

特 殊 防 波 堤 論

運輸省港湾技術研究所 伊 藤 喜 行

1 概 説

特殊防波堤とは、普通一般の防波堤と異なる何らかの特殊性を有し、類例の少ない防波堤のことである。この場合、特殊に対する一般が何であるかは時と所によって異なるから、ある時代ある地方で一般的であったものが、他の時代、地方では特殊と見なされることもあり得る。現在我々が普通一般と考えている工法にも、各時点における創意工夫によって徐々に改良を重ねてきたものや、その創始期には極めて特殊と目されながら次第に普及定着してきたものなどいろいろあるだろう。どの程度の特殊性をもつて特殊防波堤の範疇に含めるかは観点によって異なるが、本稿ではやゝ広義に解釈し、文字どおり特殊な着想から部分的な創意工夫に至るまでを含めて扱うこととした。

特殊な防波堤の着想は極めて古くからあり、我々が今日抱くような考えの多くは、すでに数十年、百年あるいは数千年の昔から存在している。その中には、アイデアのみが提示されて実現に至らなかったものもあれば、実施に移されながら失敗に終わった例もある。また、たとえ成功しても遂に普遍化しなかったものは、依然として特殊防波堤の地位に止まっているわけである。

こうした場合の阻害因子が防波堤としての本質的なものでなく、その実現の過程に伏在していたとするならば、材料や施工機械が発達し力学的知識の進歩した現在、経済条件の変化とあいまって、あらためて実現の可能性を検討する余地は大に残されている。特殊防波堤は普通一般のものよりも更に合理性を追求しようとする技術的向上心の現われでもあり、我々は先人の叡智に学び、その体験を生かしてより一層の発展を心がけるべきである。もちろん、その実現にあたっては万全の論議をつくす必要があり、一片の着想を安易な理論や実験に頼って適用し、思わざる災害を招いて軽重浮薄のそしりを受けるようなことがあってはならない。そして特殊防波堤について検討を重ねた結果、終局には多年の経験を背景とする伝統的工法へ帰着するとしても、防波構造物における本質的問題点を再反省する上で、特殊防波堤は好個の素材を提供し得るのである。

さて、特殊防波堤における特殊性は多種多様であるから一義的な分類はできないが、特殊性を要求または許容する要因として考えられるものは、その防波堤の果たすべき特殊な目的や機能、設計や施工上の特殊な自然条件、材料・施工能力・工費・工期についての条件などである。こうした外的条件が特殊な防波機構、構造型式、断面または平面形状、施工法を必然的にもたらす。このほか、普通一般の工法が可能な条件下でも、なおそこに存在する欠陥を克服するため特殊防波堤への指向が試みられるのは当然である。

特殊な目的・機能を有する例としては、高潮・津波防波堤のように通常の風波やうねり以外に長周期波を対象とするもの、海岸防護あるいは漂砂制御のための離岸堤、工事用や軍事用などで短期間に設置したり後に撤去移動したりするものなどがある。それぞれの特殊性に応じて所要の防波効果や強度をもたなければなら

らないが、それらを犠牲にしても敢えて透過構造や簡易構造とすることもある。

自然条件における特殊性には、上記の高潮や津波のほか、異常な波浪・潮汐・水深や海底地盤の軟弱などが挙げられる。こうした自然条件は悪条件となって特殊工法を余儀なくするばかりではなく、逆に恵まれた条件として特殊な簡易構造を許容する場合もある。

材料や施工機械の発達、特殊工法を可能にし、かつその一般化に寄与する。例えば鉄筋コンクリートケーソンは初期に多くの論議をよんだが、日本ではもはや完全に陳腐化した。しかし、必ずしもこれが全世界的傾向ではないから、普通一般と断定できるとは限らない。逆に浮起重機の発達はサイクロピアブロックを普及させたが、日本では遂に導入されることがなかった。また、鉄材を用いた構造のアイディアは、すでに100年以上も前から提示されているが、鋼材の普及した今日でも未だに普遍化はしていない。

一方、普遍的工法に対する材料の供給不足や施工能力の欠如、また工費・工期の制約は必然的に特殊工法の採用を促す。特に小港湾などでは、何らかの特殊性がなければ実現不可能とさえいえる。

以上は主として外的要因から見た特殊性であるが、次に構造面における特殊性について考えてみよう。

まず防波機構の点では、特殊防波堤といえども基本的原理には全く変りはなく、来襲波のエネルギーをその場で散逸させるか、沖へ送り返すか、またはその中間であるが、それを具現する機構が異なる。すなわち、普通の防波堤が斜面で碎波させたり直立壁によって反射したりするのに対して、波を流れに変えた上でエネルギーを消耗せしめたり、また空気防波堤のように構造物に頼らないものもある。

次に耐波機構とでもよぶべきものの特殊性がある。従来の防波堤の大部分は自重によって波力に対抗する重力式であるが、杭や矢板のように根入部の横抵抗を利用するもの、浮防波堤のようにアンカーの碇着力によるものなどがその例である。

重力式構造においても、安定性を増すための特殊工法は極めて多く、波力を減殺する方法、箇塊相互を結合させる方法、滑動抵抗を増加する方法、洗掘を防止する方法、地盤反力を減少させる方法などに古来幾多の創意工夫がなされて来た。構造要素の形状寸法やその組み合わせにおけるこうしたアイディアは無数にあり、それぞれの防波堤が何らかの特殊性を有すると云っても過言ではない。たゞ特殊な構造の中には、災害後の対策としてやむを得ず採られたものも多く、必ずしも合理性の追求の結果とは云えない場合のあることを注意する必要がある。

なお構造様式について云えば、日本の防波堤の最も一般的な型式は捨石マウンド上にケーソンを据えた混成堤であって、多くの場合に碎波の作用を想定している。しかし、傾斜堤＝碎波堤、直立壁堤＝重複波堤という国際航路会議流の考え方からすれば、むしろ特殊と見なされるものかも知れない。

次章から特殊防波堤の各論に入るが、限られた頁数でその全容を詳細に述べる余裕はないから、本稿ではこれまで余り紹介されていない古典的事例を交えながら、歴史的な変遷をたどってみることとした。特殊を語るにあたって普通一般を省くことはできないが、これについては別の機会にとりまとめたと思っている。

2. 初期の特殊防波堤

2.1 古代の特殊防波堤^{1) 2)}

防波堤の最も原始的な形態は恐らく自然石の単純な堆積であっただろうが、古代地中海世界では既に現代の防波堤型式がほとんど網羅されており、また現代から見た特殊防波堤的なものさえある。

文献に見られる最古の防波堤は、紀元前3000年頃エジプトのアレキサンドリアにあった石積堤である。大地震のため海底に埋もれてしまっていたが、1910～15にG. Jondetが発掘した。石灰岩の粗石を入念に積み重ねたもので、空隙には砂礫を填充して結合させてある。

フェニキヤの時代に入ると、紀元前1000年頃の防波堤に、切石の大方塊で基礎および壁体を形成し、壁間にコンクリート中詰を施した直立堤がある。

フェニキヤ人が北アフリカに築いた植民都市カルタゴの南方にタブススという港がある。ここに19世紀半ばまで残っていた古代の防波堤は、木杭の上に幅12m以上の直立壁を設けたもので、側面に多数の水抜孔をあけて波の衝撃を緩和せしめているのが特徴である(図-1)。すなわち、水面上1.25mとその上1.20mの高さに、25×17cmの矩形の孔が水平間隔1.44mごとにあいており、直角に堤体内へ向って法線方向の同大の水路で結ばれている。孔は侵入した水が排出しやすいよう僅かに傾斜している。

このような水抜孔、圧気孔あるいは潮吹きと云ったアイディアは、近代になってからもしばしば用いられたものであり、その原型が遠く紀元前の防波堤に見出されることは一種の驚異でもある。

ギリシャ時代には、自然な斜面勾配をもつ捨石マウンドを海面まで形成し、その上に繋鉄で結合した大方塊の壁体を築く方法、すなわち混成堤型式が標準型であった。

ローマ時代に道路や橋梁など建設技術の各分野で偉大な進歩を遂げたことは周知のとおりで、港湾技術もその例外ではなかった。代表的な港の一つはオスティアである。その外港は南北両防波堤と中央の島堤とで囲まれていたが、島堤はエジプトからオベリスクを運搬して来た船を沈め、大量のコンクリート塊を投入して水面上まで現われるようにしたものである。沈船防波堤の原型といえよう。堤頂には海神ネプチューンを像った灯台を築いたという。

オスティア港は埋没して衰微したが、トラヤヌス皇帝はこれに代る港をチビタ・ベッキアに築いた。紀元1世紀のことである。やはり2本の半島堤と沖の島堤とから成るが、島堤は大量の石をバージュから投入して、文字どおり島のような捨石堤としたものである。

この防波堤は、1920年代において当時現存する最古の捨石堤と称されていた。石はあまり大きくないが、ほとんど維持を必要としないまでに安定化しており、斜面勾配は-2mまで10:1、-7.5mまで8:1、それ以下2:1で、水深14mの地点での底幅は140mにも達する。もちろん、古代の建設当初からこのような緩斜面を意図したものではなく、維持補修を経て長年月に到達した断面である。

1812年に着工したブリマス(英)の捨石堤は、波による散乱と捨石の補充とを繰返して、ほぼ同様な緩斜面に達した。17世紀を隔てても基本的考え方は変わっていないわけである。逆に考えれば、古代人はもっと多くの特殊防波堤のアイディアと経験とをもっていたに違いない。

2.2 近代初期の特殊防波堤

(1) シェルブール港(仏)のコーン堤³⁾

この沖防波堤約3,900mを着工したのは1781年のことで、近代における大防波堤の嚆矢ともいえるものである。最初は de Cessart が提案したコーンを用いた(図-2)。これは木製、無底の截頭円錐型をなし、直径は底面で約50m、頂面で20m、高さ20~24m、天端高HWL+2.7mという雄大なもので、計90箇を陸上で製作、進水・曳航して沈設し、中詰石を施し、干潮面上はモルタルと花崗岩とで壁体を形成する。

水面附近では間隙のあいた不連続堤となるが、背後は広大な泊地であるから透過波は許容できる。そして、工法単純、施工迅速容易、工費低廉という利点によって提案は受け入れられた。1874年に2箇を据えたが、第2号コーンは中詰完了前に干潮面上を破壊され、中詰石が散乱してしまった。このため第3号コーンを隣接して据えることができず、以後は約60mの間隔をあけて沈設し、中間は天端の低い捨石堤とすることにした。後にこの間隔は390mとなり、計20箇を据えたが中詰不十分のため相い次いで破壊し、1879年に至ってこの方法は放棄するに至った。

以後捨石堤に変更したのであるが、これも多くの困難を経た後、上部に直立壁を設けて1853年に漸く完成した。途中で工事中断の時期があったとはいえ、着工以来実に70年の歳月を要したのである。完成した高基混成堤は近代初期における一典型であり、隣接各港で類似の断面を採用している。

上記のコーンは一種の石枠堤である。石枠そのものは恐らく極めて古い工法であろう。特殊な石枠堤については、Lewthwaite や Scott が1850年代に提案したものもある。^{4) 5)}

(2) 初期の骨格式防波堤

石やコンクリートの塊によって形成されるものに対して、梁や版のように部材強度に直接頼るもので形成された型式を、鮫島茂博士の用法にならって骨格式とよぶことにする。

1) Scott の格子堤^{5) 6)}

図-3は碎波を生ずるような浅海に対する M. Scott の提案で、木材を格子状に張った斜面が杭で支持されている。波が格子斜面を上下するとき水塊は隙間から落下してしまい、戻り流れて脚部が洗掘される恐れは少ない。斜面の下方を直接通過した波は、落水水塊によって減殺される。斜面に作用する碎波力は空隙のために緩和される。また、透過構造は流れを阻害しないから港内埋没防止に有効である。

これを更に水深の大きい地点にも適するよう改良したものが図-4である。まず、例えば-4.5m付近まで捨石マウンドを設け、その上に前壁と勾配を附した扶壁とを据え、扶壁間に幅30cm、間隔45cm程度の鉄桁をわたす。壁体は陸上で製作すればよく、また鉄桁は干潮面上にあるから塗装しなしておいて耐久性を増すことができる。更に、できれば法線を適切に定めることによって波が斜めに入射するようにすれば、より大きな表面で波エネルギーを散逸させ得るとしている。

2) Hays のルーバー堤^{5) 7)}

図-5はオーストラリアのアデライド附近で、棧橋保護用の波除堤として W.B.Hays が提案したもの

である。石の取得が困難であること、離岸堤であるために石を用いたのでは工費の増大することが、この型式を提唱した理由となっている。

これの主体は、約30 cm間隔に配置した傾斜板にある。傾斜板の両面にはほとんど同時に波があたるから、互いに消し合って大きな力はいかない。しかし、貝類が繁殖すると強度を損なうし、その除去には費用がかかること、除去を怠ればスクリーンが壁となって効果を失うことなどの批判があった。

3) Calver のパイル堤⁷⁾

図-6は E.K. Calver の提案によるもので、径50 cmのスクリーパイルを根入れ3 m程度に打ち込んである。パイルの間隔は直径と同程度とする。

以上のような骨格式防波堤において、防波効果はその形状寸法、特に間隙の大小にかかっている。設置点の水深や来襲波の性質に応じて異なることはもちろんである。こうした点について、当時も各種の議論がなされていたが、今日のような実験的手段のなかった頃であるから、定量的に明確なものではなかった。防波効果だけを考えるならば、間隙を閉じさえすれば所要のものは得られる。しかし、それと強度との調和、また埋没防止に対する透過構造の効果との関係については、現在でも明確な結論は容易に得られない。なお、W. Shield は漂流物の衝突の危険性をも指摘しており、骨格式構造で波をとめようとしても、結局は失敗に終るだろうと悲観的な見解を示している。

(3) 初期の浮防波堤^{8) 9)}

傾斜堤を天然の海岸にたとえ、直立堤を断崖絶壁にたとえるならば、海草や浮氷、繫留中の船などから浮防波堤の着想が得られる。そして古くから種々の提案があったが、実際に施工したものは何れも失敗している。

イギリスでは、1811年にブリマス港防波堤に対して S. Bentham が木製の浮防波堤を提案した。これは採用されなかったが、Taylor が1843年に提唱したやはり木製のもの(長さ20 m、高さ8.5 m、吃水5.5 mのフロート)はブライトン沖で試験に移された。しかし、1845年の嵐でチェーンが切れ、フロートも破壊して失敗に終わった。

1843年には、ラ・シオタ港(仏、地中海岸)で図-7のような一連の浮防波堤を港口沖に設置したが、予期に反して波が減衰しない上、アンカーはずれチェーンは切れ、フロートは海虫に食われたり漂流して船に衝突したりという有様で、2年後にこれを断念せざるを得なかった。

ロシアでは1850年に黒海のヤルタ港で試みて失敗し、1854-55年にはレニングラード附近である程度の効果を得たが、互いに衝突して破壊してしまった。

これらはすべて浮箱型であるが、浮草型というものもある。Parlby の提案したものは、椰子の繊維をゴムで被覆した筒で、それぞれをアンカーして1 m間隔で縦横に数千本並べておく。船はこれをかき分けて出入できるというアイディアである。

さて、浮防波堤の考え方における一つの根拠は、波の運動は水面附近に集中しているとする点にある。

したがって、通常の防波堤の海底に近い部分は防波機能にあまり関係なく、単に上部工の基礎として用いられているに過ぎないということになる。波の作用が水面下どの位の深さまで及ぶかは、混成堤直立部の基面高に密接な関係をもつため古くから論じられているが、初期の頃には4 m内外とされていた。

Th. Cargill はこの深さをゼロ線とよび、実在の代表的防波堤についてこの線以上と以下の断面積を求めてみたところ、プリマス港の捨石堤では570:480 m²、ドーバー港の直立堤では270:200 m²となった。すなわち、ゼロ線以下の部分が全断面の半分近くを占めている。換言すれば、防波機能を果たすのに必要な材料の約2倍を消費しているわけである。したがって下部を取り去り上部のみとすれば、防波堤として完全でしかも経済的利点は甚だ大きい。

こうして Cargill が提案したものが図-8である。寸法は条件に応じて異なるが、例えば長さ30 m、幅7.5 m、高さ4.5 mといった大きさである。これの特徴は、従来のものがたゞ1列のスクリーンで波を阻止しようとしたのとは異なり、3列のスクリーンと多数のフレーム、そして円筒フロートによって徐々に、しかも完全に防波効果を発揮させる点にある。また、これまでの失敗が主として碇置法の欠陥にあったため緩衝装置を介してアンカーするようにした。この浮防波堤は、マンプな構造と比較して工費は~~1/2~~以下で足りるとのことである。

図-9は Sakhanski が1882年に提案した各種の中の一つである。浮体に過度の浮力を支えてチェーンを緊張させているため、浮体の動揺が減少するというのが特徴である。

浮防波堤の可動性や透過性もその重要な属性である。特に可動性については、最適の配置を見出すまで何度でも据えなおして試みることができるとの考えもあった。しかし多くの失敗例が示すとおり、その効用を発揮する段階以前に困難があったのである。

(4) その他

19世紀末頃までのやゝ特殊な工法を二、三述べよう。

図-10、11はW.D.Cay のアイディアによる袋詰コンクリートの特許工法である。¹¹⁾ 初期の代表的な直立堤はドーバー港のそれであるが、基礎岩盤の均しに莫大な時間と費用を要したため、アバディーン港などでは袋詰コンクリートを基礎に用いるようになった(1870頃)。そして更にその応用法をいくつか案出したのであって、図-10は捨石堤の被覆に98 tの円筒形袋詰を用いたもの、図-11は50 t袋詰で基礎をつくり、その上に88 t円筒形袋詰を積重ねて堤体とし、更に頂部場所打を施したものである。

図-12はコペンハーゲン港で1891年に施工した捨石堤で、壁体は無筋コンクリート(一部に鉄筋コンクリート版を使用)の砂詰ケーソンを二段積としたものである。¹²⁾ ケーソンの原型は恐らく枠であり、それが次第に連続して箱となり、更にセルラブロックへ、そして現在のような意味でのケーソンへと変化して来たものであろう。初期には鉄製のものが多く、古い例としては、マドラス港の旧堤頭で径13 m、高さ16 mの鉄製円筒ケーソンを1881年に施工している。¹³⁾

図-29は四日市港の孔あき二重防波堤である。¹⁴⁾ 四日市旧港は明治6~17年(1873~84)に稲葉三右衛門翁が私財を投じて建設したもので、その石積防波堤は沖側の小堤で先ず波をはね返し、次いで内

側の大堤で完全に食い止めるといふ二段構えになっている。そして、大堤には高さ 1.1 m 、幅 0.95 m の水抜き孔が 2.5 m 間隔に計 48 箇所設けられていて、小堤からの越波は中間の溝に流入し、水抜き孔から港内へ排出される。この防波堤の前面は最近埋立てられたが、一部は原型のまゝ残っている。

3. 近代の特殊防波堤

初期においては、一方で通常の傾斜堤や直立壁堤などの経験を重ねて改良を加えながら、他方では骨格式防波堤、浮防波堤など特殊なものも盛んに提案されていた。しかし、後者のグループは未だ実用に供されるような機運になく、前者の構造が主流としてますます定着して来た。そうなるや技術的関心は主にその枠内の工法の発展に向けられ、各種の創意工夫が続々とあみ出される。本章ではこうした意味での特殊防波堤を中心として、幾つかの事例を述べることにする。大体において20世紀初頭以降のものを対象とするが、時代区分は必ずしも厳密ではない。もちろん、この期間中にも骨格式や浮防波堤、更には空気防波堤などの試みは続けられていたが、それらは次章へ譲ることにする。

3.1 特殊なケーソン

(1) 異型ケーソン

普通のケーソンは断面的にも平面的にも矩形であるが、それ以外にもいろいろな形状がある。例えば、前述のマドラス港のものは円筒形であり、堤頭部に限って円形とした例は他にもいくつかある。

側壁に傾斜をつけた台形断面のケーソンは、北米五大湖地方に多い(1920年代頃)、日本にも若干ある。

図-13は横浜港外防波堤の非対称ケーソンで、鮫島茂博士の考案に成る水平骨格式である。¹⁵⁾ 水平骨格式というのは水平なラーメンあるいはトラスを適当間隔に配置したもので、外壁の厚さ、各方向に対する剛度、頂部の強度などの点で通常の隔壁式よりも合理的であるとされている。このケーソンの港外側は $\frac{1}{2}$ 勾配の斜面となっているが、これはあまり緩やかであると越波を導びいて港内静穏度が低下するし、あまり直であるとマウンドの安定に有害であるとの考え方によるものである。また、なるべく重心を下げ、平時における底面圧力を平均化するために非対称の断面とし、港内側には $\frac{1}{2}$ の勾配をつけてある。なお、このケーソンは容積に比して重量が大きいので、浮遊曳航には特製のフロートを用いた。

ケーソンの前壁を斜面とすれば、波圧自体も減るだろうし、波力の鉛直成分が重量に加わって滑動抵抗が増大する。筆者が図-14のような 45° 斜面のケーソンで実験したところでは、鉛直壁とくらべて、ある条件の場合 $\frac{1}{2}$ 程度の重量(静水中)で安定を保っていた。この斜面を底面の摩擦角に等しくとれば、原理的には自重を全く必要としないことになる。もちろん斜面とすれば越波はかなり増大するが、その代り鉛直壁では跳波が著しい。

波力を減らすために特殊な複合斜面としたものに、ハンストホルム港(デンマーク)の実施例がある。^{16) 17) 18)}

図-15に示すとおり、上部工の前面は 30° の傾斜をなしているから、この部分に作用する波力は滑動に影響しない。模型実験結果によると、鉛直壁とくらべて水平波力は約 $\frac{1}{2}$ に減少するという。このケーソンは

直径1.25mの無底円筒形で、岩盤上に設置する。円筒とした理由は、波圧や中詰土圧を直応力で受け、曲げ応力を減ずる利点があるからで、円筒形としても波力は僅かしか増大しないとのことである。

図-16は別府港で最近施工している張出しケーソンである。側壁に各1.8mの張出し部をもたせたもので、通常のケーソンとくらべて約10%の工費減となる。中詰は隔室、張出し部ともに雑石で、張出し部には底板がないため、転倒に対する抵抗機構として中詰石のアーチ作用を考えている。この張出しケーソンを变形したアイデアが図-17で、中間に鉄筋コンクリート版をはめ込んで石を詰める。更に版と版との間隔をあければ孔あき防波堤の効果も期待できるとしている。

孔あき防波堤は次章で述べるが、図-18は孔あきケーソンで波力発電をしようという着想である。²⁰⁾ ケーソンの前部隔室を空気圧縮室とし、外壁の波谷以下の深さに孔をあけて波の一部を入れ、空気管を発電機へ連結して水面の昇降により圧縮吸引を行なう。波エネルギーの30%を利用するものにとすると、波高1m、防波堤延長300mのとき約150KWの出力となるということである。

異型ケーソンを用いた特許工法の一つに、関口四郎氏の波殺堤と称するものがある。^{21) 22)} これは凸字形ケーソンを並べたもので、干潮面上を透過構造とすることによって侵入水塊が港内水位の上昇をもたらすから、港口から流出する底層流で水深を維持しようという考えである。透過構造であるため港内静穏度は低下するが、堤体に及ぼす波の衝撃を緩和する効果もある。1/20の模型で浮遊時の安定を確かめ、また1/200の模型実験により各種の防波堤配置のもとでその効果を検討している。

図-19は岡部三郎博士の桶型ケーソンである。^{23) 24) 25)} 海底勾配が急で波の荒い砂利浜における小港湾用のアイデアで、例えば幅30m、長さ80mといった大きさのものを港口に沈設する。海底には方塊や井筒を据えてこれを支持する。先端部では海底が洗掘される傾向にあるから漂砂の侵入がなく、また側壁の一部を生簀に利用することもできる。波力に対しては十分な強度をもたせるように設計すればよく、取付部の胸壁を高くして波や砂の侵入を防ぐこともできるが、あまり港口幅を広くできないので荒天時の船の出入に多少の不便がある。

このほか、沈船防波堤なども一種の異型ケーソンと考えてよい。

(2) ケーソンの特殊施工法

ケーソンヤードなどの施設が十分でない場合には、製作にいろいろな工夫がこらされている。打継工法などもその一つであろう。

図-20はグディニア港(ポーランド)で実施した製作進水法である。²⁶⁾ 砂浜上で横倒しのケーソンをつくり、前面を渡漕して行くと次第にケーソンが立ち上がって浮遊するに至る。鹿島港でも最近ドックの容量不足から類似の方法を採用した。たゞ、鹿島では最初から直立の状態で製作し、次第にずり落ちて浮遊する方式となっている。

²⁷⁾ スウェーデンの漁港では特殊な打継法をとった。まず短い棧橋をつくり、その頂部は水面よりやや上とする。この上で厚さ50cm、長さ10mの鉄筋コンクリート版を打ち、鉄筋の端部は外へ延ばして後の運搬時の吊下げに用いる。側壁と隔壁を高さ2.3mまで仕上げたら、上に10本のIビームを渡し、両側にボン

ツーンを奇せて浮上させ、 -2.2 m の第二棧橋へ移す。ここで高さ 4.1 m まで継ぎ足して更に第三の棧橋へ移し、最終的な高さまで完成したらポンツーンで現場へ曳航、設置する。この方法は極めて良好な成績をあげたということである。

図-21はスペイン北海岸のムーゼル港で用いたシャフトつきケーソンである。²⁸⁾ マウンドの安定を保つために直立部基面を -8 m に下げることとなったが、潮差が 5 m もあり、満潮面上 2 m の余裕高をもつケーソンでは高さが 15 m にも達し、施設面に難点がある。これ以前の経験から、ケーソン天端を満潮面以下としたのでは中詰作業が困難であるため、ケーソンに蓋と作業用シャフトを取りつけることとしたのである。このケーソンは幅 15 m 、長さ 20 m 、高さ 11.3 m で、3本の縦隔壁と5本の横隔壁とにより24の隔壁に分れている。シャフトは各隔壁の交点に計6本あるから、1本で4室を中詰できる。中詰にはコンクリートを用い、上部に達して打設が困難となったときには、各隔壁の蓋の中央に設けた扉からモルタルを注入する。最後に頂部コンクリートを打ってシャフトを埋め込む。

函館港では圧力ケーソンという特殊工法を用いた。²⁹⁾ これはケーソンに気密な仮蓋をつけ、進水から沈設に至るまでの間圧縮空気を注入して内部から圧力を加え、水圧鉄筋のような一時的なものを省いて工費を節減しようとしたものである。ケーソンは頭部に箱形ラーメンをつけた水平骨格式で、この部分に配筋したほかは全部無筋である。空気圧は 0.15 Kg/cm^2 程度で、約13%の工費減になる。沈設時には下方の弁から自然注水し、それに伴って内部の空気圧が上昇するので、圧力計を監視しながら徐々に排気した。問題点としては、仮蓋の気密な取付法、コンクリート壁からの洩気に対する空気補給法などが挙げられている。

(3) 滑動抵抗の増加法

ケーソンの下面に突起または凹みを設け、マウンドなど下部工との間の滑動抵抗の増大をはかった例はいくつかある。留萌港南防波堤の基部直立堤部では、下部工における最上段方塊の突起がケーソン下面の凹部とかみ合うようになっている。また、室蘭港でもケーソン下面に深さ 15 cm の凹みを設けた。³⁰⁾

久里浜港外防波堤のケーソンには港外側底面に突起を設けてあるが、こうした突起の効果についてその頃から山田正平博士が模型実験を行なっている。³¹⁾

鼠ヶ関港の西防波堤ではL型塊ストッパーを用いた(図-25)。しかし施工が複雑となり据付けに失敗の恐れもあったため1函だけに止め、次は底面に 5 cm の凹みをつけるだけとした。後に用いたのは図-24のような突起で、高さ 20 cm 、底面 20 cm 四方、側面は港内側を鉛直とし他は 45° 斜面となっている。これにより所要の堤幅 12 m を 11 m に減じた。³²⁾

酒田港南防波堤延長部では、基礎方塊とケーソンとの間に3条の凹凸をつけたが(図-26)、第1号函は施工中に滑動した際この突起が破壊したらしく、据え直し後の波浪によって 8.6 m の滑動を生じた。³³⁾

L型ストッパーは洞海湾北防波堤にも用いられた。³⁴⁾ $1/30$ 模型による引張試験の結果では、摩擦係数 $0.7 \sim 0.8$ となっている。

ケーソンの底面にアスファルトマットを張付けて抵抗を増大しようとする試みが、有田港などで行なわれた。³⁵⁾ 実験結果によると摩擦係数 0.8 に達する場合もあるが、ここでは 0.7 として設計し、堤幅 13.3 m を

1 1.5 5 mに縮小せしめた。

図-23はケーソンを斜めに据えつけて滑動抵抗を増加させようとする方法で、八戸港の防波堤に関して検討された案である。³⁶⁾ 類似の考えが清水港にもあったように記憶している。

各ケーソンの滑動抵抗を増加する方法のほか、ケーソン相互を結合して一体化しようとする試みもある。図-22はスウェーデンのヘルシングボルク港やイースタッド港で実施したもので、継手の間隙に碎石をつめてアスファルトやコンクリートで蓋をしたり、あるいはコンクリートを充填したりしてある。^{37) 38)} ボルトガル領マデイラ諸島のフンシャル港では、ケーソン突合わせ部に4条の溝を設けてコンクリートを充填した。³⁹⁾ このほか防波堤ではないが、筆者が台湾基隆港を訪れたとき、外港拡張工事の岸壁ケーソンに突起とほぞのかみ合わせを用いていたのを見たことがある。不等沈下へ順応させるにはこの方がよいだろう。

3.2 二重堤と曲面堤

(1) 二重防波堤

単独の防波堤だけでは機能が不十分であったり、波力に抗しきれない場合、防波堤を二重に配置して二段構えとすることがある。たゞし、ここで扱うのは平面的な意味でのものではなく、断面形を対象として考える。すでに述べた四日市港の孔あき二重堤はその一種である。

まず、防波堤を保護するために前方に潜堤を設けた例がある。チビタベッキア港では前述のトラヤヌス堤の南側延長部を16 m³方塊積の混成堤としたが、施工中に何回か破壊されたため方塊乱積被覆で補強し、更に前方に潜堤を置いて来襲波を減殺させた。⁴⁰⁾

トルコのマーシン港でも防波堤の一部を潜堤との二段構えとしている。⁴¹⁾ 本堤の天端高は+3.0 m、潜堤は-2.5 mの共に捨石堤で、この方式で材料が最小となることである。先端部は本堤のみで、天端高+5.0 mの捨石堤である。

図-27はスペイン北岸ビルバオ港で1888年から施工した二重堤であるが、当初からそのような計画であったわけではない。^{42) 43)} 最初は捨石マウンド上に30~50 m³の方塊を厚さ6 mで乱積し、その上に壁体を設けようとする設計であった。そして常に波が荒く潜水夫の作業可能日数が極めて少ないため、壁体基面を干潮面上に置いたが、施工途中基礎洗掘のため壁体が破壊した。そこで壁体を強化して施工を進め、しばらく小康を保っていたが、1894年に至って壊滅的被害を受け、干潮面上に直立壁を設けることの困難を悟ってこれを断念し、マウンドを第一線堤として背後に第二線堤をつくるよう計画変更した。両堤の中間の水面幅は30 mである。第二線堤の直立部は鋼製ケーソンで、基面高は-5 mである。なお、第一線堤の直立部につけた胸壁の波返しは効果がなく、むしろ脚部の洗掘に有害であったため、新堤では丸みをつけて越波させることにより波力を軽減することとした。

これは災害の結果到達した二重堤であったが、同じスペインの地中海岸にあるバルセロナ港では、1903年以降の防波堤延長部1,350 mに対し、ビルバオ港の断面をまねた二重堤を採用した。^{44) 45) 46)} 先ず捨石マウンド上に35 m³の方塊を乱積して第一線堤とし、その背後にコンクリートケーソンおよび頂部工による直立壁を設け、中間には粗石を詰めコンクリート塊で被覆したものである(図-28)。乱積方塊層によって本

体の施工を安全容易とし、施工中の被害を軽減して工費・工期を減少せしめ、また港内に対する遮蔽を速やかに得ようという考えである。これをビルバオ港と比較すると、第一、二線堤間が極めて近く、また直立壁が極めてスレンダーである。そのため、1909年に完成したが1920年に至り1,000mにわたって壁体が倒壊するという大災害を招いた。その原因としては、壁体上部の受圧面積が大きかったこと、中間粗石層の被覆コンクリートと乱積方塊との間からの侵入波が壁面に作用したこと、背後に捨石層の支えがなかったことが挙げられている。

さて、直立壁の前面に捨石または捨方塊の斜面を形成した断面型は甚だ多いが、このような保護斜面をウェーブブレイカーとよぶ。その目的は壁体やその基礎を保護するため、斜面で波を砕きエネルギーを散逸せしめようとするものであるから、本質的には傾斜堤の考え方と同じである。したがって壁体を十分に被覆しなければ、砕けかけた波がまともに衝突してかえって逆効果をもたらすことさえある。

一方、捨方塊堤の大きな空隙からの透過波を防止するため、背後にウェーブスクリーンと称する直立壁を設けることがある。ウェーブブレイカーの場合と結果的には類似の断面となるが、その出発点の異なることに注意を要する。いずれにしても傾斜部と直立部との両方で防波堤としての機能と安定性とを得ようとするのであるから、二重防波堤の一種の極限と考えてもよいだろう。

ウェーブブレイカーの多くは直立壁堤の被災後に、その補強あるいは復旧策として採られたもので、当初からこれを用いたものはそれ程多くない。最近の日本ではケーソン前面に異型塊を投入した例が多く、これもウェーブブレイカーであろうが、傾斜堤と直立壁堤の欠点を併せもつ二重堤とならないよう注意が肝要である。

図-30は有明海沿岸大浦港の二重堤で、地盤が軟弱であるため内外に抑え捨石を施し、その港外側のものに小防波堤を兼用させて複断面とした。⁴⁷⁾

このほか、ジェノア港で直立堤を二重に配置し中間に25m幅の水面を残した例もある。⁴⁸⁾ 第一線堤の天端高は+2.5m、第二線堤は+4.0mとなっている。1949年頃の施工であるが、その後前面に埋立地ができて必要性はなくなった。

(2) 曲面防波堤

図-31はGourretが曲面による重複波の理論に基づいて提案した断面である。⁴⁹⁾ 通常の混成堤の形状は重複波の滑らかな流線と合致しないから、特にマウンド法肩の突出部において圧力の急変を招き、そのためマウンドが崩壊する。これに反して、適当な曲面によって重複波の滑らかな流線そのものとすれば、突出部がないから被覆石は安定であり、また緩勾配のマウンドが沖側へ延びているので海底地盤の保護にも有効である。

完全重複波を生ずるような曲面は無数にあるが、Gourretは微小振幅のポテンシャル重複波の一般解を導き、その流線の一つとしての曲面を求めたのである。そして波面の高さや波圧をも計算して具体的な断面を示し、鉛直壁との比較を行なっている。曲面堤の利点は壁体底面の反力の変動が小さいことにもあり、このためマウンドの疲労破壊が軽減される。所要材料は、ほど被覆石の増加分だけ曲面堤の方が多い。

なお、Gourret は第一近似解によって全く理論的に考察しただけであるから、被覆層による擾乱や、設計波以外の波の反射あるいは碎波の状況を模型実験などで検討した上で、更に経済的な断面を追求すべきであると述べている。

図-32は Penna、d'Arrigo の提案した曲面堤で、港内側が曲面となっている所に特徴がある。⁵⁰⁾ これは曲面に作用する水圧の鉛直成分を自重に加えて抵抗を増大しようとの考えによっている。もちろん、底面に静水圧がかかったのではこうはならないが、カタニア港で行なったブロックの吊上げ試験によると、捨石上に置いたブロックを吊上げるに要する力はその水中重量より僅かに大きい程度、細砂上ではそれよりかなり大きく、粘土混りの砂の上では空中重量にほぼ等しかった。したがって捨石マウンド上に壁体を置いたのでは自重を有効に利用できないから、鉄筋コンクリート版を直接設置し、できれば地盤内に埋め込む。また前趾を突き出すことにより更に安定を増し、かつ根固めの機能を果たさせる。各ブロックはかみ合わせて一体化し、平面的にも相互にかみ合わせ、更に法線を曲線として波が各部に同時にあたるのを防ぐ。

3.3 砂地盤上の直立堤

海底から直ちに直立堤を築く場合には、海底は洗掘の恐れがなく十分な支持力を有する堅固な地盤でなければならない。したがって砂地盤上では捨石マウンドを設けるのが原則であるが、これを省略した特殊工法について以下に述べよう。

(1) 根入れのない直立堤

砂地盤を床掘りして方塊などを設置し、周辺を根固め捨石で保護したようなものは、小規模には古くから例があるが、砂地盤上にケーソンを直接設置しようとした大規模な防波堤の例として、ベルギーのゼーブルッゲ港のものが挙げられる(1900年頃)。^{51) 52) 53)} 図-33がその断面で、鉄製ケーソン上方塊および場所打の壁体を設ける。ケーソン下面の周辺には約46cmのエッジがついていて、海底に貫入するようになっている。海底が完全に平坦でなくても、エッジが貫入する間にケーソン海底を均しながら徐々に様な沈下を生ずるという考えである。

この防波堤の基部は透過構造となっていて、-6m附近からケーソン部となるが、3箇据えたときに透過構造部が被災した。その修復期間中にケーソンの前方150mにわたって最大-19mまで洗掘されてしまった。これは大潮時に1.4m/sec程度に達する潮流のためである。そこで洗掘部には粗砂沈床と捨石によるマウンドを設け、ケーソンの基面高は当初計画どおり-7m附近として工事を進めたのであるが、洗掘箇所が工事の進行と共に移動し、堤端から200m前方が常に最も深くなったという。先端部でも-15m内外に洗掘された所へ厚さ8m程度のマウンドを形成したのであるが、完成後は著しい災害を受けていないようである。早期に洗掘を生じたため捨石マウンドを採用することとなり、結果的に幸いしたものといえよう。

砂上にケーソンを直接据えて著しく沈下した例は、台湾高雄港で大正5~10年(1916~21)に施工した南防波堤に見られる(図-34)。⁵⁴⁾ この工法を採った理由としては、捨石堤は多量の材料を要して高価であること、方塊積混成堤では堅固な基礎工事と起重機などの諸施設ならびに水中作業を必要とする

がケーソンならばそれらが不要であることを挙げている。そして海底の洗掘に関しては、ケーソンが次第に沈下してもそのため波に対する抵抗が増しある程度の傾斜に止まること、たとえ転覆しても防波効果を失わないこと、沈下したケーソンの上に新たなケーソンを据えれば一層安全であることを述べている。実際に施工したケーソンは著しい傾斜や沈下を生じ、落着いてから根固め捨石と頂部場所打を施した。その後は現在に至るまでほぼ安定を保っている。たゞし、もともと外観の美を誇る考えはなかったから、でき上がりの凹凸は甚だしい。また常にこの方法が適当であるとしたわけではなく、港内を直接保護するための防波堤であれば他の方法を探ったことももちろんである。

図-35は直江津港で砂上に鋼製ケーソンを据え、コンクリート中詰したものである。これもかなりの沈下を示した。

図-36は神戸製鋼船留の波除堤で、基礎地盤に砂置換を施し、リングの上に鋼板製無底円筒を据えて土砂詰したものである。⁵⁵⁾

洗掘防止のためにマットを用いる案もある。図-37は鹿島港船留防波堤に対して提案されたもので、マッシュバックマットを敷いた上に連続鋼セルを据え、サンドバッグで根固めする。⁵⁶⁾ 図-38は東亜港湾工業KKによる簾鋼と称する特許工法である。⁵⁷⁾

(2) 根入れのある直立堤

砂地盤上で安定な直立堤を形成するためには十分な根入れが必要である。

図-39はマドラス港新堤頭部に用いた鋼製ウエルで、1921年に施工した。⁵⁸⁾ 直径15m、高さ17mのウエルを、周辺を捨石で保護しながら根入れ11mまで沈降させ、内部にコンクリートを填充し、上部は方塊積としたものである。

フランスの英仏海峡岸の諸港では1880年代からニューマチックケーソンを用いている。この附近のように潮差の大きい地点でフラッシュによる水深維持をはかるには、断面をしぼり洗掘に耐えるような直立堤が望ましい。図-40はダンケルク港で1930年代に施工した鉄筋コンクリートケーソンで、上部工は鉄筋コンクリートフレームによる透過構造となっている。⁵⁹⁾

北米五大湖地方では1930年代から鋼矢板セル堤を用いている。図-41はエリー湖岸フェアポート港の例である。⁶⁰⁾ この地方では古くからマウンド上に箱型の石枠を据えていたが、バルチック海沿岸などでは杭式の石枠堤が多かった。これが転化したものが二重矢板堤で、日本にも東京港⁶¹⁾ その他に小規模な例がいくつかある。

図-42は田子浦港のニューマチックケーソン堤である。^{62) 63) 64) 65)} この海岸は海底勾配が非常に急で波が大きく、通常の方法では波力に耐えないので、安定基礎上に大塊を据える一法としてこれを採用した。推定洗掘量4mを見込んで先端部の根入れは8mとしたのであるが、昭和40、41年の台風によって著しい洗掘を生じ、かなりの傾斜を生じたものもある。そこで背後に更に強固なケーソンを沈設して補強した。

図-43は被災前の神戸港第五防波堤である。^{66) 67) 68)} これは砂地盤上に直接ではないが、真空沈設工法によってPCセルを軟弱地盤に貫入せしめ、下方の砂礫層で支持したものである。真空沈設工法というのは、

セルに蓋をして内部の海水と空気を吸い出し、蓋に作用する大気圧と水圧を利用してセルを地盤に圧入する方法である。ここでセルを採用したのは、前述の神戸製鋼波除堤の成功例による。セルは外径15.5m、厚さ15cmのもの二段積で、中詰には砂を用い、セル相互の間隙には鋼管杭(径2m)を打込んで透過波を防ぐ。昭和35年に着工して48基を据えたとき、昭和39年9月の未曾有の台風によって壊滅的な被害を受けた。被災原因としては、内部剪断に対するセル壁体の抵抗不足、転倒に対する中詰砂とセルとの一体化の不足、下段セルのめり込みに対する支持力の不足などが挙げられている。復旧には床掘置換を施したケーソン式混成堤を採用した。

3.4 その他の特殊防波堤

以上述べて来たもの以外にも、特殊な防波堤の例は甚だ多い。

特殊な堤体としての沈船防波堤は、古く古代ローマのオスティア港で用いられたことを既に述べたが、1930年代にはインドのビジャカパトナム港で、背後でポケット浚渫を行なうための離岸堤として建設された。⁶⁹⁾ 日本では昭和22年頃から八戸港⁷⁰⁾で施工したほか、小名浜、宇部、若松、秋田などの各港にもある。またギリシャのセント・ガリニ港にはコンクリート船を沈めたものがある。⁷¹⁾

特殊な材料として土砂を用いた防波堤は、東京港やドイツのキール港、ウルク、ハーリングェンなどオランダの各港の例が紹介されているが、^{72) 73) 74)} このほかにも第一次大戦中に急速施工を目的としてこの方式を採用したアウグスタ港(イタリー)の土砂堤、^{75) 76)} 1920年前後に施工したスエズ港の土砂堤⁷⁷⁾がある。またチリのパルパライソ港の防波堤は先端水深54mにも達するが、45m以深の部分では泥質海底上に20mまで砂マウンドをつくり、その上に捨石マウンドおよび方塊傾斜積の直立壁を設けた。^{78) 79)}

軟弱地盤上の防波堤は何らかの特殊な基礎工法を必要とする。砂礫の投入による自然置換の方法は古くから用いられており、やがて床掘による置換がこれに代った。横浜、大阪、神戸など日本における初期の代表的防波堤は何れも自然あるいは人工の置換工法をとっている。^{80) 81) 82)} また大阪や堺では杭基礎上にケーソンを据えて横抵抗の増大をはかった。⁸³⁾ タンジョンブリョク港(インドネシア)では竹杭で支持した竹工沈床上に堤体を設けている。⁸⁴⁾ 名古屋、衣浦ではサンドドレーンによる地盤改良を行なった。^{85) 86)} 粗梁沈床も古くからのものであるが、最近では川崎港などでH形鋼沈床が用いられている。⁸⁷⁾ 七尾港の波除堤ではケーソンを水だけで中詰したが、⁸⁸⁾ 横浜港でも類似の方式を計画中である。神戸港の真空沈設PCセルは既に述べたが、これも軟弱地盤に対する特殊防波堤の代表的な例である。

軟弱地盤と正反対に岩盤上の防波堤には、Consideré型というものもある。⁸⁹⁾ 乾出岩盤にコンクリート壁をアンカーして石詰した簡単なもので、フランスのブルターニュ地方の漁港などで多く用いられている(図-44)。

いわゆる異型塊は、近年消波用として多種多様の形状が開発され広く用いられているが、ブロックには古くから各種の工夫がこらされて来た。P.J.Messentの考案になるピアノ・ブロックは相互の結合をはかった初期の方法の一つであるが、あまり使われていない。⁹⁰⁾ 酒田港では昭和初期に24t根固方塊3箇所を鉄筋コンクリート俵で結合して一体とした。⁹¹⁾ 同じ酒田港や輪島港では、特殊な形状のかみ合わせブロック

クを根固や堤体に用いている。また能登半島の滝、橋立港で用いた亀甲型方塊というのものもある。⁹²⁾

特殊目的の防波堤として先ず高潮堤を挙げるならば、古くレニングラードで4 mにのぼる高潮対策のため湾口に防波堤を設置した場合の流況に関する模型実験が報告されている。⁹³⁾ 日本では名古屋、衣浦に近年施工したが、アメリカでもハリケーン対策としての例がある。⁹⁴⁾ また、津波堤は昭和8年の三陸大津波以後に各地で施工され、更に昭和35年のチリ地震津波の後、大船渡港その他に建設された。

海岸防護のための防波堤としては、新保西海岸の離岸堤が最も大規模である。^{95) 96) 97)} ここでは潜堤を採用したが、更に実験に基づいて洗掘軽減のため透過構造とすることになり、ふとん籠、孔あきコンクリートブロック、スリットつきセルラブロック、石詰パイル堤といった各種断面を用いたほか、逆丁型ブロックなどの特殊構造をも実施した。また漂砂制御用の離岸堤には、前記のビジャカバトナム港のほか、北海道節婦漁港やアメリカのカリフォルニア海岸の例がある。^{98) 99) 100)}

4 最近の特殊防波堤

4.1 骨格式防波堤、孔あき防波堤

骨格式という名称は前述のとおり鮫島茂博士によるもので、そのときは横浜港ヨットハーバーの波除堤として図-45のような薄壁扶壁形の構造が提案された。¹⁵⁾ 工費の低廉、設置および除去の便などの利益があるという。本章では、単純な杭式構造をも含めて骨格式として扱う。

(1) パイル防波堤

Calver のパイル堤のアイディアは、最近に至って漸く二、三の港で試みられるようになった。アメリカではメキシコ湾沿岸地方で施工した2例が報告されている。¹⁰¹⁾ これは外径1.4 mのPCパイルを1列に打込み、間隙にはパイルの円周に合わせた木矢板を用い、頂部を結合してある。水深は3 m内外、波高は2.5 m程度で、既設の隣接構造物の洗掘状況を考慮して6 mの根入れをとっている。

日本では大阪港で最近鋼管を用いた例がある。^{102) 103)} 水深7 m、波高3 m程度で、地盤が軟弱であるため砂礫で置換してから、径2 mの鋼管を-3.4 mまで打込んだ。

新潟東港では径80 cmの鋼管矢板による防砂堤200 mを施工したが、中央部約1/3が海底洗掘のために倒壊した。この部分は当初-2 mまでの洗掘を予想して-10 mまで根入れをもたせてあったが、実際には-9 mまでも洗掘されたのである(昭和42年11月)。

堺港の八幡製鉄船留波除堤では、ボックス鋼矢板を壁体とし、H形鋼の斜杭と組み合わせた構造を試験的に採用した。水深は11 m、波高約2 mで、根入れは-25 mとなっている。¹⁰⁴⁾

(2) カーテン防波堤

水面附近にだけ壁を設けて波を阻止し、下部を透過性とした型式を筆者はカーテン防波堤と名づけたのであるが、その原型はかなり前からある。

図-46はスイスのチューリッヒ湖で1932年に施工したものである。¹⁰⁵⁾ 水深14 mで地盤軟弱のため、径70 cm、長さ27 mの鋼板円筒8本を一組として支承をつくり、その間に長さ25 m、幅3.7 m、高

さ4.3 mの鉄筋コンクリートケーソンを据えてある。ケーソン下端は-2.4 mにあり、チューリッヒ工科大学における模型実験によると、波高1 m、波長12 mのとき伝達率は3 %であったという。また波力は0.3 t/mである。ケーソン内は水だけで、底面に孔をあけて外水位に追従させ、満潮時にも浮上しないようにしてある。

ソ連では1940年前後からこうしたカーテン型式の研究が行なわれており、種々の形状について計算や実験結果を示しているが、図-47は P.P.Sorokine と E.E.Roundnef によるレニングラード型と称するものである。⁸⁾ 水深20 m、波高5 m、波長75 m程度を対称としており、内外2列のカーテンを有する。外側のカーテンは若干傾斜している。両者の間隔は15~19 m、水面下の深さは10 mまたは15 mである。

図-48は春燕型と名づけられたもので、底幅30 m、長さ14 mの鉄筋コンクリートケーソンをピアー上に据えてある。⁸⁾ ケーソン下面は-11 mにあり、また港外側は1/1.5の斜面をなし、この斜面の上部と下部に孔があいている。そのため斜面上で砕けた波は上部の孔からケーソン内部へ落ち込んで勢力を失った後、下部から外へ流出する。カーテンと孔あきの混合型式である。

日本では清水港、名古屋港、西宮港、東浦漁港などの波除堤に最近施工した実例がある。また、名古屋港貯木場では鋼管杭で支持したカーテンと海底との間にアスファルトマットと捨石による洗掘防止工を施し、ほとんど不透過の構造としている。¹⁰⁹⁾ このほか東京電力姉ヶ崎火力発電所の冷却水放水路では、カーテンと潜堤とを組み合わせた透過性二重堤を用いた。

カナダの漁港では、木杭のフレームの片面に板張した簡単なカーテン構造を用いている。¹⁰⁷⁾

図-49はスコットランド沖シエットランド諸島のスカロウエー港における棧橋のカーテンである。¹⁰⁸⁾ 脚柱間にPC版を-1.8 mまで固定したもので、建設後の観測によると波高減衰は81~92 %に達したという。水深約6 m、最大波高は1.2 m程度である。ホアルセー港にも同様なものがあるが、波高が大きいためカーテンを海底砂礫層中へ貫入させてある。

(3) 孔あき防波堤

図-50は1908年にアメリカで特許をとった W. Smith の洞穴型で、空気のクッション作用を利用して波力を緩和するという考え方である。¹⁰⁹⁾

古いタブススの港における孔あき堤については既に述べたが、こうした緩衝作用は確かに認められるところで、Vernon-Harcourt は英仏海峡オールダーニー港の例を報告している。これは19世紀中頃に施工された混成堤で、干潮面附近のブロックが先ず吸い出されるとこれが次第に波及し、越波の打込みと相まって図-51のような空洞を生ずる。しかしある程度の大きさに破壊は停止してしまい、頂部や内壁はそのまま残っていたということである。¹¹⁰⁾

これと似た形の孔あき堤がイギリスのラムゼー港で近年建設されている(図-52)。¹¹¹⁾ すなわち、底幅11 m、頂幅7 m、高さ10 m程度のコンクリート直立堤に、幅2.4 m、高さ6.1 mの孔を3.7 m間隔にあげ、階段状に後上方へ通じさせたものである。頂部にも空気抜きが設けてある。

衝撃の緩和作用とは別に、空隙を出入する水流のエネルギー損失を利用しようとする考え方がある。その一つはカナダのコモー湾で実際に施工された孔あきケーソンである。^{112) 113) 114) 115)} 図-53に示すようにケーソンの前壁に多数の孔があいており、前面水位の昇降に応じて室内へ水が出入し、その際の損失や落水に伴う気泡の混入により波エネルギーが消耗する。模型実験結果によると、孔の径は(0.003~0.01)L₀、壁厚は0.01L₀、隔室の幅は(0.05~0.15)L₀、深さは(1/8~3/8)L₀の程度が最適だということである。コモー湾では背後を岸壁として使用しているが、防波堤の場合特に中詰は必要としない模様で、また孔あき壁を二段、三段構えとしたり、波が両方向から来るときは両外壁を孔あきとして中央に隔壁を設けたり、種々の変形も提案されている。更に、鋼板と発泡剤の壁体を用いて組み立て式の軽量構造とし、浮防波堤にする案もある。

図-54はジュネーブの附近で建設されたデルタ型である。¹¹⁶⁾ プレキャストコンクリートによる前後の孔あき壁を立て並べ、頂部をスラブでつないだもので、壁には突起もついているので波は減衰しやすい。後壁にも孔があいているが透過波は少なく、また反射率も捨石堤より小さいという。

図-55は E. Gallareto のアイディアで、前方の孔あきブロックと後方の孔あきケーソンとを下¹¹⁷⁾部ケーソンにのせたものである。

孔あき壁の厚さを増して行くとチューブ状となるが、そこを通る流れのエネルギー損失を利用しようとするものの一つに、小田賢郎氏の蜂窩式防波堤がある(図-56)。¹¹⁸⁾ 水面附近に水平な中空管を積み重ねたもので、縦断面を見ると蜂の巣状となっている。

こうしたチューブ群の防波効果についてカリフォルニア大学で行なった実験によると、¹¹⁹⁾ 管長が波長と同程度になって漸く波高が半分程度になるに過ぎないから、実用化にはまだ無理がある。

博多港で最近施工した亀の甲ブロック堤も、折れ曲ったチューブの中で流れを消耗させて消波しようとする考えであるから、チューブ式防波堤の一変形といえるかも知れない(図-57)。¹²⁰⁾

このほか孔あき式のものとして、明石海岸に施工されたルーバー式の例がある。¹²¹⁾ ただし、第2章で述べた古典的ルーバー堤の断面形とはかなり異なる。

4.2 浮防波堤

第2章では19世紀末頃までの例を挙げたが、その後も浮防波堤に関する試みは極めて多い。日本では昭和の初めに青森港で実験した例があるし、¹²²⁾ 比較的最近には音戸漁港¹²³⁾ や笠岡附近の養漁場¹²⁴⁾ で実際に用いられた。

ソ連でも新型式の提案や実験的研究がかなり行なわれて来た。⁸⁾ 図-58は P.L. Zolotaref と B.N. Grengammer によるもので、外海側を斜面としてあるから砕波を生じて防波効果が大きい。実験結果も良好であったという。図-59は N.A. Labzovski の提案の一つで、水平な安定翼をつけた十字形断面をしている。1941年頃に行なわれた設計コンクールでは、錨型、ネブチューン型、ジグザグ型などのアイディアが現われた。E.E. Roudnef と I.G. Roudachevski による錨型は、幅15mの矩形断面鉄筋コンクリートポンツーンを185mの間隔で2列に並べたもので、幅50mのポンツーン

1列と同等の効果があるという。N.A.Labzovskiのネプチューン型は3列の直立壁をフレームで連結した型式である。F.N.Sergueiefのジグザグ型は6列のポンツーンから成り、その吃水は沖から岸へ向って次第に増加する。各ポンツーンにはジグザグ状の梁がある。図-60はN.V.Moguilkoの魚形で、丸太を組んで幅100mの浮体としたものであり、模型実験結果も示されている。

さて、浮防波堤の最も大規模な実施例は、第二次大戦中に連合軍がノルマンディー上陸作戦に用いたポンバードンと称するものである。¹²⁴⁾ この頃、軍事目的のための防波堤として多種多様の型式が研究されたが、ポンバードンは十字型断面の鋼製フロートで、長さ60m、幅および深さ7.5mで、波高3m、波長45m程度を対象として水深3~4mの地点に設置した(図-61)。これを延長1,600mにわたって短時日に設けたのであり、2m程度の波を半減するという効果を示したが、1944年6月の暴風時に風波の周期が浮体の固有周期と一致して共振状態となり、繫留索が切断して破壊してしまった。またこのとき、ポンバードンと共に図-62のようなフェニックス型ケーソンも用いられた。これは海底に直接沈設したのであるが、やはり上記の暴風時に打ち込み波や海底洗掘のために破壊した。

最近もプラスチックシート、¹²⁵⁾ プラスチックバッグ、¹²⁶⁾ 粗朶マット、¹²⁷⁾ 浮タイヤ¹²⁸⁾ などによる浮防波堤の案は続々と提出されており、理論的実験的研究も盛んに続けられている。

4.3 空気・水流防波堤

空気防波堤の実用化は今世紀初頭から試みられており、アメリカではP.Brasherが1907年に特許をとっている。彼は工事中の海底トンネルから上昇する気泡が表面の波を減衰せしめている状況を観察し、これからヒントを得たのである。

当時アメリカ各地で実際に試みられた例のうち、最も著名な成功例はカリフォルニア州エル・セグンドのもので、ここでは嵐で破壊された棧橋の残存部を保護するために用いたのであるが、4m内外の波を崩壊せしめたという。

初期には空気防波堤の機構として、圧縮性の気泡の緩衝作用が水粒子の運動エネルギーを散逸させるものと考えられたが、その後世界各国において消波作用の本質や所要の空気量などに関する研究が盛んになって来た。

ソ連では1930年頃に現地試験や水槽実験を行なっている。¹²⁹⁾ 黒海沿岸のトアブセ港は石油港であるため、通常の防波堤では火災発生時に難点があるが、空気防波堤ならば常時の静穏と同時に流出した油の拡散防止にも役立つということを室内実験で確かめた。カスピ海のマハチ・カラ港では荒天時の漁獲物の荷役作用に対する保護を目的として実験したが、波の大きいときに期待した程の成果は得られなかった。水槽実験の結果からは若干の定量的事実も求められたが、まだ消波機構を十分に理解する段階とはならず、また相似性についての疑問が残されていた。

その後、Thysse、Laurie、Carrらは気泡の上昇に伴って表面に生ずる水平流が消波作用の主役であり、反対流に遭遇した進行波が波長の短縮と波高の増大によって遂に崩壊するものと考えた。ここから空気の代りに水流を直接噴射する水流防波堤のアイディアも生まれて来る。しかし、九州大学栗原教授

は室内実験や長崎県端島、伊王島における現地試験により、水平流に伴う渦動粘性の減衰作用が重要であることを見出した。^{130) 131) 132) 133)}

実際問題として空気防波堤が有効であるためには、水深の大きい地点で多量の空気を消費しなければならぬので、本格的な防波堤として用いるには難点があるが、小規模な実施例はいくつかある。日本では上記のほか、日本鋼管鶴見造船所の機装岸壁防護用に試験した例があるが、外国における実例を挙げると以下のとおりである。

ドーバー港では、フェリー用ドックの外側ゲートが定期検査のために除去されていた間、内側ゲートに作用する波力を減ずるために使用した。¹³⁴⁾ 3カ月間その効果を発揮したという。

同じドーバー港では内港の港口(幅90m)にも空気防波堤を用いた。¹³⁵⁾ 136) この特徴は空気を断続的に放射する点にあり、放射中の空気を急に止めても効果が直ちに消失しないことに着目したものである。波が大きくなって来ると平均7秒の間隔で空気が放出され、約50%の減衰効果をもつとのことである。

このような間けつ式のものは、イギリス西海岸でも試験的に実施した例がある。¹³⁶⁾

このほか、外海で作業する浚渫船を空気防波堤で保護する方法、船に水流防波堤を設置して繫留中の動揺を減ずる方法、また変わったところでは、油の拡散や結氷、埋没などの防止に気泡を応用する方法などが検討または実施されている。^{137) 138) 139) 140) 141)}

5 結 語

以上、特殊防波堤についての実施例やアイディアについて雑然と述べて来た。ほとんどを既往の文献から拾い出したのであるがもちろん省略したものもあるし、また文献のすべてに目を通し得たわけではないからまだまだ多くの例が残されている筈であり、報告されなかった実例や秘められたアイディアもあるだろう。実施例の中には建設後の効果や現況について不明な場合が多いが、こうした情報を御提供頂ければ幸甚である。

最近特殊防波堤に関する研究が各地で盛んであり、水理模型実験などの結果も多数報告されている。本稿ではそれを述べる余裕がなかったが、できれば近い機会にとりまとめてみたいと思っている。

新しい防波機構や構造に関する着想は、今後も無限に生まれ出て来るだろう。固定観念にとらわれることなく、自由奔放なアイディアを提出して大いに論議すべきである。産業や交通の形態が変化すれば、防波構造物にも従来とは異なるものが要求される筈であるから、アイディアを実行に移す機会は将来ますます拡がって行くに違いない。

反面、太陽の下に新しいものなしというとおり、我々が考えつくようなことは既に先人達が何回となく試みている。こうした経験の積重ねこそが貴重であり、成功失敗の原因についてはできるだけの解析をする必要がある。

最近波に関する知識が増え、水理実験という有力な手段もあるから、往時よりはるかに着実な基盤に立って着想を実地に応用することができる。しかし進歩したとはいえ、複雑極まりない自然現象の中には、ま

だまだ現段階の理論や実験で解決し難い問題点が甚だ多い。伝統的な防波構造についてすら簡単な実験などで解明されていない点が残されているのであるから、そうした手法を新型式に適用しただけでは単に表面をなでたに過ぎない。伝統的な構造型式であればこれを経験が補っているのであり、設計法にしても災害状況やその復旧法にしても、理論的実験的に不明の点でもどうにか処理できる。新型式を試みるにあたってこのことを忘れてはならない。もちろん、理論や実験はこうした要請に応えられるように向上をはかるべきである。

特殊型式の防波堤の場合には、ある程度の透過波を許すという考え方に立っているものが多い。透過波をどこまで許せるかは対象に応じて当然異なるから、単なる波高伝達率だけでは真の防波機能を評価することはできない。また透過構造とすることに伴う流れや漂砂の問題についても、その利点や欠点を十分に認識しておく必要があるが、これもなかなか難しいところである。

特殊防波堤論という与えられた表題とは程遠い雑文となってしまったが、多少なりとも参考になり得る点があれば幸いである。

6 文 献

- 1) L.H.Savile: Presidential Address; Proc. Institution of Civil Engineers, 1940-41 No. 1
- 2) A.M.Tasco, A.d'Arrigo: Problems arising from the increasing use of yachts and Other small boats for sport and recreation; 21st PIANC, Stockholm 1965
- 3) L.Drouet: Notice sur les digues de Cherbourg; Annales des Ponts et Chaussees, 1931-5
- 4) F.H.Cheesewright: Breakwater Construction; Transactions of Society of Engineers, 1890
- 5) M.Scott: Description of a Breakwater at the Port of Blyth and of Improvements in Breakwaters applicable to Harbours of Refuge; Proc. Institution of Civil Engineers, Vol. 18, 1858-59
- 6) M.Scott: On Breawaters; Proc. Institution of Civil Engineers, Vol. 19, 1859-60
- 7) W.Shield: Principles and Practice of Harbour Construction, 1910
- 8) N.N.Djounkovski, P.K.Bojitch: La houle et son action sur les cotes et les ouvrages cotiers, 1959
- 9) Th.Cargill: Floating Breakwaters, Transactions of Society of Engineers, 1871
- 10) Lovelace: On Harbours of Refuge; Proc. Institution of Civil Engineers, Vol. 7, 1848

- 11) W.D.Cay: Conditions affecting the force of waves and the construction of breakwaters to resist them. Estimation of this power; 10th PIANC, Milano 1905
- 12) H.C.V.Moeller: The Construction of a Breakwater at the Free Port of Copenhagen and a Short Description of this Harbour; International Maritime Congress, 1893
- 13) B.Cunningham: Dock Engineering, 1922 (3rd Edition)
- 14) 四日市港管理組合: 四日市旧港防波堤
- 15) 鯨島茂: 海工用巨大塊体に関する研究(其の1~4); 土木学会誌第27巻第3~6号、昭和16年3~6月
- 16) H.Lundgren: A New Type of Breakwater for Exposed Positions; Dock and Harbour Authority, Nov. 1962
- 17) O.Elbro: The Hanstholm Harbour, Denmark; Bulletin of PIANC, 1964 Vol. 1
- 18) J.V.Dixhoorn, A.Paape, E.Stambhuis, W.A.Venis: Breakwaters with vertical and sloping faces. Measurement of waves. Study of wave forces. Method of calculation; 21st PIANC, Stockholm 1965
- 19) 第四港湾建設局別府港工事々務所: 防波堤の設計と施工(ケーソンシリーズ第2集); 昭和41年3月
- 20) 前出繁吉: 波力発電装置を有する防波堤の考察; 港湾, 昭和23年1、2、3月
- 21) 関口四郎: 波殺堤の研究; 港湾第17巻4号、昭和14年
- 22) 関口四郎: 波殺堤(波を殺し港内水深を維持する防波堤); 昭和8年1月
- 23) 岡部三郎: 漁港の形態(一つの試案); 漁港1巻1号、昭和25年1月
- 24) 岡部三郎: 中小漁港の防波堤; 漁港2巻2号、昭和26年4月
- 25) 岡部三郎: 技術者の初夢(漁港は何処にでも造れる); 漁港3巻1号、昭和27年1月
- 26) H.F.Cornick: Dock and Harbour Engineering, Vol. 1, 1958
- 27) O.Z.Ekdall: The Swedish Fishery Harbours; 14th PIANC, Cairo 1926
- 28) M.Maese, M.Becerra, J.Brackenburg, E.de Castro: Concrete and reinforced concrete; 13th PIANC, London 1923
- 29) 北海道開発局函館開発建設部; 函館港における圧力ケーソン工法について; 港湾技術要報No.4, 1953
- 30) 広井勇: 日本築港史, 昭和2年
- 31) 山田正平: 防波堤の滑動抵抗を増加する一試案; 港湾27巻4号, 1950年4月
- 32) 中村良助: 鼠ヶ関避難港の計画および施工について; 港湾技術要報No. 15, 1956年12月
- 33) 第7回直轄港湾工事技術研究会報告; 港湾技術要報No. 17, 1957年8月
- 34) 運輸省洞海湾工事々務所: 洞海湾防波堤工事について; 昭和29年11月
- 35) 加川道男: 重力式構造物(防波堤)の摩擦抵抗の増大について; 第11回海岸工学講演会講演集, 昭和39年
- 36) 運輸省第二港湾建設局; 八戸港(八太郎地区)北防波堤の被災について、昭和42年10月

- 37) K.Petterson: Concrete and reinforced concrete. Their application to hydraulic works, means to insure their preservation and their watertightness;13th PIANC, London 1923
- 38) A.Lange,R.V.Frost: Design of breakwaters with vertical sides. Effect of wave action. Mathematical determination and method of construction.Lessons gained from experience;16th PIANC, Brussels 1935
- 39) de Lima:The Port of Funchal, Madeira; Dock and Harbour Authority,Sept.1937
- 40) Coen Cagli: Lezioni di Costruzioni Marittime (1),1928
- 41) R.Berke: Turkish Ports, Mersin Harbour;20th PIANC,Baltimore 1961
- 42) P.G.Faria: Travaux recents effectues dans les ports de Barcelone et de Bilbao;8th PIANC,Paris 1900
- 43) de Churruca: Works for improving the Bilbao River and making an outer harbour, also the application of large caissons as a breakwater foundation; International Engineering Congress, Glasgow 1901
- 44) Report of Proceedings of the 10th PIANC, Milano 1905
- 45) Batard-Razeliere: Notice sur le port de Barcelone;Annales des Ponts et Chaussees,1908-4
- 46) E.Quellenec: Breakwaters and jetties in tideless seas,cost; 14th PIANC,Cairo 1926
- 47) 末次信夫: 複断面を採用せる軟弱地盤の防波堤について;港湾技術要報No.15,1956年12月
- 48) E.Gallareto: Essay on new ideas in the design of defence works outside seaports (1); Bulletin of PIANC,Vol.3No.17,1965
- 49) Gourret: Sur certains mouvements periodiques de la mer au voisinage d'une paroi obliques ou courbe; Annales des Ponts et Chaussees,1937-4
- 50) de Seze: Sur les possibilites d'evolution dans la construction de l'infrastructure des digues a parois verticales d'apres MM. Penna et d'Arrigo; Annales des Ponts et Chaussees,1933-1
- 51) J.N.Hart,L.V.Gansberghe: Zeebrugge Harbour Works; International Engineering Congress,Glasgow 1901
- 52) J.N.Hart,C.Piens: Account of the Construction Works At the Zeebrugge Landing Place,10th PIANC,Milano 1905
- 53) L.Bonnet,A.Braeckman: Breakwaters or jetties in tideless seas, cost;14th PIANC,Cairo 1926

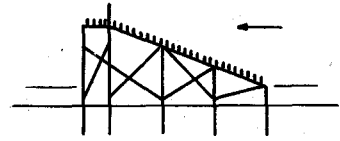
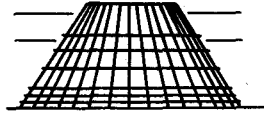
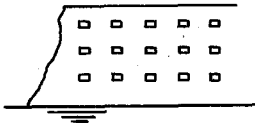
- 54) 山形要助: 打狗港けいそん. ぶろっく防波堤に就て; 土木学会誌5巻6号、大正8年12月
- 55) 長尾義三: 小船留の静穏と新しい防波堤構造について; 港湾技術要報No.29, 1960年12月
- 56) 鹿島港防波堤の設計と施工; 港湾技術要報No.48, 1966年12月
- 57) 東亜港湾工業株式会社: 東亜の洗掘防止工法. 被覆工法
- 58) C.R.White: Construction of a breakwater-head at Madras; Dock and Harbour Authority, July 1926
- 59) Broquaire, Etienne, Blosset: Layout of outer protective works, maintenance of depths in harbour on sandy shore and before mouths of estuaries. Results obtained; 16th PIANC, Brussels 1935
- 60) M.C.Tylor: Breakwaters on the great Lakes of North America; 16th PIANC, Brussels 1935
- 61) 土井正中: 杭を以て築造されたる防波堤の実例; 港湾11巻10号, 昭和8年10月
- 62) 市川武: 田子浦港西防波堤の施工について; 港湾技術要報No.29, 1960年12月
- 63) 青島茂一、市川武: 掘込港工事の問題点(田子浦港の港口部について); 土木学会誌47巻9号, 1962年9月
- 64) 市川武: 直立防波堤の洗掘災害; 第13回海岸工学講演会講演集, 1966
- 65) " : 田子の浦港西防波堤災害復旧工事について; 第13回全国港湾工事報告会報告概要, 昭和42年12月
- 66) 第三港湾建設局神戸港工事々務所: 神戸港第5防波堤工事について, 昭和37年11月
- 67) H.Sato: New Type Breakwater constructed by pressed down P.C. Cylinders; 21st PIANC, Stockholm 1965
- 68) 第三港湾建設局神戸港工事々務所: 摩耶ふ頭直轄工事施工の記録, 昭和42年4月
- 69) S.S.Rao: Island Breakwater at Vishakhapatnam Port; 21st PIANC, Stockholm 1965
- 70) 運輸省第二港湾建設部: 八戸港沈船防波堤工事誌, 昭和25年3月
- 71) C.Constantinou: Construction Work at the Port of St.Galini; Dock and Harbour Authority, March 1953
- 72) 君島八郎: 海工(上), 昭和17年(第4版)
- 73) 鈴木雅次: 港工学, 昭和30年(増補第4版)
- 74) 松尾春雄, 新妻幸雄: 波と防波堤, 昭和18年
- 75) Report of Proceedings of the 14th PIANC, Cairo 1926
- 76) H.F.Cornick: Dock and Harbour Engineering, Vol.4, 1959
- 77) E.Quellenec: Brise-lames et jetees des ports d'Egippte; 14th PIANC, Cairo 1926
- 78) J.Lira: Breakwaters or jetties in tideless seas, cost; 14th PIANC, Cairo 1926
- 79) J.Lira: Design of breakwaters with vertical sides; 16th PIANC, Brussels 1935

- 80) 広井勇：築港（前篇），大正13年（第4版）
- 81) 山田徳蔵：神戸港における防波堤；港湾4巻1号，大正15年
- 82) S.Sakamoto,K.Takanishi: Breakwaters or jetties in tideless seas, cost; 14th PIANC, Cairo 1926
- 83) 松田健作：地盤軟弱なる大阪港における繫船岸壁及び防波堤工事の特殊工法について；土木学会誌19巻5号，昭和8年5月
- 84) H.Deschenes: Ports and maritime structures built in soft ground with special reference to the need for increased depths; 21st PIANC, Stockholm 1965
- 85) K.Teranishi: Construction of Nagoya Storm-tide-preventing Breakwater; 10th Coastal Engineering, 1966
- 86) 衣浦港防波堤の設計と施工；港湾技術要報No.48, 1966年2月
- 87) 京浜港川崎防波堤の設計と施工；港湾技術要報No.48, 1966年2月
- 88) 中村正二：七尾港波除堤工事について；港湾技術要報No.14, 1956年4月
- 89) P.Bastard: A propos des moles "Considere"; Travaux, juin 1958
- 90) B.Cunningham: Harbour Engineering, 1918
- 91) 山田三郎：防波堤工事について；港湾講演集第5集，昭和12年
- 92) 原田碧：防波堤築造用亀甲形方塊について；港湾6巻12号、昭和3年
- 93) V.E.Liakhnitsky: The Harbours of USSR; 16th PIANC, Brussels 1935
- 94) J.B.McAleer: Hurricane Studies for Narragansett Bay; 9th Coastal Engineering, 1964
- 95) 新潟港技術調査委員会：新潟港技術調査報告第3報，昭和26年12月
- 96) 黒田静夫：新潟港における海岸防護工事（第18回PIANC提出論文），港湾技術要報No.9, 1954年8月
- 97) 竹内良夫：新潟海岸欠潰と防災工事；港湾技術要報No.10, 1954年12月
- 98) A.Ozaki: On the Effect of an Offshore Breakwater on the Maintenance of a Harbour constructed on a Sandy Beach; 9th Coastal Engineering, 1964
- 99) A.Ozaki: Observed Effect of the Offshore Breakwater constructed off a Sandy Beach, 10th Coastal Engineering, 1966
- 100) W.J.Herron, R.L.Harris: Littoral Bypassing and Beach Restoration in the Vicinity of Port Hueneme, California; 10th Coastal Engineering, 1966
- 101) R.N.Bruce: Prestressed Concrete Cylinders for two Breakwaters; Civil Engineering, Aug. 1959
- 102) 中森敏博：大阪港鋼管杭式防波堤建設工事について；第11回港湾工事報告会報告概要、昭和40年11月

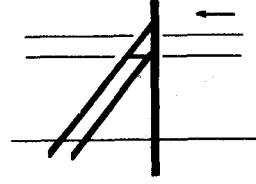
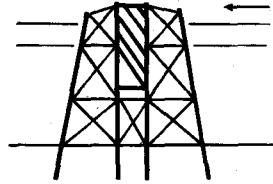
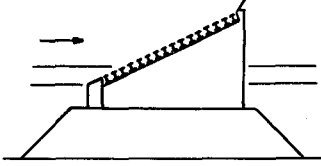
- 103) 小谷憲弘, 中森敏博: 大阪港鋼管杭式防波堤建設工事; 第12回港湾工事報告会報告概要, 昭和41年12月
- 104) 福家龍男, 天野哲男: 堺製鉄所地先鋼製防波堤工事; 第11回港湾工事報告会報告概要, 昭和40年11月
- 105) A.J.Luchinger: Lake Zurich Breakwater built on Piles; Engineering News Record, Vol.110, No.3, 1933
- 106) 加藤晋: 名古屋港鋼管式波除堤建設工事; 第12回港湾工事報告会報告概要, 昭和41年12月
- 107) A.F.Blanchard: Small Fishing Harbours in Canada; 21st PIANC, Stockholm 1965
- 108) M.H.Morrison: Fishing Harbours and their Installations; 21st PIANC, Stockholm 1965
- 109) R.Boivin: Comments on Vertical Breakwaters with Low Coefficients of Reflection; Dock and Harbour Authority, June 1964
- 110) Vernon-Harcourt: Harbours and Docks, 1885
- 111) J.C.Brown: Reconstruction of North Breakwater, Ramsey Harbour, Isle of Man; Dock and Harbour Authority, Oct.1959
- 112) G.E.Jarlan: A Perforated Vertical Wall Breakwater; Dock and Harbour Authority, April 1961
- 113) G.I.Cote, G.R.Simard: The Breakwater Quay at the Bay of Comeau; Dock and Harbour Authority, April 1964
- 114) E.Jarlan; Breakwater Structures; United States Patent Office, Jan. 21, 1964
- 115) W.Marks: A Perforated Portable Breakwater for Fixed and Floating Application; 10th Coastal Engineering, 1966
- 116) D.Baroni: Construction d'une digue en element prefabriques. Nouveau systeme de brise-lames pour la protection des cotes et la construction de quais ou de ports; 21st PIANC, Stockholm 1965
- 117) E.Gallareto: Essay on new ideas in the design of defence works outside seaports (2); Bulletin of PIANC, Vol.4, 1965
- 118) 小田賢郎: 蜂窩式防波堤と新波殺堤; 漁港 Vol.8, No.2
- 119) A.T.Ippen, E.L.Bourodimos: Breakwater Characteristics of Open-tube Systems; MIT, July 1964
- 120) 嶋田長彦: 異型ブロック防波堤建設工事; 第12回全国港湾工事報告会報告概要, 昭和41年12月
- 121) Outline of Coastal Engineering in Japan, 1966
- 122) 益田頼輔: 益田懸垂式防波壁試験工事概要; 港湾8巻12号, 昭和5年12月
- 123) 広島県港湾課: 浮防波堤について; 漁港, 昭和27年10月
- 124) R.Lochner: The Bombardon Floating Breakwater; Civil Engineer in War,

1948

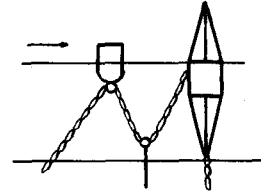
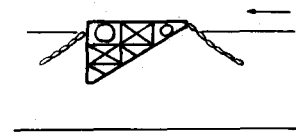
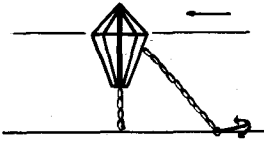
- 125) R.L.Wiegel: Oceanographical Engineering, 1964
- 126) R.L.Wiegel, H.W. Shen, J.D. Cumming: Hovering Breakwater; ASCE, Vol. 88, WW2, May 1962
- 127) J.J. Vinje: Increase of effective working-time during operations at sea by means of movable structures; Delft Hydraulics Laboratory, Oct. 1966
- 128) R.L. Stitt: Breakwater; United States Patent Office, Oct. 1966
- 129) I.A. Bogolepoff: The Compressed Air Breakwater; Bulletin of PIANC, No. 23, Jan. 1937
- 130) 栗原道德: 空気防波堤について; 海岸工学研究発表会論文集, 昭和29年
- 131) " : " (II); 第2回海岸工学講演会講演集, 昭和30年
- 132) " : " (III); 第3回 " " , 昭和31年
- 133) 空気防波堤シムボジューム講演集; 長崎県, 昭和33年
- 134) Pneumatic Breakwater at Dover; Dock and Harbour Authority, Dec. 1952
- 135) A Wall of Bubbles Controls the Waves; Engineering News Record, Jan. 22, 1959
- 136) J.G. Bryan: Non Solid Breakwaters, Performance of Full-Scale Installation; Dock and Harbour Authority, May 1963
- 137) L. James, F. Green: Pneumatic Breakwaters to protect Dredgers; Dock and Harbour Authority, June 1961
- 138) R.A. Dilley: Shipboard Hydraulic Breakwater; ASCE, WW2, March 1958
- 139) M.B. Abbot: Containing Oil Spills with a Pneumatic Barrier; Dock and Harbour Authority, Dec. 1961
- 140) S. Ince: Air Bubbles for Protecting Wharf Structures in the Arctic; Dock and Harbour Authority, Jan. 1964
- 141) Bubble Breakwater Aids Pusher Tugs; Dock and Harbour Authority, May 1966



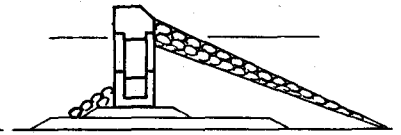
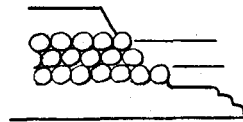
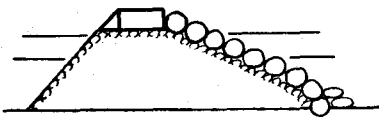
(1) 孔あき堤 (タフス港) (2) エーレン堤 (シェルブール港) (3) 格子堤 (Scott)



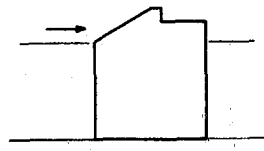
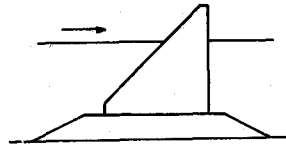
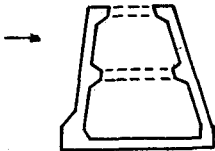
(4) 格子堤 (Scott) (5) 鎖張堤 (Hays) (6) パイル堤 (Calver)



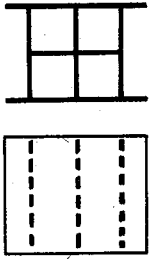
(7) 浮防波堤 (ラ・シオタ港) (8) 浮防波堤 (Cargill) (9) 浮防波堤 (Sakhanaki)



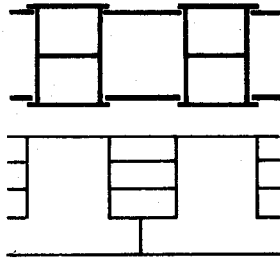
(10) 袋詰コンクリート堤 (Cay) (11) 同上 (12) ケーソン (コペンハーゲン港)



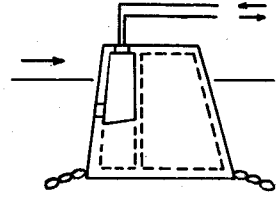
(13) 水平骨格式ケーソン (釜島) (14) 斜面ケーソン (15) 複合斜面堤 (ハンストホルム港)



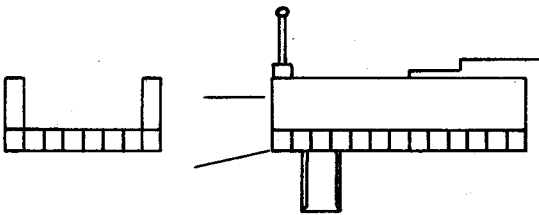
(16) 張出しケーソン (別府港)



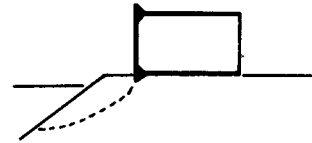
(17) ケーソンと板との組合せ



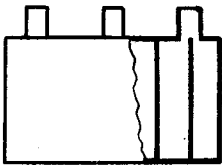
(18) 発電用ケーソン (前出)



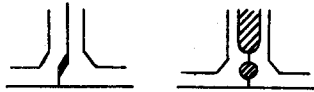
(19) 桶型ケーソン (岡部)



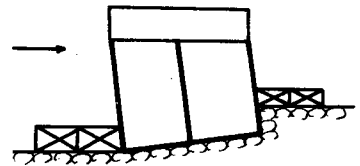
(20) 砂浜上のケーソン進水 (グティニア港)



(21) シャフトつきケーソン (ムーゼル港)



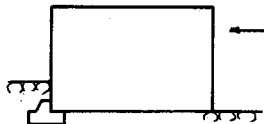
(22) ケーソンの結合 (スウェーデン)



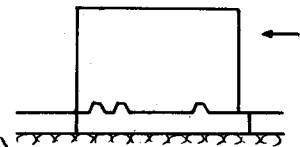
(23) 斜め据付けケーソン



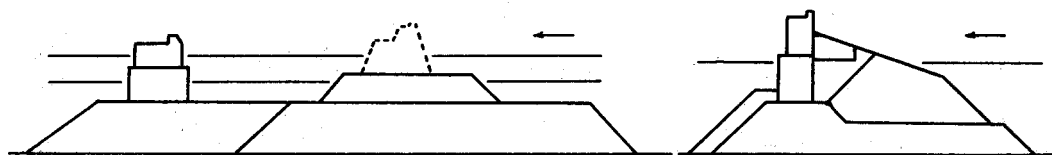
(24) ケーソン下面の突起 (新ヶ岡港)



(25) ストッパー (新ヶ岡港)



(26) ケーソン下面の凹み (酒田港)



(27) 二重堤 (ビルバオ港)

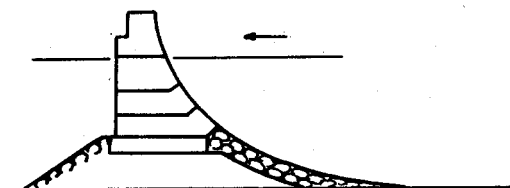
(28) 二重堤 (バルセロナ港)



(29) 孔あき二重堤 (四日市港)



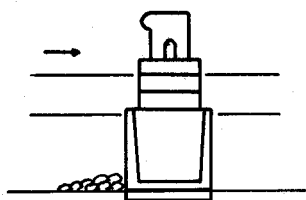
(30) 二重堤 (大湊港)



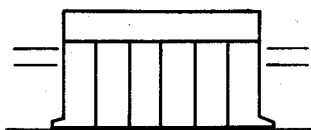
(31) 曲面堤 (Gourret)



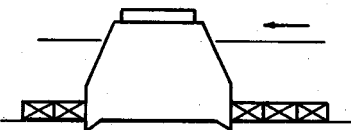
(32) 曲面堤 (Penna, d'Arrigo)



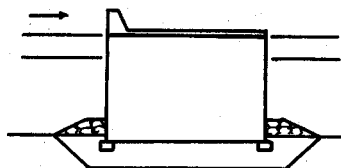
(33) 砂上のケーソン (ゼーブルグ港)



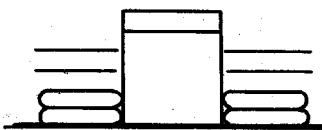
(34) 砂上のケーソン (高雄港)



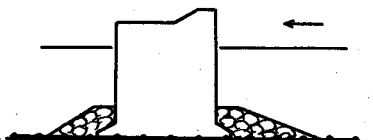
(35) 砂上のケーソン (直江津港)



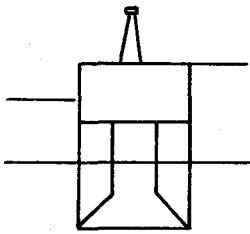
(36) 砂上のセル (神戸港)



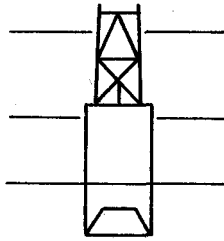
(37) マット上のセル



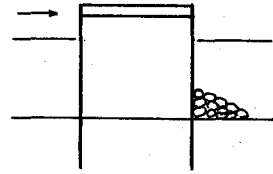
(38) 簾鋼 (東亜港務KK)



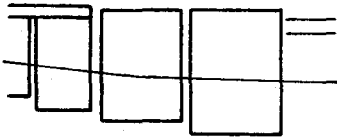
(39) ウェル (マドラス港)



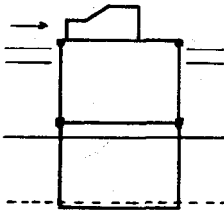
(40) ニューマチックケーソン
(ダンケルク港)



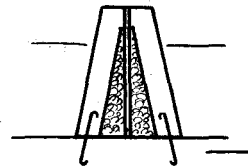
(41) 矢板セル (フェアポート港)



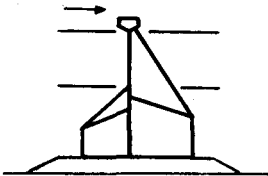
(42) ニューマチックケーソン
(田子浦港)



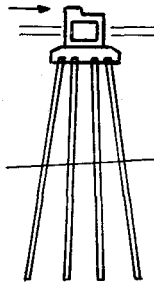
(43) 真空沈設セル (神戸港)



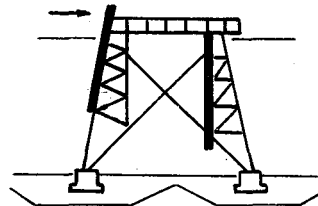
(44) Considere 型



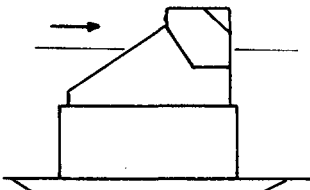
(45) 骨格式 (横浜港)



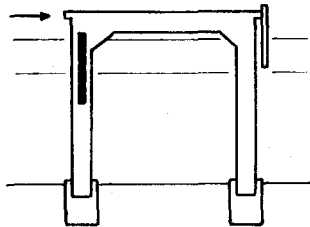
(46) カーテン式 (チューリッヒ湖)



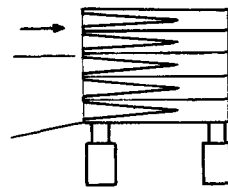
(47) Vニングラード 型
(Sorokine, Roundnet)



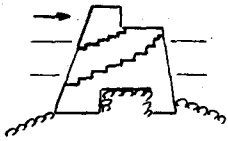
(48) 春燕型 (ソ連)



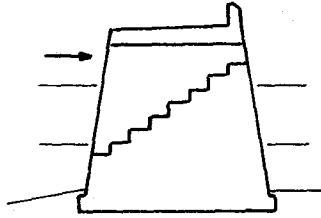
(49) カーテン式 (シェットランド)



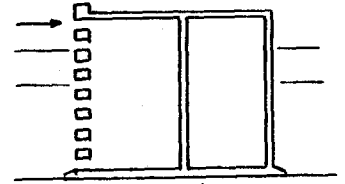
(50) 洞穴型 (Smith)



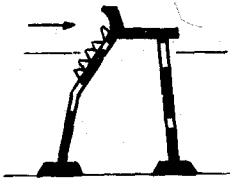
(51) オルター港の被害



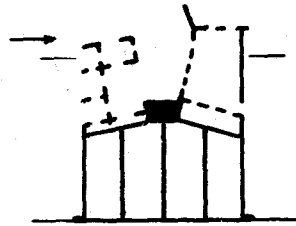
(52) 孔あき堤 (ラムゼー港)



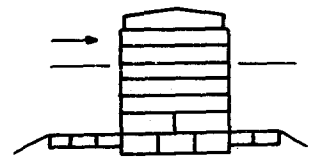
(53) 孔あきケーソン (コモール港)



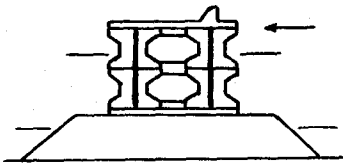
(54) デンタ型 (スイス)



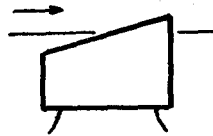
(55) 孔あき堤 (Gallaveto)



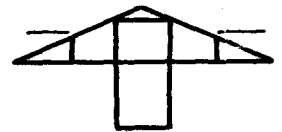
(56) 蜂窩式 (小田)



(57) 龜の甲ブロック堤 (博多港)



(58) 斜面浮防波堤
(Zolotareff, Gremammer)



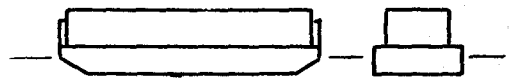
(59) 安定翼浮防波堤
(Labzovski)



(60) 異型浮防波堤 (Moguilko)



(61) ボンバードン型浮防波堤



(62) フェニックス型ケーソン