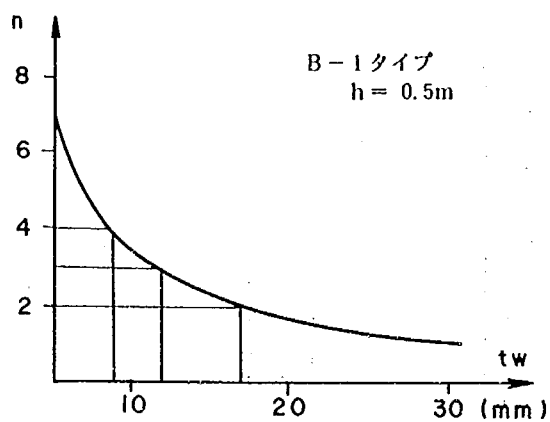
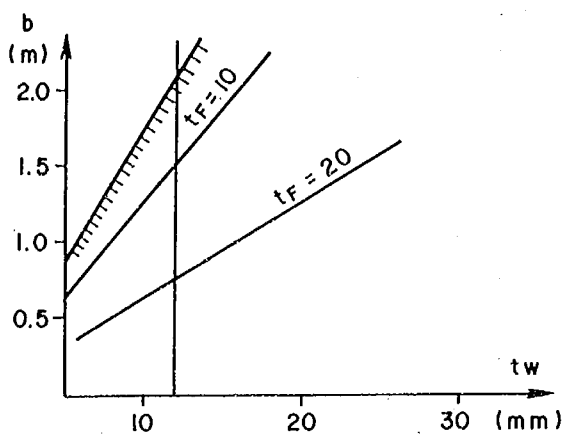
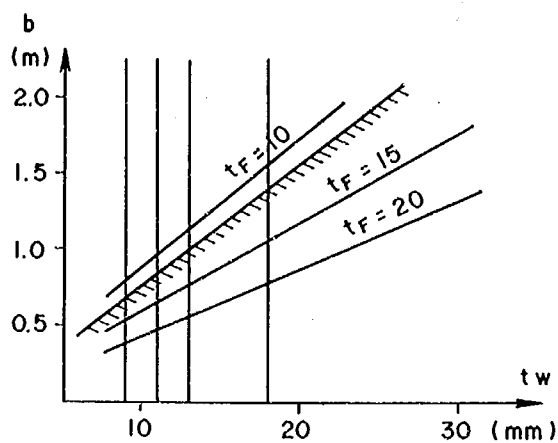
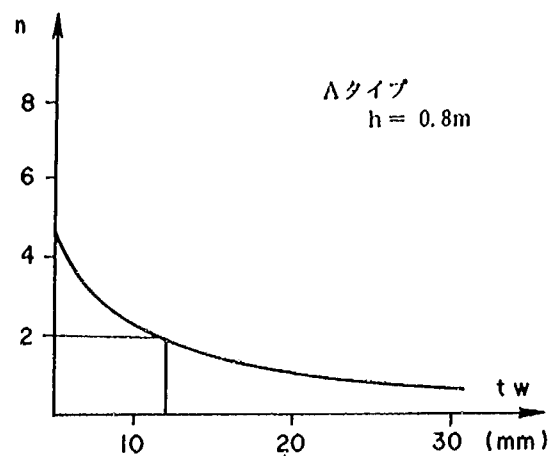
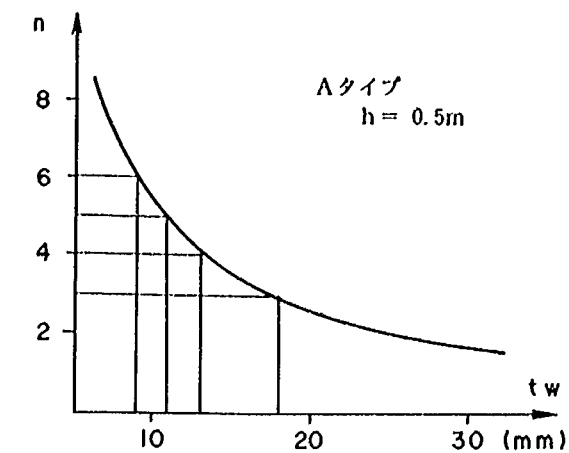


図-2.18.1 梁断面の決定 (その1)

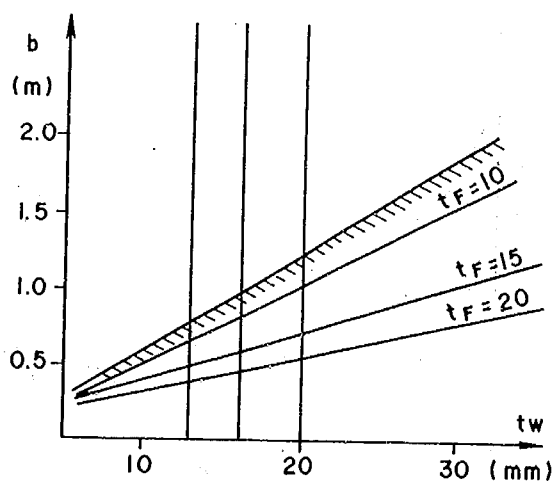
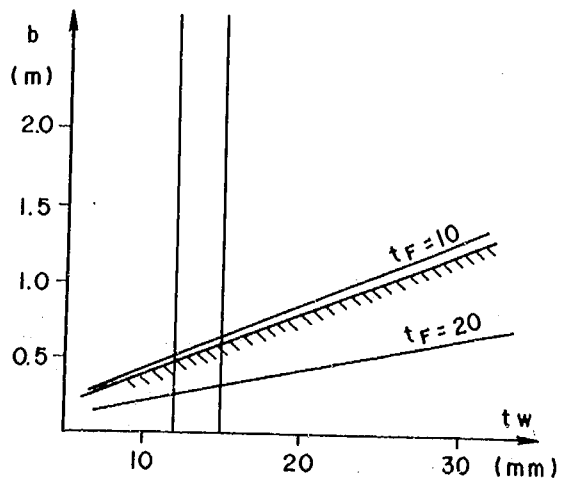
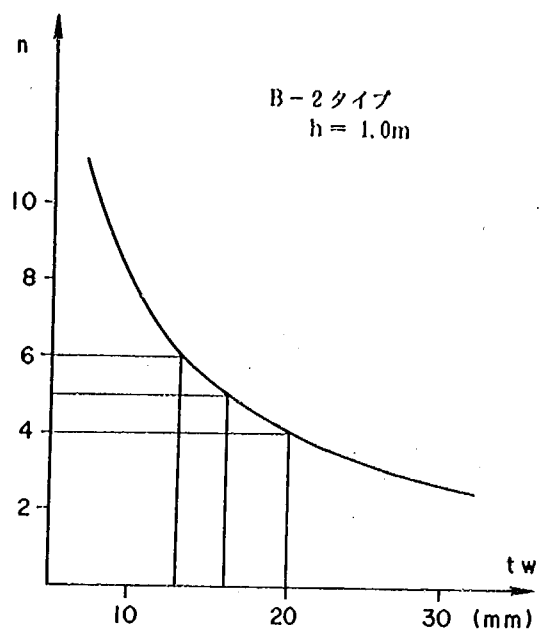
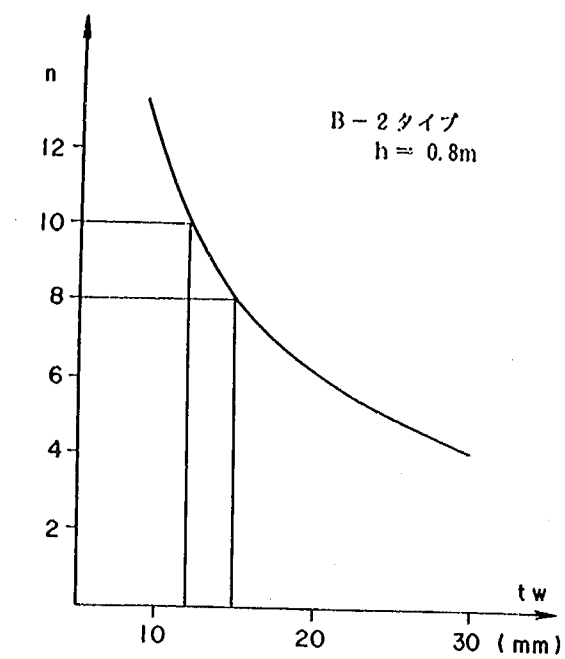


図-2.18.2. 梁断面の決定 (その2)

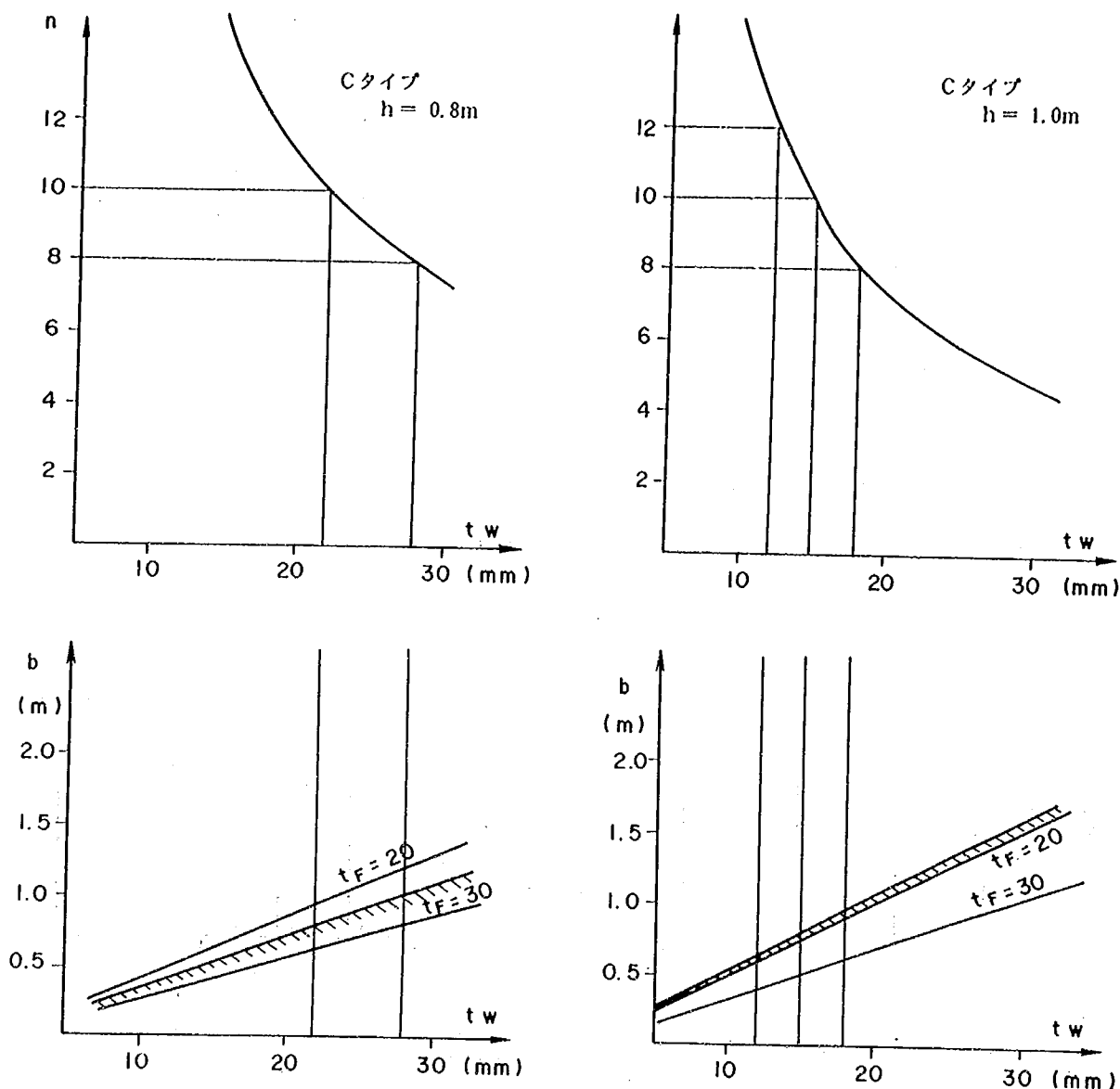


図-2.18.3 梁断面の決定 (その3)

2.3 間接形式防衛工

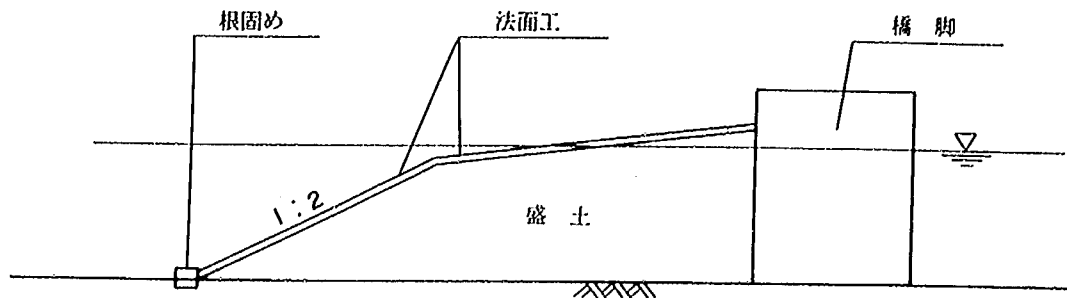
2.3.1 間接形式防衛工の形式

本調査で設計の対象とした間接形式防衛工は、人工島式防衛工、滑動ケーソン式防衛工および杭式防衛工の3種類である。以下にそれぞれの概要を示す。

(I) 人工島式

橋脚の周囲に、盛土による人工島を構築して、進入してきた船舶を人工的に座礁させて、橋脚を船舶の衝突から防護する形式である。

人工島の構造は、図-2.19に示すように、船舶の進入部の法面を緩傾斜とし、他の傾斜は、1 : 2程度とする。根固め工は施工を考慮してその構造を決定する。

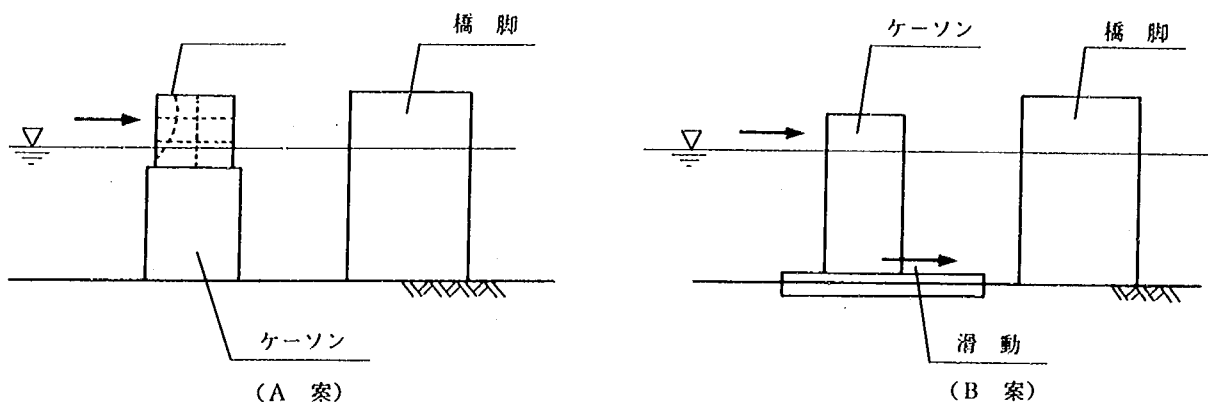


図－2.19 人工島型防衛工

(2) ケーソン式 (滑動ブロック式)

橋脚周囲にケーソンを構築して、進入してきた船舶をケーソンに衝突させて、橋脚を船舶の衝突から防護する形式である。ケーソン式の船舶の衝突エネルギーの吸収方式には、以下の2通りが考えられる。

(図－2.20参照)



図－2.20 ケーソン型防衛工

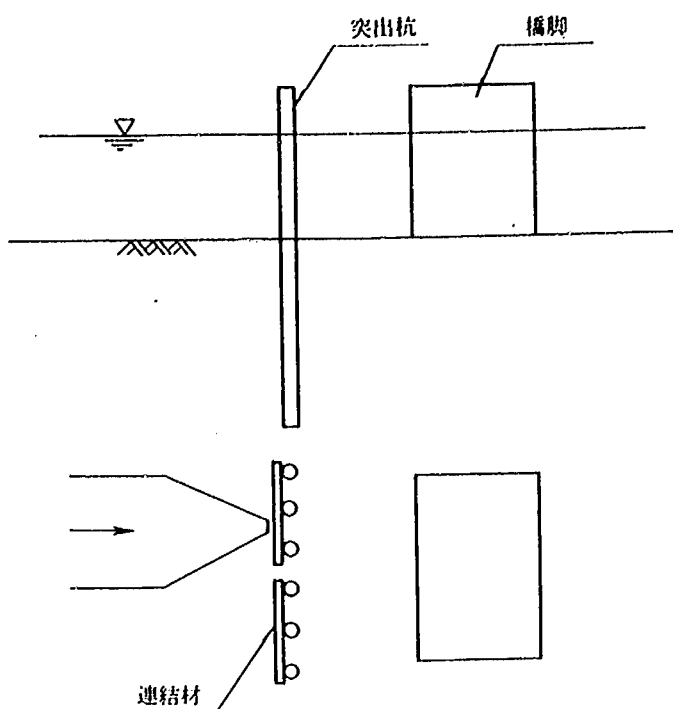
A案・・・ケーソン上部がセル形式となって多室型防衛工を形成し、船舶の衝突エネルギーをセルの座屈変形によって吸収する形式。

B案・・・ケーソン底面が滑動する構造で、船舶の衝突エネルギーをケーソンの滑動によって吸収する形式。

A案は、直接形式防衛工から設計方法や特性について推定できるため、本検討で取り扱う形式は、B案の滑動タイプとした。滑動させるブロックは、ケーソン形式でなくてもよいので、以下滑動ブロック形式と称するものとする。

(3) 杭式

橋脚周囲に杭を建て込み、進入してきた船舶を杭に衝突させて、橋脚を船舶の衝突から防護する形式である(図－2.21参照)。船舶の衝突エネルギーは、突出杭の変形によって吸収する。



図－2.21 杭型防衝工

2.3.2 設計条件

(1) 船舶条件の仮定

船舶条件は2.1に示したものをを用いた。ただし、船舶の寸法に関しては表－2.14の値を用いることとした。

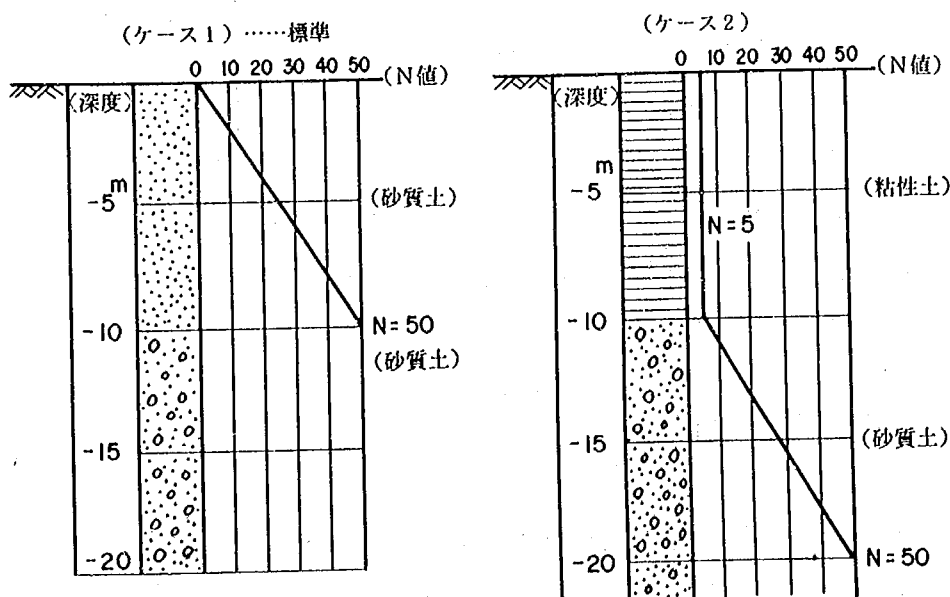
(2) 地質条件

間接形式防衝工は橋脚と独立した基礎を有するため、地質条件の工費に対する影響度が種類によって異なってくることが考えられる。そこで間接形式の概略設計では、地質条件の影響をある程度考慮に入れることとした。図－2.22に設計に用いた地質条件を示す。

杭種としては、座屈変形後も引き続きある程度の強度を期待できること、破損後の交換の比較的容易な事から、コンクリート製杭より鋼製杭の方が優れていると考え、ここでは鋼製杭を検討の対象とした。

表－2.14 船舶の形状寸法 (単位：m)

総トン (G. T.)	全 長	型 幅	型 深
500	53	9.1	4.3
1000	67	10.5	5.5
4000	119	16.5	9.4
7000	143	19.5	11.3
10000	160	21.4	12.5



図－2.22 地質条件

(3) 水深

間接形式防衛工が独自の基礎を有することは、水深が設計に大きな影響を与える可能性を示している。そこで本検討では水深の影響も調査することとした。

2.3.3 設計方法の概要

(1) 人工島式防衛工

人工島式防衛工の吸収エネルギーは式(16)のように表される。(図-2.23参照)

$$\begin{aligned} E &= (W-F) M \ell + (W-F) \ell \tan \theta \\ &= (W-F) \ell (\mu + \tan \theta) \quad \dots\dots (16) \end{aligned}$$

ここに、E：吸収エネルギー (t・m)

W：船舶の重量 (t)

F：船舶に関わる浮力 (t)

ℓ ：停止距離 (m)

μ ：人工島と船底の動摩擦係数 ($\mu=0.3$ と仮定した)

θ ：人工島の法面勾配

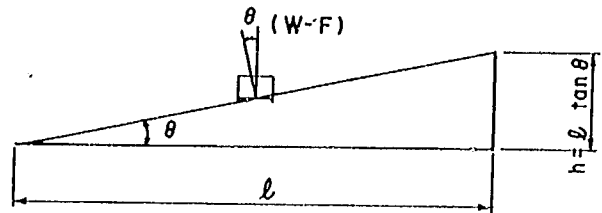


図-2.23 人工島式防衛工の吸収エネルギー

船舶に加わる浮力に付いては、次のように仮定した。

(i) 船底が人工的にタッチし摩擦抵抗力が働きはじめるときには、 $F=W$ とする。

(ii) 船底が人工島の上を滑動し、吃水高hまで人工島に乗り上げたときには、 $F=0$ とする。

なお、人工島式防衛工においては、船首は破壊しないものとして検討する。

(iii) 滑動ブロック式防衛工

滑動ブロック式防衛工の吸収エネルギーは式(17)による。(図-2.24参照)

$$E = (W-F) \mu \ell \quad \dots\dots (17)$$

ここに、E：吸収エネルギー (t・m)

W：滑動ブロックの重量 (t)

μ ：ブロック底面とマットの動摩擦係数

($\mu=0.3$ と仮定する)

F：滑動ブロックに働く浮力 (t)

ℓ ：滑動距離 (m)

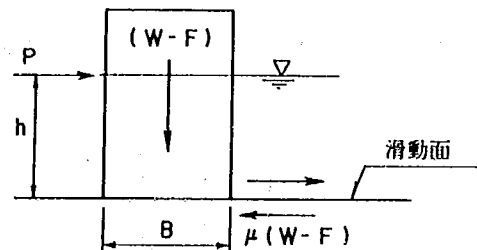


図-2.24 滑動ブロック式防衛工の吸収エネルギー

ブロックが滑動するためには、以下の2条件を満足しなければならない。

(i) ブロックが転倒しないこと

$$(W-F) \cdot \frac{B}{2} \geq vPh \quad \dots\dots (18)$$

B：ブロック底面幅 (m) P：船舶の衝突荷重 (t)

v：転倒に対する安全率 h：滑動面より衝突荷重作用位置までの高さ (m)

($v=1.2$ とする)

(ii) 船舶の船首圧壊荷重がブロックの滑動抵抗を下回らないこと

$$P_{cr} \geq (W - F) M_0 \quad \dots\dots (19)$$

ここに、 P_{cr} ：船舶の船首圧壊荷重 (t)

M_0 ：ブロック底面とマットの静摩擦係数

($M_0 = 0.6$ と仮定する)

また、衝突エネルギーの一部を船首破壊によるエネルギーで分担させるために、所定の位置にブロック移動制御のストッパーを設置するものとした。

(3) 杭式防衝工

杭式防衝工の吸収エネルギー

杭および地盤の変形を弾性範囲と塑性範囲に分けて考える。(図-2.25参照)

弾性範囲・・・突出杭の変形を求めて変位を算出する。

杭の応力度が降伏強度に達する点を塑性範囲との境界とする。

塑性範囲・・・杭断面の変形による断面係数の減少を無視し、材料を完全塑性と仮定し、 P_{cr} で塑性変形が自由に増加、除荷の場合には弾性的であるとする。

杭は、連結材で連結した杭群が等しく変形するものとし、連結材自体の変形は考慮しないものとする。

衝突エネルギーを杭の変形で吸収するためには、

$$P_{cr} > P$$

でなければならない。

ここに、 P_{cr} ：船首の圧壊荷重

P ：杭の応力を降伏応力とするに要する横方向荷重

また、衝突エネルギーの一部を船首扱いによるエネルギーで分担させるには、所定の位置に杭の変形を拘束する機構を設ける必要がある。

2.3.4 間接形式防衝工の設計

(1) 人工島式防衝工

1) 設計条件

設計条件は表-2.15の5種類を考えた。なお、本形式の防衝工では、船首の破壊を考慮せず、全衝突エネルギーを防衝工で吸収するものとし、そのエネルギーは、表-2.16のようになる。

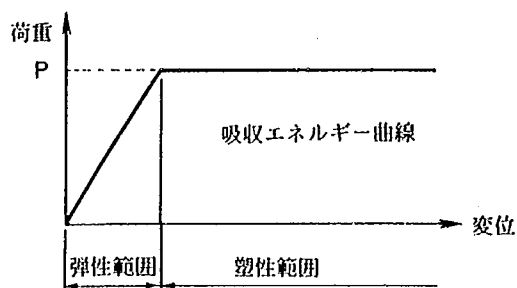


図-2.25 杭型防衝工の変位-荷重曲線

表-2.15 人工島型防衛工の設計条件

ケース番号	船舶規模 (G. T.)	水 深 (m)	地質条件
タイプ1	4000	10	砂質土
タイプ2	7000	10	"
タイプ3	10000	10	"
タイプ4	10000	15	"
タイプ5	10000	10	上層軟弱粘性土

表-2.16 防衛工が吸収する衝突エネルギー

船舶規模 (G. T.)	必要吸収エネルギー 容 量 (t・m)	摘 要
4000	10000	ケース1
7000	17600	ケース2
10000	25100	ケース3, 4, 5.

2) 衝突エネルギー吸収に必要な長さ

人工島の法面勾配を1:3とし、人工島と船底の動摩擦係数は $\mu=0.3$ と仮定した。

防衛工の吸収エネルギーは、

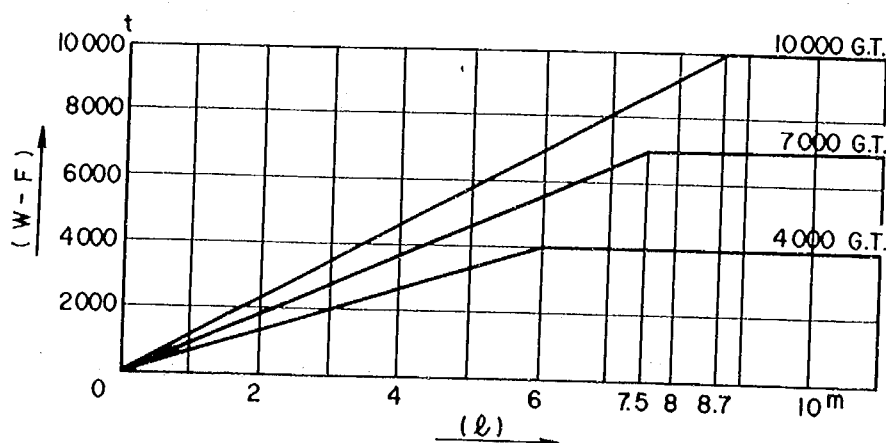
$$\begin{aligned}
 E &= (W-F) \ell (\mu + \tan \theta) \\
 &= (W-F) \ell (0.3 + 0.33) = 0.63 (W-F) \ell
 \end{aligned}$$

浮力Fは、

$$\ell = 0 \text{ のとき} \quad F = W$$

$$h = H \text{ (} \ell = 3H \text{) のとき} \quad F = 0 \text{ (ここに、} H \text{: 吃水高) となる。}$$

船舶規模と、Hの関係は表-2.1より与えられ、これをもとに $(W-F)$ と ℓ の関係をグラフで示せば図-2.26のようになる。

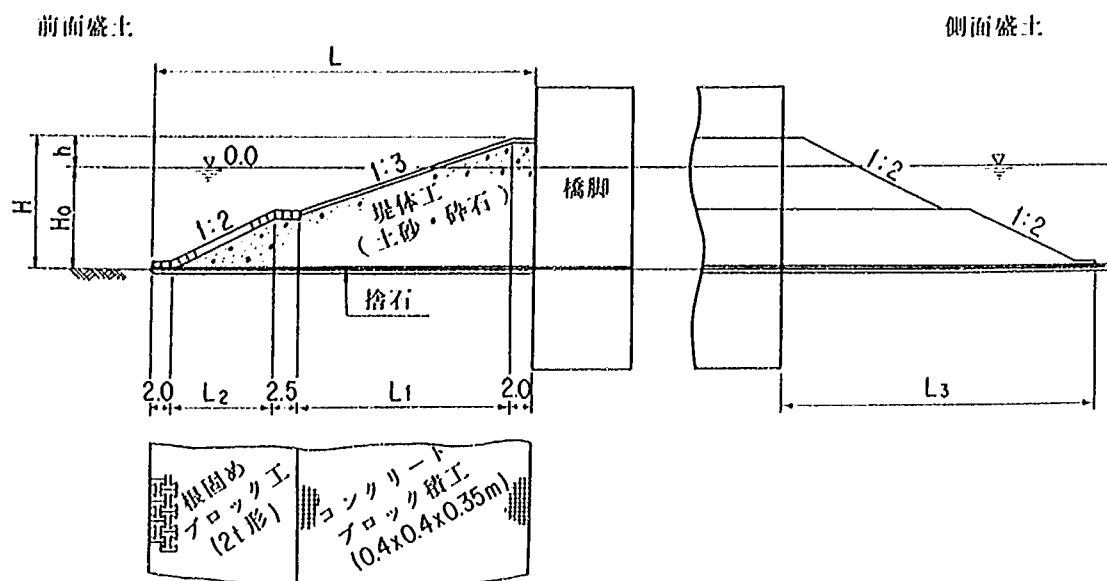
図-2.26 ℓ と $(W-F)$ の関係

以上より必要長 ℓ は表-2.17の用に決定された。

概略設計を行った結果、人工島式の構造寸法は図-2.27のように決定された。

表-2.17 人工島の必要長 ℓ

船舶規模 (G T)	ℓ (m)
4, 0 0 0	7. 0
7. 0 0 0	7. 7
1 0, 0 0 0	8. 3



	単位	タイプ1	タイプ2	タイプ3 (5)	タイプ4
船舶規模	G. T	4000	7000	10000	10000
水深 H_0	m	10.0	10.0	10.0	15.0
堤体高 H	"	12.717	12.883	12.983	17.983
堤体全長 L	"	37.8	39.3	40.3	50.3
h	"	2.717	2.883	2.983	2.983
L_1	"	21.2	24.7	27.1	27.1
L_2	"	10.1	8.1	6.7	16.7

図- 2.27 人工島型防衛工の構造寸法

(2) ケーソン式防衛工

1) 設計条件

設計条件は表- 2.18の5種類を考慮することとした。

表- 2.18 ケーソン型防衛工の設計条件

ケース番号	船舶規模 (G. T.)	水深 (m)	地質条件
タイプ1	4000	10	砂質土
タイプ2	7000	10	"
タイプ3	10000	10	"
タイプ4	10000	15	"
タイプ5	10000	10	上層軟弱粘性土

防衛工の必要吸収エネルギーについては、衝突エネルギーを船首破壊と防衛工の移動の両方で分担するものとし、船首側の吸収エネルギーは、可能量の1/2とした。したがって、吸収エネルギーは表- 2.19の値となる。

表-2.19 防衛工が吸収する衝突エネルギー

船舶規模 (G. T.)	吸収エネルギー (t・m)			摘 要
	全エネルギー	船首側	防衛工側	
4000	10000	3500	6500	ケース 1
7000	17600	6200	11400	ケース 2
10000	25100	9000	16100	ケース 3, 4, 5

表-2.20 船首圧堤荷重

船舶規模 (G. T.)	Pcr (t)
4000	1250
7000	1850
10000	2350

なお、船首圧堤荷重 P_{cr} は表-2.20により与えられる。

2) 滑動ブロック重量

滑動ブロックが滑動するためには、次の条件が満たされる必要がある。

$$P_{cr} > (W - F) M_0$$

ここに、 P_{cr} : 船首の破壊荷重

W : ブロックの自重

F : ブロックに働く浮力

M_0 : ブロック底面とマットの静摩擦係数 ($M_0=0.6$)

一方、ブロックの滑動距離 l をできるだけ少なくするためには、ブロックの滑動に要する力が P_{cr} に近い方が望ましい。

したがって、

$$0.9 P_{cr} = (W - F) M_0 = (W - F) \times 0.6$$

$$\therefore W - F = 1.5 P_{cr}$$

とした。

船舶の衝突荷重の作用幅は、型幅に等しいとする。型幅内に n 個のブロックを設置するものとすれば、衝突荷重を受け持つブロックは $(n + 1)$ 個となる。(図-2.28参照)

3) 滑動ブロックの形状寸法

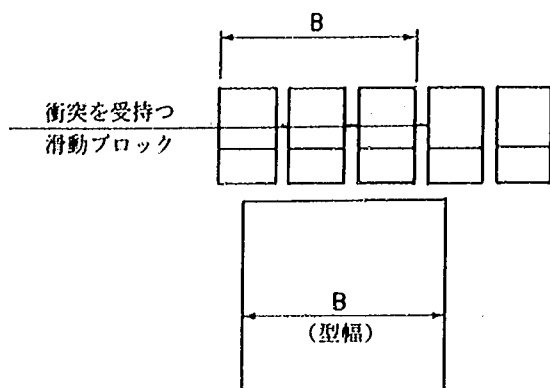
ブロックは図-2.29に示すように、転倒に対して有利な L 形断面とした。まず、ブロックの水面突出高 h は次式で示される。

$$h = h_0 + h_1$$

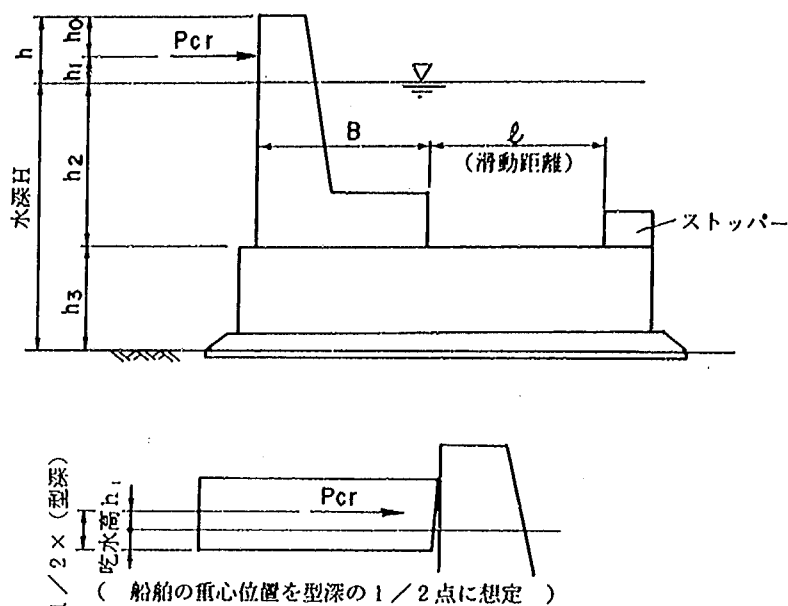
ここに、 h_0 : 潮位の干満差、積荷の軽重による設置余裕高

$$h_0 = \frac{1}{4} \times (\text{型深})$$

h_1 : 水面より突出荷重作用位置までの高さ



図－2.28 型幅と滑動するブロック



図－2.29 滑動ブロックの形状寸法

次に、船底がスラブマットに当たらないように滑動ブロックの底面位置を決定する。

$$h_2 \geq (\text{水高}) + h_0$$

ここに、 h_2 ：水面よりブロック底面までの深さ

$$h_0：\text{設置余裕高} \left(h_0 = \frac{1}{4} \times (\text{型深}) \right)$$

したがって、船舶規模と h および h_2 の関係は、表－2.21 のようになる。

表－2.21 滑動ブロックの高さ

船舶規模 (G. T.)	型深 (m)	吃水高 (m)	h_0 (m)	h_1 (m)	h (m)	h_2 (m)
4000	9.4	2.0	2.3	2.7	5.0	4.3以上
7000	11.3	2.5	2.85	3.15	6.0	5.4以上
10000	12.5	2.9	3.15	3.35	6.5	6.1以上

また、ブロックの滑動距離 ℓ は、以下のように表される。

$$\ell = \frac{E}{(W-F)M} = \frac{E}{1.5 P_a M}$$

ここに、 E ：防衛工の分担する吸収エネルギー

M ：ブロックとマットの動摩擦係数 ($M=0.3$)

したがって、船舶規模と ℓ の関係は、表－2.22 のようになる。

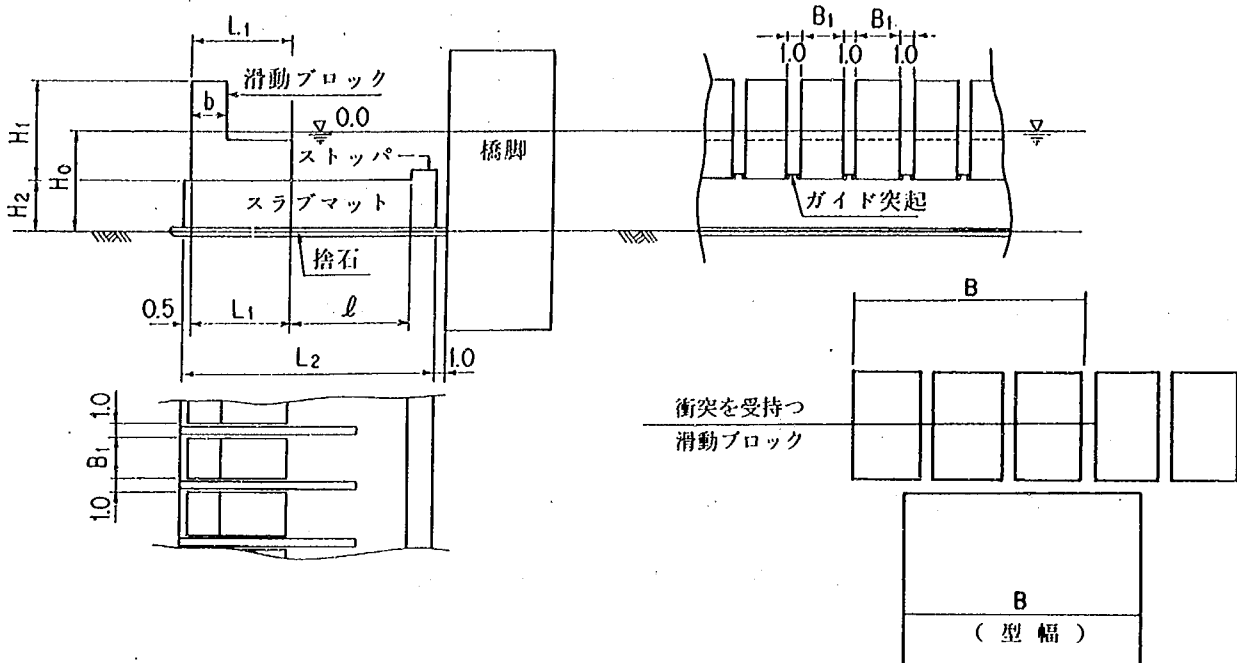
表-2.22 ブロックの滑動距離

船舶規模 (G. T.)	E (t・m)	Per (t)	ℓ (m)
4000	6500	1250	11.6
7000	11400	1850	13.7
10000	16100	2350	15.2

滑動ブロック後方にはストッパーを設け、滑動ブロック停止後に船首が圧壊し、船首側で残りの衝突エネルギーを吸収する構造とする。

滑動ブロック停止後の衝撃として100%を見込むものとした。

以上の検討によって、ケーソン式防衛工は図-2.30に示すものとなる。



	単位	タイプ1	タイプ2	タイプ3(5)	タイプ4
船舶規模	G. T.	4000	7000	10000	10000
水深 H_0	m	10.0	10.0	10.0	15.0
滑動ブロック	H_1	10.0	12.0	13.0	13.0
	L_1	10.0	11.5	12.5	12.5
	b	3.2	3.2	3.8	3.8
	h	4.0	4.2	5.0	5.0
スラブマット	H_2	5.0	4.0	3.5	8.5
	L_2	25.1	29.2	32.5	32.5
滑動距離 ℓ	〃	12.0	14.0	15.5	15.5

船舶の衝突荷重の作用幅は型幅に等しいと仮定し、滑動ブロックは型幅幅内に $n=3\sim 4$ 個設置し、衝突荷重を分担するブロックの個数は、それより1個多い ($n+1$) 個とした。

図-2.30 ケーソン型防衛工の形状寸法

(3) 杭式防衛工

1) 設計条件および設計方針

設計条件として、表－2.23の5種類を考える。

表－2.23 杭型防衛工の設計条件

ケース番号	船舶規模 (G. T)	水 深 (m)	地 質 条 件
タイプ1	500	10	砂 質 土
タイプ2	1000	10	〃
タイプ3	4000	10	〃
タイプ4	10000	15	〃
タイプ5	10000	10	上層軟弱粘性土

衝突エネルギーは、船首破壊と防衛工の移動の両方で分担されるものとした。船首側の吸収エネルギーは全可能量とした。したがって、吸収エネルギーは表－2.24のようになる。ここで、船首圧壊荷重は、表－2.25のようになる。杭種としては、施工性を考慮して材質：STK51 ($\sigma_s = 36 \text{ kg/mm}^2$) の鋼管杭を使用することとした。なお、比較的短期に衝突による部材交換があるものとして腐食しろは考慮しなかった。

表－2.24 杭型防衛工が吸収する衝突エネルギー

船舶規模 (G. T)	吸収エネルギー (t・m)			摘 要
	全エネルギー	船首側	防衛工側	
500	1260	800	460	ケース1
1000	2510	1700	810	ケース2
4000	10000	7100	2900	ケース3

表－2.25 船舶圧壊荷重

船舶規模 (G. T)	P_{cr} (t)	型幅 (m)	P_{cro} (t/m)
500	300	9.1	33.0
1000	450	10.5	42.9
4000	1250	16.5	75.8

杭の降伏曲げモーメントは式(20)で計算され表－2.26のようになる。

$$M_y = \sigma_s Z \quad \dots\dots (20)$$

ここに、 M_y ：杭の降伏曲げモーメント (t・m)

σ_s ：杭の降伏強さ ($\sigma_s = 36000 \text{ t/m}^2$)

Z ：杭の断面係数 (m^3)

表－2.26 杭の降伏曲げモーメント

杭径 D (mm)	板厚 t (mm)	M_y (tm/本)
$\phi 1000$	12	328
	14	378
	16	428
$\phi 1500$	14	864
	16	983
	19	1163
$\phi 2000$	16	1764
	19	2088
	22	2405

2) 突出杭の計算

衝突荷重の作用位置 h_1 、杭の突出長 h (図-2.31参照) は、水深 $H=10\text{m}$ の場合、表-2.27のようになる。

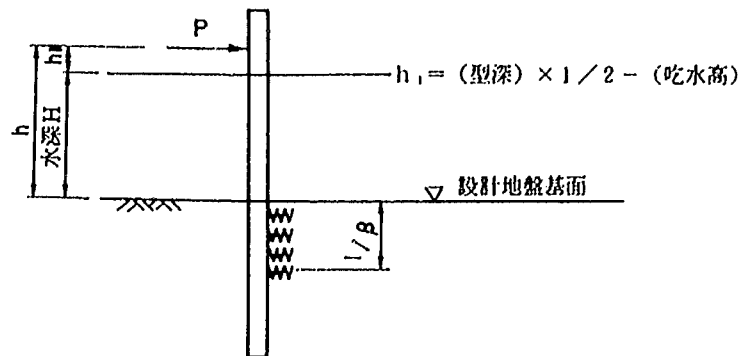


図-2.31 杭の突出長

表-2.27 杭の突出長

水深 $H=10\text{m}$ の場合

船舶規模 (G. T)	型深 (m)	吃水高 (m)	h_1 (m)	杭の突出長 h (m)
500	4.3	1.0	1.15	11.15
1000	5.5	1.4	1.35	11.35
4000	9.4	2.0	2.70	12.70

杭の横方向地盤反力係数は、杭頭より $1/\beta$ までの深さの地盤の N 値を平均して求める。

$$K = \alpha E_0 D^{-\frac{3}{4}} = 0.2 \times 28 \times N \times D^{-\frac{3}{4}} \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 K : 杭の横方向反力地盤係数 (kg/cm^2)

N : $1/\beta$ の深さまでの平均 N 値

D : 杭径 (cm)

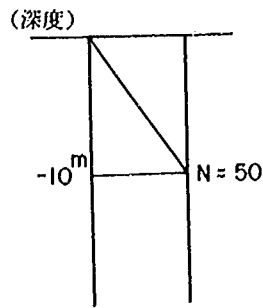
$$\beta = 4 \frac{KD}{EI} \quad (\text{cm}^{-1})$$

ここに、 E : 杭のヤング係数 ($E=2.1 \times 10^9 \text{kg}/\text{cm}^2$)

I : 杭の断面 2 次モーメント (cm^4)

砂地盤の N 値における K を算出すると、表-2.28のようになる。

表-2.28 地盤のN値およびK値



杭径 D (cm)	1/B (cm)	N	K (kg/cm ²)	摘 要
100φ	399	9.8	1.74	t=14
150φ	512	12.8	1.67	t=16
200φ	622	15.5	1.63	t=19

単位水平荷重 $P=100$ t を与えたときの杭の変形と断面力は式(22)より, 表-2.29のようになる。

杭頭変位 δ (m)

$$\delta = \frac{(1+\beta h)^3 + 1/2}{3EI\beta^3} P \quad \dots\dots (22)$$

ここに, P : 杭に作用する水平力 ($P=100$ t)

h : P の作用する地上高 (m)

最大曲げモーメント M_m (t・m)

$$M_m = \frac{P}{2\beta} \sqrt{(1+2\beta h)^2 + 1} \cdot \exp(-\beta \ell_m)$$

$$\ell_m = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{1}{1+2\beta h}$$

表-2.29 単位水平荷重 $P=100$ t を与えたときの杭の変形と断面力

杭径 D (m)	板厚 t (mm)	曲げ剛性 3EI (t m ²)	1/β (m)	β (m ⁻¹)	杭の突出長 h (m)	βh	ℓ _m (m)	最大曲げ モーメント M _m (t m)	杭頭変位 δ (m)
φ1.0	14	0.332×10 ⁶	3.99	0.251	11.15	2.80	0.600	1144	1.054
					11.35	2.85	0.591	1163	1.096
					12.70	3.19	0.538	1296	1.408
φ1.5	16	1.292×10 ⁶	5.12	0.195	11.15	2.17	0.948	1156	0.338
					11.35	2.21	0.934	1175	0.350
					12.70	2.48	0.851	1310	0.445
φ2.0	19	3.654×10 ⁶	6.22	0.161	11.15	1.80	1.331	1181	0.147
					11.35	1.83	1.315	1199	0.152
					12.70	2.04	1.209	1325	0.188

一方, 杭1本当たりの降伏荷重は次の式で示され, 表-2.29より, 表-2.30のように求められる。

表-2.30 杭1本当たりの降伏荷重

杭径 D(m)	板厚 t (mm)	M _y (t・m/本)	M ₁₀₀ (t・m)			P _y (t/本)		
			h=11.15	h=11.35	h=12.7	h=11.15	h=11.35	h=12.7
φ1.0	12	328	1144	1163	1206	28.7	28.2	25.3
	14	378				33.0	32.5	29.2
	16	428				37.4	36.8	33.0
φ1.5	14	864	1156	1175	1310	74.7	73.5	66.0
	16	983				85.0	83.7	75.0
	19	1163				100.0	99.0	88.8
φ2.0	16	1764	1181	1199	1325	149.4	147.1	133.1
	19	2088				176.8	174.1	157.1
	22	2405				203.6	200.6	181.5

$$P_y = \frac{M_y}{M_{100}/100}$$

ここに、P_y : 杭1本当たりの降伏荷重 (t/本)

M_y : 杭1本当たりの降伏曲げモーメント (t・m/本)

M₁₀₀ : P=100 tが作用したときの杭の曲げモーメント (t・m)

以上から、最適な杭の諸元が求められる。

5) 杭式防衛工の配置及びストッパー

船舶の衝突荷重の作用幅は、型幅に等しいとする。

杭連結材の幅を船舶に等しくして1ブロック単位とすれば、希な場合を除き、衝突荷重を受け持つブロック数は2ブロックとなる。(図-2.32参照)

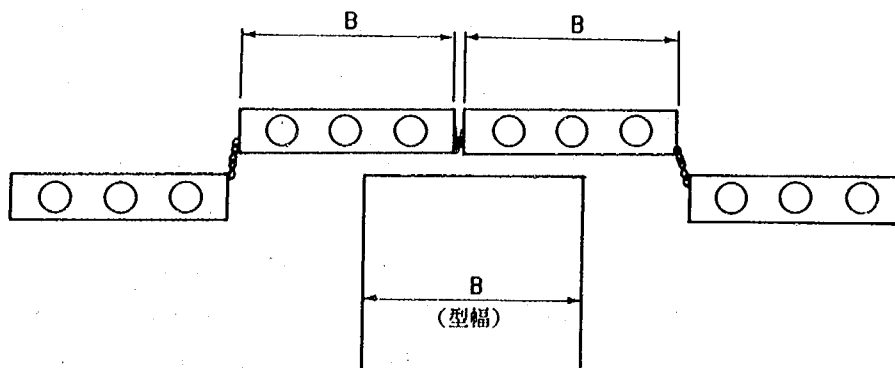
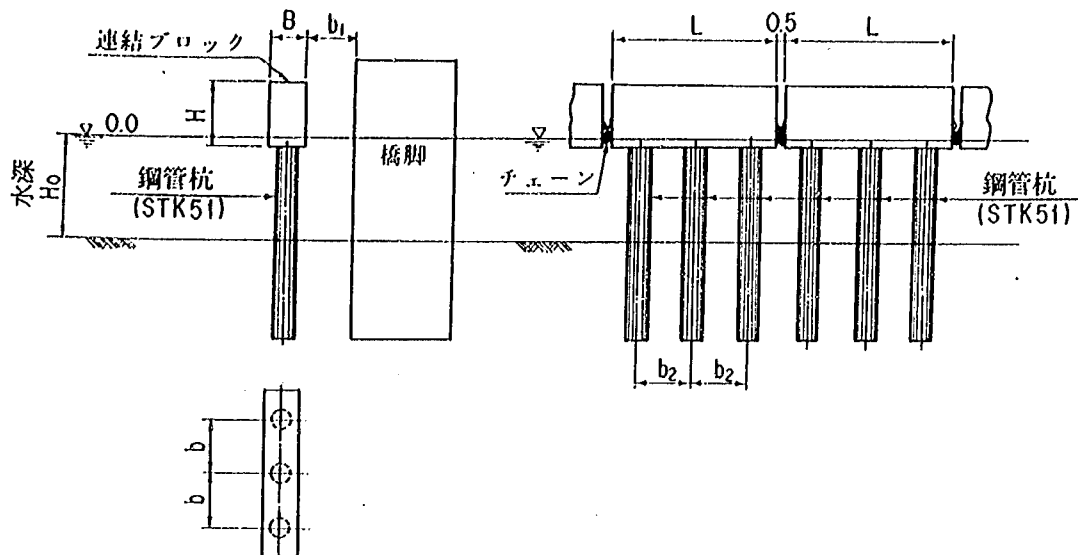


図-2.32 衝突荷重と受け持つブロック

ここで、ストッパーの構造としては、連結材をチェーンによって相互に結合することにより、衝突荷重を受けた杭ブロックが所定の変形を生じた場合には、チェーンが働いて、隣接する杭ブロックが共同して衝突荷重を分担するものにする。

したがって、それ以後は杭の座屈荷重が船首圧壊荷重を上回ることになり、残りの衝突エネルギーは船首の圧壊で吸収されることになる。

以上の検討から設計された杭式防衛工は図－2.33に示すものとなる。



	単位	タイプ 1	タイプ 2 (5)	タイプ 3	タイプ 4
船舶規模	G. T	500	1000	4000	1000
水深 H_0	m	10.0	10.0	10.0	15.0
連結ブロック	H	3.5	4.0	6.4	4.0
	B	2.5	3.0	3.5	3.0
	L	8.6	10.0	16.5	10.0
杭諸元	断面	mm	$\phi 1000, t=16$	$\phi 1500, t=14$	$\phi 2000, t=22$
	杭長	m	19.0	19.0 (29.0)	24.0
	間隔 b_2	"	3.0	3.5	5.5
橋脚との離れ b_1	"	4.0	4.0	5.0	4.0

図－2.33 杭型防衛工の形状寸法

2.4 バリヤー形式防衛工

2.4.1 バリヤー形式防衛工の形態

バリヤー形式防衛工に関しては、1種類だけを検討の対象とした。本形式の防衛工は図－2.34に示すものであり、それぞれの部分は以下の機能あるいは役割を有する。

捕捉チェーン：進入してきた船舶を捕らえる役割を有する。

浮体：捕捉チェーンが沈まないようにするための浮き

連結チェーン：浮体の沈みを結ぶチェーン

沈錘：立方体形状のコンクリート製の錘りで船舶の衝突エネルギーをこの錘りの滑動抵抗によって吸収しようとするものである。

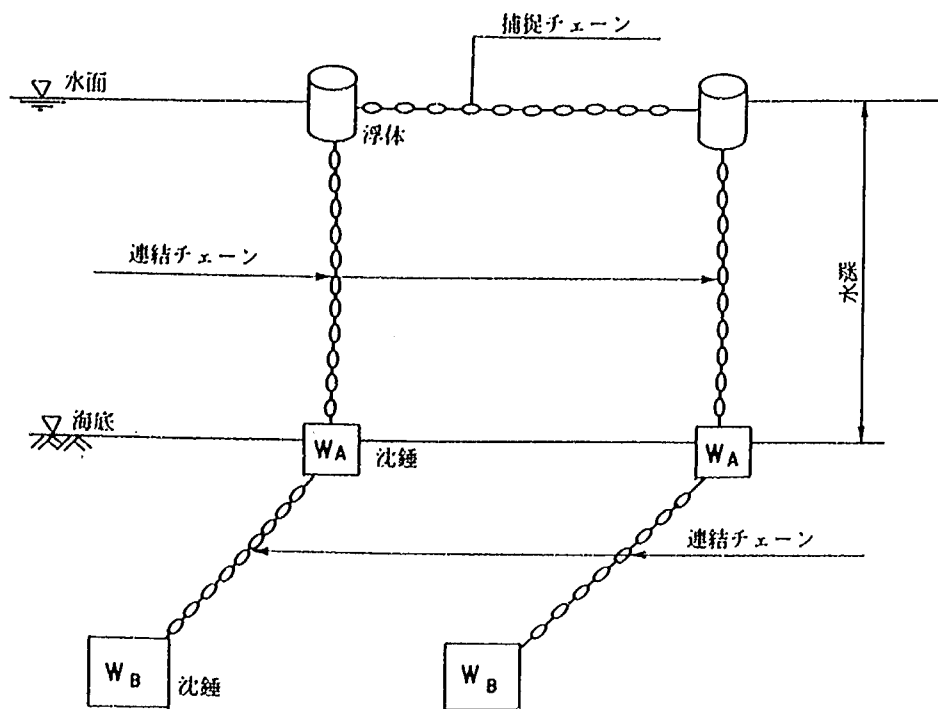


図-2.34 バリヤー型防衛工の概要

なお、2組の防衛工の間隔は設計対象船舶の型幅の2倍とする。

2.4.2 設計条件

バリヤー形式防衛工の設計条件を表-2.31に示す。設計条件としては船舶側の条件の他に、停止距離の設定が重要であるため、船舶重量が4000 tの場合に関して停止距離の影響を試算してみる事とした。

表-2.31 バリヤー型防衛工の設計条件

項 目			単位	諸 元			備 考
タ イ プ				A	B	C ₁ (C ₂)	
船 舶 諸 元	総 ト ン		G. T	500	1000	4000	
	排 水 量		t	500	1000	4000	満載時と軽荷時の中間
	形 状 寸 法	船 長	m	53	67	119	
		型 幅	m	9.1	10.5	16.5	
		型 深	m	4.3	5.5	9.4	
	船首圧壊荷重		t	300	450	1250	
衝 突 速 度		k t	13	13	13	6.69m/s	
停 止 距 離		m	20	20	20 (40)	() 内C-2タイプ	
沈錘の引張角度		度	30				
沈 錘 の 形 式			縦2連結方式 ($W_A/W_B=0.67$)				
水 深		m	10				
防衛工の間隔		m	18.2	21.0	33.0	設計対象船舶の型幅の2倍	

2.4.3 バリアー形式防衛工の設計

(1) 設計方法の概要

バリアー形式防衛工は、沈鍾と海底面に発生する摩擦力によってエネルギーを消費するものである。したがって設計では、まずバリアー形式防衛工が吸収すべき運動エネルギーと、沈鍾と海面の滑動抵抗係数より、必要な沈鍾の重量を求め、これをもとに沈鍾の形状寸法を求める。次いで連結チェーンに発生する張力から連結チェーンを設計する。続いて、捕捉チェーンの設計を行い、最後に捕捉チェーンが海底に沈まないために必要な浮体の設計をする。

(2) 防衛工による衝突エネルギーの吸収

1) 防衛工が吸収すべき運動エネルギーと停止距離

船舶の衝突をバリアー式防衛工によって減速あるいは停止させるまでの船の挙動は、運動量理論を用いると次のような関係で示される。

$$\frac{1}{2g} \Delta (1 + \alpha) V_0^2 = D_m S_0 \quad \dots\dots (23)$$

ここに、 S_0 : 停止距離 (m)

g : 重力加速度 ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$)

Δ : 船舶の排水量 (t)

α : 船の付加質量係数 ($\alpha = 0.1$ とする)

V_0 : 船舶の衝突時の速度 ($V_0 = 6.69 \text{ m/s}$)

D_m : バリアー式防衛工の沈鍾の平均移動抵抗 (t)

S : V に達する間の船舶の移動距離 (m)

(23)式より、

$$D_m = \frac{\frac{1}{2g} (\Delta + \alpha) V_0^2}{S_0} \quad \dots\dots (24)$$

(24)式より、船舶の排水量、衝突時速度および停止距離が与えられれば、必要とする平均移動抵抗が求められる。

2) 沈鍾と海底の滑動抵抗

沈鍾と海底との間の滑動抵抗係数を f とすれば、沈鍾の移動抵抗 D_m は次式で示される。(図 - 2.35 参照)

$$D_m = (W_s - T \tan \theta) f = T \cos \theta \quad \dots\dots (25)$$

ここに、 W_s : 沈鍾の海水重量 (t)

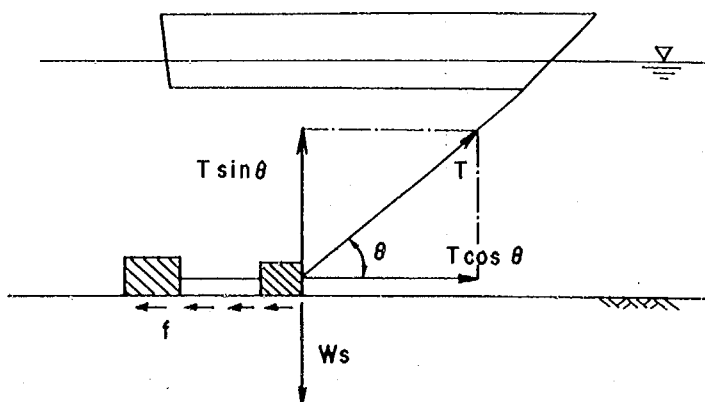


図 - 2.35 滑動抵抗力と引張力

T : 連結チェーンに働く張力 (t)

θ : 連結チェーン張力と水平軸とのなす角度

(4)式より, 沈鍾と海底との間の滑動抵抗係数は式(26)で示される。

$$f = \frac{T \cos \theta}{W_s - T \sin \theta} \quad \dots\dots (26)$$

沈鍾～海底間の滑動抵抗係数は, 以下の要因によって値が変化する。

- (1) 沈鍾の形状によって異なる。
- (2) 引張り角度 θ によって異なる。
- (3) 縦 2 連結沈鍾方式の場合, 前後の沈鍾の重量比によって異なる。

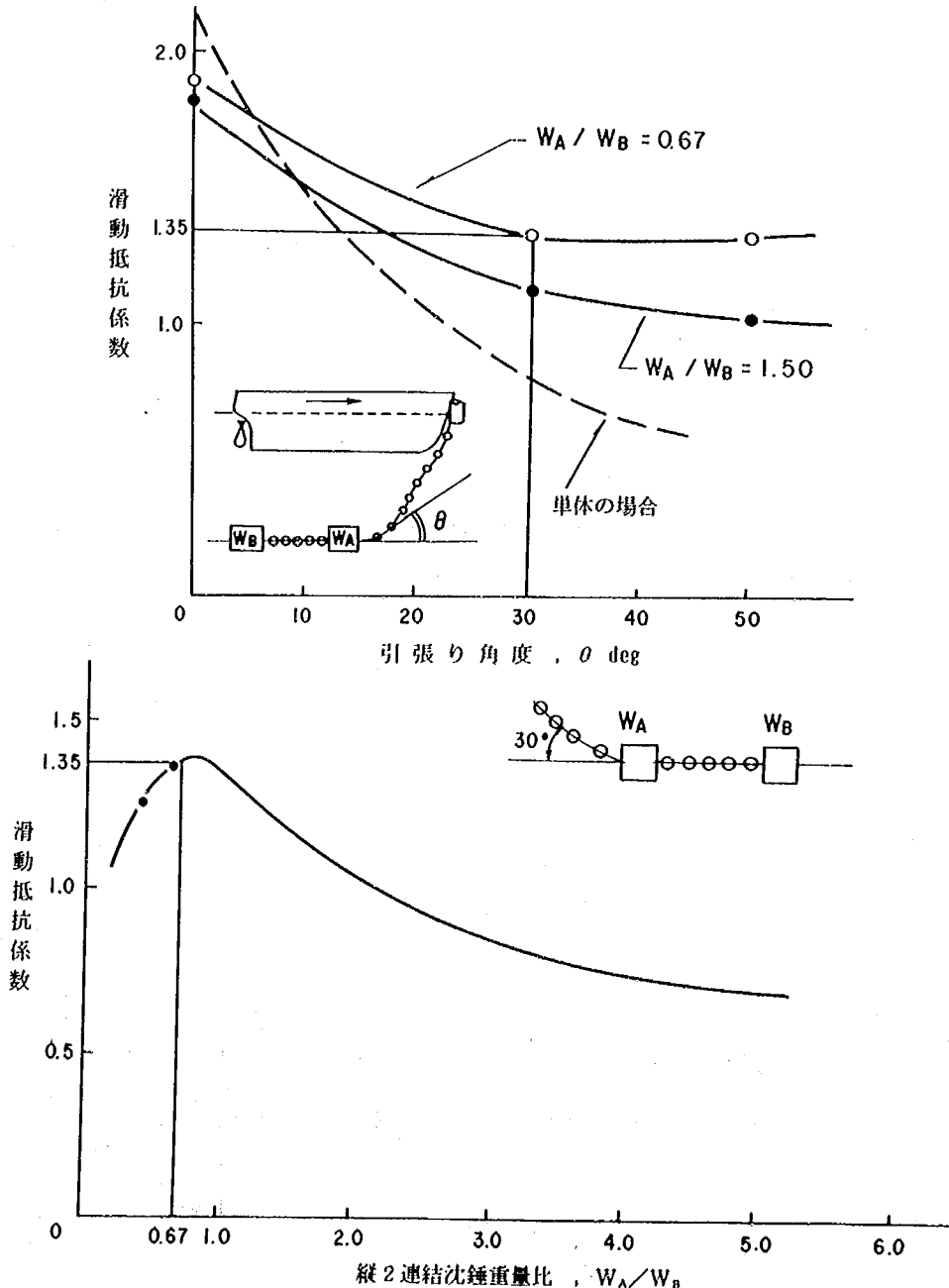


図-2.36 縦2連結沈鍾の滑動抵抗におよぼす W_A/W_B の影響

本調査においては、以下の条件によって、沈鍾～海底間の滑動抵抗係数を決定する。（図－2.36参照）

- (1) 沈鍾は立方体の縦2連結方式とする。
- (2) 引張り角度は $\theta = 30^\circ$ とし、衝突開始より停止まで変化しないものとする。
- (3) 沈鍾重量比は $W_A / W_B = 0.67$ とする。

なお、沈鍾～海底間の滑動抵抗係数については、「東京湾横断道路と船舶航行援助施設に関する基礎的調査報告書（その1～その3）、S55～57」を参考に決定した。

3) 沈鍾の形状寸法

表－2.32に与えられた衝突エネルギーから、必要とされる沈鍾重量は以下のように求められる。

$$T \cos \theta = \frac{E}{S}$$

$$(W_s - \sin \theta) f = T \cos \theta$$

$$\therefore W_s = \frac{E}{S} (1 + \tan \theta)$$

ここに、 W_s ：沈鍾の海水重量（t）

E ：衝突エネルギー（t・m）

S ：停止距離（m）

f ：沈鍾と海底間の滑動抵抗係数（ $f = 1.35$ ）

θ ：沈鍾の引張り角度（ $\theta = 30^\circ$ ）

以上より、沈鍾の海水重量は表－2.32のようになる。

表－2.32 衝突エネルギーと沈鍾重量

	単位	タイプA	タイプB	タイプC ₁	タイプC ₂
船舶規模	G. T	500	1000	4000	4000
E	t・m	1260	2510	10050	10050
S	m	20	20	20	40
W_s	t	83.0	165.4	662.3	331.2

今、沈鍾（コンクリート製）の単位重量 $W = 2.30 \text{ t/m}^3$ とし、沈鍾に加わる浮力 $F = 1.03 \text{ t/m}^3$ とすると、沈鍾の必要体積 V は、

$$V = W_s / (2.30 - 1.03)$$

沈鍾は縦2連結方式とし、2組（合計4個）の沈鍾が抵抗するものとする。前方の沈鍾体積 V_A 、後方の沈鍾体積を V_B とすれば、

$$2(V_A + V_B) = V$$

$$V_A / V_B = 0.67$$

沈鍾形状寸法を立方体とすれば、一辺の長さ ℓ_A 、 ℓ_B はそれぞれ

$$\ell_A = \sqrt[3]{V_A}, \quad \ell_B = \sqrt[3]{V_B}$$

以上の値は表-2.33のようになり、最終的に各タイプの沈鍾の一边の長さは表-2.34のとおりとなる。

表-2.33 沈鍾形状寸法

	単位	タイプA	タイプB	タイプC ₁	タイプC ₂
W_s	t	83.0	165.4	662.3	331.2
V	m ³	65.4	130.2	521.5	260.8
V_A	m ³	13.1	26.0	104.3	52.2
V_B	m ³	19.6	39.1	156.5	78.2
ℓ_A	m	2.36	2.96	4.71	3.74
ℓ_B	m	2.70	3.39	5.39	4.28

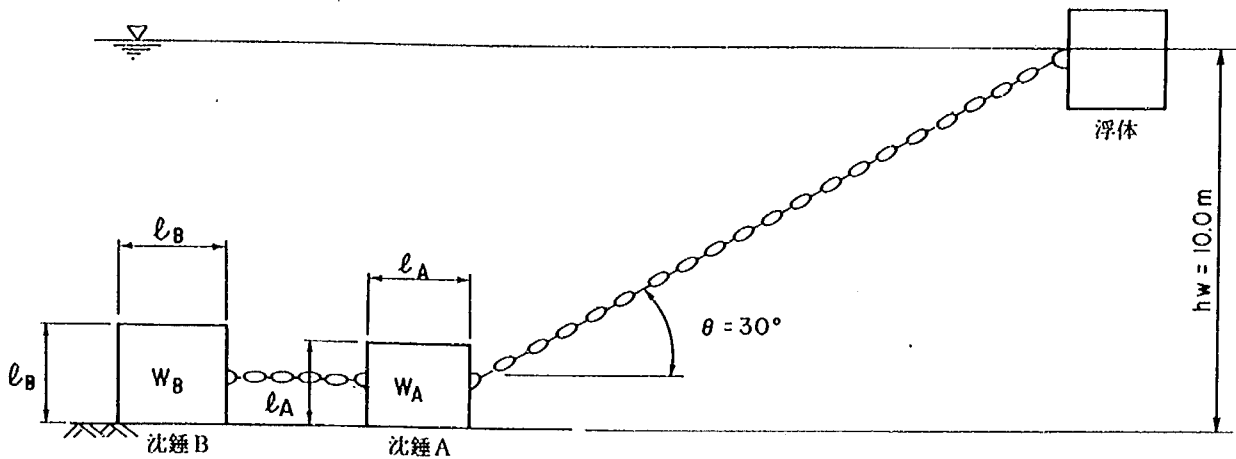


表-2.34 沈鍾の一边の長さ

	単位	タイプA	タイプB	タイプC ₁	タイプC ₂
沈鍾Aの辺長 ℓ_A	m	2.4	3.0	4.7	3.8
沈鍾Bの辺長 ℓ_B	m	2.7	3.4	5.4	4.3

4) 連結チェーンの設計

① 連結チェーンに働く張力

T_0 は、1本当たりのチェーンの張力であり、図-2.35を参考に、チェーンに働く張力は表-2.35のようになる。

沈鍾一組につき1本のチェーンを使うものとすれば、全体で2本のチェーンを使うことになる。

② 連結チェーンの断面決定

(1) 連結チェーンの断面決定

アンカーチェーンの耐力試験荷

重は表-2.36によって与えられる。ここでdは図-2.37を参照する。

表-2.35 チェーンに働く張力

	単位	タイプA	タイプB	タイプC ₁	タイプC ₂
船舶規模	G. T	500	1000	4000	4000
W_s	t	83.0	165.4	662.3	331.2
T	t	72.7	144.9	580.2	290.1
T_0	t/本	36.4	72.5	290.1	145.1

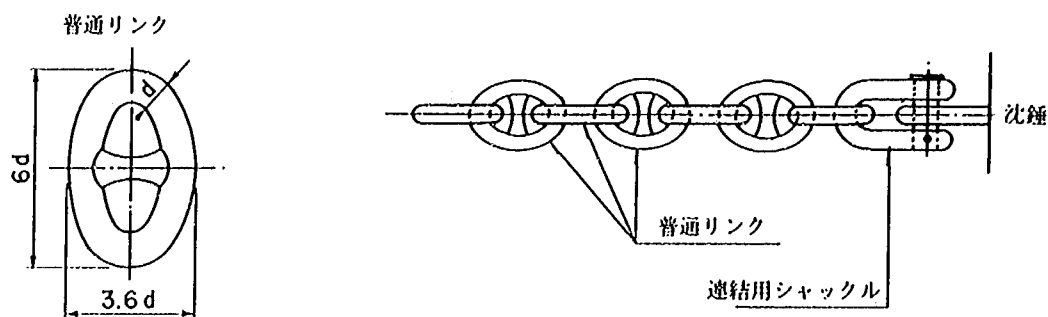


図-2.37 アンカーチェーンの形状

連結チェーンは、衝撃、腐食等を考慮して作用力に対して2.0倍の耐力荷重を有するものを使用するものとする。チェーンの種類としては熱処理を必要としない2種チェーンを使用するものとする。

したがって、各タイプの連結チェーンは表-2.37のようになる。

表-2.36 アンカーチェーンの耐力荷重

チェーンの種類	耐力荷重 (トン)
1種チェーン	$0.0007 d^2 (44-0.08 d)$
2種チェーン	$0.0010 d^2 (44-0.08 d)$
3種チェーン	$0.0014 d^2 (44-0.08 d)$

d : チェーンの呼び径 (mm)

表-2.37 使用する連結チェーン

	単位	タイプA	タイプB	タイプC ₁	タイプC ₂
チェーンの種類		2種	2種	2種	2種
呼び径	mm	44	62	137	90
耐力試験荷重	t	78.4	150	620	298
許容荷重	t	39.2	75.0	310.0	149.0
設計荷重	t	36.4	72.5	290.1	145.1

アンカーシャックル

③ 連結シャックルの形状寸法

アンカーシャックルを連結用シャックルとして使用する。アンカーシャックルの形状寸法は、図-2.38に示すものである。

5) 捕捉チェーンの設計

船舶衝突時には、捕捉チェーンは図-2.39に示すような状態で船舶を捕捉すると考えられる。船舶の衝突形態としては船首衝突を考え、船首角度を $2\alpha = 60^\circ$ と仮定する。

(直接式防衛工の設計に同じ、図-2.40参照)

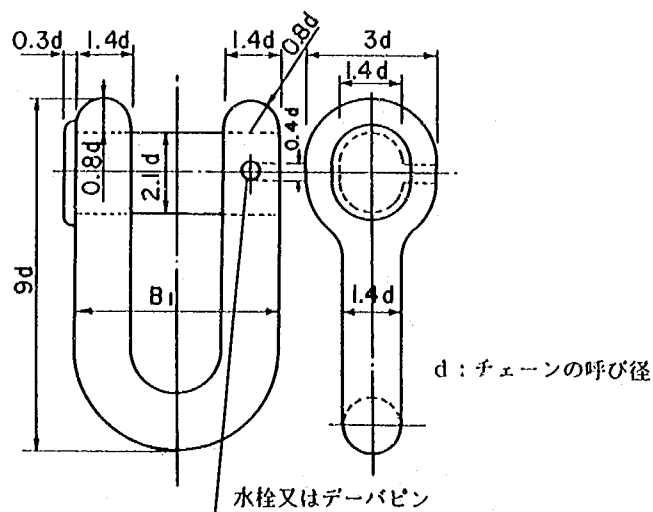


図-2.38 アンカーシャックルの形状寸法

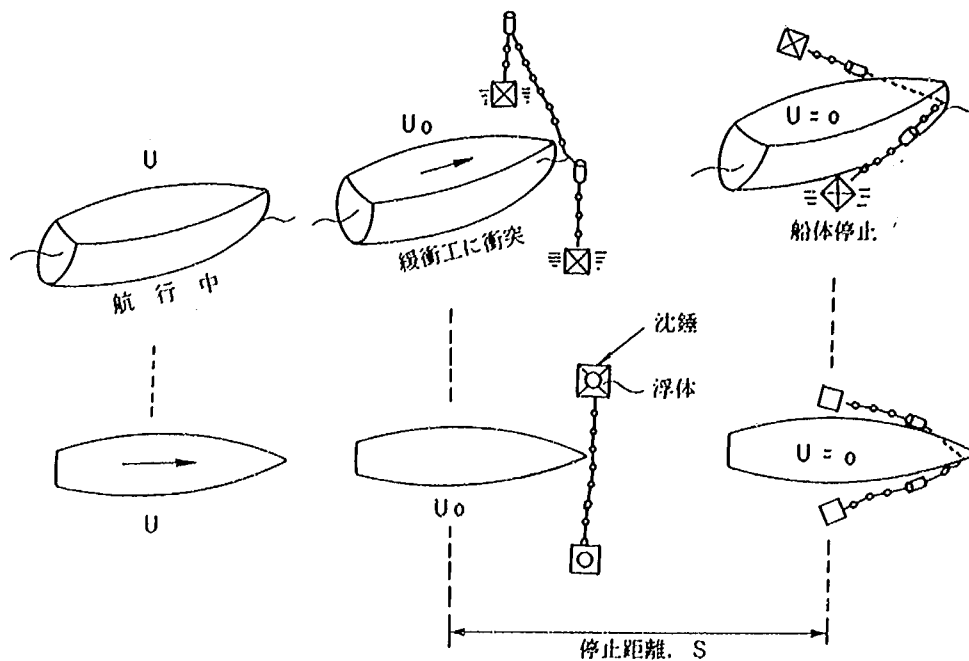


図-2.39 船舶の捕捉

捕捉チェーンに働く張力 T_c は、

$$T_c = \frac{1}{2} T \cos \theta / \cos \alpha$$

ここに、 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\theta = 30^\circ$ であり、

$$T_c = \frac{1}{2} T = T_0 \quad \text{となる。}$$

したがって、捕捉チェーンは連結チェーンと同一断面とする。

6) 浮体の設計

① 浮体に加わる下向きの力

浮体は船舶衝突時に働く下向きの力に対して沈まないように設計する。(浮体が沈むと捕捉チェーンも沈むことになり船舶を捕捉することができない)

浮体に加わる下向きの力 N は、

(表-2.38参照)

$$N = T \sin \theta$$

ここに、 T : 連結チェーンの張力 (t)

θ : 引張り角度 ($\theta = 30^\circ$)

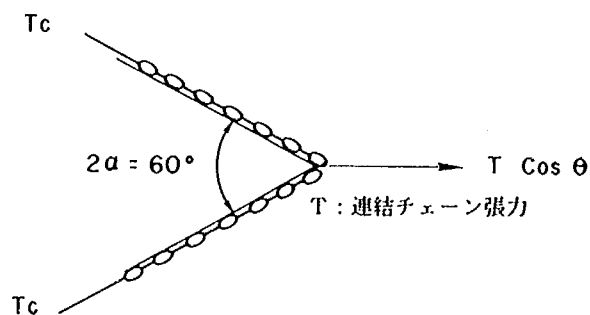


図-2.40 船首角度

表-2.38 浮体に加わる下向きの力

	単位	タイプA	タイプB	タイプC ₁	タイプC ₂
船舶規模	G. T	500	1000	4000	4000
T	(t)	36.4	72.5	290.1	145.1
N	(t)	18.2	36.3	145.1	72.6

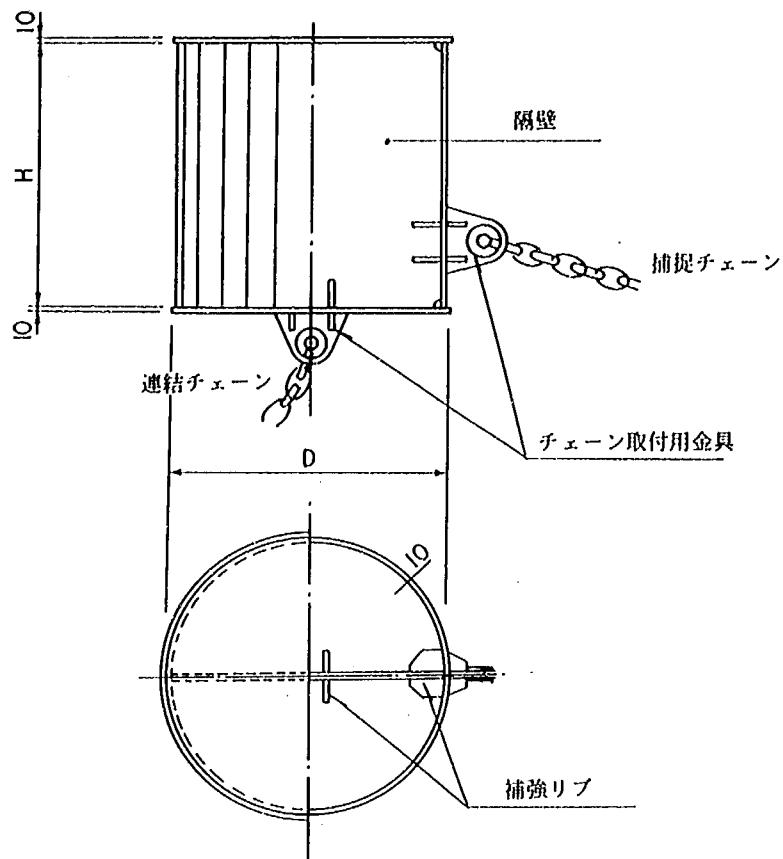


図-2.41 浮体の形状寸法

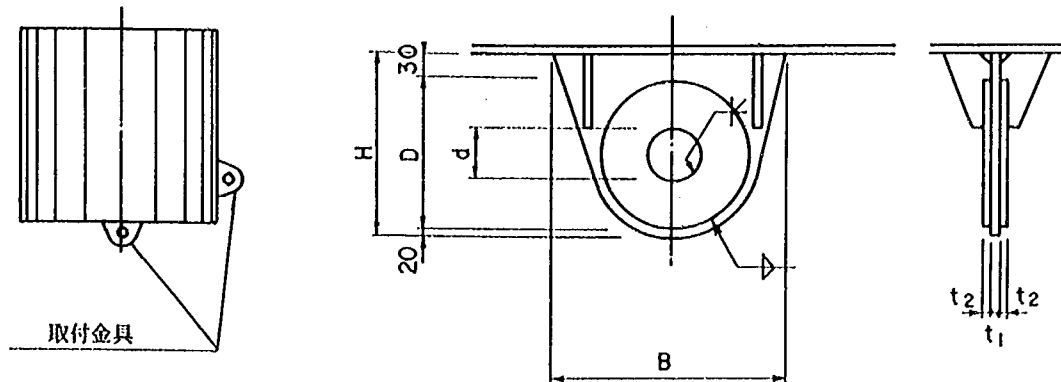
今、浮体の形状寸法は図-2.41に示すような円筒形とし、浮力は下向きの力 N と浮体の重量の和よりも大きくなることを条件とすれば、浮体の形状寸法は表-2.39のように決定される。

表-2.39 浮体の形状寸法

	単位	タイプA	タイプB	タイプC ₁	タイプC ₂
浮体径D	m	3.2	4.0	6.0	4.8
浮体高H	"	3.2	4.0	6.0	4.8

② 取付金具の形状寸法の決定

取付金具の形状寸法および板厚は以下の通りとする。(図-2.42参照)

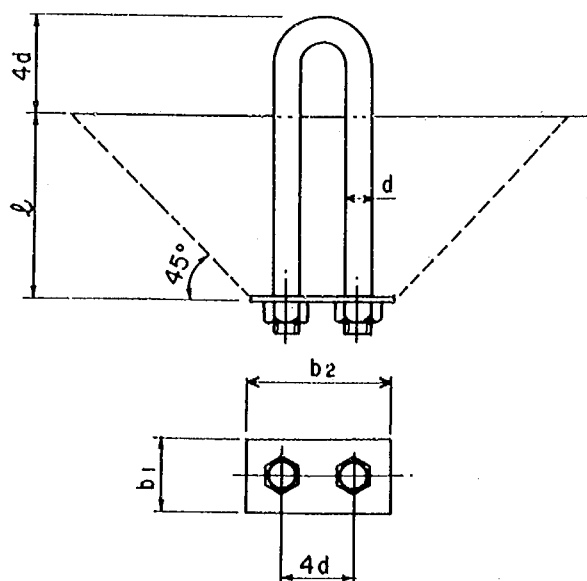


	単位	タイプA	タイプB	タイプC ₁	タイプC ₂
B	mm	380	530	1030	720
H	"	280	380	780	510
D	"	230	330	730	460
d	"	102	143	316	208
t ₁	"	12	16	22	16
t ₂	"	9	12	28	19

図-2.42 取付金具の形状寸法

③ 沈錘のチェーン取付金具の設計

図-2.43のようにチェーン用棒鋼を加工して、沈錘内に埋め込むものとする。



	単位	タイプA	タイプB	タイプC ₁	タイプC ₂
呼び径 d	mm	44	62	137	90
b ₁	"	130	180	410	270
b ₂	"	310	440	960	630
ℓ	"	300	400	800	600

図-2.43 チェーン取付金具

(3) 構造図

設計の一例として図-2.44に1000GTの船舶を対象として設計されたバリアー型防衛工の構造図を示す。

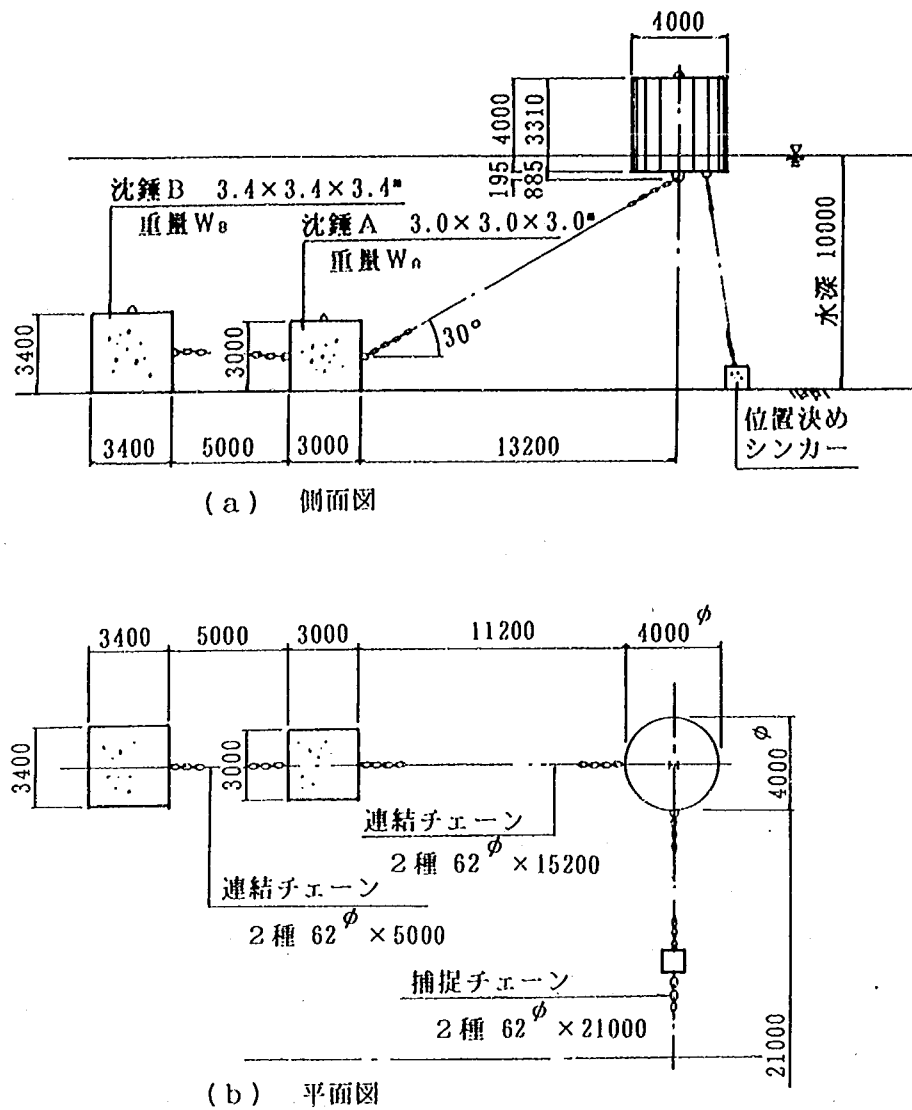


図-2.44 バリアー形式防衛工構造図

3. 防衝工の形式選定に関する考察

3.1 性能

3.1.1 直接形式防衝工の性能

(1) 防衝機能の比較

図-3.1に荷重変位曲線を模式的に分類する。タイプ1は多室型および外周板の応力を無視した複合材型防衝工に、タイプ2は本来の複合材型防衝工に、タイプ3はビーム型防衝工に対応する。

タイプ1の荷重～変位曲線を持つ防衝工は、荷重と変形が比較的広範囲の船舶規模に対応できる利点があるが、エネルギーの吸収効率が各タイプ中最も小さく、大きなエネルギーを吸収するには、大きな変形量を必要とする。

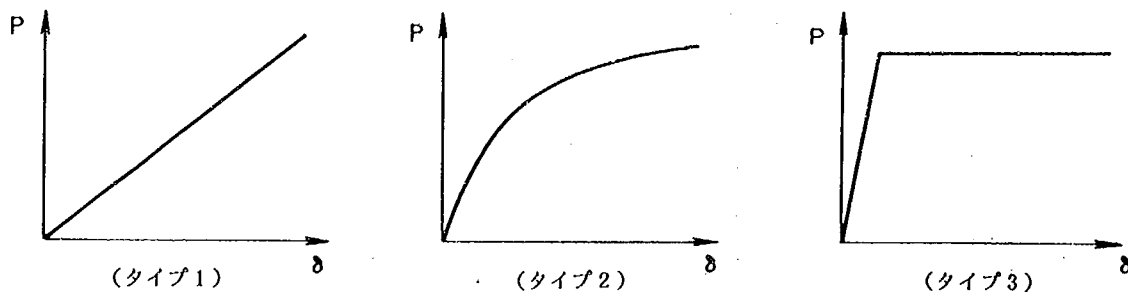


図-3.1 荷重変位曲線モデル

タイプ3の荷重～変位曲線を持つ防衝工は、エネルギーの吸収効率が高いため、比較的小さな変形で大きなエネルギーを吸収できる利点があるが荷重が大きくなるとエネルギーを吸収できないため、想定した船舶規模より小さい船舶への対応ができない。

タイプ2の荷重～変位曲線は、タイプ1とタイプ3の荷重～変位曲線の短所を解消しており、防衝工の荷重～変位曲線としては理想的である。ただし、複合材型で外周板を考慮する場合、外周板の最少板厚を腐食、製作加工性を考慮して4.5mmとすれば、外周板の耐力が過大となるため、小規模な船舶への対応は困難となる。(Cタイプのみ対応可能)

(2) 施設の規模

表-3.1に吸収エネルギーと構造幅の関係を示す。多室型は船舶規模が大きくなると施設規模もかなり大きくなる。最も規模について効率の良い構造はビーム型であるが、表裏一体の関係として小さな変位で大きな反力が生じるため、船舶側の被害が大きくなのものとされる。複合材型では吸収エネルギーが10,000 t・mに至るまでは、外周板が強度を

表-3.1 防衝工の構造幅

単位〔m〕			
形式 吸収 エネルギー	多室型	複合材型	ビーム型
1,250 t・m	3.4	4.2*	2.3
2,500 t・m	4.0	5.0*	2.6
10,000 t・m	5.1	4.8	2.7

*印は外周板の強度を無視したことを示す。

有する部材として期待されず、規模に大きな変化は無かったが、本調査で検討した以上の衝突エネルギーに対しては、外周板を有効に働かすことによって規模は多室型よりかなり小さくなるのが期待できる。

3.1.2 間接形式防衛工の性能

(1) 防衛機能の比較

人工島式は、設計条件となった船舶の規模よりも小さな船舶に対する場合でも適応性に優れ、船舶の損傷も最も少ない。これに対し滑動ブロック式及び杭式は、図-3.1に示したタイプ3の変位-荷重曲線を有し、衝突時に最大応力が発生するため、設計条件よりも小型の船舶に対しては衝撃力が過大となり船首の圧壊を招く。したがって、船舶の大きさに関する対応域はかなり狭い。

(2) 施設の規模

間接形式防衛工では、橋脚の寸法や単位長さ当たりの工費及び規模が橋脚の前面を保護するか、部分的に保護するかで差が出てくることがあるため、ここでは、橋脚寸法を 20×20 および 60×60 の2通りに、防護方法を2面防護と全周防護に分けて比較した。

図-3.2に示すように、一般的に人工島形式が最も大きくなり、2面防護の場合、特に不利となる。ただし規模の大きな橋脚の全周防護の場合は滑動ブロック式と同程度の規模と考えられる。杭式は小型の船舶が対象となり、他の2種類のものと異なる設計条件において用いられるため、比較の意味はあまり無いが規模は著しく小さい。

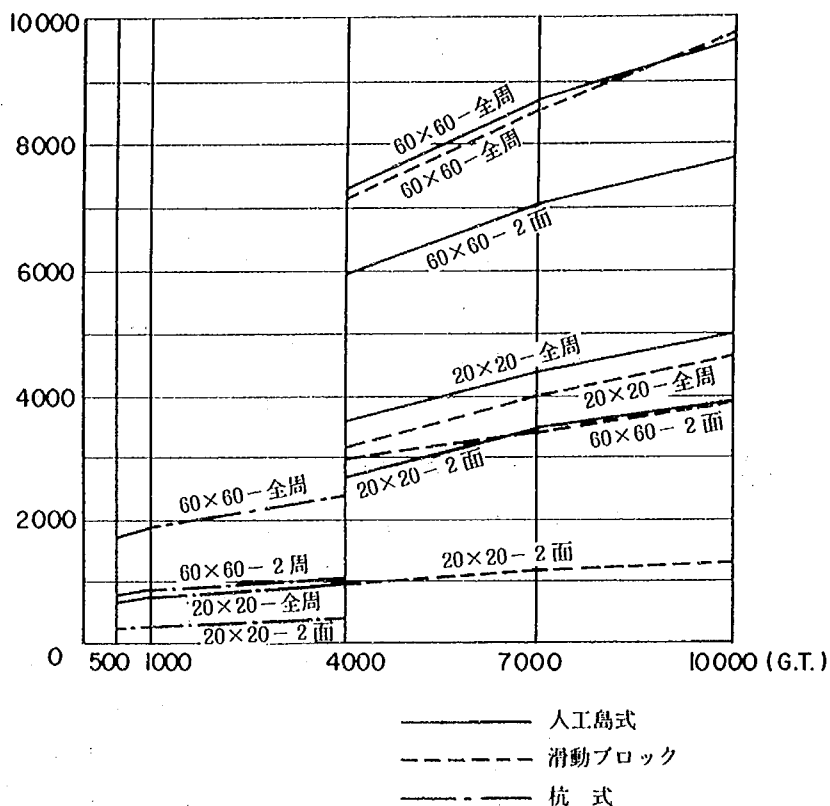


図-3.2 施設規模

3.1.3 バリヤー形式防衛工の性能

(1) 防衛性能

船舶の圧壊が生じない限度は本形式防衛工に生ずる滑動抵抗力（図-3.3参照）と船舶の圧壊荷重との関係から求めることができる。これによると表-3.2のようになり、20mの停止距離の場合は設計の対象とした船舶の総トン数の $1/5$ 程度、停止距離40mの場合は、 $1/10$ 程度の総トン数を有する船舶までは船首の圧壊は生じないことがわかる。ただし、沈鍾が海底に埋没している場合は滑動の初期において平均滑動抵抗力に対し4倍程度の抵抗力が生じることから、対応性は著しく低下する。一般に小型船舶ほど航行量が多く、事故発生の可能性も高いと考えられるため、捕捉チェーンに緩衝材を設置する、あるいは徐々に抵抗力を増大させる等といった工夫は必要となってくると考えられる。

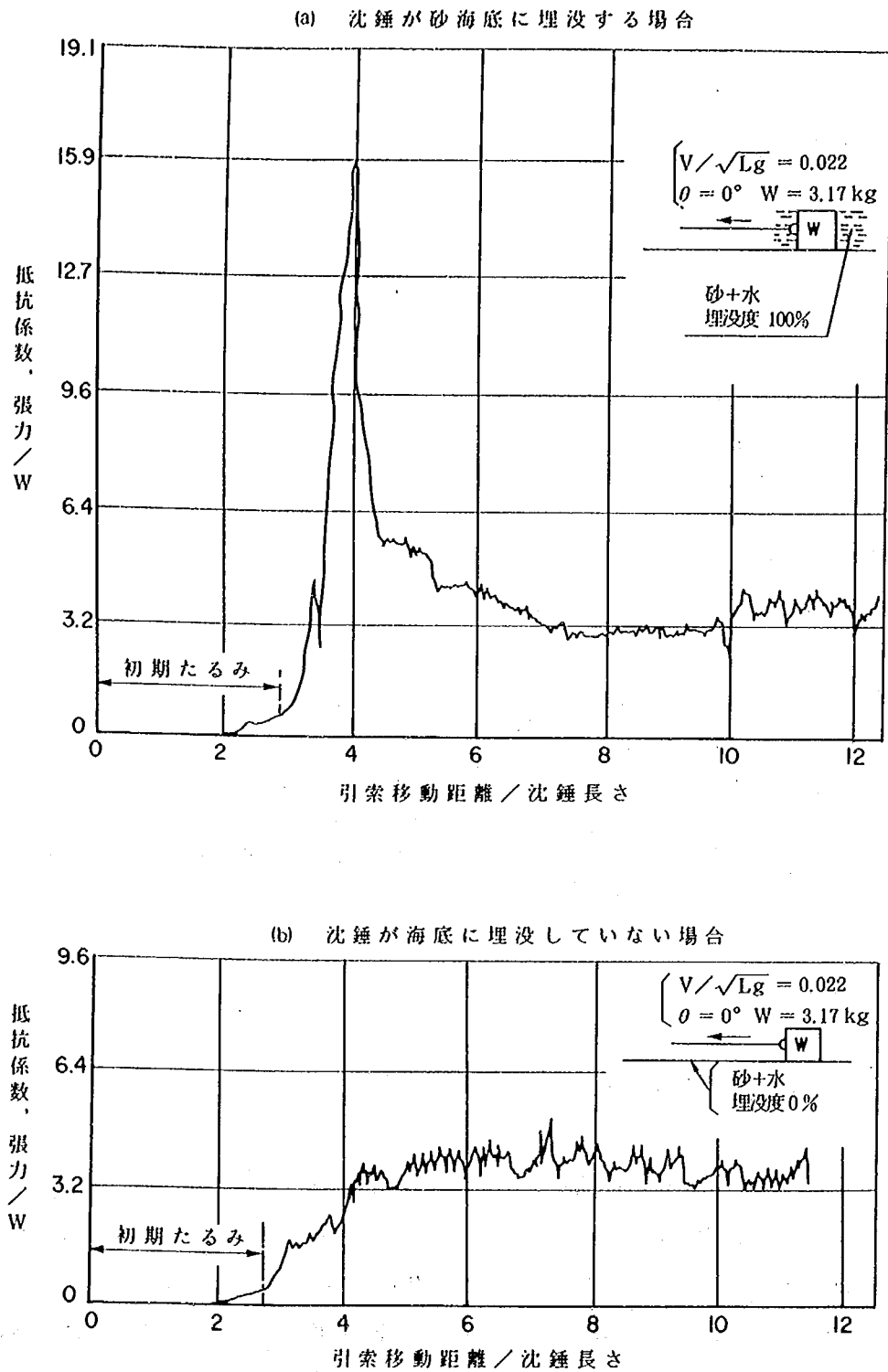


図-3.3 引張り開始時の抵抗変化（海底への埋没度影響）

表- 3. 2 500 G T規模の船舶の衝突に対する安全率

	単位	タイプA	タイプB	タイプC ₁	タイプC ₂
船舶規模	G. T.	500	500	500	500
船舶圧壊荷重 P_{cr}	t	300	300	300	300
平均滑動抵抗 D_n	t	63. 0	125. 5	502. 5	251. 2
安全率 P_{cr}/D_n		4. 8	2. 4	0. 60	1. 2

(2) 施設の規模

構造物としての規模はあまり大きくない。しかし図- 3. 4 に示す様に本形式は沈鍾がかなり長い区間を移動するために、必要とされる水域はかなり広くなる。特に橋脚から離れるほど船舶を捕捉すべき範囲も広がり、工費の増大と施設の大規模化を招くと考えられる。

3. 2 経済性

3. 2. 1 直接形式防衛工の工費

直接形式防衛工の製作費、架設費および総工費を表- 3. 3 ~ 5 に示す。また衝突エネルギーと工費の関係を図- 3. 5 に示す。概略設計を行った範囲では、対象船舶に関わらず最も経済的と言えるのは多室型防衛工であり、ビーム型防衛工についてはここで対象とした船舶よりもかなり小型の船舶で総工費は小さくなると予想される。また、複合材型防衛工については充填材や外周板を用い、緩衝性能を高めるため、多室型よりも常に高価なものとなる。

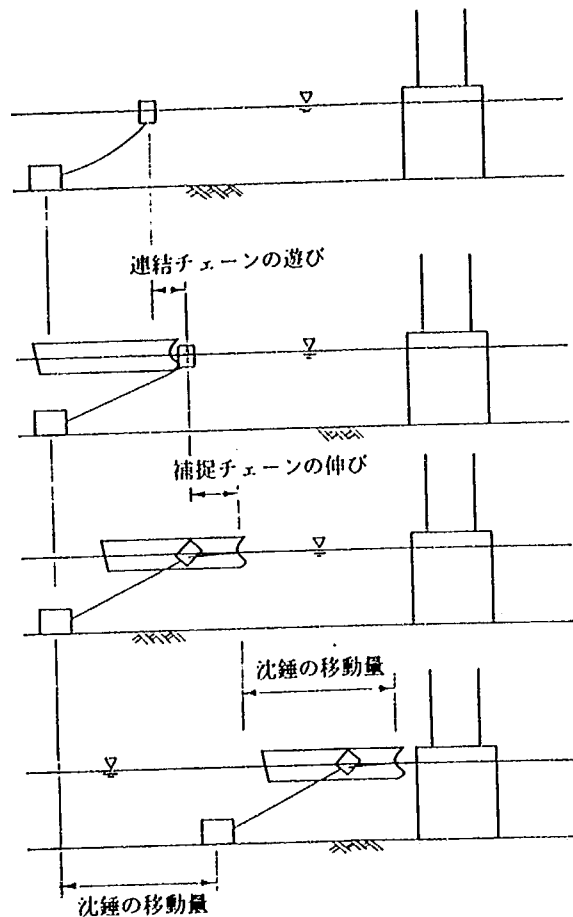


図- 3. 4 必要な水域

表-3.3 直接形式防衛工の製作費

(単位: 千円)

形 式		項 目	単 位	数 量	単 価	金 額
多 室 型	Aタイプ	製 作 費	t	59.220	439.2	26009
		塗 装 費	m ²	2408.4	2.25	5419
		一 般 管 理 費		上記計の12%		3771
		計				35199
	Bタイプ	製 作 費	t	69.810	439.2	30661
		塗 装 費	m ²	2868.0	2.25	6453
		一 般 管 理 費		上記計の12%		4454
		計				41568
	Cタイプ	製 作 費	t	112.280	439.2	49313
		塗 装 費	m ²	4516.4	2.25	10162
		一 般 管 理 費		上記計の12%		7137
		計				66612
複 合 材 型	Aタイプ	製 作 費	t	74.196	439.2	32587
		塗 装 費	m ²	3780.0	2.25	8505
		硬質ポリウレタン	m ³	1598.0	28.0	44744
		一 般 管 理 費		上記計の12%		10300
		計				96136
	Bタイプ	製 作 費	t	91.620	439.2	40240
		塗 装 費	m ²	4722.0	2.25	10625
		硬質ポリウレタン	m ³	2473.0	28.0	69244
		一 般 管 理 費		上記計の12%		14421
		計				134530
	Cタイプ	製 作 費	t	92.160	439.2	40477
		塗 装 費	m ²	3866.4	2.25	8699
		硬質ポリウレタン	m ³	3668.0	28.0	102704
		一 般 管 理 費		上記計の12%		18226
		計				170106
ビ ム 型	Aタイプ	製 作 費	t	144.450	439.2	63442
		塗 装 費	m ²	1599.0	2.25	3598
		一 般 管 理 費		上記計の12%		8045
		計				75085
	Bタイプ	製 作 費	t	198.678	439.2	87259
		塗 装 費	m ²	1803.0	2.25	4057
		一 般 管 理 費		上記計の12%		10958
		計				102274
	Cタイプ	製 作 費	t	557.584	439.2	244891
		塗 装 費	m ²	4538.0	2.25	10211
		一 般 管 理 費		上記計の12%		30612
		計				285714

表-3.4 直接形式防衛工の架設費

(単位:千円)

形 式		項 目	単 位	数 量	単 価	金 額
多 室 型	Aタイプ Bタイプ	DB (1500 t 積)	日	8.5	75	637
		TB (1000 P S)	"	8.5	300	2550
		FC (50 t 吊)	"	8.5	230	1955
		TB (800 P S)	"	8.5	250	2125
		労 務 費	人	72.0	18	1296
		雑 品		上記計の10%		856
		諸 経 費		上記計の30%		2826
		合 計				12245
	Cタイプ	DB (1500 t 積)	日	17.0	75	1275
		TB (1000 P S)	"	17.0	300	5100
		FC (50 t 吊)	"	10.0	230	2300
		TB (800 P S)	"	10.0	250	2500
		労 務 費	人	84.0	18	1512
		雑 品		上記計の10%		12687
		諸 経 費		上記計の30%		3806
		合 計				16493
複 合 材 型	Aタイプ Bタイプ Cタイプ	DB (1500 t 積)	日	8.5	75	637
		TB (1000 P S)	"	8.5	300	2550
		FC (50 t 吊)	"	8.5	230	1955
		TB (800 P S)	"	8.5	250	2125
		労 務 費	人	72.0	18	1296
		雑 品		上記計の10%		856
		諸 経 費		上記計の30%		2826
		合 計				12245
ビ ー ム 型	Aタイプ Bタイプ	DB (1500 t 積)	日	8.5	75	637
		TB (1000 P S)	"	8.5	300	2550
		FC (50 t 吊)	"	8.5	230	1955
		TB (800 P S)	"	8.5	250	2125
		労 務 費	人	96.0	18	1728
		雑 品		上記計の10%		900
		諸 経 費		上記計の30%		2968
		合 計				12863
	Cタイプ	DB (2000 t 積)	日	17.0	97	1649
		TB (1500 P S)	"	17.0	370	6290
		FC (100 t 吊)	"	10.0	340	3400
		TB (1000 P S)	"	10.0	300	3000
		労 務 費	人	112.0	18	2016
		雑 品		上記計の10%		1636
		諸 経 費		上記計の30%		5397
		合 計				23388

表-3.5 直接形式防衛工の工費

(単位:千円)

形 式		製 作 費	架 設 費	合 計
多 室 型	Aタイプ	35,199	12,245	47,444
	Bタイプ	41,568	12,245	53,813
	Cタイプ	66,612	16,493	83,105
複 合 材 型	Aタイプ	96,136	12,245	108,381
	Bタイプ	134,530	12,245	146,775
	Cタイプ	170,106	12,245	182,351
ビ ー ム 型	Aタイプ	75,085	12,863	87,948
	Bタイプ	102,274	12,863	115,137
	Cタイプ	285,714	23,388	309,102

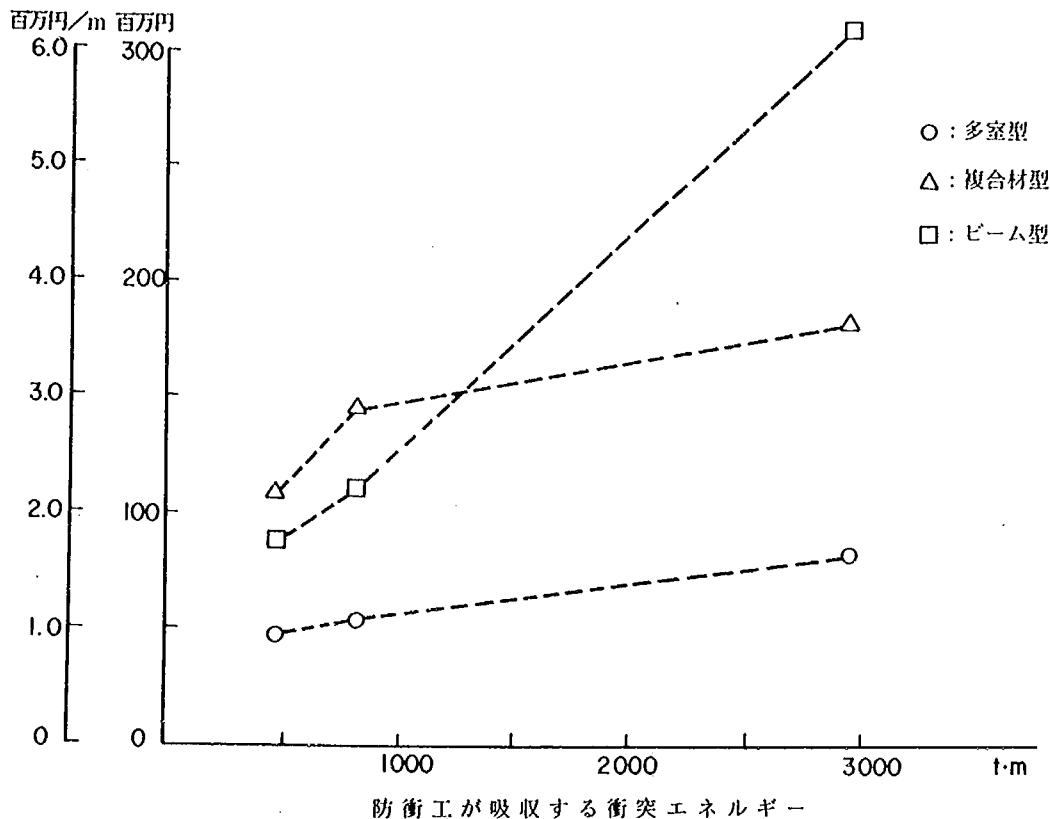


図-3.5 直接形式防衛工の吸収エネルギーと工費

3.2.2 間接形式防衛工の工費

間接形式防衛工の数量集計表, 工費をそれぞれ表-3.5, 6に示す。また水深10mの場合における衝突エネルギーと工費の関係を図-3.6に、水深および地盤が工費に及ぼす影響を図-3.7に示す。

杭式は小規模の場合は安価であるが、吸収エネルギーの増加に対する工費の増加量が大きく、4000GTを越える大船舶への対応の可否には疑問がある。人工島式および滑動ブロック式の工費は船舶の規模の影響に敏感でない。一般に、人工島式は最も高価であるが、大規模な橋脚の全周防護では滑動ブロック式よりも安価となった計算結果も得られた。人工島式では部分的な防護の場合は側面盛り土が必要とされ

るため防護長が短くても工費は高くなる。

人工島式も、滑動ブロック式も水深が大きくなると工費の急激な増加を招く。

表-3.5.1 人工島式防衛工の数量集計表

項目 \ タイプ		単位	タイプ1	タイプ2	タイプ3(5)	タイプ4
前面盛土 (10m幅当り)	コンクリートブロック積工 (0.4×0.4×0.35m)	m ²	243.4	280.3	305.6	305.6
	根固めブロック工 (2t用, t=0.6m)	m ²	157.9	135.6	119.9	231.7
	堤体工 (碎石・土砂)	m ³	2478.6	2569.1	2629.8	4788.7
	捨石	m ³	194.0	199.0	206.5 (1239.0)	256.5
側面盛土 (10m幅当り)	コンクリートブロック積工 (0.4×0.4×0.35m)	m ²	177.6	203.4	221.2	221.2
	根固めブロック工 (2t用, t=0.6m)	m ²	157.9	135.6	111.9	231.7
	堤体工 (碎石・土砂)	m ³	1849.5	1861.0	1888.2	3592.1
	捨石	m ³	158.5	160.0	161.0 (966.0)	211.0
コーナー盛土 (二ヶ所当り)	コンクリートブロック積工 (0.4×0.4×0.35m)	m ²	415.2	589.7	700.5	700.5
	根固めブロック工 (2t用, t=0.6m)	m ²	756.8	702.7	653.5	1445.0
	堤体工 (碎石・土砂)	m ³	4875.3	5230.3	5438.4	12769.4
	捨石	m ³	590.9	637.5	669.5 (4016.9)	1032.9

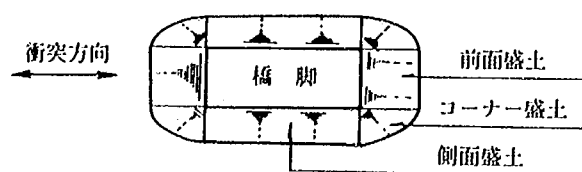


表-3.5.2 滑動ブロック式防衛工の数量集計表

項目 \ タイプ			単位	タイプ1	タイプ2	タイプ3(5)	タイプ4
積算幅 当り 数量	積 算 幅		m	5.5	6.5	5.35	5.35
	滑 動 ブロック 数 量	コンクリート体積	m ³	266.4	403.0	404.1	404.1
		型 枠 面 積	m ²	208.4	278.5	298.9	298.9
		鉄 筋	t	18.6	28.2	28.3	28.3
	ス ラ ブ マ ッ ト 数 量	コンクリート体積 (水中コンクリート)	m ³	670.1	731.3	586.8	1456.2
		型 枠 面 積	m ²	316.9	298.5	276.2	654.7
	捨 石		m ³	74.5	101.4	92.3 (553.7)	184.6
10 m 当り 数量	滑 動 ブロック 数 量	コンクリート体積	m ³	484.4	620.0	755.3	755.3
		型 枠 面 積	m ²	379.0	428.5	558.7	558.7
		鉄 筋	t	33.8	43.4	52.9	52.9
	ス ラ ブ マ ッ ト 数 量	コンクリート体積 (水中コンクリート)	m ³	1218.4	1125.1	1096.8	2721.9
		型 枠 面 積	m ²	576.2	459.2	516.3	1223.7
	捨 石		m ³	135.5	156.0	172.5 (1035.0)	345.0

表-3.5.3 杭式防衛工の数量集計表

項目 \ タイプ			単位	タイプ1	タイプ2(5)	タイプ3	タイプ4
積算幅 当り 数量	積 算 幅		m	9.1	10.5	17.1	10.5
	コンクリート		m ³	75.3	120.0	369.6	120.0
	型 枠 面 積		m ²	96.8	128.7	304.3	128.7
	鉄 筋		t	4.5	7.7	22.2	7.7
	鋼管ぐい (STK51)	寸 法	—	φ1000 t=16	φ1500 t=14	φ2000 t=22	φ1500 t=19
		杭 長	m	57.0	57.0 (87.0)	57.0	72.0
		鋼 重	t	22.1	29.2 (44.6)	61.2	50.0
10 m 当り 数量	コンクリート		m ³	82.7	114.3	216.1	114.3
	型 枠 面 積		m ²	106.4	122.6	178.0	122.6
	鉄 筋		t	4.9	7.3	13.0	7.3
	鋼 管 杭	杭長	m	62.6	54.3 (82.9)	33.3	68.6
		鋼 重	t	24.3	27.8 (42.5)	35.8	47.6

表-3.6.1 人工島式防衛工の概算工費

(単位:千円)

		単 価 (千円)	タイプ1		タイプ2		タイプ3(5)		タイプ4	
			数 量	工 費	数 量	工 費	数 量	工 費	数 量	工 費
前面盛土 (10m幅当り)	コンクリートブロック積	7.0千円/㎡	243.4	1704	280.3	1982	305.6	2139	305.6	2139
	根 固 め ブ ロ ッ ク	15.0 "	157.9	2369	135.6	2034	119.9	1799	231.7	3476
	堤 体 工	8.0千円/㎡	2478.6	19829	2569.1	20553	2629.8	21038	4788.7	38310
	捨 石	6.0 "	194.0	1164	199.0	1194	206.5 (1239.0)	1239 (7434)	256.5	1539
	現 場 諸 経 費	(35%)		8773		9010		9175 (11344)		15912
	合 計			33830		34753		35390 (43754)		61376
側面盛土 (10m幅当り)	コンクリートブロック積	7.0千円/㎡	177.6	1243	203.4	1424	221.2	1548	221.2	1548
	根 固 め ブ ロ ッ ク	15.0 "	157.9	2369	135.6	2034	111.9	1679	231.7	3476
	堤 体 工	8.0千円/㎡	1849.5	14796	1861.0	14888	1888.2	15106	3592.1	28737
	捨 石	6.0 "	158.5	951	160.0	960	161.0 (966.0)	966 (5796)	211.0	1266
	現 場 諸 経 費	(35%)		6776		6757		6755 (8445)		12259
	合 計			26135		26063		26054 (32574)		47286
コーナー盛土 (二ヶ所当り)	コンクリートブロック積	7.0千円/㎡	415.2	2906	589.7	4128	700.5	4904	700.5	4904
	根 固 め ブ ロ ッ ク	15.0 "	756.8	11352	702.7	10541	653.5	9803	1445.0	9803
	堤 体 工	8.0千円/㎡	4875.3	39002	5230.3	41842	5438.4	43507	12769.4	102155
	捨 石	6.0 "	590.9	3545	637.5	3825	669.5 (4016.9)	4017 (24101)	1032.9	6197
	現 場 諸 経 費	(35%)		19882		21118		21781 (28810)		43071
	合 計			76687		81453		84012 (111125)		166130

表-3.6.2 滑動ブロック式防衛工の概算工費 (10m幅当り)

(単位:千円)

		単 価 (千円)	タイプ1		タイプ2		タイプ3(5)		タイプ4	
			数 量	工 費	数 量	工 費	数 量	工 費	数 量	工 費
滑動ブロック	コンクリート	16.0千円/㎡	484.4	7750	620.0	9920	755.3	12085	755.3	12085
	型 枠	5.0千円/㎡	379.0	1895	428.5	2143	558.7	2794	558.7	2794
	鉄 筋	120.0千円/t	33.8	4056	43.4	5208	52.9	6348	52.9	6348
	掘 付 費	1000.0千円/基	1.82	1820	1.54	1540	1.87	1870	1.87	1870
スマット	コンクリート	19.2千円/㎡	1218.4	23393	1125.1	21602	1096.8	21059	2721.9	52260
	型 枠	6.0千円/㎡	576.2	3457	459.2	2755	516.3	3098	1223.7	7342
捨 石		6.0千円/㎡	135.5	813	156.0	936	172.5 (1035.0)	1035 (6210)	345.0	2070
現 場 諸 経 費		(35%)		15114		15436		16901 (18712)		27099
合 計				58298		59540		65190 (72176)		104526

表-3.6.3 杭式防衛工の概略工費 (10m幅当り)

(単位: 千円)

		単価 (千円)	タイプ1		タイプ2(5)		タイプ3		タイプ4	
			数 量	工 費	数 量	工 費	数 量	工 費	数 量	工 費
連結ブロック	コンクリート	16.0千円/㎡	82.7	1323	114.3	1829	216.1	3458	114.3	1829
	型 枠	5.0千円/㎡	106.4	532	122.6	613	178.0	890	122.6	613
	鉄 筋	120.0千円/t	4.9	588	7.3	876	13.0	1560	7.3	876
鋼管杭	製 作 費	300.0千円/t	24.3	7200	27.3 (42.5)	8190 (12750)	35.8	10740	47.6	14280
	打 込 み 費	2500.0千円/日	0.82	2050	0.95 (1.90)	2375 (4750)	1.75	4375	1.43	3575
現 場 諸 経 費		(35%)		4124		4859 (7286)		7358		7411
合 計				15907		18742 (28104)		28381		28584

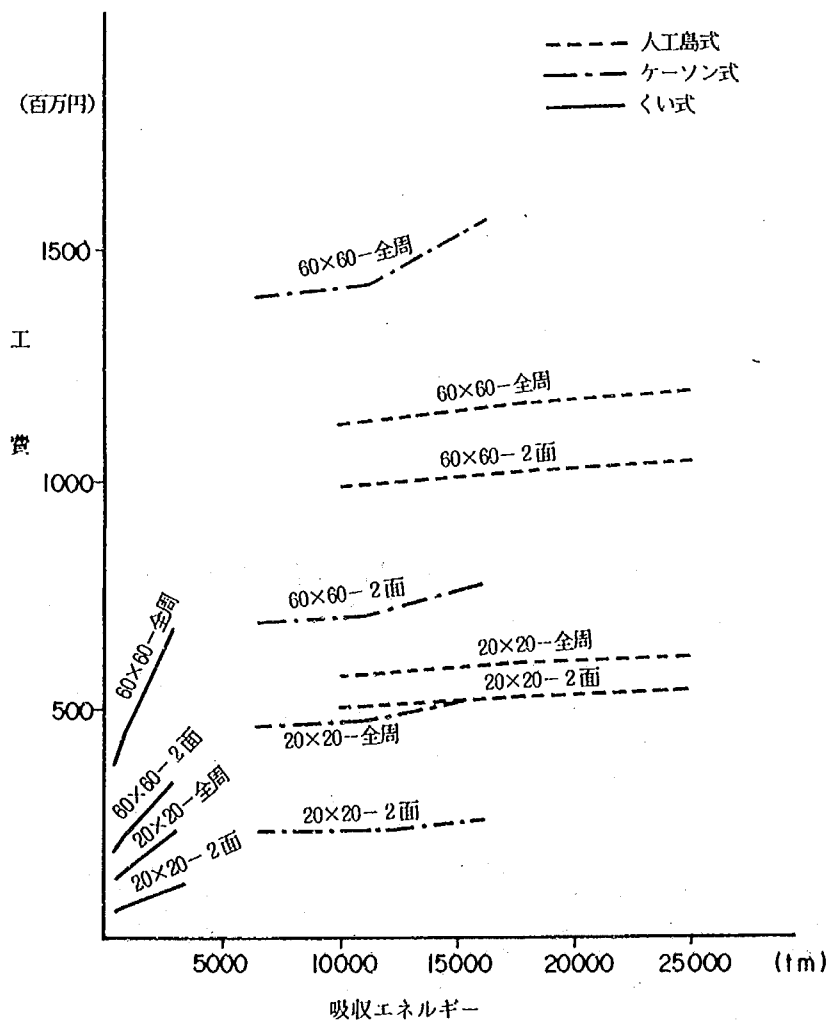


図-3.6 吸収エネルギーと工費

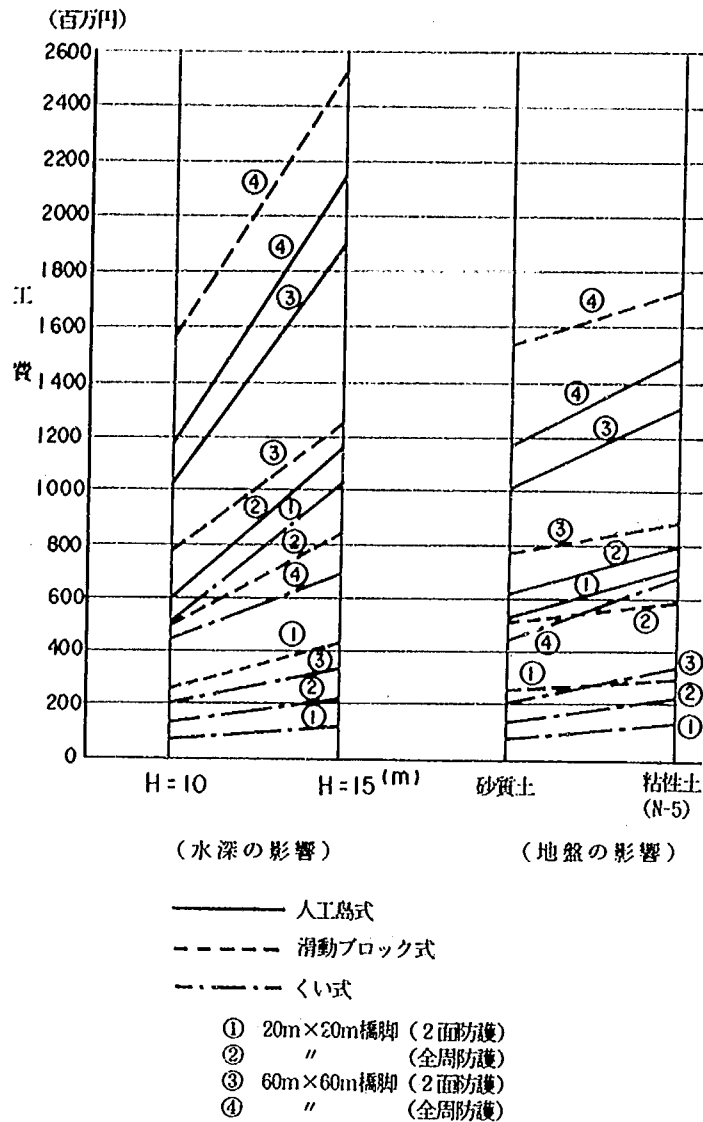


図-3.7 水深および地盤の工費に及ぼす影響

3.2.3 バリヤー形式防衛工

バリヤー形式防衛工の数量、工費を表-3.7, 8に示す。また、吸収エネルギーと工費の関係を図-3.8に示す。

工費は吸収エネルギーおよび設計停止距離にほぼ比例することがわかる。したがって、本形式の防衛工は設計条件が明らかになると工費を推定するのは容易と考えられる。また水深が大きくなってもチェーンの長さが変わる他は諸元に大きな変更はなく、間接形式防衛工に比べて水深の大きな所での適応性がよいと考えられる。

なお、バリヤー形式防衛工では直接形式防衛工との併用も考えられる。ここでは4000GT

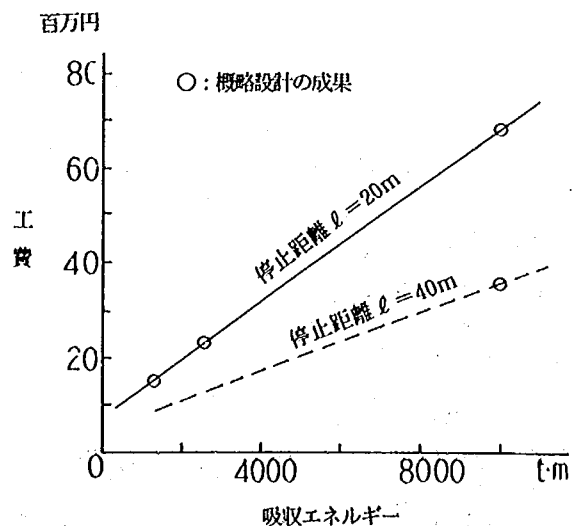


図-3.8 バリヤー型防衛工の吸収エネルギーと工費

の船舶に対し、タイプC₁のバリアー形式防衛工を単独で用いる場合と、タイプBのバリアー形式防衛工に多室型直接形式防衛工を用いる場合を比較した。その結果、併用時の工費は70百万円となり、単独使用時の費用（68百万円）とほぼ同程度の価格となった。ただし、直接形式防衛工の性能上、船舶の船首破壊を見込むため、防衛工が吸収できるエネルギーは小さい。

表-3.7 バリアー型防衛工の数量総括表

		単位	タイプA	タイプB	タイプC ₁	タイプC ₂
沈 鍾	コンクリート体積	m ³	67.0	132.6	522.5	189.2
	取 付 金 具	kg	726	1518	12342	4070
浮 体	SS41	kg	8314	13298	30748	19200
	SM50Y	"	2028	4242	10030	5384
	合 計	"	10342	17540	40778	24584
2 種 チェーン	呼 び 径	mm	44	62	137	90
	延 長	m	60.0	61.4	69.4	67.8
	重 量	kg	2544	5170	28523	12028
アンカーシャックル		個	10	10	10	10
位置決めシンカー		組	2	2	2	2
浮き（捕捉チェーン用）		個	2	2	4	4
浮体塗装面積		m ²	97.4	152.4	345.6	220.2

表-3.8 バリアー型防衛工の工費

(単位：千円)

	製 作 費	輸送架設費	合 計
タイプA (500G. T.)	8760	6237	14997
タイプB (1000G. T.)	15394	7817	23211
タイプC ₁ (4000G. T. $\ell=20$)	50580	17051	67631
タイプC ₂ (4000G. T. $\ell=40$)	24292	10854	35146

3.3 施工および維持管理

3.3.1 直接形式防衛工

(1) 製作・施工性

1) 製作の難易

多室型、複合材型は板厚の薄い鋼板を使用するため、ねじれ、反りなどが生じやすく、寸法精度の確保に留意しなければならない。一方、ビーム型では板厚の厚い鋼板で製作されるため、溶接量は多くなるが、精度確保は比較的容易である。

2) 施工の難易

多室型、複合材の場合には、分割構造とすると現地での継手作業が困難となるため、岸壁で地組立して、F Cによる一括架設が適当である。橋脚へのセットは精度を必要とする。

ビーム型の場合には、架台とビームを分割できるため、F Cによる大ブロック架設、小部材の組立のいずれも可能であり、橋脚へのセットも多室型、複合材型に比べ、誤差の吸収箇所が大きいいため容易である。ただし重量が大きいため、F C架設の場合には1ランク程度大きな吊能力を有するF Cが必要となる。

(2) 維持管理

1) 塗装面積

本調査で設計した各形式の防衛工の塗装面積を表-3.9に示す。

表-3.9 直接形式防衛工の塗装面積

形 式	多 室 型			複 合 材 型			ビ ー ム 型		
	Aタイプ	Bタイプ	Cタイプ	Aタイプ	Bタイプ	Cタイプ	Aタイプ	Bタイプ	Cタイプ
塗装面積 (㎡)	2408	2868	4516	3780	4722	3866	1599	1803	4538

塗装面積は3形式のうちビーム型が最も少ない。また、水平板のない複合材型(Cタイプ)も少なくなる。

塗り替え作業はビーム型が最も作業し易い。複合材型の内部は充填材があるため塗り替えが困難となる。

2) 衝突破損部材の交換の規模

今回の設計では、多室型、複合材型の場合は、セルを6~7ブロックに分割して、交換の規模の縮小に努めた。さらにブロック数を増すことも可能であるが、境界部の座屈強度を他の部分と差のない構造とする工夫が必要である。

ビーム型では、破損したビームのみを交換すれば良く、3案中最も交換規模を縮小できるが、支持架台に衝突した場合の処理は大がかりとなる。

3.3.2 間接形式防衛工

(1) 施工性

- 施工機械に関しては、汎用性のある小型作業性のみで施工可能な人工島が有利である。
- 施工精度では、どの形式でも激しい精度は必要としないが、杭式の場合には、杭打ちの橋脚に及ぼす影響について検討する必要がある。
- 海底、潮流条件

海底地盤が岩盤のような場合には、杭式は施工困難となる。

滑動ブロック式においては、スラブマットを直接基礎とする場合には、海底地盤の著しい凹凸は、掘削して平坦にしなければならない。

潮流が激しい場合には、人工島式では、堤体盛土土砂、碎石の流失に注意しなければならない。滑動ブロック式では水中コンクリートの打設に工夫を要する。

d. 工期について

工期は人工島式が施工規模も大きく最も長くなることが予想される。地盤の条件が良ければ、杭式が最も短い。

(2) 維持管理

人工島式では通常の管理が不要であり、衝突後はコンクリートブロック張りの部分的修復が必要となる。滑動ブロック式は滑動面の土砂の排除が必要であり、衝突後は起重機船でブロックを元の位置に戻す。ただしスラブマットのストッパーが破損した場合は作業が難しくなる。杭式では通常は不要だが、衝突後は杭を引き抜き新しいものと交換する必要がある。この場合、連結コンクリートブロックの解体が必要となり、作業は大がかりとなる。

3.3.3 バリアー形式防衛工

(1) 施工性

非航起重機船を用いた一括架設が可能であり、比較的容易である。ただし、正確な位置に設置するのが困難という問題もある。

(2) 維持管理

維持管理は比較的簡単であるが点検範囲が広くなるという欠点がある。また、防衛工が船舶に過剰の損傷を与えないように機能するために、沈鍾が海底砂に埋没しないように定期的な引き上げ作業を要する場合がある。修復に関しては、本形式防衛工が設計上は破壊を伴うことなく防衛機能を発揮することから、起重機船を用いて位置を所定の位置に戻すだけでよいが、沈鍾が海中差に埋没した状態で衝突が発生した場合、チェーンが損傷し、交換が必要となる場合も考えられる。

3.4 設計の信頼性

3.4.1 直接形式防衛工

(1) 計算の信頼性

今回検討した防衛工のエネルギー吸収機構は、いずれも塑性域での変形に期待しており、実際の変形が計算通りに生じるとは言い難い。

多室型においては、水平板の破損が食い込み型となる前提であるが、異なった破損の形態をとることもあり得る。

外周板と充填材を組み合わせ、水平板を設置しない複合材型防衛工においては、充填材の品質を良く把握した上で用いるのであれば、かなり計算値に近い変形形状が期待できるものと思われる。

ビーム型防衛工においては、降伏点を越えた範囲での変形が完全塑性体と見なせるか問題であり、ビームの破断時も、座屈した圧縮部材の抵抗、応力集中などの要因を考慮すれば、違った結果となる可能性が高い。

3.4.2 間接形式防衛工

(1) 人工島式

船底と法面の摩擦係数が異なると吸収エネルギーに差異を生ずるが、衝突エネルギーは位置エネルギー

と摩擦力から構成されるため、その影響は比較的小さい。

(2) 滑動ブロック式

滑動ブロックの滑動面の摩擦係数が異なると吸収エネルギー能力に差異を生ずる。その誤差の比率はそのまま吸収エネルギー能力の比率となって現れるので、その影響は大きい。

また、潮位の干満差による浮力の影響で滑動ブロック重量に変化を生ずるので誤差が生ずる。ただし、立壁のボリュームがフーチングに比べて小さいので、干満差による吸収エネルギー能力の差はあまり大きくならない。

(3) 杭式

杭の曲げ座屈によりエネルギーを吸収する機構であり、潮位の干満差や積荷の軽重によって衝突荷重の作用位置が変わることにより吸収エネルギー能力に差異を生ずるが、水深が深ければその影響は小さい。また、本調査では杭を完全塑性体とみなしたが、実際には変形が大きくなると杭断面が偏平となって断面係数が減少するためエネルギー吸収能力は低下することを考慮しなければならない。断面係数の減少は腐食によっても生ずる。

さらに、杭群ブロックの中心に荷重が作用しない場合には杭にねじれ変形が生じ、計算と一致しない。

3.4.3 バリヤー形式防衛工

信頼性に関しては次の問題がある。

- a. チェーンの捕捉効果が船首形状によっては期待し難くなる。
- b. 衝撃力を考慮する場合チェーンに見込むべき安全性が明確でない。
- c. 海底の状況によって沈錘の滑動に対する抵抗力は異なるが、資料は十分ではない。
- d. 潮汐によって引っ張り角度が変化し、特に浅い水域では滑動抵抗力が大きく変化してしまう。

3.5 防衝工の形式選定のためのまとめ

3.5.1 防衝工の設計の流れ

図-3.9に防衝工の形式選定の流れ図を示す。防衝工の設計においては、まず橋梁架設地点付近の潮流、風向、船舶航行状況、および走錨、船舶相互の衝突および座礁など事故事例の調査を行うことによって船舶に関する設計条件を定める。続いて船舶の重量と衝突速度より、衝突エネルギーを計算し、船舶の強度および許容変形量を踏まえ防衝工が吸収すべき衝突エネルギーを求める。設計に用いる最大の衝突エネルギーが定まると、船舶規模の多様性、水深や地盤、占有が可能な水域面積などを設計条件とし防衝工の形式を選定し、概略の設計を行う。概略設計がなされた防衝工に対しては工費の計算、施工・維持管理計画の立案、直接形式防衝工ならば橋脚基礎の安定計算等、必要な検討を加え、細部構造設計を行い作業を終了させる。

本調査ではこの設計の一連の作業のうち、形式選定に重点を置いた。以下に3.1から4における防衝工の形式選定において考慮すべき事項に関する考察をまとめ、防衝工の形式選定の目安となる資料を総括する。

3.5.2 船舶規模と防衝工

衝突船舶の最大規模が決定した場合、適当な防衝工形式は直ちに決定されるわけではないが、おおよその絞り込みは可能である。3.1等の考察をもとに、対応できる船舶の範囲を表-3.10に示す。表-3.10は必ずしも定量的な基準があるわけではなく、筆者らの直観的な判断も混入している。判断の根拠は施設規模、経済性および構造的な妥当性である。例えばビーム型および杭型防衝工では、経済的にも機能的にも大型船舶には適しておらず、想定されるほとんどの場合において別の形式を用いた方が全面的に良い選択となることから、大型の船舶に対しては不適と判断したが、人工島式に関しては常に経済的に劣るにせよ機能的には常に最も優れており、機能を優先する場合に用いられる可能性もあることから小型船舶に対しても適用可能とした。

大略的に分類すると、小規模船舶にはビーム型、杭型が、中規模船舶には多室型、複合材型が、大規模船舶には人工島型、滑動ブロック型およびバリアー型が有力になると考えられる。

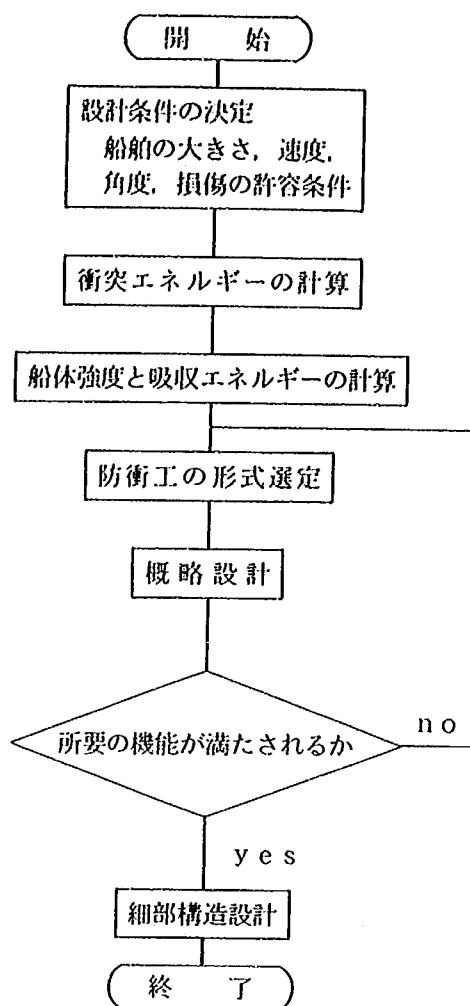


図-3.9 設計の流れ

表-3.10 適用できる船舶規模

形式	型	$\frac{1}{4}P_D$	$\frac{1}{2}P_D$	$\frac{5}{4}P_D$	$\frac{7}{8}P_D$
直接形式防衛工	多室型	×	×	△	○
	複合材型	×	×	×	△
	ビーム型	×	×	×	×
間接形式防衛工	人工島型	○	○	○	○
	滑動ブロック型	×	×	×	×
	杭型	×	×	×	×
変位形式防衛工	バリアー型	△	○	○	○

3.5.3 防衛機能

防衛工の選定において、適用できる船舶規模の範囲は経済性ととも形式を選定する上での重要な条件となる。表-3.11に各形式防衛工の船舶規模に関する適用性に関してまとめる。設計最大衝突船舶よりも小規模の船舶の衝突に対して最も優れた緩衝機能を発揮する形式は人工島型であり、次いでバリアー型が優れている。これに対して、衝突の初期に最大反力が発生するビーム型、滑動ブロック型および杭型防衛工は適応性が皆無に近い。多室型および複合材型はある程度適応性があるものの、多くの場合では不十分であると考えられる。したがってこれらの防衛工では、小型船舶用の緩衝工を衝突部に更に付加するあるいは、バリアー型防衛工と併用するなどの処置が必要となってくることが多いと考えられる。

表-3.11 船舶規模の適用性

形式	型	～ 500 G T	500～ 1,000 G T	1,000 ～ 4,000 G T	4,000 ～ 10,000 G T	10,000～
直接形式防衛工	多室型	-----			-----	
	複合材型		-----			-----
	ビーム型	-----	-----			
間接形式防衛工	人工島型	-----		-----		
	滑動ブロック型			-----		
	杭型	-----	-----	-----		
変位形式防衛工	バリアー型	-----				

3.5.4 工費の概算

図-3.10に間接形式防衛工に関して概算工費を橋脚防護長（例えば20×20mの矩形断面を有する橋脚では全周防護の場合は80m、2面防護の場合は40m）で除した単位長さ当たりの工費を示す。直接形式については既に図-3.5に示してある。またバリアー形式については、後述するように、このような表現で妥当でない。工費に関しては、設計条件や設置形態の影響が形式ごとに異なるため、単純な比較はできないが、これらを踏まえ概算工費の目安を得る方法を下に示し、表-3.12にまとめる。ここで示した目安は、形式選定の段階の参考とするには有用と考えられる。なお式中Cは工費（百万円）を、Eは防衛工が吸収すべきエネルギー（t・m）を、 ℓ は橋脚防護長（m）を意味する。

(1) 直接形式防衛工

a. 多室型およびビーム型

多室型およびビーム型防衛工は船舶規模と工費がほぼ比例するものとみなすことができ、工費Cは次の式で概算される。

多室型

$$C = (0.83 + 0.00028E) \ell$$

ビーム型

$$C = (0.89 + 0.00178E) \ell$$

b. 複合材型防衛工

複合材型防衛工の工費は、多室型およびビーム型防衛工と異なり、工費が衝突エネルギーに比例するとはみなし難い。しかし、適用範囲を1000 G. T. 以上とすると、工費は多室型と同様に船舶規模の増大にともない、緩やかに増加するものと考えられる。そこで、ここでは1000 G. T. および4000 G. T. の船舶に

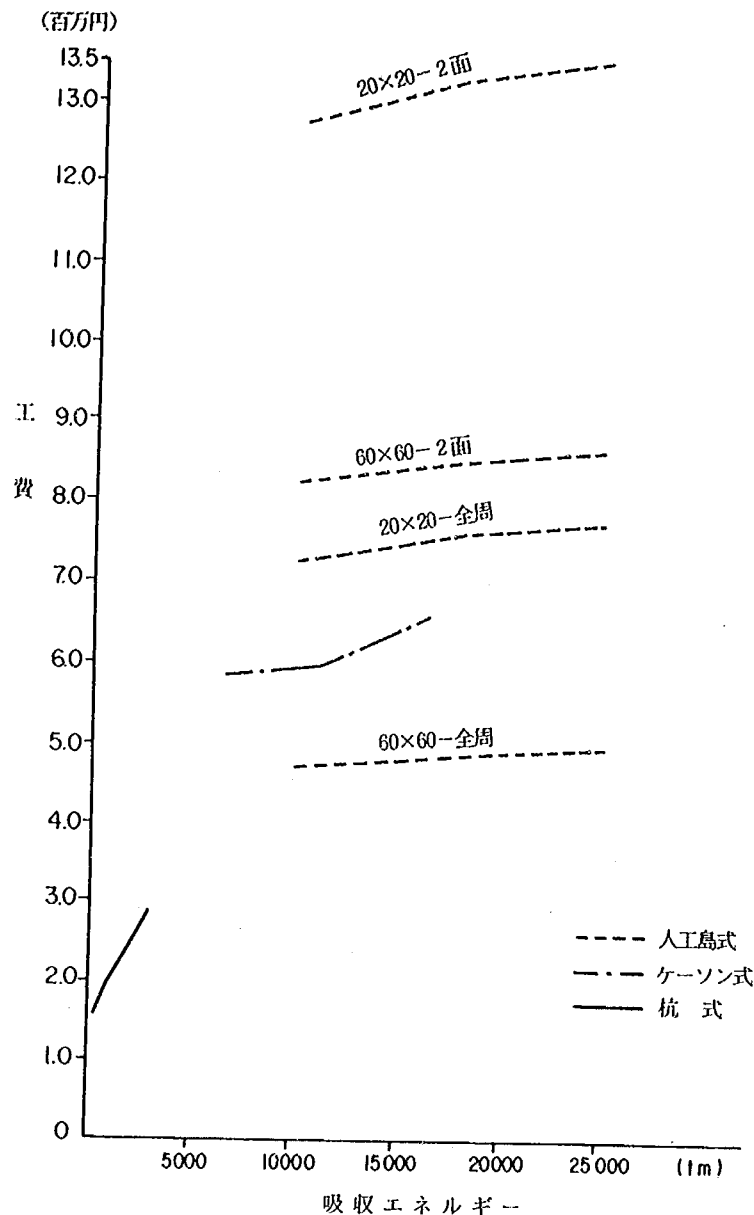


図-3.10 間接形式防衛工の工費

対する工費のみを用いて次の計算式とした。

$$C = (2.65 + 0.00033 E) \ell, \text{ただし船舶規模は1000 G. T. 以上}$$

表-3.12 防衛工の工費

	防 衛 工 の 型	工 費	備 考
直接形式防衛工	多 室 型	$C = (0.83 + 0.00028 E) \ell$	
	複 合 材 型	$C = (2.65 + 0.00033 E) \ell$	
	ビ ー ム 型	$C = (0.89 + 0.00178 E) \ell$	
間接形式防衛工	人 工 島 型	$C = \{3.5 \ell + 2.7 \ell_s (72.2 + 0.0005 E) n_c\} \{(h + 3) / 13\}^2$ ここに, ℓ_s : 側面盛土の延長 (m), n_c : コーナー盛土の個数, h : 水深 (m)	地盤は良質の場合を想定している
	滑動ブロック型	$C = (0.529 + 0.000007 E) h \ell$ ここに h は水深 (m) である。	地盤の影響を特に考慮しなくても良い
	杭 型	$C = (0.14 + 0.00005 E) h \ell$ ここに h は水深 (m) である。	地盤の影響は杭の根入れ長さに影響する
変位形式防衛工	バ リ ア ー 型	$C = (78.5 + 0.00595 E) / \ell_s$ ここに ℓ_s は沈錘の滑動距離である。	1 基あたりの工費の概算方法である

(2) 間接形式防衛工

a. 人工島型防衛工

人工島型防衛工は防護形態および水深によって工費が変化するため、工費概算はやや複雑となるが、次式でおおよその推定は可能である。ただし地盤は良質の砂質土とし、地盤が不良になると工費は概略設計で示したように増大する。

$$C = \{3.5 \ell + 2.7 \ell_s + (72.2 + 0.0005 E) n_c\} \{(h + 3) / 13\}^2$$

ここに, ℓ_s : 側面盛土の延長 (m), n_c : コーナー盛土の個数, h : 水深 (m)

ここで水深の影響は、単位長さ当たりの工費が体積 (m^3/m) に比例するものとし、実際の防衛工の総高さが水深 + 3 m 程度となるものとして水深 10 m の場合を基準として補正している。概略設計では水深 10 m のものと水深 15 m のものの工費を計算したが、上式の関係はほぼ満たされており、概算工費を求める上ではほぼ妥当な値が得られるものと考えられる。

b. 滑動ブロック型

吸収エネルギーに関してはほぼ比例の関係が成立する。水深については極端に深い場合は構造形式そのものに特別な工夫を施す必要があるため、工費も別途検討する必要があるが、水深が 20 m 以下の範囲ではスラブマットの厚みを調整すれば良いと考えられ、試算によると工費は水深にほぼ比例すると考えられる。以上をもとに、工費は以下のように概算できる。

$$C = (0.529 + 0.000007 E) h \ell$$

ここに h は水深 (m) である。

なお滑動ブロック式では地盤の影響を特に考慮しなくても良い。

c. 杭型防衛工

杭型防衛工の工費は、杭の長さおよび杭の鋼管厚さにほぼ比例すると考えられる。これらの値の積はほぼ水深に比例し、したがって工費もまた水深にほぼ比例することになる。この関係と、吸収エネルギーと工費の試算結果を考慮すると、工費は下式によって概算できる。

$$C = (0.14 + 0.00005 E) h \ell$$

ここに h は水深 (m) である。

なお、地盤の影響は杭の根入れ長さに影響し、工費は杭の全長に比例するため、ここで仮定した良質地盤の場合と、実際の地盤における必要な杭の根入れ長の関係が明らかになると、その比を上式から得られる値に乗じて工費を概算することが可能となる。

(3) 変位形式防衛工

バリアー形式防衛工は水深の影響はほとんど受けず、1基当たりの工費は吸収エネルギーに比例し、沈錘の滑動距離に反比例する。バリアー型防衛工は他の形式の防衛工と異なり、様々な配置方法が考えられ、橋脚防護長あたりの工費の計算方法を一概に定める事は、事用上の意義に欠ける。そこで、ここでは1基あたりの工費の概算方法を示すこととした。工費は下式によって概算できる。

$$C = (78.5 + 0.00595 E) / \ell_s$$

ここに ℓ_s は沈錘の滑動距離である。

なお、2組の沈錘の間隔は、本調査では対象船舶の型幅の2倍としたが、この間隔の取り方は検討の余地があるため、その間隔によって何基必要とされるかは異なってくる。

3. 5. 5 維持管理

維持管理に関する長所、問題点等を表-3.13に示す。

表-3.13 施工性および維持管理性に関する総括表

		施 工 性	維 持 管 理 性
直 接 形 式 防 衝 工	多 室 型	・極めて板厚の薄い鋼板を使用するため、ねじれ・反りが生じ易く、寸法精度の確保が難しい。 ・小ブロック分割構造とすると現地での継手作業が大変なため、F Cによる大ブロック架設が適当。 ・橋脚への取付け精度を要する。	・通常時：塗装面積は多いが、塗り替え作業は比較的容易である。 ・衝突後：セルを6～7ブロックに分割して、衝突時の交換規模を縮小するが、境界部の座屈強度を他の部分と差のない構造とする工夫が必要である。
	複 合 材 型	・多室型に同じ。	・通常時：充填材が内蔵されるため、内部の塗装の塗り替えは困難である。 ・衝突後：衝突時の交換規模を縮小するために、セルを6ブロックに分割して設計すれば軽微となる。
	ビーム型	・板厚の厚い板で構成されるため、溶接量は多くなるが、溶接による変形は小さい。 ・ビームと架台を分割できるため、F Cによる大ブロック架設の外、小部材の組立て架設も可能である。 ・誤差の吸収箇所が多いため、橋脚への取付けは比較的容易である。	・通常時：塗装面積は各案中最も少なく、また塗装の塗り替えもやり易い。 ・衝突後：破損したビームを交換すればよく、3案中最も交換規模を縮小できるが、架台に衝突した場合の処理が大変である。
間 接 形 式 防 衝 工	人 工 島 式	・小型の汎用作業船以外の特殊な作業船は特に必要としない。 ・潮流条件の厳しい場合には、堤体盛土の土砂、碎石の流失に注意しなければならない。 ・施設規模が大きいため工期は各形式中最も長い。	・通常時：特に管理を必要としない。 ・衝突後：堤体およびコンクリートブロック張りの損傷が考えられる。損傷は部分的である。干潮時に損傷部の補修を行う。
	滑 動 ブ ロ ッ ク 式	・滑動ブロックの沈設作業に1000t吊級の大型起重機船が必要となる。 ・海底地形に凹凸がある場合には地盤を掘削して平坦にする必要がある。 ・潮流条件の厳しい場合には、水中コンクリートの打設作業が問題となる。	・通常時：滑動面に土砂が堆積するため、定期的に清掃が必要となる。 ・衝突後：滑動ブロックを起重機船で吊上げて元に戻す。万一ブロックが損傷した場合には新品と交換する。ストッパーが損傷した場合には旧コンクリートとの結合を考えると作業が複雑になる。
	杭 式	・大口径の杭打ちが可能な杭打ち船又はSEPを必要とする。(潮流条件が厳しい場合はSEP) ・設置箇所が橋脚に近接するため、杭打ちの橋脚に及ぼす影響について検討が必要。 ・海底地盤が岩盤の場合には施工が困難。工期は各形式中最も短い。	・通常時：杭、チェーンが腐食する。杭の腐食は杭頭部に集中するが応力の低い箇所のため問題は少ない。 ・衝突後：折れ曲がった杭は引抜いて新しいものに交換する。そのためには連結コンクリートブロックを解体しなければならず、補修作業は極めて大がかりとなる。
変 位 形 式 防 衝 工	バリアー型	・非航起重機船を用いた一括架設が可能であり、比較的容易である。 ・正確な位置に設置するのが困難である。	・通常時：沈鍾が海底砂に埋没しないように定期的な引き上げ作業を要する場合がある。 ・衝突後：起重機船を用いて位置を所定の位置に戻す。沈鍾が海中差に埋没した状態で衝突が発生した場合、チェーンが損傷し、交換が必要となる場合もある。また、点検範囲が広くなるため、費用および時間がかかることがある。

4. ま と め

本調査では、直接形式、間接形式および変位形式の防衛工に関して、防衛機能および経済性を中心に検討した。本調査は限られた設計条件における数例の概略設計に基づくものではあるが、ある設計条件に対して防衛工の設計の初期の段階において、概算工費の算定、機能の比較、形式選定の目安を与え、防衛工設計の効率化に役立ち得るものと考えられる。

防衛工の設計においては対象船舶の規模や衝突形態の設定が難題とされる。これに関しては現地の船舶航行状況と事故発生状況をもとに、工事ごとにそれぞれ判断するのが現状であり、一般的に適用できる機械的な方法を提案することは現段階では実効性にも疑問があり、今回は調査の対象としなかった。

参考文献

本報告書においては、特に引用力所を示し得ない形で参考とした文献が多い。文献は年代順に示した。

- | | | |
|--------------------------------------|--|---------|
| 1) 社団法人 日本海難防止協会 | 本州四国連絡橋 航行安全調査報告書 (1) | 昭和46年 |
| 2) 社団法人 日本海難防止協会 | 本州四国連絡橋 航行安全調査報告書 (2) | 昭和46年 |
| 3) 社団法人 日本海難防止協会 | 本州四国連絡橋 航行安全調査報告書 (1)
(技術管理課) | 昭和47年 |
| 4) 社団法人 日本海難防止協会 | 本州四国連絡橋 航行安全調査報告書 (2)
(技術管理課) | 昭和47年 |
| 5) 社団法人 日本海難防止協会 | 本州四国連絡橋 航行安全調査報告書 | 昭和48年 |
| 6) 海洋鉄構協会
船舶衝突調査委員会 | 海洋基礎への船舶衝突力に関する調査委託報告書
(その1) | 昭和48年3月 |
| 7) 海洋鉄構協会
船舶衝突調査委員会 | 海洋基礎への船舶衝突力に関する調査委託報告書
(その2) | 昭和48年7月 |
| 8) 本州四国連絡橋公団
海洋鉄構協会 | 海洋基礎への船舶衝突力に関する調査委託報告書
要約(その2) | 昭和48年7月 |
| 9) 社団法人 日本海難防止協会 | 本州四国連絡橋 航行安全調査報告書 | 昭和49年 |
| 10) 社団法人 日本海難防止協会 | 本州四国連絡橋 航行安全調査報告書 | 昭和50年 |
| 11) 社団法人 日本海難防止協会 | 海外における長大橋の航行安全対策に関する現状
調査報告書
(オーストラリア及びニュージーランド) | 昭和50年6月 |
| 12) 近畿地方建設局阪神国道工事事務所
(株)日本構造橋梁研究所 | 長田地区海上構造物安全対策予備検討報告書 | 昭和51年3月 |
| 13) 社団法人 日本海難防止協会 | 本州四国連絡橋 航行安全調査報告書 | 昭和51年 |
| 14) 東洋技研コンサルタント(株) | 海中基礎の緩衝工検討(その2)報告書 | 昭和51年3月 |

15) 社団法人 日本海難防止協会	本州四国連絡橋 航行安全調査報告書 ー航行安全調査 その1ー	昭和52年
16) 近畿地方建設局 阪神国道工事事務所	昭和51年度 大阪湾岸道路 和田岬～須磨間海上構造物設計業務 神戸市兵庫区和田崎町～長田区駒ヶ林南町成果報告書	昭和52年3月
17) 社団法人 日本海難防止協会	本州四国連絡橋 航行安全調査報告書 ー航行安全調査報告書 その1ー	昭和53年
18) 本州四国連絡橋公団 工務第一部	スウェーデン国 チョーン橋の船舶衝突による落橋事故(速報)	昭和55年2月
19) 日本道路公団 東京商船大学	東京湾横断道路と船舶航行援助施設に関する 基礎的調査(その1)	昭和55年2月
20) 社団法人 日本海難防止協会	昭和54年度 緩衝工構造調査報告書	昭和55年3月
21) 本州四国連絡橋公団	多室型緩衝工の設計要領(案)	昭和55年3月
22) 本州四国連絡橋公団	本州四国連絡橋耐風研究小委員会 資料No.K31-11	昭和55年7月
23) 日本構造橋梁研究所	東京湾委員 第2委員会 資料No.II-2-(3)	昭和55年9月
24) 日本道路公団 東京商船大学	東京湾横断道路と船舶航行援助施設に関する 基礎的調査(その2)	昭和56年2月
25) 本州四国連絡橋公団	複合材型緩衝工の設計要領(案)	昭和56年3月
26) 社団法人 日本海難防止協会	昭和55年度 緩衝工構造調査報告書	昭和56年3月
27) 日本道路公団 東京第一建設局 (株)日本構造橋梁研究所	昭和55年度 東京湾横断道路橋梁構造検討報告書 本編(防衝工)	昭和56年3月
28) 日本道路公団 東京商船大学	東京湾横断道路と船舶航行援助施設に関する 基礎的調査(その3)	昭和57年2月
29) 日本道路公団 東京商船大学	東京湾横断道路と船舶航行援助施設に関する 基礎的調査(その3) 報告書	昭和57年2月
30) 日本道路公団 東京商船大学	東京湾横断道路と船舶航行援助施設に関する 基礎的調査(その5) 報告書	昭和59年3月
31) 近畿地方建設局 阪神国道工事事務所	昭和38年度 大阪湾岸道路 和田岬～若宮間路線整理業務 成果報告書 自 神戸市兵庫区和田崎町 至 神戸市須磨区若宮町	昭和59年3月
32) 日本道路公団 東京商船大学	東京湾横断道路と船舶航行援助施設に関する 基礎的調査(その6) 報告所	昭和60年2月
33) 建設省土木研究所 構造橋梁部構造研究室	構造研究室資料(構造研究室資料第11号) 船舶衝突力シミュレーションプログラム	昭和60年2月

横山 功一 中神 陽一
日下部毅明 永原 隆
金子 学 関谷 光昭

要 旨 各種湾岸道路や海岸部もしくは湾央部等の道路建設事業において
は、海上部に橋梁が建設され、橋脚が航路に近接して建設される事例
が多い。このような場合に、船舶が橋脚に衝突する危険性が考えられ、橋梁に対
しては、船舶の衝突に関する防護措置が取られる必要がある。本報告書は、船舶
の橋梁への衝突に対する防衛工の設計に関してなされた、実績調査および概略設
計の成果をとりまとめ、防衛工の設計の方法、形式の選定に関する考察を行った
ものである。その結果、防衛工の工費の概算方法、形式毎の設計上の問題点、お
よび製作施工性に関する長所・短所等が明らかになった。

キーワード：船舶，衝突，防衛工，概略設計，工費，形式選定

郵便はがき

3 0 5 - □ □

四十一円切
手をはって
下さい。

建設省土木研究所

構造研究室 行

茨城県つくば市旭一番地

No. 8

No. 8

配布先住所

配布先氏名

○

土木研究所資料 第 2 8 5 5 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印

○